ＩＳＳＮ　１８８０－０１１４
国総研プロジェクト研究報告第56号
平　成　29　年　4　月

国土技術政策総合研究所
プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.56　　April 2017

河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究

－「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の
設定・選択を支援する基盤技術の開発」
の成果をコアとして　－

Research on Climate Change Adaptation in River & Coastal Management
- With focusing on the results of Project Research titled
"Development of base technology to support forming a portfolio
of management alternatives for large-scale water-related disasters
under climate change" -

国土交通省　国土技術政策総合研究所

気候変動適応研究本部

Climate Change Adaptation Research Group
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告
第 56 号　　2017 年 4 月

河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究
—「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとして—

気候変動適応研究本部

概要

気候変動の下で、従来の河川・海岸の整備レベルを超える外力（超過外力）の発生等を通じた河川・海岸災害の激化・頻発化が懸念される。そこで、気候変動適応研究本部において、気候変動予測結果を河川・海岸計画対象外力等への影響に翻訳する技術、超過外力発生時の河川災害リスクを評価する技術、それらの河川災害を軽減するための様々な施策メニューの拡充手法等の基盤技術の開発を行うとともに、それらを総合化して河川・海岸分野の防災・減災マネジメントを進めるための考え方を提示した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ　：気候変動、超過外力、影響評価、適応策、治水、利水、環境

目次

気候変動適応研究本部における研究実施者　および　本報告書執筆者　一覧.....1

第Ⅰ部　研究の概要.....（気候変動適応研究本部事務局）...3

１．研究の背景・目的.....4
　１．１　本研究の着手に至る背景.....4
　１．２　研究の目的.....5
　１．３　研究期間前後の主な動き.....6
２．研究の全体構成.....7
３．研究の体制.....13
４．研究の主要な成果（概要）.....14
５．成果の活用.....17
６．プロジェクト研究としての達成度評価.....17
＜謝辞＞.....20

第Ⅱ部　河川・海岸の整備と管理に関わる気候変動影響の評価.....23

１．国内外における気候変動予測の現状.....（水循環研究室）...24
　１．１　気候モデル.....24
　　１．１．１　大気海洋結合モデル.....24
　　１．１．２　大気モデル.....24
　　１．１．３　地域気候モデル.....24
　１．２　国内の気候モデル.....25
　１．３　海外の気候モデル：ＣＭＩＰから.....27
　１．４　気候変動予測計算の特徴.....28
　　１．４．１　降水量、気温の予測計算.....28
　　１．４．２　計算解像度.....31
　１．５　気候変動予測計算の動向.....33
　　１．５．１　将来予測シナリオ～ＳＲＥＳシナリオからＲＣＰシナリオ～.....33
　　１．５．２　ＲＣＰシナリオによる気候変動予測計算.....35

２．治水施策の視点から見た気候変動影響－気候変動予測結果の翻訳と人口の長期的変化の考慮
（河川研究室）...37
　２．１　気候変動が治水施策に与える影響の水系ごとの評価.....37
　　２．１．１　はじめに～気候変動予測結果の翻訳にあたって～.....37
　　２．１．２　評価方法.....38
　　（１）評価指標の設定.....38
　　（２）評価指標の算出方法.....43

２．１．３　算出した評価指標の分析.....45
２．１．４　河川整備労力変化・氾濫可能性変化の伝播率に着目した 109 水系の類型化....46
２．１．５　まとめ.....48
２．２　人口分布の将来長期変化シナリオを考慮した浸水被害評価の試算.....49
２．２．１　背景.....49
２．２．２　人口分布の近未来変化シナリオの設定.....49
（１）人口分布シナリオ設定の基本的な考え方.....49
（２）人口分布シナリオ設定の流れ.....50
（３）人口分布の設定結果.....54
２．２．３　人口変化シナリオを考慮した人的被害推計.....59
（１）降雨外力の設定.....59
（２）人的被害の算定手法.....59
（３）人的被害の試算結果.....60

３．都市雨水排水対策の視点から見た気候変動影響.....（下水道研究室）...62
３．１　豪雨の増加傾向の推定と降雨シナリオの設定
～都市域雨水排水（下水道）計画の立場から～.....62
３．２　浸水シミュレーションによる影響評価結果.....65

４．沿岸に作用する外力に見込まれる気候変動影響.....（海岸研究室）...67
４．１　沿岸環境（海面水位、波浪）の変化の実態.....67
４．１．１　はじめに.....67
４．１．２　潮位観測施設の観測データの補正と海面変動の状況.....69
（１）潮位観測施設の設置期間と解析施設の選定.....69
（２）潮位観測施設の地盤変化の把握.....70
（３）潮位観測施設の海面水位変化の解析方法.....72
（４）潮位観測施設の海面水位変化の解析結果.....74
４．１．３　衛星海面高度計による海面変動の把握.....75
４．１．４　海象観測所データの解析による沿岸波浪の変化.....80
４．１．５　まとめ.....83
４．２　高潮外力の変化予測.....84
４．２．１　はじめに.....84
４．２．２　得られた高潮偏差データセットの妥当性の検討.....85
４．２．３　高潮偏差の階級別頻度の変化.....87
４．２．４　極値解析を用いた高潮偏差の変化.....90
４．２．５　まとめ.....91

５．水資源計画・管理の視点から見た気候変動影響.....（水循環研究室）...93
５．１　はじめに.....93
５．２　対象ダム・流域と検討手順.....94
５．３　流出計算モデルおよび利水計算モデルの構築・検証.....95
５．３．１　流出計算で使用するモデル.....95

５．３．２　Ａダム流域……95
（１）流出計算……95
（２）利水計算……96
５．３．３　Ｅダムに関する検証……97
（１）流出計算の検証……97
（２）利水計算……98
５．４　将来予測計算……99
５．４．１　使用した気象庁・環境省データ……99
５．４．２　Ａダム流域……100
（１）降水量の変化傾向……100
（２）流出量の変化傾向……101
（３）貯水位の変化傾向……102
５．４．３　Ｅダム流域……104
（１）降水量の変化傾向……104
（２）流出量の変化傾向……105
（３）貯水位の変化傾向……106
５．５　考察……108
５．５．１　２ダムにおける検討結果のまとめ……108
５．５．２　気候変動が渇水に与える影響を簡易的に評価するための指標……108
５．６　まとめ……108

６．河川環境の視点から見た気候変動影響……（河川環境研究室）…110
６．１　本研究で採用しているアプローチ……110
６．２　流量・水質の変動特性……111
（１）我が国の河川流量及び水温の特徴……111
（２）全国の河川における流量・水質の経年変化の実態調査……114
６．３　流量・水温の変化が水生生態系に与える影響に関する検討……117
（１）既往の知見の整理……117
（２）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析……122
（３）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類及び底生動物の水温・水質への依存性評価……129
６．４　気候変動が水生生態系に与えると考えられる影響……134
（１）既往の知見の活用……134
（２）水温上昇に対する簡易影響評価の試み……135
（３）今後の検討に向けて……137

７．まとめと今後の課題（第Ⅱ部）……（気候変動適応研究本部事務局）…141
７．１　主要な成果のまとめ……141
７．２　今後の課題と取り組みの方向性……143

第Ⅲ部　気候変動影響に対する適応策に関する研究.....147

Ⅲ－１　海外における適応策のレビュー.....（気候変動適応研究本部事務局）...147

１．既往調査の経緯.....148

２．英国の気候変動適応策の事例.....152
２．１　背景.....152
２．２　ＴＥ２１００のテムズ・バリアの外力設定.....153
（１）ＴＥ２１００プロジェクト.....153
（２）テムズ・バリア.....154
２．３　英国の洪水危険地図.....155
２．４　英国における土地の開発規制に係る洪水リスクの考慮手法.....155
（１）英国の土地の開発の許認可における洪水リスク考慮手法.....155
（２）洪水区域の定義.....156
（３）逐次テスト（The Sequential Test）.....157
（４）例外テスト（The Exception Test）.....157

３．オランダの気候変動適応策の事例.....159
３．１　背景.....159
３．２　オランダの洪水危険地図.....159
３．３　気候変動シナリオ.....159
３．４　デルタ・プログラム.....160
３．５　マースプロジェクト.....160
３．６　Room for the River.....161

４．米国の気候変動適応策の事例.....162
４．１　背景.....162
４．２　連邦政府の最新動向.....162
（１）大統領気候行動計画（President’s Climate Action Plan）.....162
（２）各機関の責任者による気候変動への準備及びレジリエンス強化のためのタスクフォースの設置（State, Local, and Tribal Leaders Task Force on Climate Preparedness and Resilience）.....162
（３）全国気候変動影響調査（National Climate Assessment（NCA））の実施.....163
（４）気候変動影響を考慮した基準洪水位の設定に係る大統領令.....163
４．３　ハリケーンサンディによる被害とその対応.....167
４．４　米国の洪水保険制度の概要.....168
（１）洪水保険制度創設経緯.....168
（２）洪水保険制度の概要.....170
（３）その他の NFIP 活動.....178
（４）その他の FEMA プログラム.....179

Ⅲ－２　豪雨による水害への対応.....181

１．全体構成.....182

２．気候変動影響・超過洪水生起を踏まえた新しい治水フレームの考え方..（研究総務官）...183
２．１　わが国の治水に関わる状況の概括.....183
２．１．１　河川整備による治水ストック積み上げの効果.....183
２．１．２　残余リスク対処の重要性への認識の高まり.....186
２．１．３　河川整備の効果発揮に及ぼす気候変動影響.....187
２．１．４　次の方向性についての考察.....188
２．２　治水検討フレームの内容.....189
２．２．１　被害～豪雨規模関係を基軸とした検討フレーム.....189
（１）基本事項.....189
（２）治水システムの挙動を考慮した氾濫生起シナリオ設定手法の組み込み.....191
（３）被害～豪雨規模関係の制御における評価の考え方.....193
２．２．２　施策検討との結びつけ.....195
（１）施策群の類型化.....195
（２）施策総動員の検討手順のイメージ.....197
２．２．３　気候変動適応との関係.....200
（１）気候変動影響の表現.....200
（２）気候変動への適応度の評価 201
（３）適応策検討の道筋についての考察.....203
２．３　新フレームでの検討に役立つ施策メニューの整理法.....205
２．３．１　整理法提示のねらい.....205
２．３．２　整理のための新たな視点.....206
（１）被害～豪雨規模関係の制御に関する型.....206
（２）施策実行に必要な資源.....207
（３）効果発揮の確実性.....207
（４）“他益性”の明示的承認と合意形成方策の必要性.....207
（５）技術的成熟度.....207
（６）他目的施策との相互乗り入れ性.....207
２．３．３　整理法適用・活用のイメージ.....208
２．４　具体化への展開－３、４章の内容との関係.....212

３．超過洪水時の治水システム挙動を考慮した被害生起シナリオと施策効果の分析手法
（河川研究室）...214
３．１　治水機能発揮・喪失のシナリオを考慮した氾濫時の人的・経済被害リスク評価
手法の開発.....214
３．１．１　背景.....214
３．１．２　氾濫発生シナリオの網羅的抽出手法.....214
３．２　モデル河川におけるリスク評価の試行.....216

３．２．１　試行における計算手法の概要.....216
（１）超過確率年と降水量の関係.....216
（２）氾濫ブロックの設定.....216
（３）河道内水位及び氾濫流量の算定.....216
（４）氾濫計算による被害の算定方法.....216
（５）直接被害額及び人的被害の算定.....217
３．２．２　試算結果.....217
３．３　まとめと今後の課題.....221

４．河川および流域に関する様々な適応策オプションの拡充と適用条件の明確化.....222

４．１　戦略的な河道設計・管理.....（河川研究室）...222
４．１．１　はじめに.....222
４．１．２　論点①：河道設計と（それに従って整備された河道に）生じ得る変化.....223
４．１．３　論点②：変化速度と管理労力.....224
４．１．４　論点③：縦断分布変化と安全度バランス.....225
４．１．５　まとめ.....225

４．２　ダム洪水調節操作手法の高度化.....（水循環研究室）...227
４．２．１　はじめに.....227
４．２．２　アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要.....228
（１）アンサンブル予測雨量.....229
（２）アンサンブル予測雨量を用いた洪水時のダム操作方法の考え方.....229
４．２．３　シミュレーション実施条件.....230
（１）検討対象流域・ダム、対象洪水.....230
（２）アンサンブル予測雨量の計算.....230
（３）流出計算モデル.....231
４．２．４　結果.....231
（１）台風 15 号の計算結果.....231
（２）台風 6 号の計算結果.....233
（３）台風 12 号の計算結果.....235
４．２．５　考察.....237
（１）アンサンブル予測雨量の精度と台風進路との関係.....237
（２）ダム洪水調節操作におけるアンサンブル予測雨量の利用方法に関する課題.....238
４．２．６　まとめと今後の課題.....239

４．３　既設ダムの再編・再開発.....（水循環研究室）...242
４．３．１　ダム再開発の必要性.....242
４．３．２　ダム再開発の種類および現在実施中のダム再開発事例.....242

４．４　遊水機能の維持・活用.....（水害研究室）...248
４．４．１　はじめに.....248

４．４．２　流域における治水対策の事例.....248
（１）遊水機能の維持・活用事例.....248
（２）浸水被害軽減のための建築・土地利用規制の制度化に関する事例.....251
（３）まとめ.....254
４．４．３　モデル河川における遊水機能の分析・評価.....255
（１）ケーススタディ対象河川・地区の選定.....255
（２）桜川流域の概要.....255
（３）桜川の河川改修の概要.....256
（４）気候変動による降雨量変化の推定.....256
（５）遊水機能の分析の前提条件.....257
（６）遊水機能の分析・評価.....259
（７）まとめと考察.....262
４．４．４　施策実施のための地域状況要件と施策推進に向けての論点整理.....263
（１）施策実施のための地域状況要件.....263
（２）施策推進に向けての論点整理.....263

４．５　XRAINによる高時空間分解能での迅速な豪雨観測・予測技術と利活用
（水循環研究室）...265
４．５．１　XバンドMPレーダの導入の背景.....265
４．５．２　XRAINの構築状況.....267
４．５．３　XバンドMPレーダの観測技術の特徴.....268
（１）二重偏波レーダの降雨観測と特徴.....268
（２）単偏波レーダの降雨観測と特徴.....268
４．５．４　XRAIN雨量情報の特徴.....268
４．５．５　XRAINの観測精度.....270
（１）XRAINによる豪雨の観測事例.....270
（２）個別レーダの観測精度.....271
（３）1分雨量の観測精度.....272
（４）XRAIN雨量情報の高精度化の取り組み.....273
４．５．６　XRAIN雨量情報の利活用.....279
（１）国土交通省におけるXRAINの利活用.....279
（２）XRAINの他分野利用.....281
４．５．７　XRAIN雨量情報を利用した技術研究開発.....283

４．６　都市雨水排水における効果的な浸水対策.....（下水道研究室）...286
４．６．１　仮想排水区を用いたシミュレーション.....286
（１）仮想排水区と降雨シナリオの設定.....286
（２）浸水対策必要量と浸水対策施設の設定.....288
（３）整備効率性の評価.....291
４．６．２　降雨強度増加時における効果的な浸水対策.....292

４．７　街区スケールにおける人的被害低減対策.....（河川研究室）...296

４．７．１　切迫避難を含む避難実態に即した人的被害リスクのマクロ評価手法の開発...296
４．７．２　街区スケールにおける様々な人的被害低減対策の効果算定手法の開発.....296
（１）近隣の中高層建物への避難による人的被害低減の考え方.....296
（２）集計単位の設定.....297
（３）建物・居住者データの GIS 上での整理.....297
（４）試算条件.....297
（５）計算手順.....298
（６）人的被害試算結果と被害低減対策の検討.....299
（７）おわりに.....300

５．まとめと今後の展開（Ⅲ－２部）.....302

Ⅲ－３　海岸分野における気候変動への対応.....（海岸研究室）...305

１．はじめに.....306

２．閣議決定「気候変動の影響への適応計画」までの海岸分野における検討の変遷.....307

３．海岸関係４省庁における気候変動適応策.....308
３．１　沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会.....308
３．２　高潮水防の強化に関する技術検討委員会.....310

４．海岸分野における気候変動適応策に向けた研究の動向.....313
４．１　将来気候に向けての海岸域防災に関わる研究動向.....313
４．２　気候変動リスク情報創生プログラム　沿岸災害リスクの影響評価.....314
４．３　最近の動向.....315

Ⅲ－４　水資源分野における気候変動への対応.....317

１．水資源計画・管理における施策動向.....（水循環研究室）...318
１．１　大規模渇水への備えとしてのゼロ水タイムラインの必要性.....318
１．２　ゼロ水タイムラインの概要.....318
１．２．１　過去の渇水等の降雨状況を踏まえたゼロ水シナリオの設定.....318
１．２．２　渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定.....320
１．２．３　被害や影響を最小とするための需要側、供給側等の事前予防、対応措置の検討.....320
１．３　今後の課題.....321

２．気候変動によるダム貯水池の水質への影響と適応策の検討.....（水循環研究室）...322
２．１　検討の目的.....322

２．２　検討の概要.....322
２．３　検討対象とするケーススタディダムの選定.....323
２．４　流出・利水モデル及び水質解析モデルの作成.....323
２．４．１　流出モデルの基礎構造.....323
２．４．２　流出モデルの計算条件.....324
２．４．３　利水モデルの基本構造.....325
２．４．４　水質解析モデルの基本構造.....325
２．５　気候変動によるダム貯水池水質の変化試算.....326
２．５．１　将来予測シナリオの選定.....326
２．５．２　気温及び降水量データのバイアス補正方法.....327
２．５．３　気候変動によるダム貯水池の水質変化試算.....328
２．６　現在に対する将来の水質悪化への対策検討.....329
２．７　まとめ.....333

３．都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の検討.....（下水処理研究室）...334
３．１　検討の目的.....334
３．２　水量面からの再生水利用の可能性.....334
３．３　膜処理技術の開発動向.....335
３．４　ＭＢＲにおける下水処理水の安全性の評価.....336
（１）目的.....336
（２）調査方法.....336
（３）結果.....337
３．５　膜処理を用いた再生水システムによる環境負荷の評価.....338
（１）目的.....338
（２）再生水システムによる電力消費量・LC-CO_2削減効果.....339
（３）再生水システムのエネルギー消費量と処理水質の比較検討.....341
３．６　結論.....342

おわりに　.....（気候変動適応研究本部事務局）...344

気候変動適応研究本部における研究実施者　および　本報告書執筆者　一覧　（ 平成22年4月 ～ 平成28年3月 ）

所属・役職（所属・役職は、担当期間のもの）		氏名	担当期間	総括	研究統括	事務局／幹事	研究実施者（本報告書の主たる執筆者は☆で表記）																								
							第Ⅰ部	第Ⅱ部							第Ⅲ部																
															Ⅲ-1	Ⅲ-2											Ⅲ-3	Ⅲ-4		
								1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.		1.	2.	3.	4.							5.		1.	2.	3.
																			4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7					
気候変動適応研究本部 本部長：　所長		木谷　信之	2015.10～2016.3	○																										
		岩崎　泰彦	2014.7～2015.10	○																										
		酒井　利夫	2013.8～2014.7	○																										
		上総　周平	2012.8～2013.8	○																										
		西川　和廣	2010.4～2012.8	○																										
気候変動適応研究本部 本部長代行：　研究総務官		藤田　光一	2013.4～2016.3		○		○							○		☆	☆								☆					
気候変動適応研究本部 本部長代行：　河川研究部長		鳥居　謙一	2013.4～2016.3		○																									
		藤田　光一	2011.4～2013.3		○																									
		山本　聡	2010.4～2011.3		○																									
気候変動適応研究本部　副本部長： 河川研究部　水防災ｼｽﾃﾑ研究官 （流域管理研究官、～2014.3）		深見　和彦	2013.4～2016.3			◎	☆							☆	○															
		吉谷　純一	2011.4～2013.3			◎																								
		藤田　光一	2010.4～2011.3			◎																								
気候変動適応研究本部　副本部長： 下水道研究部　下水道研究官		榊原　隆	2010.4～2011.7 2014.4～2016.3		○																									
		森田　弘昭	2012.4～2013.3		○																									
		尾崎　正明	2011.7～2012.3		○																									
気候変動適応研究本部　副本部長： 環境研究部　環境研究官		吉谷　純一	2010.4～2011.3		○																									
河川研究部 河川研究室	室長	服部　敦	2010.4～2016.3						○						○			○	☆						○					
	主任研究官	山本　陽子	2015.4～2016.3			◎			☆						☆			☆							○					
	主任研究官	板垣　修	2013.4～2015.3			◎			☆						☆			☆							☆					
	主任研究官	飯野　光則	2010.4～2011.3						○									○												
	研究官	柳川　一博	2015.4～2016.3						○									○							○					
	研究官	竹中　裕基	2014.4～2016.3						○									○							○					
	研究官	小林　勝也	2013.4～2015.3						○									○							○					
	研究官	加藤　拓磨	2013.4～2014.3						○									○							○					
	研究官	小野田惠一	2010.4～2012.2						○									○												
河川研究部 海岸研究室	室長	諏訪　義雄	2010.4～2016.3								○																☆			
	主任研究官	竹下　哲也	2015.4～2016.3																								○			
	主任研究官	野口　賢二	2010.4～2016.3								☆																○			

所属・役職（所属・役職は、研究当時も含む）		氏名	担当期間	総括	研究統括	幹事	研究実施者（本報告書の主たる執筆者は☆で表記）																										
							第Ⅰ部	第Ⅱ部							第Ⅲ部																			
															Ⅲ-1	Ⅲ-2												Ⅲ-3	Ⅲ-4			
								1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.		1.	2.	3.	4.								5.		1.	2.	3.
																			4. 1	4. 2	4. 3	4. 4	4. 5	4. 6	4. 7					
河川研究部 水循環研究室（水資源研究室、～2013.3）	室長	川﨑　将生	2012.4～2016.3					○				○								○	○		○					○	○	
	室長	鳥居　謙一	2011.10～2012.3					○												○	○		○							
	主任研究官	西村　宗倫	2014.4～2016.3																										☆	
	主任研究官	猪股　広典	2011.4～2016.3									☆								☆	☆							☆		
	研究官	土屋　修一	2011.12～2016.3					☆															☆							
河川研究部 気候変動研究チーム	主任研究官	菊森　佳幹	2010.4～2013.3			◎		○	○									○												
	主任研究官	板垣　修	2010.6～2013.3			◎		○	○									○												
	研究官	土屋　修一	2010.4～2011.11					○	○									○												
	研究官	加藤　拓磨	2010.4～2013.3					○	○									○												
	研究官	里村　大樹	2010.4～2011.3					○	○									○												
河川研究部（危機管理技術研究センター、～2014.3）水害研究室	室長	伊藤　弘之	2010.4～2016.3																			○								
	主任研究官	大沼　克弘	2014.4～2016.3																			☆								
	主任研究官	飯野　光則	2011.4～2013.3																			○								
	主任研究官	水草　浩一	2010.4～2011.3																			○								
	研究官	武内　慶了	2013.4～2014.3																			○								
下水道研究部 下水道研究室	室長	横田　敏宏	2015.4～2016.3							○														○						
	主任研究官	松浦　達郎	2014.4～2016.3							☆														☆						
	研究官	橋本　翼	2011.4～2014.3							☆														○						
	研究官	藤原　弘道	2010.4～2011.3							○																				
下水道研究部 下水処理研究室	室長	山下　洋正	2015.4～2016.3																											○
	主任研究官	田隅　淳	2013.4～2016.3																											☆
	主任研究官	山下　洋正	2010.4～2013.3																											○
	主任研究官	小川　文章	2012.4～2012.3																											○
環境研究部	室長	天野　邦彦	2010.4～2012.3										○																	
河川環境研究室	研究官	望月　貴文	2010.4～2013.3										☆																	

第Ⅰ部

研究の概要

１．研究の背景・目的

１．１　本研究の着手に至る背景

国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）が第4次報告書を発行したのは平成19年（2007年）のことであった。その第1作業部会（WGⅠ: 自然科学的根拠）報告書において、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」ことが明記され、「過去50年の温暖化のほとんどは、人類起源の温室効果ガス濃度の上昇によるものと、強く考えられる（very likely)」と結論された。それを踏まえ、温室効果ガス排出の抑制に基づく一層の緩和努力が必要となるが、仮に2100年までに温室効果ガス濃度を一定に保つことができたとしても、気温の上昇は止まらず、海面上昇（海水の熱膨張）などの温暖化の影響はその後数世紀にわたり継続するとの見通しが示された。これは、すでに現れている気候変動の影響に加え、国際的な合意の下に緩和策を講じても、我が国において様々な気候変動の影響が今後も生じる恐れがあることを意味する。このため、今後中長期的に避けることのできない気候変動による様々な分野への影響に対処することを目標にして、影響の評価及び影響への適応策を計画的に進めることが必要との認識が世界的に共有されることとなった。

地球温暖化は、気温上昇や海水面上昇のみならず、降水量の変化、とりわけ、局地的豪雨の頻度増加、融雪流出量の減少といった変化を通じて、当時、わが国の治水・利水・水環境にも大きな影響を与えると懸念されつつあった。このため国土交通省は、社会資本整備審議会（以下、社整審）に気候変動に適応する治水施策のあり方について諮問し、同河川分科会に気候変動に適応した治水対策検討小委員会が設置された（平成19年8月)。そして平成20年6月に「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」答申がまとめられた。そこでは、治水・利水・環境保全を進めていく上で鍵となる様々な外力（降水量、洪水流量、土石流、高潮、渇水等）が増大し、わが国の国土・社会に大きな影響を与え得ることを確認するとともに、それらによる水災害を完全に防ぎきれないとしても、「犠牲者ゼロ」を目指して、様々な適応策を順応的に推進していくべきことが提言された。また、平成20年（2008年）は、神戸市都賀川で7月に発生した水難事故をはじめとしたいわゆる「ゲリラ豪雨」による水害・水難事故が多発したした年であり、同小委員会に「中小河川における局地的豪雨対策WG」と「中小河川における水難事故防止策検討 WG」が設置されて、それぞれ提言を行っている。さらに、日本学術会議地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同国土・社会と自然災害分科会が、平成20年6月に提言「地球環境の変化に伴う水災害への適応」を取りまとめた。これらの諸提言によって、当時既に一部起こりつつある新しいタイプの災害が今後激化することが想定される中で、従来の河川整備のように「氾濫の発生頻度を小さくする」という河川・水系内での取り組みを中心とした枠組みにとらわれず、「氾濫による被害を最小限に留める」という新たな枠組みも視野に入れることや、それを実現させるための様々な施策オプションを列記したメニュー（例えば、堤防・ダム等既存施設の補強／有効利用、雨水流出抑制施設、新型気象レーダによる豪雨監視等）も検討していくべきことが示されたのである。

しかしながら、当時の段階では、影響評価、適応策検討の両面において、多くの課題があった。影響評価に間しては、例えば、河川流域スケールでの河川計画規模の降水量変化予測評価に耐える高空間分解能の気候予測シミュレーションデータがほとんど無く、気象庁気象研究所が、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト：RR2002（平成14～18年度)」により開発したGCM20およびRCM20と呼ばれる当時世界最高レベルの20kmの高空間分解能データが、当時唯一利用可能なデータであった。このため、当時は世界の多様なGCMデータやアンサンブルデータを用いることによる予測のバイアスや不

確実性の定量的な評価を行うことは困難であった。また、個別の河川流域毎（例えば、全国一級水系の109水系全て）での影響評価は行われておらず、代表河川での試算に止まっていた。治水分野においてこのような状況であり、利水や環境等の分野では、総合的な検討はほとんどなされていなかった。また、適応策検討に間しては、一般論・全体論の提示から踏み出して、流域ごとの実態や過去の施策の積み重ねを十分踏まえ、かつ、メニューの羅列にとどまらない系統立った個別施策オプションの組み合わせとして適応策を提示するための考え方（フレーム）については、十分な検討が行われていなかった。また、その考え方を提示するためには、技術的観点からは、1)整備目標を超過する洪水も対象に加えて各種水災害リスクを総合的に評価すること、2)タイプの異なる流域ごとに各種の施策オプションが効果を発揮する具体条件を整理することが求められることになる。1)については、治水面で言えば、洪水が設計外力（計画高水位など）を超えるときの防災施設の機能の発揮や喪失シナリオを検討することが必須となる。これらの課題は、前出の社整審の平成20年の答申が平成25年度を目処として取り組むべき課題として挙げた「災害リスクの評価法」、「流域などでの安全確保の考え方と進め方」に対応するものである。

１．２　研究の目的

上記の各種提言と、国土の高度な利用に比して水災害に対する防災インフラ整備水準が未だ低いという日本の特徴を踏まえると、気候変動に対する適応策には、被害発生頻度の低減に加え、各種水災害リスクの低減を合理的に図っていくことと、これらの効果発揮の時間的展開についても明確な方策を持つことが求められる。

そのため、気候変動予測に関する最新の知見を活用し、洪水等の水災害をもたらす外力の発生頻度や規模への気候変動影響を評価するとともに、従来の河川整備だけにとどまらず新たな施策も視野に入れる一方、流域ごとの実態や過去の施策の積み重ねを踏まえて実現性の高い施策を選択していく必要がある。

これらを踏まえ、本研究は、気候変動影響の下で水災害を引き起こす外力の算定手法やリスク評価手法を開発するとととともに、流域毎の実態や実現可能性を踏まえつつ、それらを総合化して防災・減災マネジメントを進めるための考え方を提示することを目的とする。その成果により、気候変動への適応策の実現を技術政策面で強く支えることを目指す。

なお、気候変動適応研究は、上記のように、インフラ整備水準を超えることで水災害を引き起こす、いわゆる超過外力の発生も想定に入れた上で、水災害リスクの低減を図る方策を探ることを目的としている。すなわち、気候変動への適応研究は、21世紀末といったはるか将来における気候変動後の世界のためだけの研究課題では決して無く、災害が激甚化しつつあると言われる現在において既に我々が直面している超過外力の頻発化に対する適応研究でもあり、極めて今日的な研究課題でもあると言うべきである。

本研究は、国土技術政策総合研究所（以下、国総研）におけるプロジェクト研究*「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」として、平成22年度から25年度まで実施した。

*) 国総研プロジェクト研究：
研究所として重点的に推進する研究をプロジェクト研究に指定し、プロジェクト・リーダーのもとに、目標達成に必要とされる分野の研究者が結集・連携して効果的に研究を進める。プロジェクト研究の課題設定にあたっては、研究対象の周辺状況を十分に見通し、場合によっては目標を共有する研究を統合すること等により、多面的・多角的な側面から包括的な問題解決を目指す。

１．３　研究期間前後の主な動き

本プロジェクト研究と相前後して、国内外において多くの重要な施策・研究等の動きがあり、それらは、本研究の企画立案・実施・成果とりまとめ・成果の社会への還元の各段階において大きな影響を与えているので、ここにまとめて列記しておく。

H19.3：文部科学省新世紀重点研究創生プラン(RR2002)「人・自然・地球共生プロジェクト（共生プロ）」研究終了（H14.4～）
H19.4：文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ）「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（H19～23 年）」研究開始
H19.8：社会資本整備審議会（社整審）河川分科会に「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」を設置
H19.11：IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書の公表
H20.6：社整審小委員会答申「水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適応策のあり方について」の公表
H20.6：日本学術会議地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同国土・社会と自然災害分科会提言「地球環境の変化に伴う水災害への適応」の公表
H21.4：国総研において、気候変動適応研究本部を設置。河川研究部、環境研究部（当時）、下水道研究部、危機管理技術研究センター（当時）の関係 7 研究室、1 研究チームにより構成。
H22.4：本プロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」（H22～25 年）を開始
H23.3：東北地方太平洋沖地震(M9.0)による東日本大震災の発生
H23.11：IPCC「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書（SREX）」の公表
H24.3：文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ）「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（H19～23 年）」研究終了
H24.4：文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム（創生プロ、H24～28 予定）研究開始
H25.3：本プロジェクト研究の一環としての中間報告ワークショップ「気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ」（TKP 東京駅八重洲カンファレンスセンター　ホール 5B）を開催（3 月 12 日）。
H25.8：国総研資料第 749 号「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」を本プロジェクト研究の中間成果報告として公表
H25.9：IPCC 第 5 次評価報告書　第 1 作業部会(WG1)報告書の公表　（以下、H26.3 に WG2、H26.4 に WG3 の各報告書、ならびに、H26.11 に統合報告書が、順次公表される。）
H26.1：社整審「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」が再開される。
H26.3：本プロジェクト研究「気候変動下での大規模水害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」〔H22～25 年〕の研究期間が終了。但し、上記の IPCC 第 5 次報告書や下記の環境省地域気候変動予測データの公表等の動きを受けて、一部内容についてフォローアップ研究を継続実施。
H26.6：環境省　全球気候変動予測データおよび地域気候変動予測データ（協力：気象庁）を公表
H27.1：国土交通省「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」を公表
H27.2：社整審「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」中間とりまとめを公表

H27.3：中央環境審議会「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）」を公表

H27.4：気候変動適応研究本部を改組（本部＋幹事会）。都市研究部、防災・メンテナンス基盤研究センター、沿岸海洋・防災研究部が加わる。

新規プロジェクト研究「気候変動下の都市における戦略的災害リスク低減手法の開発」（H27～29 年予定）を開始

H27.7：「浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法」の公表

H27.7：気候変動適応研究本部において、水技術政策に関する海外最新情報発信を開始

H27.8：社整審　最終答申「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～」を公表

H27.10：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の大規模氾濫災害を受けて、社整審「大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会」が設置される。

H27.11：国土交通省気候変動適応計画の公表

H27.11：閣議決定「気候変動の影響への適応計画」

H27.12：社整審　答申「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築～」を公表

H27.12：文科省・気候変動リスク情報創生プログラムおよび海洋研究開発機構・地球シミュレータ特別推進課題による「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」の公表

H29.4：国総研プロジェクト研究報告第 56 号「河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究―「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとして―」を、本プロジェクト研究の最終成果を包含するものとして公表

２．研究の全体構成

本プロジェクト研究は、気候変動適応研究本部（河川研究部、下水道研究部、旧環境研究部、旧危機管理技術研究センターの関係研究室から構成される横断的な研究グループ：　3. 研究の体制を参照）において実施した。当研究本部では、本プロジェクト研究に関係の深い河川・海岸分野の気候変動適応策に関する検討を合わせて進めている。そこで本報告では、プロジェクト研究「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとしつつ、それを包含して、現時点までに得られた河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究成果を総体として提示することとした。本研究報告書の標題には、このとりまとめ方針が反映されている。

なお、本報告書に先立ち、平成 25 年 8 月に上記プロジェクト研究の中間成果としての報告書を既に公表している。中間報告書の目次構成は図－Ⅰ. 2. 1 の通りである。

第Ⅰ部　報告書の概要

第Ⅱ部　気候変動適応策に関する研究（中間報告）

第1章　個別の研究成果

1.1　気候変動に適応する治水方策に関する研究
1.1.1　流域一体となった浸水被害軽減方策に関する研究
1.1.2　沿岸環境の変化現況と気候変動に向けた外力設定
1.1.3　XバンドMPレーダによる豪雨監視の強化について
1.1.4　豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響評価
1.1.5　降雨予測技術を活用したダム洪水調節操作の高度化

1.2　水利用への影響と適応に関する研究
1.2.1　気候変動に対応した渇水リスク増加に対応した下水処理水の活用方策に関する研究

1.3　河川環境への影響に関する研究

第2章　治水への影響と適応に関する研究

2.1　気候変動予測の進展とそれを踏まえた検討
2.1.1　気候変動予測の概要
2.1.2　気候変動予測結果の翻訳
2.1.3　翻訳結果に基づく流域特性の類型化と特徴
2.1.4　高潮外力に対する気候変動の影響についての検討

2.2　諸外国の適応策の分析

2.3　日本における気候変動適応策検討のポイント
2.3.1　概観
2.3.1.1　我が国の治水に関わる基本的状況
2.3.1.2　被害の起こり方のコントロールについての議論
2.3.1.3　論点の整理
2.3.2　河川整備手段の拡充の展望
2.3.2.1　河道設計・管理からのアプローチ
2.3.2.2　予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化
2.3.2.3　既設ダムの再編や再開発の効果
2.3.3　設計以上の外力を受けた治水施設（群）の機能発揮・喪失に関する検討
2.3.3.1　有堤河川の氾濫事象に着目した検討
2.3.3.2　氾濫リスクの試算手法
2.3.3.3　被害状況の試算結果
2.3.3.4　洪水流・堤防システムの挙動および被害状況
2.3.3.5　５つの着眼点を応用した検討事例
2.3.3.6　ダムの洪水調節
2.3.4　災害の起こり方のコントロールというアプローチの強化－氾濫を考慮した治水施策について
2.3.5　超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題
2.3.6　不確実性への対応

第Ⅲ部　気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ開催報告

図-Ⅰ.2.1　国土技術政策総合研究所資料第 749 号「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」（平成 25 年 8 月）の主要目次構成

ここで、本（最終）報告書と中間報告書との関係は以下の通りとしている。

1) 本プロジェクト研究の最終成果の全体について、中間報告書を参照しなくても把握・理解できることを最優先とする。このため、中間報告書との記述内容の重複を許容しつつ、本プロジェクト研究の最終成果について網羅的な執筆・とりまとめを本報告書において行っている。

2) 本報告書における、本プロジェクト研究の最終成果の全体の理解・把握性に影響を与えない範囲で、研究成果の全ての図表等の掲載が煩雑で長大となりすぎる場合等については、中間報告書（もしくは他の研究報告書）を参照することで代える。

このことから、本報告書を参照することで、中間報告書を参照することなしに本プロジェクト研究の全体を一通り把握・理解できることは担保している。しかしながら、一部の研究内容については、その成果等の詳細部分について、中間報告書（もしくは他の研究報告書）を参照することで、その全貌・詳細の網羅的な確認につながる場合がある。このため、その点の付記を含めて、以下で行う本報告書の全体構成の説明では、この中間報告書との関係についても言及する。

本研究（本報告書の目次）の全体構成の骨格は以下の通りである。

まず、**第Ⅱ部「河川・海岸の整備と管理に関わる気候変動影響の評価」**では、以下のように河川（治水・利水・環境）や海岸の幅広い分野における気候変動の影響評価の研究を行った成果をとりまとめている。

第Ⅱ部：河川・海岸の整備と管理に関わる気候変動影響の評価

1. 国内外における気候変動予測の現状
2. 豪雨によりもたらされる河川流域での水害に与える影響
   －気候変動予測結果の翻訳と人口の長期的変化の考慮
3. 都市雨水排水対策の視点から見た気候変動影響
4. 沿岸に作用する外力に見込まれる気候変動影響
5. 水資源計画・管理の視点から見た気候変動影響
6. 河川環境の視点から見た気候変動影響

1. では、河川・海岸における計画や管理への影響を引き起こす直接の原因となる気温や降水量、台風等の気象擾乱の将来予測データを提供する気候学分野における数値気象予測モデルの現状について、簡潔なレビューを行った。中間報告書第Ⅱ部 2.1.1 の内容を基盤としつつも、本プロジェクト研究終了後の平成 25 年 9 月に公表された IPCC 第 5 次報告書（第 1 作業部会報告書）における新しいシナリオ設定や、それに基づく環境省、気象庁による日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動アンサンブル予測計算データ（平成 26 年 6 月）による検討成果も新たに加えて報告している。

2. では、まず治水分野における気候変動影響の評価について論じている。気候変動による河川計画が対象とする治水目標規模の降水量の変化に着目し、もし従来の河川計画対応のみで気候変動に対する追加的な適応策を実施しなかった場合にどの程度洪水氾濫被害リスクが将来的に増大する可能性があるのか、そのリスク増大を防ぐためには、どの程度追加的な河川整備労力をかける必要が生じるのか、それらから気候変動が治水施策に与えうる影響をどう捉えるかについて、全国 109 の一級水系について検討を行っている。前半は、被害推定に直結する人口・資産分布の将来変化を考慮せず、現在の状況を基盤として検討を行っており、中間報告書第Ⅱ部 2.1.2 および 2.1.3 の膨大な解析データの整理・分析内容を簡潔にまとめ直したものである。したがって、検討条件や検討結果の詳細については、中間報告書を参照頂きたい。一方、後半では、人口・資産分布の将来変化を考慮した場合の被害変化の算定を新たに試みた事例をまとめた。

3. では、下水道計画・整備に関連する都市雨水排水対策への気候変動影響について論じている。中間報告書第Ⅱ部 1.1.4 の内容を基盤としている。

4. では、海岸整備等の海岸分野への影響を規定する外力条件として、沿岸での海面水位や高潮偏差・波高（波浪）に対する気候変動の影響について、分析を行った成果をまとめている。中間報告書第Ⅱ部 1.1.2 および 2.1.4 の内容を再構成したものである。

5. では、気候変動が水資源に与える影響について評価を試みた。水資源は、本来、需要と供給のバランスにより評価する必要があるが、供給量については気候変動による変化を想定した流出計算によって与える一方、需要量については現在と同様と考え、複数のダム貯水池における利水計算による貯水位変動特性を現在気候と将来気候で比較することで、気候変動の渇水への影響分析を行っている。中間報告書公表以後の新たな成果である。

6. では、気候変動が河川環境に与える影響について論じている。河川環境は、「河川の自然環境」と「河川と人との関わりにおける生活環境」に分けて捉えられるが、本研究では、平常時の河川の自然環境、特に水量や水質といった河川の水環境に大きく依拠する魚類を中心とした水生生物に焦点を当てて、評価を試みた。そこでは、気候変動により平常時の河川の水環境が変化した場合に受けるであろう水生生物への影響に関する予備的知見を得ることを目的として、過去から現在までの河川における水環境の時間的・空間的変化と水生生物の生息状況との関係を分析している。本内容は、中間報告書第Ⅱ部 1.3 の内容を再構成したものである。

第Ⅲ部「気候変動影響に対する適応策に関する研究」では、これらの気候変動影響を想定した場合の適応策のあり方や具体的なメニュー・手法について研究を行った成果をまとめる。すなわち、海外事例のレビューに関するⅢ-1、治水分野の適応策に関するⅢ-2、海岸分野の適応策に関するⅢ-3、水資源・水物質循環分野の適応策に関するⅢ-4の4つのサブパートに分けて執筆した。

Ⅲ-1では、海外における気候変動適応策事例のレビューを行った成果を報告する。中間報告書段階では、いわゆるStern Review(2006)やIPCC第4次報告書(2007)といった世界的な影響評価研究レビュー成果を踏まえつつ、英蘭独仏米伊白典中韓印尼比の各国における気候変動影響評価および適応策研究の当時の時点での概況を幅広くレビューを行うとともに、特に洪水防御施設の機能発揮の確率評価手法に焦点をあてて米英蘭における実践事例についても調査を行った成果を報告した。本報告書では、特に米英蘭3カ国におけるその後の新しい動きについて、具体的な個別の適応策メニュー事例にも焦点を当てつつ深く掘り下げて調査した成果を新たに報告する。また、そのような最新の海外における適応策を中心とした水技術政策について、国総研においてホームページを通じた情報発信を始めていることを紹介する。

Ⅲ-2「豪雨による水害への対応」は、治水分野における気候変動適応策のあり方、すなわち、豪雨により引き起こされる水害の激甚化にどのように対応すべきかについて、研究を行った成果をまとめて報告する。その主要な骨格・構成は以下のようになっている。

Ⅲ-2部：豪雨による水害への対応

1. 全体構成の説明
2. 気候変動影響・超過洪水生起を踏まえた新しい治水フレームの考え方
3. 超過洪水時の治水システム挙動を考慮した被害生起シナリオと施策効果の分析手法
4. 河川および流域に関する様々な適応策メニューの拡充と適用条件の明確化
   - 4.1　戦略的な河道設計・管理
   - 4.2　ダム洪水調節操作手法の高度化
   - 4.3　既設ダムの再編・再開発
   - 4.4　遊水機能の維持・活用
   - 4.5　XRAINによる時空間高分解能での迅速な豪雨観測・予測技術と利活用
   - 4.6　都市雨水排水における効果的な浸水対策
   - 4.7　切迫避難の局面での人的被害低減対策

2.では、気候変動影響下での超過洪水生起の頻度が増す恐れが高まる中での新しい治水検討フレームの提案を行う。計画レベルや現状の整備レベルを超える規模の超過洪水が生起した場合、河川流域で被害が生じることは避けられないが、従来は、そのような超過洪水被害の減災対策を総合的に検討する枠組みは必ずしも明確ではなかった。平成23年3月の東日本大震災を受け津波防災の分野では、防災施設では防ぎきれない外力の生起も考慮して、様々なハード・ソフト対策の総動員により防災･減災を図っていく施策の遂行が求められるようになった。ここでは、治水整備レベルと流域の現状を踏まえた被害～豪雨関係（以下、氾濫被害特性曲線と呼ぶ）の把握と制御を基盤として、新しい治水フレーム（河川整備と減災マネジメントを、それぞれの特徴・役割を踏まえつつ進めることを基本に、両者の連携を川上から織り込んで行く）の考え方の提案を行うものである。また、そのフレームの下で様々な施策メニューの組み合わせを比較検討する上で前提となる、施策メニュー群の類型化手法や、それらの組み合わせ方を整理するに当たって念頭におくべき視点について議論を行う。本内容の中間的な検討成果については、中間報告書第Ⅱ部2.3.1において既に紹介しているが、本報告書の内容は、それを更に拡充・

発展させたものである。

この「新しい治水フレーム」は、豪雨による水害への対応に資する気候変動適応策の技術政策的議論を進めるための“作業仮説”であり、この内容をそのまますぐに実際の政策に反映させることを意図したものではない。その上で、必要な技術政策の展開を実践していくためには、概念や方向性の議論にとどまらず、「このような施策の枠組みを形成すると、どのようなことになるか？」を検討するというアプローチから、施策形成の具体的内容について積極的に吟味していくことが有用かつ不可欠と考えられる。こうした考えのもとで、施策群のフレームを案として先に提示し、その下で必要になっていく技術展開を検討するというスタイルをここでは採っている。

3.では、2.で提案した新しい治水フレームを実際に河川の現場で検討するために必要となる、当該河川流域での氾濫被害特性曲線を把握するための手法を開発するとともに、その手法を国内代表 20 河川へ試験適用した成果に基づく知見について報告する。前者においては、氾濫被害特性曲線を把握するために必要となる、超過洪水を受けたときの堤防の応答を含めた氾濫リスク（人的被害・経済被害）の評価手法について議論を行っている。後者においては、氾濫被害特性の現れ方について、3～4 程度の特徴的なパターンに分類できることを論じる。本内容は、中間報告書第Ⅱ部 2.3.3 において既に詳しく紹介した内容であるが、それを基盤として一部修正しつつ簡潔に再構成したものである。

これらの 2.および 3.における研究成果により、具体の河川流域において、ハード・ソフトの様々な施策メニューを組み合わせて様々な超過洪水規模にも対応した減災マネジメント手法を検討するフレームの試案を準備したことになる。4.では、そのフレームによる施策メニューの取捨選択・組み合わせ検討の対象となる、個々のハード・ソフト施策メニューの方法論を確立するための研究を行った成果について報告する。

4.1 では、河道設計・管理の基本である洪水流下能力の確保・向上について、環境機能の向上・河道維持管理負担の軽減という他目的施策との整合を図りながら、順応的かつ効率的・効果的に進めていくための新たな考え方とその実施可能性について論じる。中間報告書第Ⅱ部 2.3.2.1 において提示した論点を再構成したものである。

4.2 では、施設の運用の工夫により減災を図る施策の一例として、既設ダムの機能を最大限活用する運用手法としてのダム洪水調節手法の高度化方策について検討を行った成果を報告する。そこでは、近年の数値気象予報技術の進歩により利用可能となってきているアンサンブル降雨予測データにより得られる降雨予測の幅に関する情報を活用した新たなダム放流量決定手法を提案し、その利用可能性と現状での限界について論じる。中間報告書第Ⅱ部 2.3.2.2 の成果を基盤としている。

4.3 では、既存施設の機能向上による適応策の一例として、既設ダムの再編・再開発による適応策の実装事例について整理を行う。中間報告書第Ⅱ部 2.3.2.3 の再掲である。

4.4 では、河川流域における遊水機能を維持・活用することによるまちづくり・地域づくりとも一体となった氾濫被害軽減対策について、数少ないながらも国内に複数存在する成功事例について分析し、当該施策実施・推進を図るための要件について、論点整理を行っている。中間報告書第Ⅱ部 1.1.1 および 2.3.4 の成果を再構成しつつ、新たな考察を加えている。

4.5 では、洪水（外水・内水）氾濫を引き起こす原因となる豪雨を確実に把握するための観測の充実を図る手段の一つとして、X バンドマルチパラメータ(MP)レーダ（MP レーダ）技術の降雨観測への導入を図った事例と、それを活用して河川・下水道管理者のみならず各種マスメディア・インターネット・携帯電話（スマートフォン）等を通じた国民・事業者への豪雨情報の活用事例について紹介する。中間報告書第Ⅱ部 1.1.3 の成果を基盤としつつ、最近の活用事例も加えて再構成している。

4.6 では、本報告書第Ⅱ部 3.（中間報告書第Ⅱ部 1.1.4）で想定された気候変動影響を踏まえ、将来的な降雨強度増加時に対応できる下水道を含む効果的な都市浸水対策施設整備の考え方について、排水

区の特性に応じた流出シミュレーション結果に基づく考察を実施した新たな成果について報告する。

4.7 では、超過洪水発生時に人的被害を最小化する「犠牲者ゼロ」に向けたソフト施策として、最後の砦となる切迫避難時の人的被害低減対策について検討した事例を報告する。すなわち、最大浸水深が 5m 以上になることにより通常の 1～2 階建ての家屋における垂直避難が有効でない地域を対象として、事前避難できずに自宅に止まっている住民が自宅周辺の浸水開始等の切迫した状況下で近隣の中高層建物等に避難する「切迫避難」を行った場合に、どの程度の人的被害が生じ得るのか、街区スケールでの建物分布等の条件に基づく避難シミュレーションにより想定するとともに、それでも人的被害を最小化するためにどのような対策が効果的かについて検討を行った新たな成果をまとめている。

これらの研究成果を縦覧することにより、2. で議論する様々な適応策の類型に対応した施策メニュー群の個々の手法の技術的到達度や適用実績事例もしくは実施可能性、ならびに、今後の課題について理解を深めることができる。

次に、**Ⅲ-3「海岸分野における気候変動への対応」**では、海岸分野における国内における気候変動適応の施策立案や研究の動向についてレビューを行っている。Ⅲ-3 の構成は以下の通りである。なお、いずれも、中間報告書では扱っていない内容である。

Ⅲ-3 部：海岸分野における気候変動への対応

1. 閣議決定「気候変動の影響への適応計画」までの海岸分野における検討の変遷
2. 国土交通省における気候変動適応策
3. 海岸分野における気候変動適応策に向けた研究の動向

最後に、**Ⅲ-4「水資源分野における気候変動への対応」**では、水資源計画・管理分野における気候変動適応に関連した研究成果の紹介や施策動向のレビューを行っている。Ⅲ-4 の構成は以下の通りである。なお、1. と 2. は中間報告書では扱っていない内容であり、3. についても中間報告書執筆以降の新しい検討内容について報告する内容である。

Ⅲ-4 部：水資源分野における気候変動への対応

1. 水資源計画・管理における施策動向
2. 気候変動によるダム貯水池の水質への影響と適応策の検討
3. 都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の検討

1. では、気候変動影響により今後発生が懸念される大規模渇水に備えるため、水源が枯渇し国民生活や社会経済活動に深刻かつ重大な支障が生じる渇水を「ゼロ水」と位置づけ、それが発生した場合の対応について事前に準備すべき「ゼロ水タイムライン」についての検討状況を紹介する。

2. では、気候変動によるダム貯水池の水質への影響について、4 つのダム貯水池を対象としてシミュレーションにより検討した事例研究の成果を論じるとともに、それに基づき様々な水質改善対策の効果の試算を行い、改善したい項目に応じた適応策の選択肢を提示する。なお、本研究は、プロジェクト研究「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発（平成 22～25 年度）」とは元来は独立して平成 26 年度に実施した研究成果であるが、本報告書の目的・内容に深い関連を有することから、ここにその概要を紹介するものである。本内容の詳細は、国総研資料第 865 号「気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究」を参照いただきたい。

3. では、都市域における水資源確保代替案として、再生水の利用の可能性を水量や膜処理技術の開発動向から論じるとともに、再生水の水質・安全面や環境負荷の軽減効果について評価を行った成果を紹

介する。

これらは、水資源計画・管理分野における気候変動影響評価や適応策検討の先駆的な試みと位置づけられる。これらの検討成果が、同分野における影響評価や、それに基づく適応策の実施への更なる推進に資することを期待するものである。

3. 研究の体制

本研究は、「気候変動適応研究本部」を主体として実施し、関連研究部の研究資源を本研究目的に合わせて統合的に投入する体制をとった。また、降雨量や気温など気候変動の最新の将来予測については、別途文部科学省による共同研究「21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ：H19～23）」等から提供を受けるなど、各外部研究機関との連携を活かした体制をとった（図-Ⅰ.3.1）。

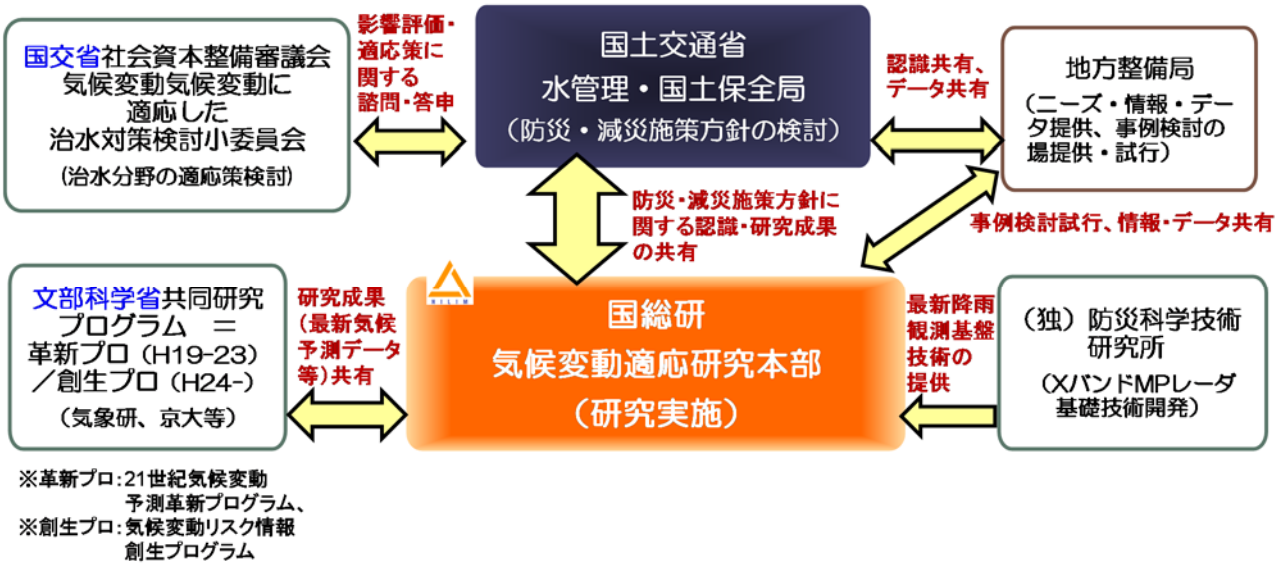


図-Ⅰ.3.1　研究の実施体制

なお、気候変動適応研究本部を構成する研究部・研究室については、平成 22 年の研究開始から 3 年を経た平成 25 年 4 月において、国総研内の研究組織の改編（環境研究部、河川環境研究室の廃止）が実施されたことから、その前後で以下のように変更されている。

平成 22 年 4 月～同 25 年 3 月：

河川研究部：河川研究室、海岸研究室、水資源研究室、気候変動研究チーム
下水道研究部：下水道研究室、下水処理研究室
危機管理技術研究センター：水害研究室
環境研究部：河川環境研究室

平成 25 年 4 月～同 26 年 3 月：

河川研究部：河川研究室、海岸研究室、水循環研究室
下水道研究部：下水道研究室、下水処理研究室
危機管理技術研究センター：水害研究室

さらに、本プロジェクト研究終了後、IPCC 最新の第 5 次報告書公表等を受けたフォローアップ追加検討を行った平成 26 年度における気候変動適応研究本部の体制は以下の通りである。

平成 26 年 4 月～同 27 年 3 月
河川研究部：河川研究室、海岸研究室、水循環研究室、水害研究室
下水道研究部：下水道研究室、下水処理研究室

４．研究の主要な成果（概要）

ここでは、本研究の中心的課題となっている治水分野の気候変動影響評価・適応策の検討に焦点を当ててあらかじめ簡潔に成果の要点を紹介しておくことにより、多岐にわたる研究成果の総合的理解の一助とする。

○気候変動予測結果を治水に関わる実務における技術検討に役立つよう翻訳する方法を示した。

気象研究所の 4 種の気候予測モデルによる降水量予測データを用いて、洪水流量や氾濫生起確率（治水基準点における計画規模相当流量を超える流量の生起確率で表現）、及び、気候変動影響を吸収するために必要となる追加的河川整備労力をマクロに表す指標に対し、気候変動による豪雨量の増加がどのように影響するかを全国の一級水系（109 水系）について算出した。これにより、気候変動影響が治水施策に与える影響度合いを個々の水系で具体的、体系的に調べることが可能になった。加えて、気候変動による豪雨量増加度合いとこれらの指標との関係性、すなわち、豪雨量の変化が治水施策に関わる指標に伝播していく特性が定量的に明らかとなった。これにより、気候予測モデルの改良に伴う豪雨量予測値の更新を考慮しつつも、その都度それに反応するというスタンスにとどまらず、この予測値に幅が残ることを前提にして、気候変動という大きな趨勢の中でどのような治水システムを構築すべきかという検討スタンスに移行するための準備が整った。上記の伝播特性は、全体としてみると、豪雨量の増加率が 1 割程度のオーダーであっても、治水施策に関わる指標には増幅して現れるというものであり、このことは、気候変動適応を織り込んで治水施策のより一層の向上を図ることがわが国にとって重要な課題であることを示すものである。詳細は、第Ⅱ部 2.1 を参照のこと。

○河川整備を着実に進捗させることを基本にしつつ、治水施設の防御レベルを超える規模の洪水により起こる被害を低減させる施策群を技術的観点を軸に類型化し、当該流域・水系の状況に応じて防災・減災を図る施策選択・組み合わせを総合的に検討する技術的フレームを提案した。

生じうる被害と豪雨規模との関係図（氾濫被害特性曲線）を活用して、洪水氾濫防御から減災マネジメントに至る技術検討を行う枠組みを提案した。想定される最大クラスの外力も考慮しつつ、外力規模が施設の防御レベルを超過してから最大クラスまでの間、どのような被害が生じうるかを体系的に把握し、被害が生じるにしてもそれを最小化するよう「被害の起こり方をコントロール」するための施策を検討する方法が、より体系的な形で提示されている。また、ここでは、洪水氾濫の防御レベルを向上させることが一義的な目的である河川整備において、場合によっては被害最小化のための考慮が有用あるいは必要となる場合があることを明確にして、減災施策をソフト面での施策に限定せず、必要に応じてハード面での施策も取り込んで行っていくフレームとしている。概念レベルの検討に終わらせず具体的な検討につながるよう、このフレームの下で類型化された施策案の例示リスト（検討・議論のためのた

たき台という性格を持つもの）を提示し、各施策案の特徴や実践に向けての課題を共通の軸で整理した。詳細は、Ⅲ-2 2.を参照のこと。

○設計で対象としている以上の外力（超過洪水）を受けたときの治水施設の機能発揮・喪失シナリオと、それに対応して生じうる氾濫被害パターンを網羅的に抽出する実用的手法を、堤防による氾濫防御システムの特徴を簡潔に反映させる工夫を行うことにより提示した。

堤防の設計洪水位に相当する水位に達したときに破堤が起こるという氾濫生起の想定が基本となる一方、それだけで氾濫生起パターンの全てを捕捉できるとは限らない。たとえば、上流区間でより高い水位まで破堤しない状況にたまたまなったときには、下流区間に作用する洪水外力がより厳しくなる。開発した手法は、このようなパターンを含む、氾濫生起の可能性を系統立って網羅的に捕捉することを可能にする。この手法を用いることで、上記の「生じうる被害と豪雨規模との関係（氾濫被害特性曲線）」について、起こる可能性を全て網羅した図化を行うことができ、検討の基本となる氾濫被害想定だけでなく、可能性はそれより小さいかもしれないが、さらに大きな被害をもたらしうる氾濫生起パターンの把握を機械的にできるようになる。詳細は、Ⅲ-2 3.を参照のこと。

以上の基盤的成果を前提に、洪水被害の軽減に資する様々な施策メニューの拡充につながる以下のような手法を提示した。

○気象予測情報を活用して既設ダムの洪水調節能力を増強する技術と、その実用化のために克服すべき課題を示した。

降雨予測を取り込むことで、通常の操作規則によるよりもさらに大きな洪水調節効果を発揮させることは原理的に可能であるが、予測が実降雨とずれたときに、調節効果がかえって減じ、また利水容量分を事前放流する場合には利水機能を一部毀損するリスクが生じうる。そこで、降雨予測においてアンサンブル予測を導入し、予測値が持ちうる幅を最初から明確な根拠に基づき考慮して、効果の最大化やリスクの最小化をはかる技術を開発した。降雨予測の精度が高い気象パターンの場合は、この手法により相当の信頼度で洪水調節機能を増強できることが示された。ただし、アンサンブル予測群全体が実際とずれるような豪雨事象においては、この手法の有効性が薄れることも明らかとなり、降雨予測の精度向上とは別に、降雨予測情報の活用がもたらしうる副作用への対応法を制度面も含め検討する必要があることが示された。詳細は、Ⅲ-2 4.2 を参照のこと。

○遊水機能を維持・活用した治水の実践例を分析し、堤内地の一部での氾濫を織り込んだ治水施策実施の可能性を高める共通的条件を整理した。

既存の遊水機能を有する区域を維持し、治水に有効に活用している施策事例を俯瞰し、施策を可能とした地域条件の類似点の分析や、今後の施策推進のための論点整理を行った。また、様々なレベルの洪水規模に対する遊水機能の維持・活用の効果を連続堤方式と比較し、氾濫被害特性曲線の違いとして表現することで、氾濫生起確率の抑制をやや緩める一方、氾濫被害の起こり方を穏やかにできる実例を示した。詳細は、Ⅲ-2 4.4 を参照のこと。

○X バンド MP レーダによる豪雨観測技術を実用化し、現場実装を可能にした。

（独）防災科学技術研究所等において開発が進められていた X バンド MP レーダ技術のすぐれた特長を実務において生かし、現場実装を図るために、高精度観測とグランドクラッタ混入のレードオフを考慮した観測仰角の設定、raw データ段階におけるデータ品質確保、レーダ毎の雨滴定数の最適化、理論的な雨量算定アルゴリズムへの工学的補正係数の導入、雨量算定アルゴリズムの最適化・改良等の多岐にわたる技術事項を検討し、それらの成果を実用化技術として体系的に提示した。これらの技術検討は、

実際に得られた観測データやその課題に基づく検討結果が逐次実運用に反映されるという、運用を通じた改良・検証プロセスを経て、実用技術としてほぼ確立される段階に至った。この成果により、2015 年 7 月現在、国土交通省は XRAIN と呼ばれる 39 基の X バンド MP レーダで構成されるレーダネットワークを構築し、地上雨量計を用いた補正を介さず地上雨量計と良く対応する雨量観測を実現し、1 分更新、1～2 分遅れのレーダ雨量情報の配信が実現した。民間での利活用も進められ、既に広く国民にも豪雨災害の防止・軽減に役立てられてきている。詳細は、Ⅲ-2 4.5 を参照のこと。

○短時間豪雨の将来の増加傾向を、既往降雨データの変化傾向分析に基づき推計し、この豪雨増加が都市雨水排水にもたらす影響を試算し、豪雨増加に対応する各種方策の特徴を整理した。

現在までに一般に入手可能な気候予測モデルデータでは、空間分解能の粗さから都市浸水対策に重要となる狭領域での短時間豪雨の変化予測を行うことはできない。そこで、過去 50 年間の観測データの分析を行い、10 分・60 分間の超過確率 1/5～1/10 降雨強度が将来 1.3～1.4 倍程度になるとの見通しを得た。そして、短時間豪雨変化の複数シナリオのもとに、雨水排水幹線・枝線各レベルにおいて、どのように雨水浸透・貯留・流下の各施設を整備強化するのが効果的かを示した。詳細は、Ⅲ-2 4.6 を参照のこと。

○都市域における大規模氾濫時の切迫避難の局面における人的被害低減対策として近隣の中高層ビルへの避難を取り上げ、その有効性を評価する手法を開発し、被害軽減効果を増大させるための要件を明らかにした。

通常の 1～2 階建ての住宅では垂直避難が困難な、浸水深が 5m を超えるような条件下での切迫避難を想定した場合、中高層ビルの多い大都市部では、切迫避難先として中高層ビルを加えたり、浸水位上昇速度を抑制する施策が有効である。開発した切迫避難の実効性を評価する手法は、人的被害軽減の最後のよりどころと言える切迫避難をせざるを得ない状況下において、通常の都市の住まい方や活動を前提に現実的な避難軽減方策を検討することに役立つ。詳細は、Ⅲ-2 4.7 を参照のこと。

以上の他、利水分野、環境分野における研究／レビュー成果も、第Ⅱ部、第Ⅲ部で説明されており、該当箇所を参照いただきたい。

なお、本報告書では、研究成果の全体を把握しやすくする観点から、各分野の影響評価研究成果をとりまとめた第Ⅱ部、および、各分野の適応策関連研究成果をとりまとめた第Ⅲ部（Ⅲ-2）について、それぞれ各分野の研究成果を横並びで縦断するまとめの章を別途設けている（第Ⅱ部 7.：第Ⅱ部のまとめと今後の課題、および、Ⅲ-2 部 5.：Ⅲ-2 のまとめと今後の課題）ので、そちらも併せて参照することで、本研究成果への理解の一助になれば幸いである。

５．成果の活用

本研究の成果のうち、全国 109 一級水系の平均としての降雨量変化倍率および氾濫可能性（基本高水を超える洪水の発生頻度）変化倍率について、文部科学省・気象庁・環境省による気候変動の観測・予測および影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響（2012 年度版）」に引用された。また、本研究のほぼ全ての主要な研究成果が、環境省中央環境審議会における「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）」に引用され、わが国への水分野における影響評価の進展に大きく貢献した。一方、社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会同小委員会においても、全国一級水系流域の降雨・洪水への影響評価や氾濫被害特性曲線を用いた氾濫被害の生起の仕方の制御の考え方も含めて、本研究の成果の一部が議論の対象となり、答申の最終とりまとめに向けてその方向性を形作る上で重要な役割を果たした。また、平成 27 年 11 月末にはその答申の成果も反映される形で国交省気候変動適応計画が策定され、さらに、その内容を包含する形で、国としての「気候変動の影響への適応計画」の閣議決定が行われた。個別の施策メニュー拡充の成果についても、例えば、XRAIN によるリアルタイム豪雨観測データが豪雨災害予測・警戒のみならず既に広く国民に活用されつつあり、それらの成果の活用は目に見える形になりつつある。このように、本研究の成果は、わが国の水災害分野における影響評価・適応策に係る施策立案に既に幅広く貢献してきていると考えられる。

本研究では、全体フレームを含む様々な施策群の吟味を行っているが、その主眼は、施策実践に向けて具体的な検討を行う基盤を、主として技術的観点から提示することにある。個々の施策の実施の可否判断や実施内容の具体化に向けては、本研究の成果を活用しつつ、さらに多くの観点からの検討を加え熟度を向上させる必要がある。たとえば、施策実施主体、施策実施に関わる権限と責任の範囲、意思決定の仕組み、社会における当該施策実施の合意形成に関わる制度的枠組みの整備などは、本研究の主対象にはなっていない。逆に言えば、一連の成果は、そのような検討を行う基盤を整えたものと位置づけられ、その点において活用に値する意義を持つと考えられる。

６．プロジェクト研究としての達成度評価

本プロジェクト研究を平成 22 年度に開始するに当たって設定した目標とそれに対する達成度については、以下のように自己評価を行い、国土技術政策総合研究所 研究評価委員会 分科会に提示し、研究評価を受けている（平成 26 年 12 月 17 日）。研究評価結果の詳細については、国総研資料第 850 号「国土技術政策総合研究所研究評価委員会平成 26 年度分科会報告書」(2015 年 6 月)を参照されたい。

表－Ⅰ.5.1　国総研プロジェクト研究「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」成果目標と達成度　（国総研、2015）

研究開発の目的	研究開発の目標	研究成果	研究成果の活用方法（施策への反映・効果等）	目標の達成度
水災害リスク評価手法および施策メニューの拡充・選択・組み合わせ手法といった基盤技術を核とし、新たな治水計画手法のたたき台を提示することで、気候変動への適応策の実現を強く推進する。	**水災害リスクの評価手法に関する研究**		**整備局における適応策検討の前提・基礎とすべき水災害（種に外水氾濫災害）リスクの評価に活用**	
	・将来の気象条件および社会経済変動シナリオの設定方法の確立	・気候変動影響の計画規模豪雨や洪水･河川整備労力への伝播を不確実性を含めて定量的に算出する手法を開発した（全国109の一級水系に適用）。 ・気候変動影響による降雨量の増加やその不確実性が、治水施策に鋭敏に影響を与えることを明らかにした。このことは、気候予測の不確実性が適応策検討の重要な判断要素であり、気候予測における不確実性の低減が強く求められることを示す。 ・都市雨水排水対策向けのシナリオとして、現在の気候予測では将来予測ができない短時間豪雨の近年の増加傾向を分析し、50年後の短時間降雨強度の変化の見通しを得た。 ・年齢階層別人口変化率及び人口･資産の集積核を踏まえた人口･資産分布変化設定手法を開発した(20河川で試算)。	・地方整備局の代表河川において、気候変動適応策検討の予備段階としての氾濫災害リスクの評価検討が始まっており、本成果が既に活用されている。 ・平成26年1月に再開された社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会においても、超過洪水による氾濫被害発生を想定に入れたリスク評価の必要性が示されている。その方向で答申がまとまれば、全国主要河川において、本研究成果に基づくリスク評価・検討に活用される見込みである。	◎
	・様々な態様の被害を表現できる水災害リスク評価手法の開発	・設計以上の外力（超過洪水）を受けたときに洪水防御システムに見込まれる機能発揮と氾濫被害との関係を網羅的に把握し、流域スケールで想定し得る様々な氾濫被害リスクパターンを河川整備や流域の実態に即して評価する手法を開発し、20河川で試算を行った。		◎
	施策メニューの選択法と組み合わせ方（計画手法）に関する研究 ・施策メニューの選択・組み合わせ手法（適応策の計画手法）の検討	・超過洪水において被害の起こり方をコントロールする考え方を導入し、各種施策メニュー群を選択し組み合わせることによる治水計画と減災マネジメントの統合的な枠組み(ﾌﾚｰﾑ)を提示し、実流域での試算を行った。 ・各種施策メニューについて、既存の治水手段との違い、効果発現の場の違い等の観点から、大きく3種、細かくは7種に分類し、無被害拡大と被害の起こり方の制御のための組み合わせ法の視点を提示した。	**整備局における気候変動適応策および超過洪水対応策検討に活用** ・気候変動適応策としてだけではなく、現時点の施設設計規模・整備水準を超える超過洪水による氾濫被害発生を想定に入れた減災対策が各地方整備局の河川において検討される見込みであり、本研究成果に基づく各種施策代替案の選択・組み合わせ手法や、被害低減効果の算定手法が、今後広く活用される予定。	◎
	・施策メニューの拡充および適用条件の明確化	・降雨予測の信頼性を考慮し適時適切なダム洪水調節操作を可能とする手法を開発し、適用条件を提示した。 ・Xバンドレーダにより詳細かつ迅速に豪雨を把握する技術を実用化し、既に主要都市域に39基が配備され、局地的・集中的な豪雨災害への備えに貢献した。 ・遊水機能を維持・活用している事例に見られる共通的な地域条件を抽出し、氾濫を考慮した治水施策推進の基礎となる社会条件を明示した。	・XバンドMPレーダによる降雨観測高度化技術は、すでにXrainとして実装され、ゲリラ豪雨等の局地的・集中的な豪雨に対する防災・減災対策の一つとして民間利用も含め既に有効に活用され始めている。 ・都市浸水対策メニューの組み合わせ手法については、「下水道施設計画・設計指針」の改定に活用される見込みである。	◎
	・既存施策メニューに加え拡充された各種代替案による被害低減効果の算定手法の開発	・流域全スケールでの被害最小化の観点から各施策メニューによる流域の氾濫被害低減効果算定手法を開発し、実流域での事例検討を行い、被害低減効果を定量的に試算した。 ・街区スケールで様々な人的被害低減対策の効果を算定する手法を開発し、それぞれ実流域での事例検討を行い、被害低減効果を定量的に試算した。 ・豪雨増加と排水区特性の組み合わせによる各種シナリオに対して、都市浸水施策メニューの組み合わせ手法を提示した。		○
	「統合」施策に関する研 ・他施策との親和性・背反性の判定	・他施策との親和性・背反性を判断するために必要となる氾濫災害に対する各種施策メニュー群の氾濫被害低減効果をわかりやすく提示する手法を開発した。 ・様々な施策メニューについて、1)被害生起の制御型、2)必要資源、3)効果発揮の確実性、4)他益性と合意形成の必要性、5)技術的成熟度、6)他施策との親和性、の観点から類型化することで、幅広い行政施策の統合化を図る手法を提案した。	本研究で開発した手法により、他分野の行政担当者や流域住民を含めて、リスクコミュニケーションを深化させることが可能となると期待される。それにより、防災・減災対策がより深く社会に組み込まれることで、適応策の実装を進展させる効果が期待される。	○
	基盤技術化に関する研究 ・基盤技術の手引きとりまとめ	・XバンドMPレーダに関する技術検討資料およびXバンドMPレーダ運用マニュアルを作成した。 ・水災害リスク評価手引き（案）（施策メニュー検討の枠組み、及び被害低減効果算定手法を含む）を作成した。本省・地方整備局の意見も踏まえて修正予定。	・XバンドマニュアルのXRAINシステム構築に活用されている。 ・水災害リスク評価手引き（案）は、リスク評価および適応策効果算定に関する現時点で唯一の実務的なガイドラインとして、整備局において既に活用されつつある。 ・これらの成果は、河川砂防技術基準・計画編の改定に活用されることが見込まれる。	◎

参考文献：

閣議決定（2015）気候変動の影響への適応計画.

環境省（2014）日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）、報道発表資料（平成 26 年 6 月 6 日）.

国土交通省（2015）新たなステージに対応した防災･減災のあり方.

国土交通省（2015）国土交通省気候変動適応計画～気候変動がもたらす我が国の危機に総力で備える～

国土交通省国土技術政策総合研究所（2015）国土技術政策総合研究所研究評価委員会、平成 26 年度分科会報告書、国土技術政策総合研究所資料、第 850 号、pp.6-7、および、pp.120-124.

国土交通省水管理・国土保全局（2015）浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法.

社会資本整備審議会（2008）水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適応策のあり方について(答申)

社会資本整備審議会（2015）水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～、答申.

社会資本整備審議会（2015）大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築～、答申.

中央環境審議会（2015）日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）.

日本学術会議地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同国土・社会と自然災害分科会（2008)提言「地球環境の変化に伴う水災害への適応」

文部科学省、気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、京都大学防災研究所、国立環境研究所、筑波大学、海洋研究開発機構（2015）地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)、利用手引き（抜粋)、2015 年 12 月 21 日版.

IPCC (2007) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4), Synthesis Report.

IPCC (2011) Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).

気候変動適応研究本部（2013）気候変動適応策に関する研究（中間報告)、国総研資料第 749 号.

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report (AR5).

IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report (AR5).

IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report (AR5).

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report of the IPCC Fifth Assessment Report (AR5).

＜謝　辞＞

外部機関と密接な連携が、本研究を効率的・効果的に実施する上で不可欠であった。気候変動外力の設定については、21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ）[1]と気候変動リスク情報創生プログラム（創生プロ）[2]の中で検討された気象予測データの提供を受け、最新の科学的なデータに基づいて様々な検討を行うことができた。また、気候変動による災害の激甚化に対応する X バンド MP レーダによる降雨観測技術の開発については、防災科学技術研究所等[3]から技術的協力を受け、研究を実施した。一方で、X バンド MP レーダの実装に代表されるように、研究成果が河川・水防災の現場管理に的確にフィードバックできる工夫をおこなうために、国土交通省の地方整備局とも密に連携・協議を図った。国土交通省とは、水管理・国土保全局等を中心に、社会資本整備審議会等における議論に関わる情報･知見整理等において緊密な連携を図り、防災･減災施策に関わる方針について認識共有を図るように努めてきた。さらに、平成 25 年 3 月に実施した中間成果報告ワークショップ[4]のみならず、各施策オプション拡充テーマに個別に構築した委員会[5]など、国総研ではカバーできない多分野の学識者より種々のアドバイスを得る機会を得た。これらに関与し 5 年以上の長きにわたりご指導・ご支援をいただいてきた関係各位に、改めて感謝の意を表するものである。

以下、ご指導を頂いた主要な外部の学識者各位を列記する。

（敬称略、所属は当時。）

1) 文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム（革新プロ、2007-2011）：

チーム 3「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」

全体課題代表者：鬼頭昭雄（気象庁気象研究所　気候研究部長）

サブ課題実施責任者：尾瀬智明、栗原和夫、楠昌司、杉真人(気象研究所)、中北英一(京都大学)、竹内邦良(土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)

2) 文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム（創生プロ、2012～）：

領域テーマＣ「気候変動リスク情報の基盤技術開発」

領域代表者：高薮出（気象庁気象研究所　環境・応用気象研究部長）

領域テーマＤ「課題対応型の精密な影響評価」

領域代表者：中北英一（京都大学防災研究所　教授）

サブ課題(i-b, i-c)代表：立川康人、森信人(京都大学)

3) 防災科学技術研究所

真木雅之（防災科学技術研究所　水・土砂防災研究部長）

岩波　越（防災科学技術研究所　水・土砂防災研究副部長）

前坂　剛（防災科学技術研究所　研究員）

4) 気候変動に適応する治水方策に関するワークショップ（2013 年 3 月 12 日）

福岡捷二（中央大学研究開発機構　教授）

中北英一（京都大学防災研究所　教授）

角　哲也（京都大学防災研究所　教授）

渡邊康玄（北見工業大学　教授）

二瓶泰雄（東京理科大学　教授）

5)例えば、レーダ活用による河川情報高度化検討会　Xバンドレーダ分科会

山田　正（中央大学　教授）
中北英一（京都大学防災研究所　教授）
上田　博（名古屋大学地球水循環研究センター　教授）
小池俊雄（東京大学　教授）
坪木和久（名古屋大学地球水循環研究センター　教授）
石原正仁（気象庁気象研究所）
鈴木　修（気象庁気象研究所）
山内　洋（気象庁気象研究所）
真木雅之（防災科学技術研究所　水・土砂防災研究部長）
岩波　越（防災科学技術研究所　水・土砂防災研究ユニット長）
岩見洋一（土木研究所　水災害・リスクマネジメント国際センター）

第Ⅱ部

河川・海岸の整備と管理に関わる気候変動影響の評価

１．国内外における気候変動予測の現状

１．１　気候モデル

気候変動適応策研究における影響評価に用いられる気候変動下の将来気候の予測データは、温暖化ガス排出シナリオを設定し、気候モデルにより計算される。気候モデルは、国内外の研究機関で研究開発された複数の気候モデルが存在し、気候モデリングの研究分野において一般的に、モデリングの対象とする現象の範囲や計算領域の範囲等によって以下のように分類されている（例えば、気象庁、2008）。

気候モデルは、大気循環モデル（General Circulation Model: GCM）とも呼ばれ、大気現象（大気循環、気温変化、物質の相変化、放射収支、物質の化学変化等）と海洋現象（海流、熱、物質循環）または大気現象のみについて力学、熱力学、化学等の物理方程式に基づいて計算し、将来の気候を予測する。GCM では大気現象を 3 次元で計算することが一般であり、日々の天気予報に使われる数値予報モデル（GSM, MSM）とは用いる物理過程等が若干異なっている。

GCM は以下ように、大きくは 2 種類に整理される。

- 大気海洋結合モデル（CGCM,AOGCM: Coupled Atmosphere and Ocean GCM）
- 大気モデル（AGCM: Atmospheric GCM）

基本的に GCM は、地球全体を計算対象としており、一部の地域の大気現象を計算対象とするモデルは、地域気候モデル（RCM: Regional Climate Model）と呼ばれる。

１．１．１　大気海洋結合モデル

大気海洋結合モデルとは、大気物理モデルと海洋物理モデルを結合し、大気と海洋の相互作用による現象（例えばエルニーニョ現象）を表現可能な気候モデルである。温暖化予測実験は、計算初期値と温暖化シナリオ（温暖化ガスの時間変化）を与えて行う。大気、海洋現象が相互作用も含めて扱われるため、温暖化予測の信頼性が高いと言えるが、扱う現象が多いため計算負荷が大きく高解像度の計算が難しい（ただし、CMIP への登録や温暖化研究のため長期間の温暖化予測実験を行っている）。また、海洋物理モデルによって海面上昇量を計算することが可能となっている。

１．１．２　大気モデル

大気モデルとは、大気物理モデルのみの気候モデルであり、初期値、温暖化シナリオを与え、CGCM の SST（海面温度）の予測値を底面境界として温暖化予測実験を行う。CGCM と比較して計算負荷が軽いため、CGCM よりも高解像度で、より詳細な大気物理過程を扱った計算が可能であるが、海洋物理モデルを扱っていないことから海面上昇量は計算されない。

１．１．３　地域気候モデル

地域気候モデルは、一部の地域を対象とした気候モデルであり、初期値、温暖化シナリオを与え、CGCM の SST を底面境界に、AGCM や CGCM の予測値を側面境界として温暖化予測実験を行う。RCM は、計算対象が限られた領域であることから CGCM や AGCM よりも高解像度で詳細な大気物理過程を扱った計算が可能であるが、AGCM、CGCM の予測値が境界値となるため AGCM、CGCM の予

測結果の影響を受ける。

１．２　国内の気候モデル

国内の気候モデルの一覧を表-Ⅱ.1.2.1 に示す。国内では、気象研究所、CCSR/NIES/FRCGC（東大気候システムセンター、国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センター）により開発された気候モデルが存在する。気象研究所は、CGCM、AGCM、RCM を開発しており、CCSR/NIES/FRCGC は MIROC と呼ばれる CGCM を開発している。

参考文献：

気象庁（2008）地球温暖化予測情報 第 7 巻.

表-Ⅱ.1.2.1　国内の気候モデル一覧（国土交通省水管理国土保全局（2012）を一部改変して掲載）

（ピンクの網掛けは、21 世紀気候変動予測革新プログラムによる気候変動予測モデル）

気候変動モデル		MRI-CGCM2.3.2	MRI-GCM20	MRI-AGCM3.1S/H	MRI-AGCM3.2S/H	RCM20（地球温暖化予測情報第6版）	MRI-CRCM（地球温暖化予測情報第7版）	RCM5、RCM2	RCM5、RCM2	MIROC3.2medres	MIROC3.2hires	MIROC4h	MIROC5 mid
提供元		気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	気象庁 気象研究所	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC	CCSR、NIES、FRCGC
発行年		2006年	2006年	2009年	2011年	2004年	2008年	2009年	2011年	2004年	2004年	2010年	2011年
計算対象期間		1851～2000年 2001～2100年	1979年-1998年 2080年-2099年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	1981～2000年 2031～2050年 2081～2100年	1981～2000年 2031～2050年 2081～2100年 （寒候期のみ）	1990～1999年 2026～2035年 2086～2095年 （夏季のみ）	1979～2003 年 2031～2050 年 2075～2099 年 （夏季のみ）	1900～2000年 2001～2100年	1900～2000年 2001～2100年	1980～1999年 2030～2049年 2080～2099年	1980～1999年 2030～2049年 2080～2099年
モデル種別		大気海洋結合モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	地域気候モデル	大気海洋結合 地域気候モデル	全球大気モデル	全球大気モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル	大気海洋結合モデル
計算エリア		全球	全球	全球	全球	日本周辺	日本周辺	日本周辺	日本周辺	全球	全球	全球	全球
大気	水平解像度	約280km	約20km	約20km/約60km	約20km/約60km	約20km	RCM5：5km RCM2：2km	RCM5：5km RCM2：2km	RCM5：5km RCM2：2km	約300km	約110km	約60km	約150km
	鉛直層数	30層	60層	60層	64層	36層				20層	56層	56層	40層
海洋	水平解像度	経度2.5° 緯度0.5～2.0°	－	－	－	－	－	－	－	約20km	約20km	約20km	約100km
	鉛直層数	23層	－	－	－	－	－	－	－	43層	47層	47層	49層
主な提供気象要素		地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	降水量、気温、日最高気温、日最低気温、風向風速、蒸発量など	気温、降水量、風向風速、日蒸発散量、融雪量、流出発生量、比湿、積雪水当量、大気圧など	気温、降水量、日射量、海面水温など	降水量、日平均気温、日最高気温、日最低気温、降雪量、積雪量など46要素	降水量、日平均気温、日最高気温、日最低気温、降雪量、積雪量など	気温、降水量など	気温、降水量など	地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	地上気温、降水量、地表面温度、蒸発量、海面気圧、海面水温、海面水位など	気温、降水量、水蒸気量、河川流量、海面水温など	地上気温、降水量、水蒸気量、河川流量、海面水温など
SERS排出シナリオ		A1B、A2、B2	A1B	A1B	A1B	A2	A1B,B1	A1B	A1B	A1B、A2	A1B、A2	RCP4.5、RCP8.5	RCP4.5、RCP8.5
研究実績		日本全体のシミュレーションが多い	共生プロジェクトでの検討実績が多数有	**IPCC-AR5向け**	**IPCC-AR5向け**	地域的な検討実績が多数有	寒候期のみしかないため、あまり実績がない	夏季の豪雨が対象	夏季の豪雨が対象	IPCC-AR4で使用	IPCC-AR4で使用	**IPCC-AR5向け**	**IPCC-AR5向け**
参考論文		Yukimoto, S., and A. Noda (2002) Yukimoto et al. (JMJ:2006)	Mizuta et al.（JMSJ：2006） Kusunoki et al.（JMSJ：2006） 和田ほか（水文・水資源：2008）	滝野ほか（水工学論文：2010）	気象研究所技術報告第64号（2011） Mizuta et al.（2011）	Kurihara et al.(SOLA：2005)	Sasaki et al.(2006)	Kanada et al.(2011), Sasaki et al.(2011)	Kanada et al.(2011) Sasaki et al.(2011)	K-1 model developers（2004）	K-1 model developers（2004）	Sakamoto et al.（2011）	Watanabe et al.(2010)
その他		■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MRI-GCGM2.3.2.htm	■ 人・自然・地球共生プロジェクトで開発されたモデル	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ 海洋・海氷部分は、MRI-COM3から計算。 ■ MRI-AGCM3.1S で使用しているスキームが異なる	■ 所謂、気候統一シナリオ第2版 ■ MRI-CGCM2.0の結果を境界条件としてダウンスケーリング。 ■ 一般的に用いられている	■ 寒候期のみしかない	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ MRI-AGCM3.1S を5km/2kmにネスティングしたモデル ■ RCM2は、限られた領域しかない（仙台以南）	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ MRI-AGCM3.2S を5km/2kmにネスティングしたモデル ■ RCM2は、限られた領域しかない（仙台以南）	■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MIROC3.2_medres.htm	■ http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/MIROC3.2_hires.htm	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム	■ 21世紀気候変動予測革新プログラム ■ 新しい物理モデルを開発・使用
データ入手の可能性		入手不可能	入手可能（DIASプロジェクト）	入手可能	入手可能	一般に提供されている	一般に提供されている	利用可能だが、季節が限られている	利用可能だが、季節が限られている	入手可能	入手可能	入手可能	入手可能

出典：国土交通省水管理・国土保全局水資源部　2012：気候変動による水資源への影響検討会、第１回、資料２、（http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdf）

１．３　海外の気候モデル：ＣＭＩＰから

CMIP とは、Coupled Model Intercomparison Project の略で、各国各研究機関の GCM の出力結果を相互比較するための枠組みである。各国各研究機関の GCM の出力結果は、CMIP に登録され、研究者等はデータをダウンロードし､各 GCM における気温､降水量等の変化やその影響等を相互評価する。CMIP3(CMIP Phase 3)は IPCC 第 4 次報告書に向けた GCM の相互比較プロジェクトであり、CMIP5(CMIP Phase 5)は AR5 に向けた相互比較プロジェクトを示す。CMIP5 に登録されているデータは近未来予測実験（2030 年まで）と長期予測実験（2100 年までとそれ以降）からなる。CMIP3 では CGCM のみであるが、CMIP5 では AGCM についても登録されている。CMIP のフェーズは IPCC と合わせることになったため CMIP4 は存在しない。

表-Ⅱ.1.3.1 に CMIP3 に登録された各国の GCM の一覧を整理したものである。日本の気候モデルである MIROC の計算解像度が 110km メッシュ程度であり、CMIP3 においては最も計算解像度が高い。（1 度は、緯度方向については約 110km、経度方向については、赤道付近で約 110km、日本付近（北緯 35 度）で約 90km となる。）

表-Ⅱ.1.3.1　CMIP3 に登録された各国の GCM と空間解像度

Num	GCM	Country	Atmosphere Spatial Res. lon*lat (deg)
1	BCCR-BCM2.0	Norway	2.8*2.8
2	CGCM3.2(T63)	Canada	2.8*2.8
3	CGCM3.1(T47)	Canada	3.8*3.8
4	CNRM-CM3	France	2.8*2.8
5	CSIRO-MK3.0	Australia	1.8*1.8
6	CSIRO-MK3.5	Australia	1.8*1.8
7	GFDL-CM2.0	U.S.A(NOAA)	2.5*2.0
8	GFDL-CM2.1	U.S.A(NOAA)	2.5*2.0
9	GISS-AOM	U.S.A(NASA)	4.0*3.0
10	INMCM3.0	Russia	5.0*4.0
11	IPSL-CM4	France	3.8*2.5
12	MIROC3.2(hires)	Japan(U.of.Tokyo...)	1.1*1.1
13	MIROC3.2(Medres)	Japan(U.of.Tokyo...)	2.8*2.8
14	MIUB-ECHO-G	German and Koriea	3.8*3.8
15	MPI-ECHAM	German	1.8*1.8
16	MRI-CGCM2.3.2	Japan(MRI)	2.8*2.8
17	NCAR-PCM	U.S.A(NCAR)	2.8*2.8

表-Ⅱ.1.3.2 に CMIP5 に登録された各国の GCM の一覧を整理したものである。多くの GCM の解像度は 200～300km メッシュであるが、日本の MIROC は 60km、MRI-CGCM は 120km メッシュであり、日本の気候モデルは世界的に最も高解像度の温暖化予測実験が行われていることがわかる。

表-Ⅱ.1.3.2　CMIP5 に登録された各国の GCM と空間解像度

Num	GCM	Country	Atmosphere Spatial Res. lon*lat (deg)
1	Bcc-csm1-1	China	2.8*2.8
2	CNRM-CM5	France	1.4*1.4
3	CSIRO-Mk3-6-0	Australia	1.8*1.8
4	CanCM4	Canada	2.8*2.8
5	CanESM2	Canada	2.8*2.8
6	FGOALS-g2	China	2.8*3.0
7	FGOALS-s2	China	2.8*3.3
8	GFDL-CM3	U.S.A(NOAA)	2.5*2.0
9	GFDL-ESM2G	U.S.A(NOAA)	2.5*2.0
10	GFDL-ESM2M	U.S.A(NOAA)	2.5*2.0
11	GISS-E2-H	U.S.A(NASA)	2.5*2.0
12	GISS-E2-R	U.S.A(NASA)	2.5*2.0
13	HadCM3	U.K.	3.8*2.5
14	HadGEM2-CC	U.K.	1.8*1.2
15	HadGEM2-ES	U.K.	1.8*1.2
16	inmcm4	Russia	2.0*1.5
17	IPSL-CM5A-LR	France	3.7*1.8
18	IPSL-CM5A-MR	Francd	2.5*1.2
19	MIROC-ESM	Japan(U.of.Tokyo...)	2.8*2.8
20	MIROC-ESM-CHEM	Japan(U.of.Tokyo...)	2.8*2.8
21	MIROC4h	Japan(U.of.Tokyo...)	0.5*0.5
22	MIROC5	Japan(U.of.Tokyo...)	1.4*1.4
23	MPI-ESM-LR	German	1.8*1.8
24	MPI-CGCM3	German	1.1*1.1
25	NorESM1-M	Norway	2.5*1.8

１．４　気候変動予測計算の特徴

１．４．１　降水量、気温の予測計算

IPCC 第 4 次報告で採用されたモデルの温暖化予測実験結果の特徴について述べる。表-Ⅱ.1.4.1.1 に第 4 次 IPCC で採用された気候モデルの一覧を示す。採用されたモデルは全部で 24 モデルあるが、表-Ⅱ.1.4.1.1 の○に示している現在気候については 19 モデル、将来(A1B シナリオ)気候については 17 モデルの結果を用いている。先にも述べたように、IPCC で採用されている気候モデルの計算格子間隔は大きく、日本国土上では数点程度しかない。そこで、日本周辺の海域のデータも含めて特徴を整理する。設定した日本周辺領域例を図-Ⅱ.1.4.1.1 に示す。図-Ⅱ.1.4.1.1 は、気象研究所の CGCM2.3.2 の例である。

図-Ⅱ.1.4.1.2、Ⅱ.1.4.1.3 に、それぞれ各モデルの 20 世紀（1900～1999 年）及び 21 世紀（2000～2099 年）の日本周辺年平均降水量の時系列変化を整理した結果を示す。図は、1990～1999 年の 10

年間の平均値を基準とした比率で示しており、データ数が少ないことによるばらつきを軽減するため、10 年間の移動平均により平滑化している。図中の青線は各世紀内で増加傾向が見えるもの、赤線は減少傾向が見えるものを示しており、実線は Mann-Kendall のトレンド検定により有意水準 5%で有意な傾向となったものを、破線は有意な傾向とならなかったものをそれぞれ表している。モデルによる比率のばらつきは大きいが、これによると、20 世紀において日本周辺の年降水量が増加傾向を示すモデルは 8 モデル、減少傾向を示すのは 11 モデルであり同程度のモデル数となっている。一方、21 世紀については、1 モデルを除き、全て増加傾向となっており、11 モデルは有意水準 5%で有意な傾向となっている。

図-Ⅱ.1.4.1.4 は日本周辺年平均の気温変化を整理したものである。ただし、1980～1999 年の平均値を基準としている。図より、日本周辺の気温は 2000 年前後から上昇が顕著になっており、年降水量変化と符合していることが分かる。図には、RCM20 で用いられている A2 シナリオの結果も併せて示しているが、2080 年程度までは両者の差はほとんどなく、21 世紀末に差が見られるのみである。また、その差も平均値で 1℃程度以下と小さい。こうした傾向は、IPCC 第 4 次報告に示されている全球的な傾向と同様である。日本周辺での気温上昇が若干大きいように思えるが、IPCC 第 4 次報告とは対象モデル数が異なるので一概には言えない。

表-Ⅱ.1.4.1.1　IPCC 第 4 次報告で採用された気候モデル一覧

（出典：http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip3/）

センター名	国	モデル名	解像度	使用モデル	
				現在気候	将来気候(A1B)
Beijing Climate Center	China	CM1	2.5°		
Bjerknes Centre for Climate Research	Norway	BCM2.0	2.8°		
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	Canada	CGCM3T47	3.75°	○	○
		CGCM3T63	2.8°		
Centre National de Recherches Meteorologiques	France	CM3	2.8°	○	○
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Org	Australia	Mk3.0	1.875°	○	
Max-Planck-Institut for Meteorology	Germany	ECHAM5-OM	1.875°	○	○
Meteorological Institute, University of Bonn Meteorological Research Institute of KMA Model and Data Groupe at MPI-M	Germany Korea Germany	ECHO-G	3.75°	○	○
Institude of Atmospheric Physics	China	FOALS-g1.0			
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	CM2.0	2.5°	○	○
		CM2.1	2.5°	○	○
Goddard Institute for Space Studies	USA	AOM	4°	○	○
		E-H	5°	○	○
		E-R	5°	○	
Institute for Numerical Mathematics	Russia	CM3.0	5°	○	○
Institut Pierre Simon Laplace	France	CM4	3.75°	○	○
National Institute for Environmental Studies	Japan	MIROC3.2-H	1.125°	○	○
		MIROC3.2-M	2.8°	○	○
Meteorological Research Institute	Japan	CGCM2.3.2	2.8°	○	○
National Centre for Atmospheric Research	USA	PCM	1.4°	○	○
		CCSM3	2.8°	○	○
UK Met. Office	UK	HadCM3	3.75°	○	○
		HadGEM1	1.875°	○	○
National Institute of Geophysics and Volcanology	Italy	SXG 2005			

1° =赤道付近約110km,日本付近約90km

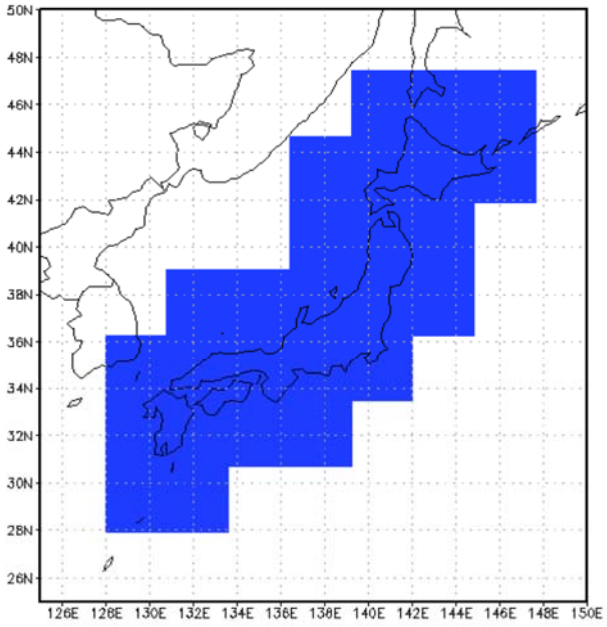


図-Ⅱ.1.4.1.1　設定した日本周辺領域の例

（気象研究所 CGCM2.3.2）

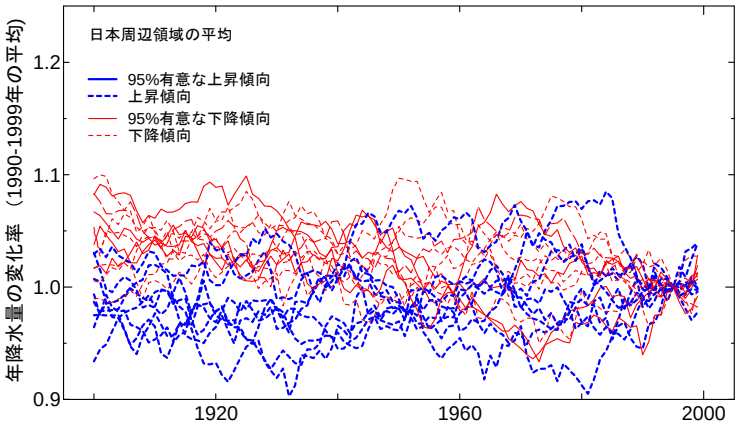


図-Ⅱ.1.4.1.2　日本周辺年平均降水量の時系列変化：1900～1999 年

（IPCC 第 4 次報告で採用された 19 の気候モデルの計算結果）

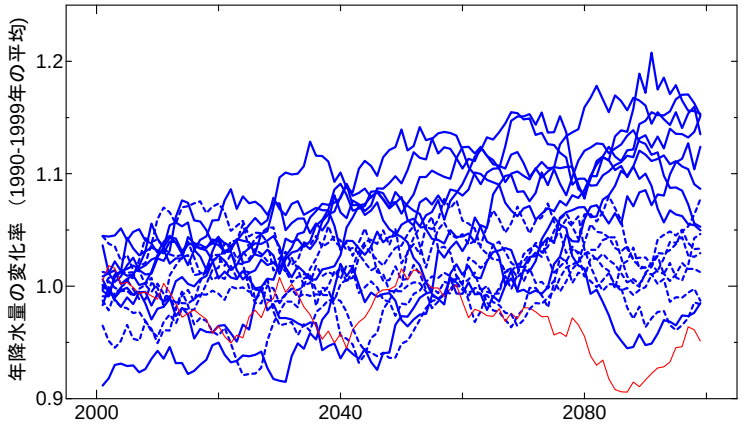


図-Ⅱ.1.4.1.3　日本周辺年平均降水量の時系列変化：2000～2099 年
（IPCC 第 4 次報告で採用された 17 の気候モデルの計算結果）

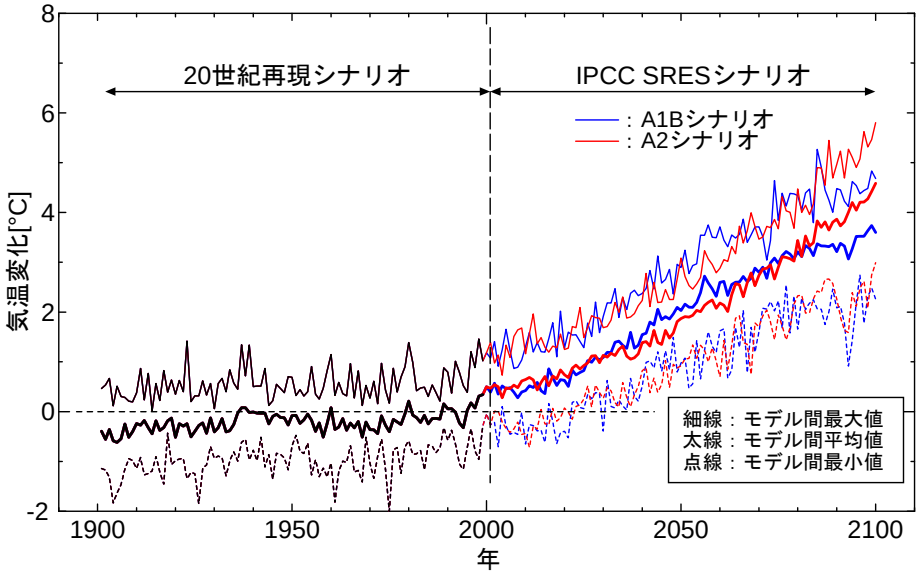


図-Ⅱ.1.4.1.4　日本周辺年平均の気温変化

１．４．２　計算解像度

図-Ⅱ.1.4.2.1 は、革新プログラムで行われた GCM20 及び RCM5 による温暖化予測実験（前期実験）の結果の一例を図化したものであり、2095 年における 72 時間最大雨量の空間分布を示している。5 km メッシュモデルは 20km モデルと比較して、地形による降雨の増大効果（地形性降雨）が再現されていることが確認できる。

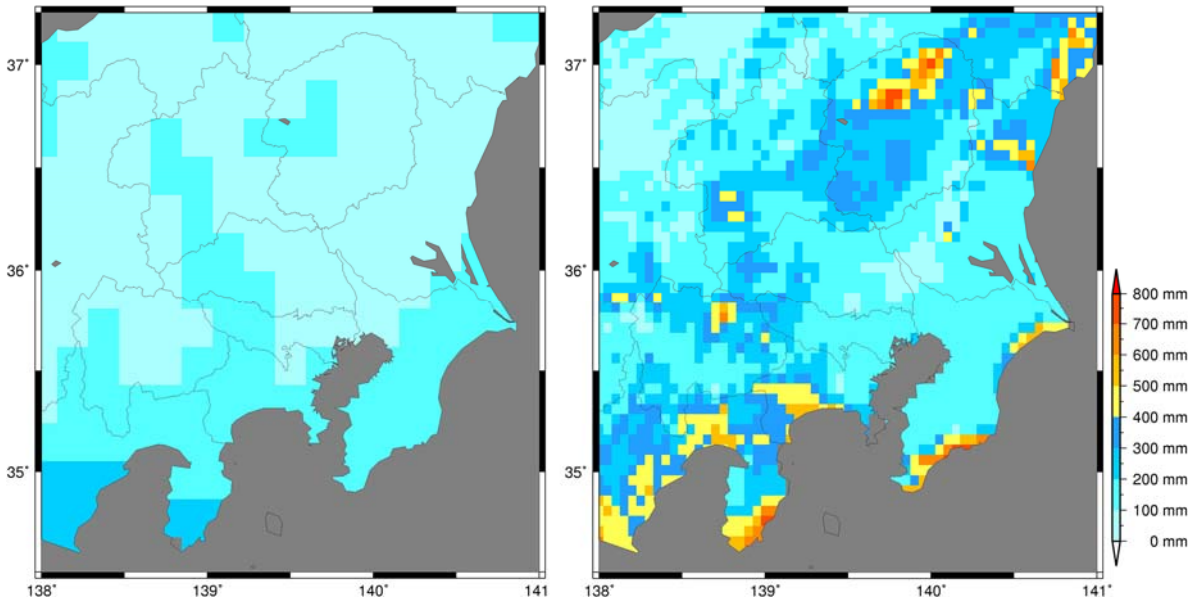


図-Ⅱ.1.4.2.1　GCM20(左)と RCM5（右）による降水量分布の比較
（2095 年における 72 時間最大雨量の空間分布）

１．５　気候変動予測計算の動向

１．５．１　将来予測シナリオ～SRES シナリオから RCP シナリオ～

気候変動の予測計算では、人為起源による温室効果ガスが引き起こす放射エネルギーの収支の変化量（放射強制力）のシナリオを与える必要がある。放射強制力に関する将来予測シナリオとして、「今後の社会・経済動向の想定から算出されるSRESシナリオ」、「政策的な緩和策を前提として、将来、温室効果ガスをどのような濃度に安定化させるかという考え方から算出するRCPシナリオ」がある。

SRESシナリオは、IPCC第3 次評価報告書（2001年）で扱う気候予測に用いるシナリオとして、IPCC が排出シナリオに関する特別報告書（SRES ： Special Report on Emissions Scenarios）において発表（2000年）したものである。将来の温室効果ガスの排出量は、今後の経済成長や人口増加、エネルギー需給、科学技術の発展・普及等により異なることから、社会的・経済的な将来像を設定する必要がある。SRESシナリオは、この将来像について典型的なパターンをいくつか設定し、排出シナリオとして定めている。

RCPシナリオは、SRESシナリオに代わりIPCCが第5 次評価報告書（2013）で扱う気候予測に用いるシナリオとして、2007 年に示されたものである。RCPシナリオでは社会・経済的な将来像を仮定せず、将来予測される複数の放射強制力の経路（代表的濃度経路（Representative Concentration Pathways））が設定されており、社会経済モデルから作成した多くのシナリオから以下の4シナリオが選択されている。

・RCP2.6（低位安定化シナリオ：気温上昇を2℃に抑えることを想定）
・RCP8.5（高位参照シナリオ：政策的な緩和策を行わないことを想定）
・RCP4.5（中位安定化シナリオ）
・RCP6.0（高位安定化シナリオ）

RCPに付く数値は2100年頃を目安とした放射強制力を示しており、例えば、RCP2.6では「2100 年以前に約3W/m² でピークを迎え、その後減少し、2100 年頃には約2.6 W/m² となる」、RCP8.5では「2100年の時点で8.5 W/m²を超え、上昇が続く」、RCP4.5 とRCP6.0 では「2100 年以降に約4.5（6.0）W/m² で安定化する」ことを示している。

SRESシナリオでは社会的・経済的な将来像に対して排出量、放射強制力、気候予測が１対で対応するが、RCPシナリオでは放射強制力に複数の社会経済シナリオを対応・比較させることで多様な将来像を仮定することが可能であり、様々な緩和策・適応策の施策に役立てることが出来る。この政策的な緩和策を前提として設定された将来予測シナリオという点がSRESシナリオとの重要な違いであり、近年の気候予測では、このシナリオに基づき気候を予測することが主流となっている。図-Ⅱ.1.5.1.1、Ⅱ.1.5.1.2は、SRESシナリオとRCPシナリオの放射強制力、二酸化炭素排出量の違いを示したものである。SRESシナリオとRCPシナリオでは様々な仮定が異なるので、放射強制力の違いだけから単純に比較することは出来ないが、「SRES A2とRCP8.5」、「SRES B2及びA1Bと RCP6.0」、「SRES B1とRCP4.5」が概ね対応する。

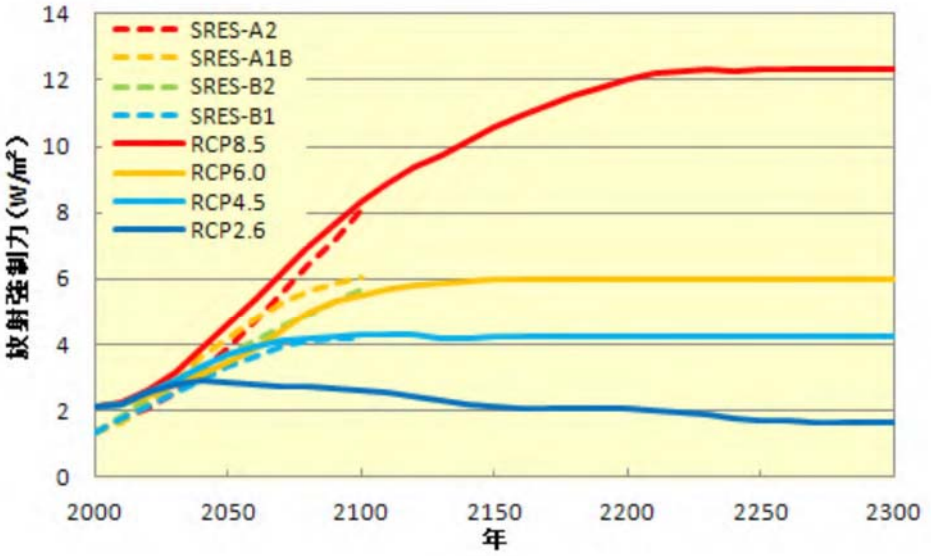


図-Ⅱ.1.5.1.1　SRESシナリオとRCPシナリオの放射強制力の比較

（出典：http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdf）

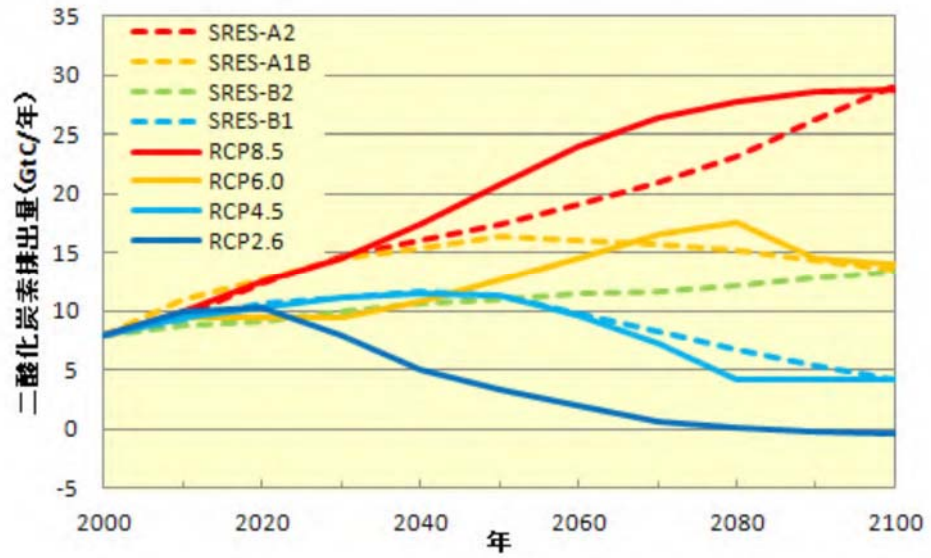


図-Ⅱ.1.5.1.2　SRES シナリオと RCP シナリオの二酸化炭素排出量の比較

（出典：http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdf）

１．５．２　ＲＣＰシナリオによる気候変動予測計算

政府全体の「適応計画」策定に向けた取組みとして、平成26年6月に公表された環境省、気象庁による日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動アンサンブル予測計算では、RCPシナリオが用いられている。

この気候変動予測計算は、21 世紀末の日本周辺における気候を対象に、RCP の 4 シナリオ（RCP2.6/4.5/6.0/8.5）を用い、また、海面水温については、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次報告書で用いられた第 5 期結合モデル相互比較計画（CMIP5）データより作成された、3 種の異なる特徴を有する海面水温の将来変化の空間パターンを与えている。さらに、全球気候モデルにおける 3 種の積雲対流スキームの適用と合わせて、計 18 ケースの将来気候のアンサンブル計算を行い、適応計画の策定に必要な予測の不確実性の幅が考慮可能なものとなっている。ここで行われた日本周辺を対象とした水平格子間隔 20km の予測計算について、大雨による降水量（上位 5%の降水イベントによる日降水量）の概要を図-Ⅱ.1.5.2.1 に示す。すべてのシナリオ・ケースで増加し、全国平均を見ると、RCP2.6 では平均 10.3%（7.9～14.5%）増加、RCP8.5 では平均 25.5%（18.8～35.8%）増加となっている。

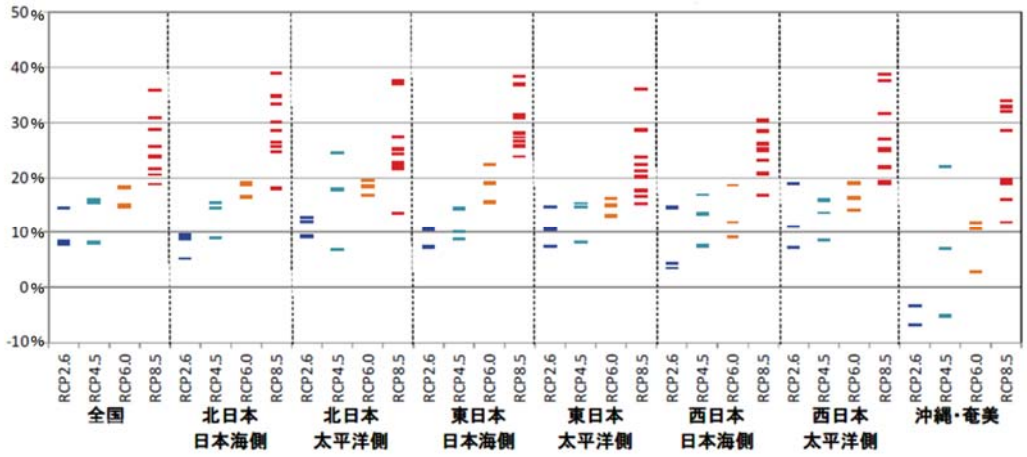


図-Ⅱ.1.5.2.1　上位 5%の降水イベントによる日降水量の変化

（出典：http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdf）

本予測計算の詳細等については、http://www.env.go.jp/press/files/jp/25593.pdfを参照されたい。なお、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムにおける気候変動予測計算においてもRCPシナリオによる計算が行われている。

図-Ⅱ.1.5.2.2、Ⅱ.1.5.2.3、Ⅱ.1.5.2.4、Ⅱ.1.5.2.5は、A1Bシナリオにより実施されたGCM、RCMによる気候変動予測計算結果から2.1.2.3に示す算定手法より求めた豪雨量変化倍率とRCPシナリオにより実施された気候変動予測計算結果から求めた豪雨量変化倍率について、関東、山陰ブロックを対象に整理したものである。なお、対象ブロックについて各気候変動予測結果で同一であるが、計算解像度については、共生プロGCM、革新プロGCM、環境省プロRCMは20kmメッシュであり、革新プロRCMは5kmメッシュとなっている。また、RCP85_c1、RCP85_c2の、RCP85はRCP8.5シナリオを示し、c1、c2は計算の境界条件として与える海面水温が異なることを示している。RCP8.5シナリオは、SRES A2シナリオと概ね対応するシナリオと言われている。試算したケース数がまだ不十分であるが、RCP8.5シナリオにおける増加率は、概ね20kmメッシュモデルのA1Bシナリオの増加率と同

程度であり、上記のRCP8.5シナリオとSRES A2シナリオとの対応関係と整合的である。

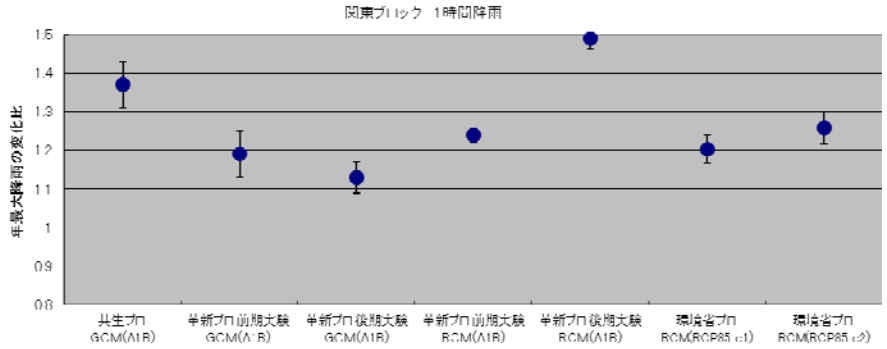


図-Ⅱ.1.5.2.2　関東ブロック　1時間雨量の豪雨変化倍率

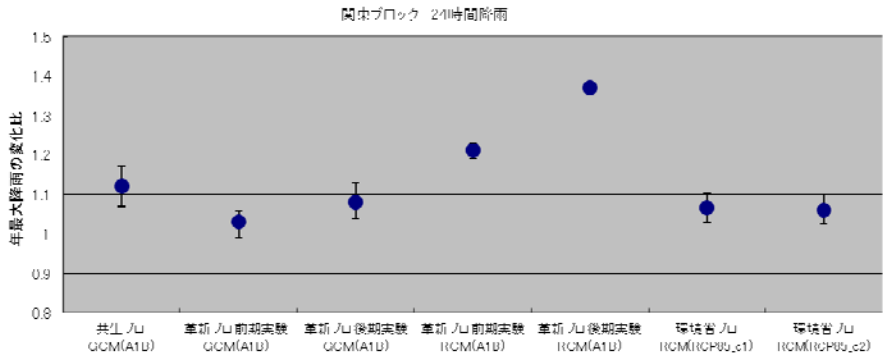


図-Ⅱ.1.5.2.3　関東ブロック　24時間雨量の豪雨変化倍率

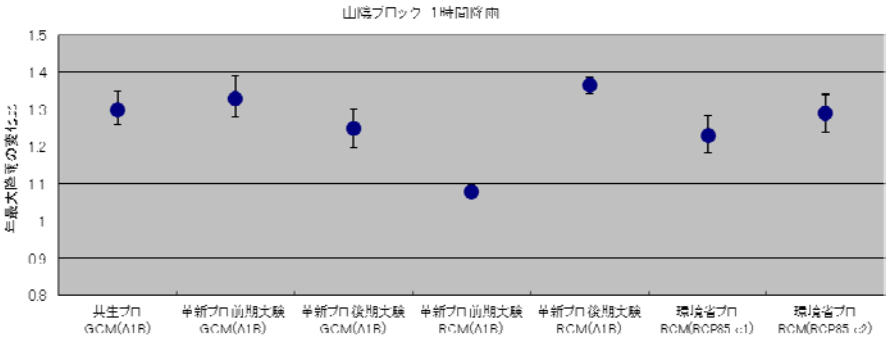


図-Ⅱ.1.5.2.4　山陰ブロック　1時間雨量の豪雨変化倍率

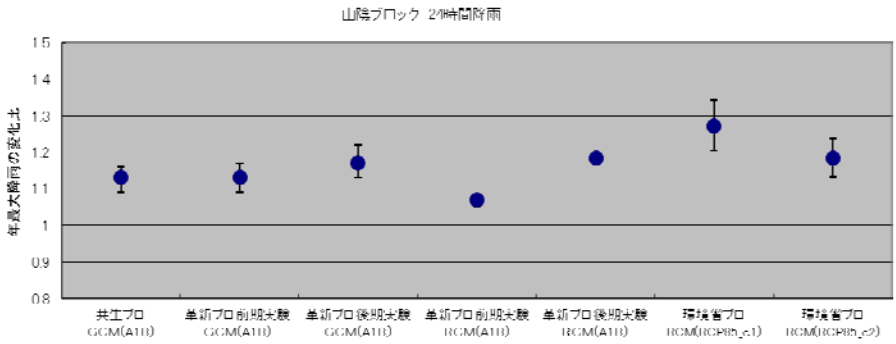


図-Ⅱ.1.5.2.5　山陰ブロック　1時間雨量の豪雨変化倍率

２．治水施策の視点から見た気候変動影響
－気候変動予測結果の翻訳と人口の長期的変化の考慮

２．１　気候変動が治水施策に与える影響の水系ごとの評価

２．１．１　はじめに～気候変動予測結果の翻訳にあたって～

気候変動に伴い、将来的に豪雨が増加傾向にあると予測されており、それは結果的にこれまで積み上げてきた河川および流域の治水安全度を引き下げる方向に働く。従来、治水計画の対象として取り込む出水規模は、降雨の発生確率が将来にわたって安定しており今後も変化しないことを前提として、過去の降雨・流量観測値に基づく生起頻度を踏まえて、甚大な災害をもたらした既往の大規模出水の規模も勘案するなど「実績」に即して検討されている。それに対して、適応策においては、降雨確率自体が中長期的に変化する条件の下、気候変動モデルによる「予測」を主軸に据えての検討とならざるを得ない。加えて、将来気候下の豪雨の予測は長足の進歩を遂げてきているものの、さらなる信頼性向上の途上でもあり、予測結果にある一定の幅が存在し、研究の進展に伴って予測結果自体も変わっていく（IPCC 第5次評価報告書他）。

本研究においては、以上のポイントを踏まえ、不確実性を有する将来予測降雨に基づいて治水に関わる適応を検討する上で踏まえておくべき要点を明確にすることを目的として、後述する４つの定量的指標すなわち雨量倍率、流量倍率、河川整備労力倍率、氾濫可能性倍率を導入し、その評価結果に基づいて考察を加えた。

指標の算定にあたっては、表-Ⅱ.2.1.1 に示した「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（21 世紀気候変動予測革新プログラム、2007～2011 年度、以後、革新プログラム）（文部科学省研究開発局 2012）」で開発された、高解像度の将来予測をした水平解像度 20km メッシュの（ⅰ）21 世紀気候変動予測革新プログラム前期モデル MRI-AGCM3.1S による前期実験（以下、前期 GCM20）、（ⅱ）同後期モデル MRI-AGCM3.2S による後期実験（以下、後期 GCM20）、また前期 GCM20、後期 GCM20 をそれぞれ境界条件として実験された水平解像度 5km メッシュの（ⅲ）前期 RCM5、（ⅳ）後期 RCM5 の 4 つの気候予測モデルデータを使用した。気候予測モデルの予測データは水平解像度 5km と 20km の 2 種類で、現在・近未来・将来の 3 時点が存在し、それぞれ計算期間が異なる。

以下、結果を概説するが、詳細の分析手法及び結果については、国土技術政策総合研究所資料 No.749「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」（平成 25 年 8 月）（以下、中間報告と呼ぶ）を参照されたい。

http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0749.htm

表-Ⅱ.2.1.1　4気候モデルの解像度・計算期間等の概要

		前期GCM20	後期GCM20	前期RCM5	後期RCM5
計算領域		全球		日本領域	
水平解像度		20km		5km	
SRES		A1B			
計算期間	年数	25年間		10年間	25年間
	月	通年		6～10月	
	現在	1979～2003年		1990～1999年	1979～2003年
	近未来	2015～2039年		2026～2035年	2015～2039年
	将来	2075～2099年		2086～2095年	2075～2099年
境界条件		ー		前期GCM20	後期GCM20
グリッド数（日本国土相当分）		1054grids		14,896grids	

２．１．２　評価方法

（１）評価指標の設定

ここでは、詳細な洪水被害リスク算定によらず、まずは、気候変動による降雨量の現在に対する将来の比である雨量倍率、その河川への洪水流出に関する洪水流量倍率とともに、これらが治水施策に与える影響を総括的に表す以下に説明する”河川整備労力倍率”、及び ”氾濫可能性”の指標を通じて評価を行った。

気候変動による降水量変化が治水施策に与える影響を考える際には、我が国においては、河川整備が未だ途上にあることをまず理解しておくことが重要である。目標とした治水安全度の確保に向けて今後とも治水整備を進捗させる必要があり、整備を完遂させるには、なお相当の期間を要する状況にある。

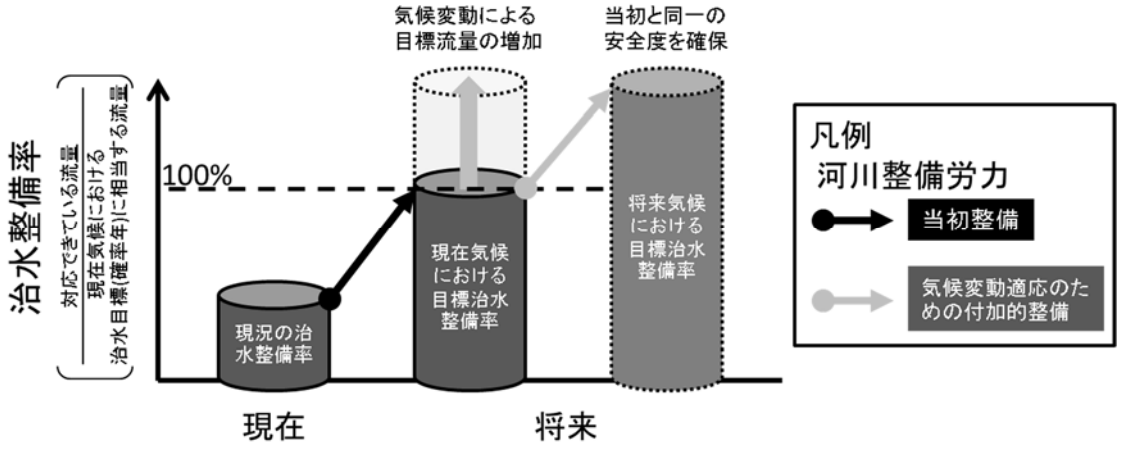


図-Ⅱ.2.1.2　河川整備労力の概念図

図-Ⅱ.2.1.2 に示すように、現在気候下で「当初整備」によって治水整備率が 100%に到達したとしても、気候変動の影響によって現在と同一の整備目標（超過確率年）に対応する将来の降雨量が増加し、それに応じて目標流量も増大するため、これを吸収するための「付加的整備」を実施する必要が生じる。

そこで本検討においては、図-Ⅱ.2.1.3 に示すように、「一定の河川整備労力の投入により到達するは

ずであった治水安全度を、気候変動の下で降雨に関する極端現象が顕著になった状況においても獲得するための付加的な整備労力」を算出し、「当初、設定されていた整備労力からの増大率」と定義される“河川整備労力倍率”を共通指標として、河川整備という多様な実務的施策群（河道の流下能力向上、洪水調節施設の整備、それら維持管理など）に対する気候変動の影響を把握した。具体的には、整備途上にある現況河道において、現在気候下での流量として河川整備基本方針の降雨量によるピーク流量を流下させた際の水位と計画高水位の差にあたる水量（定義と算出法は後述）を河川整備労力 W_P、近未来・将来気候下の予測降雨量によるピーク流量を流下させた際のそれを河川整備労力 W_F とし、その比（W_F／W_P）を“河川整備労力倍率 γ”として定義した。なお、河川整備労力倍率という指標は、適応策全てを河川の施設整備（ハード対策）によって行うことを意図したものではなく、施設整備による適応が困難であることは投入が必要となるソフト的施策（施設整備によらない施策）の質・量が増すことから、ハードとソフトを組み合わせた適応策全般の困難度をも評価することを狙ったものである。

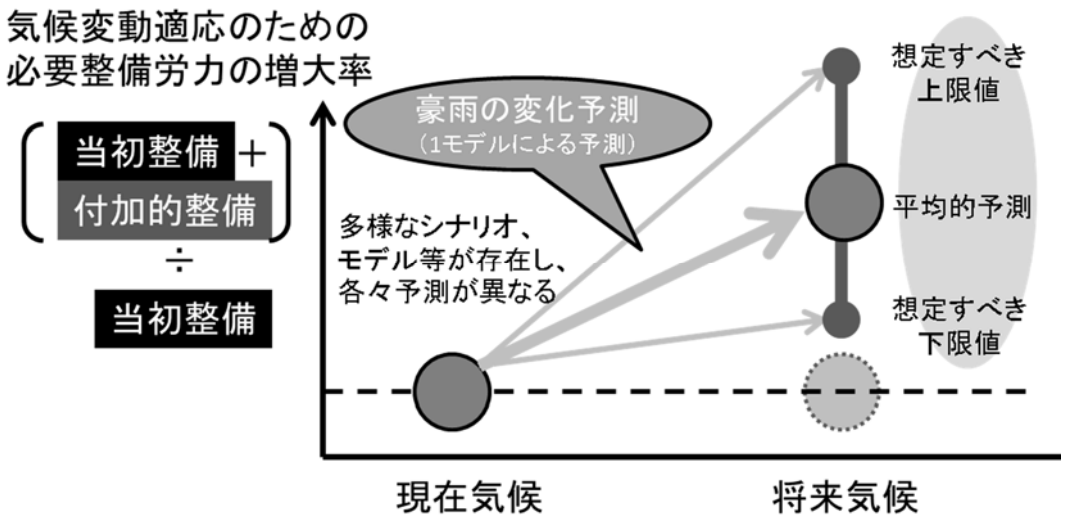


図-Ⅱ.2.1.3　整備労力増大率を用いた気候変動の影響把握

表-Ⅱ.2.1.2　流出計算に用いた資料

資料		備考
流出解析関係	流出解析手法	・基本高水、計画高水検討時のモデル ・例)貯留関数法、準線形貯留型モデル等 注：洪水調節施設は基本高水、計画工水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	流域・河道モデル	・基本高水、計画高水検討時のモデル（現況） ・流域分割図（現況） 注：洪水調節施設は基本高水、計画工水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする
	流域定数 （貯留関数モデルの場合）	・基本高水、計画高水検討時の値 ・流域面積A、K、P、Tl、f1、Rsa、Qb
	流域定数 （準線形貯留型モデルの場合）	・基本高水、計画高水検討時の値（現況） ・流域面積A、流域分割毎の土地利用面積、土地利用毎のf1、fsa、Rsa、Qb（現況）
	流域定数 （その他のモデルの場合）	・基本高水、計画高水検討時の値（現況） ・流域面積A、流出計算に使用する定数（現況）
	河道定数 （貯留関数モデルの場合）	・基本高水、計画高水検討時の値 ・河道延長L、K、P、Tl
	河道定数 （不定流計算モデルの場合）	・粗度係数（低水路、高水敷）（現況を基本） ・下流端水位（現況河道検討時）
	確率規模別雨量	・計画降雨継続時間 ・計画降雨継続時間内確率規模別雨量
	計画のハイエトグラフ	・基本高水、計画高水決定に用いた”実績”ハイエトグラフ（洪水波形、時間分布） ・引き延ばし等をやっていれば、引き延ばし後のハイエトについても記載
	ダム操作方式 （対象としているすべてのダム）	・洪水調節方式（定量カット、定率定量、自然放流、その他） ・洪水調節方式毎の諸元 ・治水容量 ・H-V関係 ・貯留池運用方法（初期水位の設定） 注：基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存の直轄、水機構、補助ダムを対象とする。
	遊水地	・位置 ・洪水調節の計算方法（定量カット、水位を用いた洪水調節） ・洪水調節開始流量、越流堤の諸元（長さ、高さ） ・治水容量 ・H-V関係 注：基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存の遊水地を対象とする。
	湖、自然調節池等の流入量－流出量関係式	・H-V関係 ・流入量-流出量関係式 注：基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	放水路等の分派	・位置 ・放水路への分派比率 注：基本高水、計画高水流量算出時に対象とした既存施設を対象とする。
	流域対策 （防災調整池、浸透施設等）	・流域対策により流量低減を見込んでいる場合のみに該当 ・位置 ・集水面積、施設規模
	内水域からの流出量	・基本高水、計画高水決定に用いた内水域からの流出量、排水位置
河道形状	横断座標	・基本方針策定に用いた現況河道 ・直轄区間すべて
	断面毎のH-Q関係式	・基本方針策定に用いた現況河道 ・直轄区間すべて ・水位H-流量Q関係（現況河道）
	距離標、区間距離、計画高水位	・直轄区間全て

また「目標水準相当の流量を超える洪水の発生確率が現在に比べて将来では何倍になるのか」を“氾濫可能性倍率 ε”として定義し、雨量の増加により氾濫が生じる可能性がどの程度高まるのかを評価した。図-Ⅱ.2.1.4 に、雨量倍率 α の変化が他指標へ伝播する概念図を示す。

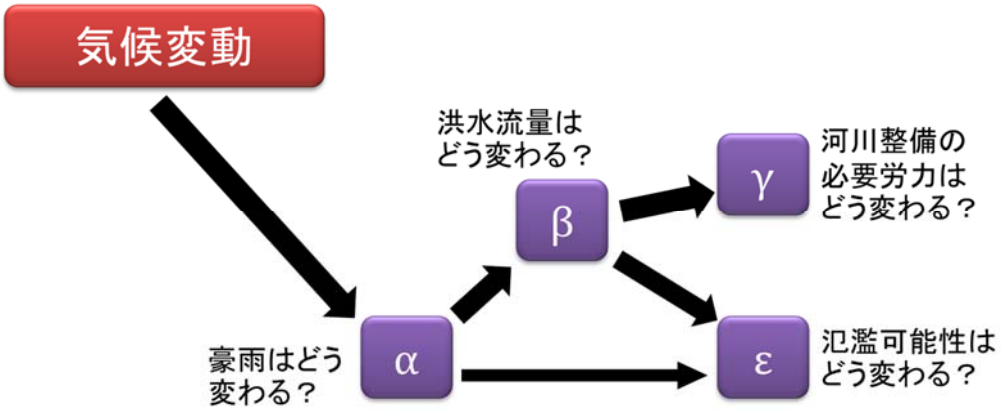


図-Ⅱ.2.1.4　気候変動による雨量の変化（増大）の治水方策に関する指標への伝播

以下に本評価において用いた上述の 4 つの指標について定義の詳細を示す。

１）雨量倍率

(2)に後述する方法を用いて、気候予測モデルの予測値から、直轄 109 水系別の各計画降雨継続時間の年最大降雨量の変化倍率を算出し、雨量倍率 α と定義した。ここで、現在と将来の年最大降雨量の確率分布について地域内でのそれぞれの平均値により無次元化したときに、両者の無次元化確率分布に変化はない、すなわち、両者の確率分布は相似と考えて良いとした柏井ら(2008)の知見を当てはめることで、現在の計画規模降雨量を R_P としたとき、近未来・将来の計画規模降雨量 R_F は、$\alpha \times R_P$ となる。

２）流量倍率

直轄 109 水系を対象に河川計画の実務で用いた流出計算モデル及び河道追跡モデルのモデル定数、計画決定洪水降雨、洪水調節施設諸元（既設）等の流出計算に必要な諸量のデータ（表-Ⅱ.2.1.2）に基づき、R_P、R_F を与え、流出計算を行い、ピーク流量 Q を算定した。本研究報告では流出計算に関する詳細な説明を省略する。現在気候におけるピーク流量を Q_P、近未来・将来気候におけるピーク流量を Q_F、Q_F/Q_P を「流量倍率 β」と設定した。また水系ごとに、超過確率年別雨量データを用いて各雨量で流出計算を行い、雨量－流量－超過確率年の関係式を構築した。なお、一部の水系では超過確率年別の雨量データが無く、この関係式は得られていない。

３）河川整備労力倍率

河川整備基本方針に示されている計画規模に相当する洪水を現況の整備途上の河道に流下させると、図-Ⅱ.2.1.5 に示すように最高水位 H_P が計画高水位 H_{HWL} を上回る区間が生じる。本研究では、その区間が長大でありかつその区間の川幅が広いほど、さらに計画高水位を上回った水深が大きいほど、今後必要な整備規模が増大すると単純化して取り扱うこととした。そこで整備規模の大きさを表す指標として図-Ⅱ.2.1.5 の灰色部分の水量 W を用いることとし、以降、W を整備必要労力と呼び、式-Ⅱ.2.1.1 により算定する。

$$W = \int_0^L B \cdot f(H_P - H_{HWL})dx$$ 式-Ⅱ.2.1.1

ここで、B は水位 H_P～H_{HWL} 間の平均川幅、$f(z)$は $z>0$ の場合 $f(z)=z$、$z \leqq 0$ の場合 $f(z)=0$ となる関数である。H_P、H_{HWL}、Bはいずれも河口からの距離 x の関数であり、国管理区間の河川総延長 L に渡って定義される。

現在気候下および近未来・将来気候下における河川整備労力 W_P、W_Fは、それぞれ当初の整備規模とそれに気候変動の影響を吸収する拡充分を加えた整備規模に対応すると考え、これらの比 W_F/W_Pを「河川整備労力倍率 γ」と設定した。なお高瀬川は河道全体のほとんどが汽水湖である小川原湖であるため、河川整備労力を算出していない。

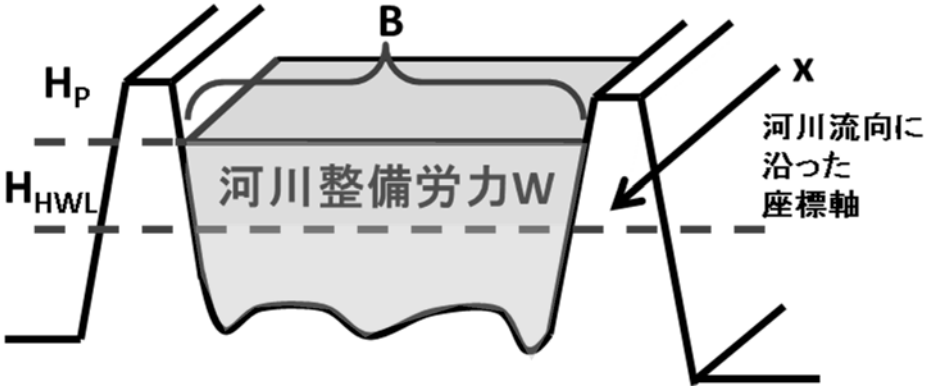


図-Ⅱ.2.1.5　河川整備労力の定義

４）　氾濫可能性倍率

2)で算出した雨量－流量－超過確率年の関係式を用いて、将来気候における流量－超過確率年の関係を算定する。

現在と将来の降雨の年超過確率とピーク流量の関係が図-Ⅱ.2.1.6 に示す関係にあるとする。いま、河川整備基本方針の降雨量の年超過確率（現在気候による降雨量の年超過確率）が P_Pのとき、この降雨によって発生する洪水のピーク流量を Q_Pとする。将来気候において同一のピーク流量 Q_Pが発生する降雨の年超過確率を P_Fとすると、将来の雨量倍率が１より大きい場合、P_Fはより大きな値（生起する確率がより高い）をとる。ここで、P_F/P_Pを「氾濫可能性倍率 ε」と定義する。氾濫可能性の次元は、超過確率年 Tの逆数 $1/T$で表され、この倍率が大きくなるほど、現在の河川整備基本方針規模のピーク流量 Q_Pの洪水が、将来において発生しやすいことを意味する。

例えば、河川整備基本方針の降雨量の年超過確率 P_Pが 1/100、将来気候における氾濫可能性 P_Fが 1/50 であった場合、氾濫可能性倍率 εは 2.0 倍となる。

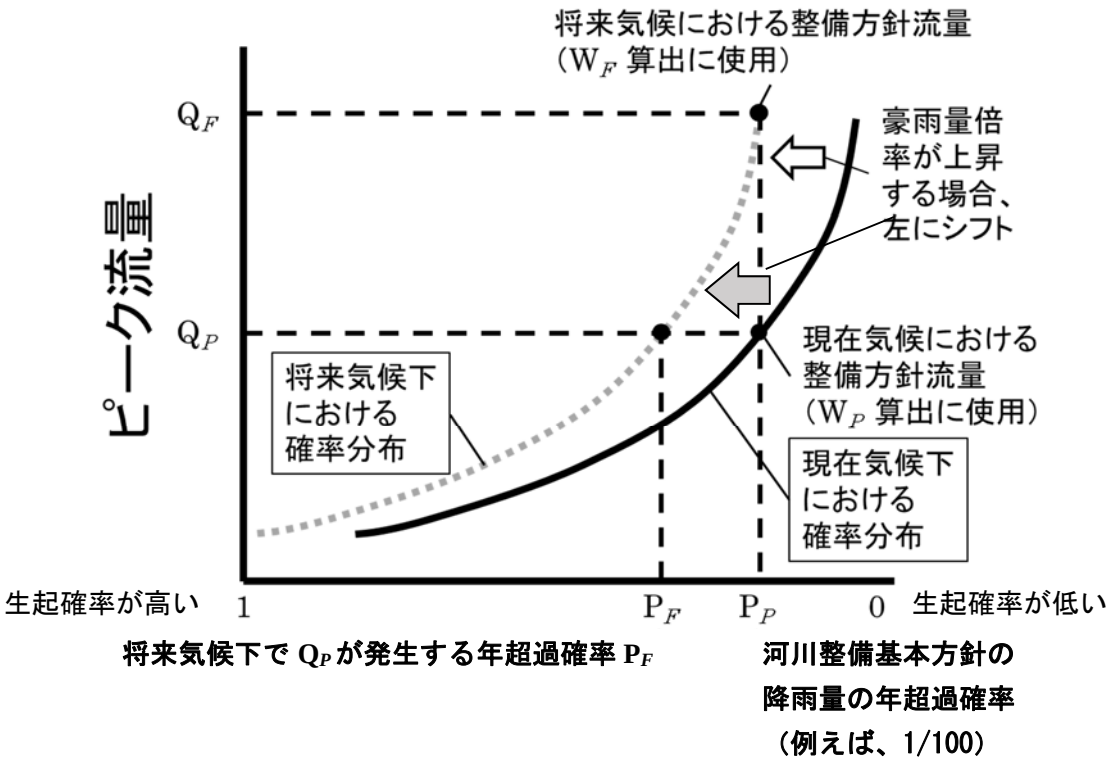


図-Ⅱ.2.1.6　氾濫可能性の概念

（２）評価指標の算出方法

１）雨量倍率 α の算出

本分析ではまず、気候予測モデルの降雨量の予測データから直轄 109 水系別に、各計画降雨継続時間の年最大降雨量の現在に対する将来の比である“雨量倍率 α”を算出した。この際、使用した気候予測モデルの予測データは、当該地点における年最大降水量生起に関わる統計的特性量を求めるためにはデータ数が不足する。このため、日本全国を同等の気候特性を持つと判断できる地域別に分割し、当該地域周辺の複数のグリッドデータを合わせて統計処理する Station Year 法を用いて多くの標本数を確保することにより、現在気候／将来気候それぞれについて地域別の年最大降雨量データを抽出し、“雨量倍率 α”を推定することとした。

同等の気候特性を持つ地域分割を行うための基本ベースとして、ダムの超過洪水検討の際に参考として用いられる地域別比流量図の地域分割（建設省河川局監修、1997）（北海道・東北・関東・北陸・中部・近畿・紀伊南部・山陰・瀬戸内・四国南部・九州）を採用し、順位和検定とスピアマン検定を用いて当該地域内のグリッドデータ間に同一性と独立性がみられるかを検証した。それらの詳細な手法と検討過程については、中間報告第 2 章 2.1.2.3（pp.Ⅱ－118）を参照いただきたい。その検討成果を踏まえ、地域分割を北海道オホーツク海側・北海道日本海側・北海道太平洋側・東北北・東北東・東北西・北陸東・北陸西・関東・長野盆地・中部東・中部西・山陰・瀬戸内・九州北・西南日本の 16 地域に分割することとした（図-Ⅱ.2.1.7）。これらの同一性が確認された地域別に、地域内各水系別の治水計画対象降雨継続時間における年最大降水量を抽出し、“雨量倍率 α”を算出した。

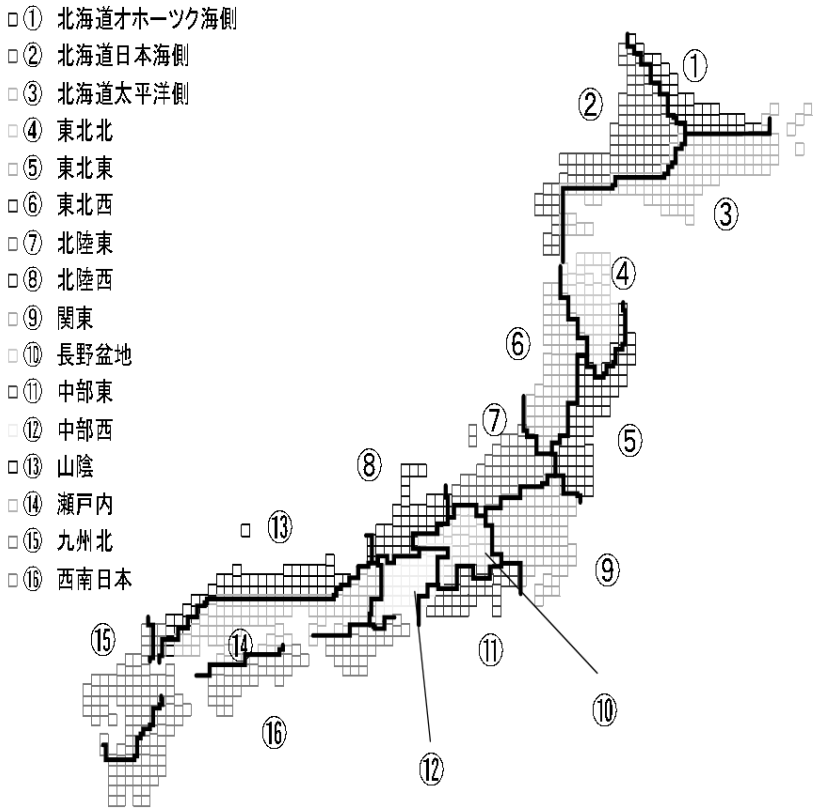


図-Ⅱ.2.1.7　日本全国 16 地域分割図

２）流量倍率 β の算出

次に、“雨量倍率 α”と流出解析モデルを用いて、現在と将来における直轄 109 水系別のピーク流量による水位の河川縦断変化と、河川の基準点における“ピーク流量倍率 β”を算出した。直轄 109 水系別のピーク流量の算定に際して、前述の通り、降雨量は現在気候においては河川整備基本方針の降雨量を使用した。また、将来気候においては、河川整備基本方針の降雨量に、気候予測モデル予測値から得られた将来気候における現在気候に対する降雨量変化倍率を乗じたものを使用した。

３）河川整備労力倍率 γ 及び氾濫可能性倍率 ε の算出

以上の過程より算出されたピーク流量による水位の河川縦断変化を用いて“河川整備労力倍率 γ”を、“ピーク流量倍率 β”を用いて“氾濫可能性倍率 ε”を求めた。

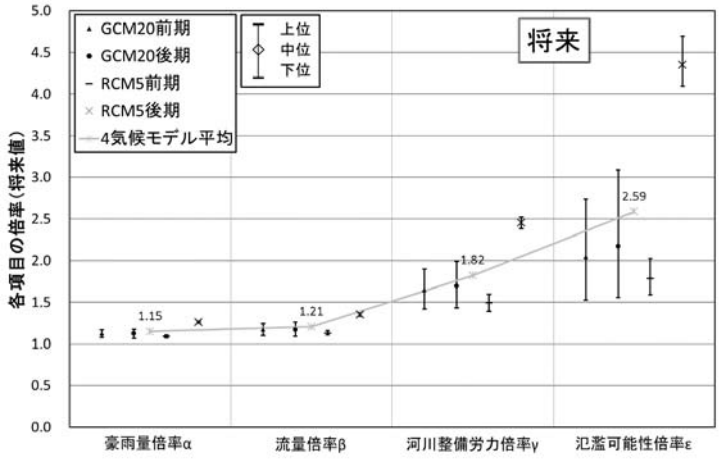
以上の手法により算出した雨量倍率 α、ピーク流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε の 4 つの指標の関係を次節において整理し、α の増加に応じた β、γ、ε の増幅傾向を考察する。なお、上記指標を算出する際には気候予測モデルを使用するが、各モデルの降雨量の予測値に信頼性の「幅」があり、その幅は評価指標へ増幅して伝播するため、指標別に予測の幅も算定している。ここでは、予測降雨量の 95%信頼区間にあたる上位値と下位値を予測の「幅」としている。

２．１．３　算出した評価指標の分析

流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ は、雨量倍率 α の増減倍率に対して増幅した形で変化する。例えば、雨量倍率 α が 1.1 倍であれば、流量倍率 β は 1.1 倍以上の値を示し、雨量倍率 α が 0.9 倍であれば流量倍率 β は 0.9 以下の値を取る。なおここで述べているのは、雨量、流量等の各項目の変化倍率である評価指標 α、β の値が 1.1 倍になっている（雨量、流量自体が 1.1 倍になる）ことであり、後述する各指標の増加率の倍率や伝播率とは意味が異なる。

分析の結果の概略を以下に示す。具体的な結果やその分析の詳細については、中間報告第 2 章 2.1.3（pp.Ⅱ－130）を参照されたい。直轄 109 水系別の雨量倍率 α は、近未来においては、後期 RCM5 の全流域で α が 1 倍を上回り、現在よりも計画降雨量が増加する流域が多く存在する。しかし、他モデルでは α が 1 倍を下回り、現在よりも降雨量が減少する流域が多く存在した。一方、将来においては、全モデルを通じて概ね降雨量が増加傾向であり、近未来と比較して将来の方が降雨量がより増加する予測である。北海道、東北地方は全国と比較して、いずれのモデル・時点においても雨量倍率 α が大きい。なお、気候予測モデルによって予測値が異なり、特に、近未来・将来とも後期 RCM5 が他モデルよりも高い値を示した。

図-Ⅱ.2.1.8 に、将来の 4 気候モデル別の雨量倍率 α、流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε の上・中・下位値それぞれの直轄 109 水系の中央値を示す。これらの図から、α の増加量が増幅して他の指標へ伝播すること、したがって上・下位値の差は α においては僅かなものであっても β、γ、ε になるとその差が増幅して伝播することがわかる。



	雨量倍率 α				流量倍率 β				河川整備労力倍率 γ				氾濫可能性倍率 ε			
	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後	GCM前	GCM後	RCM前	RCM後
上限値	1.17	1.17	1.11	1.28	1.24	1.25	1.15	1.37	1.88	2.02	1.61	2.52	2.63	2.86	2.00	4.55
中央値	1.12	1.12	1.09	1.26	1.17	1.17	1.13	1.35	1.65	1.70	1.50	2.45	2.04	2.17	1.79	4.35
下限値	1.08	1.08	1.07	1.25	1.12	1.09	1.10	1.33	1.41	1.40	1.39	2.38	1.69	1.67	1.59	4.00

図-Ⅱ.2.1.8　4 モデルの雨量・流量・河川整備労力・氾濫可能性倍率の比較
（全国 1 級水系の中央値：将来）

こうした伝播特性をより明確に把握するために「変化の伝播」つまり、各指標の増加率について着目した。この増加率を $\alpha-1$、$\beta-1$、$\gamma-1$、$\varepsilon-1$ で表し、$\alpha-1$ の増加に対する $\beta-1$、$\gamma-1$、$\varepsilon-1$ の増加をここでは伝播率と称し、直轄 109 水系別について、近未来と将来における雨量の変化の流量、河川整備労力、氾濫可能性への伝播率をプロットしたものを、図-Ⅱ.2.1.9 に示す。伝播率は水系によってかな

りばらつくものの、流量、河川整備労力、氾濫可能性の伝播率の値の分布には明確な差が存在することがわかる。それぞれの伝播率（$(\gamma-1)/(\alpha-1)$は 20 以上の値を省いたもの、他伝播率は全水系の単純平均値）は、近未来において、$(\beta-1)/(\alpha-1)$は 1.59 倍、$(\gamma-1)/(\alpha-1)$は 6.02 倍、$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$は 15.5 倍、将来においては$(\beta-1)/(\alpha-1)$は 1.51 倍、$(\gamma-1)/(\alpha-1)$は 6.11 倍、$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$は 12.24 倍となった。近未来・将来ともに雨量の変化が流量変化には 1.5 倍、河川整備労力変化には 6 倍、氾濫可能性変化には 12～15 倍程度に増幅して現れている。なお、ここで論じているのは各指標の変化量であり、例えば“氾濫可能性倍率 ε”の値が 12 倍になるわけではない（氾濫可能性自体が 12 倍になるわけではない）ことに留意されたい。

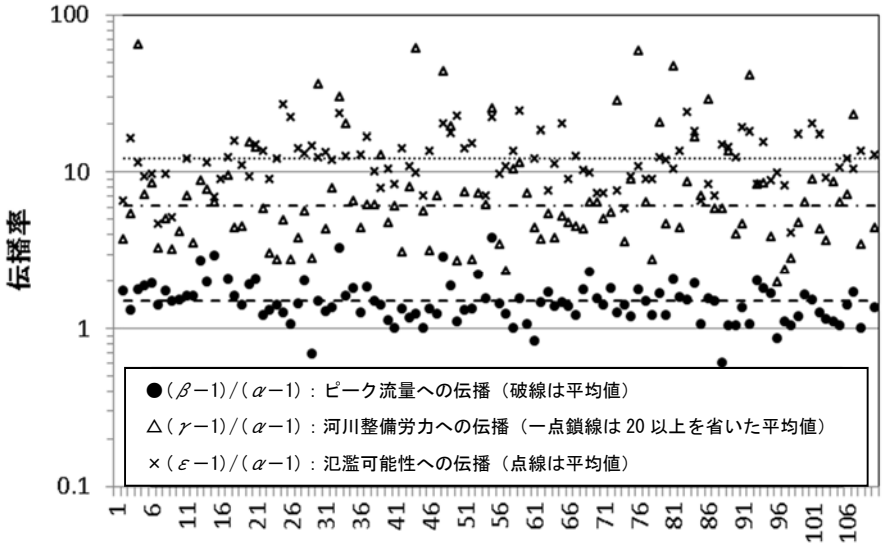


図-Ⅱ.2.1.9　雨量倍率変化が流量・河川整備労力・氾濫可能性の変化へ与える影響（将来）
（各水系についての 4 気候モデルの中位値の平均値から算出）

２．１．４　河川整備労力変化・氾濫可能性変化の伝播率に着目した 109 水系の類型化

α の変化による影響度を表すため、河川整備労力変化の伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$と氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$を算定し、その関係から 109 水系の類型化を試みた（高瀬川と川内川は計算の都合上分類から除した）。全水系の各々の伝播率を上位・下位 50%に分類した。超過確率年別の降雨がない水系は ε が算定できないため、$(\gamma-1)/(\alpha-1)$のみの分類である。

さらに河川整備率に対応するパラメータ χ と、降雨特性に対応するパラメータ m を以下のように定義し、これらが全水系中で上・下位 50%のグループに分類し、全部で 20 分類とした。ここで χ は、現況河道における流下能力 Q_{HWL} と、治水目標上の流下能力である基本高水流量 Q_P より、以下の通り定義される。

$$\chi = \frac{Q_{HWL}}{Q_P}$$

また m は、ある継続時間の降雨量 R と超過確率年 T との関係を表す確率降雨強度式（フェア式）より、以下のとおり定義される。なお、θ もパラメータである。

$$R(T) = \theta \cdot T^{m}$$

$(\gamma-1)/(\alpha-1)$が上位 50%に属している水系は、α の増加に対して、γ が鋭敏に上昇しやすく、$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$が上位 50%に属している水系は、$\alpha$ の増加に対して、ε が高くなりやすいことを示している。両方とも上位 50%である水系は α の増加により、氾濫可能性が高まりやすく、また氾濫を防ぐための河川整備労力も高まりやすい。以上の各指標の値が上位か下位かによって水系数を整理した表-Ⅱ.2.1.3 より、河川整備労力変化の伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$が上位であれば、河川整備率に対応する χ も大きく、前者が下位であれば後者も下位である水系が多い。一方、氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$は、降雨特性のパラメータ m と連動する傾向があることがわかる。そのため例えば、χ、m ともが上位の水系では、河川整備労力変化の伝播率$(\gamma-1)/(\alpha-1)$ 、氾濫可能性変化の伝播率$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$ともが上位となる可能性が高い。このことから概算的には χ と m により α の増加に対する γ および ε 増加の鋭敏性を推し量ることができる。すなわち、χ と m は、各河川流域について概算値であれば比較的容易に得ることができるので、表-Ⅱ.2.1.3 で表される類型化手法によって、雨量倍率 α 値増加という気候変動影響に対して、各河川流域の治水状況における「鋭敏性」「脆弱性」（河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε の影響の受けやすさ）を簡易的に把握することに活用できると期待される。

表-Ⅱ.2.1.3　$(\gamma-1)/(\alpha-1)$と$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$の関係（水系の数）

			$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$				
			上位50%		下位50%		確率規模別降雨データなく、不計算
			m：上位50%	m：下位50%	m：上位50%	m：下位50%	
$(\gamma-1)/(\alpha-1)$	上位50%	χ：上位50%	16	4	3	14	2
		χ：下位50%	2	0	1	6	5
	下位50%	χ：上位50%	8	1	2	4	0
		χ：下位50%	14	4	3	15	3

※高瀬川と川内川は計算の都合上分類から除いている。

２．１．５　まとめ

以上に示してきた内容を踏まえると、治水方策に与える気候変動の影響度が全体としては相当に大きくなる可能性が高いこと、同時に、図-Ⅱ.2.1.8 や図-Ⅱ.2.1.9 の結果に見られるように、その影響度の予測に相当に大きな幅がある、すなわち不確実性があることを認識した上で、気候変動に関わる適応策検討を行わなくてはならないと言える。そして、このことには、降雨特性を表す m や流出特性を表す$(\beta-1)/(\alpha-1)$などにより表される自然的特性と、χ に代表される人間が積み重ねてきた営為に関わる特性が複合的に関係している。そのために、気候変動による治水方策への影響は、雨量の変化以上に、河川水系ごとに影響の出方が違ってくる。このことは、気候変動影響を踏まえた治水方策を検討するにあたり、個々の水系の状況を詳細に把握することの重要性を改めて示すものである。すなわち、今回の分析は全国レベルのマクロな指標に過ぎないことから、気候変動影響に対して、個々の河川・流域がどのような応答特性を持っているか（鋭敏性、安定性、脆弱性など）を把握しておくというアプローチを並行して進めることが必要であろう。

この先の極端現象変化予測のレベル向上を引き続き期待するが、すぐには実現し得ない可能性が高い。したがって、極端現象の変化予測に実務上無視し得ない不確実性が残っていることを前提とした種々の検討を並行して行わざるを得ない。このために、予測の不確実性を前提にした施策の“取り組み方”に関する議論を本格化させることが求められる。

参考文献:

柏井条介、土屋修一、石神孝之(2008)気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20 による評価を中心に－、国土技術政策総合研究所資料、No.462.

服部敦、板垣修、土屋修一、加藤拓磨、藤田光一(2012)気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価、河川技術論文集、第 18 巻、pp.481-486.＊

国総研気候変動適応研究本部(2013)気候変動適応策に関する研究（中間報告)、国土技術政策総合研究所資料、No.749.＊

服部敦、板垣修、土屋修一、加藤拓磨(2014)気候変動が治水施策に与える影響のマクロ評価、土木技術資料、vol.56, No.12, pp.10-13.＊

注）参考文献末尾のアスタリスク(*)は、本研究の成果に基づくものであることを示す。以下同様。

２．２　人口分布の将来長期変化シナリオを考慮した浸水被害評価の試算

２．２．１　背景

気候変動による豪雨災害への影響評価や対策の検討には中長期的視点が必要である。ここで氾濫による人的被害に着目すると、その様相は人口（及びその年齢構成）の分布によって大きく異なると考えられることから、長期的な影響として、地域における人口減少及び高齢化の動向は無視できない要因と言える。

具体的には、人口減少に伴う氾濫域の人口・資産の減少により、被害額は現況と比較して相対的に低減することが見込まれる一方、浸水時の人的被害は一般に被災者の年齢による影響を受けるため、高齢化による人的被害の拡大が危惧される。例えば、「水害の被害指標分析の手引」（H25 試行版）（平成 25 年 7 月　国土交通省水管理・国土保全局）では、浸水深が 5m の場合の死亡率について、2 階建て建物（2 階の床までの高さを 2.7m と仮定）において 65 歳以上は屋根の上に避難できないため 91.75%と設定しており、氾濫域人口の年齢分布が死者数推計に影響を及ぼす。

さらに、人口及び年齢構成の将来動向予測については、国立社会保障・人口問題研究所によって、日本の地域別将来推計人口の市区町村別推計値が発表されている。ただし、氾濫被害の推計においては、氾濫原の人口分布状況に大きく依存するため、将来における分布を仮定する必要がある。しかし、気候変動の雨量予測データが存在する将来（今世紀末）においては、人口分布の将来推計が進んでおらず、また、政治・経済・社会的変化にともなう不確実性が大きいことから、十分な精度での将来の人口分布推計は難度が高いと考えられる。

そこで本研究においては、近未来（2030 年まで）を対象に、流域における人口分布の変化を仮定することにより、気候変動とともに人口減少・少子高齢化を踏まえた被害の推計を試行した。

対象流域とする河川は、一級水系本川の国土交通大臣直轄管理区間のうち、地域バランスや資産・人口の集積状況（下流に集中している河川、流域全体に分散している河川等）等の視点からできるだけ多様な河川を抽出し、20 河川を選定した。

２．２．２　人口分布の近未来変化シナリオの設定

（１）人口分布シナリオ設定の基本的な考え方

本研究においては、公的機関による人口分布の将来推計として、日本の地域別将来推計人口（国立社会保障・人口問題研究所）平成 20 年 12 月推計の市区町村別推計値を利用した（その後平成 25 年 3 月推計が公表されている）。同推計の対象期間は平成 17～47 年（西暦 2005～2035 年）である。気候変動は、後期 GCM20 の近未来（2015～2039）の降雨等予測値（中央値）を用いた。

氾濫被害の評価を行うにあたり、上記市区町村単位の推計結果では解像度として不十分であり、氾濫原内のメッシュ（1 辺の長さが 500m 等）ごとの人口分布を設定する必要がある。このため本研究では、氾濫原内の過去の人口分布（メッシュ別）の変化傾向を分析し、同傾向に基づき近未来変化について①現在の傾向を踏襲した場合、及び②近未来の人口減少時代において人口の集約がある程度進むのではないかとの仮説を与えた場合の、２通りのシナリオを設定することとした。これは、将来の人口推計の変化を特定することが困難であることを踏まえ、予測の不確実性を考慮した複数の近未来シナリオによる検討が妥当と考えたためである。

（２）　人口分布シナリオ設定の流れ

メッシュ毎の人口分布シナリオ設定の流れは、図-Ⅱ.2.2.1に示す通りである。ここでメッシュサイズは、既存データの有無の制約から水系ごとにサイズが異なるが、50～250mメッシュである。これを以下、「氾濫原メッシュ」と呼ぶ。氾濫原メッシュサイズの人口分布を作成するにあたり、平成22年国勢調査の小地域人口（市区町村よりも小さい単位である町丁・字等の別による集計）を基準に、コーホート要因法により、メッシュ毎の５歳階級別人口を推計した。氾濫原内の人口の移動動向については、現状において、人口が高密度に集積している範囲を「集積核」とし、その集積核への現状の集積動向が継続する、またはより集積傾向が強まる２つのシナリオを設定した。

さらに、氾濫原全体の人口の合計値の誤差を解消するために、広域ブロック、500m メッシュでの推計を実施し、より広域の推計結果で狭域の値の補正を行った。

以下、各項目について詳しく説明する。

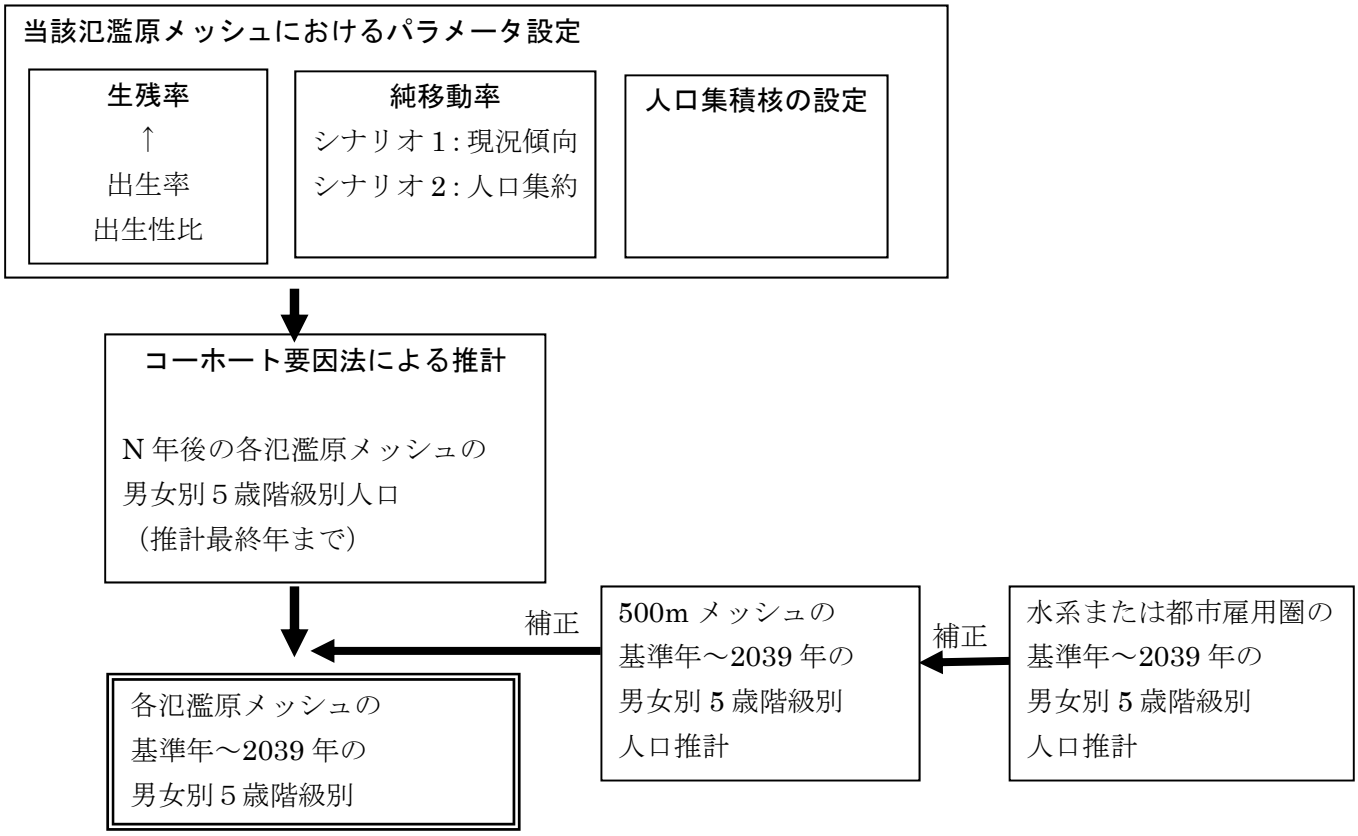


図-Ⅱ.2.2.1　人口分布シナリオ設定の流れ

①コーホート要因法による近未来人口の推計

平成 22 年国勢調査の小地域人口を基準に、コーホート要因法により、氾濫原メッシュ毎の 5 歳階級別人口を推計した。コーホート要因法とは、各年齢階級（コーホート）について、「自然増減」（出生と死亡）及び「純移動」（転出入）という二つの「人口変動要因」それぞれについて近未来値を仮定し、それに基づいて近未来人口を推計する方法である。

仮定した生残率、及び純移動率を用いることで、ある年 t 時点の男女別 n 歳人口から、その翌年 t+1 時点の男女別（ｎ＋１）歳人口を推計する手法で、以下の算出式で示される。

t+1 年時点の年齢（5 歳階級）別人口＝t 年時点年齢（5 歳階級）別人口×（生残率+純移動率）

推計に用いる生残率、及び純移動率は以下のように算定した。

a）生残率

生残率は、厚生労働統計市区町村別生命表（H12、H17）より、当該氾濫原メッシュを含む市町村の生命表における男女別 5 歳階級別の定常人口から算出した生残率の H12、H17 の平均値を、男女別 5 歳階級別の生残率とした。

出生から 0～4 歳の生残率の算出に必要な出生率、出生性比は以下のように算出した。

出生率は、人口動態調査（H12、H17、H22 の平均値）の都道府県の合計特殊出生率 F_p、及び市町村別の合計特殊出生率 F_c、並びに『日本の都道府県別将来推計人口』（平成 19 年 5 月推計）の当該氾濫原メッシュを含む都道府県の近未来の母親の年齢（15 歳から 44 歳までの 5 歳階級）別出生率 F_{mp} から、以下の式により、当該氾濫原メッシュにおける近未来の母親の年齢（5 歳階級）別出生率 F_{mn} を算定した。なおここで、合計特殊出生率とは、一人の女性が一生に産む子供の平均数である。この値は市町村別の将来推計値が存在しないため、都道府県と市町村の比（乖離率 F_c/F_p）は、近未来も現在と同じ値で推移すると仮定した。

当該氾濫原メッシュにおける近未来の母親の年齢（5 歳階級）別出生率　$F_{\mathrm{mn}} = F_{\mathrm{mp}} \times {F_{\mathrm{c}}}/{F_{\mathrm{p}}}$

出生性比は試算期間において大きな変化がないと考えられるため、人口動態調査（H12、H17、H22）の対象となる市町村の男児及び女児の出生数より出生性比を算出し、その平均値を近未来値として採用した。

b）純移動率

氾濫原内の氾濫原メッシュ毎の人口の移動動向については、現状において、人口が高密度に集積している範囲を「人口集積核」とし、その集積核への現状の集積動向が継続する、またはより集積傾向が強まる 2 つのシナリオを設定した。

まず、以下の手順により現況の人口分布（平成 22 年国勢調査）に基づき人口集積核を抽出した。

- STEP1：人口密度が 40 人/ha 以上の氾濫原メッシュを 1 次集積核とする。
- STEP2：人口密度が 20 人/ha 以上の氾濫原メッシュを副次集積核とする。
- STEP3：1 次集積核を開始点とし、1 次集積核に隣接する副次集積核を含めた一連（斜めに位置するメッシュを含む）のメッシュ群を人口集積核として抽出する。隣接しない副次集積核は、人口集積核に含めない。

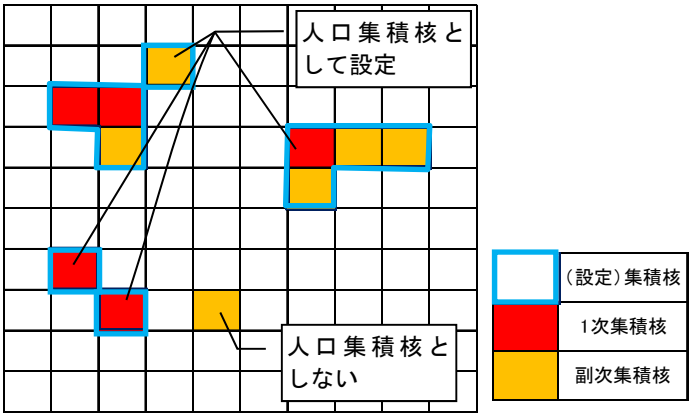


図-Ⅱ.2.2.2　人口集積核の設定

ここで、上記 40 人/ha は、総務省による人口集中地区の設定における人口密度の基準（原則として人口密度が 1 平方キロメートル当たり 4,000 人以上、人口集中地区は本人口密度に該当する基本単位が隣接したまとまりの人口が 5,000 人以上）を参考に設定した。

次に、各メッシュから人口集積核への移動率は、当該氾濫原メッシュの国勢調査によるある年の人口に生残率を乗じて、5 年後の転入・転出が生じない人口（封鎖人口）を算定する。当該氾濫原メッシュの 5 年後の国勢調査の人口と算定した 5 年後の封鎖人口の差を純移動数として、ある年の人口に対する純移動数の割合を純移動率とした。近未来の純移動を正確に予測することは困難であるため、平成 12 年～平成 17 年、平成 17 年～平成 22 年の 2 時点で算定して、平均値を純移動率として採用し、近未来についても純移動率が一定であると仮定した。

なお、ある年の 5 歳階級の人口に 0 が含まれる場合には純移動率の設定ができないことから、当該氾濫原メッシュに隣接するメッシュを含めて範囲を拡大した 5 歳階級の人口を使用して、純移動率を算定する。範囲拡大は一辺 250m を最大とし、それ以上となる場合は、全域の平均値の移動率を適用する。

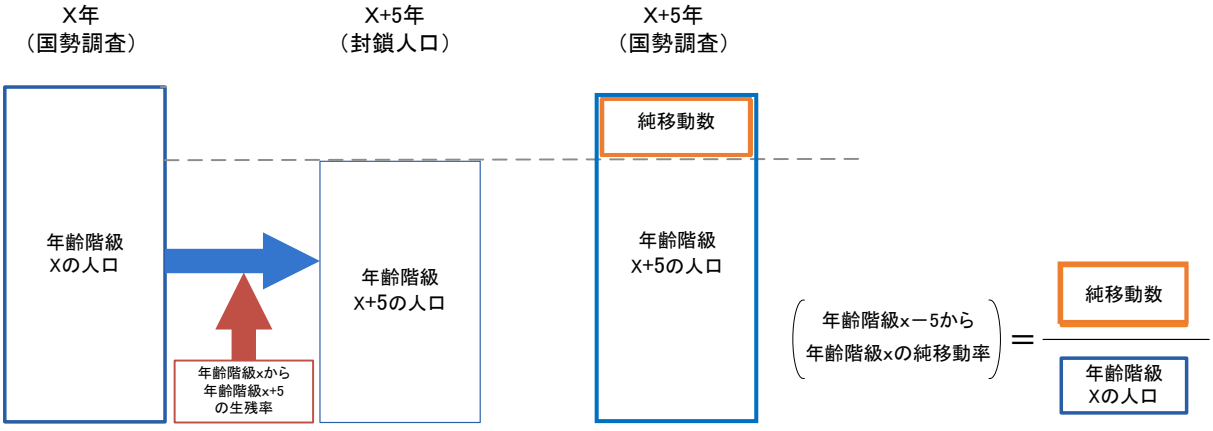


図-Ⅱ.2.2.3　純移動率設定のイメージ

さらに、以下の 2 つのシナリオを設定した。ここで、シナリオ 2 の移動率の増加は、対象 20 河川における昭和 35 年～平成 22 年の 50 年間の DID 人口比率の平均伸び率（H22 の DID 人口比率/S35

の DID 人口比率）の最大値 239.60%から設定した。なお、シナリオ２で移動率を増加させる割合については、昭和 35 年～平成 22 年の 5 年ごとの DID 比率の平均･最大伸び率の最大値から 11.48%、79.40%についても今回試算を行っているが、人口動向の変化の傾向は同様であるため、増加率が最も大きい結果に絞って、以後紹介する。

シナリオ１：近年の変化傾向が近未来も持続するものとする（純移動率×100%）
シナリオ２：人口集積核への移動率を 139.6%増加させる（純移動率＋純移動率の絶対値※×139.6%）
※純移動率がマイナスの場合もあり得る。

②広域データによる補正

①で推計した値は氾濫原メッシュ単位で計算しているため、広域ブロック全体でみると合計値に誤差が生じる。そのため、同じ手法を用いた広域ブロック単位（水系または都市雇用圏単位）、500m メッシュ単位の推計値によって、合計値の補正を実施した。

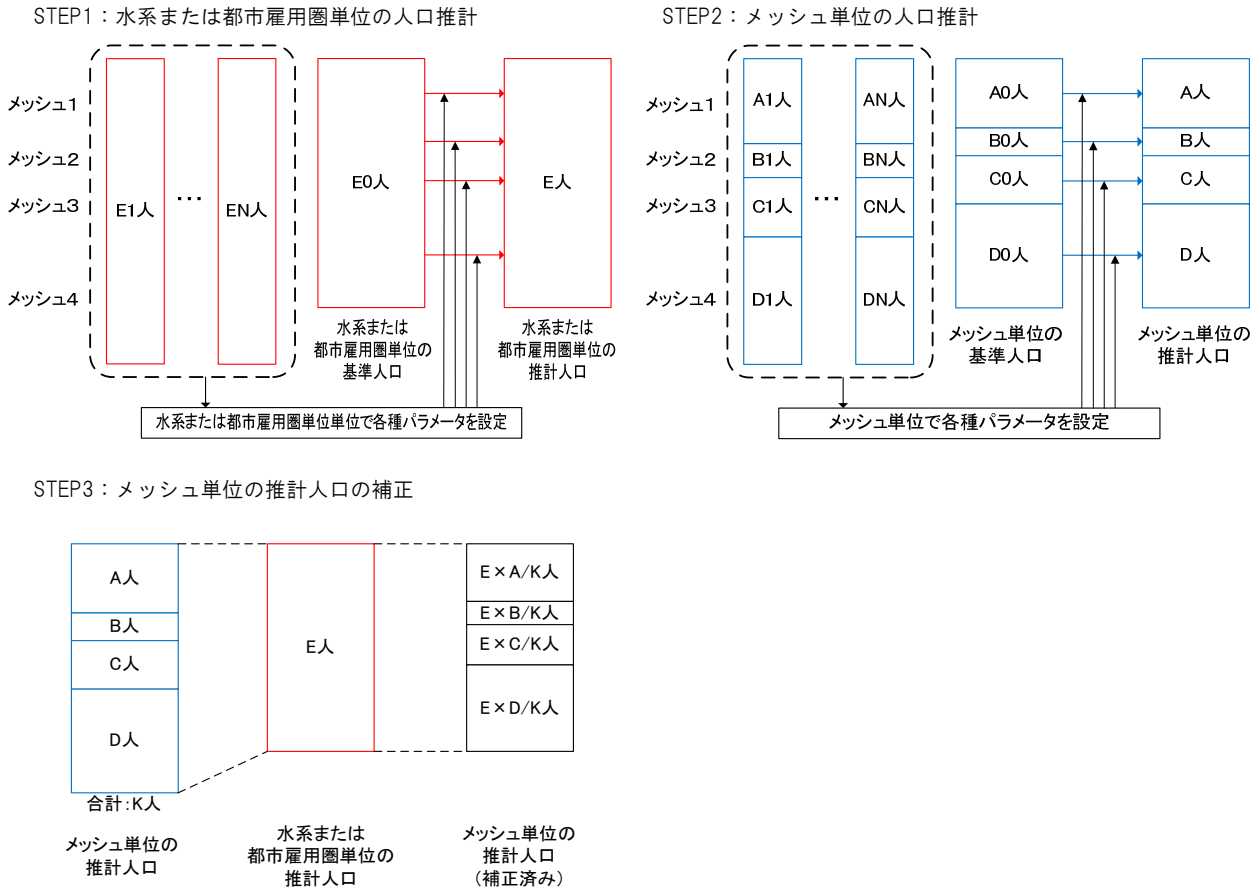


図-Ⅱ.2.2.4　推計人口の補正の流れ（広域ブロック→500m メッシュの場合）

（３）人口分布の設定結果

以上の手順で設定した対象流域（氾濫原メッシュ）における人口分布の設定結果を、図-Ⅱ.2.2.5、図-Ⅱ.2.2.6、及び表-Ⅱ.2.2.1 に示す。なお、河川 A～T は、対象とした 20 水系を、対象地域内の人口が多い水系からアルファベット順に呼称している。

図-Ⅱ.2.2.5、図-Ⅱ.2.2.6 のグラフは、上から現在、近未来のシナリオ１、シナリオ２を表示しており、それぞれ河川別の人口、集積核人口率（対象地域全体に対する人口集積核の人口割合）、集積核、及び非集積核別の人口変化率（現在に対する近未来の変化の割合）を図示している。グラフ中に記載しているパーセンテージは、氾濫原メッシュ全体の人口に占める集積核人口の割合である。

20 河川のうち、氾濫原メッシュ全体の人口が増加するのは、河川 C、G、N の３水系のみで、他の 17 水系では全体の人口は減少する推計となった。また、集積核への純移動率を現況のままとしたシナリオ１及び移動率を 139.6%増加させたシナリオ２の両シナリオによる集積核人口率の差をみると、最も差が大きい河川 Q で 4.3%、20、河川の平均値で 1.4%となっており、シナリオ付与により大きな差が生じたとは言えない。これは、本研究のシナリオで設定した移動の増加率の影響が限定的であった可能性とともに、現況で地域間、メッシュ間の移動の影響が相対的にそれほど大きくなく、むしろ現況の出生率や年齢構成から導かれるメッシュ内の人口の増減がより支配的である可能性が示唆されている。

次に集積核、非集積核ごとの人口の変化率のプロットより、現在とシナリオ１の間の集積核人口率の変化を見ると、近未来にかけて集積核人口率が上昇するのは６河川（A、C、J、K、R、S）に過ぎず、全体的には流域における集積核の相対的な位置づけが低下傾向にある河川が多く、むしろ非集積核での人口が増加傾向にあることが反映された結果となっている。なお、シナリオ２では集積核への人口移動を増加させるため、非集積核の人口増加を減少させる効果がある。

高齢化による人的被害の増大への影響が危惧される高齢者人口について、今回の試算においては、高齢者人口が増加するのは河川 G、N の２水系に過ぎず、多くの水系では人口減少に伴って高齢者人口も減少する傾向となった。なお、高齢化率は 20 水系中６水系で増大する。

以上の各河川水系のシナリオ１における対象地区全体、及び集積核・非集積核内の人口動向推計結果に基づき、以下のように各河川水系を【類型１】～【類型６】の６類型に分類した（表-Ⅱ.2.2.1）。

【類型１】集積核、非集積核とも人口が増加し、流域全体の人口が増加する水系
河川 G の１水系のみである。現況でも人口の 99.3%が集積核に居住しており、近未来においてもその傾向はほとんど変わらない。2005 年時点で 20～39 歳の人口割合が高いこと、また出生率が比較的高いことから、2030 年時点においても若年人口の減少が少ない。さらに氾濫原全体の人口増に伴い高齢者人口も増加する。

【類型２】集積核内の人口が増加し、流域全体の人口が増加する水系
河川 C の１水系のみである。現況でも人口の 96.7%が集積核に居住しているが、近未来においてはさらに集積核の人口が増加し、99.8%に集積核人口率が上昇する。これは【類型 1】の河川 G の流域同様、2005 年時点の 20～39 歳人口の割合が高いこととともに、流域外からを含め集積核への流入率が高いことも一因である。一方、非集積核の人口は 7.3%まで減少するが、年齢分布は集積核と大きな差は無く、集積核と非集積核の流入率の違い等が影響したものと考えられる。一方、流域全体の人口は増加するものの、2005 年時点の高齢者人口が 2030 年の高齢者人口に対して相対的に多いことから、高齢者人口は減少する。

【類型３】非集積核内の人口が増加し、地域全体の人口が増加する水系

河川 N の１水系のみである。集積核の人口率が 90.6%から 77.3%（シナリオ１）に大きく低下し、非集積核では 254.2%（154.2%増）となる。全体的には、集積核の方が高い流入率となっているが、2030 年時点のボリュームゾーンを構成する 55 歳以上人口においては、集積核で転出傾向、非集積核で流入傾向にあることが影響した可能性が考えられる。

【類型４】集積核内の人口は増加するが、流域全体の人口は減少する水系

河川 J、K の２水系である。2005 年時点で集積核の人口率が 48.4%、32.5%で、今回の対象河川のなかでは最も低い。両水系とも流域の広い範囲がベッドタウンであるため、人口密度が低い低層住宅地が広く分布している一方、共同住宅等が多い人口稠密な地区の割合が少ないためであると考えられる。集積核の人口は増加傾向にあり、2030 年時点では流域全体の人口に占める集積核人口の割合が過半数を占める（59.5%、62.2%）が、2005 年時点で人口の過半を占める非集積核での人口減少の進展により、流域全体の人口が減少する。

【類型５】非集積核内の人口は増加するが、流域全体の人口は減少する水系

河川 B、D、O、P、Q、T の６水系である。類型別の人口増減では、６類型中最も人口が減少する。非集積核で人口が増加傾向であるため、６水系全てで 2005 年時点に比較して 2030 年時点で集積核人口率が低下する。高齢者の割合は、2030 年にかけて低下する河川が多く、生産年齢人口の割合が高まる傾向がある。流域の人口規模で区分すると、40 万人以上と比較的大きい２河川（B、D）と、８万人未満と小さい４河川（O、P、Q、T）に分かれる。人口規模の大きい河川 B、D は 2005 年時点の集積核の人口の割合が高く（98.3%、97.8%）、2030 年時点でも減少率は小さく概ね横ばい傾向にある。一方、人口規模の小さい河川 O、P、Q、T は、集積核の人口の割合の減少率がより大きい（7.1～40.9%）。これらの水系は非集積核の人口がもともと小さいことから人口増減の影響が大きく、特に河川 P、Q では、非集積核の人口増加率が 2.5 倍以上となった。本類型における全体的な傾向として、生産年齢人口の割合の高さを背景とした非集積核への市街地の拡大が影響したことが想定される。

【類型６】集積核、非集積核とも人口が減少し、流域全体の人口が減少する水系

河川 A、E、F、H、I、L、M、R、S の９水系である。人口規模の大きい河川 A は、類型１、類型２と同様に高い流入率を示しており、2005 年時点の人口は 96.5%と人口が減少する 17 水系のなかでは最も減少率が低い。他の８水系では 67～88%の減少率となっている。2005 年から 2030 年にかけて集積核の人口割合には大きな変化は見られず、流域全体で出生率の低下が人口減少の原因と想定される。

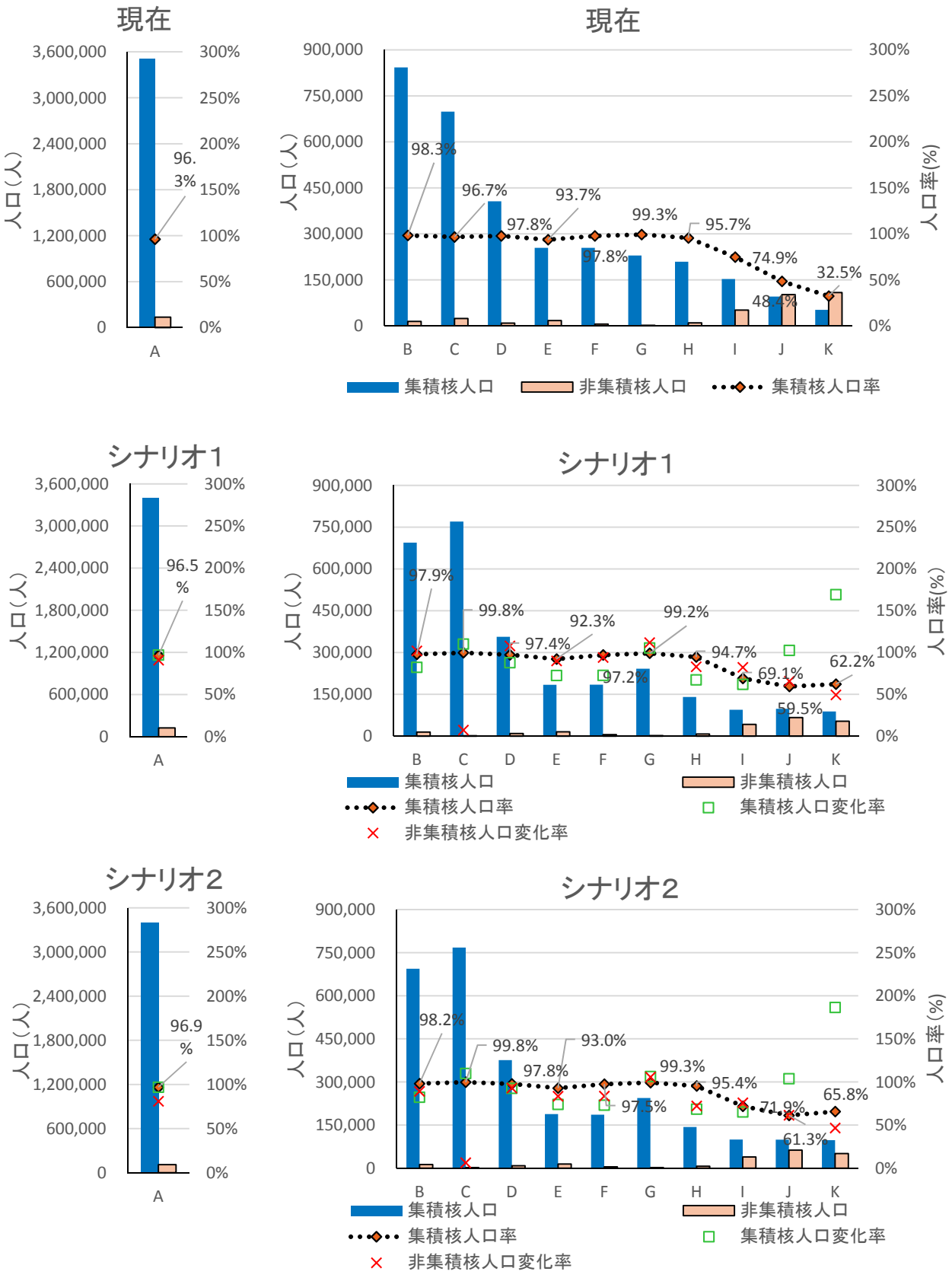
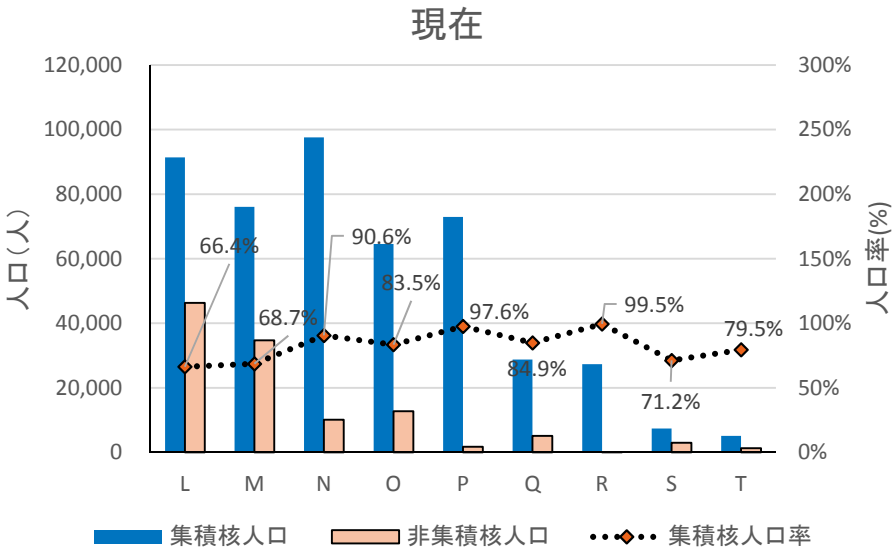
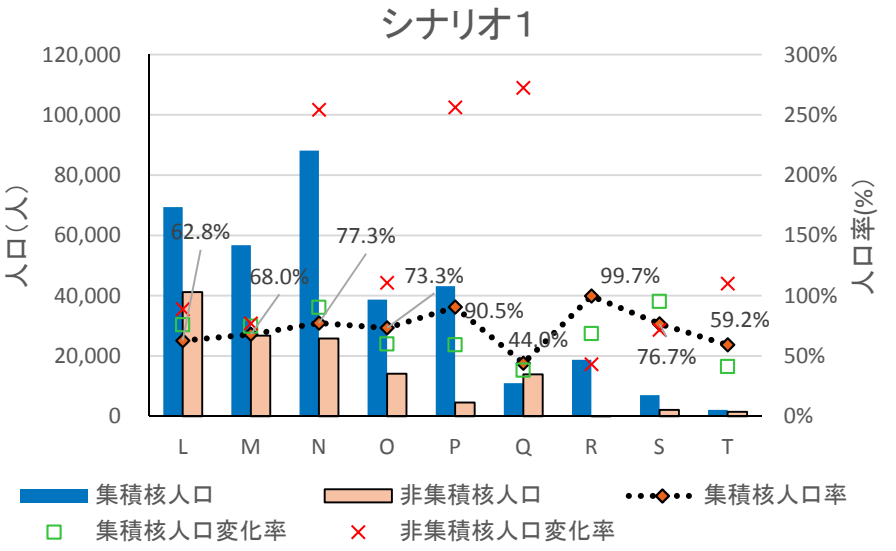


図-Ⅱ.2.2.5　人口分布の設定結果（河川 A～K）





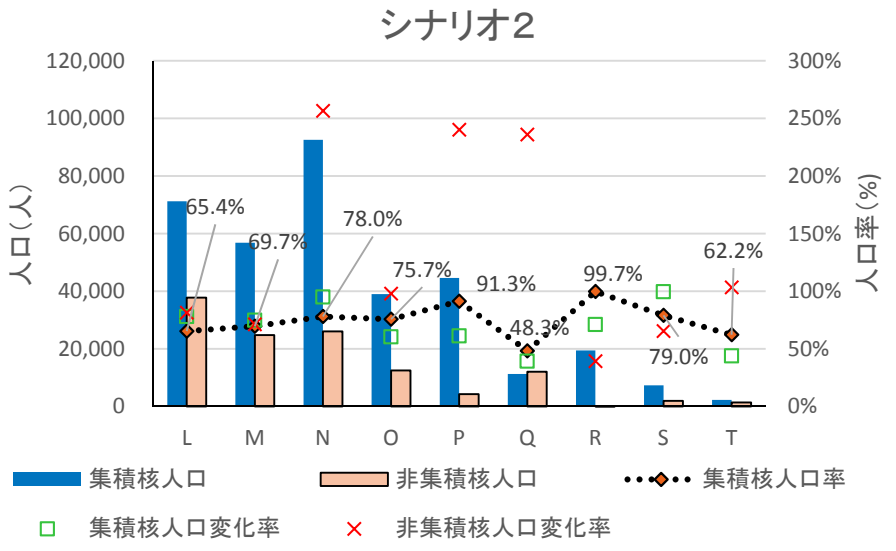


図-Ⅱ.2.2.6　人口分布の設定結果（河川L～T）

表-Ⅱ.2.2.1　河川水系ごとの人口動向（シナリオ１）と類型

河　川	対象地区内の人口総計（千人）	対象地区内の人口変化（近未来/現況）	集積核人口変化（近未来/現況）	非集積核人口変化（近未来/現況）	高齢者人口変化（近未来/現況）	
G	230	105.5%	105.5%	111.9%	105.5%	【類型1】 1水系 集積核、非集積核とも人口が増加し、地域全体の人口が増加 （高齢者人口も増加）
C	720	106.8%	110.2%	7.3%	97.1%	【類型2】 1水系 集積核内の人口が増加し、地域全体の人口が増加
N	110	105.7%	90.3%	254.2%	101.0%	【類型3】 1水系 非集積核内の人口が増加し、地域全体の人口が増加（高齢者人口も増加）
J	200	83.6%	102.6%	65.7%	94.3%	【類型4】 2水系 集積核内の人口は増加するが、地域全体の人口は減少
K	160	88.3%	169.3%	49.4%	89.5%	
B	860	82.7%	82.4%	102.1%	71.6%	【類型5】 6水系 非集積核内の人口は増加するが、地域全体の人口は減少
D	420	88.3%	87.8%	108.0%	85.2%	
O	80	68.3%	60.0%	110.7%	61.2%	
P	70	63.9%	59.2%	256.2%	61.5%	
Q	30	73.4%	38.1%	272.4%	66.4%	
T	10	55.2%	41.1%	110.1%	62.3%	
A	3,650	96.5%	96.7%	90.8%	87.7%	【類型6】 9水系 集積核、非集積核とも人口が減少し、地域全体の人口が減少
E	270	73.7%	72.6%	90.1%	71.3%	
F	260	73.1%	72.7%	94.2%	86.6%	
H	220	68.0%	67.3%	83.1%	65.0%	
I	200	67.1%	62.0%	82.3%	64.8%	
L	140	80.3%	75.9%	88.9%	89.1%	
M	110	75.4%	74.6%	77.1%	68.0%	
R	30	68.5%	68.6%	43.2%	69.0%	
S	10	88.4%	95.2%	71.7%	80.7%	

２．２．３　人口変化シナリオを考慮した人的被害推計

（１）降雨外力の設定

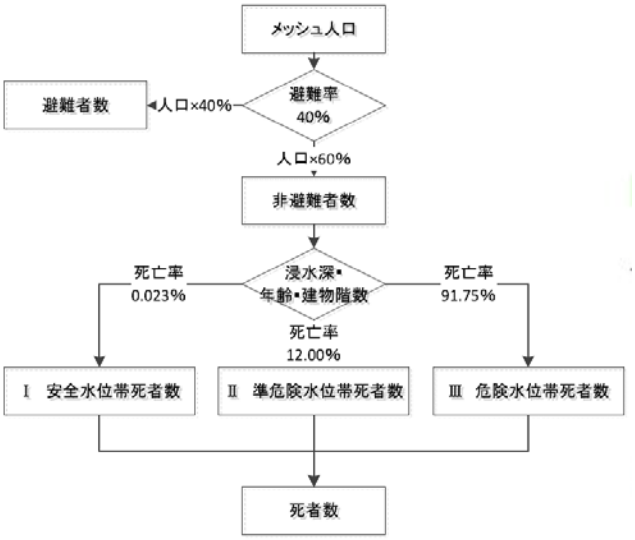
降雨外力は、近未来における気候変動影響を想定し 2.1 における後期 GCM20 の降雨等予測値（中央値）を用いた以下の条件とした（表-Ⅱ.2.2.2）。ここで気候変動の影響は、近未来では必ずしも降雨倍率が増大するわけではなく、降雨倍率が 1%以上増大するのは、河川 A、F、L、R、S、T の６水系に過ぎない。１２水系で降雨倍率はむしろ減少することに留意されたい。

表-Ⅱ.2.2.2　各水系の近未来における降雨倍率（後期 GCM20　中央値）

A	1.01	L	1.09
B	1.00	M	0.96
C	0.98	N	0.99
D	0.98	O	0.96
E	0.96	P	0.99
F	1.02	Q	0.99
G	1.00	R	1.03
H	0.99	S	1.15
I	0.96	T	1.17
J	0.98		
K	0.84		

（２）人的被害の算定手法

人的被害は、「水害の被害指標分析の手引き（H25 試行版）」（平成 25 年 7 月、国土交通省水管理・国土保全局）の想定死者数の算定手法に基づき、LIFESim モデルを参考にして算定した（図-Ⅱ.2.2.7）。このとき、各地点における年齢別人口が必要となることから、人口分布シナリオを設定した。



年齢別の浸水深の分類

	65 歳以上	65 歳未満
危険水位帯	家屋の最上階の 床面から 1.8m 以上	家屋の最上階の 天井から 1.8m 以上
準危険水位帯	同 1.2m 以上 ～1.8m 未満	同 1.2m 以上 ～1.8m 未満
安全水位帯	同 1.2m 未満	同 1.2m 未満

図-Ⅱ.2.2.7　LIFESim モデルを参考にした死者数算定方法

（３）人的被害の試算結果

人的被害（死者数）を試算した結果を表-Ⅱ.2.2.3 に示す。なお、現況・近未来とも死者数がゼロの T 水系と F 水系は表中に含まれていない。

今回の試算で、近未来において、洪水による流域の死者数が増加すると推計される水系は、河川 G、P、L の３水系であった。2.2.2 で提示した人口動向の類型別に見ると、流域全体で人口が増加する【類型１】、非集積核の人口が増加するが流域全体では人口が減少する【類型５】、流域全体で人口が減少する【類型６】が各１水系であった。一方で、死者数が減少する水系は、【類型２】～【類型６】の各類型に渡る。

なお、各流域の現況の人口、及び近未来の人口、高齢者人口の増減率と、死者数の動向との間に一般的な関係性を見いだすことはできなかった。

表-Ⅱ.2.2.3　人口動向の類型ごとの死者数の傾向

	地域全体の人口	集積核内の人口	非集積核内の人口	高齢者人口	死者数が増加する水系	死者数が減少する水系
【類型1】	増加	増加	増加	増加	G(150.0%)	ー
【類型2】	増加	増加	減少	減少	ー	C(92.3%)
【類型3】	増加	減少	増加	増加	ー	N(56.2%)
【類型4】	減少	増加	減少	減少	ー	J(57.1%) K(58.1%)
【類型5】	減少	減少	増加	減少	P(445.8%)	B(79.9%) D(81.8%) O(71.4%) Q(50.0%)
【類型6】	減少	減少	減少	減少	L(128.3%)	A(76.4%) E(52.2%) H(60.9%) I(50.0%) M(39.8%) R(63.3%) S(38.8%)

空間的な人口分布の変化に基づき、死者数が増加する水系について要因を考察する。【類型１】の河川 G の流域においては、近年、中心部（集積核）により人口が集中する傾向が見られ、そのような地区が浸水被害の大きい地域にあたるため、実績の人口動向の傾向を反映して近未来における死者数が増加する。【類型５】の河川 P の流域では、河川沿いの郊外部（非集積核）が近年宅地化したことにより、より浸水リスクの高い地区の人口が増加したために、死者数が４倍以上と大きく増加する結果となった。な

お、両流域の降雨倍率は 1.00、0.99 であり、気候変動による浸水域の増大の影響は小さい。【類型６】の河川 L の流域については、ほぼ全域で人口が減少するにも関わらず死者数が増加する要因は、人口分布からは明確には読み取れず、気候変動による降雨外力の増大（降雨倍率 1.09 倍）が主因と考えられる。

一方、死者数が減少する水系について見ると、【類型２】の河川 C の流域は、氾濫被害の影響が小さい上流部（非集積核）で人口が大きく減少し、下流域（集積核）の人口が増加する傾向にあるが、どちらかというと既存市街地と比較して河川からより離れた地区に人口が拡大する傾向がある。また、【類型３】の河川 N の流域においても、河川に近い既存市街地（集積核）からより郊外部の浸水リスクが低い地域（非集積核）へ人口が拡散する傾向があり、死者数が減少する。なお、両流域の降雨倍率は 0.98、0.99 であり、気候変動による浸水域の増大の影響は限定的で、人口動向が死者減少の主因であると考えられる。その他の水系については、河川 A、R、S の３水系を除き、降雨倍率が減少することと、人口が減少することの両面から死者数は減少する。死者数の減少率は、多くの河川で対象流域全体の人口の減少率を上回る結果となったが、一部、人口が減少する場所によって人口減少率を下回る水系（河川 O）もあった。

一般的には流域の人口増加（【類型２】）や高齢者人口の増加（【類型３】）は死者数の増加につながり、逆に人口減少の場合は死者数が減少すると予想されることが多いが、以上の結果を踏まえると、実際には人口の増加／減少域が氾濫域内にあるかどうかによって死者数が増加／減少するかどうかが決まり、流域の人口増加／減少だけで死者の増加／減少を結論づけることはできないことがわかる。また、流域全体では人口が減少する水域（【類型５】、【類型６】）においても、特に浸水リスクの高い地区の人口が増加することにより、死者数が増加する場合があり得る。

このように、流域の人口動向、特に氾濫域内の人口の分布（配置）は、人的被害リスクの評価結果に大きく影響するため、全国一律の人口減少の傾向のみで単純に結論を出そうとするのではなく、個々の流域ごとの人口分布推計結果を用いて人的被害の将来変化に関する評価をすることが望ましい。

しかし、特に今回採用したコーホート要因法の適用は概ね 20～30 年程度であり、気候変動の影響が明確に発現すると予測される将来（100 年後）の氾濫原メッシュ内の人口分布を十分な予測精度により推計することは現段階では限界があることにも十分な注意が必要である。

なお、高齢化率の上昇は、避難行動における介助者の必要など、今後の流域の浸水に対する脆弱性を高める要因の一つとして本来は留意すべきであろう。しかし、今回の検討においては、あくまでも年齢と浸水深の関係のみから避難の可否を判断しているため、死者数の増減に関わる要因は浸水区域内の高齢者人口のみであり、高齢化率自体は被害を増大させる直接的な要因とはなっていない。

参考文献:

厚生労働省（(財）こども未来財団）(2003)「地域行動計画策定の手引き」（平成 15 年 8 月）
http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/seisaku/syousika/030819/2b.html

３．都市雨水排水対策の視点からの気候変動影響

近年、日本各地において時間 50mm 以上の豪雨、さらには 10 分間程度の短時間に集中する豪雨の発生が頻繁に見られるようになっている。各都市においては浸水被害を防ぐための対策が進められているが、長期的に見ると降雨の特性が変化し、年超過確率 1/5 や 1/10 規模の降雨強度が増加傾向を示すと考えられるため、既存の浸水対策のみでは年超過確率 1/5 や 1/10 規模の短時間豪雨に対応できなくなる可能性がある。そこで、図-Ⅱ.3.1 に示すフローに基づき、将来的な豪雨の増加が既存の浸水対策に対してどのような影響を与えるのか、浸水シミュレーションを用いた 3 地区のケーススタディで検討した。

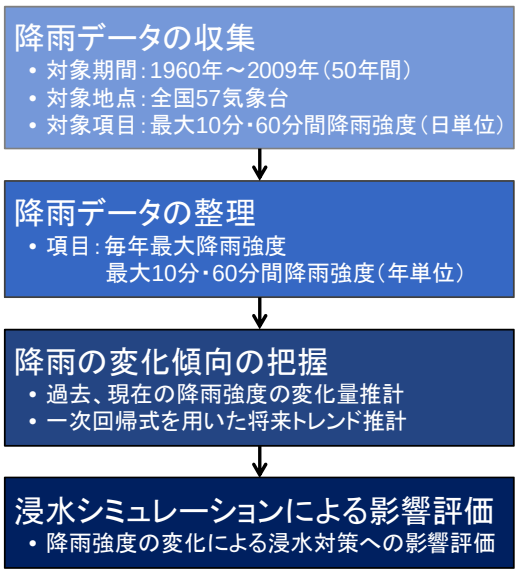


図-Ⅱ.3.1　検討フロー

３．１　豪雨の増加傾向の推定と降雨シナリオの設定 ～都市域雨水排水（下水道）計画の立場から～

気候変動に伴う降雨の変化予測については、気候モデルによる予測結果を用いることが多い。下水道で対象とする降雨スケールは最大でも 300km² 程度（下水道技術開発連絡会議 2011）であり、少なくとも水平解像度 20km 以下の気候モデルが必要である。一方、日本における一般的な下水道排水区の大きさを考慮すると、面積で数～10 数 km² 程度、降雨継続時間 1 時間程度の時空間解像度を持つ気候モデルが必要である。研究時点では、日本の下水道スケールで、日本全域において適用可能な時空間解像度を持った気候モデルによる予測値を入手することが困難であったことから、今回は過去の観測データによる統計的手法によって、将来的な降雨変化を推定することとした。

具体的には、表-Ⅱ.3.1.1 に示す全国の管区・海洋・地方気象台（全 57 気象台：2009 年時点）を対象に、1960 年から 2009 年までの各日最大 10 分間・60 分間降水量データを収集し、各気象台における毎年最大 10 分間・60 分間降雨強度を整理した。

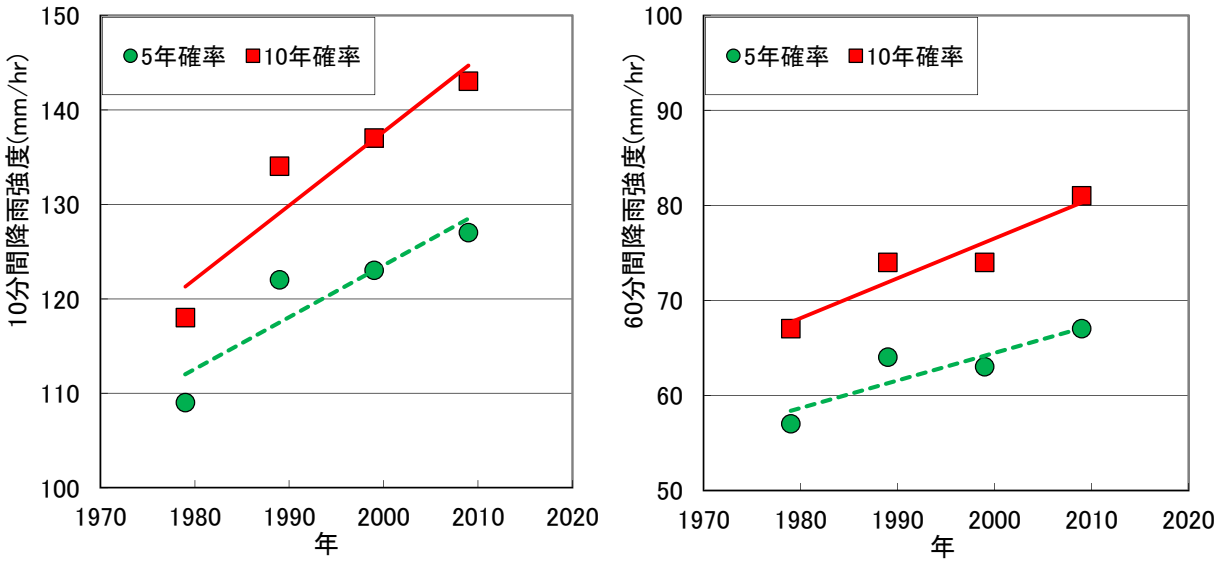
次に、整理した毎年最大降雨強度を用いて、ワイブルプロット法により各気象台における 1979 年、1989 年、1999 年、2009 年時点の年超過確率 1/5 および 1/10 の降雨強度を算出し、一次回帰直線より 1979～2009 年までの変化傾向を整理した。整理結果の一例を図-Ⅱ.3.1.1 に示す。なお、超過確率降雨強度算出の対象とした統計期間は、各算出年時点を含む過去 20 年とした（例えば、1979 年の統計対象

期間は 1960～1979 年)。

さらにこの変化傾向が将来的にも継続すると仮定した場合の 5 年超過確率降雨強度の増加率を気象台ごとに推定し、50 年後の増加率のパーセンタイルを整理した。結果を図-Ⅱ.3.1.2(a)に示す。この結果から、全体的には 50 年後の年超過確率 1/5 の 10 分・60 分間降雨強度が、現在より 1.1 倍程度（50 パーセンタイル値（中央値））、最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加することが試算された。図-Ⅱ.3.1.2(b)に年超過確率 1/10 の降雨強度の増加率に関して、同様に整理したものを示す。年超過確率 1/10 の降雨強度についても年超過確率 1/5 の降雨強度と同様な傾向が示された。

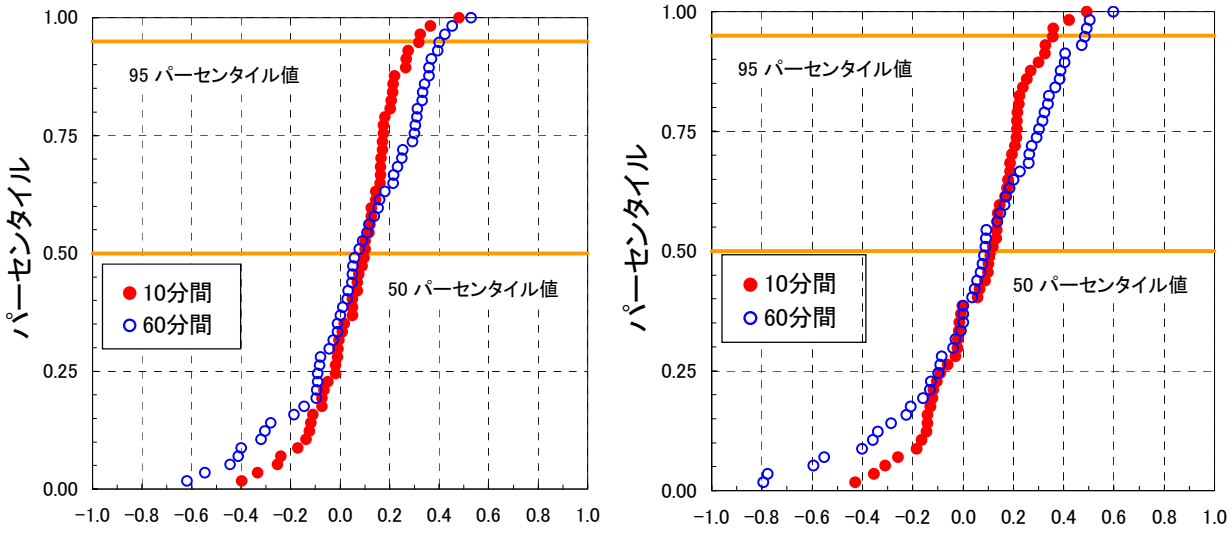
表-Ⅱ.3.1.1　対象とした全国 57 気象台の一覧

	観測所					
管区等	札幌管区気象台	仙台管区気象台	東京管区気象台	大阪管区気象台	福岡管区気象台	沖縄気象台
海洋気象台・地方気象台	函館海洋気象台	青森地方気象台	水戸地方気象台	舞鶴海洋気象台	長崎海洋気象台	宮古島地方気象台
	旭川地方気象台	盛岡地方気象台	宇都宮地方気象台	神戸海洋気象台	下関地方気象台	石垣島地方気象台
	室蘭地方気象台	秋田地方気象台	前橋地方気象台	彦根地方気象台	佐賀地方気象台	南大東島地方気象台
	釧路地方気象台	山形地方気象台	熊谷地方気象台	京都地方気象台	熊本地方気象台	
	網走地方気象台	福島地方気象台	銚子地方気象台	奈良地方気象台	大分地方気象台	
	稚内地方気象台		横浜地方気象台	和歌山地方気象台	宮崎地方気象台	
			新潟地方気象台	鳥取地方気象台	鹿児島地方気象台	
			富山地方気象台	松江地方気象台		
			金沢地方気象台	岡山地方気象台		
			福井地方気象台	広島地方気象台		
			甲府地方気象台	徳島地方気象台		
			長野地方気象台	高松地方気象台		
			岐阜地方気象台	松山地方気象台		
			静岡地方気象台	高知地方気象台		
			名古屋地方気象台			
			津地方気象台			



(a)　10 分間降雨強度　　(b)　60 分間降雨強度

図-Ⅱ.3.1.1　超過確率年 5 年および 10 年の降雨強度の変化傾向の分析結果例（名古屋地方気象台）



(a)　超過確率年 5 年降雨強度　　(b)　超過確率年 10 年降雨強度

図- Ⅱ.3.1.2　全国 57 気象台における 10 分・60 分間降雨強度の増加率

上記の結果を踏まえ、ケーススタディを実施する各都市における既存計画の降雨強度に対し、10 分・60 分間降雨強度が 1.3 倍に増加したときを想定し、図-Ⅱ.3.1.3 に示す既存降雨強度式とシナリオ A～C の降雨パターン（降雨継続時間 6 時間）を設定してシミュレーションを実施することとした。

ここで、シナリオ A は、降雨ピークの 10 分間について降雨強度を 1.3 倍とし、ピーク前後の 60 分間の降雨強度が 1.0 倍となるように設定した。また、シナリオ B は、ピーク前後の 60 分間の降雨強度を

1.3 倍とし、ピークの 10 分間降雨強度については 1.0 倍とし、シナリオ C はピーク 10 分間、ピーク前後の 60 分間の降雨強度ともに 1.3 倍とした。

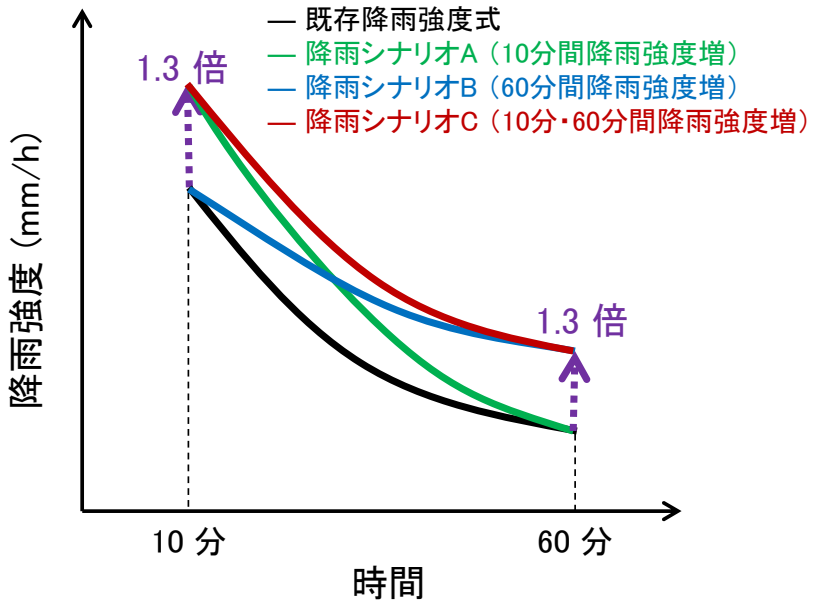


図-Ⅱ.3.1.3　降雨シナリオ設定イメージ

ケーススタディを実施する対象都市は 3 都市とし、それぞれの都市における中心市街地を含む地区（X～Z 地区）を選定した。対象都市については、地域に偏りが起こらないように選定している。また、シミュレーションに使用したソフトは MOUSE もしくは InfoWorks である。

３．２　浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区別・シナリオ別にシミュレーション結果（浸水状況）の整理を行った結果を表-Ⅱ.3.2.1 に示す。なお、浸水面積については、浸水深 20cm 以上（床下浸水相当以上）の箇所を算定対象とした。

以下にその概要を示す。

① 対象面積が比較的小さな Y 地区では、既存降雨に対して 10 分間降雨強度を増加させたシナリオ A、シナリオ C での水位上昇が顕著であった。

② 対象面積が比較的大きい X 及び Z 地区では、60 分間降雨強度増のシナリオ B、シナリオ C での水位上昇が顕著であった。

③ 10 分間降雨強度と 60 分間降雨強度を共に増加させたシナリオ C においては、いずれの地区においても浸水深 20cm 以上（床下浸水相当以上）の浸水面積が既存降雨の時に対して増加した。

④ Z 地区は他の地区と異なり、シナリオ B の方がシナリオ C よりも浸水状況が悪化している。これは Z 地区の放流方法が他の地区（自然流下）と異なり、ポンプ施設を用いている事から、総降雨量がより増加したシナリオ B において浸水面積が増加したと考えられる。

これらの結果より、将来的に豪雨の頻度が増加することが想定される場合においては、追加の浸水対策を検討することが望まれる。シミュレーション結果を踏まえると、Y 地区については、上流部の枝線部における能力不足が浸水原因と想定され、短時間雨量における影響を考慮することが重要となる。X 及び Z 地区については、雨水幹線において流下能力を超えたことが浸水原因と想定され、広範囲で排水機能のレベルアップを図ることが有効と考えられる。

また、流下対策はもちろんのこと、雨水貯留浸透の継続的な取り組みも併せて有効と考えられる。さらに、近年の厳しい財政事情を考慮すると、降雨観測技術や内水ハザードマップ等、ソフト面の対策の充実が重要となってくる。

表-Ⅱ.3.2.1　浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区名			X地区	Y地区	Z地区
排除方式			合流	分流	合流
放流方法			自然流下	自然流下	ポンプ施設
対象面積			約3,350ha	約62ha	約1,900ha
流出係数			約0.45	約0.60	約0.82
シミュレーション対象降雨		60分間降雨強度	34.3mm/hr	50.0mm/hr	53.4mm/hr
		10分間降雨強度	87.1mm/hr	109.5mm/hr	114.6mm/hr
		総降雨量	82.7mm	70.4mm	111.7m
浸水対策の形態			流下幹線整備中心	貯留池整備併用	貯留幹線整備併用
既存降雨強度での浸水シミュレーション状況			一部開水路確保	一部開水路確保	満管 (管頂レベル超)
対象降雨パターン	シナリオA 10分間 降雨強度増	60分間降雨強度	34.3mm/hr	50.0mm/hr	53.4mm/hr
		10分間降雨強度	113.3mm/hr	142.4mm/hr	149.0mm/hr
		総降雨量	76.2mm	61.3mm	98.7mm/hr
		既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水増加面積率※	0.7%	6%	0.4%
		主な浸水集中域	－	上流部	－
	シナリオB 60分間 降雨強度増	60分間降雨強度	44.6mm/hr	65.0mm/hr	69.5mm/hr
		10分間降雨強度	87.1mm/hr	109.5mm/hr	114.6mm/hr
		総降雨量	121.6mm/hr	114.1mm	175.1mm/hr
		既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水増加面積率	7%	0%	7%
		主な浸水集中域	中流部	－	全体的 (GLの低い箇所)
	シナリオC 10分・60分間 降雨強度増	60分間降雨強度	44.6mm/hr	65.0mm/hr	69.5mm/hr
		10分間降雨強度	113.3mm/hr	142.4mm/hr	149.0mm/hr
		総降雨量	107.6mm/hr	91.5mm	145.2mm
		既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水増加面積率	9%	6%	4%
		主な浸水集中域	中流部	上中流部	全体的 (GLの低い箇所)

※既存降雨に対する浸水増加面積率＝（既存降雨に対する浸水増加面積※※）／（対象地区面積）

※※既存降雨に対する浸水増加面積＝（当該シナリオによる浸水面積）－（既存降雨による浸水面積）

参考文献：

下水道技術開発連絡会議(2011)平成 22 年度局所的な豪雨による被害の軽減対策に関する調査研究報告

４．沿岸に作用する外力に見込まれる気候変動影響

４．１　沿岸環境　（海面水位、波浪）の変化の実態

４．１．１　はじめに

海岸保全として解決しなくてはならない沿岸の問題は、陸域への海水の浸入（越波や高潮浸水等）と海岸侵食である。これらをもたらす原因は、大きく海面水位変化と波浪に大別される。

海面水位は、平均潮位に加わる天文潮（潮汐）、気圧の変化による気象潮、風や海流の蛇行や流量変化等、そして海水の温度膨張や海水量の変化の積み重ねが表れたものである。これらのうち、気候変動の影響を受けるのは、気象の変化による気象潮、風の強さや向きの変化によりもたらされる異常潮位、温暖化や海面冷却機能の低下による膨張、氷河の溶解による海水量増加である。また、海面水位の変化は、海岸構造物の性能、砂浜の侵食、河川の出発水位、塩水の土壌侵入、サンゴ・有孔虫の生息域等の様々な分野に影響を及ぼす重要な現象である。特に、気候変動への適応を考慮した海岸保全施設等の計画・設計を導入しようとする際に、現在まで(既上昇量)と将来にわたる海面上昇量を設定することは避けて通れない。

IPCC の報告書では、全球の過去と将来予測の海面上昇量が示されている。これによると、一様に上昇するわけではないことが分かる。これは、我が国沿岸でも同様であり、その原因は冒頭に示した海面水位を決定する各要素の影響度が場所により異なるからである。気候変動に適応するための計画の立案に際しては、各沿岸の海面変化の特性を把握しておく必要がある．そのためには、潮位データを綿密に補正しつつ、それだけでは詰め切れない部分については仮説をもって補正法を設定することも必要となる。特に、各験潮場のデータを扱う際に地盤変動の除去という大きな課題が生じる。これについて次節 4.1.2 で議論する。

他方の波浪は主として風波であり、気候変動に影響される風が起動力となっている。波浪の変化は、構造物の性能や安全性だけでなく砂浜の漂砂環境、飛沫や越波による交通障害、農作物塩害にも大きく影響する。波浪を起こす風は、季節風や台風等と発生原因が多様で発生位置も同時多発的で面的に生じることから、ある地点で観測される値は統合的であるとも平均的であるとも言える。波浪が岸へ伝播して海岸保全の対象領域である浅海域へ到達すると波は海浜地形の影響を受けて砕波したり屈折・回折したりする。大概として砕波点における波向と波高に依存して沿岸漂砂量のポテンシャルが決まるので、波浪の変化は、次に述べる海浜地形の変化にもつながりうる。

ここで、海浜地形の変化の位置づけについて述べておく。海面水位が上昇すると、それまでの水位の下で安定していた海浜形状（安定海浜形状）が海面水位上昇後の境界条件に応じた安定海浜形状になろうとするために海岸侵食が生じると言う学説が存在する。それに従えば、その侵食によって海底が下がり、海面水位上昇の効果以上に砕波点が陸域へ近づくことになる。このような影響は、海岸構造物にとって設計外力の変化につながる。したがって海浜地形の変化は、海面水位や波浪状況の変化に応答して起こる二次的な変化であるが、沿岸環境の変化を規定する重要な条件の１つになることを考慮しなくてはならない。

その一方、砂浜の地形変化の予測は、気候変化を考慮しない場合でも、過去の変形をお手本とするパ

ラメータのキャリブレーションに拠っているのが実状である。これは、種々の外力変数が変化する中で将来の砂浜がどのように変化するかを解析的に予測することが現状ではまだ実用の域に達していないためである。以上の状況は、気候変動が海浜地形に及ぼす影響を予測することの困難さを表す。こうしたことを踏まえ、本研究では砂浜の地形変化を直接には扱わないこととする。

次に、海岸法の法令基準体系にしたがい築造される海岸保全施設の中で、堤防及び護岸を取り上げ、気候変動の影響をみてみる。堤防・護岸の天端高さは、海岸保全施設の技術上の基準を定める省令（第三条５項）で次のように定められている。

一 設計高潮位に設計波のうちあげ高を加えた値

二 設計高潮位の時の設計波により越波する海水の量を十分に減少させるために必要な値

さらに、「設計高潮位」については第二条１項で、次のように定められている。

イ　既往最高潮位

ロ　朔望平均満潮位に既往の潮位偏差の最大値を加算し、当該満潮位の時に当該潮位偏差及び設計波が発生する可能性を考慮して、当該潮位偏差の最大値の範囲内において必要な補正を行った潮位

ハ　朔望平均満潮位に台風その他の異常な気象又はこれに伴う海象に関する記録に基づき推算した潮位偏差の最大値を加算し、当該満潮位の時に当該潮位偏差及び設計波が発生する可能性を考慮して、当該潮位偏差の最大値の範囲内において必要な補正を行った潮位

これらから海岸管理者が選択し決定される。ここでは、簡単のため「一（うちあげ高）」と「ロ（観測最大潮位偏差）」の組合せを想定して説明する。図-Ⅱ.4.1.1.1 は、海岸堤防の計画・設計と外力の変化との関係を模式的に示したものである。

現在気候の状況を示した左の図について、各水位を説明する。*Za* は朔望平均満潮位の天文潮部分に相当する。*Zb* は「ロ（観測最大潮位偏差）」に相当して、台風による気圧低下による吸上げと強風による吹寄せ効果である。*Zc* は「一（うちあげ高）」に相当する部分で波によるうちあげ高である。また、*Za+Zb+Zc=Zneed* となり必要高さとなるが、省令においてはこれに「当該堤防等の背後地の状況等を考慮して必要と認められる値を加えた値」としている。この「この必要と認められる値」が「調整代」と書いた部分となり、従来から海岸堤防・護岸の計画・設計において「余裕高」と呼ばれてきたものである。例えば、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」には、「最大 1.0m 程度を限度として余裕高を適宜決定されることが多い。」との記述があるため標準的に見込まれているように読めるが、外力に対して安全を見込むための設計法が設定されているものではなく、さまざまな条件に対応するための調整値である。このため、余裕高が設定されていない海岸も多い。

次に、気候変動が生じた場合の右側の図についてである。現在気候である左側の図の *Za*、*Zb*、*Zc* のそれぞれに対して、気候変動影響分である *ΔZa*、*ΔZb*、*ΔZc* を重ねた形で示した。ΔZa は海水準上昇であるので他の変数に関係なく加えられる。*ΔZb* と *ΔZc* は、気圧低下と風により引き起こされるので台風が強くなれば大きくなる。但し、吹寄せの効果は、*Za+ΔZa* つまり湾の水深に反比例するので、*ΔZb* が負となる可能性もある。また、同様に水深は砕波や wave-setup にも影響を及ぼすことから *ΔZb* との相互作用もあり得る。

以上に示したように海岸での外力変化の影響は複雑な相互作用にあるが、現象の一つ一つについて検証していく必要がある。4.1.2 及び 4.1.3 では潮位の変化モニタリングについて、4.1.4 では波浪の変化モニタリングについて、4.1.5 ではこれらのまとめとして記述する。また、巨大なエネルギーを持ち、

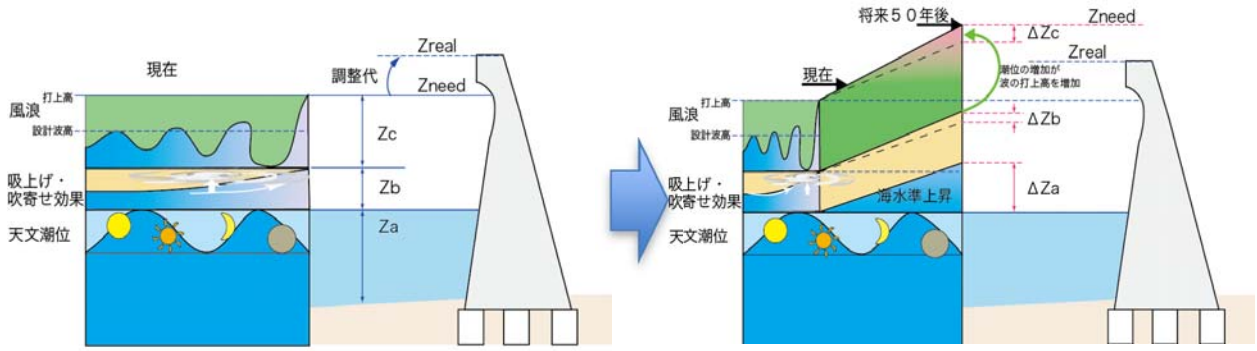


図-Ⅱ.4.1.1.1　海岸保全施設（海岸堤防）の設計要素への気候変動影響の捉え方

大きな災害をもたらす高潮の予測については、4.2 に記述する。

４．１．２　潮位観測施設の観測データの補正と海面変動の状況

（１）潮位観測施設の設置期間と解析施設の選定

日本沿岸の海面水位は、験潮場および検潮所によって観測されている。験潮場は、国土地理院が海面を一定として地盤の変動を観測するために、検潮所は、気象庁が潮位の変動を観測するために設置している。この他に、海上保安庁と港湾管理者、河川管理者、海岸管理者、水管理国土保全局所管事務所が設置した観測施設がある。本研究では、海面変動を把握するという目的から、海岸昇降検知センターに登録され、全国水準測量路線網との間を定期的に水準測量して観測所内「球分体」の標高管理が行なわれている観測所を対象とした。これらの観測所の呼称は、省庁等の違いにより「験潮場」「検潮所」等と称されるが、本研究では総称して潮位観測施設と呼ぶことにする。

表-Ⅱ.4.1.2.1　詳細解析を行った験潮場・検潮所のデータ連続性の状況(2010 年解析時点)

番号	験潮場名	所属	観測開始年	験潮場移設(最近年)	球分体再投	その他変更		設置以降年数	毎時データの開始年次	データ解析最終年	解析可能年数	地盤変動調整後の解析年数
1701	忍路	国土地理院	1905	1963				95	1933	2009	46	76
1605	浅虫	国土地理院	1954					46	1954	2009	55	55
1603	柏崎	国土地理院	1955			2007	新潟県中越沖地震	45	1955	2007	52	52
1602	輪島	国土地理院	1894	1938		1986	水準点再投	106	1933	2010	24	77
1401	海南	国土地理院	1953					47	1954	2009	55	55
1403	細島	国土地理院	1894			1936	当初検潮儀へ取り付け	106	1933	2009	73	76
2304	岡田	気象庁	1953			1961	1986噴火のため地盤不連続	47	1963	2009	48	46
2401	串本	気象庁	1895			1961		105	1961	2009	48	48
3702	大湊	海上保安庁	1952		1972			48	1952	2008	36	56
3401	呉	海上保安庁	1962		1985		1957-1961欠測	38	1952	2008	23	56
3402	徳山	海上保安庁	1950	1968				50	1950	2008	40	58
3503	厳原	海上保安庁	1947	1984				53	1947	2008	24	61
3405	西之表	海上保安庁	1965					35	1965	2008	43	43

全国 151 潮位観測施設から 13 施設を選定し詳細な解析を行った。各潮位観測施設の状況を表-Ⅱ.4.1.2.1 に示す。施設の選択は、長い期間（40 年を目安）のデータを活用できる潮位観測施設とした。また、潮位観測施設によっては B.M.標高の経時的ばらつきが大きく、信頼性が十分でないと判断される箇所が存在したので、そのような施設は対象からはずした。

（２）潮位観測施設の地盤変化の把握

本研究では、各潮位観測施設の設置標高の地盤変動による変化を全国水準測量の結果を用いて概略推定し、海面水位の変化を求める岩崎ら（2002）の手法に倣うこととした（野口ら 2010）。

ここで問題になるのは、全国水準測量の基準点である日本水準原点（東京都千代田区永田町１-１）自体の標高値に、海面水位変化の影響と地殻変動による影響が混在していないかという点である。まず、日本水準原点の標高は、 1923 年の関東大地震の影響により東京湾平均海面上 24.4140m に改定され、さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震の影響により、同年 10 月 21 日に東京湾平均海面上 24.3900m に改定された。これらのことから、両大震災の間は、日本水準原点の東京湾平均海面水位からの高さ（標高値［東京湾平均潮位 T.P.］）を変えずに、全国の水準点測量が行われていたことになる。したがって、日本水準原点が、この間地殻変動の影響を受けない不動点と見なせるならば、水準測量成果に基づく「東京湾平均潮位 T.P.」で表現された潮位観測データを分析することで、我が国周辺の正味の海面水位変化量を知ることができることになる。この仮定を裏付ける情報は十分でないが、参考材料として以下のものがある。国土地理院は、全国水準測量の「昭和 44 年度平均成果」と「2000 年度平均成果」の差を算出し図-II-4.1.2.1 を公表している。この解説を引用すると、「全国的な傾向として、日本水準原点近傍の東京周辺ではほとんど差はなく、北海道側でマイナス傾向（最大-43cm）、九州・四国側でプラス傾向（最大＋35cm）となっています。これは、旧標高の計算に遡ると北海道は、本州側と分離され計算され

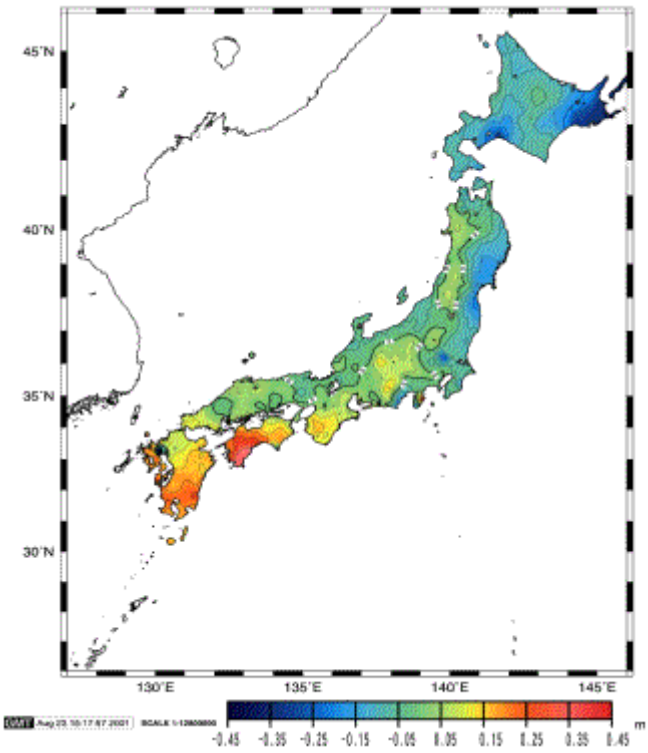


図-Ⅱ.4.1.2.1　「昭和 44 年度平均成果」と「2000 年度平均成果」の差（国土地理院）
計算手法の違いによる標高の差を含んでおり正味の地盤変動を示していないことに注意

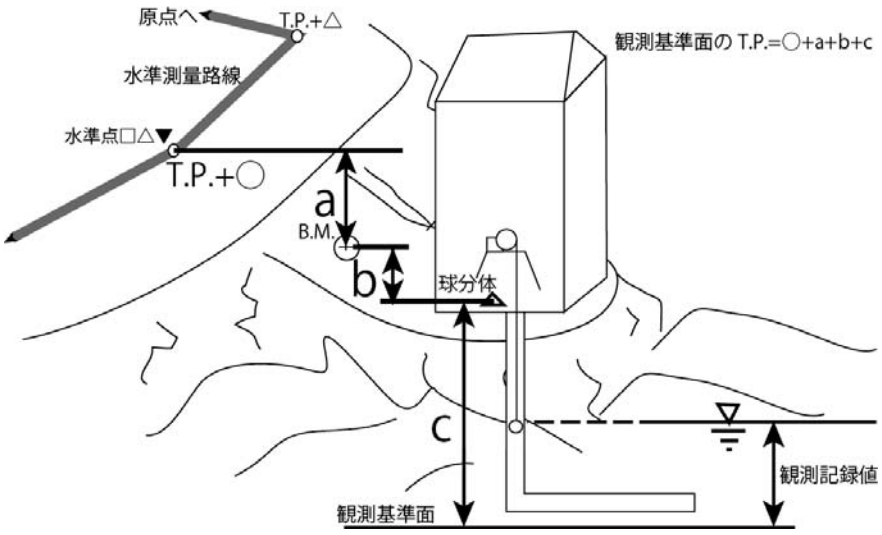


図-Ⅱ.4.1.2.2　験潮場・検潮所の観測基準面と水準測量の関係

たこと、九州・四国側は、本州側の西ブロックの計算時に、それぞれ関門・来島瀬戸ルートの路線のみで結合されていることや重力値の補正計算手法の違い等により系統的な標高差が生じたものであると考えられます。」（国土地理院）としている。

それぞれの潮位観測施設の基準点（球分体や固定点）は、「東京湾平均潮位 T.P.」で表現された最寄りの水準点と関連づけてある。潮位観測施設内の各基準点に関連付けられた水準点を取付水準点と呼ばれている。取付水準点から中間基準点（B.M.）、球分体、基準点潮位観測記録との関係を図-Ⅱ.4.1.2.2 に示す。これらの水準測量は潮位観測施設の管理者により更新される。この水準測量の結果を、中間値も含めた歴年の全データについて記載しているのが、海岸昇降検知センターが定期的に発行する「験潮場取付水準測量成果集」である。この測量結果において、図中左側の陸上に太い線で示されたのが水準点群の T.P.値（日本水準原点を基準とした標高）である。ここから B.M.との標高差 a（B.M.が高くなる方が正）、さらに B.M.と球分体との標高差 b（球分体が高くなる方が正）が「験潮場取付水準測量成果集」に示されており、これらを合計すると球分体の T.P.基準の標高となる。ここまでで、陸側の水準測量の変化つまり観測施設の地盤高変化が得られる理屈である。今度は、海側から考える。海面は、時々刻々と変動しており、その状況を記録する。そのためには観測基準面を設け、そこから水面までの高さを記録する。球分体から観測基準面までの標高差 c（観測基準面が高くなる方を正）をどのように設定するか、つまりどこを観測基準面とするか等は、潮位観測施設の管理者が属する機関の流儀に依っている。流儀の内容については、「観測基準面常数」等として明示されている。

このとき、2000 年度平均成果を反映するために昭和 44 年平均成果との差を地盤変動量として、期間で按分することが考えられる。しかし、図-Ⅱ.4.1.2.1 のように 2000 年度平均成果と昭和 44 年平均成果の間で変化量が異常に大きく、前述の「計算手法の違いによる標高の変化」の影響が無視できない。このため、継続性と変化を重視する意図から 2000 年平均成果を使用せず「験潮場取付水準測量成果集」の変化記録を追従することとした。2000 年以降の地盤変動については、それ以前の変動経過、近傍の電子基準点平均値の変化、地震の有無を考慮して外挿した。地盤変動の傾向が不確かな潮位観測施設については、地盤変動が確からしい年までを対象とすることにした。

以上の手順に従って、観測基準面と T.P.の比高値（標高）の変化を求めた。大きな地盤の変化が見られた輪島の例を図-Ⅱ.4.1.2.3 に示す。表-Ⅱ.4.1.2.1 に示したように輪島は、1894 年に設置された我

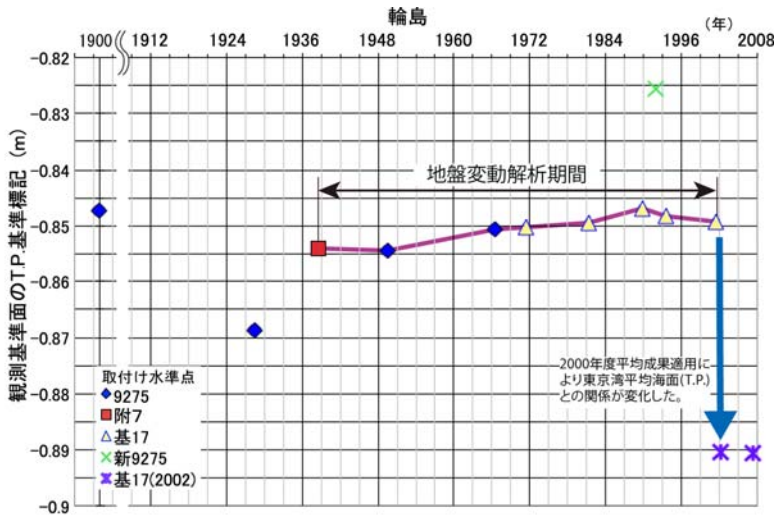


図-Ⅱ.4.1.2.3　観測基準面と東京湾平均潮位(T.P.)の関係

が国で最も古い潮位観測施設の 1 つである。しかし、図-Ⅱ.4.1.2.3 の 1936 年以前の観測基準面の標高値は大きく変化しており、これを用いて潮位の値を補正すると不自然なものとなってしまう。このため、この期間のデータは使わないこととして 77 年間の解析期間とした。また、原因は不明であるが、取付け水準点や水準測量の経路によっても標高が異なってしまう。このように、観測施設毎に解析期間と採用する水準測量の経路を選択して地盤変動の推移を設定する。

上述のとおり、各潮位観測施設の地盤高変化を考慮して海面水位の経年変化傾向を把握するため、各時点の地盤高を与える。図-II-4.1.2.3 に示すように取付水準点から球分体までの間の水準測量が実施され随時更新されている。本分析では、各 2 時期の地盤高データから内・外挿して各時点の地盤高を推定し、そこからの比高として海面水位を得ることを基本にしている。

電子基準点データは、比較的最近に限定され、またデータ処理手法に課題があるものの、そこから地盤高の変化を連続的に追跡できるので、当該潮位観測施設近傍に活用できる電子基準点データがある場合は、その情報を上記 2 時点の標高値に加味して地盤高変化を推定している。その場合は、近傍の電子基準点データを単純に平均して当該地点の標高とした。

（３）潮位観測施設の海面水位変化の解析方法

以上に述べた方法で観測基準面の変動を除去する処理を行って、表-Ⅱ.4.1.2.1 に示した期間を対象に海面水位の変化を算出した。解析には各地点の毎時データを用いて、朔望平均満潮位、平均潮位、冬季平均潮位、台風期平均潮位を算出した。

住(2005)が行った影響評価実験によると、1970 年代後半から地球温暖化の影響が急激に現れている。このことから 1980 年を地球温暖化の影響が有意になり始める時期ととらえ、その前後のデータ群で比較できるようにした。また 1980 年以前については、 1949 年に高潮対策事業が発足、1952 年に侵食対策事業が発足、1956 年に海岸法が制定されるなど、海岸関係の事業が本格化する 1950 年頃が 1 つの画期になると考え、「1980 年以前 30 年」のデータ群を別途作成した。

それぞれのデータ群に対して Mann-Kendall 検定（例えば、松山ら(2005)）を実施して傾向の有無を検定した。Mann-Kendall 検定は、正方向のトレンド、負の方向のトレンド、トレンド無しについて有

意性の判定を与える。年間の上昇割合については、Mann-Kendall 検定からトレンドを有すると判定されたデータ群について、その期間の全データについて一次回帰により変化速度を求めた。Mann-Kendall 検定でドレンドを有しないと判定が出た場合には変化量は 0 とした。

験潮データには、地球と天体間の引力による天文潮のほか、季節の変化による海面の変化、気象を原因とする気象潮、海流の蛇行に伴い生じる潮位などを含んでいる。また、太平洋十年規模振動と連動した変動が存在する可能性もある。これらの出現度合いを確認するために Fourier 変換によりスペクトル分析を行なった。図-Ⅱ.4.1.2.4 に日本海側の輪島、図-Ⅱ.4.1.2.5 に太平洋側（豊後水道）の徳山の結

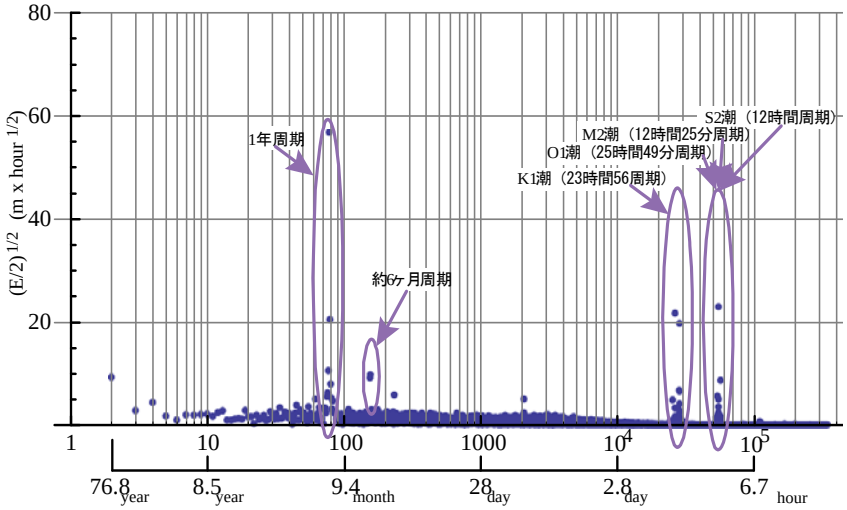


図-Ⅱ.4.1.2.4　輪島のスペクトル分析結果

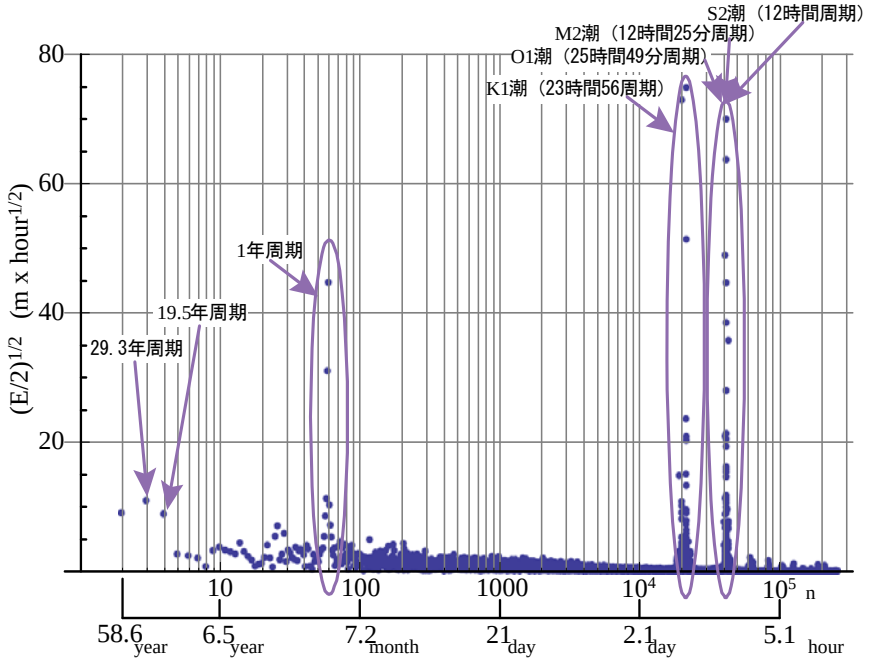


図-Ⅱ.4.1.2.5　徳山のスペクトル分析結果

果を示す。両図を比較して輪島には１０年規模の周期のピーク（徳山で見られる 29.3 年周期や 19.5 年周期に相当するもの）が顕著でないことが分かる。これは日本海側の潮位観測施設に共通して見られ、日本海側へ太平洋での広域な振動が伝わりにくいことを示している。

ところで、スペクトル分析により卓越する周期が分かるので、フーリエ変換で得られる級数列のフィルタリングしたい要素（周波数）の振幅を 0 として逆変換すれば、フィルタリングされた時系列を得る

ことができる。しかし、トレンドを有するデータ列の場合には、フーリエ変換はトレンドに対しても正弦波で近似する。これは、フィルタリングしたい要素のパワーに、トレンドを近似するための振幅量が含まれていることを意味する。このため、フーリエ級数の要素の振幅を 0 にして逆変換する方法では、トレンドが保存されない可能性がある。そこで、本研究ではトレンドの有無と傾きを求めたいため、以下の解析には元のデータを用いて解析している。

（４）潮位観測施設の海面水位変化の解析結果

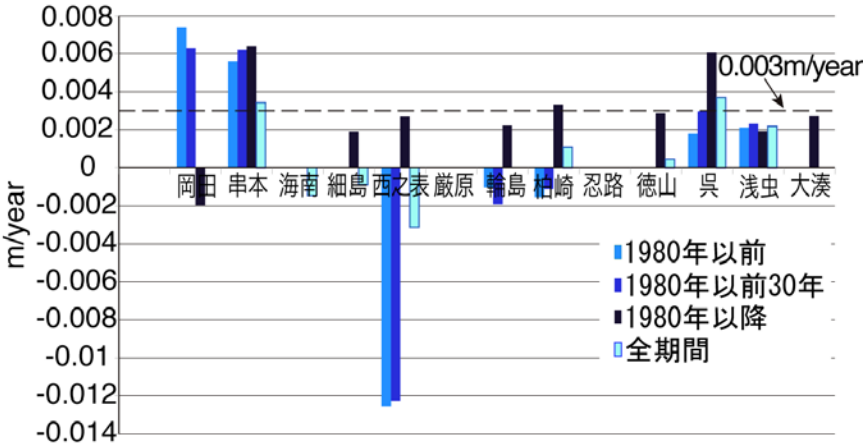


図-Ⅱ.4.1.2.6　年平均潮位

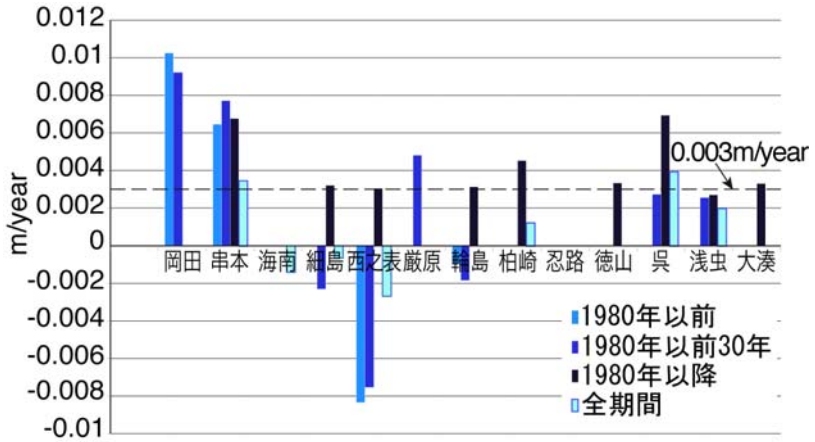


図-Ⅱ.4.1.2.7　朔望年平均満潮位

年平均潮位変化を図-Ⅱ.4.1.2.6、朔望年平均満潮位変化を図-Ⅱ.4.1.2.7 に示す。岡田を除いて全ての験潮場で、年平均潮位、朔望年平均満潮位ともに 1980 年以降は上昇に転じている。岡田は伊豆大島に位置する潮位観測施設であり、離島であることを念頭に置く必要がある。各図には、年間 3mm 上昇を破線で入れている。多くの験潮場で 1980 年以降に年間 3mm 程度の上昇が確認できる。

季節毎の変化を見るために、冬季毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.4.1.2.8 に、台風期毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.4.1.2.9 に示す。冬季と台風期について比較するのは、日本海においては冬季季節風、太平洋岸においては台風の影響を受けると考え、それぞれの影響が潮位変化に特徴的な傾向をもたらしているかを見るためである。両図からは、どちらについても年平均潮位変化と比べて大きな違いは見出せず、こ

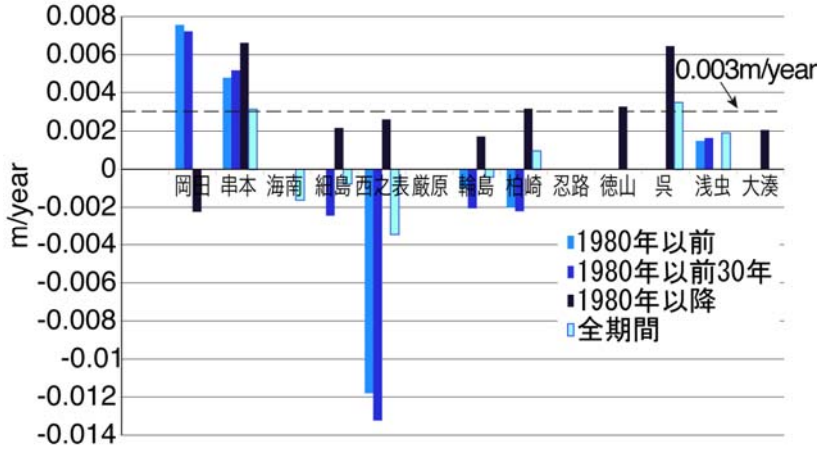


図-Ⅱ.4.1.2.8　冬期毎年平均潮位

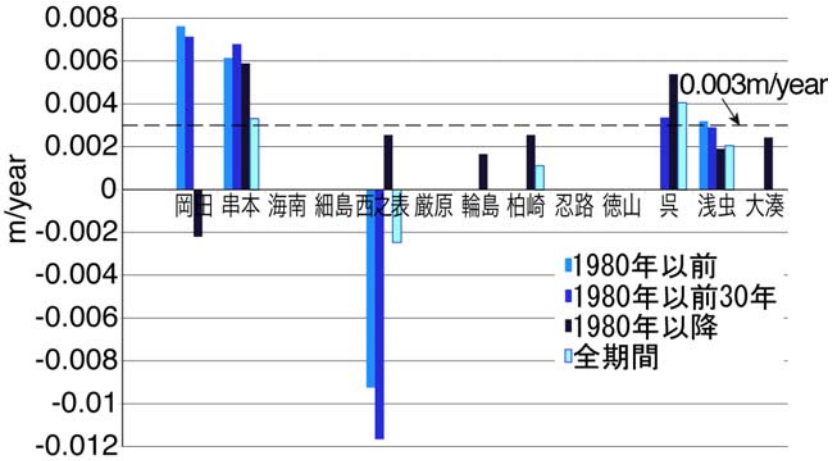


図-Ⅱ.4.1.2.9　台風期毎年平均潮位

こで示された潮位変化は年間を通じた傾向であることが分かる。1980 年以降に多くの観測地点で見られる概ね年間 3㎜ 程度の上昇は、全球的な海面上昇と連動している可能性がある。

４．１．３　衛星海面高度計による海面変動の把握

前項では、潮位観測施設で得られた潮位データから地盤変動の影響を除去することで沿岸の海水準の変化を追う岩崎らの方法を踏襲して、海水準変化の情報を得た。しかし、プレートテクトニクスの影響を強く受ける我が国においては、陸に基準を設けている限り正味の変化を議論することに精度的限界がある。また、小笠原諸島や沖ノ鳥島、大東諸島等の離島の多くは太平洋もしくはフィリピン海のプレート上にあり、プレートの動きに一層強く影響されていることが考えられる。さらに、これらのほとんどは近隣の島まで見通せないため、日本水準原点を含む水準測量網に接続できない。すなわち、その島が日本水準原点に対して隆起しているか沈降しているか比較することが出来ない。加えて、岩崎らの手法は日本水準原点が不動であることを前提にしていることから、離島と同様に、日本列島全体が沈降もしくは隆起するような有意な地殻変動があると、それを海面変化と分離することは難しくなる。

衛星海面高度計とは、NASA 及び CNES による海洋観測ミッションで打ち上げられた衛星に搭載さ

れたレーダー高度計データであり、TOPEX/POSEIDON、JASON1、JASON2 というようにデータセットを衛星の名称で呼んでいる。いずれも約 10 日の観測周期で全球における海面高度データを取得している。海面高度の測定精度は最も古い TOPEX/POSEIDON については 4～5cm、最新の JASON2 では 2～3cm 程度と想定されており、近年打ち上げられた JASON2 は、精度が向上している。1992 年に TOPEX/POSEIDON が打ち上げられてから現在に至るまで、約 20 年分の海面高度データがデータベースに蓄積され、NASA のホームページ等で公開されている。

JASON1 及び JASON2 のジオイド面からの高さである海面高度偏差のデータには、観測機器等の問題により、一定のバイアスが付加されていることが報告されている。そこで、NASA 等による資料(2011)を参考に、JASON1、JASON2 の海面高度偏差データにそれぞれ-9.1cm、-17.2cm を加えることでバイアスの影響を除去することで解析を実施した。また、TOPEX のデータには、観測機器等の問題により 60 日周期の変動成分が混入しているが、本検討では平均化されるため影響は小さいとしてバイアス除去は行っていない。

日本周辺の海域を図-Ⅱ.4.1.3.1 に示すように５つに区分した。この区分は、気象庁が検潮所（気象庁所管の潮位観測施設）のデータをクラスター検定して作成した区分にしたがっており、さらに稚内での分割を加えている。衛星データが得られている沿岸について概ね等間隔に測定点を設定して、それらの平均値を区分毎の値とした。A と E の間、B と C の間の空白域は、衛星のデータ取得に関する何らかの技術的原因によりデータが得られない領域が存在することに起因しており、上記の区分とは関係がない。

図-Ⅱ.4.1.3.2 は、各海域に属する全沿岸測定点の観測値平均を当該海域の海面高として、衛星１公転周期（約 10 日）毎とそれを年平均した値について示したものである。海域 C における 2002 年から 2004 年にかけては特異な上昇が見られる。

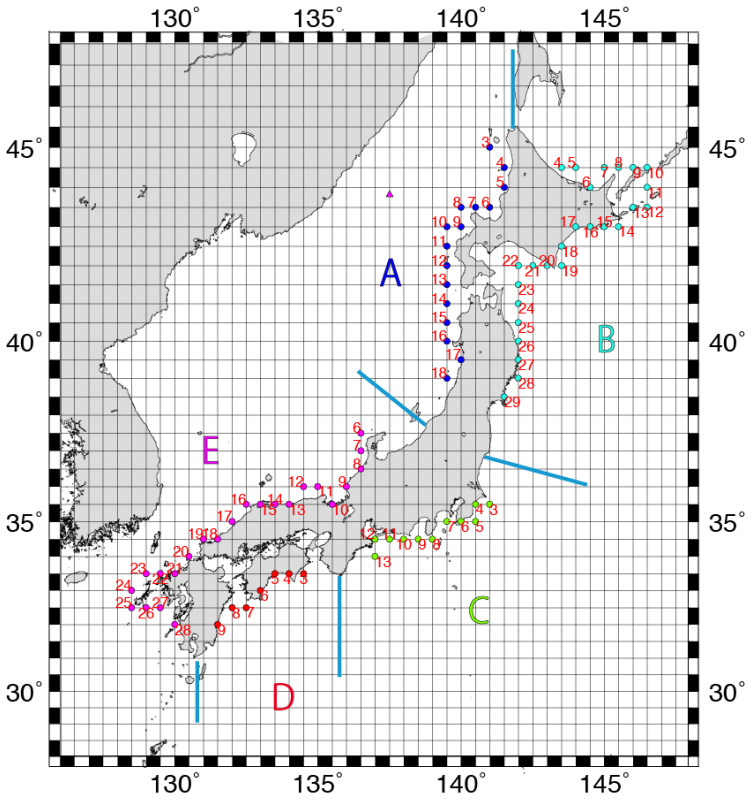


図-Ⅱ.4.1.3.1　衛星海面高度計の解析結果から沿岸部の海面上昇値を調べるための測点配置

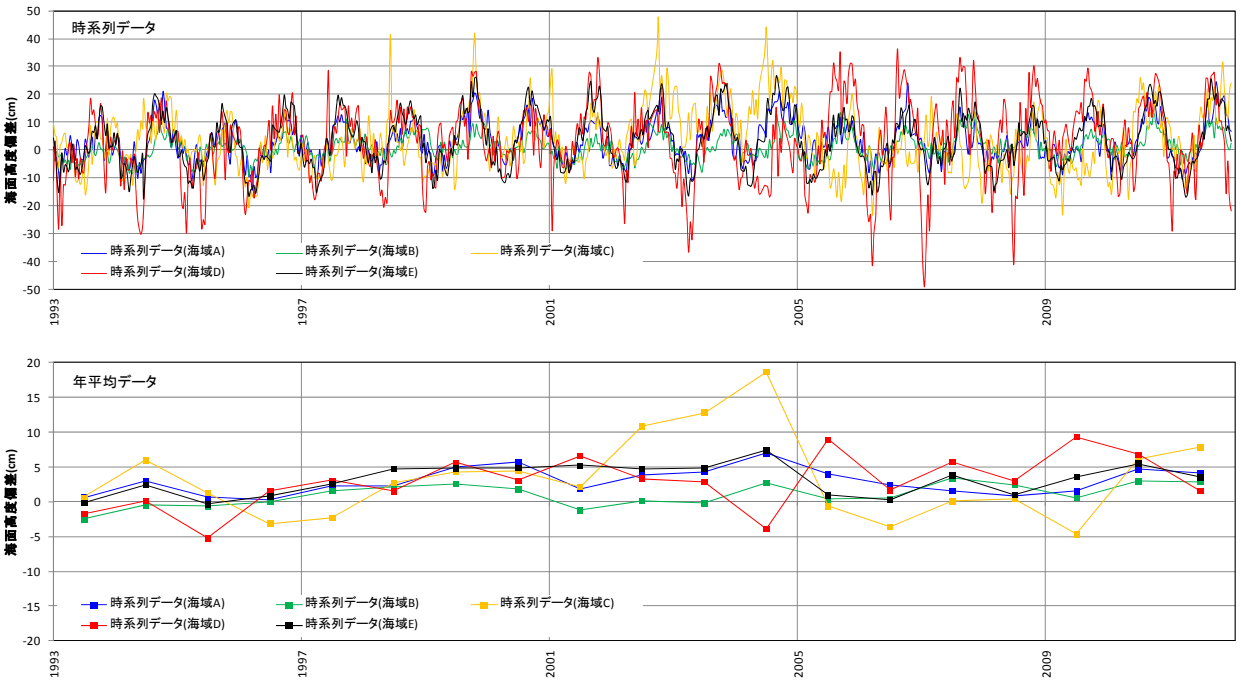


図-Ⅱ.4.1.3.2　沿岸の測定点を沿岸毎に平均した観測時系列値と年平均値

以上は沿岸測定点に着目した分析であった。次に、海岸近傍に限定せず、沿岸海域まで平均する範囲を広げて上昇量を解析する。図-Ⅱ.4.1.3.3 に各海域の設定範囲を示す。海域 C と D は黒潮領域（蛇行の範囲）を含んでいる。図-Ⅱ.4.1.3.4 に海域平均の経年変化を示す。海域 C と海域 D は大きく変動しており、これが、図中の黒潮の最南下緯度の変動と関係していることが確認できる。

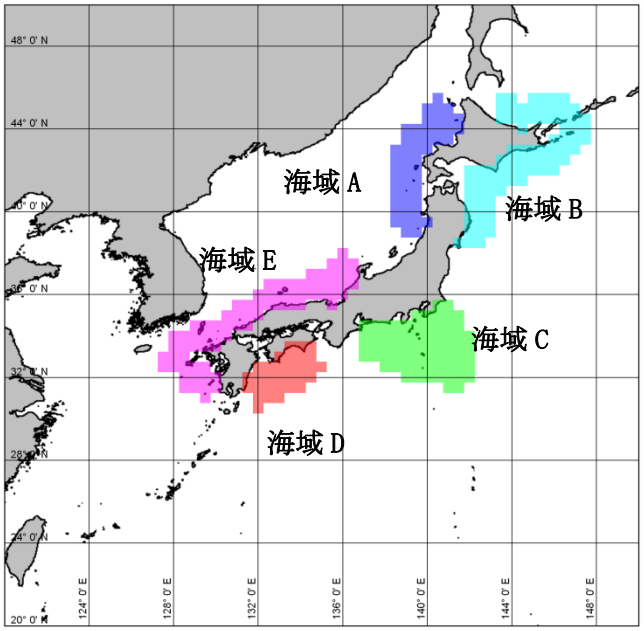


図-Ⅱ.4.1.3.3　海域毎の海面上昇値を求めるための区分（海域 C と D は黒潮領域を含むように設定）

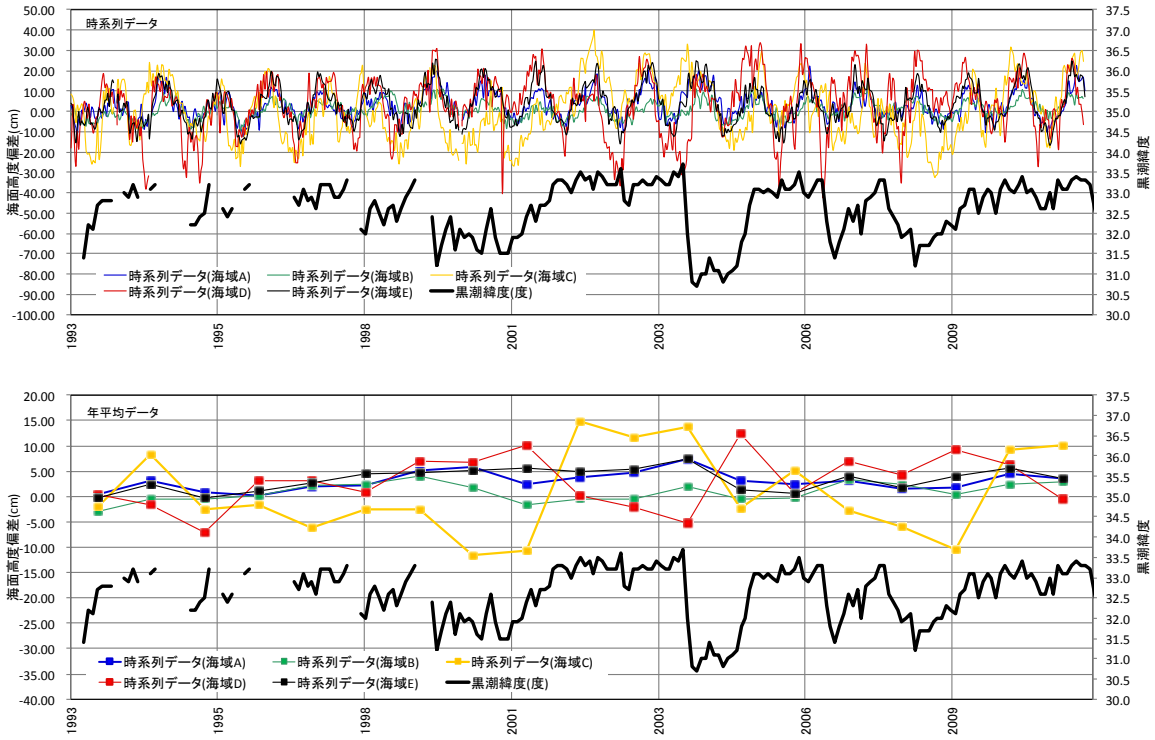


図-Ⅱ.4.1.3.4　衛星海面高度計による海域の海面高さの経時変化（海域毎）

次に、衛星公転周期をサンプリング周期とした海面高さの経時変化から単純に一次回帰により変化速度を求め、沿岸測定点の結果と合わせ図-Ⅱ.4.1.3.5 にまとめた。ただし、4.1.2 節と同様に Mann-Kendall 検定により傾向の判定を行い有意な傾向がないと判定された場合には変化量は 0 とした。沿岸と海域との比較では、沿岸部の方が大きな値となっている海域が多い。特に海域 D では、その差が 1mm/年に達している。海域 C と海域 D は全球平均の 3mm/年とほぼ同じになっている。

本節の冒頭で述べたように、離島の水準測量が孤立していることとプレートテクトニクス上の問題から、衛星海面高度計は離島周辺の海面変化の把握に有用である。そこで、図-Ⅱ.4.1.3.6 に示す 11 の離

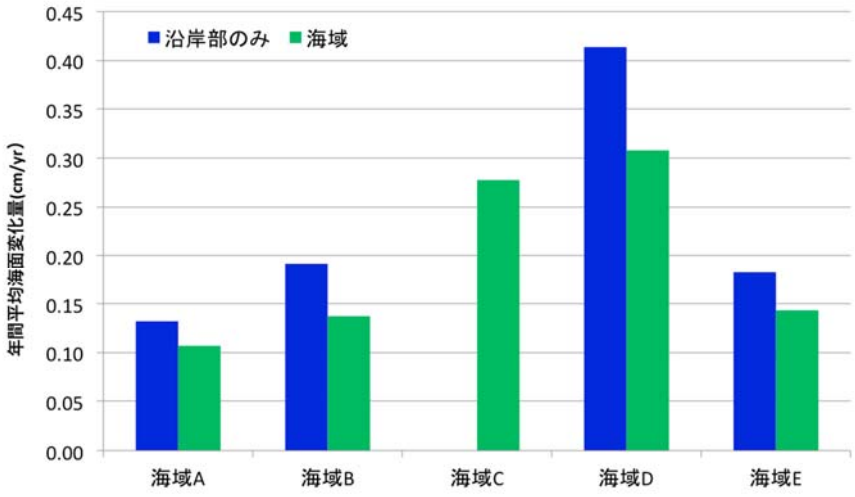


図-Ⅱ.4.1.3.5　衛星海面高度計による海域別年平均海面上昇量

島について、衛星海面高度計のデータに基づく海面水位変化の分析を行った。なお、西郷と対馬は日本水準原点を含む水準測量網に組み込まれており、結果を比較するために対象に含めた。図-Ⅱ.4.1.3.7に結果を示す。ここで、沖ノ鳥島、南大東島、種子島については、Mann-Kendall 検定によりドレンドを有しないと判定されたことから変化量は 0 とした。この図から、南西諸島では全球平均の 3mm/年と同等以上の値となっていることがわかる。

4.1.2 と本 4.1.3 で示してきた分析結果からは、IPCC が提示している全球平均の海面水位上昇速度 3mm/年と同程度の海面水位上昇が、1980 年以降、日本沿岸の多くの地点で、さらにはいくつかの沿岸海域でも生じていると言える。ただし、「10 年から 20 年周期の変動（十年規模の変動）」（気象庁の

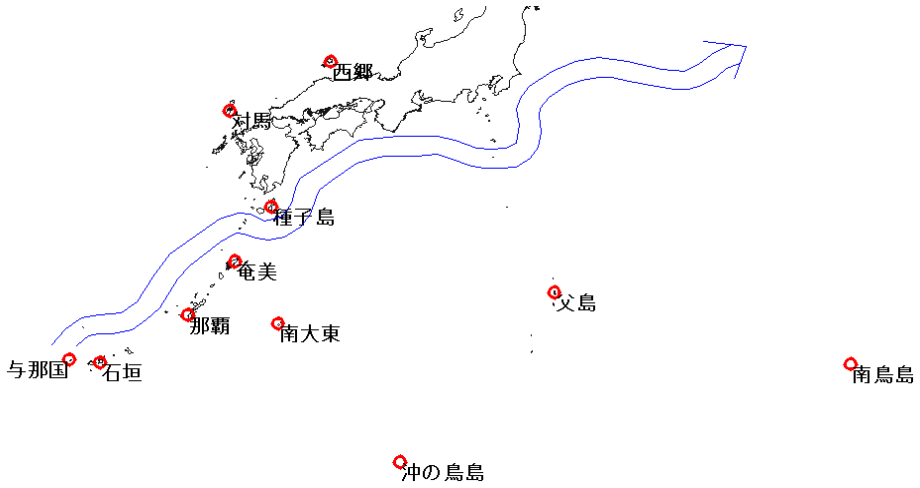


図-Ⅱ.4.1.3.6　解析を行った離島の位置

海洋の健康診断表）が太平洋側で確認されている。また、本分析では 1980 年を挟み以前 30 年、以後 20 年で分離したが、1980 年を境に下降から上昇に転じた観測施設が 4 つ（細島、西之表、輪島、柏崎）ある。これらが 1980 年以降の 20 年間が正弦波の上昇期である 1/4 周期に当たるとすると、振動の全貌を知るには最低 80 年間の観測データが必要となる。したがって、これらの地点では、海面水位上昇速度に加えて海洋の大規模変動についても検討する必要がある。近年、気象の客観再解析（JRA55 等）と同様に、海洋分野においても全球の客観解析（現状で潮汐は含まれていない）が進んでおり、その解析結果の比較検討が必要となる。

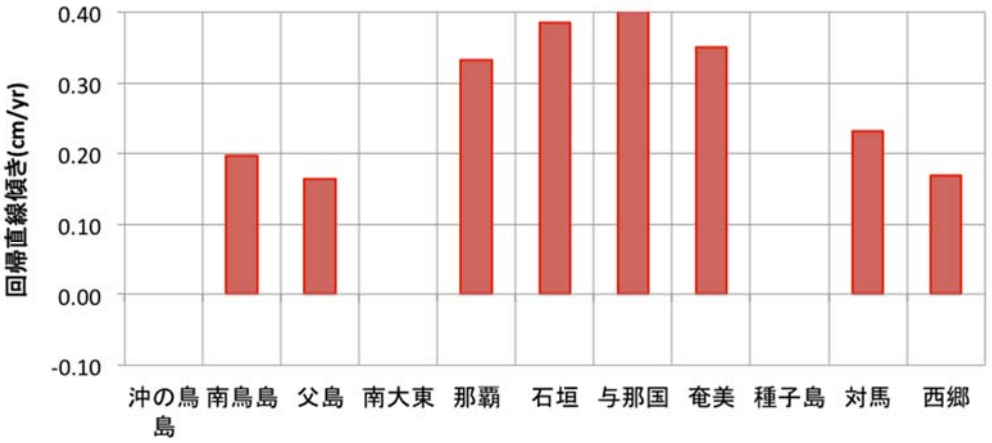


図-Ⅱ.4.1.3.7　衛星海面高度計による離島の年平均海面上昇量

４．１．４　海象観測所データの解析による沿岸波浪の変化

本研究では、日本周辺の海域を、海象を特徴付ける台風・低気圧の移動特性と日本列島の形状を考慮し、6 つの領域に区分した(図-Ⅱ.4.1.4.1)。南北には 2 つに区分することとし、その境界線として関東地方から中国地方を縦断する北緯 35 度線を用いた。東西方向には 3 つに区分し、その境界線として、東北地方と伊豆諸島付近を通過する東経 140 度線と朝鮮半島から沖縄本島を通過する東経 128 度線を用いた。東西方向の 3 列の区分は台風の通過時期や経路の違いを反映でき、南北方向の 2 行の区分は低気圧の経路を反映できる。

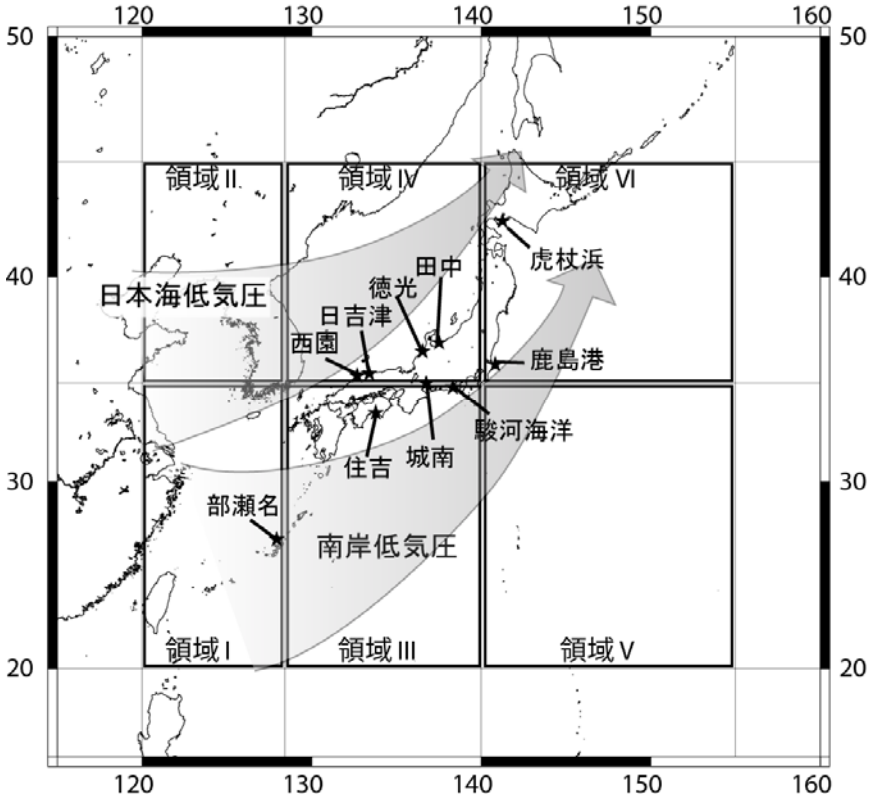


図-Ⅱ.4.1.4.1　気象外力による日本沿岸の区分

海象の統計から海岸に来襲する波浪が増大するかを調べる際に初めに行われるのは、年最大波の変化についてである。例えば、加藤は海象年表の 30 年統計において年最大有義波高の変化の検討を行っている。日本海側の下新川海岸の田中観測所と太平洋側の高知沿岸の住吉観測所の年最大有義波高の経年変化を図-Ⅱ.4.1.4.2 および図-Ⅱ.4.1.4.3 に示した。これらを見る限り明確な変化傾向は生じていない。そこで、有義波高年間上位 10 位の平均値の経年変化も図-Ⅱ.4.1.4.2 および図-Ⅱ.4.1.4.3 に示した。住吉観測所については、1982 年以降、有義波高年間上位 10 位の平均値が上昇傾向を持っているように見える。

次に、波のエネルギーに着目した分析を行った。波浪観測（海象観測の一部）は、毎正時に有義波高、有義波周期として記録される。これらの波高と周期の組合せを頻度として記録したのが波高周期結合頻度表である。この情報は、比較的早い時期から保存されている。また、年間の統計値として整理されて

いるので経年の変化を追うのには最適である。波高周期結合頻度表の波高と周期の対について、それぞれ一波とした時のエネルギーフラックス（ここでは、波高の自乗と周期の積により示した）を算出して頻度を乗じ、総和をその年のエネルギーフラックスとした。この計算において、波高とエネルギーフラックスに関しては、1990 年から 4 年間のエネルギー平均波の波高またはエネルギーフラックスの平均値を、周期に関してはうねり性とされている 8 秒を、計算対象とするデータの下限の閾値とした。

これによる経年変化を示したのが図-Ⅱ.4.1.4.4 である。日本海に面する徳光、西園の両観測所では、近年来襲する波浪エネルギーが増大していることがわかる。また、田中観測所においても若干の増加傾向がうかがえる。一方、日吉津観測所では大きな変化が見られない。これは、徳光、西園の両観測所はともに西に開いた海岸にある一方、田中・日吉津の両観測所はそれぞれ能登半島と島根半島の遮蔽域となっており、このような地形的な特徴により生じた違いと考えられる。領域 III に位置する駿河海洋、城南、住吉の各観測所でも、高波浪の来襲エネルギーが増大している。

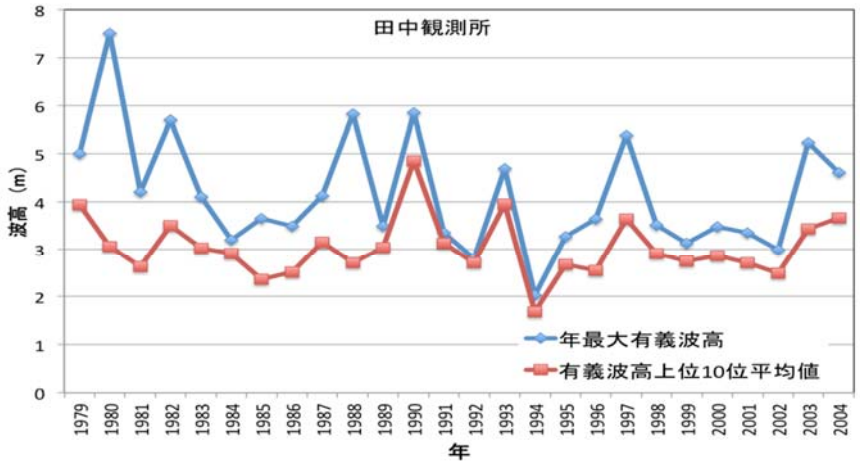


図-Ⅱ.4.1.4.2　田中観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

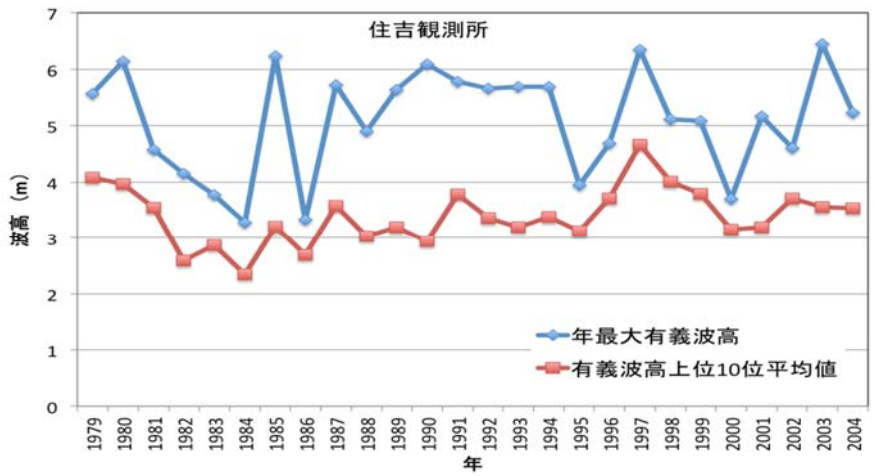


図-Ⅱ.4.1.4.3　住吉観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

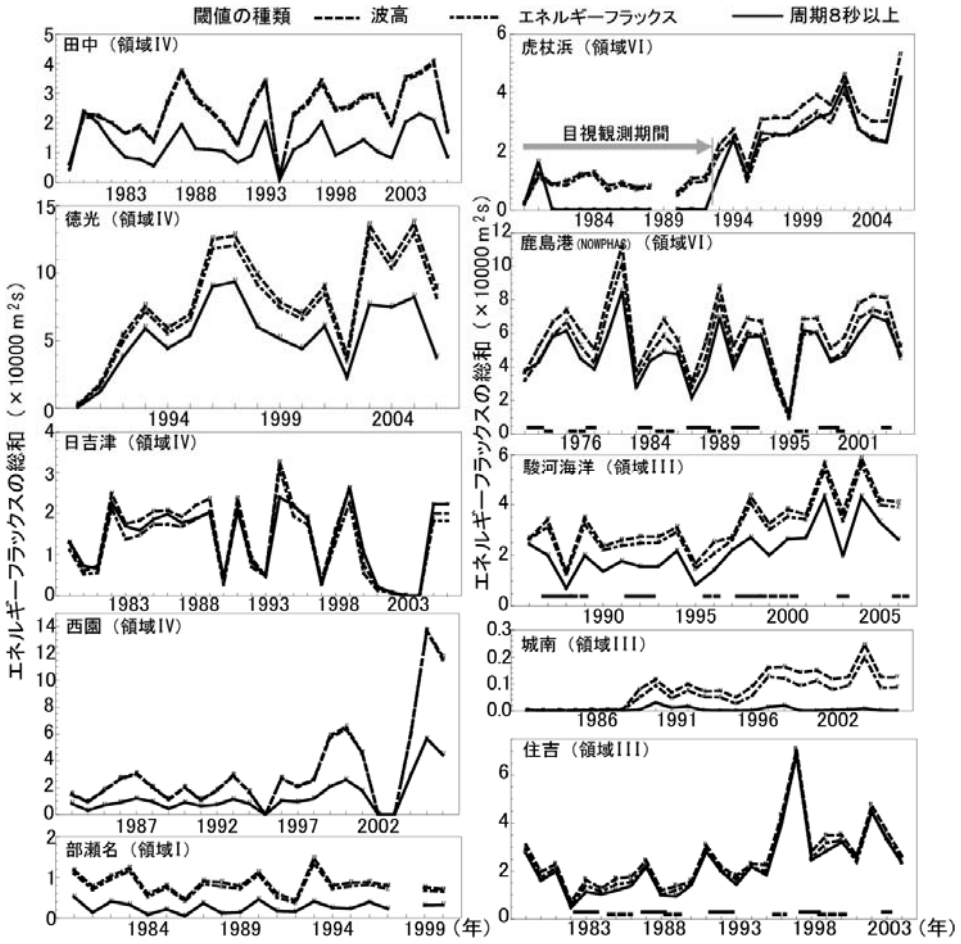


図-Ⅱ.4.1.4.4　閾値設定による波浪エネルギーフラックスの経年変化

次に波浪に影響を与える気象場の変化を見てみる。冬型の気圧配置や停滞する前線等の影響も無視できないが、ここでは天気図から数値化しやすい台風および低気圧を対象として解析した。我が国では1883 年より天気図が作成されているが、すべての天気図に緯度線と経度線が表記されるようになったのは 1915 年からである。そこで、1915 年から 2007 年 1 月までの印刷天気図を収集し、北緯 20 度～北緯 46 度、東経 122 度～東経 153 度の範囲で中心気圧が 990hPa 以下となった台風を含む低気圧を抽出し、中心気圧や位置のデータベースを作成した。なお、1951 年以降の台風についてはベストトラックデータを使用した。中心気圧は 1hPa 単位、中心位置の緯度経度は 1 度単位とした。1958 年 8 月以降は、現在の印刷天気図形式となっているが、低気圧や台風の中心位置や中心気圧が表示されたのは1965 年 11 月からである。それ以前のものについては、閉じた等圧線の中心付近を中心位置とし、中心気圧は閉じた等圧線の一番低い等圧線の値とした。したがって、1965 年以前と以後ではデータ精度が異なることに注意が必要である。また、台風は天気図上や概況文に中心気圧が表記されている場合はその値を採用した。ただし、初期の天気図では、何㎜ Hg 以下と表現されているので、その値を中心気圧とした。作成した低気圧データベースでは、1996 年以降、天気図の時間間隔が 6 時間となっており、それ以前は 12 時間である。

このデータベースから図-Ⅱ.4.1.4.1 で区分した領域毎に台風・低気圧の通過数の経年変化（図-Ⅱ.4.1.4.5 左）とその通過した台風・低気圧が領域内に滞在した時間の年間総計を示した（図-Ⅱ.4.1.4.5 中）。また、各領域を通過する台風・低気圧のその領域内での最低気圧について、年毎に平均値を算出

した（図-Ⅱ.4.1.4.5 右）。変化も少なく日本への影響が無い領域 II は省略した。

図-Ⅱ.4.1.4.5（左）の領域 III を詳しく見ると、海象観測期間である 1979 年以降で台風数（左）は増加傾向にあり、通過台風の最低気圧の年平均値（右端）も大きな低下傾向にあり（1915 年に比べ平均値で約 40hPa 低下）、年々台風の勢力が強くなっていることを示している。これが前述の住吉、駿河両観測所での高波浪の来襲エネルギー増大として現れている可能性がある。一方、図-Ⅱ.4.1.4.4 における徳光観測所や田中観測所の増加傾向の原因を図-Ⅱ.4.1.4.5 の領域 IV の傾向から見出すことはできない。これは、領域 IV の波浪の成因が低気圧ではなく冬季季節風による風浪によるものだからと言えそうである。また、波浪の原因となる強い風を発生させる停滞・発達する低気圧は、関東地方東方から北海道南東方の領域 VI で個数・滞在時間ともに、1915 年～2006 年の期間で増加傾向を示している。

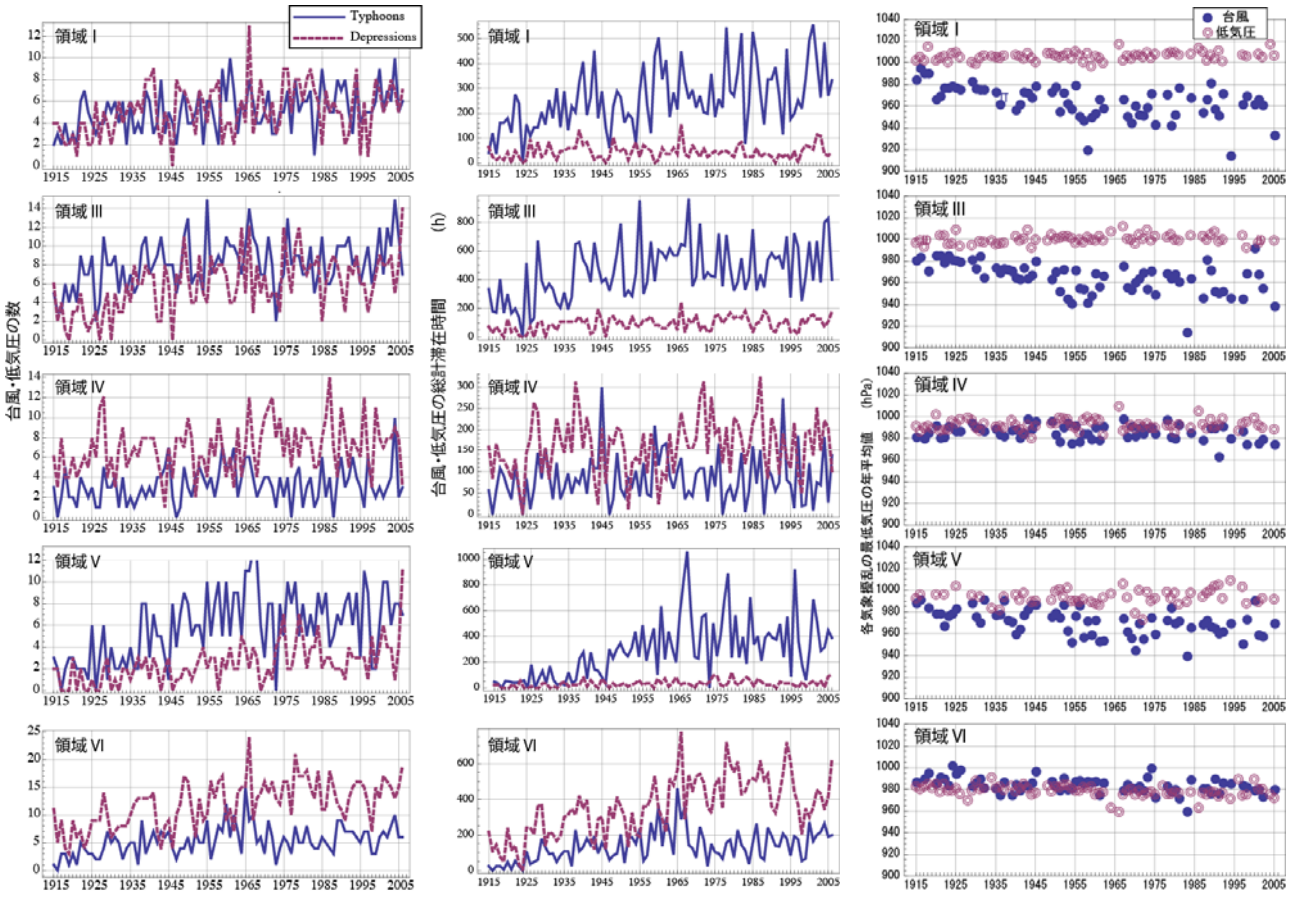


図-Ⅱ.4.1.4.5　台風・低気圧の各領域での通過数（左）、滞在時間（中）、通過期間の最低気圧の年平均値（右）

４．１．５　まとめ

海面の上昇については、全国規模の平均的な海面上昇量を設定した後に、地先海岸毎に値を調整するという方式を念頭に置いて、既往の海面水位変化に関するデータを分析した。複数の手法による結果を総合すると、科学的な各国合意として存在する気候変動に関する政府間パネル第 4 次報告書(以下、IPCC AR4)において既上昇量として示されている 1993～2003 年間の全球平均 3.1mm/年という上昇速度は、本分析で得られた 1980 年代以降の日本列島の平均的な海面水位の変化傾向と整合的である。

波浪の変化については、一部の海岸で年間の来襲波浪エネルギーが増加する傾向を示している。

４．２　高潮外力の変化予測

４．２．１　はじめに

将来予測については、IPCC により温室効果ガスシナリオが想定され、これに基づき大気海洋結合モデルにより気温と海面の水温の変化が得られる。これを境界条件として、全球の気候予測モデルが降雨、台風、風を計算する。海岸への外力を求めるには、この結果からさらに計算を行う必要がある。しかし、たとえば気象研究所の MRI-GCM は 35 年間の積分期間しかないなど、一般に気候予測モデルの計算期間は、防災で通常議論する再現期間に比べはるかに小さいことが一般的であった。これを背景として、台風の位置毎に中心気圧、移動方向、移動速度等のパラメータを確率分布で与えモンテカルロ法を援用する確率台風モデルについて橋本ら (2005)や河合ら(2009)により研究がなされてきた。これらは、高潮の特定の極値統計値に着目したものがほとんどで、高潮生起の確率密度分布全体の変化傾向に関する知見は十分でなかった。本研究では、この確率密度分布の変化にまで踏み込んで分析を行った。

本研究を行うにあたり、安田ら(2009 または 2010)により確率台風モデルで作成された現在・将来各 10、000 年分の台風の提供を受けた(以下、確率台風)。安田ら(2009)は、気象研究所が行った超高解像度全球大気循環モデル(GCM20)で得られた現在気候と将来気候の予測計算結果から、台風の将来変化の特徴を確率密度関数として抽出した。これらの特徴を、既往台風から確率台風モデルにより発生させた 10,000 年分の台風に適用させ将来気候における 10,000 年分の台風を作成した。

本研究では、三大湾（東京、伊勢、大阪）に来襲する台風について高潮偏差を推算した。高潮計算の対象とした各湾に来襲した台風の個数を表-Ⅱ.4.2.1.1 に示す。表中の緯度経度の範囲を中心気圧深度が 10hPa 以上で通過した台風が対象である。高潮偏差の値は、来襲した各台風がもたらした図-Ⅱ.4.2.1.1 中の各地点での台風毎の最大値を採用している。

表-Ⅱ.4.2.1.1　各湾への来襲台風数の比較(高潮計算対象)

気候分類		既往台風	現在気候確率台風	将来気候確率台風
対象期間（再現年数）		1951~2009年（59年間）	仮想1979~2003年（10000年拡張）	仮想2075~2999年（10000年拡張）
対象範囲と計算台風数	大阪湾 E133°30'-136°30' N 33°10'- 35°00'	52	12343	9103
	伊勢湾 E134°50'-137°50' N 33°20'- 35°30'	58	13686	8997
	東京湾 E138°10'-141°00' N 34°30'- 35°00'	49	9230	7009

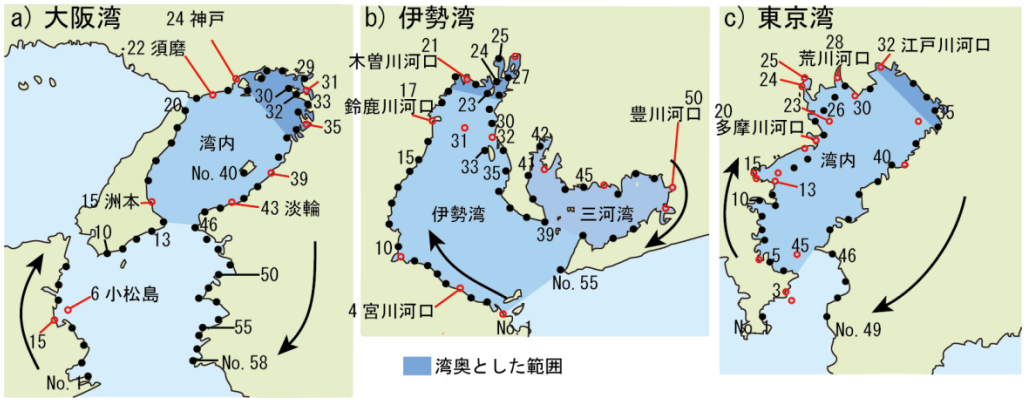


図-Ⅱ.4.2.1.1　解析に用いた沿岸の測定点

４．２．２　得られた高潮偏差データセットの妥当性の検討

本研究スキームで用いている気象研究所の気候予測モデルは、気象予報の現業に用いられている実績に裏打ちされた信頼性が相対的に高い物理モデルである。しかし、確率台風モデルは研究・調査では実績が増しているものの、事業等の計画に用いられるまでに至っていない。そのため、確率台風モデルで得られた高潮偏差が妥当であるかを判定する必要がある。確率台風モデルは、図-Ⅱ.4.2.2.1 に示すように、現状の台風情報から大量の台風を確率分布により仮想し、高潮を推算するものである。しかし、確率台風モデルで得た高潮現象のサンプル数が十分に多いとしても、既往台風による高潮現象を含んでいるとは限らず、得られた結果が既往高潮の拡張となっているか確認が必要である。

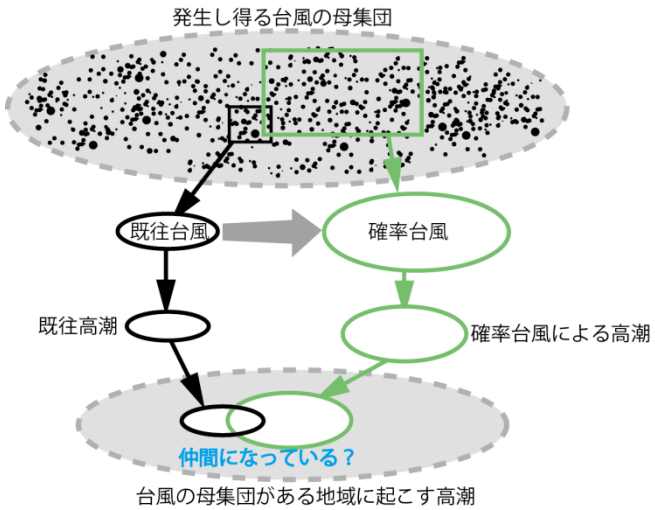


図-Ⅱ.4.2.2.1　確率台風モデルによる高潮推算結果の妥当性検討の説明

そこで、既往台風で得られた高潮と確率台風（現在気候）で得られた高潮の同一性を調べることとした。統計における検定手法の多くは、有意差を示すために同一性を帰無仮説として棄却基準と比較するｐ値を算定するものである。ここでは確認したいことは同一性であり、厳密には逆の有意差を帰無仮説とする必要がある。そこで、既往台風で得られた高潮偏差と現在気候確率台風の高潮偏差が同じ母集団である可能性が棄却されなければ十分とした。言い換えると、得られた高潮偏差の結果が現実離れしていないことを示すこととした。

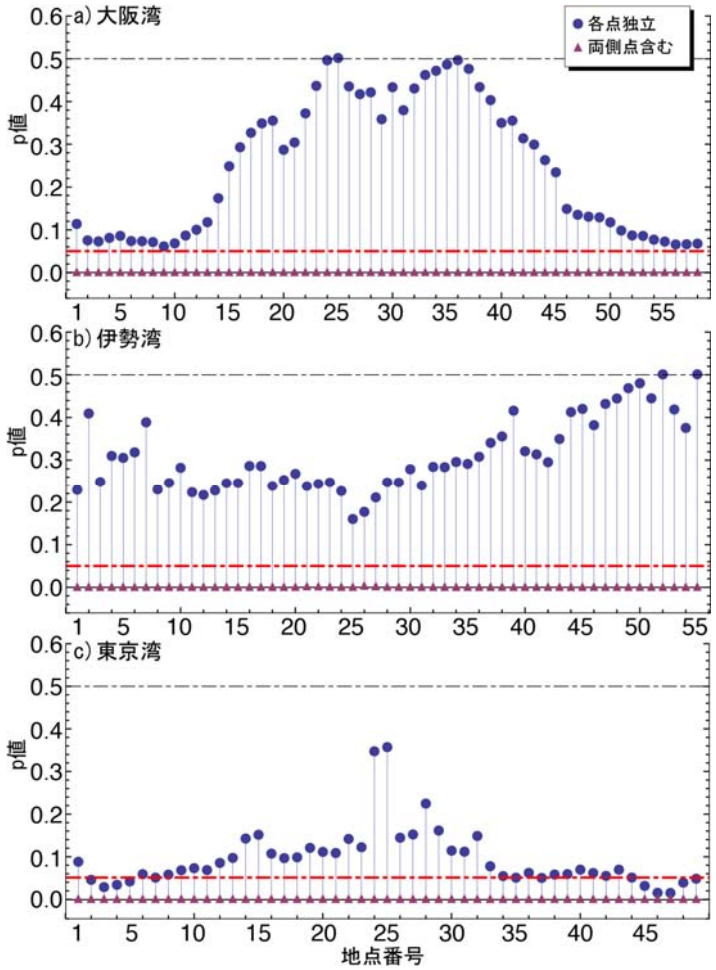


図-Ⅱ.4.2.2.2　各地点の Brunner-Munzel 検定で得られた p 値

既往台風高潮偏差と現在確率台風確率偏差の間の同一性を、Brunner-Munzel 検定（Brunner et al.、2000）により検定した。計算は、統計用言語の R とそのパッケージを用いた。帰無仮説を「統計的に優位」とする一般的な閾値（p=0.05）（奥村 2008）で評価すると、図-Ⅱ.4.2.2.2 に示すようにほとんどの地点で 0.05 を上回る結果となった。すなわち、検定は帰無仮説に対して行われ、p 値が大きいことから、「有意差は認められず同一性が否定できない」となる。同一性の主張を補強するために、既往台風高潮偏差のデータセットのみ各地点の隣接両側データをその地点のデータとして追加した集団と現在気候確率台風（以下、現在台風）の高潮偏差を比較検定した。その結果が、図-Ⅱ.4.2.2.2 の凡例「両側点を含む」のプロットで表示されている。全ての点において p 値がほぼ 0 であり帰無仮説が棄却でき、両者に有意差があることが示される。高潮偏差の沿岸分布は隣接点との著しい差が生じないと考えられるが、既往台風高潮偏差だけに隣接地点のデータを追加しただけで p 値が著しく低下したことは、既往台風高潮偏差と現在確率台風確率偏差との間の同一性に関する上記の確認結果が有効であることを補強する材料と言える。

４．２．３　高潮偏差の階級別頻度の変化

一般に計画・設計上の視点から、既往最大値や超過確率年が 30 年規模等の、特定の低頻度統計量に対応した偏差が着目される。ここでは、それだけでなく、様々な偏差の発生頻度が気候変動影響によりどのように変化しうるかの全体的傾向を把握することをねらう。

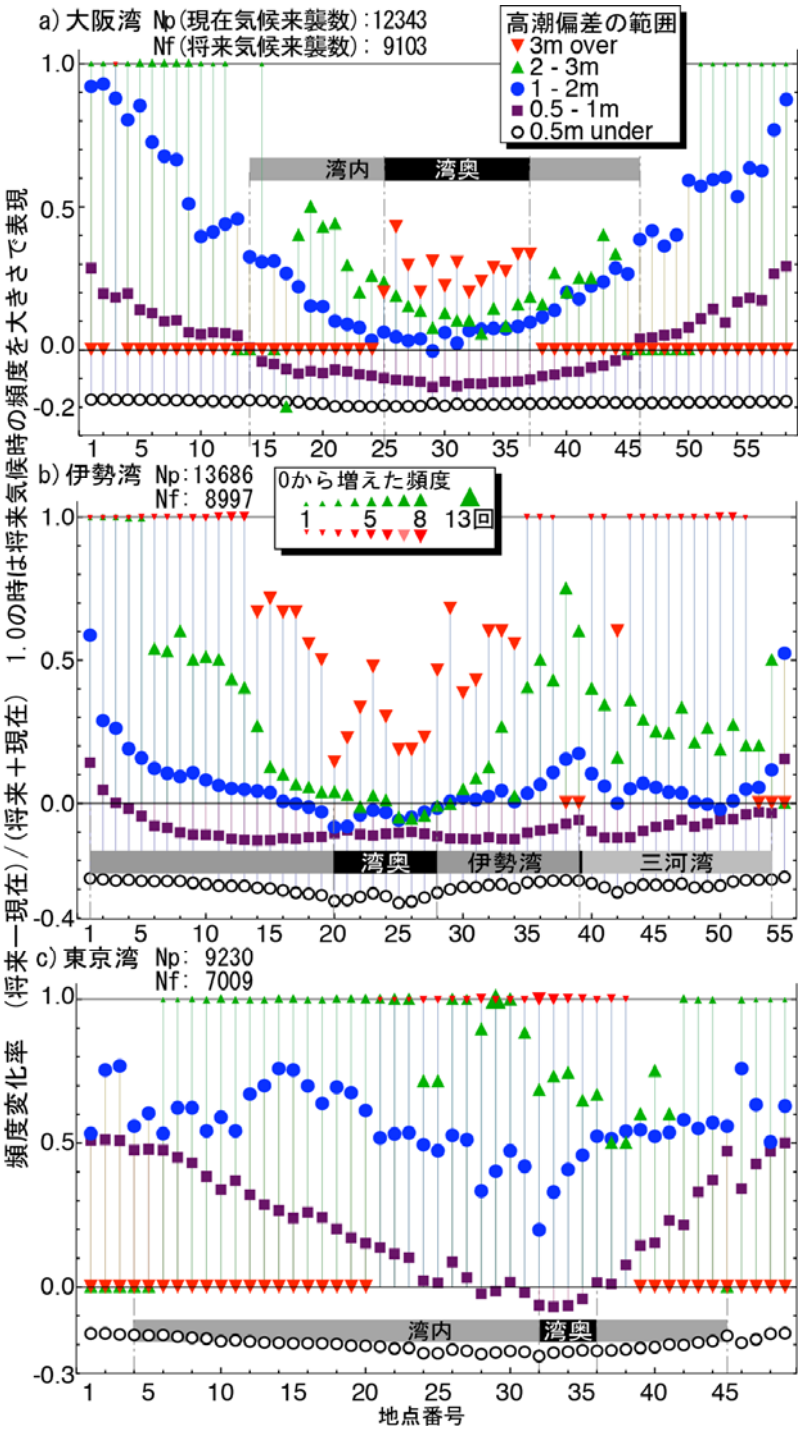


図-Ⅱ.4.2.3.1　高潮偏差範囲毎のイベント個数の変化率

高潮偏差を区分し、それら区分内の頻度の変化を図-Ⅱ.4.2.3.1 に示す。この図においては、現在気候から将来気候への頻度の変化を、「頻度の変化量」を「現在気候と将来気候の頻度の和」で除したもので表現している。このようにしたのは、同じ「頻度の変化量」であっても、もともと頻度が低い地点の方が、もともと頻度が高い地点より分母が小さくなるので「頻度の変化量」は大きくなり、現状からの変化度合いをよく表現できるからである。これにより、現在気候では発生せず、将来気候では発生した場合は 1 と表現され、逆に現在気候で存在したが将来で発生しない場合には-1 と表現されることになる。将来気候の頻度が現在気候の 2 倍は 0.33 と、3 倍は 0.5 と表現される。1 になったものについてはマークの大きさにより頻度を示した。

高潮偏差が 0.5m までの低い区分では 3 つの湾とも負の値となっており減少している。東京湾では現在気候で出現しない 2m 以上の偏差が将来気候では沿岸のほぼ全体で生じている。このように、現在気候では高潮偏差が大きくない湾口部や来襲頻度が低い東京湾で、将来において中程度以上の高潮偏差の頻度が上がる可能性を示している。一方、大阪湾および伊勢湾の湾奥部では現在気候でも 3m を越える偏差が発生しており、将来気候では頻度が増す結果となっている。

各湾における変化特性を代表する地点を選んで確率密度分布を示した（図-Ⅱ.4.2.3.2）。そこで、現在気候と将来気候の高潮偏差の確率密度の分布を重ね合わせ、両者の違いを把握した。偏差のヒストグラムの階級は、各気候と各地点を同様に比較する必要ため、0.05m 刻みに固定した。この図では最頻度付近を含み 1m 前後を中心に示している。大阪湾については、最頻度階級が最も低下した No.36 を選んだ。この地点は、大阪湾の湾奥に位置しており 1m 以上 3m 未満の高潮偏差の頻度はあまり増加していない。伊勢湾については、大阪湾とは逆に最頻度階級が最も増加した No.30 を選んだ。東京湾については、高潮偏差 1m から 2m の頻度の増加が最も大きかった No.33 を選んだ。また、3 つの湾を通じて確率密度の変化が最も大きくなった東京湾 No.2 を示した。伊勢湾の No.30 も東京湾の No.33 も同様な変化となっており、高潮偏差が高い側へ潰れた形状と表現できる。東京湾の No.2 は元々1m を上回る頻度が少なかったために大きな変化率となったことが分かる。

気候の変化により将来に台風が巨大化するために、高潮リスクが高まると言われることが多い。これは低頻度の事象で、確率密度関数の裾野の部分の議論である。それに対して、ここでは頻度が比較的高い事象の変化を重点的に示した。その結果、将来気候では、確率密度の頂点は下がり、全体に高潮偏差が高い方へ薄くシフトすることが分かる。

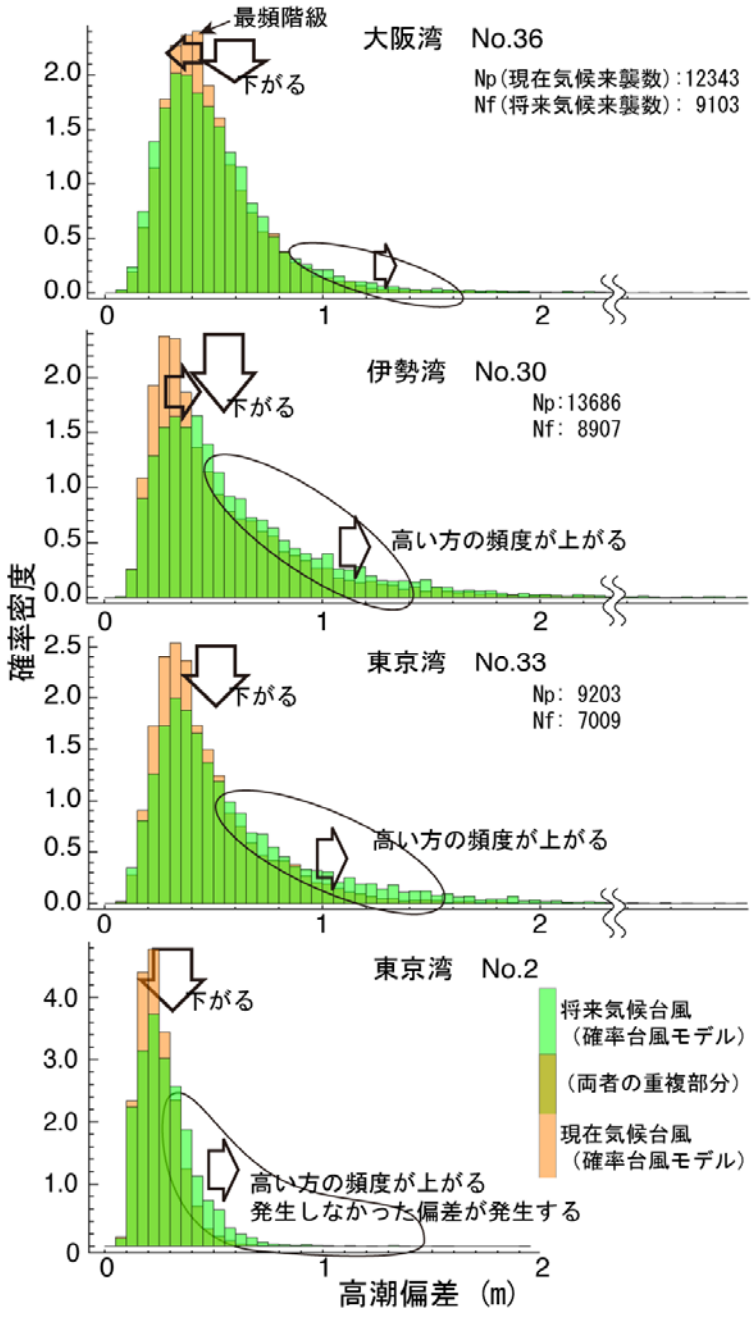


図-Ⅱ.4.2.3.2　各湾の代表的な変化特性

４．２．４　極値解析を用いた高潮偏差の変化

高潮偏差の値の変化について調べるため極値解析により偏差を求めてそれを代表値として変化を見た。極値解析は実務的に行われている手法により超過確率年を 5 年、10 年、30 年、50 年、100 年とした高潮偏差を求め将来気候時の現在気候に対する変化率として示した(図-Ⅱ.4.2.4.1)。適合分布の採択は、合田（2008）を参考にした。適合分布形は、Weibull 分布か極値 II 型となった。

ちなみに超過確率年 30 年の変化率が 1.6 を越えている地点の将来気候の超過確率年 30 年の偏差の値は、大阪湾 No.45 が 1.5m、東京湾 No.33 が 1.8m、No.34 が 1.6m であった。

図-Ⅱ.4.2.4.1 で偏差の変化率が高くなっている地域（大阪湾外岸、伊勢湾西岸）では、図-Ⅱ.4.2.3.1 の高潮偏差の高いランクについての頻度の変化率も周辺に比べ高くなっている。あるいは、そのランクの偏差が将来新たに生じている（変化率が 1.0）。また、東京湾の湾奥部では、頻度も偏差も増加する。

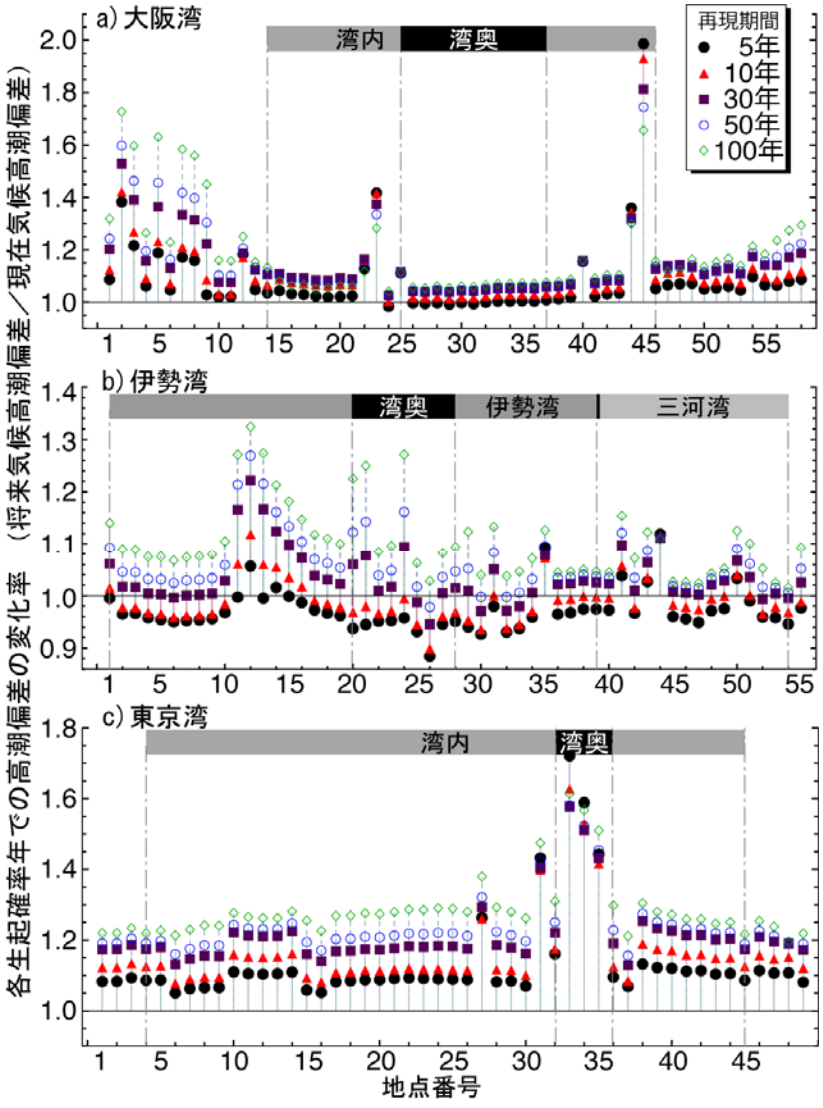


図-Ⅱ.4.2.4.1　再現期間別による高潮偏差変化率の特性

４．２．５　まとめ

三大湾（東京、伊勢、大阪）に来襲する台風について確率台風モデルの出力結果を用いて高潮偏差を推算し、現在気候と将来気候について比較を行った。その結果、従来は高潮偏差が小さかった湾口部付近で、その現在気候から将来気候に向けての増加率が他に比べ大きくなる可能性が示された。また、全体的に、最頻を中心とした低い偏差では頻度が低下し、元々低頻度である偏差が大きい側では頻度が増すという変化が、高潮偏差の確率密度分布形に起こる可能性が示された。この推算結果に対応して、超過確率年が 30 年～100 年という低頻度の高潮偏差が全体的に増加する可能性が示され、その増加率に関する見積もり結果を得た。一連の検討に用いた手法は発展途上であり、得られた数字をそのまま防災・減災のための施策に用いる段階ではない。他方、本検討の成果は、今後のさらなる検討の方向性の議論や論点整理に役立つと考えられる。

参考文献：

岩崎伸一・松浦知徳・渡部 勲(2002):地殻変動を除去した 長期海水変動と海面水温の関係 -本州沿岸域-,海の研 究,Vol.11(5),pp. 529-542.

奥村晴彦（2008）Brunner-Munzel 検定、
http://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/stat/brunner-munzel.php、参照 2011-04-29.

河合弘泰、橋本典明、山城賢、安田誠宏（2009）確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1256-1260.

建設省河川局監修（1997）改定新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説－設計編Ⅰ－、山海堂、pp.152

合田良實（2008）耐波工学―港湾・海岸構造物の耐波設計、鹿島出版会、430p.

国土交通省河川局（2008）水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について、
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf、参照 2011-04-29.

国土交通省国土技術政策総合研究所（2008）気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20による評価を中心に－、国土技術政策総合研究所資料、No.462

国土交通省（2010）洪水に関する気候変化の適応策検討ガイドライン
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/english/pdf/guigelines_jpn.pdf

国土交通省水管理・国土保全局水資源部（2012）気候変動による水資源への影響検討会、第1回、資料2（http://www.mlit.go.jp/common/000217691.pdf）

国土地理院(2003):「2000 年度平均成果」について -全国 の水準点の高さ(標高)を改定して 1 年-,http://vldb.gsi. go.jp/sokuchi/level/2000level.html,参照日 2009-06-03.
もしくは、「2000 年度平均成果」と「測地成果 2011」,
http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/suijun-2000seika.html,参照日 2016-6-16.

住 明正（2005）高分解能大気海洋モデルを用いた地球温暖化予測に関する研究、2004 年度共生報告会原稿、http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/kyousei/houkoku/h16/RR_K011.pdf

社会資本整備審議会河川分科会（2008）水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf、

橋本典明、河合弘泰、松浦邦明（2005）地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデル

への導入、海工論文集、第 52 巻、pp.1221-1225.
藤田光一、服部敦、菊森佳幹、野口賢二、土屋修一（2011）気候変動に伴う河川管理等への影響評価、21世紀気候変動予測革新プログラム 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究（課題代表者：鬼頭昭雄）、平成22年度研究成果報告書、pp.76-88.*
松山洋、谷本陽一(2005)UNIX/Windows/Macintoshを使った　実践!気候データ解析、古今書院
文部科学省研究開発局（2012）21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究、平成23年度研究報告書
安田誠宏、安藤圭、森信人、間瀬肇（2009）地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.65、No.1、pp.1281-1285.
安田誠宏、林祐太、森信人、間瀬肇（2010）地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.66、No.1、pp.1241-1245.
Brunner、 E. and Munzel、 U. （2000） The Nonparametric Behrens-Fisher Problem: Asymptotic Theory and a Small-Sample Approximation. Biometrical Journal、 Vol.42、pp.17-25.
IPCC AR4 (2007) IPCC fourth assessment report (AR4)、http://www.ipcc.ch/.

発表論文：

野口賢二、福濱方哉、竹内一浩、山本享(2008)天気図から抽出した擾乱データセットを用いた近年の海岸災害と気象の関係、海岸工学論文集、第 55 巻、pp.1336-1340.*
野口賢二、諏訪義雄、五味久昭、松藤絵理子(2010)気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.66、No.1、pp.1256-1260.*
野口賢二、諏訪義雄(2011)気候予測モデルの結果を用いて算出した三大湾の将来高潮偏差の変化特性、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、第 67 巻、pp.1186-1190.*

５．水資源計画・管理の視点から見た気候変動影響

５．１　はじめに

気候変動に伴い現在と比較して将来渇水が発生・深刻になる可能性についてはいくつか報告されている。例えば、降水量の変化特性について研究した事例としては和田らの研究が挙げられる（和田ら 2005)。和田らは空間解像度 20 km である RCM20(地球温暖化予測情報　第 6 版)(表-Ⅱ.1.2.1 を参照）の出力を用いて、年降水量および季節降水量の変化傾向を調査し、年降水量は将来増加するが、季節降水量については冬期から春期の降水量が減少する可能性を示した。また、積雪地域において融雪出水による河川流量が低減する可能性を示唆した。自然流量の将来変化予測を行った研究事例としては、例えば立川らの研究が挙げられ（立川ら 2011)、空間分解能 1 km の日本全国分布型流出モデルを作成し、空間解像度 20 km の MRI-AGCM3.1S による予測シミュレーションを実施している。月流量の変化に着目して変化傾向を分析した結果、豪雪地帯である東北地方中・南部や北信越地方で気温上昇により積雪・融雪が影響を受け、月流量の変化が大きくなる可能性を示した。また、特定の流域を対象とした流況予測シミュレーションも行われており（立川ら 2009 および Sato et.al. 2013)、特に寒冷地において温暖化に伴って積雪・融雪量の減少・季節的な流況が平滑化されることを特徴として挙げている。水資源施設を考慮した渇水に関する研究として、川村らは MRI-RCM20 を用いて豊平川流域を対象とした流出・利水計算を実施して豊平峡ダムおよび定山渓ダムへの影響について検討した。その結果、豊平峡ダムでは融雪出水の早期化に伴って 6 月中旬から 8 月中旬まで利水放流が行えない日が出現する可能性が示されている。また、適応策として豊平峡ダムで利水補給が実施できない場合における定山渓ダムからの放流可能性について言及している（川村ら 2011)。

上述の研究は主に一つの予測結果出力を用いて検討が実施されているが、近年は計算条件が異なる複数の予測結果を用いて予測の不確実性を評価することが重要であるとされている。上述の研究が実施されていた当時、予測の不確実性を評価するための複数の予測データとしては CMIP3 (Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project)の予測データが利用可能であった。道広らは、日本を対象として CMIP3 で利用可能な 24 モデルを対象として降水量だけでなくその他の気象要素も含めて精度評価を行い、観測値の再現性が高い 10 モデルを採用して予測の不確実性について検討を行っている（道広ら 2011)。その検討では CMIP3 モデルのメッシュ解像度が 100-450km 程度と大変粗いための日本の陸地にかかる全メッシュ平均値について検討を行っており、現時点でのモデル解像度では日本の気候について地域特性を論じることは実質困難であるとしており、特定の流域等を対象として予測の不確実性を評価する事は実質難しかった。

そのような中、Ⅱ部の第 1 章 5 で述べられている通り気象庁・環境省が RCP シナリオに基づく日本を対象とした気候変動予測のシミュレーション結果を公表した（以下、気象庁・環境省データ）（気象庁、環境省 2014)。このシミュレーションは、空間解像度 20km の出力結果が得られるため、日本国内における不確実性を考慮した地域別の気候変動影響評価・適応策の検討に用いられることが期待されている。ここでは、積雪・融雪が発生しないダムを有する流域と積雪・融雪が発生するダムを有する流域を対象として、気象庁・環境省データを用いてダムに着目した気候変動による渇水への影響について検討を行う。

５．２　対象ダム・流域と検討手順

ここでは、下記の 2 ダムが位置する 2 流域を対象とした検討を実施する。

1.　A ダム（B 川水系）

オールサーチャージ形式のダムで、ダム流域面積は約 90 km² である。利水容量は約 1,000 万 m³ であり、利水基準地点は C 地点（上流流域面積：約 530 km²）である。流域は日本海側に位置するが、大規模な積雪・融雪は発生しない。土地利用の多くは森林であり 91 %を占め、次いで水田・畑地等の農用地が 7 %を占めている。C 地点の流量は支川の D 川に位置する A ダムから主に補給される（図-Ⅱ.5.2.1）。

2.　E ダム（F 川水系）

制限水位方式のダムで、ダム流域面積は約 230 km² である。利水容量は約 6,000 万 m³ であり、利水基準地点は G 地点（上流流域面積：約 6,300 km²）である。E ダムは F 川の支川である H 川に位置している。F 川流域は日本海側に位置し、冬に積雪、春に融雪が発生する流域である。土地利用の多くが森林であり 72 %を占める。森林に続いて水田を主として農用地が 14 %を占めている。また、E ダム以外にも F 川流域内には複数のダムが存在するが、それらのダムは F 川と H 川の合流点の上流に位置する I 地点までを利水補給の対象としており、G 地点の流量は主に E ダムから補給される。

上記の 2 ダムを含む 2 流域を対象として下記の手順で検討を実施する。

① 対象流域・ダムに関する流出モデル・利水モデルの構築・検証
② 気象庁・環境省データを用いた将来の降水量の変化傾向（年降水量、月降水量および連続小雨日数）の評価
③ ①で構築した流出・利水モデルに気象庁・環境省データを入力した計算・評価

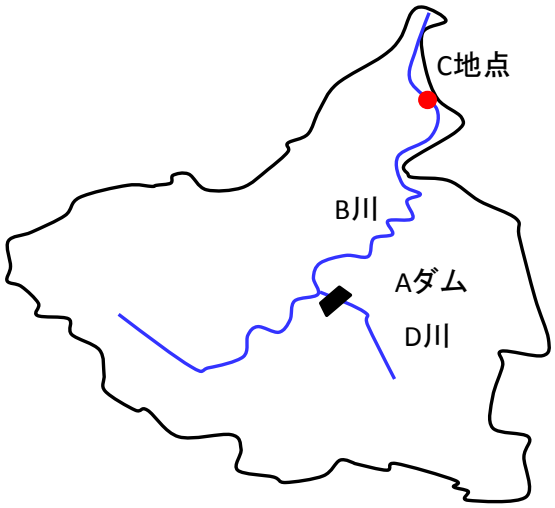


図-Ⅱ.5.2.1　A ダム（B 川流域）模式図

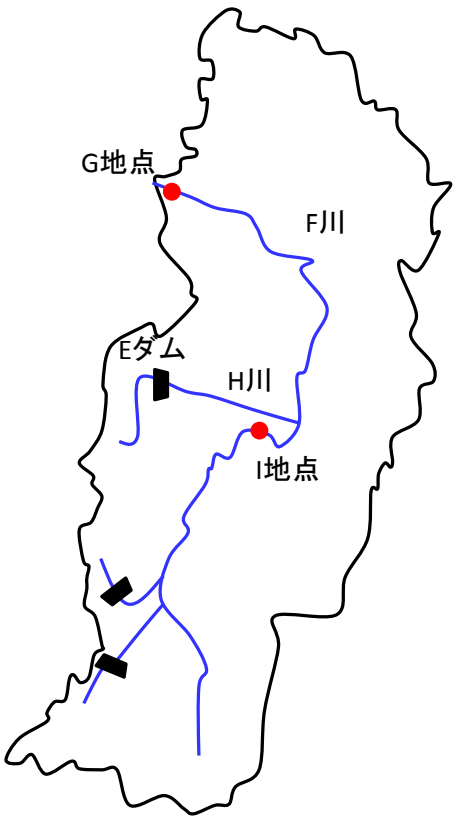


図-Ⅱ.5.2.2　E ダム（F 川流域）模式図

５．３　流出計算モデルおよび利水計算モデルの構築・検証

５．３．１　流出計算で使用するモデル

両対象河川流域について、流出計算は WEP モデルを利用した。WEP モデルは、分布物理型の流出モデルであり下記の特徴を有している（図-Ⅱ.5.3.1.1、図-Ⅱ.5.3.1.2）

- 自然流域だけでなく、複雑な土地利用・水利用のある都市河川流域にも適用できる。
- 例えば畑地と水田がメッシュ内に混在するような場合でも、蒸発散等の計算において不均質性を考慮できる。
- 土壌－植物－大気間での相互作用をモデル化しており、地表面過程を詳細に解析できる。また気象モデルとの連携もとりやすい。
- 不飽和土壌水の流れに対して、Richards 方程式と同程度の精度を有し、計算時間の短い一般化 Green-Ampt モデルを作成し使用している。
- 飽和地下水流れに対して、鉛直方向の水の移動を考慮した平面多層モデルを用い、計算速度の向上を図っている。
- 水循環のみならず鉛直一次元の熱輸送も同時に解析できる。

今回、積雪・融雪が発生する F 川流域を対象とした計算の実施にあたって、積雪・融雪計算機能を WEP モデルに追加した。

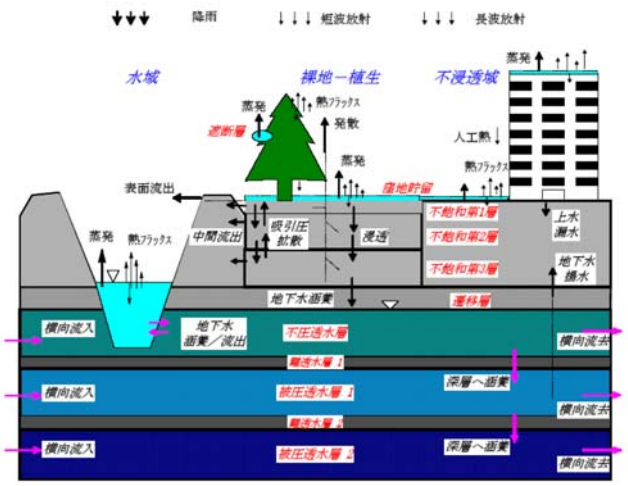


図-Ⅱ.5.3.1.1　WEP モデルの鉛直構造

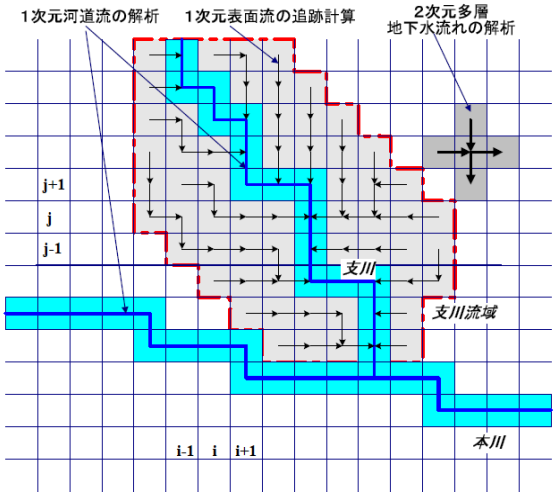


図-Ⅱ.5.3.1.2　WEP モデルの平面図（落水線）

５．３．２　Ａダム流域

（１）流出計算

WEP モデルの検証として、降水量データ（16 地点）および気象データ（アメダス観測地点 3 地点の気温、風速、相対湿度等のデータ）を入力とした計算を行い、A ダムの流入量で検証を行った。検証期間は 1985 年～2004 年の 20 年間である。図-Ⅱ.5.3.2.1 に示す月平均流入量で見ると A ダムの流入量について年間の変動は概ね再現されているが、図-Ⅱ.5.3.2.2 に示した一部期間を拡大した結果を見ると A ダムの流入量は基底流量がやや過大評価となっている。

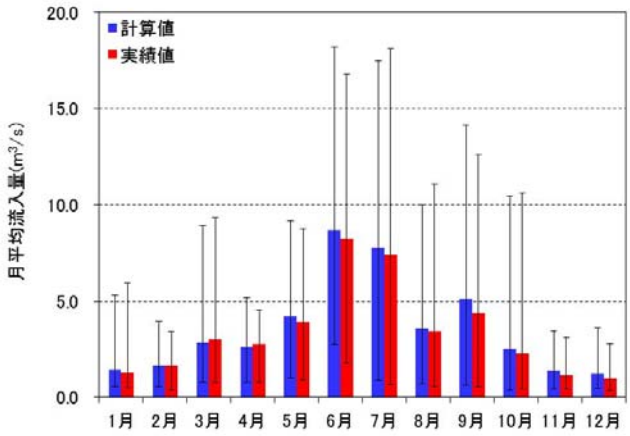


図-Ⅱ.5.3.2.1　A ダムの流入量再現計算結果
（20 年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。）

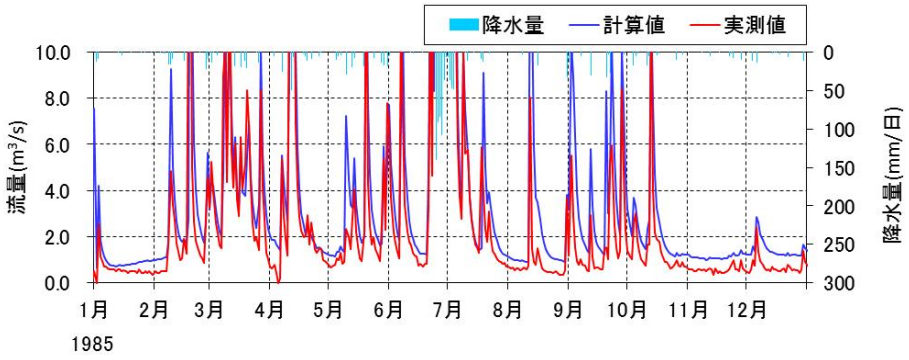


図-Ⅱ.5.3.2.2　A ダム流入量の再現計算結果（1985 年 1 月～12 月部分を拡大）

（２）利水計算

利水計算モデルでは A ダムの操作規則に則って作成した。A ダムは C 地点において正常流量が満足されるように補給を行っている。取水量は実績の取水量（発電用水：1 件、水道用水：1 件、かんがい用水：14 件）を与え、農業用水の還元率は 0.3 とした。A ダムの流入量および残流域からの流出量は前節で述べた WEP モデルの計算値を使用し、計算対象期間 1985-2004 の 20 年間を対象とした利水計算を実施した。図-Ⅱ.5.3.2.3 には試験湛水や工事等の規則操作以外に人為的な操作が行われた期間を除いた 1997 年～2004 年の結果を示す。図-Ⅱ.5.3.2.3 に示す通り、計算された貯水位は概ね実績値を再現していることが分かる。実績では夏期に貯水位が下がる傾向があり、この傾向は計算値でも再現されているが、実績において夏期に貯水位が比較的大きく低下した 1998 年や 2002 年については実績と比較して計算値の貯水位低下は小さい結果となった。

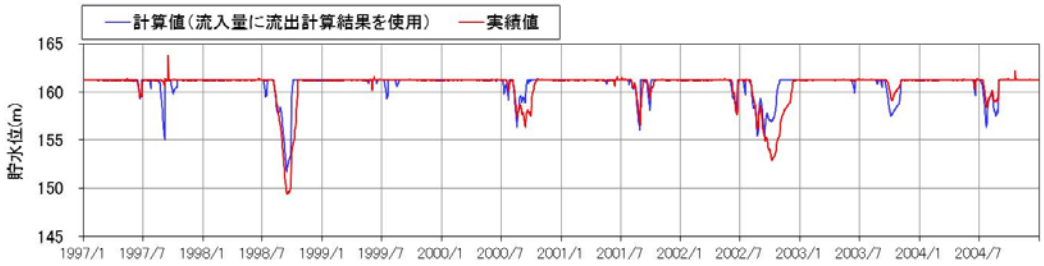


図-Ⅱ.5.3.2.3　利水計算モデルによる貯水位の再現計算結果

５．３．３　Ｅダムに関する検証

（１）流出計算の検証

WEP モデルの検証として、降水量データ（観測地点数：16 地点）および気象データ（アメダス観測地点 3 地点の気温、風速、相対湿度等のデータ）を入力した計算を行い、E ダムの流入量で検証した。また G 地点の自然流量データ（ダムの操作や取水の影響がなかった場合の流量）を入手したため、このデータでの検証も行った。検証期間は 1990 年～2004 年の 15 年間である。

図-Ⅱ.5.3.3.1 および図-Ⅱ.5.3.3.2 に示す 15 年間の月平均流量（流入量）でみると、E ダムの流入量、G 地点の自然流量ともに年間の変動を表現しており一定の再現精度が得られているように見える。しかし、図-Ⅱ.5.3.3.3 および図-Ⅱ.5.3.3.4 に示した一部期間を拡大した結果を見ると、E ダムの流入量、G 地点自然流量共に年間の大まかな流況変動は再現できているものの絶対量で見ると誤差が大きい期間も存在していることが分かる。特に、積雪期（1 月、2 月）において、実績では E ダムの流入量が減少し続けるのに対し計算では一定の流量が出続ける計算結果となっており、積雪量の計算に誤差が存在することが示唆される。

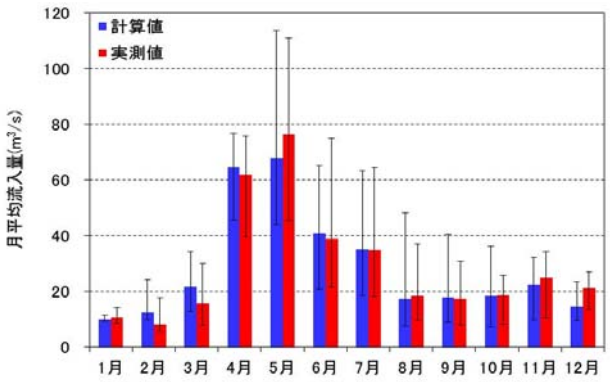


図-Ⅱ.5.3.3.1　E ダム流入量の再現計算結果
（15 年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。）

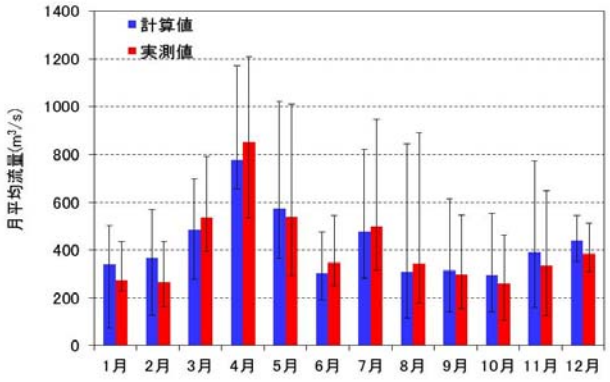


図-Ⅱ.5.3.3.2　G地点の自然流量再現計算結果
（15 年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。）

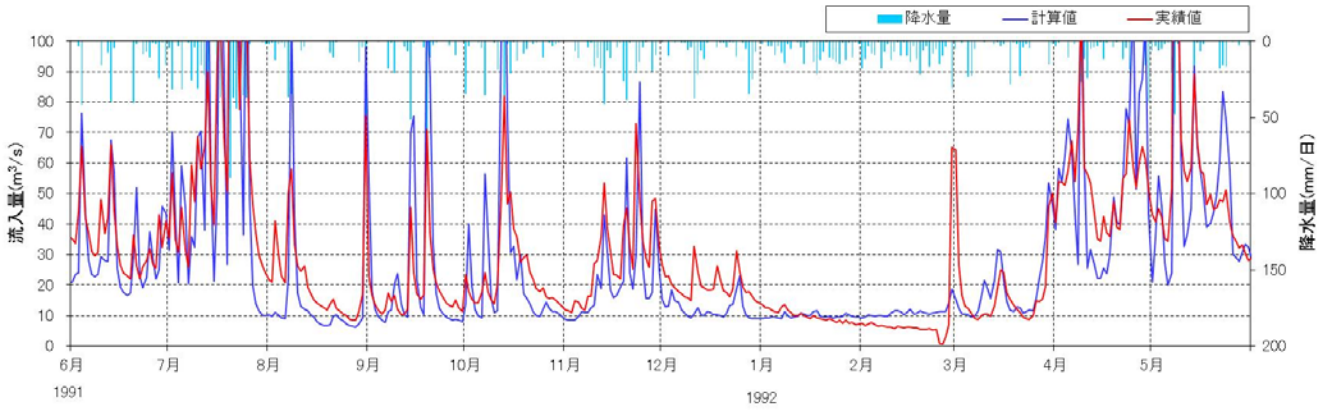


図-Ⅱ.5.3.3.3　E ダム流入量の再現計算結果（1991 年 6 月～1992 年 5 月部分を拡大）

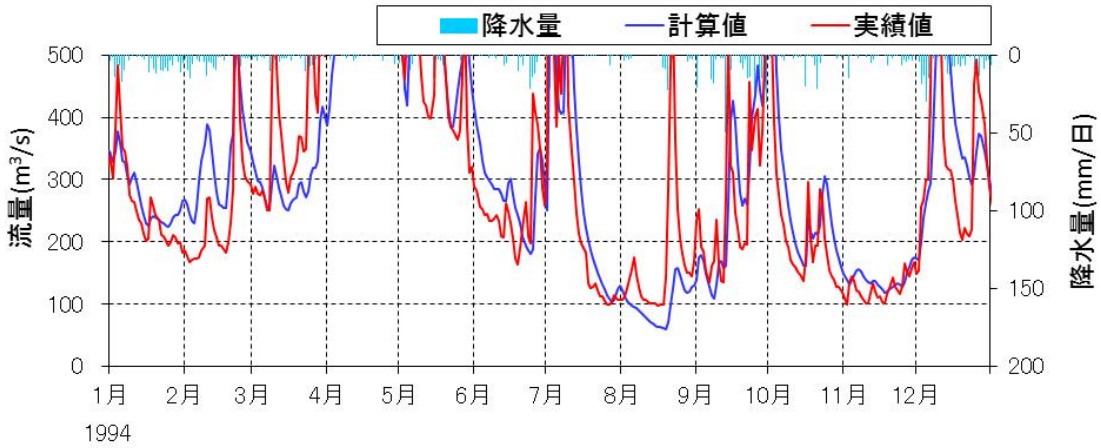


図-Ⅱ.5.3.3.4　G 地点の自然流量再現計算結果（1994 年 1 月～12 月部分を拡大）

（２）利水計算

利水計算モデルは E ダムの操作規則に則って作成した。E ダムは G 地点の正常流量が満足されるように補給を行う。取水量は実績の取水量が一部しか入手できなかったため水利権量（発電用水：1 件、水道用水：10 件、工業用水：3 件、かんがい用水：249 件）を与えた。農業用水の還元率は 0.5 とした。ここで、F 川流域では流域の上流部 E ダム以外にも利水補給を目的とする多目的ダムが存在するものの、それらのダムは F 川と H 川の合流点上流にある I 地点までを補給対象としており、利水基準地点である G 地点への補給は主に E ダムが行っている。よって、利水計算モデルの検証においては G 地点への補給は E ダムのみが行い、I 地点の正常流量は常時満足されるものと仮定して I 地点の実績値を利水計算モデルの入力として計算した。検証期間は 1990 年～2004 年の 15 年間である。

図-Ⅱ.5.3.3.5 は利水計算モデルによる E ダムの貯水位の再現計算結果である。ここでは最初に、利水計算モデルにおいて操作規則が正確にモデル化されているかを確認するため、流入量に実績値、G 地点の流量として自然流量を与えた場合の利水計算を実行した。その結果、計算された貯水位は、実績の貯水位を再現しており、利水計算モデルにおいて操作規則が正確にモデル化されたていることが確認された。続いて E ダム流入量および I 地点から G 地点間の残流域からの流出量については WEP モデルによる計算値を入力とした場合に貯水位が再現できるかを検証した。その結果、年間の貯水位の変動傾向は概ね再現できるが絶対量については誤差が大きい期間が散見された。毎年 12 月

頃に計算の貯水位が実績と比較して急激に低下して誤差が大きくなり、5 月頃融雪出水によって常時満水位まで貯め上がる時期に実績と計算が一致する傾向がある。上述した通り流入量に実績値を用いた場合の貯水位の再現性は良好であったため、WEP モデルによる流入量の計算値に誤差が存在すると考えられる。その一方で、かんがい期に関する利水計算については一定の精度を有している。また、1989 年 10 月～1990 年 10 月において計算結果と実績値が大きく異なっているのは、当該期間 E ダムは試験湛水中であり規則操作とは異なる運用を実施していたためである。

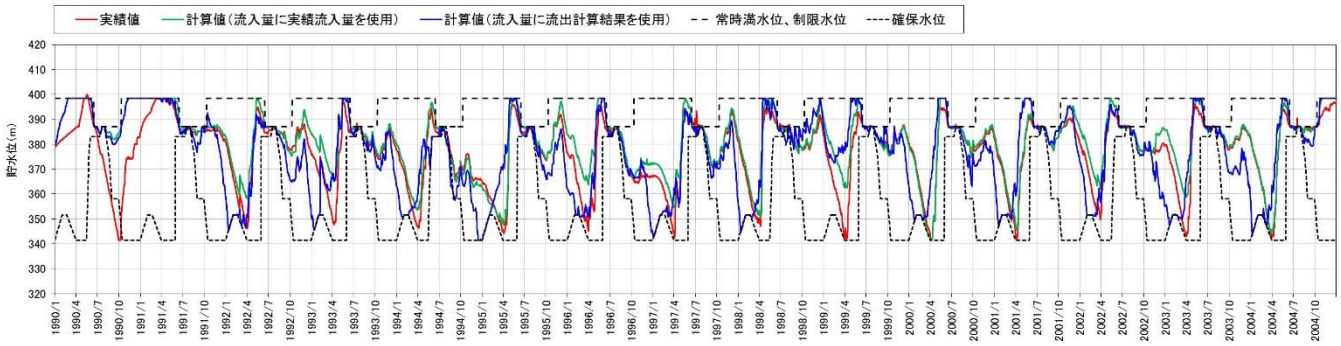


図-Ⅱ.5.3.3.5　利水計算モデルによる貯水位の再現計算結果

５．４　将来予測計算

５．４．１　使用した気象庁・環境省データ

第Ⅱ部の第 1 章 5 で示された通り気象庁・環境省データには、表-Ⅱ.5.4.1.1 に示す通り現在気候については積雲対流スキームの違いによる 3 ケース、将来気候については温暖化ガス排出シナリオ、海面水温、積雲対流スキームの違いによる合計 16 ケースの出力結果が存在し、利用可能である。これらのケースのうち本検討では、積雲対流スキームについて気象研究所が開発した YS スキームを用いた出力結果を利用することとし、現在気候については表-Ⅱ.5.4.1.1 の番号 1 (HPA_m02)を利用することとした。また将来気候については危険側を評価するという観点から、温暖化排出ガスが最も多い RCP8.5 シナリオの中から YS スキームを採用している番号 4 (HFA_rcp85_c1), 7 (HFA_rcp85_c2)および 10 (HFA_rcp85_c3)の 3 ケースを利用することとした。なお、現在気候および将来気候の計算期間はそれぞれ 1984 年 9 月～2004 年 8 月および 2080 年 9 月～2100 年 8 月のそれぞれ 20 年ずつである。また、それぞれのケースの出力結果に対して、降水量および気温について統計的なバイアス補正を施して利用した。以降、HPA_m02 を「現在気候」、将来気候のデータは HFA を削除して rcp85_c1、rcp85_c2、rcp85_c3 と標記することとする。

表-Ⅱ.5.4.1.1　気象庁・環境省出力の結果一覧表

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
–			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
–			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18			SST2	YS	HFA_rcp26_c2
19			SST3	YS	HFA_rcp26_c3

RCP4.5の2ケース(c2,c3)は平成26年度に計算を実施の予定

５．４．２　Ａダム流域

（１）降水量の変化傾向

Ａ ダム流域の年降水量および月降水量の変化傾向を整理した結果を図-Ⅱ.5.4.2.1 および図-Ⅱ.5.4.2.2 に示す。年降水量については、平均値および最小値について増加するケースと減少するケースが存在しており明瞭な傾向が得られない。また月降水量については、6、7 および 8 月の平均月降水量が減少することがほぼ全てのケースについて予測されており、夏期の降水量が減少する可能性があることを示唆している。

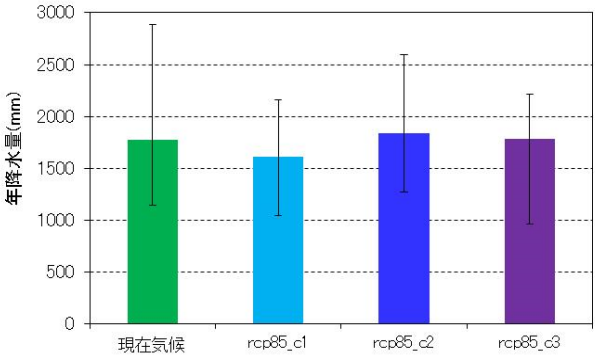


図-Ⅱ.5.4.2.1　年降水量（期間の平均、最大、最小）

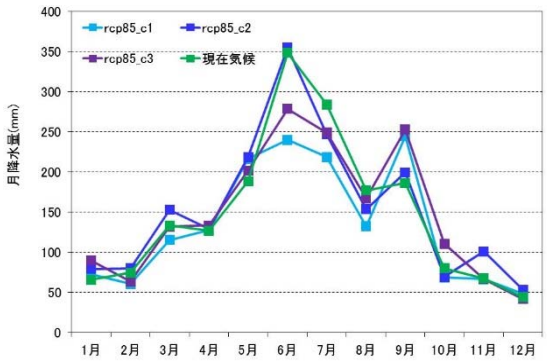


図-Ⅱ.5.4.2.2　平均月降水量

次に連続小雨日数（ここでは日降水量 5 mm 未満を小雨とする）について示す。ここでは、かんがい期および非かんがい期を 5 月 1 日～9 月 30 日および 10 月 1 日～4 月 30 日として設定し、それぞれについて各ケースの 20 年間の連続小雨日数の頻度を調べた。その結果が図-Ⅱ.5.4.2.3 および図-Ⅱ.5.4.2.4 である。かんがい期については、現在気候の最大連続小雨日数は 35-40 に分布するのに対し、将来気候の 3 ケースについては rcp85_c1 および c3 は最大連続小雨日数が 35 以上の階

級に分布しているものの、c2 の最大値は 30-35 で現在気候と比較して短くなる予測となっており、ケース間の予測結果の差が大きかった。15-20 程度の連続小雨日数については、あまり頻度が変化しない予測となっているが、20 日以上の連続小雨については 3 つのケースについていずれも頻度が多くなると予測されており、渇水リスクは現在気候と比較して高まると考えられる。非かんがい期については、現在気候の最大連続小雨日数は 45-50 に分布している。その一方で将来気候については rcp85_c1 および c3 は 45-50、55-60 と連続小雨日数が増加する予測である一方で、c2 の最大値は 40-45 で現在気候と比較して短くなる予測となっており、ケース間の予測結果の差が大きかった。

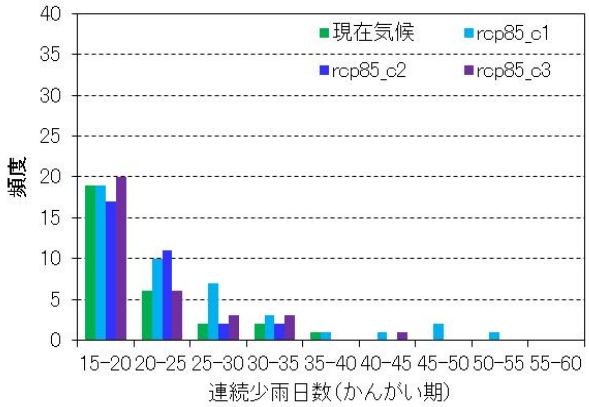


図-Ⅱ.5.4.2.3　連続小雨日数（かんがい期）

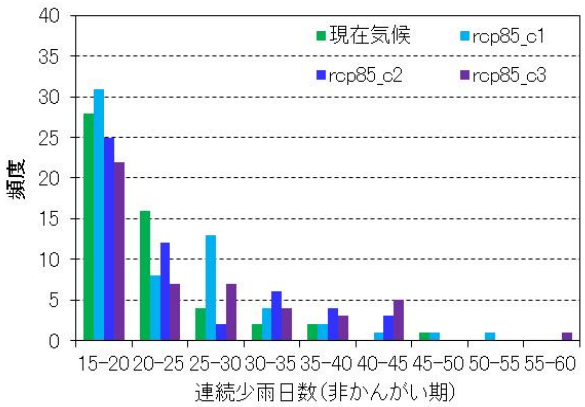


図-Ⅱ.5.4.2.4　連続小雨日数（非かんがい期）

（２）流出量の変化傾向

B 川流域を対象として作成した WEP モデルに現在気候および将来気候 3 ケースの降水量、気温を入力して流出計算を実施した結果を図-Ⅱ.5.4.2.5 に示す。上述した通り 6、7 および 8 月の降水量が減少する予測が得られた。しかし、A ダムの月別の平均流入量の変化傾向としては 8 月は 3 ケースで減少する予測である一方で 6 月および 7 月については 3 ケース間で増減傾向が分かれる結果となり、降水量の予測結果ほど明瞭な傾向は見られなかった。それ以外の時期では、5 月および 9 月についてはいずれのケースでも現在気候と比較して流入量が増加する予測結果となった。それ以外の月については 3 ケース間の予測結果が分かれ、明瞭な増減傾向は出なかった。

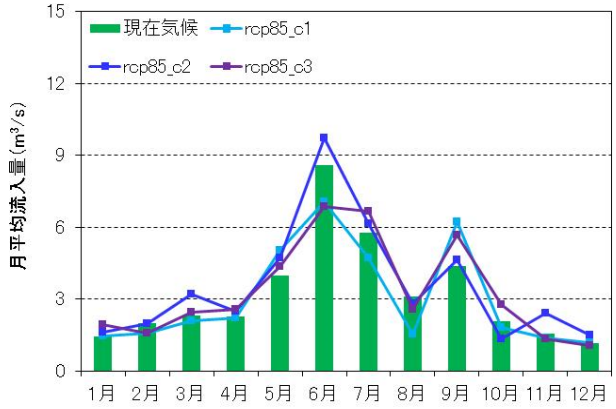


図-Ⅱ.5.4.2.5　A ダムの月平均流入量

（３）貯水位の変化傾向

利水計算における将来の取水量は、2000-2004 の 5 ヵ年の実績の取水量の平均値を与えた。20 年間の貯水位の時系列を図-Ⅱ.5.4.2.6 に示す。その結果、図-Ⅱ.5.4.2.5 において夏期（6、7、8 月）の各月の流入量の平均値については明確な変化傾向は予測されなかったものの、貯水位については現在と比較して夏期に低下することがいずれのケースについても確認された。図-Ⅱ.5.4.2.7 に示す 20 年間の月平均貯水位で見ても将来においてはいずれのケースでも平均的に夏期の貯水位が現在と比較して低くなることが予測されている。夏期における月毎の平均的な流入量については明瞭な変化傾向が得られなかったため、夏期の複数ヶ月について連続的に見た流入量の減少と放流量の増加による水収支の悪化が貯水位低下の要因として考えられる。図-Ⅱ.5.4.2.8 は、A ダムの現在気候および将来気候 3 ケースについて、20 年分の 6、7、8 月連続 3 ヶ月の平均流入量の頻度を示したものである。この図からは、現在気候と比較して将来気候において流入量が減少する予測結果は得られなかった。一方放流量については、放流量のデータそのものは洪水時の放流が含まれており利水補給に相当する放流量について評価することが難しいため、ここでは C 地点の自然流量の予測計算結果について調べた。その理由は、A ダムからの利水補給の実施および利水補給量は C 地点の流況によって決まることおよび C 地点の自然流量の将来変化を見ることで将来気候における利水補給量の増減傾向を定性的に把握することができるためである。C 地点の自然流量の現在気候および将来気候 3 ケースの計算結果について 20 年分の 6、7、8 月の連続 3 ヶ月の平均値を整理し、18.0 m^3/s 以下について発生頻度を示したものが図-Ⅱ.5.4.2.9 である。18.0 m^3/s 以下について示した理由は、C 地点では正常流量が約 2.0 m^3/s であり、C 地点上流における水利権量の合計が約 15.0 m^3/s であることから、自然流量が約 17.0 m^3/s を下回った時に A ダムから利水補給が行われると考えられるためである。その結果、現在気候と比較して将来気候においては 3 ケースいずれも 6、7、8 月の連続 3 ヶ月平均自然流量は大きく現在気候と比較して減少する予測となっており、現在気候と比較して将来気候においては多い利水補給量が必要とされることが分かる。このことから、現在気候と比較して将来気候においては利水補給量が増加することが貯水位低下の要因であると考えられる。

また、20 年間で貯水位が最低水位に到達する回数（以下、不足回数）、貯水位が最低水位になる継続日数の 20 年間の最大日数（以下、最大不足日数）で評価した結果を表-Ⅱ.5.4.2.1 に示す。不足回数および最大不足日数は、全てのケースで現在気候と比較して増加する傾向であった。

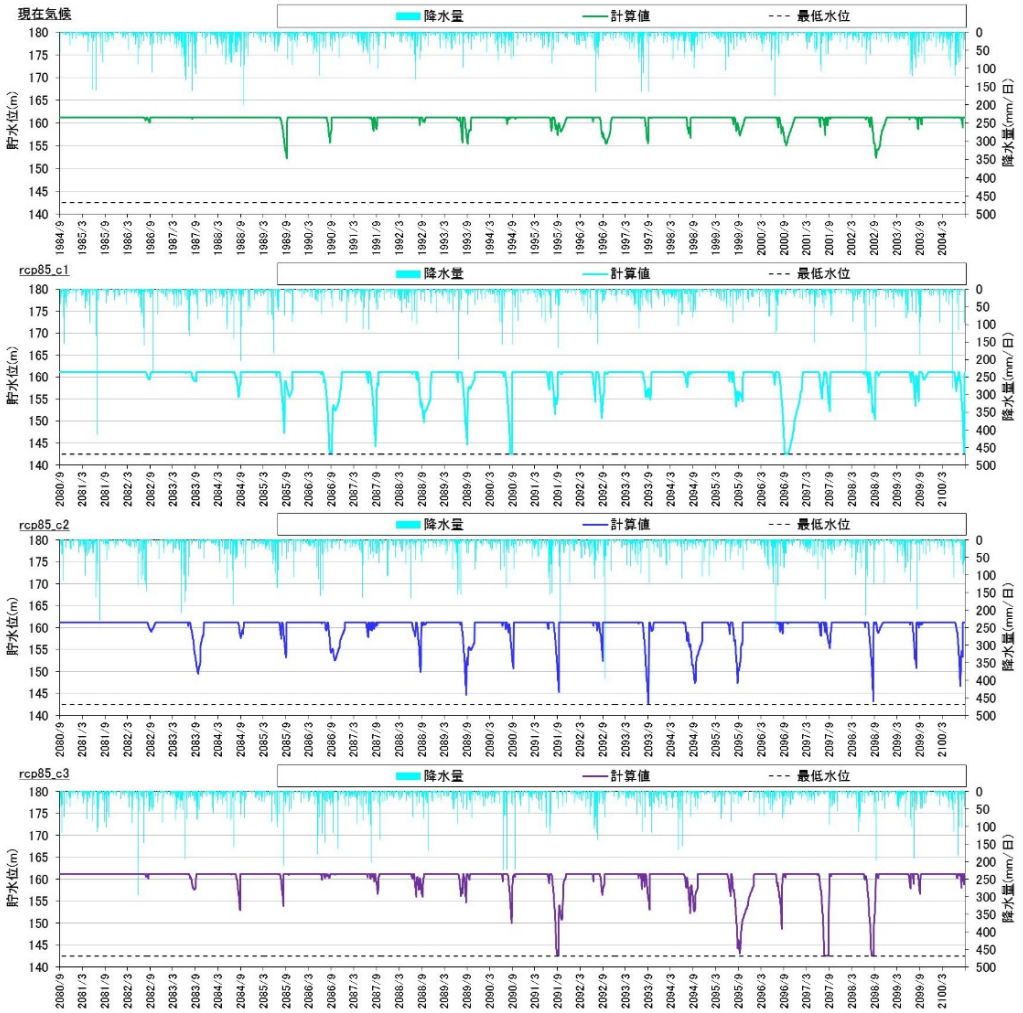


図-Ⅱ.5.4.2.6　現在および将来の貯水位の時系列

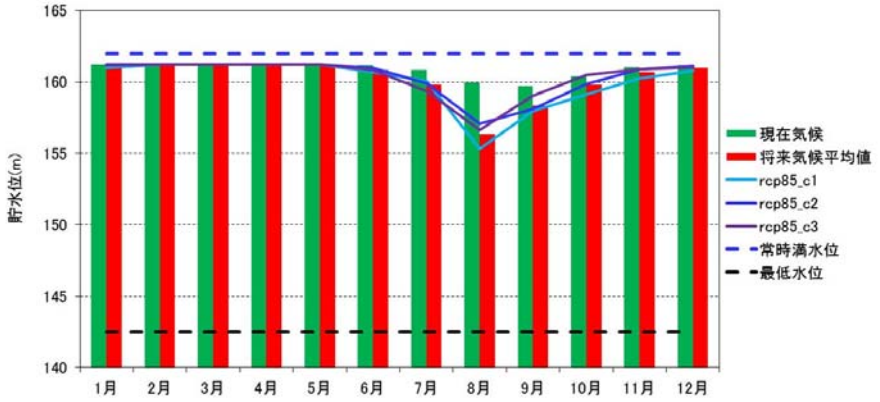


図-Ⅱ.5.4.2.7　月平均貯水位の変化

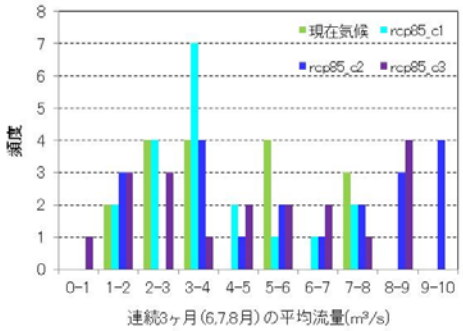


図-Ⅱ.5.4.2.8　Aダムにおける連続3ヶ月（6,7,8月）の平均流入量の発生頻度

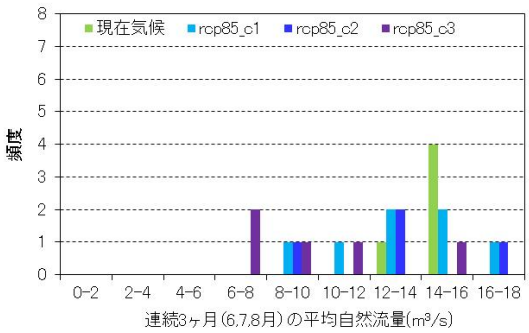


図-Ⅱ.5.4.2.9　C地点における連続3ヶ月(6,7,8月）の平均自然流量の発生頻度

表-Ⅱ.5.4.2.1　不足回数および最大不足日数の整理結果

項目	現在気候	rcp85_c1	rcp85_c2	rcp85_c3
不足回数	0	7	2	4
最大不足日数	0	21	3	37

５．４．３　Ｅダム流域

（１）降水量の変化傾向

年降水量および月降水量について整理した結果を図-Ⅱ.5.4.3.1および図-Ⅱ.5.4.3.2に示す。年降水量については、20年間平均値は大きくは変化しない予測となった。また、最大値および最小値については増加するケースとそうでないケースが存在しており明瞭な変化傾向は得られなかった。また、月降水量については、rcp85_c3のみ7月の平均月降水量が増加する傾向が見られるが、rcp_c1およびrcp_c2は同様の予測結果を示しておらず、ケース間の予測結果の差が大きかった。その一方で、8月、11月については3ケース全てが減少傾向、3月については3ケース全てが増加傾向を示した。それ以外の月については現在気候と比較して明瞭な変化傾向は示されなかった。

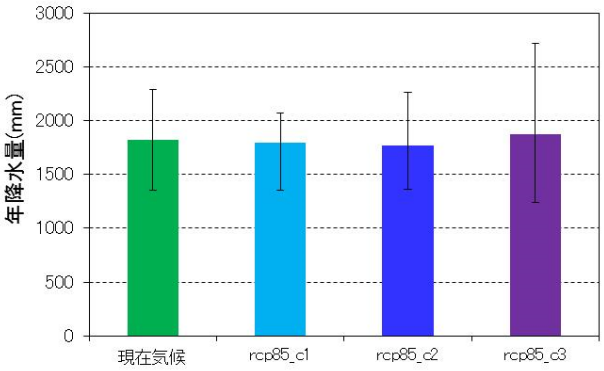


図-Ⅱ.5.4.3.1 年降水量（期間の平均、最大、最小）

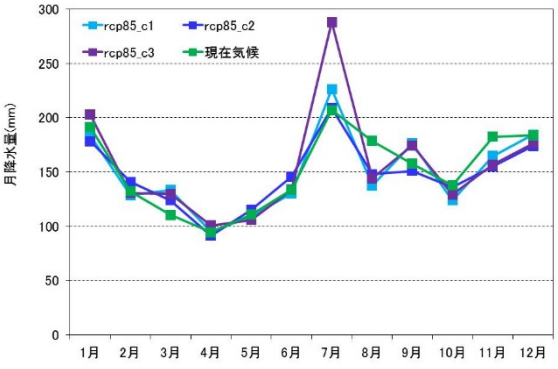


図-Ⅱ.5.4.3.2　平均月降水量

次に連続小雨日数（ここでは日降水量5 mm未満を小雨とする）について示す。ここでは、Eダムのかんがい期（5月1日～9月30日）および非かんがい期（10月1日～4月30日）に分けて各シナリオの20年間の連続小雨日数の頻度を調べた。その結果を図-Ⅱ.5.4.3.3および図-Ⅱ.5.4.3.4

に示す。かんがい期においては、現在気候の最大連続小雨日数は 30-35 に分布するのに対し、将来気候の 3 ケースについては 30-35、35-40、40-45 と現在気候と同等もしくは長い連続小雨日数を示しており、現在と比較して連続小雨日数の最大値が長くなる可能性を示唆している。また、最大値だけでなく 15-20、20-25、25-30 といった連続小雨日数の頻度についても現在気候と比較して増加することが予測されている。また、非かんがい期については、現在気候の最大連続小雨日数は 30-35 であり、将来気候については 30-35、45-50、55-60 に分布しており最大の連続小雨日数が増加する予測となっている。その一方で、15-20 や 20-25 といった期間の連続小雨についてはいずれのケースでも頻度が減少、または変化しない予測となった。

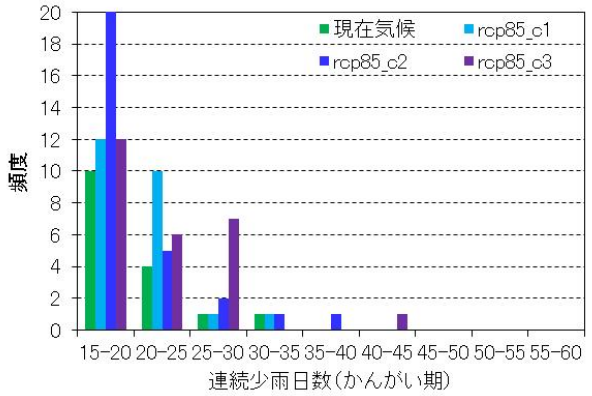


図-Ⅱ.5.4.3.3 連続小雨日数（かんがい期）

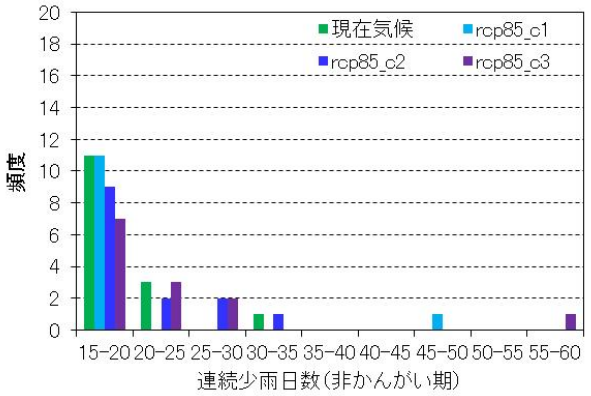


図-Ⅱ.5.4.3.4 連続小雨日数（非かんがい期）

（２）流出量の変化傾向

F 川流域を対象として作成した WEP モデルに現在気候および将来気候 3 ケースの降水量、気温を入力して流出計算を実施した結果を図-Ⅱ.5.4.3.5 に示す。その結果、夏～秋（7 月～11 月）の流出傾向は現在気候と将来気候で大きく変化しない。その一方で、12 月～6 月の流況は大きく変化する予測となった。現在気候における積雪期である 12 月～2 月の流量が増加し、融雪期である 5、6 月の流量は減少が顕著であった。これは、既往研究でも数多く報告されている通り気温の上昇に伴うものである。図-Ⅱ.5.4.3.6 に示す通り F 川流域では年間を通じて平均で 5℃程度気温が上昇する予測となっている。現在気候では 12 月～3 月は 0℃前後の気温であるのに対し、将来気候ではこの期間の気温は 2℃以上となるため降水の多くが雨になると考えられるためである。

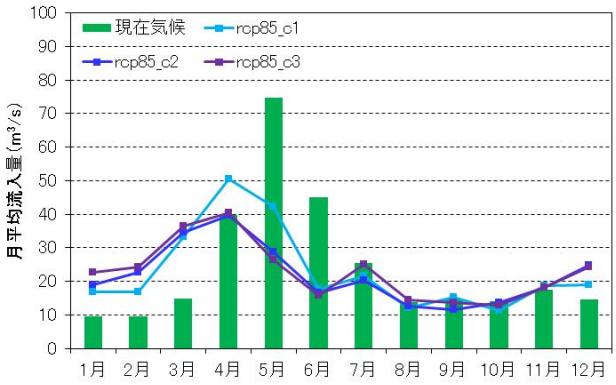


図-Ⅱ.5.4.3.5 E ダムの月平均流入量

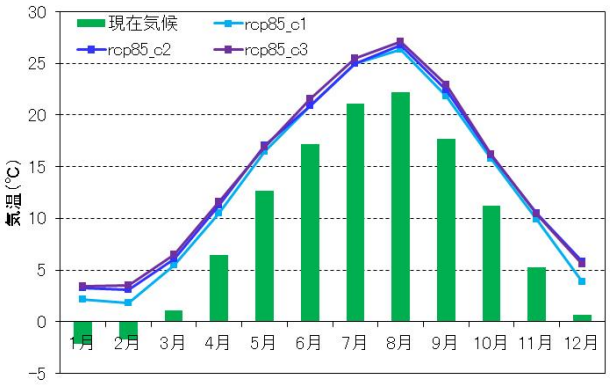


図-Ⅱ.5.4.3.6 E ダムの平均気温

（３）貯水位の変化傾向

Ｅダムを含めてＦ川流域の流出計算を行い、その結果を利水計算モデルに入力し、Ｅダムの貯水位について利水計算を実施した。取水量は、現在気候と将来気候共に水利権量で与え、Ｉ地点の正常流量は上流のダムから供給されることで常時満足されるものとして計算した。また、Ｅダムの最低水位は 341.5 m であるが、332.0 m までは取水可能であるため、将来予測計算については 332.0 m を取水できる最低水位とした（以下、332.0 m を下限水位と記す）。図-Ⅱ.5.4.3.7 に貯水位の時系列を示す。図-Ⅱ.5.4.3.7 から明確なことは、現在気候においては洪水期に入る毎年 6 月に常時満水位から夏期制限水位に向けて貯水位を下げるドローダウンが行われているのに対し、将来気候においては代掻き期間においてダム流入量が低下することで洪水期に入る以前に貯水位が制限水位よりも低くなるため、いずれのケースについてもドローダウンの実施頻度が減ることが予測される。次に、20 年間の月平均貯水位の結果を図-Ⅱ.5.4.3.8 に示す。将来気候においては融雪の早まりを受けて 1～4 月に現在と比較して貯水位が大きく上昇し、かんがい期である 5 月、6 月に流入量の低下に伴って貯水位が低下する予測となっている。さらに、5、6 月に貯水位が大きく低下した状態で洪水期に入るため、洪水期も引き続いて貯水位が低くなる状態が予測される。次に、20 年間で貯水位が下限水位に到達する回数（以下、不足回数）、貯水位が下限水位になる継続日数の 20 年間の最大日数（以下、最大不足日数）で評価した結果を表-Ⅱ.5.4.3.1 に示す。3 ケースについて、不足回数はおよび最低でも 19 回、最大不足日数についても全てのケースについて現在気候と比較して大幅に増加する予測となった。

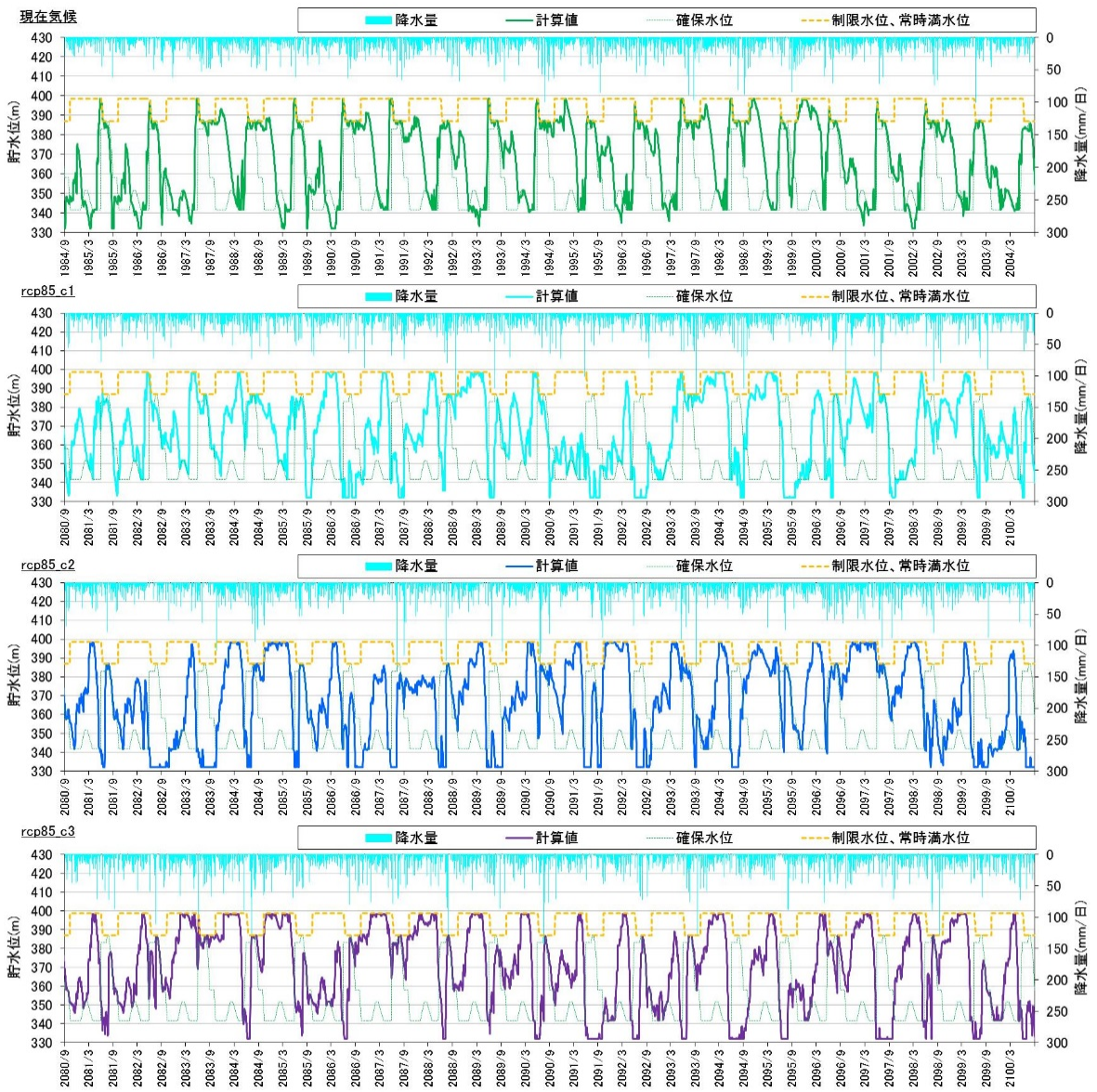


図-Ⅱ.5.4.3.7 月平均貯水位の変化

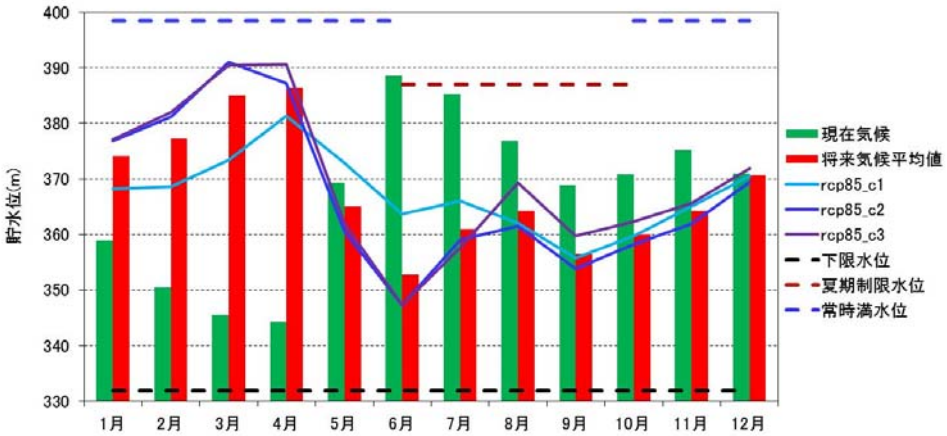


図-Ⅱ.5.4.3.8 月平均貯水位の変化

表-Ⅱ.5.4.3.1 不足回数および最大不足日数の整理結果

項目	現在気候	rcp85_c1	rcp85_c2	rcp85_c3
不足回数	0	20	33	19
最大不足日数	0	86	117	120

５．５　考察

５．５．１　２ダムにおける検討結果のまとめ

A ダムについては、将来気候においては夏期に降水量が低下することが今回検討を行ったほぼ全てのケースで予測されており、それに伴う C 地点の自然流量の減少およびその減少分を補うためのA ダムからの利水補給量の増加によって貯水位が低下することが予測された。これに伴って、表-Ⅱ.5.4.2.1 に示した通り、不足回数、最大不足日数共に現在気候と比較して将来気候では全てのケースで増加することが予測され、将来気候においては現在よりも渇水リスクが増加すると考えられる。一方 E ダムについても、表-Ⅱ.5.4.3.1 に示した通り、A ダムと同様に不足回数、最大不足日数共に現在気候と比較して将来気候では全てのケースで増加することが予測された。E ダムにおいては、水需要量が大きい代掻き期において現在よりも将来は気温上昇の影響により融雪による流入量が減少するため、貯水位が急激に低下することが予測された。この現象は、規模の違いはあるもののほぼ毎年のように発生することが予測され、不足回数が現在気候と比較して全てのケースについて増加するのはこれが原因である。それに加え、かんがい期においては図-Ⅱ.5.4.3.2 で月降水量の減少、図-Ⅱ.5.4.3.3 で連続小雨日数の長期化が全てのケースについて予測されており、代掻き期に貯水位が下がった状態から降水量の減少、長い連続小雨が発生することで、最大不足日数が現在気候と比較して大幅に増加することが予測された。

５．５．２　気候変動が渇水に与える影響を簡易的に評価するための指標

本検討では、A ダムと E ダムという 2 ダムを特別に選定して気候変動が渇水に与える影響について流出計算・利水計算により検討を実施した。今後、全国の河川流域で同様の検討が行われることが望ましいが、全ての河川流域について本検討で示したような計算を実施するのは大変な作業を要するため困難である。そこで、渇水に関するなんらかの簡易的な指標により渇水に与える影響が大きいと予測される流域を全国から抽出し、それらの流域については本検討で示したような詳細な検討を実施することが望ましいと考える。

渇水を評価する指標は、年降水量、月降水量、連続無降雨日数、連続小雨日数などなど数多く挙げられ、どの指標が渇水を適切に評価できるかについてはこれまであまり明確には示されていない。そのような中、本検討で詳細な検討を実施した 2 流域の結果からは、積雪・融雪が発生しない流域では「連続小雨日数の変化傾向」、積雪・融雪が発生する流域では「連続小雨日数の変化傾向及び気温の上昇量」が有効である可能性が示された。

５．６　まとめ

気象庁・環境省データを用いて積雪・融雪がないダムおよびあるダムを対象としてダムに着目した気候変動による渇水への影響について検討を行った。

積雪・融雪がない A ダムにおいては、現在気候において貯水位が最も下がり渇水が発生しやすいのは夏期である。将来気候においては、夏期降水量の減少及び連続小雨日数の長期化により夏期における貯水位が現在よりも低下し、渇水になりやすくなることが予測された。これは、現在気候において最も発生しうる夏期の渇水が将来気候においてより深刻になることを意味する。その一方で、積雪・融雪がある E ダムにおいて将来予測される渇水は、水需要量が大きい代掻き期における大幅な貯水位低下にさらに夏期における降水量の減少・連続小雨の長期化が加わるという現在気候においてはあまり発生しないタイプの渇水であることが分かった。A ダム、E ダム共に渇水リスクが増加する予測結果ではあるが、積雪・融雪がない A ダムと比べて積雪・融雪が発生する E ダムにおいて、現在と比較して頻度、期間共に渇水が深刻化することが予測された。

積雪・融雪が発生しない流域では「連続小雨日数の変化傾向」、積雪・融雪が発生する流域では「連続小雨日数の変化傾向及び気温の上昇量」を検討することで、気候変動が渇水に与える影響を簡易的に評価できる可能性が示された。

参考文献：

川村一人、中津川誠(2011) 気候変動下における積雪地域の利水への影響を踏まえたダム管理のあり方について、河川技術論文集、Vol.17、pp.287-292

気象庁、環境省(2014) 日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について（お知らせ）、http://www.env.go.jp/press/19034.html

佐藤嘉展、小尻利治、道広有理、鈴木靖(2011) マルチ気候モデルと貯水池操作を考慮した分布型水文モデルの木曽三川流域への適用、京都大学防災研究所年報、54(B)、pp.757-769

多田智和、土屋修一(2008) 気候変動による降水特性がもたらす水需給バランスへの影響検討、地球環境シンポジウム講演集、Vol.16、pp.137-142

立川康人、滝野晶平、藤岡優子、萬和明、キムスンミン、椎葉充晴(2011)気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.67, No.1, pp.1-15

道広有理、佐藤嘉展、鈴木靖(2011) CMIP3 マルチ気候モデルにおける日本陸域を対象とした地上気象要素の再現性・不確実性評価、水文・水資源学会、Vol.24, No.5, pp.280-291

和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介(2005)地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集、No.796/II-72、pp.23-37

Kitoh A., Ose T., Kurihara K., Kusunoki S., Sugi M. KAKUSHIN Team-3 Modeling Group (2009) Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments, Hydrological Research Letters, 3, pp.49-53

Sato Y., Kojiri T., Michihiro Y., Suzuki Y., Nakakita E. (2013) Assessment of climate change impacts on river discharge in Japan using the super-high-resolution MRI-AGCM, Hydrological Processes, 27, pp.3264-3279

６．河川環境の視点から見た気候変動影響

６．１　本研究で採用しているアプローチ

河川法において、河川環境の整備と保全が目的の１つとされ、河川環境は、「河川の自然環境」（河川の流水に生息・繁茂する水生動植物、流水を囲む水辺地帯に生息・繁茂する陸生動植物に関わる多様な生態系）、及び、「河川と人との関わりにおける生活環境」（流水の水質（底質を含む）、河川に係る水と緑の計画、河川空間のアメニティ等）であると捉えられている（河川法研究会、2006）。

ここで、地球温暖化に伴う気候変動により気温上昇や降雨パターンの変化等の気候変動が生じたとすれば、本章に先立つ各章において既に議論してきたように、洪水のような短期流出や水資源に直結する長期流出および海面水位の変化を通じて河川の流量・水位に変化が生じるとともに、河川水温も上昇し、それに伴い水質も変化する可能性がある。流量や水温・水質は、河川における物理環境、生化学的環境を規定する重要な要素であり、これらの特性が変われば、河川の生態系にも変化を生じせしめるだろうということは想像に難くない。また、河川の自然環境は、平常時の水環境だけでなく、洪水による攪乱、洪水の作用がもたらす河道地形や植生などの変化によっても規定される。気候変動により洪水生起状況の変化が起これば、そのことも河川の自然環境を変える要因になる。

しかし、流量や水温・水質の変化が生物および生態系に与える影響だけをとっても、そのメカニズムは複雑であり、そのメカニズム解明や予測手法の開発は限定的なものにとどまっている。さらに、気候変化予測モデルをベースに、各河川の水環境を規定する上記のような要素までも細かく予測することは、気温やマクロな降雨量の変化予測を行うのに比べて、さらに困難を伴う。こうした状況で、気候変動予測結果を河川の生物および生態系の変化予測までいきなりつなげるという方向は、必ずしも適切とは言えない状況にある。

そこで本研究では、まず、平常時の河川環境に対象を絞る。また、水量や水質と言った河川の水環境に大きく依拠する魚類を中心とした水生生物だけを対象とする。そして、気候変動により平常時の河川の水環境が変化した場合に受けるであろう水生生物への影響に関する予備的知見を得ることを目的として、過去から現在までの河川における水環境の時間的・空間的変化と水生生物の生息状況との関係を分析する。日本における河川の水環境は、空間的に多様であり、また時間的にも相当に変化してきているので、このような分析を行えば、水環境の変化に応じた水生生物の生息状況変化を想定する上での有益な知見が得られるはずだ、というのが本研究の着眼点である。

６．２　流量・水質の変動特性

前節における議論と目的設定を踏まえ、ここでは、水生生態系を規定する主たる流水環境要素として、流量及び水質（主として水温）をまずとりあげ、これらの変動特性について既往の知見を整理した。さらに、全国の流量観測地点及び公共用水域水質測定地点の調査データを用いて、過去 30 年程度における流量・水質の経年変化を整理し、その特徴を把握した。

（１）我が国の河川流量及び水温の特徴

a)流量

日本の河川流量は、平水比流量が 1～9$m^3/s/100km^2$ の間にあり、世界の主要河川（0.1～1$m^3/s/100km^2$）と比べて比流量が大きいことが指摘されている（坂口・高橋ら、1986）。これは日本の年間降水量が約 1,700mm と世界平均の約 2 倍と豊富であることによる。さらに渇水流量に着目すると、日本全体の平均値は流出高にして 1mm/日程度であるが、東北地方日本海側と北陸地方で 2～3mm/日程度と高いのが特徴である（高橋、1978）。これは、春季の融雪期における地下水涵養の効果によるものである。それ以外の地域を含め、第四紀火山岩・火山噴出物分布域において渇水流量が比較的大きいことがわかっている。

b）水温

河川水温は、単位水柱にかかる熱負荷とそれを受け入れる水柱の深さや流速により決まるため、気候（日射量、気温、風速）といった外部の規定要因だけでなく、流量や水深という内部の要因からも決定される。このため、日本における河川水温の年変化は流出型と密接に関係し、その年変化曲線は、二つに大別される。その一つは、流量の極大が梅雨から台風期に出現する太平洋側型で、もう一つは、融雪による流量極大を持つ日本海型の河川水温変化である（新井ら 1974）。図-Ⅱ.6.2.1 には、左の列に太平洋側型、右の列に日本海型の例を並べてこの二つの型を示している。地上におかれた開水面をもつ水塊は、その初期水温にかかわらず水面を通しての受熱・放熱によって、最終的には大気の熱的状態と釣り合った水温を示す。この水温を平衡水温あるいは平衡温度という（新井ら（1974））。図-Ⅱ.6.2.1 には、測定された河川水温と平衡温度の両方が示されている。融雪出水がある日本海側の河川（図-Ⅱ.6.2.1 の右側列）では、3 月から 5 月ごろまで水温上昇が抑制され、昇温の変化曲線が極端に凹型を示す。この凹型の深さは、その流域の積雪量によって変化する。

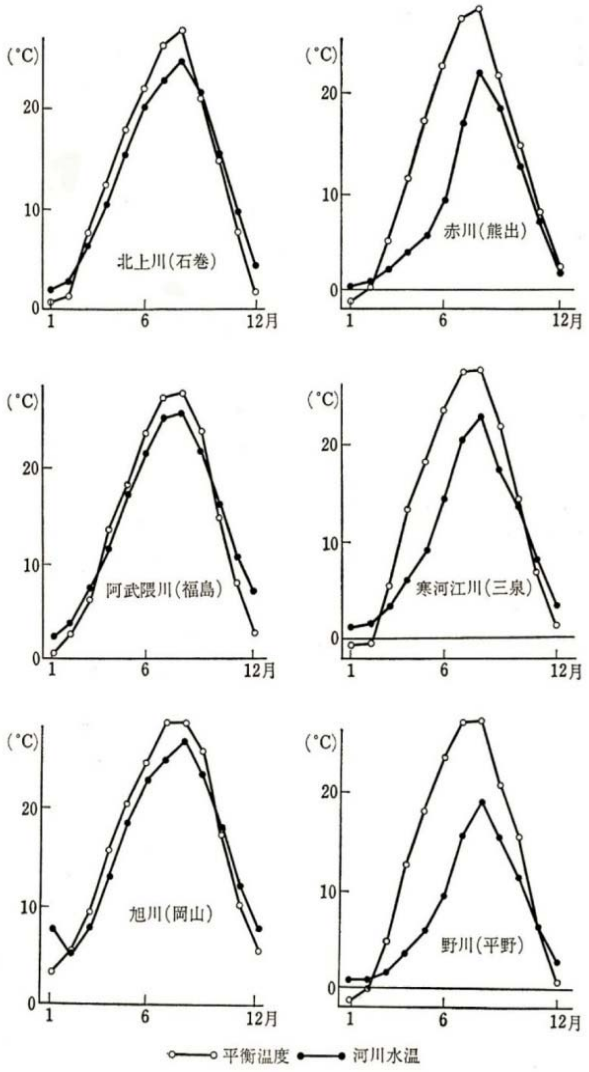


図-Ⅱ.6.2.1　積雪の少ない地方（左列）と多い地方（右列）の河川水温変化の比較

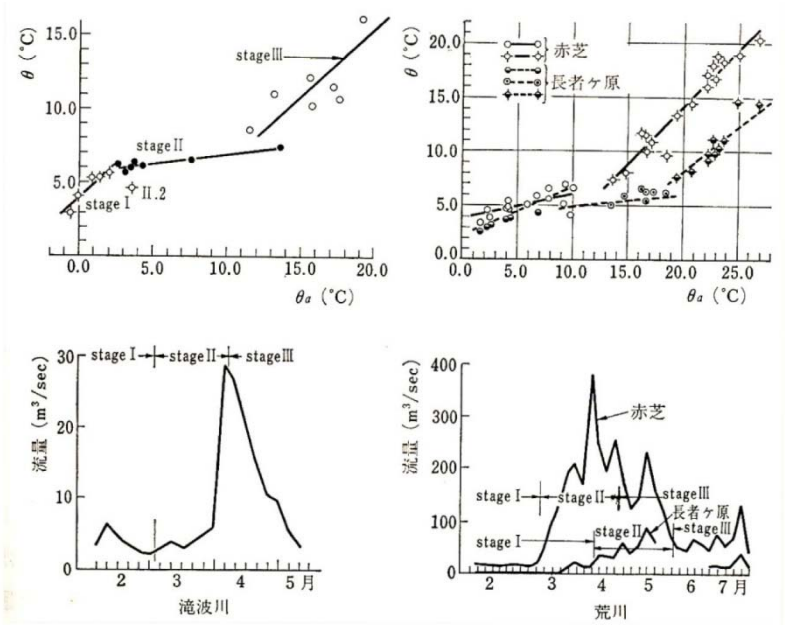


図-Ⅱ.6.2.2 滝波川と荒川における融雪期の水温と流量の変化

図-Ⅱ.6.2.2 には、荒川（山形県）、滝波川（福井県）で調査された水温と気温の半旬平均値の関係が示されている。昇温初期から 5～6 月までの季節変化は三つのステージを経て夏に向かう。第 1 ステージは、冬の渇水期から融雪の始まるまで、第 2 ステージは融雪開始からその最盛期を過ぎて 10 日前後まで、第 3 ステージは、それ以降の 7 月末から 8 月までの期間である。融雪水のうち、表面流出水の温度は、地下水流出水温よりも低温であると考えられ（新井ら 1974）、第 2 ステージで気温の上昇に応じて水温が上昇しないのは、温度の低い融雪水が河川に供給される割合が大きいためである。日本における太平洋側の河川については、平衡水温から概ね水温変化を推定できるが、日本海側の河川では融雪による影響を考慮する必要があることがわかる。山辺(1967) は、日本の山地河川の水温特性を調べて、気温との関係を表-Ⅱ.6.2.1 のように整理している。この表中の b は、水面熱負荷に対する水温の変化率に相当する。これを決定する主な因子は流速と水深であると考えられ、おおまかに流域面積の関数とも考えられている。また、a は水源の水温に近い値と考えられる。

表-Ⅱ.6.2.1 日本の山地河川における水温と気温の関係

わが国における河川水温（θ）と気温（θa）の回帰式（$\theta = a + b \cdot \theta a$）

番号	水系	河川名	観測地点	流域面積 (km²)	海抜高度 (m)	統計年数	a	b	平均偏差 (℃)
1	勇別川	勇別川	白滝	127	360	1958～1960	0.61	0.63	±0.7
2	〃	〃	丸瀬布	808	170	〃	−0.18	0.73	0.7
3	常呂川	無加川	厚和	215	430	〃	0.63	0.56	0.7
4	〃	常呂川	置戸	377	220	〃	0.76	0.66	0.7
5	十勝川	音更川	幌加	205	560	〃	−0.33	0.58	0.6
6	〃	利別川	利別	1484	80	1959～1960	0.03	0.77	1.4
7	北上川	猿ヶ石川	二日町	540	230	1958～1960	2.87	0.67	0.8
8	〃	小友川	小友	78	250	〃	4.31	0.59	0.7
9	阿賀野川	只見川	奥只見	518	540	1958～1959	1.57	0.57	1.1
10	信濃川	黒又川	黒又第二ダム地点	110	420	1960～1961	1.17	0.58	1.3
11	庄川	庄川	御母衣	407	620	1957～1960	1.84	0.61	0.5
12	利根川	神流川	万場	282	290	1965～1966	1.60	0.83	0.8
13	天竜川	大千瀬川	浦川	351	130	1958～1959	1.03	0.89	0.8
14	熊野川	東ノ川	大瀬	141	230	1956～1959	2.63	0.70	0.4
15	〃	十津川	風屋	660	210	1957～1959	3.56	0.66	0.6
16	吉野川	吉野川	早明浦	411	240	1956～1960	4.23	0.73	0.4
17	〃	伊予川	伊予川	293	140	1957～1960	1.66	0.78	0.8
18	奈半利川	奈半利川	二又	146	170	1958～1960	5.73	0.68	0.7
19	球磨川	川辺川	平川	456	140	1960	4.13	0.75	1.0

河川水温に関する研究は、旧来数多くなされてきており、またデータも数多く取得されている。既往研究により明らかになっている気温と河川水温の関連を評価することで、将来起こりうる気候変動による水温変化予測については、相当程度正確に実施できると思われる。

（２） 全国の河川における流量・水質の経年変化の実態調査

１）調査の狙いと方法

河川の流量・水温に対して適切な管理と目標設定を行うためには、それらの変化の実態を把握するとともに、影響要因を評価することが必要であるが、自然条件や人為影響の大きく異なる河川について、総合的に流量・水質の変化を分析した事例は少なく、変化の実態が明らかにされていないことが課題となっている。そこで、全国の河川における流量・水質の経年変化の実態を把握するため、全国の河川から 20 河川 60 地点を抽出し、流量観測所及び公共用水域水質測定地点の観測データを用いて、過去 30 年間程度（1982-2007 年）を対象に流量・水質の経年変化を気象情報と合わせて整理した。そこでは、各流況指標と水質の経年変化の回帰直線の傾きを求めた。さらに、水温の経年変化の回帰直線の傾き及び全期間平均値を用いてクラスター分析を行い、抽出地点を類型区分し、類型ごとに流量・水質・気象情報等の特徴との比較を行った。なお、本調査では、水温以外の水質項目（pH, BOD, COD, TN, TP, SS）についても対象とし、水温や流量の変化との関係を整理した（望月ら 2011）。

２）調査結果

抽出地点における流量・水質の経年変化（回帰直線の傾き）を整理したものを表-Ⅱ.6.2.2 に示す。傾きの値は、各指標絶対値の 1 年あたりの増加量である。傾き値の欄において、赤色は正の傾き、青色は、負の傾きを示し、その絶対値が大きいほど濃色、小さいほど淡色としている。

表-Ⅱ.6.2.2　抽出地点の流況・水質の変化の傾向把握　経年変化（回帰直線の傾き）

地方	水系名	河川名	流量観測所	豊水流量	平水流量	低水流量	渇水流量	流量トレンド（ア）増加型（イ）減少型（ウ）豊水減少、渇水増加型	水質観測所	水温	pH	DO(mg/l)	BOD(mg/l)	COD(mg/l)	SS(mg/l)	T-N	T-P	降水量
北海道	釧路川	釧路川	標茶	1.30E-03	9.00E-04	8.00E-04	7.00E-04	（ア）	新川橋	3.00E-05	5.00E-05	1.00E-04	6.00E-05	6.00E-05	-1.80E-03	3.00E-05	-6.00E-07	
									開運橋	5.00E-05	5.00E-05	8.00E-05	9.00E-05	-9.00E-06	-3.10E-03	1.00E-05	-2.00E-06	3.76
	常呂川	常呂川							金比羅橋	-7.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	1.00E-05	3.00E-05	-8.00E-04	6.00E-05	3.00E-06	
			北見	1.10E-03	5.00E-04	3.00E-04	2.00E-04	（ア）	若松橋	-2.00E-04	-4.00E-06	4.00E-05	-6.00E-05	-4.00E-05	-6.00E-04	2.00E-05	-5.00E-06	7.82
東北	最上川	最上川	下野	8.90E-03	7.30E-03	4.50E-03	2.20E-03	（ア）	下野	2.00E-04	2.00E-05	6.00E-06	6.00E-05	6.00E-05	-4.00E-04	1.00E-05	-1.00E-07	-0.48
	名取川	広瀬川	広瀬橋	9.00E-04	5.00E-04	2.00E-04	-9.00E-05		三橋	2.00E-04	5.00E-05	7.00E-05	1.00E-04	-2.00E-04	8.00E-04	-6.00E-05	-5.00E-06	4.84
北陸	小矢部川	小矢部川	長江	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	3.00E-06	（ア）	国条橋	3.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-2.00E-05	6.00E-05	-1.00E-03	-4.00E-05	-4.00E-06	6.75
									守山橋	-1.00E-04	2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-05	1.00E-04	-5.00E-04	-3.00E-06	-9.00E-06	
									聖人橋	-4.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-4.00E-05	1.00E-04	2.00E-05	-4.00E-05	-2.00E-06	
	阿賀野川	阿賀川	山科	1.70E-03	1.30E-03	-1.00E-04	-5.00E-04		宮古橋	6.00E-04	-5.00E-05	3.00E-05	-1.00E-04	-7.00E-05	-4.00E-04	-3.00E-06	-6.00E-06	21.81
			小谷	1.60E-03	2.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	（ア）	馬越橋	5.00E-05	-4.00E-05	-1.00E-05	-7.00E-05	2.00E-05	-4.00E-04	7.00E-06	-8.00E-07	14.94
		阿賀野川	馬下	9.10E-03	7.90E-03	3.40E-03	6.00E-04	（ア）	馬下橋	3.00E-04	2.00E-05	3.00E-06	-4.00E-05	3.00E-06	-1.40E-03	3.00E-06	3.00E-06	19.58
関東	荒川	荒川							葛西橋	2.00E-04	2.00E-05	2.00E-04	-1.00E-04	-6.00E-05	-1.20E-03	-2.00E-05	-1.00E-05	
									岩淵水門	4.00E-04	2.00E-05	3.00E-04	-2.00E-05	-3.00E-04	-1.20E-03	3.00E-04	-2.00E-05	
									戸田橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	8.00E-05	3.00E-05	-2.40E-03	1.00E-04	2.00E-04	
									江北橋	3.00E-04	3.00E-05	3.00E-04	-6.00E-05	-2.00E-04	-1.80E-03	8.00E-06	-1.00E-05	
									笹目橋	2.00E-04	3.00E-05	1.00E-04	-8.00E-05	-6.00E-05	-1.90E-03	5.00E-05	2.00E-04	
									治水橋	1.00E-04	3.00E-05	3.00E-05	7.00E-05	1.00E-06	-1.00E-04	-2.00E-05	-7.00E-05	
									新荒川大橋	3.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	1.00E-05	-1.00E-04	-1.70E-03	3.00E-06	2.00E-04	
									平井大橋	3.00E-04	3.00E-05	3.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-04	-1.10E-03	-7.00E-05	-2.00E-05	
									堀切橋	3.00E-04	3.00E-05	4.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-04	-1.60E-03	2.00E-04	-1.00E-05	
	多摩川	多摩川	石原	2.40E-03	1.40E-03	8.00E-04	5.00E-04	（ア）	是政橋	4.00E-04	2.00E-05	2.00E-04	-6.00E-04	-3.00E-04	-7.00E-04	-3.00E-04	4.00E-05	4.59
									多摩川原橋	3.00E-04	-1.00E-05	1.00E-04	-5.00E-04	-1.00E-04	-9.00E-04	-2.00E-04	-2.00E-05	
									大師橋	2.00E-04	-1.00E-05	6.00E-05	-2.00E-04	-1.00E-04	-5.00E-05	4.00E-04	-1.00E-05	
			調布橋	-6.00E-04	-3.00E-04	7.00E-05	3.00E-04	（ウ）	調布橋	7.00E-03	-9.00E-06	2.00E-05	7.00E-06	8.00E-05	2.00E-04	4.00E-05	-1.00E-06	4.59
									二子橋	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-7.00E-04	-4.00E-04	-9.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05	
									日野橋	4.00E-04	-1.00E-05	8.00E-05	-3.00E-04	-1.00E-04	-8.00E-04	-3.00E-04	1.00E-04	
	鶴見川	鶴見川	亀の子橋	6.00E-04	4.00E-04	8.00E-04	5.00E-04	（ア）	亀の子橋	3.00E-04	-2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-04	-4.00E-04	-2.00E-03	-1.00E-04	-4.00E-05	4.82
									大綱橋	4.00E-04	-3.00E-05	1.00E-04	-6.00E-04	-5.00E-04	-2.00E-03	-2.00E-04	-3.00E-05	
									末吉橋	3.00E-04	-3.00E-05	3.00E-04	-9.00E-04	-6.00E-04	-1.70E-03	-3.00E-04	-3.00E-05	
	利根川	烏川	高松	-9.00E-04	-3.00E-04	-2.00E-04	6.00E-05	（ウ）	高松	2.00E-04	6.00E-05	4.00E-05	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.60E-03	9.00E-06	-6.00E-06	4.77
		利根川							佐原	1.00E-04	3.00E-05	-1.00E-04	-8.00E-05	2.00E-05	-7.00E-04	4.00E-05	3.00E-06	
									須賀	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-9.00E-05	6.00E-06	-7.00E-04	3.00E-05	1.00E-06	
			布川	-3.30E-03	2.80E-03	3.30E-03	1.30E-03	（ウ）	布川	1.00E-04	3.00E-05	-1.00E-04	-8.00E-05	-2.00E-05	-9.00E-04	3.00E-05	-2.00E-06	4.34
中部	豊川	豊川							下条	8.00E-05	-2.00E-05	7.00E-07	-6.00E-06	4.00E-05	-2.00E-04			
									吉田大橋	6.00E-04	6.00E-06	-1.00E-05	-3.00E-05	-1.00E-04	-4.00E-04	-2.00E-06	-3.00E-06	
			石田	-6.00E-04	-2.00E-04	2.00E-05	1.00E-04	（ア）	江島橋	1.00E-04	3.00E-05	1.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-2.00E-04	-2.00E-05	-2.00E-06	-5.46
			当古	-6.00E-04	-3.00E-04	-1.00E-04	7.00E-06	（ア）	当古橋	3.00E-05	2.00E-05	6.00E-06	-9.00E-06	1.00E-05	-2.00E-04	-3.00E-05	-1.00E-06	-8.94
	木曽川	長良川	忠節	5.00E-04	2.20E-03	2.00E-03	9.00E-04	（ア）	錦島大橋	1.00E-04	1.00E-05	3.00E-05	-1.00E-05	-2.00E-05	-3.00E-05	2.00E-05	-4.00E-07	-2.73
			墨俣	-6.00E-04	2.10E-03	2.50E-03	2.20E-03	（ウ）	長良大橋	3.00E-04	7.00E-06	5.00E-06	-4.00E-05	-2.00E-05	-7.00E-05	-2.00E-06	-8.00E-06	2.87
									東海大橋	9.00E-05	1.00E-05	1.00E-04	-6.00E-05	-6.00E-05	-1.40E-03	-2.00E-05	-8.00E-06	
									南濃大橋	2.00E-04	1.00E-05	2.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.10E-03	-4.00E-05	-6.00E-06	
									藍川橋	2.00E-05	1.00E-05	4.00E-05	-3.00E-05	-6.00E-05	-8.00E-05	1.00E-05	-6.00E-07	
	櫛田川	櫛田川							櫛田橋	8.00E-05	3.00E-05	-7.00E-06	2.00E-06	6.00E-05	-9.00E-04	-4.00E-06	-5.00E-08	
			両郡	-7.00E-04	-1.00E-04	-3.00E-05	2.00E-05	（ウ）	両郡橋	8.00E-05	2.00E-05	-2.00E-05	-4.00E-06	5.00E-05	-8.00E-04	-7.00E-05	-7.00E-06	3.74
近畿	九頭竜川	九頭竜川							九頭竜川河口	2.00E-04	1.00E-05	9.00E-05	-4.00E-05	-2.00E-06	-2.00E-04			
			中角	-1.20E-03	-1.60E-03	-1.10E-03	2.00E-04	（ウ）	高屋橋	2.00E-04	6.00E-07	4.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-1.00E-04			5.82
	大和川	大和川							遠里小野橋	6.00E-05	5.00E-05	5.00E-04	-1.50E-03	-9.00E-04	-5.60E-03	-5.00E-04	-1.00E-04	
			王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	（ア）	河内橋	1.00E-04	2.00E-05	5.00E-05	-6.00E-04	-2.00E-04	-2.90E-03	-2.00E-04	-2.00E-05	
									御幸大橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-1.00E-03	-6.00E-04	-3.30E-03	-3.00E-04	-6.00E-05	0.48
									国豊橋	2.00E-04	3.00E-05	1.00E-04	-6.00E-04	-3.00E-04	-3.70E-03	-2.00E-04	-4.00E-05	
			坂東	2.00E-05	1.00E-04	1.00E-04	2.00E-04	（ア）	太子橋	3.00E-04	9.00E-06	2.00E-04	-1.40E-03	-4.00E-04	-1.30E-03	-3.00E-04	-3.00E-05	0.48
			王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	（ア）	藤井	3.00E-05	2.00E-05	3.00E-04	-7.00E-04	-4.00E-04	-4.20E-03	-2.00E-04	-3.00E-05	
中国	江の川	江の川	尾関山	-6.00E-04	-4.00E-04	-8.00E-04	-4.00E-04	（イ）	尾関山	7.00E-05	1.00E-05	-3.00E-05	-2.00E-05	6.00E-06	-3.00E-04	4.00E-05	2.00E-06	-1.35
	佐波川	佐波川							新橋	7.00E-05	2.00E-05	8.00E-05	-4.00E-05	6.00E-05	-2.00E-04	1.00E-05	-7.00E-07	
四国	肱川	矢落川	新谷	-6.00E-05	-2.00E-05	-1.00E-06	-3.00E-07	（イ）	新大橋	2.00E-04	-3.00E-05	2.00E-04	1.00E-05	4.00E-05	2.00E-04			4.84
									生々橋	-3.00E-05	4.00E-05	-5.00E-05	-8.00E-06	2.00E-05	-5.00E-04			
	重信川	重信川	出合	-4.00E-04	-6.00E-06	7.00E-05	4.00E-05	（ウ）	出合橋	1.00E-04	2.00E-05	3.00E-05	-2.00E-04	-2.00E-04	-5.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05	3.84
	土器川	土器川	常包	8.00E-06	2.00E-05	1.00E-05	-2.00E-06		常包橋	1.00E-04	9.00E-06	6.00E-05	-4.00E-05	9.00E-06	-1.00E-04	-4.00E-05	-9.00E-07	0.75
九州	筑後川	筑後川	瀬ノ下	-3.10E-03	-2.10E-03	-1.30E-03	-8.00E-04	（イ）	久留米大橋	1.00E-04	4.00E-05	-8.00E-06	-3.00E-05		3.00E-04	9.00E-06	1.00E-06	-6.51

流量観測地点における豊水、平水、低水、渇水流量の変化トレンドは、回帰直線の傾きを見ると、(ア)全てが増加している河川（赤色）、（イ）全てが減少している河川（黄色）、（ウ）豊水、平水が減少し、渇水が増加している河川（青色）の大きく 3 つに区分できた。今回抽出した地点の中では、（ア）が最も多い結果となった。本研究ではこれらの要因の検証には至らなかったが、（ア）は都市部では流域の開発による流出量の増加や、農村部では農地の減少による取水量の減少等が、（イ）は中国、四国、九州地方の河川で見られ、降水量の減少や取水量の増加など水利用の変化等が、（ウ）は櫛田川（蓮ダム）などの集水域割合の大きなダムの竣工が期間内にあった地点では、ダムによる貯水や維持流量の確保等が要因としてありうると考えられる。流量の変化と降水量の変化について回帰式の検定を行った結果、豊水流量と降水量は、有意水準 1%を満たし有意な正の相関が見られたが、平水、低水、渇水の順で相関は低くなり、有意な相関は得られなかった。

水質に関しては、一部の河川を除いて水温、pH、DO については全体的に増加傾向、BOD、TP、SS については全体的に減少傾向、COD、TN については増加・減少が半々程度あった。BOD、COD、TN、SS は、多摩川、鶴見川、大和川等の下流の調査地点では減少率が大きくなる傾向にあり、元々濃度が高かったこれらの地域では、総量規制、高度処理等の汚濁負荷対策の効果が大きいことが示唆された。

次に、1982-2007 年の全期間平均水温とその回帰直線の傾きによって、クラスター分析を行い、抽出地点を A~H の 8 つに類型区分した結果を表-Ⅱ.6.2.3 に示す。以下の考察のために年降水量や年平均気温の平均値や変化傾向（経年変化回帰直線の傾き）を併せて表示する。表-Ⅱ.6.2.2 と同様に、水温・年降水量・年平均気温の回帰（近似）直線の傾きが正のときに赤欄、負のときに青欄とし、その濃淡に

よって絶対値の大きさを識別できるようにした。また、水温平均値の高低を橙色の濃淡で、年降水量平均値の大小を緑色の濃淡で同様に示している。ここで、表-Ⅱ.6.2.3 に記載した「類型の特徴」は各類型における 1982-2007 年の全期間平均水温と回帰直線の特徴を示す。また、「回帰判定」は、時間を説明変数にしたときの水温変化の回帰式の有意性の検定結果、「前半期平均と後半期平均の平均の差の有無」は前半(1982-1995 年)と後半(1995-2007 年)の平均値に有意差があるかの検定結果であり、t 検定によるものである。

表-Ⅱ.6.2.3　水温の変化に着目した抽出地点の類型化

				1982-2007（全期間）			1982-1995（前半期）			1995-2007（後半期）							
水系名＿水質調査地点名	類型	類型の特徴（水温傾き・平均水温）	地方	平均	近似直線の傾き	回帰判定	平均	近似直線の傾き	回帰判定	平均	近似直線の傾き	回帰判定	前半期平均と後半期平均の差の有無（t検定）片側5%で有意*1%で有意**	降水量の平均	降水量傾き	平均気温	平均気温傾き
釧路川＿開運橋	A	低下・低温型	北海道	9.4	−0.028		9.6	0.010		9.0	0.033		*	1029	3.76	11.6	0.019
常呂川＿若松橋			北海道	10.2	−0.024		10.5	0.070		9.7	0.111			763	7.82	11.8	−0.114
阿賀野川＿宮古橋	B	低下・平均型	北陸	13.1	−0.066	**	13.4	−0.192	**	12.8	−0.025			1492	21.81	15.7	−0.170
肱川＿新大橋			四国	16.2	−0.040		16.4	−0.111		16.0	−0.023			1670	4.84	18.5	−0.105
小矢部川＿国条橋	C	横ばい・やや低温型	北陸	13.0	0.010		13.0	0.067		13.0	−0.037			2221	6.75	16.9	0.029
阿賀野川＿馬越橋			北陸	12.5	0.012		12.4	0.047		12.7	−0.094			1201	14.94	15.6	−0.111
阿賀野川＿馬下橋			北陸	11.5	0.052	*	11.2	0.128	*	11.8	−0.009			1123	19.58	14.4	−0.050
多摩川＿調布橋			関東	11.7	0.029		11.6	0.099	*	11.9	−0.046			1497	4.59	14.0	−0.045
利根川＿布川	D	横ばい・平均型	関東	15.9	0.031		15.7	0.047		16.1	−0.019		*	1382	4.34	17.7	−0.015
木曽川＿横満蔵			中部	16.2	0.031		16.0	0.044		16.3	0.065			1723	−4.39	18.3	0.055
揖斐川＿伊勢大橋			中部	16.1	0.029		16.0	0.030		16.3	0.051			2468	−3.11	18.9	0.005
宮川＿度会橋			中部	16.2	0.006		16.2	0.087	*	16.2	−0.028			3193	7.90	18.4	0.050
鈴鹿川＿小倉橋			中部	17.2	0.004		17.3	0.068		17.1	0.037			1825	−13.85	18.7	0.099
最上川＿下野	E	やや上昇・平均型	東北	13.0	0.056		12.7	0.160		13.3	−0.012			1228	−0.48	15.7	−0.059
名取川＿三橋			東北	13.7	0.074	*	13.4	0.211	*	14.1	0.013			1244	4.84	16.5	0.071
木曽川＿鏡島大橋			中部	13.9	0.079	**	13.4	0.029		14.3	0.153		*	1806	−2.73	16.7	0.075
豊川＿当古橋			中部	15.0	0.034		14.7	−0.010		15.2	0.065	*	*	1683	−8.94	17.8	0.003
櫛田川＿両郡橋			中部	14.7	0.051	*	14.4	0.090		14.9	0.057		*	2037	3.74	17.9	0.068
九頭竜川＿高屋橋			近畿	13.9	0.045		13.6	0.121		14.2	−0.076			2223	5.82	18.0	0.033
江の川＿尾関山			中国	14.0	0.049		13.8	0.029		14.3	0.097			1497	−1.35	13.7	−0.017
利根川＿高松	F	やや上昇・やや高温型	関東	14.9	0.079	**	14.4	0.021		15.4	0.115		**	1241	4.77	17.6	0.089
木曽川＿長良大橋			中部	15.8	0.091		14.6	0.051		15.7	0.047	*	**	1851	2.87	18.2	0.112
豊川＿江島橋			中部	14.9	0.071	**	14.4	0.107		15.3	0.042		**	2354	−5.46	18.3	0.021
土器川＿常包橋			四国	15.3	0.087	**	14.8	0.105		15.9	0.047		**	1143	0.75	18.6	0.052
筑後川＿久留米大橋			九州	16.2	0.059		15.7	0.070		16.8	−0.120		*	1843	−6.51	18.1	0.077
矢作川＿米津大橋			中部	16.5	0.063	**	16.1	0.025	**	16.8	0.152		**	1413	0.64	18.5	0.020
櫛田川＿櫛田橋			中部	15.5	0.057	**	15.1	0.035		16.0	0.029		**	2037	3.74	18.5	−0.017
豊川＿吉田大橋			中部	15.8	0.078	**	15.3	0.057		16.3	0.101	*	**	2354	−5.46	18.8	0.192
長良川＿伊勢大橋			中部	16.2	0.073	**	15.7	0.049		16.7	0.061		**	2170	3.24	19.4	−0.020
矢作川＿中畑橋			中部	16.8	0.083	**	16.2	0.043		17.2	0.126		**	1413	0.64	19.1	−0.003
雲出川＿雲出橋			中部	16.3	0.095	**	15.7	0.117		16.9	0.033		**	1683	−0.43	18.8	0.132
大和川＿御幸大橋	G	やや上昇・高温型	近畿	18.4	0.070	*	18.0	0.128		18.8	0.064			1233	0.48	19.6	−0.005
庄内川＿庄内新川橋			中部	18.1	0.049	*	17.7	−0.011		18.3	0.117		*	1608	−6.75	19.3	0.058
庄内川＿枇杷島橋			中部	18.1	0.044		17.9	0.024		18.4	0.073			1608	−6.75	19.2	0.108
重信川＿出合橋			四国	20.7	0.044		17.8	−0.007		18.6	0.013		*	1315	3.84	18.6	0.010
多摩川＿是政橋	H	上昇型	関東	17.6	0.133	**	16.7	0.085		18.5	0.145		**	1497	4.59	15.9	0.001
鶴見川＿亀の子橋			関東	18.1	0.142	**	17.2	0.153	**	19.1	0.076		**	1571	4.82	16.1	0.008
大和川＿太子橋			近畿	18.3	0.109	**	17.7	0.090		19.0	0.174	**	**	1233	0.48	19.0	0.005

表の下に行くほど、回帰直線の傾きが大きく、かつ平均水温が高い類型となる。水温低下・横ばい型の類型 A～D では有意な変化トレンドはほとんど見られなかったが、やや上昇型と上昇型の類型 E～H では有意な上昇トレンドが見られる。前半と後半の水温変化のトレンドの関係には一様な傾向は見られなかったが、全体的に前半のほうが上昇の傾きが大きい。また、上昇傾向にある類型区分では、前半と後半の水温の平均値に有意な差がある河川が多く、この 2 期間で、期間平均的な水温も上昇していることが示唆された。

3）考察

先に述べた各類型の特徴と区分要因について考察する。類型 A~C は、気温の低下と降水量の増加の傾向が共通して見られることが特徴である。このうち類型 A、B に見られる水温の低下傾向は、気温の低下と降水量の増加という自然的要因によって導かれた可能性が高いことが示された。

類型 D~F は、気温は上昇傾向にあるが、降水量の増減は地点によって様々である。さらに、気温の傾き度合いと水温の傾き度合いが類似していることから、これらの類型に見られる水温の上昇傾向は、気

温の上昇という自然的要因によって導かれた可能性が高いことが示された。

類型 G、H は、気温は上昇傾向にあり、降水量の増減は地点によって様々であることは類型 D~F と同様であるが、水温の上昇度合いが気温の上昇度合いを大きく上回っていることが特徴であり、自然的要因だけでは水温の上昇を説明できない。類型 G、H は人口密度の高い都市にある地点で構成されており、人口集中による流域の開発（下水道の流入等）といった人為的影響が、本類型を特徴づける要因となっていることが示唆された。

例えば、同じ河川でも異なる類型に分類された多摩川の是政橋（距離標 32.0k）（類型 H）と調布橋（距離標 60.0k）（類型 C）を比較すると、1982-2007 年の期間平均気温は約 2℃、水温は約 6℃の差があり、また、水温上昇の傾きにも 4 倍以上の差があった。この 2 地点間には、取水による河川水量の減少及び下水処理場からの処理排水の流入がある。また、1982-2007 年の期間を含む各年度の「下水道統計」の集計によると、石原（距離標 28.0k）までに流入する下水処理量は 1980 年から 2 倍以上に増加しており、平水流量には大きな変化が見られないことから、河川流量に占める処理水量の増加が水温上昇の原因となっていることが考えられ、是政橋地点では人為影響による水温変化が自然的要因による影響を大きく上回ったことを示した。このように、河川によっては水温も人為影響によるものと見られる変化が現れているようであり、今後の河川水質の変化について検討する場合、人為影響を詳細に評価することの重要性が見受けられた。

６．３　流量・水温の変化が水生生態系に与える影響に関する検討

本項では、流水環境としての流量及び水温が変化した場合にそれが水生生態系にどのような影響を及ぼすかについて、既往の知見を整理するとともに、生物・水質の全国調査データを用いて行った分析の成果を紹介する。

（１）既往の知見の整理

１）流量の変化と河川環境

まず、流量の変化が水質に与える影響について述べる。河川流量と水質との間には一般に相関関係が見られることが多い。流量と水質の相関関係を示すものとして、濃度～流量式（*C-Q* 式）あるいは、負荷量～流量式（*L-Q* 式）がある。負荷量(*L*)、水質（*C*）と流量（*Q*）との間には、*L=CQ* の関係があるので、*C-Q* 式と *L-Q* 式は独立の関係にはない。これらの関係式を実測データから導き出す場合には、最小自乗回帰法などが用いられるが、*L-Q* 式は相関関係をとる両者に流量が入っているため *C-Q* 式より相関係数が高くなる傾向がある。このことから、実際には *L-Q* 式の形で流量変化に伴う負荷量変化という形で河川流量と水質の関係が示されることが多い。

$$L = aQ^b \qquad \text{式－Ⅱ6.3.1}$$

ここに、*L(g/s)*：単位時間あたりに流出する負荷質量あるいは *L(m³/s)*：単位時間あたりに流出する負荷体積量、*Q(m³/s)*：流量、a、 b：地点毎に決定されるパラメータ

流量変化に伴う水質変化については、その影響を大きく受ける湖沼、貯水池、内湾などの閉鎖性水域へ流入する河川における調査が多く行われている。流量増加に伴い顕著になる水質変化現象としては、土砂による水の濁りがまず挙げられる。櫻井ら(2002)の作成した結果を見ると濁りに関しては、指数部の b が 2 よりも大きいと見られる河川が大半であることがわかる（図-Ⅱ.6.3.1）。これは、流量増加に比して、負荷量増加の割合が大きい、すなわち流量増加に応じて濃度が上昇することを示している。このような関係を持つ水質項目は流域において負荷の発生が面的であり、降雨により流域からの負荷流出が増加する項目である場合が多い。逆に負荷が点源で降雨量とあまり関係がない場合に

は、降雨に伴う流量増加はこの負荷を希釈する効果を持つため指数部の b が 1 より小さくなる。流量と水質の関係は、このように水質項目毎に流域における負荷の発生および流出形態により大きく影響される。

塚原ら(1998)は一つの出水中における水中懸濁物質量と流量との関係をプロットし、出水中の同じ流量時において、流量増加期での方が流量減少期よりも濁質濃度が高くなることを示している。これは、出水に伴う濃度の高まりに対する流域における貯留の影響を示唆するものである（図-Ⅱ.6.3.2)。

流量と水質との関係は、以上のように種々の形態が見られるが、水質項目、流域特性により、様々な関係を示す。気候変動により流量が変化した場合には、同時に水質変化のパターンも変化することが予想される。

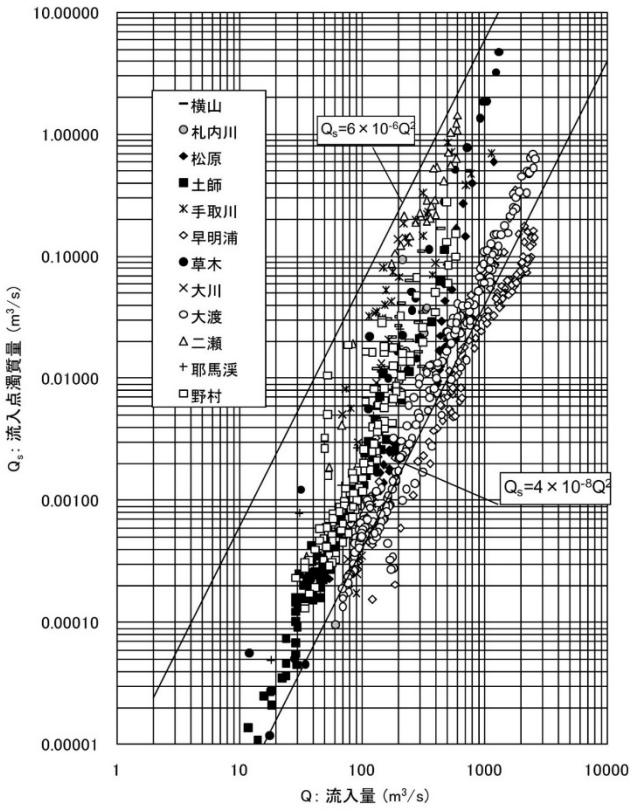


図-Ⅱ.6.3.1 貯水池の流入濁質量と流入量の関係

次に、河川流量が水生生態系に与える影響について述べる。自然の河川流量は河川や周辺の氾濫原における湿地の生態系を規定していることが示されている(Bunn,et al. 2002, Junk,et al. 1989, Poff, et al 1997, Richter, et al 1998, Puckridge, et al 1998）。Bunn, et al. (2002)は、河川流量が河川における水生生物の多様性に影響する観点として、以下のような４つの原理を提示している。

原理１：流れは河川の物理的な生物生息場（ハビタット）を強く規定するもので、この作用により生物構成を規定する。ハビタットのスケールは、流域スケール（河道網規模)、リーチスケール（瀬や淵の分布)、パッチスケール（個々の河床材料に対する水理条件）にわたる。

原理２：水生生物種は主として自然の流量（natural flow regime）に直接反応する形で生活史戦略を進化させてきている。(Blanch,et al. 1999)

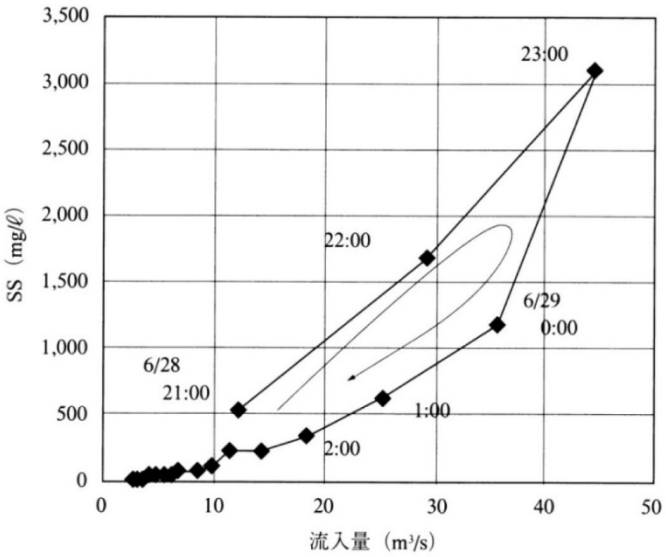


図-Ⅱ.6.3.2 流入濁質の出水中の変化

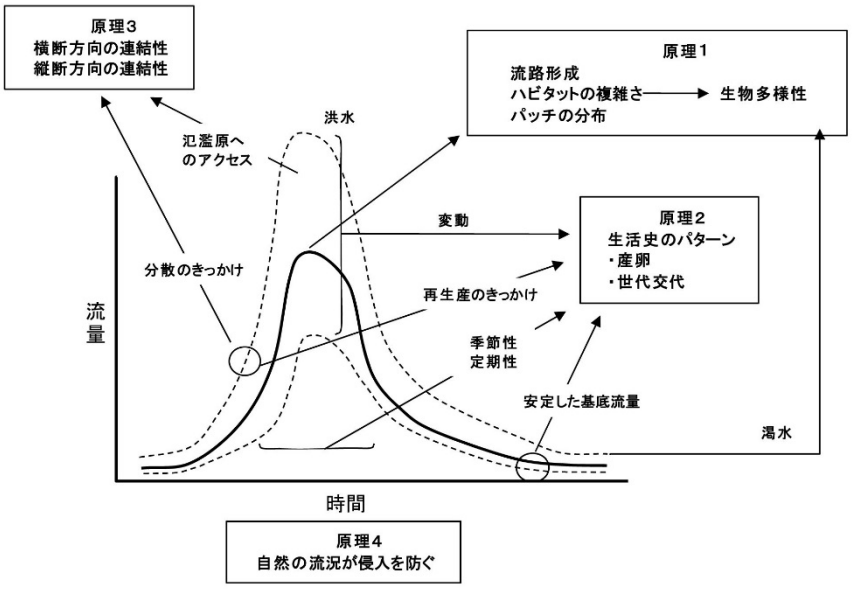


図-Ⅱ.6.3.3　水生生物の多様性と河川の自然の流況

原理３：水域の縦横断方向の連結性が自然なパターンにより維持されることが、多くの河川に生息する種の生育にとって重要である。(Ward, et al. 1999)

原理４：流量の改変は、外来種や移入種の定着を促進させる。

Bunn,et al.(2002）が整理したこれら４つの原理を概念図として示すと、図-Ⅱ.6.3.3の様になる。

皆川(2000）は、日本における研究事例を中心に、出水とハビタット、生物に関する既往研究を収集し、季節的な出水と生物の生活史と関連した役割や機能、出水規模や攪乱の程度に関連したハビタット、生物への役割や機能について整理している（表-Ⅱ.6.3.1)。表-Ⅱ.6.3.1の役割・機能の列には、Bunn,et al.(2002）による４つの原理に対応させたローマ数字を追加している。我が国においても、河川流量が生物・生態系に及ぼす影響について、現地における観測に基づいた種々の研究が行われていることがわかる。また、それぞれの現象は、Bunn,et al.(2002）が整理した、河川流量が河川における水生生物の多様性に影響する原理と矛盾せずに説明できそうである。

また、生態系に対する河川流量の影響についての検討は、生態系の評価指標の一つである多様性に着目する場合が多い。河川流量が生物多様性に影響する作用機構は攪乱によるものが大きいと考えられる。Huston(1994)の動的平衡モデル（dynamic equilibrium model）は、攪乱と生産性（一般に正味の有機物[炭素]の蓄積速度で表現される）の相互関係から多様性を予測するものであるが、河川における攪乱と多様性を比較する上で参考になる。この概念を図示したものが図-Ⅱ.6.3.4である。生産性が高く、攪乱のほとんどないシステムでは、優占種が競合の結果、他の種を駆逐してしまうために多様性は低くなる。このような場所で攪乱が増加すると優占種の競合力が低下することで他の種を駆逐することができなくなり、結果として多様性が増加する。

逆に生産性が低い場所では、競合による他種の駆逐速度が低いために、攪乱が低くても多様性は高くなる。生産性が低い場所で攪乱が激しいと、攪乱が成長速度の速くない種を再生産が行われる前に消滅させてしまうために多様度は低くなる。生産性が高く、攪乱も頻繁に生じる場所では成長速度が速いものの競合による寡占が生じさせないほど頻繁に攪乱が生じるために多様度は高くなる。

これに対して、Tilman(1982）の不均質な環境における資源競合モデル（theory of resource competition in aheterogeneous environment）は、生物種の多様性は資源の不均一性と生産性に規定されると考える。このモデルの考え方は以下のようである。まず、種数は比較的資源の少ないハビタットで最大になるが、資源がきわめて少なくなると急激に減少し、資源が増大すると徐々に減少する。次に多様性が最も高い集合体においては、多くの種が優占するが、資源が増加するとほとんどの種は数が少なくなり、少数の種により優占される。これらを図示したものが図-Ⅱ.6.3.5である。最後に、ある資源量の基では、特に資源量が少ない場において、空間的不均一性が高いほど種数が増加す

る。Huston と Tilman のモデルを合わせると、潜在的生産性、攪乱、空間的不均一性が場における多様性を規定する鍵となっているということが示唆される。

流量が生態系に与える影響を検討するには、個々の生物種についての検討の際に考慮した項目に加えて、生物種間の関係を考慮する必要がある。その際には、場の生産性という概念を追加する必要がありそうである。流量が、生物・生態系に与える影響についての研究は、数多く実施されているため、今後さらに包括的なレビューを実施することで、気候変動による流量変化に伴う生物・生態系への影響についての理解が整理されると思われる。

２）水温と河川環境

河川水温は、水生生物の代謝速度、生理、生活史特性に直接影響し、栄養塩類の循環や生産性といった重要な過程の速度を決定する(Allen1995)という点で、水生生態系において非常に重要な項目である。大型生物のみならず、微生物活性も水温に大きく影響されるため、生化学反応による水質変化を規定する極めて重要な要因であるし、水温変化は水の密度も変化させるため、流動にも影響を及ぼしうる。また溶存酸素の飽和濃度は、水温により変化することから、溶存酸素濃度変化という観点を通じてさらに生物に影響する。このように、数多くの水質項目の中でも水温は、河川環境におけるもっとも重要な項目である。河川水温が変化すると、水中に住む変温動物である魚類や無脊椎動物は、体温を調節できないために大きく影響を受ける。水温の持つ環境への影響の一事例として、環境省が設置した水生生物保全水質検討会の報告書(環境省2002)に、日本に広く分布する魚介類の生息水温が整理されている。

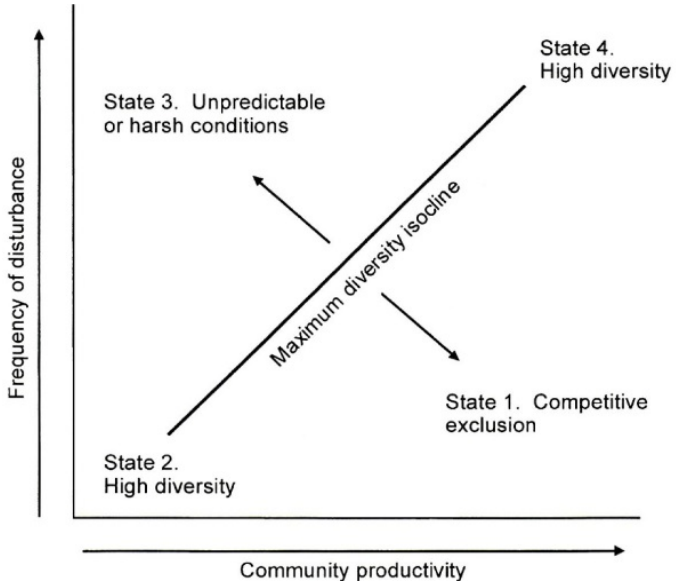


図-Ⅱ.6.3.4　生物多様性の動的平衡モデル

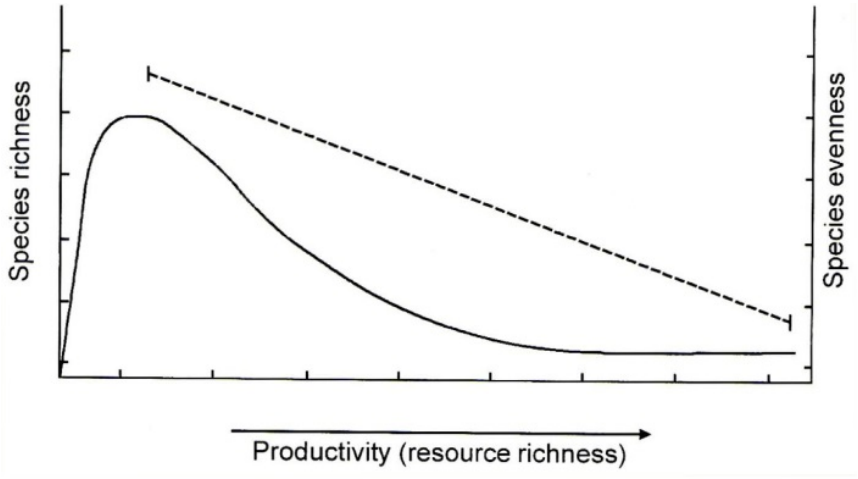


図-Ⅱ.6.3.5　Tilmanの資源競合モデル

表-Ⅱ.6.3.1 出水がハビタット、生物に果たす役割

	出水時期又は出水の規模・攪乱の程度		役割・機能	文献及び研究・調査事例
季節的な出水と生物	春期		・春出水は、魚類の遡上、産卵のトリガーとなる.（Ⅱ）	・河川下流域の魚の多くは、6月の梅雨期に増水した川の河川敷の草地や湿地帯へ侵入して産卵する習性を身につけた (片野 1995) ・春出水による流量増加は、Coregoninae（ｺﾚｺﾞﾇｽ属魚類）の孵化と流下の開始に対して最初のきっかけを与えた(Naesje T et al. 1995)
			・融雪出水による裸地の形成はその後のヤナギ類の種子の定着地となる.（Ⅱ）	・ヤナギ類は、融雪出水の減水期に種子を分散し、融雪出水によって形成された裸地にいち早く侵入する（中村 1999）
			・増水時にワンドや高水敷の草地などが冠水あるいは増水することにより本川と連続し、ワンドやタマリで生活史の一部として利用する生物の存続を維持（Ⅲ）	・千曲川における1999年5月のワンド調査において、出水による本川の増水に伴い、本川とつながっているワンドに魚類が侵入し、ワンド内の魚類は増加した（建設省土木研究所環境部河川環境研究室 2000）
	様々		・出水による種子散布、及び攪乱による種子の再分散（中村 1999）（Ⅱ）	
出水規模とハビタット・生物	小 ↓ 水域の攪乱 ↓ 大	平常時の数倍以上の河床堆積物が掃流（フラッシュ効果）する程度の出水	・比較的軽い河床付着物や堆積物の掃流、付着藻類の剥離 →付着藻類の活性化、魚類・底生動物の餌資源としての質の向上、自濁作用の防止 →自浄作用の向上 （Ⅰ）	・自然共生研究センター実験河川における人工出水実験（平常時流量 0.1m³/s を 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0m³/s に増加、ﾋﾟｰｸ継続時間 20 分）では、出水前の現存量によるが、少なくとも 1.0m³/s（平常時の 10 倍、掃流力では 5 倍）で、付着藻類は有意に減少する（皆川ほか 2000） ・松浦川水系厳木ダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（1998.11、厳木川流量0.8m³/s を 10.7m³/s に増加、ﾋﾟｰｸ継続時間 2 時間）では、付着藻類の現存量や底生動物の個体数・現存用・群集構造への影響は認められなかったが、比較的移動性の大きい底生動物への行動には影響を及ぼした（皆川ほか 2000）
			・底質に堆積した細粒土砂の掃流 →底生動物ハビタットの改善 （Ⅰ）	・木曽川水系比奈知ダム試験湛水時の流量減少によりｶｹﾞﾛｳ目は激減し，ｲﾄﾐｽﾞ目は増加していたが，フラッシュ放流のﾌﾗｯｼｭ放流（1998.3～4、ダム放流量 0.5m³/s→11m³/s に増加（約 1 ヶ月間継続））によって、その分布は試験湛水前に回復する兆候がみられた（辻本 1999）
		河床材料の移動を伴う出水 一般に、無次元掃流力 τ_* > 0.06	・河床材料の移動に伴う付着藻類の剥離、底生動物の変化 →優占種の変化、群集構造の変化 （Ⅰ）	・利根川水系五十里ダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（出水期 4～7 月に 1 回/月、対象放流は 1997.5）では、ダム放流量 1.0m³/s→100m³/s に増加（ﾋﾟｰｸ流量継続時間：20 分）させた．その結果、河床材料の移動（最大粒径約 23cm）、付着藻類は Chl-a で 1/3 に減少（緑藻・珪藻綱は大きく減少、藍藻類綱は残存率高い）、底生動物は早瀬・平瀬でｶｹﾞﾛｳ目やﾄﾋﾞｹﾗ目が減少、深い淵では増加傾向）底質の炭素・窒素含有率が約 1/3 に低下、放流前後の水質では Chl-a 及び大腸菌群数の低下が確認された (角 1998)
			・河床堆積物が動くことによる河床内間隙水域（河川水が河床内に浸透した水域）の溶存酸素を含んだ浸透水の維持 →河床内間隙水域生物のハビタットが維持 （Ⅰ）	・水生昆虫にとって重要な河床内間隙水域を維持するために溶存酸素を含んだ浸透水の存在が必要になり、このような生息場所条件は増等の攪乱時に堆積物が動くことが必要 (竹門 1997)
			・河床材料の移動に伴う底生動物の流出 →優占種の変化、群集構造の変化 （Ⅰ）	・実験により河床材料が移動した時に顕著に、水生昆虫が流出することが把握された (清水ほか 1998) ・流量が安定すると極相として造網型が優占するが、出水による攪乱・流出後は、まず、遊泳型、匍匐型が回復し、その後造網型が回復し、優占種は変更する．伊勢湾台風後の大規模攪乱後の調査結果によると、台風前の状況に回復するのに 7 年を要した（津田 1972）平常時流量の 7～10 倍の出水後の南浅川における回復過程では優占無き群集→匍匐・造網型優先群集に遷移し、1 年後には洪水前の組成の群に回復 (小倉 1985)
		2～3年に一度の規模の出水	・瀬や淵等、川の形を形成 （Ⅰ）	・河道の平面形態は低水路満杯流量（平均年最大流量＝2～3年に1回の出水）くらいで規定される (山本 1994)
		5年に一度の規模の出水	・階段状河床型の淵の形成 （Ⅰ）	千代川上流域における階段状河床形態の淵は、約5年確率の洪水に対する階段状形態とよく対応している (藤田 1995)
	水際域から陸域の攪乱 ↓ 大	冠水領域、冠水頻度の増大	・冠水領域の拡大 →本川とワンドやタマリの連続性が高まり、ワンドやタマリを生活史の一部(産卵等)として利用する生物の存続を維持（Ⅲ） ・冠水頻度 →地被状況に大きく関与（Ⅰ、Ⅲ）	・本流が増水し場合には、その周囲が冠水し、本流やワンドに住むフナ類やナマズ、ドジョウなどが冠水した場所で産卵（片野 1998） ・雫石川では冠水頻度が 1～5 日/年を越える場所に裸地が多い（萱場 2000） コロラド川グレン・キャニオンダムにおけるﾌﾗｯｼｭ放流（(1996.3) ダム放流量 200m³/s→1,270m³/s に増加、継続時間 8 日)によって、直径 75cm 程度の 10 個の河床材料は全て流下(平均 230m)し、砂浜が形成された（100 ヶ所の砂浜のうち 10%が減少，50%が増加，40%は影響を受けなかった）．河畔植生への影響については、草本植物，特に一年草に有意な減少．外来植生のタマリスクの発芽の若干の抑制効果をみられた．魚類への影響では、在来種は流れの緩やかなところに逃避．移入魚種（帰化魚）も流失せず（鷲谷 1998）(Collier M 1997)
		水際域の浸食・堆積	・水際域の浸食・堆積による砂州の形成（Ⅰ） ・水辺植生の保全（奥田・佐々木 1996）（植生遷移が進まない）（Ⅰ）	
		流路の変更及び砂州の移動 数年～10数年に一度の出水	・砂州の移動に伴う植生帯が破壊 →裸地河原の再生 →河原に依存して生育生息する生物の保全 （Ⅰ） →生物多様性の維持（鷲谷 1999）（Ⅰ～Ⅲ）	・千曲川においては、1999年8月に生じた観測史上最大規模の出水により、砂州の移動、木本類を含む植物帯の破壊・流出し、規模な裸地河原が再生した (中村 1999) ケショウヤナギの種子は、流路変化などによる攪乱によって生じた砂礫裸地に先駆的に侵入することにより存続を可能にする（建設省土木研究所北陸地方建設局松本砂防工事事務所 1995）

（２）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析

a）分析の狙いと手法

前項までに述べたように、流水環境（流量・水質等）が水生生態系に与える影響についての知見は蓄積しつつある。これらの知見を活用し、気候変動に伴う流量・水質の変化により、生息可能範囲が狭まるなどの河川生物への影響を予測し適切な管理を行うためには、現在の河川生物の分布及びその規定要因を把握する必要がある。このような目的に対して、日本全国の生物生息状況を位置情報とともに把握することができれば、近傍の水生生態系特性の情報と比較することで、水生生態系特性の変化の影響を敏感に受ける指標種の抽出やそれら指標種の生息に必要な水生生態系特性に関する検討が可能になる。このために、類似の生物生息状況や水生生態系特性の分布を知ることのできる環境類型区分を作成することは有効な手法である。そこで、全国109水系を対象に河川水辺の国勢調査を利用し、水系単位に加えて調査地点単位での類型化を行うとともに、類型化の単位や対象魚種の違いによる類型区分結果の違いやそれぞれの特徴について把握した（望月ら、2012）。

河川水辺の国勢調査は現在までに4巡の調査が実施されているが、本研究ではデータ集積が終了している第3巡目調査（平成16～20年）結果を用いた。本研究では河川環境への依存度が高く、比較的種の同定が細微まで行われている魚類（全確認魚種）を対象とした。

類型化には、調査地点と出現種による分類に使用されることが多いTWINSPAN法を用いた。類型の単位としては水系単位及び調査地点単位の２つのケースで行い、水系単位による類型区分では確認魚種、調査地点単による類型区分では確認魚種及び確認個体数により区分した。また、対象確認魚種は、全魚種・準淡水魚のみ、回遊魚のみの３つのケースで行った。

b）分析結果

水辺の国勢調査第 3 巡目より魚類の生息が確認された 840 地点を対象として分析結果を示す。まず、全調査地点が位置するセグメント（表-Ⅱ.6.3.2）の割合を図-Ⅱ.6.3.6 に示す。セグメント M の割合が少ないことが分かる。河川水辺の国勢調査は多くの調査地点が直轄区間内にあるため、上流部の調査地点が下流に比べて少ない。

図-Ⅱ.6.3.7 に、今回確認できた種の種類別の割合を示す。汽水・海水魚が最も多くその割合が半数を超えていた。

各ケースにおける類型化の結果を以下に示す。以降に示す樹状図

表-Ⅱ.6.3.2　沖積河道区間についての河道特性類型（セグメント）区分とその特徴
（山本、1994　および　国土交通省水管理・国土保全局、2014）

	セグメントM	セグメント1	セグメント2		セグメント3
			2－1	2－2	
地形区分	←山　間　地→←　扇　状　地　→ ←　谷　底　平　野　→ ←　自然堤防帯　→ ←　デルタ　→				
河床材料の代表粒径 d_R	多種多様	2cm 以上	3cm～1cm	1cm～0.3mm	0.3mm 以下
河岸の構成材料	河床河岸に岩が出ていることが多い	表層に砂、シルトが乗ることがあるが、薄く、河床材料と同一物質が占める	細砂、シルト、粘土の混合材料。ただし下部では河床材料と同一		シルト、粘土
勾配の目安	多種多様	1/60～1/400	1/400～1/5,000		1/5,000～水平
蛇行程度	多種多様	曲がりが少ない	蛇行が激しいが、川幅水深比が大きいところでは８字蛇行又は島の発生		蛇行が大きいものもあるが、小さいものもある
河岸浸食程度	非常に激しい	非常に激しい	中 （河床材料が大きいほうが、水路がよく動く）		弱 （ほとんどの水路の位置は動かない）
低水路の平均深さ	多種多様	0.5～3m	2～8m		3～8m

は、TWINSPAN法による分類の過程を簡易に示したものであり、左の1群から次々と群を分割する。記載の種は各段階で区分の要因となった種を示している。なおここでは、区分の要因となった種が出現した又は個体数が大きい場合に（-）、出現しない又は個体数が小さい場合を(+)で示している。

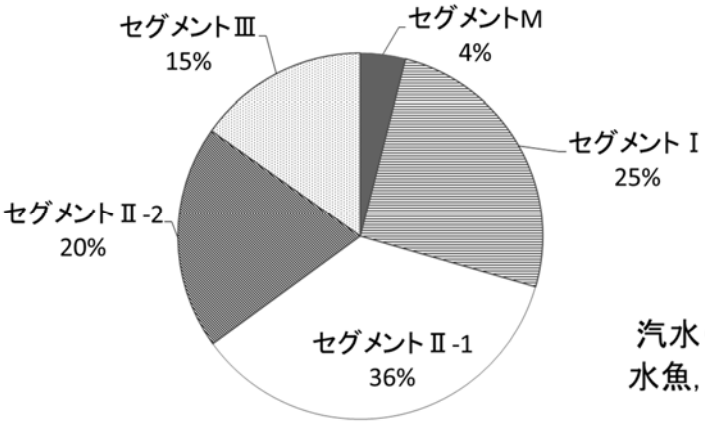


図-Ⅱ.6.3.6　調査地点のセグメントの割合

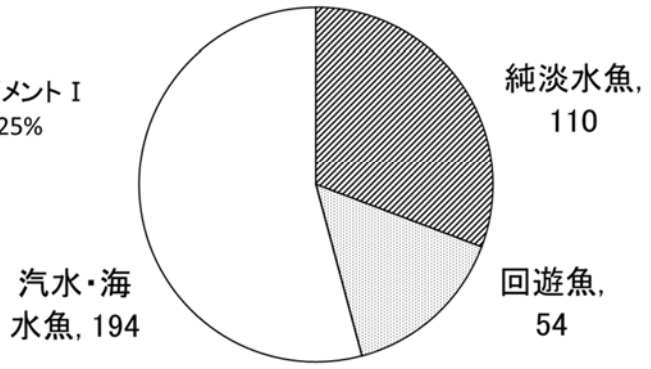
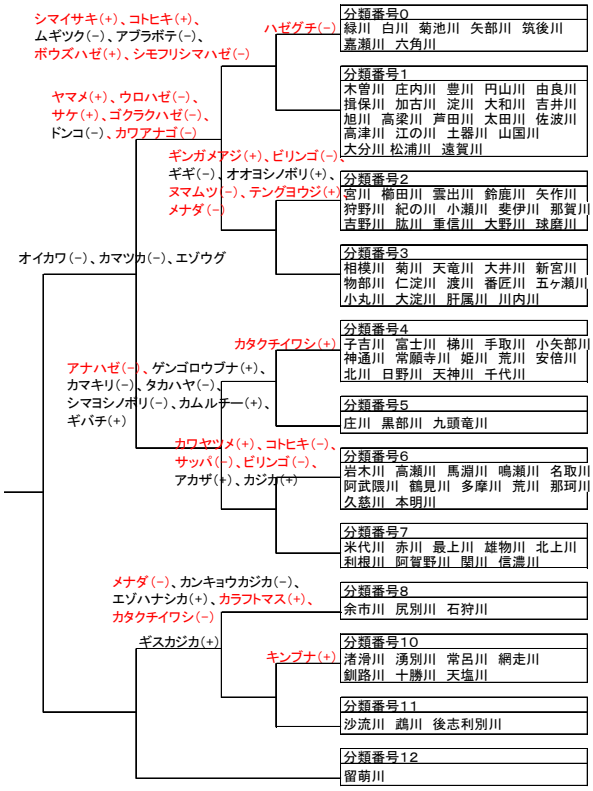


図-Ⅱ.6.3.7 確認種の割合（数字は種数）

b-1）水系単位・全魚種

樹状図を図-Ⅱ.6.3.8 に、類型区分の分類結果を図-Ⅱ.6.3.9 に示す。第一分類では北海道（類型 8～12）とそれ以外（類型 0～7）で分類された。北海道の固有種であるエゾウグイ、本州に広く分布するオイカワ、カマツカが要因となっている。本州は第二分類で類型 0～3 と類型 4～7 に大別されたが、前者は西日本、後者は東日本に分布する。（ただし、類型 4 は北陸及び中国地方の日本海側に分布する。）要因となった出現種はヤマメ、サケ（東日本に生息）、ウロハゼ、ゴクラクハゼ、ドンコ、カワアナゴ（西日本に生息）等であった。ドンコを除くと汽水・海水魚が要因となっていた。東日本は鶴見川・関川以北は主に類型 6、7 で占められ類型 6 は太平洋側、類型 7 は日本海側の水系が多く、類型 6 はコトヒキ、ザッパ、ビリンゴ等の汽水魚が、類型 7 はアカザ、カジカの淡水魚が出現することで区分されている。西日本は、有明海（類型 0）及び瀬戸内海、日本海側（類型 1）と、太平洋側の内湾（類型 2）及び外洋（類型 3）に分類された。区分の要因の種として類型 0、1 はシモフリシマハゼ、類型 2、3 はシマイサキ、コトヒキ、ボウズハゼと汽水・海水魚が多く見られた。その後の分類では類型 0 のハゼクチ、類型 2 のヌマムツ、類型 3 のギンガメアジ等がそれぞれの類型を特徴づける種となっており、既知の生息域とも一致する。



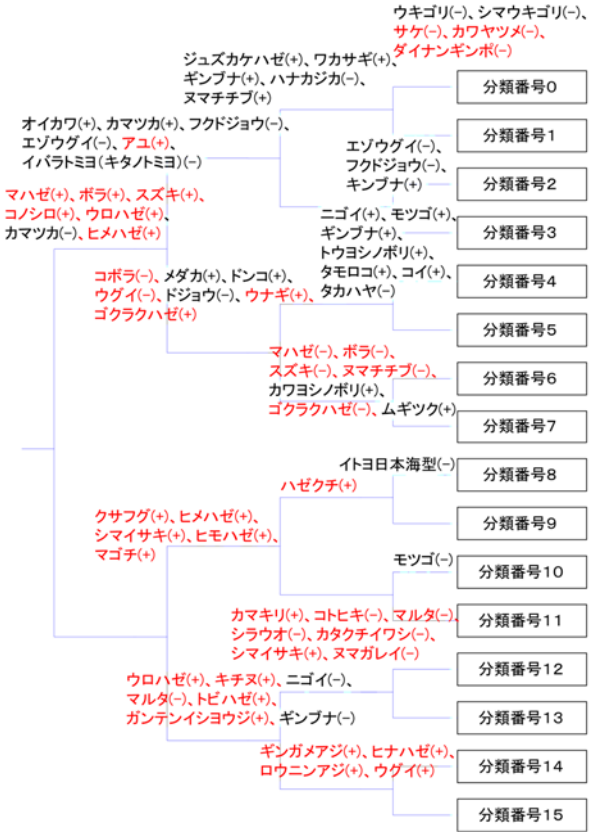
図−Ⅱ.6.3.8　水系単位・全魚種での分類結果（樹状図）



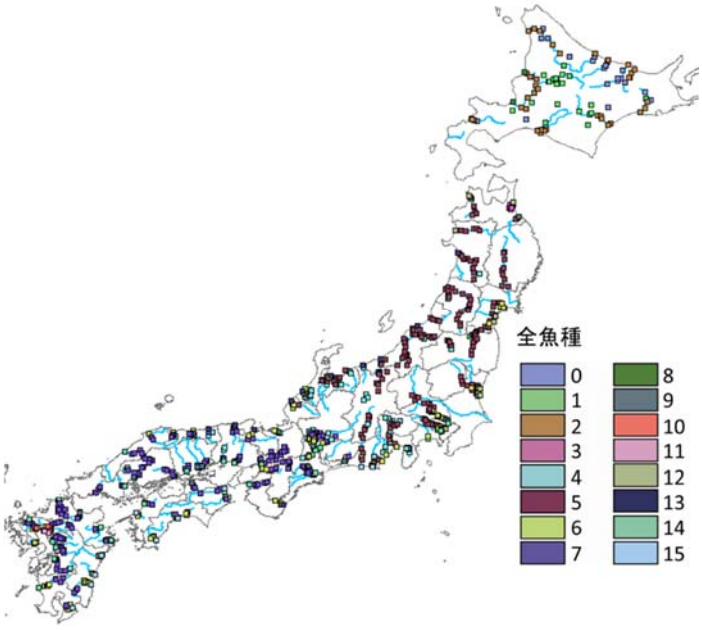
図−Ⅱ.6.3.9　水系単位・全魚種での分類結果

b-2) 調査地点単位・全魚種

樹状図を図−Ⅱ.6.3.10 に、類型区分結果を図−Ⅱ.6.3.11 示す。上流の調査地点と比較して河口・汽水域の調査地点において多様な魚種が確認されるため、これらの地点を区分するための類型が多く生じる結果となった。第一分類で 0～15 の類型は 0～7 と 8～15 の 2 つの類型に大別された。後者はほとんどが下流から河口・汽水域の調査地点であり、マハゼ、ボラ、スズキ、コノシロ、ウロハゼ、ヒメハゼ等の汽水・海水魚の生息状況が区分の要因となっている。



図−Ⅱ.6.3.10　調査地点単位・全魚種での分類結果（樹状図）



図−Ⅱ.6.3.11　調査地点単位・全魚種での分類結果

類型 8～15 は、北海道（類型 8）、瀬戸内海（類型 9）、有明海（類型 10、11）、東日本（類型 12）、本州日本海側（類型 13）、太平洋側・九州（類型 14、15）と地域毎に明確な区分が見られた。類型 0～7 は、北海道(類型 0～2)、東日本（類型 3～5）、西日本（類型 6、7）に大別され、水系と同様、北海道のエゾウグイ、フクドジョウ等の固有種が、西日本はドンコ、ゴクラクハゼ等の生息が分類の要因となっていた。類型 0～7 は類型 8～15 と比較して淡水魚が要因となっていることが多かった。また、類型 0～7 では、類型 8～15 で見られたような、太平洋側と日本海側等の地域による明確な区分は見られなかった。また、同一水系でも河口・汽水域の調査地点とそれ以外が異なる類型に分類されるものの、それ以外はほぼ同一水系で同一類型となっていた。

b-3) 調査地点単位・純淡水魚種

樹状図を図-Ⅱ.6.3.12、類型区分結果を図-Ⅱ.6.3.13 に示す。第一分類では、北海道（類型 8～15）、本州（類型 0～7）に大別された。ただし、類型 8 は高瀬川のみ 4 地点、類型 12 は小吉川のみ 1 地点、

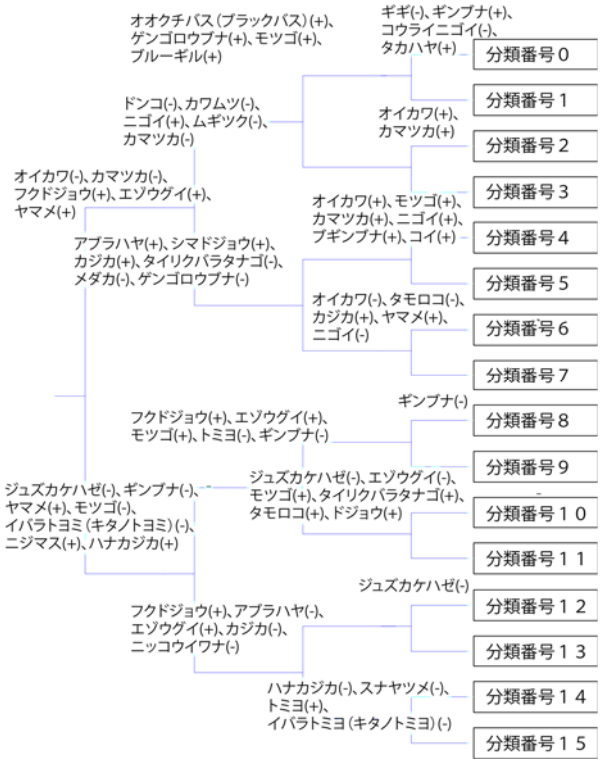


図-Ⅱ.6.3.12　調査地点単位・純淡水魚種での分類結果（樹状図）

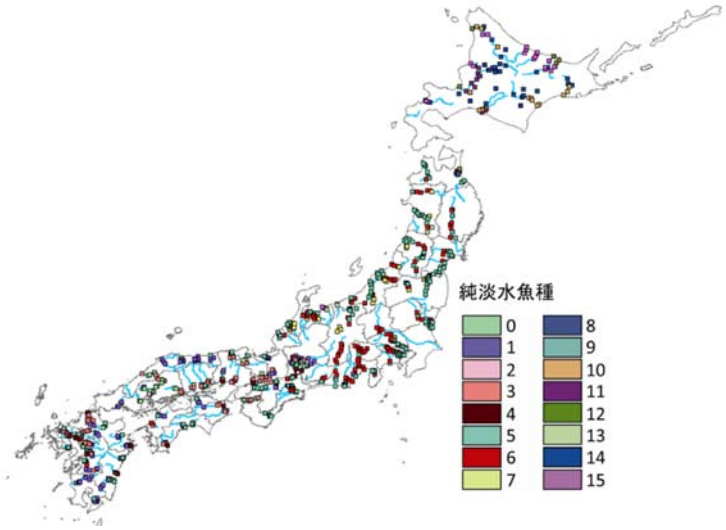


図-Ⅱ.6.3.13　調査地点単位・純淡水魚種での分類結果

類型 13 は一部東北・北陸を含む類型で 11 地点でありいずれも少数のみ存在する類型である。その後本州は東日本（類型 5～7）、西日本（類型 0～5）に分けられた。 a)、b)と同様に、北海道のエゾウグイ、フクドジョウ等の固有種の存在により本州と大別され、北海道の中でもそれらの固有種の生息状況に相対的に差があったことから、16 区分中の 8 区分（類型 8～15）を占める結果となった。例えば、日本海側やオホーツク海側に多い類型 14、15 はフクドジョウの出現割合が高く、太平洋側の水系に多い類型 10 はエゾウグイ出現割合が高いこと等の特徴が見られた。東日本の 3 分類に比べ西日本は 6 分類と細かく分類されていた。類型 5 は東日本～西日本全域に存在する類型でほとんどが下流域であり、ニゴイ、モツゴ等の環境の変化に強く比較的幅広い環境で生息できる淡水魚の出現数が多いことが特徴である。b)と異なり全国的に同一の水系でも上流と下流で異なる類型に区分されている河川が多く見られ、例えば東日本では上流側に類型 6、下流側に類型 5 を示す水系が見られる（最上川、荒川、天竜川等）。類型 6 は、アブラハヤ、シマドジョウ、カジカといった中流部に生息するとされる魚種の出現が特徴である。西日本では西日本に生息するドンコ、ムギツク等の出現が特徴的な類型 0、1、3 と類型 5 が混合している水系が見られた。西日本で対象地点の多い類型 1 と類型 3 を比較すると、類型 3 は外来種であるオオクチバスとブルーギル、元々は琵琶湖原産であるが釣りの対象として全国に移植されたゲンゴロウブナの生息等により類型 1 と区分されていた。類型 1 と類型 3 は同一地域の中でも混在しており、移植が魚類出現特性に影響を及ぼしている可能性がある。

b-4） 調査地点単位・回遊魚種

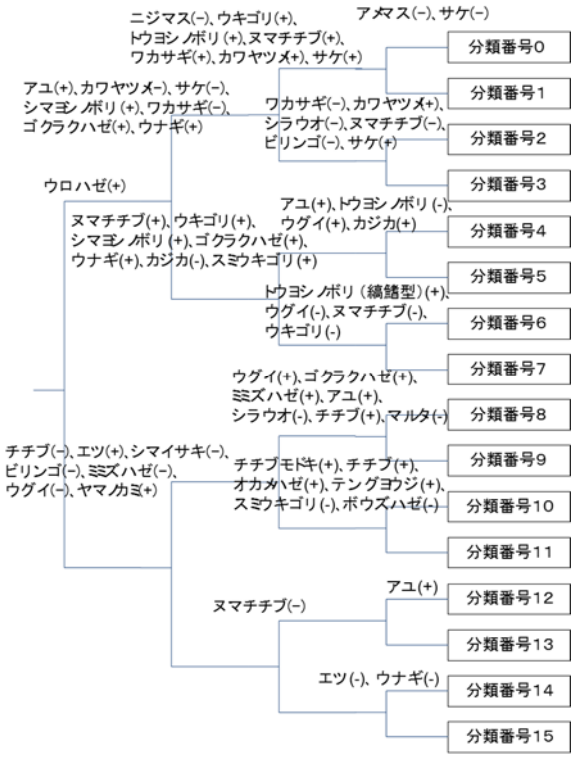
樹状図を図-Ⅱ.6.3.14、類型区分結果を図-Ⅱ.6.3.15 に示す。第一分類では類型 0～7 の北海道・東日本と類型 8～15 の西日本に大別された。本州では類型 5、類型 6 が多く出現しており、類型 5 が上流に分布し、それより下流に類型 6 が分布する水系が多く見られた。類型 5 の確認魚種が 17 種なのに対して類型 6 では 43 種の出現が確認されており、多様な種が確認される下流部と上流部が区分されていることが確認された。類型 12～13 は有明海の河川が多く、ヤマノカミが出現することが特徴である。b-1)～b-3)で見た類型と比較すると北海道や九州が大別される他は、本州内で多数の類型が混在しており、比較的明確ではなかった。

c）考察

調査地点単位・全魚種のケースでは第一分類で河口・汽水域と上流域に大別され、汽水・海水魚の生息に特徴づけられる河口・汽水域のみで構成される類型が半数を占めている。これらのことは、下流に行くほど出現種数及び出現個体数が多くなることが要因であると考えられる。河口・汽水域の類型は北海道、東日本、西日本、九州、日本海側、太平洋側と地域で比較的明瞭に類型が別れており、これは、海流や潮汐状況等の海域の影響による類型区分となっていると考えられる。

また、調査地点単位の河口・汽水域の類型区分は水系単位・全魚種のケースと類似しており、汽水・海水魚種が水系の類型を特徴づけていたことが示唆された。河川水辺の国勢調査では、多くの調査地点が直轄区間内にあり、上流部や支川での調査が比較的少なかった。このため、本来の汽水・海水域に生息する魚種及び個体数の多さもあり、全ての魚類確認種数及び個体数に占める汽水・海水魚種の割合が大きくなっていると考えられる。このように、水系単位・全魚種のケースにおける類型区分には河口・汽水域の環境特性が及ぼしている影響が大きくなることを考慮しなければならない。また、モニタリング方法に関する課題として上流域における調査地点の不足が示唆された。

全調査地点・全魚種のケースでは、河口域以外の類型は同一の水系内でほぼ同一の類型であった。しかし、純淡水魚に限定した類型区分では同一の水系内でも異なる類型が存在しており、純淡水魚の生息状況は同一水系内で一定というわけではなく、地点毎に異なる河川環境特性により影響を受け、縦断方向で魚類生息状況が異なることが確認できた。



図−Ⅱ.6.3.14　調査地点単位・回遊魚種での分類結果（樹状図）

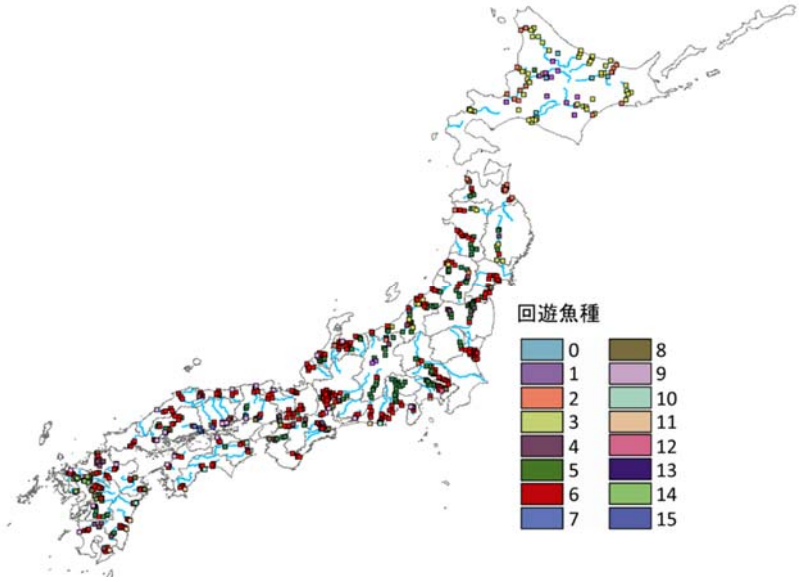


図-Ⅱ.6.3.15　調査地点単位・回遊魚種での分類結果

また、全調査地点・全魚種のケースでの河口・汽水域の類型区分は、日本海側・太平洋側で明確な区分があったが、純淡水魚では北海道、東日本、西日本で大別されるものの、日本海側・太平洋側での区分は明確ではなかった。これには以下の要因が考えられる。純淡水魚は陸水系に分布・分散が大きく制限される。渡辺ら(2010)によると、日本の純淡水魚は海峡の成立や山地形成などの歴史的イベントの影響を受けており、北海道石狩平野やフォッサマグナ等の純淡水魚出現特性の境界は、現時点における日本列島の純淡水魚類相の歴史生物地理的な「一般パターン」として位置づけられることが示唆されている。これらのことから、魚類生息状況は系統地理学的な要因によりまず前提となる出現の有無が決定されていることが近年の実測データを用いた本検討からも確認できた。そして、汽水・海水魚は純淡水魚と比較して環境変化への対応能力が高いことから、海流・潮汐等の地域ごとの違いにより太平洋側と日本海側で異なる生物出現特性を持ち、各地域固有の生物生息状況が形成されたと考えられる。

全調査地点・回遊魚のケースでは、北海道や九州が大別される他は、本州内で多数の類型が混在しており、地域ごとに類型を区分することは困難であった。このことは、回遊魚が成長の過程で海洋を利用しており純淡水魚に比較し移動能力高いため、生息場所が多様化しやすいことが要因として考えられる。今回検討を行った 4 つのケースから分かるように、生物出現特性による類型区分はその類型の単位や対象魚種により異なる結果を示す。分析方法や目的に応じて、適切な分類方法を選択することが必要である。

（３）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類及び底生動物の水温・水質への依存性評価

a）分析の狙いと手法

本項では、河川の流水環境要素のうち、水温を含む水質に着目し、魚類および底生生物の生息との関連性を明かにすることを目的とした分析を行った。河川の環境要素が水生生物の生息に与える影響を評価しようとする場合、対象とする環境要素を還元的に取り上げ、この環境要素の条件を系統的に変化させた実験が可能であれば、このような実験は影響評価の有力な手段となり得る。実際、水温や水質に関する水生生物の耐性に関する実験は水産対象種を中心に従来数多く実施されてきており、相当な知見が得られてきている。しかし、要素還元的な影響評価は、他の要素の影響を排除するのが困難な事もあり、本質でない間接的な疑似相関に惑わされたりする可能性も否めず、その解釈には細心

の注意が必要である。

今回の検討においては、水生生物種の存在可能な環境を水温・水質の観点で評価するために、実河川において、ある水生生物種の存在が確認された地点における水温・水質特性を解析することで、その水生生物種の生息可能範囲を推定することを試みた。この様な解析を実施することで上述の実験的アプローチとは異なり、生息のための水温・水質に関する必要条件の絞り込みを行うことになる。この方法を用いて種々の環境下において取得された大量のデータを一度に解析することで、検討対象とする環境要素以外の影響を含みつつも、大量データの持つランダム性によりこの影響を極力排除することを期待した。

分析の概要は以下のとおりである。全国 109 一級水系を対象に水質データ、河川水辺の国勢調査データを整理し、全国の最も多くの河川で確認された魚類 5 種、底生動物 5 種、狭温性の冷水魚等 6 種、主要な目に属する底生動物 9 種に関して、これらの種が確認された地点（生物調査地点からの距離が 2km 未満かつ同一河川内）における水温・水質（水素イオン濃度（以下 pH）、 溶存酸素濃度（以下 DO）、生化学的酸素要求量（以下 BOD）、 化学的酸素要求量（以下 COD）、 懸濁物質濃度（以下 SS））の分布をとりまとめた（天野ら 2011）。また、水温・水質に関しては、全国の全測定データを対象にその分布を整理し、上記の個々の生物種の確認地点における分布と比較することで、個々の生物種の水温・水質への依存性について検討を行った。

b）分析結果

水温・水質（pH、DO、BOD、COD、SS）の全国全地点全期間における測定値の頻度図を図-Ⅱ.6.3.16 に示す。水質項目毎に頻度分布の形状が異なっていることが分かる。

b-1）水温

水温は、10℃前後と 20℃前後に２つのピークを有する双こぶの分布形状を示した。13℃付近の水温帯で頻度が低くなるのは、地方別に見ても北海道を除く各地方で共通に見られる傾向であった。この理由としては、春から夏への昇温期、秋から冬にかけての降温期にかけて計測される水温帯である 13℃付近の水温を示す時期が期間的に短いことによると考えられる。

b-2）pH

pH はほとんどが中性を示す 7 から 8 の間の値を取った。酸性河川における測定値と考えられる pH が 6 以下の値は全体の 0/3%程度の頻度でしか存在しない。pH が 9 を超えるのは、富栄養化した湖沼や貯水池において植物プランクトンの光合成に伴って計測されることがしばしばあるものの、河川においては pH が 9 以上の値は全体の 1.5%程度の頻度であり低いものであった。

b-3）DO

DO は 8.5～9.0mg/l をピークにそれ以下では徐々に頻度が減り、それ以上ではまばらに分布する形状を示した。この値は、水温 20～23℃における飽和濃度に相当する。上記よりも低水温時には、9.0mg/l より高濃度の DO が測定されうると考えられるが、このような DO 濃度が測定された頻度は全体の 20%程度であった。順流域の河川水質測定結果からは、水生生物の生息に著しい悪影響を与えるような貧酸素は測定されていない。

b-4）BOD

BOD は 0.5～1.0mg/l をピークにそれ以上の値では徐々に頻度が減少した。近年の河川水質の向上を反映した結果と考えられ、貧酸素が発生しない結果とも整合性がとれている。ただし、BOD=5mg/l 以上の比較的高濃度を示す頻度は 10%程度を占めている。

b-5）COD

COD は 1.5～2.5mg/l をピークにそれ以下、以上の値は徐々に減少する分布であった（図-Ⅱ.6.3.16 では 10mg/l 以上の頻度は合計しているために頻度が高くなっている。）。BOD の値に比べて全体的に高い値を示す傾向が示された。COD は BOD に比べて難分解性の有機物を捉えるために、このような傾向が示されたと考えられる。また 10mg/l 以上の高い値は、降雨後に陸域から供給される微少な植物片などの有機物を多く含むサンプルで得られた可能性が高いと考えられる。

b-6）SS

SS は 5mg/l 以下の値を取ることが多く、これより高い値の頻度は徐々に減少するという分布であった。公共用水域水質測定が出水時を避けて実施されていることを示唆するとともに、環境基準を超える値がほとんど測定されない結果となっている。

次に、水温及び水質と水生生物の依存性の検討結果を示す。広域に分布する上位 5 種の魚類（ヌマチチブ、アユ、ギンブナ、ウグイ、オイカワ）と狭温性の冷水魚として選定した 5 種の魚類（ナマズ目の

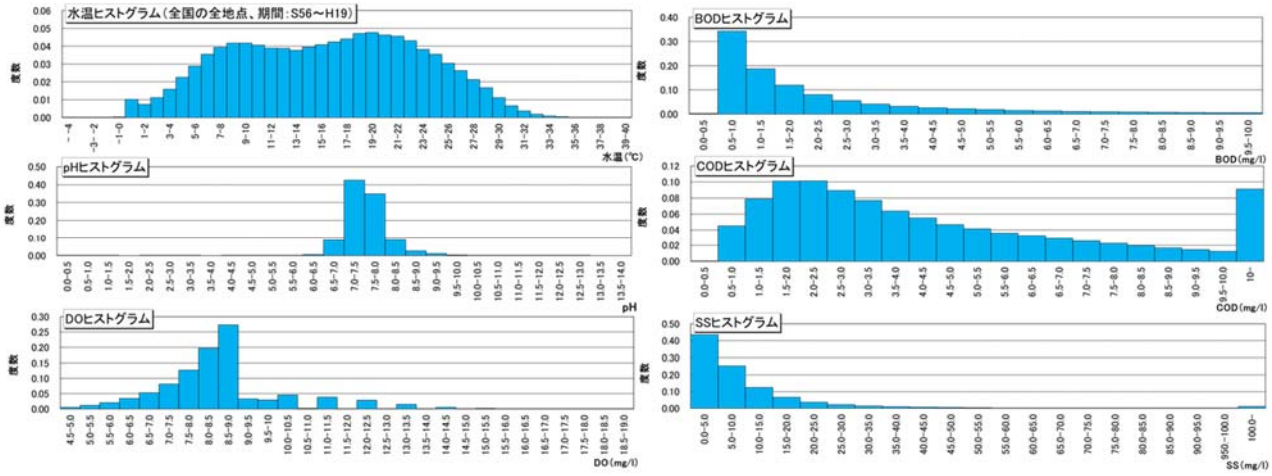


図-Ⅱ.6.3.16 全国河川水質測定値頻度分布図

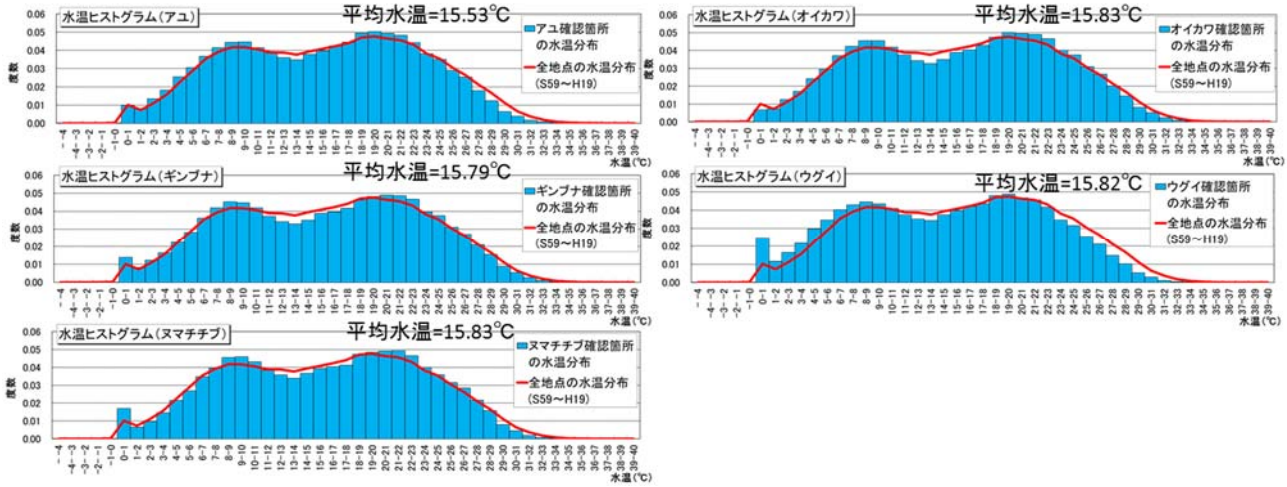


図-Ⅱ.6.3.17 広域に分布する魚類の確認地点と全水質調査地点での水温頻度分布の比較

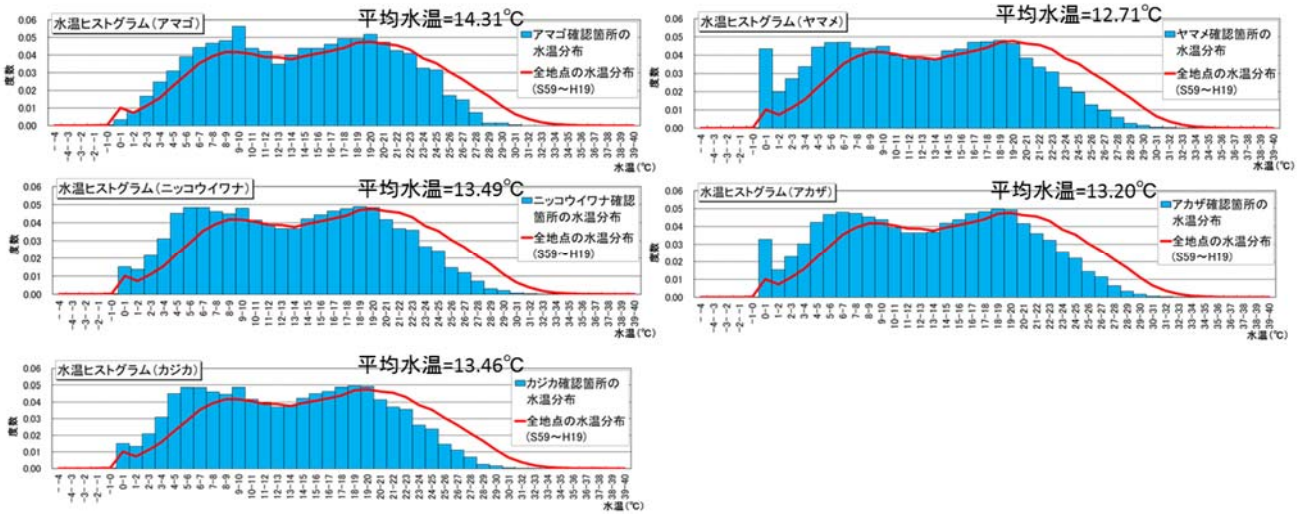


図-Ⅱ.6.3.18 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

アカザ、カサゴ目のカジカ、サケ目のニッコウイワナ、ヤマメ、アマゴ）が確認された地点における水温の頻度分布図を重ね合わせたものを図-Ⅱ.6.3.17 および図-Ⅱ.6.3.18 に示して比較する。

広域に分布する上位 5 種の魚類が確認された地点における水温の頻度分布は、全測定地点において計測された水温の頻度分布とほとんど同一の分布形状を示していることから、日本におけるこれら 5 種の魚種の分布は現在の河川水温には規定されていないと考えられる。

これに対して、狭温性の冷水魚とされる 5 種の魚類（アカザ、カジカ、ニッコウイワナ、ヤマメ、アマゴ）が確認された地点における水温頻度分布は、全測定地点において計測された水温の頻度分布と比較して低水温側に偏在しており、これら魚種の生息場所は水温が低い場所であるということが示された。なお、底生動物種についても分析したが、結果として広く分布する種を選定したためと考えられるが、水温に対する依存性は特に見られなかった。

水温以外の水質については、広域に分布する魚種と狭温性の冷水魚の確認地点における水質の相違について遊泳魚であるオイカワとヤマメを取り上げて比較すると、図-Ⅱ.6.3.19、図-Ⅱ.6.3.20 に見られるようにオイカワが確認された地点における水質（pH、DO、BOD、COD、SS）頻度分布は、全河川における測定値のそれとほぼ同様の分布を示した。これに対してヤマメでは、pH では全河川での頻度分布とほぼ同様であるものの、DO では 8mg/l 未満の値が計測されることが 10%（全河川における測定値では 33%）と DO が高い地点に生息していることが示された。 BOD については、2mg/l 以上の値が計測されるのが確認地点で 9%に対して全地点で 35%、COD について見ると、4mg/l 以上の値が計測されるのが確認地点で 12%に対して全地点で 44%という様に河川全体と比較して DO が高く、BOD と COD が低い傾向の箇所に生息していることが示された。これに対して SS の頻度分布をヤマメ確認地点と河川全体とで見ると、5mg/l 以下の低い値をとる頻度は確認地点で 53%、全体で 44%となるのに対して、25mg/l 以上の比較的高い値をとる頻度は、確認地点で 8%、全体で 9%とほぼ同等の値であった。ここでは、広域に分布する魚種と狭温性の冷水魚の確認地点における水質の相違について遊泳魚であるオイカワとヤマメを取り上げて比較したが、他の広域に分布する魚種についてはオイカワと他の狭温性の冷水魚についてはヤマメと類似の結果を示した。

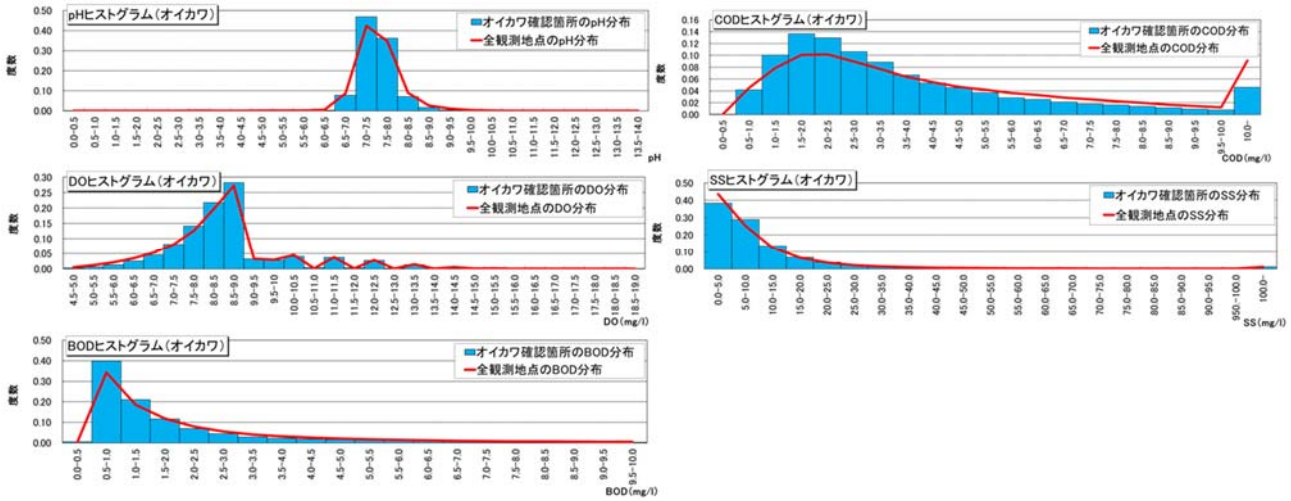


図-Ⅱ.6.3.19 広域に分布する魚類（オイカワ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

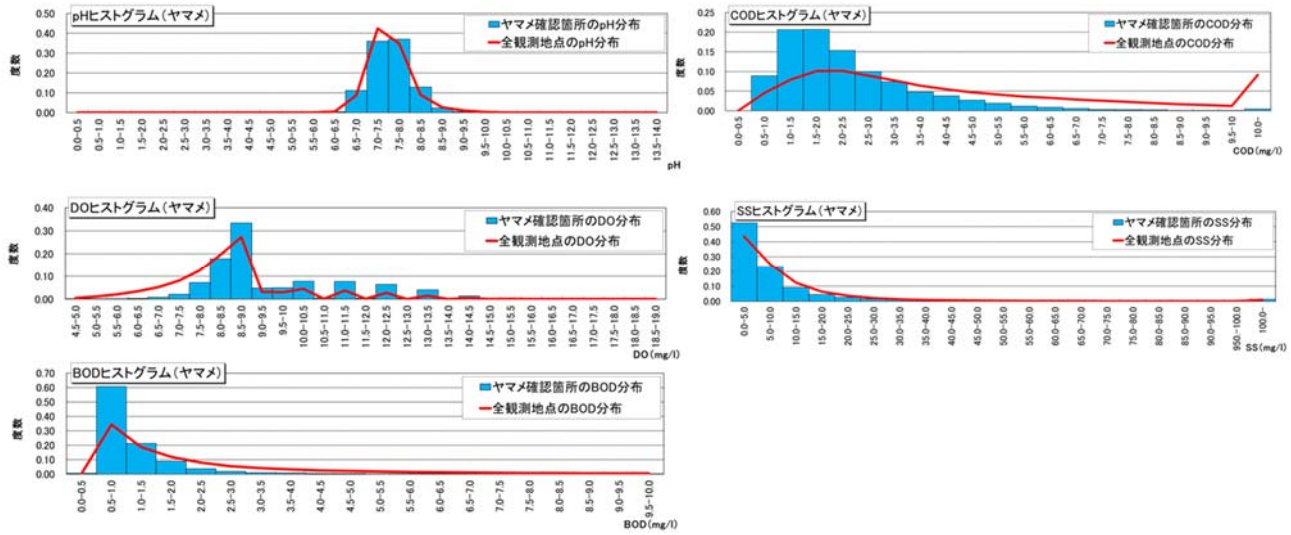


図-Ⅱ.6.3.20 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

今回解析対象とした底生動物が確認された地点における水質頻度分布については、若干 COD が低い値を多く示していることから水質の良好な箇所を選好していることが示唆されるものの、全地点の水質頻度分布と比較して際だって特徴的な相違は認められなかった。

c) 考察

今回の解析対象とした種々の水生生物が確認された地点における水質頻度分布を見ると、狭温性の冷水魚については明らかに水温が低く、DO が高く有機物濃度の低い箇所に生息していることを示す結果となった（図-Ⅱ.6.3.18、図-Ⅱ.6.3.20）。ただし、図-Ⅱ.6.3.18 を見ると、全体的に低水温帯に分布しながら、狭温性の冷水魚が確認された地点において、頻度は低いものの 30℃を超える様な比較的高い水温も測定されている。今回の検討では、一度でもヤマメの存在が確認された地点におけるすべての水質観測値を集計しているため、上記のような高水温が計測された時点で観測地点から離れた場所に移動していた可能性は否定できないが、ヤマメが確認された地点でも、かなり水温が上昇することを示している。そこで、一年ごとに最高水温を求めて、これらの平均をとった平均年最高水温を求めて比較すると、アマゴやヤマメが確認された地点では、平均年最高水温が 26℃以上になる地点は見つからず、この

辺りの水温が冷水魚の生息限界と考えて良さそうである。このことは、水生生物の生息を規定する水質影響について考察するために観測データを取り扱う際の留意点を示唆している。今回の様な解析結果から水質（水温）と水生生物の関係について考察する場合、彼らが常に耐えながら生息することができる水温の範囲、すなわち耐忍温度（最高および最低）と、生活史の中で経験はするものの、その期間が限定的であれば、耐えられる水温の範囲を区別する必要があるということである。この例では、年間の最大値にのみ着目しているが、水生生物の生息の規定要因として水質に着目する場合、生活史の段階に応じた確認などの検討が必要になる。人為的な影響としての河川水質の変化は、ダムの建設・運用や、下水処理水の放流などにより発生する。このような場合、水生生物への影響を最小限にするために種々の検討が行われるが、彼らが常に耐えながら生息することができる耐忍限度と、その期間が限定的であれば、生物には適応力があるため耐えられる水質の範囲を区別して検討することが重要であると考えられる。今後、より詳細な解析が必要である。

６．４　気候変動が水生生態系に与えると考えられる影響

（１）既往の知見の活用

社会資本整備審議会は、「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）(2008)」の中で、地球温暖化に伴う河川環境の変化として、地球温暖化による気候変動が生じた場合、気温の上昇による水温上昇、降水量の変化による流況変動、また流域の環境の変化等も相まって、土砂・栄養塩類等の物質の流出が変化することが予想されるとしている。降水量の変動幅が大きくなることから、異常洪水や異常渇水が発生し、流量の変動幅が大きくなるとともに、積雪量や雪解け時期の変化による流量パターンが変化する。また、異常洪水の発生や大規模な洪水の発生頻度の増加により、土砂・物質の流出量が増加し、水質（濁度）や河床の環境に影響を及ぼすことが予想される。流量パターンの変化は、魚類等のライフサイクルに影響を及ぼし、適応が難しい種は生息数の減少など大きな影響を受けることが予想される。濁度の増加やシルト・粘土質の堆積による河床環境の変化は、魚類、底生動物、付着藻類等への影響が考えられる。また、流況や土砂・物質の流出の変化は、河道内の植生にも影響を与え、攪乱の状況等に応じて種の分布が変わることが考えられる。こうした様々な種の変化は、種間関係を通じ生態系に対しさらなる影響を及ぼすことが考えられる。また、連続性を有する流域の環境の変化は、外来種の繁殖や新たな種の侵入などが考えられる。水質への影響は、流況との関係もあり、予想することは難しい面もあるが、水温の上昇や溶存酸素（ＤＯ）消費を伴った微生物による分解反応が進むことにより、溶存酸素濃度の低下による水質の悪化が懸念される。湖沼や貯水池においては、気温・水温の上昇により湖沼等内部での温度成層や植物プランクトンの活動が影響を受ける等、河川以上に厳しい水質変化が予想される。水質の変化によっても生物への影響は考えられる。気候変化による生態系や水・物質循環系への影響は、現段階において知見やデータも少なく、予測するのは難しい、と総括している（図-Ⅱ.6.4.1）。

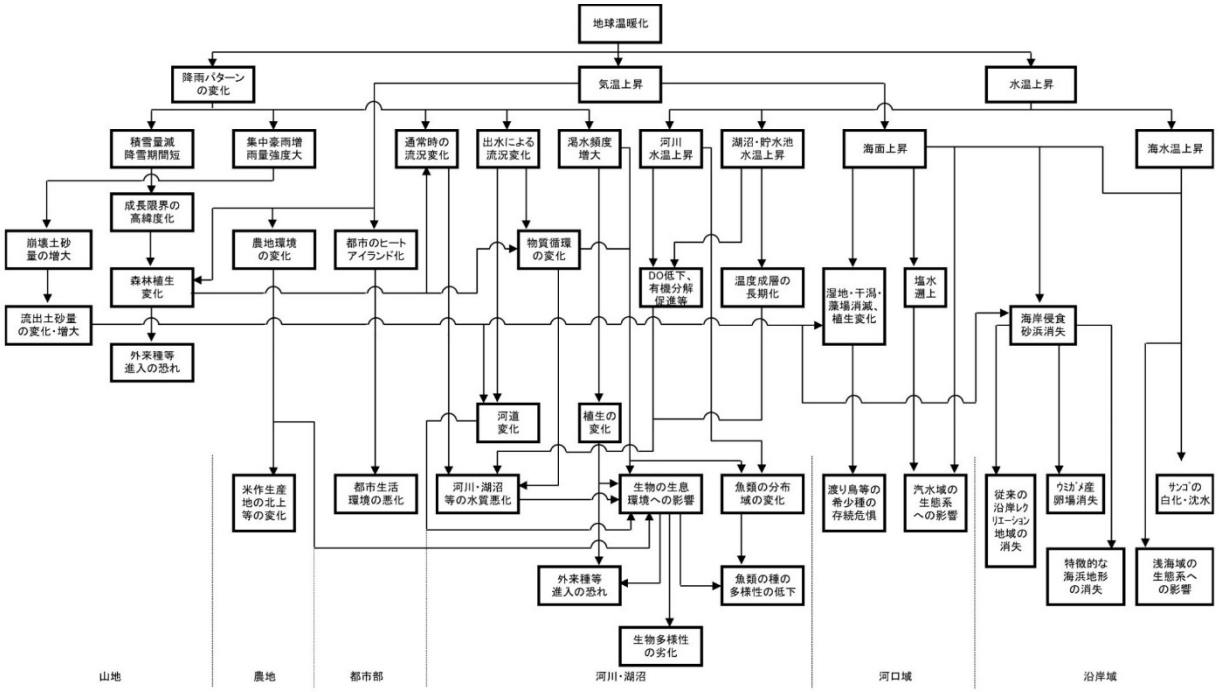


図-Ⅱ.6.4.1　地球温暖化に伴う河川環境・流域環境への影響イメージ

出典：社会資本整備審議会(2008)「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」答申

魚類への影響に関する既往研究（Vanet et al 1997、Beitinger et al 2000）は、生活史を通して生存可能な上限水温以上にならない限り（一般に卵や稚仔魚は水温の制限が強く作用する）、魚類の個体の成長や再生産速度はむしろ増加すると推定している。しかし、水温上昇が生じた場合、冷水魚は生息地が限定される可能性が高い。この場合、同一河川でも標高の高い場所に生息地が限定される可能性がある。冷水魚の分布域の減少や、残存個体群の分断は温暖化による魚類への重要な影響として予測される。温暖化の影響としては、水温上昇だけではなく流況変化も予測されているが、魚類に対するこのような複合的影響に関する検討も実施されており、水温変化に予測だけでは不十分であるとする結果が報告されている(Jager et al 1999)。複合的影響を含めて、生息環境の変化に対して、動物は生息適地への移動を試みると考えられる。水生生物については、すでに生じている水域の分断が問題を大きくする可能性がある。これらの例のように個別の生物種への影響に関する検討事例は枚挙にいとまがないが、温暖化の生物・生態系への影響評価は、現在行われている河川環境の評価に関する研究成果が相当部分利用可能である。

（２）水温上昇に対する簡易影響評価の試み

気候変動により予想されている気温上昇により河川水温も上昇するという仮定の基に、水温の変化による生物生息域の変化を予測するための試行的な検討を行った。全国の公共用水域調査全地点の各地点において測定された最高水温を測定位置（緯度、経度）情報とともに IDW 法により解析して作成した推定水温分布を図-Ⅱ.6.4.2 に示す。この推定水温分布は、水域と陸域とを区別していないため、河川の延長の中での水温分布の推定とは異なっている。

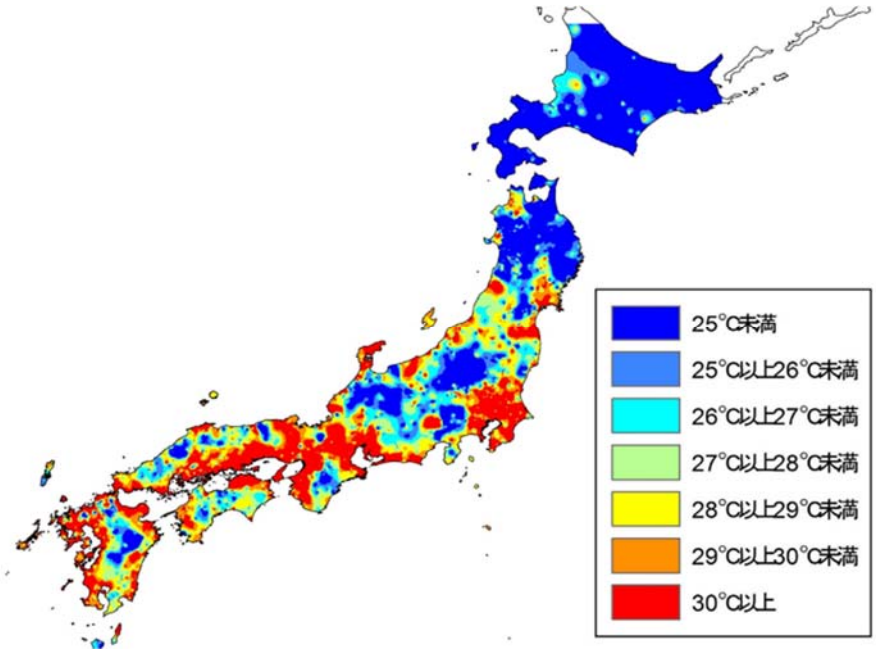


図-Ⅱ.6.4.2　最高水温の推定全国分布（現状）

このため、全国の河川水温の空間的分布の近似として認識する必要がある。この図からは、関東以北及び標高の高い山間部で水温が低くなることが数値的に示されている。冷水魚の確認地点ではあまり発現しない水温である 26℃を最高水温が下回る箇所に着目すると、東北以北が該当し、これより西の地域では信州や山地等に部分的に分布している状態である。

この状態から、仮に全国一律で水温が 1℃上昇した場合、また、極端な例として 3℃上昇した場合の分布図を図-Ⅱ.6.4.3、図-Ⅱ.6.4.4 に示す。また、最高水温ごとに国土面積を算定した。図-Ⅱ.6.4.5 はそれぞれの場合に最高水温がある温度（横軸）以下になる国土面積を求め、全国土面積に占める割合で示したものである。現状では最高水温が 20℃未満の地域面積は全体の約 5%、26℃未満の地域面積が約 40%となっている。ここで 26℃以下の地域面積に着目すると、全国の河川において最高水温がおしなべて 1℃上昇すると、全国土面積に占める割合は約 32%に減少し、現状の生息域の約 22%がなくなることになる。アマゴなど西日本に多く分布する生物の生息に影響を及ぼす可能性がある。3℃上昇したとして、これに適応できない場合を想定すると、冷水魚が生息可能な河川が分布する国土面積は約 20%程度に減少し、特に本州における生息地は非常に限定的になる。また、水温の上昇等の生息環境の変化に対して、生息適地への移動を試みると考えられるが、山地部に部分的な分布があった種や、構造物等により連続性が遮断されている場合は移動が困難になる。

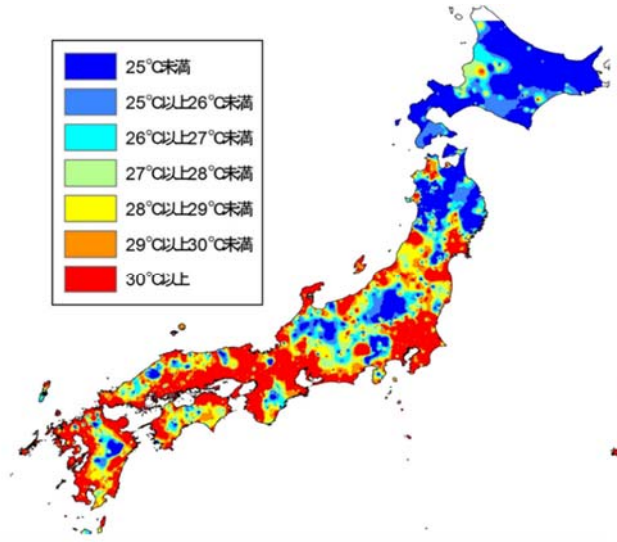


図-Ⅱ.6.4.3 最高水温の推定全国分布(1℃上昇)

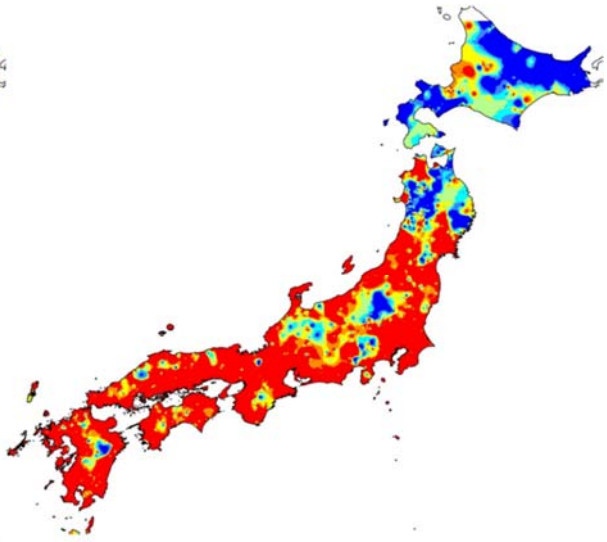


図-Ⅱ.6.4.4 最高水温の推定全国分布(3℃上昇)

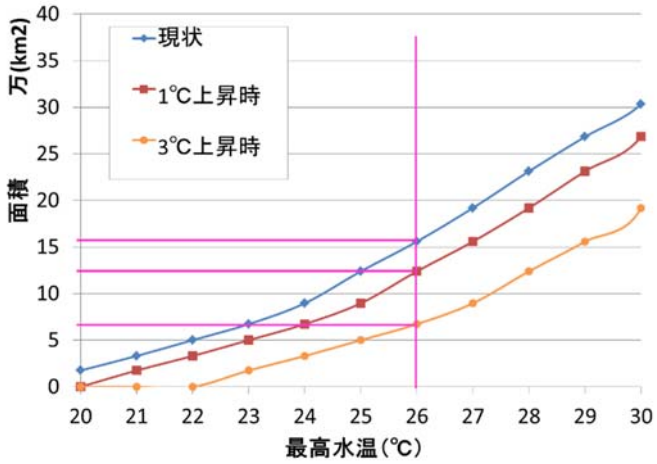


図-Ⅱ.6.4.5 最高水温ごとの国土面積の累計（全国土面積に占める割合による表示）

（３）今後の検討に向けて

気候変動による河川環境への影響を評価する場合には、6.2 で議論したように、当該河川において、流況や水温変化により駆動される河川の物理環境（地形、水質、流速、河床特性）変化の過程を理解し、現在おかれている河川の状況がすでに大きく攪乱されているものか、比較的環境が保全されているのかについてまず評価し、その後に気候変動がどの程度の新たな攪乱を生じるのかについて評価していくという手順をとるべきと考える。これは、すでに人為的攪乱の程度が高い河川ほど、気候変動による追加的な影響を強く受ける可能性が高い(Palmer et al 2009) ためである。適応策の策定においては、影響がさほど大きくないと予測されるものについては、現象が顕在化してから対応することも可能と考えられるが、6.4 で述べた冷水魚のように、影響が顕在化してからでは修復が困難と予測されるものもあると考えられる。今後、気候変動による河川環境に対する影響のうち、顕在化してからでは修復が困難な影響としてどのようなことが予測されるかについて、地域ごとに評価を行い、それらに対する適応策を策定していく必要があろう。そのためには、モニタリングや 6.2 および 6.3 で例示した分析に基づく河川環境の「システム」(7. を参照) としての現況の適切な把握を基盤として、流量や水温の変化と河川環境への影響を予測することが重要であり、それらの結果を活用し、環境の保全・整備の観点から生物の生息範囲の変化に伴う移動の確保（連続性）やダム湖の水質管理等、河川管理者として対応すべき課題を明らかにしていく必要があると考える。

参考文献：

天野邦彦、望月貴文（2011）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類および底生動物の水温・水質への依存性評価、河川技術論文集、vol.17、pp.513-518.*

新井正、西沢利栄（1974）水温論、水文学講座10、共立出版株式会社、東京

奥田重俊、佐々木寧（1996）河川環境と水辺植生、ソフトサイエンス社、東京

小倉紀雄、市川秀夫、安田卓哉（1985）洪水による南浅川上流域の水生昆虫群集の破壊と現存量の遷移、とうきゅう環境浄化財団研究助成No.77：20

片野修（1995）新動物生態学入門、中央公論社、東京

片野修（1998）ナマズはどこで卵を産むのか、創樹社、東京

河川法研究会（2006）改定版［逐条解説］河川法解説、大成出版社、p.23

萱場祐一（2000）雫石川におけるハビタットの冠水頻度との関連について、環境システム研究、Vol.28、pp.347-352.

環境省水生生物保全水質検討会（2002）「水生生物の保全に係る水質目標について」

建設省土木研究所河川環境研究室（2000）千曲川後背水域における魚類生態調査報告書

建設省北陸地方建設局松本砂防工事事務所（1995）上高地梓川河畔林保全に関する基礎調査

小出博（1970）日本の河川、京大学出版会

国土交通省水管理・国土保全局（2014）国土交通省河川砂防技術基準調査編、第4章河道特性調査

櫻井寿之、柏井条介、大黒真希（2002）日本の多目的ダムにおける微細粒子の捕捉と堆積、大ダム、n. 181、pp.30-40.

清水高男、皆川朋子、島谷幸宏（1998）底生動物の掃流に関する基礎研究－実験水路における流量の増加と底生動物の流失量の関係－、第２回応用生態工学研究会、pp.65-68.

社会資本整備審議会（2008）水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）

白川直樹（2005）流量の自然変動と人為的インパクトの影響、小倉紀雄、山本晃一編著、自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系、技報堂出版、pp.39-55.

角哲也、塚原千明、柏井条介（1998）ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、ダム技術 No.143、pp.40-51.

阪口豊、高橋裕、大森博雄（1986）日本の川、岩波書店、pp.212-228.

高橋裕編（1978）河川水文学、共立出版、pp.169-172.

竹門康弘（1997）渓流における水生昆虫の棲み場所保全、砂防学会誌、Vol.50、No.1、p.210.

塚原千明、角哲也、宮井貴大、柏井条介（1998）カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性、土木技術資料、v.40、n.11、pp.178-183.

辻本哲郎、増田健一、寺本敦子、田代喬（1999）試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュ流量、河川技術に関する論文集、No.5、pp.81-86.

津田松苗、森下郁子（1972）水中環境の変化と生物相－その破壊と回復、河川生態系の復元力に関する調査報告書

土木学会（1999）土木用語辞典、p.182

中村太士（1999）水辺林の更新動態に与えるダムの影響、応用生態工学2(2):125-139

藤田正治、道上正規（1995）千代川の淵の構造と魚類の生息、鳥取大学工学部報告、Vol.26、No.1、pp.181-193.

皆川朋子（2000）出水による付着藻類と底生動物の変化、多摩川の総合研究、pp.771-781.

皆川朋子、清水高男、島谷幸宏（2000）流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討、河川技術に関する論文集 第6巻、pp.191-196.
望月貴文、菊池佐智子、天野邦彦（2011）全国の河川における流況・水質の経年変化の実態調査と流域環境との関連性分析、環境システム研究論文発表会講演集、vol.39、pp.437-442.*
望月貴文、天野邦彦（2012）河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類出現特性による全国一級水系の類型化及び分析、河川技術論文集、vol.18、pp.107-112.*
山田俊郎、清水達雄、井上隆信、橘治国（1999）降雨時における森林集水域からの水質成分負荷流出特性、環境工学研究論文集、第36巻、pp.217-224.
山辺功二（1967）山地河川の流出水温について、水温研、4号、pp.42-47.
山本晃一（1994）沖積河川学、山海堂、東京
鷲谷いづみ（1998）生態系管理における順応的管理、保全生態学研究、Vol.3、pp.145-166.
鷲谷いづみ（1999）生物保全の生態学、共立出版株式会社、東京
渡辺勝俊、高橋洋（2010）淡水魚類地理の自然史、北海道大学出版会
Allen, J. D. (1995) Stream ecology: Structure and function of running waters, Chapman & Hall, New York, p.388.
Beitinger, T. L., Bennet, W. A. and McCauley, R. W. (2000) Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed to dynamic changes in temperature, Environmental Biology of Fishes, 58, pp.237-275.
Blanch, S. J., Ganf, G. G. and Walker, K. F. (1999) Tolerance of riverine plants to flooding and exposure indicated by water regime, Regulated Rivers: Research and Management, 15, pp.43-62.
Bunn, S. E. and Arthington, A. H. (2002) Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, Environmental Management, v.30, n.4, pp.492-507.
Collier, M., Webb, R.H. and Andrews, E.D. (1997) Experimental flooding in Grand Canyon, Scientific American, January, pp.82-89.
Huston, M. A.: Biological diversity (1994) The coexistence of species on changing landscapes, Cambridge University Press, Cambridge.
Jager, H. I., Van Winkle, W. and Holcomb, B. D. (1999) Would hydrologic climate change in Sierra Nevada streams influence trout persistence?, Trans. of the American Fisheries Society, 128, pp.222-240.
Junk, W. J., Bayley, P. B. and Sparks, R. E. (1989) The flood-pulse concept in river-floodplain systems, in Dodge, D. P. (ed.), Proceedings of the international large river symposium (LARS). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences Special Publication 106, pp. 110-127.
Naesje, T., Jonsson, B. and Skurdal, J. (1995) Spring flood: A primary cue for hatching of river spawning Coregoninae. Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol.52, No10, pp. 2190-2196.
Palmer, M. A., Lettermaier, D. P., Poff, N. L., Postel, S. L, Richter, B and Warner, R. (2009) Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options, Environmental management, 44(6), pp.1053-1068.
Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. (1997) The natural flow regime, Bioscience, 47, pp.769-784.
Poole, G. C. and Berman, C. H. (2001) An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation, Environmental

Management, v.27, n.6, pp.787-802.
Puckridge, J. T., Sheldon, F., Walker, K. F., and Boulton, A. J.(1998) Flow variability and the ecology of large rivers, Marine and Freshwater Research, 49, pp.55-72.
Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R. and Braun, D. P. (1997) How much water does a river need?, Freshwater Biology, 37, pp.231-249.
Tilman, D. (1982) Resource competition and community structure, Princeton University Press, Princeton.
Van der Kraak, G. and Pankhurst, N. W. (1997) Temperature effects on the reproductive performance offish, In: Wood C. M. and McDonald D. G. (eds), Global warming: implications for freshwater and marine fish, Cambridge University Press, Cambridge, pp.159-176.
Ward, J. V., Tockner, K. and Schiemer, F. (1999) Biodiversity of floodplain ecosystems: Ecotones and connectivity, Regulated Rivers: Research and Management, 15, pp.125-139.

７．まとめと今後の課題（第Ⅱ部）

７．１　主要な成果のまとめ

気候変動の治水・利水・環境への影響評価は、気候モデルによる将来気候の予測結果から機械的に導き出されるものではなく、気候・水文要素の変動を受けて、治水・利水・環境のそれぞれのシステムがどう応答するかの理解も重要な役割を担う。その観点から、第Ⅱ部では、各水系（河川流域）もしくは海域毎に、気候変動が治水・利水・環境の各システムにどのような影響を及ぼし得るのかについて、気候モデルによる降水量や気温などの予測結果を用いて、可能な範囲で定量的な評価を試みた。ただし、一部については、過去の経年変化実績に基づく分析・評価を中心として実施した。以下、それらの主要な成果を箇条書きにまとめると以下のようになる。

（１） 気候変動がわが国の治水施策に与える影響をマクロに評価するため、ある継続時間に関して、平均年最大降雨量の気候変動による変化率と、我が国の洪水防御計画が対象にしているスケールの年超過確率に対応した降雨量に関する変化率とに大きな差がでないとの仮定をおいて検討を行った（豪雨生起確率分布形について現在－将来間の同一性を仮定）。その結果、全国 109 の一級水系別の豪雨量（計画対象の降雨継続時間における年最大降雨量の平均値）の気候変動による変化倍率 α は、将来気候（今世紀末）に関して、SRES－A1B シナリオ下での 4 モデルそれぞれによる推定の中央値の平均で 1.15 となり、全モデルを通じて概ね降雨量が増加傾向になるとの結果を得た。なお、近未来については、α 値の 1 からの増加は不明瞭であった。また、将来気候での豪雨量変化に対応する流量倍率 β、河川整備労力倍率 γ、氾濫可能性倍率 ε は、豪雨量倍率 α の 1.15 倍率に対して順に 1.21 倍、1.82 倍、2.59 倍程度（4 モデル中央値の平均値）と増幅していく形で変化していた。それら 4 指標の倍率に関する 4 モデル間のばらつきも順に増幅していく結果となっている。以上は、施策に近い指標となるほど気候変動影響が強く現れること、降雨量の増加率が１～２割程度でも治水施策には相当の影響をもたらすこと、同時に、その影響度予測の信頼性についても相当大きな幅を想定せざるを得ないことを意味する。

（２） 豪雨量倍率 α の γ、ε への波及の全体的な傾向は上記の通りであるが、個々の水系ではそれらの応答にかなりの幅が出てくる。当該水系の河川整備進捗度合いと豪雨の年超過確率に関わる代表パラメータ（いずれも簡単に得られるもの）を用いて、豪雨量倍率 α 値の 1 からの増大率 α－1 が、河川整備労力倍率の増大率 γ-1、氾濫可能性倍率の増大率 ε-1 それぞれに敏感に影響が現れやすい（伝播しやすい）水系とそうでない水系を簡易に把握する手法を提示した。これは、水系毎の気候変動影響のマクロな観点からの受けやすさを理解して適応策を織り込んだ治水施策検討を行うことに役立つ。

（３） 気候変動影響の発現は長期にわたり、その間には被害推定に直接関係する人口・資産も有意に変化することから、人口・資産の長期変化をいくつかのシナリオに基づいて設定し、流域内での空間分布に関しても複数の展開シナリオを設定し、気候変動に加え、人口・資産の長期的変化が被害推定に及ぼしうる影響を水系単位で検討できるようにした。

（４） 都市域雨水排水対策（下水道）計画の基盤となる数 10 分スケールの短時間降雨強度について、現状の 5～60km メッシュスケールの気候モデルでは降雨セル単体の発達・減衰を表現できないため、その定量的予測は困難である。そこで、全国 57 の気象台ごとに既往降雨観測データの経

年変化傾向を調べた。その結果、年超過確率 1/5 および 1/10 のいずれの降雨強度についても全観測点の中央値で 1.1 倍、その中の 95%パーセンタイル値で 1.3～1.4 倍程度の増加傾向が実績データから見られることが確認された。そこで、10 分・60 分降雨強度について 1.0 もしくは 1.3 倍となる複数組み合わせを用いて下水道管路網水理モデルによる浸水シミュレーションを行った結果、計画対象流域の集水面積スケールによって、影響の大きい地区（上～中～下流）に違いが生じることがわかった。このことは、効果的な浸水対策を考えるためにも、対象とする排水区の降雨や浸水特性を把握することが重要であることを示している。

（5） 沿岸に作用する外力のうち海面水位と波浪の過去の変化を主要地点・海域毎に調べた。海面水位については、選定した14験潮所の過去観測データにより、1980年以降は一部例外を除きIPCC-AR4における全球平均値（年間3.1mm上昇）とほぼ整合する年間3mm程度の上昇傾向が確認された。近年の衛星海面高度計データによる解析でも、海域による違いがあったが、本州南岸～四国・九州の太平洋岸では概ね同程度の海面上昇傾向が見られた。ただし、日本近海では海面水位に十数年変動が卓越しているとの分析があり、上記の結果と周期的変動との関係をさらに調べる必要がある。一方、波浪については、年最大波高では明確な傾向を抽出できないが、ある閾値（例えば年平均の波高や波浪エネルギー）以上の波浪エネルギーの合計値に着目することにより増加傾向が複数観測所で確認された。また、海域毎に見たとき、台風数増加や台風最低気圧低下の傾向が見られる太平洋南方海域において、波浪エネルギー増加傾向が見られた。このことは、気候変動による気象場（台風・低気圧）の変化が、波浪外力を増大させるリスクがあることを示唆している。

高潮については、文科省革新プロにおける共同研究の一環としてIPCC-AR4におけるCMIP3世代の複数の気候モデル予測に基づくA1Bシナリオ下での確率台風モデルにおける予測成果について京都大学防災研究所から提供を受け、10,000年分の台風の変化予測データを用いて、日本三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）における高潮偏差の変化予測を行った。その結果、気候変動に伴い、小規模な高潮偏差の頻度は減少傾向になるが、中程度以上の高潮偏差の頻度が増加する可能性があることが示された。

（6） 水資源管理への気候変動の影響を調べるため、ダム貯水池が存在する積雪域および非積雪域の２つの河川流域を対象として、気象庁・環境省(2014)による現在気候および将来気候アンサンブル予測データ（RCP8.5 シナリオ、Yoshimura スキーム）を用いた利水計算を実施した。その結果、非積雪域ダム貯水池のある流域では、4 種いずれのアンサンブルケースにおいても夏季降水量の減少による夏季の渇水リスク（不足回数・日数）の増加が予測された。また、積雪域ダム貯水池のある流域では、同様にいずれのアンサンブルケースにおいても水需要量が大きい代掻き期における大幅な貯水位低下と、さらに夏期における降水量の減少・連続小雨の長期化による夏季渇水の激化が加わり、積雪域のある河川流域において、渇水リスクの増大がより強まるとの結果が得られた。

このように、非積雪域ダム貯水池のある流域と積雪域ダム貯水池のある流域で、渇水の変化傾向を検討する上でのとらえ方に違いがあり、前者では連続小雨日数の変化傾向を、後者では、それとともに積雪の顕著な減少につながりうる気温の上昇傾向がもたらす影響を押さえることが検討の要所となる。

（7） 全国の河川から 27 水系 60 地点を抽出し、公共用水域の観測データを用いて過去 30 年間程度の流況・水質・水温の経年変化についてまず整理した。その結果、流況の変化は各流況指標増減により 3 つのパターンに分類できること、水温が上昇傾向にある河川が多く見られること、BOD、

TP は減少傾向にあるが、COD、TN は増加・減少が半々程度あること、それらの変化特性には流域の開発や下水道整備・高度処理等の人為的影響も大きいと示唆されること、等を明らかにした。

河川の水環境特性と水生生態系指標種との関係を明らかにするために、河川水辺の国勢調査の第3巡目調査結果を用いて、まず、魚類の生息状況の類型化を試みた。その結果、全魚種を対象とした場合は河口・汽水域と上流域に大別され、調査地点の要因もあって河口・汽水域の環境特性（海流や潮汐状況等）に依存した汽水・海水魚の影響が大きいこと、純淡水魚については系統地理学的要因より出現の有無が決定されていること、回遊魚については地域類型が見られないこと、等を明らかにした。

水生生物種の存在可能な環境を水温・水質の観点で評価するために、全国規模で最も多くの河川で確認された上位5種の魚類や、上位6種の狭温性冷水魚等について、それらの存在が確認された地点における水温・水質特性を解析することで、それらの水生生物種の生息可能範囲を推定すること試みた。水温との関係に関する結果に着目すると、全国109一級水系の全測定地点における水温ヒストグラムと、魚類上位5種の生息地点における水温ヒストグラムがほぼ同一の形状であり、それらの魚種の生息は河川水温には規定されていないと考えられる一方で、狭温性冷水魚生息地点の水温ヒストグラムは、明らかに2～3℃程度水温が低い地点に生息していることを示す結果となった。また、平均年最高水温が26℃以下となる地点が狭温性冷水魚の生息限界と考えられることが示唆された。GIS解析により最高水温の現状での全国分布を推定した上で、気候変動による最高水温の上昇が１℃もしくは３℃であるシナリオを想定すると、最高水温が26℃以下である狭温性冷水魚の生息域がそれぞれ22%および50%程度減少する可能性があることがわかった。

７．２　今後の課題と取り組みの方向性

以上の成果を踏まえつつ、気候変動適応策を検討するという目標に照らして、気候変動影響評価の課題と取り組みの方向性を、いくつかのポイントに分けて以下に論じる。

<u>○特定の極端事象の生起を把握することによって影響評価および適応策検討が概ね可能となる場合</u>

この代表として、豪雨と治水施策への適応策組み込みの検討、高潮と沿岸防災・減災策の検討という組み合わせがある。この場合には、災害を引き起こす外力となる低頻度の極端事象に関する気候変動影響を気候モデルから把握することの困難性の克服が課題となる。我が国の場合、防災のための施設整備が一定程度進んできていることから、対象とする極端事象の生起確率が低頻度レンジに寄っている。また、日本の流域スケールに見合う高解像度気候モデルの予測計算は、今までのところ長くても 30 年に満たず、そこから対象となる低頻度の豪雨生起の情報を高い信頼性で得るのは難しい。このため、豪雨生起の分析に Station-year method を援用する、また高潮については確率台風モデルを導入するなど、気候モデルによる予測計算結果に対する二次的処理が必要となる。こうした処理を工夫することで影響評価に有用な情報が得られるものの、本質的限界はつきまとう。

防災・減災目標における気候変動影響のより明確な設定のためにも、的確な CO_2 排出量予測シナリオの絞り込みを含めて、気候モデルから得られる実質的情報に関する精度向上は強く望まれるところである。その意味で、平成 27 年 12 月に公開予定の地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の活用を通じた信頼性の幅の定量化・縮小の進展は大いに期待される。しかしなが

ら、d4PDF データについても、複数の降水スキーム、海面水温境界条件や観測不確実性に基づく摂動条件を与えているとは言え、全ては、同じ気象庁気象研究所の気候変動予測モデル（MRI-AGCM3.2H）の計算結果に基づいている。このため、予測値にバイアスが含まれる可能性も指摘されており（文部科学省他、2015)、世界のより多くの GCM による予測データに基づいたマルチモデルアンサンブルデータを活用する、わが国の現在～将来の降水特性を最も適切に表現できる GCM・降水スキームを絞り込む、もしくはそれらを改善する、等により、さらに気候変動予測・降水量予測そのものの精度向上を図ることが望まれる（深見、2014)。このような進展は、豪雨の流域内の時空間分布に対する気候変動影響をも直接的に分析できることにつながり、洪水防御計画における豪雨設定に本質的改良をもたらす可能性という観点からも重要である。

ところで、極端事象の中には、そもそも現在の気候モデルで表現しきれないものが残っており、その代表として、局所的な短時間集中豪雨があげられる。内水被害対応、都市域の雨水排水対策や浸水被害対応、土砂災害対応などにおいては、こうした事象を把握することが必須であり、この点において、従来の気候モデルは実用的な情報を提供するに至っていない。本研究では、このような豪雨については実務で対象になる極端事象の中では比較的多頻度のレンジが対象になることに着目し、既往データの時系列変化から将来に向けての短時間集中降雨の増大傾向を定量的に見積もった。このアプローチも、しかし、気候変動との物理的因果関係の裏付けが弱いこと、従来の局所・短時間集中豪雨の生起形態が気候変動により質的に変化するとすると有効性が低下するという課題を有する。この点からも、気候モデルのさらなる進化が望まれるところである。

<u>○気候に関わる様々な事象が組み合わさって害的事象を引き起こす場合</u>

この代表として渇水があげられる。渇水事象は豪雨のような見えやすい特定の極端事象によって概ね説明できるものでなく、小雨や無降雨の持続はもちろん、その間の気温や日照、積雪地域では気候変動による積雪量の長期低減傾向と当該渇水に直接関係する積雪量など、時間スケールの異なる様々な要素が重なり合って、また極端事象の生起特性だけでなく、通常の気候要素の経年変化にも影響を受けて、その出現状況が決まってくる。さらに渇水の生起は、当該水系等で採用している利水方式とも深い関係を持ち、この利水方式は水系によって様々な形態をとる。このため渇水については、治水施策への影響について行った $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 、 ε の影響伝播特性とそこに見られる増幅構造の理解というような、気候変動影響をシステムとして簡潔に記述することが難しい。

以上から、標記のような場合を扱う際には、個々の流域について丁寧なケーススタディを行い、その事例を積み上げる中で、渇水対応に及ぼす気候変動影響の本質を理解していくというアプローチが基本になると考えられる。その上で、本研究において、非積雪域ダム貯水池のある流域と積雪域ダム貯水池のある流域でのとらえ方に違いに着目することの有用性を指摘したように、通常の気候要素が気候変動により経年的に変化していくことによる影響と、当該事象を引き起こす直接要因となる特異な事象の生起とを組み合わせて分析するというアプローチが、標記の場合を扱う際の着手点になると考えられる。

<u>○気候モデルによる予測値に関わる精度の限界や信頼性の幅の取り扱い</u>

上述のように気候モデルの進展は急速であり、それは各モデルのスキームが実現象を表現するレベルの向上に加え、アンサンブル気候予測データベースの充実、マルチモデルアンサンブルデータの活用の幅の広がりという展開を見せている。このことは、今後も、精度向上、信頼性の幅の縮小を伴いつつも、予測値が変化していくことを意味する。

このような予測値の更新に即応し、新たな数値がもたらす影響評価に敏感になりすぎるのは必ずしも得策とは言えないであろう。これは、予測精度向上の流れにあるといっても１つの予測が劇的に精度向上や信頼性の幅の縮小をもたらすとは考えにくく、そうした状況で新しい予測値に全面的に拠って適応策を見直すことがもたらしうる混乱の可能性が現場密着の分野ほど大きいであろうとの考えに基づく。

このスタンスを前提にすると、対象とする分野における気候変動からの影響の受け方をシステムとして捉え、気候モデルによる予測値と当該分野の影響との関係を理解できるようにしておくこと、すなわち「気候変動影響の受け方の評価」が影響の評価と同等に重要になる。気候変動による豪雨量増加と治水施策との関係で言えば、$\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$、$\varepsilon$ 間の波及の仕組みと特性を理解しておき、α に関する１つの予測値更新だけに注目するのではなく、α 値のずれが適応策検討に及ぼす影響も合わせて評価しておくことが重要ということになる。このことによって、1)適応策を定めるという視点からの気候変動予測のメトリック（指標）とそれに求められる精度および信頼性の幅の逆提示、2)精度に限界があることを前提にした影響評価結果の適切な用い方（服部ら、2014）、3)将来予測の精度向上を受け身の姿勢で待つのではなく、並行して気候変動からの影響の受け方を見越した治水・利水等での施策の取り組み方に関する議論を本格的に始めることなど、より幅広い観点からの検討が可能になる。

上記の中で「逆提示」という切り口は、気候・気象予測研究者と、河川・海岸（水工）技術者との間に、当該分野におけるニーズとシーズに関する共通認識を醸成し、河川・海岸の計画・管理の現場における適応策検討にさらに貢献できる気候変動予測データの確保に向けた協働を促すことになると考えられる。

<u>○気候変動の影響の受け方を支配するシステム把握に困難性を伴う場合</u>

河川環境（水生生物の生息状況に代表される）については、元々、気候の変動が与える影響は中心的な課題になっておらず、したがって、様々な要素変化の因果関係のもとで気候変動の影響を及ぼすのシステムの理解も総じて不十分である。このため、風水害や渇水への対応に関わる影響評価においては、基本的なシステム理解があることを前提に、その理解の基盤を揺るがすような状況変化の可能性にだけ気をつけていれば良いという優位性がある（注を参照）のに対して、河川環境については、気候変動の影響の受け方を支配するシステムをいま一度総体的に理解する作業が必要になってくる。こうしたことを背景として、本研究においても河川環境への影響については、既往の観測事実に基づき、気候変動の影響の推定に役立つ局面を様々に切り取って分析するというアプローチを取っている。

このような、気候変動の影響の受け方を支配するシステムの把握から立ち上げなければならない分野については（特に生物が対象となる場合）、システムの把握が一朝一夕には進まず、その不確実性も高くなりがちなことを踏まえ、既往データの分析の深化と、より戦略性をもったモニタリングの実施を組み合わせて、気候変動に類する環境変化への応答事例の蓄積を進め、それをシステム把握に逐次つなげていくというアプローチが求められよう。

（注）風水害に対処するための施策群の検討においては、元々、災害を引き起こす外力の設定と、外力に応じた被害推定や災害防御施設の設計が作業の中心になり、そこでは様々な外力レベルによる災害発生のシステムが相当程度まで理解され、その定量的表現法が得られていることが前提になっている。そして、この外力が気候変動によってどのように変化するかが気候変動の影響を

調べる基軸になる。したがって、上記の「システム」の理解が元々なされているところからスタートできるという優位性が、この分野にはある。

渇水被害の生起に関しても、渇水被害を起こりにくくするための利水方式の設計が検討されてきており、水文事象の特性が渇水リスクやそれを軽減するための方策に与える影響を把握する手法が実用化されている。上述のように、気候モデルの予測結果から渇水リスクの検討に使える水文事象を導き出す過程が風水害の場合に比べ複雑ではあるものの、気候の変動を渇水状況生起の検討に取り込む手法が既に存在している点では同様である。

○社会経済状況の変化と気候変動影響との相対関係の読み込み

気候変動の出現が長期にわたることから、その影響評価において、その間に起こりうる社会経済状況の変化をどう捉えるかが論点になる。本研究でも、我が国において社会経済状況の中で確実性の高い将来推計と見られている人口減少を取り上げ、人口とそれと連動するとした資産の長期変化について複数のシナリオを設定し、気候変動影響にこれらがさらにどう影響するかを検討できるようにした。ただし、社会経済状況に関わる事項の長期見通しには大きな不確実性を伴うので、その取り扱いには慎重さが求められる。現時点では、気候変動がもたらすとされた影響度合いに対して、社会経済状況の長期変化がもたらしうる影響度合いの相対的大きさを概略把握し、長期的な課題への対応における気候変動適応策の効果発揮の重みに関する知見を得ることを目指すのが妥当と考えられる。

○適応策適用の基本単位となる水系あるいは流域圏の特性を把握することの重要性

治水・利水・環境のいずれのシステムにおいても、気候変動の影響は、降雨量・降雪量や気温等の変化の違いのみならず、水系・流域毎の流域における応答特性の違いにより、かなり大きな違いが生じることを、本研究においても確認した。治水・利水・環境の各方面における影響評価を的確に行うためには、水系（河川流域）の存在する地域における気候や降水量の予測について信頼できる GCM の最新の計算結果を複数参照することでその誤差の幅を見極めつつ、水系（河川流域）毎の治水・利水・環境システムと自然（降水、流出）および社会（人口・資産分布等）特性を包括的に理解した上で評価を進めることが必要である。そして、そのような包括的な理解・評価を基盤として、実態に即した適応策検討を水系（河川流域）毎に丹念に行っていくことが今求められている。

参考文献：

服部敦、板垣修、土屋修一、加藤拓磨(2014)気候変動が治水施策に与える影響のマクロ評価、土木技術資料、vol.56、No.12、pp.10-13.*

深見和彦(2014)ICC 第 5 次報告書を水工技術者はいかに読み解くべきか～洪水影響評価の観点から～、土木技術資料、vol.56、No.12、pp.6-9.*

文部科学省、気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、京都大学防災研究所、国立環境研究所、筑波大学、海洋研究開発機構(2015)地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース利用手引き（抜粋）、http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/img/d4PDF_Chap1_20151214.pdf

第Ⅲ部

気候変動影響に対する適応策に関する研究

Ⅲ－１：海外における適応策のレビュー

１．　既往調査の経緯

気候変動については、気候変動の緩和策の検討・実施が先行していたが、緩和策を実施したとしてもある程度の気候変動の影響は避けられないとの認識の下、適応策の検討・実施が近年進められてきている。このような考え方は、例えば、2006 年に発表された英国の「スターン・レビュー：気候変動の経済（Stern Review: The Economics of Climate Change）」（Sir Stern, N., et al.　2006）に詳しい（中間報告参照）。

その後、2007 年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 4 次評価報告書が発表された。この中で、大気や海洋の世界平均温度の上昇、世界平均海面水位の上昇などが観測されていることから気候システムの温暖化は明白であるとされるとともに、過去 200 年間の線形の昇温傾向は 100 年当たり 0.74℃であること、海面水位の上昇は温暖化と整合性があることなどが示された。2013 年の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書（AR5）では、個々の事象に対する長期的な影響は不確実性が大きいとしながらも、「地球上の多くの地域で、豪雨の頻度又は全降雨量に占める豪雨による降雨量の割合は 21 世紀中増大しそうである。」としている。

これらの動きを受けて、欧米諸国においては、先進的な気候変動適応策が展開されてきている。国総研気候変動適応研究本部では、特に、欧州や米・英・蘭諸国における水防災分野での気候変動適応策についてレビューを行ってきた。

欧州では 2000 年代後半、特に「気候システムの温暖化は決定的に明確」とする IPCC 第 4 次報告書と、EU 洪水指令が発出された 2007 年以降、着実に気候変動への取り組みがなされてきた。

EU（欧州連合）各国では、EU 水枠組み指令（2000 年）、同共通実施戦略（2001 年）、同指針第 24 号：気候変動下の河川流域管理（2009 年）に基づき、水に係る圧迫・影響の評価、観測計画、対策の評価において気候変動影響予測をどのように考慮したか明示することを求められている。また、EU 洪水指令（2007 年）により洪水発生について生じうる気候変動影響を考慮することを求められ、EU 白書「気候変動適応：行動のための欧州の枠組みに向けて」（2009 年）により異なる分野・管理レベル横断の気候変動適応のためのより戦略的な方法を求められている。

英国では、1.2 に後述するように気候変動法（2008 年）により 2050 年までに英国が達成すべき温室効果ガス（GHG）排出削減のための長期目標及び気候変動影響適応のためにとるべき手順を規定する等、気候変動への対応策が実施されてきた。具体的な気候変動適応策の例としては、「TE2100 プロジェクト」（2002 年～）により気候変動等を考慮した首都ロンドン及びテムズ川河口部の高潮洪水対策（年洪水確率 1/1,000 の安全の確保）のための政府の長期計画の例がある。

オランダでは、1958 年の高潮災害を契機に、第一次デルタプログラムによる河口域の締切や堤防補強等や、その後のライン川、マース川の計画流量規模の引き上げとそれに伴う空間整備事業（Room for the River、及びマースプロジェクト）等、洪水に対する対策が継続的に実施されてきたが、2006 年には国家気候変動・空間戦略プログラムが開始され、その後の第二次デルタプログラムや、国家水計画においても気候変動による海面上昇や洪水流量の増加を見込んで対策計画が検討されている（1.3 章）。

米国では、オバマ政権の下、特にハリケーンサンディを経験した 2013 年以降に矢継ぎ早に取り組みが進められてきた。2015 年には、気候変動影響を考慮した基準洪水位の設定に係る大統領令が発出されており、その詳細を 1.4 章に紹介する。

我が国では、2007 年の IPCC 第 4 次評価報告書を踏まえ、2008 年 6 月に社会資本整備審議会（河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会）より「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について」が答申された。その後、文部科学省・気象庁・環境省より「日本の気候変動とその影響（温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート）」が発表される等、影響評価等に関する調査研究が進められてきたが、水災害分野においては適応策の実現には十分に到ってこなかった。2015 年には、8 月に社会資本整備審議会より「水災害分野における気候変動適応策のあり方について」が答申され、11 月には同内容も踏まえられた「気候変動の影響への適応計画」が閣議決定されたところである。

以上のような各国の気候変動に対する取り組みの経緯について、表-Ⅲ1.1 にとりまとめた。

本報告書では、わが国における今後の適応策の施策化に資することを期して、米・英・蘭の 3 カ国について、リスク情報の公開方法と土地利用制御を通じた水災害リスクの低減策を中心に調査を実施した成果を以下に紹介する。なお、米・英・蘭 3 カ国におけるリスク評価における不確実性の考慮手法について、本プロジェクト研究の中間報告書「第Ⅱ部 2.2 諸外国の適応策の分析」に詳しい。

また、同中間報告書には、英・蘭・米の 3 カ国以外の国（ドイツ、フランス、イタリア、ベルギー、スウェーデン、中国、韓国、インド、インドネシア、フィリピン）の気候変動への取り組みについても紹介している。

以上の調査の詳細は、別途、以下の報告書にも公開しているので参照されたい。

○国土技術政策総合研究所資料 No.749
「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」（平成 25 年 8 月）
http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0749pdf/ks074910.pdf

○米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査（平成 24 年 6 月）
http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf

○H25 年度 米英蘭独豪の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策の実施事例等調査
http://www.nilim.go.jp/lab/kikou-site/data/info_data/2014_itagaki1.pdf

表-Ⅲ1.1　気候変動への対応に係る各国の動き（年表）

	IPCC	EC	イギリス	オランダ	米国	日本
２０００		水枠組み指令				
２００１	第3次評価報告書	水枠組み指令共通実施戦略		マースプロジェクト（マース川の計画流量引き上げ）		
２００２			TE2100プロジェクト開始 流域洪水管理計画（Flood Management Plan）			
２００３						
２００４			Making space for Water			
２００５					ハリケーンカトリーナ（死者1,200人以上）	
２００６			スターン・レビュー 計画政策声明「開発と洪水リスク」 「洪水・海岸防御評価指針　気候変動影響　担当部局による経済評価の補足文書」	河川空間拡張方針（Room for the River）（ライン川の計画流量引き上げ） 国家気候変動・空間戦略プログラム		
２００７	第4次評価報告書	洪水指令	豪雨災害（7月） ：過去60年間で最悪の洪水（14万世帯、35万人以上が被災）	国家気候適応・空間計画戦略		
２００８			気候変動法2008 「Future Water」 「2007年洪水から学ぶこと」			水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（社会資本整備審議会答申） 地球温暖化に伴う気候変化が水災害に及ぼす影響について（国土交通省） 「地球温暖化影響への適応策に関する関係府省連絡会議」設置
２００９		気候変動下の河川流域管理	イギリス気候変動予測プロジェクト	新水法 国家水計画	オバマ大統領就任 大統領令「環境、エネルギー及び経済効率化における連邦の統率力」	地球温暖化に挑む土木工学（土木学会） 日本の気候変動とその影響（文部科学省・気象庁・環境省）

２０１０			洪水及び水管理法 計画政策声明「開発と洪水リスク」改定	新デルタ法 デルタプログラム開始		
２０１１						気候変動下における水・土砂災害適応策の深化に向けて（日本学術会議）
２０１２	気候変動適応向上のための極端事象・災害に係るリスク管理に関する特別報告書		TE2100 計画承認 全国計画政策枠組み、及び技術指針 気候変動リスクアセスメント	新デルタ法発効	ハリケーンサンディ （死者 132 名（米・カナダ））	
２０１３	第 5 次評価報告書		国家適応プログラム（NAP）		大統領気候行動計画 USACE 海面上昇量考慮手法技術基準	中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会設置
２０１４				デルタ決定（Delta Decisions）内閣提出	全国気候変動影響調査	日本における気候変動による将来影響の報告と今後の課題について（中間報告）（中央環境審議会小委員会）
２０１５				国家水計画（National Water Plan）決定	気候変動影響を考慮した基準洪水位の設定に係る大統領令	水災害分野における気候変動適応策のあり方について（社会資本整備審議会答申） 気候変動の影響への適応計画（閣議決定）

２．　英国の気候変動適応策の事例

２．１　背景

英国は水災害分野の気候変動適応策の取り組みが最も進んでいる国の一つであると考えられる。

英国では「Making space for Water」（2004 年）により洪水・海岸浸食リスク管理のための政府戦略更新に向けた同リスクに係る見通しと目標を公表し、気候変動法（2008 年）により 2050 年までに英国が達成すべき温室効果ガス（GHG）排出削減のための長期目標及び気候変動影響適応のためにとるべき手順を規定し、「Future Water」（2008 年）により 2030 年に向けた人々、産業、自然のための良好な水の確保のための政府計画を発表している。また、2007 年の洪水被害を受けてピット卿が「2007 年洪水から学ぶこと」（2008 年）を発表し、2007 年洪水による甚大な被害を受け政府に洪水リスク対策の推進等を要請し、これに対して政府は洪水及び水管理法（2010 年）によりピット卿より示された提言等のいくつかを実現した。

具体的な気候変動適応策としては、「TE2100 プロジェクト」（2002 年～）により気候変動等を考慮した首都ロンドン及びテムズ川河口部の高潮洪水対策（年洪水確率 1/1,000 の安全の確保）のための政府の長期計画を推進しており、今世紀末までの短期・中期・長期別に政府等が行う必要のある行動を推奨している。「TE2100 プロジェクト」については、詳細情報を 1.2.2 に掲載した。

一方、特に、洪水を完全に防ぐことは出来ないことを認識した上で、被害低減対策を実施していることが、英国の洪水被害低減対策の特徴と考えられる。中でも、土地利用における洪水リスクを体系的に考慮する施策（計画政策書第 25 号：開発と洪水リスク（Planning Policy Statement 25:Development and Flood Risk: PPS25）が象徴的であり、土地ごとの浸水リスクに応じた土地開発の規制・誘導手法が確立している。

2006 年 10 月に環境・食料・農村地域省が「洪水・海岸防御評価指針　気候変動影響　担当部局による経済評価の補足文書」（Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts）を発出し、将来（2115 年まで）の海面上昇、河川洪水流量の変化等について不確定性の程度に応じた考慮手法を定量的に提示し、公的資金が投入される事業においては原則全て同手法を適用するものとした。

同年 12 月には洪水リスクの高低に応じた土地開発誘導手法をコミュニティ・地方自治省（Department for Communities and Local Government）が「計画政策書第 25 号：開発と洪水リスク」（Planning Policy Statement 25: Development and Flood Risk）により規定（2010 年 3 月改定）し、洪水確率に応じて下記 3 つの洪水区域を指定し土地開発目的に応じて洪水リスクのより低い区域への開発誘導を図る具体的手順を提示した。

○区域 1：年洪水確率 1/1,000 未満

○区域 2：河川洪水の年確率 1/100～1/1,000、高潮洪水同 1/200～1/1,000

○区域 3：河川洪水同 1/100 以上、高潮洪水同 1/200 以上）

さらに、2011 年 9 月には環境庁が「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」（Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities）を発出し、河川流域別の将来（2099 年まで）の洪水流量変化等の考慮手法を定量的に提示し、公的資金が投入される事業において適用するものとしている。この内容については、本研究の中間報告に詳しいので参照されたい。

本報告書では、「計画政策声明第 25 号：開発と洪水リスク（Planning Policy Statement 25:

Development and Flood Risk)」(2006 年、2010 年改定）の後継指針である、2012 年の土地の開発の許認可における洪水リスクの考慮手法関する規定「全国計画政策枠組みの技術指針（Technical Guidance to the National Planning Policy Framework)」(コミュニティ・地方自治省（Department for Communities and Local Government） 2012 年）について 2.4 に取り上げた。

２．２　TE2100 のテムズ・バリアの外力設定

（１）TE2100 プロジェクト

１）プロジェクトの概要

TE2100 (Thames Estuary 2100) プロジェクトとは、英国の首都ロンドンとテムズ湾周辺の 2100 年までの高潮等に対する安全確保のためのプロジェクトであり、2002 年に英国環境庁により着手され、2012 年に計画が承認された。同プロジェクトは特定の高潮災害等を契機としたものではなく、将来に備え積極的に計画し、将来の気候・土地利用変化、堤防等施設の老朽化を考慮している点が注目すべき点と考えられる。

２）ロンドンの高潮災害対策の経緯

テムズ湾における高潮防御施設は 1500 年以上前から存在している。紀元 1 世紀にローマ人は現在のロンドンとなる町を標高 5m 以上の高台に建設した。この標高 5m は、おおむね現在の高潮リスク地域の境界に対応している。その後何世紀にも渡るロンドンの継続的な拡張により周辺の低湿地が市街化し、現在の防潮堤の維持問題が発生した。

３）将来予測の不確実性への対応手法

将来の気候・社会変化・施設老朽化に係る予測の不確実性を踏まえ、TE2100 では下記のとおり柔軟な実施方策を導入している。

（ａ）実際の変化速度（※筆者注　海面上昇速度等のこと）に応じた対策実施時期の変更

（ｂ）実際の変化速度に応じた対策の変更

変化の判断に用いる 10 の指標（平均海水位、ピーク高潮位、河川のピーク洪水流量、洪水防御施設の状態等）が挙げられ、少なくとも 10 年ごとに TE2100 計画をレビューすることを推奨している。対策ごとの実施時期と同実施に係る判断時期が図示され、対策実施に係る判断は 10、20 年又はこれ以上前に行うこととされている。

（ｃ）将来の状況変化に対応可能な構造物の設計

例えば、将来改築可能とする堤防・堰等が挙げられている。

（ｄ）将来の施設整備・環境創出を可能とする空間計画における事前考慮

対策の選択肢ごとの概略位置が TE2100 計画に示されている。

（ｅ）新しいインフラ整備との事前調整

例えば、Shell Haven 地点に提案されているロンドン・ゲートウェイ港(London Gateway Port)について航路、陸上交通連結線の調整が必要であり、後者については、新しい防潮堰と一体で整備する可能性について提案の熟度に応じて適宜検討するとしている。

４）その他主な勧告事項

TE2100 の 2012 年の計画の主な勧告事項は次のとおり。

（ａ）TE2100 計画地域を 23 の政策単位（policy unit）に分け、政策単位ごとに洪水リスク管理対策を勧告。同対策は各政策単位の基準となる。具体的な対策として既存堤防等の改良、高潮貯留域の確保、防潮堰の新設等が挙げられている。

（ｂ）現在の政府による気候変化指針によればテムズ・バリアは 2070 年まで計画に耐えうるとし、最初の 25 年間の計画期間（2010～2034 年）では既存施設群の積極的維持・改良を勧告（当該期間の予想費用 15 億ポンド）。

（ｃ）次の 15 年間（2035～2049 年）の予想費用は 18 億ポンド規模とし、主要高潮防御施設の更新、氾濫原管理の継続、感潮区間のハビタットの移転を勧告。

（ｄ）2050 年前後に TE2100 計画についてレビューし、今世紀末までの選択肢について決定することを勧告。2070 年までに新しい対策を実現するには、レビュー後すぐに計画・設計・工事を行う必要があるとしている。2009 年時点の評価によれば、既存施設の更新・改良と氾濫原管理、または Long Reach 地点における新しい防潮堰の建設と関連工事が有力な 2 つの選択肢である。（※2070 年以降の期間について、費用便益評価により「2070 年まで既存防御施設の最適な維持・改良を行うとともにテムズ・バリアを改良し、さらに、2135 年以降同バリアを高潮時の船舶通過用水門を持つ施設に改造する」選択肢と「2070 年まで既存防御施設の最適な維持・改良を行うとともに Long Reach 地点に新たな防潮堰を 2070 年までに建設する（2135 年以降船舶が通過可能な防潮施設に改築)」選択肢が有力な 2 つの選択肢である。）今世紀末期間（2050～2100 年）の予想費用は 60～70 億ポンドである。

（ｅ）モニタリング・プログラムの確立。（10 のモニタリング指標、10 年ごとのレビューと更新（３）（ｂ）再出））

（ｆ）TE2100 計画期間中に海面上昇により失われる感潮区間のハビタットを移転するため、876 ヘクタールの感潮区間のハビタットの創出を勧告（同ハビタット創出の潜在的候補地 5 箇所を見極めた)。

（ｇ）政策決定者、土地所有・管理者の協働によるテムズ湾土地戦略の策定を勧告。

（ｈ）TE2100 計画に示された時間割に沿って行動計画が実施されることを勧告。

（２）テムズ・バリア

１）バリア建設の経緯と機能

1953 年の高潮による大被害（死者 300 人超）の後、1966 年の Sir Herman Bondi による報告書を受けて、洪水対策は堤防かさ上げと可動式ゲートを持つ防潮堰建設によるものと決定された。テムズ・バリアの建設は 1974 年後期に始まり、1982 年 10 月に運用可能となり、1983 年 2 月に初めて運用された。英国女王による供用開始は 1984 年 5 月 8 日である（Environment Agency　2014(a)）。

テムズ・バリアはロンドン中心部の 125km2 を高潮により生じる洪水から守るものである。また、河川洪水時に、河口の潮位が低い時にテムズ・バリアを閉めることにより、テムズ・バリア上流に河川洪水を貯める空間を確保し、上流の河川水位を低下させロンドン西部のいくつかの地区を守るものである。（Environment Agency　2014(b)）

※テムズ湾の日潮位変化は時期によるが最大約 7m である（Sarah Lavery and Bill Donovan 2005）。

２）将来の高潮の最悪シナリオ

テムズ・バリアでは気候変動による 2100 年までの高潮位の増大量の最悪シナリオとして 2.7m を想定している（Environment Agency　2012）。同上昇量の内訳は次のとおり（Environment Agency　2009）。

・万年雪の融解及び海水の熱膨張による海面上昇量として 2m。

・高潮の強大化による上乗せ量として 0.7m。（再現期間 5 年の高潮に対応）

なお、上記以前に最悪シナリオとして 4.2m 上昇としていたが、2.7m に減少した主な理由は万年雪の融解の想定を変えたためである。

２．３　英国の洪水危険地図

EU（欧州連合）各国では EU 水枠組み指令（2000 年）、同共通実施戦略（2001 年）、同指針第 24 号：気候変動下の河川流域管理（2009 年）に基づき、水に係る圧迫・影響の評価、観測計画、対策の評価において気候変動影響予測をどのように考慮したか明示することを求められている。また、EU 洪水指令（2007 年）により洪水発生について生じうる気候変動影響を考慮することを求められ、EU 白書「気候変動適応：行動のための欧州の枠組みに向けて」（2009 年）により異なる分野・管理レベル横断の気候変動適応のためのより戦略的な方法を求められている。

特に欧州連合の洪水指令「洪水リスクの評価と管理」（Directive 2007/60/EC）の第 6 条では、次の 2 つの洪水地図を 2013 年 12 月 22 日までに加盟各国が準備することを求めている。

（１）洪水危険地図（Flood hazard maps）：3 つの洪水シナリオ（①低可能性又は極端シナリオ、②中可能性シナリオ（少なくとも再現期間 100 年）、③高可能性シナリオ（必要に応じ））により浸水する区域の浸水範囲、浸水深又は浸水位及び必要に応じ流速又は関連する水流を図示するもの。

（２）洪水リスク地図（Flood risk maps）：上記洪水シナリオによる潜在的な悪影響について示すものであり、潜在的洪水影響を受ける住民数、同潜在的影響区域の経済活動の型、洪水時に偶発的汚染を起こすかもしれない統合的汚染防止・管理施設及び潜在的影響を受ける保護区域（Directive 2000/60/EC「水政策分野のコミュニティ活動の枠組み創設」に規定）、並びにその他加盟各国が有用と考える情報（例　流送土砂を多量に含む洪水及び土石流による影響区域及び重要な汚染源）を図示するもの。

英国では、地域計画への情報提供及び洪水リスク地域での開発行為を思いとどまらせるために洪水危険地図（Flood hazard map）が web 等で提供されている。同図は、年洪水確率 1%（河川）及び同 0.5%（海岸）の洪水又は過去の洪水（前 2 者より大きい場合）、並びに極端な洪水（河川・海からの同 0.1%の洪水）による浸水範囲（堤防等の施設を無視）を表示している。なお、将来の気候変動は考慮していない。

同図に基づき洪水区域（Flood Zone）を大きく 3 種類に区分している（2.4(2)参照）。

２．４　英国における土地の開発規制に係る洪水リスクの考慮手法

（１）英国の土地の開発の許認可における洪水リスク考慮手法

英国の土地の開発の許認可における洪水リスクの考慮手法については「全国計画政策枠組みの技術指

針（Technical Guidance to the National Planning Policy Framework)」（コミュニティ・地方自治省（Department for Communities and Local Government） 2012 年）に規定されている。同指針は 2006 年同省発出（2010 年改定）の「計画政策声明第 25 号：開発と洪水リスク（Planning Policy Statement 25: Development and Flood Risk)」の後継指針であり、主要部分に変更はない。

開発と洪水リスクとの関係については、「全国計画政策枠組み(National Planning Policy Framework)」（同省 2012 年）に次のとおり規定されている。

「洪水リスクのある地域での不適切な開発は避けられるべきである。最も高いリスクのある土地での開発は避けられるべきであり、開発がどうしても必要な場合には、他の場所の洪水リスクを増やさずに開発が安全となるようにすること。」

※上記洪水リスクのある土地（areas at risk of flooding）とは、後述の洪水区域 2 又は 3 内の土地、又は洪水区域 1 内で排水上重大な問題を抱えており、環境庁から地方計画当局へ当該事項が通知されている土地のことである。 洪水リスク（flood risk）には全ての原因（河川、海、降雨の直接流出、地下水上昇、下水道・排水系の施設能力超過、貯水池、運河、湖、その他人工的な原因）による洪水が含まれる。

（２）洪水区域の定義

各洪水区域の定義は以下のとおり。なお、各定義では河川及び海域からの浸水の生起確率を対象とし、洪水防御施設の存在は無視する。

1)洪水区域 1（Zone 1） －洪水可能性低（low probability）

○定義：河川又は海からの洪水の年生起確率が 1/1000 未満と評価される土地からなる区域。

○適する利用：全ての土地利用に適する。

2)洪水区域 2（Zone 2） －洪水可能性中（medium probability）

○定義：河川洪水の年生起確率が 1/100 から 1/1000、海からの洪水の同確率が 1/200 から 1/1000 と評価される土地からなる区域。

○適する利用：後述の表に規定する「必須インフラ（Essential infrastructure)」、「浸水と両立できる（water- compatible）利用」、「浸水に対してあまり脆弱でない（less vulnerable）利用」及び「より脆弱である（more vulnerable）利用」に適する。後述する例外テスト（Exception Test）に合格すれば浸水に対して「特に脆弱な（highly vulnerable）利用」も可。

3)洪水区域 3a（Zone 3a） －洪水の可能性高（high probability）

○定義：河川洪水の年生起確率が 1/100 以上、海からの洪水の同確率が 1/200 以上の土地からなる区域。

○適する利用：後述の表の「浸水と両立できる利用」及び「浸水に対してあまり脆弱でない利用」に適する。「浸水に対して特に脆弱な利用」は許可されるべきでない。例外テストに合格した場合には「浸水に対してより脆弱な利用」及び「必須インフラ」は許可される。許可された「必須インフラ」は洪水時に供用可能であるとともに利用者に安全であるように設計・建設されるべきである。

4)洪水区域 3b（Zone 3b） －機能上の氾濫原（the functional floodplain）

○定義：洪水時に洪水が流れ、貯留されなければならない土地からなる区域。

○適する利用：後述の表-Ⅲ1.2.4 の「浸水と両立できる利用」及び「必須インフラ」で当該地点に存在しなくてはならないもののみ許可されうる。当該施設は下記のとおり設計・建設されるべきである。

・洪水時に供用可能であり利用者に安全であること。

・全体として氾濫原の貯留容量を減らさないこと。
・水流を妨げないこと。
・他の洪水リスクを増さないこと。

なお、「必須インフラ」は例外テストに合格すべきである。

※洪水区域 3b は洪水生起確率のみによって定義されるべきではなく、個別の状況を考慮して定められるべきである。しかし、洪水の年生起確率 1/20 以上である土地、又は極端洪水（年生起確率 1/1000 の洪水）時に浸水するよう計画されている土地は洪水区域 3b の検討の出発点となるべきである。

表-Ⅲ1.2.4　土地利用ごとの浸水に対する脆弱性

浸水に対する脆弱性	左記に該当する土地利用
必須インフラ（Essential infrastructure）	当該リスク区域を横断しなくてはならない必須交通インフラ（大規模避難経路を含む）、運用上の理由により当該リスク区域に設置せざるを得ない必須公益施設（発電所等）、風車
特に脆弱（Highly vulnerable）	洪水時に機能することが求められる警察署・救急本部・消防署・軍指令部・電話施設、緊急通報施設、地下居住施設、定住用トレーラーハウス・移動式住居、危険物質に係る同意が必要な貯蔵所
より脆弱（More vulnerable）	病院、居住型施設（居住型介護施設、児童養護施設、社会福祉施設、監獄、寮）、住宅用建物・ホテル等、医療サービス・託児所等非居住利用、危険廃棄物の埋立て地等
あまり脆弱でない（Less vulnerable）	洪水時に機能する必要がない警察署・救急本部・消防署、商店・金融サービス等向け建物、農林業用土地・建物、汚物処理施設（危険廃棄物処理施設を除く）、採鉱施設等
浸水と両立できる開発（Water-compatible development）	洪水防御施設、送水施設・ポンプ場、下水送水施設・ポンプ場、砂礫採取場、ドック・マリーナ・波止場、航海用施設、国防省の国防施設、造船所等、水に係るリクリエーション施設（就寝施設を除く）、救命・海上保安本部、リクリエーション空間等

※特に脆弱、より脆弱とされる土地利用（用途）ほど、リスクの小さい場所に立地すべきとされる。

（３）逐次テスト（The Sequential Test）

地方計画当局は、開発のための土地の割り当てに際し、洪水の生起確率がより小さい地域内の合理的に利用可能な場所では、申請された開発・土地利用種別に適する場所が存在しないことを示すために、逐次テストを適用する。

そこでは、河川又は海からの洪水リスクのある地域では、新規開発は洪水区域 1 で実施されるべきとしている。洪水区域 1 の中に合理的に利用可能な場所がない場合には、申請された開発の洪水に対する脆弱性を考慮しつつ、洪水区域 2 の中から場所を選定する。洪水区域 2 の中にも適する場所がなければ、洪水区域 3 の中から場所を選定する。

いずれの洪水区域内においても、新規開発は洪水（全ての原因による洪水）の生起確率（戦略的洪水リスク評価（Strategic Flood Risk Assessment 以下「SFRA」） により示される）が最も小さい場所で行われるべきとしている。

（４）例外テスト（The Exception Test）

上記逐次テストの結果、より広い持続的目標に一致しつつ申請された開発を洪水生起確率がより低い洪水区域で実施することが不可能な場合に、例外テストを実施する。

そこで開発が許可されるには、次の 3 つの要素を全て満足する必要がある。

a)開発が、SFRA（SFRA が準備されている場合）により示される洪水リスクを上回る、より広い持続的便益をコミュニティにもたらすことを示すこと。

b) 開発可能な既存開発地の開発であること。既存開発地の開発でない場合には、開発可能な既存開発地の中に合理的な代替となる場所がないこと。

c)洪水リスク評価（Flood Risk Appraisal）により、開発が安全であり、他の場所の洪水リスクを増加させない（可能であれば全体の洪水リスクを減らす）ことを示すこと。

参考文献:

Prime Minister, David Cameron, UK　2014：The Somerset Levels and Moors Flood Action Plan A 20 year plan for a sustainable future.

Center for Ecology & Hydrology, British Geological Survey　2014：Hydrological Summary for the United Kingdom January 2014.

Center for Ecology & Hydrology　2014：Winter 2013/14 rainfall records at CEH's Wallingford meteorological station, CEH Science News Blog, http://cehsciencenews.blogspot.jp/, 17 March 2014.

Anne Thurston　2014：Embankment Asset Management & Fragility Curves.

Environment Agency　2012(a)：North and Mid Somerset Catchment Flood Management Plan, Summary Report, pp. 4.

Environment Agency　2012(b)：Parrett Catchment Flood Management Plan, Summary Report, pp. 4, 6, 18.

Environment Agency　2014：The Thames Barrier, https://www.gov.uk/the-thames-barrier.

Environment Agency　2009：Thames Estuary 2100 Technical Report Appendix L – Climate Change Studies in TE2100, pp.8.

Environment Agency　2012：TE2100 Plan.

Environment Agency　2014(a)：the Thames Barrier and associated tidal defences（パンフレット）.

Environment Agency　2014(b)：The Thames Barrier, https://www.gov.uk/the-thames-barrier, viewed on 18 September 2014.

Sarah Lavery and Bill Donovan　2005：Flood risk management in the Thames Estuary looking ahead 100 years, Philosophical Transactions of The Royal Society, A Mathematical, Physical & Engineering Sciences, pp. 1462.

Department for Communities and Local Government 2012: Technical Guidance to the National Planning Policy Framework

RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Netherlands, "A quick scan of spatial measures and instruments for flood risk reduction in selected EU countries", pp.17,39,44,45, 2004.

Environment Agency UK, http://maps.environment-agency.gov.uk/wiyby/wiybyController, http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/37837.aspx, viewed on 24 Aug. 2012.

Environment Agency UK, http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/31662.aspx ,viewed on 30 Aug. 2012.

Defra, "Appraisal of flood and coastal erosion risk management A Defra policy statement", pp. 10, 2009.

３． オランダの気候変動適応策の事例

３．１ 背景

オランダは、国土面積約 37,000km²（2010 年時点）、人口 16,665 千人（2011 年時点）の国であり、面積では農地が約 68%、森林が約 10%、都市が約 15%を占めており、国土の約 60%が海面以下とされている。ライン川下流の低湿地帯に位置し、国土の多くをポルターと呼ばれる干拓地が占める。国土の 1/4 は海面下に位置する。13 世紀以降、干拓によって国土を広げてきた歴史がある。

高潮や河川の洪水位より低い土地に関しては 66%にも達するオランダでは、水災害に対して脆弱な地形条件によって、治水事業の重要性が認知されてきた。ゾイデル海沿岸の都市や舟運の利用発達に伴い、沿川で勃興した商業都市を水災害から防御するための高潮対策や洪水対策は、他のいかなる社会基盤整備より先行、優先し、国土を形成する最重要課題として位置づけられてきた。

第二次世界大戦以降では、1958 年の高潮災害によって、死者 1,853 名、避難住民 7,200 名、浸水家屋 4,500 戸を記録する甚大な被害を出した。これを契機に同年、デルタ法（Delta Law）が制定され、これに基づくデルタ委員会の下、2000 年までの計画期間で、河口域の締切や堤防補強等の対策が実施された。

デルタ委員会（第1次）の計画期間終了後も、ライン川、マース川の計画流量規模の引き上げとそれに伴う空間整備事業（Room for the River、及びマースプロジェクト）等、洪水に対する国土の安全性を高める努力が継続的に続けられてきた。オランダの主要河川の洪水対策は年1/1,250（堤外の村では同1/250）、国土中枢部の高潮対策は同1/10,000、中間の湾の高潮対策は同1/2,000、1/4,000である。

以下は、平成２５年度に実施した「米英蘭独豪の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策の実施事例等調査」成果の概要に一部加筆した。詳細については、以下の URL を参照されたい。

http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf

３．２ オランダの洪水危険地図

オランダでは公的な洪水危険地図がwebで一般公開され公的な使用に供されている。洪水危険地図では年1/4,000を超える頻度で浸水深1mを超える範囲を洪水地域として示す地図と、再現期間を問わずに最大浸水深を示したもので、最悪のケースを示す地図がある。

なお、この「最悪のケース」は次の仮定により設定している。

(1)輪中堤内の土地は堤防等により分割されていないものとする（輪中堤等のどこかが破堤等すると輪中堤内の土地は全て浸水）。

(2)輪中堤内の水位は最も低い堤防の天端高さと同じとする。

(3)輪中堤内全てを浸水させるのに十分な水が流入するものとする。

なお、傾斜地においては浸水深を1mとし、輪中堤の上流端から浸水するものと仮定している。

３．３ 気候変動シナリオ

オランダ気象庁（Royal Netherlands Meteorological Institute）は、政策に資するための気候変動シナリオとして、「KNMI06 気候変動シナリオ（KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands）」を策定した（2006 年）。これは、気温、降水量、海面上昇などに関するオランダの気候変動シナリオであり、IPCC の 4 つの排出シナリオ（A1、A2、B1、B2）に基づき、４つのシナリオ（G、

G+、W、W+）が策定された。

なお、デルタプログラム 2014 より、KNMI06 を更新した新たなシナリオ KNMI'14 が採用されている。デルタプログラム 2015 によれば、新たな KNMI'14 は、KNMI06 と比較して海面上昇の最大値の予測が若干異なるもののほとんど違いがない（very similar）シナリオであるとされている。

３．４　デルタ・プログラム

デルタプログラムは、オランダ国全土における将来数十年先にわたって必要となる洪水リスク管理及び淡水確保のための計画・実施を目的としている。このうち幾つかのプロジェクトは既に実施されている。

現在のデルタプログラムを運営するデルタ委員会は、第 2 次デルタ委員会である。

第一次デルタ委員会は、1953 年の災害が転機となり、1958 年に設立された。ここでは高潮災害に対する大規模な事業計画である「デルタプラン」が策定され、この計画の下、ホランセ・アイセル防潮堤、東スヘルデ堰、マエスラント可動堰などが建設された。その後、水害リスク評価に基づく計画や気候変動の影響を考慮することの重要性が認識されてきたことを受け、2007 年に、第一次デルタ委員会の後継として第 2 次デルタ委員会が設立された。2010 年に第 2 次デルタ計画の策定と実施が開始した。

気候変動や洪水リスク管理に基づく新しい対策洪水防御のための主要な堤防や砂丘、ダムの総延長は約 3,700km に及ぶ。これらの洪水防御施設のうち、2014 年時点で安全度の基準を満たしているのは約 30%である。全ての洪水防御施設が基準に達するようにするための対策が必要である。

加えて、将来の気候変動に伴う影響に適応するための対策が必要である。デルタプログラムでは、デルタシナリオに基づき、2050 年における複数の将来シナリオが考慮されている。また、オランダ国内の人口や経済状況は 50 年前と比較して増加しており、このような状況のみを考えても、洪水に対する安全基準は見直す必要がある。

以上より、新しい安全基準に基づく、新しい対策の必要性が掲げられている。

３．５　マースプロジェクト

マースプロジェクト（Maaswerken）は、水管理局(Rijkswaterstaat)、マーストリヒト（Maastricht)、ルールモント（Roermond）から構成されるプロジェクト委員会が監督するプロジェクトである。

マースプロジェクトは、3 つの地域（Maasroute、Zandmaas、Grensmaas）を対象としており、それぞれにサブプロジェクトが動いている。このうち、Maasroute は主な目的が河川航行であることから、マース川全川が対象となっている。

プロジェクトの目的は、洪水リスク管理、河川航行の改善、自然空間のさらなる確保、採鉱等であり、洪水リスク管理に限らない。

2005 年6 月のグレンマースプロジェクトの報告書によれば、マースプロジェクトは過去～現況の流量データを元に計画されており、将来の気候変動の影響による雨の増加やマース川流量の増加は考慮されていないことが明記されている。マース川の計画規模は1/250であり、これは3,275m^3/s に該当する。

マース川における将来の気候変動の影響は、2001 年に開始した研究プロジェクトであるIVM（The study Integrated assessment of the river Meuse）で研究されている。研究によれば、マース川の Borgharen 地点における1/1250 年規模の流量は、2050年までに20%増加し、現在の3,800 m^3/s から

4,600m³/s に増加する。現行の超過確率である1/1250 年規模にすると、3,275 m³/s から3,950 m³/s に増加する。このような将来の影響は、デルタプログラムにおいて現在計画段階のサブプログラム等で考慮され、適応のための計画が進められている。

３．６ Room for the River

今後の気候変動の影響により上昇する水位に対応するために、河川空間を拡大することを目的としたプロジェクトである。プロジェクトの背景は以下の通り。

①増大するリスク

・ 河川沿いに住む25 万人程度が避難しなくてはならないような大規模洪水が1993 年および1995 年に生じた。

・今後、気候変動の進展により、洪水頻度、強度が増大するとともに、土砂堆積に伴う河積の減少により、洪水流下能力が少なくなることが見込まれている。

・堤内地にはより多くの人々が住むようになり、同時に地盤沈下も生じているため、洪水リスクにさらされる人口はおよそ400 万人と見積もられている。

② 堤防に囲まれた低地がはらむリスクへの対処

・オランダでは、継続的に洪水対策として堤防の強化を行ってきたが、同時に、堤内地の地盤低下が進んでいる居住地域にとっては、洪水時の潜在的リスクが増大してきている。すなわち、高い堤防に囲まれた狭い空間に河川を押し込めてきたことが、リスク増大の原因ということに着目した。

以上の背景を踏まえて、堤防強化とリスクの増大という傾向を打ち破り、安全、かつ、住みやすい環境となることを理念に “Room for the River”計画を策定した。そこでは、引堤などにより、河川空間を拡大することがプロジェクトの中心となっている。すなわち、30 以上の地区で安全な洪水流下能力を確保するための対策を実施する。洪水流下能力のための空間確保だけでなく、質の高い河川空間の確保も目指すものである。2006 年に開始し、2016 年には概ね終了する予定であるとされている。

プロジェクトの目的は、以下の３点を掲げている。

① 2015 年までにライン川の流下能力を16,000m³/s にする。（プロジェクト実施前では15,000m³/s）

② 洪水対策として安全性を向上させるだけでなく、同時に河川地域の環境の質を向上させる。

③ 数十年先の将来において予測されている洪水流量増大に対処するため、より大きな河川空間（河積）を将来にわたって確保する。

参考文献:

Jos van Alphen, Ron Passchier and Victor Jetten, RWS-RIKZ National Institute for Coastal and Marine Management, Netherlands, “Atlas of Flood Maps”, pp4-80 – 4-82, 2007.

Floris, “Floris study – Full report”, pp. 23 – 24, 67 – 68, 2005.

KNMI Climate Scenarios Current KNMI’06

scenarios:http://www.knmi.nl/climatescenarios/knmi06/index.php

The Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs, Delta Programme 2015

http://english.deltacommissaris.nl/delta-programme/documents/publications/2014/09/16/delta-programme-2015, pp. 135 – 136, 2014
Ruimte voo de rivier
https://www.ruimtevoorderivier.nl/english/

４．　米国の気候変動適応策の事例

４．１　背景

米国は高度に都市化が進んでおり、人口の約 80%が都市域に住んでいる（U. S. National Climate Assessment　2014）。1920～1930 年代に発生した大洪水災害に対応し、1936 年施行の洪水管理法（Flood Control Act of 1936）によって、連邦政府はダム・堤防等の施設整備による洪水被害の低減を図ったが、その後も度重なるハリケーン等による洪水被害及び災害復旧費用の増大により、1968 年国家洪水保険法により、洪水保険による氾濫原管理に舵を切った。この経緯は、本項の後半 4.5 に詳述する。

一方、オバマ政権は、大統領就任の 2009 年に大統領令（Executive Order）13514 号「環境、エネルギー及び経済効率化における連邦の統率力」を発出して以降、気候変動に対応した大統領令の発出等、気候変動に積極的な取り組んできた。他方、同政権は、ハリケーンサンディ（2012）による甚大な被害を受け、洪水・高潮災害リスクの低減方策に力を入れている。

４．２　連邦政府の最新動向

（１）大統領気候行動計画（President’s Climate Action Plan）(2013/6/25)

オバマ大統領が 2013 年 6 月に発表した米国の気候変動対策に関する政策方針。同時に大統領令第 13653 号「気候変動の影響に対する合衆国の備え」を発出し、気候変動の影響は「国のコミュニティ、天然資源、生態系、公衆衛生にすでに打撃を与えつつある」と評価した。

本計画は以下の 3 本の柱より構成されている。

① 米国内の炭素汚染削減策（Cut Carbon Pollution in America）
② 米国内の気候変動影響への準備（Prepare the United States for the Impact of Climate Change
③ 国際的な取り組みの主導（Lead International Efforts to Combat Global Climate Change and Prepare for its Impacts）

適応策については、2 つ目の柱である「Prepare the United States for the Impact of Climate Change」の中で触れており、さらに下に以下の 3 つのイニシアティブが示されている。

１）より強靭で安全なコミュニティとインフラの構築（Building Stronger and Safer Communities and Infrastructure）
２）経済と自然資源の保護（Protecting our Economy and Natural Resources）
３）気候影響を管理するための的確な科学の利用(Using Sound Science to Manage Climate Impacts)

（２）各機関の責任者による気候変動への準備及びレジリエンス強化のためのタスクフォースの設置（State, Local, and Tribal Leaders Task Force on Climate Preparedness and Resilience）(2013/11/1)

オバマ大統領は 2013 年 11 月大統領令を発令し、各機関の責任者（leaders）による気候変動への準備及びレジリエンス強化のためのタスクフォースを設置した。これは、2013 年 6 月に発表された「The President's Climate Action Plan（大統領気候行動計画）」の流れを組むものである。本大統領令は、連邦政府機関に機関間の壁を超えて、以下の行動を求めるものである。

１）Modernize Federal programs to support climate-resilient investments
（気候レジリエント強化のための投資を助成・促進しうるような連邦プログラムの更新）

２）Manage lands and waters for climate preparedness and resilience
（気候変動への適応及びレジリエンス強化のための土地および水資源管理）

３）Provide information, data and tools for climate change preparedness and resilience
（気候変動適応及びレジリエンス強化のための情報、データ及びツールの提供）

４）Plan for climate change related risk（気候変動が関係するリスクへの対策）

また、このタスクフォースの設置に伴い、2009 年に設置された省庁間気候変動適応タスクフォース（Interagency Climate Change Adaptation Task Force）は廃止され、本タスクフォースに引き継がれることとなった。(Sec. 6 (d) and (f) in Executive Order -Preparing the United States for the Impacts of Climate Change24)

（３）全国気候変動影響調査（National Climate Assessment（NCA））の実施

2014 年の 5 月に第 3 回全国気候変動影響調査が公開された。NCA は気候変動研究に関する法律（Global Change Research Act of 1990）に基づき、省庁間にまたがる気候変動研究をコーディネートする立場から、USGCRP（U.S. Global Change Research Program） によって全国を対象に定期的に行われている。Global Change Research Act of 1990 は USGCRP の設立の背景になっている法律でもある。

NCA は、既に見られている気候変動の影響と今後予測される将来の影響を国内に向けて発表することにより、気候変動に関する理解を深め、より良い政治的判断や国民の理解を促すものと位置づけている。過去には 2000 年と 2009 年に行われている。

（４）気候変動影響を考慮した基準洪水位の設定に係る大統領令

2015 年 1 月 30 日に大統領令「連邦洪水リスク管理基準の設定と利害関係者からの更なる意見聴取と考慮手続き」（Establishing a Federal Flood Risk Management Standard and Process for Further Soliciting and Considering Stakeholder Input）（Barack Obama、2015）が発出された。本大統領令は、1977 年の大統領令第 11988 号「氾濫原管理（Floodplain Management）」に基づいて連邦洪水リスク管理基準（Federal Flood Risk Management Standard、FFRMS）を設定するとともに、さらなる意見聴取と考慮の手続きについて定めている(White House　2015)。以下、詳しく解説する。

１）連邦行為への適用

FFRMS は、大統領令第 11988 号第 1 節に述べられているとおり、全ての連邦行為に適用される。同行為とは、氾濫原（※1）内又は氾濫原に影響する全ての連邦行為であり下記を含む。

①連邦の土地及び施設の取得・管理・配列

②連邦が実施・融資・援助する建設及び改良

③水及び関連する土地利用の資源計画、規制、許可行為を含む、ただしこれらに限定されない、土地利用に影響する連邦行為及びプログラムの実施

FFRMS の標高規定は、全ての新規建築及び大規模改良（例　改造、再建、増築及びその他全て

の改良。建物（※2）価値の 50%以上の費用が掛かるもの）に適用される。

また、FFRMS において考慮すべき浸水位（標高規定）はプロジェクトが連邦資金による場合には、建物の多大被害プロジェクト（substantial damage projects、例：あらゆる原因・事象による損害が建物の価値の 50%以上となった場合）にも適用される。

※1 大統領令第 11988 号における氾濫原の定義：内陸・沿岸の水に隣接する低地の比較的平らな範囲。沖合の島の浸水しやすい範囲を含む。年超過確率 1%以上の洪水の浸水域を少なくとも含む。

※2 建物（structure）の定義：壁があり、屋根のある建築・移動式住居・ガス又は液体貯蔵タンクで、主に地面より上にあるもの。

３）例外（Exception）

連邦機関の長又は当該機関の実施計画で指名された者は、国の安全に関わる場合、緊急対応の場合、連邦施設又は建物への適用が明らかに不適切である場合、又は、機関の行為が国の安全に関わる事項又は緊急対応に関する必要不可欠な要求事項である場合、特定の部局又は機関の行為・施設を FFRMS の規定の例外とすることができる。国の安全に関わる事項、緊急対応、又は国の安全に関わる事項又は緊急対応に関する必要不可欠な要件であることから機関の行為が例外とされた場合には、当該機関の長は基準洪水（base flood）にさらされる土地に基づくものとする。

４）重要な行為（Critical Actions）

ほんのわずかな洪水発生見込みも極めて重大である重要な行為は、大統領令第 11988 号の実施指針（Implementing Guidelines to EO 11988 (2015 年)）において定義されている。重要な行為の概念は、基準洪水位（base flood elevation）によるよりも程度の高い防御又は靭性付与によらなければ、多くの行為による人命・健康・福祉への洪水影響を最小化できない懸念を反映したものである。

連邦部局及び機関は、下記のような懸案を含めて、連邦行為が重要な行為を構成するかどうか決定する責務を負う。

・洪水にさらされた場合、提案行為は追加的な被害を生じさせるか。例えば、揮発性・毒性が高い又は水と反応する材料を製造及び貯蔵する液化天然ガス貯蔵所及び施設。

・洪水警報のリードタイムを確保できるとして、病院、療養所、刑務所及び学校の建物の存在は、人命損失及び負傷を避けるうえで十分機動的か。

・必須でかけがえのない記録、科学的・文化的博物館の収蔵物、実用品、救急サービス、国立研究所、及び、重要な装置、システム、ネットワーク及び機能を格納する建物が失われないか。

５）大統領令第 11988 号の施行の改良

FFRMS は、現実的な代替案がほかにない場合に、リスク、気候変化及び脆弱性を考慮することにより、氾濫原内又は近傍での意図する期間に渡る連邦行為を確実にすることを目的に、全国の最低限の洪水リスク管理基準を作成したものである。

FFRMS は、下記改良により大統領令第 11988 号の施行を改善しようとするものである。

・FFRMS は連邦行為の代替案の開発において自然特性（※1）及び自然に基づく手法（(※2)の使用を奨励する。

・FFRMS は、現在及び将来の不確実な洪水リスクに対処するため、より高い基準標高と対応する氾濫原を定める。

・FFRMS の標高及び対応する氾濫原は、後述する 3 つの手法により決定できる。

※１　自然特性 natural features：物理的、地質学的、生物学的、化学的過程により生成され、動的平衡により存在する特定の環境の特性。例えば、バリアー島（barrier islands、海岸に平行に発達した砂の島）、砂丘（sand dunes）、湿地（wetlands）。景観（landscape）のうち自立する（self-sustaining）部分であり、当該環境サービス（機能）の継続的提供のためにほとんど又は全く維持管理を要しない。

※２　自然に基づく手法 nature-based approaches：自然過程を模擬し特定のサービス（例えば洪水リスク低減及び／又は水質の向上）を提供するために設計された特徴（features）（時に「グリーンインフラ（green infrastructure）」と呼ばれる）。（自然過程と提携し同過程に適合するよう）人間の設計により創作され、一般に、ただし常にではないが、意図された水準のサービスを確実に提供するために維持されなくてはならない。（FEMA　2015）

６）FFRMS 標高及び洪水危険地区設定手法（Approaches for Establishing the FFRMS Elevation and Flood Hazard Area）

FFRMS の標高及び洪水危険地区を設定する手法には下記 3 つがある。

・気候科学に基づき洪水について現在及び将来変化を統合する、利用可能な中で最良の実行可能な手法及び水文・水理データの利用。（以下「気候学に基づく科学的手法」（climate-informed science approach））
・フリーボード（Freeboard；余裕高）の追加
・500 年洪水位（500-year flood elevation）

気候学に基づく科学的手法が好ましい。このような分析を支えるデータを利用可能な場合には、連邦部局・機関は本手法を用いるべきである。

a）気候学に基づく科学的手法

沿岸洪水の危険に脆弱な地区では、気候学に基づく科学的手法には、地域の海面上昇の可変性と連邦行為の対象期間（lifecycle）を含む。

河川洪水の危険に脆弱な地区では、連邦行為のための気候学に基づく科学的手法は下記のとおりである。

・政策、実施、重要性（criticality）及び被害（リスク）に対して適切である最新科学を適用することにより、現在及び将来の気候変化による河川の状態及びその他要素（例　土地利用）の変化を考慮する。

重要な行為（Critical Actions）に係る気候学に基づく科学的手法は、大統領令第 11988 号に従うその他重要でない行為（non-critical actions）で用いられるのと同じ方法を用いるが、解析実施時には部局及び機関が考慮すべき要素の 1 つとして重要さ（criticality）を強調する。重要な行為に関する気候学に基づく科学的手法は、沿岸システムと河川システムとの間で異なるであろう点に注意せよ。

b）フリーボードの大きさ（Freeboard Value）

FFRMS は下記のとおりフリーボードの大きさを定める。

・基準洪水位（BFE）に 2 フィート（約 61cm）追加。
・重要行為（Critical Actions）については、基準洪水位に 3 フィート（約 91cm）追加。
・これら追加は鉛直方向の標高及び対応する水平方向の氾濫原の広がりに適用される。

※フリーボードとは、喫水線から甲板までの垂直距離のこと。転じて、予測される浸水深と１階床高との間に追加高さを設けること。余裕高。

c）500 年確率浸水位（500-Year Elevation）

国土安全保障省（Department of Homeland Security）の FEMA※提供の「500 年確率」洪水危険データは、沿岸部においては高潮（storm-surge）の危険のみ考慮している。これらデータは局所的な波の影響又は嵐による浸食を考慮していないが、基準洪水位の計算ではこれらは考慮されている。提案の投資が適切な水準の洪水耐性を具備するよう、波高を含む必要なデータを取得又は作成するよう連邦部局・機関に推奨されている。

※FEMA　連邦危機管理庁：Federal Emergency Management Agency。1979 年設立の大統領に報告する独立した連邦庁。使命は「災害に関する準備、防御、対応、復旧について米国を先導する」ことである。

７）500 年確率及びフリーボード選択肢の適用の補足指針

連邦部局又は機関が、沿岸部において気候学に基づく科学的手法を用いない場合、当該部局又は機関は、少なくとも、適切なフリーボード標高（つまり、重要行為について基準洪水位プラス 3 フィート、その他行為について基準洪水位プラス 2 フィート）を用いなくてはならない。FEMA の 500 年確率洪水標高が波高を含んでいない場合、又は波高が決定されていない場合、500 年確率標高は現行の基準洪水位又は基準洪水位プラスフリーボードよりも低くなりがちである。このような場合、「500 年確率」標高は用いられるべきではない。

河川洪水の危険地区について、適用可能な科学がなく、連邦部局又は機関が気候学に基づく科学的手法に従わないことを選択した場合にも、連邦部局又は機関はフリーボード手法、「500 年確率」標高手法、又は組合せた手法を適宜選択することができる。連邦部局又は機関はより高い標高を用いることを求められないが、より高い標高を選択して良い。

８）FFRMS の更新

全国緩和枠組み（National Mitigation Framework, NMF）により設立された緩和枠組み指導グループ（Mitigation Framework Leadership Group, MitFLG）が、連邦機関横断氾濫原管理タスクフォース（Federal Interagency Floodplain Management Task Force, FIFMTF）との協議及び利害関係者から意見聴取のうえ、毎年 FFRMS を再評価し、更新が正当であるか、水資源審議会（Water Resources Council）へ何らかの勧告をすべきか決定する。水資源審議会は少なくとも 5 年ごとに基準の更新を行う。全体更新（full update）は少なくとも 5 年ごとに行われる。

９）基礎となる洪水危険情報の変化

Biggert-Waters Reform Act of 2012 に基づき FEMA が設置した技術的地図化助言審議会（Technical Mapping Advisory Council）は、予測された海面上昇、及びその他将来の気候変化が既存洪水調査過程に与える影響の考慮手法について勧告する。

１０）現行の気候科学の変化

FFRMS に含まれる指針（guidance）の開発において、MitFLG のワーキンググループは多くの重要なデータ及び情報の空白（gaps）を見つけた。河川に係る気候学に基づく科学的選択肢の向上に関して見つかった重要な空白の 1 つは、将来の洪水流量の頻度予測の新たな評価手法を作成するワーキンググループの未招集であった。

４．３　ハリケーンサンディによる被害とその対応

ハリケーンサンディは 2012 年 10 月に東海岸を襲い、沿岸部で高潮と洪水による大規模な災害を発生させ、約 150 人の死者と、600～800 億ドルの経済被害を生じさせた。850 万人が停電となり 65 万の住宅が破損した（U. S. National Climate Assessment　2014）。米国の歴史上、ハリケーンサンディは 2 番目に被害額が大きいハリケーンである。

2012 年 12 月にオバマ大統領は執行命令 13632 号「ハリケーンサンディからの再建タスクフォースの設置」（Establishing the Hurricane Sandy Rebuilding Task Force）に署名した。同タスクフォースは、気候変動による影響面を含め、被災した州・地元・部族コミュニティを支援するために適切な資源を提供し続けることにより、将来に向けた建設により当該地方のレジリエンス、健康、繁栄を向上させることを使命とする。また同タスクフォースは、政策決定者に当該地方の気候変動による潜在的影響に関する情報を提供する。2013 年 8 月に、同タスクフォースは被災地方の最終的な再建戦略を公表した。（U. S. Department of State　2014）

上記再建戦略には 69 の政策勧告（多くは既に実施されている）が含まれており、家屋所有者が引き続き居住し家屋を補修し、小規模な企業活動を強化し地元経済活動を復興させ、将来の嵐に対してコミュニティ全体がより耐えうるとともに、より再建しうるよう支援する。また同勧告には、気候変動の影響に全ての関連プロジェクトが耐えうるようにするための指針が含まれており、全国の将来の洪水関連災害に耐え、効果的に復興する能力の向上が図られている。

2013 年災害救援特別支出金法（Disaster Relief Appropriation Act of 2013）に基づき、米国陸軍工兵隊は北部大西洋沿岸の洪水・高潮災害リスクの最適な低減方策を決定するための調査に 2013 年 5 月に着手した。同法によると同調査の予算は最大 2 千万ドルで、北大西洋師団（North Atlantic Division）管内のハリケーンサンディ被災地を対象とし、2015 年 1 月までに完了する。（Army Corps of Engineers 2013）

さらに、2013 年 8 月 19 日にオバマ大統領はハリケーンサンディの被災地の復興を促進し、災害対策のロールモデルとなるようなより災害に強いまちとなるよう、復興計画を進めていくためのタスクフォース Hurricane Sandy Rebuilding Task Force (2013/8/19)22,23 を設置した。本タスクフォースの目標は以下の通りである。

・連邦政府の予算を地方の再建のビジョンに沿うよう配置すること
・官僚主義から脱却し、家族やビジネス、コミュニティへ最大級の責任でもって効果的・効率的な支援を行うこと
・地域規模の再建に向けた連邦、州、地方政府の取り組みの調整
・地域がより災害に強いまちとなるよう再建すること、すなわち将来の気候変動によってもたらされる暴風雨やその他のリスクにも耐えうるよう再建すること

４．４　米国の洪水保険制度の概要

（１）洪水保険制度創設経緯

１）洪水保険制度創設以前の経緯

1968 年まで、洪水に関する連邦政府の行為は、主に重大な洪水への対応であり、結果としての洪水管理のための施設による対策であった。それは、1920 年代、1930 年代に発生した大洪水災害並びに 1936 年施行の洪水管理法（Flood Control Act of 1936）により、人命・資産を洪水から守るための防災施設であるダム・堤防等の整備に連邦政府は多額の投資を強いられたことが背景としてあった。当時一般に洪水被災者を財政的に支援する手立ては被災者援助（disaster assistance）のみであった。連邦政府による洪水対策施設プロジェクトへの何十億ドルもの投資にもかかわらず、洪水による人命・資産の損失と被災者援助額は増大を続けた。

早くも 1950 年代には、洪水保険提供の可能性について最初の提案がなされるとともに、民間保険会社が利潤を確保しつつこのような補償高を手頃な価格の洪水保険で提供することは不可能であることが明らかになった。この主な理由は、洪水災害が有する壊滅的な特性と、洪水に暴露された資産のリスクを適切に反映した保険料率の枠組みを開発することが出来なかったことにある。連邦議会は 1956 年連邦保険法（Federal Insurance Act of 1956）を制定し、民間セクターによる洪水保険提供の実現可能性を示すために設計された実験的なプログラムを提案したが、同法が適用されることはなかった。

引き続き増大する洪水被害及び災害復旧費用を踏まえ、洪水対策に関する連邦政府の政策・手法の再定義が 1960 年代に大きく進んだ。1965 年に連邦議会は南東ハリケーン災害救済法（Southeast Hurricane Disaster Relief Act）を制定した。同法はハリケーン・ベッツィによるメキシコ湾沿い各州における大災害を受けて制定された。同法は洪水被災者の財政支援を提供するとともに、国家洪水保険プログラム（National Flood Insurance Program、以下 NFIP）の実現可能性調査を承認した。同実現可能性調査の報告書は「洪水被災者援助のための保険及びその他のプログラム」（Insurance and Other Programs for Financial Assistance to Flood Victims）と題された。このすぐ後に、1966 年連邦予算局洪水対策タスクフォース（Bureau of the Budget Task Force on Federal Flood Control in 1966）が下院文書第 465 号「洪水被害管理のための統合国家プログラム」（A Unified National Program for Managing Flood Losses）における洪水氾濫原開発の文脈での洪水対策に関する広範囲の観点について提唱した。下院文書第 465 号は次の 5 つの主要目標を含んでいる。

・洪水の危険（flood hazards）に関する基礎知識の向上
・氾濫原における新規開発の調整・計画
・技術サービスの提供
・洪水保険に関する実際的な国家プログラムへの移行
・堅実な基準と変化するニーズへの連邦洪水管理政策の順応

２）1968 年国家洪水保険法

下院文書第 465 号と前述の実現可能性調査報告書が 1968 年国家洪水保険法（National Flood Insurance Act of 1968）の基礎を提供した。同法による NFIP 創設の主要目的は次のとおりである。

・保険を通じた個人の洪水被害に対する補償
・州及びコミュニティ（※）による氾濫原管理規制を通じた将来の洪水被害の低減
・災害援助及び洪水対策のための連邦政府の支出削減

※NFIP におけるコミュニティの定義：州、州内の区域又は政治的区画、先住民又は公認の部族組織、アラスカ土着集落又は公認の土着組織であり、当該管轄区域内において氾濫原管理規制を採用し施行する権限を有するもの

上記 1968 年法の 1315 節は鍵となる規定であり、同法 1361 節(c)に一致する氾濫原管理基準に合致又はより厳しい氾濫原管理規制をコミュニティが採用し施行しない限り FEMA（連邦危機管理庁）に洪水保険提供を禁じている。同氾濫原管理基準は第 44 連邦規制法典（44 Code of Federal Regulations、44CFR）の第 60 編の土地管理・利用基準（Criteria for Land Management and Use）に含まれている。NFIP における氾濫原管理要件の強調は、洪水が発生しがちな区域内の人命への脅威と潜在的資産被害の低減を目的とするものである。

NFIP が導入された頃、保険料への連邦政府補助がなければ、既存（コミュニティが NFIP に参加する前に建築された）建物の保険は法外に高価となるだろうと連邦議会は認識した。連邦議会はまた、洪水にあいやすい建物の大部分は、洪水の危険について情報に基づき決定を行うには十分な知識を持たない個人により建てられたものであると認識した。NFIP において既存建物は一般に「洪水保険料率地図前建物」（Pre-FIRM（Flood Insurance Rate Map） buildings）と呼ばれる。これらの建物は、コミュニティの洪水保険料率地図上で洪水リスクが定義される前に建てられた。2002 年当時、有効の 430 万件の洪水保険契約の約 26%が洪水保険料率地図前建物の補助された契約である。なお、1978 年の同比率は 70%であった。

既存建物への補助された保険の提供の代わりに、コミュニティの氾濫原管理条例の採用と施行を通じた新規建築物及び大規模に改良された建築物の防御がコミュニティに課せられた。上記 1968 年法は、コミュニティの最初の洪水保険料率地図（Flood Insurance Rate Map ）が有効になった日又は 1974 年 12 月 31 日の翌日の遅い方以降に建築された建物又は大規模改良された建物に完全な洪水リスクを反映した全保険料率を課することを求めている。これらの建物は一般に「洪水保険料率地図後建物」（Post-FIRM buildings）と呼ばれる。

３）1973 年洪水災害防御法以降

本プログラムの歴史の初期に、既存建物への補助された洪水保険の提供は、コミュニティが自発的に NFIP に参加し個人が洪水保険を購入するのに十分なインセンティブを与えないと連邦政府は認識した。1972 年時点で、全国では、数千コミュニティのみが NFIP に参加しており、9 万 5 千件の保険契約のみが有効であった。1972 年に東海岸の広範囲の河川で洪水を生じさせた熱帯暴風雨アグネスにより、被災地では鑑定済みの氾濫原内の家屋所有者のほとんどが洪水保険契約をしていなかったことが明らかになった。本暴風雨に係る災害援助額はそれまでの災害で最大となった。

この結果、連邦議会は 1973 年洪水災害防御法（Flood Disaster Protection Act of 1973）を制定した。本 1973 年法は連邦機関に対して、1975 年 7 月 1 日まで、又は洪水が生じがちであると鑑定されてから 1 年以内に NFIP に参加しないコミュニティの氾濫原内の建物の取得・建築に関する財政援助の提供及び同氾濫原内での一定の災害援助を禁止した。

さらに上記 1973 年法は、連邦機関及び連邦政府が保証又は管理している融資業者に対し、NFIP に参加しているコミュニティの特別洪水危険区域（Special Flood Hazard Areas）内の建物の取得・建築のための全ての助成及び貸付けにおいて洪水保険を要件とするよう求めた。本要件は「洪水保険必須購入要件」（Mandatory Flood Insurance Purchase Requirement）と呼ばれる。上記特別洪水危険区域とは、氾濫原内の年確率 1%以上の洪水（一般に 100 年洪水（100-year flood）と呼ばれる）による浸水区域のことである。

特に、洪水保険必須購入要件の結果、その後年々NFIP に参加するコミュニティ数は劇的に増加

した。1973 年には 2,200 強のコミュニティが NFIP に参加していた。その後 4 年間で、約 15,000 のコミュニティが NFIP に参加した。これは、有効な洪水保険契約数の劇的増加につながった。1977 年時点で、1973 年 12 月に比べ有効保険契約数が約 90 万件増加し、約 120 万件の洪水保険契約が有効であった。

1994 年に連邦議会は上記 1968 年法及び同 1973 年法を改正する国家洪水保険改正法（National Flood Insurance Reform Act）を制定した。同 1994 年法には例えば、家屋に対する将来の洪水被害を低減するための州やコミュニティによる防災計画策定や対策実施を支援するための洪水対策援助助成プログラム（Flood Mitigation Assistance grant program）の創設が含まれている。

（２）洪水保険制度の概要

NFIP は連邦議会による 1968 年国家洪水保険法（National Flood Insurance Act of 1968）の可決をもって創設された。NFIP は、将来の洪水被害を低減するための州・コミュニティによる氾濫原管理規制を条件として、当該コミュニティ内の家屋所有者が洪水被害に対する保険を購入できるようにする連邦プログラムである。NFIP への参加はコミュニティと連邦政府との合意に基づく。氾濫原への新規建築の将来の洪水被害を低減するための氾濫原管理条例をコミュニティが採択し施行した場合、洪水被害に対する財政的保護として、連邦政府は当該コミュニティ内での洪水保険を利用可能とする。本保険は建物及び家財の洪水被害からの復旧費用の上昇を低減するために、被災者支援のための保険選択肢を提供するために設計されている。

2002 年当時、19,700 を超えるコミュニティが国家洪水保険プログラムに参加しており、これらは重要な洪水の危険を有するコミュニティのほぼ全てを含んでいる。

NFIP は、洪水保険を提供するとともに氾濫原管理規制により洪水被害を低減するだけでなく、全国の氾濫原を見極め、洪水危険地図に描く。洪水の危険を地図に描くことは、洪水の危険の共通認識を醸成するとともに、氾濫原管理プログラム及び洪水保険のための新規建築の保険料率設定に必要なデータを提供する。

NFIP は、上記 1968 年法により国庫に設立された国家洪水保険基金（National Flood Insurance Fund）から資金を提供されている。集められた保険料は本基金に納められ、損害、運用・管理費用が基金から支払われる。これに加えて、NFIP は国庫から 15 億ドルまで借りることができる。当該借金は利子付きで返済する必要がある。

1991 年より、NFIP に関する給与、支出、対策費用を賄うために連邦契約料（Federal policy fee）（当初 25 ドル、1995 年に 30 ドルに増額）がほとんどの洪水保険契約に上乗せされている。

NFIP は次の 3 つの基本要素から構成されている。

・洪水が生じがちなコミュニティの鑑定と地図上での表示
・コミュニティによる氾濫原管理規制の採択と施行の要求
・洪水保険の提供

以下、上記の項目を実現するために必要な制度的、技術的観点について述べる。

１）洪水危険性の鑑定とリスク評価

FEMA 長官は法令により、全国の洪水が発生しがちな区域を鑑定し地図に描くとともに、当該区域内に洪水リスク区域を設定することを求められている。この規定に基づき、洪水危険地図（flood hazard maps）が、15 億ドル（2001 年価値で 28 億ドル）を超える費用をかけて 19,200 を越えるコミュニティについて発行された。2002 年当時、約 15 万平方マイル（1 マイル 1.6km として約 38 万 4 千 km2）の氾濫原区域（我が国の国土面積約 37 万 8 千 km2（2012 年 10 月 1 日現在（総務

省統計局 web)）とほぼ同じ面積）を描いた洪水危険地図が公表されている。

FEMA の洪水危険地図は、州及びコミュニティの氾濫原管理規制、洪水保険料率の計算、家屋所有者が抵当付き借金、又は連邦又は連邦関連の財政援助を得るための法令に基づく条件としての洪水保険を取得する必要があるかどうか決定するために、概算で毎年 1,500 万回利用されている（2002 年時点)。FEMA の洪水危険地図はまた、州やコミュニティにより危機管理及び土地利用・水資源計画のために利用されるとともに、氾濫原内の又は氾濫原に影響する連邦行為の提案に係る大統領令第 11988 号「氾濫原管理」のために連邦機関により利用されている。

① 100年洪水基準（The ”100-year” Standard）

洪水被害を低減するリスク管理（氾濫原管理）なしには、NFIP は手頃な値段で保険を提供することができない。洪水リスクを評価・管理するために全国基準が必要であった。広範囲の研究及び連邦・州機関との調整の後、年超過確率 1%洪水（1-percent-annual-chance flood）（別名 100 年洪水（100-year flood）又は基準洪水（Base Flood））が NFIP の基準として推奨された。

年超過確率 1%洪水は、家屋所有者に過度に厳しい要求又は法外の費用負担をさせずに、より高い防御水準を与えるものとして選択された。年超過確率 1%洪水（1-percent-annual-chance flood）（または 100 年洪水（100-year flood））とは、どの年においても超過確率が 1%である洪水の大きさと頻度を表す。

また、年超過確率 1%洪水は連邦機関及び大部分の州が氾濫原管理プログラムを施行する際の規制基準として用いている。年超過確率 1%洪水基準は NFIP 開始以来用いられ、洪水危険地図を発行済みの 19,200 の参加コミュニティの全てにおいて氾濫原管理の目的のために用いられている。

なお米国では、1968 年の国家洪水保険プログラム発効前の主要河川の基準プロジェクト洪水（Standard Project Flood）は、おおむね年確率 0.2～0.1%（再現期間 500～1,000 年）規模の洪水であった。同プログラムが 1%年確率洪水からの防御を保険加入免除の要件としていることから、近年は年確率 1%の規模の洪水が目標設計レベルとして採用されることが多い。

②洪水氾濫しがちな区域の見極めと地図化（Identifying and Mapping Flood-Prone Areas）

米国では年確率 1%の洪水により浸水する区域を特別洪水危険区域（Special Flood Hazard Area）又は高リスク区域（high risk area）として規定している。同区域内では地元の条例を満足すれば土地開発が可能だが、連邦の融資等による土地・建物の購入・建築には洪水保険加入が必要である。同区域が表示された洪水保険料率地図（Flood Insurance Rate Maps）等を FEMA（連邦危機管理庁）が提供している。

各洪水氾濫しがちなコミュニティ内の洪水リスクを正確に評価するための調査が実施されるように、前出の 1968 年法は次の 2 つを要求している。

・氾濫原内のうち、特別な洪水危険性（special flood hazard）を有する全ての区域の見極めと公表（5 年以内）
・上記区域内全ての洪水リスクゾーン（flood-risk zones）の設定（15 年以内）

上記のために、各コミュニティは洪水保険調査（Flood Insurance Study）を行うが、NFIP 運用当初、洪水保険調査の実施を NFIP 参加の要件とすると、コミュニティの NFIP への参加が大幅に遅れることが明らかになったため緩和措置がとられた。つまり、1969 年住宅建設及び都市開発法（Housing and Urban Development Act of 1969）により、洪水保険調査が完了していなくても NFIP に参加できる（ただし家屋所有者が契約できる洪水保険額に制限あり）道が開かれ

た。

洪水保険調査が実施されるまでは、概略手法によりコミュニティの特別洪水危険区域を描いた洪水危険境界地図が用意された。本手法では、概略ではあるが、年超過確率 1%氾濫原（1-percent-annual-chance floodplain）を見極めるが、基準洪水位（Base Flood Elevations : 100 年洪水位）※、浸水深、洪水流下範囲（floodways）の決定は行わない。洪水危険境界地図は氾濫原の開発管理についてコミュニティを支援するとともに、当該区域における洪水保険契約が得策であるかどうかを保険代理店・家屋所有者が見極める際に両者を支援することを意図している。

その後、NFIP に参加している大部分のコミュニティに関し洪水保険調査が行われた。洪水保険調査は水文学的･水力学的な詳細な解析を使用して基準洪水位を設定し、氾濫原内の開発された区域に関する洪水流下範囲及びリスクゾーンを指定する。さらに詳細なリスクデータがコミュニティに示されると、コミュニティは通常プログラムに移行することができ、これによりコミュニティはより総合的な氾濫原管理要件の適用を求められ、建物の所有者はより高額な保険を購入することができるようになる。

洪水保険調査の実施・更新について、FEMA は代表的な 2 つ（概略と詳細）の調査手法の組合せを用いてコミュニティの洪水危険性を鑑定している。詳細手法では典型的に工学的モデルを用い、少なくとも基準洪水位又は浸水深及び洪水流下範囲の決定に至り、これらは洪水保険料率地図上に示される。一般に、どちら（概略か詳細か）の調査手法を用いるかの判断は、氾濫原内及び氾濫原近傍で現在及び将来見込まれる開発によっている。開発済み又は開発中の区域に影響する洪水原因に係る洪水危険情報（flood hazard information）は、可能な限り詳細手法に基づかなくてはならない。詳細手法よりも厳密でない概略手法は基準洪水位又は洪水流下範囲を定めないものであり、未開発又は低密度に開発される区域において利用可能である。

洪水保険調査では一般に次の洪水危険情報を得る。

・洪水時の氾濫水の表面の標高又は洪水氾濫流の地表面からの平均水深として表された基準洪水位

・10 年（年超過確率 10%）、50 年（同 2%）、100 年確率（同 1%）及び 500 年（同 0.2%）洪水時の氾濫水の表面の標高（water-surface elevations）

・100 年洪水の流下域の規制境界（boundaries of the regulatory 100-year floodway）：基準洪水位を 1 フィート（約 30cm）より超過することなく基準洪水（100 年確率洪水）を流下させるために、占拠等してはいけない流路及び隣接する氾濫原の範囲

・100 年及び 500 年洪水の氾濫原の境界（100 年洪水の氾濫原は特別洪水危険区域（前出）と呼ばれる）

洪水保険調査の結果は地図上に示され、洪水保険料率地図（Flood Insurance Rate Map）と呼ばれる。河川沿いの区域の特別洪水危険区域は洪水保険料率地図上で「A ゾーン」（A Zones）と呼ばれる。A ゾーンは特性に応じて AE ゾーン等に更に区分される。

○詳細な区域例

(1) AE 区域：年確率 1%の洪水による浸水範囲。基準洪水位（Base Flood Elevation）が示される。洪水保険加入義務あり。

(2) AH 区域：年確率 1%の洪水による平均 1～3 フィート（約 30～90cm）の浅い浸水範囲（一般に池状の区域）。詳細な水理解析による基準洪水位が示される。洪水保険加入義務あり。

(3) AO 区域：年確率 1%の洪水による平均 1～3 フィートの浅い浸水範囲（一般に傾斜地の薄

層流)。詳細な水理解析による平均浸水深が示される。洪水保険加入義務あり。

② NFIP地図上での堤防システム及び洪水防御壁システムの記載

FEMA は堤防システム又は洪水防御壁システムの設計・建設・資金提供、認可（approve）を行わない。しかし、洪水保険料率地図上で年超過確率 1%の洪水からの防御を提供するシステムとして記載されるために、満足すべき厳重な基準を明らかにしている。NFIP 規制の基準を満足すれば、堤防又は洪水防御壁背後の年超過確率 1%氾濫原内の資産は FEMA により当該氾濫原外にあるものとして取扱われる。堤防又は洪水防御壁システムの FEMA による調査は、NFIP 地図におけるリスクゾーンの決定のみを目的とするものであり、構造物又はシステムが洪水時に機能発揮するかどうかを FEMA が決定又は保証するものではない。

２）氾濫原管理（Floodplain Management）

1968 年国家洪水保険法（既出）の 1315 節は同法 1361 節(c)に定める権限による氾濫原管理基準をコミュニティが採用し施行しない限り FEMA に洪水保険提供を禁じている。同氾濫原管理基準は第 44 連邦規制法典（44 Code of Federal Regulations）の§60.3 の NFIP 規定により確定されている。コミュニティは以下①に詳述する最低限の NFIP 基準に一致、又はこれを上回る氾濫原管理条例を採択しなくてはならない。

なお、地元の氾濫原管理条例の管理に FEMA が直接関与することはない。

以下に、氾濫原管理に必要な事項に関する規定を示す。

① NFIP の最低限の氾濫原管理要件（Minimum NFIP Floodplain Management Requirements）

NFIP では、コミュニティが採択しなくてはならない最低限の氾濫原管理要件は、コミュニティが FEMA から提供を受けた洪水リスクデータのタイプ（基準洪水位を含む詳細な洪水保険調査、及び洪水保険料率地図、又は基準洪水位が含まれない概略の A ゾーン及び V ゾーン※１）によって決まる。NFIP の規定によれば、NFIP 参加コミュニティは特別洪水危険区域内の全ての開発※2 を規制することが求められている。

一般に、NFIP の最低限の氾濫原管理規定によれば、A ゾーン内の新規建築物又は大規模改良又は大規模に破損した既存建物の最も低い（地下室を含む）床高さは基準洪水位以上としなくてはならない。A ゾーン内の非居住用建物については、必ずしもかさ上げではなく、洪水に耐えうる（dry-floodproofed）構造とすることも可能である。

NFIP により新規建築物（洪水保険料率地図後の建物）の潜在的年平均洪水被害は大幅に減少した。NFIP の被害経験によれば、新規建築に関する NFIP の氾濫原管理規定により、毎年 10 億ドルの洪水被害が避けられている。NFIP 基準に基づき建築された構造物は被害の頻度と程度の低減により、被害が 80%減少している。

新築だけでなく、新たに大幅な改良をする建物（substantially improved）、又は大幅な被害を受けた（substantially damaged）建物は、NFIP の最低限の要件を満たさなければならない。大幅であるかどうかを決めるのはコミュニティの責任である（例えば、改良費用が建物の市場価値の 50%以上であれば「大幅な改良」、復旧費用が建物の市場価値の 50%以上であれば「大幅な被害」と定める)。

※1　V ゾーン（V-zone）：年超過確率 1%洪水時の氾濫原のうち、海岸沿い（along the coast）にあり、水深等の条件から少なくとも 3 フィート（約 90cm）の高さの波が想定される区域

※2　開発（development）：改良された又は改良されていない土地の全ての人為的変更。建築物、その他構造物、採鉱、浚渫、うずめる、緩勾配化、舗装、掘削又は穴開け工事、又は装置又は材料の貯蔵を含み、これらに限定しない。

洪水保険料率地図公表前の多数の建築物（Pre-FIRM structures）は繰り返し洪水被害を受け、NFIP にとって重要な問題を提示している。NFIP における「繰り返し被災資産」（Repetitive Loss Properties）とは一般に 10 年間に千ドル以上の被害を 2 回以上受けた資産のことである。2002 年時点で、全国で約 4 万 5 千件の繰り返し被災資産が保険契約されている。これらの建物は全国洪水保険基金の深刻な損失につながっており、全支払い被害の 1/3 近くを占めている。

②条例の採択（Ordinance Adoption）

洪水氾濫しがちであると知らされてから NFIP の最低限の要件以上の氾濫原管理条例の採択をしそこなった、又は維持しそこなったコミュニティについて、FEMA は NFIP の適用を一時中止できる。NFIP が一時中止されたコミュニティ内では、家屋所有者は洪水保険を利用することができない。

さらに、前出の 1973 年法の 202 節(b)に、連邦が規制している融資機関に対して、特別洪水危険区域内の改良された不動産の購入者又は賃借者に、当該資産がローンの設定、増額、延長又は更新のために使われる際に、連邦災害援助が利用可能かどうか知らせることを求めている。

③コミュニティの要件満足状況のモニタリング（Monitoring Community Compliance）

FEMA 又は FEMA の代わりとしての州は、コミュニティ支援訪問（Community Assistance Visits）及びコミュニティ支援問合せ（Community Assistance Contacts）を行い、コミュニティの氾濫原管理プログラムをモニタリングしている。これらに加えて、FEMA は地図更新書簡（Letter of Map Revision）の過程を通じてコミュニティによる氾濫原管理実施状況をモニタリングできる。

④コミュニティが氾濫原管理を実施しない場合の対処（Actions Against Communities For Failure to Enforce）

コミュニティの氾濫原管理プログラムにおける欠陥又は地元の条例の違反は、一般に NFIP の要件の理解不足、技術力不足、NFIP の要件の背後の原理の理解不足、又は保険意義及びその他決定による結果の認識不足によっている。認識された問題の大部分は、コミュニティ支援を通じて解決されうる。解決不能な場合に、FEMA はコミュニティの要件を満足させるための手段を持っている。コミュニティが氾濫原管理規制を適正に施行しない場合には、NFIP の一時停止（suspend）又は執行猶予（probation）が行われる。執行猶予は洪水保険の利用可否に何の影響も与えないが、最低 1 年間、保険契約ごとの保険料に 50 ドルが上乗せされる。

NFIP が一時停止されると、洪水保険はもはや利用できない。また、コミュニティに対する連邦の金融支援も制限される。

コミュニティが規定に従う主な理由は、洪水保険の潜在的喪失を伴う不動産市場の混乱を避けるためである。

⑤個別建物が規定に従わない場合の対処（Actions Against Individual Properties For Failure to Comply）

ある保険対象建物がコミュニティの氾濫原管理条例に違反していると見極められた場合、

FEMA は当該建物の保険会社に対して当該情報を再調査し、当該建物のリスク増大を反映した保険料率を再設定させることができる。

⑥州の氾濫原管理上の役割

多くの州が州氾濫原管理プログラムを創設している。各州は、NFIP の連絡窓口として NFIP 州調整機関（NFIP State Coordinating Agency）を任命している。多くの州で氾濫原管理法令・規制を採択し、独自の氾濫原管理プログラムを創設し予算化している。

⑦被災後の評価

FEMA の連邦保険・緩和行政部（Federal Insurance and Mitigation Administration, FIMA）及び地方事務所（Regional Offices）は、大きな洪水被害の後、NFIP の氾濫原管理要件がいかに機能発揮したか評価するための現地調査を実施する。評価結果は洪水被害評価報告書（Flood Damage Assessment Reports）及び建物機能発揮評価チーム（Building Performance Assessment Team, BPAT）報告書として FIMA が文書化し広く配布する。

⑧技術的援助の提供

FEMA は、氾濫原管理プログラムの施行に責任を負う地元・州職員の広範囲の訓練を実施している。FEMA は危機管理研究所（Emergency Management Institute, EMI）において 1 週間の期間の居住氾濫原管理コース（Resident Floodplain Management Course）を年何回も実施している。

３）洪水保険の制度

有効な洪水保険証券数は、1973 年洪水被害防御法（Flood Disaster Protection Act of 1973）前の約 9 万 5 千から、1989 年の 220 万、2002 年の 430 万へと増加してきている。有効な洪水保険補償範囲は、2002 年 3 月 31 日時点で 6,060 億ドルを超えている。

全国洪水保険基金（National Flood Insurance Fund, NFIF）は NFIP に対する連邦政府の財政上の責務を果たすための手段である。2001 会計年度において FIMA は、主に保険料及び保険契約又は更新時に保険証券ごとに上乗せされる 30 ドルの連邦政策料により、約 15 億ドルを歳入として得た。連邦政策料による歳入により、ほとんど全ての洪水危険地図作成、及び洪水緩和援助（Flood Mitigation Assistance）プログラムを含む氾濫原管理活動が支えられている。

①洪水保険の販売（Sale of Flood Insurance）

FEMA は保険業界と密接に連携し、洪水保険証券の販売及びサービスを促進している。NFIP の洪水保険は NFIP 参加コミュニティ内の資産の所有者に次の 2 つの手法により販売される。

・州の免許を受けた、 FEMA と直接取引する資産・生命保険代理店・仲介人を通じて販売
・1983 年に創設されたプログラム「Write Your Own, WYO」により私的保険会社を通じて販売

WYO プログラムは、私的保険業界の販売網及び既存保険契約を活用して洪水保険を販売し、NFIP 契約数と契約の地理的分布を拡大するために開始された。現在 NFIP の洪水保険契約の約 95%は WYO プログラムを通じて締結されている。

NFIP は洪水保険の唯一のよりどころではない。企業は Difference In Conditions（DIC,通常の保険でカバーされない激甚な災害被害を補償する保険）に基づく洪水保険をいくつかの保険会社から購入可能である。一方、NFIP 導入以前は、居住家屋所有者のための洪水保険補償を私的保険市

場で得ることはより困難であった。しばしば壊滅的となる洪水の特性が、NFIP 以外の大部分の保険事業者が当該保険補償を行うことを妨げてきた。

②洪水保険証券（Flood Insurance Policy）

標準洪水保険証券（Standard Flood Insurance Policy, SFIP）には、保険者である FEMA 又は WYO の会社と被保険者との間の保険契約の期間及び条件が詳細に記される。NFIP のコミュニティの被保険者には、所有者、賃借人、建築中の建物の建築者、分譲マンションの組合、分譲マンションの区分所有者が含まれる。

SFIP における洪水の定義は次のとおり。

「通常乾いている 2 エーカー（約 8 千 m^2）以上の土地又は 2 以上の資産（少なくともこれらのうちの 1 つは契約者の資産）が、内陸水又は海水の氾濫（overflow）、異常な急激な集水又は何らかの流出源からの表面水の流出又は土石流により、一時的に部分的又は完全に浸水する全般的な状態。」

③適格建物（Eligible Structures）

1968 年法の 1305 節に洪水保険プログラムの適格建物の範囲が規定されている。 1968 年法は、洪水保険がまず最初に 1～4 家族用居住建物、小規模企業、及び教会で利用可能であることを求めた。その他居住用資産、その他企業用資産、農業資産、私的な非営利組織が占有する資産、州又は地元政府が所有する資産への洪水保険の拡大については調査後認めることとした。現在、これら全ての資産タイプ及び一部例外を除く家具等についての保険が利用可能である。NFIP コミュニティ内の資産所有者は、建物又はその家具等が氾濫原内にあろうとなかろうと洪水保険を購入できる。完全に水上にある又は主に地下にある建物は洪水保険の対象にならない。また、ガス・液体の貯蔵タンク、動物、鳥、魚、飛行機、埠頭、桟橋、遮断壁、生育中の作物、低木、土地、家畜、道路、屋外の機械又は装置、及び一般的に自動車両も対象外である。

④待機期間（Waiting Period）

洪水保険の購入者は、申込の完了及び保険料提出日から保険証券が有効になるまで 30 日間待たなければならない。1994 年全国洪水保険改革法の一部として、待機期間の 5 日間から 30 日間への変更が含まれた。これは、大河川流域に資産を持つ個人が、何マイルも上流で洪水が発生するまで保険補償範囲の購入を待つことができる問題に対処するためである。

⑤保険補償範囲（Coverage Amounts）

NFIP においては、緊急プログラム（Emergency Program）と通常プログラム（Regular Program）で各保険補償範囲の上限がある。コミュニティの洪水保険調査完了前の緊急プログラムでは、保険料率計算によらない、連邦が補助する保険料率で限定された保険補償範囲が利用可能である。洪水保険料率地図及び洪水保険調査の形でより詳細なリスクデータが提供された後、コミュニティは通常プログラムに移行し最大補償範囲が利用可能となる。

⑥その他の補償（Other Coverages）

建物及び個人所有物の補償範囲に加え、標準洪水保険証券（SFIP）はその他水害ゴミの除去・被害回避対策のための補償範囲を提供する。また、住宅型（Dwelling Form）の SFIP では、マンション区分所有を対象とする場合マンション被害評価（Condominium Loss Assessments）を補償範囲とする。SFIP は洪水を原因とする場合汚染被害（Pollution Damage）を補償範囲として含む。

SFIP の全ての 3 つの型は、法令遵守のための増加費用（Increased Cost of Compliance, ICC）を補償範囲に含む。

⑦保険料率の設定（Ratemaking）

上記 1968 年法は洪水保険料率の設定法を 2 つ（補助された料率（subsidized rates）と保険計算上の料率（actuarial rates））に区分した。連邦議会は、1974 年 12 月 31 日（同日を含む）又は最初の洪水保険料率地図が発効する日の遅い方の日より前に建設された既存建物に補助された料率（保険計算上の料率よりも少ない料率）で NFIP が保険証券を提供することを認めた。FEMA による評価によると、これら既存建物では、建物の長期間に見込まれる洪水被害に用意するための全リスクに対応した保険料の平均 35～40%のみを支払っている。

洪水保険料率は、洪水保険料率地図上に示された洪水リスクゾーン、最も低い床高さが基準洪水位を上回っているか下回っているか、建物の種類（type）、階数、地下室又は囲いの存在を含む多数の異なる要素を考慮している。洪水リスクゾーンと基準洪水位は、地域の様々な区域の洪水リスクを区別する独特の要素である。

コミュニティの氾濫原管理規定に適合した建物が支払う保険料の洪水保険料率は、たいていの場合、洪水保険料率地図発効前からの既存（Pre-FIRM）建物に課せられる補助付き料率よりもかなり低い。しかしながら、コミュニティの氾濫原管理条例に違反して建築された建物はかなり高い料率を支払い、必要な標高よりかなり低い建物では何千ドルにもなる。

⑧保険金支払請求（Claims）

2001 年会計年度において、NFIP は洪水被害に係る 43,525 件の請求に対して、1 件当たり平均 26,079 ドルを支払った。NFIP の想定年平均支払額は約 7 億ドルである。

前述のように、NFIP の基準に従って建築された建物は、洪水頻度及び損失の程度の低減により、被害が 80%減少している。NFIP の氾濫原管理要件は、年 10 億ドルの被害を低減していると評価されている。

⑨マーケティング（Marketing）

潜在的な洪水保険市場に関する正確な数を得ることは難しい。控えめな見積りによると、特別洪水危険区域（SFHA）の 1/3～1/2 のみが洪水保険補償範囲に該当している。過去数年間の数々の洪水災害では、特別洪水危険区域内の被災者のたった 10～20%が洪水保険の補償範囲に該当していた。残りの 80～90%は、税金による連邦災害援助（Federal disaster assistance）（これは極めて限られている）、借金（返済が必要）、税金の免除、復旧を助ける貯金に依存しなければならない。

NFIP の開始以来洪水保険販売における主要機能である保険業界は、洪水保険販売上の鍵は国家規模での社会認識であると繰り返し言明している。消費者を教育し、認識を高め、保険代理店の仕事をより容易にするよう、保険業界と協力しつつ FEMA は洪水保険の広告と促進活動の洗練を計画し継続している。

⑩洪水保険購入要件（Mandatory Flood Insurance Purchase Requirement）

1968 年から 1973 年洪水災害防御法採択まで、洪水保険の購入は任意であった。残念ながら、洪水保険購入に関する全国的反応は熱心なものではなかった。1972 年時点の有効な洪水保険証券数はたった 95,000 件超であり、同年襲った熱帯暴風雨アグネスの被災者のごくわずかしか洪水保険を購入していなかった。1973 年法は多くの資産について洪水保険補償範囲を要件とした。中西部における 1993 年の何十億ドルもの洪水被害を受けて、議会は国家洪水保険改革法（National Flood Insurance Reform Act of 1994）を制定した。1994 年法の目的の一つは、融資者、債権回収会社、転売市場での購入者に NFIP 購入要件を遵守させることである。同法は融資業者を規制する連邦機関に対して、洪水保険の購入・維持がされていない適用可能資産について貸付けの設定、増額又は更新をしないよう連邦規制融資業者（federally regulated lenders）を指導するための規則を制定するよう求めている。

（３）その他の NFIP 活動

①コミュニティ等級付けシステム（Community Rating System）

NFIP のコミュニティ等級付けシステム（CRS）は、NFIP の最低要件を上回る氾濫原管理プログラムを創設したコミュニティ内の洪水保険料を割り引くものである。CRS では、洪水にさらされやすい建物のより厳しい規制、取得、移転又は洪水耐性の付与（floodproofing）、空地の保全、洪水被害を低減する又は氾濫原の自然資源及び機能を保護するその他方策により、コミュニティはクレジット（credit）を得る。

CRS は、コミュニティによる NFIP 最低基準を超える氾濫原管理活動を認め、奨励するために 1990 年に導入された。CRS において洪水保険料率は、CRS の下記 3 つの目的に合致するコミュニティ活動により低減された洪水リスクに応じて調節される。

・洪水損失の低減
・正確な保険料率の促進
・洪水保険の認識の増進

CRS には 10 の等級がある。等級 1 は最も多くのクレジット点が必要であり、最大の保険料割引がある。等級 10 には保険料割引はない。CRS の保険料割引は、等級 9 コミュニティでの 5%から、等級 1 コミュニティの 45%まである。CRS にはクレジットを与えうる 18 の活動があり、4 種類（公的情報（Public Information）、地図化と規制（Mapping and Regulations）、洪水被害低減（Flood Damage Reduction）、洪水事前準備（Flood Preparedness））に分類される。

2002 年資料現在、900 を超えるコミュニティが、NFIP の最低要件を超える地元緩和策、出前講座及び教育的活動の実施に基づき、洪水保険料の割引を受けている。

②洪水緩和援助プログラム（Flood Mitigation Assistance Program）

洪水緩和援助（FMA）プログラムは、州及びコミュニティが洪水緩和計画を成し遂げ、建物への将来の洪水被害の低減対策を実施するための資金を提供する。本プログラムは、1994 年法により認可された。本資金は災害発生前に使用可能である。

FMA プロジェクト補助金の目的は、NFIP が保険対象としうる建物に対する洪水被害のリスクを低減するための洪水緩和プロジェクトの州及びコミュニティによる実施を支援することである。適格のプロジェクト種類の例には、NFIP の保険対象である建物及びその下の不動産の取得、取得又は制限された不動産上の NFIP の保険対象である建物の除却などが含まれる。

※2002 年現在、約 45,638 件の繰り返し被災資産（repetitive loss properties）が NFIP の契約対象となっている。これらの建物は、保険請求ベースで年 2 億ドルの費用を NFIP に負担させていると見積られている。建物価値の 4 倍以上の損失を出している建物が 8,753 件、同 2～3 倍が 1,160 件ある。

（４）その他の FEMA プログラム

①危険緩和補助金プログラム（Hazard Mitigation Grant Program）

危険緩和補助金プログラム（HMGP）は、1988 年 Robert T. Stafford 災害救援及び危機援助法（Robert T. Stafford Disaster Relief and Emergency Assistance Act）の第 404 節（その後 1993 年危険緩和及び移転援助法（Hazard Mitigation and Relocation Assistance Act of 1993）、2000 年災害緩和法（Disaster Mitigation Act of 2000） により修正）により創設された。HMGP は、全ての種類の災害に対する長期的な危険緩和対策の実施について州及びコミュニティを援助する。HMGP の重要な目的は、災害後の復旧・復興において、将来の災害から生命・財産を守るための重要な緩和方策を講じる機会を失わないようにすることである。

HMGP における適格な対策には、洪水にさらされがちな建物の取得又は除却、かさ上げを含む。

洪水の危険への対応について、FEMA は基本的にハード以外（nonstructural）の危険緩和方策を重視している。構造物以外の方策には、洪水被害を受けた又は洪水にさらされがちな建物の取得・除却、移設、かさ上げ又は洪水耐性の付与（floodproofing）を含む。

本プログラムの開始以来 2001 年 9 月までに、FEMA はリスクにさらされた 25,801 件の建物について、構造物以外の方策により、将来の洪水被害を永久的に削減又は大幅低減した。同内訳は 22,564 件の取得、733 件の移設、2,504 件のかさ上げである。これら対策の連邦支出の合計は 826,943,785 ドルである。

②2000 年災害緩和法（Disaster Mitigation Act of 2000）

2000 年災害緩和法（DMA）は、1988 年 Robert T. Stafford 災害救援及び危機援助法（Robert T. Stafford Disaster Relief and Emergency Assistance Act of 1988）を修正した。DMA は州・地元・部族政府に対する補助金の支出について、災害前（pre-disaster）の緩和プログラムの作成を認定する。災害の宣言時点で、規則に定められた基準に合致する州の緩和プログラムが FEMA に認定され有効である場合、州は HMGP 資金を割り増し（15%から 20%へ）で受け取る。

③計画の先制（Planning Initiatives）

FEMA と米国計画協会（American Planning Association、APA）は共同で、災害後の復興過程においてより安全でより持続可能なコミュニティに資する計画道具の使用を奨励する文書「災害後の復旧・復興のための計画」（Planning for Post-Disaster Recovery and Reconstruction）を作成した。同文書は 1998 年に発行された。

参考文献：

Barack Obama 2015: Federal Flood Risk Management Standard, http://www.fema.gov/media-library-data/1422649643416-c0ff9e51d11442790ab18bae8dc5df4b/Federal_Flood_Risk_Management_Standard.pdf, viewed on 5 Feb. 2015.

FEMA　2015: Revised Guidelines for Implementing Executive Order 11988, Floodplain Management, Draft for Public Comment, 1/28/2015, pp. 4, https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/101761, viewed on 12 Feb. 2015.

White House 2015: Office of the Press Secretary, http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/01/30/executive-order-establishing-federal-flood-risk-management-standard-and-, viewed on 5 Feb. 2015.

U. S. National Climate Assessment　2014: Climate Change Impacts in the United States Highlights, pp. 39, 71.

Army Corps of Engineers　2013: Corps of Engineers begins post-Sandy comprehensive study of North Atlantic coast, 29th May 2013, http://www.usace.army.mil/Media/NewsArchive/tabid/204/Article/478091/corps-of-engineers-begins-post-sandy-comprehensive-study-of-north-atlantic-coast.aspx, viewed on 24th Sept. 2014.

U. S. Department of State　2014: United Stats Climate Action Report 2014, pp. 165.

FEMA (Federal Emergency Management Agency) Federal Insurance and Mitigation Administration 2002: National Flood Insurance Program Description.

Jos van Alphen, Ron Passchier and Victor Jetten, RWS-RIKZ National Institute for Coastal and Marine Management, Netherlands, “Atlas of Flood Maps”, pp6-144 - 6-145, 2007

National Committee on Levee Safety, “DRAFT RECOMMENDATIONS FOR A NATIONAL LEVEE SAFETY PROGRAM”, pp9-10, 2009.

第Ⅲ部

気候変動影響に対する適応策に関する研究

Ⅲ－２：豪雨による水害への対応

１．全体構成

豪雨がもたらす水害に関わる適応策は、とりもなおさず、治水方策を気候変動影響の下でも有効となるように拡充する方策と言える。そこでまず第２章１節において、我が国の治水に関する状況を技術政策的観点から概括し、以降の適応策検討の起点とする。適応策の検討においては、細部の積み上げから入ることよりも、適応策の全体像を提示し、その下で個々の施策がどのようなものになっていくかを吟味するという手順が有効と考えられる。そこで次に第２章２節において、第Ⅱ部の成果と上記第２章１節の内容を踏まえつつ、作業仮説的に適応策の枠組みを提示する。ここで述べている通り、Ⅲ-2 で扱う適応策は従来の治水施策を包含するものなので、第２章で提示する枠組みを「新しい治水フレーム」と称している。第３章では、このフレームの下での施策検討に不可欠となる被害発生状況の見積もりを、治水システムの挙動まで考慮して行う方法について述べる。ここでいう「治水システムの挙動の考慮」とは、ある水系における破堤氾濫の起こり方を、実態に即し幅広く想定して（水位が計画高水位に達したら破堤が生じるという一律的判断法を採らず)、被害見積もりとそれが起こる可能性の組み合わせをあまねく把握しようとすることを指す。第４章では、新しい治水フレームの下で重要な役割を担い、かつ新たな技術展開が求められる個別の治水方策について、技術開発や検討を行った成果について述べる。第４章で提示されている成果をもっても、「新しい治水フレーム」の実装に必要な施策推進の道具を高いレベルで充足するまでには至っていない。しかしそれらは、概念や方向性の議論にとどまらず具体的施策検討に踏み出す際に有用な材料になるものであり、また技術展開の方向性や有り様を理解する助けとなる。最後に第５章で、以上のまとめと今後の展開の見通しについて述べる。

上に述べたとおり、第２章で提示している「新しい治水フレーム」は、豪雨による水害への対応に資する気候変動適応策の技術政策的議論を進めるための“作業仮説”であり、この内容をそのまま実際の政策に反映させることを意図したものではない。その上で、必要な技術政策の展開を実践していくためには、概念や方向性の議論にとどまらず、「このような施策の枠組みを形成すると、どのようなことになるか？」を検討するというアプローチから、施策形成の具体的内容について積極的に吟味していくことが有用かつ不可欠と考えられる。こうした考えのもと本Ⅲ-2 では、施策群のフレームを案として先に提示し、その下で必要になっていく技術展開を検討するというスタイルを採っている。

２．気候変動影響・超過洪水生起を踏まえた新しい治水フレームの考え方

２．１　わが国の治水に関わる状況の概括

２．１．１　河川整備による治水ストック積み上げの効果

自然に形成された沖積河川の流路は、一般に 2～3 年に一回の生起頻度の洪水を満杯状態で流す容量を有している。それを超える洪水が発生すれば沖積平野に溢れ出す。こうした自然システムの一部であった洪水氾濫は、沖積平野の利用が広がり、その形態が高度化してくる中で、ハザード（危険要素）としての側面が強まり、その頻度・影響を低下させる営為が積み重ねられてきた。その手段として、1)洪水の流量を減らす、2)氾濫せずに河川が流せる洪水流量を増大させる、3)氾濫から防がれるエリアを増やす、の 3 つがある。1)は、山地部（ダム）や平野部（遊水池）に洪水を一時的に貯留し洪水のピーク流量を減少させる方法、放水路開削によって洪水流量自体を分けてしまう方法などに分かれ、2)も、自然に形成された流路の断面積を掘削により大きくする方法、蛇行河川の短絡化によって河川の勾配を大きくする方法、流路の両脇に堤防を築く方法、などに細分されていく。3)としては、地先堤防、輪中堤や二線堤など、氾濫の影響を受けにくいエリアを逐次確保・拡大する方法が代表的である。明治以降の機械力の本格導入と治水技術の急速な向上によって、1)と 2)を中心とする、氾濫頻度を低下させることを主軸とした河川整備が我が国で精力的に進められ、今日に至っている。

図-Ⅲ2.2.1 は、一級河川の国交省管理区間の総河道容量の経年変化を示したものである（舛屋ら、2015）。ここで総河道容量は、計画高水位と堤防、河床で囲まれた断面積の縦断方向積分値を集計して算出されている。この図が扱っている 1970 年から 2010 年までの 40 年間だけを見ても、およそ 112 億 m^3 から 138 億 m^3 に 23%拡大している。

図-Ⅲ2.2.2 は、条件を単純化した簡易計算から導いた河積増大と氾濫生起確率との関係の基本特性を示したものである。その簡易計算の方法は次のようである。式-Ⅲ2.2.1 は、ある継続時間について、降雨強度 r[mm/hr] と超過確率年 T[年]との関係をフェア公式により示したものである（Fair et al. 1970）。ここで m は公式のパラメータである。式-Ⅲ2.2.2 は、強度 r の降雨によって生ずる洪水のピーク流量 Q[m^3/s] を表し、式中の p は降雨～流出関係における非線形性を考慮するために導入されている（p=1 の場合、線形）。式-Ⅲ2.2.3 は水深 h と流量 Q との関係を表し、この導出は広長方形・一様断面水路にマニングの抵抗則を適用することにより行われている。これら 3 つの式において添え字 0 は変化前の数量（比較のリファレンス）であることを示す。

$$\frac{r}{r_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^m \qquad \text{式-Ⅲ2.2.1}$$

$$\frac{Q}{Q_0}=\left(\frac{r}{r_0}-1\right)\cdot p+1 \qquad \text{式-Ⅲ2.2.2}$$

$$\frac{h}{h_0}=\left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{\frac{3}{5}} \qquad \text{式-Ⅲ2.2.3}$$

これら 3 式を連立させると次式が得られる。

$$\frac{\Delta T}{T_0}=\left\{\frac{1}{p}\left(\frac{\Delta h}{h_0}+1\right)^{\frac{5}{3}}+1-\frac{1}{p}\right\}^{1/m}-1 \qquad \text{式-Ⅲ2.2.4}$$

ここで、$\Delta h=h-h_0$、$\Delta T=T-T_0$ である。さらに、この式の$\frac{\Delta h}{h_0}$について第一次までのテイラー展開を行うと次式が得られる。

$$\left.\frac{\partial\frac{\Delta T}{T_0}}{\partial\frac{\Delta h}{h_0}}\right|_{\frac{\Delta h}{h_0}=0}=\frac{5}{3pm} \qquad \text{式-Ⅲ2.2.5}$$

図-Ⅲ2.2.2 の特性によれば、河積の 5%の増大が氾濫生起確率年を３割伸長させる（氾濫確率は２割強の減)。 このことからも、図-Ⅲ2.2.1 の河積増大が持つ治水上の大局的意義を理解することができる（各水系における河川整備の効果評価にはさらに詳細な個別検討が必要となるものの)。なお、この治水効果は、河床掘削と、築堤による計画高水位までの洪水を安全に流すようにする整備との合わせ技で発揮される。概念的整理であるが、図-Ⅲ2.2.1 と図-Ⅲ2.2.2 を組み合わせ、たとえば、横軸に河道容量を、縦軸に氾濫生起確率年をとると、ストック（河道容量）と効果（氾濫生起確率年の減少）との関係を導き出せる。河川整備は、このような単調増加を示す効果～ストック関係を前提にストックを堅実に増大させる営為と表現される。

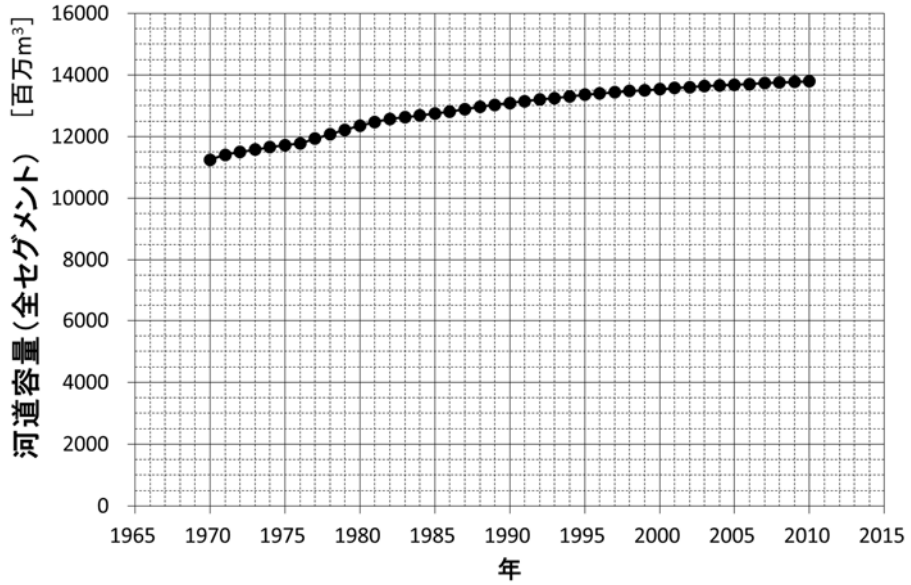


図-Ⅲ2.2.1　一級河川の国交省管理区間の総河道容量の経年変化

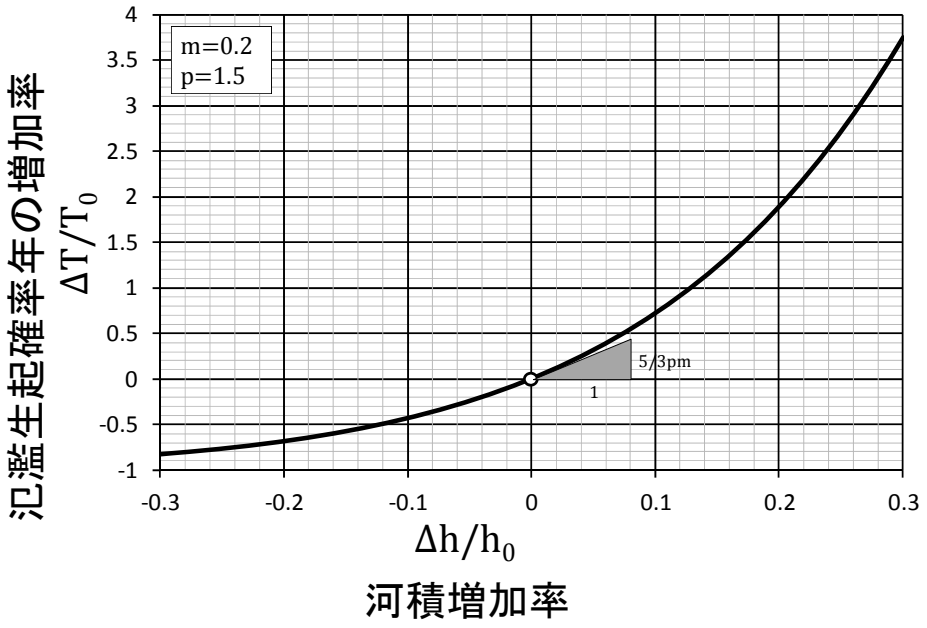


図-Ⅲ2.2.2　河積と氾濫生起確率年との関係（単純化した計算式から導かれる基本特性）

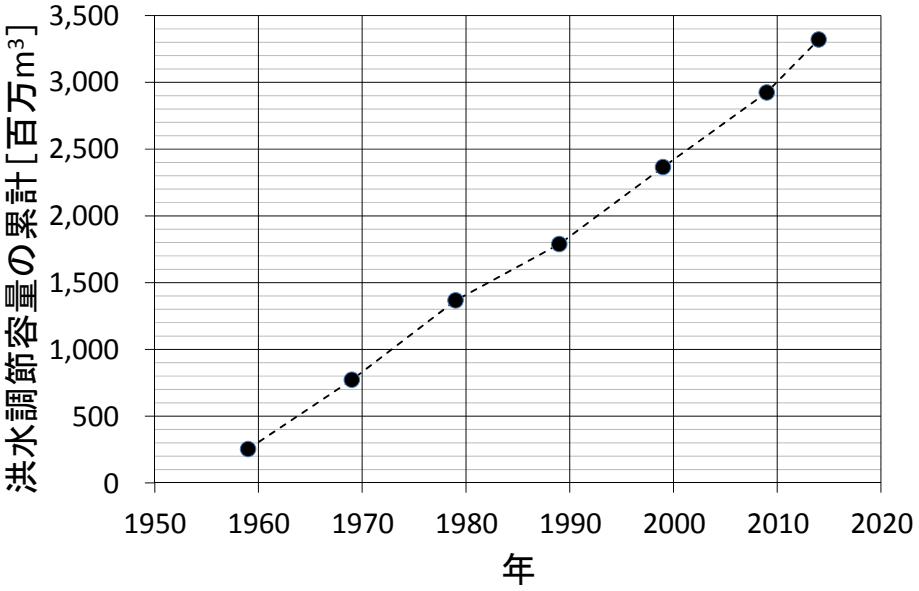


図-Ⅲ2.2.3　ダムの洪水調節容量の経年変化（国土交通省および水資源機構が管理するダムについて集計）

図-Ⅲ2.2.3 は、国交省および水資源機構が管理するダム貯水池の洪水調節容量の累計の経年変化を示したものである。洪水ピーク流量の低減に用いるダム貯水容量は着実に増え、その総量は、渡良瀬遊水地（面積 33km²）が持つ全容量の 19 個分以上に相当するまでになっている。流下能力の増大のみならず、洪水ピーク流量を低減するための洪水調節という点でも、河川整備によるストックが長年にわたり着実に積み上げられている。

治水に関わるストックは、上記のように量で直接的に表現できるものにとどまらない。堤防の質的強化など築いたストックの機能発揮の信頼性を高める整備も並行して進められている。長年の河川整備を通じた量的・質的なストックの充実によって、氾濫生起の可能性を自然状態に対して明瞭に減じる効果を我々は獲得するに至っている。

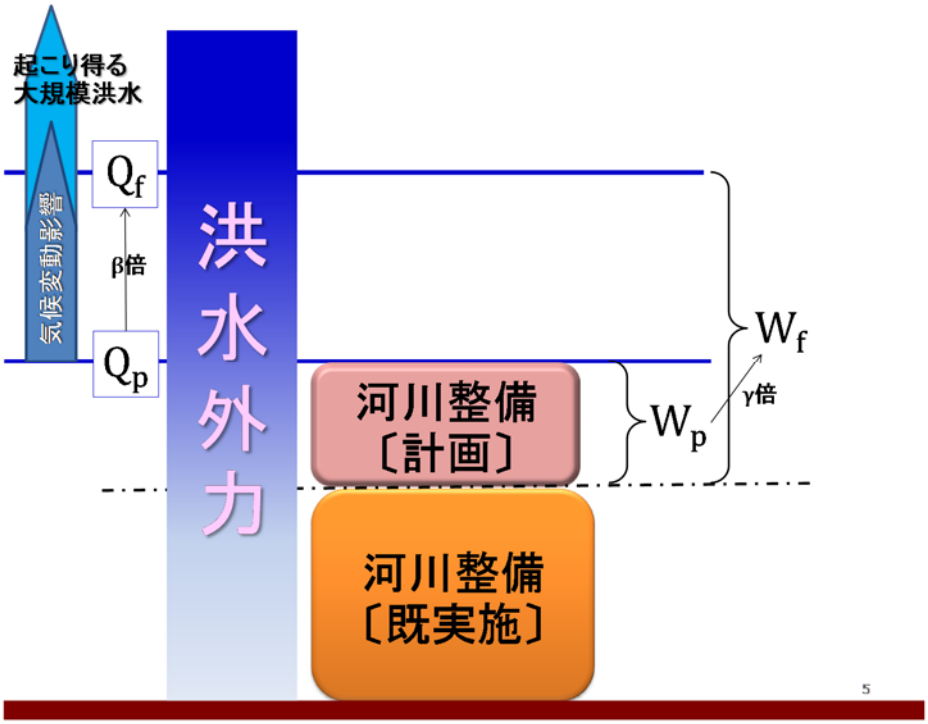


図-Ⅲ2.2.4　我が国の水害対処に関わる河川整備進捗の構図

その一方で、今日においてもなお、多くの河川で、河川整備における長期的な治水目標の安全度（年超過確率 1/100～1/200 の規模の豪雨に対応できるレベル）に到達しておらず、相当の隔たりを残している（大河川について年超過確率 1/30～1/40 程度の豪雨規模に対して 6 割程度の整備率（国土交通省社会資本整備審議会答申、2015））。先進諸国に比べ高くない目標安全度を持ちながら（日米英蘭四カ国共同報告書、2011）、いまだ安全度向上の途上にあるというこの状況は、我が国における水害対処の施策を検討する上で基点となるものである。それを概念的に図化するとは図-Ⅲ2.2.4 のようになる。この図は、安全度の長期的目標に対応する洪水流量（基本高水流量）に、実施済みの整備では届いておらず（安全に処理できる洪水流量が基本高水流量 Q_p よりかなり低い）、残り分をカバーするための河川整備がまだ相当量（W_p）残っている状況を、洪水外力と河川整備進捗量との“高さ比べ”として表現している。Q_p と W_p の添え字 p は現在気候下のものであることを表し、河川整備労力 W の定義は第Ⅱ部の 2.1.2(1)3 で説明している。

２．１．２　残余リスク対処の重要性への認識の高まり

平成 16（2004）年 7 月新潟・福島豪雨による水害は、平地河川の破堤氾濫が“浸水することによる被害”にとどまらず、土砂災害と同様に人的被害を起こすことを改めて認識させる契機になった。沖積平野での氾濫は最終的には浸水の範囲・深さの増大と空間的移行という形態に落ち着くが、特に破堤直後の破堤口近傍の氾濫流は、洪水位と堤内地標高との間に存在する数mの落差によって加速されるため、条件によっては家屋の破壊・流出までを引き起こす。家屋流出は、戸建て住居の二階への垂直避難が浸水深の観点からは妥当な判断になる場合でも、それを人的被害につながる選択に変えてしまうことから、

被害軽減を図る上で重要な事象である（たとえば、国土交通省河川局 2004 年）。このような認識を踏まえ、破堤口近傍の高速流が生じうるエリアを他と区別して高リスク・エリアと捉えるなど、同じ浸水範囲でも起こりうる被害の態様に応じて取るべき対策を考えていくというアプローチの検討が本格化し（たとえば、新潟県三条市・片田、2011）、今日に至っている。

その後、2005 年には米国ニューオリンズを中心にハリケーン・カトリーナが 1800 人を超える死者・行方不明者を出す激甚な高潮災害をもたらし、また 2012 年にはハリケーン・サンディが、同じ米国の世界有数の大都市ニューヨークを中心に大きな災害（73 名の死者：大都市機能に深刻な影響）をもたらし、これらは我が国の治水対策にも大きな影響を与えることとなった。前者からの復興をはかる過程において、米国陸軍工兵隊は技術検討を主導し、その結果を大部な IPET レポートにとりまとめた（Final Report of the Interagency Performance Evaluation Task Force , 2009）。その中で、カトリーナ襲来時点での災害防御施設の機能発揮状況を徹底的に分析するとともに、施設の防御能力を超えたハザードが作用した際の想定死者数を、現況施設のまま（被災時点）を含む様々な条件で算出し、生じうる被害を考慮した上での復興策検討に活用している。我が国では、内閣府中央防災会議が設置した「大規模水害対策に関する専門調査会」が、荒川等での大規模氾濫がもたらす被害想定について幅広い検討を行い、「首都圏水没～被害軽減のために取るべき対策とは～」を 2010 年にとりまとめている（中央防災会議、2010）。ここでは、河川整備における治水長期目標を超える豪雨生起ケースを含む大規模水害の死者想定、地下鉄網への氾濫水の広範な侵入・浸水過程の再現などが行われ、これらを危機管理策によってどのように軽減できるかが調べられている。ハリケーン・サンディ災害の分析（国土交通省・防災関連学会合同調査団、2013）からは、実践され奏功した「タイムライン」というフレームの有用性が示され、我が国の危機管理手法にそれを採用する取り組みが始まっている。

以上のように、氾濫生起頻度を低下させるための河川整備とは視点を異にする上述のような技術検討が今世紀に入って活発化している。この背景には、激甚な災害が内外で頻発していること、次章に述べる気候変動影響の懸念が高まっていることがある。その上で、「自然外力である豪雨は計画規模で頭打ちにはならず、したがって、河川整備が治水目標に到達している・いないにかかわらず防御施設の能力を超える洪水の生起も想定して減災策を講じることが求められ、このための検討においては、起こりうる災害の内容をよく知っておくことが基本になる」という認識の本格的な浸透があると考えられる。

河川審議会（当時）が、大都市地域の大河川において、破堤による壊滅的な被害を回避するための超過洪水対策及びその推進方策についての諸問題を審議している。そして、昭和 62 年（1987 年）に出された答申「超過洪水及びその推進方策について」において、高規格堤防の整備という施設面での対策をはじめ、通常の改修方法によらず地域の選択により土地の有効利用を図りつつ住宅等を洪水から防御するための水防災対策、閉鎖型氾濫地域における土地利用及び建築方式の設定、氾濫流の制御、洪水氾濫時における警戒避難体制の強化を提示している。氾濫が起こることを直視した施策群の提示が、今から四半世紀以上も前に、正式な政策検討の場でなされている。

２．１．３　河川整備の効果発揮に及ぼす気候変動影響

前 2.1.2 までで概括した状況に対して気候変動が及ぼしうる影響について以下に整理する。

第Ⅱ部において、図-Ⅱ.2.1.4 により、気候変動が豪雨を増大させ、それが治水方策に関する諸項目に伝搬していく状況を概念的に示した。残りの河川整備に要する労力が気候変動により何倍になるか？を示すγは、図-Ⅲ2.2.4 で説明すると、W_f を W_p で除したものに当たる。ここで f は将来気候下（気候変動が現れた状態）を示す。W_fは、現在の長期治水目標が設定しているのと同じ年超過確率の豪雨に対して、気候変動後も同等に防御される状態に持って行くのに必要な河川整備労力と定義される。γは、

気候変動影響に対する適応を河川整備の単純な拡大のみによって実現することを前提にするものではなく、気候変動適応の困難性の度合いを示す指標の一つとしての活用を意図して考案されたものであることは、第Ⅱ部で既に述べたとおりである。

図-Ⅱ.2.1.4 により示されている気候変動影響の伝播状況を日本の１級水系について見積もった結果が、やはり第Ⅱ部において、図-Ⅱ.2.1.3 により示されている。この図は、第Ⅱ部の 2.1.3 で説明したとおり、α 値（豪雨量倍率）変化の影響が→ β → γ → ε に向かって増幅して現れることを示すものである。ε（氾濫可能性倍率）や γ（河川整備労力倍率）は、気候変動が治水に与える影響の度合い（深刻度）や適応の困難度に対応する概括指標であることから、図-Ⅱ.2.1.3 に示される特性は、気候変動による豪雨量の増大の影響が、施策に近い指標になるほど大きくなって現れ、α の増大が仮に１割程度でも、γ や ε には施策検討上看過できない値に増幅して現れることを意味する。治水面での気候変動影響は、図-Ⅲ2.2.4 において、治水目標に対応する洪水流量を Q_p から Q_f に増大させ、それに伴って河川整備労力を W_p から W_f に増大させ（W_f を実施するか、実施可能かは別として）、積み上げてきた河川整備ストックの治水効果を減退させ、“逃げ水のように”治水目標への到達を遠ざけるものと表現できる。この減退は、当然、2.1.2 で扱った残余リスクの増大を意味する。

２．１．４　次の方向性についての考察

Q_p から Q_f への増大に代表される気候変動に伴う洪水流量増を吸収するために、現在の計画よりも河道の流下能力をさらに増大させること、あるいは洪水ピーク流量の低減をさらにはかることがまず考えられるが、これは実効可能性という点で高いハードルである。流下能力の増大というと、大規模な引堤等に頼らなくて済むという観点から、また、しばしば数字上は流下能力増が説明できてしまうことから、河道の掘削という手段に傾きがちであるが、流下能力の 2-4 割増に見合う河道掘削を現計画からさらに行うことが広い意味の河川技術として本当に妥当であるのか・どこまで可能であるのか、という技術的問いにしっかり答えることが必要となる。

2.1.1 で蓄積効果の意義を説明した河川整備を、目標の引き上げも含め強化するという選択については、気候変動の予測に伴う不確実性の取り扱いも関係してくる。河川整備の着手から治水効果発現までに多くの場合長時間を要することを踏まえ、不確実性を持つ情報に基づく適応策（治水）のための先行投資をどのような考えに基づき実施するか？という課題は、いわゆる“後悔しない施策 (no regret policy)”の具体的あり方を見定めることと相まって重要なポイントとなる。α の増加率に対して γ や ε の増加率が増幅して伝搬するという上述の特性は、α に関する少しの予測の幅が、実施すべき施策量や治水安全度への影響度を大きく変えることを意味することから（第Ⅱ部 2.1 参照）、施策実施の判断に関わる不確実性が豪雨に関する気候変動影響予測の持つ不確実性よりも大きくなることに留意する必要がある。河川整備の強化は検討すべきことの１つではあるが、それだけを考えておけば事足りるわけではないことを、ここで改めて確認しておきたい。

となると、次の展開として、治水安全度を向上させるための河川整備の手段を技術開発等によって拡充（イノベーションというニュアンスも含めて）するという方向が出てこよう。少し前までは実務上存在しない技術的道具が技術開発により手に入るようになってきた状況において、それらを活用することにより従来の枠組みを超えて治水手段を拡充する方策を追求することは、今後重要となる。先端技術を突破口にするものから、確立されたと思われていた技術体系のリノベーションを目指すもの、さらには従来技術の地道な改良の積み重ねまで、様々な切り口からの技術展開が期待される。ただし、こうした方策は、技術開発の成否と一体不可分であり、その追求の重要性は論を俟たないものの、やはり、それ

に全面的に依存するというスタンスは適切でなかろう。また、「従来の枠組みを超える」という点において、既往の治水施策との整合性を確保するのに新たな検討を要する状況も場合によっては想定でき、その難易にも留意しておく必要がある。

以上から、「河川整備の強化」「整備手段の拡充」を追求することもそれぞれ重要であるが、その上で、「被害の起こり方のコントロール」という方策に改めて力を入れていくことの重要性に行き当たる。そして、これら３つは、いずれかを選択するということではなく、当該河川・流域等の状況や技術開発の進捗を見据えて適切なバランスで並行的に実施していくという考え方を基本にすることが肝要であろう。その中でも「被害の起こり方のコントロール」は、洪水外力の規模や河川整備の進捗段階によらず、すべての局面で考慮すべき方策に位置づけられるものと考えられる。

２．２ 治水検討フレームの内容

２．２．１　被害～豪雨規模関係を基軸とした検討フレーム

（１）基本事項

前節 2.1 で行った概括と第Ⅱ部に示した治水施策への気候変動影響を踏まえ、ここで、被害の起こり方のコントロールという包括フレームを構築し、その中で引き続き主軸となる氾濫生起頻度の低減をしっかり位置づけるという方向を提示する。すなわち、氾濫生起頻度の低減（➔防災）と被害制御（➔減災あるいはリスク・マネジメント）のハイブリッドで防災・減災を包括的に進めることを基本にするというものである。以下、１章で述べたように作業仮説との位置づけで、この考えに基づく具体的な検討フレームを説明する。

図-Ⅲ2.2.5 は、被害（想定）と豪雨規模（超過確率年）との関係を示すものであり、この被害～豪雨規模関係の活用が検討フレームの基軸となる。図中の「無被害範囲」は、この図に対応した現況において水害防止が達成されているレベル（氾濫生起の可能性がどこまで抑えられているか）に当たり、この範囲を拡大することが河川整備の直接目的となってきた。そして被害制御は、図中の関係を全体的に右下方に抑制し、適切にコントロールすることに当たる。

ここで縦軸の被害想定は、まずは当該水系（被害事象を共有する流域圏）で起こりうる全被害の推計に基づく俯瞰的検討から入る。縦軸（被害想定）には評価軸を複数用意することで、多面的な態様を示す水害を限定的に捉えてしまうことを避け、被害の総合的な特性をも理解した上で施策検討を行うようにする。たとえば、直接被害額に加え死者数の想定を行うことは、「せめて命だけは」の施策をより具体的に検討することや、それと被害額軽減方策との関係性を知る出発点になる。「水害による被害推計の手引き（試行版）」は、被害推定を様々な指標で行う手法を提示しており、評価軸を複数設定する検討に役立つ（国土交通省水管理・国土保全局 河川事業の評価手法に関する研究会、2013）。

この被害～豪雨規模関係を“作業台”にした検討の要点は次のようである。

- 【無被害で済む可能性（確率）の拡大】と【被害～豪雨規模（超過確率年）関係の制御】のハイブリッドで洪水災害に対する防災・減災を進める。
- 【無被害で済む可能性の拡大】は、現行と同様に、河川整備により計画的に着実に実施していく。【被害～豪雨規模関係の制御】は、不確実性（気候変動影響、流域諸状況の将来変化、施策の効果発揮という複数の面にわたる）も織り込み（不確実性を持つ施策も検討から排除せず）、減災マネジメントとして積極的に実施して行く。

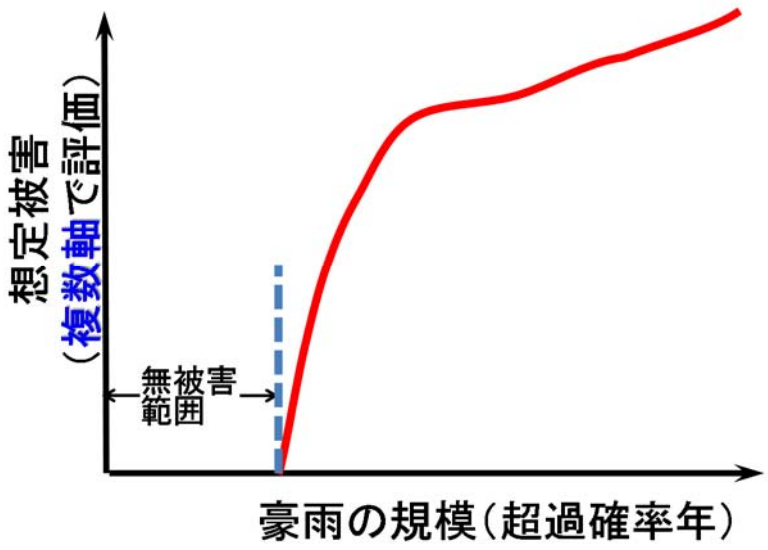


図-Ⅲ2.2.5　被害～豪雨規模関係と無被害で済む範囲

- ハイブリッドを成す２つの施策体系は本質的に性格を異にするので、「機械的に共通の軸を当てはめて２つの効果を合算して評価し、たとえば両者の代替性を前提にするような検討スタンス」はとらない。その上で、両者が合わさった施策進捗の全体的効果も把握していく。
- 俯瞰的検討により全体的な被害制御を達成することが重要であることから、「まずは当該水系で生起する全被害の推計に基づき検討」としている。ただし、並行して、上記関係が作られている要因の分析や、どこに施策を展開するとどのように関係が変わるかの応答関係を具体的に検討する。そしてこの内容を、各地域の具体施策の丁寧な検討・積み上げにつなげていく。ただし、包括的な被害制御の観点も維持する。
- 従来も【被害～豪雨規模関係の制御】についての取り組みはなされていた。ここでは、それを、1)より体系化する、2)合理的かつ適正な範囲で定量化する、3)包括的なマネジメントの面を強める、4)手段の進化と拡充を図る、ことを通じて強化し、治水フレームに明確に組み込む。
- 「【無被害で済む可能性の拡大】はハード、【被害～豪雨規模関係の制御】はソフト」という単純な切り分けによらず、包括目標の下にハード・ソフト施策を適切に糾合する。

なお、豪雨規模（超過確率年）の検討範囲については、起こりうる規模という観点から幅広く設定することを旨とし、その上で、必要に応じ重要チェック規模（超過確率年）を設ける。その際には以下を考慮する。

イ）可能最大豪雨（手法の違いによる複数設定も；１つの真値が設定できるとは即断しない）。
ロ）歴史上の大洪水
ハ）著名豪雨（地理的類似性を持つ他流域での豪雨も場合によっては含める）
ニ）　“スーパー台風”など、地球温暖化を取り込んだ気象モデルにより計算される象徴的極端事象がもたらす豪雨
ホ）既往最大
ヘ）河川整備基本方針における目標
ト）河川整備計画における目標

（２）治水システムの挙動を考慮した氾濫生起シナリオ設定手法の組み込み

被害～豪雨規模関係を治水検討の基軸に据える際に、水位が計画高水位（HWL）に達したら破堤が生じるという一律的判断法によらず、当該水系における破堤氾濫の起こり方を実態に即し幅広く想定して被害見積もりを行えるようにすることが不可欠となる。具体的には、図-Ⅲ2.2.6 に示すように、１つの豪雨規模（超過確率年）に対して生じうる被害の確率分布を算出し、そこから被害期待値（あるいは代表値）と最大被害値の２つを算出し検討に用いることができるようにする技術を新たに導入する。

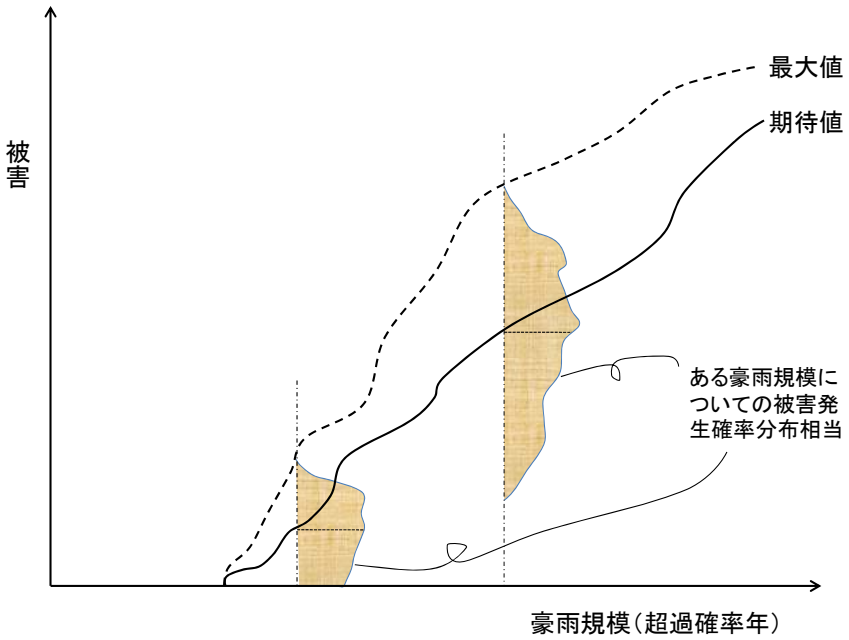


図-Ⅲ2.2.6　被害～豪雨規模関係と無被害で済む範囲

同じ規模の豪雨に対して被害値に幅が生じることと上記の「治水システムの挙動」との関係は次の通りである。各地先の氾濫危険度を安全側に評価するという観点から、また、HWL を上回ると堤防の氾濫防止機能発揮の確実性が担保できなくなることを踏まえると、洪水位が HWL を越えると直ぐ破堤するという条件設定に基づく氾濫被害想定は合理性を持つ。そして、この条件設定の下では、降雨-流出・流下過程の現象に不確実性を持ち込まなければ、ある豪雨規模に対して１つの氾濫被害が想定されることになる。

一方、実際の破堤は、洪水位が HWL に達して直ぐに生じるとは限らない（堤防の氾濫防止機能発揮の確実性は、洪水位が HWL を上回ると急速に失われていくものの）。国総研開発の氾濫生起シナリオ設定手法においては、洪水位が HWL を越えると直ぐ破堤するという条件設定ではなく、洪水位が HWL を上回る度合いに応じて破堤の可能性が急増するという条件設定を採用している。具体的な設定法は図-Ⅲ2.2.7 の通りである。なお、堤防が未完成の場合、HWL を、HWL に達する洪水の通常の作用時に完成堤防が持つ構造上の安全性と同等となる水位に置き換える。この場合、各区間の破堤の起こり方に様々なパターンが出てくるため、同じ豪雨に対しても様々な破堤氾濫の起こり方が想定される。そして、破堤氾濫が起こる場所が異なれば生じる被害も違ってくるので、豪雨規模が同一でも想定氾濫被害値に幅が生じ、これが図-Ⅲ2.2.6 のように被害発生確率分布に似た形の表現を提供することになる。なお、被害が起こり始める豪雨規模は、被害期待値（あるいは代表値）と最大被害値で変わらない。したがって、この手法を導入しても、ハイブリッドを構成するもう一つの体系である「無被害で済む可能性の拡

大」は影響を受けない。以上の「氾濫生起シナリオ設定手法」の詳細は３章で説明されているので参照されたい。

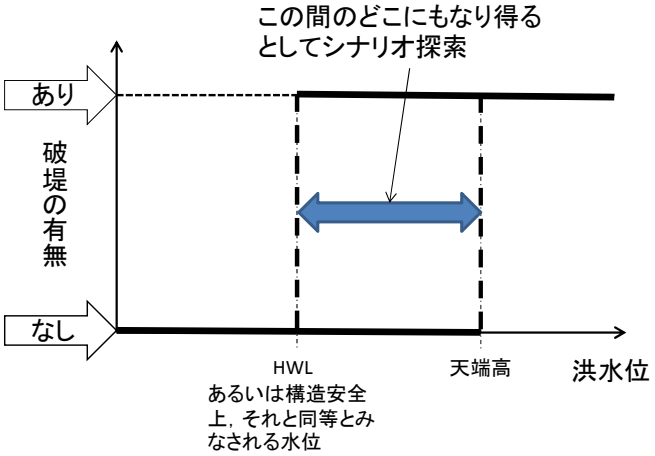


図-Ⅲ2.2.7　洪水位と破堤発生可能性との関係の設定

以上のような手法を新たに導入することの意義は次の通りである。HWL で破堤することを前提にした被害想定は、場合によっては、実際に起こりうる被害を過小評価する。「被害～豪雨規模関係の制御のための減災マネジメント」においては、“最尤的”あるいは“代表的”被害の想定とは別に、起こりうる最大被害も施策検討の評価対象に加えることは必須かつ本質である。津波と洪水氾濫とでは、前者が無限の水ボリュームを有するのに対し、後者は有限の水ボリュームである点が異なり、このため後者の洪水氾濫では、ある場所の氾濫が他を緩和する可能性が存在する。このことが、このような手法が必要となる重要な背景になっている。従来も、起こりうる最大被害の想定を考慮してはいたが、体系的技術手法によっていたわけで必ずしもなかった。こうした考慮を、多少回りくどくても明示的かつ漏れなくカバーできる体系的技法によって行えるようにすることの意義は大きい。

さて、図-Ⅲ2.2.7 に示した設定は、堤防の信頼性解析と深い関係を持つ。すなわち、この図に示すような設定を、地盤工学や水工学の知見と堤防土質情報に基づき、各地点で、さらには一定区間で破堤が生じる可能性（確率と信頼性など）を工学的に評価する手法によって検討することは技術的に重要である。したがって、この図に示した設定を、このような方向で技術的に発展させる取り組みを今後とも継続していくことが求められる。その一方で、このような信頼性工学のアプローチを、“工学的ロジックという点で適切というレベル”から実務に耐えると判断できるレベルにまで持って行くには、なお多くの検討を要する状況にある。国総研における堤防・基盤土質データを用いた信頼性解析の試行検討結果と、英国、米国、オランダでの同種の手法の適用実態の把握を通じて得た見立ては、この見解と整合する。このことの背後には、現段階では信頼性解析において、どこかに大きな割り切りを持ち込まざるを得ず、その割り切りが技術判断結果を相当程度支配するという構図が共通して存在すること、その割り切りを実務への最終判断の活用においてどのように正当化するかをさらに詰める必要があるという課題が横たわる。

そこで、工学的技術発展の取り組みを行いつつも、この成果が一定レベルに達するまで施策展開を行わないと言うことでなく、「第一次近似」という性格も兼ね、ここで提示している手法を用いて治水フレームの拡充を図るのが良いというのが、本提案の主旨である。外形的なアプローチ（水位と破堤確率との関係線）という点で両者には親和性があるので、工学的アプローチが進展すれば、「第１近似」線をそれに順次置き換えていけば良く、そこに大きな手戻りは生じないと期待される。以上の整理の下、ここ

で提示している手法は次のように位置づけられる。すなわち、見かけ上は信頼性解析の道具となっている脆弱性曲線 FC を用いているが、本質的には「氾濫生起シナリオをもれなく捕捉し、少なくとも、ある豪雨規模において起こり得る最悪の氾濫被害の想定を機械的に把握できるようにする」ためのものであり、その意味から「氾濫生起シナリオ設定手法」あるいは「水系破堤シナリオ広範探索法」と位置づけられる。

以上から、現時点では、以上の方法で得られる図-Ⅲ2.2.6 で説明した被害発生確率分布に工学的に深い意味があるわけではなく、それを仔細に分析・活用することよりも、分布の幅や大まかな特徴を捉えることに重点を置くのが適切である（具体的には期待被害値あるいは代表値と最大被害値）。なお、上述の「地盤工学や水工学の知見と堤防土質情報に基づき、各地点で、さらには一定区間で破堤が生じる可能性（確率と信頼性など）を工学的に評価する手法を検討する」という取り組みは、堤防の弱点箇所を特定する精度の向上、それを踏まえた堤防強化のさらなる合理化、水防や危機管理への活用、HWL や天端高など水位を機軸にした堤防機能表現フレームの課題把握（外力の履歴、高水位継続時間など、水位基軸では考慮しきれない事象の取り扱いなど）と必要な改善を図っていくために、そして被害発生可能性の推定精度を高めるために、引き続き継続させていくことが重要である。

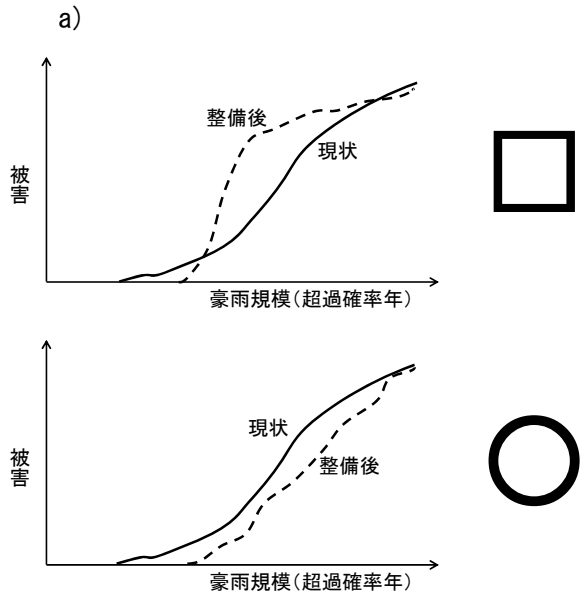
前述のように、そもそもここで提案している被害想定は、被害～豪雨規模関係を制御するための減災マネジメントに用いるものであり、「無被害で済む可能性を拡大」するために計画に基づき着実に実行する施策を吟味するためのものではない。したがって、豪雨規模について積分して包括被害期待値に変換するという使い方は想定しておらず、現在用いられている事業評価における被害想定（各地点破堤被害の包含）との間に代替性は無い。減災マネジメントにおける B/C の考え方、防災・減災施策全般に関わる B/C の考え方については、その適用（従来枠組みの延長線上での）の可否も含め、長期的な課題として検討していくことが肝要である。

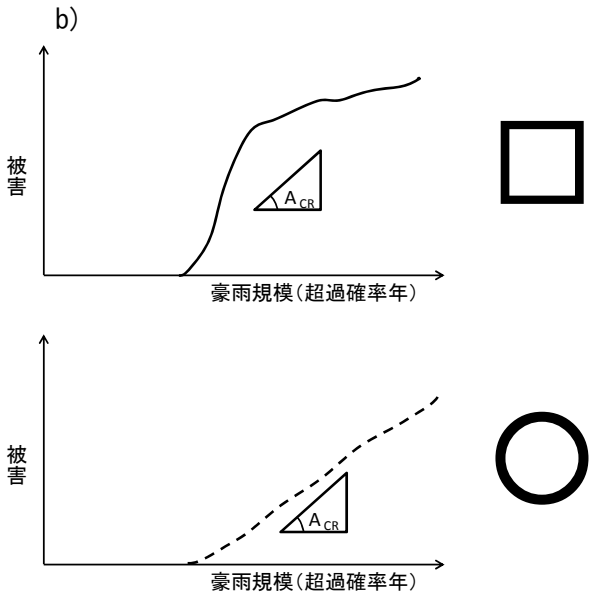
（３）被害～豪雨規模関係の制御における評価の考え方

たとえば、以下の a)～d)いずれか（図-Ⅲ2.2.8 参照）、あるいは組み合わせにより、被害～豪雨規模（超過確率年）関係の制御状況を評価し、減災マネジメントの推進に役立てる。いずれも□から○の方向にマネジメントすることを目指す。評価は期待被害値と最大被害値それぞれについて行う。ここで扱うのは、計画に基づく着実な実施を通じた【無被害で済む可能性の拡大】ではなく、減災マネジメントを通じた【被害～豪雨規模関係の制御】のパートであるので、関係制御について定量的な目標設定を統一的・画一的な方法で行うのではなく、この関係をどのような方向に持って行くべきかについて、いくつかの視点から評価できるようにすることにねらいがある。

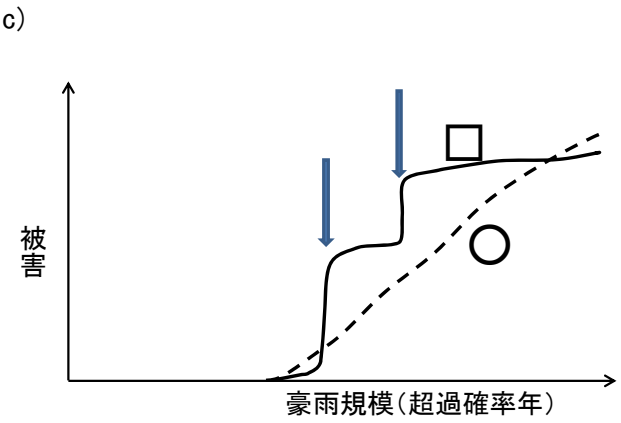
なお、以下に出てくる A_{CR}、許容最大被害線や Tipping point ならび Cliff edge は、規準としての意味を持ちうるが、これらの値を一律に定め、それを満たすことを減災マネジメントの要件にすることについては、引き続き多くの議論や検討が必要である。重要なことは、認識すべき脆弱性を確実に把握することに各手法を役立てていくことである。b)と c)は、当該流域（圏）の弱点あるいは脆弱性の把握と、その解消にかかわる評価軸と表現することもできる。

a) 整備段階を上げる際に、被害～豪雨規模（超過確率年）関係において、整備後の被害が整備前を上回らない。
b) 被害～豪雨規模（超過確率年）関係の傾きが A_{CR} 以下。
c) Tipping point あるいは Cliff edge が無い。
d) 豪雨規模（超過確率年）毎に定められた許容最大被害値を上回らない。

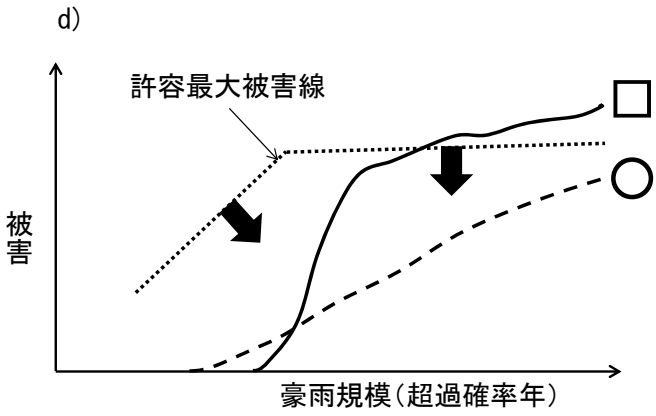




※Acr が急≒「逃げ場がなくなる状況に追い込まれる可能性大」という考えから



※急な A_{cr} を忌避する考えに類似。大きく見て、ジャンプの存在≒やりくりが非常に困難という仮定に立脚。



※既に米国やオランダで実践を議論。

図-Ⅲ2.2.8　被害～豪雨規模関係の制御における評価の考え方の例

２．２．２　施策検討との結びつけ

（１）施策群の類型化

前項 2.2.1 に示した検討フレームは、それが様々な施策適用の検討と結びつけられて初めて意味を持つ。その結びつけ作業を円滑にすることをねらって、施策群の類型化を以下で行う。この類型化は、この検討フレームの下で新たに必要となる技術および技術政策手段の展開を誘導する役割も合わせて担う。また、ここで提示している治水検討フレームは、前述のように、ソフト・ハード施策という類型をそのまま用いることはせず、それを再編成するという考え方も採っている。

図-Ⅲ2.2.9 に類型化の全体構成を示す。ここにあるように、各類型の施策にはには、既存の熟成された技術で実行可能なものもあれば、新しい技術開発や技術政策の展開を必要とするものもある。以下、各類型の意味を説明する。

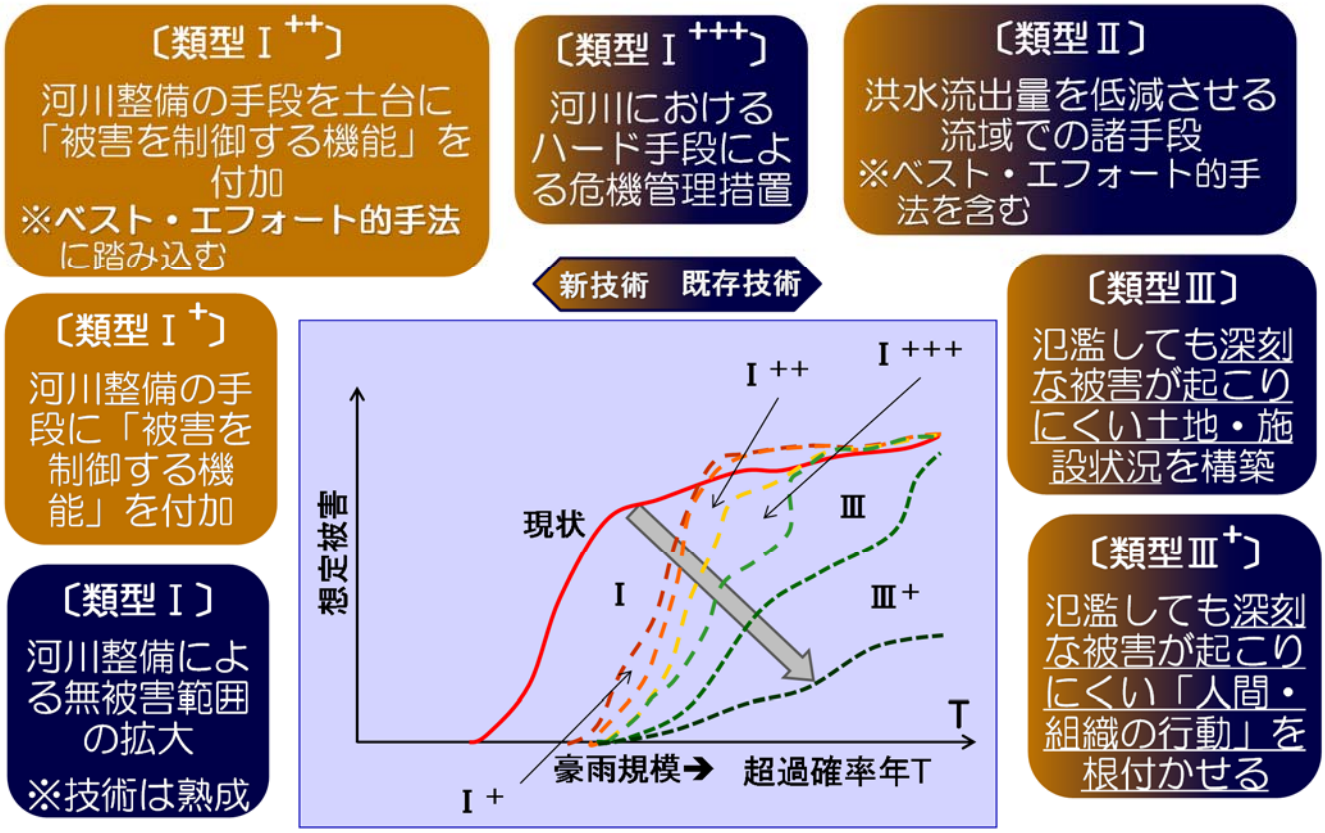


図-Ⅲ2.2.9　様々な類型の施策を総動員した「無被害で済む範囲拡大」と「被害～豪雨規模関係制御」の全体像
（中央は、施策効果総合表現の例）

【Ⅰ】河川での施策

無被害で済む可能性の拡大を図るための、既存の手段から構成される河川整備。すなわち河道改修、放水路、洪水調節施設（ダム、遊水池、正式な防災調節地）など。ただし、必要に応じ減災マネジメントの観点を取り込む。

【Ⅰ+】河川での施策

メニューは上記【Ⅰ】と同じであるが、【無被害で済む可能性】の確保を適切に図りつつ、超

過外力作用時を主対象に措置を施し、超過外力作用時に減災マネジメントにとって逆目に出ないようにする、あるいは減災マネジメントに資する機能を積極的に発揮させることが、この類型に当たる。

【Ⅰ$^{++}$】河川での施策

上記【Ⅰ$^{+}$】において、ベストエフォート的手法の適用まで対象を広げたもの。ここで、「ベストエフォート的」とは、【無被害で済む可能性の拡大】を確実に図る類型【Ⅰ】と性格を異にし、かける労力に対して高い効果発揮を期待できるが、場合によっては効果発揮が一定程度減るなど、状況によって成果が変わってくるという特徴を持ち、それを理解した上で講ずることを指す。こうした方策を適用することの可否や位置づけについての議論・検討を必要に応じて行うことになる。特に、事前想定と実際の効果との間に大きなマイナスのずれが生じたときの対応法やそのための制度設計、それに対する合意形成などが、ベストエフォート的手法を扱うこと特有の課題となり得る。施設への粘り強さの付与、リアルタイム水文・水理情報による、さらには気象予測の積極活用によってダム操作を高度化し、その洪水調節能力を増強することなどがその例として上げられる。

【Ⅰ$^{+++}$】河川での施策

危機管理措置。たとえば、各種水防、破堤箇所の緊急締め切りや破堤口拡大の緊急抑制工の適用、氾濫水排除のためのポンプ稼働、氾濫流緊急制御工法の適用などがその例として上げられる。

【Ⅱ】流域（降雨から洪水への流出エリア）での施策

流域での施策で、洪水流出の低減につながるもの（ベストエフォート的側面を持つものを含む）。

【Ⅲ】氾濫エリアでの施策（施設や土地条件の整備や状態制御が主）

たとえば、二線堤による氾濫制御、深刻な氾濫が生じる場所の土地利用を被害が大きくなりにくい、あるいは被害から回復しやすいものに制御する方策、氾濫時にそこに居ても深刻な被害を受けないような建築構造・諸元にする方策、氾濫時に近場に緊急避難ができる地物を配置する方策、ライフラインや重要な公共サービスに支障が出ない、あるいは復旧しやすいようにする方策など。いずれも、氾濫エリアの物理的、施設的、施設管理面での条件を整えることに属するもの。

【Ⅲ$^{+}$】氾濫エリアでの施策（主に人間の行動が対象）

たとえば、情報の提供を受け適切な避難を行うなど、人的被害の回避や軽減につながる人間の行動が生じるようにする方策。

※都市雨水排水対策は、講じられる場所は氾濫エリアであるが、内水氾濫を防ぐための施設整備であるので、上記の類型においては、Ⅲというよりも Ⅰに属すると整理した方がわかりやすい。なお、雨水浸透を取り込む場合はⅡが加わる。さらに、所定の雨水に対する排水処理にとどまらず、内水氾濫の起こり方の制御という側面も入る場合は Ⅰ$^{+}$や Ⅰ$^{++}$、Ⅲの性格が加わることになる。

図-Ⅲ2.2.10 は、災害発生に関わる一連の事象を俯瞰して示し（左から右への矢印でつながれた流れ）、その上に防災・減災の諸方策を重ね（黒四角枠）、さらにその上に今説明した各類型の施策を載せたもの（赤太枠）である。なお点線の赤枠は、直接ではないが、その方策の実施に当該類型が関係することを示す。この図から、治水施策の根幹を成してきた河川整備（類型Ⅰ）の位置づけ、その着実な進展を前提に、そこから拡充されて行く諸方策（類型Ⅰ$^{+}$、Ⅰ$^{++}$、Ⅰ$^{+++}$）や河川以外での施策が系統立って加わることで、防災・減災施策群が全般にわたって幅広く展開されていく様子がイメージできる。

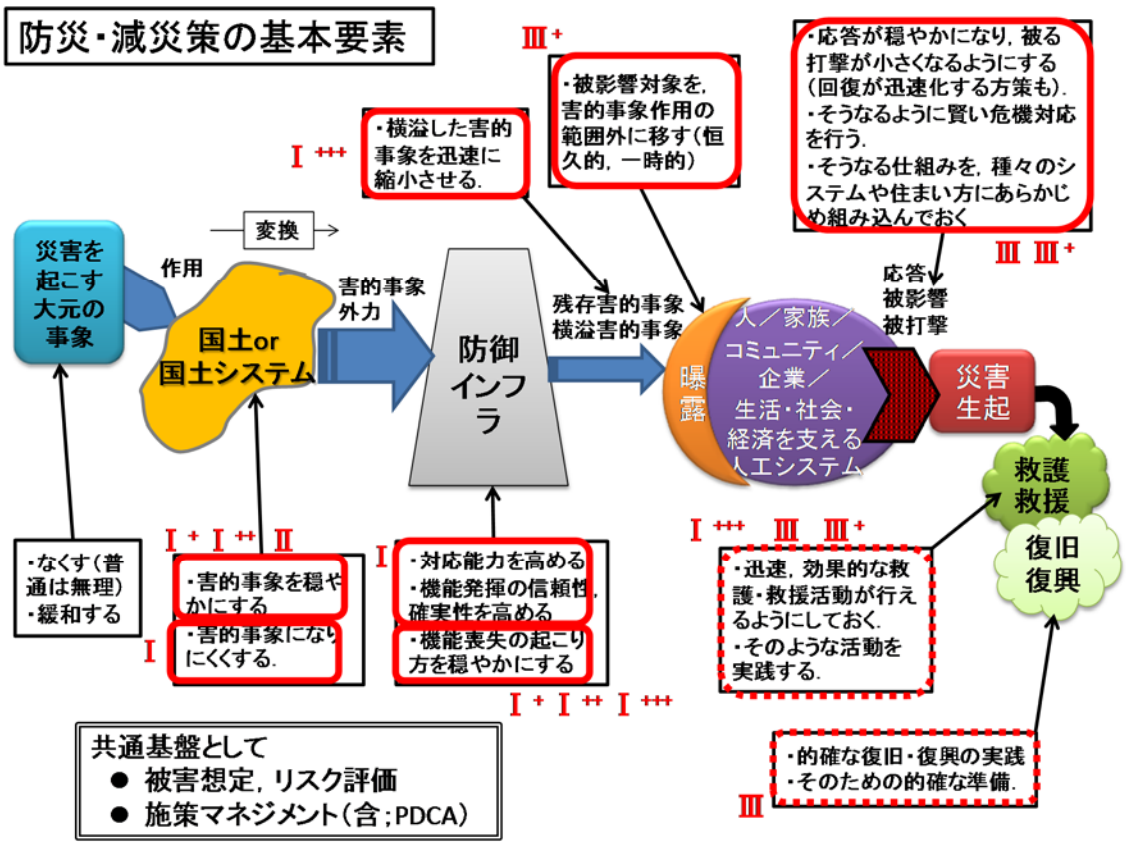


図-Ⅲ2.2.10　防災・減災方策を構成する基本要素と施策類型との関係

（２）施策総動員の検討手順のイメージ

まず、当該水系について、各類型の施策を総合的に適用することにより、被害～豪雨規模（超過確率年）関係がどのように改善されるかを、種々の施策群代替案について試算し、比較する。その際、技術面、コスト面、制度面、要する時間、社会的側面などから、実行可能性（不確実性）を吟味する。場合によって、現行治水目標の内か外か？も適宜考慮する。

以上の検討を行う際の基本的な作業場として、図-Ⅲ2.2.9 の中央に示されている図の活用が考えられる。これは「施策効果総合表現図」であり、様々な類型の施策群が総動員されることで、無被害範囲の拡大を含む被害制御がどのように進捗するかを総合的に吟味するのに役立つ。これに、施策群遂行に伴う時間軸上の状態推移の表現や、期待値（代表値）・最大値の別、効果の不確実性（ベストエフォート）の表現などを加えていく。以下で、「施策効果総合表現図」活用のイメージを、いくつかの検討事項に関して例示して行く。

図-Ⅲ2.2.11 は、ある整備段階において、豪雨規模に応じた施策組み合わせの意味やあり方を検討する様子を説明するものである。着眼点は以下である。

・ 各豪雨規模（規模には、計画規模との相対関係を含む）において、各類型の施策のミックスをどのようにすべきか？
・ その際、不確実性を伴う施策の適用をどのように考えるか？　“施策の積み木”の１つとして位置づける方向を基本としつつ、確実性が担保された施策との使い分けのロジックを整理する。

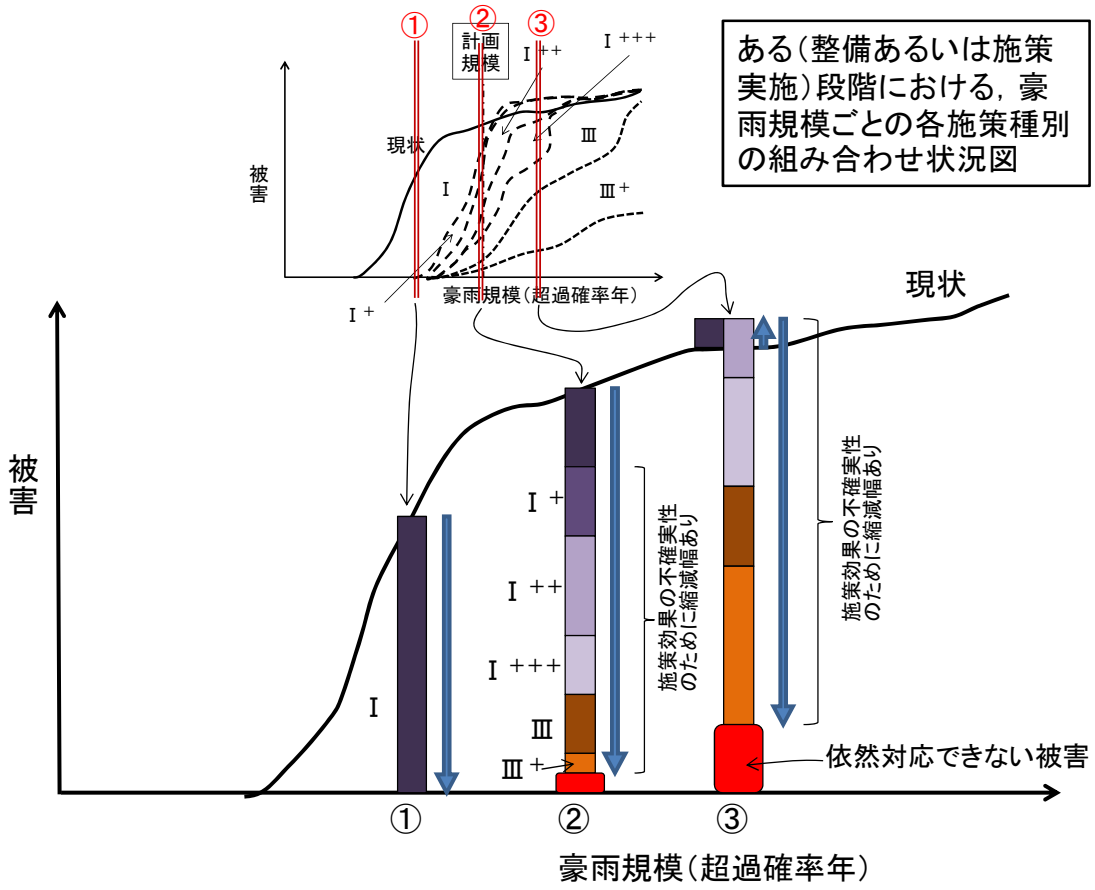


図-Ⅲ2.2.11　施策効果総合表現図の活用イメージ：豪雨規模に応じた施策組み合わせの意味やあり方の検討

図-Ⅲ2.2.12 は、各豪雨規模について、各施策種別の時間軸上の効果発揮の状況を把握する、あるいはそのあり方を検討する様子を説明するものである。着眼点は以下である。

・ 豪雨規模毎に、目標年次に向けて、各種別の施策による効果発現を時間軸上でどのように図っていくべきか？を考えていく。
・ たとえば、各施策の効果発現に要する時間の違い、不確実性の違いを組み合わせながらの最適ミックスの考え方を詰めていく　前出の「不確実性を伴う施策の適用をどのように考えるか？」の議論とも密接に関係する。
・ 人口減少に代表される流域の根幹状況の変化を、上記において考慮していく（たとえば第Ⅱ部 2.2 参照）。
・ 気候変動影響の出現状況についても同様に考慮する（次の 2.2.3 で述べる）。

いずれにしても、施設整備の完了が何年後という観点だけでなく、現時点から時間軸上でシームレスに施策を展開していくフレームとすることがポイントとなる。今後、河川整備の進捗による「無被害で済む可能性の拡大」が引き続き図られ、また同時に流域の社会・経済状況も大きく変化する（高度成長期とは違った形で）ことが考えられる。このことから、河川整備の進捗はもちろんのこと、被害～豪雨規模関係で表される被害可能性の経年変化を絶えず把握し、時間軸上でのマネジメントを行うというアプローチの重要性が増すと考えられる。

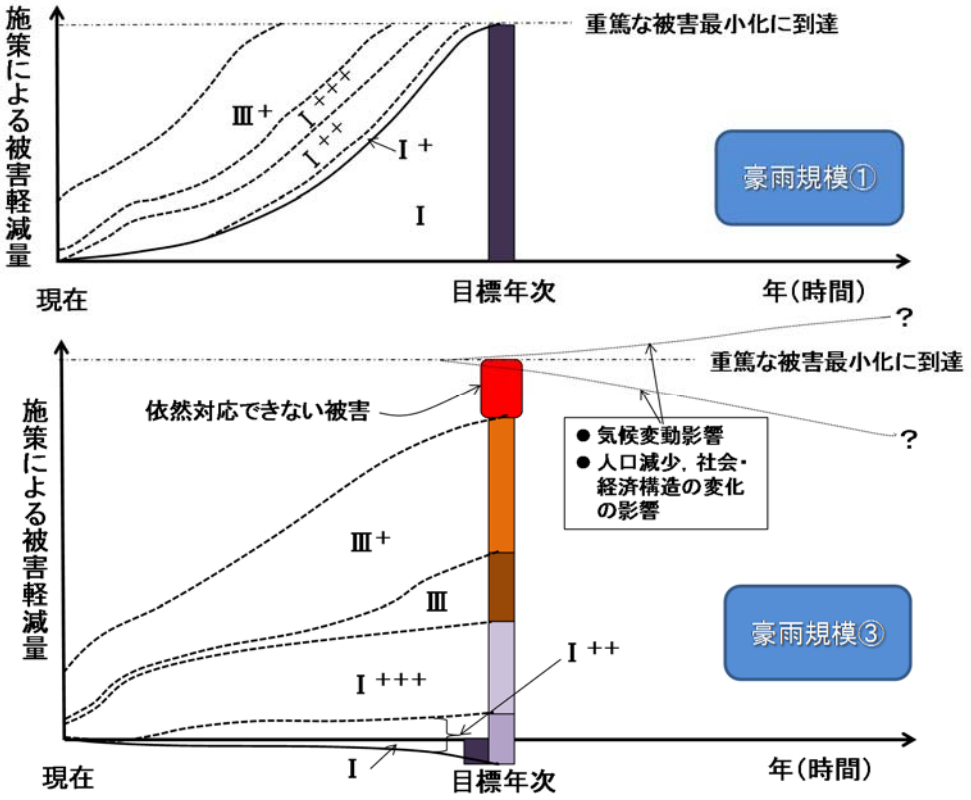


図-Ⅲ2.2.12　施策効果総合表現図の活用イメージ：各施策種別の時間軸上の効果発揮状況の検討

図-Ⅲ2.2.13 は、無被害で済む可能性（確率）を拡大する方策と被害～豪雨規模（超過確率年）関係制御との取り合いに関する論点を調べる様子を説明するものである。既に何度か述べたように、河川整備の着実な実施による【無被害で済む可能性の拡大】と減災マネジメントによる【被害～豪雨規模関係の制御】とは性格が異なるものであり、それらがハイブリッドされて全体として治水の進捗を図るというフレームをここでは提示している。したがって、両者を同一軸で評価することは想定していない。その一方、２つの施策体系が相互影響を持つ場合があり、施策検討においてはこのことに留意しておく必要がある。ここでは、類型Ｉに属する２つの施策が被害～豪雨規模関係に異なる影響を与える水系があったと仮定し、その場合の論点を以下に整理しておく。この整理は、施策類型Ｉで減災マネジメントを考慮することやＩ$^{+}$の内容検討につながるものである。

・「ハイブリッド」を基本にしつつも、どのような場合に被害コントロールのための案２採択が妥当となるか？を検討する。被害制御の考え方に立つと、案２が魅力的に見えるだけに、その適用条件をよく考える必要がある。
・妥当となる場合の具体の実施法を案出していく。これには、河道・構造物設計にかかわる基準とリンクさせる方法や水系毎の個別考慮を基本にする方法など様々なアプローチが考えられる。
・以上の前段の整理として以下が必要となる。
    ・　技術的に上図の関係が現れる条件（河川・流域特性）の明確化
    ・　案１を案２に替えることによる被害コントロールの効き具合の理解。

なお、4.4.3 では、このような検討に対応する試算例が示されている。

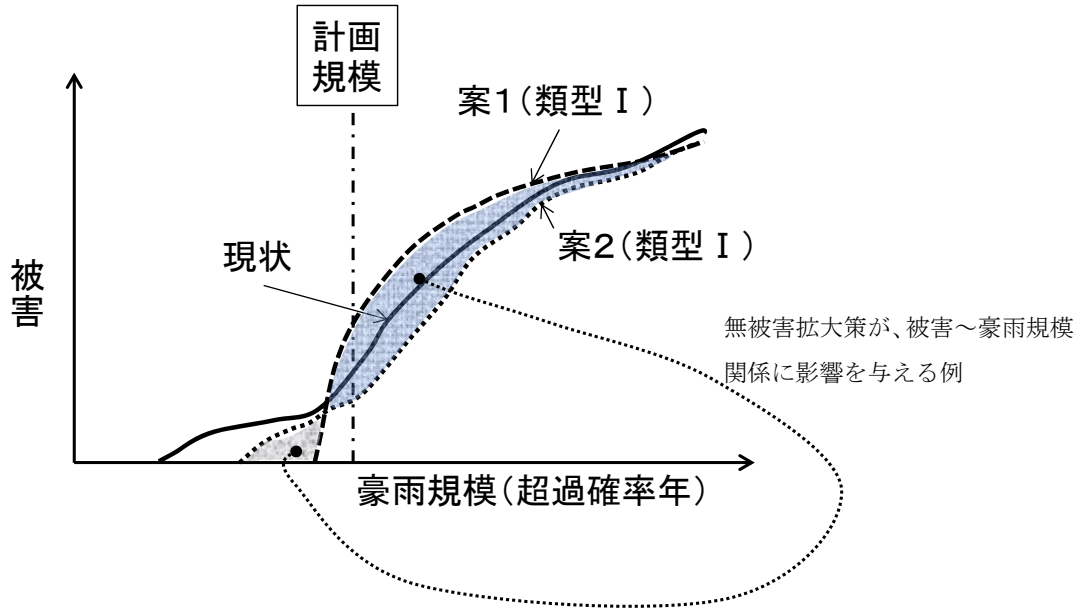


図-Ⅲ2.2.13　施策効果総合表現図の活用イメージ：無被害範囲拡大策と被害制御策との整合確保の検討

２．２．３　気候変動適応との関係

（１）気候変動影響の表現

今まで説明してきた治水検討フレームにおいて、気候変動影響、具体的には「同一の超過確率年の豪雨量が増大することをどのように扱うか？」について、さらに整理を進める。日本において地球温暖化に伴う気候変動影響で豪雨が増大するという予測については、多くの専門家が見解を共有しており、第Ⅱ部の内容もそれと整合している。その一方、増大量を実務判断に用いることができる高い精度で予測するまでには検討をさらに要する状況であり、ここでは、気候変動による豪雨量増大の度合いには現時点で不確実性が伴うことを前提に議論を進めている。

気候変動影響によるα倍の豪雨増は、被害～豪雨規模（超過確率年）関係図において横軸の超過確率年が対数表示であると、被害～豪雨規模（超過確率年）関係を概ね左方に一定距離移動させることになる。影響予測の不確実性は、この移動量の幅で表現することができる。このような表現により、気候変動影響によって防御状態がどのように退行するか、影響の出やすい局面と比較的出にくい局面がどのようになっているか、などを把握することができる。図-Ⅲ2.2.14は、図-Ⅲ2.2.9に示した施策効果総合表現図が、気候変動による豪雨量増大が強めに出た場合と弱めに出た場合にどう変わるかを模式的に示したものであり、前者が図中の上の図での黒線から赤線への移動に、後者が図中の下の図での黒線から緑線への移動に対応する。

このような表現法を用いることにより、ある豪雨規模について被害、施策効果および気候変動影響を総体的に把握することができるようになる。図-Ⅲ2.2.15は、このことを模式的に表したものであり、このような図に基づき吟味から次のようなポイントが浮かび上がる。

・ 気候変動により、場合によっては類型Ｉの施策の進捗により加算された防災効果が失われ、さらに後退する（現状よりも被害が大きくなる）ことも起こりえる。
・ そうしたときに、類型Ｉ以外の施策群による減災マネジメントの効果がかぶっていると（超過洪水対策と表現してよい）、気候変動影響が相当程度緩和される可能性がある。これは、無被害で済む可能

性の一層の拡大とともに、被害～豪雨規模（超過確率年）関係を“寝かせておく”ことの重要性を示す。

（２）気候変動への適応度の評価

以上を踏まえ、被害～豪雨規模（超過確率年）関係図を用いて気候変動への適応状況を包括的かつ簡便に調べる方法を以下に提示する。図-Ⅲ2.2.16 を参照されたい。

前述のように、横軸の超過確率年が対数表示であると、対象とする豪雨量のα倍の増加は、被害～豪雨規模（超過確率年）関係を概ね左方に一定距離移動させることになるので、気候変動影響はこの図にあるように二本の平行な黒線で表現できる。なお、図中の３ケースとも、この左方への移動量は同じとしている（図中の左向きの太矢印の長さに対応）。

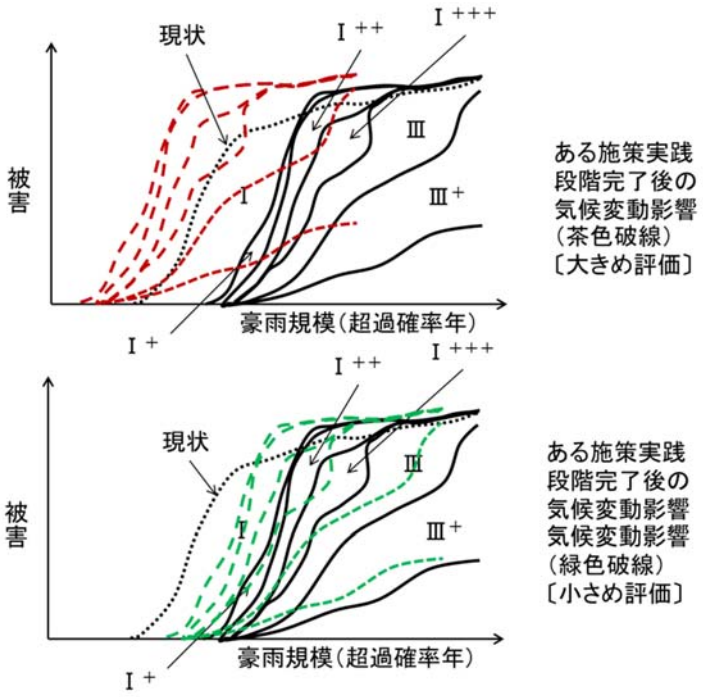


図-Ⅲ2.2.14　施策効果総合表現図における気候変動影響の表現（上が強めの影響の場合、下が弱めの影響の場合）

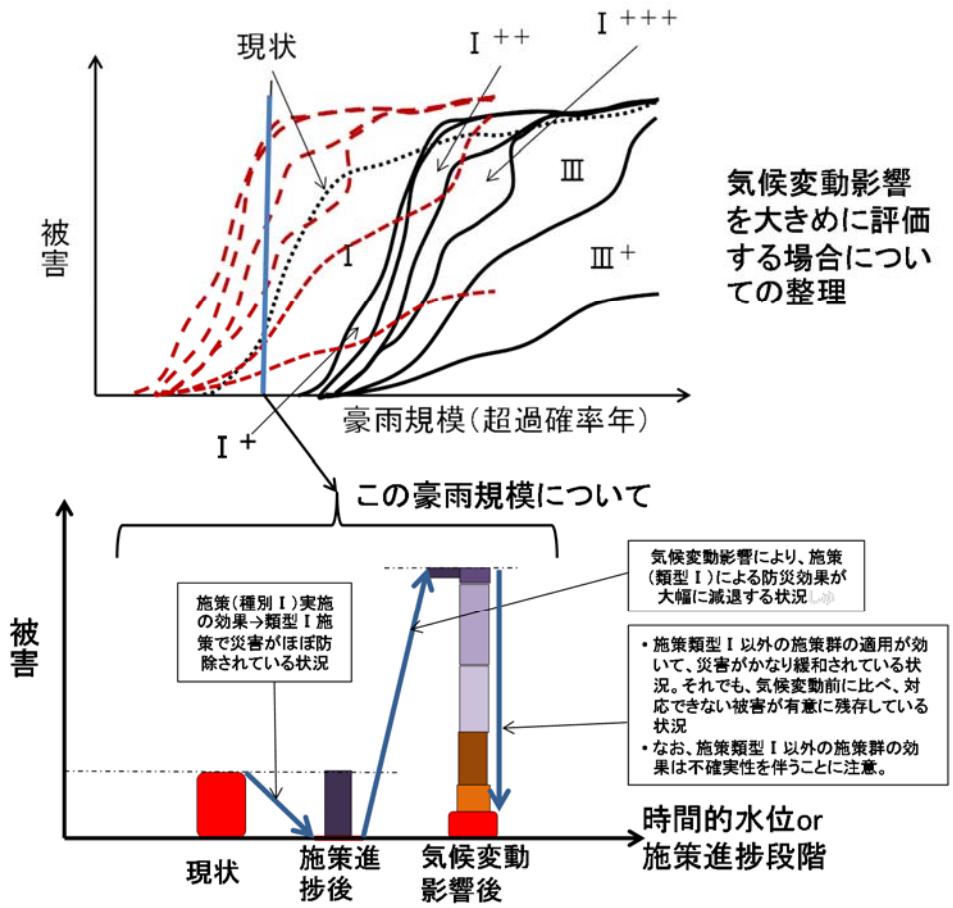


図-Ⅲ2.2.15　施策効果総合表現図を用いた被害、施策効果および気候変動影響の総体的把握

この準備の下、気候変動による被害の変化は、これら二本の黒線の差分で表され、これを次図中では青い細矢印で示している。この差分を豪雨規模（超過確率年）との関係で「被害」と同じ縦軸で表示したのが赤破線である。したがって、この赤破線は、気候変動に伴う被害増分量を豪雨規模（超過確率年）毎に示すものとなる。赤破線の全体的傾向を把握し、また異なるケースでの比較を行うことで、気候変動影響に対する感度、ひいては適応度を吟味できると期待される。

例えば、図-Ⅲ2.2.16 の一番上のケースでは、無被害で済む限界を超える外力が生じると急激に被害が増える特性を持つ場合を取り上げている。その次のケースでは、無被害で済む限界は同じであるが、その後の被害の増え方が緩慢な場合を示している。両ケースの赤破線すなわち気候変動に伴う被害増分量は、二番目のケースにおいて全体として緩和されていることがわかり、これは（１）で述べた「被害～豪雨規模（超過確率年）関係が“寝ている”と、影響が出にくい」ことに対応する。すなわち、被害～豪雨規模関係を制御することが気候変動適応としても有用であることが赤破線の特性から理解される。以後、赤破線を気候変動影響感度線と呼ぶ。

この図の上から三つ目のケースにおいては、無被害で済む限界を高め、より大きな外力まで無被害が持続するようにしている。この場合の気候変動影響感度線は、一番目のケースと形は同じであるが、右方にずれているので、頻度が減少するという点で一番目に比較して気候変動影響が小さくなっている。二番目と三番目のケースを比較すると、ともに一番目のケースに比べ気候変動影響に対する感度は緩和され、ただし、その緩和は、二番目は主に被害の程度の面で、三番目は被害の生起頻度の面で主になされている。

以上のように、この図で示したやり方で気候変動影響感度線を整理することにより、気候変動影響に対する感度、脆弱性、適応度についての情報を体系的に得ることが可能になると考えられる。

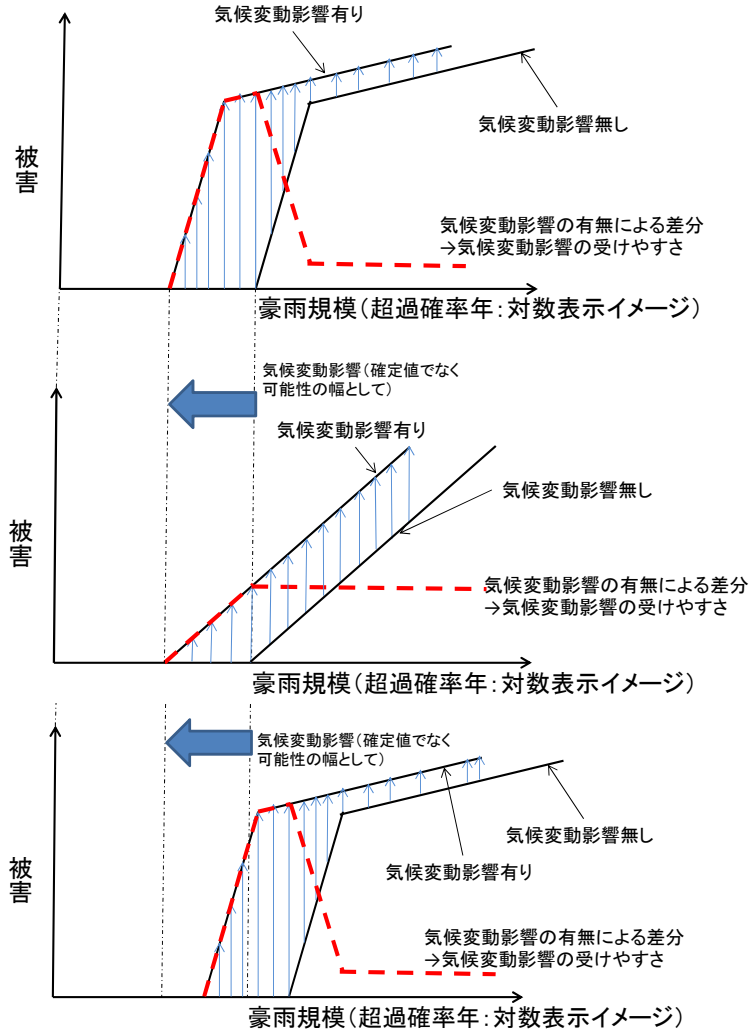


図-Ⅲ2.2.16　施策効果総合表現図を用いた気候変動への適応度の検討
（実黒線は被害～豪雨規模（超過確率年）関係、赤破線は気候変動影響感度線）

（３）適応策検討の道筋についての考察

以上を踏まえ、治水検討フレームに気候変動適応策を融合させるという考え方を基本に、適応策検討の部分を説明すると次のようになる。

・ 我が国の多くの水系において、治水目標が未達で、達成までに相当量の河川整備が必要であることに鑑み、引き続き、現行治水目標の完遂に向け、「無被害で済む可能性」を拡大するための類型Ⅰ施策（河川整備）を着実に進めていく。それを前提に、さらに以下の施策の検討を行う。
  ・ 無被害で済む限界を外力が超えた後の被害増大を穏やかにする（被害～豪雨規模（超過確率年）関係を“寝かせる”）施策群
  ・ 無被害で済む限界をさらに拡げる施策群
  ・ 両者を混成した施策群

※これらの検討において、2.2.2に示した様々な類型に属する施策群が投入される。

・ 種々の施策群代替案に対して、被害～豪雨規模（超過確率年）関係を見積もり、また気候変動影響感度線を分析し、これらから代替案比較・総合判断を行う。
・ 総合判断を吟味する観点は、1)無被害で済む可能性の拡大の進捗、2)被害～豪雨規模関係の適切な制御、3)気候変動影響への感度の鈍さ、の 3 点である。このうち、1)と 2)は治水検討フレームの主軸であり、3)も、上述のように 1)と 2)によって図られることから、全体として、治水検討フレームに気候変動適応策検討を包含させることができる（図-Ⅲ2.2.17 参照）。
・ 上記の比較・総合判断において、気候変動影響による豪雨増大の推定に不確実性があることも考慮する。

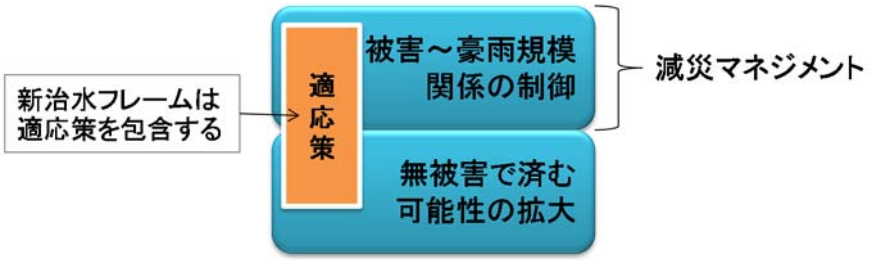


図-Ⅲ2.2.17　新しい治水フレームと適応策

この不確実性の扱いについてさらに考察する。現時点において、気候変動影響による豪雨増大量の推定に未だ不確実性が存在する。推定の信頼性は引き続き向上していくと見込まれるが、政策検討にとって十分な推定信頼性が得られるまでには一定の時間がかかると考えておいた方が良さそうである。アダプティブなアプローチがこのような課題へ対応する方策となり得るが、潮位変化などの平均事象の経年変化を扱う場合と異なり、極端現象である低頻度豪雨を対象とする場合、実測データの分析だけから気候変動影響を特定するには長期間のデータ蓄積が必要となり、政策検討につなげるための手段としてアダプティブアプローチに大きく依存するのは現実的でない。

以上のことから、現状では、適応策実施に関する次の二種の「後悔」への対処が重要になると考えられる。

◆やっておけば良かった後悔

【(コスト・労力を考慮して）適応策を小さめに実施】
↓
【気候変動影響が有意に出現〕
↓
【甚大な被害】

◆やり過ぎて損した後悔

【(気候変動影響による被害を重視して）適応策を大きめに実施】
↓
【気候変動影響が実際は穏やか】
↓
【掛けたコスト・労力の必要度が低かった（と見なされる)】

これら二種類の後悔の中で、最初の「やっておけば良かった後悔」は、人的を含め被害に直接関わるものであり、甚大な被害を極力起こさせないという防災・減災の本義から、二番目の「やり過ぎて損した後悔」よりも高い優先度で対処しなければならないものと判断されよう。その一方、防災・減災のレベルを引き上げることに要するコスト･労力を青天井にしてよいとするのも非現実的である。したがって、防災・減災の取り組みが生命・財産を守るという重い役割を担っていることを十分理解しつつ、両方の後悔に陥りにくい巧みで実践可能な方策を追求するという常識的スタンスがやはり重要ということになる。

上記２つの後悔をともに避けるための留意点として以下が考えられる。

・効果に対するコスト・労力が小さい施策を積極的に取り込む。

・必要度が気候変動影響の度合いに左右されにくい施策を積極的に取り込む。

一つ目の「効果に対するコスト・労力が小さい施策」は、多くの場合、効果が限定的であったり、効果発揮の確実性が低いなどの課題を持つ（例えば、避難は、人的被害を軽減するための低コストとされるソフト施策であるが、避難率は一般に 40%程度と高くなく（池内ら、2011）、効果発揮の確実性が低い場合もある。）。したがって、このような施策を採用する場合には、他の施策との連動や多重化を図るなどして、それらが持つ短所の克服をあらかじめ織り込んでおくことが必要となる。二つ目の「必要度が気候変動影響の度合いに左右されにくい施策」の代表としては、ここで提示している「被害～豪雨規模関係の制御」があげられる。（２）で示したように、新治水フレームの下で、被害～豪雨規模関係を“寝かせる”方策を打つことは気候変動適応策と高い親和性を持つ。この他、気候変動影響の度合いが事前の想定よりも小さくても、他の目的に資するとの位置づけがあり、その必要度が大きく低下しないような施策を積極的に見いだすことも求められる。たとえば、人口減少を踏まえ、地域を活性化し、水害に限らず災害が全般的に起こりにくいまちづくりを進める方策などがこれに当たる。こうした施策は、「他目的施策との相互乗り入れ性がある」ため、仮に気候変動影響が当初予測よりも小さかったとしても、他の目的において施策効果の発現があり、「やり過ぎて損した後悔」の可能性が減じると期待される。

このように、関連する、あるいは他の目的を設定した様々施策との統合的な施策展開が、気候変動影響における不確実性への対処に当たっては有用になると考えられる。この方向の実践に関して、さらに次節 2.3 において詳しく議論を行う。

２．３　新フレームでの検討に役立つ施策メニューの整理法

２．３．１　整理法提示のねらい

前節 2.2 に示した治水検討フレームは、概念の提示に意味があるのではなく、その下で施策展開を実践することができて初めて意味を持つ。したがって、無被害で済む可能性を拡大するための施策群に加えて、被害～豪雨規模関係を制御するための施策群が幅広く用意されていなくてはならない。そして、その中から当該水系に適した施策群の組み合わせを選び出し、それらの実施法を練り、無被害で済む可能性の拡大と被害～豪雨規模関係の制御に関わる目標を達成する道筋を体系的に検討できる状況を構築することが大切である。そのために共通的かつ基盤的に必要になることとして、新フレームでの検討に役立つ形で施策メニューを用意しておくことがあげられる。

しかし、第１章でも述べたように、新しい治水フレームの実装に必要な施策群が現段階で充足されているわけではなく、今後、必要な施策群の形成をそれらの実施法開拓と合わせて図っていかなければならない状況にある。こうした方向に向かうための第一歩として、ここでは、2.2 で説明したフレームでの施策検討に役立つ施策群の整理法を検討・提示する。まず、2.2.2(1)に示した施策類型に加えてさら

に導入すべき整理の視点を以下に示す。

２．３．２　整理のための新たな視点

（１）被害～豪雨規模関係の制御に関する型

次に示す４つの型（図-Ⅲ2.2.18）の導入は、各施策が被害～豪雨規模関係の制御にどのような効果を持ちうるかを体系的に議論できるようにすることに役立つと考えられる。

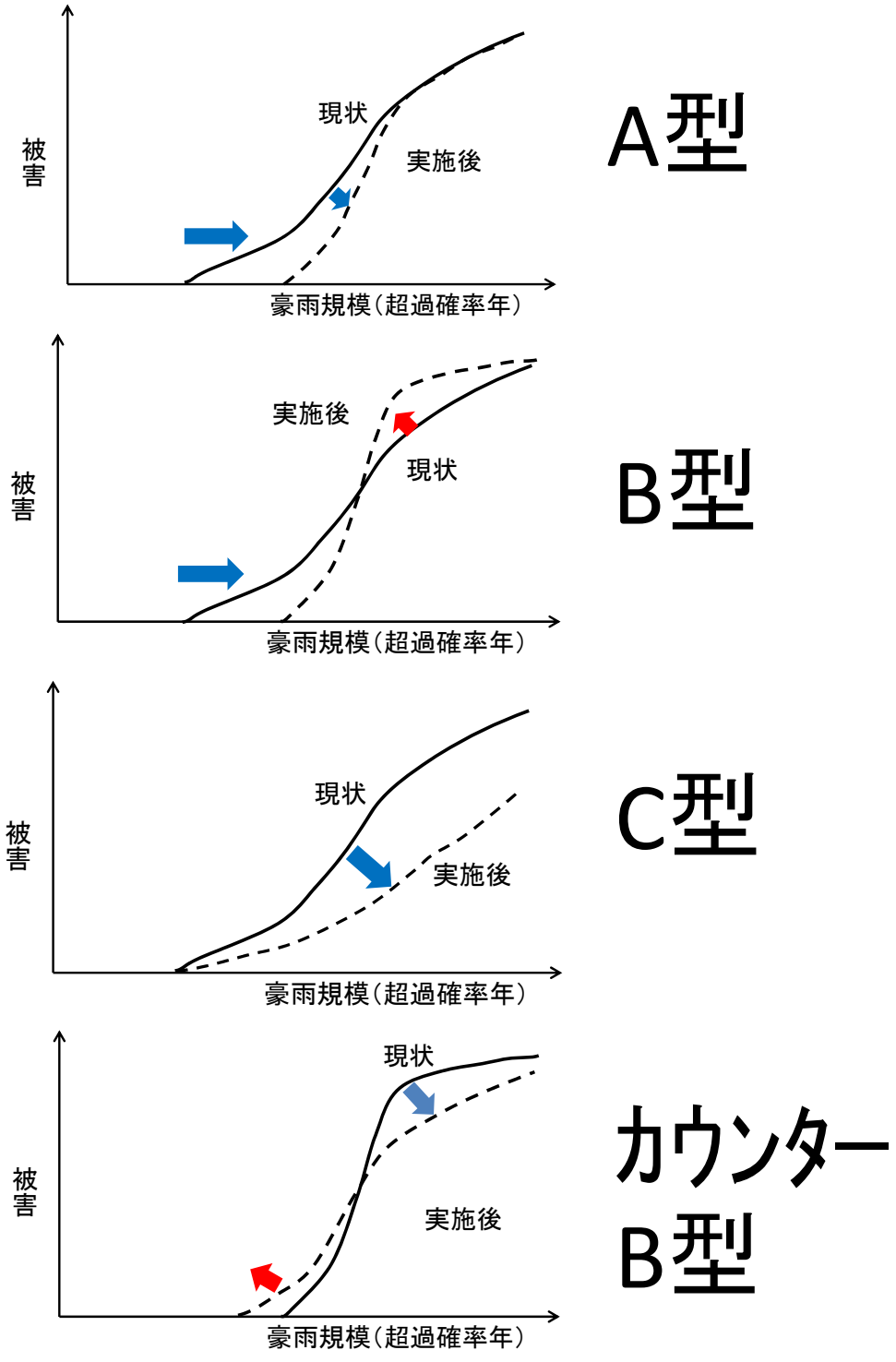


図-Ⅲ2.2.18　施策が被害-豪雨規模関係に与える変化に関する類型

（２）施策実行に必要な資源

当該施策の実行に必要となる資源の基本的性格・種別（以下の５つ）を把握する材料として設定するものである。2.2.3(3)で述べた不確実性への対処において、ポイントの一つとなる「コスト・労力の小さい施策の選定」にも関係してくる。

・河川の整備・管理に要する費用・労力
・地域の整備や誘導等に要する費用・労力
・情報分析を踏まえた高度な施設等運用力
・関係者の調整を通じた合意形成の方法・労力・費用
・情報運用･活用と人間および企業等の適切な行動の誘導に要する労力(情報活用力の増進を含む)。

（３）効果発揮の確実性

ベストエフォート的な性格を持つ施策も検討対象に含めることから、確実性の違いを把握しつつ検討できるように設定するものである。確実性に課題がある施策については、2.2.3(3)でも述べたように、他の施策との連動や多重化を図るなどして、この課題への対応をあらかじめ織り込んでおく。また、ベストエフォート的な性格を持つ施策について、特に、事前想定と実際の効果との間に大きなマイナスのずれが生じたときの対応法やそのための制度設計、それに対する合意形成などを検討する必要性が、この項目に発して吟味される。

（４）“他益性”の明示的承認と合意形成方策の必要性

この視点は、ある区間の氾濫可能性を他の区間より相対的に高く保つことにより、大規模洪水に対して、より大きな被害が生じる他箇所における破堤氾濫の可能性が有意に減ぜられ、全体として被害～豪雨規模関係が右下方にコントロールされる状況が生まれる構図に着目したものである。この“他益性”の明示的承認に際しては、一般に、合意形成のための種々の方策が合わせて講ぜられる必要性が高いと考えられることから、ここに項立てている。なお、遊水地など、その氾濫域の確保を河川整備に位置づける場合は、これに当たらない。

この“他益性”は治水目標に照らしての表現であり、自然状態に照らして表現する、すなわち治水施設がない状態を基準にリスク移転状況を評価するならば、「他損性回避の必要性確認」と表現される。

なお、“他益性”の概念は、進展状況によって流域（圏）内の「共生・連携」さらには「契約」「減災に役立つ資産の共有活用」という概念につながって行く可能性がある。その具体化のためには現実を見据えた周到な検討を通じた制度設計や実践法開拓が求められる。

（５）技術的成熟度

当該施策を実行するに際して、現時点において技術がどの程度伴っているかを判断するための項目であり、研究開発の必要性や方向性の見通しを示すことにつながる。

（６）他目的施策との相互乗り入れ性

この度合いが高ければ、2.2.3(3)で述べた「やり過ぎて損した後悔」への担保としての性格を併せ持つ施策選定につながる可能性が出てくる。この観点から項立てしたものである。この例としては、人口減少を踏まえ、地域を活性化し、水害に限らず災害が全般的に起こりにくいまちづくりを進める方策、都市部の環境改善方策、水資源確保方策、などが考えられる

２．３．３　整理法適用・活用のイメージ

2.2.2(1)に示した類型と2.3.2に示した視点を取り入れた整理がどのようなものになるかのイメージを掴むため、考えられる施策を幅広く取り上げて、試行的に整理表を作成した（表-Ⅲ2.2.1 参照)。この表は、今後の検討のための呼び水的位置づけであり、取り上げている施策も例示であって確定したものではない。施策メニュー整理法、各項目の仕分けとも、今後さらに確認・拡充・改善が加えられるべきものである。

このような施策群整理表を施策形成に活用するイメージとして次のようなものが考えられる。

- ✧ 現状の被害～豪雨規模関係を算出し、被害の起こり方の構図と特性（含；地域毎の特性）、脆弱性の内容を把握し、課題を確認・特定する。
- ✧ 既定の整備計画､整備基本方針について､それらが達成された段階での被害～豪雨規模関係を把握し、それらの効果を確認するとともに、被害制御の観点からさらに取り入れるべきポイントを吟味する。
- ✧ 上記を踏まえ、所定の「無被害で済む可能性拡大」の推進を前提に、被害～豪雨規模制御を進める具体方策の検討を行う。このために、整理表からの代替案抽出、各施策案の具体化、効果の試算、総合検討を行う。
- ✧ 代替案抽出や総合検討において､表中の整理項目それぞれの内容を適切に考慮するなどして､施策群整理表を基本台帳あるいは作業台として活用する。
- ✧ ここにおいて、「“他益性”の明示的承認と合意形成方策の必要性」「他目的施策との相互乗り入れ性」は、統合的な施策群形成のために特に重要となる項目である。

表-Ⅲ2.2.1　施策群整理の試行例

（整理法を今後さらに確認・拡充・改善するための呼び水的位置づけ。取り上げている施策は例示であり、確定したものではない。）

施策No.	施策内容 ※一定程度整備が進んだ現状からの逐次適用が前提 ※有堤区間を中心に議論	類型 2.2.2(1)参照	被害～豪雨規模関係制御に関する型 2.3.2(1)参照	施策実行に必要な資源－2.3.2(2)参照					効果発揮の確実性 2.3.2(3)参照	「他益性」の明示的承認と合意形成方策の必要性 2.3.2(4)参照	技術的成熟度 2.3.2(5)参照	他目的施策との相互乗り入れ性 2.3.2(6)参照	備考	
				河川の整備・管理に要する費用・労力	地域の整備や誘導等に要する費用・労力	情報分析を踏まえた高度な施設等の運用力	関係者の調整を通じた合意形成の方法・労力・費用	情報運用・活用と人間および企業等の適切な行動を誘導する労力（情報活用力の増進を含む）。					論点明確化のための仮想メニューの位置づけ（一律は非現実的）	特に技術展開について
1	一律的な河道掘削	I	A型	✓					○		○		論点明確化のための仮想メニューの位置づけ（一律は非現実的）	環境保全と維持管理を考慮した河道設計
2	一律的な堤間幅拡大	I	A型	✓ 含；用地					○		○		論点明確化のための仮想メニューの位置づけ（一律は非現実的）	堤防を含む河道設計
3	一律的な築堤	I	ややB型	✓ （含；用地）					○		○		論点明確化のための仮想メニューの位置づけ（一律は非現実的）	堤防を含む河道設計
4	放水路	I	A型	✓ 含；用地					○		○			
5	洪水調節施設（ダム、遊水池）（既設ダム容量増強を含む）	I	A型	✓ 含；用地					○		○	やや有り	水資源確保、流水管理への転用	かさ上げ技術
6	既存ダムの容量再編等による治水容量増	I	A型				✓		○		○		元のやり方に戻せる	ストック効果の賢い活用
7	既存ダムの操作規則の高度化による洪水調節能力の拡張	I I^{+}	A型			✓	✓		○～△		○～△		元のやり方に戻せる	・操作高度化技術の実用化、・試験湛水未ゾーンへの対処など構造対応、・水系統合マネジメントへの組み込み
8	降雨予測を活用した既存ダムの操作規則の高度化による洪水調節能力の拡張	I^{++}	A型			✓	✓		△		研究段階開発		・元のやり方に戻せる。 ・施設運用についてベストエフォート的手法を社会が受容する必要	・気象予測を用いた操作高度化技術の実用化 ・水系統合マネジメントへの組み込み

施策No.	施策内容 ※一定程度整備が進んだ現状からの逐次適用が前提 ※有堤区間を中心に議論	類型 2.2.2(1)参照	被害～豪雨規模関係制御に関する型 2.3.2(1)参照	施策実行に必要な資源－2.3.2(2)参照					効果発揮の確実性 2.3.2(3)参照	「他益性」の明示的承認と合意形成方策の必要性 2.3.2(4)参照	技術的成熟度 2.3.2(5)参照	他目的施策との相互乗り入れ性 2.3.2(6)参照	備考	
				河川の整備・管理に要する費用・労力	地域の整備や誘導等に要する費用・労力	情報分析を踏まえた高度な施設等の運用力	関係者の調整を通じた合意形成の方法・労力・費用	情報運用・活用と人間および企業等の適切な行動を誘導する労力（情報活用力の増進を含む）。						特に技術展開について
9	相対的に流下能力が低い区間の河川整備（掘削 or 築堤による流下能力増）	Ⅰ	B型の可能性	✓					○		○		B型になりうる施策として要マーク	B型度合いを判断する技術
10	B型にならないワクチン付き「流下能力が低い区間の河川整備」 ※ワクチン：元々流下能力が高い場所の流下能力付与を合わせて実施	Ⅰ Ⅰ＋	A型	✓					○		○			・B型にならないために必要な流下能力付与の技術判断、・流下能力付与を可能にする河道設計
11	B型にならない「流下能力が低い区間での対処」→当該区間の堤防を越流堤にすることで対応	Ⅰ＋	C型	✓ 含；用地					○～△	有り	○～△			目的に適い、実行可能な越流堤設計技術
12	B型にならない「流下能力が低い区間での対処」→当該区間の堤防を、避難時間をかせげる粘り強い堤防にすることで対応（当面の措置）	Ⅰ＋＋	C型	✓					△	有り	△			粘り強い堤防の技術、配置計画
13	破堤氾濫による被害が甚大となる区間の流下能力増（流下能力が最小の区間とは必ずしも一致しない）	Ⅰ Ⅰ＋	C型	✓					○	有り	○		・No.10 と同じ系列、・No.9 の積み重ねの副次作用に対応する措置の位置づけ	必要な流下能力増強に関する技術判断
14	破堤氾濫発生後の氾濫迅速軽減緊急措置→排水ポンプ稼働、破堤口拡大の緊急抑制や迅速締切り、緊急的氾濫流制御・氾濫戻し策の実施	Ⅰ＋＋＋	C型			✓			△		△～研究段階			リアルタイムの情報把握、最適対応法、工法開発など多面に渡る研究開発課題あり。
15	主として都市部において、防災調節池等を公園や空き地活用とセットで設置	Ⅱ	A型 C型		✓		✓		○	場合によって有り	○	有り	環境保全・再生、縮退関連施策との連携の可能性	整備手法・制度
16	主として都市部において、防災調節池等を公園や空き地活用とセットで設置（アクティブコントロール指向）	Ⅱ	A型 C型		✓	✓	✓		△	場合によって有り	△	有り	環境保全・再生、縮退関連施策との連携の可能性	整備手法・制度、アクティブコントロールの手法

17	主として都市部において、雨水貯留を住民協働で高度に行う方策	Ⅱ	A 型 C 型		✓	✓	✓	✓	△	少し有り	△		“住民協働型流出抑制”	最適操作法、効果評価法、協働化プロセス
18	主として都市部において、氾濫水あるいは氾濫につながる過剰雨水・河川水を、河川・下水道システムを連携させて、氾濫を最小化するように誘導・貯留するダイナミックなコントロールを行う	Ⅰ⁺ Ⅱ Ⅲ	A 型 C 型			✓	✓		△		△	前提	No.16,17 と合わせ一体化できる可能性。河道整備で H-Q を下げることも手段になる。	現場実態ベースの案出。整備手法・制度、アクティブコントロールの手法。
⑲	相対的に氾濫が起こりやすい地域を、氾濫に対して被害が生じにくい状態に保つ方策、あるいは洪水氾濫後の復旧が容易となる方策。	Ⅲ Ⅲ⁺	C 型		✓		✓	✓	△	有り	△	有り	比較的土地利用が稠密でないエリアがターゲット。実行可能性の確保法	種々有り
⑳	洪水氾濫が生じた場合に甚大な被害の発生が想定される地域の減災あるいは洪水氾濫後の復旧を容易にする方策	Ⅲ Ⅲ⁺	C 型		✓		✓	✓	△		△	有り	地域さらには国としての基幹施設・機能の保全もターゲットに。実行可能性の確保法。	種々有り
㉑	適切な避難・“身構え”によって、致命的な災害を大幅に軽減する方策。	Ⅲ⁺	C 型					✓	△		△	少し有り	水害に限定せず、地域防災計画への組み込みなど、災害全般に拡張することも。実効性確保のはかり方。	種々有り。人間の心理・行動に関わる専門分野との連携。
㉒	救護・救援活動の支援につながる方策	Ⅰ⁺⁺⁺ Ⅲ Ⅲ⁺	C 型		✓	✓	✓	✓	△		△	少し有り	Ⅰ⁺⁺⁺、Ⅲ、Ⅲ⁺類型の施策を講じる際に、救護・救援活動の促進を考慮する。災害状況把握・活用が共通の鍵。	種々有り。統合化がポイント
23	密集市街地の大水深水没危険域について、切迫避難段階での救命率を向上させる方策	Ⅲ Ⅲ⁺	C 型		✓			✓	△		△	少し有り	No.21 の下で構成される施策の１つになり得る。 水害に限定せず、地域防災計画への組み込み	種々有り／切迫避難と“身構え”による救命成功率を上昇させる実効ある方策は大事なポイント。
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

※施策 No.に○囲いがあるものは、その施策内容の下に様々な施策群が構成される性格を持つことを示す。たとえば、No.19 については、長期的な動向推移も見通した地域づくりを兼ねたまちづくりに洪水氾濫時の減災を組み込み、それに緊急対応の準備を合わせるという方向で様々な施策展開が考えられる。No.20 については、大都市部の大規模風水害の被害軽減や早期復旧のための様々な備えに関わる方策が考えられる。

※なお、No.5, 6, 8, 19, 21, 23 に関しては、その技術手法を開発するための検討が本研究で行われており、その成果が本Ⅲ-2 部第 4 章に示されている（2.4 参照）。

２．４　具体化への展開－３、４章の内容との関係

平成 27 年 8 月に国土交通省の社会資本整備審議会から出された気候変動適応策のあり方についての答申（国土交通省社会資本整備審議会答申 2015）は、水災害分野における防災・減災施策の最近の展開と今後の方向性を凝縮して見せるものとなっている。本章で示してきた新しい治水フレームの考え方は、根本の方向性という点で、この答申と共通するところが多い。水害への対処に関する枠組み進化の流れを、実際に施策展開がなされる現場において具体的かつ継続的に反映・実践していくことがいよいよ重要になってくる。その意味で、本章においてフレームだけでなく、その下での展開されうる施策を検討する大まかな技術的道筋、さらには施策群の整理法までをセットで示したことは、実際の施策群適用を検討するステージにおいて、有用な支援になるものと考えられる。

既に 1 章や 2.3.1 で述べたように、現段階で「新しい治水フレーム」の実装に必要な施策推進の道具が十分には整えられてはおらず、このフレームが新たな技術展開を求めていると言える。本研究では、フレームの提示と同等以上の重みで、それを支える技術手法の検討に取り組んできた。この成果を次章以降で示す。3 章以降の各研究内容とフレームとの関係を説明すると次のようになる。

まず 3 章は、フレームの基軸となっている被害～豪雨規模関係を算出する技術手法を提示している。具体的には、図-Ⅲ2.2.5、図-Ⅲ2.2.6 に示したような関係を算出する実用的な手法を 3.1 で示している。そこでは、図-Ⅲ2.2.7 を用いて説明した様々な破堤状況シナリオを幅広く取り込むことを可能にしている。3.2 では、この手法を用いることにより、様々な代替案の下で異なる被害～豪雨規模関係が算定され、それらの比較を通じて施策群選定のための実務的検討が行えることを多くの試算を通じて示している。

4 章では、3 章の成果の活用を前提として、個々の施策の技術手法に関する取り組みの成果を示している。各節とフレームとの関係は次の通りである。

- 4.1：河道設計・管理において、類型Ⅰ$^{+}$の施策がどのようなものになるかを、代表的局面を想定して検討し、そのポイントを提示している。
- 4.2：表-Ⅲ2.2.1 の施策 No.8 に対応する内容を扱っている。
- 4.3：同表の施策 No.5, 6 に対応する内容を示している。
- 4.4：同表の施策 No.19 の吟味に資する内容を提示している。この内容は、施策 No.10-12 で取り上げている B 型にならないための方策にも関係する。また、4.4.3 の内容は、被害～豪雨規模関係を用いた検討が、施策類型Ⅰ$^{+}$の案出や気候変動影響感度の把握に役立つことを、実流域を対象にした試算を通じて示すものとなっている。
- 4.5：同表の施策 No. 21 をはじめ、施策類型Ⅰ$^{++}$やⅡ、Ⅲ、Ⅲ$^{+}$に属する施策推進の有力な道具となりうる XRAIN を実装するための技術開発とその活用について述べている。
- 4.6：気候変動影響による降雨強度増に対処するため都市雨水排水能力を増強する効果的な方策について検討している。これは類型ⅠとⅡの性格を合わせ持つ。
- 4.7：表-Ⅲ2.2.1 の施策 No.23 に関するものである。

上記の検討内容は「新しい治水フレーム」の実装に必要な施策推進の道具全体から見れば一部のカバーにとどまっているが、それでも技術政策的に重要な課題を優先的に選んでおり、今後、具体的施策検討に踏み出す際に有用な材料になるものと期待される。また技術展開の方向性や有り様を理解する助けになるものと期待される。

参考文献：

池内幸司、越智繁雄、安田吾郎、岡村次郎、青野正志（2011）大規模水害時の氾濫形態の分析と死者数の想定，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.67，No.3，pp. 133 - 144.

国土交通省河川局（現 水管理・国土保全局）（2004）：新潟・福島豪雨災害の状況についてのシミュレーション動画等資料、2004 年公開：http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200407_12/041224-2/table.htm

国土交通省 社会資本整備審議会答申（2015）：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～、平成 27 年 8 月：http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinhonbun.pdf

国土交通省・防災関連学会合同調査団（2013）サンディ調査報告－米国ハリケーン・サンディに関する現地調査報告書（第二版）― 先進国の大都市を初めて襲ったニューヨーク都市圏大水害からの教訓 ―、平成 25 年 7 月：http://www.mlit.go.jp/river/kokusai/disaster/america/america_hurricane_201307.pdf

国土交通省水管理・国土保全局、河川事業の評価手法に関する研究会（2013）第 5 回（平成 25 年 3 月 18 日）配付資料－「水害の被害指標分析の手引き」(案)（H25.3 月時点版）：http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasen_hyouka/dai05kai/dai05kai_siryou2-3.pdf

中央防災会議（2010）大規模水害対策に関する専門調査会 報告：首都圏水没～被害軽減のために取るべき対策とは～、平成 22 年 4 月.

新潟県三条市発行、片田敏孝 群馬大学大学院教授 監修（2011）三条市豪雨災害対応ガイドブック、平成 23 年 3 月：http://www.city.sanjo.niigata.jp/data/gyousei/heavyrainfall_hazard_guidbook/

日米英蘭四カ国共同報告書（2011）Flood risk management approaches -as being practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States（各国の洪水リスクの特性比較表から）：http://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/2011-R-08.pdf

舛屋繁和、中村圭吾、服部敦、武内慶了、佐藤慶太、竹下直樹、福島雅紀（2015）全国一級水系における河道容積の年平均変化率について、土木学会水工学委員会河川部会、河川技術論文集、第 21 巻、pp.241-245.

Fair, G. M., J. C. Geyer and D. A. Okun (1970): Elements of water supply and wastewater disposal: second edition, John Wiley & Sons, Inc., Toppan Company, Ltd., pp.58-59.

Final Report of the Interagency Performance Evaluation Task Force （2009） Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System : http://biotech.law.lsu.edu/katrina/ipet/ipet.html

３．　超過洪水時の治水システム挙動を考慮した被害生起シナリオと施策効果の分析手法

３．１　治水機能発揮・喪失のシナリオを考慮した氾濫時の人的・経済被害リスク評価手法の開発

３．１．１　背景

本章では、第２章で説明した治水検討フレームの下で必要となる根幹的技術手法として、米英蘭における洪水リスク分析手法の考え方を取り入れて、治水機能の発揮・喪失のシナリオを考慮した人的・経済被害リスク評価手法について検討した。

具体的には、安全に流下できる水位を超過した洪水時における堤防の応答、すなわち氾濫発生の有無とその位置について、生じうる全ての組み合わせを氾濫発生シナリオとして設定し、各シナリオに対して直接被害額及び人的被害を推算することで、ある豪雨規模に対してシナリオ数に応じた複数の被害推算値、すなわち被害の幅を算定する。これを超過確率年が異なる複数の豪雨規模に対して行うことで、洪水の発生頻度と被害推算値の関係として氾濫被害特性曲線を作成し、流域の特性を反映した氾濫リスクを求めることを試み、その有効性についてとりまとめた。

３．１．２　氾濫発生シナリオの網羅的抽出手法

本研究では、各氾濫ブロックにおける氾濫の有無による不確定性を考慮するため、起こりうる氾濫発生シナリオを網羅的に抽出する以下のような手法を用いた。

通常、無害流量に相当する水位では、破堤は起こらないと判断されるが、これを越えた水位（以下、「氾濫開始水位」）においては、堤防の機能が十全であるとは保証されていない。このことから、水位が氾濫開始水位以下の範囲では氾濫は発生せず、水位が氾濫開始水位より大きくかつ天端高以下の場合には、氾濫する・しないの両方があると設定した。

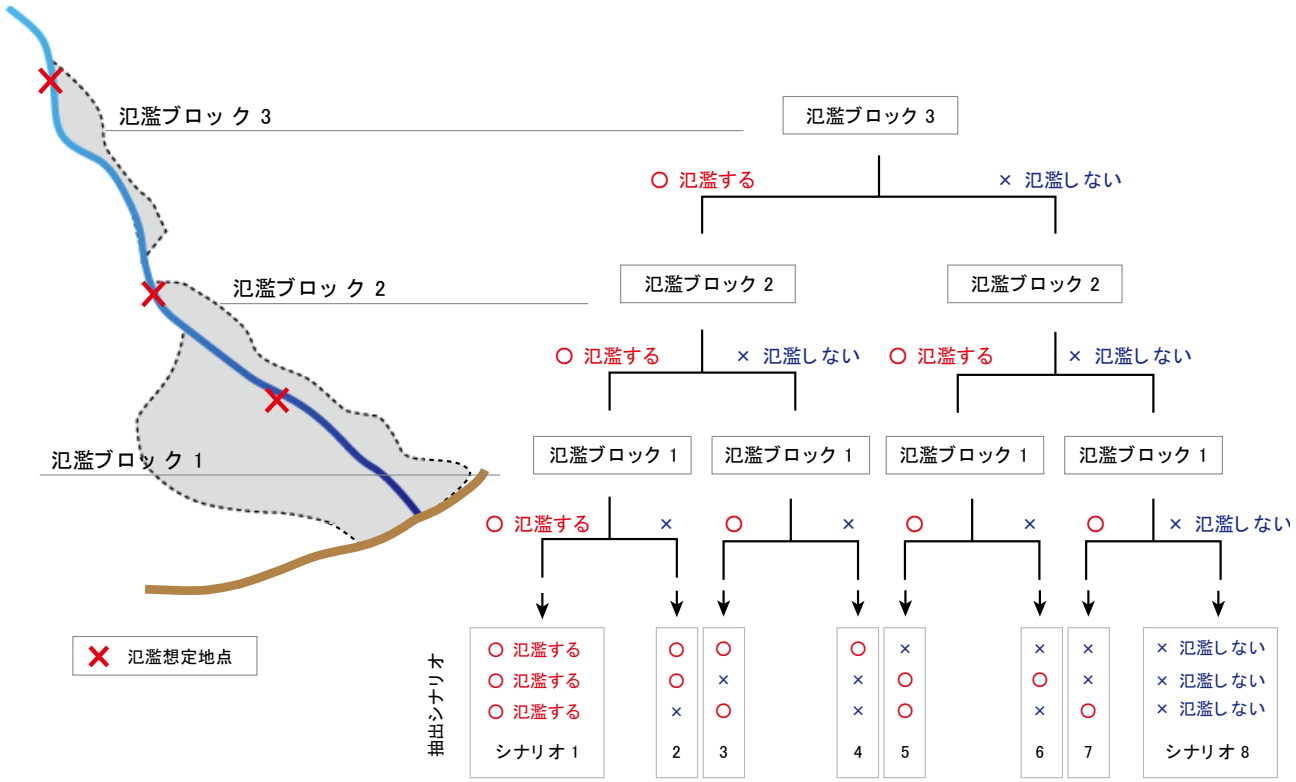


図-Ⅲ2.3.1.1　ツリー図を用いた氾濫発生シナリオの網羅的抽出手法

ある豪雨規模に対する氾濫発生シナリオ群は図-Ⅲ2.3.1.1 に模式的に示すツリー図のように設定される。図-Ⅲ2.3.1.1 は対象河川区間の下流側に位置する氾濫ブロックから番号 1～3 を付しており、いずれのブロックの氾濫想定地点においても、水位が天端高より低く、「氾濫開始水位」よりも高い場合で、氾濫する・しないの両方の可能性を有する例について示している。この例では全８種のシナリオとなる。

なお、土堤は越水に対して構造的にそもそも弱く、そのため、越水させないことによって機能確保をすることを堤防構造の基本としていること、またこれまでの実績でも越水区間において破堤する事例が多いことから、水位が天端高を超過し越水が生じた時点で 100%氾濫すると設定する。

上記手順による氾濫発生シナリオの設定は、氾濫発生の候補地点をあらかじめ選定した代表箇所のみに限定する単純化がなされているものの、単独または複数の氾濫ブロックにおいて氾濫が生じうる組み合わせの全てを、氾濫発生シナリオ群として網羅的に抽出することを可能にする。言い換えれば、リスク低減を検討する上で重視すべき被害最大となる最悪の氾濫発生シナリオの取りこぼしがない、という特長がある。

リスク評価にあたっては、超過確率年の異なる豪雨規模ごとに、全シナリオのうち被害の最大値を線で結んだものを最大被害シナリオにおける氾濫被害特性曲線、被害の最小値を線で結んだものを最小被害シナリオにおける氾濫被害特性曲線とし、この形状によって豪雨規模別の被害の特徴を評価する。さらに、特殊値の可能性がある最大・最小被害シナリオだけでなく、それ以外のシナリオ群による平均的な被害についても評価するために、全シナリオ群の単純平均値による氾濫被害特性曲線も表示することとした。

３．２　モデル河川におけるリスク評価の試行

３．２．１　試行における計算手法の概要

本研究では、必要なデータ一式が揃っている一級水系本川の国土交通大臣直轄管理区間から試算を行うモデル河川を選定し、最大浸水深と当該メッシュの資産額・人口より算出した直接被害額、人的被害によって、氾濫被害特性曲線の作成を試行した。算出条件については、以下の通りである。

（１）超過確率年と降水量の関係

当該水系の河川計画で用いられている降雨継続時間の年最大値を統計処理して標記を得た。超過確率分布としては、極値分布であるグンベル分布、平方根指数型最大値分布および一般化極値分布を用いることとし、SLSC 値により適合度を評価し、最も高い適合性を示した分布を採用した。また、降雨量の時空間分布は、既往観測の分布を降水量に応じて引き延ばし・縮めて与えることとした。今回は、河川整備方針に示された計画高水流量に最も近い流量値となる分布を採用した。

（２）氾濫ブロックの設定

別途実施された既往の非定常平面二次元浅水流解析による浸水位算定結果を収集し、各氾濫ブロック内を氾濫流が水面勾配を持って流れる流下域と、そうして運ばれてきた氾濫水が貯留される水面勾配が概ねゼロである湛水域に分割した。

（３）河道内水位及び氾濫流量の算定

各氾濫ブロックにおける水位が氾濫開始水位、天端高を超過するかどうかを判定し、また氾濫が発生する場合の氾濫流量を算定するための河道内水位は、現況河道を対象として、河川水位を一次元不定流計算により算定した。破堤地点では、本間の堰公式によって河川水位と堤内水位から河川からの氾濫流量、及び戻り流量を算定している。また、河道への戻り流量が破堤地点下流で生じる場合には、氾濫地点から当該地点までの距離等に応じて、氾濫ブロック内を氾濫流が流下するのに要する時間を設定し、不定流計算に反映した。

ここで、氾濫に伴う河道内流量の増減、また破堤地点での水位低下による水位縦断分布の変化を不定流計算に反映することによって、ある地点での氾濫発生に伴う水位変化の結果として、他地点で氾濫発生の有無や氾濫水量（本間の堰公式による）が変わる効果について、評価に取り込むことが可能となっている。

（４）氾濫計算による被害の算定方法

今回の試行では、被害を算定する必要がある豪雨規模・破堤条件別のシナリオ数が多いことから、本研究の目的とする精度を確保しつつ、より計算負荷の小さい現実的な手法としてポンドモデルを採用した。下記のような手法で、被害算定を実施している。

① まず、各氾濫ブロックの１カ所のみで氾濫する条件で、非定常平面二次元の氾濫流解析を実施し、浸水深に応じた直接被害額と死者数を算定する。

② 図-Ⅲ2.3.1.2のように、氾濫ブロック内を貯留域と流下域に区分し、貯留域では最大氾濫水量（氾濫ブロック内に貯留される水量の最大値の計算結果）、流下域ではピーク氾濫流量（境界条件として各氾濫ブロックに与えた氾濫流量の最大値の計算結果）と、①で算定した直接被害額および死者数と

の関係（図-Ⅲ2.3.1.2の右図）を導出する。

③　上記の関係を用いて、ポンドモデルによる浸水深と流入流量から各領域の被害額を得て、その総和を各ブロックの被害推計値とする。

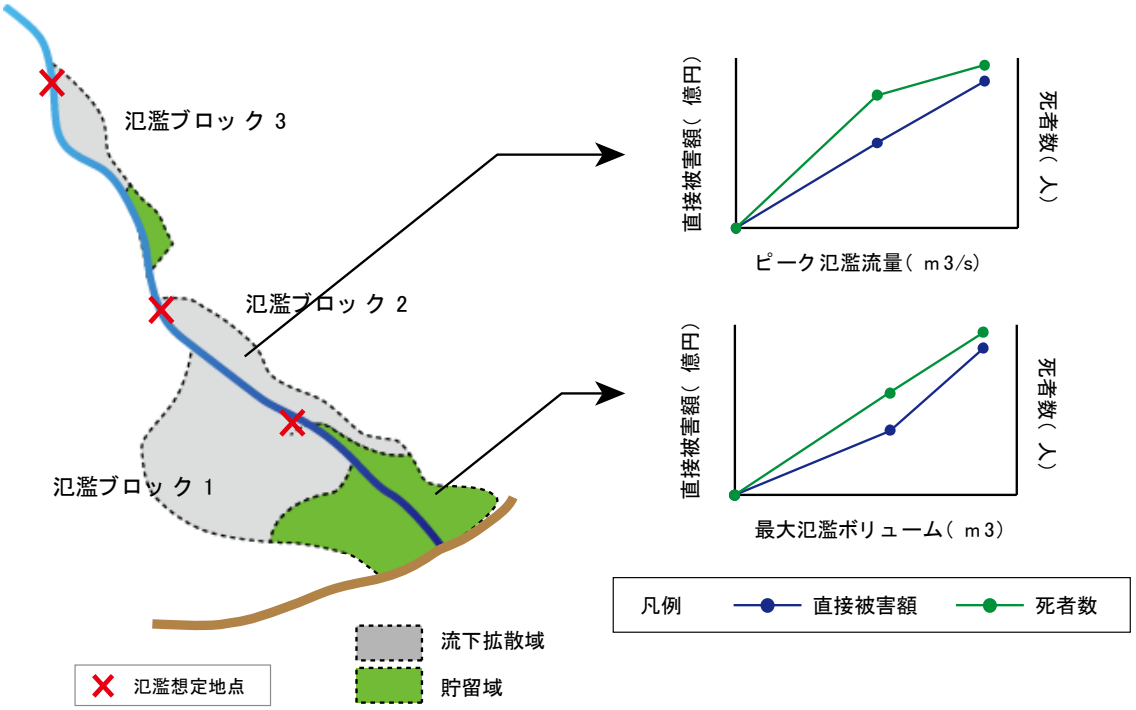


図-Ⅲ2.3.1.2　あるシナリオにおける氾濫事象の簡略計算法と氾濫被害推算（イメージ）

（５）直接被害額及び人的被害の算定

対象とする資産被害としては、上記手法でメッシュ展開した浸水深を活用して、治水経済調査マニュアル（案）に基づき直接被害額について算定した。

また、人的被害は、「水害による被害推計の手引き（H24)」に基づき、死者数を算定した。

３．２．２　試算結果

下流より上流に向かってブロック１～５の５つの氾濫ブロックに分割され、上流２ブロックと比較して、下流のブロック１、ブロック２、及び中流のブロック３の人口・資産が相対的に多い特徴を持つモデル河川において、氾濫発生シナリオ別の被害を算定した結果を、一つの事例として図-Ⅲ2.3.1.3（直接被害額)、図-Ⅲ2.3.1.4（人的被害）に示す。

図の横軸の 1～32 は、3.1.2 の手法で網羅的に抽出した各氾濫発生シナリオを示している。５つのブロックのそれぞれで氾濫する・しないの２通りがある 32 通り（2 の 5 乗）の氾濫発生シナリオがあり得ることとなる。それぞれの番号に対応するシナリオの氾濫する・しないの設定について、表-Ⅲ2.3.1.1、表-Ⅲ2.3.1.2 に示す。

縦軸は、各氾濫シナリオにおける直接被害額及び死者数をブロック別に積み上げで示しているが、軸の数値は基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を１として無次元化している。

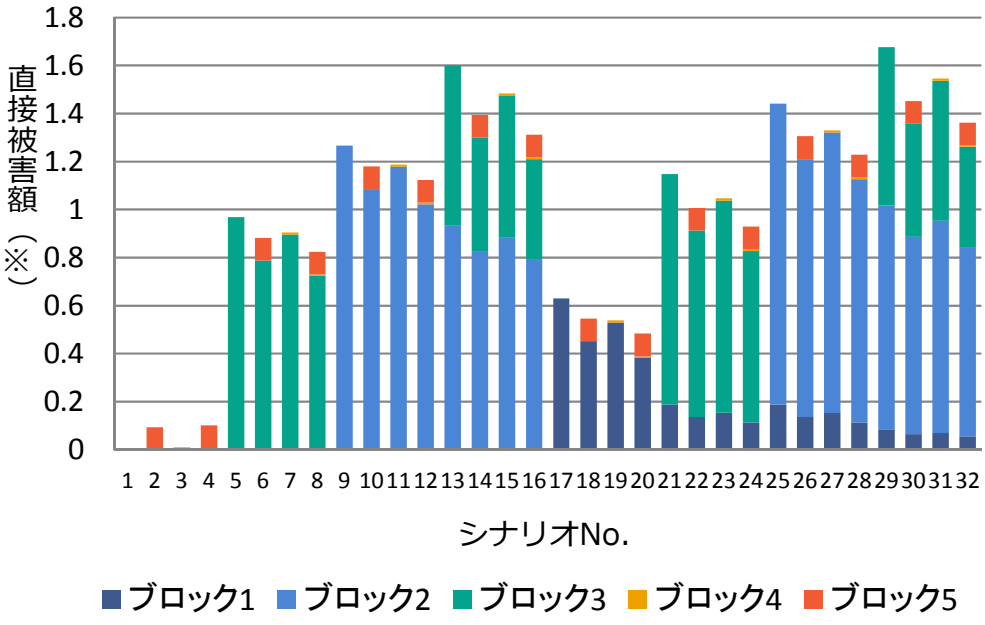


図-Ⅲ2.3.1.3　シナリオ別の直接被害額

※直接被害額は、基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を１として無次元化

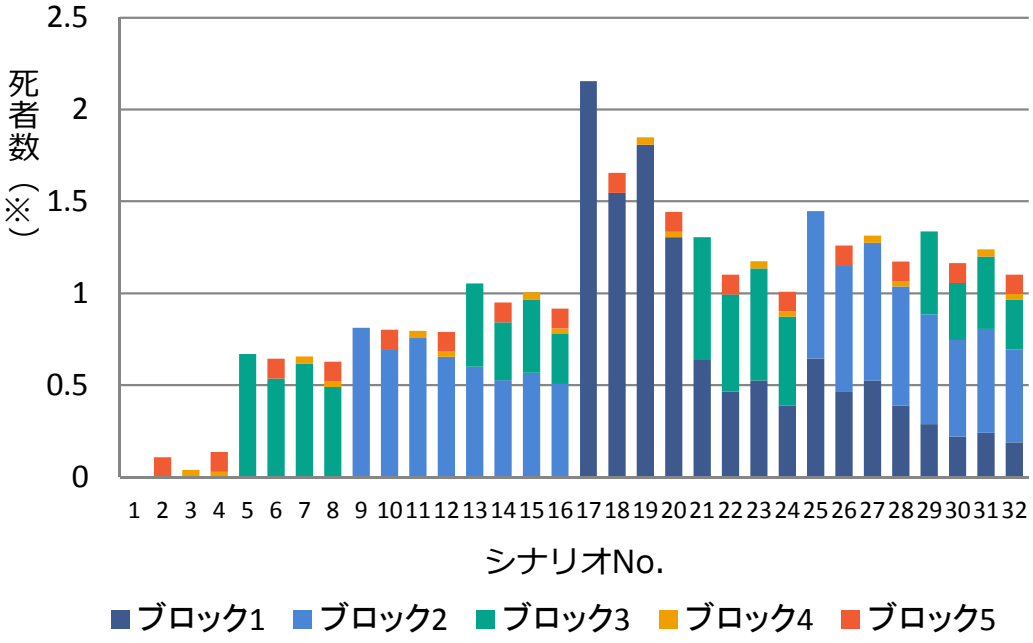


図-Ⅲ2.3.1.4　シナリオ別の死者数

※死者数は、基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を１として無次元化

表-Ⅲ2.3.1.1　氾濫発生シナリオの設定(1)（●を付しているブロックで氾濫が発生すると設定）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ブロック１																
ブロック２									●	●	●	●	●	●	●	●
ブロック３					●	●	●	●					●	●	●	●
ブロック４			●	●			●	●			●	●			●	●
ブロック５		●		●		●		●		●		●		●		●

表-Ⅲ2.3.1.2　氾濫発生シナリオの設定(2)（●を付しているブロックで氾濫が発生すると設定）

	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
ブロック１	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ブロック２									●	●	●	●	●	●	●	●
ブロック３					●	●	●	●					●	●	●	●
ブロック４			●	●			●	●			●	●			●	●
ブロック５		●		●		●		●		●		●		●		●

ここで、全てのブロックが氾濫する条件であるシナリオ 32 で、ブロック１～５の被害を合計した流域全体の被害が最大になる訳ではないことに注目いただきたい。これは、上流のブロック３、４、５においても氾濫が発生することで、相対的に人口・資産が多い下流ブロック１、２での氾濫流量が低減し、被害が小さくなっているためである。例えば、シナリオ 32 と、上流 3 ブロックで氾濫が発生しないシナリオ 25（ブロック１、２のみが氾濫するケース）や、上流ブロックのいずれかが同時に氾濫する 26～31 について、下流のブロック１、２のみの被害を比較すると、氾濫する上流ブロックが多いほど、下流ブロックの被害は小さくなる傾向がわかる。この結果、流域全体の直接被害額が最大となる氾濫発生シナリオは、シナリオ 29（ブロック１、２、３が氾濫。ブロック４、５は氾濫しないケース）である。

また、このモデル河川においては、氾濫域が広いブロック２において直接被害額が最も大きいのに対して、死者数は、浸水したメッシュの浸水深が大きいブロック１で大きくなる特徴がある。この特性を反映し、死者数が流域全体で最大となる氾濫発生シナリオはシナリオ 17（ブロック１のみが氾濫。他の 4 ブロックは氾濫しないケース）である。

このように、直接被害額と人的被害の両指標で評価することで、当該流域のリスクの特徴を把握することが可能である。

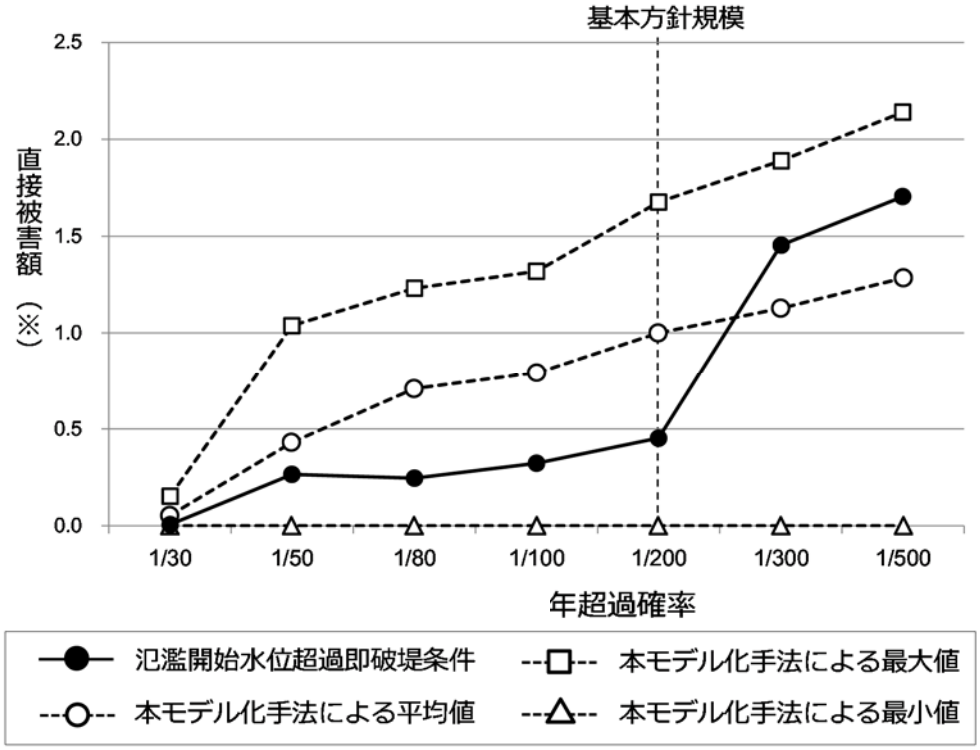


図-Ⅲ2.3.1.5　氾濫発生条件による流域の直接被害額の違い

※直接被害額は、基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を１として無次元化

次に、流域全体の総被害の氾濫被害特性曲線を図-Ⅲ2.3.1.5に示す。

なお、図中には、網羅的に各氾濫発生シナリオを設定するのではなく、一次元不定流計算による河道内水位が氾濫開始水位を超えた時点で当該ブロックが必ず氾濫すると設定した場合の被害推算結果（以下、仮に「氾濫開始水位超過即破堤条件」）を併記した。個別氾濫ブロック毎に見た場合、この設定は堤防の安全性が十全であることが保証されない最小の流量で氾濫が生起することになり、上流のブロックの被害が最も生じやすい条件となる。なお、この設定では各氾濫ブロック地点において水位が氾濫開始水位を越えるか否かのみで、氾濫発生の有無が一意に決定するため、流域全体の氾濫発生シナリオは一つに定まる。

上記の氾濫開始水位超過即破堤条件による氾濫被害特性曲線は、個々の氾濫ブロック単位で見ると氾濫被害が最も生じやすい条件ではあるが、複数の氾濫ブロックの被害総和（流域全体の被害）の観点では、本手法によって被害最大となる氾濫被害特性曲線を下回っている。すなわち、氾濫開始水位超過即破堤条件が、流域全体の被害の最大値を与えるシナリオに必ずしもならないことがわかる。

これは、氾濫開始水位超過即破堤条件では、ある程度以上の豪雨規模（図-Ⅲ2.3.1.5 では 1/300 以上）では、洪水流が先に到達する上流において河道内水位が氾濫開始水位を超過し、またそれによって必ず氾濫が発生するためである。その結果、上の個々の氾濫発生シナリオ別の被害のグラフから見たように、上流での氾濫は下流の流量を低減する効果を有することから、より資産が集中する下流の被害が減少する。しかし実際の現象としては、上流での氾濫は水位が氾濫開始水位を超過した時点で必ずしも生起するとは限らないため、結果として、上流で氾濫が起こらず、下流で氾濫が起こることによって、流域の被害が最大となる最悪の条件の可能性を見逃していると言える。

それに対して、本研究で提案した設定は氾濫発生シナリオが複数となる煩雑さがある反面、最大リスクを与えるシナリオを機械的に抽出でき、見逃しが起こりづらい特長があることを端的に示している。

３．３　まとめと今後の課題

今回、氾濫発生シナリオの網羅的抽出手法を用いることによって、計画規模を上回る洪水を含む様々な規模の洪水を対象として、氾濫生起に係る不確実性を限定的ではあるものの考慮し、流域の特徴を反映したリスク評価を実施することが可能であることを示すことができた。

今回はリスク低減施策の有無を想定せず、現状の河道条件による被害の評価例のみを示したが、本手法はさらにリスク低減施策の実施前後について超過洪水も含めた氾濫リスクを算定し、その差異から当該施策の減災効果を、流域全体への影響を含めて評価することに展開可能である。

なお、本手法は河川技術者が常識として持ってきた治水上の原則を数値的に確認する手法に過ぎないが、本手法を用いることにより流域の洪水被害の特性及び洪水被害低減対策の効果について河川分野以外の関係者に対してもより明快な、統一的かつ具体的な説明をできるようになることが本手法を活用する大きな利点であると考える。また、若手河川技術者等が流域の最悪の氾濫発生シナリオを見落していないかどうか確認するためにも，本手法は有効であると考える。

今後の展開として、もし氾濫発生確率の評価が可能となれば、各氾濫ブロックでの氾濫発生確率をすべて掛け合わせることによって、各氾濫発生シナリオが発生する確率を算定することができる。これによって、豪雨の超過確率年ごとの被害について、単純平均ではなく、シナリオ発生確率を考慮した加重平均による期待値の算定が可能となる。

参考文献：

国土交通省河川局治水課(2005)、浸水想定区域図作成マニュアル
国土交通省河川局治水課(2005)、治水経済調査マニュアル（案）
国土交通省水管理・国土保全局(2013)、水害の被害指標分析の手引き（H25 試行版）
竹中裕基、板垣修、小林勝也、服部敦(2015)様々な洪水規模に対する河道－構造物群システムの応答シナリオに基づく氾濫リスク・減災効果評価、河川技術論文集、第 21 巻、pp.491-496.*

４．河川および流域に関する様々な適応策オプションの拡充と適用条件の明確化

４．１　戦略的な河道設計・管理

４．１．１　はじめに

今後、気候変動影響等により洪水流量の規模や頻度が増大するとするならば、それに対する適応策の一つとして、河道掘削による河道における洪水流下能力の積極的な拡大がまず考えられよう。しかしながら、同じ河床掘削や川幅拡幅を実施しても、それに対する河道の応答特性は、礫床と砂床、山間部・平野部・感潮域などの条件によって異なる。また、河道掘削が長期に渡って効果を発揮する場合もあるが、そうでない場合も想定し得る。さらに、断面形状や河道縦断勾配、河床材料・土砂収支や河道植生等の変化を通じて、上下流方向を含めて様々な影響を及ぼし、トータルでみたときに洪水流下能力のみならず環境保全や維持管理コストの面で逆効果になるリスクも全くないとは言い切れない。故に、気候変動影響等による洪水流量の規模や頻度の増大に対する適応策として、河道流下能力の拡大を検討する場合には、河道の変化の「仕組み」を踏まえる必要があるし、目先の河道応答だけでなく、中長期的な変化や流下能力だけでない環境面を含めた多面的な河川の機能の変化と言った巨視的な現象も把握し踏まえておく必要がある。さらに、それらの諸機能確保だけでなく、その確保のための河道維持管理の負担の抑制をも同時に考慮しつつ、トータルとして最大の効果を得るべく実施していくことが必要である。

すなわち、このような河道の設計や管理を仮に「戦略的な河道設計・管理」と呼ぶとすれば、その方法を検討する際には、基本的に以下のことが重要になると考えられよう。

- 河道の形状・変化の仕方を司る「仕組み」を踏まえた河道設計法であること。
- 目先の河道応答だけでなく、それを包含する、より巨視的な現象を見据えた河道設計法であること。
- 実現すべき「河道形状」を具体的に示せる河道設計法であること。
- その先の環境機能や維持管理を考慮した河道設計法であること。
- 澪筋の固定化した低水路と植生が繁茂した高水敷から構成されるいわゆる「二極化した河道」を再度平坦化する設計で良いのか？　河積拡大を行う際の拡幅と掘り下げの依存度比をどう決めるか？　など、実際的な技術判断を直截に下せる河道設計法であること。

これらに関する基礎的な知見は、個別・部分的には得られつつはあるが（武内ら、2011　服部ら、2012）、現段階では、それらを統合化・体系化することで確立した方法論として提示できる状況にはなく、今後の更なる調査・研究に待つところは少なくない。

本章では、今後の「戦略的な河道設計・管理」の実装を図っていくために検討が必要と考えられる上記の事項に関連する論点を、図-Ⅲ2.4.1.1に示す3つの側面から整理して提示することを試みたい。

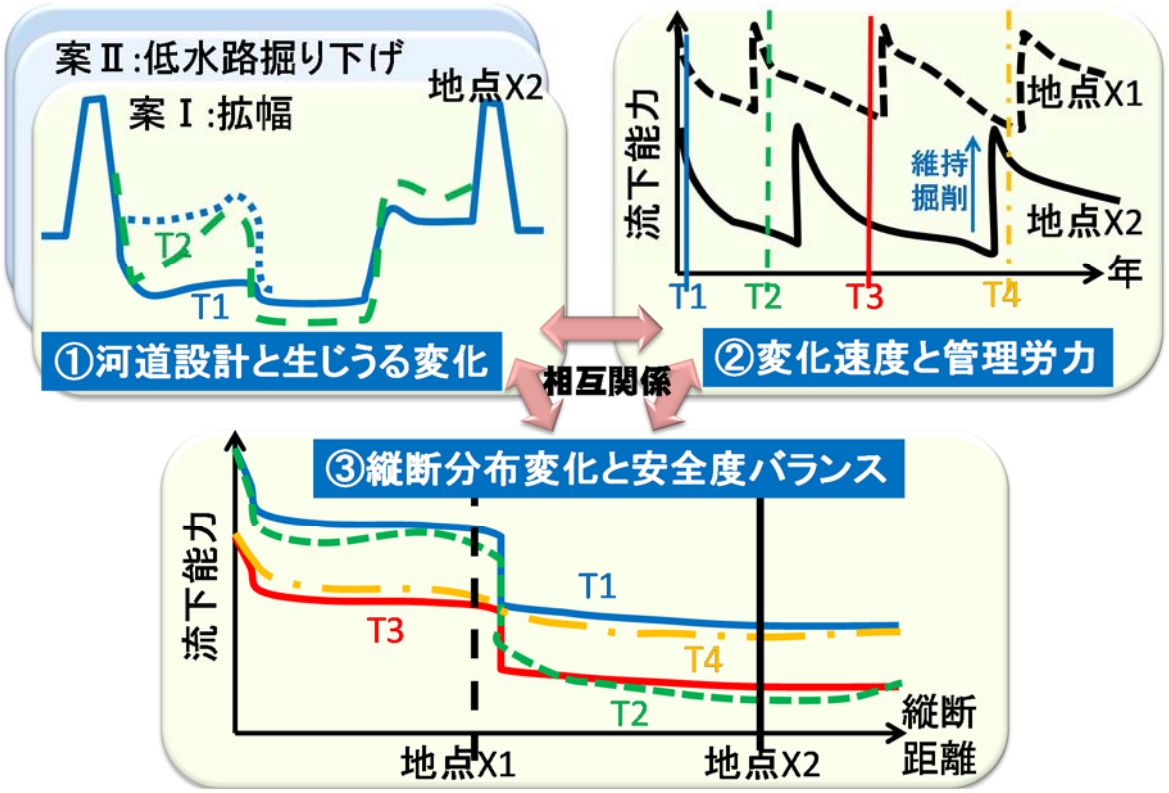


図-Ⅲ2.4.1.1　河道設計・管理手法の向上に関わる３つの側面

４．１．２　論点①：河道設計と（それに従って整備された河道に）生じ得る変化

前節で述べた戦略的な河道設計・河川管理を考える場合、治水で重視される計画規模の大出水時における「安全」を確保するだけでは不十分である。他の環境面での機能向上や、それらの諸機能を確保するための維持管理コスト等の課題をも必ず同時に解決できているとは限らないからである。したがって、その目標としては、治水や環境を含む河川の諸機能の確保と、それらを実現するためのある一定レベル以下の維持管理コストを同時に満たす「安定河道」を確保すること、と一般論としては書くことができる。

しかしながら、河道への様々な働きかけに対する河道応答特性に根ざした河道の安定性、すなわち「安定河道」をどのように定義するかがここで問題となる。例えば、自然河川が自己形成する河道、河道変化が小さい河道、形状改変してもまた元に戻る河道、等が考えられるが、果たして、どのような河道が、上記の目標を高いレベルで満足できる「安定河道」と言えるかについて、共通理解が必要である。

また、「安定河道」の条件を具体的かつ定量的に議論し、管理できる必要がある。例えば、ある「安定河道」を基準形状（テンプレート）として、現況や設計した河道との差異（ズレの大きさと場所）を調べることで、生じうる地形変化パターンとその進行速度が定式化できる、といったように、計測可能な具体的な条件によって定義することが条件となるであろう。

さらに、そのような安定河道を作り出すために、その確保を目標とすべき何らかの代表水理量（例えば平均年最大流量といった「河道形成流量」）を設定することができるか、という課題が生じる。かつ、ここで目標とすべき代表水理量は、単純に一つで良いとは限らない。例えば、川幅、砂州形態、局所洗掘深、河道の安定性（改修前後の摩擦速度の変化）などの観点からそれぞれ別々に考えるべき流量があるかもしれない。そもそも、そのような代表水理量を目標として設定することで、本当に「安定河道」確保を目標とした河道を現場で実現できるか、という点についても、検証が必要であろう。

今、河道設計において安定河道を確保するために目標とすべき「代表水理量」として流量のみを例示したが、「土砂供給量」についても明示的に示す必要もあるかもしれない。その場合、土砂供給量そのものを水系全体を通して把握することは難しいことから、河道縦断勾配と河床粒径をその代替指標として利用することも考えられる。しかし、それらの条件が同じでも縦断形状と河床材料が有意に変化する状況も生じており、その場合、当該河川では代替指標の有効性が失われる可能性もある。

このように、理想的な「安定河道」を見出し定義することは容易ではないため、現在の「河道横断形状」を保ったまま掘り下げれば、その近似解になるのではないか、という期待も生じる。その場合、河道構成材料（地表と地下）が、鉛直方向に一様かどうかがキーポイントとなることが想定されるため、河道横断図に、横断形状を表す「線」だけでなく、その地質構成を表す「色分け」も示すことが重要となる。但し、特に未固結、軟岩が露出する場合など、その情報を河道設計に生かす技術が未熟な状況にある。また、掘り下げることで、大出水時にこれまで経験のない大きい水深（流速）が作用するが、その場合にも「安定」か否かの技術判断が必要となる可能性がある。

４．１．３　論点②：変化速度と管理労力

4.1.2では、戦略的河道設計・管理を検討する際に、河道への様々な働きかけに対する河道応答特性に根ざした河道の安定性（すなわち「安定河道」）をどのように考えるかや、その定義に必要となる「代表水理量」の必要性や設定可能性等について論じた。そこでは、ある「代表水理量」をもとに河道設計・管理を行えば、その河道への働きかけに対応した河道応答によって、ある期間全体を通してある一定レベル以上の洪水流下能力を有する河道が確保できるであろうとする考え方が前提としてある。

これを現場での維持管理労力の軽減の観点からみると、現実的に可能な点検・判断・対策実施のスキームにおける速度・時間スケールの中で、どのレベルの河積までなら安定的に確保できるか、という課題に置き換えることができる。ここで、河床掘削や川幅拡大といった河道への働きかけに対する河道応答がどのような速度で生じるか、という点の重要性が浮かび上がる。この論点について、以下詳述する。

まず、どのレベルまでの河積であれば、安定して維持できるかを把握する必要がある。マクロには、「再堆積の速度vs維持管理に費やせる労力」のバランスが主要な判断要素となる。論点①と関連で言えば、堆積速度を小さくできる（「安定」した）河道設計が重要であると言えよう。大洪水時（洪水中）に生じうる堆積で河積が不足しないことも大事な要件であることは言うまでもない。

次に、現実的に可能な点検・判断・対策実施のスキームの範囲内で管理できる河道を設計することが重要である。再堆積量(河積減)がごく軽微と見なせるほど頻繁に維持掘削するのは、実務的には必ずしも容易ではない。すると、次の維持掘削実施までの期間内に堆積しうる分だけ、あらかじめ河積を大きめに確保しておくという「河積マージン確保」のアイデアが生まれる。すなわち、その必要な河積マージン量を河床変動計算で推計し、維持管理の実行可能性判断と河道形状の設定に反映することを、河道設計項目として取りこむことも考えられる。

もちろん、河積管理だけでなく、樹木繁茂等による粗度管理も同様に河道設計に取り込むべきである。その場合、伐採後の樹木繁茂の進行速度（樹高、群落面積などの増加速度）が直接的に設計に関わるパラメータとなる。そして、それらの速度が、河道形状、洪水による攪乱、伐採時の工夫（例えば抜根）によってどの程度変わりうるか？の知見を蓄積することで、河道設計に反映させることが重要となる。

さらに、河道掘削・樹木伐採の頻度・範囲を決める際には、環境への影響を評価することが必要である。その際、保全箇所を直接改変せざるを得ない影響と、その反面、洪水の代替として攪乱を生じさせる好影響の正負の両面から評価することが大事である。また、このような正負の両面は、次節の論点③に述べるように、治水安全度の上下流バランスにも現れることになる。

４．１．４　論点③：縦断分布変化と安全度バランス

ある断面での河積拡大は、河道縦断勾配、河床材料・土砂収支や河道植生等の変化を通じて、上下流方向にも影響を及ぼし得る。そのような河積拡大を水系内の複数断面で実施すれば、水系全体での洪水流下能力の縦断分布に影響が及ぶことになる。すなわち、水系内のどの地点でどのようなタイミングでどの程度の河積拡大を行うかを検討するためには、水系内の洪水流下能力の縦断分布（上下流バランス）をどのように設定すれば、現況の実力（HWL以下で流せる洪水の規模）や計画規模を超える洪水時の氾濫被害を流域全体として低減できるか、を検討しておく必要がある（ここで、Ⅲ-2部3.で提示した超過洪水時の治水システム挙動を考慮した人的・経済被害リスク評価手法の活用が期待される。）。今後、氾濫生起特性を組み込んだ河道計画のあり方を検討することが河川計画の基本に組み込まれるとするならば、この検討は、河川・河道計画の主テーマの１つになると考えられる。

すなわち、戦略的な河道管理技術が確立した暁には、論点②の河道変化速度を織り込んだ、より精密な河道設計・管理の下で、水系全体として氾濫被害リスクを大きくしない賢い河川管理手法を必然的に考えなければならなくなるであろう。例えば、河道の変化速度が大きく、かつ、維持管理実施頻度が少ないと、必要な河積確保のための河積マージンを大きく設定する必要がある。この場合、結果として、河道管理実施と洪水生起のタイミングによっては、上下流のバランスに大きなズレをもたらす可能性が出てくる。すると、河道変化速度を小さくし、適度な管理頻度にすることが、現実的な維持管理労力の範囲内で上下流バランスを取りやすくする上で重要ということになる。戦略的な河道設計・管理がもたらす、このような高度で複雑な河川管理が実務として実施可能かは、十分慎重に検討する必要がありそうである。

このように、治水安全度の上下流バランスを保つ上で、河道変化速度を制御する観点が必要となる可能性がある。このことは、論点③におけるニーズが、論点①の河道設計技術の要件とも結びついてくる可能性があることを示しており、論点①、②、③は、それぞれ相互に密接に関連し合うことになる（図-Ⅲ2.4.1.1）。

一方、樹木繁茂などの粗度管理についても、上記の河積の議論と同様に河道設計に取り込むことが重要である。このとき、上記のような氾濫生起特性を組み込んだ河道設計において必要となる河床変動計算・樹木繁茂推計等の各計算の精度・確度を見極めた上で、どのような検討手順とするか、上下流バランスのズレ方をどのように推計し設定するか、を総合的に検討する必要がある。

４．１．５　まとめ

以上、戦略的な河道設計・管理を今後検討し実用化させるために必要となる考え方について、①河道設計と生じ得る変化、②変化速度と管理労力、③縦断分布変化と安全度バランス、という３つの論点を通して展開を試みた。今後は、ここで提示した論点は踏まえつつ、河道応答特性に関連する現場での経験・知見をさらに蓄積し分析を進めることで、戦略的な河道設計・管理の方法論を早期に確立させることを目指す必要がある。

このような戦略的な河道設計・管理は、Ⅲ-2 部の 2.で議論した、河川整備と減災マネジメントを一体的に進める新しい治水フレームや、同 3.で議論した流域スケールでの洪水氾濫被害生起特性・各種代替案被害低減効果の検討と一体で推進していくべきものである。

また、ここで述べたような戦略的な河道設計・管理を実効性のあるものにするためには、計画・設計と維持管理の間の相互のフィードバックが極めて重要である。すなわち、当初の計画・設計通りに河積・粗度が制御できなかったとするならば、計画・設計においてどこに詰め切れなかったポイントがあるか

を明確にするとともに、その改善のために現場で実施すべきことを維持管理側に伝えることが重要である。また、その経験を踏まえて、維持管理側の課題を踏まえた、より適切な計画・設計のあり方を検討しておくことも重要である。このようなPDCAサイクルを生かしたマネジメントを活用して、全体を改善していく仕組みを確立させておくことも、戦略的な河道設計・管理を持続的に継続し発展させていくために重要な要件と考える。

参考文献:

武内慶了、服部敦、藤田光一、佐藤慶太(2011)細粒土砂堆積による高水敷形成現象を１次元河床変動計算に組み込んだ河積変化予測手法、河川技術論文集、vol.17，pp.161-166.

服部敦・板垣修・土屋修一・加藤琢磨・藤田光一(2012)気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価、河川技術論文集，vol.18，pp.481-486.＊

４．２　ダム洪水調節操作手法の高度化

４．２．１　はじめに

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までに IPCC レポートやその他の研究において多く指摘されている（例えば IPCC Working Group II 2014）。日本国内に対象とし、将来において豪雨の規模が増大する可能性については Ⅱ 部の第 1 章 5 節や第 2 章において述べられている。このように豪雨の降り方が変化するとダムの洪水調節操作にも影響を与える可能性がある。例えば佐山らは、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデル RCM20 のデータを用いて分布型流出モデルにより検討を行っており、例えば日吉ダムにおいては計画規模を越えるような超過洪水頻度が多くなる将来気候においてただし書き操作回数が現在気候と比較して増加することを示している（佐山ら 2008）。同様の検討結果は森らの研究からも得られている（森ら 2008）。新規治水ダムの建設の大きな進捗を見通す状況にはないことから、ダムについては上述したような増加する洪水外力に対して既設ダムの従来の操作を高度にすることで対応することも重要な技術開発の目標となる。

既設ダムの治水機能向上の一つの方策として予測雨量を活用した洪水調節が挙げられる。青山は超過洪水に対し大被害を回避するダム操作として、超過洪水発生が予測された段階で洪水調節開始流量から洪水調節を開始しないで洪水調節容量を温存し、下流河川における水位が大被害発生水位（当該水位を超えると大被害が生じる水位）を超えると予測した段階で当該水位を超えないように洪水調節を行うという方法を提案している（青山 2007）。水位上昇の予測は予測雨量を利用して行う。以上の操作によりただし書き操作時に発生する大被害を回避することが可能となる。この操作の課題としては、超過洪水の発生を洪水初期の段階で予測する必要があるとともに、洪水調節中にも下流河川の大被害発生水位以上に水位が上昇することを予測する必要があり、高い予測雨量の精度が要求される。また、無害流量以上の放流を行うため、中小規模の氾濫の許容が前提となる。

予測雨量の精度が高ければ、青山が提案するような操作を実施することが可能となるが、近年予測精度は日々向上しているものの予測誤差は未だにゼロとなったわけではないため、ダム洪水調節における予測雨量の定量的な利用は限定的である（鳥居 2012）。現在までに行われている予測雨量を活用したダム洪水調節に関する代表的な研究・取り組みとして、洪水調節操作の事前放流操作および後期放流操作における利用が挙げられる。事前放流操作の高度化に関する研究として、秋葉ら、戸谷ら、下坂ら、腰塚らは流入量特性を活用した事前放流量決定手法を提案している（秋葉ら 2004；戸谷ら 2006；下坂ら 2009；腰塚ら 2006）。その手法では、過去の実績洪水データを用いてピーク流入量と洪水低減部における総流入量の関係を予め把握しておく。次に、実際に洪水が発生した時にはリアルタイムで観測される流入量から、予め求めておいたピーク流量－総流入量の関係を基に以降の総流入量を推定し、推定された総流入量に相当する利水容量を事前放流するというものである。これにより、利水側に支障を来すことなくダムの洪水調節容量を洪水時に一時的に増加させることができる。上記手法は当初は予測雨量を利用せず、実測流量からその後の総流入量を推定していたが、北田らはその手法に予測雨量として気象庁の降水短時間予報（30 分間隔で発表される、6 時間先までの 1 時間雨量）を組み合わせ、草木ダムの 2007 年 9 月台風 9 号を対象としてシミュレーションを実施してその効果を確認している（北田ら 2010）。

後期放流操作における予測雨量の活用事例として、平成 22 年 7 月 13 日から 14 日にかけて発生した洪水時の中国地方整備局八田原ダムにおける操作と、平成 23 年 9 月の台風 15 号に伴って発生した洪水に対する三春ダムの操作が挙げられる。八田原ダムにおいてはピーク以降においてはダムの空き容量と

比較して予測される雨量が小さいため、規則操作よりも放流量を小さくする（オーバーカット）ことにより、ダムからの放流量を最大約 138m³/s 低減させることに成功した。この操作によって流入量と放流量の差は約 282m³/s となり、下流の目崎地点において約 55cm の水位低下に成功した（国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010）。また三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成 23 年 9 月の台風 15 号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、流入量の全量カットによる洪水調節を実施された。三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約 0.5m の水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約 0.35m の水位低減効果があったとしている。すなわち、全量カットによる効果は約 0.15m の水位低減効果であったとしている（国土交通省東北地方整備局 2011）。

上述した流出量特性を活用した事前放流量は、基本的には予測雨量への依存性を極力低下させつつも治水に効果的かつ利水に支障をきたさないことを指向した手法である。この手法は、事前放流を実施することで洪水調節容量を一時的に増やすことができるものの流入量が洪水調節開始流量を超えた後は規則操作に従うため、ダムの計画規模を超えるような大規模出水に対しては効果を発揮するが、流域全体では大きな出水ではあるもののダム流域では中小規模にとどまる洪水などに対しては規則操作と比較して放流量を下げることができず、下流の安全性を高めることはできない。また、洪水後期のオーバーカットについては、予測雨量への依存性自体は低くはないが、予測雨量の精度が十分に高い降り終わりに的を絞って予測雨量を活用する方法であるため、下流の安全性を高めるという点でその効果はまだ限定的である。流域の降雨状況に応じて下流の安全性を高めるための効果的なダム洪水調節手法は未だ提案されていない状況である。

規則操作よりも効果的にダム地点において洪水調節を行い下流の安全性を高めるためには、洪水の全体規模を把握した上で洪水調節終了時において洪水調節容量を 100%使い切れるような最適放流量を決定することが求められる。そのためには洪水の全体規模をおおよそ把握することができる予測雨量に対して高い精度が要求される。気象予測技術の進歩により予測雨量の精度は日々改善されているが、その時々の気象状況に応じて予測の誤差は異なると考えられ、予測誤差が完全にゼロになるのは困難またはかなり遠い未来であると考えられる。このような状況では、予測誤差がゼロになるのを待つよりも「予測雨量とは誤差を含んでいるが、それを用いることでダムの洪水調節効果を高める可能性であるデータ」という認識を持ち、その利用法を考えることが重要である。例えば三石らは WRF で計算された予測雨量に対して起こりうる上限値と下限値をそれぞれ設定し、予測の幅を考慮してダム洪水調節を行うことを提案している（三石ら 2011）。この研究事例にも示されるような予測の幅を考慮した上でダム操作をどのように行うかという視点が重要であると。ここでは、三石らや鳥居らで述べられている予測雨量の誤差発生確率を考慮したダム洪水調節手法を基に（三石ら 2011）（鳥居ら 2012）、現在気象分野で盛んに研究が実施されているメソアンサンブル予測雨量（以下、本章において断りがない限り「アンサンブル予測」は「メソアンサンブル予測」を示すものとする。）から得られる予測の幅を利用した下流の安全性を高めるためのダム洪水調節手法について述べる。2 節(4.2.2)ではアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要、3 節(4.2.3)ではシミュレーション実施条件、4 節(4.2.4)ではシミュレーション結果、5 節(4.2.5)では考察、6 節(4.2.6)ではまとめと今後の課題を述べる。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型の I ⁺⁺に相当する（2.2.2(1)）。

４．２．２　アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作方法として、三石らや鳥居らで述べられている予

測雨量の予測の幅を考慮した放流量決定手法をベースとし、その手法の概要を述べる。

（１）アンサンブル予測雨量

従来、ダム管理の現場においては気象庁の MSM33 時間予測に代表されるような確定的な予測雨量が使われてきている。しかし、ダム流域単位で見たときに予測雨量に誤差が含まれていることは様々な調査において指摘されている（例えば和田ら 2004、鳥居 2012)。そのような中、三石ら、鳥居らは予測雨量を確定値として扱うのではなく、誤差を持つことを前提として予測雨量の誤差確率分布を把握するための検討を行っている（三石ら 2011）（鳥居ら 2012)。それらの検討では、気象庁 MSM の過去の予測データと観測値を比較することで統計的に予測雨量の誤差確率分布の設定を行っている。しかし、気象予測モデルおよび予測計算の初期値・境界値の改良に伴い予測雨量の精度が日々変化することから、統計解析を実施するに足る同質なデータを蓄積することが難しい。さらに、予測雨量の誤差はその時々の気象状況に依存するためイベント毎に誤差が大きく異なると考えられるため、過去の予測雨量データの蓄積に基づいて誤差確率分布を設定する場合、適用する洪水によっては誤差の幅をかなり広く見積もってしまう可能性がある。

これらのことから本検討では、データの蓄積を必要とせず、かつその時々の気象状況に応じて適切な予測雨量の幅を算出するアンサンブル予測雨量を用いることとした。近年気象予測の分野では、予測計算の初期値に対してある程度のばらつきを与えて複数の初期値（アンサンブルメンバー）に対して予測計算を実施し、計算された予測の幅を評価するアンサンブル予測に関する取り組み・研究が盛んに行われている。これは、一つの初期値による予測では気象の不確実性故の予測の時間推移評価が難しいため、幅を持って評価するべきであるという近年の気象予測に関する認識を反映している。気象庁の 1 ヶ月や 3 ヶ月といった長期予測においてはすでに長期アンサンブル予測が現業化されているが、豪雨を対象としたような短期予測に関するアンサンブル予測はまだ現業化されていない。しかし研究は多く実施されている（例えば吉野ら 2011、Seko et.al.2011)。

（２）アンサンブル予測雨量を用いた洪水時のダム操作方法の考え方

上述したアンサンブル予測雨量を用いたダム放流量決定手法を以下に述べる。

1) 最大放流量がO_1からO_Nまで異なるN通りの操作ケースを設定する。
2) 境界値の予測が更新されるタイミングでアンサンブル予測雨量の計算を行う。ここではメンバー数をMとし、その各アンサンブルメンバーの予測雨量の結果をここではEn 1、En 2…En Mとする。
3) 得られるアンサンブル予測雨量のメンバー1（En 1）についてダム流域を含めた流域全体で流出計算を行う。
4) 3)においてダム流域について得られる予測流入量に対し、操作ケース1（最大放流量O_1）で操作したときの下流基準地点のピーク流量（$Q_{p_1_1}$）を計算する。
5) 3)と4)の計算をその他のアンサンブルメンバーについても実施する。
6) 各メンバーの発生確率は等しいものとして、操作ケース1で操作した時の下流ピーク流量期待値（Q_{p_1}）を計算する。各操作の下流ピーク流量期待値は次式で定義される。

$$Q_{p_i} = \sum_{e=1}^{M} p(e) \times Q_{p_i_e}$$

ここに、Qp_i：操作iによる下流ピーク流量期待値、M：アンサンブルメンバー数、$p(e)$：アンサンブルメンバーeの発生確率（全てのアンサンブルメンバーは発生確率が等しいとする）、Qp_i_e：アンサンブルメンバーeから求められる予測流入量に対して操作ケースiで操作した時の下流ピーク流量

7) 全ての操作ケースについて3)～6)の計算を行うことで下流ピーク流量期待値を計算する。
8) 得られた全操作ケースの下流ピーク流量期待値を最小にする操作ケースがその時点における最適操作とし、次の予測更新までその放流量で操作する。
9) 上記計算を境界値の予測が更新されるたびに行い、洪水が終了するまで実施する。

４．２．３　シミュレーション実施条件

前節で示したアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作について、実際に発生した洪水事例を対象としてシミュレーションを行い、その効果を確認する。ここでは対象流域・ダム、計算条件等について示す。

（１）検討対象流域・ダム、対象洪水

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節の検討対象地域として、近年大きな洪水が発生し、洪水調節を実施したダムを含む河川流域を検討対象流域として選定することとした。ここでは平成 23 年に台風 6 号、12 号および 15 号により洪水調節操作を実施した A ダムを含む B 川流域を対象とし、その 3 つの台風に伴って発生した洪水を検討対象とした。それぞれの台風の対象期間は以下の通りである。
台風 6 号：7 月 15 日 9 時～7 月 20 日 15 時
台風 12 号：8 月 29 日 9 時～9 月 4 日 15 時
台風 15 号：9 月 16 日 9 時～9 月 21 日 21 時

（２） アンサンブル予測雨量の計算

アンサンブル予測雨量は、気象庁 GSM の 84 時間予測を境界値として、WRF により計算した。各台風について上述の対象期間について、GSM の予測が更新（6 時間おき）される毎にその予測値を境界値として 84 時間先までの計算を行う。初期値についてはその時点よりも 6 時間前に行った予測計算結果を基に Hybrid 法（Wang2008a, Wang2008b）によりデータ同化による改善とアンサンブルメンバーの発生を行った。ここでアンサンブルメンバーは 20 とした。また計算領域については図-Ⅲ2.4.2.3.1 に示し、空間解像度は親領域において 15km、子領域において 5km である。また、データ同化に用いたデータとしては、表-Ⅲ2.4.2.3.1 に示す。

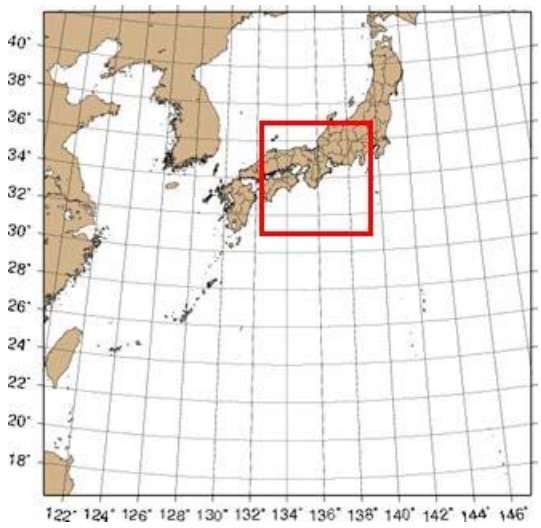


図-Ⅲ2.4.2.3.1　計算領域（全体が親領域、赤枠内が子領域）

表-Ⅲ2.4.2.3.1　データ同化に用いた観測データー覧

種別	要素	入手先
気象観測衛星（AMSU-A, B）	気温、水蒸気	NCAR Research Data Archive
衛星大気追跡風	風	
高層実況	気温、風、水蒸気、気圧	
海上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
飛行場実況	気温、風、水蒸気、気圧	
航空機実況	気温、風	
地上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
ドップラーレーダ	風、反射強度（雨水）	気象業務支援センター

（３）流出計算モデル

アンサンブル予測雨量を入力として河川流量やダム流入量を計算する流出モデルとして、土研分布型モデルを用いた（鈴木ら 1996、猪股ら 2007)。パラメータ値については、上記 3 洪水の観測値から SCE-UA 法（Duan1992）を用いて決定した。

４．２．４　結果

（１）台風 15 号の計算結果

最初に台風 15 号の計算結果について示す。降雨が降り始める前から降り終わりかけて 6 時間おきに 84 時間予測計算を行っているが代表的な事例として流入量が洪水調節開始流量に到達する 2 日前（図-Ⅲ2.4.2.4.1）および 1 日前（図-Ⅲ2.4.2.4.2）の結果を示す。その結果、台風 15 号はそれほど長期間に渡る洪水ではなく 2 日程度のものであったため、GSM84 時間予測を用いて計算した結果は降雨の降り始めから終わりまでを見通すことができる結果となった。洪水調節開始の 2 日前の時点で、アンサンブル平均雨量の積算値としては観測値よりも 100mm 程度小さい値となっている。また図-Ⅲ2.4.2.4.2 は洪水調節開始の 1 日前の結果である。2 日前の予測と比較して降雨のピークをより正確に予測できている。積算雨量の値については 2 日前の予測結果とほぼ同等で、100mm 程度アンサンブル平均値が観測値より小さい値となっている。図-Ⅲ2.4.2.4.1 および図-Ⅲ2.4.2.4.2 には併せて MSM33 時間予測の結果も記載しているが、MSM33 時間予測では、予測先行時間 33 時間と短いため降雨の全体規模が見渡すことができず、洪水の始まりから終わりまでを見通した効率的な洪水調節操作を実施することは難しいと考えられる。この点でも今回計算した 84 時間の予測はダム操作にとって有効な情報を提供しうるものであると言える。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅲ2.4.2.4.3 に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約 380m^3/s を放ることになり、貯水量の最大時において洪水調節容量の 9.2%を使用し、下流の治水基準地点である C 地点のピーク流量は 1,506m^3/s となった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量 200 m^3/s の一定量放流となり、貯水量の最大時において洪水調節容量の 30.5%を使用し、C 地点のピーク流量は 1,321 m^3/s まで低減することができ、規則操作と比較して 10%程度ピーク流量を低減することができた（図-Ⅲ2.4.2.4.4)。このように、アンサンブル予測雨量から得られる情報を活用することで、その時点における最適な放流量を機械的に算出することができるのが本検討で提案する手法のメリットである。

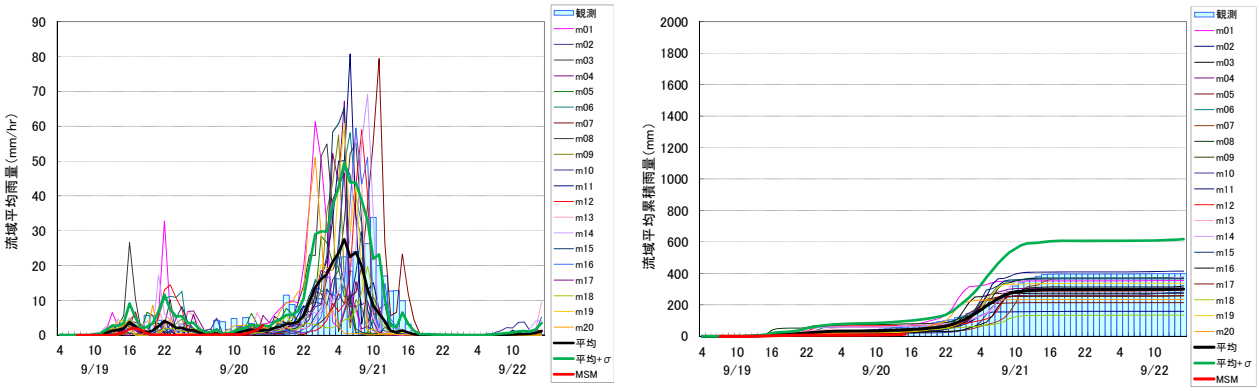


図-Ⅲ2.4.2.4.1　9 月 19 日 3 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 2 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

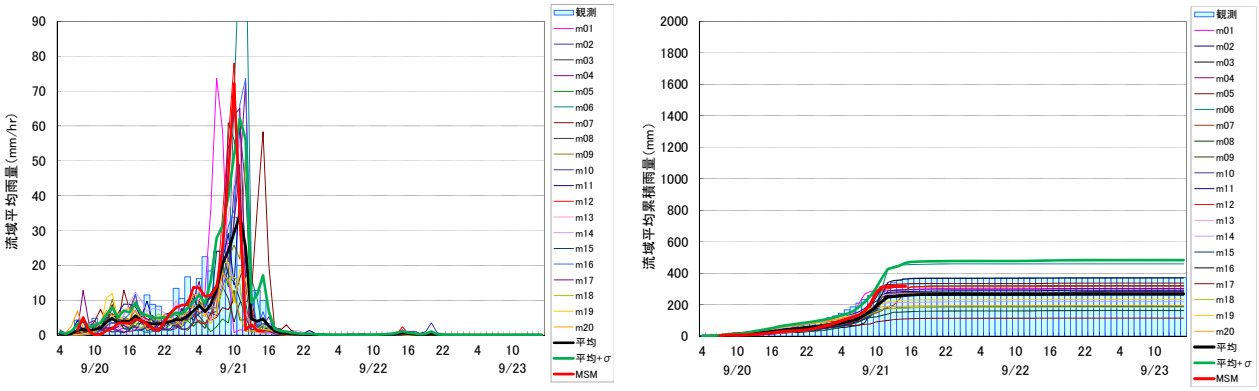


図-Ⅲ2.4.2.4.2　9 月 20 日 3 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 1 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

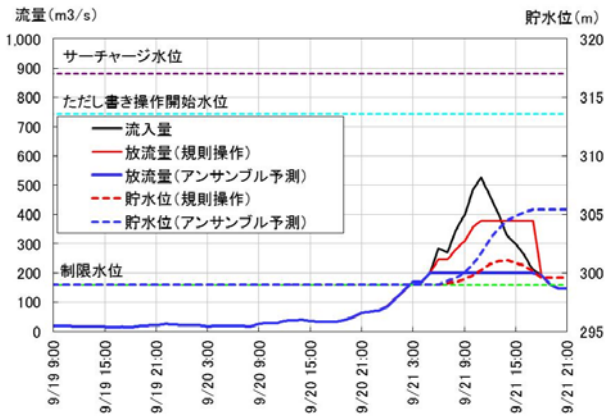


図-Ⅲ2.4.2.4.3　台風 15 号時の A ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

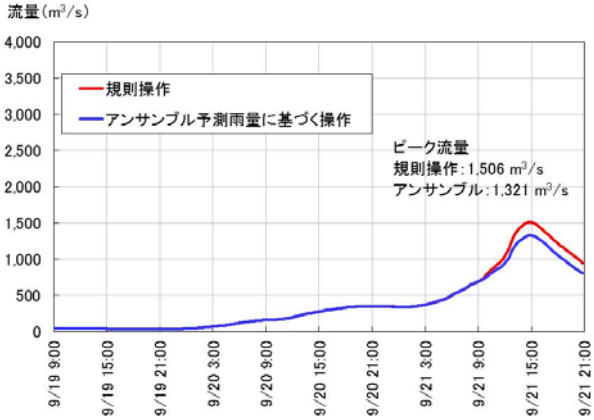


図-Ⅲ2.4.2.4.4　台風 15 号時の C 地点の流量時系列

（２）台風６号の計算結果

図-Ⅲ2.4.2.4.5 および図-Ⅲ2.4.2.4.6 は、台風 6 号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風 15 号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達する 2 日前および 1 日前の時点を初期値として予測した結果である。図-Ⅲ2.4.2.4.5 に示す結果では、降り始めの直後に発生する 40mm/hr 程度の雨について予測できていないものの、全体的な傾向は概ね再現されており、ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 2 日前から雨の降り終わりまでほぼ見通すことができていることが分かる。その一方で、MSM33 時間予測では一山目の終わりまでしか見通すことができていない。しかし、7 月 20 日の未明から朝にかけて雨がほとんど観測されていないにも関わらず、アンサンブル予測ではほぼ全てのメンバーが 20～40mm/hr 程度の予測をしており、過大評価している。図-Ⅲ2.4.2.4.6 に示す、ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する 1 日前の予測結果については、84 時間の積算雨量としてはアンサンブル平均値と観測値は近い値を示しているが、予測の前半期間でやや過小評価傾向、後半期間で先述の同様の傾向で過大評価傾向となっている。後半部分の過大評価については、次節でその原因について述べる。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅲ2.4.2.4.7 に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約 450 m³/s であり、貯水量最大時において洪水調節容量の 10.7%を使用し、2 つある下流の C 地点のピークについては、一つ目および二つ目のピーク流量はそれぞれ 1,573m³/s および 1,893m³/s となった（図-Ⅲ2.4.2.4.8）。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量は 7 月 19 日 9 時～15 時にかけての 280m³/s であり、その後は 200 m³/s まで放流量を落とす結果となった。これは 7 月 19 日 9 時を初期値とした予測では予測雨量が観測値と比較して過大評価であり（図-Ⅲ2.4.2.4.9）、放流量を上げて操作していたが、7 月 19 日 15 時を初期値とした予測では二つ目の降雨ピークが精度良く予測され（図-Ⅲ2.4.2.4.10）、過大評価が解消されたことにより放流量を下げることができると判断されたからである。貯水容量の使用率については、貯水量最大時において洪水調節容量の 63.5%を使用し、規則操作よりもかなり大きい容量を使用している。下流の C 地点のピークについては、一つ目のピークは 1,480m³/s、二つ目のピークは 1,662m³/s となり、それぞれ 6%、12%程度低減することができ、台風 15 号と同様に規則操作と比較して効果的な洪水調節を行うことができた。

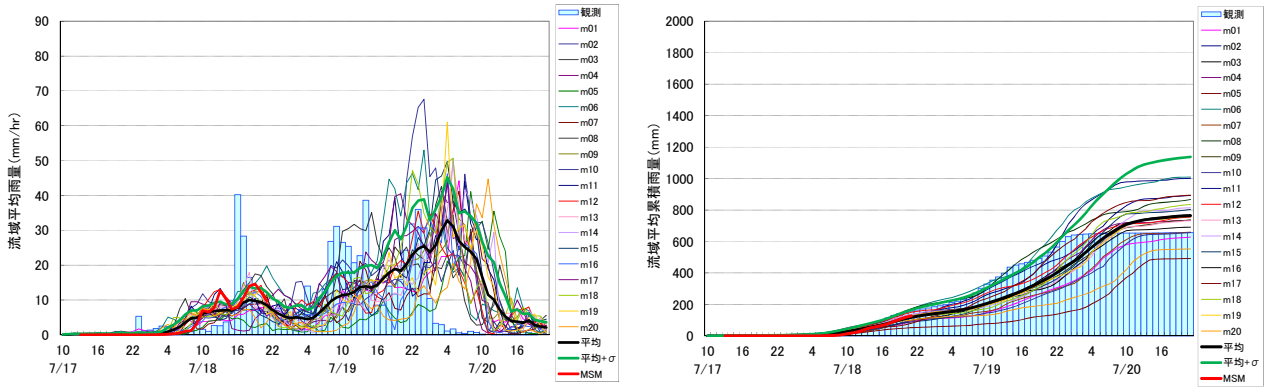


図-Ⅲ2.4.2.4.5　7 月 17 日 9 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 2 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

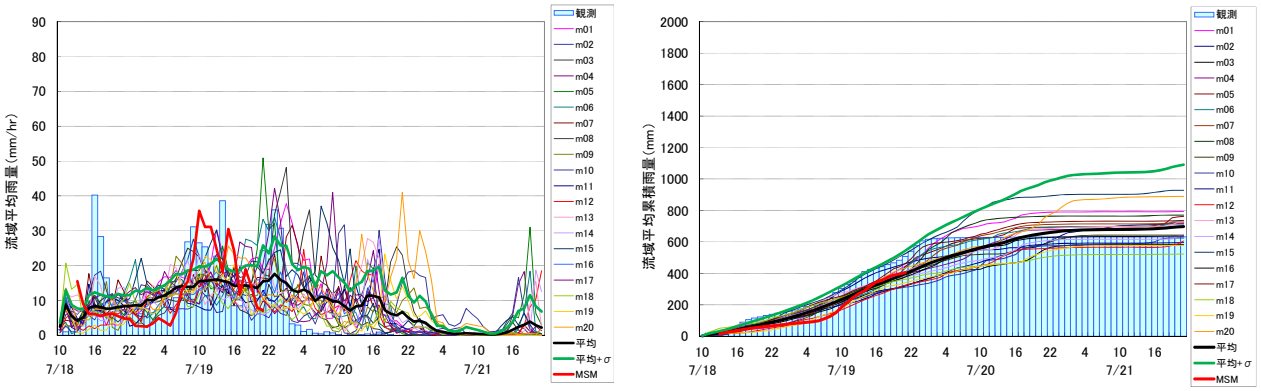


図-Ⅲ2.4.2.4.6　7 月 18 日 9 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 1 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

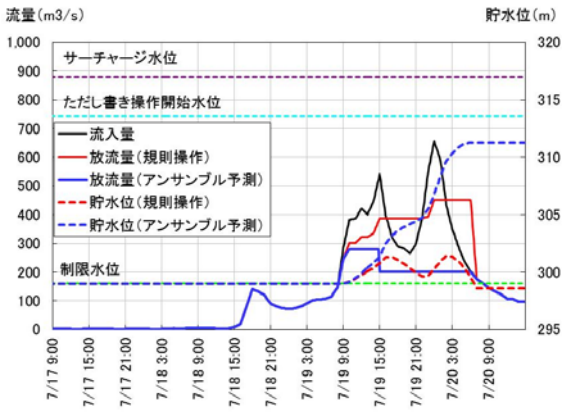


図-Ⅲ2.4.2.4.7　台風 6 号時の A ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

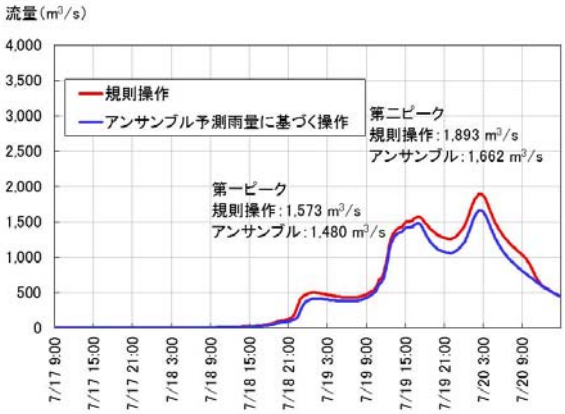


図-Ⅲ2.4.2.4.8　台風 6 号時の C 地点の流量時系列

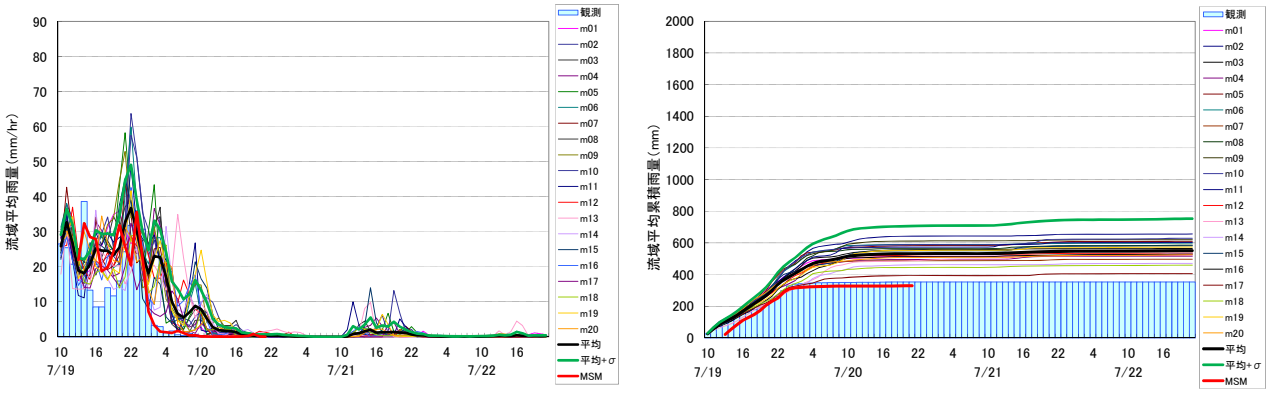


図-Ⅲ2.4.2.4.9　7 月 19 日 9 時（放流量 280 m³/s が最適と判断された時）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

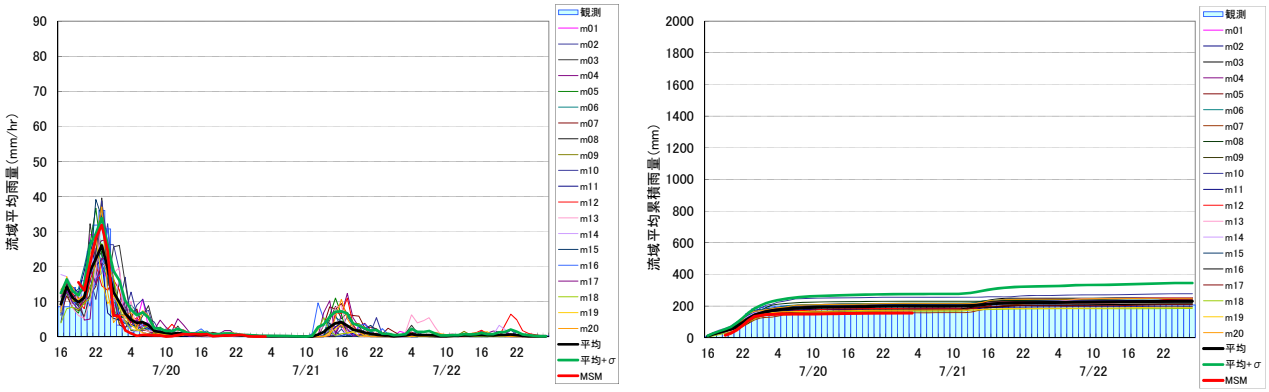


図-Ⅲ2.4.2.4.10　7 月 19 日 15 時（放流量 200 m^3/s が最適と判断された時）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

（３）台風 12 号の計算結果

図-Ⅲ2.4.2.4.11 および図-Ⅲ2.4.2.4.12 は、台風 12 号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風 15 号、6 号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達した 2 日前および 1 日前の時点を初期値として予測した結果である。図-Ⅲ2.4.2.4.11 においては、全体的な傾向としては再現されているが、積算雨量で見るとやや過小評価傾向であることが分かる。また台風 12 号は非常に長い時間に渡る降雨であったため、84 時間の予測であっても 8 月 31 日 9 時の時点では降雨の降り終わりまで見通すことができない。次に図-Ⅲ2.4.2.4.12 を見ると、一つ目のピークまではタイミング、雨量共に精度良く予測できている。しかし、ほとんどのアンサンブルメンバーが一つ目の山を過ぎたところで雨が降り止むと予測しているのに対し、実際にはそこから一つ目を上回る二つ目のピークが存在しており、その存在をアンサンブルメンバーの全てが予測できない結果となった。結局この二つ目のピークは実際に雨が降る直前の予測である 9 月 3 日 9 時や 15 時においても正確に予測することができなかった。この原因についても後述する。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅲ2.4.2.4.13 に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約 500m^3/s であり、貯水量の最大時において洪水調節容量の 35.9%を使用している。下流の C 地点におけるピークは 2 山あり、一つ目と二つ目のピーク流量はそれぞれ 1,803m^3/s および 1,977m^3/s となった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、規則操作より洪水調節容量を多く使ってはいるが、ただし書き操作に入ったことで放流量が上がり、580m^3/s であった。ただし書き操作を行った結果、下流の C 地点のピークについては、一つ目のピークは 1,548m^3/s と規則操作よりも低減させることができたが、二つ目のピークは 2,052m^3/s となり、4%程度増加させてしまった（図-Ⅲ2.4.2.4.14）。二つ目の山のピーク流量を増加させてしまった理由としては、A ダムで二つ目のピーク流入を迎えた時にただし書き操作に入っているからであり、その原因としてはアンサンブル予測雨量で二つ目のピークが予測できていないため、アンサンブル予測雨量に基づく操作では一つ目のピークに対して洪水調節容量を使い切るように操作してしまっているからである。その結果として、C 地点の結果について一つ目のピークについては規則操作よりも低減することができたが、二つ目のピークについて規則操作よりも流量を増加させてしまう結果となった。

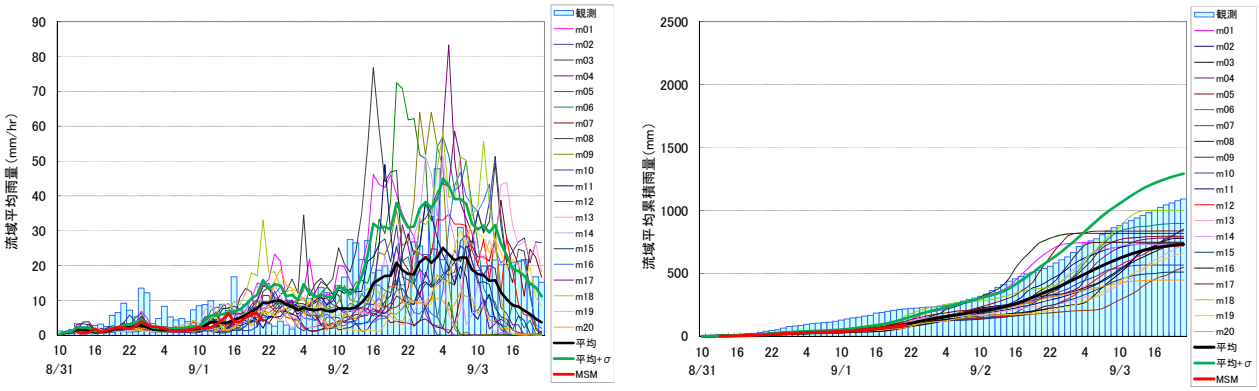


図-Ⅲ2.4.2.4.11　8 月 31 日 9 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 2 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

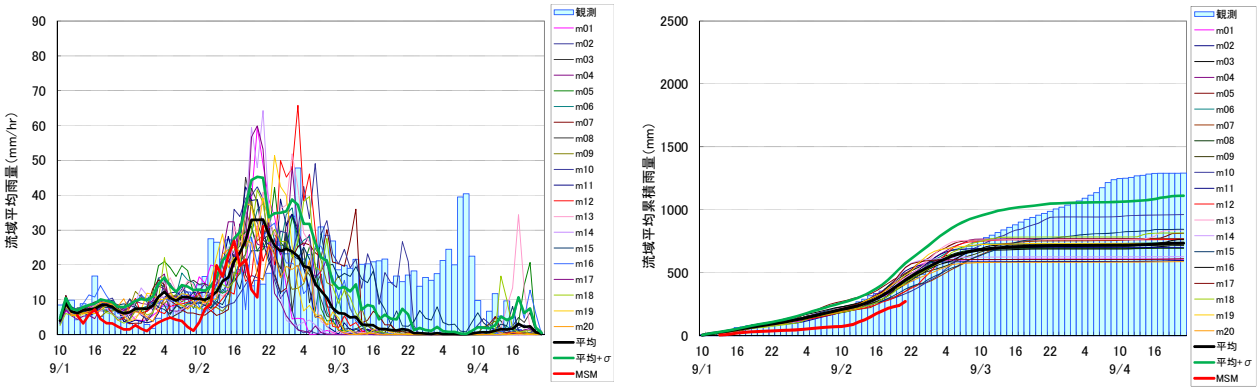


図-Ⅲ2.4.2.4.12　9 月 1 日 9 時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 2 日前）の GSM を初期値とした A ダム流域平均雨量の 84 時間予測結果（左：84 時間の時系列、右：積算雨量）

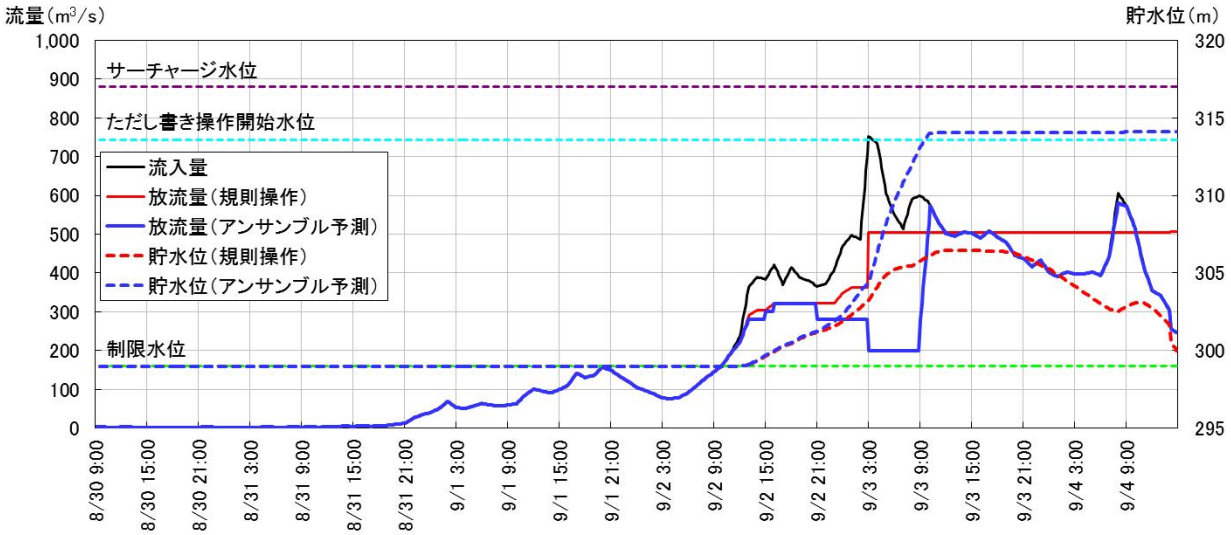


図-Ⅲ2.4.2.4.13　台風 12 号時の A ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

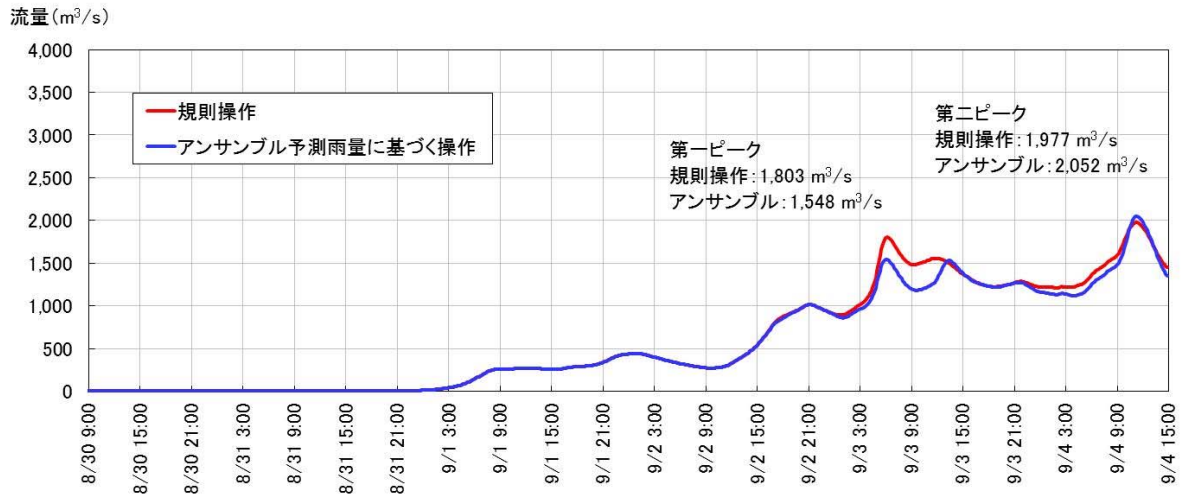


図-Ⅲ2.4.2.4.14　台風 12 号時の C 地点の流量時系列

４．２．５　考察

ここでは、台風の予測進路および速度からアンサンブル予測雨量の精度について定性的な考察を行うことで、アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関して考察を行う。

（１）アンサンブル予測雨量の精度と台風進路との関係

4. 2. 4 で記載したとおり、アンサンブル予測雨量の誤差の傾向は台風のイベント毎に異なることが分かった。台風 15 号で流入量が洪水調節開始流量に到達する約 1 日前である 9 月 20 日 3 時を初期時刻とした予測では、図-Ⅲ2.4.2.4.15 に示すとおりアンサンブル予測の進路・速さ共に概ね実際に近いことが分かる。その結果として図-Ⅲ2.4.2.4.2 に示したように予測の精度が全般的にかなり高い結果となった。次に台風 6 号の場合、実際の台風は紀伊半島近くまで南から近づいてきた後、一度南東に向けて進み出した。図-Ⅲ2.4.2.4.16 に示す 7 月 18 日 9 時を初期値とした予測では、アンサンブル予測は実際の進路よりも北寄りの進路を進み、かつ実際の進路よりも大回りしているため、実際よりも A ダム付近を通過するタイミングが遅くなり、かつ通過に長い時間を要したことから観測値よりも予測が大きくなったと考えられる。図-Ⅲ2.4.2.4.17 に示す次に台風 12 号の場合、台風本体が紀伊半島に近づいてきた 9 月 1 日 9 時を初期値とした予測では、48 時間後の予測においてはほとんどアンサンブルメンバーについて中国地方から日本海側に台風が抜けると予測されているのに対し、実際には 48 時間後においても四国の室戸岬近辺に位置している。さらに、72 時間後の予測では全てのアンサンブルメンバーの予測について台風の中心は日本海に進出して時間が経過しているのに対し、実際には中国地方をわずかに北に出た程度である。よって、実際の台風は予測よりも長い時間をかけて四国地方から中国地方を通過したものと考えられる。これによって雨が予測よりも長時間に渡って雨が降り続ける結果となった。これが先述した図-Ⅲ2.4.2.4.12 の二山目の見逃しの原因である。これはアンサンブル予測計算に用いたモデルである WRF やデータ同化手法というよりは、アンサンブル予測の境界条件として使った GSM84 時間予測がそのような予測を行っているためであると考えられる。

このようにアンサンブル予測雨量の精度は境界条件として用いている GSM の予測精度に依存しており、特に台風 12 号の二山目の降雨のように、GSM の予測が実際と著しく異なる予測を行っている場合、それを境界条件としたアンサンブル予測も全てのメンバーについて実際とは異なる結果を示す可能性がある。

（２）ダム洪水調節操作におけるアンサンブル予測雨量の利用方法に関する課題

１）アンサンブル予測雨量の精度を考慮した利用方法

(1)で述べた通り、アンサンブル予測雨量は境界値の予測精度に依存すると考えられ、予測と観測がほぼ一致する場合、予測が観測よりも大きい場合、小さい場合というように、豪雨イベントによって予測の精度が異なってくる。特に今回検討した 3 つの台風の事例の中で、ダム操作の観点から最も避けなければいけないのは台風 12 号で見られたアンサンブル予測雨量に基づく操作が著しく過小評価した結果として規則操作よりも結果が悪くなる操作である。アンサンブル予測雨量の精度が境界条件に依存し、アンサンブル予測のどのメンバーも実際の現象を予測できていないことが起こりうる。そうすると、実用化にあたっては例えば計算されたアンサンブル予測雨量の平均値よりも+σ程度大きい予測雨量を想定しておき、その予測雨量に対して提案した最適放流量決定手法を適用することが考えられる。この場合、例えば台風 12 号については洪水の前半から図-Ⅲ2.4.2.4.13 に示した放流量よりも大きい放流を行うため、洪水調節容量を温存する操作となる。結果として、アンサンブル予測雨量の全てのメンバーが二山目を見逃したとしても、温存しておいた洪水調節容量によって対応できる可能性がある。今後はこのような検討を行い、アンサンブル予測が全体的に予測を外した場合でも規則操作より下流の流量を増やさないように操作するための検討を行う必要がある。

２）アンサンブル予測雨量から得られる確率情報の利用方法

本検討で示したダム放流量の決定方法は、アンサンブル予測雨量から得られる最も発生確率が高いと予測される雨量に対して洪水調節容量を使い切る放流量を求めるものであり、洪水調節容量が不足する確率と余らせる確率は同等である。これにより、アンサンブル予測雨量から得られる雨量の発生確率情報に基づくダム操作方法の考え方について一例ではあるものの示されたと考えられる。その一方で、実際のダム操作においては予測雨量に基づいた操作を行った結果として洪水調節容量が不足する事態は避けなければいけないため、発生確率は低いものの大きい予測雨量に対して洪水調節容量を使い切る操作を実施することで洪水調節容量が不足するリスクを下げる操作も考えられる。また事前放流においては、アンサンブル予測雨量のうち発生確率が低い小さい予測雨量を想定して事前放流を実施することで利水容量が回復できなくなるリスクを下げる操作も考えられる。このように、アンサンブル予測雨量が持つ確率情報を利用することでダム操作が高度化されることが期待され、具体的な利用方法や実運用に向けて今後検討することが必要である。

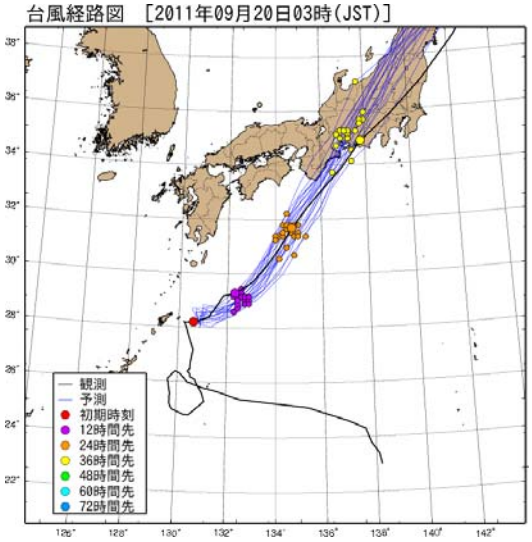


図-Ⅲ2.4.2.4.15　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風 15 号、9 月 20 日 3 時予測）

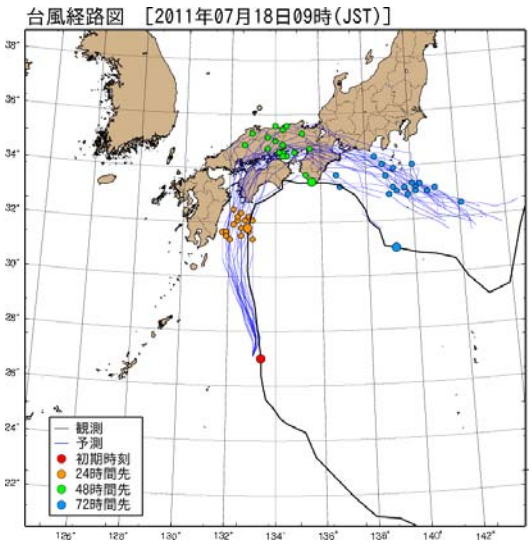


図-Ⅲ2.4.2.4.16　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風 6 号、7 月 18 日 9 時予測）

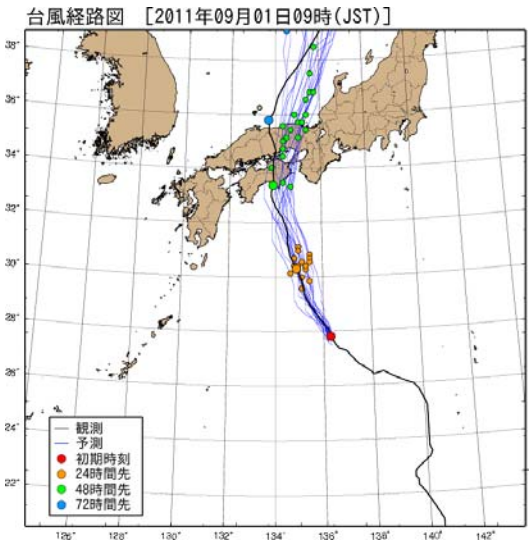


図-Ⅲ2.4.2.4.17　アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風 12 号、9 月 1 日 9 時予測）

４．２．６　まとめと今後の課題

本研究のまとめと課題を以下に示す。

アンサンブル予測雨量の計算について

- GSMの84時間予測を境界値としてWRFによりアンサンブル予測雨量を計算した結果、84時間先の雨量についてもおおよそ把握することができる可能性が示唆された。これは、気象庁のMSMの33時間予測と比較して予測先行時間が非常に長く、ダムの洪水調節操作にとって非常に有益な情報となり得る。
- アンサンブル予測の精度は境界値であるGSMの予測精度に依存する。GSMの予測精度が著しく低い場合、アンサンブル予測のほぼ全メンバーが予測をはずすことがある（台風12号の二山目）。

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作

- アンサンブル予測雨量を利用することで、下流治水基準地点のピーク流量期待値を最小化する放流量を自動的・機械的に算出することができる。予測雨量に基づいて洪水調節操作を行う場合、現在は属人性が入り込む余地が少なからず存在していたが、この手法により自動的・機械的に放流量を決定することが可能となり、属人性が排除される。
- 台風6号､15号についてはアンサンブル予測雨量を活用した洪水調節操作によって規則操作よりも効果的な操作が行えることが分かり、規則操作と比較して下流基準地点のピーク流量を10%程度低減することができた。
- 台風12号では、アンサンブル予測雨量のほぼ全メンバーが二山目のピーク見逃すことから、一山目の流出に対して洪水調節容量を使い切ってしまい、予測で見逃した二山目についてはただし書き操作を行い、洪水調節できなかった。その結果として下流のピーク流量を規則操作と比較して増加させてしまった。アンサンブル予測雨量が全体として精度が低くなった場合においても規則操作と比較して下流の流量を増やさないような操作を今後検討する必要がある。

また、本研究で実施した内容はリアルタイムでのダム洪水調節操作を指向した手法であるが、リアルタイム運用を行うにはアンサンブル予測雨量の計算に時間を要するため、今後はリアルタイム運用に向けた課題整理を併せて検討する必要がある。

参考文献:

青山俊樹(2007) 大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザバー、pp.1-2.

秋葉雅章、腰塚雄太、宮本守、戸谷英雄、佐藤直良、山田正(2004) 流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第 10 巻、pp.89-94.

猪股広典、深見和彦(2007) 吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発、河川技術論文集、第 13 巻、pp.433-438.

柏井条介、土屋修一、石神孝之(2008) 気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20 による評価を中心にー、国土技術政策総合研究所資料、第 462 号.

北田悠星、菊地慶、岡部真人、山田正(2010) 気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案、水工学論文集、第 54 巻、pp.523-528.

国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所(2010) 平成 22 年 7 月 14 日～14 日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成 22 年 7 月 15 日

国土交通省東北地方整備局(2011) 台風 15 号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成 23 年 9 月 23 日

腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田正(2006) 確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会

佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也(2008) 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、第 21 巻、4 号、pp.296-313.

下坂将史、呉修一、山田正、吉川秀夫(2009) 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集 B、Vol.66 No.2、pp.106-122.

鈴木俊朗、寺川陽(1996) 実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発、土木技術資料、第 38 巻、10 号、pp.26-31.

戸谷英雄、秋葉雅章、宮本守、山田正、吉川秀夫(2006) ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案　土木学会論文集 B Vol.62 No.1、pp.27-40.

鳥居謙一(2012) ダム管理の高度化に向けて、土木学会水工学に関する夏期研修会講義集
鳥居謙一、猪股広典(2012) 予測降雨を活用したダム洪水調節効果の評価、国総研レポート 2012、pp.95.
三石真也、尾関敏久、角哲也(2011) WRF による降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討、水文・水資源学会誌、第 24 巻、2 号、pp.110-120.
三石真也、角哲也、尾関敏久、矢神卓也(2011) 降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究、ダム工学、第 21 巻、4 号、pp.242-250.
森英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治(2008) ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会、pp.II-59.
和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介(2004) 気象予測データの利用可能性に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第 210 号.
和田一範、村瀬勝彦、冨澤洋介(2005) 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集 No.796、II-72、pp.23-37.
吉野純、飯田潤士、安田孝志(2011) モデルアンサンブル予報による 2010 年 7 月可児豪雨の予測可能性、水工学論文集、第 55 巻、S475-S480.
Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K.(1992) Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, 28(4), pp.1015-1031.
Hiromu Seko, Takemasa Miyoshi, Yoshinori Shoji, Kazuo Saito (2011) Data assimiliation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, Tellus, 63A, pp.402-414.
IPCC Working Group II (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability
Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill (2008) A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part I: Observing System Simulation Experiment, Monthly Weather Review, Vol.136, pp.5116-5131.
Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill (2008) A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part II: Real Observation Experiments, Monthly Weather Review, Vol.136, pp.5132-5147.

４．３　既設ダムの再編・再開発

４．３．１　ダム再開発の必要性

近代的な設計理論に基づくダム建設の歴史を振り返ってみると、明治から大正時代にかけては発電のみのダムが中心であり、更に第二次大戦の戦前及び戦後の十数年間は、洪水調節と発電を目的としたダムが多い。その後、昭和 30 年代後半から現在に至るまでは洪水調節、水道用水、工業用水の供給を目的とするダムが数多く建設された。

これらのダムは、いずれも各時代の社会的要請に基づき建設されたものであり、ダム計画にあたっては、目的に合った構造及び形式を選択し、地形・地質及び社会的条件から最も開発効率の高いダムが建設されている。

しかし、ダム竣工後において、その後の社会的要請の変化に伴い、洪水調節機能の増強や、水道用水や工業用水の供給量の増加及び発電機能の増大などの要請が生じ、これらの要請に対応するため貯水池容量を増大し、流水を有効に利用するためにダムの再開発が必要とされた例も多々ある。

また、ダム建設の進展とともに、地形・地質の条件に恵まれたダムサイトは減少してきている。一方、ダム技術の進展は目覚ましく、例えば、ダム建設当時には不可能であった基盤地盤改良が、最近の土木技術によると可能となり、既設ダムのダム高さより十分高いダムの建設が可能となる場合もあり得る。このような場合、新しいダムサイトに新規にダムを建設するよりも、既設ダムを改築する方がより開発効率が高くなることがある。

更に、我が国は、近年急速な高齢化が進行しており社会資本への投資余力が減少してきていることや近年の自然環境保全に対する社会的要望の高まりから、新規にダムを建設することが困難になってきている。このため、将来の治水利水の需要に対応するため、貴重な社会資本ストックである既設ダムを効率的に利用することが求められる状況が生じている。気候変動に伴う豪雨の激甚化に備え、既存ダムの洪水調節機能を向上させることを考えると、ダムの再開発による機能向上も選択肢の一つとなる。

以上述べたように、社会的な状況の変化及びダムの設計・施工技術の進展が相まってダム再開発の要望が高まってきている。ここでは、現在実施中のダム再開発事例について、特に治水面に焦点を絞って紹介する。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型の Ⅰ～Ⅰ$^{+}$に相当する（2.2.2(1)）。

４．３．２　ダム再開発の種類および現在実施中のダム再開発事例

既設ダムの主な再開発は、1) 貯水池容量を増大させる方法、および 2)現行の貯水池の運用を変更する方法の 2 通りがある（財団法人ダム技術センター2005）。1)の具体的な方法としては、①ダムの嵩上げ、②貯水池の掘削、③取水設備、放流設備の改良、④容量の再配分がある。2)については、取水設備、放流設備の新設あるいは改造による貯水池運用を変更する方法、あるいは貯水池容量の再配分による貯水池の運用を変更する方法が挙げられる。ここで運用とは、前節で述べたような操作の高度化は含まないものとする。上記①～④の内容については財団法人ダム技術センター（2005）を参考にしていただき、ここでは現在進行中の治水機能向上に関わるダム再開発の事例として、①津軽ダム、②鹿野川ダムおよび③鶴田ダムの事例を紹介する。

①　津軽ダム（ダム嵩上げ）

津軽ダムの建設が予定されている岩木川は、青森・秋田両県境に位置する世界自然遺産白神山地の雁森岳（標高987m）に源を発し、流域面積2,540km^2、流路延長102kmの一級河川である。大正

7年に直轄事業となり暫時下流部から河川改修工事が実施されてきたが、その後度重なる水害に見舞われ1次、2次と改修計画は変遷し、昭和35年には目屋ダムが完成した。目屋ダムが完成していたものの、度重なる計画規模を上回る洪水の発生を受けた。完成から48年の間に、目屋ダムの計画高水流量500m³/sを上回る洪水が21回発生し、たびたび洪水被害が発生した（図-Ⅲ2.4.3.2.1）。

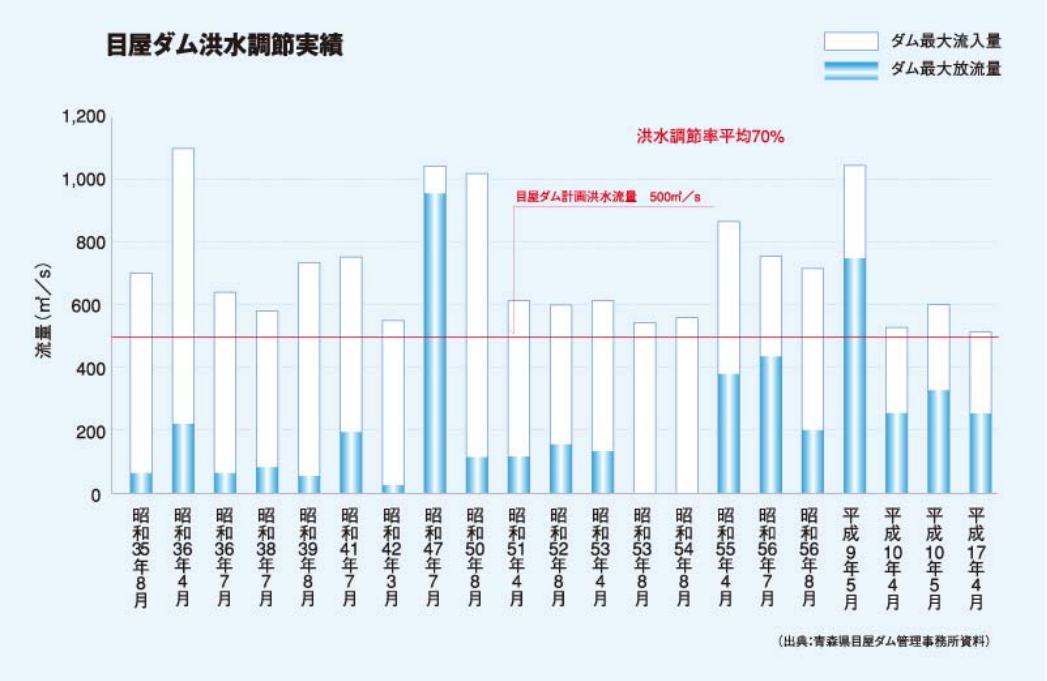


図-Ⅲ2.4.3.2.1　目屋ダムの洪水調節実績（国土交通省津軽ダム工事事務所）

このような状況の中で津軽ダムは、当初昭和48年3月の岩木川水系工事実施基本計画の第1次改定における目屋ダムの洪水調節ルールの変更（ゲート改造等）によるものと位置づけられていたものである。その後、旧建設省及び青森県において、ゲート改造、ダム嵩上げ、上流ダムとのシリーズ化等、第1次改定に基づいた検討を行った結果、既設ダムを再開発することが、治水・利水計画上の必要容量を確保でき、地形地質上からも基礎地盤が良好で特に問題がなく建設可能であり、技術的・社会的・経済的にも有利であると判断されたことから、現目屋ダム地点に新たに建設される計画となった。津軽ダムは、高さ97.2m、堤頂長342mの規模で築造され、総貯水容量140,900,000m³（うち、洪水調節容量50,000,000m³）の貯水池を設けた多目的ダムであり、洪水調節についてはダム地点の計画高水流量3,100m³/sのうち、2,940m³/sの洪水調節を行い岩木川沿岸の洪水被害の低減を図ることとなっている。図-Ⅲ2.4.3.2.2および表-Ⅲ2.4.3.2.1より、津軽ダムの洪水調節機能は目屋ダムよりも大幅に増強されていることが分かる。

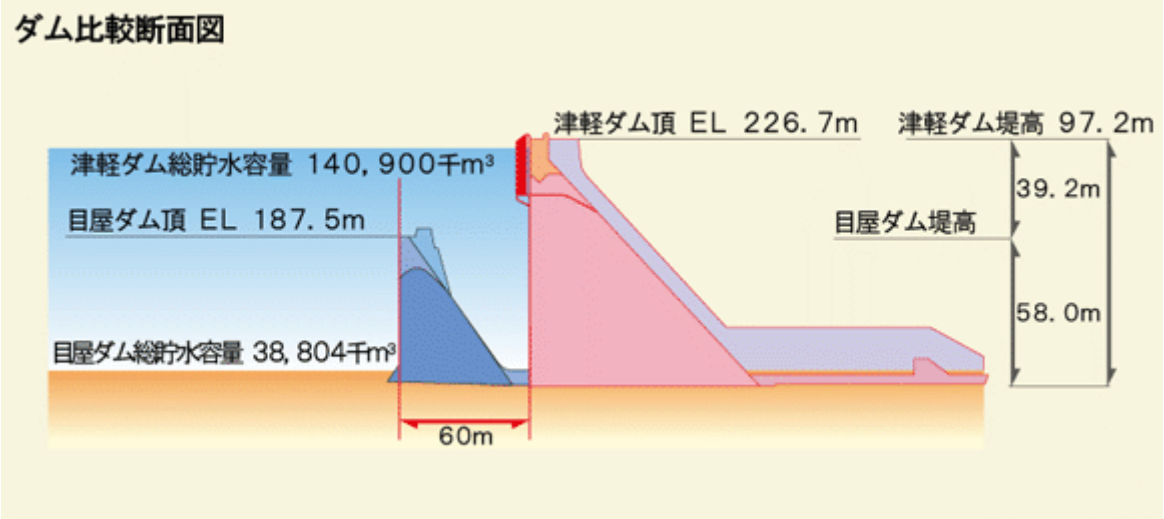


図-Ⅲ.4.3.2.2　目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

表-Ⅲ.4.3.2.1　目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

	目屋ダム	津軽ダム	比較
型式	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	
目的	洪水調節、かんがい、発電	洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道、工業用水道、発電	
堤高	58.0 m	97.2 m	1.7倍
堤頂長	170.0 m	342.0 m	2.0倍
堤体積	118,050 m^3	717,000 m^3	6.0倍
総貯水容量	38,804,000 m^3	140,900,000 m^3	3.6倍
有効貯水容量	33,000,000 m^3	127,200,000 m^3	3.9倍
集水面積	172.0 km^2	172.0 km^2	
湛水面積	2.1 km^2	5.1 km^2	2.4倍
完成年月	昭和35年3月	平成28年度（予定）	

② 鹿野川ダム（容量再配分、および放流設備の改良）

鹿野川ダムは、肱川水系肱川の愛媛県大洲市肱川町山鳥坂地先に、洪水調節、発電を目的に高さ61m、総貯水容量48,200,000m^3、有効貯水容量36,200,000m^3の重力式コンクリートダムとして昭和34年に建設された。しかしながら、肱川流域では近年において激特事業が採択された平成7年7月洪水をはじめ、平成16年8月、平成23年9月などに甚大な被害が発生した。特に平成16年の戦後2番目の規模となる台風16号の大洪水では、浸水家屋914戸、氾濫面積853haの被害が発生し、地域住民からの早急な治水対策が強く望まれている。このような背景から鹿野川ダムは平成16年に策定された肱川水系河川整備計画に基づき、ダムの治水機能の増強、流水の正常な機能の維持、ならびに貯水池および放流水の水質改善を目的とした改造事業を行っている。特に治水については大洲地点における戦後最大洪水5,000m^3/sに対して既設ダム及び鹿野川ダム改造、山鳥坂ダムの建設で、1,100m^3/sの調節を行い、肱川下流全川に渡り洪水位の低下を図ることとなっている（図-Ⅲ2.4.3.2.3）。

鹿野川ダムの治水機能を増強するためダムの貯水容量を再編し、発電容量、死水容量を廃止し一部を洪水調節容量に振り替え、併せて洪水調節の開始水位を下げることにより洪水調節容量を現在の約1.4倍に増強することとしている（図-Ⅲ2.4.3.2.4）。しかし、鹿野川ダム天端に設置されている既設の洪水用ゲート（クレストゲート）では、洪水調節を開始する水位まで下げても現在の放流設備では放流能力が小さいため、洪水調節容量増強の効果を発揮できない。そこで、トンネル洪水履きを新設することにより放流能力を上げ、洪水調節容量の効果的な活用を図っている（図-Ⅲ2.4.3.2.5）。トンネル洪水吐きは、トンネル部の延長約457m、トンネル内径11.5m（標準部）、放流能力約1,000m³/s（最大）の規模である。

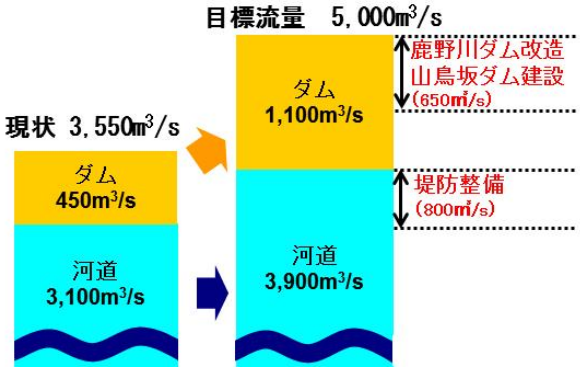


図-Ⅲ2.4.3.2.3 河川整備計画における目標流量への対策イメージ（吉岡 2013）

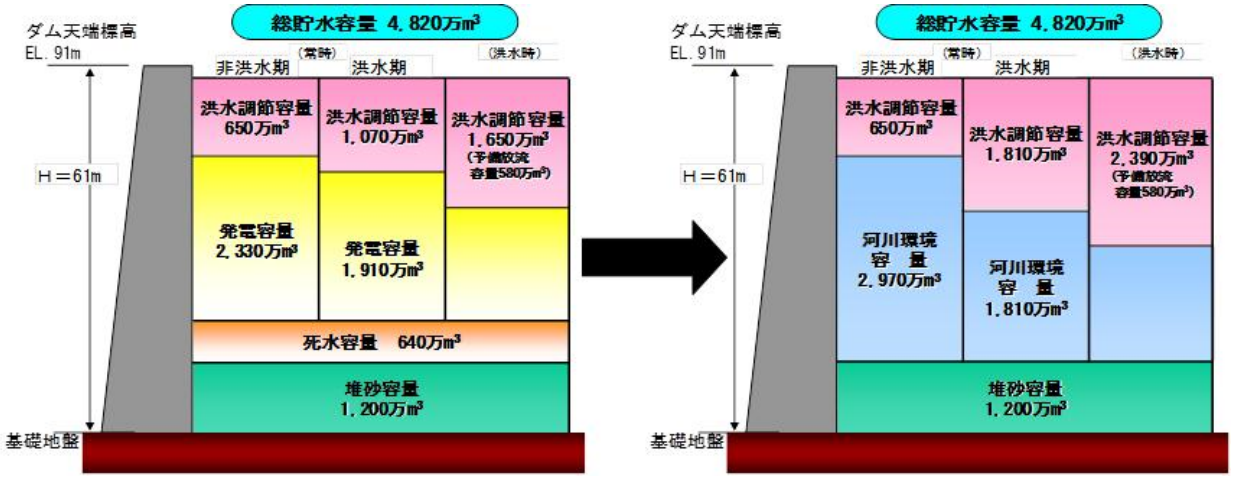


図-Ⅲ2.4.3.2.4 鹿野川ダム容量変更配分図（吉岡 2013）

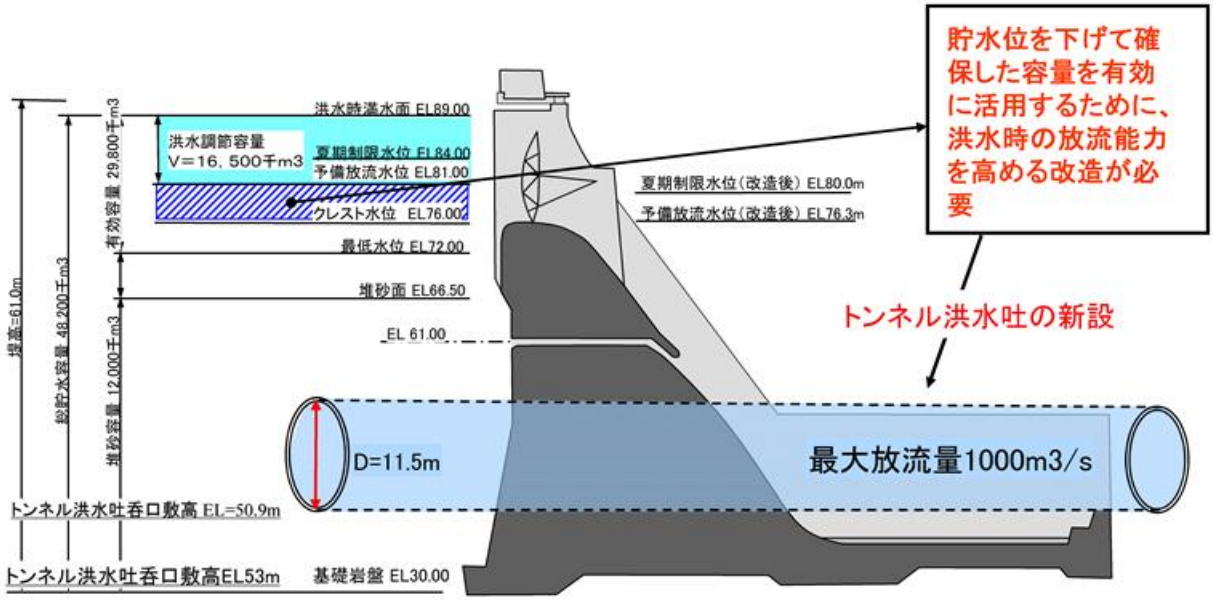


図-Ⅲ2.4.3.2.5 トンネル洪水吐き配置図（イメージ）（吉岡 2013）

③ 鶴田ダム（容量の再配分、および放流設備改良）

川内川は熊本、宮崎、鹿児島の 3 県を貫流して薩摩灘へ注ぐ幹線流路延長 137km、流域面積 1,600km^2 の一級河川であり、鶴田ダムは川内川のほぼ中央、河口から約 51km に位置する昭和 41 年に完成した洪水調節と発電を目的としたダムである。この川内川流域では、平成 18 年 7 月 19 日から 23 日にかけて記録的な豪雨に見舞われ、特に宮崎県えびの市の西ノ野雨量観測所では、この 5 日間だけで全国平均の年間総雨量の 70%、鹿児島市の年間総雨量の 50%に相当する 1,165mm という雨量が観測された。河口から約 38km に位置する鹿児島県さつま町の宮之城水位観測所では、計画高水位を 2.92m も超過し、11.66m に達した。この既往最大の洪水により川内川流域全体の 3 市 2 町において浸水家屋 2,347 戸におよぶ甚大な被害が発生した。鶴田ダムは、この洪水において東京ドーム約 60 個分に相当する 7,500 万 m^3 の洪水を貯留し、下流の河川に流れる水の量を少なくして洪水被害を軽減させた。具体的には、洪水調節を行わなかった場合と比較して、上述の宮之城水位観測所で最高水位を 1.3m 低下させ、最高水位に達する時間を約 4 時間遅らせる効果を発揮した。水害直後は鶴田ダムに対する批判的な意見もあったが、最終的には地元から「鶴田ダムの洪水調節容量を増やして、治水機能を強化してほしい。」という要望が出され、平成 19 年度より鶴田ダム再開発事業に着手した。

治水機能を高めるためには洪水調節容量を増やす必要がある。そこで、洪水期の発電容量（250 万 m^3）と死水容量（2,050 万 m^3）の合計 2,300 万 m^3 を洪水調節容量に振り替えることにより洪水期の洪水調節容量を最大 7,500 万 m^3 から最大 9,800 万 m^3 に増量することとした（図-Ⅲ2.4.3.2.6）。これにより、洪水期の最低水位は現在の標高 130.0m から標高 115.6m まで 14.4m 低下することになる。しかし、既存の放流施設では常用洪水吐の敷高が 117.96m であるため、最低水位である 115.6m から 117.96m までの間は放流を行うことができず、洪水調節操作開始までにこの間の容量を使用してしまうことになる。さらに、水位が 117.96m に到達したとしても、水位が低いと十分な量を放流することができないため、やはり洪水調節操作開始前までに容量を使用してしまうことになる。洪水調節操作開始まで容量を温存するためには、水位が低い状態においても十分な放流が行うことが可能な放流施設が必要である。そのため、現在の放流施設より低い位置の右岸側に新たな

放流施設（コンジットゲート３門）を増設して放流能力の増強を図ることとした。新しい位置に放流施設を増強すると、この放流施設からの流水は既存の減水工を通過しなくなるため、既存の減勢工のとなりに新たな減勢工を設置することとした（図-Ⅲ2.4.3.2.7）。

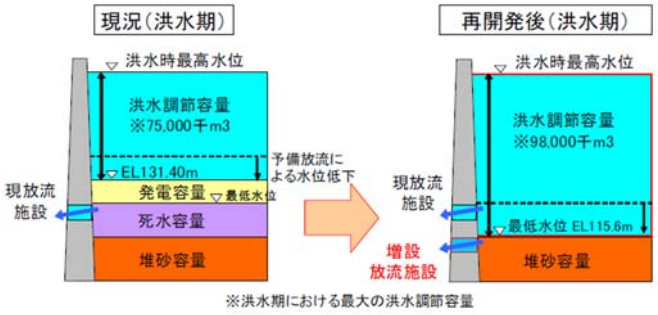


図-Ⅲ2.4.3.2.6　再開発事業による容量と放流施設の変更イメージ（国土交通省川内川河川事務所）



図-Ⅲ2.4.3.2.7　再開発事業の全体イメージ図（国土交通省川内川河川事務所）

参考文献：

国土交通省川内川河川事務所：鶴田ダム再開発事業の概要、
http://www.qsr.mlit.go.jp/sendai/tsuruta-damu/pdf/gaiyou.pdf
国土交通省津軽ダム工事事務所：http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/dam/dam_baton_03.html
財団法人ダム技術センター(2005) 多目的ダムの建設、第５巻設計 II 編、pp.230-231
吉岡修一(2013) 鹿野川ダム改造事業「トンネル洪水吐き」、四国技報、第 12 巻 24 号、pp.28-31

４．４　遊水機能の維持・活用

４．４．１　はじめに

気候変動に伴う洪水流量の増大に対して河道改修や洪水調節施設等の河川整備で対処するには、完成まで相当の期間と費用・労力を要すること、また施設は一義的には計画規模の範囲内での効果発揮を確保するためのものであることから、それを超える外力への対処の検討にあたっては、それ以外の様々な施策を総動員する必要があることは、2 章で述べた通りである。施設の能力を上回る外力に対する減災のためにも、氾濫原にあって氾濫の拡大を抑制する機能を有している自然堤防や連続盛土等については、これらによる氾濫拡大の抑制効果を評価し、必要に応じてその保全を図るべきであり、さらに、河川等の担当部局とまちづくり・地域づくりの担当部局が連携し、様々な法令による規制・誘導や事業の実施などにより、災害リスクを踏まえたまちづくり・地域づくりを促進する必要があるとされている（社会資本整備審議会、2015)。

流域における治水対策としては、河川への流入量を抑制する流域貯留対策や、氾濫を制御・誘導することにより氾濫による影響を軽減する氾濫原減災対策が挙げられる。しかしながら、これらの対策は地権者等の利害関係者の合意を得ることが難しいこと等が原因で、進捗が芳しくないケースも見受けられる。

本研究では、氾濫を考慮した治水施策の推進に向け、流域における治水対策の事例として、上記２者のうちの後者、すなわち、既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例や浸水被害軽減のための建築・土地利用規制の制度化に関する事例を調査した成果（小野田、2012）を踏まえて、施策実施のための地域状況要件や施策推進に向けての論点整理を行った。さらに、遊水機能を活用した治水事例について、様々な確率規模での氾濫計算に基づいて被害額の試算を行い、2.2 で述べたような被害と豪雨規模（超過確率年）との関係図での整理を踏まえ、遊水機能の確保と連続堤防の整備と比較し、治水検討フレームの検討実例として示した。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型のⅠ⁺、Ⅱ、Ⅲに相当すると考えられる（2.2.2(1)）。

４．４．２　流域における治水対策の事例

（１） 遊水機能の維持・活用事例

まず最初に、流域における治水対策の事例として、既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例を紹介する。

１） 北太田・君島地区水防災対策特定地域（茨城県桜川）

利根川水系桜川は桜川市鍬柄山（標高 274.5m）に源を発し、筑西市、つくば市、土浦市を流下し霞ヶ浦に注ぐ流域面積 349km²、流路延長 64km の茨城県を代表する河川の一つである（図-Ⅲ2.4.4.2.1）。上中流部の氾濫原は農地と小集落が存在し、下流部の氾濫原は土浦市街地となっている。

桜川においては、昭和 61 年 8 月台風 10 号により、床上床下あわせて約 1,500 棟の大規模な浸水被害が発生した。この水害を契機として、桜川地域水防災対策計画が平成 7 年に策定されたが、下流側に位置する土浦市街地の治水安全度を低下させないため、同地区においては、河道改修の実施計画としては暫定計画（年超過確率 1/5）を目標とし、暫定計画河道完成後の宅地等については輪中堤により年超過確率 1/30（将来計画規模と同様）の安全度を確保し、遊水機能を有する図-Ⅲ 2.4.4.2.2 の範囲を「計画高水時に浸水する水防災対策特定地域」として設定している。

水防災対策特定地域は市街化調整区域、農振農用地区



図-Ⅲ2.4.4.2.1　桜川流域図

（茨城県資料をもとに作成）

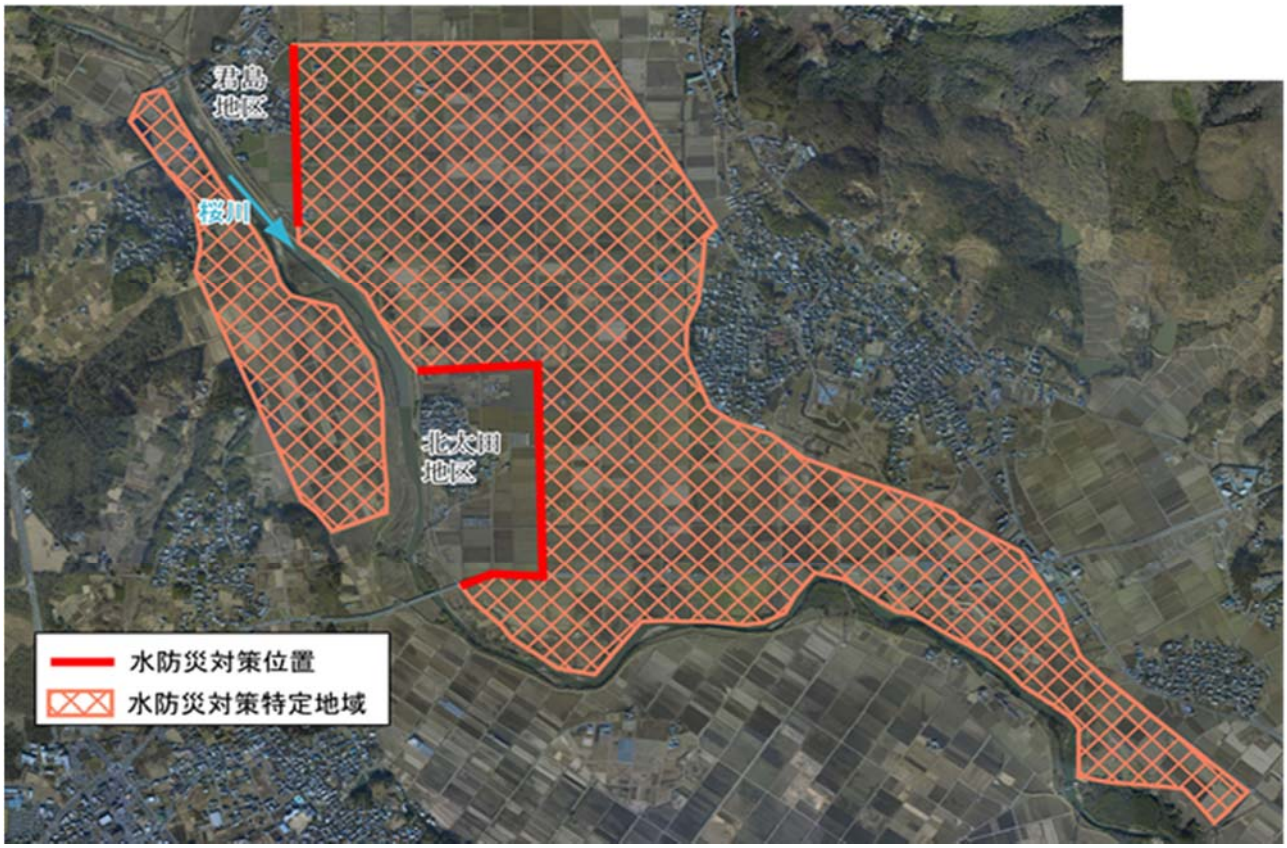


図-Ⅲ2.4.4.2.2　北太田・君島地区水防災対策特定地域位置図

（関東地方整備局：平成１８年度関東地方整備局管内河川航空レーザー測量業務のオルソ画像を使用）

域に指定されており、遊水機能を有する区域が農地として維持されている。

また、輪中堤よる堤内地の排水不良を軽減するため、北太田・君島両地区では排水設備が整備された。

北太田地区の遊水機能の被害軽減効果については飯野等が試算しており（飯野・伊藤、2012)、例えば年超過確率 1/30 の洪水に対して、流域全体での被害額が現計画堤防高による連続堤防で整備するケースよりも 40 億円程度小さくなり、上流の氾濫による被害以上に下流側の被害軽減効果が大きいことが分かる。なお、さらに詳細な分析は 4.4.3 で改めて述べる。

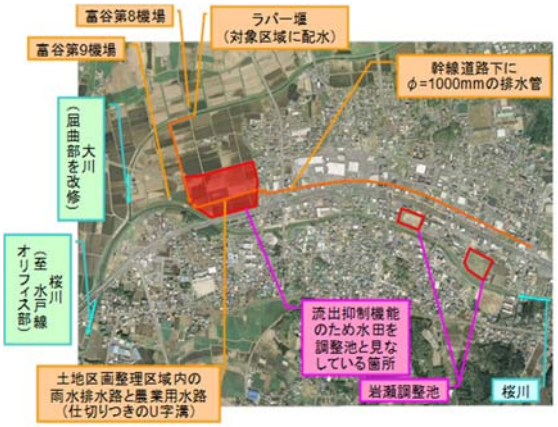


図-Ⅲ2.4.4.2.3　岩瀬駅前土地区画整理事業における防災調整池位置図（茨城県資料をもとに作成、国土地理院撮影の空中写真（2008 年撮影）を使用）

２）岩瀬駅前土地区画整理事業（茨城県桜川）

旧岩瀬町（現桜川市）は茨城県の北西部に位置する。岩瀬駅前地区は JR 岩瀬駅の北方約 200m に位置し、国道 50 号バイパスに伴うスプロール化を防ぐために道路、公園、緑地水路等の公共施設の整備・改善、宅地整備より構成される土地区画整理事業が昭和 53 年に計画・立案され、平成 4 年に事業が完了した。同事業においては、防災調整池が計 3 箇所設置されたが、2 箇所は通常の調整池として市街地に整備され（図-Ⅲ 2.4.4.2.3 中「岩瀬調整池」箇所)、残る 1 箇所については通常の調整池を整備する代わりに、水田を調整池とした。

調整池として位置づけられた水田がある地区は、桜川と大川との合流点付近に位置しており、当該地域の下流にある JR 水戸線のオリフィス部（図-Ⅲ2.4.4.2.3 の桜川下流端よりさらに下流）が流下能力のボトルネックとなっていることもあり、出水時には地域一帯が湛水する浸水常襲地域であった。また、この水田は市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、遊水機能は将来的に維持されると期待できる。

計画時には湛水による米の減収が懸念されたが、排水用のコールゲート管を設置して出水後に湛水を速やかに解消する対策をしており、米の生産への影響を軽減させることにより地権者に容認されたと見られる。

３）岩脇・西円寺地区越流堤（滋賀県天野川）

天野川は米原市内を流れ、流域面積 111.6km²、幹川流路延長 19.0km の河川である。流域は伊吹山や霊仙山などの起伏のある山を抱いているが、天野川流域は古来より河道周辺に広がる土地を開拓するなど、勾配の緩やかな水田が広がっており、主に農地と宅地で構成されている（図-Ⅲ2.4.4.2.4)。

岩脇地区（宅地）と西円寺地区（農地）は 3.6k 左岸付近に位置し、西円寺地区に面する近江橋から箕浦橋までの区間の堤防の高さがその上下流に比べて低く、国道 8 号と東海道本線に囲まれている低地が自然遊水地となっている（図-Ⅲ2.4.4.2.5)。

西円寺地区で遊水機能を維持することで、直下流の岩脇地区や対岸の箕浦地区の宅地における浸水リスクが軽減されている。

遊水機能を有している西円寺地区は、市街化調整区域、農振農用地区域となっており、開発が抑制されている。また、西円寺地区の水田は、元来から良田ではないこと、西円寺地区の営農者（兼業農家）自身が箕浦地区や岩脇地区の住民であり、水田の湛水により自宅のリスク低減効果があることを認識した上で、営農を続けている。



図-Ⅲ2.4.4.2.4　天野川流域図
（滋賀県資料を元に作成）



図-Ⅲ2.4.4.2.5　岩脇・西円寺地区位置図
（滋賀県資料をもとに作成、国土地理院撮影の空中写真（1996 年撮影）を使用）

（２）浸水被害軽減のための建築・土地利用規制の制度化に関する事例

次に、まちづくり・地域づくりの担当部局との連携により、施設能力を上回る洪水外力の発生時においても減災を図ることを目的とした、建築や土地利用規制の制度面からの取り組みの事例を紹介する。これらは、現在進めつつある治水施設の整備をもってしても防ぎきれない浸水リスクが残ることを認識しつつ、更なる開発圧力のもとで従来の市街化調整区域・農振農用地区域の開発規制や災害区域の設定による建築規制といった既存制度で規制が困難なものに対する上乗せ・横出しの規制の役割を担っているものと理解できる。(1)で紹介した遊水機能の維持・活用を直接担う制度ではないが、浸水リスクの残余を前提として、少なくとも人為的な要因による被害リスクの増大をできる限り抑制しようとする取り組みであり、流域における氾濫を考慮した減災対策のもう一つの方向性を示す事例である。遊水機能を維持・活用する施策を今後推進していく上で、このような制度と一体的に進めることも有効と考えられることから、ここに紹介する。

１）草津市建築物の浸水対策に関する条例

草津市は滋賀県の南東部、いわゆる湖南地域にあり、京都・大阪都市圏のベッドタウンとして発展し、大学や大手企業等の工場が立地する。開発圧力が高い地域であるが、梅雨期や台風時には田畑や道路が冠水し、住宅の一部が浸水する等の内水氾濫がしばしば発生している。

草津市では、市街地での浸水対策を推進するために、「建築物の浸水対策に関する条例」を制定し、平成 18 年から施行している（草津市）。

この条例では、市民及び事業者は、建築物の浸水に対する安全性の確保その他の浸水対策を行うよ

うに努めるものとされている。また、図-Ⅲ2.4.4.2.6 に示すように、水害時に防災活動拠点、避難場所となる施設を特定建築物として位置づけ、特定建築物の新築・改築は届出の対象となる他、非常用電気設備等の電気設備関係を設置する場合は想定浸水深を考慮し、地下室を設ける場合は浸水を可能な限り生じさせない構造とすることが義務づけられている。特定建築物以外の一般建築物では、「浸水のおそれのある区域」（図-Ⅲ2.4.4.2.7 参照）において地下室あるいは非常用エレベーターを設置する場合は届出の対象となる。

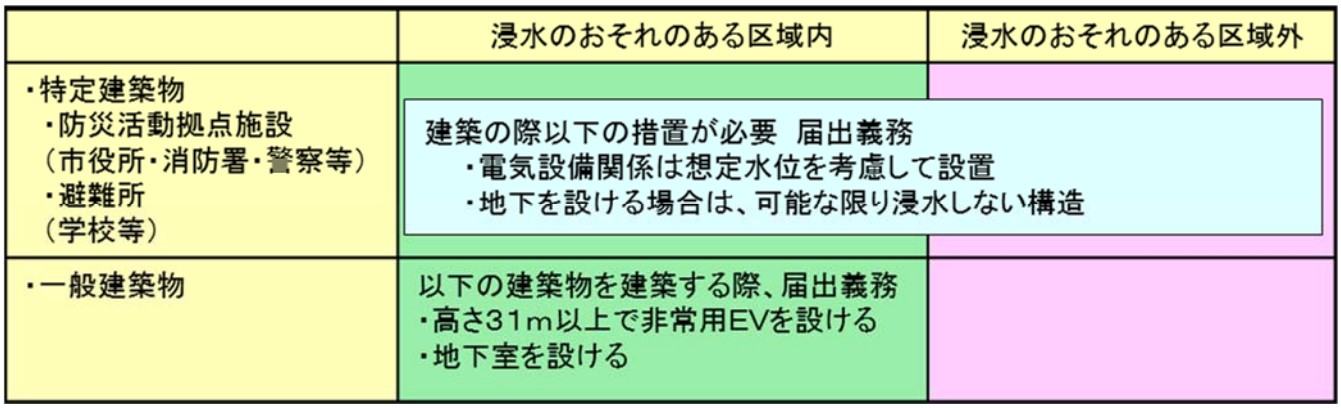


図-Ⅲ2.4.4.2.6　草津市建築物の浸水対策に関する条例に定める必要な措置と届出
（草津市都市建設部：草津市における地域防災の取り組み（流域治水シンポジウム）に加筆）

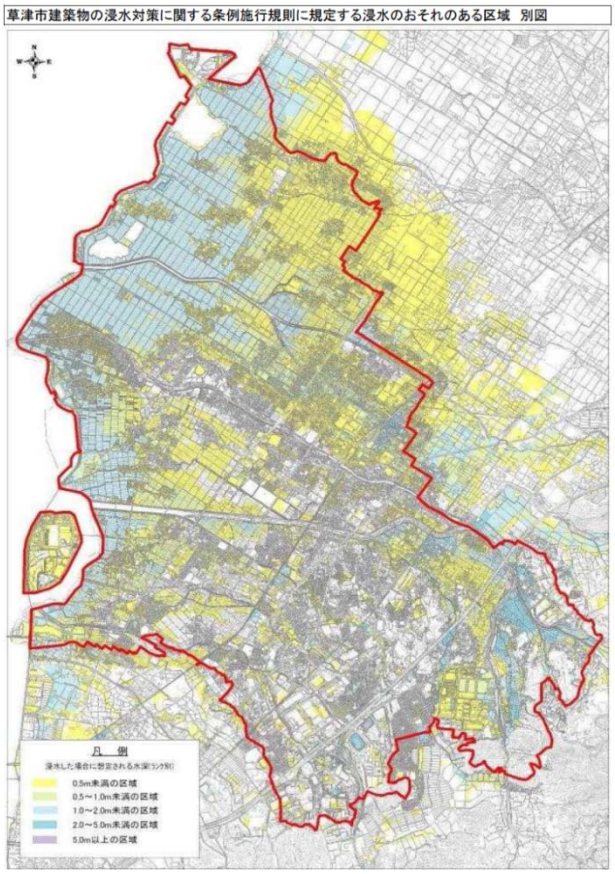


図-Ⅲ2.4.4.2.7　草津市建築物の浸水対策に関する条例施行規則に規定する浸水のおそれのある区域
（草津市 HP より引用）

２） 雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（埼玉県）

埼玉県では、高度成長期以降に急速に都市化が進展したことにより、特に地形的に浸水しやすい中川低地や荒川低地を中心に、甚大な水害が幾度となく発生している。このような状況に対し、水害の都度、災害復旧事業による再度災害防止対策を実施するとともに、予防保全的な治水対策が強力に推進されてきた結果、浸水戸数は着実に減少してきているものの、その整備水準は低く、依然として河川改修が進んでいない流域では浸水被害が頻発している。

埼玉県は昭和 43 年より、1ha 以上の開発行為の際に、調整池等の雨水流出抑制施設の設置を指導してきたが、流域における浸水被害対策を一層強化するため、行政指導の内容をより明確にし、公平性、厳格化を図るとともに、浸水被害の発生、拡大を抑制するために平成 18 年に「埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例」を制定した（図-Ⅲ.2.4.4.2.8 参照）。その内容は、1ha 以上の開発行為に伴う流出増対応の調整池設置義務付け及び湛水想定区域（現在の河川整備状況を踏まえ、過去における洪水の状況を基に、湛水することが想定される区域として知事が指定する区域）での盛土の抑制等である。

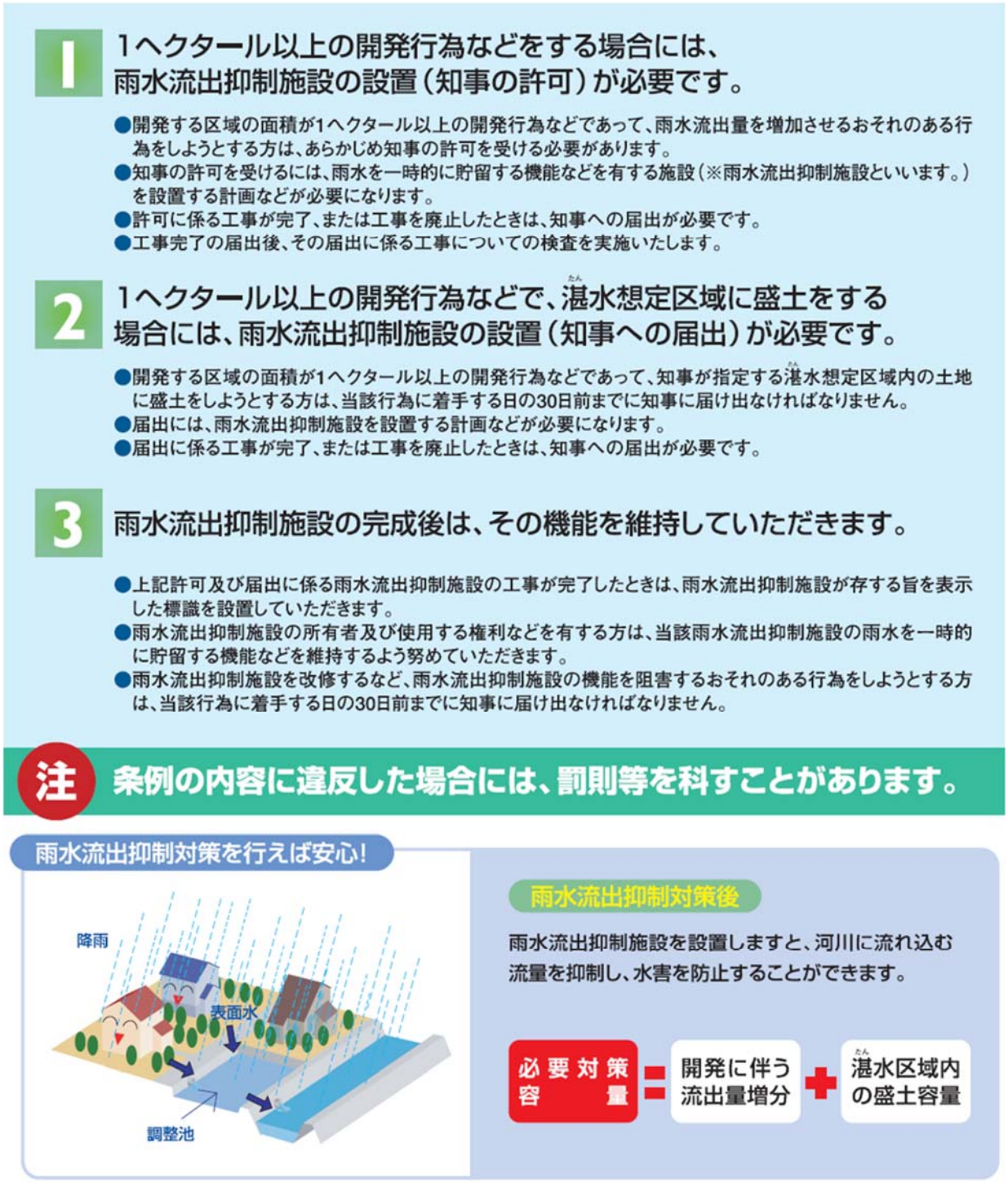


図-Ⅲ2.4.4.2.8　埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例の主な内容
（埼玉県：安心・安全な暮らしのために　埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（パンフレット）より抜粋）

（３）まとめ

4.4.2 では、流域における治水対策の事例として、(1)遊水機能の維持・活用に関する事例、および、これら事業とあわせて検討されるべき、(2)浸水被害軽減のための建築・土地利用規制の制度化に関する事例を紹介した。これらを踏まえ、施策を可能とした地域条件の類似点の抽出を後述する 4.4.4(1)で

行っている。また、今後、気候変動に適応するため、水田等の遊水機能を活用した流域貯留対策や、輪中堤や土地利用規制等氾濫流を制御・誘導する対策も含めて、総合的に対応していく必要がある。そのため、防災・減災の観点がより考慮されるまちづくり・地域づくりとの連携が重要となり（社会資本整備審議会 2015)、都市部局や農業部局等と調整図りながら総合的な治水対策を行っていくことが益々求められよう。

４．４．３　モデル河川における遊水機能の分析・評価

気候変動適応策として期待される流域治水施策の一つとして、4.4.2(1)で紹介した事例にあるように、遊水機能を有する土地の保全・活用が挙げられるが、降雨規模の増加に対する遊水機能の変化や流域全体の被害軽減への寄与度について検討された事例は少ない。本研究では、ケーススタディ地区を対象に、遊水機能を有する土地について、気候変動による外力増加も含めた遊水機能の定量的評価を行った（国土技術政策総合研究所気候変動適応研究本部、2013、飯野・伊藤、2012)。

（１） ケーススタディ対象河川・地区の選定

対象河川は、ダム等の洪水調節施設が存在せず、遊水機能と被害軽減効果の関係が比較的把握しやすいと考えられる桜川（図-Ⅲ2.4.4.2.1）を選定した。桜川は、田畑が広がる上流部は無堤区間、小集落が散在する中流部は一部無堤区間と輪中堤、市街地を有する下流部は有堤区間となっている。目標としている治水安全度は年超過確率 1/30 であるが、中上流区間では水防災事業が実施されたことを織り込んで、河道からの氾濫生起確率年は 10 年程度となっている。

（２） 桜川流域の概要

桜川流域の地形は、山地、台地、沖積低地に大別され、筑波山などの山地部を除き、台地と河川によって刻まれた低地が広がっている。その低地の多くは田畑であるが、下流部は土浦市街地が形成されている。特に下流左岸は土浦市の中心部であり、浸水した場合の被害は甚大なものとなる。中・上流は無堤区間が残存しているとともに、有堤区間でも計画堤防高に達していない区間があるため、1/10 洪水に対しても氾濫するところがあり、氾濫水は河川に沿って流下する。

当該流域は、水防災事業が実施されており、田畑に氾濫水を貯留させるための横堤や霞堤、住宅の浸水防止のための輪中堤が多く存在する。流域の特徴を整理すると下表のようになる。

表-Ⅲ2.4.4.3.1　桜川の上流・中流・下流の特性

	下流	中流	上流
区間	0.0～10.0k	10.0～25.6k	25.6～42.0
堤防	有堤区間	無堤区間が残存	無堤区間が残存
土地利用	市街地	田畑(一部集落散在)	田畑(一部集落散在)
氾濫形態	拡散型	沿川流下型	沿川流下型

（３） 桜川の河川改修の概要

桜川の河川改修は市街地に甚大な被害をもたらした昭和 13 年洪水を契機に本格的に始まった。昭和 14 年に着手された中小河川改修事業の対象区間は霞ヶ浦合流点から 10km 上流までの区間とされ、当区間の計画高水流量が 1,000m³/s と定められた。

その後、中流域と上流域で洪水被害がしばしば発生したことにより、圃場整備事業と合わせた河川改修に対する要望が強まり、全体計画の見直しが必要とされた。見直しの結果、昭和 56 年に中小河川改修事業の対象区間が霞ヶ浦合流点から 42.0k 地点の JR 水戸線まで延伸された。

昭和 61 年 8 月台風 10 号によって当時未改修であった中・上流域の広い範囲で 1500 棟に及ぶ浸水被害が発生した。これを受けて緊急改修計画が策定され昭和 62 年度から実施に移されたが、緊急改修計画のみの実施では著しい流下能力の増大が望めないこと、全ての集落の浸水被害をゼロとすることは困難であると考えられたこと、また改修に莫大な費用と時間が必要となることより、既存の河川改修計画を前提とした「桜川地域水防災計画」が平成 7 年に策定され、平成 8 年より水防災対策事業が実施されている。桜川地域水防災計画の基本方針は下記の通りである。

①：河道改修＋水防災施設の配置によって、宅地については上・中・下流同等の治水安全度を確保する。

②：河道改修の規模に関して、実施計画としては、現に実施中である暫定計画を目標とし、これに水防災対策を実施することにより、暫定計画河道完成後の宅地等については年超過確率 1/30（将来計画規模と同等）の安全度を確保する。

③：ただし、暫定計画河道完成には長年月を要することから緊急改修河道と水防災施設の組合せにより宅地等の安全度を早急に向上させる。

④：緊急改修後における宅地等の安全度は最下流の土浦市を含む区間の流下能力および中・上流部における水防災施設からみた実施可能性等を総合的に評価し、下流部における暫定計画の安全度である年超過確率 1/10 とする。

⑤：水防災施設規模は②、④の両方を満足するものとする。

⑥：計画高水時に浸水する区域を「水防災対策特定地域」とし、土地利用の制限等を行う。

前述の通り、桜川では当該事業によって河道が未整備の中・上流域では田畑に氾濫水を一次貯留させるための横堤や霞堤、住宅の浸水防止を図るための輪中堤が整備されてきた。土地利用は中・上流域の無堤区間では田畑が広がっており(一部集落散在)、下流部の有堤区間では市街地が広がっている。

桜川は、年超過確率 1/10（水防災事業の計画対象規模）の外力では、上流・中流区間の越水により流量低減させ、下流区間の河道水位をＨＷＬ以下にする。つまり、桜川の現況の治水システムは、上流・中流区間の低未利用地や田畑での氾濫を許容し、その氾濫水が横堤・二線堤により下流への流下を阻止もしくは軽減させ、下流区間の市街地の浸水を防ぐことにより流域全体の被害の軽減化を意図している。

（４） 気候変動による降雨量変化の推定

気候変動による降雨量変化については、「21 世紀気候変動予測革新プログラム」において、気象庁・気象研究所が開発した 20km の水平分解能を持つ高解像度全球気候モデルでの後期実験（後期 GCM：詳細は第Ⅱ部 2 章 1 節参照のこと）による計算結果から、柏井ら（柏井ら 2008）の手法を用いて降雨量変化率を推定した。対象としている桜川の治水計画は 48 時間雨量に基づいていることから、気候変動による降雨量の変化率は、当モデルのおける関東地域における降雨継続時間 48 時間の 50%タイル

値である 1.126 倍を適用した。そこで、本研究おいては、現治水計画の降雨(年超過確率 1/30 規模)に 1.126 倍の変化率を乗じた降雨を気候変動による降雨として設定した。なお、当該降雨の確率規模は、現治水計画に基づいて確率評価を行うと年超過確率 1/50 程度である。

（５） 遊水機能の分析の前提条件

①ケース設定

遊水機能を評価するために現況条件をケース A とし、比較ケースとして北太田地区近傍の左岸（12～17ｋ）を現計画堤防高による連続堤で整備したケース B を設定した。ケース B の設定条件を図-Ⅲ 2.4.4.3.1 に示す。現況堤防高が計画堤防高よりも低い箇所において堤防高を現計画堤防高まで引き上げたものとする。

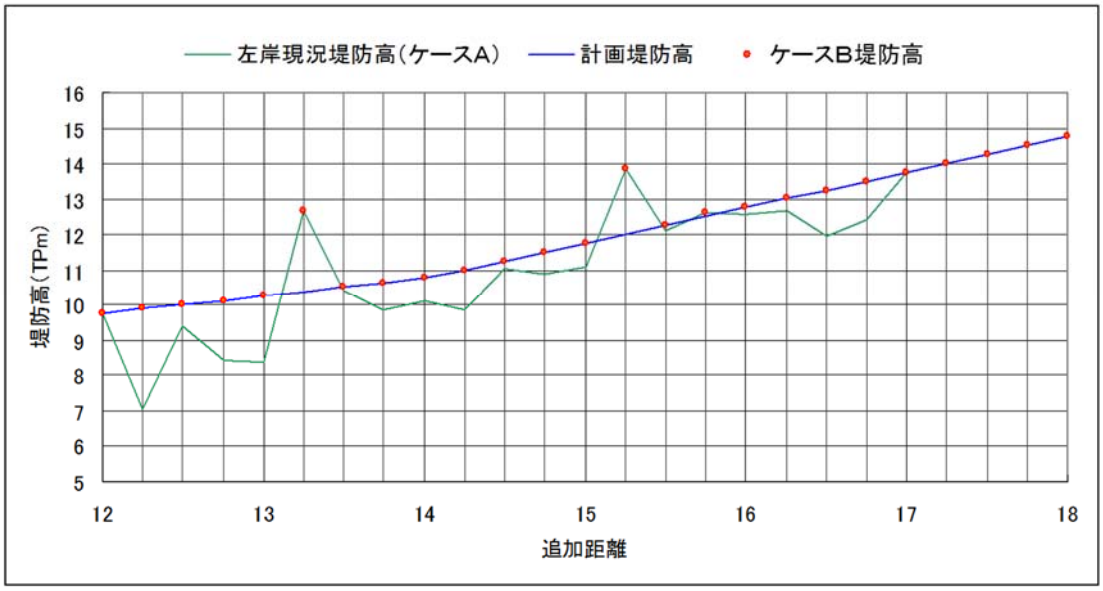


図-Ⅲ2.4.4.3.1　ケースＢの設定条件

②外力条件

外力設定は、降雨波形は現治水計画における昭和22年9月洪水型とし、年超過確率規模は1/10、1/20、1/30、現況1/30確率の気候変動後想定規模(1.126倍)、1/200、1/500、1/1000とした。桜川の計画降雨波形であるS22.9洪水波形を引き伸ばした。

③モデル条件

貯留関数による流量ハイドロを与え、河道は一次不定流、氾濫原は二次元不定流（メッシュサイズ 100m）。地盤高については、図-Ⅲ2.4.4.3.2 でオレンジ色に着色した左岸 7.0ｋ～17.0ｋの範囲については LP データ（関東地方整備局）より処理した地盤高を使用し、それ以外の地域については、浸水想定区域図検討時の 1/2,500 地形図よりデジタイズしたデータを使用した。

④氾濫条件

計算水位が堤防高又は堤内地盤高の高い方を越えた時点で越流が始まるとし、越流量は栗城等の式を用いて算定した。なお本稿では、河道水位が堤防天端高に達しない状態で起こりうる浸透破壊も含め堤防決壊が生じないケースについて記述する。

⑤被害額算定方法

被害額の算定にあたっては、治水経済調査マニュアル(案)（国土交通省河川局2005）に準じて、流域全体の浸水被害額（一般資産被害額）を氾濫ブロックごとに計算・整理を行った。氾濫原内に位置する

氾濫原制御施設（横堤、二線堤等）や主要な支川の流入を考慮して、左岸は5ブロック（L1～L5）、右岸は3ブロック（R1～R3）に分割して被害額を整理した。ブロックの区分については、図-Ⅲ2.4.4.3.2のとおりである。

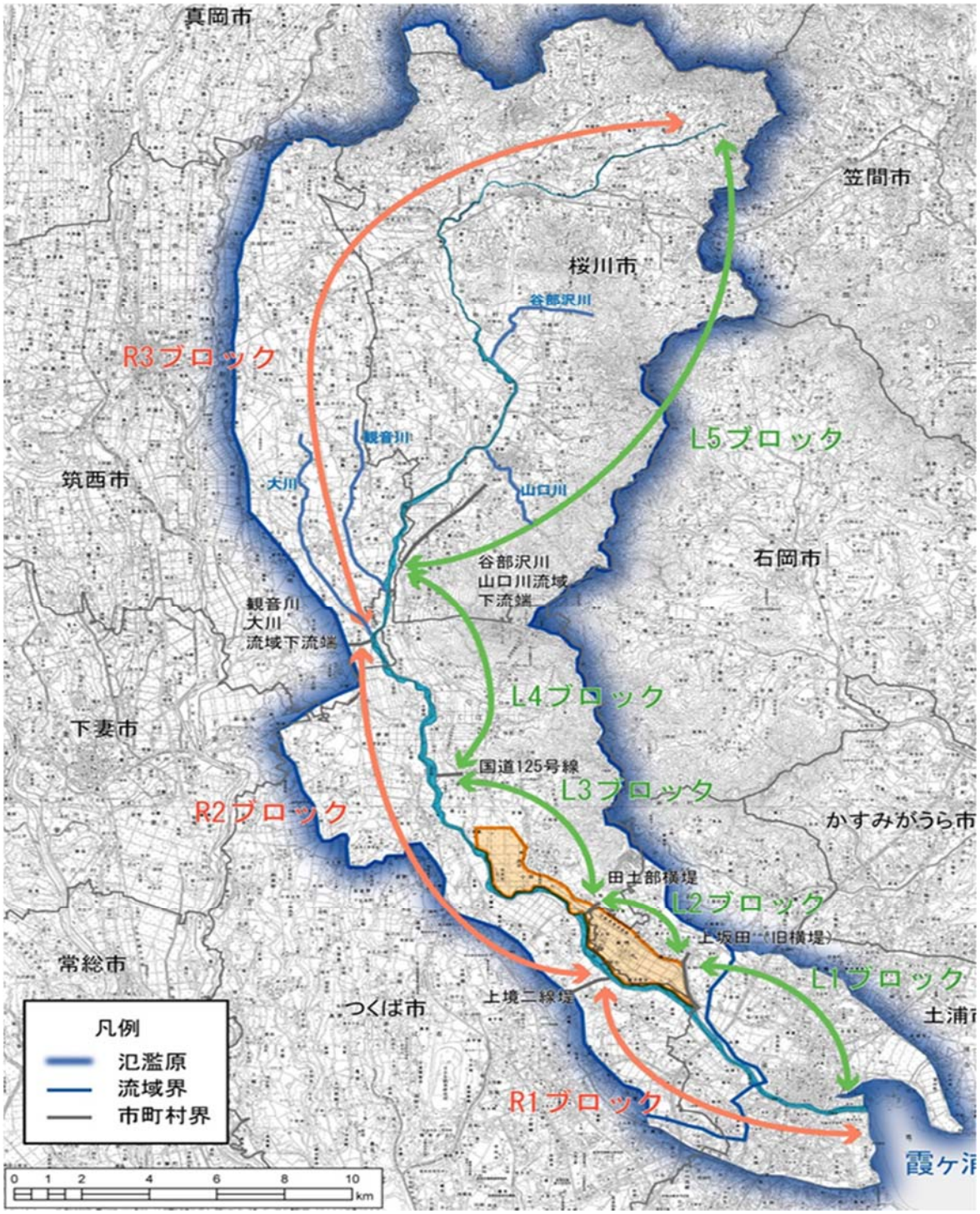


図-Ⅲ2.4.4.3.2　流域のブロック分割

L1：左岸 0.0ｋ～7.0ｋ（河口～上坂田旧横堤）

土浦市街地の中心部が存在し、資産が集中している。現況でも堤防高は HWL を上回っており、気候変動規模（1.126 倍ケース）の外力でも当該区間での越水氾濫はない（河道水位は堤防天端を超えない）。上坂田横堤（台地が張り出した部分にある）は、土浦城下を水害から守るために「御城御要害堤」として土浦藩が 1736 年に設置したものであるが、現在は横堤を横切って道路が整備される等姿を変えてお

り、かつてほどの機能はないようである。上流の L2 ブロックからの氾濫水は、年超過確率 1/200 規模までは上坂田旧横堤付近で止まる計算結果となっている。年超過確率 1/200 の外力になると L1 ブロックの堤防でも一部越水する区間が見られ、年超過確率 1/500 の外力になるとさらに越水区間が広がり、浸水範囲は市街地の中心部まで及び、莫大な被害が生じる。

L2：左岸 7.0ｋ～12.0ｋ（上坂田旧横堤～田土部横堤）

現況でも堤防高は HWL を上回っている。気候変動規模（1.126 倍ケース）の外力でも当該区間での越水氾濫はない（河道水位は堤防天端を超えない）が、上流の L3 からの氾濫水が流入するため、年超過確率 1/10 の外力でも浸水するところがある。

L3：左岸 12.0ｋ～20.0ｋ（田土部横堤～国道 125 号線巡見橋）

水防災対策特定地域を包含する区間で、4.4.2（1）で取り上げた北太田地区は 15.8k 付近、君島地区は 17.0ｋ付近である。図-Ⅲ2.4.4.3.1 に示すように、一部区間で堤防高が計画堤防高を下回っており、年超過確率 1/10 の外力でも当該区間で氾濫するが、先述のように輪中堤や横堤によって住宅を防御しているため、被害額はさほど大きくならない。氾濫水は下流の L2 ブロックにも流下する。

L4：左岸 20.0ｋ～28.0ｋ（国道 125 号線巡見橋～谷部沢川山口川流入地点）

年超過確率 1/10 の外力では越水氾濫はないが、年超過確率 1/20 では限られた区間ではあるが越水が発生する。

L5：左岸 20.0ｋ～（谷部沢川山口川流入より上流）

年超過確率 1/10 の外力でも当該区間の上流側では全面的に越水氾濫が発生し、被害額も比較的大きいが、農村部であるため、外力が大きくなるにつれ相対的には被害は小さくなる。

R1：右岸 0.0ｋ～10.0ｋ（河口～上境二線堤）

上境ニ線堤より下流に位置するエリアで、土浦市街地が広がり、資産額も大きい。上境ニ線堤の直上流で堤防が低くなっている。ケース A では年超過確率 1/20 の外力で、ケース B では年超過確率 1/10 の外力でニ線堤を越えて上流部が一部浸水し、さらに外力が大きくなるにつれ浸水域は下流の市街地へ近づく。ケース A では年超過確率 1/200 規模で、ケース B では気候変動後想定規模（1.126 倍）で、氾濫水は市街地を横断して、河口の霞ヶ浦まで到達するようになるため、被害額は飛躍的に大きくなる。

R2：右岸 10.0ｋ～25.5ｋ（上境ニ線堤～観音川大川流入）

水防災対策特定地域の対岸を含んでおり、左岸の北太田地区の堤防を計画堤防高まで嵩上げするケース B と、当エリアの被害が増大する。

R3：右岸 25.5ｋ～（観音川大川流入より上流）

無堤部により沿川の田畑で自然遊水。現況では年超過確率 1/20 以上のケースで最も浸水面積が大きいブロックである。

（６） 遊水機能の分析・評価

ケース A、B それぞれの、各外力での氾濫ブロック毎の浸水面積と被害額を表-Ⅲ2.4.4.3.2 と表-Ⅲ2.4.4.3.3 に示す。ケース A、B については、年超過確率ごとに、相対的に比率が大きいものほどセルに赤く着色し、ケース B－ケース A については、年超過確率ごとに、小さい値ほど青く、大きい値ほど赤くセルに着色している。A、B 間の比較分析（被害額の増減比）を行ったものを図-Ⅲ2.4.4.3.3 に示す。

ケース A については、全区間にわたり HWL 以上の堤防高となっている L1 では気候変動規模（1.126 倍ケース）まで河道水位は堤防天端を超えず、上流の L2 からの氾濫水も年超過確率 1/200 ま

では L1 上流端の上坂田旧横堤付近で阻止されるため、L1 の被害にはつながらない。その他のブロックは当該区間やその上流で氾濫した氾濫水が流入するため、被害が生じる。流量が年超過確率 1/20 程度以下の場合、上流の L5 や R3 で相対的に大きな被害が見られる。R1 の被害額は年超過確率 1/20 から出始め、年超過確率 1/200 まで流量が増えると被害額が顕著に大きくなる。これは、年超過確率 1/20 の外力でブロックの上流端の上境ニ線堤を越えて氾濫するようになり、年超過確率 1/200 の外力では氾濫水は市街地を横断して、河口の霞ヶ浦まで到達するようになるためである。年超過確率 1/500 程度の大規模な洪水になると、氾濫水は L1 の多くの区間で越水氾濫し、氾濫は L1 の土浦市の中心部まで及び、被害は甚大なものとなる。

ケース B では、気候変動規模（1.126 倍ケース）までは、ケース A において上流の L3 から氾濫水が流下することにより L2 においても被害が発生していたのに対し、L3 の堤防整備によりこの上流からの流下がなくなり、L2 の被害額が 0 になる（ただし、L3 の上流端で計算水位が計画堤防高を上回るため、L3 では一部浸水が生じる）。しかし、この堤防整備により下流に流下する流量が増大し、年超過確率 1/10 の外力でも R1 の上流端にある上境ニ線堤を越えて上流部の一部で浸水し、年超過確率 1/20、1/30 と外力が大きくなるにつれ浸水域は下流の土浦市街地へ近づいて被害額が次第に大きくなり、気候変動規模（1.126 倍ケース）になると浸水域が市街地を横断して河口の霞ヶ浦まで到達するため急激に被害額が大きくなる。

流域全体の浸水面積でケース A と B を比較すると、いずれの外力に対してもケース B のほうが小さい。しかし、流域全体の被害額で見ると、現状の治水安全度と同程度の年超過確率 1/10 規模では、若干ケース B の方が小さいが、一方、年超過確率 1/20 規模、年超過確率 1/30 規模及び気候変動規模（1.126 倍ケース）においては、逆にケース A の方が小さくなっており、現況の計画対象規模降雨のみならずそれ以上の降雨規模を考慮した場合には、ケース A のほうが水害に強いシステムであると言える。すなわちケース A は、宅地や事業所等浸水すると被害が大きくなるエリアの防御を優先するシステムと言えよう。ただし、流量が年超過確率 1/200 程度を越えるような大規模な洪水に対しては、現存する遊水機能の効果は寄与せず、ケース A と B の差異は、全体の浸水面積や被害額と比べると目立たなくなる。

表-Ⅲ2.4.4.3.2　ﾌﾞﾛｯｸ別浸水面積（単位：ｋｍ²）

ケースA

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	5.61	7.55
L2	1.42	1.73	1.83	1.92	2.56	2.89	3.42
L3	2.02	3.56	3.84	4.28	5.35	5.89	6.29
L4	0.00	0.29	0.49	0.64	1.70	3.14	3.50
L5	1.75	3.59	3.89	4.28	5.42	5.97	6.36
R1	0.00	3.20	4.11	4.80	8.53	9.20	9.32
R2	2.15	3.58	3.76	4.52	10.12	10.82	11.04
R3	1.92	5.22	5.63	6.13	8.22	8.73	9.28
全流域	9.26	21.17	23.55	26.57	42.37	52.25	56.76

ケースB

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	5.69	7.54
L2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61	1.90	3.10
L3	0.00	0.84	1.06	1.44	5.34	5.77	6.10
L4	0.00	0.29	0.49	0.64	1.70	3.14	3.50
L5	1.75	3.59	3.89	4.28	5.42	5.97	6.36
R1	0.20	4.50	4.75	6.73	8.55	9.21	9.33
R2	2.83	3.88	4.13	4.65	10.12	10.81	11.04
R3	1.92	5.22	5.63	6.13	8.22	8.73	9.28
全流域	6.70	18.32	19.95	23.87	41.35	51.22	56.25

（ケースB）－（ケースA）

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.08	0.08	-0.01
L2	-1.42	-1.73	-1.83	-1.92	-0.95	-0.99	-0.32
L3	-2.02	-2.72	-2.78	-2.84	-0.01	-0.12	-0.19
L4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R1	0.20	1.30	0.64	1.93	0.02	0.01	0.01
R2	0.68	0.30	0.37	0.13	0.00	-0.01	0.00
R3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
全流域	-2.56	-2.85	-3.60	-2.70	-1.02	-1.03	-0.51

表-Ⅲ2.4.4.3.3　ﾌﾞﾛｯｸ別一般資産被害額（単位：百万円）

ケースA

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0	0	0	0	5,052	113,426	206,117
L2	370	529	562	607	1,060	1,577	2,883
L3	337	794	879	973	3,090	5,346	8,115
L4	0	57	115	198	803	1,491	1,980
L5	1,117	2,678	2,985	3,732	7,876	10,725	12,542
R1	0	1,108	3,733	9,284	69,968	78,048	81,967
R2	401	1,238	1,431	1,876	7,327	11,134	13,288
R3	938	3,301	4,112	5,476	15,930	21,536	26,648
全流域	3,164	9,705	13,817	22,146	111,105	243,282	353,539

ケースB

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0	0	0	0	2,094	115,471	208,187
L2	0	0	0	0	473	582	1,858
L3	0	214	267	343	3,316	5,397	7,742
L4	0	57	115	198	803	1,491	1,980
L5	1,117	2,678	2,985	3,732	7,876	10,725	12,542
R1	23	6,507	8,464	31,251	70,021	78,334	82,065
R2	771	1,706	1,824	2,168	7,386	11,348	13,370
R3	938	3,301	4,112	5,476	15,930	21,536	26,648
全流域	2,850	14,463	17,767	43,168	107,900	244,884	354,390

（ケースB）－（ケースA）

	1/10	1/20	1/30	1.126倍	1/200	1/500	1/1000
L1	0	0	0	0	-2,957	2,045	2,070
L2	-370	-529	-562	-607	-587	-995	-1,025
L3	-337	-580	-612	-630	226	52	-373
L4	0	0	0	0	0	0	0
L5	0	0	0	0	0	0	0
R1	23	5,400	4,731	21,968	53	286	97
R2	370	467	393	291	59	214	82
R3	0	0	0	0	0	0	0
全流域	-314	4,758	3,950	21,022	-3,206	1,602	850

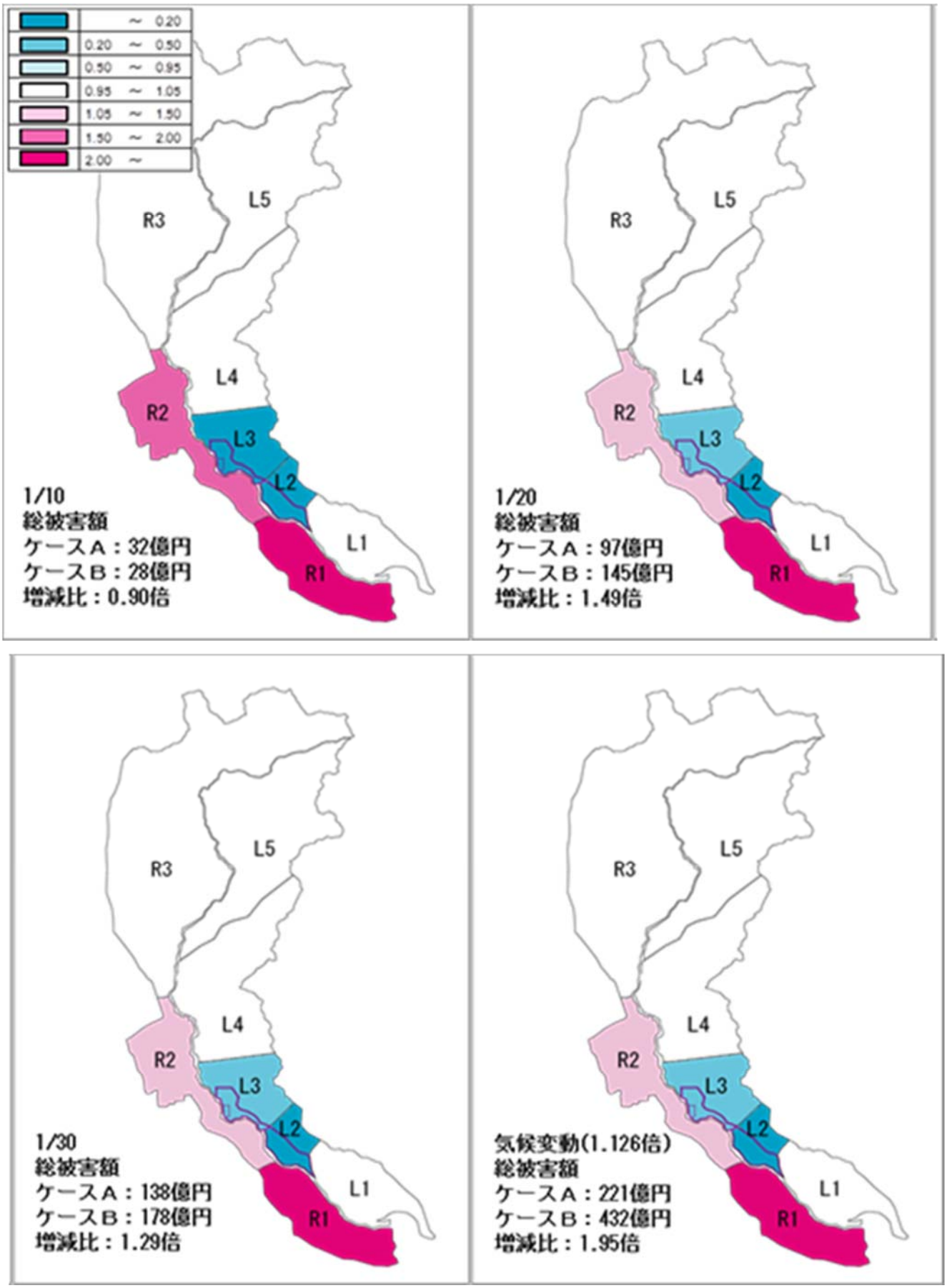


図-Ⅲ2.4.4.3.3　氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースＢ／ケースＡ）

（７） まとめと考察

以上より、年超過確率 1/20、1/30 並びに現況 1/30 の気候変動想定規模（1.126 倍ケース）の降雨まで考慮すると、現況整備方式は連続堤で整備するよりも遊水機能の保全等により、流域の総被害額が軽減されることが確認できた。一方、流量が年超過確率 1/200 程度を越えるような大規模な洪水に対しては、遊水機能を含むハードの能力を外力がはるかに上回るため、両ケースにはほとんど差異が見られなかった。

図-Ⅲ2.4.4.3.4 は、この特性をわかりやすく示すために、上記の結果を被害～豪雨規模関係の比較図に表したものである。ここで 1.126 倍ケースは、超過確率年 50 年でプロットしている。この図から、本検討の最小豪雨規模である超過確率年 10 年ではケース B の被害がケース A より小さくなるが、それを越え超過確率 200 年にかけては、ケース A の被害～豪雨規模関係がケース B より“寝ている”ことがわかる。この結果は、2.2.2(2)の図-Ⅲ2.2.13 を用いて説明した論点に対応している。すなわち、同図で案 1 としたものがケース B に、案 2 としたものがケース A に当たると言える。また、2.2.3(2)において図-Ⅲ2.2.16 を用いて説明した気候変動影響への感度という観点から見ると、図-Ⅲ2.4.4.3.4 はケース A の感度がケース B より鈍いことを示していると言える。このように、遊水機能の評価結果を被害～豪雨規模関係図に表して吟味することで、遊水機能の確保や連続堤防方式の適用度合いが被害制御にどのような違いをもたらすかをわかりやすく把握できるようになる。これが、2.2 に示した治水検討フレームの下での検討実例の１つと言える。

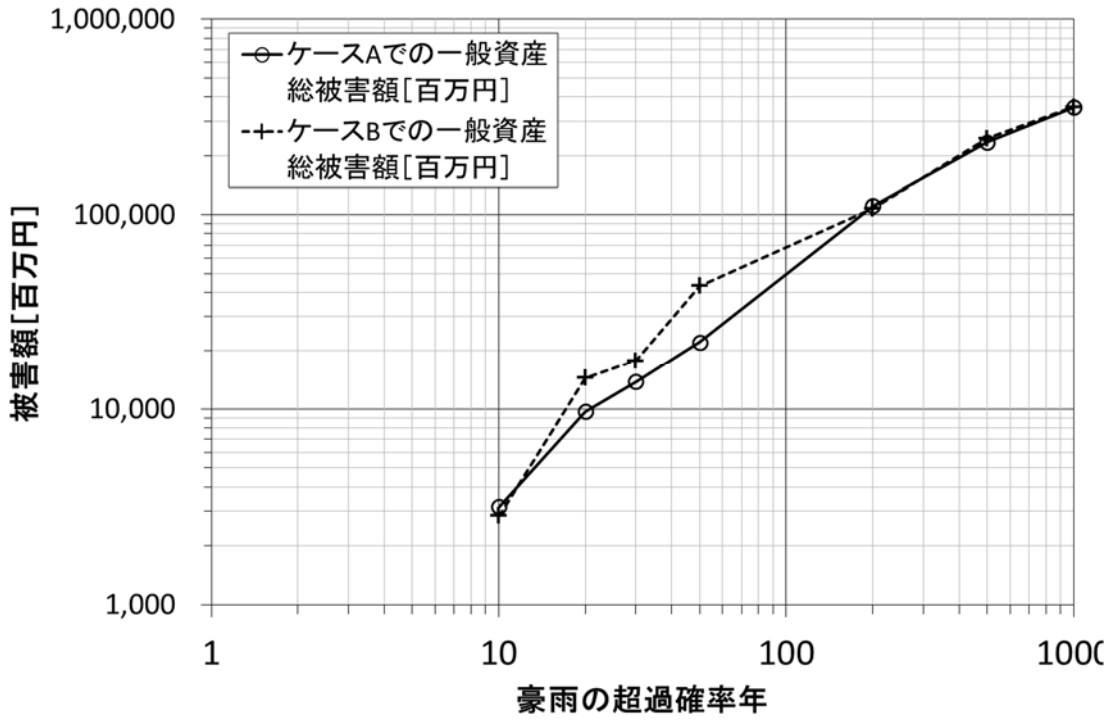


図-Ⅲ2.4.4.3.4　被害額～豪雨規模関係についてのケース A、B の比較

４．４．４　施策実施のための地域状況要件と施策推進に向けての論点整理

（１） 施策実施のための地域状況要件

4.4.2 の遊水機能が維持・活用されている各事例を俯瞰すると、施策を可能とした地域の類似点としては以下が浮き彫りになる（大沼・伊藤、2014）。

①当該地域が浸水常襲地帯であること。

遊水機能の維持・活用しようとしている区域がもともと浸水常習地帯となっており、氾濫を許容することに対するコンセンサスを得やすくしていると考えられる。

②当該地域が氾濫することにより、下流域または流域全体の被害が相当程度減少すること。

浸水の影響が相対的に小さい農地等の浸水を許容する代わりに宅地等を防御することにより、地域トータルとしての被害の減少が期待できる。このため、事業の社会的効果が大きくかつ意義が明確である。これは、2.3.2(4)で説明した「他益性」に当たるものである。

③施策を行っても、当該地域のリスクが現状より増加しないこと。

家屋等については現状以上の治水安全度を確保している他、農地等に対しても、輪中堤の整備に伴う堤内の排水不良を軽減するための排水設備が整備や、湛水による農業生産の減少に対する軽減措置（排水施設の整備等）などにより、被害が顕著にならないよう配慮されている。

④当該地域が、市街化調整区域、農振農用地区域に指定されている等により、開発が抑制されている若しくは開発圧力が低い地域であること。

河川法の規定の及ばない区域における遊水機能を将来的に維持するために重要な要件である。

この要件を満足させるためには、河川管理者と河川管理者以外の関係部局（自治体の都市計画部局、建築部局、農政部局等）と継続的かつ実効的な連携・協力・調整を行っていくことが必要である。

⑤対象地域で確保すべき治水安全度と現存する遊水機能のバランスが確保されていること。

一般に上流での氾濫は下流の流量低減に寄与するが、想定する降雨規模が遊水機能に比べてはるかに大きい場合や氾濫開始水位が相対的に低い場合は、必ずしも洪水のピークカットに寄与しない場合がある。確保すべき治水安全度と人口・資産の分布、現存する遊水機能、横堤等による遊水機能の強化等を総合的に考慮し、遊水機能の保全・活用方策を検討する必要がある。

（２） 施策推進に向けての論点整理

遊水機能の保全・活用は、総合的な治水を行う上で重要であるが、地権者等の利害関係者の合意を得ることが難しいこと等が原因で、進捗が芳しくないケースも見受けられる。ここでは、本節の結果を踏まえ、施策推進に向けての論点整理を行う。

施策実施のための地域条件を（１）で整理したが、①、②を満たすような地域が遊水機能を活用・維持に適しており、③を満たすような現実的な手当（排水設備の整備等）が可能であること、④が満たされた地域条件や条例整備等の社会条件が整っていることが施策推進にあたって重要であると考えられ、河川管理者と都市、道路、農地等の関連部局との連携し、施策の総合化を図る必要がある。

また、地域との合意形成に当たっては、（１）を踏まえて施策の効果や地域に残存するリスク等を地域住民に分かりやすく提示し、施策の特徴を十分理解してもらうことや行政との信頼関係を築くことが重要と考えられる。さらに、2.3.2(4)で述べたように、流域圏内の「共生・連携」さらには「契約」という観点からの取り組みが求められるかもしれない。

以上、氾濫を考慮した治水施策手法の確立に向けて、施策実施要件の整理と今後に向けた論点の整理

を行った。各要件の評価法をさらに具体化し、評価結果を総合的な評価（施策評価）に結びつけ、実務的な手法にする道筋を得るために、今後も引き続き事例分析・評価の積み重ねを通じた検討が必要である。

参考文献：

飯野光則､伊藤弘之（2012）気候変動を踏まえた河道隣接地域における遊水機能の評価に関する一考察、土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集、Ⅱ-049、pp.97-98.*

大沼克弘、伊藤弘之（2014）遊水機能を維持・活用した治水の実践事例～事例調査から浮き彫りになった地域特性の共通点～、土木技術資料 56-12、pp.18-21.*

小野田惠一（2012）流域一体となった浸水被害軽減策の実践例に関する調査、国土技術政策総合研究所資料、第 665 号.*

柏井条介、土屋修一、石神孝之（2008）気候変動による豪雨時の降雨量変化予測に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第 462 号

草津市（2006）草津市建築物の浸水対策に関する条例
http://www.city.kusatsu.shiga.jp/kurashi/sumai/sumai/shinsuijorei.html

国土技術政策総合研究所気候変動適応研究本部(2013)気候変動適応策に関する研究（中間報告）、国土技術政策総合研究所資料、第 749 号*

国土交通省河川局（2005）治水経済調査マニュアル(案)

埼玉県（2006）雨水流出抑制施設の設置等に関する条例
http://www.pref.saitama.lg.jp/site/usuijyourei/usuijyourei.html

社会資本整備審議会（2015）水災害分野における気候変動適応策のあり方について（答申）

４．５　XRAIN による高時空間分解能での迅速な豪雨観測・予測技術と利活用

４．５．１　X バンド MP レーダの導入の背景

国土交通省水管理・国土保全局は、昭和 51 年に赤城山に C バンド(約 5cm)の波長の電波を使用するレーダ雨量計(以下、既存レーダ)を設置して以来 26 基のレーダを配置し、雨量データを河川管理や一般向けの防災情報等に活用している（図-Ⅲ2.4.5.1.1)。



図-Ⅲ2.4.5.1.1　レーダ雨量計（C バンド）観測網

一方で近年、日本の各地で局地的な大雨や集中豪雨が多発し、それらに起因する浸水被害や水難事故が発生している。気象庁の報告によると短時間強雨や大雨の発生回数はここ 30 年間余りで増加傾向にあることが指摘され、1 時間降雨量 50mm 以上の短時間強雨の発生回数は最近 10 年と 30 年前を比較して約 1.5 倍に増加している（図-Ⅲ2.4.5.1.2)。日降水量 400mm 以上の大雨の発生回数についても約 2.5 倍増加している（図-Ⅲ2.4.5.1.3)。また、東京大学など合同研究チームの報告によると今後の大雨の発生回数が地球温暖化の進行に伴って増加すると予測されている（図-Ⅲ2.4.5.1.4)。

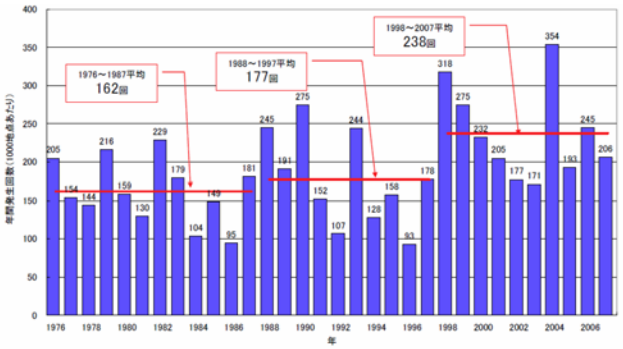


図-Ⅲ2.4.5.1.2　1時間雨量50㎜以上の降雨の発生回数

（出典：気候変動監視レポート 2007 より）

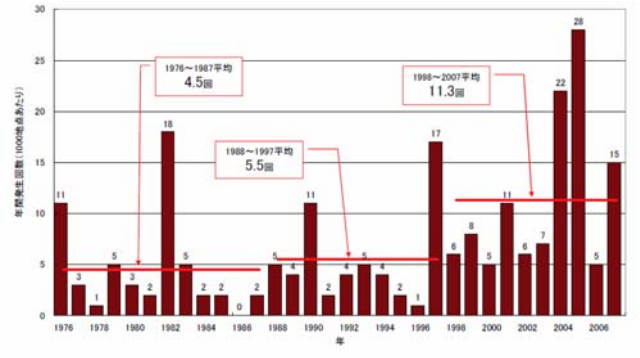


図-Ⅲ2.4.5.1.3　日降水量 400mm 以上の降雨の発生回数
（出典：気候変動監視レポート 2007 より）

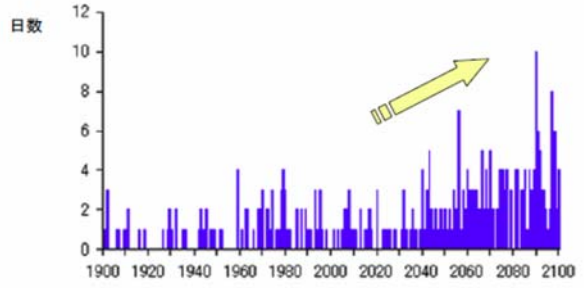


図-Ⅲ2.4.5.1.4　日降水量 100mm 以上の降雨の発生回数
（出典：東京大学など合同研究チーム報道発表より）

平成 20 年度おいては、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨（以下、豪雨と呼ぶ）により、石川県金沢市街地を流れる浅野川等や愛知県岡崎市街地を流れる伊賀川等が氾濫し、人的被害や床上浸水等の甚大な被害が発生している。また、兵庫県神戸市を流れる都賀川においては、豪雨による河川水位の急激な上昇により河川にいた 5 名が流され亡くなるという水難事故が発生している。

既存レーダの面的分解能は、使用する電波の波長帯の関係から 1km メッシュ程度あり、台風や低気圧、前線といった面的スケールの大きい降雨を観測するには十分である一方、局地的な大雨や集中豪雨といった面的スケールが小さい降雨の観測には十分とは言い難い。また、既存レーダは、水平の偏波面を持った 1 種類の電波（単偏波）を発射し、雨滴に当たって戻ってくる電波の強度(反射強度)を受信するのみの単偏波レーダである。反射強度のみによる雨量換算は様々な誤差要因の影響を受け、定量的な観測は難しいことが知られている。そのため、既存レーダでは、テレメータ地上雨量データを用いて既存レーダ雨量の実時間補正を行われている。この補正に用いる地上観測雨量の観測間隔が 5～10 分間隔であることにより、既存レーダの雨量情報の配信が 5 分間隔となる。地上雨量計を用いた補正を必要とする既存レーダは、補正処理の時間を必要とするために、配信時間に 5～10 分程度以上を必要とし、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を迅速に配信することが難しい。

そこで、国土交通省は、豪雨の監視体制を強化するために XRAIN と呼ばれる X バンド MP レーダ（X バンド(約 3cm)の波長の電波を使用する二重偏波のレーダ雨量計）ネットワークの構築を開始した。

X バンド MP レーダは、X バンドの波長帯を使用しているため既存レーダより高い空間解像度での観測が可能であり、面的スケールの小さい豪雨を詳細に捉えるのに十分な解像度を有している。また、X

バンド MP レーダは、二重偏波レーダであるため、地上雨量計との補正を行わなくとも高い精度の降雨観測が可能であるため、地上雨量計との補正を行わずに降雨情報を配信することで配信時間が短縮され、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を時々刻々と捉えることが可能となる。

国土技術政策総合研究所は、（独）防災科学技術研究所によって開発された雨量算定アルゴリズムを導入したデータ処理・配信システムの構築し、XRAIN 雨量情報の配信を実現した。また、レーダネットワークの設計、レーダの観測設定やパラメータチューニング等を行い、必要な精度の確保を行うと共に、減衰補正、合成処理の高度化等を行い、精度向上を実現した。

本項では、XRAIN の構築状況、X バンド MP レーダ雨量観測の技術的特徴、配信される XRAIN 雨量情報の特徴及び観測精度、XRAIN の運用と並行して行われた精度向上に係わる検討を概説する。また、XRAIN 雨量情報は、従来からレーダ雨量が利用されている降雨予測、河川管理、自治体の災害対応等の他に、鉄道交通、道路交通等の分野にも利用の用途が拡大されつつあり、XRAIN 雨量情報を利用した利活用及び技術開発の取り組みについて紹介する。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型の I^{++}に直接的には相当するが、$Ⅲ^{+}$等にも関連すると考えられる（2.2.2(3)）。

４．５．２　XRAIN の構築状況

XRAIN は、H22 年 7 月より 11 台で構成される X バンド MP レーダネットワークで、三大都市圏等の 4 地域を観測範囲として試験運用を開始した。H23 年度には、15 台、H24 年度には 1 台のレーダがネットワークに追加され、XRAIN は、H25 年 1 月現在、11 地域を観測範囲とする 27 台の X バンド MP レーダネットワークとなっている（図-Ⅲ2.4.5.2.1）。現在の XRAIN は主要都市を観測範囲としており都市部における豪雨の監視体制の強化が図られ、また、河道閉塞や噴火活動により土砂災害の危険性が高い地域についても監視体制の強化が図られている。また、H25 年度中には、東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下や地震、津波による河川堤防の損壊により、治水安全度が低下している被災地に 8 台のレーダがネットワークに追加され、被災地の豪雨対策強化が図られる予定となっている。

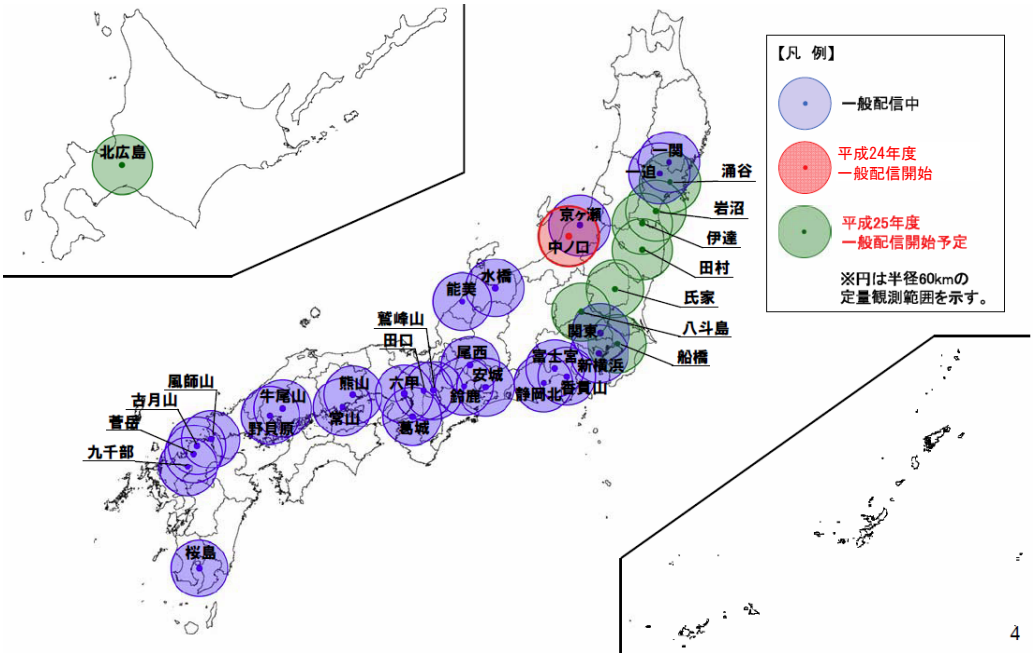


図-Ⅲ2.4.5.2.1　XRAIN の整備状況

４．５．３　Ｘバンドｍｐレーダの観測技術の特徴

Ｘバンド MP レーダのリアルタイム降雨観測は、二重偏波による降雨観測により高精度の降雨観測が可能となったことで実現されている。以下に、二重偏波レーダの降雨観測方法とその特徴を示す。また、参考までに単偏波レーダの観測方法についても示す。

（１） 二重偏波レーダの降雨観測と特徴

雨粒は粒径が大きくなる程、球状から扁平した形状になり大気中を落下する。扁平した形状の雨粒の中を電波が通過すると水平と垂直偏波の間で位相差が生じる。二重偏波レーダでは、この位相差から降雨量を換算（Kdp-R 方式）する。雨粒の扁平度によって生じる位相差は、雨粒の粒径の 4 乗に比例する。実際の降雨強度は雨粒の粒径の 3.6 乗に比例することから、この位相差は実際の降雨強度と概ね一致する対応関係にあるため、Kdp-R 方式は定量的な雨量換算が可能となる。また、電波は降雨中を通過すると強度が低下（降雨減衰）するが、Kdp-R 方式では位相信号が検出できれば雨量換算が可能であるため降雨減衰により定量性が損なわれることがない。

以上、位相情報から雨量算定することで、精度向上が図られるとともに降雨減衰の影響を受けず精度良く観測することが二重偏波レーダの主な特徴である。

（２） 単偏波レーダの降雨観測と特徴

単偏波レーダは、雨粒に当たり反射した電波の強度（反射強度）から降雨量を換算（Z-R 方式）する。降雨強度が大きければ、強い反射強度が得られるという定性的な関係は得られるが、反射強度は雨粒の粒径の 6 乗に比例、実際の降雨強度は 3.6 乗に比例することから、反射強度から定量的な降雨強度を求めるには、両者を結び付ける対応関係（粒径分布）が必要となる。しかし、この対応関係は、雷雨や台風、低気圧等の降雨タイプで異なり、また時々刻々と変化することが知られており、一義的に定めることができない。そのため、Z-R 方式による定量的な雨量換算は難しい。また、降雨減衰により正確な反射強度を得られなくなることから単偏波レーダで降雨を精度良く観測することは難しい。

４．５．４　XRAIN 雨量情報の特徴

今回、導入されたＸバンド MP レーダ観測よって配信される XRAIN 雨量情報の特徴を既存のレーダ雨量情報と比較して整理すると下記のとおりである。

・空間解像度の向上

既存のレーダ雨量情報の観測分解能は 1km メッシュであることに対して XRAIN 雨量情報は 250m メッシュの解像度で配信される。このため既存のレーダ雨量情報の 16 倍の空間解像度で雨量情報の提供が可能となる（図-Ⅲ2.4.5.4.1）。

・更新間隔の高頻度化

既存レーダは、地上雨量とのキャリブレーションを行うため、地上雨量の観測間隔の関係から、観測間隔は 5 分間隔となるため、既存のレーダ雨量情報の更新頻度は 5 分間隔となる。Ｘバンド MP レーダは、地上観測とのキャリブレーションを行わずとも精度良く観測ができ、キャリブレーションが不要であるため、XRAIN 雨量情報の更新頻度は 1 分間隔となる。このため既存のレーダ

雨量情報の 5 倍の更新頻度で雨量情報を提供可能となる。

・リアルタイム性の向上

既存レーダは地上雨量とのキャリブレーションのために、地上雨量の収集、補正処理のために観測から配信まで 10 分程度を要するが、X バンド MP レーダは、キャリブレーションの必要がないため、観測から 2 分程度の遅れで配信される。このため、現行 C バンドレーダの 1／5 の遅れ時間で雨量情報を提供可能となる。

X バンド MP レーダの欠点として、降雨による電波強度の減衰（降雨減衰）が著しいため、降雨減衰の影響を受けにくい位相情報を用いた雨量推定を行っても、豪雨時には降雨減衰によって電波が消散し、観測不能領域が発生する場合がある。XRAIN では、複数台の MP レーダをネットワーク化し、異なる方向から降雨域を観測することにより、観測不能領域の発生をある程度回避している。

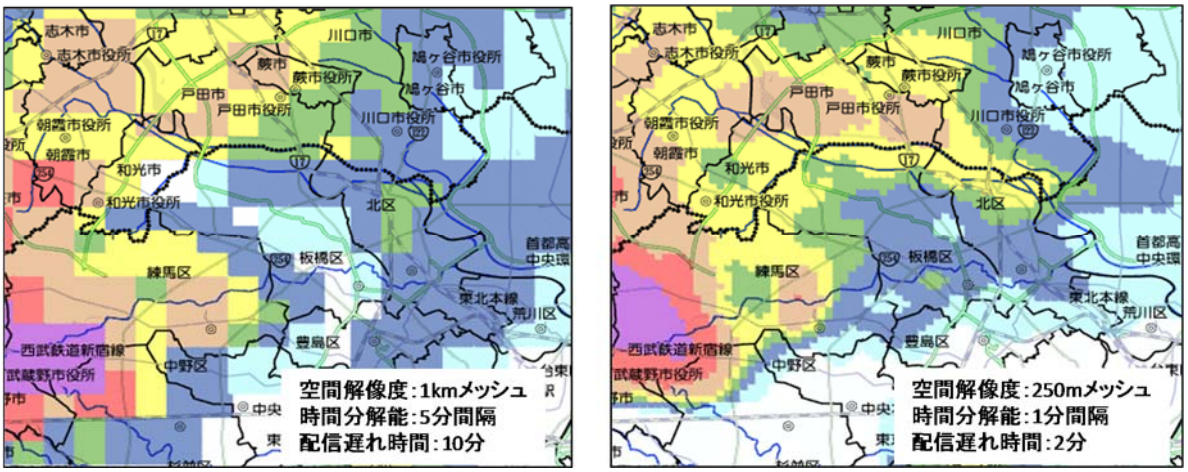


図-Ⅲ2.4.5.4.1　既存レーダと X バンド MP レーダの空間解像度の比較

４．５．５　XRAIN の観測精度

（１） XRAINによる豪雨の観測事例

2010 年 7 月 5 日東京都北部で局地的な集中豪雨が発生し、浸水被害が発生した。19 時 30 分～20 時 30 分までの 1 時間に、東京都板橋区役所に設置されている地上雨量計で 107mm の降雨が観測された。その時の X バンド MP レーダによる当該豪雨の観測状況を図-Ⅲ2.4.5.5.1 に示す。板橋や練馬の観測所周辺に 1 時間あたりに換算して 100mm を超える雨域が集中し、南に数 km 離れると、ほとんど雨域が観測されていないことが明確に把握できる。なお、X バンド MP レーダは、そのレーダの特性から豪雨時に観測不能エリアが発生する場合があり、これを回避するために特定のエリアは複数台で観測するようにレーダネットワークが設計されている。この雨域が観測されたエリアは 2 台のレーダで観測されていたため、観測不能エリアの発生を回避して観測を継続することができていた。

この豪雨イベントの、X バンド MP レーダ、C バンドレーダ、地上雨量計で観測した 10 分間雨量の時系列図を図-Ⅲ2.4.5.5.2 に示す。レーダ雨量は、地上雨量計の設置場所に対応した 1 メッシュの雨量値を示したものである。いずれの地点においても X バンド MP レーダは、C バンドレーダと比較して地上雨量計で観測雨量の時間変化及び降雨量を精度よく観測できていることが確認できる。

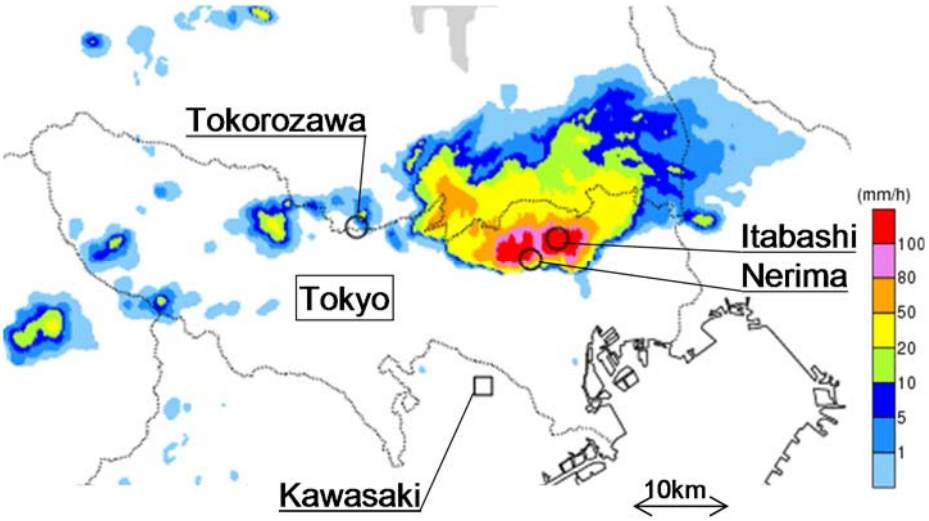


図-Ⅲ2.4.5.5.1 X バンド MP レーダによる観測状況（2010 年 7 月 5 日）

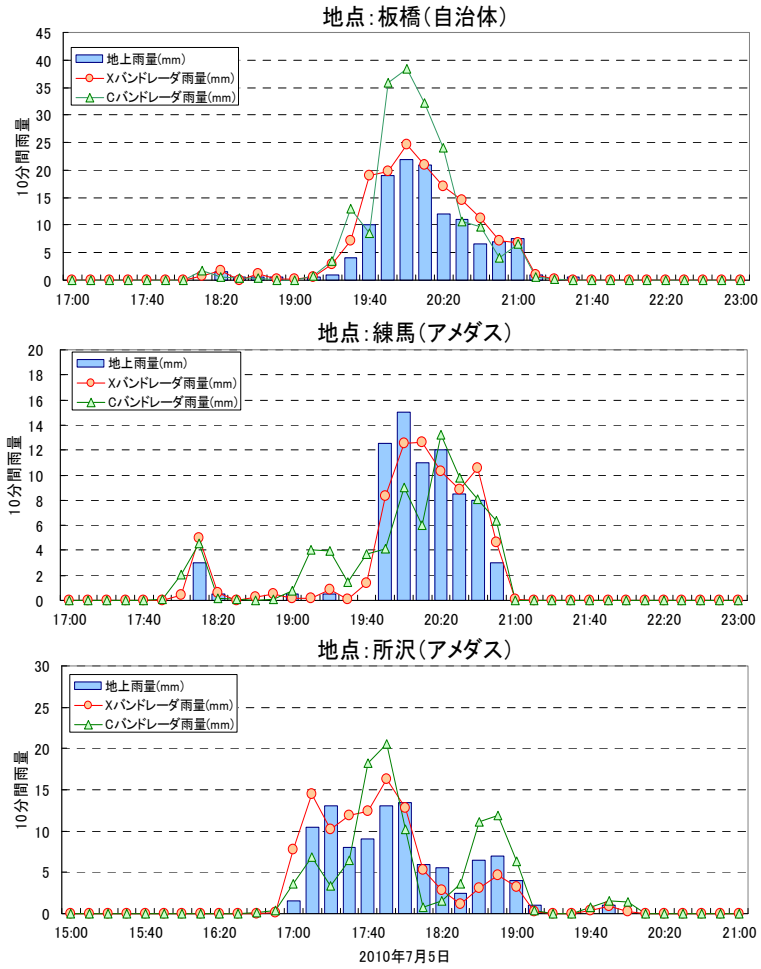


図-Ⅲ2.4.5.5.2 X バンド MP レーダ合成雨量と地上雨量の比較（2010 年 7 月 5 日）

（２） 個別レーダの観測精度

2010 年 7 月 1 日～9 月 30 日までにおいて各地域の地上雨量計で時間雨量が大きい上位 10 事例を用いて、X バンド MP レーダの雨量観測精度を検証した。各レーダサイトの観測範囲内（半径 60km）にある全ての地上雨量計とそれに対応したメッシュのレーダ雨量を 10 分雨量値で比較した散布図を図-Ⅲ2.4.5.5.3 に示す。縦軸は X バンド MP レーダ雨量、横軸は地上雨量を示している。X バンド MP レーダの雨量算出は、1 分間降雨強度で約 14mm/h 以上に相当する降雨の場合は Kdp-R 関係式、約 14mm/h 未満の場合は Z-R 関係式により行われることから、図中の黒色で示すプロット点は X バンド MP レーダの 10 分間積算雨量が全て Z-R 関係式で求められた積算雨量を意味し、緑色で示すプロット点は 10 分間積算雨量の 9 割を Kdp-R 関係式で求めた積算雨量を意味する。実線は X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の関係の回帰直線を示している。X バンド MP レーダ雨量は、地上雨量に対してある程度のばらつきを有し、いくつかのレーダサイトではやや過小評価傾向を示していることが確認できる。ただし、X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の比較は、地上雨量計を真値と仮定しているため、レーダ観測固有の誤差の他に、レーダ観測と地上雨量観測の空間的代表性（目標体積中の平均的雨量と点雨量）や時間的代表性（1 分毎の瞬間値の積算と連続積算値）、測定高度（上空と地上の降水）の違い等に起因する誤差を含んだ評価であることに留意する必要がある。

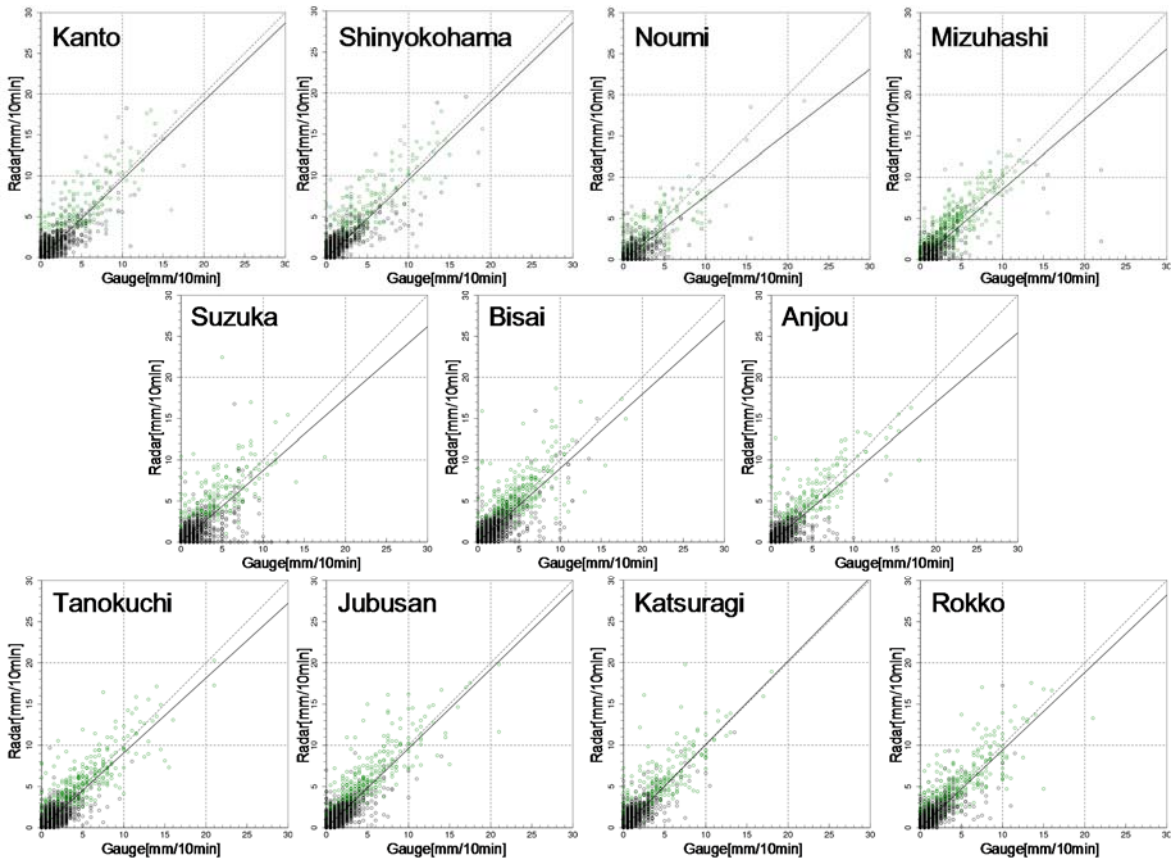


図-Ⅲ2.4.5.5.3　X バンド MP レーダと地上雨量の比較

（３） 1分雨量の観測精度

図-Ⅲ2.4.5.5.1 に示す川崎にディスドロメータを設置し降雨を観測した。ディスドロメータにより観測した 1 分間雨量と X バンド MP レーダ雨量を比較した結果を図-Ⅲ2.4.5.5.4 に示す。X バンド MP レーダ雨量は、ディスドロメータの設置場所に対応した 1 メッシュの合成雨量(1 分間値)である。実際の降雨は 1 分毎に大きく変動していることが確認できる。X バンド MP レーダ雨量は、1 分毎の降雨の変動及び降雨量を概ね精度良く観測できていることが確認できる。一方で、雨量の差異や降雨波形のズレが一部で確認できるが、これは上記で述べたとおり、レーダ観測固有の誤差、レーダ観測と地上雨量観測の空間的代表性、時間的代表性、測定高度（上空と地上の降水）の違い等に起因するものと考えられる。

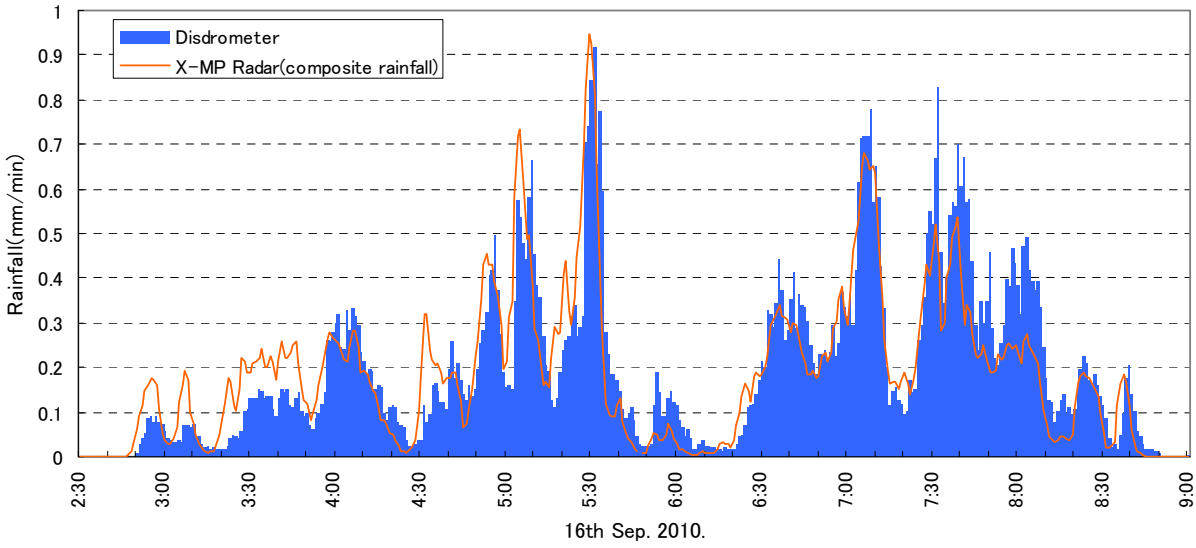


図-Ⅲ2.4.5.5.4 Ｘバンド MP レーダ合成雨量とディスドロメータ雨量による１分雨量の比較

（観測日時：2010 年 9 月 16 日、観測場所：川崎国道事務所）

（４） XRAIN雨量情報の高精度化の取り組み

試験運用期間中の XRAIN 雨量情報の観測精度を全体的に評価した結果、上記に一例を示したとおり既存レーダ雨量と比較して同等以上の精度があることが確認できている。しかし、個々の事例、時間、場所を局所的に評価すると以下に示す課題が確認された。

■強雨時における Z-R 関係式使用による雨量算定精度の低下

図-Ⅲ2.4.5.5.5 は、京都アメダスに対応する合成雨量メッシュおける地上雨量と合成雨量の時系列である。強雨時において合成雨量の過小評価が確認できる。

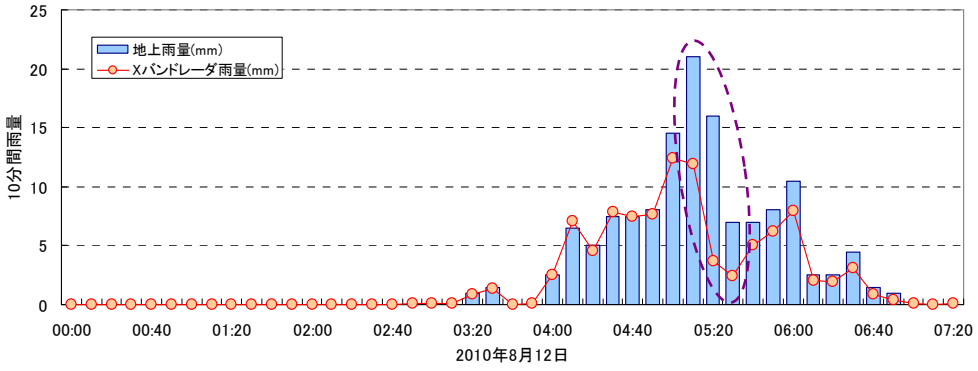


図-Ⅲ2.4.5.5.5　Ｘバンド MP レーダ雨量と地上雨量の比較（京都アメダス）

強雨域の裏側では、降雨減衰により SNR（Signal Noise Ratio）が小さくなりやすく、Kdp-R 関係式の使用条件のうち SNR に関する条件を満たさないため、強雨時に Z-R 関係式が用いられ、さらに、強雨用の雨滴定数は、十分な降雨事例を確保して同定されていないため、豪雨時にレーダ雨量が過小傾向を示していると考えられる。この課題への対応として、Kdp-R 関係式の使用条件の SNR の閾値について引き下げ、また、強雨用の雨滴定数の同定を行った。

■合成処理における雨量算定精度の低下

図-Ⅲ2.4.5.5.6 は、枚方出張所の地上雨量とそれに対応するメッシュのレーダ雨量、合成雨量を比較したものである。地上雨量と合成雨量を比較して、強雨時において合成雨量が過小となっている。また、レーダ雨量については、枚方出張所から距離が近い田口、鷲峰山、六甲局は Kdp-R 関係式でレーダ雨量が算出され、地上雨量と良く対応しているが、距離が遠い田口レーダでは Z-R 関係式により降雨が算出され、地上雨量と比較して過小となっている。

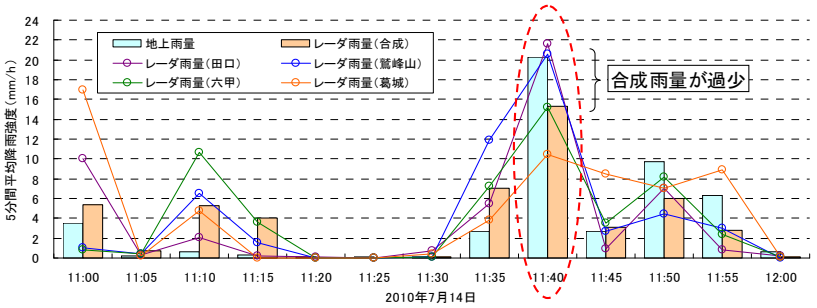


図-Ⅲ2.4.5.5.6　地上雨量とレーダ雨量、合成雨量の比較（枚方出張所）

レーダ遠方では、距離減衰により Kdp-R 関係式の使用条件のうち SNR に関する条件を満たさないことにより、Z-R 関係式により降雨算出がされ易い。そのため、枚方出張所に距離が近い田口、鷲峰山、六甲局は Kdp-R 関係式が用いられ、距離が遠い田口局では Z-R 関係式が用いられている。また、レーダ遠方では降雨減衰の影響を受け易く、さらに降雨減衰補正が不十分になり易いことから Z-R 関係式による降雨算出の精度が低下する。これらの理由から、距離が遠く Z-R 関係式が用いられた田口局は過小なレーダ雨量が算出され、田口局のレーダ雨量の影響により合成雨量が過小評価となっていたと考えられる。現状の合成処理では、観測高度に関する重み付けによりレーダと雨域の距離がある程度考慮されて合成されているものの、仰角が低く遠方でも観測高度が低いレーダでは、距離の重みが考慮されにくい。この課題への対応として、レーダからの距離を考慮した合成処理手法の検討を行った。

■弱雨時の過小評価傾向

表-Ⅲ2.4.5.5.1 は、弱雨時（地上雨量が 3mm/10 分未満）及び強雨時（地上雨量が 3mm/10 分以上）の 10 分雨量について、合成雨量と地上雨量の関係から求めた精度指標（回帰係数）の４地域平均である。弱雨時は Z-R 関係式が用いられることが原因で弱雨時の精度が過小傾向である。

表-Ⅲ2.4.5.5.1　弱雨、強雨時の観測精度

	弱雨	強雨
Xバンド MP レーダ	0.82	0.93
C バンドレーダ	0.88	0.98

弱雨用雨滴定数は、試験配信前の数事例程度で同定されており、雨滴定数の代表性が十分とは言えないことから、十分な降雨事例を確保して再同定を行った。また、可能な限り弱雨に対しても Kdp-R 関係式により降雨強度算出をするため Kdp-R 関係式の使用条件の見直しを行った。

■電波消散による観測不能領域の発生

Ｘバンド MP レーダの特性から当初より想定されていたが、強雨時に降雨減衰により電波が消散し観測不能領域が発生することが確認された。隣接地域のレーダを用いて複数レーダにより観測される領域の拡大を行った。

表-Ⅲ2.4.5.5.2 は、上記に示した課題とその対応策の一覧である。

表-Ⅲ2.4.5.5.2 XRAIN の観測精度に関する課題一覧

課題	内容	対策
強雨域の精度向上	降雨減衰の大きい強雨域の裏側、遠方において、強雨時の雨量推定精度が過少評価となる場合がある。	強雨用(Z＞35dBZ)の雨滴定数(B、β)の設定
		Kdp-R関係式を採用する閾値の見直し
弱雨域の精度向上	弱雨域の雨量推定精度が過少評価の傾向にある。	弱雨用(Z＜35dBZ)の雨滴定数(B,β)の見直し
合成雨量の精度向上	合成時に、レーダサイトからの距離が遠い(精度の悪い)データの影響を受け、合成雨量が過少評価となることがある。	合成手法の高度化 ・レーダサイトからの距離、雨量算定方式等を考慮した合成処理の検討
電波消散対策	降雨減衰により強い降雨の裏側が観測不能となる。	隣接合成 ・合成雨量作成に隣接地域のレーダも利用

以下に、上記課題の対策に関する検討の概要を示す。

雨滴定数の見直しによる弱雨、強雨の精度向上

弱雨用、強雨用の雨滴定数は、前年の出水期の事例で同定した雨滴定数で、その年の出水期の定数としており、毎年見直しを行い、弱雨、強雨の精度向上を図っている。

Kdp-R 関係式の使用条件の見直しによる弱雨、強雨の精度向上

強雨時及び弱雨時に Kdp-R 関係式の使用頻度を増やし観測精度の向上を図るために使用条件の見直しを行った。なお、H22 年度試験運用における Kdp-R 関係式の使用条件は以下のとおりである。

H22 年度試験運用の Kdp-R 関係式の使用条件：

Zh=30dB 以上かつ Kdp=0.5°/km 以上かつ SNR=10[dB]以上

各閾値を引き下げ悪影響が生じないことを確認して、Kdp-R 関係式の見直しを行った。まず、SNR 閾値を引き下げることで強雨域（特に降雨減衰が大きい強雨域裏側の電波消散領域付近）での Kdp-R 関係式の使用頻度を増加させ強雨時の観測精度の向上を図る。SNR 閾値の引き下げの検討にあたり、SNR 閾値を引き下げることで弱雨域においてノイズ的な異常に大きい Kdp が生じないことを留意した。その結果、SNR 閾値はほぼ考慮しないのと同等である SNR 閾値=-50 としてもノイズ的な Kdp が見られないことを確認した。図-Ⅲ2.4.5.5.7 は、SNR 閾値を 10 とした場合、考慮しないことと同等である-50 とした場合の Kdp-R 関係式により算出された雨量分布を示している。SNR 閾値を変更したことで、Z-R 関係式が使用されていた強雨域で Kdp-R 関係式が使用されるようになったことが確認できる。

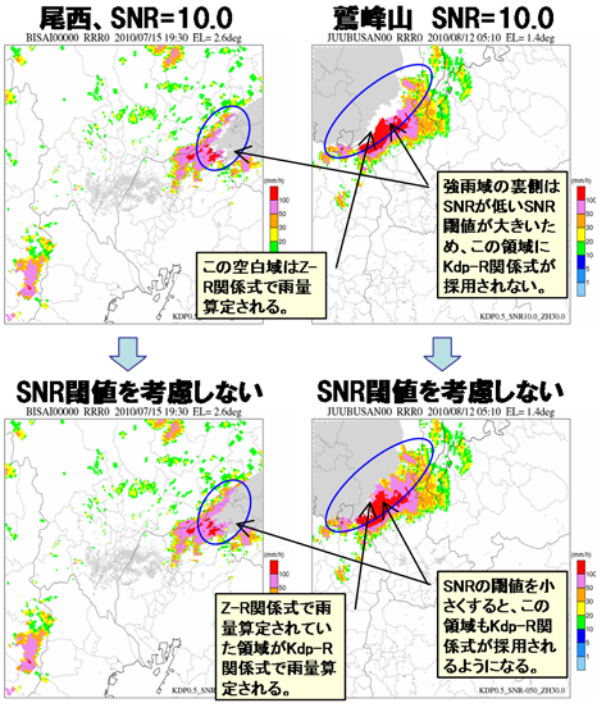


図-Ⅲ2.4.5.5.7　SNR 閾値の引き下げの検討（Zh 閾値：30[dB]、Kdp 閾値：0.5°/km）

次に、Zh 閾値を引き下げ、弱い降雨を可能な限り Kdp-R 関係式で雨量算定することで弱雨時の精度向上を図った。Zh 閾値の引き下げの検討にあたり、Zh 閾値を引き下げることで弱雨域においてノイズ的な異常に大きい Kdp が生じないことを留意した。図-Ⅲ2.4.5.5.8 は、Zh 閾値を 30dBZ から 22dBZ まで引き下げた時の雨量分布を示している。Zh 閾値を引き下げると弱雨域内にノイズ的な Kdp が出現している。そのため、Zh 閾値は変更しないこととした。

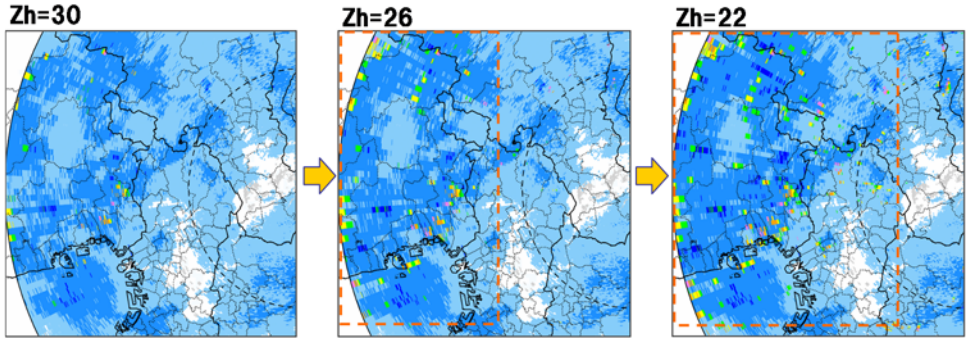


図-Ⅲ2.4.5.5.8　Zh 閾値の引き下げの検討（SNR 閾値：-50、Kdp 閾値：0.5°/km）

最後に、Kdp 閾値を引き下げ、弱い降雨を可能な限り Kdp-R 関係式で雨量算定することで弱雨時の精度向上を図った。Kdp 閾値の引き下げにあたり、Kdp 閾値を引き下げることで異常な値が生じないことを留意した。図-Ⅲ2.4.5.5.9 は、Kdp 閾値を 0.5、0.1 とした場合の雨量分布図を表しており、上段は Kdp-R 関係式で算出された雨量分布、下段は Kdp-R 及び Z-R 関係式で算出された雨量分布を示している。この結果より、Kdp 閾値は 0.1°/km としてもノイズ等は見られないことが確認できる。

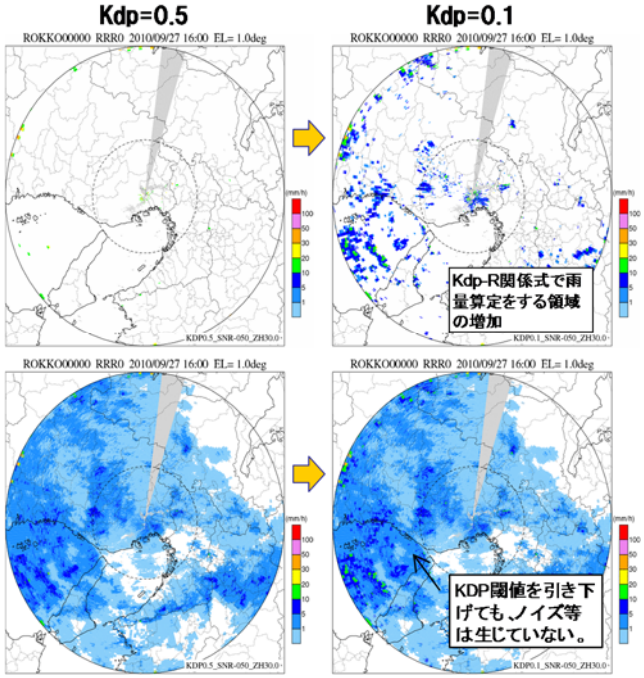


図-Ⅲ2.4.5.5.9　Kdp 閾値の引き下げの検討（SNR 閾値：-50、Zh 閾値：30[dB]）

以上、Kdp-R 関係式の使用条件を見直した結果は下記のとおりとなった。

Kdp-R 関係式の使用条件：

Zh=30dB 以上かつ Kdp=0.1°/km 以上かつ SNR=-50[dB]以上

使用条件の見直し前は約 14mm/h の降雨強度の降雨に対して Kdp-R 関係式が使用されていたが、見直し後は約 4mm/h の降雨に対して Kdp-R 関係式が使用されることとなり、Kdp-R 関係式の使用頻度が 2.5 倍に増加している。

合成処理の高度化

配信されるデータは、各レーダで観測された雨量値を合成処理しているため、レーダサイト近傍であっても遠方のレーダの雨量値が合成に含まれる領域は、過小評価傾向を示す場合がある。図-Ⅲ2.4.5.5.10 は、近畿地域のレーダから 60ｋｍ以遠のデータが合成に含まれる領域をピンクで示している。図中の〇印はアメダス観測所を示しており〇印の色は、2011 年の台風 12 号事例での X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の回帰係数を示している。ピンクで示される領域内では回帰係数が小さく過小評価傾向であることが確認できる。

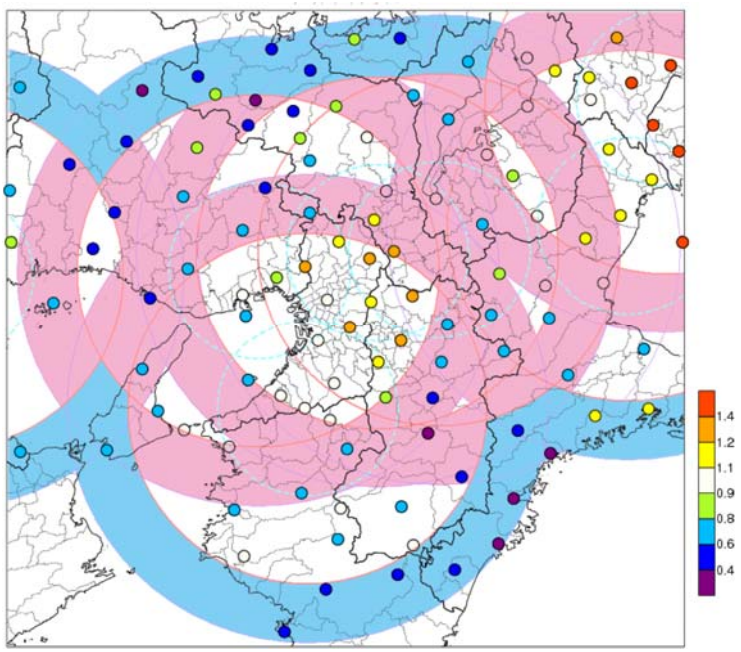


図-Ⅲ2.4.5.5.10 レーダから 60ｋｍ以遠のデータが合成に含まれる領域の過小評価傾向

合成処理はクレスマン内挿法を採用しており、データの影響半径に関する重みと観測高度に関する重みの積による重み付け平均により行われる。上記の問題を解決するために、前記の重みに加え、レーダからの距離、雨量推定方式による重みを考慮した。レーダからの距離に関する重みは、半径 30km 以内の精度が非常に高く、60km 以遠は精度が低いことから、基地局から 30km までは重み係数を 1 とし、30km から 60km では重み係数を 1 から線形的に 0.01 まで減少させ、60km 以遠では 0.01 としている。また、雨量推定方式に関する重みについて、Z-R 関係式は、基地局から 30km 程度は比較的精度が良いことから、重み関数は基地局から 30km までは重み係数を 1 とし、30km から 60km では重み係数を 1 から線形的に 0.01 まで減少させ、60km 以遠では 0.01 としている。Kdp-R 関係式は、Z-R よりも遠方まで精度が高いため、重み係数は基地局から 45km までは重み係数を 1 とし、45km から 60km では重み係数を 1 から線形的に 0.01 まで減少させ、60km 以遠では 0.02 としている。Kdp-R 関係式の距離に応じた重みは、Z-R と Kdp-R 関係式の重みの差を大きくすると、雨域形状が不自然となるため、1 を超過しない範囲で Z-R 関係式の重みに対して 2 倍以内としている。

図-Ⅲ2.4.5.5.11 の横軸の H23 は合成処理において、データの影響半径に関する重みと観測高度に関する重みを考慮して運用した H23 年度観測結果を示しており、H24 はレーダからの距離、雨量推定方式による重みを加えて運用をした H24 年度観測結果を示している。なお、領域 1、2、3、4 は大雑把にはレーダサイトから離れることを意味している。比較する事例が異なっているため正確ではないが、減衰補正を改善したことと合成処理にレーダからの距離、雨量推定方式による重みを加えて考慮することにより、観測精度が空間的に均一化されていることが確認できる。

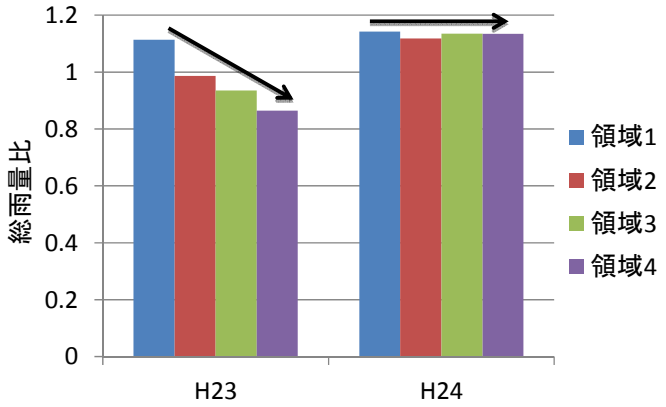


図-Ⅲ2.4.5.5.11　減衰補正及び合成処理の改良前後の近傍、遠方の総雨量比の比較

隣接合成

電波消散による観測不能領域の発生を回避するには、複数台で異なる方向から観測することが有効であるため、隣接地域のレーダで当該地域を観測範囲に含むレーダを、合成処理において当該地域のレーダとして合成（隣接合成）することとした。隣接合成により複数台で観測されることとなる領域を対象に、その領域の地上雨量により精度検証を行い精度低下がないことを確認した上、実施している。サイト遠方の観測データによって隣接合成され複数台観測となる場合は、精度低下を招く場合があることから、可能な限りサイト近傍の観測データにより複数台観測となるようにした。

４．５．６　XRAIN 雨量情報の利活用

XRAIN 雨量情報は、従来からレーダ雨量が利用されている降雨予測、河川管理、自治体の災害対応等の他に、道路交通等の分野にも利用の用途が拡大されつつある。以下に、国土交通省における XRAIN の利活用事例、他分野における XRAIN の利活用事例を紹介する。

（１） 国土交通省におけるXRAINの利活用

例１）洪水予測の入力情報としての活用

国土交通省が管理する各河川の洪水予測システムは、レーダ雨量情報を入力情報の一つとして運用されている。洪水予測システムには、分布型流出モデルの採用が進められており、レーダ雨量計によるメッシュ（面的）雨量情報を直接的に反映できるようになっている。洪水予測の精度向上においては、実況雨量情報のみならず、特に、降雨予測情報の精度向上が期待されている。（図-Ⅲ2.4.5.6.1）

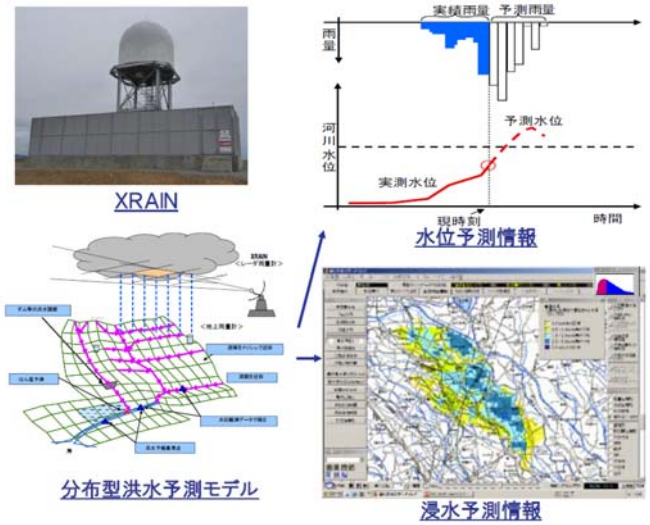


図-Ⅲ2.4.5.6.1 レーダ雨量情報の洪水予測への活用

例２）アラートメール配信のトリガー情報としての活用

国土交通省では、レーダ雨量計が設定値を超える強雨を観測した際に、関係者にアラートを配信し、迅速な災害対応に役立てている例もある。（図-Ⅲ2.4.5.6.2）

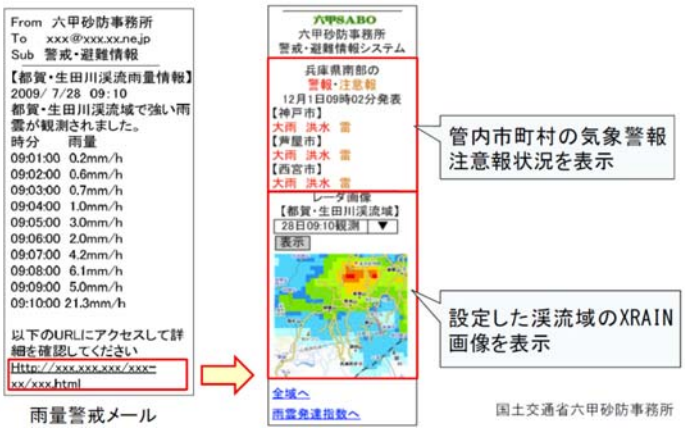


図-Ⅲ2.4.5.6.2　レーダ雨量情報を用いたアラートメール配信

例３）河道閉塞箇所における代替雨量情報としての活用

レーダ雨量情報は、水防活動、避難発令のための参考情報としても利用されている。H23 年台風 12 号においては、大雨に伴う土砂崩れにより発生した河道閉塞箇所に雨量計を設置するまでの間、閉塞箇所上流の詳細な雨量の代替情報源として活用された（図-Ⅲ2.4.5.6.3）。



図-Ⅲ2.4.5.6.3　河道閉塞箇所とその集水域を示した Web 画面

例４）高解像度降水ナウキャスト

気象庁では、XRAIN と気象庁 C バンドレーダを合成した高分解能のレーダ画像を作成し、降水予測を行う高解像度版降水ナウキャストの提供が行われている（図-Ⅲ2.4.5.6.4）。

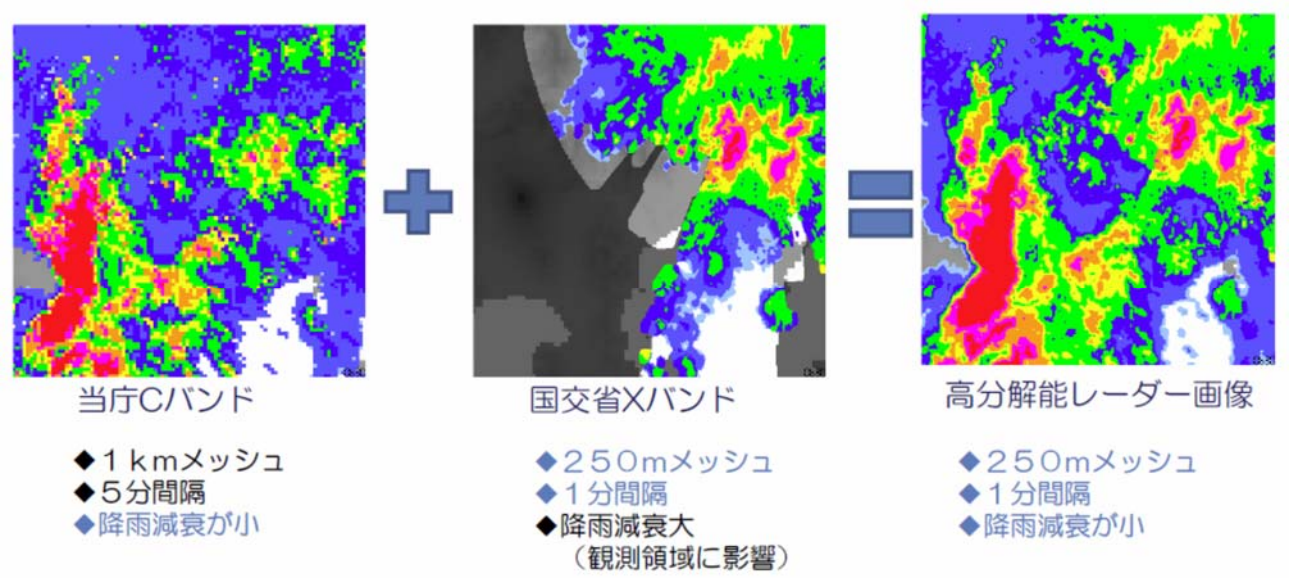


図-Ⅲ2.4.5.6.4　XRAIN と気象庁Ｃバンドレーダを合成した高解像度版ナウキャスト

（２） XRAINの他分野利用

スマートフォン向けのアプリ等の開発

XRAIN の観測データを利用して、（一財）日本気象協会等でスマートフォン向けのアプリ（応用ソフト）等を開発し一般に提供している。具体的には、予測雨量強度を表示するサイトや AR（拡張現実）機能により観測データをカメラ画像に重ねあわせて表示するアプリを提供している。（図-Ⅲ2.4.5.6.5）



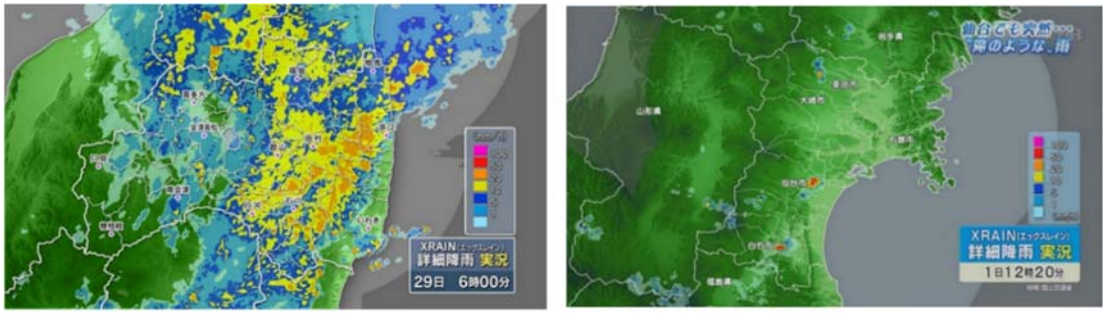
図-Ⅲ2.4.5.6.5 レーダ雨量情報を利用したスマートフォン向けアプリ

テレビ局での活用

東日本放送（宮城県）では、平成 24 年 6 月にテレビ局として初めて XRAIN の情報の放送を開始した。

また、福島中央テレビでは、平成 26 年 3 月から XRAIN の情報の放送を開始し、天気予報のコーナー等で利用している。

さらに、NHK では XRAIN 配信エリアを対象に、平成 27 年 3 月 30 日から XRAIN の情報の放送を開始している。（図-Ⅲ2.4.5.6.6）



東日本放送のオンエア画面　　福島中央テレビのオンエア画面

図-Ⅲ2.4.5.6.6 レーダ雨量情報の放送

車載ナビ向け気象・災害情報の提供

（一財）道路交通情報通信システムセンターでは、XRAIN の雨量情報から、ドライバーの前方視認性が低下する降雨強度とされる 50 ㎜/h 以上の大雨が発生しているエリア（250m 四方メッシュ単位）を情報提供するサービスを、新たな道路交通情報サービス「VICS WIDE」（ビックス ワイド）の一つとして、平成 27 年 4 月 23 日より開始している。（図-Ⅲ2.4.5.6.7）

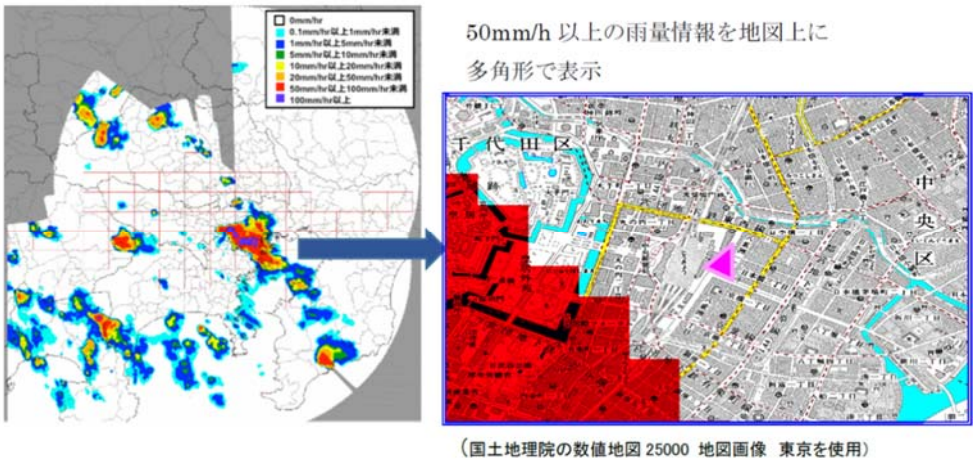


図-Ⅲ2.4.5.6.7　カーナビによるレーダ雨量情報の提供

地方公共団体の電子地図サービスでの活用

各地方公共団体内の各施設・情報を案内する電子地図に、XRAIN の観測データを重ね合わせ、リアルタイムの降雨情報を提供している。（図-Ⅲ2.4.5.6.8）



図-Ⅲ2.4.5.6.8　自治体におけるレーダ雨量情報の活用

４．５．７　XRAIN 雨量情報を利用した技術研究開発

XRAIN 雨量情報を利用した技術研究開発が種々の枠組みの下に行われている。以下に研究開発の枠組みとその概要を示す。

河川技術研究開発制度

XRAIN の活用に関する技術研究開発を課題とした公募を行い、選定された研究グループにより、レーダ観測技術の向上、降雨予測技術の高度化、水災害予測技術の高度化、避難情報等への活用の研究が行われている（表-Ⅲ2.4.5.7.1）。

表-Ⅲ2.4.5.7.1　河川技術研究開発制度に選定されたテーマ一覧

【XバンドMPレーダ等の観測情報の活用に関する技術開発】

テーマおよび概要		提案者名
テーマ	XバンドMPレーダと雲解像モデルによる短時間・極短時間量的降水予測法の開発	名古屋大学 坪木　和久
概要	MPレーダと雲を解像する気象モデルを結合し、局地的豪雨などについて、短時間(1～3時間)および極短時間(30分程度)の高精度量的予測法を開発する	
テーマ	ゲリラ豪雨予測手法の開発と豪雨・流出・氾濫を一体とした都市スケールにおける流域災害予測手法の開発	京都大学 中北　英一
概要	都市域を対象に、「ゲリラ豪雨」・「中小河川や下水道内の流れ」・「浸水氾濫」を一体とした豪雨災害の予知・予測手法を開発する	
テーマ	XバンドMPレーダの効果的実利用へ向けての降雨観測・予測とCバンドレーダとの連携活用に関する技術研究開発	(独)土木研究所 深見　和彦
概要	XバンドMPレーダに必要な精度を明確化し、高速な豪雨予測手法とCバンドレーダ雨量計との連携技術を開発する	
テーマ	MPレーダデータによる定量的降雨量推定とユーザの立場からの避難支援システム開発に関する研究	(株)建設技術研究所 藤原　直樹
概要	河川管理者、住民等の様々な雨量情報ニーズを満足するための、MPレーダ運用方法、避難支援システム等の研究を行う	
テーマ	MPレーダネットワークによる雨と風の3次元分布推定手法の開発	(独)防災科学技術研究所 真木　雅之
概要	局地的大雨の監視と予測精度の向上に資するために，雨と風の3次元分布および風水害ポテンシャル指標の算出手法を開発する	

例１）豪雨の早期探知による直前予測

京都大学では、XRAIN の 3 次元の降雨分布情報から、上空で豪雨へ発達段階にある雨域を探知し、十数分先の豪雨を予測する技術研究開発を行っている（図-Ⅲ2.4.5.7.1）。

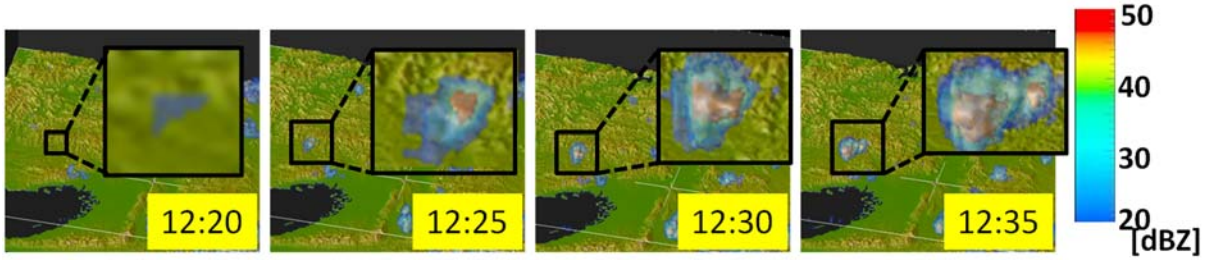


図-Ⅲ2.4.5.7.1　XRAIN による 3 次元降雨分布情報により捉えた発達段階の豪雨

例２）XRAIN 情報を同化した降雨予測

名古屋大学では、物理学的降雨予測モデル(CReSS)の計算に XRAIN 情報を取り込むことで数時間先の降雨予測の精度向上を目指す技術研究開発を行っている（図-Ⅲ2.4.5.7.2)。

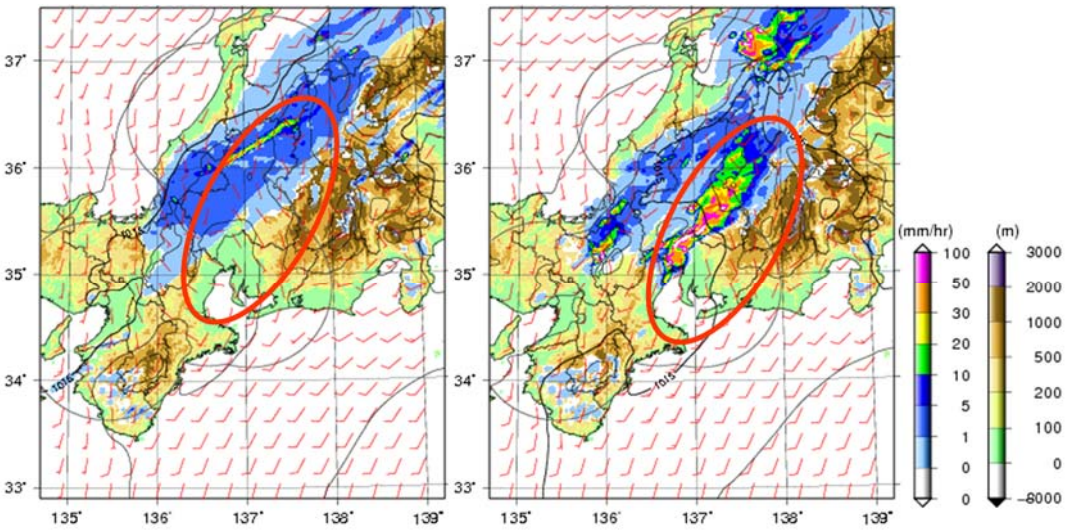


図-Ⅲ2.4.5.7.2　2010 年 7 月 15 日の可児・八百津の豪雨の再現

（左：XRAIN データの同化なし、右：同化あり）

技術開発コンソーシアム

XRAIN 等から得られるデータを活用した技術研究開発を効果的に進めるため、産学官からなる技術開発コンソーシアムを設置し、参画者には、X バンド MP レーダの観測データを提供することで技術研究開発の一層の促進を図っている。コンソーシアムには 40 機関程度が参画しており、豪雨の予測技術や洪水予測の高度化等の技術研究開発が行われている。

XRAIN 雨量データ提供社会実験

XRAIN 雨量データを一般に提供し、データ受信者の利用方法、加工・処理方法、利活用による効果及びデータ提供方式への要望等について調査・分析を行い、XRAIN 雨量データを避難行動や防災活動等に役立てるための更なる活用方法等を検討することを目的とした社会実験が行われている。50 者弱のデータ受信者により、XRAIN 雨量データを避難行動や防災活動等の利用や研究活動、商品・サービス開発、業務管理への利用等の検討が進められている。

参考文献：

気象庁（2007）気候変動監視レポート

土屋修一、山地秀幸、川崎将生（2016）XRAIN雨量観測の実用化技術に関する検討資料、国土技術政策総合研究所資料、No.909.*

東京大学など合同研究チーム(2004年9月16日報道発表)

土木学会都賀川水難事故調査団（2009）都賀川水難事故調査について、平成20年度河川災害に関するシンポジウム

中北英一、竹畑栄伸、中川勝広（2007）最新型Cバンド偏波レーダを用いた降雨量推定精度の検証、水工学論文集、第51巻、pp.325-330.

松浦直、佐藤武司、深見和彦、金木誠（1999）直交二偏波レーダにより観測された雨滴粒径分布の時空間分布特性、水文水資源学会1999年研究発表会要旨集, pp.18-19.

吉野文雄、水野雅光、水野秀幸、五十嵐久敬（1988）二重偏波・ドップラレーダによる降水観測について、水理講演会論文集、第32巻、pp.383-388.

Alexander V.R., Terry J. S., Donald W. B., Pamela L. H., Scott E.G. (2005) The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.86, No.6, pp.809-824.

Bringi VN., Chandrasekar V. (2001) Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge University Press, pp.636.

Iwanami K., Misumi R., Maki M., Wakayama T., Hata K., Suto M. (2001) Development of Multiparameter Radar System on Mobile Platform, Preprints 30th Inter. Conf. Radar Meteor., pp.104-106.

Iwanami K., Le Bouar E., Testud J., Maki M., Misumi R., Park S-G., Suto M. (2003) Application of the Rain Profiling Algorithm “ZPHI” to the X-band Polarimetric Radar Data Observed in Japan, Proc. 31st Conf. Radar Meteor., pp.274-277.

Maki M, Iwanami K, Misumi R, Park S-G, Moriwaki H, Maruyama K, Watabe I, Lee D-I, Jang M, Kim H-K, Bringi VN, Uyeda H. (2005) Semi-Operational Rainfall Observations with X-band Multi-parameter Radar, Atmos. Sci. Letters, 6,pp.12-18

Maki M., Park S-G., Bringi VN. (2005) Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimate of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 83, pp.871-893.

Park S-G., Maki M., Iwanami K., Bringi VN., Chandrasekar V. (2005) Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X-band Wavelength. Part II: Evaluation and Application, J. Atmos. Oceanic Technol., 22, pp.1633-1655.

４．６　都市雨水排水における効果的な浸水対策

第Ⅱ部第３章での検討結果より、過去 50 年間の変化傾向がそのまま継続したと仮定した場合、50 年後の降雨強度は、最大で 1.3 倍程度増加することが推定された。また、この降雨変化を基に設定した降雨シナリオ（図-Ⅱ.3.1.2）を用い、3 都市の下水道排水区における既存の浸水対策に与える影響評価を行った結果、浸水原因や必要となる対策が地区の面積や降雨特性毎に異なることが確認できた。そこで、将来的な降雨強度増加時に対応できる効果的な浸水対策について、仮想排水区を用いた流出シミュレーションによる検討を実施した。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型のⅠとⅡに相当する（Ⅲでない理由も含め 2.2.2(1)参照）。

４．６．１　仮想排水区を用いたシミュレーション

（１） 仮想排水区と降雨シナリオの設定

既存対策施設（流下管＋ポンプ施設）が設置された排水面積が異なる 2 つの仮想排水区を設定した（図-Ⅲ2.4.6.1.1）。ここで排水区Ⅰは幹線レベルを、排水区Ⅱは枝線レベルの排水区を想定している。

降雨シナリオは、東京都における事例（東京都総合治水対策協議会 2009）を参考に設定した基準降雨強度（10 分間降雨強度: 124.5mm/h、60 分間降雨強度: 59.0mm/h）に対して、第Ⅱ部 3.1 と同様に、10 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ A、60 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ B、10 分・60 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ C とした（図-Ⅲ2.4.6.1.2）。さらに、各シナリオの 10 分間・60 分間降雨強度より特性係数法（(公社）日本下水道協会 2009）を用いて、シナリオ毎の降雨強度式を設定するとともに（表-Ⅲ2.4.6.1.1）、降雨波形は中央集中型、継続時間は 24 時間とするシナリオ毎のハイエトグラフを設定した（図-Ⅲ2.4.6.1.3）。

排水区	Ⅰ	Ⅱ
排水面積(ha)	200	2
L(m)(右図参照)	1,000	100
ポンプから最遠点までの距離(m)	2,500	250
流達時間(min)	50	10
流出係数	0.8	0.8

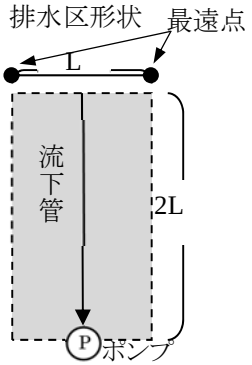


図-Ⅲ2.4.6.1.1　仮想排水区の設定

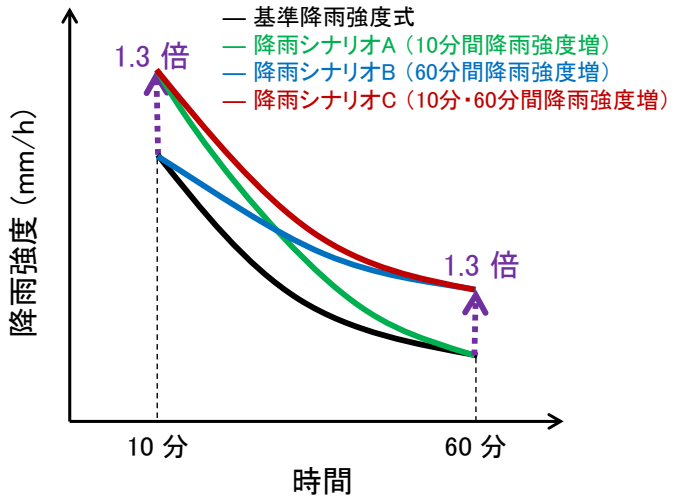


図-Ⅲ2.4.6.1.2　降雨シナリオ設定イメージ

表-Ⅲ2.4.6.1.1　設定降雨強度式

項目	基準降雨強度	降雨シナリオA	降雨シナリオB	降雨シナリオC
①60分降雨強度 (mm/h)	59.0	59.0	76.7	76.7
②10分降雨強度 (mm/h)	124.5	161.8	124.5	161.8
③特性係数：②/①	2.11	2.74	1.62	2.11
④b：$(60^{2/3}-10^{2/3}\times③)/(③-1)$	5	1.497	12.545	5
⑤a'：$60^{2/3}+④$	20.33	16.82	27.87	20.33
⑥a：①×⑤	1,200	993	2,139	1,560
降雨強度式：⑤/$(t^{2/3}+④)$	1,200/(t^2/3+5.0)	993/(t^2/3+1.5)	2,139/(t^2/3+12.5)	1,560/(t^2/3+5.0)

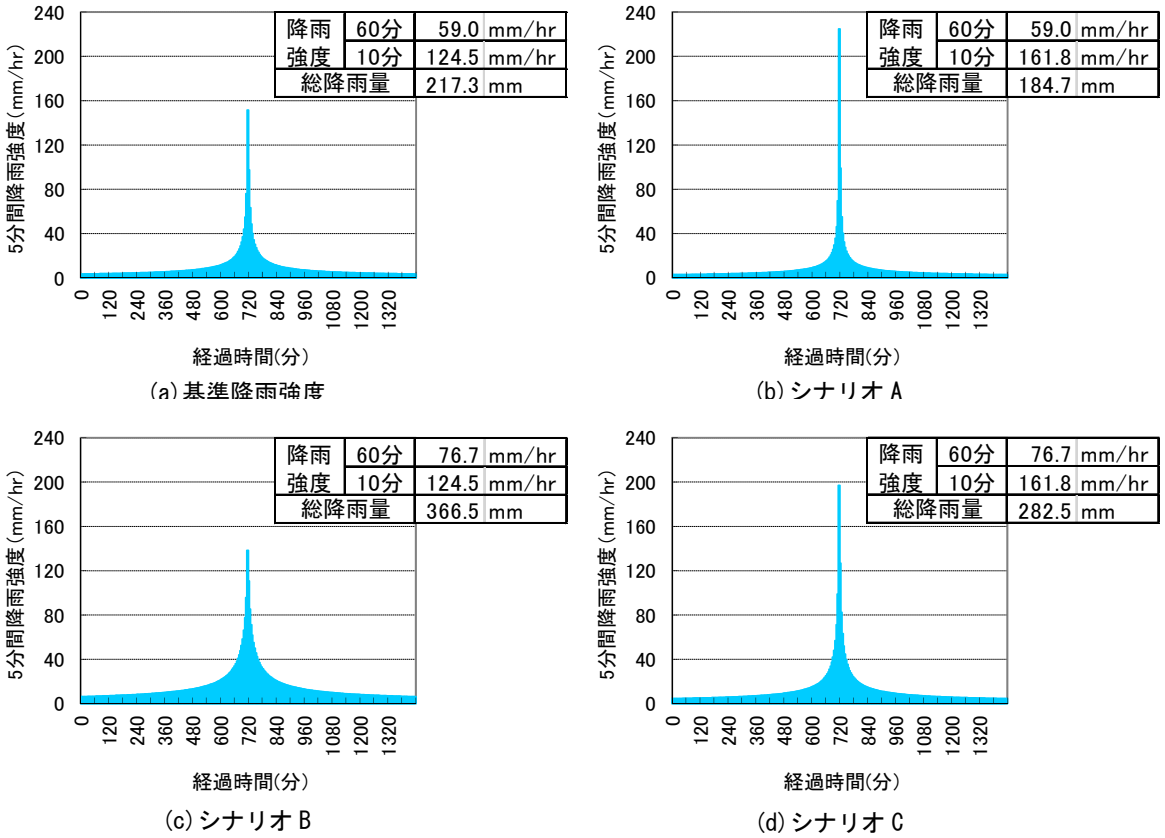


図-Ⅲ2.4.6.1.3　設定ハイエトグラフ

（２） 浸水対策必要量と浸水対策施設の設定

各排水区において増設が必要な浸水対策施設の規模を設定するためには、降雨シナリオ毎の浸水対策必要量を設定する必要がある。今回は、各降雨シナリオから算出したハイドログラフを基にして、図-Ⅲ2.4.6.1.4 に示す通り、基準降雨強度によるピーク流量の８割程度を各排水区における現状の排水能力（以下、許容放流量）とし、それを超過する雨水流出量を増設する浸水対策施設による浸水対策必要量として設定した。この設定に基づき算出した、各排水区における降雨シナリオ毎の浸水対策必要量を表-Ⅲ2.4.6.1.2 に示す。

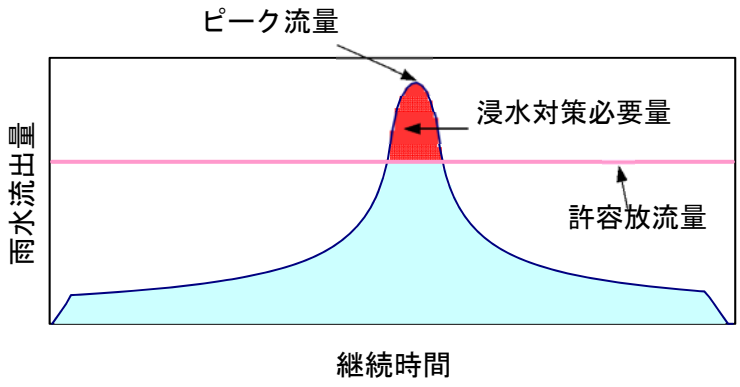


図-Ⅲ2.4.6.1.4　浸水対策必要量設定イメージ

表-Ⅲ2.4.6.1.2　浸水対策必要量

項目			排水区Ⅰ	排水区Ⅱ
排水面積(ha)　①			200	2
流達時間(分)			50	10
浸水対策必要量 (m^3) ②	シナリオA	10分間雨量増	9,538	148
	シナリオB	60分間雨量増	29,740	59
	シナリオC	10分・60分間雨量増	30,803	157
1ha当り対策量 (m^3/ha) ③＝②/①	シナリオA	10分間雨量増	48	74
	シナリオB	60分間雨量増	149	30
	シナリオC	10分・60分間雨量増	154	79
ピーク流量 (m^3/s) ④	シナリオA	10分間雨量増	29	0.72
	シナリオB	60分間雨量増	36	0.55
	シナリオC	10分・60分間雨量増	37	0.72
許容放流量 (m^3/s) ⑤	シナリオA	10分間雨量増	24	0.44
	シナリオB	60分間雨量増	24	0.44
	シナリオC	10分・60分間雨量増	24	0.44

次に、増設する浸水対策施設は、排水施設（流下管＋ポンプ施設）、貯留施設（雨水貯留管）、浸透施設（雨水浸透マス・トレンチ）を対象とした。なお本検討では、最下流端でポンプにより雨水排水を行うポンプ排水区を設定し、流下管の最下流端にはポンプ施設を設置する。対策施設の設置は、まず浸透施設による対策を優先し、浸透施設による対策が浸水対策必要量に満たない場合、不足分を排水施設及び雨水貯留管により対応する設定とした。また、雨水浸透施設の平均浸透強度は自治体の事例を参考に対象区域全域に浸透施設を設置した場合、6.0mm/h と設定した。

仮想排水区域内における対策施設の配置イメージを図-Ⅲ2.4.6.1.5 に示す。浸透施設は、表-Ⅲ2.4.6.1.3 に示す設置面積相当となるように排水区全域に均等に配置し、排水施設及び雨水貯留管は、それぞれの施設が受け持つ浸水対策必要量に対応した施設を排水区内に配置する。

また、増設する排水施設の配置は、排水区を面積が等しくなるように 4 つのブロックに等分割した上で、全延長 L_R の流下管について、最上流ブロックで $2L_R/5$、それ以外のブロックでそれぞれ $L_R/5$ の延長となるように配置する。さらに各ブロック内で配置する管径は、各ブロック下流端における雨水流出量を算定し、それが流下可能な管径（ブロック内では管径一定とする）を設定するとともに、最下流端には流下管からの雨水流出量を排水可能なポンプ施設を配置する。排水施設の設定イメージを図-Ⅲ2.4.6.1.6 に示す。

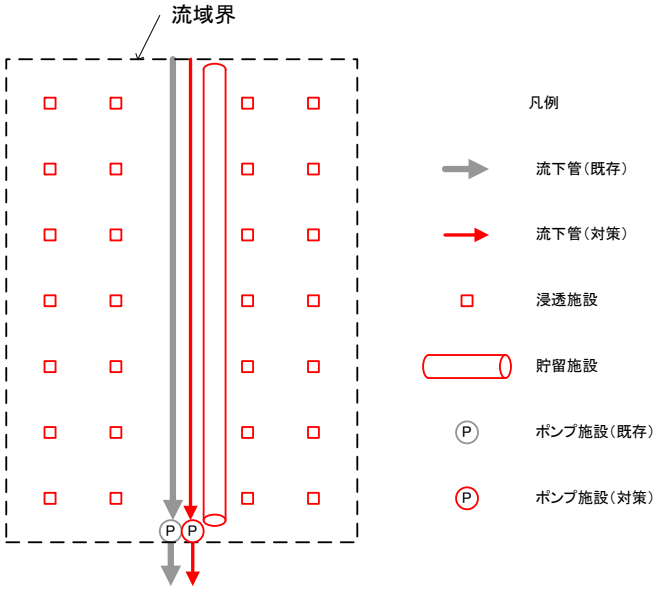


図-Ⅲ2.4.6.1.5　浸水対策施設配置イメージ

表-Ⅲ2.4.6.1.3　検討ケース

シナリオ	内容
浸透施設の設置	浸透施設の設置面積割合75%
	浸透施設の設置面積割合50%
	浸透施設の設置面積割合25%
	浸透施設の設置面積割合0%
貯留管及び流下管の設置	貯留管負担率100%、流下管負担率0%
	貯留管負担率75%、流下管負担率25%
	貯留管負担率50%、流下管負担率50%
	貯留管負担率25%、流下管負担率75%
	貯留管負担率0%、流下管負担率100%

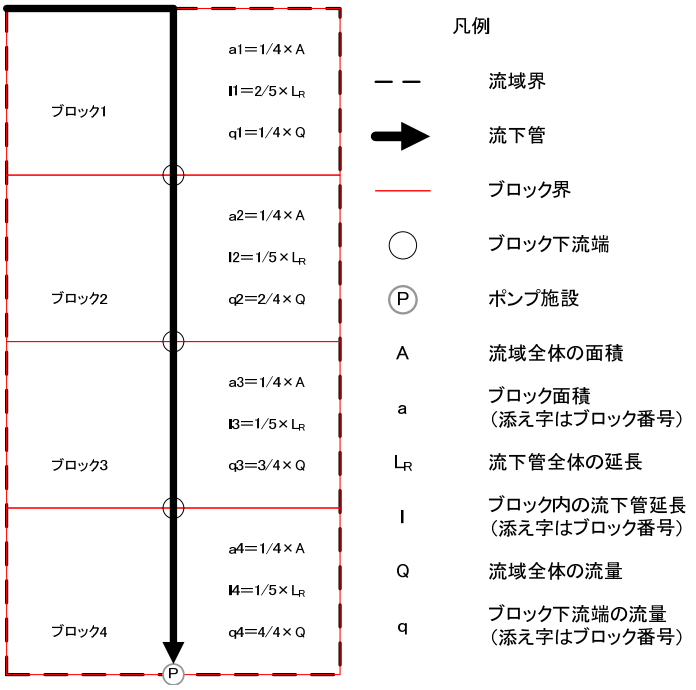


図-Ⅲ2.4.6.1.6　排水施設（流下管＋ポンプ施設）配置イメージ

（３） 整備効率性の評価

(1)で設定した仮想排水区（2 ケース）・降雨シナリオ（3 ケース）と表-Ⅲ2.4.6.1.3 のシナリオ（浸透施設設置 4 ケース×貯留管および流下管設置 5 ケース）を組み合わせた全 120 ケースについて、以下に基づき整備効率性の評価を行った。

○施設対策量の算出：(2)の考え方に基づきシナリオ毎に各対策施設で負担する対策量（以下、施設対策量）を算出した。

○整備費用の算出：既往文献や自治体事例を参考に設定した整備単価を施設対策量に乗じて、対策施設の整備費用を算出した。

○整備期間の算出：対策量と，既往文献や自治体事例を参考に設定した整備速度を基に、対策施設の整備期間を算出した。

○総合評価：各整備費用と整備期間について、指標の数値化を行った。具体的には、整備費用は施設対策量 1m³ あたり費用を指標値とし、整備期間は対策完了までに要する年数を指標値とした。これらの指標は単位が異なるため、降雨シナリオ・排水区毎に次式で点数の基準化を行った。

整備費用及び期間について基準化された点数
＝1-（指標値）／（表-Ⅲ2.4.6.1.3 の 20 ケースのうち最も劣る指標値）

○整備費用と整備期間の基準化された点数の和を基準化点数と定義し、それを比較することで評価を行った。基準化点数の値が大きいほど、整備効率性が高い評価となる。なお今回は、整備費用と整備期間の重みを同等（１：１）として評価を行っている。

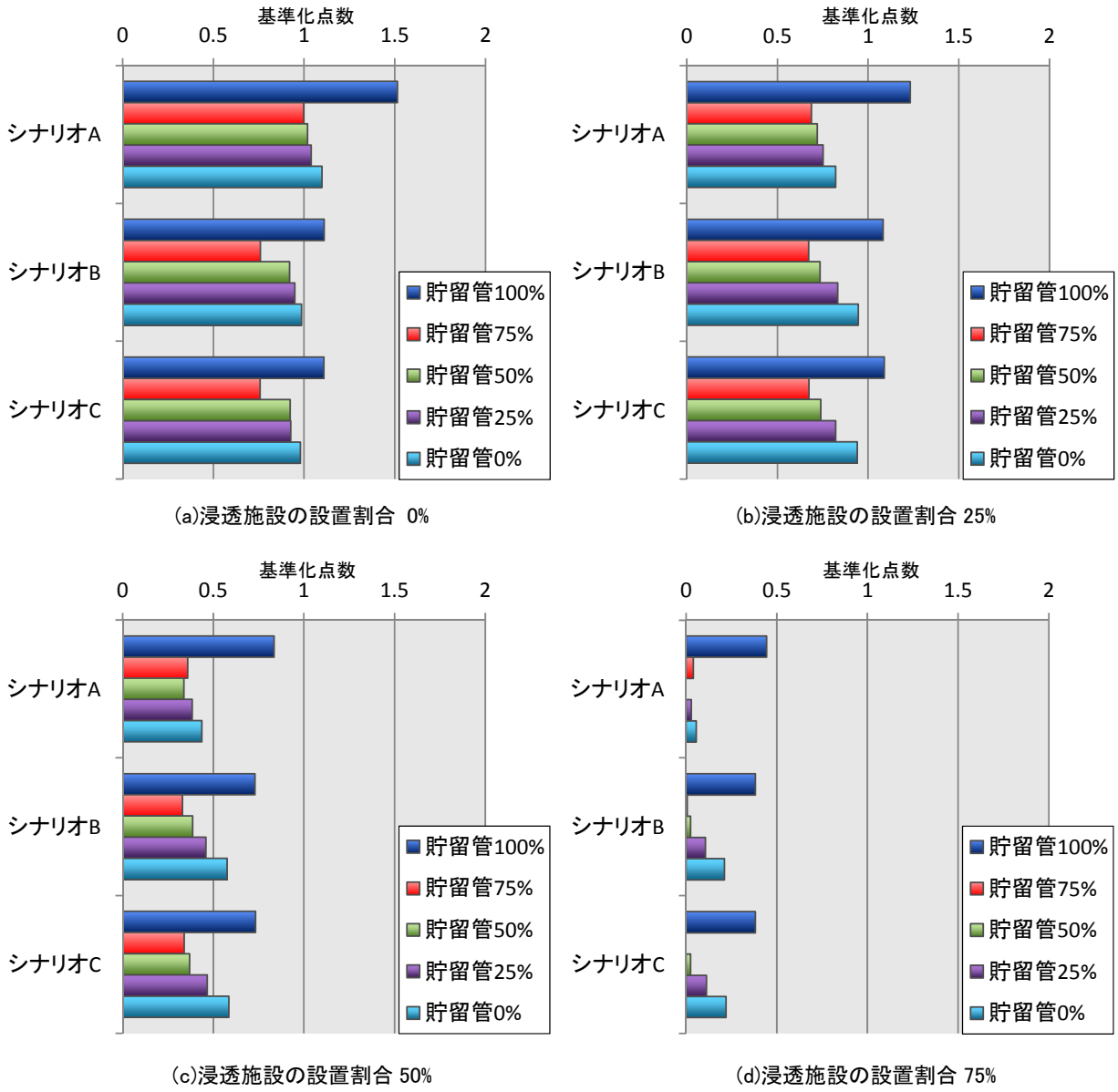
４．６．２　降雨強度増加時における効果的な浸水対策

図-Ⅲ2.4.6.2.1に排水区Ⅰ、図-Ⅲ2.4.6.2.2に排水区Ⅱの評価結果を示す。どちらも、浸透施設の設置割合が高くなるにつれて、評価が低くなった。この主な理由は、浸透施設の整備期間が他と比べて長いためである。浸透施設は１施設で対応できる量が少ないため、他と比べて多数の施設を設置する必要があることや、整備対象として民間施設まで含まれることから、他の施設と比べて対策量あたりの整備期間が長くなる傾向がある。なお、浸透施設による効果は浸水対策だけでなく、合流式下水道改善対策や地下水涵養等多岐にわたるが、今回の評価ではこれらが考慮された内容では無いことに留意が必要である。

排水区Ⅰにおいては、ポンプ施設の整備費用が比較的高額なこともあり、全てのケースにおいて貯留管負担率 100%（ポンプ施設を含む排水施設を設置しない）の整備効率性が最も高い評価となった。またほとんどのケースにおいて最も低い評価となったのは貯留管負担率 75%の場合だが、これはポンプ施設における対策量 1m³ あたりの整備費用が、対策量が少ないほど高くなるためである。さらに、シナリオ A では貯留管負担率 100%の評価が突出して高いが、シナリオ B・C では貯留管負担率 100%と 0%の評価の差が比較的小さくなった。これは、シナリオ B・C では浸水対策必要量が多く、貯留管による負担率を 100%で整備すると、かなり大規模な施設が必要となること、ポンプ施設における対策量 1m³ あたり費用は対策量が大きくなるほど低下することから、整備費用に関して排水施設との差が小さくなったためと考えられる。

排水面積が小さい排水区Ⅱでは、全てのケースにおいて、貯留管負担率 100%の点数が他の場合より高くなった。これは、排水区Ⅰと比べ浸水対策必要量が少ない排水区Ⅱでは、ポンプ施設の対策量 1m³ あたり費用が他の施設と比べ非常に高額となり、その結果ポンプ施設による整備費用が大きくなるためである。したがって、排水面積が小さい地区での対策は、貯留管による対策が有効と考えられる。

また、排水区Ⅰにおけるシナリオ B・C、及び排水区Ⅱの全シナリオでは、浸透施設の設置割合が 0%と 25%の差が比較的小さい。特に排水区Ⅰのシナリオ B・C における貯留管負担率 100%の場合、浸透施設の設置割合が 0%と 25%の基準化点数はほぼ同等である。これは、浸透施設による対策はこの範囲内で実施することが最も効果的であること示唆していると考えられる。



(a)浸透施設の設置割合 0%

(b)浸透施設の設置割合 25%

(c)浸透施設の設置割合 50%

(d)浸透施設の設置割合 75%

図-Ⅲ2.4.6.2.1　排水区Ｉにおける評価結果

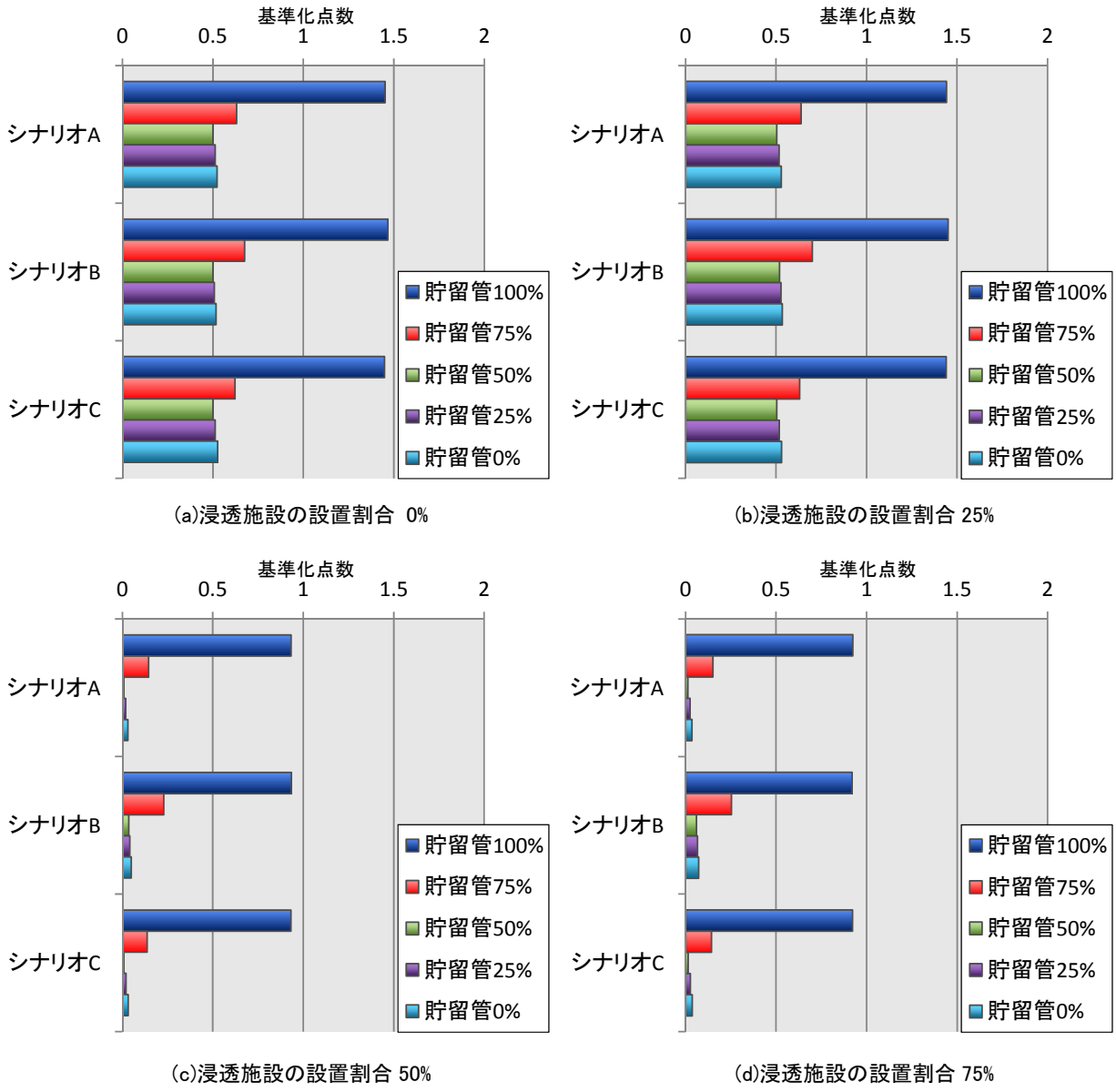


図-Ⅲ2.4.6.2.2　排水区Ⅱにおける評価結果

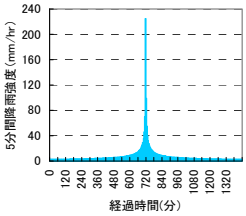
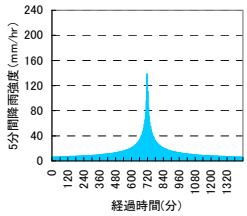
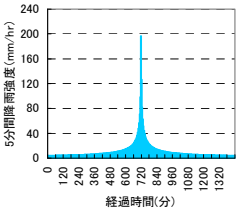
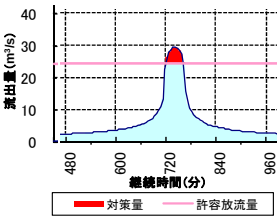
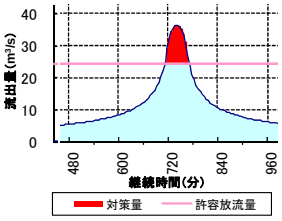
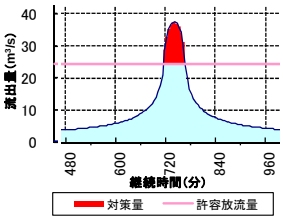
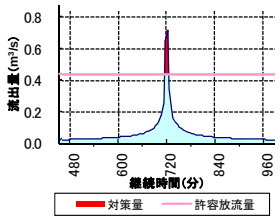
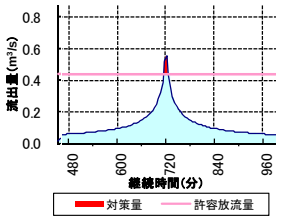
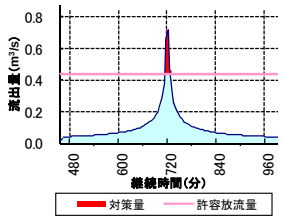
検討結果のまとめを表-Ⅲ2.4.6.2.1 に示す。排水区Ⅰではシナリオ A の場合、浸水対策必要量が多くないため、貯留施設による対策で十分であるのに対して、シナリオ B・C は浸水対策必要量が多く、大規模な貯留施設だけでなく、排水施設や浸透施設を組み合わせることが効果的な場合もあることを示唆していると考えられる。排水区Ⅱでは、いずれの降雨シナリオに対しても許容放流量を超える流出の継続時間が短いこともあり、貯留施設が効果的と評価された。

以上の結果より、枝線レベルの排水区域や短時間豪雨に対しては貯留施設が有効であるとともに、幹線レベルの排水区域で長時間続く豪雨に対しては、排水施設、貯留施設等を効果的に組み合わせ、面的に排水能力を向上させることによる排水区域全体のレベルアップを図ることが重要と考えられる。

今後、このような検討結果から、雨水排水が対象にする短時間集中型豪雨が気候変動影響などによりさらに増大したときのことも見据えた対策はどのようなものかを見出すことが望まれる。都市排水の場合、有堤河川の洪水流下と異なり、流量が能力を超えても、破堤のような洪水対応機能の急減が生じに

くいと期待され（ただし、河川への排水規制がかかる場合は除く）、そのような点に着目して浸水形態の制御も見据えた排水方策の検討を進めることが重要となろう。

表-Ⅲ2.4.6.2.1　降雨シナリオ及び排水区の特性を踏まえた効果的な浸水対策

		降雨シナリオ A （10 分間降雨強度増）	降雨シナリオ B （60 分間降雨強度増）	降雨シナリオ C （10 分･60 分間降雨強度増）
ハイエトグラフの特徴		■ 降雨継続時間が短い ■ 10 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が少ない 	■ 降雨継続時間が長い ■ 60 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い 	■ 降雨継続時間が長い ■ 10 分･60 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い 
排水区Ⅰ（幹線排水域レベル）	浸水対策必要量の特徴	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い 	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い 
	効果的な対策	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池）	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池） ■ 排水能力アップ（流下管＋ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など） ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池） ■ 排水能力アップ（流下管＋ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など） ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的
排水区Ⅱ（枝線排水域レベル）	浸水対策必要量の特徴	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない 
	効果的な対策	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池）	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池）	■ 貯留施設（雨水貯留管や調整池）

参考文献：

（公社）日本下水道協会（2009）下水道施設計画・設計指針と解説　前編　-2009 年度-
東京都総合治水対策協議会（2009）東京都雨水貯留・浸透施設技術指針-資料編-

４．７　街区スケールにおける人的被害低減対策

４．７．１　切迫避難を含む避難実態に即した人的被害リスクのマクロ評価手法の開発

第 3 章で論じたとおり、気候変動に伴う水災害の高頻度・激甚化の影響等から、堤防等施設の整備計画の対象とする規模の洪水を超える洪水が生起する可能性は常に残されている。ハード整備だけでなく、避難や土地利用などの流域対策によって被害の大きさを減じる適応策の重要性が、これまでにも増して重要である。特に、激甚な超過洪水発生時に「犠牲者ゼロ」に向けた施策として、重要な構成要素である「避難」については、避難に至る心理面、避難場所の配置・収容力・避難シミュレーション、高齢者等災害時要援護者等についてこれまでも多くの研究が行われてきている。

今後とも避難等による被害低減対策の研究・推進が重要であることは言うまでもないが、実際の洪水時の避難率はせいぜい 40%程度である（池内ら　2011）こと、氾濫直前や自宅浸水等の危険な状況が発生しなければ避難を決意しない人が少なくないこと（桑沢ら　2011）を踏まえると、浸水が生じつつある切迫した状況下においても人的被害を極力低減する方策の検討が重要であると考えられる。

そこで、大規模洪水を想定した氾濫シミュレーション結果に基づき最大浸水深が 5m 程度となる恐れがある地区を対象として、自宅周辺の浸水が始まるなど切迫した状況における救命対策の推進に資する技術的検討を行うこととした。

なお、本適応策オプションは、治水推進施策類型のⅢ⁺に相当すると考えられる（2.2.2(3)）。

また、本研究成果については（加藤ら、2014）として論文にもとりまとめている。

４．７．２　街区スケールにおける様々な人的被害低減対策の効果算定手法の開発

（１）近隣の中高層建物への避難による人的被害低減の考え方

大規模氾濫時の人的被害低減対策としては、氾濫発生前に安全な場所へ避難（事前避難）するほか、浸水深に応じ自宅建物の非浸水階へ避難（垂直避難）することが考えられる（表-Ⅲ2.4.7.2.1）。しかし洪水規模・地形特性等により最大浸水深がおおむね 5m 以上になる場合には 1、2 階建て建物の居住者にとって垂直避難による安全確保は困難であり、事前避難を行わなかった場合には、近隣の高所に緊急的に逃げこまなくてはならない。なお、その後浸水が長期間継続した場合には孤立することが考えられ、事前避難が重要であることは言うまでもない。

本研究では、何らかの理由により事前避難できずに自宅にとどまっている者が自宅周辺の浸水開始等の切迫した状況下で近隣の中高層建物等に避難することを「切迫避難」と定義し、実際の市街地の建物の分布に基づき人的被害低減対策の効果について検討した。本検討では、市販データ等を活用し実際の建物の位置・階数・面積を詳細に GIS 上に整理し、居住者の分布・属性（年齢階層等）、切迫避難者の移動速度、切迫避難先の収容可能人数等については簡略化した設定を行っている。これは、実際の代表的な街並み、建物分布における「切迫避難」による人的被害低減の有効性を概略評価することを主目的としたためである。

表-Ⅲ2.4.7.2.1　人的被害試算に係る用語の定義

用語	定義
集計単位内人口	集計単位内居住者数
事前避難者	浸水開始以前に集計単位外へ安全に避難する者
在宅者	3階以上の居住者のうち事前避難せず自宅にとどまった者
垂直避難者	3階建以上の建物の2階以下居住者のうち事前避難せず同一建物内の3階以上へ避難する者
切迫避難者	自宅周辺の浸水が始まってから避難しはじめ，近隣の中高層建物等に逃げこめた者。切迫避難で逃げこむ高所（切迫避難先）の分類は下記のとおり。 ①公的避難場所 ②デパート等商業施設・鉄道駅 ③民間ビル（マンション，オフィスビル） ④堤防（階段・スロープ（以下「堤防入口」）が設置されているものに限る）
要緊急救助者	2階建以下の建物の居住者で事前避難しなかった者のうち切迫避難先へ逃げこめなかった者
切迫避難必要者	切迫避難者＋要緊急救助者

※集計単位内人口=事前避難者数+在宅者数+垂直避難者数+切迫避難者数+要緊急救助者数

（２） 集計単位の設定

氾濫シミュレーション結果に基づき、大規模氾濫時に最大浸水深が 5m 以上になる恐れがある範囲を抽出し、当該範囲を包含するように広幅員幹線道路等により囲まれる領域（以下「集計単位」）に分割した（図-Ⅲ2.4.7.2.1）。本分割は計算・分析の効率化を図るとともに以下の考えに基づいて行った。すなわち、都市部では一般に幹線道路沿いに中高層建物が集中しているとともに広幅員幹線道路等を横断しての切迫避難は相対的に少ないと想定されるので、集計単位内で切迫避難はおおむね完結すると仮定し、集計単位ごとに被害低減対策の検討を行うこととした。

（３） 建物・居住者データのGIS上での整理

集計単位ごとにゼンリン社の建物ポイントデータ 2012 に基づき各建物の位置・階数・面積を GIS 上に整理した。各建物の居住者数（年齢階層別）の設定に当たっては 2010 年国勢調査結果（町丁・字等別集計値）を活用した。さらに 65 歳以上の居住者の戸建て住宅居住割合が高いこと、並びに災害時要援護者の比率を関連する統計値に基づき設定し、建物ごとの属性別居住数を設定した。なお、本研究における居住者設定は通勤・通学等を考慮しない夜間の設定に相当する。

（４） 試算条件

切迫避難は徒歩により行われるものと仮定し、移動速度は（須賀ら、1995）の水中歩行に関する実験結果を参考に 5～64 歳の健常者で 24m/分、65 歳以上の高齢者及び乳幼児（およびその付き添い者）で 12m/分とした。市区町村指定の避難場所（公的避難場所）、デパート等の商業施設・鉄道駅、河川堤

防、民間ビル（マンション・オフィスビル）を切迫避難先として抽出した。これらのうち民間ビルを除く場合をケース 1、民間ビルを含む場合をケース 2 とした。
切迫避難先ごとの切迫避難者収容能力は避難者 1 人当たりの必要面積を 1m^2 として設定した。民間ビルでは廊下等共用スペースの面積比率を推定し、この比率を非浸水階（3 階以上）の延べ床面積に乗じることで収容能力を設定した。面積比率は、オフィスビルで 15%、マンションで 10%と設定した。公的避難場所及びデパート等商業施設については非浸水階の全延べ床面積に基づき収容能力を設定した。駅及び河川堤防の収容可能人数については路線や天端道路に沿ってさらに避難できるため、上限を設けなかった。



図-Ⅲ2.4.7.2.1　集計単位設定例

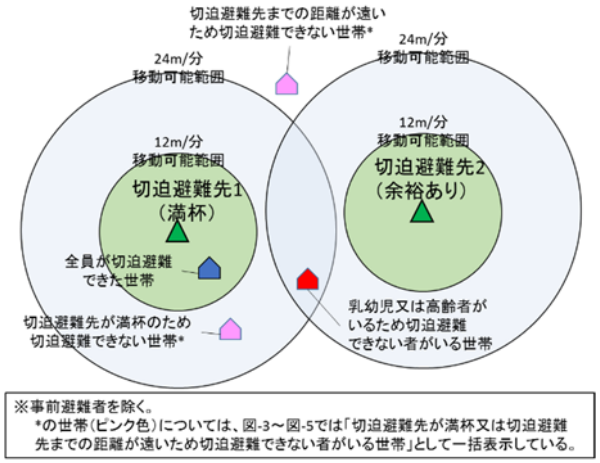


図-Ⅲ2.4.7.2.2　切迫避難可否の判定概念図

（５） 計算手順

まず、事前避難率に応じて氾濫発生時点の居住者数を一律低減した。次に、3 階建以上の建物の 1･2 階居住者は同建物の 3 階以上へ垂直避難した。最後に、垂直避難できなかった者及び 2 階建以下の建物居住者が近隣の中高層建物等へ切迫避難するものとした。

図-Ⅲ2.4.7.2.2 に切迫避難可否判定の概念図を示す。切迫避難しようとする者は街路等を無視し居住建物から切迫避難先まで直線移動すると仮定した。切迫避難先を中心として「避難可能時間」×「歩行速度」として求めた距離（以下「移動可能距離」）を半径とした円を描き、同円内に居住建物がなければ、同建物居住者は切迫避難できないものとした。同円内に居住していても切迫避難先 1 のように既に避難者で満杯である場合、まだ空きのある切迫避難先 2 へ避難する。なお、切迫避難しようとする世帯にとって切迫避難先の選択肢が複数ある場合には、公的避難場所、商業施設、堤防、民間ビルの順に選定するものとした。最終的にどの切迫避難先へも避難できない者は切迫避難できないものとした。これら切迫避難できなかった者を要緊急救助者とした。

事前避難率 0、20、40%、避難可能時間 5 分、10 分、15 分、避難先の設定ケース 1、2 を組合せた 18 の試算条件で各人的被害を試算した。なお避難可能時間は、氾濫シミュレーションで集計単位の代表地点における浸水深が 10cm（自宅周辺の浸水開始を認識する水深）から 60cm（水中歩行の限界水深）まで上昇するのに要する時間を参考に設定した。

（６） 人的被害試算結果と被害低減対策の検討

試算例を図-Ⅲ2.4.7.2.3～Ⅲ2.4.7.2.5 に示す（図中の表示・色分けは図-Ⅲ2.4.7.2.2 と同じ）。いずれも、事前避難率 0%、避難可能時間 5 分の本試算上最悪の想定である。

図-Ⅲ2.4.7.2.3 は大都市密集市街地における試算例であるが、ケース 1 に比べケース 2 では要緊急救助者が大幅に（79%）減少している。これは、集計単位内に 3 階建て以上の民間ビルが多数分布しているため、これらを切迫避難先に追加することにより切迫避難可能な人数が大幅に増えるためである。

図-Ⅲ2.4.7.2.4 は田園地帯における試算例であるが、ケース 1 とケース 2 の違いはほとんど認められない（要緊急救助者は 1%のみ減少）。これは、3 階建て以上の建物が少ないため、民間ビルを避難先として追加しても切迫避難可能な人数はほとんど増えないためである。

図-Ⅲ2.4.7.2.5 は大都市郊外の 2 階建て以下の住宅が広がる住宅街での試算例であるが、3 階建て以上の建物が相対的に少ないとともに分布が偏っているため、避難先として民間ビルを追加しても切迫避難可能な人数の増加は限定的であり、要緊急救助者数は 20%減少するのみである。

また、何らかの手段により浸水深の上昇速度を小さくすることができれば、避難可能時間が長くなり、切迫避難できる人数が増えることが考えられる。ケース 1、2 の避難可能時間を 15 分と長くした場合の試算結果を 5 分の場合の結果とともに表-Ⅲ2.4.7.2.2 に示す。本試算例では、避難可能時間を増加させる施策により大都市密集市街地においては民間ビルを避難先に加えるのと同等の被害低減効果となった。また、田園地帯及び郊外戸建て住宅街においては民間ビルを切迫避難先に加えることによる効果を上回る結果となった。さらに民間ビルの切迫避難先への追加と浸水深上昇速度低減策を合せて実施することにより、大都市密集市街地で約 9 割、郊外戸建て住宅街で約 7 割、田園地帯で約 1 割の要緊急救助者数が減じる結果となった。

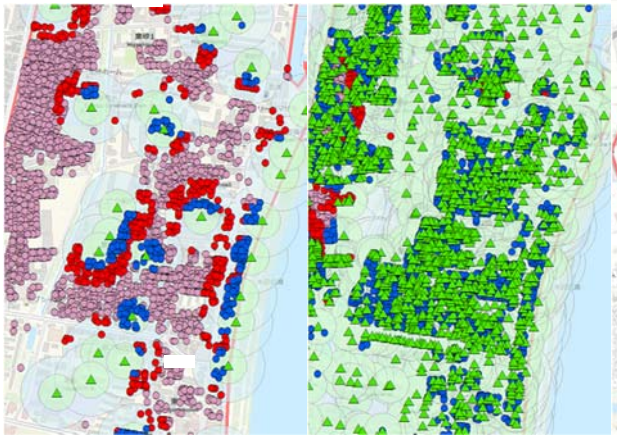


図-Ⅲ2.4.7.2.3　大都市密集市街地における試算例
（左：ケース 1、右：ケース 2）

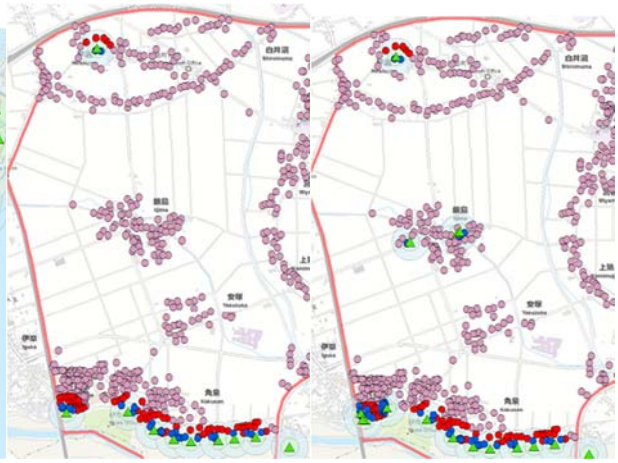


図-Ⅲ2.4.7.2.4　田園地帯における試算例
（左：ケース 1、右：ケース 2）

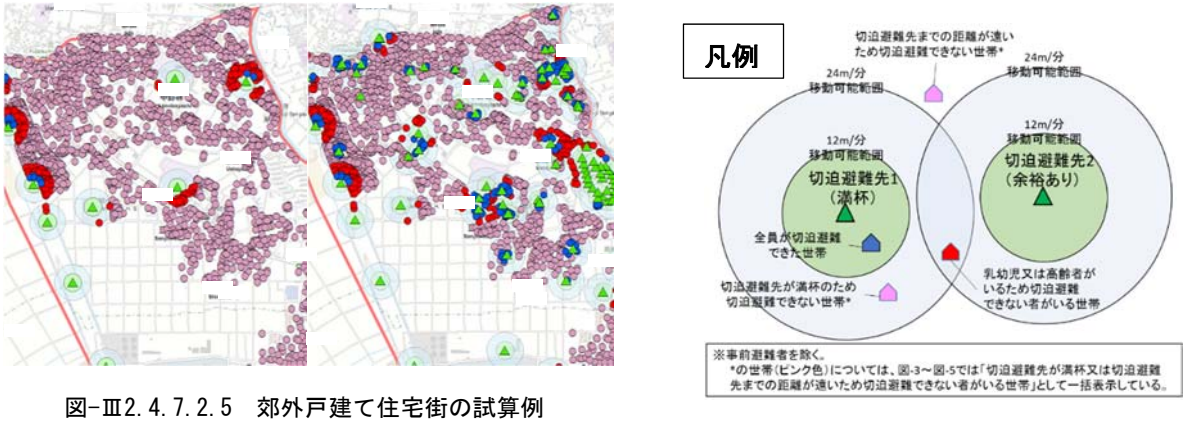


図-Ⅲ2.4.7.2.5　郊外戸建て住宅街の試算例
（左：ケース 1、右：ケース 2）

表-Ⅲ2.4.7.2.2　切迫避難先の拡大による要緊急救助者数の低減

	避難可能時間	避難先設定ケース	要緊急救助者数	要緊急救助者数の減少率
大都市密集市街地	5分間	1	14700	－
		2	3130	79%
	15分間	1	4115	72%
		2	1799	88%
田園地帯	5分間	1	6107	－
		2	6026	1%
	15分間	1	5314	13%
		2	5239	14%
郊外戸建て住宅街	5分間	1	11789	－
		2	9382	20%
	15分間	1	7266	38%
		2	3375	71%

（７） おわりに

最大浸水深が 5m に達するような大規模氾濫時における人的被害低減対策の検討に資するため、自宅周辺の浸水等を契機に避難しはじめる「切迫避難」について、人的被害低減対策の有効性について試算を行った。試算に当たっては、大都市の密集市街地、田園地帯、郊外戸建て住宅街を対象として、市販データ及び国勢調査結果に基づき中高層建物等の分布を与えるなど極力実態を反映した。

切迫避難先として①公的避難場所、デパート等の商業施設・鉄道駅、河川堤防を想定した場合と、②さらに民間ビルを加えた場合、並びに③浸水の上昇速度を低減する（自宅周辺が浸水しはじめてから避難困難な水深に達するまでの時間を延長する）施策による被害低減効果を各試算したところ、地区特性によるが、②民間ビルを切迫避難先として追加する施策、並びに③浸水上昇速度を低減する施策による大きな被害低減効果が算定された。また、中高層建物等の分布特性の違いにより被害低減効果に違いがあることから、大規模氾濫時の人的被害低減対策の検討には、地域の中高層建物等の分布特性を踏まえることが重要であることが示された。

以上の結果より、高層建築の民間ビルが多数分布している大都市密集市街地においては、民間建物を避難先として活用する等、垂直避難を推進する施策が有効であると考えられる。一方、高層の建物が少ない田園地帯や住宅街においては、垂直避難だけでは対応が困難なため、避難場所の新設や、避難のリードタイムを増やす氾濫流の拡大低減策など、水平避難を可能とするような施策の展開が必要と言える。

参考文献：

池内幸司・越智繁雄・安田吾郎・岡村次郎・青野正志(2011)大規模水害時の氾濫形態の分析と死者数の想定、土木学会論文集 B1（水工学)、Vol.67、No.3、pp. 133 – 144.

加藤拓磨・板垣修・服部敦・深見和彦・鳥居謙一・藤田光一(2014)近隣の中高層建物の分布を考慮した大規模氾濫時の人的被害マクロ試算手法の開発、河川技術論文集、第 20 巻、pp. 403 – 408.*

桑沢敬行・片田敏孝　(2011)大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシミュレーション分析、日本災害情報学会第 13 回研究発表大会予稿集、pp. 37 – 42.

須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒(1995)水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討、水工学論文集、第 39 巻、pp. 879 – 882.

５．まとめと今後の展開（Ⅲ-2 部）

Ⅲ-2 部第 2 章で提示した治水検討フレームは、無被害で済む可能性を治水目標レベル達成に向け着実に拡充していくことを柱の１つとしながら、「被害～豪雨規模関係を制御する」という包括枠組みを骨格とする。そしてそれは、様々な施策を有機的に動員させ、質あるいは種類の観点にまで踏み込んで被害抑制をはかるための、さらにこれを時間軸上で切れ目なく行っていくための土台を提供するものである。その技術的評価軸は、タイプの異なる多様な施策の効果を重合も含め定量的に表現できるように、また、気候変動影響も同様に定量的に反映できるよう考えられている。こうしたことから本フレームは、より多様な施策を、概念論やビジョンの段階にとどめずフィールドに実装する検討にまで“落とし込む”のに適しており、今後何より重要となっていく「具体的にどうしていくか」の作業推進との親和性が高いものである。

このフレームと合わせて、施策形成の検討に役立てるという観点から、Ⅰ、Ⅰ+、Ⅰ++、Ⅰ+++、Ⅱ、Ⅲ、Ⅲ+の 7 つから成る施策類型を提示した。さらに施策の特性を整理するための 6 つの視点を示している。この類型および整理の視点に基づき様々な施策群の特徴を一貫した方式で表示することで（表-Ⅲ2.2.1 に例示)、施策の選択、施策実行の要件や課題の把握、施策実行を促進する状況の創出やそのための調整（地域の状況変化や他目的施策との相利関係の追求を含む)、必要な技術開発の内容や方向性の把握を体系的に行いやすくなる。これは、新しい施策案出の呼び水としての効果も併せ持つ。

Ⅲ-2 部第 3 章は、一つの水系における破堤氾濫の起こり方を実態に即し幅広く想定するための作業をルーチン化する手順を提示している。これは、Ⅲ-2 部第 2 章で提示したフレームを具体化する上で不可欠な「被害～豪雨規模関係」の算出を根幹で支える技法である。開発されたこの技法を用いて行った 20 水系についての試算結果は、被害～豪雨規模関係の算出を基軸にした施策検討がどのようなものになるかをわかりやすく示しており、上記のフレームの意義や活用法の理解を深めるのに役立つ。その試算において合わせて検討した人口の長期的変化（マクロには減少）がもたらす影響の吟味は次のことを浮かび上がらせている。すなわち、マクロな人口減少がその分だけ人的被害のリスクを減少させるという単純な見方をするだけでは不十分であり、人口変化の空間的非一様性（増加する場所、大きく減少する場所の偏在など)、年齢構成の変化（高齢化)、人口減少に伴う地域コミュニティの災害適応力の変化など、マクロな人口減少以外の要因変化の影響を合わせて考慮した上での施策検討が重要である。この成果は、今まで直接的に検討されてこなかった減少局面での人口動態と水害リスクとの関係を踏まえた施策検討に向けて有用な切り口を提示するものである。

現場において被害を起こりにくくするための個々の施策の存在が、上記の治水検討フレームが意味を持つための前提条件となる。この点を強く意識しつつⅢ-2 部第 4 章では、このフレームの下で新たな展開が求められる個々の治水方策について、技術開発や施策内容の検討を行った。得られた成果は以下である。

まず 4.1 は、河道設計･管理という河川整備の根幹手段の１つが、無被害の可能性拡大にとどまらず被害制御とも深い関係を持つことを示した上で、両方を適切に考慮した河道改修・管理を行うための要点を提示した。この内容は、オーソドックスな治水手段において、被害の制御まで考えることの意義やその具体アプローチを検討する際の良い題材となっている。

4.2 に示した降雨予測を取り込んだダムの洪水調節の高度化に関する検討は、降雨予測という急速な進展が見られる新技術を治水手段の拡充に用いるという展開についてポジティブな見通しを提示し、その上で「ベストエフォート」的性格（本件で言えば、予測が当たれば顕著な効果を得られるが、実際とずれると効果が減退するという特徴を持つこと）を持つ施策に踏み込む際の課題と解決の方向性

を、具体事例を通じて示している。4.3 で示した既設ダムの再編と再開発の実例紹介は、既存ストックの適切な活用・掘り起こしの有用性をわかりやすく示すものである。

4.4 に示した遊水機能の維持・活用の検討内容は、“氾濫を織り込んだ治水”という方向性を具体化することが必ずしも容易には施策展開されない状況がある中、実際に遊水機能の維持・活用ができている事例から、それを可能にした条件をあぶり出すものであり、ビジョンから実行に移行するための１つの、しかし有用な材料になっている。合わせて定量的に検討した遊水機能活用の有無による被害生起の特性比較に関するケーススタディは、遊水機能の活用が被害～豪雨規模関係曲線を“寝かせ”、したがって、被害制御の効き具合や気候変動への適応度を増進させることを示している。これは、被害制御を進める方策の検討において貴重な材料となる。

4.5 では、XRAIN 実装のための技術開発の概要を説明した上で、XRAIN が既に実際の被害軽減方策に役立てられている事例を紹介した。この内容は、豪雨がもたらす災害の抑制を図る上で、いち早く精確に降雨状況を把握することが共通の重要な手段になることを端的に示すものである。特に、気候変動影響による激化が早期に現れることが懸念される局地的・突発的な豪雨（いわゆる“ゲリラ豪雨”）への対応において、ここで示した XRAIN が重要な役割を担っていく。

4.6 は、その局地的豪雨の影響を受けやすい都市部の内水氾濫被害の抑制に向け、気候変動による豪雨強度増分を都市雨水排水対策の増強でどのように吸収できるかの検討に役立つ成果を示している。検討は、仮想の排水区を大小２つ設定し、[雨水浸透施設、雨水貯留管、排水のための流下管、排水のためのポンプ施設]という対策構成の重みを変えながら必要な対策量を試算するものである。その試算は、排水区の特性や豪雨ハイエトグラフの特徴に応じて、貯留に重点を置いた方が有利になる条件、排水能を増強した方が有利になる条件など、好適な対策組み合わせを選択するのに役立つ知見を導き出している。これは、都市における内水氾濫の抑制や扱いやすい浸水形態となるような制御を図る際の、雨水浸透促進から貯留、排水能増強にわたる各手段のベストミックスを追求する際の参考になる。

4.7 では、 水深 5m 以上の浸水が迫る中での街区における切迫避難に対象を絞り、実際の街区の情報を極力詳細に取り込んで避難過程の計算を行い、そのような厳しい状況においても高い避難成功割合を確保する方策を調べている。その結果、街区の状況と氾濫水の侵入速度によって取るべき方策が大きく変わり、したがって、実際的な避難方策を得るには、対象とする街区状況と氾濫生起状況に応じた方策設定が必要であることが明らかとなった。たとえば、一戸建ての割合、中高層ビルの割合や配置、民間ビルへの避難可能性、浸水継続時間、氾濫発生から高浸水深到達までの時間などによって、切迫下での実効的避難方策は大きく変わりうる。避難方策を画一的に捉えず、対象とする現場の状況に応じて実行可能性を重視した方策検討を行うことの重要性（最初から切迫避難を推奨する、あるいは認めると言うことではないが）と、そのためのアプローチのひな形を、この成果は示す。

以上、Ⅲ-2 部第 4 章で得た成果は、新しい治水検討フレームの実施に必要な施策推進の道具を全て揃えるまでには至っていないものの、概念や方向性の議論にとどまらず具体的施策検討に踏み出す際に有用な材料になるものである。今後、第 2 章に示したフレームの活用と、第 3、4 章に示した技法や施策の検討を具体流域に対して試行し、両者の間でキャッチボールしながら、フレーム自体と個々の施策内容や技法の改良・創出を行っていくことが重要である。

そのキャッチボールの内容を考える上で、Ⅲ-2 部第 2 章 3 節に示した表-Ⅲ2.2.1 が手がかりになる。この表の整理軸（横軸）にしても、施策内容の例示（縦軸）にしても、1 章で述べたように、技術政策的議論を進めるための“作業仮説”であり、この内容をそのまま実際の政策に反映させることを意図したものではない。 その上で、この表が指向する内容と現状とのギャップを、Ⅲ-2 部第 3 章およ

び第４章の成果・課題も踏まえて把握することから、今後さらに取り組むべき技術および技術政策の検討内容が見えてくるはずである。たとえば次のようである。

この表の右端の列に示した技術展開について記載した内容を見ると、まず、無被害の可能性を拡大するための河川整備が被害～豪雨規模関係に与える影響を把握し、必要に応じてそれをコントロールすることも考慮した整備法を検討する技術をさらに詰めていくことが必要とわかる（4.1、4.6 の発展）。被害を制御する技術の追求に関しては、防災関連インフラの機能喪失（含；“壊れ方”、“粘り方”）を把握する技術を高め、それをコントロールあるいはマネジメントする技術のさらなる開発につなげていくこともターゲットになる。同表で導入した施策整理の視点の１つ「情報分析を踏まえた高度な施設等の運用力」については、物理的限界を情報の力で拡大する手法の追求を、その活用において避けがたい課題となる情報・判断に関わる不確実性・誤差の克服・受容の道筋とあわせて行っていくことがターゲットになる（4.2 の発展）。このようなインフラの機能の拡充に対応して、外力生起・被害発生・防災関連社会インフラの極力早い段階での状態探知・把握を実現する体制を構築し、そのような格段に充実した情報取得体制の実現を前提に、得られる情報をどう使いこなすか？の戦略をやはり並行して詰めていくことが求められる（4.5 の発展もこれに関係）。表-Ⅲ2.2.1 の横軸に導入した“他益性”に関しては、これを持つ地域を明示的に承認するプロセス・技法と流域における合意形成方策の追求が重要になる。このことは、防災機能で吸収できないリスクを賢く分担することについての、より実効的・合理的な実践フレームを確立することを意味する（4.4 の発展）。ここにおいて、流域内支え合いというような側面を持たせることについての議論を深めることも考えねばならない。さらに、「他目的施策との相互乗り入れ性」という整理の視点に関して、常日頃から抱える、また将来動向を踏まえた地域の課題と防災・減災のための国土づくりとをリンクさせる構想を示すこと、環境・暮らし・経済・防災などのバランスをトータルで見る視点を堅持し、その相利効果を最大化する仕組みを追求することが大事となる。ここにおいては、第Ⅱ部の 2.2 や本Ⅲ-2 部の第３章で取り上げた長期的な人口動態を施策形成にどう取り込むかの検討に代表される地域状況組み込みの方法論確立が、今後さらに重要になっていく。この点の取り組みは本報告書においてまだ熟度が低い。もう一つの整理の視点である「情報運用・活用と人間および企業等の適切な行動を誘導する労力（情報活用力の増進を含む）」についても、「こうすべき」論だけによらず、実態理解に根ざした方策を見出す検討が求められる（4.7 の発展）。

Ⅲ-2 部第４章の内容は、以上に述べた今後の取り組みの方向を見据えた検討ではあるものの、今まで述べてきたように今後多くの発展が必要であり、本研究報告はその一部に乗り出したという段階である。本Ⅲ-2 部の内容を今後の展開に向けての出発点とも捉え、適応策を包含する、さらには防災・減災策を包含する流域圏・水系マネジメントに向けて、様々な検討を体系的に行うことに役立てていくことが肝要である。

第Ⅰ部で述べたように、本研究では、施策実施主体とその施策遂行形態、施策実施に関わる権限と責任の範囲、意思決定の仕組み、社会における当該施策実施の合意形成に関わる制度的枠組みの整備などは扱っていない。施策実践においては、これらに関わる課題解決や実施法の詰めが必須となる。

第Ⅲ部

気候変動影響に対する適応策に関する研究

Ⅲ－３：海岸分野における気候変動への対応

１．はじめに

海岸分野における気候変動影響への適応策を検討するためには、海面水位や沿岸波浪・高潮で構成される沿岸外力への影響評価が重要である。そこで、本報告書第Ⅱ部第 4 章において、過去の観測データに基づき、海面水位について近年の実績として 3mm/年程度の速度での上昇傾向にあることを示したが、今後の動向については、気象庁は「日本沿岸の海面水位は、地球温暖化のほか海洋の十年規模の変動など様々な要因で変動している」ため、現段階ではまだ明らかでなく、引き続き監視が必要としている（気象庁地球環境・海洋部、2017）。また、沿岸波浪や高潮の今後の動向についても、各湾・各地点毎に定量的な評価を行う必要性と現時点での予測の不確実性を考慮すると、CMIP5 世代の最新の気候変動予測データに基づく分析結果が待たれる状況である。このように、海岸分野において気候変動適応策を具体的に設定し実施するためには課題が残されているが、その一方で、沿岸における種々のハザードが増大傾向に向かうこと自体については概ね共通理解となってきている。この状況下で、適応策の進め方に関し様々な議論が行われ、各種提言が出されるとともに、より信頼できる沿岸災害リスク評価に向けた研究が活発化してきている。

本Ⅲ－3 部では、これらの適応策検討に向けた最近の議論や動向についてまとめて報告することで、海岸分野における適応策検討の現況を理解いただく一助としたい。

参考文献：

気象庁地球環境・海洋部（2017）日本沿岸の海面水位の長期変化傾向(平成 29 年 3 月 9 日発表)、
http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html

２．　閣議決定「気候変動の影響への適応計画」までの海岸分野における検討の変遷

IPCC の AR5 を受けて、2015 年 11 月 27 日に「気候変動の影響への適応計画」が閣議決定された。IPCC AR4 以降、この決定に至までの海岸分野に関係する動きを図-Ⅲ3.2.1 に示した。AR4 以降、気候変動に関連したいくつかの提言やマニュアルが出されている。第Ⅱ部 4 章に示した内容は AR4 を受けてのものであり、そこでは、海水面上昇と台風強大化等への対応が重要と考え進めた研究の成果が述べられている。

大学等の各研究機関において、文科省の創生プログラム、環境省の地球環境総合推進費の研究等を通じて気候変動関係の研究が引き続き進められ、それらの研究成果のいくつかは、AR5 に反映されている。

AR5 の後は、国土交通省社会資本整備審議会河川分科会「気候変動に適応した治水対策検討」小委員会（活動は 2007 年より）、海岸関係省庁（後述）の「沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会」及び「高潮水防の強化に関する技術検討委員会」において、海岸分野における気候変動への対応についての検討がなされた。これらの検討内容が「気候変動の影響への適応計画」に反映されている。「気候変動の影響への適応計画」→第４章 自然災害・沿岸域→第２節 高潮・高波等に関する適応の基本的な施策→2)海岸→(適応策の基本的考え方) では、「海象のモニタリングを行いながら気候変動による影響の兆候を的確に捉え、背後地の社会経済活動及び土地利用の中長期的な動向を勘案して、下記のハード・ソフトの施策を最適な組み合わせで戦略的かつ順応的に進めることで、高潮等の災害リスク増大の抑制及び海岸における国土の保全を図る。」とされている。

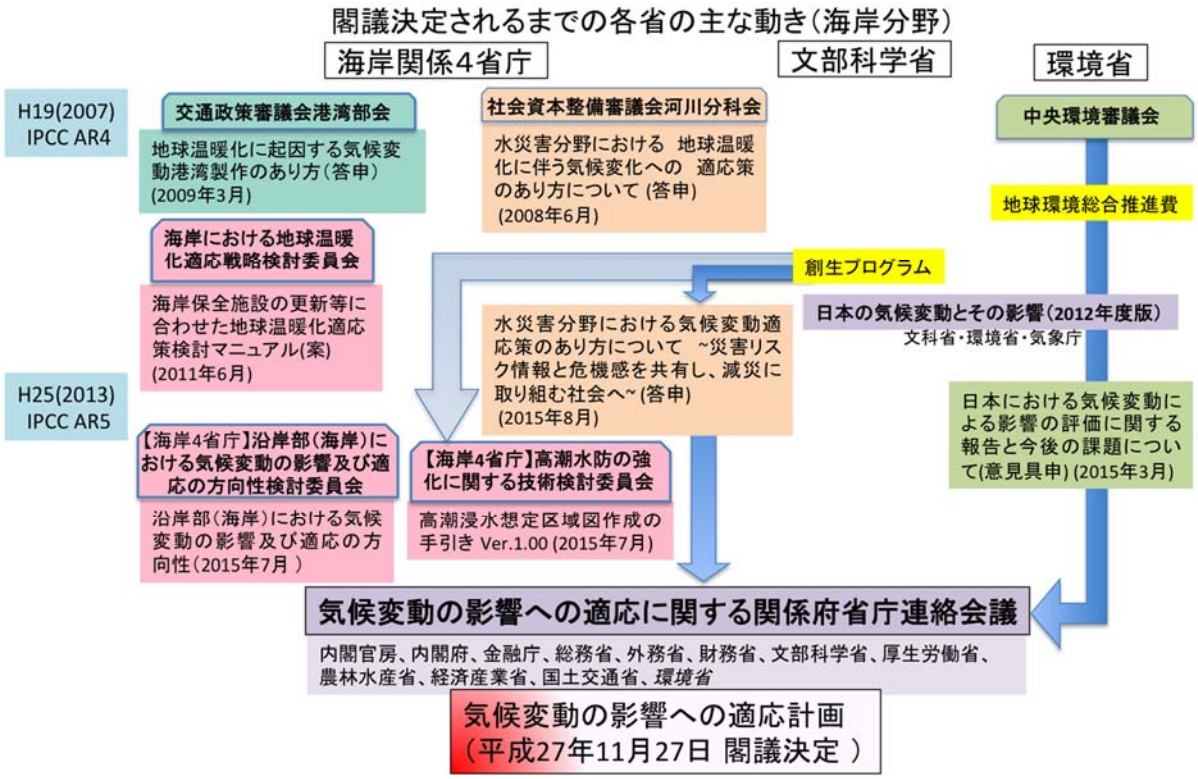


図-Ⅲ3.2.1　海岸分野の各省庁の提言等と閣議決定

参考文献：

社会資本整備審議会河川分科会 2008：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）

http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf

３．海岸関係４省庁における気候変動適応策

３．１　沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会

海岸保全事業は、海岸関係４省庁と呼ばれる国土交通省水管理・国土保全局、同省港湾局、農林水産省水産庁、同省農村振興局により所管されている。2014 年 6 月の海岸法改正を受けて、海岸法が国に策定を義務づける「海岸保全区域等に係る海岸の保全に関する基本的な方針」が 2015 年２月に更新され、地球温暖化による沿岸地域への影響が懸念されることを踏まえ、地球温暖化による影響の予測・評価を踏まえた適応策の検討を進めていくことが新たに示された。すなわち、更新前の基本方針が「調査研究を進める」であったことに対して、更新後が「適応策の検討を進めていく」と一歩進めた内容となった。

海岸関係４省庁の取組みとして、「沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会」（メンバーを表-Ⅲ3.3.1.1 に示す）が 2014 年 7 月に設置された。この検討委員会は、海岸保全基本方針を受けたものであり、IPCC の AR5 を受けての適応策の検討を行うことを役割としている。2015 年 7 月に「沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性」（以下、「方向性」という。）を示した。

「方向性」においては、「気候変動が沿岸部（海岸）に与える影響に対して取り得る適応策（案）」を表-Ⅲ3.3.1.2 のように整理している。これらはあくまで技術的な観点から検討した適応策（案）であり、具体的には個々の場所の特性や気候変動の影響の発現動向に応じ適切な施策を適切なタイミングで講じていくことが肝要であるとしている。

表-Ⅲ3.3.1.1 沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会委員等一覧

区　分	氏　名	所　　属
委員長	磯部　雅彦	高知工科大学　　副学長
委員	大村　智宏	(独)水産総合研究センター水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 主任研究員
委員	栗山　善昭	(独)港湾空港技術研究所　特別研究官
委員	諏訪　義雄	国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室長
委員	鈴木　武	国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部長
関係機関	岡　哲生	農林水産省農村振興局　整備部 防災課長
関係機関	木島　利通	農林水産省水産庁　漁港漁場整備部 防災漁村課長
関係機関	井上　智夫	国土交通省水管理・国土保全局　海岸室長
関係機関	眞田　仁	国土交通省港湾局　海岸・防災課長

表-Ⅲ3.3.1.2 気候変動が沿岸部（海岸）に与える影響に対して取り得る適応策（案）
（「沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性」より）

主な項目	影響	適応策（△：ソフト対策、□：ハード対策）
砂浜・国土保全への影響	○海岸保全施設前面の汀線の後退による防護機能の低下 ○砂浜を有する景観の変化・悪化 ○海水浴場の減少などレジャーへの影響など、観光資源としての価値の減少	□養浜・侵食対策の実施 △海岸侵食対策にかかる新技術の開発等 △防護ラインのセットバックや都市機能の移転・集約の機会等を捉えた土地利用の適正化
生態系への影響	○砂浜植生の減少・消滅の危険性 ○藻場の磯焼け、二枚貝などの生息環境の変化	△環境に配慮した整備や新工法等に関する調査研究 □環境に配慮した整備の実施
堤防・護岸等への影響	○堤体の滑動、転倒、倒壊 ○被覆工、上部工の被災 ○越波、越流に伴う洗掘による堤体の被災、破堤 ○汀線の後退による防護機能の低下	△海象のモニタリング △超過外力が作用する場合の海岸保全施設への影響の把握 □粘り強い構造の堤防等の整備 △ライフサイクルコストを考慮した最適な更新等の考え方の検討 □養浜・侵食対策の実施
背後地への影響	○越波・越流による浸水被害の増加 ○破堤による海水の流入に伴う浸水被害の増加	△海岸保全施設の防護機能の把握 △ライフサイクルコストを考慮した最適な更新等の考え方の検討 □被災リスクの高い箇所及び更新時期を踏まえた海岸保全施設の戦略的な整備 △海象のモニタリング □関係機関と連携した排水機能の確保 □高潮位時の逆流防止対策 △市町村によるハザードマップ作成の支援 △避難判断に資する情報の分析・提供 △避難計画策定・訓練実施の促進（操作規則との整合確保を含む） △防護ラインのセットバックや都市機能の移転・集約の機会等を捉えた土地利用の適正化

（取り得る適応策（案）の内容）抜粋	
＜砂浜・国土保全への影響＞	
○養浜・侵食対策の実施	海岸侵食に抜本的に対応していくため、海岸地形のモニタリングを行いつつ、海岸部において、沿岸漂砂による土砂の収支が適切となるよう構造物の工夫等を含む取組を進めるとともに、海岸部への適切な土砂供給が図られるよう河川の上流から海岸までの流砂系における総合的な土砂管理対策とも連携する等、関係機関との連携の下に広域的・総合的な対策を推進する。なお、堤防等の前面の海浜が減少することで防護機能が低下すること

	に対し、養浜・侵食対策を実施することも含む。
○海岸侵食対策にかかる新技術の開発等	漂砂の予測モデルの高度化や対策工法の開発など、海岸侵食対策にかかる新技術の開発を進める。また、中長期的な海面水位の上昇による汀線の後退に対する適応の考え方や対策方法等の調査研究を進める。
＜背後地への影響＞	
○市町村によるハザードマップ作成の支援	強い台風の増加等に伴う高潮偏差及び波浪の増大、海面水位の上昇による災害リスクの高まりを市町村によるハザードマップ作成の支援を行うことにより、背後地の住民等に周知し、避難対策の推進等を図る。
○避難計画策定・訓練実施等の促進（操作規則との整合確保を含む）	強い台風の増加等に伴う高潮偏差の増大・波浪の増大等も踏まえ、堤外地の企業等や背後地の住民の避難に関する計画の作成、訓練の実施等を促進する。特に堤外地が活動の場として活用されている場合には、地域防災計画と海岸法に基づく陸閘の操作規則との整合を図り、利用者等の円滑な避難活動を支援する。

海水面上昇に関する基本認識については、日本沿岸の海面水位変化と IPCC の全球海面水位変化を踏まえ、以下の引用 2)に示すとおり、「・・モニタリングしつつ海面水位上昇量の最大値も考慮に入れて、海岸への影響を検討する必要がある」としている。

○中長期的な海面水位の上昇

気象庁の気候変動監視レポート 2013 によれば、我が国沿岸の海面水位は現在の観測体制が確立した 1960 年代以降上昇傾向にあるものの、IPCC 第 5 次評価報告書中の全球平均の海面水位に見られるような 100 年規模での一貫した上昇傾向は見られない。

しかしながら、IPCC 第 5 次評価報告書では、世界平均海面水位の上昇（RCP8.5 シナリオで世界平均海面水位の上昇量が最大 0.82m）が予測されており、また、気温や海水温が上昇した場合、陸氷の融解や海水の膨張によって海面水位が上昇することはメカニズムとして明らかであるとともに、海面水位の上昇が顕在化した場合、沿岸部（海岸）に甚大な影響が生じると想定されることから、我が国沿岸の海面水位の変動をモニタリングしつつ、海面水位上昇量の最大値も考慮に入れて、海岸への影響を検討する必要がある。

適応策の取組の方向性としては、「適応策を進めるに当たっては、様々な施策の連携による相乗効果等を踏まえ、温暖化防止効果以外の面でも大きな効用があり、仮に温暖化が起こらなくても後悔しない範囲の対策（ノンリグレットな対策）を考慮することが重要である。」と不確実性を踏まえた考え方としている。

参考文献：

1)　沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性、沿岸部（海岸）における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会、平成２７年７月、http://www.mlit.go.jp/common/001095553.pdf

３．２　高潮水防の強化に関する技術検討委員会

日本では、三大湾や有明海、瀬戸内海等高潮リスクの高い沿岸も多く、人口・資産が集中している。しかし、1959 年の伊勢湾台風以降三大湾では高潮災害が起きていないため、高潮災害への危機感が薄れている。このため、東日本大震災の前から、高潮ハザードマップの整備率は津波ハザードマップの整

備率に比較して低かった。津波については、2011 年の東日本大震災を受けて同年に津波防災地域づくり法ができ、「最大クラス」の津波を対象に法律に基づく浸水想定を整備する枠組みが整い、支援体制が充実した一方で、高潮対策はそのままであった。

2012 年のハリケーン・サンディでは、2005 年のハリケーン・カトリーナの教訓を踏まえて充実した米国のハリケーン対策が有効に機能し、ニューヨークという世界の中枢都市を 74 年ぶりに浸水させたにも関わらず、被害を拡大させなかった。ハリケーン対策の要の１つは、あらかじめ整備されていたハリケーンのカテゴリー別浸水予測とそれに基づく避難の呼びかけ・命令であった。ハリケーンは接近があらかじめ予期でき、地震が起きてからでないとアクションが起こせない津波と違い被害軽減活動のためのリードタイムがとれる。この特性を生かして、ファースト・レスポンダーと呼ばれる救助隊等の活動ができなくなる風速 39 マイル/hr（17.4 m/s）をゼロ・アワーとするタイムラインがあらかじめ検討されるしくみができていた。ハリケーン・サンディでは、地下鉄等の交通機関や市・州政府・連邦政府等各関係者がハリケーン接近の前に適切な準備行動をとっていたことが被害の拡大防止と都市機能の迅速な回復を助けていた。2014 年の台風 30 号ではアジア地域のフィリピンで高潮災害が起きたことも踏まえ、津波対策の法律整備が整った我が国において、新たなステージの防災・減災対策として、高潮対策を充実させることとなった。

これを受け、上記の海岸関係 4 省庁が事務局となって、水防法改正等を踏まえ水防強化の施策を推進するため、2015 年 2 月に「高潮水防の強化に関する技術検討委員会」が設置された。同委員会では、最悪の事態を視野に入れた最大規模の高潮に関する浸水想定の作成のため、想定し得る最大規模の高潮の設定方法、堤防等の決壊条件等の技術的な事項について議論がなされた。委員を表-Ⅲ3.3.2.1 に示す。海岸分野以外の専門家も委員に参加頂いている。

表-Ⅲ3.3.2.1 高潮水防の強化に関する技術検討委員会 委員名簿

◎磯部 雅彦	高知工科大学 学長
佐藤 慎司	東京大学大学院工学系研究科 教授
関谷 直也	東京大学大学院情報学環 准教授
高橋 重雄	国立研究開発法人港湾空港技術研究所 理事長
中北 英一	京都大学防災研究所 副所長 教授
中山 哲巖	国立研究開発法人水産総合研究センター水産工学研究所　水産土木工学部長
山田　正	中央大学理工学部 教授
事務局	農林水産省 農村振興局 整備部 防災課 農林水産省 水産庁 漁港場整備部 防災漁村課 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 保全課 海岸室 国土交通省 港湾局 海岸・防災課

◎：委員長

2015 年 5 月には水防法が改正され、高潮浸水想定区域を設定する制度が整えられた。これにより、津波と同様、高潮についてもハザードマップ整備とそれを支援する高潮浸水想定区域設定が法律に基づいて行えることとなった。委員会の議論等を踏まえて「高潮浸水想定区域図作成の手引き（Ver.1.00）」が 2015 年 7 月にとりまとめられた。

浸水想定区域図は、２．１で紹介した「方向性」における『＜背後地への影響＞○市町村によるハザードマップ作成への支援』の重要なパーツである。高潮浸水想定区域図を作成するためのシミュレーションにおいて、初期水位に「海水面上昇」を見込むべきか、高潮の起動力となる台風の設定において「台風の強大化」を見込むべきかは重要な事項である。これらについての見解が、手引き（Ver.1.00）の冒頭「1.はじめに」の「1.1 背景　(3)気候変動に対する懸念」に示されているので、その部分を引用する（波線や波線は本報添加）。

「・・(2015 年 2 月に)社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会から公表された「水災害分野における気候変動適応策のあり方について~災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ ~中間とりまとめ」の中で、今後は、浸水想定区域の対象とする外力を、想定し得る最大規模のものとするとともに、洪水だけでなく、内水、高潮も対象とするべきであり、その際、地方公共団体、企業、自治組織、住民等が避難等の検討ができるよう、必要に応じて、浸水深だけでなく浸水継続時間を提示するべきであるという考え方が示された。また、地球温暖化に伴う気候変動により懸念される外力の増大を見込むべきであるが、気候変動予測に関する研究は進められているものの、現段階においては低頻度の現象に地球温暖化が及ぼす影響等についての研究は途上であり、気候変動予測の結果を直ちに見込むことは難しい、とされている。」（「1.1.　背景　（２）気候変動に対する懸念」）。

「高潮浸水想定区域における外力条件は、地球温暖化に伴う気候変動による海面上昇や台風の将来変化を見込んで設定する必要がある。高潮、海面上昇等の沿岸に関する気候変動の研究も着実に進んでいるものの、現段階においては、研究途上であり不確実性を伴うことから、気候変動による将来予測を直ちに見込むことは難しい。このため、現在進められている調査・研究等により、新たな知見が得られた段階で本手引きを見直す。」「また、技術の進歩に伴う地形測量や水理解析の精度向上等により、本手引きで示した手法を見直す必要がある段階で本手引きを見直す。」（2.1.　高潮浸水想定区域図作成の基本的な考え方）。

以上のように、気候変動を現段階で標準的に見込むことはせず、今後の見直しの中で考慮する方向としている。

その一方、適応策の研究成果は着実に挙がっており、全国一律に標準的に見込むことは難しいとしても、取り組むことができるレベルにはあることから、以下のように整理された。「高潮浸水想定区域を指定しようとする海岸の状況、過去の被災実績及び過去台風の疑似温暖化実験等の調査・研究、技術の進歩に伴う地形測量や水理解析の精度向上等を踏まえ、本手引きで定めた手法以外で高潮浸水想定区域図を作成することが適切な場合は、これにより作成することができることとする。」（「1.3. 本手引きの位置付け」）。手引きにおける標準的な手法とは、中心気圧、最大旋衡風半径等のパラメータを与えて気圧場を作成する Myers モデルを用いて風・気圧場を作成し、これを既往の顕著な台風経路を参考に移動方向、速度を与えて潮位偏差・波浪を計算するシナリオベースによるものである。気候変動の研究では、アンサンブル計算や大気・海洋結合モデル等の手法も用いられていることから、隣県で矛盾が生じない等の調整がとれることを確認できれば最新の研究成果の導入も可能としているものである。

４．　海岸分野における気候変動適応策に向けた研究の動向

４．１　将来気候に向けての海岸域防災に関わる研究動向

気候変動の検討の経緯を振り返ると、IPCC の報告が出されとそれまでの研究成果を踏まえて国内の適応策検討の見直しを行うことが繰り返されている。気候変動予測が、研究途上であり、モニタリングや研究の進展とそれらに基づく予測等の修正が繰り返されていく性質のものであることを踏まえると、今後もこのサイクルは続いていく。現場の課題解決や研究成果の現場反映・施策反映をミッションとする国総研（河川研究部海岸研究室）にとっては、本省とともに気候変動に関わる研究動向を見守り、現場や施策への反映に資する助言や提案を研究グループに行うことが重要な役割である。本節では、気候変動適応策に関する研究動向をレビューする。



図-Ⅲ3.4.1.1 我が国の主要な気候変動に関する組織的研究（海岸分野のみ）

図-Ⅲ3.4.1.1 に海岸分野における気候変動に関する我が国での機関横断の組織的研究の変遷を示す。気候変動に関する研究の枠組みは大きく分けて文科省が推進するものと環境省が推進するものの２つとなっている。文科省の枠組みは気候変動将来予測を起点にしており、学術研究予算で組み立てられているため、バックグランドがメカニズム重視で学術性が高い。他方、環境省の枠組みは環境政策への反映を強調したアウトカムを重視している。なお、研究制度間で分担者の乗り入れがあり、取り組みが分離されている訳ではない。

４．２　気候変動リスク情報創生プログラム　沿岸災害リスクの影響評価

気候変動リスク情報創生プログラムの検討体系を図-Ⅲ3.4.2.1 に示す。海岸分野におけるデータの入口の課題として、気候予測により算出されるものは気象データのみであり、海象データは気象データから海上風、台風データを抽出して、さらに波浪計算や高潮計算を行う必要がある。このプログラムでは、波浪や高潮の予測情報を作成することが研究目標の１つとなっている。
高潮に関しては、GCM を直接用いた高潮偏差の将来変化予測、海水面温度を疑似温暖化させて設定し経路アンサンブル計算を行う予測、確率台風モデルを用いてサンプル数を確保して統計的な評価を行う

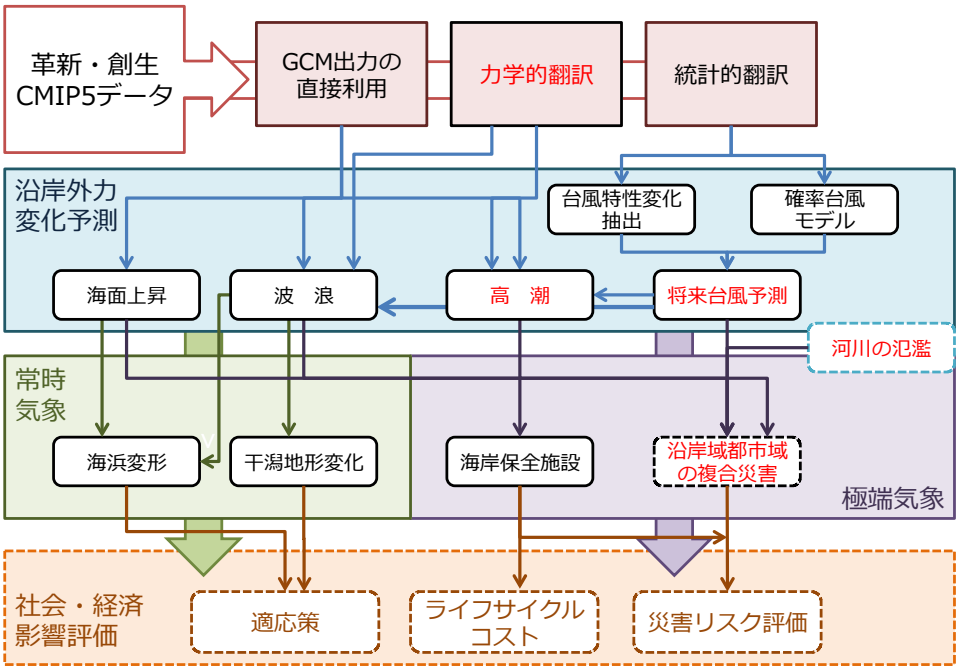


図-Ⅲ3.4.2.1　創生プログラムの検討体系（沿岸防災グループのみ）

予測等の長所・短所を整理している。波浪に関しては、アンサンブル実験による地球規模の将来変化が推定されている。体系にあるとおり、海浜変形や干潟の地形変化、沿岸域の複合災害も扱うこととしており、適応策、海岸保全施設のライフサイクルコスト、災害リスク評価を行うことを目指す意欲的な内容である。

４．３　最近の動向

2014 年の第 61 回海岸工学講演会の前日シンポジウム「ＩＰＣＣ第６次評価報告書を見据えた海岸工学分野における気候変動の影響評価と適応策の検討」、2015 年の第 62 回海岸工学講演会の企画セッション「海岸工学分野における気候変動への対応」では、文科省、環境省双方の研究動向が報告され、気候変動への対応についてディスカッションが行われた。適応策の研究の進展と現場での実践に向けた取り組みは活発である。

表-Ⅲ3.4.3.1 海岸工学分野における気候変動対応に関する最近の取組

2014 年の第 61 回海岸工学講演会　前日シンポジウム 「ＩＰＣＣ第６次評価報告書を見据えた海岸工学分野における気候変動の影響評価と適応策の検討」	2015 年の第 62 回海岸工学講演会　企画セッション 「海岸工学分野における気候変動への対応」
2014 年 11 月 11 日（火）１８～２０時 ウィンクあいち１１階 1102 会議室	2015 年 11 月 12 日（木）　14:40～17:30 東京都江東区青海・タイム 24 ビル 【ホール１】
司会　武若（筑波大学） プログラム １．趣旨説明（武若・筑波大学） ２．IPCC-AR5 の分析と海岸工学分野における着目点（横木・茨城大学） ３．海岸工学に重要な将来変化の予測とその問題点（森・京都大学） ４．港湾・海岸における適応戦略とその問題点（栗山・港湾空港技術研究所） ５．海浜変形予測とその問題点（有働・東北大学） ６．海岸工学分野への提言（三村・茨城大学） ７．総合討論	■　企画セッションプログラム　【前半】 0) 趣旨説明（武若、横木） 1) Estimation of non-linear sea level rise and uncertainty and its projection in the Seto Inland Sea, Japan（李漢洙）file 要旨 2) JRA-55 にもとづく長期波浪推算と波候特性の解析（森信人） 3) 高解像度台風モデルによる台風強度に対する温暖化影響のシナリオ間相互比較（吉野純） 4) 気候変動に伴う最大クラス台風経路と高潮偏差および再現期間の推定－伊勢湾における検討－（澁谷容子） 5) 気候変動適応のための海岸堤防の必要嵩上げ高算定法に関する研究（間瀬肇） 6) 気候変動による影響の検出に伴う２つの過誤のバランス（北野利一） 7) ブルーカーボン研究の将来：気候変動の緩和と適応の両得（桑江朝比呂）file 要旨 ■　企画セッションプログラム　【後半】 A) 水工学分野における気候変動研究の動向（中北英一、京都大学、水工学委員長） B) 総合討論 filePoints

第Ⅲ部

気候変動影響に対する適応策に関する研究

Ⅲ－４：水資源分野における気候変動への対応

１．水資源計画・管理における施策動向

１．１　大規模渇水に対する備えの必要性と国土交通省における施策動向

昭和 53 年の福岡渇水の発生や、平成 6 年の列島渇水等、大規模な渇水は度々発生してきている。また、世界でも 2006～2008 年のオーストラリアでの渇水など、過去例のないような大きな渇水が発生している。それに加えて今後はⅡ部の第 5 章で示したように気候変動に伴いダム枯渇回数の増加や枯渇日数の長期化など渇水リスクの上昇が懸念されている。渇水リスクの上昇は予測されるものの、どの程度上昇するかを定量的に予測（降水量がどの程度減少するか等）することは、第Ⅱ部 5 章でも論じたように、予測結果に幅があるため現時点では極めて困難である。そのため、将来的に渇水が発生することを前提として対応策を可能な限り現時点で検討しておくことが重要である。

現在までに大規模な渇水を経験した地域では渇水に対する経験や知見が一定量蓄積されていると考えられるものの、現在までに大規模な渇水を経験してこなかった地域においては一度大規模な渇水が発生した場合に大きな混乱が発生する可能性がある。また、渇水の経験が豊富な地域においてもこれまでに経験の無い規模の大規模な渇水が発生する可能性は否定できないため、予め大規模渇水に対して備えることは重要なことである。大規模渇水への対応として、現在計画されている水資源施設の整備を着実に進めることが重要である一方で、新設の水資源施設に大きく依存することは困難な状況であり、大規模渇水が発生した場合のソフト的な対応を事前に想定しておくことが対応策として必須である。大規模渇水に対する国土交通省における施策動向として、水源が枯渇し国民生活や社会経済活動に深刻かつ重大な支障が生じる渇水を「ゼロ水」とし、ゼロ水発生時の対応について事前に検討・設定・準備する「ゼロ水タイムライン」について現在検討を行っている。ここでは、現時点でのゼロ水タイムライン検討について簡単に紹介する。なお以下で紹介する内容は「水資源分野における気候変動への適応策のあり方検討会（平成 24 年 7 月～）」において検討を行っている段階のものであり、今後の検討会を踏まえて修正される可能性がある。

１．２　ゼロ水タイムラインの概要

ゼロ水タイムラインの検討は大きく分けて、「①過去の渇水等の降雨状況を踏まえたゼロ水シナリオの設定」、「②渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定」および「③被害や影響を最小とするための需要側、供給側等の事前予防、対応措置の検討」という構成となっている。

１．２．１　過去の渇水等の降雨状況を踏まえたゼロ水シナリオの設定

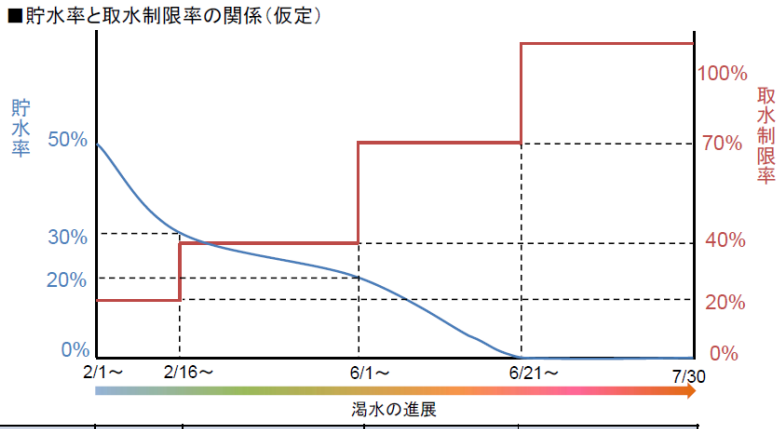
最初に、過去の降水量データを基にして、それらを多角的に分析してより厳しい渇水状況が発生するようにゼロ水のケース設定を行う。設定手法の考え方としては、現在以下のケースが考えられているが、今後の検討によって変更になる可能性がある。

ケース0：既往最大規模の渇水時の降水量を対象とする
ケース1：12ヶ月降水量（※）が一番少ない期間を対象とする。
ケース2：冬期の最小降水量と夏期の最小降水量を連続させる。
ケース3：年間降水量（※）が1番少ない年と2番目に少ない年を連続させる。

ケース4：過去の渇水時に台風による回復が行われなかったものとする。
ケース5：各月単位毎の降水量最小値を12ヶ月間組み合わせる。

※12ヶ月降水量：連続した12ヶ月の総降水量
年間降水量：1月～12月の総降水量

ここで想定した降水量と、既往渇水時の貯水率の減少率等の情報を参考にしてゼロ水シナリオを設定するための取水制限率を時系列的に設定する。図-Ⅲ4.1.2.1.1は貯水率と取水制限率の時系列での設定事例である。降雨は上述のケース2により設定し、既往渇水時の貯水率の減少状況を参考に、ゼロ水シナリオを設定するための取水制限率を時系列的に設定した。具体的には、11月1日には貯水率を100%とし、既往渇水時はその後の少雨により貯水率が減少し1月末に50%まで減少したため、取水制限を開始したものとした。それ以降は図-Ⅲ4.1.2.1.1に示す日数の経過に従い渇水が進展するものと仮定した。ここでの事例では、シナリオを簡略化するため、取水制限率＝給水制限率とし、表-Ⅲ4.1.2.2.1に示す通り20%取水制限で減圧給水、40%で8時間断水、70%で16時間断水が発生し、100%では24時間断水が発生するものと仮定した（国土交通省水資源部2014）。ここで示した事例は過去に大きな渇水を経験している流域を対象とした設定事例であり、今まで渇水を経験していない流域での設定方法については今後の検討課題である。また、設定方法についても上述した降雨の設定に応じて変更・検討する必要がある。



貯水率	50%～30%	30%～20%	20%～0%	0%
取水制限率	20%	40%	70%	100%
制限日数	15日	105日	20日	40日

図-Ⅲ4.1.2.1.1　貯水率と取水制限率の時系列での設定イメージ（国土交通省水資源部2014）

表-Ⅲ4.1.2.2.1　取水制限率に応じた影響項目の整理イメージ（国土交通省水資源部 2014）

取水制限率	20%	40%	70%	100%	100%（長期間）
断水率	減圧給水	8時間（夜間）断水	16時間断水	24時間断水	24時間断水

水道断水状況		減圧給水	8H（夜間）断水	16H断水	24H断水	24H断水
社会・経済活動	農業（耕作）	番水実施	番水強化	収穫量の減少	収穫量の減少	農作物枯死、収穫量激減
	農業（畜産）	畜舎の清掃用水不足	家畜の飲用水不足	家畜の健康状態悪化	家畜の斃死	家畜の斃死
	水産・海運	漁港の清掃用水不足	水産物加工場の操業への影響	製氷用水不足鮮度悪化	河川・湖沼の漁獲量減少	食品流通への影響
	工業	生産調整、回収水増加	工場の稼働日数減少	減産、水の輸入（コスト増）	脱臭・脱硫が困難	操業停止
	商業（デパート等）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 飲料水買い占め	食品類品薄 サービス低下	客足低下が顕著 一部食品販売停止	臨時休業
	商業（ホテル、観光等）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 ガソリンスタンドでの洗車休止	入浴の制限 クリーニング停止 テーマパーク、プールの休園、営業時間短縮 観光資源枯渇 清掃頻度減	臨時休業	臨時休業
	商業（飲食店）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 営業時間短縮	清掃頻度減 営業時間短縮	臨時休業	臨時休業
	オフィス	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	清掃頻度減　衛生状態悪化 職場環境悪化　能率低下	トイレ閉鎖 水冷のシステムはダウン	臨時休業
	発電　水力 発電　火力	水力発電量低下 火力への依存増大	水力さらに低下 火力への依存増大	都市用水への融通による減電 ボイラー用水等の不足による減電	ダム枯渇、河川水量減少によりさらに減電 代替水源無ければ停止	計画停電の実施
	建設業	下水処理水利用増加	散水、機械清掃に支障 工事の遅れ	コンクリート養生水不足 生コン使用現場停止	緊急的な工事以外中止	緊急的な工事以外中止
	銭湯、理容等	水の出悪化	洗髪に支障 営業時間短縮	公共の風呂閉鎖	臨時休業	臨時休業
福祉・医療	病院	水の出悪化	夜間診療の中止 人工透析が困難等医療活動に支障 入浴回数削減	緊急以外の外来医療中止 緊急以外の手術困難 給食体制に支障	通常の医療水準維持不可ならば休診 緊急以外の外来医療中止	入院患者の転院
	老人ホーム	水の出悪化	夜間のトイレ使用不可による紙おむつ増加 入浴回数削減	清掃頻度減少 水を利用しない調理メニューへ	外部からの支援が不可欠	入所者の移転
	保育所・児童施設	水の出悪化	保育時間短縮　共働き家庭へ影響	保育所は閉鎖 水を利用しない調理メニューへ	入所児童の移動開始	入所児童の移動開始
公共施設・サービス	役所	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	避難所・簡易トイレの設置と維持管理業務増大 行政サービス低下	最低限の窓口業務以外の業務停止 水冷のシステムはダウン 行政機関の業務継続に支障	住民の最低限機能維持
	銀行・郵便・電話	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	営業時間短縮	業務や社員の地方への移転 水冷のシステムはダウン	住民の最低限機能維持
	学校	水の出悪化	プール中止・給食メニューの変更や中止	大学・高校は休校	小中学校は休校	全ての学校休校
	交通機関等	水の出悪化	作業能率低下による安全に対するリスク増大	交通機関の運行に支障 SAの使用制限　安全面の低下	運行に必要な人員が確保出来ず、運行に支障	運行停止
	公共施設（公園、焼却場）	水の出悪化	公営プール中止 植栽への散水制限	公園等への簡易トイレ設置　公園機能低下 ゴミの焼却機能低下	下水処理場の機能不全 ゴミの焼却停止	ゴミの一時保管 公園機能喪失
	防災	水の出悪化 減圧により消火用水に支障	消火用水不足による火災被害増加	さらに火災リスク増加 緊急対応困難	山火事・野火の消火困難	火災発生時のリスク激増
個人生活	個人生活	水の出悪化　高台では断水し給水車出動 ポリタンクの用意	生活時間への制約増加 高齢者の水運搬負担	健康状態悪化　ストレス増加 幼児を抱える家庭での共働き困難	バケツ等くみ置きによる生活のため労力増大 トイレ不可　公共設置の簡易トイレ利用	渇水疎開

注）影響項目、状況想定は、各流域の特性等により異なることも想定される。

１．２．２　渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定

取水制限率と、「社会・経済活動」、「福祉・医療」、「公共施設・サービス」、「個人の生活」各分野への影響について、渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定を行う（表-Ⅲ4.1.2.2.1）。各分野については、できる限り細分化を行う。たとえば社会・経済活動であれば、「農業（耕作）」、「農業（畜産）」、「水産・海運」、「工業」、「商業（デパート・スーパー）」、「サービス業（ホテル、観光、娯楽）」、「サービス業（飲食店）」、「オフィス」といった細分類を行う。

１．２．３　被害や影響を最小とするための需要側、供給側等の事前予防、対応措置の検討

次に、1.2.2で想定した状況設定を考慮した対策を検討する。ここでの対策は、ゼロ水が発生する以前の事前予防と発生した以降の対応措置に分けられる。

●事前予防：

通常時から水資源供給施設の整備、既存施設の機能向上、施設の再編や運用の見直しによる水供給の効率化を推進する。また、限られた水資源を有効に利用するため、需要マネジメントを行い節水型社会を構築していく。さらに、海水淡水化装置、給水タンク、輸送のためのトラック、水備蓄（ペットボトル）等の備えを実施する。

●対応措置：

取水制限率に応じて、需要側および供給側の対応を設定しておく。例えば社会経済活動の農業（耕作）、農業（畜産）、水産・海運の例を下表に示す。

表-Ⅲ4.1.2.3.1　農業（耕作）、農業（家畜）、水産・海運の取水制限率別の対応策イメージ
（国土交通省水資源部2014）

影響項目		想定される内容
1－1）農業（耕作）	農作業への負担増	・取水制限による番水実施に伴い、農業従事者の労力が増加。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・キャベツ等植え替えが必要な作物への影響。利根川平成2年夏渇水では、ホウレンソウ、キャベツ、白菜等野菜に不作あり。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・取水制限による番水実施に伴う農業従事者の労力がさらに増大。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・農作物被害（収穫量減少、品質の低下）が想定。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・農業用機械等洗浄用水の不足が想定。【農機具等洗浄水】
	品質低下の懸念	・水不足による病害虫の発生が想定。【防除用水】
	商品価値低下の懸念	・農産物加工場で収穫物の洗浄ができなくなると想定。【洗浄水不足】
	営農地周辺への影響	・農作物被害の増大が想定。【かんがい用水】
	農作物の損失	・農作物の枯死、収穫量激減が想定。【かんがい用水】
1－2）農業（畜産）	畜産従事者の負担増	・節水による清掃作業等への影響。【畜舎用水】
	畜産従事者の負担増	・家畜の飲用水の不足。【畜産用水】
	家畜品質低下の懸念	・家畜の健康状態悪化が懸念されることと想定。【畜産用水】
	家畜の損失	・夏期畜舎冷却用水が不足しニワトリ等が熱死するなどが想定。【畜舎・鶏舎維持用水】
	家畜の損失	・牛・豚・鶏等の斃死が想定され、疎開も考えられるが、受け入れ先が無ければ不可能【家畜の成育管理】
	家畜の損失	・牛・豚・鶏等の斃死が増大。【家畜生命維持用水】
1－3）水産・海運	水産従事者の負担増	・節水による清掃作業等への影響。【洗浄用水】
	水産業への影響	・水産物加工工場の操業等に支障が発生すると想定。【食品加工用水】
	水産業への影響	・鮮度管理のための製氷に支障、流通にも影響。【製氷用水】
	水産業、海運業への影響	・船舶で使うボイラー水、飲料水、風呂水等の給水が出来なくなる。航行停止は工業製品の出荷停止に繋がり影響は消費地へも拡大するものと想定。 ・ただし外洋航路など大型船では海水淡水化装置を使用している。（日本船主協会HP）【操船・操業用水】
	漁業資源の減少	・河川や湖沼の水量低下による漁獲量の低下【河川水量】
	食品流通への影響	・長期的には農業・畜産での収穫量低下を補うため、水産物の消費量が増えるが対応・体制が追いつかなくなる。H6列島渇水事例あり。【営業用水】

取水制限率（%）

20％	40％	70％	100％	100%（長期間）

１．３　今後の課題

ゼロ水タイムラインの検討は現在も継続して行われている段階であり、今後最終的なとりまとめが完成した後、各地域においてとりまとめに基づいてゼロ水タイムラインを作成することが期待される。

参考文献：

国土交通省水資源部 2014：第 6 回気候変動による水資源への影響検討会、平成 26 年 3 月

２．気候変動によるダム貯水池の水質への影響と適応策の検討

２．１　検討の目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第５次評価報告書においては、将来、温室効果ガスの排出量がどのようなシナリオをとったとしても、世界の平均気温は上昇し、21 世紀末に向けて気候変動の影響のリスクが高くなると予測されている。こうした見解を受けて、中央環境審議会は 2015 年３月に「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）をとりまとめた。この中で、気候変動が日本にどのような影響を与えうるのか、また、その影響の程度、可能性等（重大性）、影響の発現時期や適応の着手・重要な意思決定が必要な時期（緊急性）、情報の確からしさ（確信度）がどの程度あるかを科学的に取りまとめた。しかしながら、この中では、気候変動による湖沼・ダム貯水池の水環境への影響については、具体的な予測の研究事例は確認できないと報告している。

そのため、本検討においては、気候モデルによる現在及び将来気候の計算結果を使用し、ケーススタディ対象ダムについて、気候変動がダム貯水池の水質に与える影響について定量的な評価を試みた。また、適応策の一例として、現在と将来の水質の変化を解消するための対策について検討を行った。

２．２　検討の概要

図-Ⅲ4.2.2.1 に示すとおり、ケーススタディダムに対して、流域の流出・利水モデル、ダム貯水池の水質モデルを構築し、これに気候変動予測モデルの出力結果を入力することで、気候変動によるダム貯水池の水質・水温への影響を試算した。計算結果については、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」に分類して整理した。また、この将来の水質に対して現状の対策を継続した場合の効果と、この現在と将来の水質の変化の解消をするための対策の効果を試算した。

なお、本検討の各段階における計算結果や考察等を含む詳細な内容については、国総研資料 856 号「気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究」と題して、国総研ホームページにおいて（http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0856.htm）公表しており、本稿では本検討の手法と結論を中心に要点を記す。

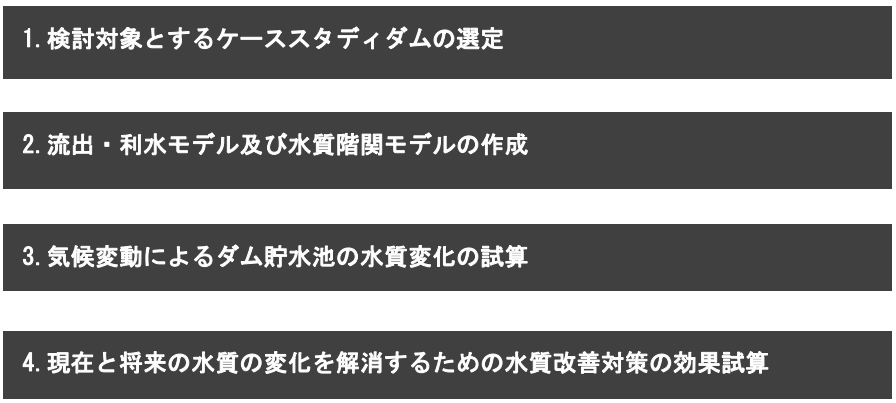


図-Ⅲ4.2.2.1　本研究のフロー

２．３　検討対象とするケーススタディダムの選定

本検討では、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」への適応策を検討可能な４つのケーススタディ対象ダムを選定した。

具体には、我が国の閉鎖的ダム水域における主要な水質問題となる藻類増殖の観点から、流入リン面積負荷率が大きく貯水池の水交換速度が小さいダムとして、「耶馬溪ダム」、「釜房ダム」を選定した。上記で選定した「釜房ダム」が東北の太平洋側に位置するのに対し、わが国を代表する豪雪地帯を流域に抱え、気候変動による気温上昇により融雪への影響が大きいと思われる東北の日本海側から「寒河江ダム」を選定した。同ダムは、水深が深く、冷水放流による農業等の利水面への影響も懸念されることから、気候変動による春先の融雪期の流況や水温に影響も検討も可能となる。さらに、「耶馬溪ダム」と東北の「釜房ダム」・「寒河江ダム」を地理的に補完する観点および「濁度の上昇」が問題となっていることから「早明浦ダム」を選定した。

２．４　流出・利水モデル及び水質解析モデルの作成

２．４．１　流出モデルの基礎構造

各ダム流域に適用した流出モデルは、非定常の分布型物理モデルである WEP モデルを基本とし、融雪・積雪を考慮したものである。WEP モデルは表-Ⅲ4.2.4.1.1 および図-Ⅲ4.2.4.1.1 に示すように、水循環の素過程のみならず熱輸送の素過程も同時に解析でき、モデル解析を通して気候変動による水循環系の変化を把握するのに適している。

表-Ⅲ4.2.4.1.1　流出モデルで考慮する素過程

水循環素過程	①蒸発散	⑥地表面流れ
	②浸透	⑦河道内の流れ
	③表面流出	⑧地下水流れ
	④中間流出	⑨積雪・融雪
	⑤地下水流出	
熱輸送素過程	①正味放射	⑤潜熱フラックス
	②短波放射	⑥顕熱フラックス
	③長波放射	⑦地中熱フラックス
	④人工排熱	⑧地表面温度

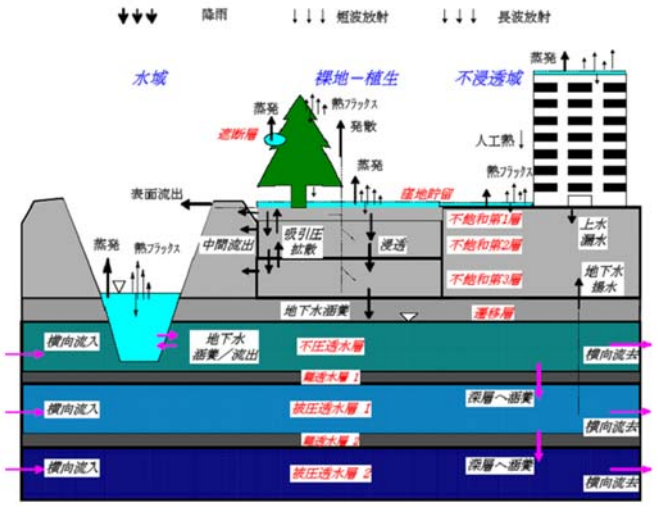


図-Ⅲ4.2.4.1.1　モデルの鉛直構造

（出典：WEP モデル解説書、土木研究所、水工研究グループ）

２．４．２　流出モデルの計算条件

流出モデルに設定する地形・地質、土地利用、気象条件、地表流条件、河道条件を表-Ⅲ4.2.4.2.1 に示す。各ダムで構築した流出モデルの計算範囲は、ダム上流域から下流における利水基準点までとし、解析メッシュサイズは 200m とした。

表-Ⅲ4.2.4.2.1　流出モデルに用いる計算条件

項目		内容	出典
地形・地質	計算領域	流域界	国土数値情報、河川管内図
	標高	標高(50m メッシュデータ）から 200m メッシュを作成	国土数値情報
	表層地質	表層地質メッシュ	国土数値情報
土地利用	土地利用面積	100m メッシュ土地利用	国土数値情報
気象条件	降水量	国交省雨量観測所、アメダス観測所の時間降水量	国土交通省、気象庁
	ティーセン分割	観測所位置から作成	国土交通省、気象庁
	気温	気温データ（時間）	気象庁
	ティーセン分割	観測所位置から作成	気象庁
	日射量	全天日射量データ（時間）	気象庁
	時刻データ	日照時間	気象庁
	相対湿度	相対湿度データ（時間）	気象庁
	風速	風速データ（時間）	気象庁
地表流	落水線方向	標高データから作成	作成データ
	傾斜	標高データから作成	作成データ

河道	河床標高	標高データから作成	作成データ
	河川幅	地形図等から設定	作成データ
	河川位置	地形図から河川ラインを設定	国土数値情報、 国土地理院地形図

２．４．３　利水モデルの基本構造

図-Ⅲ4.2.4.3.1 にモデルの概念図を示す。利水モデルは日単位を基本とし、ダム直接取水及びダム～利水基準点上流までの取水・還元を考慮したモデルとした。

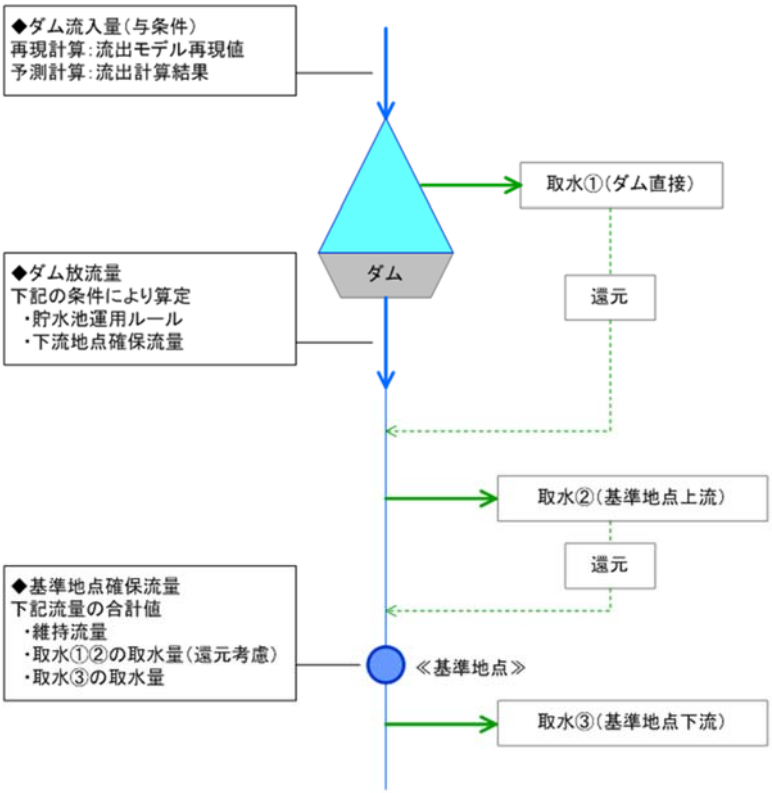


図-Ⅲ4.2.4.3.1　利水モデルの基本構造

２．４．４　水質解析モデルの基本構造

本検討で適用した水質解析モデルには、国内の複数のダム貯水池において、環境影響評価や水質解析への適用実績のある鉛直二次元モデルを用いた。図-Ⅲ4.2.4.4.1 に水質解析モデルの基本構造を示す。

水質解析において考慮した生態系モデルは、各水質項目（ダム貯水池・放流水・取水の窒素、リン、COD、クロロフィルａ、水温、SS 等）について、ダム貯水池における流入、放流、取水、蒸発散、一次生産、無機化分解、熱収支、酸素消費、沈降等のプロセスを表現可能なものとした。

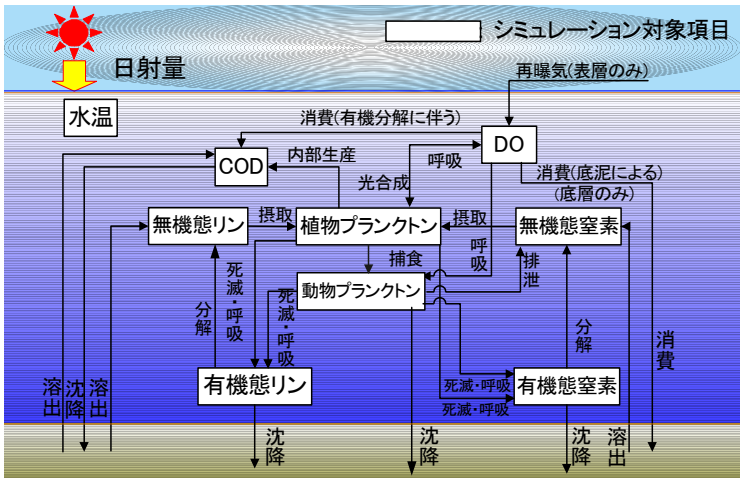


図-Ⅲ4.2.4.4.1　水質解析モデルの基本構造

２．５　気候変動によるダム貯水池水質の変化試算

２．５．１　将来予測シナリオの選定

第Ⅱ部第 1 章 5.に示すとおり、2014 年 6 月 6 日に環境省が日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測に供することを目的に、RCP シナリオに基づいた地域気候モデル（MRI-NHRCM20：水平格子間隔 20km）の出力結果を公表しており、本検討では、同出力結果を用いたダム貯水池の水質変化試算を実施した。

本検討においては、環境省が公表する RCP シナリオに基づく気候変動予測モデルによる予測出力結果（全 19 ケース）のうち、図-Ⅲ4.2.5.1.1 に示す考え方により表-Ⅲ4.2.5.1.1 に示す計 7 ケースを予測計算ケースとして選定した。第Ⅱ部第 5 章と異なり、Step①として 4 つの放射強制シナリオの違いを見る観点を加えている。

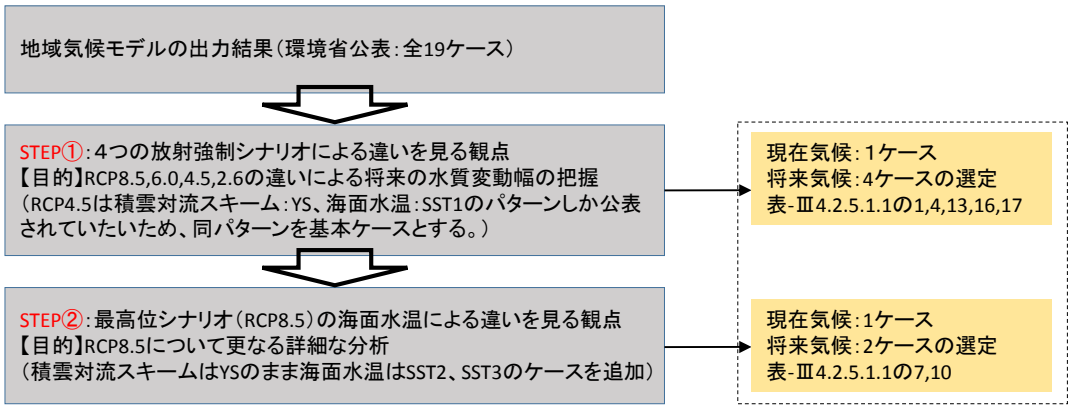


図-Ⅲ4.2.5.1.1　予測計算ケース選定の考え方

表-Ⅲ4.2.5.1.1　RPC シナリオ全 19 ケースのうち本研究で採用した予測ケース

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
—			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
—			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18			SST2	YS	HFA_rcp26_c2
19			SST3	YS	HFA_rcp26_c3

RPC4.5 の２ケース（c2,c3）は平成 26 年の本検討時点で未実施

・・・本検討対象ケース

２．５．２　気温及び降水量データのバイアス補正方法

気候変動予測モデルの現在気候における出力結果には、観測値と差違がある。そのため、気候変動予測モデルの出力値については、長期的な平均や分散等の統計的な観点から、観測値に近づけるバイアス補正を行った上で、取り扱う必要がある。

本検討では、気候変動予測モデル出力値のうち気温、降水量に対して、表-Ⅲ4.2.5.2.1 に示す手法によりバイアス補正を実施した。気温は、月毎に概ねの変化パターンを持つことから、モデル値と観測値の月平均値の差分をバイアスとし、気候モデルにより計算された日平均の気温に月毎に設定したバイアスを乗せる差分法により補正した。降水量は気温とは異なり年によって当該月中の降水頻度が異なることから、モデル値と観測値の累積分布関数(CDF)を作成し、パーセンタイル毎に補正する CDFDM 法を採用した。

表-Ⅲ4.2.5.2.1　バイアス補正方法

気象要素	バイアス補正方法	手順概要
気温	差分法	①対象メッシュ毎に観測値とモデル値(現在気候)の月毎の平均気温を算出する。 ②観測値とモデル値の差（モデル値-観測値）を月別に算出し補正値（バイアス）とする。 ③モデル値（将来気候）の値から当該月の補正値を増減させる。
降水量	CDFDM 法	①観測値とモデル値(現在)を昇順に並べ替える。(月別) ②観測値とモデル値を比較するため、月別の累積分布関数(CDF)を構築し、観測値と同じパーセンタイルのモデル値の比を算出しモデル誤差（バイアス=観測値/モデル値）とする。気候変動モデルの将来気候で構築した CDF に対応するパーセンタイル時のバイアスを当該データに乗じる。(モデル補正値=モデル値(将来)×バイアス(比率) ③補正したモデル値(将来)を日付順に並べ替える。

２．５．３　気候変動によるダム貯水池の水質変化試算

２．４で構築した流出・利水モデルおよび水質解析モデルを用いて、気候変動によるダム貯水池の水質変化の試算を行った。具体には、２．５．２でバイアス補正を行った気温および降水量のデータをもとに表-Ⅲ4.2.5.3.1 に示す条件で流出・利水計算を行い、その計算結果をもとに表-Ⅲ4.2.5.3.2 に示す条件で水質計算を行った。

計算結果については、ダム毎に、気象条件（気温・降水量）、流況（ダム流入量）、水質変化現象（藻類増殖（表層 Chl-a・表層 Chl-a25 μg超過日数）、底層水質悪化（底層 DO2.0mg/l 低下日数）、濁度の上昇（表層 SS・放流 SS25mg/l 超過日数）、水温の上昇（表層水温・放流水温・温水放流日数・温水放流温度・冷水放流日数・冷水放流温度））の項目で整理した。

表-Ⅲ4.2.5.3.1　流出・利水計算条件

項目		内容
計算モデル		分布型流出モデル（WEP モデル）
計算期間		現在気候　：1984 年 9 月～2004 年 8 月 将来気候　：2080 年 9 月～2100 年 8 月
地形・地質形状		検証計算と同様
気象条件	気温	バイアス補正後のモデル出力値
	降水量	バイアス補正後のモデル出力値
	日射量 日照時間	降水量と関係式から日射率を算出し、最大可能日照時間及び最大可能日射量に乗じて推定
	湿度	降水量からの推定値
	風速	実績値による月平均値
下流基準点の取水量 (利水計算)		現在気候期間における近 5 ヵ年の日平均パターン

表-Ⅲ4.2.5.3.2　水質計算条件

項目		内容
計算モデル		鉛直二次元モデル
計算期間		現在気候　：1984 年 9 月～2004 年 8 月 将来気候　：2080 年 9 月～2100 年 8 月
貯水池形状		検証計算と同様
流入量		流出モデルの計算結果
放流量		利水モデルの計算結果
気象条件	気温	バイアス補正した日平均気温（流出モデルと同様）
	日射量	降水量により日射率を設定（流出モデルと同様） 最大可能日射量を上限とする。
	湿度	降水量からの推定値（流出モデルで設定する条件のダム貯水池に該当するメッシュの値）
	風速	実績値による月平均値（流出モデルで設定する条件のダム貯水池に該当するメッシュの値）
	雲量	日射率からの推定値
流入水温		気温との関係式で日平均水温を設定（検証計算と同様）
流入水質		ダム流入流量から LQ 式で設定（検証計算と同様）
選択取水の取水位置		最新の施設諸元、運用ルールを設定
水質保全施設の運転状況		最新の施設諸元、運用ルールを設定

２．６　現在に対する将来の水質悪化への対策検討

本検討においては、気候変動に伴う将来の水質悪化に対して、現状の対策を継続した場合の効果を確認した上で、さらに水質悪化を解消することを目指した対策を新たに設定し、現状対策の増強変更も含めこれを適応策と捉え、その効果を試算した。ただし、ダムの水温については、将来の水温を現在の水温に完全に戻すために膨大な貯留水を人為的に冷却することが非現実的なことから、絶対的な水温変化ではなくダム湖流入前後の水温差に着目し、将来の冷温水放流日数を、現在の冷温水放流日数とするための対策の検討を行った。本検討により得られた知見の概要は以下のとおりである。

【藻類増殖】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケーススタディ対象ダムにおいては、気候変動により、平均年降水量はやや増減するものの、気温上昇による蒸発散量も増大するため、平均年総流入量が顕著な増加を示すケースはほとんどない。そのため、流入負荷量が顕著に増加するケースもほとんどないと考えられ、全体的には、藻類増殖に顕著な変化は見られない。ただし、釜房ダム、耶馬溪ダムにおいては、気温上昇に伴う水温上昇により藻類増殖期が早期化・長期化する場合が見られる。以下の図-Ⅲ4.2.6.1.1 に釜房ダムの流入量、図-Ⅲ4.2.6.1.2 に釜房ダムの表層 Chl-a の試算結果を示す。

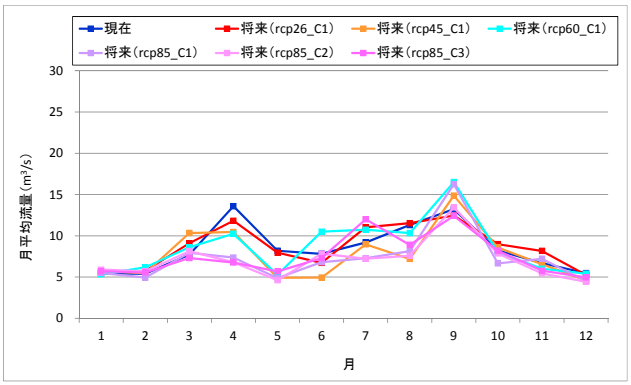


図-Ⅲ4.2.6.1.1　釜房ダムの流入量

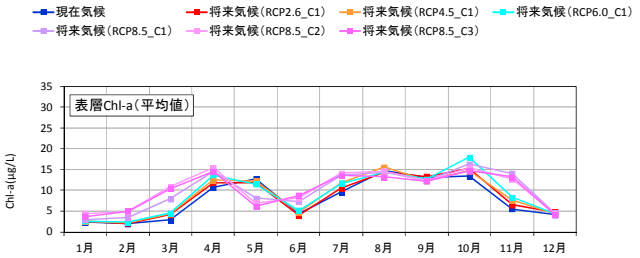
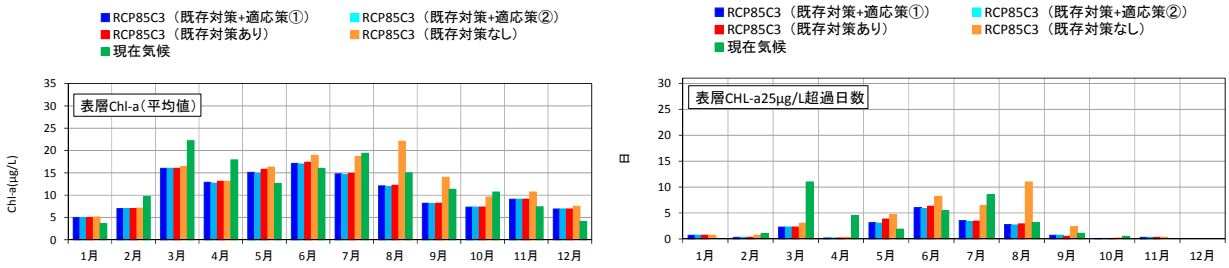


図-Ⅲ4.2.6.1.2　釜房ダムの表層 Chl-a

（対策効果試算）

➢ このような藻類増殖に対する水質改善対策としては、既設の曝気循環施設が有効であり、さらには、釜房ダムで散気量の増量、耶馬渓ダムで曝気開始時期の前倒し及び散気量増量により、効果が増すと考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.3 に耶馬渓ダムにおける藻類増殖への対策の試算結果を示す。



図Ⅲ4.2.6.1.3　耶馬渓ダムにおける藻類増殖への既存対策・適応策の効果試算
（左：表層 Chl-a 月平均値、表層 Chl-a25μg/L 超過日数）

※適応策①：既存の浅層曝気施設（2 台）の運用開始時期を 5 月から 4 月に変更
適応策②：適応策①の条件に加え、浅層曝気施設（水面設置式）の散気量を 2 倍に増加

【底層水質悪化】

（気候変動による水質変化の予測）

➢ ケーススタディダムのうち耶馬渓ダム、寒河江ダムにおいては、気候変動により、水温上昇に伴う有機物分解のための酸素消費量が増加し、底層の貧酸素化の進行が見られる。図-Ⅲ4.2.6.1.4 に耶馬渓ダムの底層 DO が 2mg/L を下回る日数の試算結果を示す。

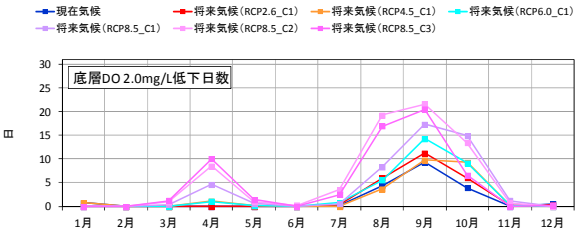


図-Ⅲ4.2.6.1.4　耶馬渓ダムの底層 DO が 2mg/L を下回る日数

（水質改善対策の効果試算）

- このような底層水質悪化に対する適応策としては、深層曝気施設や高濃度酸素水供給施設が有効と考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.5 に耶馬渓ダムにおける底層水質悪化への対策の試算結果を示す。

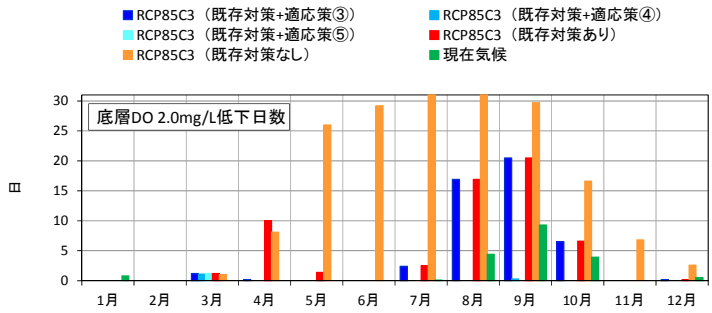


図-Ⅲ4.2.6.1.5　耶馬渓ダムにおける底層水質悪化への既存対策・適応策の効果試算
（底層 DO2.0mg/L 低下日数）

※適応策③：既存の深層 DO 改善設備の運用開始時期を 5 月から 4 月に変更。
適応策④：適応策③の条件に加え、深層 DO 改善設備の散気量を 2 倍に増加。
適応策⑤：適応策③の条件に加え、高濃度酸素水供給装置を 1 台設置。
（運用時期：深層 DO 改善設備と同様の 4～9 月、散気量：80m^3/h、吐出 DO 濃度：300%）

【濁度の上昇】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケーススタディダムのうち寒河江ダムにおいては、気候変動により、発生頻度は低いがダムへの流入量規模の増大やダムの流出土砂の特性から、濁度の上昇が見られる。
- ただし、本検討で用いた気候モデルの予測結果は、アンサンブルデータではないため、本結果は気候モデルの偏りによる現象である可能性は否定できない。図-Ⅲ4.2.6.1.6 に寒河江ダムの表層 SS 年平均値及び放流 SS25mg/l 超過日数の試算結果を記す。

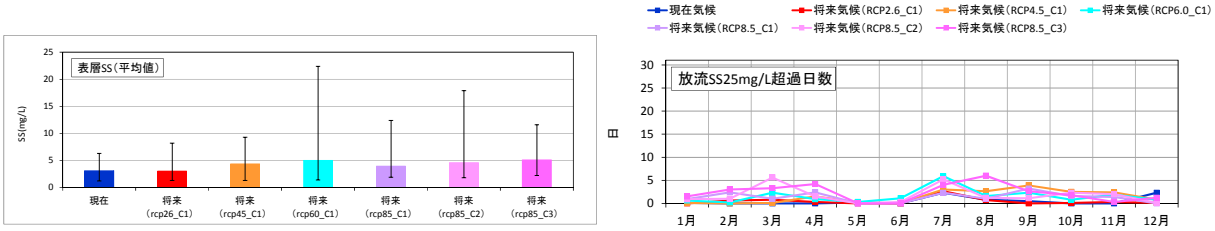


図-Ⅲ4.2.6.1.6　寒河江ダムの表層 SS 年平均値（左）と放流 SS25mg/L 超過日数（右）

（水質改善対策の効果試算）

このような大規模な出水に伴う濁度の上昇に対する適応策としては、選択取水設備の効果は限定的と見られ、清水バイパスのような新規施設の検討も有効と考えられる。しかし、可能性の限定的な事象とも解され、大きな費用を要する適応策の可否は、環境影響を踏まえつつ慎重に検討する必要がある。図-Ⅲ4.2.6.1.7 に寒河江ダムにおける濁度の上昇への対策の試算結果を示す。

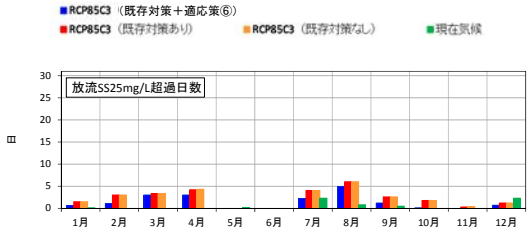


図-Ⅲ4.2.6.1.7　寒河江ダムにおける濁度の上昇への既存対策および適応策の効果試算
（放流 SS25mg/L 超過日数）

※適応策⑥：清水バイパス。本川からの流入水をダム下流にバイパスする。

【水温の上昇】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケースタディダムにおいては、気候変動により、気温上昇に伴って貯水池内水温が上昇するが、ダム流入水温も上昇するため、ダムの流入水温変動幅に対する現状の温水放流日数からの顕著な増加は見られない[注)]。図-Ⅲ4.2.6.1.8 に早明浦ダムにおける温水放流日数と温水放流時の超過水温の試算結果を示す。

注）上述のとおり、将来気候の水温から現在の水温に人為的に冷却することに膨大な費用とエネルギーを要し、非現実的であることから、「ダムの現状の流入水温の変動幅に対する現状の温水放流日数」と「ダムの将来の流入水温の変動幅に対する将来の温水放流日数」を同等とする観点から評価した。

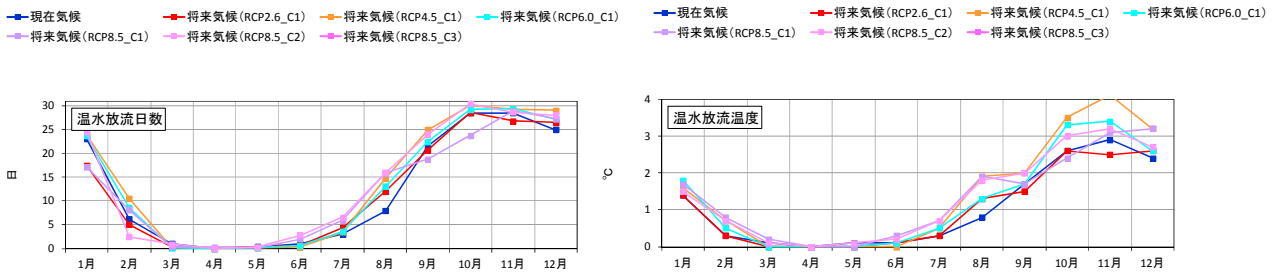


図-Ⅲ4.2.6.1.8　早明浦ダムにおける温水放流日数（左）と温水放流時の超過水温（右）

（適応策）

このような冷温水放流の増加に対する適応策としては、選択取水設備の運用ルールを気候変動による流入水温の変動等に対して柔軟なものに変更することが有効と考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.9 に釜房ダムにおける温水放流への対策の試算結果を示す。

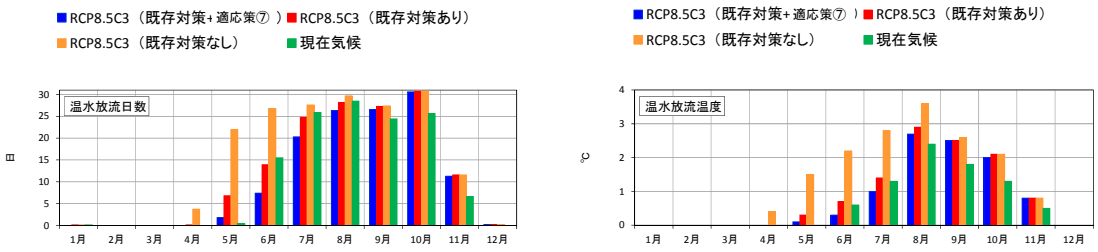


図-Ⅲ4.2.6.1.9　釜房ダムにおける温水放流への既存対策および適応策の効果試算

※適応策⑦：現状の表層取水を基本とした設備から任意層の取水が可能な設備に改造し、将来気候の流入水温に応じた運用目標水温を設定。

２．７　まとめ

本検討においては、4 つのケーススタディ対象ダムについて、それぞれ流域の流出・利水モデル、ダム貯水池の水質モデルを構築した。これらのモデルに、現在気候及び RCP2.6～8.5 の 6 ケースの将来気候に対する気候モデルの出力結果をバイアス補正して入力することにより、気候変動によるダム貯水池の水質・水温への影響を試算した。

試算結果については、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」に分類して整理した。ダムごとに、変化が大きいと考えられる現象の種類はダムにより異なるが、全ての水質変化現象に対して悪化傾向を示す可能性が見られた。

これらの現在気候に対する将来気候下での水質悪化を解消することを目標として、現在対策済みの施設の効果を試算するとともに、選択取水設備、曝気循環設備等、従来採用されている水質改善対策の追加（既存設備の運用変更や増強を含む）を基本とした対策を設定し効果を試算したところ、これらの対策の有効性が見出された。

本検討で得られた知見をもとに、国土交通省が 2015 年 11 月に策定した「国土交通省気候変動適応計画」において、ダム貯水池の水環境に対する気候変動適応策については、選択取水設備、曝気循環設備等の水質保全対策を引き続き実施するとともに、気候変動に伴う水質の変化の内容と程度に応じ水質保全設備の運用方法の見直し等を検討することが位置づけられた。これを受けて、ダム貯水池の水質保全に係る調査・対策検討・運用・効果検証等のマネジメントサイクルをより充実し、これを間断なく適用することが気候変動への適応策として機能するとの認識のもと、今後、上述のマネジメントサイクルの体系的整理を進めていくこととしている。

参考文献

川崎将生、西村宗倫（2015）気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、No.856.*

３．　都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の検討

３．１　検討の目的

平成 24 年度末現在で、下水道普及率は 76%を超えており、下水道の普及に伴って下水道に流入する水量も膨大なものとなっている。併せて、水処理技術、特に膜処理を中心とした技術の開発と普及により、一度使用された水（排水・下水）を、利用用途に応じた水質に再生して利用することも可能となってきており、都市内に豊富に存在する水資源として下水処理水の価値が高まりつつある。

このことから、再生水を利用することは、渇水リスクを軽減する効果が期待され、地球温暖化への有効な適応策として捉えられつつある。例えば、慢性的渇水に対する安全度を向上するために、再生水を雑用水や農業用水等に供給することや、緊急渇水時の水利用の安定化に向けた方策として、平常時の再生水利用の形態を、渇水時にはより高度な利用に転換することも考えられる。

しかし、海外では、降水量の少ない地域を中心に、下水処理水の再利用率が高くなっているのに対し、日本における下水処理水の再利用率は極めて低水準にとどまっている状況である。

そこで、本章では、都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の意義や可能性について、水量面や膜処理技術の開発動向の観点から概観するとともに、膜処理技術を活用した再生水利用について、再生水の水質・安全面や環境負荷の軽減効果（電力消費量削減効果、CO_2 排出量削減効果）の観点から評価することとした。

３．２　水量面からの再生水利用の可能性

日本では、生活用水として年間152億m^3の水道水が利用され、そのうち約97%にあたる148億m^3の排水が下水道を経由して公共用水域に排出されている（国土交通省水管理・国土保全局水資源部、2014）。

このように、下水道の普及に伴い、都市域における水資源確保代替案としての下水処理水の意義・可能性は非常に大きなものとなってきているが、平常時の下水処理水の再利用率については、1.3%（平成23年度）と極めて低水準にある。

また、下水再生水の用途別再利用状況については、図-Ⅲ4 3.2.1に示す通りとなっており、修景用水や親水用水、河川維持用水のような付加価値的な用途への利用が中心となっており、水洗トイレ用水に代表される都市用水としての利用のように、水資源確保代替策としての再生水の利用はまだ少ないのが現状である。このことは換言すれば、再生水の水資源確保代替案としての水量面からの可能性は非常に大きいものと考えることができる。

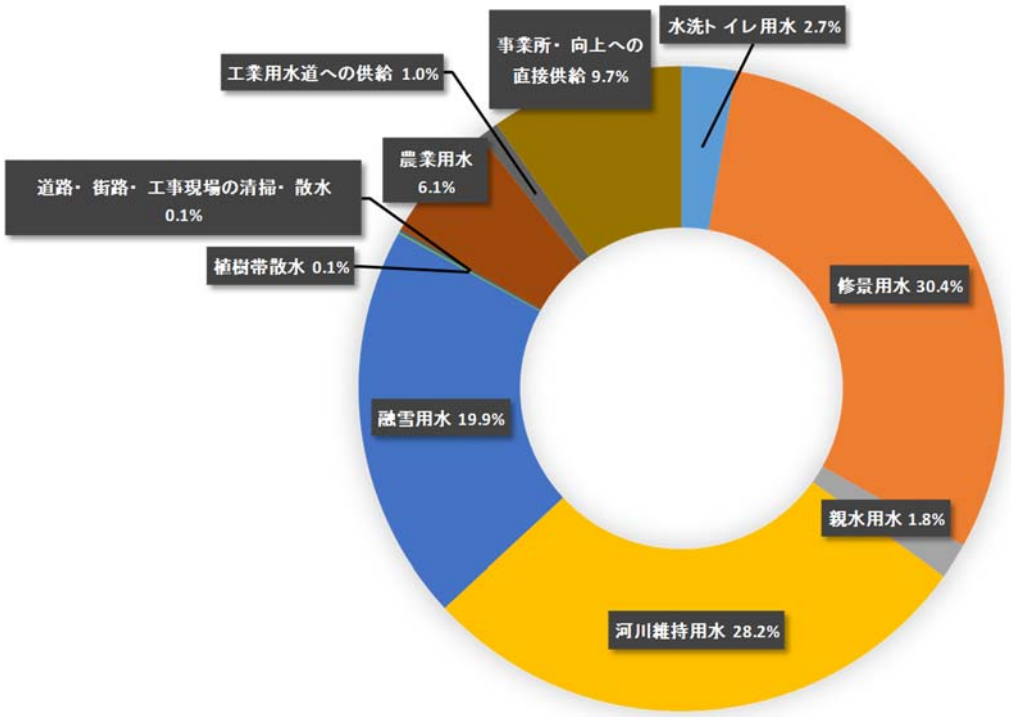


図-Ⅲ4.3.2.1　下水再生水の用途別利用状況（平成 26 年度）

３．３　膜処理技術の開発動向

再生水利用における処理技術として活用が期待される膜処理技術は、下水中のSS成分はもとより、大腸菌等の細菌を確実に除去し、ウイルスや微少な物質についても低減効果が期待できる技術であり、再生水利用において膜処理技術を活用することにより、再生処理施設のコンパクト化や水質面での再利用用途の多様化等を図ることが可能となる。

海外市場における日本の膜メーカーの水処理用膜のシェアは、全膜種では60%となっており、日本が大きなシェアを占めている（有限責任中間法人膜分離技術振興協会・膜浄水委員会、2008)。膜処理技術は、わが国が世界屈指の技術・ノウハウを有している技術分野である。下水道における膜処理技術は、近年、低コスト型膜モジュールの開発や膜の長寿命化が図られており、現在もコスト、エネルギー使用量の削減等、様々な観点からの研究や技術開発が進められており、都市域における水資源確保代替策としての再生水利用の可能性は今後一層高まってくるものと想定される。

なお、膜処理技術の再生水利用への導入形態としては、「①下水二次処理水を対象とした膜処理の導入」、「②サテライト処理場（下水処理場に至る前の下水管から下水を取り込む中間浄化施設）における膜分離活性汚泥法(以下、MBRという)の導入」の２パターンが考えられる。前者については、利用目的に応じた膜の選択により多様な用途への利用が可能であり、下水処理場の周辺地域では特に有効である。その一方で、後者については、利用箇所の近傍でサテライト処理場を設置するため、下水処理場から離れた地域でも低コストで利用が可能となる。

３．４　MBRにおける下水処理水の安全性の評価

（１） 目的

感染性胃腸炎の主な原因となるノロウイルスは人の腸管に感染して増殖し、糞便中に排出されるため、流行期には下水処理場に高濃度で流入する。下水処理場に流入するノロウイルスは、活性汚泥処理により一定程度除去されるものの活性汚泥と処理水の分離に重力沈降の原理を用いている従来型の処理法（以下、従来処理法という）では、対数除去率（90%除去で 1log）で 2log～3log 程度（99～99.9%除去）（国土交通省、2010）であり、再利用用途によっては、凝集剤の添加や消毒の強化等の対応では不十分な場合がある。

一方、MBRは、活性汚泥と処理水を孔径0.1～0.4μm程度の膜で分離するもので、ウイルス対策として有効であるとの報告がある（武村ら、2003)。そこで、MBR施設についてノロウイルス除去の実態を調査した。

（２） 調査方法

１）調査時期及び対象施設

調査は、ノロウイルスが流行する 2010 年 12 月から 2011 年 2 月に実施した。7 つの MBR 施設の流入水及び膜ろ過水（以下、処理水という）を各 3 回採水した。採水にあたっては，水理学的滞留時間を考慮し、G 処理場は 24 時間コンポジットの採水を行い、その他の処理場は代表的時間におけるスポット採水を行った。表-Ⅲ4.3.4.1 は各処理場と使用している膜の概要である。有機膜 6 か所（平膜 3 か所、中空糸膜 3 か所)、無機膜 1 か所であり、膜の使用期間は 11 カ月から 5 年 10 カ月である。なお、A、C、G 処理場はリン除去を目的として凝集剤を添加している。

表-Ⅲ4.3.4.1　調査対象とした膜分離活性汚泥法処理施設の概要

処理場	凝集剤	生物処理方法	膜の種類／形状	膜の設置位置	好気槽MLSS (g/L)	調査時における膜の使用時間	調査時における膜のろ過流束 (m3/m2)
A	添加	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	10.6～11	5年8ヶ月～5年10ヶ月	772～799
B	－	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	12.2～14	3年3ヶ月～5年1ヶ月	675～838
C	添加	嫌気-無酸素-好気法	有機／平膜	浸漬型	9.1～10.3	11ヶ月～1年0ヶ月	170～196
D	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	10.3～11.1	4年8ヶ月～4年10ヶ月	568～586
E	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	8～9.2	2年8ヶ月～2年10ヶ月	126～134
F	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	11.2～12.3	2年8ヶ月～2年10ヶ月	188～197
G	添加	循環式硝化脱窒法	無機／モノリス	別置型	5.6～9.4	10ヶ月～1年0ヶ月	543～625

２）ウイルスの検出手法

①　試料水からの濃縮

1次濃縮である陰電荷膜法（Katayama,H.、2008）は、まず試料水中で負電荷のノロウイルスに多価の陽イオン（塩化マグネシウム（$MgCl_2$）や塩化アルミニウム）を添加することによって電荷を正に転換させて、陰電荷膜上にノロウイルスを捕集する。陰電荷膜に捕集されたノロウイルスにpH 3の硫酸溶液を用いてマグネシウムなどの陽イオンを洗浄し、その後、pH 10の水酸化ナトリウム10 mlで溶出する。これを遠心式限外ろ過膜によって1mL以下に濃縮する。陰電荷膜１枚で処理する試料の量は流入水

20mL、処理水1Lとした。

② ノロウイルスの検出

濃縮液 140 µl に対して QIAamp viral RNA mini kit（Qiagen）を用いて RNA ゲノムを抽出し、その後、逆転写酵素（SuperScript II、Invitrogen）を添加して cDNA 溶液とした。ノロウイルスの定量を 10 倍希釈 3 連法による最確数法により行うため cDNA 溶液を段階希釈し、各希釈液 5µL をリアルタイム PCR に供した。リアルタイム PCR に用いたプライマー・プローブ及び反応条件等は厚生労働省医薬食品局食品安全部による「ノロウイルスの検出法」（厚生労働省、2007）に記載された方法に準じ、ノロウイルスの遺伝子型 GI と GII ごとに 50 サイクル増幅させ陽性/陰性を判断して MPN 値を求めた。求めた MPN 値にこれまでの濃縮倍率の逆数を乗じ実験水中のゲノム量からノロウイルス濃度を算出した。

③ 除去率の算出

除去率は、対数除去率として算出した。また、処理水中のノロウイルス濃度が不検出となった場合は、処理水の検出下限値を処理濃度と仮定して除去率を算出し、「＞対数除去率」とした。

（３） 結果

調査結果を表-Ⅲ4. 3. 4. 2に示す。12～2月の感染性胃腸炎の流行期における流入水中のノロウイルス濃度は10^4～10^7 MPN-copies/Lのばらつきがあったものの、膜ろ過水中のノロウイルスは検出限界以下であった（33～36 MPN-copies/L未満）。各処理場における除去率の最大値は、A,C処理場がノロウイルスGIIで5.9 log以上、F処理場が5.3 log以上、E,G処理場が5.2 log以上、D処理場が5.1 log以上、B処理場が4.6 log以上であった。

表-Ⅲ4.3.4.2　MBRのノロウイルスの除去効果

濃度単位：MPN-copies/L、対数除去率：log

A処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/4	1.4×10^{4}	2.6×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.7×10^{1}	>2.6	>3.9
2011/1/7	5.4×10^{5}	2.7×10^{7}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>4.2	>5.9
2011/2/4	1.3×10^{6}	5.1×10^{5}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>4.6	>4.2

B処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.2×10^{3}	1.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>1.8	>4.6
2011/1/18	8.9×10^{3}	8.9×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>2.4	>4.4
2011/2/4	5.6×10^{3}	4.5×10^{4}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.8×10^{1}	>2.2	>3.1

C処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.7×10^{5}	2.7×10^{6}	1.9×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>3.9	>4.9
2011/1/12	1.3×10^{6}	2.7×10^{7}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>4.6	>5.9
2011/2/2	1.4×10^{6}	9.2×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>4.6	>5.4

D処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/10	ND	2.4×10^{4}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	—	>2.8
2011/1/12	2.5×10^{4}	4.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>2.8	>5.1
2011/1/31	ND	ND	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	—	—

E処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	2.5×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	—	>3.9
2011/1/17	1.4×10^{5}	1.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	>3.6	>4.6
2011/2/7	1.5×10^{5}	5.6×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>3.6	>5.2

F処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	1.3×10^{4}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	—	>2.6
2011/1/24	5.7×10^{3}	5.7×10^{4}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>2.2	>3.2
2011/2/4	2.2×10^{3}	6.7×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>1.8	>5.3

G処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/15	2.4×10^{5}	5.2×10^{6}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>3.9	>5.2
2011/1/19	7.0×10^{5}	4.4×10^{6}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>4.3	>5.1
2011/2/9	2.6×10^{5}	2.6×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>3.9	>4.9

３．５　膜処理を用いた再生水システムによる環境負荷の評価

（１） 目的

独立行政法人科学技術振興機構の CREST（戦略的創造研究推進事業）の領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において、課題名「21 世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で京都大学と共同研究を実施しており、国総研では「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」を担っている。ここで、「新しい循環型水利用システム」とは、水需要の高い

都市域に位置する下水処理場やサテライト処理施設を新たな水源と考え、再生水をトイレ洗浄水や散水用水などの非飲用用途に再利用することによって、水輸送に係るエネルギーを削減し、流域全体の水利用に係るエネルギー消費の削減を図るシステムである。

本節では、国総研が担っている研究内容として、膜処理を用いた再生水システムの導入による電力消費量・ライフサイクル CO_2（LC-CO_2）削減効果を評価するとともに、LC-CO_2 と処理水質の関係を評価することとした。

（２） 再生水システムによる電力消費量・LC-CO_2 削減効果

再生水は水洗トイレ用水利用や修景用水利用等、都市域で利用されている地域が多数ある。ここでは、沖縄県内で、下水処理水をさらに高度に処理した水を再生水利用するシナリオを設定し、図-Ⅲ4.3.5.1 に示す X 地区で 4000m^3/日、Y 地区 1000m^3/日の再生水が利用されるものとした。再生水の処理フローについては、CREST 研究において開発中である、「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋ナノろ過膜(NF 膜)処理」、「UF 膜処理＋逆浸透膜(RO 膜)処理」の 3 つの処理フローを設定し、従来型フローとして、実施設での実績がある「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」の処理フローを比較対象として設定した。電力消費量は、構成する機器の電力消費量を積み上げて計算した。また、LC-CO_2 は、平成 22 年度に検討した国総研の計算手法（国土交通省国土技術政策総合研究所、2011）に基づき、再生水施設の建設、維持管理及び廃棄に係る LC-CO_2 を算定した。電力に係る CO_2 原単位は、平成 21 年度の沖縄電力の値である 0.931kg-CO_2/kWh（沖縄電力、2012）を適用した。

また、再生水の送水ポンプ及び送水管に係る LC-CO_2 は、「持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe）報告書」（(財）水道技術研究センター、2011）に記載されている手法に基づき算定した。

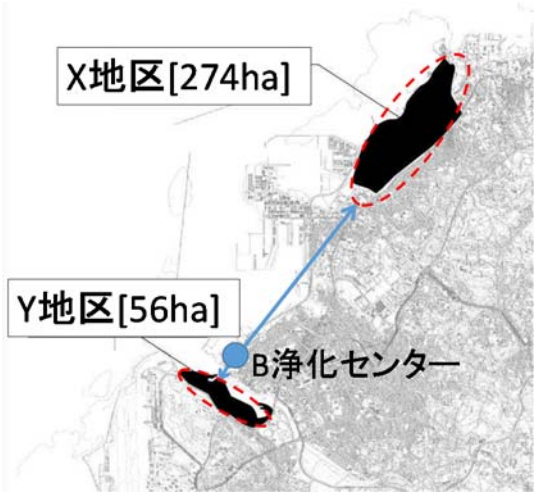


図-Ⅲ4.3.5.1　再生水の都市用水利用地域

図-Ⅲ4.3.5.1 の地域における再生水の都市利用における消費電力原単位の試算結果を図-Ⅲ4.3.5.2 に示す。

オゾン処理において多くの電力を消費する試算結果となり、そのため、開発中の 3 つの膜処理フローについては、いずれも「生物膜ろ過処理＋オゾン処理」のフローよりも消費電力原単位が小さくなった。また、この 3 つのフローの間でも、消費電力原単位には大きな差が生じ、低分子量の物質を除去できる高度な膜処理を含むフローほど、消費電力原単位が大きくなる結果となった。このため、膜処理を含む処理フローについては、利用用途に応じて適切なフローを選定する必要があると考えられる。

また、この都市利用シナリオについては、再生水の送水ルートにおける最も標高が高い地点が29mと比較的低いため、再生水処理施設に係る電力消費量と比較して、再生水送水ポンプに係る電力消費量は相対的に低い結果となった。このように、再生水利用においては、地域の標高差が、再生水供給に係る電力消費量に大きな影響を与えることがわかった。

また、モデルとしている図-Ⅲ4.3.5.1のX地区、Y地区が存在するC市、D市の水道供給に係る消費電力原単位を、平成21年度水道統計（(社）日本水道協会、2011）のデータを用いて算定し、開発中の3つの膜処理フローの数値と比較した。その結果、いずれのフローも、この地域の水道供給に係る消費電力原単位よりも小さくなり、電力消費量の観点では、高度な膜処理を用いた再生水供給であっても、水道供給よりも効率的であることが分かった。しかし、当該地域は、水道供給に係る電力消費量が比較的大きく、地域によって、再生水と水道供給に係る電力消費量の比較結果は大きく変わりうる旨、留意が必要である。

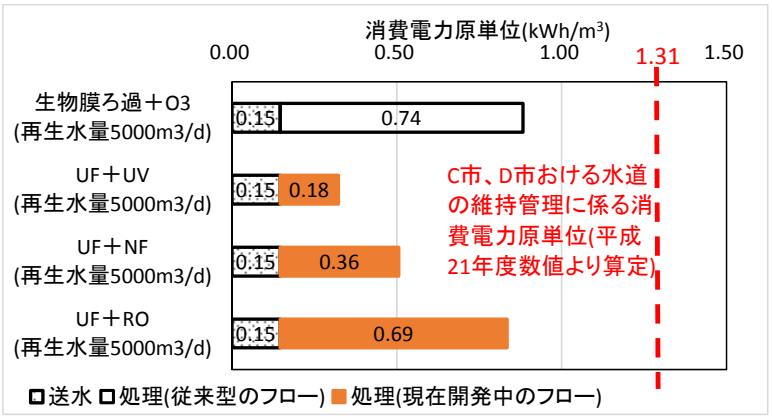


図-Ⅲ4.3.5.2　再生水の都市用水利用における電力消費量の比較

図-Ⅲ4.3.5.1の地域における再生水の都市利用における$LC\text{-}CO_2$の試算結果を図-Ⅲ4.3.5.3に示す。なお、都市利用における再生水送水に係る$LC\text{-}CO_2$の算定については、送水ポンプや送水管だけでなく、再生水利用地区における再生水の配水管の建設に係る$LC\text{-}CO_2$も算定した。配水管の延長については、下水道管の配管密度の経験値を踏まえ、150m/haと設定して、$LC\text{-}CO_2$を計算した。図-Ⅲ4.3.5.3に示す$LC\text{-}CO_2$の計算結果は、図-Ⅲ4.3.5.2に示す消費電力原単位の傾向と同様であり、これは、いずれの処理フローも、$LC\text{-}CO_2$の数値の大半は電力消費量によるものであるためと考えられる。

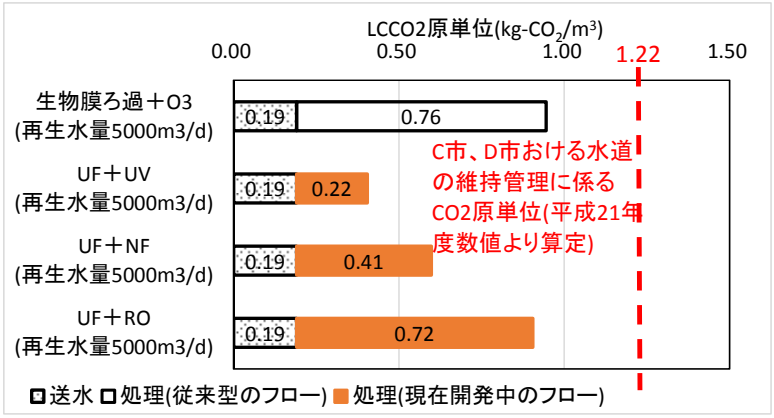


図-Ⅲ4.3.5.3　再生水の都市用水利用における$LC\text{-}CO_2$の比較

（３） 再生水システムのエネルギー消費量と処理水質の比較検討

再生水システムについて、電力消費量や LC-CO_2 を比較するだけでなく、全有機炭素(TOC)等の水質についても比較検討を行った。なお、浮遊物質(SS)や濁度については、全ての再生水システムで、再生水中において低い値を示し、膜処理フローについては全てのシステムで検出限界を下回っていた。

従来型のフローである「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と、CREST 研究において開発中のフローである「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」について、LC-CO_2 と再生水の水質項目値の比較を行った。なお、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」については既存の再生水処理施設の公表データから引用し、「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」については、CREST 研究において稼働している実験プラントの再生水水質の実測値から引用した。

図-Ⅲ4.3.5.4 に、再生水の都市用水利用シナリオにおける、LC-CO_2 と再生水の TOC 濃度の相関を示す。「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と「UF 膜処理＋UV 消毒」については、ともに再生水の TOC 濃度が約 6mg/L であったが、LC-CO_2 は「UF 膜処理＋UV 消毒」の方が大幅に小さいため、「UF 膜処理＋UV 消毒」の方が省エネルギーで高度な処理が出来ると考えられる。また、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」については、再生水の TOC 濃度がそれぞれ 0.7mg/L、0.1mg/L であり、「UF 膜処理＋UV 消毒」よりもエネルギーを消費するが、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と比べれば、少ないエネルギー消費で、より高度な処理が可能であると言える。

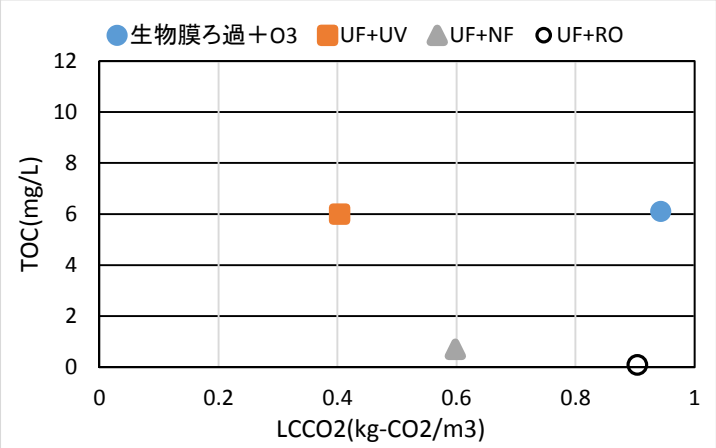


図-Ⅲ4.3.5.4　再生水の都市用水利用における LC-CO_2 と TOC の相関

その一方で、図-Ⅲ4.3.5.5 に示す通り、「UF 膜処理＋UV 消毒」による再生水が最も高い色度を示し、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」は、オゾンによる色度除去効果のため「UF 膜処理＋NF 膜処理」と同等の再生水の色度を示した。このように、水質項目値によって、LC-CO_2 と水質項目値の相関の傾向が異なっている。また、「UF 膜処理＋RO 膜処理」による再生水の色度は 0 度であり、LC-CO_2 は比較的高いものの、かなり高度な処理を行っていることが示された。

その他、再生水の BOD 濃度については、いずれのフローにおいても 0.5～1.2mg/L の範囲であり、大きな差は見られなかった。また、再生水中の大腸菌数については、いずれのフローにおいても検出限界以下であり、大腸菌数の観点では衛生学的に問題のない結果が示された。

また、「UF 膜処理＋NF 膜処理」については、リン除去率が 85%と高い値を示したが、アンモニウムイオン濃度が高い原水を対象とした窒素除去率については、10%と低い値であった。「UF 膜処理＋RO

膜処理」については、窒素、リンの除去率がそれぞれ 92%、100%とかなり高い値を示し、栄養塩除去にも対応できることが示された。しかし、再生水の利用用途によっては、ここまでの高度な処理を要求しないものもあるため、利用用途に応じた処理フローの採用が必要と考えられる。

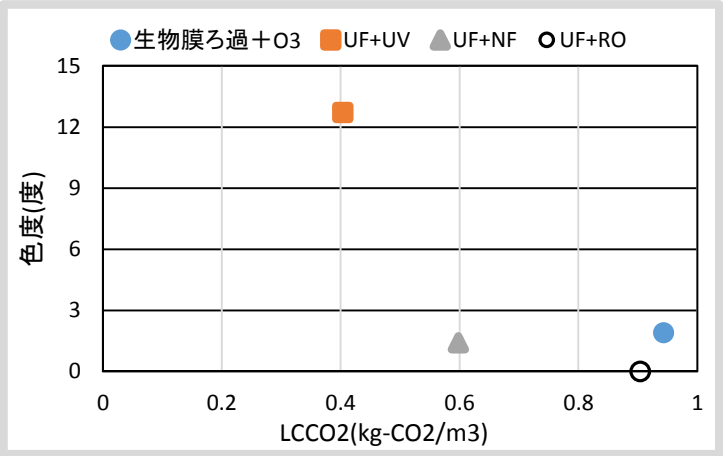


図-Ⅲ4.3.5.5　再生水の都市用水利用における LC-CO_2 と色度の相関

３．６　結論

日本国内では、生活用水のほとんどが排水として下水道を経由しているが、水資源確保代替策としての下水処理水の利用は極めて低水準にとどまっている。その一方で、下水中の大腸菌等の細菌を確実に除去し、ウイルスや微少な物質についても低減効果が期待できる膜処理技術について、低コスト、エネルギー使用量の削減等、様々な観点からの研究や技術開発が進められており、都市域における水資源確保代替策としての再生水利用の可能性は今後一層高まってくるものと想定される。

膜処理技術の一つであるMBR処理施設を対象に、ノロウイルスの除去率について調査を行った結果、ノロウイルスの除去率は最大で5.9logを確認することができ、処理水中のノロウイルス濃度は全て33～36MPN-copies/L未満となり、MBRによる下水処理水の安全性が確認された。

また、水資源に乏しい沖縄県において、膜処理を用いた再生水の都市用水利用シナリオを設定し、膜処理による電力消費量・LC-CO_2を評価した結果、従来型の再生処理フローや水道供給よりも効率的であることが分かった。ただし、地域の標高差が、再生水供給に係る電力消費量に大きな影響を与えるため、シナリオの設定により効果は大きく変わることに留意する必要がある。

参考文献：

沖縄電力(株)(2012) ホームページ
http://www.okiden.co.jp/environment/report2012/sec11/sec114.htm#tbl10
厚生労働省（2007）ノロウイルスの検出方法について、食安監発第1105001号（最終改正食安監発第0514004号）
国土交通省（2010）下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書
国土交通省国土技術政策総合研究所（2011）平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料No.654、pp.77-82
国土交通省水管理・国土保全局水資源部（2014）平成26年版日本の水資源について

(財)水道技術研究センター（2011）持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe）報告書

(社)日本下水道協会（2016）平成26年度版下水道統計　第71号　p.98

(社)日本水道協会（2011）平成21年度水道統計　施設・業務編　第92-1号

有限責任中間法人膜分離技術振興協会・膜浄水委員会監修、浄水膜(第2版)編集委員会編集（2008）浄水膜（第2版)、技報堂出版

Katayama, H., Haramoto, E., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H. and Ohgaki, S. (2008) One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, Water Research, vol.42 pp.1441-1448

おわりに

国土技術政策総合研究所において平成22年度から25年度にかけて実施したプロジェクト研究「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」における研究成果を中心としつつ、その後２年間に実施した追加検討の内容も含めてとりまとめたものが本報告書である。プロジェクト研究のタイトルや本報告書の内容に示されているように、河川における治水分野における影響評価や適応策の検討に大きな重点を置きつつも、河川・下水道・環境・危機管理の各分野を所掌する研究部門が一同に会し横断的に研究を遂行できる気候変動適応研究本部の機能を活用し、治水以外の利水・環境分野や海岸分野も含めて、それらの各分野の計画・管理に影響を与える重要な外力・指標への気候変動影響や、それらの影響が実際に生じた場合の適応策メニューの拡充方策等について主として技術的観点からの検討を行った成果をまとめた。

本報告書の構成と全体概要は第Ⅰ部に簡潔にまとめているが、大きくは、気候変動の影響評価編（第Ⅱ部）と、それに対する適応策検討編（第Ⅲ部）に分けられる。第Ⅱ部では河川（治水・利水・環境）と海岸の各分野をある程度網羅して影響評価検討を行うとともに、第Ⅲ部の中でも特にⅢ-2部においては、治水分野を対象として施設整備レベルを超える超過洪水による災害が起こりえることを見越した上で、あらゆる施策を総動員して防災のみならず減災を図っていくための治水の考え方から、それを実現するための必要な具体的な施策メニューの拡充手法について幅広く検討した成果をまとめている。このことから、第Ⅱ部とⅢ-2部については、それらの多岐にわたる成果の要点を総合的にまとめる章を各部の最後に別途設けている。

第Ⅰ部第5章で述べたように、本研究の主眼は、適応策実践に向けた具体的な検討を行う基盤（影響評価手法、それを踏まえた適応策検討の枠組み（フレーム）、および、それを実現するための様々な適応策メニュー拡充の試行事例）を、主として技術的観点から示すことにあり、特に治水分野については、一定レベルの成果を得ることができたと考えられる。今後の課題としては、第Ⅱ部第7章やⅢ-2部第5章をはじめ、個別の章にも詳しく議論しているのでそれらを参照いただきたいが、全体としては、個々の施策の実施の可否判断や実施内容の具体化に向けて、施策を実施する主体・権限・責任のあり方や、意思決定・合意形成に向けての制度的枠組みなどをさらに詰めていくための技術政策のあり方や、それを支える技術を引き続き検討していく必要がある。もちろん、影響評価手法については、気候予測そのものにおける不確実性低減を含めて、各分野毎に定量的な評価に耐える一層の精度改善が望まれる。個別の適応策メニューについても、施策メニューの充実に加えて、被害～豪雨規模関係の制御度合いを把握する手法の確立や施策実装に向けた実践的な検討等が今後の課題である。一方、Ⅲ-3部やⅢ-4部で示した海岸分野や水資源分野における適応策検討は、治水分野に比べると、影響評価も含めてまだ端緒についた段階にある。河川環境分野については、気候変動影響を把握するためのモニタリングとシステム理解をさらに進める必要があることを議論した。

このように、河川・海岸分野における気候変動影響評価・適応策実装に向けて課題も残るが、少なくとも防災・減災の観点からみたときの気候変動影響評価や適応策のあり方については、その基本的な方向性を提案できたと考える。

本研究の成果が、気候変動により激化する災害等への適応策実装の推進に貢献できれば幸いである。

※謝辞については、第Ⅰ部に掲載しました。

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告
PROJECT RESEARCH REPORT of ＮＩＬＩＭ
Ｎｏ．56　　April　2017

編集・発行　©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804　茨城県つくば市旭１番地
企画部研究評価・推進課　　TEL 029-864-2675