

## 2.2 諸外国の適応策の分析

### 2.2.1 情報収集の方法

諸外国の技術政策動向の把握、我が国の技術政策のまとめ・情報発信と途上国の技術政策立案支援（防災パッケージの一部）が国総研の役割であるとの認識の下に、河川研究部では国際水技術政策タスク・フォース（吉谷流域管理研究官、板垣主任研究官）を2011年秋以降設置し、2012年4月よりの郡司非常勤職員からの事務的支援と合わせ、下記5つの情報収集を継続的に実施する体制を取っている。

- ① 国内施策を推進するための海外実態調査（例：諸外国の気候変動適応策実施事例、堤防信頼性評価手法、経済評価手法の調査）
- ② 国内技術のベンチマーキング（日本の技術の先進度確認、遅れている部分の特定）
- ③ 情報戦に備えての事実確認（例：海外の災害における構造物の効果や方針転換報道の背景確認）
- ④ 技術政策推進の観点からの国際貢献、国際技術政策対話のニーズ発掘
- ⑤ 災害調査

上記の一環として実施している諸外国の気候変動適応策に係る情報収集については、これまでに蓄積された情報及び調査の効率性を踏まえ、下記のとおり国別に重点的に情報収集する機関を選定し、当該機関のホームページ（web）を定期的に確認することにより情報を収集している。

#### ○国別重点的情報収集対象機関

米国：陸軍工兵隊（U.S. Army Corps of Engineers、USACE）、連邦危機管理庁（FEMA）

英国：環境・食料・農村地域省（Department for Environment Food and Rural Affairs）、環境庁（Environment Agency）（環境・食料・農村地域省の下部機関で、洪水対策等の実施機関）

オランダ：社会基盤・環境省（Ministry of Infrastructure and the Environment）、公共事業庁（Rijkswaterstaat）

また、「気候変動を踏まえた各国の流水管理の動向に関する調査分析」（平成21～23年度河川総合開発事業調査費）、「水災害・水資源管理に係る海外の気候変動適応策・技術基準調査分析」（平成24年度～同）等として委託業務を活用した海外調査を実施し、米英蘭等の技術基準・指針の収集等を行っている。後述の各国の事例では、上記委託業務の1つである水災害・水資源管理に係る海外の気候変動適応策・治水施設機能評価手法調査業務（実施期間：平成24年7月～平成25年2月）として財団法人国土技術研究センター、株式会社建設技術研究所から得た情報を一部活用している。

さらに、上記情報収集・委託では目的とする詳細・具体的情報収集を行いたい場合等に、下記のとおり上記機関等を訪問し、技術者等からの聞き取り調査、意見交換を行っている。

- ・日米英蘭4カ国共同研究「Flood Risk Management Approaches As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States」（2009～2011年）
- ・米国現地調査（カリフォルニア大学デイビス校、カリフォルニア州政府水資源局（Department of Water Resources, State of California）、陸軍工兵隊水文学センター（Hydrologic Engineering Center）、同サクラメント地区（Sacramento District）事務所）（2012年）

上記現地調査は、各機関のホームページ・委託調査では難しい情報の収集・確認・理解に有益と考えられ、諸外国の政策モニタリング、政策研究に貢献するところ大であるため、今後とも継続的に実施すべきである。

### 2.2.2 共通の流れ

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。

同レビューは英国の大蔵大臣からの委託に基づきニコラス＝スターン卿 (Sir Nicholas Stern) とレビュー・チーム (チームリーダー：シボーン・ピータース (Siobhan Peters)) により実施され首相と大蔵大臣に提出されたものであり、気候変化に係る経済に関する徴候の評価、理解の確立に資するものである。

同レビューでは、前半で気候変化自体による経済的影響に係る徴候について吟味し大気中の温室効果ガスの安定に係る経済について論評し、後半で低炭素経済への移行管理並びに最早避けることができない気候変化の影響への社会の適応の確保に係る複雑な政策課題について論評している。

同レビューの主な結論は次のとおりである。

(1) 今強力な行動を起こせば、気候変化による最悪の影響を避けるための時間はまだある。

強力な早期の行動による便益は、行動しない場合の経済損失を大きく上回る。本レビューによる見積りによれば、行動しない場合の気候変化に係る損失及びリスクは毎年の全世界の GDP の少なくとも 5% に匹敵する (広範囲のリスクと影響を考慮すると GDP の 20% 以上になりうる)。一方気候変化による最悪の影響を避けるための温室効果ガス排出削減行動の費用は毎年の世界の GDP の 1% 程度に過ぎない。

(2) 気候変化は成長と発展に深刻な影響を与える。

極端気象現象による損失 (洪水、渇水、嵐を含む) は豊かな国を含め既に増加している。

(3) 気候の安定化費用は大きいだが、処理可能である。遅れは危険と費用の増大につながる。

大気中の温室効果ガス濃度を二酸化炭素相当 450～550ppm で安定させることができれば気候変化の最悪の影響を大きく減少させることが可能である。なお、現在の同濃度は 430ppm であり、毎年 2ppm を超えて増加している。

(4) 気候変化に係る行動は全ての国において必要であり、当該行動は豊かな国・貧しい国の成長意欲を妨げるものではない。

気候変化を無視することは徐々に経済成長を損なう。気候変化に対処することは長期的に成長に資する戦略である。

(5) 排出削減のための様々な選択肢があり、当該選択肢の採用を促す強力で慎重な政策実施が必要。

世界の効果的な対応には、次の 3 つの政策要素が必要。それらは、「炭素価格の設定 (pricing of carbon)」「低炭素技術の開発・採用の支援政策」「エネルギー効率化の障壁除去、気候変化に対し何ができるかについての個人々人への情報提供、教育、説得」である。

(6) 気候変化について長期目標の理解の共有と行動の枠組みに関する合意に基づく国際的な取組みが必要。

将来の国際的枠組みの基本要素には、排出量取引 (Emissions trading)、技術協力 (Technology cooperation)、森林破壊の防止行動 (Action to reduce deforestation)、適応 (Adaptation) が含まれるべき。

スターン・レビューのうち、特に印象的な事項は下記のとおりである。なお、詳細については後述の ※補足説明を参照されたい。

(1) 気候変化の結果を完全に確かに予測することはできないが、リスクを理解するのに十分な知識は有している。

(2) 徴候によれば、気候変化を無視することは徐々に経済成長を損なう。今後数十年間の我々の行動はその後の今世紀及び次世紀の経済・社会活動における主要な混乱リスクにつながりうる。そして当該混乱の規模は、20 世紀前半の世界大戦と経済恐慌の規模に匹敵する。

(3) 現在の適応行動がより少なければ、将来の適応継続の困難さはより大きくなる。

※補足説明 スターン・レビューによる主な論評

- (1)気候変化に対する強力な早期の行動による便益は費用を上回る。
- (2)科学的徴候は、従来どおり (business-as-usual) の排出推移から生じる気候変化の深刻かつ不可逆的な影響によるリスクの増大を示している。
- (3)気候変化は世界中の人々の生活の基本要素 (水利用、食料生産、健康、土地・環境利用) を脅かす。(海面上昇により東京等巨大沿岸都市等に深刻なリスクが生じる。ある見積りでは今世紀中頃までに海面上昇、よりひどい洪水、より強い渇水のため 2 億人に移住の必要が生じるかもしれない)
- (4)世界が温暖化するにつれて気候変化による被害は加速する。
- (5)気候変化の影響は均等には分布しない。最も貧しい国・人々が最初に、最大の損害を被る。損害が生じた時では引き返すには遅すぎる。このため、我々は長期の将来をにらむ必要がある。
- (6)当初気候変化はいくつかの先進国において小さな良い影響をもたらすかもしれない。しかし、従来どおりの排出シナリオにおいて今世紀の中頃・後半に予想される大きな気温上昇は大きな被害をもたらす。 (英国では現在 GDP の 0.1%である年洪水被害が、全球平均気温が 3~4℃上昇した場合には同 0.2~0.4%に増加しうる)
- (7)統合評価モデルを用いた経済への全影響の評価結果は、これまで連想されてきた影響よりも大きな影響が生じそうであることを示している。
- (8)過去も現在も排出は経済成長に影響されてきたが、継続的成長下における大気中の温室効果ガス濃度の安定化は実現可能である。
- (9)大幅な排出削減には費用が掛かるであろうが、二酸化炭素相当濃度を 500~550ppm に安定させるための年間費用は 2050 年までの GDP の約 1%であり、大きい処理可能なレベルである。
- (10)資源費用見積り手法によれば、二酸化炭素相当濃度 550ppm での安定化につながる排出削減に係る年費用の予測上限値は 2050 年までの GDP の約 1%になりそうである。
- (11)広範囲のマクロ経済モデルにより上記見積りは確認された。
- (12)低炭素経済への移行は競争力の課題をもたらすであろうが、成長の機会ももたらすであろう。
- (13)気候変化により予想される悪影響を減らすことは、大変望ましいとともに実現可能である。
- (14)排出削減政策は 3 つの必須要素 (炭素価格の設定 (carbon pricing)、技術政策 (technology policy)、行動変化に係る障壁の除去 (removal of barriers to behavioral change)) に基づくべきである。
- (15)課税、取引、規制による炭素価格の確立は、気候変化政策の必要不可欠な基礎である。
- (16)低炭素・高効率技術の開発を支援する政策が今すぐ必要。
- (17)行動変化に係る障壁の除去は 3 番目の必須要素。これは特に、エネルギーの効率化のための機会採用の奨励において重要。
- (18)気候変化による避けられない影響に対処するには適応政策が極めて重要であるが、多くの国ではこれが十分には強調されてきていない。
- (19)気候変化への効果的な対処は、国際的協調行動に資する状況の創造に依存する。
- (20)広域かつ同様な炭素価格の世界への発信と、炭素融資 (carbon finance) の活用による発展途上国における行動の加速は、国際協力における緊急的優先事項である。
- (21)欧州連合域内排出量取引制度 (EU ETS) の第 3 フェーズについての決定は、同仕組みが将来の世界の炭素市場に影響し、また、中核となる機会を与える。
- (22)排出削減のための効果的な政策・計画を支援する炭素融資 (carbon finance) の発展途上国での拡大は、低炭素経済への移行を加速する。
- (23)技術革新と普及を加速する国際協力の拡大は、緩和策の費用を低減させる。
- (24)森林の減少防止は温室効果ガス排出削減における非常に費用効果の高い対策である。

- (25) 発展途上国における適応努力は、国際開発支援を含め、加速され支援されなくてはならない。
- (26) 共同行動を確立し、維持することが現在の緊急の課題である。
- (27) 今強力な共同行動を開始すれば、気候変化による最悪の影響を避けるための時間はまだある。

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。

同報告書によると、21世紀末の世界平均地上気温の上昇は高成長型シナリオで化石エネルギー源を重視した場合（A1FIシナリオ）4℃（2.4～6.4℃）と予測し、海面水位上昇量については温室効果ガス排出シナリオ別に下表のとおり予測している。なお、後者については海面上昇を引き起こすいくつかの重要な影響の理解が極めて限られているため、生起する可能性、最も確かな予測値、予測上限値は示されていない。これらの予測には気候-炭素循環フィードバック（気温上昇による大気中の二酸化炭素の陸域・海洋への取込み量の減少等）の不確実性及び氷河の流れの変化の全影響は含まれていないため、同表の大きい方の値を海面上昇量の上限値ととらえてはいけぬ。また、氷河の流速が全球平均気温に一次比例する場合には下表の値はさらに0.1～0.2m増大する。

表-Ⅱ.2.2.2.1 2090～2099年の全球平均海面上昇量予測（1980～1999年比）

ケース	海面上昇量 m
B1シナリオ	0.18-0.38
A1Tシナリオ	0.20-0.45
B2シナリオ	0.20-0.43
A1Bシナリオ	0.21-0.48
A2シナリオ	0.23-0.51
A1FIシナリオ	0.26-0.59

※（IPCC 2007）45頁のTable3.1より作成

※※各シナリオの2100年時点の大気中の温室効果ガスの二酸化炭素相当濃度はB1、A1T、B2、A1B、A2、A1FIについて概略で各600、700、800、850、1,250、1,550ppmである。（IPCC 2007）

極端な大雨の頻度は引き続き増加し、熱帯低気圧の強度が増大する可能性が高く、極端な気象現象の強度と頻度の変化及び海面水位上昇は自然システム及び人間システムに悪影響を及ぼすと予想している。アジアでは淡水利用可能性が2050年までに中央・南・東・東南アジア、特に大規模河川流域で減少すると予想し、沿岸域、特に人口が集中する南・東・東南アジアのメガデルタ地帯において海からのあるいは川からの浸水リスクが高まる等としている。（IPCC 2007）

同報告書で用いられた将来の排出シナリオ等に基づき各国で影響予測、適応策の検討が進められている（後述2.2.3参照）。

2012年3月にはIPCCが「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」（Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation）を発表し、気候変化と極端気象・気候事象との関係からこれらの事象の社会・持続的開発への影響までの範囲について既存研究に基づき分析している。

2012年11月には世界銀行が「Turn Down the Heat: Why a 4°C Warmer World Must be Avoided」を公表し、気候変動緩和のための現行の全ての約束・公約が実行されたとしても、2100年までに4°Cを超える気温上昇（産業革命前比）（以下「+4°C」）が生じる可能性が概略20%あるとし、同約束・公約が実行されない場合には2060年代にも+4°Cが生じうるとしている。同報告書は科学の現状と+4°Cの世界における開発（開発途上国の（特に貧困削減））への潜在的影響の理解を助けるためのものとされ、+4°Cの世界では、沿岸都市の浸水、食料生産に係るリスク増大・栄養不足の拡大、多くの乾燥地域の更なる乾燥、同湿潤地域の一層の湿潤化、前例のない熱波の多くの地域（特に熱帯地方）への襲来、多くの地域の水不足の深刻化、強いサイクロンのより頻繁な発生、珊瑚礁を含む生物多様性の不可逆的な喪失、が予測されている。+4°Cの世界は現在の世界とは大きく異なり、大きな不確実性と新たなリスクを伴っているため、我々が将来の適応策の必要性について予測・計画する能力を脅かすとし、上記の解決策は、気候金融（climate finance）や気候プロジェクト（climate projects）にのみあるのではなく、効果的なリスク管理と、我々の全ての行為・思考における+4°Cの世界の考慮にあるとしている。

同月には国連環境計画（UNEP）が「地球温暖化ガス排出ギャップ2012年報告書（The Emissions Gap Report 2012）」を公表した。同報告書は2100年時点の世界平均気温の上昇を2°Cに抑える温室効果ガス排出量と、現在の各国の排出削減に係る約束が実行された場合に見込まれる同排出量の2020年時点の差（ギャップ）に関する3回目の報告書（初回は2010年発表）であり、主な内容は次のとおりである。

- ・世界の温室効果ガス排出見込みの更新。
- ・現行の約束・公約に基づく各国の現況（2010年）、予測（2020年）排出レベルの概観。
- ・2100年時点2°Cの気温上昇の目標に応じた2020、2030、2050年時点の全球排出レベルの見積り。
- ・2020年時点の排出ギャップの見積りの更新。
- ・大幅な排出削減に既に成功した世界の事例のレビュー。

現在の世界の温室効果ガス排出量は、2100年時点で2°Cの気温上昇の目標に対応した排出レベル（2020年時点）を既に大幅に上回っており、更に増加しつつあるとし、前報告書（2011年発表）では2020年時点の排出ギャップ（66%を超える確率で2100年時点の温度上昇を2°Cに抑える温室効果ガス排出量と見込まれる同排出量との差）は6～11GtCO<sub>2</sub>（ギガトン・二酸化炭素相当量）であったが、本報告書では同8～13GtCO<sub>2</sub>に拡大している。（理由：予想を上回る経済成長と、排出量相殺の二重計上考慮）

一方我が国では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、2009年5月に土木学会地球温暖化対策特別委員会より「地球温暖化に挑む土木工学」が発表され、同10月には文部科学省・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、2011年9月には日本学術会議土木工学・建築学委員会地球環境の変化に伴う水害・土砂災害への対応分科会より「気候変動下における水・土砂災害適応策の深化に向けて」が提言されている。

政府では、関係府省との連携により地球温暖化影響への適応策に関する取組みの一層の推進を図ることを目的として2008年より「地球温暖化影響への適応策に関する関係府省連絡会議」を設置し、2012年3月の第6回連絡会議では、関係府省は政府全体の総合的、計画的な適応に係る取組みを取りまとめる「適応計画」を2014年度末に策定することに合意した。

また、2012年4月に閣議決定された第4次環境基本計画において、地球温暖化に関する重点的取組事項の一つとして、「短期的影響を応急的に防止・軽減するための適応策の推進と中長期的に生じうる影響の防止・軽減に資する適応能力の向上を図るための検討」が挙げられている。

気候変動影響に関する研究としては、H14～18年度の「人・自然・地球共生プロジェクト」（温暖化予測、水循環変動予測等に係る高分解能化を実施）、H19～23年度の「21世紀気候変動予測革新プログラム」（地球シミュレータによる気候変動予測の高分解能化、不確実性の定量化を実施）、H24～28年度に実施中の「気候変動情報創生プログラム」（リスクマネジメントに必要な情報の創出等）、H22～26年度に実施中の「環境省環境研究総合推進費 S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（食料、水資源、災害、自然生態系、人の健康などを対象）、H22～26年度に実施中の「気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）」（気候変動予測の成果を都道府県あるいは市区町村などの地域規模で行われる気候変動適応策立案に科学的知見として提供するために必要となる研究開発を推進）がある。

今後 IPCC より第 5 次評価報告書の公表が予定（2013～2014 年）されており、これを受けて我が国においては環境省により 2015 年半ば目途（2013 年 7 月 2 日現在）で政府全体の「適応計画」の策定が進められている（IPCC 第 5 次評価報告書に係る作業の遅れによってはずれこむ可能性あり）。

### 2.2.3 各国の気候変動適応に係る取組み

これまでに調査した各国の気候変動適応に係る事例について以下に紹介する。なお、米英蘭の 3 カ国については、国総研気候変動適応研究本部 web 上に掲載している（板垣・吉谷 2012a）ので合せて参照されたい。

#### 2.2.3.1 英国

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

英国を含む 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「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。

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）を发出し、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実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)

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。同助言は 2006 年 10 月発出の上記補足文書の改訂であるが、主な変更点は次のとおりである。(同助言の概要は後述※補足説明参照)

- (1) 気候変動因数 (予測中央値等)、予測上下限界及び更に厳しい気候変動予測値 (H++シナリオ) を提示。(改訂前は考慮すべき相対的平均海面上昇速度、及び将来の洪水流量等に係る感度分析に用いるための増加率を提示)
- (2) 河川洪水、極端降雨に係る予測時期の区分数が改訂前の 4 区分 (1990～2025、2025～2055、2055～2085、2085～2115 年) から 3 区分 (2010～2039、2040～2069、2070～2115) へ減少。
- (3) 河川洪水について流域地区・時期別の流量増加率を提示。(改訂前は時期ごとに全国一律の増加率を提示)
- (4) 上記増加率は、流域地区によっては改訂前の値よりも大きくなっている。
- (5) 極端降雨の増加率が拡大 (改訂前 5～30%増→改訂後 10～40%増 (予測上限値))。
- (6) 1990～2100 年の各年の地点別相対的平均海面上昇量を web 上で提供。なお、3 つの分割地域から各選定した 3 地点 (London、Cardiff、Edinburgh) で改訂前後の同上昇量を筆者が比較したところ、気候変動因数については改訂前の設定値 (allowances) よりも 2025 年頃まで大きい上昇量、その後は小さい上昇量となっている。予測上限値については地点により改訂前の設定値より大きい場合と小さい場合とがある。H++シナリオについては改訂前の設定値よりも大きい上昇量となっている。予測下限値については改訂前の設定値より小さい上昇量となっている。
- (7) 高潮時潮位について予測値を提示 (改訂前の同値は提示の対象外であった)。
- (8) 風速の予測値について追って提示予定とのこと (改訂前同値は提示されていた)。

**※補足説明 「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」の概要**

- (1) 位置づけ：環境食料農村地域省が 2006 年 10 月に発出した「Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts」に置き換わるもの。同省発出の「洪水・海岸浸食リスク管理の評価」(Appraisal of Flood and Coastal Erosion Risk Management) (2009 年) 及び環境庁発出の「洪水・海岸浸食リスク管理評価指針」(Flood and Coastal Erosion Risk Management Appraisal Guidance) (2010 年) の補足情報を提供するとともに、「洪水・海岸浸食リスク管理 イングランドの全国戦略」(Flood and Coastal Erosion Risk Management National Strategy for England) (2011 年) を支援するもの。
- (2) 適用範囲：イングランド (England) で実施される洪水防御に係る中央政府の補助金を申請するプロジェクト・戦略のうち、2011 年 8 月以降評価を開始するもの、又は 2012 年 1 月以降の承認に向け申請するもの全てに適用。
- (3) 対象外力：河川洪水、極端降雨、相対的平均海面上昇、高潮。

- (4)対象年代：2015～2115年。(2020、2050、2080年頃の3時期)
- (5)気候変動因数：1961～1990年比の潜在的变化を定量化するもの(増加率等)。
- (6)予測上下限值：洪水・海岸浸食リスク管理に係る、排出シナリオ・気候の不確実性を反映するために設定された値。
- (7)上記因数の使用手法：洪水防御施設等が機能を発揮すべき期間(年数)に応じた同因数(洪水流量の増加率等)に基づく選択肢(洪水対策の代替案等)の作成を推奨。同因数に基づくだけでなく、上下限值等に基づく感度分析により選択肢を洗練可能。
- (8)上記因数等の根拠：2009年英国気候予測(UKCP09)又は同データを用いた研究。
- (9)極端シナリオ：極端な将来シナリオとして「H++シナリオ」を提示。(より厳しい気候変動に応じた選択肢見極めのため)

流域地区・時期別洪水流量に係る気候変動因数等は下表のとおり(1961～1990年比)。同表の値は1/50年確率の洪水流量に対応した値であるが、再現期間がより長い洪水流量についても同一の値でよしとしている。

表-Ⅱ.2.2.3.1 流域地区・時期別洪水流量の潜在的増加率(1961～1990年比)

	Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s		Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s
<b>Northumbria</b>				<b>SE England</b>			
Upper end estimate	25%	30%	50%	Upper end estimate	30%	55%	100%
Change factor	10%	15%	20%	Change factor	10%	20%	30%
Lower end estimate	0%	0%	5%	Lower end estimate	-15%	-5%	0%
<b>Humber</b>				<b>SW England</b>			
Upper end estimate	25%	30%	50%	Upper end estimate	30%	40%	75%
Change factor	10%	15%	20%	Change factor	15%	20%	30%
Lower end estimate	-5%	0%	5%	Lower end estimate	-5%	0%	5%
<b>Anglian</b>				<b>Severn</b>			
Upper end estimate	30%	40%	70%	Upper end estimate	25%	40%	70%
Change factor	10%	15%	25%	Change factor	10%	20%	25%
Lower end estimate	-15%	-10%	-5%	Lower end estimate	-10%	-5%	0%
<b>Thames</b>				<b>Dee</b>			
Upper end estimate	30%	40%	70%	Upper end estimate	20%	30%	45%
Change factor	10%	15%	25%	Change factor	10%	15%	20%
Lower end estimate	-15%	-10%	-5%	Lower end estimate	0%	0%	5%
				<b>NW England</b>			
				Upper end estimate	25%	35%	65%
				Change factor	15%	20%	30%
				Lower end estimate	5%	10%	10%
				<b>Solway</b>			
				Upper end estimate	25%	35%	65%
				Change factor	15%	20%	25%
				Lower end estimate	5%	15%	10%
				<b>Tweed</b>			
				Upper end estimate	25%	35%	35%
				Change factor	15%	20%	30%
				Lower end estimate	0%	5%	15%

©Environment Agency and database right

※(Environment Agency 2011) 11～12頁より。

※※Upper end estimate：予測上限値 Change factor：気候変動因数(予測中央値) Lower end estimate：予測下限値

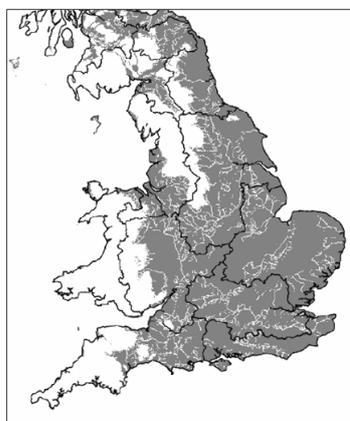
流域地区別の極端(H++)シナリオによる洪水流量増加率は下表のとおり。稀な大洪水による被害が特に甚大と考えられる場合には、洪水対策の決定に当たり下表の増加率について感度分析して良い。

なお、下図の灰色部分以外の領域では上記感度分析は不要。(極端な流量増加率予測結果とはならなかったため)

表-Ⅱ.2.2.3.2 H++シナリオでの流域地区・時期別洪水流量の潜在的増加率（1961～1990年比）

	Total potential change anticipated for the 2020s	Total potential change anticipated for the 2050s	Total potential change anticipated for the 2080s
Northumbria	35%	45%	75%
Humber	35%	45%	75%
Anglian	35%	55%	90%
Thames	40%	55%	90%
SE England	40%	70%	125%
SW England	40%	60%	110%
Severn	40%	55%	100%
Dee	30%	45%	70%
NW England	40%	60%	105%
Solway	40%	55%	105%
Tweed	35%	50%	65%

©Environment Agency and database right  
 ※（Environment Agency 2011）12頁より。



©Environment Agency and database right

図-Ⅱ.2.2.3.1 極端な増加率が生ずる可能性のある領域（灰色部分）

※（Environment Agency 2011）13頁より。

極端降雨のうち、再現期間5年以下の降雨についてはUKCP09の情報を用いるものとしている。5年を超える再現期間の降雨については下表に基づくこと。同表は気候モデルによる予測結果のうち最大日雨量のみ考慮しており、時間単位の降雨の将来予測指針は提供不可能とのこと。なお、H++シナリオは提供されていない。

表-Ⅱ.2.2.3.3 極端降雨強度の潜在的増加率（1961～1990年比・全イングランド共通）

	2020年頃	2050年頃	2080年頃
予測上限値	10%	20%	40%
気候変動因数	5%	10%	20%
予測下限値	0	5%	10%

※（Environment Agency 2011）14頁より作成。

※※小流域及び都市・地区排水に適用。河川流域（例えば5km<sup>2</sup>超）については洪水流量に係る値（既出）を適用。

相対的平均海面上昇量についてはUKCP09の値を適用。UKCP09では、1990年に対する2100年ま

での相対的海面上昇量予測の中央値及び上下限界を排出シナリオ（3つ。2.2.5.1(5)参照）及び地域別に提供（2.2.5.1(6)参照）。なお、上記予測値は IPCC 第4次報告書に基づいているが、同報告書は今世紀中の海面上昇量を過小評価しているとの指摘があるため、気候変動因数については予測中央値を用いずに、中排出シナリオの95パーセンタイル上限値を用いることを推奨している（下表参照）。

表-Ⅱ.2.2.3.4 期間別潜在的な海面上昇に係る気候変動因数等（単位：mm/年）

	2025年まで	2026～2050年	2051～2080年	2081～2115年
H++シナリオ	6	12.5	24	33
予測上限値	4	7	11	15
気候変動因数	UKCP09のデータで対象地点について利用可能な中排出シナリオの95%予測値を用いること。			
予測下限値	UKCP09のデータで対象地点について利用可能な低排出シナリオの50%予測値を用いること。			

※（Environment Agency 2011）16頁より作成。

高潮時潮位については UKCP09 の値に基づき下表のとおり提示。既述の相対的平均海面上昇量に加算する。なお、下表の予測上限値は UKCP09 の H++シナリオに基づくものである。（高潮時潮位については相対的平均海面上昇よりも H++シナリオの予測上限値が生起する確率が大きいとし、H++シナリオによる値を予測上限値としている）

表-Ⅱ.2.2.3.5 期間別高潮時潮位の潜在的变化に係る気候変動因数等（2008年比）

	2020年頃	2050年頃	2080年頃
予測上限値	20cm	35cm	70cm
気候変動因数	現況の極端な高潮位に関する厳しめの評価結果に基づくこと。		
予測下限値	なし	なし	なし

※（Environment Agency 2011）17頁より作成。

※※「予測上限値」欄の値は感度分析のために気候変動因数に更に加える高さである（平均海面高さに加える高さではない）。

一方、環境庁の地方出先機関では2002年以降流域別に流域洪水管理計画（Flood Management Plan）を発表しており、気候変動・土地開発の影響を考慮し今後50～100年を対象に洪水（高潮を除く）リスク管理の方針を発表している（気候変動による洪水流量20%増を明記している流域あり）。

これらの事例に関して特筆すべきは、将来の洪水等の不確定性に応じた適応策を提示していることであり、「まだ確実ではないから行動しない」よりは「現在の知見に基づきよしましと考えられる行動を起す」を政府として選択していることである。これは、上記2006年発出の指針における洪水流量増加率を5年後の2011年に見直している（一律20%の洪水流量増加率（2006年指針）では過小評価となる流域が見いだされたため2011年の助言では一部増加率を大きくした）ことから明らかである。

## 2.2.3.2 オランダ

オランダは国土面積約37,000km<sup>2</sup>（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。

伝統的にオランダにとって洪水は避けがたい現実であったため、家屋や農場を守るために中世初期よ

り堤防が築かれ始めた。また、干拓やその他の方法によって体系的に景観を形成し始めたのもこの頃である。

1916年の高潮の後、1932年までに水系に大規模な改変がなされた。洪水から守るために設計されたアイセルダム completionによりアイセル湖が形成され、土地開拓の機会を創出した。1953年の洪水災害の後、新たな基準が設定されデルタプランの下一連のダム及び高潮防御施設が建設された。その結果、オランダの海岸線は700キロ短縮しオランダ南西部は大幅に変化した。

1990年代度々河川の水位が危険なほど高くなり Limburg の一部が氾濫した。1995年には堤防破壊の恐れのため25万人の人々が避難を余儀なくされた。1976年及び2003年の夏は経済的損害を被るほどの渇水により繰り返し水不足に見舞われた。(Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al. 2010)

オランダも英国同様に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と考えられる。

オランダでは洪水防御法により洪水防御施設による防御レベル(1950年代にデルタ委員会により設定)が輪中ごとに定められている。同防御レベルには次の種類がある。

基準水位の年超過確率 1/250 : マース川の非感潮区間

同 1/1,250 : 上流河川地方

同 1/2,000 : (河川と海岸の) 遷移地域

同 1/4,000 : 大都市域を除く海岸

同 1/10,000 : 大都市域(通称 Randstad)の海岸

※注1 運輸・公共事業・水管理省の構造物設計の指針によれば、堤防の天端高さは基準水位よりも少なくとも0.5m高くしなくてはならない。

なお、上記基準は基準水位の超過確率であることから、越水・越波による破壊のみを対象としており、その他の破壊メカニズムは確率評価されていない(しかし、設計や安全評価ではその他の破壊メカニズムも考慮されている)。また、上記確率は数百から数千mの長さの堤防区間の超過確率であり、輪中全体の洪水確率ではない。

また、同法には5年ごとに運輸・公共事業・水管理省が基準水位の(気候変動等による)変化の有無について検査しなくてはならない旨規定されている。また、同省が10年ごとに安全基準の有効性について報告しなくてはならない旨規定されている。(Floris 2005)

なお、上記英国と同様欧州連合の諸規定を背景として、オランダ王立気象研究所が2006年に、2050年までの4つの気候シナリオ及び2100年までの海面上昇・洪水流量増加予測を下記のとおり発表している。

- ・2100年までに1990年比最大85cm海面上昇(地盤沈下除き)

- ・ライン川ロビス地点の1/1,250洪水流量が2100年までに17,000~22,000m<sup>3</sup>/sに増加(現況16,000m<sup>3</sup>/s)

また、(第2)デルタ委員会が2008年に2050年、2100年までの海面上昇予測等を発表している(2050年までに1990年比0.2~0.4m、2100年までに0.65~1.3m海面上昇(地盤沈下含み))。

ここで、上記(第2)デルタ委員会とは、2007年にオランダ内閣により設立されたものであり、同委員会は、1,835人の死者を出した1953年の劇的な高潮の後に設立された有名なデルタ委員会の後継として名づけられた。

前農業大臣 Cees Veerman が議長を務めた同委員会は、長期にわたる洪水防御及び淡水管理のための戦略に関する助言をとりまとめ、「水と共に生きる: 将来のための生活国土の建設」(Working together with water; A living land builds for its future)として2008年に発表した。

同委員会の主な提案は、オランダ政府が水安全と淡水利用の維持・改善に向けた（第2次）デルタプログラムを準備及び実施すること、同プログラムの遂行に必要な資源を提供するデルタ基金を設立すること、同プログラムの遂行を監督するデルタ委員長を任命することであった。

1916年の海洪水の後のZuiderzeeの閉鎖、1953年の劇的な高潮の後に起草された（第1次）デルタプログラム、1993年と1995年のライン川とマース川洪水の後に発表された新しいRoom for the River政策とは異なり、（第2次）デルタプログラムは災害後の助言ではないことに注目することが重要である。

上記提案を踏まえ、2010年に（第2次）デルタプログラムが開始された。同プログラムは、今後数十年間にオランダが直面する主要な水の課題に関して、洪水に対する持続可能な安全及び同淡水供給の達成を目的としている。

オランダのデルタ地帯の将来のために必要な決定の準備がデルタプログラムの中心である。デルタ委員長は、今世紀中の洪水リスク管理と淡水供給に関する指針となるデルタ決定（Delta Decisions）を2014年に内閣に提出し、同決定は次期国家水計画（National Water Plan）（2015年）に反映される。

デルタ決定は下記5項目を対象とする。

- (1) 主要洪水防御システムの安全基準の更新
- (2) オランダの十分な長期的水供給を保証する淡水戦略
- (3) オランダの水供給と地域の安全に焦点を合わせたアイセル湖（Ijsselmeer）の長期的な水位管理
- (4) ライン・マースデルタ（Rhine-Meuse Delta）の防護
- (5) 市街地（再）開発のための全国政策枠組み

また、長期的に必要なものについて下記9つのサブ・プログラムによりレビューが行われている。

- ・安全：洪水防御基準の更新（デルタ堤防（後述※注2参照）の推奨を含む）
- ・淡水：将来のオランダの淡水供給・需要に係る対策
- ・新市街地開発・再開発：市街地開発に係る全国政策枠組み
- ・西南デルタ：引き続き安全で、粘り強くかつ重要な西南デルタの長期的な戦略の開発
- ・ライン河口・ドレヒト都市群：ライン・マースデルタの洪水リスク管理と淡水供給に係る解決戦略の選択
- ・河川：ライン川及びマース川周辺地域の安全を維持するための長期計画の策定（同計画はRoom for the River（後述※注3参照）とマース・プロジェクト（同注4）の拡張となる）
- ・アイセル湖地方：アイセル湖の長期的な水位管理戦略の考案（淡水供給・需要の長期的変更及び主要洪水防御システムの標準化に応じた改良はアイセル湖地方において必要不可欠であり、水位管理は重要な役割を有する）
- ・海岸：海岸の安全のための持続可能な戦略の策定、海岸の拡張の可能性・望ましさの研究の確立
- ・ワッデン地方：ワッデン地方の長期的安全の保証、特別自然保護区域のモニタリング計画の策定

※注2 デルタ堤防：通常の堤防よりも高い、幅広又は強い堤防。突然の制御不能な破堤を実質上なくす。都市の再開発等と機能を共有できる。（Central government, Netherlands 2009）



©Central government, Netherlands (2009)

#### 図-Ⅱ. 2. 2. 3. 2 デルタ堤防

※ (Central government, Netherlands 2009) 72 頁より

※注 3 Room for the River : 2006 年開始、2015 年完了予定の総予算 23 億ユーロ (120 円/ユーロとして約 2,760 億円) のプロジェクト。Ijssel、Rhine、Lek、Waal 川の 30 以上の地点において河川空間の拡張 (堤防の再配置、高水敷掘削等による) が行われる。より安全 (2015 年にライン川 (Lobith 地点) で 16,000m<sup>3</sup>/s (実施前 15,000m<sup>3</sup>/s) を安全に流す)、より魅力的な (河川空間の拡張は河川周辺の空間の質を向上させる) 河川周辺地域の実現が目標。(ruimte voor de rivier 2012、Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al. 2010)

※注 4 マースプロジェクト (Maasroute) : 1993 年と 1995 年のマース渓谷における洪水を受けて開始。Zandmaas 及び Grensmaas 地域の 52 の事業より構成される。洪水防御、自然に係る目的の達成、鉱物の採取、舟運の改善が目的。マースプロジェクトが完了しても、マース渓谷地方全体で合意された安全レベルを確保するには更なる対策事業が必要であり、マース渓谷の長期的対策についてはデルタプログラムの枠組みの中で明確にされる予定。(Ministry of Transport, Public Works and Water Management, et al. 2010)

なお、デルタ委員会の委員長は、毎年デルタプログラム報告書を社会基盤・環境大臣に提出することとなっている (2010 年発表の 2011 年デルタプログラム報告書が最初)。また、2012 年 1 月にデルタ法が発効し、デルタプログラムの法的位置づけ等が規定されている。

上記報告書の最新版である 2013 年デルタプログラム報告書の中から主な点を以下に挙げる。

(Ministry of Infrastructure and the Environment, et al. 2012)

##### (1)重点報告事項

前報告書 (デルタプログラム 2012) では洪水リスク管理と淡水供給の課題に焦点を合わせたが、本報告書ではこれらの可能な解決策に焦点を合わせ、可能な戦略の概要 (目標、方策、及び展開) を述べている。

##### (2)主な内容

###### ①洪水リスク管理と空間の適応

第 3 次主要洪水防御システム評価の結果によれば、検査された総延長 3,767km の洪水防御システムのうち 1,225km は現在法定基準を満たしていない。これら基準を満たしていないシステムの約半分は新たな課題に属する理由による。残りについては、既に対策が実施されつつある。多くの洪水リスク管理基準は 20 世紀中頃のものであり、それ以降堤防背後の人口は大きく増加し、同経済成長と投下資本のかなりの増大が見られる。

2011 年末に公表された堤防防御システムに関する社会的費用・便益分析結果によると、(第 2 次)デルタ委員会提案の「安全基準の 10 倍強化」のオランダ全土での必要性は認められなかったものの、

一部の地域、特に主要河川周辺、ライン川河口・Drechtsteden (Drecht 都市群) 地方の一部及び Almere 周辺では安全基準の強化が必要と認められた。

以下、テーマ別記載事項を例示する。

○多層的安全 (multi-layer safety)

- ・一般に、災害の予防・防止が洪水リスク低減のための最も費用効果の高い方法とされる。デルタプログラムでは多層的安全の概念にも焦点を当てる。これは、災害の予防・防止に加え、より効果的な空間計画・災害管理により、洪水の結果として生じる被害を低減するものである。

○主要河川周辺、ライン川河口・Drechtsteden、南西デルタ (ライン・マースデルタ)

- ・原則として洪水対策は、地区開発と連携した堤防の改良と河川の拡張との組合せにより長期的に実現可能である。Room for the river プロジェクト及びマースプロジェクトから良い知見が得られている。
- ・ライン・マースデルタでは戦略的適地において堤防の多機能的利用を含む革新的 (デルタ) 堤防 (既出) が試みられる。
- ・Alblasserwaard、Krimpenerwaard 及び Lek 川沿いを含む地域の要求される水準での防御には、大規模な対策が必要かもしれない。例えば、ライン川支川の流量配分の見直し、新しい開閉式洪水防御システムの建設が考えられる。

○都市部

- ・高密度に建てこみ、舗装比率の高いオランダの都市域は、河川洪水及び熱による被害リスクを抱えている。
- ・洪水発生時の被害を低減する空間計画及び洪水リスク管理、並びに都市内の河川洪水、濁水及び熱による影響の低減に資する気候耐性都市 (Climate-proof city) のための系統的空間対策が重要課題である。

○アイセル湖地方

- ・アイセル湖からワッデン海への自然排水がいつまで可能であるかが懸念事項。海面上昇の影響により、いずれポンプにより排水する必要が生じる。

○海岸沿い及びワッデン海地方

- ・基本原則は「可能であればソフト対策を、必要であればハード対策を」である。長期的海岸保全には十分な砂の補給が引き続き必要不可欠である。2013 年発表予定の国家沿岸構想 (National Coastal Vision) に対策の提案が含まれる予定。

②淡水供給

○全般

- ・淡水供給に関する問題としては、低水期間の河川水の不足、地下水の塩水化、地下水位の低下による砂質微高地における水不足等がある。水不足による被害額は数千万ユーロ (120 円/ユーロとして数十億円) の規模となる。

○アイセル湖

- ・アイセル湖は重要な水源である。以前提案された「アイセル湖の水位 1.5m 上昇案」は取り止められた。夏期の柔軟な水位管理と組み合わせることにより、より少ない水位上昇量で淡水供給量のかなりの増加を実現できる。

また、デルタプログラム 2013 年報告書によれば、デルタプログラムの洪水対策分野を構成する第 2 洪水防御プログラム、Room for the River、マースプロジェクト等関連プロジェクトの進捗状況は下表のとおりである。

表-Ⅱ. 2. 2. 3. 6 デルタプログラム進捗状況（単位 百万ユーロ）

	全体予算額	2012年時点残額
第2洪水防御プログラム	3,151	2,527
Room for the River	2,180	1,495
マースプロジェクト	543	295
河川地方の更なる対策	188	62
東・西スケルト川の石張り堤防の改良・補修	904	345

※（Ministry of Infrastructure and the Environment ,and the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation 2012）18、21～24 頁より作成。

また、デルタプログラムの実施事例であるマース川 Overdiep 地点における川の拡張の概要は次のとおりである。

2011 年よりマース川の Overdiep 地点（一面の農地）において引堤、盛土上への輪中内農家の移転、旧堤の切り下げによる旧堤内地の遊水地化工事が行われている（Brabantse Delta 水組が施工管理）。2015 年予定の同工事完了後、遊水地は約 25 年に 1 度冠水し、同地点でマース川水位を約 27cm 低下させるとともに、同地点上流のマース川水位を低下させるとしている。

デルタプログラムの実施事例ではないが、主要洪水防御施設について将来の海面上昇を考慮した事例としてマエスラント高潮堰（Maeslantkering）の事例を以下に簡潔に述べる。

マエスラント高潮堰はオランダ南部を北海から守る上で重要な高潮堰である。現行のデルタプログラム開始前のデルタ・ワークス（Deltawerken：1950 年に最初の締切が行われた高潮災害対策プロジェクト）により 1997 年に完成した。5m の高さの高潮から防御できるとされ、2007 年 11 月に初めて高潮防御のために閉鎖した。なお、計画どおり閉鎖できる確率（操作システムが計画どおり作動する確率）は 99%。閉鎖操作は堰上流の水位（ロッテルダム地点）が 3m を上回ると予測される場合に行われる。（Rijkswaterstaat 2012）

本堰に係る高潮によるロッテルダムの年浸水確率は現在 1/7,000 とされている。（※著者注 ロッテルダムを含む Randstad 地域の法定安全率（年浸水確率）は 1/10,000 であることから、設計当初の本堰の超過確率は 1/10,000 以下であったが、海面上昇により同確率は 1/7,000 に増大したと推察される。）

2050 年までの本堰の高潮による閉鎖頻度は平均 10 年に 1 回。2050 年以降は、予測される海面上昇量によるが、5 年に 1 回程度まで増加する見込みである。（H<sub>2</sub>OLLAND 2012）

### 2. 2. 3. 3 ドイツ

ドイツも英国・オランダ同様に EU の諸規定に対応して気候変動適応策の実施が進められているが、ドイツでは洪水対策等は地方（州）が主体であり、気候変動適応策は地方により異なり、統一されていない。いくつかの地方では気候変動適応策に係る決定に直結する文書を発出済みである一方、いくつかの地方ではより効果的に政策決定するために重要な地域での調査を実施しているに過ぎない。

IPCC の A1B 排出シナリオに基づく気候予測によれば、基準期間 1961～1990 年に比べ下記のとおりとしている。（Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany 2009）

- ①年平均気温は 2021～2050 年に 0.5～2.5℃上昇、2071～2100 年に 1.5～4.5℃上昇。
- ②冬期雨量は 2071～2100 年に 0～40%増加の可能性（中央高地地方で 70%増加の可能性）
- ③夏期雨量は 2071～2100 年に最大 40%減少の可能性（南西部で特に減少の可能性）

ドイツ全体（連邦政府）では、2008年12月に「ドイツ適応戦略」（German Strategy for Adaptation to Climate Change: DAS）を公表し、2011年8月には「ドイツ適応戦略行動計画」（Adaptation Action Plan of the German Strategy for Adaptation to Climate Change）を公表している。

州政府では、バーデン=ビュルテンベルク、バイエルン、ラインラント・プファルツの各州で、新しい洪水防御施設計画時に2050年までの気候変動の影響を気候変動因数として設計流量算定時に考慮（従来の設計流量に気候変動因数を掛ける）している。同因数は地域・洪水規模別に設定している（下表参照）。なお、上記各州では一般に100年確率洪水流量を対象に洪水防御施設を計画している。実際の堤防整備時には従来の設計流量に対応する高さの堤防を整備するとともに隣接地を確保し、必要な時に容易に堤防のかさ上げ・拡幅を可能としている。橋梁については、当初から気候変動因数を考慮した設計流量に対応して計画し、擁壁については、将来かさ上げが必要になっても困難が生じないように設計している。（KLIWA<sup>※注</sup> 2009）

※注 KLIWA:水資源管理に係る気候変動と同影響に対応するためのドイツのバーデン=ビュルテンベルク、バイエルン、ラインラント・プファルツの各州とドイツ気象庁を含む協同プロジェクト。

表-Ⅱ.2.2.3.7 ドイツの地域・確率年別気候変動因数例

地域	確率年	気候変動因数
ネッカー	100	1.15
ドナウ上流	100	1.25
ドナウ上流	5	1.67
ババリア	100	1.15
ライン上流	5	1.45
スウェービア上流	5	1.24
コンスタンス湖	5	1.24

※（KLIWA 2009）18～19頁より作成。

#### 2.2.3.4 フランス

フランスも欧州連合の1国として上述同様EUの諸規定に応じた取り組みを進めている。これまでの調査によると、気候変動適応策の具体化が上述の英蘭独各国よりもゆっくりしているように見えるが、我が国よりは具体化が進んでいるように見える。

IPCCのB2及びA2排出シナリオに基づくフランスの将来（2070～2099年）予測（フランス気象庁等による）は下表のとおり（1960～1989年比）。冬期の平均降水量が増加する一方夏期の平均降水量が減少すると予測。（Cochran, Ian 2009）

表-Ⅱ.2.2.3.8 フランスの気候変動予測（フランス気象庁とラプラス環境科学研究所による）

排出シナリオ	年平均気温	冬期平均気温	夏期平均気温	年平均降水量	冬期平均降水量	夏期平均降水量
B2	2～2.5℃上昇	1.5～2℃上昇	2.5～3.5℃上昇	0～5%減少	0～10%増加	5～25%減少
A2	3～3.5℃上昇	2.5～3℃上昇	4～5℃上昇	0～10%減少	5～20%増加	20～35%減少

※（Cochran, Ian 2009）10、15頁より作成。

フランスでは気候変動適応行動を計画し、不適当な適応を避け、適応に係る公的政策の一貫性を確保することを目的として、2011年10月に全国気候変動影響適応計画（対象期間：2011～2015年）が策定された。

同計画の背景となる水災害・水資源管理に係る主な将来予測は次のとおりである。（Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing 2011）

- (1)楽観的シナリオ（IPCC第4次報告書(2007年)のB2シナリオ）、悲観的シナリオ（同A2）の2つのシナリオにより2100年までの将来予測結果を提示。
- (2)春・夏（乾期）は両シナリオとも降水量は低減傾向。
- (3)悲観的シナリオでは夏の降水量が2050年頃約10%、2090年頃同30%減少。（南西部で最も減少）
- (4)夏期の渇水期間が長くなる傾向が全地域で明確。
- (5)全土の河川で夏・秋に平均流量が急減。
- (6)冬（雨期）にはアルプス及び南東部で河川流量が増加。
- (7)セーヌ川流域についての研究によると、使用した全モデルにおいて現況に比べ21世紀末の流量が20～40%減少。
- (8)河川の極端な高水位についてはあまり変化しない。

また、水災害・水資源管理に係る気候変動適応策として例えば下記方策が挙げられている。

- (a)たとえ気候変動が生じなくても便益の生じる対策（後悔しない「No regrets」対策）。
- (b)既存貯水施設の最適化、必要に応じた貯水施設新設。
- (c)海面高さの変動の観測体制の確立。
- (d)海岸のリスク低減計画における海面上昇予測の考慮。

フランスの主要河川の堤防は1/100（都市域は最大1/500）年確率洪水を対象に設計されているが未完成区間が少なくない。

1995年にバルニエ基金が設立され、洪水危険区域にある資産を洪水から防御する費用が当該資産の価値を上回る場合には当該資産を買い取ることができるようになっている。

フランスには28万kmの河川等があるが、国家が保有するのは1.4万kmのみである。3万6千の地方自治体が洪水リスク及び秩序・安全の維持の第一責任者である。国家は洪水予報と警報システムについて責任を持つ。

フランスは洪水危険度に応じた法的強制力を持つ地区設定の長い伝統（1935年以来）がある。1982年には洪水保険制度とともに洪水危険区域図（PER）が導入された。PERでは高洪水危険区域（赤色区域）での建築は禁止され、中洪水危険区域（青色区域：パリの例では1/100年確率洪水に相当する1910年洪水の浸水区域）では建築規制（イトン川の例では基準浸水位より20cm上に建築する必要あり）に従うものとされている。

1995年にはPERを「予想される自然リスク防止計画」（PPR）に強化し、全地方自治体にPPRの作成を義務づけた。PERとは異なりPPRは知事の承認が必要である。（RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment 2004）

### 2.2.3.5 米国

米国では2008年に環境保護庁（Environmental Protection Agency）が「国家水プログラム戦略：気候変動への対応」（National Water Program Strategy: Response to Climate Change）により水資源等に係る気候変動の潜在的影響を概観し（Environmental Protection Agency 2008）、2009年には気候

変動科学プログラム（Climate Change Science Program（CCSP））が「統合・評価成果4.1：海面上昇に係る沿岸部の敏感さ：中部大西洋地区を対象として」（Synthesis and Assessment Product 4.1（SAP 4.1）Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region）を発表し、海水面変化が沿岸・河口部に様々な影響（海岸浸食、沿岸低地の浸水、洪水被害の変化等）を与えうると指摘した。（USACE 2011）

これらを受けて、気候変動適応に係る連邦政府横断タスク・フォース（The Interagency Climate Change Adaptation Task Force）が2009年に設置され、連邦政府諸機関の政策・プログラム・計画検討が米国の気候変動への準備により貢献する方策の大統領への提言が行われている。（2010、2011年に進捗報告書を発表）（Interagency Climate Change Adaptation Task Force 2011）

連邦政府による具体的な気候変動適応策は海面上昇に係る事例に限られている。陸軍工兵隊は2009年に「土木事業プログラムにおける海水面変化の考慮」（Water Resource Policies and Authorities Incorporating Sea-Level Change Considerations in Civil Works Programs）（技術回覧 EC1165-2-211）を発出し、2011年には改訂版となる同（Sea-Level Change Considerations for Civil Works Programs）（同 EC1165-2-212）を発出し次の事項を規定している。

- ・感潮区間を含む沿岸部の活動において海水面変化を考慮すること。（必要に応じ洪水調査等における出発水位で考慮）
- ・将来の海水面変化予測を計画、設計、工事、管理プロジェクトで考慮すること。計画・工学的検討・設計において次の事項がいかに気候変動及びその他地球規模の変化に対して敏感・適応可能か考慮しなくてはならない。

①自然・改変エコシステム ②人間社会

- ・計画調査及び設計は、将来可能性のある海水面変化の全範囲を対象として作成・評価された代替案を考慮すべきである。各代替案は「低」「中」「高」の将来の海水面変化速度についてプロジェクトを実施する場合としない場合とについて評価されること。

なお、2012年春に陸軍工兵隊の水文工学センター等で聞き取り調査を行った限り、海面上昇以外の（例えば洪水流量に係る）気候変動適応策についてはまだ議論中（気候変化はありそうだとの点ではおおむね合意できているが、どの程度の影響が予測されるかについて合意できていない）であり指針はまだ示されていないとのことであった。

州政府の気候変動適応策では、メリーランド州気候変動委員会が2008年に「メリーランドの気候変動影響の包括評価」（Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts in Maryland）によりメリーランド州の農業、森林資源、漁業資源、淡水供給、水陸のエコシステム及び人々の健康に全球気候の変動が及ぼしうる影響を評価（Maryland Commission on Climate Change 2008）し、同委員会は2011年に「メリーランドの気候変動に対する脆弱性低減のための包括戦略」（Comprehensive Strategy for Reducing Maryland's Vulnerability to Climate Change）により、メリーランド州の人々の健康、農業、森林・陸域のエコシステム、湾及び水域のエコシステム、水資源、人口増加及び社会資本を対象として、気候変動に対する脆弱性を低減するための短・中期の適応策の概要を示した。（Maryland Commission on Climate Change 2011）

カリフォルニア州では、2009年に同州水資源局が「カリフォルニア水計画2009」（California Water Plan 2009）（1957年より定期的に更新（前回更新は2005年））を公表し、カリフォルニア州の水資源の現況、気候変動影響等について整理するとともに、2050年までの3つの将来シナリオ、水資源管理戦略、地域別戦略を提示している。（Department of Water Resources, CA 2009）

### 2.2.3.6 イタリア

気候変動の影響を考慮した事例であるイタリア北東部に位置するベネチアのモーゼ計画の概要は次のとおりである。

ベネチアは外敵の侵略から逃れるため干潟内の島等に建設された都市であるが、近年「高潮被害」「海岸浸食」「干潟環境の悪化」に直面している。ベネチアはアドリア海の北端にあり、シロッコと呼ばれる初冬の季節風が吹きつける場所のため高潮が押し寄せやすい特性がある。これに加え、世界的な海面上昇、地下水の汲みあげによる地盤沈下によって浸水頻度が増加している。（(長倉敏郎 2006)における現在水位は1900年初頭と比べ23cm上昇）

伝統的にベネチアのPunta Salute地点（大運河内）の潮位が80cm以上で「高潮（High tide）」とされ、町の低地部分（市の中心であるサン・マルコ広場）の交通・歩行に支障が生じる。同100cm以上でより広範囲の歩行・車の運転に支障が生じる（公共空間の5%が浸水）。同110cmで市域の約12%が浸水に影響され、同140cmで市域の59%が浸水する。（Institution Centro Previsioni e Segnalazioni Maree 2012）

高潮対策として干潟と外海（アドリア湾）とを結ぶ3つの水路に可動堰を設置するモーゼ計画に2003年に着工しているが、同計画はベネチア事業連合（略称 CVN、民間建設会社で構成）が基本計画を策定し、公共事業交通省等で構成される委員会が同計画を決定し、CVN が工事を実施している。110cmを超える高潮が予測されるとフラップゲートが起き上がる。陸側と海側の水位差について最大2mまで（潮位3.1mまで）対応する計画となっている（長倉敏郎 2006）。（2012年9月時点工事進捗率75%（Ministry for Infrastructure and Transport 2012））

同計画では地球温暖化による海面上昇を見込んでおり、60cmまでの海面上昇（IPCC第4次報告書による100年後の上昇予測18～59cmを上回る）に対応している。（Ministry for Infrastructure and Transport 2012）

### 2.2.3.7 ベルギー

ベルギーは3つの地域（フランダース、ワロン、ブリュッセル）から成る連邦国家であり、水管理と空間計画は各地域の責務である。許可制の自然災害（洪水を含む）保険制度の導入について検討中である（2004年時点）。

堤防等の設計対象洪水規模については引き続き調査中であるが、100、350年確率の事例がある。フランダース地方のシグマ計画（第2次）完成時には1万年確率洪水に対応とのことである。

ベルギーの2071～2100年の気温・降水量予測（高中低の3気候シナリオを用いて予測）は下表のとおりである（1961～1990年比）（National Climate Commission 2010）。洪水リスクの将来予測（1998年）によれば、2100年までに4～28%流量が増加し、調査対象全流域で洪水リスクが増加する結果となっている。（RIZA 2004）

気候変動適応策としては、適応策の選択肢の評価・優先順位付けのためのリスクに基づく手法（拡張した費用便益分析）の提案が行われている。（Giron, E., et al. 2010）

表-Ⅱ.2.2.3.9 ベルギーの気候変動予測（2071～2100年時点 1961～1990年比）

冬期気温	夏期気温	冬期降水量	夏期降水量
1.5～4.4℃上昇	2.4～7.2℃上昇	最大60%増加	最大70%減少

※（National Climate Commission 2010）14～15頁より作成。

### 2.2.3.8 スウェーデン

スウェーデンは洪水問題が少ない国である。このため洪水防御施設の建設は割高と考えられ、仮設堤防・避難、氾濫流制御を考慮した道路等の設計、発電用ダムの操作による洪水被害最小化などが行われている（RIZA 2004）。スウェーデンにおいて洪水リスク評価、土地利用計画、危機管理計画は地方自治体の責務である（Van Alphen, J., et al. 2007、Ministry of Environment 2009）。土地利用計画に活用可能な洪水浸水地図をスウェーデン気象水文研究所が作成しているが、一般に洪水危険区域における建築規制はない。中央政府のスウェーデン救援事業庁（SRSA）は、地方自治体による土地利用計画策定に地域の救援事業者が参画することを奨励している。（RIZA 2004）

一般に、気候変動適応策実施の責務は地方自治体にある。具体的な気候変動適応策は主に最近極端な気象現象の影響を受けた地方自治体で始められている。多くの地方自治体で建築時の最低高さの引き上げ、洪水防御壁・ポンプ排水システムの整備が行われている。いくつかの地方自治体は豪雨時に問題が生じないように、水路・下水道システムにおける対策を始めている。（Ministry of Environment 2009）

将来の極端な日平均気温については、スウェーデンのほぼ全土で 1961～1990 年に 20 年に 1 度の年最高値が 2071～2100 年には 2～4 年に 1 度に増加し、同 20 年に 1 度の年最低値はほぼなくなると予測。同極端な日降水量については、1961～1990 年に 20 年に 1 度の夏期最大日降水量が、地域により異なるが、2071～2100 年には 6～12 年に 1 度に増加し、1961～1990 年に 20 年に 1 度の冬期最大日降水量は 2071～2100 年にはほぼ全土で 4～6 年に 1 度に増加すると予測。（MISTRA SWECIA 2012）

表-II.2.2.3.10 スウェーデンの 1961～1990 年における再現期間 20 年の気象事象の 2071～2100 年における再現期間予測

年最高気温	年最低気温	夏期最大日降水量	冬期最大日降水量
2～4年	—	6～12年	4～6年

※（MISTRA SWECIA 2012）10～11 頁より作成。

将来（2071～2100 年）の 100 年確率洪水流量の地域別変化率（1961～1990 年に対する）の予測結果によると、イエータランド西部、スヴェアラランド南西部及びノールランド北西部では全てのシミュレーションにおいて同流量が増加している。上記地方では洪水の再現期間が短くなることにより、より頻繁に洪水が発生する見込み。山岳地帯の 100 年確率洪水流量の増加は、管理河道のドミノ効果（上流の土砂の洗掘・流下による下流の流量増加のことか（筆者注））のリスクを有する。（Swedish Commission on Climate and Vulnerability 2007）

### 2.2.3.9 中国

中国の気候変動の影響評価・適応策の概要について気候変動枠組み条約に係る第 2 次国別報告書（2012 年）に基づき以下に述べる。

中国では 1990 年に気候変動に係る全国調整グループ（National Coordination Group on Climate Change）を設置し、同グループは 1998 年に「気候変動対応戦略に係る全国調整グループ」（National Coordination Group on Climate Change Response Strategies）に改編された。

2007 年には「気候変動に係る国家先導グループ」（National Leading Group on Climate Change。代表：国家主席 事務局：国家開発・改革委員会（National Development and Reform Commission））が設置された。同グループは現在関係省庁・組織の代表から構成され、気候変動に係る主要戦略・指針・政策の開発、気候変動への対応に係る活動、国際協力・調整のための対応計画のレビュー、気候変動への対応に係る主要課題に関する調整・検討を責務としている。同グループは 2008 年に 18 部から 20 部

へ拡充され、国家開発・改革委員会の下に気候変動部（Department of Climate Change）が設置された。

中国国家気候変動プログラム（China's National Climate Change Programme）（2007年）に示されているように、ほぼ全ての省政府は「気候変動先導グループ」（Leading Group on Climate Change。代表：省の指導者 関連する地方機関より構成）を設置し、同グループは地方レベルでの気候変動対応行動を責務としている。また、気候変動に対応するための実施機関が省の開発改革委員会の下に設置されている。

気候変動に関して科学に基づく国家の決断を支援するため「気候変動に係る全国専門家パネル」（National Panel on Experts on Climate Change）が設置され、科学的助言並びに気候変動に対応するための戦略・指針・政策・法令・規制・対策に関する政策提案を行っている。

中国本土では特に1990年代より夏期の降雨量が増加傾向にあり、一方、春秋の降雨量はかなり減少し、気象上の渇水がより頻繁に広範囲で生じている。多くの全球温室効果ガス排出シナリオによれば、中国本土の年間降水量は増加しそうであり、A1Bシナリオにおいては2040年には2～4%降水量が増加する見込みである。

気候変動の影響によるより頻繁な洪水・渇水等のため、小麦とトウモロコシの生産量が過去30年間に5%減少した。渇水の影響を受けた地域の面積は1950年代の3.8百万ヘクタールから2000～2008年の14.5百万ヘクタールへ4倍近く増加している。洪水の影響を受けた農地面積は1950～2000年の年平均で9.37百万ヘクタールであり、同期間に洪水のために減少した収穫量は全収穫量の3%に当たる。過去10年間に渇水の影響を受けた地域の割合の平均及び渇水による被害率の平均は各16.95%、10.05%に達し、1950年代の同割合の各2.3倍、4.3倍であった。

気候変動により中国北部の水資源が減少し、同南部で増加した。過去30年間に中国南部の河川流量及び全水資源量は約4%増加し、同北部では河川流量が17%減少し、全水資源量が12%減少した。

過去30年間平均で中国沿岸部の海面は年平均2.6mm上昇した（全球平均年1.7mmより大きい）。また、高潮被害及び沿岸浸食が激しくなっている。平均海面上昇量予測は下表のとおりである。

表-Ⅱ.2.2.3.11 中国沿岸の海域別海面上昇量予測（2040年まで、単位mm、2010年比）

海域	2040年までの予測値 mm
渤海	74-122
黄海	81-128
東シナ海	83-132
南シナ海	78-130
海域全体	80-130

※（China 2012）94頁より作成。

海面上昇による珠江（Pearl River、南部のベトナムとの国境近くの川）の三角洲地帯への影響が予測されており、2050年までの海面上昇を考慮すると現況の海岸防御壁では観測史上最大の高潮又は100年に1度の高潮により人口の2.2%、地域GDPの2.1%が失われる可能性があるとしている。

中国の気候変動適応に係る主な政策・行動として下記が挙げられている。

- (1) 農業構造の適合化、高効率灌漑・天水栽培における節水技術の展開。
- (2) 洪水・土砂・渇水災害軽減、水資源開発・保全プロジェクトの拡充、洪水・渇水管理システム制度の強化。
- (3) 森林保全、砂塵発生防止のための主要建設プロジェクトの強化。

- (4)海岸防御施設のかさ上げ・強化による海面上昇に適応した沿岸部・地域の社会資本の能力強化。
- (5)伝染病の流行・公衆衛生における緊急事態の直通報告システムの設置。(China 2012)

### 2.2.3.10 韓国

韓国における気候変動の影響としては洪水被害の増大（10年ごとに3.2倍に増大してきた）等が挙げられており、2010年に関係13機関（省庁レベル）による全国気候変動適応マスタープラン（2011～2015年）（National Climate Change Adaptation Master Plan (2011～2015)）が策定されている。同プランには10の分野について87の主要課題が位置づけられている。

極端気象事象については、これまでに日降水量が80mmを超える日数が1970年代に比べて倍以上に増加しているとしている。

将来の気候予測については、MM5地域気候モデルにより水平方向解像度27kmでA1Bシナリオに基づき実施している。同予測によると、21世紀末には降水量が17%増加（1971～2000年比）するとされるとともに、時空間的変動性の増大に伴う渇水や豪雨の増加が地域によっては予測されている。

気候変動の影響により大規模地滑りがMt. Jiri国立公園にて生じているとし、夏期の頻繁な豪雨が年間1千ヘクタールの地滑りに影響しているとしている。

2000～2009年の10年間の洪水頻度は以前の平均に比べ70%増加しているとしている。また、渇水が将来悪化するとしている。

気候変動適応策については、2011年6月に政府の適応策に関する新しい展望と計画が発表された。同適応策は7つの分野（公衆衛生、災害、農業、森林、海洋・漁業、水管理、生態系）に分類され、実施結果については3年目、5年目に総合評価報告書として発表される。

災害分野の適応策としては、災害防止施設の整備（同整備に資する脆弱性評価システムの導入）、洪水等に係る保険の強化（2006年以降実施中）、災害危険地域の維持管理、情報技術による局地豪雨警報システムの整備（2011年以降実施中）、都市計画における気候変動に係る脆弱性評価手法の確立（2011年以降実施中）が挙げられている。(The Republic of Korea 2011)

### 2.2.3.11 インド

インドは国土の12%が洪水氾濫域にあり、また、国土の16%で渇水の可能性があるとされている。同国には流域面積2万km<sup>2</sup>以上の主要河川流域が12、同2千～2万km<sup>2</sup>の中規模河川流域が46あり、両者を合わせると国土の約81%を占めている。

インド政府による第2次国別報告書（2012年）に係る将来の気候予測については、ハドレイ・センター（Hadley Centre）の地域気候モデルの第2世代（HadRM2、PRECIS、水平方向解像度50km）を用いてA1Bシナリオにより実施されている。同分析は2011年から2098年までについて3時期（2020、2050、2080年代）に分けて実施されている。同分析によるとインド亜大陸南部の一部地域を除き、モンスーン（雨季）の降雨量の大きな減少はなさそうとのことであり、21世紀末のモンスーンの降雨量は10%前後の増加が予測されている。

降雨日数は現在よりも減ることが予測されており、多くの地域、特に中央部で、降雨強度がより大きくなることが予測されている。

サイクロンについては襲来頻度が低下すると予測されているが、強度はより大きくなるかもしれないとされ、また、サイクロンの進路は現在と変わらないと予測されている。

水資源・洪水に関しては総流出量等をA1Bシナリオにより短期（2021～2050年）及び長期（2071～2098年）について予測・分析し、長期的には多くの流域で降水量が増加し、蒸発散量については流域・期別に増加・減少（多くの流域で蒸発散量が40%以上増加）すると予測しているが、これらの

予測値は流域平均値であるため、流域内の地域差に留意が必要とし、流域平均では総流出量が増加しているがいくつかの小流域では総流出量が減少している例を挙げている。また、流域の降水量が増加しているにもかかわらず総流出量が減少している河川が挙げられており、気温上昇に伴う蒸発散量の増加が原因とされている。

渇水については農業関係について土壌湿潤指標 (Soil Moisture Index) により予測し、長期的には中程度までの渇水はほぼ全ての流域において軽減されるが、中程度から極端な渇水は、降水量の増加にもかかわらずさほど改善されないとしている。

洪水については小流域ごとの日流出量シミュレーション結果から年最大流量を求め、現況 (1961～1990 年) の 99 パーセントイルの洪水流量からの変化率を算出し地図上に色分けして示している。

海面上昇については地域の精密な将来予測が利用可能となるまでは全球予測結果を使うものとし、平均 4mm/年の上昇としている。(Ministry of Environment & Forests Government of India 2012)

また、同国政府 (気候変動に係る首相審議会 (Prime Minister's Council on Climate Change)) は 2008 年に気候変動に係る国家行動計画 (National Action Plan on Climate Change) を発表しており、国家の 8 つの使命として「太陽エネルギー利用」「エネルギー効率の向上」「持続可能な居住」「統合水資源管理」「ヒマラヤ生態系の維持」「炭素貯蔵等に係る自然機能の向上」「持続可能な農業」「気候変化に係る戦略的研究」を挙げている。(Prime Minister's Council on Climate Change 2008)

上記使命に関する目的・戦略・行動計画・予定表、モニタリング・評価基準について詳細に述べた包括的使命文書 (Comprehensive Mission documents) が 2011 年に発表されている。「統合水資源管理」に関しては、5 つの目標 (「包括的公開水データベースの整備と水資源への気候変化の影響の評価」「水の保護・増大に向けた国民・国家の行動の促進」「過剰取水地域を含む脆弱な地域への配慮」「水利用効率の 20%向上」「流域レベルの統合水資源管理の促進」) が挙げられ、目標ごとに実施年が明示されている (例 「包括的公開水データベースの整備と水資源への気候変化の影響の評価」について「全てのデータと全体の情報 (慎重さを要するデータ及び機密に属するデータを除く) の 2012 年までの公開」) (Government of India 2011)

### 2.2.3.12 インドネシア

インドネシアは 17,500 以上の島からなる 81,000km の海岸線を持つ国であり、国民の大部分が海岸近くで生活している。

同国ではこれまで地域により異なる降雨の変化傾向が観測されている。14 の全球循環モデルによる将来予測が A2 及び B1 シナリオを用いて 2025、2050、2080 年について行われている。雨季の降水量は地域により増加・減少傾向が予測され、乾季の降水量は年代により増加・減少傾向が予測されている。また、雨季の開始時期が遅れ (2050 年には現況より 30 日開始時期が遅れる頻度が高まる可能性が高い)、雨季が短くなる傾向が予測されている。

水資源関係ではジャワと東部諸島では多くの年に既に水資源不足になっているが、気候変動により更に多くの地域での水不足が見込まれている (供給量を月降水量と森林比率から求めるとともに需要量を人口予測等から推定し試算)。このため貯水施設の設置と流域間導水が選択肢として挙げられている。

海面上昇については 2050 年に約 25cm、2100 年に同 50cm の上昇を予測し、地盤沈下と相まって沿岸部の都市の多くの部分が浸水するとしている。(Ministry of Environment Republic of Indonesia 2010)

同政府は 2007 年に「気候変動に係る国家行動計画」(National Action Plan Addressing Climate Change) を策定し、同行動計画は同国の長期開発行動計画 2005-2025 年 (Long Term Development

Action Plan 2005-2025) 及び中期開発行動計画 (Medium Term Development Action Plan) に含まれるものとされている。

同行動計画には緩和策と適応策について記述されており、適応策については気候変動に対し脆弱とされる水資源、農業、漁業、沿岸・海洋、社会資本・集落、健康、森林の分野別に、時期 (2007-2009、2009-2012、2012-2025、2025-2050 年の 4 期間) 及び責任機関 (省庁部局名) を明示して記述されている。例えば水資源分野については気候変動により渇水がより悪化し、海水面の上昇による地下水への塩水浸入により飲用水及び農業用水の質が低下するとし、適応策として貯水池開発プログラム (ジャワ、スマトラ、スラウェシ、マルク、バリ等)などを挙げている。(Republic of Indonesia 2007)

### 2.2.3.13 フィリピン

フィリピンは 7,107 の島嶼から構成され、うち 1,000 が居住に適している。地形の特徴は大部分を占める山地と狭い沿岸平野と内陸の谷・平地である。1998 年 4 月時点の県の数 は 78、市は 85、町村は 1,525 である。同国には 12 の水資源地方 (水文的・自然地理的境界、気候により分割) があり、343 の独立した主な河川流域 (各流域面積 40km<sup>2</sup> 以上) があり、これらの合計は国土の 66.5% を占める。これらのうち 20 の主要河川流域は各流域面積が 990km<sup>2</sup> 以上である。海岸線の延長は約 32,400km であり、県の 80%、市町村の 65% が海に面している。(Philippines 1999)

フィリピンでは 1951 年から 2010 年までに年平均気温が 0.64℃ 上昇するとともに、サイクロンの通過数の増加が観測されている。

また、中程度の排出シナリオに基づくフィリピン大気地球物理天文機構 (Phillippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration) による 2020~2050 年の気候予測結果によると、夏期には国土の大部分で降水量が減少するが、6~8 月の南西モンスーン期にはルソン島の大部分等で降水量が増加しそうである。12~2 月の北東モンスーン期の降水量は増加しそうであるが、一部減少傾向が予測されている。(Climate Change Commission 2011)

2009 年には気候変動を政府の政策において主流化し、気候変動に係る枠組み戦略及びプログラムを策定するとともに気候変動委員会を設置する「2009 年気候変動法」(Republic Act No. 9729, Climate Change Act of 2009) を制定している。同法では気候変動委員会の構成・権能・職務、気候変動枠組み戦略・計画、国家気候変動行動計画、地方気候変動行動計画、気候変動に係る予算、合同監督委員会、年報等について規定している。(The LAWPHiL Project 2013)

2010 年には気候変動国家枠組み戦略 (National Framework Strategy on Climate Change) が採択され、枠組み戦略はリスクに基づくこと、適応策を中心とすることなどの指針が定められている。

2011 年には国家気候変動行動計画 (National Climate Change Action Plan 2011-2028) を大統領が承認し、2011~2028 年のフィリピンの適応策及び緩和策の概略の予定表が公表された。同計画では優先分野として「食料」「利水」「自然生態系・環境」「人間の安全」「気候に応じた産業・利用」「持続可能なエネルギー」「知識・能力開発」を挙げている。

上記のうち「利水」分野の目標は「水資源の持続的管理と平等な利用の確保」とし、焦点となる 3 つの短期的成果 (他に中期的・長期的成果も記載されている) として「気候に適応し、水分野の性差別撤廃に向けた水管理の再構築」「水供給と安全で手頃な水利用の確保」「気候変化に適応するための水分野の知識・能力の向上」を挙げている。そして各指標・関連組織を明示し、2011~2016 年、2017~2022 年、2023~2028 年の 3 期間に分けて行動と期待される成果を示している。例えば期待される 3 つの直接的成果の 1 つ目の「気候に適応し、水分野の性差別撤廃に向けた水管理の再構築」については指標として「既存の水資源管理法令がレビューされ調和させられる」等 3 つを挙げ、関連組織として「環境・自然資源部」(Department of Environment and Natural Resources) 等を挙げ、行動と

して「既存の水資源管理制度・政策のレビュー・合理化」を 2011～2016 年に実施するなどとし、同行動により期待される成果として「調和した合理的な水資源管理制度・政策が策定・確立される」等を挙げている。

また、同「人間の安全」分野の目標は「男女及び脆弱な集団（子供、老人、障害者等）の気候及び災害によるリスクの低減」とし、焦点となる 3 つの短期的成果として「全国及び地方レベルでの気候変化適応策及び災害リスク低減策の全領域での実施」「健康及び社会の保護システムの気候変化リスクへの対応」「気候変化に適応した居住及び利用の開発・促進・採用」を挙げ、指標として「脆弱性及びリスク評価が全ての県で実施される」等を挙げ、関連組織として「気候変化委員会」(Climate Change Commission) 等を挙げ、行動として「県レベルの気候・地質上のリスクの明確化」を 2011～2016 年に実施するなどとし、同行動により期待される成果として「県レベルのリスク情報・地図」等を挙げている。(Climate Change Commission 2011)

#### 2.2.4 各国の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法

気候変動による影響に限らず、整備水準を上回る規模の洪水等が発生した場合に防災施設がシステムとしてどのように挙動するか事前に予測・評価しておくことは危機管理対策の検討等において重要と考えられる。諸外国では、例えば米英蘭において防災施設の機能発揮に係る確率分布（幅）について定量的な考慮手法の研究・実施が進められてきており、以下に主な事例について述べる。

※注 「不確実性」と「不確定性」：以下本節では「不確実性」を「確率分布を仮定せずに分析する場合」に用い、「不確定性」を「確率分布を仮定して分析する場合」に用いる。

##### 2.2.4.1 米国陸軍工兵隊の事例

米国の河川堤防の機能発揮に係る技術基準等の概要は次のとおりである。

なお、米国陸軍工兵隊では 1996 年以降不確定性を定量的に考慮したリスク分析手法を導入しており（板垣、吉谷 2012b）、同年前後で手法が異なることに留意されたい。

###### ・堤防の設計基準

土堤の設計・建設において用いる基本原則は陸軍工兵隊の「堤防の設計・施工」(Design and Construction of Levees)（技術マニュアル EM1110-2-1913）（2000 年）に示されている。

###### ・堤防のフラジリティカーブ

堤防のフラジリティカーブ（堤防等施設に作用しうる外力（一般に洪水位）範囲について、外力に応じた破壊確率を表した曲線）は洪水被害低減プロジェクトの事業便益評価時に使用されている。陸軍工兵隊の基準を満たす堤防は堤防天端未満の水位における破堤確率は 0。（注意：堤防天端水位まで洪水を安全に流せる意味ではない。堤防の余裕高の考え方欄参照）堤防天端の水位で破堤確率 0.85。古い、劣化した可能性のある堤防については、技術者の判断により PFP（Probable Failure Point：85%破壊する確率の水位）及び PNP（Probable Non-failure Point：15%の確率で破壊する水位）を設定し、両者の間を一般に直線で結ぶか、堤体を構成する土質特性等を踏まえ FOSM（First-Order Second-Moment）、PEM（Point Estimation Method）などによりフラジリティカーブを導出する。陸軍工兵隊の基準を満たす堤防は天端水位で破堤確率 0.85。同基準を満たさない堤防についてはフラジリティカーブによる。既存堤防の改良プロジェクト等の事業便益評価時にはフラジリティカーブを用いたモンテカルロシミュレーションを行う（陸軍工兵隊水文工学センター（Hydrologic Engineering Center、HEC）が開発した HEC-FDA（Flood Damage Reduction Analysis）等のソフトウェアが使われている）。フラジリティカーブは過去の洪水時の機能発揮状況（パフォーマンス）を重視しつつ、解析結果、技術者判断を踏まえ導出する。対外説明、合意形成には解析手法が望ましい。現在のフラジリティカーブには堤防の長

さは考慮されていない。同解析に用いる土質定数の標準偏差には滑り面の面積等は考慮されていない。

- ・事業便益評価における既存堤防破堤水位

堤防の構造上の完全性に疑念のある場合（越水前に破堤する恐れがある場合。特に既存の非連邦堤防又は古い堤防で劣化が進み当初意図していた水位まで耐えうると仮定できない場合）には常に、外水位に応じた堤防の土質工学的破壊確率を土質工学に基づく分析により設定し、便益評価時に使用する。この場合、いかなる堤防も天端水位まで耐えられるものとすべきでない。（既存堤防の便益評価時の破堤水位の検討時に）適当と認められる場合、過去の洪水時の挙動はテンプレート手法（**template method**）（筆者注 日本のスライドダウン手法に類似。後述※注参照）に取ってかわる。一般に PNP は、一貫して堤防に異常が生じていない過去の経験水位より低くすべきでない（当該水位経験時に比べ現在堤防の信頼性が低下していると信じる理由がある場合を除く）。

※注 **Template** 手法：天端幅を粘土では 10 フィート（約 3m）、砂では 12 フィート（約 3.6m）、法勾配を 1:3（粘土）から 1:4（砂）とした仮想断面で既存堤防等の中に含まれるものの中で最も高い天端高さ等を PNP（被害がほぼ発生しない高さ）、同天端幅を 6 フィート（約 1.8m）、法勾配を法滑りの安全率が 1 となるよう設定した仮想断面の最も高い天端高さを PFP（これを超えると被害がほぼ発生する高さ）とする手法。（USACE 1993）

- ・1996 年以前の事業評価時の破堤（被害発生）水位

陸軍工兵隊の基準を満たす堤防については、堤防の高さと等しい水位まで被害は発生せず、同水位を超えると被害が発生しはじめる。事業便益計算上の堤防高さに **freeboard** は含めない。既存堤で原則 3 フィートの **freeboard** を確保できない水位では防御効果を見込まない。信頼性の不確かな既存堤防等については過去の経験水位・**Template** 手法等により被害発生水位を設定。

- ・堤防の **freeboard** の考え方

リスク評価手法への移行前、**freeboard** は **design flood stage**（設計対象洪水の水位）に加える高さであり、**design flood stage** の不確定性に対応するとともに、他の工学上の不確定性に対する緩衝となるものであった（最低 3 フィート（約 90cm））。1996 年のリスク評価手法への移行により、固定した **minimum freeboard criteria**（最低 **freeboard** 基準）は定量的な条件付非超過確率（**assurance**）へ移行した。当該 **assurance** は **base flood**（全米洪水保険制度において基準となる洪水）を最低 90% 防御しうる（堤防天端高さの洪水水位の非超過確率が 90% 以上（ただし同 95% を上回る必要はない））ものとしている。

一方、連邦緊急事態管理庁（**Federal Emergency Management Agency, FEMA**）は全米洪水保険制度の堤防認証基準において原則 3 フィートの **freeboard** の確保を求めている。原則最低 3 フィートだが、不確定性に関する分析結果から 3 フィート未満としても良い。ただし、2 フィート未満は認めない。また、一連の堤防区間の上流端で 0.5 フィート（約 15cm）、下流に向けて徐々に減少し同下流端で 0 以上となる高さを最低限の **freeboard** に加えるものとしている。

なお、2012 年春のカリフォルニア州サクラメントでの聞き取り調査によれば、工兵隊の技術文書 ETL1110-2-299 に基づく余裕高を縦断的に変えて越水開始地点を限定する手法（USACE 1986）は、現在全てに適用されているわけではないとのことであり、適用されない理由として越水開始地点周辺への家屋の立地が挙げられていた。

- ・事業評価制度における B/C の位置づけ

連邦機関は **Principles and Guidelines (WRC 1983)**（以下 P&G）に基づき治水事業選択肢からの選定等を行うが、P&G では一般に治水事業は国家経済開発（**national economic development**）に貢献する（便益がコストを上回る）ことが求められる。しかし、他の考慮事項により、最大の国家経済開発便益（**national economic development benefits**）を与える事業以外を選定することがある。例えば、FEMA

の全米洪水保険制度で基準となる洪水（base flood）に対応した堤防等の選択肢がしばしば優先される。  
（経済評価に基づく事業規模から全米洪水保険制度に対応した事業規模までの費用増分については地元が全て負担することになる）

工兵隊では、プロジェクトの便益がコストを上回るだけでなく、プロジェクトの各要素についてもコストを上回る便益を生じさせなくてはならない。

・ B/C 計算手法（工兵隊による河川洪水被害低減事業の場合）

- (1) 計算を容易にするため対象流域を reach へ分割。
- (2) 各 reach における洪水頻度及び被災可能性のある資産を定量化するためのデータの収集。
- (3) 洪水流量の生起確率、流量・水位関係、水位・被害関係式の導出。
- (4) 堤防、洪水防御壁、移転、避難、ダム、放水路などの代替案（選択肢）を作成し、各コストを算出するとともに、上述(3)の各関係式が代替案ごとにどのように変化するか明らかにする。
- (5) 導出された各関係式を統合し、代替案ごとの想定被害、被害軽減及び便益を算定。
- (6) 代替案ごとに、①事業コスト、被害軽減及び便益 ②残留洪水リスク（特に施設完成後の年平均超過確率、長期リスク）を算出し、事業を実施しない場合と比較。

代替案ごとの便益等を算出するためのモンテカルロシミュレーションは HEC-FDA ソフト（既出）等により実施している。

・ 同一氾濫ブロック内複数点破堤の有無

各 reach で最も弱い地点又は最大被害を生じさせる地点 1 箇所を想定氾濫地点とする。

・ 被害額の計上方法

年平均被害額、年平均被害軽減期待額、施設能力の年超過確率の中央値、施設能力の年超過確率、長期間（10、25、50 年間）の施設能力超過確率、条件付施設能力非超過確率（超過確率 0.02、0.01 又は 0.004 の洪水が発生した場合の施設能力非超過確率）を示している。

・ 波及被害の計上方法

地域外への影響の「Rest of Nation」部門への計上、支払意志額（willingness-to-pay）の活用、社会の安全（public safety）への影響（残留リスク、自然災害の頻度又は強さ、リスク管理施策の信頼性、危険にさらされている人々の数、災害による潜在的な犠牲者数、影響される人々の避難又は死傷を避ける力と手段、必要不可欠な公共サービス喪失等への影響）を明記している。例えば、人的被害の評価ソフトとして HEC-FIA（Flood Impact Analysis）が用いられている。

・ 洪水対策計画立案の考え方

計画立案過程は、リスク評価手法導入後も従来と同様（関連する地域コミュニティ、利害関係者、他の連邦、州、地域機関、関連する公的・非政府組織と工兵隊による民主主義的なプロセスによる）。リスクに基づく（risk based）政策決定と呼ぶよりはリスクを踏まえた（risk informed）政策決定と呼ぶべきである。連邦政府による計画立案では P&G に基づき、様々な関連事項を考慮しつつ国家経済開発（national economic development）を最大化する選択肢等を立案する。地域コミュニティは事業目的のより良い設定と潜在的な解決策の提案を担う。議会の決定が絶対。

・ 洪水対策に係るリスク評価の基本方針

- (1) 洪水の発生確率と結果について正確で公平な評価を行い、同評価結果を公表・共有し、事業担当者と対象地域住民による慎重な検討において活用する。
- (2) 事業に係る不確定性を認識、定量化、公表、共有し、慎重な検討における重要な要素とする。（特に流量の生起確率、水位・流量関係、土質・構造特性、事業の運営・管理、事業のコスト・便益に係る不確定性を対象とする）
- (3) 残留リスク（計画対象外力を上回ることによる公共安全、ライフライン、地域・地方経済への影

- 響) 分析による同リスクの強調、同公表、共有による事業の慎重な検討。(Davis, D., et al. 2008)
- ・洪水流量の発生確率に係る不確定性の考慮方法  
 解析的に求める場合には信頼区間 (confidence band) を「洪水流量頻度決定指針 (告示 B17)」 (Guidelines for Determining Flood Flow Frequency (Bulletin 17B)) (Interagency Advisory Committee on Water Data 1982) に基づき設定。非解析的に求める場合には工兵隊の技術文書 ETL1110-2-537 (USACE 1997) に基づく順位統計量による (Davis, D., et al. 2008)。流量～超過確率関係に対数ピアソンⅢ型分布を適用できる場合には、不確定性として非心 t 分布を採用 (告示 B17 に基づく手法)。
  - ・洪水流量と水位との関係における不確定性の考慮方法  
 歴史的な洪水、洪水痕跡、水理的パラメタの感度分析、水位観測データの分析、公表値に基づき考慮。(詳細は工兵隊の技術マニュアル EM1110-2-1619 (USACE 1996) の 5-1～5-7 頁参照)
  - ・水位・被害関係における不確定性の考慮方法  
 建物の 1 階の床高さ、建物の価値、被害発生曲線 (damage fragility curve) についてモンテカルロシミュレーションを行い分布式及び分散を求めて考慮。(詳細は工兵隊の技術マニュアル EM1110-2-1619 の 6-1～6-7 頁参照)
  - ・氾濫計算  
 堤防越水時の堤内水位については詳細な分析が必要としているが、内外水位が同じと仮定している事例が紹介されている。必要に応じ二次元不定流計算等を実施。

米国陸軍工兵隊の洪水対策事業の便益評価に係るリスク分析手法の特徴は次のとおりである。詳細は (板垣・吉谷 2012b) 参照。

- ① ソフトウェア (HEC-FDA 等) を活用し効率的なリスク分析を図っている。
- ② 流量～超過確率関係、流量～水位関係、水位～被害関係ごとに不確定性を定量的に算入し、モンテカルロシミュレーションにより各関係を合成し、被害～超過確率関係を算定している。
- ③ 年平均被害軽減期待額だけでなく、残余リスク、一定期間 (30 年間等) に施設能力を超過する回数等を算定している。

#### 2.2.4.2 英国環境・食料・農村地域省及び環境庁の事例

英国の洪水リスク管理のためのリスク評価手法は「戦略的計画のためのリスク評価 (RASP<sup>※注1</sup>) プロジェクト」(2001～2004 年) (※注1 RASP=Risk Assessment for Strategic Planning, 英国環境庁と環境・食料・農村地域省が委託した研究開発プロジェクト) により開発され、2004 年全国洪水リスク評価 (NaFRA<sup>※注2</sup> 2004) (※注2 NaFRA=National Flood Risk Assessment) にて実際に適用された。同評価は全国堤防データベース (NFCDD=National Flood and Coastal Defence Database) に基づき実施している。リスク評価は、原因 (source) - 経路 (pathway 又は barrier) - 受容者 (receptor) - 結果 (consequence) モデルに基づいている。

原因：水理的負荷 (水位、波等)

経路：堤防の越流・破堤等

受容者：氾濫原内の人々・資産・社会資本・環境等

結果：被害等

洪水防御施設を線状の施設 (堤防等) と点の施設 (ポンプ、水門等) に分類して評価している。

洪水防御施設種類ごとの主要破壊モードが下表のとおり示されている。これらの破壊モードは主に詳細な (後述) 信頼性評価において重要とされている。

表-Ⅱ. 2. 2. 4. 1 洪水防御施設の種類ごとの主要破壊モード

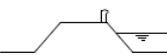
Flood and coastal defence type		Key Failure Modes
Embankment / sloping seawall		<ul style="list-style-type: none"> <li>Erosion of crest and inside face leading to breach following overtopping (possibly induced by settlement)</li> <li>Piping, excessive seepage, breach or collapse following deterioration due to vermin infestation</li> <li>Breach following failure of foreign objects or weak spots caused by their presence</li> </ul>
Slope protection against erosion		<ul style="list-style-type: none"> <li>Structural failure following vandalism</li> <li>Toe erosion/foundation failure</li> <li>Slip failure due to instability or foundation failure</li> <li>Failure of slope drainage</li> <li>Damage by boats and barges</li> <li>Structural failure of inflexibility of rigid revetments placed on dynamic watercourses/coastlines</li> </ul>
Vertical wall structures		<ul style="list-style-type: none"> <li>Overtopping</li> <li>Toe erosion</li> <li>Failure of structural members (e.g. tie-rod or anchorage system)</li> <li>Structural failure due to wash out of fill following joint failure</li> <li>Structural failure following abrasion or corrosion</li> </ul>
Beaches	Sand / Shingle Beach	Beach roll-back and erosion are natural cyclic processes rather than failure Beaches fail when they do not perform their primary function (e.g. overtopping/ tidal flooding/erosion protection), although they may recover with time. Key processes resulting in failure: <ul style="list-style-type: none"> <li>Overtopping due to erosion/gullying/reduced energy dissipation following beach lowering</li> <li>Failure of control structures</li> </ul>
	Beach control / wave attenuation structures (ancillary coastal structures)	Failure is a failure of the system the structure directly or indirectly protects Key failure modes: <ul style="list-style-type: none"> <li>Progressive failure of timber groyne system following deterioration by rotting, abrasion, vandalism</li> <li>Ship impact</li> </ul>

©Crown copyright (Defra); (2007)

※ (Defra 2007a) 92 頁より。

また、線状の防災施設（堤防等）の経年劣化に係る指標が例えば下表のとおり示されている。

表-Ⅱ. 2. 2. 4. 2 堤防・海岸傾斜壁の劣化指標等の例

Flood and coastal defence type	Failure modes	Indicators of Failure	Deterioration	Indicators of Deterioration
Embankment / sloping seawall (defence could include crest wall to embankment, particularly for coastal areas)	<u>Non-structural failure:</u>	<u>Non-structural:</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Loss of beach or berm in front of defence</li> <li>Settlement</li> <li>Loss of fine material</li> <li>Long term erosion (e.g. foreshore erosion, gradual slope erosion)</li> <li>Animal infestation</li> <li>Cracking/micro-fissuring</li> <li>Seepage and softening</li> <li>Vandalism</li> <li>Crest and slope erosion due to</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduction in beach/berm level</li> <li>Reduction in crest level</li> <li>Reduction in foreshore level, gradual loss of slope material</li> <li>Noticeable washout of fine material</li> <li>Noticeable presence of burrowing animals, holes within embankment</li> <li>Noticeable cracking (may only be apparent during dry weather)</li> <li>Soft/saturated areas of defence or ground nearby during high water levels</li> <li>Obvious vandalism damage to defence</li> <li>Heavy use by vehicles/ pedestrians/ animals, tyre ruts, vegetation and bank</li> </ul>
	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Overtopping</li> <li>Seepage</li> <li>Outflanking</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Saturated ground along inner face of defence</li> <li>Erosion and low points at end of defence</li> </ul>		
	<u>Structural failure:</u>	<u>Structural</u>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erosion of crest and inside face following overtopping Erosion of outside face</li> <li>Global slope instability (rotational or translational)</li> <li>Shallow slope instability</li> <li>Damage/failure of revetment</li> <li>Bearing capacity failure</li> <li>Sliding</li> <li>Piping</li> <li>Toe or retaining structure failure</li> <li>Failure due to presence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obvious cutting into slope</li> <li>Obvious erosion and damage to crest and slope following overtopping</li> <li>Movement of embankment / wall</li> <li>Settlement of crest</li> <li>Obvious damage to, or local movement or abrasion of revetment</li> <li>Downward movement of embankment/ wall</li> <li>Lateral displacement of embankment/ wall</li> <li>Saturated or wet ground along inner face or close to inner toe of defence</li> </ul>		

©Crown copyright (Defra); (2007)

※ (Defra 2007a) 26 頁より。

多くの洪水防御システムにおいて最も重要であることが多く、また、フラジリティカーブ導出上最も複雑な問題を生じさせるポンプと防潮水門について下記のとおり顕著な機能喪失モードが示されている。

(1)ポンプ

①機械的機能喪失

閉塞又は部品の故障による。

②電氣的機能喪失

電気ケーブルの破断、電気系統の故障による操作の遮断による。

③施設の機能喪失

ポンプの施設全体の破壊による（原因：越流、越水、パイピング・滑り・転倒・強度不足による施設の不安定化）。

(2)防潮水門

①閉鎖できない

人的失敗、機械的故障、電氣的故障。

②施設の破壊

越流、越水、パイピング、滑り、転倒。

③湾内貯留水量の超過

流入量が「貯留可能量＋流出量」を超える場合。

RASPによる堤防の信頼性評価手法として下記3レベルの階層的风险評価手法が開発されている。

- ・概略レベル手法（HLM：High level Method）又は同改良型（HLM+：High level Plus）：  
NaFRA（既出）2004で使用。空間解像度 1km×1km。
- ・中間レベル手法（ILM：Intermediate Level Method）：施設種別・複合外力考慮。空間解像度 100m×100m。
- ・詳細レベル手法（DLM：Detailed Level Method）：破壊モード間の依存性考慮。空間解像度 20m×20m。

上記3レベルのリスク評価において下記限界状態関数を設定。

$$Z=R \cdot S$$

ここで、R:構造物の強さ S:構造物に作用する力 Z:限界状態関数（ $Z \geq 0$  で破壊せず）。

RASPの概略レベル手法改良型（HLM+）による河川堤防のフラジリティカーブ導出手法の概要は次のとおりである。

河川の土堤については指標とする破壊モードとして越流による堤体浸食、パイピングを選定。各破壊モードの限界状態関数に基づきモンテカルロシミュレーションにより各生起確率を算定し、各破壊モードが独立していると仮定し、それらの単純和を破堤確率とする。

越流による浸食について、限界越流水深  $\Delta h_c$  は下記式・II.2.2.4.1により算出する。

$$\Delta h_c = \left[ \frac{2.78 \cdot q_c^2}{g} \right]^{1/3} \dots\dots\dots \text{式-II.2.2.4.1}$$

ここで、 $q_c$  は下記式・II.2.2.4.2により算出する。

$$q_c = \left[ \frac{3.8 \cdot c_g^{2/3}}{(6 \cdot 10^5)^{2/3} \cdot [1 + 0.8 \cdot \log_{10}(P_t \cdot t_s \cdot \frac{c_g \cdot d_w}{c_g \cdot d_w + 0.4 \cdot c_{RK} \cdot L_{k,inside})}]} \right]^{5/2} \cdot \frac{k^{1/4}}{125 \cdot (\tan \alpha_i)^{3/4}} \quad \dots \text{式-II.2.2.4.2}$$

ここで、

$c_g[m \cdot s]$ =植生の耐浸食性係数（値の範囲： $10^6$ （良）～ $3.3 \times 10^5$ （悪））

$P_t$ =越水（流）の生じる時間のパーセント（越流の場合 1）

$t_s[\text{hours}]$ =嵐の時間長さ

$d_w[m]$ =植生の根の深さ（値の範囲：0.05～0.07m。維持管理、植生の位置・種類に影響される）

$c_{RK}[m \cdot s]$ =表面の粘性土層の耐浸食性係数（値の範囲： $7 \times 10^3$ （悪）～ $54 \times 10^3$ （良）、砂の場合 0）

$L_{k,inside}[m]$ =堤内側の表層粘土層の厚さ

$k[s^6/m^2]$ =堤内側法面の Strickler の粗さ因数

$\alpha_i [\text{degrees}]$ =堤内側法面の傾斜角

また、パイピングによる河川の土堤の破堤の限界水頭差： $dh_c$ は下記式-II.2.2.4.3により算出する。

$$dh_c = \frac{t + 1/3 \cdot L}{C_w} \quad \dots \text{式-II.2.2.4.3}$$

ここで、

$t$ =堤防の下の不透水層の厚さ

$L$ =水平方向の浸透路長

$C_w$ =クリープ比（土質により異なる）

なお、上記計算に係る各パラメタの確率分布を下記のとおり提示している。

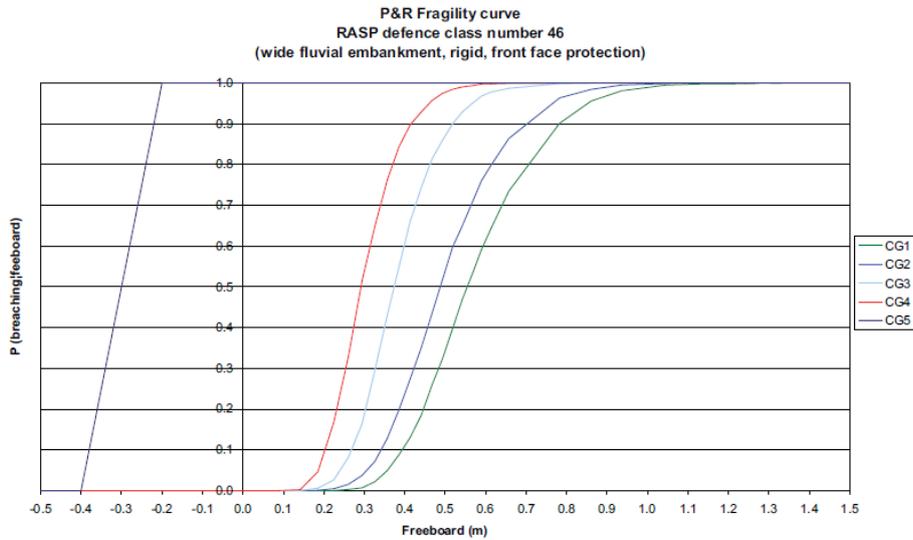
表-II.2.2.4.3 英国の RASP 手法（概略レベル手法改良型）における各パラメタの確率分布

		Distribution function	Standard deviation ( $\sigma$ ) or variation coefficient ( $v$ )	Mean
Width $L_K$	Narrow (m)	lognormal	$\sigma = 0.2$	7.5
	Wide (m)			20.0
Tan $\alpha_i$ (angle inside slope)	Steep (tan)	normal	$v = 0.05$	0.5
	Shallow (tan)			0.25
Erosion strength $c_g$		lognormal	$v = 0.30$	See table below
Grass root depth $d_w$		lognormal	$v = 0.20$	0.1
Roughness inside slope $k$		lognormal	$v = 0.25$	0.015
Erosion strength core embankment $c_{RK}$		lognormal	$v = 0.30$	23,000
$t$ , thickness impervious layers		normal	$\sigma = 2.5$	0
$C_w$ creep ratio		normal	$\sigma = 0.2$	
Seepage length $L$ (m)	Condition 1	normal	$\sigma = 0.2$	60
	Condition 2			60
	Condition 3			60
	Condition 4			10
	Condition 5			6

©Crown copyright (Defra); (2007)

※ (Defra 2007b) 11 頁より。

河川堤防のフラジリティカーブの例は下図のとおり。



©Crown copyright (Defra); (2007)

図-Ⅱ.2.2.4.1 概略レベル手法改良型による河川堤防のフラジリティカーブ例

※ (Defra 2007b) 12 頁より。

※※横軸：堤防天端との相対水位、縦軸：破堤確率。凡例の CG は堤防の状態等級で CG1 が良好、CG5 が劣悪。

また、RASP の中間レベル手法 (ILM) による河川堤防のフラジリティカーブ導出手法の概要は次のとおり。

限界状態関数等は HLM+と同様である。ILM では堤防に係るより多くのデータが利用可能なことから HLM+より不確定性が小さいとし下表のとおり HLM+より小さい (半分の) 標準偏差を使用する。

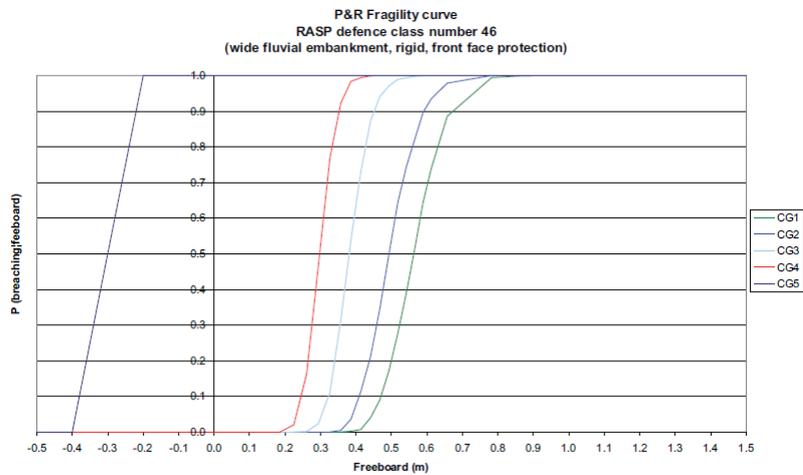
表-Ⅱ.2.2.4.4 中間レベル手法における各パラメタの標準偏差等

		Distribution function	Standard deviation ( $\sigma$ ) or variation coefficient ( $v$ )	Mean
Width $L_K$	Narrow (m)	lognormal	$\sigma = 0.1$	7.5
	Wide (m)			20.0
Tan $\alpha_i$ (angle inside slope)	Steep (tan)	normal	$v = 0.025$	0.5
	Shallow (tan)			0.25
Erosion strength $c_g$		lognormal	$v = 0.15$	See table below
Grass root depth $d_w$		lognormal	$v = 0.10$	0.1
Roughness inside slope $k$		lognormal	$v = 0.125$	0.015
Erosion strength core embankment $c_{RK}$		lognormal	$v = 0.15$	23,000
t, thickness impervious layers		normal	$\sigma = 1.25$	0
$C_w$ creep ratio		normal	$\sigma = 0.1$	
Seepage length $L$ (m)	Condition 1	normal	$\sigma = 0.1$	60
	Condition 2			60
	Condition 3			60
	Condition 4			10
	Condition 5			6

©Crown copyright (Defra); (2007)

※ (Defra 2007b) 17 頁より。

中間レベル手法（ILM）によるフラジリティカーブ例（下図）は同一施設の概略レベル手法改良型（HLM+）によるフラジリティカーブ（既出）より勾配が急になっている（不確定性が減少している）。（CG5（劣悪な状態）のものを除く）



©Crown copyright (Defra); (2007)

図-Ⅱ.2.2.4.2 中間レベル手法（ILM）によるフラジリティカーブ例

※（Defra 2007b）18 頁より。

中間レベル手法（ILM）では下記洪水防御施設ごとにフラジリティカーブ導出手法が紹介されている。

- (1) 海岸堤防
- (2) 河川堤防
- (3) アンカー付矢板
- (4) 片持梁式擁壁（アンカーのない壁）
- (5) 石積・コンクリート・蛇籠擁壁
- (6) 小石の浜・丘
- (7) 砂丘

既存堤防の状態調査手法については、PAMS<sup>※注3</sup>プロジェクト（※注3 PAMS=Performance-based Asset Management System）により開発。（同プロジェクトの成果である状態評価マニュアル（CAM2）は内部資料のため web 非公開である（2013 年 1 月現在））

PAMS では下記 3 レベルの状態評価手法を開発。

- ・概略（Superficial 例 状態等級（Conditional grade）1=良好（excellent）～5=劣悪（very poor）への分類）
- ・中間（Intermediate 例 ボーリング調査（Window Sampling））
- ・詳細（Detailed 例 コーン貫入試験（CPT test））

堤防等施設の状態等級（Conditional grade）への分類は状態等級点数（最悪機能特性点数）を計算することによる。（Environment Agency 2009）

### 2.2.4.3 オランダの事例

オランダでは、下記のとおり従来の水位超過頻度に基づく洪水（高潮を含む。以下同様）対策からリスクに基づく洪水対策へ移行するための調査・研究を進めている。

- (1)1960年のデルタ委員会諮問報告書における「安全対策は洪水リスク評価に基づくことが望ましい」との考えを踏まえ、1992年に水防衛技術諮問委員会（TAW）が研究プログラム「洪水リスク：確率と重大さの研究」を開始し、2000年に報告書「超過頻度から洪水確率へ」を完成。
- (2)水防衛法（1996年）による輪中ごとの最低防御レベル（水位超過確率。経済価値と洪水種類により設定）の規定。（上記デルタ委員会報告書では「リスクに基づく設計哲学」を導入したが、洪水確率を定量化することが難しかったため、水位超過確率を定義した）
- (3)2000年の運輸・公共事業・水管理省の政策文書「水と共に生きる、21世紀の水管理政策」（Living with water, water management policy for the 21<sup>st</sup> century）（気候変動と背後地人口増を予想）におけるリスクのより良い理解の主唱。
- (4)上記TAWによる研究のFloris 1プロジェクト（2001～2005年、蘭語でVNK1）、同Floris 2（2006年～、同VNK2）への継続。これらで研究されている手法と従来（現行）の手法との違いは下記の3つである。
  - ①個別堤防から輪中堤全体へ。
  - ②輪中堤の様々な破壊メカニズムの考慮。（現行では越水・越流を破堤の主原因としている）
  - ③決定論から確率論へ。（洪水確率計算時に系統的かつ確認可能な手法により不確実性を前もって考慮。現行手法では不確実性の大部分は最後の段階で追加的安全マージンを付加することにより対応）（Floris 2005、Jongejan, R. B., et al 2011）
- (5)水組合・公共事業省による堤防の維持管理における義務である5年ごとの堤防安全性評価では、多くの場合決定論的データが収集されており、確率的データは収集されていない（同評価は決定論的データのみを必要とするため）。（Hazenoet, E.C., et al. 2008）
- (6)気候変動と経済成長を考慮した2050年時点の輪中ごとの最適洪水防御レベルの実現について2011年3月に分析を完了し、輪中ごとの経済的に最適な洪水防御レベルと、これを2050年に実現するために必要な（堤防の補強に要する）総投資額を明らかにした。
- (7)水法規定の洪水に対する安全率を2017年に改定の見込み。（Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism et al. 2011）

上記のうち、特に参考となるのはフロリス（Floris=Flood Risks and Safety in the Netherlands）プロジェクトであり、同プロジェクトにはこれまでに1期（Floris 1）と2期（Floris 2）とがある。各概要は次のとおりである。

- Floris1（蘭語 VNK1）プロジェクト（2001～2005年）：運輸・公共事業・水管理大臣からの要請に基づきオランダ公共事業庁（Rijkswaterstaat）の道路・水理工学研究所が水組合・県との密接な協力の下に実施。オランダにおける洪水の影響の重大さと可能性についての理解を得ることを目的とする。代表的な16の輪中の洪水確率について各計算（輪中堤内で比較的弱い部分を見つけるのに利用可能（レベル1））するとともに、3つの輪中で人的・経済被害について詳細な計算を実施（他の輪中との比較に利用可能（レベル2））。ただし、いずれの計算結果も相対値に過ぎず、更に研究を進めより堅固な計算結果を与えるレベル3に進む必要がある。多くの輪中堤においてパイピングが最も大きな脅威であるとした（1950年代のデルタ委員会では極端に高い水位が洪水における最も大きな脅威としていた）。なお、パイピングの大きな可能性には恐らく水防衛施設基礎下の地盤の不確実性の影響が一部ある。更なる現地調査により実際に比較的弱い箇所があるのかどうか明らかになりうる。更なる調査により不確実性が小さくなる場合があり、同調査後、洪水確率は初めて堅固なものになる（Floris 2で調査予定）。また、パイピングを防ぐ水防活動の効果は確率計算上考慮されていない。
- Floris 2（蘭語 VNK2）プロジェクト（2006年～）：公共事業省、水組合、県の3者の代表を含む管理グループがプロジェクトを管理し水管理センターがプロジェクトを実施（Floris 1よりも水組合・

県の役割が増加)。全輪中の洪水生起確率と洪水の影響の重大さの定量化を目的とする(2015年末までに全輪中の詳細なリスク評価を実施予定)。同評価結果はリスク低減の選択肢の評価、新しい安全基準に係る政治論議への情報提供、対策の優先順位付け、不確実性の重要な原因の縮小に向けた調査・研究の方向づけに利用できる。Floris 2プロジェクトの第1フェイズは2007年に終了したが、同フェイズでは下記開発等が完了した。

- ・PC-Ring(後述)のセントラルサーバー方式による利用しやすいインターフェイスの開発。
- ・パイピングメカニズムに関するPC-Ringモデルの改良。
- ・水工構造物の挙動を表現する破壊メカニズムの開発。
- ・洪水生起確率から洪水リスクへの段階的計算ツールの開発。(Hazenoot, E.C., et al. 2008)

上記フロリスプロジェクトにより開発された洪水リスク評価手法の概要は次のとおりである。

## I. 洪水防御システムの信頼性評価手法

### (1)洪水生起確率の算定手順

①洪水防御施設に係るデータの収集、堤防のモデル化。(Floris チームの監督の下地域の水組合・県が実施)：いくつかの破壊メカニズムに係る詳細データの収集・破壊確率計算には大きな労力が掛るため、洪水生起確率の計算を行わない堤防の部分(section。後述(3)参照)、破壊メカニズムの全ては考慮しない同部分がある。

②技術コンサルティング企業によるPC-Ringを用いた洪水生起確率の計算。

③洪水防御施設管理者からの情報の収集・上記計算結果の向上(水組合、同アドバイザー、県、Floris チーム、TAWの専門家によるワークショップでの上記計算結果についての議論)。

※注 直観的に大きな破堤確率が計算された箇所のレビューが2004年に行われた。不確実性が主に堤防の強度に関連する場合、実際よりも大きな破堤確率が計算される場合が多かった。計算された高い破堤確率に洪水防御施設管理者が同意しない場合には当該計算結果は洪水確率の計算時に除外された。(Floris 2005)

### (2)洪水防御施設の種類

主要洪水防御施設(primary water defence)とは、輪中堤地区を(恐らく高い土地と共に)囲むシステムの一部であるか、又は、輪中堤地区の前面に設置された、洪水から防御するための施設(例防潮堰)であり、下記4つに分類される。

- a. 輪中堤地区を(恐らく高い土地と共に)囲む、直接外水から守る主要洪水防御施設。(Florisプロジェクトの対象)
- b. 輪中堤地区の前面に設置され、外部からの水に対抗する主要洪水防御施設(閘門等)。(原則としてFlorisプロジェクトの対象外(理由:上記a.よりも厳しい安全基準が課されており、洪水生起確率への影響が小さいと考えられるため(ただし、マエスラント防潮堰のように背後地への影響が大きい施設はFlorisの対象))
- c. 直接には外部からの水に対抗しない主要洪水防御施設(二つの輪中堤の間の堤防等)。(Florisプロジェクトの対象外(理由:上記a.の施設が破壊した場合のみ水荷重が作用するが当該荷重データが不足しているため)
- d. 上記a.からc.のいずれかに該当するが、国境の外にあるもの。(Florisプロジェクトの対象外(理由:データ不足のため))(Floris 2005)

(3)システムの信頼性評価に当たっては、まず、輪中堤を統計上一様な部分(section。延長は主に200~1,000m。水門等は別扱い)に分割する。

(4)下記主要破壊メカニズムを対象とし、他のメカニズムは定性的に考慮する。

- ①堤防：越水、越流、パイピング、法面不安定、護岸破壊、浸食
- ②水工構造物：越水、越流、非閉鎖、パイピング、構造的破壊（崩壊）
- ③砂丘：浸食

(5)ある破壊メカニズムに係る耐力を上回る荷重が高潮・極端洪水等により生じると当該部分は破壊する。（耐力・荷重は一般に不確定扱い）

(6)下記 3 つの不確実性について考慮。（Floriss 2 プロジェクトでの分析によれば、モデルの不確実性は土質特性、水理境界条件の不確実性に比べ重要性が小さいことが多い。なお、Floriss 2 では難透水性被覆層の存在、数世紀前の水工構造物の基礎の質等の不確実性は考慮できない（感度分析で対応））

- ①自然変動（時間的・空間的）
- ②モデルの不確実性
- ③統計的不確実性

(7)Floriss 2 プロジェクトにおける施設破壊確率の計算は PC-Ring（下記(8)参照）のバージョン 5.3.2 以上により実施（法面の安定計算については MProStab による）。（Jongejan, R. B., et al. 2011）

(8)PC-Ring とは、水防御技術諮問委員会（TAW）（2005 年 7 月 1 日以降は水防御専門技術ネットワーク（ENW））による 1992 年以降の研究により開発された新しい安全性評価手法に基づき、TNO Building and Construction Research が公共事業庁、大学、その他専門技術センターの専門家の協力の下、専門コンサルティング企業とともに開発した、水防御システムの信頼性を解析するソフトウェアである。（Floriss 2005）

(9)PC-Ring では多様な確率手法（FORM（First Order Reliability Method）、SORM（Second Order Reliability Method）、指向的サンプリング、モンテカルロシミュレーション、数値積分）を使用可能である。比較的効率的な FORM 手法が一般に満足すべき結果を与える。

(10)水組合から決定論的データを収集し PC-Ring に必要な確率的データを作成するシステムを Floriss 2 プロジェクトで構築した。

(11)破壊確率の合成

PC-Ring における区間・破壊メカニズムの合成は下記式-II.2.2.4.4 のとおり組合せの考え方にに基づき行われる。

$$P_{12}=P(Z_1<0 \cup Z_2<0)=P(Z_1<0)+P(Z_2<0)-P(Z_1<0 \cap Z_2<0) \quad \dots\dots\dots\text{式-II.2.2.4.4}$$

ここで相関がある場合には  $P(Z_1<0 \cap Z_2<0)$  は  $P(Z_1<0) \cdot P(Z_2<0)$  ではなく、相関を考慮することになる。同相関は下記式-II.2.2.4.5 のとおり Hohenbichler-Rackwitz の手法により考慮される。

$$Z_i=\beta_i+\sum_{k=1}^{\text{全ての}k} \alpha_{ik}u_{ik} \quad \dots\dots\dots\text{式-II.2.2.4.5}$$

ここで、 $\beta_i$  は信頼性指数、 $\alpha_{ik}$  は影響係数、 $Z_i$  は限界関数、 $u_{ik}$  は標準正規分布変数である。（詳細は（Jongejan, R.B., et al. 2011）の 3～4 頁参照）

(12)全国パイピング関連土質データベースの設置

パイピングの確率計算に必要な土質工学データの入手を容易にするため、Floriss 2 プロジェクトで全国データベース「DINO」を設置。（オランダ調査研究所（TNO）に設置）

(13)水防活動

堤防・砂丘の破壊確率算定上水防活動は考慮されていない。特に河川沿いのパイピングについて水防活動が行われているため、Floriss プロジェクトにより算定された破壊確率は過大評価である可能性

がある。

#### (14)同時破堤の影響考慮

他セグメントの破堤による荷重軽減効果について場合分けにより考慮する。

#### (15)洪水防御施設のデータが不十分な場合

区間が「堅固」と分類されたが十分なデータがない区間については破堤確率を 0 と仮定している。十分なデータがなく強さが不明の区間については、不足データが少ない場合には専門家の判断により例えば近傍の区間と同一と仮定し、同不足データが多い場合には当該区間を無視し、リスク計算結果を表示する際に注釈を付けた。

## II. 堤防の信頼性評価手法

### (1)堤防の破壊メカニズム

堤防破壊確率の算定時に下記 4 つの破壊メカニズムを考慮している。

#### ①越流又は越波

基準により堤防天端は設計水位より 0.5m 高く（波による越水を制限するためしばしば 0.5m より更に高く）されているため、本メカニズムが輪中の全浸水確率に与える影響は一般にかなり小さい。限界越水流量  $q_c$ （確率分布）により耐力を設定し破壊確率を算定。同耐力設定時に植生考慮。

#### ②パイピング

被覆層の持ち上げとパイピングの 2 つが生じると破堤と判定。Sellmeijer 公式を適用。必要浸透路長と実際の浸透路長との比較はクリープ係数を用いたブライ（Bligh）の手法による（Floris 1 プロジェクト）。Floris 1 プロジェクトで算定されたパイピング生起確率が直観よりも大きかったため、Floris 2 プロジェクトで改良が図られた。同改良では、①基礎地盤への第 2 層の追加、②人工神経ネットワークによるパイピング計算システム（Mpiping）の開発、③全国土質工学データベース（DINO）の開発、が行われた。

#### ③護岸の破損と堤体の浸食

護岸については次の 3 種類を対象とし、下記のとおり破堤を各判定。

- ・植生：嵐の継続時間により破堤を判定。
- ・石護岸：石張の比重と厚さ、表法面の傾き、波の強さ（以上石張の破損について）、浸食係数、堤体の構造（以上石張破損後の残留強度について）より破堤を判定。
- ・アスファルト護岸：アスファルトの重さ・厚さ、護岸位置、裏法面の傾き（以上圧力超過による破損について）、アスファルト厚さ・傾き、有義波高、護岸下の土質（以上衝撃による破損について）、アスファルト破損後の残留強度より破堤を判定。

#### ④堤内側法面の滑り・ふくれ

下記 2 つの破壊メカニズムがある。

- ・裏法面の浅い滑り（計算ソフト MProstab による計算結果を PC-Ring では利用）
- ・堤内側被覆層の盤ぶくれによる滑り（同 MProlift）

### (2)長さの影響（length effect）の考慮

長さ 0 の堤防（モデル横断面）の破壊確率に対して、長さの影響を考慮した堤防区間の破壊確率は作用外力が支配的な破壊メカニズム（例 越水）では約 2～10 倍、耐力が支配的な破壊メカニズム（例パイピング）ではおよそ 100 倍になるとしている。（Vrijling, J.K., et al. 2011）

長さ L の堤防の破壊確率を算定する際には、下記式-II.2.2.4.6 に示す  $\Delta L$  の長さを相互に独立扱いの堤防要素の長さとし、各堤防要素の破壊確率を統合することにより堤防区間の破壊確率を算定している。なお、 $\Delta L$  の長さの堤防要素内では各変数の相関係数  $\rho$  は 1 と考える。（Vrouwenvelder,

A.C.W.M., et al. 2003)

$$\Delta L = (d_{xi}\sqrt{n})/\beta \quad \dots\dots\dots\text{式-II.2.2.4.6}$$

ここで、  $d_{xi}$  : 相関距離  
 $\beta$  : 信頼性指標

※筆者考察 上記  $\Delta L$  を求める際に当該破壊メカニズムに関係する変数が複数あり、各変数の相関距離  $d_{xi}$  が互いに異なる場合にはどのようにすべきか。最も短い相関距離に基づく  $\Delta L$  を採用すると他の変数の相関係数も 1 となるが、隣接堤防要素との相関係数が一部の変数についてゼロとは言えなくなり、堤防要素が相互に独立との仮定が成立しなくなる。一方、最も長い相関距離に基づく  $\Delta L$  を採用すると一部の相関係数が堤防要素内で 1 とはならないが、隣接堤防要素と相互に独立との仮定は成立する。破堤確率計算結果をにらみながら妥当な  $\Delta L$  を設定しているのではないかと推察される。

(3)堤防部分 (section) 中の空間的変動の影響の考慮

同影響を効率的に考慮するため、破壊確率は最初に有効幅 (effective width。破壊事象が生じる幅のイメージ) について算出され、その後当該部分 (section) 全体へ拡張される。同拡張時には空間相関の影響を下記式-II.2.2.4.7 により考慮する。(時間相関については Ferry-Borges & Castanheta モデルにより考慮) (Jongejan, R.B., et al. 2011)

$$\rho_k(\Delta x) = \rho_{x,k} + (1 - \rho_{x,k})e^{-\Delta x^2/d_{x,k}^2} \quad \dots\dots\dots\text{式-II.2.2.4.7}$$

ここで、  $\rho_k(\Delta x)$  : 次元の相関関数  
 $\Delta x$  : 2 つの断面間の距離  
 $\rho_{x,k}$  : 定数 (  $\rho_k(\Delta x)$  の下限値)  
 $d_{x,k}$  : 相関距離

III. その他施設の信頼性評価手法

(1)砂丘

Jarkus (=毎年沿岸測量結果 (Annual Coastal Measurement)) 断面に基づき、高潮継続時間、波高、水位等 (以上、荷重について)、砂丘断面の向き、粒径 (以上、耐力について) を考慮して砂丘浸食による破壊確率を算定する。

(2)水工構造物

「越波」「非閉鎖」「構造的破壊」の 3 要素を合成し水工構造物が寄与する洪水確率を算定する。(「ポンプ場」「切り通し」「閘門」「トンネル」「パイプライン」「長大施設」の評価手法が作成されている (後 3 者については Floris プロジェクトでは考慮せず (理由: データ不足のため))。なお、取水カルバートの非閉鎖についてはポンプ場で対処可能な流入量であるとともに流速が構造物の不安定化につながらない場合には輪中堤地区の洪水確率算定上考慮していない。

高水時の水工構造物の破壊メカニズムは一般に次の 3 つに分類される。

- ・高さ不足
- ・非閉鎖
- ・強度不足 (閉鎖装置の破損、施設の浸食、パイピング)

Floris 1 プロジェクトでは水位超過頻度のみに基づき破壊確率を決定した (その他要素 (強度、基礎地盤パラメタ等) は決定論的な値とした)。Floris 2 プロジェクトでは Z 関数 (限界状態関数。耐力・作用力パラメタを各確率値により表現) により表される破壊メカニズムを PC-Ring に追加した。

多くの場合水工構造物に関する良質なデータを入手可能であるが、歴史的な水工構造物についてはし

ばしばデータが不十分である。この場合、「過去に確認された強度」(proven strength)を考慮し、専門家の判断により洪水生起確率を見積っている。(Hazenoot, E.C., et al. 2008)

#### IV. 洪水の影響評価手法

(1) 洪水の影響を計算するには浸水の水力学面を理解する必要があるが、これを洪水シナリオにより示す。洪水シナリオとは洪水防御施設が破壊した場合(複数箇所を含む)の一連の結果のことである。代表的洪水シナリオ設定のため、輪中堤を区間(1つ又は複数の部分(section)から成る)に分割する。区間内では厳密な破堤位置と洪水の態様とは無関係とする(オランダでは堤防背後地が比較的lowかつ平らであることから仮定可能。なお、シナリオごとに代表破堤箇所を仮定し、水理荷重条件、破堤進行速度を決定論的に設定(Jonkman, S.N., et al. 2008))。シミュレーション回数低減のため一区間破堤するシナリオのみについてシミュレーションを実施し、複数区間同時破堤については一区間破堤シナリオから概略推定(重複を差引く)。計算時間削減のため、他セグメントの破堤が水理荷重軽減につながらない場合には、生起確率の高い方から50の氾濫シナリオについてのみ(例外を除く)計算。同50以外の氾濫シナリオについては最悪のケース(後述(2)の概略手法参照)を想定。ある事例では同50シナリオの生起確率の合計は99%超であった。

(Jongejan, R.B., et al. 2011)(ただし期待値への影響は小さいが稀な甚大な被害ケースも詳細に評価すべき(Jonkman, S.N., et al. 2008))

(2) シナリオ設定手法には次の「概略手法」と「詳細手法」の2つがある。

○概略手法(global approach): 最悪のケースを単一の被害額により決定する。重要な水力学パラメータ(例 浸水位上昇速度)が不明のため人的被害については確実な値を決定することはできない。本手法では破堤地点を示す必要はないが輪中内を全て浸水させるのに十分な水が流入し、輪中内は堤防等で細分割されておらず、浸水位は各輪中堤の最も低い高さと同じ(傾斜地の浸水深は1m)、傾斜地(例 河川沿いの土地)では輪中堤の最上流端から洪水が発生する、と仮定する。

○詳細手法(detailed approach): 水力学モデル(SOBEK 1D-2D(二次元流計算モデル、WLI Delft Hydraulicsが開発))により洪水態様を計算する。破堤地点及び水理荷重は破壊確率計算結果(PC-Ringによる)に基づく。当該破壊確率計算により堤防・砂丘の部分(section)、水工構造物の各破壊確率を決定できる。当該計算結果に基づき「ScenarioKans」プログラムを用いて破堤箇所の選定が行われる。複数同時破堤の生起可(生起しうるか吟味する)。

(3) 被害算定には「HIS<sup>※注1</sup> Damage and Victim Module」を用いる(※注1 HIS=High water Information System)。被害額算定は下記の3つのカテゴリーについて実施(浸水深と洪水流速に基づく被害関数を設定)。

①直接被害(物質的): 土地・建物の修繕費用等

②直接被害(事業の中断): 事業の中断による損害。

③間接被害: 事業に係る供給・消費に係る浸水区域外への悪影響等。

人的被害算定は下記2段階で実施。

・避難分析。

・地区残存者における人的被害の算定。

(4) 自然的特徴に係る被害については、次の4つの観点から別のHISモジュール(HIS-LNCモジュール)により被害を算定する。(Floris 2005)

①背の高い植生

②植生

③淡水生態系

#### ④歴史的建築物

### 2.2.4.4 上記各国の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法に関する考察

上述の各国の事例より特に印象的な事項を挙げると下記のとおりである。

- (1)米国の事例（2.2.4.1 参照）で選択肢の比較・検討時に施設完成後の残留リスクを算出している。気候変動等により当面の整備水準を上回る外力の発生が懸念される現状において重要な観点と考えられる。
- (2)英国の RASP の事例（2.2.4.2 参照）では、3つのレベルの階層的リスク評価手法が開発されている。不確定性を考慮することが特に有益であると考えられる分野（例 大規模水害時の危機管理対策検討）及び土質データ等の蓄積状況から当面実施可能な分析レベルに基づき、段階的にリスク評価手法の調査・研究を進めていくことが現実的であることを示していると考えられる。
- (3)オランダの事例（2.2.4.3 参照）で「堤防の土質強度の不確定性が大きいと、計算される破堤確率は大きくなるが、現地調査により土質強度の不確定性が小さくなれば、計算される破堤確率は小さくなる場合がある」とされている。これは、堤防等に係る信頼性評価の特徴を表していると考えられ、信頼性評価手法の適用範囲（限界）について正しく認識することが重要であることを示していると考えられる。
- (4)同事例で「破堤確率の計算結果について堤防管理者が同意しない場合には、当該計算結果を洪水リスク計算時に除外する」との記述がある。これは、現在の土質データ蓄積状況等を踏まえた信頼性評価手法の特性・限界を如実に示していると考えられる。
- (5)同事例で堤防を長さ  $\Delta L$  の堤防要素に区分し、各堤防要素の破壊確率から一連の堤防区間の破堤確率を算定しているが、これは堤防の区間長が長いほどどこかで破堤する確率が高まることを定量的に評価する有効な手法の1つと考えられる。ただし、上述のとおり同事例においても堤防の信頼性評価結果は現在のところ相対的なものに過ぎず、また、同評価結果に現場技術者が同意しない場合には当該評価結果を不採用とする程度のものであることから、堤防の長さを定量的かつ適切に反映しうる評価手法の確立にはまだ時間が掛りそうである。
- (6)同事例における「期待値への影響は小さいが稀な甚大な被害ケースも詳細に評価すべき」との指摘は我が国においても重要と考えられる。

### 2.2.5 適応策研究のレビュー

各国の適応策に係る事例の中で特に興味深くかつ我が国の河川行政上参考になると考えられる英国の気候変動因数（2.2.3.1 参照）の基となっている UKCP09（2.2.5.1 参照）及び UKCP09 のデータを用いた研究のうち、河川の洪水流量の変化予測に係るものについて以下に述べる。

#### 2.2.5.1 英国の UKCP09

最初に、UKCP09 の概要を以下に示す。

- (1)UKCP09 の位置づけ：英国政府による 21 世紀中の英国の気候変化予測。UKCIP（UK Climate Impacts Programme。1997 年英国政府設置。これまでに 1998 年及び 2002 年に予測結果を発表）による気候予測の 1 つ。
- (2)とりまとめ機関：気象庁ハドレーセンター（Met Office Hadley Center）
- (3)予測対象期間：21 世紀（7つの期間（重複する 30 年間）ごとの平均値を予測）
- (4)平面分解能：25km
- (5)排出シナリオ：IPCC の排出シナリオから下記 3 つを選定。
  - ・高排出シナリオ（IPCC の A1FI シナリオ）
  - ・中排出シナリオ（同 A1B）

- ・低排出シナリオ（同 B1）

(6)その他

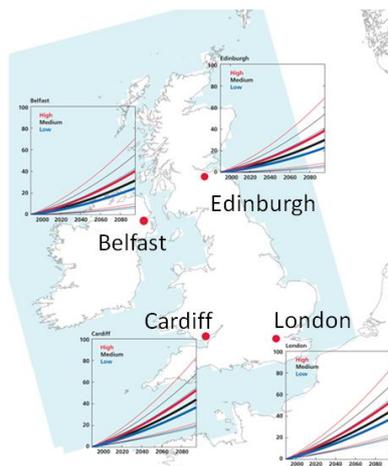
- ①予測結果については、報告書とは別に User Interface により web 上で提供（下表に例示（表中の各地点の位置は下図参照））。
- ②炭素循環（carbon cycle）に係る影響を初めて明示的に含んでいる。
- ③不確実性について初めて定量的に示している。（確率的予測は IPCC では第 4 次報告書で初めて採用）
- ④予測結果は平面的には 25km 格子、16 行政地域、23 河川流域、海岸地域平均で、時間的には月、季節、年平均で提供。

表-Ⅱ.2.2.5.1 10年ごとの地点別相対的海面上昇予測中央値（1990年比 単位：cm）

	London			Cardiff			Edinburgh			Belfast		
	High	Med	Low	High	Med	Low	High	Med	Low	High	Med	Low
2000	3.5	3.0	2.5	3.5	2.9	2.5	2.2	1.6	1.2	2.3	1.7	1.3
2010	7.3	6.2	5.3	7.3	6.2	5.3	4.7	3.5	2.6	4.9	3.8	2.8
2020	11.5	9.7	8.2	11.5	9.7	8.2	7.5	5.7	4.3	7.8	6.0	4.6
2030	16.0	13.5	11.4	15.9	13.4	11.4	10.7	8.2	6.1	11.1	8.6	6.6
2040	20.8	17.5	14.8	20.8	17.5	14.8	14.2	10.9	8.2	14.7	11.4	8.7
2050	25.8	21.8	18.4	25.9	21.8	18.4	18.0	13.9	10.5	18.6	14.5	11.1
2060	31.4	26.3	22.2	31.4	26.3	22.2	22.1	17.1	13.0	22.9	17.8	13.7
2070	37.2	31.2	26.3	37.1	31.1	26.3	26.6	20.6	15.7	27.4	21.4	16.5
2080	43.3	36.3	30.5	43.3	36.2	30.5	31.4	24.4	18.6	32.3	25.3	19.6
2090	49.7	41.6	35.0	49.7	41.6	35.0	36.5	28.4	21.8	37.6	29.4	22.8
2095	53.1	44.4	37.3	53.1	44.4	37.3	39.2	30.5	23.4	40.3	31.6	24.5

©UKCIP; (2010)

※（UKCIP 2010）6頁より。



©UKCIP; (2010)

図-Ⅱ.2.2.5.1 各代表地点の位置及び海面上昇予測

※（UKCIP 2010）5頁の Figure 1.3 の地点名を拡大。

2.2.5.2 英国の河川洪水に係る気候変動因数に関する研究

UKCP09 による降雨及び気温予測結果に基づき今世紀中の河川の洪水流量が予測され、予測中央値から気候変動因数が設定されている。当該洪水流量予測は環境・食料・農村地域省（Department for

Environment Food and Rural Affairs (Defra)) と環境庁 (Environment Agency (EA)) との共同研究プロジェクト「気候変動による洪水への地域別影響」(Regionalised impacts of climate change on flood flows (FD2020)) (以下「FD2020」) により実施されており (Environment Agency 2011)、同研究プロジェクト報告書 (Joint Defra/EA 2009) に基づき以下に概要を述べる。

上記共同研究プロジェクトの主な目的は気候変動に係る 2006 年の指針 (「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」(2.2.3.1 参照)) の適合性を評価することであり、研究の実施者は生態・水文センター (Center for Ecology and Hydrology) であった。

FD2020 によると、これまで行われている気候変動影響分析の大部分は 1 つ又は複数の全球気候モデル (Global Climate Model= GCM) 又は地域気候モデル (Regional Climate Model=RCM) によるシミュレーション結果を用いた「シナリオに基づく」(scenario-led) 分析であるが、この分析手法には主に 2 つの弱点がある。第 1 の弱点は気候変動、流域特性、洪水変化の相互関係の完全なる理解を得ることができないこと、第 2 の弱点は気候モデルによる予測シナリオとは異なる事態が生じた場合に何が起こるかについての知見を得られないことである。このため、新しい予測シナリオが発表されるたびに新たな影響分析を実施する必要が生じる (シナリオに基づく政策は期間限定である)。

上記弱点を乗り越えるため、FD2020 では広範囲の感度分析に基づくとともに、1 つのシナリオに依存しない「シナリオ中立」(scenario-neutral) な検討手法を採用した。本手法では全ブリテン (Britain) の流域に同じ気候変化を与えた場合の各流域の反応について詳細に調べ、当該反応が似ている流域をグループ化 (又は洪水に係る反応型に基づき細分化) した。本検討結果を確かなものにするとともに本検討結果に基づく政策が長期間有効であるように、本検討で設定した気候変化の枠組みには IPCC 第 4 次評価報告書で用いられた GCM 及び UKCP09 の成果を導出するのに用いられた RCM で得られた将来の気候変化に関する現在の知見が含まれている。

なお、本共同研究プロジェクトにおけるモデル化の対象外の流域を含め、本検討手法により明らかとなった流域ごとの洪水反応型 (flood response type) に基づき、気候変化に対する流域ごとの脆弱性が評価可能となっている。

FD2020 により得られた多くの知見のうち特に強調されているのは次の 2 点である。

- a. 流域別分析結果より、上記 2006 年指針 (洪水ピーク流量の一律 20%増) は大部分の流域の洪水の将来変化について安全側であるとは言えない。
- b. 気候変化に対する洪水ピーク流量の観点からの流域の反応は流域特性に影響される。

FD2020 では洪水ピーク流量を予測するために下記水文 (流出) モデルを開発している。

(1)融雪を考慮 (洪水に係る気候変動の影響評価上極めて重要と認識)。

※注 英国では冬の洪水の影響がより大きい。

(2)全ブリテン (Britain) の 154 流域をモデル化。うち 120 流域は集中型モデル (PDM : lumped conceptual hydrological model)、35 流域 (一般に大流域) は準分布型モデル (CLASSIC : semi-distributed hydrological model) でモデル化された (1 流域は両モデルを用いてモデル化された)。

(3)実測流量に基づき上記水文モデルはキャリブレーションされた。

(4)上記水文モデルは時系列の日平均流量を算出するものである。なお、対象流域の大部分において日平均流量の観測値の頻度曲線とシミュレーション値による同曲線とは良く似ていたとのことである。

(5)開発された水文モデルを用いて気候変動に対する流域の反応を詳細に調べるための感度分析を

行うため、気温・潜在的蒸発量の時間分布を変化させるとともに、観測降雨の時間分布に広範囲かつ一定の変化を与える機能を有している。

FD2020 における将来シナリオ及び感度分析の枠組みは次のとおり設定された。

- a. 3つの排出シナリオ（2.2.5.1(5)参照）に基づく17のGCM（IPCCの第4次評価報告書より）による予測結果から月ごとの気候変動因数（現在を基準とした気候変動による月ごとの雨量等の変化（増加）率）を算出した。月ごとの気候変動因数の季節分布型は、「年平均値の変化」「月ごとの増加率の最大値」及び「月ごとの増加率の最大値の発生月」から成る一次元の調和関数により表すことが可能であることが判明した。月ごとの降雨量の増加率のピークはおおむねいつも冬に生じ、気温の増加率については年中いつでもピークが生じた。
- b. 月ごとの降雨量の増加率の最大値の発生月は1月に固定された。これにより、感度分析の枠組みは年平均降雨量の変化率（年40%減少から年60%増加まで）と降雨の季節分布型の変化率（0%から120%まで。同変化率が0%の場合には冬夏の変化率に大差はなく、降雨の季節分布型に変化はない。同値が大きいほど冬期の増加率は夏期の増加率よりも大きくなる（季節性が増加しより湿潤な冬とより乾燥した夏となる））の2軸に簡略化された。上述の調和関数を用いて、全ブリテン（Britain）の現在利用可能な将来気候予測全てを含みうる月平均降雨シナリオを525設定（年平均降雨量及び季節分布型の各5%増を考慮）した。気温については8シナリオが選定され、対応する潜在的蒸発量シナリオについて分析された（降雨、気温、潜在的蒸発散量に関する4,200パターンの変化シナリオを対象として感度分析が行われた）。

上述の枠組みにより、下記のとおり洪水に関する流域別の気候変動に対する脆弱性が分析された。

- (1) 再現期間2、10、20及び50年の洪水ピーク流量の変化率（%）を洪水の変化に関する指標として選定した。
- (2) 上記洪水ピーク流量の流域ごとの変化率は、気候変動に対する流域ごとの反応を代表するものと考えられ、洪水に関する気候変動に対する脆弱性を表すものと考えられた。
- (3) 上記指標に基づく分析により、気候変動に係る洪水に関する154流域ごとの反応特性を9つに分類した（(4)、(5)参照）。
- (4) 上述の9分類は下記5つの主要グループ及びこれらの細区分（(5)参照）から成る。
- ・ 中立的な（Neutral）流域：洪水ピーク流量の増加率が月別降雨量の増加率の最大値に類似している流域。
  - ・ 抑制的な（Damping）流域：降雨の小さな増加率に対する洪水流量の増加率が比較的小さい（比較的粘り強い）流域。
  - ・ 増幅しがちな（Enhancing）流域：降雨の小さな増加率に対する洪水流量の増加率が比較的大きい（比較的脆弱な）流域。
  - ・ 混合（Mixed）的な流域：降雨量の増加率の大きさと降雨の季節分布型により洪水流量の増加率が比較的小さかったり（粘り強かったり）、同比較的大きかったり（脆弱だったり）する流域。
  - ・ 敏感な（Sensitive）流域：降雨のほとんど全ての増加率に対して洪水流量の増加率が比較的大きい（特に脆弱な）流域。
- (5) 上述(3)の9分類は、(4)の5主要グループのうち抑制的な流域及び増幅しがちな流域を各3つに細分したものである。（例 抑制的な→「わずかに抑制的な」（Damped L, Slightly damped）、「非常に抑制的な」（Damped H, Very damped）、「極端に抑制的な」（Damped E, Extremely

damped))

### 2.2.5.3 英国の事例から示唆されること

上述 2.2.5.2 の英国の事例が示唆すると考えられる事項は次のとおりである。まず、同事例における洪水流量の将来変化に係る分析は 17 の気候モデル (GCM) による予測結果に基づいている。我が国の河川の洪水に係る気候変動適応策の検討においても、多くの気候モデルが示す気候変動予測の幅とパターンを踏まえた感度分析レンジの設定というアプローチは参考になる。また同事例では、洪水流量の将来予測において融雪の影響が大きいとし、短期間の豪雨だけでなく気温を含む年間の気象変化パターンに着目し、また比較的大きな流域において準分布型流出モデルを利用している。これは、我が国においても、気候変動の影響・流域特性によっては、また、洪水の、しかもピーク流量が主たるターゲットになる場合ではなく、比較的長期間の流量変動が重要になる場合には、参考になるアプローチと言えそうである。

その上で、2.2.5.2 で指摘されている「気候変動、流域特性、洪水変化の相互関係の完全なる理解を得ること」の重要性、「気候モデルによる予測シナリオとは異なる事態が生じた場合に何が起こるかについての知見を得られないこと」の克服を意識し、流域ごとの洪水反応型 (flood response type) に基づき気候変化に対する流域ごとの脆弱性を評価可能とするという考え方、そして、1つのシナリオに依存しない「シナリオ中立」(scenario-neutral) な検討手法をとるという考え方は、2.1.3 で説明した検討内容、その中でも 2.1.3.3 で説明した 109 水系の類型化の検討 (図-II.2.1.3.27、表-II.2.1.3.1) と共通するところがあって、興味深い。

### 2.2.6 諸外国の適応策検討及び実践から見えてくるポイントと日本の施策との関係についての考察

これまでに調査した諸外国の適応策の事例から見えてくるポイントと我が国の施策との関係については次のとおり。

- (1)気候変動による影響についての定性的議論から脱し、定量的議論を行うための材料を提供するための各国の数々の試みは、我が国にとっても重要であり、見習うべき点が多々ある。
- (2)気候変動による影響については不確実性が避けられないため、当該不確実性を踏まえた適応策を検討・実施することとなるが、例えば英国の「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」(2.2.3.1 参照) に示された将来のピーク洪水流量等に係る複数の変化率の提示 (破堤が生じた場合の被害・影響を踏まえて変化率を選択する) は、不確実性を踏まえた治水計画等の検討において我が国も考慮すべき手法と考えられ、我が国における調査・研究が急がれる。
- (3)水災害対策における土地利用計画の重要性が指摘されて久しいが、例えば英国の「計画政策書第 25 号：開発と洪水リスク」(板垣、吉谷 2012a) 参照) は、洪水リスクを土地利用計画に反映する具体的枠組みの一つを示しているものと考えられ、我が国においても同様の枠組みについて検討が必要と考えられる。
- (4)気候変動による海岸周辺の災害への影響の考慮手法については、例えば米国の「土木事業プログラムに係る海面変化の考慮」(板垣、吉谷 2012a) 参照) に示された平均海水面の上昇予測の考慮手法、英国の「気候変動適応：洪水・海岸浸食リスク管理部局への助言」(既出) に示された上昇量の考慮手法があり、我が国においても同様の調査・研究を進める必要がある。
- (5)気候変動による河川の洪水流量増加については、オランダ政府が 2006 年に「河川空間拡張方針に関する主要国土計画決定」(板垣、吉谷 2012a) 参照) によりライン川支川の安全度をロビス地点の計画流量 16,000m<sup>3</sup>/s に対応するよう 2015 年までに向上させることを明らかにするとともに、着実な洪水対策の推進を図っており、我が国も参考とすべきである。
- (6)気候変動による水資源への影響については、例えば米国の「気候変動に対するメリーランドの脆弱

性低減のための包括戦略 フェイズⅡ：社会・経済・生態系回復力の強化」（（板垣、吉谷 2012a）参照）に、1カ月の無降雨発生頻度など定量的予測・比較のための具体的手法が記述されており、同様の手法により気候変動の我が国の水資源への影響について調査・研究することが考えられる。

(7)米英蘭の防災施設の機能発揮に係る確率分布の考慮手法（2.2.4 参照）は、整備水準を上回る規模の洪水が生じた場合の堤防システムの挙動について予測・分析する際に参考となる手法と考えられる。

## 2.2.7 今後の諸外国の政策モニタリングのあり方について

今後の諸外国の政策モニタリングにおいて留意すべきと考えられる事項は下記のとおりである。

- (1)気候変動適応策に係る調査・研究、政策の検討・実施は次々に変化しており、数年前の情報はその当時の情報に過ぎない。このため、継続的に最新情報を収集・整理・分析しつづけることが重要である。
- (2)インターネットを用いた情報収集は、限られた予算・時間の中で広く薄く海外の状況を概観するには適している（やむを得ない）面があるが、具体的な検討手法の理解等には限界がある。委託業務による海外の情報収集は、特定の目的（例 堤防等の機能発揮に係る確率分布の考慮手法に係る技術基準の収集）に絞った情報収集では最適と考えられる場合があるが、より詳細・具体的な情報を確認するには不十分な場合がある。国総研職員による現地聞き取り調査は、現地での協力が得られるとともに、当該分野における国内の調査・研究経験を積んだ職員が実施すれば効果的であるが、旅費・職員数に限りがある。各調査手法の長所・短所を踏まえ、効果的・効率的な政策モニタリングを進めることが重要である。
- (3)全般的に、各国の関連する事例の原典等を web 上で閲覧することが容易であるように感じられた。我が国においても関連資料の英訳・web 上での提供を進め、海外への情報発信力を高めしていく必要がある。我が国の情報を十分に発信しなくては、海外の技術者・研究者と効果的な議論・情報交換を行うことが難しいのではないだろうか。

## 参考文献

- 板垣修、吉谷純一 2012a : 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,  
<http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf>
- 板垣修、吉谷純一 2012b : 米国陸軍工兵隊による洪水被害のリスク分析手法, 土木技術資料, 54-11, pp.  
28 - 31
- 長倉敏郎 2006 : ベネチア・モーゼ計画とラグーンで実施されている対策事業,  
[http://www.wave.or.jp/outline/doc/vene\\_j.pdf](http://www.wave.or.jp/outline/doc/vene_j.pdf), (2012年11月2日閲覧), pp. 3 - 4, 10, 20, 25, 27
- Central Government, Netherlands 2009 : 2009 – 2015 National Water Plan, pp. 72
- China 2012 : Second National Communication on Climate Change of The People's Republic of  
China, pp. 11 – 14, 46 – 47, 83, 85 – 86, 94 – 95
- Climate Change Commission, Republic of the Philippines 2011 : National Climate Change Action  
Plan 2011 – 2028, pp. 2, 4 – 5, 11 – 14, 16 -19, 69 – 77, 85 – 90
- Cochran, Ian 2009 : Climate Change Vulnerabilities and Adaptation Possibilities for Transport  
Infrastructures in France, pp.10,15
- Davis, D., Beth A. Faber and Jerry R. Stedinger 2008 : Experience in Implementing Risk Analysis  
for Flood Damage Reduction Projects, pp. 5 - 6
- Defra 2007a : Performance and Reliability of Flood and Coastal Defences, FD2318/TR1, pp.92
- Defra 2007b : Performance and Reliability of Flood and Coastal Defences, FD2318/TR2, pp.11
- Department of Water Resources, CA 2009 : California Water Plan Highlights, pp. 12, 14 – 15
- Environment Agency 2009 : delivering benefits through evidence, pp.vii
- Environment Agency 2011 : Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion  
Risk Management Authorities, pp.10 - 11
- Environmental Protection Agency 2008 : National Water Program Strategy: Response to Climate  
Change, pp. i
- Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany  
2009 : Combating Climate Change the German Adaptation Strategy, pp. 16 - 17
- Floris 2005 : Floris study – Full report, pp. 7 - 11, 15, 18, 25 - 26, 29 - 33, 49 - 53, 85
- Giron, E., et al. 2010 : Science for a Sustainable Development, “Towards an Integrated Decision  
Tool for Adaptation Measures – Case Study: Floods “Adapt”, pp.8, 56
- Government of India 2011 : National Water Mission under National Action Plan on Climate  
Change, pp. iii - iv
- Hazenoot, E.C., et al. 2008 : The Floris-2 Project, 4<sup>th</sup> International Symposium on Flood Defence:  
Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, pp. 8-3 – 8-7
- H<sub>2</sub>OLLAND 2012 : Maeslantkering, Hook of Holland, 1991-1995,  
<http://www.h2olland.nl/project.asp?id=259>, viewed on 5 Nov. 2012
- Institution Centro Previsioni e Segnalazioni Maree 2012 : The tide,  
<http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/EN/IDPagina/1753>, viewed on 2  
Nov. 2012
- Interagency Advisory Committee on Water Data 1982 : Guidelines for Determining Flood Flow  
Frequency, Bulletin # 17B
- Interagency Climate Change Adaptation Task Force 2011 : Federal Actions for a Climate Resilient  
Nation, pp. iv, 1, 2

- IPCC 2007 : Climate Change 2007: Synthesis Report, pp. 38, 45
- Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers 2011 : Flood Risk Management Approaches As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States, IWR Report No. 2011-R-08, pp. 6, 9 - 10
- Joint Defra/EA 2009 : Regionalised Impacts of Climate Change on Flood Flows, R&D Technical Report FD2020/TR, pp. ii - iii, 9, 25 - 26, 37, 41
- Jongejan, R.B., et al. 2011 : The VNK2 Project: Detailed, Large-scale Quantitative Flood Risk Analysis for the Netherlands, 5<sup>th</sup> International Conference on Flood Management (ICFM5), pp. 1 - 5, 9, 11
- Jonkman, S.N., et al. 2008 : Flood Risk Assessment in the Netherlands: A Case Study for Dike Ring South Holland, Risk Analysis, Vol. 28, No.5, pp. 1358, 1361, 1366
- KLIWA 2009 : Climate Change in Southern Germany Extent -Consequences – Strategies, pp.18-19
- Maryland Commission on Climate Change 2008 : Comprehensive Assessment of Climate Change Impacts in Maryland, pp. 1
- Maryland Commission on Climate Change 2011 : Comprehensive Strategy for Reducing Maryland's Vulnerability to Climate Change, pp. 2
- Ministry for Infrastructure and Transport, Venice Water Authority, CVN 2012 : SAL.VE activities for the safeguarding of Venice and its lagoon,  
<http://www.salve.it/uk/domande/f-domande.htm>, viewed on 10<sup>th</sup> Oct. 2012
- Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing 2011 : French National Climate Change Impact Adaptation Plan 2011-2015, pp. 30, ANNEXE II pp. 28
- Ministry of Environment & Forests, Government of India 2012 : Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. i -XVI,95 – 110, 141, 152
- Ministry of Environment, Republic of Indonesia 2010 : Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change, pp.ix - x viii, iv – 1 - iv – 9, iv – 19 - iv-30
- Ministry of Environment, Sweden 2009 : Sweden's Fifth National Communication on Climate Change, pp.80-81
- Ministry of Infrastructure and the Environment ,and the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation 2012 : Delta Programme 2013, pp. 11 - 13, 18, 21-24, 46, 50, 52
- Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment 2010 : The 2011 Delta Programme Working on the delta, pp. 26, 55
- MISTRA SWECIA 2012 : Annual report 2011, pp.10-11
- National Climate Commission 2010 : Belgian National Climate Change Adaptation Strategy, pp.14-15
- Philippines 1999 : The Philippines' Initial National Communication on Climate Change, pp. x i - x iv, 44 – 45, 71 - 72
- Prime Minister's Council on Climate Change, Government of India 2008 : National Action Plan on Climate Change, pp. 2 - 6

- Republic of Indonesia 2007 : National Action Plan Addressing Climate Change, pp.iii - iv , 59 – 63, 93
- Rijkswaterstaat 2012 : Maeslantkering,  
[http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten\\_en\\_cijfers/dijken\\_en\\_keringen/europoortkering/maeslantkering/index.aspx](http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/dijken_en_keringen/europoortkering/maeslantkering/index.aspx), viewed on 1 Nov. 2012
- RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Netherlands 2004 : A quick scan of spatial measures and instruments for flood risk reduction in selected EU countries, pp. 32- 33, 38, 47, 49, 53, 55, 57, 60, 104 – 106
- ruimte voor de rivier 2012 : Safety for four million people in the Dutch delta Room for the River, pp. 2
- Sir Stern, N., et al. 2006 : Stern Review: The Economics of Climate Change, pp. i - ii , vi -ix ,
- Sir Stern, N., et al. 2006 : Stern Review: The Economics of Climate Change Executive Summary, pp. i - x iv , x vi - x xvii
- Swedish Commission on Climate and Vulnerability 2007 : Sweden facing climate change, pp. 144
- The LAWPhiL Project 2013 : Republic Act No.9729,  
[http://www.lawphil.net/statutes/repacts/ra2009/ra\\_9729\\_2009.html](http://www.lawphil.net/statutes/repacts/ra2009/ra_9729_2009.html), viewed on 31 Jan. 2013
- The Republic of Korea 2011 : Korea's Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change, pp. 99 - 120
- UKCIP 2010 : UKCIP09 sea level change estimates, pp. 3, 6
- USACE 1986 : Engineering and Design Overtopping of Flood Control Levees and Floodwalls, ETL1110-2-299
- USACE 1993 : Reliability Assessment of Existing Levees for Benefit Determination, ETL1110-2-328, pp. 3
- USACE 1996 : Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies, EM1110-2-1619
- USACE 2011 : Sea-Level Change Considerations for Civil Works Programs, EC 1165-2-212, pp. 2
- Van Alphen, J., Ron Passchier and Victor Jetten, RWS-RIKZ National Institute for Coastal and Marine Management, Netherlands 2007 : Atlas of Flood Maps, pp. 4 - 100
- Vrijling, J.K., et al. 2011 : Safety Standards of Flood Defenses, Keynote, International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, pp. 15
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., et al. 2003: Theoriehandleiding PC-RING Deel C: Rekentechnieken, pp. 7, 30