

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 は以下のように、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こと、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	ROM20 (地球温暖化予測情報 第6版)	MRI-CORM (地球温暖化予測情報 第7版)	ROM5_ROM2	ROM5_ROM2	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	CGSR, NIES, FROGC	CGSR, NIES, FROGC	CGSR, NIES, FROGC	CGSR, NIES, FROGC
発行年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	2006年	1979年-2003年 2015年-2039年 2075年-2099年	2006年	1981~2000年 2031~2050年 2081~2100年 (寒戦期ののみ)	2006年	1990~1999年 2026~2035年 2086~2095年 (夏季のみ)	2011年 1979~2003年 2031~2050年 2075~2099年 (夏季のみ)	2004年 1900~2000年 2001~2100年	2004年 1900~2000年 2001~2100年	2010年 1980~1999年 2030~2049年 2080~2099年	2011年 1980~1999年 2030~2049年 2080~2099年
計算対象期間												
モデル 種別	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	大気海洋結合モデル 地域気候モデル	大気海洋結合モデル 地域気候モデル	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	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	約280km	約20km	約20km/約90km	約20km/約90km	RCM5:5km RCM2:2km	RCM5:5km RCM2:2km	RCM5:5km RCM2:2km	RCM5:5km RCM2:2km	約300km	約110km	約80km	約150km
海洋	30層	60層	60層	64層					20層	56層	56層	40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	気温、降水量、日最高 気温、日最低気温、風 向風速、蒸発量など	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48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48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	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	地上気温、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	A1B/B1	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模 試実験が多数有	IPCC-AR5向け	IPCC-AR5向け	気候期のみしかない ため、あまり実験がない	気候期のみしかない ため、あまり実験がない	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
参考文献	Yukimoto, S. and A. Noda (2002) Yukimoto et al. (JMA)2006	Mizuta et al. (JMSJ); Kusunoki et al. (JMSJ); 和田ほか(水・文・水資 源:2008)	気象研究所技術報告 第64号(2011) Mizuta et al. (2011)	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/mo del_documentation/MRI- CGCM2.3.2.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 測プログラム ■ 海洋・海水部分は、 MRI-COM4から計算 ■ MRI-AGCM3.1Sで 使用しているスキーム が異なる	21世紀気候変動予 測プログラム ■ 所謂、気候統一 ナリオ第2版 ■ MRI-CGCM2.0の結 果を換算条件としてタ ウンステーション ■ 一般的に用いられ ている	寒戦期のみしかない ■ 寒戦期のみしかない ■ 寒戦期のみしかない	21世紀気候変動予 測プログラム ■ MRI-AGCM3.1Sを 8km/2kmにネスティン グしたモデル ■ RCM2は、暖られた 領域しかない(仙台以 南)	21世紀気候変動予 測プログラム ■ MRI-AGCM3.2Sを 8km/2kmにネスティン グしたモデル ■ RCM2は、暖られた 領域しかない(仙台以 南)	21世紀気候変動予 測プログラム ■ MRI-AGCM3.2Sを 8km/2kmにネスティン グしたモデル ■ RCM2は、暖られた 領域しかない(仙台以 南)	http://www- pcmdi.llnl.gov/ipcc/mo del_documentation/MIR OC3.2_hires.htm	http://www- pcmdi.llnl.gov/ipcc/mo del_documentation/MIR OC3.2_hires.htm	http://www- pcmdi.llnl.gov/ipcc/mo del_documentation/MIR OC3.2_hires.htm	http://www- pcmdi.llnl.gov/ipcc/mo del_documentation/MIR OC3.2_hires.htm
データ入手の 可能性	入手不可	入手可能 (OAS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ですが、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	Germany	ECHO-G	3.75°	○	○
Meteorological Research Institute of KMA	Korea				
Model and Data Groupe at MPI-M	Germany				
Institute 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

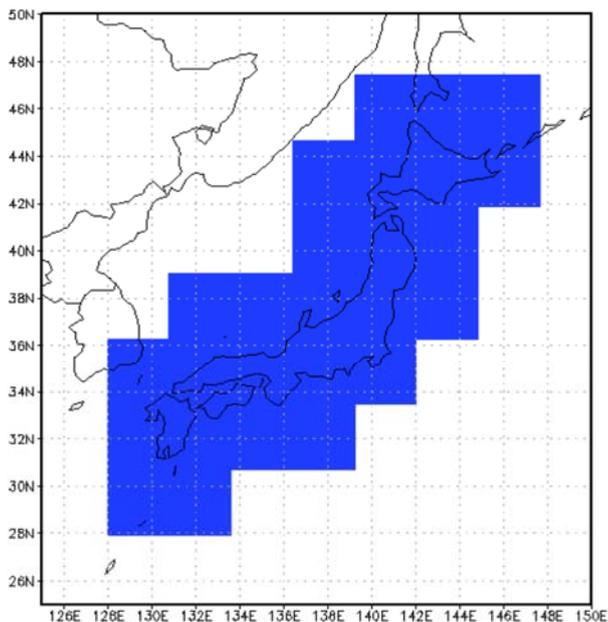


図-Ⅱ.1.4.1.1 設定した日本周辺領域の例
(気象研究所 CGCM2.3.2)

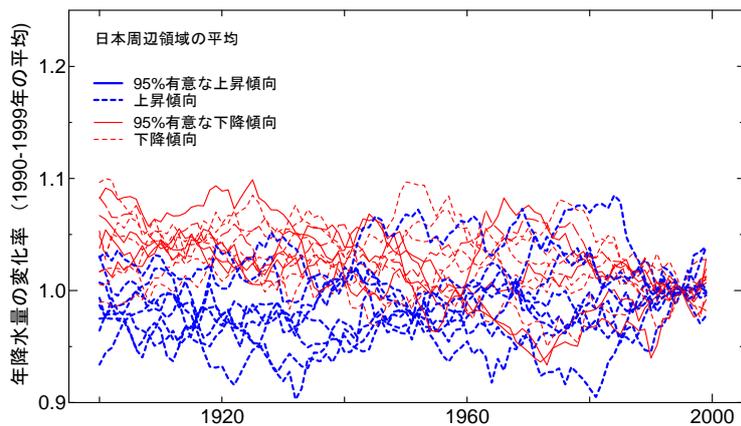


図-Ⅱ.1.4.1.2 日本周辺年平均降水量の時系列変化：1900～1999年
(IPCC第4次報告で採用された19の気候モデルの計算結果)

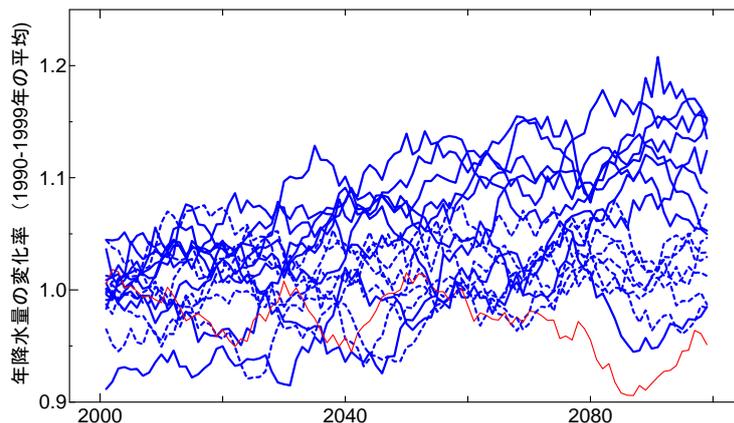


図-Ⅱ.1.4.1.3 日本周辺年平均降水量の時系列変化：2000～2099年
(IPCC第4次報告で採用された17の気候モデルの計算結果)

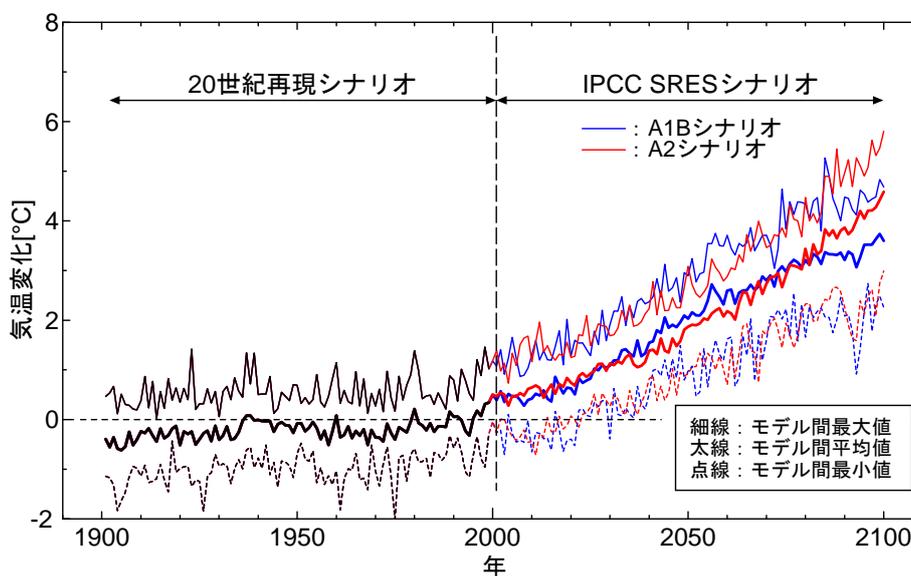


図-Ⅱ.1.4.1.4 日本周辺年平均の気温変化

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。

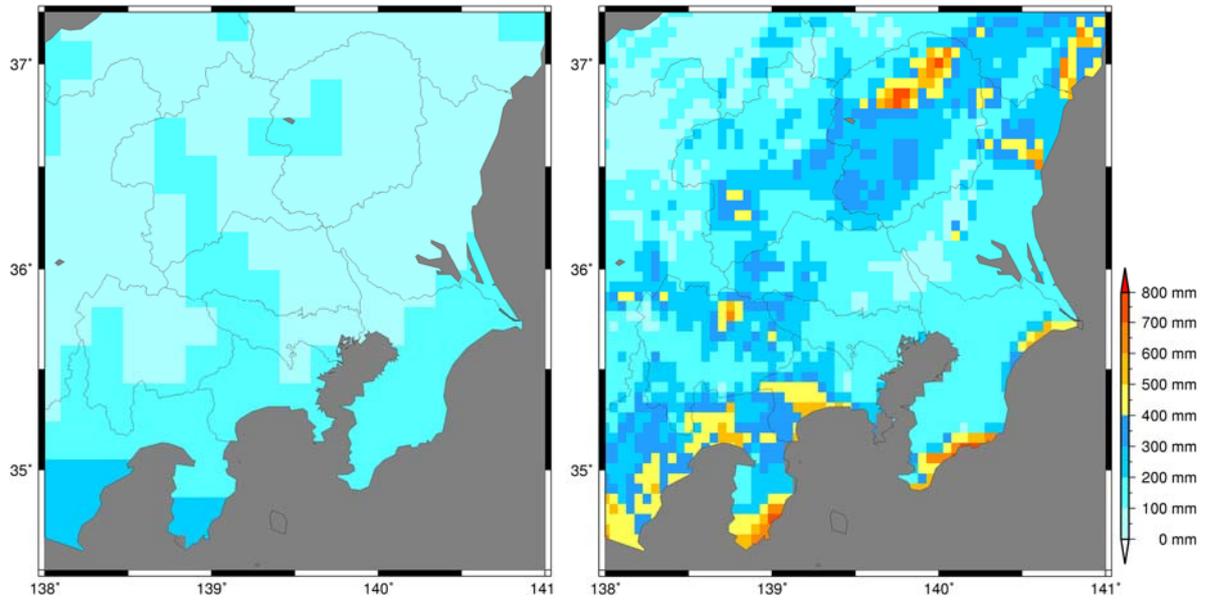


図-Ⅱ.1.4.2.1 GCM20(左)とRCM5(右)による降水量分布の比較
(2095年における72時間最大雨量の空間分布)

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。

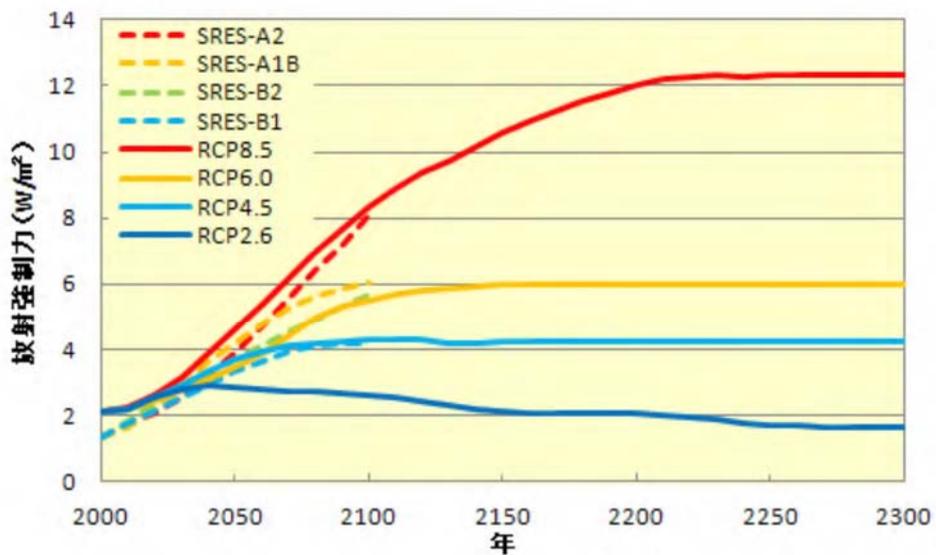


図-Ⅱ.1.5.1.1 SRESシナリオとRCPシナリオの放射強制力の比較

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

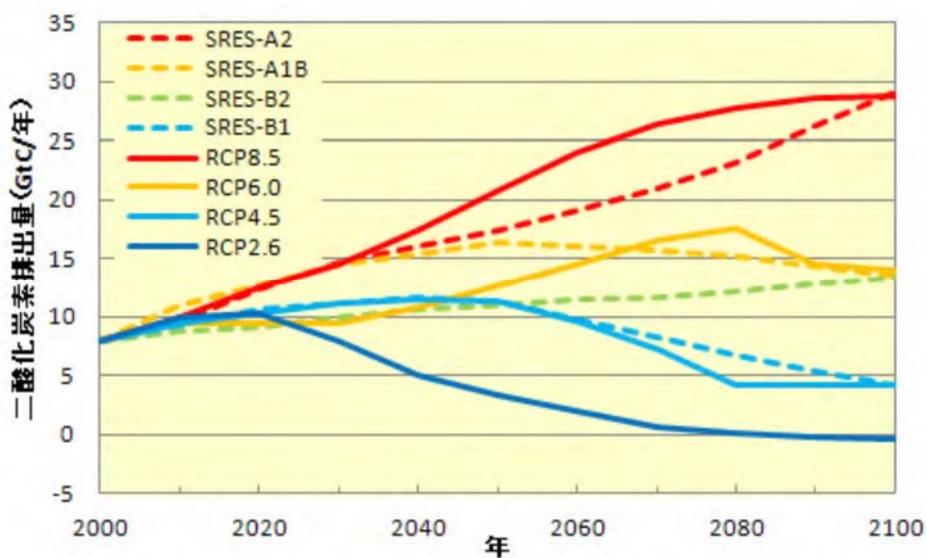


図-Ⅱ.1.5.1.2 SRESシナリオとRCPシナリオの二酸化炭素排出量の比較

(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。

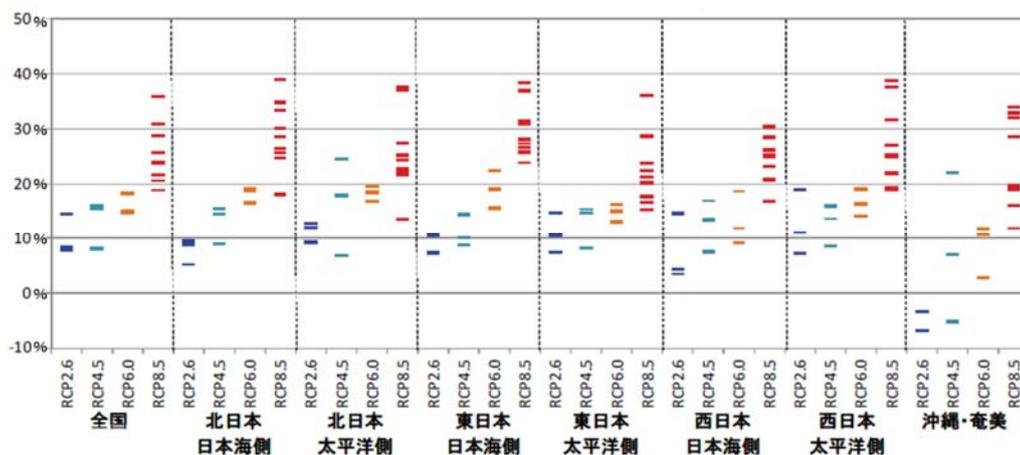


図-II.1.5.2.1 上位5%の降水イベントによる日降水量の変化

(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。

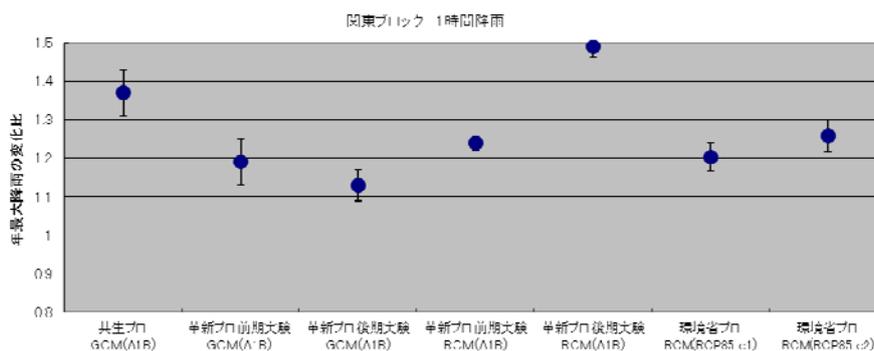


図-Ⅱ.1.5.2.2 関東ブロック 1時間雨量の豪雨変化倍率

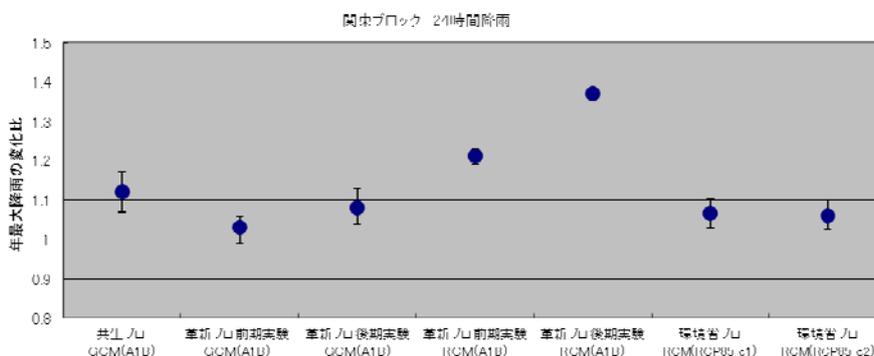


図-Ⅱ.1.5.2.3 関東ブロック 24時間雨量の豪雨変化倍率

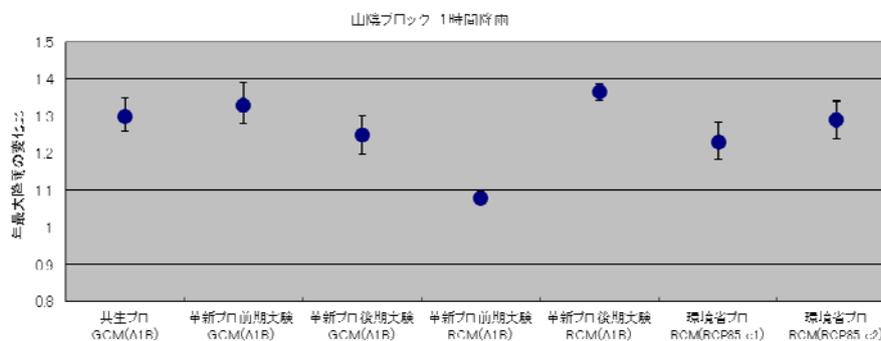


図-Ⅱ.1.5.2.4 山陰ブロック 1時間雨量の豪雨変化倍率

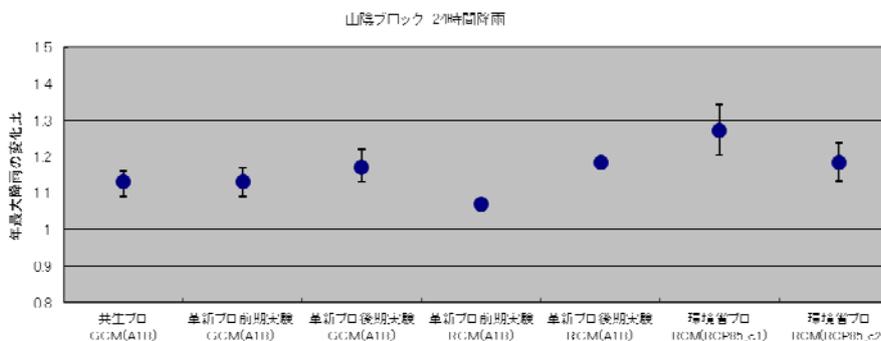


図-Ⅱ.1.5.2.5 山陰ブロック 1時間雨量の豪雨変化倍率

2. 治水施策の視点から見た気候変動影響

一 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/siryoutnn/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		-		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。

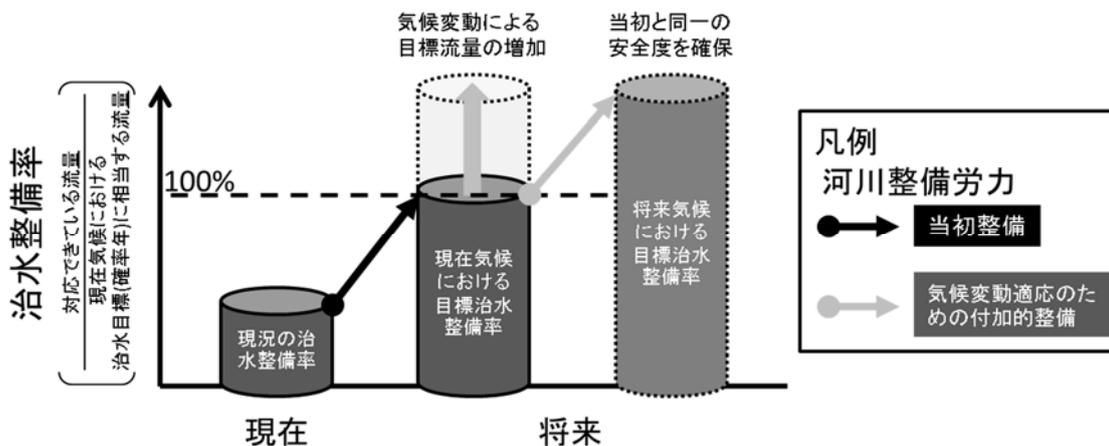


図-Ⅱ.2.1.2 河川整備労力の概念図

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、それに伴っ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」を実施する必要性が生じる。

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。

気候変動適応のための
必要整備労力の増大率

$$\frac{\left(\begin{array}{c} \text{当初整備} + \\ \text{付加的整備} \end{array} \right)}{\text{当初整備}}$$

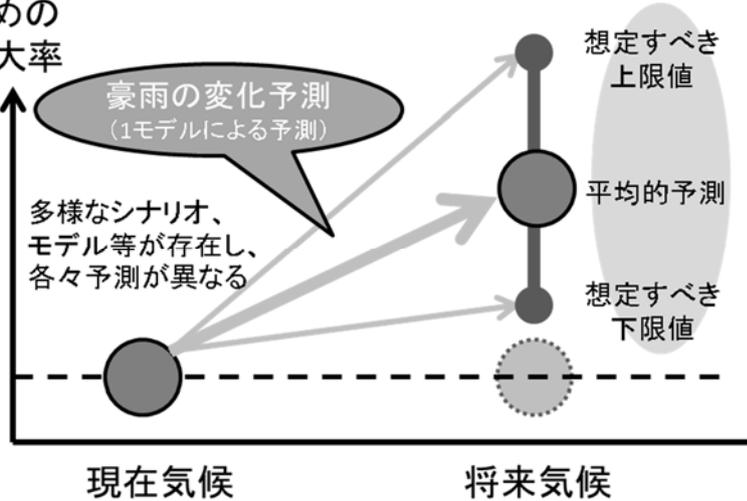
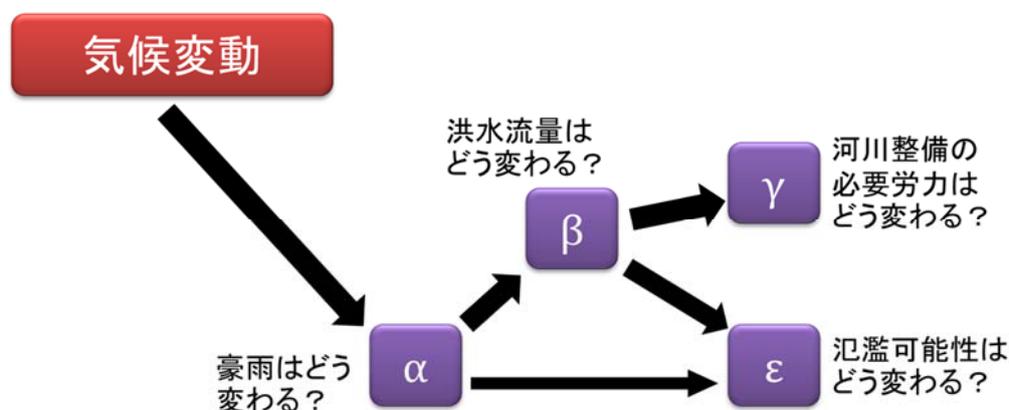


図- II . 2 . 1 . 3 整備労力増大率を用いた気候変動の影響把握

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
計画のハイトグラフ	・基本高水、計画高水決定に用いた”実績”ハイトグラフ(洪水波形、時間分布) ・引き延ばし等をやっていたら、引き延ばし後のハイトについても記載
流出解析関係 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。

$$W = \int_0^L B \cdot f(H_P - H_{HWL}) dx \quad \text{式-II.2.1.1}$$

ここで、 B は水位 $H_P \sim H_{HWL}$ 間の平均川幅、 $f(z)$ は $z > 0$ の場合 $f(z) = z$ 、 $z \leq 0$ 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。

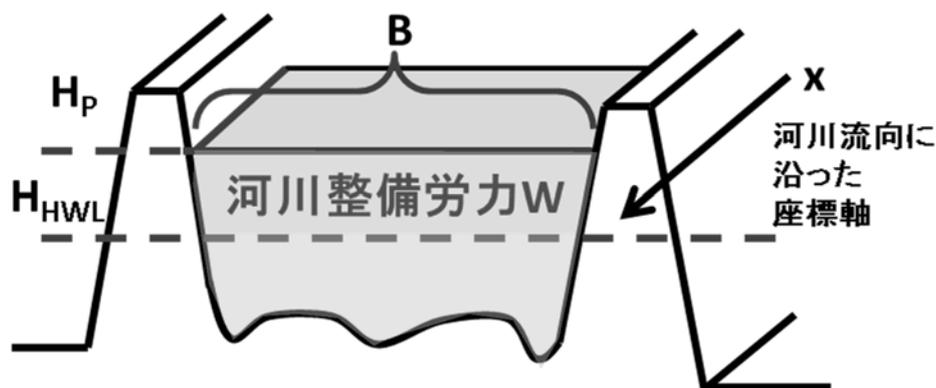


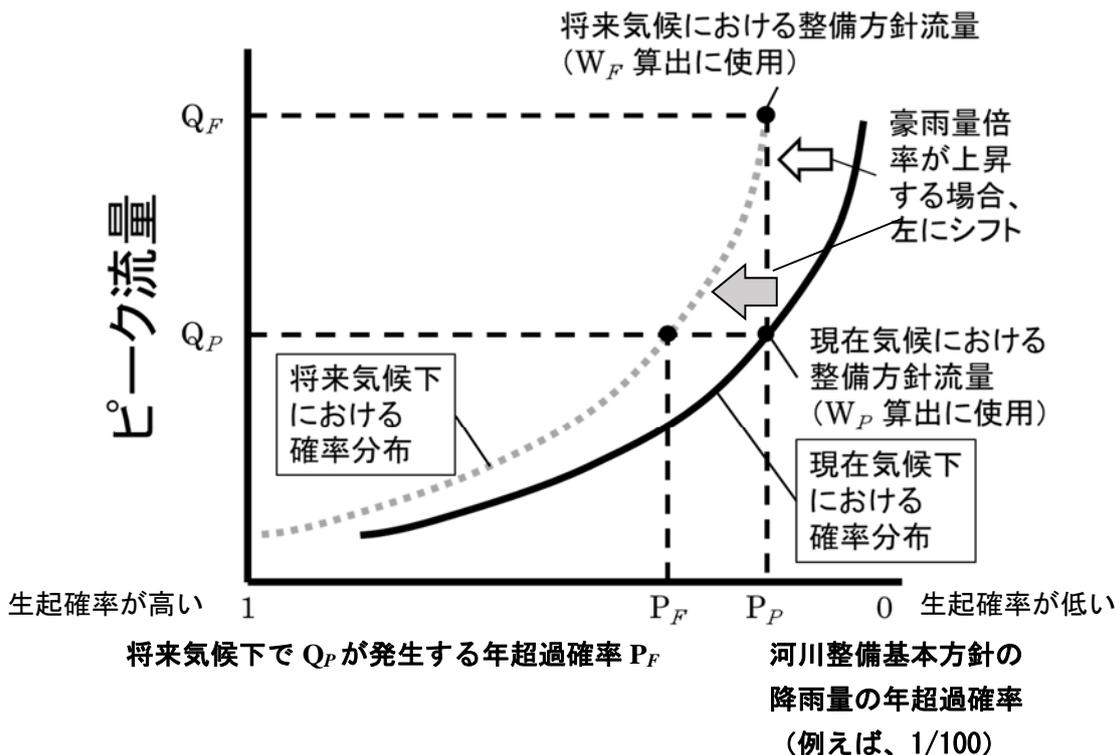
図-II.2.1.5 河川整備労力の定義

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。



降雨の年超過確率

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・東路北・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。

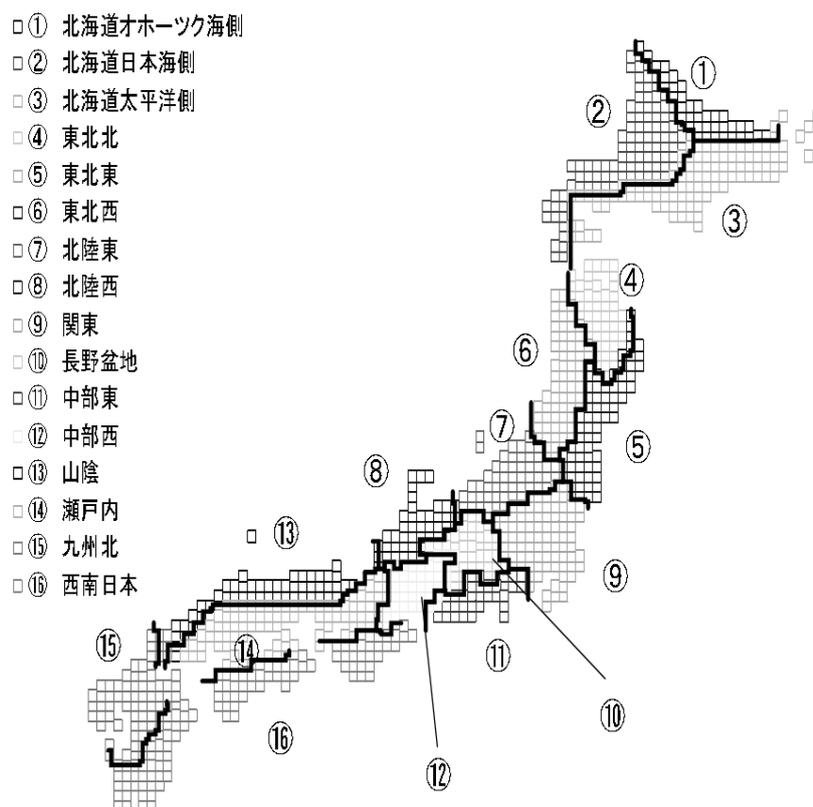


図-Ⅱ.2.1.7 日本全国16地域分割図

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。

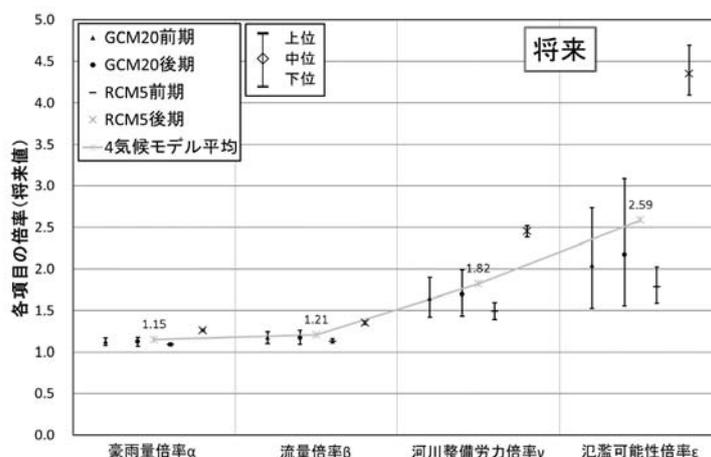
以上の手法により算出した雨量倍率 α 、ピーク流量倍率 β 、河川整備労力倍率 γ 、氾濫可能性倍率 ε の4つの指標の関係を次節において整理し、 α の増加に応じた β 、 γ 、 ε の増幅傾向を考察する。なお、上記指標を算出する際には気候予測モデルを使用するが、各モデルの降雨量の予測値に信頼性の「幅」があり、その幅は評価指標へ増幅して伝播するため、指標別に予測の幅も算定している。ここでは、予測降雨量の95%信頼区間にあたる上位値と下位値を予測の「幅」としている。

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 $\alpha-1$ 、 $\beta-1$ 、 $\gamma-1$ 、 $\epsilon-1$ で表し、 $\alpha-1$ の増加に対する $\beta-1$ 、 $\gamma-1$ 、 $\epsilon-1$ 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。

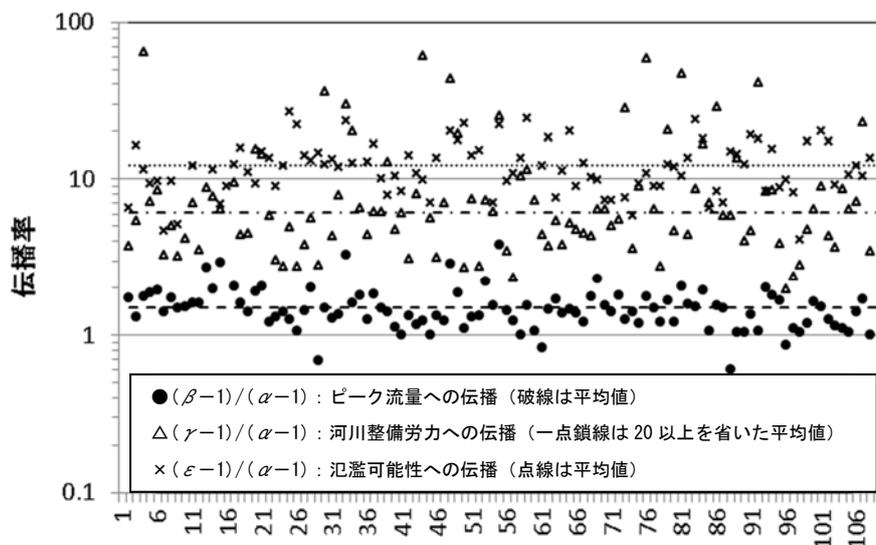


図-Ⅱ.2.1.9 雨量倍率変化が流量・河川整備労力・氾濫可能性の変化へ与える影響 (将来)
(各水系についての 4 気候モデルの中位値の平均値から算出)

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、 α 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)

			$(\varepsilon-1)/(\alpha-1)$				確率規模別降雨データなく、不計算
			上位50%		下位50%		
			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、 X 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—to、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。

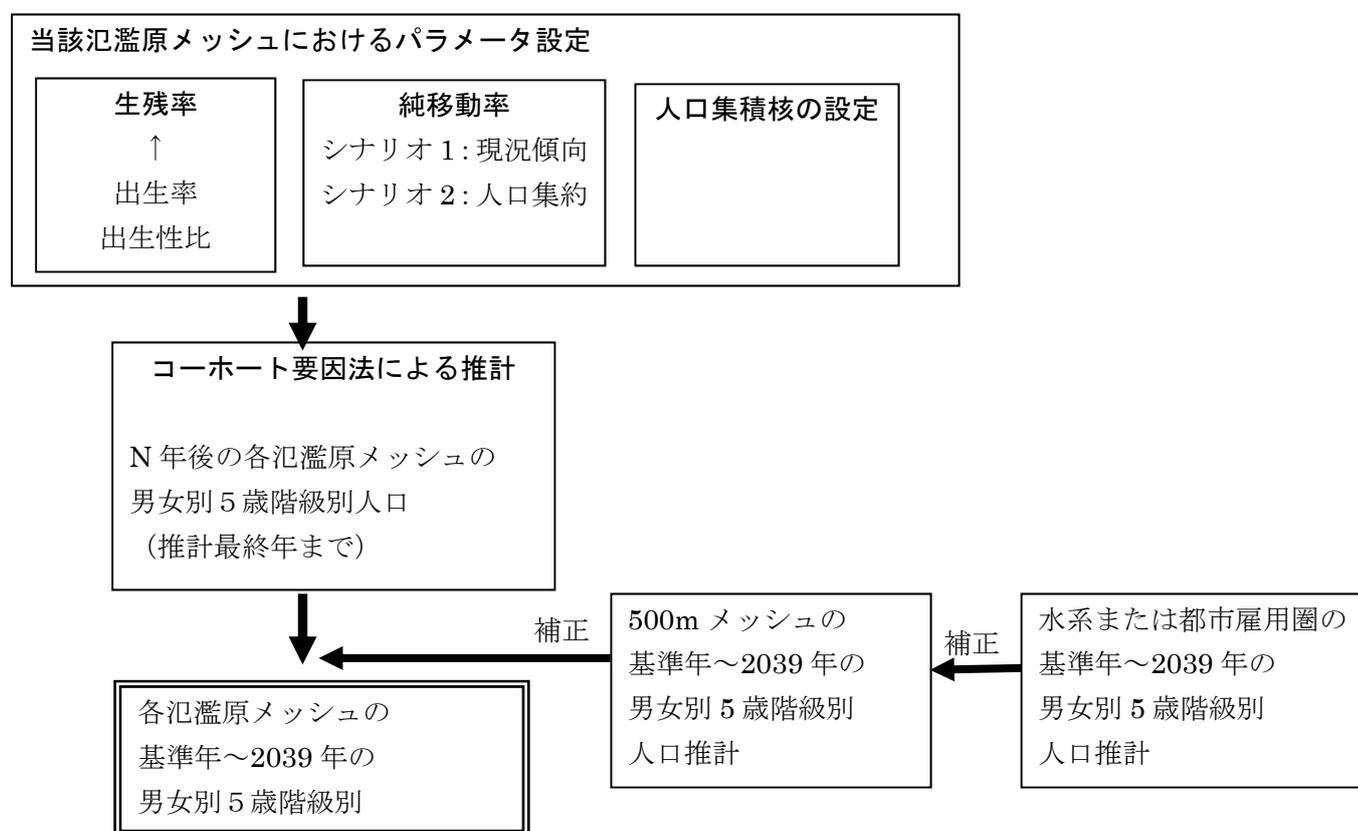


図-II.2.2.1 人口分布シナリオ設定の流れ

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。

$$t+1 \text{ 年時点の年齢 (5 歳階級) 別人口} = t \text{ 年時点年齢 (5 歳階級) 別人口} \times (\text{生残率} + \text{純移動率})$$

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。

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

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。

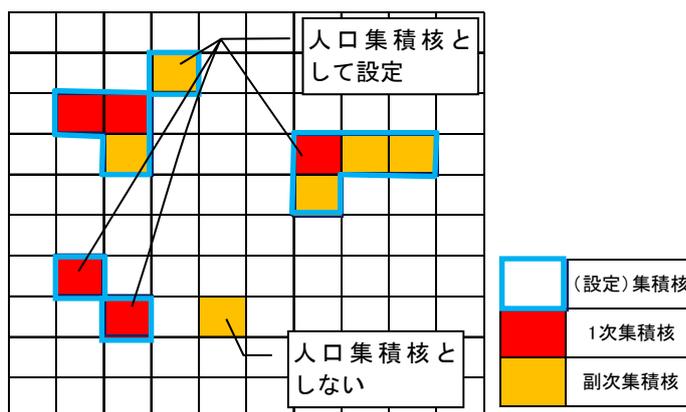


図-Ⅱ.2.2.2 人口集積核の設定

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。

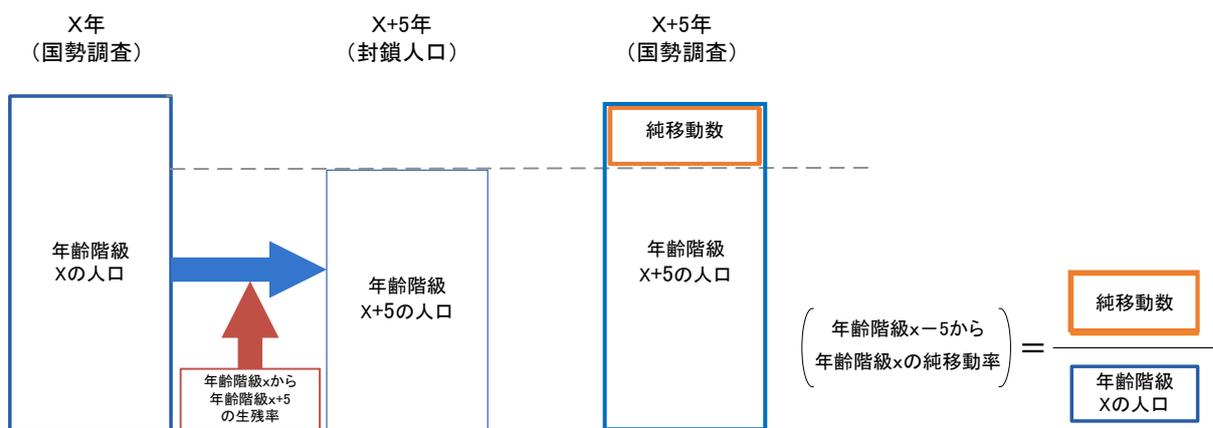


図-Ⅱ.2.2.3 純移動率設定のイメージ

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。

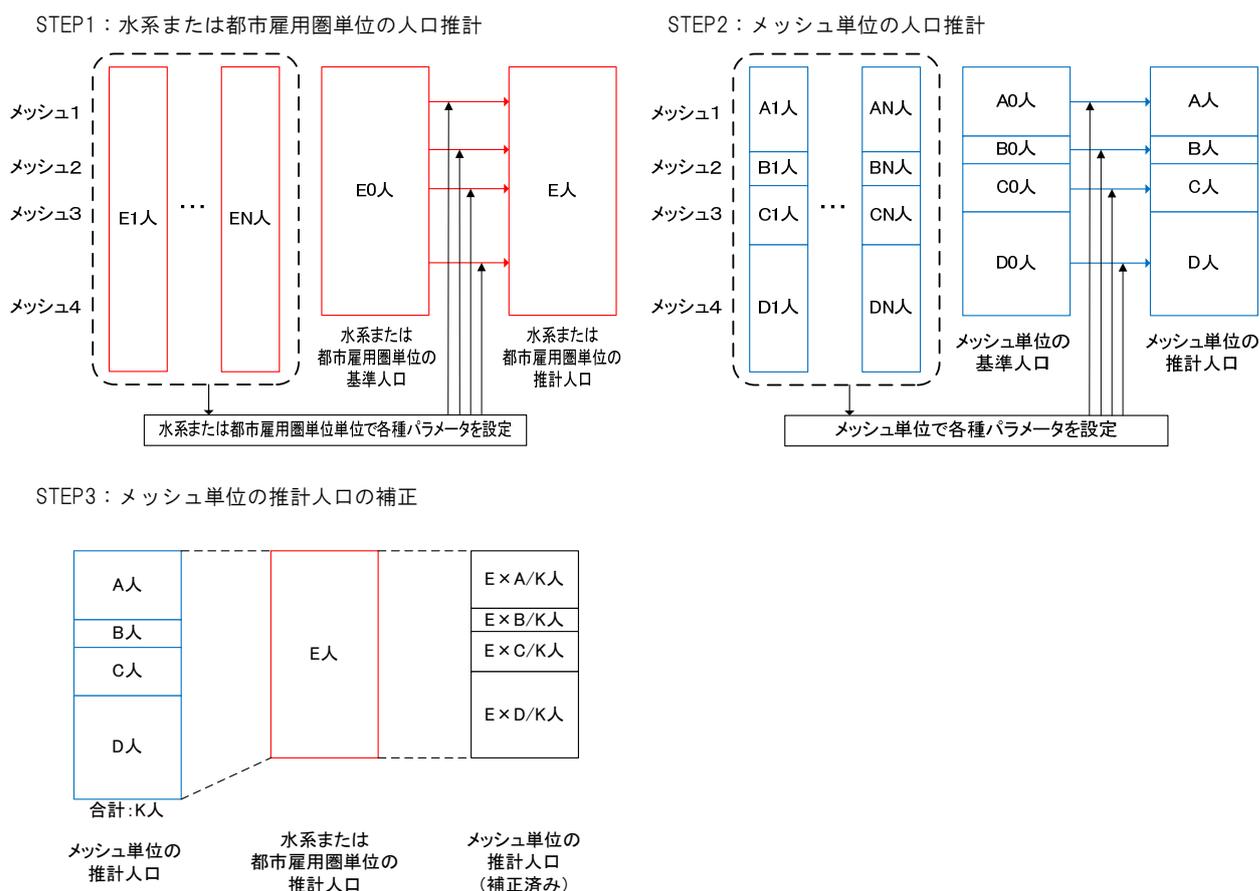


図-Ⅱ.2.2.4 推計人口の補正の流れ (広域ブロック→500m メッシュの場合)

(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小さくなく、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。

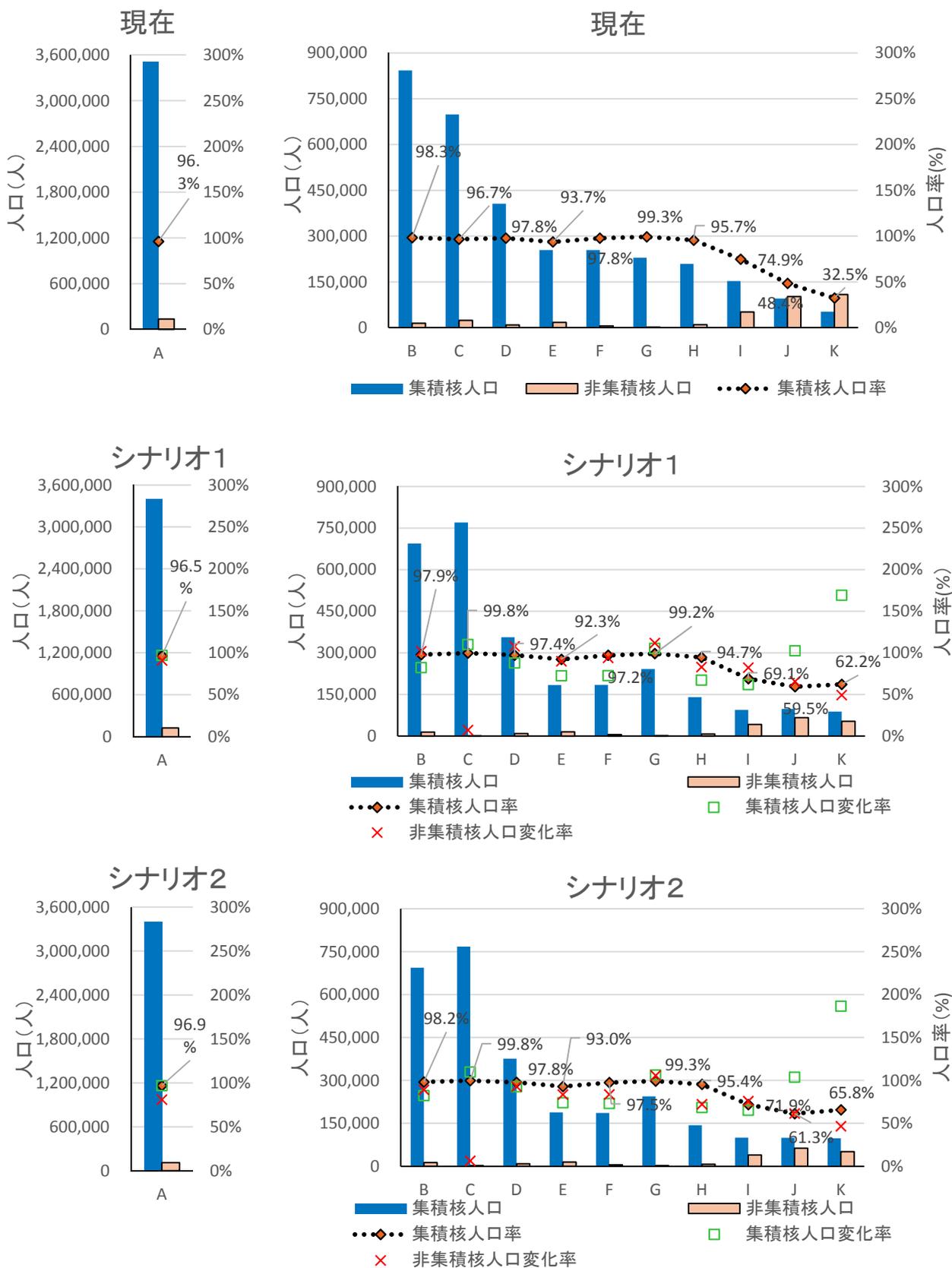


図-Ⅱ.2.2.5 人口分布の設定結果 (河川 A~K)

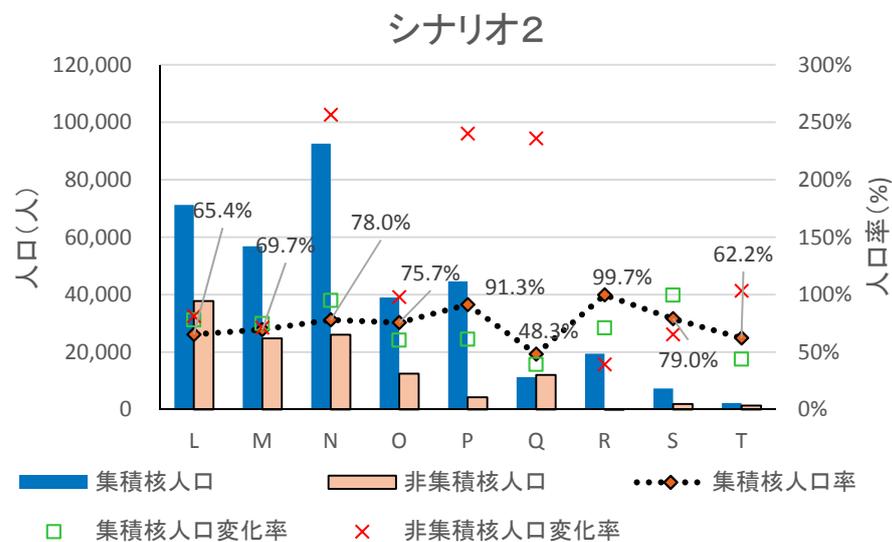
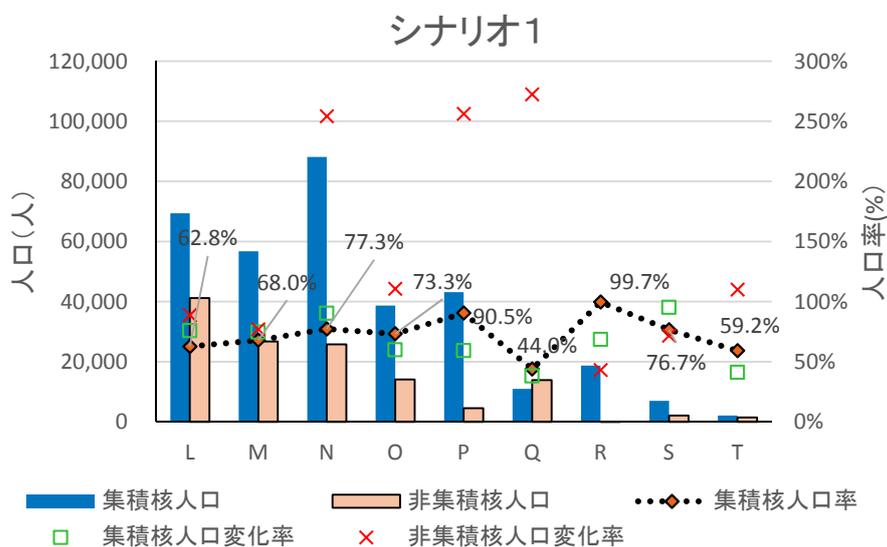
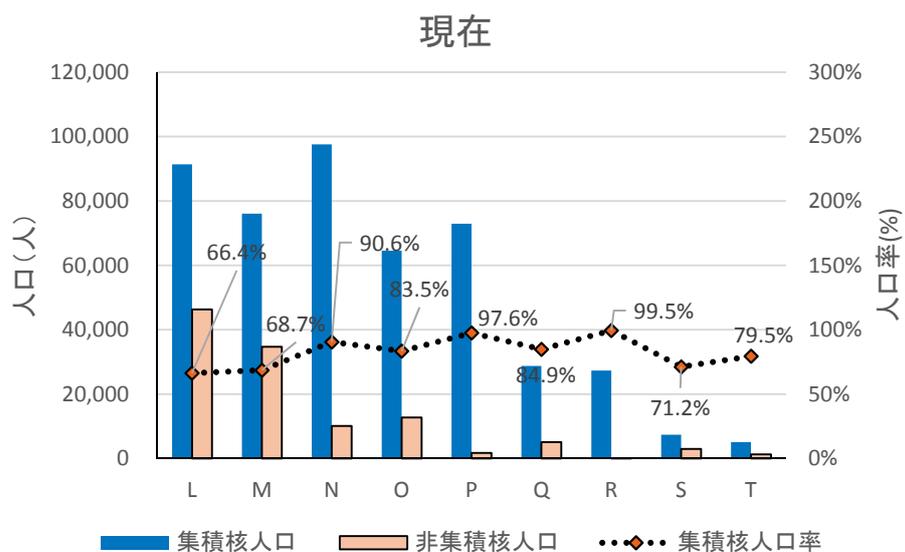


図-Ⅱ.2.2.6 人口分布の設定結果 (河川L~T)

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。

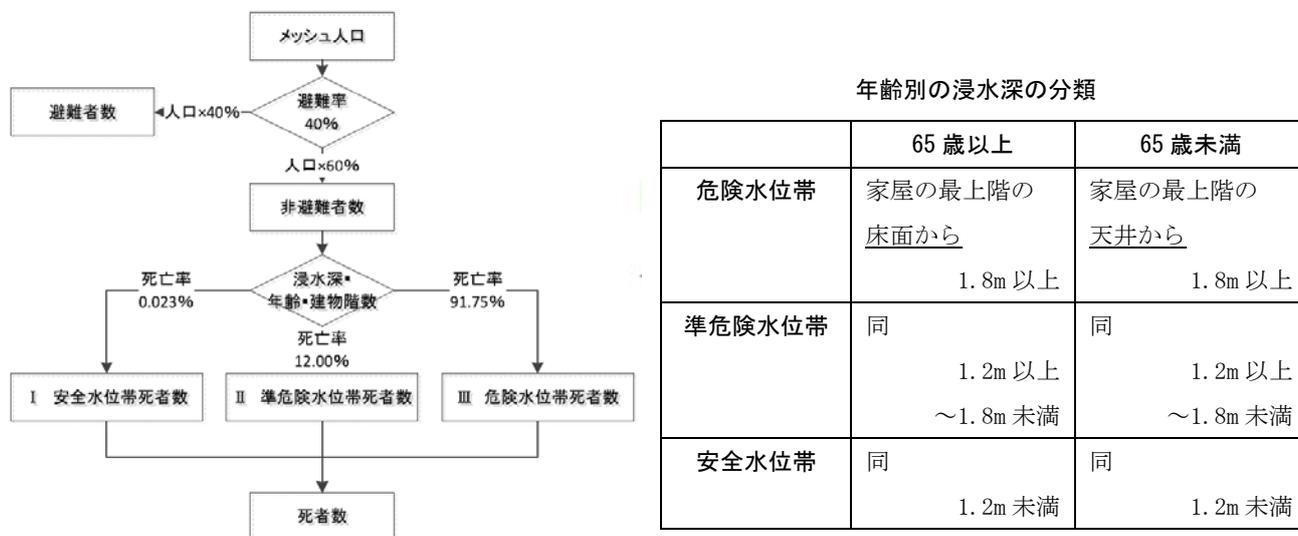


図-II.2.2.7 LIFESim モデルを参考にした死者数算定方法

(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%)	—
【類型2】	増加	増加	減少	減少	—	C(92.3%)
【類型3】	増加	減少	増加	増加	—	N(56.2%)
【類型4】	減少	増加	減少	減少	—	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、どちらかというとも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ます。

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。

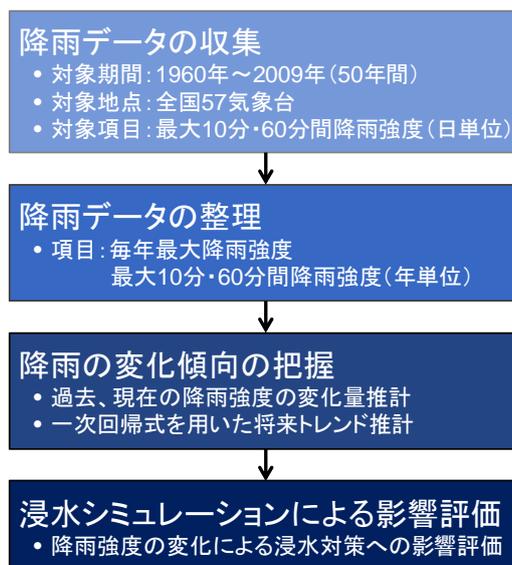


図-Ⅱ. 3. 1 検討フロー

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

管区等	観測所					
	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			

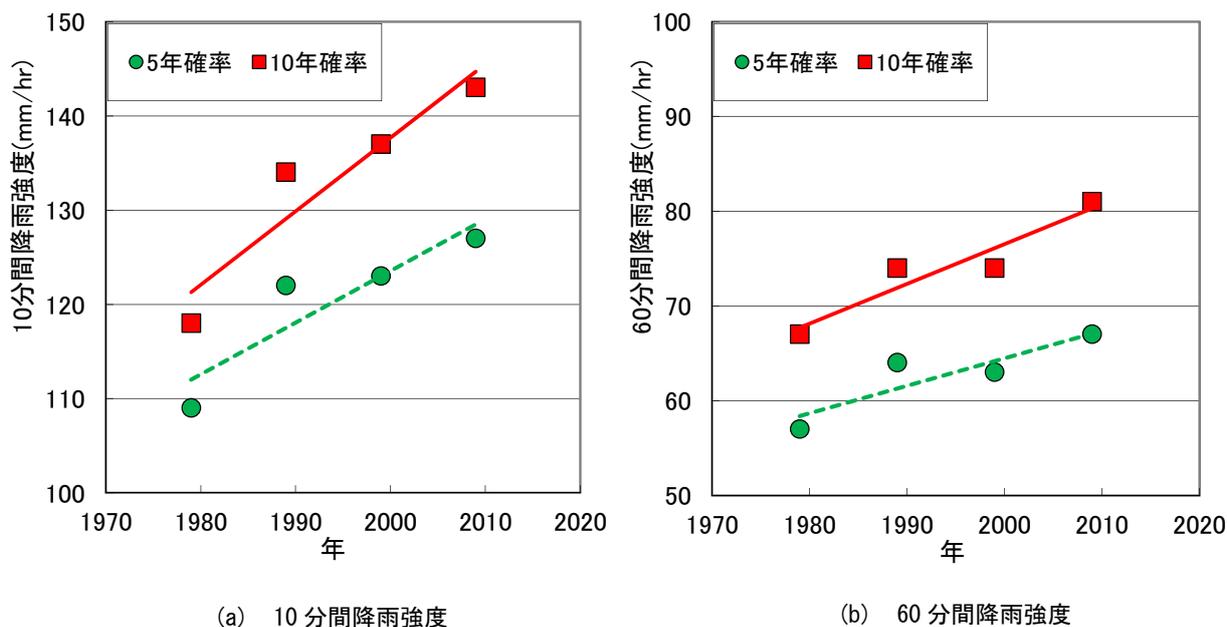


図- II. 3. 1. 1 超過確率年 5 年および 10 年の降雨強度の変化傾向の分析結果例 (名古屋地方気象台)

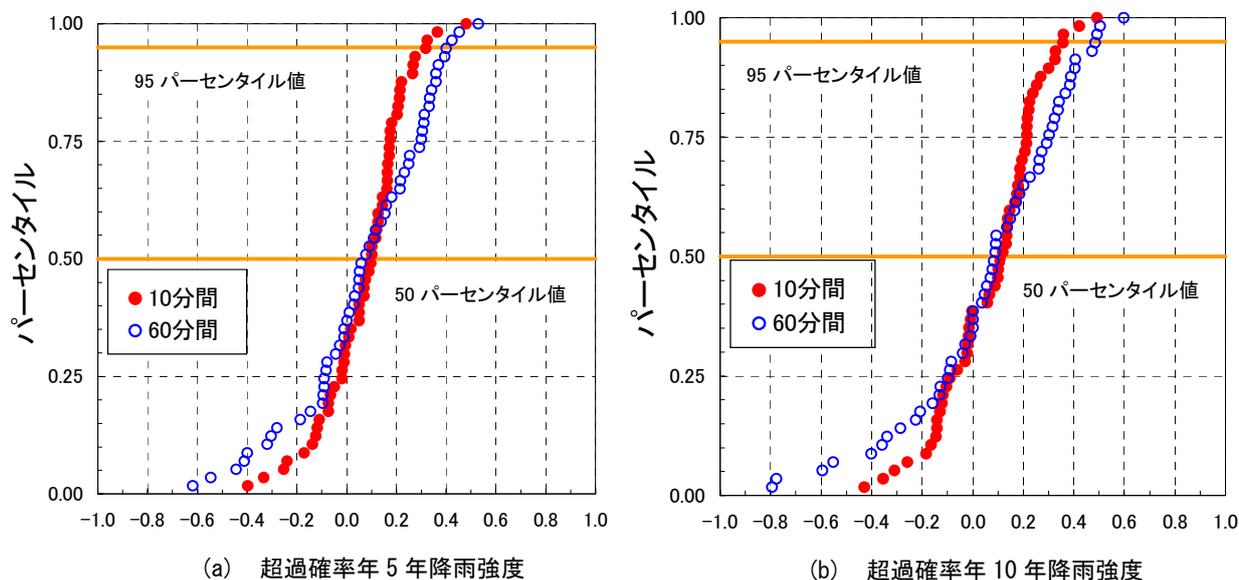


図- II. 3. 1. 2 全国 57 気象台における 10 分・60 分間降雨強度の増加率

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。

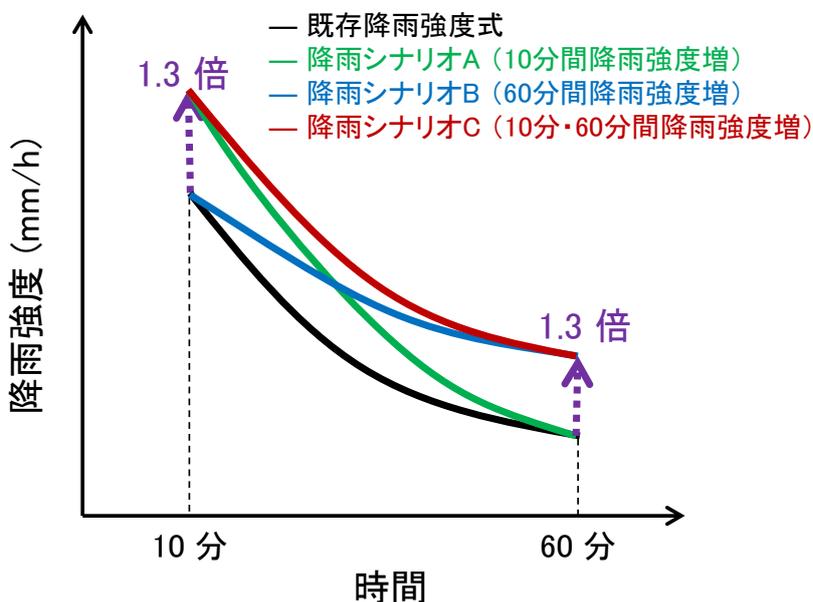


図-Ⅱ. 3. 1. 3 降雨シナリオ設定イメージ

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。

第 部

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碎波したり屈折・回折したりする。大概として碎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るように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碎波点が増えることになる。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ตอบสนอง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こと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とめる。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。 Z_a は朔望平均満潮位の天文潮部分に相当する。 Z_b 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。 Z_c 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、 $Z_a + Z_b + Z_c = Z_{need}$ 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 Z_a 、 Z_b 、 Z_c のそれぞれに対して、気候変動影響分である ΔZ_a 、 ΔZ_b 、 ΔZ_c を重ねた形で示した。 ΔZ_a 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。 ΔZ_b と ΔZ_c 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、 $Z_a + \Delta Z_a$ つまり湾の水深に反比例するので、 ΔZ_b 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 ΔZ_b 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、

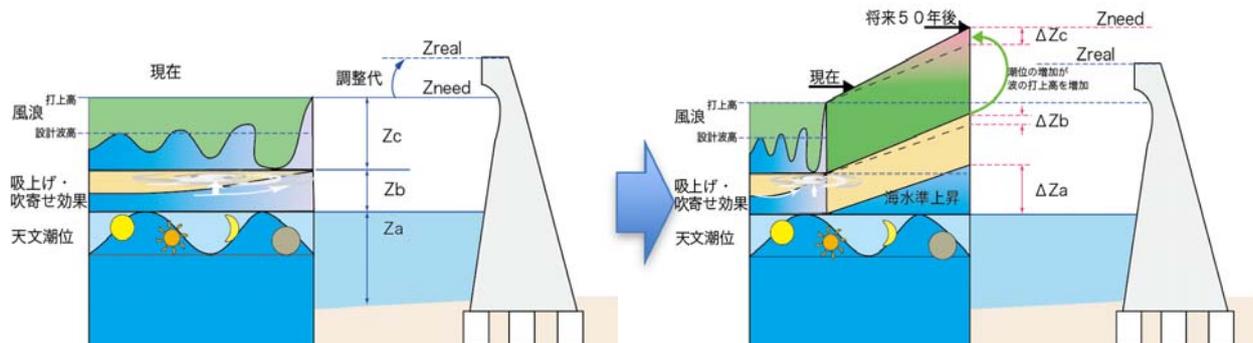


図-Ⅱ.4.1.1.1 海岸保全施設（海岸堤防）の設計要素への気候変動影響の捉え方

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	当初験潮儀へ取り付け	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

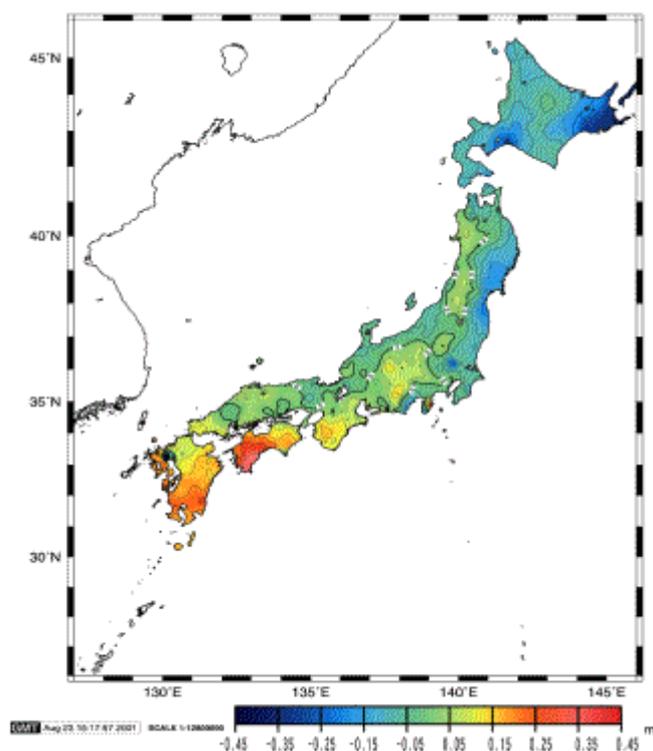


図-II.4.1.2.1 「昭和44年度平均成果」と「2000年度平均成果」の差(国土地理院)
計算手法の違いによる標高の差を含んでおり正味の地盤変動を示していないことに注意

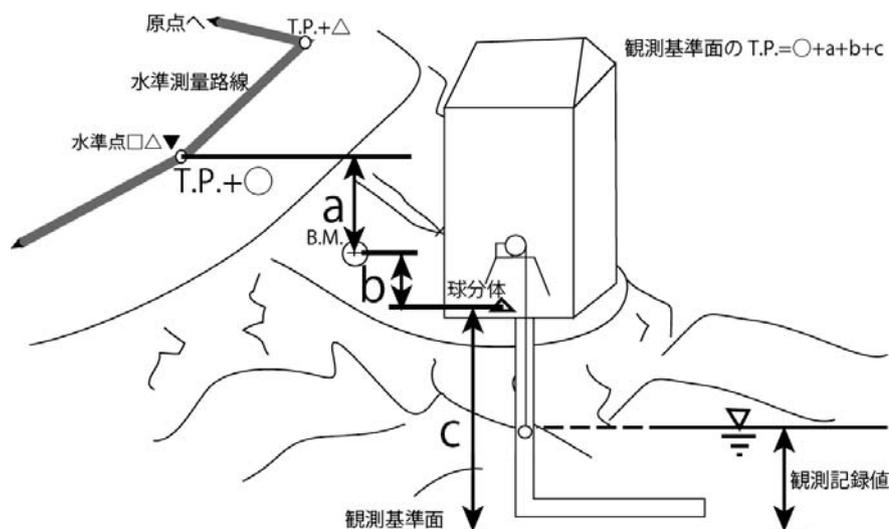


図-Ⅱ.4.1.2.2 験潮場・検潮所の観測基準面と水準測量の関係

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

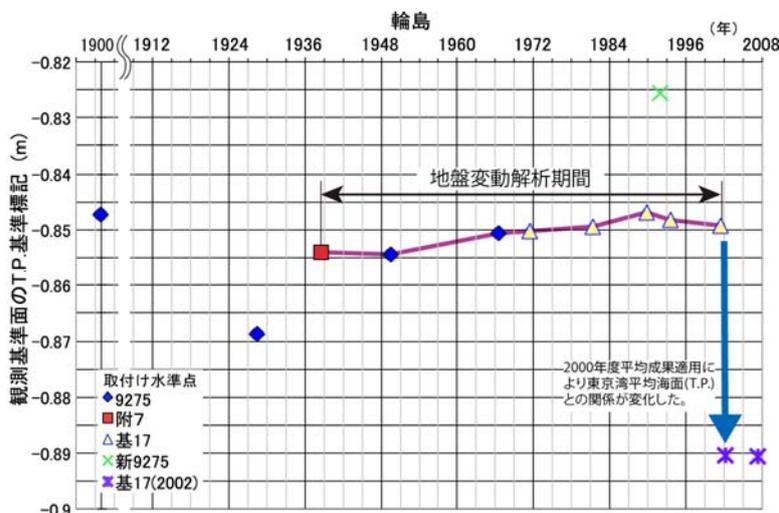


図-Ⅱ. 4. 1. 2. 3 観測基準面と東京湾平均潮位 (T. P.) の関係

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になってしまう。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 検定でト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

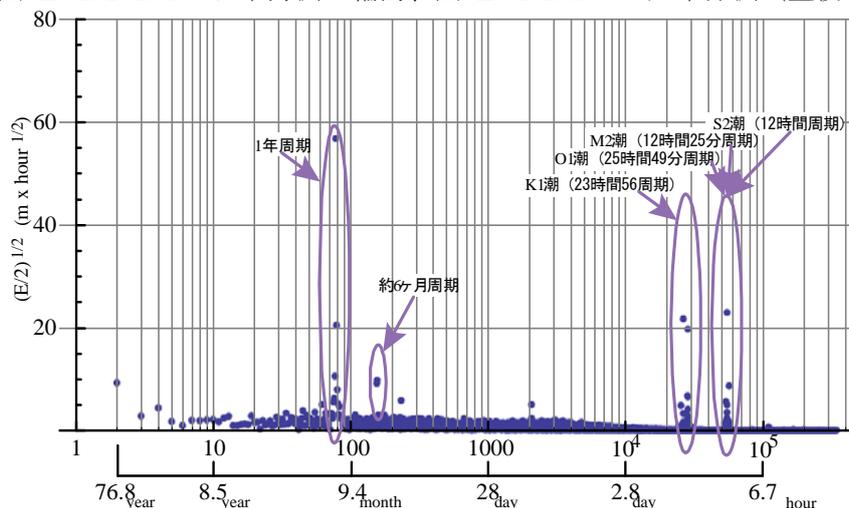


図-Ⅱ.4.1.2.4 輪島のスペクトル分析結果

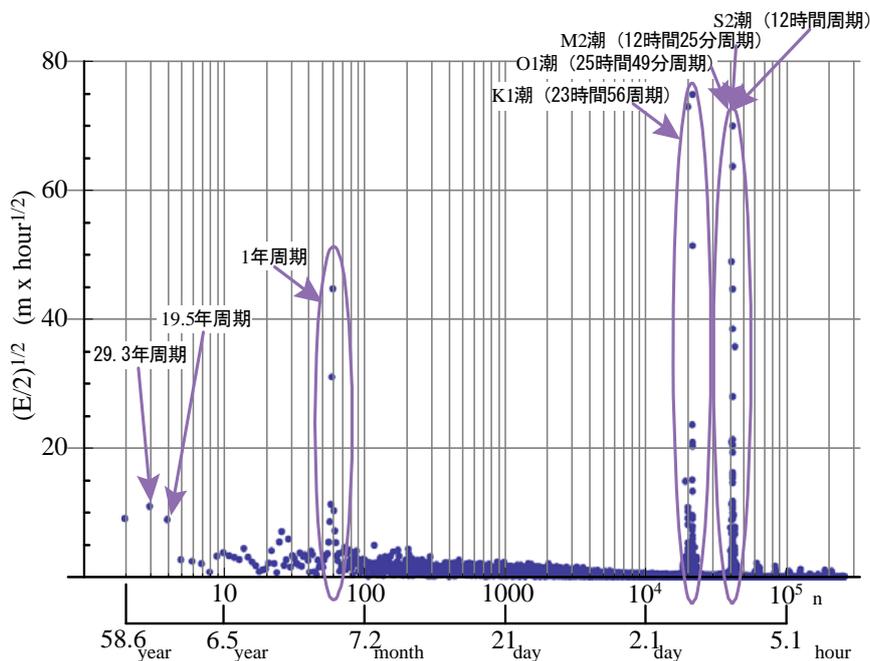


図-Ⅱ.4.1.2.5 徳山のスペクトル分析結果

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

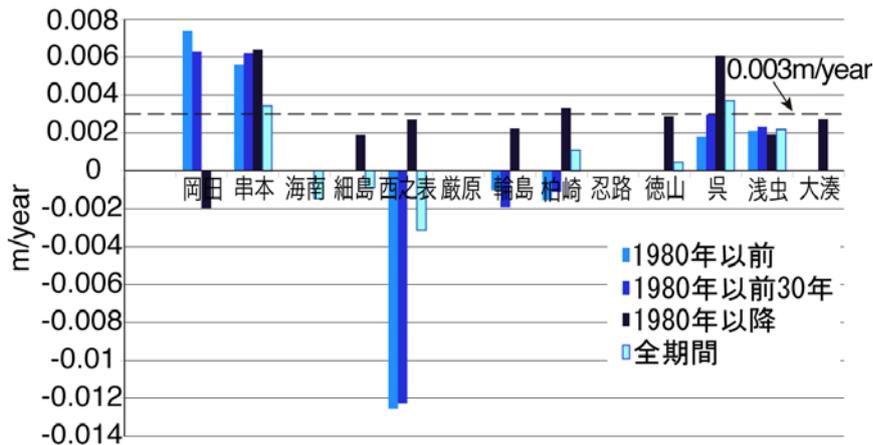


図-Ⅱ.4.1.2.6 年平均潮位

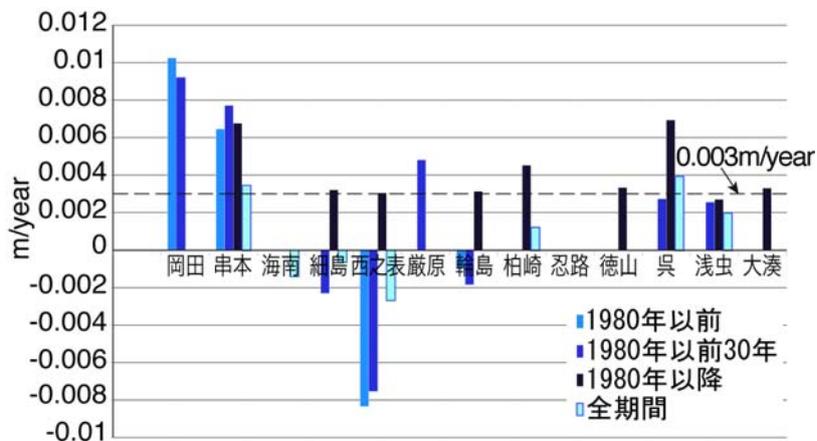


図-Ⅱ.4.1.2.7 朔望年平均満潮位

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観測場で、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。多くの観測場で 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

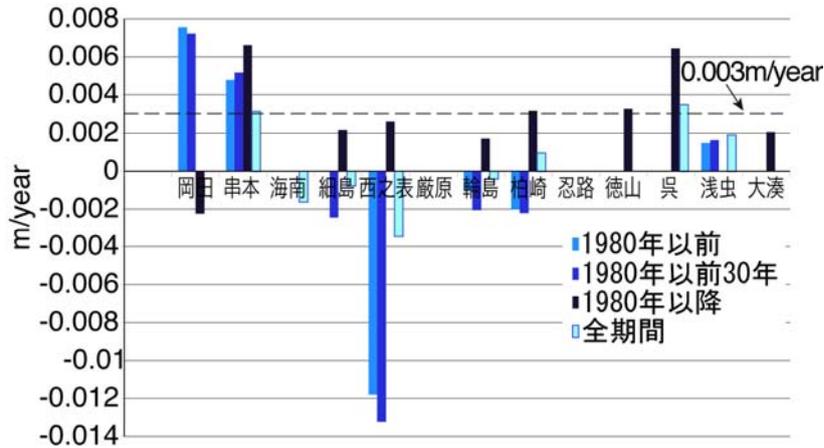


図-Ⅱ.4.1.2.8 冬期毎年平均潮位

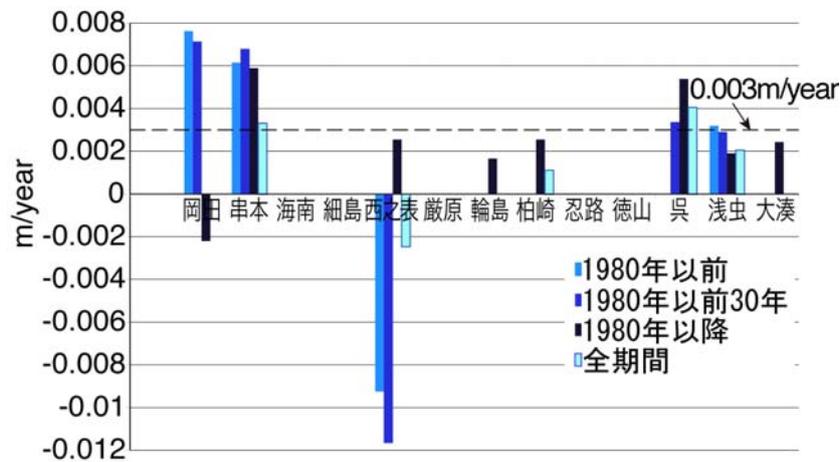


図-Ⅱ.4.1.2.9 台風期毎年平均潮位

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3mm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。

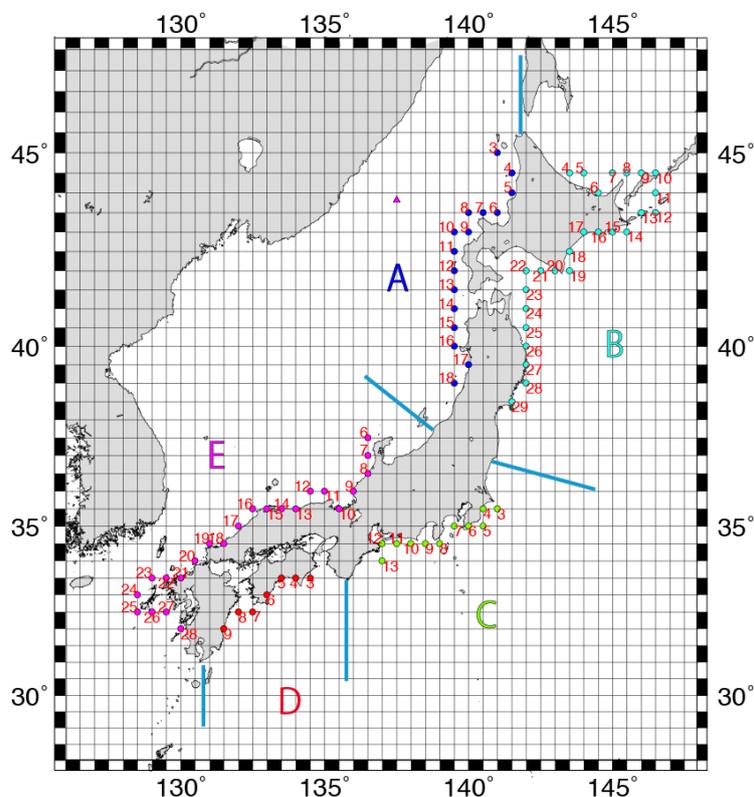


図-Ⅱ.4.1.3.1 衛星海面高度計の解析結果から沿岸部の海面上昇値を調べるための測点配置

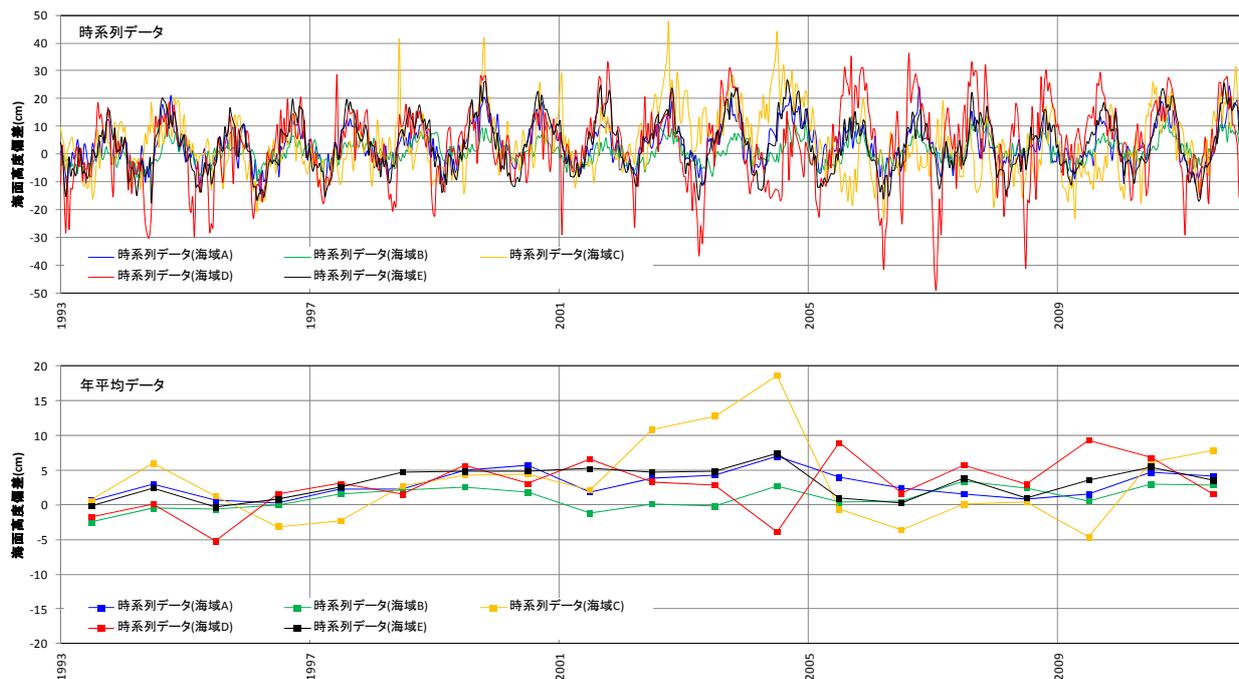


図-Ⅱ.4.1.3.2 沿岸の測定点を沿岸毎に平均した観測時系列値と年平均値

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。

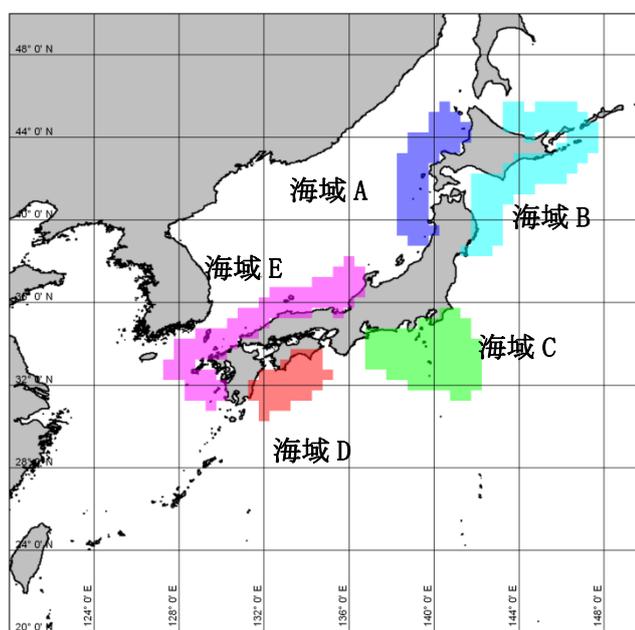


図-Ⅱ.4.1.3.3 海域毎の海面上昇値を求めるための区分（海域 C と D は黒潮領域を含むように設定）

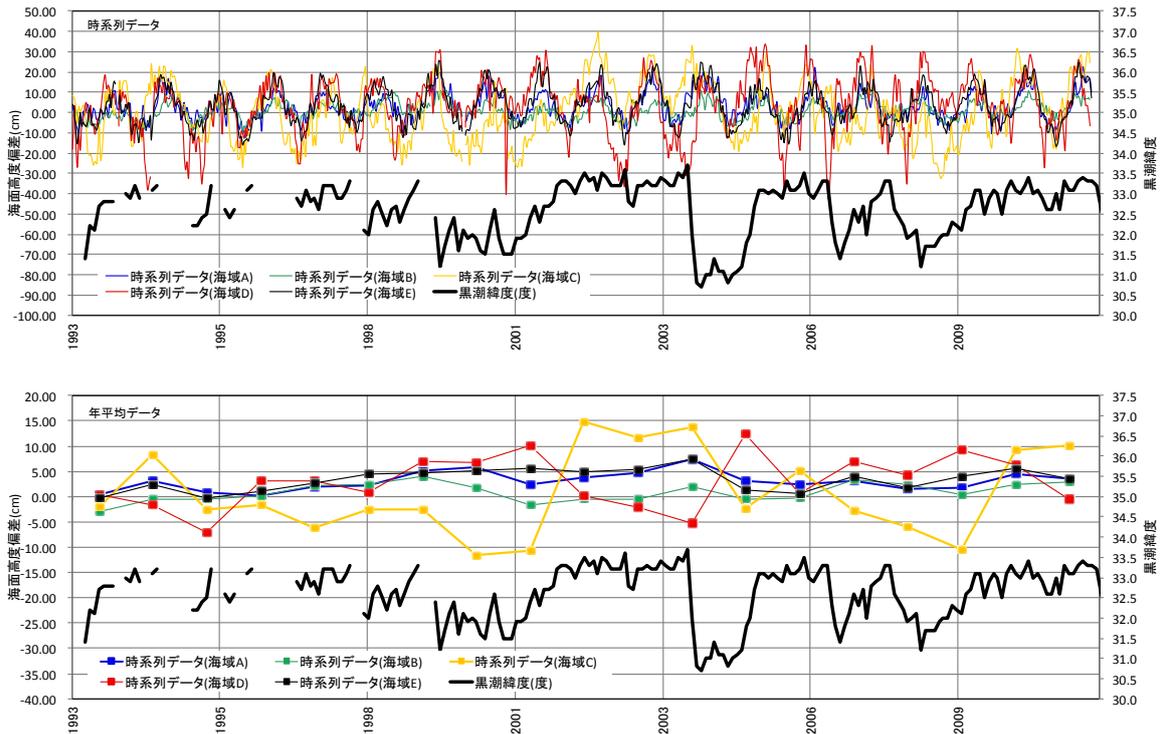


図-Ⅱ.4.1.3.4 衛星海面高度計による海域の海面高さの経時変化（海域毎）

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

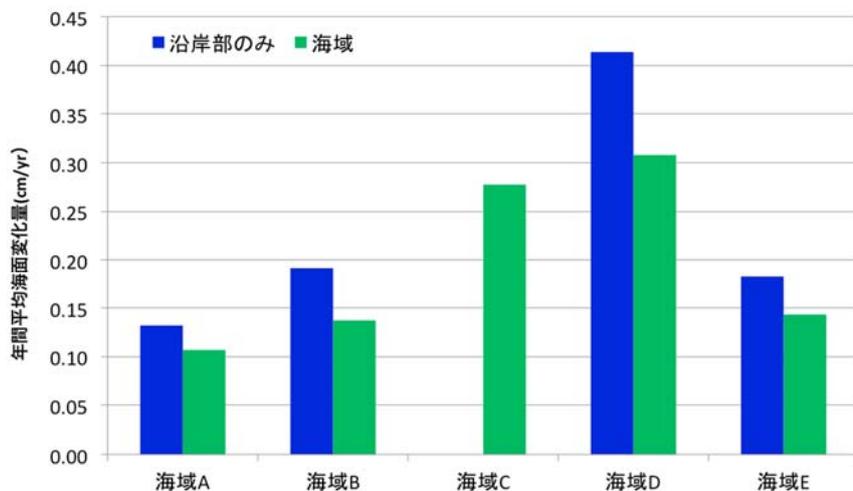


図-Ⅱ.4.1.3.5 衛星海面高度計による海域別年平均海面上昇量

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 検定によりト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

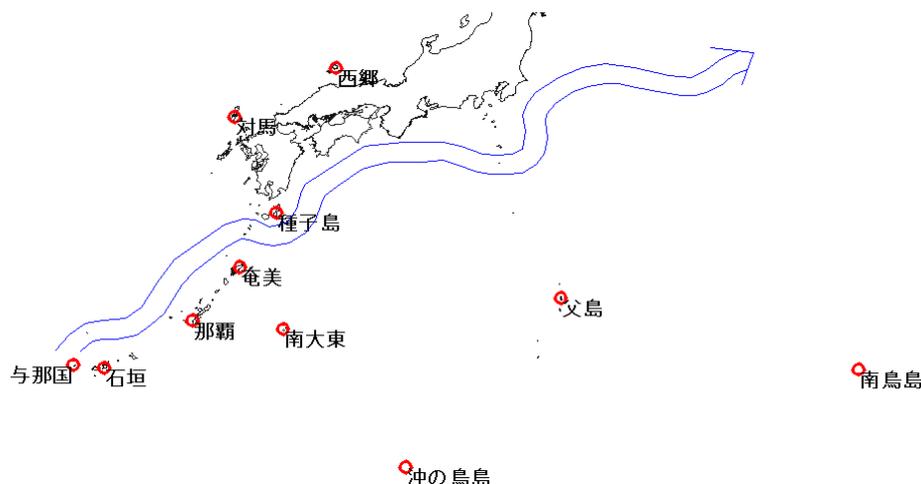


図-Ⅱ.4.1.3.6 解析を行った離島の位置

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 年間で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。

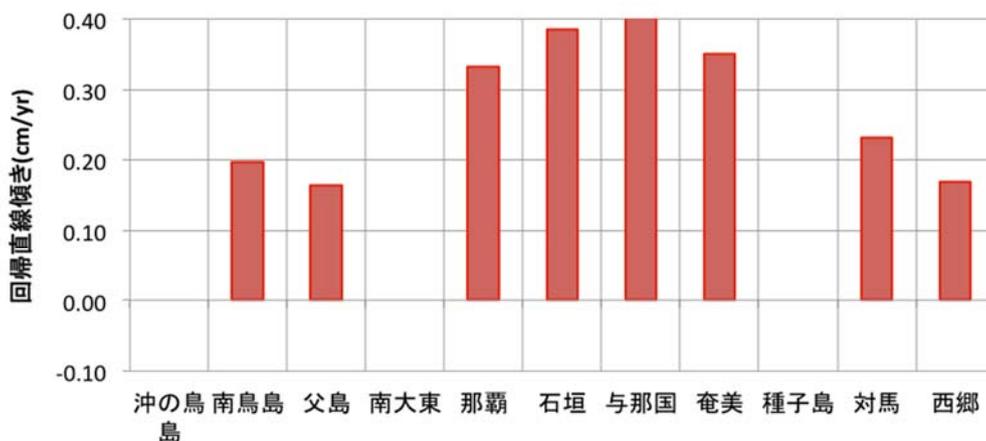


図-Ⅱ.4.1.3.7 衛星海面高度計による離島の年平均海面上昇量

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。

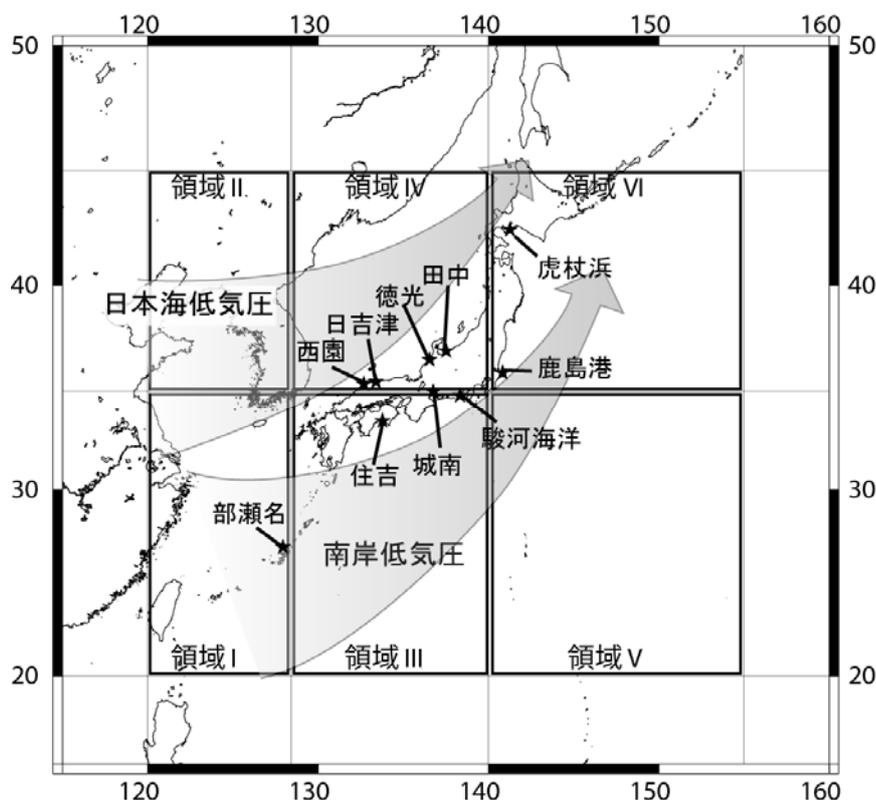


図-II.4.1.4.1 気象外力による日本沿岸の区分

海象の統計から海岸に來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。

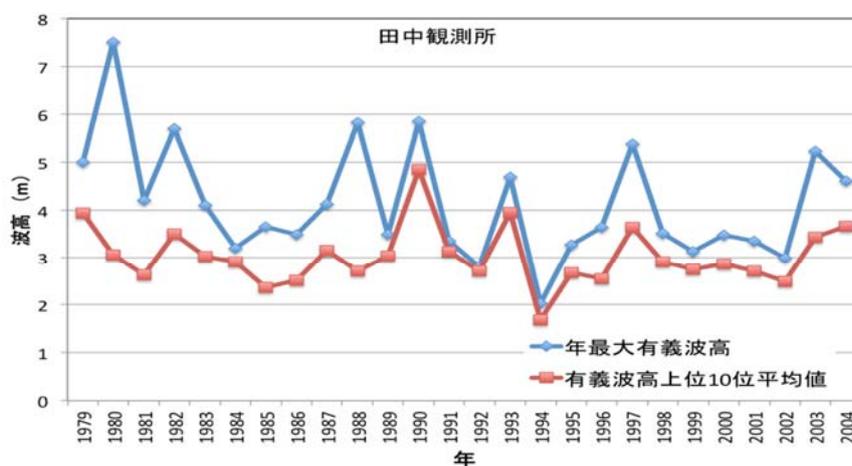


図-Ⅱ.4.1.4.2 田中観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

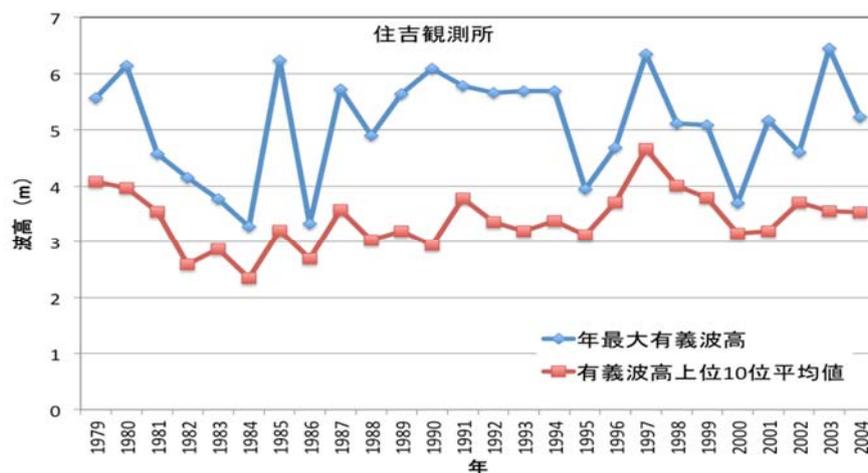


図-Ⅱ.4.1.4.3 住吉観測所における年最大有義波高、年上位 10 位の平均値の変化

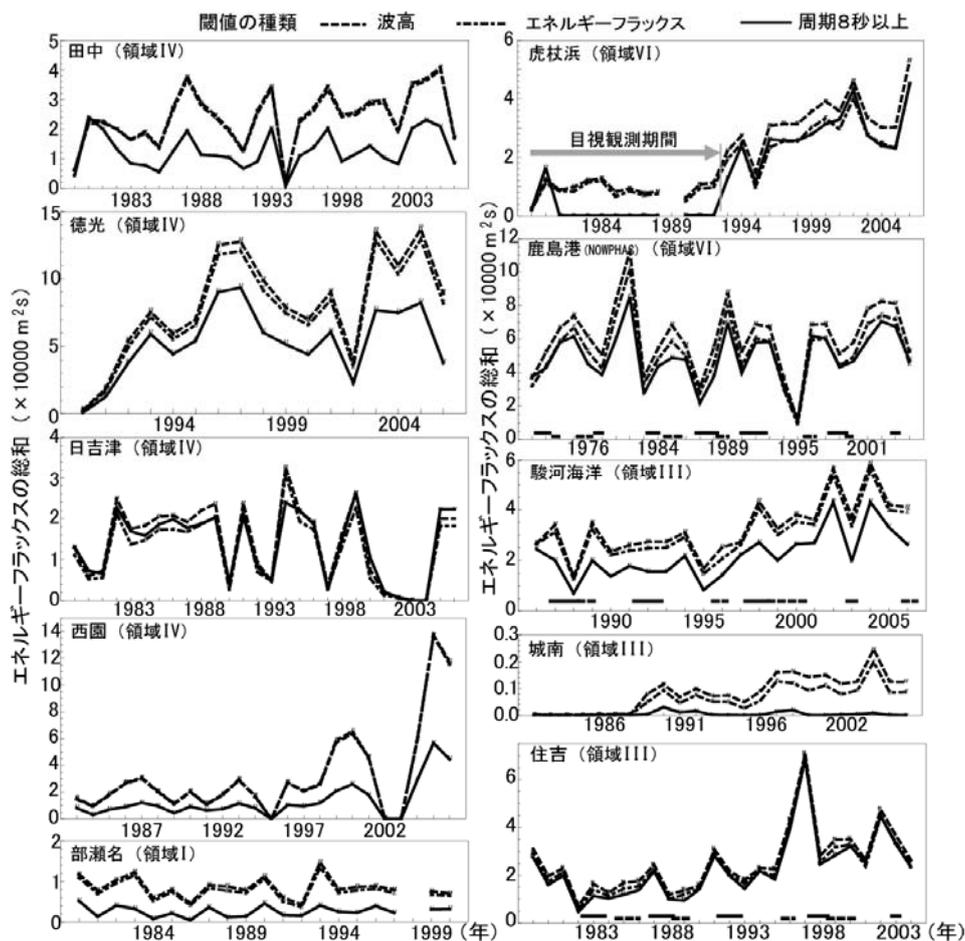


図-Ⅱ.4.1.4.4 閾値設定による波浪エネルギーフラックスの経年変化

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mm 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見えそうである。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。

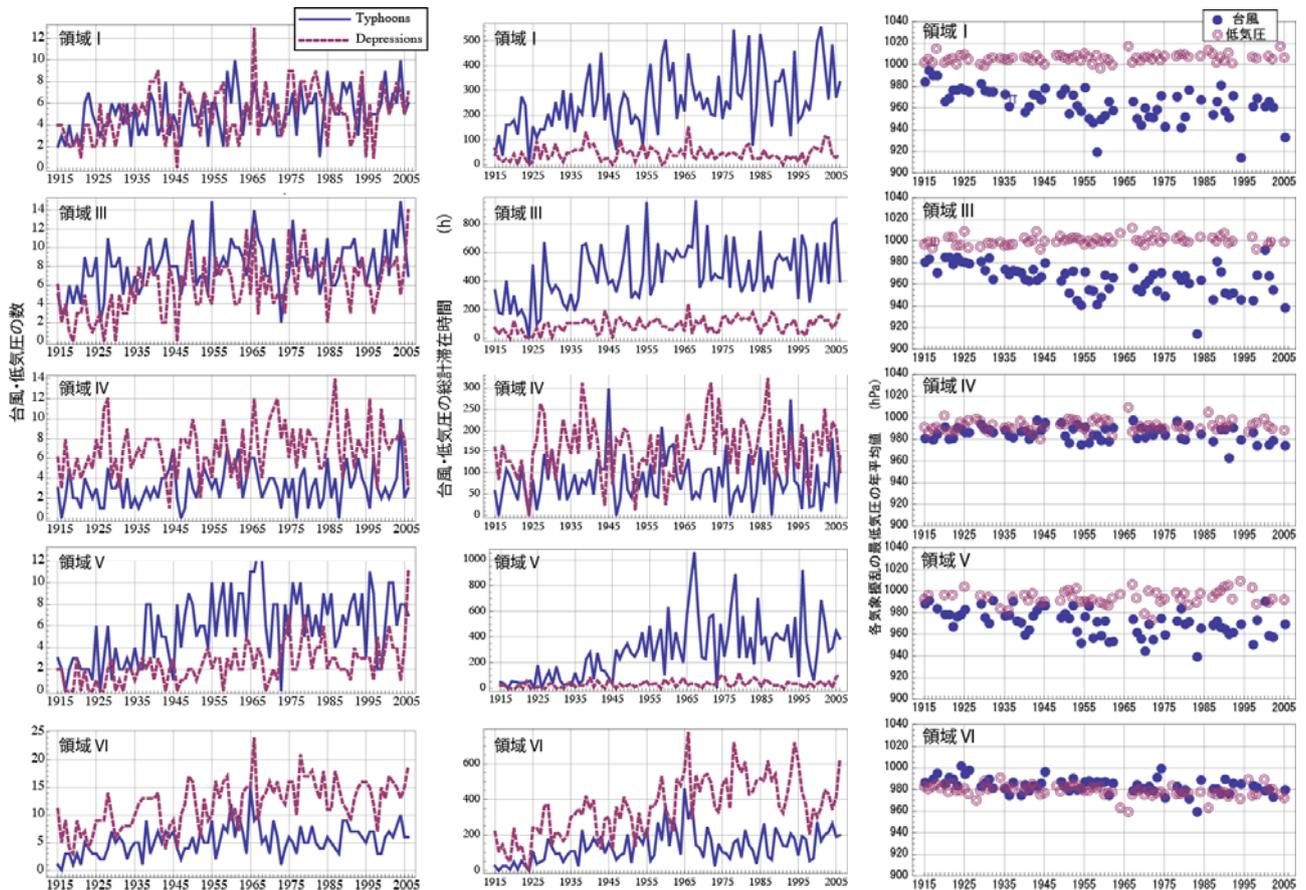


図-II.4.1.4.5 台風・低気圧の各領域での通過数(左)、滞在時間(中)、通過期間の最低気圧の年平均値(右)

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' N33°10'-35°00'	52	12343	9103
	伊勢湾 E134°50'-137°50' N33°20'-35°30'	58	13686	8997
	東京湾 E138°10'-141°00' N34°30'-35°00'	49	9230	7009

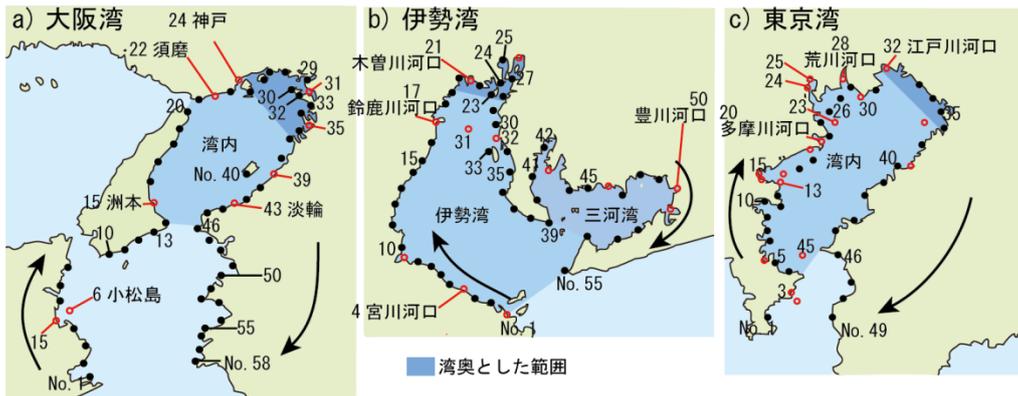


図-Ⅱ.4.2.1.1 解析に用いた沿岸の測定点

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。

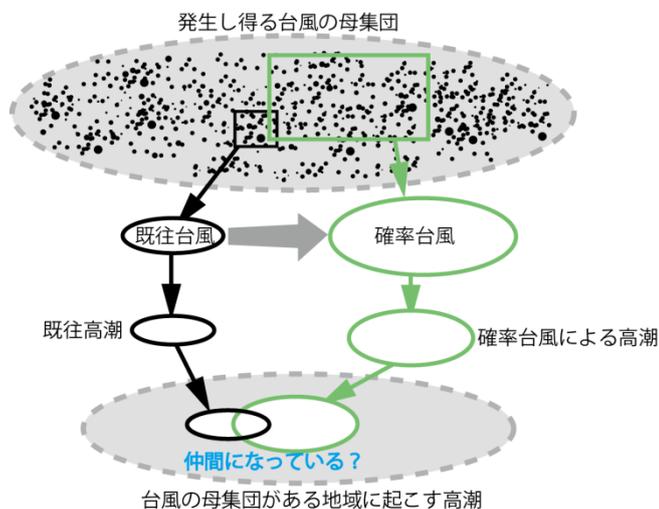


図-Ⅱ.4.2.2.1 確率台風モデルによる高潮推算結果の妥当性検討の説明

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にした。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にした。

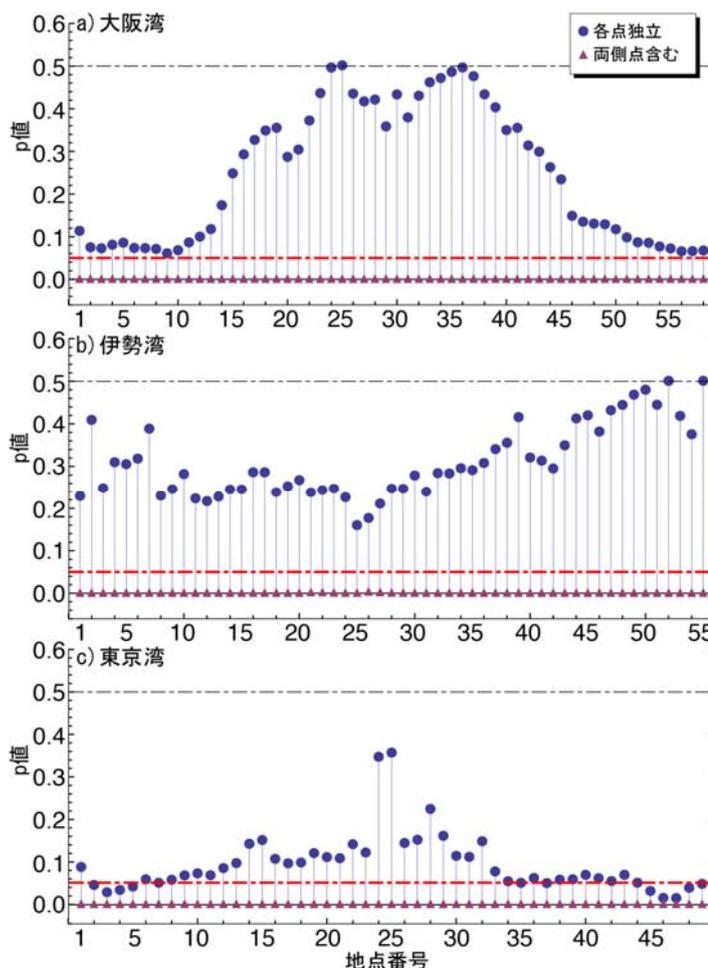


図-Ⅱ.4.2.2.2 各地点の Brunner-Munzel 検定で得られた p 値

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。

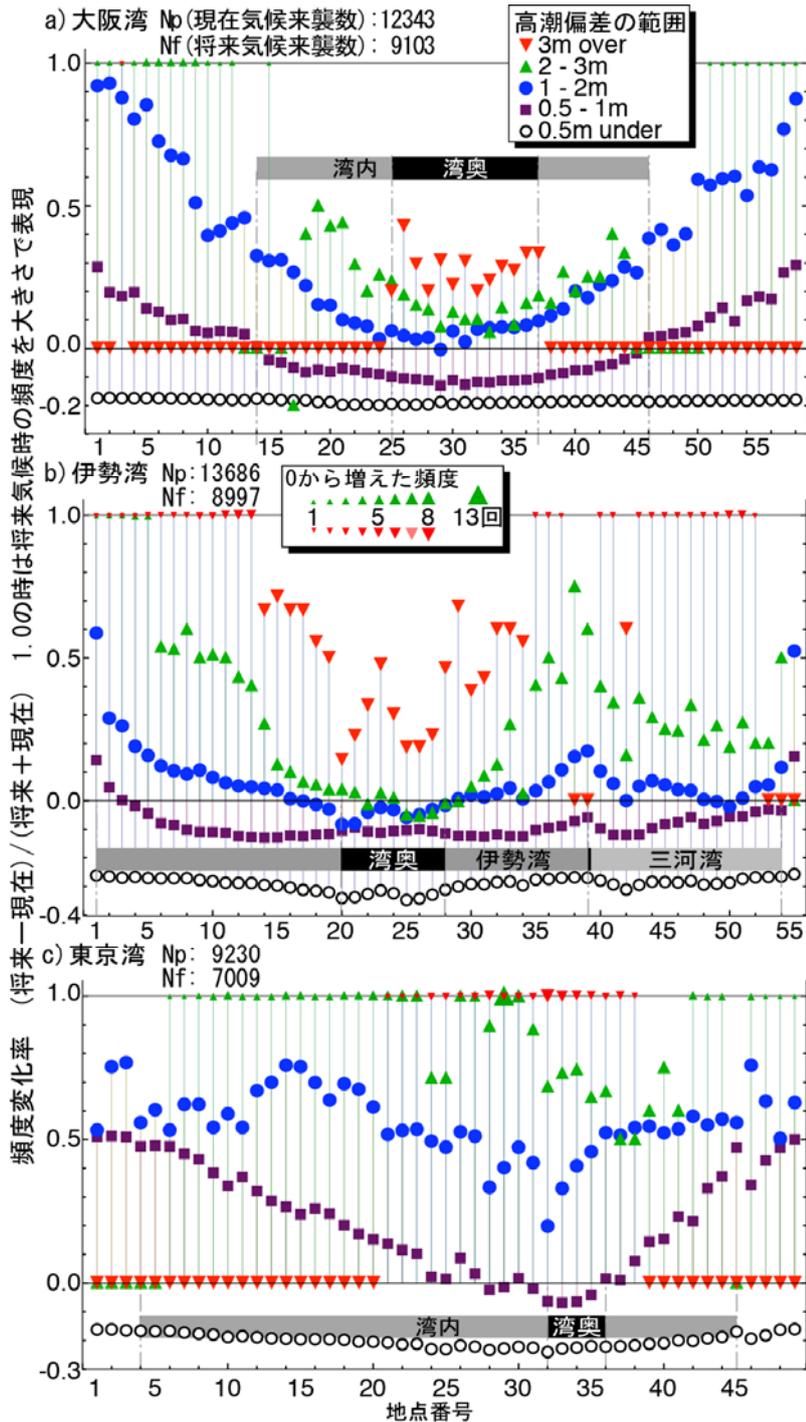


図-II. 4. 2. 3. 1 高潮偏差範囲毎のイベント個数の変化率

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。

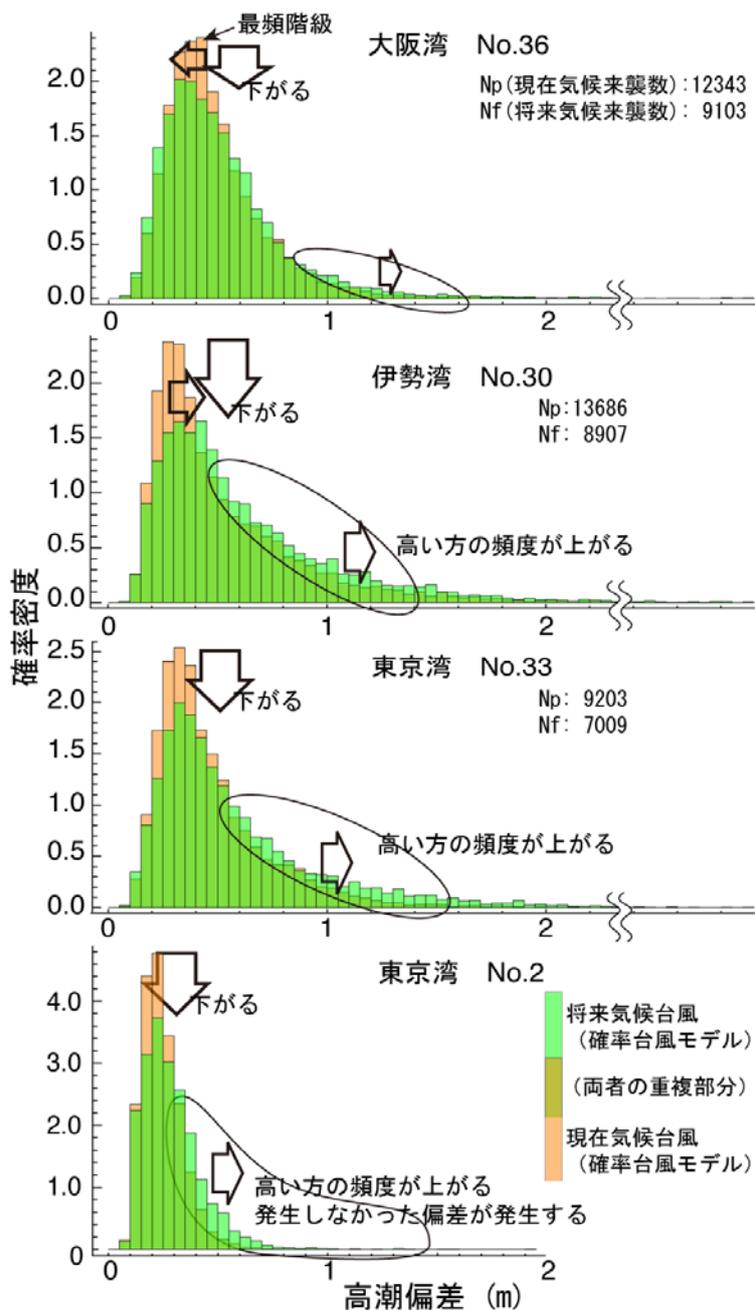


図-Ⅱ.4.2.3.2 各湾の代表的な変化特性

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。

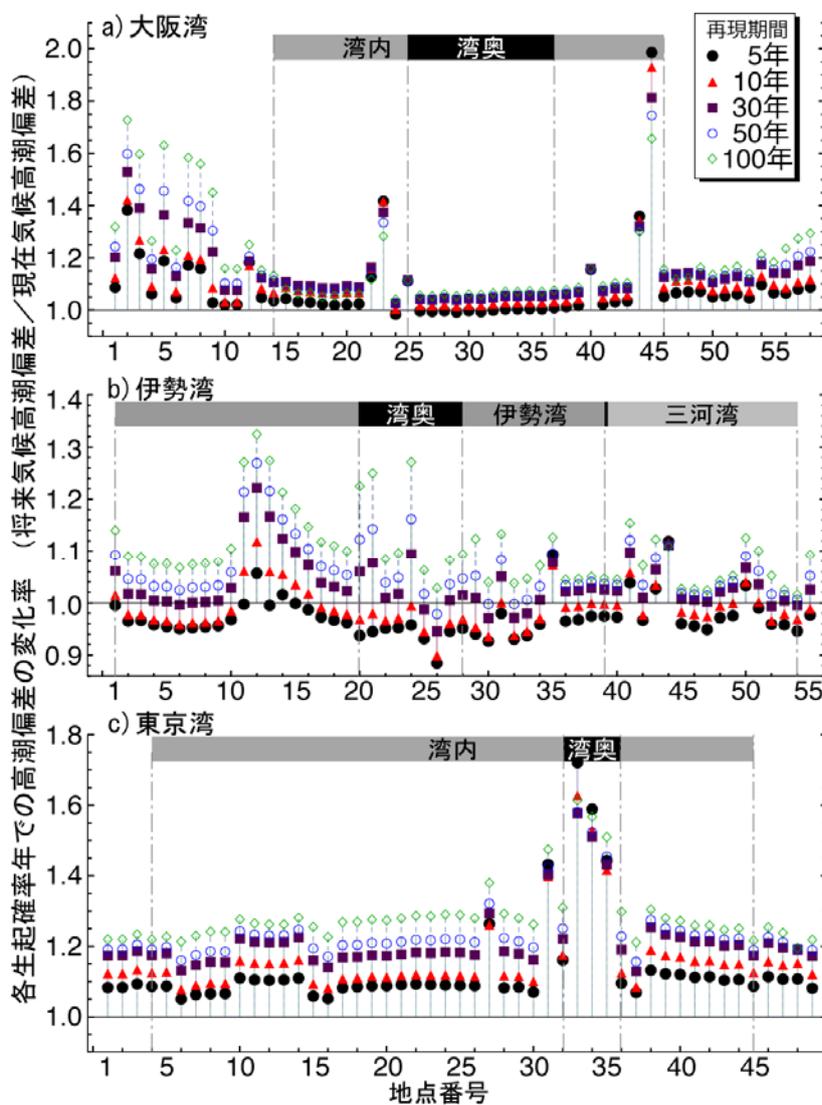


図-II.4.2.4.1 再現期間別による高潮偏差変化率の特性

4. 2. 5 まとめ

三大湾（東京、伊勢、大阪）に來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、超過確率率が 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溪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溪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

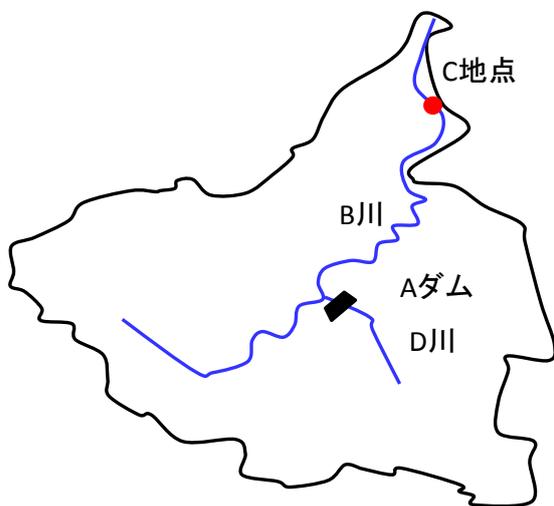


図-II. 5. 2. 1 Aダム (B川流域) 模式図

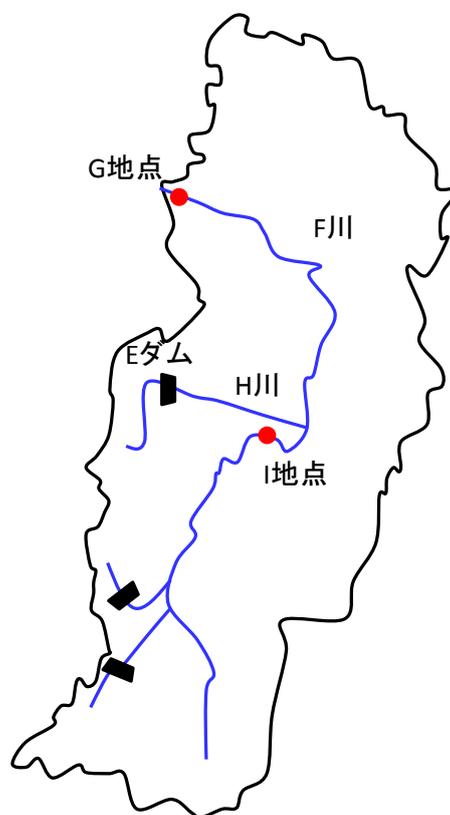


図-II. 5. 2. 2 Eダム (F川流域) 模式図

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。

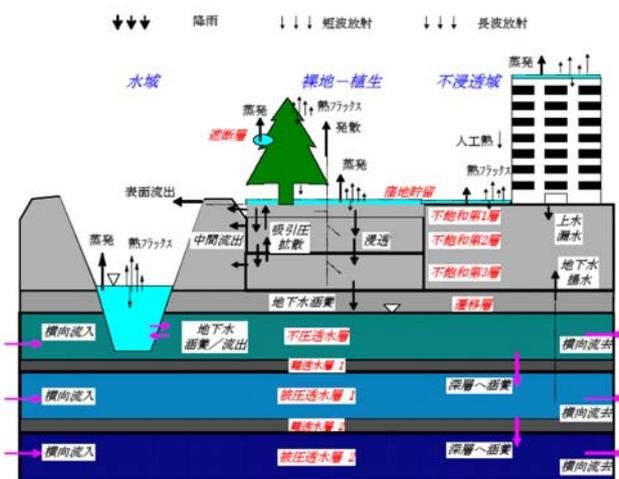


図-II.5.3.1.1 WEP モデルの鉛直構造

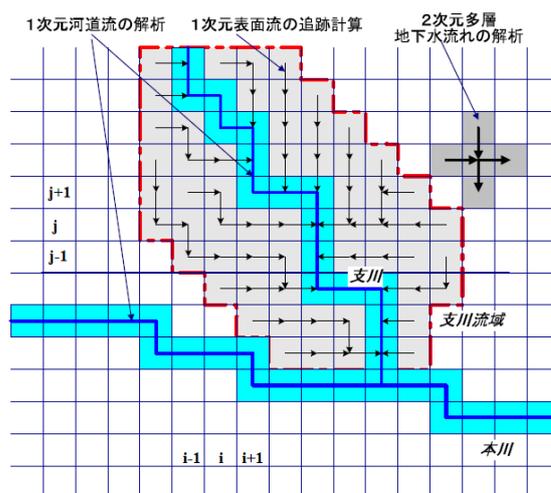


図-II.5.3.1.2 WEP モデルの平面図（落水線）

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。

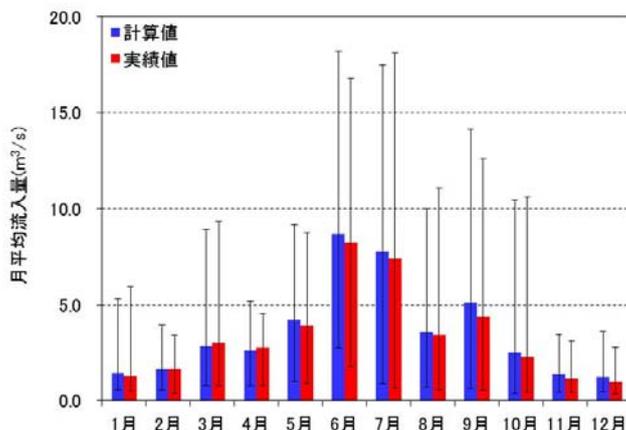


図-Ⅱ.5.3.2.1 A ダムの流入量再現計算結果
(20年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。)

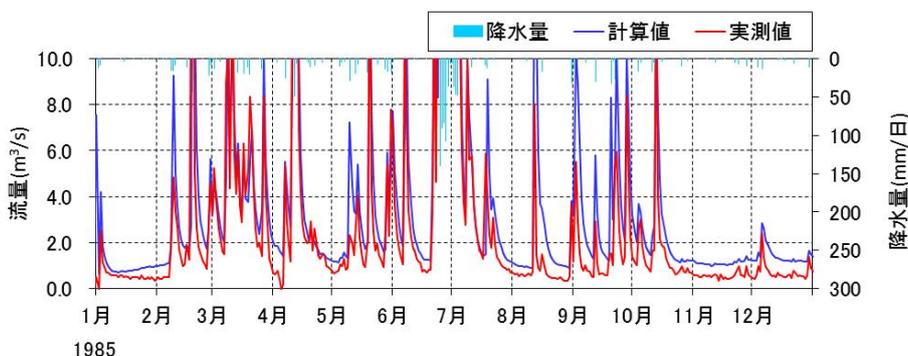


図-Ⅱ.5.3.2.2 A ダム流入量の再現計算結果 (1985年1月～12月部分を拡大)

(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。

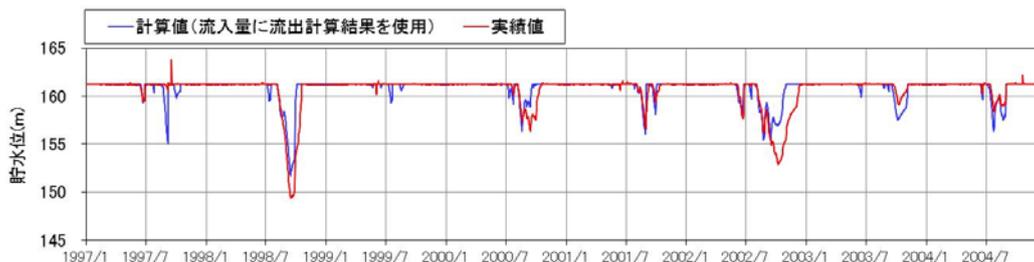


図-Ⅱ.5.3.2.3 利水計算モデルによる貯水位の再現計算結果

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。

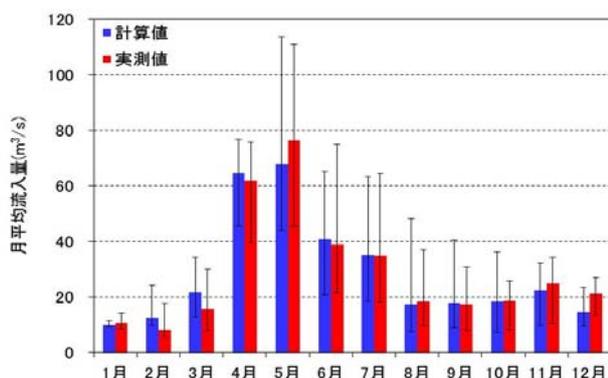


図-Ⅱ.5.3.3.1 Eダム流入量の再現計算結果
(15年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。)

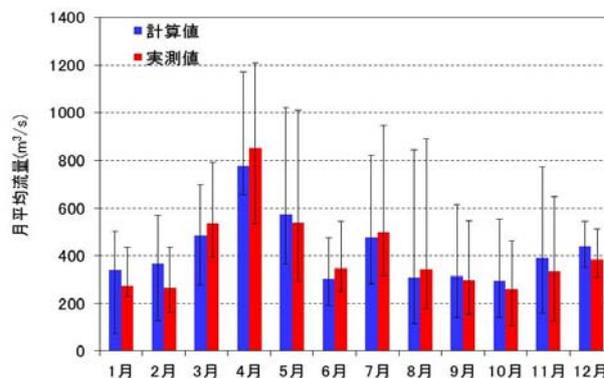


図-Ⅱ.5.3.3.2 G地点の自然流量再現計算結果
(15年間の平均値、エラーバーは最大値および最小値を示す。)

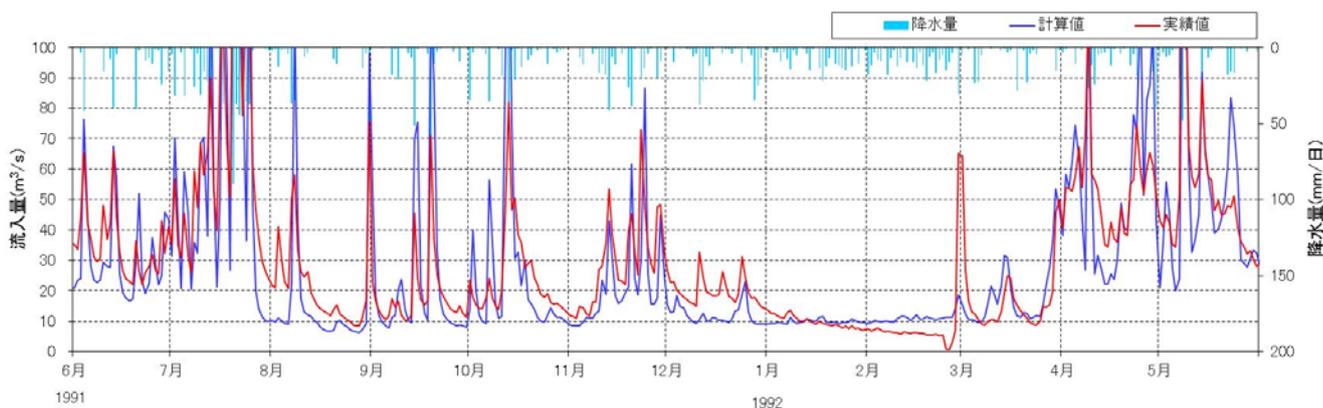


図-Ⅱ.5.3.3.3 E ダム流入量の再現計算結果 (1991年6月～1992年5月部分を拡大)



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思われる。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。

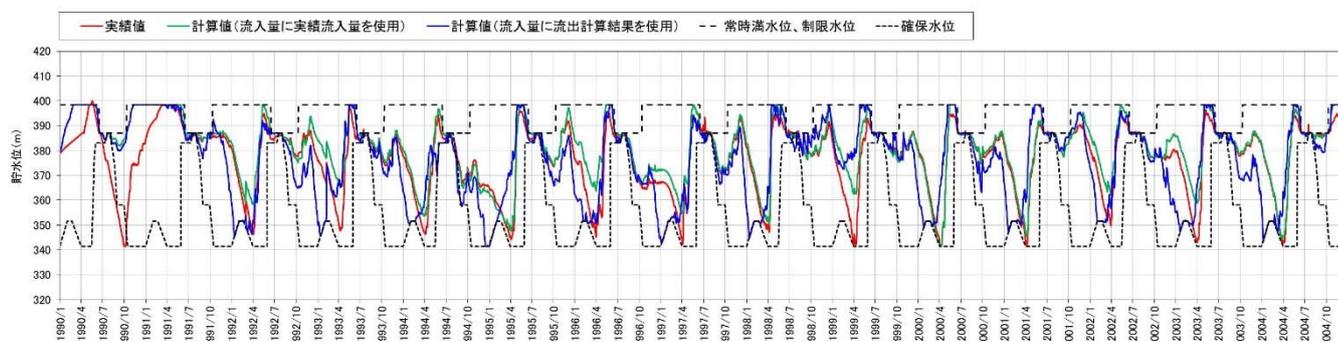


図-Ⅱ.5.3.3.5 利水計算モデルによる貯水位の再現計算結果

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。

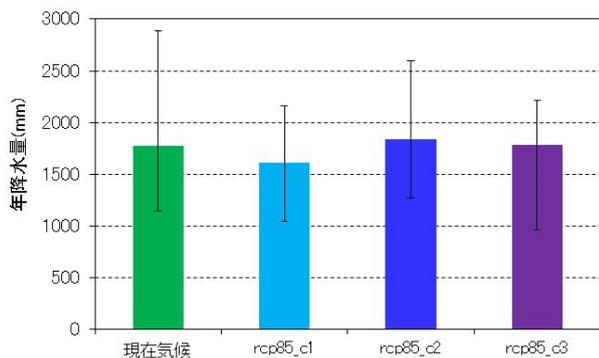


図-Ⅱ.5.4.2.1 年降水量 (期間の平均、最大、最小)

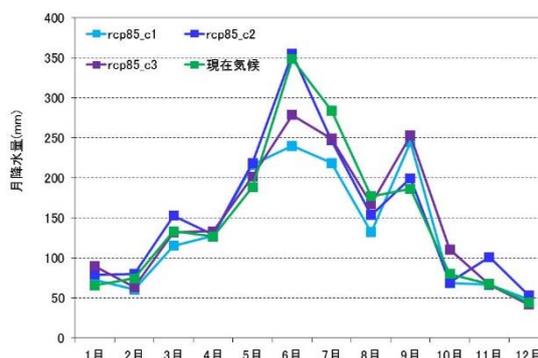


図-Ⅱ.5.4.2.2 平均月降水量

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 rep85_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。

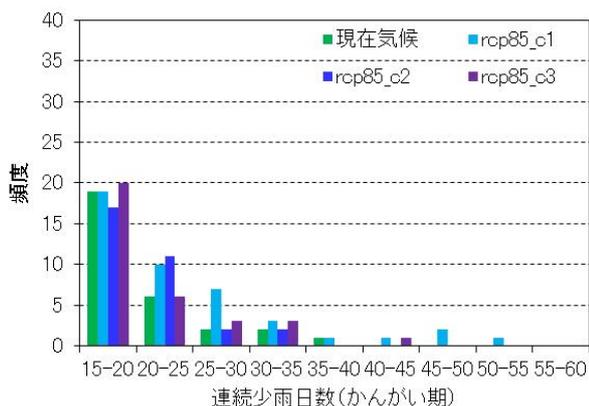


図-Ⅱ.5.4.2.3 連続小雨日数 (かんがい期)

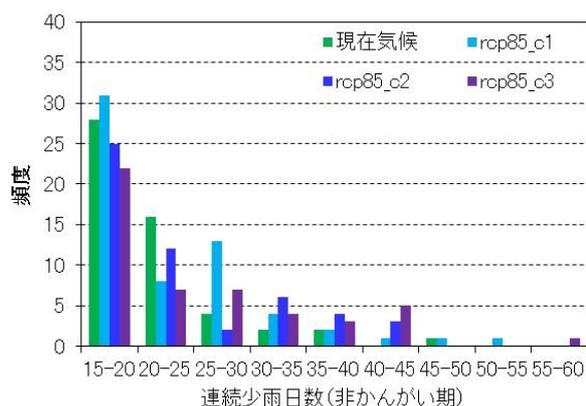


図-Ⅱ.5.4.2.4 連続小雨日数 (非かんがい期)

(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。

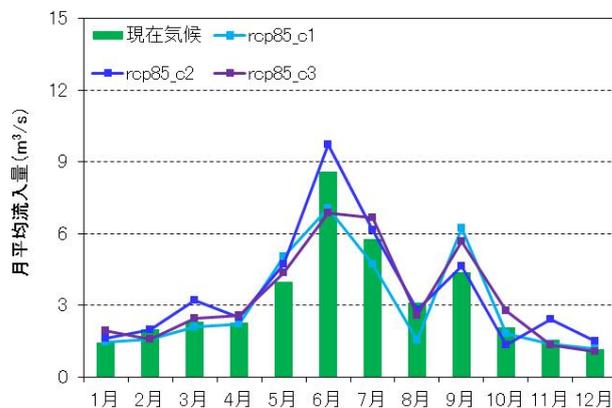


図-Ⅱ.5.4.2.5 A ダムの月平均流入量

(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 ヶ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 m³/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 m³/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 m³/s であり、C 地点上流における水利権量の合計が約 15.0 m³/s であることから、自然流量が約 17.0 m³/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。

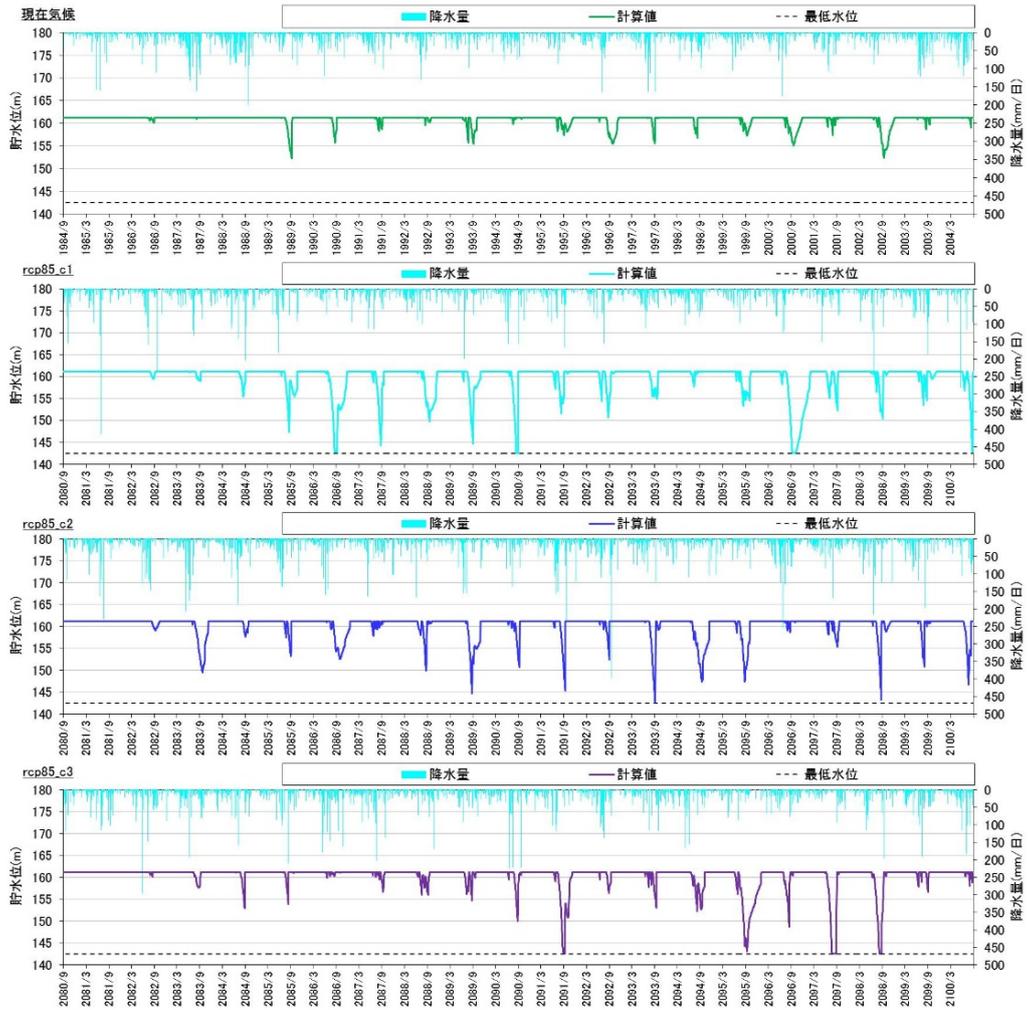


図-Ⅱ.5.4.2.6 現在および将来の貯水位の時系列

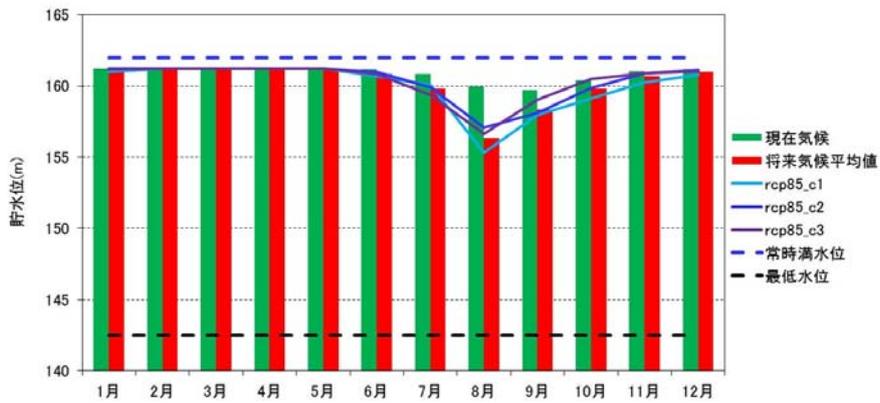


図-Ⅱ.5.4.2.7 月平均貯水位の変化

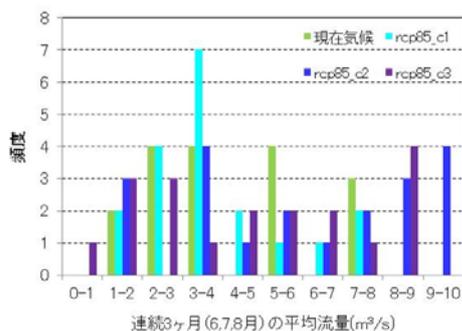


図-Ⅱ.5.4.2.8 Aダムにおける連続3ヶ月(6,7,8月)の平均流入量の発生頻度

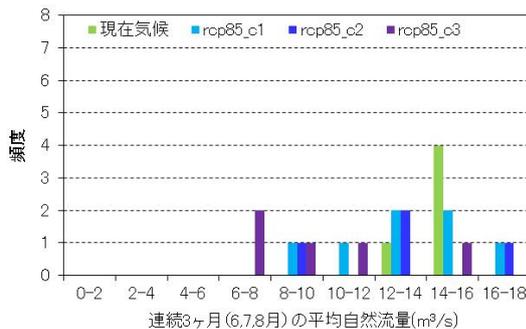


図-Ⅱ.5.4.2.9 C地点における連続3ヶ月(6,7,8月)の平均自然流量の発生頻度

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。

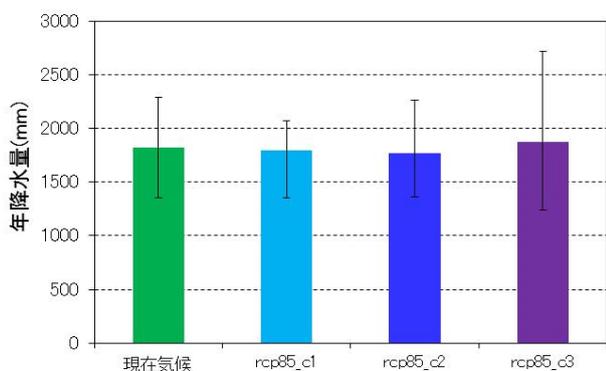


図-Ⅱ.5.4.3.1 年降水量 (期間の平均、最大、最小)

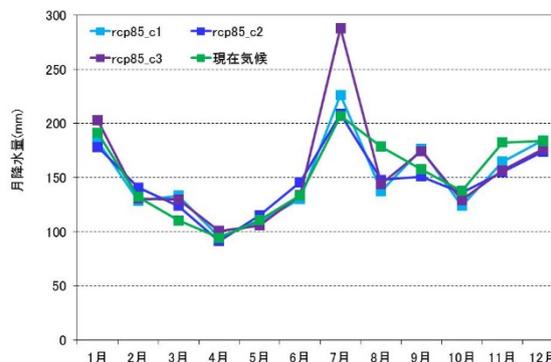


図-Ⅱ.5.4.3.2 平均月降水量

次に連続小雨日数(ここでは日降水量5mm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。

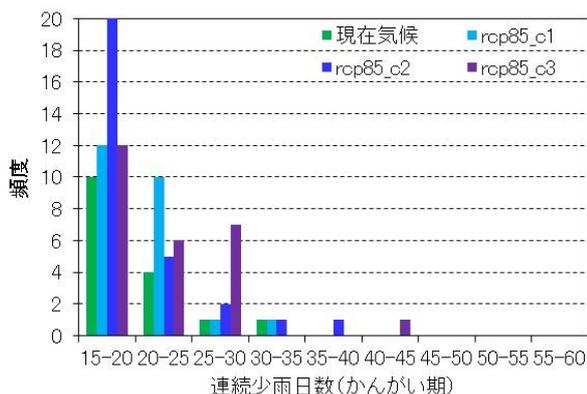


図-Ⅱ.5.4.3.3 連続小雨日数 (かんがい期)

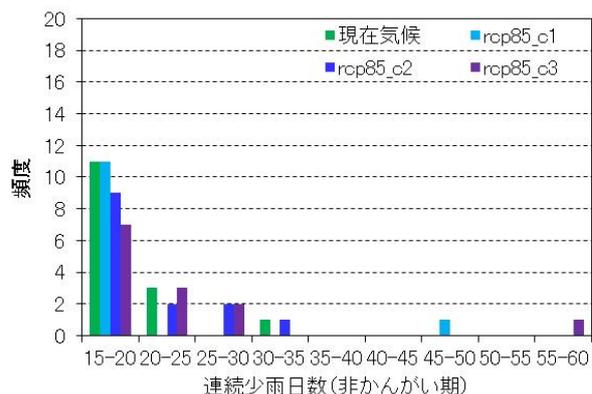


図-Ⅱ.5.4.3.4 連続小雨日数 (非かんがい期)

(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°C 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°C 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°C 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。

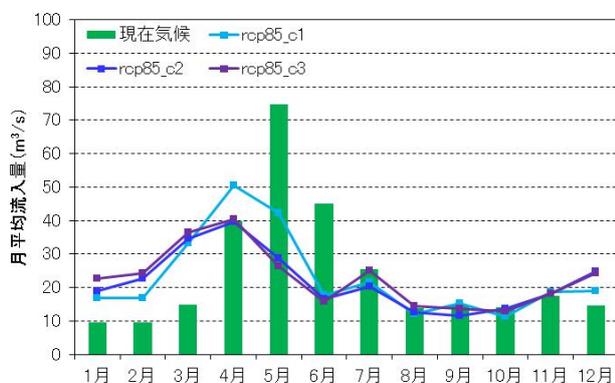


図-Ⅱ.5.4.3.5 E ダムの月平均流入量

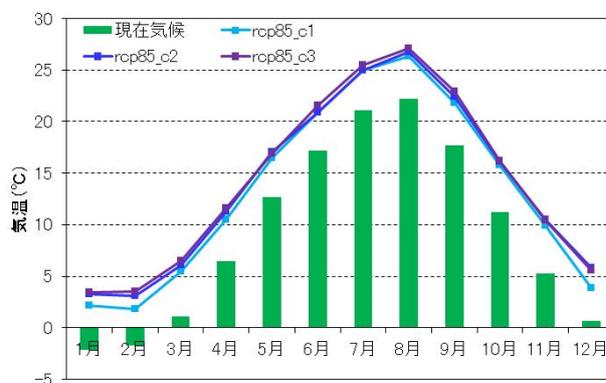


図-Ⅱ.5.4.3.6 E ダムの平均気温

(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。

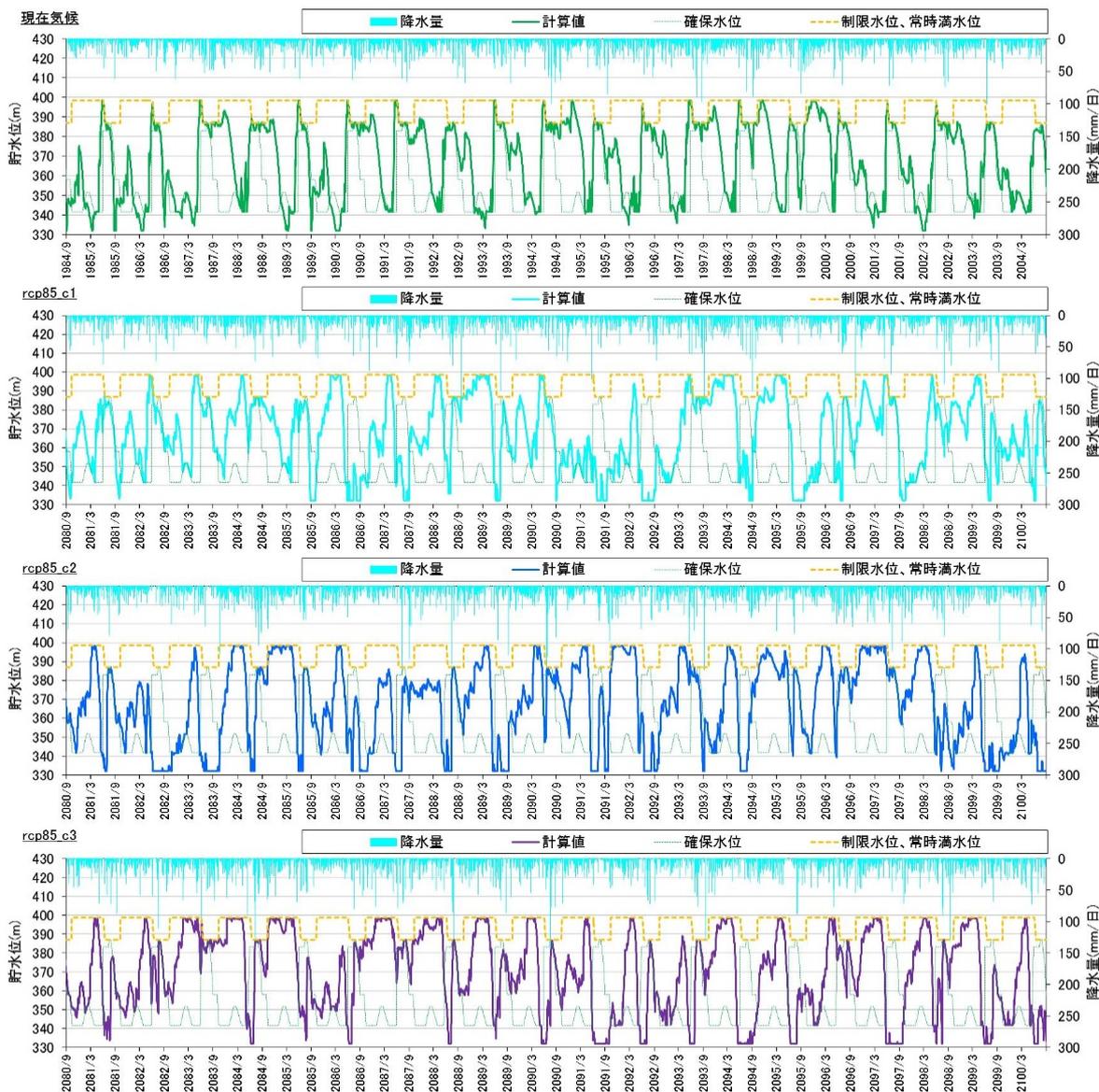


図-Ⅱ.5.4.3.7 月平均貯水位の変化

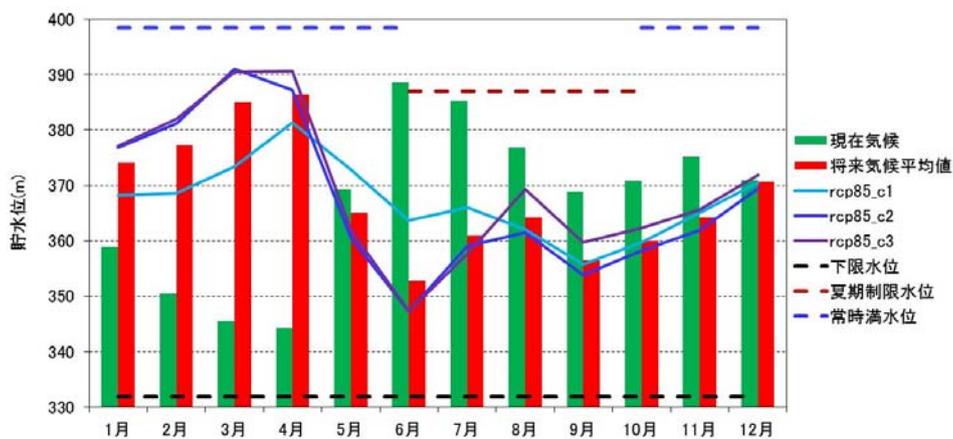


図-Ⅱ.5.4.3.8 月平均貯水位の変化

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。

渇水の評価する指標は、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本曾三川流域への適用、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、富澤洋介(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、平常時の河川環境を対象を絞る。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・空間的变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 $1\sim 9\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ の間にあり、世界の主要河川 ($0.1\sim 1\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$) 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 $2\sim 3\text{mm}/\text{日}$ 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。

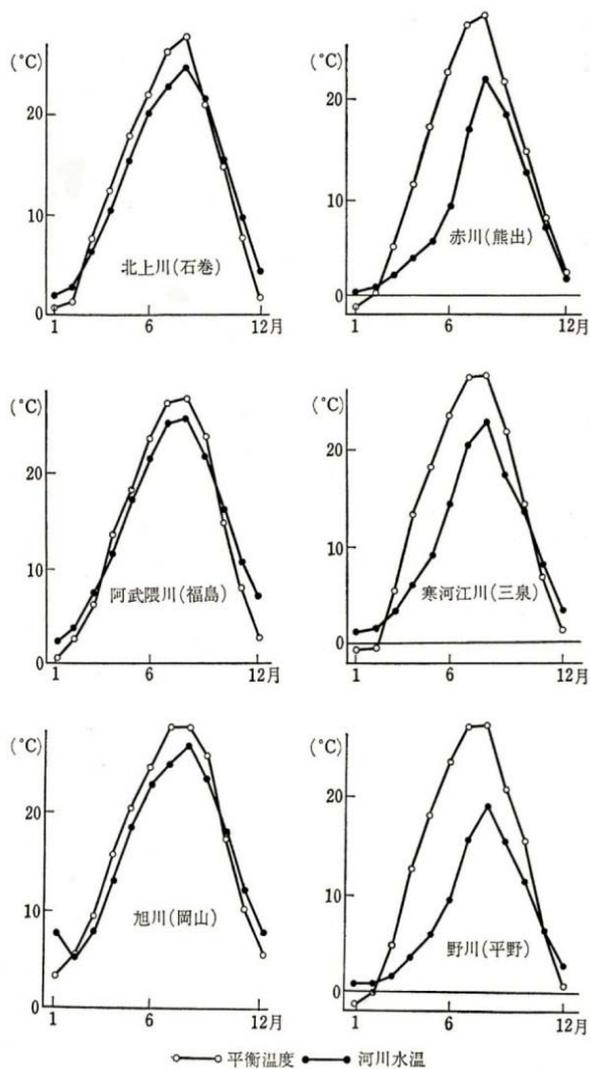


図-Ⅱ.6.2.1 積雪の少ない地方(左列)と多い地方(右列)の河川水温変化の比較

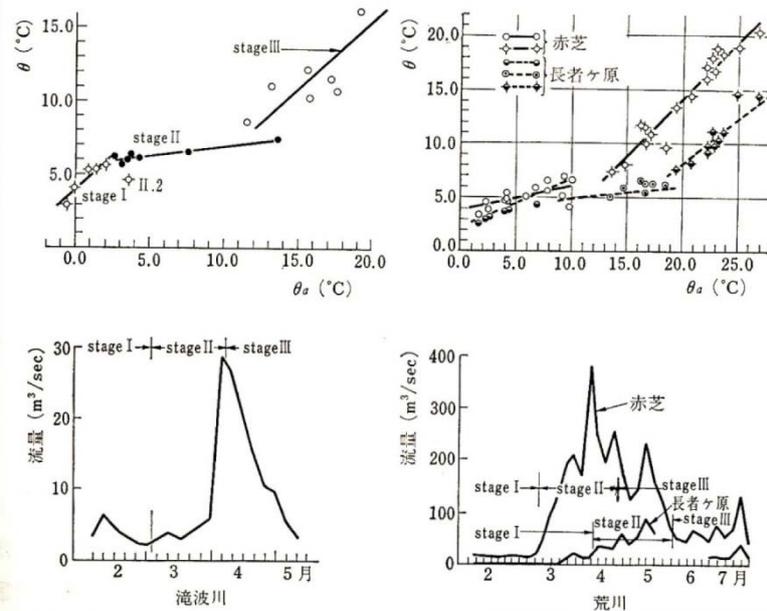


図-Ⅱ.6.2.2 滝波川と荒川における融雪期の水温と流量の変化

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月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(θ = a + b · θa)

番号	水系	河川名	観測地点	流域面積 (km ²)	海拔高度 (m)	統計年数	a	b	平均偏差 (°C)
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。ここでは、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	
			橋本	1.30E-03	9.00E-04	8.00E-04	7.00E-04	(ア)	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	北見	1.10E-03	5.00E-04	3.00E-04	2.00E-04	(ア)	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	
			豊上川	7.30E-03	4.50E-03	2.20E-03	(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	名取川	広瀬川	下野	8.80E-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
			広瀬橋	9.00E-04	5.00E-04	2.00E-04	-9.00E-05	(イ)	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	3.00E-06		(ア)	国衆橋	3.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-2.00E-05	2.00E-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-08							
	阿賀野川	阿賀野川	山科	1.70E-03	1.30E-03	-1.00E-04	-5.00E-04	(ア)	守人橋	-4.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	-4.00E-05	1.00E-04	2.00E-05	4.00E-05	2.00E-06	
			馬下	9.10E-03	7.90E-03	3.40E-03	6.00E-04	(ア)	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
	荒川	荒川	戸田橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	9.00E-05	3.00E-05	-2.40E-03	1.00E-04	-2.00E-04							
			戸田橋	2.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	9.00E-05	3.00E-05	-2.40E-03	1.00E-04	-2.00E-04							
			北北橋	3.00E-04	3.00E-05	3.00E-04	-6.00E-05	-2.00E-04	-1.80E-03	8.00E-06	-1.00E-05							
			益田橋	2.00E-04	3.00E-05	1.00E-04	-8.00E-05	5.00E-05	-1.90E-03	5.00E-05	2.00E-06							
			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-05							
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								
振切橋			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)	見取橋	4.00E-04	2.00E-05	2.00E-04	-6.00E-06	-3.00E-04	-7.00E-04	-3.00E-04	4.00E-05	4.59	
		調布橋	-6.00E-04	-3.00E-04	7.00E-05	3.00E-04	(ウ)	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		
		大野橋	1.00E-04	1.00E-05	6.00E-05	2.00E-04	5.00E-05	6.00E-06	4.00E-05	4.00E-05								
		子子橋	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	7.00E-05	-4.00E-04	-9.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05								
鶴見川	鶴見川	亀の子橋	6.00E-04	4.00E-04	8.00E-04	5.00E-04	(ア)	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	4.82	
		大綱橋	4.00E-04	-2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-04	-4.00E-04	-2.00E-03	-1.00E-04	-4.00E-05								
		大綱橋	4.00E-04	-2.00E-05	1.00E-04	-3.00E-04	-4.00E-04	-2.00E-03	-1.00E-04	-4.00E-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	利根川	高松	-9.00E-04	-3.00E-04	-2.00E-04	6.00E-05	(ウ)	高松	2.00E-04	6.00E-06	4.00E-05	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.60E-03	9.00E-06	-6.00E-06	4.77	
		赤川	-3.30E-03	2.80E-03	3.30E-03	1.30E-03	(ウ)	赤川	1.00E-04	3.00E-05	2.00E-04	-9.00E-05	8.00E-06	-7.00E-06	3.00E-05	1.00E-06		
中部	豊川	豊川	石田	-6.00E-04	-2.00E-04	2.00E-05	1.00E-04	(ア)	吉田大橋	6.00E-04	6.00E-06	-1.00E-05	-3.00E-05	-1.00E-05	-4.00E-04	-2.00E-06	-3.00E-06	
			当古	-6.00E-04	-3.00E-04	-1.00E-04	7.00E-06	(ア)	江島橋	1.00E-04	3.00E-05	1.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-2.00E-04	-2.00E-06	-2.00E-06	-5.46
			忠節	5.00E-04	2.20E-03	2.00E-03	3.00E-04	(ア)	当古	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
			豊橋	-6.00E-04	2.10E-03	2.50E-03	2.20E-03	(ウ)	錦島大橋	1.00E-04	1.00E-05	3.00E-05	-1.00E-05	-3.00E-05	-3.00E-05	2.00E-05	-4.00E-07	-2.73
	木曾川	長良川	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							
			津海大橋	9.00E-05	1.00E-05	1.00E-04	-6.00E-05	5.00E-05	-1.40E-03	2.00E-05	-3.00E-06							
			津海大橋	2.00E-04	1.00E-05	2.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-04	-1.10E-03	4.00E-05	-6.00E-06							
			藤川橋	2.00E-05	1.00E-05	4.00E-05	-3.00E-05	-6.00E-05	-8.00E-05	1.00E-05	-6.00E-07							
	柳田川	柳田川	柳田橋	8.00E-05	3.00E-05	-7.00E-06	2.00E-06	6.00E-05	-9.00E-04	-4.00E-06	-5.00E-08							
			柳田橋	8.00E-05	3.00E-05	-7.00E-06	2.00E-06	6.00E-05	-9.00E-04	-4.00E-06	-5.00E-08							
九頭竜川	九頭竜川	中角	-1.20E-03	-1.60E-03	-1.10E-03	2.00E-04	(ウ)	丸頭竜川河口	2.00E-04	1.00E-05	9.00E-05	-4.00E-05	-2.00E-06	-2.00E-04				
		高屋橋	2.00E-04	6.00E-07	4.00E-05	-1.00E-05	2.00E-05	-1.00E-04										
		小野橋	6.00E-05	5.00E-05	6.00E-04	-1.50E-05	9.00E-04	-5.80E-03	5.00E-04	-1.00E-04								
		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								
大和川	大和川	王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	(ア)	御妻大橋	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	
		王寺	2.00E-04	2.00E-04	9.00E-05	1.00E-04	(ア)	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	尾闾山	-6.00E-04	-4.00E-04	-8.00E-04	-4.00E-04	(イ)	尾闾山	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
			佐渡川	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	矢野川	新谷	-6.00E-05	-2.00E-05	-1.00E-06	-3.00E-07	(イ)	新大橋	-9.00E-04	-3.00E-05	-2.00E-04	1.00E-05	4.00E-05	2.00E-04			4.84
			出合	-4.00E-04	-6.00E-06	7.00E-05	4.00E-05	(ウ)	牛々橋	-3.00E-05	4.00E-06	-5.00E-05	-6.00E-06	2.00E-05	-5.00E-04			
			土讃川	8.00E-06	2.00E-05	1.00E-05	-2.00E-06	(イ)	出合橋	4.00E-05	3.00E-05	2.00E-05	-2.00E-04	-5.00E-04	-1.00E-04	-2.00E-05	3.84	
			土讃川	8.00E-06	2.00E-05	1.00E-05	-2.00E-06	(イ)	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)は柳田川（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

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	1982-2007 (全期間)			1982-1995 (前半期)			1995-2007 (後半期)			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
				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					
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	
阿賀野川 宮古橋			北陸	16.2	-0.040		16.4	-0.111		16.0	-0.023		1670	4.84	18.5	-0.105	
阿賀野川 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	D	横ばい・平均型	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	E	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	
木曾川 横溝蔵			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	F	やや上昇・平均型	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	G	やや上昇・やや高温型	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			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	H	上昇型	東北	13.7	0.074	*	13.4	0.211	*	14.1	0.013		1244	4.84	16.5	0.071	
木曾川 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	I	やや上昇・やや高温型	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	J	やや上昇・やや高温型	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	K	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	
木曾川 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	L	やや上昇・やや高温型	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	M	やや上昇・やや高温型	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	N	やや上昇・やや高温型	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	O	やや上昇・やや高温型	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	P	やや上昇・やや高温型	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			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	Q	やや上昇・高温型	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	R	上昇型	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			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	S	上昇型	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的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的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、人為的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（ $C\cdot Q$ 式）あるいは、負荷量～流量式（ $L\cdot Q$ 式）がある。負荷量（ L ）、水質（ C ）と流量（ Q ）の間には、 $L=CQ$ の関係があるので、 $C\cdot Q$ 式と $L\cdot Q$ 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、 $L\cdot Q$ 式は相関関係をとる両者に流量が入っているため $C\cdot Q$ 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 $L\cdot Q$ 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。

$$L = aQ^b$$

式- II 6.3.1

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 $L(m^3/s)$: 単位時間あたりに流出する負荷体積量、 $Q(m^3/s)$: 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。

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)

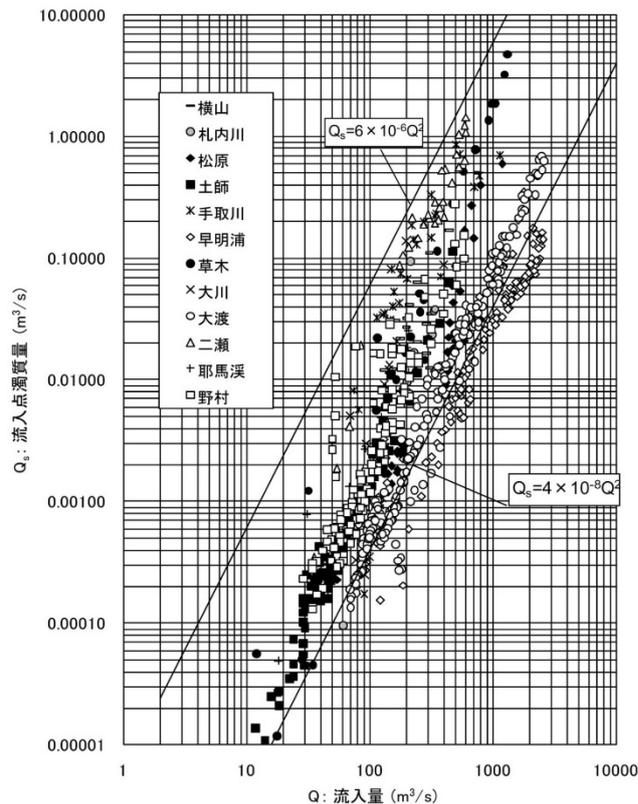


図-II.6.3.1 貯水池の流入濁質量と流入量の関係

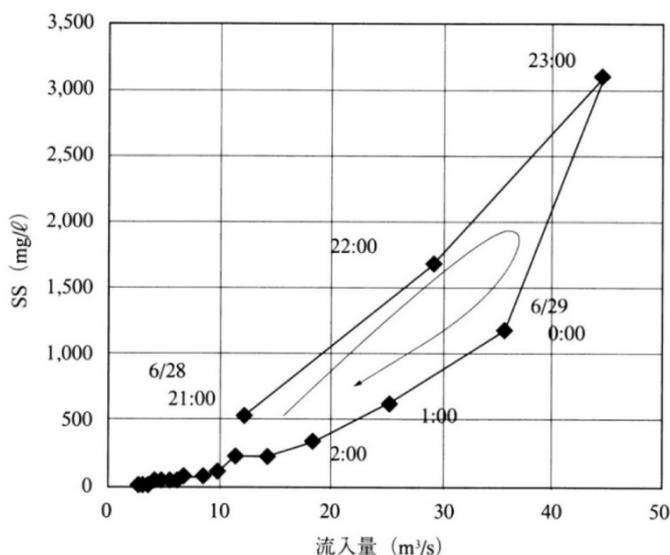


図-II.6.3.2 流入濁質の出水中的の変化

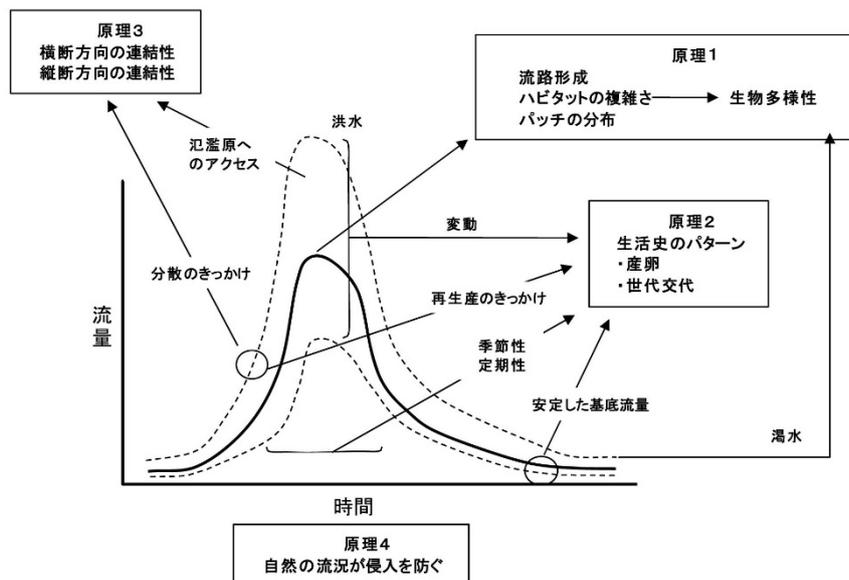


図-Ⅱ.6.3.3 水生生物の多様性と河川の自然の流況

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 のようになる。

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、優占種が競争の結果、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争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、競争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争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争モデル(theory of resource competition in a heterogeneous 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なものである。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るであろう。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。

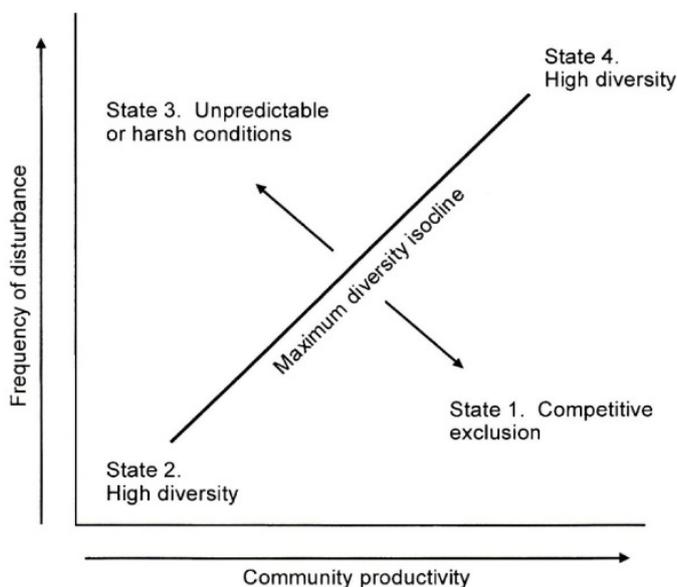


図- II . 6 . 3 . 4 生物多様性の動的平衡モデル

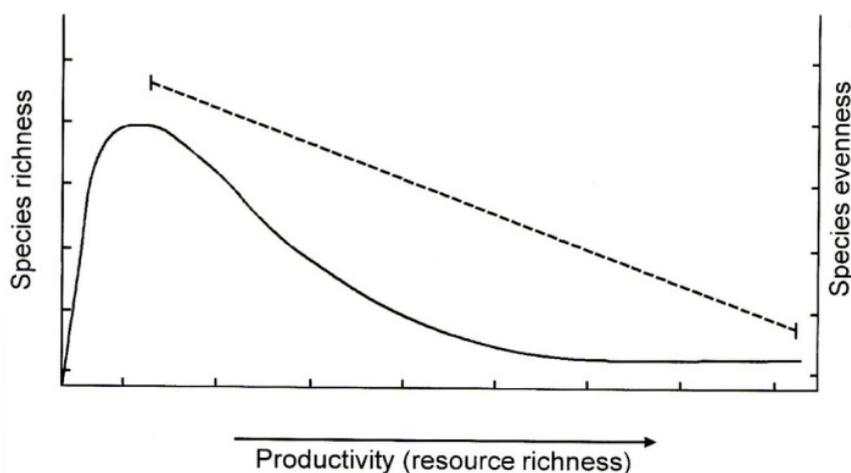


図- II . 6 . 3 . 5 Tilman の資源競合モデル

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)
		・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)
	様々	・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)
水域の攪乱	小	・比較的に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0.1m ³ /sを0.5、1.0、1.5、2.0、3.0m ³ /sに増加、ピーク継続時間20分)では、出水前の現存量によるが、少なくとも1.0m ³ /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)
		・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)	・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0.8m ³ /sを10.7m ³ /sに増加、ピーク継続時間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)
	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1.0m ³ /s→100m ³ /sに増加(ピーク流量継続時間: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・珪藻類は大きく減少、藍藻類は残存率高い)、底生動物は早瀬・平瀬でカゲ目やトビケラ目が減少、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)		
大	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	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)	・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ス、ドジョウなどが冠水した場所で産卵(片野 1998)
	水際域の浸食・堆積	・冠水頻度 →地味状況に大きく関与(Ⅰ、Ⅲ)	・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)
	・水際域の浸食・堆積による砂州の形成(Ⅰ)	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200m ³ /s→1,270m ³ /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のみ見られた。魚類への影響では、在来種は流れの緩やかかなところに逃避、移入魚種(帰化魚)も流失せず(鷲谷 1998)(Collier M 1997)	
大	流路の変更及び砂州の移動	・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する生物の保全(Ⅰ)	・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)
	数年~10数年に一度の出水	・河原に依存して生育する生物の保全(Ⅰ) →生物多様性の維持(鷲谷 1999)(Ⅰ~Ⅲ)	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 dr	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	曲がりが多い	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。

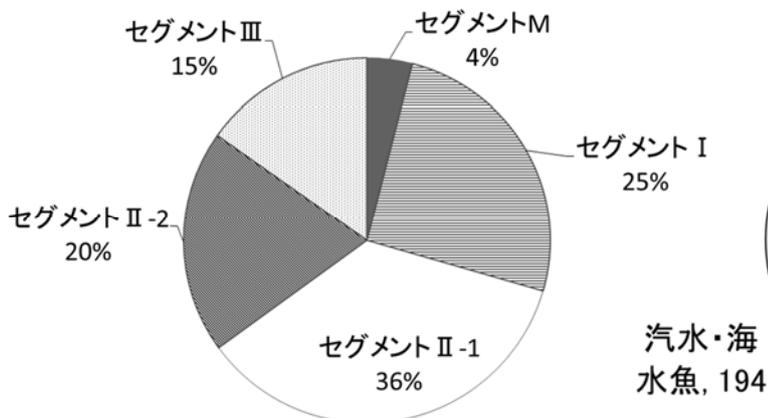


図-Ⅱ.6.3.6 調査地点のセグメントの割合

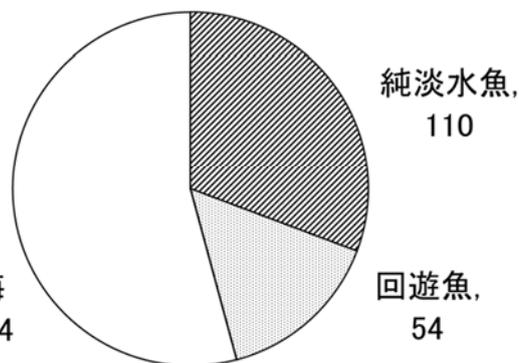


図-Ⅱ.6.3.7 確認種の割合 (数字は種数)

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مام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。

第 部

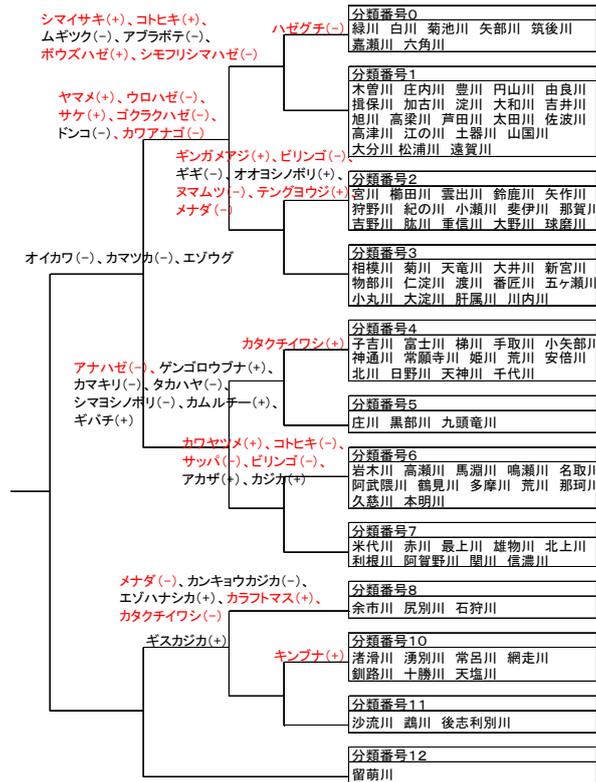


図-Ⅱ. 6. 3. 8 水系単位・全魚種での分類結果（樹状図）



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。

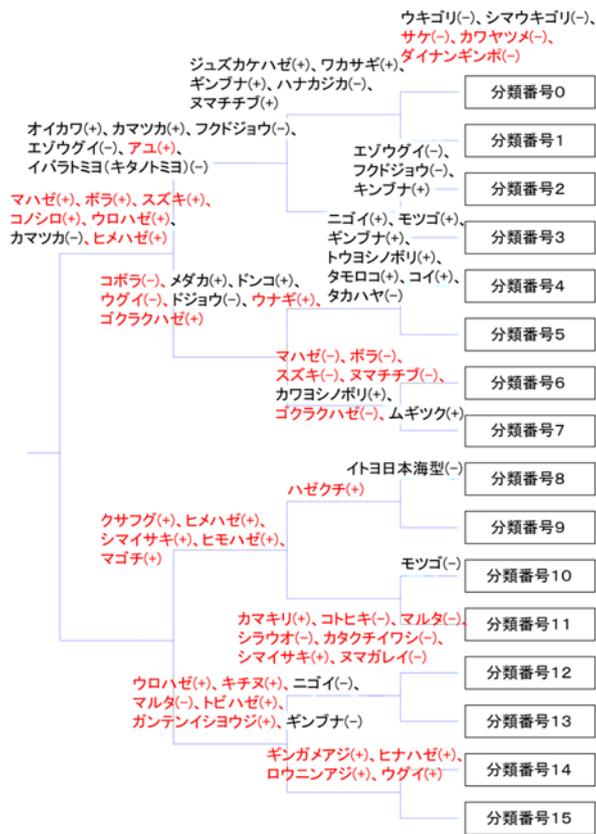


図-Ⅱ.6.3.10 調査地点単位・全魚種での分類結果 (樹状図)

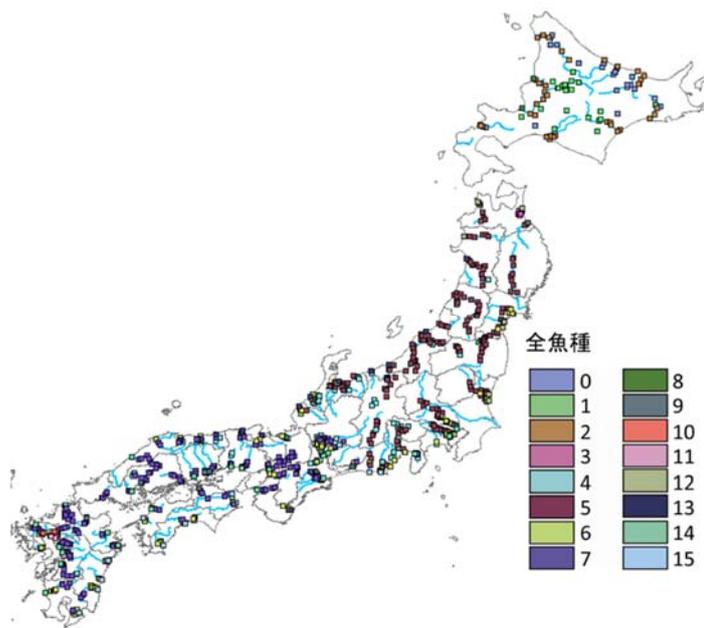


図-Ⅱ.6.3.11 調査地点単位・全魚種での分類結果

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、

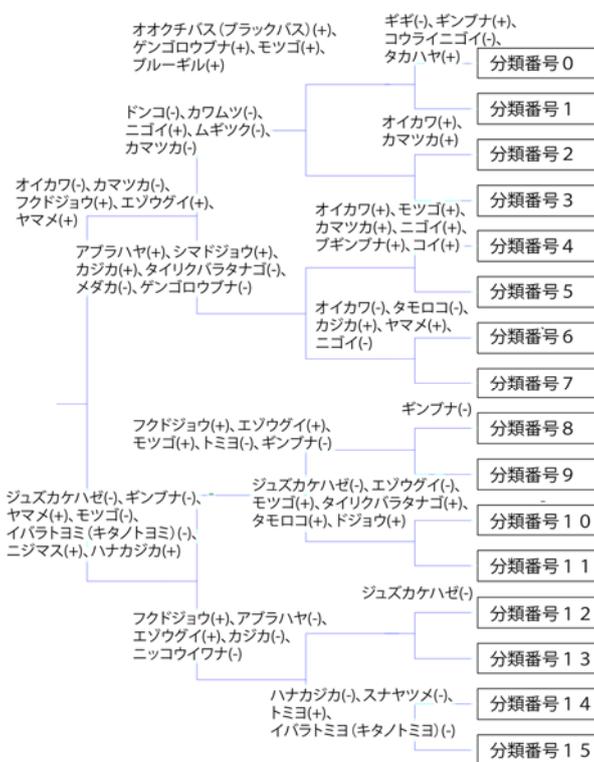


図-Ⅱ.6.3.12 調査地点単位・純淡水魚種での分類結果（樹状図）

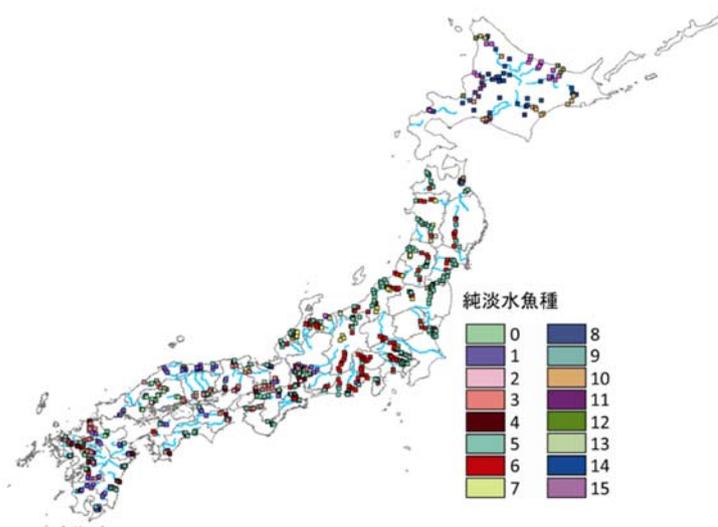


図-Ⅱ. 6. 3. 13 調査地点単位・純淡水魚種での分類結果

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。

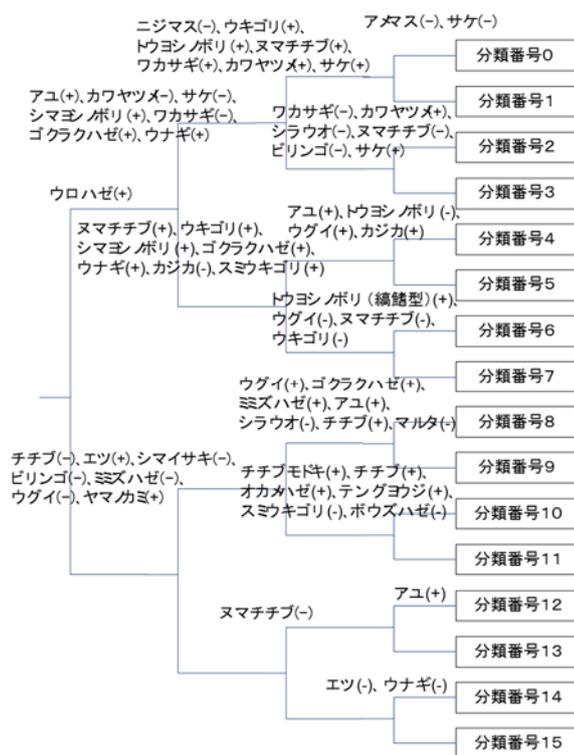


図- II. 6. 3. 14 調査地点単位・回遊魚種での分類結果（樹状図）

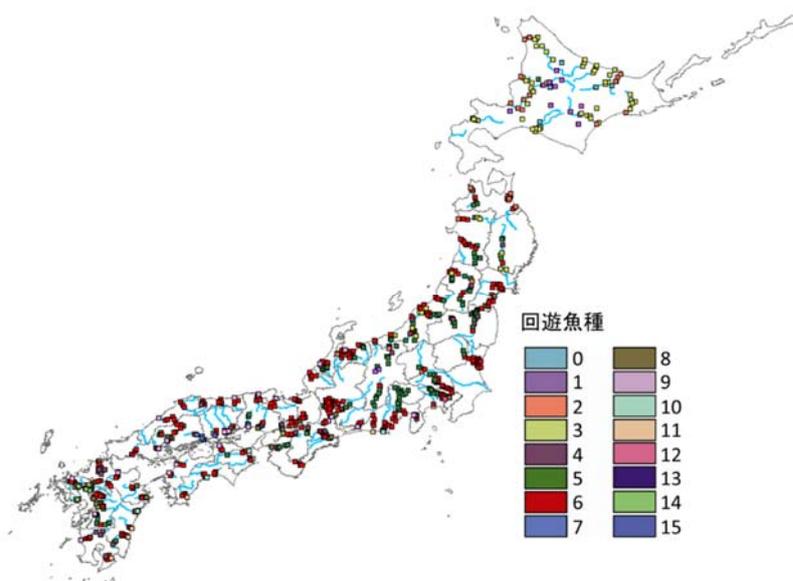


図-Ⅱ.6.3.15 調査地点単位・回遊魚種での分類結果

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。このよう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（アマチチブ、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

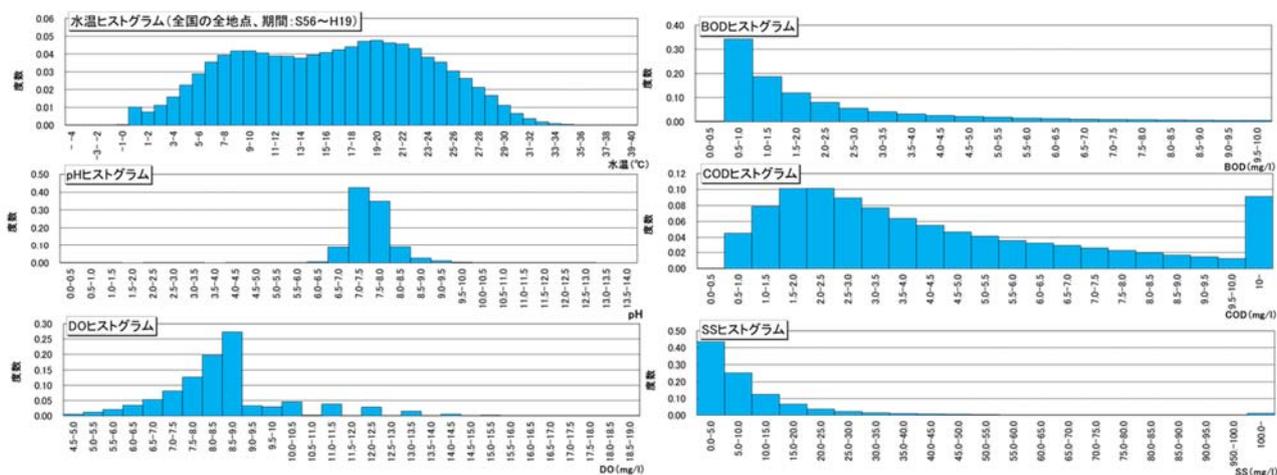


図-Ⅱ.6.3.16 全国河川水質測定値頻度分布図

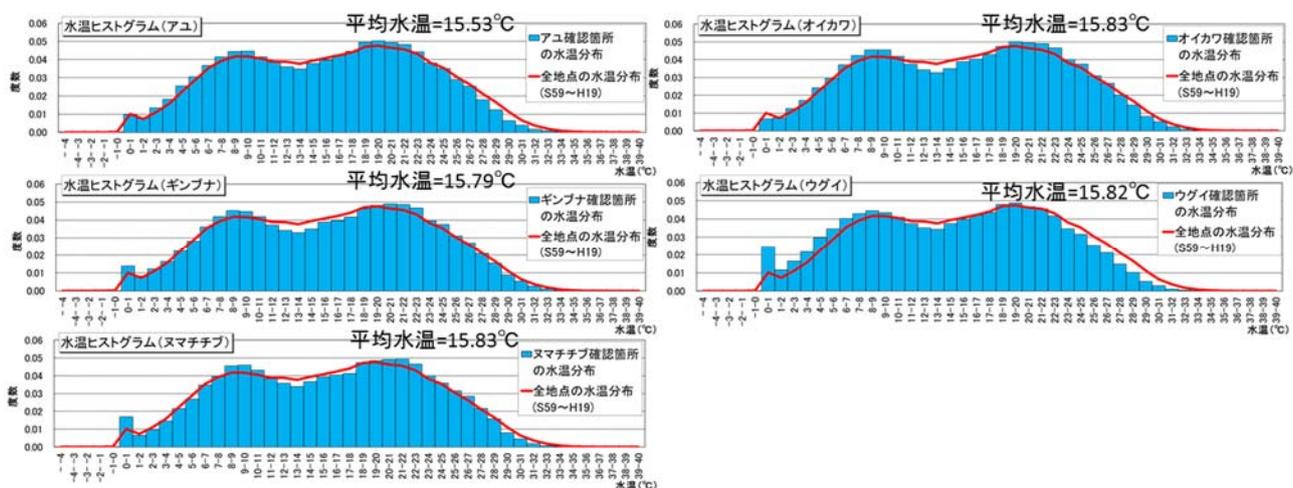


図-Ⅱ.6.3.17 広域に分布する魚類の確認地点と全水質調査地点での水温頻度分布の比較

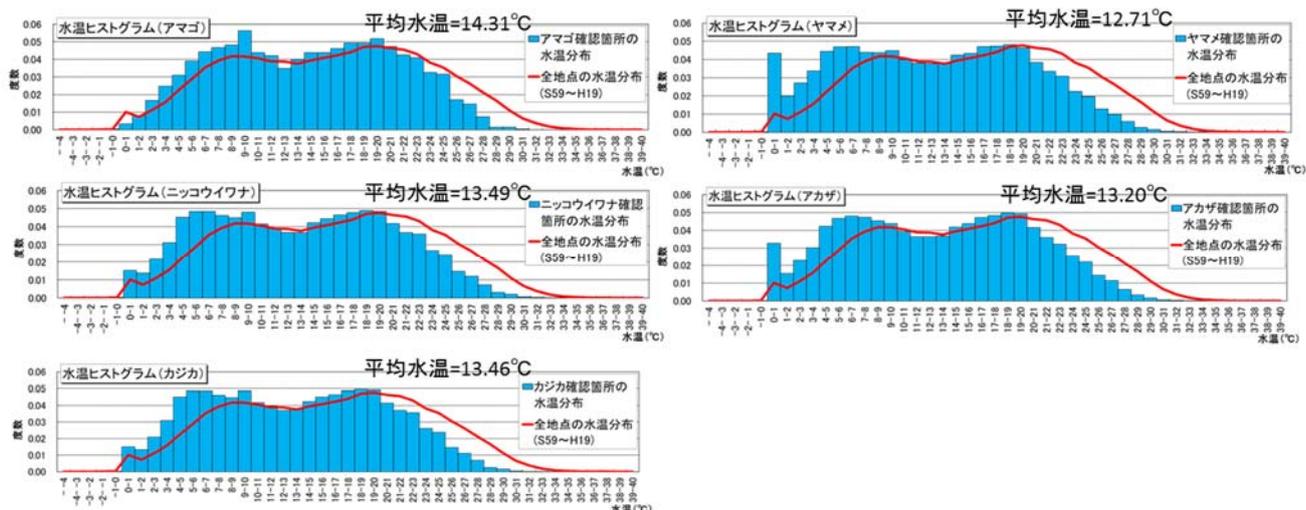


図-Ⅱ. 6. 3. 18 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

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。

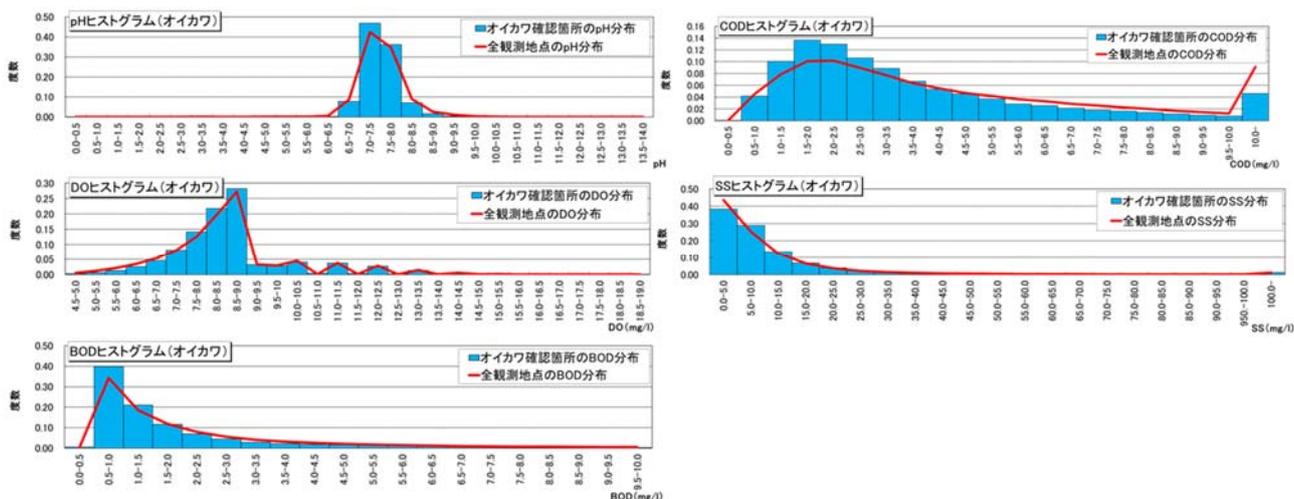


図-Ⅱ.6.3.19 広域に分布する魚類（オイカワ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

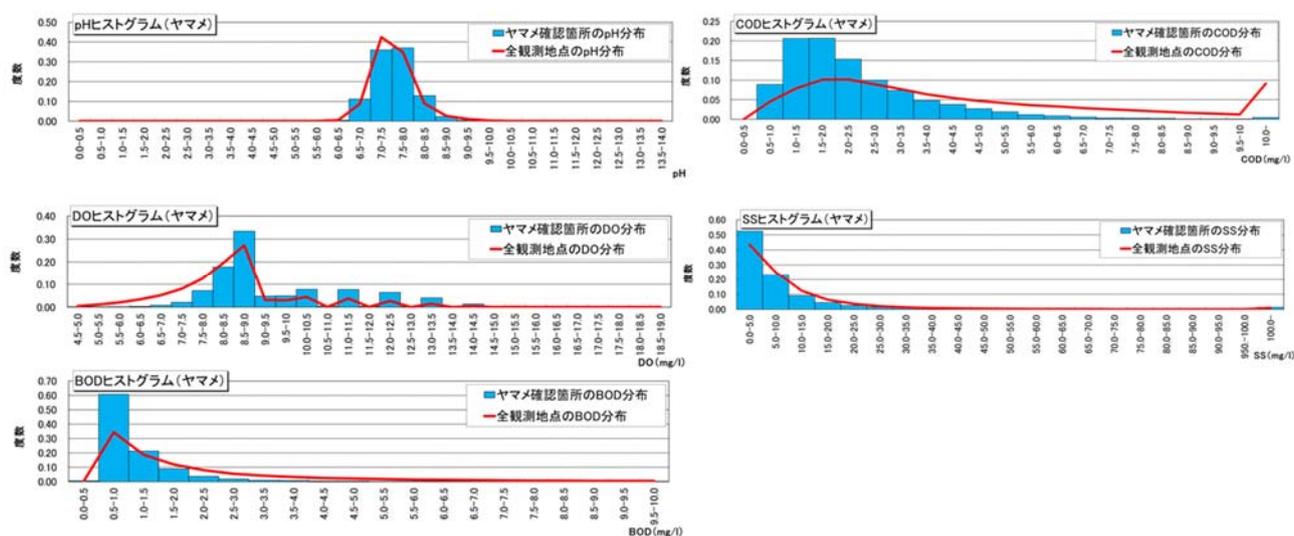


図-Ⅱ.6.3.20 狭温性の冷水魚（ヤマメ）の確認地点と全水質調査地点での水質頻度分布の比較

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へ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ると良さそうである。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らるる影響

(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）。

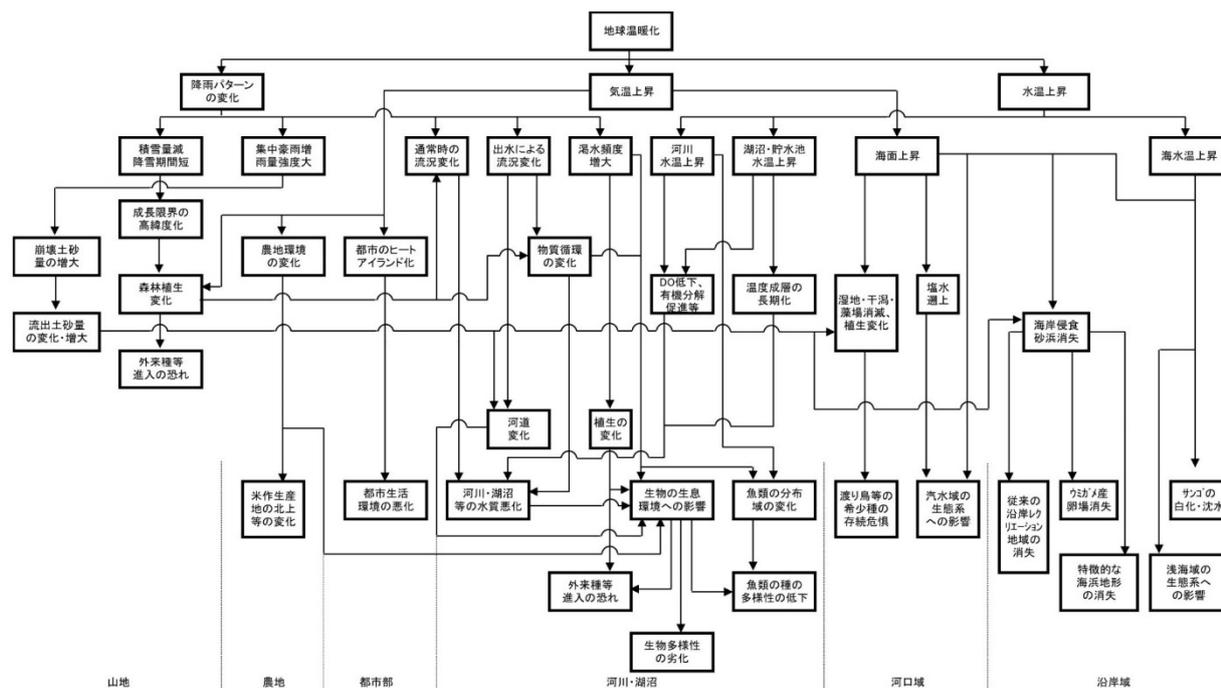


図-Ⅱ.6.4.1 地球温暖化に伴う河川環境・流域環境への影響イメージ

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。

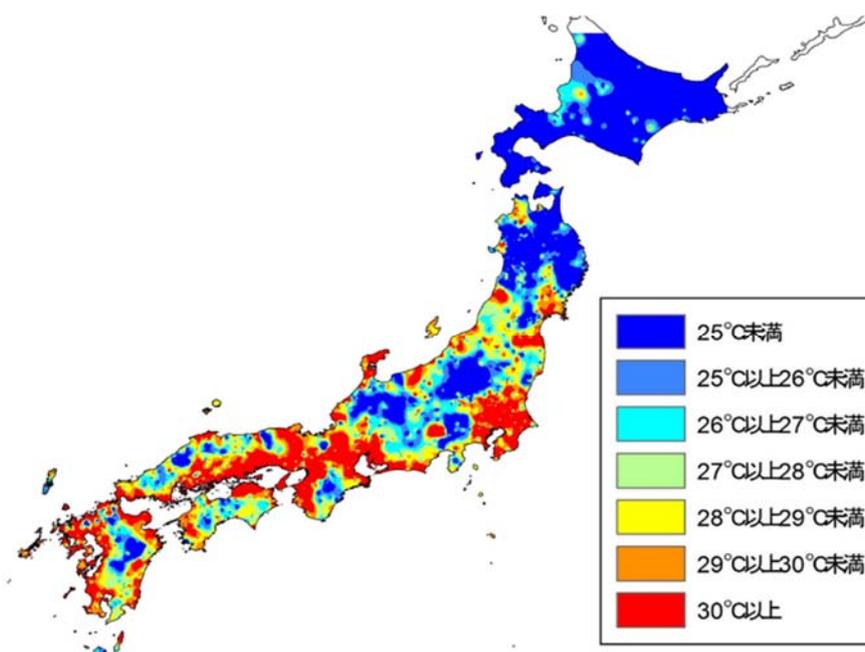


図-Ⅱ.6.4.2 最高水温の推定全国分布（現状）

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°C 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°C 上昇した場合、また、極端な例として 3°C 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°C 未満の地域面積は全体の約 5%、 26°C 未満の地域面積が約 40% となっている。ここで 26°C 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°C 上昇すると、全国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°C 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。

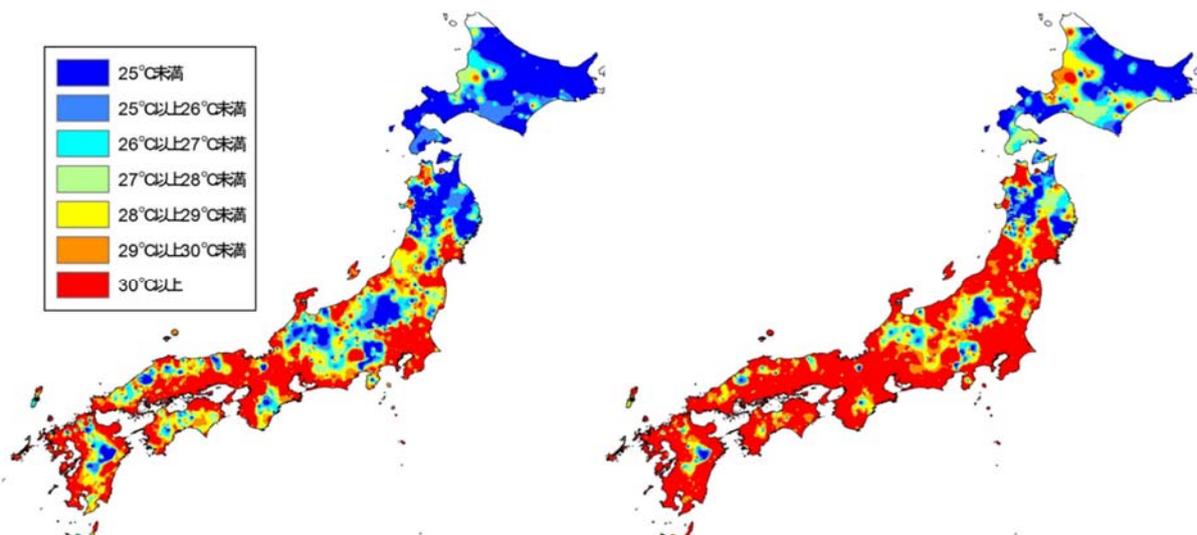


図- II . 6. 4. 3 最高水温の推定全国分布 (1°C上昇)

図- II . 6. 4. 4 最高水温の推定全国分布 (3°C上昇)

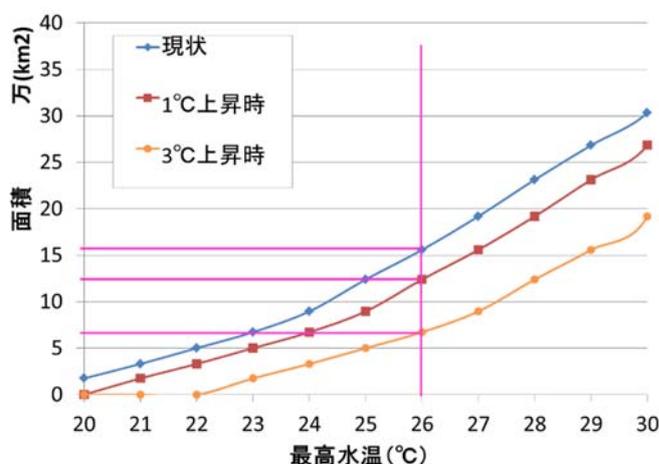


図- II . 6. 4. 5 最高水温ごとの国土面積の累計 (全国土面積に占める割合による表示)

(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のかについて、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るだろう。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）溪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
- 鷺谷いづみ (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.
- 鷺谷いづみ (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., Prestegard, 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を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 $\alpha - 1$ が、河川整備労力倍率の増大率 $\gamma - 1$ 、氾濫可能性倍率の増大率 $\varepsilon - 1$ 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 の气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観測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多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。

○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

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CO₂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。

○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

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、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。

○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

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、 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 、 ε 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使い方（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。

○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

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、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