

水災害分野における現場からの気候変動適応
～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための
河川技術の方向～

河川研究部長

藤田 光一

水災害分野における現場からの気候変動適応 ～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～

河川研究部長 藤田 光一

1. はじめに

社会資本整備審議会が河川分科会「気候変動に適応した治水対策検討小委員会」での検討を通じてとりまとめた答申（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」は、当分野における日本で初めての本格的な適応策検討である。本答申では、激化する水災害を完全に防御することは難しいため、人的被害を抑え、国家機能の麻痺の回避など被害の最小化を目標とする基本的方向性の下で、施設整備に加え、地域づくりと一体となった適応策、危機管理対応を中心とした適応策なども含めて、水災害に適応した強靱な社会を総合的に目指す必要性が強調されている。

その後、気候変動予測技術の進展は急で、気候変動による水災害に関わる外力や基本量の変化に関する情報が大幅に充実してきている。本稿では、そうした成果を踏まえつつ、我が国の河川および流域などの実態を踏まえたとき、気候変動予測の研究成果が現場での適応策の検討において具体的にどのような意味を持つかを述べる。その上で、諸外国と対比した場合の我が国における気候変動適応の特徴、気候変動予測が持つ不確実性の捉え方、適応策と既往の施策との関係についての話題を絡めながら、気候変動影響により苛烈化が懸念される水災害を乗り切ることができる靱性を持った国土づくりに向け、現場の実態を見すえてのポイントを解説することを狙う。

なお、適応の対象として、海面上昇、寡雨・渇水、生態系への影響なども同様の重要性を持つが、本講演では限られた紙数・時間の中で議論が散漫にならないように、豪雨の増加が直接的にもたらす影響に絞って話を進める。また、講演者の昨年度の講演内容（藤田 2011）と密接な関係を持つので、必要に応じ併読いただければありがたい。以下、多くの数字を示しながら議論を進めていくが、全体として検討途上であり、これらを個々の施策に直接適用するにはまだ距離があること、本講演における数字は、あくまで適応策検討の方向性やポイントを掘り下げるための材料としての位置づけであることにご留意いただきたい。

2. 気候変動予測結果の翻訳—治水方策への影響が見えるように

2. 1 翻訳の重要性

日本の河川流域は、大陸の河川に比較してスケールが小さく、地形も急峻かつ複雑であるため、水害への対応を実務レベルで検討するのに必要な解像度あるいは細密性をもって、豪雨という極端現象の地球温暖化影響を再現・予測することは従来相当に困難とされてきた。しかし、計算能力の急伸を背景としたモデル改良と高解像度化（たとえばこの5年でも日本周辺の計算メッシュが20kmから5km, 2km, さらに1kmと急速に細密になってきている）の進展によって、少なくとも外形的には、気候変動による豪雨変化の予測技術が、

日本の河川流域スケールにも適用しうるレベルに到達しつつある。

図-1 は、文部科学省による「21 世紀気候変動予測革新プログラム」(2007-2011 年度；以下「革新プログラム」と略称；

<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports.html>) の下で行われた

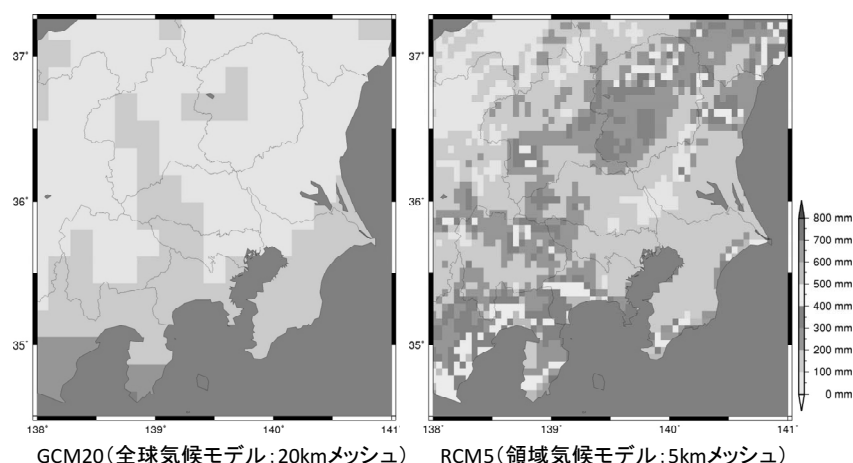


図-1 大気モデルの超高解像度化は何をもたらすか？

※両者とも、革新プログラムで実施された前期実験結果から、2095 年についての 72 時間最大雨量の空間分布を表示

「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」(研究代表者；気象庁気象研究所 鬼頭昭雄 気候研究部長)において用いられた大気モデルの出力結果の一例である。この研究では、従来用いられていなかった水平方向に非常に細かい格子を持った大気モデルによる極端な現象の正確な予測が検討されており、20km 格子間隔(メッシュ)で地球全体を覆う大気モデル(GCM20)をベースに、日本付近の領域では5km, 2km および 1km 格子間隔を採用した大気モデル(それぞれ RCM5, RCM2, RCM1)が構築されている。この図から、計算メッシュ 20km と 5km とでは、降雨の空間分布に与える山地地形の影響の再現のレベルが大きく異なることが容易に理解される。その絶対的な精度は別にしても、RCM5 のような超高解像度の大気モデルは、降雨現象について、日本の河川流域スケールに見合う細密な情報を提供するものと言える。

となれば、いよいよ、地球温暖化に伴う気候変動による豪雨変化の予測結果が実河川の治水方策に具体的にどのような意味を持つのか、すなわち「気候変動予測結果の実務への翻訳」がより一層重みを持つことになる。その理由は次のようである。第一は、科学技術分野として急速な進展が見られるとはいえ、後述のように気候変動予測結果の実務への適用性には依然課題があり、したがって、治水方策に関わる実務技術者が予測結果を使いこなすリテラシーを身につけ、気候変動予測の成果を最大限かつ適切に活用する状況をつくるのがますます大切となるからである。第二は、気候変動予測にたずさわる研究者と適応策検討を担う研究者や実務技術者との間での双方向のやりとりを活発化することが、適応策の検討において今後重要となり、実際の適応策検討に生かせる気候変動予測について、実務の側からも積極的に発信することが求められるからである。

2. 2 翻訳の基本的なスタンスー気候変動影響の“伝播特性”を把握する

ここでは、いたずらに細部に入り込むことを避け(実際の適応策の検討では詳細な検討が必要なのは当然だが)、全体の構図を見通すことを優先して極力単純化した方法をとる。すなわち、以下の4つを調べることを土台に「翻訳」作業に取りかかる。

- **雨** 豪雨（ある継続時間，ある超過確率の降雨量）が気候変動によりどう変化（増大）するか？ → 式(1)の α （豪雨量倍率）はいかほどか？

$$r_f = \alpha \cdot r_p \quad \cdots (1)$$

r_f ：将来（気候変動後）の豪雨量， r_p ：現在（気候下）の豪雨量

$$\text{別の表現として，豪雨量変化率：} \alpha - 1 = \frac{\Delta r}{r} \quad \cdots (2)$$

Δr ：気候変動による豪雨量変化

- **流量** それにより洪水ピーク流量はどう変化（増大）するか？ → 式(3)の β （洪水ピーク流量倍率）はいかほどか？

$$Q_f = \beta Q_p \quad \cdots (3)$$

Q_f ： r_f による洪水ピーク流量（気候変動後）

Q_p ： r_p による洪水ピーク流量（現在気候下）

- **河川整備労力** 気候変動による上記の変化（増大）量を河川整備で全て吸収しようとした時，目標とする治水安全度を達成するための河川整備に要する労力がどれだけ増えるか（いわば“逃げ水効果”の度合い）？ → 式(4)の γ （河川整備労力倍率）はいかほどか？

$$W_f = \gamma W_p \quad \cdots (4)$$

W_p ：所定の治水安全度を達成するために必要な河川整備の労力（現在気候下）

W_f ：上記と同じ所定の治水安全度を達成するために必要な河川整備の労力（気候変動後；将来）

- **氾濫可能性** 河川整備に関して適応策をとらなかった場合に，気候変動影響によって河川からの氾濫が起こる確率がどれだけ変化（増加）するか？ → 式(5)の ε （氾濫発生確率の倍率）はいかほどか？

$$\left(\frac{1}{T_f}\right) = \varepsilon \left(\frac{1}{T_p}\right) \quad \cdots (5)$$

T_p ：現在気候下での氾濫発生の確率年

T_f ：気候変動後（将来）の氾濫発生の確率年

これらを俯瞰的に見ることは，図-2のように，気候変動による豪雨量の変化（増大）が治水方策に関する諸項目にどのように伝播していくか？を大局的に把握することを意味する。以下，この天（気候変動予測）から地（河川・流域における治水方策の実務）への伝播の大まかな特性を見ていく。

2.3 伝播特性に関わる α , β , γ , ε の算定法

技術検討の詳細を述べることは本講演の主目的ではないので参考文献（服部ほか2012）にゆずり，ここでは算定法の要点のみを説明する。

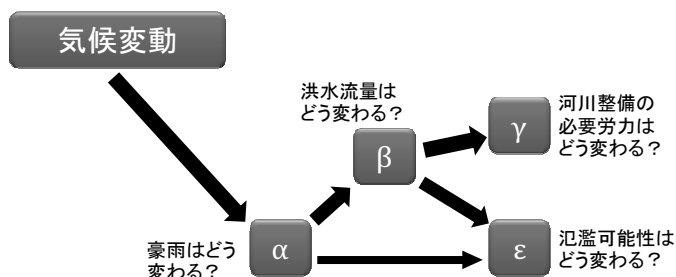


図-2 気候変動による豪雨量の変化（増大）が治水方策に関する諸項目にどのように伝播していくか？

(1) 豪雨量の倍率 α

気候変動予測については、前述の気象庁気象研究所による大気モデル GCM20 と RCM5（開発段階にしたがって、いずれにも前期バージョンと後期バージョンがある）を用いた温暖化予測実験の結果（鬼頭（研究代表者）2011）を用いている。現在（1979～2003 年）、近未来（2015～2039 年）および将来（2075～2099 年）の降雨量出力データを用い、継続時間 24, 48, 72 時間等の年最大雨量を

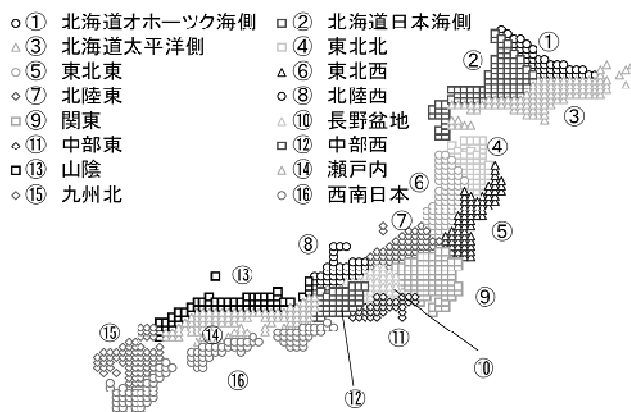


図-3 豪雨変化の算定に用いた地域分割（16 分割）

抽出し、河川整備基本方針で計画対象としているようなレベルを中心とした超過確率年に対応する豪雨について、[現在→近未来]、[現在→将来]に関する α 値を算出している。

ここで問題となるのは、温暖化予測実験の計算期間が 25 年程度であり（地球シミュレーターをもってしても多ケースの予測実験を行うだけの余裕はまだ無い状況）、超過確率年 100～200 年の豪雨量を推定するにはデータ数が少ないことである。そこで、限られた期間の予測実験結果からより多くのデータ数を確保するため、図-3 に示すように、日本全土を複数の地域に分割し、各分割地域に含まれる n 個の格子点の年最大雨量データ（25 年分）をその地域の雨量特性を反映した 1 組のデータセットとして扱うこととしている（柏井ほか 2008; Linsley ほか 1949）。それでもなお種々の理由で統計的推定に誤差を伴うことから、 α の中央値とともに、その 95% 信頼区間を上位・下位として算出、表示している。

(2) 洪水ピーク流量の倍率 β

河川整備基本方針の策定などに用いられている既往の算定手法を採用して、河川整備基本方針の検討で用いている継続時間に対応した降雨ハイエト（ r_p に対応）から洪水ピーク流量 Q_p を、同様に $r_f = \alpha \cdot r_p$ から Q_f を算定し、 β 値を得るという手法を用いている。

(3) 河川整備労力の倍率 γ

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-4 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。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っている。すなわち整備労力の大きさを表す指標として図-4 中の塗られた部分の水量 W を用い、これを整備労力と呼び、 γ 値を算定している。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、現状で想定していた整備労力と、気候変動の

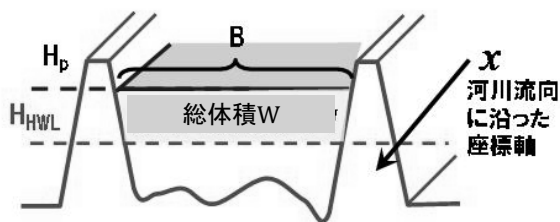


図-4 河川整備労力を概括的に表す指標の算定法の説明

影響を吸収するための拡充分をそれに加えた整備労力に対応する。

さて、河川整備労力の倍率 γ は、一義的には、施設整備（いわゆるハード対応）による気候変化への適応の困難度を概括的に表す1つの指標である。しかし施設整備による適応が困難である場合にはソフト的施策の質・量をより充実させることも必要となり、ソフト施策の効果が簡単に発現するというわけではないことを理解すれば、この指標はまた、ハードとソフトを組み合わせた適応策全般の困難度も評価しうるものとできる。そして、 γ という指標は、気候変動適応の困難度に基づき適応策の方向性の検討を行いやすくすることを狙ったものであり、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い。

（４）河川からの氾濫可能性の倍率 ε

将来気候下における各水系の基準地点流量の生起確率分布を算定し、この分布から現行の河川整備基本方針規模相当の流量の超過確率 $1/T_f$ を求めた。この値と現行の計画規模流量に対応する超過確率 $1/T_p$ （たとえば $1/100$ 等）との比 T_p/T_f として、氾濫生起確率の倍率 ε を算出している。

2. 4 翻訳結果 1－各分割地域で豪雨量はどう変化するか？

まず、豪雨量の倍率 α の算定結果を見ていく。図-5に、4つの気候変動予測モデル（GCM20 前期、RCM5 前期、GCM20 後期、RCM5 後期）それぞれを用いて、各分割地域の年最大日雨量の変化率を算定した結果を、近未来と将来について示す（一連の検討では、年最大降雨に関する気候変動影響が種々の生起確率の豪雨についても同様に現れる

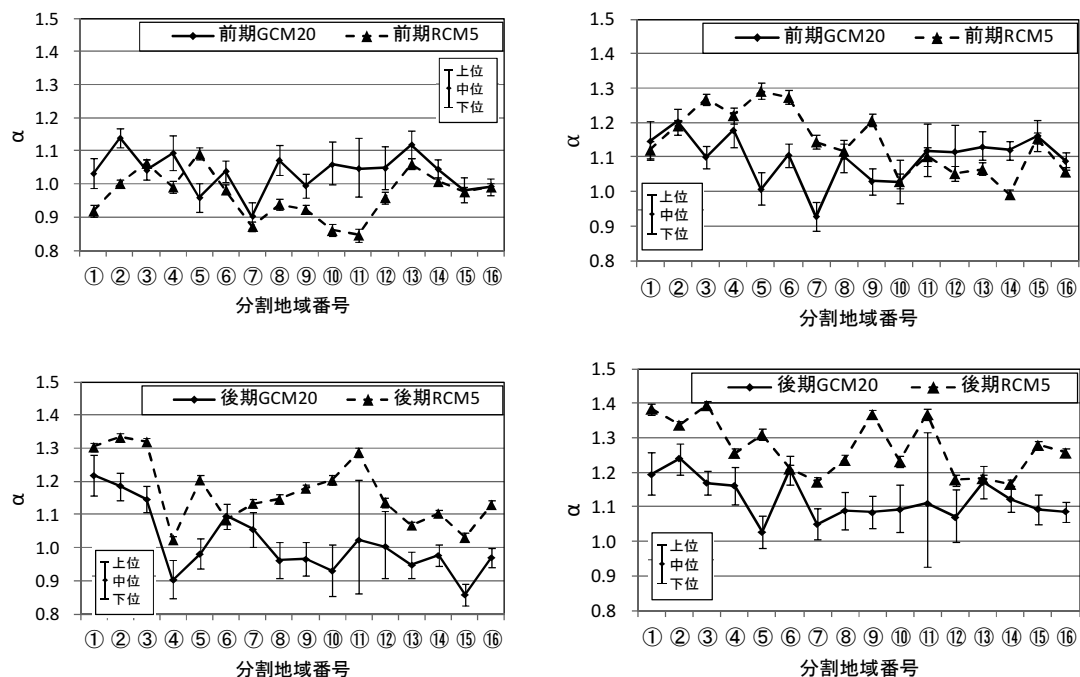


図-5 各気候変動予測モデルによる豪雨量倍率 α (24 時間降雨)

<左：近未来，右：将来>

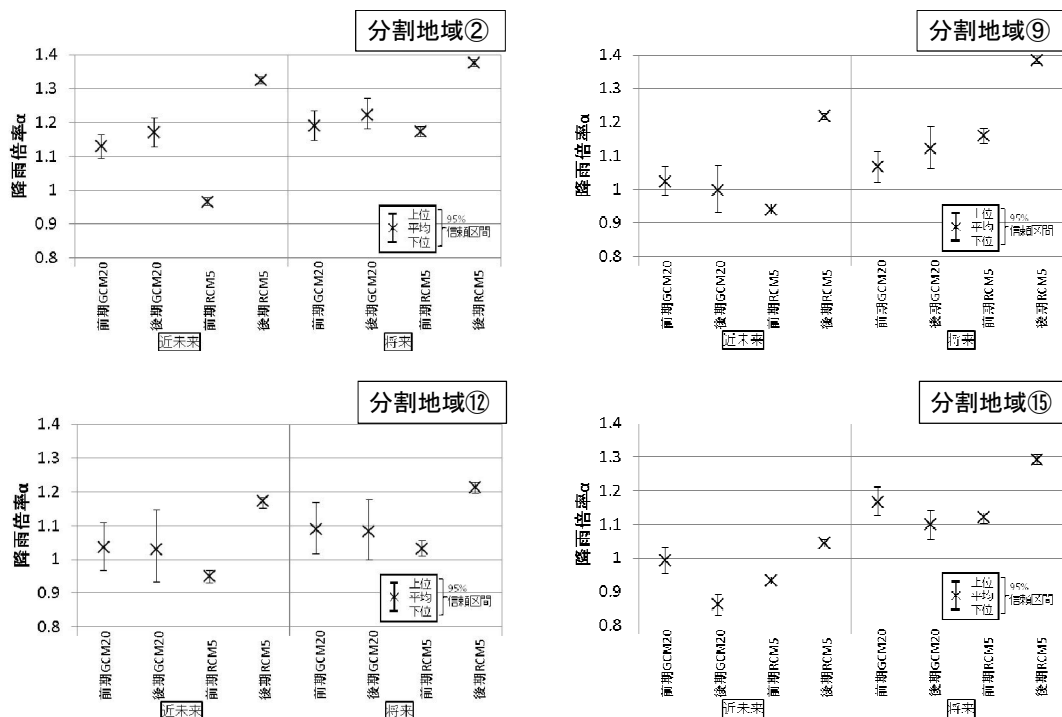


図-6 気候変動予測モデルと近未来・将来の違いによる豪雨量倍率 α の違い（24時間降雨）

という近似的取り扱いを行っている). なお上位と下位の差(95%信頼区間の幅)について, RCM5がGCM20に比べて小さくなっているのは, RCM5の分割地域内の計算格子点数がGCM20の16倍あるという有効データ数の違いによるものである. さて, 図-5から, 将来についてみると, α 値が全体としては1.0付近から1.4付近に分布していること, 中央値, 上位一下位値の幅のいずれについても分割地域によって値がかなり異なっていること, メッシュの小さいRCMによる方がより大きな α 値となる傾向があることがわかる. そして, 全体的には近未来に比較して将来の α 値が大きくなること, しかし近未来の中でもモデルによってはかなり大きな α 値を示しているものがある.

図-6は, 4つの分割地域を取り出し, 4モデルによる近未来と将来の α 値を比較したものであり, 近未来に対して将来の α 値が大きくなる傾向がより見やすくなっている. その上でこの図からは, 計算期間が短いことに起因する個々のモデルの上位一下位値の幅もさることながら, α 中央値のモデルごとの違いもそれなりに存在することがわかる. これが適応策検討にどのような意味を持つかについては, $\alpha \rightarrow \beta, \gamma, \varepsilon$ という伝播特性について述べた後, 再度掘り下げることにする.

近未来は適応策準備の時間が短く施策選択の幅が狭くなることから, 施策検討にとって将来とは異なる重要な意味を持つ. 近未来における豪雨量増加が将来に比べるとそれ程ではないという図-5, 図-6から読み取れる全体的傾向は, 適応策実施に与えられた時間的猶予という観点からは安心材料と言えるが, こうした解釈を実務に反映させる際には計算結果の持つ信頼性や地域特性を踏まえて行うことが必要である.

2. 5 翻訳結果2－豪雨量変化から治水方策に関する諸項目への伝播特性

α （豪雨量倍率）の中央値および上下限值に対して、 β （洪水ピーク流量倍率）、 γ （河川整備労力倍率）、 ε （氾濫可能性倍率）それぞれの全水系単純平均値を算定した結果を図-7に示す。この図から、マクロに見れば、 β 、 γ 、 ε 値となるにしたがって α 値変化の伝播がより増幅して現れること、すなわち、施策に近い指標になるほど豪雨量増大に対する応答の鋭敏度が増すことがわかる。このことは、予測の信頼性の幅の伝播についても同様である。 ε 値や γ 値は（ β 値も一定程度）、気候変動が治水に与える影響の度合い（深刻度）や適応の困難度にある程度対応する概括指標であることから、図-7に示される特性は、豪雨という極端現象の予測結果のわずかなズレが、適応策検討の前提に大きなズレをもたらしうることを示すものと言える。

こうした伝播特性をより明確に把握するために、「変化の伝搬」にも着目するとよい。すなわち、以下の関係を調べることである。

$$\frac{\Delta r}{r} \rightarrow \frac{\Delta Q}{Q}, \frac{\Delta W}{W}, \frac{\Delta(1/T)}{(1/T)} \quad \cdots (6)$$

ここで Δ は気候変動による変化分を表し、したがって上式の各項は「気候変動による変化率」を表す。図-8は、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性

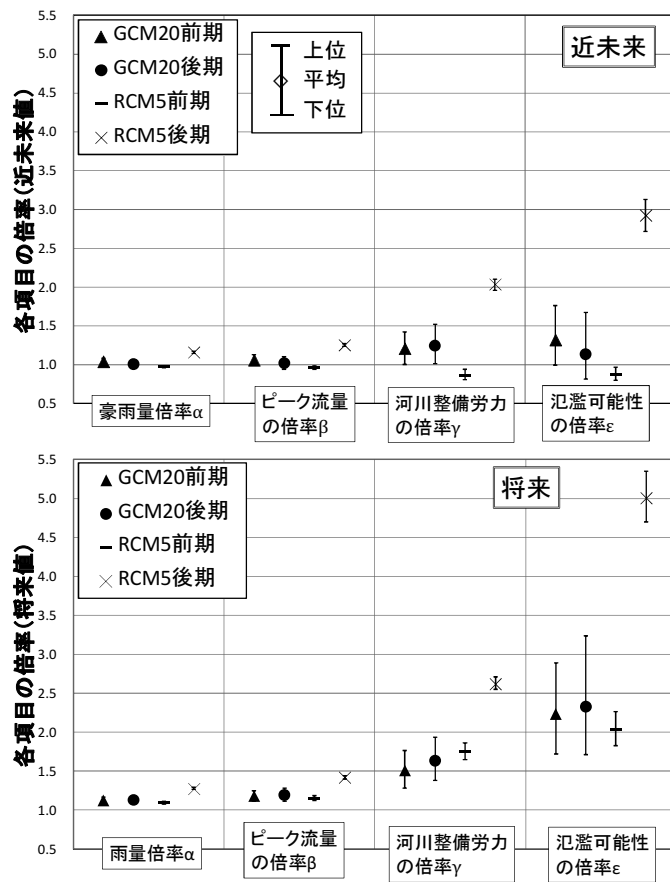


図-7 α 、 β 、 γ 、 ε の中央値、上位・下位値の全体傾向
（全国一級水系の単純平均で表示）
＜上：近未来，下：将来＞

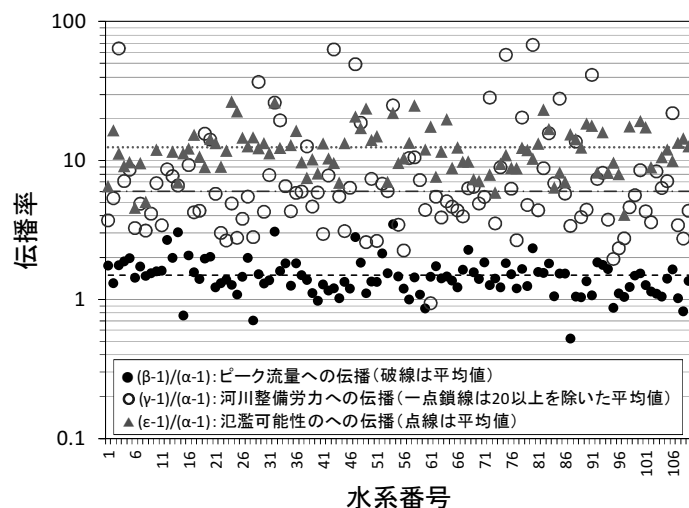


図-8 豪雨量の変化が洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性の変化にどう伝播するか？

※将来；4 気候変動予測モデルの結果から

それぞれの変化率（それぞれ $\beta-1$, $\gamma-1$, $\varepsilon-1$ で表される）を豪雨量の変化率（ $\alpha-1$ ）で割った値を「伝播率」として、1級水系すべてについてプロットしたものである。ここでは4気候変動予測モデルの将来の出力を用いている。この図から、伝播率は水系によってかなりばらつくものの、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性の間には明確な差が存在することがわかる。すなわち、豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への平均的伝播率が1.5程度であるのに対して、河川整備労力変化への伝播率は6.0程度、氾濫可能性変化への伝播率は12程度となっている（いずれも全水系の単純平均値；ただし河川整備労力に関する伝播率については20以上の水系を除いて平均）。以上のことは、全体的傾向として、豪雨量の変化が洪水ピーク流量の変化には1.5倍に、河川整備労力の変化には6倍に、氾濫可能性の変化には12倍に増幅して現れることを示すものである。

2. 6 翻訳結果3－豪雨量変化予測に要求される精度を適応策検討の側から考えるという視点

議論を単純にするため、上記の平均的な伝播率に基づいて、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性それぞれの変化率と豪雨量の変化率との関係を図化したのが図-9である。この図を縦軸から横軸の方向に読むことによって、洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性に与える気候変動影響を一定の精度をもって把握しようとする時に、豪雨量変化率に対しどの程度の精度を求めることになるかを考えることができる。たとえば、氾濫可能性および河川整備労力の変化率推定が ± 0.5 以内のズレでよしとするならば、それでも豪雨量変化率に求められる許容誤差はそれぞれ ± 0.04 と ± 0.1 程度以下となり、もしこれを ± 0.1 以内に抑えようとする場合、それぞれ ± 0.01 と ± 0.02 程度以下にしなければならないことになる。後者は、気候変動による豪雨量倍率 α の誤差をそれぞれ $\pm 1\%$ と $\pm 2\%$ 程度以下に、前者であっても、それぞれ $\pm 4\%$ と $\pm 10\%$ 程度以下に抑えることに当たる。こうした要求水準は、図-6に示した α 値の状況に照らし、気候変動予測が急速に発達してきている今日においてなお高いハードルと言える。

以上のことは、しかし、豪雨などの極端現象に関する気候変動予測の営為と成果の価値を減じることにはならない。豪雨生起確率の分析について、気候変動予測だけについて厳密に議論することもフェアとは言えない面がある。ここで重要なことは、気候変動による豪雨予測の精度が顕著に向上してきている一方、それを治水の適応策に直接関係する指標に翻訳すると、図-7と図-8に示した特徴が一因となって未だ精度不十分な状況

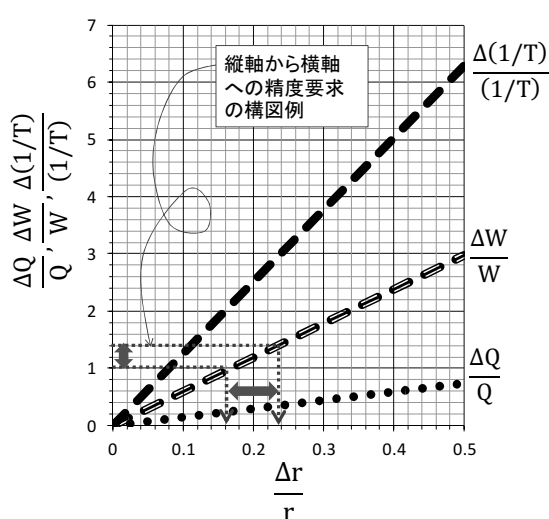


図-9 洪水ピーク流量、河川整備労力、氾濫可能性それぞれの変化率と豪雨量変化率との関係の代表例示

にあると理解することであろう。そしてこのことは、新しい高度なモデルによる気候変動予測結果が出るたびに一喜一憂するのではなく、予測精度の向上の根幹的トレンドを適切に把握し、信頼性のより高い情報とそうではない情報を適切に使い分けるというあるべき態度につながる。さらには、気候変動予測の進展を待つだけでなく、適応策を検討するために具体的にどのような情報（精度を含む）が必要となるかを、治水方策の実務に近い側から積極的に発信していくというスタンスの重要性に行き着くはずである。

3. 治水方策の気候変動適応に関して日本が置かれた大局的状況

3. 1 豪雨量変化から治水方策に関する諸項目への伝播はなぜ増幅するか？

本章では、2章に述べた結果も踏まえ、気候変動適応に関して日本が置かれた大局的状況を現時点でどう見るか？を考えていく。その本題に入る前に、上述の増幅という特性が現れる理由を掘り下げてみる。その吟味は、日本が置かれた状況の一般性と個別性の分析に役立つ情報をもたらす。

(1) $\alpha \rightarrow \beta$ における増幅について

降雨の時間変化パターンを変えずに降雨強度を全体的に増大させると、当然洪水ピーク流量も増大する。その際の降雨量と洪水流量ハイドログラフとの間に「非線形の応答関係」が見られる、すなわち降雨量の変化（増大）率よりもピーク流量の変化（増大）率が大きくなる特性が現れることはよく知られている（たとえば、山田 2003）。伝播率 1.5 という数字も種々の分析で議論されている数字と整合している。本講演で紹介しているのは、実測値による検証を経て実務で用いられてきた降雨一流出計算による結果に基づくものであり、こうした一般的に見られる非線形性が α から β への伝播にも現れたと言える。なお、この非線形性には、気候変動による豪雨量増大が洪水調節施設の機能発揮に限界をもたらす（計画規模など一定の洪水規模に対して効果を適確に発揮するように諸設定がなされていると考えられることから）、豪雨量のさらなる増大により洪水調節効果が減退したことによる影響が付加されている可能性がある。いずれにしても、気候変動による豪雨量増大は、降雨一流出関係の非線形性という水文流出現象の基本的性質に改めて焦点を当てさせることになる。

(2) $\alpha \rightarrow \gamma$ における増幅について

$\alpha \rightarrow \beta$ すなわち豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への平均的伝播率が 1.5 程度であるのに対して、 $\alpha \rightarrow \gamma$ すなわち河川整備労力変化への伝播率が

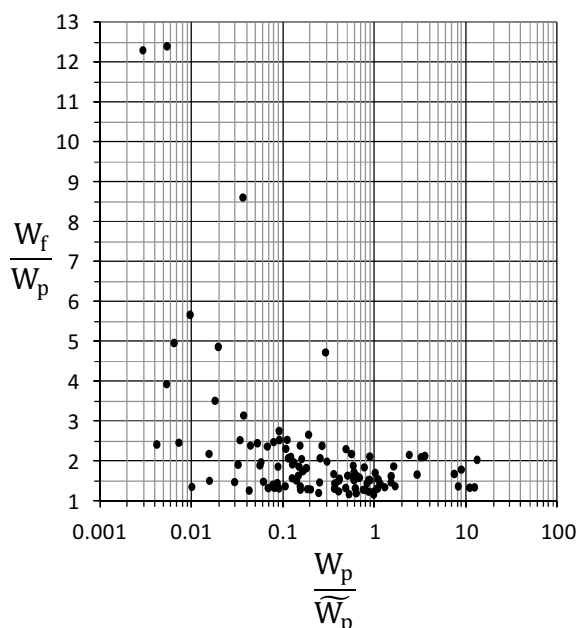


図-10 W_f/W_p と W_p との関係（後期 GCM20・将来・中位の結果を全水系についてプロット）
※ W_p は全水系の単純平均で基準化

6.0 程度と一気に大きくなるのはなぜであろうか？

これを考える前段として、 W_f/W_p と W_p との関係を全水系についてプロットしたものを図-10 に示す（気候変動予測の計算結果は後期 GCM20・将来・中位）。なお横軸の W_p は全水系の単純平均である $\bar{W}_p$ で基準化している。この図から、 W_p が非常に小さい一部の水系について W_f/W_p が顕著に大きくなる傾向が見られるものの、全体としては W_p の小さい一部の水系が W_f/W_p を全体的に押し上げているという状況ではなく、横軸 0.05~10 という幅広い範囲において W_f/W_p が 1.2~2.5 ぐらいの間にかたまっていることがわかる。

ここで、図-4 に示した W 算出の定義に立ち戻って、 W_f/W_p の決まり方を原理的に考えてみる。式(7)は、河道における流れを矩形・縦断方向一様断面における等流で表現し、 W_f/W_p に当たる量を近似的に導いたものである（藤田ほか 2011）。

$$\frac{W_f}{W_p} - 1 = \gamma - 1 = \frac{\{p(\alpha-1)+1\}^{\frac{3}{5}} - 1}{1 - \chi^{\frac{3}{5}}} \quad \cdots (7)$$

ここで、 χ は治水目標上の流下能力に対する現況流下能力の比であり、治水整備率に相当するパラメータとして導入したものである。また、 p は、豪雨量変化から洪水ピーク流量変化への伝播率 $(\beta-1)/(\alpha-1)$ である。ここで p に上記の 1.5 を、 α には 1.2 を与え、豪雨量変化から河川整備労力変化への伝播率 $(\gamma-1)/(\alpha-1)$ を χ との関係で表すと、図-11 のようになる。この図によれば、河川整備労力変化に関する伝播率は治水整備率に対応するパラメータ χ に強く依存する。すなわち、治水整備が進捗している状況では、治水目標に到達するための残りの整備労力が相対的に小さいので、気候変動による豪雨量増加は γ に増幅して現れる。逆に治水整備がほとんど進んでいない状況では、図-11 において $\chi=0$ の時、 $(\gamma-1)/(\alpha-1)$ がほぼ 1 となっていることからわかるように、豪雨量変化から河川整備労力変化への有意な増幅は見られなくなる。河川整備労力変化への伝播率の主なばらつき範囲が 2.5~9 程度となっていること（図-8 参照）、図-11 においてこれに対応する χ 値が 0.5~0.85 辺りであること、これが日本の一級水系における治水整備の進捗度合いと大局的には整合的であると考えられることから、図-11 で表現された $(\gamma-1)/(\alpha-1) \sim \chi$ 関係は、細部はさておき本質を大まかには捉えている可能性がある（このことのさらなる精査を通じ確認していく必要はある）。

さて、とりあえず図-11 の妥当性を認めて議論を進めるならば、治水施策における気候変動適応の難度の構図を考える上で、治水整備率が重要な因子の 1 つ

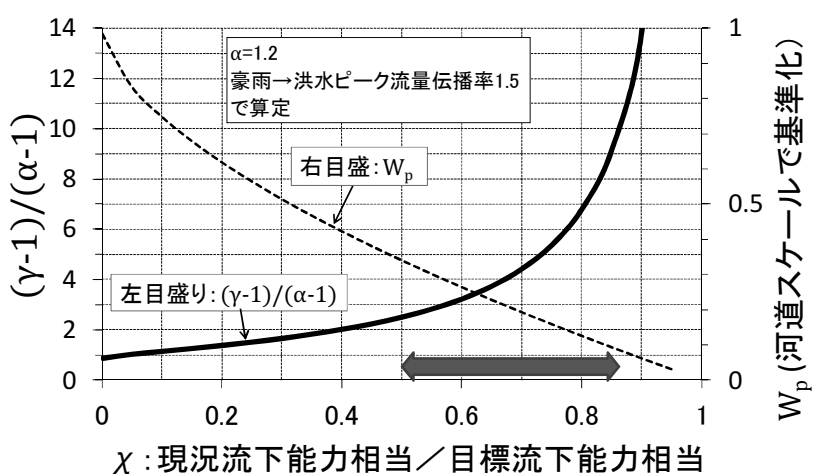


図-11 豪雨量変化→河川整備労力変化の伝播率と治水整備進捗度との関係についての考察図

になるという見方に行き着く。これは以下のようなものである。図-11 に併記した W_p (右側の縦軸がスケール) と χ との関係も合わせて参照されたい。なおこの図の W_p は同一水系について表現したものであり、異なる水系の W_p をプロットした図-10 とは趣旨が異なることに留意されたい。

①治水整備がまだ初期段階の場合

χ が 0 に近いと表現され、豪雨量変化の河川整備労力変化への増幅はほとんど見られない。したがって、この場合、気候変動影響と言うよりは、 W_p すなわち残している（あるいはこれから本格化する）河川整備労力そのものの大きさが支配的になる。

②治水整備がほぼ完了している場合

χ 値が 1 に近い状況である。図-11 に示されている通り上記の増幅が非常に大きくなるものの、 W_p が既に非常に小さくなっているため、大きな γ 値が問題になるのではなく、 W_f そのものが適応の難度を支配することになる。

③治水整備の進捗が両者の中間である場合

まだ相当の W_p を残している一方、 γ 値も図-11 に示す通りかなり大きくなる。この場合、適応の難度が γ と W_p の両方から支配されることになる。

大局的に見ると、日本の河川の多くは③の状況に当てはまるのではないかとすれば、このことは、 γ 値が大きな値を取ることがかなり“こたえる”状況にあり、したがって豪雨量変化から河川整備労力変化への伝播率が高い（増幅の度合いが高い）ことに敏感にならざるをえないことを意味する。

以上のことは、さらに、気候変動が治水施策に及ぼす影響を考える際に、その水系における治水整備の進捗度合いによって影響の仕方が異なることも踏まえた整理・分析が重要になることを示唆している。豪雨量の増え方だけでは適応の難度がつかめないことを踏まえ、図-2 に示した気象・水文から地文への伝播の仕方を把握し、それと当該河川水系における諸状況・特性（治水の歴史的経緯を含む）との関係に目を向けることが大事であり、またそれゆえに、この検討段階において河川水系それぞれの個別性が重要度を増すということである。こうした観点は、日本を含む諸外国の適応策を比較検討する際にも持つておくべきではないか。

(3) $\alpha \rightarrow \varepsilon$ における増幅について

豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が前述のように 10 のオーダーになることについては次のように理解できる。ある継続時間の降雨量 r と超過確率年 T との関係を、式形が単純なフェア式タイプにより次のように表現する。

$$r = \theta \cdot T^m \quad \cdots(8)$$

気候変動が降雨に与える影響が θ のみに現れるとすると、現在気候（添え字 p ）、将来気候（添え字 f ）について以下の関係が得られる。

$$\frac{\frac{1}{T_f}}{\frac{1}{T_p}} = \alpha^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{r_p}{r_f} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \cdots(9)$$

気候変動後も変動前と同じ降雨量となるために超確率年をどれだけ減じる必要があるか？

は、上式で $r_p/r_f=1$ と置いた次式の関係から求めることができる。

$$\frac{\frac{1}{T_f}}{\frac{1}{T_p}} = \alpha^{\frac{1}{m}} \quad \cdots(10)$$

日本の降雨特性に対応した m 値は一般に 1 を大きく下回り、0.2 前後になることが多い(たとえば、土木研究所 2001)。 $m=0.2$ 、 $\alpha=1.3$ を与えると、超過確率年比 $(1/T_f)/(1/T_p)$ は 3.71 となり、これに対応する伝播率はおおよそ 9 となる。

以上のように、式(8)に代表される降雨量～超過確率年関係において、超過確率年が降雨量変化に敏感に応答する特性をそもそも持つことが、豪雨量変化から氾濫可能性変化への伝播率が上記のように大きな値を持つ基本的な理由である。

3.2 「相当のインパクトが見込まれる。水系ごとに差がある。そして不確実性も伴う。」という課題

以上に示してきた内容を踏まえると、図-7、図-8、図-9 に示した特性から、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-5、図-6 の特性からわかるように、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 3.1 で示したように、自然的特性と人間が積み重ねてきた営為に関わる特性がモザイク的に関係している。そのために、気候変動による豪雨量の変化以上に、河川水系ごとに影響の出方が違ってくる。このことは個々の水系の状況把握の重要性を改めて示すものである。そして、施策を立案・遂行する立場から見ると、予測の信頼性がさらに向上して α の推定幅が十分小さくなる状況、また、モデル更新の度に各地域の α 値が違ってくる状況から脱却することが好ましい。しかし、一方、図-7、図-8、図-9 に示されるような特性と、地球温暖化に伴う極端かつ低頻度事象の変化予測の本質的困難さを踏まえると、この先の極端現象変化予測の急速なレベル向上を引き続き期待する一方で、それをただ待つだけではなく、並行して極端現象の変化予測に実務上無視し得ない有意な幅があることを前提とした種々の検討を行うことが大事になってくる。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。

4. 諸外国の適応策の概況

ここで諸外国の適応策に触れておく。ここでは、政府の適応策として先進的な取り組みがなされている代表として、オランダ、英国、ドイツの事例を取り上げる。内容は全て各国政府から出された資料に基づいている。冒頭に述べたように、気候変動による降雨量増大に直接関わる治水施策に焦点を絞っている。なお、国総研の気候変動適応研究本部 (<http://www.nilim.go.jp/lab/kikou-site/20info.html>) においては、諸外国の気候変動適応策についての情報収集・分析を定期的に行っており、以下に述べる内容も、その直近の報告(板垣、吉谷 2012)からの抜粋である。根拠資料を含む詳細はそちらを参照されたい。

4. 1 オランダの事例

オランダでは、2006年にKNMI（オランダ王立気象研究所）が2050年までの4つの気候シナリオを発表している。気候変動による外力増加については次のような見込みが提示されている。

- ・2100年までに1990年比最大85cmの海面上昇、
- ・ライン川ロビス地点の1/1,250洪水流量が2100年までに17,000～22,000m³/sに増加（現在の設定は16,000m³/s）。

また、デルタ委員会は2008年に、2050年までに海水面が0.2～0.4m、2100年までに0.65～1.3m上昇と予測している。ライン川の洪水流量の増加予測には大きな幅があるが、現状では上流のドイツで氾濫することを見込めることから、オランダまで流下しうる洪水流量を18,000m³/sとしている。これは、気候変動による洪水流量増の予測の幅を、河川の物理的条件を踏まえ小さくしている例と言える。ただし今度は、上流ドイツにおけるライン川改修が、不確実性をもたらす新たなファクターとして考慮対象となってくる。

2001年に、その時までの洪水生起状況を踏まえ、ライン川ロビス地点での計画対象洪水流量が15000³/sから16000³/sに引き上げられ、この増加分に対応するための河川整備等を2015年目途に完了させることになっている。これは3.1(2)で述べた②の状況に当たる。その先の洪水流量増への対応については引き続き種々の検討がなされているようである。

その中で、“デルタ堤防”が具体的な適応策の1つとして打ち出されている。デルタ堤防は、通常の堤防よりも高く、幅広に、（越水に対し）強く造られ、その導入により越水に際しても突然の制御不能な破堤を実質上無くすことで越水時の破堤氾濫による莫大な被害を大幅に軽減し、気候変動による脆弱性の増加を抑えることを狙っている。都市の再開発と機能を共有することも想定されており、日本のスーパー堤防と共通する部分が多い。

4. 2 英国の事例

英国では、2008年に制定された気候変動法が、2050年までに英国が達成すべき温室効果ガス排出削減のための長期目標および気候変動影響適応のために取るべき手順を規定している。この中で、全国の気候変動影響に関するリスク評価を5年ごとに行い、国家適応プログラムを作成し、それも同じく5年ごとに見直すことを定めている。このリスク評価では、UKCP09（2009年英国気候予測：気象庁ハドレーセンター等が2099年までの気候を予測。従来の英国の気候シナリオよりも空間・時間的により詳細な情報を提供するとともに、不確実性に係るより多くの情報を提供）の予測結果を利用して2100年までの評価が行われ、700を超える気候変動によるリスクから優先度に基づき選定された100以上のリスクについて、影響の大きさと確からしさの観点から分析がなされている。

適応策に密接に関係する取り組みとしては、環境食料農村地域省（Defra）が2006年の段階で、イングランドおよびウェールズ地方を対象に、気候変動適応の検討対象とする海面上昇量やピーク降雨強度・洪水流量の増加量を時期ごとに示した上で、公的資金による洪水および海岸管理に関する事業の計画策定や評価などにおいて、提示された量を基本的に考慮することとし、その内容を示した手引きを発出している。ここで、海面上昇については、地盤沈下込みで、各地域の「見込んでおく量（allowances）」が時期別の上昇速度の

形で示されている。一方、ピーク降雨強度・洪水流量については、「指標となる感度範囲 (Indicative Sensitivity Ranges)」が時期別に増加率（前述の α -1, β -1 に対応）の形で次のように示されている。

- ・ピーク降雨強度

1990-2025 : +5%, 2025-2055 : +10%, 2055-2085 : +20%, 2085-2115 : +30%.

- ・ピーク流量

1990-2025 : +10%, 2025-2115 : +20%.

ここで、ピーク降雨強度を用いるのは小流域が望ましいとしている。また、ピーク洪水流量の増加率については、さらに検討が必要であることを認識した上での実務的な推奨値であり、テムズ川などの大規模な流域については詳細な範囲設定が別途なされるべきとしている。

ここで、「見込んでおく量」と「感度範囲」の違いは確からしさの違いに基づいている。海面上昇量は確からしさがより大きいため、基本案や代替案の策定にストレートに算入するが、ピーク降雨強度・洪水流量の増大については確からしさが相対的に小さいため、提示された感度範囲を用いて基本案や代替案について感度分析を行い、その結果を踏まえた対策案の選定、最適な対策実施時期の検討を求めている。

4. 3 ドイツの事例

ドイツの気候変動適応策は地方（州）によりだいぶ異なり、いくつかの地方では気候変動適応策決定に直結する文書を発出済みである一方、いくつかの地方（州）では、より効果的な政策決定のための調査を重要な地域で実施している段階にある。その中で、ドイツのバーデン=ビュルテンベルク、バイエルン、ラインラント・プファルツの各州では、新しい洪水防御施設設計画時に 2050 年までの気候変動の影響を気候変動因数として設計流量算定時に考慮する（この因数を既往計画の洪水流量に掛ける）ことになっており、この因数が地域・洪水規模別に設定されている。実際の河川整備時には、従来の設計流量に対応する高さの堤防を整備するとともに隣接地を確保し、必要な時に容易に堤防のかさ上げ・拡張を可能とすること、橋梁については、はじめから気候変動因数を考慮した設計流量に対応して計画すること、擁壁については、将来かさ上げが必要になっても困難が生じないよう設計することなどが合わせて示されている。

5. 日本における気候変動適応策検討におけるポイントー技術的課題を中心に

前章までの内容を踏まえ、現時点で考えられる適応策検討に関わるポイントについて、技術的観点を中心に以下で論じる。

●従前の治水目標を気候変動下においても引き続き達成するための技術的手段が十分用意されているか？

これは、図-5 や図-6 に示す外力（豪雨量）の増大、図-7 に示す増幅特性を覚悟した上で、従来設定されていた治水目標に対して河川氾濫を起こさせないという状況を確保しようとしたとき、そのための河川整備に関する技術的手段を現時点でどの程度持ち合わせているか？ その限界が認識できているか？という論点である。代表的例示をするなら、2-4

割のピーク流量増を吸収するために、現在の計画よりも河道の流下能力をさらに増大させること、あるいは洪水ピーク流量の低減をさらにはかることが必要となり、したがって、河道設計や洪水調節に関わる技術的観点から、その可能性と限界を把握することが適応策検討の土台の1つとなる。

流下能力の増大というと、大規模な引堤等に頼らなくて済むという実行可能性の観点から、また、しばしば数字上は流下能力増が説明できてしまうことから、河道の掘削という手段に傾きがちであるが、流下能力の2-4割増に見合う河道掘削をさらに行うことが広い意味の河川技術として本当に妥当であるのか・どこまで可能であるのか（藤田 2006）、河道設計・管理上の根本的な問い（福岡 2010）が改めて提示されていると言えよう。

●河川整備の手段の拡充

こうした可能性と限界の把握は、逆に手段拡充の必要性を具体的に認識させることにつながり、それは気候変動適応のための新たな技術展開につながっていく。河道設計の考え方を新たに構築する取り組み（福岡 2010）、降雨予測などの新技術を活用して既存ダムの洪水調節能力を高める方法の追求（鳥居 2012）、河道管理の合理化をはかる技術的枠組みの検討（大沼ほか 2009）など、先端技術を突破口にするものから、確立されたと思われていた技術体系のリノベーションを目指すもの、さらには従来技術の地道な改良の積み重ねまで、様々な切り口からの技術展開が期待される。総合治水を社会技術と融合させて、流域治水として洪水ピーク流量の制御を住民ぐるみで行っていくという新たな取り組み（島谷ほか 2010）も、手段拡充の新機軸と言えよう。これらの成果が適切に組み合わせられ集積したときに、全体として気候変動影響をどの程度吸収できるかを、適用に際しての留意事項とともに評価していくことが大事になる。

●設計以上の外力を受けた治水施設（群）の（システムとしての）機能発揮・喪失状況に対する理解増進と必要な対応策の検討

このような手段の拡充が精力的に行われたとしても、従来よりも大きな外力が治水施設に作用し、ある場合には設計上の外力を上回ってしまうことが気候変動によって起こりやすくなる状況を現気候以上に考えざるを得ない。したがって、適応策を考えるに際して、施設の「壊れ方」と「機能維持→喪失の過程」を理解し、それを表現する技術が求められる。ここでは、防災・減災施設群のシステムとしての総体的な機能発揮・喪失に関わる挙動を分析することも大事な課題になる。以上の内容や位置づけについては昨年度講演（藤田 2011）の4.2.4を中心に詳述しているので、必要に応じ参照されたい。

このポイントを適応策という観点からとらえた場合、外力が増大するために生じる可能性が増大すると考えられる破壊および機能喪失事象の中で、特に対処を考える必要性が高いものを特定し、対処法を検討することが大事となろう。このためにも、少なくとも気候変動により起こりうる外力増の範囲については優先的に、その作用が治水施設（群）および機能発揮に及ぼす影響とそれにより起こりうる被害等を体系的に調べることが重要である。

●災害の起こり方のコントロール（緩和、靱性の付与）というアプローチの強化

そして、この議論の延長上には、この標題のポイントが浮かび上がる。これについては、

講演者の昨年度の講演「リスクを意識した治水技術体系の展望と課題」（藤田 2011）の主題であるので、ここで再度述べることは控える。重要なことは、気候変動がもたらす外力増が否応なしに上記のアプローチの強化を促進させる明確な因子になっており、また、このアプローチが適応策検討全般に関わってくるという点である。このことは、いわゆる超過洪水への対応と気候変動適応が相互に密接に関係していることを改めて示す。

●防御レベルの後退という事態へのスタンス

気候変動下での治水において特徴的なことの1つは、ほうっておくと、土地利用の高度化などの人間社会の側に発する直接要因とは無関係に、時間とともに災害を受けやすくなるという状況が生じる得ることである。こうした事態は、少なくとも近代化・都市化・産業化が進んだここ一世紀半の間には未経験のものと考えられる。今までは、防災施策の進展により、長らく、防御レベルが時間とともに増大するのが基調であって、それによって人間の側の災害対応能力が劣化する側面があることは（それへの対処法とともに）しばしば議論されてきたが、災害の危険度が時間とともに減少するトレンドから増大基調に転じ継続する状況での人間社会の応答については未知な部分が多いのではないかと。こうした課題認識も踏まえ、時間とともに防御レベルが後退する懸念に対して、最低限、後退はさせないのというスタンスで臨むかなどが適応策上の1つの論点になるかもしれない。それは気候変動影響が現れる（事態変化の）スピードへの対抗のスタンスを決めることにもなる。

●不確実性への対応

3.2 に述べた「相当のインパクトが見込まれる。水系ごとに差がある。そして不確実性も伴う。」の中で、外力増やその治水施策への影響度が少なからず不確実性を伴うことは、気候変動適応の特質を代表するものと言える。このことが適応策検討にもたらす意味は複雑であるが、後悔が生じる構図の単純な説明例を持ち出し、議論の若干の整理を試みたい。

図-12 は、図-9 のうち、河川整備労力の変化率だけを抜き出して、豪雨変化率との関係を模式的に表示したものである。豪雨変化率の予測には幅が設定されている。ここで、豪雨予測幅の中央値を選んで、それに対応する整備労力の増分を加えるという適応策を実施したとする（図中の○印）。その後、気候変動が起こり、実際の豪雨量変化率が大きい側に振れたとすると、○の右側の点線のゾーンで示される「もっとやっておくべきだったと悟る」後悔や、二重線のゾーンで示される「ちょっとした労力増をケチったことのツケの大きさを悟る」後悔が生じ得る。逆に、実際の豪雨量変化率が小さい側に振れたとすると、○の左側の二重線で示される「やりすぎて無駄だったと悟る」後悔が生じ得る。前二者の後悔を避けようとする、○の設定位置を予測幅の右方にずらす（整備労力の増分を大きくする）ことになるが、その場合、三番目の後悔が生じる可能性が増大してしまう。

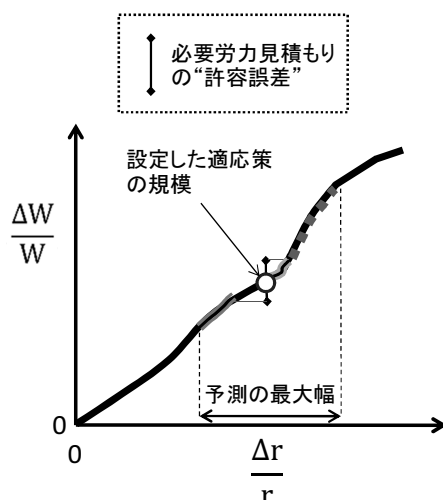


図-12 予測の幅により“後悔”が生じる構図の説明例

この説明をもう一段実際のなものにするために、当該適応策が目標とした外力の実際の出現が予測からずれた時に（特に大きい方に）、どのような被害が生じるかという視点を加えることになる。たとえば、気候変動影響は、想定被害～豪雨生起の超過確率年の関係を表す曲線が ΔT 分左にずれることを意味する（図-13

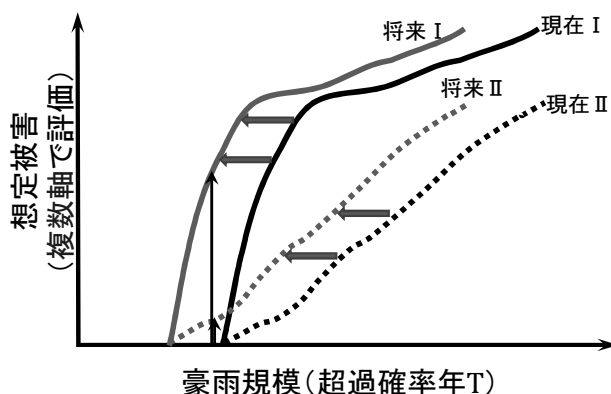


図-13 被害～豪雨規模関係における気候変動影響
※関係を表す曲線の立ち上がり方の違いが何をもちたらすかの説明。上向き矢印は被害の代表比較。

参照)。ここで、この曲線の立ち上がりが急であれば（図中の I），気候変動影響による被害増大の程度、河川整備に関わる適応策の投入量が結果として過小だったことによる被害増大の程度のどちらも大きくなる。このよう場合には、少々無駄になる可能性があっても、予測幅の中でより安全側の外力増想定が選択される方向が考えられる。以上のことは、また、想定被害～豪雨生起の超過確率年の曲線の立ち上がりが緩いことが（図中の II），換言すれば、施設群の設計外力を超えても被害が徐々にしか増えない構造あるいはシステムを具備していることが、不確実性への対処にも有利となることを示しており、重要なポイントである。

●モニタリングと順応的対応のあり方

不確実性への対処法として、・気候変動の出方がはっきりした時点で適応策を講じる、・適応策を将来時点で実施することが種々の点で高コストを伴う、あるいは時間を要しすぎて適応に間に合わないことが考えられる場合については、そうしたことが生じにくくする事前措置を予め施しておく、というアプローチが当然有力となる。これが実効的となるためには、事前措置のコストを（適応策本体に比較して）小さくできること、気候変動を探知してからアクションで間に合うことの担保、気候変動を的確に探知できること、が要件となる。このうち3番目については、日本の治水目標水準のようにある程度大きな豪雨（したがって低頻度）が対象になっている場合に、たとえば、観測されたデータから低頻度事象の生起の変化を適応策が間に合うタイミングで探知できるのか？という技術課題に突き当たる。ここが、“日常的現象”の気候変動による変化を扱う場合との本質的な違いと言える。これは、非定常性(non-stationarity)が進行したとき、低頻度の極端現象についてどのような手法で計画や管理をすべきか、という重要な技術的課題である（竹内 2010）。この分野の科学的進展を評価の上、計画での利用を検討することは適応策検討において重要な位置を占める（吉谷 2012）。適応策に関わる判断への活用を目的とする気候変動のモニタリング戦略は、こうした観点を踏まえることがポイントとなる。

いずれにしても、外力が内包する不確実性を完全に除去するのは困難と考え、外力の作用（大きさ、性質、タイミングなど）を幅広に捉えて「シナリオ分析」を行い、そこから適応策実施について総合的な判断を下し、それを継続的にチェックしていくという基本的

フレームの構築・実践が求められていると言える。

6. おわりに―気候変動を奇貨として

気候変動は治水施策の推進にとって重荷ではあるが、長年にわたり培ってきた治水に関わる技術政策を進化させる重要な機会とも捉えるべきである。気候変動という新たに（あるいは、いよいよ）認識すべき流域への負荷という課題を奇貨として、長らく持ち越していた根本的課題の解決を図るという視点も持ちつつ、我々が流域圏単位で本質的に保持すべきシステムを明示し、それを実現する方策を積極的に提示するというスタンスを打ち出すことで、韌性を持った国土づくりを支える技術が活発に展開されることを期待したい。

【参考文献】

- 板垣修, 吉谷純一(2012): 米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査, 国総研気候変動適応研究本部。
<http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/info/research-results/itagaki-kikouhendou.pdf>
- 大沼克弘, 武内慶了, 今村能之, 藤田光一, 西本直史, 平井新太郎, 宮内信(2009): セグメント2河道を対象とした河道掘削後の戦略的河道管理に関する研究, 土木学会水工学委員会河川部会, 河川技術論文集, 第15巻, pp.291-296.
- 柏井条介, 土屋修一, 石神孝之: 気候変動による豪雨時の降雨量変化予測(2008): 国土技術政策総合研究所資料, 第462号。
- 鬼頭昭雄(研究代表者)(2012): 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, 平成23年度研究成果報告書, pp.17-87.
- 島谷幸宏, 山下三平, 渡辺亮一, 山下輝和, 角銅久美子: 治水・環境のための流域治水をいかに進めるか?(2010), 土木学会水工学委員会河川部会, 河川技術論文集, 第16巻, pp.17-22.
- 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)。http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshin.pdf
- 竹内邦良(2010): 連邦水関係機関共催「非正常性, 水文頻度解析, 水マネジメント」ワークショップ参加報告, 河川763号, 日本河川協会。
- 土木研究所(2001-): アメダス降雨確率解析プログラム。
<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm>
- 鳥居謙一(2012): ダム管理の高度化に向けて, 土木学会水工学委員会・海岸工学委員会, 水工学シリーズ, 12-A-9.
- 服部敦, 板垣修, 土屋修, 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, 土木学会水工学委員会河川部会, 河川技術論文集, 第18巻, pp.481-486.
- 福岡捷二(2010): 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法, 土木学会水工学委員会河川部会, 河川技術論文集, 第16巻, pp.5-10.
- 藤田光一(2006): 河道変化を治水・環境保全の接点においた川づくりの考え方, 2006年度(第42回)水工学に関する夏期研修会, 土木学会水工学委員会・海岸工学委員会, A-8.
- 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.
- 藤田光一(2011): リスクを意識した治水技術体系の展望と課題, 平成23年度国土技術政策総合研究所講演会講演集, 国土技術政策総合研究所資料, 第655号, pp.91-108.
- 山田正(2003): 山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第47巻, pp.259-264.
- 吉谷純一(2012): 水災害における適応策に関する研究動向, 九州技報, 第51号, pp.11-15.
- Linsley, R.K., M.A. Kohler, and J.L.H. Paulhus (1949): Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 560-561, 1949.