

気候変化の治水施策への影響に関する 全国マクロ評価

MACRO-EVALUATION OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON FLOOD CONTROL MEASURES IN JAPAN

服部 敦¹・板垣 修²・土屋修一³・加藤拓磨³・藤田光一⁴

Atsushi HATTORI, Osamu ITAGAKI, Shuichi TSUCHIYA, Takuma KATO and Koh-ichi FUJITA

¹正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室長
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工修 同 水資源研究室 主任研究官

³正会員 博(工) 同 水資源研究室 研究官

⁴正会員 工博 同 河川研究部長

The authors have estimated the median and the confidence intervals of the rate of increase of following three values, flood discharge, amount of additional work, and probability of exceedance (for representative flood discharge, e.g. 1/100 year flood discharge on the current basic policy for river improvement) for major rivers in Japan under global climate change. For this estimation, the authors calculated the median and the confidence intervals of the rate of increase of the annual maximum rainfall in each geographical region from the results of 20km mesh Global Circulation Model and 5km mesh Regional Climate Model simulations conducted by Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, MLIT. The estimation has been conducted for two periods, one for about 30 years later from now, and another around the end of 21st century. The authors have drawn nationwide figures indicating the results above.

Key Words : *climate change, impact evaluation, flood control, adaptation measures, reliability*

1. はじめに

地球温暖化に伴う豪雨の増大は、これまで積み上げてきた安全性を引き下げる方向に働く。また、我が国は、目標とした治水安全度の確保に向けた河川整備の途上にある。したがって、上記のベクトルに抗してさらに安全性を高めていくことが、気候変化に対する治水施策を検討する上で踏まえるべき基本的条件と言える。このような条件下で治水安全度をできるだけ早期に引き上げていくためには、必ずしも従前の治水施策の枠にとらわれず、施策メニューを拡充していくことも重要である。

そうした施策（適応策）の基本的な考え方や方向性などについては広範な検討が行われている¹⁾。また、気候変化による洪水への影響評価は、施策検討にあたっての根幹的情報であり、洪水をもたらす豪雨さらに河川洪水流量への影響について検討が行われている²⁾。

欧州では、そうした影響評価を活用して施策化に向け

た検討がなされており、それを受けた動きも認められる状況である^{3~5)}。また日米英蘭4か国の治水施策に携わる機関によって、とりまとめられた施策事例集⁶⁾には、適応策として活用しうる施策メニューが提示されている。

こうした検討の進捗を踏まえ、種々の課題を克服し、気候変化さらには大規模洪水に対する施策をより一層進展させることが望まれる。

その際、気候変化に対する適応策の検討にあたっては、既往の治水計画とは質的に異なることを踏まえる必要がある。治水計画の対象として取り込む出水規模は、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「実態」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、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いると思われるが、さらなる信頼性向上の途上であり、予測結果にある一定の幅や変化が認められる²⁾。し

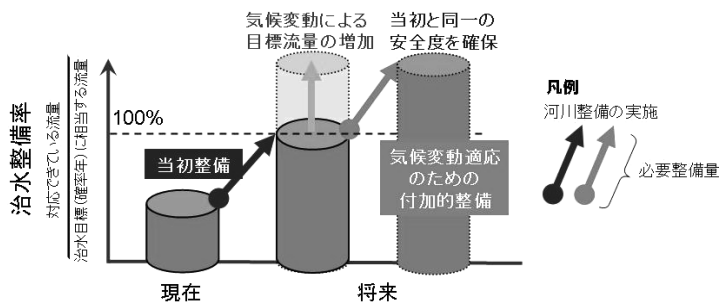


図-1 気候変動下における河川整備目標の概念図

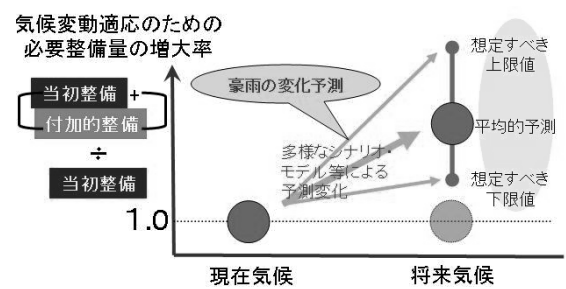


図-2 河川整備必要量比を用いた気候変動の影響把握

たがって、施策の検討上、無視し得ない不確実性を有する外力規模に対して治水・減災施策を検討する考え方を早急に詰めることが重要である。

そうした考え方についてこれまでも議論されている^{7,8)}ところであるが、さらに深めて施策に反映できるまでかみ砕き具体化することが求められる。そのための方策の一つとして、将来予測に伴う不確実性がどの程度、治水施策に影響を及ぼすか、定量的な評価を行うことが有効と考えられる。

本研究では、気候変動の影響を吸収し所定の治水安全度を将来にわたって確保するという設定の下、その実現の難易度を概括的に表しうる指標を設定し、将来予測の不確実性が治水施策に及ぼす影響について定量的に考察を加えたものである。指標値の算定にあたっては、複数の気候モデルによる将来予測結果を用いており、年最大雨量の予測値の変化が上記指標に及ぼす影響を感度分析的に評価している。

2. マクロ評価の基本的考え方と評価指標の設定

気候変化により将来にわたり年最大雨量が増加する状況下において、当初目標と同一の治水安全度（年最大降雨量の確率年）を維持するためには、当初予定していた整備規模を拡充し、気候変化の影響による雨量増加分を埋め合わせる必要がある。その拡充の規模について、一級水系の国管理区間を対象として、新たに設けた指標「河川整備必要量比」を用いて試算した。この考え方の背景と指標の算定手法について以下に説明する。

(1) 治水施策への影響把握の基本的考え方

気候変化による降雨量変化が治水計画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過去の進捗状況から見て数十年以上を要すると推定される。

この間に地球温暖化が顕在化して降雨量が増加すれば、当初と同一の目標到達までの時間が有意に延びる可

能性が出てくる。すなわち、図-1 に模式的に示すように、現在気候下で「当初整備」によって治水整備率が100%に到達するものの、気候変動の影響によって現在と同一の整備目標（確率規模）に対応する降雨量が増加し、それに応じて目標流量も増大するため、これを吸収するための「付加的整備」を実施する必要があるためである。この点において、洪水に対する防護施設が既に完成している流域における適応策や、これから本格的な開発並びに治水整備等が同時進行する流域における適応策のあり方との質的な差異が生じうる。

そこで、本研究課題の検討においては、図-2 に示すように「一定の年数の後に河川整備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必要量」を算出し、「当初、設定されていた整備必要量からの増大率」と定義される河川整備必要量比を共通指標として、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することとする。

河川整備必要量比は、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の施策（施設整備によらない施策）の質・量が増すことが必要となるが、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をも評価しうるものとできる。このように、河川整備必要量比という指標は、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。

(2) 河川整備必要量の算定法

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-3に示すように最高水位 H_p が計画高水位 H_{HML} 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

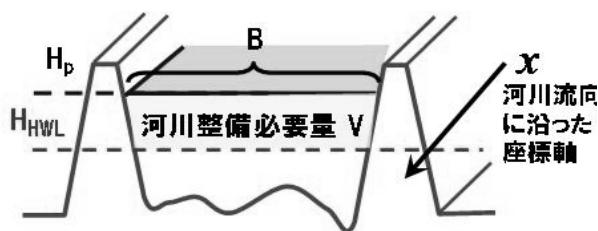


図-3 河川整備必要量の定義

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-3の灰色部分の水量 V を用いることとし、以降 V を整備必要量と呼び、式(1)により算定する。

$$V = \int_0^L B \cdot f(H_p - H_{HWL}) dx \quad (1)$$

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必要量 V_p 、 V_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 V_f/V_p を「整備必要量比」と設定した。

3. 近未来・将来の年最大雨量の倍率

現在(1979～2003年)、近未来(2015～2039年)および将来(2075～2099年)の降雨量データとして、気象研究所で開発された気候予測モデルである前期・後期GCM20及び前期・後期RCM5による温暖化予測実験結果を用いた²⁾。本結果から継続時間24,48,72時間等の年最大雨量を抽出し、下記の手法によって雨量倍率を推定した。ここで、雨量倍率 α は、河川整備基本方針での計画対象とする雨量 r について、現在気候下 r_p に対する将来気候下 r_f の比($\alpha = r_f/r_p$)として算定している。

温暖化予測実験の計算期間は25年程度であり、確率年100～200年の雨量を推定するにはデータ数が少ない。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、日本全土を複数の地域に分割し、各地域に含まれる 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た。

こうした手順で得たデータセットを用いて地域内の年最大降雨の出現確率を推定する手法は、Station Year Method⁹⁾(以下、SY法)として知られている。

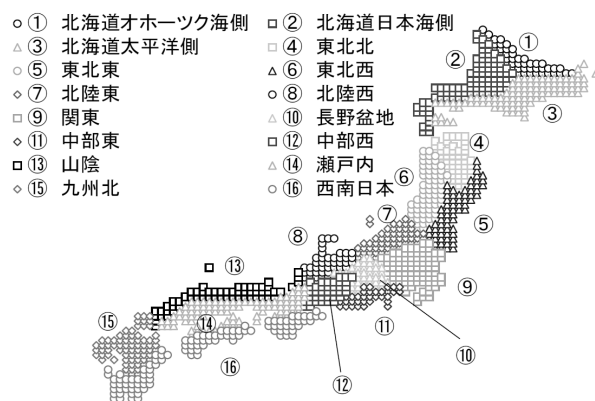


図-4 地域分割と格子点 (16分割)

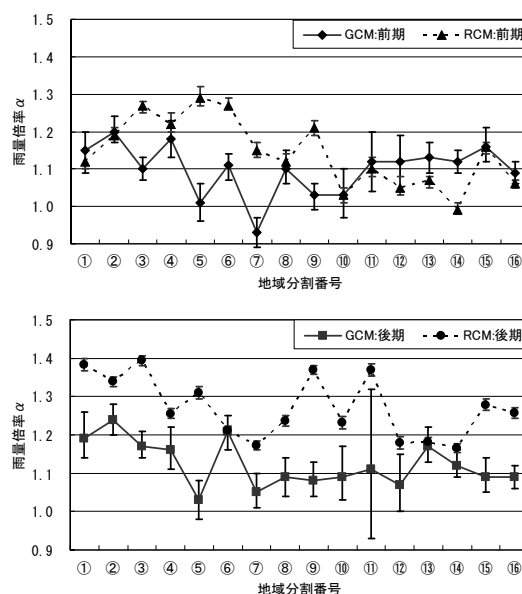


図-5 各気候予測モデルによる雨量倍率(将来)

SY法において1組のデータセットとして扱う地域内では、データの均質性、独立性の確保が肝要である。本研究では、柏井ほか¹⁰⁾が年最大雨量の生起頻度変化の分析を行った際に用いた手法を基本的には採用して、以下の手順によって α 値を算定した。

・手順1：地域分割(均質性の評価)

地域内で年最大降雨の生起確率分布が同様となるよう地域分割を行った。均質性については順位と検定を用いて評価した。本研究では、前期GCM20の現在気候予測実験結果のデータを用いて、図-4に示すように日本全国を16地域に分割した。さらに、地域内の年最大降雨の平均値で規格化した年最大降雨の生起確率分布が、現在と将来で同一と見なせることを順位と検定により確認した。

・手順2：独立性分析

地域内の任意の2点の格子点の全ての組み合わせについてスピアマン順位相関係数を算出し、独立性の検定を行い、独立割合(独立が検証された組み合わせ数/全組み合わせ数)を算定した。

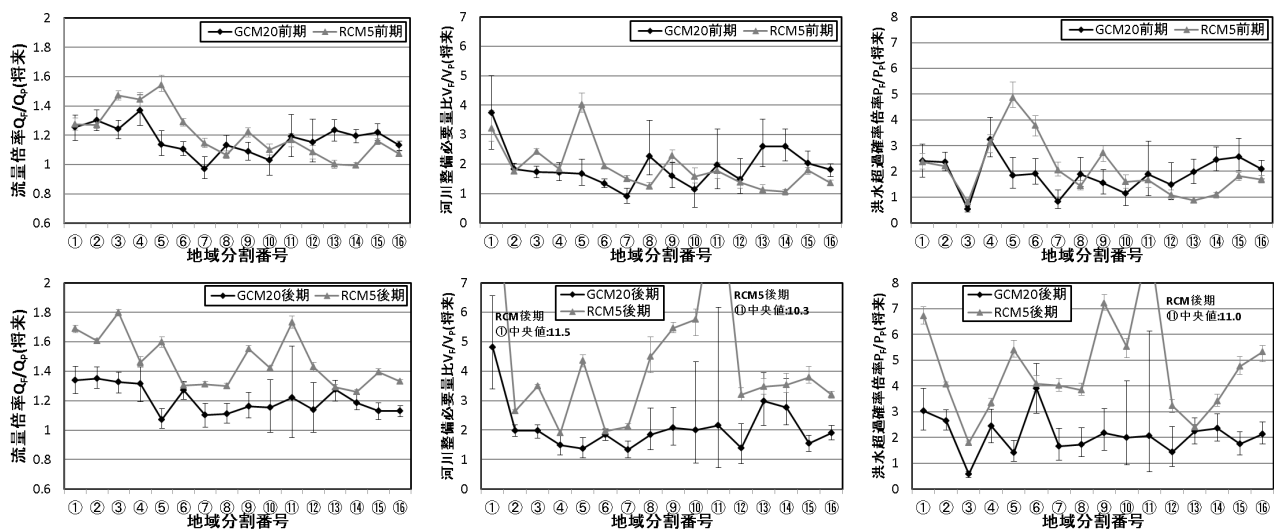


図-6 各気候予測モデルによる Q_F/Q_P , V_F/V_P , P_F/P_P の地域別平均値(将来)

・手順3：統計的な信頼性を踏まえた年最大降雨の変化比の算定

手順1. において現在一将来の生起確率分布の同一性が確保されていると見なすことで、任意の生起確率に対する倍率 α は、平均年最大雨量の倍率として求められる。この値を地域内の全格子の平均値として算定した。あわせて、モンテカルロシミュレーションによりこの平均値の推定誤差を評価した。その際、地域内のすべての格子点で年最大降雨の生起確率の独立性が確保されていれば、地域内格子点数 $m \times$ 計算年数 n として算定される全データ数が有効となる。今回は、全格子点で年最大降雨の生起確率の独立性が確保できなかったため、有効と見なすデータ数は、 $m \times n$ に独立割合(手順2)を乗じることで評価した。

以上により、各気候予測モデルに対して年最大日雨量の変化倍率 α の中央値と95%信頼区間の幅を算定した結果(将来気候)を図-5に示す。中央値に着目すると、気候予測モデルにより α の地域分布が異なっている。モデル間の α の幅は、例えば後期 GCM20 の⑬地域では0.1程度に対して、⑪地域では0.4程度となるなど、地域間で大きな差が見られる。

95%信頼区間の幅については、RCM5 が GCM20 に比べて小さくなっているが、これは地域内計算格子点数が GCM20 の16倍あることにより有効データ数が大きくなったためと考えられる。

4. 最大流量・整備必要量・超過確率の倍率

(1) 各倍率の試算方法

実務で用いられている既往の算定手法を用いて、河川整備基本方針の計画規模に対応する時間雨量分布(ハイ

エトグラフ) r_p から最大流量 Q_p を算定した。同様に $\alpha \cdot r_p$ として求めた将来気候下における降雨量 r_F を与えて流量 Q_F を算定し、流量倍率(Q_F/Q_P)を得た。

4種の気候予測モデルごとに α の中央値及び95%信頼区間の上下限値が異なり、それら全ての組み合わせについて上記手法で計算を行うのは多くの作業量を伴う。そこでその削減を目的として、複数の α 値に対して流量倍率を算定し、両者の関係を良好に表す近似式を導き、この式を用いて気候予測モデルごとに流量倍率を得ている。近似式を用いる手法は、整備必要量、超過確率の倍率算定においても用いている。

なお図-5には年最大日雨量に対する α を示したが、上記の算定にあたっては、現行の河川整備基本方針における検討対象降雨の継続時間(24, 48, 72時間等)に対応した α 値を用いた。

河川整備必要量 V は、現況河道の水位・流量関係式($H \sim Q$ 式)に上記で得た Q_P, Q_F を代入して最高水位の縦断分布を求め、これを式(1)の H_p として与えることで算定した。

また、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 P_F を求めた。この値と現行の計画規模 P_p (1/100等)との比として、超過確率の倍率(P_F/P_p)を得た。この値は、現在気候下で整備方針を完遂した時点で得られる治水安全度の気候変化の影響による低下の大きさを表す。見方を変えれば、完遂後の氾濫発生に繋がる危険度の増大率を表すと考えて、本研究ではこの指標を氾濫危険性増大率として取り扱うこととする。

(2) 将来気候に対する倍率試算の結果

将来気候下における雨量倍率 α の中央値および上下限

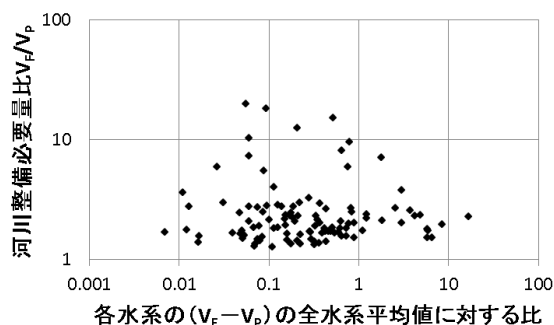


図-7 V_F / V_P と付加的整備必要量 ($V_F - V_P$) の関係 (後期 GCM20・将来・中央)

値に対して、 Q_F / Q_P 、 V_F / V_P 、 P_F / P_P について水系ごとに算定した。これら値について各地域別にそこに含まれる全水系の単純平均値を算定した結果を図-6に示す。

Q_F / Q_P 、 P_F / P_P は、大局的には α の地域分布に対応して値が変化する傾向が認められる。これと同様の傾向が V_F / V_P にも認められるが明瞭ではない。この原因は、 V_F は雨量倍率に応じて単調に増加するものの、 V_P は $H_p - H_{HWL}$ の大きさが現況における整備状況(目標水準に対する整備達成の度合い)に応じて水系ごとに異なるためである¹¹⁾。なお、後期GCM20の α 中央値を用いた各水系 V_F / V_P と付加的整備必要量 $V_F - V_P$ との関係を図-7に示すが、両者には明確な相関が認められなかった。

α の中央値および上下限値に対して、 Q_F / Q_P 、 V_F / V_P 、 P_F / P_P の全水系単純平均値を算定した結果を図-8に示す。

この図から、マクロに見れば、 α の変化に対する応答が、 Q_F / Q_P 、 V_F / V_P 、 P_F / P_P の順に大きくなること、すなわち、施策に近い指標になるほど豪雨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、予測の信頼性の幅も同様の傾向を持つことを意味する。

図-8では、 α の高位・低位値(95%信頼区間の幅)から算定した幅を示している。河川整備必要量比は気候変動適応の困難度にある程度対応する指標であることから、図-8に示される幅の大きさは、極端現象予測結果のわずかなズレが、適応施策の困難度を大きく変えうる状況を示すものと言える。

各気候予測モデルの中央値に着目すると、平均的には α の基準値1からの増分0.16に対して、 Q_F / Q_P の増分は0.24と約1.5倍程度の増加、その影響を吸収するための V_F / V_P の増分は約1.53と約10倍、また P_F / P_P の増分では約1.9と12倍程度の大きさとなった。

α の変化に対する応答が施策に近い指標になるほど鋭敏に現れることには、我が国の治水水準の歴史的向上の経緯(河川整備を相当に進捗させてきた一方で、依然大きなリスクを抱えている)が密接に関係している¹¹⁾。

したがって、図-8に示した特性からは、治水施策への影響度が全体としては大きく、同時に、相当大きな幅を持つ予測値に基づき施策検討を行わなくてはならない状

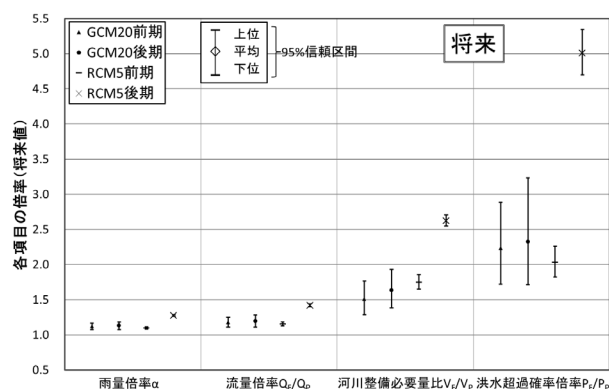


図-8 α の中央値および高位・低位値に対する Q_F / Q_P 、 V_F / V_P 、 P_F / P_P の全水系単純平均値(将来)

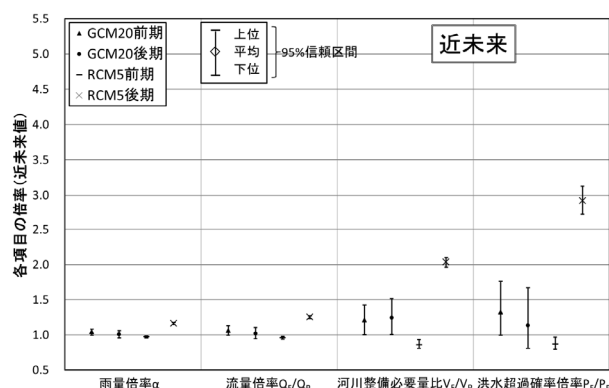


図-9 α の中央値および高位・低位値に対する Q_F / Q_P 、 V_F / V_P 、 P_F / P_P の全水系単純平均値(近未来)

況に、少なくとも現時点においては直面していると言える。そうである。

(3) 近未来気候に対する倍率試算の結果

図-8と同様に全水系単純平均した V_F / V_P 等の近未来の算定結果を図-9示す。

中央値に着目すると、近未来では前期RCM5を除いた3モデルでは、程度は異なるものの将来に向かって単調に増加する傾向が見られる。

95%信頼区間の幅についても、同様に増加傾向にある。また近未来では、将来値に比べて α が1に近い値となったことと対応して、95%信頼区間の幅が将来値に比べて6割程度まで小さくなった。気候予測モデル更新による差異も、相対的には小さなものとなっている。

ただし、図-9の全国平均から図-10に示す地域別の倍率に目を向けると、倍率が図-8に示した将来値(全国平均)に匹敵する値となる地域が散見され、またその地域が気候予測モデル更新によって異なる結果となった。

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。近未来の予測に基づく施策検討では、全国

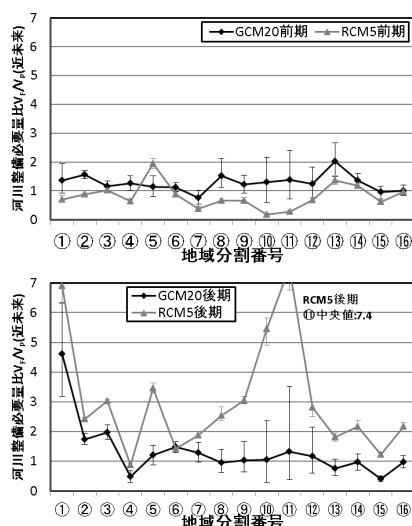


図-10 各気候予測モデルによる V_F/V_P の地域別平均値
(近未来)

的な動向も重要であるが、それと同等以上の重みをもって地域ごとと水系ごとの情報も取り扱うこととなりうる。その様な情報の一つとして図-10に示した地域分布を捉えたと、施策検討の立場からは、近未来においても予測の変動が大きな状況下にあると考えられる。

6. おわりに

図-8～10にまとめたように、日本の一級水系に関する全般的な傾向として、豪雨の増大の影響が治水施策に関わる指標に増幅して現れる特性が認められた。この増幅特性は、豪雨量増大の予測結果に関する信頼性の幅の伝播についても同様である。したがって、日本の治水施策への地球温暖化影響について、1) 影響度が全体としては相当に大きい、2) 影響度予測の信頼性の幅についても相当大きな幅を想定せざるを得ない、ことが本研究の試算を通じて改めて明確になってきたと言える。

治水施策を計画・実践する立場からは、モデル予測の信頼性を向上させ、 α の推定幅が極力小さくなる状況、また、モデル更新においても各地域の α 値が安定的な状況（モデル更新の度に数字が大きく変わり、それに施策が大きく影響されない状況）となることが好ましい。

こうした地球温暖化に伴う極端事象の将来予測の信頼性のさらなる向上を期待しつつも、一方でこれと並行して、気候変動の影響を見越した治水等の施策の取り組み方に関する議論を本格化させることも求められる。

その議論の基盤情報である整備労力規模の将来像に無視し得ない幅があることを前提として、その対処の考え方を具体化することが重要である。

理念としては今までも議論されてきた内容を持ってお

り、気象変化の具体的な予測値を踏まえ、今後、実態に即した検討を着実に進めていくことが肝要である。本研究の成果は、このことを検討するのに有用な情報を提供するものと思われる。

謝辞：本研究は文部科学省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」による温暖化予測実験データを用いた。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会：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/kikouh_endou/pdf/toshin.pdf, 2008.
- 2) 例えば、21世紀気候変動予測革新プログラム：<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/reports.html>.
- 3) Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra): *Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts*, U.K., 2006.
- 4) Netherlands Environment Assessment Agency: *The effects of climate change in the Netherlands*, Netherlands, 2005.
- 5) Bavarian Environment Agency: *Flood Protection and Climate Change–The Bavarian Adaptation Strategy*, the Federal State of Bavaria, Germany, 2007.
- 6) Flood Risk Management Approaches –as being practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom and United States –, IWR Report, No.2011-R-08, <http://www.nfimp.us/international/intapp.cfm>, 2011.
- 7) 国土交通省：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, 2010.
- 8) 辻本哲郎：気候・社会条件変化への対応を含む流域総合目標の達成に向けた河川整備手法について，河川技術論文集，第16巻，pp.11-16，2010.
- 9) RK Linsley, MA Kohler, JLH Paulhus : *APPLIED HYDROLOGY*, MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., pp. 560-561, 1949.
- 10) 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，国土技術政策総合研究所資料，第462号，2008.
- 11) 藤田光一ほか：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，平成22年度研究成果報告書，pp.76-88,2011.

(2012. 4. 5受付)