

全球気候モデル出力と洪水及び経済被害推定 モデルを用いた中小河川の水害リスクの 将来変動に関する研究

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE FLOOD HAZARD AND ECONOMIC
RISK IN A JAPANESE CATCHMENT USING GCM PRECIPITATIONS UNDER
THE A1B SCENARIO

小林健一郎¹・寶 馨²・中北英一³
Kenichiro KOBAYASHI, Kaoru TAKARA and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 Dr.-Ing.; 博 (工) 京都大学学際融合教育研究推進センター 極端気象適応社会教育ユニット
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

First this paper introduces an integrated flood risk assessment framework especially focusing on the economic damage estimation in a flood prone region using a very detailed vector-type GIS map which delineates precisely the shapes of the houses and crop fields. Then the paper tries to estimate a climate change impact on flooding in a river catchment using the precipitation outputs of a super high-resolution global climate model (GCM) with 20-km spatial resolution developed by the Japan Meteorological Research Institute (MRI). The MRI has carried out a numerical experiment of climate variation from the present (1979-2003) toward near future (2015-2039) periods under the climate change A1B scenario. Using the GCM precipitation data, the 100-year rainfalls of a catchment for the present and near-future periods are roughly estimated. Based on the 100-year rainfall change, the future change of the flood hazard and economic risk of the catchment are analyzed. The Hinogawa river catchment, Shiga, Japan and the Ryuou Town in the catchment are selected as the test sites.

Key Words : *flood risk assessment framework, economic risk, vector data, climate change, flood*

1. はじめに

本稿では、分布型降雨流出計算、1次元不定流河道洪水追跡、外水・内水氾濫計算による洪水ハザードの定量化から、家屋・農地経済被害の算定を主とする水害経済リスクの推定を可能にするための枠組みを示す。水害経済リスクの定量化については地理情報システム (GIS) を基本ツールとして用いる。さらに、気象研究所により開発された超高解像度全球気候モデル (A1Bシナリオ) による気候変動影響評価実験の現在期間 (1979-2003) と近未来期間 (2015-2039) の出力降水量を用いて、日本の中規模河川流域の確率日雨量の現在から将来への変動を相対的に把握し、推定した確率日雨量を基礎値として降雨流出計算、外水・内水氾濫計算、家屋・農地経済被害推定計算を実施する。将来に向けての洪水災害変動

を河道流量、氾濫浸水深などのハザード指標だけでなく、家屋・農地被害額といった経済リスク指標を用いて定量化することが目的である。本稿では滋賀県日野川流域と流域内部の竜王町を対象にする。

2. 洪水モデリング及び家屋・農地被害推定手法

本論文では、物理法則に基づく分布型降雨流出モデルにより流域からの洪水流出計算と河道内の洪水追跡計算を実施し、得られる流量ハイドログラフを上流端境界条件として氾濫原における河道網 (排水路網) の1次元不定流計算を実施する。不定流計算による河道流の水位が堤防高を超えた場合に溢水が生じるとし、さらに堤内地の内水・外水は河道網を通じて排水される。排水を考えるのは農地作物の被害は一般的には浸水時間に依存する

からである（浸水時間が短ければ作物被害が小さい）。これらの洪水モデリングの詳細については、小林・寶¹⁾、²⁾を参照されたい。

経済被害推定についてはGISを用いた次のような方法論を提示する（小林ら³⁾、小林・寶⁴⁾）。図-1～3に示すように、滋賀県竜王町には家屋一棟一棟、農地一区画一区画を詳細に再現したベクトル型のデータが存在するので、構造格子で内水・外水氾濫解析を実施し（図-1左）、このグリッドセルの浸水深を各家屋や農地のポリゴンデータに属性情報として割り当てる（図-1右）。次に、

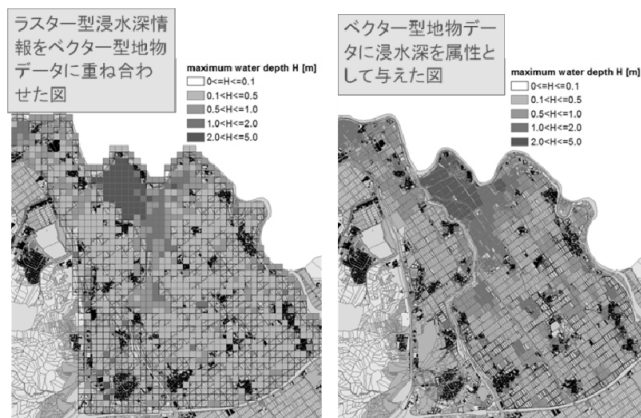


図-1 ラスタ型浸水深情報とベクター型地物データの重ね合わせ図（左）、ベクター型地物データへの浸水深属性化（右）

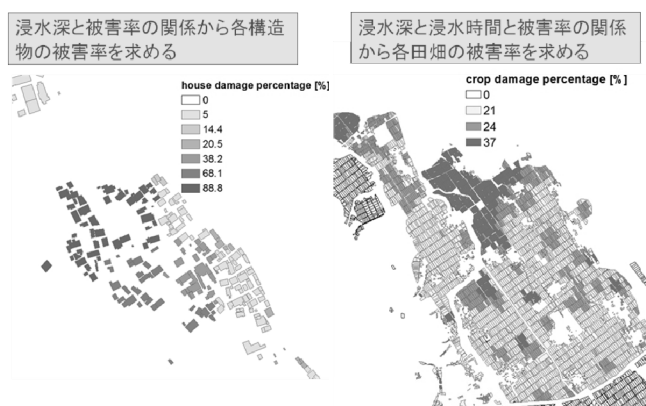


図-2 家屋・農地各ポリゴンの被害率

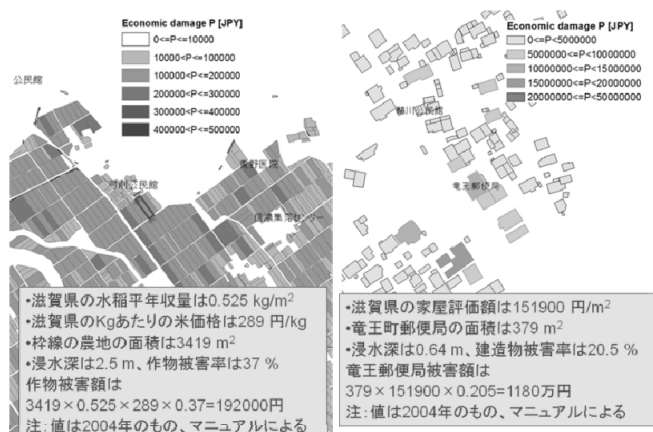


図-3 家屋・農地作物被害額推定手続き

各家屋や農地の浸水深に応じたいわゆる被害率（家屋・農地の評価額が受ける被害の割合）を治水経済調査マニュアルの統計値⁵⁾を用いて計算する。家屋及び農地についてこの被害率を計算した結果が図-2である。図-2に示したようにこの手続きにより各家屋あるいは農地毎に例えば88.8%といった被害率が割り当てられる。その後、図-3に示すように、家屋については「面積当たり家屋評価額×面積×被害率」により被害額を推定する。農地については「面積当たりの作物収量×単位重さあたり作物価格×面積×被害率」により農地作物被害額を推定する。この手法は汎用性が高く、竜王町以外の地域でも適用可能である。

3. 気象研究所全球気候モデル

21世紀気候変動予測革新プログラム⁶⁾では、気象庁現象数値予報モデル（GSM0103）が、水平解像度をTL959（格子間隔約20km）、鉛直層数を60層（上端は0.1 hPa）と高解像度化され、これを用いて検証用に現在気候（1979-2003年）、温暖化影響評価のために近未来気候（2015-2039年）、将来気候（2075-2099年）の3期間について数値実験が行われている。海表面温度（SST）・海水氷接度は現在気候については英国ハドレーセンターが提供するHadISST⁸⁾を用いており、海水厚については年々変動を含まない月平均気候値が使用されている。SSTは将来実験においては現在気候実験で用いた値とIPCC第4次報告書のために提出されたCMIP3の18のモデルのアンサンブル平均を用いて作成されている⁹⁾。二酸化炭素濃度は、現在気候実験では観測値、将来実験においてはA1Bシナリオに従った濃度を用いており、濃度は全球で一様な値を年ごとに変化させている。IPCCのSpecial Report on Emissions ScenariosによるとA1Bシナリオはグローバル化による経済成長が進展し、化石・非化石燃料をバランスよく消費するというもので、世紀末において地球平均気温は2.5°C上昇し、CO₂濃度は現在の380ppmから720ppmまで上昇するとしている。

4. 確率日雨量

図-4に淀川流域、淀川流域内部の日野川流域、日野川流域内部の滋賀県竜王町で特に町内の氾濫原に相当する氾濫解析エリア、及びGCM出力点を示す。GCMは実際には図中の出力点を中心とする約20km四方のグリッドセルの平均雨量を出力している。この図からわかるように日野川流域を含むのは4セルである。この4セルの時間降水量から日野川流域の流域平均時間・日雨量を計算し、この日雨量時系列から、現在期間（1979-2003）、近未来期間（2015-2039）についてそれぞれ25年間の流域平

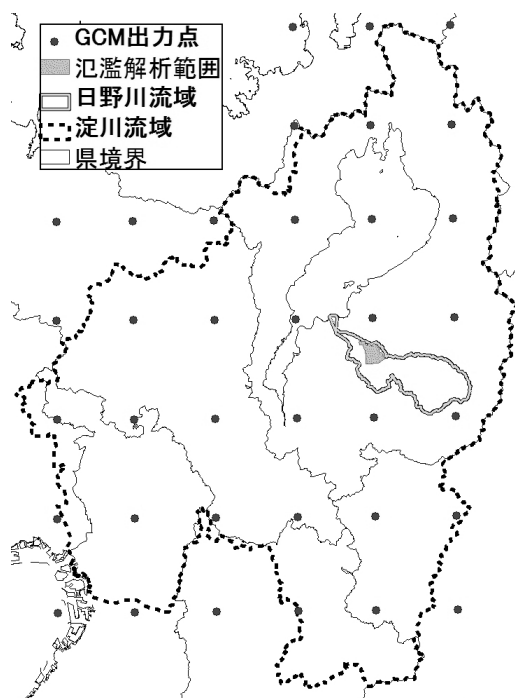


図-4 日野川流域，竜王町氾濫解析地域，GCM出力点

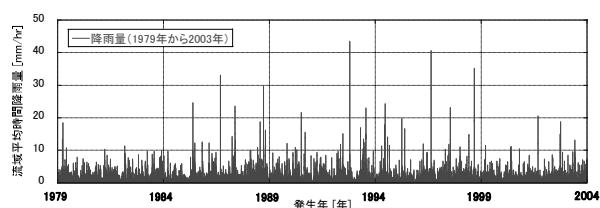


図-5 GCMによる現在期間（1979～2003）の流域平均時間雨量時系列

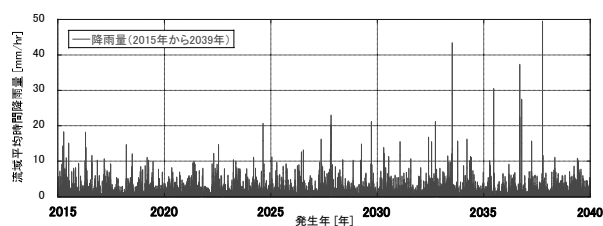


図-6 GCMによる近未来期間（2015～2039）の流域平均時間雨量時系列

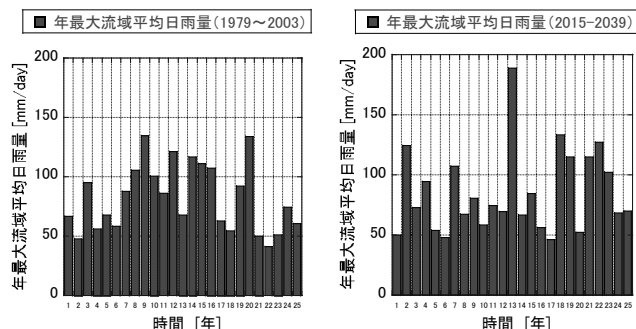


図-7 年最大日雨量時系列（現在期間：1979～2003） 図-8 年最大日雨量時系列（近未来期間：2015～2039）

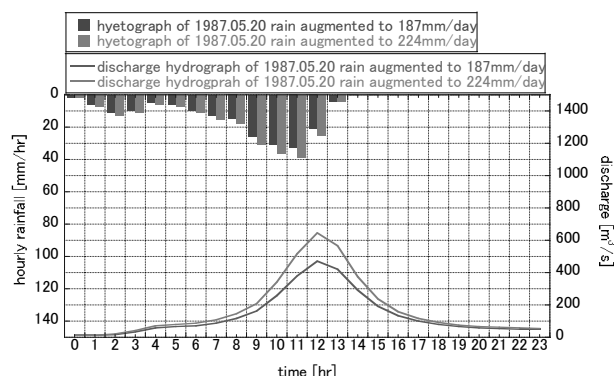


図-9 GCM1987年5月20日降雨を日雨量187，224 mm/day相当まで引き延ばした降雨ハイトグラフとそれにより計算された日野川・法教寺川合流点での流量ハイドログラフ

均年最大日雨量時系列を整理した。現在期間と近未来期間についてそれぞれ25年間の時間雨量時系列を図-5，図-6に，年最大日雨量時系列を図-7，図-8に示す。なお，図-5，6は25年間の時間雨量を並べたもので密であるので，実際には無降雨期間が存在するが図では見えない。

現在期間については25年間の中で最大の時間降水量は43.4 mm/hr（図-5），近未来期間については49.5 mm/hrであった（図-6）。年最大日雨量については現在期間においては1987年の133.4 mm/dayが25年間で最大，近未来期間については2027年の189.1 mm/dayが最大であった。

一般化極値分布は極値理論に基づいているので，特に25年間のGCMの年最大日雨量時系列に一般化極値分布を適用して100年確率日雨量を試算した。ここで100年確率日雨量を用いるのは同流域の河川計画が100年確率日雨量に基づいて策定されているからである。これによると現在期間については187 mm/day，近未来期間については224 mm/dayと推定された。なお，滋賀県により推定されている観測データに基づく同地の100年確率流域平均日雨量は228.7 mm/dayである。降雨波形については流域面積（205 km²）がGCM解像度（20 km）に比較すると小さいのでとりあえず時間分布のみを考慮し，空間分布は考慮しないこととする。

5. 洪水ハザード計算及び経済リスク分析

図-9にこれらの降雨により計算した日野川と法教寺川合流部での流量ハイドログラフを示す。GCM1987.5.20降雨を224 mm/dayまで引き伸ばした場合の方がピーク流量が大きくなっているのがわかる。

これらの流量ハイドログラフと降雨波形を用いて内水・外水氾濫解析を行い，メッシュ浸水深情報を家屋・農地ポリゴンデータに割り当てた結果（図-1参照）を図-10～13に示す。図-10，12はGCM1987.05.20降雨を187 mm/dayまで引き伸ばした降雨，図-11，13は224 mm/dayまで引き伸ばした降雨を入力として計算した家

屋・農地の最大浸水深を示している。図-10と図-11の家屋の最大浸水深を比較すると図-11で最大浸水深が増加している家屋があるのがわかる（丸印）。図-12、13の農地の場合も、総降雨量224 mm/day（図-13）のケースで最大浸水深が高くなっている区画がある。これらの最大浸水深を家屋と田畑の場合に対して浸水深毎に階数分けした表-1、表-2を示す。表-1を見るとGCM1989.05.20降雨（187 mm/dayまで引き伸ばし）のケースで501戸で床上浸水（0.5 m以上）が生じている。他方、同降雨（224 mm/dayまで引き伸ばし）では619戸で床上浸水している。表-2の田畑についてみると、0.5 m以上の浸水田畑数は、GCM1989.05.20降雨（187 mm/dayまで引き伸ばし）のケースで365区画、同降雨（224 mm/dayまで引き伸ばし）で471区画である。

次に図-14～17に家屋、農地の被害額を推定した結果を示す。家屋については多くは500万以下の被害額が試

算された。図-14～15の中央の丸印の大きな建造物はどちらの降雨に対しても2862万円の被害が生じると推定された。一方同図右上部の丸印の建造物は2300万円から5000万円まで被害額が上昇する結果となった。被害率が浸水深に対して幅を持って階数分けされているため、浸水深が多少増えたからといってこの推定法では必ずしも被害額が増えるわけではない。農地については多くは10～20万程度の被害、一部30万程度の被害が見られる。

表-3に示したようにGCM1989.05.20降雨（187 mm/dayまで引き伸ばし）から同降雨（224 mm/dayまで引き伸ばし）への被害額の変動をみると家屋で5億5000万円の増加、農地については222万円の増加になる。このように降雨波形が同じで、気候変動により100年確率日雨量が増加するならば、一般的には水害経済リスクは増加すると言える。



図-10 各家屋の最大浸水深（1987年降雨を187 mm/dayまで引き伸ばし）

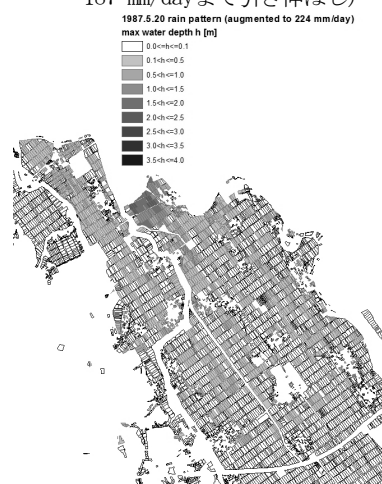


図-11 各家屋の最大浸水深（1987年降雨を224 mm/dayまで引き伸ばし）



図-12 各農地区画の最大浸水深（1987年降雨を187 mm/dayまで引き伸ばし）



図-13 各農地区画の最大浸水深（1987年降雨を224 mm/dayまで引き伸ばし）

図-14 各家屋の被害額（1987年降雨を187 mm/dayまで引き伸ばし）

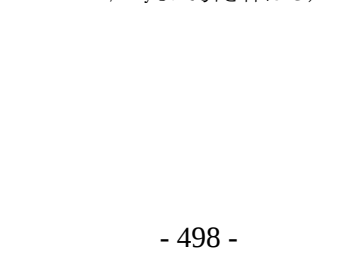
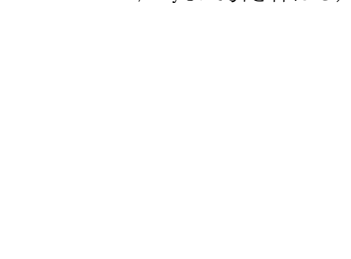


図-15 各家屋の被害額（1987年降雨を224 mm/dayまで引き伸ばし）



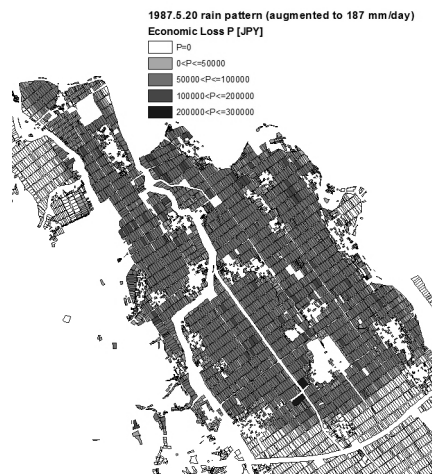


図-16 各農地区画の被害額（1987年降雨を187 mm/dayまで引き伸ばし）

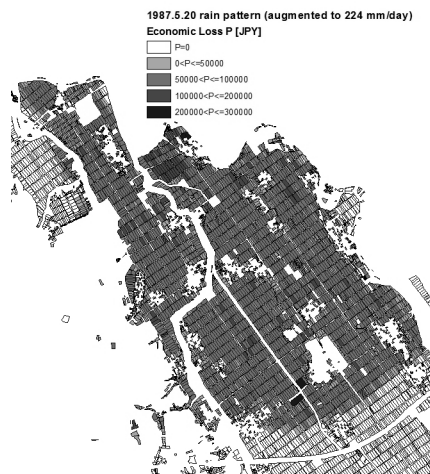


図-17 各農地区画の被害額（1987年降雨を224 mm/dayまで引き伸ばし）

表-1 浸水深毎の家屋数

降雨波形	最大浸水深				
	0.5-1m	1-2m	2-3m	3m以上	50cm以上
1987.05.20 降雨波形を187mm/dayまで引き伸ばし	449	50	2	0	501
1987.05.20 降雨波形を224mm/dayまで引き伸ばし	498	84	37	0	619

表-2 浸水深毎の農地区画数

降雨波形	最大浸水深				
	0.5-1m	1-2m	2-3m	3m以上	50cm以上
1987.05.20 降雨波形を187mm/dayまで引き伸ばし	313	52	0	0	365
1987.05.20 降雨波形を224mm/dayまで引き伸ばし	326	123	22	0	471

表-3 家屋・農地の推定被害額

降雨波形	家屋被害額（円）	農地被害額（円）
1987.05.20 降雨波形を187mm/dayまで引き伸ばし	48億2千万	1億6988万
1987.05.20 降雨波形を224mm/dayまで引き伸ばし	53億7千万	1億7210万

6. まとめと考察

本稿では降雨を入力とする分布型降雨流出モデルによる洪水流出解析、氾濫原での一次元不定流解析による河道洪水追跡、内水・外水氾濫解析を実施し、流域及び氾濫原において洪水浸水によるハザードを定量的に把握した。これに加えて詳細なベクトル型構造物・家屋データを用い、GISを基本ツールとして洪水氾濫による経済リスクを評価する手法を示し

た。今回示した家屋・農地経済被害推定手法は、従来の手法に比較すると簡便で、従来行われてきたような数え上げによる手法が自動化され、より正確に被害計量ができると考える。これにより洪水による一次被害を浸水家屋数・農地区画数、あるいは経済的にも推定するための枠組みの基礎ができた。この枠組みを用いれば、河川計画における費用便益分析なども現在よりは容易に実施することができよう。

この一連のハザード及びリスク評価の枠組みと気象研究所全球大気モデル（GCM）による気候変動影響評価実験（A1Bシナリオ）の出力降水量を用いて、気候変動による水害リスクの変動を分析した。ここでのGCMデータを用いた結果の取り扱いについての留意事項を以下に述べる。

[1] 本稿で示した気象研究所の全球気候モデルは世界でも最高解像度（約20km）のGCMであり、これまでのGCM解像度（数100km）に比較すると格段に精緻である。ようやくGCMを用いて局所性の強い地域の気象条件をもある程度実用的なレベルで考慮できるようになってきた。水文学、河川工学など気象変化による風水害の影響評価を実施する側にとっても有用なデータが利用できるようになりつつあると言える。したがって、本稿は、このデータを利用して日本の中河川流域を対象に気候変動が洪水災害へ与える影響の評価を試みたものと位置付けられる。

[2] しかしながら、図-4からもわかるようにGCMの解像度は今回のような200 km²程度の流域に対してはまだ粗い。またこれらの出力点を中心とする約20km四方のグリッドセルの平均雨量を出力していること、解像度が20kmの場合、地形の再現性が必ずしも十分でないことから（急峻な地形が十分に再現できない）、雨量強度が弱くなる傾向がある。また、本稿で示した家屋・農地のベクトル型データのスケールに対応するような局地的な豪雨は再現できていないと考えられる。つまり、本稿で示した結果は滋賀県あるいは滋賀県の東近江地域の降雨の気候変動にともなう平均的な変化の一部を定量化し、それによる洪水災害変動の一例を示したという意味合

いが強い。さらに局所的な現象を取り扱うために、本稿で示したGCM出力を境界条件として解像度が1km～5kmのRCM出力を導出して使うなどにより、今後はより局所的な気候変動の影響について検討することが必要であると考えている。

[3]本稿では、GCM出力により求めた年最大日雨量時系列を用い、降雨変動を確率指標（100年確率日雨量）によって定量化することを試みた。極値データ時系列を対象としたため、極値理論に基づく一般化極値（GEV）分布を用いた。地点雨量ではなく、4降雨出力点の平均雨量を用いていることなども含めて、地点雨量の確率指標の変動に比べるとある程度は安定で、相対的な変化を定量化するという意味では、ある程度の妥当性があると考えている。ただし、依然として25年の年最大時系列では確率分布を当てはめるには標本サイズが小さいことから、その推定精度は必ずしも高くはないと言わねばならない。この問題を解決するためには今後提供されるGCMアンサンブル計算を用いたり（実質上データ数を増やす）、あるいは地域頻度解析のような手法を適用したりすることも考えられる。

どちらにしても、GCMデータを用いた確率評価の議論で曖昧になっていることとして、計画実施に必要な確率指標をある程度の理論的妥当性を背景に推定することを求めるのか、あるいは科学的な真値を推定することを求めることを目的としているのかがあると思われる。前者は計画実施者サイドにとっては必要な情報であり、後者は真理を追究する考え方であるとも言える。本来は両者が合致するのが最善ではあるが、確率指標を洪水防御計画（気候変動への適応策）の策定に必要な情報として考えるという立場から、ここでは前者によっている。

[4]GCM計算結果を現実の観測結果に近付けるために通常いわゆる降水量分布のバイアス補正が必要になる。本稿ではこのバイアス補正を実施したデータは用いなかった。バイアス補正は現在の観測情報とGCMの計算結果の差異を基に、計算結果を観測結果に近付けようとするものである。しかしながら、この原理を将来の予測降水量に適用しようとする場合には現在から将来にわたってバイアス傾向が同一であるかという点が問題になる。一般にはこれは証明しようがないので、バイアス補正を将来の計算結果にあえて適用する場合、それによる不確実性が生じると言える。したがって、本稿ではGCMの出力データをそのまま用いて相対的な変化を分析することにとどめた。バイアス補正を実施したデータを用いることも今後の検討課題となる。

[5]ここでは現在の河川計画で一般に適用されている、降雨波形を治水安全度相当の確率雨量まで引き伸ばして、降雨流出計算の入力条件とする方法論をGCM降水量に対して適用した。示した例は一降雨波形のみを用いた結果である。多数の降雨波形に対してこの方法論を用いれば河川計画で実施されている一般的な方法となる。しかしながら、GCM計算には多大なコストがかかるのが現状であり、20km

の解像度を維持したまま、多数の時系列を発生することは今のところ不可能である。よって、今回はGCMの一計算結果の時系列を用いているのみであるから確率雨量の変動幅など不確実性を定量化するのが難しいが、仮にここでみられた変動が実際に生じるならば、現地の水害リスクは基本的には上昇することになる。降雨波形の引き伸ばし法は、現実の河川計画で用いられてきており、治水面から安全な社会を作ってきた実績があるものの、今後は対象降雨を物理的・統計的にダウンスケーリングして設定する方法などにより新たな展開を図る必要があろう。

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において地球シミュレータで実施された全球気候モデルによる気候変動影響評価実験の結果を用いた。また、財団法人河川情報センターの研究助成金の支援を受けた。被害推定手法については株式会社パスコの吉岡裕嗣氏、船田征氏、間野耕司氏の技術的支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小林健一郎・寶 馨：雨域の移動が流域の降雨流出・洪水氾濫過程に及ぼす影響，水工学論文集，土木学会，第53巻，pp. 841-846, 2009
- 2) 小林健一郎・寶 馨：洪水氾濫シミュレーションによる農地の作物被害の推定，京都大学防災研究所年報第52号B，pp.19-27, 2009
- 3) 小林健一郎・寶 馨・船田征：ラスタ型氾濫解析とベクター型地物GISデータを統合した地域水防災計画の研究，第28回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.45-46, 2009
- 4) Kobayashi, K and Takara, K: An Integrated Flood Risk Assessment Framework for the Community-Based Flood Disaster Management in Japan, Road Map Towards a Flood Resilient Urban Environment, Proceedings Final Conference of the COST action C22 Urban Flood Management in cooperation with UNESCO-IHP, Paris, 26-27 Nov. 2009, CD-ROM, 8 pp., 2009
- 5) 国土交通省：治水経済調査マニュアル平成17年度版，2005
- 6) 文部科学省地球・環境科学技術推進室：21世紀気候変動予測革新プログラム平成19年度研究成果報告会要旨集，2008
- 7) 小林健一郎・寶 馨・中北英一：全球気候モデル出力を用いた日本域の100年確率日降水量の将来予測，水工学論文集，土木学会，第54巻，pp. 223-228, 2010
- 8) Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., and Kaplan, A.: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, Journal of Geophysical Research, 108, No. D13, 4407, doi:10.1029/2002JD002670, 2003
- 9) Kitoh, A. and Kusunoki, S.: East Asian summer monsoon simulation by a 20-km mesh AGCM, Climate Dynamics, DOI10.1007/s00382-007-0285-2, 2007

(2010.4.8受付)