# 流量確率指数を用いた地球温暖化に伴う 日本域洪水リスク変化の推定 CHANGE OF FLOOD RISK UNDER CLIMATE CHANGE BASED ON DISCHARGE PROBABILITY INDEX IN JAPAN

新田友子<sup>1</sup>・鼎信次郎<sup>2</sup>・沖大幹<sup>3</sup> Tomoko NITTA, Shinjiro KANAE and Taikan OKI

 1学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
2正会員 工博 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)
3正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

We conduct river discharge simulations using the output from Regional Climate Model 20 (RCM20) developed by the Meteorological Research Institute. In order to evaluate the change in flood risks under climate change in Japan, simulated river discharge is converted to discharge probability index (DPI). We divide Japan into 9 regions and evaluate the occurrence of flood events corresponding to DPI categories. The results indicate low DPI flood events (return period of 2years) become more frequent in 2031-2050, and high DPI flood events (return period of 200 years) more frequent in 2081-2100 compared with the period of 1981-2000, though average precipitation is heavier during 2031-2050 than during 2081-2100 in most regions.

Key Words : Climate Change, River Discharge, Flood Risk, Discharge Probability Index

## 1. はじめに

水循環と気温や放射バランスは密接に関連している. 近年の気候システムの温暖化は明確であり,大気・海水 温度の上昇,広範囲にわたる雪氷の融解,全球規模での 海水面の上昇が観測されている<sup>1)</sup>.将来予測に関しては, 全球気候モデルを用いた研究が盛んに行われており,気 候変動と水災害に関する研究も進められている.例えば, Milly et al.<sup>2)</sup>は,気候モデルによるシミュレーション結 果と観測流量を用いて,大流域における100年確率を超 える洪水の頻度が,20世紀の間に大幅に増加しているこ とを示し,この傾向が続くだろうと予測している.また, Hirabayashi et al.<sup>3)</sup>は比較的高解像度の気候モデルを用い て洪水・渇水リスクの変化を調べ,北アメリカや中央~ 西ユーラシアを除く多くの地域で洪水の頻度が増加し, 洪水・渇水共に増加する地域もあると指摘している.

気候変動対策としては、緩和策だけでなく適応策も不 可欠であり、適応策を考える上では、全球スケールだけ

でなく地域に着目した研究が必要である. Wilby et al.<sup>4)</sup> はイギリスの降雨・河川流量記録の長期傾向と地域気候 モデル予測に関する過去の研究についてまとめ、国際 的・国内的な適応策は、地域スケールでの洪水リスクの 不確実性評価に基づいて考えられており、今後、気候と 土地利用の両者の変化や発生機構の異なる洪水発生の変 化に関する理解、解析の全ての段階における不確実性の 評価に向けた更なる研究を組み込む必要があるとしてい る.日本を対象とした研究としては、和田ら5が気象 庁・気象研究所が開発した地域気候モデル (RCM20) と全球気候モデル(GCM20)の計算結果を用いて雨量 について解析を行い、100年後の100年確率雨量を指標と して将来の洪水リスクを求めている.また、佐山らのは RCM20の計算結果から、地球温暖化が淀川流域の洪水 と貯水池操作に及ぼす影響を調べ、2031-2050年と2081-2100年の洪水流出は1981-2000年に比べて増加する傾向 があることを示している. また, 気候変動に関する経済 影響評価も行われており、佐藤ら<sup>7</sup>は2つの気候モデル による将来の降水量から、将来再現期間における年平均

被害期待額を求めて気候変動による便益と被害を定量化 し,被害の方が大きく,その差額はそれぞれの気候モデ ルで3兆700億円と7,000億円になると見積もっている. さらに,国としての適応策のあり方についても検討が始 まっており<sup>8</sup>,荒川において降水量が将来1.1倍になった 場合,現状の目標である治水安全度1/200が1/120に低下 すると試算されている<sup>9</sup>.水災害への影響を考える上で は,降水量などの気候値だけでは不十分で河川流量への 変換が必要である.また,国レベルの対応が必要である ことから,ある流域の変化だけではなく日本全域を対象 とした変化の情報も得られることが望ましい.不確実性 の高い気候モデル出力値を利用する際には,日本全域と いった広域での傾向を確認することも必要である.

そこで本研究では、日本全域を対象とし、地域気候モ デル(RCM20)の出力値を用いて河川流量をシミュ レーションする.計算に用いるモデルはToday's Japan<sup>10)</sup> を基本とし、後述するように改良・検証を加えている. さらに、計算した河川流量をYoshimura et al.<sup>11)</sup>の流量確 率指数に変換する.流量確率指数は計算した河川流量を 再現期間に直して表現する指数である.高い流量確率指







図-3 日流量(2004年5月江の川都賀)青が観測,青が観測,黄 色が河川流速一定を用いた計算結果,緑色が流速変化を考慮し た計算結果を示す

数と現実の水害記録が対応していることが示されており, 流量確率指数を用いることによって,誤差や不確実性を 含む計算結果を有用な情報に変換できていると言える. この指標を用いて,将来の洪水リスクの変化を推定する.

## 2. 日本域河川流量シミュレーション

#### (1) Today's Japan

河川流量シミュレーションには、芳村ら<sup>10)</sup> が開発した Today's Japanを用いる. Today's Japanは陸面モデルIso-MATSIRO<sup>12)</sup>,河川モデルにJTRIP<sup>13)</sup>を用いており,入 力値はGPVデータ<sup>14)</sup>として配信されている気象庁メソ 気象モデルによる予報結果を用いて作成している.また、 時間解像度は1時間,空間解像度は0.1度(約10km)と なっている. 図-1に示す概念図のように、まず気象デー タを陸面モデルに入力し、蒸発散量、積雪・融雪量、流 出量等を計算する. 陸面モデルに必要な土地利用は国土 数値情報<sup>15)</sup>のデータを利用し、地質は日本全域で一定と 仮定している. そこから得られた流出量をJTRIPに入力



図-2 年・月比流量(2004年江の川都賀)青が観測, 黄色が河 川流速一定を用いた計算結果,緑色が流速変化を考慮した計算 結果で,破線は年平均比流量を示す.上流域面積は観測が 2890km<sup>2</sup>,モデルが2939km<sup>2</sup>となっている



図-4 時間流量(2004年5月13~18日江の川都賀)青が観測,黄 色が河川流速一定を用いた計算結果,緑色が流速変化を考慮した計算結果を示す

して河川流量を求める. Today's Japanは日本全域を対象 として河川流量を計算できるシステムの先駆けであるが, 河川流速に一定値を用いており,洪水検出を目的とする には不十分な点もある.

## (2) モデルの改良と検証

現状のToday's Japanは流速を一定とする河川モデルを 用いているため、洪水時の速い流速を考慮できていな かった. そのため、まず流速変化を考慮した河川モデル <sup>10</sup>を日本域へ導入する.河川流量*Q*は式(1)で表される.

$$Q = 1.564 \times A^{1.173} \times R^{0.400} \times s^{-0.0543 \times \log_{10} s}$$
(1)

$$R = \frac{A}{2 \times A/W + W}$$

 $W = \max(10, (6.0 + 10^{-4} \times Q_{m,mouth}) \times Q_{m}^{0.5})$ 

$$A = \frac{S_s}{(l \times r_M)}$$
$$\frac{dS_s}{dt} = D_{up} + D_{LSMs} - Q$$

ここで、A: 断面積、R: 径深、W: 川幅、s: 勾配、  $Q_{m,mouth}$ :河口での年平均流量、 $Q_m$ : 年平均流量、 $S_s$ : 河 道内貯水量、l: グリッド間距離、 $r_M$ : 蛇行率、 $D_{up}$ : 上 流からの流入量、 $D_{LSMs}$ : 陸面モデルからの流出量とし、 蛇行率は0.8を用いる.

図-2は2004年,江の川都賀での年・月流量,図-3は日 流量,図-4は時間流量の検証結果を示している.青が観 測, 黄色が河川流速一定を用いた計算結果, 緑色が流速 変化を考慮した計算結果を示しており、観測値は水文水 質データベース<sup>17)</sup>の流量を用いた. 江の川での年・月単 位の流量は比較的良く再現されている. また, 日流量に 関しては,流速変化を考慮した河川モデルを導入するこ とで、勾配に対応した河川流速を表現できるようになり、 結果が改善されていることがわかる. しかしながら, 時 間流量をみると、観測値と計算結果に差異が認められる. また、逓減曲線が表現されず、ピーク流量を過大評価す る傾向が全体的に見られた. 斜面流の導入といった物理 面の改良も必要だと考えられるが、0.1度というモデル の解像度を考えると現状のシステムでは時間流量の再現 は難しいと判断し、日本全域を対象とする本研究では、 10分単位で河川流量シミュレーションを行い、日流量に 集計した結果を用いて評価を行うこととした.

# 3. 温暖化予測情報を用いた洪水リスクの評価

#### (1) 気象庁地域気候モデル(RCM20)

RCM20は気象庁・気象研究所が開発した地域気候モデルである<sup>18)</sup>.日本周辺を計算領域とし高解像度の予測

が可能で、解像度の粗い全球大気・海洋結合モデルでは 表現されない梅雨前線による降雨や日本海側の降雪の変 動など、日本周辺の重要な現象の再現を目指して開発さ れている.計算に必要な側方境界条件は全球大気・海洋 結合モデル(CGCM2)の計算結果を,海面水温は CGCM2で計算した結果を観測値で補正した値を用いて いる. また, 温室効果ガス排出シナリオにはSRESのA2 シナリオが選択されている. 温室効果ガスの排出シナリ オは人間社会がどのような方向に発展するかによって大 きく変わってくるが、A2シナリオは地域主義が高く自 由貿易に基づく経済効率性に高い価値を置かないという 将来を想定しており、人口が約150億人に達し、エネル ギーを地域内の資源に依存する割合が高くなるため、温 室効果ガス排出も高水準となる.出力値は,1981-2000 年,2031-2050年,2081-2100年の3期間,各20年間の日 データで、ランベルト正角円錐図法で投影されており、 空間解像度は20kmとなっている。

#### (2)入力気候データの作成

RCM20を用いた温暖化実験の出力値をもとに,陸面 モデルへの入力値として必要な,空間解像度0.1度の日 データを作成する.使用するRCM20の要素,作成する 入力気候データの一覧を表-1に示す.

#### a) RCM20出力値の分析

まず最初に、モデルの空間解像度に合わせて、ランベルト正角円錐図法で投影されているRCM20の出力値を日本域0.1度の緯度経度データに内挿・変換する.データの特性を把握するため、1981-2000年の降水量・気温・風速・雲量・海面更正気圧・比湿を観測値と比較する.観測値は、気象庁のAMeDAS・地上観測による気象データ<sup>19)</sup>を逆距離二乗法で内挿した0.1度グリッドデータを用いる.図-5、図-6に1981-2000年の降水強度について、RCM20出力値と観測値をそれぞれ20年平均した値を示す.両者を比較すると、北陸、紀伊半島、四国といった相対的に降水量の多い地域の分布は良く再現されていることがわかる.しかしながら、降水量の大きさに



図-5 1981年-2000年の平均 降水強度[mm/day] (RCM20)

図-6 1981年-2000年の平均 降水強度[mm/day](観測値)

変数	単位	使用するRCM20	バイア
		出力値	ス補正
降水量	mm/day	降水量	比
気温	K	気温	差
風速	m/s	風速東西・南北成分	比・差
雲量	0-1	上・中・下層雲量	差
地表面気圧	hPa	海面気圧	差
比湿	g/kg	比湿	比・差
短波放射	$W/m^2$	比湿・海面気圧・雲量	なし
長波放射	W/m²	比湿・海面気圧・	なし
		気温・降水量・雲量	

表-1 入力気候データ

は差異が認められる.本来は気候モデルと観測値の誤差 を詳細に検討してバイアス補正を行ったデータを用いる べきだが、本研究の入力値として利用可能なデータは今 までのところ整備されていない.そこで、20年平均値の 比を用いてバイアス補正を施すこととする.また、同様 の検討を他の要素についても行い、20年平均値の差と比 を用いた最小限のバイアス補正を行うこととした.

## b)バイアス補正

前述のように20年間の平均値の比・差を用いて観測値 とRCM20出力値のバイアスを補正する.用いた補正法 を表-1に示す.将来の気候値を作成する場合,現在気候 の観測値にモデル出力値の変化量を加える方法と,将来 のモデル出力値の時系列を用いてその絶対量を補正する 手法が考えられる.観測値の時空間分布を用いる前者の 手法の方が現実に近い気候値を表現できる可能性はある が,この手法では「無降雨日数が増える」,「強い雨が 増える」といった降水日数や強度の変化が表現できない. このため,本研究では後者の手法を用いることとした.

# c) 入力データの作成

RCM20出力値にない気候要素に関しては、バイアス を補正したデータを用いて作成する.地上気圧は、海面 気圧と気温、さらに標高データを用いて作成する.また、 短波・長波放射は近藤<sup>20)</sup>の手法によって作成する.

## (3)河川流量シミュレーション

作成したフォーシングデータをモデルに入力し, 1981-2000年,2031-2050年,2081-2100年の計60年間の河 川流量をシミュレーションする.まず,全国的な変化を 見るために,図-7に日本全域で平均した年流量の時系列 変化を示す.図は実線が流量,破線が降水量を表してお り,1981年-2000年に比べて,2031年から2050年では大 きく年平均流量が増加することがわかる.これは,降水 量と同じ傾向となっている.

## (4)考察

計算した河川流量を,Yoshimura et al.<sup>11)</sup>の提案する 流量確率指数に変換する.流量確率指数は,計算した流 量を再現期間に変換し,洪水リスクとして表す指標であ



図-7 日本全域の年平均流量(実線)と年平均雨量(破線)

る. 2004年の台風を対象とした検証によって,高い流量 確率指数と実際に洪水の被害を受けた地域が対応してい ることが示されている.再現期間を求める際には1981-2000年の日流量から閾値以上の値を持つデータのみ抽出 した資料を母集団として利用する.閾値を超えた洪水 ピークの発生間隔(到着率)がポアソン分布に,閾値以 上の洪水ピーク値が指数関数に従うとし,閾値を超える 年最大ピーク流量の確率分布としてグンベル分布を仮定 すると,流量確率指数∏は以下の式から計算できる.

$$\Pi = \left[1 - \exp\left\{-\exp\left(-\frac{D-\mu}{\beta}\right)\right\}\right]^{-1}$$
(2)

ここで、D:日流量(計算結果),  $\beta$ : グンベル分布の スケールパラメータ、 $\mu$ : ロケーションパラメータであ る. パラメータは以下の式から推定できる.

$$\hat{\beta} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} (D_i - D_M)$$
$$\hat{\mu} = D_M + \hat{\beta} \ln \lambda$$

$$\lambda = M / N$$

ただし、 $D_M$ : 閾値、N: 対象とする年数で本研究では20 年とし、M: 資料数、 $\lambda$ : 年平均生起数である. Yoshimura et al.<sup>11)</sup> は異なる $\lambda$ の値を用いて仮定した指数 分布を32の観測点で検証し、 $\lambda = 3$ が適当であるとして いることから、本研究でもそれに倣うこととした.よっ て、M=60となる.

1981-2000年,2031-2050年,2081-2100年の日流量から 流量確率指数を計算する.まず,1981-2000年の計算結 果を用いて2,5,10,20,30,50,100,200年の再現期間に対 応する流量を求め,指数の基準とする.次に,基準とな る流量のうち,計算した日流量を超えない最大のものに 対応する指数をそのグリッドの流量確率指数とし,各グ リッドで20年×365日の流量確率指数を3つの期間で求め



図-8 左:流量確率指数を用いた各地域の洪水リスク変化 (1st:1981-2000年, 2nd:2031-2050年, 3rd:2081-2100年を意味し, 棒グラフが20年間の平均生起回数,点が20年間の平均降水量を表す.流量確率指数ごとに色分けしている.) 右上:地域区分,右下:流量確率指数の例



図-9 流量確率指数∏=100に対応する流量の変化 左:1981-2000年の流量確率指数∏=100に対応する流量[m<sup>2</sup>/s], 中:左図に対する2081-2100年の流量確率指数∏=100に対応する流量の変化率, 右:1981-2000年に対する2081-2100年の100年確率降水量の変化率

る. ある日の流量確率指数の空間分布を図-8の右下に示 す. さらに,各20年間で,流量確率指数の各値が出現す る回数を数え,地域ごとに平均する.地域区分は**図-8**右 上に,結果を**図-8**左に示す.1981-2000年に比べると, 2031-2050年,2081-2100年は全ての地域で洪水のイベン トが増加していることがわかる.また,規模の小さい流 量確率指数 $\Pi$ =2の洪水は第2期に増える地方が多いの に対して,流量確率指数 $\Pi$ =200の極端な洪水は第3期 の方が増加している. 次に、流量確率指数Π=100に対応する流量の変化を図 -9に示す.1981-2000年と2081-2100年のそれぞれの期間 の結果を母集団とした流量確率指数=100に対応する流量 を計算し、1981-2000年に対する2081-2100年の変化率を 計算した.比較のために、同様にグンベル分布を仮定し て計算した100年確率降水量の比を図に示す.基本的に は100年確率降水量が増加している地域が流量に関して も増加する傾向になっているが、降水量と比べて中国地 方の流量の増加が顕著である.降水量はある地点の値の みを反映するが、流量はその地点より上流の積算値となる.そのため、降水量に対して流量の増加が顕著なのは、 局地的な降水よりも流域全域に降る雨が増えたためだと 考えられる.RCM20の計算上では瀬戸内海が湖のよう に閉じた水面として扱われており海面水温の観測値も十 分ではないため、この地域の算定値に基づく結果を利用 する際には注意が必要であるとされている<sup>17)</sup>.従って、 この結果の信頼度は低い可能性があるが、将来の洪水リ スクを考える上では、降雨の空間分布を反映できる流量 確率指数が有効な指標になると考えられる.

## 4. まとめ

本研究では気象庁の地域気候モデルの出力値を用いて、 将来の日本域洪水リスクの変化を推定した.日本を9つ の地域に分け、地域ごとの流量確率指数の平均生起回数 を1981-2000年、2031-2050年、2081-2100年の3つの期間 で比較した.その結果、2031-2050年は流量確率指数の 低い中小洪水の頻度が増す傾向にあること、流量確率指 数200年の大きな洪水は2081-2100年の方が増えることが わかった.

今後の課題として、以下のことが挙げられる.洪水リ スクの評価には被害規模の評価が必要となるが、流量確 率指数を用いることで将来的には可能となると考えられ る.本研究では気候モデル出力値のバイアス補正に平均 値の比と差を用いた簡易な手法を用いたが、その不確実 性の検討や最適なバイアス補正手法の導入が今後の課題 となる.変化する気候の中でモデルのバイアスをどう補 正するかは非常に難しい問題であり、研究が進められて いるところであるが、現在利用可能な予測結果に基づい て洪水リスクの変化を推定することも適応策を考える上 では重要であると考える.また、本研究ではRCM20の 出力値のみを用いたが、今後は複数のモデルを使った評 価にも取り組む意向である.

謝辞:本研究は環境省地球環境研究総合推進費(S-5), 文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「高解像 度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究」 から援助を受けました.ここに記して謝意を示します.

#### 参考文献

- Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change and Water IPCC Technical Paper VI, 2008
- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., and Delworth, T. L.: Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, Vol.415, pp.514-517, 2002.
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., Kimoto, M.: Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing

climate, Hydrological Sciences, Vol. 53(4), pp.754-772, 2008.

- Wilby, R. L., Beven, K. J., and Reynard, N. S.: Climate change and fluvial flood risk in the UK: more of the same?, *Hydrological Processes*, Vol.22, pp.2511-2523, 2008.
- 5) 和田一範, 川崎将生, 冨澤洋介, 楠 昌司, 栗原和夫:高解 像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化に ともなう洪水リスクの評価, 水文・水資源学会誌, Vol.21, No.1, pp.12-22, 2008.
- 6) 佐山敬洋,立川康人,寶 馨,増田亜美加,鈴木琢也:地球 温暖化が淀川流域に及ぼす影響の評価,水文・水資源学会誌, Vol.21, No.4, pp.296-313, 2008.
- 7) 佐藤歩,川越清樹,風間 聡,森杉壽芳:気候モデルを利用 した日本列島洪水リスク評価,水工学論文集,第53巻, pp.847- pp.852,2009.
- 国土交通省河川局: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/index.html, 2008.
- 9) 国土交通省:国土交通白書2008 平成19年度年次報告 進行す る地球温暖化とわたしたちのくらし、2008.
- 10) 芳村圭, 岡澤毅, H. Kim, 瀬戸心太, 小岩祐樹, 沖大幹, 鼎信次郎: 気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川 流量予測システムの構築と検証, 水工学論文集, 第51巻, pp.403-408, 2007.
- 11) Yoshimura, K., Sakimura, T., Oki, T., Kanae, S., and Seto, S.: Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan. *Hydrological Research Letters*, Vol.2, pp.22-26, 2008.
- 12) Yoshimura, K., S. Miyazaki, S. Kanae, and T. Oki: Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, Global Planetary Change, 51, pp90-107, 2006.
- 13) 岡澤毅:0.1度グリッド河道網を用いた日本域河川流量予測 システムの開発,東京大学修士論文,2005.
- 14) GPV Data Archive, http://gpv.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/GPV/, 2006.
- 15) 国土交通省:国土数值情報,http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/
- 16) Ngo-Duc, T., T. Oki, S. Kanae: A variable stream flow velocity method for global river routing model: Model description and preliminary results, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2007.
- 17) 国土交通省:水文水質データベース, http://www1.river.go. jp/
- 気象庁:地球温暖化予測情報 第6巻, http://www.data.kishou. go.jp/climate/cpdinfo/GWP/Vol6/contents.html, 2005.
- 気象業務支援センター:気象データベース・アメダス、気 象データベース・地上観測,2009.

go.jp/climate/cpdinfo/GWP/Vol6/contents.html, 2005.

20) 近藤純正:水環境の気象学,朝倉書店, 1994.

(2009.9.30受付)