

## 1.1 不確実性を考慮した地球温暖化が洪水・渇水特性に与える影響に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：深見和彦，上野山智也，  
廣江亜紀子，長谷川聡

### 【要旨】

気象研究所が開発した水平解像度約 20km の全球大気気候モデル MRI-AGCM3.1S および同 3.2S に対して、バイアス補正による現在気候の降水量の再現を試みた。また、約 60km の解像度をもつ MRI-AGCM3.2H にバイアス補正手法を適用することにより、観測データの解像度 20km にダウンスケールした。洪水流出特性変化の検討として、ネパールの西ラプティ川を対象に、解像度 20km の MRI-AGCM3.1S, 3.2S による降水量を流出モデルに与え、流出解析を行った。今回検討に用いたのは、限られた気候モデル予測結果であるため、今後はより多くの研究機関の気候モデルの出力データを解析し、様々な不確実性を考慮した検討を行っていく必要がある。

キーワード：気候変動，バイアス補正，ダウンスケーリング，洪水流出解析，流量確率

### 1. はじめに

平成 23 年度までの 5 年に渡った「21 世紀気候変動予測革新プログラム」において気象研究所は、水平空間解像度が約 20 km の全球大気気候モデルである MRI-AGCM3.1S (Mizuta et al., 2006)を開発し、最終的には IPCC 第五次報告書に向けた全球気候モデルデータセット CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)への貢献のために改良された 20 km 版の MRI-AGCM3.2S (Mizuta et al., 2012)と 60 km 版の同 3.2H を開発した。気候変動実験を行った全球気候モデルでは、20 km という空間解像度は現時点で世界最高水準にあるものである。上記は CMIP3 で用いられた SRES (Special Report on Emissions Scenarios)の A1B シナリオを元に実験が行われている。

平成 23 年度は、CMIP5 として世界各国の研究機関から提出され始めた全球気候モデルによる現在気候再現実験の降水量の再現性および将来変化予測の評価の手始めとして、上記の三種の気象研究所の全球大気気候モデルによる実験について検討を行った。また、粗い空間解像度のモデル実験結果から、より詳細な空間情報を含むデータセットを構築する空間ダウンスケーリングの手法の検討として、観測値を用いたバイアス補正手法に伴う統計的ダウンスケーリング手法を 60 km 版の MRI-AGCM3.2H の日降水量に適用した。

さらに、主要な河川の洪水流出特性の検討としてネパールの西ラプティ川を対象に洪水流出解析を行った。

解像度 20km の MRI-AGCM3.1S および同 3.2S にバイアス補正手法を適用して得られた降水量を入力として用い、将来における洪水流出量のピーク値の変化を検討した。

### 2. 全球気候モデルの降水量の検討

#### 2. 1 データと手法

##### 2.1.1 用いたデータ

水平空間解像度が約 20 km の MRI-AGCM3.1S および 3.2S, 同 60 km の MRI-AGCM3.2H による現在気候実験(1980-2004 年), 近未来気候実験(2015-2039 年), 21 世紀末気候実験(2075-2099 年)の各 25 年分について、日降水量の全球気候モデルによる現在気候の再現性と将来変化予測を評価した。

現在気候の再現性の評価や各種気候実験におけるバイアス補正の参照となる観測値として、APHRODITE プロジェクト(Yatagai et al., 2009 等)を引き継ぐ形で気象研究所において、対象領域を全球陸面としたグリッド日降水量データセットの試作版を用いた。あくまで試作版であり、アフリカ中央部や南米の一部などでは欠測値も非常に多く、その結果の扱いには注意を要する。使用期間は 1980-2004 年、水平空間解像度も約 20 km と、20 km 版の全球大気気候モデルに合わせた。

##### 2.1.2 バイアス補正手法

太陽定数、温室効果気体の濃度、海面水温や海氷分布などの境界条件として、過去の観測値を与えたとし

でも、全球大気気候モデルによる現在気候の再現実験結果にはバイアスが含まれている。流出モデルを用いた河川流量の予測やハザードの推定を量的に行うためには、このバイアスを適切に補正する必要がある。本研究では、Inomata et al. (2011)のバイアス補正手法を用いた。この手法は、極端に強い降水の出現時期の気候変動に伴う変化予測も考慮しつつ、降水の季節変化も適切に補正することを狙った手法である。

## 2.2 バイアス補正による現在気候の再現性

図1は気象研の20 km版の全球大気モデルの年平均降水量の観測に対するバイアスを示している。赤道周辺の低緯度地域ではどちらも年降水量が過剰となっている。一方、中高緯度地域ではMRI-AGCM3.2Sの方がバイアスは抑えられる傾向にあることが分かる。

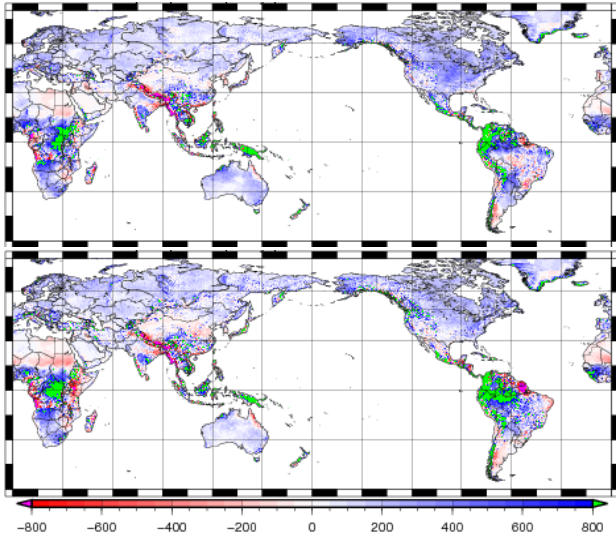


図1 MRI-AGCM3.1S(上)および3.2S(下)の現在気候実験と観測における年平均降水量の差 (単位:mm/年)

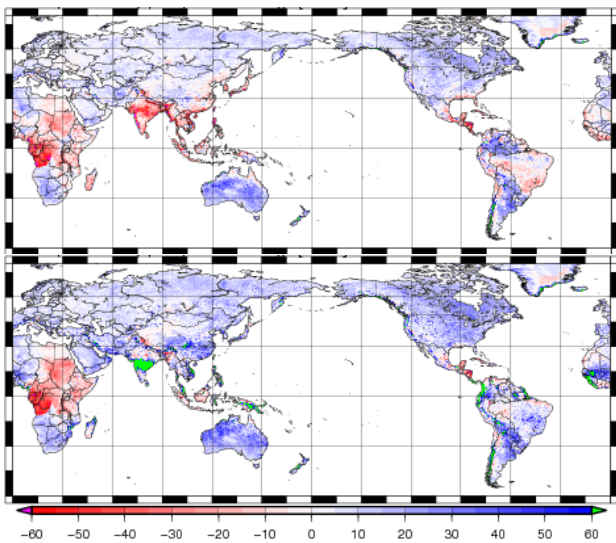


図2 MRI-AGCM3.1S(上)および3.2S(下)の現在気候実験と観測における極端に強い日降水量の差 (単位:mm/日)  
極端に強い降水として現在気候の全期間の上位

## 1.1 不確実性を考慮した地球温暖化が洪水・渇水特性に与える影響に関する研究

0.5%を平均した日降水量の観測に対するバイアスを示したのが図2である。MRI-AGCM3.1Sではアジア域で、極端に強い降水が観測と比べて非常に弱かったが、同3.2Sでは逆に強すぎるというバイアスを示している。

一方、バイアス補正を行うことにより、現在気候再現実験に見られるこれらのバイアスについてアフリカや高山地域などの一部の地域を除いて適切に補正され、観測と同レベルの年平均降水量(図3)および月平均降水量や極端に強い降水量(図4)が得られた。

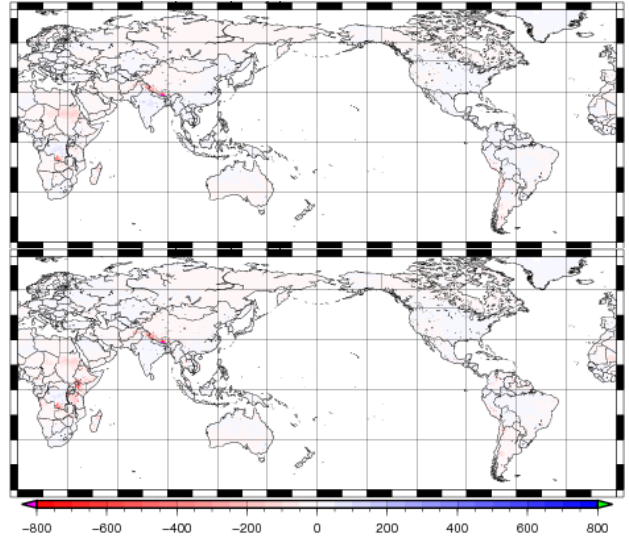


図3 MRI-AGCM3.1S(上)および3.2S(下)のバイアス補正後の現在気候実験と観測における年平均降水量の差 (単位:mm/年)

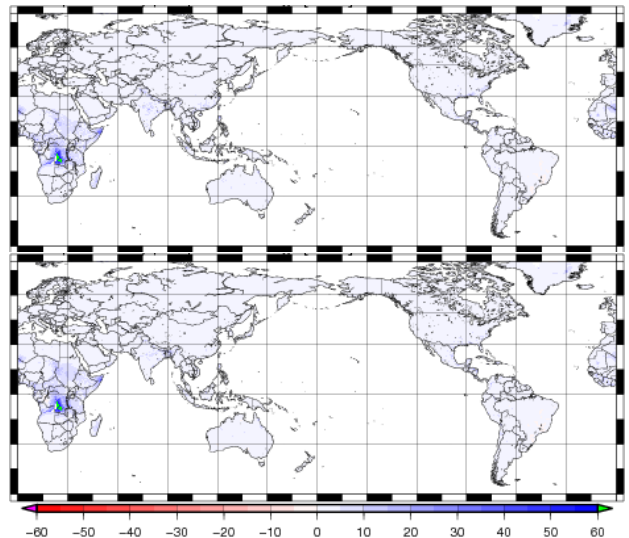


図4 MRI-AGCM3.1S(上)および3.2S(下)のバイアス補正後の現在気候実験と観測における極端に強い日降水量の差 (単位:mm/日)

## 2.3 気象研究所全球大気モデルのアンサンブル解析

### 2.3.1 統計的ダウンスケーリング手法の開発

## 1.1 不確実性を考慮した地球温暖化が洪水・渇水特性に与える影響に関する研究

CMIP5 で提供されるデータでは、水平空間解像度が 100 km かそれよりも粗い気候モデルによるものも多く、そのまま解析・比較することは困難を伴う。そこで Inomata et al (2011)による統計的バイアス補正手法を拡張して、粗い気候モデルのピクセルと細かい観測データのピクセルを関連付けてバイアス補正を行った。結果として観測データと同じ空間構造でバイアス補正も施された現在および将来気候の日降水量データが得られる。その試験として、60 km 版の気象研究所の全球大気モデル出力の日降水量について統計的バイアス補正およびダウンスケーリングを施した。今回のケースでは観測データと気候モデルデータのピクセルの重なり具合が単純(観測 1 ピクセルはモデル 1 ピクセルの一部に対応)であったため容易に適用できたが、より複雑なケース(観測 1 ピクセルがモデルの複数ピクセルに対応)にも適用できるような手法の改良が今後必要である。

### 2.3.2 三本の気象研全球大気モデル実験を用いた解析

上記の統計的バイアス補正およびダウンスケーリングによって、気象研究所の 60 km 版全球大気モデル MRI-AGCM3.2H は、同 20 km 版の MRI-AGCM3.2S と非常に近い予測結果を示した。そこで、MRI-AGCM3.1S を含め三本とアンサンブル数は最低限であるが、アンサンブル平均を取って不確実性についての議論を試みる。

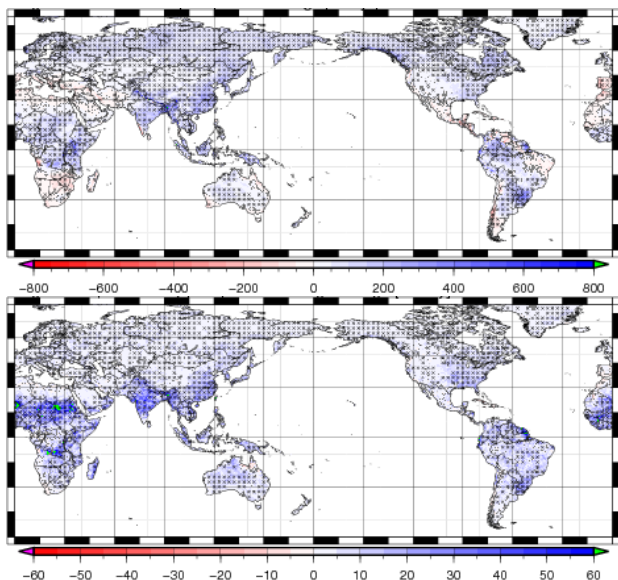


図5 MRI-AGCM3.1S, 3.2S および 3.2H のバイアス補正後のアンサンブル平均による年降水量(上, 単位 mm/年)と極端に強い降水量平均(下, 単位 mm/日)の 21 世紀末と現在気候実験の差。×は三本のモデルで傾向が一致した地域を示す。

図 5 上図は三本の将来変化予測の平均年降水量のアンサンブル平均を示す。多くの地域で年降水量は増加傾向にあるが、アフリカ南部、地中海沿岸から中東、オーストラリア南西部と東岸、南米の南部や東部、中米から北米南西部などの中緯度地域の一部では減少傾向が見られる。しかしその信頼性は地域によって異なる。例えば、米国の中西部やメキシコ等では、その増減傾向は三本のモデルで一致したものではない。図 5 下図は極端に強い降水のアンサンブル平均を示す。年降水量では減少傾向にあった地域も含めて、ほとんどの地域で極端に強い降水は増加傾向にある。この傾向はより多くの地域で三本のアンサンブル実験で一致するように見える。

現時点では、アンサンブル数は三本と最低限であり、バージョン違いはあるものの同じ研究所で開発された一連の気候モデルの結果を用いている。また、大気モデル実験故に将来の海面水温や海水の分布状況は既存の大気海洋結合モデル実験の成果の平均的な変化しか評価していない。さらに温室効果ガスの排出シナリオも中間的な一種に限定されているために、今回の議論では非常に限られた気候モデル予測の自由度の中での議論に留まっている。今後は順を追って、より多くの研究機関の気候モデルの出力データを解析することによって、様々な不確実性を考慮した降水量の将来予測を進めたい。

## 3. ネパール西ラプティ川の洪水流出特性の検討

### 3.1 ネパール西ラプティ川の概要

ネパール西ラプティ川は、ヒマラヤ山岳域、中間山地域、扇状地～平野域(テライ)と大きく3つに分類されるネパール地形区分の中で、中間山地域に源を發しテライを通じてガンジス川に流入する河川である。流域面積は 6500km<sup>2</sup>、流域内に 5 点の流量観測所をもつ。氷河の影響を受けない一方、豪雨による洪水被害をたびたび受ける貧困層の多い地域である(図 6)。

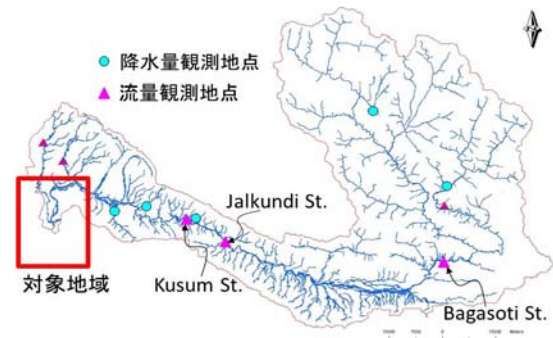


図6 西ラプティ川流域および検討対象地域

### 3.2 検討の流れ

西ラプティ川がテライに流入する氾濫原域を対象に、気候変動が洪水に与える影響を評価することを目的として、土木研究所 ICHARM が開発を進めている総合洪水解析システム IFAS (Integrated Flood Analysis System) による流出解析を行い、気候変動下における洪水流出量の変化予測を行う。対象地域雨量・流量観測データは、ネパール開発研究機構 (NDRI: Nepal Development Research Institute) の協力を得て収集したものを用いる。2006 年から 2008 年までの対象流域内外の地上雨量観測値を IFAS に与え、洪水流出量の計算値を得る。これを流域内 3 か所の観測点における既往の洪水流出量観測値と比較して流出モデルの調整を行う。得られた流出モデルに、MRI-AGCM3.1S および 3.2S による現在・近未来・21 世紀末の各気候実験降水予測データを入力し、流出解析を行う。対象領域本川最上流部における 25 年分の日流量時系列を作成し、再現期間 50 年と 25 年の確率流量を求め、極端現象としての将来における洪水ピーク流量の変化の検討を行う。

### 3.3 ネパール西ラプティ川の流出解析

IFAS により流出モデル定数のキャリブレーションを行い、洪水ピークを適切に表現するモデル定数セット 1 および、洪水波形の誤差が全体として小さくなるモデル定数セット 2 を得た。モデル定数の選定には、式(1)から(4)に示す波形誤差  $E_Q \cdot E_w$ 、ボリューム誤差  $E_v$ 、ピーク誤差  $E_p$  を指標として用いた。

$$E_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{OP}} \right)^2 \quad (1)$$

$$E_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_o(i)} \right)^2 \quad (2)$$

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^n Q_o(i) - \sum_{i=1}^n Q_c(i)}{\sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (3)$$

$$E_p = \frac{Q_{OP} - Q_{CP}}{Q_{OP}} \quad (4)$$

定数セット 1, 2 による既往洪水の評価結果と、本川上最下流の観測所である Kusum 観測点における観測値を時系列でグラフ化した例を図 7 に示す。ただし、モデル定数セットの評価には 2006 年から 2008 年に Kusum でピーク流量が  $1000\text{m}^3/\text{s}$  を超えた複数の洪水を対象に行ったため、図 7 は必ずしもすべての既往洪

水の結果を代表するものではない。

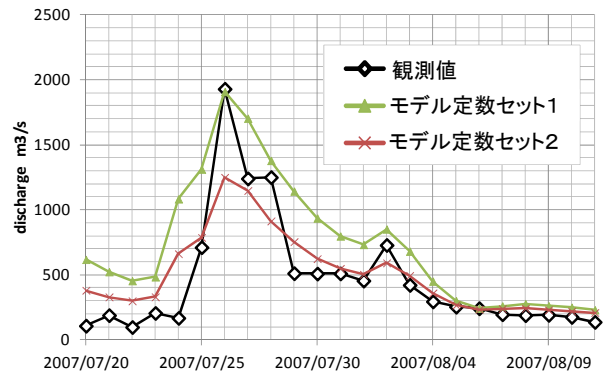


図 7 流出モデルによる計算値と実測値の比較例

これらのモデル定数セットを用いた 2 種類の流出モデルに、現在・近未来・21 世紀末の各気候実験降水予測データを与えて流出解析を行い、対象領域本川最上流部における 25 年分の日流量時系列を得た。解析結果例として、図 8 に MRI-AGCM3.2S の近未来の日流量時系列を示す。

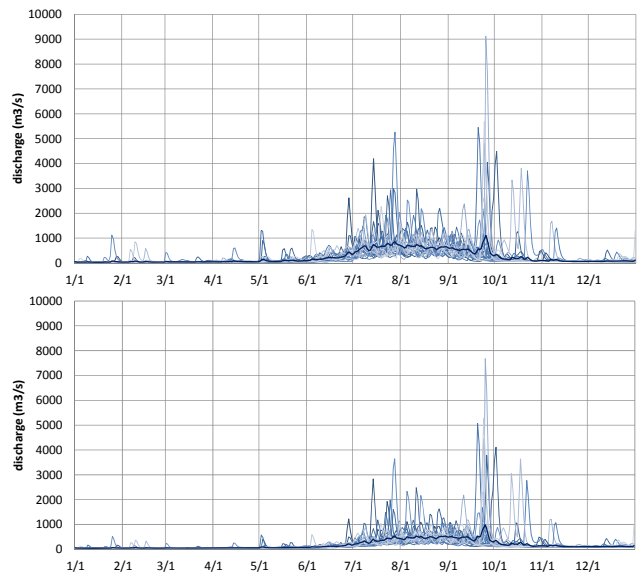


図 8 近未来気候実験における流出解析結果

(上：モデル定数セット 1 下：同 2)

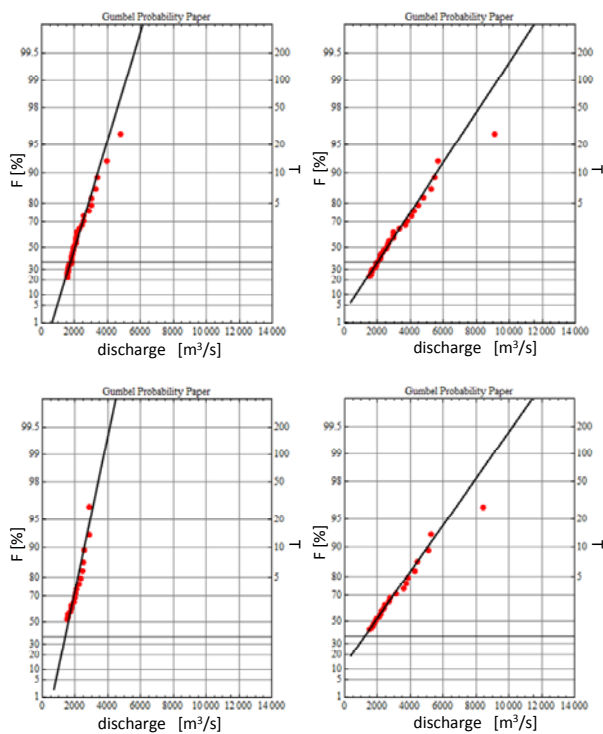
### 3.4 日流量時系列からの確率流量の導出

2つのモデル定数セットから得られた 25 年間の 2 つの日流量時系列データから閾値超過系列で資料を抽出し、指数分布を当てはめる。ここでは、閾値を超過している期間を 1 イベントとみなし、1 イベントごとの最大流量を資料とした。対象地域では流量観測点 Kusum の水位が 5.0m (流量約  $1500\text{m}^3/\text{s}$ ) のときに洪水の注意喚起が行われることから、閾値を  $1500\text{m}^3/\text{s}$  に設定した。

閾値超過系列と毎年最大値系列との関係式(5)を用いて指数分布をGumbel分布に変換することにより、再現期間50年と25年の確率流量を求める。

$$F(x) = \exp\{-\lambda[1 - G(x)]\} \quad (5)$$

ここで、 $F(x)$ は年最大値系列による非超過確率、 $G(x)$ は閾値超過系列による非超過確率、 $\lambda$ は1年あたりの平均イベント発生回数(=[25年間の閾値超過回数]/25)である。プロットングポジション式 (Weibull 式) による閾値超過系列資料のプロットおよび、当てはめた指数分布を、Gumbel 確率紙上に変換した例が図7である。図9から、MRI-AGCM3.1Sと3.2S、モデル定数セット1と2では資料の分布が大きく異なることがわかる。



● 閾値超過系列によるプロットを年最大値系列に変換したプロット (Weibull Plot)  
 — 指数分布(閾値超過系列)を変換して得られたGumbel分布

図9 近未来気候実験における年最大値系列に変換された閾値超過系列資料

(上段: モデル定数セット1 下段: 同2  
 右列: MRI-AGCM3.1S 左列: 同3.2S)

現在・近未来・21世紀末の確率流量について、現在気候実験による確率流量に対する比として表1に示す。ただし、ここでの頻度解析の元となる流出解析は日単位であり、日平均流量としての表示である。このため、瞬時のピーク流量はより大きい値を示す可能性がある

表1 近未来・21世紀末と現在気候との確率流量比

		25年間の発生回数	現在気候の確率流量との比		
			1/25	1/50	
モデル定数セット1	MRI-GCM 3.1S	現在	38	1	1
		近未来	38	1.25	1.27
		21世紀末	53	1.08	1.08
	MRI-GCM 3.2S	現在	30	1	1
		近未来	37	1.72	1.75
		21世紀末	66	1.88	1.89
モデル定数セット2	MRI-GCM 3.1S	現在	11	1	1
		近未来	17	1.21	1.20
		21世紀末	17	1.16	1.15
	MRI-GCM 3.2S	現在	13	1	1
		近未来	22	2.18	2.22
		21世紀末	34	2.32	2.34

ことには留意が必要である。閾値を1500m³/sとしたとき、閾値の超過回数は近未来・21世紀末と増加していくが、モデル定数セット1と2で回数に大きな差があった。確率流量比では近未来における増加が顕著であることは、4種類の組み合わせに共通する傾向として明らかとなったが、3.1Sと3.2Sでは近未来と21世紀末の確率流量比に差があることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究により、気象研究所が開発した水平空間解像度が約20kmの全球大気気候モデルMRI-AGCM3.1S、同3.2Sにはバイアスが含まれており、これを補正することにより、現在気候において観測と同レベルの年および月平均降水量や極端に強い降水量が得られた。また、解像度60kmのMRI-AGCM3.2Hにバイアス補正手法を応用することにより、20km版のMRI-AGCM3.2Sと非常に近い予測結果を得た。しかし、今回の検討では非常に限られた気候モデル予測結果を用いているため、今後はより多くの研究機関の気候モデルの出力データを解析することによって、様々な不確実性を考慮した降水量の将来予測の検討が必要である。

ネパール西ラプティ川を対象とした洪水流出特性の検討では、MRI-AGCM3.1Sおよび同3.2Sによる降水予測データを用いて洪水流出解析を行い、洪水流出量について極値解析をすることで極端洪水のピーク流量変化を検討した。閾値を1500m³/sに設定すると、将来において確率流量や閾値超過回数が現在よりも増加することがわかったが、MRI-AGCM3.1S・3.2S両モデル間、また流出モデルのモデル定数セット間で近未来・21世紀末の増加率の値が異なることも明らかとなった。このことから、流出モデルの不確実性に加え、気候変動の将来予測の不確実性の影響を大きく受けていることが窺える。今後は他のGCMとも比較し、不

確実性の検討と将来予測評価手法の検討が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai and M. Nakagawa : 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GCM model --- Mean climate states ---, J. of Meteor. Soc. of Japan, Vol.84, No.1, pp.165-185, 2006
- 2) Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh : Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid, J. of Meteor. Soc. of Japan, Vol.90A, pp.233-258, 2012
- 3) Yatagai, A., O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto,

#### 1.1 不確実性を考慮した地球温暖化が洪水・渇水特性に与える影響に関する研究

M. I. Nodzu and A. Hamada : A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, SOLA, Vol.5, pp.137-140, doi:10.2151/sola.2009-035, 2009

- 4) Inomata, H., K. Takeuchi and K. Fukami : Development of a statistical bias correction method for daily precipitation data of GCM20, Ann. J. of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.55,S\_247-252, 2011
- 5) 杉浦友宣, 深見和彦, 藤原直樹, 浜口憲一郎, 中村茂, 弘中貞之, 中村和弘, 和田高宏, 石川正人, 清水敬生, 猪股広典, 伊藤和久 : 衛星雨量情報を利用した洪水予測システム(IFAS)の開発, 河川技術論文集, 第 14 卷, 53-58, 2008

## CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT ON RIVER FLOW FROM FLOOD TO DROUGHT UNDER UNCERTAINTY OF PROJECTION

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2016

**Research Team** : Water-related Hazard Research Group

**Author** : Fukami Kazuhiko

UENOYAMA Toshiya

HIROE Akiko

HASEGAWA Akira

**Abstract** : A bias correction method by Inomata et al.(2011) was applied to General Circulation Model MRI-AGCM3.1S and 3.2S, which were produced by the Meteorological Research Institute of Japan and have approximate 20 km resolution, in order to reproduce precipitation of the present from GCM. Applying the Bias correction method to MRI-AGCM3.2H which has approximate 60 km resolution, MRI-AGCM3.2H was down-scaled to the resolution of observation data, 20km. A preliminary discussion on the uncertainty of GCM outputs was conducted using the three MRI-AGCM outputs. In the meanwhile, as one of the analysis on change of the runoff characteristics due to climate change, runoff analyses were done in the West Rapti River, Nepal. Bias-corrected precipitation of MRI-AGCM 3.1S and 3.2S was given to the runoff model. This study used limited climate models' projection, so that more various GCM output, produced by different institutes, are needed to fully analyze uncertainty of future projection under the climate change.

**Key words** : climate change, bias correction, down-scaling, flood runoff analysis, probable discharge