

# 世界流域データベースの利用による大陸河川における流出解析に関する研究

CONTINENTAL RUNOFF ANALYSIS THROUGH THE USE OF GLOBAL DRAINAGE BASIN DATABASE

山敷庸亮<sup>1</sup>・辰己賢一<sup>2</sup>・鈴木琢也<sup>3</sup>・Roberto V. DA SILVA<sup>4</sup>・寶馨<sup>5</sup>  
Yosuke YAMASHIKI, Kenichi TATSUMI, Takuya SUZUKI, Roberto V. DA SILVA and Kaoru TAKARA

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>正会員 工修 京都大学技術員 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>非会員 工修 千葉県庁県整備部君津地域整備センター建設課 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>4</sup>学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

<sup>5</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The goal of this study is to develop global-scale river basin model to forecast the river discharge under the climate change scenario of SRES A1B. In this study we select 11 large rivers, considering the magnitude of average discharge and the importance for human activities for the region. For the continental-scale hydrological model, the TOPMODEL, converted into the open GIS system, is employed and linked with the Global Drainage Basin Database (GDBD) network. Calibration has been carried out using the Climate Research Unit (CRU) Meteorological dataset and Global Runoff Data Centre (GRDC) observed discharge. The resulting Nash coefficient improved significantly by using GDBD river dataset in comparison with that of GRDC river drainage mapset. The monthly discharge set has been calculated for SRES A1B scenario using three GCM outputs and compared with the current discharge obtained by GRDC. The outputs using three GCM datasets results differ significantly. Even though the averaged discharge for all three normalized in such cases, the message from each GCM output should be transferred in appropriate manner to obtain better adaptation mean for those basins.

**Key Words :** GDBD, CRU, GCM, SRES, TOPMODEL

## 1. はじめに

現在,世界的に急激な人口増加による農業用水需要の増大や,都市開発,産業発展などの社会的要因,また地球温暖化に代表される気候変動によって水問題は一層深刻なものになると懸念されている。水問題の要因は広域にわたっており,解決には自然科学から社会科学にわたり包括的に要因を考慮した流域から地球規模の統合的な研究や解析と,それに基づく管理や対策の実施が必要であると考えられる。このような背景を踏まえ,独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターデータベース事業の一環として,世界流域データベース(Global Drainage Basin Database : GDBD)<sup>1,2)</sup>が開発された。GDBDは自然科学から社会科学にわたる幅広い情報を格納した

6つのGISデータ(流域界データ,河道位置データ,流量観測所データ,自然湖データ,人工湖データ,表面流向データ)から構成されるデータベースである。GDBDは水に関連した様々な分野へ基礎情報を提供し,水問題の解決に向けた研究や解析に応用されることが期待されている。

Aroha *et al.*<sup>3)</sup>は, General Circulation Models(GCM)を用いて世界の23河川について流量計算を行い, GCMと観測における降水量のバイアスが各流域における流量に大きな影響を与えることを示した。Ducharme *et al.*<sup>4)</sup>は,複数の流出データを使ったモデルのキャリブレーションと流量計算を実施し,モデルで考慮されていない貯水池操作,融雪や洪水イベント,灌漑取水による流量の減少が計算結果に与える影響が大きいことを示した。また,流量計算において使用するGCM出力の降水量が流量計算結果に

大きな影響を与えることを示した。沖<sup>9)</sup>は、全球スケールで将来の河川流量の現在との比を示し、アメリカの穀倉地帯や南米地域では流量が減少し、アフリカ・アジア・オーストラリアを中心とした乾燥地においては流量が増加すると予測した。Nohara *et al.*<sup>6)</sup>は、19の大気海洋結合GCMモデルを使って世界の24主要流域における2100年までの流量計算を行い、高緯度に位置する河川では、将来において流量が増加し、温暖化による融雪が現在気候より早く起こるため、流量のピークが早まることを示した。一方、ヨーロッパ・地中海や南米では将来において流量が減少する傾向にあることを示した。

以上の既往研究では、現在観測流量値とモデルによる計算流量値の比較についての研究が複数行われているが、GCM出力を使ったグローバルな将来の流量計算まで行った例は少ない。これらを踏まえ、前述の懸念に対し適切に対処するためには、的確な将来展望を持つことが不可欠であるといえる。

本研究では、温暖化を考慮した複数のGCM出力を利用し、GDBDを使って作成した河道網データを用いた流出解析を行い、世界主要河川における将来の流量を高精度で推定することを目的とする。なお、個々のGCM出力の差異・特徴を認識することの必要性から、アンサンブル平均は用いず、複数のGCM出力を流量計算に必要な入力データとして用いた。

## 2. 河道網データセットの作成

代表的河川の流量計算を行なうにあたり、河川流域における河道網データセットを作成する必要がある。必要となるデータは各河川を50~100分割し、それぞれにおける源流地点からの距離とその河川の全流域におけるその地点の上流域が占める割合である。

### (1) GRDC流域界を利用した河道データ

Global Runoff Data Centre (GRDC)<sup>7)</sup>のデータを利用した河道網データ構築の手順は以下の通りである。[1]GRASS<sup>8)</sup>にDEMであるETOPO5を組み込む。[2]GRDC流域界を表示させMASKをかける。図-1に示すようにMASK中でNo-data(データなし、カテゴリ値0)となっているセルは、もとの実際の値にかかわらずデータなしに対応づけられる。

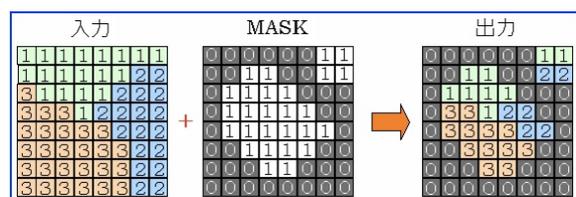


図-1 MASKの概念図

逆に、MASK中でデータあり(カテゴリ値1)となっているセルは、元の値通りに対応づける。これにより、様々な形で取り扱う領域を限定することが可能となる。[3]流域面積および総河川長をGRASSの計算コマンドであるr.mapcalcで計算する。[4]河川上に任意の数点を取り、その場所における標高を調べ、源流地点からの距離を計算する。[5]流域に対し指定した点の標高より高い地点の面積を計算し、全流域に対する割合を計算する。[6]得られた流域面積及び河川長をGRDCの提供する流域面積、河川長に合わせる。その倍率に合わせ[4],[5]で得られたデータに対し変換を行う。

### (2) GDBD流域界を利用した河道データ

GDBDの流域界の属性情報を利用した河道網データ構築の手順は以下の通りである。[1]対象流域の流域界及び河道位置データの属性情報を抽出する。[2]下流単位流域(下流の単位河道に流入する一つ一つの領域)のPfafstetter Code<sup>9)</sup>が-1(最下流域において-1の値を取る)である単位流域を見つけ、単位流域識別IDと自身の単位流域面積を含む上流流域面積を抽出する。[3]最下流域のPfafstetter Codeに等しい下流単位流域のPfafstetter Codeを持つ流域界は複数存在するが、そのうち上流流域面積が大きいものを主流として考え、その流域界に対して同様なプロセスで上流域界を追跡する。Pfafstetter Codeに対応する下流単位流域のPfafstetter Codeが存在しなければその上流域界が存在しない最上流域とし、作業を終える。[4]それぞれの流域界に対して単位流域識別IDと上流流域面積を取り出し、それぞれの上流単位面積に対して[2]で得られた上流単位面積に対する割合を計算する。[5]河道位置データの属性情報で、[2][3]で得られた単位流域識別IDに対応する河川長を取り出し、最上流域からの累積河川長を計算する。

以上の手法により河道網データセットの作成を行った。アマゾン流域に対しては107回のPfafstetter Codeの追跡により最上流域にたどり着いた。これは、アマゾン流域界を108分割したことにつながる。本研究で選択した11河川では、49-124分割した河道網データセットを得た。

## 3. TOPMODEL

### (1) 概要

本研究では分布定数型と集中定数型の両特徴を併せ持つ準分布型モデルであるTOPMODEL<sup>10) 11) 12)</sup>を流量計算に用いた。TOPMODELでは地表流出および地下水涵養までを含めた土壌部分は面的に分割されたグリッドごとに分布定数型で計算し、植物の根などが存在している表層、および地下水貯留部の水収支は集中定数型で計算する。このモデルの特長は、流域を二次元グリッドで分割し、各グリッドの標高から得られる標高データをもとに計算

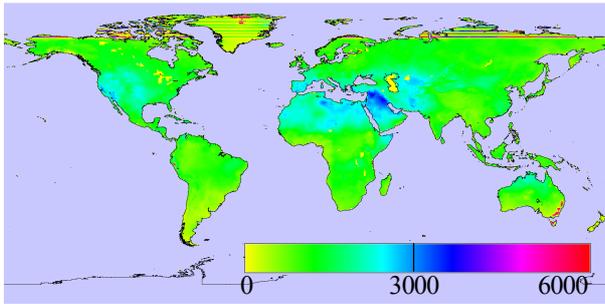


図-2 蒸発散量 (2001年7月, 0.01 mm/month)

表-1 主要流域におけるGCMごとの気温変化量 (2001年比, 左からHadGEM1, MIROC3.2 medres, CCSM3)

流域名称	2010-2019年平均	2090-2099年平均
アマゾン	0.25 / 0.06 / 0.43	2.58 / 2.37 / 1.84
ブラマプトラ	0.53 / 0.39 / 0.45	2.42 / 3.06 / 2.07
インダス	-0.43 / -0.04 / -0.29	2.97 / 3.06 / 1.44
パラナ	0.58 / 0.08 / -0.28	3.54 / 2.42 / 2.35
ニジェール	0.42 / 0.22 / 0.13	3.58 / 2.23 / 1.85
オリノコ	0.04 / 0.49 / 0.49	2.24 / 2.65 / 2.03

される各グリッドの地形指標から地表流型の変動流出寄与域を割り出し, 流出量を空間的に算定できる点にある。

## (2) 計算手順

TOPMODELはメッシュごとに根群域, 不飽和域, 飽和域の3つの貯留部分を持つ。実際のモデル計算では計算時間短縮の観点から0.5度メッシュの地形指標の分布を算定し, キャリブレーションにより得られたパラメータを利用して将来流量計算を行った。

## (3) 入力データ

標高には, National Geophysical Data Center(NGDC)が作成した5分メッシュのETOPO5を0.5度メッシュにリサンプルしたデータを用いた。モデルのキャリブレーションに用いた気象データには, Climatic Research Unit(CRU) Version TS 2.1<sup>13)</sup>で提供されている0.5度メッシュの月平均の降水量, 最高・最低気温を用いた。本研究では日単位でのキャリブレーションも行ったが, その際の使用データにはNCEP Final Analysisを0.5度メッシュにリサンプルしたデータを用いた。蒸発散量はPenman法<sup>14)</sup>を用いて算定を行った。図-2に2001年7月の蒸発散量を示す。

観測流量にはGRDCによって提供されている各河川の各月平均流量を用いた。平均とはGRDCが提供する流量データの各月平均であり, 河川ごとに対象年月は異なっている。将来計算には, The IPCC Data Distribution Centreが配布しているAR4 GCM data<sup>15)</sup>から, UK Met. Office(UKMO)によるGCMモデルHadGEM1, National Institute for Environmental Studies(NIES)によるGCMモデルMIROC3.2 medresとNational Centre for Atmospheric Res-

表-2 Em 値の比較

流域名称	GRDC	GDBD
アマゾン	0.56	0.77
ブラマプトラ	0.71	0.73
コンゴ	-4.6	0.36
ドナウ	-0.26	0.62
インダス	0.78	0.74
メコン	0.62	0.66
パラナ	0.47	0.64
ニジェール	0.92	0.84
オリノコ	0.64	0.68
ミシシッピ	0.30	0.26
ライン	-0.34	0.25

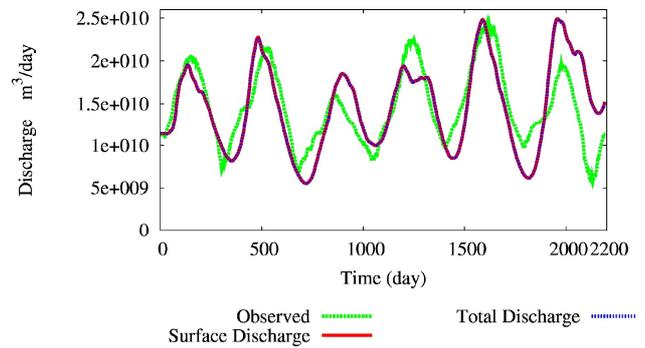


図-3 アマゾン流域におけるキャリブレーション結果

earch(NCAR)によるGCMモデルCCSM3の3つの出力結果を用いた。用いたシナリオSpecial Report on Emissions Scenarios(SRES)の分類の高成長型社会シナリオA1の中で, 各エネルギー源のバランスを重視するA1Bである。計算期間は2003年から2099年までの97年間である。表-1に各GCM出力の現在気温 (CRUによるもの) との気温差を示す。

## 4. 構築した河道網の評価

TOPMODELにおけるパラメータは, あらかじめ設定した閾値内に一様分布していると仮定し, モンテカルロ法を用いて推定した。Nash-Sutcliffe効率係数<sup>16)</sup>を目的関数として設定し, 0.2 (GRDCにおいては-10) を閾値とした。Nash-Sutcliffe効率係数は次式で示される。

$$Em = 1 - \frac{\sum_t^T (Q_{0t} - Q_{mt})^2}{\sum_t^T (Q_{0t} - \bar{Q}_0)^2} \quad (1)$$

ここで,  $Q_0$ : 観測流量,  $Q_m$ : 計算流量,  $\bar{Q}_0$ : 平均観測流量,  $t$ : 計算対象年月,  $T$ : 計算終了年月である。

本手法でそれぞれの流域に対して50,000回のパラメータ推定を繰り返し, 抽出されたパラメータセットの不確

実限界の上限／下限値の抽出においては正規分布を仮定した。表-2にGRDCを利用した河道データを用いた流出計算とGDBDを利用した河道データを用いた流出計算の各50,000回のパラメータ推定により得た最も大きい  $Em$  値を示す。これらの比較をすると、インダス、ニジェール、ミシシッピの3流域ではGRDCを利用した河道データを用いた方が高い  $Em$  値となったが、それ以外の8流域では、GDBD を利用した河道データを用いた方が  $Em$  値が高く、精度の良い結果となった。一般に  $Em$  値が0.7を越えると精度がよいとされる<sup>4)</sup>が、GDBDでは、アマゾン、ブラマプトラ、インダス、ニジェール の4流域において、 $Em$  値は0.7を超え、精度の良い結果を得た。一方、ミシシッピ、ラインの2流域では、 $Em$  値は0.3未満となり現在観測流量をよく再現できない結果となった。特にライン流域においては、貯水池操作が大規模に行われている<sup>6)</sup>ことから、これらの影響をモデルに組み込んでいないことが影響していると考えられる。図-3にGDBDを利用した河道データを用いた日単位のアマゾン流域におけるキャリブレーション結果を示す(1990-1995年)。最も高い  $Em$  値を得た際の計算結果は、観測値の時系列トレンドを精度良く表現していると言える。

## 5. 結果と考察

図-4にGDBDを用いた各流域における流量計算結果を示す。なお図-4において、各月平均観測流量（以下、現在観測流量）は緑線、2010年から2019年までの各月平均流量（以下、近未来流量）を赤線、2090年から2099年までの各月平均流量（以下、将来流量）を青線で示す。

アマゾン流域における流量計算結果では、MIROC3.2 medresとCCSM3では近未来、将来とも、全月において現在観測流量を下回り、トータル流量で30%程度減少する結果となった。また、近未来から将来では、約4%程度流量が増加する結果となった。流量のピークは現在観測流量に比べほとんど明瞭でなくなる結果となった。一方、HadGEM1では、近未来、将来（5,6月を除く）において、現在観測流量を上回る結果となった。Duchame *et al.*<sup>4)</sup>、Nohara *et al.*<sup>9)</sup>では、GCM出力を用いたモデルによるアマゾン流域内における現在流量は現在観測流量と比較して半分程度と指摘しており、本研究におけるMIROC3.2 medresとCCSM3を使った近未来・将来流量値の現在観測流量値と比較した際の過小評価は、これら既往研究と同様の傾向を示す結果となった。これは、アマゾン流域内において、MIROC3.2 medresとCCSM3の近未来・将来における降水量値がCRUのメッシュ観測降水量値に比べ、4割程度小さい値をとっていることに起因していると考えられる。一方、HadGEM1の近未来・将来における降水量は、現在観測降水量と比較してやや増加する結果となっていたため、近未来・将来における流量の増加が示

されたのではないかと考えられる。

ブラマプトラ流域では、MIROC3.2 medresとCCSM3において、現在から将来にかけて流量が増加しており、特に夏季における増加率が大きくなっている。これは、GCM出力の降水量が現在観測降水量と比較して、特に夏季に大きく増加しており、このことが大きく影響していると考えられる。また、流量のピーク値は現在観測流量と比べ、1か月程度遅れる傾向が全てのGCMで見られた。

インダス流域では、CCSM3において、将来流量が7-10月にかけて大きく増加していることがわかる。表-1に示すように、CCSM3での流域内の将来における気温上昇は他のGCMに比べ1.5°C程度以上小さい結果となっていることから、他の2つのGCMによる結果に比べ、蒸発散量が小さくなり、流量が増加したのではないかと解釈することができる。また、近未来と比較し、将来における流量が全GCMで増加する結果となったことは、沖<sup>5)</sup>の指摘と同様の結果となった。

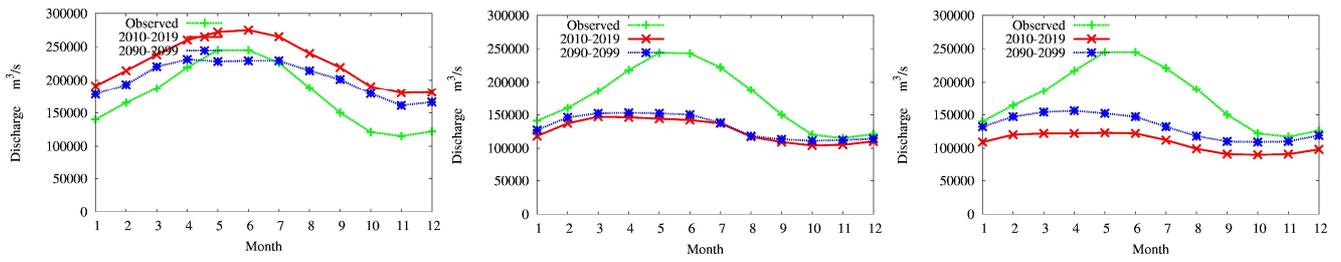
パラナ流域では、MIROC3.2 medresで、近未来・将来流量は1年を通して現在観測流量より小さくなっているが、HadGEM1とCCSM3では大きく増加していることがわかる。これは、現在降水量に対する、各GCM降水量の増減率にばらつきがあることが原因であると解釈することができる。MIROC3.2 medresでは近未来から将来にかけて流量が減少するのに対し、HadGEM1とCCSM3では流量が増加していることがわかる。

ニジェール流域では、全GCM結果において、近未来・将来におけるピーク流量が、現在観測流量と比較して1か月早まっていることがわかる。また、近未来と比較して将来における流量が増加する結果となった。これはGCM出力の降水量が近未来と比較して将来において増加する結果によるものと解釈することができる。また、HadGEM1では、他のGCMで見られるような、現在観測流量に対する近未来・将来における顕著な流量増加は見られないことがわかる。これは、HadGEM1における将来における気温上昇は、他のGCMに比べ1.5°C以上大きく、蒸発散量が増えたことによるものと考えられる。

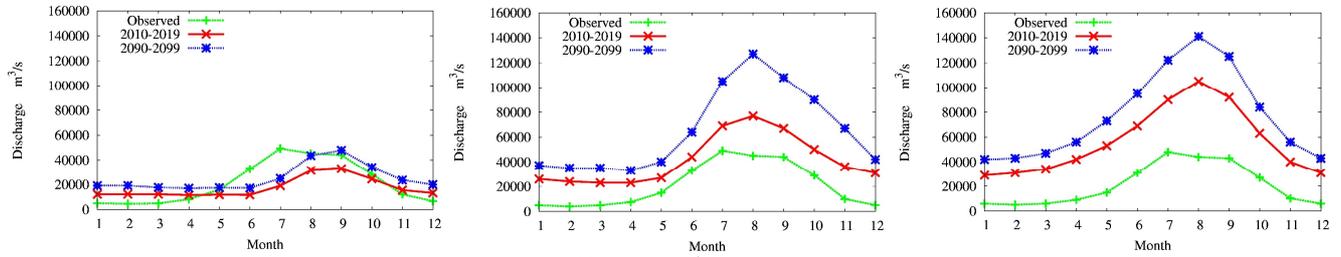
オリノコ流域では、MIROC3.2 medresとCCSM3において、近未来・将来の流量が現在観測流量に比べ、5月から12月にかけて大幅に減少していることがわかる。例えば流域内における2001年のGCM出力の降水量は、CRUのメッシュ観測降水量の6割程度となっており、このGCM降水量の過小評価が大きく結果に影響したと解釈することができる。また、HadGEM1とMIROC3.2 medresでは、流量のピークが早まっていることがわかる。

## 6. まとめと今後の課題

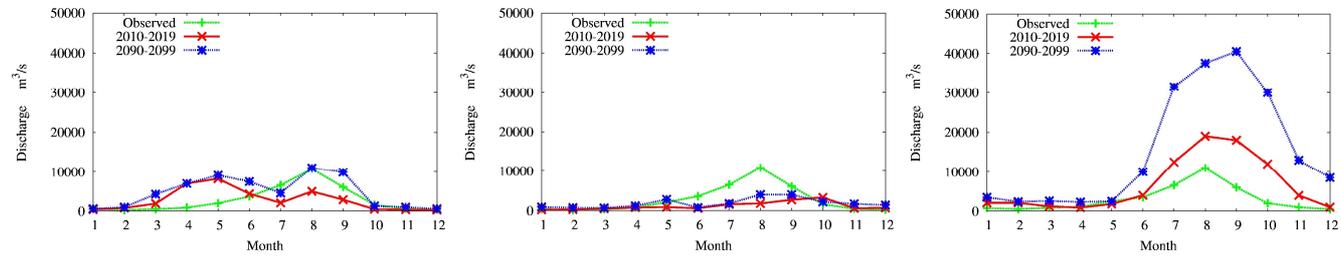
本研究では、融雪水の影響が少ないと考えられる11河川について、現在気候データと現在観測流量データを用



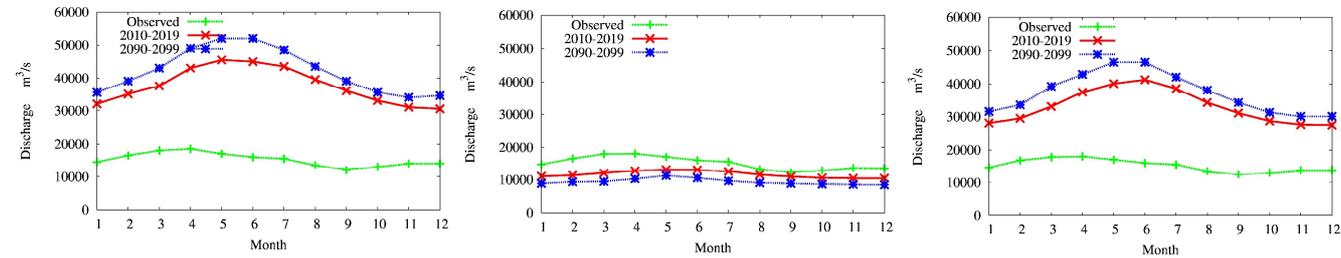
a) アマゾン (南アメリカ)



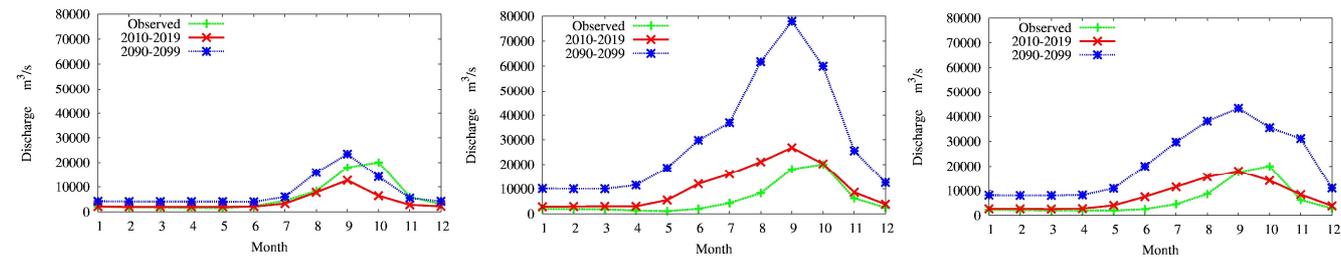
b) ブラマプトラ (南アジア)



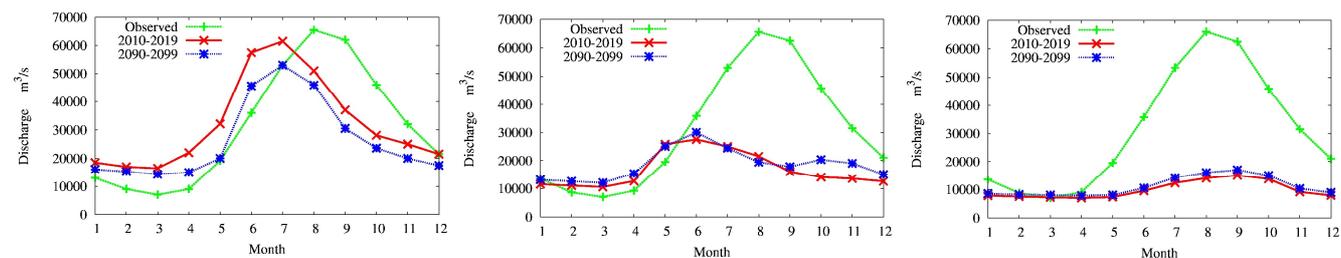
c) インダス (南アジア)



d) パラナ (南アメリカ)



e) ニジェール (西アフリカ)



f) オリノコ (南アメリカ)

図-4 各流域による年間流量変化 (左からHadGEM1, MIROC3.2 medres, CCSM3)

いたキャリブレーション結果におけるパラメータ値を使い、3種のGCM出力を用いたTOPMODELによる流量予測計算を行なった。キャリブレーション結果ではコンゴ、ミシシッピ、ラインにおいて、Nash-Sutcliffe効率係数が十分高くない結果となったが、他の河川については現在観測流量を良好に再現することができた(図等は割愛)。またGDBD 河道網データを利用したキャリブレーション結果が、GRDC 河道網データを利用した結果と比べ、概ね良好となった。

これらの結果を基にGDBD河道網データを用いた流量の将来推計を行なった結果、各GCM出力により、流量増加と流量減少が顕著に異なるケースが見られたが、ブラマプトラ、インダス、ニジェールの各流域については、全GCMで近未来と比較して将来の流量が増加する結果となった。アマゾン流域においては、MIROC3.2 medresとCCSM3では、現在観測流量に比べ、近未来・将来におけるトータル流量は30%程度減少し、近未来に比べ将来においては約4%トータル流量が増加する結果となり、アマゾン流域におけるこれらの特徴は、Ducharme *et al.*<sup>4)</sup>やNohara *et al.*<sup>9)</sup>の結果と整合的なものとなった。一方、HadGEM1では、近未来・将来におけるトータル流量は、現状観測流量を上回り、近未来と比較して、将来の流量が減少する結果となった。

本研究では以下の点が課題として残っている。現在観測流量と近未来・将来流量では絶対的に流量値が大きく異なっているケースが多かったことである。このことは、CRUによる現在気候データとGCMでシミュレートされた気候データの間には大きなバイアスがあることが主要な原因であると解釈することができる。現在気候において、GCMとCRU間の気候値バイアスを適切に補正した上で、将来計算を行わなければ、現在と将来の比較を相対的に行うことは困難であることが認められた。また、本モデルでは貯水池操作や灌漑取水などの影響を考えていないことから、これらの効果も考慮した流量計算モデルを開発していくことが必要であると考えられる。

モデルの流量予測結果はGCM出力に大きく依存するため、単純にこれらのアンサンブルを取るのではなく、ベースとなるモデルの傾向性を考慮した予測結果の解釈が必要である。本研究は月平均流量の変化に対する大きな変化傾向を予測することが目的であり、洪水などの短期流出を対象としたのではない。しかしながら、将来流量においては、大きな変化が予測される流域が多数存在することから、複数のGCM出力を使用した将来予測結果の定量的な評価が、地域・流域における水資源に対する政策を意思決定していく際などにも大きく貢献できることが期待される。

#### 参考文献

1) Masutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K. and Matsuoka, Y.: Development of highly accurate global polygonal drainage basin

- data, *Hydrological Processes*, Vol.23, pp.572-584, 2009.
- 2) Masutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K. and Matsuoka, Y.: Global Drainage Basin Database (GDBD) User's Manual, [http://www-cger-nies.go.jp/cger-j/db/enterprise/gdbd/data/Readme\\_j\\_20070711.pdf](http://www-cger-nies.go.jp/cger-j/db/enterprise/gdbd/data/Readme_j_20070711.pdf), 2007.
- 3) Aroha, V.K.: Streamflow simulations for continental-scale river basins in a global atmospheric general circulation model, *Advances in Water Resources*, Vol.24, pp.775-791, 2001.
- 4) Ducharme, A., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Polcher, J., Ledoux, E. and Marsily, G.: Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to access runoff from the LMD GCM, *Journal of Hydrology*, Vol.280, pp.207-228, 2003.
- 5) 沖 大幹: 水資源賦存量変動評価と検証, [http://www.mri-jma.go.jp/Project/water\\_resource/outcomes/mizushigen/water3\\_1.pdf](http://www.mri-jma.go.jp/Project/water_resource/outcomes/mizushigen/water3_1.pdf), 2004.
- 6) Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M. and Oki, T.: Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble, *Journal of Hydrometeorology*, Vol.7, pp.1076-1089, 2006.
- 7) UNH/GRDC: Composite Runoff Fields V 1.0, <http://www.grdc-sr.unh.edu/>, 2009.
- 8) GRASS Development Team: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0, <http://grass.osgeo.org>, 2009.
- 9) Pfafstetter, O.: Classification of hydrographic basins: coding methodology, Dep. Nac. De Obras e Saneamento, Rio de Janeiro, Brazil, 1989. (Translated by Verdin, J.P., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo., 1991.)
- 10) Beven, K.J. and Kirkby, M.J.: A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.* Vol.24, pp.43-69, 1979.
- 11) Wolock, D.M. and McCabe, G.J.: Comparison of single and multiple flow-direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, Vol.31, pp.1315-1324, 1995.
- 12) Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R. and Freer, J.: TOPMODEL. In: Singh, V.P. (ED.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp.627-668, 1995.
- 13) Mitchell, T.D. and Jones, P.D.: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International Journal of Climatology*, Vol.25, pp.693-712, 2005.
- 14) Penman, H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London*, A193, pp.120-145, 1942.
- 15) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Data Distribution Centre. High resolution observation climatologies, [http://www.mad.zmaw.de/IPCC\\_DDC/html/ddc\\_gcmdata.html](http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/ddc_gcmdata.html), 2009.
- 16) Nash, J.E. and Sutcliffe J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol.10(3), pp.282-290, 1970.