

気候変動による流域水環境の変動特性に関する比較

井本昂志*・小尻利治・田中賢治・浜口俊雄

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

近年、世界各地で深刻な水資源問題が発生している。地域により気候特性・地理特性が異なり、水資源の地域的偏在や植生・生態系への影響も様々である。従って、気候変動を考慮に入れた地域レベルでの水資源、流域環境の総合的な管理が不可欠である。一方、大循環モデル(GCM)の精度向上やダウンスケール化も取り組まれており、将来の気象予測精度が向上してきている。

そこで本研究は、気候変動による流域水環境への影響を世界規模で比較評価することを目的とし、GCM出力をベースに分布型流出モデルを用いて、気候変動による流域水環境への時空間的影響評価を比較検討するものである。

キーワード： 分布型流出モデル，比較研究，水環境，地球温暖化

1. はじめに

水は生物にとって必要不可欠なものであり、人間の生活と密接に関わっている。またそれと同時に、水は限りある資源でもある。地球上の全水量（約 14 億 km^3 ）のうち大部分を海水が占め、淡水の割合は 2.5%である。淡水の大部分は極地の氷雪として存在しており、河川水や湖沼水、地下水として存在するのは、地球上の水の 0.8%である。このうち比較的容易に利用できる河川水や湖沼水は、地球上の水のわずかに約 0.01%にすぎない。水は循環しているため、実際に利用可能な水量はこれよりも多いが、UNESCO（国連教育科学文化機関）によると、世界全体の水資源賦存量は約 0.0045 億 km^3 と報告されており、これも全体の水量からするとごくわずかである。加えて、水資源賦存量の多くを占める河川水は、地域による偏在が激しく、世界の陸地総面積の約 40%を占める乾燥・準乾燥地域における河川流量は、世界全体の約 2%にすぎない（環境省、2000）。

現在多くの国で水不足が発生しているが、国連によると、途上国での病気の約 8 割は汚染された水がおもな原因であり、毎年約 1000 万人が死亡していると推定されている（高橋 他、1998）。言い換えると、水不足は生活用水だけではなく、食料不足や生態系への影響、地域紛争など地域社会・流域環境に深刻

な影響をもたらすことになる。IPCC（International Panel on Climate Change）は 2007 年に発表した第 4 次評価報告書の中で、以下のように報告している（文部科学省 他、2007）。

- ・ 地球の気候システムの温暖化は、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから、気象学的にも明白である。
- ・ 20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が高い。過去 100 年間（1906～2005 年）の線形の昇温傾向は 100 年当たり 0.74 [0.56～0.92] $^{\circ}\text{C}$ であり、第 3 次評価報告書で示された 0.6 $^{\circ}\text{C}$ [0.4～0.8 $^{\circ}\text{C}$]（1901-2000 年）と比べて大きい。温度上昇は地球全体にわたり生じており、とりわけ北半球での高緯度地域ほど上昇が大きい。降水量は、1900 年から 2005 年にかけて、南北アメリカの東部、ヨーロッパ北部、アジア北部と中部でかなり増加した一方、サヘル地域、地中海地域、アフリカ南部や南アジアの一部では減少した。1970 年代以降、世界的に干ばつの影響を受ける地域が拡大したことになる。
- ・ SRES 排出シナリオの範囲では、今後 20 年間

に、10 年当たり約 0.2°C の速度で気温が上昇すると予測される。例えば、全ての温室効果ガス、及び、エアロゾルの濃度が 2000 年のレベルで一定に保たれたとしても、10 年当たり 0.1°C のさらなる昇温が予測される。その後の気温予測は、個別の排出シナリオに徐々に依存するようになる。昇温分布やその他の地域スケールの特徴（風のパターン、降水、一部の極端現象や海氷現象を含む）の予測されたパターンについて、第 3 次評価報告書よりも高い確信度が得られるようになった。すなわち、

- ・ 昇温は、積雪面積の縮小、ほとんどの永久凍土地帯における融解深度の深化、海氷面積の縮小といった最近の観測された傾向を継続する形で、ほとんどの北半球の陸域において最大となり、南極海及び北大西洋の一部地域で最小となる。
- ・ 極端な高温や熱波、大雨の頻度は引き続き増加するであろう。
- ・ 降水量は、高緯度地域では増加する可能性がかなり高く、一方、ほとんどの亜熱帯陸域においては減少する可能性が高い。
- ・ 今世紀半ばまでに、世界の年間河川流量及び利用可能性は高緯度地域、及び、いくつかの熱帯湿潤地域において増加し、中緯度地域と熱帯のいくつかの乾燥地域において減少すると想定される。
- ・ 地中海周辺、米国西部、アフリカ南部、ブラジル北東部といった半乾燥地域では、気候変動に

よる水資源の減少に苦しむことの確信度は高い。

- ・ アジアでは、2050 年までに淡水の利用可能性は、中央・南・東・東南アジア、特に大規模河川の流域において減少すると予測される。

本研究では世界各地の異なる 3 流域を対象に、GCM 出力値を利用し 1979～1988 年、2075～2084 年の 2 期間について、流域レベルでの気候変動による水環境への影響を時空間的に評価するとともに、世界規模での地域による較差を明らかにすることを試みる。対象流域として木曽川（日本中部）、Narmada 川（インド中央部）、Struma 川（ブルガリア南西部）を取り上げる。温暖化の影響評価として、GCM 出力値における 1979～1988 年、2075～2084 年を対象に比較を行う。対象流域の位置は、木曽川（日本：東経 $136\text{--}138^{\circ}$ 北緯 $35\text{--}37^{\circ}$ ）、Narmada 川（インド中央部：東経 $72\text{--}83^{\circ}$ 北緯 $20\text{--}24^{\circ}$ ）、Struma 川（ブルガリア南西部：東経 $22\text{--}25^{\circ}$ 北緯 $40\text{--}43^{\circ}$ ）である（Fig. 1 参照）。

なお、各流域での特徴は、以下のようである。

- ・ 流域の緯度経度・規模・傾斜度など、流域の地形特性が大きく異なる。
- ・ 木曽川流域は温暖湿潤気候、Narmada 川流域はサバナ気候、Struma 川流域は地中海性気候に属し、気象特性も異なる。
- ・ IPCC 第 4 次報告により水資源の減少が予想される地域である。



Fig. 1 Location of applied river basins. (1: The Kiso River, 2: The Narmada River and 3: Struma River)

2. 分布型流出モデルによる解析と評価

2.1 分布型流出モデルの基本構成

流出解析に関しては、平面分布型としてメッシュ型モデル、鉛直分布型として多層モデルを用いてメッシュ型多層流出モデル Hydro-BEAM (Hydrological River Basin Environment Assessment Model, 小尻 他, 1998) を適用する。Hydro-BEAM は、流域の水循環に関わる水・物質動態や生態環境を評価する分布型流出モデルである (Fig. 2 参照)。その適用範囲は蒸発散・積雪融雪・流出・地下水・水温・水質・生態など多岐に渡る。すなわち、様々な解析手法を組み込むことが出来る、という柔軟性を持ち合わせている。Hydro-BEAM の構造は、流域を正方形メッシュに区切り、それぞれのメッシュに鉛直構造を有するメッシュ型多層モデルである。鉛直方向の層数は解析目的により適宜変えることができる。

Fig. 3 にモデルの模式図を示す。それぞれのメッシュは A 層～E 層の 5 層の鉛直構造を有しており、A 層～D 層の水平流出量は河川に流入し、E 層は河川流量には影響を及ぼさない地下水層とする。解析では、表面流と A 層には kinematic wave 法を、B～E 層には線形貯留法を適用する。水田では河川からの灌漑用水の取水が、必要な維持湛水深を満たすように行われるという農業従事者の操作方策を考慮し、地下浸透・用水路流出・畦畔越流を算定する。また、大気－土壌間の水移動として蒸発散を考慮し、積雪・融雪についても考慮する。さらに、用水路の設定は流域水循環における人為的な水移動を示す上で不可欠となる。そこで、水田からの排水を扱う用水路網は落水線に沿うと仮定し、最終的に各メッシュ内で河川へと流入するものとする。

分布型流出モデルでは、入力データとして各メッシュの気候データ (気温・降水量の時間データ) が

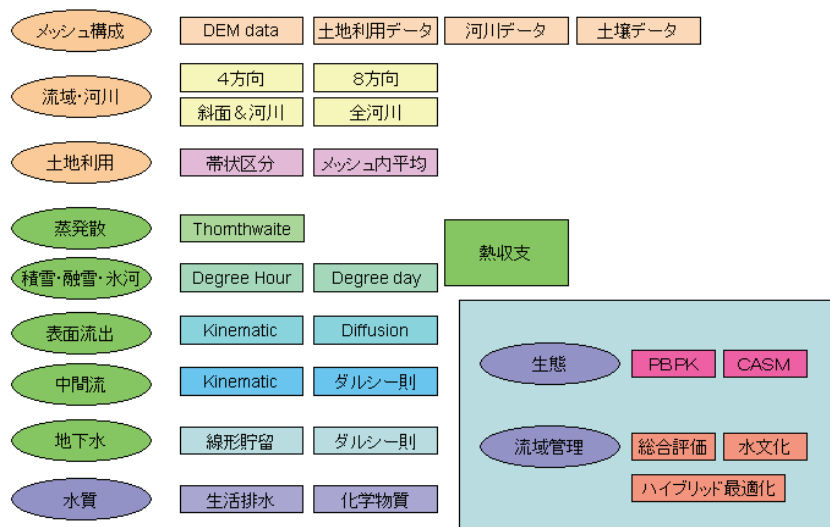


Fig. 2 Feasible components on Hydro-BEAM

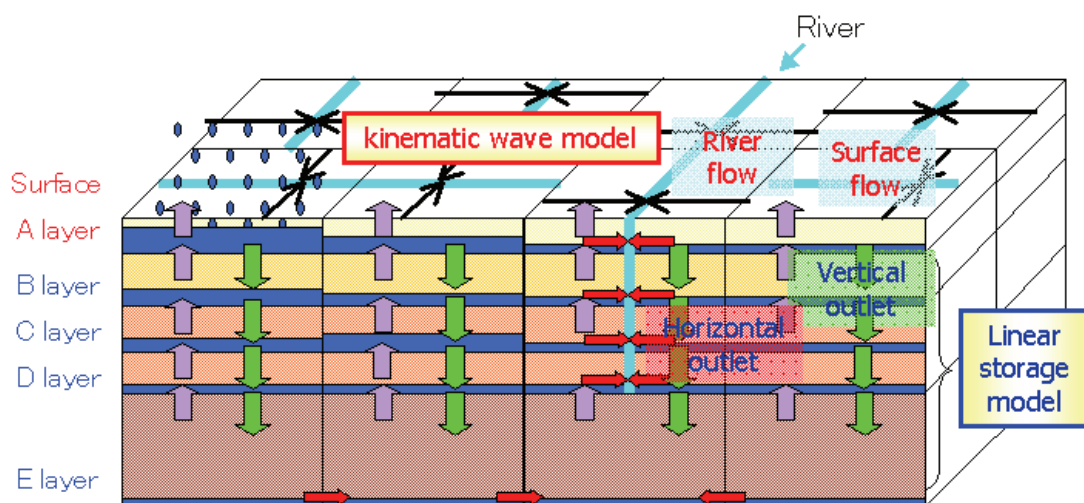


Fig. 3 Conceptual illustration of Hydro-BEAM

必要となる。日本以外の河川流域を対象にする場合、観測所の密度が非常に薄い地域も存在する。従って、国内においてもティーセン法を用いるのではなく、対象メッシュに近い2つの AMeDAS 観測地点を選び、その観測量を線形補間し、各メッシュの気象データとする。GCM 出力値については 20 kmグリッドでの数値が存在するので、気候観測値による補正を行った後、各メッシュを内包するグリッドの GCM 出力値で割り当てることとする。各メッシュの気温は、式(3)を用いて、観測地点の標高と各メッシュの平均標高の差により補正する。データが欠測の場合は、他の観測所のデータで補完することとする。

$$T'_m = \frac{(T_1 - \tau(H_m - H_1))dis_2 + (T_2 - \tau(H_m - H_2))dis_1}{dis_1 + dis_2}$$

(1)

$$P_m = \frac{P_1dis_2 + P_2dis_1}{dis_1 + dis_2}$$

(2)

$$T_m = T'_m - \tau(H_m - H_{gcm})$$

(3)

ここに、 T_m はメッシュ m の気温($^{\circ}\text{C}$)、 H_m はメッシュの標高(m)、 H は観測地点標高(m)、 dis はメッシュと観測地点の距離(m)、 τ は気温の递减率($0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$)、 gcm : GCM 出力を表す添字、1, 2 は観測地点を示す添字である。

2.2 国外河川のモデル化

(1) 流域形状の決定

世界の流域界データとして、各研究機関が提供しているウェブサイト(例えば、CGER による GDBD、USGS による Hydro-sheds、など)がインターネット上から入手できる。Hydro-sheds は流域単位が大きいので、大規模河川の解析に、それ以外の河川には GDBD を用いる。Narmada 川には Hydro-sheds、Struma 川には GDBD による流域界データを用いた。Arc-GIS を用いて対象流域を切り出し、流域境界点のデータセットを作成する。流域境界部では、データの信頼性に欠けるため、メッシュが一部分でも流域界に重なった時点で落水線作成プログラムの対象メッシュとする。

(2) 落水線図の作成

全世界の標高分布データには、CGIAR-CSI による SRTM をインターネット上からダウンロードして用いる。解像度は 3 秒グリッドである。これを用いて、メッシュ内の最低標高値と、隣接する 4 メッシュそれぞれの内部の最低標高値を比較し、落水方向を決定する。窪地やループ状になっている箇所がある場

合は、メッシュの平均標高、斜面勾配(計算値)、地図を参考に修正し、最終的な落水線図とする。

(3) 土地利用分布の設定

土地利用分布データは、USGS による GLCC をインターネット上から入手する。GLCC では全部で 24 の土地利用タイプに区分されている。同じような流出特性、負荷特性のものを 1 つにするという方針で 5 種類に再分類化を行う。

山林：森林・荒地

水田：田

畑地：畑・果樹園・その他の樹木畑

都市：建物用地・幹線交通用地・その他の用地

水域：内水地・海浜・海水域

GLCC と HydroBEAM の土地利用区分は 1 対 1 に対応しておらず、再分類を行う際には Hydro-BEAM の土地利用タイプに即した実測データによる検証が必要である。

Table 1 Obtained data and information

	Name	Producer	Characteristics
Topographical data	GDBD	CGER	River basin boundary
	Hydro-sheds	USGS	River basin boundary
	SRTM	CGIAR-CSI	Elevation
	GLCC	USGS	Land use
Meteorological data	Surface data, Hourly global	NCDC	Hourly
	GSOD	NCDC	Daily
	GCM output	Meteorological Beourou in Japan	GCM
Observed data	The Narmada River	WISDOM	Daily

GDBD: Global Drainage Basin Database

CGER: Center of Global Environment Research

Hydro-sheds: Hydrological Data and Maps based on Shuttle Elevation Derivatives at Multiple Scales

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

CGIAR-CSI: Consortium for Spatial Information

USGS: US Geological Survey

NCDC: National Climatic Data Center

GSOD: Global Surface Summary of Day Data

WISDOM: Water Information System Data Online Management

(4) 入力気候データ

日本国外の河川流域では、観測所の密度が非常に粗い場所も存在する。従って、対象メッシュに近い2個の AMeDAS 観測地点を選び、その観測量を線形補間し各メッシュの気候データとする。時間データは NCDC による Surface Data - Global Hourly (有料) データを用いる。ただ、この時間データには欠測が多く存在するため、同一観測所の前後の値により補完した後、月データを用いた補正を行う。月データには NCDC より GHCN (無料) をダウンロードし利用する。

GCM 出力値については国内河川と同様、気候観測値による補正後、ティーセン法を用い各メッシュに割り当てることとする。各メッシュの気温は、観測地点の標高と各メッシュの平均標高の差により補正を行う。

結局、世界中の情報を探すと有料、無料のデータと対応する解像度があり、モデル化の必要に応じて入手することになる。それらをまとめると Table 1 のようになる。

(5) 蒸発散過程・積雪融雪過程

分布型流出モデルでは、蒸発散過程は熱収支法と回帰式や Degree-Day 法など経験式を用いることができる。通常の観測所では、気圧、水蒸気圧、風速等の観測がなされておらず、広域の熱収支を計算することは困難とされている。一方、Degree-Day 法などの経験式は、季節や場所によって異なるパラメータを持ち、一般性には欠けるが、気温や降水量などの数個の気候因子のみにより、他の気候因子を推定することができる。日あるいは月レベルでの水環境応答特性分布を把握し、異なる流域の特性・気候変動の影響を比較評価するため、経験式による推定法を採用し解析を行うこととする。

(6) ダム操作過程

ダムによる環境変化が水量変化に起因して流域に大きな影響を及ぼすことは、明らかである。ダム操作には治水・利水だけではなく、流域環境全体を考えた役割が求められており、その役割は、より大きく、そしてダムのあり方についてもより厳しく見られるようになってきている。

実際のダム操作は必ずしも操作規定通りには行われていない。ここでは、人による主観性を排除するし、操作規則に沿った計算手順を適用する。Fig. 4 にダム操作過程の位置づけを示す。ダムは流域メッシュに組み込むのではなく、流出モデルとは別に計算を行う。また、ダム貯水池の形状はテーブル関数を用いて内挿することで総貯水量 V と貯水位 H の H - V 変換式を作成し反映させる。ただし、ダム湖面からの蒸発は考慮していない。ここに、 Q_{in} はダム流入量、 Q_{out} はダム放流量、 Q_{iup} はダム直上流メッシュからの受け渡し水量、 Q_{ir} はダムメッシュでの灌漑必要水量、である。洪水調節の基本式は以下のように定式化される。

洪水期：

$$Q_{out1} = \begin{bmatrix} Q_{in} \\ Q_d \\ \min(Q_{in}, Q_d) \end{bmatrix} \text{ when } \begin{bmatrix} SWL \leq H \\ NWL \leq H < SWL \\ H < NWL \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q_{out1} = 0 \text{ when } H < LWL \quad (5)$$

非洪水期：

$$Q_{out1} = \begin{bmatrix} Q_{in} \\ Q_d \\ \min(Q_{in}, Q_d) \end{bmatrix} \text{ when } \begin{bmatrix} SWL \leq H \\ DWL \leq H < SWL \\ H < DWL \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q_{out1} = 0 \text{ when } H < LWL$$

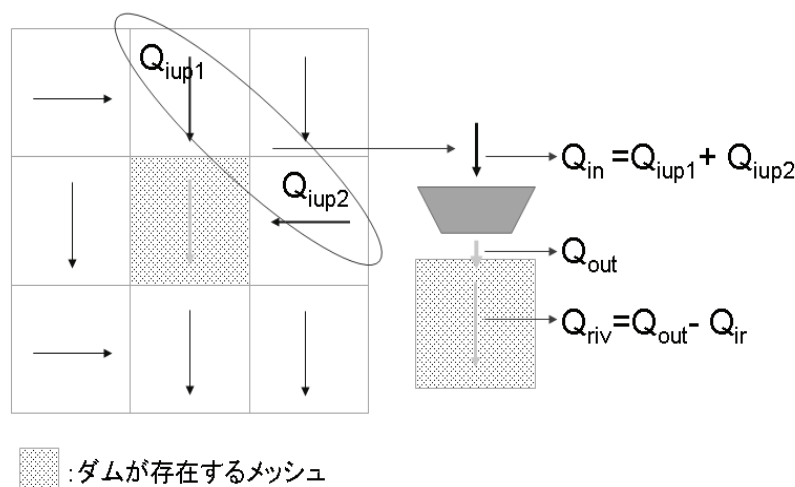


Fig.4 Graphic illustration of reservoir operation

ここに、 H はダム水位、 Q_d はダム制限放流量、 SWL はサーチャージ水位、 NWL は常時満水位、 DWL は洪水期満水位、 LWL は最低水位、である。ただし、確保流量、維持流量は次のようになる。

$$Q_{out2} = \max(Q_{out1}, Q_{sup}) \quad (7)$$

$$Q_{out3} = \max(Q_{out2}, Q_{in}) \quad \text{when } Q_{std} < Q_{eco} \quad (8)$$

ここに、 Q_{out2} は更新されたダム放流量、 Q_{sup} はダム確保流量 Q_{out3} は更新されたダム放流量、 Q_{eco} は維持流量、 Q_{std} は基準地点を含むメッシュの流量である。

3. GCM 出力による影響評価

3.1 GCM 出力のダウンスケール化

1 メッシュ 4 km² 程度の分布型流出モデルの場合、時間単位の降水量が必要である。ただ、解析目的は、日あるいは月レベルでの水環境応答特性を把握することであり、時間スケールでの詳細な流量分布を求めているわけではない。そこで、再現期間 (1979-1988 年) を対象として、GCM 出力値と気候観測値との対応関係を利用し、月降水量、月平均気温といった月単位での統計値 (平均、分散 (確率分布)) を GCM が再現するように、GCM 出力値に含まれるバイアスを補正する。なお、GCM は、解像度 20 km グリッド、1 時間タイムステップの最新の GCM を用いる。

(1) 気候観測値の GCM グリッドへの変換

ダウンスケールをする前の準備として、各メッシュへ気候観測値を割り振った後、ポイントデータである気候観測値を式 (9) により GCM グリッドに変換する。観測値の各メッシュへの割り振りには線形補間を用いる。

$$P_{obs(i,j)} = \sum_{m=1}^X \frac{P_m}{X} \quad (9)$$

ここに、 $P_{obj}(i, j)$ は気候観測値によるグリッド i , 月 j の降水量算定値、 P_m は気候観測値によるメッシュ m の降水量算定値、 X はグリッド i に含まれるメッシュ数、である。

(2) 月補正変換関数の算定

再現期間における GCM による各月における日降水量再現値と観測日降水量を比較することにより、GCM 出力値から各観測地点・各月の日ごとの降水量

を求める関数を作る。すなわち、ある GCM 出力値が p であったとき、当該グリッド、当該月における日降水量 p の非超過確率関数を求める。

$$F_{GCM(i,j)}(P) = \int_{-\infty}^P f_{GCM(i,j)}(p) dp \quad (10)$$

ここに、 $F_{obs(i,j)}(P)$ はグリッド i , 月 j の GCM 出力値を用いた日降水量の非超過確率関数、 $f_{obs(i,j)}(P)$ はグリッド i , 月 j の GCM 出力値を用いた日降水量の確率分布関数である。

同様に、ある気候観測値が p' であったとき、そのグリッド・その月における日降水量 p' の非超過確率関数を求める。

$$F_{AMeDAS(i,j)}(p') = \int_{-\infty}^{p'} f_{AMeDAS(i,j)}(p') dp \quad (11)$$

ここに、 $F_{GCM(i,j)}(P)$: グリッド i , 月 j の気候観測値を用いた日降水量の非超過確率関数、 $f_{GCM(i,j)}(P)$: グリッド i , 月 j の気候観測値を用いた日降水量の確率分布関数である。GCM 出力値 p_m の非超過発生確率と気候観測値 p_m' の非超過発生確率は同じであると仮定し、 p_m を p_m' で置き換える変換関数 $g(p_m)$ を作成する。

$$p' = F_{AMeDAS(i,j)}^{-1}(F_{GCM(i,j)}(p)) = g(p) \quad (12)$$

(3) 補正 GCM 出力値のダウンスケール

変換関数 $g(p)$ を求めることにより、GCM 再現値を日単位で補正する。補正前の日降水量が補正後の日降水量と一致するよう時間降水量に一定の比率を乗じ、GCM 再現期間の補正出力値を得る。同様に、GCM 将来実験の出力値に作用させることによって、GCM 将来予測値を補正し、将来の日降水量を算定する。なお、気温については、最後の部分で比率の代わりに差を加えることによって求める。

3.2 影響評価項目の設定

流域の特性は、さまざまな要素によって決定される。しかし、データの信頼性が不均一であり、それぞれの要素の影響が混在していることを踏まえると、条件を単純化した上での検討が必要である。比較要素として地理特性要素、気候特性要素、流出特性要素、評価指標による気候変動評価要素の大きく 4 要素について評価を行う。以下にそれぞれの指標について説明を行う。なお、各指標の季節値としては、

1 年を 12-2 月, 3-5 月, 6-8 月, 9-11 月の 4 つに分け,
それぞれ 3 ヶ月あたりの値で与えることとする。

i) 地理特性要素

流域平均標高

流域平均傾斜: 各メッシュの勾配の平均値

流域土地利用平均

ii) 気候特性要素

気温変動幅: 最高月平均気温

—最低月平均気温

降水集中度: 最大季節降水量/年降水量

月水資源賦存量: 月降雨量+月融雪量

—月蒸発散量

期間 9 日雨量:

iii) 流出特性要素

気候変動の評価という視点に加え, ダムの有用性・
必要性を測ることを目的とする。

年流出高: 年流量/観測地点での集水面積

流出率: 年流出高/年降水量

流量集中度: 最大季節流量(累計値)
/年流量

河況係数: 年最大流量/年最小流量

流量安定度: 豊水量/渇水量

ダムによる開発水量

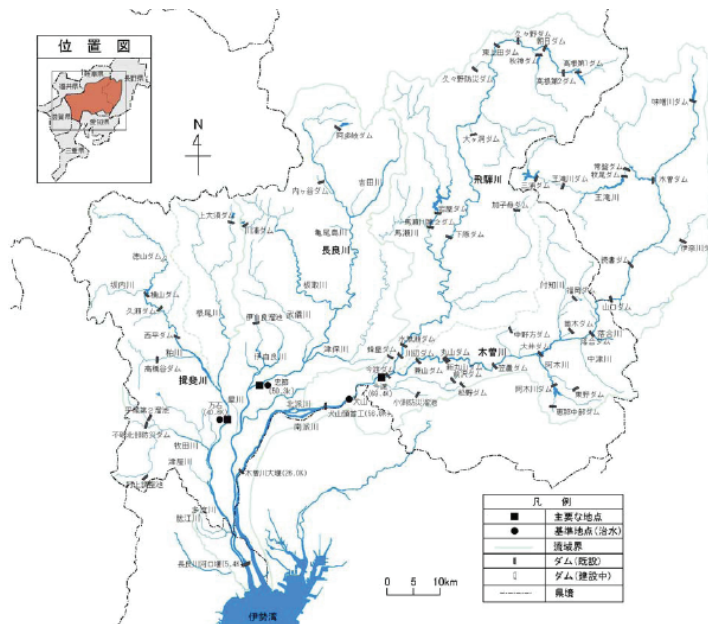


Fig. 5 Map of The Kiso River Basin

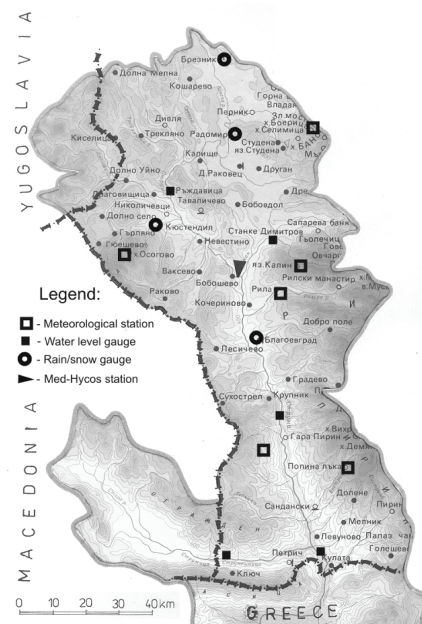


Fig. 7 Map of the Struma River Basin

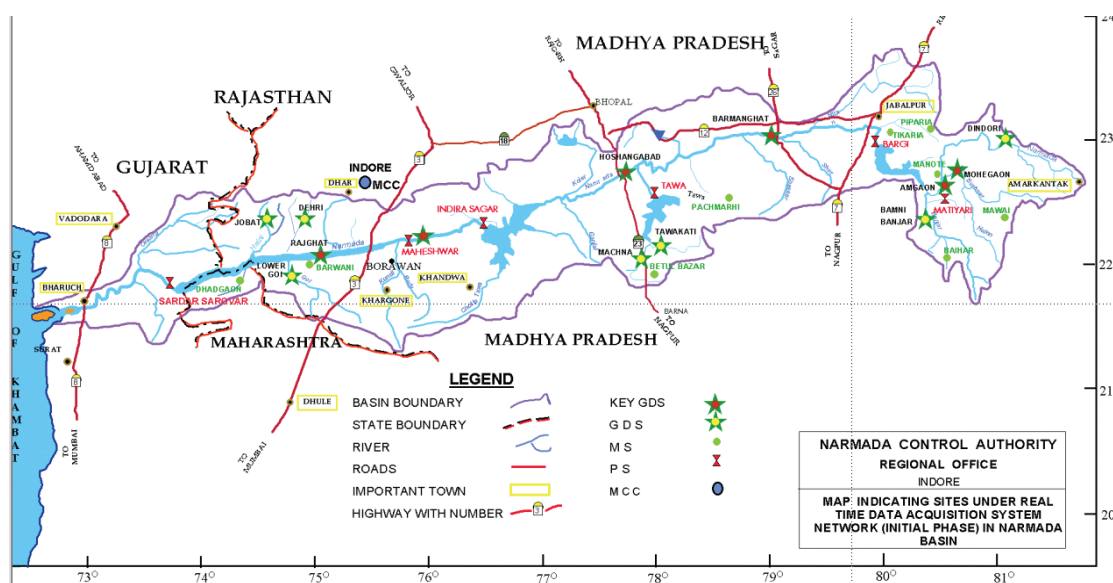


Fig.6 Map of the Narmada River Basin

4. 実流域への適用と考察

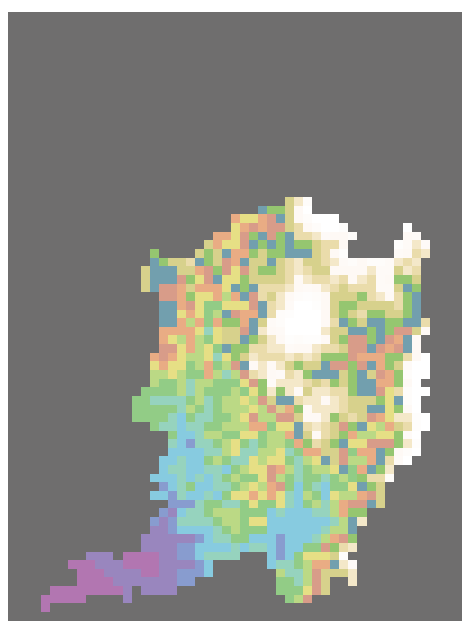
4.1 対象流域の概要

(1) 木曽川流域

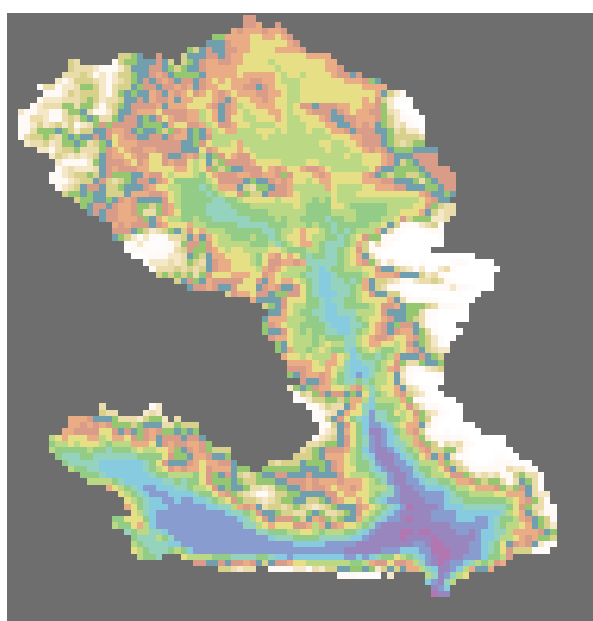
木曽川流域は、流路延長 229km、流域面積 5,275km² の日本の一級河川で、犬山地点より上流の 4,684km² を対象とする。流域の気候は、温暖湿潤気候区（太平洋側気候）に属し、流域の年間降水量は、約 2,500mm である。地形の特徴としては、上流域は 3,000m 級の山々を擁する日本有数の山脈地帯となっており、下流域は日本最大規模のゼロメートル地帯である。長良川・揖斐川と合わせて木曽川水系を形成し、流域面積 9,100km² の日本有数の大規模水系となっている。その豊富な水資源は、古くから農業用水や水力発電として、また産業の発展・人口集中に伴う都市用水として利用されてきた(Fig.5 参照)。

(2) Narmada 川流域

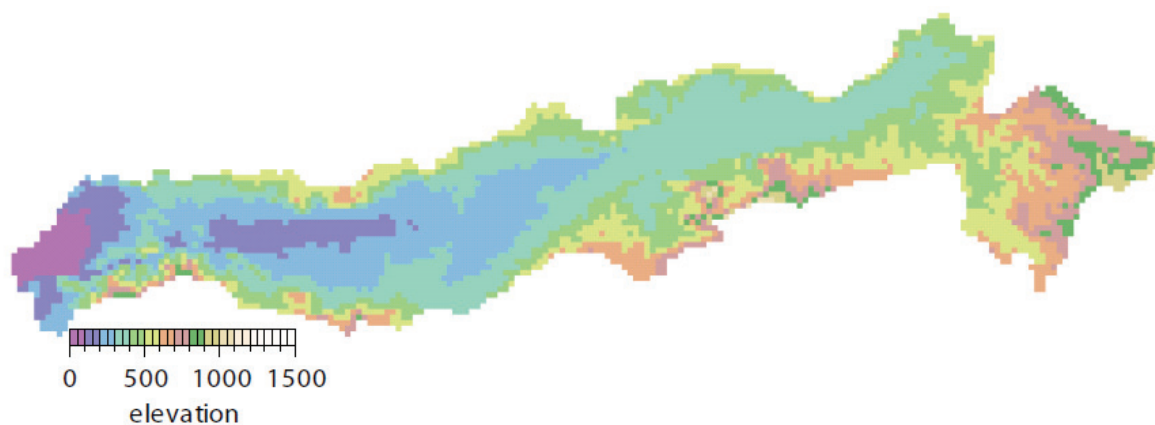
Narmada 川は、インド中央部を Vindhya Satpura 分水界を水源に東から西へ流れ、Gujarat 州でアラビア海へと注ぐ。インド半島を東から西に方向に流れる水系はインドの河川総流量の 10%と少なく Narmada 川はその主要河川の 1 つとして水資源の観点から重要である。流路延長は 1,289km に達し、北インドと南インドとの境界となっている。流域はサバナ気候に属し、年間降水量の 90%が 6 月～10 月の間に降るため、乾季には流量が極端に減少する。Narmada 川流域はインドでの水資源開発の中心で、現在、南 Gujarat の Narmada 川流域に大小あわせて 3,200 ものダムを建設するというナルマダ渓谷総合開発 (NVDP) が進行しており、多数の灌漑・発電プロジェクトの計画・建設が進められている。一方、この計画により 3,500km²の森林と 2,000km²の農地が水没



(a) Kiso River



(b) Struma River



(c) Narmada River

Fig. 8 Elevation distributions on applied river basins.

し、100 万人以上の人々が強制移住を余儀なくされるとみられている。これに伴う住民補償の問題や生態系の破壊、経済的なメリットの疑問視など、国内外から厳しい批判を受けている。なかでも、NVDP 最大のプロジェクトである Sardar Sarovar Project (SSP) は国際的な批判を浴びており、NVDP はその是非を大きく問われている(Fig. 6 参照)。

(3) Struma 川流域

Struma 川は、流路延長 290km、集水面積 10,797km² (ブルガリア内、全流路延長 400km、全流域面積 18,078km²) のブルガリア南西部最大の河川である。ブルガリア南西部を南に流れ、ギリシャに入りエーゲ海へと注ぐ。流域の一部には他にマケドニア、セルビアモンテネグロを含む。本研究では、ブルガリア／ギリシャ国境地点より上流の 10797km² を対象とする。大陸の河川としては急峻な地形特性であり、気候は大陸性気候と地中海性気候の影響を受け、河川流量は年 25 億トン、融雪期の春に最大、乾季の夏に最小となる。下流域の南部では、融雪期と地中海サイクロンとが合わさり、突発的な洪水が発生する。流域の年間平均降水量は 700 mm 程度と少なく、水資源は貴重となっている。しかし、1989 年以前に策定された開発計画に基づく過剰な取水や、流域内及び流域間の複雑な導水により必要以上の水利用が行われているため、乾季には都市部において慢性的な水不足が起こっている(Fig 7 参照)。

4.2 流域のモデル化

メッシュサイズは、それぞれの対象流域の規模・得られる精度・解析時間を考慮し、木曽川、Struma 川は 2 km メッシュ、Narmada 川は 5km メッシュが適切であると判断した。解析メッシュ数は木曽川：1188、Narmada 川：4811、Struma 川：4396 個となった。なお、メッシュは全て正方形と仮定し、水流はメッシュの中心を東西南北の 4 方向いずれかに流下する。流域を比較評価する際には、それぞれのメッシュサイズは全て同じであることが望ましいが、Narmada 川が余りにも大きな流域であるため、5km メッシュで解析する。それぞれの流域の標高分布を Fig. 8 に示す。

気象データとして、AMeDAS 観測値 (1979 から 1988 年)、GCM 出力値 (1979 から 1988 年、2075 から 2084 年) を使用した。気象データは、ティーセン法により観測所の位置をもとに、それぞれの観測値を各メッシュに割り当てた。気温は観測所の標高と各メッシュの平均標高の標高差を用い、気温の逓減率を 6.5(°C /km) として補正を行った。

4.3 気象データから見た特性

入力情報である気温・降水量については、観測値、GCM 再現期間 (補正後)、GCM 再現期間 (補正前)、GCM 予測期間で以下のような特性が得られた。

(1) 木曽川流域

木曽川流域では気温、降水量とも、GCM 出力が補正前から流域の気候特性を良く捉えている。補正の効果はあまり伺えないが、補正により逆に実測値から外れてしまうといった負の効果は見られなかった(Fig. 9, 10 参照)。

Fig. 9 のように、気温は 1 年間は全体を通して軒並み上昇する結果となり、流域平均気温は 8.5°C から 11.8°C へと上昇した。特に冬季に気温が上昇し、氷点下の期間が大幅に減少する結果となった。年平均降水量は 2,151mm/y から 2,065mm/y へと、ほぼ横ばいとなった。年降水量の変動は、概して小さくなる傾向が見られた。ただ、最大日降水量はほとんど変わっておらず、最少月降水量は減少する結果となり水管理を楽観視することはできない。

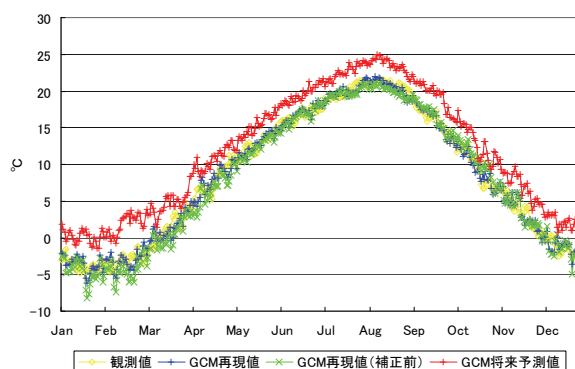


Fig. 9 Averaged daily temperature at the Kiso River Basin

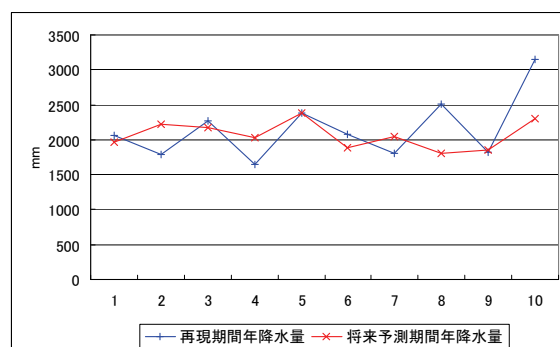


Fig. 10 Averaged annual precipitation at the Kiso River Basin

(2) Narmada 川流域

Narmada 川流域は雨季と乾季が非常に明瞭で、かつモンスーンによる突発的豪雨により降水量の大小が非常に大きい。ただ、流域が非常に広大であるため、こうした気候特性と Fig.11 で示したように、補正により逆に値が平均化されてしまう(Fig. 11 参照)。ただ、Narmada 川流域は気候観測地点の分布が粗く、観測データの信頼性も高いものではない。そこで、流域から無作為に 4 地点を抽出し各地点ごとの観測値、再現値（補正後）、再現値（補正前）の比較を行った。流域が非常に広大であるため流域平均で見ると値が均されているが、各地点で見るとうまく再現できている。このことから、GCM 出力値は観測地点よりも密なため、観測値のみによる線形補完では再現できなかった流域内部の降雨分布を表現していると言える。その結果、流域内での平均化の結果が強くと出ていると推察できる。しかし、流域平均値の補正結果と観測値との間にはまだ隔たりがある。また、気温の年変動の概形がうまく表現できておらず、気温の将来予測値には不自然な不連続箇所が見られる。今後、さらなる実測データの収集・整備、新しいデータの補完・補正方法（衛星観測データの利用など）

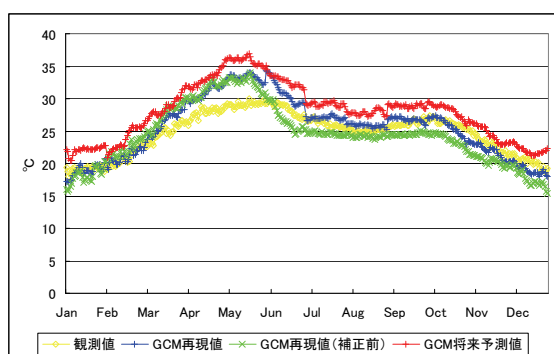


Fig. 11 Averaged daily temperature at the Narmada River Basin

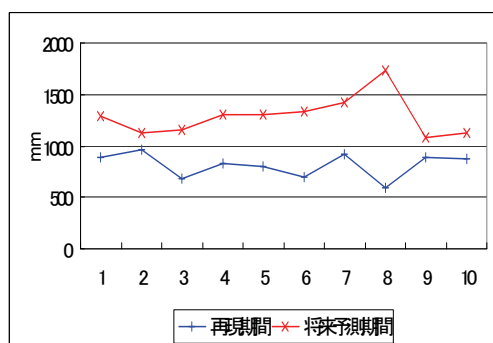


Fig. 12 Averaged annual precipitation at the Narmada River Basin

の開発が必要である。気温は、1 年間全体を通して軒並み上昇する結果となり、流域平均気温は 25.7 °C から 28.1 °C へと上昇した。

年平均降水量は 815mm/y から 1,288mm/y へと、大きく増加した。降水量の変動は、年・月・日単位ともに気候変動後増加する傾向となった。モンスーン型の気候特性は変化しておらず、気候変動前後の変化の傾向としては、大雨発生の確率が増え、渇水期の降水は変わらず乏しいと言える。

(3) Struma 川流域

Struma 川流域では、特に降水量について補正の効果がよく表れている。しかし、気温の将来予測値に、不自然な不連続箇所が見られる。今後、この要因を検討し、ダウンスケール手法を改良していく必要がある。

気温は、1 年間全体を通して軒並み上昇する結果となり、流域平均気温は 8.8 °C から 12.1 °C へと上昇した。年平均降水量は 363mm/y から 335mm/y へと、減少した。一方、気候変動前後の降水量変化の傾向としては、年・月・日単位ともに減少し、最少月降水量の結果から、極端な渇水が起こる可能性が示唆された。

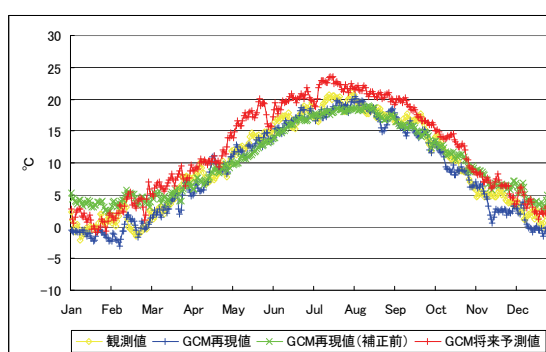


Fig. 13 Averaged daily temperature at the Struma River Basin

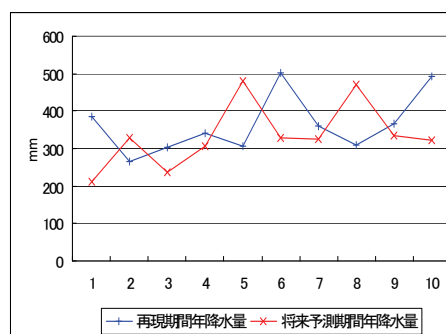


Fig. 14 Averaged annual precipitation at the Struma River Basin

4.4 温暖化の影響評価

Fig. 15 は、木曽川におけるパラメータ同定時の観測値と計算値の比較である。解析結果を比較し、層厚、浸透係数等のパラメータを同定した。同定期間は、データの信頼性と計算時間を考慮して、木曽川で2年(1999年から2000年)、Narmada川(1979年)、Struma川で1年(1982年)とした。パラメータ決定は、時刻ごとの流量の誤差比率 E_1 、ピーク流量の再現性、総流量の再現性、の3点から総合的に判断した。すなわち、 E_1 は次式で表される。

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_o(i)} \right\}^2 \quad (13)$$

ここに、 n は計算時間数、 $Q_o(i)$ は i 時の観測流量 m^3/s 、 $Q_c(i)$ は i 時の計算流量 m^3/s 、である。

木曽川流域では、ダム集水域ごとに同定を行い、それぞれの小流域にパラメータを設定した。ダム地点での同定手法は、ダム操作による誤差（人の主観を排除するためダム操作はマニュアル通りに行われると仮定している）を無くするため、ダムへの流入量（観測値）とダムメッシュへの流入量（解析値）を比較した。また、ダムからの放流量には観測放流量を与え、解析を行った。

今回は日単位での同定を行ったので、特に問題は発生していないが、時間単位で同定を行う際には、ダム流入量の観測値の信頼性を十分に検討する必要がある。なお、実際の集水面積と落水線図における集水面積が一致しているかの確認も必要である。

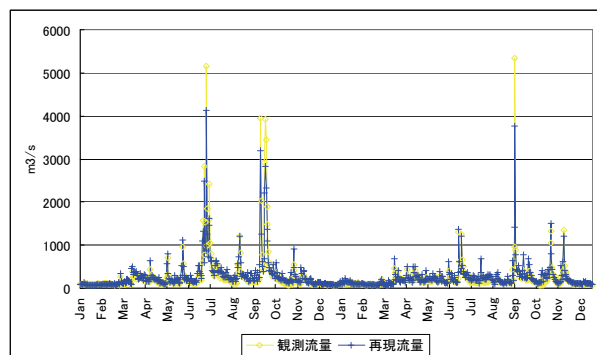


Fig. 15 Daily discharge at Inuyama in the Kiso River Basin

Narmada 川流域での観測流量が入手できなかったため、パラメータの同定は行っていない。今後の課題の一つとして、データを入手し同定を行う必要がある。Struma 川流域でも観測地点の詳細が入手でき

なかったため、パラメータの同定は行っていない。今後、観測地点の緯度・経度・集水面積を入手し同定を行う必要がある。

蒸発散過程、積雪融雪過程での解析結果を入力値として、決定したパラメータを用い、水田流出、表面流出、土壌内浸透、河川流下の各流出過程について解析を行った。

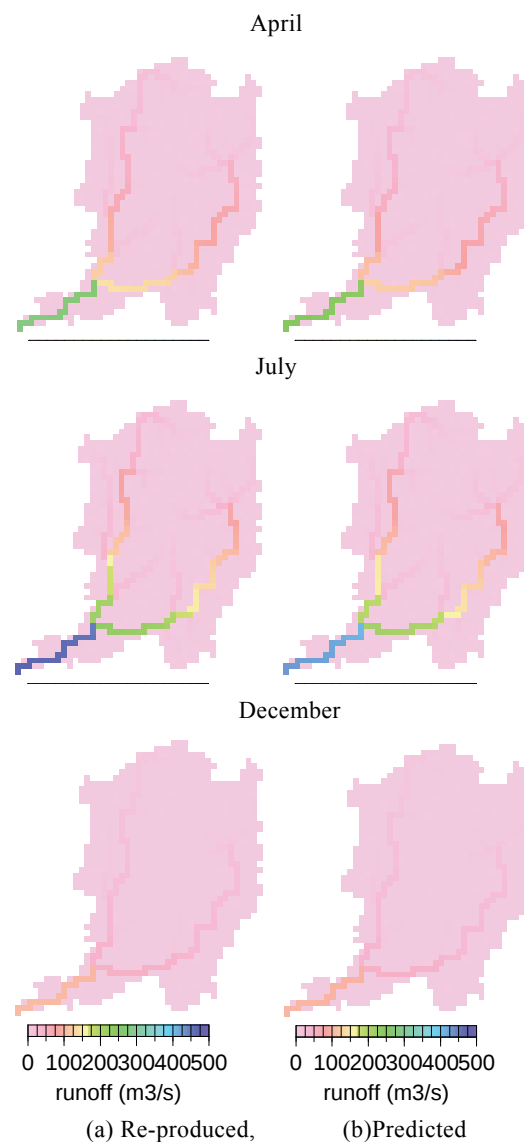


Fig. 16 Comparison of spatial distributions of discharge at the Kiso River

Fig. 16 に木曽川流域での月平均流量平均分布を示す。水流は河川メッシュに集中して流れ込んでいるのが分かる。同流域では詳細なダム操作規則の情報が入手できたため、再現期間・将来予測期間ともにダム操作ケースと自然流下ケースの計4ケースを評価する。なお、メッシュサイズは2km、タイムステップは1,200秒とした。流量変化の傾向としては、

基底流量が全体的に減少した一方、ピーク流量は横ばい傾向、10年確率洪水の規模は増す結果となった。全体として、流量の時期的偏差は拡大し、平年流量は減少する結果となった。

ダムの有用性については、気候変動前後共に洪水時のピークカットが行われており、ダムが機能していることが分かる。現在の犬山地点での計画高水量は12,500m³/sであり、十分にこの値を下回っている。

一方、渇水期に注目すると、気候変動前では、ダム操作により渇水現象に改善が見られるが、気候変動後はダム操作による改善が見られない。現状の流域管理システムでは、気候変動後の渇水に対応しきれない可能性が示唆された。

Narmada 川流域では、再現期間、将来予測期間の自然流下（ダム操作なし）の状態で2ケースを評価する。なお、メッシュサイズは5km、タイムステップは3,600秒とした。流量変化の傾向としては、ピーク流量は大幅に増加し、その一方で乾季（渇水期）の流量は減少する結果となった。全体として、流量の時期的偏差は拡大する結果となった(Fig. 17, Fig. 18 参照)。

流域内にダム建設プロジェクトが進められており、いくつものダムが運用を開始されている。しかし、ダム群は利水・発電のみの用途として捉えられてお

り、明確な操作規則等は定められていないのが現状である。気候変動により、流量偏差の拡大・ピーク流量の増大・洪水被害が予想されることから、今後、ダム等を有効に活用した流域管理が求められる。

Struma 川流域では、再現期間・将来予測期間の自然流下ケース2ケースを評価する。なお、メッシュサイズは2km、タイムステップは1,800秒とした。流量変化の傾向としては、ピーク流量は横ばい、基底流量は減少する結果となった。全体として、流量の時期的偏差は拡大する結果となった。

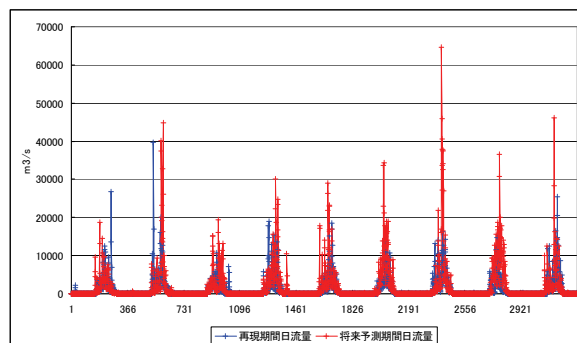


Fig. 17 Daily discharge at downstream point of the Narmada River Basin; Bigger than fifty-th maximum daily discharges and smaller than 2000-th ones for these ten years are plotted.

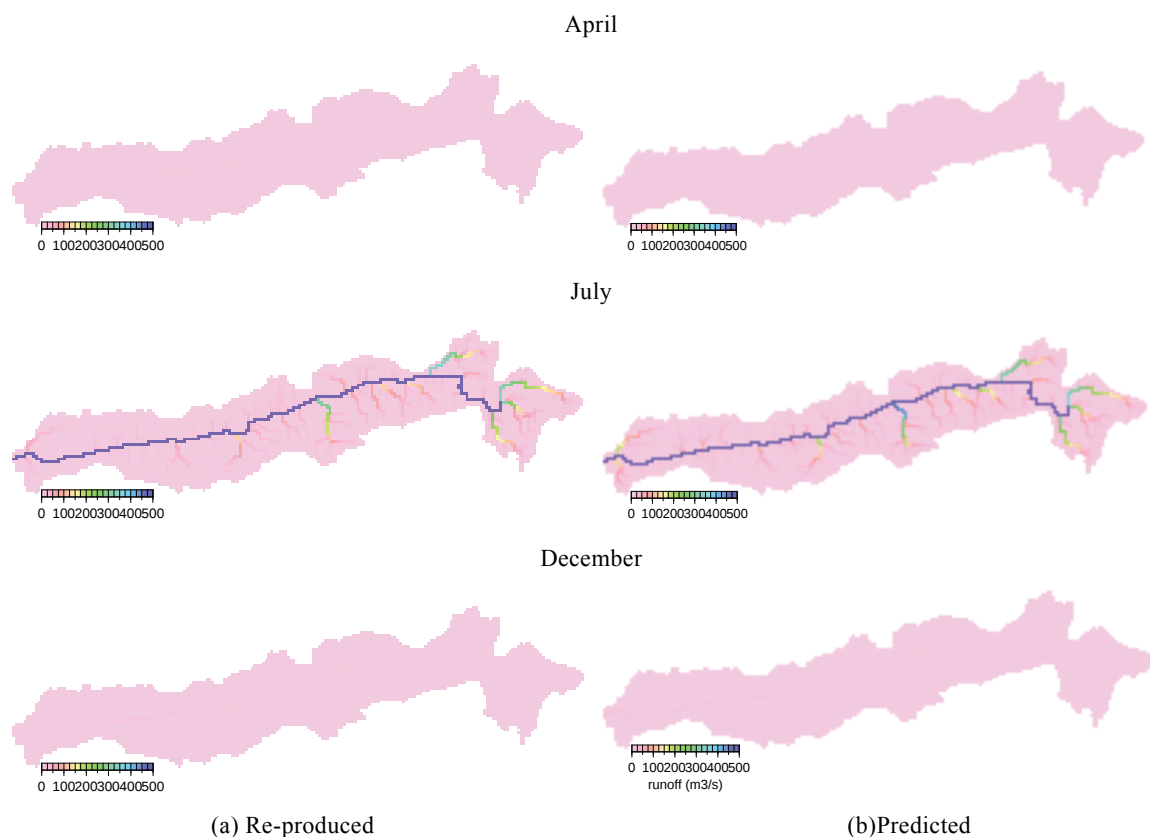


Fig. 18 Spatial distributions of discharge in the Narmada River Basin

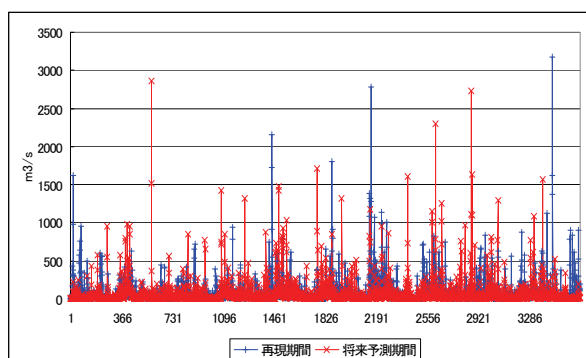
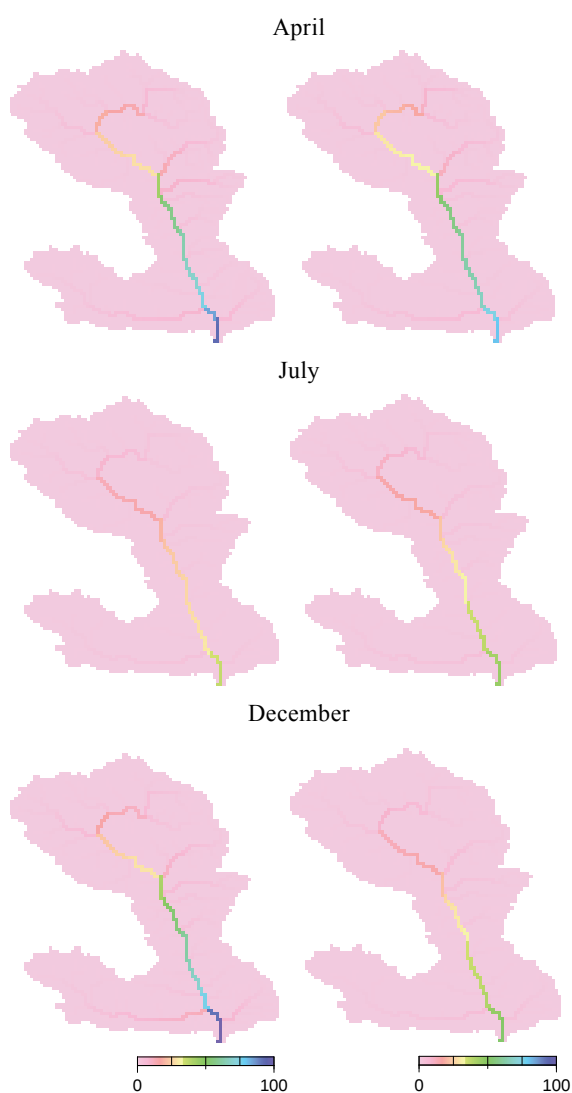


Fig. 19 Daily discharge in the Struma River Basin



(a) Re-produced, (b) Predicted
Fig. 20 Spatial distributions of discharge in the Struma River Basin

以上の結果をまとめると地球温暖化の流域への影響は、以下ようになる。

Table 2 Comparison of hydrological characteristics due to global warming

The Kiso River	Assessed characteristics
Temperature	Rise of yearly averaged temperature from 8.5 °C to 11.8 °C
	Less periods of below zero degree
Precipitation	Not specified change of averaged yearly of 2,151 mm/y
	Decrease of monthly minimum precipitation
Discharge	Decrease of base flow
	Increase of temporal delay of hydrograph feature
	High availability of reservoir for flood
	Not effective reservoir operation for irrigation
The Narumada River	
Temperature	Rise of yearly averaged temperature from 8.5 °C to 11.8 °C
Precipitation	Increase of averaged yearly precipitation of 815 mm/y to 1,288 mm/y
	No change of Climatic characteristics based on Monsoon
Discharge	Increase of peak
	Decrease of low flow
The Struma River	
Temperature	Rise of yearly averaged temperature from 8.8 °C to 12.1 °C
Precipitation	Decrease of averaged yearly precipitation of 363 mm/y to 335 mm/y
	Decrease of monthly minimum precipitation
Discharge	Decrease of base flow
	Increase of temporal delay of hydrograph feature

5. 結語

本研究では、GCM 出力値を利用して 1979 年から 1988 年、2075 年から 2084 年の 2 期間を対象に、分布型流出モデルを用い、気候的に大きく異なる 3 流域の流出解析を行った。その結果、流域特性や温暖化の影響を時空間的に比較し評価することができた。以下に、得られた成果と課題について述べる。

i) 流域のモデル化における成果と課題

海外での河川流域のモデル化手法を実施したことで、あらゆる河川流域への適用が可能になった。現在、流量観測値はネット上から容易に入手することは難しく、現地とのコンタクトが必要である。他のデータは気候の時間データは有料だが、全てネット上から簡単に入手できる。表層土壌の特性分布を組み込むことにより、土壌水分量のある程度定量的に評価できるようになった。加えて、今までパラメータとして扱っていた間隙率や透水係数をデータから与えることができるようになったことから、パラメータ同定の精度の向上が期待できる。

ii) 陸面過程における成果と課題

GCM アウトプットを用いた解析を行うため、蒸発散量を算定する際には陸面過程では必要データが少なくすむ Thornthwaite 法, Degree-Day 法を用いた。GCM の補正手法についてはさらなる精度向上が求められる。特に海外の河川流域に関しては、気候観測値の信頼度が低く、観測データの補正/補完手法、GCM 補正手法の両方を向上させていく必要がある。

iii) 流出解析における成果と課題

表層土壌の特性分布を組み込んだが、地下部分の計算は線形貯留法を用いて行った。そのため、地下部分の出力値はまだパラメータに依る所が大きく、実測データによる妥当性の検証が必要である。地下基盤までの深さの情報など地下全体の情報が整備され、これを組み入れれば、地下部分の計算を物理モデルベースで行うことが可能になるだろう。

iv) 流域間の比較と気候変動影響評価における成果と課題

水量・土壌水分量など特に水動態に着目して結果を分析しつつ、気候変動による影響を評価した。対象流域は地域・気候とも大きく異なるが、流域ごとに異なる影響が現れた結果が得られ、地域レベルでの流域管理の重要性が示された。

今後の以下に挙げる課題についてさらなる検討が求められる。

- ・異なる地域・気候区における適用を目指し、様々な河川流域を対象とし評価を行う。
- ・気候要素と水動態の変動との関連性を明らかにするなど、得られたアウトプットの分析を進める必要がある。
- ・気候変動評価指標を充実させ、様々な視点から気候変動による影響を評価する

- ・指標による評価結果の妥当性を実測値により検証する。

謝 辞

なお、海外の流域の解析にあたっては、当研究室と交流の深いインド科学研究所の Mujumdar 教授、Sofia 大学の Daniela Zulatunova 教授より各種データの収集や入手方法の解説、現地の水利用の解説など、多岐にわたり多大な協力をしていただいた。記して謝意を表したい。

参考文献

- 環境省 (2000) : 平成 12 年度版 環境白書
- 小尻利治・東海明宏・木内陽一 (1998) : シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号 B-2, pp.119-134.
- 高橋裕・河田恵昭編 (1998) : 水環境と流域環境, 岩波書店,
- 土木学会編 (1999) : 水理公式集 平成 11 年版, 土木学会.
- 日本気象協会 (2003) : 地球環境変動が水資源に与える影響評価調査報告書
- 農林水産技術会議事務局編 (1984) : 農林水産研究文献解題 No.10, 農林統計協会.
- 藤原洋一・大出真理子・小尻利治・友杉邦雄・入江洋樹 (2006) : 地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集第 50 巻.
- 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省 : IPCC 第 4 次報告書統合報告書政策決定者向け要約, 2007
- Kojiri, T., Hamaguchi, T. and Ode, M. (2007): Assessment of global warming impacts on water resources and ecology of a river basin in Japan, J. Hydro-Environment Research, Science Direct, Elsevier, pp.164-175.
- Matsunaka, T. Takeuchi, H. and Miyawaki, T. (1992): 土壌の水分供給能並びに作物水分生理に関する試, Soil science and plant nutrition, vo.138, pp.260-279.
- Saxton, K.E. and Rawls, W.J. (2006): Soil Water Characteristics Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, Soil Science Society of America Journal vol.70 pp.1569-1578.

Comparison of Water Environment Variations in River Basin due to Global Warming

Takashi IMOTO*, Toshiharu KOJIRI, Kenji TANAKA and Toshio HAMAGUCHI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The impacts of climate change on water environment in river basins are assessed to analyze the difference of meteorological and hydrological characteristics in the world-wide scale with focus on water dynamics. In this study, three rivers of the Kiso River (Japan), the Narmada River (India), and the Struma River (Bulgaria) are applied by using the distributed runoff and environment model (Hydro-BEAM) with GCM outputs for present (from 1979 to 1988) and future (from 2075 to 2084) climate condition. First, data handling processes, such as the bias correction and downscaling process from GCM outputs to input data on simulation model are proposed for the limited river basins in Japan. Second, the modeling for runoff simulation is taken for the designated river basin. Finally, the impacts of climate change for water quantity are assessed.

Keywords: distributed runoff model, comparison, water environment, global warming