

温暖化が水資源に及ぼす影響評価における 不確実性に関する研究

UNCERTAINTIES IN GLOBAL WARMING IMPACTS ON WATER RESOURCES

藤原洋一¹・小尻利治²

Yoichi FUJIHARA and Toshiharu KOJIRI

¹正会員 博(農) 日本学術振興会特別研究員 総合地球環境学研究所 (〒 603-8047 京都市北区上賀茂本山 457-4)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

We examined the global warming impacts on the water resources of the Tone River Basin from the future projections of 9 GCMs (General Circulation Models) outputs under the IPCC SRES A2 and B1 scenarios. Moreover, we assessed the uncertainties in the global warming impacts by means of statistical test. As a result, temperature shows highly significant increases by 2080-2099 of about 4°C under A2 and about 2°C under B1, respectively. The magnitude of temperature increases under A2 is consistently higher than B1. But, the projections of precipitation are greatly different by GCMs, and the statistical significances are not shown clearly. Decreases in snow depth and in snow cover period are more remarkable under A2 than B1. As for the projections of river flow, some months appeared to have statistical significance while some months appeared to be no significance. Increase in river flow from December to March and decrease from May to June are highly significant. But, there is no significance for other months. Although increases of necessary reservoir storage volume are projected under A2 and B1 scenarios, the statistical significances are not indicated.

Key Words : *global warming, water resources, general circulation model, uncertainty*

1. はじめに

将来, 地球温暖化の影響によって, 洪水や渇水が頻発するのではないかと懸念されており, 21 世紀における流域水資源が, どの様に変動するのかについて大きな関心が集まっていることから, 地球温暖化が流域水資源に及ぼす影響評価に関する研究が, 近年, 盛んに行われている。

ここで, 将来の気候状態に関しては, 気候モデルによる予測結果に頼らざるを得ないが, どの排出シナリオに従うかによって予測結果は異なり, また, 同一の排出シナリオに基づいたシミュレーションであっても予測結果はモデルによって大きくばらついている。そのため, こうした温暖化予測に関する不確実性は, 流域水資源の変動評価に対して大きな障害となっており, 温暖化の予測結果が実際の流域水資源計画・管理に活用できるレベルまでには至っていない。

なお, 気候モデル間の不確実性を考慮するために, 複数のモデルの予測結果を平均するアンサンブル予測が行われているが, その予測値の統計的有意性に関しては, ほとんど議論されていないのが実状である。

そこで, 本研究では, 2つの排出シナリオに基づいた

9つの気候モデルからの出力値を利用して流域水循環モデルを駆動し, 現在期間と将来期間における結果を比較することによって, 温暖化が流域の水文・水資源に及ぼす影響を評価する。さらに, アンサンブル予測だけでなく, 予測結果の統計的有意性を検討することによって, 温暖化影響評価の不確実性について明らかにすることを試みる。

2. 対象流域と流域水循環モデル

(1) 利根川上流域

我が国を代表する大河川である利根川 (流域面積: 16,840 km², 幹川流路延長: 322 km) は, 群馬県と新潟県の県境にある大水上山を源流とし, 大小 765 にのぼる支川を合わせながら関東平野を北西から南東へ貫き, 千葉県銚子市で太平洋へと注いでいる。本研究では, 栗橋地点より上流 (流域面積: 8,588 km²) を利根川上流域として解析を行う。

利根川上流域の降水量を地域的に見ると, 奥利根流域, 吾妻川流域の北部, 赤城山, 榛名山周辺に多く, 流域南部に行くほど少ない傾向となっている。また, 降水量を月別に見ると, 6月から9月の梅雨および台風期

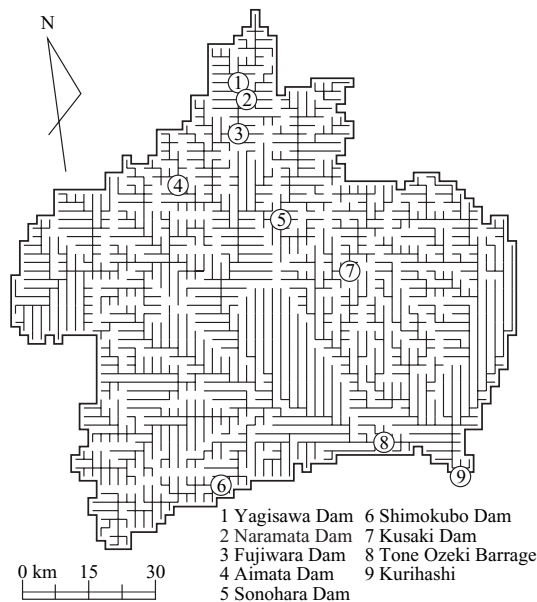


図-1 利根川上流域 (落水線図)。

に多く冬期に少ないが、流域北部の山岳域に関しては、冬期にも相当の降水量が降雪としてもたらされている。

栗橋地点の流量は、降水量の多寡に対応して、洪水期の7月から9月に多い。また、春先4,5月における流量は、山岳域からの融雪水の影響によって降水量の傾向と比べると安定的に多く、利根川上流域の大きな特徴となっている。

(2) 流域水循環モデルの利根川上流域への適用

a) 適用条件

本研究では、分布型の流域水循環モデルを解析に用いる。流域を分割するメッシュのサイズは、利根川上流域の大きさ、計算にかかる時間などを考慮して2 kmに設定した。その結果、流域を構成するメッシュの総数は2,114個となった(図-1)。

気象データには、流域内27のAMeDAS観測地点における時間降水量および時間気温を用いる。そして、AMeDAS観測地点によって流域をティーセン分割し、観測地点の時間降水量および時間気温を各メッシュに標高の依存性を考慮してそれぞれ割り当てることとした。なお、解析期間は、1980年1月1日から1999年12月31日までの20年間とした。

b) 積雪・融雪量および蒸発散量の推定

積雪・融雪量の推定には、Degree Day法を採用した。ここでは、Degree Day法を時間単位で適用することによって、時間融雪量を推定した。また、積雪の圧密を小島¹⁾、近藤ら²⁾の式で推定することによって、積雪相当水量を積雪深に換算した。

なお、蒸発散量の推定には、気温データのみから可能蒸発散量を推定する修正Hargreaves式³⁾を用いた。

c) Hydro-BEAM⁴⁾

本研究では、流出モデルとして、Hydro-BEAM⁴⁾を採用する。Hydro-BEAMは、地表面およびA～D層の4層から構成されている。地表面流および河川流に関しては、kinematic wave法を用いて追跡し、A～D層流

については、線形貯留法を用いて追跡する。ここで、実蒸発散量は、層内の空き容量に比例するものとして見積もられ、推定された実蒸発散量は、A層から差し引き、A層の水量が空のときはB層から、さらにB層の水量が空のときはC層から差し引くこととした。

ここで、Hydro-BEAMの利根川上流域への適用に関して、積雪・融雪量および河川流量の再現精度は良好であることを確認しており、また、その詳細は藤原ら⁵⁾に述べられていることからここでは割愛する。

3. 適用方法

(1) General Circulation Models

本研究では、多数のGCMsからの出力値を利用して流域水循環モデルを駆動し、現在期間と将来期間における結果を比較することによって、温暖化が流域の水文・水資源に及ぼす影響を評価する。さらに、現在期間におけるアンサンブル平均と将来期間におけるアンサンブル平均の差を統計的に検定することによって、温暖化影響評価の不確実性について明らかにすることも試みる。

本研究では、結合モデル国際相互比較プロジェクトCMIP⁶⁾ (Coupled Model Intercomparison Project)に参加している9つのGCMs (General Circulation Models)を解析に用いることとした。採用したGCMsの一覧を表-1に示す。そして、20世紀再現実験およびSRES A2とB1シナリオに基づいた将来予測実験におけるアウトプットから、月平均気温および月降水量を収集した。ここで、CO₂排出量の観点から比較すると、SRES A2は高排出シナリオ、SRES B1は低排出シナリオとなっている。なお、現在期間は1980-1999年の20年間、予測期間は2080-2099年の20年間と設定した。

(2) 気候モデルのバイアス補正

本研究では、空間解像度の大きいGCMsから解像度を小さくするダウンスケーリングは行わず、AMeDAS観測地点を覆うGCMsのメッシュからの出力値を解析に用いる。この場合、GCMsの初期値や境界条件などによるバイアスに加えて、メッシュサイズに起因するバイアスも加わることから、このデータを直接流域水循環モデルの入力値とすることはできない。

このため、GCMsのバイアスを補正する必要があるが、GCMsの出力値を対応する実際の年の観測値と一対一で比較することは難しいことから、GCMsの出力値の平均や分散(確率分布)が、20年間というある程度の長期間で見た場合に観測値のそれらと一致することを期待して、気候モデルからの出力値に含まれるバイアスを補正する。本研究では、月降水量および月平均気温といった月単位での確率分布が保存されるように、GCMsの出力値を補正する。バイアス補正には、Dettinger et al.⁷⁾、Wood et al.⁸⁾の手法を応用し、月降水量を例にした補正方法を以下に述べる。

1. 現在期間(1980-1999年)における観測値および

表-1 本研究で使用した GCMs.

Institute	Model	Grids (lon. × lat.)
Canadian Center for Climate Modeling and Analysis	CGCM3.1	96 × 48
CSIRO Atmospheric Research, Australia	MK3.0	192 × 96
Max Plank Institute for Meteorology, Germany	ECHAM5/MPI-OM	192 × 96
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	CM2.1	144 × 90
NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	ModelE20/HYCOM	72 × 46
Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK	HadCM3	96 × 73
CCSR/NIES/FRCGC, Japan	MIROC3.2	128 × 64
Meteorological Research Institute, Japan	CGCM2.3.2a	128 × 64
National Center for Atmospheric Research, USA	PCM	128 × 64

GCMs からの出力値を用いて、各 AMeDAS 観測地点および各月毎に月降水量の確率分布をそれぞれ定める。

2. GCMs の月降水量を P_{GCM} とし、現在期間の GCMs の月降水量で定めた確率分布を用いて、 P_{GCM} の非超過確率 $F(P_{GCM})$ を計算する。

3. 現在期間の観測値で定めた確率分布を用いて、非超過確率が $F(P_{GCM})$ に対応する月降水量 $F^{-1}(F(P_{GCM}))$ を算出し、これを P_{GCM} と置き換えることによって補正を行う。

ここで、確率分布関数には、正規分布、対数正規分布、ピアソン III 型分布を用意し、標準最小二乗基準⁹⁾によって適合度評価を行い、最も適合度の高い関数を選択することとした。その結果、月降水量にはピアソン III 型分布、月平均気温には正規分布がそれぞれ採用された。

なお、将来予測期間における GCMs の出力値の補正に際しては、現在期間において定めた観測値の非超過確率と GCMs の非超過確率の対応関係が、将来予測期間においても成立すると仮定して、上述と同様の方法によって補正を行う。

ところで、流域水循環モデルを駆動する際には、時間単位ないし日単位の気象データが必要となる。そこで、流域水循環モデルを駆動する際には、ランダムに過去の年の気象データを抽出し、抽出した年の気象データが GCMs の出力値を補正した値と一致するように、降水量データには一定の比率を乗じ、気温データには差を加えることで入力データを作成した。

(3) バイアス補正の適用結果

現在期間 (1980-1999) における矢木沢ダム地点を対象として、バイアス補正前後のデータを用いて Hydro-BEAM を駆動した河川流量と観測値を用いて推定した河川流量の比較 (20 年平均) を図-2 に示す。これを見ると、バイアス補正前のデータを用いた河川流量は、観測値によって計算した河川流量をほとんど再現できていないが、バイアス補正後のデータを用いた河川流量には、GCMs の違いによって再現結果に僅かなバラツキはあるものの、年間を通して河川流量を極めてうまく再現できていることが分かる。なお、ここでは紙面の都合から割愛したが、気温、降水量、積雪量、各ダム

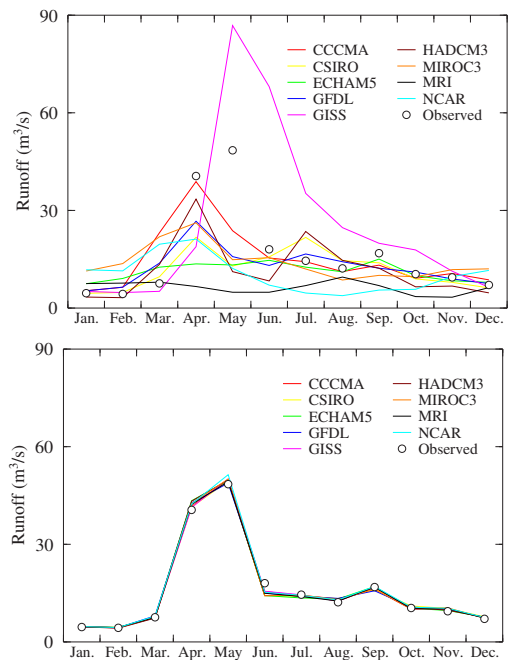


図-2 河川流量の再現結果、矢木沢ダム (上: バイアス補正前, 下: バイアス補正後)。

および栗橋地点における河川流量などに関しても、同程度の精度で再現できることを確認している。

4. 適用結果

(1) 降水量・気温への影響

図-3 に、現在期間において各 GCMs から推定された流域平均月気温 (20 年平均) の算術平均 (実線)、将来期間において各 GCMs から推定された流域平均月気温 (20 年平均) の将来予測結果、および、予測結果の算術平均 (点線) を示す。なお、下段には、各 GCMs からの将来予測結果の平均から現在平均を差し引いた値を示している。さらに、流域平均月気温について、各 GCMs からの予測結果の平均と現在平均の差を t -検定によって検定し、有意水準 1% で流域平均月気温に差がある場合には黒色、有意水準 5% で差がある場合には灰色にすることによって、予測結果の不確実性を示すこととした。図-3 を見ると、気温上昇が大きい月を特定することは難しいが、両シナリオとも全ての月において有意水準

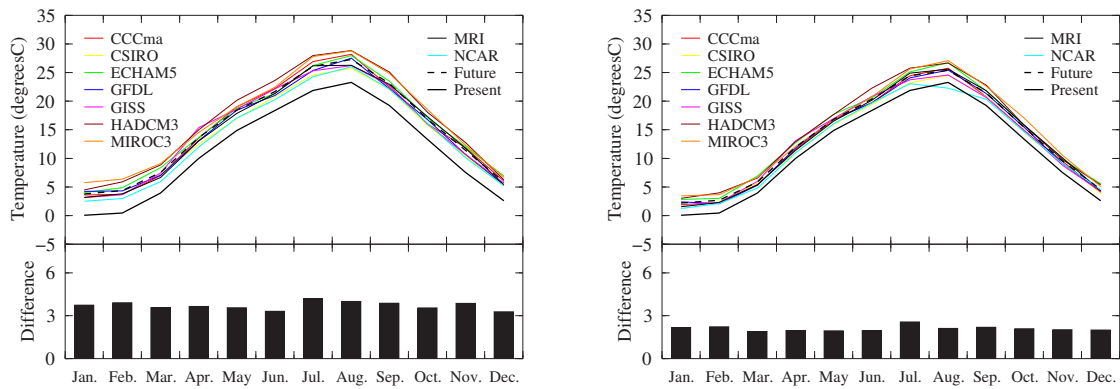


図-3 流域平均気温の予測結果 (左: A2, 右: B1)。

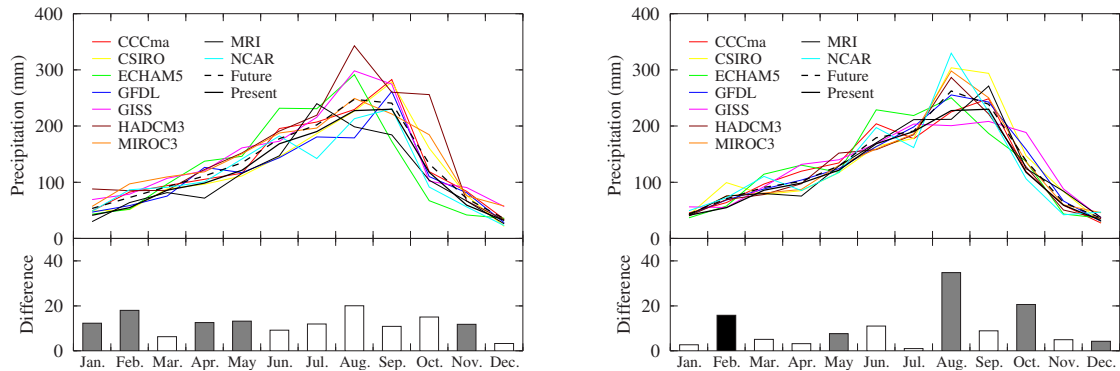


図-4 流域平均降水量の予測結果 (左: A2, 右: B1)。

1%で流域平均月気温に有意な差があることが分かる。また、A2 シナリオの場合は年平均で約 4°C 上昇、B1 シナリオの場合は年平均で約 2°C 上昇しており、CO₂ 低排出の B1 シナリオより高排出の A2 シナリオの方が、一貫して気温上昇の程度も大きくなっていることが分かる。

図-4 に、現在期間において各 GCMs から推定された流域平均月降水量 (20 年平均) の算術平均 (実線)、将来期間において各 GCMs から予測された流域平均月降水量 (20 年平均) の将来予測結果、および、予測結果の算術平均 (点線) を示す。また、気温の場合と同様に、各 GCMs からの将来平均から現在平均を差し引いた値を示すと共に、各 GCMs の将来平均と現在平均の差を *t*-検定によって検定し、有意水準 1% で流域平均降水量に差がある場合には黒色、有意水準 5% で差がある場合には灰色で表した。これを見ると、両シナリオとも全ての月において降水量が増加する結果とはなっているものの、GCMs によって予測結果には大きなバラツキがあり、有意水準 1% で有意な差がある月はほとんどないことが分かる。また、A2 シナリオと B1 シナリオの結果を比較すると、気温の場合に見られたような、B1 シナリオより A2 シナリオの場合の方が一貫して降水量が減少する、もしくは、増加するといった傾向は見られないことが分かる。

(2) 積雪・融雪量への影響

図-5 に、現在期間において各 GCMs から推定された気温および降水量を用いて推定した、矢木沢ダム地点における積雪深 (20 年平均) の算術平均 (実線)、将来

期間において各 GCMs から推定された積雪深 (20 年平均) の予測結果、および、予測結果の算術平均 (点線) を示す。また、各 GCMs からの将来平均から現在平均を差し引いた値を示すと共に、将来平均と現在平均の差を *t*-検定によって検定し、有意水準 1% で積雪深に差がある場合には黒色、有意水準 5% で差がある場合には灰色で表した。これを見ると、積雪深の予測結果は、両シナリオとも全ての月において、有意水準 1% で有意差があることが分かる。ここで、A2 シナリオと B1 シナリオの結果を比較すると、気温の場合と同様に、B1 シナリオより A2 シナリオの場合の方が積雪深の減少が大きくなっていることが分かる。なお、A2 シナリオの場合においては、3 月の積雪深が平均で 1,200 mm 減少、B1 シナリオの場合においては、3 月の積雪深が平均で 700 mm 減少となっていた。また、消雪日に関しては、A2 シナリオにおいて約 1ヶ月、B1 シナリオにおいて約半月早まっていることも分かる。このことは、温暖化が積雪に及ぼす影響に関しては、将来どの排出シナリオに従うのが極めて重要であることを示している。

(3) 河川流量への影響

図-6 および図-7 に、現在期間において各 GCMs から推定された矢木沢ダムおよび栗橋地点における河川流量の算術平均 (実線)、将来期間において各 GCMs から推定された河川流量の予測結果、および、予測結果の算術平均 (点線) をそれぞれ示す。また、将来平均から現在平均を差し引いた値を示すと共に、現在平均と将来平均の差を *t*-検定によって検定し、有意水準 1% で河川流量に差がある場合には黒色、有意水準 5% で差が

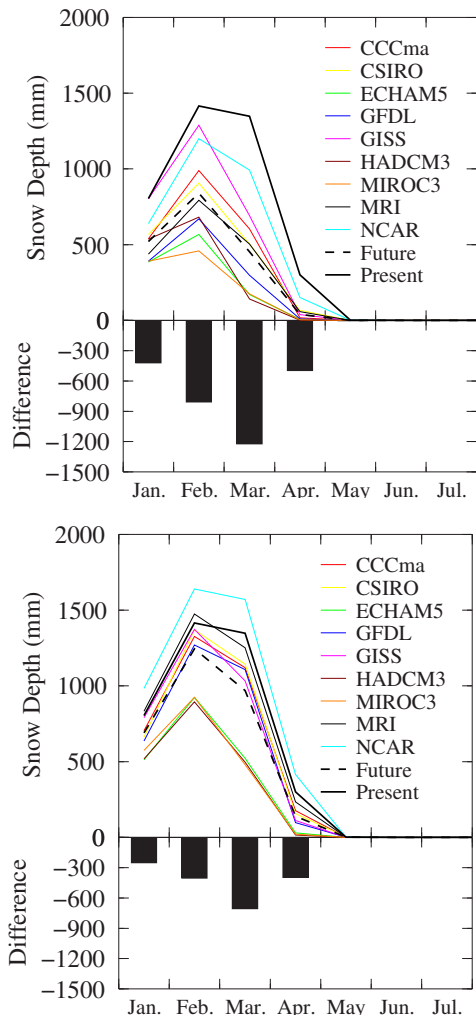


図-5 積雪深の予測結果、矢木沢ダム (上：A2，下：B1)。

ある場合には灰色で表した。これらを見ると、全ての季節において有意水準1%で有意差が見られた気温や積雪量の場合とは異なり、有意な差が見られる季節と有意な差がない月があることが分かる。

まず、矢木沢ダムの結果を見ると、12月～3月の河川流量が増加しており、有意水準1%で有意差があることが分かる。一方、5、6月の河川流量は、消雪日が早まった影響によって大きく減少しており、有意水準1%で有意な差が見られる。ところが、7～11月の流量は増加することが見積もられているものの、GCMs間のバラツキは大きく、有意水準1%で差がある月はほとんどない。次に、栗橋地点の結果を見ると、矢木沢ダムでの結果と同様に12月～3月の河川流量が増加しており、有意水準1%で有意な差がある。一方、5月の流量は、矢木沢ダムと同様に減少しているが(有意水準1%で有意)、6月の流量については有意な差は見られない。なお、その他の期間は、矢木沢ダムと同様にGCMs間のバラツキが大きく、有意な差は見られないことが分かる。

なお、A2シナリオとB1シナリオの結果を比較すると、冬季の河川流量の増加、消雪日の早期化、5月の流量の減少に関しては、A2シナリオの場合の方がB1シナリオの場合より、傾向がより大きくなっていることが注目される。

表-2 必要貯水池容量 (億 m³)。

Present	Future (A2)	Future (B1)
6.63	9.47 (0.071)	7.41 (0.539)

(4) ダム必要容量への影響

各GCMsから推定された河川流量を用いてダム必要容量を算定し、温暖化がダム必要容量に与える影響についても検討する。ここで、ダム必要容量とは、基準点における確保流量を満足させるのに必要な貯留施設の容量であり、定義は次の通りである。ダム流入量： Q_1 、基準点流量： Q_2 、確保流量： Q_k 、必要容量： V とすると、

$$\text{基準点不足流量：} Q_3 = Q_k - Q_2 \geq 0.0$$

$$\text{基準点余剰流量：} Q_4 = Q_2 - Q_k \geq 0.0$$

$$\text{ダム必要補給量：} Q_5 = Q_3$$

$$\text{ダム貯留可能量：} Q_6 = \min(Q_4, Q_1)$$

$$\text{ダム必要量：} V = VB + (Q_5 - Q_6) \geq 0.$$

ここに、 VB は前日の必要量。ここでは、基準点は栗橋、確保流量は栗橋確保量に利根大堰からの取水量を加えた値、ダム流入量は主要5ダム(矢木沢、奈良俣、藤原、相保、菌原)の合計流量、とそれぞれ設定した。なお、ここでは日単位で計算を行ったことから、86,400を乗じて m³ 単位で表した。

現在期間および予測期間の20年間の中で、GCMs毎にダム必要容量が最大であった値を選び出し、これらの値を算術平均したダム必要容量を表-2に示す。なお、ここでは、計画上の1/20年に相当するダム必要量を求めているため、実際の総貯水容量とは必ずしも一致しないことに注意されたい。また、現在平均と将来平均の差をt検定によって検定し、その有意確率も示した。これを見ると、A2、B1シナリオのいずれの場合においても、現状と比較してダム必要容量は増加していることが分かる。これは、解析に用いた現在の水需要は、春先から夏期にかけて大きくなっているが、基準地点への将来流入量は、春先に減少するのに加えて、同時期における上流ダム地点への流入量が減少した結果である。しかしながら、いずれの場合も、有意水準5%では有意な差があると認められないことが分かる。

5. まとめ

本研究では、2つの排出シナリオ、9つのGCMsからの出力値を利用して流域水循環モデルを駆動し、現在期間と予測期間における結果を比較することによって、温暖化が流域の水文・水資源に及ぼす影響を評価した。さらに、GCMsのアンサンブル平均だけでなく、予測結果を統計的検定することによって、温暖化影響評価の不確実性について明らかにすることを試みた。

気温の予測結果には、有意な差が見られ、B1シナリオよりA2シナリオの方が一貫して気温上昇の程度も大きい。降水量の予測結果は、GCMsによって大きなバラツキがあり、有意な差が見られる月はほとんどなかった。また、B1シナリオよりA2シナリオの方が、一貫

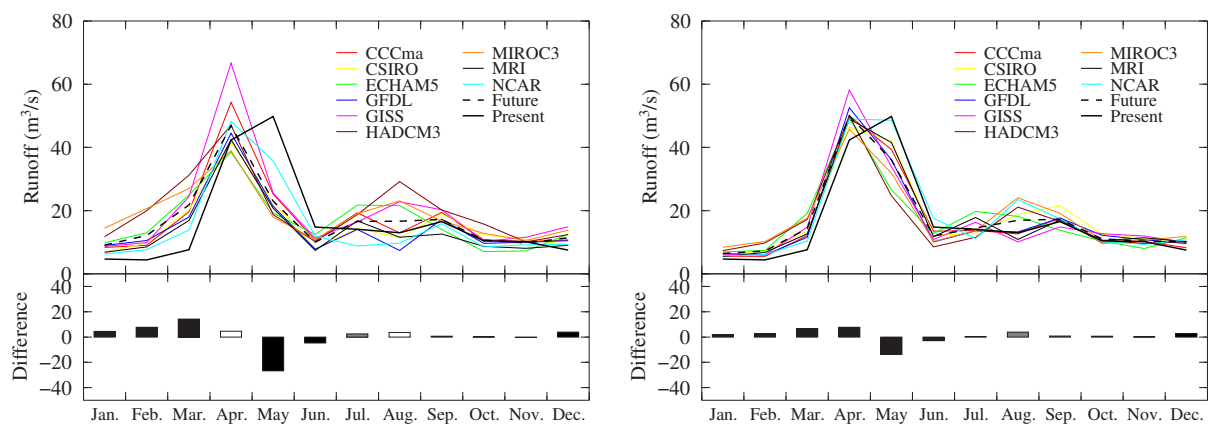


図-6 河川流量の予測結果，矢木沢ダム（左：A2，右：B1）。

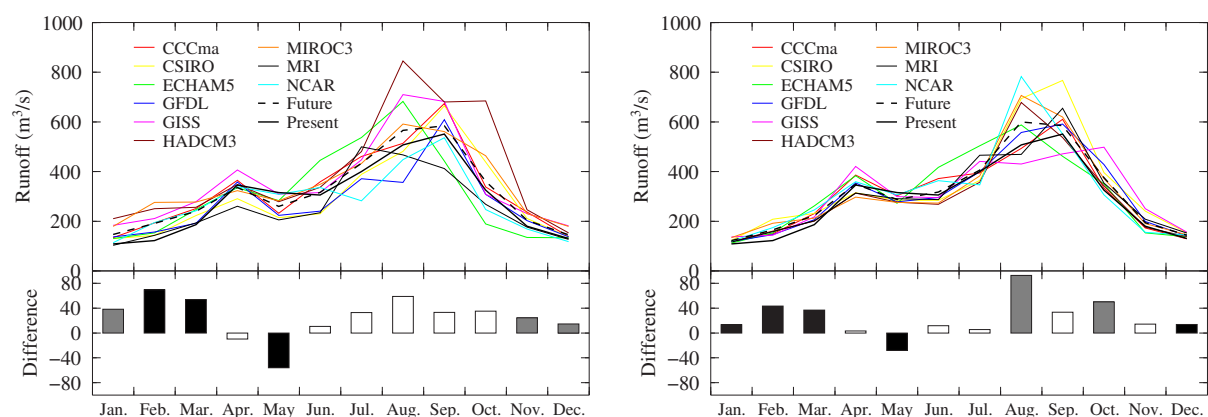


図-7 河川流量の予測結果，栗橋地点（左：A2，右：B1）。

して降水量が減少する（増加する）などといった傾向は見られなかった。積雪深の予測結果には有意な差が認められ、気温の場合と同様に、B1 シナリオより A2 シナリオの方が一貫して減少が大きい。

河川流量の予測結果は、気温や降水量の場合とは異なり、有意な差が見られる季節と有意差がない月が見られた。12 月～3 月の流量増加、融雪流出の早期化、5 月の流量の減少に関して有意な差が見られ、また、これらの傾向は B1 より A2 シナリオの方が大きかった。さらに、ダム必要容量の予測結果は、現在より増加傾向にあったが、有意差があるとは認められなかった。

謝辞：本研究の一部は、総合地球環境学研究所とトルコ科学技術研究機構の共同研究プロジェクト「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」（代表：渡辺紹裕）の補助を受けた。また、本稿を執筆するにあたり、元京都大学防災研究所の友杉邦雄先生には有益なコメントをいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小島賢治：積雪層の粘性圧縮 III，低温科学物理篇，16，pp.167-196，1957。
- 2) 近藤純正・沼田洋一：積雪表層密度のパラメータ化，雪水，50-2，pp.80-86，1988。
- 3) Droogers, P. and Allen, R.G.: Estimating Reference Evapotranspiration under inaccurate data conditions, Irrigation and Drainage Systems, 16, pp.33-45, 2002。

- 4) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：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，41B-2，pp.119-134，1998。
- 5) 藤原洋一・大出真理子・小尻利治・友杉邦雄・入江洋樹：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，Vol.50，pp.367-372，2006。
- 6) Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones, P., Lambert, S. J., Mann, M. E., Phillips, T. J. and Taylor, K. E.: An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), Global and Planetary Change, Vol.37, pp.103-133, 2003。
- 7) Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M.K., and Jeton, A.E.: Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099, Climatic Change, 62, pp. 283-317, 2004。
- 8) Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P.: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, Climatic Change, 62, pp.189-216, 2004。
- 9) 寶馨・高棹琢馬：水文頻度解析における確率分布モデルの評価規準，土木学会論文集，393/II-9，pp.151-160，1988。

(2006. 9. 30 受付)