

GCMs・ダウンスケーリング・水文モデルに 起因する温暖化影響評価の不確実性

UNCERTAINTIES IN CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT CAUSED
BY GCMS, DOWNSCALING TECHNIQUES, AND HYDROLOGIC MODELS

藤原洋一¹・田中賢治²・渡邊紹裕³・小尻利治⁴

Yoichi FUJIHARA, Kenji TANAKA, Tsugihiko WATANABE, 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 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 農博 教授 総合地球環境学研究所 (〒 603-8047 京都市北区上賀茂本山 457-4)

⁴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 investigated uncertainties in climate change impact assessment caused by general circulation models (GCMs), downscaling techniques, and hydrologic models. Two GCMs (MRI-CGCM2 and CCSR/NIES/FRCGC-MIROC) under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenarios (SRES) A2 scenario were dynamically downscaled to the Seyhan River Basin in Turkey. The downscaled data covered 10-year present (1990s) and 10-year future (2070s) time-slices and were used as inputs for two hydrologic models: the Simple Biosphere including Urban Canopy (SiBUC) model and the Tank Model. Results are summarized as follows. (1) There were huge uncertainties in the future projections by the GCMs. Therefore, the range of future projections should be shown using results from various GCMs. (2) Since there were huge errors in the dynamically downscaled data, bias-correction was necessary when using such data to assess climate change. (3) Like GCMs, hydrologic models can cause uncertainties. The performance of hydrologic models should be examined using maximum past flood and drought data, or multiple hydrologic models should be used to show the range of projections.

Key Words : *climate change, downscaling techniques, GCMs, hydrologic models, uncertainties*

1. はじめに

近年、地球温暖化が水文・水資源に及ぼす影響に関心が高まっている。ここで、将来気候を見通すための有用なツールの一つとして、General Circulation Models (GCMs) が挙げられ、最近ではそのアウトプットを入手することも容易になってきている。しかしながら、GCMs の時間・空間解像度は非常に粗いことから、GCMs のアウトプットは、流域水文モデルのインプットとして直接利用することは難しい。そのため、温暖化が水資源に及ぼす影響評価を行う際には、GCMs のアウトプットからより解像度の高いデータを作りだし、このダウンスケーリングされたデータを用いて流域水文モデルを駆動することによって、将来における水文応答変化をシミュレーションする方法が広く用いられている。

ところが、この方法は、GCMs、ダウンスケーリング手法、水文モデルをそれぞれ適用する際に、各モデルが有している誤差が予測結果に不確実性をもたらしていることがしばしば指摘されている。そのため、温暖化の影響に対応するための水資源計画・管理に、影響

予測の結果を活用するためには、この不確実性を低減させるとともに、不確実性を定量的に評価することが求められている。

こうした背景から、複数の SRES シナリオに基づいた複数の GCMs の結果を利用することによって、GCMs に関連する不確実性を考慮した温暖化影響評価に関する研究が数多く見られる^{1),2),3)}。また、ダウンスケーリング手法の選択が、将来予測結果にどのような違いを生じさせるのかについて検討した事例もある^{4),5)}。ところが、水文モデルに起因する影響予測の不確実性について検討した研究は極めて少なく、Wilby and Harris⁶⁾ が英国・テムズ川における低水流量の影響予測にもたらず不確実性の要因として、GCMs、ダウンスケーリング手法、水文モデル (構造、パラメータ) SRES シナリオを比較した報告がある程度で、水文モデルの不確実性の大きさが他の要因と比較してどの程度の大きさであるのかが明らかになっていない。

そこで、本研究では、2 つの GCMs を力学的にダウンスケーリングしたデータを用いて 2 つの水文モデルを駆動し、GCMs、ダウンスケーリング手法、水文モデ

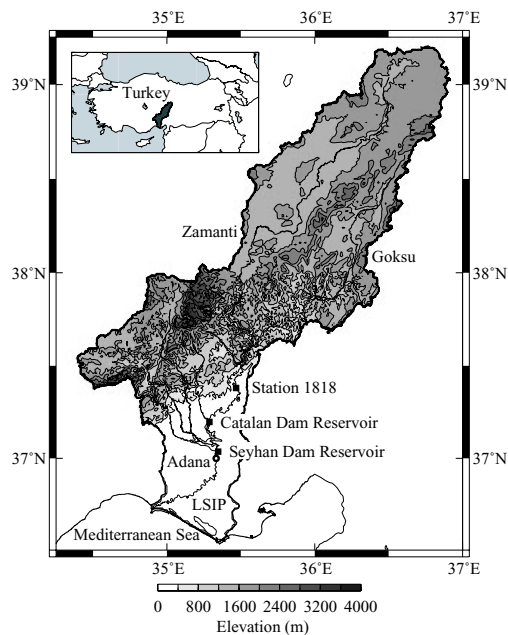


図-1 セイハン川流域の概要

ルに起因する温暖化影響評価の不確実性の大きさを比較する。さらに、この比較結果に基づいて、それぞれの要素がもたらす不確実性に対処する方法についても検討する。

2. 対象流域

研究対象とするセイハン川流域 (21,700 km²) は、トルコ南部に位置しており、下流域は地中海性気候、中・上流域は大陸性気候によって支配されている。セイハン川流域の概要を図-1 に示す。年降水量は、下流域では約 700 mm、中流域では約 900 mm となっており、標高が高くなるに従って降水量が増加する傾向がある。一方、大陸性の気候が卓越している上流域においては、降水量が 300 mm を下回る年もある。

総流量は、少ない年で約 37 億 m³ (191.1 mm/y)、多い年で約 73 億 m³ (377.0 mm/y) であり、平均すると約 55 億 m³ (284.1mm/y) である。流量変動を月別に見ると、流量は雨季の始まりである 11 月から徐々に増加し、融雪の影響によって 4 月に最大となり、乾季の始まりである 6 月から徐々に減少して 9 月に最小となる。

海岸平野部に展開されている灌漑農業地帯への灌漑用水は、約 20 億 m³/y、生活用水は、約 1 億 m³/y 取水されている。なお、下流域に配置されているセイハングダムおよびチャタラダムの有効貯水量は、それぞれ 8.8 億 m³、16.0 億 m³ であり、年間の発電量はそれぞれ 350 GWh、596 GWh となっている。

3. 解析手法

(1) 解析の概要

本研究では、まず、現在期間を対象として力学的ダウンスケーリング手法を適用し、同法の適応性につい

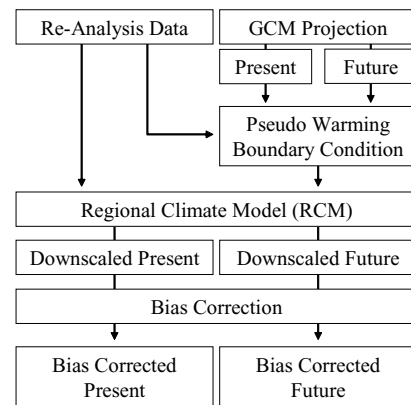


図-2 疑似温暖化手法の概念図

て検討する。また、ダウンスケーリングした気象データを用いて 2 つの水文モデルを駆動し、河川流量の再現性について検討する。次いで、将来期間を対象として 2 つの GCMs を力学的にダウンスケーリングし、現在期間における気象データと比較する。また、ダウンスケーリングした 2 つの気象データセットを用いて 2 つの水文モデルを駆動し、水文応答変化のシミュレーション結果を比較検討する。なお、3.(2) では力学的ダウンスケーリング手法について説明し、3.(3) では水文モデルについて述べる。

(2) ダウンスケーリング手法

本研究では、ダウンスケーリング手法として、力学的手法の一つである疑似温暖化手法⁷⁾を採用した⁸⁾。疑似温暖化手法の概念を図-2 に示す。現在期間に関しては、再解析データを境界条件として領域気候モデル (RCM) を実行する。将来期間に関しては、GCMs によって計算された温暖化前後の気象要素の差を再解析データに加えることによって擬似的な境界を作成し、これを境界条件として領域気候モデルを実行する。

本研究では、温暖化の影響が明確に現れると考えられる期間を対象として、GCMs、ダウンスケーリング手法、水文モデルの不確実性の大きさを示すために SRES A2 シナリオを選択し、データ期間は、1990 年代の 10 年間 (現在期間)、2070 年代の 10 年間 (将来期間) と設定した。再解析データには、NCEP/NCAR 再解析データ、GCMs には、MRI-CGCM2⁹⁾および CCSR/NIES/FRCGC-MIROC¹⁰⁾を採用した。領域気候モデルには、TERC-RAMS (Terrestrial Environment Research Center - Regional Atmospheric Modeling System) を用い、最終的な空間解像度は約 8.3 km に設定した。なお、領域気候モデルのアウトプットから、時間単位の 7 気象要素 (降水量、下向き短波放射、下向き長波放射、風速、気温、比湿、気圧) を利用することとした。

現在期間を対象として、ダウンスケーリングデータと観測値を比較する予備検討を行ったところ、両者には大きな隔たりがあることが分かった。そこで、このバイアスの特徴を全流域において整理し、この情報を基にして領域気候モデルのパラメータの調整を行った。さらに、このフィードバックを数度繰り返すことで、バ

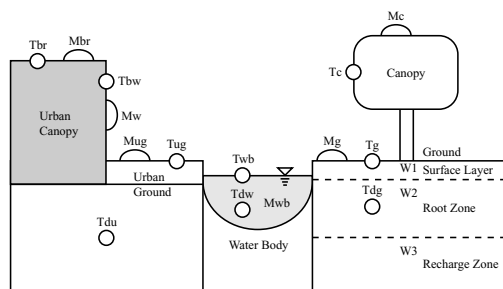


図-3 SiBUC の概念図

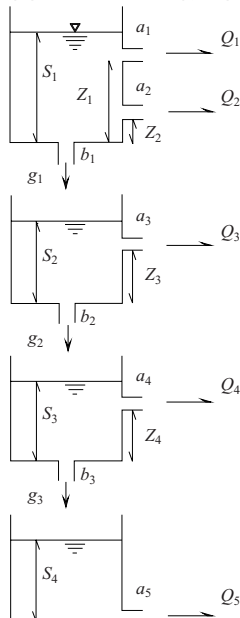


図-4 タンクモデルの概念図

イアスを完全に取り除くことを試みたが、取り除くことができなかったバイアスに関しては、次の方法によってバイアスを統計的に補正した。降水量に関しては、ダウンスケーリングした気象データの月別値が観測値のそれと一致するような補正係数を乗じることによってバイアスを補正したが、極端に大きな補正係数とならないように上下限値を設定した¹¹⁾。一方、気温に関しては、ダウンスケーリングした気象データの月別値が観測値のそれと一致するだけでなく、日較差も一致するように補正を行った¹¹⁾。

(3) 水文モデル

a) 適用条件

水文モデルを適用するに際しては、セイハン川流域を覆う領域 (34.25°E-37.0°E、36.5°N-39.25°N) を 5 分 (1/12°) 解像度のグリッドに分割し (33 × 33 グリッド) それぞれのグリッドにおいて後述する水文モデルを適用することとした。数値標高モデルには、Gtopo30 を採用し、土地利用データは、LANDSAT データを基にして作成した。また、土壌のパラメータ (間隙率、圃場用水量、根群域の深さなど) は、ECOCLIMAP¹²⁾ を利用した。

b) SiBUC

SiB¹³⁾ に基づいて開発された SiBUC¹⁴⁾ は、地表面の熱収支・水収支を物理仮定に基づいて解く陸面過程モデル

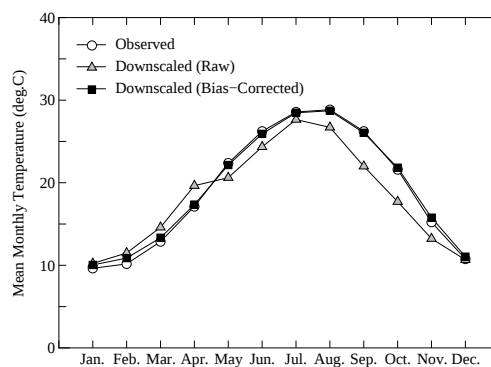


図-5 10 年平均の月平均気温の再現結果 (Adana)

の一つである。SiBUC の概念図を図-3 に示す。SiBUC では、1 つのグリッド領域は 3 つの土地利用カテゴリー (緑地、都市域、水体) に分かれており、それぞれのグリッドには、3 つの土地利用の面積率が与えられている。そして、土地利用カテゴリー毎に、顕熱、潜熱、流出量などを計算し、さらに、カテゴリー毎のフラックスを土地利用面積で加重平均することによって、1 つのグリッドからの計算値が得られる。

c) タンクモデル

直列 4 段タンクモデル¹⁵⁾ (図-4) は、簡単な構造であるが物理的に無理がなく、降雨・流出の非線形性も表現できること、さらに精度も良いことから、長期流出解析に広く利用されている。蒸発散量の推定に際しては、ペンマン式によって推定された日蒸発散位を用いる。実蒸発散量は、水収支がほぼバランスするように、係数を先の日蒸発散位に乗じて推定することとした。積雪・融雪量の推定には、Degree Day 法を採用した。なお、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。

d) 河川流量追跡モデル

SiBUC およびタンクモデルによってグリッド毎に推定された流出量は、Hydro-BEAM (Hydrological River Basin Environment Assessment Model)¹⁶⁾ のコンポーネントの一つであり、kinematic wave 法に基づいた河川流量追跡モデルによって、河川流量に変換した。なお、各グリッドにおける流下方向の数は 8 方向とし、その向きは数値標高モデルと実際の河川位置情報を併用して決定した。

4. 現在期間における結果と考察

(1) 気温・降水量の再現結果

Adana 地点を例として、10 年平均の月平均気温の観測、ダウンスケーリングデータ (補正なし)、ダウンスケーリングデータ (補正あり) を比較した結果を図-5 に示す。これを見ると、ダウンスケーリングデータ (補正なし) は、3,4 月において過大推定、5~11 月において過小推定となっている。一方、バイアス補正を行ったダウンスケーリングデータは、全ての月において観測値とほぼ一致していることが分かる。

10 年平均の月降水量の観測、ダウンスケーリングデー

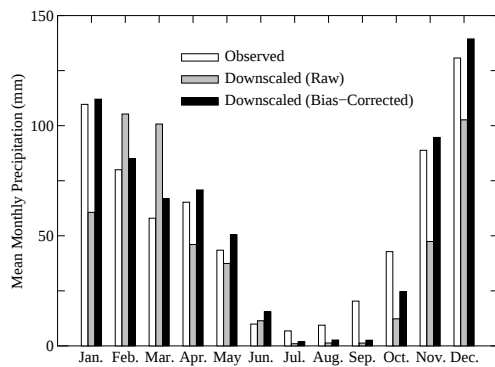


図-6 10年平均の月降水量の再現結果（Adana）

タ（補正なし）、ダウンスケーリングデータ（補正あり）を比較した結果を図-6に示す。これを見ると、補正なしのダウンスケーリングデータは、1,4,10,11,12月において過小推定、2,3月において過大推定となっている。一方、バイアス補正を行ったダウンスケーリングデータは、観測値と僅かに乖離している月もあるものの、おおむね良好な再現性であることが分かる。なお、年降水量の結果は紙面の都合上割愛したが、バイアス補正した降水量の年総量は観測値とおおむね合致していることを確認している。

(2) 河川流量の再現結果

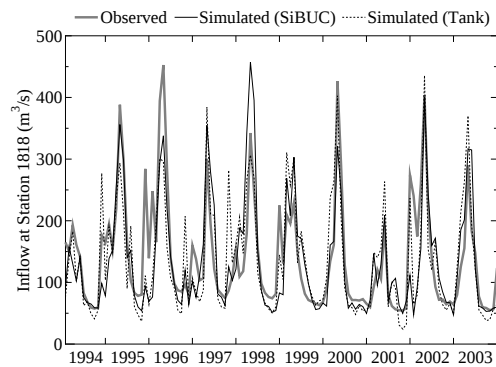
バイアス補正を行ったダウンスケーリングデータを用いて SiBUC およびタンクモデルを駆動し、河川流量を計算した結果を図-7および図-8に示す。また、それぞれの計算結果と観測値との差を求めて図-8の下段に示した。なお、モデルのパラメータは、1994-2003年の全期間を対象として観測値と計算値が合致するように調整することとし、水文モデルの計算時間を考慮して試行錯誤的に決定した。また、こうして同定したモデルに、補正なしのダウンスケーリングデータを入力した計算結果も示した。これを見ると、補正なしのデータを用いた計算結果は、全ての月において過大推定となっていることが分かる。一方、バイアス補正を行ったデータによる計算結果は、いずれのモデルを用いても良好な再現性である。また、5月を除けば、2つの水文モデルの計算結果は、ほとんど同じであることが注目される。

以上のことから、力学的ダウンスケーリングデータのバイアスの特徴を抽出して、気候モデルのパラメータを調整することでバイアスを取り除くことは極めて困難であり、ダウンスケーリングデータを温暖化影響評価に使用するためには、現時点では、統計的なバイアス補正が必要であると言える。

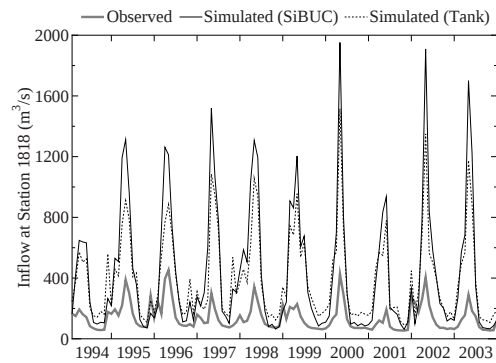
5. 将来期間における結果と考察

(1) 気温・降水量の比較結果

10年平均の月平均気温の現在、将来（MRI）、将来（CCSR）を比較した結果を図-9に示す。なお、将来期間に関しては、現在期間で定めたバイアス補正と同じ



(a) バイアス補正あり



(b) バイアス補正なし

図-7 月流量の再現結果（地点：1818）

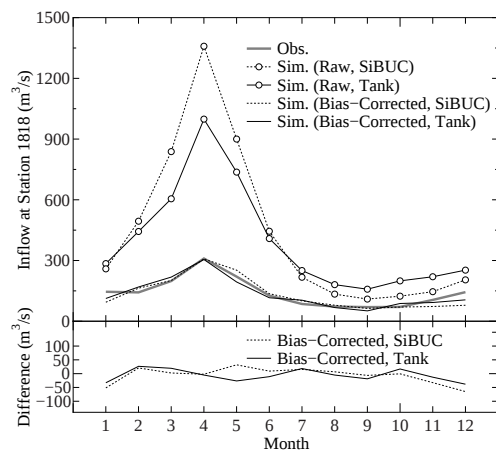


図-8 10年平均の月流量の再現結果（地点：1818）

手法を適用したデータのみを示す。これを見ると、特定の月もしくは季節における気温が上昇することは認められず、ほぼ年間一様に上昇する結果となっていることが分かる。なお、年平均気温で見た場合、MRIでは+2.0、CCSRでは+2.7となっており、GCMsによる将来予測結果には幅があることが分かる。

10年平均の月降水量の現在、将来（MRI）、将来（CCSR）を比較した結果を図-10に示す。これを見ると、MRIでは2,8月の降水量が僅かに増加し、その他の月の降水量は減少している。一方、CCSRでは、7月の降水量が増加し、その他の月の降水量は減少する結果となっている。さらに、年降水量の変化で見ると、MRIでは-157mm、CCSRでは-182mmとなっており、GCMsによる将来予測結果には大きな違いがあることが分かる。

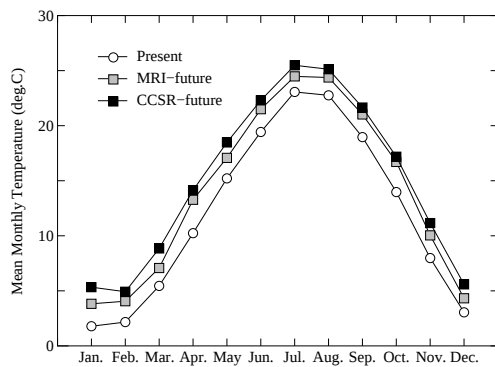


図-9 流域平均の月平均気温の比較結果

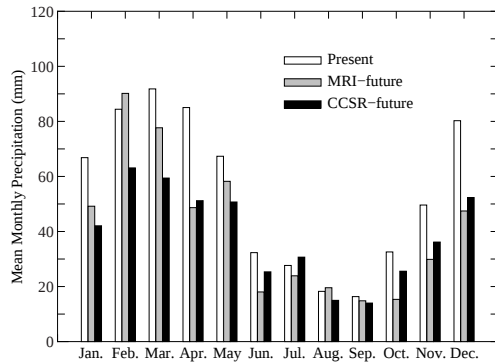


図-10 流域平均月降水量の比較結果

(2) 積雪・河川流量の比較結果

10年平均で表した流域総合計の積雪相当水量の比較結果を図-11に示す。また、2つのGCMsを用いて、同一の水文モデルを駆動した結果の差（絶対値）を求め、タンクモデルとSiBUCの結果を平均した値をGCMsに起因する不確実性として、図-11の下段に示した。さらに、2つの水文モデルを同一のGCMで駆動した結果の差（絶対値）を求め、MRIとCCSRの結果を平均した値を水文モデルに起因する不確実性として、図-11の下段に示した。これを見ると、気温上昇が大きかったCCSRを用いた予測結果の方が、いずれのモデルを用いても積雪量の減少が大きい。また、SiBUCによる計算値とDegree day法による計算値にさほど違いはなく、GCMsが積雪量の違いに及ぼす影響の方が常に大きいことが分かる。

10年平均で表した河川流量の比較結果を図-12に示す。また、2つのGCMsを用いて、同一の水文モデルを駆動した結果の差（絶対値）を求め、タンクモデルとSiBUCの結果を平均した値をGCMsに起因する不確実性として、図-12の下段に示した。さらに、2つの水文モデルを同一のGCMで駆動した結果の差（絶対値）を求め、MRIとCCSRの結果を平均した値を水文モデルに起因する不確実性として、図-12の下段に示した。これを見ると、積雪融雪期である2～5月における河川流量は、GCMsがもたらす不確実性の方が水文モデルのそれより大きい。一方、渇水期である6～10月における河川流量は、水文モデルがもたらす不確実性の方がGCMsがもたらすそれより大きいことが分かる。すなわち、水文モデルはGCMsと同程度の不確実性を引き起こす可能性があることが分かる。

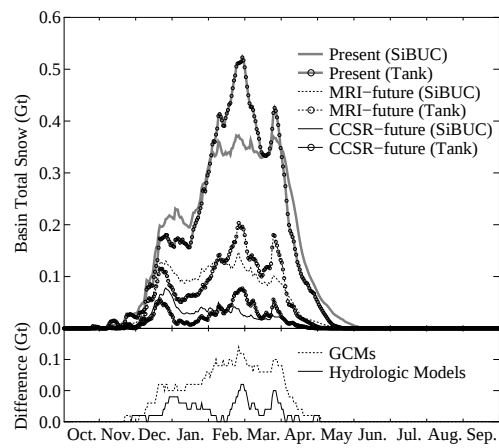


図-11 積雪相当水量の比較結果（流域総合計）

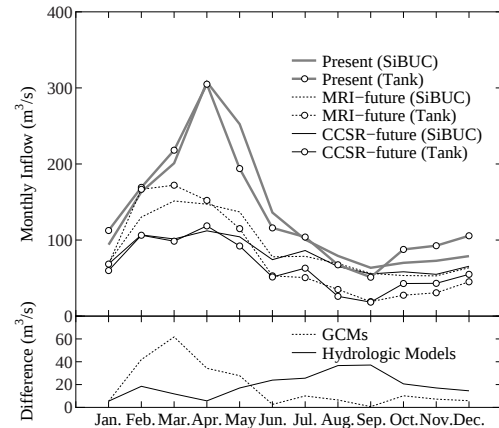


図-12 10年平均の河川流量の比較結果（地点：1818）

(3) 考察

GCMsによって気温、降水量の将来予測結果には大きな違いがあり（図-9および図-10）、多くの場合、水文モデルの不確実性より大きいことから、影響評価には複数のGCMsを利用する必要があると言える。一方、積雪融雪モデルに起因する不確実性は、GCMsのそれと比較して非常に小さい（図-11）。すなわち、十分に確立された積雪融雪モデルであれば、一つのモデルのシミュレーション結果でもある程度信頼できることを示している。

水文モデルに同一の将来気象データを与えた場合、将来期間の渇水期におけるシミュレーション結果は、水文モデルによって大きく異なっていた（図-12）。ここで、SiBUCでは、光合成有効放射（PAR）および土壌水分ポテンシャルによる気孔機能を制御する構造を有しているのに対して、タンクモデルでは、水収支がバランスするように、ペンマン式によって推定した日蒸発散位に係数を乗じることで実蒸発散量を推定している。そのため、こうした水文モデルの構造の違いが、シミュレーション結果に大きな差異をもたらしたと考えられる。

ここで、将来期間における降水量（気温）は、現在期間のそれと比較すると極めて少なく（高く）、現在期間から見れば、かつて経験したことのない外力であった。この様な未経験の外力が与えられた場合に、実際の流域がどの様に応答するのかを検証する術はないの

で、どちらの水文モデルが正しいのかを判断することはできない。しかしながら、少なくとも既往最大の洪水や渇水に対する水文モデルの再現性を十分に検討し、極端な水文事象に適応できる水文モデルを同定すれば、少しでも予測結果の不確実性を減少させることができると考えられる。また、GCMsのように、複数の水文モデルによるシミュレーション結果を利用して予測の幅を示すことも選択肢の一つとして推奨されよう。

6. まとめ

本研究では、トルコ・セイハン川流域を対象として、2つのGCMs(MRI-CGCM2、CCSR/NIES/FRCGC-MIROC)を力学的にダウンスケーリングしたデータを用いて2つの水文モデル(SiBUC、タンクモデル)を駆動し、GCMs、ダウンスケーリング手法、水文モデルが温暖化の影響予測結果にもたらす不確実性について検討した。さらに、比較結果に基づいて、これら不確実性を減少させるための方法についても検討した。得られた結果をまとめると次のようである。

1) GCMsの将来予測には大きな不確実性があり、多くの場合、水文モデルの不確実性より大きいことから、複数のGCMsを利用して予測の幅を示す必要がある。

2) 力学的ダウンスケーリングデータのバイアスの特徴を抽出して、気候モデルのパラメータを調整することでバイアスを取り除くことは極めて困難であり、データを温暖化影響評価に使用するためには、統計的なバイアス補正が必要である。

3) 積雪融雪モデルの不確実性は、GCMsのそれと比較すると小さいことから、確立された積雪融雪モデルであれば、一つのモデルのシミュレーションでもある程度信頼できる。

4) 水文モデルは、GCMsと同程度の不確実性を引き起こす可能性がある。これに対処するには、既往最大の洪水・渇水に対する水文モデルの再現性を十分に検討する、もしくは、複数の水文モデルを利用して予測の幅を示すことが推奨される。

謝辞：本研究は、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」の補助を受けた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金No.16380164、No.18-11748、No.19208022の補助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Zierl, B. and Bugmann, H.: Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments, *Water Resources Research*, Vol.41, W02028, doi:10.1029/2004WR003447, 2005
- 2) Maurer, E. P.: Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios, *Climatic Change*, Vol.82, pp.309-325, doi:10.1007/s10584-006-9180-9, 2007
- 3) 藤原洋一・小尻利治：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、*水工学論文集*、Vol.51、pp.427-432、2007
- 4) Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J. and Wilks, D. S.: Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods, *Water Resources Research*, Vol.34 (11), pp.2995-3008, 1998
- 5) Prudhomme, C., Reynard, N. and Crooks, S.: Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?, *Hydrological Processes*, Vol.16, pp.1137-1150, 2002
- 6) Wilby, R. L. and Harris, I.: A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK, *Water Resources Research*, Vol.42, W02419, doi:10.1029/2005WR004065, 2006
- 7) Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A.: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model, *Journal of Hydrology*, Vol.333, pp.144-154, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023, 2007
- 8) Kimura, F., Kitoh, A., Sumi, A., Asanuma, J. and Yatagai, A.: Downscaling of the global warming projections to Turkey, *The Final Report of ICCAP (Impact of Climate Changes on Agricultural Production System)*, Research Institute for Humanity and Nature, pp.21-32, 2007
- 9) Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Sugi, M., Kitamura, Y., Hosaka, M., Shibata, K., Maeda, S. and Uchiyama, T.: The new Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2): model climate and variability, *Papers in Meteorology and Geophysics*, Vol.51, pp.47-88, 2001
- 10) K-1 Model Developers: K-1 Coupled Model (MIROC) Description, K-1 Technical Report 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, 2004
- 11) Tanaka, K., Fujihara, Y. and Kojiri T.: Bias correction of the meteorological variables from RCM for hydrological application, *The Advance Report of ICCAP (Impact of Climate Changes on Agricultural Production System)*, Research Institute for Humanity and Nature, pp.43-46, 2006
- 12) Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R.: A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models, *Journal of Climate*, Vol.16, pp.1261-1282, 2003
- 13) Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A.: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.43, pp.505-531, 1986
- 14) Tanaka, K. and Ikebuchi, S.: Simple biosphere model including urban canopy (SiBUC) for regional or basin-scale land surface processes, *Proceedings of International Symposium on GEWEX Asian Monsoon Experiment*, pp.59-62, 1994
- 15) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、1972
- 16) 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*、No.41B-2、pp.119-134、1998

(2007. 9. 30 受付)