

<原著論文>

領域気候モデルとバイアス補正手法に起因する不確実性が 早明浦ダム貯水量将来変化の推定に与える影響

井芹 慶彦*, 藤村 和正**, 村上 雅博***, 鼎 信次郎*

Estimation of future change of water storage in Sameura reservoir with considering uncertainties
stemming from regional climate models and bias correction methods

Yoshihiko ISERI, Kazumasa FUJIMURA, Masahiro MURAKAMI and
Shinjiro KANAE

*Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku,
Tokyo 152-8550, Japan

**Department of Interdisciplinary Science and Engineering, Meisei University, 2-1-1 Hodokubo, Hino,
Tokyo 191-8506, Japan

***School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosayamada-cho,
Kami-gun, Kochi 782-8502, Japan

Abstract

Future change of water cycle could cause serious impacts to human society. Outputs from climate models are often used to make future climate scenarios, which are used as input for impact assessment model. In addition, many impact studies carry out bias correction of climate model outputs so that input for impact model is quantitatively consistent with observation. This study employs three bias correction methods against daily precipitation outputs from three regional climate models, in order to evaluate uncertainties of future scenarios stemming from choice of regional climate models and bias correction methods. The result indicated precipitation scenario's uncertainty from regional climate models and bias correction methods is higher in heavy rainfall season. In addition, we developed impact model for Sameura river basin, and utilized those precipitation scenarios as input for our impact model. The result suggested water storage in Sameura reservoir during non-irrigation season might be higher in the future period of 2091-2100. It should be noted that there are some limitations in simulation design of this study (i.e. limited number of Global Climate models, bias correction methods, etc), and thus, further improvement of simulation conditions would be necessary for more reliable estimations.

Key words: Sameura river basin, regional climate model, bias correction, precipitation

1. はじめに

気候変動に伴って起こりうる水循環の変化が、将来の安定した水資源確保や水災害に与える影響は、社会にとっての重要な関心事項の一つである。将来の水循環変化が与えうる負の影響を、有効かつ効率的に回避または軽減するためには、将来の水循環変化が可能な限り確からしく推定されることが望まれる。気候変動

*東京工業大学大学院理工学研究科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 W8-4）

**明星大学理工学部総合理工学科（〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1）

***高知工科大学環境理工学群（〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185）

が水循環変化に与える影響に関する研究は、特に近年様々に行われているが^{1),2),3),4)}それら影響評価研究の多くでは、まず将来の気候シナリオが作成され、その気候シナリオが影響評価モデルへと入力される。そして、影響評価モデルから得られた出力を解析することで一連の影響評価が行われる。将来の気候シナリオが作成される際には、GCM (Global Climate Model)やRCM (Regional Climate Model)といった気候モデルの出力がしばしば用いられる。しかし、各GCMやRCMによって計算格子以下の現象の扱いや解像度が異なる事等によって、将来気候の予測値は個々のGCMやRCMに依存して異なり得る。そのため将来気候予測を行う際には、気候モデルの選択に伴う将来予測の不確実性を考慮することは重要である。

その一方で、気候モデル出力にはバイアスが含まれている^{5),6),7)}と同時に、多くの場合は影響評価研究に用いるには空間あるいは時間解像度が十分ではない。従って、気候モデル出力を用いて将来シナリオを作成する際には、気候モデル出力に対してダウンスケーリング（空間または時間解像度の高解像度化）やバイアス補正が行われる。なお、気候シナリオの作成方法や各方法の特徴については、飯泉(2010)⁸⁾に詳しい。

気候モデル出力のダウンスケーリング方法は、大別すると力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリングに分けられる。Fowler (2007)⁹⁾では、統計的ダウンスケーリングの方法を、(i)回帰モデル (Regression models), (ii)天気図型 (Weather typing schemes), (iii)ウェザージェネレーター (Weather Generators)の三つに分類している。このようなダウンスケーリング手法が将来シナリオの作成に用いられる場合、対象とする変数が観測値に合うようにダウンスケーリングされるので、結果として気候モデル出力と観測値との誤差の補正も、ダウンスケーリングと同時にされることとなる。

一方、空間または時間解像度の高解像度化を主たる目的とするのではなく、気候モデル出力や、空間内挿された気候モデル出力の確率分布・基本統計量が、観測値に近づくようにモデル出力を補正することを主たる目的として、モデル出力に対して統計処理を行う研究も見られる^{5),9)}。本研究ではこの方法を統計的バイアス補正手法と呼ぶ。統計的バイアス補正手法の単純な例としては例えば、モデル出力値と観測値の平均値の差を計算し、その差をモデル出力に加えることでモデル出力の平均値が観測値と一致するように補正するという方法がある。これまでに種々のバイアス補正手法が提案されており^{5),6),9),10)}、バイアス補正手法の選択も将来気候シナリオを作成する上での不確実性の一つとなり得る。

そこで本研究では将来気候シナリオの作成に際して、RCM及びバイアス補正手法の選択に起因する不確実性を考慮する。そして、それらの選択による不確実性を考慮した上で、将来の水循環変化が四国・早明浦ダムの貯水量に与える影響を評価する。四国地方は、これまでに渇水や大雨が地域社会に強い影響を度々与えてきた地域の一つであり、同地方を対象として水循環の将来変化がダム貯水量に与える影響を評価することは重要である。早明浦ダムは四国最大規模のダムであるが、村上(2008)¹¹⁾は、早明浦ダムの上流域の降水量の長期傾向から、近年は早明浦ダム上流域の年降水量の変動幅が大きくなっていることを指摘している。また、藤部ら(2008)¹²⁾は、早明浦ダム流域の降水量の長期傾向と早明浦ダムの渇水発生の関係を統計的に調べ、早明浦ダム流域の降水量と早明浦ダム流域の渇水発生には強い関係があることを示している。このように、早明浦ダムの貯水量は気候変化の影響を受けやすいと考えられるため、将来の気候変化が早明浦ダムの貯水量に与え得る影響を分析することは重要である。そのため本研究では、早明浦ダム流域を対象として、RCM及びバイアス補正手法による不確実性が、早明浦ダム貯水量の将来変化の推定に与える影響を調べた。

本論文の構成は以下である。1章では本研究の背景を述べた。2章では早明浦ダム流域の水文観測データ及びRCM出力について述べると共に、RCM出力のバイアス補正手法を述べる。また、気候シナリオから早明浦ダム流域流出量を求めるための流出モデル、早明浦ダムからの放流量とダム貯水量を計算する早明浦ダム操作モデル、の各影響評価モデルについても2章で説明する。3章では気候シナリオとモデルの検証を行い、4章では、RCMとバイアス補正手法の不確実性を考慮した気候シナリオを用いて、早明浦ダム貯水量の将来推定を行った結果を示す。5章では本研究のまとめと今後の課題を述べる。

2. 用いたデータとモデル

早明浦ダム貯水量の将来変化の解析手順は以下の通りである(**Fig. 1**)。まず、3つのRCMからの降水量出力に対して3通りのバイアス補正手法を適用し、バイアス補正を行わない場合も含めて計12通りの現在及び将来気候シナリオを作成した。次に、12通りの将来気候シナリオを流出モデルに入力し、各気候シナリオに

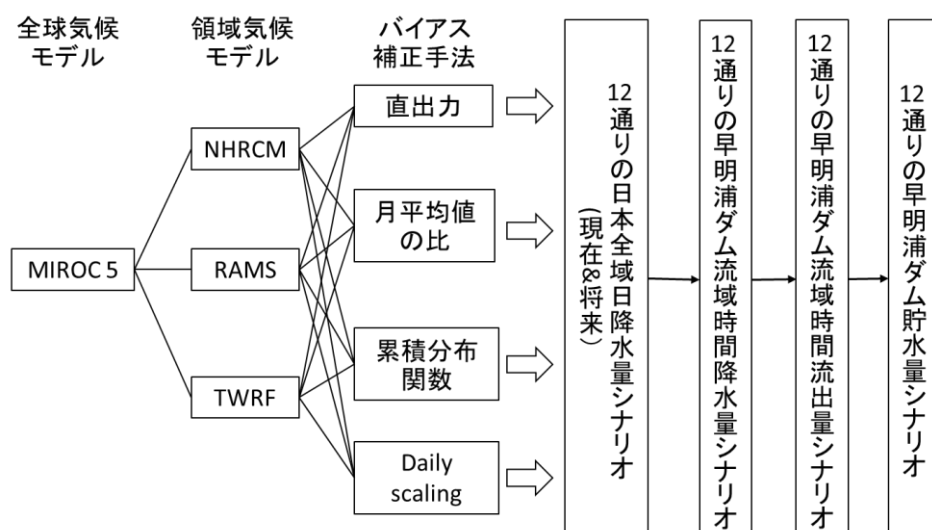


Fig. 1 Flame work of climate change impact assessment at Sameura river basin with considering uncertainties of regional climate models and bias correction methods.

対応する早明浦ダム流域の流出量シナリオを求めた。更に、得られた流出量シナリオをそれぞれ早明浦ダム操作モデルに入力することで、早明浦ダム貯水量の将来変化を推定した。また、推定したダム貯水量を、かんがい期と非かんがい期に分け、各期間における貯水量の将来傾向を分析した。

2.1 早明浦ダム流域水文データ

早明浦ダムの観測データとしては、早明浦ダムの貯水位[m]，流入量[m³/s]，放流量[m³/s]を用いた。早明浦ダム流域の降水量データとしては、早明浦ダム流域内に位置する7観測地点(寺川，長沢，桑瀬，小北川，黒丸，大北，早明浦地点)の降水量データを用いた。上記のダムデータ及び降水量データは全て1時間毎のデータであり，独立行政法人水資源機構より提供を受けたものである。本研究ではこれらのデータについて，1991年-2000年の10年間分のデータを解析に用いた。

2.2 領域気候モデル(RCM)出力

本研究では，3つのRCMの日降水量出力に対して，それぞれ3通りのバイアス補正手法を適用することで，早明浦ダム流域の降水量シナリオ（気候シナリオ）を作成した。

3つの領域気候モデルは，気象研究所 NHRCM (Non-Hydraustatic Regional Climate Model)，防災科学技術研究所 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)，筑波大学 WRF (Weather Research & Forecasting model)を対象とした。これら三つの領域気候モデルについて，各研究機関で計算されたデータの提供を受け，それらデータから日本域の日降水量出力を抽出して用いた。なお，これら RCM の空間解像度は20km×20kmであり，RCP4.5で計算された MIROC5 の出力を，領域気候モデルによるシミュレーションの境界値として用いている。

RCM 出力の日降水量をバイアス補正するための観測データとしては，0.05°×0.05°格子で E 123°E-146°E，24°N-46°N の領域を覆う日降水量データである Aphro-JP (Kamiguchi, 2010)¹³⁾を用いた。そこで，バイアス補正を行う際には，各 RCM の出力と Aphro-JP の格子点が一致するように，Aphro_JP の 0.05°×0.05°格子点上に対して，その格子点の周辺4点における RCM の日降水量出力を逆距離荷重法で空間内挿することで，0.05°×0.05°格子点上の日降水量データをまず作成した。そして，0.05°×0.05°上に空間内挿された RCM 日降水量データに対して，3通りのバイアス補正手法を各 RCM 毎に適用することで，降水量シナリオを作成した。従って，RCM 出力にバイアス補正を行わない場合を含めて，計12通りの日本全域の日降水量シナリオを作成した。なお日降水量シナリオは，現在期間(1991-2000年)及び将来期間(2091-2100年)に対してそれぞれ作成した。更に，これら12通りの日本全域日降水量シナリオを早明浦ダム流域内の7地点それぞれへと内挿すると共に，日

降水量を 24 等分する（日降水量を 24 で割る）ことで時間降水量とした。本研究では、この早明浦ダム 7 地点の時間降水量シナリオを、早明浦ダム流域の降水量シナリオ(気候シナリオ)として解析に用いた。なお、日降水量を 24 等分して時間降水量シナリオを作成した場合は、時間降水量の極大値を過少評価している可能性がある。従って、洪水の規模や頻度の将来変化の評価のような、日スケール以下の降水量の極大値が入力情報として重要になる解析を行う場合は、本研究で行った時間降水量シナリオの作成方法は改善される必要がある。しかし本研究は、将来の洪水評価を主たる目的としている訳ではなく、RCM とバイアス補正手法の選択に起因する影響評価の不確実性を調べることを主目的としている為、日降水量を 24 等分して時間降水量とする方法をとった。

2.3 RCM 日降水量出力のバイアス補正手法

本研究で 3 つのバイアス補正手法として、領域気候モデルと観測値の月平均降水量の比を用いる方法（月平均値の比）、気候モデル出力と観測値の累積分布関数（CDF; Cumulative Distribution Function）を用いてバイアス補正を行う方法⁹⁾（以降 CDF 手法とよぶ）、日降水量に対して各日毎に補正係数を定める方法（Daily scaling 手法^{4),10),14)}を用いた。

月平均降水量の比を用いた方法は、基準期間におけるモデル出力と観測値の各月毎の月平均降水量の比を計算する。その比を対応する月の日降水量にかけることで、モデル出力の月平均値が観測の月平均値と一致するように補正される。累積分布関数（CDF）を用いる方法では、モデル出力及び観測値それぞれについて、各月毎の日降水量のクオンタイル値を求める。そして、モデル出力の各クオンタイル値が対応する観測値のクオンタイル値に置き換えられることによって、モデル出力のバイアス補正が行われる。なお、CDF 手法では、CDF として経験分布関数を用いる場合と理論分布に当てはめる場合があるが、理論分布に当てはめる場合は分布のパラメータの推定方法などについて不確実性が生じる。そこで本研究では、CDF 手法については経験分布関数のクオンタイル値を用いる方法を採用している。本研究で用いた各日降水量毎に係数を定める方法（Daily scaling 手法）ではまず、基準期間における観測日降水量とモデル日降水量をそれぞれ降順に並べ、同順位の日データの比を求めることで、各日毎のスケーリング係数を定めた。そのスケーリング係数を、降順に並べたバイアス補正対象期間の対応する順位の日降水量にかけることで、補正された日降水量を得た。なお、RCM の出力日降水量のバイアス補正は、各手法とも各月別に各格子点毎に行っており、バイアス補正の基準期間は、RCM および Aphro-JP が共にデータの存在する 1981 年～2000 年としている。

2.4 降雨流出モデル

降雨流出モデルとしては、安藤ら¹⁵⁾が提案し藤村らによって積雪・融雪過程が組み込まれ、更に雨水浸透過程については Diskin-Nazimov モデルによる浸透量と有効降雨の分離が行われるように改良されたもの¹⁶⁾を用いた。なお、本降雨流出モデルの計算ステップは 1 時間単位であり、早明浦ダム流域（汗見川流域を除く 417km²）を対象領域としている。以下、この降雨流出モデル¹⁷⁾の概要を説明する。本モデルでは、降雨・降雪判別、直接流出量と雨水浸透量の計算は、早明浦ダム流域を 50m 格子に区切った各格子点上で行われる。そして、洪水流出量、不飽和帯水分量・地下水涵養量と地下水流出量は、集中型モデルによって計算される。

本モデルによる流出計算の流れは以下である。まず、流域内の 50m×50m の各格子点毎に、早明浦ダム流域内の 7 地点における時間降水量を基に、逆距離荷重法を用いて時間降水量の重み付き平均値を求める。更に、逆距離荷重法を用いて計算した時間降水量の重み付き平均値の標高補正を、早明浦ダム流域内の 7 地点の観測降水量から予め作成していた標高・降水量関係の式を利用して、各格子点毎に行う。このようにして計算された降水量に対して、各格子点上の気温を参照して雨雪判定を行う。積雪および融解水量の計算は、菅原による積雪融雪モデル¹⁸⁾を用いて行われる。降雨と判定された場合は、Diskin-Nazimov の雨水浸透モデル^{19),20)}によって、降雨が浸透量と直接流出量へと分離される。Diskin-Nazimov の雨水浸透モデルは、土壌表層の貯留量（土壌の湿り具合）と降雨強度との関係に応じて、逐次的に浸透量が算定される点に特徴がある。浸透量と直接流出量の内、直接流出量は貯留関数式の入力値として使われ、これにより洪水流出量の計算が行われる。一方、浸透量は、不飽和帯を表すタンクへの入力となる。なお、ハモン式を用いて算定した蒸発散量は、不飽和帯タンクの貯留量から差し引かれる。また、不飽和帯水分量が不飽和帯の最小容水量を上回る場合は、地下水涵養が行われる（地下水として貯留される）。貯留した地下水からの地下水流出は、低水流出のための貯留関数式から計算する。その結果、洪水流出量と地下水流出量の合計が、総流出量として算

定される。

2.5 ダム操作モデル

早明浦ダム管理者である独立行政法人水資源機構へのインタビューや同機構が発行しているパンフレット、吉野川水系水利用連絡協議会の公開資料を用いて、早明浦ダムのダム操作をモデル化した²¹⁾。構築したダム操作モデルは、1時間毎の流入量データに対してモデル出力として1時間毎のダム放流量を計算する。なお、早明浦ダムの流出量と放流量の差をダム貯留量の変化とみなして、観測の水位と貯留量変化から、水位と貯留量の関係を表す曲線（水位～貯留量曲線）をスプライン補間を用いて作成した。本ダム操作モデルでは、この水位～貯留量曲線を利用して、ダム貯留量をダム水位に変換している。なお、本節におけるダム操作モデルの説明の大部分は、著者らの論文²¹⁾からの引用である。

本研究で適用したダム操作モデルのアルゴリズムの概要は以下である。ダムモデルの操作は大別して、洪水時・通常時・渇水時に分かれるものとした。早明浦ダムでは、7月1日～10月10日は洪水期制限水位として329.5[m]、1月1日～6月30日および10月11日～12月31日は、常時満水位として331[m]が定められている。なお以降は便宜上、上記の洪水期制限水位・常時満水位ともに、洪水貯留準備水位とよぶ。本モデルでのダム操作は、洪水貯留準備水位を境にして大きく次のように分かれる。まず、早明浦ダム貯水量が洪水貯留準備水位を超えておりかつ、流入量が800[m³/s]を超えていると洪水時操作を適用する。洪水時操作は流入量をDin[m³/s]、放流量をDout[m³/s]として、

$$Dout = 800 + \frac{Din - 800}{4,900 - 800} \cdot 1,200 \quad (1)$$

で表わされるとした。以上のように洪水時放流量を定めることで、水位が洪水貯留準備水位を超えていて流入量が800[m³/s]を超えている時は、上式に従った上乘せ放流が行われることになる。水位は洪水貯留準備水位を超えているが流入量が800[m³/s]以下の場合は、流入量に100[m³/s]を上乘せした値を放流量とする。一方、洪水貯留準備水位以下で、かんがい期（5月21日～10月10日）の場合には貯水率が50%以上、非かんがい期（1月1日～5月20日、10月11日～12月31日）の場合は貯水率60%以上であれば、通常時操作を行い、貯水率が上記の値以下の場合は渇水時操作を行う。本モデルの通常時操作では、任意の時刻における徳島不特定用水と香川・徳島への新規用水の合計値が、その時刻における早明浦ダム～池田ダム間の吉野川自流量より大きい場合は、その差を池田ダムからの要請量として早明浦ダムから放流する。なお、任意の時刻における早明浦ダム～池田ダム間の自流量は、その時刻における早明浦ダム流入量に、12時間前の早明浦ダム放流量に0.3をかけたものを加えた値とした。なお、12時間前の放流量が全てそのまま12時間後の池田ダム流入量になる訳ではなく、早明浦ダムから放流された水は流下の過程である程度拡散すると考えられる。そこで、その拡散を表す方法として、上記の係数0.3をここでは導入している。渇水時操作では、貯水率の低下度に応じて4段階に徳島新規用水・香川新規用水の削減量を定め、それら削減量を勘案して池田ダム要請量を計算し、その値とその時刻での池田自流量との差を早明浦ダム放流量とした。なお、渇水時の新規用水については、過去に実施された自主節水も削減量に加えている。また、貯水率0%時には、発電容量の緊急放流3.75[m³/s]（徳島1.9[m³/s]、香川1.85[m³/s]）が行われるものとした。

3. 降水量シナリオおよびモデルの検証

3.1 降水量シナリオの検証

2.2で述べたバイアス補正手法を用いて作成した計9通りの日降水量シナリオに、バイアス補正なしの日降水量シナリオを合わせた計12通りの早明浦ダム降水量シナリオそれぞれについて、現在期間について7地点の降水量を算術平均し、各シナリオ毎に早明浦ダム流域平均降水量を計算した。更に、各シナリオ毎の流域平均降水量の月平均値を求め、折れ線グラフで示した（Fig.2）。なお、Fig.2において、早明浦ダム流域7地点の観測降水量を算術平均して求めた早明浦ダム流域降水量の月平均値は、棒グラフで示している。

Fig.2より、RCM出力をバイアス補正しない場合の降水量シナリオは、観測降水量と比べて過小評価であることが分かる。従って、バイアス補正を行わない降水量シナリオを用いて将来の流出量を推定した場合は、流出量が過小評価され、例えば渇水の頻度や規模の過大評価に繋がる可能性がある。また、バイアス補正し

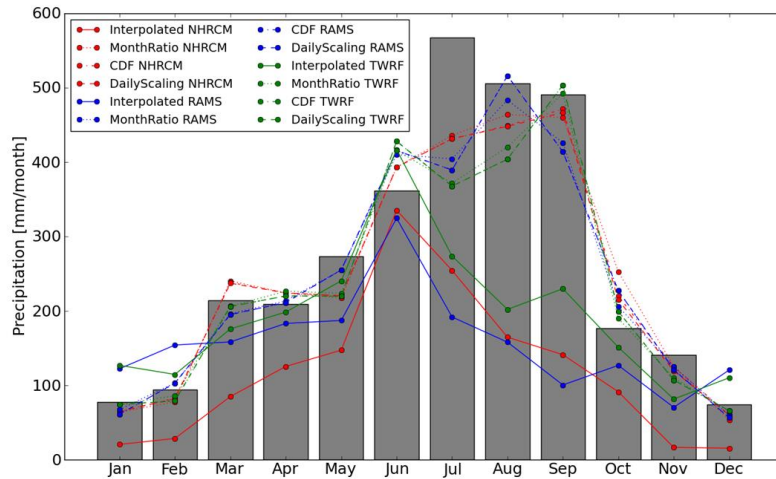


Fig.2 Monthly mean precipitation of Sameura river basin. The monthly mean is computed for current period. Each line color indicate regional climate model. Red: NHRCM, Blue: RAMS, Green: TWRF. Each line type show bias correction method. Solid line: RCM output without bias correction. Short dashed line: Monthly ratio. Dashed line: CDF. Dotted line: Daily scaling. Gray bar is observation.

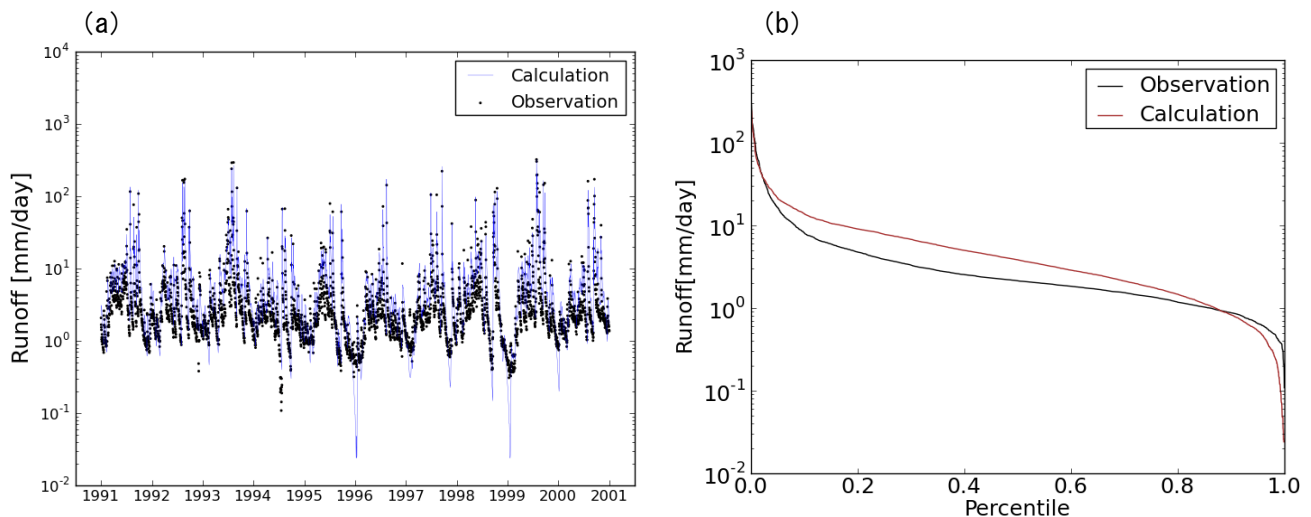


Fig. 3 (a) Time series of daily runoff to Sameura reservoir for observation (dot) and calculation (blue line). (b) Hourly discharge of observation (black) and calculation (red). The discharge is arranged from the largest to the smallest.

ない場合の降水量シナリオは、多雨期である7, 8, 9月の降水量が観測値と比べて特に少ないことが見て取れる。それ故、バイアス補正しない降水量シナリオを用いた場合は、洪水流量の過小評価になることも考えられる。一方、RCM出力にバイアス補正を行った場合の降水量シナリオは、観測降水量よりやや月降水量が小さい場合があるものの、バイアス補正を行わない場合と比べて観測降水量に大きく近づいていることが分かる。

3.2 降雨流出モデル・早明浦ダム操作モデルの検証

1991年-2000年における早明浦ダム7地点の観測の時間降水量を降雨流出モデルに入力し、早明浦ダム流域の流出量を算定した。算定した時間流出量から日流出量を求め、その値を、早明浦ダム時間流入量の観測値から求めた観測の日流出量と比較した (Fig.3(a),(b)). Fig.3(a)より、流出量計算値は流出量観測値のピーク値をよく捉えている。また、計算対象期間における流出量の計算値と観測値とでNash係数を求めた所0.86

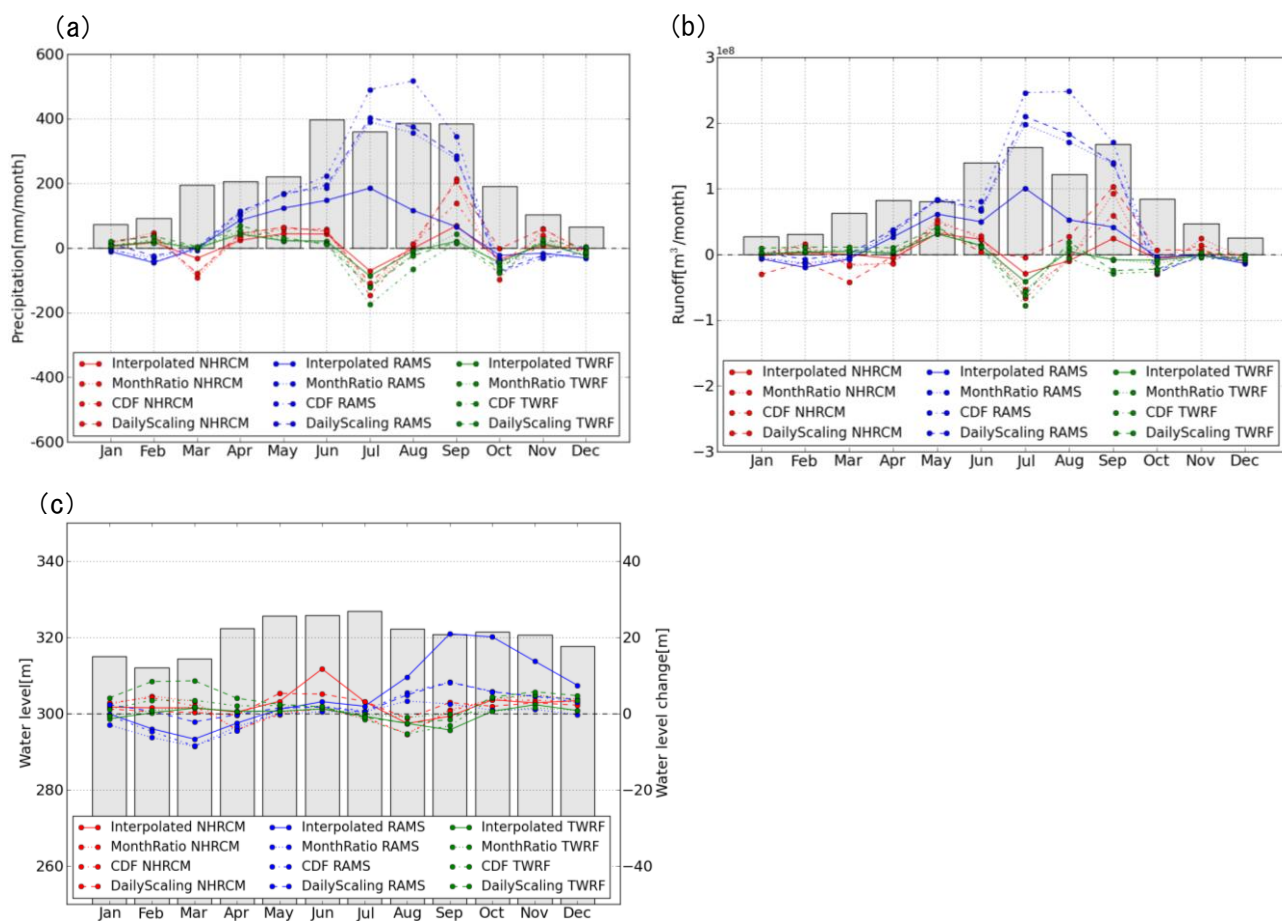


Fig. 4 Line plots on future change of (a) average monthly precipitation (b) average monthly total runoff (c) average monthly water level of Sameura reservoir. Future change is computed as difference between 2091-2100 and 1991-2000. The computation of future change is performed for each of 12 scenarios. The meaning of each line color and type is the same as **Fig.2**. Bar chart shows monthly mean of 12 scenarios for current period (1991-2000) simulation. Note that **Fig. 4(c)** uses two Y-axes: Right axis corresponds to future change (i.e. line plots) and left axis corresponds to monthly mean value of 12 scenarios (i.e. bar chart).

であり、このことから降雨流出モデルはピーク流量を良く再現していることが分かる。一方、**Fig.3(b)**より、低水時に着目すると、計算流出量は観測流出量と比べて過大評価している。これらの検証結果から、本研究で用いた降雨流出モデルは、洪水流出に関わるサブモデル（貯留関数式）は優れた再現性を有しているが、地下水涵養・地下水流出計算についてのサブモデルは改良の余地があることが示唆される。なお、藤村ら(2014)²⁰⁾は、低水流出の貯留関数式について感度分析を行い、同式における解析誤差を最も小さくする減水定数と指数の間には、指数関数が成り立つことを指摘している。今後は、これらの知見も踏まえ、降雨流出モデルのパラメータの検討と修正を行い、低水の再現性を向上させることが望まれる。

次に、1991年-2000年における観測の早明浦ダム時間流入量を早明浦ダム操作モデルに入力し、その結果得た早明浦ダム水位の計算値を、早明浦ダム水位の観測値と比較した。水位の計算値と観測値との相関係数は0.788であり、計算値は観測値をよく再現していることが分かる。また、ダム水位の計算値と観測値の時系列を比べた所、両者は良く似ており、計算水位は観測水位の変動を良く捉えていることが確認された。

4. 早明浦ダム流域の将来降水量、流出量、貯水量のシミュレーション

現在期間(1991-2000年)および将来期間(2091-2100年)それぞれについて、12通りの降水量シナリオを

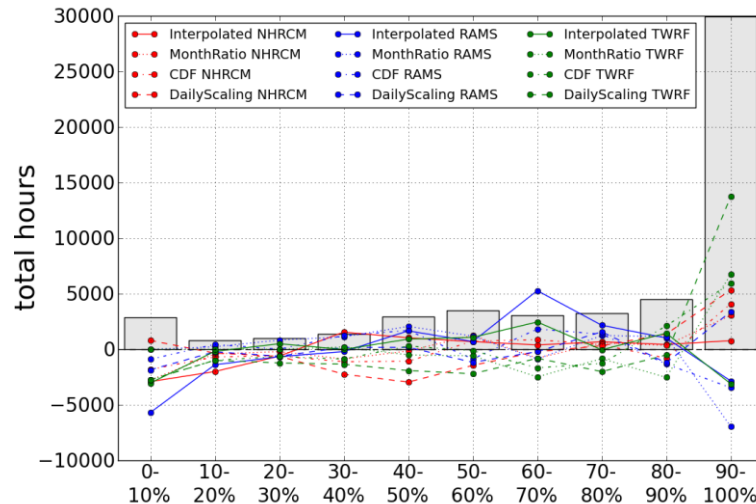


Fig. 5 Line plot on future change of total occurrence hours of water storage during non-irrigation season. The total occurrence hours of water storage is shown for every 10% from 0 to 100%. The meaning of each line color and type is the same as **Fig.2**. Bar chart shows total occurrence hours of each storage rate during current period in non-irrigation season. The average for each storage rate is computed as mean of 9 bias corrected scenarios (i.e. three scenarios without bias correction are excluded).

降雨流出モデルに入力し、各降水量シナリオに対応する早明浦ダム流入量シナリオを計算した。更に、流入量シナリオを早明浦ダム操作モデルに入力することで、早明浦ダムの水位(貯水量)シナリオを得た。そして、得られた水位シナリオについて、現在期間の特徴を調べた。3.1の降水量シナリオで検証したように、バイアス補正しない降水量シナリオは、降水量を観測と比べて過小評価しているため、結果として早明浦ダム水位も過小評価している傾向があった。しかし、バイアス補正した降水量シナリオについては、早明浦ダム水位を過小評価している傾向は特に見られなかった。次に、12通りの降水量シナリオ・流出量シナリオ・水位シナリオそれぞれについて、将来期間の月平均値と現在期間の月平均値の差を求めることで、それら各シナリオの将来変化を調べた(**Fig. 4(a),(b),(c)**)。なお **Fig.4** の棒グラフは、降水量シナリオ、流出量シナリオ、水位シナリオそれぞれについて、現在期間における各月毎の12シナリオの平均値を示している。**Fig.4(a),(b)**より降水量シナリオと流出量シナリオを見ると、RCMとしてNHRCMとTWRFを用いて作成したシナリオは比較的似た挙動をする傾向があり、RAMSから作成したシナリオは、それらと夏季において異なる挙動をしているのが見て取れる。また、夏季については上記のようにRCM間でシナリオの挙動が大きく異なりうるのに加えて、バイアス補正手法の違いもシナリオの挙動に大きく影響を与えている。即ち、RAMSから作成したシナリオの7,8,9月や、NHRCMから作成した9月のシナリオは、バイアス補正手法の違いによるシナリオの不確実性の幅が大きく現れている。これらより、降水量の大きい夏季については、RCMの違いによる不確実性が他の季節に比べて大きいと共に、バイアス補正手法の違いによる不確実性の幅も大きく現れる傾向にあると考えられる。

また、水位シナリオについて見ると、RAMSの水位シナリオは夏～秋にかけて他のRCMのシナリオに比べて高い水位を示している傾向がある。これは、RAMSの夏季における降水量・流出量が他のシナリオに比べて高いため、夏季に水位が高くなりその結果、秋頃まで高い水位が持続しているためと考えられる。

更に、1年をかんがい期(5月21日～10月10日)と非かんがい期(1月1日～5月20日、10月11日～12月31日)に分け、それぞれの時期における貯水率別の発生時間の将来変化を12通りの各シナリオ毎に調べた。その結果、かんがい期については貯水率50%以下の発生時間がわずかに増加する傾向がある様にも見えたものの、顕著な変化は見受けられなかった。一方非かんがい期については、多くのシナリオについて渇水頻度(低い貯水率)が減少する傾向にあった。そこで **Fig.5** には、非かんがい期における各貯水率の合計発生時間について、将来値と現在値との差を12の各シナリオ毎に示す。なお、合計発生時間は将来(2091-2100年)

及び現在(1991-2000 年)期間における、各 10 年間分の合計発生時間として計算している。**Fig.5** の棒グラフは、非かんがい期における各貯水率の 10 年平均の発生時間を、バイアス補正を行っていない 9 つのシナリオについて平均した結果を、現在期間に対して示している。**Fig.5** より、特に、非常に低い貯水率が将来は顕著に減少する傾向が見られた。また、非かんがい期における 0-10%の非常に低い貯水率は、ほとんど発生しなくなるシナリオもあることが推察される。また、RAMS のバイアス補正なしのシナリオでは、将来は貯水率 0-10%の発生時間が大幅に減少しているが、これは以下の理由によると考えられる。RCM 出力をバイアス補正しないシナリオは降水量が過小評価な為、貯水率 0-10%の発生時間がバイアス補正ありのシナリオと比べて総じて高い傾向にある。そして、**Fig.4(a),(b),(c)**に見られる様に、RAMS のシナリオでは将来期間において夏季～初秋の降水量が大きく増加し、その結果、非かんがい期を含む秋頃の貯水位が高くなっている。その為、RAMS のバイアス補正なしのシナリオでは、貯水率 0-10%の発生頻度が将来は大きく減少する結果となったと考えられる。なお、本研究でのシミュレーションでは、将来の気温変化を考慮していない為、将来の気温変化を考慮すると、貯水率が今回のシミュレーションと比べて下がる可能性がある点や、本研究は平均の変化に着目した分析を行っており分散（変動）の将来変化は分析対象としていない点は注意する必要がある。

5. おわりに

本研究では気候変動が早明浦ダムの貯水量に与える影響に着目し、降雨流出モデルおよびダム操作モデルからなる早明浦ダム影響評価モデルを構築し、貯水量の将来変化を推定した。また、3 通りのバイアス補正で補正された 3 つの領域気候モデルの降水量出力を将来気候として用いることで、領域気候モデルの選択とバイアス補正手法の選択が貯水量の将来変化推定の不確実性に与える影響を調べた。その結果、降水量の大きい夏季において、領域気候モデルとバイアス補正手法の選択に伴う不確実性が大きくなることが示唆された。また本研究で作成した将来シナリオの多くでは、非かんがい期の貯水率は現在と比べて高くなる傾向を示した。ただし本研究は、領域気候モデルとバイアス補正手法の選択による不確実性の評価と、流出モデル及びダム操作モデルからなる早明浦ダム影響評価モデルの構築を主たる目的としたため、影響評価を主たる目的とする研究を行う際には、今後更に改良すべき点が幾つか挙げられる。それら改良すべき点としてはまず、本研究は一つの GCM(MIROC5)と排出シナリオ(RCP4.5)での将来変化を分析したものであるため、今後は複数の GCM 出力や異なる温室効果ガス排出シナリオを用いる等して、より多様な将来シナリオを考慮する必要がある。また、低水流出量が過大評価であることに対する降雨流出モデルの改良、将来の気温変化を考慮した将来予測といった事も今後の改良事項として重要である。また、本研究では日降水量を 24 等分して時間降水量シナリオを作成しているが、この方法では時間降水量の極大値を過小評価している可能性がある。従って、日スケール以下の大雨による洪水流出量を過小評価している可能性がある為、今後は時間降水量シナリオの作成方法についても改善することが望まれる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり白羽陽蔵氏（東京工業大学大学院情報理工学研究科）から賜ったご協力に深謝致します。独立行政法人水資源機構には貴重なデータの提供を頂きました。感謝の意を表します。本研究は文部科学省気候変動適応研究推進プログラム「流域圏にダウンスケーリングした気候変動シナリオと高知県の適応策」、環境省地球環境研究総合推進費(S-10)の成果の一部です。ここに謝意を表します。

(原稿受付 2014年12月4日、原稿受理 2015年3月20日)

参考・引用文献

- 1) Shabalova MV, van Deursen WPA and Buishand TA. (2003): Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model, *Climate research*, 23, pp. 233-246.
- 2) Fowler HJ, Blenkinsop S, Tebaldi C. (2007): Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International journal of climatology*, 27, pp. 1547-1578.
- 3) Leander R and Buishand TA. (2007): Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows, *Journal of hydrology*, 332, pp. 487-496.

- 4) Kiem AS, Ishidaira H, Hapuarachchi HP, Zhou MC, Hirabayahis Y, Takeuchi K. (2008): Future hydroclimatology of the Mekong river basin simulated using the high-resolution Japan Meteorological Agency (JMA) AGCM, Hydrological processes, 22, pp. 1382-1394.
- 5) Piani C, Weedon GP, Best M, Gomes SM, Viterbo P, Hagemann S, Haerter JO. (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models, Journal of hydrology, 395, pp. 199-215.
- 6) Terink W, Hurkmans RTWL, Torfs PJJF and Uijlenhoet R. (2010): Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, Hydrology and earth system sciences, 14, pp. 687-703.
- 7) 洪尾欣弘, 鼎信次郎 (2010) : 大雨に着目した気候モデル日降水量出力のバイアス補正手法比較, 水工学論文集, Vol. 54, pp. 235-240
- 8) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸 (2010) : 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門, 農業気象, Vol. 66, No. 2, pp. 131-143
- 9) Ines AVM and Hansen JW. (2006): Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, Agricultural and forest meteorology, 138, pp. 44-53.
- 10) Li H, Sheffield J, Wood EF. (2010): Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental panel on climate change AR4 models using equidistant quantile matching, Journal of geophysical research, 115, D10101, doi:10.1029/2009JD012882
- 11) 村上雅博(2008) : 気候変動と水資源の脆弱性・吉野川水系早明浦ダムと高松市渇水問題, 水資源・環境研究Vol. 21, pp. 89-92.
- 12) 藤部文昭, 村上正隆, 越田智喜, 吉田一全 (2008) : 早明浦ダム周辺の降水量とダム貯水量の変動特性, 日本気象協会, Vol. 302, No. 406, pp. 21-25.
- 13) Kamiguchi L., Arakawa, O., Kitoh A., Yatagai A., Hamada A., and Yasutomi N. (2010): Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years, Hydrological Research Letters, Vol. 4, pp. 60-64.
- 14) Harrold T.I., Chiew F.H.S., Siriwardena L. (2005): A method for estimating climate change impacts on mean and extreme rainfall and runoff, MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, Zenger A, Argent RM (eds). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand: Melbourne; 497-504, CDROM (ISBN 0-9758400-2-9)
- 15) 安藤義久, 虫明功臣, 高橋裕 (1981) : 丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響, 第25回水理講演会論文集, pp. 197-208.
- 16) 藤村 和正, 日下 巧, 橋本 和雅 (2007): 積雪地域の4つのダム流域における1時間単位の長期流出解析, 水文・水資源学会2007年研究発表会要旨集 (名古屋大), pp.74-75.
- 17) 藤村和正, 井芹慶彦, 鼎信次郎, 村上雅博 (2014) : 水循環解析に基づく低水流出の貯留関数式における最適定数に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.70, No.4, I_361-I_366.
- 18) 菅原正巳(1972) : 流出解析法, 共立出版, pp.99-106.
- 19) Diskin, M. H. & Nazimov, N. (1995): Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process, J. Hydrology, 172, pp.313-330.
- 20) Diskin, M. H. & N. Nazimov, N. (1996): Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall, J. Hydrology, 178, pp.369-380.
- 21) 井芹慶彦・白羽陽藏・藤村和正・村上雅博・鼎信次郎 (2012) : 気候変動が早明浦ダムの渇水特性に与える影響の評価, 第20回地球環境シンポジウム講演集, p. 37-42.