

6. 気候変動が早明浦ダム of 渇水特性に与える影響の評価

井芹慶彦^{1*}, 白羽陽藏¹, 藤村和正², 村上雅博³, 鼎信次郎¹

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

²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)

³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)

* E-mail: iseri.y.aa@m.titech.ac.jp

早明浦ダムは四国における水供給と洪水調節に重要な役目を担っているが、将来における渇水リスクを低減するためには、気候変動が早明浦ダム貯水量に与える影響を定量的に評価し、それに応じて適切な適応策を立案する必要がある。そこで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、バイアス補正された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、早明浦ダムの将来の渇水特性の変化を分析した。本研究で構築した影響評価モデルを用いることで、ある程度将来予測の不確実性を考慮した上で、将来の早明浦ダムにおけるかんがい期・非かんがい期の渇水構造の変化の可能性を評価できた。

Key Words : Sameura reservoir, climate change, drought, evaluation

1. はじめに

地球温暖化と降雨変化の関係については、これまで様々な議論がなされている (IPCC, 2007¹⁾)。また、異常気象の発生は世界各地で報告されており (異常気象レポート, 2005²⁾)、これら異常気象の発生は防災や水資源などの面で社会に甚大な影響を及ぼしうる。従って地球温暖化にともなう異常気象の発生傾向を調べることは、防災計画や水資源計画を策定する上で重要である。また、地域防災や水運用計画に地球温暖化が及ぼしうる影響を具体的に取り込むためには、異常気象の発生が地域水資源に与える影響が定量的に評価されることが望まれる。

日本においてこれまでに異常気象の発生が地域社会に強い影響を度々与えてきた地域の一つとして、四国地方が挙げられる。四国地方は過去に度々渇水に悩まされてきたと同時に、台風や前線の発達に伴う豪雨災害にもさらされている。一方、日本全体で見した場合の年間降水量の変動幅が、近年大きくなっている傾向が指摘されており (日本の水資源, 2008³⁾)、実際、例えば1994年には列島規模での大渇水が発生している。従って、これら地球温暖化に

伴って引き起こされている可能性のある降水の変動傾向が、四国の水資源にどのような影響を与え得るかを評価することは社会的にも重要である。村上 (2008)⁴⁾は、四国最大規模のダムである早明浦ダムの上流域の降水量の長期傾向から、早明浦ダムでも近年は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)⁵⁾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、従って将来の気候変化によって早明浦ダムの利水・渇水特性がどのように変化しうるかを分析することは重要な課題である。

早明浦ダムの将来の渇水特性を調べるには、何らかの方法で早明浦ダム流域の将来気候を推定する必要がある。これまで種々の研究において、流域の将来気候を予測する有効な方法として、領域気候モデル出力の利用が行われている。領域気候モデル (または全球気候モデル) が出力する将来気候の予測値を用いることで、モデル内で仮定された温暖化ガス

排出シナリオの下で、物理法則に従って予測された将来気候をその流域の影響評価に用いることができる。現在の気候モデルの出力にはバイアスがあることが知られており、それ故、気候モデル出力に影響評価に用いる際には、そのバイアスを除去して利用することで、より影響評価に使いやすい将来予測データとすることができる。また、気候モデルではその計算格子や時間間隔では直接計算することが困難な現象をモデル内で表現するための手法が種々提案されており、それらの手法の違いは、将来予測の結果に幅が表れる一因となる。したがって、より様々な可能性を考慮した将来予測を行うためには、複数の気候モデル出力を利用することが望ましい。

以上を考慮して、本研究では早明浦ダムを対象流域として、将来気候の変化が早明浦ダムの渇水構造に与える影響を、3つの地域気候モデルの降水量出力を用いて評価した。また、気候モデルの出力にはバイアス補正手法を適用し、補正された将来気候予測値を用いて、早明浦ダム流域の将来の渇水構造を分析した。

2. 影響評価モデルの構築手順

本研究のフローチャートを図-1に示す。本研究ではまず、早明浦ダム流域の降水量シナリオの作成を行い、流域の降水量を早明浦ダム流入量に変換するための降雨流出モデルの性能検証、早明浦ダムのダム操作を模倣して必要に応じて放流を行い早明浦ダムの貯水位を計算するためのダム操作モデル、の各モデルの性能を検証した。

具体的にはまず、3つの地域気候モデルの降水量出力を基に、1991-2000年および2091-2100年の早明浦ダムにおける、バイアス補正された日降水量データをそれぞれ作成した。次に、早明浦ダム流域内の7地点における観測の時間降水量データを降雨流出モデルに入力し、降雨流出モデルで早明浦ダム流域の流出高を計算した。そして、流出高を流出量を早明浦ダムへの流入量に変換し、その値を観測のダム流入量データと比較することで、降雨流出モデルの性能を検証した。更に、観測のダム流入量データをダム操作モデルに入力し、ダムモデルを介して計算される早明浦ダム貯水位の時間変動を、観測の時間水位データと比較して、ダム操作モデルの性能を検証した。

以上の手順でバイアス補正された降水量データ、降雨流出モデル、ダム操作モデルの性能をそれぞれ

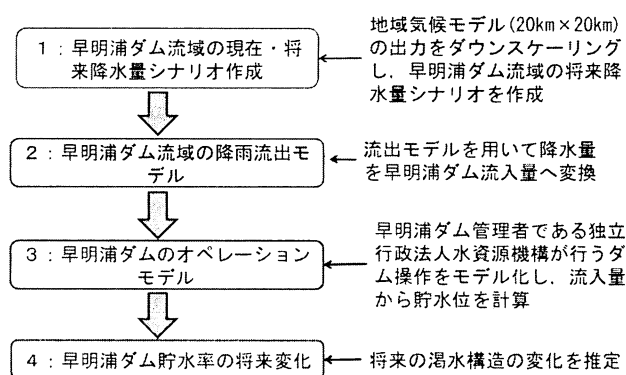


図-1 本研究で用いる早明浦ダム影響評価モデルの構成

検証した。その後、1991-2000年を現在期間として、同期間におけるバイアス補正された領域気候モデルの降水量出力を降雨流出モデルに入力し、流出モデルから出力された流出量をダムモデルに入力した。これにより、ダムモデル内で1991-2000期間における貯水率の時間変動が計算される。観測水位から求められる貯水率と、同期間におけるモデル計算貯水率の変動を比較することで、本研究で用いた一連の影響評価モデルが、早明浦ダムの貯水率変動を適切にシミュレーションし得るかを検証した。

以上の検証を行った後、同影響評価モデルに、2091-2100年におけるバイアス補正済みの降水量データを入力することで将来期間における早明浦ダムの貯水率変動を評価し、将来の渇水構造を分析した。

3. 用いたデータとモデル

本章では、影響評価モデルで用いたデータと、評価モデルを構成するサブモデル（降雨流出モデル・ダム操作モデル）について述べる。

(1) RCM出力降水量と観測降水量データ

早明浦ダム流域の将来降水量の予測値として用いる領域気候モデル(RCM: Regional Climate Model)の出力値として、気象研究所のNHRCM (Non-Hydrostatic Regional Climate Model)、防災科学技術研究所のRAMS (Regional Atmospheric Modeling System)、筑波大のWRF (Weather Research and Forecasting model)、の計3つの領域気候モデルの降水量出力を用いた。これら3つの各モデルは空間解像度20km×20kmで計算されており、時間解像度は1時間の時間解像度で提供されていたが、本研究では時間降水量を積算して日降水量としたものを解析に用いている。また、領域気候モデルの境界条件には

MIROC5の出力が用いられており、将来気候シナリオにはRCP4.5が用いられている。本研究では、これら3つのRCMの降水量出力の1991-2000年を現在期間、2091-2100年を将来期間としている。

上記の各RCMの日降水量をバイアス補正するための観測降水量データとして、地点雨量観測を基に作成された空間解像度 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ で日本全域を覆う日降水量データである、Aphro-JP (Kamiguchi, 2010)⁶⁾を用いた。上記の3つの各RCM出力日降水量に対し、Aphro-JPを観測値として、Daily scaling法 (Harrold et al, 2005⁷⁾; 洪尾ら, 2010⁸⁾)を用いてモデル出力日降水量のバイアス補正を行った。

(2) 早明浦ダム流域の地点観測雨量とダムデータ

本研究では、独立行政法人水資源機構から提供を受けた、早明浦ダム流域内の7観測地点（寺川、長沢、桑瀬、小北川、黒丸、大北、早明浦地点）の雨量データを、Aphro-JPの格子点上でバイアス補正したRCM出力降水量を上記の早明浦ダム流域7地点にダウンスケーリングした降水量データの検証に用いた。また、観測のダムデータとしては、同じく独立行政法人水資源機構より提供を受けた、早明浦ダムの貯水位[m]、流入量[m³/s]、放流量[m³/s]を用いた。上記の地点雨量データおよびダムデータは全て時間データであり、本研究で対象とした1991-2000年期間で利用可能である。

(3) 降雨流出モデル

降雨流出モデルとしては、安藤ら⁹⁾が提案し、藤村ら¹⁰⁾によって、積雪・融雪過程が組み込まれるとともに、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(藤村ら, 2008)¹¹⁾を用いた。なお本降雨流出モデルの計算ステップは時間単位である。

(4) 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、現行のダム操作をモデル化した。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。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、上式に従った上乗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]を上乗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分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。

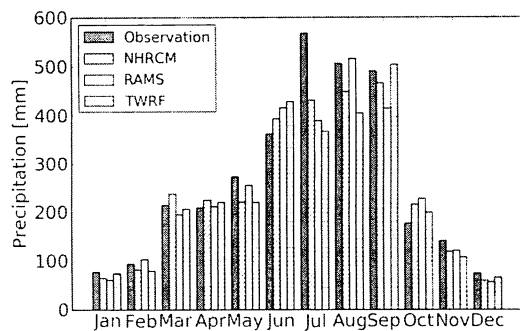


図-2 バイアス補正した 3 つの RCM 出力を早明浦ダム 7 地点にそれぞれ内挿した降水量と、7 つの各観測地点の観測雨量データの 1991-2000 年の月毎の平均降水量

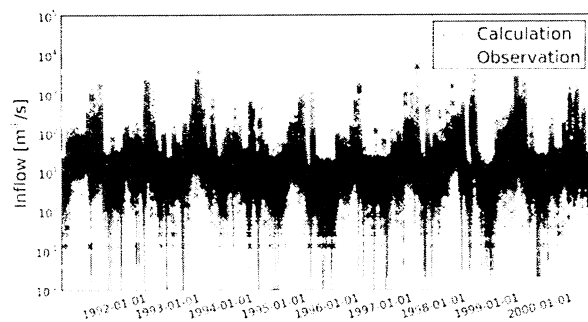


図-3 1991-2000 年における早明浦ダム流域内の 7 地点の観測時間降水量を降雨流出モデルに入力して計算した早明浦ダム流入量[m³/s]と、観測の早明浦ダム流入量[m³/s]時系列

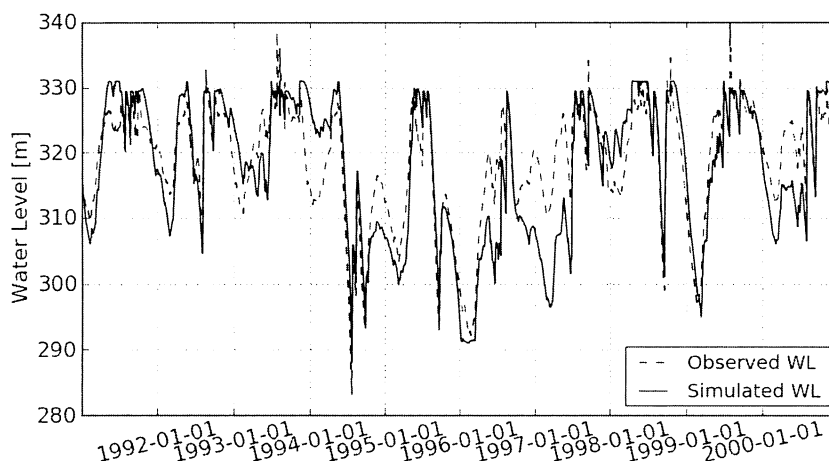


図-4 1991-2000 年における早明浦ダムの観測時間流入量[m³/s]をダム操作モデルに入力して計算した早明浦ダムの水位[m]と、観測の早明浦ダム水位[m]時系列

4. 降水量シナリオと影響評価モデルの性能評価

ここでは、バイアス補正したRCM日降水量データ、降雨流出モデル、ダム操作モデルの性能を検証する。まず、Aphro-JPの格子点上でDaily scaling法でバイアス補正した3つのRCMの日降水量データを、早明浦ダム流域内の7雨量観測地点(寺川、長沢、桑瀬、小北川、黒丸、大北、早明浦地点)に逆距離荷重法を用いて内挿した。内挿したバイアス補正降水量データと、7つの各観測地点の地点観測雨量データの1991-2000年の各月毎の平均降水量を図-2に示す。図-2より、RCM出力から作成した早明浦ダム流域7地点の雨量データは、観測と比べて7月の平均降水量はやや小さくなっているが、その他の月では観測の月平均降水量と大よそ近い値を示している。

次に、1991-2000年における早明浦ダム流域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高を求めた。こうして求めた流出高に早明浦ダムの流域面積を乗じることで早明浦ダムへの時間流入量を計算し、その値を観測の早明浦ダム時間流入量と比較した(図-3)。図-3から分かるように降雨流出モデルは、精度よく早明浦ダム流出量を算出できているといえる。

更に、1991-2000年における観測の早明浦ダム時間流入量[m³/s]をダム操作モデルに入力してダムモデルの出力放流量[m³/s]を計算し、それと同時にダムモデル内で計算されるダム貯水位を、観測の貯水位データと比較した(図-4)。図-4より、観測の貯水位との乖離が多少見られる場合もあるが、全般的には、観測貯水位の変動をダム操作モデルは追隨している。特に、1991-2000年期間の低貯水位に関しては、ダムモデル出力はおおよそ再現できているといえる。

5. 降水量シナリオを用いた早明浦ダムの渇水評価

図-5のヒストグラムは、1991-2000年における観測水位をから計算した同期間の時間単位の貯水率を基に、各貯水率の発生頻度をかんがい期・非かんがい期別に示している。図-5より、早明浦ダムではかんがい期だけではなく非かんがい期においても、低い貯水率が少なからず発生していることが分かる。

次に、1991-2000年におけるバイアス補正された3つのRCM日降水量をそれぞれ降雨流出モデルに入力し、更にダム操作モデルを介して貯水位時系列を求めた。求めた貯水位時系列を基に、1991-2000年

における3つの各降水量シナリオのかんがい期・非かんがい期における貯水率別の発生頻度を調べた所、本影響評価モデルは、貯水率が高い状態の発生頻度が観測と比べて高めである傾向があった。本研究では貯水率の発生回数の絶対値そのものよりも、用いた影響評価モデル内で現在期間と比べて将来期間に低い貯水率がどれ位多く発生するかを調べることに特に重点をおいているため、本研究ではその乖離は許容範囲内として以後の解析を行った。

次に、2091-2100年におけるバイアス補正された3つのRCM日降水量シナリオを降雨流出モデルにそれぞれ入力し、ダム操作モデルを介して2091-2100年における、かんがい期・非かんがい期の貯水率別

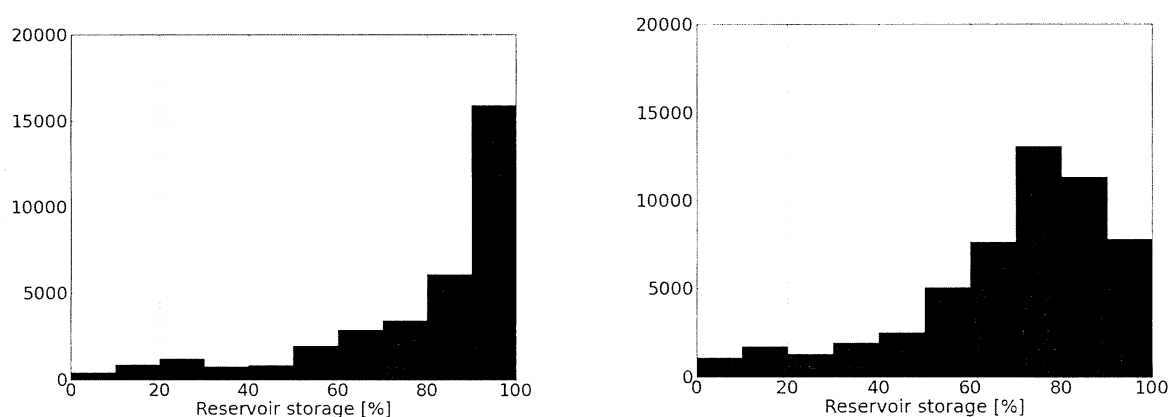


図-5 観測時間水位を基に計算した、1991-2000 年における早明浦ダム貯水率のかんがい期・非かんがい期別のヒストグラム

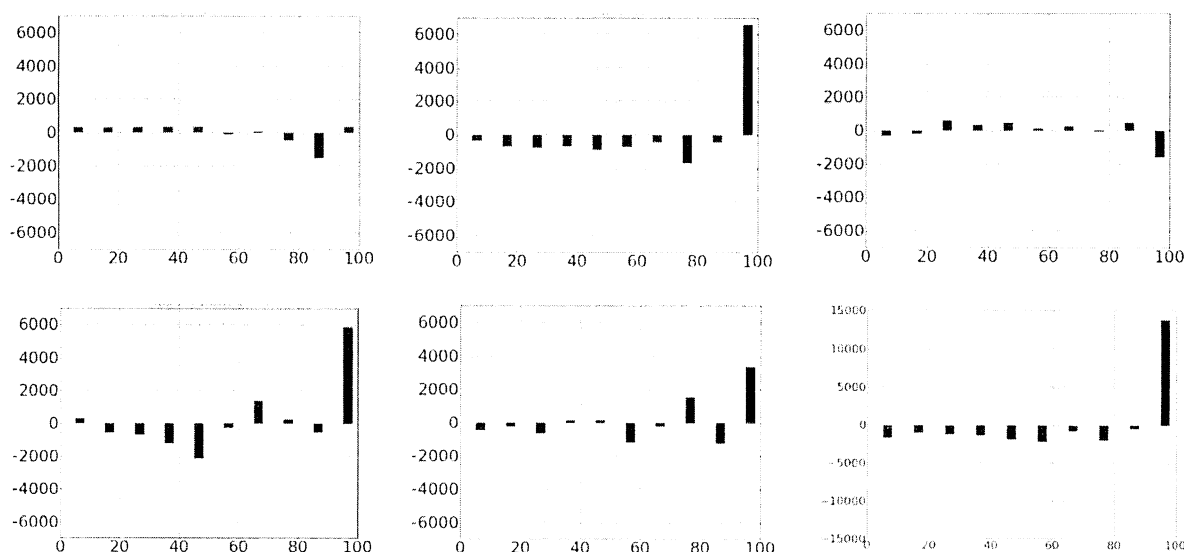


図-6 バイアス補正された 3 つの各 RCM の降水量を影響評価モデルに入力して計算した 2091-2100 年におけるかんがい期・非かんがい期別の各貯水率の 1991-2000 年と比べた場合の発生頻度変化。各図は左から NHRCM, RAMS, TWRF の結果であり、各列の上段はかんがい期・下段は非かんがい期における各貯水率の発生頻度変化を表す。

の発生頻度ヒストグラムを作成した(図-6)。図-6より、各降水量シナリオによって将来傾向にばらつきはあるが、かんがい期は2つのシナリオにおいて低い貯水率の発生頻度が上がる傾向にあり、一方、非かんがい期については今回用いたどのシナリオも、非常に低い貯水率の発生回数は基本的には現在と比べて減少傾向にある。

6. 結論

本研究では、3つの領域気候モデルから出力された降水量に対して、バイアス補正を行って早明浦ダム流域の将来降水量シナリオを作成し、降雨流出モデルとダム操作モデルを用いて早明浦ダムの渇水発生を評価する影響評価モデルを構築した。構築した影響評価モデルで早明浦ダム流域の将来の渇水発生構造を調べた所、かんがい期には低い貯水率の発生頻度が上昇する傾向を示す場合があるのに対し、非かんがい期は基本的に低い貯水率の発生回数が減少する傾向にあった。ただし、本研究で用いたダム操作モデルは大枠では観測の貯水位を再現できているが、本研究で適用した操作ルールでは、実際の貯水位変動との乖離がみられる場合もあるため、本結果およびダム操作モデルについては更なる改良の余地がある。また、本研究での将来シミュレーションは領域気候モデルの境界条件となるGCM出力としてMIROC5のみを用いており、将来シナリオはRCP4.5のみである。即ちここで得られた結果は、あくまで限られた条件での将来の渇水発生構造の変化を分析したものであるため、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などして、より多様な将来シナリオを考慮することで、早明浦ダム流域の将来の渇水構造をより多様な視点と可能性から分析できると考えられる。

謝辞：独立行政法人水資源機構には貴重なデータの提供を頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究は、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)の研究課題「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」の成果の一部である。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. [http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm], 2007.
- 2) 気象庁：異常気象レポート 2005 [http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/1.7.2.html]
- 3) 国土交通省 土地・水資源局水資源部：日本の水資源, 317pp., 2008.
- 4) 村上雅博：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, 2008.
- 5) 藤部文昭, 村上正隆, 越田智喜, 吉田一全：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, 2008
- 6) Kamiguchi L., Arakawa, O., Kitoh A., Yatagai A., Hamada A., and Yasutomi N.: 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, 2010.
- 7) Harrold T.I., Chiew F.H.S., Siriwardena L.: A method for estimating climate change impacts on mean and extreme rainfall and runoff, *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation*, Zerger A, Argent RM (eds). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand: Melbourne; 497-504, CDROM (ISBN 0-9758400-2-9), 2005.
- 8) 渋尾欣弘, 鼎信次郎：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, 2010.
- 9) 安藤義久, 虫明功臣, 高橋裕：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, 1981.
- 10) 藤村和正, 後藤吉裕：最上川上流域における GIS を活用した長期流出解析, 水文・水資源学会 2004 年研究発表会要旨集, pp. 162-163, 2004.
- 11) 藤村和正, 日下 巧, 橋本 和雅：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, 2007.