

木曽川水系統合流出解析モデルの高度化

佐藤嘉展・道広有理・鈴木靖

要 旨

将来の木曽川水系の流況をより正確に予測するため、CMIP3による複数の温室効果ガス排出シナリオと気候予測モデルの出力結果を分布型流出モデル(Hydro-BEAM)への入力としたマルチシナリオ・マルチモデル解析を実施した。さらに、人間活動の影響として貯水池操作や河道からの取水の影響も考慮してモデルを高度化し、河川流量の予測精度の向上を試みた。その結果、特に渇水時の河川流量の再現性が向上し、異常渇水時における主要ダム貯水量についても良好な再現性が得られることが確かめられた。

キーワード: CMIP3, マルチシナリオ, マルチモデル, 分布型流出モデル, 貯水池操作

1. はじめに

木曽川水系では、1959年9月の伊勢湾台風をはじめ、これまでに洪水や高潮に伴う甚大な被害が頻繁に発生している。一方、1994年8月には主要水源ダムの利水容量が枯渇するなど、深刻な渇水被害も起きており、治水と利水の両面からの総合的な河川管理が重要な課題となっている。さらに、気候モデルを用いた将来の流出解析の結果からも、木曽川水系における洪水規模の増加と渇水の深刻化が予測されている(佐藤ら, 2010)。

木曽川水系では、洪水調節、不特定供給、水道・工業・かんがい用水供給、発電などを目的とした多目的ダムが多数設置されており、河川の流水は高度に管理されている。このため、河川を流れる水量は自然状態とは大きく異なる挙動を示し、洪水時には、ダムによる洪水調節により、洪水のピークが低減され、渇水時には、利水補給や正常流量を維持するために維持流量の補給が行われる。したがって、温暖化に伴う将来の河川流量を、分布型流出モデルなどを用いて推定する際にも、流域内に設置されたダム群の運用操作の影響を考慮しなければ、気候変化に伴った河川流量の相対的な変化は把握できても、実際の流域内の任意の地点における将来の河川流量の変動を定量的に予測することはできない。そのため、現行の洪水期・非洪水期の設定、洪水調節容量の妥当性や、主要取水地点における利水の安全性や、(利水調整を行う必要のある)渇水の発生頻度予測、水源の多系統化、ダム群の統合管理(治水、利水、不

特定容量の総合運用)、既存ダムの維持管理、(堤体や堤防の嵩上げなどの)機能補強や導水路建設などの、河川管理における重要な温暖化適応策を検討するために必要な定量的な情報を提供することも難しい。そこで、本研究では、木曽川水系河川整備基本方針および河川整備計画で考慮されている主要ダム(丸山、牧尾、横山、岩屋、阿木川、味噌川、徳山)の運用操作と主要な水利用の実態をより厳密に考慮できるように、これまで木曽三川流域に適用してきた分布型流出解析モデルを高度化し、河川流況再現性の向上を試みた。

2. 解析方法

2.1 流出解析モデル

本研究では、Kojiri(2006)により考案された流域環境評価モデル(Hydro-BEAM: Hydrological River Basin Environment Assessment Model)をベースにした流出解析を実施した。このモデルは、セル集中型の分布型流出モデルのひとつで、対象流域を一定格子間隔のグリッドセル単位に分割し、グリッドセルごとに1本の河道とそれを挟む2つの斜面を仮定し、各河道を河道網に従って源流(上流端)から河口(最下流端)まで連続するように結合し、上流側から順次下流側に流出計算を実施していくことで、流域内の水移動を追跡するモデル構造となっている。モデル計算の水平面空間解像度は約1km(国土数値情報の3次地域メッシュ格子間隔に相当)であり、モデルへの入力となる地上気象観測データは、距離逆数加重平均(IDW)

法により1km格子間隔に内挿して用いた。流出計算の実行間隔は10分である。分布型流出解析に必要な流域のモデル化（流域界、落水線、河道網、勾配、土地利用区分の設定）には、標高データ（数値地図50m）と国土数値情報を利用した。表面流や地中流の追跡計算に必要なマニングの等価粗度や透水係数については、5つの土地利用形態（森林、草地、水田、都市、水域）ごとに設定した。Fig.1に示される木曾川水系の主要ダム（丸山、牧尾、岩屋、阿木川、味噌川、横山、徳山）の操作および河道からの取水水量については、実際のダム操作規則および取水実績データをもとにサブモデル化し、流出解析モデルに組み込んだ。

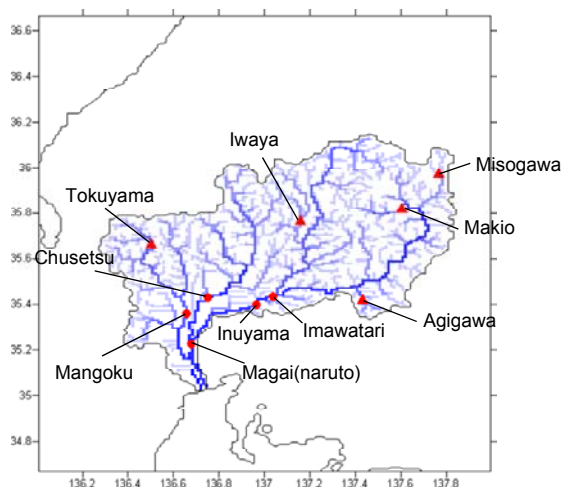


Fig. 1 Channel network, major dam and reference point in the Kiso River System.(▲:Dams; ●:Reference point)

2.2 データ

現在気候(1980~1999年)における流出解析モデルの再現性を検証するため、地表面熱収支モデルのSVAT(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer)モデル (Sato *et al.*, 2008) を用いて、地上気象観測データ（降水量、気温、風速、日射、大気圧、水蒸気圧、日照時間）から、流出解析モデルの入力データとなる地上到達降水量、融雪量、蒸発散量を算出した(Fig.2)。

将来気候(2080~2099年)の予測情報として、気候モデルによる予測の不確実性を低減させるため、第三次結合モデル相互比較プロジェクトCMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project phase 3) による複数の気候モデルの予測結果を用いた。将来の温室効果ガス排出シナリオとしては、IPCCのA2,A1B,B1シナリオがすべて揃っている15個の全球気候モデル(GCM: General Circulation Model)を用いた。

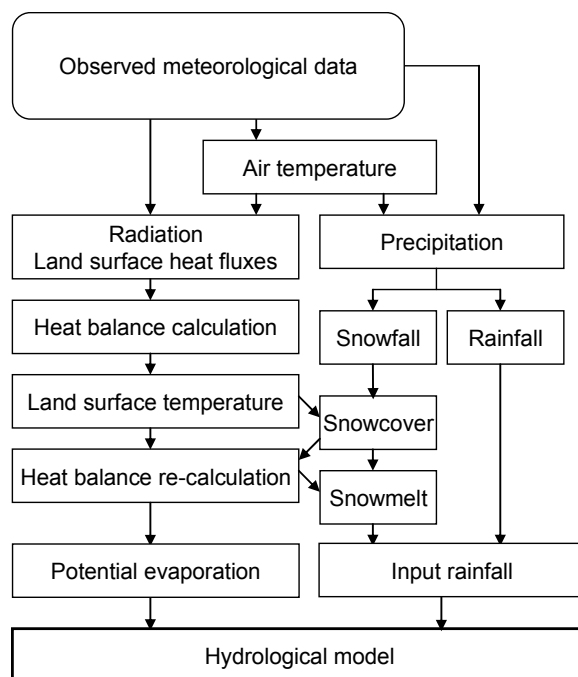


Fig. 2 Flow chart to obtain input variables for hydrological model from SVAT model.

2.3 解析手順

本研究では、Fig.3に示すように3段階の手順（ステップ）で解析を実施した。

ステップ1：地上気象観測値とSVATモデルによる出力を用いた場合の流出解析モデルのパラメータ（表層土層厚、流出係数、降雨遮断係数）を対象河川の基準地点における観測流量を誤差3%以内で再現できるように調整する。

ステップ2：CMIP3から得られる現在と将来のGCMによる降水量と気温の出力結果の差分を抽出し、気候変化値として整理する。解析に用いた気候モデルは以下の15モデルである。(国名、格子間隔)

1. BCCR-BCM2.0 (Norway, 313km)
2. CCSM3 (USA, 156km)
3. CGCM3.1_T47 (Canada, 417km)
4. CNRM-CM3 (France, 313km)
5. CSIRO-Mk3.0 (Australia, 208km)
6. CSIRO-Mk3.5 (Australia, 208km)
7. ECHAM5/MPI-OM (Germany, 208km)
8. ECHO-G (Germany/Korea, 417km)
9. GFDL-CM2.0 (USA, 222km)
10. GFDL-CM2.1 (USA, 222km)
11. INM-CM3.0 (Russia, 444km)
12. IPSL-CM4 (France, 278km)
13. MIROC3.2_medres (Japan, 313km)
14. MRI-CGCM2.3.2 (Japan, 313km)
15. UKMO-HadCM3 (UK, 313km)

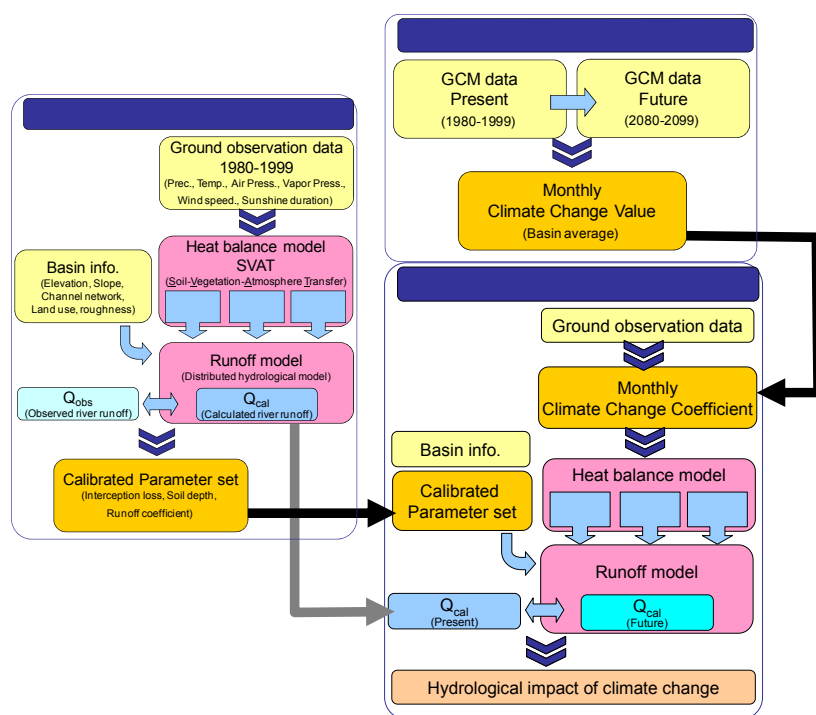


Fig. 3 Applied experimental procedures.

ステップ3: 観測値をベースに整理した流出モデルへの入力データに、上記ステップ2で得られた気候変化値を上乗せして、ステップ1で調整されたパラメータセットで流出解析を実施し、得られた結果を将来の河川流量の予測値として影響評価を実施する。

3. 結果と考察

3.1 CMIP3マルチ気候モデルによる現在気候の気温と降水量の再現性と将来変化予測結果

CMIP3気候モデルによる現在気候の再現性を検証するため、木曽川流域を対象に気温と降水量の流域平均の月別平均値について、地上気象観測値、再解

析値とCMIP3気候モデルによる出力結果を比較した。

Fig.4は、CMIP3の現在気候(1980～1999年)再現結果(20c3m: 20th century climate in coupled models)とJRA25再解析データ(Onogi *et al.*, 2007)および、AMeDASによる地上観測値を比較した結果を示している。

エラーバーは異なる15個のモデルの出力結果の標準偏差を示している。Fig.4の結果から気温、降水量ともにCMIP3の複数のモデルによる出力結果をアンサンブル平均した値が、JRA25再解析値とAMeDASによる観測値の間に位置しており、流域平均の年間値としては妥当な値が得られていると考えられる。しかし、月別降水量については、流出解析を実施する際に無視できない誤差が生じることがわかった。

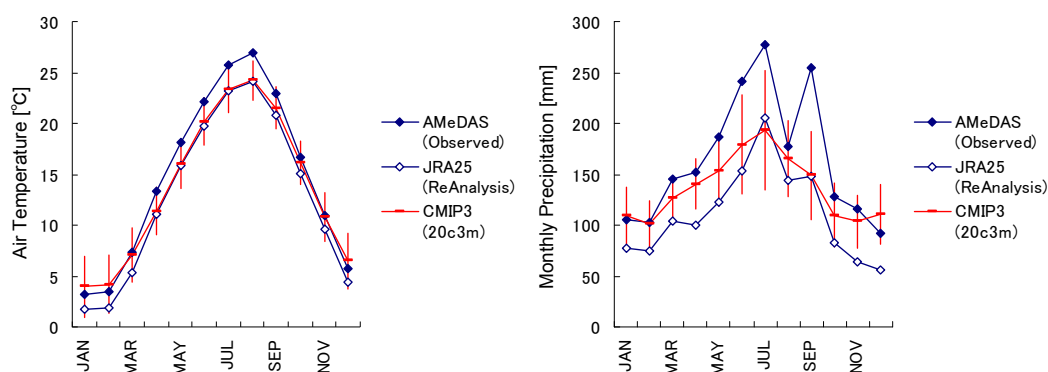


Fig. 4 Comparison of monthly air temperature and precipitation among AMeDAS (observation), JRA25 (re-analysis) and CMIP3 multi-model outputs in the Kiso River basin.

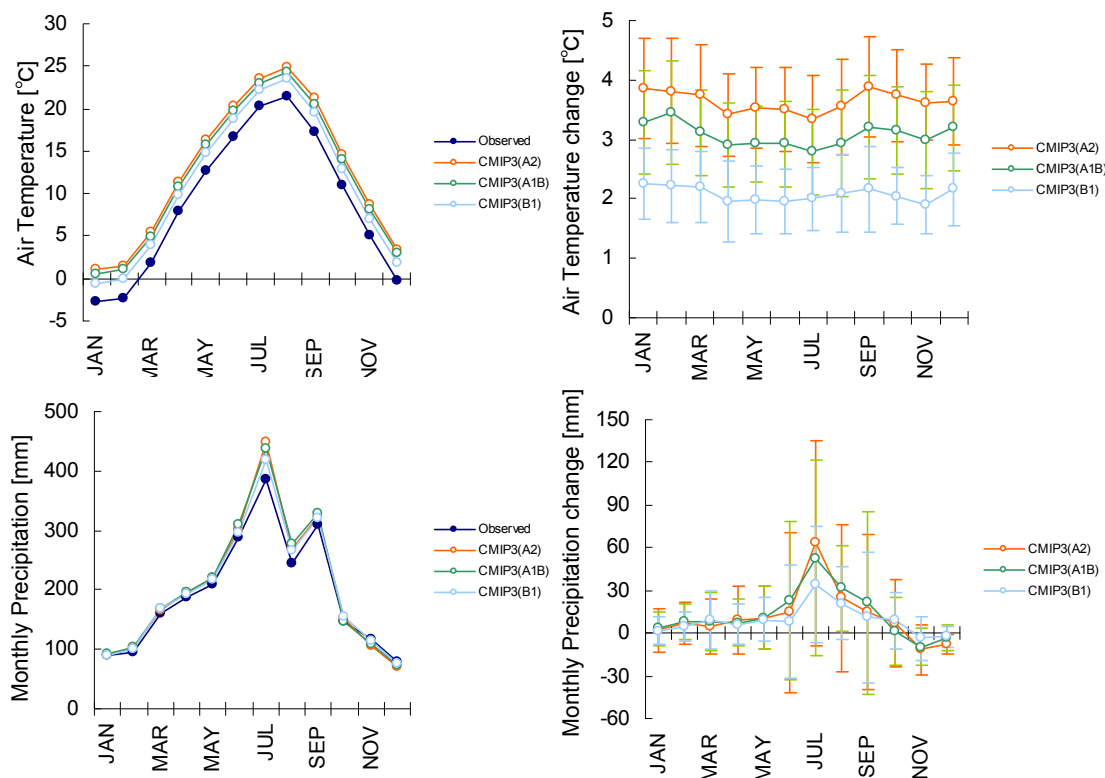


Fig.5 Monthly change of the air temperature and precipitation in the Kiso river basin. Left: Seasonal change, Right: monthly change between present and future climate projected by CMIP3.

気候変動による影響評価を行う際には、上記のような気候モデルによる予測の不確実性の影響を取り除くため、統計的なダウンスケーリング（バイアス補正）あるいは力学的なダウンスケーリング手法が一般的に用いられる。しかし、現在気候を基準にしたモデル出力結果の調整（バイアス補正係数等）が将来にも適用可能であるという保証はなく、現在の計算機資源では複数の気候モデルの出力結果を長期間積分できるような力学的なダウンスケールの実施も極めて困難である。そこで本研究では、通常のバイアス補正や力学的なダウンスケーリングは実施せず、Fig.3に示す方法で、GCMからは気候差分（気候変化値）のみを抽出して、それを観測値に上乘せることで将来の影響予測を行うことにした。

Fig.5は、CMIP3に含まれる15個の気候モデルから抽出した木曽川流域の気温（上段）と降水量（下段）の現在(1980～1999年)と将来(2080～2099年)の月別変化を示している。各図の左側が気温、降水量の月別値で、右側は現在に対する将来の変化量を示している。気温については95%の信頼度で統計的に有意な変化が認められた。降水量については統計的に有意な変化は認められなかったが、多くのモデルが冬季よりも夏季に降水量が現在よりも増加すると予測

していることがわかった。また、モデル間の予測結果のばらつき（図中にエラーバーとして示される標準偏差の値）は、気温については年間を通してあまり変化しなかったのに対し、降水量については冬季に比較して夏季にモデル間の予測のばらつきがより大きくなったことから、夏季の降水量については気候モデルによる不確実性が大きい（モデルによって予測結果が大きく異なる）こともわかった。

シナリオによる予測結果の違いについては、気温については温室効果ガスの排出が最も多いA2シナリオの予測結果が最も気温上昇が大きく、排出量が最も少ないB1シナリオの気温上昇が最も小さくなり、A1Bシナリオはその中間の値を示した。降水量の変化については、夏季にはA2シナリオの降水量増加が最も大きくB1シナリオで最も小さい結果が得られたが、それ以外の季節では温室効果ガス排出シナリオにおける明確な違いは見られなかった。Fig.4およびFig.5はいずれも木曽川流域を対象にした結果であるが、CMIP3の空間解像度はかなり粗い(約100～400km程度)ため、同じ木曽川水系の隣接する長良川流域についてもほぼ同様の結果が得られた。

3.2 SVATモデルによる降雨・降雪・融雪・蒸発量の将来変化予測結果

複数のGCMによる長期間連続した出力が得にくい降雨量、降雪量、融雪量および蒸発量については、気温と降水量について複数のGCM(CMIP3)から抽出した気候差分値を地上観測値に上乗せした値を用いてSVATモデルによる熱収支計算によって将来値を推計した。まず、降雨量と降雪量についてはFig.5では降水量に大きな変化がみられなかった冬季から春先にかけて明確な降雨量の増加と降雪量の減少が認められた (Fig.6)。これは、この時期の降水が現在は雪として地上に到達しているものが、温暖化した将来気候のもとでは雨として地上に到達することを意味しており、その影響（冬季降雨量の増加量と降雪量の減少量）はA2シナリオで最大で、B1シナリオで最小となった。

Fig.7は、SVATモデルによって算出された融雪量と

蒸発散量の変化を示している。気温上昇量の大きいA2シナリオで変化が最も大きく、B1シナリオで最も変化が小さいという傾向は同じだが、降雪量の変化パターンと融雪量の変化パターンが異なることに注目する必要がある。これは、気温が上昇して降雪量が減少しても、それがそのまま融雪量の減少につながるわけではなく、地上の積雪が気温上昇に伴って融雪するためであり、融雪発生の時期と量の変化は、気温だけでなく、厳密な熱収支計算によって求める必要があることを示唆している。蒸発散量についても、その増加量は気温上昇量に対して一定ではなく、融雪量が減少する時期に最も大きく増加しており、これも氷雪に対する蒸発潜熱よりも水に対する蒸発潜熱が大きいことに起因しており、蒸発散量の変化も、単純な気温のみの関数ではなく熱収支計算による推定が必要なことを示唆している。

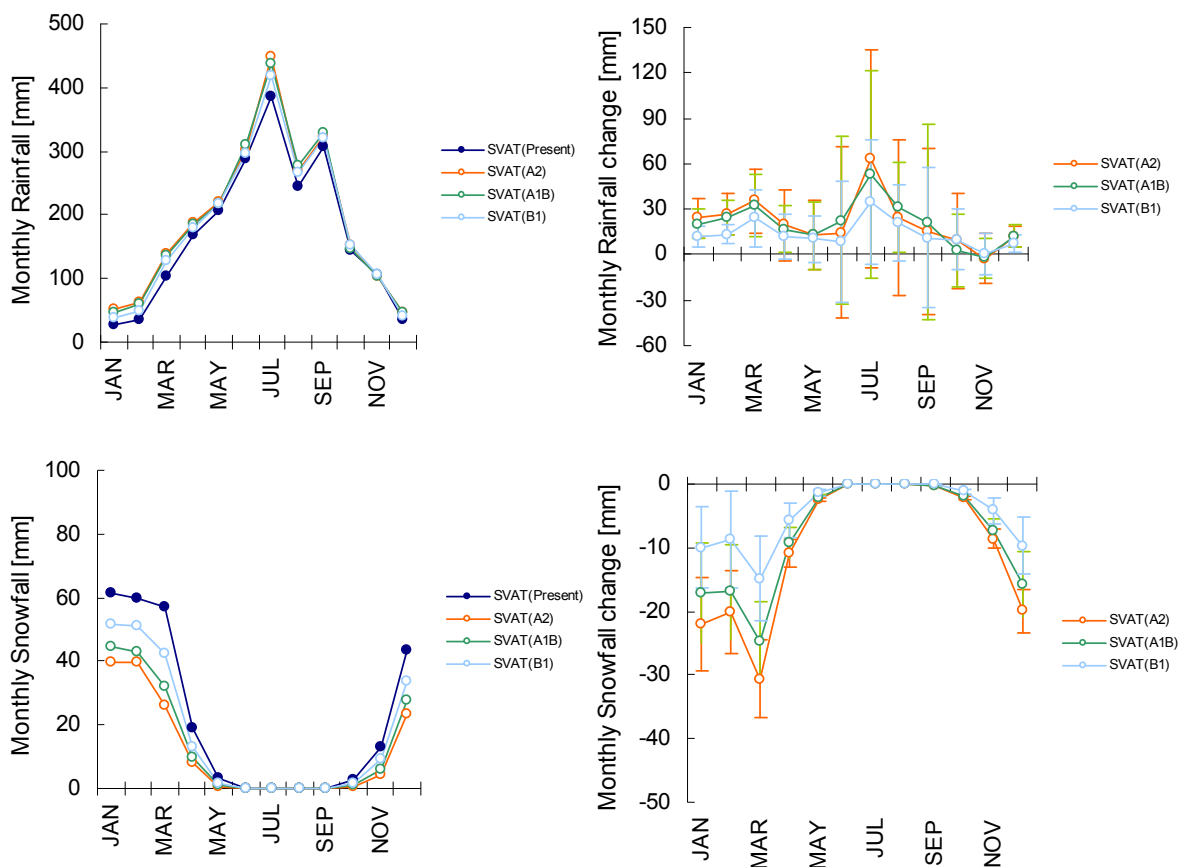


Fig.6 Monthly change of the rainfall and snowfall in the Kiso River basin. Left: Seasonal change, Right: monthly change between present and future climate. SVAT is correspond to the present climate calculated by SVAT model using observed meteorological data. A2, A1B and B2 is correspond to future climate condition estimated by SVAT model using climate change value derived from CMIP3 output.

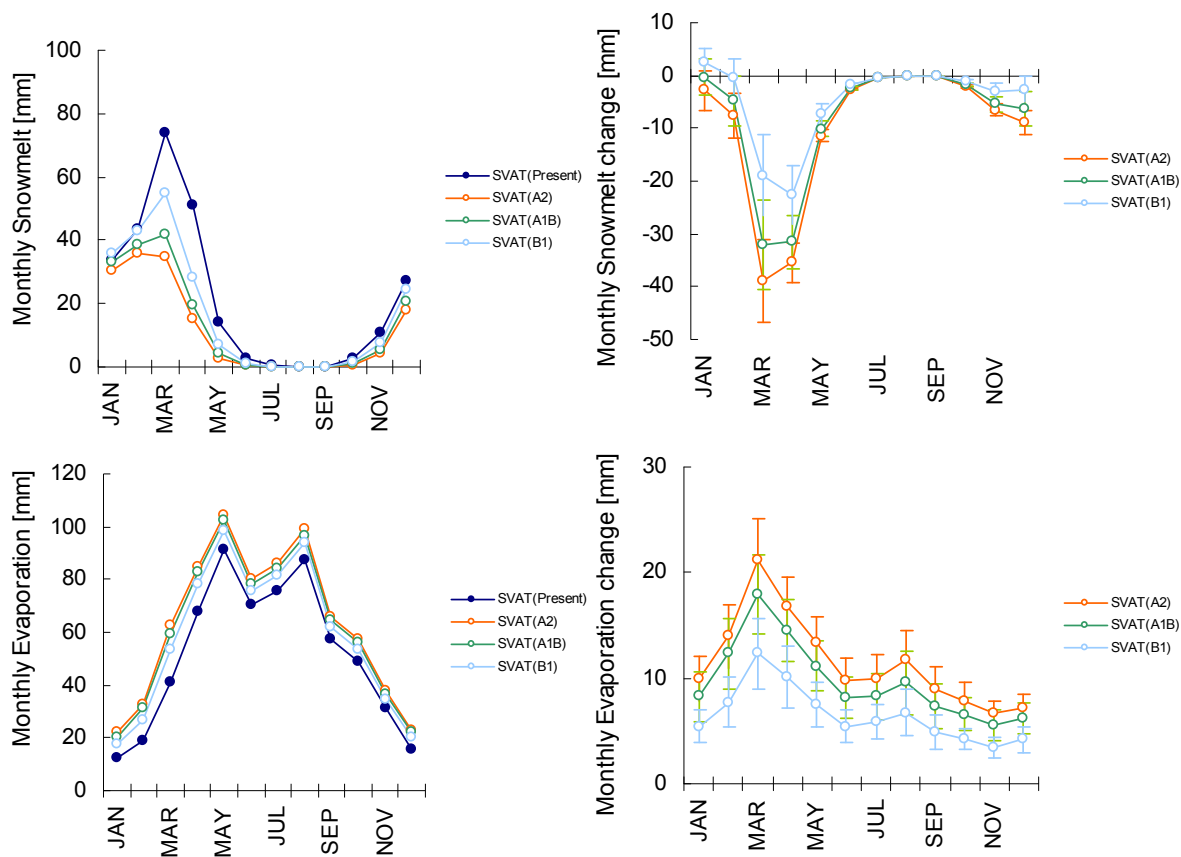


Fig.7 Monthly change of the snowmelt and evaporation in the Kiso River basin. Left: Seasonal change, Right: monthly change between present and future climate. SVAT is correspond to the present climate calculated by SVAT model using observed meteorological data. A2, A1B and B2 is correspond to future climate condition estimated by SVAT model using climate change value derived from CMIP3 output.

3.3 水収支と河川流量との関係

降雨流出過程では、降水が降雨と降雪にわかれ、降雨量の一部は地上植生等により遮断され、残りが地中へ供給される（以下、正味降雨量とする）。降雪量は積雪量となり、積雪量が時間遅れをとまってやがて融雪量として地中に供給される。正味降雨量および融雪量として地中に供給された雨水の一部は、蒸発あるいは蒸散によって大気中へと戻され、残りが深部浸透（地下水涵養量）と河道への流出成分となる。つまり、河川流出量は、正味降雨量と融雪量の総量から蒸発散量と深部浸透量を差し引くことによって求めることができる。しかし、実際の蒸発散量と深部浸透量を分離して正確に見積もることは現時点では困難なため、ここでは蒸発散損失量の一部に深部浸透量が含まれるものとして取り扱うことにした。Fig.8は月別水収支（上段）と河川流量（下段）の変化を示している。水収支は、SVATモデルにより算出した降雨量と融雪量から蒸発散量（ここで

はポテンシャル蒸発量）を差し引いた値である。河川流量は、木曾川犬山地点のもので、Hydro-BEAMによる流出解析の結果を示している。Fig.8下段左側の河川流量の月別変化のパターンは上段の水収支の変化パターンとよく対応しており、Fig.8右側の将来変化量についても両者の変化がほぼ一致していることがわかる。このことから、将来の河川流量の変化が、単純に降水量の変化のみに規定されるのではなく、地表面熱収支に基づく、正味降雨量、融雪量および蒸発散量すべての変化の相互作用によって決まることがわかる。

さらにFig.8の結果とFig.5～Fig.7の結果を比較することで、冬季河川流量の増加は、冬季降雨量の増加による影響が大きく、春先の河川流量の減少は、融雪量の減少と蒸発散量の増加による影響が大きく、さらに夏季河川流量の増加は、夏季降雨量の増加の影響が大きいことがわかる。つまり、流域スケールでの水収支が明らかになることで、将来の河川流量

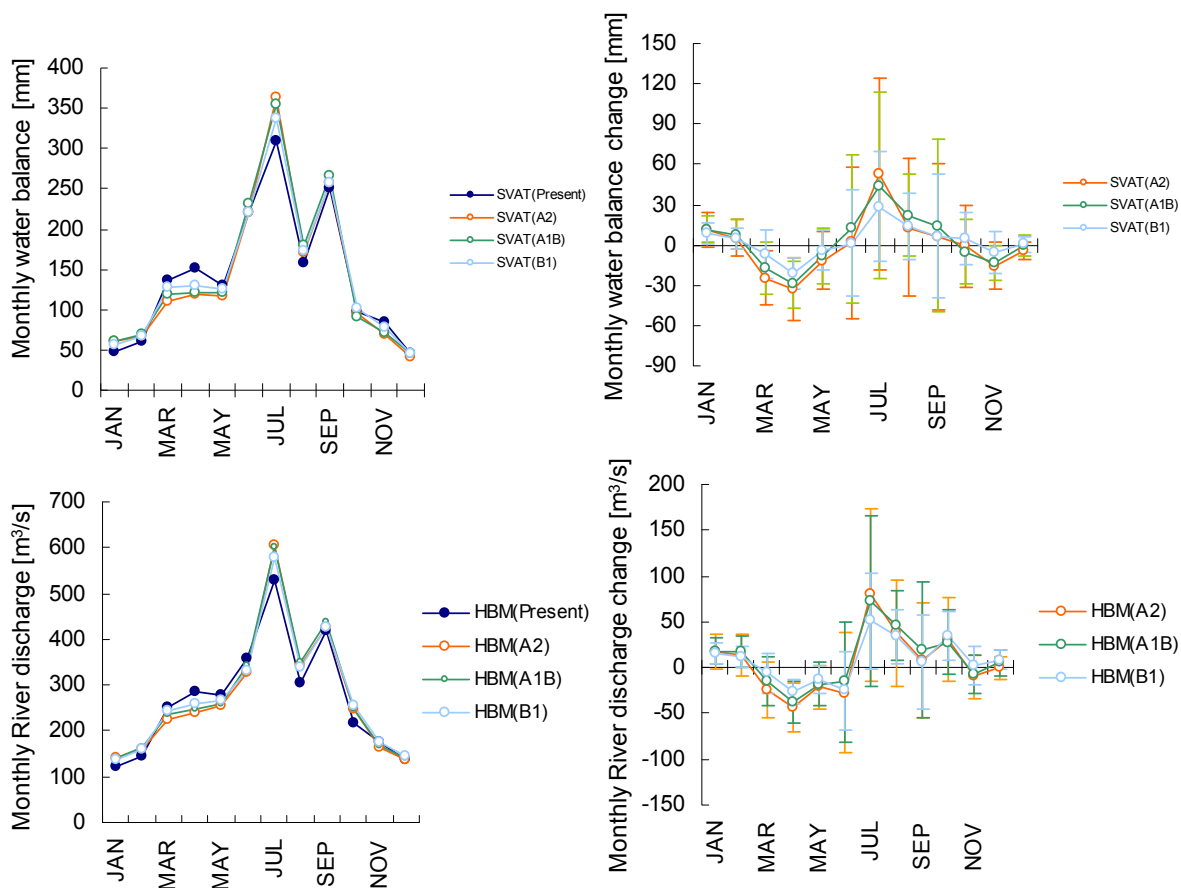


Fig. 8 Monthly change of water balance calculated by the SVAT model and river discharge calculated by the Hydro-BEAM for the Kiso river basin. River discharge data is correspond to the reference point of Kiso river basin (Inuyama).

の変化要因を特定することが可能となり、温暖化時に何が原因で河川流量が変化するのがわかれば、その適応策についても焦点を絞ってより具体的に検討することが可能となる。シナリオ別では年間の河川流量の変動はA2シナリオで最も大きく、B1シナリオが最も小さくなることから、温暖化の程度が大き

くなるほど、より効果の大きな適応策を実施する必要があると考えられる。

3.4 温暖化が河川流況変化に及ぼす影響

流況曲線は、年間（365日）の日平均河川流量を年最大日流量から年最小日流量まで降順に並べ替えた

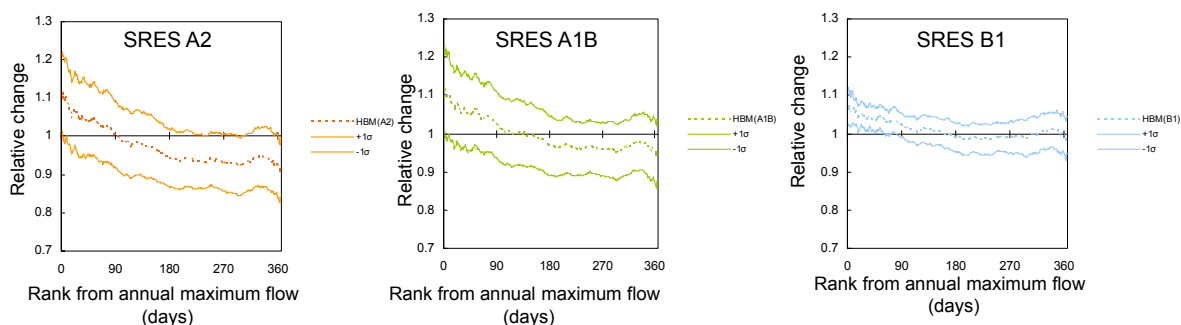


Fig. 9 Change of flow duration curve at Inuyama in the Kiso river basin between present and future climate condition calculated by the Hvdro-BEAM.

もので、対象とする流域の年間の河川流量の特性の全体像を把握することができる。さらに、流況曲線を現況と将来の温暖化時で比較することで、温暖化に伴う流況変化の影響も明らかにすることができる。

Fig.9は木曽川犬山地点の流況曲線の変化を3つのシナリオ別に示したものであり、横軸の左端の年最大流量が5~10%増加し、横軸の右端の年最小流量は0~10%減少するという予測結果が得られた。このことは、将来、木曽川流域では洪水と渇水の両方のリスクが増加し、その影響は温暖化に伴って大きくなることを示唆している。

3.5 温暖化がダム貯水量に及ぼす影響

Fig.10は、木曽川水系の主要ダム（牧尾、岩屋、阿木川、味噌川）の1990年から1999年までの10年間の貯水量の計算値と100年後(2090~2099年)の推計値を示している。本研究で用いた貯水池操作モデルには、洪水調節と利水補給の操作が考慮されており、それぞれのダムの操作規則に応じて、洪水時には洪水調節容量でダムへの流入洪水を貯留し、下流への洪水被害を防ぎ、渇水時には、それぞれのダムの下流基準地点における流量に対し不足する水量を利水容量と水利権に応じて補給するようにし、河道からも実際の取水地点からできるだけ実績値に近い水量を取水するようにモデル化した。ただし、ここでは取水量の将来変化は考慮しておらず、河道への排水量の影響も考慮されていないため、将来の河川流量の予

測情報としてはまだ問題が残されている。しかし、各ダム貯水量変化の再現性は、昨年度構築した初期モデルよりも大幅に向上しており、1994年の渇水時の貯水量低下やその他の年の貯水量変動も概ね良好に再現されているため、Fig.10の結果は水需要が現状と同程度だと仮定した場合の各ダムの将来の貯水量変化を示していると考えることができ、温暖化時には、すべてのダムで現在よりも渇水時の貯水量が低下し、特に温暖化による気温上昇の大きいA2シナリオで最も渇水が深刻化するという予測結果が得られた。

4. 結論

本研究では、木曽川水系の将来の気候変化と河川流況変動および主要ダムの貯水量変化について気候モデルによる将来予測データを用いた流出シミュレーションによって3つの異なる温暖化シナリオ別に解析を試みた。その結果、河川流量の将来変化は、単純な降水量の変化だけでなく、降雨量や融雪量および蒸発散量の相互作用で決まる水収支変化に大きく規定され、木曽川水系では冬季流量の増加と春季流量の減少、さらに夏季流量が増加するという予測結果が得られた。複数の温暖化シナリオで比較した結果、将来の気候変動に伴う河川流量の変動が最も大きいのは温室効果ガス排出量が最も多いA2シナリオで、最も変動が小さいのが排出量が最も少ないB1

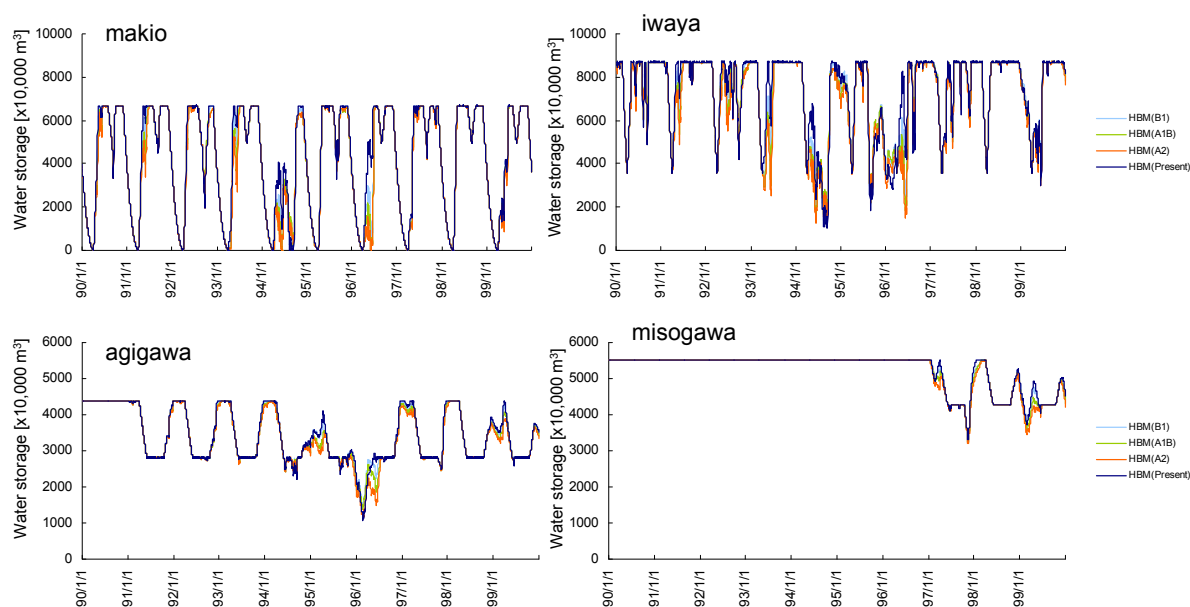


Fig. 10 Change of water storage in the major reservoirs in the Kiso River basin calculated by the Hydro-BEAM.

シナリオという結果が得られた。このことは、温暖化による河川流量の変動を抑えるためには、できる限り温暖化ガスの排出量を抑える緩和策を実施する必要があることを示唆している。さらに、流況曲線の将来変化から洪水と渇水のリスクが同時に高まることが予想されるため、夏季の制限水位（洪水調節準備水位）を現在よりも低く設定し、春先の水不足を防ぐために、融雪出水を見込んだ発電放流の時期を変更するなど、ダム操作規則の変更などを含めた適応策の準備が必要と考えられる。特に、渇水対策については、1994年レベルの異常渇水時に現在よりも各ダムの貯水量が少なくなると予想されており、現在の水利用形態のままでは、より深刻な渇水被害が生じることが予想される。したがって、適応策としては、節水などを強化して水利用量を抑えると同時に、非常時の利水補給システムとして、（水系連絡導水路を含む）水源の多系統化や、複数ダムの統合運用（利水容量に余裕のあるダムからの先行利用）や貯水容量の再配分など、総合的な対策が必要になると考えられる。

謝 辞

本研究で解析に用いた将来気候予測データおよび計算機、データサーバーの一部は、環境省地球環境研究総合推進費(S5-2)「マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究」、

文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」、および名古屋市上下水道局からの提供を受けた。

参考文献

- 佐藤嘉展・道広有理・鈴木靖・中北英一・小尻利治 (2010): 気候変動に伴う木曾三川流域の流況予測, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp. 723-735.
- Kojiri, T. (2006): Hydrological River Basin Assessment Model (Hydro-BEAM), In Singh V.P. and Frevent D.K., "Watershed models", Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 613-626.
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N. and Taira, R. (2007): The JRA-25 reanalysis, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 85, pp.369-432.
- Sato, Y., Ma X.Y., Xu J.Q., Matsuoka M., Zheng H.X., Liu C.M. and Fukushima Y. (2008): Analysis of long-term water balance in the source area of the Yellow River basin, Hydrological Processes Vol.22, 1618-1629.

(論文受理日: 2012年5月17日)

Upgrading the Integrated Hydrological Model for the Kiso River System

Yoshinobu SATO, Yuri MICHIHIRO and Yasushi SUZUKI

Synopsis

In the Kiso river system, the river flow is controlled by the many multi-purpose reservoirs operation located in the upstream of the basin. Thus, in order to simulate river flow more realistically, we upgraded our distributed hydrological model by considering actual reservoirs operation and water withdrawal from the river channel. The results indicate that our new model shows better performance than the previous one. However, we also found that further improvement is needed to the maintenance flow modeling for more realistic river flow simulation.

Keywords: CMIP3, multi-model, multi-scenario, hydrological model, reservoir operation