

マルチ気候モデルと貯水池操作を考慮した分布型水文モデルの 木曾三川流域への適用

佐藤嘉展・小尻利治・道広有理・鈴木靖

要 旨

気候変動に伴う木曾三川流域における河川流量の将来変化を明らかにするために、複数の将来気候予測情報を用いて分布型流出モデル (Hydro-BEAM) による流出解析を行い、流域内の複数地点における現在流況との比較を試みた。また、上流域のダム群による貯水池操作の影響についても考慮するため、簡易な貯水池操作モデルを構築した。その結果、木曾川下流域における河川流量の再現性が大幅に向上し、将来の気候変動が河川流量に与える影響は流域内で一様ではなく、洪水や渇水のリスクが流域内で大きく異なることが明らかになった。

キーワード: 木曾三川流域, 気候変動, 貯水池操作, 河川流量, 分布型流出モデル

1. はじめに

木曾川水系は、木曾川と長良川および揖斐川の 3 河川を幹川とする流域面積 9,100km² の中京圏の産業・人口・資産が集中する濃尾平野を貫流する極めて重要な河川であり、これら 3 河川を総称して木曾三川と呼ばれている。

木曾川水系河川整備計画 (国土交通省中部地方整備局, 2008) によると、木曾川水系における基本高水流量 (ダムや遊水地による洪水調節前の洪水流量) は、木曾川犬山地点において 19,500m³/s、長良川忠節地点において 8,900m³/s、揖斐川万石地点において 6,300m³/s とされている。

一方、計画洪水流量は、河川流路の改修計画の基本となる河川流量であり、ダムや遊水地等の流域内の洪水調節施設による洪水調節後に河川に配分される流量に相当し、木曾川犬山地点で 13,500m³/s、長良川忠節地点において 8,300m³/s、揖斐川万石地点において 3,900m³/s とされている。

さらに、河川整備計画では、上記の治水対策だけでなく、「河川水の適正な利用及び流水の正常な機能の維持に関する目標」(利水対策) および「河川環境の整備と保全に関する目標」(環境保全対策) も定められており、この「流水の正常な機能を維持するために必要な流量」(正常流量) は、木曾川水系では、木曾川今渡地点において、かんがい期は概ね 150m³/s、非かんがい期では概ね 80m³/s とし、長良川忠節地点

では通年で概ね 26m³/s、揖斐川万石地点では通年で概ね 30m³/s とされている。

近年、局地的な集中豪雨の規模や頻度の増加や、極端な猛暑や大雪、無降雨期間の長期化など極端な気象現象が増えていると言われており、計画時に想定された規模を超える災害が今後ますます増加すると予想される。洪水時に、下流域の洪水氾濫のリスクを軽減するためには、流域内の複数のダムが連携して洪水調節を実施する必要がある。異常渇水時において安定した水資源量を確保するためには、平常時においてもある程度余裕を持った水資源量を確保し、さらに気象、気候、地理的条件の異なる複数の流域に分散してダム水源池を持つこと (水源の多系統化) は、渇水のリスクを分散し、利水安全性の向上にも大きく貢献すると考えられる。

そこで本研究では、流域内に設置された複数のダム貯水池の運用操作の影響も考慮した上で、木曾三川流域における気候変動に伴う将来の洪水および渇水リスクの変化を明らかにすることを目的とした。

2. 解析方法

2.1 対象流域の概要

木曾川水系は、長野県木曾郡木祖村の鉢盛山 (2,446m) を源とする木曾川 (流域面積 5,275km², 河川延長 229km) と、岐阜県郡上市の大日ヶ岳 (1,709m) を源とする長良川 (流域面積 1,985km²,

河川延長 165.7km), 岐阜県揖斐郡揖斐川町の冠山 (1,257m) を源とする揖斐川 (流域面積 1,840km², 河川延長 121km) を幹川とし, これら 3 川を総称して木曾三川と呼ばれている。

平成 9 年 (1997 年) の国土数値情報土地利用メッシュ (L03-09M) によると, 木曾川流域の土地利用は, 森林 85.1%, 水田 5.3%, 草地 (農地) 3.1%, 市街地 3.9%, 水域 2.6% であり, 長良川流域 (揖斐川流域を含む) の土地利用は, 森林 73.2%, 水田 11.3%, 草地 (農地) 3.2%, 市街地 8.6%, 水域 3.7% であり, 長良川流域の方が, 木曾川流域よりも森林が少なく, その分, 水田や市街地が多いことがわかる。なお, この 5 つの土地利用区分は, 流出解析モデルで利用するために, 地表面植生の被覆状況 (葉面積, 降雨遮断, 蒸発散など) や表層土壌の物理性 (表面粗度, 浸透性, 透水性, 保水性など) の類似性を考慮した分類となっている。国土数値地図 50m 標高によると, 木曾川流域の平均標高は 903.4m で, 長良川流域の平均標高は 435.2m となっており, 長良川流域の方が標高が低く, 木曾川流域では特に御嶽山周辺や木曾川源流域の標高が高くなった地形特性となっている。

2.2 地上気象観測データ

気象要素の地上観測値として, 地域気象観測システム (AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System) と地上気象観測網 (SDP: Surface Daily Product) のデータを用いた。AMeDAS からは 1 時間単位の降水量と気温データを利用し, 気温についてはそこから日平均, 日最高, 日最低値を抽出して, 日単位データとして整理したものを用いた。積雪・融雪・蒸発散量については, 熱収支モデルから別途算出するため, 必要な気象要素 (風速, 大気圧, 水蒸気圧, 日照時間) を SDP の日別データから抽出した。離散した地上気象観測地点のデータは, IDW (距離逆数加重平均法) により, 1km×1km グリッドメッシュデータに内挿して解析に用いた。流出解析モデルの入力となる地上到達降雨量, 融雪量およびポテンシャル蒸発量は, 地表面熱収支 (SVAT) モデルで算出した (佐藤ら, 2009)。ここで, 地上到達雨量とは, 降水量から植生による遮断損失量を差し引いた値のことで, 流出に寄与する降雨成分のことである。

2.3 分布型流出モデル

流出解析には空間解像度 1km の分布型流出モデル (Hydro-BEAM) を用いた (Kojiri, 2006; 佐藤ら, 2009)。Fig. 1 に木曾三川流域における主要ダムと基準流量観測点の位置を示す。本研究では, 地上気象観測デ

ータを入力とした場合に, 木曾川犬山地点における多年平均流量を誤差約 1% 以内で再現できるように流出モデルのパラメータ (表層土壌層厚, 下層土壌側方および鉛直流出係数, 地表植生による遮断貯留容量) を調整した。

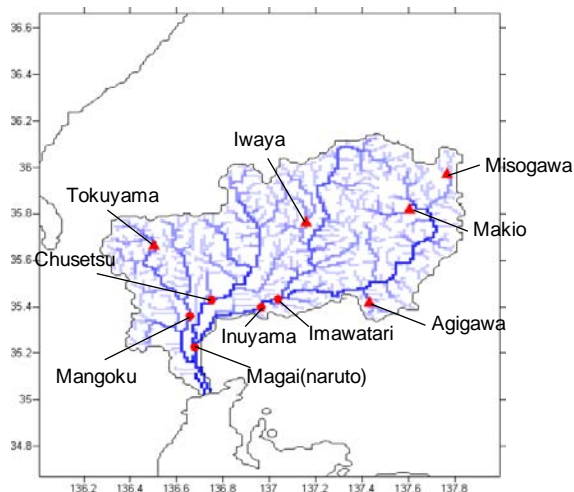


Fig. 1 Location of reservoirs and reference observation points of the Kiso three river basin.

: reservoir, : reference observation point

Fig. 2 は, 木曾川水系各流域の基準地点における年平均流量の年別および月別変化を示している。ここでは 1979 年から 2008 年までの期間を解析対象としているが, 実測流量のデータは 2003 年までで, 一部欠測期間 (犬山地点: 2001~2003 年, 忠節地点: 1998・2002 年, 万石地点: 1998~1999・2002 年) がある。

Hydro-BEAM による流出解析は, 木曾川犬山地点における多年平均実測流量 (283.1m³/s) を誤差 0.1% 程度 (ここでは -0.13%) の精度で再現 (計算値: 282.7m³/s) するように調整し, そのパラメータを長良川流域 (揖斐川を含む) にも適用した。厳密には, 木曾川と長良川流域では, 気候だけでなく植生や地質等の状況も異なるため, 個別にパラメータを調整した方が再現性の面からはよいかもしれないが, パラメータを変えることにより流出特性に違いがでると, 得られた 2 流域間の解析結果の違いについて, その解釈や説明が複雑になるため, ここでは同一のパラメータを用いることにした。そのため, 長良川忠節地点では多年平均で約 8% 過小評価 (実測値: 112.9m³/s, 計算値: 104.3m³/s), 揖斐川万石地点では約 5% 過大評価 (実測値: 81.6m³/s, 計算値: 86.0m³/s) となっている。なお, これらの計算結果は, 将来の気候条件における河川流量の変化を解析する際に, 現在流量の基準値として用いることにした。

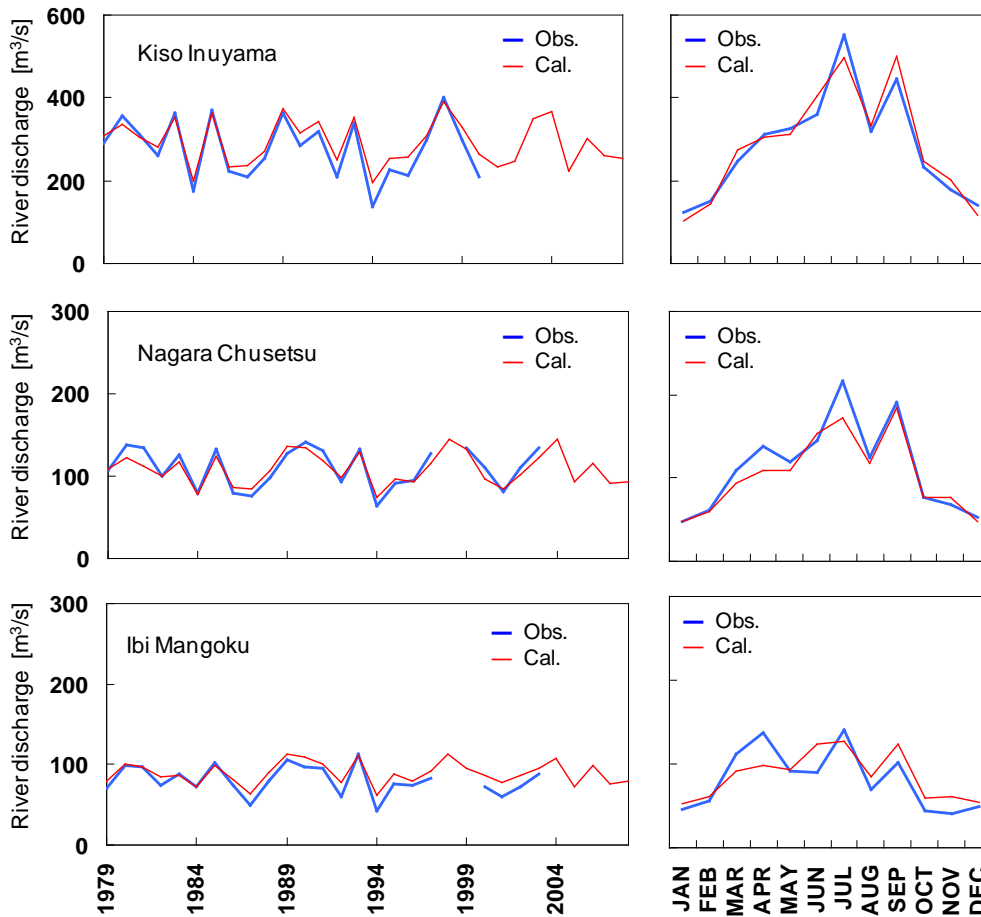


Fig. 2 Annual and monthly river discharge of the Kiso three river basin at each reference point.

2.4 ダム操作モデル

Fig. 3 は、木曾川犬山地点における多年平均（1976～2003年）の流況曲線を示している。

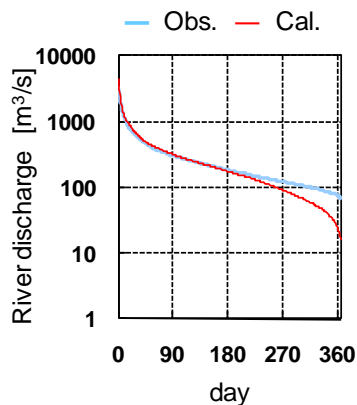


Fig. 3 Flow duration curve at Inuyama.

Fig. 3 をみると、犬山地点では、年平均流量の計算値が実測値と概ね一致するようにパラメータを調整したにも関わらず、モデルによる豊水流量（95日）以上の流量が過大評価となり、低水流量（275日）以下の流量が過小評価になっていることがわかる。

これは、主にダム操作（洪水調節時のピークカット操作および渇水時の放流操作）の影響がモデル計算の中に反映されていないためであると考えられる。

そこで、ここでは、木曾川上流域の4つのダム（岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム、牧尾ダム）に着目し、その運用操作の実態を正確に把握し、将来の気候変動に伴う治水・利水安全度の変化や、さらなる高度運用の可能性について検討するため、現行の操作規定（規則・細則）を可能な限り忠実に反映した貯水池操作のモデル化を試みることにした。

Fig. 4 は、木曾川上流域における4ダム（岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム、牧尾ダム）の貯水位の変化を示している。

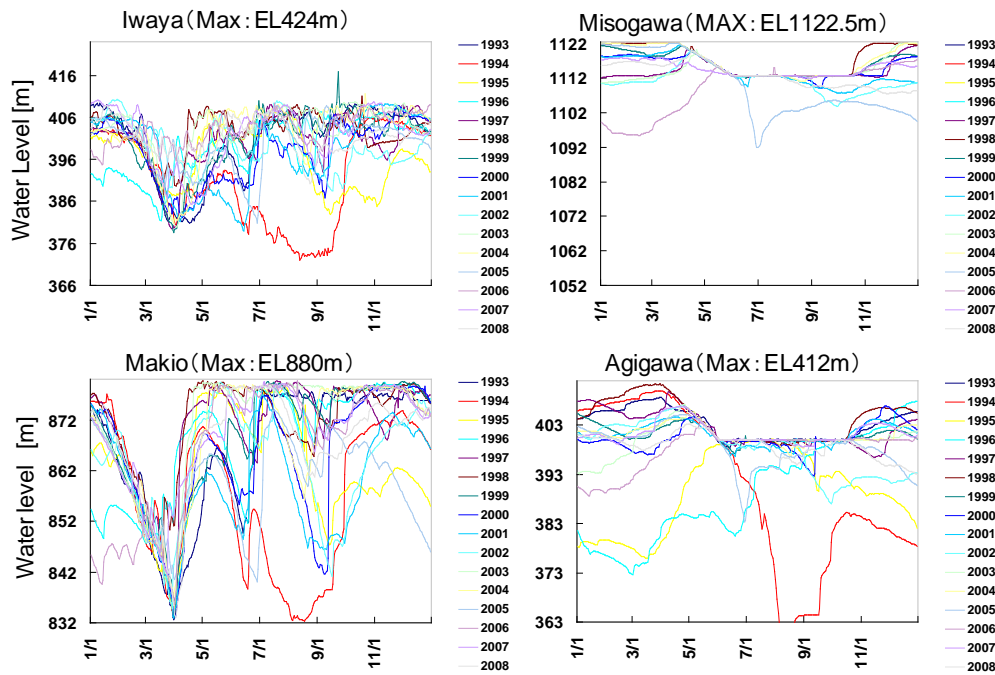


Fig. 4 Change of water level at each dam reservoir in the upstream of the Kiso river basin.

この図から、それぞれのダムが、独自の利水・治水・発電容量、運用開始時期等により異なる特徴的な運用をしていることがわかる。各図中の縦軸の下端は、それぞれのダムの最低水位、上端は満水位（常時または非洪水期）を示しており、阿木川ダムと味噌川ダムには、洪水期に洪水貯留準備水位（制限水位）の設定があることがわかる。

通常、ダムへの流入量が洪水流量を超えると洪水調節（貯留操作）が実施され、下流の基準地点における河川流量が不足する場合には、その不足量を補給するために放流操作が実施される。また、岩屋ダムと牧尾ダムの場合、Vカット運用（発電放流）が行われ、味噌川ダムと阿木川ダムの場合は、洪水期に常時満水位を下げる操作（治水容量分）が実施される。さらに、各ダムは放流操作を実施後、低下した水位を回復させるために、貯留操作を実施するが、下流基準地点における河川流量が基準値を下回る場合には、貯留制限がかかることになる。

以上の条件を考慮し、ここでは、洪水期制限水位を設定する味噌川・阿木川ダムと、Vカット運用（確保貯留量の設定日あり）を実施し、洪水期制限水位設定のない岩屋・牧尾ダムの2タイプのダム操作モデルを構築した。

各ダムの個別操作については、Fig. 5 に示す運用曲線（ダム操作の基準となる期別貯水量）を仮定し、以下のようにモデル化した。(1) 洪水調節容量をもつ3ダム（岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム）で

は、洪水時に、洪水調節操作（ピークカット操作）を実施するが、ダム最高水位を超えそうな場合は、ダム決壊を防ぐために、流入量全量放流を実施する。

(2) 岩屋ダムと牧尾ダムではVカット操作（発電放流）期間中は、下流基準地点の河川流量によらず一定量の放流を実施し、その後は、常時満水位（岩屋ダムは常時満水位の約80%）まで速やかに水位を回復させる。(3) 味噌川ダムと阿木川ダムでは、非洪水期満水位および洪水期制限水位を超えないように運用する。

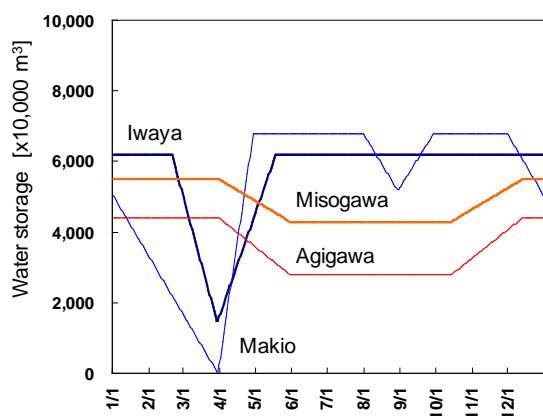


Fig. 5 Simplified reservoir operation curve.

洪水調節時（ダム流入量が洪水流量を超えた場合）の各ダムからの放流量は、以下のように制御した。

- [1]ダム水位が、サーチャージ水位を超える場合は、流入量を全量放流する。
- [2]ダム水位が、サーチャージ水位以下で常時満水位あるいは洪水期制限水位以上の場合、洪水調節操作として、ダムごとに定められた制限量を放流する。
- [3]ダム水位が常時満水位あるいは洪水期制限水位より低い場合は、下流基準地点の流況に応じてダム水位の回復のため放流量を一部制御する。
- [4]ダム水位が最低水位以下になったら放流しない。

なお、モデル上では、水位を貯水量に変換して利用し、各ダムの洪水流量は、ダムの位置するメッシュへの流入量の合計として扱い、操作規則に則して、岩屋ダムが 300m³/s、味噌川ダムが 50m³/s（最大 65m³/s）、阿木川ダムが 120m³/s とした。

非洪水時には、基本的に常時満水位（あるいは制限水位）を維持するように操作するが、下流基準地点の流量が基準流量に満たない場合は、不足分を補給するための放流を実施する。

下流基準地点については、貯留制限は今渡地点で 100m³/s、馬飼地点で 50m³/s、維持流量は、河川（犬山頭首工、河川自流、木曾川大堰）からの取水を考慮した上で木曾成戸地点で 40m³/s に設定した。

2.5 河川取水量の推定

渇水時のダムからの補給放流量は、下流基準地点における河川流量に規定されるが、実際の河川流量は、河川からの人為的な取水の影響で、計算流量よりも少なくなる。そこで、木曾川流域内における取水を考慮しない流出モデルによる今渡～馬飼間の流量増加分を考慮して、この 2 地点間の月別区間利水量の推定を試みた。ここで、区間利水量は、実測の今渡地点流量に、今渡～馬飼間流入量（モデル計算

値）を加えた値から、実測の馬飼流量の差し引いた値に相当するとして、月別で推定することにした（Fig. 6）。なお、月別の今渡～馬飼間における利水量推定図（Fig. 6 右）中の棒グラフ内の青線は、今渡～馬飼間における既知利水量（木曾川用水、愛知用水、愛知上水、名古屋上水）の取水実績合計値（期間平均）を示している。この結果から、木曾川流域では、今渡地点より下流で、夏期のピーク時には最大 100m³/s 以上の水が河川から取水されていることがわかる。つまり、今渡地点で夏期の河川流量が約 100～150m³/s を下回ると、利水者間で渇水調整などを実施しなければ、下流で取水できなくなったり、木曾川本線に瀬切れ（断流）が発生したりする可能性があることを示唆している。

この月別の今渡～馬飼間における利水量の推定値を用いて、木曾川馬飼地点の河川流量を Hydro-BEAM で再計算してみると、実測流量の時系列変化や季節変化の値や変動の特徴を良好に再現できることが確かめられた（Fig. 7）。したがって、ここで推定した区間利水量は、今渡地点より下流域における利水量の実態を概ね良好に再現していると考えられる。

木曾川水系河川整備計画によると、木曾川流域の主要な利水ダムは、今渡地点の河川流量が 100m³/s 以下、または馬飼地点の河川流量が 50m³/s 以下の場合、貯留制限がかかり、ダムへの流入量を全量放流しなければならない。また、上記基準流量を下回る場合、ダムの利水容量から不足量を補給しなければならないと定められている。したがって、流出モデルによる今渡および馬飼地点における河川流量の再現性が向上すると、各基準地点の流量を常時モニタリングして放流量を調整する貯水池操作モデルの再現性も向上することになる。

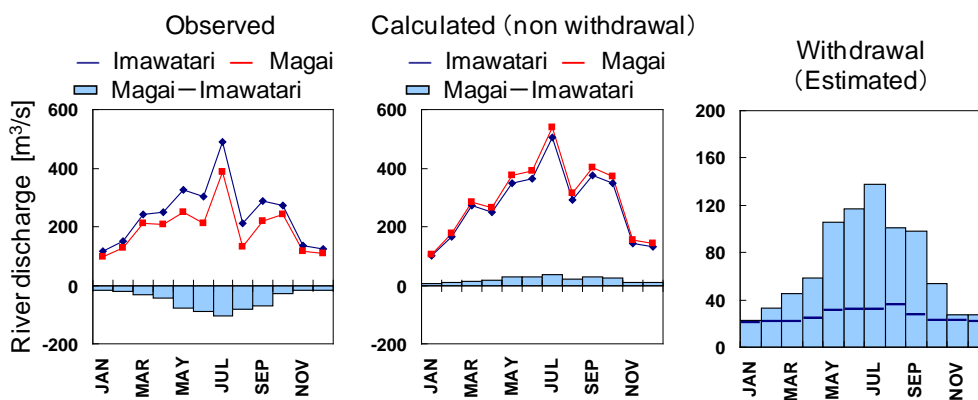


Fig. 6 Difference of river discharge and water withdrawal between Imawatari and Magai.

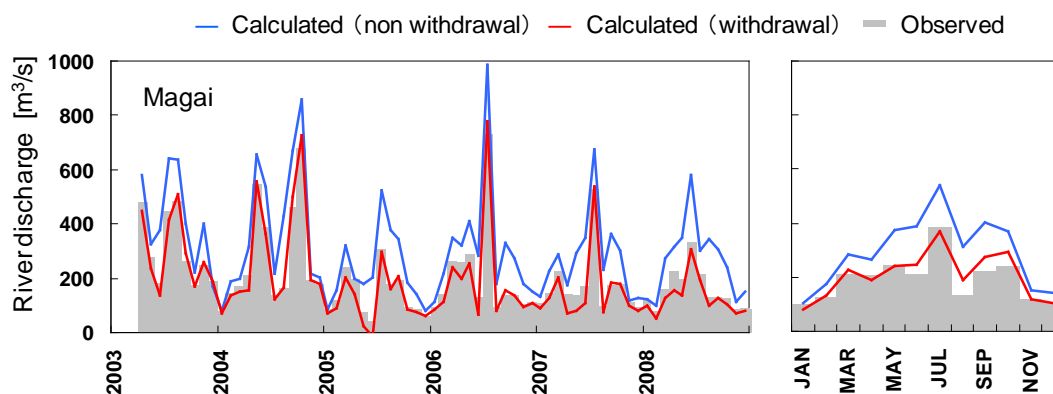


Fig. 7 Difference of observed and calculated river discharge at Magai.

2.6 将来気候予測データ

将来の気候予測については、世界各国の研究機関で開発された複数の気候モデルによる実験結果が、第3次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP3：Coupled Model Intercomparison Project phase 3）として公開されている。しかし、CMIP3に含まれる気候モデルは、水平解像度が100km（1メッシュ10,000km²）以上であり、大陸河川に比べて面積が小さく、急峻かつ変化に富んだ地形の日本の河川流域の流出解析や影響評価にはそのまま適用することが難しい。また、CMIP3には25個のモデルが含まれているが、個々の実験結果のばらつきが大きく、将来予測についての不確実性が大きく、複数の実験結果の中から特定の最適な予測結果のみを確実に抽出することも困難である。そのため、GCMを用いた気候変動の影響評価では複数のモデルによる実験結果のアンサンブル解析を実施するのが一般的である。

そこで、本研究では日本国内の様々な地域における任意のGCMによる将来予測情報を容易に抽出可能な汎用データベース「気候変動情報データベース：<http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/>」を用いることにした。このデータベースには、CMIP3の25個のモデルだけでなく、気象庁気象研究所の高解像度（20km）大気モデル（AGCM20：MRI-AGCM3.1S/3.2S）、さらに、検証用として再解析値（JRA-25）およびAMeDASの平年値が格納されている。各データは月別値として整理され、国土数値情報の地域一次メッシュ単位で平均化されており、それよりも解像度の粗いデータについてはメッシュの直近4格子点のデータが平均化されている。それぞれのデータは、地上気象観測データの場合と同様にIDW法で1kmグリッドメッシュスケールに内挿して解析に用いた。将来予測シナリオは、IPCC第4次評価報告書（AR4）のA1Bシナリオである。CMIP3から抽出するモデルは、日本付近

でJRA25やAMeDAS気候値と比較して再現性のよい8つのモデル（INGV-SXG, MIROC3.2 (hires), CSIRO-Mk3.0, CSIRO-Mk3.5, ECHAM5_MPI-OM, CNRM-CM3, UKMO HadCM3, CGCM3.1 (T47))を用いることにした。

2.7 将来河川流量の変化予測（気候変化上乗せ法）

将来の河川流量の予測には、各GCMの出力値をそのまま用いずにGCMごとに流域平均の気温の変化量と降水量の変化率を「気候変化値」として前述の「気候変動情報データベース」から月別に抽出し、その気温と降水量の気候変化値を地上気象観測値の気温と降水量に「上乗せ」して、熱収支モデルを稼働させて得られた地上到達降雨量、融雪量、蒸発散量を将来気候値として、Hydro-BEAMにより流出計算を行った結果を、将来の河川流量の予測値として用いた。

この方法は、地上気象観測値を基準とし、GCMによって予想される気温と降水量の将来変化が、地上到達降雨量、融雪量、蒸発散量に与える影響と、それが河川流出に与える影響を検出する温暖化の感度分析実験のひとつとして位置づけられる。利点としては、地上気象観測値が基準となるため、個々のGCMの煩雑なバイアス補正処理が不要となり、同一の熱収支モデルを用いることで、流出量変化の要因が特定しやすくなることが挙げられる。しかし、その一方で、時系列情報（発生頻度）や月単位以下の現象の変化情報が失われる欠点もある。しかし、極端な降水イベントの発生頻度や無降雨日数の変化などは、より高解像度の気象モデルでなければ、地形の影響を強く受ける降雨や対流などの再現が難しく、現状で利用可能なGCMでは、流域平均程度の空間スケールで、月平均の気候値の変化までが将来の影響評価に実際に利用可能な情報と考えられる。なお、

ここでの将来変化は、AGCM20 と CMIP3 を同じ期間で比較するため、現在気候（1981～2000年）と将来気候（2081～2100年）としている。

3. 結果と考察

3.1 マルチ気候モデルによるアンサンブル実験結果-1(気候変化)

Fig. 8 は、木曽川流域と長良川流域を対象とした月別平均気温の将来変化についての高解像度気候モデル（AGCM20）と、CMIP3 マルチ気候モデルのアンサンブル実験の結果を示している。AGCM20の結果からは、月別平均気温の変化は、夏期よりも冬期の方が大きいことがわかる。これは、冬期積雪量の減少に伴う地表面アルベド（短波放射の反射率）が減少し、地表面がより温まりやすくなったことが一因として考えられる。CMIP3 による解像度の粗い気

候モデルでも、同様の傾向はみられたが、変化幅は小さく、特に夏期～秋期に AGCM20 との差異が大きくなった。

Fig. 9 に示した月別降水量の将来変化率の結果からは、CMIP3 では冬期に降水量が減少し、夏期には降水量が増加すると予測されているのに対し、AGCM20 では、冬期に増加し、秋期に減少すると予測されており、降水量の変化予測については、気温の変化予測に比べて不確実性が高いことがわかる。図中に示されているエラーバーは、CMIP3 の 8 つのモデルによる各月における変化予測のばらつき（標準偏差）を示しており、標準偏差が大きい月ほど、その月の気候モデルによる予測結果が大きく異なることを示しており、特に日本付近においては、梅雨期から初秋にかけての降水量の予測が難しい（予測の不確実性が高い）ことを示唆している。

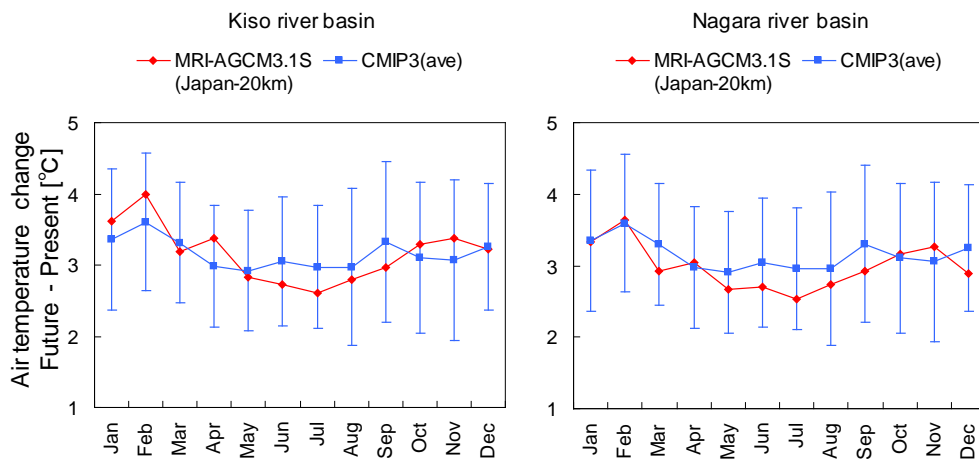


Fig. 8 Change of air temperature between present and future climate condition.

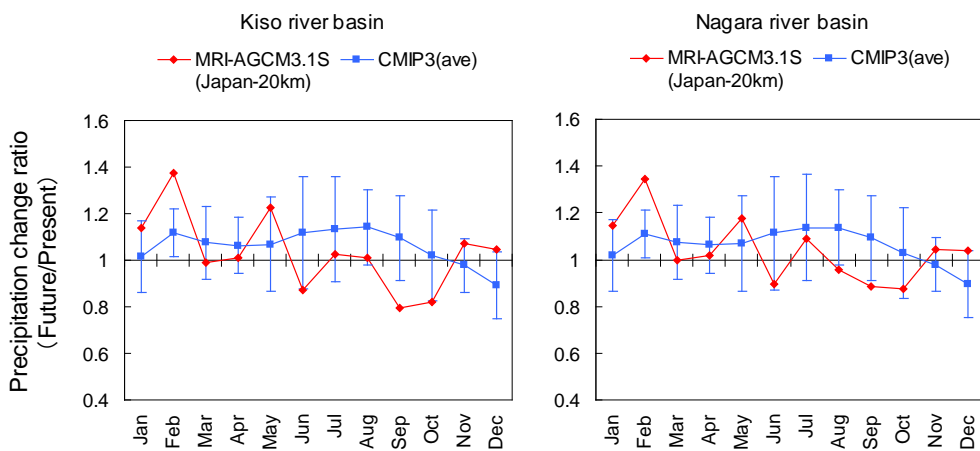


Fig. 9 Change of precipitation between present and future climate condition.

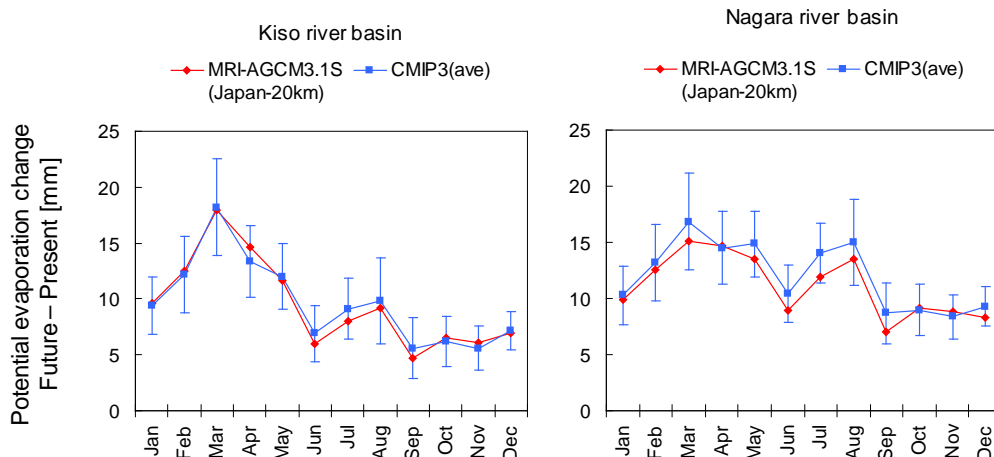


Fig. 10 Change of potential evaporation between present and future climate condition.

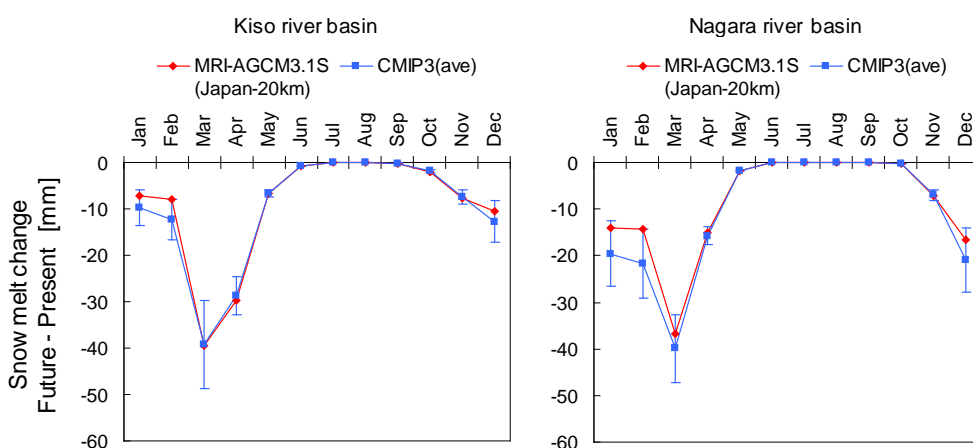


Fig. 11 Change of snow melt between present and future climate condition.

Fig. 8 および Fig. 9 の結果を用いて地表面熱収支モデルで算出された木曾三川流域全体の年間積算ポテンシャル蒸発量は、AGCM20 では 124mm 増加（木曾川流域：114mm 増加，長良川流域：133mm 増加）すると予想され，CMIP3（8 モデル平均）では 130mm 増加（木曾川流域：116mm 増加，長良川流域：145mm 増加）すると予想された。また，CMIP3 の 8 つのモデルの結果を平均すると，月別蒸発量の変化は，AGCM20 の予測値と概ね一致し，月別蒸発量の増加には 2 つのピークがあることがわかった（Fig. 10）。1 つ目のピークは温暖化による冬期積雪量の減少に伴う蒸発潜熱の変化に起因するもので，地表面に氷面が減り水面が増えることによる蒸発量の増加と考えられる。2 つ目のピークは，夏期の気温上昇によるものと考えられるが，Fig. 8 の結果によると気温の上昇量はこの時期が最も小さいにも関わらず他の月よりも蒸発量が増加しているということは，蒸発量の気温変化に対する感度が，この時期に他の月より

も高くなっていることが要因のひとつとして考えられるが，現時点ではまだ明らかではない。

融雪量については，木曾三川流域全体で AGCM20 では年間 109mm 減少（木曾川流域：112 減少，長良川流域：106mm 減少）すると予想され，CMIP3（8 モデル平均）では 123mm 減少（木曾川流域：120 mm 減少，長良川流域：127mm 減少）すると予想された。融雪量の減少は，3 月から 4 月にかけて最も大きくなることわかる（Fig. 11）。この結果から，現在この時期の融雪出水に大きく依存して水位を回復させている木曾川水系の上流域のダム群は，将来十分に水位が回復できず，その後のかんがい期に必要な利水容量を確保できなくなる可能性が示唆される。さらに，Fig. 10 の結果からこの時期の蒸発散量の増加量が大きくなると予想されていることから，将来の木曾三川流域では，春先の融雪期に深刻な水不足が発生する可能性が高いと予想される。

3.2 貯水池操作モデルの再現性

Fig. 12 は、木曽川流域における4ダム(岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム、牧尾ダム)を対象とした貯水池操作モデルによる各ダムの有効貯水量の再現結果を示す。実際のダム操作は、洪水制御に入る前に、気象予測情報などを用いてダム管理者の判断で予備放流操作を実施したり、水不足の際には、渇水調整のため、平常時とは異なる操作が行われることもあるため、実際のダム貯水池の水位変動(貯水量変動)を完全に再現することはできなかったが、Vカット運用の実態や、洪水期制限水位、平成6年(1994年)の異常渇水時における水位低下などの実

態をある程度再現できることが確認できた。

Fig. 13 は、木曽川犬山地点における日平均河川流量の変化について、ダム操作を考慮しないモデルと4ダムの操作を考慮したモデルの計算結果を示しており、ダム操作の影響をモデルに組み込むことで低水流量(約 $120\text{m}^3/\text{s}$)以下の再現性が大幅に向上していることがわかる。さらに、流況曲線の再現性も向上し、ダム下流地点における豊水流量の過大評価や低水流量以下の過小評価についても、ダム操作の影響を考慮することで再現性が大幅に改善されることが確かめられた(Fig. 14)。

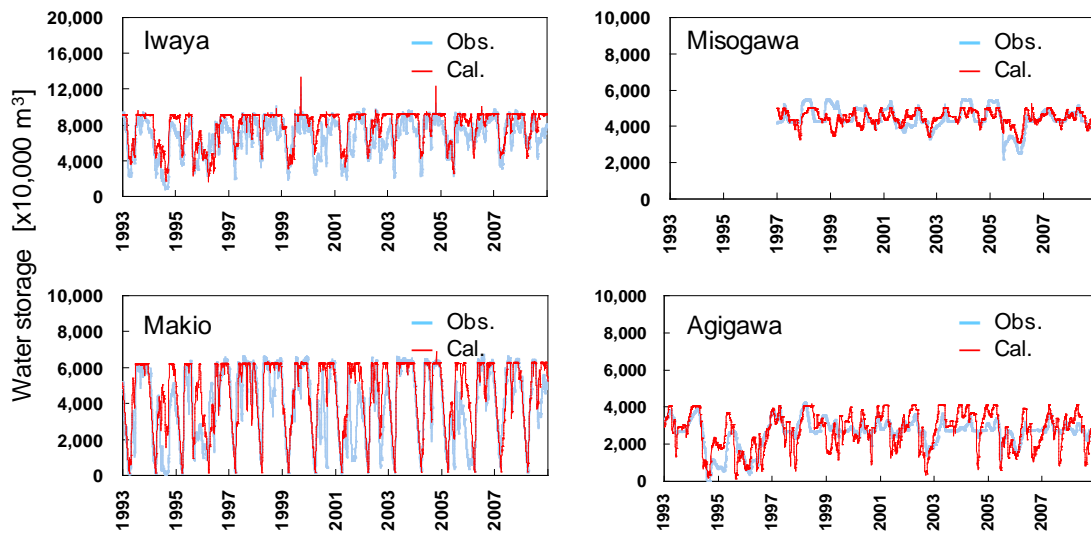


Fig. 12 Performance of the reservoir operation model for the upstream of the Kiso river basin.

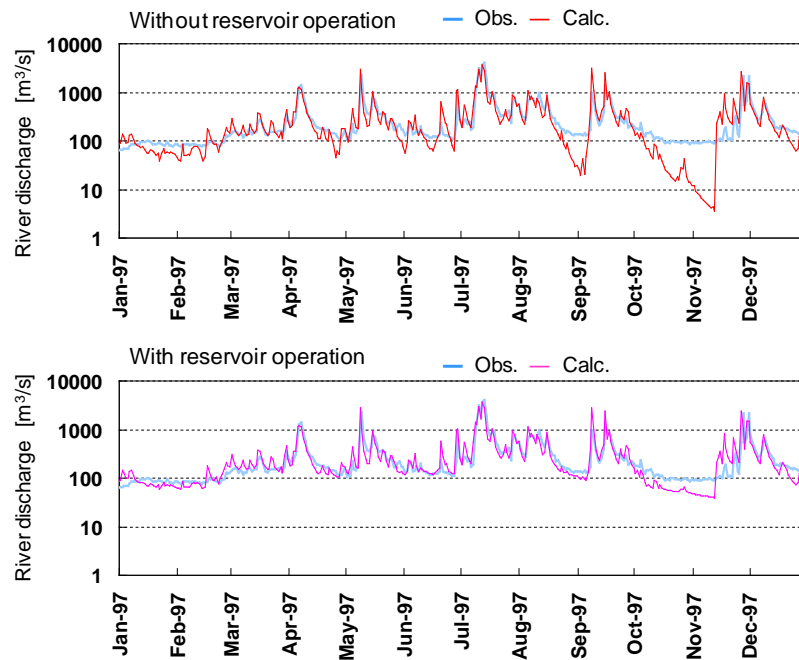


Fig. 13 Influence of the reservoir operations on river discharge at the downstream of reservoirs (Inuyama).

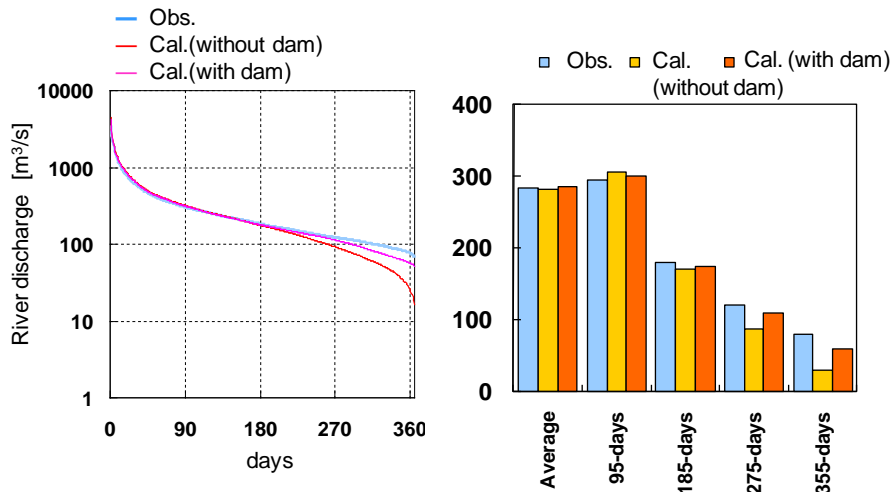


Fig. 14 Influence of reservoir operation on flow duration curve at Inuyama.

3.3 マルチ気候モデルによるアンサンブル実験結果-2(基準地点における河川流量変化)

Fig. 15 上段は、木曾川水系の各基準地点における月別河川流量の将来変化率（現在の河川流量に対する将来の河川流量の相対変化）を示している。図中に赤色で示されているのがAGCM20の将来気候予測結果をHydro-BEAMに入力して得られた流出解析結果で、青色で示されているのがCMIP3の将来気候変化予測の結果を入力として得られた流出解析結果である。

Fig. 15 上段の月別流量の変化率からは、いずれの地点においても、1～2月の河川流量が増加し、3～4月の流量は減少、さらに5月の流量は増加するという予測結果が、AGCM20およびCMIP3でともに得られており、これらの月流量変化の予測結果の信頼性は比較的高いことがわかる。この結果は、温暖化に伴って1～2月の降水量に占める降雪量の比率が減少することにより、現在では厳冬期に積雪として地表面に一時的に保持され流出に寄与していなかった降水成分が、降雨として供給されるようになり、それがそのまま（時間遅れを生じずに）河川に流出してしまうことによって、この時期の河川流量の増加に寄与しているものと考えられる。また、地表面に保持されていた積雪が、気温の増加に伴い3～4月頃にかけて融けて、融雪出水として河川流量の増加に寄与していた流出成分が、冬期降雪量（積雪量）の減少に伴って減少するために、この時期の河川流量が減少するという予測結果になったものと考えられる。

一方、6月から12月にかけては、CMIP3では夏期に増加し、その後減少していくと予想されているの

に対し、AGCM20では、8～10月頃に一旦減少して、その後増加するという逆パターンの結果が得られており、特に6～10月にかけてはCMIP3による予測結果の標準偏差も大きいことから、この時期（梅雨～台風シーズン）の将来予測結果は不確実性が高いことがわかる。

各流域の下流部に位置する基準地点における1～2月期における河川流量の増加と3～4月期における河川流量の減少は、下流域の利水者の利水安全性を考える場合に、現行の許可水利権の期別割り当てのままでは、将来の気候変動に伴う河川流量の変化に適応できなくなる可能性を示唆している。しかし、特に水需要が高まる夏期における河川流量の変化予測結果についての不確実性が高いことから、将来より安定した水資源量を確保するためには、気候条件だけに左右されないためにも、上流域のダム群による水資源量の十分な確保が重要になると考えられる。

Fig. 15 下段の流況曲線の変化からは、AGCM20による予測では、各流域ともに豊水流量以上の洪水規模は現在とほとんど変化しないという結果となっているが、低水以下の流量については、木曾川犬山地点ではやや増加、長良川忠節地点と揖斐川万石地点では減少するという予測結果が得られた。一方、CMIP3（8モデル平均）による予測では、各流域とも年最大洪水の規模が現在よりも約20%ほど増加し、渇水側では、木曾川の犬山地点を除いて、長良川忠節地点と揖斐川万石地点では、低水以下の流量が現在よりも10%以上減少するという結果が得られ、木曾川水系内でも気候変動に伴う流況変化のパターン（洪水や渇水リスク）が基準地点ごとに大きく異なることがわかった。

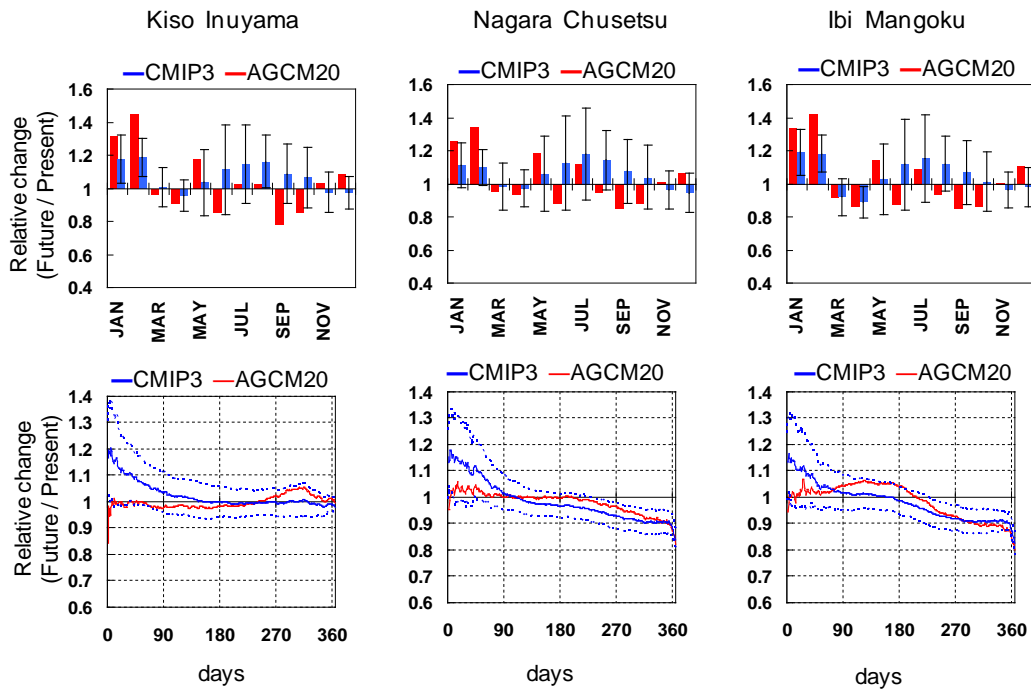


Fig. 15 Change of monthly river discharge (Upper) and change of flow duration curve (Bottom) in the Kiso three river basins.

3.4 マルチ気候モデルによるアンサンブル実験結果-3(ダム貯水池への河川流入量変化)

Fig. 16 は、木曾川水系における主要5ダム(徳山ダム、岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム、牧尾ダム)貯水池への月別河川流入量の将来変化率(現在の河川流量に対する将来の河川流量の相対変化)を示している。Fig. 15 上段の結果と同様に、1~2月における各ダムへの流入水量が増加し、3~4月の流入水量が減少すると予想されている。このような月別のダムへの流入量の変化は、現行の各ダムに適用されている操作規則が、将来の気候変動条件下においてもそのまま適用できるかどうかを判断する重要な資料となる。

冬期積雪量の多い徳山ダム、牧尾ダム、味噌川ダムなどは、1~4月の流量変化率が他のダムよりも大きく、特に、融雪出水期に発電放流を行い、その後の流入量で水位回復を図って5月以降のかんがい用水の供給を行う牧尾ダムでは、現在の同じ操作規則のままでは、Vカット操作後に速やかな水位回復ができず、十分なかんがい用水の供給ができなくなる可能性が示されている。また、洪水調節(治水容量)を持つダムにおいては、現在よりも規模の大きい出水が予想されるため、ダム別および季節別に制限水位や治水容量の見直しをしなければ、既往の出水を超えるような規模の大きな洪水が発生した際に、洪水調整できずに無効放流を生じ、下流域に対する

洪水氾濫のリスクを高めてしまう可能性も示唆される。

Fig. 17 は、木曾川水系における主要5ダム(徳山ダム、岩屋ダム、味噌川ダム、阿木川ダム、牧尾ダム)貯水池に流入する河川の流況変化を示している。洪水側の極値付近以外は、CMIP3による予測結果はAGCM20の結果と概ね一致しているため、以下ではCMIP3の結果のみについて考察する。

まず、洪水側(年最大流量)付近については、すべてのダムにおいて、流入河川の流量が現在よりも20%以上増加していることから、洪水調節に対しては、各ダムともに現在よりも厳しい操作を要求されるようになると予想される。

一方、渇水側(低水流量以下)の変化については、増減のパターンがダムごとに大きく異なる結果が得られた。これは、地域によってダム上流域における水資源賦存量(年間降水量-蒸発散量)や融雪量の変化が大きく異なるためであると考えられ、特に味噌川ダムと牧尾ダムでは、渇水期の流入量が大幅に増加するため、利水安全性は高まると考えられる一方で、徳山ダムや阿木川ダムでは現在よりも10~20%減少すると予想され、渇水時のダム管理が難しくなる可能性がある。したがって、異常渇水時に備えて、気候条件の異なる複数の流域に水源を持つこと(水源の多系統化)は、将来の渇水リスクを分散させるという意味で有効な対策であると考えられる。

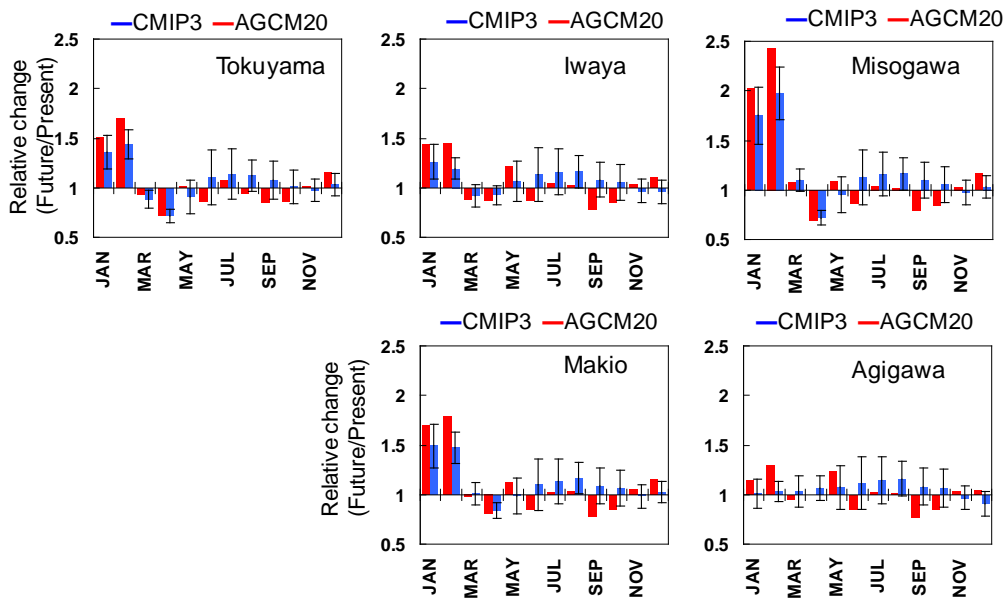


Fig. 16 Change of monthly river discharge into the dam reservoirs located in the upstream of the Kiso three river basins.

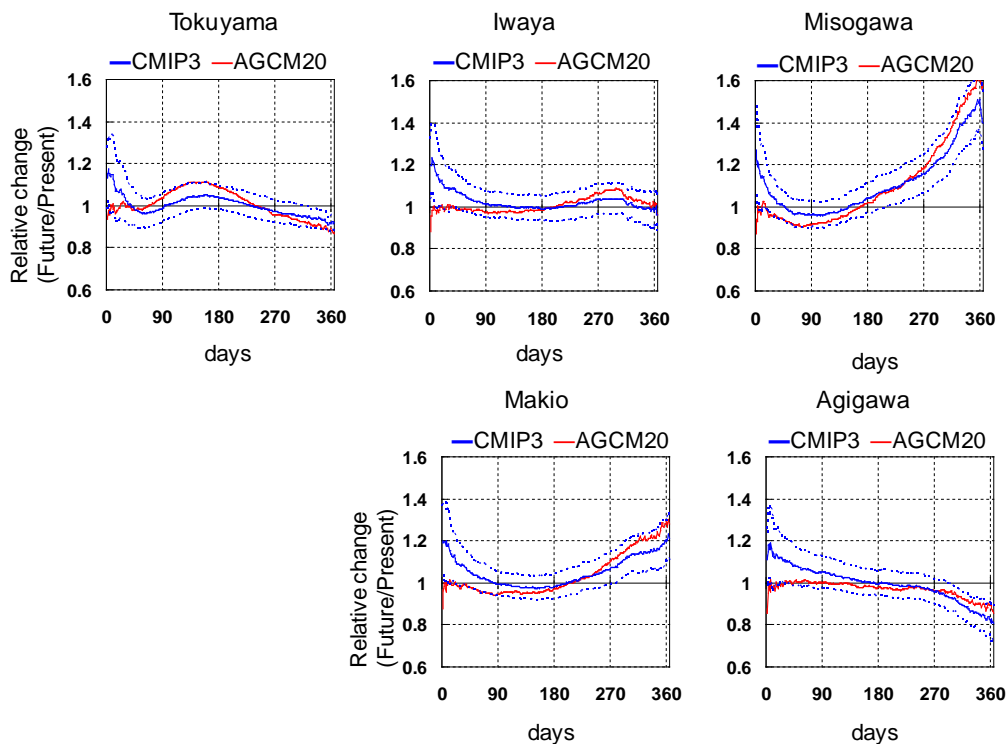


Fig. 17 Change of flow duration curve of the inflow to the dam reservoirs located in the upstream of the Kiso three river basins.

4. おわりに

本研究では、木曾三川流域における気候変動に伴う将来の洪水および渇水リスク変動の影響を明らかにするため、高解像度気候モデル(AGCM20)と

CMIP3 マルチ気候モデルによる複数の将来予測結果を用いた将来予測の不確実性の幅を考慮した将来の気候変動予測と、人間活動(取水および貯水池操作)の影響を考慮した流出解析を実施した。

その結果、木曾三川流域における利用可能な水資源量変化の空間分布が流域内で大きく異なると予想

され、洪水や渇水のリスクについても、基準地点やダム場所によって、リスクが増加するところや緩和されるところが生じることが明らかとなった。

これらの知見は、今後のダム管理や河川管理の計画を考える上で重要な将来予測情報を提供するとともに、予想される極端な洪水や異常渇水リスクの分散を図るためには、木曽川水系内における複数のダムによる統合的な洪水調節やダム水源の多系統化がひとつの有効な対策となりうることを示唆している。

今後、IPCCのA1Bシナリオ以外の将来予測シナリオや、人口変動予測に対応した将来取水量（水需要予測）の影響、徳山ダムの操作や木曽川水系連絡導水路を組み込んだ流出シミュレーションなどを実施することで、木曽川水系における将来の流況予測がより確度の高いものになることが期待できる。

謝 辞

本研究の一部は、名古屋市上下水道局の受託研究費用を用いて行われた。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)および文部科学省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」から提供を受けた。また、岩屋ダムの

操作については、独立行政法人水資源機構岩屋ダム管理所の加藤宏基所長および吉澤利男所長代理からデータおよび情報を頂き、その他の水資源機構管理ダムの操作やH-Vデータ等については、独立行政法人水資源機構中部支社管理部の皆様（利水サービス課 竹内英二課長、施設課 野村孝芳課長、利水調整課 足立武士氏）から提供して頂いた。また、水資源機構徳山ダム管理所の青井保男副所長および木曽川用水総合管理所の加藤智雄副所長からは、木曽川水系連絡導水路や木曽川用水に関する資料と詳しい説明をして頂いた。ここに記してこれらの方々に謝意を表します。

参考文献

- 国土交通省中部地方整備局 (2008): 木曽川水系河川整備計画.
- 佐藤嘉展・森英祐・浜口俊雄・田中賢治・小尻利治・中北英一 (2009): 気候変動に対する先行適応のための洪水および渇水リスク評価, 京都大学防災研究所年報 第52号B, 573-586.
- Kojiri T. (2006): Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM). In Watershed models, Singh VP, Frevent DK. (eds). Taylor & Francis, CRC Press: Florida; 613-626.

Application of Multi-Climat Model and Distributed Hydrological Model with Storage Reservoirs on the Kiso Three River Basins

Yoshinobu SATO, Toshiharu KOJIRI, Yuri MICHIIHIRO and Yasushi SUZUKI

Synopsis

To clarify the hydrological impact of climate change on water resources management and adaptation measures for river disaster prevention in a regional scale, a super high resolution AGCM20 and CMIP3 multi model dataset are applied to the Kiso three rivers basin as an input data for a distributed hydrological model (Hydro-BEAM) with storage reservoir. The results shows that the uncertainties of the future projection caused by a relatively coarse resolution current conventional GCMs can be decreased significantly by a simple multi-model ensemble approach applied in this study.

Keywords: Kiso three river basins, climate change, reservoir operation, river discharge, distributed hydrological model