

## 気候変動に伴う木曾三川流域の流況予測

佐藤嘉展・道広有理・鈴木靖・中北英一・小尻利治

### 要 旨

将来の気候変動に伴う木曾三川流域の流況変化を明らかにするため、IPCCのA1Bシナリオに基づく超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM20)と分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM)を用いて、近未来(2015-2039年)と21世紀末(2075-2099年)における流況の変動予測を試みた。その結果、木曾三川流域の平常時の流況は、降水量と蒸発散量の水収支に大きく規定され、近未来では流量が増加するが、今世紀末には逆に減少するという結果が得られた。同様に、極端現象時についても、洪水や渇水のリスクが時期により大きく変化するという結果が得られた。さらに、温暖化による融雪量の減少と蒸発散量の増加に伴って、河川流量の季節変化が平滑化されることも示された。

**キーワード:** 気候変動, 木曾三川流域, 流況予測, MRI-AGCM20, Hydro-BEAM

### 1. はじめに

木曾川水系は、長野県木曾郡の鉢盛山(2446m)を源とする木曾川と、岐阜県郡上市の大日ヶ岳(1709m)を源とする長良川、岐阜県揖斐郡の冠山(1257m)を源とする揖斐川を基幹とし、濃尾平野を南下し、下流域では海拔ゼロメートル地帯を天井川となって流れ、最終的には伊勢湾に注ぐ、流域面積約9100km<sup>2</sup>の流域であり、木曾・長良・揖斐の三川をまとめて木曾三川と呼ばれている。木曾三川流域の河川表流水は、名古屋などの大都市への水道用水や、木曾川用水、濃尾用水、愛知用水などの農業用水への貴重な水源となっており、また、中京圏の自動車産業や航空宇宙産業などにとっても重要な役割を担っている(国土交通省河川局, 2007)。

流域地形は、上流域の傾斜がきわめて急峻であるのに対し、下流域では高低差がほとんどないため、河川の通水能力が低く、急激な出水時には、下流域で深刻な洪水被害が頻繁に発生している一方、生活用水・工業用水の需要増加に伴って、水不足の問題も深刻化しており、木曾三川流域では、治水・利水の両面からの総合的な河川管理が求められている。

このような状況の下、流域内の気候が将来どのように変化し、それに伴って、流域環境がどのように変化し、さらに、洪水や渇水などの災害リスクがどのように変化するのかを明らかにすることは、流域内の水資源をより適切に管理し、将来予測される災

害の被害を軽減するためにも重要な課題といえる。

そこで本研究では、高解像度の全球気候モデルと分布型流出モデルを用いて、気候変動に伴う木曾三川流域の流況解析を実施し、将来の河川災害リスクの変動予測を試みた。

### 2. 手法

#### 2.1 解析の概要

本研究では、木曾三川流域を対象に、分布型流域環境評価モデルHydro-BEAM (Kojiri, 2006)を用いて、空間解像度1kmで1時間ごとの流出計算を実施した。

流出計算の精度検証には、入力気象データとして地上気象観測データを利用し、現在気候条件下での実測流量をできるだけ良好に再現できるようにパラメータ(土壌透水性係数・流出係数等)を調整した。将来の流域環境の予測と災害リスクの変動評価については、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)のA1Bシナリオに基づいた気象庁気象研究所の超高解像度気候変動推計情報 (MRI-AGCM20) を利用した。

#### 2.2 対象流域と河道網の抽出

Hydro-BEAMで流出解析を実施するための対象流域の抽出には、国土数値情報の流域・非集水域メッシュ(W07\_52M)を用い、メッシュ内に一部でも対象流域が含まれれば、そのメッシュは流域内とするようにして流域メッシュを抽出した。この条件で抽出

された木曾三川流域の全メッシュ数は8993で、その総面積は約9409km<sup>2</sup>となり、実際の木曾三川の全体の流域面積(約9100km<sup>2</sup>)よりもやや大きくなったが、ここでは特にメッシュ数の調整は行わず、そのままの値を用いることにした。

河道網については、流域内の全メッシュを対象にDEM(国土数値地図50m標高データ)のみから抽出しようとする、標高差が小さくなるにつれ、実際の河道位置と大きくずれたり、窪地が生じたりすることがある。そこで、まず流域内メッシュから主河道となるメッシュの位置を抽出し、次に、それ以外のメッシュの落水方向と河道勾配を決定することにした。主河道位置の抽出には、国土数値情報の流路延長(W06-52M)を用いた(Fig. 1)。この方法を適用することにより、ほとんど標高差のない木曾三川下流域についても、実際の河道位置が忠実に再現され、上流端から河口まで連続して流れを追跡することが可能となった。

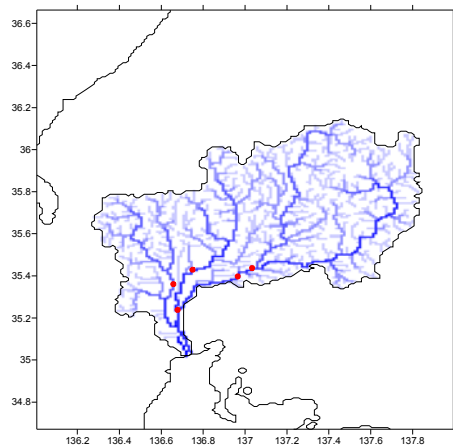


Fig.1 Channel network of the Kiso three river basin.

### 2.3 地上気象観測値

気象要素の観測値として用いたのは、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)データである。AMeDASデータからは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に必要な気象要素(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。

木曾三川流域で用いた地上気象観測地点の位置をFig. 2に示す。これらの離散データは、距離逆数加重平均(IDW)法により、1kmグリッドメッシュデータに

内挿し、流出解析モデルの入力値として用いた。なお、気温については、各地点における値を標高補正係数(0.61°C/100m)で海面気温に換算し、IDW法を用いてグリッド海面気温に内挿後、グリッド平均標高値を用いてグリッド平均気温に修正した値を用いた。

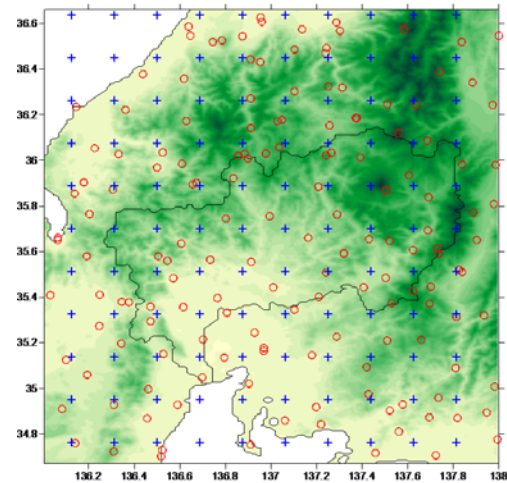


Fig. 2 Location of ground meteorological observation (AMeDAS/SDP) stations (○) and GCM's output points (+) around the Kiso three river basin.

### 2.4 地表面熱収支モデル

地上気象観測値には、融雪量や蒸発散量の観測値がないため、長期の流出解析を行うためには、入手可能な気象観測要素から地表面熱収支モデルを用いて、融雪量および蒸発散量を推定する必要がある。そこで、ここでは、構造が比較的単純で精度のよい解析が可能なSVATモデルを用いることにした。

特に冬季の流出解析を行う場合、各グリッドセル内に供給される降水が雨か雪かによって、それが土壌中にそのまま供給されるか、積雪層として地表に一時保持され、その後融解して土壌に供給されるかが異なり、それが流出過程に大きな影響を及ぼす。そこで、ここでは、気温データを用いて雪と雨の分離を行い、地上気温が2°C以下になると雪になるようにした(気象庁気象研究所物理気象研究部, 1984)。

一方、夏季の流出解析を行う場合、降雨直後のピーク流量からの低減過程は、各グリッドセルからの蒸発散量に大きく規定される。そこで、ここでは、近藤・徐(1997)の「ポテンシャル蒸発量」を基準蒸発量として用いることにした。

本研究で用いた地表面熱収支(SVAT)モデルの概要については、佐藤ら(2009)に詳しくまとめられている。

## 2.5 気候変動推計情報 (MRI-AGCM20)

将来の気候変動推計情報として流出解析モデルへの入力気象データに用いたのは、気象庁気象研究所が開発した超高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM20, TL959)である。このモデルは全球を経度方向に1920分割、緯度方向に960分割しており、空間解像度は約20kmである。

このモデルは、現在気候条件(1979-2003年)では、月単位の平均海表面温度(SST)を境界条件とし、地形性降雨や梅雨前線に伴う降雨を良好に再現できることが確認されている(Kitoh *et.al.*, 2009)。

一方、将来気候条件(近未来：2015-2039年；21世紀末：2075-2099年)については、IPCC第4次報告書(AR4)の温室効果ガス排出シナリオ(SRES)のA1BシナリオのSSTを境界条件として与えている。なお、A1Bシナリオは、21世紀末までの全球平均の気温上昇が約2.8℃であり、様々な温暖化予測シナリオ(1.8～4.0℃)の平均的な気温上昇を想定するシナリオとなっている。

本研究では、AGCM20の出力要素(以下GCMデータとする)のうち、1時間単位の降水量と気温、日単位の地上到達雨量、融雪量、地面蒸発量および蒸散量を用い、1時間ごとの正味入力降水量(地上到達雨量+融雪量)と日蒸発散量を流出解析モデルの入力要素として用いた。ここで、地上到達雨量とは、降水量から植生による樹冠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。

Fig. 2に木曾三川流域周辺のGCMデータの出力地点を示す。それぞれのデータは、地上気象観測値の場合と同様に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。

## 2.6 流出解析モデル (Hydro-BEAM)

流出解析については、土地利用や土壌の鉛直多層構造を考慮し、洪水解析だけでなく、渇水リスクや物質循環、生態環境等、様々な流域環境を総合的に解析することが可能な分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM: Hydrological River Basin Environment Assessment Model; Kojiri, 2006)を用いた。

本研究で用いたHydro-BEAM(佐藤ら, 2009)では、森林地・草地/農地では、表層土層の飽和度に応じて表面流が発生し、その残差が下層土壌層へ浸透し、中間流や規定流成分となる。一方、都市部では下方浸透はほとんど発生せず、水域では表面流のみが発生するようにしている。また、水田部では、実際の水田の維持水深を再現するように、不足水は河道から取水するようにし、余剰水は河道へと排水されるようにした。

Fig.3に本研究で用いたHydro-BEAMの概要を示

す。斜面土壌の鉛直構造は、A～C層までを考慮し、D層は不透水層とした。斜面流出過程は、表面流と中間流を考慮したKinematic waveモデルで追跡し、B層とC層は線形貯留関数モデルで解析した。

蒸発散には、まずはA層の水を利用し、A層の水がなくなった時点でB層、B層の水がなくなるとC層の水を利用するようにした。

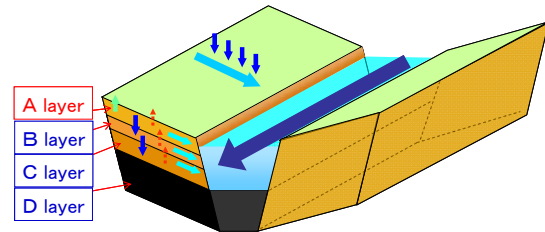


Fig. 3 Basic structure of the Hydro-BEAM.

## 2.7 水文時系列の傾向変動解析

気温や降水量などの水文量の時系列は、傾向成分(トレンド)と周期成分および確率的変動成分の和として表現される。傾向成分は、水文量が経年的に増加傾向にあるのか減少傾向にあるのかを意味し、周期成分としては、季節変動や多雨年と少雨年あるいは猛暑年と冷夏年が交互に繰り返される場合の周期変動などが挙げられる。これら2つの変化を取り除けば、確率的な変動成分が得られる(西岡・寶, 2003)。

長期的な傾向については、IPCC第4次評価報告書によると、20世紀後半に急激に気温が上昇しており、21世紀後半までにさらに上昇すると予想されている。また、北半球の高緯度地域で年平均降水量が増加し、その変動も大きくなると予測されている。

そこで、本研究では、まず木曾三川流域の過去から現在までの流域気候の実態を把握するため、ノンパラメトリック法のひとつであるMann-Kendall検定によって流域の水文量変動解析を試みる。

Mann-Kendall検定では、ある水文量の時系列に対して、それが独立で同一の確率分布にしたがうという帰無仮説が成立するかどうかを検定する手法である。この仮説が棄却されると、その水文時系列は変化傾向があるとみなされる。Mann-Kendall検定の帰無仮説H0は、「n個のデータ(x1,x2,...,xn)が独立で同一の確率分布に従う」というものである。

Mann-Kendall検定では、統計量Sを以下のように定義する。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\sin(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

統計量Sの平均E[S]と分散Var[S]は、以下の式で表される。

$$E[S] = 0 \quad (3)$$

$$\text{Var}[S] = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^k t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right] \quad (4)$$

ここで、 $t_j$ は、データを大きさ順に並べ替えたときに、同じ値が連続して出現する個数を表し、 $k$ はその同じ値が発生する組（グループ）数を表している。これらから、 $S$ を標準化した標準統計量 $Z$ は、以下の式で算定される。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、有意水準を $\alpha$ とすると、標準正規変量 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ が満たされるとき、帰無仮説 $H_0$ が棄却され、 $S > 0$ のとき、時系列データは増加傾向があり、 $S < 0$ のとき減少傾向があることになる。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 気温と降水量の長期変化傾向

Fig. 4に、1979年から2003年までの25年間における長良川流域と木曾川流域の年平均気温と年間降水量の変化を示す。

長良川流域の多年平均気温は12.2°C、木曾川流域は、9.2°Cであり、木曾川流域の方が約3°C低い。これは、主に木曾川の平均標高が長良川流域よりも高いことに起因する。

流域平均気温の変化傾向については、Mann-Kendall検定の結果、各流域ともに95%以上の信頼度で有意な上昇(温暖化)傾向があることがわかった。10年あたりの気温上昇のトレンドは各流域とも約0.4°Cで、このままなら、100年後には各流域の平均気温が約4°C上昇することになる。

一方、流域平均降水量は、長良川流域が2183mm(標準偏差：319mm)、木曾川流域が2050mm(標準偏差：363mm)で、各流域ともやや減少(長良川流域：-2.2mm/y；木曾川流域：-5.4mm/y)していたが、統計的に有意な傾向は検出されなかった。つまり、木曾三川流域で、この25年間の間に、降水量が有意に増加したり減少したりする傾向はみられないという結果が得られた。

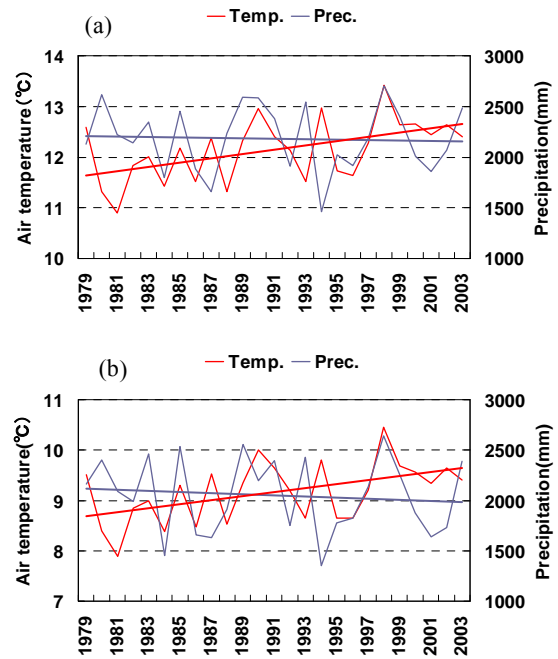


Fig. 4 Long-term trend of air temperature and precipitation in (a) Nagara and (b) Kiso river basin.

#### 3.2 現在気候の再現結果

Hydro-BEAMなどの分布型流出モデルを用いて河川流況の解析を行うためには、入力データとして、1kmグリッドメッシュ単位の正味降雨量(地上到達降雨量)、融雪量、蒸発散量が必要となる。過去から現時点までの河川流量の再現計算については、地上で実測された気象観測値と、熱収支計算を実行することにより、流出解析に必要な入力データを得ることができるが、将来の流況を予測する際には、地上気象観測値がないため、GCMによる将来予測情報を用いることになる。GCMから出力される気象要素のデータは、あくまで物理的な根拠に基づく様々なモデルから得られる計算値であり、実際の地上観測値と完全に一致するわけではない。

そこで、ここでは、現在気候条件下でGCM出力データと実際の地上気象観測データとの差異(バイアス)がどの程度あるのかを検証することにした。

Fig.5 は、現在気候条件(1979-2003年)における地上気象観測値とAGCM20による木曾三川流域の気温について多年(25年)平均の空間分布を比較した結果を示している。気温の空間分布は標高依存性が高いことと、本研究で用いたGCMデータの空間分解能が高いことなどにより、流域内気温の空間分布はGCMでも良好に再現されていることがわかる。しかし、流域平均値でみると木曾三川流域ではGCMの方が約1°C気温が過小評価となっていた。

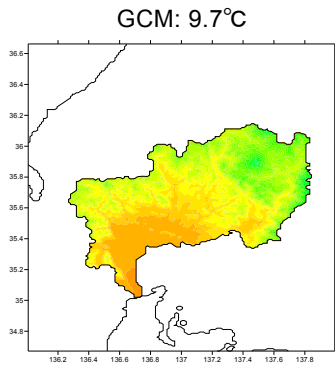
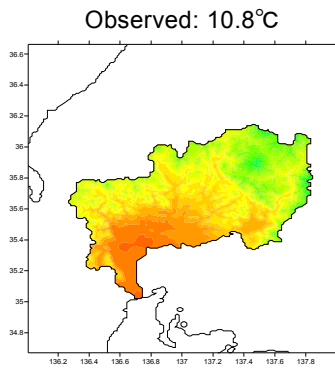


Fig. 5 Spatial distributions of air temperature in the Kiso three river basin (1979-2003).

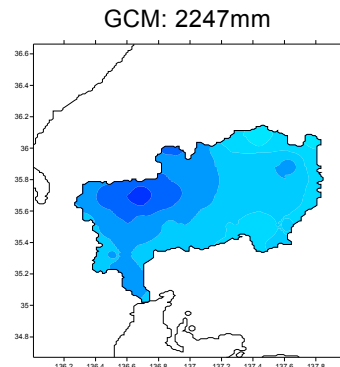
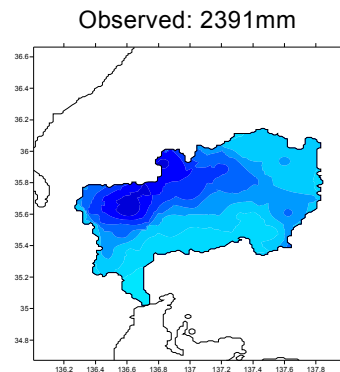


Fig. 6 Spatial distributions of annual precipitation in the Kiso three river basin (1979-2003).

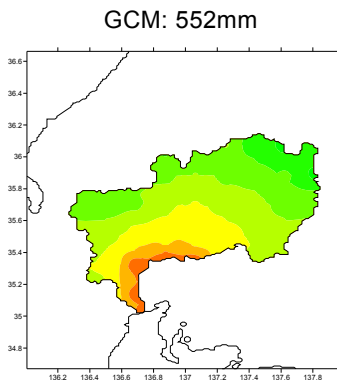
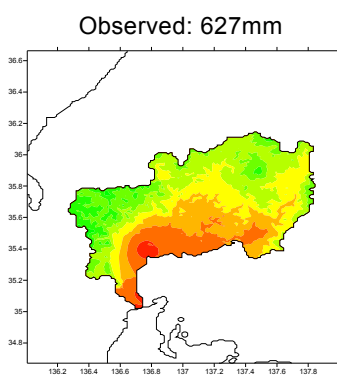


Fig. 7 Spatial distributions of annual evapotranspiration in the Kiso three river basin (1979-2003).

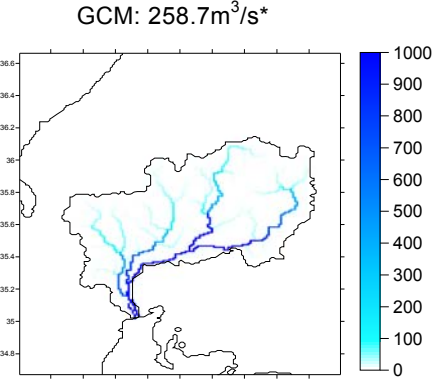
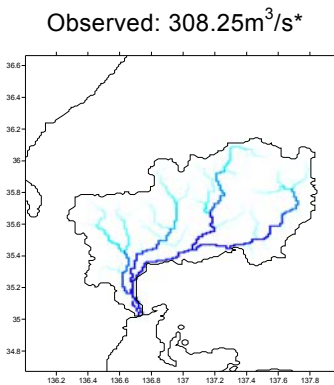


Fig. 8 Spatial distributions of annual mean river discharge in the Kiso three river basin (1979-2003).

\* Inuyama observation point

同様に、Fig.6は年降水量の再現性を示している。気温の場合と同様に、流域内で降水量が多いところや少ないところなどの空間分布はGCMでもある程度は再現されているが、GCMによる再現値は、144mm(約6%)過小評価となった。

Fig. 7は、蒸発散量の空間分布を示している。蒸発散量については、前述したように地上気象観測値(実測値)がないため、2.4の地表面熱収支(SVAT)モデルによる計算結果とGCM出力結果を比較した。

SVATに比べるとGCMの蒸発散量が75mm少なく見積もられた。これは今回用いたGCMでは流域の気温が約1℃低く見積もられていることと、モデルの違い(SVATはポテンシャル蒸発量でAGCM20は実蒸発散量)の影響が大きいと考えられる。このため、現時点では、GCMの値が過大評価なのか過小評価なのかについての結論は出せないが、SVATモデル出力値を実蒸発散量に修正することで、この差異はある程度まで縮小できると考えられる。それでも解消されない差異は、SVATモデルによる結果を基準としたバイアス補正を行って修正する必要がある。

Fig. 8にHydro-BEAMによる木曾三川流域の流出解析結果を示す。この図は、現在気候における流域内の多年平均流量の空間分布を示している。図中の数値は、木曾川の犬山地点の流量を表している。はじめに、入力気象データとして地上気象観測値を用いて、モデルパラメータを調整(キャリブレーション)した結果、実測流量(305.3m<sup>3</sup>/s)との誤差を1%以内で流量を推定することができた。しかし、GCMを用いた場合は、モデルに入力される降水量、蒸発散量、さらに融雪量のそれぞれに、観測値(もしくは熱収支モデル推定値)との間に差異(バイアス)が含まれるため、全く同じパラメータ設定で流出解析を行っても、得られる結果が異なってしまうことになる。Fig. 8の場合、GCMを用いた場合の年平均流量が約50m<sup>3</sup>/s過小評価となった。この結果は、流出量が、蒸発散量の寄与と降水量の寄与のバランス(水収支)で決まることを示しており、将来の河川流量の予測には、単純に降水量や気温だけでなく、蒸発散量や融雪量のバイアス補正も重要になることを示唆している。

### 3.3 現在流況の再現結果

Fig. 9に1996年1月1日から1998年12月31日までの木曾三川流域主要4地点(揖斐川：万石、長良川：忠節、木曾川：今渡・犬山)における河川日流量の再現結果を示す。このキャリブレーション期間は、土地利用データ(1997年)を含む前後1年間とした。図中の青線が実測値、赤線が地上気象観測値を用いた場合のモデル(Hydro-BEAM)による計算値である。

期間中の水収支誤差(TWBE)は、実測流量をQobs、

計算流量をQcalとすると $TWBE(\%) = \left\{ \left| \sum Q_{cal} - \sum Q_{obs} \right| / \sum Q_{obs} \right\} \times 100$ で表される。TWBEの値は、万石で15.5%、忠節で3.6%、今渡で3.6%、犬山で0.9%となり、揖斐川の万石以外は5%以内の誤差に抑えられた。万石の誤差については、流域面積の影響が大きいと考えられるが、今回の河道網モデルでは問題を十分に修正できなかった。これは河道網を作成する際に必要となる基準点における河川断面形状(川幅、計画高水位)および集水面積のデータが十分に得られなかったため、揖斐川の河道網の形状について十分な調整が行えなかったことが主な原因と考えられる。国内主要水系の諸元については、(社)日本河川協会の日本河川図などから必要な情報が得られるが、それ以外の河川流域については、河川整備基本計画などに断面形状等のデータはあっても、集水面積に関する情報までは得られないため、今後さらに別の情報を収集して河道モデルの精度向上を図る必要がある。

Table 1に各地点の期間平均流量とその誤差(相対誤差)を示す。平均流量の相対誤差の値は水収支誤差と一致するが、符号が付くため、計算値が過大評価か過小評価になっているのかについての判断もできる。

Table 1 Annual mean river discharge of Kiso three river basin (1996-1998)

| Basin Point | Ibi mangoku | Nagara chusetsu | Kiso imatataru | Kiso inuyama |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|--------------|
| Observed    | 88.6        | 124.6           | 264.4          | 305.3        |
| Calculated  | 102.3       | 129.0           | 254.9          | 308.3        |
| Error (%)   | +15.5       | +3.6            | -3.6           | +0.9         |

Unit: (m<sup>3</sup>/s)

次に、1979年から2003年までの25年間の平均流量の再現性をTable 2に示す。(揖斐川万石は誤差が大きいため除外) この結果から、本研究で用いたモデルが長期間の河川流量についても良好に再現可能であることがわかる。

Table 2 Annual mean river discharge of Kiso three river basin (1979-2003)

| Basin Point | Nagara chusetsu | Kiso inuyama |
|-------------|-----------------|--------------|
| Observed    | 111.1           | 270.5        |
| Calculated  | 106.3           | 272.4        |
| Error (%)   | -4.3%           | +0.7%        |

Unit: (m<sup>3</sup>/s)

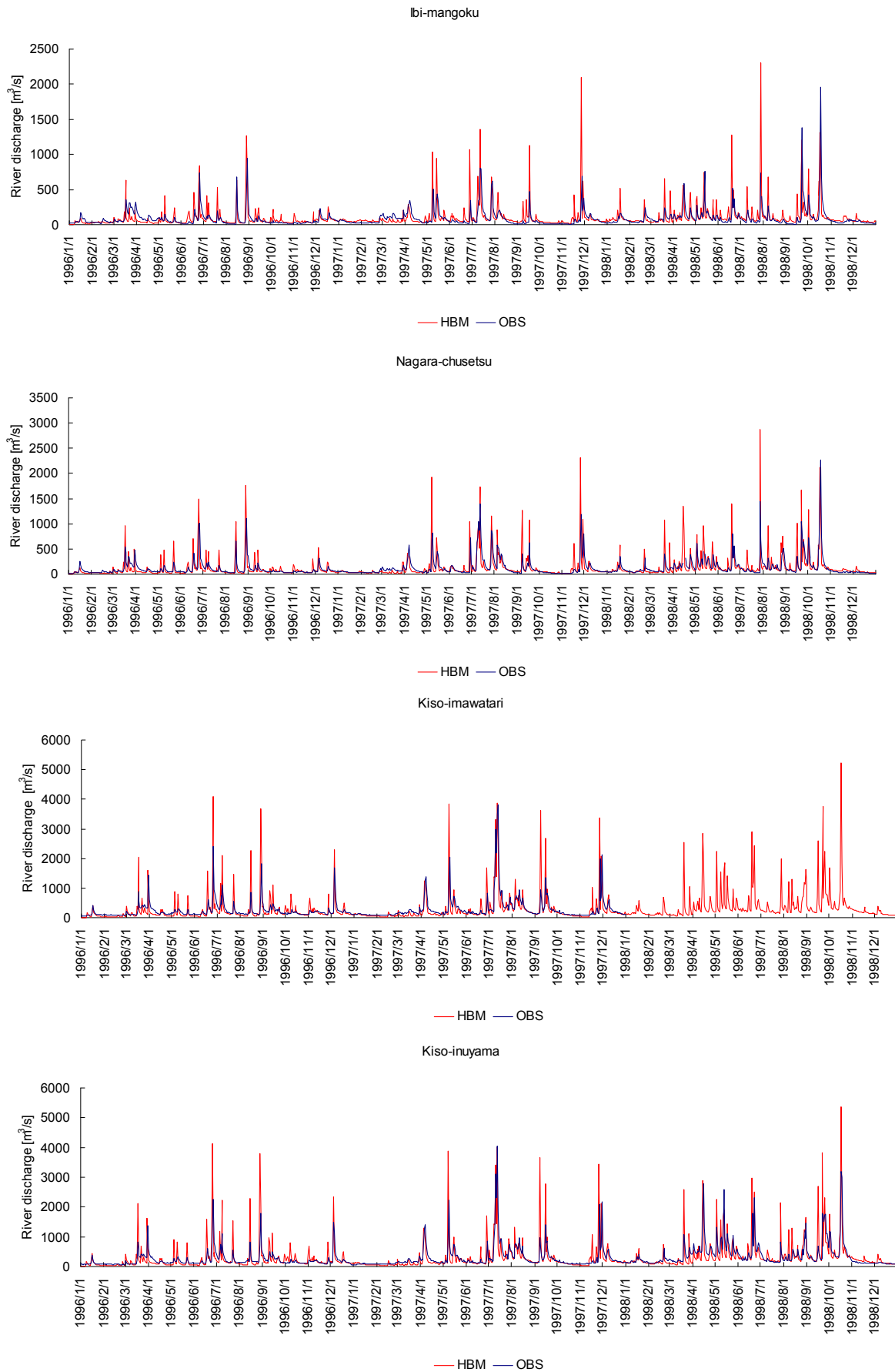


Fig. 9 Daily average river discharge in the Kiso three river basin (1996-1998).

Fig. 10は、長良川の忠節と木曾川の犬山の1979年から2003年までの25年間を対象にした長期流出計算の結果を示している。この図からも、月平均流量ベースで、各流域とも長期間にわたってその特性が良好に再現できていることがわかる。

Fig. 11は、長良川と木曾川の月平均流量の季節変化を示している。各流域とも冬～春(12～4月頃)にかけて、計算値が過小評価になっており、夏～秋(8～11月頃)にかけては逆に過大評価になっていることがわかる。

河川流量の実測値と比較して計算結果が過小評価になる要因としては、融雪量を過小に推定していることが挙げられ、過大評価となっている要因としては、蒸発散量を過小に推定していることが考えられる。融雪量と蒸発散量の推定誤差については、本研究で用いた地表面熱収支(SVAT)モデルの精度を向上させる必要があり、実際に積雪・融雪量や蒸発散量の実測データのある地域を対象としたモデルパラメータのさらなる調整が必要と考えられる。

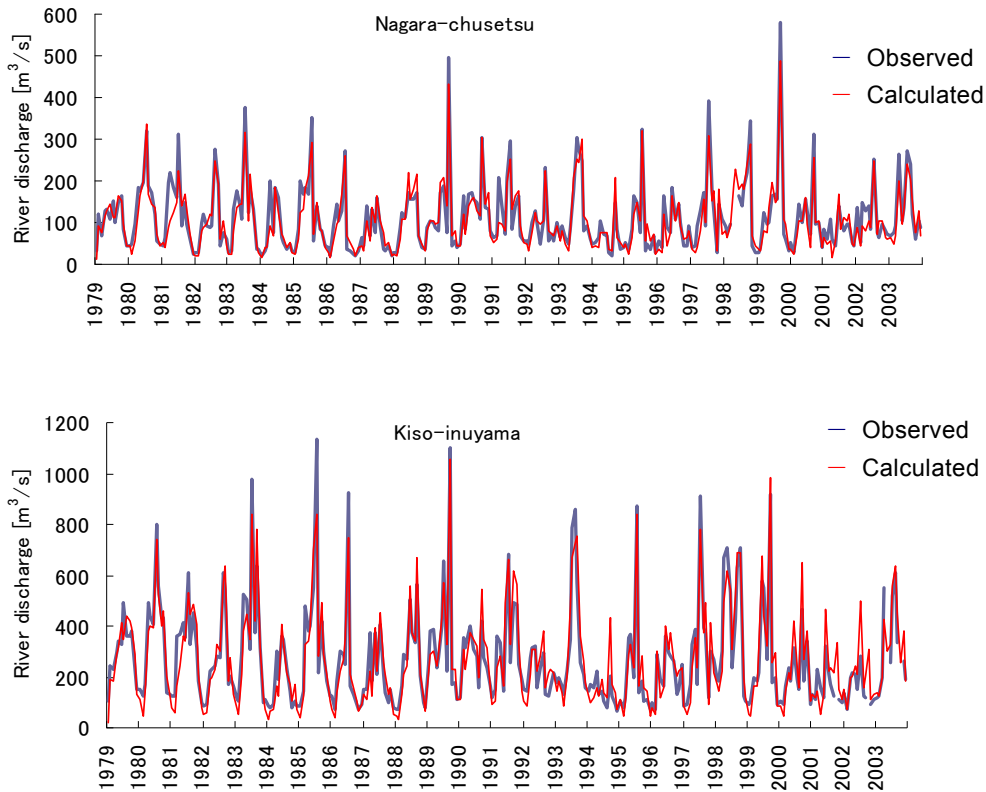


Fig. 10 Monthly average river discharge in the Kiso three river basin (1979-2003).

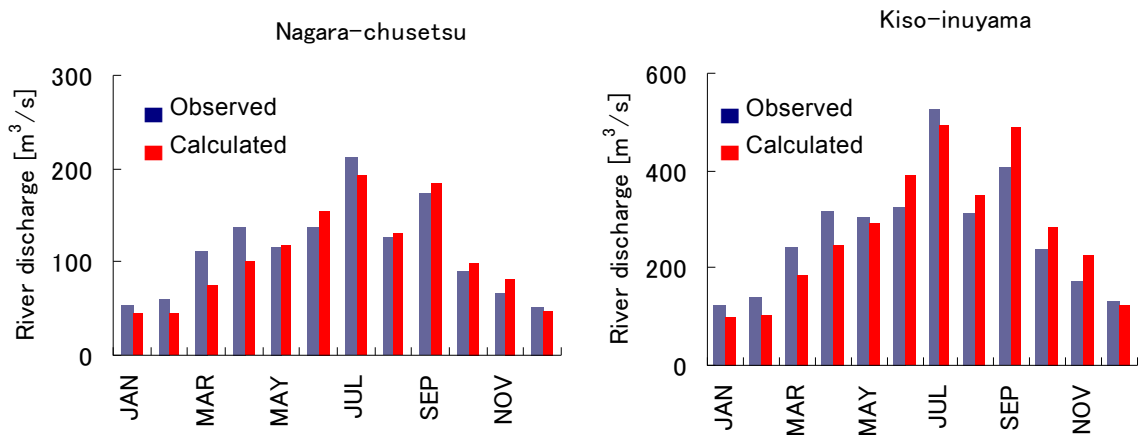


Fig. 11 Seasonal change of river discharge in the Kiso three river basin (1979-2003).



また、木曾川流域では、流域内に岩屋ダム(150×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)や味噌川ダム(55.0×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)、阿木川ダム(44.0×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)などにより流量が人為的に操作されているため、放流時や貯水時の流量を過小あるいは過大評価している可能性が高い。また、木曾川流域では、木曾川用水(上流部・下流部)や濃尾用水、愛知用水などが取水されており、そのほかにも名古屋市をはじめ、愛知県や岐阜県が河川から直接取水を行っているため、その分の計算流量が過大評価になっていることも挙げられる。これらの影響を厳密に考慮するためには、実際の流域内の各地点における取水の実態やダム操作の実態といった人為的な要因を考慮した木曾三川流域の総合的な水資源管理モデルを構築していく必要がある。しかし、本研究では、流域平均の誤差が5%以下の精度で河川流量を予測できているので、敢えて人為的な影響は考慮せず、将来の気候変動に伴う影響評価の解析を行うことにした。

### 3.4 将来気候の予測結果

Fig.12(上側3段)は、AGCM20による木曾三川流域における将来気候の予測結果を示している。

木曾三川流域の平均気温は、近未来(2015-2039年)で約11℃、21世紀末(2075-2099年)には約13℃に上昇すると予想されている。流域の温暖化に伴って、流域内からの蒸発散による年間損失水量も増加し、現在気候に対して、近未来で年間約21mm、21世紀末には年間87mm蒸発散量が増加すると予想されており、流域内の水資源がその分減少することを意味している。一方、温暖化すると蒸発散量が増加するだけでなく、大気中に含まれる水蒸気量も増加するため、全球的には降水量も増加すると予想されている。しかし、降水量については、地形や大気の循環など様々な要因の影響で変化の大きさの地域差が蒸発散量の場合よりも大きく、気温増加に伴って一様に増加しないことが多い。

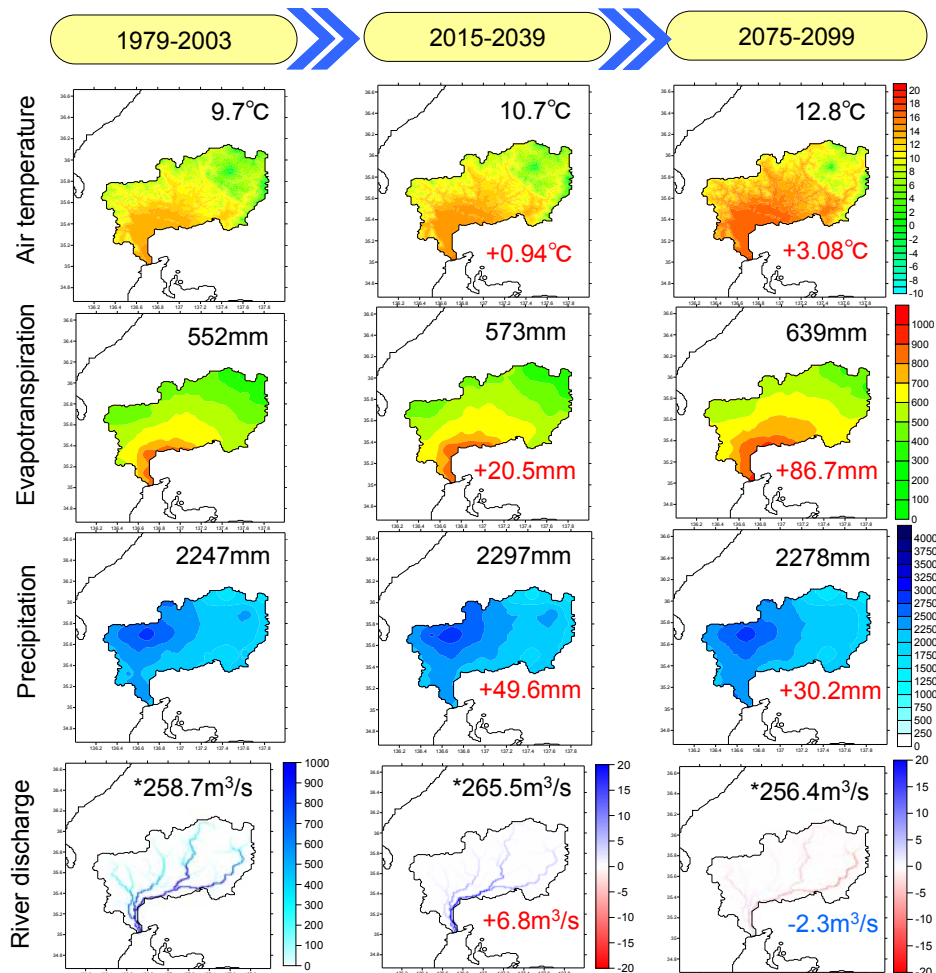


Fig. 12 Projection of future climate and river flow in the Kiso three river basin.

\*Inuyama observation point

そのため、気候変動(主に温暖化)に伴う流域内水資源量の変化を正確に予測するためには、蒸発散による損失量と降水による供給量の両者のバランスを考慮した長期水収支解析が不可欠となる。

木曾三川流域の場合、近未来では、温暖化に伴う蒸発散量の増加量よりも降水量の増加量のほうが多いため、流域内の水資源量は相対的に増加すると予想されたが、21世紀末になると、蒸発散量は、約87mm増加するが、降水量が31mmしか増えないので、近未来とは逆に流域内の水資源量は現在より減少すると予想された。

Fig. 13は、長良川と木曾川流域の河川流出に大きな影響を及ぼす気象要素の季節変化を示している。各流域ともに、温暖化に伴って、融雪量が顕著に減

少し、その発生時期が早期化していることと、年間を通して蒸発散量が増加すると予想されたが、降水量については明確な変化はみられなかった。

### 3.5 将来流量の予測結果

Fig. 12(最下段)は、AGCM20を入力した場合のHydro-BEAMによる木曾三川流域の流量変化の計算結果を示している。図中の数値は木曾川犬山地点の多年平均流量を示しているが、現在気候条件下で実測流量(305.3m<sup>3</sup>/s)よりも約15%過小評価となっていることに注意する必要がある。これはAGCM20の降水量が、実測よりも少ないことに起因すると考えられるが、それ以外にも、日降水量や時間降水量の発生頻度が異なることなども要因として考えられる。

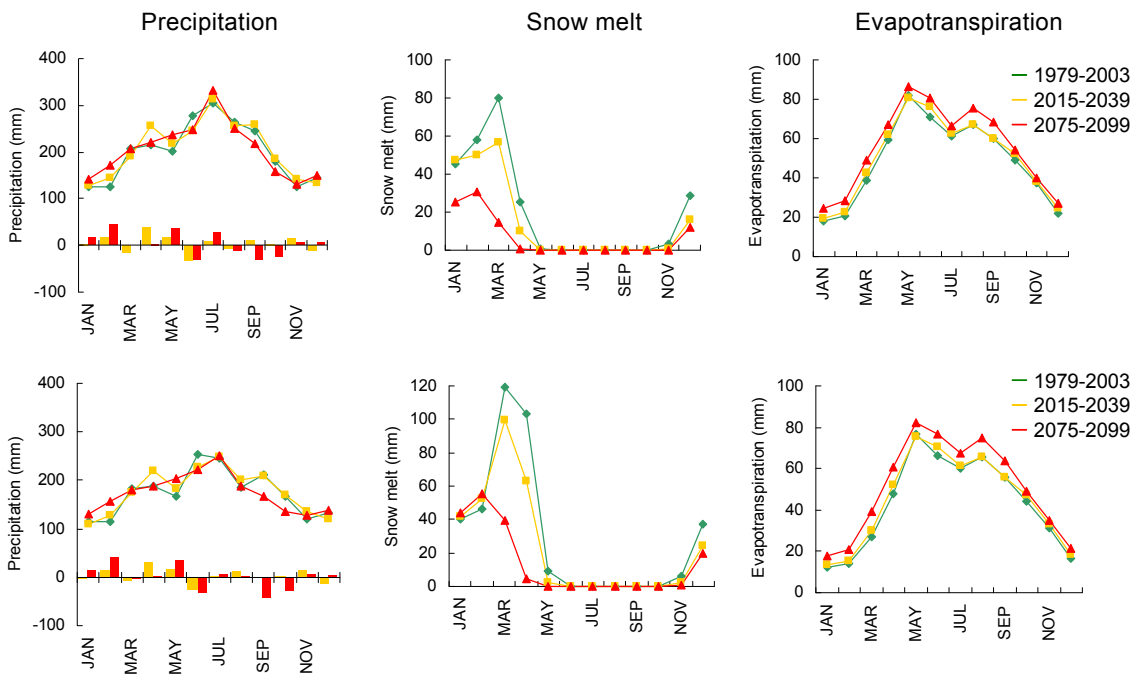


Fig. 13 Future climate change of the Kiso three river basin.  
Upper: Nagara river, Lower: Kiso river

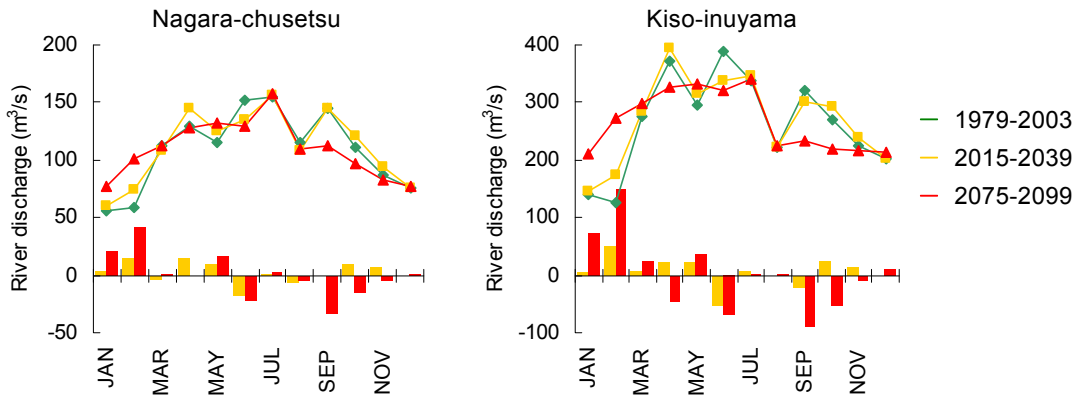


Fig. 14 Change of seasonal river flow in the Kiso three river basin.

一般にGCMで出力される降水量データは、比較的ばらつきが少なく、実際の降水現象と比較すると極端な大雨や少雨の発生頻度が少ない傾向があり、小～中規模の雨が長く続くことが多いため、流域内の土壌層は現実よりも湿潤な状態になっていると考えられる。このため、各降雨時の初期損失が少なく、地上到達降雨量の大部分が流出するケースが多くなると考えられる。しかし、実際の降水現象の発生頻度とGCMで出力される降水特性の違いや、その差異の補正、および流域内土壌水分の乾湿状態の時空間分布と流出特性の関係性などについての詳細については、現時点ではまだ不明な点が多いため、ここではこれ以上議論しない。したがって、本研究で得られた将来の計算流量の絶対値そのものは将来の影響評価には使えないが、変化量(差)の情報は、将来の木曾三川流域における流況変化の予測に有益な情報を提供すると考えられる。

Fig. 12からは、木曾川犬山地点の流量が、近未来には現在よりも6.8m<sup>3</sup>/s増加し、21世紀末には2.3m<sup>3</sup>/s減少するという結果が得られた。この原因は、前述したように、各時期の水収支の違いによるものであると考えられ、木曾三川流域では、時期に応じて異なる水資源管理を行っていく必要があることが示唆される。

Fig. 14は、長良川(忠節)と木曾川(犬山)における、月別河川流量の将来変化を示している。各流域ともに、冬季(12~3月頃)の流量が増加し、秋季(9~11月頃)の流量が減少しており、結果として、一年を通じた河川流量の季節変動幅が小さくなり、流況が平滑化されていくことがわかった。これは、Fig. 13の結果から、温暖化に伴う融雪量の減少と融雪時期の早期化、および蒸発散増加による影響が大きいと考えられた。

### 3.6 極端水文現象の予測

Fig. 15は、流況曲線による木曾三川流域の将来流況の予測結果を示している。図中で黄色の枠で示した部分が、豊水流量から低水流量までの間の流域の

平均的な(平常時の)流量の変化を示しており、Fig. 12の結果と同様に、近未来では流量が増加し、21世紀末では減少することがわかる。

Table 3に、木曾三川流域の主要地点における現在流況に対する近未来と21世紀末の流況の変化率を整理した結果を示す。この結果からも、木曾三川流域の平常時の流況は、近未来では1.6~2.4%増加するが、21世紀末には1.3~3.1%減少することがわかる。

一方、洪水や渇水時など極端現象時の流況は、豊水流量以上および低水流量未満の流況変化を調べることで影響評価を行うことができる。

Fig. 15の赤枠で示された部分が、木曾三川流域の洪水時および渇水時における流況の変化率を示している。この図からは、近未来では渇水が深刻化するが、21世紀末には逆に渇水時の流量が増える(渇水リスクが緩和される)ことがわかる。

一方、洪水のリスクについては、近未来では顕著な変化は見られないが、21世紀末では各流域ともに現在よりも洪水時の流量が増加する(洪水リスクが増加する)ということがわかった。

Table 3の各流域の豊水以上および低水未満の流況の変化を整理した結果からも、渇水のリスクは、近未来では木曾川を除いて深刻化(低水流量未満の平均流量が1.7~2.1%減少)するが、21世紀末には各流域ともに流量が1.9~6.5%増加(渇水リスクが緩和)すると予想された。

一方、洪水のリスクについては、豊水流量以上の流量を平均化した場合、近未来で0.7~1.1%、21世紀末で1.0~2.0%増加すると予想され、木曾三川流域では現在に比べ将来は洪水のリスクが徐々に高まっていくと予想された。

これらの結果は、今後木曾三川流域で治水と利水の両面から総合的な流域の管理を行っていくためには、時期に応じて、極端な気象現象に伴う災害時と平常時で異なる管理を実施していく必要があることを示唆している。

Table 3 Relative change of river flow in the Kiso three river basin

| Basin Point | 2015-2039   |                 |              | 2075-2099   |                 |              |
|-------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|
|             | Ibi mangoku | Nagara chusetsu | Kiso inuyama | Ibi mangoku | Nagara chusetsu | Kiso inuyama |
| High flow   | +0.7%       | +1.1%           | +1.0%        | +1.0%       | +2.0%           | +1.6%        |
| Normal flow | +1.6%       | +2.2%           | +2.4%        | -2.3%       | -3.1%           | -1.3%        |
| Low flow    | -2.1%       | -1.7%           | +0.1%        | +2.7%       | +1.9%           | +6.5%        |

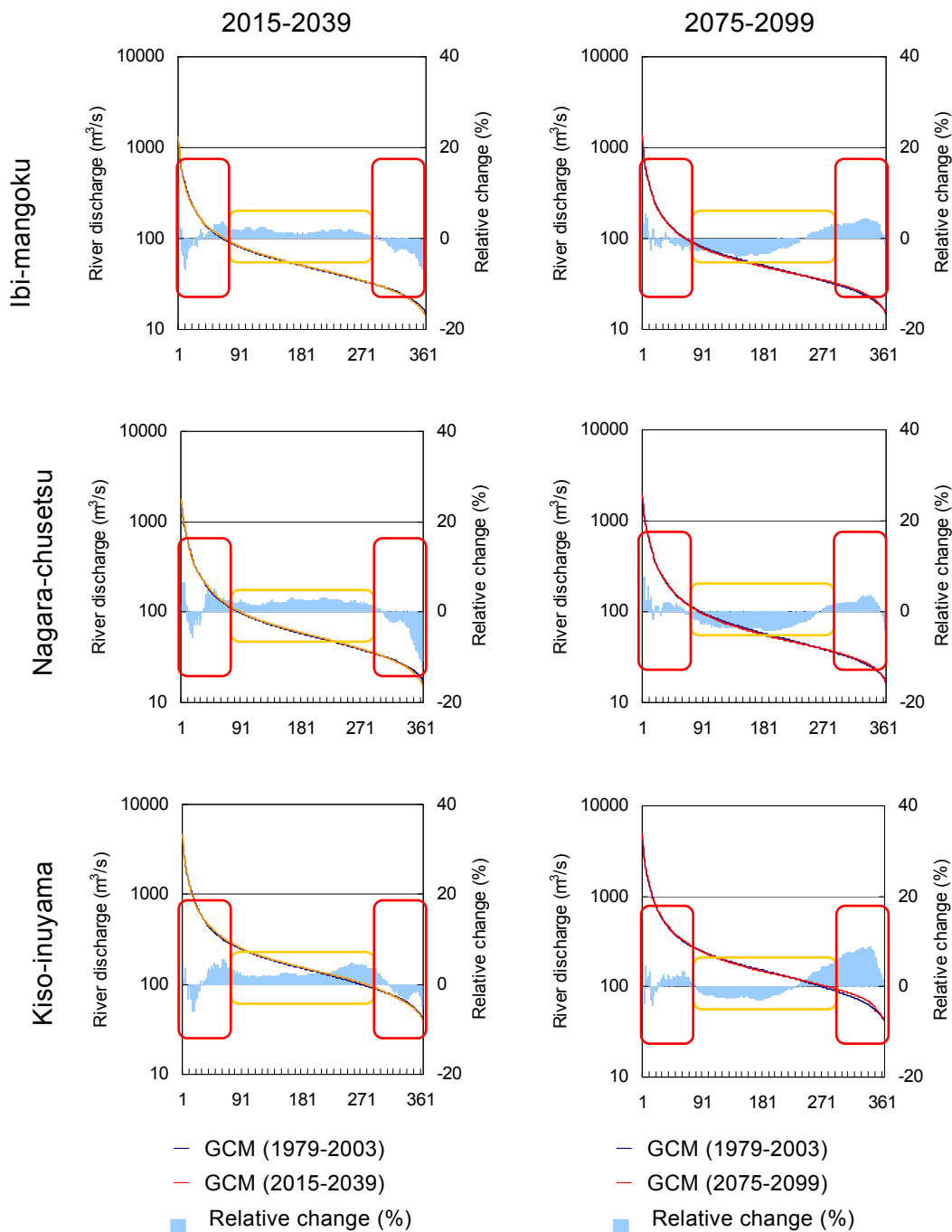


Fig. 15 Change of flow duration curve (FDC) in the Kiso three river basin.

#### 4. おわりに

将来の気候変動に伴う木曾三川流域環境の予測とその影響を明らかにするため、高解像度の全球気候モデルと分布型流出モデルを用いて、将来の河川流況の変動予測を試みた。

木曾三川流域の気温については統計的に有意な温暖化傾向が検出されたが、降水量については、統計的に有意性は認められなかった。

GCMの再現性については、空間分布特性については地上気象観測値によく対応していることがわかったが、定量的な評価を行うためには、気温や降水量だけでなく、蒸発散量や融雪量のバイアス補正が不可欠であることがわかった。

本研究で用いた分布型水文モデル(Hydro-BEAM)は、1979年から2003年までの木曾三川流域の長期平均流量を誤差5%以内の精度で推定できることがわかった。しかし、月別流量の季節変化については、ダム貯水池の人為的な操作や取水量の実態を考慮し

たさらなる解析が必要であることがわかった。

木曾三川流域の将来気候については、21世紀末までに約3.1℃の温暖化が予想され、それに伴って、蒸発散量の増加や融雪時期の早期化、融雪量の減少などが予想された。

温暖化に対する降水量の変化率は一定ではなく、時期により降水量と蒸発散量の変化が異なるため、状況にあわせてより適切な水資源管理を行う必要があることが示唆された。

木曾三川流域の将来流況は、平常時流量は近未来では1.6~2.4%増加し、21世紀末には1.3~3.1%減少すると予想された。豊水流量以上の流量は近未来で現在よりも0.7~1.1%増加し、21世紀末も1.0~2.0%増加すると予想されており、木曾三川流域では将来は洪水のリスクが高まると予想された。低水流量以下の流量は、近未来では揖斐川と長良川で1.7~2.1%減少して渇水リスクが増すが、21世紀末には各流域で1.9~6.5%増加する(渇水リスクが緩和される)と予想された。

さらに、温暖化に伴う融雪時期と融雪量の変化および蒸発散量の増加に伴って、月別河川流量の季節変化幅が小さくなり、年間を通して流況が平滑化されると予想された。

これらの結果は、単一の将来気候予測推計情報(AGCM20)の単一シナリオ(IPCC A1Bシナリオ)に基づいた将来予測のひとつに過ぎないが、木曾三川流域内の将来の水資源管理を行う際のひとつの有効な参考情報となることが期待される。

## 謝 辞

本研究の一部は、名古屋市上下水道局の受託研究費を用いて行われた。また、本研究で解析に用いた

データの一部は、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」のもと、地球シミュレーターを用いて行われた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 気象研究所物理気象研究部 (1984) : 大気中における雪片の融解現象に関する研究, 気象研究所技術報告, 第8号, 1-80.
- 国土交通省河川局 (2007): 木曾川水系河川整備基本方針, 1-24.
- 近藤純正・徐 建青 (1997) : ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿潤度, 天気, 44 : 875-882.
- 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.
- 西岡昌秋・寶 馨 (2003) : Mann-Kendall検定による水文時系列の傾向変動, 京都大学防災研究所年報 第46号B, 181-192.
- Kitoh A, Ose A, Kurihara K, Kusunoki S, Sugi M, and KAKUSHIN Team-3 Modelling Group (2009): Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. *Hydrological Research Letters* 3: 49-53. doi:10.3178/HRL.3.49.
- 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.

## Hydrological Impact of Climate Change in the Kiso Three Rivers Basin

Yoshinobu SATO, Yuri MICHIHIRO, Yasushi SUZUKI, Eiichi NAKAKITA and Toshiharu KOJIRI

### Synopsis

In order to clarify the hydrological impacts of climate change in the Kiso Three River basin, a super-high resolution atmospheric general circulation model (MRI-AGCM20) based on IPCC SRES-AR4-A1B scenario were used as input parameter for a distributed Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM). The results obtained in this study showed that long-term trend of air temperature and precipitation estimated by the non-parametric Mann-Kendall test and change of future river flow regimes by the flow duration curves (FDCs).

**Keywords:** climate change, Kiso three river basin, river discharge, MRI-AGCM20, Hydro-BEAM