

木曽川水系統合流出解析モデルの高度化(II)

Upgrading the Integrated Hydrological Model for the Kiso River System (II)

佐藤嘉展・本間基寛・鈴木靖

Yoshinobu SATO, Motohiro HONMA 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. 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. Then, to mitigate the damages of the severe drought disasters, we tried several adaptation options by numerical simulations such as the change of the reservoir operation rules and inter basin water transfer. The results obtained in this study will contribute as an adaptation measures for the better water resources management.

キーワード: 木曽川水系, 分布型流出モデル, 貯水池操作, 適応策

Keywords: Kiso river system, distributed hydrological model, reservoir operation, adaptation

1. はじめに

木曽川水系(木曽三川)は、木曽川(5275km²)、長良川(1985km²)、揖斐川(1840km²)からなる総流域面積約9100km²の大河流域である。木曽三川の河川水は、日本有数の面積をもつ濃尾平野全体(約1800km²)に灌漑用水を供給するだけでなく、名古屋市など東海地方の人口集中地域への飲料水や工業用水、さらに、発電用水の水源としても重要な役割を担っている。木曽川水系には河川流況を制御する多目的ダムが多数設置されており(Fig.1)、各河川流域から海洋へと流出する流量を正確に見積もるためには、ダムによる流況制御の影響を正確に把握する必要がある。ダムによる流況制御は基本的に、洪水時における洪水調節(ピークカット操作)と、渇水時における利水補給および維持流量の放流操作に大別される。洪水調節については分布型流出モデルによるダムへの流入量の予測精度を向上させることで対応可能だが、ダムからの利水補給や維持流量の放流については、ダムごとに異なる貯水容量の配分(洪

水調節、発電、新規利水、不特定利水、緊急渇水対策用水等)や割り当てられる水利権によって大きく異なり、それらの実態を再現するためには各ダムが監視する下流基準地点における流量を正確に予測する必要がある。下流基準地点の流量はその上流側で取水が行われていると流出モデルで見積もられる河川流量よりも少なくなるため、河川からの取水を考慮しないモデルでは利水補給操作の回数が実態を反映しなくなる。さらに、利水補給後の水位回復のためのダムへの貯留操作についても、下流基準地点の流量が基準値を下回る場合には貯留制限がかかるなど、流況や季節に応じて複雑な操作が行われている。

そこで本研究では、これまでの先行研究で構築した木曽川水系統合流出解析モデルをさらに高度化し、下流域で取水される農業用水の影響も考慮した上で流域全体での河川取水量をモデル化し、各河川の現在気候条件下における流況再現性の向上と異常渇水時における木曽川水系連絡導水路等を用いた渇水時補填シミュレーションを試みた結果について報告する。



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

2. 手法

2.1 解析方法

本研究では、Kojiri (2006) によって開発された空間解像度 1km の分布型流域環境評価モデル (Hydro-BEAM: Hydrological River Basin Environment Assessment Model) を用いた流出解析を実施した。Fig.1に示される木曽川水系の主要7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。

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 (佐藤ら, 2012)。

2.2 ダムのモデル化

本研究では、木曽三川における主要ダムの効果を定量的に評価するため、洪水調節, 利水補給, 貯留条件および水位運用操作について既存モデルよりも詳細なモデル化を試みた。

[1] 洪水調節操作

洪水調節を目的に持つダムは洪水時にダム下流域における洪水氾濫被害の軽減を目的とした洪水調節(ピークカット)を実施する。木曽三川で洪水調節を実施する主要なダムには、国土交通省直轄管理の

丸山ダムと横山ダム, および水資源機構が管理する牧尾ダム, 岩屋ダム, 阿木川ダム, 味噌川ダム, 徳山ダムがある。それぞれのダムは、ダムへの流入量が洪水流量を超えた場合に、各ダムの有効貯水容量の範囲内で洪水流量を超える流量をダムに貯留し、下流へは洪水流量を放流する「一定量放流方式」としてモデル化した。

木曽川流域の各ダムの運用開始年は丸山ダムが1956年, 牧尾ダムが1961年, 岩屋ダムが1976年, 阿木川ダムが1991年, 味噌川ダムが1996年, 長良川(揖斐川)流域では、横山ダムが1960年, 徳山ダムは2008年からとした。洪水流量は、丸山ダムが $4800\text{m}^3/\text{s}$, 牧尾ダムが $400\text{m}^3/\text{s}$, 岩屋ダムが $300\text{m}^3/\text{s}$, 阿木川ダムが $120\text{m}^3/\text{s}$, 味噌川ダムが $50\text{m}^3/\text{s}$, 横山ダムが $500\text{m}^3/\text{s}$, 徳山ダムが $200\text{m}^3/\text{s}$ とした。厳密には徳山ダムの洪水調節は徳山ダムへの流入量が $200\text{m}^3/\text{s}$ を超えた時点で流入量を全量カットする操作が行われるが、ここではモデル単純化のため、徳山ダムも一定量放流方式とした。また、横山ダムについては洪水調節容量が徳山ダムの供用開始前後で変更となっているが、本研究では将来の影響評価を主目的とするため、再開発後の最新の操作規程と容量配分に基づいてモデル化を行った。ただし、新丸山ダムについては平成24年度の時点で供用が開始されていないため、本解析では考慮に入れていない。

各ダムの洪水調節容量は、洪水時最高水位(サーチャージ水位)と平常時最高水位(常時満水位)または洪水期制限水位(洪水貯水準備水位)の間に確保される容量とし、各ダムの運用曲線(日別の平常時最高水位の目標水位)によって変動する。各ダムが最大限貯留できる容量は総貯水容量から堆砂容量を除いた有効貯水容量に相当し、各ダムに以下の容量を割り当てた。

丸山ダム: $3839\text{万}\text{m}^3$
 牧尾ダム: $6800\text{万}\text{m}^3$
 岩屋ダム: $1\text{億}5000\text{万}\text{m}^3$
 阿木川ダム: $4400\text{万}\text{m}^3$
 味噌川ダム: $5500\text{万}\text{m}^3$
 横山ダム: $2960\text{万}\text{m}^3$
 徳山ダム: $3\text{億}8040\text{万}\text{m}^3$

[2] 利水補給操作

利水容量が設定されたダムは、各ダムに設定された利水容量と下流取水地点における受益者の水利権量に応じて渇水時に利水補給を実施する。本研究では、利水補給を実施するダムとして、牧尾ダム(愛知用水), 岩屋ダム(木曽川用水), 阿木川ダム(東濃用水, 愛知用水), 味噌川ダム(東濃用水, 愛知用水)の4つのダムの利水補給操作のモデル化を行った。なお、徳山ダムについては、木曽川水系連絡導

水路が現時点ではまだ供用されていないため、利水容量7800万 m^3 のうち木曽川に導水される4700万 m^3 分の利水補給（平常時4.0 m^3/s ）は考慮していない。また、残りの3100万 m^3 分の利水容量についても、掛斐川への新規利水供給（岐阜上水1.2 m^3/s 、岐阜工水1.4 m^3/s ）は考慮していない。不特定容量の運用（流水の正常な機能の維持のための放流）については、万石地点流量20 m^3/s を確保するように不特定容量から補給が行われるようにした。さらに、徳山ダムの施設管理規定に基づき、ダム直下地点において、4/1から11/30までは2.3 m^3/s 、12/1から翌年3/31までは0.7 m^3/s をダムから放流させるようにモデル化した。横山ダムのかんがい用水のための利水容量は、徳山ダム運用開始と同時に、徳山ダムの利水容量に全量付け替えられ、横山ダムについては、洪水期（6/16から10/15）は貯水容量（2960万 m^3 ）がすべて洪水調節容量に割り当てられ、非洪水期にはそのすべてが発電容量に割り当てられるようにした。その他の水資源機構管理ダム（牧尾ダム、岩屋ダム、阿木川ダム、味噌川ダム）については、以下の基準で利水補給を行うようにモデル化した。

(a) 牧尾ダム：利水容量6800万 m^3

落合地点への最大補給量：0.542 m^3/s

兼山地点への最大補給量：30.515 m^3/s

(b) 岩屋ダム：発電・利水容量1億 m^3

白川地点への最大補給量：9.19 m^3/s

犬山上流地点への最大補給量：12.584 m^3/s

犬山下流地点への最大補給量：6.58 m^3/s

馬飼地点への最大補給量：39.93 m^3/s

(c) 阿木川ダム：利水容量2200万 m^3

（不特定容量2200万 m^3 ）

落合地点への最大補給量：0.8 m^3/s

兼山地点への最大補給量：3.2 m^3/s

(d) 味噌川ダム：利水容量6800万 m^3

（不特定容量2400万 m^3 ）

落合地点への最大補給量：0.3 m^3/s

兼山地点への最大補給量：1.098 m^3/s

犬山地点への最大補給量：2.902 m^3/s

なお、阿木川ダムと味噌川ダムについては、流水の正常な機能の維持のため、木曽成戸地点40 m^3/s を確保するために不特定容量の範囲内から維持流量の放流が実施されるが、本研究では、モデルの単純化のため少し上流に位置する馬飼地点（馬飼頭首工で取水後）を基準地点とした。

[3] 貯留条件

各ダムから利水補給が行われると、その時点でダムに確保すべき目標水位（運用曲線）よりもダムの水位が低下してしまう。そのため、その時点で必要なダム水位を確保するために、洪水流量以下のダム

への流入量をダムに貯留する操作が実施される。その場合、ダムからの放流量がダム流入量よりも少なくなり、下流に位置する取水地点で十分な流量が確保できなくなならないように、ダム流入量をダムに貯留するためには、下流基準地点における河川流量がある一定量以上確保されている必要がある。各ダムの基準流量（貯留条件）は以下のように設定した。

(a) 牧尾ダム：今渡100 m^3/s 以上

(b) 岩屋ダム：今渡100 m^3/s 以上、馬飼50 m^3/s 以上

(c) 阿木川ダム：今渡100 m^3/s 以上、馬飼50 m^3/s 以上

(d) 味噌川ダム：今渡100 m^3/s 以上、馬飼50 m^3/s 以上

[4] 水位運用操作

本研究では、国土交通省ダム諸量データベース（<http://www2.river.go.jp/dam/>）から各ダムの近年（1993年以降）の水位変動データ（Fig.2）を入手し、実際の水位変動データから各ダムの水位運用パターンをモデル化した（Fig.3）。木曽川水系のダムは、2つのタイプの運用パターンに大別される。ひとつはVカット運用方式と呼ばれるもので、ある基準日に一旦ダム貯流量を全放流し、その後平常時最高水位まで貯留するタイプのダムで、牧尾ダムと岩屋ダムがこれに該当する。厳密には、牧尾ダムには節水対策線という期別値が設定されており、ダム貯水位がその値を下回ると、下流利水者にセクタ（農水・上水・工水）別にダム貯水残量に応じた節水（取水制限）が求められるが、本研究ではダム貯水量減少に伴う下流利水者の節水については考慮していない。また、平常時最高水位についても、洪水調節容量を多めに確保する等の理由で施設管理規定の水位よりも少し低めで運用が行われているため、運用曲線も実際の水位運用の実態に合わせてモデル化した。したがって、牧尾ダムおよび岩屋ダムの諸元に記載された平常時最高水位（洪水期最高水位）よりも低い水位で運用される。もうひとつの運用方式は洪水期に洪水貯留準備水位（洪水期制限水位）まで水位を下げる制限水位方式で、丸山ダム、阿木川ダム、味噌川ダム、横山ダム、徳山ダムがこれに該当する。なお丸山ダムは洪水期が通年（1/1から12/31まで）に設定されているため、平常時最高水位と洪水貯留準備水位は同じ値となる（洪水調節と発電以外では水位が変化しない）。洪水期は木曽川流域では6/1から10/15までで、長良川流域では6/16から10/15までとなっている。なお、横山ダムの運用曲線は、再開発事業後（2008年以降）の運用に基づいてモデル化を行った。運用曲線はダム諸量データベースから得られる日別水位データから、日別の変化パターンを抽出してモデル化し、さらにその水位変化を各ダムのH-V式（水位－貯水量関係式）により貯水量に変換したものを解析に用いた。

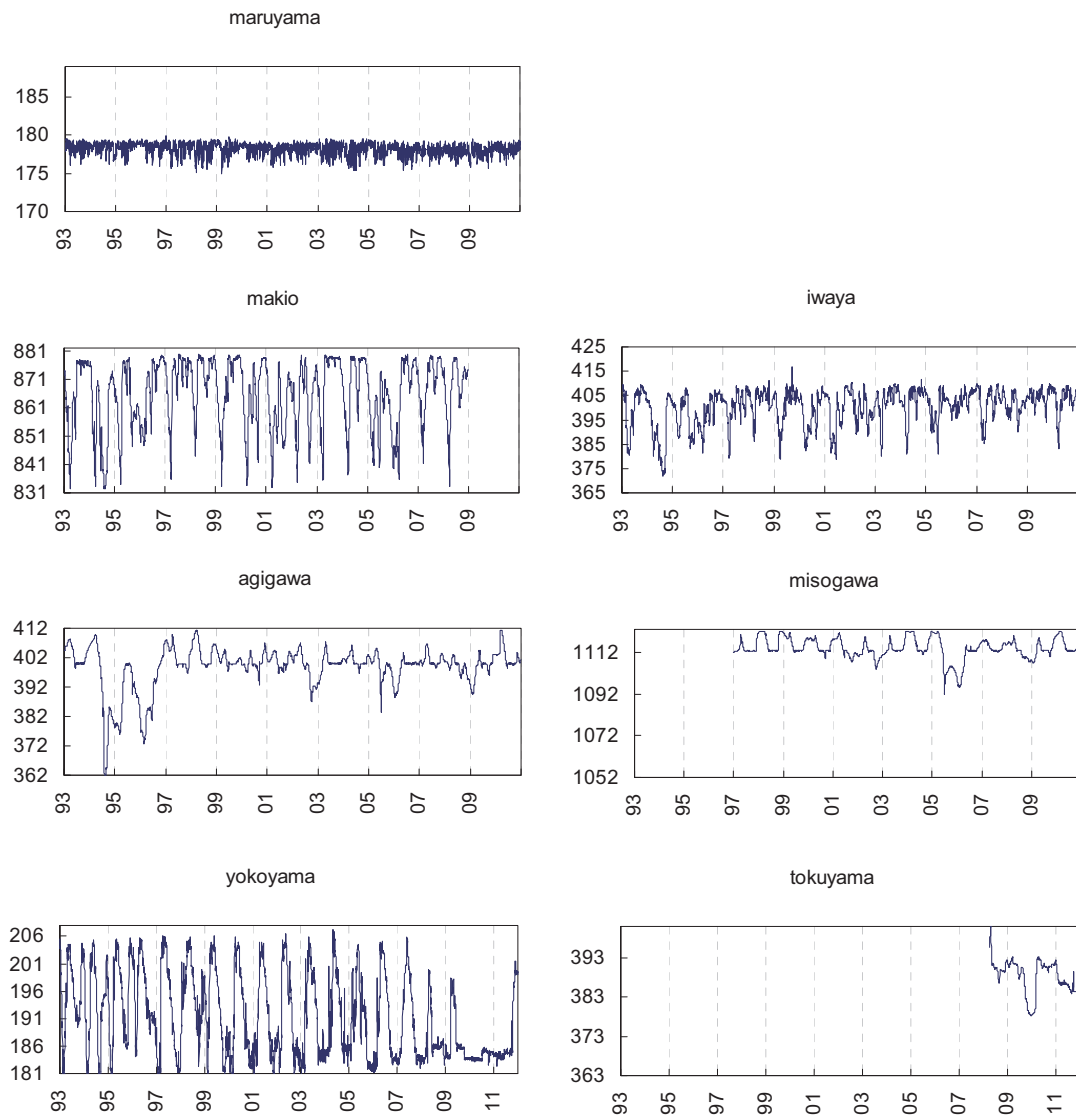


Fig. 2 Daily averaged observed water storage level (m) of each dam in the Kiso river system.

[5] 取水量のモデル化

(a) 水利権（最大取水量）

木曽川水系に水源を持つ利水者が安定した取水ができるかどうかを明らかにするためには、上流域に設置されたダム群による洪水調節や利水補給だけでなく、実際に河川のどこで・いつ・どれくらいの水が取水されているかといった河川水の利用実態を正確に把握し、それをモデルに反映させる必要がある。さらに、上流域のダムからいつ・どのくらいの利水補給が行われるかも、各ダムの利水者がどこで、どれくらいの水の補給を要求しているのかに依存するため、取水量のモデル化は流域スケールでの流況シミュレーションには必要不可欠である。

既得（慣行）水利権は流況によらず取水できるが、

許可水利権は渇水時には取水が制限される水利権であり、水利権は農業用水と水道用水（上水）および工業用水の3つのセクタに分離され、渇水時には、流況に応じてそれぞれのセクタごとに異なる節水率が設定される。ただし、実際の渇水時に、どのような流況で、どのセクタに、どれくらいの期間、どの程度の節水率が設定されるのかについては、明確な規定はなく（牧尾ダムからの利水補給を受ける利水者は、牧尾ダム貯水量に応じた節水率が設定されているが、本研究ではモデルに反映されていない）、渇水時に利水者間で相互調整が行われるため、本研究では渇水時における河川流況や主要利水ダムの貯水率に応じた節水率の設定はモデル化されていないが、用水ごとに設定された水利権（最大取水量）および自流取水条件についてはモデル化を行った。

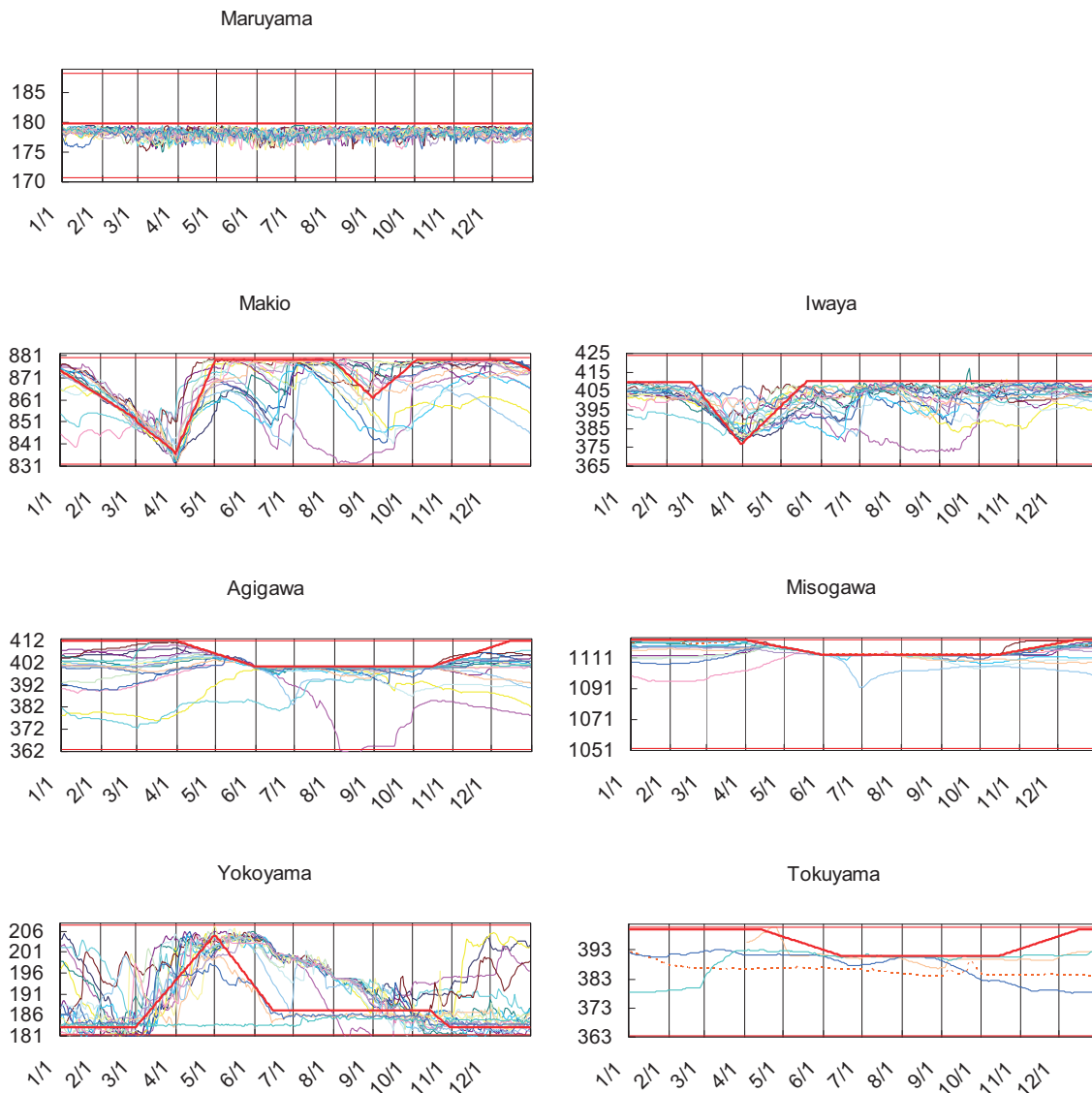


Fig. 3 Change of observed water storage level and simplified reservoir operation rule curve (m) of each dam in the Kiso river system.

木曽川水系における主な用水の取水地点と水利権および自流取水条件は以下のように設定した。

- ・付知川用水：1.677 m³/s
自流取水条件なし
- ・東濃用水（落合）：1.642 m³/s
夏期：兼山200m³/s（5/1~10/3）
通年：今渡100 m³/s, 馬飼50 m³/s
- ・愛知用水（兼山）：31.847 m³/s
夏期：兼山200 m³/s（5/1~9/30）
通年：今渡100 m³/s, 馬飼50 m³/s
- ・木曽川用水（白川）：9.19 m³/s
夏期：川辺155 m³/s（5/1~9/30）
冬期：今渡100 m³/s
- ・木曽川用水（犬山）：12.584 m³/s
通年：馬飼50 m³/s
- ・愛知用水（犬山）2.402 m³/s
夏期：兼山200 m³/s（5/1~9/30）
通年：今渡100 m³/s, 馬飼50 m³/s
- ・名古屋既得（犬山）3.62 m³/s
- ・濃尾用水（犬山頭首工）51.06 m³/s
自流取水条件なし
- ・木曽川用水（朝日）：4.14 m³/s
通年：馬飼50 m³/s
- ・木曽川用水（尾西）：2.44 m³/s
通年：馬飼50 m³/s
- ・名古屋既得（朝日）3.94 m³/s
- ・木曽川用水（馬飼）：39.930 m³/s

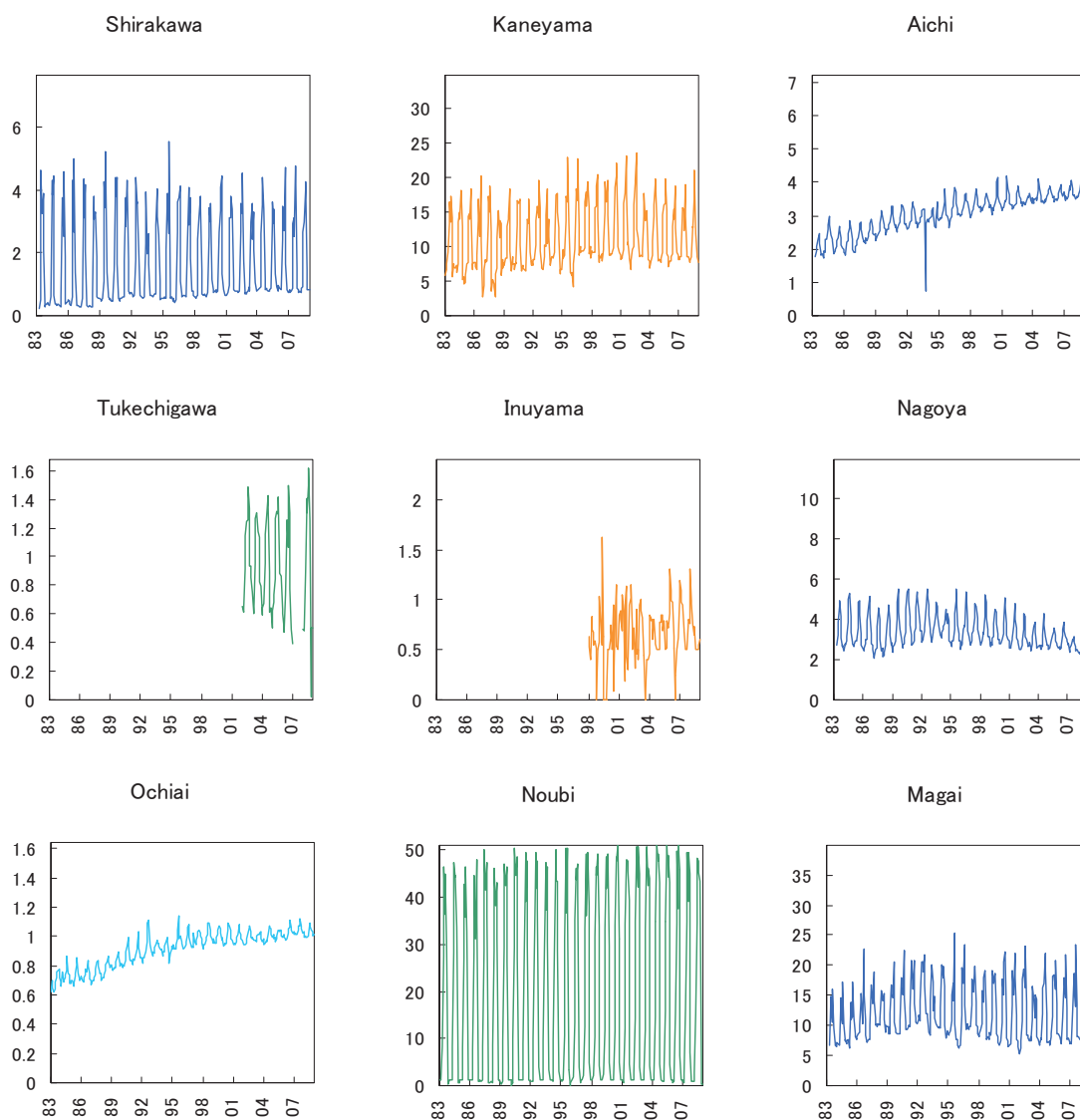


Fig. 4 Monthly amount of actual water intake from river channel of the Kiso river basin at each water intake point.

通年：馬飼50 m³/s

ここで、各用水の取水地点における基準地点の流量が自流取水条件以下となり、取水に制限がかかった時点で、不足する水量を、上流に確保した水源の利水容量の範囲内で補給を要求し、上流域のダム群はその利水補給要求量に応じた水量をダムに貯留された利水容量から補給するようにモデル化した。なお、木曽川用水のうち河川直接取水の「川合」（岐阜上水）0.4 m³/sおよび「鵜沼」（岐阜農水）0.65 m³/s、（岐阜上水）0.38 m³/s、（岐阜工水）3.13 m³/sについては、過去の取水実績データを調べた結果、それが木曽川下流域の河川流況に与える影響が量的に無視できるとして、本研究では考慮していない。

[6] 実績取水量

実際に各取水地点で取水されている水量は水利権量（最大取水量）よりも少なく、しかも農業用水は期別に水利権が設定されているため、水利権に対する不足水量をすべてダムから補給すると、下流の河川流量が実際よりも過大になってしまう。また、現在の河川流況を再現するだけの目的であれば、河川取水量の実績データをそのままモデルに組み込めばよいが、気候や水需要が変化する場合の将来変化予測や、異常渇水時のシミュレーションを実施するためには、取水地点別、かつ産業セクター別の期別取水量のパターンをモデル化しておく必要がある。そこで本研究では、実際の河川取水量の実態を把握し実

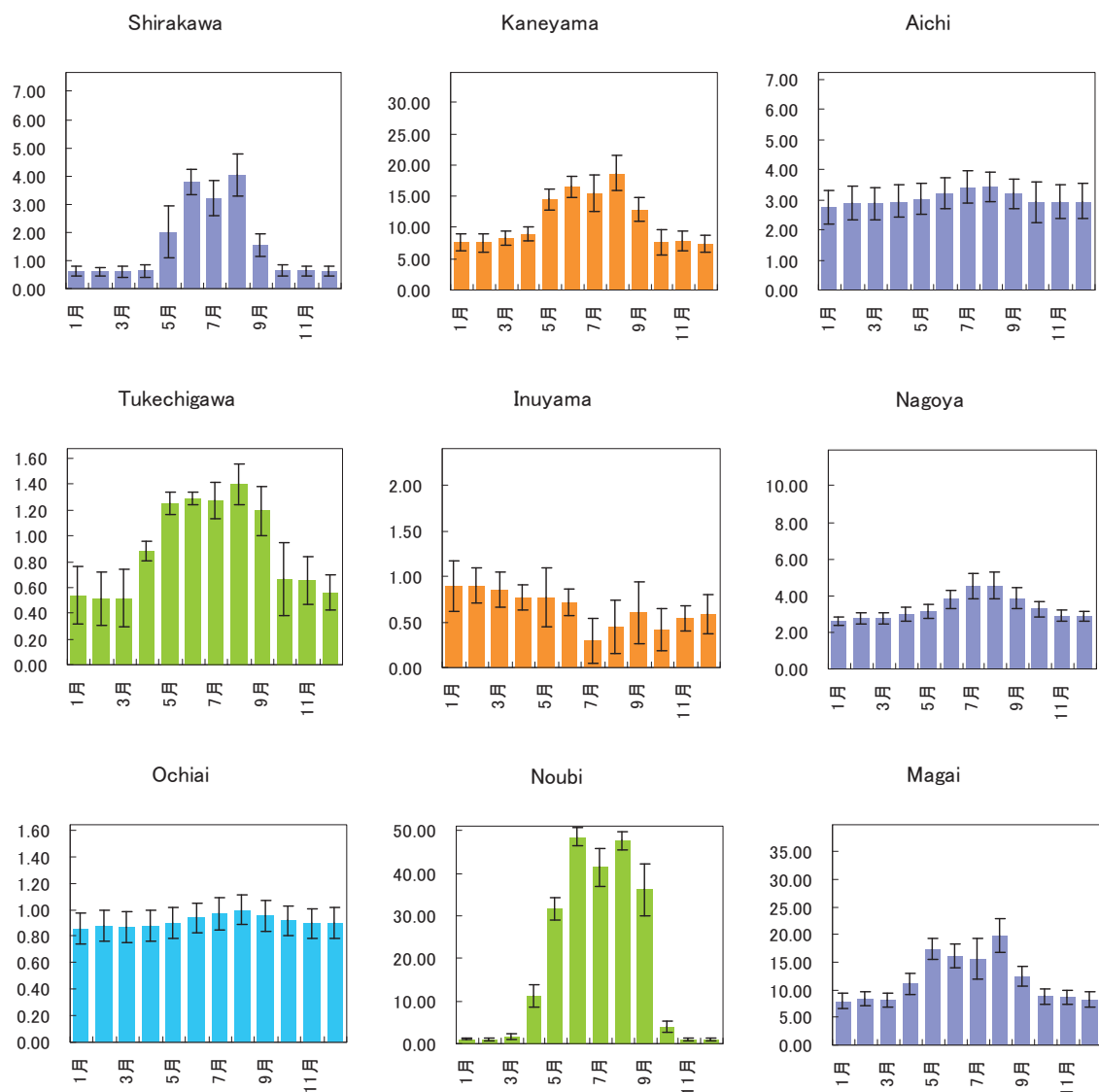


Fig. 5 Monthly amount of water intake pattern from river channel of the Kiso river basin at each water intake point.

態を反映したモデル化を実施した。

Fig.4は、木曽川水系の主要用水の取水地点別の1983年から2008年までの26年間に実際に取水された取水実績の推移を示している。本研究で入手できたデータの一部は、取水地点別ではなく、用水別のデータになっており、木曽川用水の愛知上水は犬山と尾西の取水量の合計で、同じく名古屋上水の取水水量も犬山と朝日の取水量の合計値となっている。しかし、実際には、犬山で取水された後に、犬山頭首工を経て、尾西や朝日で取水されるため、これらの量をモデル上で犬山地点でまとめて取水させてしまうと、犬山頭首工地点での河川流量を過小に評価してしまい、濃尾用水の取水を著しく阻害させる。一方で、尾西や朝日でまとめて取水させてしまうと、犬

山頭首工地点での河川流量が過大となり、濃尾用水の取水条件が緩和されすぎてしまうことになる。そこで、本研究では、木曽川用水の愛知上水分と名古屋上水分を50%ずつに分割して、犬山地点と下流の尾西および朝日地点で取水させることにした。厳密には、犬山合同取水口や尾西、朝日取水口の施設能力に応じた比例配分や、各地点別の実際の取水実績データを用いることが望ましいが、現状ではそれらのデータが得られなかったため、本解析では上記のように50:50で取水量を配分することにした。

濃尾用水については、味噌川ダムが運用を開始する前の1998年以前と1999年以降で期別水利権の設定が変更となっているが、本研究では最新の水利権設定に基づいてモデル化を行った。また、今渡100m³/s

以下での取水制限は考慮しないことにしたため、異常渇水時における犬山頭首工より下流の流量を過小評価してしまった可能性がある。

Fig.5は、Fig.4の月別取水量の時系列データを単純平均して月別の平均取水量のパターンを抽出した結果を示しており、図中のエラーバーは平均化した解析期間における各年の月別値変動の標準偏差を示している。この結果から、農業用水の比率が高い、木曽川用水（白川）、付知川用水、愛知用水（兼山）、濃尾用水、木曽川用水（馬飼）の季節変化が大きく、上水道用水の東濃用水（落合）、木曽川用水（愛知上水）および木曽川用水（名古屋上水）は夏季にピークがあるものの、農業用水に比べると季節変化が小さいことがわかる。

また、Fig.4で見られた東濃用水（岐阜上水）や木曽川用水（愛知上水）の増加傾向については、その要因（人口や経済動向など）が明らかではないので、本研究では考慮しないことにした。

2.3 渇水時補填のモデル化

木曽川用水の主要利水者である名古屋市は、犬山で $3.62\text{m}^3/\text{s}$ 、朝日で $3.94\text{m}^3/\text{s}$ の既得水利権（木曽川自流）を確保しているため、合計 $7.56\text{m}^3/\text{s}$ 、日総量に換算すると $65万3184\text{m}^3$ の水を木曽川から取水することができる。さらに、木曽川上流の岩屋ダムに $11.94\text{m}^3/\text{s}$ の水利権があるので、合計 $168万4800\text{m}^3$ の水が利用可能であり、1日の最大給水能力（施設能力93%）は $156.3万\text{m}^3$ となり、平常時には岩屋ダムからの給水のみで1993年から2008年の平均日給水量（約 $93万\text{m}^3$ ）を確保することができる。しかし、渇水時には犬山と朝日の新規水利権分は、馬飼流量が $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下になると取水制限がかかり取水できなくなるため、渇水時の供給可能水量は大幅に減少し、1/10規模の渇水時で $102.9万\text{m}^3$ 、1/20規模の渇水時では $79.9万\text{m}^3$ にまで低下し、ピーク時の一日最大給水量 $112.9万\text{m}^3$

（1995年8月）の約70%になると言われている。実際に、平成6年（1994年）の渇水では、岩屋ダムの利水容量が枯渇し、上水は最高で35%の節水率が設定され、平成7年（1995年）や平成17年（2005年）にも、岩屋ダムの貯水率（利水）が20%を下回り、上水には最高で25%の節水が求められる事態が発生した。岩屋ダムは1976年から2008年までの33年間の間に14回の渇水（取水制限）を発生させており、ほぼ2年に一回の割合で上水には5%から35%の節水が求められ、取水制限日数も1週間から長いときには200日以上にもわたる事態も発生し、安定した水資源の確保が重要な課題となっている。

そこで本研究では、名古屋市が岩屋ダムだけに水源を依存するのではなく、水源を分散（多系統化）

させることによる渇水リスクの軽減効果の検証を試みた。具体的には、木曽川上流域の味噌川ダムに $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 、長良川河口堰に $2.0\text{m}^3/\text{s}$ 、さらに徳山ダムに $1.0\text{m}^3/\text{s}$ の水利権を確保し、異常渇水対策用の水源を確保させることにした。

現時点では、長良川河口堰や徳山ダムから名古屋市が上水を取水するための導水施設はまだ確保されていないが、本研究では仮にこれらの施設から導水が可能となった場合に、どのくらい渇水のリスクが緩和されるのかについて、以下の条件でシミュレーションを実施した。

[1]渇水時補填で使用する水源施設のパターン

- ①味噌川ダムのみ
- ②味噌川ダム及び徳山ダム（水系連絡導水路）
- ③味噌川ダム及び徳山ダム（水系連絡導水路）及び長良川河口堰

[2]複数の水源施設を併用する場合の優先順位

- ①長良川河口堰
- ②徳山ダム
- ③味噌川ダム

なお、上記の条件設定は、河口堰には貯留能力がないので先行利用し、木曽川上流域のダム群の貯水量を温存するという考え方に従っている。また、味噌川ダムの供用は1997年からなので、渇水時補填のシミュレーションは2000年から2009年までの10年間を解析対象とすることにし、徳山ダムについては2000年から利用可能であると仮定して解析を実施した（実際は2008年から）。

3. 結果と考察

3.1 基準地点流量の再現性

Fig. 6は1980年から2009年までの30年間における、木曽川水系の基準地点（木曽川：今渡、犬山、馬飼；長良川：忠節；揖斐川：万石）における日平均流量の計算結果を、各基準地点における観測流量（Qobs）と比較した結果を示している。本研究で構築した流出解析モデルによる計算結果は、ダムの効果を考慮しない場合のシミュレーション結果（Qcal(old)）とダムの効果を考慮した場合のシミュレーション結果（Qcal(new)）の2つを示している。また、いずれのシミュレーションにおいても木曽川流域における河川からの取水は考慮してあるが、長良川流域における河川からの取水量については考慮されていない。

ダムについては、1980年以降に運用を開始した阿木川ダム、味噌川ダム、徳山ダムについては、それぞれ1991年、1997年、2008年から運用操作をモデル上で反映するようにした。Fig.6の結果から、木曽川

流域の3地点では、ダム運用操作を考慮することによって流量が少ない時期の河川流量の再現性が大幅に向上し、ダムの利水補給によってダム下流地点の流況が改善される効果がモデルによって良好に再現されていることがわかる。しかし、馬飼地点については、ダムを考慮したモデルでも観測流量よりも流量が少なくなる場合がみられた。これは、各取水地点における異常渇水時の節水率設定の効果や馬飼地点での取水に取水制限値を設定しなかったことにより馬飼地点での取水量を過大評価してしまっていることが主な要因と考えられる。さらに、濃尾用水についても、渇水時には今渡地点の流況に応じて取水制限が実施されるとすれば、馬飼地点における流況の再現性はさらに向上させることができると考えられる。忠節地点については長良川上流域に河川流況を大きく制御するようなダムが設置されていないため、「ダムあり」と「ダムなし」で結果が全く変化しないが、上流に横山ダム（2008年からは徳山ダム）のある揖斐川万石地点の流況が観測流量よりも過大評価になっているのは、モデルパラメータのキャリブレーションの問題（長良川を基準に設定しているため、揖斐川では流況を過大評価してしまっている可能性がある）や、揖斐川流域での河川からの取水の影響が全く考慮されていないこと、さらに、横山ダムの運用ルールが2008年以前は異なっていたが、本研究では全期間を通して2008年以降の運用規則を適用したことなどが主な原因であると考えられる。これらの問題については、今後の検討課題である。

以上の結果から、木曽川水系では、馬飼地点の河川流量を過小評価し、揖斐川万石地点の流量を過大評価しているが、それ以外の地点ではダムの運用や取水を考慮することで河川流量の再現性が大幅に向上し、異常渇水時における流量も取水や利水補給の実態を反映した上で再現できることが確認できた。

Fig.7は、1980年から2009年までの期間を平均した流況曲線を示している。Fig.6の結果と同様に、ダムを考慮することで流況の再現性が大幅に向上することが確かめられた。

各基準地点における日平均流量の再現性は以下のようなった。

- ・木曽川 今渡地点
 実測：273.4 m³/s
 ダムなし：269.6 m³/s
 ダムあり：276.4 m³/s
- ・木曽川 犬山地点
 実測：265.1 m³/s
 ダムなし：275.2 m³/s
 ダムあり：282.0 m³/s
- ・木曽川 馬飼地点

実測：211.7 m³/s
 ダムなし：241.3 m³/s
 ダムあり：284.3 m³/s

- ・長良川 忠節地点
 実測：111.1 m³/s
 ダムなし：112.4 m³/s
 ダムあり：112.4 m³/s
- ・揖斐川 万石地点
 実測：79.1 m³/s
 ダムなし：87.3 m³/s
 ダムあり：87.3 m³/s

3.2 ダム貯水量の再現性

[1] 丸山ダム

Fig.8は1993年から2009年までの丸山ダム貯水量の再現結果を示している。丸山ダムは平常時最高水位179.8mで1822万m³の利水容量を持つが、その全量が発電専用のため、水位は平常時満水位上限値付近を維持するように運用され、それ以上の水位は洪水調節容量2017万m³に設定されているが、日単位でダムの貯水量を変化させるような大規模な洪水(ダム流入量4800m³/s以上)はこの期間には発生しなかったため、日平均ダム貯水量の計算結果は全く変化しなかった。実際には、昭和58年（1983年）9月に、最大流入量8217m³/sの洪水が発生し、洪水調節が実施されたが、洪水流量以上の流入量が継続した時間は約6時間であり、ただし書き操作を実施した結果、洪水時最高水位を超えることなく、1日以内に平常時最高水位まで回復した。以上の結果から、丸山ダムは、計画規模の大洪水出水時において洪水調節の効果を発揮するが、それ以外では木曽川の流況には大きな影響を与えることはないことが確認された。

[2] 牧尾ダム

Fig.9は1993年から2009年までの牧尾ダム貯水量の再現結果を示している。牧尾ダムの水位データはダム諸量データベースに掲載されていないため、水位の観測値は水資源機構中部支社から提供された2008年までとなっている。牧尾ダムは、洪水調節容量を持たないが、実際には洪水時最高水位よりも1mほど水位を下げ（880m→879m）運用されている。利水容量は6800万m³であり、12/15から水位を下げ始め（発電放流）、3/31に最低水位（832m）まで全量放流する規程になっているが、実際には837mくらいまで下げた後は貯留操作に移行し、5/1に満水位-1m（879m）まで水位を回復させる。さらに7/31から水位を下げ、8/31に約862mまで下げ、その後10/14に平常時満水位-1m（879m）まで水位を戻すようにモデル化した。

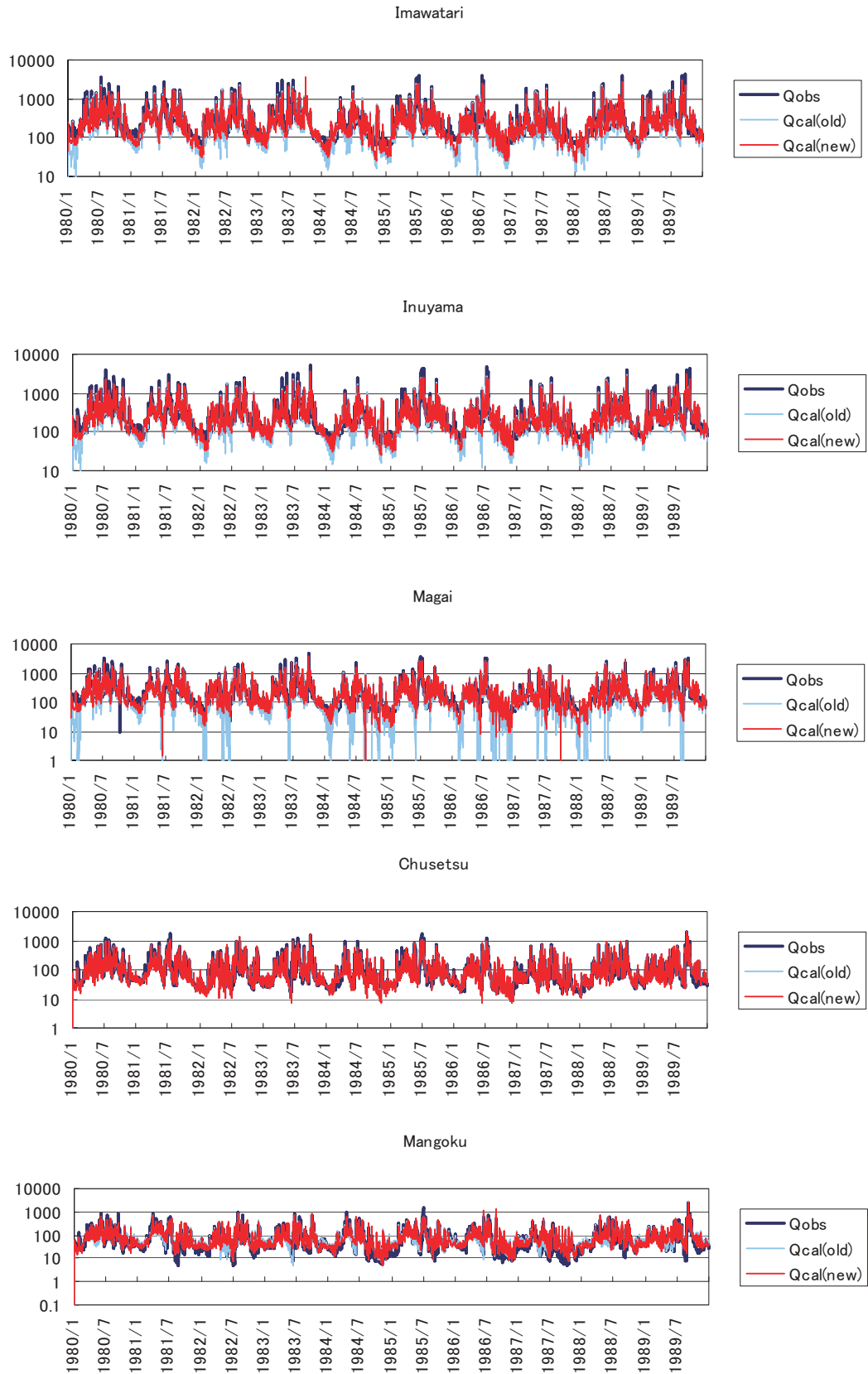


Fig. 6 Daily average river discharge at each reference point in the Kiso river system.
(1980 - 1989)

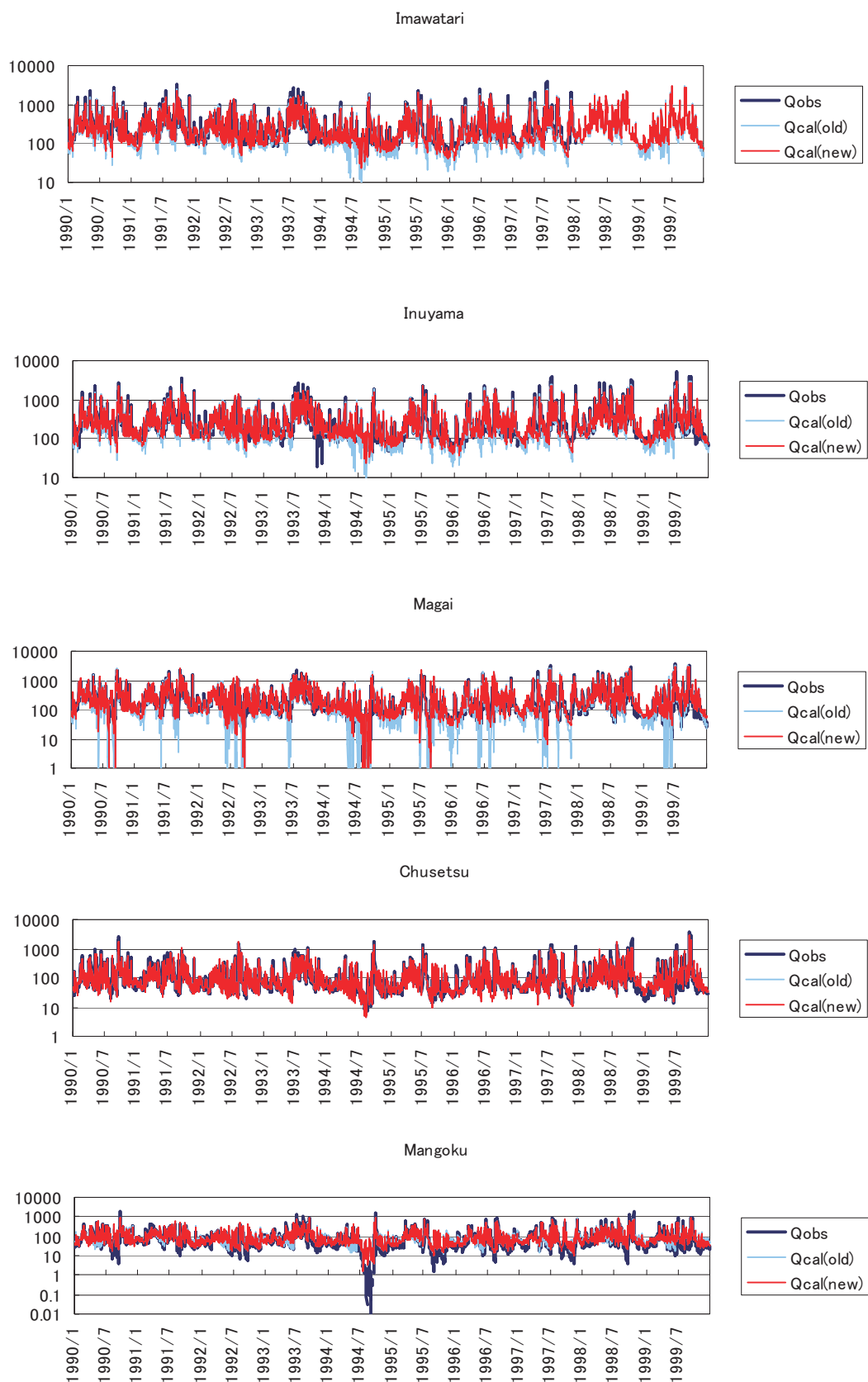


Fig. 6 Daily average river discharge at each reference point in the Kiso river system.
(1990 - 1999)

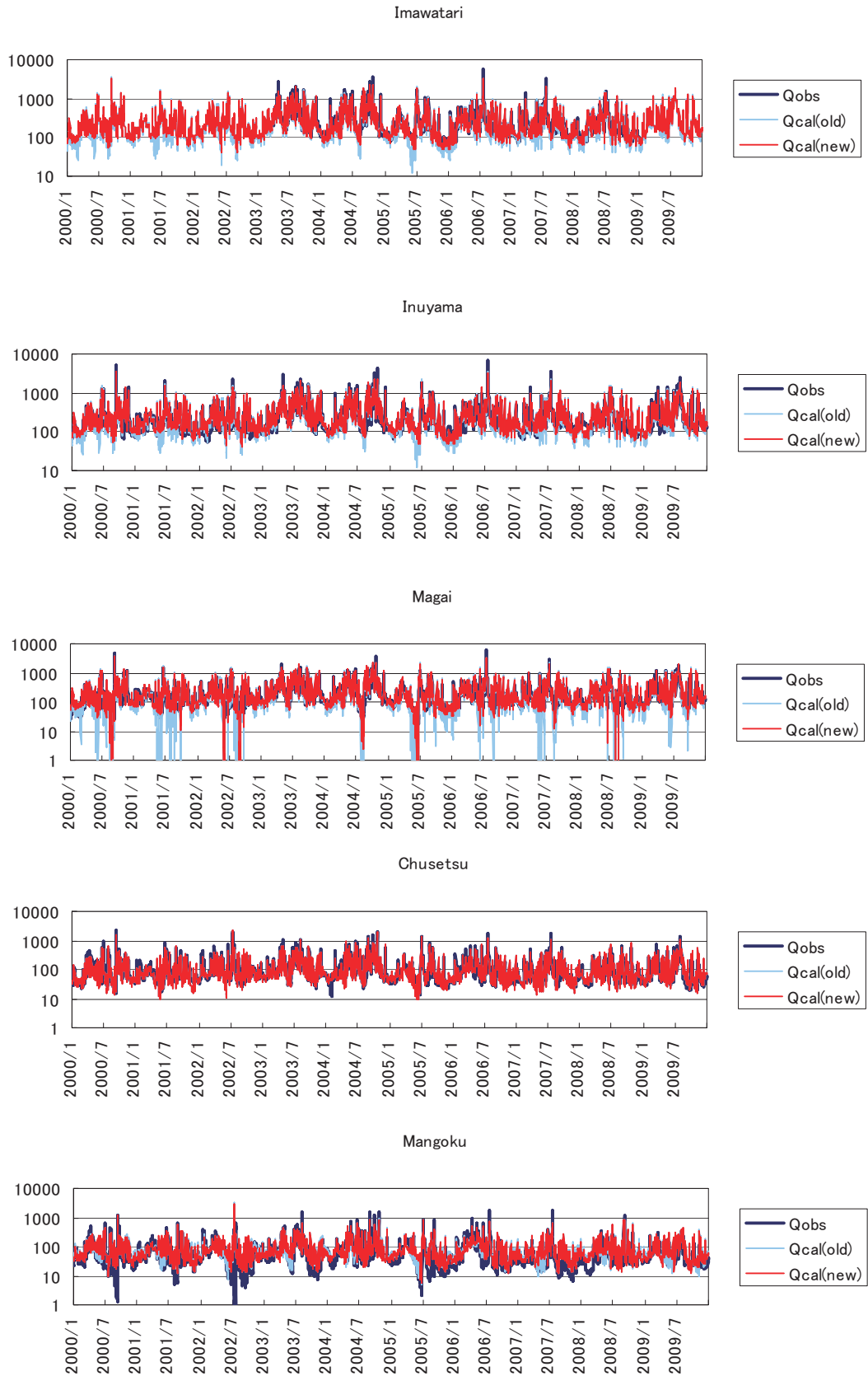


Fig. 6 Daily average river discharge at each reference point in the Kiso river system.
(2000 - 2009)

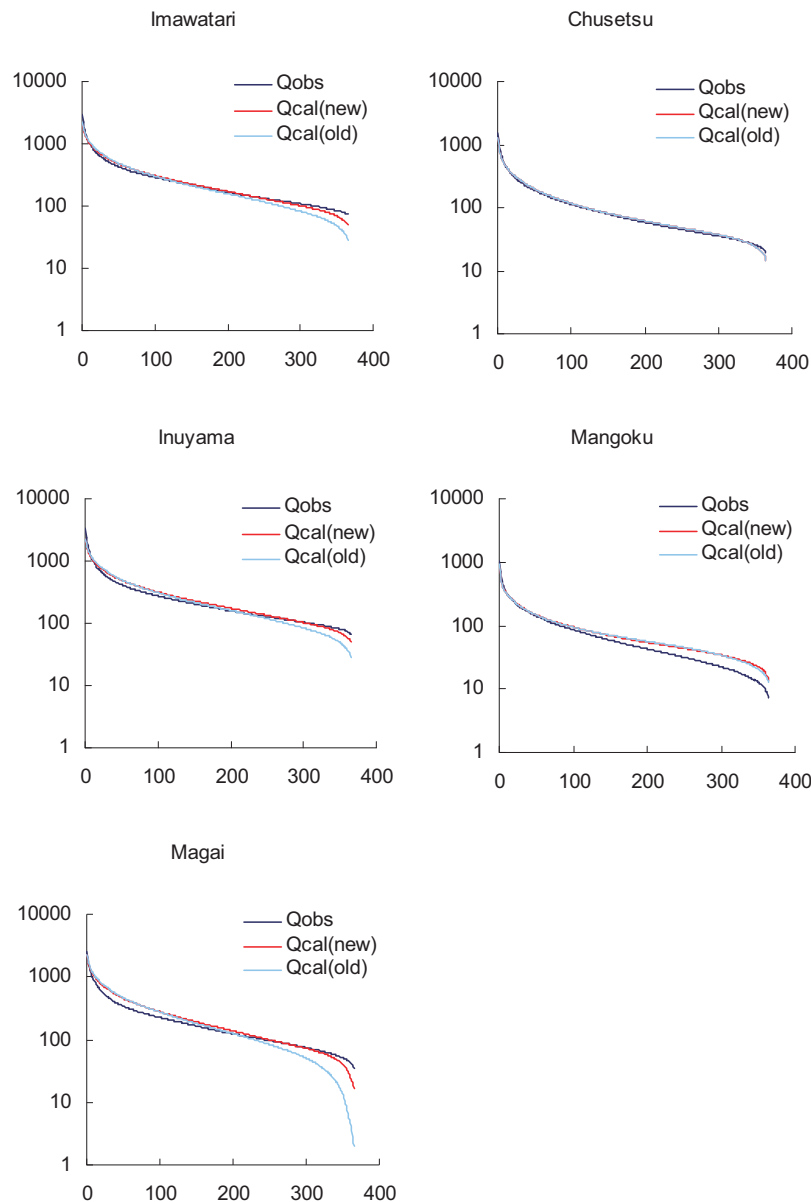


Fig. 7 Flow duration curve at each reference point in the Kiso river system. (1980 - 2009)

[3] 岩屋ダム

Fig.10は1993年から2009年までの岩屋ダム貯水量の再現結果を示している。岩屋ダムは、5000万 m^3 の洪水調節容量を持つが、実際には平常時最高水位よりも1mほど水位を下げて（411m→410m）運用されている。利水容量は1億 m^3 であるが、発電専用容量3810万 m^3 が新規利水容量の上に乗っているという容量配分になっているため、6190万 m^3 分は発電と共同で使われている。牧尾ダム同様、Vカット運用が実施され、2/20から水位を下げ始め（発電放流）、3/31に1500万 m^3 の確保水位（377m）まで放流し、その後は貯留操作に移行し、5/20に満水位-1m（410m）まで水位を回復させるようにモデル化した。平常時最高

水位付近を上限に水位が大きく変動する要因の一つは岩屋ダムの発電放流の影響であると考えられるが、発電に関する運用操作の実態が不明なため、岩屋ダムの発電放流のモデル化は行っていない。

異常渇水時の貯水量変動の再現性については1994年（平成6年）渇水については概ね良好に再現できたが、翌1995年の水位低下が再現できなかった。この要因については今後より詳細に検討していく必要がある。

洪水調節については1999年9月や2004年11月の洪水調節に伴う貯水量の増加を再現できており、ダムによる洪水調節が良好にモデル化できていることが確認された。

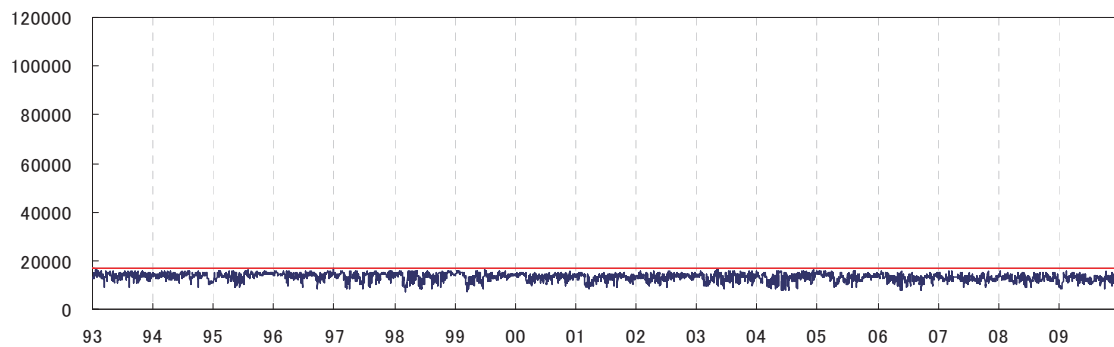


Fig. 8 Performance of the reservoir operation model for Maruyama Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

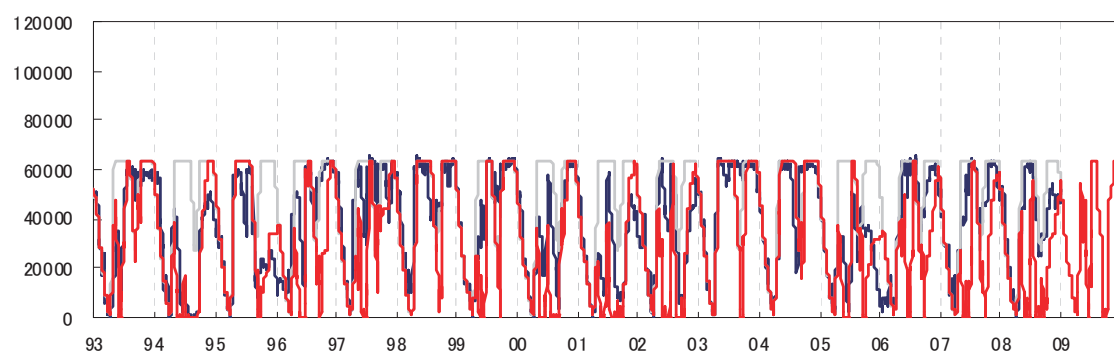


Fig. 9 Performance of the reservoir operation model for Makio Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

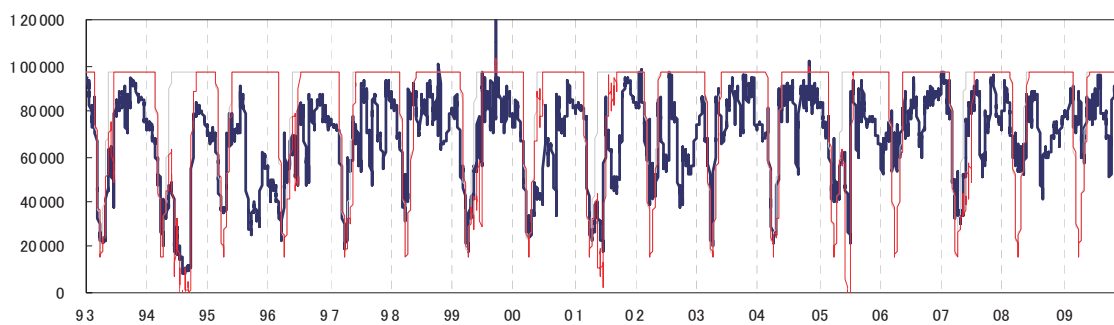


Fig. 10 Performance of the reservoir operation model for Iwaya Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

[4] 阿木川ダム

Fig.11は阿木川ダムの貯水量の再現結果を示している。阿木川ダムは制限水位方式の運用で6/1から10/15までの期間、洪水貯留準備水位(400.5m)まで水位を下げて運用される。平常時最高水位(412m)から洪水貯

留準備水位までの水位調整は約2ヵ月かけて実施されるようにモデル化した。阿木川ダムの洪水調節容量は1600万m³であり、その分は非洪水期には不特定容量に配分される。

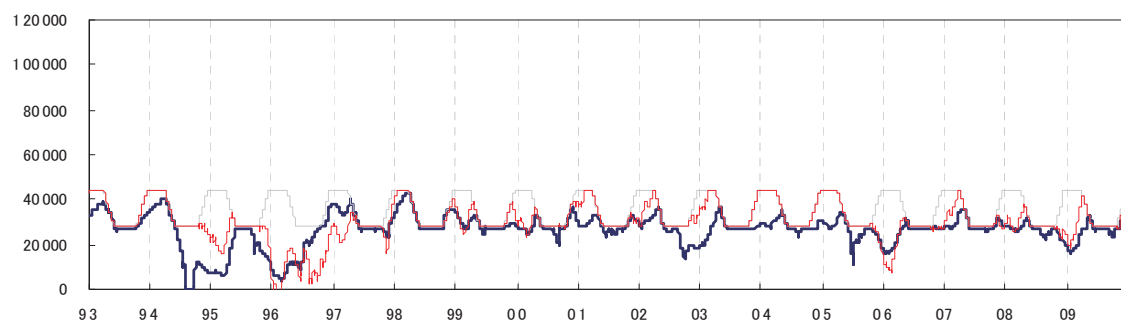


Fig. 11 Performance of the reservoir operation model for Agigawa Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

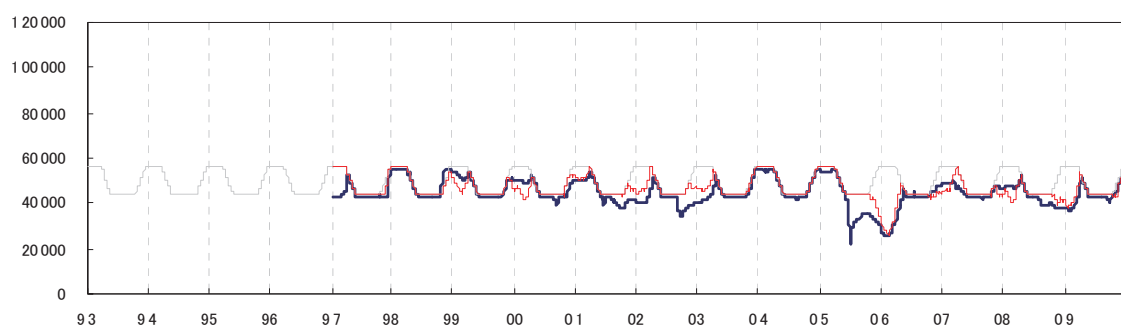


Fig. 12 Performance of the reservoir operation model for Misogawa Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

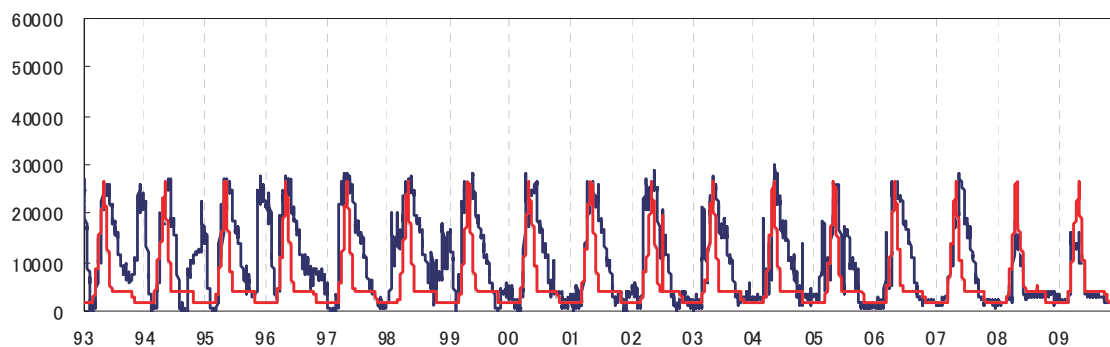


Fig. 13 Performance of the reservoir operation model for Yokoyama Dam.
(— Observed, — Calculated) Unit: 1000m³

不特定容量は利水容量の上に配分され、木曽成戸地点の流量が40m³/sを下回る場合に不特定利水容量の範囲内で「流水の正常な機能の維持」のための放流が実施される。1994年と1995年の渇水時における阿

木川ダム貯水量の再現性については、1994年については貯留量を過大評価（放流量を過小評価）し、1995年では過小評価（放流量を過大評価）する結果となった。特に、1995年の阿木川ダムからの過大な放流

が、今渡や馬飼地点における流量を実際よりも多くし、その影響でFig.10の1995年に岩屋ダムからの放流（利水補給）が実施されなかった可能性がある。複数のダムが、個別の規則に沿って運用され、しかもその操作の影響が独立ではなく、他のダム操作に影響を与えるため、モデルの精度検証が著しく複雑かつ困難になるが、木曽川水系の主要多目的ダムの貯水量を高度に再現できるモデルが構築できれば、今後の流域総合水資源管理に大きく貢献できるため、現地へのヒアリング等を実施し、さらなるモデルの再現精度の向上のための改良を実施していく必要がある。

木曽川水系では、ダムの開発順に補給していく「シリーズ運用」が実施されている。このため、牧尾ダムや岩屋ダムなどの古いダムの水が先に使われ、その後、阿木川ダム、味噌川ダムの順となる。しかし、現行のモデルでは、「シリーズ運用」ではなく、上流域から流水の移動順にダムモデルが稼働するアルゴリズムになっているため、現行のシリーズ運用を反映できるようにすると、岩屋ダムと阿木川ダムの貯水量の再現性が向上する可能性がある。

[5] 味噌川ダム

Fig.12は、味噌川ダムの貯水量の再現結果を示している。味噌川ダムは1996年12月に運用が開始されているが、ここでは1997年からの運用をモデル化している。水位の運用曲線は、阿木川ダムと同様に6/1から10/15までの洪水期に、洪水調節容量分(1200万 m^3)の空き容量を確保し、それ以外の期間は平常時最高水位(1122.5m)を維持するように運用され、水位2ヵ月間で調整するようにモデル化した。不特定容量は洪水期が1200万 m^3 で非洪水期は2400万 m^3 に設定されている。味噌川ダムには新規利水容量が3100万 m^3 確保されているが、現時点ではあまり利用されていないため、2005年から2006年にかけての渇水時以外は、

概ね運用曲線に沿った貯水量で運用されている。味噌川ダムについては、不特定容量からの放流および貯留、さらに「シリーズ運用」のモデル化などの改良を適用することで、さらなる再現性の向上が期待される。

[6] 横山ダム

Fig.13は、横山ダムの貯水量の再現結果を示している。横山ダムは2008年に徳山ダムの運用が開始されるまではかんがい用水の利水補給を実施していたが、2008年から洪水調節と発電専用ダムとなった。ここでは、再開発後の横山ダムの操作規則をモデル化したため、2008年以前のダム貯水量の変化は再現できていない。長良川流域の取水実績のモデル化およびダム操作については、モデルの再現性を向上させるためには、さらなるデータの収集と解析が必要であるが、近年の貯水量の変動については概ね再現できているので、500 m^3/s の洪水調節効果以外では本研究の解析結果に大きな影響は与えないと考えられる。

[7] 徳山ダム

Fig.14に徳山ダムの貯水量の再現結果を示す。徳山ダムも制限水位方式でモデル化し、洪水期は6/16から10/15に設定した。徳山ダムは2008年に運用が開始されたばかりで、まだ運用期間が短いため、ダム運用の実績データの蓄積が乏しく、運用曲線等のモデル化に問題が多く残されていると考えられる。しかし、徳山ダムは木曽川水系で最大の貯水容量を持ち、揖斐川の流況調節や異常渇水時における木曽川水系連絡導水路の運用上でもきわめて重要な役割を担うため、徳山ダムの貯水量を良好に再現するモデルを構築することは重要な課題である。本研究では、徳山ダムの貯水容量が極めて大きいため、異常渇水時においても徳山ダムの利水容量および不特定容量が枯渇しないことが明らかであったため、後述の木曽川水系連絡導水路を用いた渇水時補填のシミュレー

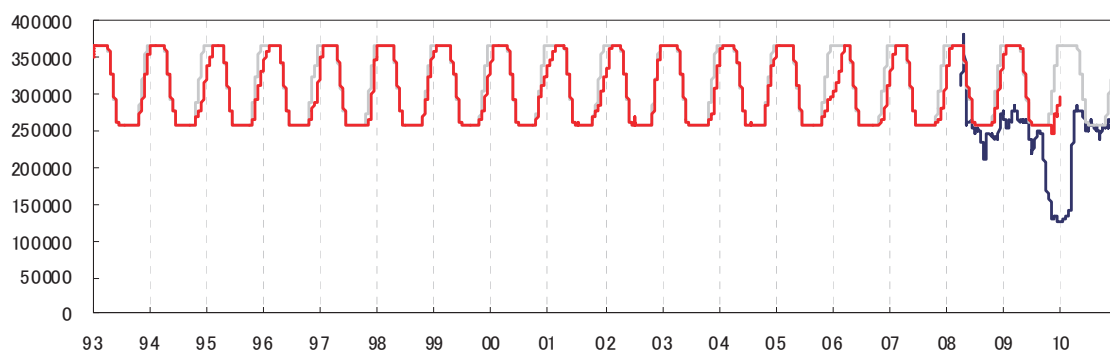


Fig. 14 Performance of the reservoir operation model for Tokuyama Dam.

(— Observed, — Calculated) Unit: 1000 m^3

ションには全く影響を及ぼさなかったが、今後、将来の気候変動時に影響評価などを実施する際には、徳山ダムのモデル化についてはさらなる高度化が求められる。

3.3 渇水時補填シミュレーション

水源の多系統化による渇水リスク軽減効果を検証するため、岩屋ダムだけでなく、味噌川ダム、徳山ダムおよび長良川河口堰からの利水補給を実施した場合に、木曽川の流量がどのように変化するのかについて検討を試みた。はじめに、味噌川ダムからの利水補給の効果を検証するため、2000年から2009年までの10年間を解析対象とし、徳山ダムについては、（実際には2008年からの運用であるが）2000年の時点で運用されていると仮定してシミュレーションを実施した。なお、長良川河口堰と徳山ダムについては、1994年（平成6年）の渇水時にもし運用されていた場合、渇水がどの程度緩和されるかについてのシミュレーション（1990～1999年）も実施した。実施したシミュレーションは以下の7パターンである。

SIM-1：味噌川ダムからの渇水補填（ $0.5\text{m}^3/\text{s}$ ）あり

SIM-2：徳山ダムからの渇水補填あり

馬飼流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下で $4.0\text{m}^3/\text{s}$

馬飼流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下で $15.3\text{m}^3/\text{s}$

導水地点：犬山地点（取水地点上流側）

SIM-3：長良川河口堰からの渇水補填（ $2.0\text{m}^3/\text{s}$ ）あり

導水地点：馬飼地点（取水地点上流側）

SIM-4：長良川河口堰と徳山ダムからの渇水補填あり

SIM-5：長良川河口堰・徳山・味噌川ダムの渇水補填あり（フル活用）

SIM-6：徳山ダムからの渇水補填あり（1990年代）

SIM-7：長良川河口堰と徳山ダムからの渇水補填あり（1990年代）

なお、木曽川水系連絡導水路の運用条件は以下のように設定した。

・渇水時（馬飼流量 $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下）

上流施設（犬山地点上流） $4.0\text{m}^3/\text{s}$

下流施設（木曽成戸：馬飼下流）なし

・異常渇水時（馬飼流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下）

上流施設（犬山地点上流） $15.3\text{m}^3/\text{s}$

下流施設（木曽成戸：馬飼下流） $4.7\text{m}^3/\text{s}$

[1]利水補給の効果（2000～2009年）

Fig.15は、2000年から2009年までの10年間における木曽川犬山地点と馬飼地点における渇水日数（基準流量を下回る日数）を比較した結果を示している。渇水時における木曽川水系上流ダム群の貯留制限や各用水の取水制限は、厳密には今渡地点の流況で決まるが、今渡地点は流量観測データに欠損が多く、モデルシミュレーションの結果と比較しにくいいため、下流の犬山地点の流量データを解析に用いることにした。犬山地点の観測値は、犬山取水口で木曽川用水や愛知用水が取水される前の値なので、今渡地点の流量と大きな違いはない。しかし、この期間の $100\text{m}^3/\text{s}$ 付近での犬山地点の計算流量が観測値よりもやや過大評価になっているため、 $100\text{m}^3/\text{s}$ を下回る日数（535日）が観測値（666日）よりも少なくなっていることに留意する必要がある。つまり実際には期間平均で年間に約67日間の $100\text{m}^3/\text{s}$ を下回る期間が発生しているのに対し、モデルでは約54日間となり、実態よりも年間で約13日少なく見積もられていることになる。一方、馬飼地点では、先述のとおり本研究では取水量をやや過大評価している可能性があり、馬飼地点における計算流量が観測値よりも少なくなっているため、ダム貯留条件および自流取水条件の基準流量（馬飼 $50\text{m}^3/\text{s}$ ）や異常渇水流量（ここでは馬飼 $40\text{m}^3/\text{s}$ ）を下回る日数が、観測値よりも多くなり、 $50\text{m}^3/\text{s}$ を下回る日数は、観測値が199日に対し、計算値が238日となり、 $40\text{m}^3/\text{s}$ を下回る日数は、観測値が103日に対し計算値は143日となった。これらの差異は、今後、流出解析モデルの再現精度をより向上させることで改善されると思われる。

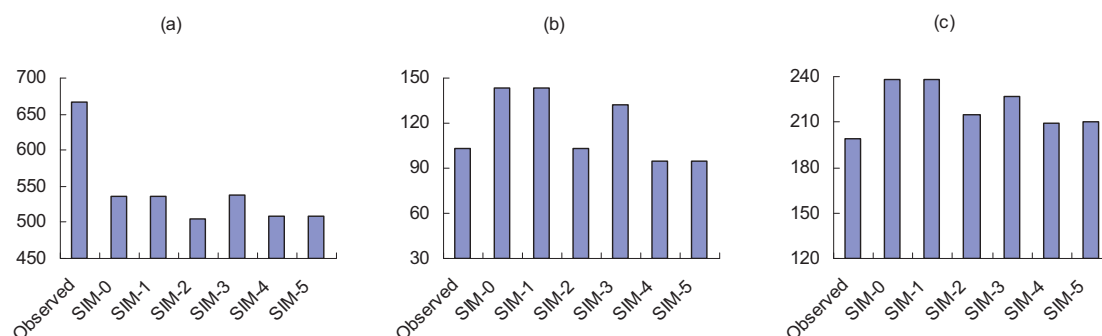


Fig. 15 Influence of additional water supply for drought mitigation. (2000 - 2009)

(a) Inuyama (Drought), (b) Magai (Severe drought), (c) Magai (Drought)

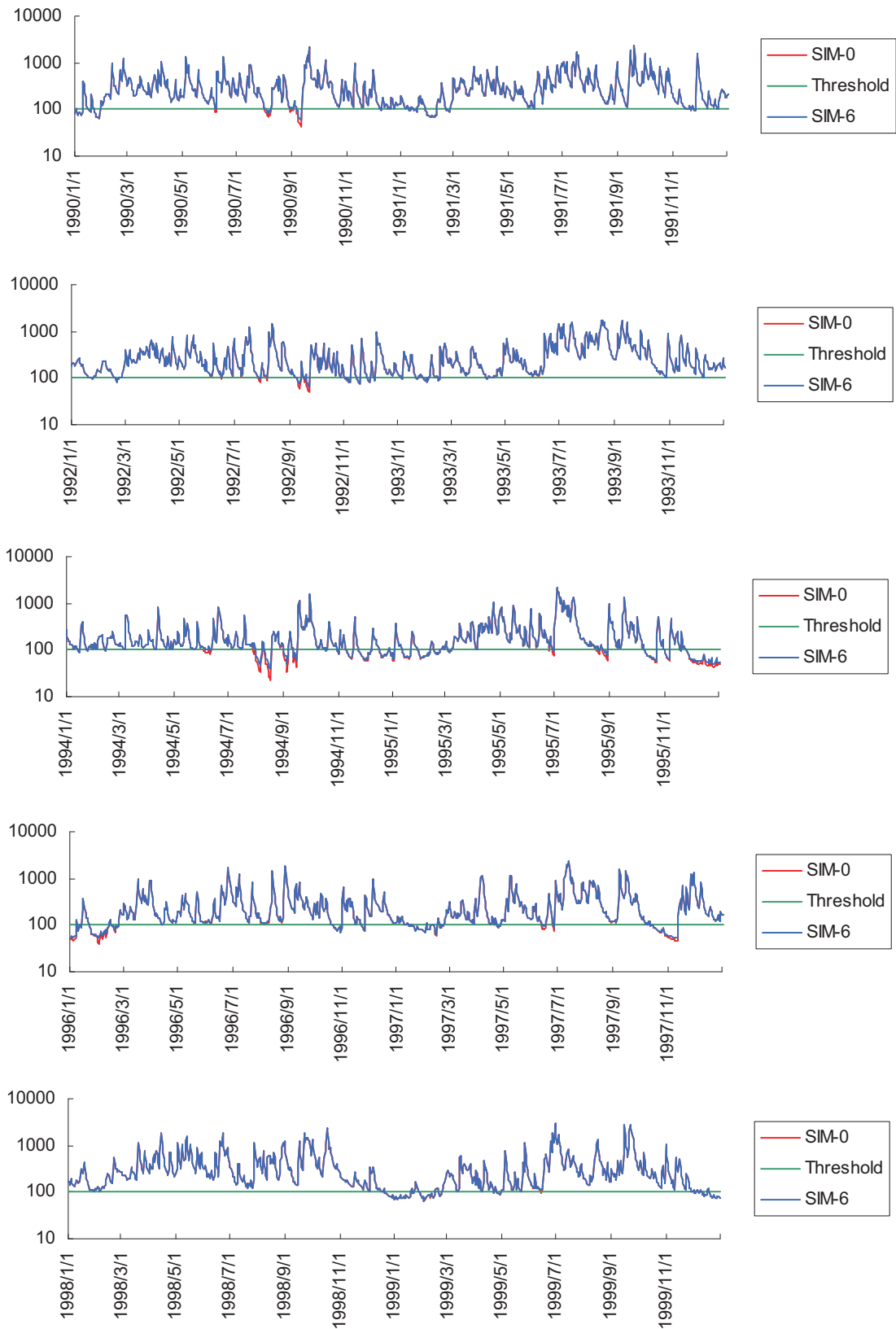


Fig. 16 Influence of additional water supply for drought mitigation at Inuyama.
(1990 - 1999)

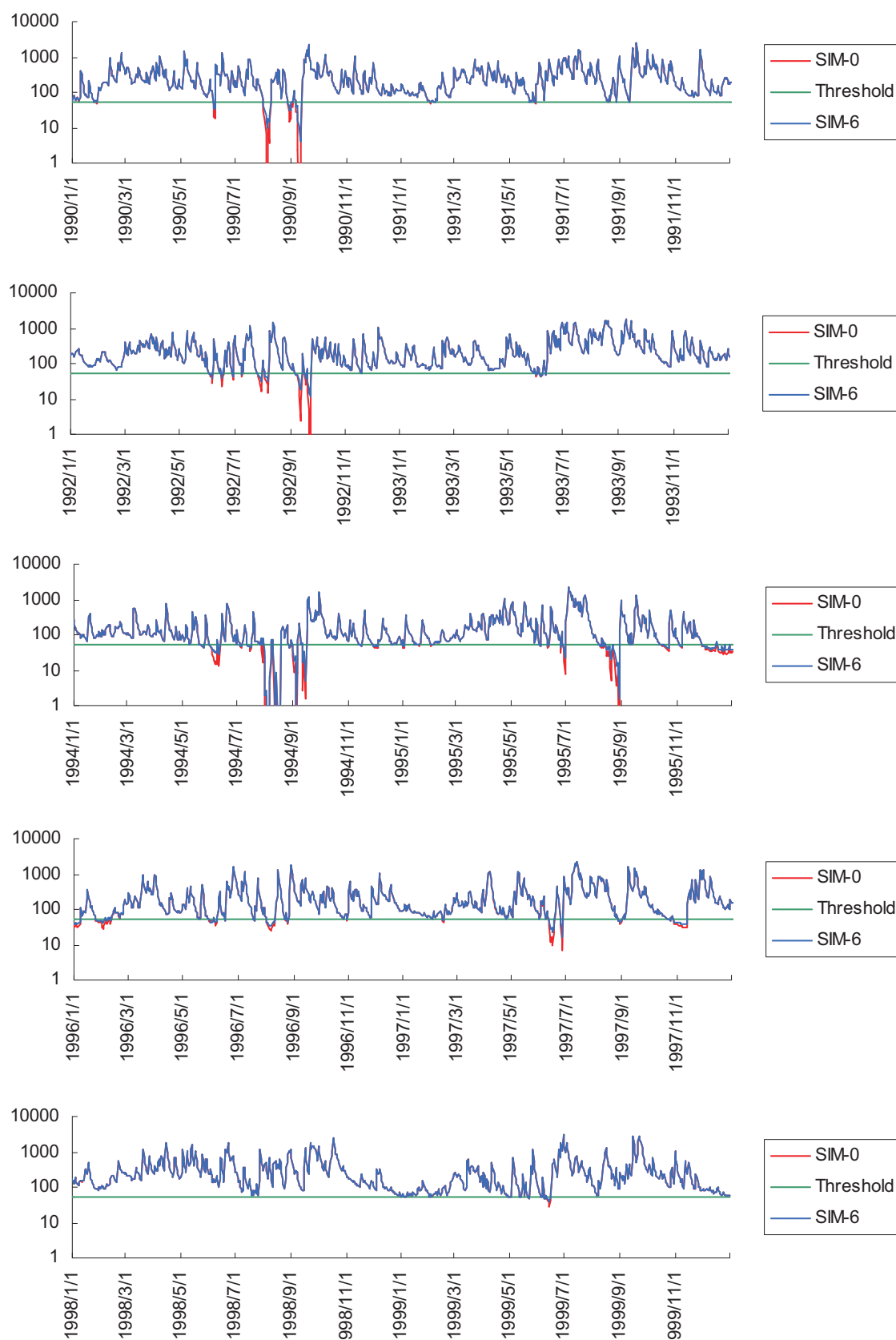


Fig. 17 Influence of additional water supply for drought mitigation at Magai.
(1990 - 1999)

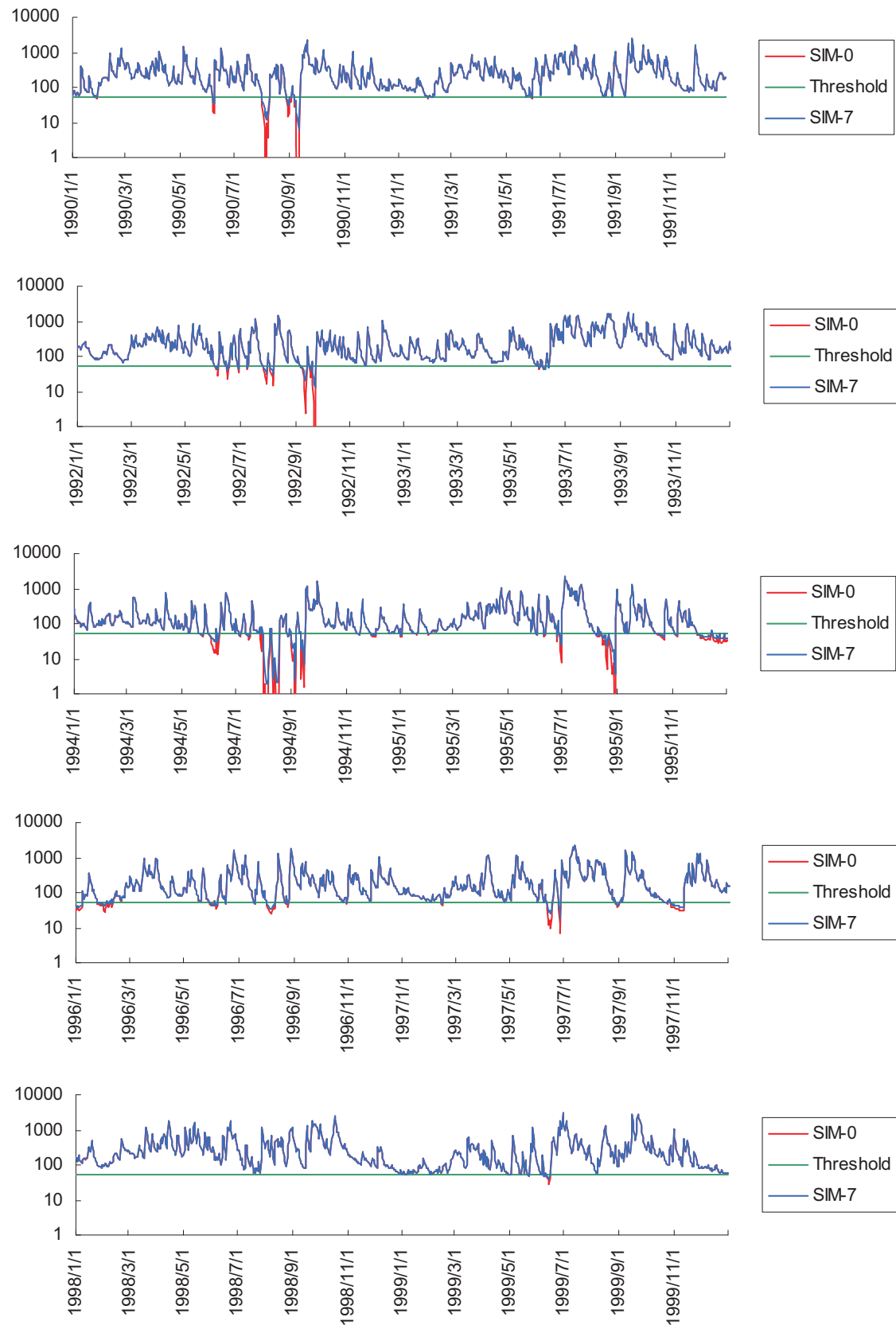


Fig. 18 Influence of additional water supply for drought mitigation at Magai.
(1990 - 1999)

まずSIM-0（渇水補填なし）とSIM-1に違いが全く見られなかったことから、渇水時に味噌川ダムからの補給水量を $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 増やしても、犬山地点や馬飼地点の流況は全く変化しないという結果が得られた。これは、味噌川ダムから従来の放流量に追加された $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 分の増加流量が、犬山地点に到達する前に、上流側で同時期に水不足が生じている他の取水地点で取水されてしまった可能性が考えられる。この問題を改善するには、個々の取水地点において、取水制限を基準地点の流量だけでなく、特定のダムから補給された水量についても常時監視しながら取水をさせるようにモデルの構造を変更させる必要があり、改善はかなり難しいと考えられる。SIM-2は木曽川水系連絡導水路によって犬山上流地点に徳山ダムから導水が実施された場合のシミュレーション結果であり、犬山地点および馬飼地点ともに流況が改善され、犬山地点の渇水日数（ $100\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が31日、馬飼地点の異常渇水日数（ $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が40日、渇水日数（ $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が23日減少するという結果が得られた。SIM-3は、長良川河口堰から馬飼取水地点の上流側に導水されることから、犬山地点の流況には影響がでないと思われたが、若干流況が悪化した。これは、長良川河口堰からの導水によって馬飼地点の流況が改善されたことにより、木曽川上流のダム群からの利水補給や不特定容量からの放流が抑制された可能性が考えられる。したがって、長良川河口堰から導水が実施された場合には、馬飼地点の基準流量は導水する前の流量に設定しないと犬山地点の流況がさらに悪化する可能性が示唆される。馬飼地点では異常渇水日数（ $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が11日、渇水日数（ $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下）も11日減少するという結果が得られたが、 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ のみの導水なので、SIM-2の徳山ダムからの利水補給を実施した場合よりも流況の改善効果は小さくなった。SIM-4では徳山ダムと河口堰からの導水を実施する場合のシミュレーション結果を示している。犬山地点では、SIM-3で考察したように長良川河口堰からの導水によって流況が少し悪くなる影響がでるため、徳山ダムからの導水が実施されても、徳山ダムからの単独補給の場合（SIM-2）よりも流況が悪くなったが、馬飼地点では、長良川河口堰と徳山ダムの両方からの利水補給により、異常渇水日数（ $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が48日、渇水日数（ $50\text{m}^3/\text{s}$ 以下）が29日減少し、本研究で実施したシミュレーションの中では最大の流況改善効果が得られた。SIM-5では、さらに味噌川ダムからの利水補給も加えたシミュレーションを実施したが、犬山地点および馬飼地点ともに明確な流況の改善効果は見られなかった。

[2]利水補給の効果（1990～1999年）

Fig.16は、1990年代に徳山ダムから木曽川水系連絡導水路を通して木曽川（犬山地点の上流側）に導水が可能であると仮定した場合に、犬山地点の流況がどの程度改善されるかをシミュレーションしてみたSIM-6の結果を示している。1990年から1999年の10年間に犬山地点の計算流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ を下回った日数は536日であったが、徳山ダムから導水があれば497日まで渇水日数が減少する結果が得られた。しかし、これにSIM-7で長良川河口堰からの導水を加えても犬山地点の流況は全く変化しなかった。

Fig.17は、馬飼地点における木曽川水系連絡導水路による導水の効果をシミュレーションした結果を示している。馬飼地点では、 $50\text{m}^3/\text{s}$ を下回る渇水期間が287日から257日に短縮され、導水路による渇水被害の軽減効果が認められた。さらに、長良川河口堰から導水を加えると、1994年（平成6年）規模の異常渇水時に置いても馬飼地点での瀬切れを回避できる効果があることもわかった（Fig.18）。実際に、馬飼地点における1990年から1999年までの異常渇水期間（ $40\text{m}^3/\text{s}$ 以下）は192日であり、渇水補填を考慮しないモデルでは178日であった異常渇水期間が、徳山ダムと長良川河口堰からの導水があった場合には106日まで短くなるという結果が得られた。これらの結果は、まだ定量的な評価としては問題があるが、定性的には、渇水時における水源の多系統化による渇水リスクの軽減効果を評価できたことを意味している。

9. おわりに

本研究では、これまでの先行研究で構築した木曽川水系統合流出解析モデルをさらに高度化し、下流域で取水される農業用水の影響も考慮した上で流域全体の河川取水量をモデル化し、各河川の現在気候条件下における流況再現性の向上と異常渇水時における木曽川水系連絡導水路等を用いた渇水時補填シミュレーションを試みた。具体的には、ダムのモデル化、取水量のモデル化および渇水時補填のモデル化に取り組み、過去の渇水事例を対象に、木曽川下流域における流況の再現性検証と渇水時における利水補填シミュレーションを実施した。渇水時補填で使用する水源施設のパターンは、味噌川ダム、徳山ダム（水系連絡導水路上流施設を使用）、長良川河口堰の3パターンを考慮した。その結果、味噌川ダムのみからの利水補給では犬山地点および馬飼地点の流況改善にほとんど寄与しなかったが、木曽川水系連絡導水路により徳山ダムからの利水補給が実施されると犬山地点および馬飼地点の流況は大きく改善し、渇水期間および異常渇水期間が大幅に短縮されるという結果が得られた。さらに、長良川河口堰か

らの導水を実施すれば1994年（平成6年）規模の異常
渇水時でも木曽川下流域の瀬切れを回避できる可能
性があることが示された．今後は，本研究で構築し
たモデルのさらなる精度向上と，将来温暖化時にお
ける影響予測を実施し，もし深刻な渇水被害の発生
が予測される場合には，その被害を回避するために
事前にどのような対策を実施すべきかといった流域
総合水資源管理に資する温暖化適応策の検討を早
急に実施していく必要がある．

謝 辞

本研究で解析に用いた丸山ダム，横山ダムおよび
主要地点における河川流量データは，国土交通省中
部地方整備局河川部，農業利水実績データについて
は東海農政局から提供を受けた．また，独立行政法
人水資源機構東海支社から，木曽三川における4ダム
（牧尾ダム，岩屋ダム，阿木川ダム，味噌川ダム，
徳山ダム）のデータの提供を受けた．ここに記して

謝意を表します．

参考文献

- 佐藤嘉展・道広有理・鈴木靖（2012）：木曽川水系
統合流出解析モデルの高度化，京都大学防災研究所
年報，第55号B, pp. 519-527.
- 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.
- 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, pp.
1618–1629.

（論文受理日：2013年6月1日）