

ダム貯水池モデルを組み込んだ流域環境評価モデリング

浜口俊雄・小尻利治・森 英祐*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本稿は、気候変動による流域の水文環境・生態環境の影響評価が可能なモデリングを示し、淀川流域の過去の再現結果と100年先推定結果の比較検討することを目的とする。解析に際しては、GCM出力値を用い、分布型流出モデルにより流域単位での評価を行った。その際現在と将来との流況の変化を捉えるとともに、簡素化した条件下で水温等を用いた指標から環境面への影響の検討も行った。また、分布型流出モデルにダム貯水効果を導入し、人為的な水移動を考慮した結果、気候変動による河川流況の変化や環境面の変化傾向が見受けられ、河川管理の重要性が増すことが示唆された。さらにダム貯水池の治水効果によるピーク流量の減少が確認された。

キーワード：気候変動，分布型流出モデル，GCM，影響評価

1. はじめに

現在、多くの国で水問題が発生しているが、人口の増加、経済の発展に伴い水需要の更なる増加が予測され、水問題はより深刻化していくと考えられ、不安は高まっていると言える。また、将来的な気候変動による水資源分布への影響も懸念され、近年においても、各地での異常気象の発生が報告されている。以上のような背景を受け、1997年に第1回世界水フォーラム、2007年にはアジア太平洋水サミットが開かれるなど、安定的な水資源供給は世界的な問題として認識されており、取り組みが検討されている。日本においては、我が国は世界的に見ると降水量が多く水資源の豊かな国であるが、季節変動が大きく、地形も急峻であるため、安定的な水利用に適しているとは言いがたく、ダムや堰などにより水資源の安定供給に努められてきた。近年、日本では水資源の回収利用が進んだため、水利用量は横ばい、もしくは減少傾向にあるが、異常少雨、異常多雨の変動が大きくなる傾向も見られ、また、現在運用されているダムの多くは利水基準を1956年から1975年の少雨年を基準とし、設定されており、近年における水資源動態への対応はしていない。水資源の地理的、期間的な偏在性を鑑みると、世界規模での取り組みがなされると同時に、流域単位での総合的な水資源管理

が求められ、人為的な水移動としてのダム操作による治水及び利水効果の評価、運用がなされる必要がある。流域管理に際しては、短期、長期両者の視点からの水資源分布評価が必要であり、気候変動による影響を考慮する必要がある。また、近年、大循環モデル(GCM)を用いた温暖化シナリオに基づく将来予測が活発化、高精度化している。そこで、本研究ではGCM出力値を流域単位に適用し、ダム貯水池による流域での効果の検証及び気候変動前後における流域での水資源分布の比較、評価を行った。

2. 解析手法

本章では、気候変動による影響評価の解析手法を述べる。Fig.1に解析フローチャートを示す。

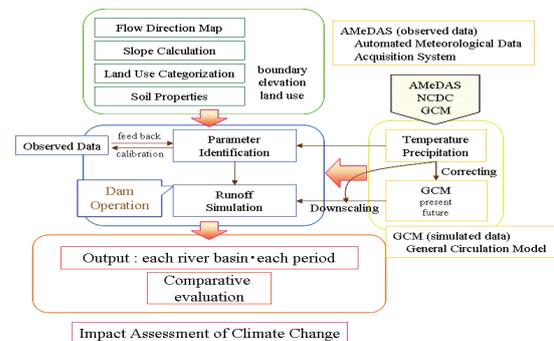


Fig.1 Analysis method

同図に示すように、解析は流域のモデル化、気象データ解析、流出解析、影響評価の順に行った。流域のモデル化は多層メッシュ分布型モデル(Hydro-BEAM)を用い、ダム貯水池に関しては別モデルを構築し、これを Hydro-BEAM に組み込んだ。次に過去のデータを用い、透水係数などのパラメータ同定を行う。パラメータ同定はダム流域ごとに行い、ダム下流域については、ダムからの放流量の実測値を与え、最下流地点にて行った。また、GCM データに関しては、CGCM2の結果(気象庁, 2003)を利用し、ダウンスケールをした後、入力データとし、流出解析結果を再現期間、将来予測期間において比較・検討を行った(井本ら, 2007)。

3. 流域のモデル化

3.1 Hydro-BEAMの基本構成

流域のモデル化はHydro-BEAM(Hydrological River Basin Environment Assessment Model)(小尻ら, 1997)を用いた。Fig.2にHydro-BEAMの概念図を示す。

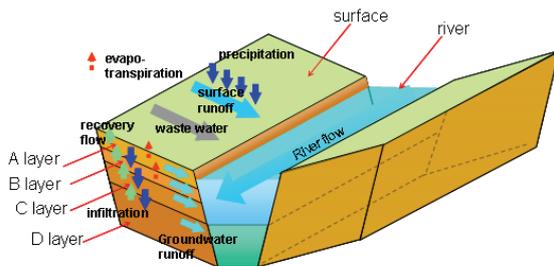


Fig.2 Pattern diagram of Hydro-BEAM

Hydro-BEAMは多層メッシュ分布型流出モデルで、鉛直構造にA~D層の4層を設定しており、A~C層の水平流出量は河川に流入し、D層は河川流量には影響を及ぼさない地下水層としている。各セルに対し標高や土地利用などの地理情報、及び、降水量や蒸発散量の気象情報を与え、解析を行うため、比較的忠実に流域をモデル化出来ると考えられる。また、河川流出、表面流、A層からの流出にはkinematic wave法、B~D層は線形貯留法を用いて解析を行っている。

3.2 ダム貯水池のモデル化

ダムの目的は洪水調節、灌漑、上水道・工業用水供給、水力発電など多岐にわたっており、安定的な水資源供給の観点から、とりわけ、治水、利水を目的としているダムは重要であると考えられる。ダム貯水池では人為的に放流量が操作されており、水移動は地理条件のみに依存していない。ダムにおける人為的な水移動操作により、下流域ではその影響を受けていると考えられ、ダムの規模によりその影響は無視出来るものではない。そこで、ダム貯水池に

関しては、Hydro-BEAMとは異なったモデル化を行い、外挿モデルとしてHydro-BEAMに組み込んだ。以下、ダムのモデル化手法を述べる。ダム貯水池での水移動は次式で表される。

$$S_{t+1} = S_t + (R - Q)\Delta t \quad (1)$$

ここに、 S : 貯水量、 R : 流入量、 Q : 放流量、 t : タイムステップを表す添字、 Δt : 時間差分である。従って、ダムでの水移動をモデル化する際、流入量、及び、放流量の決定が要求される。実際のダム貯水池においては、流入量は貯水位の変化割合から、貯水位-貯水量関係式から導き出され、流入量、貯水位より放流量が決定されるが、本研究では以下の手順に従いダム貯水池のモデル化を行った。

(i) ダム貯水池のモデル化

ダム貯水池は周辺地形、貯水位に応じその貯水域が大きく変化する。Hydro-BEAMに組み込むため、メッシュ上でダムに該当するセル(以下ダムセル)を決定する。Fig.3に貯水域の算定結果の一例を示す。赤印がダム堤体位置、青セルがダム貯水域である。尚、貯水域の算定は貯水位ごとにDEMを用いて行い、貯水位によるダムの貯水域変化を捉えるものとした。



Fig.3 The area of a dam reservoir

Fig.3は貯水位差15mあり、貯水位による貯水域の変化が分かる。算定結果を用い、ダムセルを決定し、Hydro-BEAM上でのダム貯水池の位置を決定する。Hydro-BEAMではkinematic wave法、線形貯留法を用い各セルの計算が行われているが、ダムセルでは、流量の収支によってのみ計算を行うものとした。

(ii) 流入量の決定

ダムセルの位置に従い、Fig.4のように流入位置を決定し、当該セルへの流出量をダム流入量とした。

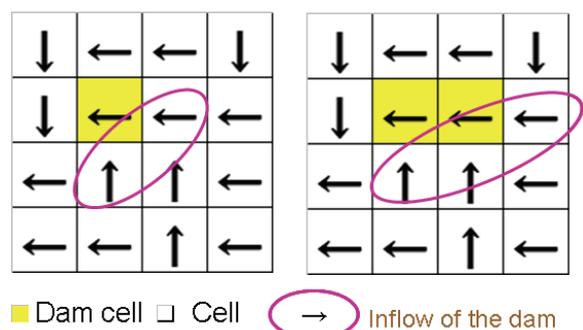


Fig.4 inflow of a dam

(iii)放流量の決定

ダム貯水池では操作規則が設けられており、放流量は操作規則に則り決定される。治水・利水目的のダムでは主に、洪水調節、制限水位、確保流量が設定されており、次式に定式化を行いモデルでの放流量とした。

1.洪水調節

・洪水期

$$Q_{out1} = \begin{cases} Q_m \\ Q_d \\ \min(Q_m, Q_d) \end{cases} \text{ when } \begin{cases} SWL \leq H \\ DWL \leq H \leq SWL \\ H \leq DWL \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{out1} = 0 \quad \text{when } H < LWL \quad (3)$$

・非洪水期

$$Q_{out1} = \begin{cases} Q_m \\ Q_d \\ \min(Q_m, Q_d) \end{cases} \text{ when } \begin{cases} SWL \leq H \\ NWL \leq H < SWL \\ H < NWL \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{out1} = 0 \quad \text{when } H < LWL \quad (5)$$

ここに、H：ダム水位、 Q_{in} ：ダム流入量、 Q_{out} ：ダム放流量、 Q_d ：ダム制限放流量、SWL：サーチャージ水位、NWL：常時満水位、DWL：洪水期満水位、LWL：最低水位である。

2.確保流量

$$Q_{out2} = \max(Q_{out1}, Q_{sup}) \quad (6)$$

ここに、 Q_{out2} ：更新されたダム放流量、 Q_{sup} ：ダム確保流量である。

3.維持流量

$$Q_{out3} = \max(Q_{out2}, Q_{in}) \quad \text{when } Q_{std} < Q_{eco} \quad (7)$$

ここに、 Q_{out3} ：更新されたダム放流量、 Q_{eco} ：維持流量、 Q_{std} ：基準地点を含むメッシュの流量である。尚、ダム貯水位Hに関しては貯水量Sをから貯水量-貯水位関係曲線より導いた。また、実際のダムでの放流量はダム管理者の判断による部分が少なくない。しかし、将来予測をするにあたり、客観性を保つため、人為的判断によるダム操作は考慮せず、操作規則のみに則るものとした。以上により決定した放流量をダム下流メッシュに返すことにより、Hydro-BEAMに組み込むこととした。

3.3 琵琶湖のモデル化

本研究では淀川流域を対象とした。淀川流域は上流部に琵琶湖を有し、その面積は約630km²に及ぶ。琵琶湖は淀川流域に多大な影響を与えていると考えられ、ダム貯水池同様、Hydro-BEAMとは異なったモデル化を行い、これに組み込んだ。琵琶湖での水移動は、ダム貯水池同様、流入量、放流量から決定されるものとし、放流量は瀬田川洗堰、疎水により

決定される。ただし、流入量に関しては、琵琶湖は貯水位の変化による貯水域の変化は小さいものとし、予め、琵琶湖対象セル、琵琶湖への流入セルを決定した。一般に、上流部から琵琶湖に流入した水は下流に至るまでに1日程度の時間がかかると言われているが、これを考慮せず、琵琶湖へ流入した水は直ちに貯水位に影響し、放流量が決定されるものとして解析を行った。

4. 気象データ解析

Hydro-BEAMでは各メッシュの気温・降水量の時系列データが必要である。気象データはAMeDAS観測値、GCM出力値を用い、ティーセン分割を行い、各メッシュの気象データをAMeDAS観測値で代表させることとした。尚、データが欠測している場合は他の観測所のデータで補完し、観測所と各メッシュにおける高度補正を行う。気象データの解析として、蒸発散量、積雪深の推定をそれぞれ行う。蒸発散量の推定は熱収支式から推定するものと、気温などから経験的に推定するものが考えられる。今回使用したGCM出力値では降水量、気温しか与えられず、熱収支式を解くことが出来ないため、必然的に後者を選択し、蒸発散量の推定にはThornthwaite法を用いた。Thornthwaite法は平均気温と可能日照時間から可能最大蒸発散量を与え、経験的に求められている補正係数を用い、蒸発散量の推定を行うものである。次に積雪・融雪過程について述べる。積雪・融雪モデルは、蒸発散量と同様、熱収支法によるものと、経験式を用いるものに大別されるが、蒸発散量と同様の理由で後者を選択し、Degree-Day法を用いてこれを行った。

5. ダウンスケーリング

GCMはIPCCのSRES A2に基づいた気象庁の全球大気海洋結合モデル(CGCM2)を用い、再現期間、将来予測期間をそれぞれ1979-2000年、2079-2100年とした。しかし、解像度が100kmと流域単位に適用させるには粗く、また、バイアスが存在するため、このダウンスケール、バイアス補正を行い、モデルへの入力値とした。補正方法は、Dettinger *et al.*, Wood *et al.* の手法を改良した方法を用い、以下の仮定の下、月単位での統計量(平均,分散)を合わせるように行った。Fig.5に補正方法の概念図を示す(藤原ら, 2006)。

①降水、気温はそれぞれある確率密度関数に従う。

②再現期間、将来予測期間において確率密度関数は時間的な変化はしない。

③月降水量、月気温はそれぞれピアソンⅢ型分布、

正規分布に従う。

補正は上述の仮定の下、以下に示す方法で行った。

[1]再現期間における観測値、GCM出力値を用い、各観測地点・各月毎に確率分布を定める。

[2]気候モデルの出力値が P_{GCM} であるとき、これ

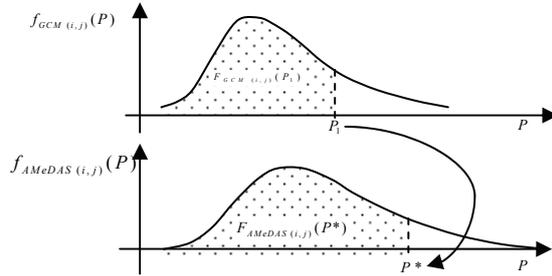


Fig.5 Pattern diagram of bias correction

の非超過確率を求める。

[3]観測値の確率分布において[2]の非超過確率に等しい値 P_{AMeDAS} を求め、これを P_{GCM} と置き換える。

[4]将来予測期間についても再現期間でのGCM出力値の確率分布における非超過確率を求め、再現期間と同様に観測値を用い置き換える。

以上の手法によりGCM出力値の補正を行った。

Fig.6, 7に再現期間でのAMeDASによる観測値、補正前のGCM出力値、補正後のGCM出力値を示す。

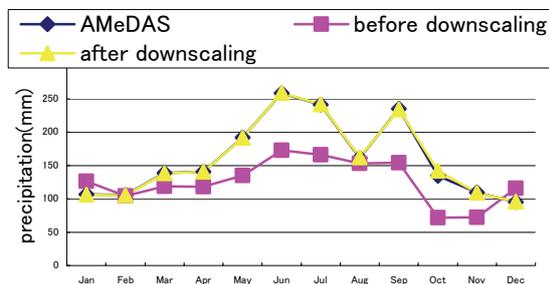


Fig.6 Monthly averaged precipitation

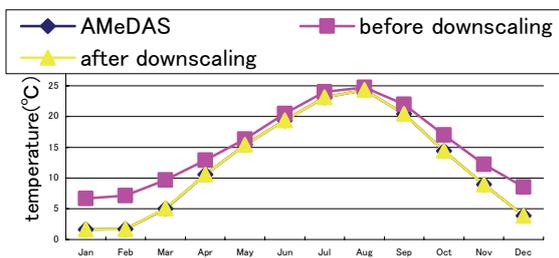


Fig.7 Monthly averaged temperature

確率密度関数の時空間的な変化、また、確率密度関数の適用の妥当性などの問題は残るが、仮定が妥当であると想定し、本稿でのダウンスケールとする。補正前の出力値は降水量について概ね過小評価、気温について過大評価をしていたが、補正により再現性は高まったと考えられる。ダウンスケール手法に

関しては、ニューラルネットワークの導入など種々の方法を適用し、その妥当性を検討するなども考えられるが、今後の課題とする。

6. 実流域への適用

6.1 対象流域の概要

実流域への適用は琵琶湖・淀川流域を対象とし、行った。Fig.8に標高図を示す。淀川は幹線流路延長75.1km、流域面積8240km²の2府4県に跨る近畿地方最大の一級河川である。日本最大の湖である琵琶湖、また、965本の支流を持ち、古くから社会、文化、経済の基盤となってきた。大阪府内では取水、排水など人為的な水移動が多く行われ、地理情報のみによる解析には適していないと考えたため、枚方観測所地点を最下流地点とし、枚方観測所地点から上流を対象に流出解析を行った。

北東に位置する琵琶湖流域では農業地帯が広がっているが、中流域には京都市、下流域には大阪市などの大都市も流域内に含み、取水・排水などの人為的な水移動も多く行われている。

流域の気候はそれぞれ、下流域は雨量の少ない瀬戸内海気候区、木津川上流域は台風による雨量の多い太平洋型気候区、琵琶湖北部流域は降水量の多い日本海型気候区、桂川上流域および猪名川上流域は前線性の雨量が多い区域、以上の4区域に分類される。各区域における流出特性がそれぞれ異なっていること、また、琵琶湖による調整効果のため、日本における他河川に比較して、流況は安定したものとなっている。

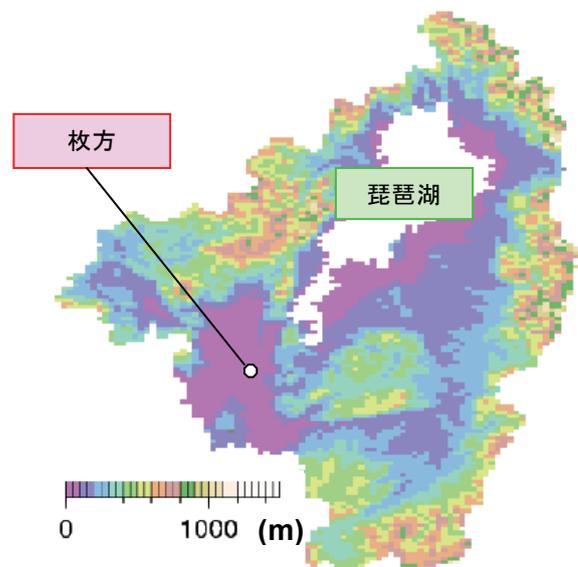


Fig.8 Elevation

6.2 パラメータ同定

パラメータ同定は各ダム流域において行った。パラメータ同定期間は2000年である。2000年は渇水年であった。パラメータ同定後の計算結果をFig.9, 10に示す。

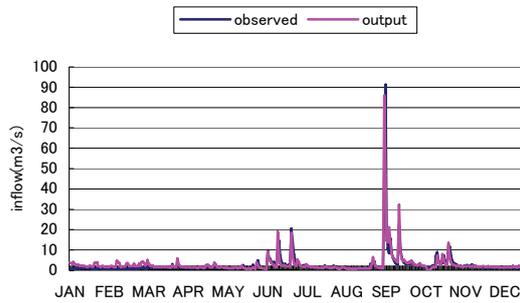


Fig.9 Inflow (Shorenji Dam, 2000)

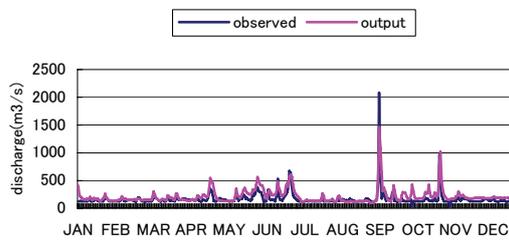


Fig.10 Discharge (Hirakata, 2000)

各地点において概ね再現性が保たれていると考えられる。また、ダムからの放流量はFig.11, 12のようになり、貯水位はFig.13, 14のようになった。放流量も流入量同様、概ね再現されている。しかし、貯水位に見られるように渇水時におけるダムからの放流量が過小評価されており、モデル解析値では貯水位変化が見られない。ダム管理者の判断による放流量増量が行われたとも考えられるが、渇水を捉えきれていないことが分かる。今後モデルの改善が必要と考えられる。また、室生ダムは常に常時満水位よりも大幅に貯水位が低く保たれていた。これもダム管理者の判断によるものと考えられる。

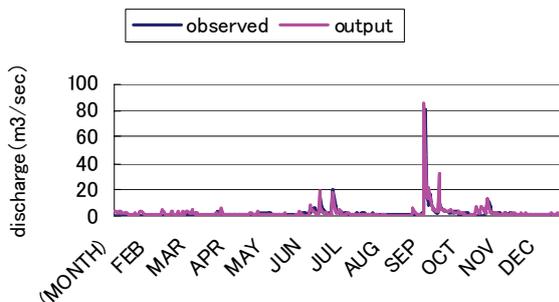


Fig.11 Discharge (Shorenji Dam, 2000)

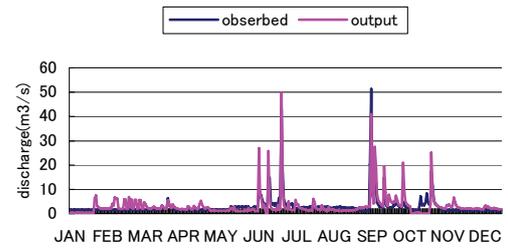


Fig.12 Discharge (Muro Dam, 2000)

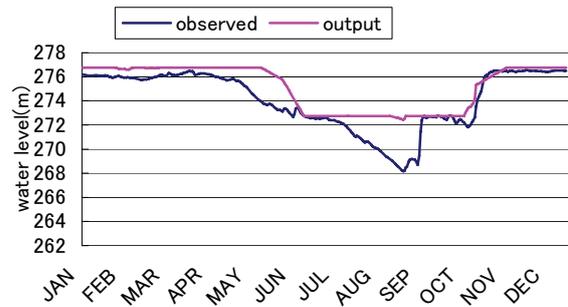


Fig.13 Water level (Shorenji Dam, 2000)

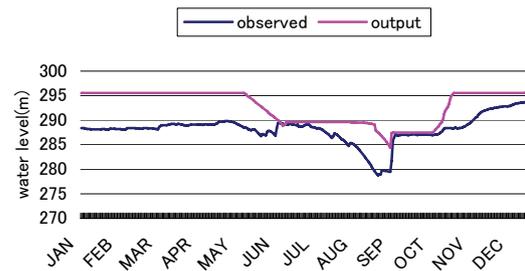


Fig.14 Water level (Muro Dam, 2000)

6.3 気象データ解析

Fig.15に流域平均降水量, Fig.16に流域平均蒸発散量, Fig.17に箱館山地点での積雪深, Fig.18に同地点での融雪量を示す。それぞれ青線がAMeDAS解析値によるもの、赤線がGCMの再現期間、黄線がGCM将来予測期間である。また、Fig.19に積雪深の2月の分布図を示す。

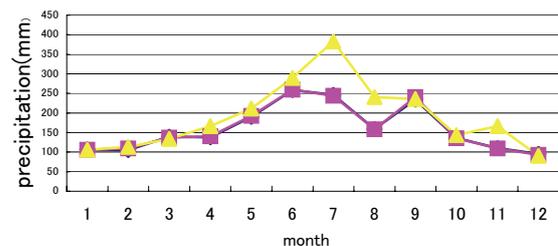


Fig.15 Monthly averaged precipitation

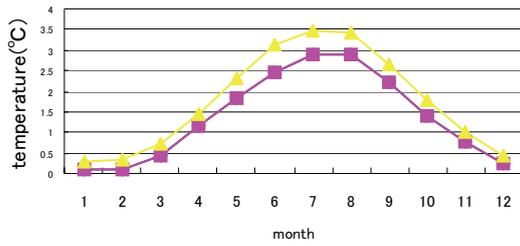


Fig.16 Monthly averaged temperature

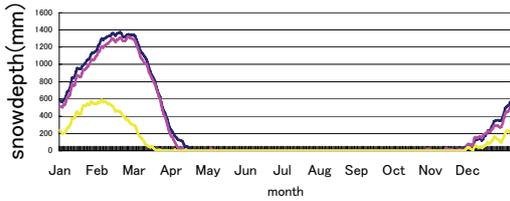


Fig.17 Snowdepth (Mt. Hakodate)

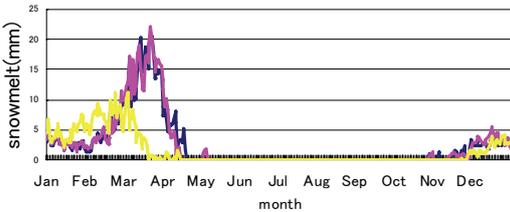


Fig.18 Snowmelt (Mt. Hakodate)

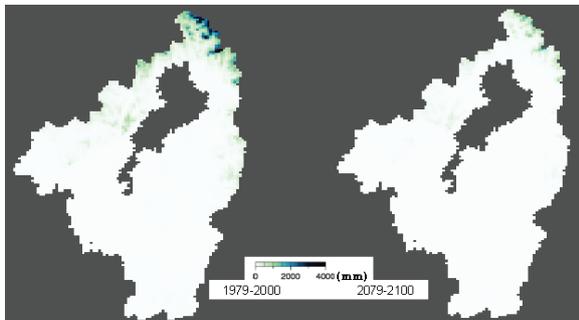


Fig.19 Snowdepth

降水量に関し、Fig.15に示すように大幅な変化が見られた。将来予測期間において、年降水量は増加傾向が見られる。Fig.20にそれぞれ月降水量、日降水量を示す。

降水は夏季において大幅に増加する傾向が見られ、特に、7月、8月での著しい増加が認められる。3ヶ月降水集中度は35%であったのに対し、40%を上回る。冬季においては若干の減少が見られ、現在よりも降水の季節変動は大きくなると考えられる。また、

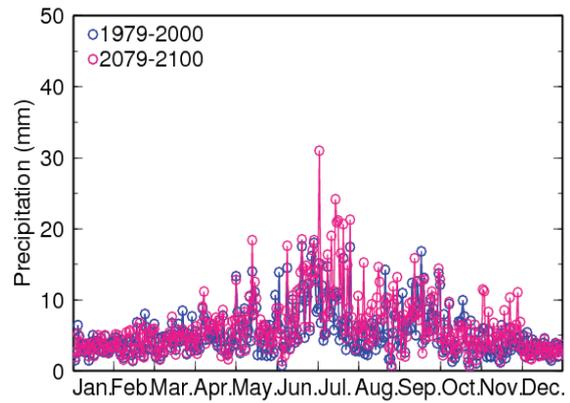


Fig.20 Daily precipitation

Fig.20に示すように降水パターンにも変化が見られた。夏季での降水量の大幅な増加に加え、ピーク降水量も大幅に上昇することが示唆される結果となり、季節的にも、短時間的にも変動幅が大きくなるという結果になった。蒸発散量の推定にはThornthwaite法を用いたため、風速、大気圧、水蒸気圧などは考慮されておらず、気温によってのみ依存するものとなっているが、1年を通して増加傾向が見られる。蒸発散量は季節的、地理的な条件により違いはあるものの、降水量の約1/3が蒸発するといわれ、降水減少の季節的、時間的な変動が大きくなったことを考えると、蒸発散量の増加は水資源管理、水資源供給に対し大きな負の影響を与えると考えられる。蒸発散量と同様に、気温変動を受け、積雪量の減少、融雪期の早期化が見られた。箱館山は滋賀県にあり、近畿圏では比較的積雪が豊富な地域であるが、最大積雪深は将来予測期間において1/2以下に落ち込む結果となった。また分布図からも分かるように、琵琶湖北東部の雪が豊富であった地点での積雪深は大幅に減少する結果となった。伊吹山は琵琶湖東部に位置し、箱館山同様スキー場がある場所であるが、伊吹山においても大幅な積雪深の減少が見られる。また、積雪域も大幅に減少し、積雪域は北東部に一部残るだけとなった。このことは、冬季における積雪としての水資源貯留量の大きな減少を意味する。また、融雪量の減少、早期化も見られることから、春季での水資源分布の変化が予想される。

6.4 流出解析

Fig.21に枚方地点での月平均流出量を示す。夏季においての降水量の増加を受け、流出量も夏季において大幅に増加する傾向が見られた。年間を通して増加傾向が見られたが、3月のみ減少傾向が見られた。これは積雪量の減少、消雪期の早期化により、融雪量が減少したためであると考えられる。Table1に枚方地点での流出特性を示す。

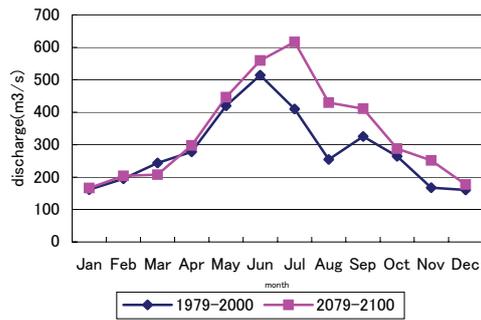


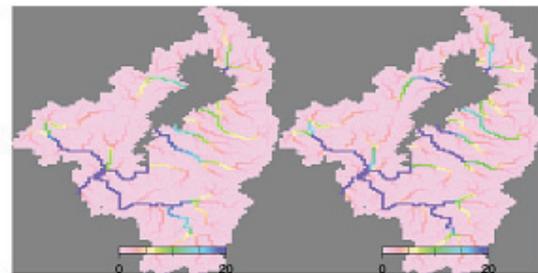
Fig.21 Monthly discharge (Hirakata)

Table1 Discharge regime

	1979-2000	2079-2100
Maximum(m ³ /s)	2863.2	4995.4
95-day(m ³ /s)	374	444.9
185-day(m ³ /s)	171.8	239.2
275-day(m ³ /s)	130.3	139.8
355-day(m ³ /s)	112.7	116.9
Minimum(m ³ /s)	81.6	81.6
Annual averaged(m ³ /s)	283.1	338.4
Dec.-Feb. (m ³)	15411.3	16307
May.-Mar. (m ³)	28920.9	29215
Jun.-Aug. (m ³)	36034.8	49190.9
Sep.-Nov. (m ³)	22964.9	28798
Coefficient of river regime	16.08	19.32
Discharge concentration	0.36	0.399

流出特性に関し、最大流量、放水流量は将来予測期間において、大きく増大する傾向が見られた。一方、渇水流量、最低流量には大きな変化は見られなかった。洪水に対する危険性が増加する一方で、渇水に関する危険性が減少するわけではないと考えら

れ、水資源管理の重要性が増すと考えられる。Fig.22にそれぞれ8月の分布図、Fig.23に再現期間、将来予測期間においてダム操作を考慮した場合、しない場合、それぞれ平年、最大流量年、最小流量年についてハイドログラフを示す。



1979-2000 Discharge(m³/s) 2079-2100

Fig.22 Discharge (August)

平年においても夏季の降水量が増加し、また、最大降水量も大幅に増加していることが分かる。また、平年、最大流量年、いずれもダム貯水池を考慮することにより、最大流量は減少させることが出来ることも分かる。最大流量記録時での日吉ダムによる洪水調節をFig.24に示す。

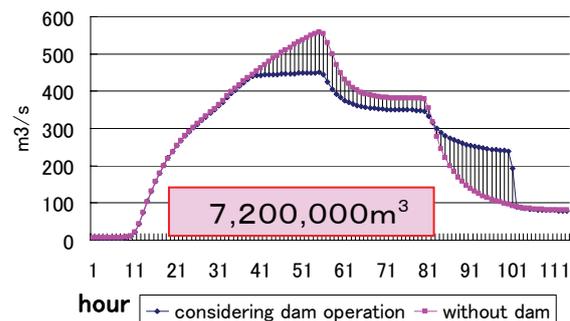


Fig.24 Flood control

最大流量時、日吉ダムでは7,200,000m³の流量が操作され、流量ピーク値をカットした。しかし、ダム操作により洪水調節を行った場合でも、将来予測期間で

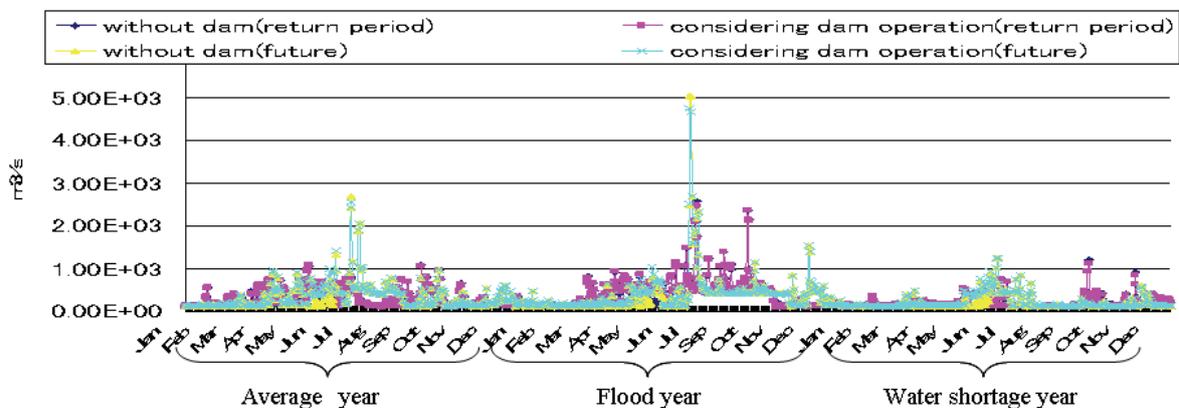


Fig.23 Hydrograph

のピーク流量値は再現期間でのピーク流量値を大幅に上回っている。ダム下流域においても流量が増加するため、最下流地点においても大幅に流量が増加すると考えられ、これを再現期間に起こるピーク流量値の水準に下げるには、より厳しいダム操作が要求される。ダム貯水池における洪水調節は、制限水位、予備放流などにより事前に洪水対策が取られ、ピーク時における放流量の制限により、これがなされる。将来、予備放流の重要性が大幅に増すと考えられ、また、制限水位、制限放流量が見直される必要がある可能性を示唆する結果となった。渇水に関しては、現状と大きな違いが見られなかったため、水資源利用形態に大きな変化がない限り、操作規則に関しても大きな変革を行う必要性はないと考えられるが、多目的ダムにおいては、洪水対策のため、制限水位の見直しなどが行われると、渇水に対する危険性が大幅に増すと予想され、ダム貯水池操作は厳しいものとなる。将来、淀川流域での水資源管理はより難しいものとなることが予想される。安定的な水資源供給を目指し、ソフト面、ハード面、両者の観点から河川整備が行われることが望まれる。

7. 水温移流

Hydro-BEAMの長所として、ダムモデル同様、様々なモデルをその中に組み込むことが可能な点が挙げられる。ここでは流量・気温などから、簡略化した条件下で、水温解析手法とその計算結果を述べる(小尻ら, 2006)。

・地中水温度推定過程

各層から流出する地下水温は、地中温度に等しいとする。このとき、深さ $Z(m)$ 地点での地中水温度は、次式で表される。

$$\theta_g = \bar{\theta}_0 + D e^{-\sqrt{\pi/\chi T} z} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - z \sqrt{\frac{\pi}{\chi T}}\right) \quad (8)$$

ここに、 θ_g : 地中水温度 $^{\circ}C$, $\bar{\theta}_0$: 年平均水温度 $^{\circ}C$, D : 地表面温度 T_s の時系列変化を正弦関数に近似したときの振幅, T : 周期 365 日, χ : 地中での熱の拡散率 $0.04m^2d^{-1}$ である。

・河川水温度推定過程

河川水温に影響を及ぼす要素として、水面熱収支、表面流、A-C 層流、用水路流、下水道流、下水処理場からの放水を考えるものとする。次式により基礎式を与え(新井・西沢, 1974), 河川水温を求める。

$$c\rho D\left(\frac{\partial\theta_m}{\partial t}\right) = H_0 + \frac{c\rho}{A} \sum_i q_i(\theta_i - \theta_m) \quad (9)$$

ここに、 c : 比熱 $1.0cal\ g^{-1}\ ^{\circ}C$, ρ : 水の密度 $1.0 \times 10^6 gm^{-3}$, D : 平均水深 m , θ_{riv} : 河川水温 $^{\circ}C$, H_0 : 単位面積

あたりの水面熱収支量 $cal\ m^{-2}s^{-1}$, A : 水面積 m^2 , q_i : 流入流量 $m^3\ s^{-1}$, θ_i : 流入水温 $^{\circ}C$ である。

以上を用い、水温解析を行った結果を Fig.25 に示す。気温の上昇を受け、河川水温も 1 年を通し上昇する結果が得られた。

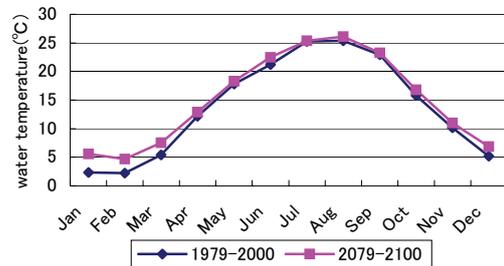


Fig.25 Water temperature

8. 環境評価

気候変動に伴う流域での環境の変化は生態へも影響を及ぼすと考えられる。生態は生物群集、周辺環境など相互に影響を及ぼし合い、複雑な系をなしている。従い、環境からの影響によってのみ生態への影響評価を行うことは、必ずしも生態の実態を捉え、包括的な生態への影響評価を行えると言えないが、本研究では生態に影響を与える要素を取り出し、指標を作成し、温暖化による生態への影響評価をおこなった。

8.1 植生評価

日本における植生は、暖かさ指数(warmth index, WI)と、寒さ指数(coldness index, CI)を用いて、5タイプに大別される。WI, CIは、それぞれ月平均気温が $5^{\circ}C$ 以上、 $5^{\circ}C$ 以下となる月の年間合計値(積算月平均気温)である。沖縄等最も温暖な地域には亜熱帯林が分布し、亜熱帯常緑樹林帯に区分される。西日本から東海・関東までの温暖な地域は、照葉樹林帯に区分され、湿潤を好むものから乾燥を好むものまで様々な樹種によって構成される。また、中部地方の内陸山間部では、WIだけ見ると照葉樹が生える条件を満たしているのに、落葉広葉樹や針葉樹が広がる地域があり、暖帯落葉樹林帯または中間体と呼ばれる。さらに、西日本から東北にかけての山地、北海道南部には、温帯落葉樹林帯が、北海道東部、北部には常緑針葉樹林帯(亜寒帯)が広がっている。

本研究では、植生が WI, CI によって評価できるとし、メッシュ毎に WI, CI を用いて植生帯を推定することとする。このとき、適性度を用い、これを次式で表し、解析結果を Fig.26, 27 に示す。

$$\ln_{ii} = W_i(x) \cdot C_i(x) \quad (10)$$

ここに、 \ln_{ii} ：植生帯 i の生産適性度、 $W_i(x)$ ：サンプル i の WI に関する適性度(0-1)、 $C_i(x)$ ：サンプル i の CI に関する適性度(0-1)である。

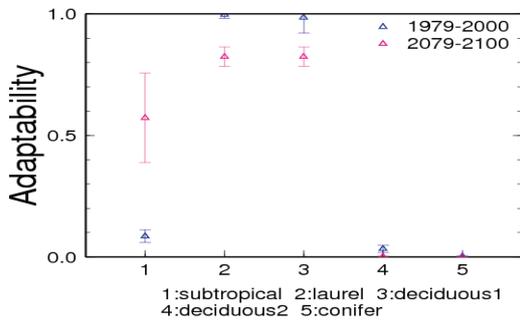


Fig.26 Adaptability of vegetation

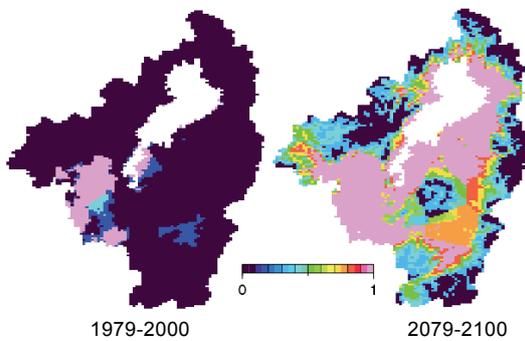


Fig.27 Adaptability of vegetation (subtropical)

亜熱帯性常緑樹林の適正度が大きく上昇したことが見て取れ、標高の低い地域ではほぼ全般で適正度は1となった。照葉樹林、暖帯落葉樹林などの適正度は微減し、気温による評価だけであるが、温暖化により、それぞれの適正地が変化すると考え、植生に対しても影響が及ぶことが予想される。また、植生に対する評価として、気候変動前後において、花粉飛散期推定を行い、次節にて示す。

8.2 花粉飛散期推定

近年、花粉症患者は全国で約 2000 万人とも推定されて折り、年々増加傾向にあるという現状がある。花粉症の原因となるのはスギをはじめ、ヒノキやマツ、イネ科など様々な種の花粉であるが、最も患者数が多く、関心が高いのがスギ花粉である。したがって、本研究では、スギ花粉を取り上げることとする。スギ花粉飛散予測には、総飛散量予測、飛散開始日予測、日花粉飛散量などがあるが、飛散量に関しては、スギの雄花数が非常に強く関係しており、年度によっても大きく異なる現状があることから、

ここでは取り扱わない。飛散開始日の予測手法は、従来から 1 月 1 日を起因日とする積算気温が用いられているが、地域によってその差は大きく、雄花の休眠打破を考慮する必要性や、高度分布を考慮する必要性があるといわれている。ここで、休眠とは、水分・温度等の環境条件が発育に好適でも生理的要因により発育できない状態のことをいう。金指・横山 (2002) によれば、スギでは休眠打破に必要な温度範囲は $0^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$ (または、 $\sim 10^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 12^{\circ}\text{C}$) であり、この温度条件が 5 週間続くと休眠の完全打破に至る。また、開花に至るのに要する有効積算温度は $200 \sim 240^{\circ}\text{Cd}$ (または、 $140 \sim 260^{\circ}\text{Cd}$) とされ、その幅は広いのが現状である。本研究ではデータが少ないこともあり、従来からの方法と、休眠打破を考慮する方法の両方を検討することとし、Fig.28, 29 にそれぞれの方法においての、再現期間、将来予測期間での解析結果を示す。

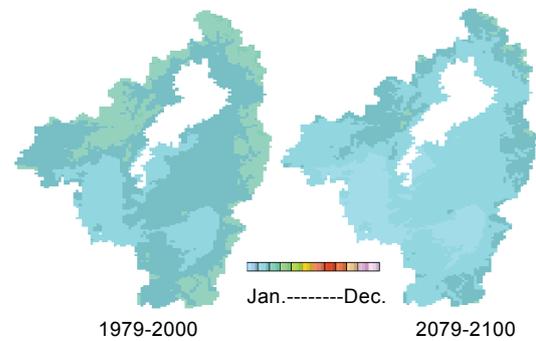


Fig.28 Pollen scattering season

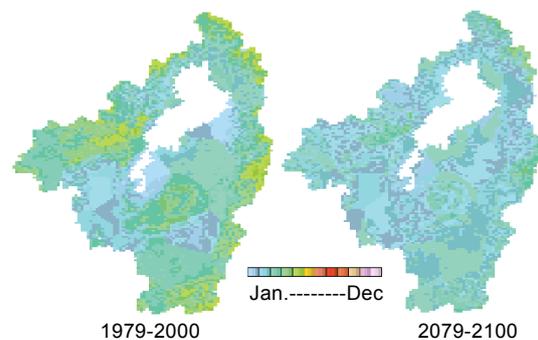


Fig.29 Pollen scattering season (Considering breaking of dormancy)

1 月、2 月の積算気温から推定する方法の結果は、再現期間、将来予測それぞれの流域平均で 2 月 23 日、2 月 14 日であった。次に休眠打破を考慮する方法では、それぞれ、3 月 2 日、2 月 15 日であった。また、この方法では休眠打破に至らない地域が確認され、期間的に休眠打破に至ることが出来なかったことが原因と考えられる。このことは温暖な地域または、

寒冷な地域での休眠打破の条件をさらに検討する必要があることを示している。いずれも全体的に花粉飛散時期は早くなる傾向を示しており、花粉飛散期からの観点からも、気候変動による植生への影響がみられる。

8.3 魚類評価

水辺動物の代表格である魚類は、その生息域が水温、水質、地形等の様々な要素によって評価可能である。IFIMやPHABSIMといった河川の詳細を扱い、地形要素や底質等まで評価項目として取り入れるモデルでは、魚類生態を総合的に扱うことが可能となってきた。しかし、これには現地調査を含む詳細なデータが必要である。本研究では、瀬、淵等の微地形は考慮せず、水温と標高によって生息域評価を行うものとする。

評価方法は、ファジイ理論を用いて種類毎に生息適性を評価するというものであり、これを次式に示す。また、使用するメンバーシップ関数を Fig.30, 31 に示し、Fig.32~34 にそれぞれの結果を示す。

$$\ln_{fi} = T_i(x)G_i(x) \quad (11)$$

ここに、 \ln_{fi} : サンプル i の生息適性度、 $T_i(x)$: サンプル i の水温に関する生息適性度、 $G_i(x)$: サンプル i の標高(地形)に関する生息適性度である。

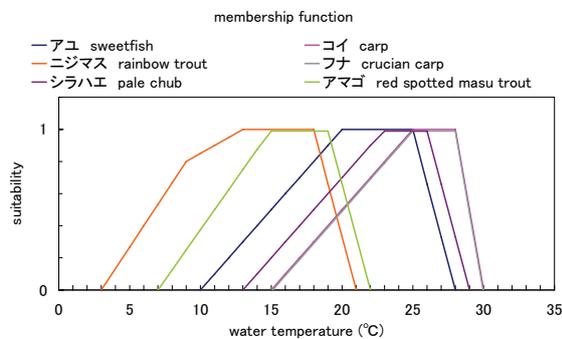


Fig.30 Membership function (water temperature)

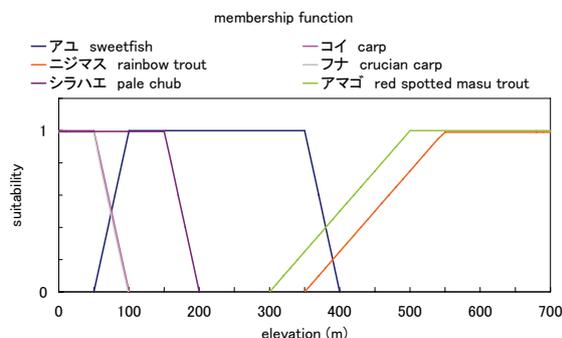


Fig.31 Membership function (elevation)

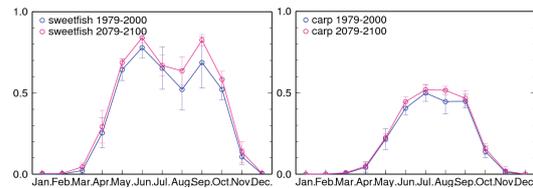


Fig.32 Adaptability (sweetfish, carp)

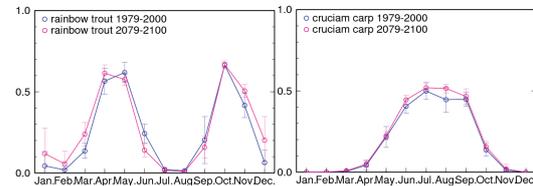


Fig.33 Adaptability (rainbow trout, crucian carp)

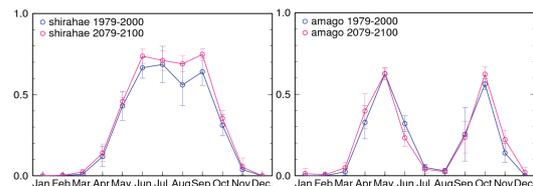


Fig.34 Adaptability (shirahae, amago)

水温上昇により、アユ、コイ、フナ、シラハエなど、比較的高い水温を好む生物の適正度が、夏季において上昇、比較的低い温度を好むニジマス、アマゴなどの適正度は減少する結果が得られた。また、冬季においての水温上昇により、低い温度を好む生物の適正度は冬季において上昇傾向が見られたが、高い温度を好む生物に対しては影響を及ぼす程度のもではなく、適正度は低く保たれた。気候変動の影響を受け、低い温度を好む生物が大きな影響を受けると考えられる。

9. おわりに

気候変動による影響評価を様々な指標を用い比較を行うことにより、流況、環境へ影響を与えることが示唆された。主な結果を以下にまとめる。

- (i) 夏季流量の大幅な増加
- (ii) ピーク流量値の大幅な増加
- (iii) ダム貯水池による、ピーク流量の減少
- (iv) 水温の上昇
- (v) 植生適正地分布の変化
- (vi) 魚類の適正度の変化

本稿で示した水文評価は将来的な流域管理への一指標として利用されることが望まれる。今後、更なるモデル精度の向上、利水安全度など水利用の観点からの評価、土砂生産・移動の観点からの評価など多様な発展性が期待される。環境評価に関しては、気温・水温要素のみに着目して評価を行ったが、水質などの重要要素の追加、生態系との相互影響の検討などから更なる発展が望まれる。

参考文献

- 井本昂志・小尻利治・田中賢治・浜口俊雄(2007): 気候変動による流域水環境の変動特性に関する比較, 京都大学防災研究所年報, 第 51 号. (印刷中)
- 小尻利治, 黒田良人, 東海明宏(1997): GISベースでの水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発, 第5回地球環境シンポジウム公演集, pp.209-214.
- 小尻利治・浜口俊雄・大出真理子(2006): 地球温暖化による流域水資源・生態への影響評価, 京都大学防災研究所年報, 第 49 号 B, pp.741-753.
- 気象庁(2003): 地球温暖化予測情報, 第5巻.
- 金指達郎, 横山敏孝(2002): スギ雄花の休眠打破と開花に要する温度条件, 日本花粉学会誌, pp.95-102.
- 藤原洋一・大出真理子・小尻利治・友杉邦雄・入江洋樹(2006): 地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集第 50 巻.
- 土木学会編(1999): 水理公式集 平成 11 年版, 土木学会.
- Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M.K., and Jeton, A.E.(2004): Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099, *Climatic Change*, 62, pp. 283-317.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P. (2004): Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, 62, pp.189-216.

River Basin Environment Assessment Modeling in Conjunction with Dam Reservoir Models in Hydrology

Toshio HAMAGUCHI, Toshiharu KOJIRI and Eisuke MORI*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This study provides the extended distributed runoff model, which is based as the Hydro-BEAM, in conjunction with some dam reservoirs to assess the physical effects of dam reservoirs and water body such as a lake in river basin environments. Simulations are conducted from 1979 to 2000 and from 2079 to 2100 in the Yodo River basin by inputting GCM outputs. The effects of modeling dam reservoirs can be found from results with and without dam simulations. Global warming can also influence on the hydrological and ecological behavior in the coming future through the fuzzy criteria to be proposed as some suitability.

Keywords: climate change, distributed runoff model, dam, GCM, impact assessment