気候変化の適応策としてのダムの治水・利水容量の再配分に関する考察-紀の川流域を例として

DAM VOLUME REALLOCATION BETWEEN FLOOD CONTROL AND WATER USE AS AN ADAPTING POLICY UNDER CLIMATE CHANGE IN KINO RIVER BASIN

吉村耕平¹⁾・小池俊雄²⁾
Kohei YOSHIMURA and Toshio KOIKE

¹正会員 東京大学大学院工学系研究科 特任研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

²フェロー会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

Using existing stock is important to plan the adaptation policy under climate change. This study is focus on evaluation about multi purpose dam volume reallocation from water use to flood control and “trade-off” problem. In kino river basin, we input bias corrected and temporal/special downscaling 10 GCM output data to hydrological model which can represent long-term water circulation and simulate dam storage. The simulation indicates that drought risk shift is not common trend in each GCM without dam, but it will decrease mutually with dam which can storage increased flood. In addition, reallocation method enable to avoid exceedance flood or to make evaluate delay time and ease peak flow.

Key Words : *Distributed hydrological discharge model, multi purpose dam, global climate model, dam volume reallocation, down scaling, bias correction, adaptation policy*

1. はじめに

(1)本研究の背景

IPCC第4次評価報告書¹⁾では大雨の頻度の増大が指摘され、国内の答申²⁾でも洪水と渇水のリスクの増大についても指摘されており、河川整備における適応策は重要となってきた。特に洪水リスクの増大から人命や資産を守ることを求められる。しかし人口減少や財政難の点からは新規のインフラの建設は限定的であり既存ストックの活用も候補となる。その中でも多目的ダムの容量の再配分という手法も存在するが、洪水制御容量への再配分は利水容量を圧迫し渇水リスクを高める。トレードオフを考慮すべきであるという指摘³⁾⁴⁾もあるが、もし強雨の頻度が増大すれば、ダムの水位回復のチャンスが増えるため、より少ない利水容量で渇水を回避でき、トレードオフの問題は緩和される可能性も考えられる。治水・利水双方のリスクと、治水・利水の間で発生するトレードオフの問題を定量的に分析することが求められる。

(2)本研究の目的と手法

本研究の目的を、多目的ダムでの利水から洪水調節へ

の容量再配分に焦点をあてて、洪水被害をどの程度軽減できるか、利水へのリスクの増大がないか、さらに洪水渇水の同時のリスクの増大や、トレードオフの関係を検証することとする。

先のような課題を議論するには、気候変化をシミュレーションした全球気候モデル(GCM)のアウトプットを水文モデルに入力し、河川の流量の値に変換してダムの貯留量の変動を分析する、という研究手法が有効である。これらの研究はすでに多くあるが、GCMのアウトプットには不確実性があり、水文モデルで活用するには時間的・空間的解像度が不十分であり、観測データに対しての再現性の点でバイアスがある。

そのため、単一のモデルの持つ不確実性を避けるため、複数のGCMを活用し、流域の特性や降雨強度特性に応じた統計的ダウンスケーリング・バイアス補正を行なう。次に長期で高水・低水を精度よく再現できる水文モデルに、補正された気候データを入力し、気候変化による治水上・利水上のリスクの変化をシミュレーションする。そして適応策としての多目的ダムの容量の再配分の影響を検証することとする。対象流域は、流域内での降雨特性が変化に富む紀の川とする。

(3)対象河川の概要

対象河川の紀の川は、日本有数の降雨地帯の奈良県南部は大台ヶ原を源流とし、中央構造線にそって流れ下り、和歌山県の北部を流れ和歌山市で紀伊水道に注ぐ幹線流路長136km、流域面積1750km²の一級河川である。水害のリスクは極めて大きく、戦後だけでも昭和28年の台風13号と昭和34年の伊勢湾台風で大きな被害を受けている。

一方で紀の川は流況の不安定な河川であり、夏期においては支流の貴志川では断流が発生している。このため用水路の建設に加え利水用ダムの建設や他水系との導水などを行い、多目的ダムの大滝ダムが完成している。現在の流域水利権量は64.9m³/sであり、大半は農業用水である。

この河川の流域特性を再現し、気候変化が洪水の変化に与える影響を定量的に評価するには、大滝ダムの運用の要となる大台ヶ原に集中する降雨を再現する必要がある。またダムの運用の変更など既存の水システムを利用し適応策を考えるにあたっては、治水と利水は切り離せないことを考えると、洪水のみならず、低水期の流量を再現し、利水面からも検討が必要となる。

2. GCMのバイアス補正とダウンスケーリング

(1)本研究で利用するGCM

本研究で使用するGCMは以下の条件のアウトプットを出力しているものとした。

- ・流出計算に必要な日降雨量と気象データ
- ・20世紀再現実験の40年分(以下20cとする)
- ・温室効果ガス排出シナリオA1Bの2050年/2100年が20年分(以下2050y/2100yとする)

以上の条件を満たす24GCMから東アジアでの再現性を基準⁵⁾に10モデル(表-1)を選択した。モデルの詳細はPCMDI⁶⁾を参照されたい。

表-1 選択したGCM

Country	Model	略称
Japan	MIROC3.2(hires)	miroc-h
Japan	MIROC3.2(medres)	miroc-m
Japan	MRI-CGCM2.3.2	mri
France	CNRM-CM3	cnrm
USA	GFDL-CM2.0	gfdl20
USA	GFDL-CM2.1	gfdl21
USA	GISS-AOM	giss-aom
Germany	ECHAM5/MPI-OM	mpi
Canada	CGCM3.1(T63)	cccma31
Canada	CGCM3.1(T47)	cccma31
Italy	INGV-SXG	ingv

図-3 利用した流域の雨量観測点の分布

図-1 年総雨量の観測とGCMとの差異

図-4 “強雨”の季節分布

図-2 年最大日雨量の観測とGCMとの差異

図-5 各月の最大日雨量

(2)GCMの日雨量の再現性と地点別バイアス補正

GCMの現在再現のアウトプットの再現性について、図-1では年総雨量を、図-2では年最大日雨量を、GCMと地上観測点とで比較をした。年総水量と年最大日雨量が、大きく異なり、降雨日数に関しても、観測データと再現実験では大きな違いがあるため、バイアス補正を行う必要がある。流域内での降雨特性の変化を再現するために、降水が集中する上流部は、観測点網の密な国交省の観測点を、それ以外の部分ではアメダスの観測点を用いて、図-3のように流域を地上雨量観測点単位でティーセン分割し、観測点にバイアス補正を行うことで空間的ダウンスケーリングに相当する処理も行った。

年最大日降水量の最小値を閾値とし、それ以上の降雨を“強雨”⁷⁾とここでは定義する。図-4のように流域の中下流部では”強雨”が梅雨と台風期に集中するが、再現性が低い対象から外すgiss-aom以外はそれを再現できている。

本研究では洪水を引き起こす年最大日降水量をはじめ、利水面で大きな意味を持つ2位以下から1mmという微少な降雨まで変換を行い、降雨日数まで適合させることが必要となる。20世紀再現実験と将来予測で現れた日雨量が同じであれば、モデル上では近似した気象現象が発生していると考えられるため、変換後の日雨量も同じでなければならない。またGCM中では、再現実験では発生していないが、将来は発生しうより大きな規模の降雨も変換する必要がある。これらを同時に満たすためにDettinger⁷⁾やWood⁸⁾らの手法を利用したが、これらの研究は月ごとのグループを分けて補正しているが、中下流部は月ごとのグループとせず通年で1グループとして補正を行った。対して上流部では図-5のように台風期に現れる降雨の強度が他の時期に比べて卓越しているため、台風期の7月・8月・9月と、前線性降雨と一部の台風がある5月・6月・10月・11月(準洪水

図-6 年総雨量

図-8 日雨量の降順曲線

図-9 流域図(—河道—生成河道■ダム●流量観測点)

期とする)とそれ以外(非洪水期)と3つのグループに分けバイアス補正を行った。

「強雨」のバイアス補正はクオンタイルマッピングで行った。上流部ではこれらの処理を3グループの中でそれぞれ行うが、非洪水期と準洪水期の「強雨」の閾値を、年最大日雨量の最小値ではなく中央値とした。「強雨」以外の降雨のバイアス補正は、観測データと再現実験の降雨量を降順にならべ、40年換算で同順位の数値への置換を行った。再現実験と観測の順位を比較して、観測の日雨量が1mmを切る境界の順位以下の再現実験の日雨量を、補正後の無降雨に相当するとした。

図-6・図-7・図-8で示したとおり、再現実験をバイアス補正した結果、観測データと補正結果が、平均年総雨量・降雨日数・大台ヶ原での日雨量の降順の曲線が合致しておりバイアス補正の効果が確認された。

(3)時間的ダウンスケーリング

洪水のリスクを分析するには日雨量から時間雨量へ時間的ダウンスケーリングを行う必要がある。本研究では対象流域の特徴を再現するために、統計的ダウンスケーリングの中でも極端値の扱いに対応が可能であるWhether generator⁹⁾を利用した。

補正された日雨量を時間雨量にダウンスケーリングにするにあたっては、佐山ら¹⁰⁾が淀川流域において適用したAR過程を用いる手法を利用したが、紀の川流域においては観測点ごとに年最大日雨量や強雨の頻度と規模が大きく異なるため、各観測点の過去に経験した最も大きい日雨量の1/20を各クラスの幅として、計10クラス設定した。

観測点同士が近接しており、降雨パターンの相関性が高い上流部の国交省の観測点は、大台ヶ原で時間雨量を生成し、他観測点は、大台ヶ原の時間雨量を自らの日雨量を基準にして引き延ばしを行った。また最上位クラスでの過去の観測データから日雨量と時間雨量の最大の相関を求め、最大時間雨量とした。またこの上流部で過去の水害の中でも規模の大きかった伊勢湾台風の降雨パターンを基準として、午前中から降雨があり、午後に降雨が強くなり、18時に最大雨量を迎えるパターンとした。

それ以外のアメダスの観測点については、観測点同士で

の相関性が比較的低いため、各観測点の独立したAR過程による時間雨量の生成を行った。

佐山らは複数回の試行を行ったが、本流域では洪水リスクに関しては上流部の伊勢湾台風のパターンの引き延ばしが大きな影響を与えるため、単一の試行で十分とした。

(4)気象データのダウンスケーリング

水文モデル内で適切に蒸発散を再現させるために気象データの時間的ダウンスケーリングを行った。毎時の時間は最低・最高気温からCesaraccioら¹¹⁾によるTM modelを利用して生成した。それを元に長波放射や相対湿度など各気候データも日データから時間データへと適宜ダウンスケーリングを行った。

3. 水文モデルについて

(1)モデルの概要

本研究で利用する水文モデルは、本研究室で開発されたWEB-DHM(Water and Energy Budget based-Distributed Hydrological Model)¹²⁾である。このモデルは、過去に開発された分布型水文モデルであるGBHM(Geomorphology-Based Hydrological Model)¹³⁾に、陸面過程モデルであるSiB2(Simple Biosphere Model2)¹⁴⁾をカップリングさせたモデルである。

WEB-DHMは分布型水文モデルであるため、地形・土地利用の状況をモデル内で再現することができる。また局地的な強雨、言い換えれば空間的に偏りのある降雨なども再現できるため洪水の再現に適している。さらに陸面過程と斜面水文過程がモデルに組み込まれており、蒸発散と土壌水分を長期にわたって精度良くシミュレーションすることという利水に関して重要な点も可能で、このため降雨時のみならず平時の水循環特性の再現性も良いことが確認されており、国内においても利根川上流においても検証されている¹⁵⁾。

(2)流域における水文モデルの構築と検証

元になる標高データは国土地理院の50mグリッドのものを十分な精度を保ちつつ計算を高速化するため、500mに変更してモデルを構築した(図-9)。雨量データは流域内の国

図-10 1990年の出水の計算結果

図-11 伊勢湾台風時の計算結果

図-12 2001年の船戸における計算結果

交省・アメダスの観測点からレーダーアメダスを、気象データは流域内のアメダス観測点のものを利用した。

モデルのキャリブレーションと検証としては、近年の例として1990年(図-10)と既往最大とされる伊勢湾台風(図-11)に対して、流域内唯一の洪水制御を行う多目的ダムとなる大滝ダムの建設地点である衣引の出水で行った。またレーダーアメダスの精度の向上した2001年において、通年での船戸の流量についての結果(図-12)では、代かき期とそれ以降の夏季の取水による流量の大幅減少ならびに瀬切れがあり、その影響のある6月から9月を除いて¹⁶⁾洪水から低水まで十分な再現性が得られていることが確認できた。

さらにGCMのダウンスケーリング・バイアス補正の検証のために、GCMの現在再現データから生成した雨量と観測雨量からそれぞれ流量を計算し、その計算流量同士の日流量の低減曲線が合致していることを確認した(図-13)。

図-13 日流量の低減曲線

しgfdl21については、GCM上での最大日雨量が現在再現の80mmから2050年では120mmと変化し、補正後の日流量は対数正規分布のグラフ上で1000mmから3500mmへと引き延ばされたためである。

(2) 渇水リスクの変化

対象期間は後に述べる6月から9月とした。船戸地点で122日中119日確保できる渇水流量の平均(図-16)については、共通の傾向は見られなかった。水利権量に対して、灌漑用水における還元率を半分程度として30m³/sを確保すべき流量とする。この流量が確保できない日数は、多くのGCMで緩和の傾向が見られる(図-17)が、渇水流量が減少しつつも渇水日数は緩和されるアウトプットは、将来予測では少数の年に現状より厳しい渇水が発生し、統計上の渇水流量を左右しているため緩和とされないように見えるが、他の年では現状よりも流量が安定しており、渇水日数が減少しているため考えられる。

4. 気候変動による流況の変化

(1) 洪水頻度と規模の変化

船戸地点で6,000m³/sを超過する洪水の頻度はほぼ全てのGCMで増大している。(図-14)また衣引地点での30年確率の洪水流量も多くのGCMで増大している(図-15)。ただ

図-14 洪水頻度の変化

図-15 30年確率の洪水流量

図-16 平均渇水流量の変化

図-17 30m³/sを下回る日数

5. ダムによるリスク軽減と容量再配分の検討

(1) ダム運用のシミュレーションについて

対象期間はダムの洪水期運用の期間や、灌漑用水の取水期間や洪水・渇水が集中する6月から9月までとした。本

表-2 ダムの容量(単位:万m³)

	大滝	津風呂	大滝	総計
	非洪水期			
利水	27	25	71	123
治水	-	-	0	0
	第1洪水期			
利水	27	25	31	83
治水	-	-	45	45
	第2洪水期			
利水	27	25	15	67
治水	-	-	61	61
	再配分後			
利水	0	25	0	25
治水	27	-	76	103

流域では流域の特性で述べたとおり複数のダムが存在するが、仮想的に一つのダムを想定する。多目的ダムである大滝ダムは第1期洪水期、第2期洪水期、それ以外の非洪水期でダム容量の配分が大きく異なる(表-2)。洪水リスクが大きい時期である第2期洪水期の運用を現状のダム容量とする。大台ヶ原を集水域とし、大規模な洪水流が流入するのは本川上流(吉野川)の大迫ダムと大滝ダムである。このため、洪水調節容量を最大に割り振る場合には、洪水調節容量を103万 m^3 とすることができる。

流量の基準点は河口部の船戸とし、利水面での維持すべき流量:30 m^3/s 、洪水時の河道疎通能力:6,000 m^3/s 、洪水後の放水量:1,000 m^3/s とする。ダムの運用はまず、ダムの利水容量の満水時を基準として、30 m^3/s を下回った場合にはダムの利水容量分から補給し、容量を使い切った場合には次の雨まで30 m^3/s を維持できなくなる。維持できなかった期間を同様に“渇水日数”として評価を行う。もし河道疎通能力を超える洪水が発生すれば、超過分をダムの洪水制御容量に貯留する。洪水後は貯水量が基準になるまで放水する。もし貯水量が基準以下であれば、維持すべき流量以上分や洪水を貯留して貯水量を回復する。このため、各洪水イベントや渇水イベント単体で分析をするよりも、「渇水で貯水量が減少しているが、洪水が来て貯水量が回復した」、「渇水が断続的に発生し貯水量を回復することができなかった」といった現象を分析できる。

(2) 増大する洪水リスクへの軽減効果

現状の洪水制御容量と最大限にまで再配分を行って増加させた洪水制御容量でゼロカット操作(放流量を流入量と同一にして貯水量を変化させない操作方法、ただし書き操作)の回数を比較した(図-18・図-19)。発生しうる可能性のある超過洪水の一部に対してダムの容量再配分によりゼロカット操作を回避している。また再配分後でもゼロカット操作

図-18 2050年におけるゼロカット操作回数

図-20 現在の渇水リスクを維持する利水容量

図-19 2100年におけるゼロカット操作回数

図-21 利水容量25万 m^3 での渇水日数

に追い込まれる場合でも、発動を遅らせることで避難時間を稼ぎ、洪水のピークの後まで持ちこたえれば放水量も低下できる。一例としてingvの2082年の出水では、4時間程度放流を遅らせ、最大放流量を2000 m^3/s 程度低下できた。以上の点からも容量再配分は洪水リスク軽減について極めて効果的であるといえる。

(3) 渇水リスクの変化とダム容量再配分について

現状の利水容量の67万 m^3 の条件で、現在での渇水日数と同じレベルを確保するために、将来予測ではどの利水容量が必要なかを計算した(図-20)。もし必要な利水容量が減少すれば、その分の容量はトレードオフなしに洪水制御容量に再配分できる。2050年では10GCM中5GCMが、2100年では6GCMがトレードオフなしに利水容量から洪水制御容量に再配分できる余地があることが分かった。再配分可能な容量は20万 m^3 ～30万 m^3 程度である。トレードオフがない範囲で再配分を行った場合では、ゼロカット操作を回避するには至らなかったが、避難時間を確保するなどには貢献できる。また図-21では増大する洪水リスクに対応するために、洪水制御容量を増大させ利水容量を最低の25万 m^3 で運用した場合の渇水リスクについて示す。

表-3にGCMの各アウトプットについて容量再配分に伴う利水面でのリスクの変化やトレードオフなしでの再配分の可能性についてまとめる。

2050年のcccma31とcccma63では、洪水のリスクはほぼ増えず、渇水のリスクが高まるため、単純なトレードオフの問題となる。さらに双方のリスクが増大するアウトプットにおいては、治水安全度を確保するために、本来ならより必要となる利水容量を削減する必要があり、渇水リスクの受容や他流域からの送水、さらにコストをかけての節水などのオプションを検討する必要がある。この中でも特徴的な2パターンについて述べる。

表-3 容量再配分の評価

	2050y	2100y
miroc-h	○	○
miroc-m	α	○
mri	○	β
cnrm	○	β
gfdl20	○	○
gfdl21	×	×
cccma31	△	○
cccma63	△	○
ingv	α	×
mpi	○	○

○: 再配分可能
 ×: 双方のリスク増大
 △: 洪水のリスクのみで増大でトレードオフ

miroc-mとingvの2050年では、ダムなしでは渇水日数は減るものの必要な利水容量が増大している($\rightarrow \alpha$)。これは多くの年では渇水は緩和されるが、一部に今よりも深刻な渇水が発生する年があるからである。この場合、特定の年の深刻な渇水に対応するオプションを考えるべきである。

同じくmriとcnrmの2100年では同じ渇水日数を確保するには必要な利水容量は増大している。もし、最大限に利水容量を洪水制御容量に再配分した場合での渇水日数を比較すると、当然現在の渇水日数は67万 m^3 に比して25万 m^3 では増大するが、25万 m^3 で運用した場合の渇水日数は、現在よりも2100年では減少している。現状の利水安全度を確保するなら双方のリスクが増大することになるが、再配分することが前提であるならトレードオフの問題は緩和されるということである。($\rightarrow \beta$)

6. おわりに

本研究では、紀の川流域を対象として、GCMのアウトプットを補正し流出解析に利用し、洪水渇水リスクとダムの運用について検討を行った。

洪水リスクについては気候変化によって確率流量や洪水頻度の増大が明確となり、超過洪水のリスクがあることが示唆された。またダム容量の再配分は超過洪水を回避、あるいは被害の軽減に寄与することが分かった。

また利水と渇水のトレードオフについては、半数以上のアウトプットでトレードオフなしに再配分できる余地があり、トレードオフを強いられるアウトプットや双方のリスクが増大するアウトプットよりも多いことが分かった。ダム容量の再配分はトレードオフの問題がある程度回避出来る可能性があり、有利なオプションになりうると判断できた。

また再配分は限定的なコストで行えることに加え、一部のGCMで2050年と2100年とで傾向が異なるように、これからの気候変化の動向が変化することも考えられ、その変化に対して柔軟にかつ手戻りがなく最適な配分に変更が出来るため、適応策に求められる「順応的アプローチ」に適しているオプションだと考えられる。

謝辞：本研究は、文部科学省「地球観測データ統融合連携研究機構 地球環境情報統融合プログラム (DIAS-P)」の下で行われたものです。ここに感謝します。

参考文献

- 1) IPCC: IPCC第4次評価報告書, 2007.
- 2) 社会資本整備審議会: 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について, 2008.

- 3) Jeffrey T. Payne, Andrew W. Wood, Alan F. Hamlet, Richard N. Palmer and Dennis P. Lettenmaier: Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River Basin, Climatic Change, 62, 233-256, 2004.
- 4) Se-Yeun Lee, Alan F. Hamlet, Carolyn J. Fitzgerald, and Stephen J. Burges: Optimized Flood Control in the Columbia River Basin for a Global Warming Scenario, Journal of water resources planning and management, 135, 440-450, 2009.
- 5) 山本弘樹: 気候変動下の洪水・渇水評価のためのモデルバイアス補正手法の開発, 東京大学工学系研究科修士論文, 2011.
- 6) PCMDI: CMIP3 Climate Model Documentation, References, and Links, http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php (参照: 2012/4/23).
- 7) Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M.K., and Jeton, A.E.: Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099, Climatic Change, 62, 283-317, 2004.
- 8) Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P.: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, Climatic Change, 62, 189-216, 2004.
- 9) RL Wilby, SP Charles, E Zorita, B Timbal, P Whetton, LO Mearns: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods, IPCC, 2004.
- 10) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨, 増田亜美加, 鈴木琢也: 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価, 水文・水資源学会誌, Vol.21(4), 296-313, 2008.
- 11) C. Cesaraccio, D. Spano, P. Duce and R. L. Snyder: An improved model for determining degree-day values from daily temperature data, International Journal of Biometeorology, Vol. 45, 161-169, 2001.
- 12) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T., Bindlish, R. and Yang, D.: Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 114, 2009.
- 13) Yang, D.: Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments, 水工学論文集, 42, 169-174, 1998.
- 14) Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D. and Bounoua, L.: A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part I: Model Formulation, Journal of Climate, 9, 676-705, 1996.
- 15) Wang, L., Koike, T., Yang, K., and P. Yeh: Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, Journal of Hydrology, 337, 21-34, 2009.
- 16) 第17回紀の川流域委員会配付資料: 紀の川河川整備計画立案に向けての考え方について【利水編】, 2003.

(2014.9.30受付)