牧尾ダムの水資源管理に対するダム堆砂および気候変動の長期的影響

Long-term Effects of Reservoir Sedimentation and Climate Change on Water Resources Management of the Makio Dam

角哲也·寺田和暉⁽¹⁾·竹門康弘·佐藤嘉展⁽²⁾

Tetsutya SUMI, Kazuki TERADA⁽¹⁾, Yasuhiro TAKEMON and Yoshinobu SATO⁽²⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科(2) 愛媛大学農学部

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

(2) Faculty of Agriculture, Ehime University

Synopsis

Makio dam in the Kiso River is a multipurpose dam which generates hydroelectric power and supplies water to Aichi Irrigation Project. Reservoir sedimentation increased in the Dam because of Nagano West Earthquake in 1984. It cost about 3 million yen to recover active storage capacity in 1996 by excavating deposited sediments. In the future, flow regime is going to change due to global warming which will have another impact on water resources management. In this study, we assessed multiple effects of the several reservoir sedimentation scenarios and future inflow changes calculated by GCM model and distributed hydrological model (Hydro-BEAM). Regarding hydroelectric power generation, annual total generation can be almost maintained by modifying seasonal dam operation rule. However, water supply to the Aichi Irrigation Project will be subject to severe damage mainly by the loss of active storage volume and additionally by future flow regime change.

キーワード: 牧尾ダム・ダム堆砂・気候変動・分布型流出モデル Hydro-BEAM・水力発電・ 愛知用水

Keyword: Makio Dam, reservoir sedimentation, climate change, distributed hydrological model (Hydro-BEAM), hydropower generation, the Aichi Irrigation Project

1. はじめに

1.1 本研究の背景

わが国の国土は、山地が多く地形が急峻である.また、 構造線やそれに伴う変成帯が多く分布している.わが国 の気候は平均年間降水量が 1,700mmと多く、梅雨前線 の活動や台風により、短期間にまとまった量の洪水が生 じる傾向がある.このような条件から、わが国は世界的 に見ても土砂生産・流出の活発な地域である((財)ダ ム水源地環境整備センター、2008).

地形が急峻で河川勾配が大きく,降雨量が大きいこと から,水利用の面,防災の面からダムを設置する意義が 大きい(鈴木, 2012). そのことを象徴的に示すものとし て,昭和初期に「害水を変じて資源と為す.」という河 川統制事業が提唱されたことが挙げられる(中澤, 1991). このような背景があり,わが国は現在までに約2,700 基 の大ダムを設置し,世界第4位のダム保有国になった (World Commission on Dam, 2001).

約2,700 基のダム設置により、1 人あたりの表流水量 (河川の総流出量を人口で割った値)が、戦後は世界平 均の半分程度であったわが国であるが、1987 年には 1 人当たりの平均水使用量 660 m⁶の1.4 倍までに到達した. 現在、わが国の河川水使用は、ダムの設置により世界的 に高い水準にあるといえる(中澤、1991).

土砂生産・流出が活発であることは、ダムの設置後の 運用・維持管理において有利な条件ではない.ダム湖に 流入する土砂のうち、粒径の小さなウォッシュロードな どは、ダム放流に伴って一部は排出される可能性がある が、これより粒径の大きな浮遊砂や掃流砂はダム湖内の 河床に堆積して堆砂となる.また、流入土砂の量は地形、 地質や降雨条件などに加えて地震による土砂災害、火山 の噴火による火山灰など、自然災害にも大きく影響を受 ける.環太平洋造山帯に位置する日本はこのような災害 に見舞われやすく、ダムの100年計画堆砂量を上回る早 さで堆砂が進行している例が多い.ダム堆砂の進行によ って有効貯水量の一部が失われると、洪水を貯留して流 況を安定化させて水利用や水力発電を行う機能が低下 することが懸念される.

一方,ダム堆砂計画で想定する100年スケールの変化 は、気候変動に伴う河川流況の変化も同じであり、特に、 積雪地域の降雪・融雪の量と時期の変化、梅雨や台風に よる降水の変化などは、過去の水文事象に基づいて計画 された既存のダムの運用に大きな影響をもたらすこと が考えられる.奥村は、ダム堆砂による有効貯水容量の 減少と、気候変動に伴う貯水池流入流況の変化が、発電 運用に与える影響についてFig.1のように整理している (奥村、2013).



Fig. 1 Assessment of the influence of reservoir sediments and climate change on hydroelectric generation (奥村ら, 2013)

1.2 牧尾ダム

本研究では、ダムの長期的な課題であるダム堆砂と気 候変動の影響を考えるため、木曽川水系牧尾ダム(Fig.2) を検討対象とした.昭和36年に建設された牧尾ダムは、 (独)水資源機構によって建設された利水と発電を目的 とする多目的ダムであるが、洪水調節機能は持たない、 有効貯水量は6,800万㎡である.利水としては、岐阜県 から愛知県の尾張東部の平野及びこれに続く知多半島 一帯に農業用水、水道用水及び工業用水を供給する愛知 用水の水源施設として、完成以来中部圏の生活・産業を 支える役割を担い続け、受益地域の重要な施設となって いる.また、発電としては、関西電力㈱が王滝川の発電 用水利権を所有し、三尾発電所にて牧尾ダムを上池、木 曽ダムを下池とした揚水発電を行っている.



Fig. 2 Outline of Makio Dam and the Aichi Irrigation project ((独)水資源機構愛知用水総合管理所 HP)

1984年(昭和59年)に御嶽山南麓を震源とした長野 県西部地震が発生,当時降り続いていた雨のため,地震 発生直後に各所で大規模な土砂崩れが発生した(Fig.3). 牧尾ダムは震源地から直線距離で4.8kmの至近地であっ たが,ダム本体には致命的な被害は生じなかった.しか し,地震で発生した大規模な土石流と泥流により,ダム



Fig. 3 Outline of the project of excavating deposited sediments

貯水池内へ大量の土砂, 流木が流入し, 貯水機能の著し い低下を招いた.

牧尾ダムの計画堆砂量は 100 年間で 700 万㎡であり, 地震前までは,計画堆砂量とほぼ同程度で推移していた が,ダム完成後 24 年の 1985 年(昭和 60 年)までに堆 砂が一気に進行し,100 年の堆砂進行速度を大幅に超え てしまったことが Fig.4 から分かる.



Fig. 4 Change of reservoir sedimentation (in the active storage and the Dead storage) in Makio Dam

このため, 貯水機能の回復と保全及び災害の未然防止 を図ることを目的として, 様々な現地での調査がなされ, 平成8年(1996年)3月から愛知用水二期事業として牧 尾ダムの本格的な堆砂対策が開始され, 平成19年(2007 年)3月に竣工した.同事業の内容は, Fig.3に示すよ うに堆砂除去量約580万m³, 費用の概算額300億円であ った(杉本, 1996).

一般に貯水池における堆砂対策には、牧尾ダムで行われた貯砂池上流端に貯砂ダムを設置し、毎年貯砂される 土砂を陸上掘削する方法以外にも、流入・堆積土砂を浚 渫船により排除する方法や、貯水池上流端に排砂バイパ スを設置し、毎年の流入・堆積土砂をダム下流へバイパ スする方法などがある(角・Sameh・鈴木, 2012、宮本・ 鈴木, 2003). しかしながら、堆砂対策の費用対効果に ついては、これまで十分な検討が行われてきているとは 言えない. 堆砂対策は、ダムの長期的な持続可能性に関 係するものであり、1.1 で述べたようにその間に生じる 気候変動の影響についても同時に考えていく必要があ る(Bettina et al, 2007).

このような長期間におよぶ堆砂対策の経済評価については、奥村により、堆砂進行の影響をうける太平洋側の水力発電用貯水池を対象に、堆砂対策費用と発生電力 量減少により発電所が生み出す経済価値の減少との関係が検討されている(奥村, 2013).しかしながら、これだけ大規模に堆砂対策工事が行われた牧尾ダムにおいては、対策工事実施後の経済分析は必ずしも十分に行われていないのが現状であり、長期的な気候変動の影響についても同時に考慮する必要がある.

1.3 研究の目的

以上の背景により,本研究では以下の目的を設定した.

- 既存の運用実績をベースに牧尾ダムの運用モデル を構築し、現在気候を前提とし、ダム堆砂の進行 のみを考慮した長期的貯水池運用を検討する.
- 将来気候による河川の流況変化を検討し、気候変 動が貯水池運用に与える影響を検討する.
- ダム堆砂の進行と気候変動の複合的影響を考慮した検討を行う.
- 4) これらの長期的な影響を、貯水池の運用水位、有 効・無効放流量、発生電力量などの観点から総合 的に評価する.

2. 研究手法

本研究では、ダムへの流入量を入力データとし、有効 放流量・無効放流量を算出するための簡易な牧尾ダム運 用再現モデルを構築した. そして,実測流入量を入力値 として、構成要素である水位-貯水量曲線(H-V曲線) を堆砂進行速度と掘削工事の有無によってパターン分 けしながら上記のモデルを用いることで,有効放流量・ 無効放流量, さらには水力発電量・愛知用水に対する補 給能力に対する堆砂進行,掘削工事施工の影響を評価し た. また,将来予測流入量を入力値とした場合の計算も 行うことで,気候変動とダム堆砂による複合的影響につ いても検討を行った. なお,検討対象期間は実測流入量 に関しては 1993~2009 年, 将来予測流入量に関しては 2093~2109 年のそれぞれ 17 年間である. ここでは、① 牧尾ダム運用再現モデル, ②水位-貯水量曲線(H-V曲 線)のパターン分け、③将来予測流入量の算出法、④モ デルによる計算結果の評価法について示す.

2.1 牧尾ダム運用再現モデル

一般的にダム運用はダム貯水位と時期によって、ダム に貯水する量を定めたダム運用曲線を用いて行われる. 牧尾ダムにおけるダム運用曲線では発電効率向上及び 利水容量確保を目的に、5/1-12/1まで高い水位を維持し ている.一方で、融雪による出水を効率よく活用するた め、12-3月の期間においては、牧尾ダムは貯めた水を一 気に発電放流し、3/31には貯水位が 0mになるよう運用 を行い、4月の融雪出水を用いて 5/1に再び満水になる ような運用がなされている.

しかし,牧尾ダムは下流の愛知用水の従属であるため, ダム運用曲線に基づく効率的な運用だけでなく,愛知用 水の取水口のある兼山ダム及びその下流の今渡ダム流 入量を維持することが求められている.そのため,牧尾 ダムは夏季(5/1-10/3)では兼山ダム流入量 200 m³/s 以下, または今渡ダム流入量 100 m³/s 以下,夏季以外では今渡 ダム流入量 100 m³/s 以下となると自流取水が制限され, 兼山ダム流入量及び両ダム流入量が不足している場合 は 15 m³/s 前後の放流,今渡ダム流入量が不足している 場合は 10 m³/s 弱の放流が行われている.

また、これらの通年モデル以外に、渇水モデルと無効 放流モデルを設定した. 渇水モデルは夏季(5/1~10/3)に 貯水位が 3m以下になったときに、放流量を0 m³/s とし た. 無効放流はダムの有効貯水量を超える水量分とし、 この放流量は発電と無関係のものとした.本研究ではこ れらの条件を簡易的に導入した牧尾ダムモデルを作成 した.

2.2 水位-貯水量曲線(H-V曲線)のパターン分け

堆砂進行や堆砂対策工事の有無によって,牧尾ダムの H-V曲線・有効貯水量が変化することを考慮し,堆砂進 行状況に応じた6つのダムモデルを作成した(Table 1).

牧尾ダムでは 1961 年(建設時), 1994 年(掘削工事前), 2007 年(掘削工事後), 2010 年にダム貯水池の測量及び H-V 曲線の作成が行われた(Fig. 5). ここでは, 2100 年 の H-V 曲線を作成するにあたり, 2007 年の貯水池形状 を基に作成した.

Table 1 Reservoir Height-Volume (H-V) curves based on several reservoir sedimentation scenarios

	堆砂進行	堆砂速度	掘削工事
Case1-1	なし	なし	あり
Case1-2	なし	なし	なし
Case2-1	あり	現状通り	あり
Case2-2	あり	現状通り	なし
Case3-1	あり	現状の2倍	あり
Case3-2	あり	現状の2倍	なし



Fig. 5 H-V curve before the project of excavating deposited sediments



Fig. 7 Change of the amount of amount of annual reservoir sediment

Case1-1

掘削工事後の 2007 年からダムに土砂が流入しなかった場合であり,2007 年の H-V 式をそのまま用いる. Case1-2

掘削工事を行わなかった場合で,かつ 2007 年から 93 年間土砂が流入しなかったケースである.この場合,本 工事の掘削量である 500 万㎡を元の 2007 年に流入させ たものとして作成した.500 万㎡の土砂の堆積形状は 1961 年(建設時)と 1994 年(掘削工事前)の堆砂形状を参 考とした(Fig.6).

Case2-1

掘削工事後の2007年から93年間にわたって現状の平 均年間堆砂量と同様のペースで堆砂した場合である.ダ ム建設時から2012年までの牧尾ダムの年間堆砂量の変 化をFig.7に示す.1979年から2007年までは、御嶽山 噴火・長野県西部地震による大規模な土砂生産イベント や堆砂掘削工事による人為的作用の影響が大きいと考 えられ、平均年間堆砂量はこの期間を除いて算出した.

Case2-2

掘削工事を行っていない 2007 年に現状と同様のペー スで堆砂した場合である.

Case3-1

掘削工事後の2007年から93年間にわたって現状2 倍のペースで堆砂した場合である.これは、感度分析と して設定したもので、御嶽山噴火・長野県西部地震によ る大規模な土砂生産イベントや、気候変動による土砂生 産量の増加などの可能性を考慮したものである.

Case3-2

掘削工事を行っていない 2007 年に現状の 2 倍のペースで堆砂した場合である.

2.3 将来予測流入量の算出法

将来予測流入量は、流出計算によって求めた現在気候 条件下に対する将来気候条件下での牧尾ダム流入量の 割合を、月ごとに実測流入量に乗じて求めた.流出計算 には、分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM: Hydrological River Basin Environment Assessment Model) を用いた. Hydro-BEAM の詳細に関しては、佐藤ら(佐 藤ら、2009)を参照していただきたい.ここでは、① Hydro-BEAM への入力気象データ、②流出計算によって 求めた現在気候条件下に対する将来気候条件下での牧 尾ダム流入量の割合を示す.

(1) Hydro-BEAM の入力気象データ

現在気候,将来気候条件下それぞれにおける,流域内 のグリッドメッシュごとの日単位の気温,融雪量,蒸発 散量,そして1時間単位の降雨量が流出解析モデルの入 力値となる.

現在気候条件の入力値は、地域気象観測システム (AMeDAS: Automated Meteorological DataAcquisition System)と地上気象観測網 (SDP: SurfaceDaily Product) の観測データを元に、距離逆数加重平均法 (IDW) を用 いてグリッドメッシュデータに内挿し作成した.

気温については、時別値を利用し、日平均・日最高・ 日最低値を算出して、日単位データとして整理した.1 時間単位の降水量については、観測データをそのまま利 用した.融雪量および蒸発散量は、観測値がないため、 気温・降水量・風速・大気圧・水蒸気圧・日照時間の日 別データを元に、SVAT(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer)モデルを用いて地表面の熱水収支を解析する ことで推定した.

一方,将来気候条件下での予測値は,IPCC 第4次評 価報告書における A1B シナリオに基づく,気象庁気象 研究所による超高解像度全球大気モデル(MRI- AGCM3.2S)の出力結果を用いて作成した.気温につい ては,現在気候条件における各グリッドメッシュの日単 位の気温の観測値に,MRI-AGCM3.2Sの流域内平均の 現在気候に対する将来気候の上昇温度を加えた値を用 いた.1時間単位の降水量については,現在気候条件に おける各グリッドメッシュの1時間単位の降水量の観 測値に,気温の場合と同様に流域内平均の現在気候に対 する将来気候の上昇割合を乗じた値を用いた.融雪量お よび蒸発散量は,上記の気温・降水量データと,観測値 と同じ仮定した風速・大気圧・水蒸気圧・日照時間の日 別データを元に,SVATモデルを用いて推定した.

(2) 流出計算によって求めた現在気候条件下に対 する将来気候条件下の牧尾ダム流入量の割合

Hydro-BEAM を用いて,現在気候では1993年~2009 年,将来気候では2093年~2109年までの牧尾ダムの平 均月間流入量を求め,現在気候条件下に対する将来気候 条件下での牧尾ダム流入量の割合を求めた.また,木曽 川水系において,SVAT モデルで算出した月間平均気 温・月間積算降水量・月間積算降雨量・月間積算降雪量・ 月間積算融雪量・月間積算落発散量の現在気候と将来気 候の値のうち,月間積算降水量(Fig. 8)と月間積算融 雪量(Fig. 9)の比較と牧尾ダムへの月間流入量の現在 気候と将来気候の比較と現在気候の流入量に対する将 来気候の月間流入量の割合(Fig. 10)を以下に示す.



Fig. 8 Comparison of monthly total amount of rainfall in Kiso river system by SVAT model between present and future climate



Fig. 9 Comparison of monthly total amount of snowmelt in Kiso river system by SVAT model between present and future climate



Fig.10 Monthly inflow in present and future climate calculated by Hydro-BEAM (top figure) and the ratio of future inflow to present inflow (under figure)

2.4 モデルによる計算結果の評価

本研究では、各ケースにおいて牧尾ダム運用再現モデ ルの出力値である有効放流量から水力発電による利益、 貯水位から渇水による損失をそれぞれ求め、比較するこ とで金額によって堆砂進行、気候変動の影響を評価した. 本節では、①水力発電量、及びその利益の計算法、②渇 水基準、及びその損失の計算法について述べる.

(1) 水力発電量および発電利益の計算

水力発電量は有効放流量と有効落差によって求めら れ,牧尾ダムにおける有効落差(m)は,有効貯水位+ 94(m)である.ここで,有効貯水位は,ダムの放流口か らダム満水位までの距離である.堆砂すると,ダム底部 がかさ上げされ,最低有効落差が上昇する.牧尾ダムに おける水力発電量は以下の式で求められる.

発電出力(kw)=9.8×有効放流量(m²/s)×(牧尾 (2.1) ダムの有効貯水位+94)m×0.85

発電利益の計算には, 平成 17 年度から平成 22 年度の 間の 8.4 円/kWh, 平成 23 年度以降の 12 円/kWh の利益 を得ることができる(奥村ら, 2013)と仮定し, 2 つの 場合の計算を行った.日本では夏期の電力需要が高いこ とを考慮し,年間の総発電量に対する夏期(7-9月)の 発電電力量の割合(夏期発電電力量率)も計算した.

(2) 渇水基準および経済損失の計算

牧尾ダムの貯水位が3m以下に低下した場合は、十分 に愛知用水に水を供給することができない渇水日であ ると見なし、渇水による一日あたりの損失額は、1億円 (杉本、1996)と仮定して計算を行った.

3. 結果および考察

3.1 ダムモデルの検証

2.で記述した牧尾ダムモデルと堆砂影響を考慮した 計算モデルで1993-2010年までの貯水位の通年変化(Fig. 11)・年間無効放流量(Fig. 12)・年間発電電力量(Fig. 13) を算出した.Fig. 11より,計算値と実測値を比較すると, ダムモデルは貯水位低下に伴う渇水対策の貯水位運用 はあまり再現できながったが,現状のダムの運用を概ね 再現していると判断される.







Fig. 12 Total amount of effective discharge (observation and calculation)



Fig. 13 Annual amount of hydroelectric power generation (observation and calculation)

3.2 牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量変化

将来気候の牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量は, 各月において Hydro-BEAM の将来値と現在値の比率を 現在気候の実測値にかけて算出した.牧尾・兼山・今渡 ダムの実測値と将来値の比較は Fig. 14 に示す.



a)



Makio Dam

b) Kaneyama Dam



c) Imawatari Dam

Fig. 14 Monthly average inflow into Makio Dam, Kaneyama Dam and Imawatari Dam (observation and calculation (observation × ratio)

時期別に見ていくと、1-3月の期間では、Fig.8より 温暖化により降雪量が減り降雨量が増えたため、牧尾ダ ムの流入量が増加している.このため、4月はFig.9よ り融雪出水が減少し、Fig.14より牧尾ダムの流入量も大 きく減少している.これ以降の期間は全体的に流入量が 減少している.兼山ダム・今渡ダム流入量も牧尾ダムと 同様の傾向であるが、下流であるため流入量が比較的多 く、温暖化による影響は牧尾ダムよりも小さい.

3.3 牧尾ダムモデルの運用結果

(1) 貯水位の変化

ダムモデルの運用結果の代表例を Fig. 15 に示す.また,現在・将来気候における牧尾ダム期間内月間平均貯 水位(m)を Fig. 16 に,月間平均貯水位の現在気候からみ た将来気候の変化値を Fig. 17 に示す.





b) Present : Reservoir sediment progress



c) Future : No Reservoir sediment progress



d) Future : Reservoir sediment progress

Fig. 15 Representative example of Makio Dam operation result in each case





b) Future climate





Fig. 17 Change of the amount of water level from present climate to future climate in each case

堆砂影響に着目し, Fig. 24 より以下のことがわかる. 1-3 月においては, 堆砂が進むにつれて最低貯水位が 増し, 1 月と3 月の平均貯水位の差が小さくなっている ことがわかる. 4-6月においては、堆砂が進むにつれて有効貯水量が 減少し融雪出水により、早く満水位に近づくため、平均 貯水位が高くなっている.

7-9月において、堆砂量が多い方が全体的に貯水位は 高くなっている.これは渇水日が多い年において、貯水 量が少なくなったときに、堆砂が増えるほど最低貯水位 が高くなるためと思われる.

10-12 月においては、今渡が取水制限 100 m³/s を切る ことが少ないため、牧尾ダムが貯水に専念でき、堆砂量 に関わらず平均貯水位が高いと考えられる.

次に温暖化が与える影響について Fig. 17 より以下の ことが分かる. 1-3 月において, V カット発電により貯 水位を落とし始める 1 月は,現在気候より貯水位が低下 している. これは将来気候の 4-11 月の流入量減少のた め,この時期までに十分に貯めることができなかったこ とが原因であると考えられる.一方で3月では,本来は 貯水位 0m 近くまで低下させるが,流入量が増えたこと, 牧尾ダムモデルの放流量を温暖化による流入量増加に 合わせて変更しなかったことの二つの原因により,低下 しなくなったため,平均貯水位が高くなっていると考え られる.

4-6月では貯水位が高くなっている.これは流入量が 減少したことよりも、3月で貯水位を0mまで低下させ なかった影響が強く出ていることが原因と考えられる.

5,6 月は貯水位が下がっている.この原因は,牧尾ダ ムの流入量が減少することに加え,下流の兼山ダムの流 入量も減り取水制限を切ることが多くなり,牧尾ダムの 放流が増えてしまったためと思われる.

7-9月の貯水位減少も上記の理由と同じであると思われる.

10-12月も将来気候では今渡ダムの流入量も減っているため、上記と同じ理由と思われる.

堆砂および温暖化が貯水位に与える影響は, 堆砂が進 むほど最低貯水位が上昇するため, 温暖化の影響が小さ くなるということと, 最低有効落差が上昇するため月間 の平均貯水位が高くなるということと言える.

(2) 有効放流量, 無効放流量および水利用率

牧尾ダムの計算流入量をダムモデルに入力した場合 の有効放流量,無効放流量および水利用率の計算結果を Table 2, 3 に示す.

(a) 有効放流量

牧尾ダムの現在気候・将来気候における期間内平均月 間有効放流量と,現在気候からみた将来気候の変化値を 堆砂シナリオ別に比較したものをそれぞれ Fig. 18, Fig. 19 に示す.

堆砂進行条件	掘削有無	気候条件	最高有効落差(m)/最低有効落差(m)	有効貯水量(万m3)	総有効放流量(万m3)	総無効放流量(万m3)
堆砂進行無し	撮影方は	現在	142/94	8855	649888	200608
	加出すり行う	将来	142/ 54	0000	665885	174272
	「山き」(十二)	現在	142/94	6155	648830	201896
	加利無し	将来	142/ 34	0100	661688	178083
堆砂進行有り(15万m3/年)	掘削有り	現在	142/107	5410	642864	208778
		将来	142/107	5410	657997	182180
	掘削無し	現在	142/112	4010	638736	213449
		将来		4910	654850	185425
# 孙佐仁吉川(20 王…2 /年)	掘削有り	現在	142/120	4105	631249	219989
		将来			642765	197381
堆砂進11有9(30万冊3/平)	「山き」(十二)	現在	140 /100	3515	621992	229714
	加引無し	将来	142/123		639564	200684

Table 2 Total effective outflow and ineffective outflow in 18 years in the each case

Table 3 Water availability in the each case

北 刊田玄(04)	堆砌)進行無し	堆砂進行有以15万	m3/年)(15万m3/年)	堆砂進行有りに	30万m3/年)
小利用平(70)	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し
現在気候	76.4	76.3	75.5	75.0	74.2	73.0
将来気候	79.3	78.8	78.3	77.9	76.5	76.1



b) Future climate

20 A. A. A. A. A.

A. A. A. A. A.

A. A. A.





Fig. 19 Change of the amount of monthly average effective discharge from present climate to future climate in each case

Fig. 18 より, 堆砂の影響について考察する. 1-3 月の
V カット発電による有効放流量は, 12 月までの貯水量
と 1-3 月の流入量によって決まる. 堆砂量が多いほど,
12 月までの貯水量が減り, 有効放流量は減少する.

4-6月は、堆砂量が増えるほど、有効放流量が増えている.これは4月の早い時期で満水位近くになり、最大 放流量 30 m³/s を流しているからである.有効貯水量が 減るにつれて、最大放流を行っている回数が増えている ことが以下の Fig. 20 からわかる.



Fig.20 Relation between the active storage and times of the max daily outflow in April in 18 years

7-9 月において、7 月は流入量が多く、堆砂量に関わ らず貯水位も高いため、放流量はあまり変わらない.た だ、堆砂進行が進むと、最大 30 m²/s 放流の日数が増え、 兼山ダム補給目的の放流 15 m²/s の日数は減っている.

8,9 月になるにつれて, 兼山ダム補給目的の放流 15 m³/sの日数は減っている. また, 貯水位が 5m以下のための放流量0 m³/sの日数も増えていることが分かる.

10-12月について、10、11月においては、放流量に差 はほとんどない.これは堆砂が一番進行した状態になっ ても、今渡基準点の取水制限を補給する能力はあること を示している.12月は堆砂量が多くなるほど、有効放 流量が少なくなっている.これは12月中旬から行われ る V カット発電放流量は有効貯水量が多いほど、多い 設定にしているからである.

Fig. 19 より, 温暖化の影響については, 流入量の変化 と同じく 12-3 月の期間では増加し, 4-11 月の期間では 10 月以外は減少している. Fig.20 より, 現在気候と将来 気候の変化率と有効貯水量の関係は, 線形ではなく非線 形な関係が見られた. これは有効放流量が, 有効貯水量 だけでなく, 期間ごとの総流入量・流況変化など多くの 影響を受けているためと考えられる.

(b) 無効放流量

牧尾ダムの現在気候・将来気候における期間内平均月 間無効放流量と,現在気候からみた将来気候の変化値を 堆砂シナリオ別に比較したものを,それぞれ Fig. 21, Fig. 22 に示す.





a) Future climate

Fig. 21 Amount of monthly average ineffective discharge in each case



Fig. 22 Change of the amount of monthly average ineffective discharge from present climate to future climate in each case

Fig. 21 より, 堆砂の影響について考察する. 無効放流 量が堆砂量に影響を受けているのは4-5 月の貯留期間で ある. これは有効貯水量が減少すると早く満水位に近づ いてしまうためであることと,満水位付近の 1m あたり の貯水量が減少してしまい,満水位付近で耐えられる流 入量が小さくなるためである. 夏期でほとんど差が見ら れなかったのは, 夏期での大量流入の頻度とその量は, 有効貯水量が今回の条件で一番多い6,655 万㎡でも全て 貯水できなかったからと考えられる.

温暖化の影響については, Fig. 22 より 4-11 月の流入 量が減るため, 無効放流量が減っている. 温暖化すると 夏期の流況が極端化し, 大量流入が増える可能性がある ことが想定されるが, 今回の計算では, これが考慮され ていない. これを考慮すると将来気候における夏期の無 効放流量はもう少し増えると考えられる.

(c) 水利用率

以上から,水利用率について堆砂と温暖化が与える影響について考察する. Table 3 より,堆砂の影響につい ては,有効貯水量が約半分以下になっても,年間の有 効・無効放流量ともに大きな差は生まれず,水利用率も 2~3%の差しか生まれていない.しかし,Fig. 23 より 堆砂量増加により,期間内における牧尾ダムの最大放流 日数の割合が増えているため,放流の質は低下している ものと考えられる.温暖化の影響については,Fig. 24 からも分かるように,無効放流量が減るため,現在気候 より水利用率が高く,堆砂による変化率の差は,現在と 将来でもあまり変化しなかった.



Fig. 23 Relation between the active storage and the percent of the times max outflow in 18 years



Fig. 24 Relation and the active storage and water availability

(3) 発電電力量

計算結果を以下の Table 4,5 に示す.牧尾ダムの現在 気候・将来気候における期間内平均月間発電電力量と, 現在気候からみた将来気候の変化値を堆砂シナリオご とに比較したものをそれぞれ Fig.25, Fig.26 に示す.

3 月を除く全時期において発電電力量は放流量に大 きく影響されていることが分かる.これは、放流量はそ の変化率が直接,発電電力に影響するのに対し、貯水位 は有効落差に変換するためである.有効落差は最低 94m と最高 152m で、最大でも変化率が約 1.5 倍である.

総年間発電量と有効貯水量の関係は Fig.27 に示すよ

うに、有効放流量と同様に非線形関係が見られた.これ は発電電力量に影響する要素が多く、堆砂による貯水量 減少や貯水位上昇だけでなく、時期ごとの流入量・貯水 位設定・取水制限にも影響されているためと考えられる.

次に,夏期の発電電力量を Fig.28 に示す.将来気候で は1-3月の発電が増える一方で,夏期の発電電力量は現 在気候よりも低い値となる.また,有効貯水量6,000万 ㎡弱よりも有効貯水量が減少すると,現在気候・将来気 候ともに夏期発電電力量率が低下する.現在の発電単価 は年間一定であるが,夏期の発電価値がより高くなると, 気候変動や堆砂の影響が顕在化することが想定される.

Table 4 Total amount of effective outflow and hydroelectric power generation in 18 years in the each case

堆砂進行条件	掘削有無	気候条件	最高有効落差(m)/最低有効落差(m)	有効貯水量(万m3)	総有効放流量(万m3)	総発電電力量(万kwh)
	堀削右い	現在	142/94	8855	649888	196956
#111/# /二 /冊		将来	142/ 54	0000	665885	200644
足り進行無じ		現在	142/04	8155	648830	197689
	加引無し	将来	142/ 94	0100	661688	200333
圭砂進行有り(15万m3/年	堀割方は	現在	142/107	5410	642864	198440
	101 FU - 7	将来	142/107	5410	657997	202041
	掘削無し	現在	142/112	4010	638736	198264
		将来		4910	654850	202087
+11))))(20下2/月	掘削有り	現在	142/120	4105	631249	199132
		将来			642765	202200
1191年1月9(307月113/4	百些有	現在	140/100	3515	621992	196771
	掘削無し	将来	142/123		639564	202064

Table 5 Ratio of the total amount of hydroelectric power generation in normal case (present climate, excavation, no progress of

eser von sediment) to ny droereeure power generation in outer eases	
---	--

比索(発電電力)	堆砂進	行無し	堆砂進行有り	堆砂進行有り(15万m3/年)		堆砂進行有り(30万m3/年)	
山平(光电电力)	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し	
現在気候	1.000	1.004	1.008	1.007	1.011	0.999	
将来気候	1.019	1.017	1.026	1.026	1.027	1.026	



Fig. 25 Amount of monthly average hydroelectric power generation in 18 years in each case



Fig. 26 Change of the amount of monthly average ineffective discharge from present climate to future climate in each case







Fig. 28 Relation between the active storage and the amount of summer hydroelectric power generation



Fig. 29 Relation between the active storage and the ratio of water shortage days

(4) 渴水発生頻度

ここでの渇水日は、夏期(5/1~10/3)において貯水位 が5m以下に低下した時と定義する.現在・将来気候そ れぞれにおける堆砂進行・掘削有無・気候の複合条件に おける18年間の渇水日数とその割合をTable 6に示す.

Fig. 29 より,有効貯水量6,000万㎡までは,有効貯水 量が減ってもあまり渇水率に変化は見られないが,有効 貯水量5,000万㎡弱(有効貯水量の減少率30%)を境に 有効容量の減少により渇水率が大きく上昇している.ま た,温暖化すると夏期の流入量が減るため,現在気候に 比べ全体的に渇水日が増えている.

前述のように、堆砂進行によって水利用率はあまり変 化しなかったが、渇水日が増えているということは、牧 尾ダムの放流が不安定なものになっていることを示し ている. Fig. 23 で示したように、有効貯水量の減少に伴 って最大放流量での放流頻度が増えており、ダムとして の流量調節(貯留)ができず、その反動として渇水頻度 が増加することが明らかとなった.

Table 6 Percenta	ge of the number	er of water sho	rtage days ir	n 18 years in	the each s	simulated si	ituations

汜水 亥(04)	堆砂進	行無し	堆砂進行有り(15万m3/年)」		堆砂進行有り(30万m3/年)	
/句小平(90)	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し	掘削有り	掘削無し
現在気候	3.85	3.77	4.34	4.99	9.40	12.18
将来気候	6.05	6.16	6.73	7.66	11.04	14.10

3.4 経済効果

経済効果は牧尾ダムの利水機能(愛知用水の供給およ び水力発電)に着目して検討を行う.

水力発電について,電力料金単価として,平成17年 度から平成22年度の間のJEPX(日本卸電力取引所)で の平均である8.4円/kWhを用いたが,平成23年3月11 日の東北地方太平洋沖地震後,JPEXでの取引単価は12 円/kWh程度にまで上昇し,現在(平成24年12月)ま でその単価程度を維持している.今後,原発事故に限ら ず,化石燃料の枯渇,不安定な新エネルギー導入等によ り,電力料金単価が加工する可能性は殆どなく,上昇し ていくことが考えられる(奥村, 2013).

また,愛知用水の供給の経済効果については牧尾ダム の放流量ではなく,渇水日の損失額より評価していくこ とにする.渇水による一日あたりの損失額は,杉本(1996 年)を参考に算出した(杉本,1996).愛知用水における 工業用水の経済効果は年間約550億円,農業用水が年間 約12億円,上水が同じく157億円であり,これらの合 計を365日で割ると、一日あたり2億円、愛知用水から 生まれることになる. 渇水時、使用量50%カットの節 水対策を行うとすると、渇水による損失額は一日当たり 1億円となる. 以上をもとに各堆砂条件における牧尾ダ ムの経済効果を評価した.

計算対象期間である17年間の総発電金額をFig.40に 示す.現在気候・将来気候ともに,有効貯水量に対して は大きくは変化していない.現在気候に対する将来気候 の変化では,発電金額がわずかに増加(3,000万円/年 程度)することが予想される.



Fig. 30 Relation between the active storage and the amount of hydroelectric power generation benefit





一方,17年間の渇水被害総額は,Fig.41に示すよう に,現在気候では,有効貯水量5,000万㎡(有効貯水量 の減少率30%)を境に被害額が増大し,また,将来気 候ではさらに全体的に被害額が増大することがわかる.

これらを,気候変動の影響の有無,堆砂による有効容量の減少レベルごとに段階ごとに比較すると,a)現在気候・堆砂なし(6.5億円/年)に対して、b)将来気候・堆砂進行なしで約1.5倍(10億円/年)に増加する.これに対し堆砂進行により有効貯水量が約30%減少(6,800万㎡から4,900万㎡に減少)すると,c)現在気候で約1.3倍(8.2億円/年)に,d)将来気候で約1.9倍(12.3億円/年)に増加する.約50%まで有効容量が減少(6,800万㎡から3,500万㎡に減少)すると,e)現在気候で約3倍(20億円/年)に,f)将来気候で約3.6倍(23.5億/年)に増大する結果となった

4. おわりに

本研究の目的は,堆砂と温暖化による気候変動の影響 によって牧尾ダムの利水機能である水力発電と愛知用 水の供給がどのような影響を受けるかを明らかにする ことである.

発電量については、今回の検討では堆砂や気候条件に よって大きく変化することは無かったが、特に、夏期の 発電量に関しては将来気候で減少することが示された. 一方、愛知用水の供給では堆砂進行による有効貯水量の 減少・温暖化による夏期流入量の減少により多大な損失 が出る可能性があることが明らかとなった.

この愛知用水への損失は、牧尾ダムの有効貯水量が5, 000万㎡(有効貯水量の減少率30%)を切ってからであ り、堆砂なし・現在気候で想定される損失額(6.5億円/ 年)に対して、堆砂なし・将来気候で今世紀末に1.5倍 (10億円/年)、これに堆砂進行が加わると、これまでの 平均的な堆砂進行速度で有効貯水量が約30%減少 (6,800万㎡から4,900万㎡に減少)し、損失額は約1.9 倍(12.3億円/年)に、堆砂進行速度がこれまでの平均 的な速度の2倍に上昇した場合(御嶽山噴火・長野県西部地震による大規模な土砂生産イベントや,気候変動による土砂生産量の増加などの可能性を考慮)に有効貯水量が約50%減少(6,800万㎡から3,500万㎡に減少)し,損失額は約3.6倍(23.5億/年)に増大することが予想される.

謝辞

本研究を進めるにあたり,独立行政法人水資源機構中 部支社から牧尾ダムの浚渫事業や運用に関する情報の 提供を受けた.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 奥村 裕史(2013):水力発電設備の持続的使用を目的 としたダム貯水池土砂管理に関する研究,京都大学博 士論文
- 技術委員会分科会報告(2001):ダム排砂対策の現状と 課題,大ダム No176,57(1)-57(49).
- (財)ダム水源地環境整備センター(2008):ダムの堆砂 対策技術ノート-ダム機能向上と環境改善に向けて-
- 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 流域スケールで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.
- 杉本義行(1996):愛知用水事業の経済効果-工業用水 の便益-,千葉大園学報第50号,203-210.
- 鈴木 篁(2012):水力発電の底力,ダム工学会 Vol.22 No.2, 107–119.
- 角 哲也, KANTOUSH Sameh A, 鈴木昭二 (2012):美 和ダム排砂バイパストンネルの運用-上流および下流 河川状況およびバイパス効果-, 大ダム, 221, 89-98
- 独立行政法人水資源機構愛知用水総合管理所 HP: http://www.water.go.jp/chubu/aityosui/

中沢 弌仁 (1991):水資源の科学,朝倉書店.

- Bettina SCHAEFLI, Benoit HINGRAY, Andre MUSY (2007) :Climate change and hydropower production in the Swiss Alps-quantification of potential impacts and related modelling uncertainties, Hydrology & Earth System Sciences, 11, 3, 1191-1205.
- World Commission on Dams (2001) : DAMS AND DEVELOPMENT - A New Framework for Decisionmaking- , THE REPORT OF THE WORLD COMMISSION ON DAMS, Earthscan Publications Ltd.

(論文受理日: 2014 年 6 月 11 日)