

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 m³ 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）。

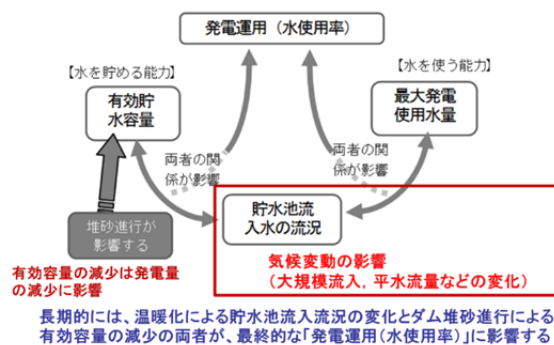


Fig. 1 Assessment of the influence of reservoir sediments and climate change on hydroelectric generation (奥村ら，2013)

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 m³ 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地施設として、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。

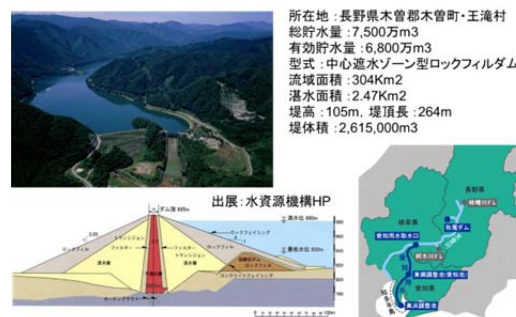


Fig. 2 Outline of Makio Dam and the Aichi Irrigation project ((独)水資源機構愛知用水総合管理所 HP)

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 4.8 km 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

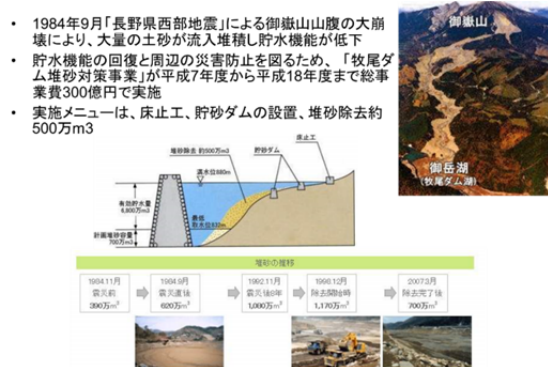


Fig. 3 Outline of the project of excavating deposited sediments

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 m³ 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。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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 以下となると自流水取水が制限され、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

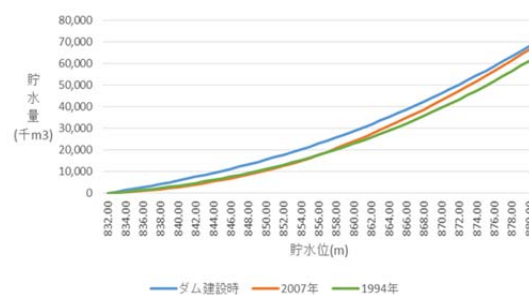


Fig. 5 H-V curve before the project of excavating deposited sediments

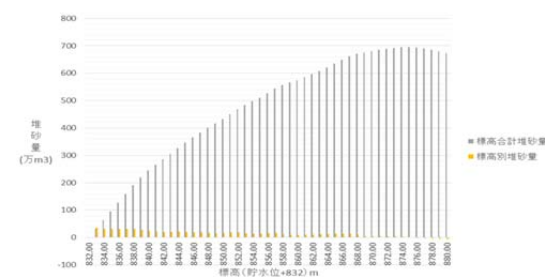


Fig. 6 Shape of reservoir sediment

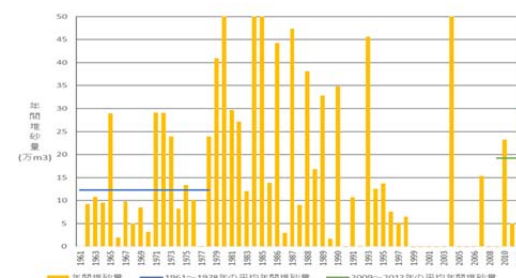


Fig. 7 Change of the amount of amount of annual reservoir sediment

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 m³を元の 2007 年に流入させたものとして作成した。500 万 m³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・月間積算蒸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。

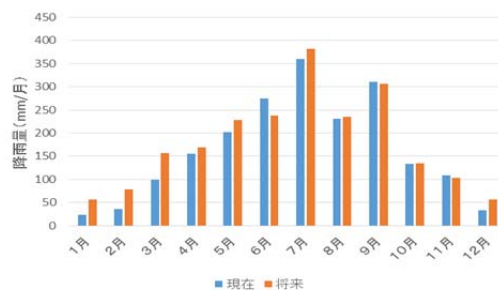


Fig. 8 Comparison of monthly total amount of rainfall in Kiso river system by SVAT model between present and future climate

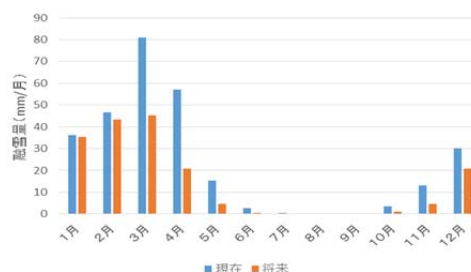


Fig. 9 Comparison of monthly total amount of snowmelt in Kiso river system by SVAT model between present and future climate

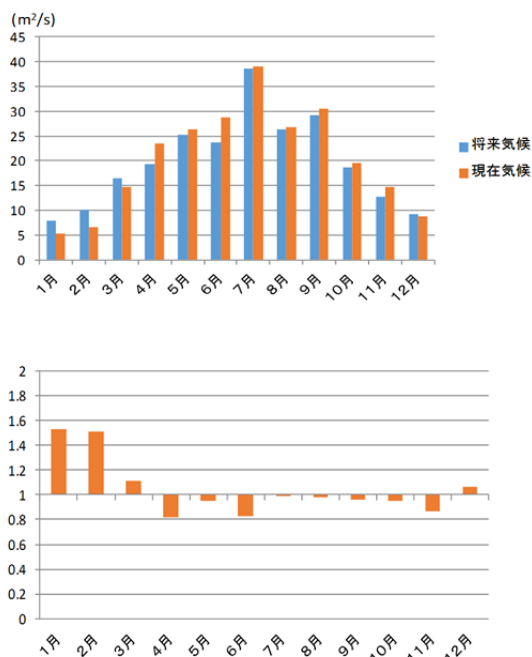


Fig.10 Monthly inflow in present and future climate calculated by Hydro-BEAM (top figure) and the ratio of future inflow to present inflow (under figure)

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る。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。

$$\text{発電出力(kw)} = 9.8 \times \text{有効放流量(m}^3\text{/s)} \times (\text{牧尾ダムの有効貯水位} + 94\text{m}) \times 0.85 \quad (2.1)$$

$$\text{電力量(kwh)} = \text{発電出力(kw)} \times \text{時間(h)} \quad (2.2)$$

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かったが、現状のダムの運用を概ね再現していると判断される。

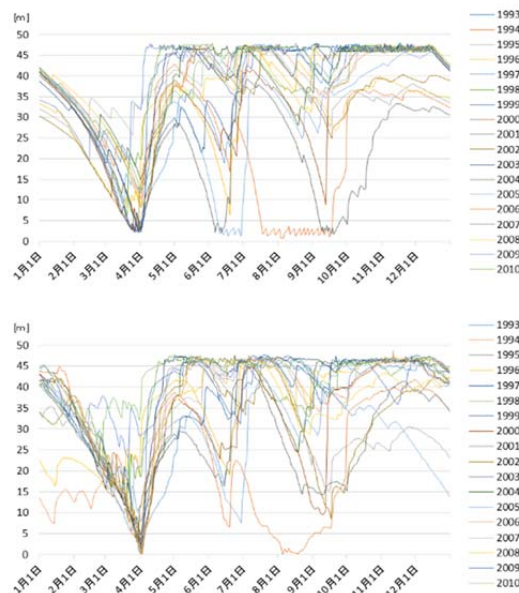


Fig. 11 Change of the water level (model (top) : observed (under))

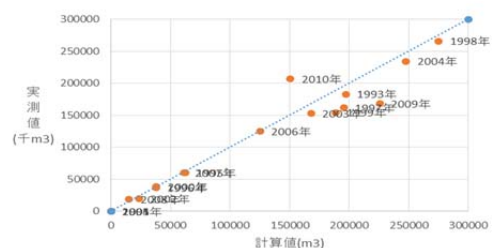


Fig. 12 Total amount of effective discharge (observation and calculation)

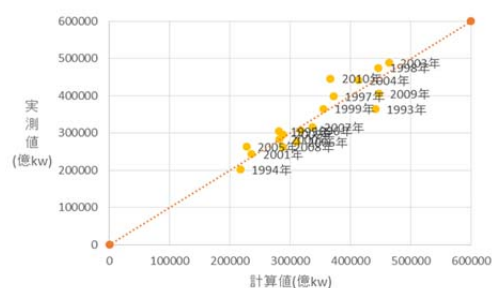
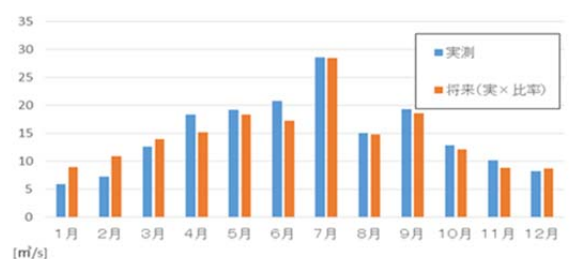


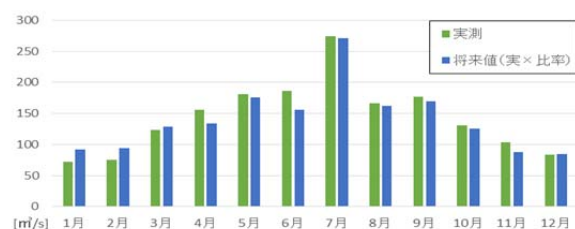
Fig. 13 Annual amount of hydroelectric power generation (observation and calculation)

3.2 牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量変化

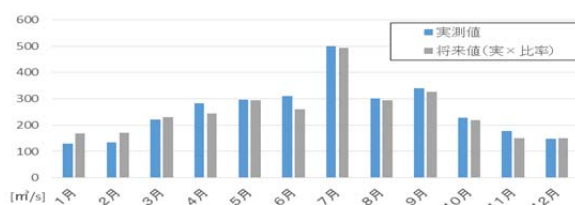
将来気候の牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量は、各月において Hydro-BEAM の将来値と現在値の比率を現在気候の実測値にかけて算出した。牧尾・兼山・今渡ダムの実測値と将来値の比較は Fig. 14 に示す。



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。

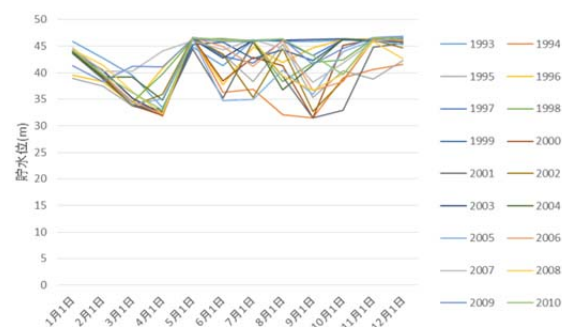
3.3 牧尾ダムモデルの運用結果

(1) 貯水位の変化

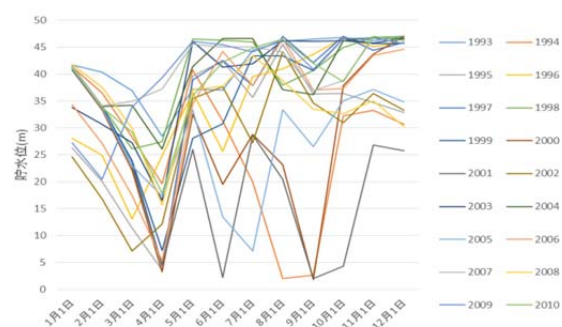
ダムモデルの運用結果の代表例を Fig. 15 に示す。また、現在・将来気候における牧尾ダム期間内月間平均貯水位(m)を Fig. 16 に、月間平均貯水位の現在気候からみた将来気候の変化値を Fig. 17 に示す。



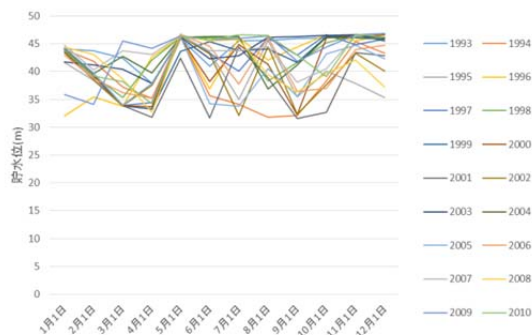
a) Present : No Reservoir sediment progress



b) Present : Reservoir sediment progress

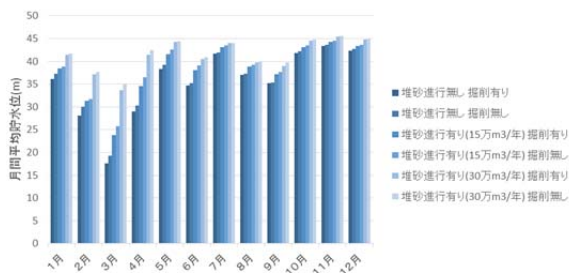


c) Future : No Reservoir sediment progress

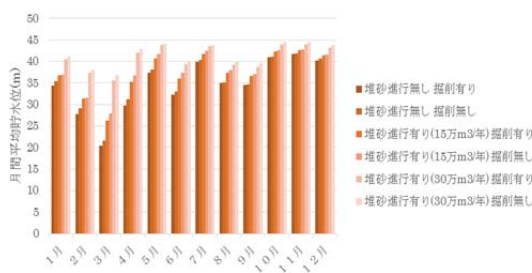


d) Future : Reservoir sediment progress

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



a) Present climate



b) Future climate

Fig. 16 Monthly average water level (m) in Makio Dam in 18 years in each case

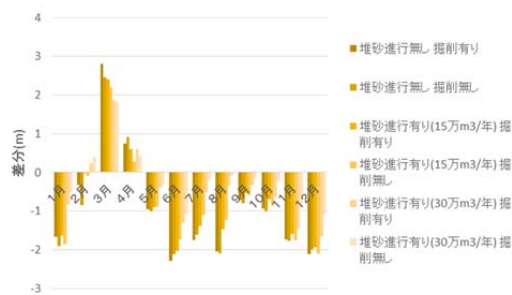


Fig. 17 Change of the amount of water level from present climate to future climate in each case

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

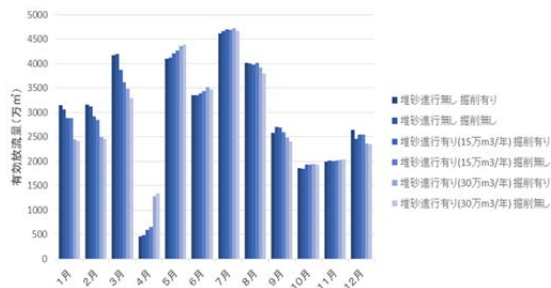
牧尾ダムの現在気候・将来気候における期間内平均月間有効放流量と、現在気候からみた将来気候の変化値を堆砂シナリオ別に比較したものをそれぞれ Fig. 18, Fig. 19 に示す。

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

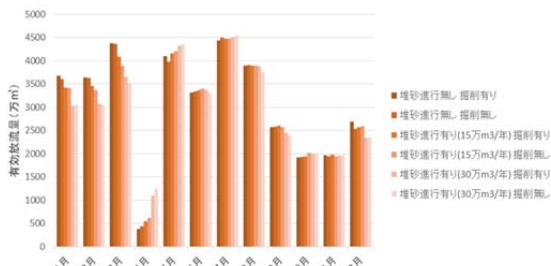
堆砂進行条件	掘削有無	気候条件	最高有効落差(m)/最低有効落差(m)	有効貯水量(万m ³)	総有効放流量(万m ³)	総無効放流量(万m ³)
堆砂進行無し	掘削有り	現在	142/94	6655	649888	200608
		将来			665885	174272
	掘削無し	現在	142/94	6155	648830	201896
		将来			661688	178083
堆砂進行有り(15万m ³ /年)	掘削有り	現在	142/107	5410	642864	208778
		将来			657997	182180
	掘削無し	現在	142/112	4910	638736	213449
		将来			654850	185425
堆砂進行有り(30万m ³ /年)	掘削有り	現在	142/120	4105	631249	219989
		将来			642765	197381
	掘削無し	現在	142/123	3515	621992	229714
		将来			639564	200684

Table 3 Water availability in the each case

水利用率(%)	堆砂進行無し		堆砂進行有り(15万m ³ /年)(15万m ³ /年)		堆砂進行有り(30万m ³ /年)	
	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



a) Present climate



b) Future climate

Fig. 18 Amount of monthly average effective discharge in 18 years in each case

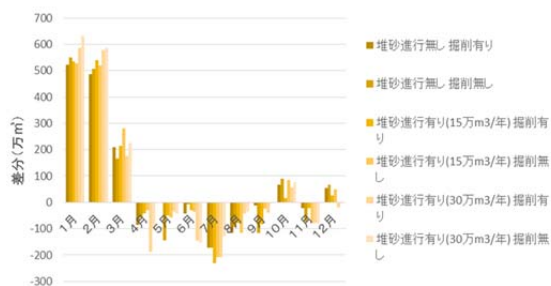


Fig. 19 Change of the amount of monthly average effective discharge from present climate to future climate in each case

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。

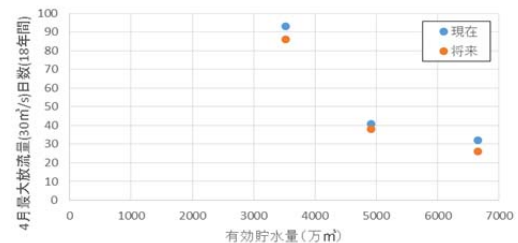


Fig.20 Relation between the active storage and times of the max daily outflow in April in 18 years

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 m³/s 放流の日数が増え、兼山ダム補給目的の放流 15 m³/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。

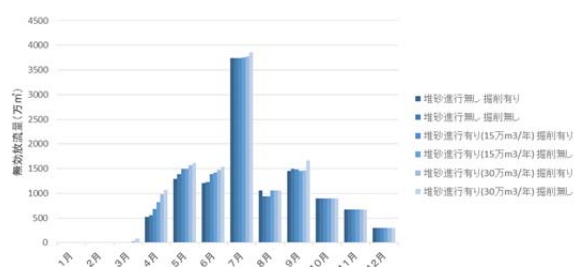
10-12 月について、10, 11 月においては、放流量に差はほとんどない。これは堆砂が一番進行した状態になっても、今渡基準点の取水制限を補給する能力はあることを示している。12 月は堆砂量が多くなるほど、有効放流量が少なくなっている。これは 12 月中旬から行われ

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。

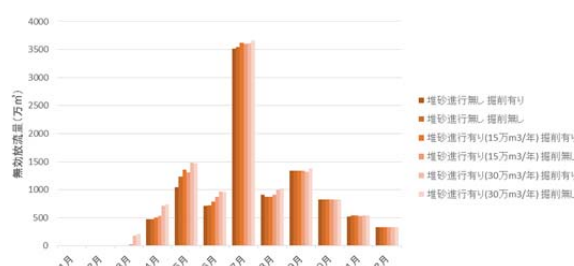
Fig. 19 より、温暖化の影響については、流入量の変化と同じく 12-3 月の期間では増加し、4-11 月の期間では 10 月以外は減少している。Fig.20 より、現在気候と将来気候の変化率と有効貯水量の関係は、線形ではなく非線形な関係が見られた。これは有効放流量が、有効貯水量だけでなく、期間ごとの総流入量・流況変化など多くの影響を受けているためと考えられる。

(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) Present climate



a) Future climate

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

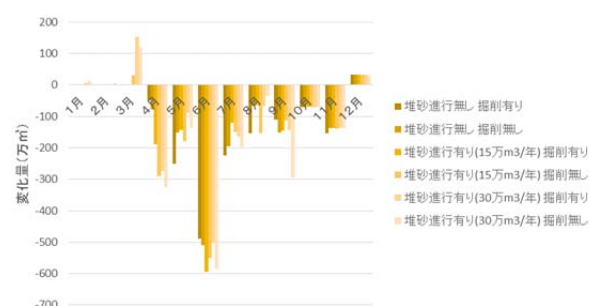


Fig. 22 Change of the amount of monthly average ineffective discharge from present climate to future climate in each case

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m³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。

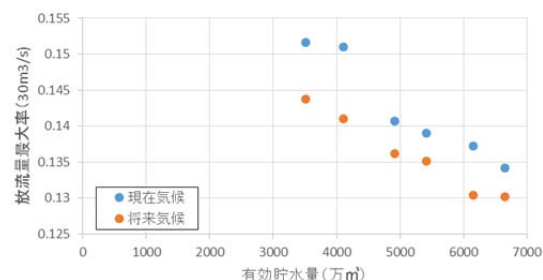


Fig. 23 Relation between the active storage and the percent of the times max outflow in 18 years

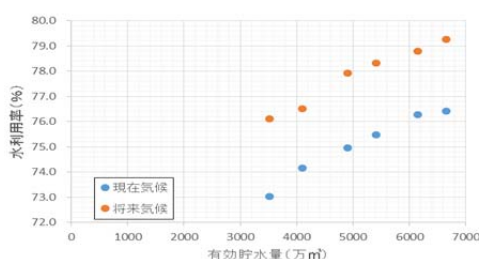


Fig. 24 Relation and the active storage and water availability

(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 m³ 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、夏期の発電単価がより高くなると、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m ³)	総有効放流量(万m ³)	総発電電力量(万kwh)
堆砂進行無し	掘削有り	現在	142/94	6855	649888	196956
		将来			665885	200644
	掘削無し	現在	142/94	6155	648830	197689
		将来			661688	200333
堆砂進行有り(15万m ³ /年)	掘削有り	現在	142/107	5410	642864	198440
		将来			657997	202041
	掘削無し	現在	142/112	4910	638736	198264
		将来			654850	202087
堆砂進行有り(30万m ³ /年)	掘削有り	現在	142/120	4105	631249	199132
		将来			642765	202200
	掘削無し	現在	142/123	3515	621992	196771
		将来			639564	202064

Table 5 Ratio of the total amount of hydroelectric power generation in normal case (present climate, excavation, no progress of reservoir sediment) to hydroelectric power generation in other cases

比率(発電電力)	堆砂進行無し		堆砂進行有り(15万m ³ /年)		堆砂進行有り(30万m ³ /年)	
	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

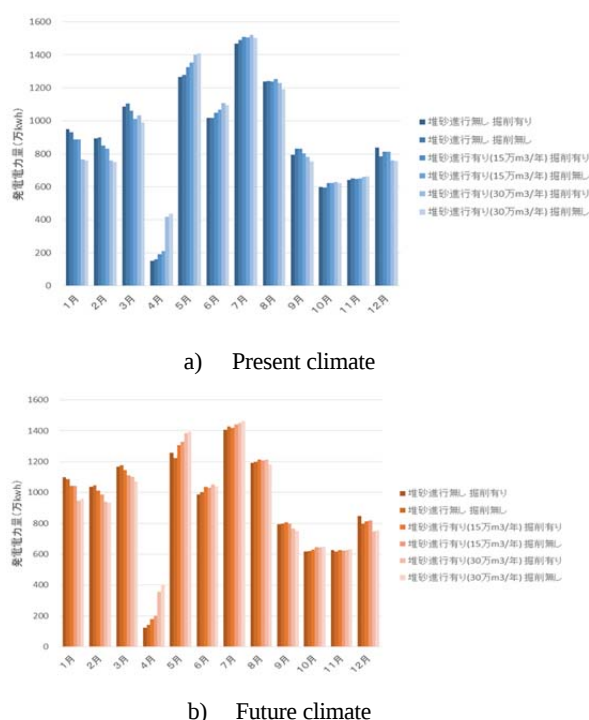


Fig. 25 Amount of monthly average hydroelectric power generation in 18 years in each case

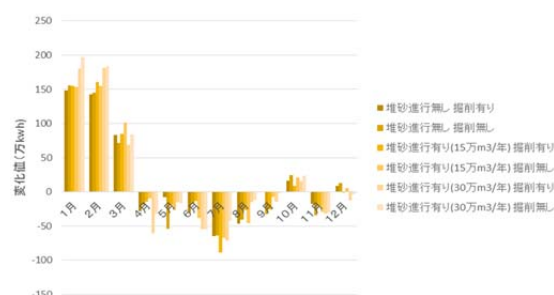


Fig. 26 Change of the amount of monthly average ineffective discharge from present climate to future climate in each case

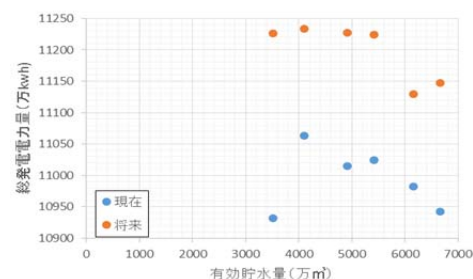


Fig. 27 Relation between the active storage and the annual total amount of hydroelectric power generation

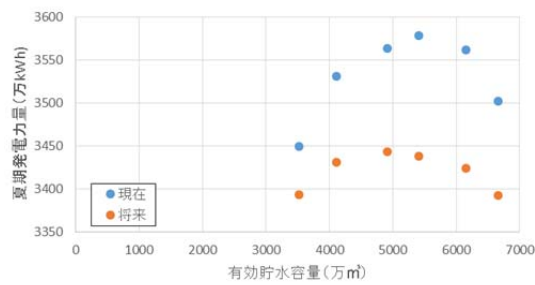


Fig. 28 Relation between the active storage and the amount of summer hydroelectric power generation

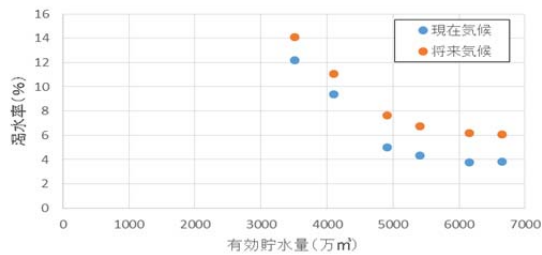


Fig. 29 Relation between the active storage and the ratio of water shortage days

Table 6 Percentage of the number of water shortage days in 18 years in the each simulated situations

渇水率 (%)	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)	
	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

(4) 渇水発生頻度

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m³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m³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。

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。

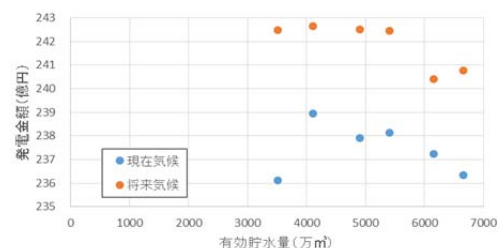


Fig. 30 Relation between the active storage and the amount of hydroelectric power generation benefit

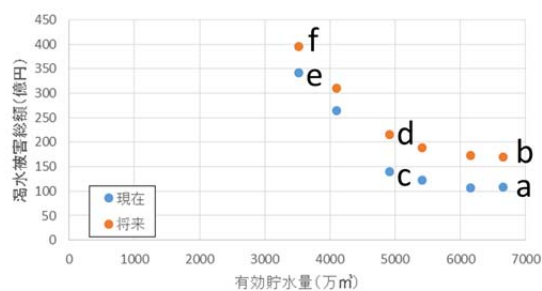


Fig. 31 Relation between the active storage and the drought damage amounts in present and future climate

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 m^3 （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 m^3 から 4,900 万 m^3 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 m^3 から 3,500 万 m^3 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 億円/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、夏季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・温暖化による夏季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 m^3 （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 m^3 から 4,900 万 m^3 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 m^3 から 3,500 万 m^3 に減少）し、損失額は約 3.6 倍（23.5 億円/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 弼仁（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 Decision-making-, THE REPORT OF THE WORLD COMMISSION ON DAMS, Earthscan Publications Ltd.

（論文受理日：2014 年 6 月 11 日）