

気候変動を考慮したダム堆砂進行による牧尾ダムの長期的便益評価

Long Term Benefit Evaluation of Makio Dam Based on Reservoir Sedimentation Progress Considering Climate Change

寺田和暉⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘・佐藤嘉展⁽²⁾

Kazuki TERADA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI, 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 the Aichi Irrigation Project. Reservoir sedimentation increased in this Dam because of Nagano West Earthquake in 1984. 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 and future inflow change by GCM model and distributed hydrological model (Hydro-BEAM). We evaluated economic effect in future (2093-2110) in terms of hydropower generation and water supply to the Aichi Irrigation Project. Regardless of the sedimentation scenarios and flow-regime changes, annual total hydroelectric power generation can be maintained. However, water supply to the Aichi Irrigation Project will be seriously damaged due to a loss of active storage volume by reservoir sedimentation and changes in seasonal availability of discharge.

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, 便益評価

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

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 1700mm 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、降雨量が大きいというわが国においては、水利用の面、防災の面からダムを設置する意義が大きいといえる（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（中沢，1991）。このような背景があり、わが国は現在までに約 2700 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 2700 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土砂災害、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）。

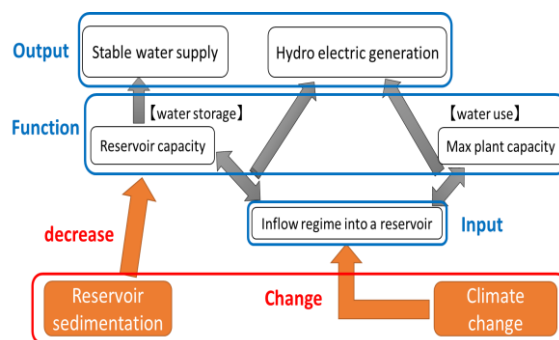


Fig. 1 Assessment of the influence of reservoir sediments and climate change on hydroelectric generation (Okumura, 2013)

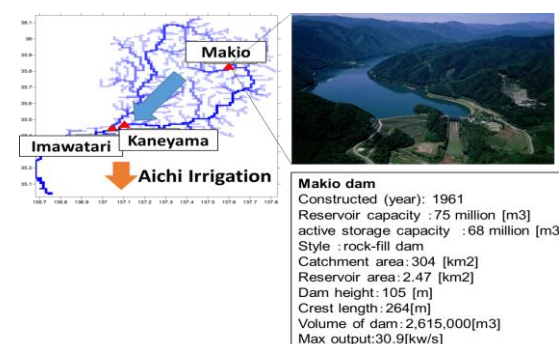


Fig. 2 Outline of Makio Dam and the Aichi Irrigation program (独立行政法人水資源機構愛知用水総合管理所 HP)

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を検討対象とした。昭和 36 年に建設された牧尾ダムは、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造られ、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。（株）関西電力で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も行っている。利水と発電を目的とした（独）水資源機構が管理する多目的ダムであるが、洪水調節機能は持たない。最大有効貯水量は 6800 万 m³ である。

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。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てしまった。牧尾ダムの計画堆砂量は 100 年間で 700 万 m³ であり、西部地震前までは、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）において、堆砂進行が一気に進み、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。

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牧尾ダム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 m^3 、費用の概算額 300 億円であった（杉本, 1996）。

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、奥村が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を検討している（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検討が行われていないのが現状である。

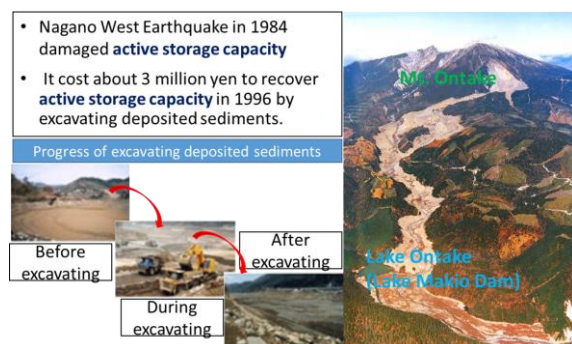


Fig. 3 Outline of the project of excavating deposited sediments

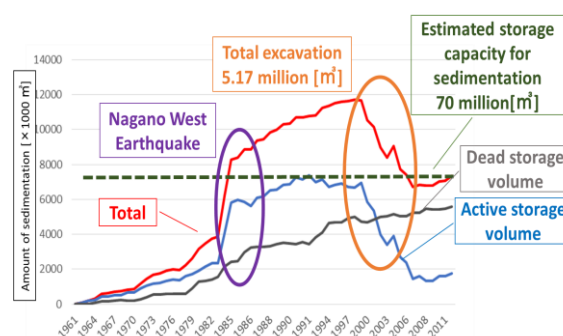


Fig. 4 Each amount of reservoir sedimentation (in the active storage and the Dead storage) in Makio Dam

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する。

- 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、貯水池の運用水位、有効・無効放流量、発電電力量、節水量などの観点からで長期評価する。
- 4) 水力発電便益と愛知用水（農業用水・工業用水・水道用水）への水供給による便益に着目して牧尾ダムの利水機能の経済効果を評価する。

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。本章では、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述べる。

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、牧尾ダムは夏期(5/1-10/3)では兼山ダム流入量 200 m³/s 以下のとき 15 m³/s 前後の放流を行い、今渡ダム流入量 100 m³/s 以下のとき 10 m³/s 弱の放流が行われている。両ダムが不足しているときは15 m³/s 前後の放流が行われる。夏期以外では今渡ダムのみの流入量で自流取水制限される。

また、これらの通年モデル以外に、節水モデルと無効放流量モデルを設定した。

水不足が頻繁に起こる夏期においては、牧尾ダムの貯水量が不足している際、兼山ダムに対して必要量の放流を行わず、節水して放流を行う。Fig. 5,6 から分かるように、このときの牧尾ダムの貯水量と放流量の関係は時期によって異なる。5,6月の節水時の放流は、貯水量が500万m³以上1700万m³以下の場合(12 m³/s 放流)と500万m³未満の場合(6 m³/s 放流)に分けて、放流量を決定した。7,8,9月では貯水量が2000万m³未満の場合に節水を行うとし、過去の運用結果から導いた貯水量と放流量の関係式を用いて、放流量を決定した。また、夏期(5/1~10/3)の間、貯水位が3m以下になった際は、放流量は0 m³/s とした。

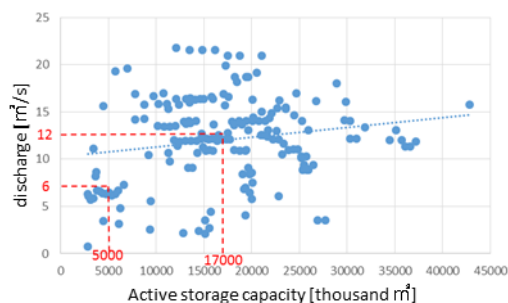


Fig. 5 Relation between saving discharge and active storage in May and July

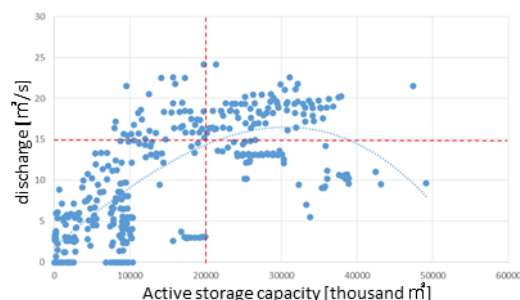


Fig. 6 Relation between saving discharge and active storage from June to September

無効放流量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。また、ダムの堆砂や堆砂対策工事による影響を評価するため、堆砂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。

2.2 水位-貯水量曲線（H-V 曲線）のパターン分け

Table 1 Simulated situation to make Height-Volume (H-V) curves

	Sedimentation progress speed	Excavation construction or not
Case1-1	Not	Yes
Case1-2	Not	Not
Case2-1	Normal	Yes
Case2-2	Normal	Not
Case3-1	Normal × 2	Yes
Case3-2	Normal × 2	Not

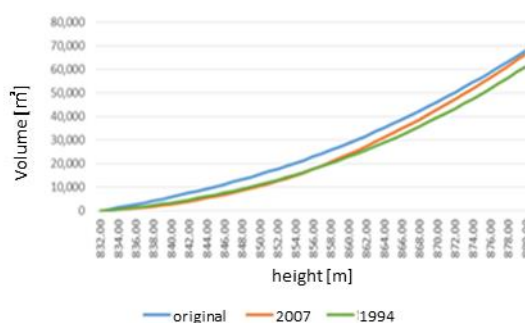


Fig. 7 H-V curve before the project of excavating deposited sediments

堆砂の進行や堆砂対策工事による影響を評価するため、2100 年において異なる堆砂状況における牧尾ダムの H-V 曲線を Table 1 のように、6 つ作成した。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. 7)。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。

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の 2007 年から 93 年間土砂が流入しなかった Case である。掘削工事を行わない場合の 2007 年は、本工事の掘削量である 500 万 m^3 を元の 2007 年に流入させたものとして作成した。500 万 m^3 の土砂の堆積形状は 1961 年(建設時)と 1994 年(掘削工事前)の堆砂形状を参考に(Fig. 8)、これと同様とした。

Case

掘削工事後の 2007 年から 93 年間現状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. 9 に示す。ここでは、平均年間堆砂量は 1978 年以前、2008 年以降の年間堆砂量から算出した。これは 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るためである。

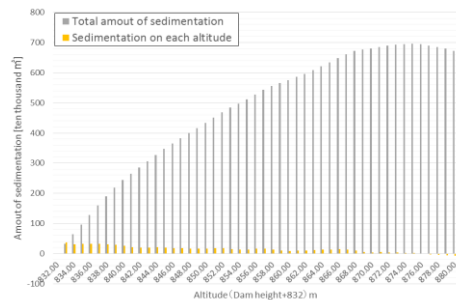


Fig. 8 Shape of reservoir sedimentation

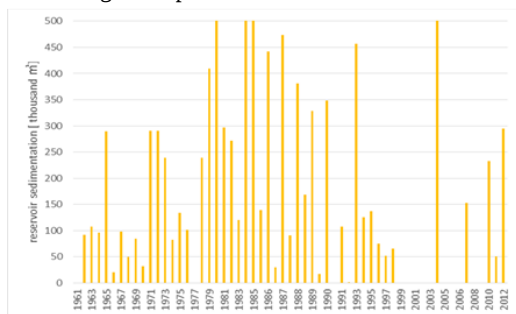


Fig. 9 Change of amount of amount of annual reservoir sedimentation

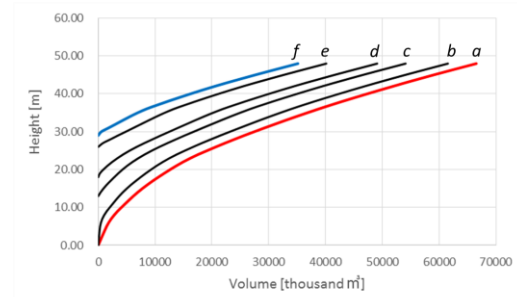


Fig. 10 H-V (Height-Volume) curves in 6 cases (a: Case1-1(red), b: Case1-2, c: Case2-1, d: Case2-2, e: Case3-1, f: Case3-2(blue))

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 年間現状 2 倍のペースで堆砂した場合である。1978 年以前、2008 年以降の平均堆砂量の 2 倍が同様の堆砂形状で堆砂したと仮定し、H-V 曲線を作成した。

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。

6 ケースの H-V 曲線を Fig. 10 に示す。下から順に a: Case1-1 (赤) , b: Case1-2, c: Case2-1, d: Case2-2, e: Case3-1, f: Case3-2 (青) の H-V 曲線である。堆砂が進行するにつれ、有効貯水量が減少し、最低貯水位が上昇していることが分かる。

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、①Hydro-BEAMへの入力気象データと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での牧尾ダム流入量の割合

Hydro-BEAM の現在・将来気候における牧尾ダムについて、現在気候では 1993 年～2009 年、将来気候では 2093 年～2110 年まで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. 11) と月間積算融雪量 (Fig. 12) の比較図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図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を示した図(Fig. 13)を以下に載せる。

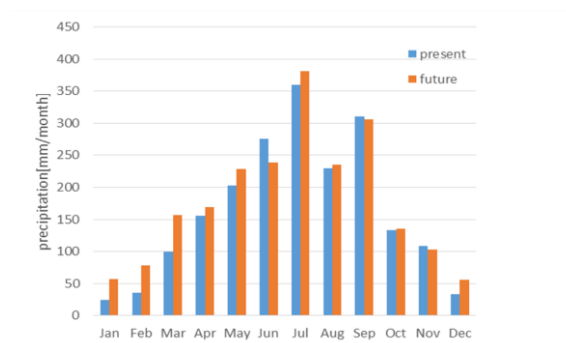


Fig. 11 Comparison of monthly total amount of rainfall in Kiso river system by SVAT model between present and future climate

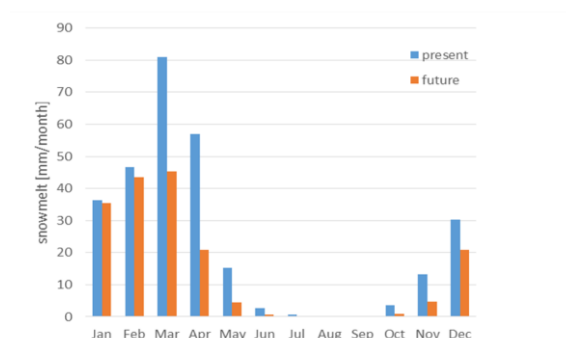


Fig. 12 Comparison of monthly total amount of snowmelt in Kiso river system by SVAT model between present and future climate

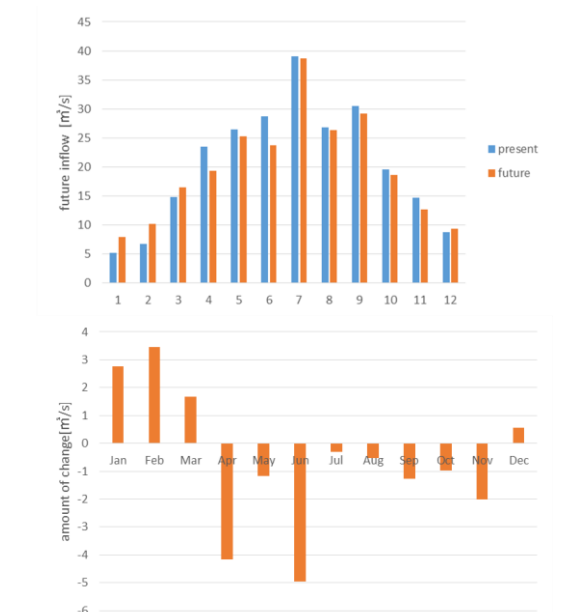


Fig.13 Monthly inflow in present and future climate calculated by Hydro-BEAM (top figure) and the ratio of future inflow to present inflow (under figure)

2.4 モデルによる計算結果の評価法

本研究では、牧尾ダム運用再現モデルの出力値である貯水位と有効放流量から、水力発電による利益と節水量から渇水による損失額を求め、これら2つを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、およびその利益の計算方法、②節水量、及びその損失額の計算方法、について述べる。

(1) 水力発電量、及びその利益の計算法

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。

牧尾ダムの水力発電量は以下の式で求められる。

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

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

(2) 節水量、及びその損失の計算法

夏期において、兼山ダム・今渡ダムの流入量が不足している際、牧尾ダムは放流を行う必要があるが、牧尾ダムの貯水量が不足している場合は本来の放流量から一部節水をして放流を行う。このときの本来の放流量から節水後の放流量の差分を節水量と定義する。

節水量 1 m³あたりの損失額は、牧尾ダムが供給する愛知用水の各用水（農業用水・工業用水・水道用水）の 1 m³あたりの損失額と全節水量に対する各用水の節水量の割合より以下の式で求める。

$$\begin{aligned} & \text{節水量 1 m}^3 \text{あたりの損失額(円)} \\ &= \sum \{ \text{各用水の 1 m}^3 \text{あたりの節水損失額 (円)} \\ & \times \text{全節水量に対する各用水の節水量の割合} \} \end{aligned} \quad (2.3)$$

各用水の 1 m³あたりの節水損失額は、どの場合も一定期間の平均年間便益額をその期間の平均年間用水量で割った値とした。

そこで、以下では各用水の年間便益額と年間使用量の算出方法を述べていく。

まず、農業用水の 1 m³あたり年間便益額は「愛知用水

二期地区の事業の効用に関する説明資料」を参考にして平成 21-24 年までの 5 年間の平均の作物生産効果額を農業用水による便益額とした。年間農業用水使用量は水資源機構愛知用水総合管理所からの提供データを参考にした。

工業用水に関しては、杉本による愛知用水の工業用水便益評価（杉本, 1996）を参考にし、工業用水の平均年間便益額を算出した。工業用水の年間使用量は「平成 25 年度 水資源機構営事業 愛知用水二期地区 事後評価基礎資料」を参照した。

水道用水の年間便益額は、愛知用水が水道用水の供給を行っている市町村の年間使用水量と全使用水量に対する愛知用水量の割合、供給単価のデータを用い以下の式で算出した。また、年間水道用水使用量のデータは各市町村のホームページを参考にした。

$$\begin{aligned} & \text{愛知用水による水道用水の年間便益額(円)} \\ &= \sum \{ \text{各市町村の年間水道使用水量(m}^3) \\ & \times \text{全使用水量に対する愛知用水供給量の割合} \\ & \times \text{供給単価 (円/m}^3) \} \end{aligned} \quad (2.4)$$

次に、愛知用水の節水量 1 m³に対する各用水の節水量の割合の計算方法について述べる。愛知用水の全供給量に対する各用水への供給量の割合は農業用水 20%、水道用水 26%、工業用水 54%である。また、各用水の節水率（供給量に対する節水量の割合）は基本的に農業用水 20%、水道用水 10%、工業用水 20%である。以上より、愛知用水の節水量 1 m³あたりの各用水の節水量の割合は愛知用水 1 m³あたりの各用水への使用割合と各用水の節水率を乗じることで算出できる。

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. 14)・年間無効放流量 (Fig. 15)・年間発電電力量 (Fig. 16) を算出した。それぞれの計算値と実測値を比較すると、現状のダムの運用を概ね再現していると判断される。

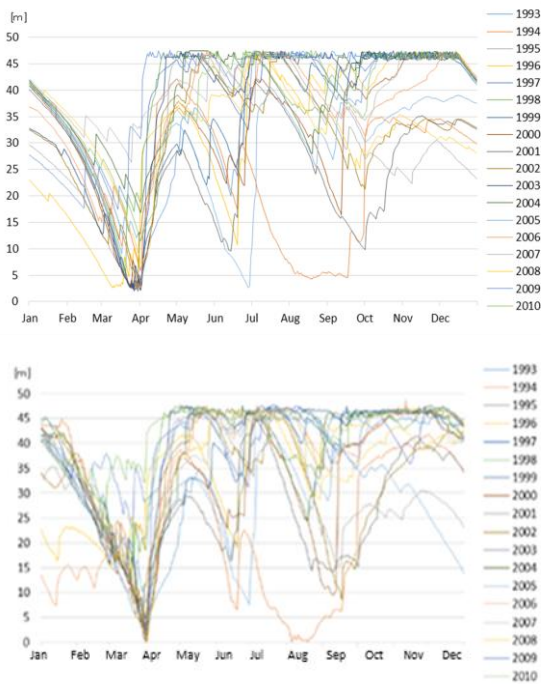


Fig. 14 Change of water level [model (top), observation (under)]

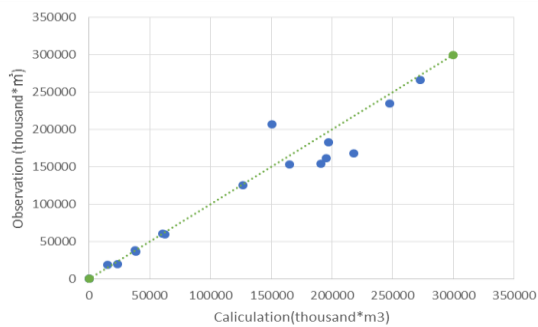


Fig. 15 Total amount of ineffective discharge (observation and calculation)

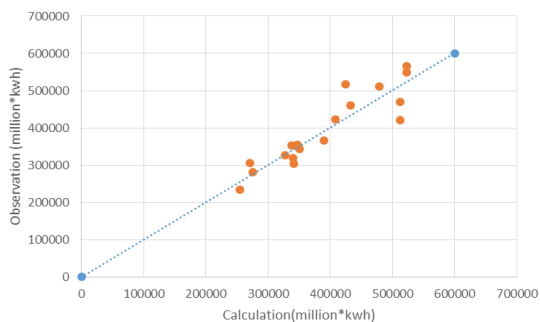
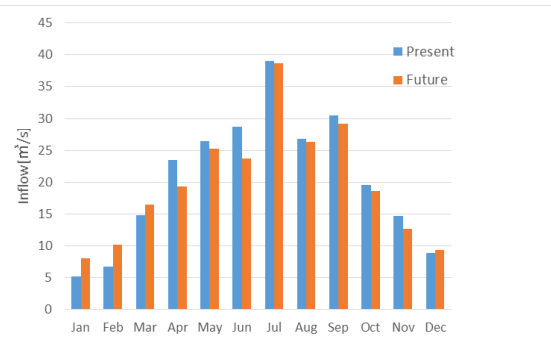


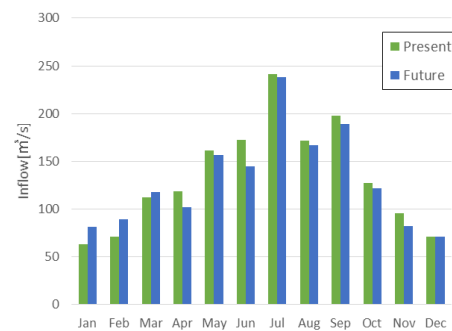
Fig. 16 Annual amount of hydroelectric power generation (observation and calculation)

3.2 牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量の変化

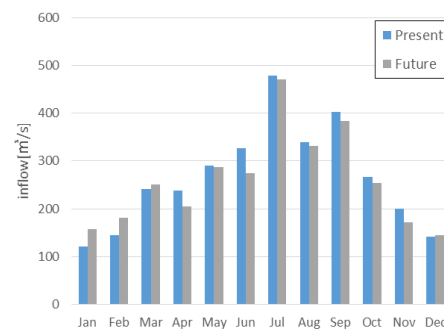
将来気候の牧尾ダム・兼山ダム・今渡ダムの流入量は、各月において Hydro-BEAM の将来値と現在値の比率を現在気候の実測値にかけて算出した。牧尾・兼山・今渡ダムの実測値と将来値の比較図は Fig. 17 に示す。また、Hydro-BEAM による牧尾ダムの流況変化を Fig. 18 に示す。将来気候の方は流況が厳しくなっていることが分かる。



a) Makio Dam



b) Kaneyama Dam



c) Imawatari Dam

Fig. 17 Monthly average inflow into Makio Dam, Kaneyama Dam and Imawatari Dam [observation and calculation (= observation × ratio)]

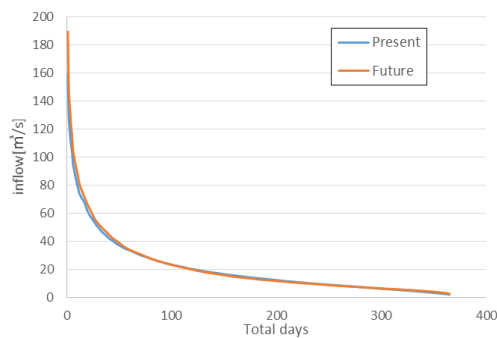


Fig. 18 Comparison of flow regime curves between present and future climate by Hydro-BEAM

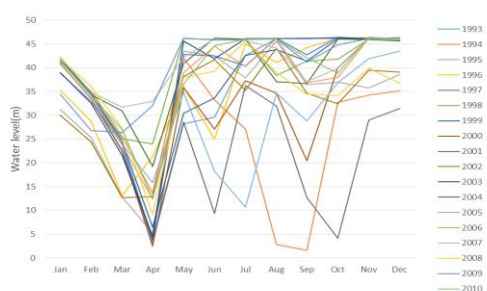
Fig. 17 a) について、時期別に見ていくと、1-3 月の期間では、Fig. 11 から分かるように温暖化により降雪量が減り降雨量が増えたため、牧尾ダムの流入量が増加している。このため、4 月は Fig. 12 から分かるように融雪出水の減少し、牧尾ダムの流入量も大きく減少している。これ以降の期間は全体的に流入量が減少している。

Fig. 17 b), c) より、兼山ダム・今渡ダム流入量も牧尾ダムと同様の変化を見せている。だが、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と比べると小さい。

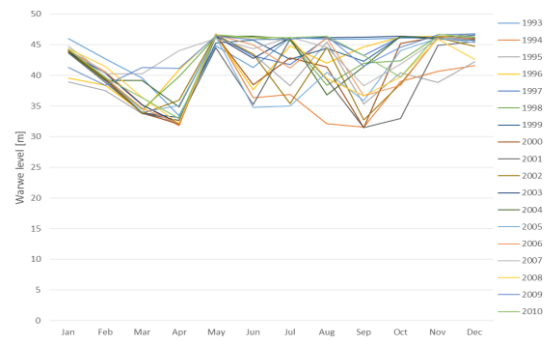
3.3 牧尾ダムモデルの運用結果

(1) 貯水位の変化

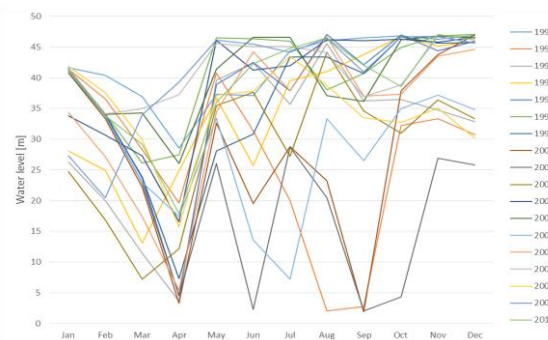
ダムモデルの運用結果の代表例を Fig. 19 に示す。また、堆砂進行なし(Case1-1)と堆砂進行あり(Case3-2)の牧尾ダム期間内月間平均貯水位(m)の比較図を Fig. 20 に、堆砂進行なしの場合の現在気候(Case1-1)と将来気候(Case1-1(future))の比較図を Fig. 21 に、堆砂進行ありの場合の現在気候(Case3-2)と将来気候(Case3-2(future))の比較図を Fig. 22 に示す。



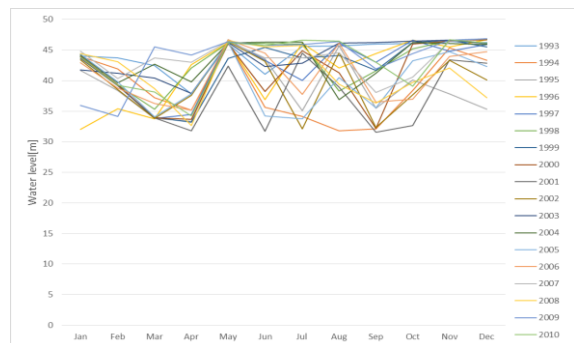
a) Present : Case1-1 (No Reservoir sediment progress)



b) Present : Case3-2 (Reservoir sediment progress)



c) Future : Case1-1 (No Reservoir sediment progress)



d) Future : Case3-2 (Reservoir sediment progress)

Fig. 19 Representative example of Makio Dam operation result in each situations

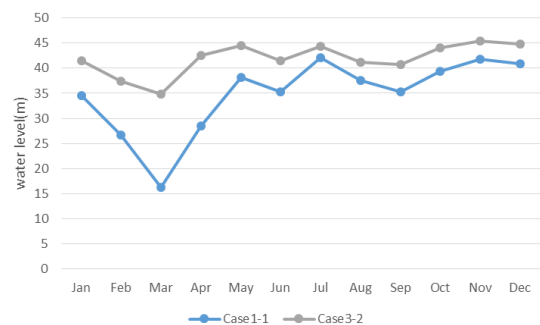


Fig. 20 Comparison of monthly average water level (m) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case3-2 (Present : Reservoir sediment progress)

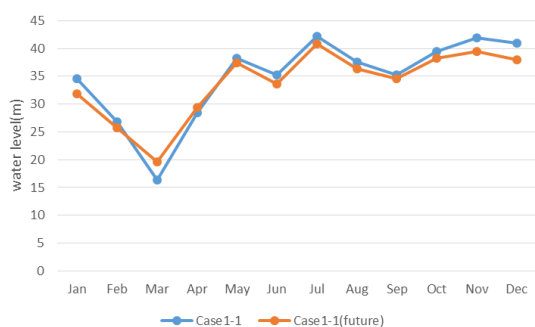


Fig. 21 Comparison of monthly average water level (m) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case1-1 (Future : No Reservoir sediment progress)

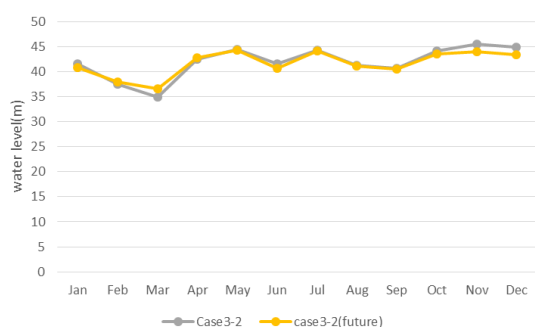


Fig. 22 Comparison of monthly average water level (m) in Makio Dam between Case3-2 (Present : Reservoir sediment progress) and Case3-2 (Future : Reservoir sediment progress)

堆砂影響に着目し、Fig. 20 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。これは節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. 21 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

近くまで落としきるのが、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、落とし切る事が難しくなったため、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 にまで落とし切れなかった影響が強く出ていることが原因であると考えられる。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。

Fig. 20 と Fig. 22 より堆砂・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) 有効放流量と無効放流量と水利用率

有効放流量と無効放流量、水利用率のそれぞれの計算結果は以下の Table 3, 4 に示す。3.3 (1)と同様に、堆砂進行の影響については堆砂進行なし(Case1-1)と堆砂進行あり(Case3-2)を比較することで、気候変動の影響については現在気候(Case1-1)と将来気候(Case1-1(future))を比較することで考察を行う。

(a) 有効放流量

堆砂進行・気候変動による有効放流量への影響は、計算期間内の月間平均有効放流量(m³)で評価する。

Table 3 Total effective and ineffective discharge (million[m³]) in 18 years in the each simulated situations

	effective	ineffective
Case1-1	271.7	82.7
Case1-1(future)	278.1	72.0
Case3-2	258.8	96.0
Case3-2(future)	265.4	84.7

Table 4 Water availability (= effective discharge / total discharge) in the each simulated situations

	Case1-1	Case3-2
present	76.7%	72.9%
future	79.4%	75.8%

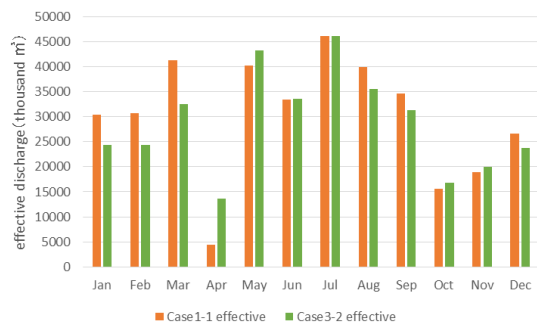


Fig. 23 Comparison of monthly average effective discharge (thousand [m³]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case3-2 (Present : Reservoir sediment progress)

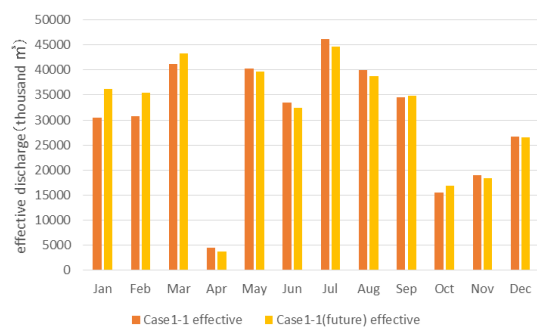


Fig. 24 Comparison of monthly average effective discharge (thousand [m³]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case1-1 (Future : No Reservoir sediment progress)

Fig. 23 より、堆砂の影響について見て行く。

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ることになるので、有効放流量は減少する。

4-6 月、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。

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。これは堆砂が一番ひどい状態になっても、今渡基準点の取水制限を補給する能力はあるということを示している。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. 24 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。現在気候と将来気候の変化率と有効貯水量の関係は、非線形関係が見られた。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からだと思われる。

12 月以外は有効貯水量の大小によって、この変化率の正負が変わることはなかった。

(b) 無効放流量

無効放流量も、同様に計算期間内の月間平均有効放流量(m³)で評価する。

Fig. 25 より、堆砂の影響からみていく。

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 6655 万 m³ でも全て貯水できなかったからと思われる。

温暖化の影響については、Fig. 26 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。しかし、温暖化すると夏期の流況が極端化し、大量流入が増える影響を将来気候の流入量の計算の際に考慮していないため、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思われる。

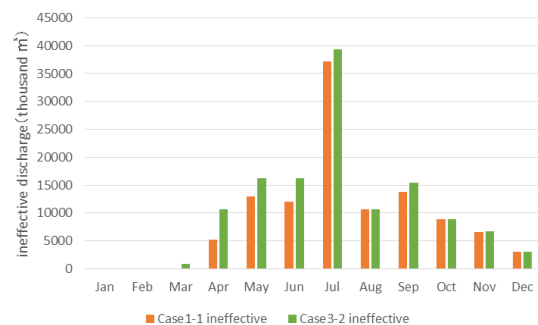


Fig. 25 Comparison of monthly average ineffective discharge (thousand [m³]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case3-2 (Present : Reservoir sediment progress)

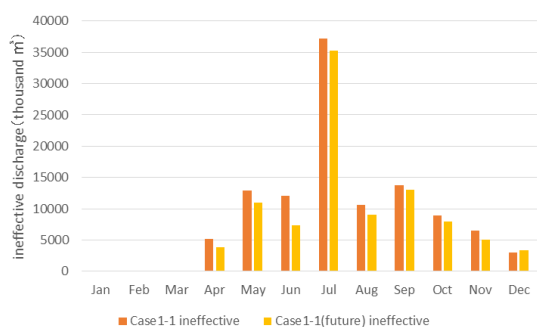


Fig. 26 Comparison of monthly average ineffective discharge (thousand [m³]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case1-1 (Future : No Reservoir sediment progress)

(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えてみる。

Table 4 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、年間で見ると有効・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。

だが、Table 5 より堆砂量増加により、期間内における牧尾の最大放流日数の割合が増えているため、放流の放流量の質は下がっていると思われる。

(3) 発電電力量

計算結果を以下の Table 6 に示す。

発電電力量は計算期間内の平均月間発電電力量と総発電電力量から評価する。

また、これまでと同様に、堆砂進行の影響については堆砂進行なし(Case1-1)と堆砂進行あり(Case3-2)を比較することで、気候変動の影響については現在気候(Case1-1)と将来気候(Case1-1(future))を比較することで考察を行う。

Table. 5 Comparison of percent of the times of max discharge in that of total discharge in term of reservoir sedimentation and climate change

	Case1-1	Case3-2
present	12.8%	14.7%
future	12.3%	14.0%

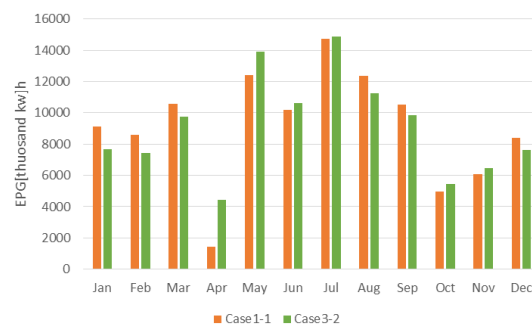


Fig. 27 Comparison of monthly hydroelectric power generation (million [kwh]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case3-2 (Present : Reservoir sediment progress)

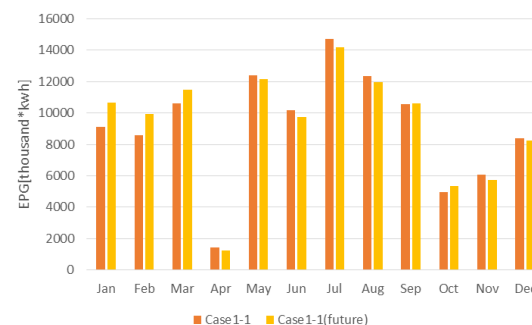


Fig. 28 Comparison of monthly average hydroelectric power generation (million [kwh]) in Makio Dam between Case1-1 (Present : No Reservoir sediment progress) and Case1-1 (Future : No Reservoir sediment progress)

Table 6 Total amount of hydroelectric power generation (million [kwh]) in 18 years in the each simulated situation

	Minimum effective height (m)	effective volume (thousand m³)	Hydroelectric power generation (million kwh)
Case1-1	94	66547	1968.8
Case1-1(future)			2002.6
Case1-2	94	61547	1972.6
Case1-2(future)			2002.7
Case2-1	107	54097	1981.6
Case2-1(future)			2007.6
Case2-2	112	49097	1984.4
Case2-2(future)			2014.3
Case3-1	120	41047	1990.0
Case3-1(future)			2017.0
Case3-2	123	35147	1967.4
Case3-2(future)			2013.1

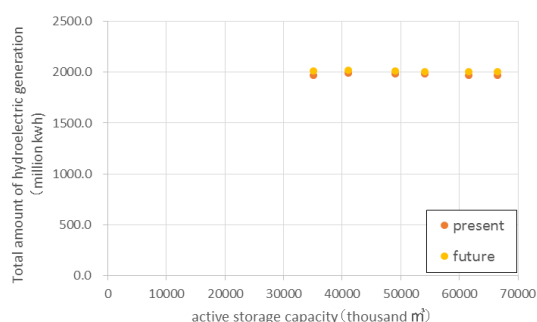


Fig. 29 Relation between active storage and total amount of hydroelectric power generation

Fig. 23 と Fig. 25 を、Fig. 24 と Fig. 26 をそれぞれ比較すると、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。これは発電電力計算式からも分かるように、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。

Fig. 29 より、総発電電力と有効貯水量の関係は線形ではなく非線形の関係が見られた。

これは発電電力量を決める放流量・貯水位の関係要素が多いからだと思われる。この二つは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。

(4) 節水量

節水量の定義は 2. で記述した。現在気候・将来気候それぞれにおける堆砂進行速度・掘削有無・気候の複合条件における 18 年間の節水量を以下に示す。

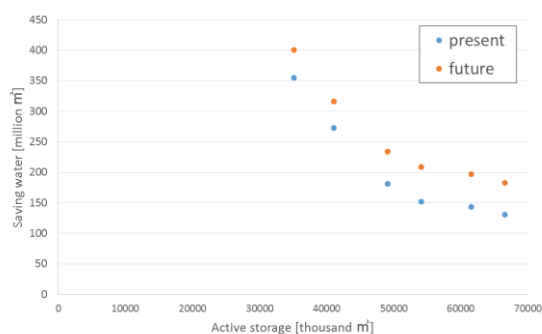


Fig. 30 Relation between active storage and saving water

Table 7 Comparison of percent of the times of saving discharge in that of total discharge in summer in term of reservoir sedimentation and climate change

	Case1-1	Case3-2
present	9.2%	30.9%
future	12.8%	34.2%

Fig. 30 より、有効貯水量 6000 万 m³以上のときは、有効貯水量が減ってもあまり節水率に変化は見られないが、有効貯水量 5000 万 m³弱(有効貯水量の減少率 30%)を境に節水量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、全体的に節水量が増えている。

Table 4 より堆砂進行によって水利利用率はあまり変化しなかったが、Table 7 より節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と言える。Table 5 から分かるように、有効貯水量減少に伴い、最大放流が行われている頻度は増えている。

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。

水力発電の、電力料金単価について、平成 17 年度から平成 22 年度の間の JEPX (日本卸電力取引所) での取引単価は平均 8.4 円/kWh であったが、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、節水量による損失額で評価していくことにする。

以上をもとに各気候条件・各堆砂条件における牧尾ダムの経済効果を評価した。

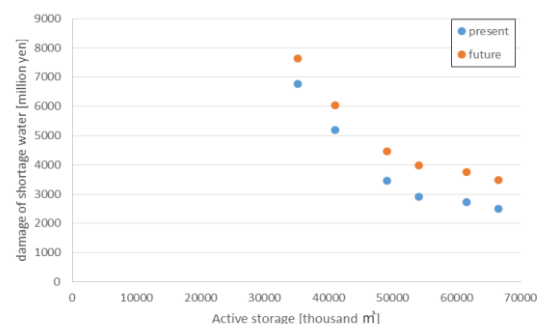


Fig. 31 Relation between active storage and damage of shortage water in present and future climate

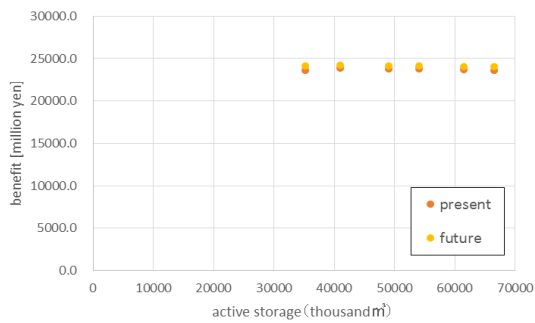


Fig. 32 Relation between active storage and amount of hydroelectric power generation benefit in present and future climate

Fig. 31 より、節水による被害総額は、現在気候・将来気候ともに、有効貯水量 5000 万 m^3 （有効貯水量の減少率 30%）を境に負の経済効果を出していることが分かる。一方で、Fig. 32 より、発電電力量が堆砂進行・気候変動に関わらず、ほとんど一定である。

4. 結論

今回の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このような影響を受けるかということであった。

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がなかったが、特に、夏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た。

この愛知用水への損失は、牧尾ダムの有効貯水量が 5000 万 m^3 （有効貯水量の減少率 30%）を切ってからであり、堆砂なしで現在気候のまま想定される 100 億円の損失額に対して、気候変動のみで 1.5 倍の 150 億円、これに堆砂進行が加わると堆砂進行 1 倍で損失額は 2 倍で（200 億円）に、堆砂進行 2 倍で、損失額は 3.5～4 倍（350 億～400 億円）に増大することが予想される。

また、この度の研究の問題点として主に以下の 3 つが挙げられる。

①今回、用いた将来気候の流入量は従来の研究から示されているように、年間流入量は現在気候の流入より減少したが、極端化を表現できなかったため、夏の有効放流量・無効放流量の値が実際の将来値とは大きな差が生まれてしまったであろうということ。

②掘削工事無しの H-V 曲線が実際の掘削工事する前の 1994 年の形状とは大きく違っているため、堆砂進行による最低有効落差の上昇は実際とは違っていると思わ

れるので、発電量の評価も違ったものになると思われること。

③牧尾ダムの下流補給は、今回は簡略して兼山地点・今渡地点のみであったが、実際はわずかではあるが東濃用水にも補給が行われており、また兼山地点・今渡地点の補給量についても、取水制限を切っているか否かで牧尾ダムの放流量を決定しており、その不足分を考慮した放流ではなかったこと、またこの地点の補給に関わっている二つの味噌川ダム・阿木川ダムの運用を考慮していなかったため、ここでも有効放流量や節水日数に影響が出てしまったと思われること。

ゆえに、今後の課題として、牧尾ダムの水資源管理を評価する際には、木曽川水系のダム運用を包括的・網羅的に評価する手法を考えること、また今回は堆砂および温暖化による牧尾ダムの利水機能に与える影響を考察するだけで終わってしまったため、その問題を解決するための牧尾ダムモデルを Hydro-BEAM の中に入れて木曽川水系の全体モデルを同時に動かせるように再構築することを今後考えていく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました、京都大学防災研究所水資源環境センター角哲也教授、竹門康弘准教授に心より感謝申し上げます。

また、流出解説モデルの扱い方等、適切な助言とご援助をいただきました愛媛大学農学部生物資源学科佐藤嘉展准教授に深く御礼申し上げます。

牧尾ダム浚渫事業に関する様々なデータや情報を独立行政法人水資源機構から提供いただきました。心より感謝の意を示します。

さらには、研究活動・研究室生活上の両方で大変お世話になりました角研究室の先輩方や同輩に深く感謝申し上げます。

最後に、有意義な大学生活を送らせて支えてくれた両親と家族に深く感謝申し上げます。

ご指導、ご協力いただいた方全員に深く感謝の意を示し、本論文を括る。

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。
- （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。
 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.pp. 203-210。
 鈴木 篁（2012）：水力発電の底力, ダム工学会 Vol.22
 No.2
 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-, 国際大ダム会議日本
 国内委員会会誌。
 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/>
 宮本博司, 鈴木徳行（2003）：貯水池の土砂管理に關す

る考察,土木学会論文集。

Bettina SCHAEFLI, Benoit HINGRAY and Andre MUSY
 （2007）:Climate change and hydropower production in the
 Swiss Alps-quantification of potential impacts and related
 modelling uncertainties , Hydrology&Earth System
 Sciences.

World Commission on Dams（2001）：DAMS AND
 DEVELOPMENT-A New Framework for Decision-
 making-, THE REPORT OF THE COMMISSION ON
 DAMS, Earthscan Publications Ltd

「平成 25 年度 水資源機構営事業 愛知用水二期地区
 事後評価基礎資料」：[http://www.maff.go.jp/j/study/dai3sya/
 pdf/7kisosiryoku2.pdf](http://www.maff.go.jp/j/study/dai3sya/pdf/7kisosiryoku2.pdf)

（論文受理日：2015 年 6 月 11 日）