

既設水利施設の運用変更による小水力発電の実現可能性の研究

Study on feasibility of small hydropower generation by changing operation of existing water use facilities

株式会社ドーコン河川環境部 ○正 員 工藤啓介 (Keisuke Kudo)

室蘭工業大学大学院 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

水のエネルギーを利用した出力 10,000kW 以下の小水力発電は、自然環境への負荷が少なく、小規模河川やダム・用水路等の既設水利施設を活用して安定的に発電することが可能であるため、気候変動対策における有力な再生可能エネルギーの一つとして注目されている。しかしながら、水利権取得の煩雑さ、採算性、長期間の維持管理の必要性、既設水利施設の運用ルールへの制約等がネックとなって普及が十分進んでいない状況にある。

こうした状況を踏まえ、本研究は、既設水利施設を活用した小水力発電の実現に向けた基礎研究として、流域水資源が豊富で水利用が盛んである積雪寒冷地の河川流域を対象に、既設水利施設の運用変更による小水力発電の可能性を活用水量や電力供給の観点から定量的に評価するとともに、小水力発電の実施に向けて必要となる方策を提案したものである。

2. 研究手法

2.1 研究対象箇所の概要

本研究では、図-1 に示す一級河川石狩川水系空知川（幹線流路延長 194.5km、流域面積 2,618km²）を対象とした¹⁾。空知川の水資源は周辺地域の発展に大きく寄与しており、発電、かんがい、上水道、工業等多目的に利用されている。空知川中上流部に位置する直轄多目的ダムの金山ダム、滝里ダムでは、下流に位置する既設水利施設への利水補給のほか、洪水調節、発電による周辺地域への電力供給を行っている。空知川下流部に位置する北海頭首工では、取水したかんがい用水を北海幹線用水路により石狩平野の広大な農地に供給している。

2.2 気象観測メッシュ値の推定

河川流量や既設水利施設の運用状況が適切に把握できる 2010 年 9 月～2015 年 8 月の 5 ヶ年を解析期間として、空知川流域周辺の気象観測データ及び解析雨量を採用し、1km×1km の気象観測メッシュ値（風速、気温、相対湿度、日照時間、全天日射量、降雪量、気圧）を推定した。

気象要素の内、風速については対数則、気温及び気圧については標高に対する変化率を考慮し、補正を行った。解析雨量については、冬期で過小評価されていることから、11 月～翌年 4 月を対象に、空知川流域内の降水量観測地点での観測値と解析雨量の差分をもとに補正した。

1km メッシュ値へのダウンスケーリングについては、空知川流域をメッシュ分割し、上記の補正処理を行った気象要素を基に Variogram を推定し、Variogram の相関関係の有無に応じて、Kriging 法、距離重み法のいずれかの空間補間法を使い分けた。



図-1 空知川流域図¹⁾

2.3 水循環モデルによる水文諸量の推定

本研究では、流域水循環に関する既往研究において降雪—積雪—融雪の水文過程の再現性及び水文諸量の妥当性が確認されている水循環モデル LoHAS (Long term Hydrologic Assessment model considering Snow process) を採用した。空知川流域の各メッシュに対して、標高、緯度経度、LAI、バルク輸送係数、蒸発効率、アルベド、受光係数比、降雪密度、積雪密度等の諸条件を設定し、LoHAS により推定した融雪量、蒸発散量をもとに水収支的に流出高を算出した。

流域水収支の検証地点は、地点上流に水利施設がなく水利用による河川流量への影響を受けない金山ダムとし、流出高に換算した金山ダム流入量観測値との比較により水文諸量の妥当性を検証した。

2.4 流出モデルによる河川流量の推定

空知川流域の地形から水の流れを模式化した 1km メッシュ流線網図を作成し、2.3 で推定した水文諸量を入力条件として、図-2 に示すタンクモデルを用いてメッシュ流出量を算出し、kinematic wave 式を変形した式を用いてメッシュ上端の流出量を下流端まで河道追跡し、河川流量（自然流量）を推定した。

河川流量の検証地点は 2.3 と同様、金山ダムとし、金山ダム流入量観測値との比較により推定結果の妥当性を検証した。

なお、タンクモデルのパラメータについては、臼谷ら²⁾ が設定された値をもとに、観測値に対する誤差が最小

となるようトライアル計算を行い、同定した。地質との関連性がある中間流出孔 a_3 及び地下水流出孔 a_4 については、国土数値情報から空知川流域の表層地質データを抽出し、図-2に示すとおり第三紀火山岩、第四紀火山岩、花崗岩、第三紀層、中生層、その他の6区分に分類し、白谷ら²⁾が提案した表層地質面積率に基づく式(1)及び式(2)の回帰式を用いて、メッシュ毎に設定した。

$$a_3 = 0.312 - 0.185g_1 - 0.261g_2 - 2.769g_3 - 0.334g_4 - 0.240g_5 \dots (1)$$

$$a_4 = -0.053 + 0.130g_1 + 0.075g_2 + 1.970g_3 + 0.106g_4 + 0.076g_5 \dots (2)$$

ここで、 g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 は第三紀火山岩、第四紀火山岩、花崗岩、第三紀層、中生層の面積率であり、メッシュに該当するいずれかの表層地質の面積率を100% (他の表層地質は0%) として与えた。

既設水利施設の実績取排水量及び水利権量を踏まえ、推定した河川流量から発電・かんがい用水の還元や上水道用水の消費等を反映した消費水量を差し引いて、現況流量を推定した。

2.5 既設水利施設における貯水位・流量の感度分析

本研究では、空知川流域に位置する既設水利施設の内、小水力発電に活用可能な水量・落差を有し、弾力的運用が実施可能である金山ダム、滝里ダム、北海頭首工の3施設を対象として、小水力発電の運用ケースを設定し、ダム貯水位等の感度分析を行った。

金山ダム、滝里ダムについては、発電・利水補給状況や確保水位等のダム諸元を踏まえ、表-1に示す小水力発電放流の運用ケースを設定し、小水力発電によるダム貯水位の変化を検証した。

ダム流入量・放流量・貯水位の観測値をもとに H-V 曲線を構築し、2.4 で推定した現況流量 (ダム流入量) とダム放流量の収支から想定されるダム貯水量を与え、ダム貯水位の感度分析を行った。なお、現状の洪水調節・発電・利水補給能力を確保しつつ小水力発電を行うものとして、表-1に示す小水力発電の運用水位の範囲を設定し、運用水位の下限値を下回る場合は小水力発電を実施しないものとした。

また、北海頭首工については、上記のダム運用に伴う当該地点の河川流量を算出し、当該地点下流で空知川の維持流量 $Q=13.0\text{m}^3/\text{s}$ を満足しつつ、小水力発電に活用可能なかんがい水利権 $Q=33.458\text{m}^3/\text{s}$ (取水期間終了の8月31日時点)の取水期間をどこまで延伸できるか、感度分析を行った。

2.6 運用変更による小水力発電可能量の試算

2.5の解析結果をもとに、NEDO³⁾の試算でも使用されている式(3)及び式(4)を用いて、金山ダム、滝里ダム、北海頭首工における小水力発電可能量を試算した。

$$P = 9.8 \times Q \times He \times \eta \dots (3)$$

$$E = 8,760 \times P \times \xi \dots (4)$$

ここで、 P は出力 (kW) , Q は最大使用水量 (m^3/s) , He は有効落差 (m) , η は水車・発電機の総合効率

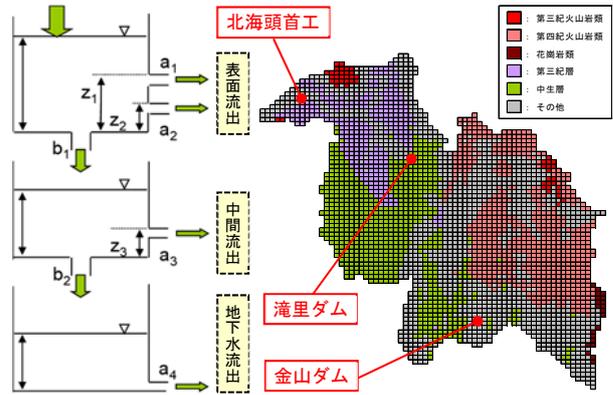


図-2 タンクモデル及び空知川流域の表層地質分布

表-1 運用感度分析ケース

No.	金山ダム				滝里ダム			
	小水力発電放流量	運用水位		小水力発電放流量	運用水位			
		上限値	下限値		上限値	下限値		
Case-1	0.0m ³ /s			0.0m ³ /s				
Case-2	0.0m ³ /s	<6/15~10/31>	最低水位+2m	1.0m ³ /s	<1/1~12/31>	常時満水位+1m	最低水位+2m	
Case-3	1.0m ³ /s	制限水位+1m		3.0m ³ /s				
Case-4	3.0m ³ /s	<11/1~6/14>		5.0m ³ /s				
Case-5	5.0m ³ /s	常時満水位		8.0m ³ /s				

(=72~80%) , E は発電電力量 (kWh) , E は発電電力量 (kWh) , ξ は設備利用率 (=95.4%) である。

有効落差については、2.5 で設定した運用水位の下限値と利水放流管敷高の差分として、金山ダムで 22.0m、滝里ダムで 21.4m とした。北海頭首工については、北海道開発局札幌開発建設部の既往検討報告書⁵⁾から引用し、有効落差を 2.5m とした。

また、既往調査結果をもとに家庭一世帯あたりの年間電気使用量を 5,161kWh として、小水力発電可能量を除く小水力発電による電力供給世帯数を推定し、小水力発電による電力供給能力を定量的に評価した。

3. 研究結果及び考察

3.1 水循環モデルによる水文諸量の推定

金山ダム流域水収支の推定結果を表-2 に示す。金山ダム流域の水文諸量は、2010年9月~2015年8月の5ヶ年平均で、降雨量 1,054mm/年、降雪水量 681mm/年、総蒸発散量 484mm/年となり、白谷ら⁶⁾による推定値と同程度であり、LoHAS により推定した蒸発散量は妥当であるといえる。

また、流域水収支による年間流出高は 5ヶ年平均で 1,251mm/年となり、金山ダム流入量流出高の5ヶ年平均値 1,258mm/年に対する誤差は極めて小さく、流域水収支は妥当であるといえる。

3.2 流出モデルによる河川流量の推定

金山ダム流入量の再現計算結果を図-3 に示す。2010年9月~2015年8月の5ヶ年月別平均値で見ると、概ね金山ダム流入量の季節変動を再現できており、本研究で採用した解析手法は妥当であるといえる。

なお、4月で誤差が大きいが、冬期間の解析雨量の精度が良好ではなく、降雪水量が過少評価されたため融雪出水が少なくなっていることが要因として考えられる。

今後、冬期間における解析雨量の補正手法の検証を行うことで、ダム流入量の再現精度向上を図る。

表-2 金山ダム流域水収支
(2010年9月～2015年8月の5ヶ年平均)

降雨量 (mm/年) ①	降雪水量 (mm/年) ②	総蒸発散量 (mm/年) ③	水収支 (mm/年) ④=①+②-③	流出高 (mm/年) ⑤	誤差 (mm/年) ⑥=④-⑤	誤差率 ⑦=⑥/⑤
1,054	681	484	1,251	1,258	-7	-0.6%

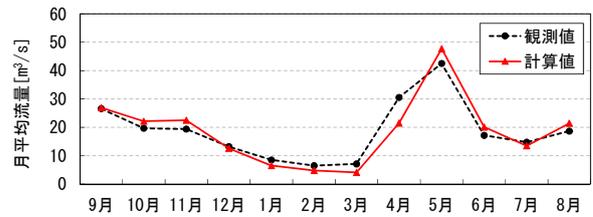


図-3 金山ダム流入量の再現計算結果
(2010年9月～2015年8月の月別平均)

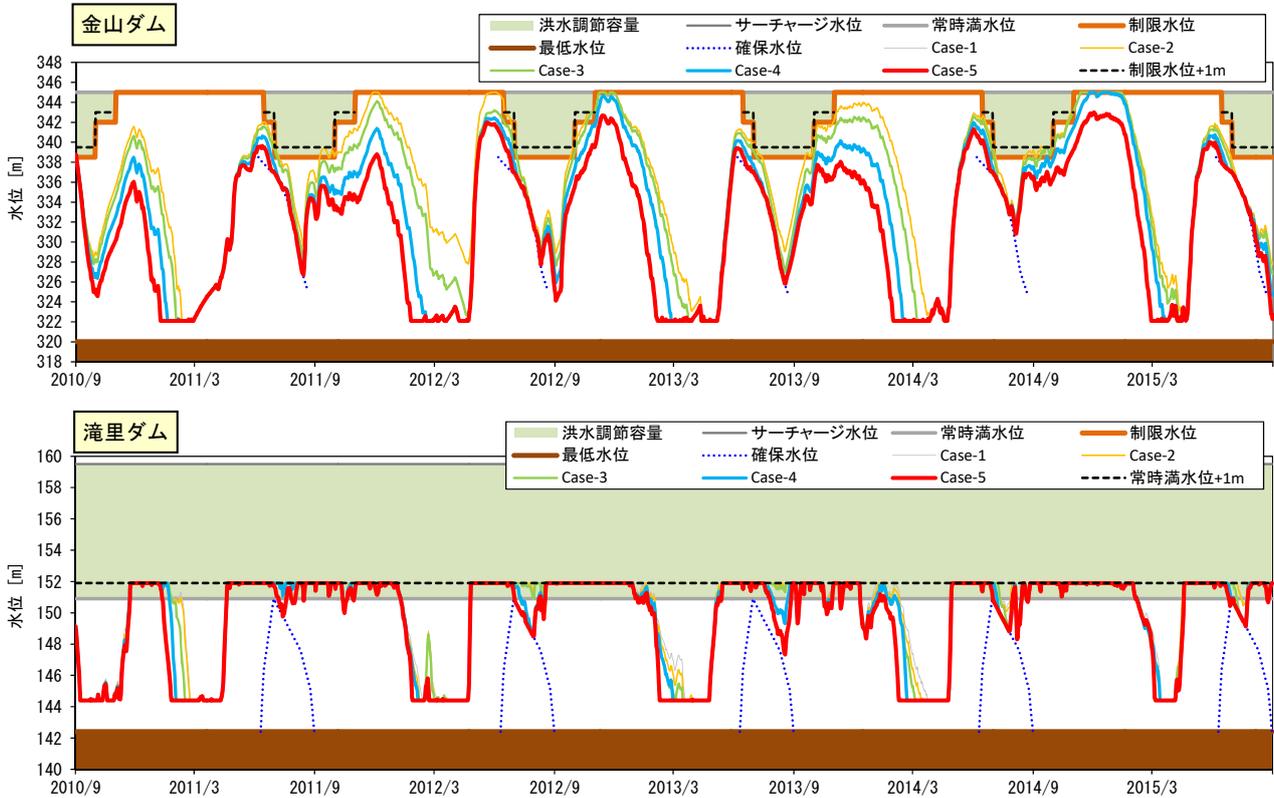


図-4 金山ダム・滝里ダム貯水位の感度分析結果 (2010年9月～2015年8月)

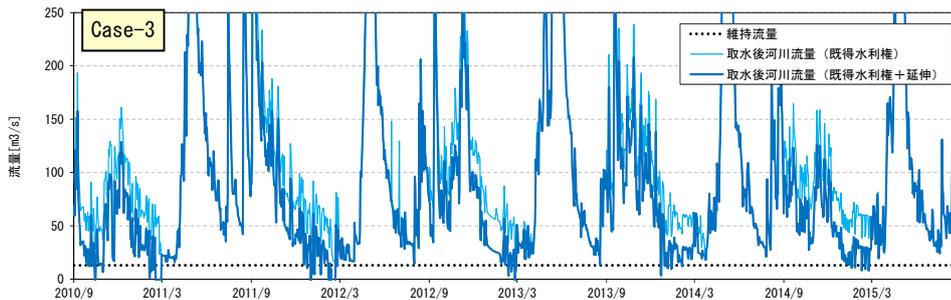


図-5 北海頭首工直下流流量の感度分析結果
(2010年9月～2015年8月: Case-3)

表-3 かんがい水利権の
延伸期間 (5ヶ年平均)

No.	既得水利権 取水期間 (期間日数)	延伸期間 (延伸日数)
Case-1	5/1～8/31 (123日)	9/1～3/3 (183日)
Case-2		9/1～3/2 (182日)
Case-3		9/1～2/27 (179日)
Case-4		9/1～2/20 (172日)
Case-5		9/1～2/8 (160日)

3.3 既設水利施設における貯水位・流量の感度分析

小水力発電の運用変更に対する金山ダム、滝里ダムの貯水位の感度分析結果を図-5に示す。金山ダム、滝里ダムにおいて北海頭首工かんがい水利権の延伸に対する運用を行う場合、1～4月の冬期から融雪期にかけてダム貯水位が大きく低下し、小水力発電放流量が最大となるCase-5では約2ヶ月最低水位付近でダム貯水位を維持せざるを得ない状況となることが把握された。

また、小水力発電の運用ケースにおける北海頭首工直下流の空知川河川流量の感度分析結果を図-6、各運用ケースにおける北海頭首工かんがい水利権の延伸期間の試算結果を表-3に示す。金山ダム、滝里ダムの運用変更に伴う放流量の増加に伴い、北海頭首工では160～180日程度取水期間を延伸可能であるものの、直下流の河川流量は大きく減少し、降雨量の少ない冬期に空知川の維持流量を下回る頻度が増大することが把握された。

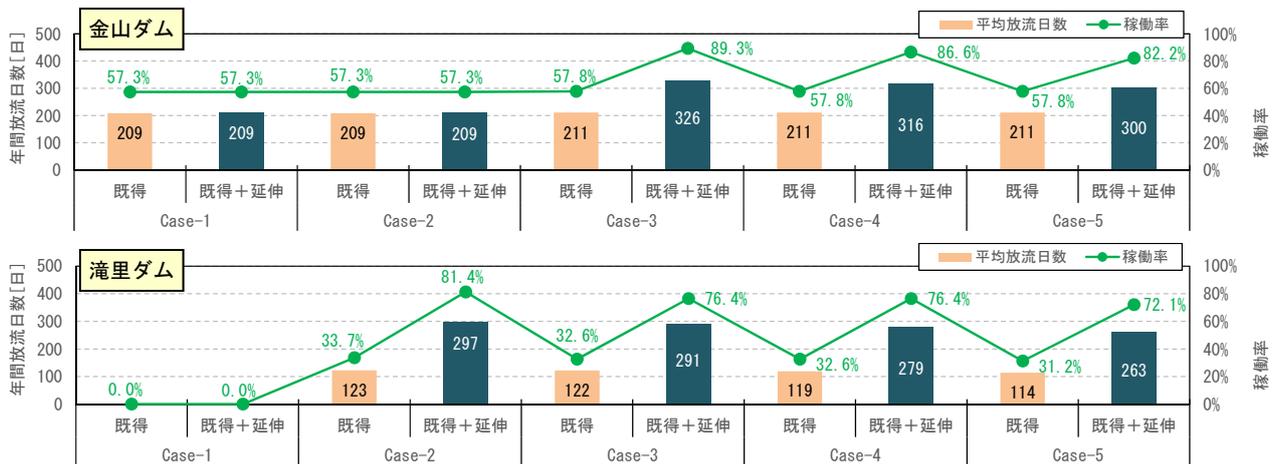


図-6 金山ダム、滝里ダムにおける小水力発電の年間放流日数と稼働率 (2010年9月～2015年8月の5ヶ年平均)

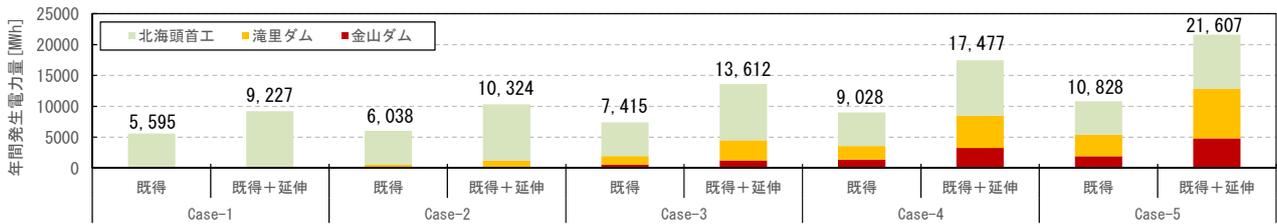


図-7 運用変更による小水力発電可能量 (2010年9月～2015年8月の5ヶ年平均)

前記の試算結果より、小水力発電放流量の運用次第で金山ダム、滝里ダムにおいて既得利水や空知川の維持流量のために必要となるダム貯水容量の確保が困難となることが明らかとなった。小水力発電の実現に向けて、ダム貯水容量や空知川維持流量を確保しながら発電放流を行う運用ルールを構築するとともに、ダム堤体の嵩上げによる容量増量や洪水調節容量の弾力的管理・運用の実施が重要であると考えられる。

3.4 運用変更による発電可能量の試算

3.3 の感度分析に基づく金山ダム、滝里ダムにおける小水力発電の年間放流日数（小水力放流量がゼロ以上となる日数）と稼働率の試算結果を図-6 に示す。北海頭首工かんがい水利権の延伸に対する運用を行う場合、小水力発電放流量を増加させると年間放流日数が減少し、年間の稼働率は7～8割程度となることが把握された。

また、小水力発電の運用ケースにおける金山ダム、滝里ダム、北海頭首工での小水力発電可能量の試算結果を図-7 に示す。北海頭首工かんがい水利権の延伸により運用ケース Case-3 では、3施設の合計で年間13,612MWhの電力を生み出すことが可能となり、発生電力量の1世帯あたりの消費電力5,161kWhで換算すると、約2,600世帯分の電力供給量に相当することが把握された。

小水力発電の実現に向けて、年間稼働率と周辺地域の電力需要を見極めながら採算性の向上につながる運用ルールを構築する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究より得られた結果を以下に示す。

- 1) 空知川流域全体の長期的な水循環とダム運用を融合した解析モデルを構築し、気象やダム運用の仮想条件に対応した発電可能量の試算が可能となった。

- 2) 北海頭首工かんがい水利権の延伸に対する運用を行う場合、小水力発電に活用可能な水量が増加し、芦別市の総世帯数の約3割に相当する需要電力のポテンシャルを有することを明らかにした。

今後、気象水文特性の予測に係る各種情報を解析モデルの入力条件として与えることにより、リアルタイムでの河川流量・発電量の把握・予測とこれに対応した柔軟なダム運用が可能となり、気象観測データに基づく効率的な水資源管理・発電の実現につながるものと考えられる。

謝辞：本研究は、平成30年度ロバスト農林水産工学研究プログラム（国立大学法人北海道大学）の助成を受けたものである。また、本研究にあたり、北海道開発局札幌開発建設部より空知川流域の各種データ・資料をご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：石狩川水系空知川河川整備計画【大臣管理区間】[変更]，2018。
- 2) 臼谷友秀，中津川誠，松岡直基：流域貯留量推定のためのモデルパラメータの一般化に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.70，No.4，I_355-I_360，2014。
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：マイクロ水力発電導入ガイドブック，2003。
- 4) 北海道開発局札幌開発建設部：平成22年度千歳川外低水循環検討業務報告書，2011。
- 5) 一般財団法人エネルギーセンター：2008年調査，2008。
- 6) 臼谷友秀，中津川誠，工藤啓介：石狩川流域における水循環の定量化について，水工学論文集第49巻，pp.229-234，2005。