

日本域表面流向マップに降雨・積雪情報を導入した流出計算手法の提案

A Proposal of Runoff Calculation Method for Japan Flow Direction Map Incorporating Rainfall and Snowfall Information

室蘭工業大学 ○学生員 今井優希 (Yuki Imai)
 室蘭工業大学 学生員 片寄陸 (Riku Katayose)
 室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地域では、融雪水は水資源であるとともに治水上のリスクをもたらす。さらに、気候変動による大雨の激甚化や融雪期の大雨などが懸念されている。北海道のダムは夏期の大雨だけでなく、春期の雪解け水による流入量の増大も考慮しなければならない。このように、今後の気候変動によってダムの治水機能を上回るほどの流入量の増加も考えられるため、対応策の検討が必要である。

本研究では、札幌市を貫流する豊平川の治水の要である豊平峡ダムを対象とし、気候変動による豪雨が懸念されている夏期、雪解け水による流入量増加が懸念される融雪期の流出計算を行う。この際、「日本域表面流向マップ」から取得した流向データ、「解析雨量」、「解析積雪深」を用いて大雨のみならず、融雪流出も計算することで、通年の流出計算を可能とすることが目的である。ダムの流入量を計算するための流出計算には「分布型流出モデル」を使用する。分布型流出モデルは、流出現象を物理的に扱うために流域を細分し、各メッシュに降雨・融雪情報を与えるため、それらの時空間分布を反映した流出予測が可能となる¹⁾。分布型流出モデルに関してはこれまでも多くの研究事例がある。近年は「全球から市町村スケールのシームレスな洪水予測」²⁾といった例のように実装ベースの研究に発展してきている。しかし、リアルタイムの降雨・積雪情報を用いた通年の流出計算について研究された事例はみられない。図-1 に流出計算のフローを示す。

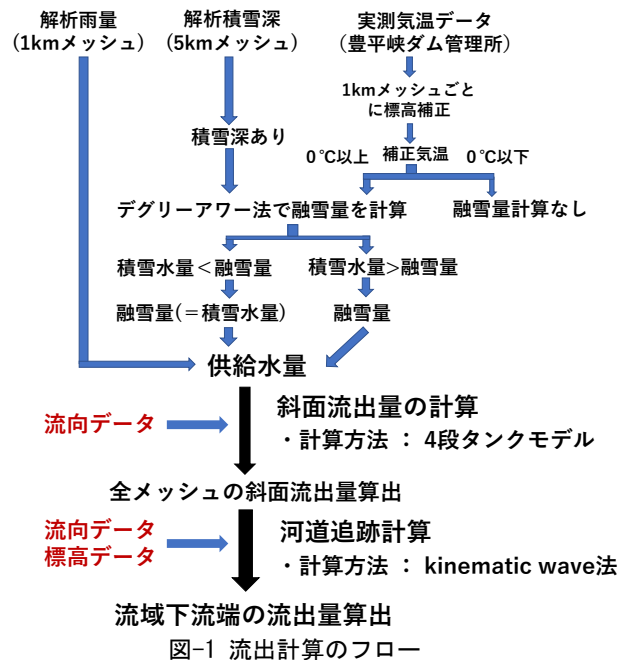


図-1 流出計算のフロー

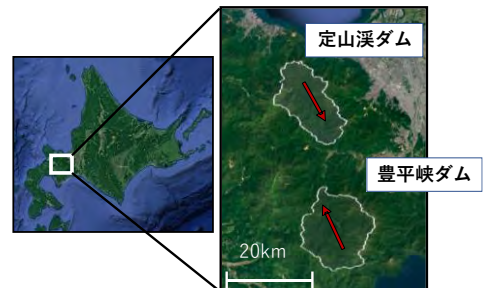


図-2 豊平峡ダム流域の位置図

2. 研究方法

2.1 研究対象

豊平峡ダムは、1972年に国土交通省（当時北海道開発庁）北海道開発局によって建設されたアーチ式の多目的ダムであり、札幌市南部に位置している。表-1 に豊平峡ダムの諸元、図-2 に流域の位置を示す。豊平峡ダムはもう一つの定山溪ダムと合わせて豊平川の治水及び上水道の供給、発電という重要な役割を担っている。

2.2 対象事例

再現計算の対象とする事例は、融雪期の豊平峡ダムの最大流入量が、所定の気象水文データ、解析雨量、解析積雪深のデータが揃っている過去3年で最も大きかった2020年5月の事例とした。この事例では融雪期である5/5 0:00にピーク流入量 63m³/sを記録している。

また、夏期の事例として西島ら³⁾が豊平峡ダムの最大流入量が大きい事例として2014年9月の事例を再現計

表-1 豊平峡ダムの緒元

型式	アーチ式コンクリートダム	
水系河川	石狩川水系豊平川	
堤高	m	102.5
堤頂長	m	305.0
流域面積	km ²	134.0
総貯水容量	m ³	47,100,000
有効貯水容量	m ³	37,100,000
サーチャージ水位	m	474.8
第1期洪水貯留準備水位	m	458.7
第2期洪水貯留準備水位	m	469.0
最低水位	m	437.6

表-2 使用するデータ

データ	メッシュサイズ	出典
流向データ	3secメッシュ	日本域表面流向マップ
標高データ	3secメッシュ	日本域表面流向マップ
解析雨量	1kmメッシュ	気象庁
解析積雪深	5kmメッシュ	気象庁
実測気温データ		国土交通省北海道開発局 豊平峡ダム管理所

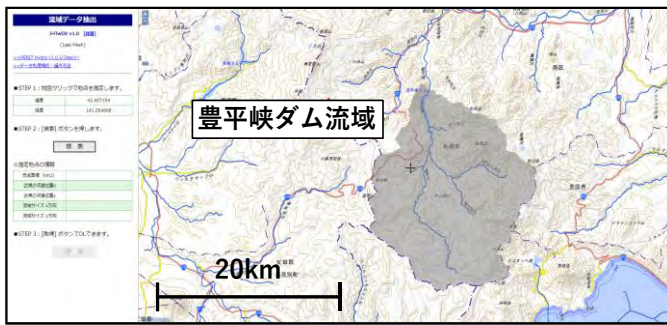


図-3 日本域表面流向マップ上における流域の抽出画面

算の対象としているため、本研究でも再現の可能性を検証するために選定した。この事例では、北海道で初めて大雨特別警報が発令され、9/11 5:00 にピーク流入量 $489\text{m}^3/\text{s}$ を記録している。

2. 3 必要なデータ

本研究で使用するデータを表-2 に示し、解説する。

2. 3. 1 流向データと標高データ

分布型流出モデルを適用するために河道網が必要であり、そのために、DIR データ(流向データ)、DEM データ(標高データ)の地形データが必要である。本計算に用いた流域の地形・流向データは、日本域表面流向マップ/v1.0 [20 Nov, 2018] ⁴⁾ ⁵⁾ から豊平峡ダム流域のデータを抽出 ⁶⁾ したものである。日本全域を 3 秒メッシュの空間解像度で公開しているため、より詳細な地形の特徴をとらえることができる。図-3 には日本域表面流向マップから豊平峡ダム流域周辺を抽出している例を示す。

2. 3. 2 解析積雪深

解析積雪深は ⁷⁾、積雪深の実況が 1 時間ごとに約 5km 四方の時空間解像度で提供されるもので、2019 年 11 月に配信が始まった。解析積雪深を利用すると、積雪計による観測が行われていない地域を含めた積雪の画的な状況の把握ができ、水資源管理や防災に役立てることが可能である。図-4 に入手した解析積雪深の一例を示す。

2. 3. 3 解析雨量、実測気温データ

解析雨量は ⁸⁾、気象庁・国土交通省が保有する気象レーダの観測データに加え、気象庁・国土交通省・地方自治体が保有する全国の雨量計のデータと組み合わせて、2006 年からは 30 分間隔ごとに 1km 四方の時空間解像度で配信されている。また、実測気温データは豊平峡ダム管理支所から提供されたものを用いる。

2. 4 気温データの補正

融雪量の計算を行う際、1km メッシュごとに気温の補正が必要である。豊平峡ダム流域を 1km ごとに分割した際のそれぞれの標高と、気温の実測値がある豊平峡ダム管理所の標高が異なるため、標高差を求め、気温減率を用いて気温データを補正する。以下に手順を述べる。

- 1) 豊平峡ダム流域を 1km メッシュごとに分割するために ArcGis より豊平峡ダム流域のデータを抽出する。
- 2) 国土数値情報 ⁹⁾ からダムコードを確認し、ダムコードから各メッシュの標高を確認する。
- 3) ダム管理所(標高 485m)と各メッシュの標高差を求め、それらに気温減率 $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ を乗じて気温補正をす

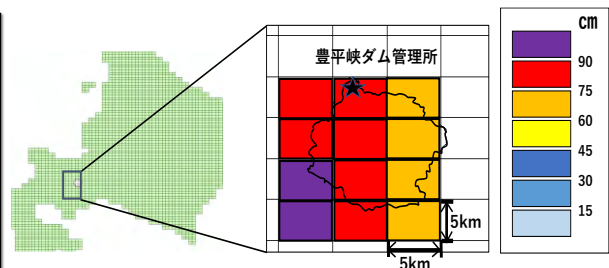


図-4 豊平峡ダム流域を対象に取得した解析積雪深の例(2021年2月1日1時)と豊平峡ダム管理所の位置

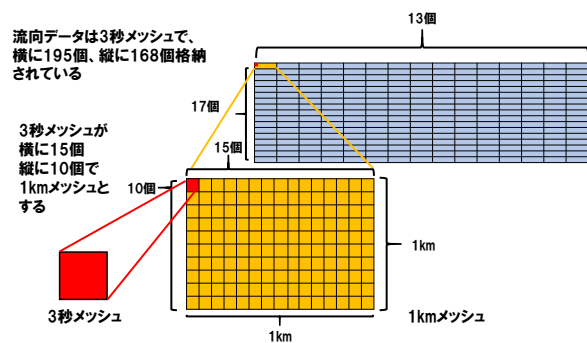


図-5 各メッシュデータの関係

る。図-4 に豊平峡ダム管理所の位置を示す。

2. 5 メッシュデータの整理

使用する流向データは 3 秒メッシュで、豊平峡ダム流域においては東西方向に 195 個、南北方向に 168 個格納されているが、解析雨量は 1km メッシュであり、気温データも 1km メッシュごとに標高補正しているため、メッシュデータを整合させる必要がある。また、解析積雪深で雪の有無を判定する際にもメッシュを整合させる必要がある。図-5 に各メッシュデータの関係を示す。

2. 6 融雪量、積雪水量の推定

1 時間ごとの気温のうち、 0°C を上回った度数に相当し、解析積雪深で積雪の有無を判定した場合、融雪量を次式のデグリーアワー法から算出する。

$$m = k_{dhf} T_{dh} \quad (1)$$

ここで、 m は融雪量(mm/h)、 T_{dh} は所定時刻 t での 0°C 以上の度数(deg)、 k_{dhf} はデグリーアワーファクター(mm/deg/h)であり、中津川ら ¹⁰⁾ による 0.15 mm/deg/h を採用した、また、積雪がある時期は中津川ら ¹¹⁾ を参考に底面融雪量を $1 \text{ mm/d}(=0.042\text{mm/h})$ として融雪量に加算した。また、積雪の深さを $H(\text{mm})$ 、積雪の比重 s を 0.5 として、積雪水量 $M(\text{mm})$ は次式で与える。

$$M = sH \quad (2)$$

2. 7 流出量の計算方法

流出量の計算は、入力値である融雪量・雨量データを流向データに対応したメッシュ単位で行う。各メッシュで流出量の計算を行い、これらと合算しつつ河道追跡し、流域末端で算出したものが全流出量となる。以下に斜面流出モデルと河道追跡モデルについて説明する。

1) 斜面流出モデル

各メッシュの斜面流出量は、図-6 に示す 4 段タンクモデルを用いる。使用したパラメータは表-3 に示す。モデルパラメータは中津川らの報告¹²⁾を基に、表面流出 q_0 と地下水流出 q_4 を増加させるように微修正を加えた値を使用し、パラメータ $S_1 \sim S_4$ に初期水位を与える。なお、パラメータは全てのメッシュで同じ値を用いた。融雪量を求める際、(1)式に示すデグリーアワー法で算出する。気温が 0°C 以上の場合、(1)式の結果をそのまま用い、積雪水量が融雪量より少ない場合は積雪水量を融雪量とする。また、気温が 0°C 以下では、融雪量を0とする。

2) 河道追跡モデル

算出した流出量から河道追跡モデルを用いて流域末端における流出量を算出する。河道追跡には、kinematic wave 式を変形した次式を差分化して計算を行う^{13), 14)}。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i^{-0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここで、 Q は流量(m^3/s)、 i は勾配、 n は粗度係数。 B は川幅(m)を表す。勾配 i は、流向データから計算対象メッシュとその流下側メッシュの最低標高を抽出し標高差から決定する。粗度係数 n は0.05とし、川幅 B (m)は山口ら¹⁵⁾を参考に次式で推定した。

$$B = 3.476A^{0.435} \quad (4)$$

ここで、 A は流域面積(km^2)である。

3. 結果と考察

3.1 2020年融雪期の再現結果

2020年融雪期における流入量の計算結果、及びマスカーブを図-7 に示す。結果を見ると、計算値は全体的に過小評価をしていることがわかる。そこでマスカーブ

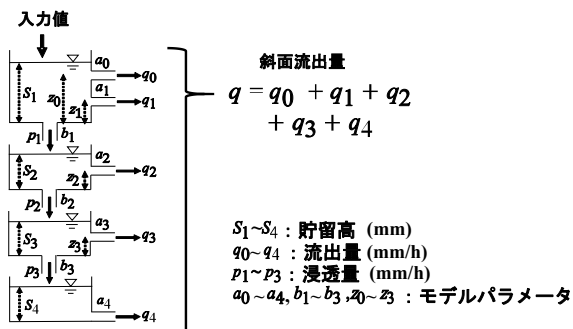


図-6 4段タンクモデルの模式図

表-3 豊平峡ダム流域の4段タンクモデルパラメータ

係数	採用値	係数	採用値
a_0	1.7	z_0	20
a_1	0.2	z_1	0
a_2	0.07	z_2	1
a_3	0.04	z_3	0
a_4	0.01	S_1	0
b_1	1.1	S_2	0
b_2	1	S_3	0
b_3	0.9	S_4	5

によって水収支を確認した。その結果、実測流量に比べて、「融雪量+雨量」の値が小さいことが判明した。

「融雪量+雨量」の値を実測流量に近づけるために、デグリーアワーファクターの値を $0.4(\text{mm}/\text{deg}/\text{h})$ とし、パラメータを表-4 に示すように再調整した。

3.2 再調整パラメータによる再現結果

上記による再調整パラメータを用いて行った2014年と2020年の再現計算結果を図-8 に示す。2020年融雪期事例の流入量の実測値と計算値を比較すると、計算値は概ね実測を再現していることがわかる。計算値が実測値より過大となっているが、ピーク値までは立ち上がりの遅れもなく、防災上の観点からみて安全側の結果を与えているといえる。2014年夏期事例においても計算での再現性が確認できた。また、水収支の確認もそれぞれ行い、図-9 に示す。計算値は実測値に比べ過大だが、ピーク値は再現できており、安全側の結果を与えている。また、精度評価を行うために Nash-Sutcliffe 係数(以下、 NS)、実測ピーク時平均流出高相対誤差(以下 J_{Pe})を用いて行った。結果を表-5 に示す。パラメータ調整前は、 NS 、 J_{Pe} ともに精度が悪いが、パラメータ調整後は、 NS はよいとは言えないが、 J_{Pe} の精度が良いことからピーク時をとらえた安全側の予測が可能であることが確認できた。

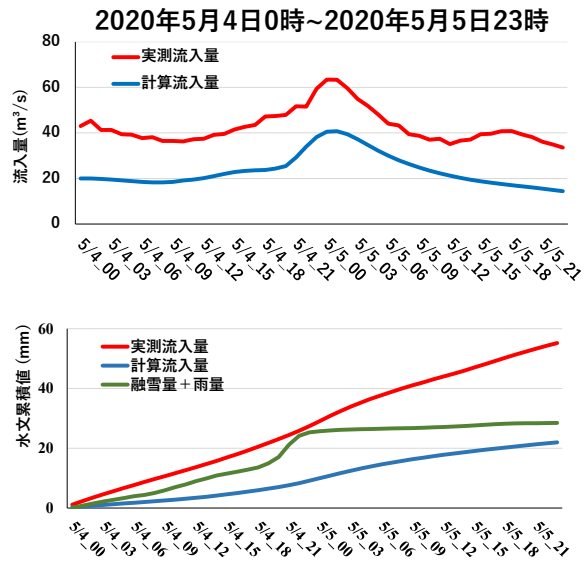


図-7 2020年の流入量の再現とマスカーブ

表-4 豊平峡ダム流域の調整後の4段タンクモデルパラメータ

係数	採用値	係数	採用値
a_0	1.3	z_0	20
a_1	0.2	z_1	0
a_2	0.07	z_2	1
a_3	0.04	z_3	0
a_4	0.055	S_1	0
b_1	1.1	S_2	0
b_2	1	S_3	0
b_3	0.9	S_4	5

※朱字は変更された値

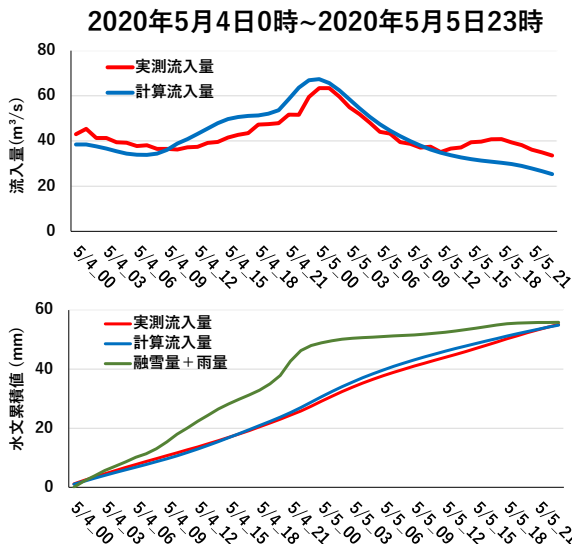


図-8 パラメータによる再調整後の2020年の流入量の再現結果, マスカープ

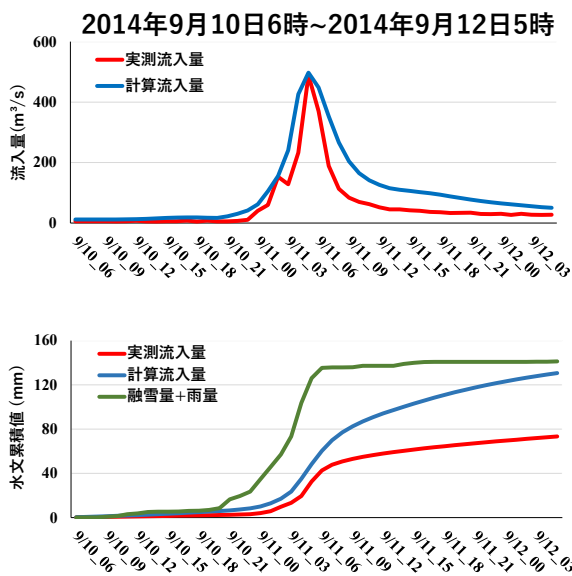


図-9 パラメータによる再調整後の2014年の流入量の再現結果, マスカープ

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 過去に発生した夏期出水の事例と、融雪期出水の事例を検証し、通年でダム流入量の再現が適切に行えることを確認した。
- 2) 今回の結果によると、融雪量の推算が過小評価されているようにみえたため、融雪に関わるパラメータの調整が必要であることが示された。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（課題番号 22H01594, FY20222025）の助成を受けたものである。また、国土交通省北海道開発局豊平峡ダム管理支所には、貴重なデータを提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 安部和雄ら：分布型モデルの広域的適用, 水工学論

表-5 精度評価の結果

2020年	NS	-5.91
パラメータによる再調整前	J_{Pe}	0.36
2014年	NS	0.54
パラメータによる再調整後	J_{Pe}	-0.02
2020年	NS	0.37
パラメータによる再調整後	J_{Pe}	-0.06

文集, 第46巻, 2002.

- 2) 東京大学：全球から市町村スケールのシームレスな洪水予測, https://www.u-tokyo.ac.jp/adm/fsi/ja/project/s/sdgs/projects_00129.html(アクセス日: 2022/12/10)
- 3) 西島星蓮ら：気候変動による豊平峡ダムの異常洪水時防災操作の生起頻度について, 土木学会北海道支部 論文報告集, 第77号, B-09, 2021.
- 4) 山崎大ら：日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75巻5号, I_163-I_168 2018.
- 5) Dai Yamazaki *et al.*: MERIT Hydro: A highresolution global hydrography map based on latest topography datasets, Water Resources Research, vol.55, pp.5053-5073, 2019.
- 6) RRI on iRIC Examples, https://iric.org/uc/uc_products/rri_examples/manuals/index.html>https://iric.org/uc/uc_products/rri_examples/manuals/index.html (アクセス日: 2022/12/08)
- 7) 国土交通省 気象庁：解析積雪深・解析降雪量降雪短時間予報, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/snow.html> (アクセス日: 2022/12/08)
- 8) 国土交通省 気象庁：解析雨量, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseki.html> (アクセス日: 2022/12/08)
- 9) 国土交通省 国土数値情報ダウンロードサービス, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html> (アクセス日: 2022/12/08)
- 10) 中津川誠ら：水文情報の総合化による雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 11) 中津川誠ら：積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 12) 中津川誠ら：流出成分の分離によるタンクモデル定数の最適化, 水文・水資源会研究発表会要旨集, 1996.
- 13) 品川守ら：洪水ハイドログラフ 形成過程と治水対策の効果に関する研究, 水文・水資源学会第5巻3号, 1992.
- 14) 土木学会：水理公式集, 例題プログラム集, 平成13年度版, pp.16, 2002.
- 15) 山口甲ら：豊平川の生産土砂について：土木学会北海道支部論文報告集第55号(B), pp.268-271, 1998.