

気候変動に伴う定山溪ダムの異常洪水時防災操作実施頻度の推定

Research on frequency of disaster prevention operations during abnormal floods for Jozankei Dam due to climate change

室蘭工業大学 ○学生員 近藤一平 (Ippei Kondo)
 室蘭工業大学 学生員 西島星蓮 (Seren Nishijima)
 室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、ダムの異常洪水時防災操作を行う例が増えている¹⁾²⁾。一方、北海道のような積雪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。融雪期の多目的ダムでは利水を確保する一方で出水時の洪水調節も必要であり、相反する貯水位管理が要求される。さらに、将来は気候変動による融雪期の早まりや季節外れの大雨が懸念されており³⁾、現に融雪期に大雨に見舞われ、異常洪水時防災操作を行った過年度の事例もあり⁴⁾、洪水調節のあり方を検証する必要がある。そのような中、治水と利水の両立を図る多目的ダム、さらには利水ダムでも事前放流のような被害軽減を図るダム操作の改善が行われようとしている。

本研究では、先行研究として西島ら⁵⁾が豊平峡ダムを対象とした評価手法を、北部にある定山溪ダムにも適用し、異常洪水時防災操作の実施頻度を推定する。定山溪ダムは、豊平峡ダムと合わせて大都市札幌の治水及び利水の要となるダムであり、異常洪水に備えて両ダムの機能の評価や向上が必要である。具体的には、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change)⁶⁾の降水量と気温データを用いて、ダムの治水機能を検証する。

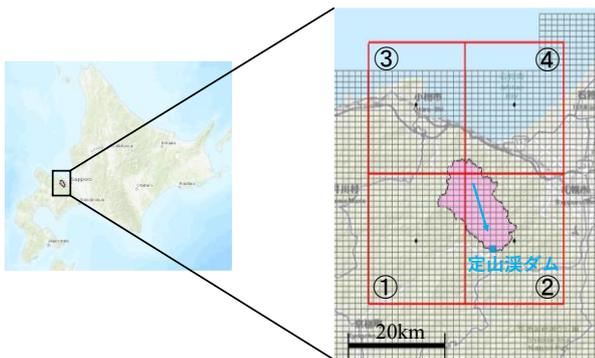


図-1 定山溪ダム流域の位置図と d4PDF, 1kmDS のメッシュ位置

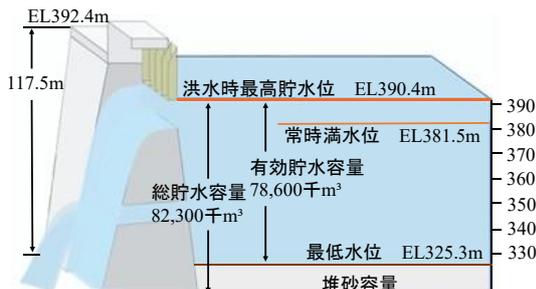


図-2 定山溪ダムの容量配分

2. 研究方法

2.1 対象地域

定山溪ダムは、1989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重力式の構造を有し、オールサーチャージ方式で運用される多目的ダムであり、札幌市南部に位置している。図-1に流域の位置、図-2に容量配分を示す。定山溪ダムはもう一つの豊平峡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 d4PDF

d4PDFは、全世界および日本周辺でそれぞれ 60 km, 20 kmメッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力である。実験は全球実験と日本周辺の領域実験に大別され、過去の気候状態と、将来において全球平均気温が 4℃上昇した気候状態でモデル実験が行われた。データは過去 3,000 年分(過去 60 年×50 メンバー、以下、現在気候)と 4℃上昇時の 5,400 年分(将来 60 年×90 メンバー、以下、将来気候)がある。

本研究では、気候変動により降雨が増大した場合、現在のダム操作でどの程度の調節効果を発揮するか、また治水容量を使い切ってしまうかを検証するため、現在気候と将来気候の 20 kmダウンスケーリング降水量データ(以下、d4PDF降水量データ)を定山溪ダム流域を対象に抽出した。さらに融雪期を含む通年の計算を行うため、各気候 20 kmダウンスケーリング気温データ(以下、d4PDF気温データ)をダム流域を対象に抽出した。データは4メッシュで定山溪ダム流域全体をカバーしている。

2.3 d4PDF 気温データの補正

抽出した d4PDF 気温データはダム流域の標高と異なるため、気温の補正が必要である。そこで、上田ら⁷⁾が

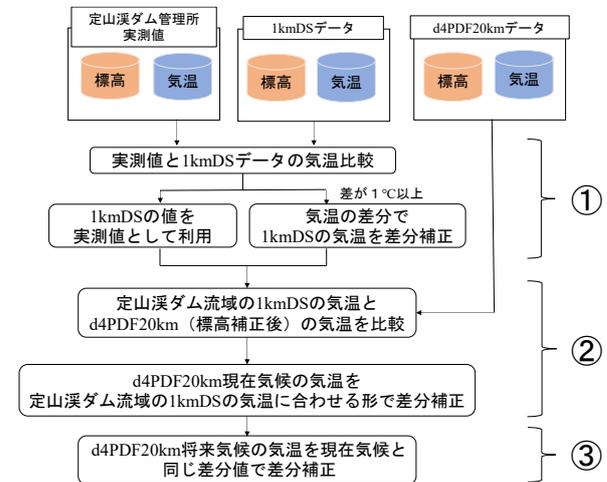


図-3 気温補正のフロー

表-1 1kmDS と実測値の比較

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
気温差	0.72	0.29	0.84	0.22	0.86	0.64	0.82	0.22	1.09	1.05	0.65	0.65

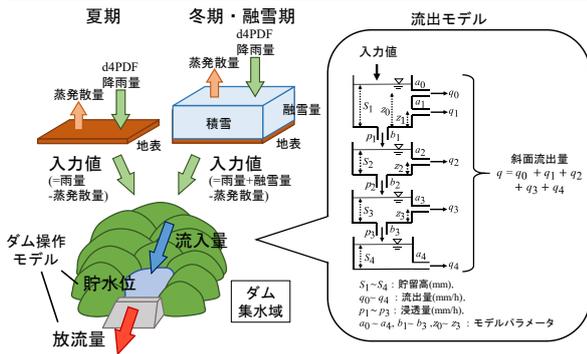


図-4 計算過程の模式図

作成した MRI-NHRCM20 (気象研究所領域気候予測モデル) を 1 km スケールに統計的ダウンスケーリングしたデータ (以下, 1 kmDS) を用いた検証と補正を行う。実測値を用いて補正を施しているため、実測の近似値として扱える。データ数は 1 kmDS の現在気候 20 年分と将来気候 60 年分, ダム管理所の観測情報 14 年分 (2007 年～ 2020 年), d4PDF 気温データの現在気候 3,000 年分と将来気候 5,400 年分である。図-1 に d4PDF と 1kmDS のメッシュ位置, 図-3 に気温補正のフローを示し, 以下にそれによって手順を説明する。

- ① ダム管理所 (標高 393m) の位置に対応する 1kmDS (標高 425m) を気温減率 0.65 °C/100 m で標高補正し, それをダム管理所の実測気温と月平均値と比較し, 両者の差が 1°C 以下であった場合, 1kmDS を実測値に代替できると判断する。比較の結果を表-1 に示す。ここで 9, 10 月の差は 1°C 以上であるが, ほぼ一致しているとみなし, 実測値に近似できると判断した。
- ② 定山溪ダム流域をカバーしている4つのメッシュそれぞれの平均標高 (図-1のメッシュ①: 444 m, メッシュ②: 391 m, メッシュ③: 183 m, メッシュ④: 143 m) の d4PDF 現在気候の気温データを 1kmDS 流域平均標高 (722m) に標高補正する。両者を月平均値で比較し, 結果として得られた差分値は 1°C 以上だったので月ごとに d4PDF 気温データを補正した。
- ③ 将来気候の気温も現在気候と同じ差分値で補正する。

2. 4 d4PDF 降水量データ補正

通年の d4PDF 降水量データから, 融雪量や蒸発散量を推算する必要がある。以下に具体的な降水量, 降雪量, 積雪量, 融雪量, 蒸発散量の推定方法を示す。図-4 には計算過程の模式図を示す。

2. 4. 1 降水量, 降雨量, 積雪量の推定

d4PDF 降水量データから, 補正した気温データが 0 °C を上回ったものを降雨量, 0 °C 以下を降雪量と判別し, 降雪量は積雪量として積算していく。

2. 4. 2 融雪量の推定

各時間毎の気温のうち 0 °C を上回った度数に相当する融雪量を次式のデグリーアワー法から算出する。

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

表-2 定山溪ダム流域の4段タンクモデルパラメータ

係数	SCE-UA法の最適値	採用値	係数	SCE-UA法の最適値	採用値
a_0	0.21	0.31	b_2	0.052	0.042
a_1	0.36	0.54	b_3	0.014	0.014
a_2	0.13	0.22	z_0	68.9	68.9
a_3	0.034	0.12	z_1	38.1	38.1
a_4	0.0015	0.007	z_2	34.9	34.9
b_1	0.38	0.38	z_3	32.4	32.4

ここで, m は融雪量 (mm/h), T_{dh} は所定時刻 t でのデグリーアワー (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⁸⁾による 0.15 mm/deg/h を採用した。なお, 積雪がなくなった時点で融雪量は 0 とした。計算期間は前年 9/1 から 12/31 までの 16 ヶ月である。用いる d4PDF データは前年 9 月～ 8 月までのデータセットとなっており, 当年 9 月～ 12 月は翌年に相当するデータセットを用いて計算を続ける。

2. 4. 3 蒸発散量の推定

定山溪ダム流域の蒸発散量は, ソーンズウェイト法⁹⁾で推算した。月蒸発散量を対象月の日数×24 時間で除し, 1 時間毎の蒸発散量を 4 段タンクの最上段から引く。

2. 5 ダム流入量・放流量・貯水位の計算条件

本研究では, 補正した d4PDF 降水量データからダム諸量を計算するために, 1) 4 段タンクモデル¹⁰⁾を用いたダム流入量の計算, 2) ダム流入量からダム操作規則に基づくダム貯水位と放流量の計算, という手順に従う。以下に具体的な計算方法を整理する。

2. 5. 1 4 段タンクモデルダムによる流入量の計算

1 年を通し通常時から洪水時まで長期的な流出量を推算するために, 流出モデルには 4 段タンクモデルを採用した。モデルの模式図は図-4 に示すとおり, 12 個のパラメータを持つタンクで表わし, 流出を再現する。上記 12 個のモデルパラメータの最適値を得るため Duan ら¹¹⁾による SCE-UA 法を適用する。実際には 2011/8/26 1:00～ 2011/9/16 0:00 の降雨量から SCE-UA 法でパラメータを最適化し, 再現性が向上するようにパラメータを変更した。採用したパラメータを表-2 に示す。

2. 5. 2 ダム貯水位と放流量の計算

定山溪ダムにおける貯水位と放流量の計算はダム操作規則に基づき行う。なお, d4PDF 降水量データは 1 時間毎に設定するため, 流入量も 1 時間毎に計算され, 放流操作も 1 時間毎にしか設定できない。よって流入量の検知と操作に大きなタイムラグができてしまう。現実には流入量を検知してから数分単位で操作を追随させていくが, 計算の時間解像度を細かくできないため, 便宜上検知と操作の時間遅れはないという仮想的な条件で考える。

計算開始の 1/1 1:00 の貯水位の初期値は, 常時満水位の 381.5 m とした。以下に貯水位・放流量の計算手順を 1)～4) に示す。

1) 貯水位の設定

ダム貯水位は, 貯留量を豊平峡ダムの $H-V$ 式に当てはめて求める。 $H-V$ 式は国土交通省北海道開発局札幌開発建設部河川整備保全課に提供していただいた。

2) 放流量の計算

放流量 Q_{out} (m³/s) は, 2.5.1 で得られる流入量 Q_{in} (m³/s)

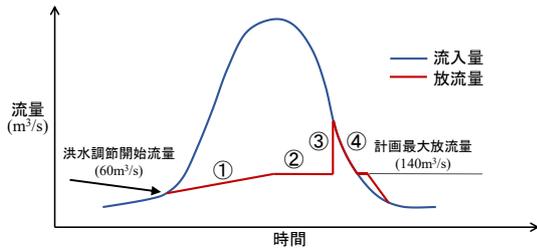


図-5 放流操作の模式図

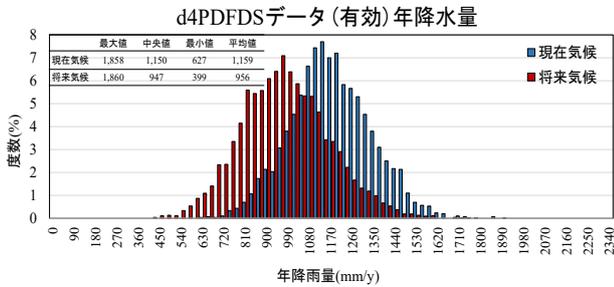


図-6 d4PDF(有効)降水量ヒストグラム

と貯水位 $H(m)$ の関係から、定山溪ダムの操作規則（以下、操作規則）をもとに計算を行う。図-5の模式図（以下の①～④は図中の番号に対応）をもとに放流量の計算を行う。

- ① $Q_{in} > 60 \text{ m}^3/\text{s}$ で貯水位が 381.5 m を超えた際、定率操作 $[Q_{out} = 0.15(Q_{in} - 60) + 60]$ を行う。
- ② Q_{in} が設計最大洪水量 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えた後は定量操作 ($Q_{out} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$) を行う。なお、 Q_{in} が $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下でピークアウトした場合はその時点の放流量で $Q_{in} = Q_{out}$ となるまで定量放流する。
- ③ H がただし書き操作水位 388.8 m を超え 390.4 m （サーチャージ水位）を超えることが予測される場合、異常洪水時防災操作を開始する。この時の放流はただし書き操作要領に基づく。
- ④ 放流量が流入量と一致した後は $Q_{in} = Q_{out}$ で水位を維持する。 $Q_{in} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回った場合、洪水量 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ となるまで $Q_{in} = Q_{out}$ で操作を続けるが、連続洪水への対応を考慮し、貯水位の速やかな低下を図るため、貯水位が 381.5 m に回復するまで $Q_{out} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ （計画最大放流量）を放流し、 381.5 m を下回った後は、 $Q_{in} = Q_{out}$ （水位維持）とする。

なお、異常洪水時防災操作に伴い 390.4 m を超えた場合はサーチャージ超過水位とみなし、ダムの貯水容量を超えたとしてシミュレーションは終了とした。（計算上は、 $Q_{in} = Q_{out}$ とする。）

3) 貯留量の更新

2.5.1で求めた流入量と上記2)で求めた放流量から、以下の(2)式、(3)式より時刻 $t + \Delta t$ での貯留量を更新する。

$$\Delta V = (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \Delta V \quad (3)$$

ここで、 ΔV :貯留量の変化量(m^3)、 $Q_{in}(t)$:時刻 t での流入量(m^3/s)、 $Q_{out}(t)$:時刻 t での放流量(m^3/s)、 Δt :時間間隔(h)、 $V(t + \Delta t)$:時刻 $t + \Delta t$ での貯水量(m^3)、 $V(t)$:時刻 t での貯水量(m^3)である。上式で貯留量を更新後、 $H-V$ 式より貯水位に変換する。

表-3 各気候における降雨量・降雪量・降水量の内訳

	降雨量(mm)	降雪量(mm)	降水量(mm)
現在気候	716 (48%)	765 (52%)	1,481
将来気候	890 (64%)	509 (36%)	1,399

※ ()は降水量に占める割合

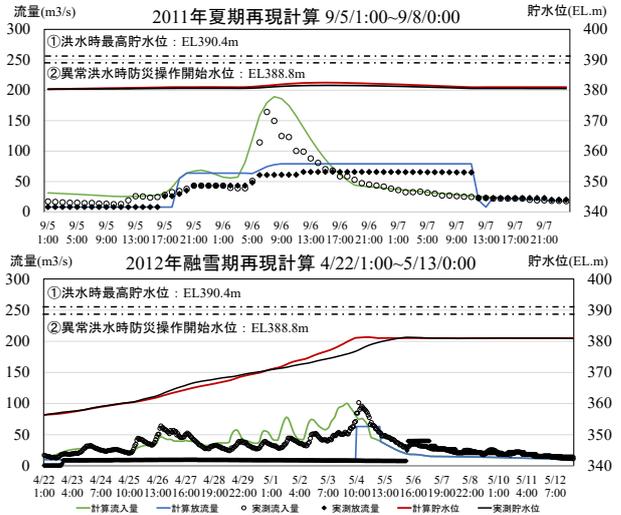


図-7 既往夏期出水事例(2011/9/5~6)と融雪出水事例

(2012/4/22~5/13)の流入量・放流量・貯水位の再現

4) 期間全体の貯水位、放流量の計算

上記1)~3)の手順を繰り返してd4PDFで設定されている1年毎の貯水位、放流量を計算する。貯水位が 388.8 m に達した場合は異常洪水時防災操作を実施、 390.4 m に達した場合はサーチャージ水位を超過したとし、その頻度を推定した。

3. 結果と考察

3.1 有効年降雨量の推定と降雨量の内訳

年降水量から、年蒸発散量を引いた(有効)年降水量のヒストグラムを図-6に示す。d4PDF降水量データから、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ を上回るものを降雨量、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下を降雪量として全アンサンブルの平均をとった値を表-3に示す。年降水量の総量はほとんど変化しないが、現在気候では降雪量52%、降雨量48%に対し、将来気候では降雪量36%、降雨量64%と降雨量の割合が16%ほど増えることがわかる。このことから、自然のダムとしての積雪の貯留効果が失われ、洪水リスクだけでなく利水リスクの増大も懸念される。

3.2 2011年夏期と2012年融雪期の再現計算結果

再現計算の対象は、定山溪ダムの夏期における流入量が過去19年間(2000年~2019年)で最大であった2011年の事例と、融雪期における流入量が最大であった2012年の事例である。2011年は、台風12号の影響による豪雨で9/6 7:00に最大流入量 $164 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録した。2012年は融雪水が一気にダムに流入し、5/4 12:00に最大流入量 $102 \text{ m}^3/\text{s}$ を記録した。各年で流入量が最大であった期間の2011/9/5~8と2012/4/22~5/13における流入量の計算結果、及び操作規則にもとづく貯水位と放流量の計算結果を図-7に示す。

2011年夏期事例の流入量・放流量・貯水位の実測値と

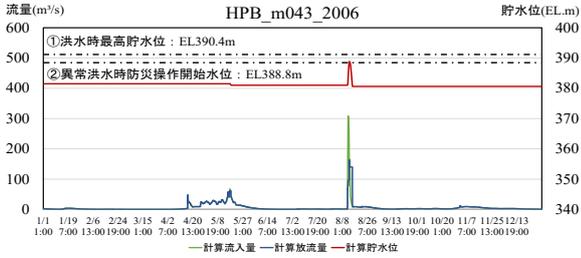


図-8 現在気候における異常洪水時防災操作事例

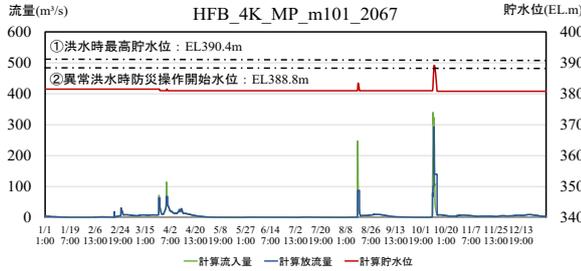


図-9 将来気候における異常洪水時防災操作事例

計算値を比較すると、両者は概ね実測を再現している。2012年融雪期事例においては、計算流入量のピークが実測よりやや早い、今回は遅れ操作が行われていない点に着目したため、再現性は確認できたと考えられる。以上より、このモデルで現在及び将来気候の推計を行っていく。

3.3 各気候での計算結果

各気候において、現在気候での異常洪水時防災操作を行った例を図-8に、将来気候での異常洪水時防災操作を行った例を図-9に示す。各気候とも夏期の雨量による流入量の増加に伴い異常洪水時防災操作を行っている。また、将来気候では現在気候と比べると、融雪時期が早まり、夏期の雨量も増えている。

3.4 月別の異常洪水時防災操作発生頻度

d4PDF現在気候3,000年分と将来気候5,400年分について連続的に流入量・放流量・貯水位を計算し、月別の異常洪水時防災操作及びサーチャージ超過水位の頻度を推定した。結果を表-4、図-10に示す。異常洪水時防災操作は現在気候で1回、将来気候で2回しか起きておらず、サーチャージ水位の超過は現在気候と将来気候のどちらでも起きなかった。また、いずれの異常洪水時防災操作も夏期の豪雨が原因で実施される結果となった。表-4、図-10に示す西島ら⁵⁾による結果と比較してみると、一方の豊平峡ダムは異常洪水時防災操作の頻度が多く、両ダムで連携した治水・利水の安全度向上が有効な対策の一つと考えられる。

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 過去の2011年夏期事例と2012年融雪期事例を通し、当時の流入量・放流量・貯水位の再現が適切に行えることを示した。
- 2) 異常洪水時防災操作が行われる結果となるが、頻度は少なくサーチャージ水位の超過は行われないことから、定山溪ダムは治水安全度の高いダムであることが示された。

今後の課題として、西島ら⁵⁾の豊平峡ダムの結果も合わせ、治水・利水の安全性を向上させるうえで2つのダ

表-4 定山溪・豊平峡ダムの各気候の異常洪水時防災操作とサーチャージ水位超過の回数

	異常洪水時防災操作		サーチャージ水位の超過	
	定山溪	豊平峡	定山溪	豊平峡
現在気候	1回(1回/3,000年)	448回(1回/6.7年)	0回	10回(1回/300年)
将来気候	2回(1回/2,700年)	906回(1回/6.0年)	0回	44回(1回/122年)

定山溪ダム異常洪水時防災操作月別発生回数

豊平峡ダム異常洪水時防災操作月別発生回数

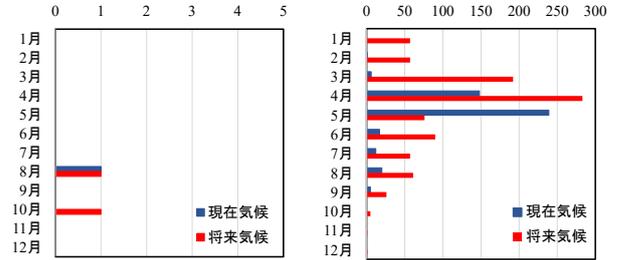


図-10 定山溪・豊平峡ダムの各気候の異常洪水時防災操作とサーチャージ水位の月別の超過回数(両ダムで横軸のスケールが異なる)

ムの連携操作の方策を検討していきたい。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費(課題番号 JP20K04698, FY2020~2022)の支援を受けたものである。また、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部河川整備保全課及び豊平川ダム統合管理事務所には、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) 国土交通省：災害・防災情報 平成30年7月豪雨による被害状況等について、https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_180703.html (アクセス日: 2021/12/6)
- 2) 国土交通省：災害・防災情報 令和元年台風第19号による被害状況等について、https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html (アクセス日: 2021/12/6)
- 3) 白谷友秀, 中津川誠: 北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響, 地球環境シンポジウム 論文集, 13, pp.1-6, 2005.
- 4) 中津川誠, 星清: 融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について, 河川技術論文集, 第7巻, pp.453-458, 2001.
- 5) 西島星蓮ら: 気候変動に伴う積雪地域の多目的ダムにおける異常洪水時防災操作の発生頻度に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.77, No.2, I_43-I_48, 2021.
- 6) Mizuta, R. et al.: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol.98, pp.1383-1393, 2017.
- 7) 上田聖也ら: 北海道を対象とした流域水収支の検証に基づく高解像度ダウンスケーリング気象情報の推定, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I_25-I_30, 2020.
- 8) 中津川誠, 白谷友秀: 水文情報の総合化による融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紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 9) Thornthwaite, C.W.: An approach toward a rational classification of climate, *Geographical review*, Vol.38, No.1, pp.54-94, 1948.
- 10) 菅原正巳: 流出解析法, 共立出版, 1972.
- 11) Duan, Q. et al.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. Hydrology*, Vol.158, No.3-4, pp.265-284, 1994.