

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

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

室蘭工業大学 ○学生員 西島星蓮 (Seren Nishijima)
 室蘭工業大学 学生員 関洵哉 (Junya Seki)
 室蘭工業大学 学生員 山洞智弘 (Tomohiro Sando)
 室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、日本では豪雨災害が多発し、それに伴い日本各地のダムで異常洪水時防災操作を行う事例が増えている。2018年7月には台風7号と梅雨前線により、西日本では愛媛県の野村ダムを始めとする8個所のダムで異常洪水時防災操作が行われた¹⁾。また、2019年10月には台風19号が東日本に上陸し、神奈川県内の城山ダムを始めとする6個所のダムで異常洪水時防災操作が行われた²⁾。異常洪水時防災操作とは、ダムへの流入量が急激に増え、サーチャージ水位の超過が予想された時、流入量と同量の放流をすることでダム堤体からの越流を防ぐ操作である。しかし、膨大な放流によって下流で大きな被害が発生する場合もあるため、極力回避すべき操作である。また、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の洪水調節の検証を行う。この際、降雨データに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)³⁾を用いることで、不確実性を有する降雨量がダム操作に及ぼす影響を推定した。得られた大量の降雨情報を4段タンクモデルに入力して長期にわたる流入量を推算し、ダム操作規則に基づき放流量・貯水位を推算する。これにより、異常洪水時防災操作の生起頻度、さらには堤体越流の可能性を定量化した。得られた結果を、気候変動を見据えたダムの治水機能の評価や改善方策などの検討に活用することを目的とする。

2. 研究方法

2.1 対象地点

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。図-1に流域の位置、図-2に容量配分を示す。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、豊平峡ダムの最大流入量が所定の気象・水象データの揃っている過去20年で1位と2位であった2011年9月と2014年9月の事例と

した。2011年の事例は、停滞前線と台風12号により、豊平川流域周辺で大雨が降り、9/6 5:00に過去最大の流入量534 m³/sを記録したものである。2014年の事例は、北海道で初めて大雨特別警報が発令され、9/11 5:00に流入量489 m³/sを記録したものである。なお、どちらの事例でも豊平峡ダムは異常洪水時防災操作に至っていないが、現在、さらに将来予想される不確実性を有する大雨により異常洪水時防災操作に達するようなケースが存在するかを検討した。

2.3 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に、従来のダム操作でどの程度の調節効果を発揮しうるか、もしくは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それぞれの20 km ダウンスケーリング降雨データ（以下、20 kmDS）を、豊平峡ダム流域を対象に抽出した。なお、山田ら⁴⁾が領域実験データの北海道周辺を力学的手法で5 km メッシュにダウンスケー

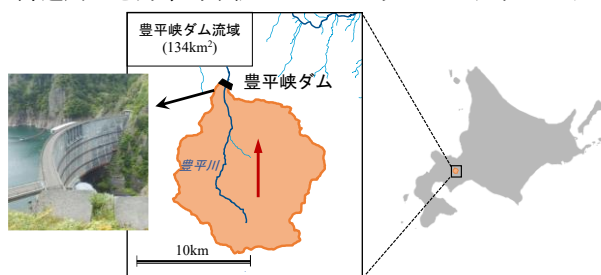


図-1 豊平峡ダム流域位置図

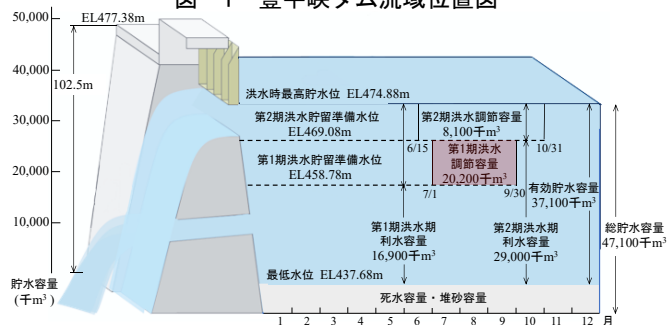


図-2 豊平峡ダム容量配分

リング（以下、5 kmDS）しており、豪雨リスクの検証には有力な情報となっている。しかしながら、データが膨大なため、各年 15 日分のデータセットに限られている。本研究は長期的なダム運用を評価するため、通年の情報がある 20 kmDS を用いることとした。

2. 4 ダム流入量・放流量・貯水位の計算条件

本研究では、d4PDF 降雨量からダム放流量を計算するために、1) 4 段タンクモデルを用いたダム流入量の計算、2) ダム流入量と貯水位から、ダム操作規則に基づくダム放流量の決定という手順で計算を行った。計算期間は図-2 に示す第一期洪水期の 7/1 から 9/30 を対象にする。以下に具体的な計算方法を整理する。

1) ダム流入量の計算

① 4 段タンクモデル

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 4 段タンクモデルを採用した。モデルは流域を図-3 に示す 12 個のパラメータを持つタンク群とみなし、流出を再現する⁵⁾。1 段目を表面流出、2 段目を表層流出、3 段目を中間流出、4 段目を地下水流出とし、流出量 $q(\text{mm/h})$ の合計をダムへの流入量とする。なお、タンクの初期貯留高は、6/1 1:00~7/1 0:00 の期間を一度計算し、計算終了時の貯留高を与えた後、6/1 1:00~10/1 0:00 の流入量を計算する。以後のダム操作シミュレーションには 7/1 1:00~10/1 0:00 の情報を用いる。

② SCE-UA 法

上記 12 個のモデルパラメータの最適値を得るため SCE-UA 法(shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona) (Duan ら⁶⁾) を適用する。この手法は、遺伝的アルゴリズム手法の一種であり、局所最適解に陥りにくいという特徴がある。再現流量の誤差指標には(1)式に示す平均二乗誤差の式を用いる。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_{obs} - q_{cal})^2 \quad (1)$$

ここで、 MSE :平均二乗誤差、 q_{obs} :観測流量(mm/h)、 q_{cal} :計算流量(mm/h)、 n :再現期間のデータ数である。本研究では、2011/9/4 0:00~2011/9/7 0:00 の降雨量から q_{cal} を求め、 q_{obs} との MSE の値が最小となるパラメータを最適パラメータとした。パラメータ最適値を図-3 に示す。

2) ダム放流量の計算

豊平峡ダムにおける放流量計算は、7/1 1:00~10/1 0:00

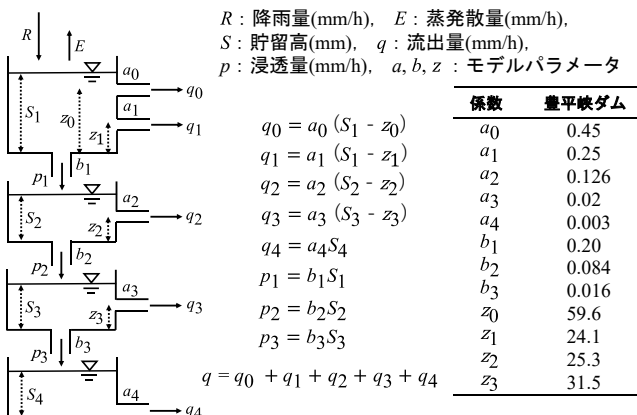


図-3 4 段タンクモデル模式図とパラメータ最適値

の期間について操作規則に基づき行う。なお、d4PDF の雨量データは 1 時間ごとに設定されているため、ダム流入量も 1 時間毎に計算され、放流操作も 1 時間ごと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そこまで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。以下に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。なお、計算開始時の初期貯水位は、第一期洪水貯留準備水位 (7/1 1:00~10/1 0:00 の水位) より 0.5 m 低い 458.28 m に設定した。

② 放流量の計算

放流量 $Q_{out}(\text{m}^3/\text{s})$ は、1) で求めた $q(\text{mm/h})$ を単位変換した流入量 $Q_{in}(\text{m}^3/\text{s})$ と貯水位 $H(\text{m})$ の関係から、豊平峡ダムの操作規則（以下、操作規則）をもとに計算を行う。以下に放流量の設定手順を示す。

・異常洪水時防災操作開始以前

ダム貯水位が 458.78 m（第一期洪水貯留準備水位）を超え、472.58 m（異常洪水時防災操作開始水位）未満の場合、操作規則に基づき、定率・定量の洪水調節操作で放流を行う。

・異常洪水時防災操作

貯水位が 472.58 m を超え、474.88 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。この際、 Q_{in} 、 Q_{out} となるまで放流量を増大し、その後は Q_{in} 、 Q_{out} として水位を維持する。 Q_{in} 140 m^3/s を下回った場合、本来は Q_{in} 、 Q_{out} で操作を続けるが、今回は長期的な計算を目的とし、貯水位を下げる操作が必要なため、貯水位が 458.28 m に回復するまで Q_{out} 140 m^3/s （計画最大放流量）を放流し、その後、 Q_{in} 、 Q_{out} （水位維持）とする。

・堤体越流時の扱い

本研究では、気候変動下での降雨量の増大による堤体越流の可能性を検討するため、474.88 m を超えた場合は、計算の便宜上 Q_{in} 、 Q_{out} （水位維持）とした。

③ 貯留量の更新

本節の 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 $t+\Delta t$ での貯留量を求める。

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

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

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)とする。上式で貯留量を更新後、 $H-V$ 式より貯水位に変換する。

④ 期間全体の計算を①~③の手順を繰り返して実施

上記の方法を用いて、20 kmDS 降雨データの現在気候 3,000 年分・将来気候 5,400 年分の 7 月から 9 月の 3 ヶ月

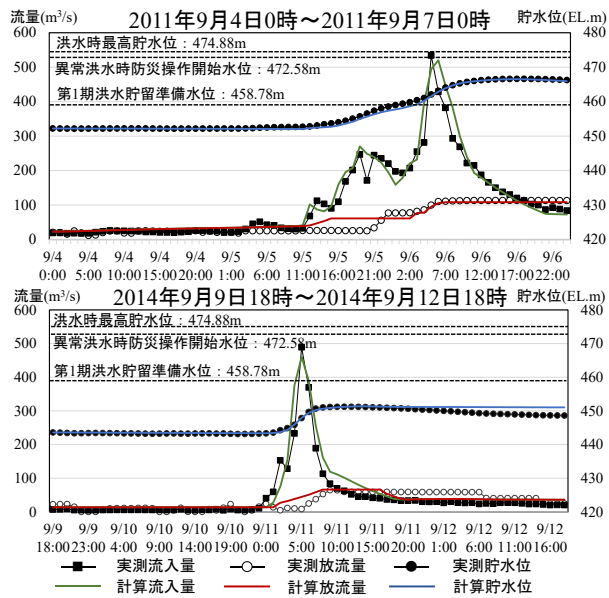


図-4 2011年・2014年の流入・放流・貯水位の再現
20kmDS年最大72時間降雨

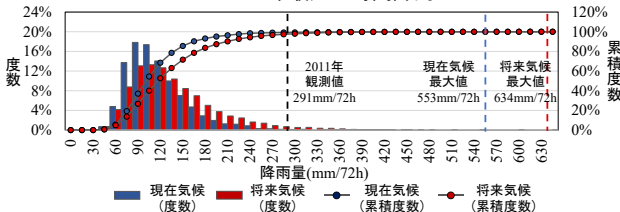


図-5 20kmDS年最大72時間降雨量ヒストグラム

表-1 20kmDS年最大72時間降雨量ランキング各上位5位

No.	年	降雨量(mm/72h)	No.	年	降雨量(mm/72h)
1	HFB_MR_m105_2091	634	1	HPB_m043_2006	553
2	HFB_ML_m114_2057	596	2	HPB_m082_1961	446
3	HFB_MP_m101_2067	508	3	HPB_m004_1957	444
4	HFB_GF_m106_2078	471	4	HPB_m048_1967	429
5	HFB_MP_m101_2053	454	5	HPB_m063_1968	419

間を自動的に計算し、貯水位が 472.58 m に達した場合は異常洪水時防災操作を実施、貯水位が 474.88 m に達した場合は堤体越流するとし、その頻度をカウントした。

3. 結果と考察

3.1 2011年と2014年降雨事例の分析結果

2011年と2014年における流入量の計算結果、及び操作規則にもとづく放流量の計算結果を図-4に示す。

2011年の流入量・放流量・貯水位の実測値と計算値を比較すると、両者は概ね実測を再現している。ただし、放流量は9/5 10:00～9/5 22:00の間で計算値が実測値より過大となっている。これは、当時の操作において貯水位の回復などを考慮した結果と推察される。また、2014年においても実測値と計算値を比較すると、計算での再現性が確認できる。放流量は洪水発生後の9/11 16:00～9/12 7:00の間で実測放流量が過大となっている。操作規則によれば第1期洪水貯留準備水位に達していなければ、流入量と放流量が等しくなるような操作（水位維持）を続けるが、実際は流入量を上回る放流を行っている。これは貯水位が急激に増大したため、その後の大雨が発生する可能性を考慮し、貯水位を極力下げる操作を行ったためと推察される。

以上より、設定したパラメータで豊平峡ダムの洪水時

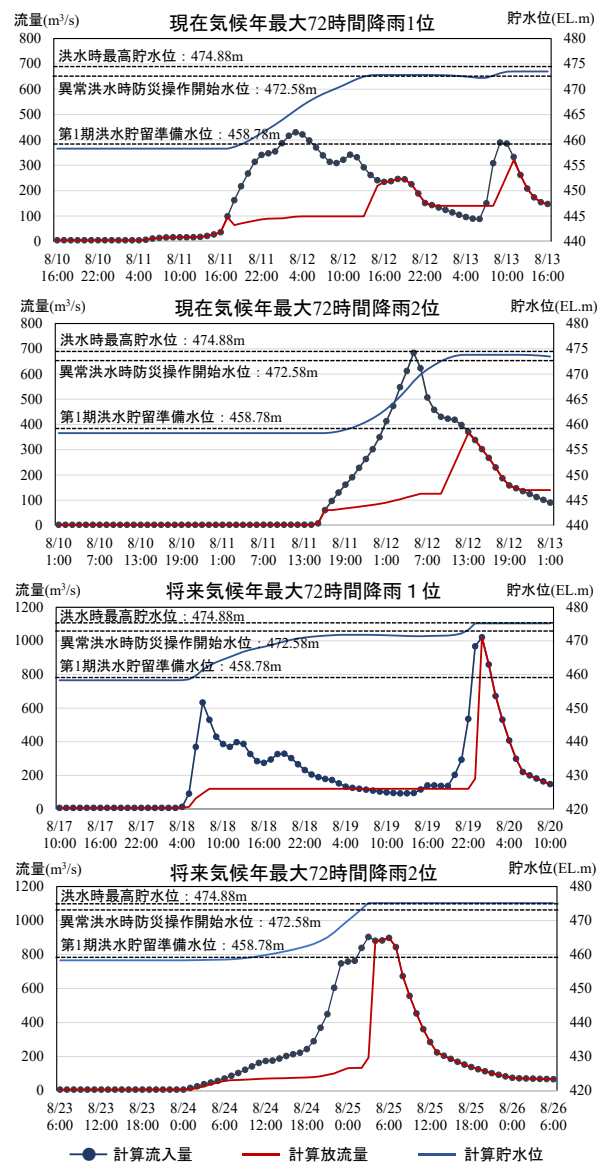


図-6 年最大72時間降雨上位4事例の計算結果

の流入量・放流量・貯水位の再現性が確認できたため、以後、これを用いて気候シミュレーションデータを用いた計算を進めていく。

3.2 年最大72時間降雨上位2位事例の分析

20 kmDSによる豊平峡ダム流域の年最大72時間降雨量（以下、72時間雨量）のヒストグラムを図-5に、現在気候・将来気候各72時間雨量上位5位を表-1に示す。図-5と表-1より、現在気候の最大降雨量が観測最大雨量値を超過していることから、現在でも気候の不確実性の観点から過去に観測されなかったような大雨が生じる可能性があり、将来気候ではさらに激しい大雨が発生する危険性が示された。表-1から、現在気候・将来気候各72時間雨量上位2位の事例について計算を行った。結果を図-6に示す。

上記の結果を見ると、現在気候では2事例とも異常洪水時防災操作を行っている。現在気候での72時間雨量の1位は553 mm/72h、2位は446 mm/72hである。2011年の72時間降雨量は291 mm/72hであるため、豪雨により今後異常洪水時防災操作を行う可能性が高まると言える。将来気候は2事例とも堤体越流をする結果となった。

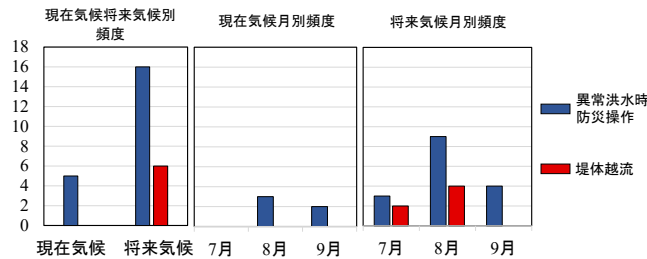


図-7 異常洪水時防災操作頻度・堤体越流頻度

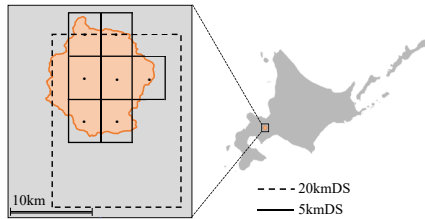


図-8 豊平峡ダムの20kmメッシュと5kmメッシュの位置図

将来気候での72時間雨量の1位は634 mm/72h, 2位は596 mm/72hである。このように、将来的には現在のダム操作では対処しきれず、堤体越流してしまうケースも現れる。

3.3 夏期洪水期における異常洪水時防災操作頻度の推定

d4PDF 現在気候 3,000 年分と将来気候 5,400 年分の7月から9月までの期間で連続的に流入・放流・貯水位のシミュレーションを行い、異常洪水時防災操作の実施頻度及び堤体越流の頻度、また現在気候・将来気候の月別の生起頻度を推定した。結果を図-7に示す。

得られた結果より、異常洪水時防災操作を実施した回数は現在気候 3,000 年で5回、将来気候 5,400 年で16回である。すなわち、現在で600年に1回、将来で338年に1回の頻度である。これより、過去に夏期の異常洪水時防災操作を実施したことのない豊平峡ダムにおいても、その可能性のある豪雨が発生すると推測され、将来気候ではその頻度はさらに増加すると考えられる。また、堤体越流の回数は現在気候では0回だが、将来気候では6回という結果となった。これより、低頻度とはいえ、現状のダム操作では放流が間に合わずダム堤体から越流が生じるという極めて重大な事象の発生が懸念される。また、月別の発生頻度では、異常洪水時防災操作が行われる頻度及び堤体越流の頻度は現在気候、将来気候ともに8月に最も多いことがわかる。これらに対し、事前放流による早期の貯水位低下、ダムの改良（堤体のかさ上げやゲートの改良）、複数ダムの連携（ダム容量振替）なども視野に異常洪水時防災操作及び堤体越流といった危機対応を検討すべきことが示唆される。

3.4 DS情報の違いについて

20 kmDS と 5 kmDS の降雨データの差について考察する。図-8に20 kmメッシュと5 kmメッシュの位置図を、図-9に20 kmDS と 5 kmDS の同期間の72時間雨量のヒストグラムを示す。5 kmDS 降雨データは豊平峡ダム流域の範囲で算術平均することによって求めた。

図-9を見ると、最大値に大きな差が出るが、平均値や中央値に大きな違いはない。このことより長期的なリスク推定に20 kmDS 情報は有用であると考え、短

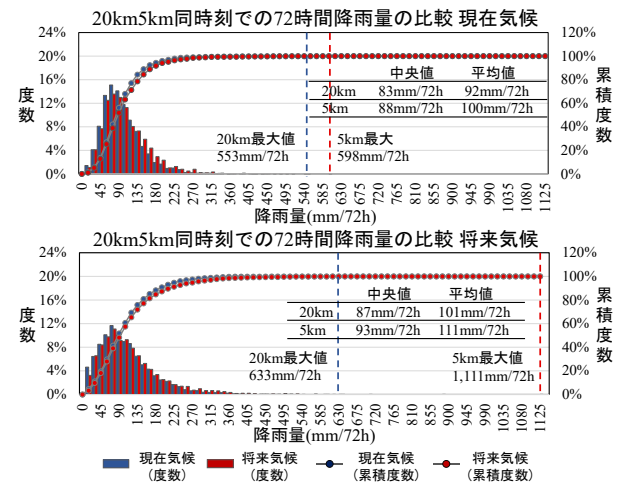


図-9 20kmDS と 5kmDS 同時刻の年最大72時間降雨量ヒストグラムと中央値・最大値・平均値

期的に集中する極端な大雨に対する操作については、今後詳しい検討が必要である。

4. 結論

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 過去に発生した2011年9月の降雨事例と、2014年9月の事例検証を通し、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確認した。
- 2) 将来の気候変動による大雨で、現状のダム操作では異常洪水時防災操作を行う頻度が増え、堤体越流する可能性も示唆した。

このような評価分析を他の流域、融雪期などについても行い、単体のダムだけでなく複数のダムで連携して治水効果を向上させるなどの方策を検証していきたい。

謝辞：本研究の遂行にあたり、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏ならびに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) 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：2020/12/08)
- 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：2020/12/08)
- 3) 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.
- 4) 山田朋人ら：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化，土木学会河川技術論文集，第24巻，pp.391-396，2018.
- 5) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972.
- 6) 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.