

RF 法を利用した異常洪水時ダム流入量予測の研究

Research on prediction of dam inflow during Extraordinary Flood using RF method

室蘭工業大学 ○学生員 木浪梨花 (Rika Kinami)
室蘭工業大学 学生員 坂本莉子 (Riko Sakamoto)
室蘭工業大学 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学 非会員 小林洋介 (Yosuke Kobayashi)

1. はじめに

2016 年 8 月、北海道において 4 つの台風が連続して上陸及び接近し、広域にわたって甚大な被害をもたらした。金山ダム、札内川ダムでは連続する台風の影響により、ダムへの流入量が増大した。この際、各ダムでは異常洪水時防災操作開始水位を超え、さらに洪水時最高水位を超えることが予測されたため、通常の洪水調節から異常洪水時防災操作に移行した。また、2018 年 7 月、西日本豪雨の際には愛媛県肱川上流部に位置する野村ダム、鹿野川ダムにおいて異常洪水時防災操作が実施され、ダム洪水が発生し犠牲者が出た。近年このような洪水事例が頻発しており、被害を最小限に抑えるためには、迅速かつ精度の良いダム流入量の予測が望まれる。

現在、国土交通省北海道開発局の現業部門で主に用いられているのは予測雨量を入力条件に、星ら¹⁾が提案した貯留関数モデルで流入量を算出する手法が主流である。その他、分布型流出モデルにカルマンフィルタを用いた流入量予測²⁾が提案されている。近年では、機械学習手法により観測された水文情報のみを使用し予測する方法が注目されている。田村ら³⁾は深層学習によりダム流入量予測を行い、精度の良い結果を得ている。一方、一言ら⁴⁾は深層学習による河川水位予測を行い精度の良い結果を得ている。また、本論文の共著者である坂本ら⁵⁾は Random Forest 法（以下、RF 法）を用いた水位予測を行い、精度の良い結果を得ている。本研究では、坂本ら⁵⁾の手法を用いて破局的被害をもたらすような低頻度豪雨（例えば、2016 年 8 月連続台風による豪雨）において RF 法にてダム流入量予測が可能であるか検証を行うことである。

2. 研究方法

2. 1 対象地点と対象事例

本研究では、国土交通省北海道開発局が管理する金山ダムと札内川ダムを対象とし、2016 年 8 月事例の予測を行った。各ダムの流域図を図-1 に、諸元を表-1 に示す。

(1) 金山ダム

石狩水系空知川上流に位置する中空重力式ダムである。2016 年 8 月事例において、最大流入量は計画流入量 1,000 m³/s を超える 1,556 m³/s であった。この際、異常洪水時防災操作開始水位である EL343.7 m を超えたため、異常洪水時防災操作を行うこととなった。

(2) 札内川ダム

十勝川水系札内川上流に位置する重力式コンクリート

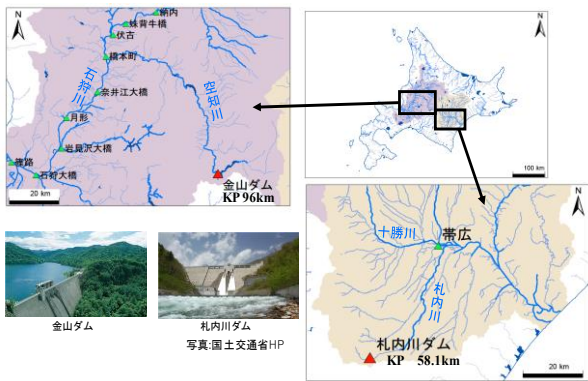


図-1 対象地点流域図

表-1 各ダムの諸元

	金山ダム	札内川ダム
堤高 (m)	57.3	114.0
堤頂長 (m)	288.5	300.0
総貯水容量 (m ³)	150,450,000	54,000,000
有効貯水容量 (m ³)	130,420,000	42,000,000
洪水時最高貯水位 (m)	345.0	484.0
異常洪水時防災操作開始水位 (m)	343.7	474.0
洪水貯留準備水位 (m)	338.5	466.0
最低水位 (m)	320.0	447.5

表-2 実事例における説明変数の諸元

観測項目	データ概要	説明変数の数
流入量 (m ³)	$t-12 \sim t-6, t-11 \sim t-5, \dots, t-6 \sim t$ の 6h 積算値	7
流域平均雨量 (mm)	$t-12 \sim t-6, t-11 \sim t-5, \dots, t-6 \sim t$ の 6h 積算値	7
地点雨量 (mm)	$t-12 \sim t-6, t-11 \sim t-5, \dots, t-6 \sim t$ の 6h 積算値	7
予測雨量 (mm)	$t \sim t+6$ の 6h 積算値	1
(みなし予測雨量)		
土壌雨量指数	$t-6 \sim t$ の時間値	7

t : 現在時刻

ダムである。2016 年 8 月事例において、最大流入量は計画流入量 700 m³/s を超える 714 m³/s であった。この際、異常洪水時防災操作開始水位である EL474.0 m を超えたため、異常洪水時防災操作を行うこととなった。

2. 2 予測に用いる説明変数と事例

本研究では 1 時間ごとではなく、6 時間積算値の流入量を予測の対象とした。その理由として、1 時間ごとの予測は、降雨予測の精度が低いために難しいことと、現業においてダムの事前放流など操作判断を行うにあたり、単位時間の流入量より積算流入量から貯水位を求めることで幅を持った操作判断が行えるためである。それに伴い、表-2 に示す予測に用いた説明変数も 6 時間積算値となっている。「流入量」, 「流域平均雨量」, 「地点雨量」は各ダム管理所から提供して頂いた単位時間データを 6 時間積算値にしたデータを使用した。ここで、

表-3 予測及び学習に用いた過去の洪水事例一覧

*順位	金山ダム			札内川ダム		
	事例年月	単位時間 ピーク流入量(m³/s)	6時間積算 ピーク流入量(m³)	事例年月	単位時間 ピーク流入量(m³/s)	6時間積算 ピーク流入量(m³)
1	2016/8/28 1:00 ~ 9/2 24:00	1556.23	26,277,804	2016/8/28 1:00~9/2 24:00	713.88	14,368,896
2	2001/9/8 1:00 ~ 9/13 24:00	406.82	8,341,200	2011/8/31 1:00 ~ 9/5 24:00	606.88	9,406,368
3	2006/8/16 1:00 ~ 8/21 24:00	380.86	7,668,000	2003/8/7 1:00 ~ 8/12 24:00	557.93	10,087,164
4	2003/8/7 1:00 ~ 8/12 24:00	285.84	5,871,600	2005/9/5 1:00 ~ 9/10 24:00	537.16	9,440,964
5	2005/8/19 1:00 ~ 8/24 24:00	238.07	4,467,600	2014/8/8 1:00 ~ 8/13 24:00	515.29	9,388,188
6	2012/9/7 1:00 ~ 9/12 24:00	219.50	3,654,000	2013/9/2 1:00 ~ 9/7 24:00	412.75	6,022,080
7	2010/8/21 1:00 ~ 8/26 24:00	184.95	3,549,600	2001/9/8 1:00 ~ 9/13 24:00	400.26	8,053,632
8	2011/8/13 1:00 ~ 8/18 24:00	167.71	3,434,400	2002/9/28 1:00 ~ 10/3 24:00	343.47	5,833,584
9	2002/9/29 1:00 ~ 10/4 24:00	165.00	3,099,600	2008/7/19 1:00 ~ 7/24 24:00	296.48	4,267,300
10	2013/9/13 1:00 ~ 9/18 24:00	162.85	3,330,000	2015/9/29 1:00 ~ 10/4 24:00	283.82	4,582,224
11	2000/8/30 1:00 ~ 9/4 24:00	124.82	2,548,800	2010/8/8 1:00 ~ 8/13 24:00	230.06	4,420,244

*2000年~2016年の1h最大ピーク流入量の順位。これらから144h（6日分）を抽出。

は予測対象事例

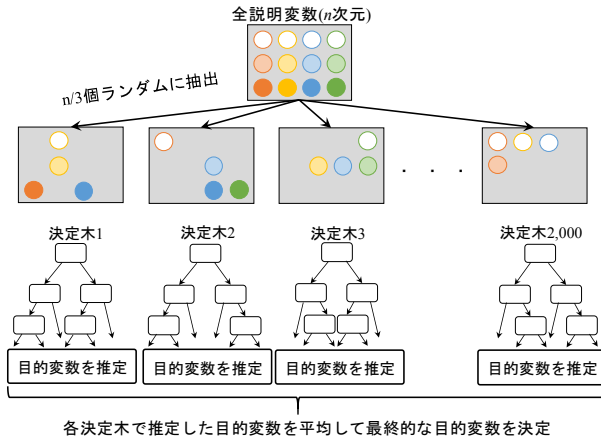


図-2 RF法の概略図

「流入量」と「雨量」は以下の式で算出した。

$$V_{Qin}(t) = \left[\frac{1}{2}Q_{in}(t-6) + Q_{in}(t-5) + \dots + Q_{in}(t-1) + \frac{1}{2}Q_{in}(t) \right] \times 3,600 \quad (1)$$

$$R(t) = r(t-5) + r(t-4) + \dots + r(t-1) + r(t) \quad (2)$$

ここで、 t は現在時刻を示す。また、「地点雨量」はダムサイトで観測された雨量を示す。モデル学習時の「予測雨量」は、実測の流域平均雨量を予測雨量に見立てて使用し、6時間積算値にしたデータを使用した。これをみなし予測雨量と称する。「土壌雨量指数⁶⁾」は流域平均雨量を用いて算出する。また、「土壌雨量指数」は降雨の累積効果を反映した指標なので、1時間毎の値を用いる。予測に用いた洪水事例は表-3に示す1洪水あたり144時間の全11事例から、予測対象（2016年8月）事例を除いた10事例を学習データとして使用した。

2.3 RF法による統計モデル

RF法⁷⁾とは、多数の決定木を組み合わせることで予測モデルの汎化性能を高めるアルゴリズムである。図-2にRF法の概略図を示し、具体的な手順を以下に示す。

- 1) 全説明変数 n 個から重複を許さずランダムに $n/3$ 個の説明変数を抽出する。
- 2) 抽出された説明変数を用いて1本の決定木を作成する。決定木の構造は以下に示す平均二乗誤差（以下、MSE）を用いて作成する。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

ここで、 N は分割時の時系列データ数、 x_i は目的変数の値、 $\bar{x}$ は分割時の目的変数の平均値である。これを全てのパターンで計算を行い、MSEの値が

最も小さくなる条件でデータを分割して決定木を作成し、目的変数を推定する。

- 3) 1), 2)の作業を L 回行い L 本の決定木を作成する。本研究では、決定木の本数 L は統一して $L=2,000$ とした。各決定木で推定した目的変数を平均し、最終的な予測値とする。

また、RF法では寄与度が算出される。寄与度とは、目的変数との重要度を表したものであり、値が大きいほど影響力が大きい説明変数であることを意味する。また、決定木の分割毎に各説明変数の寄与度が算出され、分割時のMSEが小さくなるほど寄与度は大きくなる。そのため、寄与度は個々の説明変数と目的変数の相関係数を求めた値と異なり、変数間の従属性（多重共線性）の影響を排除したよりロバストな判断の指標となる。

2.4 流出計算モデル

後述する仮想事例の作成には、2段タンク型貯留関数モデル⁸⁾を使用した。このモデルは流出課程の非線形性を比較的簡単な構造式で表すことができ、河川の洪水予測や洪水時のダム操作のための貯水池流入予測に用いられている。また、このモデルは観測雨量をそのまま使用できるという特徴があり、流出解析の前処理として必要とされていた基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業を必要としない。

なお、本研究ではSCE-UA法⁹⁾を用いてモデルパラメータの最適化を行い、仮想事例を作成した。2016年8月事例以前のデータを使用した予測を行うため、表-3に示す各ダム既往第二位の洪水事例における観測流域平均雨量を使用し、モデルパラメータの設定を行った。

3. 結果と考察

本研究で用いた精度指数は以下に示すピーク流入量相対誤差（以下、 J_{pe} ）、異常洪水時防災操作開始水位到達時刻差（以下、 ΔT ）を用いて行った。

$$J_{pe} = \frac{V_{Qinop} - V_{Qincp}}{V_{Qincp}} \quad (4)$$

$$\Delta T = T_o - T_c \quad (5)$$

ここで、 V_{Qinop} は期間中のピーク6時間積算流入量観測値 (m^3)、 V_{Qincp} は期間中のピーク6時間積算流入量予測値 (m^3)、 T_o は観測値における異常洪水時防災操作開始水位到達時刻、 T_c は予測値における異常洪水時防災操作開始水位到達時刻である。この際、 J_{pe} 、 ΔT の値が負になると安全側の予測であることを意味する。

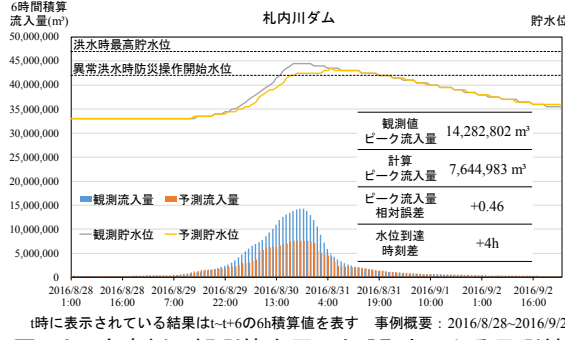
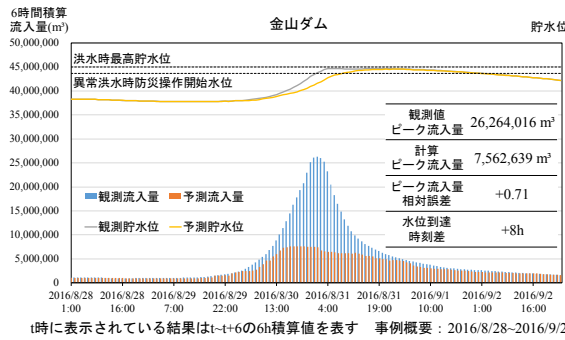


図-3 実事例の観測値を用いた RF 法による予測結果

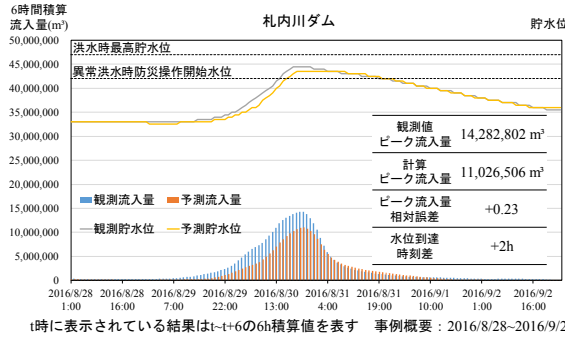
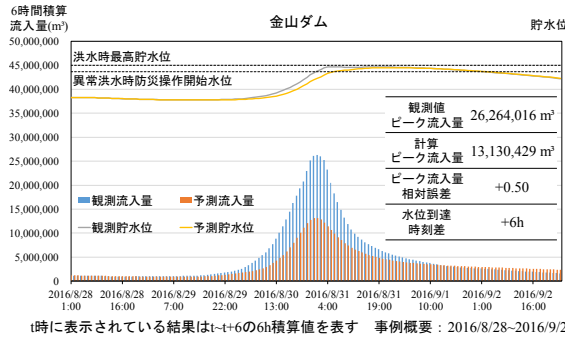


図-4 流出計算モデルによる計算結果

3. 1 実事例を用いた RF 法による予測結果

RF 法において、2016 年 8 月事例を予測した結果を図-3 に示す。また、貯水位は以下の式で求めた貯水量をもとに H-V 式で算出した。

$$V_{Qc}(t) = V_{Qin}(t) - V_{Qout}(t) + V_{Qo}(t-6) \quad (6)$$

ここで、 V_{Qc} は貯水量計算値、 V_{Qin} は 6 時間積算流入量予測値、 V_{Qout} は 6 時間積算放流量観測値、 V_{Qo} は貯水量観測値を示す。予測結果より、金山ダムにおいては観測ピーク流入量の 71%、札内川ダムにおいては 46% にしかならず過小評価していることがわかる。原因として、RF 法で用いる決定木による回帰アルゴリズムは、確率分布の推定を伴う他の機械学習アルゴリズムと異なり、学習で与えた数値以上の値を原理的に出力できないこと

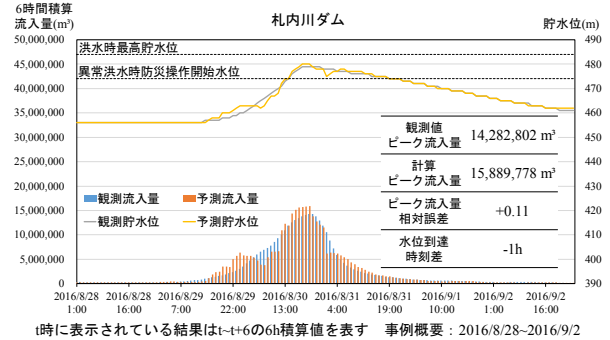
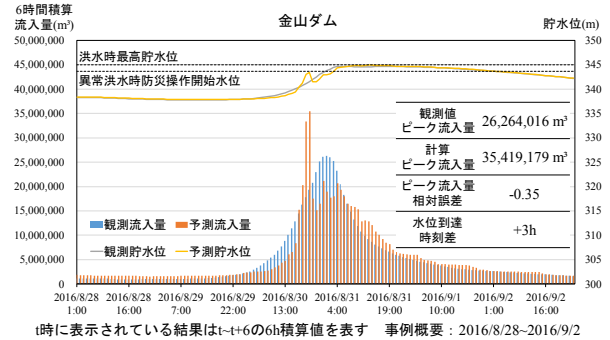


図-5 仮想事例を用いた RF 法による予測結果

表-4 新たに加えた説明変数の諸元

観測項目	データ概要	説明変数の数
流入量 (m³) (5倍流域平均雨量をもとに算出)	t-13~t-7の6h積算値とt-12~t-6の6h積算値の差分. t-12~t-6の6h積算値とt-11~t-5の6h積算値の差分. :	7
5倍流域平均雨量 (mm)	t-7~t-1の6h積算値とt-6~t-1の6h積算値の差分	7
5倍地点雨量 (mm)	“	7
流入量 (m³) (5倍流域平均雨量をもとに算出)	t-7値とt-6値の差分. t-6値とt-5値の差分. :	7
	t-1値とt値の差分	

t: 現在時刻

から、過去最大ではない観測データのみを学習データとした場合、それ以上のピーク値の予測は難しいことが示唆される。

3. 2 仮想事例を用いた RF 法による予測結果

2. 4 節に示した流出計算モデルを使用して、本研究で設定するパラメータを用いた 2016 年 8 月事例の観測流域平均雨量から流入量の再現が行えるか試算したところ、図-4 に示すように金山ダムにおいて予測値は観測値の 50%、札内川ダムにおいては 23%と過小評価する結果となった。これにより、2016 年 8 月事例は過去の情報から再現を行うことが難しい事例であることが分かる。

そこで、本研究では表-3 に示す各洪水事例の流域平均雨量を 5 倍に引き伸ばした値（以下、雨量 5 倍値）を使用して、2. 4 節に示す方法で計算した流入量を仮想事例として学習させた。仮想事例を用いた予測結果を図-5 に示す。結果より、実事例を使用した予測結果に比べ両ダム共に J_{pe} を小さく、また札内川ダムでは安全側に予測することはできたが、金山ダムは観測流入量のピーク時間において過小評価となった。また、雨量 5 倍値の仮想事例の他に雨量 2~4 倍値で同様の方法で予測を行ったが、過小評価したため、本研究では雨量 5 倍値の仮想事例での予測を提案する。

3. 3 説明変数に差分を加えた RF 法による予測結果

図-5 に示すように、金山ダムは仮想事例を加えても

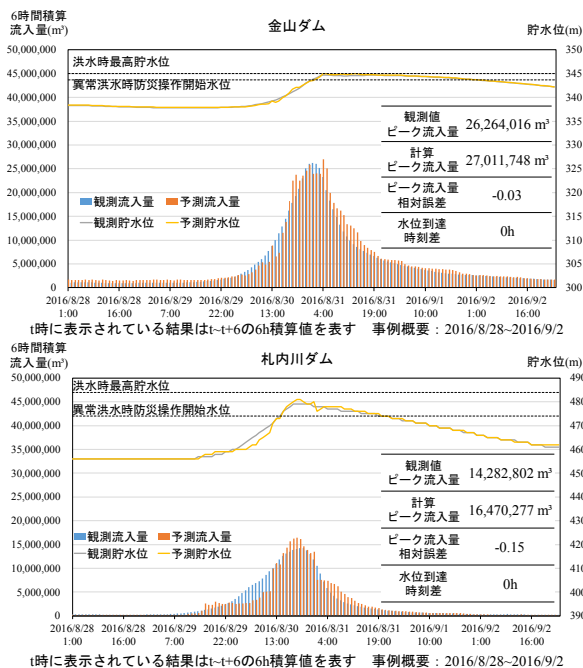


図-6 差分を加えたRF法による予測結果

実測値を過小評価する結果となった。これは過去の洪水事例に比べ2016年8月事例が急激な流入量の増加であったため、積算値のみを説明変数にした予測が難しいのではないかと考えた。そのため、前節で使用した仮想事例の説明変数に新たに表-4で示す差分量を加えて予測を行った。それらを用いた予測結果を図-6に示す。結果より、金山ダム、札内川ダムともにピーク流入量と貯水位の変化を精度良く予測を行なえる結果となった。また、RF法にて算出された各ダムの説明変数の寄与度上位5つを図-7に示す。結果より、予測雨量が上位になったが、金山ダムにおいて予測雨量より流入量の寄与度が高くなった。従来は予測雨量を用いて流入量予測を行っていたが、流入量自体も考慮すべきことが示された。

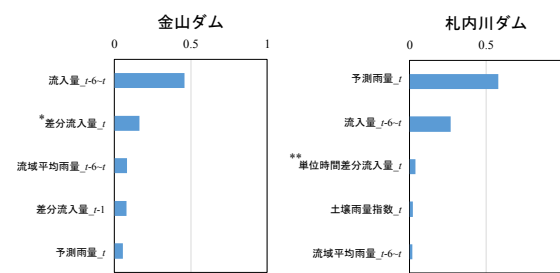
本研究で行った流入量予測結果の精度指数一覧を表-5に示す。また、一言ら⁴⁾の河川水位予測手法を参考に3.3節で使用した説明変数で目的変数も差分にして流入量予測を行った。結果は金山ダム、札内川ダム共にピーク流入量を大幅に過小評価し、低減部では負値となった。これにより、流入量予測では目的変数を差分ではなく積算値にて行うことが良いことが示された。

4. 結論

本研究において得られたダムの6h積算流入量及び6h先の貯水位予測結果を以下にまとめる。

- 1) 流出計算モデルを用いて算出された仮想事例をRF法に学習させることで、急激な流入量変化を示さない事例であれば、流入量を予測できる可能性が示された。
- 2) 急激な流入量変化を示す事例において、差分流入量を説明変数に用いるのが有効であることが示された。
- 3) 積算流入量予測に基づき、貯水位の変化予測を十分な精度で行えることを示した。

今後は予測事例を増やし、一般性のある流入量及び貯



*差分流入量：6時間積算流入量の1時間ずらしの差分値
**単位時間差分流入量：1時間流入量の1時間ずらしの差分値

図-7 RF法による寄与度算出結果(上位5個)

表-5 予測結果の精度評価一覧

目的変数	説明変数	J_{pc}				$\Delta T(h)$	
		金山ダム	札内川ダム	金山ダム	札内川ダム	金山ダム	札内川ダム
実事例積算値	実事例積算値	+0.71	+0.46	+8	+4		
実事例積算値	実事例積算値と実事例差分値	+0.71	+0.51	+7	+4		
仮想事例積算値	仮想事例積算値	-0.35	+0.11	+3	-1		
仮想事例積算値	仮想事例積算値と仮想事例差分値	-0.03	-0.15	0	0		
仮想事例差分値	仮想事例積算値と仮想事例差分値	+0.72	+0.84	-	-		
積算値：6時間積算値							
差分値：t-6~t時間積算値からt-7~t-1時間積算値を引いた値							
-：予測値が異常洪水時防災操作開始水位に未到達							

水位の予測手法を見出していきたい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北海道開発局札幌開発建設部、及び帯広開発建設部にはダム諸量の資料を提供して頂いた。また室蘭工業大学データサイエンス研究室の山田恒輝氏には解析プログラムの提供等、多大なご協力をして頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：実践流出解析ゼミ 講義テキスト編，第10回，2006。
- 2) 藤田暁，大東秀光，上坂薫，椎葉充晴，立川康人，市川温：分布型流出モデルに基づく流入量実時間予測モデルについて，水工学論文集，第45巻，pp.115-120,2001。
- 3) 田村和則，加納茂紀，三浦心，山脇正嗣，金子拓史：ダム流入量長時間予測への深層学習の適用ーダム防災操作の効率化を目指してー，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.74, No.5, I_1327-I_1332, 2018。
- 4) 一言正之，桜庭雅明，清雄一：深層学習を用いた河川水位予測手法の開発，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.72, No.4, I_187-I_192, 2016。
- 5) 坂本莉子，中津川誠，小林洋介：ランダムフォレスト法に基づく大河川の低頻度洪水の水位予測に関する研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.74, No.5, I_1375-I_1380, 2018。
- 6) 気象庁；土壌雨量指数：https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html(閲覧日 2018/11/28)
- 7) 速水悟：事例+演習で学ぶ機械学習 ビジネスを支えるデータ活用のしくみ，第5章，森北出版株式会社，2016。
- 8) Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, H. V.: Optimal use of SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, Vol.158, pp.265-284, 1994。