Elastic Net による洪水時のダム貯水位予測の研究

Research on prediction of dam inflow during Flood using Elastic Net

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)
室蘭工業大学	非会員	小林洋介 (Yosuke Kobayashi)
室蘭工業大学	学生員	坂本莉子 (Riko Sakamoto)

1. 研究背景

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,札内川ダムではダムへの流入量が増大し,異 常洪水時防災操作を実施した.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た. さらに2019年10月,台風19号による豪雨の際には山 梨県・神奈川県を流れる相模川上流部に位置する城山ダ ムにおいて異常洪水時防災操作が実施された.近年ダム の異常洪水時防災操作を余儀なくされる大雨事例が相次 いでおり,被害を最小限に抑えるための対応を行う上で, 迅速かつ精度の良いダム流入量,貯水位の予測が望まれ ている.

現在,国土交通省北海道開発局の現業部門で主に用い られているダム流入量予測手法は予測雨量を入力し,貯 留関数モデル¹⁾で流入量を算出する方法である.この ような概念モデルあるいは物理モデルによる流入量予測 は,精度の良い予測雨量や汎用性のあるパラメータの設 定が難しいなどで十分な予測結果が得られにくいことが 課題である.

一方,近年は多量の水文情報と機械学習を用いた統計 処理によりダム流入量予測を試みる手法が注目されてい る.機械学習手法の活用に関して,田村ら²⁾は深層型の 全結合型ニューラルネットワークを用いたダム流入量予 測を行い,予測雨量が正確なものであれば42h先までの 予測が可能であることを示している.また,坂本ら³⁾は 様々な機械学習手法によるダム流入量,貯水位予測を比 較し,Elastic Net を用いることで良好な予測結果を得た. しかしながら,異常洪水時防災操作開始水位の到達時刻 に遅れがみられるという課題がある.本研究では,先行 研究³)で提案された Elastic Net による予測において,積



算流入量の差分を利用した遅れの改善を提案し,他のダ ム事例にも適用できるかを検証した.

2. 研究方法

2.1 対象地点と対象事例

本稿では、国土交通省北海道開発局が管理する金山ダ ム、札内川ダム、豊平峡ダム、漁川ダムの4ダムを対象 とし貯水位の予測を検証した。各ダムの流域図を図-1, 諸元及び対象事例を表-1及び表-2に示す。

2.2 目的変数とその予測に用いる説明変数

本稿では、先行研究 ³⁾と同様に予測先行時間(Lead Time,以下LT)に合わせて6時間積算値及び12時間積 算値の流入量を目的変数とした.その理由は、1時間毎 の予測とした場合、降雨予測の精度が低いことと、現業 における事前放流などのダム操作判断にあたり、単位時 間の流入量ではなく、積算流入量に相当する貯水位が必 要となるためである.

表-3 に示す予測に用いる説明変数(モデルへ入力す る変数)は、「流入量」、「土壌雨量指数」を時間値で 使用し、それ以外の雨量データは LT 分の積算値で使用 した.また、「流入量」、「流域平均雨量」、「地点雨 量」は、国土交通省所管のデータを水文・水質データベ ース⁵⁾より取得し、「レーダー解析雨量」は(一財)気 象業務支援センターから購入した.この中で「地点雨量」 はダムサイトで観測された雨量を示す.「土壌雨量指数」

表-1 各ダムの諸元⁴⁾

		金山ダム	札内川ダム	豊平峡ダム	漁川ダム ロックフィルダム	
型式		中空重力式ダム	重力式 コンクリートダム	アーチ式 コンクリートダム		
水系河川		石狩川水系空知川	十勝川水系札内川	石狩川水系豊平川	石狩川水系千歳川	
堤高	m	57.3	114.0	102.5	45.5	
堤頂長	m	288.5	300.0	305.0	270.0	
流域面積	km ²	470.0	117.7	159.0	113.3	
能貯水容量	m^3	150,450,000	54,000,000	47,100,000	15,300,000	
有効貯水容量	m^3	130,420,000	42,000,000	37,100,000	14,100,000	
サーチャージ水位	m	345.0	484.0	474.88	176.5	
具常洪水時防災操作 開始水位	m	343.7	474.0	472.58	174.0	
平常時最高貯水位	m	345.0	474.0	474.88	164.3	
洪水貯留準備水位	m	338.5	466.0	458.78	161.0	
最低水位	m	320.0	447.5	437.68	154.6	

表-2 各事例の概要

	事例日時	最大流入量 [m ³ /s]
金山ダム	2016年8月31日午前3時	1,556
札内川ダム	2016年8月31日午前0時	707
豊平峡ダム	2011年9月6日午前5時	534
漁川ダム	2014年9月11日午前7時	687

表一3	説明変	数の諸元		
観測項目		データ概要		
流入量	m ³	一个时间的		
土壤雨量指数	mm	100時间10		
流域平均雨量	mm			
地点雨量	mm	$LT=6h \rightarrow t-6~t 006h 値算値$ LT=12h → t-12~t 0012h 積質値		
レーダー解析雨量	mm			

tは現在時刻を表す.

表-4 各ダムのテストデータ及び検証データ

	テストデータ	検証データ	
金山ダム	2016.8.27. ~ 2016.9.5.	2012.1.1. ~ 2012.12.31.	
札内川ダム	2016.8.27. ~ 2016.9.5.	2011.1.1. ~ 2011.12.31.	
豊平峡ダム	2011.9.2. ~ 2011.9.11.	2018.1.1. ~ 2018.12.31.	
漁川ダム	2014.9.7. ~ 2014.9.16.	2011.1.1. ~ 2011.12.31.	



は流域平均雨量を用いて算出する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.また、本研究 では予測雨量を使用せず、ダム貯水位がどの程度予測で きるかを検証した.

予測に用いたデータは2007年1月1日から2018年12 月 31 日まで収集した.各ダム事例の検証データ(学習 アルゴリズムの挙動を決めるハイパーパラメータを最適 化するためのデータ)及びテストデータ(学習に一切関 与しない評価用のデータ)の設定期間を**表-4**に示す. 検証データとテストデータ以外の期間すべてをモデルの 学習データとし,これらを用いて LT=6 h, LT=12 h の 2 ケースで予測を行った.

2. 3 Elastic Net[®]による統計モデル

Elastic Net はスパースモデリングの代表的手法であり 正則化を用いた重回帰分析手法である.通常の重回帰式 と異なり,不要な説明変数の重み(係数)がゼロになる 特徴を持つ. Elastic Net のコスト関数である*J*(*w*)は回帰 式の重みwを用いた以下の式で表せる.

$$J(w) = \sum_{i=1}^{n} (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2 + (1 - \alpha)\lambda_1 \sum_{j=1}^{m} w_j^2 + \alpha\lambda_2 \sum_{j=1}^{m} |w_j| \qquad (1)$$

ここで、 $y^{(i)}$ は実測値、 $\hat{y}^{(i)}$ は重回帰式から求められる 予測値であり、第1項は二乗誤差である。第2項がL2 ペナルティと呼ばれる Ridge 回帰で、選択する変数の個 数に影響を与える制約条件である。第3項はL1ペナル ティと呼ばれる Lasso 回帰で用いられる0以外の重みを 持つ変数を少なくしようとする説明変数の削除を意図し た制約条件である。Elastic Net はこの二つのペナルティ 重み α と二つのペナルティの大きさを制御する λ_1 , λ_2 を ハイパーパラメータとして最適化することで、少数のス パースな観測値からより良い回帰式を求める手法である。 また、ニューラルネット等の手法と異なりモデル内のパ ラメータ数が少なく、最終的なモデルも説明変数の線形



結合であるため,解釈性が高いのが特徴である.本稿で は検証データに対し最適化した α , λ_1 , λ_2 の値を用いる.

2.4 流入量予測値からの貯水位の算出法

本稿では以下に示す3つの方法を用いて,貯水位を算 出した.貯水位を求めるまでの流れを図-2に示す.

(1) 按分法

図-3 の左側に示すように算出された積算流入量と現 在時刻tに観測された流入量を用いて積算値が保存され るように台形近似によって1h毎に按分し,流入量の予 測値を仮定する. 貯水位は以下の手順で算出する.

- a) 最初に時刻 t の流入量と貯水位により,操作規則に
 基づき今後 1 h (t~t+1)の放流量を設定する. 放流
 量はその間一定とする.
- b) t~t+1 の流入量予測値と上記放流量から水収支計算
 により、時刻t+1の貯水量増減値ΔV(m³)を求める.
- c) V_{t+1} = V_t + ΔVで時刻 t+1 の貯水量を求め,貯水位-貯水量(H-V)関係より,時刻 t+1 の貯水位予測値 H_{t+1}(m)を求める.
- d) 上記手順を1h毎に繰返し,所定のLTまでの貯水 位を予測する.

(2) 差分法

図-3の右側に示すように時刻 t と時刻 t-1 において算 出された積算流入量の予測値の差を取り, t-1~t 間での 観測流入量を加えることにより t+5~t+6 間の流入量の予 測値を算出する. この手順で1h 毎の流入量の予測値を 求める. 以下, (1)に示す a)~d)の手順で貯水位を予測す る.

(3) 1h 值予測法

目的変数を LT までの 1 h 毎の流入量とし,(1)に示す a)~d)の手順で貯水位を予測する.

本稿では、まず、金山ダム、札内川ダムより上記3手 法を比較する.次にその中で結果が最も良い手法を、他 のダムに展開可能かを検証するため、豊平峡ダム及び漁 川ダムの予測を行なう.



図-4 各手法における予測結果

3. 結果と考察

本稿で用いた精度指標は以下に示す評価水位到達時 刻差(h)(以下, ΔT),観測ピーク相対誤差(%) (以下, J_{ne})を用いて行った.

$$\Delta T = T_o - T_c \tag{2}$$

$$J_{pe} = \frac{H_{op} - H_c}{H_{op}} \times 100 \tag{3}$$

ここで、*T*oは観測値における評価水位到達時刻、*T*cは予 測値における評価水位到達時刻、*H*opは観測ピーク貯水 位(m),*H*cは*H*op同時刻の予測貯水位(m)である. Δ*T*は金山ダム及び札内川ダムでは異常洪水時防災操作 開始水位到達時刻差、豊平峡ダムでは洪水貯留準備水位 到達時刻差、漁川ダムでは平常時最高貯水位到達時刻差 とする.なお、Δ*T*及び*J*peの値が負になると安全側の予 測であることを意味する.

3.1 金山, 札内川ダムの貯水位予測手法比較結果

前章で示した各手法における金山ダム及び札内川ダム の貯水位予測結果を図-4に示す.

結果より,金山ダムでは LT=6 h では予測結果に大き な違いはみられないが,LT=12 h は ΔT が按分法,1 h 値 予測法それぞれで5 h,7 h の遅れが生じ,差分法は3 h の遅れにとどまった.理由として,時々刻々変化する流 入量を直線的に按分するのではなく,算出された積算値 の差分をとることにより1h毎の流入量の変化を細かく 再現できたためだと考えられる.また,1h値予測法で は回帰式において目的変数と値の近い「流入量」以外の ほぼ全ての説明変数の重みがゼロとなっていた.すなわ ち,自己回帰(AR)式のような形となっており,精度 を高めるには新しい説明変数の追加や交互作用の利用も 検討していく必要がある.この結果は札内川ダムと金山 ダムで同様であり,差分法による貯水位予測が最も再現 性が高かった.

以上の結果から,差分法を用いることにより予測の遅 れを改善でき,観測ピーク時の貯水位も比較的安全側に 予測出来ることが示された.

3.2 豊平峡ダム,漁川ダムの貯水位予測結果

差分法による豊平峡ダム及び漁川ダムの貯水位予測結 果を図-5 及び図-6 の上側に示す.豊平峡ダムは金山 ダム,札内川ダム事例と同様にΔTの値がLT=6hで-1h, LT=12hで2hと小さく,*Jpe*も良好に予測出来ている. しかしながら,漁川ダムはΔTがLT=6hで4h,LT=12h で9hと予測に大きな遅れが見られ,*Jpe*も3%以上とな り十分な精度とはならなかった.原因として,2014年9 月事例は線状降水帯による短時間に集中する雨で急激な











図-6 漁川ダム貯水位予測結果 2014 年 9 月事例(上), 2011 年 9 月事例(下)

流入量の変化があったことが挙げられる.

そこで,漁川ダムにおいて,テストデータと検証デー タを入れ替え,2011年9月事例の予測を行った.結果を 図-6の下側に示す.また,この事例における ΔT は洪水 貯留準備水位到達時刻差とした.2011年9月事例では ΔT がLT=6hで-8h,LT=12hで-7hと安全側に評価され, J_{pe} も良好な予測となり,概ね予測出来ている.

以上より、急激な変化のある事例を予測することは現 在の予測モデルの枠組みでは難しいことが確認された. これについて、現在は学習データを増やすために過去数 年のデータを利用しているが、貯水位変化の大きい事例 がない場合集中豪雨による急激な変化を表しきれないこ とが原因と考えられる.このため、説明変数への2乗項 の導入など急激な変化の表現についてさらに検討する必 要がある.

3.3 各説明変数の重みによる考察

Elastic Net により算出された各説明変数の重み上位 3 位を表-5に示す.ここで,漁川ダムは2011年9月事例 の予測による結果を記す.結果より,今回検証した4つ のダムに共通して「流入量」,「土壌雨量指数」,「レ ーダー解析雨量」が上位にきている.従って,上記3つ

表-5 説明変数の重み上位3位一覧

順 位	金山ダム		札内川ダム		豊平峡ダム		漁川ダム	
	LT=6h	LT=12h	LT=6h	LT=12h	LT=6h	LT=12h	LT=6h	LT=12h
1	流入量	土壌雨量 指数						
2	レーダー 解析雨量	流入量	流入量	レーダー 解析雨量	流入量	流入量	レーダー 解析雨量	レーダー 解析雨量
3	土壤雨量 指数	レーダー 解析雨量	レーダー 解析雨量	流入量	レーダー 解析雨量	レーダー 解析雨量	流入量	流入量

の説明変数がダム流入量,貯水位予測に大きく影響する ことが示された.

4. まとめ

以上より本稿で得られた結果を以下に示す.

- 差分法を用いることで、従来の按分法に比べ貯水位 予測の遅れが改善された.
- Elastic Net による予測は、4 つの検討事例の内3 つ のダムで既往第1位の事例への適用が可能であるこ とを示した。
- 3) 漁川ダムの 2014 年 9 月事例のような急激な流入量の変化関する予測は難しいが、その事例を学習させることでそれ以外の事例を安全側に予測することが可能であることが示された.
- 4) ダム流入量、貯水位予測には「流入量」、「土壌雨 量指数」、「レーダー解析雨量」が大きく影響して いることが説明変数の重みより考察された.
- 5) 4 つの全てのダムにおいて予測雨量が無くてもΔTが 3 h, J_{pe}が 1%以下となり精度の高い予測結果を得 られることが示された.

謝辞:本稿を進めるにあたり,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.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 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-ダム防災操作の効率化を目指して-,土木学 会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_1327-I 1332, 2018.
- 坂本莉子,小林洋介,中津川誠:異常洪水時のダム貯水位予測に用いる機械学習手法の比較,土木 学会論文集 B1(水工学) Vol.75, No.2, I_85-I_90, 2019.
- 北海道のダム事業 | 北海道開発局, https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000 00054b9.html(閲覧日:2019/12/02)
- 5) 国土交通省:水文・水質データベース, http://wwwl.river.go.jp/(閲覧日: 2019/12/02)
- Hui, Z. and Trevor, H. : Regularization and vaniable selection via the elasticnet, Journal of the Royal Statistical Society, Series B67, pp.301-320, 2005.