

学習型AIを活用したダム安全管理のための判断支援ツールの開発

小堀俊秀・井上晃輔・松下智祥・櫻井寿之

1. はじめに

ダムの安全管理では、河川管理施設等構造令に従い、漏水量、変形（変位）や揚圧力等の各種計測を行っており、それらの計測データの監視が異常検知の基本的かつ重要な手段となっている。ダム管理者は、客観的な情報である計測データを、監視強化や対策検討の要否の判断に的確に活用することが求められる。これら計測データの安全管理への活用状況について、直轄と水機構のダム計133基のダムの調査を行った結果、約40%にあたる52基のダムから「信頼できるデータの分析によっても明確な異常有無の判断が難しい」など、経験ある職員も含めて何らかの課題があることが明らかになった¹⁾。そこで筆者らは、ダムの管理者による計測データ（時系列データ）の変動から異常有無の判断を支援するAI技術について検討を進め、「ダム安全管理用判断支援ツール」（以下「判断支援ツール」という。）の開発を行った。

2. 判断支援ツールで用いたAI技術

ダムの安全管理における計測のうち、漏水量や揚圧力は、貯水位の他に外気温やダム周辺地山の地下水位等の複数の要因の影響を受け増減を繰り返している²⁾。また、コンクリートダムの堤体変位量は一般に貯水位や外気温の影響を受け、周期的変化を繰り返すことが知られている。このように、漏水量、変形（変位）や揚圧力等は複数の要因による影響が各々時間をかけて各時点の計測データに反映される性質を持つと考えられる。そのため、判断支援ツールには、時系列データが持つ長期依存性を効率的に学習することが可能とされる再帰型ニューラルネットワークのひとつであるLSTM³⁾（Long Short Term Memory）を用いた。LSTMを用いた試算例¹⁾として、重力式コンクリートダム（堤高約120m）の堤体上下流方向変位量について示す。図-1に示すLSTMモデルの入

力層（説明変数）は、貯水位及び外気温の計測データを入力し、出力層（目的変数）は堤体変形（変位）とした。学習より得られた堤体変位量の推定値と実測値の比較を図-2に示す。同図中には従来手法である重回帰分析による結果も示しているが、LSTMによる推定は同図（b）に示すように実測値との差も小さく、実測値をよく表現できていることがわかる。

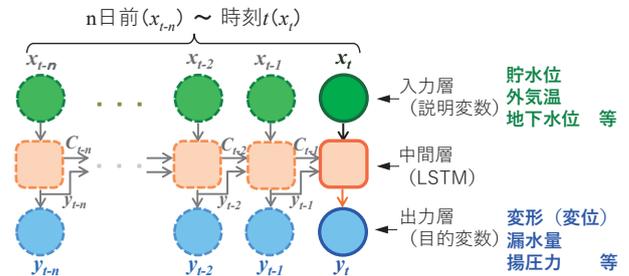


図-1 LSTMモデルの概要 1)を改変（加筆修正）して転載

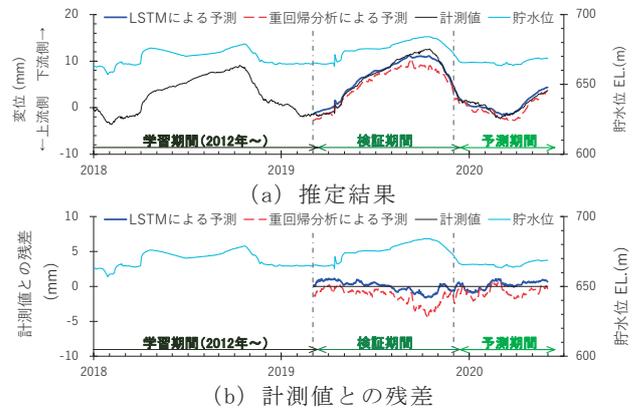


図-2 試算例（堤体変位量の推定） 1)を改変（加筆修正）して転載

3. 判断支援ツール

3.1 判断支援ツールの概要

ダムの安全管理においては、共通した管理基準値の設定は不適切であり、それぞれ個別のダムで計測された既往の計測値と比較することにより異常の有無の判断を行う。これを踏まえ、判断支援ツールでは、漏水量、変形、揚圧力等の計測データ（目的変数）と当該計測値の影響因子とされる貯水位、外気温等の計測データ（説明変数）を利用し、これらのデータを学習させ、学習期間における目的変数と説明変数の関係性から学習モデル

を構築し、目的変数において、学習期間に基づく推定と計測データが乖離する場合を「異常」と判断する。

判断支援ツールでは、過去データの長期的変化や最新データからダム異常を検知することや、将来におけるダムの異常検知のために、計測値と比較するための推定値を算出することを想定しており、以下a)~c)の用途に応じた機能を有する。

a)過去の挙動確認

活用場面としては、ダムの定期点検や総合点検等を想定しており、過去を学習期間、近年を推定期間として設定し、近年の時系列変化に異常の発生がないか、異常がある場合はいつ頃に顕在化したかを判断することができる。

b)当日の挙動確認

前回計測日から計測当日までを推定期間、それ以前を学習期間と設定することで、当日の計測値とツールによる推定値を比較し、当日の計測値に異常がないかを判断することができる。

c)将来の挙動予測

活用場面としては、計測データに上昇トレンドや下降トレンドが確認される場合に、今後の調査時期や補修時期を計画する際に使用することを想定している。判断支援ツールでは、計測データのトレンドラインを説明変数として加えることで、将来の挙動を予測する。なお、将来予測は、10日~365日の期間行うことができる。

3.2 判断支援ツールの使用方法

判断支援ツールは、汎用性を考慮し、データの入出力やパラメータの設定を表計算ソフトExcelで行えるものとした。判断支援ツールを用いた異常検知は、図-3に示す流れで行う。判断支援ツールを起動すると、図-4に示すように**基本設定**、**データ確認**、**異常検知**の3つのシートが表示される。

基本設定のシートでは、タイトル入力、保存場所や入力データの指定等を行う。なお、判断支援ツールにおける入力

データについては、CSVファイル形式の計測データを対象としている。

データ確認のシートでは、入力データの欠測値補間、目的変数・説明変数の指定、学習期間等の設定を行い、グラフを出力することで入力項目の確認を行う。

異常検知のシートでは、学習に必要なLSTMモデルの各種パラメータ設定、異常有無を判定するための閾値設定を行い、前節で述べた3つの用途に応じて異常検知結果を出力する。

3.3 判断支援ツールの主な機能

3.3.1 欠測値の補間

判断支援ツールで用いているLSTMは、欠測値や不規則なデータ間隔があると計算ができない。また、判断支援ツールは、日単位データを対象としているため、例えば計測期間が月単位である場合や計測機器の不具合により欠測が生じた場合については、欠測期間を補間する必要がある。

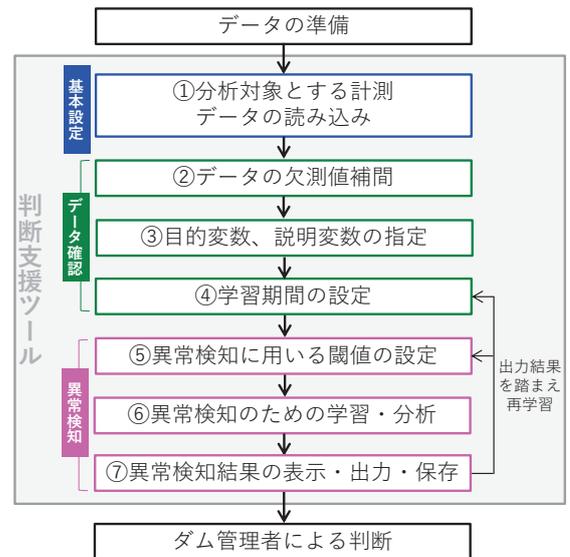


図-3 判断支援ツールによる異常検知の流れ

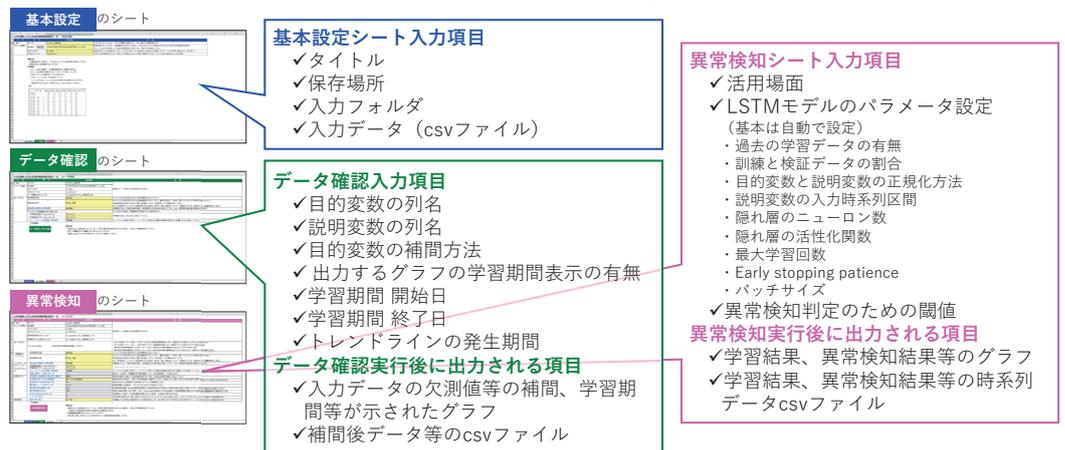


図-4 判断支援ツールにおける各シートの設定事項等

判断支援ツールでは、欠測値を自動で補間する機能を有しており、「線形補間（欠測値前後の計測値を用いて欠測値を推定）」と「状態空間モデル⁴⁾（計測時の時系列履歴から状態空間モデル等により影響因子から計測値を推定するモデルを作成し、欠測値を推定）」による補間の2つの方法から選択することができる。補間は、欠測期間がごく短時間である場合は線形補間を選択し、欠測期間が長期にわたる場合は、状態空間モデルによる補間を行うことを想定している。これは、欠測期間が長期間の場合に線形補間を行うと、本来季節的な変動サイクルを示す時系列変化を直線的に補間することとなり、実態と乖離した計算となる恐れがあるためである。

3.3.2 学習期間の設定

学習期間は、学習モデルの精度を決定する上で最も重要な要素となるため、評価対象とする計測データの時系列変化や判断支援ツールの用途を踏まえて適切に設定する必要がある。

学習期間の設定の考え方は、「3.1判断支援ツールの概要」で述べたa)~c)の用途に応じて異なる。共通の考え方として、ダム完成後数年は学習期間から除外することが望ましい。これは、ダム完成後から数年（目安として管理期間の区分の第2期⁵⁾まで）はダムの挙動が安定していないため、当該期間を学習期間に含むことで適切な異常検知ができなくなる可能性があるためである。用途ごとの学習期間設定の考え方は、表-1~表-3に示す通りである。

3.3.3 閾値の設定

閾値は、計測データの異常の有無を明確にし、ダム管理者による判断を支援するための指標として、判断支援ツールの計算結果を示すグラフに表示させるものである。

閾値は、表-4に示す閾値から選定することができる。閾値は、各ダムの管理方針に応じて選定する。閾値は、異常検知を厳しく行う場合は、 $\pm 1.96\sigma$ ~ $\pm 3\sigma$ を閾値として設定するとよいが、多数のデータを異常の可能性があると判断することとなる。

3.3.4 結果の出力

判断支援ツールの異常検知の出力例として、アーチ式コンクリートダム（堤高約130m）の上下流方向変位量について、過去データの長期的な

表-1 学習期間設定の考え方 a)過去の挙動確認

	計測値(目的変数)の時系列変化	学習期間の考え方
① 時系列変化に大きな変化なし		学習期間の違いによる計算の差異は少ない。特に問題がない場合、学習期間はできるだけ長く設定する。
② 時系列変化にトレンドがなくばらつき多い		
③ ある時点からトレンドが発生		トレンドが顕在化した時期の推定は、トレンド兆候がほとんどない期間を設定する。
④ ある時点からトレンド発生後補修し改善		補修前後の時系列変化は連続性がないため、補修後の期間のみで学習期間を設定する。

表-2 学習期間設定の考え方 b)当日の挙動確認

	計測値(目的変数)の時系列変化	学習期間の考え方
① 時系列変化に大きな変化なし		説明変数に内生変数（計算結果が計測値に追従するような目的変数自身の時系列変化）を加えることで、学習期間の違いによる計算の差異は少ない。よって、学習期間はできるだけ長く設定する。
② 時系列変化にトレンドがなくばらつき多い		
③ ある時点からトレンドが発生		
④ ある時点からトレンド発生後補修し改善		

表-3 学習期間設定の考え方 c)将来の挙動予測

	計測値(目的変数)の時系列変化	学習期間の考え方
① ある地点からトレンドが発生		学習期間内にトレンドの変化点等が含まれる場合、変化点以降の期間を学習期間として設定し直すことよい。左記のグラフの場合、下段の学習期間を設定する。

表-4 閾値の設定

設定できる閾値	閾値の説明
$\pm 1.96\sigma$	学習期間の“計測値-推定値”の残差のばらつきの $\pm 1.96\sigma$ （データの含まれる確率95%）
$\pm 2.58\sigma$	学習期間の“計測値-推定値”の残差のばらつきの $\pm 2.58\sigma$ （データの含まれる確率99%）
$\pm 3\sigma$	学習期間の“計測値-推定値”の残差のばらつきの $\pm 3\sigma$ （データの含まれる確率99.7%）
最大/最小	学習期間の“計測値-推定値”の残差の最大値と最小値 ※学習期間に異常値となる極大値が含まれていると、当該データで閾値が決まってしまうため、注意が必要。

変化からダムの異常を検知した結果を示す。目的変数は変位量、説明変数は貯水位と気温を用いた。

出力結果を図-5に示す。図-5(d)では、ダム管理者が設定する判断の指標となる表-4の設定を行った閾値が表示される。ダム管理者はこの閾値を基準に異常有無の判断を行う。

なお、分析結果は図-5に示すようなグラフを

pngファイル（画像ファイル形式）で出力できることに加え、数値データをcsvファイルで出力できるので、任意のソフトでの編集や保存も可能である。

3.3.5 判断支援ツールの活用

判断支援ツールを用いることにより、学習結果から機械的に判断基準の設定が可能となる、長期トレンドの変化点を推定できる、将来の挙動推定等が可能となる。判断支援ツールによる判定により計測データに異常と判断された場合は、日常点検結果や、他の計測データ等を総合的に評価し、ダム構造としての異常がないか判断を行うとともに、必要に応じて、ダム専門家の判断を仰ぎ、ダムの安全性の評価を行う。

4. まとめ

AI技術の一つであるLSTMを用いて、ダム管理者等による異常有無の判断を支援するツールを開発した。判断支援ツールはユーザーのAI技術への理解度によらずに活用可能なツールとなっている。判断支援ツールを用いることにより、計測データの異常有無の判断を容易に行えることが期待される。

開発した判断支援ツールは、大規模河川構造物研究室HP（<https://www.nilim.go.jp/lab/ffg/index.htm>）で、2023年9月より公開している。判断支援ツールの具体的な使用方法については研究室HPを参照されたい。

なお、判断支援ツールは、計測データによる異常検知を行う機能を有しているが、実務での活用

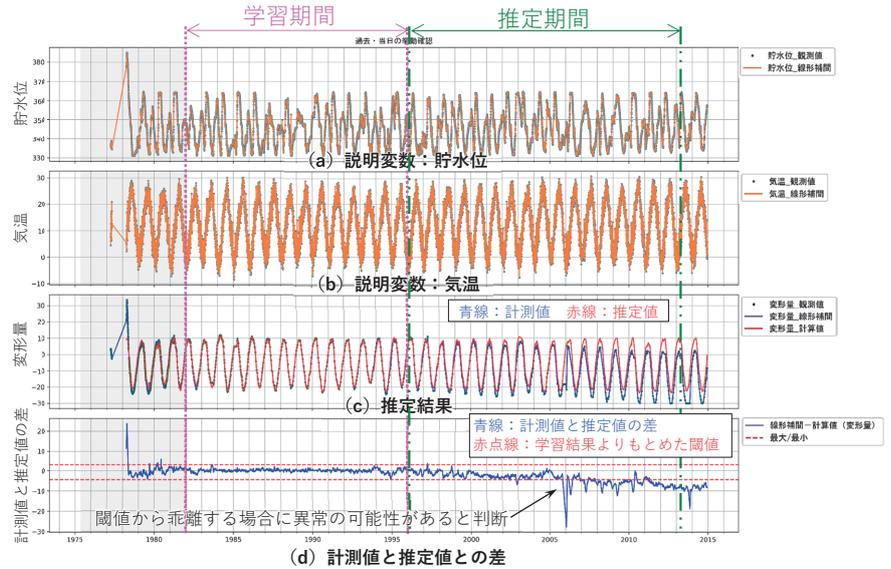


図-5 出力例（ダムの変形に関する過去の挙動確認）に説明を追記

を想定した場合、例えば、複数箇所や異なる計測項目間のデータを総合的に分析して異常かどうか判断する等の機能は、現時点では有していない。今後は、ダム管理者による実証実験等を継続して課題を抽出し、より熟練技術者のノウハウに近い判定が可能となるように改良を加えていきたい。

参考文献

- 1) 小堀俊秀、二階堂良平、松下智祥、金銅将史：ダムの安全管理用計測データに基づく異常検知へのAI技術活用に向けた試行検討、インフラメンテナンス実践研究論文集、(公社)土木学会、1巻1号、pp.363～371、2022。
- 2) 飯田隆一：ダムの安全管理、(一財)ダム技術センター、2006。
- 3) 例えば、岡谷貴之：深層学習、講談社、2015。
- 4) 北川源四郎：時系列解析プログラミング、岩波書店、1993。
- 5) 国土交通省：国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）、2016。

小堀俊秀



国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官、博士（工学）
Dr. KOBORI Toshihide

井上晃輔



国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部大規模河川構造物研究室 交流研究員
INOUE Kousuke

松下智祥



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部大規模河川構造物研究室研究官、現 国土交通省関東地方整備局鬼怒川ダム統合管理事務所
MATSUSHITA Tomoaki

櫻井寿之



国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 大規模河川構造物研究室長
SAKURAI Toshiyuki