

# AI（人工知能）を活用した地下水位予測に基づく警戒値の検討について

坂野 峻介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 奈良国道事務所 計画課 (〒630-8115奈良県奈良市大宮町3-5-11)

京奈和自動車道・大和北道路は、世界遺産「古都奈良の文化財」をはじめ、数多くの歴史的建造物、歴史的景観が存在する奈良市内を通過する道路で、広域的なネットワークの形成により県内外からのアクセス性の向上や現道の渋滞緩和などが期待されている。

本報告では、平城宮跡の地下に埋蔵されている奈良時代の史料として価値の高い「木簡」をはじめとした文化財保護の観点から、工事中における適切な地下水モニタリングを運用していくためAI（人工知能）を活用した地下水位予測に基づく警戒値の検討について紹介する。

キーワード 文化財保護，地下水モニタリング，AI技術

## 1. はじめに

### 1.1 地下水モニタリングの背景

京奈和自動車道は、大和平野を南北に縦貫して京都と和歌山を結ぶ高規格幹線道路である。そのうち、大和北道路は、木津IC～西名阪自動車道までの区間、約12.4kmの名称であり、平成20年に下図のルート「西九条佐保線地下+高架案」で都市計画決定されている。

計画ルートから西へ約700mの位置に、世界文化遺産である平城宮跡が存在し、埋蔵文化財（木簡）が大量に発見されている。木簡はおおよそ地下1～2m付近から出土されるが、平城宮跡内の地下水位がごく浅い位置に保たれているため、木簡が腐食することなく長期間保存されてきたと考えられている。大和北道路事業によって地下水位の低下が平城宮跡内へ波及した場合に、埋蔵されている木簡へ悪影響が懸念されるため、平成12年頃から地下水調査が継続して実施されてきた。



図-1 計画ルートと平城宮跡との位置関係

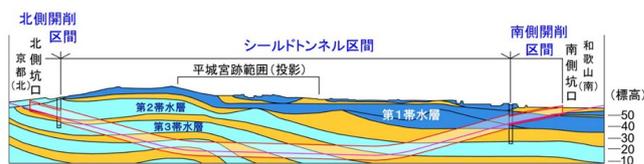


図-2 計画ルート（地下空間）の想定水理地質断面図

### 1.2 検討の背景と流れ

#### 1)警戒値の考え方

大和北道路事業における地下水監視体制は、工事前既往最低水に基づく管理基準値の超過に伴い、管理レベルを「正常」から「異常」に移行し、関係者（事業関係者）は委員会の意見・助言を踏まえ、必要に応じ、追加、緊急対策や保全措置などの「異常時対応」を検討、実施するものであった。しかし管理基準値超過直後に異常時対応に向けた行動を開始しても、時間的猶予の不足により適切に管理できない（手遅れとなる）ことが懸念される。そこで管理基準値を超過する前段階として「警戒値」を設定することで「対応」までの時間的猶予を確保し、「異常時対応」への実効性を高める方針とした。

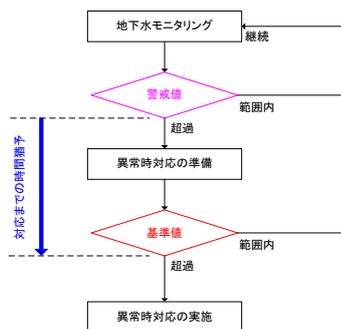


図-3 警戒値導入による管理基準値運用の考え方

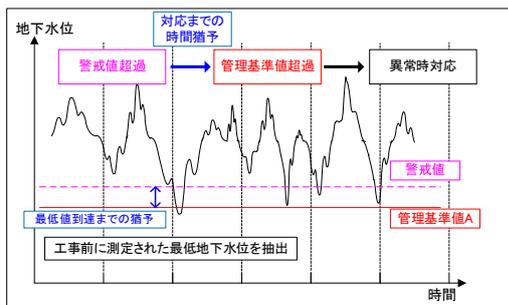


図4 管理基準値と警戒値の関係

## 2)発生確率水位による警戒値設定

警戒値を設定するにあたり、観測地下水位を用いた確率計算から設定することを最初に試みた。すなわち年度毎の発生確率低水位を算定し、その平均値を警戒値とした(1, 5, 10%)。これにより警戒値自体の設定は可能であったが、当該地では地下水位が経年的にゆるやかに上昇しているため、確率水位の算定期間に応じて警戒値が変化する等の課題があった。

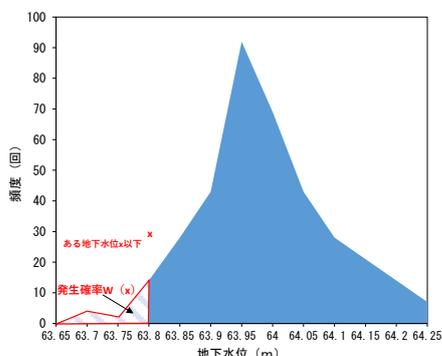


図5 発生確率水位の概念



図6 発生確率水位による警戒値の設定

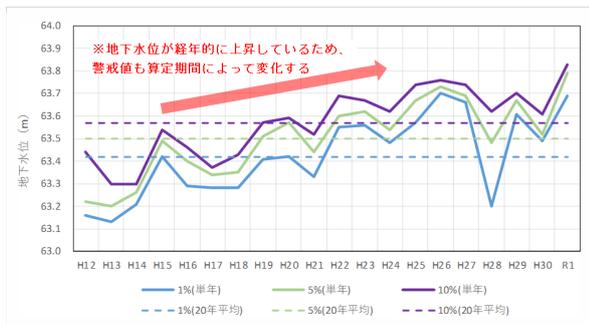


図7 発生確率水位の経年変化

## 3)検討の流れ

経年的な水位上昇傾向を反映した警戒値を検討するには何らかの水予測モデルの導入が必要と判断された。代表的な予測手法として、物理式に基づく地下水流動モデルが挙げられる。これらを適切に用いることで様々な現象(シナリオ)に対して説明性の高い予測精度が得られると考えられるが、モデル構築(条件設定・パラメータ設定)や精度確保に要する労力が大きい。一方、近年他分野で積極的に導入されるAI技術であれば学習データを与えることで自己学習を行うため飛躍的に作業の効率化が図れる可能性が考えられた。そこで本検討ではAI技術を活用して合理的に警戒値を設定する方針とし、河川分野における洪水予測等で実績を有する多層のニューラルネットワークで学習するディープラーニング(深層学習)を適用した。

地下水の変動要因と考えられる地下水位調査結果や気象データ等を学習データとし、地下水位予測可能なAIモデルを構築し、次に将来シナリオをAIモデルに与えて地下水水位を予測し、警戒値の設定を検討することとした。

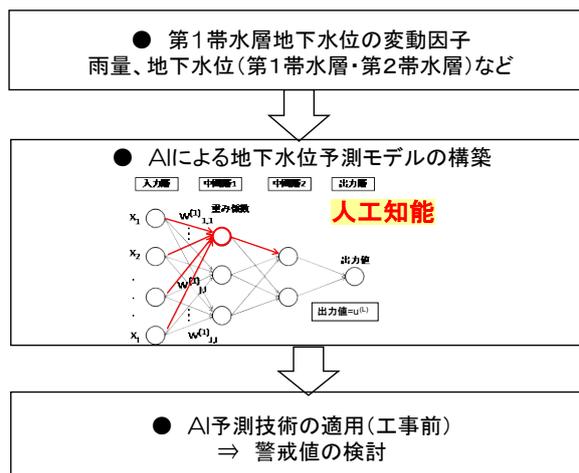


図8 AI予測のモニタリングシステムへの適用の流れ

## 2. 検討内容

### 2.1 観測データの精査

#### 1)対象地の地下水位の特徴

調査地の帯水層構造と地下水位変動の特徴を図9に示す。当該地の帯水層は上位より第1・第2・第3に区分される。第1帯水層は地表付近の帯水層とされるが、観測地点の大多数は沖積粘性土によって覆われ、ゆるく被圧している。第2・第3帯水層は大阪層群帯水層中の被圧地下水であり、経年的上昇傾向が顕著である。(地下水利用量の減少に起因)。第1帯水層水位は第2・第3帯水層水位と比較すると変化量は小さいものの、ゆるやかな継続的上昇が確認される地点が多い。第2帯水層水位の上昇影響(粘土を介した圧力伝搬)を受けているためと推定される。

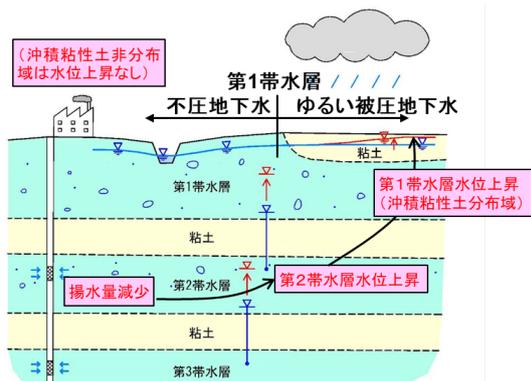


図-9 地下水位変動メカニズムの模式図

2)地下水位観測地点

大和北道路および平城宮跡の周辺で約50地点で地下水位観測が行われているが、異常時対応のための時間的猶予を確保することが警戒値設定の意義であり、南側開削トンネル工事位置から平城宮跡まで測線上に並ぶ、3地点 (No.21, No.1, No.11) を対象とした。

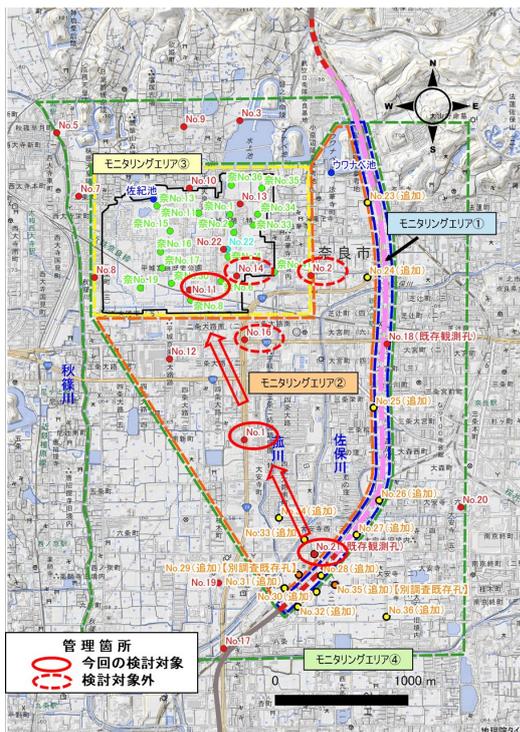


図-11 検討対象地点位置図

3)学習データの整理

①自然因子 (気象水文)

自然因子の学習データとして、当該地の水理地質構造を踏まえた気象 (降雨量, 連続干天日, 気温), 河川水位, 第2帯水層地下水位の5項目を取り上げた。第2帯水層の地下水位は経年的な上昇傾向が明確であるが、人為因子である地下水利用量の減少傾向に起因した変動であ

る。このため、第2帯水層地下水位は間接的に人為因子とみなすことも可能である。

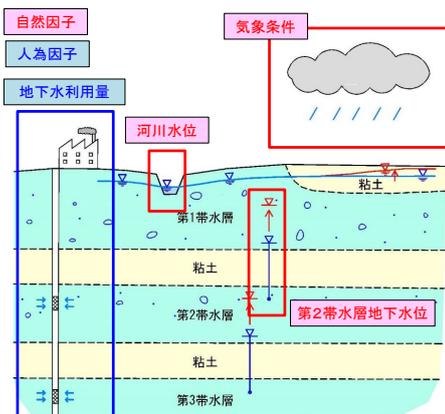


図-10 第1帯水層地下水位の影響因子

②人為因子 (地下水利用量)

地下水利用は用途別に「水道」・「工業」・「農業」の3つに大別される。このうち、水道・工業は統計資料において実績の地下水利用量が公表されている。ただし、H30年度以降、水道統計資料が刊行されていない。また農業については地下水利用量の統計がない。公開資料の整備状況を踏まえ、工業用途以外は関連する代替指標を用いることとした。「水道：給水人口」, 「工業：地下水利用量」, 「農業：水田面積」をAIモデルの学習データとする。なおデータの集計範囲は帯水層の分布域 (= 奈良盆地) とすることが妥当と考えられるが、今回の検討では全県を対象に集計した値を用いた。

区分	資料	備考
水道	奈良県の水道概要 (奈良県)	奈良県からの統計資料発行はH29で終了
工業	工業統計調査結果確報 (奈良県)	
農業	土地利用細分メッシュデータ (国土交通省 国土数値情報)	S51,S62,H3,H9,h18,H21, H26 時期が限定的

表-1 用途別収集資料

2.2 地下水位予測モデルの構築

1)AIモデルの構築・検証の進め方

AI予測モデルを構築するため、以下のステップで構築・検証を進めた。すなわち「年間変動の再現可能なモデルを構築 (ステップ1)」ののち、そのモデルに長期トレンドに関する成分を追加し「年間変動と長期トレンドの再現可能なモデル構築 (ステップ2) の過程で得られた最適AIモデル (影響因子の組み合わせ) をその他2地点 (No.21地点, No.11 地点) にも適用 (ステップ3) し、再現性を確認した。

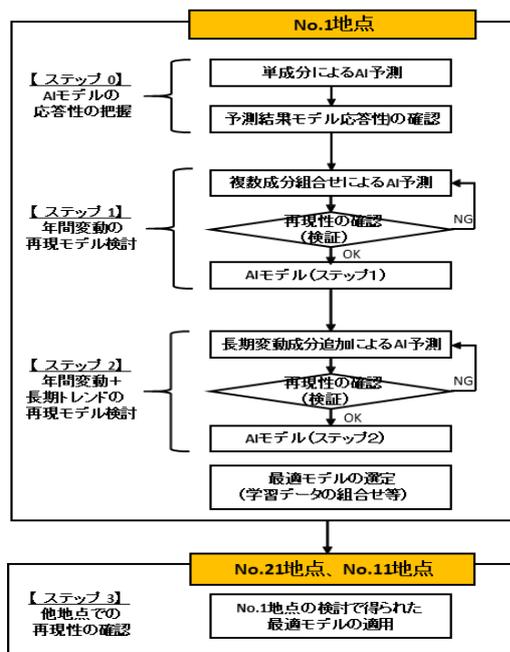


図-11 AIモデルの構築・検証の段階的な進め方

2)AIモデルの構築結果

影響因子として降雨・気温・連続干天日・河川水位を単成分としてAIモデルの応答性を確認した結果、いずれの因子も単独では地下水位変動を表現することは不可能であった。そこで各成分を複数組み合わせ合わせた学習を行ったところ予測値の再現性が格段に向上した。組み合わせのパターンは「降雨量(1日)、降雨量(7日)、降雨量(30日)+連続干天日+気温」がその他の組み合わせよりも再現性が良好であったため、これをベースケースとした。さらに、再現性を向上させるために、ベースケースに降雨の単純トレンド(増加・減少)、第2帯水層水位、地下水利用量(工業用水、給水人口、水田面積)をそれぞれ足し合わせて予測した結果、ベースケース+第2帯水層地下水位の組み合わせが最も再現性が良好であった。(図-12)

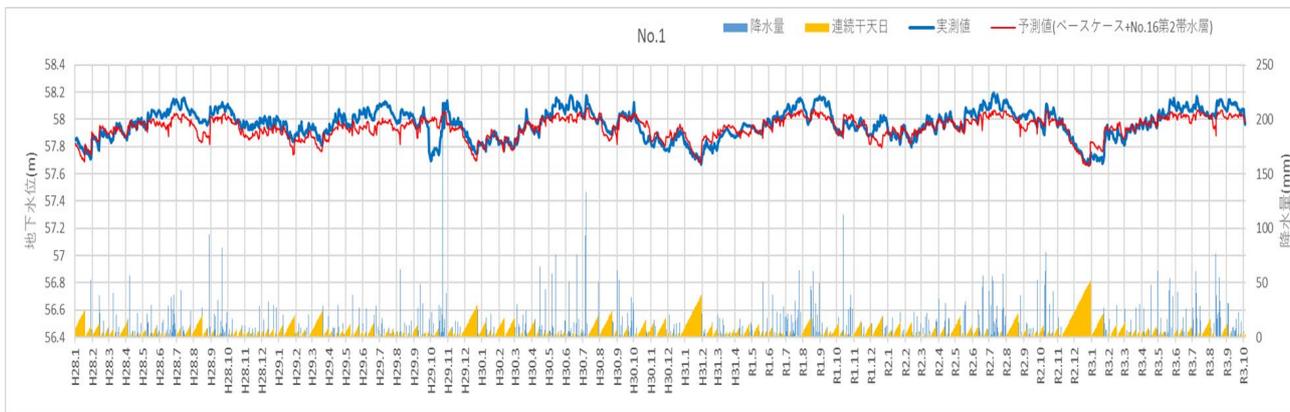


図-12 AIモデルによるテストデータの検証結果

2.3 地下水位予測モデルによる警戒値の検討

1)予測シナリオの設定

AI予測モデルを活用して下図に示すように警戒値設定を検討した。地下水位は、基本的に降雨の多寡に応じて変動するため、降雨条件を変化させるシナリオを設定して地下水位予測を行った。降雨の設定は、「年間降水量」及び「降雨の降り方(連続干天日)」の2つの観点から設定した。

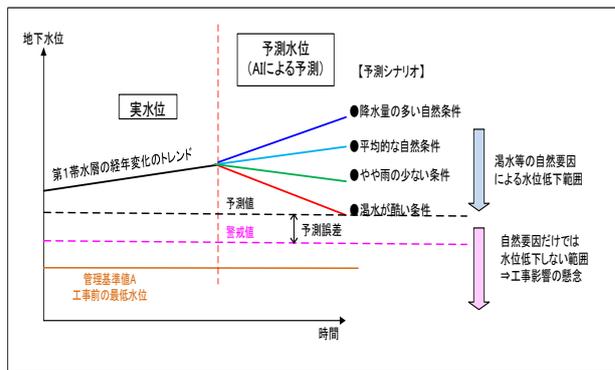


図-13 警戒値設定方法の模式図

表-2 予測ケース(シナリオ)の設定

着眼点	ケース	分類	位置づけ	年間降水量(mm)	最長連続日数(日)
年間降水量	1-1	水文基準年	最大渇水年	716	31
	1-2	"	1/10渇水年	1110	33
	1-3	"	平水年	1416	27
	1-4	"	1/10豊水年	1619	33
	1-5	"	最大豊水年	1790	30
降雨の降り方	2-1	連続干天日	最大(第1位)連続日数	1546	71
	2-2	"	第2位連続日数	1464	59
	2-3	"	第3位連続日数	1300	53
	2-4	"	平均的連続日数	1169	30
	2-5	"	最短連続日数	1623	16

2) 予測シナリオの検討

① 年間降水量

気象庁奈良観測所の既往観測データを用いて降水量の傾向を分析した。過去67年間の降水量データによると、平均値1372mm、最大値1790mm、最低値716mmとなる。統計処理に基づく水文基準年は1/10渇水年1110mm、平水年1416mm、1/10豊水年1619mmとなる。月別降水量の傾向では11月～翌2月にかけて小雨月（渇水期）、6月～9月にかけて多雨月（豊水期）として区分することができる。

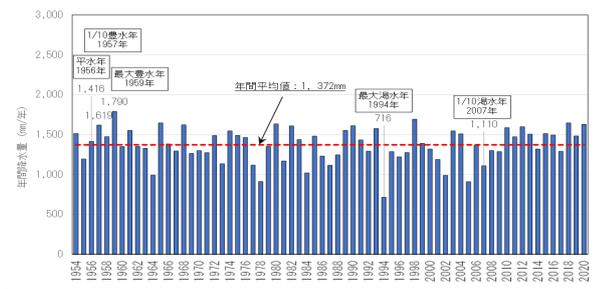


図-14 年間降水量の推移



図-15 月平均降水量

② 降雨の降り方（連続干天日）

気象庁奈良観測所の降水量データを用いて連続干天日数の傾向について分析を行った。連続干天日数とは、降水量5mm/日未満のことであり、無降雨状態の指標とされる。

過去67年間の降水量データによると、連続日数は最大値から順に71日（1月）、59日（2月）、52日（12月）、51日（9月）と渇水期に長期化する状況が確認される。頻度分布図からも連続干天日は渇水期である12月～翌2月に発生頻度が高く、次いで8～9月に出現しやすいことが読み取れる。なお、連続干天日数と年間降水量の相関性は乏しく、最大渇水年・1/10渇水年における最大連続干天日数は平年値程度となっている。

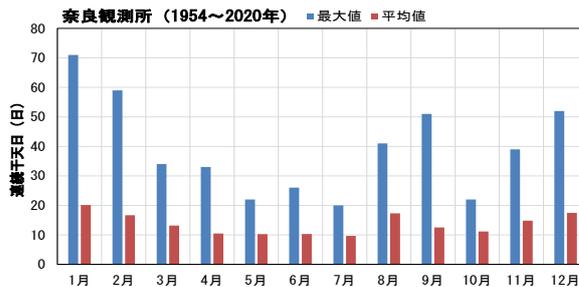


図-16 月別の連続干天日数（最大値・平均値）

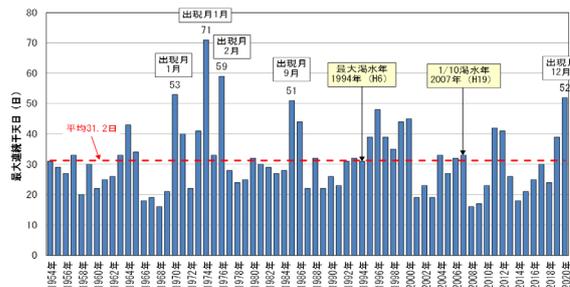


図-17 最長連続干天日数の推移

③ 予測結果

a) No. 1（水文基準年）

予測結果によると予測される地下水位の年間最低水位は、低い順に標高57.73m（1/10渇水年）、57.82m（最大豊水年）、57.83m（平水年）、57.84m（最大渇水年）、57.91m（1/10豊水年）であった。



図-18 No.1（水文基準年）予測結果

b) No. 1（連続干天日）

予測結果によると予測される地下水位の年間最低水位は、低い順に標高57.63m（最長1位）、57.68m（最長2位）、57.73m（最短）、57.77m（平均）、57.79m（最長3位）であった。

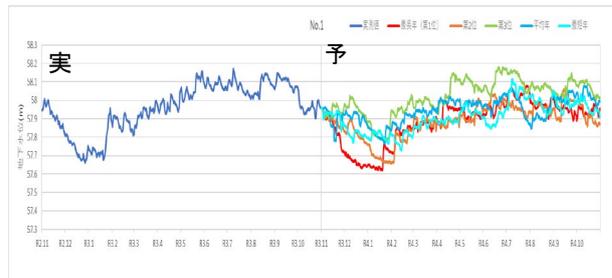


図-19 No.1（連続干天日）予測結果

#### ④警戒値（案）の設定

AIモデルによる予測計算地下水位のうち最低水位を参考に警戒値を検討した。モデル検証において評価した計算誤差を踏まえ予測値に計算誤差分を加味した値を警戒値として採用した。

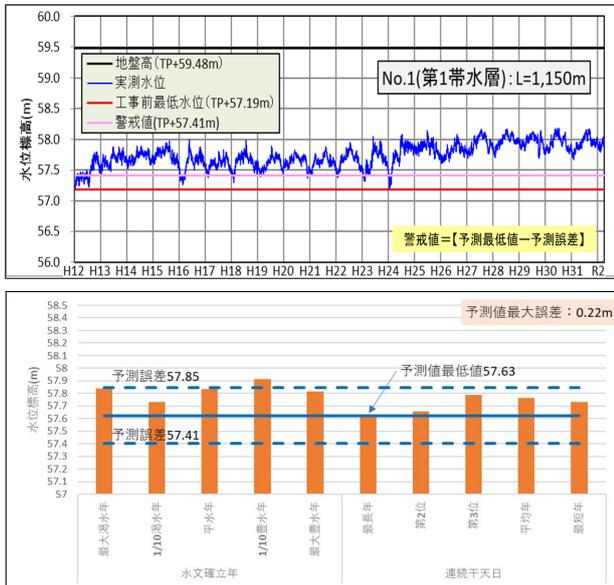


図-20 No.1地点の警戒値（案）の設定

### 3. おわりに

本検討によりAI技術（ニューラルネットワークによる深層学習）により当該地の地下水位変動を精度良く予測することが確認された。また経年的な上昇傾向が継続される観測地点に対し、適切に警戒値を設定することができた。さらに発展的な利用方法として「工事中」段階においてはモニタリングシステムにAI技術を実装して日々予測を行うことで、リアルタイム影響監視等によるシステム拡張の可能性が考えられる。

今後の検討課題としては、水理地質状況の異なる他サイトでの本手法の適用性検証やその他の予測手法との比較による評価、学習データを超過する予測条件時の計算結果の精度向上策の検討などが挙げられる。

**謝辞：**本稿の作成にあたり、ご助言、ご協力をいただいた日本工営(株)の方々に心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 京奈和自動車道(大和北道路)環境影響評価書（平成20年3月）
- 2) 大和北道路地下水モニタリングシステムとリスク低減計画（案）（平成30年2月）
- 3) 深層学習を用いた河川水位予測手法の開発(水工学論文集、第60巻、平成28年2月)