

水道情報の活用等による技術水準の確保及び技術継承のための研究

研究代表者 清塚 雅彦 公益財団法人水道技術研究センター 常務理事

研究要旨

我が国では、人口減少に伴う水需要の減少、水道施設の老朽化、深刻化する人材不足等の水道が直面する課題に対応し、水道の基盤強化を図ることが求められている。

本研究では、水道事業者が保有するビッグデータを活用することにより、浄水場の運転管理の負担軽減を検討する。また、水道管路の維持管理についてもビッグデータを活用して構築した漏水予測モデルや、既存のデータ収集手法を見直し、新たにデータを収集する。データを活用して構築した GIS システム及び事故発生要因の分析結果等を提示することで、管路の維持管理・更新計画の立案などデータに基づいた技術継承を含めたアセットマネジメントの一助とするものである。

具体的には以下のような4つの課題について取り組んでいる。

- (1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討
- (2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討
- (3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析
- (4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

研究期間は、令和5年度から令和7年度の3ヵ年を予定しており、令和5年度は3ヵ年計画の1年目である。研究体制は清塚雅彦（水道技術研究センター常務理事）を研究代表者とし、学識者および水道技術研究センター職員を研究分担者とするとともに、水道事業者の技術者を研究協力者とした。

令和5年度の研究成果の概要は次のとおりである。

(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討
各水道事業者にてビッグデータや AI・機械学習の活用状況、浄水処理に関する課題、凝集沈殿処理におけるフロック画像の撮影状況等についてのアンケート調査票を作成し、全国の132水道事業者に対して送付し、97水道事業者から回答を得た。アンケート調査の結果よりビッグデータや AI・機械学習を活用している事業者は限られていることが確認できた。

また、研究代表者清塚が行った令和2年～令和4年度までの科研において浄水分野のビッグデータについて文献調査を行っているため、今年度は主に管路分野について関連キーワードを整理したうえで、科学技術論文に関する文献データベースである Web of Science Core Collection を用いて文献検索を実施した。検索抽出された文献のタイトル・キーワード・要旨等をもとに、利活用分野毎に分類した文献リストを作成し、文献収集を行った。研究の初年度である本年は、キーワードの組み合わせで抽出できた文献の中から近年のものや引用数の多いもの64文献をリストアップし、うち無料で入手できたもの36件と有料で入手したもの17件の合計53件の要点を翻訳した。

(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討
砂ろ過の損失水頭に影響する因子を整理し、研究協力事業者から入手したデータを元にニューラルネットワーク、LSTM等の手法により、砂ろ過の損失水頭を予測するモデルを構築した。モデルの精度を比較した結果、時系列変化を学習する LSTM モデルが最も高精度であった。また、入力に必要なデータは、水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度、ろ過継続時間であり、これらの浄水場で容易に観測可能なデータから損失水頭の予測が可能となった。さらに、LSTM を用いてろ過速度を変動させたシミュレーション数値実験を実施した。その結果、ろ過速度が3割以上

増加すると、洗浄頻度の見直しが必要であることが示唆された。

(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

本研究では、衛星より取得した干渉 SAR 時系列解析を用いて地盤変動量の推定を行った。千葉県を例として、ALOS-2 の PALSAR-2 画像を用いて干渉 SAR 時系列解析を実行し、千葉県内の地盤沈下の発生状況を推定した。さらに、公開されている水準測量結果と比較することで推定精度を評価した。その結果、地盤変動が目立った地域においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向を捉えられることが分かった。

(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

既存のデータ収集手法を見直すために、水道技術研究センターで毎年実施している「水道管路の布設状況及び漏水事故に関するアンケート調査」の令和3年度結果を集計し、課題点を明らかにした。アンケート回答の負担軽減と、より精度の高い回答結果を得られるよう課題点を改善したアンケートの入力フォーマットを作成した。

また、研究協力者に参加している水道事業体に対して、国土地理院の地図データを活用できるフリーでオープンソースな Quantum-GIS (QGIS) を導入しデータ収集を行うために、管路事故情報の管理を目的とした QGIS のマニュアル案を作成し、水道事業体に導入してもらった。マニュアルの作成にあたっては、研究協力者である水道事業体に対して QGIS 導入から操作方法の説明を行い、マニュアル内容に関する意見をフィードバックしてもらった。

研究分担者氏名・所属研究機関名及び所属研究機関における職名

- 市川 学・公益財団法人水道技術研究センター 主幹 浄水技術部長
- 増田 貴則・国立保健医療科学院 統括研究官
- 山村 寛・中央大学 教授
- 丸山 喜久・千葉大学 教授
- 國實 誉治・東京都立大学 特任准教授

A. 研究目的

平成30年の水道法改正の主目的は、人口減少に伴う水需要の減少、水道施設の老朽化、深刻化する人材不足等の水道が直面する課題に対応し水道の基盤強化を図ることであり、適切な資産管理の推進が重要施策の一つとされていた。適切な資産管理を行うためには多大な時間と費用を要するだけでなく、その多くが人の手に依存しているという課題が存在しており、近年、これら課題の解決に向けて CPS/IoT 等の先端技術の活用が着目されている。

このような背景のもと、水道事業体が抱えるビッグデータを活用することにより、浄水場の運転管理の負担軽減を検討するとともに、水道管路の維持管理についてもビッグデータを活用して構築した漏水予測モデルや、既存のデータ収集手法を見直し新たに収集したデータを活用して構築した GIS システム及び事故発生要因の分析結果等を提示することで、管路の維持管理・更新計画の立案などデータに基づいたアセットマネジメントの一助とする。加えて、水道の基盤強化に向けて、管路における技術継承の

体系化による効率的な人材育成手法について提案することを目的としている。

B. 研究方法

令和5年度は、「(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討」ではアンケート調査及び海外文献調査、「(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討」では砂ろ過の損失水頭を予測するモデルを構築、「(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析」では干渉 SAR 時系列解析を用いて地盤変動量の推定、「(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討」では既存の漏水事故アンケート調査の見直し及び QGIS マニュアル作成に取り組んだ。

(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討

全国の水道事業体へのアンケート調査と海外文献調査を実施し、ビッグデータ等の活用状況や課題、凝集沈澱処理における現状等を整理するとともに、ビッグデータ等の活用可能性について課題を確認した。アンケート調査は全国の132水道事業体に対して送付し、97水道事業体から回答を得た。海外文献調査は国立保健医療科学院内にて利用可能な学術文献データベース (Web of Science Core Collection) を用い、本年度は管路に関する文献調査のため、あらかじめ設定した管路に関するキーワードにて文献検索を実施した。

(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討

本研究では、研究協力者である長岡市水道局の水質データを用いて砂ろ過の損失水頭を予測するモデルを構築した。水質データは、長岡市水道局の妙見浄水場の2021年4月から2023年3月までの凝集剤注入量、処理水濁度、ろ過池流入水、ろ過量、損失水頭、ろ過水濁度の1時間間隔データを2年間分いただき、データの前処理や統合方法を検討した上で、重回帰モデル (MLR)、ランダムフォレスト (RF)、ニューラルネットワーク (DNN)、長期短期記憶 (Long Short-Term Memory : LSTM) により予測手法を比較した。

各モデルの性能を評価する指標として、決定係数 (R^2) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を利用した。 R^2 は、1に近いほど高精度とみなした。一方、RMSE は、値が0に近いほど予測が適合していると判断した。

また、ろ過速度を変動させた場合のシミュレーションを実施した。シミュレーションは、LSTM モデルを用いて行った。ろ過速度と損失水頭が異なる4つのパターンでシミュレーションモデルを構築し、各モデルは5回学習をさせ、最も高精度の結果を用いてシミュレーションを行った。

(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

本研究では、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2) が撮影した PALSAR-2 画像を用いる。ALOS-2 に搭載されているレーダセンサ PALSAR-2 は、地上3m分解能を有するLバンドのセンサであり、災害状況の把握、森林分布の把握や地殻変動の解析など、様々な目的で使われている。Lバンドのマイクロ波は、透過性が高く木の枝葉を透過しやすいため、地表面の形状を捉えることができる。

干渉 SAR 時系列解析の結果は、千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて精度を検証した。対象地域内では1003個の水準測量点が存在する。さらに、地盤変動量と漏水位置の関係性を確認した。

(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

アンケートの回答を行う担当者の負担軽減や、できるだけ正確な回答が得られるように、過去に集計したアンケートの回答結果について分析を行った。全国統一の水道管路事故に関するアンケートの入力フォーマットを作成するため、水道技術研究センターが実施している「水道管路の布設状況及び漏水事故に関するアンケート調査 (その2)」の内容を見直して修正を行った。

また、全国の水道事業者で保有する水道管路事故データの効率的な管理と可視化を目的に、中小事業者でも導入しやすい QGIS の操作マニュアルを事業者へのヒアリング調査も参考に作成した。

C. 研究結果

(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討

アンケート結果では、ビッグデータを活用していたのは11事業者等、AI・機械学習を活用していたのは17事業者等であり、その内容はビッグデータ活用では主に管路の劣化診断、AI・機械学習活用では管路の劣化診断に加えて、漏水調査や浄水場における薬品注入量の設定に活用していることが多いことが分かった。また、分担研究「ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討」における研究テーマ「ろ過池閉塞シミュレーションモデルの開発」に関連し、砂ろ過処理におけるビッグデータ等の活用状況や運転状況についての調査を行った。

砂ろ過処理を含む処理フローの浄水場に対し、濁度計や微粒子カウンター等の自動監視装置の導入状況について調査した。その結果、処理フローとして凝集沈澱+急速ろ過処理を採用している73浄水場における濁度計等の自動監視装置の導入状況について、濁度計は原水～配水池に至る各主要地点、特に原水後や沈澱池後に導入されていることが確認できた。一方、高感度濁度計や微粒子カウンターはろ過池後に多く導入されており、ろ過池前ではほとんど導入されていないことが確認できた。

水道管路に関する文献調査については、キーワードの組み合わせで抽出できた文献の中から近年のものや引用数の多いもの64文献を最終的にリストアップし、うち無料で入手できたもの36件と有料で入手したもの17件の合計53件の要点を翻訳した。主要部分の翻訳と図表の抜粋整理を行い、文献の内容から「漏水検知」・「破損予測」・「その他」に大きく分けて整理し文献レビューを作成した。

(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討

砂ろ過の損失水頭を予測する各モデルを比較したところ、重回帰モデルでは、 R^2 が0.92、RMSE が0.14mであり、ランダムフォレスト (RF) と同程度の精度で予測された。しかし、損失水頭がピークに達した時点では、正解値より低く予測していることがわかった。全体を通して、同じ高さに予測のピークがあることから、おおまかな傾向を捉えることはできたものの、細かな変動には対応できていない。

RF では、 R^2 が0.93、RMSE が0.13mであった。予測値は、損失水頭が高い時点で正解値と大きく離れており、重回帰モデルと似た挙動を示した。

ニューラルネットワーク (DNN) は、モデル精度

において MLR、RF、LSTM の 3 モデルと比較し、劣る結果となった。

LSTM は、 R^2 が最も高く、かつ RMSE が最も低いことが示唆された。また、損失水頭の細かい挙動を捉えられていることがわかった。特に損失水頭が最大時の予測は、他のモデルと比較し、正解値に近い挙動を示した。

ろ過速度を変動させたシミュレーションについては、損失水頭上昇速度は必ずしも一定ではなく、時期によって差があった。ここでは、洗浄頻度の提案を行うため、損失水頭上昇速度が大きい期間に合わせて洗浄時間の提案を行った。

ろ過速度を 3 割、5 割、10 割増加させた場合で、妙見浄水場のろ過経過時上限の 84 時間以内に、損失水頭上限の 2 m に到達した。また、1 割の増加では、現状との差が見られなかった。

物理式より算出した損失水頭と、モデルから予測された損失水頭の結果を比較したところ、ろ過速度を増加させるにつれ、損失水頭がピークに達した時点での予測に誤差が生じていることがわかった。

(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

千葉県が公開する毎年の水準測量データを用いて、干渉 SAR 時系列解析で推定された地盤変動量の精度を検証した。その結果、地盤変動が目立った地域においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていることが分かった。一方で、 $\pm 10\text{mm}$ よりも小さな地盤変動は、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難であることが分かった。

また、千葉県内の漏水発生地点の地盤変動状況を干渉 SAR 時系列解析による垂直変動量を用いて評価した。その結果、A 市においては地盤沈下が顕著な市内北部に漏水箇所が集中していることが分かった。

(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

過去のアンケート結果の分析を行った上で、事業者へのヒアリング調査を実施し、水道管路事故データの入力フォームを新たに作成した。令和 6 年度に全国の水道事業を対象に新たに作成した入力フォームを用いてアンケートを実施する。また、QGIS について、研究協力者である水道事業体にヒアリングを重ねた上で、インストールから、水道管路事故データの管理に特化した操作方法までの一連の流れを、「QGIS による水道管路事故記録の管理・分析マニュアル」としてまとめた。マニュアルに沿って QGIS を活用することで、システム上に事故データや管路情報、土地条件図を重ねることができ、効率

的な漏水事故の管理と分析が可能となる。

D. 考察

(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討

今回のアンケート調査では、ビッグデータと AI・機械学習の活用についての定義づけを行わず調査を実施したが、回答結果から、「ビッグデータの活用」はデータの活用そのもの自体を、「AI・機械学習の活用」はどちらかというところ算出した結果を「ヒトの判断に委ねて活用する」場合に用いられていると推察された。ビッグデータ、AI・機械学習ともに、今回の調査結果では給水人口規模 30 万人～50 万人程度の規模の事業者で活用されていたが、これらの事業者では、他の給水人口規模に比べて、給水人口 1,000 人当たりの職員数や給水人口一人当たりの給水収益が小さく、非常に厳しい状況にて事業を運営しており、業務効率化のためにこれらの技術を活用しているものと考えられた。ビッグデータ等の活用に関しては、業務効率化等の利点がある一方で、結果の精査・検証が難しいことや予測精度等に依然として課題が残っており、今後、これらの課題を克服していくことにより、更なる活用が見込まれると考えられる。また、濁度計等の自動監視装置における測定状況についてクロス集計を行った結果、原水後に濁度計を導入している場合には、沈澱池後に濁度計、ろ過池後に高感度濁度計や微粒子カウンターを導入している浄水場が多いことがそれぞれ確認できた。また、原水後に濁度計を導入している場合には沈澱池後にも濁度計を導入している場合が多く、この場合にも、ろ過池後に高感度濁度計や微粒子カウンターを導入している浄水場が多いことが確認できた。

さらに、高感度濁度計や微粒子カウンターは、濁度計とは異なり複数箇所に導入している浄水場は少なく、特に微粒子カウンターの導入数は、濁度計や高感度濁度計に比べて少ないものの、ろ過池後に微粒子カウンターや高感度濁度計を導入している場合が多いことが確認できた。これらより、原水から沈澱池後に至るまでは、凝集沈澱処理が確実に行われているかを濁度計にて監視し、以降では砂ろ過処理により確実な処理が行われているかを濁度計よりも感度の高い高感度濁度計や微粒子カウンターにて監視しているものと考えられる。

(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討

損失水頭予測モデルの開発として、MLR、RF、DNN、LSTM の 4 モデルを開発し、最適モデルを検討した結果より、MLR では RF と同程度の精度で予測されたことがわかった。これは、ろ過継続時間は損失水頭と正の相関があることに起因していると考え

えられる。損失水頭とろ過継続時間に線形関係があることから、統計的手法である重回帰モデルでも高い予測精度を出すことができたと考えられる。

また、DNN は 4 モデルのうち最も精度が悪く、DNN から算出された予測値は中央変動するような挙動を示した。このような挙動を取る原因として、誤差を小さくするために、モデルが中央値を予測していると考えられる。また、MLR よりも精度が劣った原因として、学習条件やモデル構造の最適化が不十分であったことが考えられる。ノード数や隠れ層等が最適化されることで、RF と同等の予測精度まで向上する可能性が考えられる。

LSTM が最も高精度で損失水頭のピークを記述した。ろ層内の状態は時間と共に変化するため、過去の時系列変化を学習する LSTM が適していると示唆された。したがって、損失水頭予測モデルとして最も適しているモデルは、LSTM であることが示された。LSTM を用いて、ろ過速度の異なるモデルから損失水頭をシミュレーションした結果、3 割、5 割、10 割の増加で 84 時間以内に損失水頭上限の 2 m に達することが示された。ここから、現状のろ過打ち切り時間を 84 時間とすると、3 割の増加では 15 時間、5 割の増加で 27 時間、10 割の増加で 41 時間程度、洗浄時間を早める必要があると予測された。また、ろ過継続時間が 84 時間の時点で、1 割の増加で現状との差が見られなかったが、ろ過継続時間を延長することで、差が生じる可能性が考えられる。

また、シミュレーションモデルの精度から、ろ過速度が大きくなるにつれて予測誤差が増加する傾向が明らかになった。その原因として、損失水頭上昇速度の増加が影響を及ぼしていると考えられる。また、ろ過速度の値が大きいため、モデルが学習する際の重みがろ過速度に偏った可能性も考えられる。

(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

A 市については、千葉県の水準測量の結果と干渉 SAR 時系列解析の結果が概ね 1 対 1 の直線上に分布しており、全体の 74% の水準点が誤差 ± 10 mm 以下、91% が誤差 ± 20 mm 以下に収まっており、RMSE (二乗平均平方根誤差) は 9.7 mm である。2015 年から 2022 年までに、水準測量値では平均 71.6 mm 沈下し、干渉 SAR 時系列解析の結果では平均 69.5 mm 沈下したと推定される。これらのことから、地盤変動が目立った地域においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていると言える。また、A 市においては地盤沈下が顕著な市内北部に漏水箇所が集中しており、この地域においては、管種にもよると思うが、地盤沈下が水道管の漏水に影響を与えているものと考えられる。一方、B 市に関しては、地盤変動が顕著ではないため、水準測量の結果と干渉 SAR 時系列解析の結果に相関

が見られない。実際の地盤変動量が ± 10 mm 以下と小さいため、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難である。B 市の漏水箇所については、漏水発生日より前の地盤変動は ± 10 mm 以下であり、大きな地盤変動は見られなかった。本研究による干渉 SAR 時系列解析によって推定される垂直地盤変動量の RMSE が約 ± 10 mm であることを踏まえると、この地域では、埋設環境や経年劣化、交通荷重などのほかの要因が漏水に影響しているものと考えられる。

(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

QGIS は日本国内の上下水道の実務でも普及しつつあるが、官公庁ではフリーソフトに対する懸念や LGWAN 環境といった障壁によって、QGIS の導入が困難な状況もある。ヒアリング調査でもオフラインのニーズも多くあった。インターネットから隔離されたスタンドアロン PC に QGIS を導入して利用することが可能であるので、インターネットを利用しないケースも令和 6 年度に行う作業でマニュアルに反映したい。

D. 結論

(1) 浄水場の運転管理及び水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用方策の検討

アンケート結果よりビッグデータ等の活用については、予測精度等に課題はあるものの、管路の劣化診断・漏水調査や浄水場における薬品注入量の設定等に活用されていることが確認できた。また、海外の文献調査では、水道管路の漏水検知、破損予測技術等の開発状況や技術動向について最新動向を把握し、ビッグデータの利活用状況、課題点を抽出した。漏水検知、破損予測のいずれの技術においても、人工知能や機械学習技術の利用が近年急速に広がってきており、分析精度、予測精度の向上に期待が置かれている状況であった。

(2) ビッグデータに基づく浄水場運転管理予測手法の検討

損失水頭予測モデルの開発および、ろ過速度を変化させたシミュレーションを行った。予測モデルとして、LSTM が最適モデルであることが示された。また、損失水頭を予測するにあたって、モデルに入力したろ過速度、水温、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度の妥当性が示唆された。これらは、浄水場で容易に測定可能なデータであるため、実務へ応用できる簡略さを持つと考えられる。本モデルの活用によって、浄水場の統廃合が行われる前にシミュレーションが可能となったことから、処理水量の変化に迅速に対応可能であると考えられる。

3. その他

なし

(3) ビッグデータに基づく水道管路に関する配水管維持管理の実態把握及び解析

地盤変動が目立った A 市においては、干渉 SAR 時系列解析の結果は地盤沈下の傾向をとらえることができていたことが分かった。一方で、 ± 10 mm よりも小さな地盤変動は、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定することはやや困難であった。

千葉県内の漏水データを用いて漏水箇所付近の地盤変動量を調べたところ、地盤変動が目立った A 市では、地盤沈下が顕著な地域に漏水箇所が集中していたため、地盤沈下が水道管の漏水に影響を与えていると考えられる。一方で、B 市の漏水箇所では、漏水発生日より前に大きな地盤変動はなかったため、漏水には埋設環境や、経年劣化、交通荷重など他の要因が影響しているものと考えられる。

(4) 水道管路事故データを活用した水道管路アセットマネジメント手法及び水道管路技術の継承に関する手法の検討

本年度は、全国の水道事業体の水道管路事故データを有効利用するためのツールの提案を行い、それらを活用頂けるマニュアルを作成した。令和 6 年度は、マニュアルを参考に QGIS を実際に使ってもらいその結果のヒアリング調査を通じて、マニュアルの改訂や QGIS の更なる活用方法について検討したいと考える。また、QGIS のようなデジタル情報を共有して活用することが可能なソフトを使用することで、事業体同士が互いの管路情報を共有できるため、震災等で被災した事業体への復旧支援活動の際にも役立つのではないかと考える。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

内山明音, 劉ウエン, 丸山喜久:干渉 SAR 時系列解析による千葉県内の地盤変動量の推定と漏水箇所の分析, 第 14 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 21-24, 2024.

H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし