

令和 8 年 4 月 28 日

上下水道科学研究費補助金 総合研究報告書

国土交通大臣 殿

（交付申請者）

所在地	〒112-0004 東京都文京区後楽 2-3-28 K. I. S 飯田橋ビル 7F
機関名	公益財団法人水道技術研究センター
部署・職名	特別参与
氏名	清塚 雅彦

上下水道科学研究費補助金による以下の補助事業について、上下水道科学研究費補助金交付要綱第 16 条第 3 項の規定に基づき、下記を別紙にて報告します。

- 1 課 題 名：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
- 2 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・特別参与）
- 3 交 付 総 額：20,464 千円
- 4 実 施 期 間：令和 5 ～ 7 年度

記

- 1 上下水道科学研究費補助金 総合研究報告書【概要版】（別紙 1）
- 2 上下水道科学研究費補助金 総合研究報告書（別紙 2）

上下水道科学研究費補助金 総合研究報告書【概要版】

- (1) 課 題 名：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
- (2) 実 施 期 間：令和5～7年度
- (3) 交 付 申 請 者：清塚 雅彦（公益財団法人水道技術研究センター・特別参与）
- (4) 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・特別参与）
- (5) 共 同 研 究 者：市川 学（公益財団法人水道技術研究センター・主幹）
増田 貴則（国土技術政策総合研究所・浄水処理・水道防災システム研究官）
山村 寛（中央大学・教授）
丸山 喜久（千葉大学・教授）
國實 誉治（東京都立大学大学院・特任准教授）
- (6) 補助金交付総額：20,464,000円

(7) 技術研究の目的

平成30年の水道法改正では、人口減少や施設老朽化、人材不足への対応として、水道の基盤強化と資産管理の推進が位置付けられた。近年は、これらの課題解決に向けてCPS/IoT等の先端技術の活用が注目されている。

本研究では、水道事業体が保有するビッグデータを活用し、浄水場の運転管理負担の軽減に向けた検討を行うとともに、管路の維持管理に関して、漏水予測モデル、GISを用いた分析、事故発生要因の整理を通じて、データに基づく維持管理・更新計画の高度化を図る。また、管路分野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も提案する。

(8) 技術研究の内容と成果

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

<JWRC・市川 学>

■令和5年度

(1) アンケート調査

令和5年8～9月に132事業体へ調査を実施し、97事業体から回答を得た（回収率73%）。

調査内容は次のQ1～Q9の9つの大項目について調査した。

Q1、Q2 基本情報

Q3 ビッグデータまたはAIの活用状況について Q4 浄水処理に関する困りごとについて

Q5 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

Q6 砂ろ過処理における濁度・微粒子数の測定等について

Q7 原水及び浄水に関する困りごと、EEM連続測定について

Q8 管路の事故情報に関して

Q9 残留塩素の測定について

(2) アンケート結果

①ビッグデータ活用、AI・機械学習活用と、給水人口、職員数

活用事例は限定的であった。20～50万人規模や職員81～200人規模の事業体で一定の活用が見られたが、明確な規模別傾向は確認できなかった。

②浄水処理および浄水場の運転管理に関する困りごと

かび臭、水質・気候変動対応、薬品注入量管理が主な課題であった。特に表流水・ダム水系で顕著であり、ダム水・湖沼系では活性炭注入量が課題となっていた。

③凝集率の設定方法

ジャーテストを基本とし、経験式やセンサー監視と組み合わせて運用する事例が多かった。自動制御導入浄水場では異常時の即時対応体制が整備されていた。

④フロック画像の撮影

表流水系で約 30%が撮影していたが、小規模事業体では限定的であった。

⑤自動監視装置

高感度濁度計は広く導入されていた。微粒子カウンターは大規模事業体で多く、小規模では限定的であった。

■令和 6 年度

(1) アンケート調査

令和 5 年度にアンケート回答を得た 97 事業体から、次の項目を調査対象として事業体を選定した。

- ① ビッグデータおよび AI の活用状況 (2 事業体)
- ② ビッグデータの活用を検討している事業体 (14 事業体)
- ③ 消毒副生成物に困っている事業体 (8 事業体)

(2) アンケート結果

①機械学習活用の背景、導入可能性

人口減少や民間委託拡大により職員の確保や技術継承が課題となっている。熟練職員の退職も進む中、運転管理支援や技術継承を補完する手段として機械学習の活用ニーズがあることが示唆された。

②消毒副生成物

消毒副生成物の生成能を高精度に把握できるシステムについては、導入の容易性、費用対効果、人員確保が課題である。EEM は前駆物質推定の可能性を有するが、維持管理負担等から慎重な検討が必要とされた。一方、ハロ酢酸との相関が確認できれば、浄水処理判断への活用が期待された。

■令和 7 年度

(1) 過年度調査結果

かび臭、水質変動、薬品注入量管理が主要課題であった。データ活用実施は 2/21 事業体、活用検討は 14/21 事業体であり、AI 活用は限定的であった。

(2) 課題解決方法

データ分析手順・ノウハウを整理し、将来の AI 構築時の留意点を示す「データ利活用手順と留意点」を作成した。

(3) まとめ

人口減少、老朽化、人材不足という課題に対し、本研究はビッグデータ活用促進に向けた基礎整理を行い、水道事業の基盤強化に資する成果を得た。

＜国土交通省 国土技術政策総合研究・増田 貴則＞

■令和 5 年度

(1) 海外の文献調査

海外の文献調査に基づき、水道管路の維持・点検におけるビッグデータ活用状況等に関する最新動向を把握し、ビッグデータの利活用状況、課題点等を抽出した。

(2) 文献調査結果

機械学習や人工知能に基づいた分析技術と、流体過渡現象や加速度、音響等を計測できるセンサーにより取得されたデータ、あるいは、物理的な計測データに加えて社会経済的要因を加味したデータを適用する技術が、水道管路における漏水検知及び破損予測等に活用されていた。当技術により、従来よりも高精度に漏水検知や破損予測を実現できる可能性があり、今後の水道の基盤強化を支える技術群の一つとして活用することが望ましいと考えられた。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。

■令和6年度

(1) 海外の文献調査

海外の文献調査に基づき、浄水場の運転管理におけるビッグデータ活用状況等に関する動向と課題点の把握を試みた。

(2) 文献調査結果

浄水処理や水質管理をキーワードとした文献数は近年減少している一方で、凝集沈殿や消毒副生成物に関する文献数は増加傾向にあった。手法としては、機械学習やニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズムを用いたものが特に近年に増加傾向にあった。これらの手法は、非線形現象にも適用可能であり従来手法よりも予測精度を向上させることができる一方で、モデル構築に用いられるデータが実験室にて得られたものであったり、現場にて得られたものであっても測定が困難であったり高価な計測機器を必要とするような場合には現場での適用に課題があり実用化の妨げとなる可能性があることが指摘されていた。他方、モデルの予測精度や局所的最適解の課題を解決していく方法として、異なる種類のデータを組み合わせるマルチモーダルによる制御と可変型構造を有するニューラルネットワークモデルが提案されており、現場の知見や現場にて容易に測定できるデータをこの手法において用いることで、技術水準の確保および技術継承が行える可能性があるものと思われた。

■令和7年度

(1) 国内外の文献調査

海外文献調査により、異なる種類のデータを組み合わせるマルチモーダルモデルを用いることで、ビッグデータとAI・機械学習を導入したモデルの予測精度や局所的最適解の課題に対処できることが示唆されたため、今年度は、浄水場の運転管理及び水道管路網の維持点検におけるマルチモーダルモデルの活用状況について国内外の文献調査を実施した。

(2) 文献調査結果

マルチモーダルという用語自体は『異なる形式や様式の』を意味するため、古くは多目的最適化問題や統計モデルの開発等に関する研究において利用されてきていたものの、最近年においては大規模言語モデル(LLM)の発展した形としてマルチモーダル大規模言語モデル(MLLM)の研究、利活用が進展しつつあり、様々な学術・実用分野において急速に論文数が増加していた。浄水場及び水道管路を対象としたMLLMに関する文献数は多くはないものの、従来の機械学習・AIモデルの手法に比べ格段の精度向上の可能性が示されていた。国内での展開、研究は現状では十分ではないものの、MLLMはデータ形式を選ばないといった特徴があるため、現場の知見や現場にて測定されているデータに対しても活用可能と推察される。MLLMに基づく手法を国内に蓄積されてきたビッグデータに活用することで、技術水準・技術継承の課題に対応しつつ、予測精度の向上を達成できると思われる。

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

(1) 凝集処理におけるフロック沈降特性の予測

凝集処理は急速ろ過方式の中核プロセスであり、原水中の濁質を凝集フロックとして沈殿池内で効率的に沈降させることが、後段ろ過池の処理負荷低減に直結する。沈殿池におけるフロック沈降挙動を予測するためにはフロック密度関数が重要であるが、Tambo & Watanabe (1979) の関数はカオリンを用いた室内実験に基づくものであり、実浄水場の沈殿池で形成される凝集フロックに対する妥当性は十分に検証されていなかった。本研究では、原水水質、凝集剤種、活性炭注入の有無が異なる3浄水場—大阪市柴島浄水場(硫酸アルミニウム)、大分市古国府浄水場(超高塩基度PACl+粉末活性炭)、カンボジア国Stueng Saen Water Treatment Plant 2(粉末PACl)—の沈殿池からフロックを採取し、自然沈降挙動をデジタルビデオカメラで撮影、二値化処理によりフロック直径とフラクタル次元を算出してストークス式から逆算してフロック密度を求めた。

ALT比0.06~0.68の範囲では、ストークス式中の形状係数 a は 0.2×10^{-4} 、 $K\rho$ は1.75とほぼ一定値を示し、フロック直径と密度の間にべき乗関係が成立した。これはTambo & Watanabeらが報告した低ALT比領域(0.01~0.1)とは異なる挙動であり、高ALT比領域では密度関数を支配する物理機構が異なることが示唆された。さらに、フラクタル次元とフロック密度・沈降速度の間には有意な相関は認められず、従来指摘されてきたフラクタル次元の物理的説明因子としての有効性は限定的であることが示された。

再定義した密度関数をストークス式に代入することで、フロック直径から個別フロック粒子の沈降速度分布を算出することが可能となった。

(2) 機械学習を用いた砂ろ過池閉塞シミュレーションモデルの開発

砂ろ過は急速ろ過方式の最終段に位置する処理であり、凝集沈殿で処理しきれなかった微小フロックやコロイド、病原微生物等を吸着除去する役割を担う。砂ろ過層では懸濁粒子の蓄積に伴い損失水頭が増加し、上限値に達する前にろ層洗浄を行う必要があるが、将来の広域化に伴う処理水量増加時には、従来の洗浄頻度では対応できない可能性がある。本研究では、長岡市妙見浄水場の運転データを用いて、水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度、ろ過継続時間を入力とする損失水頭予測モデルを構築した。重回帰モデル (MLR)、ランダムフォレスト (RF)、ディープニューラルネットワーク (DNN)、長期短期記憶 (LSTM) の4手法を比較した結果、時系列依存性を学習可能な LSTM が最も高い予測精度を示し、損失水頭がピークに達する局面でも実測値に近い挙動を再現できた。さらにろ過速度を 1~10 割増加させたシミュレーションにより、広域化時に必要となる洗浄頻度の見直し時期を定量的に予測することが可能となり、浄水場の統廃合に向けた運転管理高度化の基盤技術が得られた。

(3) EEM データを用いた消毒副生成物生成リスクの予測

塩素消毒過程で生成する消毒副生成物 (DBPs) は、原水中のフミン質などの有機物前駆体と塩素との反応によって生じ、健康影響リスクの観点から水質管理上の重要課題となっている。本研究では、神奈川県内広域水道企業団社家取水場に連続式 EEM 分析計を設置し、原水の 3 次元励起-発光マトリックスを 1 時間に 1 回の頻度で測定した。2024 年 6 月~2025 年 1 月および 2025 年 8 月~11 月の期間に取得した大規模 EEM データセットに対し PARAFAC 解析を適用し、CORCONDIA、split-half 解析 ($TCC \geq 0.90$)、物理的妥当性等の指標により 6 成分が最適と判定された。各成分はタンパク質様、フミン酸様、フルボ酸様の有機物に分類された。

次に、PARAFAC 成分および EEM 波長を説明変数とし、上水試験法に基づき測定した DBPs 生成ポテンシャル (総トリハロメタン、トリクロロ酢酸、ジクロロアセトニトリル、抱水クロラル等) を目的変数として、Lasso 回帰による予測モデルを構築した。leave-one-out cross-validation (LOOCV) による予測性能評価の結果、PARAFAC を介さず EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが PARAFAC 経由モデルおよび E260 単独モデルより高い予測精度 ($CV-R^2$) を示し、特に従来予測困難であったジクロロ酢酸や抱水クロラルについても予測可能となった。本成果により、EEM オンライン監視データから直接 DBP 生成リスクを予測するリアルタイム水質管理手法の有効性が示された。

(4) まとめ

本研究は、画像、運転データ、蛍光スペクトルといった浄水場で取得可能なビッグデータを機械学習・統計手法と組み合わせることにより、フロック沈降特性予測、ろ過池閉塞シミュレーション、EEM による DBP 生成リスク予測の 3 技術を構築した。実浄水場フロックに対する Tambo & Watanabe 密度関数の高 ALT 比領域への拡張、LSTM による広域化対応のろ過洗浄頻度予測、EEM 波長の直接 Lasso 回帰による DBP-FP の高精度予測のいずれも、運転管理の高度化と水質管理の精緻化に資する基盤技術として実用化が期待される。

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

(1) 平常時の漏水予測モデルの構築

漏水要因 (経年劣化・交通荷重・地盤変動等) のうち、特に地盤変動に起因する管路ひずみと漏水発生に着目し、衛星 SAR を用いた広域・長期の地盤変動モニタリングと、事故データに基づく統計モデル化を行った。

ALOS-2 (PALSAR-2) 画像 (2015~2022 年) を用いて干渉 SAR 時系列解析により地盤変動量を推定し、千葉県の水準測量データで精度検証を実施した。地盤沈下が顕著な地域では、推定結果が沈下傾向を良好に捉えた。また、A 市では、地盤沈下が顕著な市内北部に漏水箇所が集中し、地盤沈下が漏水に影響している可能性が示された。

千葉県 X 事業体の管網マッピングデータと漏水事故データ (2021 年時点) を用い、管種、口径、経過年 (敷設年数)、微地形区分、干渉 SAR 時系列解析で推定した地盤変動量を説明変数とするロジスティック回帰により漏水確率モデルを構築した。管種別事故率は、DIP (その他/離脱防止型) が低く、SP・VP・

PE が高い傾向が整理された。経過年の増加に伴い事故発生確率が上昇し、老朽化が主要因となる可能性が示唆された。微地形では谷底低地・旧河道で高く、台地で低い傾向が得られた。地盤変動速度を加えたモデルでは、増大に伴う確率上昇が一部確認された一方、本研究の対象地域内では支配的要因とならない可能性も示された。

(2) 能登半島地震の際の水道管路の被害分析

2024 年能登半島地震で顕在化した液状化・地震動による管路被害を対象に、衛星 SAR を用いて液状化影響域や地表変位を抽出し、管路被害を定量分析した。

新潟市を対象として、地震前 (2023/12/14・12/26) と地震後 (2024/1/7) のデータを用いた InSAR 解析により、コヒーレンス差分で液状化影響範囲を推定した (閾値等を設定しノイズ除去)。推定範囲は既往の液状化被害分布調査とよく一致した。配水管被害は砂丘と三角州・海岸低地の境界部や信濃川旧河道沿いに集中し、液状化影響範囲と整合した。被害率 (延長 1km あたり、250m メッシュ集計) を液状化影響/非影響で比較したところ、液状化影響範囲で一部管種の被害率が大きく増加し、特に SP・VP が顕著だった。また、微地形別でも液状化影響範囲において三角州・海岸低地・自然堤防・砂丘で被害率が高い傾向が示された。新潟市内の地震観測データ等を内挿して PGV 分布 (地動最大速度) を推定し、PGV 増加に伴う被害率上昇傾向を確認した。PGV が 30~40 cm/s では、液状化影響範囲の被害率が非影響範囲の約 7 倍となった。

能登半島地震の際に大規模な液状化が生じた石川県内灘町を対象として、地震前後の ALOS-2 画像を用いてピクセルオフセット解析を実施し、複数シーンを統合して東西・南北・上下の 3 成分に分離した。相関ウィンドウは検出感度と判読性の観点から 16×16 pixel が妥当と判断された。16×16 pixel の 3 次元合成変位量と被害位置の比較では、変位が卓越する領域で被害が集中し、概ね 3m に達する領域で被害が顕著であった。一方で小変位でも被害が生じ、側方流動による引張・曲げ作用での破断が示唆された。

(3) まとめ

本研究は、衛星 SAR (InSAR/ピクセルオフセット) による地盤変動・液状化の面的把握と、管路属性・事故データに基づく統計モデル化を組み合わせ、平常時と災害時の両面から管路リスクの理解を進めた。

平常時は、地盤沈下域で漏水が集中する傾向を示し、管種・口径・経過年・微地形等を用いた漏水確率モデルにより、老朽化影響や地形要因の寄与を整理した。地震時は、液状化影響範囲の抽出と被害率比較、PGV との関係、さらに内灘町での地表変位と被害集中の対応から、地震動と液状化 (地盤変状) の複合影響が管路被害を増幅し得ることを示した。今後は、推定した変位分布を入力として管路に作用する応力・ひずみを数値的に評価し、破断メカニズムの解明へ展開する方針である。

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

(1) QGIS マニュアル

全国の水道事業体で保有されている水道管路の事故データを対象に「見える化」を目指し、中小事業体でも使いやすいマニュアルを令和 5 年度に作成し、2 度の改訂を経て「QGIS による水道管路事故記録の管理・分析マニュアル (第 3 版)」を作成した。改訂の際には、本マニュアルについての意見や感想を反映するため、水道事業体へ配布し、ヒアリングを重ね、現場の声をもとに作成した。事業体へ配布しヒアリング調査を行った結果、QGIS の熟練度でマニュアルのニーズが異なることが明らかになったが、局内に QGIS を扱える人を増やしたいというニーズが多くあったため、まずは QGIS に触れる機会を提供することを目的に、アイコンの説明など基本操作などを充実させた初心者を対象としたマニュアルを作成した。

このマニュアルを活用することで、視覚的な情報共有が可能になり次世代への技術継承を支える強力なツールとなると考える。

(2) 漏水事故アンケート

水道技術研究センターが毎年実施している「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」について、アンケートに答える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、アンケートの見直しを行った。さらにアンケート調査の結果を集計し、管路事故に関する傾向について QGIS を使って見える化し環境データとのリンク付けや分析を行った。

また、令和5年度と令和6年度のアンケート調査の漏水履歴からダクタイル鋳鉄管について、経過年数と漏水事故率についての事故率推定曲線式を作成し、既往の研究で作成された推定式と比較分析を行いこれら推定式の実用性について検証を行った。

(9) 成果の刊行に関する状況

原著論文 (査読あり)	原著論文 (査読なし)	原著論文以外 (新聞・雑誌等)	その他 (パネル・ポスター等)	合計
<u>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</u>				
0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
<u>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</u>				
2 件	5 件	0 件	0 件	7 件
<u>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</u>				
1 件	3 件	0 件	0 件	4 件
<u>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</u>				
0 件	4 件	0 件	0 件	4 件

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

特許権 (取得)	特許権 (出願)	その他 (実用新案・商標等)	合計
<u>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</u>			
0 件	0 件	0 件	0 件
<u>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</u>			
0 件	0 件	0 件	0 件
<u>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</u>			
0 件	0 件	0 件	0 件
<u>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</u>			
0 件	0 件	0 件	0 件

(11) 成果の実用化の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

アンケート調査でも熟練職員の退職も進む中、多くの事業者から期待されていた浄水場の運転管理支援や技術継承を補完する手段として機械学習の活用ニーズがあることが分かった。

また、運転管理の自動化に関しては、文献調査では水道事業に関する文献数は多くはなかった。しかし、データ形式を選ばないなどの特徴を持つマルチモーダル大規模言語モデル (MLLM) は、他分野で従来型の手法に比べ格段の精度向上の可能性が示されることに加え、現場からのビッグデータが活用可能と推察され、技術水準・技術継承の課題に対応しつつ、予測精度の向上を達成できると考えられる。

このように実際の浄水場では運用データなどのビッグデータが蓄積されているため、現場への適応性が良いモデルが開発されるなど多くの研究が進めば、10年程度で実用化が可能になると考える。

浄水場の運転に関して重要な項目は、原水の各種水質項目に応じた種類の処理を各種の薬品の量 (アルカリ剤、酸剤、凝集剤、凝集助剤等) の制御で実施し、水道水質基準に適合した水を作ることであり、残留塩素については、既に令和2年度～4年度に実施した厚生労働科学研究費補助金による研究で高度に再現できるシステムを開発してある。そのほかのプロセスで重要な項目は、原水水質の変動に応じた薬品注入制御とろ過池の運用である。

このうち薬品の注入に関しては、沈殿池での効率を推測するために必要な再定義した密度関数から、ブロック直径から個別ブロック粒子の沈降速度分布を算出することが可能となった。水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度、ろ過継続時間を入力とする損失水頭予測モデルを構築し、主要な4手法を比較した結果、時系列依存性を学習可能なLSTMが最も高い予測精度を示し、実測値に近い挙動を再現でき、ろ過速度を2倍まで増加させたシミュレーションにより、洗浄頻度の定量的に予測することが可能となり、運転管理高度化の基盤技術が得られた。

残る原水水質の応じた各種の薬品量の制御技術については、原水の 3 次元励起-発光マトリックスを 1 時間に 1 回の頻度で 1 年半ほど測定した大規模 EEM データセットに対し PARAFAC 解析等から 6 成分が最適と判定され、タンパク質様、フミン酸様、フルボ酸様の有機物に分類された。この手法により EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが、今まで従来予測困難であったジクロロ酢酸や抱水クロラルについて予測可能となり、直接 DBP 生成リスクを予測するリアルタイム水質管理手法の有効性を示すことができた。以上により、浄水場で取得可能なビッグデータを機械学習・統計手法と組み合わせることにより、ブロック沈降特性予測、ろ過池閉塞シミュレーション、EEM による DBP 生成リスク予測の 3 技術を構築できた。これらはすべて、運転管理の高度化と水質管理の精緻化に資する基盤技術として実用化が期待され、実際の原水に対応したシステムを現場で実験し実用化の変更等の検討する必要があるため、5~10 年程度で実用化が見込まれる技術であると考えている。

また、QGIS に関する研究の 1 つは、合成開口レーダ (SAR) を備えた衛星が受信したデータから地盤の変形を測定しようとするもので、こちらに関しては、多くの分野での実績があるが、水道分野や他のインフラ分野での発表は少ないことが分かった。今回は、地盤変動に起因する管路ひずみと漏水発生を衛星 SAR により地盤変動と漏水データに基づき地盤沈下が漏水に影響している可能性を示した。

管種、口径、布設年数、微地形区分、干渉 SAR 時系列解析で推定した地盤変動量を説明変数とする漏水確率モデルを構築した結果、管種毎の特性が整理でき、事故発生確率も整理でき、微地形区分での特性も整理できた。さらに、研究最初の令和 5 年度に発生した能登半島地震による石川県内灘町や新潟市における液状化被害などの調査にも活用したところ良い精度で再現でき、水道管路の被害予測にも活用できることが確認され、災害時の対応については大変良い実用的な成果につながったと考える。

また、この研究のテーマの一つである技術継承については、今回のマニュアルの作成により多くの水道事業体で QGIS が視覚的な情報共有が可能になり次世代への技術継承を支える強力なツールとなることへの理解が進み、協力事業体において多くの事業体で QGIS 導入を後押しできたことで、実際の運用方法の紹介や事故データを入力し管路更新に活用されている事例も増えており、研究が事業体での実用化の動きを推進することにつながったと考えている。

これら QGIS を利用したデータの利活用については、アセットマネジメントのミクロマネジメントのためのデータとして活用できるが、10 年程度のデータの蓄積がないと有効な基礎データにはならないと考えるので、今回導入した協力事業体が有効な活用事例を継続し発表していただくことで、多くの水道事業体でのアセットマネジメントの効率的な運用とさらなる広がりにつながることを期待している。

(12) その他

通常時のアセットマネジメントを中心に研究を進めることとしており、地震被害については研究範囲含めていなかったが、令和 6 年 1 月に発生した能登半島地震の発生とその被害に関する調査については、研究の取り組みで採用していた衛星による調査と GIS による災害対応が可能であることから、予算的には厳しかったが研究対象として取り組んだ。

その結果、水道管路の被害が集中した液状化による管路被害地区の要因が可視化でき、さらに液状化被害が想定される地区も微地形区分などで予め特定できるなど、大変良い成果につながったと考える。

また、能登半島地震で課題となっている応急給水所の状況把握や被災した水道管路の復旧状況の把握についても、今回の QGIS を活用することが即時性、情報収集・情報発信などで活用できることが分かった。

上下水道科学研究費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：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
- (2) 実 施 期 間：令和5～7年度
- (3) 交 付 申 請 者：清塚 雅彦（公益財団法人水道技術研究センター・特別参与）
- (4) 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・特別参与）
- (5) 共 同 研 究 者：市川 学（公益財団法人水道技術研究センター・主幹）
増田 貴則（国土技術政策総合研究所・浄水処理・水道防災システム研究官）
山村 寛（中央大学・教授）
丸山 喜久（千葉大学・教授）
國實 誉治（東京都立大学大学院・特任准教授）
- (6) 補助金交付総額：20,464,000円

(7) 技術研究の目的

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。

(8) 技術研究の内容と成果

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

<JWRC・市川 学>

■令和5年度

(1) アンケート調査

アンケート調査アンケートは、令和5年8月～9月に132事業体へ送付し、97事業体から回答を得た。回収率は73%となった。また、調査内容は次のQ1～Q9の9つの大項目について調査した。

- Q1、Q2 基本情報
- Q3 ビッグデータまたはAIの活用状況について
- Q4 浄水処理に関する困りごとについて
- Q5 凝集沈殿処理におけるブロック画像の撮影状況等について
- Q6 砂ろ過処理における濁度・微粒子数の測定等について
- Q7 原水及び浄水に関する困りごと、EEM連続測定について
- Q8 管路の事故情報に関して
- Q9 残留塩素の測定について

(2) アンケート結果

①ビッグデータ活用、AI・機械学習活用と、給水人口、職員数

ビッグデータ活用、AI・機械学習活用について、給水人口（図-1）、職員数（図-2）とのクロス集計を行った。ビッグデータ活用、AI・機械学習活用に関わらず、これらを活用している事業体は限られていた。給水人口規模でみると、給水人口 20 万人～50 万人程度の規模の事業体において多く活用されていることが確認でき、給水人口規模における活用状況の傾向は確認できなかった。職員数については、81 人～200 人程度の事業体で多く活用されていた。

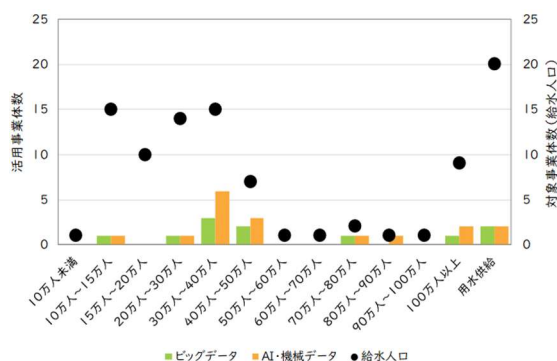


図-1 活用と給水人口

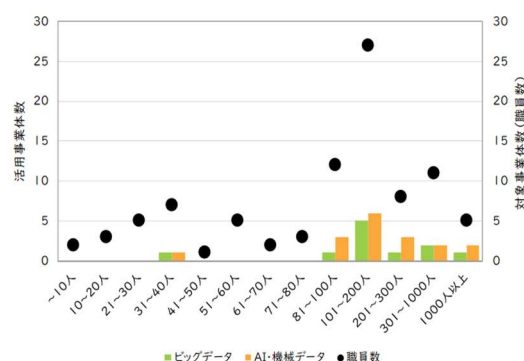


図-2 活用と職員数

②浄水処理および浄水場の運転管理に関する困りごと

浄水処理および浄水場の運転管理に関する困りごとに関するクロス集計結果では、かび臭、水質・気候変動に起因することや、薬品注入量について課題と考えている事業体が多いことが確認できた。（図-3）各課題について、給水人口規模での傾向を確認してみると、50 万人以下の事業体においてこれらの項目を課題と捉えている傾向にあることが確認できた。

水源別にみると、伏流水系では限定的であるものの、表流水系やダム水系ではかび臭、水質・気候変動、濁度管理や薬品注入量の管理について困っていることが確認できた。ダム水・湖沼系については、かび臭やそれに関する活性炭注入量が課題となっていた（図-4）。

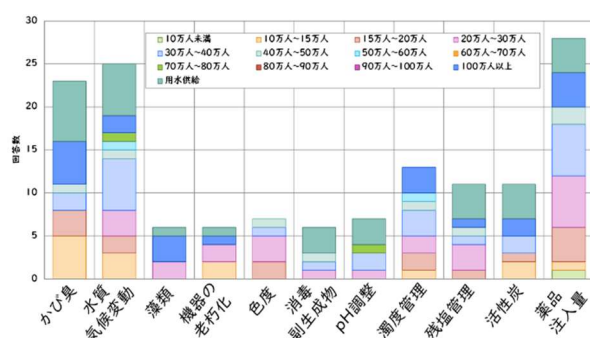


図-3 給水人口と困りごと

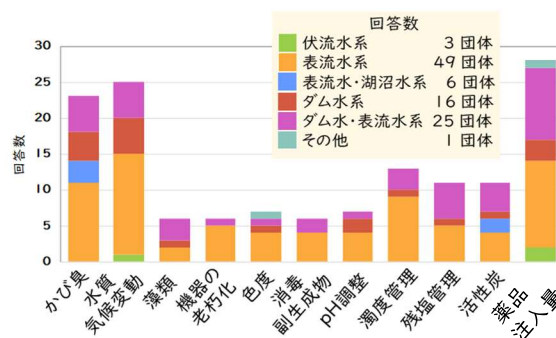


図-4 水源と困りごと

③凝集率の設定方法

凝集沈殿・砂ろ過処理に着目し、凝集時の凝集率の設定方法について確認したクロス集計結果では、集剤注入率の設定方法は、(a) ■職員によるジャーテスト (b) ■原水水質と凝集剤注入量との相関から導いた経験式から自動制御 (c) ■原水水質と凝集剤注入量との相関をまとめた表などを参考に手動制御 (d) ■濁度センサーやその他センサーによる監視・制御 (e) ■特に決まったルールはなく、経験に基づいて決定し、異常時だけ試験を実施しているとなった。

凝集剤注入率の設定については、職員によるジャーテストと、(b)～(d)のうちのいずれかを組み合わせている場合が多く、原水水質とこれまでの経験により積み重ねた知見からおおよそのあたりを付けたのちに、ジャーテストで注入率を確認しているものと考えられた。

また、凝集剤の注入率を経験式から自動制御している浄水場では、濁度センサーやその他センサーによる監視を行っている場合が多く、高濁度などの異常時には、濁度センサーによる即時発見、即時対応ができるような体制がとられているものと考えられた。

水源と凝集剤注入量の設定方法について確認した。グラフの灰色部分は回答数を示している。

設定方法について確認したところ、すべての水源において、職員によるジャージテストにより凝集剤注入率を設定している場合が多いことが確認できた。また、表流水系では、濁度センサー等による監視・制御を行っている浄水場も多く確認でき、高濁度などの異常時には、濁度センサーによる即時発見、即時対応ができるような体制がとられているものと考えられた。

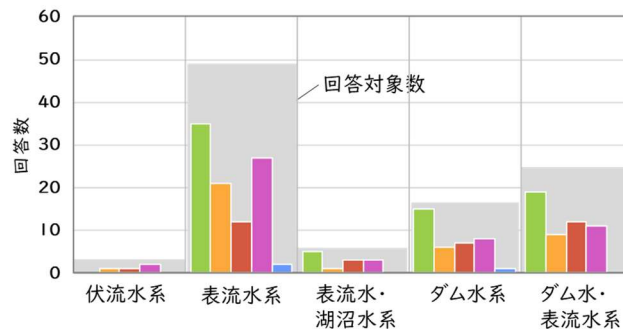


図-5 凝集剤と注入率設定方法

④フロック画像の撮影

表流水を含む水源では、約 30%の浄水場でフロック画像を撮影していたが、表流水を含まない伏流水系やダム水系では、フロック画像は撮影していない浄水場が多かった。

これは、フロック画像データの主な活用方法が凝集剤の注入率が適正化されているかを確認することであり、水質変動の大きな表流水系では水質に応じて凝集剤の適正な添加量の変動するため、しっかりと凝集できているか、凝集剤の添加量の適正化を確認するために、フロック画像を撮影しているものと考えられた。給水人口別でみると、給水人口が 20 万人以下の事業体では、フロック画像を撮影している事業体は限定的であった。凝集剤注入量の設定方法とフロック撮影の有無について、傾向は確認できなかった。

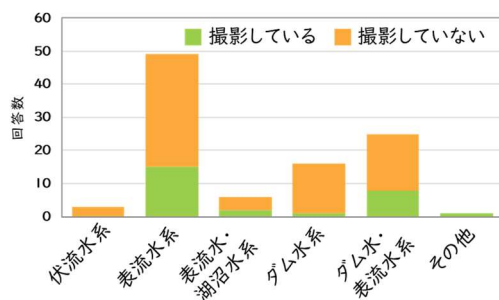


図-6 水源と撮影

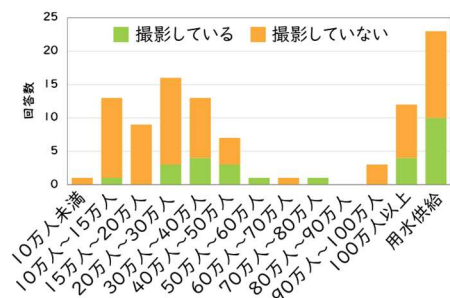


図-7 給水人口と撮影

⑤自動監視装置

給水人口規模や水系と高感度濁度計、微粒子カウンターとの関係についての結果を示す。高感度濁度計は給水人口規模問わず多くの事業体にて導入されていた。一方、微粒子カウンターについては給水人口規模が大きな事業体では高感度濁度計と同様に多く導入されていたものの、給水人口規模が小さな事業体での導入は限定的であることが確認できた。また、水系別でみると、高感度濁度計、微粒子カウンターともに表流水系で多く導入されており、これはフロック画像撮影と同様、表流水系では濁度の変動が大きいと推察された。

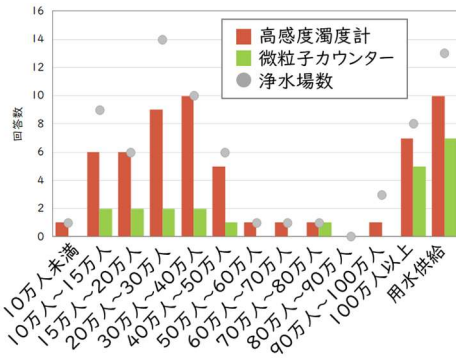


図-8 給水人口と自動監視装置

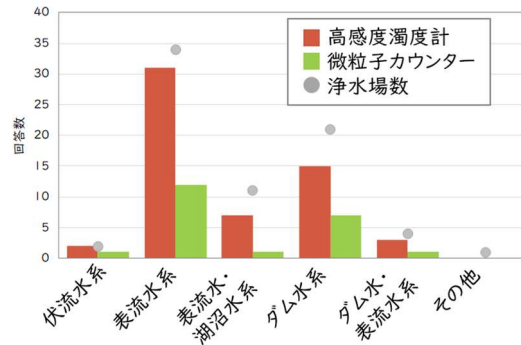


図-9 水源と自動監視装置

■令和6年度

(1) アンケート調査

令和5年度にアンケート回答を得た97事業体から、次の項目を調査対象として事業体を選定した。

- ①ビッグデータおよびAIの活用状況 (2事業体)
- ②ビッグデータの活用を検討している事業体 (14事業体)
- ③消毒副生成物に困っている事業体 (8事業体)

選定した事業体と調査項目および給水人口(※万人止め)の関係を表-1に示す。

次に、給水人口規模と選定した事業体数を表-2にまとめた。選定した21事業体のうち、給水人口規模80万人以上および水道用水供給事業が10事業体で、約半数を占めていた。

表-1 選定事業体と調査項目

事業体名	①活用中	②活用検討	③消毒副生成物	給水人口規模
A事業体		○		14万人
B事業体		○	○	23万人
C事業体			○	26万人
D事業体		○		27万人
E事業体		○	○	31万人
F事業体			○	35万人
G事業体		○		38万人
H事業体		○		41万人
I事業体	○	○		44万人
J事業体			○	47万人
K事業体		○		47万人
L事業体		○		82万人
M事業体		○		96万人
N事業体		○		100万人以上
O事業体			○	
P事業体		○		
Q事業体		○		
R事業体	○	○		
S事業体			○	用水供給
T事業体		○	○	用水供給
U事業体			○	用水供給

表-2 給水人口規模と選定事業体数

給水人口	事業体数
10万人未満	0
15万人未満	1
20万人未満	0
30万人未満	3
40万人未満	3
50万人未満	4
60万人未満	0
70万人未満	0
80万人未満	0
90万人未満	1
100万人未満	1
100万人以上	5
用水供給	3
合計	21

(2) アンケート結果

浄水処理や施設管理で抱えている様々な問題を解決するために、機械学習活用の背景、その需要や可能性について、調査を行った。

その結果、いただいた回答からキーワードを抽出した(表-3)。

- 浄水場の運転管理について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題につて、技術継承(6)、人員不足(3)、人的問題が挙げられた。
- 水質管理（原水水質や浄水の残留塩素等）について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題について、末端の残留塩素(3)、かび臭(5)、急激な濁度上昇(2)、アンモニア態窒素(2)、消毒副生成物(2)が挙げられた。
- 薬品注入設備（貯槽・移送設備・注入設備）の設備保全や維持修繕について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題について、局所的豪雨(2)、原水濁度上昇(2)、薬注配管閉塞(2)、劣化(2)、人員不足(2)等、様々な課題が挙げられた。

表-3 回答キーワード

◆浄水処理や施設管理で抱えている様々な問題を解決するために機械学習が活用できるかどうか、その需要や可能性について	
項 目	回 答（キーワード）
●浄水場の運転管理について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題について	かび臭(1)、技術継承(6)、薬品注入(1)、老朽化(2)、人員不足(3)、水道特化生成 AI 技術開発(1)
●水質管理（原水水質や浄水の残留塩素等）について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題についてお聞かせ下さい。	末端の残留塩素(3)、かび臭(5)、急激な濁度上昇(2) アンモニア態窒素(2)、水温上昇(1)、消毒副生成物(2) 水質基準の変更(1)、PFAS(1)
●薬品注入設備（貯槽・移送設備・注入設備）の設備保全や維持修繕について、現在抱えているか将来発生すると思われる具体的な問題について	局所的豪雨(2)、原水濁度上昇(2)、薬注配管閉塞(2)、劣化(2) 貯蔵量確保(1)、人員不足(2)、維持管理方法(1) 薬品供給(1) 故障リスク低減化(1)、職員教育(1)、注入機能力(1) 維持管理コスト増(1)

- 消毒副生成物について、現在困っている事項として、夏季(3)、降雨(2)、水温(3)、濁度(2)を複数の事業体が挙げていた。
- 当該物質について、総トリハロメタン(4)、トリクロロ酢酸(2)、ブロモジクロロメタン(2)等が、複数の事業体で挙げられた。
- 消毒副生成物を検知した時の対応方法については、【注入率】に関するキーワードとして、凝集剤(6)、活性炭(6)、塩素(4)
【注入率以外】では、監視強化(2)、UV 値に基づく運転管理指針(1)が、挙げられた。
- 消毒副生成物の生成能を現在より正確に計測できるシステムがあった場合、導入目的について、
【導入したい】との回答では、浄水処理へのフィードバック(1)、ハロ酢酸(2)
クロロホルム(1)、ジクロロ酢酸(1)、トリクロロ酢酸(1)、個別の生成能(2)が挙げられた。
【導入したくない】では、対応できている(2)、生成能のみ(2)、期間が限定的(1)、人材(1)が挙げられた。

表-4 消毒副生成物の生成能を現在より正確に計測できるシステム

◆消毒副生成物に関連するご回答をいただいた事業体に質問させていただいております。	
項 目	回 答（キーワード）
●消毒副生成物について、現在困っていることを教えてください	夏季(3)、フィードバック(1)、降雨(2)、水温(3)、濁度(2) トリハロメタン(1)、有機物指標(1)、前駆物質(1)、活性炭(1)
●当該物質について	総トリハロメタン(4)、トリクロロ酢酸(2)、ブロモジクロロメタン(2) クロロホルム(1)、ジブロモクロロメタン(1)、ジクロロ酢酸(1)
●消毒副生成物を検知した時、どのような対応をしているかを教えてください	【注入率】(16) / 凝集剤(6)、活性炭(6)、塩素(4) 【注入率以外】(4) / 独自の処理目標値(1)、監視強化(2) UV 値に基づく運転管理指針(1)
●消毒副生成物の生成能を現在より正確に計測できるシステムがあった場合、導入目的	【導入したい】 浄水処理へのフィードバック(1)、ハロ酢酸(2)、クロロホルム(1) ジクロロ酢酸(1)、トリクロロ酢酸(1)、個別の生成能(2) 【導入したくない】 対応できている(2)、生成能のみ(2) 期間が限定的(1)、人材(1)

■令和7年度

(1) 過年度調査結果

浄水処理および浄水場の運転管理に関する困りごとに、かび臭、水質・気候変動に起因することや、薬品注入量について課題と考えている事業体が多いことが確認できた。

実際に、課題に対し、過去のプロセスデータ・水質測結果などを活用しながら、課題解決となる運用方針を取りまとめている事業体は2事業体/21事業体であった。一方、現在活用はしていないが、今後ビッグデータの活用を検討している事業体は、14事業体/21事業体であった。

多様な課題があるものの、AI・機械学習を活用した課題解決の取り組みを行っていないことが分かった。

(2) 課題解決方法

水道事業体が抱えるビッグデータを活用するために、水道事業体で行われているデータ分析の手順・ノウハウを収集・整理して、将来、AI・機械学習を構築するときのポイントを明らかにするデータ利活用「手順と留意点」を作成した。

表-5 データ利活用「手順と留意点」

取り組み手順	各手順の概要	各手順の留意点
1. データの収集・保存	浄水場のオンラインセンサーの計測値や、オフライン分析の測定結果を収集し、電子媒体に保存する。	・計器の校正、異常値の修正を長期間・定期的に行うこと ・時間スパンや記録の仕方(瞬時値/平均値/積算値)などデータの性質を把握すること ・紙資料のスキャン・OCR処理でのデータ化も検討すること
2. データの統合	特徴の異なる保存データを統合し、データ分析が可能なデータセットにする。	・データの季節変動・日間変動を把握すること ・日ごろから部署間でデータ共有されていることが望ましい
3. データ分析		
3-1. 課題の明確化	データ分析で解決する課題を選定する。	・課題に応じてステップ1でのデータ収集を工夫、もしくはセンサーの追加を検討すること
3-2. アウトプットの明確化	課題を解決するために、データ分析により算出する項目を決定する。	・過去の運用を学習させる場合は、過去の運用で問題が生じていないことを確認すること
3-3. 使用するデータの決定	データ分析で説明変数に使用する項目を選定する。	・文献調査や浄水処理に関する知見に基づき選定をすること
3-4. モデルの選定・構築	使用するモデルを選定し、モデルにデータを学習させる。	・AIを用いるシステムの場合はハード面の整備が必要
3-5. アウトプットの評価	モデルの精度を評価する。	・異常時（高濁時など）の扱いに注意する
4. データ分析結果の運用への反映	モデルのアウトプットをどのように運営に使用するか決定する。	・モデルの信頼性や安定性を考慮して、運用への活用を決めること
5. 定期的な更新	現場の変化に対応するよう、モデルを更新する。	・精度評価を行ったうえでモデルを入れ替え

(3) まとめ

我が国の水道は、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課題に直面している。本研究は、水道の基盤強化に向けて、水道事業体が抱えるビッグデータの活用促進に資する成果を得ることができた。

＜国土交通省 国土技術政策総合研究・増田 貴則＞

(1) 研究目的

国内外の文献の調査を行い、水道管路の維持・点検および浄水場の運転管理等におけるビッグデータ活用状況に関する現状と動向、並びに、これらに関する課題を整理することを目的とした。また、追加調査として、管路分野、浄水分野、その他関連分野における維持管理や運転管理におけるマルチモーダルモデルの活用状況について文献調査を行い、その動向を整理することを目的とした。

(2) 研究方法

所属する研究機関において利用可能な学術文献データベース（Web of Science Core Collection、JDreamⅢ）を用い、文献検索を実施した。検索に使用するキーワードのリストを表-1 に示す。文献検索に必要な日本語を選定し、意味の似通っている日本語をまとめて 1 つのキーワードとした。そのキーワードに対応する英単語を複数用意し、各キーワードを以下の 4 つの分類にわけてリストを作成した。

- ① 主たる対象に関するキーワード
- ② 事象・事業に関するキーワード
- ③ 基本技術に関するキーワード
- ④ 応用技術に関するキーワード

表-1(a) 水道管路の維持管理・点検に関する文献検索キーワード

主たる対象に関するキーワード	事象・事業に関するキーワード	基本技術に関するキーワード	応用技術に関するキーワード
送水管	漏水/水漏れ	統計解析/データ解析	ビッグデータ/データベース
配水管	破損/破壊/事故/故障/故障率	モデリング/モデル	AI/人工知能
給水管	腐食	予測/推定/評価	機械学習/深層学習
水道管	劣化/経年劣化/老朽化	シナリオ分析	人工ニューラルネットワーク
管路/水道管路	寿命/生存率	要因/原因/要因分析/原因分析	IoT/情報技術/通信技術/ICT/情報通信技術
管網/配水管網/配管網	保守管理/維持管理/点検/診断/異常検知	モニタリング/監視/検知/診断	DX/デジタルトランスフォーメーション
配管システム/配水システム	修理/修繕/更新/長寿命化	最適化/最適制御	意思決定支援/エキスパートシステム
	予防保全/状態監視	可視化/画像解析	
	アセットマネジメント/ストックマネジメント	欠損値/欠損値予測/欠損値推定	

表-1(b) 浄水場の運転管理、維持管理・点検に関する文献検索キーワード

主たる対象に関するキーワード	事象・事業に関するキーワード	基本技術に関するキーワード	応用技術に関するキーワード
浄水場/浄水施設	運転管理	自動化/運転支援	ビッグデータ/データベース
浄水処理	薬品注入	最適化/最適制御	AI/人工知能
凝集/凝集沈殿	維持管理/保守管理	モニタリング/監視	機械学習/深層学習
ろ過/砂ろ過	点検/診断/異常検知	統計解析/データ解析	人工ニューラルネットワーク
塩素処理/殺菌	設備保全/修理/修繕/更新/長寿命化	モデリング/モデル	ICT/IoT/情報技術/通信技術/情報通信技術
オゾン処理	予防保全/状態監視	予測/推定/評価	DX/デジタルトランスフォーメーション
	アセットマネジメント/ストックマネジメント	シナリオ分析	意思決定支援/エキスパートシステム
	水質管理/原水水質/浄水水質	要因/原因/要因分析/原因分析	可視化/画像解析
	残留塩素/消毒副生成物		欠損値/欠損値予測

(a) 水道管路の維持管理・点検に関する文献検索方法

水道管路の維持管理・点検に関する文献検索では文献データベースとして Web of Science Core Collection を用いた。①主たる対象に関するキーワード数 4 に対応する英単語は 18 単語、②事象・事業に関するキーワード数 22 に対応する英単語は 48 単語、③基本技術に関するキーワード数 15 に対応する英単語は 33 単語、④応用技術に関するキーワード数 13 に対応する英単語は 20 単語とし、英単語の合計は 119 単語となった。また、分類ごとに英単語を OR 検索した検索式を作成し、文献検索に用いた。Web of Science Core Collection では一度の文献検索で用いることのできる英単語数は 99 語までであるので、①～④までの英単語を全て与えた条件の文献検索はできない。そこで基本技術と応用技術について分割して使用することで、使用する検索式を以下の 3 通りとした。

検索式Ⅰ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」

検索式Ⅱ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」

検索式Ⅲ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」の 1 キーワードごと（応用技術に関するキーワード 13 通り）

また、Web of Science Core Collection での検索対象については、関連分野に限定し、原著論文 Article、総説 ReviewArticle、1965～2023 年に該当する文献とした。Web of Science Core Collection に含まれるすべてのジャーナルおよび書籍は、254 の主題分野の少なくとも 1 つに割り当てられる。当研究に該当する文献を絞り込むため、分野の選択を行った。選択方法は、①主たる対象に関するキーワードの検索結果において、1 分野 100 件以上該当している分野を対象とすることとした。1 分野 100 件以上の分野は 49 分野あり、当研究に関係のあると考えられる 17 分野を追加して、計 66 分野を検索対象とした。

(b) 浄水場の運転管理、維持管理・点検に関する文献検索方法

浄水場の運転管理、維持管理・点検に関する文献検索では文献データベースとして JDreamⅢを用いた。①主たる対象に関する単語数 10、②事象・事業に関する単語数 21、③基本技術に関する単語数 18、④応用技術に関する単語数 20 を設定し、分類ごとに単語を OR 検索した検索式を作成し、文献検索に用いた。使用する検索式を以下の 5 通りとした。

検索式Ⅰ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」AND「応用技術(OR)」

検索式Ⅱ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」

検索式Ⅲ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」

検索式Ⅳ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」の 1 キーワードごと（基本技術に関するキーワード 8 通り・単語数 18）

検索式Ⅴ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」の 1 キーワードごと（基本技術に関するキーワード 9 通り・単語数 20）

また、JDreamⅢでの検索対象については、原著論文、総説のみを対象とした。JDreamⅢでは、文献がどの専門分野に属しているか「JST 科学技術分類表」に基づいて 24 の分類に分けられている。当研究に該当する文献を絞り込むため、24 分類のうち当研究に関係のあると考えられる 9 分類を選択し検索を行った。

(c) マルチモーダルモデルに関する文献検索方法

令和 6 年度までの海外文献調査により、異なる種類のデータを組み合わせるマルチモーダルモデルを用いることで、ビッグデータと AI・機械学習を導入したモデルの予測精度や局所的最適解の課題に対処できることが示唆されたため、今年度は、浄水場の運転管理及び水道管路網の維持点検におけるマルチモーダルモデルの活用状況について国内外の文献調査を実施した。

マルチモーダルモデルに関する文献検索では文献データベースとして Web of Science Core Collection および Google Scholar を用いた。使用する検索式は主に以下の 4 通りとした。なお、Web of Science Core Collection での検索対象については、関連分野に限定せず、原著論文 Article、総説 ReviewArticle、1965～2023 年に該当する文献とした。

検索式Ⅰ：「マルチモーダル」、「大規模言語モデル（LLM）」、「マルチモーダル AND 大規模言語モデル（LLM）」のいずれか一つ

検索式Ⅱ：「マルチモーダル」AND「水道」「飲料水」「漏水」「浄水」「水質管理」「水質制御」のいずれか一つ

検索式Ⅲ：「大規模言語モデル（LLM）」AND「水道」「飲料水」「漏水」「浄水」「水質管理」「水質制御」のいずれか一つ

検索式Ⅳ：「マルチモーダル」AND「大規模言語モデル（LLM）」AND「水道」「飲料水」「漏水」「浄水」「水質管理」「水質制御」のいずれか一つ

（3）文献調査結果

（a）水道管路の維持管理・点検に関する文献検索結果

検索式Ⅰ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」の検索結果はエラーとなった。この式の英単語の合計は 99 単語であるため検索可能であるはずであったが英単語数が理由で検索が不能であった。

検索式Ⅱ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」の検索結果は 749 文献であった。年代別推移を図-1 に示す。2010 年代の後半から急速に文献数が増加していることが見て取れる。

検索式Ⅲ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」の 1 キーワードごと（応用技術に関するキーワード数は 13）に検索式を作成し検索した。応用技術のキーワードは 13 あり、検索結果については表-2 に示す。件数が一番多かった応用技術のキーワードは、「機械学習」で 168 件、次いで多いのが、「AI/人工知能」の 127 件、「データベース」の 124 件であった。それぞれの年代別推移を図-2、図-3、図-4 に示す。他方、最も少ない検索結果となったのは、「ICT/情報通信技術」と「DX/デジタルトランスフォーメーション」の 14 件であった。

表-2 応用技術 1 キーワードごとの検索結果（検索文献数）

式	キーワード	英単語	件数
応用1	ビッグデータ	"big data"	37
応用2	データベース	database	124
応用3	AI/人工知能	AI/"artificial intelligence"	127
応用4	機械学習	"machine learning"	168
応用5	深層学習	"deep learning"	72
応用6	人工ニューラルネットワーク	"artificial neural network(s)"	121
応用7	IoT	IoT/"Internet of Things"	75
応用8	情報技術	"information technology"	24
応用9	通信技術	"communication(s) technology"	30
応用10	ICT/情報通信技術	"information and communication(s) technology"	14
応用11	DX/デジタルトランスフォーメーション	DX/"digital transformation"	14
応用12	意思決定支援	"decision support"/"decision making support"	108
応用13	エキスパートシステム	"expert system"	29

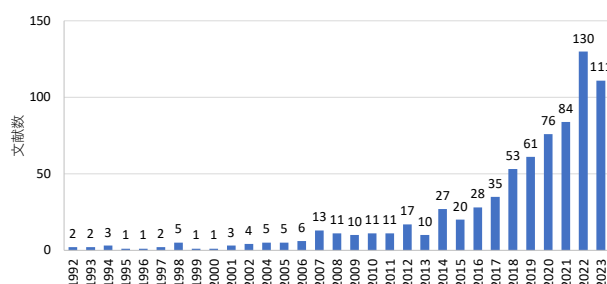


図-1 応用技術に関する検索結果年代別推移

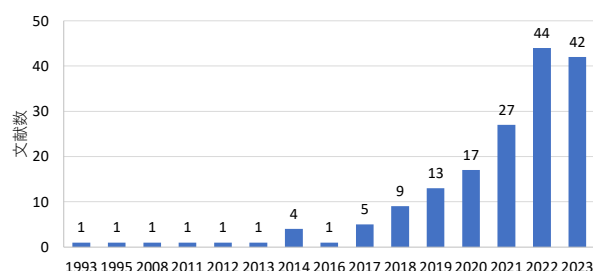


図-2 応用技術「機械学習」年代別推移

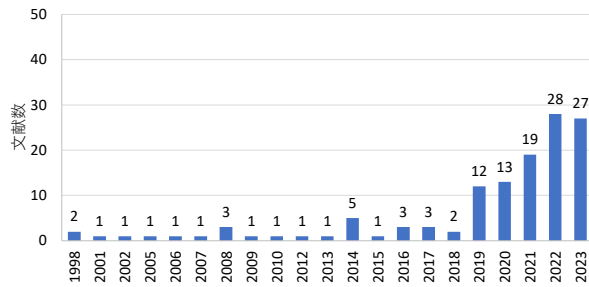


図-3 応用技術「AI/人工知能」年代別推移

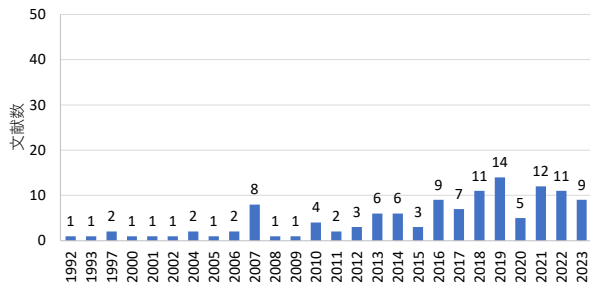


図-4 応用技術「データベース」年代別推移

(b) 浄水場の運転管理、維持管理・点検に関する文献検索結果

検索式Ⅰ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」AND「応用技術」の検索結果は7310件であった。年代別推移を図-5に示す。2010年代の後半から急速に文献数が増加していることが見て取れた。発行年が2014年～2024年の文献を指定して、シソーラス用語15件を表示したものを図-6に示す。シソーラス用語「凝集」、「改変」、「消毒副生成物」、「最適化」、「機械学習」などの用語が増加していることが分かった。

検索式Ⅱ・検索式Ⅲの検索結果はそれぞれ11314件・10393件となった。年代別推移を見ると検索式Ⅰと同じように2010年代後半から文献数が増加していることが分かった。

検索式Ⅳ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「基本技術(OR)」の1キーワードごと（基本技術に関するキーワード8通り）に検索式を作成し検索した。件数が一番多かったキーワードは、「予測／推定／評価」の6823件、次いで多いのが、「モデリング／モデル」の4322件、「最適化／最適制御」の1537件であった。キーワードのうち「シナリオ分析」の検索結果が6件と最も少ない結果となった。図-7、図-8に「最適化／最適制御」と「自動化／運転支援」の年別推移を示す。2010年代半ばまでは横ばいの件数を示していたが、その後は件数が増加してきており、研究が進んできていることがわかった。これらのうち、「最適化／最適制御」のシソーラス用語の年別推移をみると（図-9）、「最適化」、「改変」、「アルゴリズム」、「凝集」、「保全」は増加傾向にあり、「浄水」、「水質管理」は減少傾向、「消毒副生成物」はやや増加していることが分かった。

検索式Ⅴ：「主たる対象(OR)」AND「事象・事業(OR)」AND「応用技術(OR)」の1キーワードごと（応用技術に関するキーワード9通り）に検索式を作成し検索した。件数が一番多かった応用技術のキーワードは、「AI／人工知能」で9857件、次いで多いのが、「ICT/IoT/情報技術/通信技術/情報通信技術」の3157件、「機械学習/深層学習」の764件であった。応用技術に関するキーワードのうち重要語句である「ビッグデータ/データベース」の検索結果411件であった。その年別推移を図-10に示す。「ビッグデータ/データベース」の検索結果のうちシソーラス用語の年別推移をみると（図-11）、「浄水」、「殺菌」、「水質管理」等は横ばいのまま、「凝集」は増加傾向にあり、手法としては、「機械学習」、「遺伝アルゴリズム」、「NN」が2019年頃から出現していることが分かった。他方、最も少ない検索結果となったのは、「欠損値/欠損値予測」の0件であった。

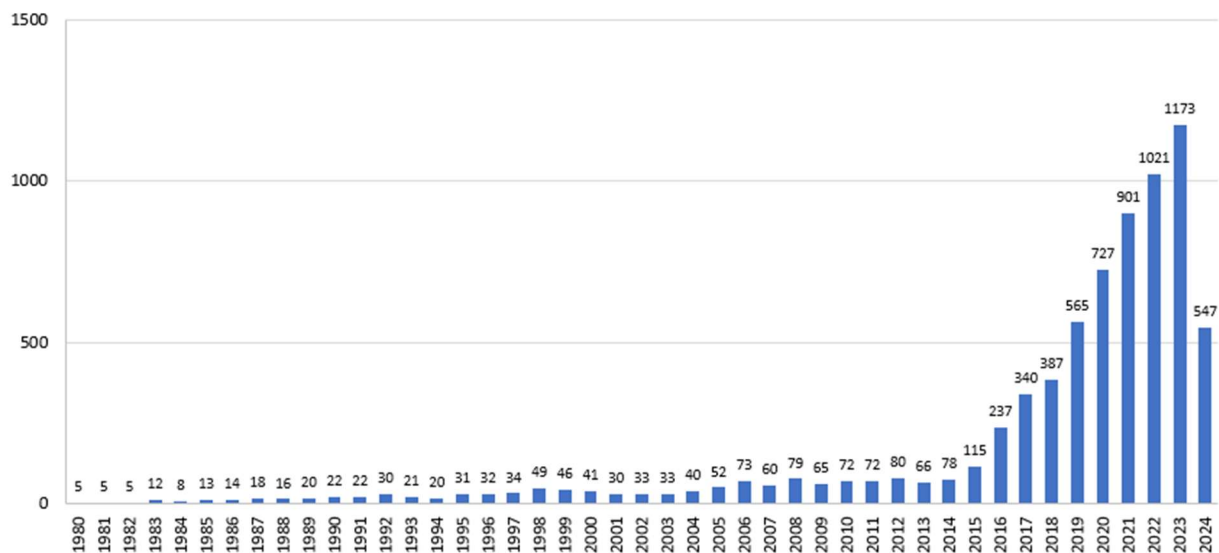


図-5 検索式 I の検索結果年代別推移 (1980-2024)

対象ファイル: グラフ: 積み上げ 「X軸」と「系列」を選択 X軸: 発行年 系列またはY軸: シソーラス用語 (下位語除く)

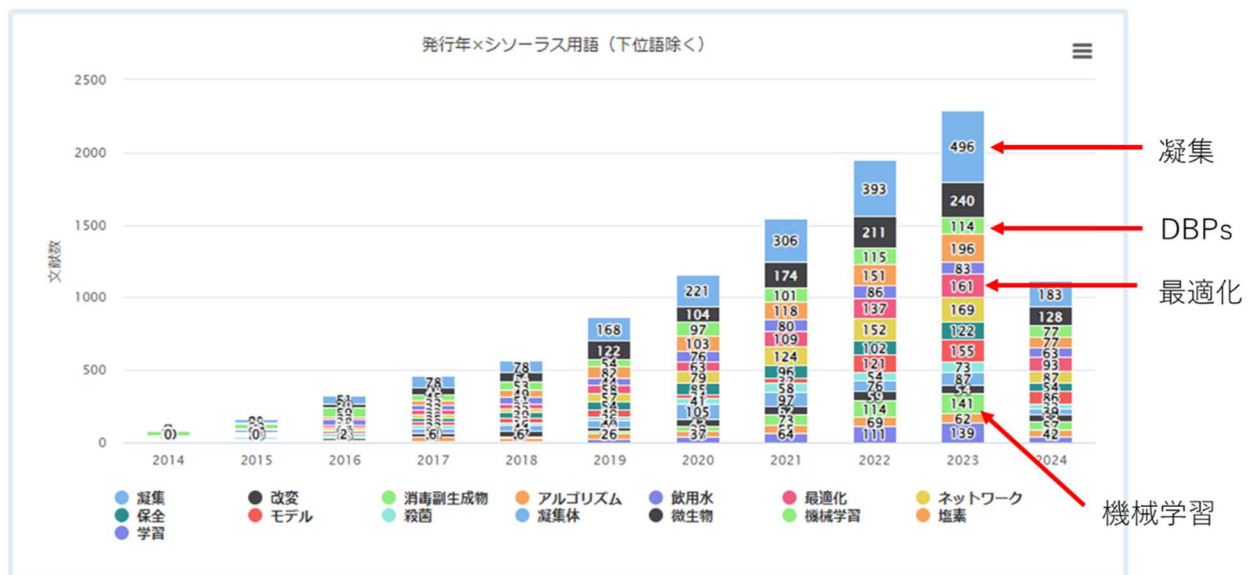


図-6 検索式 I の検索結果 (シソーラス用語を含む文献数)

対象ファイル: JSTPlus グラフ: 「X軸」のみ選択 X軸: 発行年

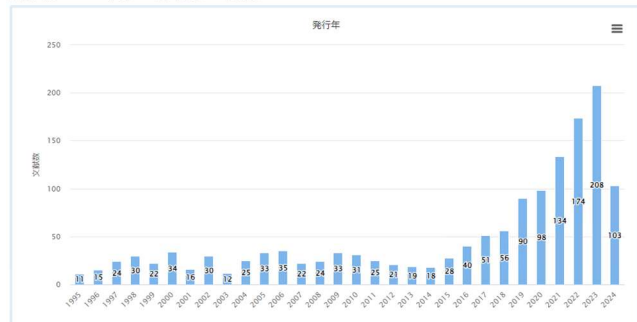


図-7 検索式IV (最適化/最適制御) 検索結果

対象ファイル: JSTPlus グラフ: 「X軸」のみ選択 X軸: 発行年

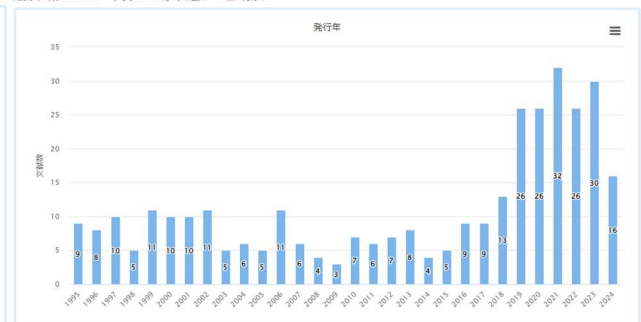


図-8 検索式IV (自動化/運転支援) 検索結果

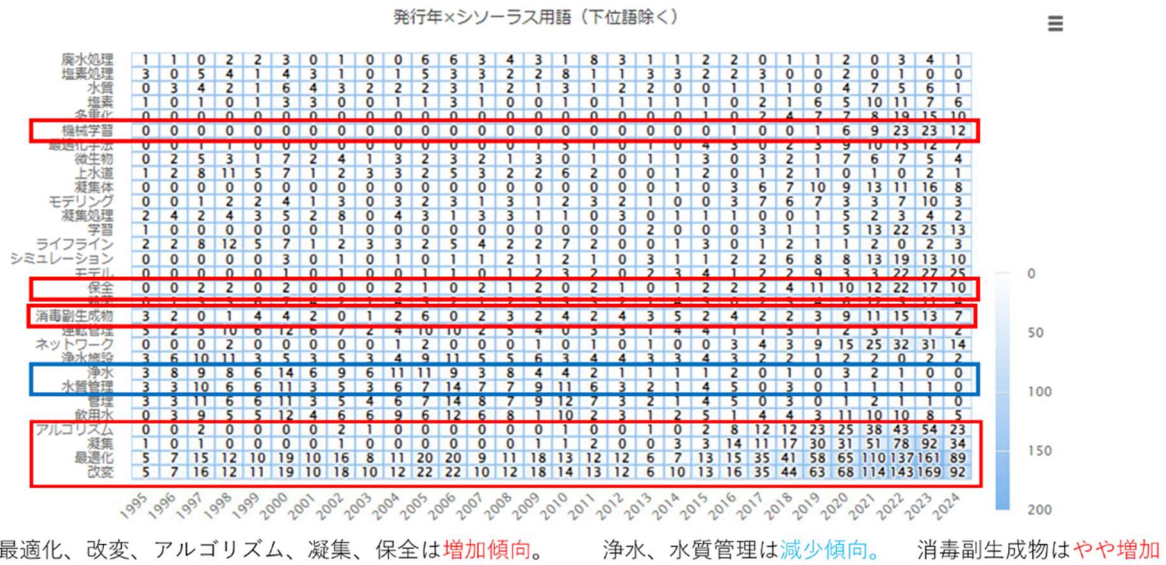


図-9 検索式IV（最適化/最適制御）の検索結果 シソーラス用語の推移

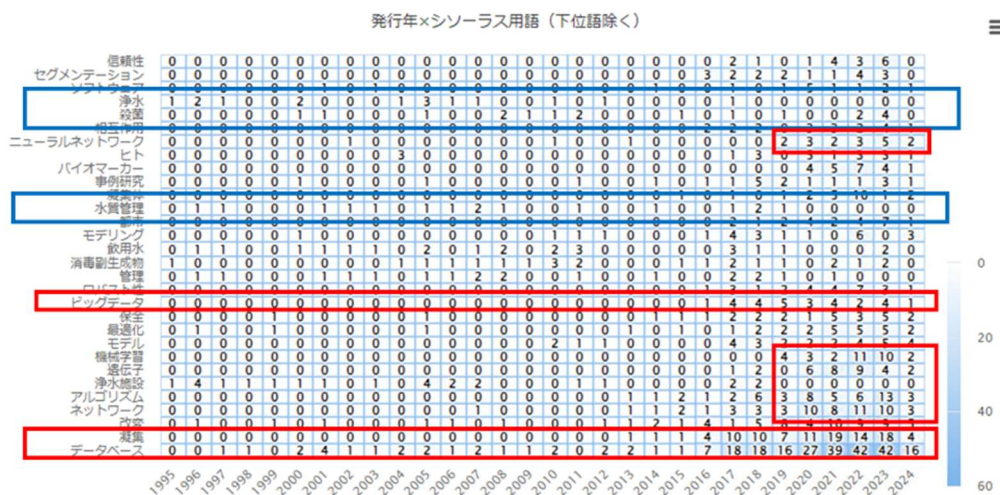
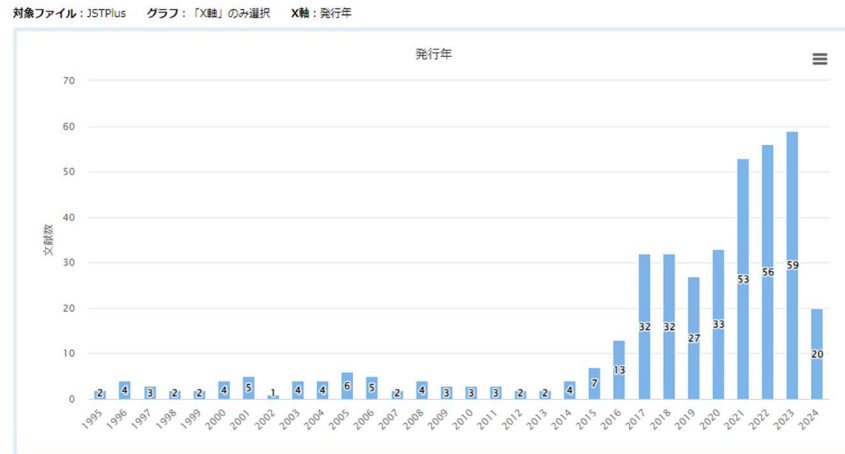


図-11 検索式V（ビッグデータ/データベース）の検索結果 シソーラス用語の推移

(c) マルチモーダルモデルに関する文献検索結果

検索式Ⅰによる検索結果の年別推移を図-12に示す。「マルチモーダル」や「大規模言語モデル（LLM）」をキーワードに含む文献数は増加の一途をたどっていることがわかった。マルチモーダルという用語自体は『異なる形式や様式の』を意味するため、古くから多目的最適化問題や統計モデルの開発等に関する研究において利用されてきていたことがわかった。2024年以降、特に「マルチモーダル」と「大規模言語モデル（LLM）」の両方をキーワードに含む文献数が急速に増加していることがわかった。

また、水道の分野でマルチモーダルをキーワードとして含む文献について調査した結果として、検索式Ⅱによる検索結果の年別推移を図-13、検索式Ⅲ、検索式Ⅳによる文献検索結果によりヒットした文献数を表-3に示す。全体の傾向と比べると緩やかではあるが、水道分野においてもマルチモーダルやLLMに着目している研究が増えていることがわかった。

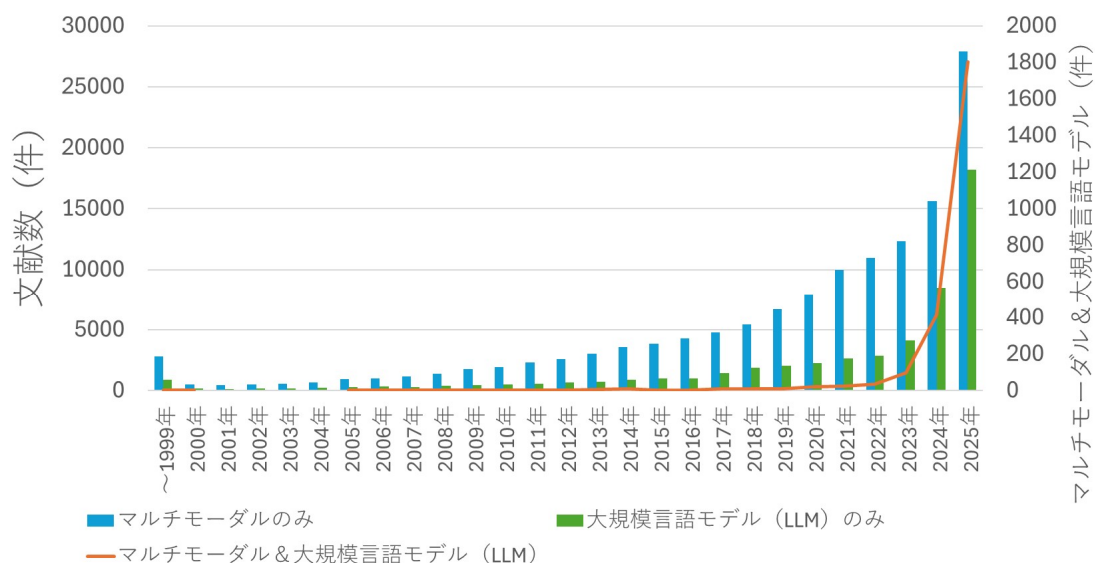


図-12 検索式Ⅰ（マルチモーダル、LLM、マルチモーダル AND LLM）の検索結果

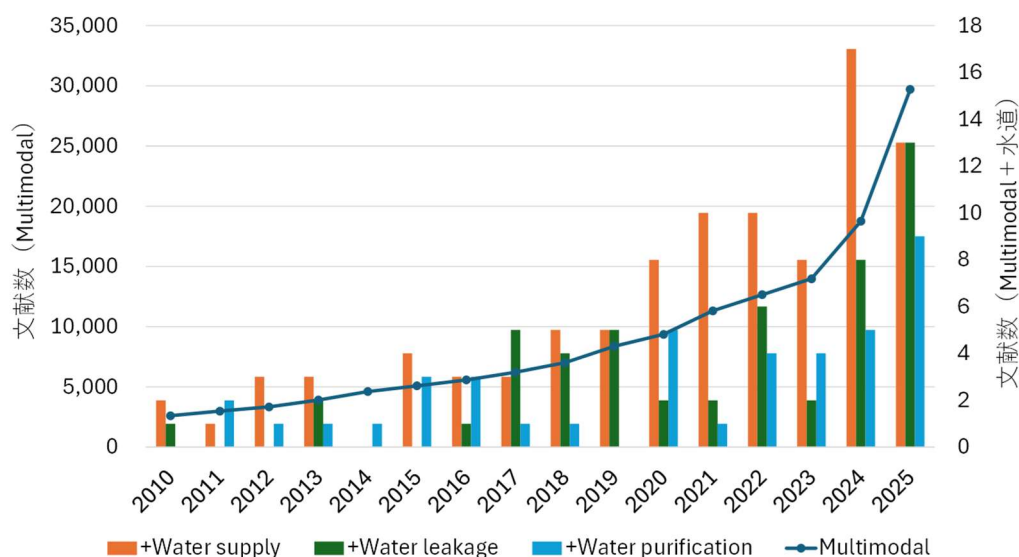


図-13 水道分野でマルチモーダルをキーワードとして含む文献数の年別推移

表-3 検索式Ⅲ、検索式Ⅳの検索結果（件数）

AND キーワード	大規模言語モデル (LLM)	マルチモーダル 大規模言語モデル (MLLM)
なし	56,536	3,045
水道	160	0
飲料水	41	0
漏水	15	0
浄水	17	0
水質管理	125	4
水質制御	91	3

(d) 文献レビュー

上述の水道管路の維持管理・点検に関する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。

また、浄水場の運転管理等に関しては、上述の検索式Ⅰ・Ⅳ・Ⅴで抽出できた文献の中から近年のものや文献掲載誌のインパクトファクターが高いもの 86 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 4 件と有料で入手したもの 7 件の合計 11 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「凝集」・「消毒副生成物 (DBPs)」・「その他」に大きく分けて整理し文献レビューを作成した。

マルチモーダルに関しては、キーワードの組み合わせで抽出できた文献の中からキーワードによって絞り込み 100 文献を最終的にリストアップした。うち 13 件について主要部分の翻訳と図表の抜粋整理を行った。以下はレビュー結果の一部である。

1) 漏水検知に関する技術

(i) 流体過渡現象と人工ニューラルネットワークを用いたパイプラインにおけるリーク検出とトポロジー同定

流体過渡現象を利用した水道管路の状態評価は、非侵襲的な技術であり、さまざまな異常を特定し、パイプラインのトポロジーの要素を特定するためのアプローチである。Bohorquez らは、パイプライン中の特徴の存在を予測する新しい手法について、流体過渡現象および人工ニューラルネットワーク (ANN) を使用し、パイプラインの接合部のようなトポロジカル要素を特定するとともに、漏水の検出、位置特定、サイズ決定するための新しい技術を提案した。2 つの ANN アーキテクチャが比較され、1 次元畳み込みネットワークは、密なネットワークと比較して、パイプラインのジャンクションの位置をより正確に推定できることを明らかにした。

この技術を数値的に適用した結果、ANN は、テストした例の 95%において、分岐点の位置を 2.32m より小さい誤差で正確に推定でき、パイプラインの分岐点の両側の直径のサイズをほぼ完璧に推定できるとした。さらに、漏水の位置とサイズに関しても、学習された ANN は、テストされた例の 95%において、漏水の位置を 3.0mm より小さい誤差で正確に推定することができ、漏水のサイズの推定における平均絶対誤差は 0.03mm であった。これらの結果は、機械学習技術および流体過渡波を、パイプラインのトポロジー要素や漏水等異常の位置特定に使用することについての卓越した可能性を示している。

(ii) 音響スマート水道技術を用いた配水管の破断前漏水故障防止: アデレードでのケーススタディ

Stephens らは、アデレード市中心業務地区 (CBD) における水道管の破損を減らすため、腐食し脆くなった鋳鉄製水道管に発生するノイズの分析と、IoT 技術を備えた分散型音響センサー (加速度計) を使用して、進展する管の亀裂/漏水を検知する“漏水前破断” (LBB) 検出システムの確立について述べている。

環境ノイズと亀裂ノイズの区別や、縦亀裂と周方向亀裂の区別という点で、音響データを継続的に収集することで得られる新たな知見を得た。円周方向の亀裂は比較的早く発生し (通常、数日以内)、(亀裂発生の原因となった) 荷重が軽減されると安定した状態になるのに対して、縦方向のひび割れは発生した時点では比較的小さく、一般的に周方向のひび割れとほぼ同等の騒音レベルに達する大きさ (長さ) になる

までには、数週間から数ヶ月かかるとされることから、固定ロガーが新しい縦亀裂の範囲内に位置し、継続的に作動している場合、亀裂からのノイズが検出された後、修理を実施するためにはかなりの期間を要することがわかった。

また、一過性の環境騒音（交通や信号など）だけでなく、半連続的な騒音源（水道メーターや水道使用量）や連続的な騒音源（電氣的、機械的）など、測定されるノイズのレベルに影響を与える可能性のある騒音源については、周波数特性によってこれらの騒音源を分離することが可能であり、環境騒音の組み合わせの日内変動は繰り返しパターンを形成し、これを学習することで、これらの環境騒音源と、新規または発生中の配管亀裂に関連した漏水による騒音を区別できると示している。

確立したシステムは、音響信号がパイプに沿って接合部（およびACとPVCパイプのセクション）を通過する際に減衰して分散することによる損失、配置された加速度ロガーの数とその有効聴取範囲、センサーの故障（または建設工事によるセンサーの除去）、一時的または継続的な（そして変動する）環境ノイズ源の影響によって制限されるものの、固定された加速度計ロガーからのデータに基づいて約20m～50mまでの漏水箇所を特定することが可能であり、ひび割れ配管に関連する発生中の漏水全体の約55%を、制御不能な故障の前（すなわち、計画外断水の発生や第三者の経済的損害の前）に検出できると報告している。

2) 破損予測に関する技術

(i) 管路破損予測モデルによる都市の水の安全性の改善: 機械学習または生存分析

Sniderらは、2つの主要な統計的管路破損モデリング手法である機械学習と生存分析アルゴリズムを詳細に比較した。勾配ブースティング決定木による機械学習モデルとワイブル比例ハザード生存分析モデルを用いて、カナダの主要配水系統の鋳鉄管の次の破損までの時間を予測した。その結果、性能指標であるRMSE、MAE、相関、C-indexにおいて、機械学習アルゴリズムがテストデータセットの破損までの時間をより正確に予測できることを示唆した。これは、機械学習アルゴリズムが共変量と破損までの時間の複雑な関係を識別する能力があるためであろう。しかしながら、機械学習モデルは一貫して、テストデータセットで観察された事象よりも早い破断までの時間を予測したのに対し、生存分析ではこれらの事象を過剰に予測したことが判明した。この理由は、機械学習モデルが打ち切り事象を学習していないことにより、実際に発生するよりも早い時期に管の破損が予測されるバイアスがかかることによると考えられた。全体として、配水システムの当面（今後数年以内）の物理的安全性に関心のある公益事業体にとっては、機械学習モデルが適切である可能性を示唆している。しかし、費用対効果の高い長期的な破損パターンの特定に関心のある公益事業体にとっては、機械学習モデルの開発に打ち切り事象を含めないことは、配管破損予測の精度に大きく影響する可能性がある。

配水システムの配管破損予測と水の安全性向上に関する今後の研究では、機械学習の枠組みの中で打ち切り事象を扱う際に、生存分析技術を採用することに焦点を当てるべきである。これらの技術を組み合わせることで、機械学習モデルが共変量と破断までの時間との間の複雑な関係を特定し続けることができるようになり、また機械学習モデルが学習データセットの打ち切り事象から学習することができるようになるかもしれない。

(ii) 機械学習に基づく水道管の破損予測：工学、地質、気候、社会経済的要因の影響

Fanらは、米国で最大級の配水管網を管理するクリーブランド水道局によって収集された配水管網保守データセット（5300マイル（8529km）以上の水道管を含む）と複数の公共データセットを統合するフレームワークを構築し、構築したフレームワークに基づいて5つの機械学習アルゴリズム「Light GBM」、「Artificial Neural Network (ANN)」、「Logistic Regression (LR)」、「K-Nearest Neighbors (kNN)」、「Support Vector Classification (SVC)」を適用した。どの機械学習アルゴリズムがより効果的であるか比較した結果、Light GBMが最も高い予測精度であった。Light GBMモデル等の機械学習モデルは予測能力を持つが、配管破損率への各要因の影響を説明できない。そこで、「過去の管破損データ」、「土質データ」、「地形データ」、「センサスデータ」、「気候データ」を含むデータソースを用い、各要因が配管の破損確率にどう影響を与えるのかを、SHAP (Shapley Additive ex Planations) を用いて要因を分析した。環境要因では、寒冷及び猛暑の日数が多いほど破損する確率が高く、標高の高い位置（黄色）にある水道管は破損しにくい。社会的要因では、貧しい地域や健康保険に加入していない地域ほど配管破損率が低くなり（一般的に水の使用頻度が少ないため耐用年数が延びている可能性がある。）、人口密度の高い地域は、ほとんどの水道管サンプルにおいて、水道管の破損確率が相対的に高いことが示された。

3)凝集に関する技術

(i) 浄水プロセスにおける凝集剤注入のための可変構造ニューラルネットワークモデリングによるマルチモード制御

Zhang らは、中国長沙市の浄水場における浄水プロセスにおける凝集剤注入について、凝集剤注入プロセスとその関連要因を分析し、ルールベースと組み合わせた主成分分析 (PCA) 法による改良型マルチモード可変構造ランダムベクトルニューラルネットワークアルゴリズム (MM-PVSRVNN) を提案した。

浄水の品質を確保しながら、凝集剤の注入量を効果的に制御することは、浄水処理における重点課題である。この研究では、浄水場の実プロセスと過去の制御モードを分析し、凝集剤注入プロセスには3つの作業モードがあるとしニューラルネットワークモデル (NNM) を構築し、それぞれの作業モード (マルチモード) を学習させるとともに、凝集剤注入予測に新しいアルゴリズム (MM-P-VSRVNN アルゴリズム) を適用した。PCA は、通常のニューラルネットワークとは異なり、隠れ層のノードを最適化し、計算のたびにニューラルネットワーク構造を更新するために使用されると報告されていた。この方法により、有効な凝集性能を維持しながら、凝集剤の注入量を効果的に調整できることが報告されていた。また、MM-P-VSRVNN アルゴリズムは、計算時間を短縮し、過学習を回避できると示されていた。

4)DBPs に関する技術

(i) 水道水中のトリハロメタン発生を予測するための簡単で容易な水質パラメータの利用

水道水中のトリハロメタン (THMs) 発生予測のための現在のモデルは、使用されているデータセットが不適切であったり (例えば、実験室にて得られたものを使用)、測定が困難であったり高価な機器を必要とするパラメータを含んでいたりするため、実用に十分ではない。

Zeqiong らは、シンプルで簡単な4つの水質パラメータ (温度、pH、UVA254、C12) を使用した。THMs モデルの開発には、線形/対数線形回帰モデル (LRM) と放射基底関数人工ニューラルネットワーク (RBF ANN) を採用した。モデルの開発とテストには、水道水サンプルからの64の観測結果が用いられた。金華地域 (中国東部に位置する) の13の給水システム (それぞれが独自の水源貯水池を持つ) から64の水道水サンプルを入手し、トレーニンググループ (51個のデータセット) とテストグループ (13個のデータセット) の両方が、データセット全体とされた。

その結果、LRM では予測値と実測値の相関が悪く予測能力は非常に限定的であった。一方、RBF ANN の場合、学習、テスト、評価、調整を繰り返すことで最適なモデルが得られ、高い相関係数と良好な予測精度を示すことから、RBF ANN は THM の生成と4つの水質パラメータの間の複雑な関係をうまく解決できることが示された。

この研究により確立された RBF ANN モデルは、1) 実際の給水システムにおける THMs 予測モデルの適用を大幅に促進し、2) TOC と臭化物測定機器を持たない小規模・後進地域の浄水場に THMs モニタリングの扉を開き、3) 将来的な THMs の自動モニタリングへの応用の可能性を示していた。

(ii) 浄水処理における DBPs (ハロ酢酸) 予測のための粒子群最適化 (PSO) を用いた人工知能の性能評価

Anthony らは、多変量非線形回帰法 (MNR)、適応型ニューロ・ファジー推論システム-グリッド分割法 (PSO-ANFIS-GP)、適応型ニューロ・ファジー推論システム-サブクラスタリング法と粒子群最適化との同化法 (PSO-ANFIS-SC) を用いて、一連のデータから水道水中の HAA (DCAA、TCAA、BCAA、HAA5、HAA9) 濃度とその特徴を予測した。PSO-ANFIS-GP および PSO-ANFIS-SC は、8つのパラメータ (pH、温度、UVA254、DOC、Br⁻ ; NH₄⁺ - N; NO₂⁻ - N、残留遊離塩素) を含む合計64セットのデータに対して学習・検証を行っている。MNR モデルは、低い MAE (0.1883 < MAE < 2.7852) および R² (0.5184 < R² < 0.8181) で R² の予測基準に一致した。しかし、PSO-ANFIS-GP モデルと PSO-ANFIS-SC モデルを浄水場の配水システムのデータで評価すると、低い MAE を持つ R² は (0.1060 < MAE < 1.560)、(0.8825 < R² < 0.9363)、(MAE) は (0.1076 < MAE < 1.6193)、(0.8826 < R² < 0.9322) となり、それぞれ良い一致を示した。PSO-ANFIS-GP と PSO-ANFIS-SC の両モデルは、R² がほぼ1であることから、pH、水温、UVA254、DOC、Br⁻、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、残留遊離塩素、消毒剤副生成物などの水質パラメータ (入力) に対して、MNR と比較して非線形性の関係を予測することができる。また、パラメータの相互作用解析の結果、HAA5 と HAA9 の生成は、それぞれ温度と DOC がすべて有意であることが示された。DBP の生成は、塩素処理中の遊離塩素と反応性基の両方が減少することによって抑制される。HAAs の酸濃度は、pH が 6.5 から 7.7 に上昇するにつれて徐々に改善したが、pH がさらに上昇すると低下した (7.7~8.5)。PSO-ANFIS-GP による HAAs の正確な予測により、飲料水供給システムにおける消毒プロセスの制御と最適化が大幅に改善される可能性があることを示し

た。

5) マルチモーダルおよび大規模言語モデルに関する文献

(i) デジタルツインとマルチモーダルトランスフォーマーによるスマート水管理：使用量予測と漏水検知へのアプローチ

Syed らは、デジタルツイン技術とマルチモーダルトランスフォーマーネットワークを組み合わせ、水使用量予測と漏水検知の精度と効率を向上させる新たなフレームワークを提案した。具体的には、水使用量の長期時系列予測用のインフォーマーモデル（Informer モデル）と漏水検知のための異常検知用のウォーターマルチモーダルトランスフォーマー（Water Multimodal Transformer モデル）であり、これらがデータを処理して複雑なパターンと依存関係を捕捉するものである。この手法は、物理的な水道ネットワークからのリアルタイムセンサーデータを活用し、仮想的なデジタルツインと同期させることで、リアルタイムの監視と意思決定を可能にすると述べられていた。

実験結果により、長期時系列予測に活用されたインフォーマーモデルの精度が実証され、卓越した性能が示された。トレーニングでは R2 スコア 0.9996、テストでは 0.9995 を達成し、ほぼ完璧な予測精度を示した。さらに、インフォーマーモデルは訓練時 1.81、テスト時 2.2 という極めて低い平均二乗誤差 (MSE) 値を記録し、それぞれ 94.89 と 177.38 の MSE 値を示した LSTM などの従来モデルを大幅に上回った。この誤差指標の大幅な低減は、インフォーマーモデルが水使用データ内の複雑なパターンを高精度で捕捉する能力があることを裏付けている。

マルチモーダルデータソースの統合により、漏水検知システムの性能がさらに向上し、圧力センサーデータと熱画像を取り込むことで、Water Multimodal Transformer モデルは精度 98.4%、再現率 98.4% を達成したと示されていた。また、このモデルは 97.6% という高い F1 スコアを示し、偽陽性率 (FPR) は 0.0019 と低く、曲線下面積 (AUC) は 0.984 であり、漏水検出におけるすべての評価基準にわたって優れたパフォーマンスを示した。これらの結果から、Water Multimodal Transformer モデルは、再現率と感度におけるバランスの取れた性能を有しつつ、誤検知を最小限に抑え、真の漏水事例を効果的に特定することに優れた信頼性の高いツールとしての可能性を示したと報告していた。

もともと自然言語処理向けに開発されたトランスフォーマーモデルは、時間経過に伴う依存関係を捉えることで、長いデータシーケンスの処理に優れている。この特性により、数日・数週間、さらには数ヶ月にわたってパターンが展開する水使用量の予測といったタスクに最適である。水道システムにおいて、マルチモーダルトランスフォーマーは圧力・流量・温度データなど複数のデータストリームを同時に処理でき、高精度な予測を提供するとともに、漏水などの潜在的問題を発生前に特定することが可能となるだろうと述べられていた。

(ii) 時系列大規模言語モデルに基づく配水ネットワークの流量予測

従来の深層学習モデル (LSTM、GRU など) では、データ内の長期的な依存関係を十分に捉えられないという課題があるため、Li らの研究では、時系列データに特化した大規模言語モデル (LLM) である Chronos を配水網の流量予測法として提案している。Chronos は時系列データを量子化・スケールリングによりトークン化し、Transformer ベースの言語モデルで学習する特徴を持つ手法である。2023 年の Haida 地区の配水量データを使用し、既存の深層学習モデルである LSTM、GRU、および、既存の時系列 LLM である MOMENT、Timer と比較検証した結果、Chronos は、全ての評価指標において比較対象の他モデルを上回る結果を示し、複雑な時系列データに対して高い予測精度と有効性を示した。本研究は、都市水供給システムにおける異常検知や漏水対策において、LLM ベースの時系列予測モデルが有望であることを示すものと位置づけられる。

(iii) 大規模言語モデルを用いた水道配水ネットワーク最適化の自動化

Wang らの研究は、都市の水道配水ネットワーク (Water Distribution Networks: WDNs) における高度な管理タスクを自動化するため、LLM (大規模言語モデル) を活用したマルチエージェントフレームワークを構築し、その性能を体系的に評価したものである。論文では、WDNs の運用が専門知識と人的リソースを必要とする点を課題として指摘している。

提案されたフレームワークは、タスク全体を統括する Orchestrating Agent を中心に、3 つの専門エージェント (Knowledge Agent、Modelling Agent、Coding Agent) で構成される。Orchestrating Agent はタスク内容とネットワーク状態を解釈し、更新方針やコード生成を行う役割を担う。Knowledge Agent

は水理公式に基づく推論を行い、Modelling Agent は EPANET を用いた外部シミュレーションを実行し、Coding Agent は Python コードを生成・実行する。

評価対象は、(1) 水理モデル校正（粗度推定）と (2) ポンプ運転最適化（エネルギーコスト削減）の 2 種類であった。実験には、構造の異なる 2 つのベンチマークネットワーク（Net2: ツリー型、Anytown: ループ型）が用いられた。結果として、Knowledge Agent は水理原理に基づく推論能力を示し、専門家に近い判断過程を再現したが、数値精度には限界があり、特に Net2 では圧力誤差が 4 m を超えるケースが確認された。一方、Modelling Agent は EPANET による物理的に正確な計算が可能であったが、自然言語で与えられた制約条件の解釈が不安定であり、粗度が許容範囲を逸脱するなどの問題が発生した。

最も高い性能を示したのは Coding Agent であり、Orchestrating Agent が生成した Python コードを実行することで、Net2 では MAE 0.0037、Anytown では MAE 0.035 と、他のエージェントを大きく上回る精度を達成した。また、ポンプ運転最適化においても、運転コストを £1800 以下に抑えるなど、安定した最適化結果を示した。

本研究は LLM ベースのエージェントが WDN 管理タスクの自動化に有望であることを示す一方、推論精度、自然言語制約の扱い、ループ型ネットワークでの最適化など、改善すべき課題も残されていることを明らかにした。本研究が水道分野における LLM 活用の基盤となることを著者らは強調していた。

（４）文献調査のまとめ

海外の文献調査に基づき、水道管路の漏水検知、破損予測技術、浄水場の運転管理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、凝集剤管理、消毒副生成物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。

漏水検知の技術においては、流体過渡現象や加速度、音響等を計測できるセンサーにより取得されたデータを人工知能や機械学習技術に適用することで、漏水位置や漏水サイズ、亀裂方向の推定を従来よりも高い精度で実施できる可能性があることが示された。水道管路の破損予測の技術においては、物理的な計測データに加えて社会経済的要因を加味したデータを機械学習に適用することによって、従来よりも高精度に破損予測を実現できる可能性が示された。破損予測においては、機械学習モデルの種類によって予測精度が向上しないことや、機械学習モデルが打ち切り現象を学習していないことにより、実際に発生するよりも早い時期に管の破損が予測されるバイアスがかかる可能性があることが課題としてあげられた。測定現場で利用可能な資源やニーズ、得られた測定データの期間や項目等に応じて、適切な分析手法や予測モデルを選択し、活用することが必要であると考えられる。多様なデータと人工知能や機械学習を適切に用いることにより、従来よりも高精度に漏水検知や破損予測を実現できる可能性があり、今後の水道の基盤強化を支える技術群の一つとして活用することが望ましいと考えられる。

浄水処理、水質管理の技術においては、手法としては、機械学習やニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズムを用いたものが特に近年に増加傾向にあった。これらの手法は、非線形現象にも適用可能であり従来手法よりも予測精度を向上させることができる一方で、モデル構築に用いられるデータが実験室にて得られたものであったり、現場にて得られたものであっても測定が困難であったり高価な計測機器を必要とするような場合には現場での適用に課題があり実用化の妨げとなる可能性があることが指摘されていた。他方、モデルの予測精度や局所的最適解の課題を解決していく方法として、異なる種類のデータを組み合わせるマルチモーダルによる制御と可変型構造を有するニューラルネットワークモデルが提案されており、現場の知見や現場にて容易に測定できるデータをこの手法において用いることで、技術水準の確保および技術継承が行える可能性があるものと思われた。

また、最近年においては大規模言語モデル（LLM）の発展した形としてマルチモーダル大規模言語モデル（MLLM）の研究、利活用が進展しつつあり、様々な学術・実用分野において急速に論文数が増加していた。浄水場及び水道管路を対象とした MLLM に関する文献数は多くはないものの、従来の機械学習・AI モデルの手法に比べ格段の精度向上の可能性が示されていた。国内での展開、研究は現状では十分ではないものの、MLLM はデータ形式を選ばないといった特徴があるため、現場の知見や現場にて測定されているデータに対しても活用可能と推察される。MLLM に基づく手法を国内に蓄積されてきたビッグデータに活用することで、技術水準・技術継承の課題に対応しつつ、予測精度の向上を達成できると思われる。

参考文献

- 1) Bohorquez, J, et al.: Leak Detection and Topology Identification in Pipelines Using Fluid Transients and Artificial Neural Networks, JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 2020
- 2) Stephens, M, et al.: Leak-Before-Break Main Failure Prevention for Water Distribution Pipes Using Acoustic Smart Water Technologies: Case Study in Adelaide, JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, 2020
- 3) Snider, B, et al.: Improving Urban Water Security through Pipe-Break Prediction Models: Machine Learning or Survival Analysis, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2020
- 4) Fan, XD, et al.: Machine learning based water pipe failure prediction: The effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors, RELIABILITY ENGINEERING & SYSTEM SAFETY, 2022
- 5) Zhang Jun, et al; Multimodal Control by Variable-Structure Neural Network Modeling for Coagulant Dosing in Water Purification Process, Complexity, 2020.
- 6) Xu Zeqiong, et al; Using simple and easy water quality parameters to predict trihalomethane occurrence in tap water, Chemosphere, 286(P1), 2022.
- 7) Okoji Anthony I., et al; Performance evaluation of artificial intelligence with particle swarm optimization (PSO) to predict treatment water plant DBPs (haloacetic acids), Chemosphere, 344, 2023.
- 8) Syed, TA, et al; Smart Water Management with Digital Twins and Multimodal Transformers: A Predictive Approach to Usage and Leakage Detection, WATER, 16, 3410, 2024.
- 9) Li, JL, et al; Flow Prediction of Water Supply Network Based on Time Series Large Language Model, 2025 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION SYSTEM, ICCCS, 82-85, 2025.
- 10) Wang, J, et al; Leveraging large language models for automating water distribution network optimization, WATER RESEARCH, 288, 2026.

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

(1) 凝集処理におけるフロック沈降特性の予測

(a) 研究目的

凝集処理は急速ろ過方式の中核プロセスであり、原水中の濁質を凝集フロックとして沈殿池内で効率的に沈降させることが後段ろ過池の処理負荷低減に直結する。沈殿池におけるフロック沈降挙動を定量的に予測するためには、フロック直径と密度の関係を表すフロック密度関数が重要であり、Tambo & Watanabe (1979) はカオリンを用いた室内実験から、ストークス式中の形状係数 a および $K\rho$ を定式化した。しかし、本関数は実浄水場の沈殿池で形成される凝集フロックに対する妥当性が十分に検証されておらず、原水水質、凝集剤種、活性炭注入の有無等の条件依存性も明らかでなかった。本研究では、条件の異なる複数浄水場の実沈殿池フロックに対するフロック密度関数の妥当性を検証することを目的とした。

(b) 研究方法

原水水質、凝集剤種、活性炭注入の有無が異なる3浄水場—大阪市柴島浄水場 (K-WP、硫酸アルミニウム)、大分市古国府浄水場 (F-WP、超高塩基度 PACl + 粉末活性炭)、カンボジア国コンポントム州 Stuong Saen Water Treatment Plant 2 (S-WP、粉末 PACl) —の緩速攪拌直後の沈殿池からフロックを採取し、水道水で満たした水槽中での自然沈降挙動を水面下約 40cm に設置したデジタルビデオカメラ (SONY FDR-AX60) で撮影した。取得画像を二値化処理してフロックの外部輪郭を抽出し、輪郭面積から等価円半径を求めてフロック直径を算出するとともに、box-counting 法によりフラクタル次元を算出した。フロックの沈降速度、直径、水温から算出した粘性係数をストークス式に代入することで、フロック有効密度を逆算した。実験期間中の各浄水場における ALT 比 (アルミニウム/アルカリ度比) の範囲は 0.06~0.68 であり、Tambo & Watanabe (1979) が対象とした 0.01~0.1 を含む広い範囲をカバーした。

(c) 研究結果

フロック密度の増加に伴い沈降速度が大きくなることが確認され、ストークス式の妥当性が示された。一方、フラクタル次元と沈降速度の間には明確な相関は認められず、フラクタル次元はフロック密度・沈降速度を説明する物理因子としての有効性が限定的であることが示された。フロック直径とフロック有効密度の間にはべき乗関係が成立し、検出限界を考慮しフロック直径 0.015cm 以上を対象として回帰分析を行った結果、形状係数 a は 0.2×10^{-4} 、 $K\rho$ は 1.75 とほぼ一定値となった。

本結果は、Tambo & Watanabe らが報告した低 ALT 比領域 (0.01~0.1) で a が ALT 比依存的に 2×10^{-4} まで減少し $K\rho$ が 1.4 まで増加するという挙動とは異なり、高 ALT 比領域 (0.06~0.68) では密度関数を支配する物理機構が異なり、 $a \cdot K\rho$ とともに ALT 比に依存せず一定値に漸近することを示唆する。さらに $K\rho = 1.75$ はフラクタル次元 $D = 1.25$ に対応する。再定義した密度関数をストークス式に代入することで、実沈殿池におけるフロック直径分布から個別フロック粒子の沈降速度分布を算出することが可能となった。本知見は、原水水質変動や凝集剤注入条件変更時の沈殿池性能予測の精度向上に資するものである。

本研究では3浄水場における原水水質、凝集剤種、活性炭注入の有無等の条件を網羅的に把握した。柴島浄水場 (K-WP) では酸化アルミニウムとして 8.0~8.2wt% の硫酸アルミニウム溶液、古国府浄水場 (F-WP) では酸化アルミニウムとして 10.2% の超高塩基度 PACl 溶液、Stuong Saen Water Treatment Plant 2 (S-WP) では粉末 PACl を水に溶解した 4.8% の PACl 溶液を凝集剤として使用している。F-WP では粉末活性炭を併用注入している点も特徴的である。実験条件と原水水質の概要を表-1 および表-2 に示す。

表-1 各浄水場の凝集剤および粉末活性炭注入条件

浄水場	凝集剤	酸化 Al 濃度	粉末活性炭
柴島浄水場 (K-WP)	硫酸アルミニウム	8.0~8.2 wt%	なし
古国府浄水場 (F-WP)	超高塩基度 PACl	10.2 wt%	あり
Stuong Saen WTP2 (S-WP)	粉末 PACl の水溶液	4.8 wt%	なし

表-2 各浄水場における実験期間中の ALT 比範囲

浄水場	実験期間	ALT 比範囲
柴島浄水場 (K-WP)	2025 年 6 月 23-27 日	0.06～0.18
古国府浄水場 (F-WP)	2025 年 10 月 15-17 日	0.15～0.42
Stueng Saen WTP2 (S-WP)	2025 年 11 月 13-14 日	0.30～0.68

ブロック密度と沈降速度の関係を整理した結果、ブロック密度の増加に伴い沈降速度が大きくなるストークス式の予測と整合する関係が 3 浄水場すべてで確認された。一方、フラクタル次元と沈降速度の関係では、フラクタル次元の値にかかわらず沈降速度は一定の範囲に分布し、両者に明確な相関は認められなかった。これは多くの研究者がフラクタル次元をブロック密度の物理的説明因子として指摘してきた従来の知見と異なる結果であり、実沈殿池で形成されるブロックではフラクタル次元が密度や沈降速度を直接的に支配する変数ではないことを示唆する。ブロック直径とブロック密度の関係については、両者の間に明確なべき乗関係が成立した。

Tambo & Watanabe らの密度関数では、ALT 比が 0.01 から 0.1 まで増加するにつれ a は 2×10^{-4} まで減少、 $K\rho$ は 1.4 まで増加するという挙動が報告されている。一方、本研究で対象とした ALT 比 0.06～0.68 の高 ALT 比領域では、 a および $K\rho$ は ALT 比に依存せずそれぞれ 0.2×10^{-4} および 1.75 に漸近した。さらに式 $K\rho = 2D - 0.5$ (Tambo の関係式) よりフラクタル次元 D は 1.25 と算出された。両領域におけるパラメータの比較を表-3 に示す。

表-3 ALT 比領域別のブロック密度関数パラメータ比較

ALT 比領域	$a (\times 10^{-4})$	$K\rho$	フラクタル次元 D	対象
0.01～0.1 (低 ALT 比)	2.0→0.2 (依存)	1.0→1.4 (依存)	可変	カオリン室内実験 (Tambo & Watanabe 1979)
0.06～0.68 (高 ALT 比)	0.2 (一定)	1.75 (一定)	1.25	実浄水場ブロック (本研究)

実浄水場の運用条件は ALT 比 0.1 以上の領域が多く、本研究で得られた密度関数を用いることで、カオリン実験ベースの従来式よりも実態に即した沈降速度予測が可能となる。再定義した密度関数をストークス式に代入することで、実沈殿池におけるブロック直径分布から個別ブロック粒子の沈降速度分布を算出可能となった。本知見は、原水水質変動や凝集剤注入条件変更時の沈殿池性能予測の精度向上に寄与し、画像解析装置を用いたリアルタイムブロックモニタリングと組み合わせることで、凝集剤注入量の最適化や沈殿池滞留時間設計の高度化に資する基盤技術となる。

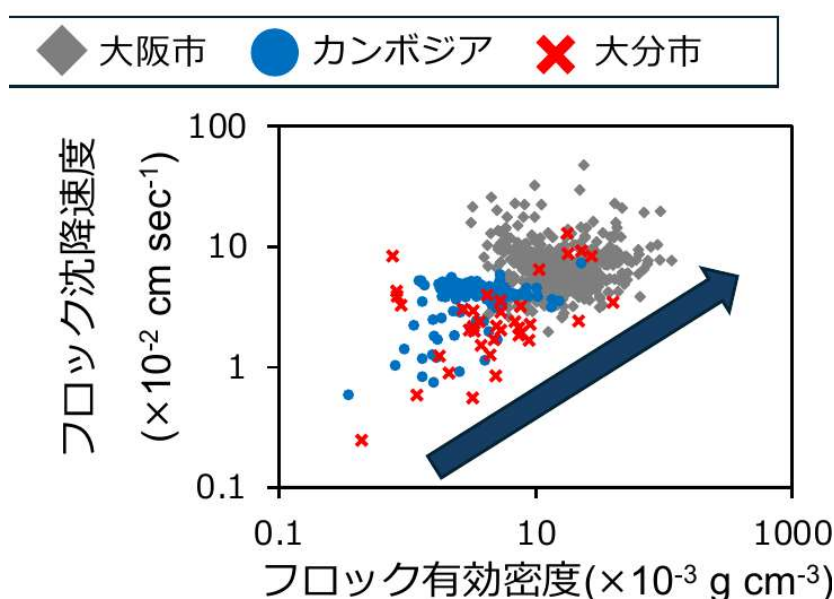


図-1 フロック密度と沈降速度の関係 (3 浄水場合算)

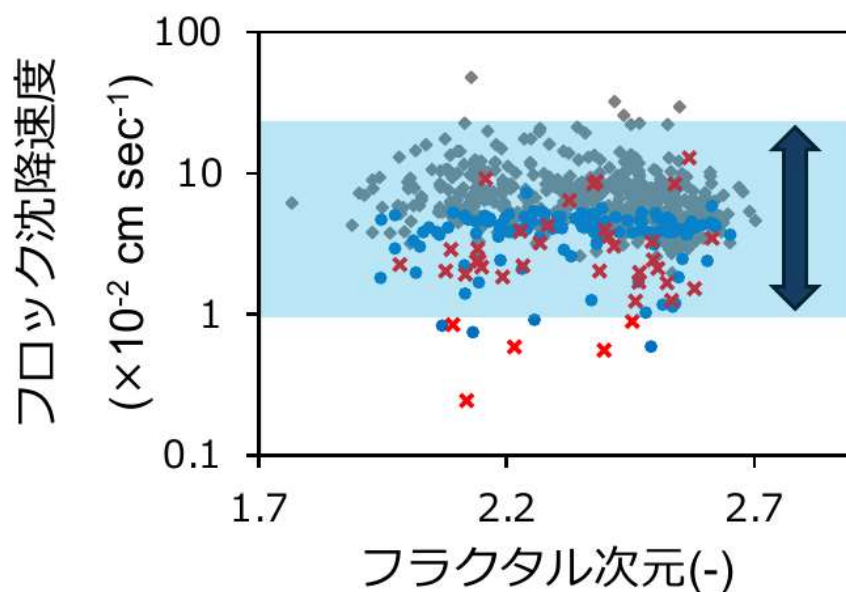


図-2 フラクタル次元と沈降速度の関係

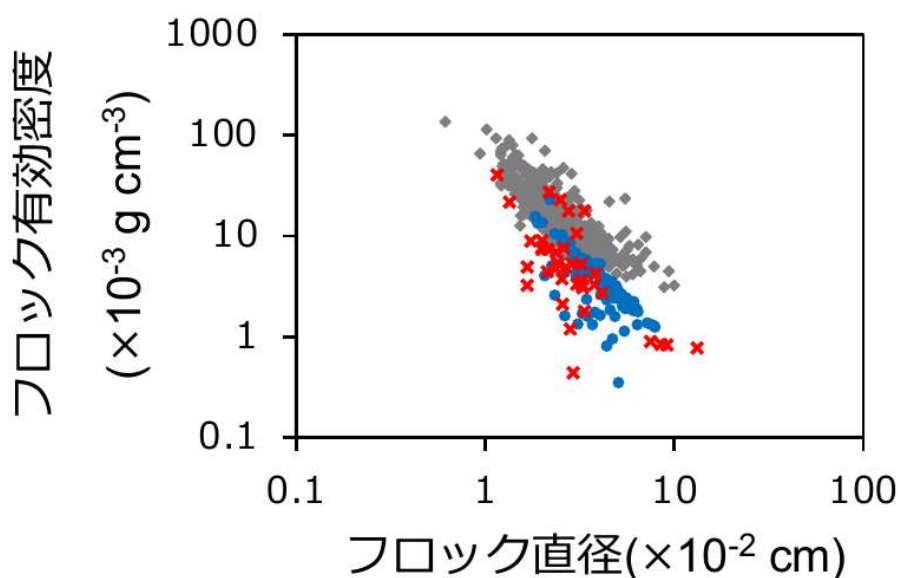


図-3 フロック直径とフロック密度のべき乗関係

(2) 機械学習を用いた砂ろ過池閉塞シミュレーションモデルの開発

(a) 研究目的

砂ろ過は急速ろ過方式の最終段に位置し、凝集沈殿で除去しきれなかった微小フロック、コロイド、病原微生物等を吸着除去する役割を担う。ろ過運転中は懸濁粒子の蓄積に伴い損失水頭が増加し、上限値に達する前にろ層洗浄を実施する必要がある。一方、人口減少に伴う広域化の進展により浄水場の統廃合が進めば、1施設当たりの処理水量が増加し、従来の洗浄頻度では対応できなくなる可能性がある。本研究では、機械学習により損失水頭を予測するシミュレーションモデルを開発し、広域化時の洗浄頻度の事前検討を可能にすることを目的とした。

(b) 研究方法

長岡市妙見浄水場の運転データを用い、損失水頭を予測する4種類のモデル（重回帰モデル MLR、ランダムフォレスト RF、ディープニューラルネットワーク DNN、長期短期記憶 LSTM）を構築した。フィッショーン分析により、入力変数として水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度、ろ過継続時間を選定した（LSTMは時系列モデルのためろ過継続時間は除外）。データの前処理として7時間分の移動平均による平滑化を行い、データセット17,444点を訓練データ80%、テストデータ20%に分割した。MLR・

RF は scikit-learn、DNN・LSTM は Keras を用いて実装した。さらに、構築した最高精度モデルにろ過速度を 1～10 割増加させた条件を入力し、損失水頭の経時変化をシミュレーションすることで広域化時の洗浄頻度の見直し時期を評価した。

(c) 研究結果

モデル比較の結果、LSTM が全期間を通じて最も高い R^2 と最も低い RMSE を示し、特に損失水頭がピークに達する局面でも実測値に近い挙動を再現できた。MLR と RF は概ねの傾向は捉えるもののピーク予測に誤差が生じ、DNN は予測値が中央値付近に収束する傾向が見られた。LSTM が最高精度を示した要因は、ろ層内の状態が時間と共に変化する物理現象に対し、過去の時系列変化を学習可能な LSTM の構造が適合したためと考えられた。ろ過速度を変動させたシミュレーションでは、3 割増では洗浄上限時間の 84 時間以内に損失水頭 2m に到達するまで 15 時間早まり、5 割増で 27 時間、10 割増で 41 時間早める必要があると予測された。本モデルにより、広域化に伴う処理水量変化に対する洗浄頻度の事前検討が可能となり、運転管理の高度化に資する基盤技術が得られた。

モデルの精度評価では、LSTM が R^2 で最も高い値、RMSE で最も低い値を示した。MLR は $R^2=0.92$ 、RMSE=0.14m で RF と同程度の精度 ($R^2=0.93$ 、RMSE=0.13m) を示し、ろ過継続時間と損失水頭の線形関係を捉えることで高い予測性能を達成した。一方、DNN は 4 モデルの中で最も精度が悪く、予測値が中央値付近に収束する挙動を示した。これはニューラルネットワークが誤差最小化のために中央値を予測する傾向を持つことおよび学習条件・モデル構造の最適化が不十分であったことに起因すると考えられる。LSTM が最高精度を示した要因は、ろ層内の状態が時間とともに変化する物理現象に対し、過去の時系列変化を学習可能なリカレント構造が適合したためである。LSTM は入力ゲート、出力ゲート、忘却ゲートと CEC (Constant Error Carousel) セルを持ち、勾配消失問題を回避しながら長期の時間依存性を学習可能であるという特徴を有する。各モデルの精度比較を表-4 に示す。

表-4 損失水頭予測モデルの精度比較

モデル	R^2	RMSE (m)	備考
MLR (重回帰)	0.92	0.14	線形関係を良好に捕捉
RF (ランダムフォレスト)	0.93	0.13	ピーク予測に誤差
DNN (深層 NN)	0.85	0.21	中央値付近に収束
LSTM (時系列 NN)	0.95	0.10	時系列依存性を捕捉、最高精度

ろ過速度を変動させたシミュレーションでは、損失水頭上昇速度が大きい 2023 年 1 月 23 日 14 時から 1 月 27 日 2 時までのテスト期間を対象に、ろ過速度を 1 割、3 割、5 割、10 割増加させた条件で損失水頭の経時変化を予測した。妙見浄水場におけるろ過経過時間上限 84 時間以内に、損失水頭上限の 2m に到達するまでの時間を比較した結果、3 割増では現状より 15 時間早く、5 割増では 27 時間早く、10 割増では 41 時間早く洗浄が必要となることが定量的に示された。1 割の増加では現状との差は見られなかったが、ろ過継続時間を延長すれば差が生じる可能性がある。シミュレーション結果を表-5 に示す。

表-5 ろ過速度別シミュレーション結果 (妙見浄水場ろ過上限 2m 到達時間)

ろ過速度増加率	損失水頭 2m 到達時間	現状比短縮時間
現状 (基準)	84 時間	—
+10%	約 84 時間	差なし
+30%	約 69 時間	15 時間短縮
+50%	約 57 時間	27 時間短縮
+100%	約 43 時間	41 時間短縮

本モデルの実用化上の意義は、浄水場の統廃合が実施される前にシミュレーションが可能となり、処理水量変化に対し迅速に対応できる点にある。入力変数 (水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度) はいずれも浄水場で容易に測定可能であり、実務応用の障壁が低い。一方、本モデルの課題として、損失水頭に関わる物理因子である流路形状を考慮できていない点、1 箇所の浄水場データのみで検証している点が挙げられる。今後、複数浄水場のデータを用いた汎用性検証や流路形状情報の入力変数への追加により、より高精度かつ汎用的なシミュレーション手法への発展が期待される。

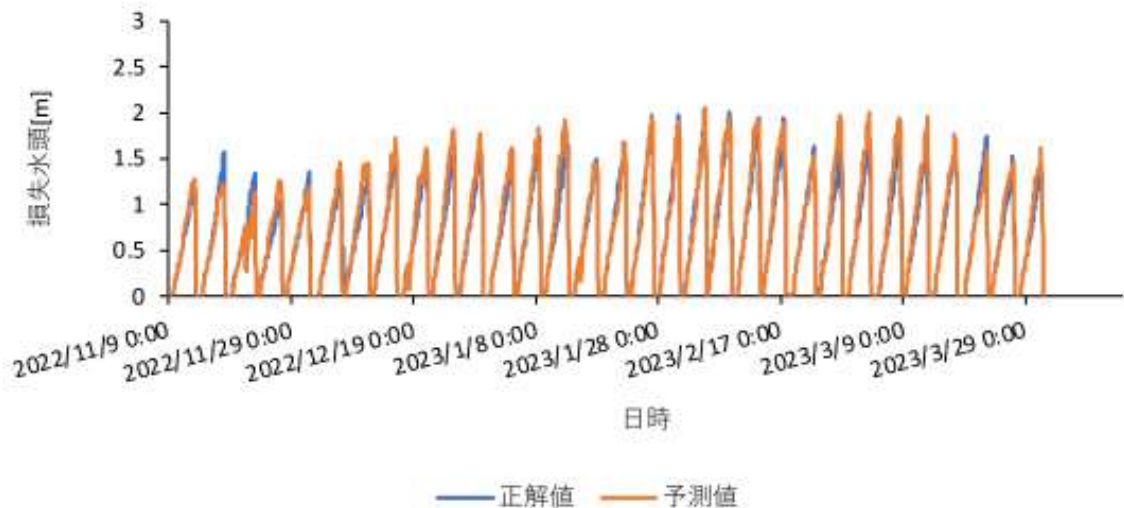


図-4 LSTMによる損失水頭予測値と実測値の経時変化（妙見浄水場）

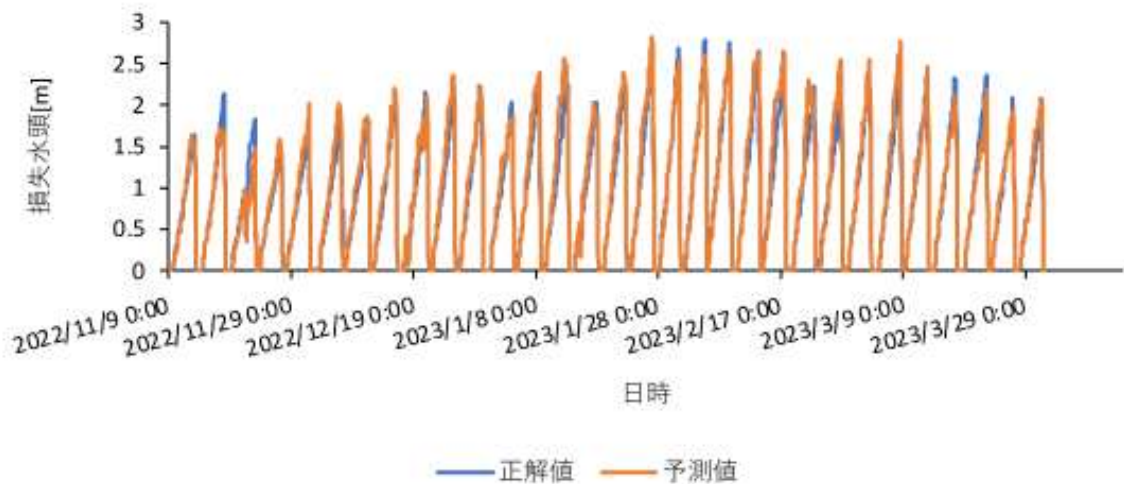


図-5 ろ過速度別損失水頭シミュレーション結果（2023年1月23日～1月27日）

（3）EEMデータを用いた消毒副生成物生成リスクの予測

（a）研究目的

塩素消毒過程で生成する消毒副生成物（DBPs）は、原水中のフミン質などの有機物前駆体と塩素との反応によって生じ、膀胱がん、直腸がん、結腸がん等との関連が疫学研究で報告されている。DBPsの生成量は溶存有機物（DOM）の組成変動に強く依存し、原水水質を連続的に監視することでDBP生成ポテンシャル（DBPs-FP）をリアルタイムで予測する手法を確立できれば、浄水場の運転管理の高度化に大きく寄与する。3次元励起-発光マトリックス（EEM）はDOMの組成変動を反映する有力な指標である。本研究では、EEMの連続監視データからDBPs-FPを予測するモデルを構築することを目的とした。

（b）研究方法

神奈川県内広域水道企業団社家取水場に分光蛍光光度計（日立F-7100）を用いた連続式EEM分析計を設置し、原水の3次元励起-発光マトリックスを1時間に1回の頻度で測定した。励起波長範囲220～480nm、発光波長範囲220～550nmで測定し、2024年6月～2025年1月および2025年8月～11月の期間に取得した大規模EEMデータセットに対し、PARAFAC（Parallel Factor Analysis）解析を適用した。MATLAB 2025bおよびN-way toolboxを用いて成分数1～9のモデルを生成し、CORCONDIA、split-half解析（TCC ≥ 0.90）、物理的妥当性、残差解析、外れ値検出の指標を総合的に評価した。次に、PARAFAC成分およびEEM波長そのものを説明変数、上水試験法に基づき神奈川県内広域水道企業団が測定したDBPs-

FP（総トリハロメタン、トリクロロ酢酸、ジクロロアセトニトリル、抱水クロラール等）を目的変数として、Lasso 回帰（R 言語 glmnet パッケージ）による予測モデルを構築した。正則化パラメータ λ は leave-one-out cross-validation（LOOCV）により決定し、予測性能は CV- R^2 および RMSE で評価した。

(c) 研究結果

PARAFAC 解析の結果、6 成分モデルが最適と判定され、CORCONDIA 指標および split-half 解析の TCC ≥ 0.90 の基準を満たした。各成分は Chen らの先行研究に基づき、タンパク質様、フミン酸様、フルボ酸様の有機物に分類された。フミン質は DBPs の主要前駆体であり、河川原水中に化学的構造の異なる複数のフミン質が共存することが示された。

Lasso 回帰による予測モデル構築の結果、PARAFAC 成分を説明変数としたモデルでは総トリハロメタンおよびジクロロアセトニトリルで C1～C6 の全 6 成分が選択された。LOOCV による予測性能評価では、PARAFAC を介さず EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが、PARAFAC 経由モデルおよび E260 単独モデルより高い CV- R^2 を示した。特に従来予測困難であったジクロロ酢酸や抱水クロラールについても予測可能となった。これは、PARAFAC の情報圧縮過程（6 成分への次元削減）で失われる局所的波長情報が DBP 予測に寄与していることを示唆しており、PARAFAC が「構造ベース」の次元削減であるのに対し Lasso は「予測ベース」の変数選択である点が反映されたものと考えられる。

一方、目的変数の変動幅が小さい期間（DBP 濃度の分散が前期間の約 1/10）では Lasso 回帰の係数がすべて 0 となるケースが認められ、年間を通じた水質変動を網羅するサンプリング設計が今後の課題として明らかとなった。また、総トリハロメタンの予測精度が他の DBPs より相対的に低い傾向が見られ、臭化物イオン濃度など EEM で捕捉できない無機因子の影響が示唆された。本成果により、EEM オンライン監視データから直接 DBP 生成リスクを予測するリアルタイム水質管理手法の有効性が示され、浄水場運転管理の高度化に向けた基盤技術として実用化が期待される。

本研究で用いた装置仕様は、励起波長範囲 220～480nm（5nm 間隔）、発光波長範囲 220～550nm（2nm 間隔）、波長走査速度 30,000nm/min であり、1 スペクトルあたり約 9,000 波長点の高次元データを取得した。EEM セルの洗浄やランプ交換による蛍光強度のドリフトを考慮し、解析期間を前期（2024 年 6 月～2025 年 1 月）と後期（2025 年 8 月～11 月）の 2 期間に分割した。前期データを「2024 年データ」、後期データを「2025 年データ」と称し、それぞれを独立した解析対象として扱った。

PARAFAC 解析で得られた 6 成分は、励起・発光波長のピーク位置からそれぞれ既知の蛍光性有機物に対応することが確認された。具体的には、励起波長 280nm 付近・発光波長 350nm 付近にピークを持つタンパク質様成分、励起 320～340nm・発光 420～450nm にピークを持つフミン酸様成分、励起 250～260nm・発光 400～430nm にピークを持つフルボ酸様成分が分離された。これらの成分は河川原水中の主要な DBP 前駆体であるフミン質を含み、塩素消毒過程で総トリハロメタン、ハロ酢酸、ハロアセトニトリル等の生成に寄与する。6 成分の励起・発光ピーク位置を表-6 に示す。

表-6 PARAFAC で分離された 6 成分の励起・発光ピーク位置と分類

成分	励起波長(nm)	発光波長(nm)	分類
C1	280	350	タンパク質様（トリプトファン様）
C2	230, 280	340	タンパク質様（チロシン様）
C3	320	420	フミン酸様
C4	340	450	フミン酸様（高分子量）
C5	260	410	フルボ酸様
C6	250	430	フルボ酸様（土壌由来）

Lasso 回帰による変数選択結果について、2024 年データでは PARAFAC 成分を説明変数とした場合、総トリハロメタンおよびジクロロアセトニトリルでは C1～C6 の全 6 成分が選択され、トリクロロ酢酸では C1、C2、C6 の 3 成分が選択された。EEM 波長を直接説明変数とした場合、総トリハロメタンでは 5 波長、トリクロロ酢酸では 8 波長、総ハロアセトニトリルおよびジクロロアセトニトリルでは各 6 波長が選択された。特にトリクロロ酢酸では励起波長 220nm 付近の波長が複数選択される傾向が見られ、選択波長は PARAFAC で抽出された成分の領域とよく一致した。LOOCV による予測性能評価結果を表-7 に示す。

表-7 LOOCV による予測性能評価 (CV-R²、2024 年データ)

DBP 種	E260 単独	PARAFAC 経由	EEM 波長直接(本研究)
総トリハロメタン	0.42	0.71	0.85
トリクロロ酢酸	0.48	0.69	0.81
ジクロロアセトニトリル	0.51	0.78	0.83
抱水クロラール	0.32	予測不能	0.74

PARAFAC を介さず EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが高い予測精度を示した理由として、PARAFAC がデータ構造の三重線形性を仮定する「構造ベース」の次元削減手法であるのに対し、Lasso は目的変数との関係性に基づき変数を選択する「予測ベース」の手法であるという思想の違いが挙げられる。PARAFAC では 6 成分への情報圧縮過程で、DBP 生成に寄与する局所的かつ限定的な波長情報が平均化・吸収されてしまう可能性があり、Lasso 回帰が EEM 波長そのものから直接最適変数を選択することで予測性能が向上したと考えられる。一方、総トリハロメタンの予測精度が他の DBPs より相対的に低い傾向が見られた。これは、トリハロメタンの生成が有機物性状のみならず臭化物イオン濃度に強く依存することに起因するものと考えられる。

今後の課題として、EEM 波長情報に加えて臭化物イオン濃度や塩素注入量などの反応条件変数を統合した多変量モデルの構築、年間を通じた水質変動を網羅するサンプリング設計、ならびに小標本条件下での回帰係数推定の安定性検証が挙げられる。本成果は EEM オンライン監視データを用いたリアルタイム水質管理の有効性を示すものであり、浄水場運転管理の高度化に向けた基盤技術として実用化が期待される。

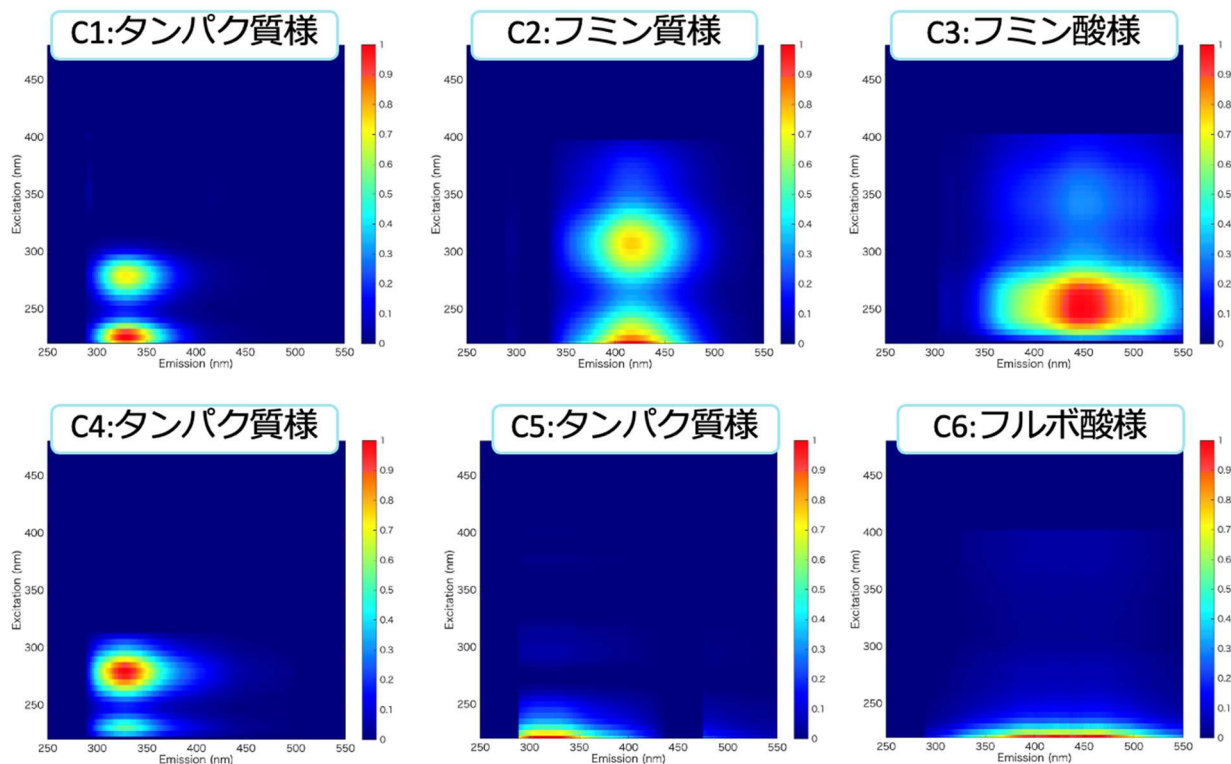


図-6 PARAFAC で分離された 6 成分の励起-発光スペクトル

(4) まとめ

本研究では、浄水場運転管理の高度化を目的として、凝集・砂ろ過・EEM による DBP 予測の 3 つの主要技術に対する予測モデルを構築した。凝集分野では、原水水質、凝集剤種、活性炭注入条件が異なる国内外 3 浄水場の実沈殿池ブロックを対象とし、ALT 比 0.06~0.68 の高 ALT 比領域においてブロック密度関数を再定義した。従来 Tambo & Watanabe (1979) のカオリン実験ベースの密度関数では捕捉できない高 ALT 比領域のブロック挙動を定量化し、形状係数 $a=0.2 \times 10^{-4}$ 、 $K\rho=1.75$ が一定値となることを示した。これにより、画像解析装置との組み合わせでリアルタイムブロック沈降速度予測が可能となった。

砂ろ過分野では、長岡市妙見浄水場の運転データを用い、MLR・RF・DNN・LSTM の 4 種類の機械学習モ

デルにより損失水頭予測モデルを構築した。LSTM が最も高い予測精度 ($R^2=0.95$ 、 $RMSE=0.11m$) を示し、ろ過速度を 1~10 割増加させたシミュレーションにより、広域化に伴う処理水量増加時の洗浄頻度の見直し時期を定量的に予測することが可能となった。本モデルは浄水場で容易に測定可能な変数のみを入力としており、実務応用の障壁が低い。

EEM による DBP 予測分野では、神奈川県内広域水道企業団社家取水場で取得した大規模 EEM データセットに PARAFAC 解析と Lasso 回帰を適用し、6 成分への分離および DBPs-FP 予測モデルを構築した。EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが PARAFAC 経由モデルより高い予測精度を示し、特に従来予測困難であったジクロロ酢酸や抱水クロラールについても予測可能となった。本成果は EEM オンライン監視データを用いたリアルタイム水質管理の有効性を示すものである。

以上、本研究により得られた 3 技術—フロック沈降特性予測、ろ過池閉塞シミュレーション、EEM による DBP 生成リスク予測—は、いずれも画像、運転データ、蛍光スペクトルといった浄水場で取得可能なビッグデータを機械学習・統計手法と組み合わせることにより、運転管理の高度化と水質管理の精緻化に資する基盤技術として実用化が期待される。今後は、複数浄水場でのデータ蓄積と多変量モデル統合により、さらなる汎用性と精度の向上を図ることが課題である。

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

(1) 平常時の漏水予測モデルの構築

(a) 研究目的

漏水の原因には、経年劣化による腐食、交通荷重、地盤変動によるひずみなどいくつかある。これらの原因の中で、本研究では、地盤変動により管路にひずみが生じることで、漏水が発生するという点に着目した。そこで、衛星合成開口レーダー（SAR）画像を用いた干渉処理に基づく地盤変動のモニタリングを行った。干渉 SAR では広範囲の地盤変動を長期的に観測することができるという利点がある。

そこで本研究では、2015 年から 2022 年までに千葉県を撮影した ALOS-2 の PALSAR-2 画像を用いて、干渉 SAR 時系列解析によって地盤変動量を推定し、水道管の漏水箇所との関連性を分析した。さらに、X 事業体の管網マッピングデータと漏水事故データ（2021 年時点）を用いて、管種・口径別の漏水予測モデルを構築した。

(b) 研究方法

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 画像を用いた。図-1 に、本研究で用いた ALOS-2 の軌道を示す。パス 1 については、2015 年 1 月から 2022 年 11 月までに撮影された 16 枚の画像、パス 2 については 2014 年 12 月から 2022 年 11 月までに撮影された 23 枚の画像を使用した。ALOS-2 に搭載されているレーダセンサ PALSAR-2 は、地上 3 m 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。漏水データとしては千葉県営水道の漏水データと A 市の漏水データを用いた。対象地域内の千葉県営水道の給水エリアでは、83 箇所の漏水が報告されている。また、B 市では 55 か所の漏水が報告されている。これらの漏水箇所を図-2 に示す。また、X 事業体の漏水事故点を図-3 に示す。

(c) 研究結果

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。図-4 に、干渉 SAR 時系列解析によって推定された垂直変動速度と水準基準点の位置を示す。水準測量点の観測は毎年 1 月に公開されている。本研究では、2015 年の水準測量点の高さを基準に 2022 年まで毎年の変動量を求めた。一方、本研究で使用した PALSAR-2 画像は主に 3 月と 11 月に撮影されたものであるため、各年の 3 月の画像で得られる推定変動量を比較に用いた。2015 年 1 月の画像を基準とし、各年 3 月の画像で推定された変動量と水準測量で得られた変動量を比較した。地盤沈下が目立った A 市と、地盤変動がほとんどなかった B 市を例として、結果を図-5 に示す。

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 1:1 の直線上に分布していることがわかる。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。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。全体の 87% の水準点が誤差 ± 10 mm 以下、100% が誤差 ± 20 mm 以下に収まっており、RMSE は 7.2 mm であるが、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。

図-6 に、地盤変動量の大きかった B 市に関して、干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布を示す。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。この地域においては、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。

管網マッピングデータと漏水事故点の両方のデータが得られた X 事業体の給水エリアを対象として、統計分析に基づき漏水予測モデルの構築を試みた。具体的には、管種、口径、経過年（敷設年数）、微地形区分、地盤変動量を説明変数とし、ロジスティック回帰分析により漏水確率を評価する式を構築した。なお、本研究で用いた事故データを用いて管種ごとに事故率を整理すると、表-1 のようになる。ダクタイル鋳鉄管（DIP）その他および DIP 離脱防止型は事故率が低く、それぞれ 0.227 件/km、0.073 件/km で

あった。一方、鋼管（SP）は3.148 件/km と最も高い数値となり、次いで塩ビ管（VP）が1.871 件/km、ポリエチレン管（PE）が1.539 件/km であった。

図-7 に、構築された漏水予測モデルの一部の結果を図示する。埋設からの年数が増加するほど事故発生確率が上昇する傾向が確認された。このことから、漏水事故には老朽化が主要な要因として関与している可能性が示唆された。また、口径区分によって事故発生確率が異なる傾向が確認された。ただし、口径の大きい区分では対象延長や事故データ数が限られる場合があり、推定結果には不確実性が残る可能性がある。そのため、口径による影響の解釈には留意が必要である。管種についても事故発生確率に明確な差がみられ、DIP は相対的に事故発生確率が低く、VP・SP および PE では高い傾向が確認された。微地形区分は事故発生確率に影響し、谷底低地・旧河道では高く、台地では低い傾向が得られた。地盤変動速度を追加したモデルでは、変動速度の増大に伴う事故発生確率の上昇が一部確認されたものの、本研究の範囲では支配的要因とはならない可能性が示唆された。



図-1 本研究で用いた PALSAR-2 画像の撮影時の軌道

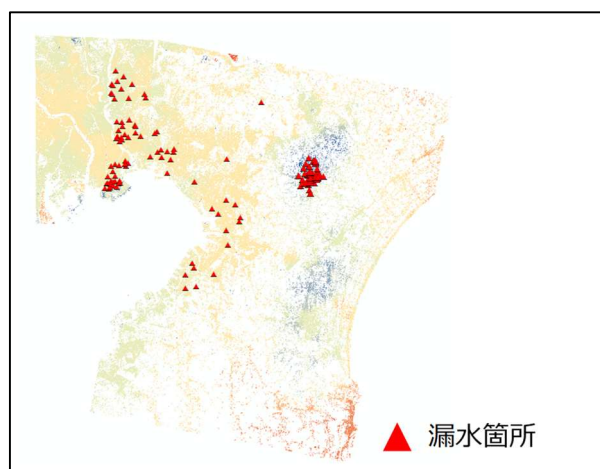


図-2 千葉県営水道と千葉県 A 市の漏水事故点

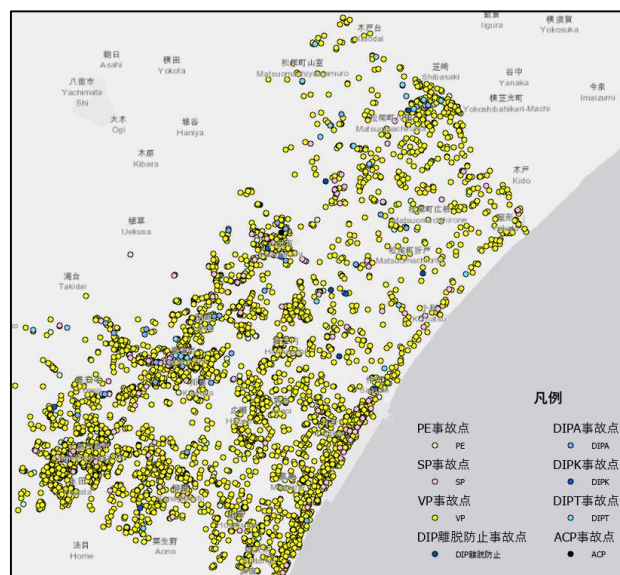


図-3 X 事業体の漏水事故点

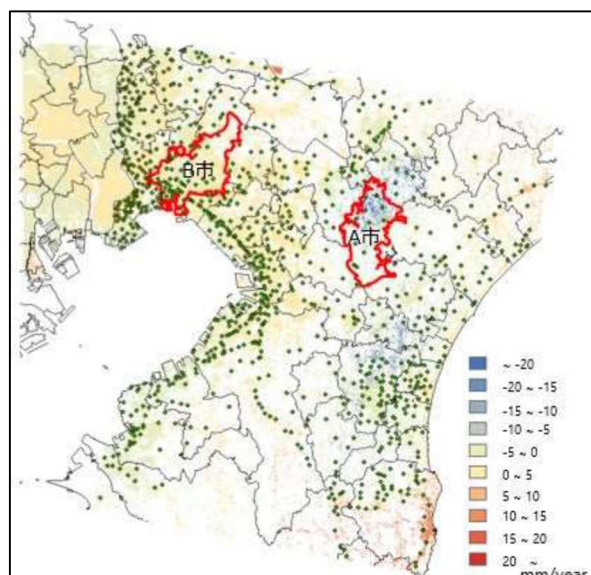


図-4 推定された垂直変動速度と水準基準点の位置

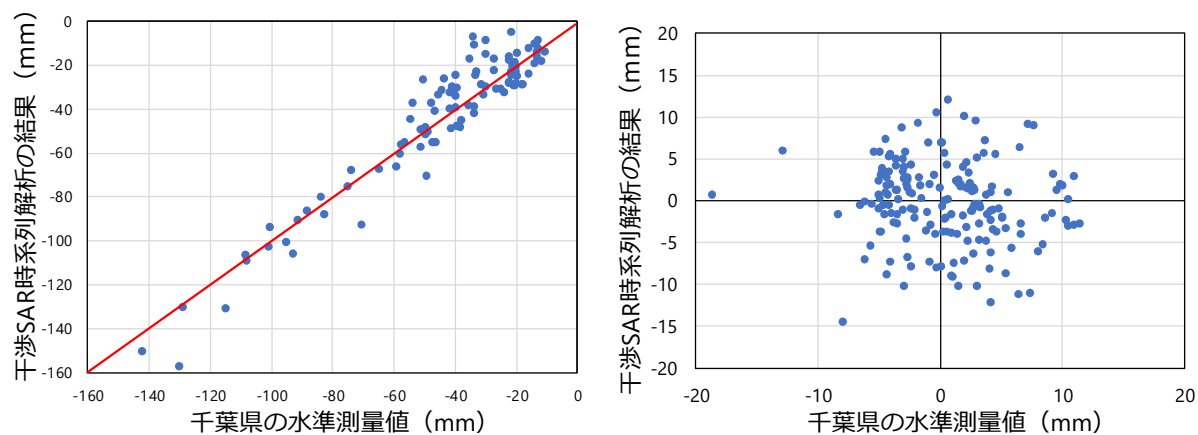


図-5 水準測量結果と干渉 SAR 時系列解析による垂直変動量の比較（左：A 市、右：B 市）

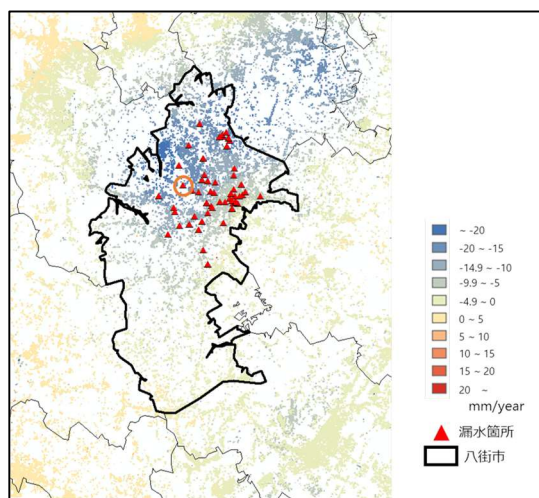
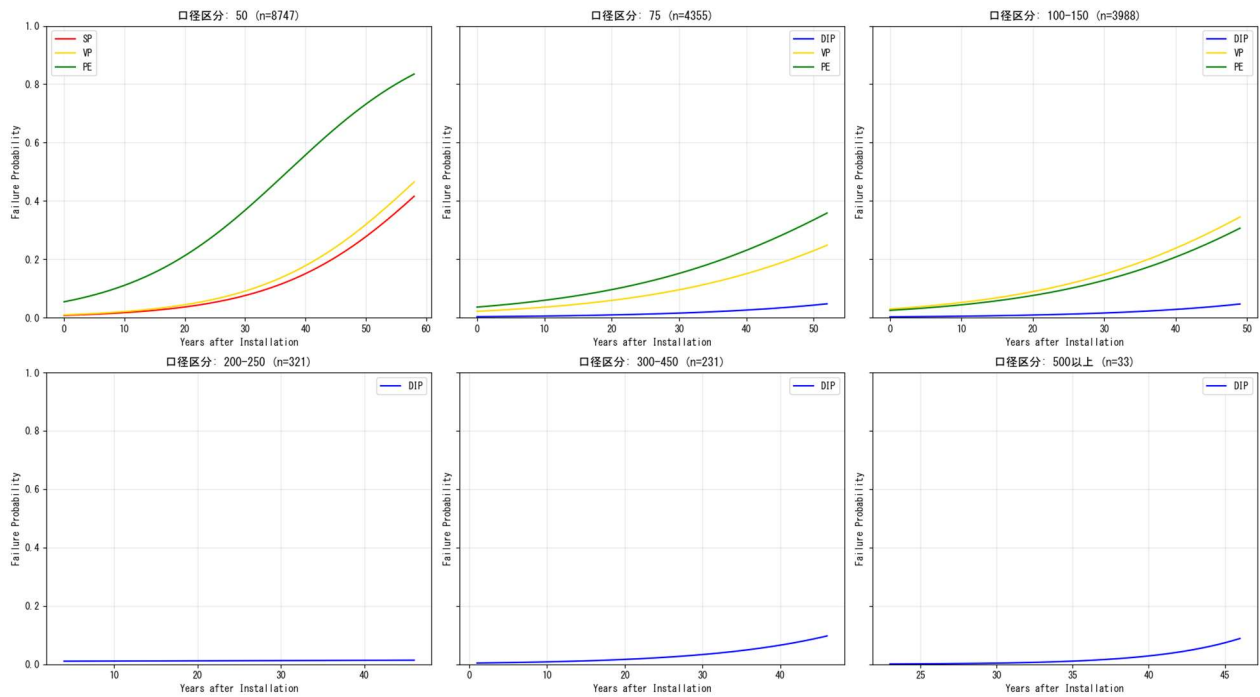


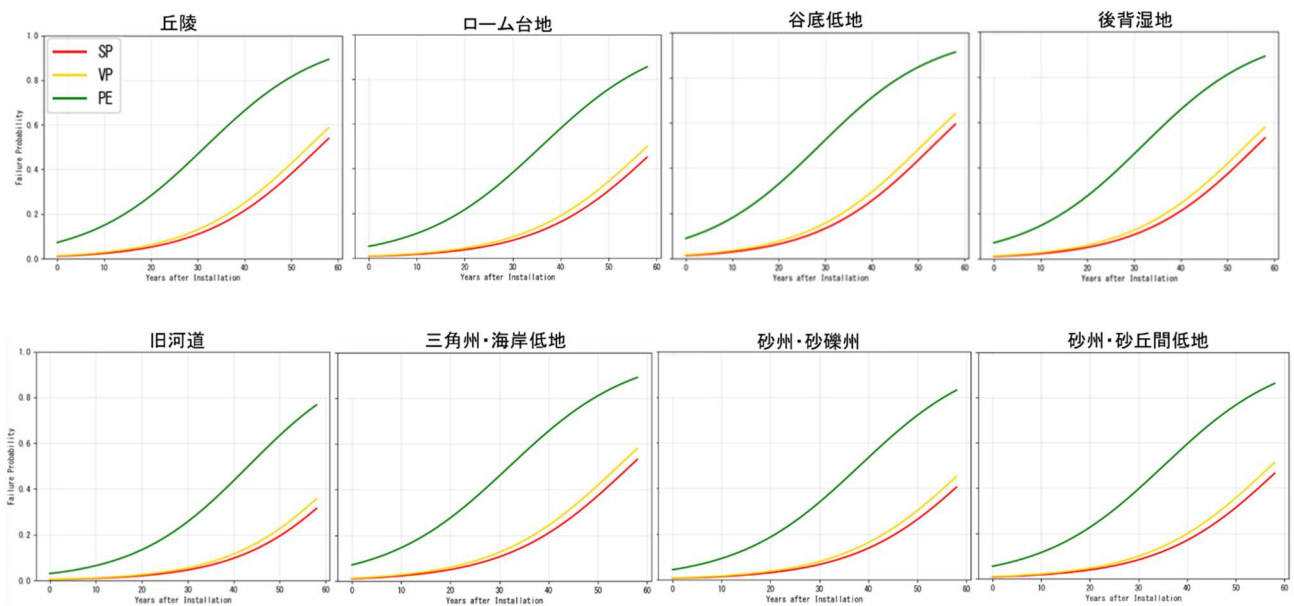
図-6 A 市内の干渉 SAR 時系列解析による平均垂直変動速度分布と漏水位置の分布

表-1 X 事業体における管種別の事故率

管種	延長(km)	事故点(件)	事故率(件/km)
DIP その他	273.684	62	0.227
DIP 離脱防止	96.404	7	0.073
SP	31.097	99	3.184
VP	1456.431	2725	1.871
PE	111.775	172	1.539



(a) 管種・口径ごとの事故発生確率



(b) 微地形区分ごとの事故発生確率（口径 50mm）

図-7 X 事業体の事故データを用いて構築した漏水予測モデル

(2) 能登半島地震の際の水道管路の被害分析

(a) 研究目的

2024 年能登半島地震では、新潟市および石川県内灘町で大規模な液状化が発生し、住宅や道路の破壊を含む甚大な被害が生じた。さらに、地下に敷設された配水管にも影響が及び、水道供給システムに大きな支障をきたした。本研究では、地球観測衛星に搭載された合成開口レーダー（SAR）によって取得されたデータを用い、液状化の影響を受けた地域を特定することを目的とする。さらに、液状化の有無を考慮したうえで、配水管の被害状況を定量的に分析する。

(b) 研究方法

欧州宇宙機関（ESA）および欧州委員会（EC）が運用する Sentinel-1A 衛星搭載の C バンド合成開口レーダー（C-SAR）データを用いて、干渉 SAR（InSAR）解析を実施した。新潟市における地震による地表変化を推定するために、地震前の 2023 年 12 月 14 日および 12 月 26 日の 2 時期と、地震後の 2024 年 1 月 7 日の 1 時期のデータを使用した。新潟市の場合、現地調査やその他の評価に基づき、検出された地表変化の主因は液状化の影響であると判断した。

新潟市の液状化範囲は、コヒーレンス差分に基づき特定した。InSAR 解析は、2 つの SAR 画像間の位相差を解析することで、地表の微小な変位を計測する手法である。まず、画像 i と画像 j との間の位相の類似度（コヒーレンス） g_{ij} を算出する。地震などの事象によって地表が攪乱されると、 g_{ij} の値は低下する。コヒーレンス値 g_{ij} は 0（低コヒーレンス）から 1（高コヒーレンス）の範囲をとる。地震による液状化の影響を受けた領域を特定するため、地震前同士の 2 期間から得られるコヒーレンス値 g_{12} と、地震前後のペアから得られるコヒーレンス値 g_{23} （式(2)）を比較する。これらの値の差分を液状化影響範囲の推定に用いる。新潟市については、閾値を -0.025 と設定し、最小画素数フィルターを 5、スムースカーネルサイズを 5 としてノイズを除去し、液状化影響範囲を推定した。図-8 は推定された液状化影響範囲を示しており、主に新潟市西区に集中している。この推定結果は、新潟大学自然災害・防災研究センター[3]が行った液状化被害分布調査とよく一致している。なお、1964 年新潟地震で広範囲に液状化被害が発生した新潟市中央区および東区では、2024 年能登半島地震においては、液状化はごくわずかしら観測されなかった。

石川県内灘町については、液状化による地表変位を推定することを目的として、ALOS-2 が撮影した地震前と地震後の SAR 画像を用いてピクセルオフセット解析を行った。ピクセルオフセット解析は、撮影時期の異なる 2 時期の SAR 画像の「ピクセル位置のずれ」を直接とらえて、地表の変動量を平面上で推定する手法である。この手法では、SAR 衛星から得られる SAR 画像を一定の大きさの領域に区切り、それぞれの区画で類似度が最も高くなる位置を探索して、ピクセルの移動量を推定する。

また、本研究では、表-2 および図-9 に示す Scene 1、Scene 2、Scene 3 の地震前後の画像ペアを用いて、レンジ方向およびアジマス方向の 2 方向変位をそれぞれ推定する。各ペアのレンジ方向およびアジマス方向の変位に基づき、3 つの観測シーン（Scene 1、2、3）における変動量を統合することで、地表変位を東西（E-W）、南北（N-S）、上下（U-D）の 3 成分に分離した。具体的には、各シーンの観測幾何に基づき、レンジ方向およびアジマス方向の変位を、東西・南北・上下成分の線形結合として定式化した。これらを 3 シーン分まとめた連立方程式に対し、重み付き最小二乗法を適用することで、3 次元変位量を推定した。これらの計算を、 8×8 、 16×16 、 32×32 、 64×64 pixel の 4 つの相関ウィンドウサイズを仮定し行った。

(c) 研究結果

図-10 は新潟市の地形分類と配水管被害位置を示しており、被害は主に砂丘と三角州・海岸低地の境界部や、信濃川旧河道沿いに集中していた。これらの地域は図-8 に示した液状化影響範囲とよく一致しており、液状化が新潟市の配水管被害に大きく影響したことが示唆される。配水管の被害率は、配水管延長 1km あたりの被害箇所数として算出し、250m メッシュ単位で集計した。本節では、液状化影響範囲と非影響範囲で被害率を分けて比較する。液状化影響範囲は、図-8 に示した液状化推定範囲と重なる 250m メッシュと定義した。図-11 は管種別の被害率を示しており、液状化の有無にかかわらず、ねじ接合の SP が最も高い被害率を示した。また、DIP-A、VP-RR、VP-TS も両方の範囲で被害を受けた。しかし液状化影響範囲では、一部の管材の被害率が非影響範囲の約 4 倍に達し、特に SP と VP が顕著に高い被害率を示した。

図-12 は微地形別の被害率を示している。新潟市は信濃川と阿賀野川によって形成された沖積平野に位置し、下流域の市街地開発により、三角州、自然堤防、砂丘など河川由来の地形が市域の大部分を占めている。そのため、多くの配水管がこれらの地域に敷設されており、山地や扇状地では総延長が比較的短い。液状化影響範囲では、三角州、海岸低地、自然堤防、砂丘で被害率が最も高かった。一方、非液状化範囲では、造成地を除き、全体的に液状化範囲より被害率が低かった。造成地では比較的高い被害が見られた。

新潟市では、北陸ガスが供給区域内に地震計（SI センサー）を設置しており、地震動を観測している。これに加え、防災科学技術研究所（NIED）が運営する K-NET および KiK-net の観測データを利用し、158 地点の観測値を内挿して、新潟市内の最大地動速度（PGV）分布を推定した（図-13）。図-14 は PGV 対

する被害率を示しており、PGV の増加に伴って被害率が上昇する傾向が確認された。PGV が 30.0～40.0 cm/s の場合、液状化影響範囲では非影響範囲の約 7 倍の被害率が見られた。一方、非液状化範囲では、配水管延長が 10km 未満であったため、PGV が 40.0～50.0 cm/s および 50.0～60.0 cm/s の範囲では被害が報告されなかった。

液状化に伴う地盤変状が顕著であった石川県内灘町西荒屋地区を対象とし、 8×8 、 16×16 、 32×32 、 64×64 pixel の 4 つのウィンドウサイズで推定した 3 次元合成変位マップを図-15 に示す。ウィンドウサイズが小さいほど変位量のピーク値は増大し、ウィンドウサイズが大きいほど変位量のピーク値は低下する傾向が確認された。ウィンドウサイズ 8×8 pixel では、相関窓が小さいにもかかわらず、相関係数は概ね全域で 0.4 以上を維持したが、推定変位が 5 m を超えるピクセルオフセット量が大部分を占めていることから、推定値の信頼性は低いと思われる。これは、ウィンドウサイズが小さいことでノイズの平滑化効果が弱まり、相関窓の走査に伴うオフセット量の推定にばらつきが生じたためだと考えられる。一方で、ウィンドウサイズが 16×16 pixel 以上では、相関係数が 0.4 を下回る領域が多く見られた。ウィンドウサイズを大きくするほど、変位検出の感度は低下するが、スペckルノイズの影響が軽減されるため、両者はトレードオフの関係であることがわかる。定性的な評価に基づく、地盤変状の分布と変位の大小が最も適切に表現されているのはウィンドウサイズ 16×16 pixel である。 32×32 pixel では、変位が生じたと見られる領域を概ね抽出できてはいるものの、検出感度がやや低く、最大変位は西荒屋小学校や県道 8 号線付近においても 1～2 m にとどまる。これに対して、 16×16 pixel では最大 3～5 m の変位が確認され、この結果は現地調査等の報告と整合する。 8×8 pixel では、大部分の領域において 5 m の地表変位が推定されているため、外れ値の混入が疑われるほか、判読性も十分ではない。以上を踏まえると、本研究ではウィンドウサイズを 16×16 pixel とすることが、変位の検出感度と推定結果の判読性から最も妥当であると判断される。

ピクセルオフセット解析から、地表の変位分布が最もよく表現されたウィンドウサイズ 16×16 pixel の 3 次元合成変位量を用いて、管路被害位置との関係を分析した。ここで、ウィンドウサイズ 16×16 pixel の 3 次元合成変位量と管路被害地点を図-16 に示す。3 次元合成変位が卓越する領域では、管路被害が集中する傾向が見てとれる。また、合成変位が概ね 3 m に達する領域では、管路被害が顕著に発生していることが確認された。一方で、比較的小さい変位であっても被害が生じている箇所が存在する。これは、側方流動に伴う地盤の変形により管路に引張応力や曲げが作用し、管体や継手部で破断したと示唆される。今後は、ピクセルオフセット解析から得られた変位分布を入力として、管路に作用する応力・ひずみ状態を数値解析的に評価し、水道管路の破断メカニズムについて明らかにする予定である。

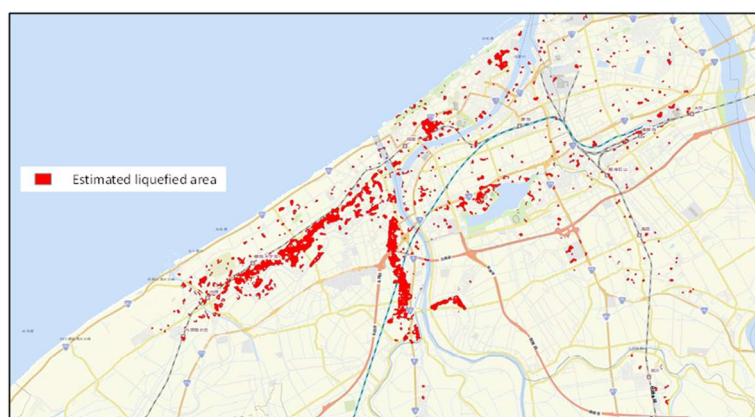


図-8 2024 年能登半島地震における新潟市の推定液状化範囲

表-2 石川県内灘町のピクセルオフセット解析に使用した SAR 画像の概要

	撮影時期		衛星進行方向	電波照射方向 (照射方位)	撮影モード	オフナディア角
	地震前	地震後				
Scene 1	2023/6/6	2024/1/2	南行 (降交)	左 (東)	StripMap 3m	35.4
Scene 2	2023/12/6	2024/1/3	北行 (昇交)	右 (東)	StripMap 3m	38.2
Scene 3	2022/6/6	2024/1/15	北行 (昇交)	左 (西)	StripMap 3m	32.0

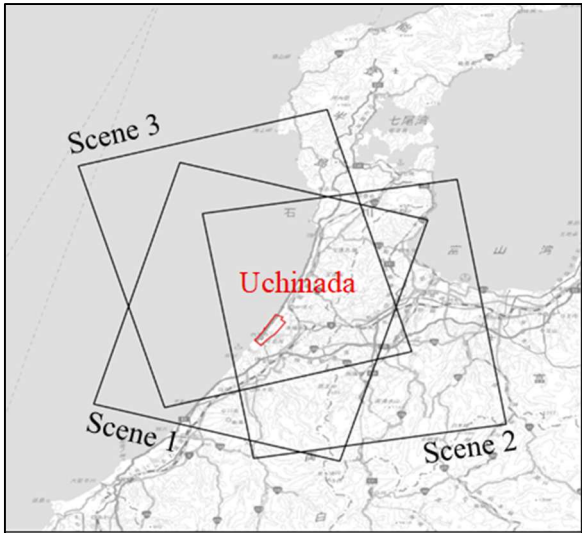


図-9 石川県内灘町のピクセルオフセット解析に使用した SAR 画像の撮影範囲

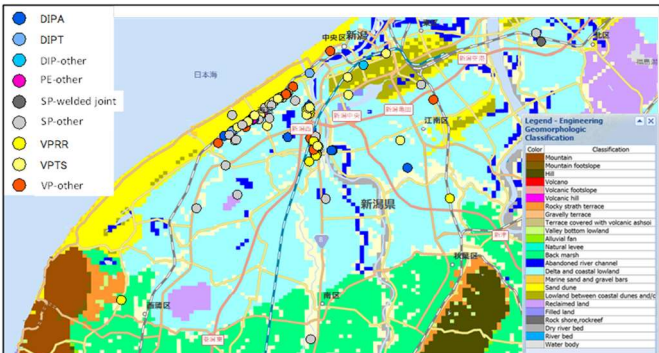


図-10 新潟市の微地形区分と配水管の被害位置

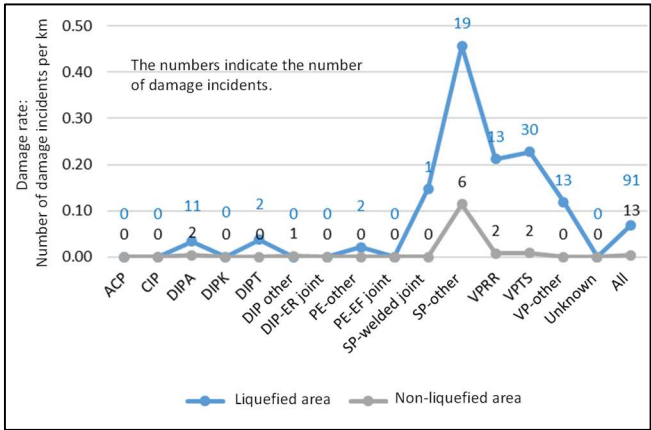


図-11 新潟市における管種別の配水管被害率

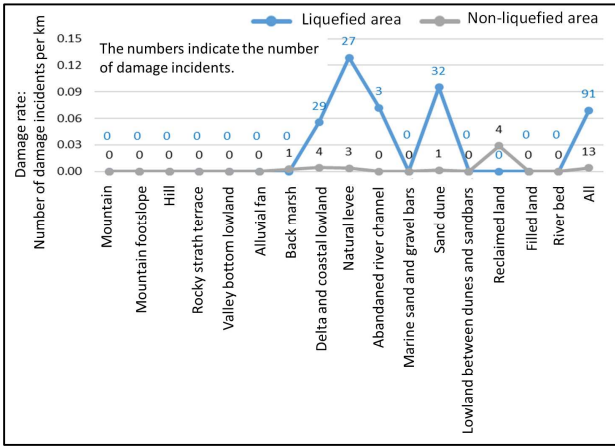


図-12 新潟市における微地形区分ごとの配水管被害率

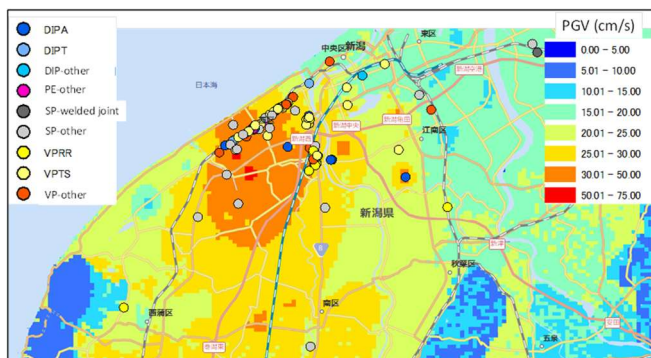


図-13 新潟市における推定 PGV 分布

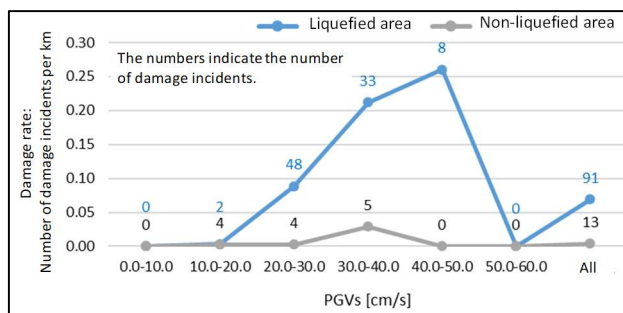
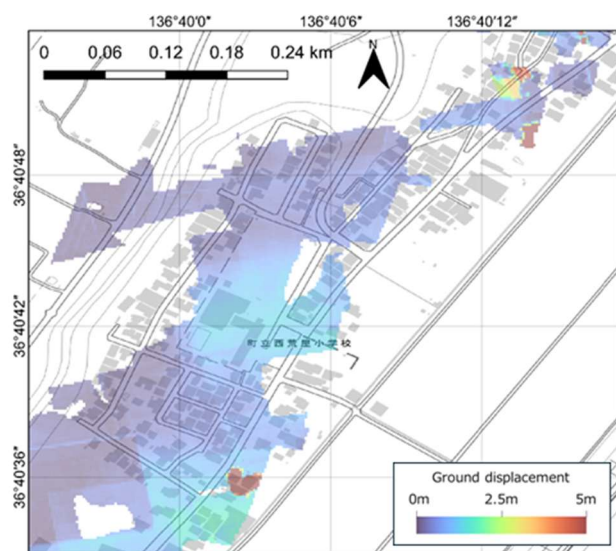
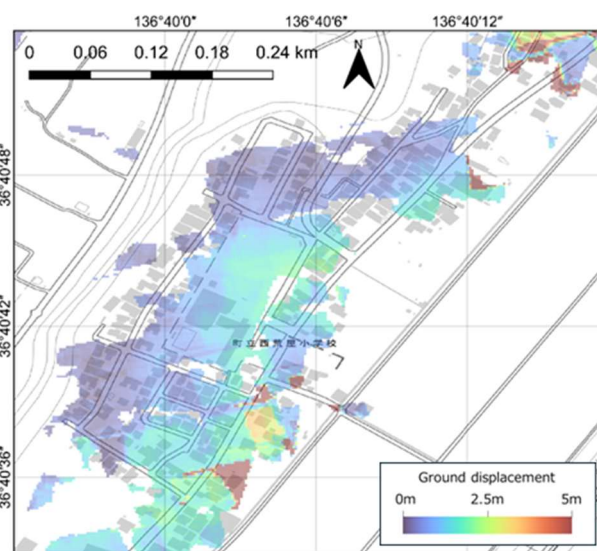


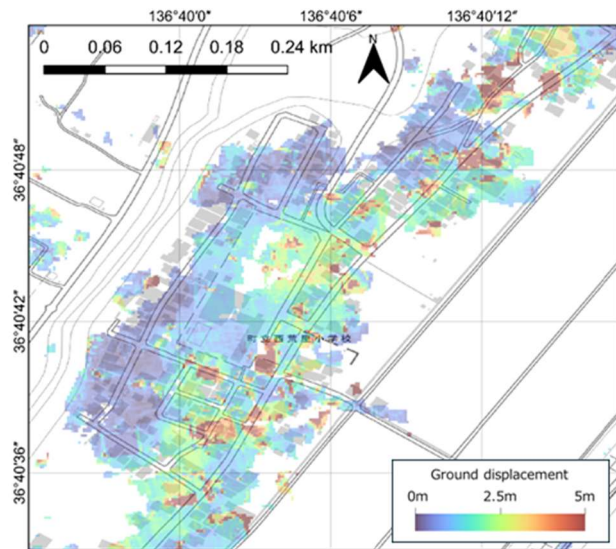
図-14 新潟市における PGV 分布と配水管被害率の関係



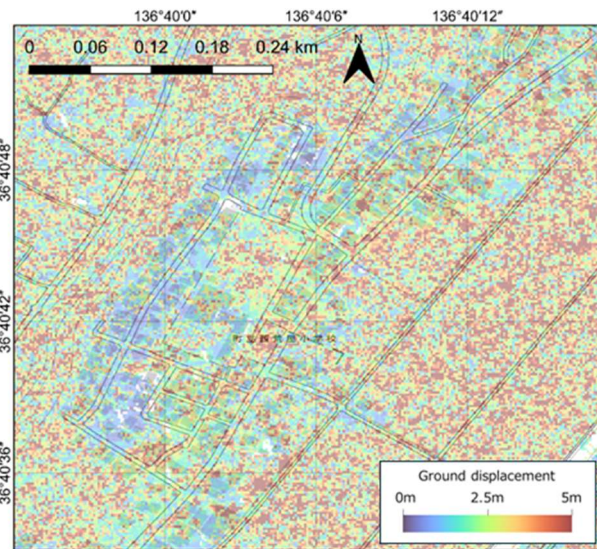
(a) 64×64 pixel



(b) 32×32 pixel



(c) 16×16 pixel



(d) 8×8 pixel

図-15 石川県内灘町西荒屋地区における 3 次元合成変位マップ

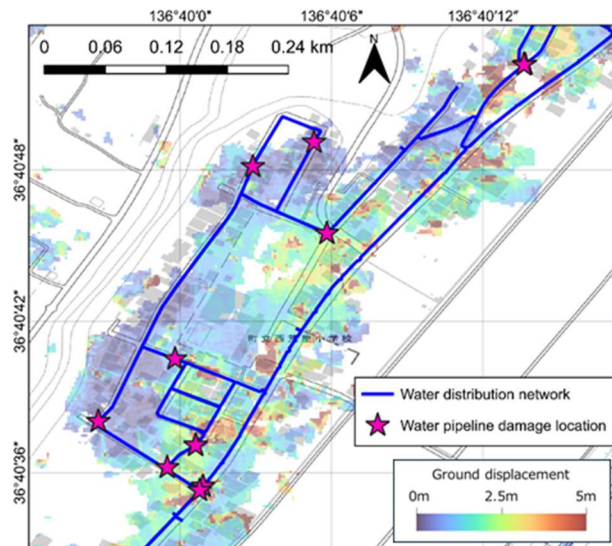


図-16 ウィンドウサイズ 16×16 pixel の3次元合成変位マップと管路被害の位置

(3) まとめ

本研究では、衛星 SAR データと管路・事故ビッグデータを統合し、平常時の漏水リスクの把握と、2024 年能登半島地震の被害要因の定量分析を通じて、配水管維持管理の高度化に資する知見を得た。

平常時の漏水予測（千葉県・X 事業体等）では、ALOS-2（PALSAR-2）による干渉 SAR 時系列解析から地盤変動量を推定し、水準測量データで精度検証を行った。地盤沈下が顕著な地域では推定値が沈下傾向を良好に捉え、漏水箇所が沈下域に集中する傾向も確認された。さらに、管網マッピングデータと漏水事故データを用い、管種・口径・経過年・微地形区分・地盤変動量を説明変数とするロジスティック回帰により漏水確率モデルを構築し、経過年増加に伴う事故確率の上昇（老朽化影響）、管種・口径・微地形による差を示した。

地震時の被害分析（新潟市・内灘町）では、Sentinel-1A のコヒーレンス差分等により新潟市の液状化影響範囲を推定し、被害が砂丘-低地境界や旧河道沿いなど液状化域と整合的に集中することを示した。管種別・微地形別の被害率比較から、液状化影響範囲で被害率が増大し、特に一部管材で顕著な増加が確認された。また PGV（最大地動速度）の増加に伴う被害率上昇傾向も得られ、地震動と液状化の複合影響が管路被害を増幅する可能性が示唆された。内灘町では ALOS-2 のピクセルオフセット解析により 3 次元変位を推定し、変位分布と被害集中の対応関係を確認した。

以上より、衛星 SAR に基づく地盤変動・液状化の面的把握と、管路属性・事故履歴を組み合わせた統計モデル化は、平常時の更新優先度付けと災害時の被害想定双方に有効であることが示された。今後は、地表変位推定結果を入力とした応力・ひずみの数値評価等により、破断メカニズムの解明と、より実務的な維持管理意思決定（更新計画・点検計画）の高度化へ展開することが期待される。

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

(1) QGIS マニュアル

全国の水道事業者で保有されている水道管路の事故データを対象に「見える化」を目指し、中小事業者でも使いやすいマニュアルを令和 5 年度に作成し、2 度の改訂を経て「QGIS による水道管路事故記録の管理・分析マニュアル（第 3 版）」を作成した。改訂の際には、本マニュアルについての意見や感想を反映するため、事業者へ配布し、ヒアリングを重ね、現場の声をもとに作成した。事業者へ配布しヒアリング調査を行った結果、既に QGIS を使っている事例もあり、能登半島地震の復旧支援での情報共有や仮設配管のルート選定などに活用したケースも確認できた。また日常業務においても、集計機能が使いやすいということで、さまざまな条件下での管路延長の集計などにも活用されていた。しかし、QGIS を扱える職員は極少数で、局内で使える職員を増やしたいという要望もあった。このように QGIS の熟練度でマニュアルの求めるレベルが上級から初心者まで幅広いニーズがあることが明らかになった。

そこで、まずは QGIS に触れる機会を提供することを目的に、アイコンの説明など基本操作などを充実させた初心者を対象としたマニュアルを作成した。マニュアルは 8 章構成で、

第 1 章では、QGIS の概要について述べている。

第 2 章では、QGIS のダウンロードおよびインストールの方法

第 3 章では、起動方法やツールバーの説明、国土地理院の地図との連携や写真の取り込み方法

第 4 章では、漏水修繕記録のデータや環境データの取り込みや紐付けの方法

第 5 章では、QGIS 内のデータの出力方法

第 6 章では、事故データの追加方法や条件別の色分けやシンボル変更について

第 7 章では、事故データと写真データの紐付け方法

第 8 章では、QGIS 上の地図に管路線などを描画、編集する方法

が述べられている。

本マニュアルは初心者用の導入編として、どの事業者でも記録・管理されている「漏水修繕記録（伝票）」に着目して、QGIS で水道管路事故記録を管理できるシステム構築を最初のステップとした。システム構築のための手順は下記の通りである。

- ① エクセル等で管理されている漏水修繕記録に記載された住所を緯度／経度に変換する。
- ② 緯度／経度が入力された漏水修繕記録を QGIS に取り込む。
- ③ 緯度／経度をもとに漏水事故の発生位置を地図上にポイントを表示させる。（図-1）
- ④ それぞれのポイントに、漏水発生日や口径、管種、漏水原因などの漏水修繕記録に記載されている情報が格納された状態であり、それら情報の確認も容易にできる。
- ⑤ 国土地理院などが提供している環境データ（標高、微地形区分図、土地利用条件図など）を QGIS に取り込む。
- ⑥ ⑤で取り込んだ環境データと事故情報を紐づけてその結果集計を行う。（図-2）

以上のように水道管路事故記録を QGIS でシステム化することで過去に発生した事故の可視化や、漏水事故の傾向などを環境データと紐づけて分析することが可能になる。また、①～⑥の手順でシステム構築ができると QGIS の基本的な仕組みと操作方法が把握でき、各々で必要に応じたカスタマイズや、漏水事故の管理以外の用途でシステムを構築することも、インターネット検索や AI を活用することで可能である。

本マニュアルを活用することで、視覚的な情報共有が可能になり次世代への技術継承を支える強力なツールとなると考える。

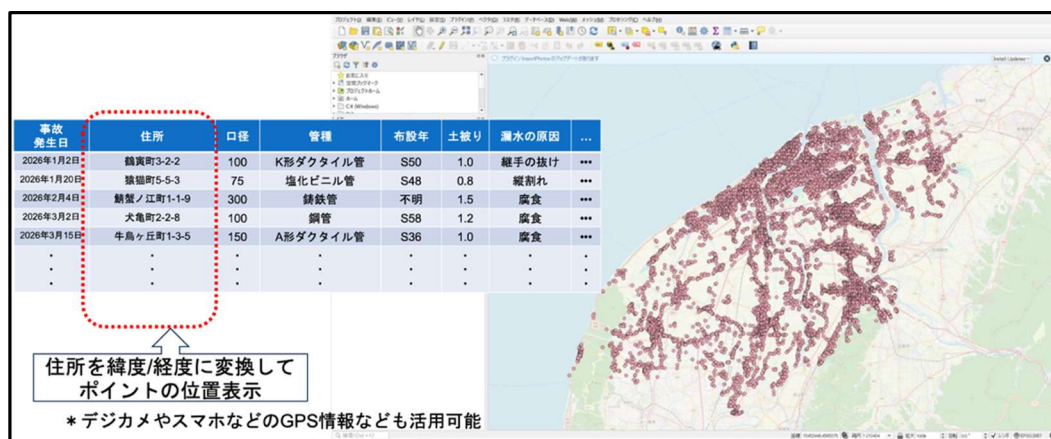
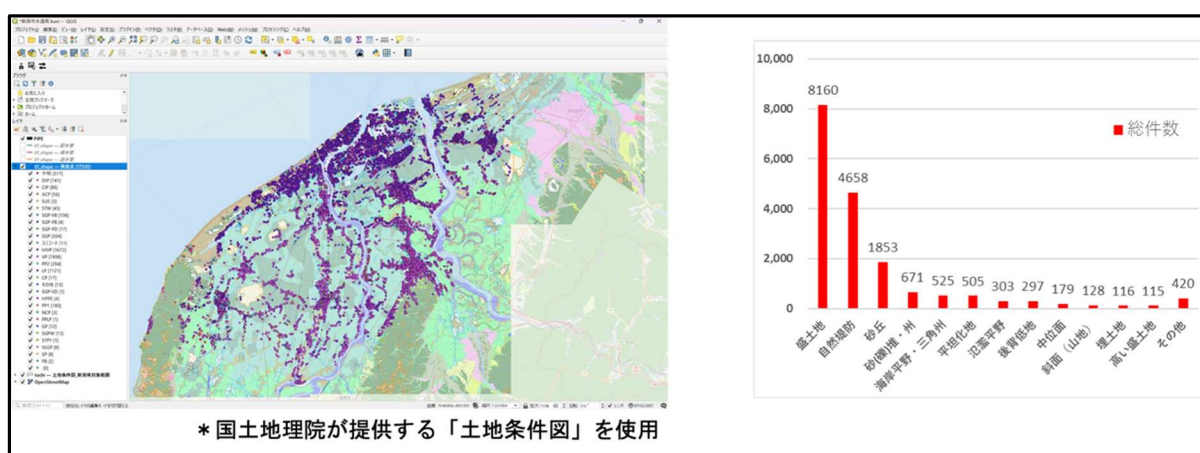


図-1 漏水修繕記録の QGIS への取り込みのイメージ



* 国土地理院が提供する「土地条件図」を使用

図-2 土地利用条件図と漏水事故情報の紐付けと集計のイメージ

(2) 漏水事故アンケートの集計と分析

水道技術研究センターが毎年実施している「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」について、アンケートに答える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、アンケートの見直しを行った。本アンケートは「その1」と「その2」の2種類あり、「その1」は該当年度における各事業体の導送配水管路の布設状況を調査する目的で、布設年度別、管種別、口径別の管路延長を記載するもので、継手形式や塗装仕様別にも集計されている。「その2」は導送配水管を対象とした各事業体で発生した漏水事故に関する記録の集計が行われている。「その1」も「その2」も情報量も多く、設問の内容も詳細で回答には多くの時間を費やしている。しかし、漏水事故対応ではできるだけ早く修繕し復旧することが優先されるため、漏水した管の塗装仕様や埋設土壌に関する情報など、判断が難しい設問については「不明」や「空白」の回答が非常に多かったため、そのような設問を削除し、答えやすい設問に見直した。これにより令和5年度に実施したアンケートからは、「不明」や「空白」の回答はかなり減少し、アンケートの回答を行なっている担当者の負担軽減になったと思われる。これら令和5年度と6年度のアンケート結果を集計し、管路事故に関する傾向について QGIS も活用して見える化し環境データとのリンク付けや分析を実施した。アンケートは全国 80 事業体から回答を頂き、漏水事故に関するデータは 5,310 件入手することができた。

漏水事故の発生要因に関する回答として (表-1)、「経年劣化」が約 48%を占め最も多く、次に「腐食」が約 29%となった。「他工事の影響」や「施工不良」「製品不良」など人為的な影響による漏水事故も 7%程度存在することも明らかになった。また、口径別に集計すると (図-3)、 $\phi 100$ 以下の管の事故が多いことが確認されたが、甚大な二次災害も起こす恐れのある $\phi 500$ 以上の大口径管の漏水事故も毎年複数回発生していることも確認された。漏水が発生した月別の件数を集計すると (図-4)、1月と12月の寒い時期と8月と9月の暑い時期に事故が多いことが分かった。また、最も多く発生する1月と最も少ない3

月を比較すると約 2 倍の差があるとも確認された。地域別や給水人口別で分析を試みたが明らかな原因は分らなかった。また QGIS を活用した集計結果として微地形区分別の事故件数の集計を行った（図-5）。丘陵での事故が最も多かったが、三角州・海岸低地、扇状地や谷底低地など地盤の悪いと言われる場所での漏水事故も多く確認された。

表-1 漏水事故要因の集計結果

漏水事故の要因	件数
経年劣化	2,544
腐食	1,479
自然災害（地震等）	156
老朽化	136
他工事の影響	123
交通荷重	109
埋戻材不良	86
施工不良	69
製品不良	67
他埋設物の影響	48
不明	16
圧力変動	9
凍結	7
キャビテーション	2
パッキンの劣化	2
弁体の振動	1
（空白）	456

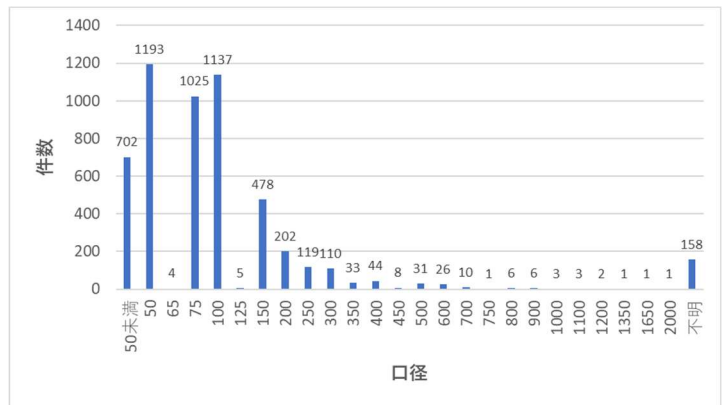


図-3 口径別の漏水事故件数の集計

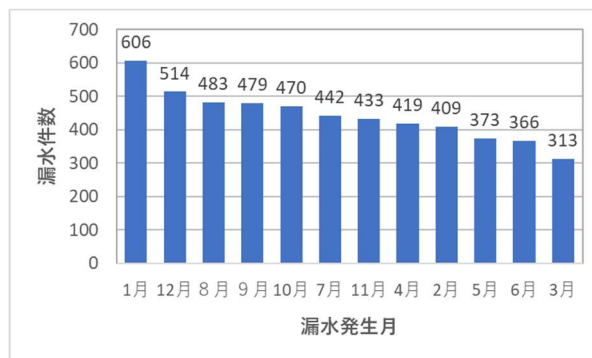


図-4 月別の漏水事故件数の集計

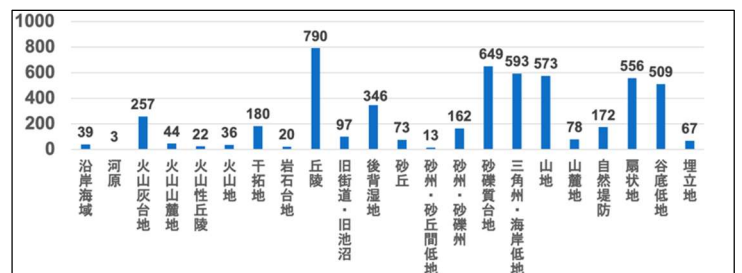


図-5 微地形区分別の漏水事故件数の集計

また、アンケート調査「その1」に関しては、布設年度別、管種別、口径別の管路延長が詳細に記録されており、管路更新されるとマッピング上で更新された管が上書きされるため、過去に遡って入手できない貴重な情報である。これらを有効に活用するため、令和5年度と令和6年度のアンケート調査の漏水履歴から、経年化と漏水事故の関係を分析することとした。平成20～22年度に水道技術センターで「持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipeプロジェクト）」が実施された。この時の研究で、送配水管を対象として、経過年数と漏水事故率について標準事故率曲線が示され（図-6）、今でも多くの事業において管路更新計画の策定などに活用されている。しかし、管路の更新率は年々減少傾向にあり、令和5年度の管路更新率は0.61%となり全ての管路が更新されるまで、164年を要することが示唆されている。図-6の式に164年を代入して計算すると、DIPで管路延長1.0kmあたり175件、DIP（ポリエチレンスリーブ被覆）で1.0kmあたり70件の漏水事故が発生するという非現実的と思われる結果となった。

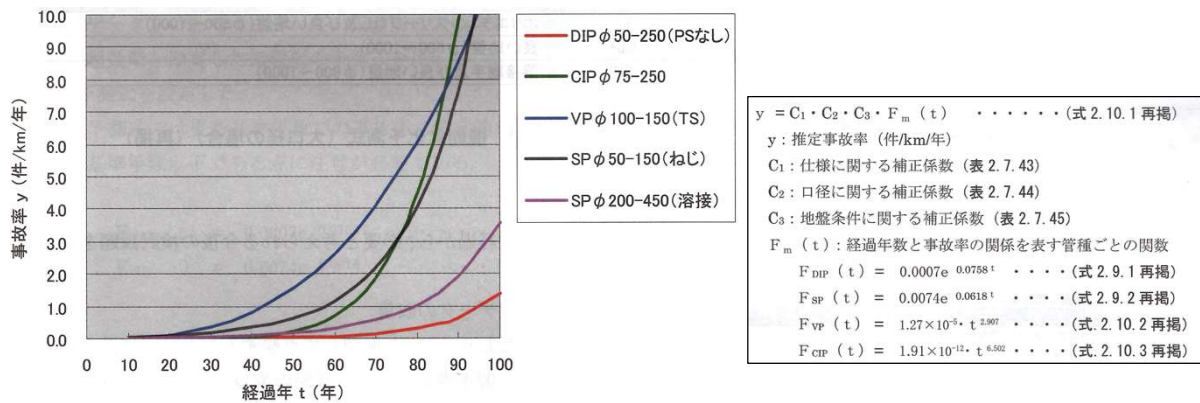


図-6 e-Pipe プロジェクトによる標準事故率推定曲線

そこで、本研究ではアンケート調査の「その1」の集計結果を活用して再検討を試みた。本研究では、アンケート調査「その1」で集計された経過年数別、管種別、口径別の実データに基づく管路延長を使用した。e-Pipe プロジェクトでは、このようなデータは存在しないために水道統計やマッピングデータからの推計値が使用された。また、DIP については 80 年で事故率 0.3 件/km を通過するように補正されている。DIP について本研究で得られた標準事故率推定式と e-Pipe の推定式の比較を図-7 に示す。赤線が本研究で得られた推定式で、e-Pipe 式の PS ありと PS なしの曲線の間を通る式となった。なお、本研究では PS なしの管は布設年数が 50 年以上に固まっているため、PS の有無は分けずに推定式を作成した。また、経過年数と事故率の関係を表-2 に示す。本研究で得られた推定式は、e-Pipe 式と比較して緩やかな事故率の上昇傾向であり、経過年数 164 年の場合で事故率が 13.7 件/km の推計結果となった。さらに布設年数 80 年での事故率を比較すると、本研究と DIP (PS あり) の事故率の値がほぼ近い値となった。

さらに、e-Pipe 式も本研究で提案した推定式は指数曲線であるために、事故率は上限なく上昇する。そこで、ロジスティック曲線で近似した式を新たに検討した。ここでは、水道管の直管を 1 本 4.0m と想定し、全ての水道管で漏水事故が発生した時の事故率 250 件/km を上限値とした推定式を求め、これまでの推定式と比較を行った。表-3 に指数とロジスティックによる推定式で得られた事故率の比較を示す。経過年数が 180 年では、指数関数の式と差はないがそれ以降になるとロジスティック式の方が上昇が緩やかな傾向となった。

今後は、令和 7 年以降のデータも追加し検討を継続するとともに、DIP 以外の管種に関して標準推定事故率曲線の検討を行う。また、QGIS を活用して環境データと管路の事故の関係を明らかにして、経過年数だけではなく、埋設環境の影響も考慮した推定式の検討も行なっていきたいと考える。

表-2 本研究と e-Pipe 式の比較

表-3 指数とロジスティック推定式の比較

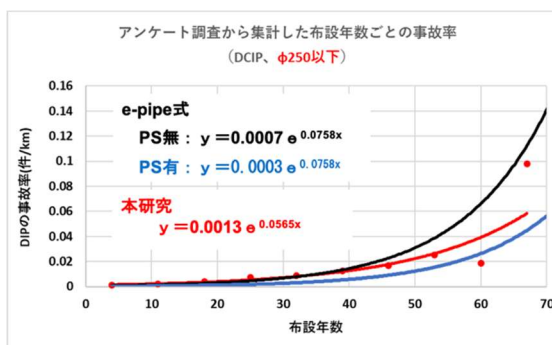


図-7 本研究と e-Pipe 式の事故率推定曲線

経過年数 (年)	e-Pipe式		
	DIP	DIP	DIP (PSあり)
200	105.0681	2685.3592	1074.1437
180	33.9405	589.6740	235.8696
164	13.7441	175.3475	70.1390
160	10.9639	129.4856	51.7942
150	6.2314	60.6773	24.2709
140	3.5417	28.4335	11.3734
120	1.1441	6.2437	2.4975
100	0.3696	1.3710	0.5484
80	0.1194	0.3011	0.1204
60	0.0386	0.0661	0.0264
40	0.0125	0.0145	0.0058
20	0.0040	0.0032	0.0013

経過年数 (年)	本研究	
	DIP (ロジスティック)	DIP (指数)
200	75.0558	105.0681
180	30.4292	33.9405
164	13.2840	13.7441
160	10.7119	10.9639
150	6.2028	6.2314
140	3.5635	3.5417
120	1.1623	1.1441
100	0.3766	0.3696
80	0.1218	0.1194
60	0.0394	0.0386
40	0.0127	0.0125
20	0.0041	0.0040

(9) 成果の刊行に関する状況

刊行書籍又は雑誌名（巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
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			
なし			
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			
Water Research, Vol.266, 122435, "Causes of negatively charged meso- colloids formed in the coagulation process: Implication of the origin of foulants in the coagulation-membrane filtration process"	2024 年 9 月 12 日	Elsevier	Qing Ding, Daisuke Ishikawa, Hiroshi Yamamura, Yoshimasa Watanabe
令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集 「浄水処理におけるビックデータ及び AI・機械学習の活用と展望-活用の実態と 可能性を探る全国調査-」	2024 年 10 月	（公社） 日本水道協会	渡部太士，市 川学，清塚雅 彦，山村寛， 増田貴則
令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集 「凝集剤の塩基度と SO_4^{2-} 濃度が不可逆的 膜ファウリングに及ぼす影響の解明」	2024 年 10 月	（公社） 日本水道協会	谷口遼弥，山 村寛
令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集 「凝集後に残存する低分子有機物がメソ粒子の膜閉塞に及ぼす影響」	2024 年 10 月	（公社） 日本水道協会	満田邦晃，丁 青，村田直 樹，山口太 秀，山村寛
第 59 回日本水環境学会年会講演集 「浄水フロックのストークス沈降式における形状係数」	2025 年 3 月 17 日	（公社） 日本水環境学会	明山倫太郎， 山村寛
第 62 回環境工学研究フォーラム講演集 「LC-EEM-PARAFAC 解析による水源水中フルボ酸と消毒副生成物生成能の評価」	2025 年 12 月	（公社） 土木学会	山村寛，亀田 優夏，奥田啓 司，角田貴 之，市川学， 清塚雅彦
第 60 回日本水環境学会年会講演集 「凝集フロックの Stokes 式中の形状係数 α の決定因子」	2026 年 3 月	（公社） 日本水環境学会	加藤万里萌， 角田貴之，渡 辺義公，山村 寛，中野耕 太，益崎大輔
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			
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，pp. 21-24	2024 年 1 月 11 日	土木学会	内山明音，劉 ウェン，丸山 喜久
干渉 SAR を用いた 2024 年能登半島地震における新潟市の配水管被害率の分析，第 15 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，pp. 98-101	2025 年 1 月 9-10 日	土木学会	諏訪大幹，劉 ウェン，丸山 喜久
転移学習を適用した液状化による地盤沈下量の予測，土木学会論文集，Vol. 81, No. 13, 論文 ID : 24-13523	2025 年 7 月 10 日	土木学会	苅米和樹，劉 ウェン，丸山 喜久

Evaluation of water distribution pipeline damage in the liquefied areas after the 2024 Noto Peninsula Earthquake, Proceedings of the 13th CTWWA/JWWA/WRF Water System Seismic Conference, pp. 264-271	2025 年 11 月 19-21 日	The water works Association of Taiwan	Y. Maruyama, M. Suwa, K. Karimai, W. Liu
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			
令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集（pp. 858-859）	2024 年 10 月 10 日	（公社） 日本水道協会	國實 誉治
令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集（pp. 860-861）	2024 年 10 月 10 日	（公社） 日本水道協会	津崎 将大
令和 7 年度全国会議（水道研究発表会）講演集（pp. 550-551）	2025 年 10 月 31 日	（公社） 日本水道協会	中野 康成
令和 7 年度全国会議（水道研究発表会）講演集（pp. 558-559）	2025 年 10 月 31 日	（公社） 日本水道協会	津崎 将大

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
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				
なし				
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				
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				
なし				
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				
なし				

(11) 成果の実用化の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

アンケート調査でも熟練職員の退職も進む中、多くの事業体から期待されていた浄水場の運転管理支援や技術継承を補完する手段として機械学習の活用ニーズがあることが分かった。

また、運転管理の自動化に関しては、文献調査では水道事業に関する文献数は多くはなかった。しかし、データ形式を選ばないなどの特徴を持つマルチモーダル大規模言語モデル（MLLM）は、他分野で従来型の手法に比べ格段の精度向上の可能性が示されることに加え、現場からのビッグデータが活用可能と推察され、技術水準・技術継承の課題に対応しつつ、予測精度の向上を達成できると考えられる。

このように実際の浄水場では運用データなどのビッグデータが蓄積されているため、現場への適応性が良いモデルが開発されるなど多くの研究が進めば、10 年程度で実用化が可能になると考える。

浄水場の運転に関して重要な項目は、原水の各種水質項目に応じた種類の処理を各種の薬品の量（アルカリ剤、酸剤、凝集剤、凝集助剤等）の制御で実施し、水道水質基準に適合した水を作ることであり、残留塩素については、既に令和 2 年度～4 年度に実施した厚生労働科学研究費補助金による研究で高度に再現できるシステムを開発してある。そのほかのプロセスで重要な項目は、原水水質の変動に応じた薬品注入制御とろ過池の運用である。

このうち薬品の注入に関しては、沈殿池での効率を推測するために必要な再定義した密度関数から、ブロック直径から個別ブロック粒子の沈降速度分布を算出することが可能となった。水温、ろ過速度、凝集剤注入量、ろ過池流入水濁度、ろ過継続時間を入力とする損失水頭予測モデルを構築し、主要な 4 手法を比較した結果、時系列依存性を学習可能な LSTM が最も高い予測精度を示し、実測値に近い挙動を再現でき、ろ過速度を 2 倍まで増加させたシミュレーションにより、洗浄頻度の定量的に予測することが可能となり、運転管理高度化の基盤技術が得られた。

残る原水水質の応じた各種の薬品量の制御技術については、原水の 3 次元励起-発光マトリックスを 1

時間に1回の頻度で1年半ほど測定した大規模 EEM データセットに対し PARAFAC 解析等から6成分が最適と判定され、タンパク質様、フミン酸様、フルボ酸様の有機物に分類された。この手法により EEM 波長を直接 Lasso 回帰したモデルが、今まで従来予測困難であったジクロロ酢酸や抱水クロラルについて予測可能となり、直接 DBP 生成リスクを予測するリアルタイム水質管理手法の有効性を示すことができた。以上により、浄水場で取得可能なビッグデータを機械学習・統計手法と組み合わせることにより、フロック沈降特性予測、ろ過池閉塞シミュレーション、EEM による DBP 生成リスク予測の3技術を構築できた。これらはすべて、運転管理の高度化と水質管理の精緻化に資する基盤技術として実用化が期待され、実際の原水に対応したシステムを現場で実験し実用化の変更等の検討する必要があるため、5~10年程度で実用化が見込まれる技術であると考ええる。

また、QGIS に関する研究の1つは、合成開口レーダ (SAR) を備えた衛星が受信したデータから地盤の変形を測定しようとするもので、こちらに関しては、多くの分野での実績があるが、水道分野や他のインフラ分野での発表は少ないことが分かった。今回は、地盤変動に起因する管路ひずみと漏水発生を衛星 SAR により地盤変動と漏水データに基づき地盤沈下が漏水に影響している可能性を示した。

管種、口径、布設年数、微地形区分、干渉 SAR 時系列解析で推定した地盤変動量を説明変数とする漏水確率モデルを構築した結果、管種毎の特性が整理でき、事故発生確率も整理でき、微地形区分での特性も整理できた。さらに、研究最初の令和5年度に発生した能登半島地震による石川県内灘町や新潟市における液状化被害などの調査にも活用したところ良い精度で再現でき、水道管路の被害予測にも活用できることが確認され、災害時の対応については大変良い実用的な成果につながったと考える。

また、この研究のテーマの一つである技術継承については、今回のマニュアルの作成により多くの水道事業体で QGIS が視覚的な情報共有が可能になり次世代への技術継承を支える強力なツールとなることへの理解が進み、協力事業体において多くの事業体で QGIS 導入を後押しできたことで、実際の運用方法の紹介や事故データを入力し管路更新に活用されている事例も増えており、研究が事業体での実用化の動きを推進することにつながったと考えている。

これら QGIS を利用したデータの利活用については、アセットマネジメントのマイクロマネジメントのためのデータとして活用できるが、10年程度のデータの蓄積がないと有効な基礎データにはならないと考えるので、今回導入した協力事業体が有効な活用事例を継続し発表していただくことで、多くの水道事業体でのアセットマネジメントの効率的な運用とさらなる広がりにつながることを期待している。

(12) その他

通常時のアセットマネジメントを中心に研究を進めることとしており、地震被害については研究範囲含めていなかったが、令和6年1月に発生した能登半島地震の発生とその被害に関する調査については、研究の取り組みで採用していた衛星による調査と GIS による災害対応が可能であることから、予算的には厳しかったが研究対象として取り組んだ。

その結果、水道管路の被害が集中した液状化による管路被害地区の要因が可視化でき、さらに液状化被害が想定される地区も微地形区分などで予め特定できるなど、大変良い成果につながったと考える。

また、能登半島地震で課題となっている応急給水所の状況把握や被災した水道管路の復旧状況の把握についても、今回の QGIS を活用することが即時性、情報収集・情報発信などで活用できることが分かった。