

## II. 厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）

「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」

### 分担研究報告書

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法の検討  
(水道管路網の維持・点検におけるビッグデータ活用動向の文献調査)

研究分担者 増田 貴則 国立保健医療科学院 研究統括官

#### 研究要旨

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動向を把握し、課題点等を抽出した。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。

#### A. 研究目的

文献調査を行い、水道管路の維持・点検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。

#### B. 研究方法

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、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

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 単語となり、英単語の合計は 119 単語となった。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。

表 1. 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	

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)

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。

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。

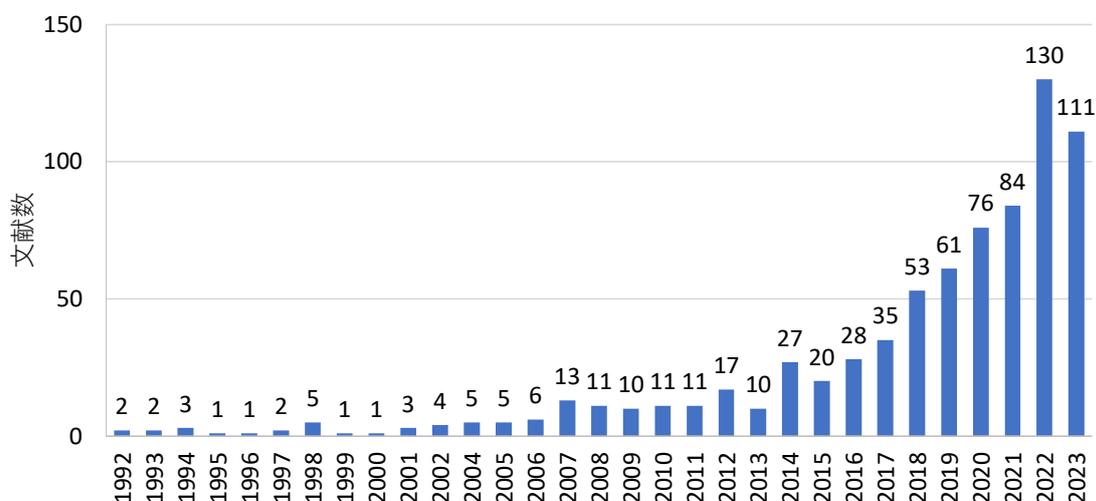


図1. 応用技術に関する検索結果年代別推移 (1992-2023)

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

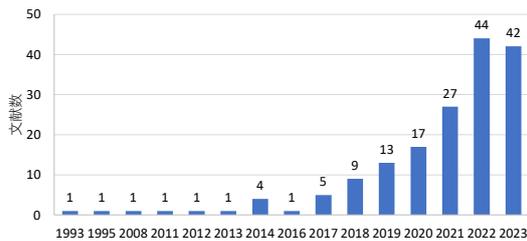


図 2. 応用技術「機械学習」年代別推移

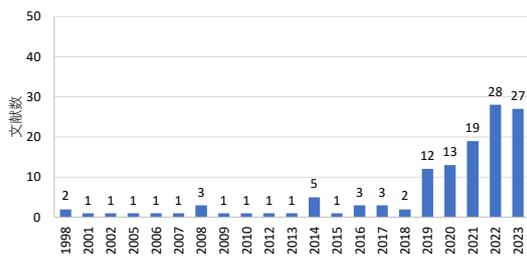


図 3. 応用技術「AI/人工知能」年代別推移

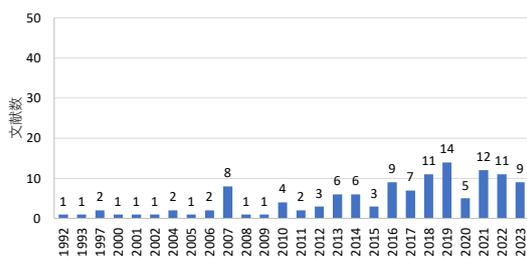


図 4. 応用技術「データベース」年代別推移

### C. 調査結果

研究の初年度である本年は、上述の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。以下、作成したレビューの内容の一部を報告する。

#### (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することが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。

## E. 結論

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。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。

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

(該当なし)

### 2. 学会発表

(該当なし)

## G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

### 1. 特許取得

(該当なし)

### 2. 実用新案登録

(該当なし)

### 3. その他

(該当なし)

## 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