

〈特集〉

AIによる音響データを用いた雨天時浸入水検知技術

鈴木英之¹⁾, 吉田 健²⁾, 石川美宏³⁾
 叶 嘉星⁴⁾, 津田 浩⁵⁾

¹⁾(株)建設技術研究所 東京本社 上下水道部
 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町3-15-1 E-mail: suzuki-hideyuki@ctie.co.jp)

²⁾(株)建設技術研究所 東京本社 上下水道部
 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町3-15-1 E-mail: k-yoshida@ctie.co.jp)

³⁾(株)建設技術研究所 東京本社 上下水道部
 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町3-15-1 E-mail: y-isikaw@ctie.co.jp)

⁴⁾(国)産業技術総合研究所 計量標準総合センター
 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2 E-mail: jiaxing.you@aist.go.jp)

⁵⁾(国)産業技術総合研究所 計量標準総合センター
 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2 E-mail: hiroshi-tsuda@aist.go.jp)

概要

ボイスレコーダを用いて下水管路内の音響データを収録し、音響データのAI解析から分流式下水道における雨天時浸入水の有無を判別する技術を開発した。この技術は流量計を利用した従来技術と同等の精度で雨天時浸入水を検知することができ、また安価な計測システムを利用することから容易に多点での同時計測が可能で、雨天時浸入水の発生地点を短期間に絞り込むことが出来る特徴を有する。本稿では本技術、ならびにB-DASHにおける実証研究結果及びガイドライン(案)の概要について紹介する。

キーワード：分流式下水道, 雨天時浸入水, AI解析, 音響調査, B-DASH

原稿受付 2021.4.26

EICA: 26(1) 12-16

1. はじめに

分流式下水道の污水管渠に流入する雨天時浸入水は、溢水発生や維持管理費増大の要因となっている。下水道管理者は、早急な雨天時浸入水対策の必要性は認識しているものの、コスト面等の課題から抜本的な対策を講じることができていない状況である。

これらの課題解決に向け、**Fig. 1**に示す着眼点に基づき、建設技術研究所・産業技術総合研究所・郡山市・つくば市・名古屋市・神戸市・熊本市共同研究体

は、令和元年度下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)において、「AIによる音響データを用いた雨天時浸入水検知技術の実用化に関する実証研究」を国土技術政策総合研究所からの委託研究として実施した。本研究では全国5都市の污水管渠を実証フィールドとし、管渠内にボイスレコーダを設置して下水管路内音響データを収集し、音響データのAI解析から雨天時浸入水を検知した。

課題解決策における着眼点		
課題	解決方針	方策
流量計等の調達費用が高い (調査費用も高い)	安価で汎用性の高い調査機器の導入	市販の集音機器(ボイスレコーダ)による観測
観測データ整理・分析に時間がかかる (費用も高い)	迅速な分析に対応できる手法の導入 (費用低減)	AIの異常検知技術を適用した新たな解析手法(音響解析)
人孔内作業における事故等のリスクが高い (硫化水素中毒、酸素欠乏、転落、水難事故等)	調査機器設置及びメンテナンス、撤去等で人孔内作業を伴わない簡易な機器設置方法の導入	人孔蓋の開閉のみで簡易に設置できる集音装置の製作(硫化水素・酸素濃度の計測は必須)

Fig. 1 Viewpoints to Solve Problems

2. 音響データを用いた AI 解析技術の概要

本技術は音響データ AI 解析プログラム作成、音響調査と AI 診断の3つの要素技術で構成される。まずは雨天時浸入水の有無による音響パターンの相違を学習するため、雨天時浸入水の発生が確認されている箇所から音響データを採取した。採取した音響データを機械学習して、雨天時浸入水の有無を判別する AI 解析プログラムを構築した。つぎに AI 解析プログラムによる判別の有効性を検証するため、雨天時浸入水の特性及び発生要因等を踏まえ、音響調査を実施し、そこで収録された音響データを AI 解析して雨天時浸入水の有無を判断し、流量計を用いた従来技術による診断結果と比較・検討した。

AI 解析プログラムの構築にあたっては観測地点において流量と流水音の特徴に関係があること、さらに下水道の流量は生活パターンと一致した24時間周期の変化挙動を取ることに着目した。本技術は AI を利用して晴天時の雨天時浸入水がない場合の正常な流水音特徴パターンを規定し、解析された音響データの特徴が正常な流水音特徴パターンから逸脱する場合は雨天時浸入水が発生したと判断する。

2.1 音響データ AI 解析プログラム作成

近年、様々な社会的諸課題に対し深層学習に代表されるニューラルネットワークを利用した AI が適用され、有効性が実証されている¹⁾。また人間と機械による評価を比較することで、最新の AI は画像認識や音声識別において人間の代替となることが明らかにされている²⁾。さらに AI にはヒューマンエラーがなく、24時間作業し続けるなど、人間による作業と比較して優れた点がある。

深層学習は特徴量と呼ばれる入力パラメータをコンピュータ (PC) が自動的に最適化することで、データ認識における学習精度を飛躍的に向上させた機械学習法である。しかし、深層学習には大量の学習データと高い演算能力を有する高価な PC を要するため、データ量が限られる下水道の音響データから雨天時浸入水を検知することに深層学習を適用するメリットは少ない。本技術では低コスト、高効率、かつ高い自動化実現の観点から、雨天時浸入水検知の機械学習法として判別分析法³⁾を適用した。

AI 解析プログラム作成フローを Fig. 2 に示す。実証研究に先立って雨天時浸入水の発生が確認されている10箇所の下水管路内の流水音を教師データとして収集した (Step 1)。各調査箇所において少なくとも晴天日が14日、一日の降雨量が1.5 mm以上の雨天日が2日含まれる流水音を収録した。

収録された音響データには車両通行音や生活音と

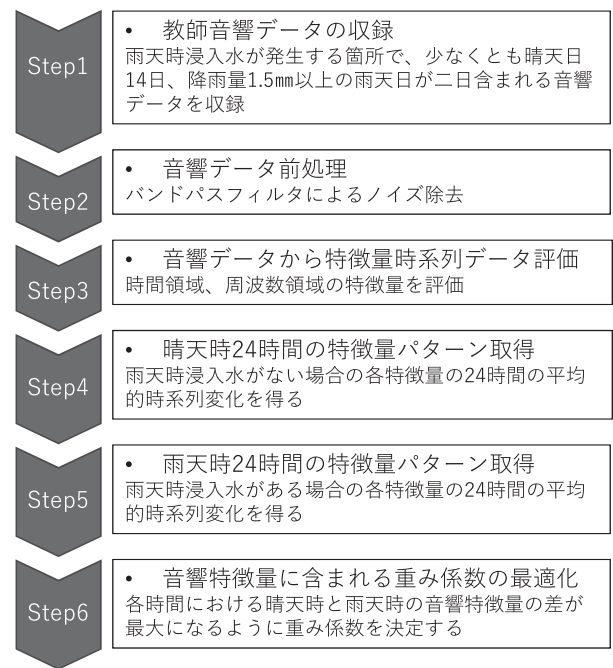


Fig. 2 A Flow Showing How to Make the Program for Detecting Rainwater Infiltration

いった流水音とは異なるノイズが含まれている。そこでノイズの周波数帯域を調べ、バンドパスフィルタ処理により音響データからこれらのノイズを除去した (Step 2)。

ノイズ除去された音響データを10分間ごとにセグメント化し、セグメント毎に音響データの特徴量を評価した (Step 3)。なお本技術では最大値、最小値などの72の時間領域特徴量と周波数パワースペクトルなどの210の周波数領域特徴量、合計282の特徴量を評価した。

次に雨天時浸入水がない場合、つまり晴天時における各特徴量の24時間の平均的時系列変化を得た (Step 4)。同様に雨天時浸入水がある場合、つまり雨天時における各特徴量の24時間の平均的時系列変化を得た (Step 5)。

ここで AI 特徴量 F_a を次式で定義する。

$$F_a = \sum_i w_i f_i \tag{1}$$

式(1)の w_i , f_i はそれぞれ重み係数、時間領域、または周波数領域特徴量である。

24時間の各セグメントにおいて式(1)で定義される AI 特徴量の晴天時と雨天時の差が最大になるように判別分析法から重み係数 w_i を最適化した (Step 6)。この最適化された重み係数を有する式(1)を用いて、2.3節で後述する手法から雨天時浸入水の有無を検出する。

2.2 音響調査

音響調査は、雨天時浸入水の発生が予想される区域

及び箇所を対象に雨天時浸入水の有無を検知することを目的とした。下水道管内に集音装置を設置して音響調査を行った。

流量計を用いた従来技術は、観測機器の調達費用が高いことや事前準備含め機器設置・撤去に時間を要する。しかし本技術は安価なボイスレコーダを調査機器に用いることから、従来技術と同程度の予算規模であれば、広域的に多地点での調査が可能となる。また機器の設置・撤去において、基本的には人孔内作業を伴わないため、設置数が大幅に増大し、効率的な調査を実施することが可能となる。今回用いたボイスレコーダはサンプリング周波数 44.1 kHz、周波数帯域 50～14 kHz の音響データを MP3 フォーマットで保存する機器である。

調査機器に用いた市販のボイスレコーダを耐腐食性・防水性を具備する筐体内へ格納した写真を **Photo. 1** に示す。本技術では筐体内での音質低下を防止するためにボイスレコーダに別途、延長マイクを取り付け、水面近くで集音できるようにした。



Photo. 1 Sound Collecting Device

2.3 AI 診断

本技術の雨天時浸入水の有無を判断する解析フローを **Fig. 3** に示す。解析対象となる現場の管路内音響データは晴天が 14 日以上、降雨量 0.5 mm 以上の雨天が一日含まれることが必要条件である (Step 1)。2.1 節で述べたようにボイスレコーダで収録された管路内音響データには生活音や車両通行音などのノイズが含まれる。そこでバンドパスフィルタ処理により音響データからこれらのノイズを除去する (Step 2)。次に 10 分間の音響データを 1 セグメントとして、各セグメントの特徴量の時系列データを評価する (Step 3)。

Step 3 で得られた特徴量の時系列データから雨天時浸入水が発生しない晴天時の時系列データを抽出し、それらの特徴量を式(1)に入力して、24 時間毎の各セグメントにおける AI 特徴量の平均値 μ 、標準偏差 σ

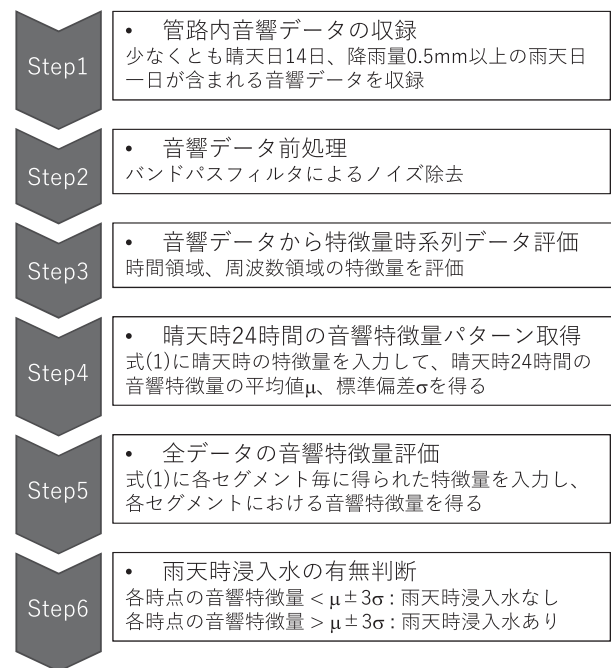


Fig. 3 An analytical Flow for Detecting Rainwater Infiltration

を得る (Step 4)。また収録した全音響データの各セグメント時刻における AI 特徴量を式(1)から評価する (Step 5)。

そして Step 5 で評価した各セグメント時間における AI 特徴量が、Step 4 で評価した晴天時における AI 特徴量の平均値を中心にした標準偏差の 3 倍の範囲である $\mu \pm 3\sigma$ に入る場合は雨天時浸入水なし、 $\mu \pm 3\sigma$ の範囲から外れる場合は雨天時浸入水ありと判断する (Step 6)。

本研究では 3 節で後述するポンプ起動の影響や不定期排水のある流域といった本技術の適用範囲外を除いて、雨天時浸入水がない場合に収録された音響データから評価された AI 特徴量はすべて正規分布を取ることが確認されている。統計量が正規分布を取る場合、AI を利用した異常時のしきい値として、 3σ 法と呼ばれるここで採用した判別基準が用いられることが多い⁴⁾。正規分布においては“平均値±標準偏差の 3 倍”，つまり、 $\mu \pm 3\sigma$ の範囲に 99.73% のデータが含まれ、その範囲外にあるデータはわずか 0.3% 弱で、非常に稀な事象になる。そこで診断対象となる日時における AI 特徴量が、雨天時浸入水がない晴天時に収録された音響データの AI 特徴量の 99.73% が含まれる $\mu \pm 3\sigma$ の範囲に入る場合は雨天時浸入水がない、 $\mu \pm 3\sigma$ 範囲外は雨天時浸入水があると判定した。

同一調査地点における流量計を用いた従来技術、および本技術の解析結果を比較したものをそれぞれ **Fig. 4** の上、および下図に示す。横軸は時間を表し、午前 0 時から翌日の午前 0 時までの 24 時間を表している。また各時間における降雨量を図の上からの棒グラフで表している。**Fig. 4** 上図の細実線は晴天時に計

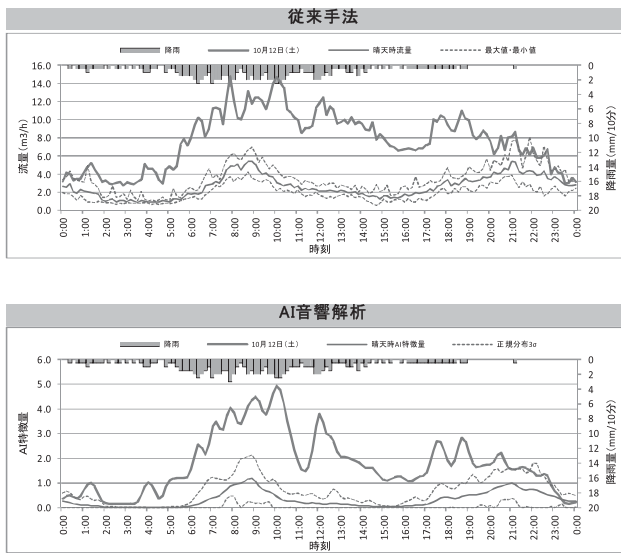


Fig. 4 Comparison of Results Obtained from the Conventional Method using Flowmeters and the Developed AI Analysis

測された平均的な流量の時系列変化を、点線は晴天時の各時間において計測された最大、および最小流量を表す。太線は降雨があった10月12日に計測された流量を示す。10月12日の流量は午前0時半ごろから晴天時に計測された最大流量を超えた。また晴天時では午前2～5時に流量は少なくなるが、同日は午前4時から流量が増加した。その後、朝の活動時間に入ると晴天時においても流量は増加するが、同日は降雨量が増加し、計測された流量は晴天時と比較して大幅に増加した。以上から雨天時浸入水があると判断される。その後、雨が止み、23時頃に流量が晴天時の最大値を下回るようになった。

一方、Fig. 4 下図では細実線が晴天時の平均的なAI特徴量、点線が $\pm 3\sigma$ を示す。太線が10月12日の音響データから評価されたAI特徴量である。この図から10月12日午前0時半ごろにAI特徴量が $\mu \pm 3\sigma$ の範囲を外れていることが分かる。また午前2～5時において晴天時のAI特徴量はほぼゼロになっているが、同日のAI特徴量は午前3時半ごろから増加し始め、その後も時間の経過とともに $\mu \pm 3\sigma$ の範囲を超えた大きなAI特徴量を取った。その後、流量計による計測と同様に23時頃にAI特徴量が $\mu \pm 3\sigma$ の範囲に収まった。このようにAI解析においても流量計測とほぼ同じ時刻に雨天時浸入水の発生、および終了を識別できた。また結果表示において従来技術におけるY軸の流量がAI特徴量に置き換わるだけで、地方自治体の担当者も理解しやすい形となっている。

3. 実証研究で得られた知見

実証研究で得られた知見を以下に示す。
本技術は人孔内の流水音を観測し、晴天時の範囲を

Table 1 The Scope of Application of the Developed Technology

項目	検証結果	適用可否
・地上部の騒音の影響 ・人孔内の反響音 ・極小流量	いずれも影響なく判定可能	○
・屈曲部	晴天時の正常の範囲が広がりやすい	△
・マイク水没危険箇所	豪雨後に集音部清掃が必要	△
・ポンプ起動の影響 ・不定期排水のある流域 ・マンホールの直接流入	晴天時のパターン構築が困難	×

Table 2 Experimental Results

実証項目	評価項目	実証結果 (従来技術比)
性能	検知精度	100%
	適用範囲	適用範囲外事象抽出
事業性	トータル事業費	42%
効率性	調査分析日数	40%

規定して雨天時の異常（雨天時浸入水浸入）を検知する特徴を有していることから、晴天時のパターン構築に支障をきたす観測地点では適用が困難になる場合があるが、それ以外のケースでは従来技術と同様の適用範囲であることが確認できた (Table 1)。

- ・検知精度については、適用範囲の観測地点では従来技術と同程度の検知精度が確保された (Table 2)。
- ・事業性・効率性については、50%以上の削減効果が期待された (Table 2)。
- ・調査は極小規模から大規模なエリアまで対応できるため、これから雨天時浸入水対策に取り組む自治体だけでなく、従来技術等でスクリーニングが一定程度済んでいる自治体等、様々なシチュエーションで対応することが期待できる。

4. 技術導入ガイドライン

本技術の技術概要やB-DASHプロジェクトにおける実証研究結果については、「AIによる音響データを用いた雨天時浸入水検知技術導入ガイドライン (案)」(以下、「ガイドライン (案)」という。)として、国土技術政策総合研究所から発刊されている⁵⁾。

ガイドライン (案) は以下の内容で構成されており、本技術を活用した雨天時浸入水調査を行うことを検討している地方自治体の担当者等に対して活用が期待される。

- ・第1章：総則
目的、適用範囲、ガイドラインの構成等を記載
- ・第2章：技術の概要と評価
本技術の要素技術の概要と実証研究における評価結果等を記載

- ・ 第3章：導入検討
地方自治体が本技術を用いた雨天時浸入水調査を実施する場合に検討すべき内容を記載
- ・ 第4章：調査
実際に雨天時浸入水調査を実施する際の実施手順を記載
- ・ 資料編
機器の仕様や実証研究のAI解析の概要等を記載

5. おわりに

本技術は、下水処理場での処理水量削減に伴う経営改善だけでなく、効率的・迅速な雨天時浸入水対策を可能とするものである。実証研究を通じて本技術を

国内外に普及展開し、下水道事業に貢献していきたい。

参考文献

- 1) E. Siegel: Predictive analytics, Wiley (2016)
- 2) O. Russakovsky, et al.: ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge, Computer Vision and Pattern Recognition, arXiv: 1409.0575 (2015)
- 3) C.M. Bishop: Pattern recognition and machine learning, Springer, pp. 181-196 (2007)
- 4) A Survey, V. Chandola, A. Banerjee and V. Kumar: Anomaly Detection, ACM computing surveys, Vol. 41, No. 3, pp. 1-58 (2009)
- 5) 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No. 34 AIによる音響データを用いた雨天時浸入水検知技術導入ガイドライン（案），国土技術政策総合研究所資料第 1150 号（2021）