

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04670

研究課題名（和文）AIによる不明水調査手法、ならびに路面下空洞特定手法の開発

研究課題名（英文）Development of an AI-based method for infiltration and inflow and a method for identifying cavities under the road surface

研究代表者

佐藤 克己（SATO, Katsumi）

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：50788544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：研究成果は、時系列水温データの成分分析による下水量解析、流量・水温法データのAI機械学習による雨天時浸入水量解析の研究、下水温の成分分解法を用いたノンパラメトリック手法による雨天時浸入水量割合の推定、にまとめた。では、水温法によって得られた水温データを成分分解して、不規則変動水温から雨天時浸水量を推定した。では、流量・水温データからAI機械学習であるニューラルネットワークによって雨天時浸入水量の解析を試みた。では、晴天時と雨天時の不規則変動水温をノンパラメトリックなカーネル密度分布で表して水温変動量を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水道事業が概成する一方で、不明水の浸入による下水処理場やポンプ場の運転経費増加は下水道経営を圧迫させるほか、簡易処理による水環境悪化も懸念されることから、解決すべき重要課題として、早期の対策が求められている。同時に、下水道経営は、公営企業会計を導入し、持続可能な経営が必須であり、今後の維持管理は、経済的で優先順位を付けたわかりやすく可視化できる管理が急務である。こうしたなか、不明水対策、とりわけ雨天時浸入水対策は、下水道施設の大部分の管路を維持管理するうえで重要な対策事項である。本研究は、人に頼ったアナログ的な既存の調査方法ではなく、センサーとAI技術を使って浸入水の特定をするものである。

研究成果の概要（英文）：Regarding the research results, 1) Analysis of Sewage Volume by Decomposition of Time Series Water Temperature Data, 2) Research on Analysis of Infiltration of Stormwater Volume by AI Machine Learning of Flow Rate, Water Temperature Method Data, 3) Estimating the Rate of Infiltration of Stormwater Volume by a Non-parametric Method Using the Component Decomposition Method of Sewage Temperature. In 1), the water temperature method data was decomposed into long-term fluctuation water temperature, daily periodic fluctuation water temperature, and irregular fluctuation water temperature, and the inundation amount during rainy weather was estimated. In 2), the amount of infiltration water during rainy weather was analyzed using the neural network method from the flow data and water temperature data. In 3), the water temperature fluctuation amount was analyzed by expressing the irregular water temperature fluctuations in fine weather and rainy weather by kernel density distribution.

研究分野：水環境浄化システム

キーワード：雨天時浸入水対策 水温法 成分分解 ニューラルネットワーク 雨水浸入強度 機械学習 不明水対策  
カーネル密度分布

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

国土交通省が、下水道管理者に対し行った雨天時浸入水に関するアンケート調査によれば、雨天日年最大汚水量を晴天日平均汚水量で除した数値で表す雨水混入比が 2 倍以上の処理場が、調査対象(有効回答:763 処理場)の 50%を超えており、さらに、3 倍以上ある処理場は、20% 近く存在している。また、雨天時浸入水の問題点として、問題があると認識している管理者の約 8 割が処理場の能力超過を挙げ、施設への被害で最も多いものは水処理への影響、次が処理場からの簡易放流である、と回答している。

このような状況を改善するため、不明水に対する従来からの調査手法として、晴天時と雨天時の管路内の流量差に基づいて、大ブロックから中ブロック、小ブロックのように順次細分化して調査を進める手法が提案されている。流量差による調査は、流量計を用いて晴天時と雨天時の相対的な流量差で不明水の有無を判断している。このため、地下水などの常時浸入水では、流量差の判断が困難なケースがある。

こうした状況のなか、申請者は、不明水が浸入した際の管路内下水の水温変化を対象とする下水処理区域の複数のマンホール内に設置した水温センサーで自動計測し、晴天時と降雨時の管路内下水の水温データから不明水の有無およびその原因を推定する「水温法」を開発した。管路内下水の水温計測に用いる装置は、従来の流量計などと比較すると設置が簡易であり、しかも安価であることから、広範囲に多数の測定装置を設置でき、同一降雨で広範囲の水温データの取得が可能である。既往の研究では、晴天時、雨天時の水温と直近の降雨データ(アメダス)を比較することで、不明水の浸入区域、さらには浸入スパンを特定した。

不明水が管路内へ浸入することは、前述したとおり下水道経営の圧迫や水環境の悪化といった問題だけではなく、管路内へ不明水が浸入する際に周辺土砂も一緒に管路内へ流入することで、路面下に空洞が生じ、その空洞が成長することで占用する道路の陥没が発生している。

道路陥没件数は、平成 27 年度で約 3,300 件確認されており、その原因は種々あるが多くが下水道に起因している指摘されている。道路陥没は、通行する車両や歩行者への損害のほか、道路に埋設されているライフラインの破損、復旧に要する通行止めなどにより、多くの経済的な損害が発生する。このため、道路陥没を未然に防止するため、路面下空洞を発見し、その空洞が陥没に直結するか否かの危険度を判定することは、道路管理者や下水道管理者にとって非常に重要な事案である。

申請者は既往の研究で、下水道が原因で発生した路面下空洞は下水道を流下する下水熱により、空洞内の温度が暖められ、周辺の地盤との温度差を赤外線サーモグラフィで可視化できることを明らかにした。また、加振器を地面に設置し、その振動を離れた場所に設置した加速度センサーで振動の波形を受信すると、地盤下に存在する空洞の有無、また空洞の大小によって波形に変化があることが確認した。さらに、路面下空洞を舗装の健全性を考慮して道路陥没の危険度評価や空洞の補修工事優先度評価を提案した。

申請する研究は、1)不明水が浸入する区域、箇所特定、2)路面下空洞の発見、3)空洞の危険度評価、空洞補修工事の優先度を今までは人がデータ解析していた部分をよりの確に評価できるシステムにするため AI を導入、利活用することで、より早く、正確に、確実に実行できるようにするものである。

## 2. 研究の目的

日本は、少子高齢化のなか、人口減少を迎えており、特に人口規模の小さい地方自治体では財政状況の逼迫は深刻な問題である。と同時に土木技術者数の減少も深刻な問題であり、マンパワーの不足を如何に機械化、省力化していくかが今後の課題といえる。人口 10 万人未満の地方自治体の人口総数は、国土交通省の平成 21 年度データでみると、4,000 万人弱で総人口の 30%を超えており、これらの自治体の都市数は 1、459 市町村で総都市数 1728 市町村の実に 85%近くになる。これら市町村の下水道普及率は全国平均より低い状況であり、限られた財政状況のなか、効率的な下水道整備と維持管理が望まれる。一方で、10 万~50 万人の都市(人口総数:4,900 万人超)や 50 万以上の大都市(人口総数:3,800 万人超)においては、下水道をはじめとする社会資本を効率的、かつ戦略的に維持管理・更新することが喫緊の課題である。

既往の研究では、上述した成果を人力によるデータ解析で解を求めてきたが、本研究では不明水浸入箇所を特定するための水温データの解析や路面下空洞を特定するための波形データの解析といった“人”が行ってきた種々のデータ解析を AI が行うことで、技術者や技術力の低い地方自治体でも活用できるシステムを構築していくことが主目的である。不明水調査手法について、実際下水道区域で長期間(1 年間)モニタリング調査をして、晴天時と雨天時の管路内下水の水温変動を観察し、AI 化していくためのデータ収集をおこない、AI の精度を高める。また、路面下空洞については、1)振動計と加速度センサーを使って空洞を特定する手法は、実験場内で人工的に作成した模擬空洞を使い、波形の収集をしていく、2)サーモグラフィでの特定に関しては、恒温室内で種々の気象条件下を再現させて模擬空洞上部の温度変化と熱画像データを収集して、それぞれ AI 化の資料作りをしていく。最終的には、実フィールドで精度を確認する。

### 3. 研究の方法

本研究は、実際に流れている下水道施設で水温データや流量データを入手して、そのデータを使用して解析する方法で研究した。また、データは、長期にわたり収集して、季節変動、日々の時間変動、さらには晴天時、雨天時の変動を解析した。

### 4. 研究成果

本研究によって得られた研究成果は、佐藤克己・中根進・高橋岩仁・保坂成司・森田弘昭：時系列水温データの成分分析による下水量解析、下水道協会誌 Vol. 57, pp. 88-97, 2020 年 12 月、佐藤克己・中根進・高橋岩仁・保坂成司・森田弘昭：流量・水温法データの AI 機械学習による雨天時浸入水量解析の研究、下水道協会誌 Vol. 58, pp. 88-99, 2021 年 10 月、佐藤克己・中根進・堀田孝行・高橋岩仁・保坂成司・森田弘昭：下水温の成分分解法を用いたノンパラメトリック手法による雨天時浸入水量割合の推定、下水道協会誌 Vol. 59, pp. 98-106, 2022 年 12 月、にまとめた。

は、雨天時不明水調査法の 1 つである水温法で得られる時系列水温データに着目し、計測水温の特徴を踏まえ計測水温を移動平均法により成分分解し、分解した水温を晴天時と雨天時に分けた。晴天時と雨天時の水温を分布の形にして、それぞれの分布の違い(差)を非超過確率(検出力)で表し、この確率を指標にすることにより、計測点間における雨天時浸入水量割合を水温から評価できるようにした。AI 学習の 1 つであるニューラルネットワークを使い、降雨による計測水温の低下水温を推定し、計測期間中の計測水温の総和に対する降雨による低下水温の総和の比を求め、この比と成分分解で得られた非超過確率を比較することにより、非超過確率が降雨による水温低下を表すことを示した。また、一部の水温計測点で流量調査を行い、これもニューラルネットワークで雨天時浸入水量割合(=総雨天時浸入水量/総流量)を推定し、非超過確率との相関性があることを確かめ、非超過確率が雨天時浸入水量割合を表すことを確認した。

では、AI 機械学習の 1 つであるニューラルネットワークを使い、計測した水温から降雨による低下水温を推定し、計測期間中の計測水温の総和に対する降雨による低下水温の総和の比を求め、この比と成分分解で得られた非超過確率を比較することにより、非超過確率が降雨による水温低下を表すことを示した。また、同一地点で水温と流量を計測し、これをニューラルネットワークで雨天時浸入水量割合を推定し、非超過確率との相関性があることを確かめ、非超過確率が雨天時浸入水量割合を表すことを示した。

本研究では、機械学習を使って計測した流量を教師データとしてそこから推定流量を、さらに推定晴天時流量を導いた。そして、この解析にはニューラルネットワーク手法が最もよく再現でき、有効であることを確認した。また、水温法解析に適した説明変数の選定や水温データの適正な計測間隔と調査面積について考察した。あわせて流量や水温のいずれの計測によっても、計測点間の雨天時浸入水量の多寡を評価ができることを示した。

では、管路を流下する下水温は、雨天時浸入水の影響によって変動する。既報では、計測水温を長期変動水温、周期変動水温ならびに不規則変動水温に成分分解した。雨天時浸入水によって変動する不規則変動水温をさらに晴天時と雨天時の水温に分類し、それぞれパラメトリックな極値分布、正規分布の形で回帰した。そして晴天時と雨天時の不規則変動水温分布の違いから雨天時浸入水の影響を評価した。しかしながら、この手法では集水面積が小さい計測点における解析が難しかった。

本研究では、晴天時と雨天時の不規則変動水温をノンパラメトリックなカーネル密度分布で表し、カーネル密度の累積確率曲線を使って降雨時における降雨の影響の無い水温を推定(推定晴天時水温)することで水温変動量を明らかにした。この手法により、狭小な集水面積の解析も可能となり、さらに雨水温度を計測することにより、雨水温度と計測水温から推定晴天時水温を算出して雨天時浸入水量割合を推定できるようにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>佐藤克己・中根進・高橋岩仁・保坂成司・森田弘昭          | 4. 巻<br>第58         |
| 2. 論文標題<br>流量・水温法データのAI機械学習による雨天時浸入水量解析の研究 | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>下水道協会誌                           | 6. 最初と最後の頁<br>88-99 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし              | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）      | 国際共著<br>-           |

|                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名<br>佐藤克己 中根進 高橋岩仁 保坂成司 森田弘昭     | 4. 巻<br>57          |
| 2. 論文標題<br>時系列水温データの成分分解による下水量解析      | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>下水道協会誌                      | 6. 最初と最後の頁<br>88-97 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし         | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著<br>-           |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>佐藤克己・中根進・堀田孝行・高橋岩仁・保坂成司・森田弘昭             | 4. 巻<br>59           |
| 2. 論文標題<br>下水温の成分分析法を用いたノンパラメトリック手法による雨天時浸入水量割合の推定 | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>下水道協会誌                                   | 6. 最初と最後の頁<br>98-106 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                      | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）              | 国際共著<br>-            |

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                          | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                | 備考 |
|-------|--|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 高橋 岩仁<br><br>(Takahashi Iwahito)<br><br>(20453871) | 日本大学・生産工学部・教授<br><br><br><br>(32665) |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                | 備考 |
|-------|---|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 保坂 成司<br><br>(Hosaka Seiji)<br><br>(70328699)   | 日本大学・生産工学部・教授<br><br><br><br>(32665) |    |
| 研究分担者 | 森田 弘昭<br><br>(Morita Hiroaki)<br><br>(90355933) | 日本大学・生産工学部・教授<br><br><br><br>(32665) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|         |         |