

成分分解ならびに AI 学習による下水温解析手法

—水温法による雨天時浸入水の効率的なスクリーニング手法—

中日本建設コンサルタント(株) 水環境技術本部 技師長 中 根 進



1 はじめに

令和6年6月に(公社)全国上下水道コンサルタント協会から新技術奨励賞をいただいた「成分分析ならびにAI学習による下水温解析手法」という技術がある。この技術は、分流式下水道の雨天時浸入水量の発生領域を安価で効率的に絞り込むスクリーニング手法であり、過去にこの手法に関連した論文を発表し、いくつかの賞を受賞した(2021年6月:下水道協会誌奨励論文(学術部門)賞/2022年6月:全国上下水道コンサルタント協会 有効賞/2023年6月:下水道協会誌優秀論文(学術部門)賞)。投稿論文の論文名を発表した順に文末に記した。本稿は、この技術について誌面を借りて紹介するものである。

雨天時浸入水量や常時浸入水量の調査には、流量調査や水位調査などが実施されている。

流量調査が直接法とすれば、下水温(以下、水温という)の計測による調査は間接法になるが、水温を今回紹介する成分分解法等で解析することにより、計測点間の雨天時浸入水の影響を非超過確率(検出力)や雨天時浸入水量割合として評価する。

本稿では、小規模区域で整備した管路を2022年5月末～7月末に水温、雨量、雨の温度を測定した事例を使って水温を解析する手法を示す。

2 調査機器(水温計と雨量計)

水温法は、雨天時浸入水の発生により管路内下水に雨水が浸入した場合、管路内下水の温度に影響を及ぼすことに着目し、人孔内に設置した温度センサーにより連続して水温を測定することで、雨天時と晴天時の水温の変化から雨天時浸入水の発生領域を推定するスクリーニング調査法である^{1),2)}。調査機材と調査イメージを写真-1、2および図-1にそれぞれ示す。

3 水温の特徴と解析法

3.1 水温の特徴

(1) 計測期間中の水温の時間変動例

水温法では、3ヵ月程度下水の水温を測定して、計測点間の雨天時浸入水の評価をする。図-2に、ある計測点における2ヵ月分の1日ごとの水温変動を示す。

図－2の水温の変化だけでは、雨天時浸入水による影響を確認することは難しい。

(2) 降雨日水温の1日の時間変動(周期変動)

1 降雨最大10分当り10mm程度の降雨時の1日の水温の時間変動例を図－3、4に示す。推定方法は投稿論文^{(3),(4),(5)}を参照とするが、ニューラルネット法⁽⁵⁾で推定した降雨時の降雨の影響のない水温（以下、推定晴天時水温と呼ぶ）も併せて図－3、4に示す。気温も、降雨時には晴天時より低下している。

推定晴天時水温と計測水温の差を降雨時の低下水温とし、図－5、6に示す。

同じ10分雨量であっても、降雨の時間帯による雨温度、汚水の水

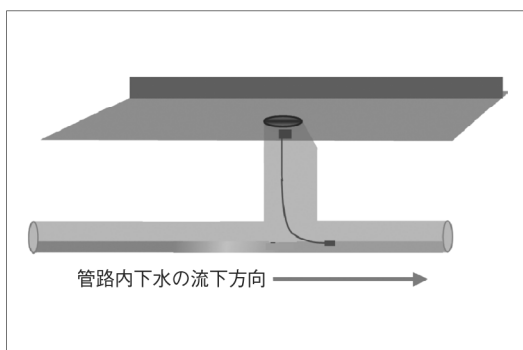
温、汚水量によって、低下水温は図－5、6のように、2℃、0.5℃と異なった値を示し、低下水温だけでは計測点の雨天時浸入水の評価は困難である。



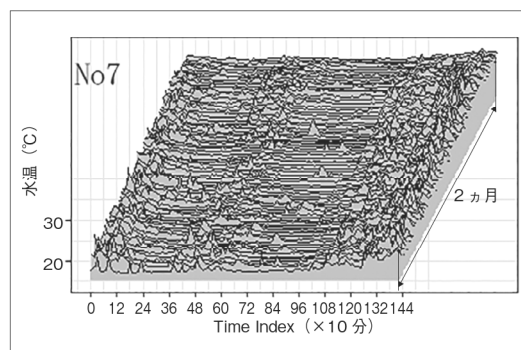
写真－1 温度センサーとロガー



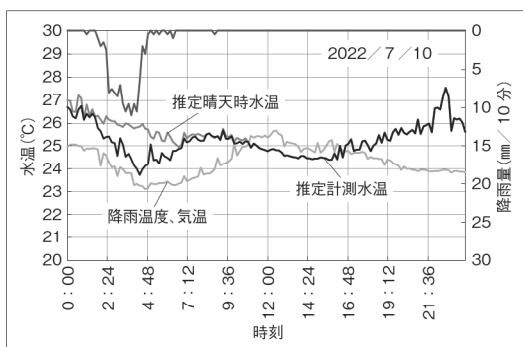
写真－2 雨量計



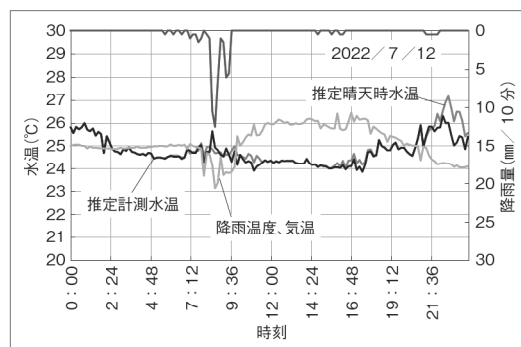
図－1 温度センサーの設置



図－2 計測期間中の1日ごとの水温変動



図－3 降雨日(7月10日)の水温と雨温度



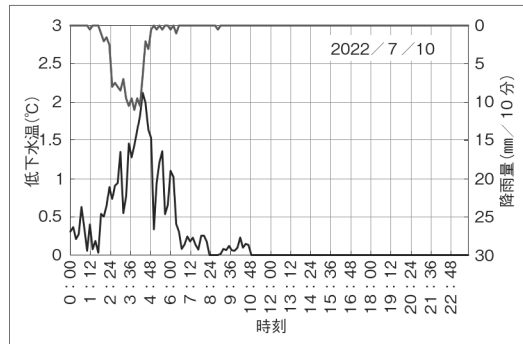
図－4 降雨日(7月12日)の水温と雨温度

3.2 成分分解法による下水水温解析

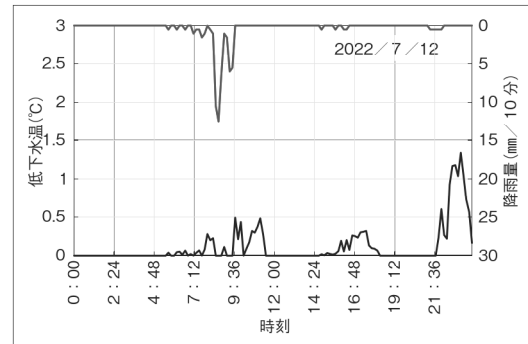
図－7に5月末から7月末の2ヵ月間計測した水温の推移を示す。水温は分、時間、日によって大きく変動している。図中に降雨時の水温も○印で示

すが、水温の低い側、高い側に位置している。このままでは、降雨の影響による水温変化の判断が難しい。そこで、成分分解による手法を開発した。

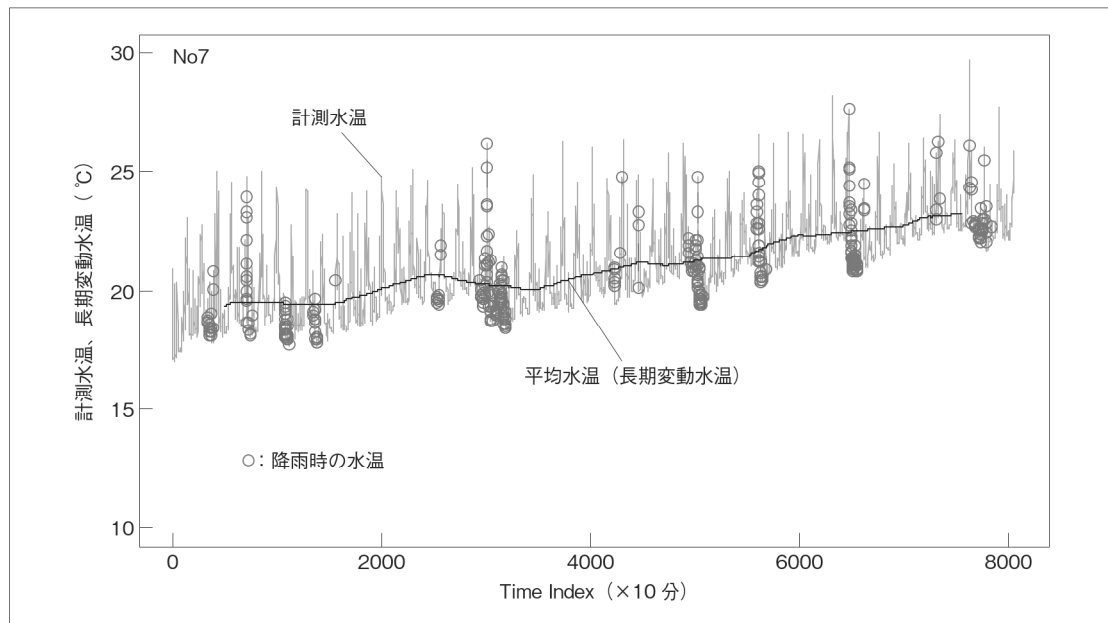
成分分解法では、加法モデル（additive mode）によって、表－1に示す3成分に分解する。



図－5 降雨日（7月10日）の低下水温と雨温度



図－6 降雨日（7月12日）の低下水温と雨温度



図－7 計測期間中の計測水温、長期変動水温の推移 (No.7)

表－1 計測水温の3成分

成分名	データの状態	データの特徴
長期変動	データが長期間にわたる計測により上昇、あるいは下降する状態	長期間にわたり増加または減少する変化がある
周期変動	データがある時間間隔で変動を繰り返す状態	1日の間で変動を繰り返す
不規則変動	データの動きが時間の経過に依存しない状態	時間に関係なく水温の増減がある

$$\begin{aligned} \text{計測水温} = & \text{長期変動水温} + \\ & \text{周期変動水温} + \text{不規則変動水温} \cdots (1) \end{aligned}$$

計測水温の時系列データの長期変動水温は、図－7では水温の上昇傾向として現れる。

周期変動水温については、計測水温の時系列データを解析することにより明確となる。ある時点のデータとの間に何らかの関係性を見つけて推定する。

時系列データの異なる時点間の自己相関関係（相関：ACFという）を調べ、時点間に相関があるか判断する。

計測水温の時系列データについて統計用言語RのACF関数を使い、自己相関係数を求めたところ、図－8を得た。図－8の自己相関を表すグラフをコレログラムといい、144時点（1日）間で自己相関が大きくなっており、その自己相関が続いている。水温の時系列データは、1日の間で水温の周期性があることが判明した。

計測水温から長期変動水温と周期変動水温を差し引いた水温を表－1の中に示す不規則変動水温とし、この不規則変動水温の中に降雨による水温の影響が含まれると考えた。

水温の時系列データの成分分解には、統計用言語Rのdecompose関数を使い、ts関数を使って周期性（144個）の時系列データを作成する。

本稿で使用した成分分解の長期変動水温は、時系列データの時点を中心に前後の周期分（144個）の計測水温を平均した値とする。

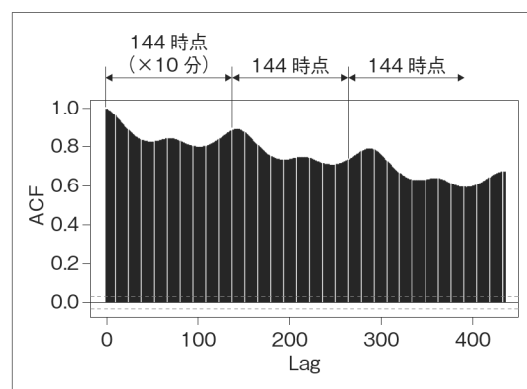
次に周期変動水温は、計測水温から長期変動水温を差し引いた水温に対して計測期間全部の時点1ごと、時点2ごと、～時点144ご

との平均値とし、その平均値を計測期間中に並べる。不規則変動値水温は、「＝計測水温－長期変動水温－周期変動水温」とする。

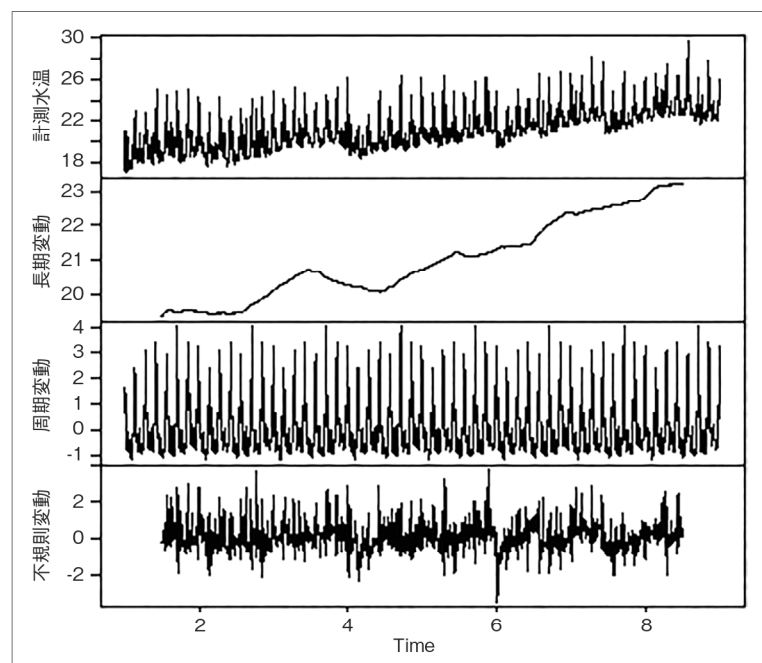
図－7の時系列データを成分分解した結果を図－9に示す。長期変動水温は、計測期間中に水温が上昇している傾向を示している。

周期変動水温は、図－9では周期性が見づらいため、1日分を拡大して図－10に示す。

図－9に示した不規則変動水温を、あらためて



図－8 コレログラム（周期変動）の一部



図－9 計測水温の成分分解例 (No.7)

図－11に示す。この不規則変動水温に降雨時の水温を○印で示す。降雨時には、不規則変動水温が低い側に表れている。

晴天時と雨天時の不規則変動水温からそれぞれの頻度分布を作り、これを確率密度で表し、分布で示すと図－11（右）を得る。

不規則変動水温の分布の表し方は、以下で考えているが、多くはカーネル密度分布を使っている。

● パラメトリック分布

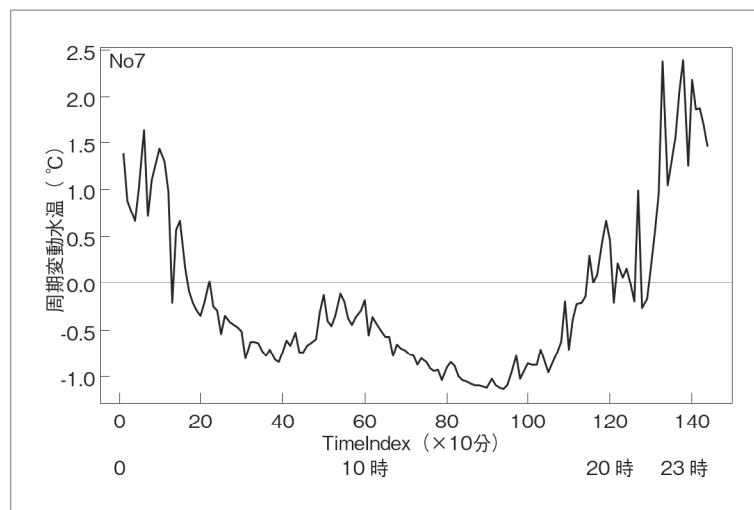
……正規分布、極値分布←赤池情報量基準で決定

● ノンパラメトリック分布

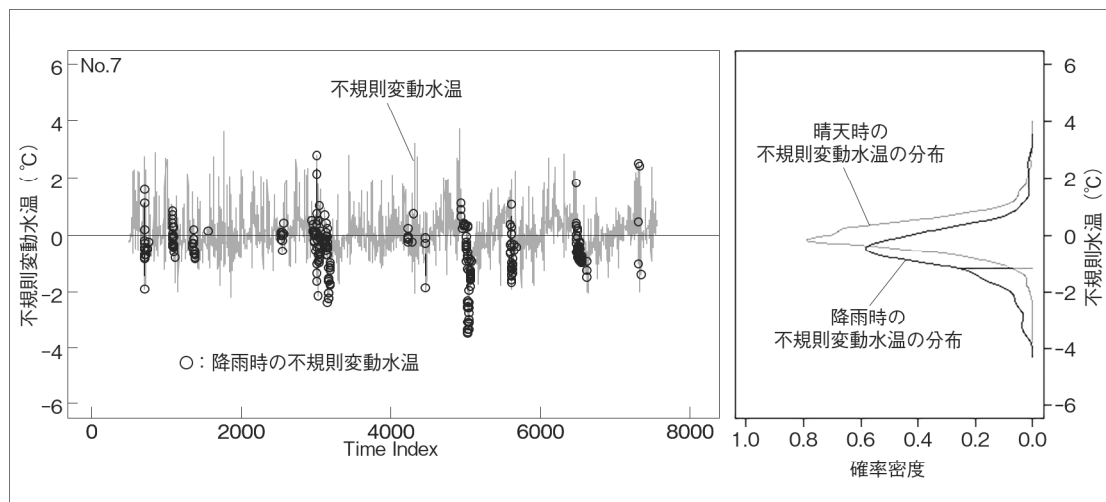
……カーネル密度分布

不規則変動水温分布の晴天時水温の95%下限値に対し、その晴天時水温を超えない雨天時不規則水温の確率を非超過確率（統計用語：検出力）と呼び、計測点間の雨天時浸入水の影響の大小を表す。本業務での非超過確率の一例を図－12に示す。

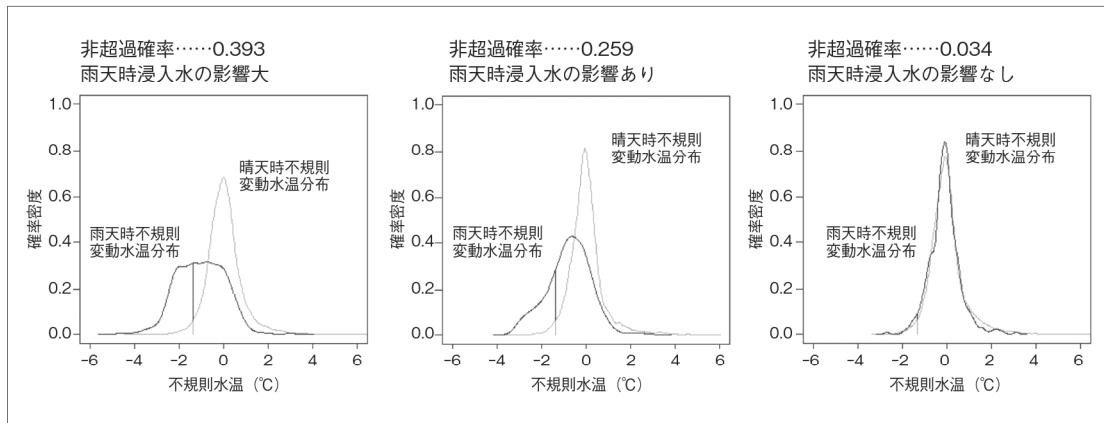
降雨時の水温は、計測によって得られるが、降



図－10 1日の変動水温：周期変動水温



図－11 計測期間中の不規則変動水温とその確率密度分布



図－12 晴天時と雨天時不規則変動水温を用いた雨天時浸入水の評価例

雨時に降雨のない水温（晴天時水温）は、未知数である。この際の晴天時水温は、図－12の不規則変動水温分布を使って推定することができる。これを累積確率法と言ひ、AI学習のニューラルネットワーク法とともに論文^{5)、6)}に詳述した。

夜間非超過確率で評価するなどの工夫もしているが、水温計測期間も8～9月を避けるなどの必要がある。

水温法の詳細は、投稿論文を付記したので参照願えれば幸いである。

4 まとめ

水温法は、流量が少ない場合も、管内水深が満管以上となっても雨天時浸入水の影響を非超過確率（検出力）で評価でき、安価で効率的なスクリーニング手法と考えている。

本稿では示していないが、計測点間の雨天時浸入水量割合で雨天時浸入水の影響の大小を評価することもできる。また、計測点間の区域面積が同程度でも異なった大きさの面積についても評価が可能であり、それらについては投稿論文²⁾に示した。

ここ数年、8～9月の気温が高く、結果、雨温度も高いため、地下水温が低くても雨天時浸入水の水温が高くなっており、雨天時浸入水があっても下水の水温が低下しない現象が発生することがある。夜間の気温が低い時間帯の降雨を抽出して

〈投 稿 論 文〉

- 1) 中根進ら：時系列水温データの成分分解による雨天時浸入水の影響評価手法、2019年、第56回下水道研究発表会 N-7-1-6
- 2) 中根進ら：水温法の成分分解による非超過確率値評価手法の提案、2020年、第57回下水道研究発表会 N-7-2-6
- 3) 中根進ら：時系列水温データの成分分解による下水量解析、下水道協会誌、2020年12月号、Vol.57、No.698 [令和3年6月下水道協会誌奨励論文（学術部門）受賞、全国上下水道コンサルタント協会令和4年6月有効賞受賞]
- 4) 中根進ら：下水水温の成分分解による雨天時浸入水量割合の推定、(公社)全国上下水道コンサルタント協会、令和2年度技術報告集（第35号）[令和2年度優秀発表賞受賞]
- 5) 中根進ら：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、2021年10月号、Vol.58、No.708
- 6) 中根進ら：下水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、2022年12月号、Vol.59、No.722 [令和5年6月下水道協会誌優秀論文（学術部門）受賞]