

**【研究成果報告時/研究成果の概要】様式-2-U**

# 道路・市街地の冠水のリアルタイムモニタリング に関する研究

東京電機大学 教授 小林 亘

道路・市街地の冠水をリアルタイムにモニタリングできれば、通行や避難の安全確保等に有用である。そのためには、誤った冠水情報を発することのないよう、十分な信頼性が必要である。本研究では道路・市街地の冠水のリアルタイムモニタリングに適した低コストで省スペースなセンサをアンダーパスや窪地に実際に設置して 2021 年 11 月から 2023 年 10 月までの間の信頼度を評価した。いずれも通信キャリアがサービスエリアの範囲内としているが、最高は 100%、最低は 64% の信頼度であった。発信処理において繰り返し送信を行うことは信頼度の改善に効果があった。水位確定の処理に要する時間における水位の変化に配慮が必要であることが分かった。冠水センサと水位計を同一の高さで検証したところ、過半数は一致していたが、水位が超えていたが瞬時的な変動であると見做して排除したもの、原因が不明な不一致が見られた。道路冠水と予測を可視化する情報システムについて道路管理者から有用との評価を得た。

**Key Words** : road flooding, flooding sensor, LPWA, Geographical Information System, radar rain gauge

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景

気象庁の統計<sup>注 1)</sup>は、気候変動によって強度の高い降雨の頻度が増加していることを示している。これにより道路に流入する雨水は、以前に比べて短時間でより多くなることが懸念される。都市化によって雨水が地下に浸透しにくい地表が増えると、その影響も加わる。このような環境下で、流入する雨水を十分に排出しきれない道路区間では、冠水によって安全な通行ができなくなり、一般の交通の他、緊急車両の出動や避難にも影響を及ぼす可能性がある。冠水区間に進入した車での死亡事故<sup>注 2)</sup>も発生しているほか、杉本ら<sup>3)</sup>はアンダーパスが冠水することで避難経路に影響があることを示している。冠水区間への車両等の進入を防ぐため、道路管理者には速やかな通行規制を行うことが必要とされる。しかし、管理区間の状況によっては、個所数の多さ、短時間で水位が上昇する箇所が存在、人的資源の制約等から全箇所を即座に規制することは難しいことが想定される。

このような問題に対して、道路・市街地の冠水をリアルタイムにモニタリングできれば、道路利用者は冠水に対する迂回経路を選択でき、道路管理者は効率的な通行規制の準備や解除を行える。本研究は道路・市街地の冠水のリアルタイムモニタリングを実現し、大雨時における道路交通の円滑化、水防活動、避難活動に役立てることを目指すものである。

### (2) 研究の目的

本研究は、信頼性と有用性のある冠水のリアルタイムモニタリングを実現するために次の事項に取り組むことを目的とする。

#### a) 道路・市街地の冠水のリアルタイムモニタリングの信頼性評価

道路・市街地の冠水をリアルタイムにモニタリングする目的に適した冠水センサの水検知、伝送、設置等に関する事項を調査し、これに基づいて製作した冠水センサを実際に冠水が想定される現地に設置し、実地での信頼性を評価する。

#### b) 冠水可視化システムの有用性評価

リアルタイムに収集した冠水の情報(冠水センサの識別コード、観測時刻)と、予め記録してある冠水センサの場所、高さを組み合わせると、ひとまとまりの冠水情報が得られる。これらの情報を有用に利用するため、降雨等の情報を併用する道路・市街地の冠水の表現について検討し、実際に可視化システムを開発し、実務者による評価によって、可視化システムの有用性を明らかにする。

## 2. 冠水のリアルタイムモニタリングの信頼性評価 実験の手法

### (1) 実験に用いた冠水センサ

#### a) 観測仕様の概要

河川砂防技術基準<sup>2)</sup>、危機管理型水位計<sup>3)</sup>で標準と

している連続式水位計は10分以内の周期で1/100mの精度で水位を連続的に関することを標準としている。これに対し、検出する水位を限定して状態変化時にのみLPWA (Low Power Wide Area、省電力長距離無線) で通信を行う方式とすれば電源線と通信線を不要として乾電池で数年動作させられる。このような設定高さの水の有無の変化の検出時に発信を行う装置を「冠水センサ」と呼ぶこととし、実験で使用した。冠水センサは連続式水位計に比べて小型で安価となるため河川区域に比べて制約のある道路や市街地に導入しやすい。

#### b) 水の検知方法と発信処理

水を検知する方法には水の浮力を利用するフロート式、空気に比して高い自然水の電気伝導度を利用する電極式などがある。これまでの実験から構造が簡単で安定性に優れている電極式を採用した。ただし、瞬時値を平滑化する仕組みが必要であり、実験では30秒間隔の検出を4度連続したときに検知を確定させ、検知信号 (主検知信号) を送出する (水位確定処理)。

また、発信処理の信頼度向上対策として主検知信号の30秒後に副検知信号を送信する。

#### c) 観測情報の伝送

水検知の観測情報の伝送には920MHzのLPWAであるSigfoxを使用した。送信の空中線電力は13dBmである。受信機を自ら準備する必要がないこと、これまでの筆者ら<sup>4),5)</sup>の実験から920MHz帯の伝送特性について知見を有していることがその理由である。なお、Sigfoxネットワークの上り信号 (センサから基地局向け) には、信頼度向上策として、同一データの3回の繰り返し送信、サイトダイバーシティ (複数の基地局での受信) が実装されている。

### (2) 冠水センサの設置と高さの基準

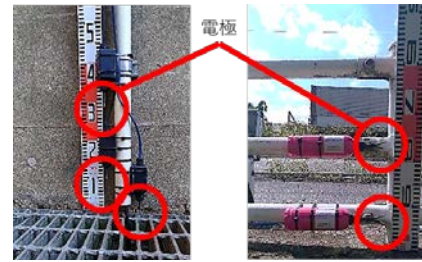
冠水センサの設置場所は、冠水時の水位と照合するために、さいたま市水位情報システム<sup>注3)</sup>において水位計による水位の公表がなされている地点の中から過去の浸水履歴や地形を考慮して選定した。

高さの基準は設置時に地表面から水検知の高さまでの高さを図り、その後、前述の水位計の値で補正を行った。設置した冠水センサ21個、9か所の一部を図-1に示した。

なお、設置においては占用許可を、設置工事においては道路使用許可を得ている。

### (3) 無線通信の信頼度の評価方法

冠水センサの信頼度は無線通信の信頼度と水検知の信頼度の積と考えら、これらを個別に調査する。冠水センサから送信の度に1ずつ増加する送信カウンタ値が送られる。受信回数を送信カウンタ数で除することにより無線通信の信頼度を算出することができる。また、Sigfoxネットワークではゲートウェイでの受信レベルと受信局数によるLink Quality (表-1) が定義されている。これも併せて取得し評



(左)馬込アンダーパス (右) 北稜高校前



(下) 村田 710

図-1 設置した冠水センサの例

表-1 Sigfox ネットワークのリンク品質<sup>注4)</sup>

| RSSI(受信信号強度)             | 受信局数   | Link Quality |
|--------------------------|--------|--------------|
| -122dBm ≤ RSSI           | 3      | EXCELLENT    |
| -135dBm ≤ RSSI < -122dBm | 3      | GOOD         |
| -122dBm ≤ RSSI           | 1 or 2 | GOOD         |
| -135dBm ≤ RSSI < -122dBm | 1 or 2 | AVERAGE      |
| RSSI < -135dBm           | any    | LIMIT        |

価する。その他、Sigfoxネットワークによってセンサ位置を推定した情報を参考に取得する。

### (4) 発信処理の信頼度向上対策と評価方法

受信信号を主検知信号 (1回目の検知信号)、そのバックアップとして送信された副検知信号 (30秒後に送信される2回目の検知信号) に分解し、主と副を連動して受信 (連動受信) していた割合、どちらか一方 (単独受信) であった割合を求め、発信処理の信頼度向上対策を評価する。

### (5) 冠水センサの検出から受信までの時間の評価

冠水センサの受信時の前後における水位計の水位から、センサで検知している水位に相当する水位計の水位 (水位計補正センサ高) を求める。これは、センサの設置高さを水位計の高さでキャリブレーションするものであり、次の工程である、センサと水位計の照合を行うために必要である。このとき、水位計の水位を使用して、水位計補正センサ高を検知した時刻から発報までの時間を求める。

### (6) センサと水位計の観測日時の照合

センサの検知時刻と、その場所の水位計において水位計補正センサ高に達した、あるいは、下回っ

2カ年研究用 (R5 提出)

た時刻をそれぞれ求め、両者を対比し、それぞれの水位観測の正しさを検証する。

冠水センサで冠水の発生を検知した時刻の前5分から2分後までの水位を求めた。図-5は馬込アンダーパ

3. 信頼性評価実験の結果

(1) 無線通信の信頼度と無線リンク品質

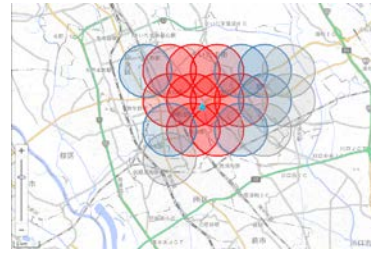
送信カウンタ数を受信回数で除して求めた信頼度と無線リンク品質の内訳を図-2に示した。信頼度が1であったものは21個中5個であった。信頼度の高いものと最も低いものについて1例ずつSigfoxネットワークによる位置情報推定結果を図-3に示した。

(2) 発信処理の信頼度向上対策

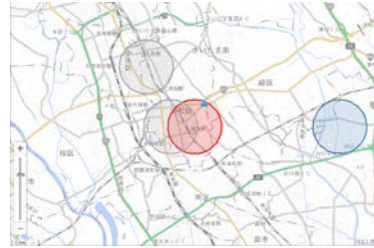
受信信号の連動受信、単独受信の割合を図-4に示した。信頼度が1のものは当然ながら全て連動受信であり、信頼度が最も低いものの67%が単独受信であった。

(3) 冠水センサの検出から受信までの時間と水位計補正センサ高の算出

冠水センサを設置した場所の水位計を使用して、



1424D99 (通信信頼度=1)



1424D75 (通信信頼度=0.643)

図-3 Sigfoxネットワークによる位置情報推定結果

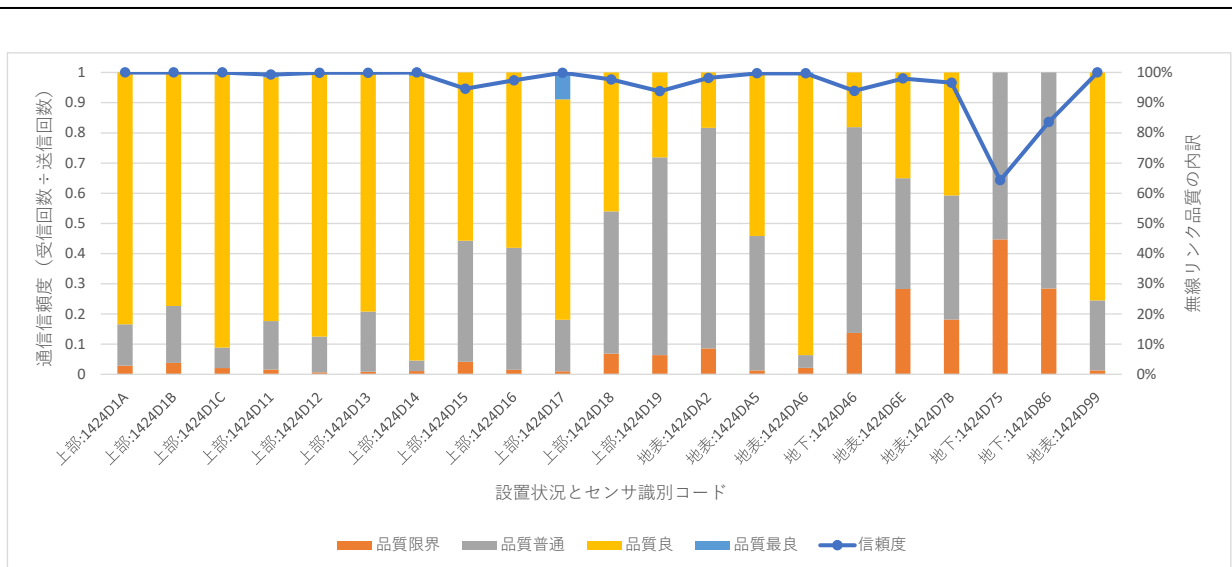


図-2 無線通信の信頼度と無線リンク品質(2022年11月~2023年10月)

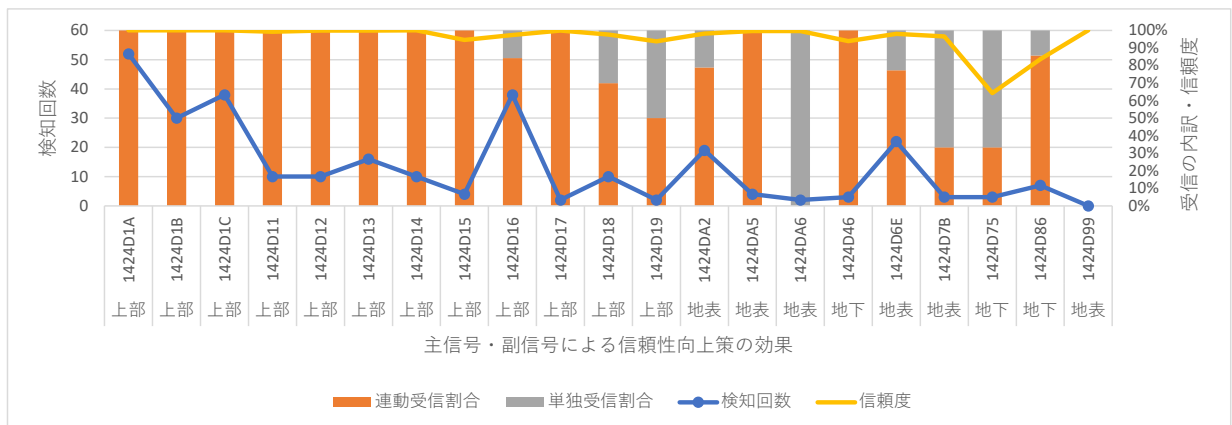


図-4 発信処理による信頼度向上の効果：連動受信と単独受信の割合(2022年11月~2023年10月)

2カ年研究用 (R5 提出)

スに設置した3つのうちの1つ(識別コード1424D1C)に対する水位であり、このときのセンサ検知時刻からの時間差毎の水位の平均と標準偏差を表-2に示した。

のセンサも冠水を検知していたことから、放水などによる何らかの冠水があったと推測するが、その原因は不明である。

(4) センサと水位計の観測日時の照合

センサの検知時刻と、その場所の水位計において水位計補正センサ高に達した、あるいは、下回った時刻を突合した。馬込アンダーパスに設置した1424D1Cでは、冠水をセンサで検知した回数が18回、この地点の水位計が水位計補正センサ高に達した回数は20回であった。このうち13回は両者が2分以内で一致した。一致したケースの水位を図-6に示した。水位計のみが冠水を観測した7回の水位を図-7に示した。センサのみが観測した5回は、水位計では目立った変化は見られず、降雨データでもさほど大きな降雨も見られなかったが、同じ場所の他の2個

4. 冠水可視化システムの有用性評価実験の手法

(1) 実験に用いた冠水可視化システム

a) 概要

地図上に冠水センサの検知情報を表示することで冠水の場所が分かり易い。降雨は冠水の主たる誘因であることから降雨の重畳は冠水情報の正しさの確認に役立つ。センサの周辺については利用者の推測が必要であるが、センサの高さ以下の地盤高は浸水していると見做す空間補間による支援が考えられる。複数のセンサの情報を利用できる場合にはより高度な空間的な推定を行える。ここでは、同じ

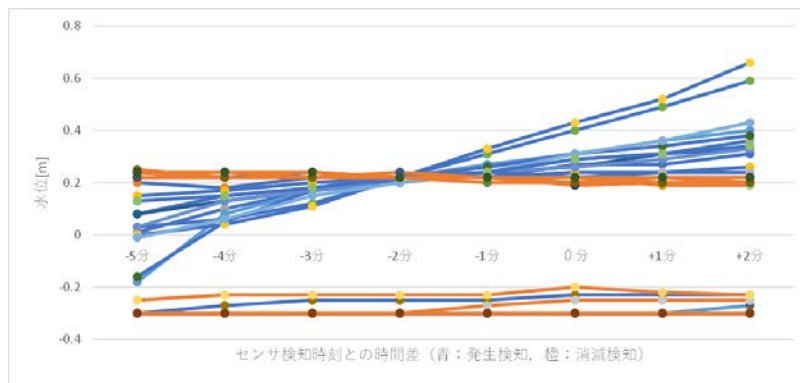


図-5 センサ検知との時間差と水位 (馬込アンダーパスに設置した 1424D1C)

表-2 センサ検知との時間差と平均水位・標準偏差 (1424D1C)

| センサ検知との時間差 | -5分   | -4分   | -3分   | -2分   | -1分   | 0分    | +1分   | +2分   |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均水位 [m]   | 0.14  | 0.17  | 0.20  | 0.22  | 0.24  | 0.25  | 0.27  | 0.29  |
| 標準偏差       | 0.125 | 0.066 | 0.035 | 0.008 | 0.029 | 0.059 | 0.085 | 0.120 |

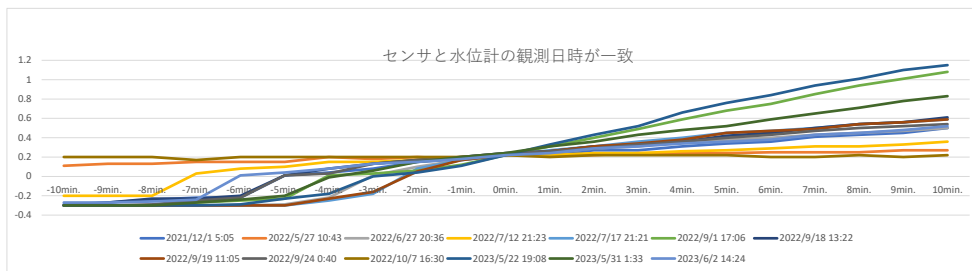


図-6 センサ検知と水位計が一致した 13 回の水位 (馬込アンダーパス)

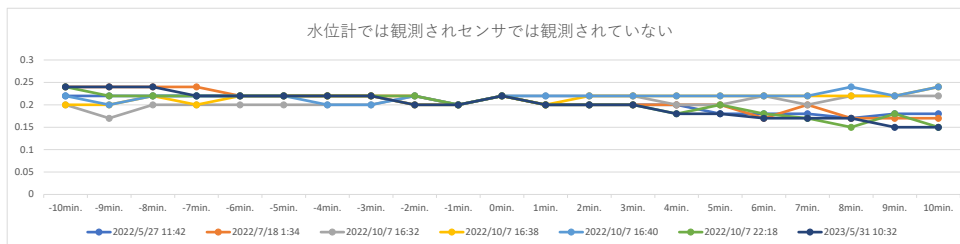


図-7 水位計のみが観測した 7 回の水位 (馬込アンダーパス)

地点に高さを違えて設置したセンサを用いて水位の時間変化を重畳することを試みる。

b) 降雨観測データ

可視化システムで使用する降雨観測データは、国土交通省が整備しているXRRAIN<sup>注5)</sup>(eXtended RAdar Information Network: 高性能レーダ雨量計ネットワーク)を用いた。これは毎分4分の1基本メッシュ(約250m)毎の降雨強度を0.1mm/hの精度で提供する。

c) 降雨観測データ

予測雨量には1km10分間隔の降水ナウキャスト<sup>注6)</sup>を用いた。

d) 水位予測方法

水位予測は著者が考案した式(1)、(2)によった。

$$L_j - L_i = A \times R_{sum} + B \times (j - i) \quad (1)$$

ここで、

$i, j$ : 時刻 ( $i < j$ )

$L_i, L_j$ : 時刻  $i, j$  における予測地点の水位

$A$ : 予測地点の上昇係数(降雨による) ( $A \geq 0$ )

$B$ : 予測地点の下降係数(排水による) ( $B \leq 0$ )

$R_{sum}$ : 時刻  $i - td$  から  $j - td$  の予測地点近傍の総降雨量

$R_{sum}$  は以下で与えられる。

$$R_{sum} = \int_{(i-td)}^{(j-td)} R(t) dt \quad (2)$$

ここで、

$td$ : 予測地点近傍の降雨の予測地点への到達時間

$R(t)$ : 時刻  $t$  における予測地点近傍の降雨量

e) 地理情報システム

地図の背景には国土地理院のベクトルタイルを用いた。

これらの要素を組み合わせ冠水可視化システムを開発した。GIS上に時間を指定できるタイムスライダ、レーダ観測による雨量強度、冠水の現況・高さ・予測に応じて色とデザインが変わるセンサアイコンを配置し、ポップアップで降雨と水位の予測を含む時間変化グラフを表示できる。図-8に2023年6月2日から3日にかけての表示画面を2つ例示した。写真-1は、同日の、北稜高校馬込アンダーこの地点の冠水時の状況を平時の状況と対比したものである。冠水が予測されるとき目視にて実際に生じている。

(2) 冠水可視化システムの有用性評価方法

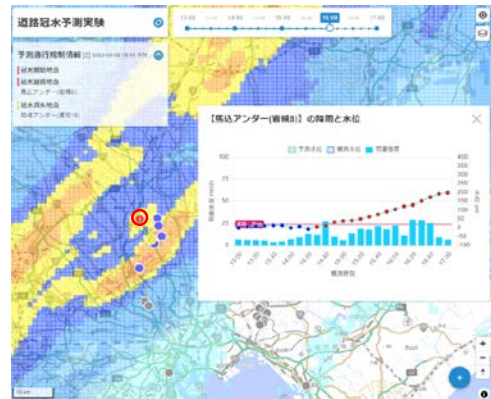
システムの画面を提示して、関東地方整備局、さいたま市、茂原市の道路管理者から意見を聴取した。

5. 有用性評価実験の結果

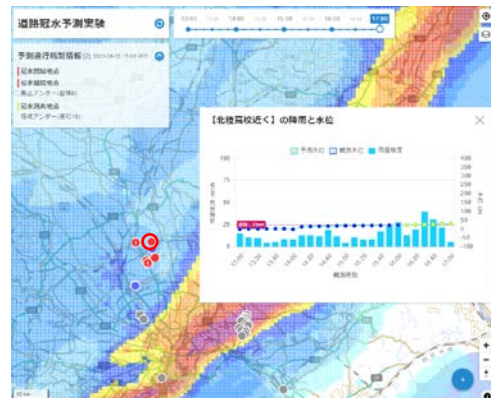
得られた意見の主なものを列挙する。

2カ年研究用(R5提出)

- ・現在は予測を行っていないので1時間以内の予測であっても、水位の上昇・低下・不変が予測できるだけでも有用である。
- ・通行規制の現地作業は地元の業者が行っており、長年の勘で実施しているが高齢による退職によってノウハウが失われることを懸念しており、新技術で補えることを期待する。
- ・通行規制の現地作業を職員が行っており、個所数に対して職員数が不足なので優先順が分かることは有用である。



2023年6月2日 16:00, グラフは馬込アンダーパス



2023年6月2日 17:00, グラフは北稜高校近く

図-8 道路冠水予測実験の表示画面の例



馬込アンダーパス (右 2023年6月2日 19時)



北稜高校前 (右 2023年6月3日)

写真-1 表示画面例のグラフ該当場所の冠水時の状況 (筆者撮影)

## 6. 考察

### (1) 無線通信の信頼度の評価について

センサの全設置箇所は通信キャリアが提供するサービスエリアの範囲内である。図-2から2年間の実験期間中、無線通信の信頼度が100%の箇所が5か所あり、これらのセンサに伝送の問題はない。しかし、サービスエリア内でも信頼度の低い場所があることに注意が必要である。原因は受信基地局が遠い、電波伝搬に障害があると考えられる。使用している920MHz帯は移動通信のために1960年代に市街地の電波伝搬に関する大規模な実測調査が行われた。結果を伝搬損失推定式にまとめたものは奥村-秦式と呼ばれ、代表的な伝搬損失算出方法の一つであり、1キロメートル以上に適用される。1キロメートル未満は都市内多重波伝搬の幾何光学モデルに基づくWalfisch-池上式が適用できる。都市部における奥村-秦式、そして、基地局とセンサ間に見通しが無く、屋根から街路への回折と散乱、多重スクリーン回折の損失が正の場合のWalfisch-池上式による時、センサ側のアンテナ高を高くすることで理論上伝搬損失が減少する。すなわち、信頼性の向上が期待できる。なお、本基地局の位置と位置推定アルゴリズムは公表されていないが、信頼度の高いセンサでは位置推定の分散が小さいことが図-3に見られた。図-4では、送信アルゴリズムにおいて繰り返し送信することによる信頼度改善効果が見られた。Sigfoxネットワークのデフォルトの3度の繰り返し送信に加えてである。

### (2) 水検知の信頼度の評価について

無線通信の信頼度が100%のセンサにおける水の誤検知の原因は水を検知する機構にある。馬込アンダーパスに設置した識別コード1412D1Cでは、水位確定処理時間(2分間)を補正した時刻での水位計の平均観測水位は表-2から0.22mであった。図-5からこの水位確定までの2分間の水位変化の平均は0.02mであるが、最大0.2m程度の水位上昇がみられたことに注意が必要である。

センサ(1412D1C)の冠水検知回数は18回、水位計が0.22mに達した回数は20回であり、これらの13回は両者が2分以内で一致した。図-6から13回の観測結果が正しいと考えられる。水位計で観測され、センサでは観測されなかった7回は、図-7から一時的に0.22mを上回ったが、センサでの水位の確定に至らないものであったと考えられる。このように水位の瞬時的な変動を打ち消すための機構によって冠水の発信の有無が変化することに留意すべきである。センサは検知し水位計で検知されない5例は原因が不明であった。

### (3) 冠水可視化システムの有用性の評価について

冠水可視化システムに対して道路管理者の評価は肯定的なものであり、実用化への期待が伺えた。

## 7. おわりに

道路・市街地の冠水のセンシングを安全な通行や避難に活かすには、冠水が発生していても検知できない、冠水が無いにも関わらず冠水情報を発するといいことが生じることのないよう、十分な信頼性を確保する必要がある。本研究が信頼性の高い冠水センシングの実現に寄与できれば幸甚である。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり一般財団法人河川情報センターの助成を受けた。関東地方整備局、さいたま市、鎌ヶ谷市、茂原市、株式会社関電工にはセンサ設置とヒアリングに協力いただいた。感謝の意を表す。

- 注1) 気象庁: 極端現象の変化, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)  
 注2) 例えば、2016年9月愛知県、2019年9月三重県等  
 注3) さいたま市: さいたま市水位情報システム, <<https://www.flood-info.city.saitama.jp/JP/index.html>>  
 注4) 京セラコミュニケーションシステム: Sigfoxネットワーク品質指標 - Link Quality -, <<https://www.kccs.co.jp/Sigfox/blog/technical/2018/0902/>>, 2018.09.12記事  
 注5) 一般財団法人河川情報センター: 水防災オープンデータ提供サービスデータ配信項目, <<http://www.river.or.jp/koeki/opendata/komoku.html>>, (入手 2022.5.1).  
 注6) 気象庁: 気象庁情報カタログのナウキャスト, <[https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/catalogue/make\\_product\\_page.cgi?id=Nowcast](https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/catalogue/make_product_page.cgi?id=Nowcast)>, (入手 2023.8.1).

### 参考文献

- 1) 杉本 賢二, 谷 眞太朗, 八木 隆征: アンダーパス冠水による避難経路への影響評価, 土木学会論文集, 79 巻, 22 号, 2023.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準調査編平成 24 年 6 月(最終改訂 2023 年 5 月 19 日), 第 2 章第 3 節 p.7, <[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/chousa\\_all\\_230519.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/chousa_all_230519.pdf)>, (入手 2023-06-12).
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局: 危機管理型水位計設置の手引き(案)平成 31 年 3 月, <[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kasen/pdf/kikikanri\\_tebiki.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/kikikanri_tebiki.pdf)>, pp.2-2, 2019, (入手 2023-06-12).
- 4) 小林 亘, 大原 美保: LPWA を用いた市街地でのリアルタイム浸水モニタリングに関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 75 巻, 1 号, pp. 36-47, 2019.
- 5) Wataru Kobayashi: Reliability Assessment in Wireless Apparatus using LoRa and Sigfox in Catch Basin, *Journal of Disaster Research*, Vol.16, No.3, pp. 363-370, 2021.
- 6) ITU-R: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, pp.15-21, RECOMMENDATION P.1411-9, 2017