

(一財) 日本建設情報総合センター

研究助成事業実績報告書

助成番号：第 2022-3 号

冠水センサと機械学習を用いた道路冠水予測システムの開発

2023 年 11 月

東京電機大学総合研究所

小林 亘

研究者紹介

小林 亘 (こばやし わたる)

現職：東京電機大学総合研究所 教授 (博士 (工学), 技術士 (総合技術監理、情報工学、
電気・電子))

目次

1. はじめに.....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 研究の目標と範囲.....	1
1.3 先行研究.....	2
2. 水位予測に用いる観測手段と取得データ.....	3
2.1 水位の収集.....	3
2.2 冠水センサ.....	4
2.3 冠水センサの設置.....	5
2.3 雨量の観測と予測.....	7
2.4 冠水センサによる取得データと雨量の重ね合わせ.....	8
3. 水位予測手法の提案.....	8
3.1 冠水センサによる予測のための仮定.....	8
3.2 予測式.....	9
3.3 予測手法.....	10
4. 道路冠水の水位予測実験.....	11
4.1 実験の概要.....	11
4.2 実験に用いた雨量データ.....	14
4.3 実験に用いた水位データ.....	14
4.4 偏回帰係数の算出.....	14
4.5 予測水位の算出と評価.....	14
5. 実験結果.....	16
6. 道路冠水予測表示システム.....	17
7. 考察.....	20
8. おわりに.....	20

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

気候変動により、強度の高い降雨の頻度が増加していることが気象庁の統計から示されている（気象庁：極端現象の変化,https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html）。このため、道路に流入する雨水は、短時間でより多くなることが懸念される。さらに、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場合には、その影響も加わる。このような環境の下で、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ことになる。実際、冠水区間に進入した車での死亡事故も発生しているほか（例えば、2016年9月愛知県、2019年9月三重県等）、杉本ら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¹⁾。道路管理者は冠水区間への車両等の進入を防ぐため、速やかな通行規制を行うことが必要となるが、管理区間によっては個所数の多さ、短時間での水位の上昇、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。

この問題に対して、道路冠水の水位予測が可能であれば、道路利用者は事前に冠水に対する迂回経路を選択でき、道路管理者は事前に通行規制等の準備ができる。このような背景を踏まえ、本研究は道路冠水の水位予測を可能とし、大雨時における道路交通の円滑化を目的とするものである。

1.2 研究の目標と範囲

本研究は道路交通の円滑化のために道路冠水の水位予測をリアルタイムで行うことを可能として、それを社会実装することを目標とする。本研究では次の方策を採った。

データの準備を容易にするために、予測に使用する情報を道路の水位と雨量に限ることとし、地形、粗度、下水管路等の情報を準備しなくても予測を行えることを目指す。

次に、コストやスペースの点での導入のし易さから、道路冠水の水位の収集には河川で使用される連続式水位計に比べて安価で省スペースな冠水センサを用いる。ただし、冠水センサでは不定期に限られた水位が収集されるのみであり、連続式水位計のように定期的な水位は得られないという欠点がある。そこで、冠水センサの水位収集の制約でも利用可能な水位予測手法を提案する。

さらに、予測の分かりやすさと説明性を確保するために、予測に用いるアルゴリズムはブラックボックスとならないものを使用する。

本研究では、これらによる水位予測手法を道路に実際に設置した冠水センサから得たデータと観測雨量に適用して実験を行った。具体的には、重回帰分析によって道路の水位の予測モデルを作成し、台風の観測データを用いて予測を行い評価した。また、社会実装のため

の実用上の知見を得るため、道路冠水予測を可視化する情報システムを開発し、これを使用して道路管理者から意見を聴取した。

1.3 先行研究

本研究に関係する先行研究として道路の冠水に関するもの、都市の内水氾濫に関するもの、水位の予測に関するものを調査した。

道路の冠水に関する先行研究には、高橋らによる浸水実績・降雨記録に機械学習を適用した研究²⁾がある。これは、過去の浸水実績と過去の降雨量から時間最大雨量に対する浸水の有無を予測するものである。佐藤らによる高解像度のDEM（数値標高モデル）と道路ネットワークに機械学習を適用した研究³⁾は、DEMと機械学習を用いて内水氾濫による浸水リスクの評価を行ったものである。いずれも、道路において冠水の危険性のある場所を推定することを目的としており、個々の降雨に対する冠水の発生の予測を行うものではなかった。

道路において個々の降雨に対する冠水を予測する研究には、リアルタイムでの予測ではないが、関根らによる東京都23区の道路、下水道、都市河川、地下調整池、ポンプ所などの関連施設、街区内の土地利用などを再現して、時間雨量100mmと150mmの一樣降雨を与えて道路冠水の数値計算を行った研究がある⁴⁾。この数値計算を行うためのモデルの構築には、下水道、土地の利用状況等に関する最新かつ正確なデータを必要とする。道路冠水が懸念される地点は全国に点在しており、この手法を全国に展開するためには、地形、土地利用状況、施設等の多くの種類の最新データを収集して精緻なモデルを作成して専用のソフトウェアによって短時間に数値計算を行う必要が全国で生ずることとなり、普及は容易ではないと想定される。精緻なモデルの構築をせずに予測を行うことを目指している本研究とは異なる手法である。また、このシミュレーションによる計算時間は不明であるが、実際の降雨に対してリアルタイムで予測を行うには長い計算時間を要しないことが求められる。リアルタイム性能を重視した研究には井上らによる予測降雨とDEMに基づいてNays2DFloodを使用して道路の浸水を予測した研究がある⁵⁾。そこでは空間解像度を25m四方以上とすることで実用的な時間での予測が可能であるという成果が得られている。Nays2DFloodは河川洪水用の汎用二次元氾濫計算ソフトであり、小規模な内水氾濫への適用可能性については不明であることと、DEMと予測降雨の準備とNays2DFloodによる処理には相応のスキルが必要となることが全国的な普及の点から懸念される。

道路に限らず都市全体の内水氾濫を対象に研究を行ったものとして、木村らによる局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測に関する研究がある⁶⁾。この研究においても下水道管渠、地表面のデータを使用してモデルを構築しているため、本研究とは手法が異なっている。なお、その研究成果によると下水道管渠には枝線～準幹線程度の精細さ等、地表面は5~10mメッシュ程度の精細さが必要とされている。

さらに、広く水位の予測に関する研究は河川の洪水予測においてなされている。椿らは河

川技術論文集の掲載論文・報告を俯瞰して、水位の予測技術を、上流下流の水位の相関関係などにに基づき評価地点の水位を直接予測する手法（機械学習による方法）と、降雨からの流出流量を評価する流出解析技術を基盤とする手法の二つに分類している⁷⁾。これらの手法を道路冠水に適用しようとした場合、前者の手法（流出解析を行わない水位直接評価モデルに分類されるもの）は、モデル構築のためのデータは不要であるが道路においては定常的な上流下流といった水流はなく適用が難しく、後者（流出解析をベースとするもの）は、既に述べたようにモデル構築のために地形等のデータを必要とするという課題がある。

なお、河川では水位観測が行われていることから実際の水位を用いた研究が見られるが、本研究で取り組んでいる道路での水位観測データに基づく予測、さらに、流出解析が不要な手法によって水位の予測を行う取り組みは、唯一、筆者らによる先行研究⁸⁾でのみ見られ、それは連続式水位計によるものである。

2. 水位予測に用いる観測手段と取得データ

2.1 水位の収集

河川における水位の収集について、例えば、国土交通省の河川砂防技術基準では水位観測所のデータ伝送について10分以下の時間間隔でデータを転送できる機能を有するものを標準としており⁹⁾、中小河川用の安価な危機管理型水位計においても監視モードで10分間隔以内、観測モードで中小河川は5分、水位が急激に上昇する河川は2分間隔で観測及び計測データの送信を行うことを標準としている¹⁰⁾。このように河川では連続式水位計によって一定の時間毎に水位が取得されることが一般的となっている。ただし、これらの水位計は連続的な動作のために電源の引き込み、あるいは太陽光発電と大容量の蓄電池を要し、そのための工事とスペースが必要となる。河川における水位計の例を図-1に示す。



図-1 河川水位計の例（阿武隈川本宮水位観測所）
2022年6月著者撮影

連続的な動作を行わず、検出する水位と送信するタイミングを限定してもよければ、例えば、通信に LPWA (Low Power Wide Area、省電力長距離無線) を使用して水位の状態変化時にのみ通信を行う方法によって電源の引き込みをせずに乾電池で数年動作させることができ¹¹⁾、無線通信によるため通信線の工事も不要とすることができる。このような、設定された高さの水の有無の変化を監視して、変化の検出時に発信を行う装置を、ここでは「冠水センサ」と呼ぶこととする。これは目的によって浸水センサ、越水センサ、洪水センサなどと呼ばれることがある。国土交通省が行っているワンコイン浸水センサ実証実験¹²⁾において使用されているものも冠水センサの一種である。図-2 に国土交通省ワンコイン浸水センサ実証実験で使用されている浸水センサを示す。冠水センサは連続式水位計に比べて機能が限定されているが、小型で安価であることから、連続式水位計の設置が困難な、道路冠水が懸念される地点へも設置しやすい。



図-2 国土交通省ワンコイン浸水センサ実証実験パンフレットより (https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/wankoinsensa/pdf/r5_chirashi.pdf)

2.2 冠水センサ

冠水センサは、水の有無が変化したときに水の状態、すなわち、水を検出したことまたは水が消滅したことと、自局の識別コード等とをリアルタイムで無線通信により伝送する装置である。冠水センサは、水の検出部と通信部、そして電源から構成される。水を検出するための原理には、水の有無によって生ずる電気抵抗の違いを利用する電極式、水の浮力によって回路の開閉を切り替えるフロート式、水の有無による静電容量の変化を検知する静電容量式などがある。ただし、継続的な水位上昇と水滴・雨滴による瞬間的な水検出との誤認を防止すること、強風によるフロートの上昇を防止することなど、屋外環境で確実な水検知を行うために種々の工夫と検証が必要である。通信部に LPWA を用いる場合には、例えば LoRa、sigfox、NB-IoT などが利用できる^{11)、13)}。これらは電池により動作させることができ、水の検出部の消費電力と通信部の動作回数に配慮して適切な設計を行えば電池によっても数年間動作させることができる¹¹⁾。

本研究で使用した冠水センサの仕様を表-1 に、回路基板を図-3 に示す。

表-1 冠水センサの仕様

項目	細目	仕様
水検知方式	検出方法	2電極間の抵抗値による判定
	測定周期	30秒（4回連続同一判定で判定を確定）
送信方式	無線方式	sigfox
	周波数	923.2MHz±20ppm
	空中線電力	13dBm
電源及び電池寿命	電源	リチウム電池（CR17450E-R×1本） 電圧3V，2400mAh
	電池寿命	3年以上（実績）



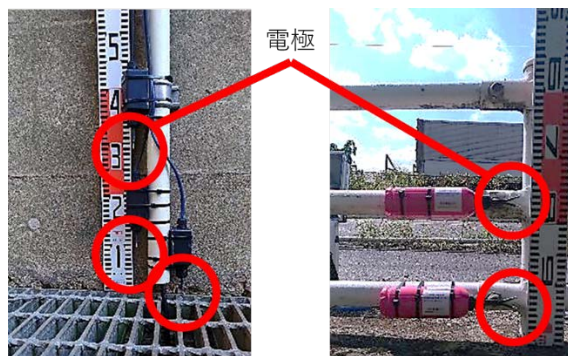
(3×7cm)

図-3 冠水センサの電子基盤

2.3 冠水センサの設置

冠水センサによって浸水や冠水を把握するだけでなく、予測をも可能とするため、本研究では同一地点に複数の水検出部を高さを違えて設置することとする。設置する高さは、現場にある工作物の制約なども考慮する必要があるが、3つの高さの一例を挙げると、地表から3cm（道路冠水の発生を検出し、通行規制開始を予測するため）、地表から20cm（20cmを通行規制水位としている場合、通行規制水位の冠水を冠水センサによって直接に把握するため）、25cm（通行規制より上の水位の水の消滅を検知して規制解除を予測するため）が考えられる。電極位置の高さを違えて設置している例を図-4に示す。左は配線防護用の管路に添架した例、右はガードパイプに添架した例である。このほか、案内標識、カーブミラ

ーへ添架した例、縁石へ設置した例も図-4に示す。なお、冠水センサの設置においては、道路占有許可の申請と取得し、工事に必要な各種の届け出を行い、法令順守に万全を期した。



配管防護用の管路への添架 ガードパイプへの添架



カーブミラーへ添架 案内標識へ添架



縁石に設置

図-4 冠水センサ（電極式）の設置例

2.3 雨量の観測と予測

道路冠水が想定される地点の観測雨量を入手するには、地上雨量計、レーダ雨量計が利用できる。後者の一つである、国土交通省が整備している XRAIN (eXtended RAdar Information Network: 高性能レーダ雨量計ネットワーク) 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の精度で提供している¹⁴⁾。国土交通省のレーダ雨量計の配置を図-5に示す。降雨の予測値は、例えば、気象庁の高解像度降水ナウキャストにおいて250m解像度で5分毎の60分先までの降水強度分布がある¹⁵⁾。雨量はレーダをベースとして観測値、予測値とも概ね日本全国を網羅しており、道路冠水が想定される地点の雨量は観測機器を新たに設置せずに入手可能である。

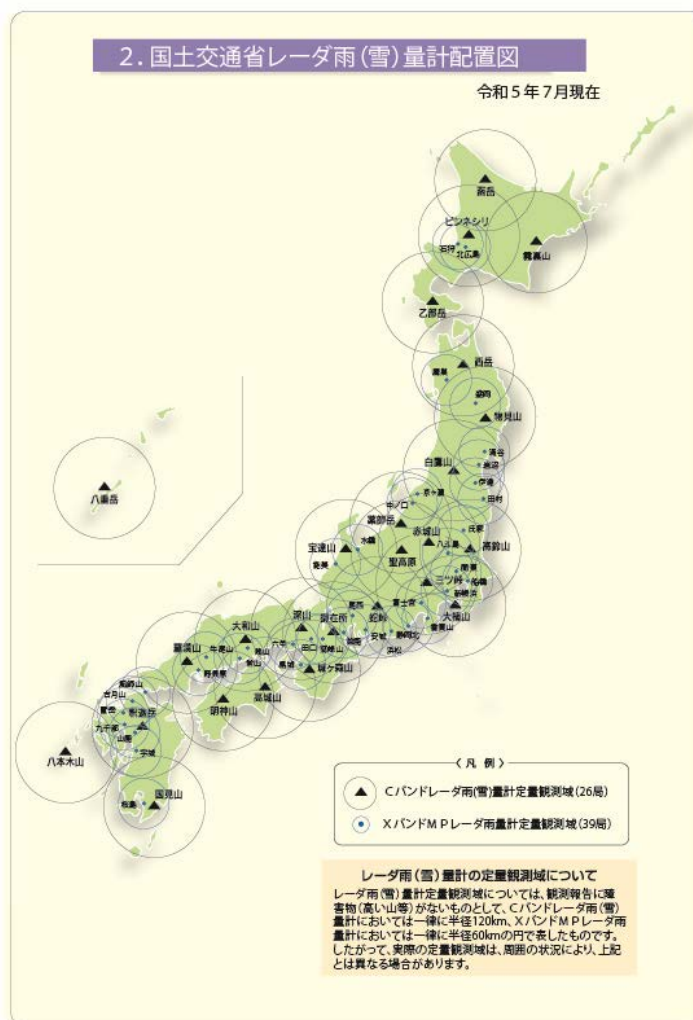


図-5 国土交通省のレーダ雨量計配置図 (出典 国土交通省、https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000040.html)

後述する実験においては観測雨量として XRAIN を使用し、道路冠水予測実験システムには予測雨量として 1km10 分間隔の降水ノウキャストを用いた。

2.4 冠水センサによる取得データと雨量の重ね合わせ

冠水センサによって取得できる水位の情報と雨量観測データを時刻順に並べたものを図-6 に示す。雨量観測データは一定の時間毎に取得できるためハイエトグラフとなっているが、冠水センサのデータではハイドログラフを作成することはできない。

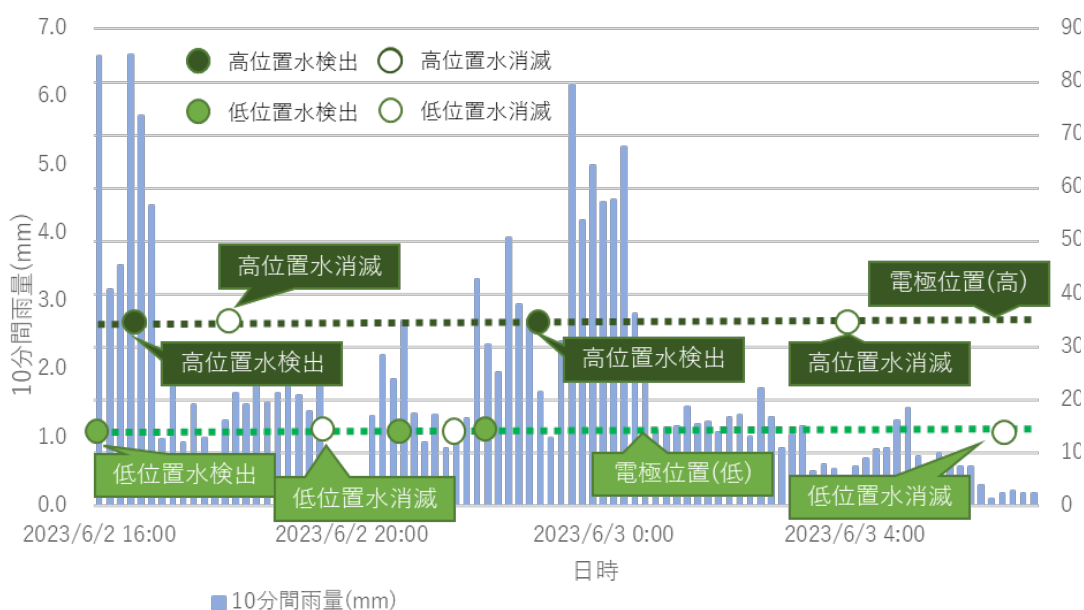


図-6 雨量と冠水センサの情報の重ね合わせの例（さいたま市内村国 710 番地）

3. 水位予測手法の提案

3.1 冠水センサによる予測のための仮定

一定の時間毎の雨量と水位が得られるならば、機械学習によって水位予測を行える場合がある⁸⁾。しかしながら、図-6 に例示したように冠水センサによって得られるデータは極めて限定されているため、水位と雨量とを同じ時刻で対応させることができない。この制約に対応するため、本研究では予測対象の道路冠水地点の雨量と水位の関係に以下の仮定を設けた。

(1) 降雨と予測地点に流入する雨水における仮定

道路冠水の水位予測の対象とする地点（以下、「予測地点」という）に流入する雨水（有効雨量）は、周辺に降った雨水のうちの一部であり、その割合は予測地点毎に決定される時不変な値または関数であるとした。

降雨が観測時刻から予測地点へ到達するまでの時間は予測地点毎に決定される時不変な値又は関数であるとする。これを到達時間 t_d と呼ぶこととする。

(2) 流入する雨水による水位の上昇における仮定

水位を上昇させる要因は流入する雨水のみであるとし、そして、予測地点に流入した雨水は、その量を入力値とする関数の出力に応じて水位を上昇させようとするとした。この関数も予測地点毎に決定される時不変なものであるとする。経験から不合理と思えない簡便な関数として正比例（水位が雨量に比例して上昇する）を挙げることができる。

(3) 降雨を水位の上昇に換算する係数

以上をまとめた、予測地点の周囲の降雨（量）を（有効雨量を介して）水位上昇に換算するための係数または関数を「上昇係数」 A と呼ぶこととする。これは、予測地点毎に決定される時不変な値または関数となる。

(4) 排水による水位の低下の仮定

予測地点の水位の低下は自然の排水（重力式や浸透）によってのみなされ、時間当たりの水位低下量は予測地点毎に決定される時不変な値または関数であるとした。時間を水位低下量に換算する係数を「下降係数」 B と呼ぶこととする。

3.2 予測式

以上をまとめると、排出による水位低下量を超えて流入した雨水は予測地点の水位を上昇させることになり、排出量が流入量を上回ると水位は下降する。そして、時刻 i と時刻 j の間の水位差は到達時間 t_d 前の時刻 i から時刻 j までの総降雨量と、時刻 i と時刻 j の間の排水による水位低下によるものと考えることとなる。これにより、時刻 i における水位 L_i が時刻 j における水位 L_j に変化したときの水位差と降雨量と経過時間の関係は、(1)式で表される。

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

ここで、

i, j : 時刻 ($i < j$)

L_i, L_j : 時刻 i, j における水位

A : 上昇係数 (降雨による. $A \geq 0$)

B : 下降係数 (排水による. $B \leq 0$)

R_{sum} : 時刻 $i - td$ から $j - td$ 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 : 到達時間 (降雨から予測地点への)

$R(t)$: 時刻 t における降雨量

式(1)において A と B とを固定した係数とすると、降雨量 R_{sum} 、時間差 $(j - i)$ を説明変数とし、水位差 $L_j - L_i$ を目的変数とする重回帰式と見なすことができ、各時刻の降雨量と時間差から水位差を予測できる。

到達時間 td を決めるには、既知のデータを用いて複数の到達時間で予測を行い、最も優れたものを採用するという方法のほか、重回帰分析を用いる場合は複数の td による教師データのそれぞれの決定係数を比較して最も優れた td を選ぶといった方法が考えられる。後者の方法は決定係数が 1 に近いほど回帰式がデータによく適合することを表しているためである。

3.3 予測手法

前節では式(1)の上昇係数と下降係数を予測地点毎に固定した値とすることで、重回帰分析が適用できることを述べた。より複雑な表現を可能とするために固定された上昇係数と下降係数に代えて、カーネル関数を用い、同時にオーバーフィッティングを抑制するための正則化項を加えたカーネルリッジ回帰とすることができる。そのほか、上昇係数、下降係数が水位により変化すると考えて、これらを固定せずに水位の関数とすることも考えられる。しかし、本研究では次の理由から上昇係数と下降係数を固定した重回帰分析を採用する。

(a) 説明性と係数の解釈の可能性

本研究は、降雨と水検知から道路冠水水位の予測の可能性を検討している段階であり、精度の向上よりモデルの妥当性を判断できることを優先すべきであると考えた。

上昇係数は降雨の水位上昇への影響度を表しており、下降係数は時間当たりの排水による水位低下を表している。重回帰分析では、これらを固定した値で直接確認できるため、係数の妥当性、他の予測地点との比較、教師データによる係数の変化を読み取ることができる。なお、無降雨時の水位低下から、下降係数のみの妥当性

を検証することもできる。

(b) 重回帰分析の線形性による頑健さ

冠水センサは通行規制の判断に用いられることと、高くまで水位が到達する頻度が少ないことから、設置される水検出部の高さは 30cm 以下が多いと想定している。しかし、大量の降雨によって水位が予想を超えた高さに到達する場合もある。その際、重回帰分析では線形性によって、未知の高さに対しても大きく破綻することのない頑健な予測が期待できる。

(c) 教師データ数の少なさ

連続式水位計では一定の時刻毎に水位データが得られるが、冠水センサでは 1 回の水位上昇と下降で得られる教師データの数はいくつか少ない。このため、実用的な精度を得るために大量のデータを一般的に必要とするアルゴリズム（例えば、ニューラルネットワーク）を使用するにはデータ数の少なさを補う必要がある。重回帰分析ではより少ないデータでも実用的な予測を行える可能性がある。

4. 道路冠水の水位予測実験

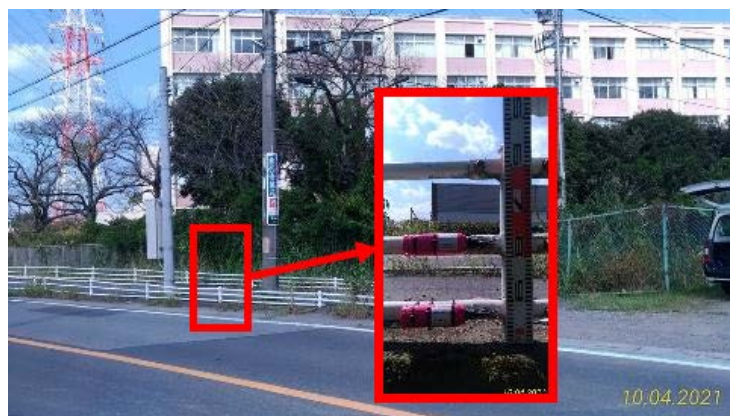
4.1 実験の概要

さいたま市では道路の冠水状況を把握するための水位計が低地に 5 か所、アンダーパスの 17 か所に設置されている。このうちの 9 か所に 2021 年 10 月から許可を得て冠水センサを設置した。同時に、XRAIN によって各地点の降雨を収集し、それらのデータを実験に使用した。ただし、冠水センサの設置は、無線通信の信頼度の評価、水検知の正確さも目的としており、同一地点に複数の高さの水検出部を設置していない箇所もある。

予測実験では、道路冠水が平地部（アンダーパス部ではない）で、同一地点に複数の高さの水検出部を設置した、北稜高校前（さいたま市岩槻区慈恩寺 117-2）、村国 710 番地（さいたま市岩槻区村国 710-1）のデータを用いた。実験場所のうち、北稜高校の地図と設置状況を図-7 に、村国 710 番地の地図と設置状況を図-8 に示す。



位置図



センサ設置状況

図-7 実験場所 北稜高校前



位置図



センサ設置状況

図-8 実験場所 村国 710 番地

4.2 実験に用いた雨量データ

実験では予測降雨より正確な観測降雨データを使用した。予測の精度に影響を与える要因を少なくして、予測モデルそのものを評価しやすくするためである。実験では XRAIN の 250m メッシュ、1分周期、降雨強度 0.1mm/h を入手した。ただし、実用化の際に降雨予測を使用する場合に、250m メッシュで 1 分周期のデータを使用できない場合を想定して、10 分毎の 3 次メッシュ (約 1km) に変換して実験データとした。毎分から 10 分への変換は、毎 10 分毎の 0 分から 9 分までの平均を次の 10 分の値とした (例えば、5 時 10 分から 5 時 19 分までの平均が 5 時 20 分の時刻のデータ)。実験では予測地点を含む 1 つの 3 次メッシュの降雨データを用いた。

4.3 実験に用いた水位データ

実験に用いた水位データは、現地に設置した冠水センサと「さいたま市水位情報システム」¹⁶⁾から取得した。さいたま市水位情報システムの表示画面例を図-9 に示す。さいたま市水位情報システムからは毎分の水位を 0.01m の解像度で得ることができる。冠水センサは送信された検知器の識別コードから予め計測した水検出部の地表からの高さを水位として得ることができ、これと送信された時刻 (観測時刻) を合わせて記録してデータとした。ただし、観測時刻について、使用した冠水センサは水位が継続的に変化したことを判定するための処理時間を 2 分間必要とするため、検知時刻としてその処理にかかる時間を補正した。

4.4 偏回帰係数の算出

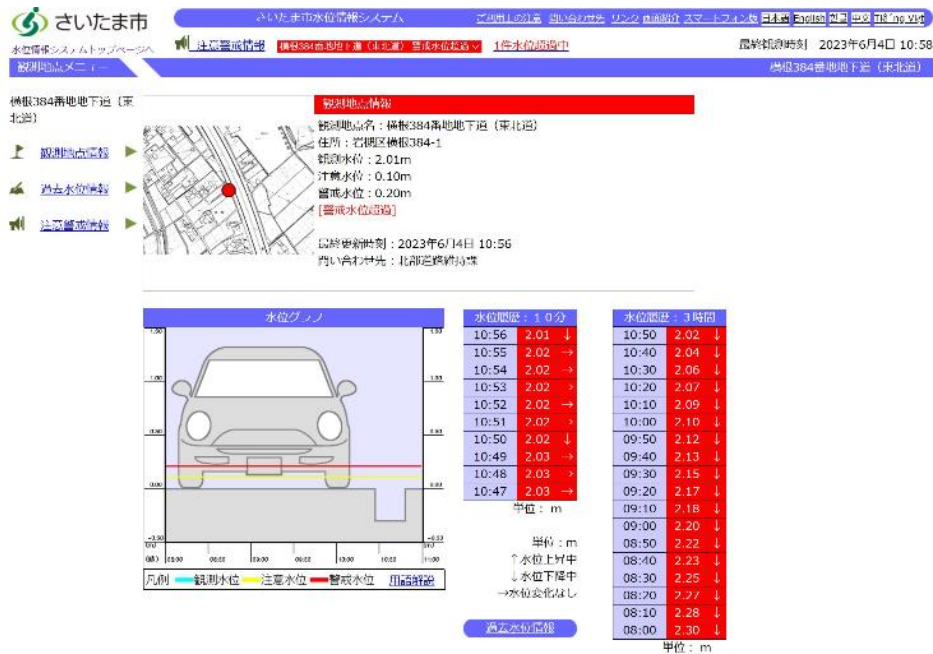
予測式 (重回帰式) の偏回帰の算出には水位計から取得したデータのうち、冠水センサを地表から 3 cm、20 cm、25 cm に設置したときに 2021 年 4 月 1 日から 2023 年 5 月 30 日までの間で取得できたと想定される水変化の検出時刻を使用した。冠水センサを設置した期間を長くし、あるいは、水検出部の個数を増やせば冠水センサのみで偏回帰係数を算出できるが、短期間で偏回帰係数を準備できるようにすることは今後の課題の一つである。雨量は上記期間の XRAIN 観測値から算出し、これと水位の検出時刻を合わせ、到達時間を -10 分から +40 分まで 10 分刻みに変えたデータを作成して、それぞれから決定係数を算出し、最も優れていた到達時間と偏回帰係数を採用した。

4.5 予測水位の算出と評価

前節で得た偏回帰係数を式(1)に代入し、2023 年 6 月 2 日から 3 日にかけての台風 2 号の雨量と冠水センサから得られた水位情報に適用して予測水位を算出した。冠水センサからの情報によって予測した結果をさいたま市水位情報システムによって評価するとともに現地において状況を確認した。図-10 に現地の状況の例を示す。



トップ画面



地点選択後の水位表示画面
図-9 さいたま市水位情報システム



図-10 冠水時の状況（北稜高校前）

5. 実験結果

実験によって得られた予測結果のうち北稜高校前のものを図-11 に示した(村国 710 番地の予測結果、偏回帰係数、並びに、比較の考察については、投稿中の論文の新規性を確保するため掲載を割愛した)。図-11 において、黒線はさいたま市水位情報システムによる観測水位であり、赤線は地点の予測水位である。地点予測水位は複数の高さの冠水センサ(水検出部)のうち、最も新しい時刻に検知した情報による予測を繋ぎ合わせたものである。このため、最初は低位置の電極による予測が地点予測水位となり、次に中位置での検知による予測が地点水位となり、その次に高い位置による水の検知による予測が地点の予測水位となっている。水位低下時にはその逆に高位置、中位置、低位置の順の水検知器の情報が使用されて地点の予測水位となっている。一つの検出部による予測水位を観察できるように、最初から最後まで予測が得られる最も低い位置の電極による予測水位を併記した。

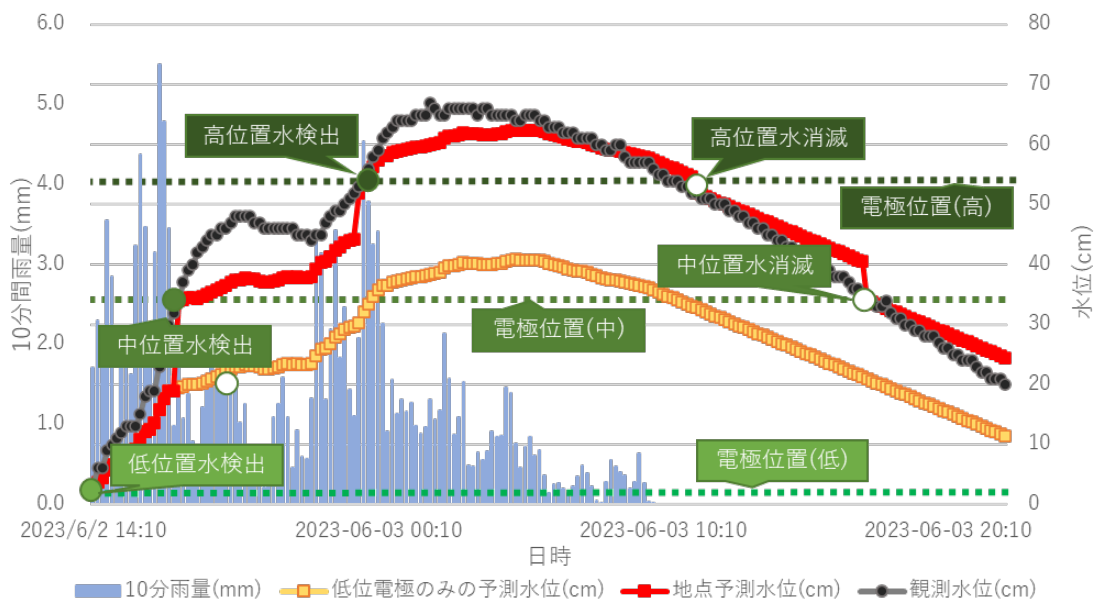


図-11 北稜高校前の道路冠水水位

6. 道路冠水予測表示システム

道路冠水の水位予測の利用をイメージできるように、予測結果を文字とアイコンに要約して地理情報システム上に示し、必要に応じて時系列グラフで雨量と水位を表示するシステム（道路冠水予測表示システム）を開発した。予測時のシステムのデータの流れを図-12に示す。2023年6月2日から3日にかけての台風2号時の表示画面の例を図-13に示す。

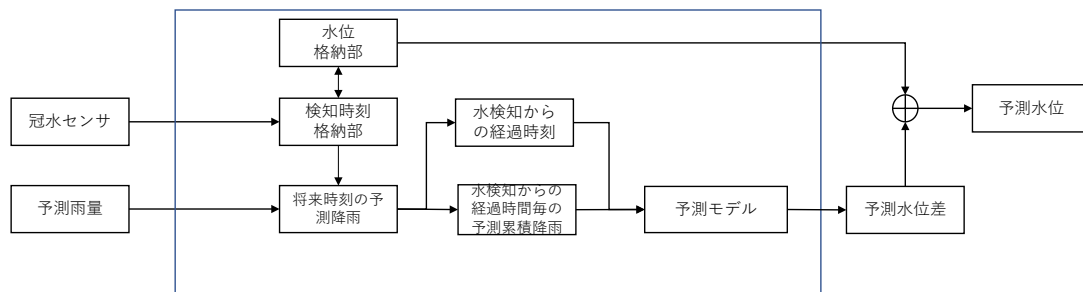
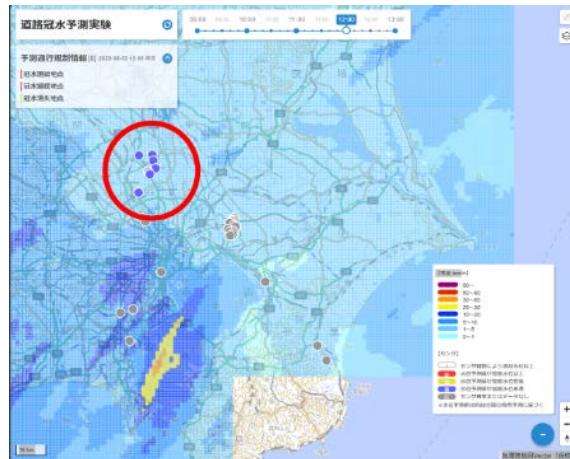
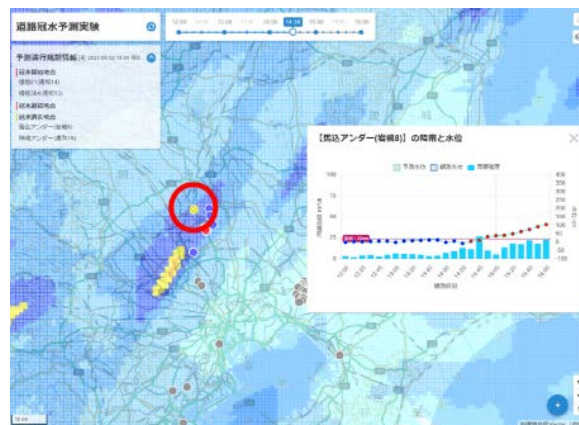


図-12 システムにおける予測時のデータの流れ

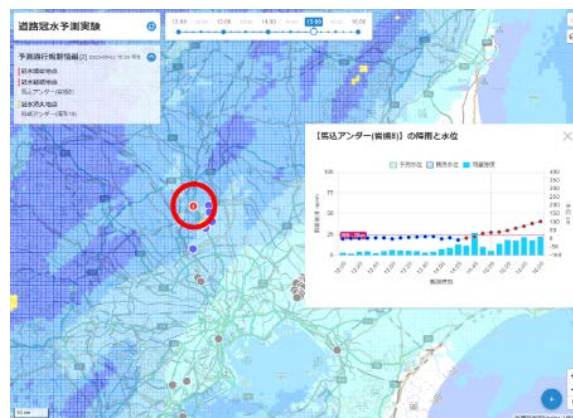


2023-06-02 12:00



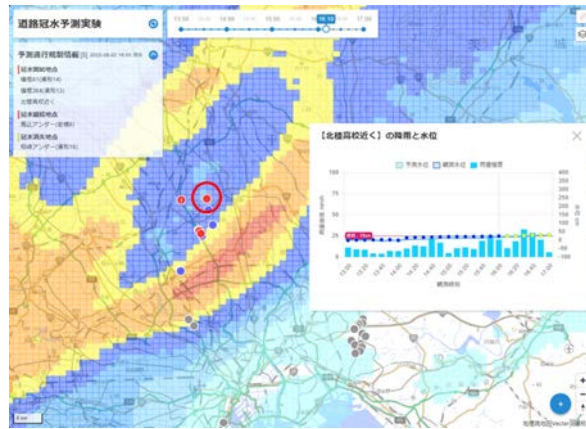
2023-06-02 14:30

馬込アンダー地点で低位置センサが発報、冠水を予測している



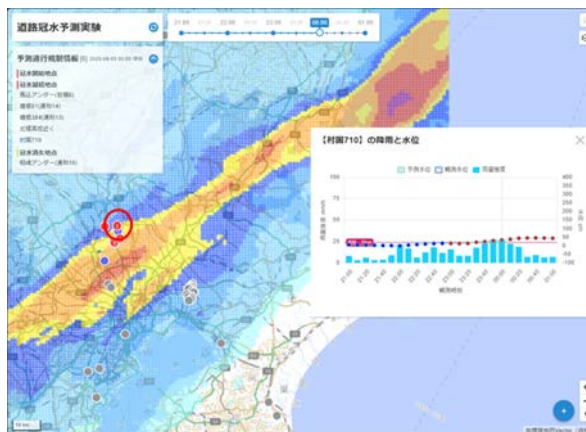
2023-06-02 15:00

馬込アンダー地点で予測のとおり規制値以上のセンサが発報し、冠水を観測した



2023年6月2日 16:10

20mm/h、30mm/h以上の降雨により、冠水が予測される地点が増加し、北穂高校前も規制値以上を予測。



2023年6月3日 0:00

深夜0時において、20mm/h前後の降雨により、冠水を予測した地点で冠水の確認地点が増加。

図-13 道路冠水予測実験の表示画面の例

道路冠水予測表示システムの背景地図には地理院ベクトルタイルを用い、表示方法を制御できる利点を活かして、ユーザが道路種別毎の表示方法を変えられ、また、複数の道路が上下に位置している場合や、立体的に交差している場合に対象の道路を識別できるよう、予測対象の道路区間を強調できるものとした。例えば、高速自動車道の側道やアンダーパスなど、上下に高さの異なる道路が整備されていることがあり、しかも、高低差がある道路では

下側の道路に冠水が発生する可能性が高く、平面的な地図では識別が難しいからである。同一の場所に高低差のあるリンクに対応しなければならないことは河川を対象とする防災情報システムでは見られない特徴である。

社会実装のための実用上の知見を得るため、このシステムの画面を提示して、道路管理者から道路冠水の予測に関する意見を聴取した。道路冠水による通行規制の大成や予測に必要な精度などである。これまでに得られた意見は以下のとおりである。

- ・ 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有用である。
- ・ 道路冠水の水位の上昇・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、長年の勤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。

7. 考察

図-11において、提案手法による予測は水位変化の上昇、下降における概要において観測水位と類似した傾向を示している。しかし、水位値の正確さには課題がある。ただし、通行規制の開始と解除においては、その準備の時間や手間を考えると、基準を数分間上回ったとしても直ちに規制すること、数分間下回ったから直ちに解除することは現実的ではなく、ある程度の水位の継続時間の判断が必要であり、道路管理者からの意見も踏まえて、そのような判断には利用できる可能性があると考えられる。このような用途によって求められる精度を整理することは今後の課題である。

8. おわりに

道路冠水の水位を予測するため、連続式水位計に比べて安価で設置が容易な冠水センサと雨量を用いた平易な予測手法を提案した。実験により、提案した手法によって水位変化の概要を予測できる場所があることが確かめられた。実験は比較的小さなエリアで繰り返し内水氾濫が生ずる道路で行ったが、市街地、施設（避難施設、要援護者施設、地下施設等）の周辺、ため池でも適用できる可能性が考えられる。また、リアルタイムの利用以外に偏回帰係数を分析することで排水施設や水害対応施設の整備計画、その効果測定に利用することも期待できる。

しかし、外水氾濫、高潮、人工的な排水施設の有る場所のように降雨以外の要因で急激な水位変動が生ずるものに対しては適切な予測を行うことはできない。実用化のためにより多くのデータを収集して解析を行い、適用範囲を明らかにし、精度の向上を図ること、短時間で急激に水位が上昇する地点への取り組み、実用化のためにより多くの道路管理者の意見を収集することが今後の課題である。

謝辞：本研究にあたり（一般財団法人）日本建設情報総合センターの助成を受けたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 杉本 賢二, 谷 眞太郎, 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) 高橋 俊彦, 平山 康典, 天野 玲子, 武田 誠, 松尾 直規, 浸水実績・降雨記録を用いた機械学習に基づく簡易浸水予測システム, 土木学会論文集 B1 (水工学), 67 巻, 4 号, p. I_937-I_942, 2011.
- 3) 佐藤 李菜, 小口 高: 道路ネットワークデータと機械学習を用いた内水氾濫による浸水リスク評価の可能性, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 71 巻, 1 号, p. 25-31, 2015.
- 4) 関根 正人, 児玉 香織: 東京都 23 区を対象とした豪雨時浸水リスク評価とアンダーパスの冠水事前予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), 74 巻, 4 号, p. I_1543-I_1548, 2018.
- 5) 井上 卓也, 中谷 剛, 矢部 浩規, リアルタイムの浸水予測を考慮した経路検索の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2018, 74 巻, 4 号, p. I_1291-I_1296.
- 6) 木村 誠, 城戸 由能, 中北 英一, 都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2011, 67 巻, 4 号, p. I_931-I_936.
- 7) 椿 涼太, 小林 健一郎, 内藤 正彦, 谷口 丞: 洪水予測技術の現状と課題について, 河川技術論文集, 19 巻, pp. 1-6, 2013.
- 8) 小林 亘: 道路冠水深の予測への重回帰分析とニューラルネットワークの適用, AI・データサイエンス論文集, 3 巻, J2 号, pp. 661-667, 2022.
- 9) 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>, (入手 2023-06-12) .
- 10) 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>, pp.2-2,2019, (入手 2023-06-12) .

- 11) 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.
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局: ワンコイン浸水センサ実証実験, <<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/wankoinsensa/index.html>>, 2023-05-31 新着, (入手 2023-06-11).
- 13) Wataru Kobayashi: Reliability Assessment in Wireless Apparatus using LoRa and Sigfox in Catch Basin, , Journal of Disaster Research, 2021, 16 巻, 3 号, pp. 363-370, 2021.
- 14) 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) .
- 15) 気象庁: 高解像度降水ナウキャスト, < https://www.jma.go.jp/jma/kishou/nowcast/kurashi/highres_nowcast.html>, (入手 2022.5) .
- 16) 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>>, (入手 2023.8) .