

## (35) 冠水把握システムと雨量計による 道路冠水の発生予測に関する基礎的研究

小林 亘<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 正会員 東京電機大学教授 総合研究所 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番地)  
E-mail: wkoba@mail.dendai.ac.jp

道路路面の冠水を把握するために水位計、浸水センサが設置されている場所がある。これらを利用して冠水を予測できれば、道路利用者は合理的な経路の選択に、道路管理者は効率的な道路の管理に役立てることができる。本稿では、さいたま市に設置された道路の水位計と国土交通省のレーダ雨量計から得た観測データを説明変数とし、道路の水位を目的変数とする重回帰分析を行い、予測に影響を与える観測時刻と係数を考察し、予測モデルを作成した。この予測モデルを3年間の観測データに適用して、水位計、浸水センサによる冠水把握システムで冠水を予測する効果を確かめた。

**Key Words:** road flooding, water level forecast, rainfall radar, multiple regression analysis

### 1. はじめに

気候変動や都市化によって、道路路面の冠水（以下、「冠水」と言う。）の増加が懸念される。冠水は、自動車の事故や水没、車内での溺死、通行規制による道路交通の混乱の原因となるため、冠水の恐れのある場所では標識や冠水深を視認するための路面等への標示を設けて注意を喚起しているところや、冠水の発生時には冠水区間への自動車等の進入を防ぐ設備を導入しているところがある。しかし、冠水区間の直前では、経路の変更や引き返すこと（Uターン）が難しい場合がある。このため、冠水区間を回避できるように、道路の水位を定期的に計測して伝送し、冠水の発生を把握する仕組み（以下、「水位計システム」と言う。）を導入しているところがある<sup>1</sup>。ただし、水位計システムが行う定期的なデータ伝送には、商用電源の引き込み、あるいは、大型の太陽光発電と蓄電池といった設備が必要になり、その整備と運用のコストが導入の妨げとなることが考えられる。これに対して、定期的なデータ伝送を行わずに冠水の発生と解消の時だけ発報する仕組み（以下、「浸水センサ」と言う。）では、水位の計測を行わず水の検知に限ることによって消費電力を抑えて小型の電池でも数年の稼働が可能となるため、整備と運用のコストを低減できる<sup>2</sup>。これらの離れた場所で冠水を把握する仕組みを活用して、冠水の発生を予測できれば、道路利用者はより合理的な経路の選択が可能となる。また、道路管理者は、冠水発生

の連絡を受けてから、現地での確認、通行規制の実施、道路利用者への周知、関係機関への連絡などを行う必要があるが、冠水を予測できれば事前に要員を配置するなどの効率的な対応が可能となる。本研究は、冠水を把握する仕組み（冠水把握システム）と雨量計を利用して冠水の発生の予測を試みたものである。

冠水の危険性のある場所を推定するため、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<sup>3</sup>、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<sup>4</sup>がある。これらは個々の降雨に対する冠水の発生の推定は行わない。個々の降雨に対する冠水を予測する研究には、関根らによる道路や下水道のデータを網羅してモデルを構築したものがある<sup>5</sup>。精度の良いモデルの構築には、地盤高、土地の利用状況、下水道等に関する最新かつ正確なデータを必要とする。しかし、その入手は容易ではない。

本研究は、冠水を把握する仕組みを用いて、冠水の発生の予測を行うものであり、このような取り組みは見られない。本稿では水位計システムによって道路の水位の予測モデルを作成し、次に、この予測モデルを用いて水位計システムと浸水センサによる冠水の予測を試みた。

### 2. 定期的な水位と降水量を使用した予測モデル

本章では、水位計システムから定期的に送信された道

路の水位と雨量計による降水量を用いた、道路の水位の予測モデルの作成について述べる。なお、路面上の冠水深と路面下の水位を連続して表現するため、路面の高さをゼロ点としてプラス側の路面上の冠水深と、路面下の水位とを「水位」と同一の用語で扱う。

### (1) 水位データ

本研究では、さいたま市の水位情報システム<sup>1)</sup>から1時間ごとの水位データを入手した。対象とした水位計は、北稜高校前（さいたま市岩槻区慈恩寺 117-2）である。位置と近傍の標高を図-1に、写真を図-2に示す。

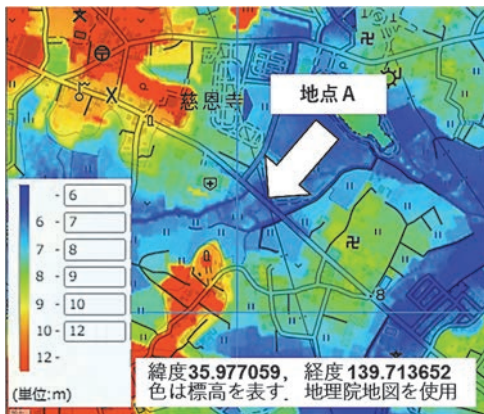


図-1 対象地点の位置



図-2 対象地点

### (2) 降水量データ

降水量データは国土交通省の X バンド MP レーダ (XRRAIN) を使用した。データの観測周期は1分、空間分解能は5次メッシュ (四分の一地域メッシュ)、観測値は降水強度 0.1[mm/h]である。水位の時間的な粒度に合わせるため、N-1 時ゼロ分から N 時マイナス 1 分の間の降水強度を合計して時間雨量[mm]に換算した値を N 時の降水量とした。

対象地点に流入し、対象地点の水位に影響を及ぼす降雨には、対象地点の5次メッシュの降雨のほか、周囲の降雨の可能性がある。3年間の対象地点の5次メッシュ (メッシュコードは 5339757711) と、周辺の8メッシュを加えた9メッシュの平均に対し、時間雨量1ミリ以上の降雨は 1435 時間あり、対象地点のメッシュと周囲を加えた平均との相関係数は 0.999941 であった。このように周辺と高い相関が見られたため、対象地点のメッシュの降雨で代表させても不都合はないと考えた。

### (3) 観測された水位と降水量データの重ね合わせの例

2019年の台風19号があった10月の対象地点の降水量と水位の状況を図-3に示す。気象庁が公表しているさいたままでの10月12日の降水量は、10時、15時、21時の3回のピーク (それぞれ 22.5 ミリ、36.0 ミリ、37.0 ミリ) であり、図-3も同様の傾向を示している。

### (4) 予測モデルの作成手法

前述の方法で入手した複数時刻の道路の水位と降水量を説明変数とし、未来時刻の予測水位を目的変数とする重回帰分析を行う。重回帰分析は基本的な多変量データ解析手法であり、訓練データの説明変数と目的変数の2乗誤差を最小とする係数を求め、未知のテストデータに適用して予測を行うものである。水位と降水量はそれぞれが一つの尺度 (高さと時間当たり降水量) で構成される。説明変数が独立していると考えられるならば、複数時刻の水位、複数時刻の降水量のそれぞれにおいて観測時刻の違いが予測水位に与える影響度の比較を、重回帰分析から得られる偏回帰係数によって行える。

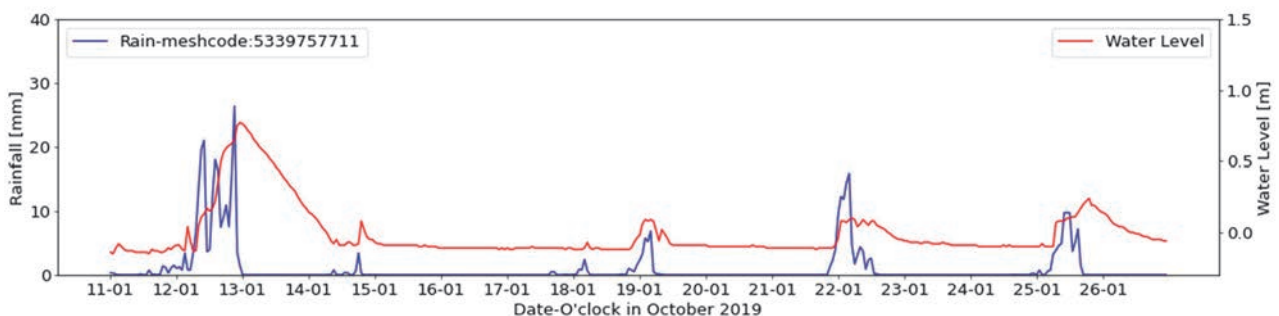


図-3 水位と降雨の重畳

## (5) 予測モデルの作成

重回帰分析に使用したデータと条件は以下のとおりである。

### a) 訓練データとテストデータ

全データの0.7をランダムに10回取り出して訓練データとし、残りをテストデータとする交差検証を行った。

### b) データの期間

2019年4月1日から2022年3月31日までの3年間

### c) 水位データの範囲

降雨の有無に関わらず-0.3メートルを超えて+0.4メートル以下の水位データを採用した。観測水位が-0.3メートル以下の場合には、実際の水位は水位計の計測下限値を下回っている可能性があると考えたため使用するデータに下限値を設けた。そして、主たる予測範囲を通行規制の基準に見られる0.15メートルとしたため、データ数の少ない0.4メートルを超えたデータを上限値の範囲外とした。各水位階級毎のデータ量を表-1に示す。

### d) 説明変数と目的変数

説明変数は、現在時刻までの6時間分の水位、現在時刻までの6時間分の降水量と予測時刻（現在時刻から1時間後）の降水量とした。目的変数は、1時間後の水位である。予測計算に用いた未来時刻の降水量（予想降水量）には、観測した降雨を使用した。

## (6) 計算結果

重回帰分析から得た各観測時刻の水位データ、降水量データに対する偏回帰係数を、水位については図-4に、降水量については図-5に示す。テストデータに対する予測値を図-6に示す。RMSE（Root Mean Square Error）は0.014であった。

## (7) 考察

図-4から、水位では最新の現在時刻のデータの影響度が高く、その偏回帰係数の平均は0.881であった。図-5から、降水量でも現在時刻の影響度が高く、その偏回帰係数の平均は0.010であり、現在時刻から1時間後までの予測降雨の影響度は低かった。切片（常数項）は0.007であった。これらから、最新（現在）時刻の水位をベースにして、現在時刻までの降水量による水位の上昇と切片が示した一定の水位の低下がモデル化されたと考えられる。予測モデルを式(1)に示す。

$$H_1 = 0.881 \times H_0 + 0.010 \times R_0 - 0.007 \quad (1)$$

$H_1$ : 現時刻から1時間後の水位

$H_0$ : 現時刻の水位

$R_0$ : 現時刻までの1時間の降水量

表-1 各水位階級のデータ数

下限値(超え)[m]	上限値(以下)[m]	データ数
-0.4	-0.3	10097
-0.3	-0.2	10570
-0.2	-0.1	4915
-0.1	0.0	503
0.0	0.1	146
0.1	0.2	20
0.2	0.3	3
0.3	0.4	5
0.4	0.5	5
0.5	0.6	10
0.6	0.7	3
0.7	0.8	3

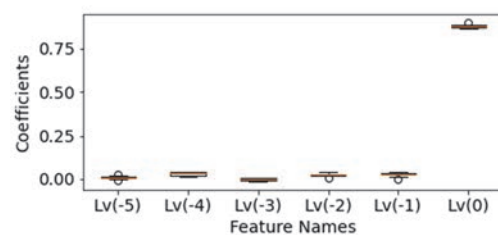


図-4 各時刻の水位データに対する偏回帰係数  
(Lvの右の数値は現在時刻をゼロとした相対時刻[hour])

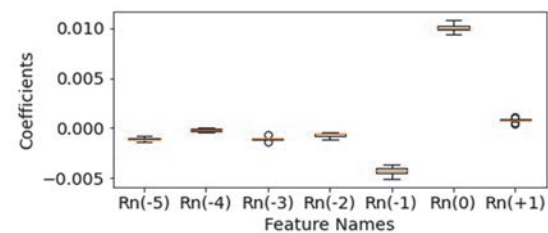


図-5 各時刻の降水量データに対する偏回帰係数  
(Rnの右の数値は現在時刻をゼロとした相対時刻[hour])

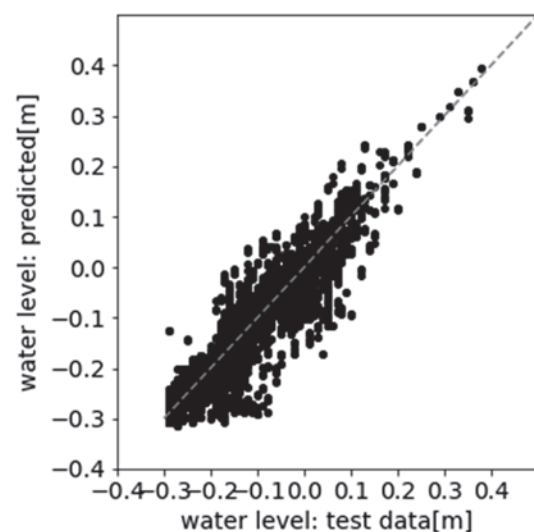


図-6 テストデータと予測値

### 3. 冠水把握システムへの適用による検証

前章で作成した予測モデルを冠水水位把握システムに適用し効果を検証する。通行規制の冠水深を 15 センチメートル（以下、「規制冠水深」と言う。）として、予測モデルの交差検証に使用した 3 年間の全データを使用して規制冠水深を上回る冠水の発生を予測した。後述するように規制冠水深未満から以上へと移行した回数が少なかったためテストデータを分離していない。

#### (1) 水位計システムへの適用

水位計システムからの水位と、降水量を式(1)の予測モデルに代入し、1 時間後の水位が規制冠水深未満から以上へ移行したものを冠水と判定する。

規制冠水深より低い水位であったものが 1 時間後に規制冠水深を上回ったもの（真値）は 4 回あり、この全てを正しく予測した（真陽性率は 1.0）。このほかに観測値が規制冠水深に達していないにも関わらず予測値が規制冠水深以上となった（偽陽性の）回数が 27 回あった。

#### (2) 浸水センサへの適用

浸水センサでは定期的に観測データが得られない。ここでは地表面に浸水センサの水検知水位をセットしたと仮定して、地表面で水を検知した時点を水位ゼロメートルとして、降水量データを加えて、式(2)の漸化式により水位を予測し、水位が規制冠水深を上回ったものを冠水（陽性）、上回らずに地表面未満となったものを陰性とする。真偽は、水位が地表面以上となった後、水位が地表面未満となるまでに規制冠水深以上となった場合を真、規制冠水深に至らない場合を偽とする。

$$H_{i+1} = 0.881 \times H_i + 0.010 \times R_i - 0.007 \quad (2)$$

$H_{i+1}$ : 時刻*i*から 1 時間後の水位

$H_i$ : 時刻*i*の水位

$R_i$ : 時刻*i*までの 1 時間の降水量

真は 3 回あり、その全てを陽性と予測した（真陽性率は 1.0）。ただし、規制冠水深を超えた時間は観測値と同じとは限らない。18 回の偽陽性があった。

#### (3) 考察

真陽性率が 1.0 であったこと、1435 時間の 1 ミリ以上の降雨に対して偽陽性が少ないことから予測精度を向上させれば実用の可能性がある。図-7 に浸水センサが検知した時刻から規制冠水深以上となるまで長時間を要したケースを示す。降水量を過大評価し、実際より早く規制冠水深以上と予測していた。また、地表面での水検知から時間が経過するごとに誤差が蓄積されている。より正確な予測には、モデルの改良、浸水センサを複数、異なる水位にセットすることが考えられる。

## 5 おわりに

本研究は、冠水把握システムと雨量計を用いて、道路の冠水の予測を試みた。予測モデルの精度を向上させることが課題である。また、対象地点には分単位で水を検出する装置を実験的に設置しており、それらを用いて、効率的な冠水の検出、予測の可能性について検証したい。

謝辞：本研究は一般財団法人河川情報センターの研究助成を受けたものです。

### 参考文献

- 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 2022.5）。
- 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, p. 36-47, 2019.
- 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.
- 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.
- 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.

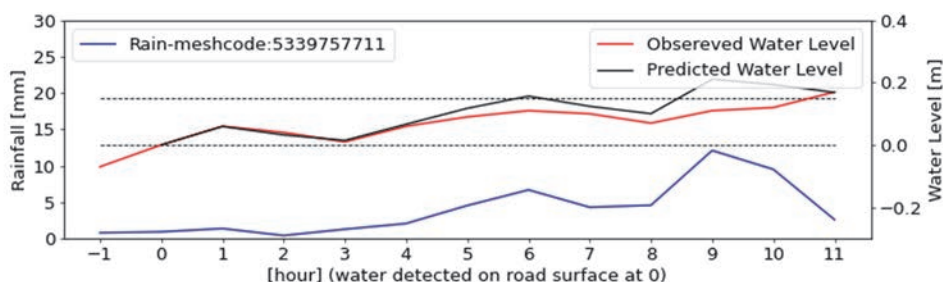


図-7 浸水センサへ予測モデルを適用した例