(59) 道路冠水による通行規制に対する水検知器と雨量計を用いた予測に関する基礎的研究

小林　亘[1]

[1]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

道路冠水による道路規制の開始時刻と終了時刻を予測することは，道路利用者が安全なルートを決定し，道路管理者が効率的に道路を運営するのに有用である．本稿では道路冠水の水位をリアルタイムに簡便に予測するために，使用するデータを雨量と限られたタイミングでの水位とに絞り，汎用的な機械学習を用いる手法を提案した．限られたタイミングでの水位とした理由は連続式水位計に依らず，低コストで設置できる水検知器の利用を可能とするためである．さいたま市内の実験対象地点において，2022 年までに取得したデータと提案手法で作成した予測モデルを用いて 2023 年 6 月の台風 2 号の道路冠水の水位を予測した．これにより，精度の向上に課題はあるものの，道路冠水による通行規制の予測の可能性を示した．

Key Words: *road flooding, water detector, radar rain gauge, multiple regression, road regulation*

1. はじめに

気候変動により，強度の高い降雨の頻度が増加し，以前よりも短時間でより多くの雨水が道路に流入す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加している地域では，その影響も加わる．流入する雨水を十分に排出しきれない道路区間では，道路が冠水し通行の規制を必要とすることになる．道路利用者，道路冠水が発生する区間の周辺の住民，道路管理者にとって，道路冠水による通行規制の発生と解除の予測は，生活と通行の安全と効率化に有用である．これを可能とすべく，この研究では道路の冠水の水位が上昇して通行の規制を必要とする時刻と，水位が低下して規制が解除できる時刻をリアルタイムに予測する手法を提案する．

(1) 水位の予測

河川の水位については多数の予測手法がある．椿らは洪水予測技術を，上流下流の水位の相関関係などに基づき評価地点の水位を直接予測する手法と，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[1]．しかし，道路においては定常的な上流下流といった水流はなく，また，流量から水位を換算する係数が準備されていないため，河川で使用している水位予測手法をそのまま利用することは難しい．リアルタイムでの予測ではないものの，関根らは東京都 23 区を対象として道路や下水道，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 の一様降雨を与えて道路冠水に関する数値計算を行った[2]．これによって，注目した地点では地上の浸水に下水道からの逆流が密接に関係していることを明らかとした．このように多くの種類の精緻な最新データを収集して数値計算を行うことは容易ではない．このため，全国に点在する道路冠水が懸念される地点で道路冠水を予測するためには，より簡便な手法の実用化が課題である．

(2) 水位の収集

河川では，連続式水位計によって一定時間毎に水位を取得する方法が一般的である[3]．動作のためには商用電源または太陽光発電と大容量の蓄電池などを要するため，電源を含めた工事の実施とある程度のスペースが必要となる．これに対して，検出する水位の値を限定できるならば，水位計に代わってある高さの水の有無に変化があったときだけ送信する装置を利用することができる．このような装置（ここでは「水検知器」と呼ぶ）ならば，乾電池で数年動作させることができる[4]．水検知器は連続式水位計に比べて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の可能性がある．例えば，国土交通省では水検知器を流域内などに導入するためのワンコイン浸水センサ実証実験を行っている[5]．

(3) 研究の目標と本論文の目的

本研究は，全国に点在する道路冠水が懸念される地点においてリアルタイムで通行規制の必要性を予測することを目標とする．流出解析をベースとする水位の予測計算では多くのデータと専用のプログラムが必要であることに対して，本論文では，データを大幅に省略して降雨量と時間を説明変数とし，現在と将来の水位の差を目的変数とし，これを一般的な機械学習アルゴリズムで実施する．加えて，水位の収集において，連続式水位計に依らず，水検知器と呼ぶ簡易な水位収集装置によって不定期に収集される限られた水位によって予測を行う手法を提案する．そして，収集した実測値を使って本提案手法に基づいて水位を予測し，これを評価する．

2. 実験データ

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 年から許可を得て水検知器を設置し，水位計と水検知器による水位を収集した．同時に，国土交通省のレーダー雨量計である 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．対象地点のうち，道路冠水が複数回観測された北稜高校前（さいたま市岩槻区慈恩寺 117-2）で収集したデータを用いて実験を行った．実験地点並びに実験地点への水検知器の設置状況を**図-1** に示す．

(1) 雨量

XRAIN は毎分 4 分の 1 メッシュ（約 250m）毎に 0.1mm/h の単位で雨量強度を提供している．本実験では過去のデータを用いて予測を行うため，この降雨強度の観測値を予測値として用いている．実際の降雨予測は高解像度降水ナウキャストを始めとしたものがあるが，10 分毎の 3 次メッシュ（約 1km）のものであれば比較的安価に入手が見込めるため，実際の降雨予測に基づく実験を見越して，10 分毎の 3 次メッシュに変換したものを実験に用いた．毎分から 10 分への変換は，毎 10 分毎の 1 分から 10 分のデータを平均したものを 10 分の値とした（当該 10 分を含む，それ以前の 10 分間の降雨強度の平均値）．

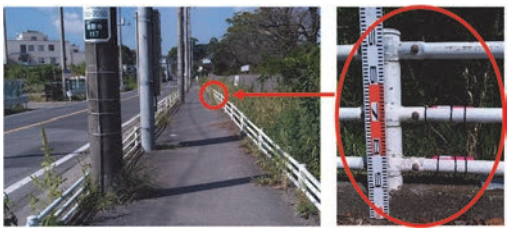


図-1 北稜高校前の水検知器の設置状況（3 個中の上 2 個）

(2) 水位

前述した水検知器は，設置された高さで水が観測されたとき，観測されていた水が無くなった時にリアルタイムで信号を発する．これらの水の検知，水の消失と時刻を記録し実験に用いた．さいたま市では前述の水位計の観測時刻と観測値を「さいたま市水位情報システム」として公開しており，併せて実験に用いた．実験では，降雨に合わせるためと水位の平滑化のために毎 10 分に観測値を変換した．

(3) 道路冠水事象の定義

雨水によって路面が濡れている状況と道路冠水とを区別するため，水検知器の高さを 0.03m とし，水位がこの高さ以上であるものを道路冠水事象とし，1 つの道路冠水事象は，水位が 0.03m 以上に達してから 0.03m 以下になるまでの時間とした．ただし，0.03m を下回り，2 時間以内に再び 0.03m 以上に上昇した場合は連続する 1 つの道路冠水事象とした．

(4) 通行規制水位の定義

通行規制の水位は，道路管理者によって異なる場合があるが，少なからずの道路管理者が目安として使用している 0.2m とした．

(5) データセット

以上の考えに基づいて 2019 年 4 月 1 日から 2022 年 12 月 31 日までの 3 年 9 か月間の雨量と水位を収集し，これを使用して予測モデルを作成し，2023 年 6 月 2 日から 3 日にかけての台風 2 号の雨量と水位に適用した．

3. 予測手法

本検討では，以下の水位予測モデルを想定した．

道路冠水による通行規制の予測の対象とする地点（以下，「予測対象地点」という）の周辺に降った雨水のうち，予測対象地点に到達するものは，一部であり，到達した割合を有効雨量係数 A で表すこととする．A は場所によって異なり（場所の関数），土地の利用状況の違いなどによる浸透の違いなどによるが，ここでは単純化のために一定とする．また，降雨の時刻から予測対象地点

への到達までに要する時間（以下，「遅延時間」と呼び，*td* で表す）も，降雨の場所によって異なり，一般的に，予測対象地点に近い場所，流速の早い地形や地表では短時間で到達する．予測対象地点の周囲の状況も様々であるため，*td* も場所の関数になるが，ここでは単純化のために一定とする．予測対象地点の周囲の降雨のうち，流入する雨水をその中央値についてのみ考えることとすると，時刻 *t* の降雨量を *R(t)* としたとき，時刻 t1 に予測対象地点に流入する雨量は，*A*×*R*(t1-td)となる．一方，予測対象地点に流入した雨水が排出される量は，単純のため時間当たり一定量と仮定する．このとき，排出量を超えて流入した分は予測対象地点に溜まり，水位を上昇させ，排出量が流入量を上回ると水位は下降する．予測対象地点の水量と水位の比率は，単純化のために一定であると仮定する．

以上の単純化した仮定のもとで，時刻 *i* における水位 *Li* が時刻 *j* における水位 *Lj* に変化したときの関係は(1)式で表すことができる．

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

ここで，*Li*: 時刻 *i* における水位

Lj: 時刻 *j* における水位（$j > i$）

A: 対象地点に到達する R_{sum} の割合

R_{sum} : $\int_{(i-td)}^{(j-td)} R(t)dt$　（*Lj* − *Li* の変化に関係する遅延時間 *td* 前の降雨量)

B: 単位時間当りの排水により低下する水位

式(1)を，降雨量 R_{sum}，時間差$(j - i)$を説明変数とし，水位差（*Li* −*Lj*）を目的変数とする重回帰式と見なせば，水位 *Li* を降雨量と時間差から予測できることになる．

ここで，遅延時間 *td* を決める必要がある．実験では，複数の td を仮定した R_{sum} の説明変数のデータセットを作り，それぞれに重回帰分析を行って決定係数（式 (2)）を算出し比較した．決定係数が 1 に近いほど，回帰式がデータによく適合し，使用された変数が効果的であることから，そのときの td による係数を予測に用いた．

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \qquad (2)$$

ここで，y_i: 観測値

$\hat{y}_i$: 予測値

$\bar{y}$: 観測値の平均

4. 実験結果と考察

重回帰分析の偏回帰係数の決定には，2019 年 4 月 1 日から 2022 年 12 月 31 日までの水位計データを用いて，地表からの水位 0.03m，0.10m，0.20m，0.25m に水検知器があると仮定して，0 分から 50 分まで 10 分刻みで 6 種類の異なる遅延時間に対して，32 組の水位上昇と 32 組の水位下降の合計 64 組の説明変数を使用した．最も良い決定係数と偏回帰係数は以下のとおりである．

決定係数　0.77

偏回帰係数 *A*　0.452

偏回帰係数 *B*　-0.329

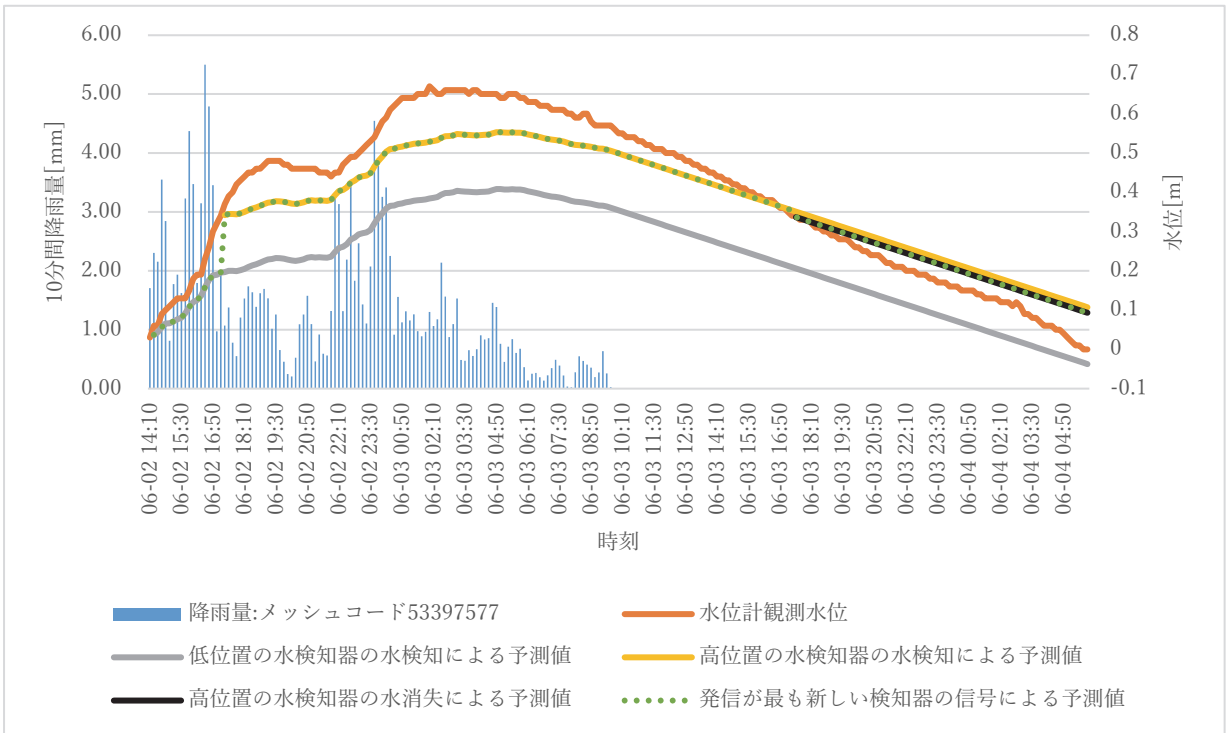


図-2　2023 年 6 月台風 2 号における北稜高校前の道路冠水水位

この値を用いて，0.03m（低位置）と 0.34m（高位置）に設置されている水検知器からの水の検知と水の消失の検知をもとに 2023 年 6 月の台風 2 号の道路冠水に対して予測を行った結果を図-2 に示す．

降雨から水位の傾向を捉えているが，以下の課題がある．観測水位に対して，予測水位のピーク水位が低いことは，算出した偏回帰係数 A が実際に比べて小さいと考えられる．そして，水位の低下速度が遅いことは偏回帰係数 B が小さいと考えられる．これにより，本実験で通行の規制の基準とした 0.2m に達した時刻は，観測では 6 月 2 日 16:30 であるが，低位置の水検知器の水検知を用いた予測では同 17 時 10 分と 40 分の遅れであり，解除である 0.2m を下回った時刻は，観測では 6 月 3 日 22 時 40 分であったが，高位置の水検知器の水消失を用いた予測では 6 月 4 日 0 時 50 分と 2 時間 10 分の遅れであった．水検知器の増加によるデータ数の増加，使用するデータの精査，アルゴリズムの改良等による精度の向上については今後の課題である．

5. 予測結果の利用

道路冠水による通行規制の発生時刻と解除時刻を予測することと並んで，予測結果を社会に実装することも課題である．予測結果の利用を可能とするため地理情報システム上に予測結果表示したシステムを作成した．道路を対象とする場合，複数の道路が立体的に交差すること，上下に高さの異なる道路が整備されていることがある．これ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．しかも，高低差がある道路では冠水が発生することも少なくない．このとき，どの道路が冠水しているのかを正しく示す必要がある．システムの背景地図には地理院ベクトルタイルを用い，ベクトルタイル方式であることによって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に表示方法を変えられることとした．加えて，水検知器を設置した点だけでなく，対象としている道路を強調することとした．また，ドライバの利用を考慮して，言語による情報伝達の機能も備えることとした道路冠水予測実験の表示画面の例を図-3 に示す．

6. おわりに

道路冠水による通行の規制と解除を予測するため，水検知器と雨量計を用いた水位予測手法を提案した．提案手法は，水位計に比べて安価で設置が容易な水検知器と雨量を使用するものである．精度の向上と，より多くの地点で提案手法の有効性と適用範囲を明らかにすること，短時間で急激に水位が上昇する地点での対応が今後の課題である．

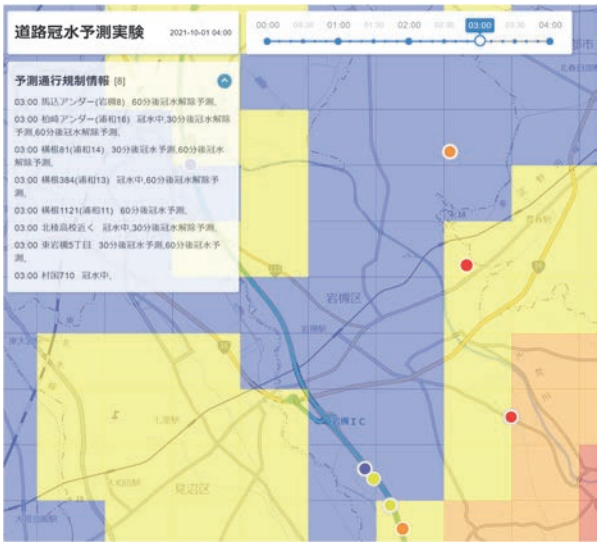


図-3　道路冠水予測実験の表示画面の例

謝辞：冠水のモニタリングに関して（一般財団法人）河川情報センターの，予測に関して（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．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) 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）.
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, p. 36-47, 2019.
5) 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).
6) 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）.