

データ同化による浸水位推定手法の提案と 都市型水害での精度検証

廣井 慧¹ 村上 大輔² 倉田 和巳³ 田代 喬³ 篠田 陽一⁴

概要：本論文では、浸水の上昇速度、拡大過程、危険水位に至るまでの時系列を実時間で把握するための、状態空間モデルを用いたデータ同化による浸水位推定手法を提案する。数値解析シミュレーションを用いて生成した浸水予測の基礎データについて、観測データとの因果関係を解析し、基礎データを補正することで、精緻な浸水の時空間解析を実現する。はじめに、数値解析シミュレーションを用いて様々な降水量のパターンでの浸水予測を行い、高分解能（5m-10m）の精緻な地理空間について、浸水深を表す状態空間の時系列データのデータセットを構築する。次に、各格子に対する氾濫水の流入量・流出量を、状態空間モデルの変数として、多変量解析を行う。愛知県津島市で発生した内水氾濫での観測データを利用し、提案手法の性能評価を行う。土木研究所の開発した氾濫解析シミュレーション NILIM を用いて、既往水害で観測された降水量、河川水位、氾濫時刻などから数値シミュレーションを行い、対象地区の 5-10m 格子ごとの浸水過程の時系列データを作成した。約 60cm の浸水が発生した愛知県津島市の水路 4 地点での観測データを用いて、本手法を適用したところ、観測地点での、数値解析シミュレーションでは 0 であった浸水位が状態空間モデルを用いた推定により実測値と比べ 10cm 以内の誤差となった。

A Proposal of Data Assimilation Approach for Flood Level Estimation and Evaluation with Urban Flood Disasters

KEI HIROI¹ DAISUKE MURAKAMI² KAZUMI KURATA³ TAKASHI TASHIRO³
YOICHI SHINODA⁴

1. はじめに

温暖化の影響により、地球規模での洪水のリスクが高まるのが懸念されている。IPCC の第 5 次評価報告書 [1] は、地球温暖化は徐々に進行していると述べており、それに伴って降雨の頻度と激しさが増加する可能性が指摘されている [2] [3]。日本においても、平成 30 年度西日本豪雨や平成 29 年北九州豪雨など多くの死傷者を出した水害が数多く発生している。近年、高精度な気象レーダや河川水位の予測技術が開発され、災害対応に活用されているものの、

被災地住民の避難行動には大きな課題が残っている。平成 30 年西日本豪雨では、岡山県倉敷市で大河川の洪水が発生し、事前に避難情報が発表されたにも関わらず、52 名の死者を出した。

大河川では、水位観測データに基づく予測技術の開発が古くから行われ、現在では精緻な洪水の事前検知が可能となった。一方で、豪雨のあまり排水能力が追いつかず水路などが溢れる現象である内水氾濫は、その被害量が小さいことから、大河川で行われるような水位観測はほとんど行われてこなかった。しかし近年の主な水害被害は、大河川の洪水を検知し避難する時点で、既に内水氾濫の発生により市街地の多くの道路が冠水して、避難困難な状況となり発生している。

内水氾濫の予測は、一般的に氾濫解析などの数値解析シミュレーションに基づいて行われる。氾濫解析は降水の流出係数、排水路の出水条件などのパラメータを一定と仮定

¹ 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 統計数理研究所
The Institute of Statistical Mathematics

³ 名古屋大学減災連携研究センター
Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

⁴ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

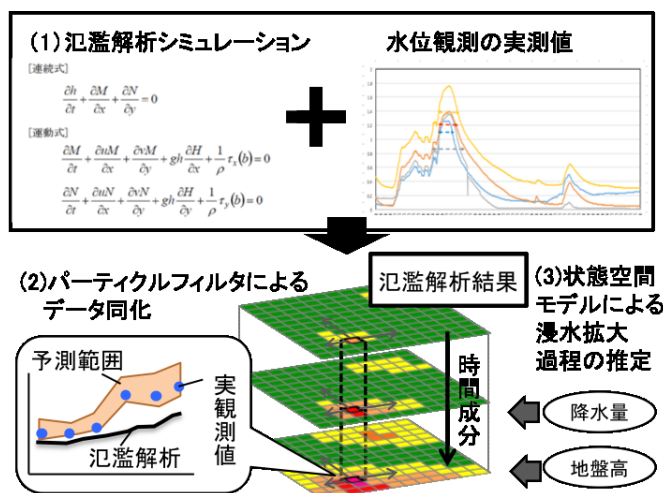


図 1: 提案する浸水推定手法

した理想モデルを利用している。例えば、[4]では、市内の洪水リスクは約2メートルの詳細な空間分解能で推定した。[5][6]は、理論的な水理工学モデルを用いて指数ベースの洪水リスクを推定する研究を実施した。しかし、これらの研究は最大冠水位は予測できるが、解析結果と実際の冠水位時系列は異なっており、氾濫発生を検知が難しい。

特に国内で発生する水害被害は、その9割以上が観測地点をもたない中小河川で発生しており、今後もこのような被害は継続的に全国各地で生じると考えられる。水害の被害軽減には、観測機器の設置がない地域においても道路の冠水状況把握を行い、大河川の洪水発生前に被災地住民に対し安全な避難経路を生成、提示することが最重要課題のひとつである。

本論文では、水位観測と物理モデルから導出した氾濫解析シミュレーションを統合し、水位観測の行われていない水路において内水氾濫とその浸水拡大過程を推定するためのデータ同化手法を提案する(図1)。はじめに、氾濫解析シミュレーションを用いて、連続方程式と運動方程式を計算することによって、高い時空間分解能(5または10分/メートル)で各グリッドの浸水値を算出する。次に、観測データを用いて、パーティクルフィルタで数値解析のシミュレーション結果をデータ同化によって補正する。さらに、氾濫流の空間方向への拡大過程を状態空間モデルを用いて推定する。ここでは、浸水の要因となる氾濫の流入量を、表面流、水路網、下水道網の3つの要素に分割して、それぞれの要素ごとに、状態空間モデルを用いる。本論文は、2017年に愛知県で発生した浸水に対し、4ヶ所で観測した氾濫の観測データを用いて、提案手法を適用し、その推定精度を調査する。

2. 関連研究

2.1 河川水位観測に基づく水害予測

河川観測による水位予測技術は古くから研究、実用化さ

れており、大規模な洪水の発生について高精度な予測を実現している[7],[8]。河川水位の予測によって、洪水発生タイミングやその洪水流出量、市街地への氾濫拡大過程の予測など、水害被害のより精緻な予測に役立てられてきた。また、近年では河川での継続的な観測により、水文学的手法を利用した洪水予測や[9]、ニューラルネットワーク[10],[11]による手法など、より高精度な洪水予測へと応用されている。しかし、河川水位観測は、その導入費用が高額であることや、大掛かりな設備が必要であることから、破堤や越水が懸念される一部の危険箇所の監視に止まっている。そのため、降水量や河川水位のモニタリングデータなど、空間的に高分解能なデータを得るための大量の観測機器設置は現実的ではない。

2.2 数値解析による氾濫拡大過程の推定

市街地の様々な地点で発生する内水氾濫を把握するための手段としていくつかの手法が試みられている。ひとつめは、地形解析などを利用して洪水リスクを分析し、あらかじめどの場所が危険であるかを把握する手法である。Sinnakaundanら[12]は、ArcView GIS拡張した効率的でインタラクティブな洪水リスク分析を行った。この事例では、水面プロファイルを分析することで、パリ川の関連洪水図を作成している。Lyu[13]は、2016年に広州で発生した洪水事象のデータを利用し、広州地下鉄システムのリスク分析を行い、いくつかの地下鉄駅の脆弱性を示している。

他の手法として、数値解析による氾濫シミュレーションを行い、内水氾濫を含む洪水に対して、リスク分析があげられる。Ernstら[4]は、詳細な2次元浸水モデリングと高解像度地形図を利用した、2メートルグリッドでのマイクロスケール洪水リスク分析手順を提案した。また、時間的リスク分析法(例えば、[15])は、水工学に基づく理論的アプローチで浸水地域の時系列変化を推定する手法である。しかし、流速や粗粒度などのパラメータが必須であるため、レーザー高度計データなどの詳細なデータ測定が必要となる。また、上記の手法はいずれも、時刻を一定と仮定した空間的な氾濫拡大範囲の分析、もしくはある地点における浸水の時間的变化に関する時系列解析のどちらかであり、時間的变化を鑑みつつ、空間的な氾濫拡大過程を精緻に予測することは難しい。

2.3 本論文で対象とする課題とアプローチ

安全な避難経路を知るためには、市街地の道路について状況把握が重要となる。現在の水害の状況把握は、氾濫解析などの数値解析シミュレーションと、低分解能な地上観測データ(降水量、河川水位)によるモニタリングの2つの手法に基づいて行われている。数値解析シミュレーションはあらかじめ、ある一定の降水量に対する市街地の氾濫流について微分方程式を用いて解析し、詳細空間(10m格

子など)における冠水位の最大値を算出する。算出結果をもとにして豪雨時の危険箇所が周知されているものの、解析には降水量やその流出係数、排水路の出水条件などのパラメータを一定と仮定した理想的なモデルを利用している。そのため、降水分布や土地利用の複雑な都市域では、解析結果と実際の冠水位が異なってしまう、警報や避難情報の発表前に道路の冠水が発生し、被害につながる。一方で、モニタリングは道路のアンダーパスや河川の破堤が懸念される特定箇所において、危険水位となる閾値を定め、観測データから氾濫の発生を検知する状況把握方法である。これは、実際の被害状況把握が容易であるが、観測地点が限られているという問題がある。

つまり、現在の状況把握手法では観測対象外地域の把握は困難であり、河川の洪水、土砂災害の避難が必要となる頃には、市街地に氾濫流が流れ込み避難行動を阻害する事例は少なくない。特に国内で発生する水害被害は、その9割以上が観測地点をもたない中小河川で発生しており、今後このような被害は継続的に全国各地で発生すると考えられる。そのため、都市型水害における被害軽減には、観測対象外地域においても道路の被害状況把握を行い、被災地住民に対し安全な避難経路を生成、提示することが最も重要な課題であると考えられる。本論文では、都市型水害において、限られた観測データしか入手できないなかで、安全な避難経路、タイミングを知るため、浸水の拡大過程を時間的、空間的に推定する手法を提案する。

3. 状態空間モデルを用いたデータ同化による浸水推定手法の提案

3.1 概要

本論文では、都市型水害の発生時に、安全な避難経路、タイミングを把握するための手段として、状態空間モデルを用いたデータ同化による浸水値推定手法を提案する。これは観測機器が設置されていない地域でも浸水値上昇の時系列変化を推定する手法である。

提案する浸水推定手法の手順を、図2に示す。はじめに、過去の豪雨事例の降水データをもとに氾濫解析シミュレーションを行い、10m格子空間における時系列変化データを作成する。次に、降雨量や河川水位などの観測データを利用して、最後に、観測地点での浸水位の時間変化をパーティクルフィルタを用いて逐次的に予測する。観測地点を中心にDEM、各格子の氾濫解析結果などのデータを変数としたパラメータ補正を行い、観測対象外地域への拡大過程を予測する。観測地点では、常に観測データをもとに予測結果が更新され、その予測結果にしたがって観測対象外地域の拡大過程も更新される。

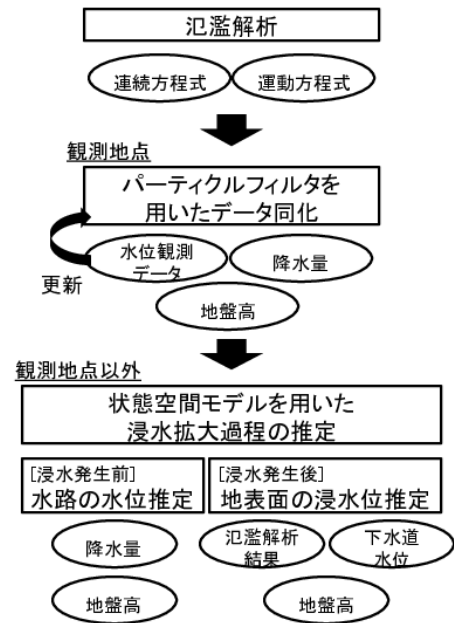


図2: 浸水推定手法の処理手順

3.2 推定手法

3.2.1 氾濫解析シミュレーション

洪水シミュレーションには、既存手法である氾濫解析シミュレーションNILIM 2.0^{*1}を使用する。これは、指定したグリッドおきの地表面の高度、氾濫水の移動を阻害する建物構造、人孔を含む下水道管路、水路を設定し、氾濫流の市街地への流出量を推定する手法である。本論文では、下水道管路内から地表面への溢水、地表面での湛水を対象とした氾濫現象を扱うため、地表面氾濫モデルを利用した。これは、氾濫流を連続方程式と運動方程式で表現し、1グリッドおきにその流出量を算出する手法となる。連続方程式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

であり、運動方程式は以下のように示される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_x(b) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_y(b) = 0 \quad (3)$$

各パラメータは、 H : 水位、 h : 洪水の水深、 u : 流速 (X方向)、 V : 流速 (Y方向)、 g : 重力加速度、 ρ : 水密度、 M : 流束 (X方向)、 N : 流束 (Y方向) ($M = uh$ 、 $N = vh$)となる。ここで、 $\tau_x(b)$ と $\tau_y(b)$ は次のように定義される。

$$\tau_x(b) = \frac{\rho g n^2 \bar{u} \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

^{*1} NILIM 2.0: <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nlim/download/manual.pdf>

$$\tau_y(b) = \frac{\rho g n^2 \bar{v} \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

粗度係数 n は建物の影響を考慮して以下のように表せる。

$$n^2 = n_0^2 + 0.020 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{\frac{4}{3}} \quad (6)$$

(n : 底面粗さ係数、 n_0 : 組成物相当粗さ係数、 θ : 建物占有率 (%)) 式 (1)-(3) は、下水管路の内側から地表への流出量と雨水による地表への洪水を考慮して、各グリッドごとの水深 h を算出している。上記の式について、各グリッドへの流入量は隣接グリッドから流入する流束および各格子の建物による流入量への影響を示す。そのため、本手法で提案する状態空間モデルについても、流入量を空間に対し連続で構成することで各格子の浸水値を推定できると考えた。

3.2.2 パーティクルフィルタによる観測地点での浸水推定

水路の観測データをもとに、時点 t の水路の水位をパーティクルフィルタを用いて推定する。本論文では、現在の観測値の影響を考慮し、状態の標本を抽出する補助粒子フィルタを用いた。補助粒子フィルタは、時点 t_1 に得られた粒子 $\hat{x}_t^i (i = 1, \dots, M)$ に補助インデックス k を付加し、時点 t の観測値 y_t に基づき、望ましい $\hat{x}$ を選別したうえで、予測分布 $p(x_t | y_{1:(t-1)})$ を発生させ、重み w_t^i を修正する手法である。初期分布 $p(x_0)$ 、パラメータ π を与え、観測値 $y_{1:T}$ と状態空間モデルに粒子フィルタを適用して、状態を推定する。ここで粒子フィルタによって推定された粒子は $\hat{x}_t^i (i = 1, \dots, M)$ となる。真の状態 x_t と推定された状態 $\hat{x}_t^i$ の代表値を比較し、粒子フィルタが適切に真の状態を推定できているか確認する。堤防高を水路の水位の上限値として、得られた観測データを観測値として、推定を行う。

3.2.3 状態空間モデルによる浸水拡大過程の推定

次に、パーティクルフィルタでの推定結果と算出したシミュレーション結果について状態空間モデルを用いて浸水の拡大過程を推定する。式 (1)-(3) は地表面の氾濫流から道路上の浸水深を導出する計算式であるが、実際の氾濫流は流入量と流出量の差分で示される。各グリッドに対する流入量は、降水からの湛水、隣接グリッドからの流入、河川や水路からの溢水、下水道からの噴き出す溢水の合計値となる。流出量は、隣接 grid への流出、下水道への流出の合計値で示される。本論文では降水からの湛水、隣接グリッドへの流入出、水路や下水道からの溢水を考慮することとし、氾濫水位推定の状態空間モデルを式 (7)(8)(9) で定義する。

$$y_t^{(i)} = S_t r_t^{(i)} + G_t^{(i)} x_t^{(i)} + e_t^{(i)} \quad (7)$$

$$r_t^{(i)} = r_{t-1}^{(i)} + v_t^{(i)} \quad (8)$$

$$x_t^{(i)} = x_{t-1}^{(i)} + u_t^{(i)} \quad (9)$$

ここで、 S_t は各グリッド i の補正シミュレーション結果となる。 $x_t^{(i)}$ は流入/流出に関連する値によって定義される。流入量/流出量の合計は以下のように定義した。これは、上記状態空間モデルに対する線形回帰の説明変数である。観測地点以外の水路の水位推定の際は、 $x_t^{(i)}$ は、地盤高と降水量、浸水拡大過程の推定の際は、地盤高と氾濫解析シミュレーション結果、下水道水位とした。観測地点の観測データをもとに前項の処理を用いて、水位推定を行い水位が堤防高を超え溢水発生が推定されたとき、浸水が発生したとし、状態空間モデルを用いて氾濫流の推定を行う。

$$x_t = \begin{bmatrix} x_t^{(1)} \\ x_t^{(2)} \\ \vdots \\ x_t^{(r-1)} \\ x_t^{(r)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

4. 評価

4.1 使用データ

本論文では、2017 年 10 月 22 日から 23 日にかけて、台風 23 号による降雨により、愛知県津島市を対象としデータを収集した。このデータと当日の雨量を用いてシミュレーションした氾濫解析の結果を用いて状態空間モデルによる浸水推定手法を適用する。推定には対象地域 4 ヶ所に設置した圧力式のセンサから収集した 5 分おきの水路での水位観測データを用いる。設置した水路の幅はそれぞれ 2m 程度であり、通常の水位は 0.06m, 0.07m, 0.16m, 0.31m である。設置したセンサでそれぞれ、水路から水が溢れ、道路を基点として最大 0.26 m, 0.25m, 0.63m, 0.48m の浸水位を確認した。対象地点の最近傍の降水計（愛知県愛西観測所）では、23 時に 32mm/h の降雨を観測した。

4.2 地理的加重回帰によるパラメータの確認

状態空間モデルに用いたパラメータが浸水に影響するデータであるか地理的加重回帰を用いて調査する。地理的加重回帰は、空間的な要因を加味した回帰モデルである。時間成分を考慮せず、位置の違いがそれぞれのパラメータの浸水への影響の大きさを回帰係数を用いて調べる。使用するデータとしては、空間分解能の高い降水量や積算降水量の分布などがあげられる。ここで補正を行うデータは式 (1)-(3) のシミュレーションで導入していないデータを用いる。対象地域で観測された浸水の観測値を出力として、回帰の係数を X_n をそれぞれ、 X_1 : 氾濫シミュレーションの

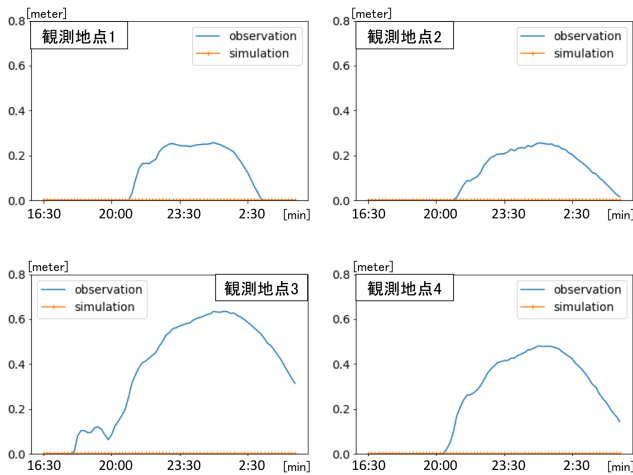


図 3: 水路での観測結果

結果、 X_2 : 詳細空間の降水量 (250 メートルグリッドおきの降水量として xbandMP レーダのデータを使用)、 X_3 : 積算降水量、 X_4 : 地盤高として、式 (11) を適用した。

$$S_i = \beta_0(x, y) + \sum_{n=1}^N \beta_n(x, y) \times X_n \quad (11)$$

はじめに地理的加重回帰分析の結果について述べる。得られた回帰係数に対し、グローバル検定を行い、F 値を算出する。F 値の大きいデータは統計的な有意差があることを示しており、浸水の大きさに寄与することがわかる。 β_1 , β_2 , β_3 , β_4 について、F 値を算出したところ、F 値は、 β_1 , β_2 , β_3 は 27.07, 2.02, 32.48 となり、統計的な有意差が見られた。 β_4 については、観測を行った 4 地点の高度差が見られなかったため、有意差は見られなかった。このことから F 値の大きい、 X_1 : 氾濫シミュレーションの結果、 X_3 : 積算降水量については、位置ごとの浸水値に違いがあり、状態空間モデルのパラメータとして用いることが妥当であると考えられる。

4.3 氾濫解析シミュレーションの結果と観測値との比較

この降水の観測データを入力値として氾濫解析シミュレーション NILIM 2.0 を用いて解析した結果を図 3 に示す。青線は 4 地点でモニタリング機器によって観測した浸水深の値を示している。各地点で、23:30 から 2:00 の間に水位はピークとなり、その後減少した。一方で、これらの 4 地点でのシミュレーション値を調べると各点とも浸水は発生しておらず、その水位は 0 であった。

この降水の観測データを入力値として氾濫解析シミュレーションを用いて解析した結果を図 4 に示す。4 ケ所の観測地点は黒丸で示している。シミュレーションでの浸水値は、カラーバーに表示されている値で示される。18:00 の時点では、浸水が市街地のいくつかの地点で発生し、その浸水位は 0.4-0.6m であった。18:00、20:00、22:00 と時

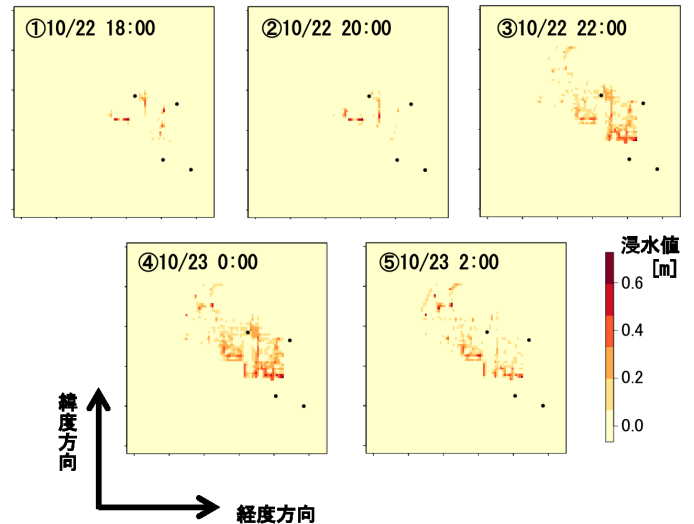


図 4: 氾濫解析シミュレーションの結果

間経過とともに浸水範囲は徐々に拡大している。最終的にシミュレーション結果から、対象地域では最大 0.6m の浸水があったが、観測地点 4 ケ所でのシミュレーション結果では、浸水深が 0m であった。この結果は、実際の浸水値は氾濫解析シミュレーションと異なった値を示す可能性があることを示唆した。

4.4 水路での水位のパーティクルフィルタ

水路の水位観測データに対し、パーティクルフィルタを行った結果を表 1 に示す。愛知県の水路 4 ケ所で観測した水位に対し、補助粒子フィルタを適用し、実際の観測値との誤差を Root Mean Squared Error (RMSE) を用いて算出した。本論文では時刻 t の観測データを用いて、時刻 $t+10$ の水位を推定している。4 ケ所の観測地点ともに RMSE は 0 以下となり、高精度での推定を行うことができた。

表 1: 水位推定に関する RSME[m]

	観測地点 1	観測地点 2	観測地点 3	観測地点 4
RMSE	0.00	0.00	0.00	0.00

4.5 状態空間モデルによる浸水拡大過程の結果

状態空間モデルを対象地域の水路全体に適用し、水位の推定を行った。図 1 に 10/23 0:00 時点での推定結果の一部を示す。図の青線は水路、紫点は水位が上昇している箇所を示す。一部に水路の上昇が起きていない水路もあるが、水路のほとんどで水位の上昇がみられた。

次に状態空間モデルを用いて、氾濫水位を推定した。同一水路状の観測データを用いて推定した浸水位と実際の浸水位を図 6 に示す。観測地点 1 と観測地点 2 を同一水路上に設置したことから、観測地点 1 の観測値から観測地点 2 の水位を推定する。また、観測地点 3 と 4 も同一水路上に

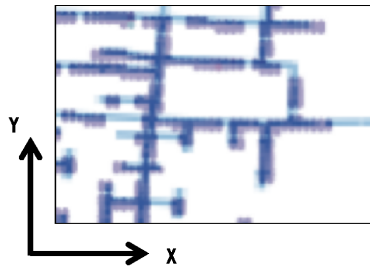


図 5: 水路の推定結果 (対象地域の一部)

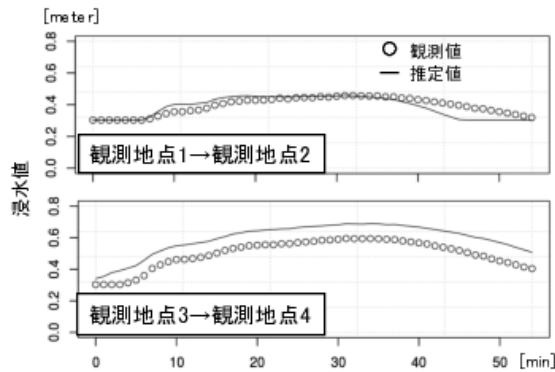


図 6: 観測地点での推定浸水位と実際の浸水位の比較

あるため、観測地点 3 の観測値から観測地点 4 の水位を推定する。図 6 のドットは観測水位を示し、実線は推定した水位を示している。観測地点 2 ではドットと実線はほぼ一致し、水位の上昇が開始する時刻および上昇の傾向がほぼ同等となった。観測地点 4 では、推定値の方が早く水位の上昇が開始し、実測値より 10cm ほど大きく推定した。しかし、推定値の上昇の傾向は実測値に類似していた。観測地点 4 のグラフに示されているように、推定値は実際よりも早く上昇し始め、最終的に実際の値よりも約 10 センチ増加した。ただし、推定値の上昇傾向は実測値と同様であった。このことから、本論文の状態空間モデルを用いた手法で、観測対象外地域の水位を推定・予測できる可能性があると考えられる。

次に状態空間モデルを用いて、氾濫水位の推定した結果を表 2 に示す。これは、異なる水路上に設置された観測機器のデータを利用した推定となる。観測地点 1、観測地点 2、観測地点 3、観測地点 4 のうち、3 ヶ所をテストデータとした場合、2 ヶ所をテストデータとした場合、1 ヶ所をテストデータとした場合のそれぞれの平均を示す。それぞれの場合において実際の観測データとの RMSE を算出した。観測点 1-3 において、テストデータ数が 1-3 の場合で RMSE はほとんど同じだった。しかし、観測点 4 のみ、テストデータ数が 1 の際に推定精度が低下した。前述の同一水路上の推定と比較して、異なる水路の観測データを利用した場合の推定では全体的に精度が低下した。特に、観測地点 3 と 4 ではそれぞれ 0.37m、0.46m の大きな誤差が発生した。

表 2: 浸水の拡大過程の推定に関する RMSE[m]

(a) テストデータ数:3

	観測点 1	観測点 2	観測点 3	観測点 4
RMSE	0.21	0.23	0.46	0.37

(b) テストデータ数:2

	観測点 1	観測点 2	観測点 3	観測点 4
RMSE	0.21	0.23	0.46	0.37

(c) テストデータ数:1

	観測点 1	観測点 2	観測点 3	観測点 4
RMSE	0.21	0.23	0.46	0.46

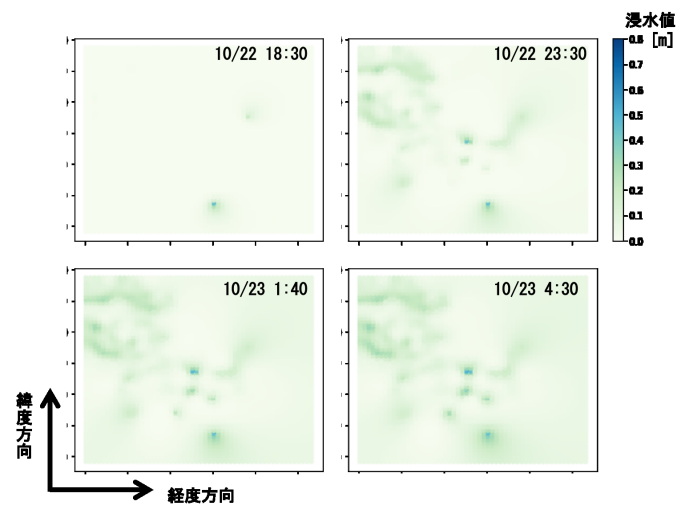


図 7: 対象地域における浸水の拡大過程の推定結果

対象地域全体の浸水拡大過程を図 7 に示す。観測データが 4 地点のみしかないため、精度の評価を行うことはできないが、全体として対象地域の各所で浸水が発生し、徐々に拡大していく様子がわかる。今後は、浸水の拡大過程を高精度に推定するため、観測データを増やし、対象地域全体での浸水拡大過程の推定を行う。

5. まとめ

本論文では、浸水の上昇速度、拡大過程、危険水位に至るまでの時系列を実時間で把握するための、状態空間モデルを用いたデータ同化による浸水位推定手法を提案した。世界的に豪雨や洪水の程度・頻度の増加が指摘されているが、現在の状況把握手法では観測対象外地域の把握は困難である。特に国内で発生する水害被害は、その 9 割以上が観測地点をもたない中小河川で発生しており、状況把握が困難であることに起因する被害発生は継続的に全国各地で起きると考えられる。本論文は、都市型水害における被害軽減を目指し、観測対象外地域においても道路の被害状況把握を行い、被災地住民に対し安全な避難経路を生成、提

示することを目的に、都市型水害において、安全な避難経路、タイミングを知るための浸水の拡大過程の時間的、空間的な推定手法を提案した。

本手法は数値解析と観測データを組み合わせた手法であり、数値解析シミュレーションを用いて生成した浸水予測の基礎データについて、観測データとの因果関係を解析し、基礎データを補正することで、精緻な浸水の時空間解析を実現する。補正には、パーティクルフィルタにより観測データを用いて観測地点の推定水位を推定するデータ同化および、観測地点以外の地域において、浸水の拡大過程を推定する状態空間モデルを用いた。愛知県津島市で発生した内水氾濫での観測データを利用し、提案手法の性能評価を行ったところ、観測地点では、水路の推移推定のRMSEは0.00cmとなった。また、同一水路の観測データを用いた推定の場合、観測地点以外では10cm程度の誤差での推定が可能であった。しかし、異なる水路の観測データを用いて観測地点以外の浸水値を推定したところ、RMSEは0.21-0.46mとなり、水路によっては大きな推定誤差が発生した。今後は、水路の高さや管路ネットワーク構造などを状態空間モデルの説明変数として取り入れ、異なる水路上であっても高精度な推定を目指す。

謝辞 本論文開発は総務省SCOPE(受付番号172106102)の委託およびJSPS 科研費JP19K20414の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (AR5), Retrieved April 17, 2018, from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>, 2018.
- [2] Milly, P. Christopher D., Wetherald, Richard T., Dunne, K. A., Delworth, Thomas L, Increasing Risk of Great Floods in a Changing Climate, *Nature*, Nature Publishing Group, Vol.415, No.6871, page514, 2002.
- [3] Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., and Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., and Kanae, S., Global Flood Risk under Climate Change, *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, Vol.3, No.9, page816, 2013.
- [4] Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M., Micro-scale Flood Risk Analysis based on Detailed 2D Hydraulic Modelling and High Resolution Geographic Data, *Natural Hazards*, Springer, Vol.55, No.2, pp.181–209, 2010.
- [5] Saudi, A. S. M., Ridzuan, I. S. D., Balakrishnan, A., Azid, A., Shukor, D. M. A., Rizman, Z. I., New Flood Risk Index in Tropical Area Generated by using SPC Technique, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol.9, No.4S, pp.828–850, 2017.
- [6] Silva, S. F., Martinho, M., Capitão, R., Reis, T., Fortes, C. J., Ferreira, J. C., An Index-based Method for Coastal-flood Risk Assessment in Low-lying Areas (Costa de Caparica, Portugal), *Ocean & Coastal Management*, Elsevier, Vol.144, pp.90–104, 2017.
- [7] Pulvirentia, L., Chinib, M., Pierdicca, N., Guerriero, L., Ferrazzolic, P., Flood Monitoring using Multi-temporal COSMO-SkyMed Data: Image Segmentation and Signature Interpretation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.115, No.4, pp.990–1002, 2011.
- [8] Basha, E. A., Ravela, S., Rus, D., Model-based Monitoring for Early Warning Flood Detection, In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems (SenSys)*, pp.295–308, 2008.
- [9] Elshorbagy, A., Corzo, G., Srinivasulu, S., Solomatine, D., Experimental Investigation of the Predictive Capabilities of Data Driven Modeling Techniques in Hydrology—part 2: Application, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.14, pp.1943–1961, 2010.
- [10] Rafieeinasab, A., Norouzi, A., Kim, S., Habibi, H., Nazari, B., Seo, D., Lee, H., Cosgrove, B., Cui, Z., Toward High-resolution Flash Flood Prediction in Large Urban Areas – Analysis of Sensitivity to Spatiotemporal Resolution of Rainfall Input and Hydrologic Modeling, *Journal of Hydrology*, Vol.531, part 2, pp.370–388, 2015.
- [11] Ruslan, F. A., Samad, A. M., Zain, Z. M., Adnan, R., Flood Prediction using NARX Neural Network and EKF Prediction Technique: A Comparative Study, In *Proceeding of the IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pp.203–208, 2013.
- [12] Sinnakaudan, S. K., Ghani, A. A., Ahmad, M. S. S., Zakaria, N. A., Flood Risk Mapping for Pari River Incorporating Sediment Transport, *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, Vol.18, No.2, pp.119–130, 2003.
- [13] Lyu, H. M., Sun, W. J., Shen, S. L., Arulrajah, A., Flood Risk Assessment in Metro Systems of Mega-cities using a GIS-based Modeling Approach, *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol.626, pp.1012–1025, 2018.
- [14] Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., Wilson, M. D., Simple Spatially-distributed Models for Predicting Flood Inundation: A Review, *Geomorphology*, Elsevier, Vol.90, No.3–4, pp.208–225, 2007.
- [15] Horritt, M. S., Bates, P. D., Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation, *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol.268, No.1–4, pp.87–99, 2002.