

時々刻々と変化する浸水域を考慮した 避難経路検索手法の開発

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○井上 卓也
 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 中谷 剛
 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 矢部 浩規

近年、豪雨の増加に伴い避難勧告の数も増加している。避難勧告を受けた場合、避難場所までの経路を検索する必要があるが、洪水時の浸水域は時々刻々と変化するため、携帯などのルート検索機能で示された経路が本当に利用可能かは不明である。そこで本研究では、高解像度降水ナウキャストを用いた内水氾濫予測と浸水域を回避する経路検索機能を組み合わせることにより、リアルタイムの避難経路検索システムを構築した。

キーワード：内水氾濫、リアルタイム、避難経路検索、ナウキャスト

1. はじめに

「想定外」、「経験したことが無い」という言葉を枕詞とする水害が、近年増加している。表-1は2014年度の主な豪雨における避難勧告対象人数である。これによると、全国で1000万人以上の市民が避難勧告の対象となっており、北海道においても、9月10日～12日の豪雨により、92万人の市民が避難勧告を経験した。避難勧告を受けた後、避難経路をサポートする資料として洪水ハザードマップがある。しかし、内閣府がまとめた「防災に関する特別世論調査」¹⁾によると、約7割の市民がハザードマップを認識・利用していない。現状の洪水ハザードマップは事前に印刷し、予想浸水深や避難ルートを確認しておくことを前提としており、普段見慣れていない人や、外国人を含む旅行者がとっさに利用するのは困難である。さらに、洪水ハザードマップは外水氾濫を想定したものが多く、より頻度の高い内水氾濫を想定したものは少ないのが現状である。

このような背景を受け、近年タイムライン（防災行動計画）に関する研究が活性化している^{2,3)}。例えば、坂井ら²⁾は、内水氾濫、外水氾濫も含めたリアルタイムの浸水予測結果と最短避難経路（浸水の影響未考慮）を Web ブラウザを通じて配信するシステムを構築している。また、矢木澤ら³⁾は、破堤氾濫計算の氾濫到達時間を用いて避難支援バスの最適運行経路の解析を行っている。しかし上述の研究では、時々刻々と変化する浸水域を回避する経路検索システムは掲載されておらず、示された避難経路が浸水しておらず本当に通行可能かは不明である。

そこで、本研究では内水氾濫を想定したリアルタイム氾濫予測と、浸水域を回避する経路検索機能を組

表-1 2014年度の主な豪雨と避難指示・避難勧告人数

時期	豪雨	対象地域	対象人数
2014/7/8～10	台風8号	沖縄～山形	118万
2014/8/1～11	台風11・12号	宮崎～北海道	217万
2014/8/15～26	前線	福岡～北海道	25万
2014/8/20	線状降水帯	広島	16万
2014/9/10～12	線状降水帯	北海道・宮城	92万
2014/10/5～6	台風18号	高知～茨城	356万
2014/10/10～14	台風19号	沖縄～岩手	181万
合計人数			1005万

*内閣府の防災情報を基に集計

み合わせるにより、リアルタイムの避難経路検索システムを構築する。また、2014年9月に発生した北海道豪雨における新千歳空港周辺の道路冠水状況の調査をもとに、構築したシステムの検証を試みる。

2. システムの構築

(1) リアルタイム浸水予測

図-1は、リアルタイムの浸水予測と浸水域を回避する避難経路検索システムの概念図である。灰色はデータ、オレンジは本研究で構築したシステム、青は既存のプログラムである。青の部分は自動的データを読み込み、計算を開始するようにシステム内に組み込まれている。リアルタイム浸水予測は以下の手順で実施する。

- i. 高解像度降水ナウキャストのデータを受信する。
 高解像度降水ナウキャストは、XバンドMPレーダーネットワーク(XRAIN)の観測データを利用した250m格子の降雨情報である。一般財団法人気象業務支援センターが、5分毎にデータを配信

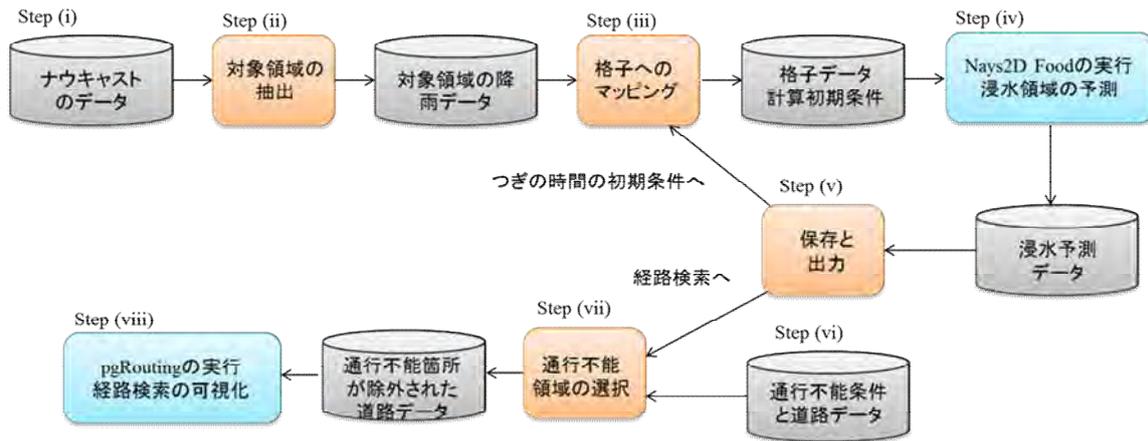


図-1 構築したシステムの概念図

しており、登録すれば誰でも利用可能である。なお、高解像度降水ナウキャストには、現在の雨の状況を表す「実況解析」に加え、30分後までの5分毎の「予測解析」が含まれるが、本研究では実況解析を用いる。

- ii. 浸水計算の対象地域の降雨データを切り出す。配信される高解像度降水ナウキャストのデータは、日本全域のデータであるため、浸水計算に必要な地域の降雨だけを抜き出す必要がある。
- iii. 降雨データを浸水計算の格子にマッピングする。高解像度降水ナウキャストのデータは、250mの緯度経度座標系である。一方、浸水計算の格子は25 m × 25 m の直交座標系であるため、TIN (Triangulated Irregular Network) を用いて補完する。
- iv. Nays2D Flood⁴⁾を用いて浸水域を予測する。Nays2D FloodはiRICに含まれる浸水計算ソルバーである。基礎式などは、HPに公開されているためここでは省略する。Nays2D Floodは流出計算モデルを含んでいないため、本研究では、対象流域全体 (10 km × 12 km) を計算領域とし、降雨を平面2次元計算の表面流として下流へ伝達させる (雨水の地下浸透は考慮していない)。地盤標高データは国土地理院が公表しているDEMデータを用い、計算に必要な粗度、時間刻みなどの計算条件、道路に設置されたボックスカルバートなどは事前に設定しておく。
- v. 計算結果を避難経路検索用にアウトプットする。また、計算結果は次ステップの初期条件となるためにサーバー上に保存する必要がある。

(2) 浸水域を回避した経路検索

経路検索は、嘉山による先行研究⁵⁾を参考に、pgRoutingを用いて行う。pgRoutingはスイスとフランスオープンソースの経路探索システムである。経路検索に必要な道路データは、オークニー・ルート検索用道路データ DRM2609A (H26.9) 版とする。経路検索は以下の手

順で実施する。

- vi. 流速と水深を用いて通行不能条件を設定する。車による避難の場合、マフラーから水が入るとエンジンが止まる可能性が高くなり、軽自動車や普通自動車の場合、20~30cmを超えると安全な運行は困難となる。
- vii. 通行不能な道路データをルート検索から除去する。ただし、国土地理院が公表しているDEMデータは、橋梁や高速道路などの高架橋空を除いた地表面のデータのため、地表面が浸水していても実際には橋梁や高速道路上の路面は浸水していない。そこで、橋梁や高架橋は地表面の浸水有無に関わらず通行可能とする。
- viii. pgRoutingを用いて最短距離のルートを検索する。上述の通行不能な道路を除去したデータを用いて、pgRoutingを実行する。出発地点と到着地点は、利用者が任意に選択可能である。検索されたルートはWeb画面上に可視化される。

3. 2014年北海道豪雨を対象とした検証

(1) 対象豪雨について

2014年9月9日から12日にかけて北海道の西海上にある低気圧を含む気圧の谷の中に入った状態が続いた。この影響で大気の状態が非常に不安定となり、十勝地方、胆振地方、石狩地方では局地的に猛烈な雨が観測された。9月11日には石狩地方、空知地方、胆振地方に大雨特別警報 (土砂災害、浸水害) が発表され、北海道内で初めての特別警報の発表となった⁶⁾。特に、千歳~札幌の支笏湖周辺では、バックビルディング型形成過程による線状降水帯が生じ、総雨量は400mmに近くなった⁷⁾。大雨の影響により、石狩地方や胆振地方を中心に床上・床下浸水、土砂崩れ、停電などの大きな被害が発生し、12市町約46万世帯約92万人に避難勧告が発令された。交通機関は国道や北海道管理道路で通行止め、JRや新千歳空港

を発着する航空機に運休が発生した。

(2) 新千歳空港周辺の通行止め状況

2014年9月11日の早朝、筆者らは新千歳空港に向かい新千歳空港周辺の道路冠水状況を確認した。新千歳空港に至るルートは大きく分けて3つある。一つ目は千歳ICから新千歳空港へ向かうルート①（図-2の青線）、二つ目は新千歳空港ICから空港に向かうルート②（図-2の黄色線）、三つ目は新千歳空港を大きく迂回するルート③（図-2の赤線）である。ルート①は、9月11日午前7時時点で、アンダーパスが冠水し車高の高いバスしか通行できないとの報告があった。ルート②は、7時30分の時点で、写真-1のように道路に水深30cm~40cmの水たまりができていた。写真中の黒い車は故障し停車しており、バスでも通行は困難な状況にあった。ルート③は、距離が長いので、札幌方面から新千歳空港に向かう人は普段利用しないルートである。しかし、このルートだけは浸水しておらず、新千歳空港に到着することができた。

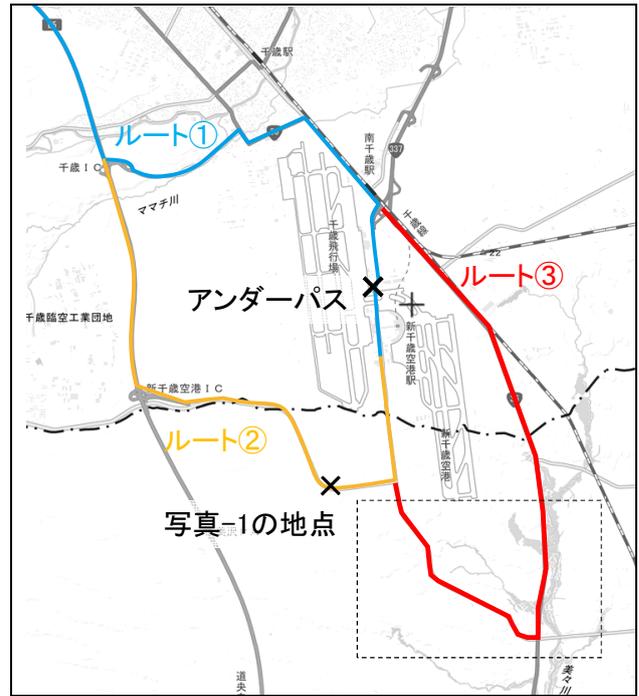


図-2 新千歳空港周辺地図
(下図は地理院地図)

(3) 浸水計算結果および経路検索結果の検証

河川事務所や市町村役場で、予測計算を行うことを考えると、あまりにも初期コストが高い環境を整えることは困難である。そこで、スーパーコンピュータやクラスターコンピュータの構築に比べ安価な市販パソコンの中から、利用するパソコン（CPUはIntel Xeon E5-2687W v4、実装メモリは32GB）を選出した。このパソコンを用いて、25m×25mの格子を採用した場合、5分間の計算に必要な時間は39秒であった。ルート検索時間を加えても、十分にリアルタイムでの運用が可能な計算時間である。そこで本節では、リアルタイム運用が可能な25m×25m格子を採用した場合の道路冠水予測の精度検証を行った。

図-3 は浸水深 30cm 以上の道路を通行不能と考えた場合の最短ルート検索の結果である。ルート③が最短ルートに選ばれる結果となり、現地調査と一致している。なお、図中の丸い囲みは橋や高架橋の位置を、四角い囲みはボックスカルバートの位置を示している。次に、それぞれの冠水箇所を詳しく確認する。図-4a はの午前7時の時点の計算結果である。アンダーパスの浸水深が30cmを超えており、車高の高いバスしか通行できなかったという浸水状況報告と概ね一致している。図-4b はルート②の浸水箇所の計算結果である。午前7時30分時点で水深30cm~40cmとなっており、写真-1に示した状況と一致している。図-4c はルート③（図-2の点線四角の範囲）の午前7時30分時点の浸水深のコンターと国土院の色別標高図である。色別標高図をみるとルート③の美々川沿いに陰影が付き、周辺地盤より少し高いのが分かる。美々川沿いの道路は、1m程度の盛り土の上に設置されているため冠水しにくくなっており、浸水深のコンターをみても、30cm以下の小さな浸水はあるが、30cm以上の浸水箇所は無いことがわかる。



写真-1 ルート②の通行不能箇所の浸水状況

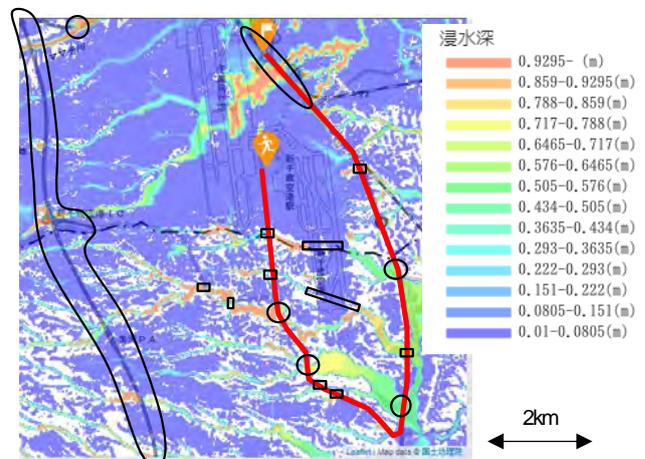


図-3 ルート検索の Web 画面
自動車の場合、水深 30cm 以上通行不可

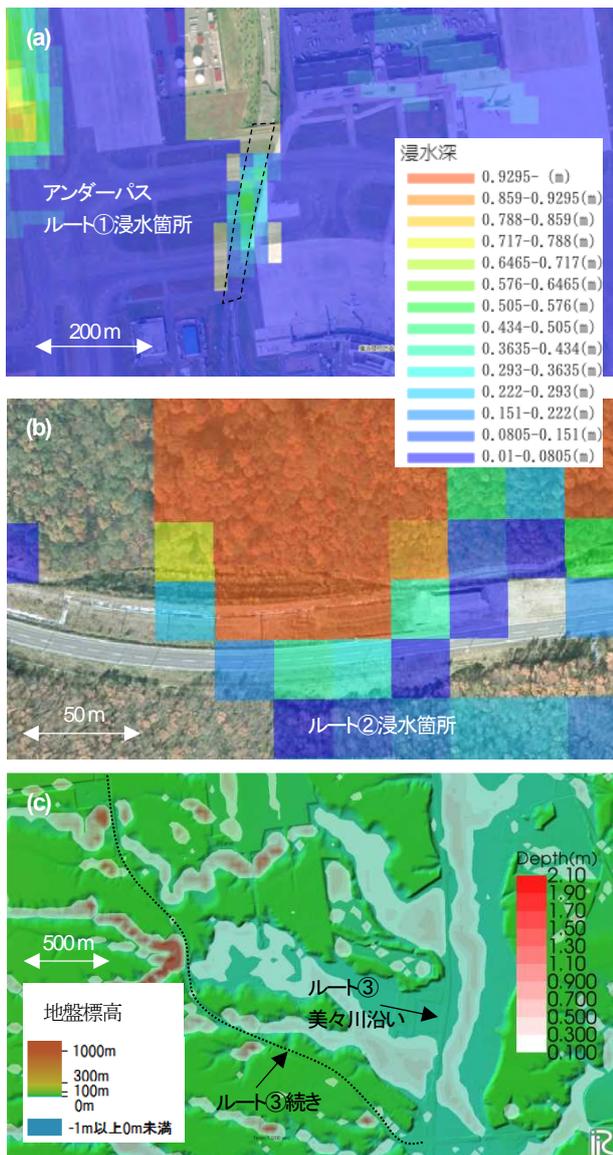


図4 浸水深の計算結果(拡大図)
背景: 国土地理院の航空写真と色別標高図

上述のように、本研究で構築したシステムは、道路が浸水し始める状況を概ね再現できている。しかし、道路の浸水が終わる時間については、観測結果が無いので検証出来ていない。浸水の継続時間を精度良く再現するためには、氾濫水の地下浸透を考慮するなどの工夫が必要と予想される。また、都市部を対象とする場合は、下水管網を考慮する必要があるだろう。これらの点は今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では、高解像度ナウキャストを用いた氾濫予測と浸水箇所を回避する経路検索機能を組み合わせることによりリアルタイム避難経路探索システムの構築を行った。本研究で得られた知見を以下に列記する。

- 構築したシステムがリアルタイムで予測可能かどうかを分析したところ、浸水想定区域図作成マニュアル⁸⁾で推奨されている25m×25mの計算格子であれば、十分にリアルタイム予測が可能であることを確認した。
- 新千歳空港周辺に構築したシステムを適用し、2014年9月11日の北海道豪雨時の再現検証を行った。検証の結果、本研究で構築したシステムが算出した浸水箇所および最短経路は、災害時に現地へ行って調査した結果と一致した。

本研究で開発したシステムは、避難だけでなく豪雨時のタクシーやバスの運行経路、コンビニなどの配送経路、災害時に出勤する必要がある河川管理者や消防隊員などの安全な通勤の経路の予測にも活用できる可能性がある。また、災害の発生頻度は低いため、災害時しか活用できないコンテンツは、いざというときに忘れられ利用されない傾向にある。経路検索は、平時でも良く使われるコンテンツのため、これとリアルタイムの浸水予測を組み合わせることができれば、より身近な防災アプリの提供につながる。今後は、道路管理者と連携し、社会実装を目指して研究を継続する予定である。

謝辞: 本研究のシステム構築にあたっては、株式会社 River Link の旭一岳氏、株式会社 MIERUNE の朝日孝輔氏にたくさんのご助言とご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 防災に関する特別世論調査: 内閣府政府広報室, 2010.
- 坂井広正, 深草新, 原田翔太, 田中耕司, 井辻英雄, 酒井伸一: 避難行動を支援するための洪水氾濫予測システムの設計と構築, 安全問題研究論文集, Vol.5, 2011.
- 八木澤順治, 大窪和明, 田中規夫, 赤崎佑太: 埼玉県川島町を対象とした洪水氾濫解析に基づく避難支援バスの最適運行経路の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, I_331-I_336, 2017.
- Nelson, J. M., Y. Shimizu, T. Abe, K. Asahi, M. Gamou, T. Inoue, T. Iwasaki, T. Kakinuma, S. Kawamura, I. Kimura, T. Kyuka, R. R. McDonald, M. Nabi, M. Nakatsugawa, F. R. Simões, H. Takebayashi and Y. Watanabe: The International River Interface Cooperative: Public Domain Flow and Morphodynamics Software for Education and Applications, Advances in Water Resources, 93A, pp.62-74, 2016.
- 嘉山陽一: FOSS4G を利用した水害時避難経路探索システムの構築, 第19回地理情報システム学会学術研究発表大会, 2010.
- 平成26年9月9日から12日の大雨に関する気象速報, 平成26年9月17日札幌管区气象台資料.
- 松岡直基: 北海道における2014年8月, 9月の豪雨の概要について,
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室, 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室: 浸水想定区域図作成マニュアル (第4版), 2015.