

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：92103

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13843

研究課題名（和文）人工知能による都市河川のリアルタイム洪水予測

研究課題名（英文）Real-time flood prediction of urban rivers with artificial intelligence

研究代表者

一言 正之（HITOKOTO, Masayuki）

日本工営株式会社中央研究所・先端研究センター・課長

研究者番号：40463559

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：高解像度な雨量データおよび深層学習を用いて、これまで予測が困難とされてきた都市中小河川における迅速かつ高精度な河川水位予測モデルを構築し、鶴見川にて実証した。また畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いて高解像度の雨量レーダを直接読みこめるモデルを構築し、複数流域にて実証した。その他、物理的なモデルとのハイブリッドや、説明可能なAI（XAI）の適用、データ拡張による未経験事象への適用性向上などの高度化を行った。最終年度には深層学習を用いた流出解析のレビュー論文を発表した。また本研究のメインテーマである水位予測からの発展形として、人工知能による外水氾濫の浸水域予測技術の基礎検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は次の通りである。都市河川における人工知能を用いたリアルタイム洪水予測手法の適用性の提示。CNNの適用によるレーダ雨量の活用、データ拡張による大規模洪水への適用性の向上、不定流モデルとのハイブリッドによる縦断的な水位予測、深層学習に対するXAIの適用による説明性の向上など、新しい手法の開発。レビュー論文の投稿による学術コミュニティへの知見の共有。社会的意義は、気候変動による水害リスク増大への適応策に資する技術的貢献として、次の通りである。洪水予測やダム運用の高度化に直結する技術開発・実証。開発した水位予測と連携した、将来的なリアルタイム氾濫予測に向けた基礎技術の開発。

研究成果の概要（英文）：Using high-resolution rainfall data and deep learning, we constructed a rapid and accurate river water level prediction model for small and medium-sized urban rivers, which had been considered difficult to predict, and demonstrated it in the Tsurumi River. We also constructed a model that can directly read high-resolution rainfall radar data using a convolutional neural network (CNN), and demonstrated it in several river basins. In addition, we have improved the model by hybridizing it with physical models, applying explainable AI (XAI), and improving its applicability to inexperienced events through data augmentation. In the final year of the project, a review paper on runoff analysis using deep learning was published. In addition, as a development from the main theme of this research, we conducted a basic study of inundation area prediction technology for inundation by river water using artificial intelligence.

研究分野：水文学

キーワード：洪水予測 河川水位予測 ダム流入量予測 都市河川 機械学習 深層学習 人工知能 氾濫予測

1. 研究開始当初の背景

河川からの洪水氾濫は、気候変動との関連からも世界的な課題となっている。洪水氾濫による人的被害の低減に向けて、洪水予測情報に基づく早期避難が重要である。日本の一級河川(洪水予報河川)では水位予測が義務づけられており、既に全国で洪水予測システムが導入されている。しかしながら、十分な水位予測精度が得られない場合も多く(椿ら、2013)、適切な避難行動への活用に向け課題が多い。また、都市中小河川では、アスファルトの被覆などにより洪水到達が非常に早く、水位予測が更に困難である。こうした都市中小河川では、洪水予測システムが未導入である場合も多く、水防上の大きな課題である。

こうした中、水位予測に向けたインフラとして、レーダ雨量観測の高度化が全国で進められてきた。XRAINと呼ばれるレーダ雨量は、従来のレーダ雨量と比べて空間解像度が16倍(1kmメッシュ 250mメッシュ)、時間解像度が5倍(5分 1分)と性能が向上している。

またニューラルネットワークの新しい手法として深層学習と呼ばれる手法が提案されている。日本の一級河川を対象として、深層学習による水位予測手法により、他の予測手法と比較して高い精度が報告されている。また、深層学習は多量の観測情報をより有効に予測に反映できることが報告されており、有望な手法として期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、これまで予測が困難とされてきた都市中小河川を対象に、迅速かつ高精度な河川水位予測を実現することを目的とする。都市中小河川の水位予測を目的として、深層学習モデルを用いること、XRAINを入力データとして活用すること、が本研究のポイントである。著者は、これまでニューラルネットワーク水位予測モデルに着目し、一級河川におけるモデルの適用性・妥当性評価を実施してきた。さらに発展形として深層学習モデルを提案し、従来手法より高い精度を示してきた(一言ら、2015)。加えて、深層学習モデルの適用性検討として、流域特性や入力データの多寡による精度の違いについても明らかにしてきた。なお洪水予測に対して深層学習を適用した事例は、国内外を合わせて主要な論文等では他に見あたらない。本研究は類似研究から大きく先行した試みであると同時に、既往実績のノウハウから高い実現性も期待される。実現した際の社会的な意義も大きい。

3. 研究の方法

(1)深層学習を用いた都市中小河川の水位予測モデルの構築

高解像度レーダ雨量(XRAIN)を入力データとして、深層学習モデルにより水位予測を行うモデルのプロトタイプを作成する。過去のレーダデータ、水位データなどを収集し、主要な洪水を再現するように学習を行うことで、水位予測を実施可能なモデルを作成する。

(2)様々な河川における精度検証

流域面積や土地利用などの流域特性、地域による降雨特性など、様々な条件下において精度検証を実施する。対象地域による適用性の違いを検証する。

(3)他の洪水予測手法との連携

人工知能モデルの課題として、学習事例を上回る洪水規模に対して、予測精度が担保されない点が挙げられる。本研究にて、未経験規模の洪水におけるケーススタディから実際の精度を見極めるとともに、著者らが研究中的他手法との連携解析による精度向上を検討する。

(4)ケーススタディによる課題抽出とその対応

研究実施において明らかになる課題を抽出し、検討手法の適用範囲を整理する。また課題に対応するための新しい手法開発や、研究期間中に登場する新しいAIの手法を取り入れることで、研究の発展を図る。

4. 研究成果

(1)都市河川での洪水予測技術

都市河川の鶴見川(矢崎橋地点)を対象に、2010年より整備されている高解像度なレーダ雨量(XRAIN)を用いて、深層学習を適用した人工知能モデルにより、都市中小河川での適用性検証を行った。対象は鶴見川水系真光寺川の矢崎橋観測所(図1左)とした。流域の8割以上が市街地で、流域面積は4.3km²である。レーダ雨量の約1km²の平均値の10分雨量を入力し、10分後の水位予測を行った。レーダ雨量は流域内の降雨分布を十分にとらえていること、また地点雨量の1時間雨量では予測地点の水位変化との関係を十分に表せられないことを確認した。予測計算結果は図1右に示す通りであり、急激な水位上昇もある程度とらえている。より細かな水位データを利用すれば、さらに精度向上が見込まれる。また、予測雨量の活用により、予測時間も伸ばすことが可能である。ただし、水位上昇が最も多いケース(図1の右、2016年7月の事例)では、ピーク時の再現性に課題も残された。

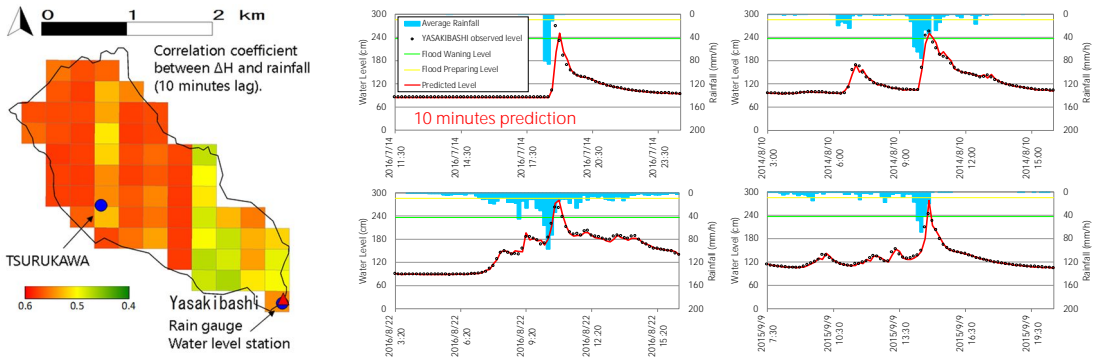


図1 鶴見川矢崎橋地点における水位変化とレーダ雨量との相関図、および水位予測の結果

(2) CNN による洪水予測技術

前頁の洪水予測検討では「全結合型」と呼ばれるネットワークを用いたが、一般に画像認識などでは「畳み込みニューラルネットワーク (CNN)」により二次元的なデータを扱う。近年は CNN を始めとした画像解析 AI の性能が飛躍的に向上しており、様々な分野での応用が進んでいる。本検討では CNN を洪水予測用に改良する。地点雨量や平均雨量のデータを用いた予測に代えて、CNN により雨量レーダの面的な情報を取り込んだ予測手法を開発した。対象流域は、筑後川水系城原川、日出来橋を対象地点とした。流域面積は 50.8km² で上流域は山地だが、日出来橋周辺は天井川となっており、越水時は周辺市街地が浸水するリスクを抱えている。レーダ雨量が入手できた 2006 年以降について、日出来橋で水防団待機水位以上の水位を記録した出水を抽出し、そのうち上位 30 出水を対象出水とした。26 出水を学習に、4 出水を精度検証に用いた。本検討では、時系列的な雨量情報を画像データの構造に見立て (図 2 左) 60 分後までの水位変化を出力とすることで水位予測モデルを構築した。検討結果予測結果の例を図 2 右に示す。いずれの出水においても洪水の挙動を再現できた。

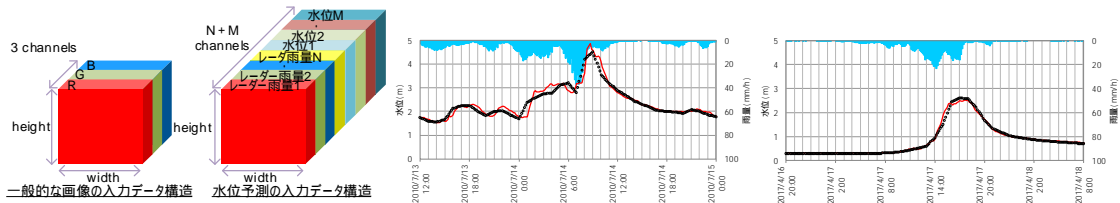


図2 CNN による水位予測モデルの模式図と、日出来橋における水位予測結果

(3) 不定流モデルとのハイブリッドによる縦断的な水位予測

上述の予測手法は、観測地点の水位をピンポイントで予測するものである。しかしながら、市街地の洪水予測では河川のどの地点で危険度が高まっているかを把握することが重要である。そこで筆者らは、縦断的な河川水位予測の精度向上を目的として、深層学習モデルと不定流計算モデルを組み合わせた新たなモデルを構築した (図 3 左)。具体的には、レーダ雨量を用いて上流地点の流量を ANN で予測し、その予測流量を用いて下流の不定流計算を行うモデルを構築し、実河川にて精度の検証を行った。さらに、流量予測の誤差を解消するための、高密度水位計を用いた予測水位を補正する簡易で高精度な手法を提案した。検証対象地点は、前項と同じ筑後川水系城原川とした。精度検証の結果、構築したモデルは高い予測精度を示した (図 3 右)。また、実績流量に誤差が生じた場合においても、高密度水位計データを用いて深層学習モデルの予測流量を補正することで、精度が向上することが確認された。

(4) データ拡張による未経験規模の洪水に対する適用性の向上

既往の研究において、AI は学習したことのないような大規模な出水において予測精度が低くなるのが課題となっていた。著者らは、理論値に基づくデータ拡張により大規模出水を模した学習データを用いることで、未経験規模の出水に対する適用性向上を図った。提案手法により、肱川水系の野村ダムにおいて、過去事例を大幅に上回る大規模出水での予測精度の向上を確認した。また、寺内ダム、宮ヶ瀬ダム、金山ダムを加えた 4 流域でケーススタディを行い、提案手法による予測精度が十分に高いケース、予測精度が不十分なケースがあることを確認した。さらに下笠ダム、阿木川ダム、美利河ダムを加えた 7 流域においてケーススタディを行い、学習対象である過去の出水の流出率などの水文特性と、提案手法による精度向上効果との関係を分析した。検討の結果、過去の流出率が小さい (流域の湿潤度合いが小さい) ほど、提案手法の効果が表れにくいことを確認した (図 4)。なお本研究はダム流域を対象としたが、都市河川においても同様の手法が適用可能と考えられる。

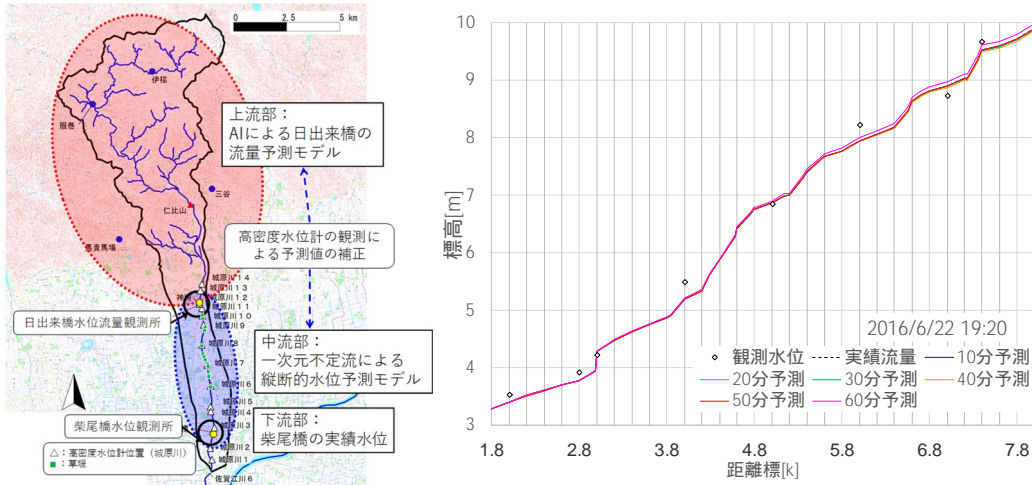


図3 城原川の流域図とハイブリッドモデル適用の適用範囲、および河川縦断水位の予測結果

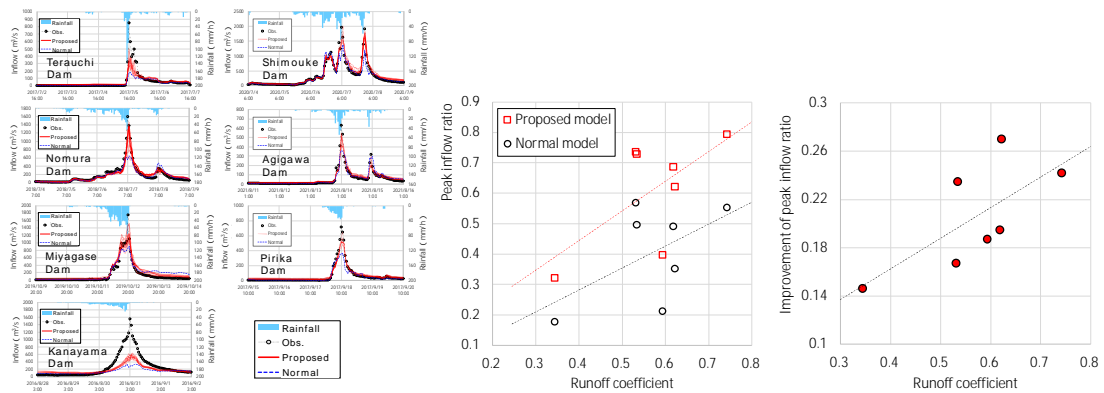


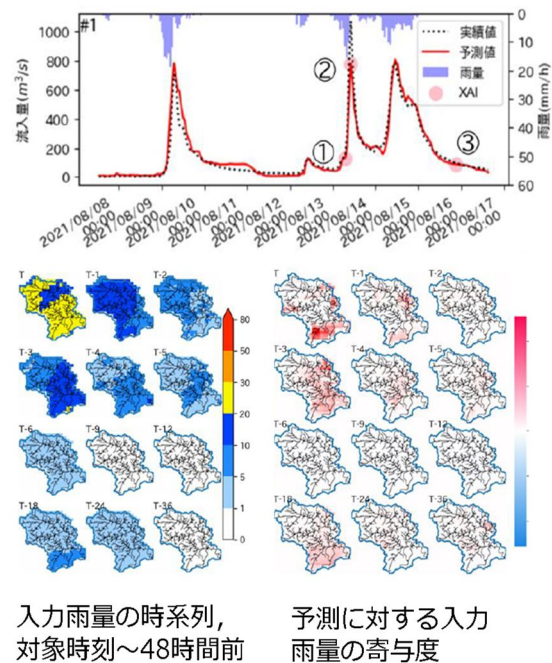
図4 データ拡張を適用した洪水予測結果、およびデータ拡張による精度向上と流出率の関係

(5) XAI の適用による AI 水位予測の信頼性・説明性の向上

研究課題の実施期間中において、AI の計算結果に対する説明性（説明可能な AI = XAI ; explainable AI）に対する研究の重要性が高まっていた。そこで本研究において、深層学習を用いた洪水予測に対して XAI 技術の適用性を検証した。

本研究では対象流域を江の川水系土師ダム流域とし、気象庁の解析雨量を入力条件とする畳み込みニューラルネットワークによる流入量予測モデルを構築した。このモデルに対し、XAI（説明可能な AI）の代表的なアルゴリズムである Grad-CAM、SHAP を適用し、どのような根拠に基づいてモデル予測を行ったかを可視化し考察を行った。

ダム流入量予測において、入力データ（降雨のメッシュデータの時系列）のどのエリア・どの時刻が寄与したかを図化した。洪水立ち上がりでは直近～数時間前の降雨が強く寄与し（図5下）、洪水低減時には24～48時間前の降雨が寄与していた。このように XAI によって可視化した入力-出力の関係は、水文的な解釈と矛盾しないことを確認した。今後はこうした技術により社会実装における信頼性向上、モデル構築時の検証・精度向上に役立つことが期待される。



入力雨量の時系列、対象時刻～48時間前 予測に対する入力雨量の寄与度

図5 CNN による土師ダムの洪水予測結果、および入力雨量の時系列と SHAP の適用による入力雨量の寄与度

(6) レビュー論文による知見の共有

深層学習を用いた流出解析（河川水位予測，ダム流入予測など）について、2016 年以降の主な国内論文、および 2018 年以降の主な国際論文を収集した。得られた論文 326 編から、技術動向やモデル構築の手順や留意点、今後の課題などについて調査・整理した。国内では基本的な構造のモデルが使われる事例が多い一方で、国際誌では、複数モデルのハイブリッドや、データ分解アルゴリズムおよび複数のネットワーク構造を組み合わせたモデルなど、より複雑なモデルの適用例が多くなっている（図 6）。今後の方向性として、未経験洪水などに対応したモデルの汎用性・適用性の向上、より説明性の高いモデルの開発・適用、物理的なモデルとのハイブリッドなどによる物理特性の組み込み、その他様々な新しい技術開発が検討されている。

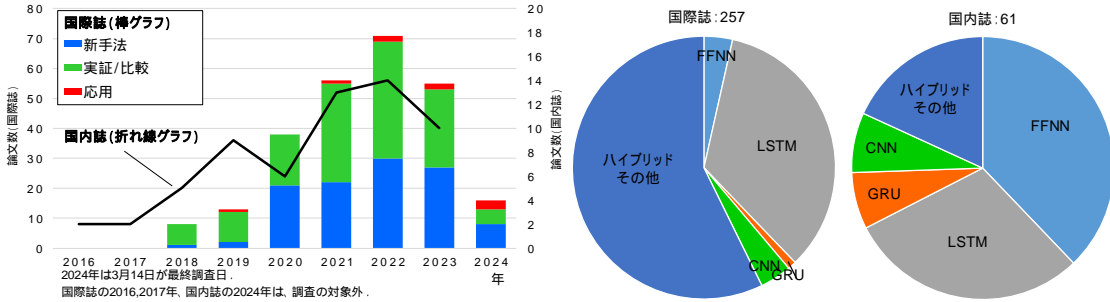


図 6 深層学習モデルを適用した流出解析の論文数の経年変化と、モデル種類の割合

(7) 氾濫浸水への拡張性の提示

災害発生時、浸水範囲を素早く知ることは、適切な避難行動や防災活動のために重要である。ハザードマップでは物理シミュレーションに基づき浸水範囲が想定されている。しかしながら、時々刻々と進展する浸水範囲をリアルタイムに計算・推定することは難しい。本検討では、災害時に得られるであろう点的な浸水観測情報を利用して、面的な浸水範囲を素早く的確に推定する AI モデル（浸水域推定モデル）を開発した。具体的には、物理的な氾濫シミュレーション結果による浸水分布と疑似的な浸水観測データを学習・検証データとした。画像生成 AI (GAN) の一種である pix2pix による画像変換により、浸水観測データから浸水分布を推定するモデルを構築した。構築したモデルを荒川下流域で検証し、妥当な推定結果を確認した（図 7 左）。

また、事前に予測される河川からの越流に応じて、氾濫範囲や新水深を予測する技術の基礎検討を行った。具体的には、疑似的な河川水位（堤防からの越流水深）と、河川水位に応じた物理的なシミュレーション結果を学習・検証データとした。階層型の深層学習モデルを用いて、越流水深の予測値から、検証地点における 12 時間後の浸水深を予測するモデルを構築した。構築したモデルは、物理シミュレーション結果をほぼ再現できる結果となった。

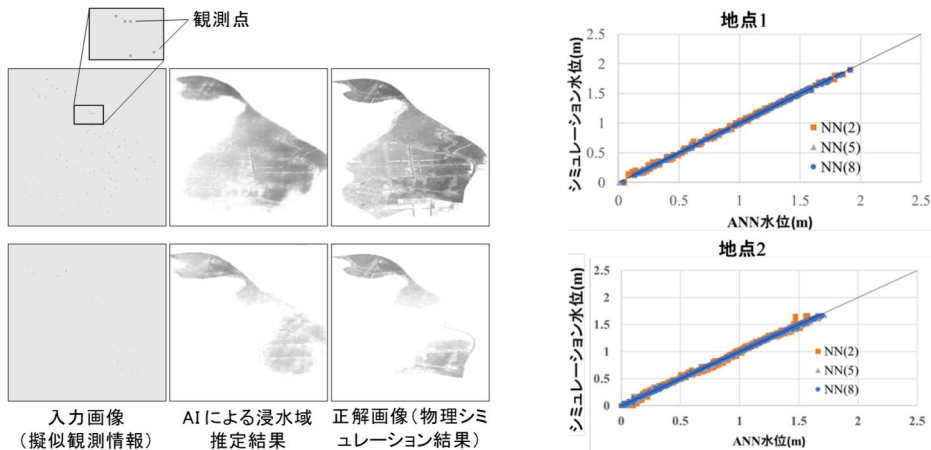


図 7 AI による氾濫分布推定、新水深予測の実証結果

引用文献

- 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, Vol.19, pp.1-6, 2013.
- 2) 一言正之, 櫻庭雅明, 清雄一: 深層学習を用いた河川水位予測手法の開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), vol. 72(4), pp.187-192, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 一言正之、荒木健、箱石健太、遠藤優斗	4. 巻 30
2. 論文標題 深層学習を用いた流出解析の技術動向およびモデル構築手順のレビュー	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 641-646
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 一言 正之	4. 巻 52
2. 論文標題 河川・水防災におけるAI 技術の活用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 環境情報科学	6. 最初と最後の頁 45～50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11492/eis.52.2_45	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 箱石 健太、一言 正之、善光寺 慎悟、西口 亮太	4. 巻 4
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークを用いた流入量予測モデルにおけるXAIの考察	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 539～546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/jsceiii.4.3_539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 西口 亮太、善光寺 慎悟、高木 康行、一言 正之	4. 巻 29
2. 論文標題 CNNによる流出解析における降雨の時空間分布の影響検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 31～36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/river.29.0_31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 HITOKOTO Masayuki, ARAKI Takeru, HAKOISHI Kenta, ENDO Yuto	4. 巻 78
2. 論文標題 深層学習を用いたダム流入予測における学習データ拡張の適用性検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_175 ~ I_180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2.I_175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 一言 正之、荒木 健、箱石 健太、遠藤 優斗	4. 巻 28
2. 論文標題 深層学習を用いたダム流入量予測における学習データ拡張方法の提案 - 未経験規模の出水に対する適用性の向上 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 67 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.28.0_67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 箱石 健太、荒木 健、一言 正之	4. 巻 1
2. 論文標題 スタッキングの適用による河川水位の時系列予測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 453 ~ 458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.1.J1_453	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 荒木 健、箱石 健太、一言 正之、島本 卓三、房前 和朋	4. 巻 25
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークによるレーダ雨量を用いた河川水位予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 297 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.25.0_297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 石尾 将大、野島 和也、一言 正之、房前 和朋	4. 巻 24
2. 論文標題 ニューラルネットワークと一次元不定流を組合せた縦断的な河川水位予測手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 427 ~ 432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.24.0_427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masayuki Hitokoto, Takeru Araki
2. 発表標題 New data augmentation method for rainfall-runoff calculation using machine learning and examining it's applicability
3. 学会等名 15th International Conference on Hydroinformatics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kenta Hakoishi, Masayuki Hitokoto, Shingo Zenkoji, Ryota Nishiguchi
2. 発表標題 Consideration of XAI In Inflow Prediction Model Using Convolutional Neural Network for Multiple Dams
3. 学会等名 15th International Conference on Hydroinformatics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中山龍也, 羽物裕人, 一言正之, 櫻山和男
2. 発表標題 Neural Networksに基づく氾濫浸水深予測モデルの構築
3. 学会等名 第51回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masayuki Hitokoto, Takeru Araki, Kenta Hakoishi, Yuto Endo
2. 発表標題 Novel Data Augmentation Method for Rainfall-Runoff Calculation by Machine Learning
3. 学会等名 Proceedings of the 40th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 一言 正之, 荒木 光一, 古木 宏和
2. 発表標題 敵対的生成ネットワークによる洪水氾濫浸水域の推定
3. 学会等名 2019年度人工知能学会全国大会 (第33回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Hitokoto, Masaaki Sakuraba
2. 発表標題 River-stage prediction for urban small rivers with deep learning model by using x-band radar rainfall
3. 学会等名 EGU General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 古田 均、北原 武嗣、野村 泰稔、宮本 崇、一言 正之、伊藤 真一、広兼 道幸、高橋 亨輔	4. 発行年 2022年
2. 出版社 電気書院	5. 総ページ数 209
3. 書名 AI × 防災	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------