

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05841

研究課題名(和文) 深層学習モデルで生成する豪雨の時空間分布を活用した流域の水害リスク評価

研究課題名(英文) Flood risk assessment using spatio-temporal distribution of heavy rainfall generated by a deep learning model

研究代表者

皆川 裕樹 (Minakawa, Hiroki)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員

研究者番号：70527019

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)：流域の洪水リスク評価に活用する目的で、豪雨時空間データの生成モデルを構築した。

対象地区の解析雨量を事前に学習させた生成モデルにより、1時間単位の降雨時空間パターンが多数生成できた。水害リスク評価には流域水循環モデルを適用し、そこに農業ダムや田んぼダムの機能を組込むことで、リスクと同時に洪水対応策の効果を評価可能とした。対象流域で流域平均雨量が同等のイベントで洪水対応策の効果を比較した結果、ダムや水田の対象範囲と雨量分布が重なるかどうかで効果が異なり、降雨の時空間情報が地域の水害リスクに大きく関与することが示された。今後この2つの技術を連携させ、よりリスク評価と対応策の提案に繋げる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多発する水害に対して、どのような降雨パターンでリスクが高まるか、またどのような対策を実施すればリスク低減に繋がるかを事前に十分検討できれば、よりロバストな地域防災計画の策定が可能になる。その実現には、観測数が少ないために十分な豪雨のパターンを準備できない点がネックであったが、本課題で開発した生成モデルを活用することでその課題が解消された。また、流域内で取りうる対策の効果を評価する流出モデルを組み合わせることで具体的な対応策の検討が進むなど、流域治水の促進に貢献可能な点で、本課題成果には社会的な意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：A model for generating spatio-temporal heavy rainfall data was developed for use in flood risk assessment in the watershed.

The generation model, which was trained on the analyzed rainfall in the target area, was able to generate a large number of hourly rainfall spatiotemporal patterns. A watershed water cycle model was applied to flood risk assessment, and the functions of dams and paddy field dams were incorporated to enable assessment of risk and the effectiveness of flood countermeasures. The results of a comparison of the effectiveness of flood control measures in events with equivalent basin-averaged rainfall in the target watershed showed that the effectiveness differs depending on whether the rainfall amount distribution overlaps with the target area of dams and paddies, indicating that spatiotemporal information on rainfall has a significant bearing on flood risk in the region. Next, these two technologies will be linked to assess risk and propose countermeasures.

研究分野：水文学

キーワード：流域治水 拡散モデル 水害リスク 気候変動

1. 研究開始当初の背景

近年、各地で激甚な豪雨による水害が発生している。さらに将来は気候変動の影響によるスーパー台風の発生、線状降水帯やゲリラ豪雨のような局地的・時間集中的な降雨パターン変化によって、水害リスクがさらに増大する可能性が高い。実際に、ゲリラ豪雨や線状降水帯のように局地性の高い且つ集中的な豪雨が発生しており、広域の河川流域では、上流域で大きな降雨があると雨が降っていない下流で急激に河川流量が上昇したり、流出遅れの影響で雨が止んだ翌日に水位が上昇する場合があるなど、その地点だけを見てはリスクを把握できない現実がある。そのため、このようなリスクを把握し低減させるためには、流域内における様々な降雨時空間パターンを想定して、流出を一体的に解析し、危険度の高い降雨パターンやその被害量等の潜在リスクを見出す必要があると考えられる。

このようなリスク評価を実現するには、様々な降雨パターンを備える豪雨が入力となる。しかしながら、災害を伴うような豪雨の発生数は1地区で見ると少なく、想定できるパターンに限りがある。このような課題解決に向け、研究実施者らは過去に豪雨の模擬発生法(皆川ら、2014)を開発した。しかし、この手法は地点雨量の時系列変化まで考慮できたが、雨量の面的なバラツキで表される空間分布の想定への拡張が残された課題となっており、広域の河川流域への適用に至っていない。

水害リスクが注目される中で、近年は流域治水の理念が注目されている。これは、流域内に現存するあらゆる関係者が協力し災害リスクを低減させることを目指すもので、ここでは本来治水の役割を持たない農業用ダムの事前放流(洪水キャッチ能力強化)や水田を用いる田んぼダム(雨水貯留と流出遅延効果)による洪水緩和機能の発揮も期待される。そのため、これらの施設が流域治水に対してどの程度の貢献が可能であるかについて詳細な評価が求められる。上記のような技術が開発されると、リスク評価とともに、様々な施設の機能を定量的に評価し、具体的な流域治水策の提案と発展に繋がる情報を提供できると予見される。

2. 研究の目的

上記背景を受け、本研究では以下の3点の実現を目的とする。

(1) 様々な降雨パターンでの水害リスク評価にむけて、過去に経験したものから未経験のものを含む多様な降雨時空間データを多数生成する技術を開発する。

(2) 広域の河川流域における水害リスクとその空間分布を明らかにするため水文解析モデルを適用し、農業用ダムの事前放流と水田を利用する田んぼダムの流出機構を組み込む。

(3) 構築したモデルによる洪水解析を実施するとともに、農業施設を活用した洪水対策による流域治水への貢献可能性を検証する。

3. 研究の方法

本研究の目的達成に向けて、以下の2つの手法に取り組む。

(1) 深層学習モデルを活用した豪雨時空間データの生成

本研究では、豪雨データの生成に深層学習モデルの1つである拡散モデル(diffusion model)を適用する。拡散モデルは画像生成に用いられるモデルの一種で、元データに徐々にノイズを加えてデータが完全なノイズへと変化する過程を学習し、完全なノイズになったデータに対して変化と逆の過程を加えて修復する機能を備える。これにより、学習済みモデルに様々なノイズ画像を与えると、そのノイズを除去して学習データ(ここでは降雨時空間情報)に類似する様々なデータを生成可能になる。モデル内部で学習処理に用いるU-Net構造には、2次元情報である降雨空間分布の時間発展の特徴をうまく捉えるため3次元畳み込み演算を実装し、降雨の時空間情報の特徴も学習できるよう工夫する。

学習データには、1kmメッシュ単位の解析雨量を用いる。研究対象とする河川流域を内包する矩形領域を設定し、その領域内のどこかである程度の雨量(ここでは日雨量70mm以上に設定)が生じた日とその前後の期間を抽出し、その期間のデータを1時間単位で取得する。1時間単位の降雨空間分布を1枚の画像と見做し、そこから24時間分の時間発展を1つのまとまりとして学習させる。生成されるデータは、学習データと同様に24時間分の降雨時空間情報とする。

(2) 流域水害リスク評価に向けた分布型モデルの構築

対象流域には最上川流域を選定する。水害リスク評価には、水文解析用に開発された分布型水循環モデル(例えば吉田ら、2012;相原ら、2023)を用いる。本モデルは1kmメッシュ単位で構成されており、地形、土地利用等の基礎情報を収集して各メッシュの必要情報を整理する。また、流出パラメータは観測流量との比較によりチューニングを行う。

本モデルで、洪水時の農業施設の活用を想定するため、農業用ダムにおける事前放流と、水田における田んぼダムの流出を組み込む。具体的には、ダムにおいては洪水イベントの前に治水協定等で締結された空き容量を確保することとし、田んぼダムでは水田落水枒内に器具(オリフィス型)を設定した際の流量計算機構を組み込む。

(3) 農業施設を活用した洪水対策による流域治水への貢献可能性の検証

上記(2)で構築したモデルで、同降雨イベント時における農業用施設の洪水対策ありの場合/対策なしの場合の解析結果を比較することで、効果を評価する。その際の評価指標は、以下の式(1)で表されるイベント期間内の最大ピークカット効果とする。

$$PCR_i = \frac{(Q_{max1_i} - Q_{max2_i})}{Q_{max1_i}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 PCR_i ：最大ピークカット率(%)、 Q_{max1_i} ：活動未実施時の最大流量(m^3/s)、 Q_{max2_i} ：活動実施時の最大流量(m^3/s)、 i ：メッシュ番号である。

結果は、ダムの効果、水田の効果、合算の効果をそれぞれ算定する。

4. 研究成果

(1) 深層学習モデルを活用した豪雨時空間データの生成

ここでは、後に示すリスク評価の対象に選定した最上川流域全域を含む東西に約120km、南北に約200kmの領域を設定した(Fig. 1)。まずこの領域において、2008年～2020年までの解析雨量を収集し、その中から閾値を超える雨量が発生した降雨イベントを探索した結果、合計で57のイベントが抽出され、その期間の全時間数は約13000時点となった。この全データを、生成モデルの学習用に活用し、実際に学習を進めた。ここでは学習の空間サイズをランダムクロップによって64km×64kmとし、降雨継続時間は24時間に固定した。構築したモデルの学習曲線を見ると順調に学習が進行している様子が示され、2500 epochで損失が0.01程度となった(Fig. 2)。

この学習済みモデルで、学習時の設定と同じ領域の降雨時空間データを多数生成させた。その結果の1例を見ると、ある程度の雨量が生じている領域が時間と共に推移することが確認でき、またその領域が生成データごとに異なるなど、多様な降雨時空間パターンを生成できていることが確認された(Fig. 3)。さらに詳細に結果を見るために、1つのメッシュに注目した地点雨量のハイエトグラフを見ると、地点毎に降雨パターンが異なるとともに、実測降雨の特徴でもある降雨波形の自己相関性が備わっている様子も見て取れた。よって、本データが観測データの代替として水害リスク評価に活用する適用可能性は十分に見て取れた。

一方で、各メッシュの生成結果より、24時間分のデータ中に無降雨(0mm/h)の期間が無く、どの時点でも僅か(1mm/h未満)に雨量が生じている結果となっていた。この影響により、生成データの総雨量を積算すると観測データより大きくなることが予見された。また生成データの最大時間雨量はモデル内の設定による他、学習データに含まれる地域特性が十分反映できているか等については、さらなる検証が必要と考えられた。よって本研究においては、多様な降雨時空間パターンの生成手法を新たに開発したところまでに留め、本生成データについて今後さらなる検証を実施した後に、様々な解析に利活用するよう判断した。

(2) 流域水害リスク評価に向けた分布型モデルの構築

分布型モデルの適用範囲は、解析時間の短縮や近年豪雨に伴う水害が

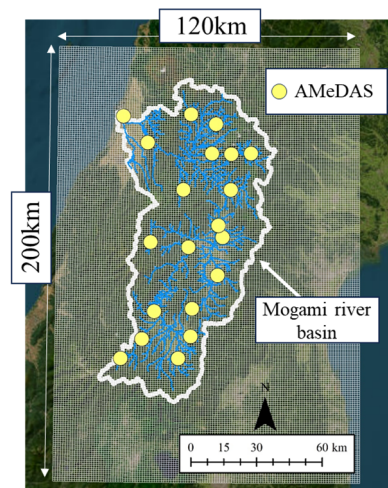


Fig. 1 生成モデルの学習に用いた解析雨量範囲

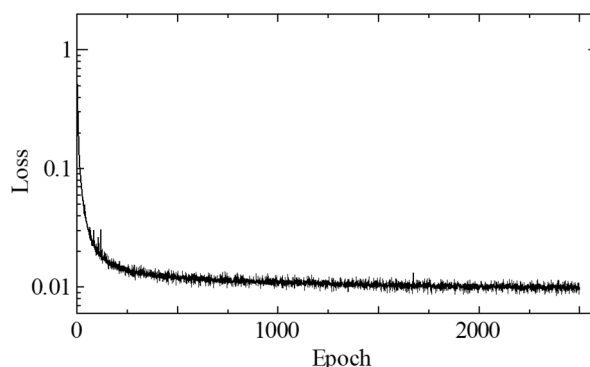


Fig. 2 構築した生成モデルによる学習曲線の推移

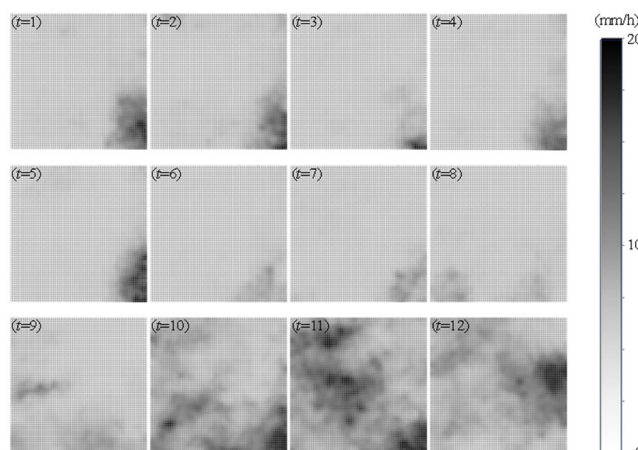


Fig. 3 生成豪雨にみる降雨量の時空間分布パターン例 (64km × 64km 領域での例)

生じている区間を含むように条件を設定し、最上川流域全体（流域面積約 7,000km²）の中から稲下地点を最下流とする上～中流域までとした（対象流域面積約 3,700km²）。その範囲において、前述の解析雨量期間中における最下流の稲下地点の観測流量を収集し、ピーク流量がある程度大きい値（1,500 m³/s 以上）であった過去の豪雨イベントを抽出すると、全部で 10 イベントが得られた。これらの豪雨イベントを対象に、モデル内で流出に係るパラメータ群を、観測流量をよく再現するようチューニングした。

同モデルの各メッシュには、土地利用情報が設定されている。その中で、水田の土地利用があるメッシュでは、通常の落水柵からの流出に加え、田んぼダム器具を設定した際の流出計算機構を組み込んだ。ここでは、代表的な器具としてオリフィス流出により流出量を抑制する機能分離型の器具（例えば皆川ら、2022）を適用した結果、水田面積が卓越するメッシュでは Fig. 4 のように大きく流出ハイドログラフが変化し、降雨時に水田を活用した対策の効果を評価できた。水田流出量は、メッシュ内の水田面積割合に応じて変化するため、メッシュ毎の効果に加え、上流にある全メッシュの流出が集まる下流地点での総合的な効果を評価可能となった。また、ダムについては、対象の降雨イベント開始前に治水協定で設定された空き容量まで強制的に水位を下げてポケットをあけることで、事前放流の効果を表現した。

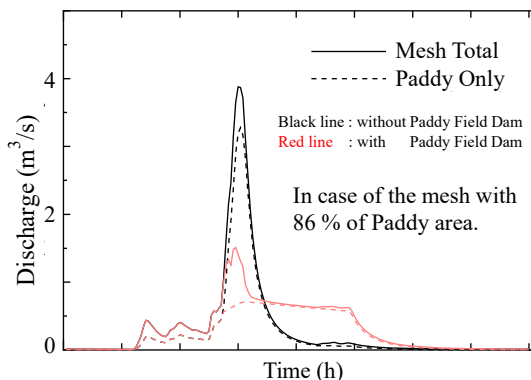


Fig. 4 田んぼダムを組み込んだことによる水田主体のメッシュ流出量の変化

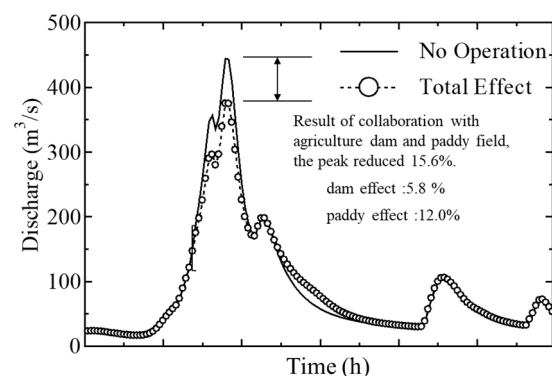


Fig. 5 農業施設のフル活用による河川流量ピークカットの推定例（糠野目地点）

(3) 農業施設を活用した洪水対策による流域治水への貢献可能性の検証

本モデルを活用し、最上川上流域にある農業用ダムである水窪ダム（総貯水量約 3,000 万 m³、うち 93%が利水用）を有し、流域面積の約 12%を水田が占める糠野目地点から上流域を対象に解析した結果を Fig.5 に示す。本イベントは 2019 年 10 月に襲来した台風 19 号時の例であるが、農業施設の活用を仮定した結果を見ると、活用しない場合の結果に比べ流量ピークが約 15%カットされることが示された。この効果はダムの空き容量や水田の活用を 100%とした場合の結果であり、本流域において期待される最大ポテンシャルと考えられる。また、治水目的ではない農業用ダムや水田を活用することで流域治水に貢献できる可能性が示された。実際にはダムの空き容量や田んぼダム実施率は時期によって異なると考えられるため、降雨の発生時期によって異なる様々な地域条件下で、この効果がどのように変化していくかを示すことが次の課題となる。

また、同イベント時の各メッシュのピークカット率の解析結果を対象流域全体で面的に示すと Fig. 6 のようになった。図に見るように、ダム直下ではダム効果が大きく発揮されるほか、水田面積割合が大きいメッシュでは水田の効果が現れており、効果が大きいエリアの空間分布や下流域で発揮される効果を面的に示すことができた。このような空間情報を示すことで、対策を実施した地域の効果がどこにどの程度発揮されるか定量的に評価できるため、具体的な流域治水計画の検討・策定に資する情報を提供可能となった。

本課題により、河川流域の水害リスク評価の入力となる広域の降雨時空間分布データの生成手法と、その解析に用いる分布型モデルが開発された。今後、この両者の活用により、様々な降雨パターンと水害リスクの関係、洪水対策によるリスク低減効果のさらなる評価に取り組む。

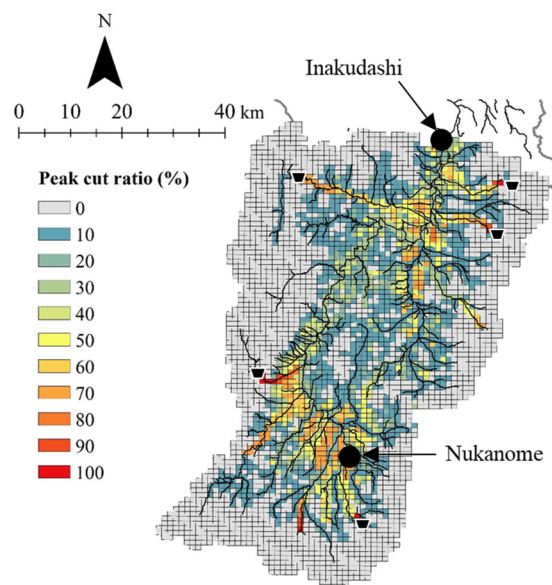


Fig. 6 豪雨時に発揮された河川流量の最大ピークカット効果の空間分布（洪水調節ダム効果を含む）

引用文献：

- 皆川ら（2014）：長短期降雨特性を備えた豪雨の内部波形の模擬発生法、農業農村工学会論文集、291、pp.15-24.
- 皆川ら（2022）：模擬豪雨を活用した特徴の異なる田んぼダム器具の機能評価、農業農村工学会論文集、314 (90-1)、pp. I_157- I_165
- 吉田ら（2012）：広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化、農業農村工学会論文集、277、pp.9-19.
- 相原ら（2023）：分布型水循環モデルにおける短期流出過程の改良、農業農村工学会論文集、316 (91-1)、pp. I_21- I_28

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 皆川裕樹、相原星哉、吉田武郎、高田亜沙里、久保田富次郎
2. 発表標題 農業水利施設の協働が広域の河川流量に与える影響の評価
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 皆川裕樹、相原星哉、吉田武郎、高田亜沙里、久保田富次郎
2. 発表標題 流域治水への貢献に向けて農業水利施設が発揮する広域ポテンシャル評価の検討
3. 学会等名 水文・水資源学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 皆川裕樹、福重雄大、相原星哉
2. 発表標題 拡散モデルによる多様な時空間分布特性を備えた降雨データ生成の試み
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	福重 雄大 (Fukushige Yudai) (80845850)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究員 (82111)	

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
---------	---------