

## 学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高時空間解像度河川情報を用いた河川流域シミュレーションの高度化 (Advanced river basin simulation using high spatiotemporal resolution river information)
氏名 (Name)	大中 臨

近年は地球温暖化の進行と共に高強度の雨とそれに伴う河川災害の被害数が増加しており、IPCC の第 6 次報告書によれば、将来気候における豪雨災害の激甚化が言及されている。実際に我が国では、「平成 30 年 7 月豪雨」、「令和元年東日本台風」、「令和 2 年 7 月豪雨」と命名された激甚な豪雨災害が発生し、多くの人的・物的被害を齎した。それらの豪雨災害に対する調査研究を行った結果、「流域治水」に代表される流域一体の河川管理を実現するには、広域の高時空間解像度の河川情報を活用して、河川流域シミュレーションの高度化を図ることが必要不可欠であることが示された。そこで本研究では、河川観測技術と河川流域シミュレーション技術の高度化を目的として、[1]リモートセンシング技術を用いた高時空間解像度の河川情報モニタリング手法の開発、[2]当該河川情報を用いた河川シミュレーションの高精度化、そして[3]高精度化したモデルを用いた将来気候における氾濫リスク評価を実施した。

[1]のリモートセンシング技術を用いた河川情報モニタリング手法の開発では、水面屈折補正係数を適用した UAV-SfM 測量手法によって宍道湖の浅水域では透明度の高い時期に 2m 程度の水深までの地形を把握できることを示した。また、実河川においても公共測量手法である航空レーザー測深と同等の精度で冠水部も含む地形を把握できた。また、空中・水上両用ドローンで得られた画像と水深から河床の粒径を計測する手法を開発し、その精度を確認した。その結果、当該手法は面積格子法とほぼ同等の精度で河床の粒度分布を計測できることを示し、河川内に侵入することなく効率的に水面下の河床表層の粒度分布を把握できる可能性を示した。また、衛星画像から、NDVI 法、決定木法、深層学習法によって土地被覆分類を実施し、その精度を検証した。その結果、各手法とも学習元の流域の地被分類の精度として F 値が 0.7 以上であったが、特に深層学習法は 0.93 と精度が高かった。また、他の流域に適用した際に NDVI 法と決定木法は共に F 値が 0.69 であったが、深層学習法は 0.86 であり、深層学習法は汎用性にも優れていることが示された。

[2]の高時空間解像度の河川情報を用いた河川シミュレーションの高精度化では、はじめに UAV リモートセンシング技術を用いた河道地形モニタリングで得られた河川情報を元に、初期条件として与える地形、粒度分布の空間解像度が河床変動計算の精度に及ぼす影響の検討を実施した。その結果、初期条件として与える地形の縦断解像度を 5m, 10m, 50m, 100m, 200m に変更させた場合の計算で、平均河床変動量誤差はそれぞれ 0.397m, 0.424m, 0.444m, 0.484m, 0.495m、堆積と洗堀の一致したセルの割合はそれぞれ 84%, 81%, 80%, 76%, 75% となり、初期条件として与える河川地形の解像度が高くなると、河床変動計算の精度が向上することが示された。また、初期条件として空間的に細かい粒度分布を与えた場合と一様粒径で計算を実施した場合の計算でも、前者で河床変動解析の精度が向上することが示された。高空間解像度の河道断面情報が流出氾濫シミュレーションの精度に及ぼす影響の検討では、実河道断面を入力した解析は、掘り込み河道を想定した計算よりも水位の RSME が新橋、真尾、漆尾、堀観測所の平均で約 1.1m 改善することが示された。

[3]の高精度化したモデルを用いた将来気候における氾濫リスク評価では、佐波川流域を対象に、高解像度の河川断面情報を入力して高度化した降雨流出氾濫モデルを用いて佐波川の計画降雨を対象とした 4 度上昇のシナリオ下における疑似温暖化実験を行い、将来気候における佐波川流域の氾濫リスク評価を実施した。その結果、現在気候と比較して将来気候は流量・水位とも増加しており、ピーク流量は、各観測所および将来気候で想定される 4 つのメンバーの平均で約 2.03 倍、

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）（Format No.7）日本語版

ピーク水深は約1.30倍増加し，床上浸水面積は最大3.37倍拡大することが示された．また，流域治水対策として行われる計画河道整備および森林整備（国有林・私有林における植栽，間伐，森林土壌の育成等）の効果を検証した．その結果，計画河道整備は，最も流量の増加する将来気候メンバーで最大122cm最大水位を低下させ，対策なしの状況より床上浸水域を14%減少，1m以上の浸水域を27%減少させる効果が示された．一方，森林整備は計画河道整備よりも効果は得られず，同メンバーにおける水位低減効果は最大15cm，床上浸水域および1m以上の浸水域の減少効果はそれぞれ4%と5%であった．いずれの検討でも防府市街地より上流の外水氾濫は抑えられておらず，上流域の氾濫原に対して将来気候に備えた対策案を検討する必要があることが示された．

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高時空間解像度河川情報を用いた河川流域シミュレーションの高度化 (Advanced river basin simulation using high spatiotemporal resolution river information)
氏 名 (Name)	Nozomu Onaka

In recent years, with the progress of global warming, the number of damages caused by heavy rainfall and related river disasters has increased. In Japan, heavy rain disasters named "The Heavy Rain Event of July 2018," "Typhoon Hagibis (2019)," and "The Heavy Rain Event of July 2020" have caused many human and property damages. First, this study was conducted to identify the characteristics and mechanisms of each heavy rain disaster through field surveys and river simulations. It was concluded that river simulations are effective in understanding disaster mechanisms, and high-resolution river information are crucial for improving simulation accuracy. Effective flood control planning requires obtaining detailed river basin information, improving the accuracy of river basin simulations, and predicting future runoff floods. Therefore, this study aims to improve river monitoring and river basin simulation methods. First, we developed a method for monitoring river information using remote sensing technology. The spatial resolution of the river information provided as an initial condition was evaluated for its influence on the accuracy of the analysis of riverbed fluctuation and rainfall-runoff inundation. Then, an assessment of inundation risk in a future climate was conducted using a rainfall-runoff inundation model for the Saba River, a first-class river in Yamaguchi Prefecture.

First, in developing a river information monitoring method using remote sensing technology, it was shown that a UAV-SfM surveying method with a water surface refraction correction factor can determine the topography of Lake Shinji to a depth of about 2 m during clear water in the shallow water area. The UAV-SfM surveying method was also able to determine the topography of actual rivers, including underwater areas, with the same accuracy as the airborne laser survey, which is a public surveying method. In addition, we developed a method to measure the grain size distribution of riverbed materials based on the images and water depths acquired by both aerial and underwater drones, and confirmed the accuracy of the method. The results showed that this method can measure the grain size distribution of the riverbed with almost the same accuracy as the area sampling method, and has the potential to efficiently determine the grain size distribution of the riverbed surface layer below the water surface without entering the river. We also performed land cover classification from satellite images using the NDVI method, the decision tree method, and the deep learning method, and verified the accuracy of these methods. The results showed that all methods used for land cover classification achieved an accuracy (F-value) of at least 0.7. However, when applied to different basin, the deep learning method showed higher versatility with an F-value of 0.86, outperforming the NDVI and decision tree methods, which scored 0.69.

Then, based on the river information obtained from channel topography monitoring using remote sensing technology, we investigated the effect of the spatial resolution of the topography and the grain size distribution given as initial conditions on the accuracy of the calculation of riverbed fluctuation. The results showed that finer longitudinal resolutions of the topography (5 m, 10 m, 50 m, 100 m, and 200 m) resulted in more accurate riverbed fluctuation

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)  
(about 800 words)

calculations, with average errors of 0.397 m, 0.424 m, 0.444 m, 0.484 m, and 0.495 m, respectively, and sediment deposition/scour accuracy decreasing from 84%, 81%, 80%, 76%, and 75% with decreasing resolution. Higher topographic resolution as initial conditions improved the accuracy of riverbed fluctuation analysis. It was also shown that the accuracy of the riverbed fluctuation analysis was improved when a spatially fine grain size distribution was used as the initial condition. The effect of high spatial resolution channel cross-section information on the accuracy of the runoff-inundation simulation was investigated. The analysis using actual channel cross-section information improved the RSME of the water level by about 1.1 m on average at each station compared to the calculation assuming an excavated channel.

Finally, a pseudo global warming experiment was conducted for the Saba River basin using a rainfall-runoff inundation model refined by inputting high-resolution cross-section information of the river channel, and a rainfall waveform of the Heavy Rain Event of July 2018 was used to assess the inundation risk of the Saba River basin in the future climate. The results showed that both discharge and water level will increase in the future climate compared to the current climate, and the peak discharge and water depth will increase by about 1.35 and 1.13 times, respectively, on average for each observatory and four scenarios assumed in the future climate, and the inundated area above ground level will increase by up to 2.00 times. The effects of channel excavation and forest maintenance as “River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All” were also investigated. The results showed that river channel excavation was effective in lowering the maximum water level by up to 1 m and reducing the inundated area above ground level in the C2 scenario. Forest maintenance was shown to be slightly effective in reducing peak water levels and flow rates, especially in the upper reaches of the river.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	大中 臨
審査委員	主 査：赤松 良久
	副 査：朝位 孝二
	副 査：鈴木 素之
	副 査：榊原 弘之
	副 査：山本 浩一
論文題目	高時空間解像度河川情報を用いた河川流域シミュレーションの高度化 (Advanced river basin simulation using high spatiotemporal resolution river information)

## 【論文審査の結果及び最終試験の結果】

近年は地球温暖化の進行と共に高強度の雨とそれに伴う河川災害の被害数が増加しており、IPCC の第 6 次報告書によれば、将来気候における豪雨災害の激甚化が言及されている。実際に我が国では、「平成 30 年 7 月豪雨」、「令和元年東日本台風」、「令和 2 年 7 月豪雨」と命名された激甚な豪雨災害が発生し、多くの人的・物的被害を齎した。それらの豪雨災害に対する調査研究を行った結果、「流域治水」に代表される流域一体の河川管理を実現するには、広域の高時空間解像度の河川情報を活用して、河川流域シミュレーションの高度化を図ることが必要不可欠であることが示された。そこで本研究では、河川観測技術と河川流域シミュレーション技術の高度化を目的として、[1]リモートセンシング技術を用いた高時空間解像度の河川情報モニタリング手法の開発、[2]当該河川情報を用いた河川シミュレーションの高精度化、[3]高精度化したモデルを用いた将来気候における氾濫リスク評価を実施した。

[1]のリモートセンシング技術を用いた河川情報モニタリング手法の開発では、水面屈折補正係数を適用した UAV-SfM 測量手法によって宍道湖の浅水域では透明度の高い時期に 2m 程度の水深までの地形を把握できることを示した。また、実河川においても公共測量手法である航空レーザー測深と同等の精度で冠水部も含む地形を把握できること確認した。さらに、空中・水上両用ドローンで得られた画像と水深から河床の粒径を計測する手法を開発し、従来用いられている面積格子法とほぼ同等の精度で、河川内に侵入することなく効率的に水面下の河床の粒度分布を計測できることが明らかとなった。次に、NDVI 法、決定木法、深層学習法を用いた衛星画像解析によって、河川内の土地被覆分類を実施し、その精度を検証した。その結果、各手法とも学習した流域の地被分類の精度は F 値 0.7 以上であったが、特に深層学習法は 0.93 と精度が高かった。また、他の流域に適用した際に、NDVI 法と決定木法は共に F 値が 0.69 であったが、深層学習法は 0.86 であり、深層学習法は汎用性にも優れていることが示された。

[2]の高時空間解像度の河川情報を用いた河川シミュレーションの高精度化では、はじめに UAV リモートセンシング技術を用いた河道地形モニタリングで得られた河川情報を元に、初期条件として与える河床地形、粒度分布の空間解像度が河床変動計算の精度に及ぼす影響を検討した。その結果、初期条件として与える河床地形の縦断解像度を 5m, 10m, 50m, 100m, 200m に変更させた場合の計算で、平均河床変動量誤差はそれぞれ 0.397m, 0.424m, 0.444m, 0.484m, 0.495m、堆積と洗堀の一致したセルの割合はそれぞれ 84%, 81%, 80%,

76%, 75%となり, 初期条件として与える河川地形の解像度が高くなると, 河床変動計算の精度が向上することが示された. また, 初期条件として空間的な分布を考慮した粒度分布を与えた場合と一様粒径で計算を実施した場合の比較から, 前者で河床変動解析の精度が向上することが示された. 次に, 高空間解像度の河道断面情報が流出氾濫シミュレーションの精度に及ぼす影響の検討では, 実河道断面を入力した解析は, 掘り込み河道を想定した計算よりも水位の RSME が各観測所の平均で約 1.1m 改善することが示された.

[3]の高精度化したモデルを用いた将来気候における氾濫リスク評価では, 佐波川流域を対象に, 高度化した降雨流出氾濫モデルを用いて計画降雨を対象とした疑似温暖化実験を行い, 将来気候における流域の氾濫リスクを評価した. その結果, 現在気候と比較して将来気候は流量・水位とも増加しており, ピーク流量は, 各観測所および将来気候で想定される4つのシナリオの平均で約 2.03 倍, ピーク水深は約 1.30 倍増加し, 床上浸水面積は最大 3.37 倍拡大することが示された. 次に, 流域治水対策として行われる計画河道整備(河床掘削, 築堤)および森林整備(国有林・私有林における植栽, 間伐, 森林土壌の育成等)の効果を検証した. その結果, 計画河道整備によって, 最大で 122 cm ピーク水位が低下し, 整備前より床上浸水域が 14%減少, 1 m 以上の浸水域が 27%減少することが明らかとなった. また, 森林整備によって, 床上浸水域は 5%程度減少することが示された. しかし, いずれの対策でも上流域の外水氾濫は抑えられておらず, 上流域の氾濫原に対して将来気候に備えた追加の対策案を検討する必要があることが示唆された.

以上の検討より, 高時空間解像度の河川情報を活用することによって, 河床変動や降雨流出シミュレーションの再現性を高めることが可能であり, 将来気候における氾濫リスク評価及び今後の治水計画の立案に活用可能であることが明らかとなった.

公聴会においては, 本研究で開発した観測手法の流域治水への適用案や, 佐波川流域治水に関して現段階で考えられる案, 粒度分布調査結果における調査地点の粒度のばらつき, 疑似温暖化実験に使用した将来気候の空間的な特徴の違い, 河川データの取り扱いやモデルの作成に関して工夫した点について説明を求められた. この公聴会での質問に対して適切な回答がなされた.

以上より本研究は新規性, 独創性, 有用性, 信頼性, 完成度ともに優れ, 博士(工学)の論文に十分値するものと判断した.

また, 審査会, 公聴会での質問に対して適切な応答がなされたことから最終試験は合格とした.

なお, 主要な関連論文の発表状況は以下の通りである.

【関連論文(査読のある雑誌等)計 6 編】

- (1)著者氏名 : 大中臨, 赤松良久, 河野誉仁, 山口皓平  
論文題目 : 平成 30 年 7 月豪雨における島田川水系東川の土石流・河川氾濫の複合災害の実態解明  
学術雑誌名: 土木学会論文集 B1 (水工学)  
巻、号、頁: 第 75 巻, No.1, 260-269 頁  
発行年月 : 2019 年 12 月発行
- (2)著者氏名 : 大中臨, 安木進也, 赤松良久  
論文題目 : 宍道湖浅水域における UAV・SfM-MVS を用いた水面下地形測定の有効性に関する検討  
学術雑誌名: 土木学会論文集 B1(水工学)  
巻、号、頁: 第 76 巻, No.2, I\_1033-I\_1038 頁  
発行年月 : 2020 年 11 月発行
- (3)著者氏名 : 大中臨, 赤松良久, 平田真二, 佐山敬洋  
論文題目 : 令和元年台風第 19 号による那珂川流域の流出氾濫再現シミュレーション  
学術雑誌名: 土木学会論文集 B1 (水工学)  
巻、号、頁: 第 76 巻, No.1, 304-314 頁  
発行年月 : 2020 年 11 月発行
- (4)著者氏名 : 大中臨, 赤松良久, 宮園誠二  
論文題目 : UAV 写真測量に基づく水面下を含めた効率的な河道形状モニタリング手法の検討

(様式 9 号)

学術雑誌名：土木学会論文集 B1 (水工学)

巻、号、頁：第 77 巻, No.2, I\_907-I\_912 頁

発行年月：2021 年 12 月発行

(5)著者氏名：大中臨, 赤松良久, 矢野真一郎, 二瓶泰雄, 山田真史, 佐山敬洋

論文題目：令和 2 年 7 月豪雨における球磨川渡-人吉地区の河川氾濫の実態解明

学術雑誌名：土木学会論文集 B1(水工学)

巻、号、頁：第 77 巻, No.1, 203-214 頁

発行年月：2021 年 12 月発行

(6)著者氏名：大中臨, 赤松良久, 宮園誠二, 丸山啓太

論文題目：水上・空中両用ドローンを用いた河川水面下の粒度分布推定手法の開発

学術雑誌名：河川技術論文集

巻、号、頁：第 29 巻, 97-102 頁

発行年月：2023 年 6 月発行