

## 2 国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：水災害研究グループ長 伊藤弘之

研究担当グループ：水災害研究グループ、寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

### 1. 研究の必要性

時間雨量が 50 mm を上回る豪雨が全国的に増加しているなど、近年、雨の降り方が局地化・集中化・激甚化しており、各地で災害が発生している。20 世紀半ば以降気温は上昇しており、降水の極端化による水災害はさらに頻発化すると予測されている（IPCC 第 5 次報告書（2013））。また、積雪量が減少し、積雪・降雪期間が短くなることも予測されている。

国内では、「国土強靱化基本計画」の閣議決定（2014 年 6 月）に加え、国土交通省より「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」が公表（2015 年 1 月）され、1)「状況情報」の提供による主体的避難の促進、広域避難体制の整備、2) 国、地方公共団体、企業等が主体的かつ、連携して対応する体制の整備を目指している。

第 3 回国連防災世界会議（2015 年 3 月）では、今後 15 年間に「災害リスク及び損失の大幅な削減」を目指す仙台防災枠組が採択されるとともに、我が国の防災の知見と技術による国際社会への貢献をさらに力強く進めるため「仙台防災協力イニシアティブ」が発表された。

社会資本整備審議会の答申「水災害分野における気候変動適応策のあり方について」（2015 年 8 月）においても、激甚化する水災害に対応し気候変動適応策を早急に推進すべきとされた。

その後、社会資本整備審議会の答申「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～」(2015 年 12 月)において、施設の能力には限界があり、施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するものとされ、「水防災意識社会再構築ビジョン」(2015 年 12 月)が策定された。また、「中小河川等における水防災意識社会の再構築のあり方について」(2017 年 1 月)において、中山間地域特有の洪水被害軽減に向け、避難判断のための雨量情報の活用や、流木や土砂の影響への対策の研究強化を進めるべきとされている他、「大規模広域豪雨を踏まえた水災害対策のあり方について」(2018 年 12 月)においては、被害が発生するメカニズム等について科学的に明らかにするとともに、効果的な防災・減災に関する技術開発を推進する必要があるとされている。

さらに 2019 年には、気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会による提言「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」(2019 年 10 月)において、気候変動の影響の評価も進め、よりの確に地域の水災害リスクを評価できる手法を開発し、気候変動による水災害リスク増大について分析を進め、将来の水災害リスクについてわかりやすく地域社会に情報発信することが必要とされている。

加えて、社会資本整備審議会の答申「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～」(2020 年 7 月)において、近年の水災害による甚大な被害を受けて、施設能力を超過する洪水が発生することを前提に、社会全体で洪水に備える水防災意識社会の再構築を一步進め、気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で行う、流域治水への転換を推進し、防災・減災が主流となる社会を目指すこととされている。

これらを踏まえ、今後一層、集中豪雨などの観測や予測等技術向上、気候変化等も考慮したリスク評価・防災効果が適切に把握されるとともに、防災対策に役立つ防災情報が提供されるようリスクマネジメント支援技術を開発することが必要かつ急務である。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、データ不足を補完する技術開発やリモートセンシング技術により、地上観測が不足している地域等において予測解析の精度を向上させること、様々な自然条件、多様な社会・経済状況に応じ、

多面的な指標で水災害リスクを評価する技術を開発すること、これらの技術により、例えば地上観測データなどが不足する地域においても気象・地形地質等の自然条件、社会経済条件など地域の実情に合った水災害リスクマネジメントが実行できるよう支援することを主要な研究分野とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発
  - (2) 様々な自然・地域特性における洪水・渇水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発
  - (3) 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発
- このうち、令和2年度は(1)、(2)、(3)について実施している。

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和2年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。これらの研究課題を統合させることにより、洪水予測、リスク評価、対応策等を総合的に支援する技術の開発が期待される。

#### (1) 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

中小河川を対象とした、「短時間で計算可能な」、「安価」、「簡便」、「必要な精度を有する」水位予測システムの開発を行い、主に次の成果が得られた。①流出解析モデルとして RRI モデルを選定するとともに、計算流量から水位への換算式(H-Q式)を使用し、水位を短時間で計算する方法を開発した。②リアルタイムの水位観測データを用いて水位予測モデルを逐次修正する手法として、粒子フィルタを適用した。③パラメータ自動調節機能として、SCE-UA法をRRIモデルに適用した。④実績・予測雨量として解析雨量、速報版解析雨量、降水短時間予報、速報版降水短時間予報、高解像度降水ナウキャストの検証及び組み合わせ方法の提案を行った。⑤データが不足している河川でのモデル構築手法として、河川特性からパラメータを推定する手法の開発等を行った。⑥中小河川の河川管理者等が容易にモデル構築を行えるよう、開発したモデル構築手法及び留意事項をとりまとめたマニュアル案を作成した。⑦令和3年までに125河川のモデルを構築し、データ入手・変換、予測計算、図化、配信を行うリアルタイム自動配信システムへの適用を試行した。

発電ダムを対象にアンサンブル降雨予測と流出モデルを用いて、発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作を検討した。アンサンブル降雨予測については、大井川・犀川流域を対象に39時間先の予測システムを運用するとともに、利根川流域を対象に気象庁3ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法を検討した。流入量予測については、犀川流域における2018年7～9月の出水イベントを対象に検討し、ピーク流入量の積算流入量ともに高精度で予測した。流入量予測を基にした効率的なダム操作については、大井川の畑薙第一ダムを対象に2018年、2019年の出水で検討し、事前放流でゲート放流量を抑えるとともに発電量指標で増電を示した。

土砂移動を含む水災害を対象にした数値モデルを開発し、同時に人工衛星データや現地調査から計算条件を作成する手法を開発し、これらを用いて数値計算を行い、水災害ハザードを推定する手法を示すことを目的に研究を行った。降雨に伴う流域からの土砂流出予測法の提案、連行の概念を用いた浮遊砂浮上量式の提案、人工衛星と水位計データから河道地形を作成する手法の提案を行った。これらを用いてバングラデシュのジャムナ川と五福谷川において洪水再現計算を行った結果、提案する手法が対象地域の水災害ハザードを推定する上で有用であることが示された。

航空レーザ測量による積雪分布の計測、風による雪の移動を考慮した融雪流出解析、深層学習による融雪期のダム流入量予測、ダム管理を高精度化するシステムの検討を行った。その結果、森林限界未満の樹林帯では積雪深は標高と線形関係があり、森林限界以上の高標高帯では地上開度との間で線形関係がある事を示した。さらに、風による雪の移動を考慮する事で融雪流出解析の精度が向上した。深層学習においても24時間先までの予測を行い、これらの成果と積雪面積率を用いて融雪期のダム管理を高精度化するシステムを提案した。

## (2) 様々な自然・地域特性における洪水・渇水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発

世界には地上観測データの空白域が未だに存在し、洪水・渇水等の水災害リスク評価の妨げとなっている。このような空白域の一つである西アフリカを対象に、データ不足を解消するために再解析気象データや衛星マイクロ波データを効果的に活用した植生動態－陸面結合データ同化システム (CLVDAS) を用いて渇水解析を行い、西アフリカにおける渇水状況・主要穀物の収穫量とシミュレーション値との間に良好な整合性を見出した。

ベトナム、フィリピン、インドネシア、タイを主な対象として、ICHARM において開発した RRI の機能を拡充し統合的水資源管理の解析機能を向上させた WEB-RRI モデルの開発を行った。地球温暖化に伴う水資源量変化を見積もるため、GCM による気候実験結果に対して力学的および統計的ダウンスケーリングを実施し、水文モデルの計算に耐えうる高解像度データを作成した。得られた降水量等を RRI や WEB-RRI モデルに導入し、河川流量や氾濫面積の計算を行い、水資源量や水災害リスクの見積もりを行った。

2015 年関東・東北豪雨災害で鬼怒川が氾濫した茨城県常総市、2016 年台風第 10 号災害で小本川が氾濫した岩手県岩泉町において、被災後の住宅・生活の回復状況等についての住民アンケート調査を行った。回答データに基づき、発災からの月数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復曲線の推定を行った。自宅の補修や自宅の建て替えが済んでいても、多くの住民は毎日の生活が元に戻ったとは感じていないという実態を把握するとともに、早期の回復を阻害する要因の分析を行い、強靱な社会構築に向けた示唆を得た。

## (3) 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発

わが国の中山間地や発展途上国などの災害情報が乏しい地域において、災害に対する市町村の防の防災・減災活動を支援するために、地域の災害に対する脆弱性を可視化する「洪水カルテ」、防災担当者や住民間の災害情報を共有する「災害情報共有システム」及び VR を用いた「仮想洪水体験システム」を開発後、現地適用し、その有効性を確認した。

災害対応担当者が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥って、円滑な災害対応に支障をきたした況を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」として新たに定義し、過去の災害対応検証報告書から事例を抽出して、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成した。

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY TO SUPPORT RISK MANAGEMENT FOR WATER-RELATED DISASTERS OCCURRING MORE FREQUENTLY AND SEVERELY IN JAPAN AND OVERSEAS

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Water-related Hazard Research Group  
ITO Hiroyuki

**Research Group** : Water-related Hazard Research Group,  
Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research  
Group (Watershed Environmental Engineering Research Team)

### **Abstract** :

In this research project, we aim to develop technologies to analyze and predict water-related disasters in terms of meteorology, hydrology and resulting damage. We will also develop technologies for various organizations to cope better with disasters using technologies for collecting and providing information.

During the research period (FY2016-2021), we proceeded the research in each field of (1) the development of technologies and models for improving accuracy of flood forecasting and long-term water balance analysis, (2) the development of technologies for analyzing water disaster hazards in various natural and local conditions, methods for water-related disaster risk assessment using highly accurate, advanced estimation approaches, and (3) the development of methods for producing, utilizing and communicating useful information on disaster prevention and disaster status to assist efforts in disaster prevention and mitigation. These technologies and methodologies are expected to establish systems to estimate damage and risk using real-time observation information. Such systems will make reliable disaster information readily available for municipal disaster management personnel, who will thus be able to make well-informed decisions for effectively fighting floods and leading safe evacuation in time of disaster.

**Key words** : water-related disaster, flood forecasting, drought monitoring and forecasting, assessment of climate change, efficient dam operation based on forecast of dam inflow, sediment and flood analysis, risk information system, VR(virtual reality), critical situations during flood emergency response.



## 2.1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

### 2.1.1 データ不足の補完等を考慮したリアルタイム流出氾濫予測の精度向上技術に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：江頭進治、伊藤弘之、大沼克弘、菊森佳幹、望月貴文、柿沼太貴、原田大輔、玉川勝徳、中村要介、沼田慎吾

#### 【要旨】

中小河川を対象とした、「短時間で計算可能な」、「安価」、「簡便」、「必要な精度を有する」水位予測システムの開発を行った。主な成果を以下に示す。①流出解析モデルとして RRI モデルを選定するとともに、計算流量から水位への換算式 (H-Q 式) を使用し、水位を短時間で計算する方法を開発した。②リアルタイムの水位観測データを用いて水位予測モデルを逐次修正する手法として、粒子フィルタを適用した。③パラメータ自動調節機能として、SCE-UA 法を RRI モデルに適用した。④実績・予測雨量として解析雨量、速報版解析雨量、降水短時間予報、速報版降水短時間予報、高解像度降水ナウキャストの検証及び組み合わせ方法の提案を行った。④データが不足している河川でのモデル構築手法として、河川特性からパラメータを推定する手法の開発等を行った。⑤中小河川の河川管理者等が容易にモデル構築を行えるよう、開発したモデル構築手法及び留意事項をとりまとめたマニュアル案を作成した。⑥令和3年までに125河川のモデルを構築し、データ入手・変換、予測計算、図化、配信を行うリアルタイム自動配信システムへの適用を試行した。

キーワード：中小河川、水位予測、RRI、SCE-UA 法、粒子フィルタ、解析雨量、速報版解析雨量

#### 1. はじめに

近年、豪雨災害が頻発・激甚化しており、毎年のように水害による多くの人的被害が発生している。また、地球温暖化の影響により、豪雨は今後さらに増加・激甚化するとみられている。

これまで、主要な大河川においては水位予測を実施してきたが、中小河川では現在もお水水位計の不足しているところが多く、水位上昇速度が大きいことに加え、急激な豪雨の頻発化により洪水到達が早まっており、避難が遅れる危険性がさらに高まっている。

このため、国土交通省の主導のもと洪水時の水位観測に特化し、機器の小型化や通信機器等のコストを低減した「危機管理型水位計」の設置が進められ、洪水の危険性把握ができる河川が飛躍的に増加したところである。中小河川流域においては豪雨の降り始めからの洪水到達時間が短い場合が多く(図-1 参照)、安全な避難を確保するためには、少しでも先の水位状況を予測し意思決定や行動の前倒しを支援することが重要である。

現在一級水系においては、上下流連続的な水位観測をもとに洪水危険度が把握できる水害リスクラインの整備が進められているが、都道府県等が管理する二級河川は、一級水系よりもはるかに数が多く、水害リス

クラインと同じ方法で水位の監視や予測を行うことは困難と考えられる。このため、本研究開発では、中小河川での避難行動のトリガー情報となるよう、水位上昇と氾濫の恐れがある水位の超過を2時間以上前に予測することに特化するとともに、中小河川に対応し、速やかに普及が可能な安価で汎用型の水位予測システムを開発することを目指す。

本研究開発は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

(PD: 東京大学大学院 池内幸司教授) を活用し実施された。

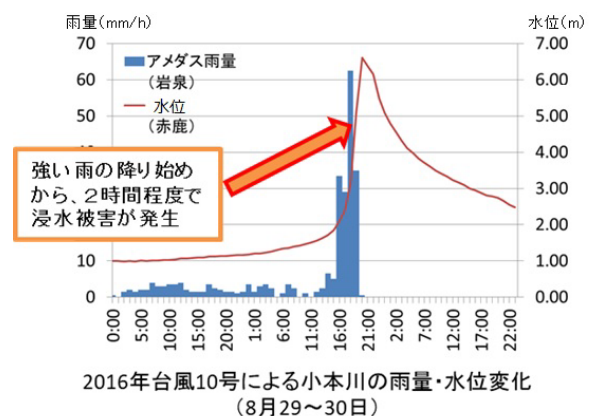


図-1 中小河川における急激な水位上昇

## 2. 技術開発項目

本技術開発は、大きく分けて次の5つのプロセスにより水位予測システムの構築を実施している。

### 2.1 RRI\_GUI を用いたベースモデルの構築

ベースモデルを構築するにあたって、安価・簡便かつ既往研究が多く信頼性の高い分布型流出モデルである RRI モデル<sup>1)</sup>を用いることとした。RRI モデルの GUI は既に整備されているが、更に汎用性を高めるために、地形データとして 2018 年から山崎ら<sup>2)</sup>が公開している日本全体を対象とした日本域表面流向マップ（空間解像度 1 秒のデータを 5 秒にスケールアップ）の整備や、降雨データとしてバイナリーファイル形式の解析雨量データのフォーマット変換機能等を加えた GUI を開発した。これにより、より簡便にベースモデルの構築、解析入力データの準備をすることが可能となった。なお、河道形状は測量データや衛星画像を基にレジーム則により設定している。

### 2.2 デフォルトパラメータによる初期解析

パラメータの最適化を実施する前に、デフォルトパラメータを用いてベースモデルの精度を確認する。デフォルトパラメータについては、RRI モデルマニュアルに記載されている一般値等を参考に国内における中山間地河川に対して平均的な値としている。観測水位による精度検証を行う上で、流出解析結果から得られる河川流量を水位に変換する必要がある。一級河川では主だった洪水イベント時に、流量観測により H-Q 式が作成される、または縦断的に豊富な測量断面データから不等流・不定流計算により水位を算出しているが、中小河川においてはそれらの水文データが不足している河川が多いため、H-Q 式がない場合には水位観測地点における河道断面や河床勾配を用いて等流計算により H-Q 式を作成した。精度検証では主に無降雨時における平水位の整合性や降雨に対するハイドログラフの応答性を確認する。具体的には、観測水位が無降雨時にもかかわらず急激に変化する等の通常では考えにくい挙動を示すデータの有無や、降雨に対して観測水位が過大に増加している場合は解析雨量では捉えられていない局所的な豪雨の有無について確認している。

### 2.3 SCE-UA 法によるモデルパラメータ調節

モデルの再現性を大きく左右するパラメータの推定には、従来から時間と労力を要してきた。また、使用者の一定の水文学的知識に加え、RRI モデルが扱う水文現象の理解が必須である。そのため、洪水予測システムを広く普及させるという観点からは課題といえる。本研究では、洪水予測に適した RRI モデルパラ

メータの最適化手法を提案している<sup>3)</sup>。少なくとも 2 つの洪水イベントに対して最適化を実施することとした。最適化期間は水位の立ち上がりから逓減部までの期間、評価関数は NS 値、最適化パラメータの探索範囲は物理性を損なわない範囲を基本としている<sup>3)</sup>。以上により得られたパラメータを最終パラメータとして次のデータ同化に進む。

### 2.4 粒子フィルタによるデータ同化

実時間水位予測に関して、昔から多数の研究が行われており<sup>4) 5)</sup>、近年においては観測値と計算値を逐次修正するデータ同化技術を用いた研究が盛んに取り組みられている<sup>6) 7)</sup>。その中でも、非線形・非ガウス型の状態空間モデルに適用可能な粒子フィルタが演算機の CPU 向上にも相まって、近年広く普及している。中村ら<sup>8)</sup>は RRI モデルに粒子フィルタを組み込み、その有効性を示している。本研究においても同様の手法により水位予測を実施しており、逐次修正を行う状態量を不透水層からの水深の初期値としてデータ同化を行った。詳細は論文を参考されたい<sup>8)</sup>。なお、尤度評価関数には RMSE、リサンプリングにはドント方式を採用し、システムノイズは固定粒子を除く全粒子に 0.05 を与えた。入力降雨としては、解析雨量と降水短時間予報を組み合わせた、後ろ 3 時間、前 6 時間の計算とした。

### 2.5 リアルタイム自動演算・図化・配信

構築したモデルを用いてリアルタイム水位予測を実施するために、データ統合・解析システム (DIAS: Data Integration and Analysis system) 上に自動演算・配信システムを試作した。システムでは降雨や水位等の観測データを収集および格納し、構築したモデル河川を用いたリアルタイム演算、計算結果の図化および配信を行っている。図-2 に実際の洪水予測の事例を示す。

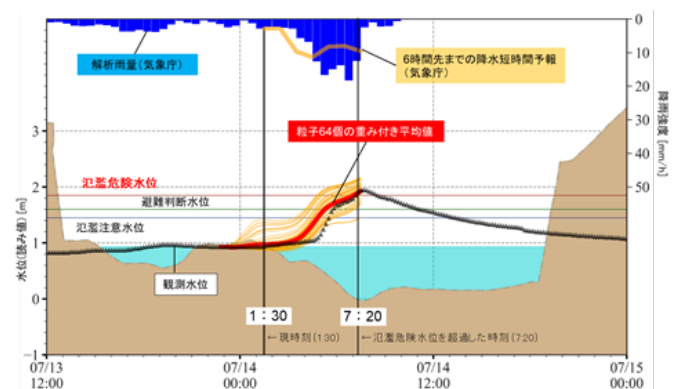


図-2 洪水予測の事例

この事例では、7月14日1:30の時点で、7時頃に氾濫危険水位の超過を予測しており、実際には7月14日7:20で、氾濫危険水位を超過した。結果として、5時間50分前に氾濫危険水位の超過を予測できたことを確認した。

計算間隔は30分とし、予測水位に応じたアラート機能も整備している。また、2019年台風19号の時のように広範囲で大雨が発生することによって、多数の河川で同時に出水がある場合には、計算負荷および計算時間の著しい増加が予想される。その場合において配信遅延が発生しないようにするために、各河川の予測計算に適切に計算機を割り当てることにより、限られた計算リソースを有効に利用する手法を適用している。

## 2. 6 125 河川のモデル構築・改良や予測精度の検証

これまでに構築した125河川のうち、パラメータ調整を行った2洪水以外に洪水イベントのあった59河川83の洪水イベントについて、リードタイムの確保の状況を確認した。その結果、約7割の河川において、2時間以上のリードタイムを確保できていた。リードタイムを確保できていない河川においても、更なる改善を目指している。

中山間地河川においてはその流出特性から洪水到達時間が早く、目標とするリードタイムが得られるかどうかは降雨の予測精度に大きく依存する。そのため、降雨の予測精度に依存しない対象流域の洪水到達時間分のリードタイムが確保できているのかを確認する必要がある<sup>9)</sup>。本システムの実用にあたっては、当該河川の洪水到達時間等の特徴を踏まえ、各流域のモデルの性能を理解したうえで活用していくことが必要である。

これら125河川のモデルは、リアルタイム自動演算・描画・配信システムへの適用を試行し、適切に動作がなされていることを確認している。また、随時実測値との比較・検証を行い、その結果から水位予測手法を改めて評価し当該研究開発にフィードバックしている。

## 3. 課題と検討状況

上記開発プロセスの中で挙げられた課題及びその改善策について具体的な事例を以下に示す。

### 3. 1 河床変動・潮位変動の影響への対応

河床変動等の要因により、既往のH-Q式が現状では合わないと考えられる河川が確認された。H-Q式が合わない事例として、a)低水時から合わないケース、b)洪水時に合わなくなるケースが考えられた。そのため、

H-Q式を逐次修正する以下のアルゴリズムを開発した。

- ① 遡り時間内の粒子フィルタによる予測水位と観測水位の差を算出
- ② 生じた差は河床変動によるものと考え、この河床変動量Dに応じて断面を修正
- ③ 新しい断面でH-Q式を作成
- ④ 次の時刻は新H-Q式で①を行う。

以下にa)の事例を図-3に示す。低水時のH-Q式が修正されたことにより、氾濫危険水位の超過を予測できなかったものが、予測できるようになった。

また、水位観測所が潮位変動の影響を受ける範囲にある場合、その影響を適切に評価することは現在の方式では難しい。そこで、上記の手法を応用し、潮位を河積阻害とみなし、河道の基準断面と河積阻害量Dから河道断面を逐次修正する手法を考案した。河道断面形状は最新河床高からDの高さで、フラットな河床に修正する。修正断面におけるH-Q式テーブルを作成し、流量から水位を換算した。

潮位変動の影響を受ける水位観測所において本手法を適用した事例を図-4(潮位補正なし(上)とあり(下))に示す。洪水の立ち上がり部(10/12 12:00辺り)において、潮位補正なしでは水位予測結果が過剰になっているのに対して潮位補正ありでは実測値に近い値となっており、再現性が向上した。

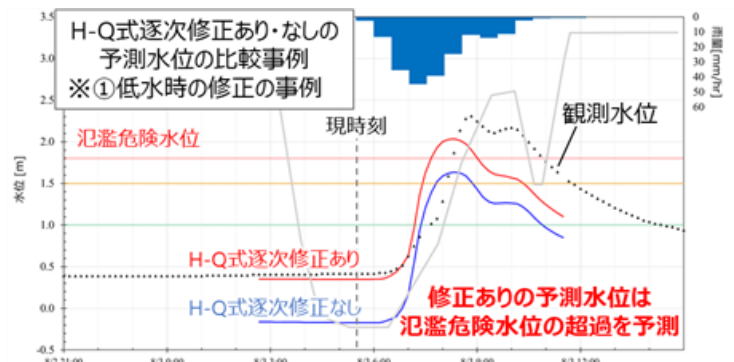


図-3 H-Q式逐次修正あり・なしの結果比較



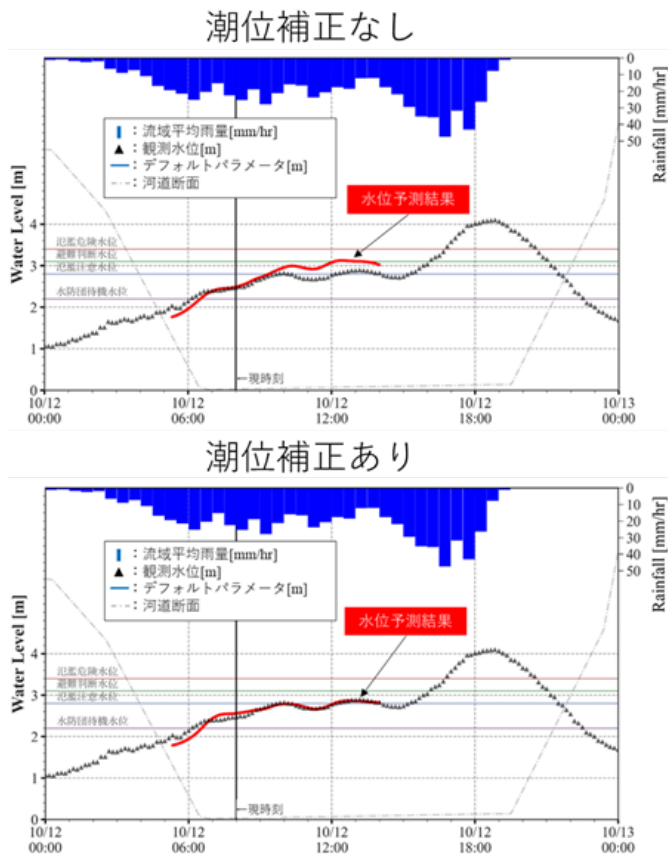


図-4 潮位補正なし（上）とあり（下）の水位予測結果

### 3. 2 降雨量データの検証・組み合わせ方法の開発

降雨量データとして気象庁解析雨量を使用していたが、更新時間間隔が 30 分間であるため、突然の豪雨が発生しても 30 分間程度は予測計算に反映できないことがある。さらに、データが発信されるまでに 20 分程度の遅れが生じる。そこで、降雨量データとして、精度の高い解析雨量、降水短時間予報に加え、更新時間間隔が 10 分間かつ配信時間の遅れが 7 分程度の速報版解析雨量、速報版予測降雨を組み合わせる方法について検討した。さらに、気象庁高解像度降水ナウキャストについても検証を行った。高解像度降水ナウキャストは、実況及び 1 時間先までの予測雨量であり、配信間隔は 5 分、配信遅れは 2 分である。また、解析雨量のメッシュサイズが 1km に対して、実況～30 分先までの予測雨量は 250m と細かな分布になっている。これにより、短時間に雨量が増加する豪雨を補足するとともに、配信遅延を減らすことでリードタイムをより伸ばすことができる。組み合わせ方法として有効であると考えられるものを図-5 に示す。本組み合わせ方法について、解析に使用できるようプログラムの改良を行った。

雨量データとして解析雨量と高解像度降水ナウキャストを使用した場合の計算結果を比較したものを図-6 に示す。この河川は流域面積約 9km<sup>2</sup> と小さいため、降雨からの流出時間が短い。ハイトを比較すると、高解像度降水ナウキャストは急な豪雨による短時間での雨量の変化を捉えている。その影響により、ピークの水位は観測水位により近くなっていた。このことから、とくに流域面積の小さい河川においては、高解像度降水ナウキャストを使用することにより急な豪雨があった場合の再現性を向上させる可能性があることが分かった。

### 3. 3 データが不足する河川でのモデル構築手法の開発

中小河川には、洪水イベントに関するデータ、H-Q 式、断面データ等のデータが不足する河川も多い。そのような河川でもモデル構築を行うため、以下に示す手法を開発した。

- ① 断面データ等から等流計算により H-Q 式を作成する方法を提案するとともに、計算機能を RRI-GUI に搭載し、簡便に H-Q 式を作成できるようにした。

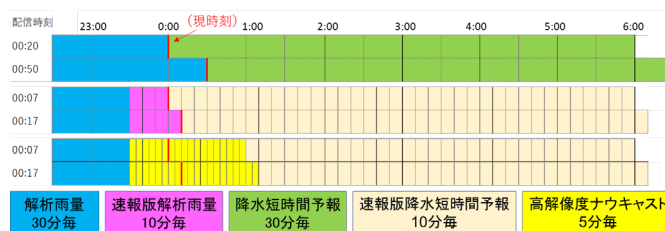


図-5 雨量データの組み合わせ方法

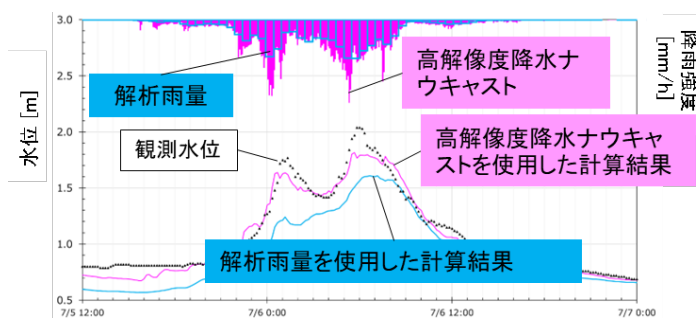


図-6 解析雨量と高解像度降水ナウキャストによる計算結果の違い

- ② 断面データがない河川では、RRI モデル上で仮定したレジーム則による矩形断面から計算流量を用いて水位を算出する手法を提案した。さらに水位観測地点において地盤高を補正し、より再現性を高める方法を提案した。
- ③ これまで構築した 125 河川のモデルのパラメータを整理し、統計分析等を行うことで、洪水観測データが不足している河川において、河川特性からパラメータを推定する手法を開発した。

### 3.4 粒子フィルタの応答特性に関する検討

流出過程には表面流・中間流・河道流のように時定数が異なる流出過程を含んでいるが、粒子フィルタを用いた既往研究は、いずれも河道流のみもしくは中間流のみの研究にとどまっており、それぞれの時間遅れを伴う流れに関しては検討されていない。本検討において、表面流・中間流・河道流のような時定数が異なる流出過程を表現する降雨流出モデルに粒子フィルタを適用した際の応答特性について検討すると共に、適用上の課題およびその対応手法を提案した。

図-7 に流域面積約 200 km<sup>2</sup>、流域の 9 割が山地に覆われている典型的な中山間地河川における、1 時間毎の水位予測結果を示す。青線は SCE-UA 法によって最適化されたパラメータを用いて解析雨量のみを使用したオフライン計算結果、複数の点線は粒子 64 個全ての計算結果、赤線は全粒子の水位予測結果の重み付き平均値を示す。6:00 時点ではオフライン上に沿った予測がされているが、7:00 から予測水位がオフラインより

過小になり始め、8:00 には 1 山目のピーク水位が約 50 cm 低い値を示した。水位はあくまでデータ同化された結果であるため、より内部情報である状態変数に乗ずる補正係数を確認したところ、7:00 から予測水位を実測値に近づけるために負の補正係数が働いており、その後、実測水位が上昇し始め、オフラインが実測水位より小さくなり、正の補正係数を乗ずるが状態量が小さくなっているため水位の復帰が遅くなっていることが分かった。つまり、水位上昇時において粒子フィルタによる斜面水深に対する負の補正が働いた場合、流出の時間遅れによって予測水位が低下することが新たに分かった。

本課題を解決するために、補正係数が負にならないよう逐次修正するアルゴリズムを加え、かつ実測水位に最も近い粒子を選択する手法を提案した結果、図-8 に示すように、粒子フィルタによる予測水位の低下を抑制できることを示した。

### 3.5 危機管理型水位計の特性を踏まえた観測水位の同化手法の開発

近年、洪水時のみの水位観測に特化した安価な危機管理型水位計の中小河川への普及が進められているところであり、通常水位計と併せて危機管理型水位計データを同化することで、河川水位をより高精度に把握可能となることが期待されている。危機管理型水位計の特性として、一定の水位以上になった時点で観測を開始することが挙げられる。観測が開始された時点から観測水位を計算モデルに取り込む（同化する）手

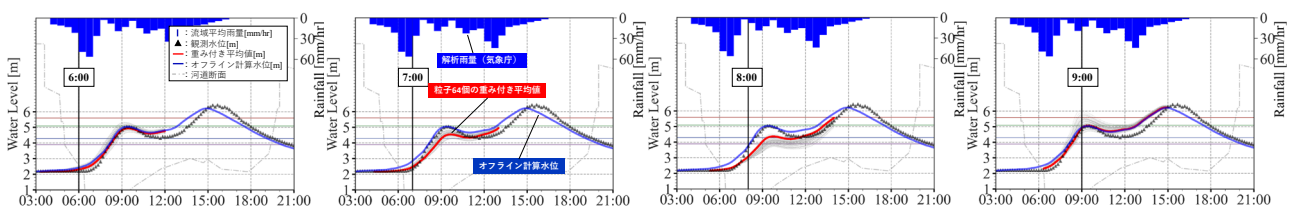


図-7 水位上昇時にオフライン計算値が実測水位より大きい場合の水位予測結果

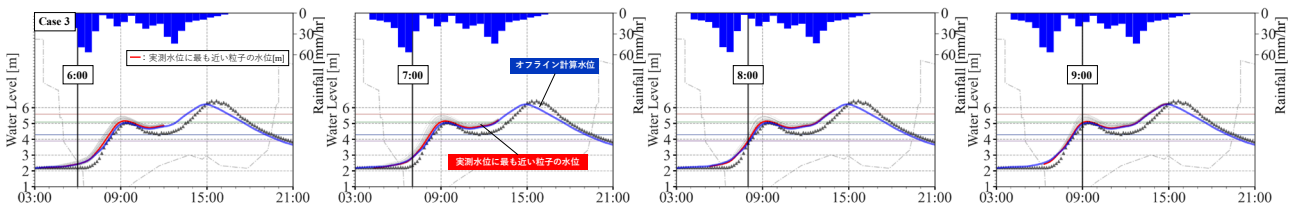


図-8 補正係数を逐次修正するアルゴリズムを加えた計算結果

法が必要となる。危機管理型水位計を用いたデータ同化手法としては、以下の3つの方法が考えられる。

① 多地点同時同化

河川の予測地点（既存水位観測所）だけでなく、流域内の危機管理型水位計等の水位データを同時に評価した同化手法

②カスケード同化

上流の危機管理型水位計でモデルと既存水位観測所のモデルに分割し、上流から同化していく手法

③ ハイブリッド型同化

危機管理型水位計の監視モードに応じて、同化対象エリアが変更される同化手法

ただし、①は多地点全体としての精度向上を目的とするため、特定の水位予測地点の予測精度に着目すると他の方法より精度が落ちること、②は危機管理型水位計の特徴として、水位がある程度上がってから観測が開始されるため、反映できる時間が制限されることがあげられる。そこで、③のハイブリッド型について紹介することとする。

a) 危機管理型水位計が死活監視モードの場合

危機管理型水位計が観測開始水位より低い死活監視モード\*の場合、水位データは常時観測されていないため状態量をフィルタリングすることができない。そのため、同化対象地点は既存水位観測所となり、この地点での尤度評価に応じて流域全体の状態量を修正する。(図-9)

\*死活監視モード：水位が観測開始水位未満の時のモードのこと。例えばある河川では、このモードでは、水位データは1日に1回伝送される。

b) 危機管理型水位計が常時監視モードの場合

危機管理型水位計が観測開始水位を超過した常時監視モード\*の場合、危機管理型水位計は常時観測されるため状態量をフィルタリングすることが可能となる。そのため、同化対象地点は危機管理型水位計地点上流での領域と、それ以外の領域に分けることができる。それぞれで同化サイクル（予測⇒尤度評価⇒リサンプリング⇒ノイズ）を回すことにより予測する。(図-10)

\*常時監視モード：水位が観測開始水位以上の時のモードのこと。例えばある河川では、このモードでは、水位データは10分間に1回伝送される。

本手法を用いることで危機管理型水位計の特徴を考慮したうえで水位予測に活用することができると考えられる。ただし、使用する水位計の数が増えるほどモデル構築は複雑になり計算時間も長くなると考えられる。今後はそれらとのバランスも考慮し、モデル構築

手法の体系化を行っていく必要がある。

4. おわりに

当該研究により、全国の中小河川に速やかに普及可能な安価・簡便な水位予測システムの開発が進められている。全国展開へ向けて、中小河川の河川管理者等が容易にモデル構築を行えるよう、上記のように開発したモデル構築手法及び留意事項をとりまとめ、モデル構築手法の体系化およびマニュアルの整備等を行うこととしている。とくに、地方公共団体や建設コンサルタント協会等と意見交換を行い、より実用性の高い手法への改善及びマニュアルの作成を行っていく予定である。

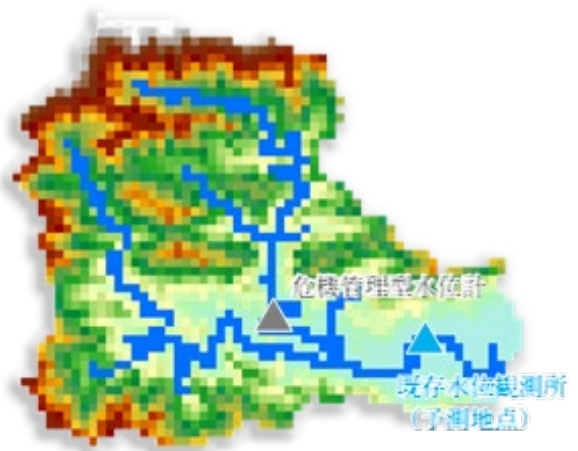


図-9 死活監視モード時の修正領域

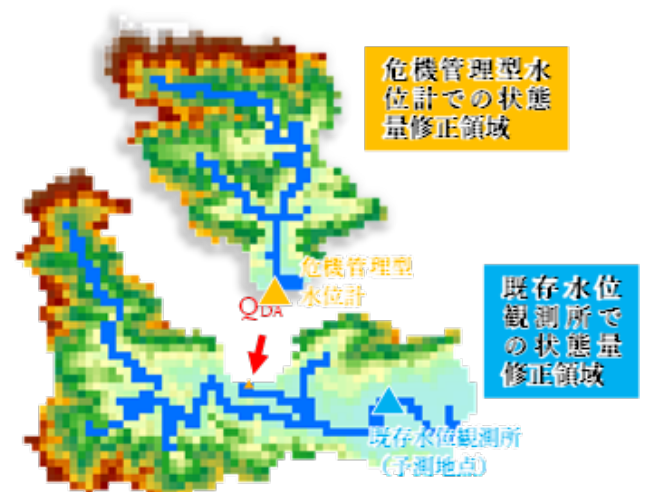


図-10 常時監視モード時の修正領域

## 参考文献

- 1) 佐山敬洋、岩見洋一：降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用、土木技術資料、56-6、2014
- 2) 山崎大、富樫冨佳、竹島滉、佐山敬洋 日本全域高解像度の表面流向データ整備、土木学会論文集 B1 (水工学)、75 卷 5 号、I\_163-I\_168、2018
- 3) 柿沼太貴、中村要介、伊藤弘之、池内幸司：複数洪水イベントの組み合わせによる洪水予測に適した RRI モデルパラメータの最適化手法に関する検討、河川技術論文集、第 26 卷、pp.199-204、2020.
- 4) 鈴木俊明、寺川陽、松浦達郎：実時間洪水予測のための分布型モデルの開発、土木技術資料、Vol.38-10、pp.26-31、
- 5) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書、2004.1996.
- 6) 立川康人、須藤純一、椎葉充晴、萬和明、キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.67、 No.4、I\_511-I\_516、2011.
- 7) 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、No.4、I\_187-I\_192、2016.
- 8) 中村要介、小池俊雄、阿部紫織、中村和幸、佐山敬洋、池内幸司：粒子フィルタを適用した RRI モデルによる河川水位予測技術の開発、土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74、No.5、pp.I\_1381-I\_1386、2018.
- 9) 柿沼太貴、沼田慎吾、望月貴文、大沼克弘、伊藤弘之、安川雅紀、根本利弘、小池俊雄、池内幸司：中小河川を対象とした洪水時におけるリアルタイム水位予測システムの開発に向けた研究、河川技術論文集、Vol.27、pp.105-110、2021.



## 2. 1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

### 2.1.2 様々な自然・地勢条件下での長期の統合的水資源管理を支援するシミュレーションシステムの開発に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：伊藤弘之、大沼克弘、牛山朋來、菊森佳幹、海野 仁、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、Acierto Ralph Allen、Asif Naseer、望月貴文、玉川勝徳

#### 【要旨】

本研究は発電ダムを対象にアンサンブル降雨予測と流出モデルを用いて、発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作を検討した。アンサンブル降雨予測については、大井川・犀川流域を対象に 39 時間先の予測システムを運用するとともに、利根川流域を対象に気象庁 3 ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法を検討した。流入量予測については、犀川流域における 2018 年 7～9 月の出水イベントを対象に検討し、ピーク流入量の積算流入量とともに高精度で予測した。流入量予測を基にした効率的なダム操作については、大井川の畑薙第一ダムを対象に 2018 年、2019 年の出水で検討し、事前放流でゲート放流量を抑えるとともに発電量指標で増電を示した。

キーワード： アンサンブル降雨予測、WEB-DHM-S、効率的ダム操作、発電効率、洪水調節

#### 1. はじめに

近年、気候変動の影響による大雨・少雨の極端化が顕在化しており、「ダム再生ビジョン」が示すように、我が国が多数保有する既設発電ダムによる治水機能の発現と水利用の効率化が有効かつ必要となっている。具体的には、大規模化・頻発化する集中豪雨等による洪水に対してダム下流の洪水危険度を増すような異常放流を回避するためのダム操作の信頼性向上と、発電のための河川流水の効率的な利用を支援する情報の提供が求められている。事前放流を含む新たなダム操作の安全性の確度を向上することにより、ダムの弾力的、効果的な操作の可能性を見出し、洪水リスクの低減と水資源の効果的利用を両立させるための技術として、河川の流量やダムの水位をリアルタイムかつ詳細に予測することが可能なシステム開発の重要性が高まっている。

そこで本研究では、1)領域アンサンブル降雨予測技術の改善、2) 大気と陸面の水文過程を精緻に表現し降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)の改善をし、予測された降雨を WEB-DHM-S に入力することでダムへの流入量を予測し、その予測流入量に基づき発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法を検討した。具体的には、1)領域アンサンブル 39 時間降雨予測の運用、2) 利根川を対象とした気象庁 3 ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法の開発、また、3)犀川を対象とした 39時間先アンサンブル流入量予測、4) 大井川の畑薙第一ダムを対象に 39 時間先の流入量予測とその予測情報に基

づく発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法を検討した。

なお、本報告は、文部科学省 地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム(水課題アプリケーションの開発)」のもと、土木研究所、東京大学、日本工営株式会社、中部電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社の協働で実施した成果の一部を記したものである。また、本成果は日本気象学会 2020 年度春季大会、土木学会論文集 B1 (水工学), 77 巻, 2 号で発表済である。ここでは両論文を引用し、内容を包括的に報告する。

#### 2. 対象流域

本検討で対象とした、大井川、犀川、利根川流域を含む領域アンサンブル降雨予測で対象とした領域の概要を図-1に示す。

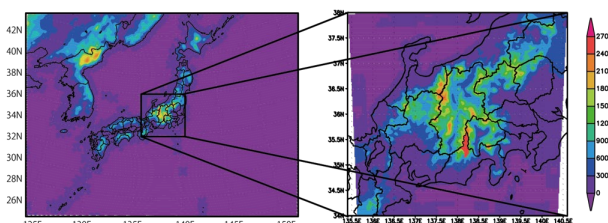


図-1 領域気象モデルの計算領域  
(左：外側領域：格子間隔 15km、  
右：内側領域：格子間隔 3km)



### 3. 領域アンサンブル降雨予測技術改善の検討

#### 3.1 検討手法

領域アンサンブル降雨予測は、米国 NCAR 等で開発された領域気象モデル(WRF: Weather Research and Forecasting)を用いて図-1 に示した領域を対象とし実施した。モデル領域は、広範囲の大気の状態を表現する格子間隔 15km の外側領域と、降水現象を正確に表現する 3km の内側領域の 2 重ネステイングとした。

外側領域(15km メッシュ)を対象に、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いたデータ同化およびアンサンブル初期値の更新を行なった。ここで用いた EnKF は、LETKF (局所アンサンブル変換カルマンフィルター、Hunt et al.,2007<sup>1)</sup>、Miyoshi and Kunii 2011<sup>2)</sup>)と呼ばれる、現在最も広く使われている手法の一つである。アンサンブルメンバーの個数は 33 とした。1 日 4 回 6 時間毎に提供される気象庁全球モデル GSM(Global Spectral Model)を境界条件として用い、米国環境予報センター(NCEP)によって収集アーカイブされた全球の観測データ(PREPBUFR と呼ばれる)を用いて LETKF による解析を行ないアンサンブル初期値を更新する。更新された初期値から、WRF モデルによる 3 時間～9 時間予報を用いて 6 時間後の LETKF 解析を行う。これを順次繰り返すことにより、現実の気象状況を反映したアンサンブル初期値を連続して得ることが出来る。さらに内側の 3km メッシュ領域も含めて 48 時間先まで予測計算することで、高解像度の予測データを得るものである。

#### 3.2 検討結果

降水予測精度改善を目指し、鉛直解像度の改善、雲物理パラメタリゼーションの変更を検討した。鉛直解像度を 40 層から 50 層に増やし、雲物理パラメタリゼーションをこれまで Lin et al. (1983)の方法に代えて、WRF モデルに備わっている雲物理パラメタリゼーションスキーム(WSM5 (WRF Single Moment 5-class)、WDM5 (WRF Double Moment 5-class)、WDM6 (同 6-class))について検討した。キャリブレーションの結果としては、鉛直層は 50 層、雲物理パラメタリゼーションは WDM6、水平解像度は 3km、局所化半径  $\sigma$  は 200km で再現性が最も良好となった。

図-2 にモデル設定変更前と変更後の降水量予測精度を示す。2011 年 9 月 11 日、2017 年 10 月 23 日、2017 年 10 月 28 日の典型的な 3 つの洪水事例について調査した結果、2011 年 9 月の事例は水色で示すレーダ観測値のピーク降水量に対して、赤色で示すアンサンブル平均の予測降水量が追いつかず精度改善は見られなかったものの、他の 2 事例

は予測降水量がレーダ観測に近づいており予測精度の改善が見られた。

#### 3.3 領域アンサンブル降雨予測の運用

1 日以上リードタイムで降水予測情報を提供することが出来る高解像度アンサンブル数値天気予報を開発・運用を続けるとともに、過去の年単位の検証計算を行うため、2018 年 4 月以降現在までの連続計算データを作成した。

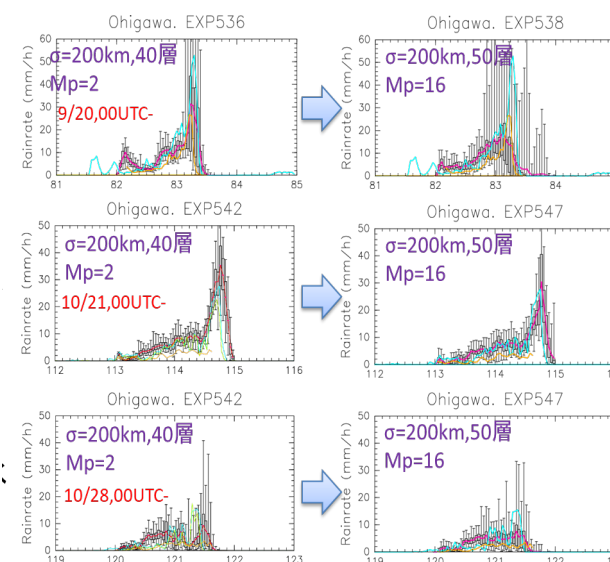


図-2 モデル設定変更前(左)と変更後(右)の大井川流域平均予測降水量

(上から 2011/09/11, 2017/10/23, 2017/10/28 の結果)。

- ・横軸の数字は 7/1 を 1 とする日付である。
- ・黒がアンサンブル予測。
- ・灰色塗りつぶし部分は 25～75 パーセントイル値。
- ・赤がアンサンブル平均。
- ・水色がレーダ観測雨量。
- ・黄色は気象庁 MSM の予測結果である。
- ・Mp=2 は雲物理パラメタリゼーションで Lin スキーム。
- ・Mp=16 は WDM6 を示す。

2018～2020 年のスレットスコアを雨量強度別に描いた図を図-3 に示す。スレットスコアは、基準雨量強度(図-2 の横軸に相当)を超える雨を予測できたかどうか、こつて、

(的中) / (的中+見逃し+空振り)

で示される値である。ただし、的中は基準を超える雨を予測と観測が上回ったものを指し、雨が降らなかった場合的中は含まない。

各年度においては、期間中に起こった降水イベントの数や強度にも違いがあるため、一概に比較はできないが以下(1)～(4)に示す共通点が見られる。

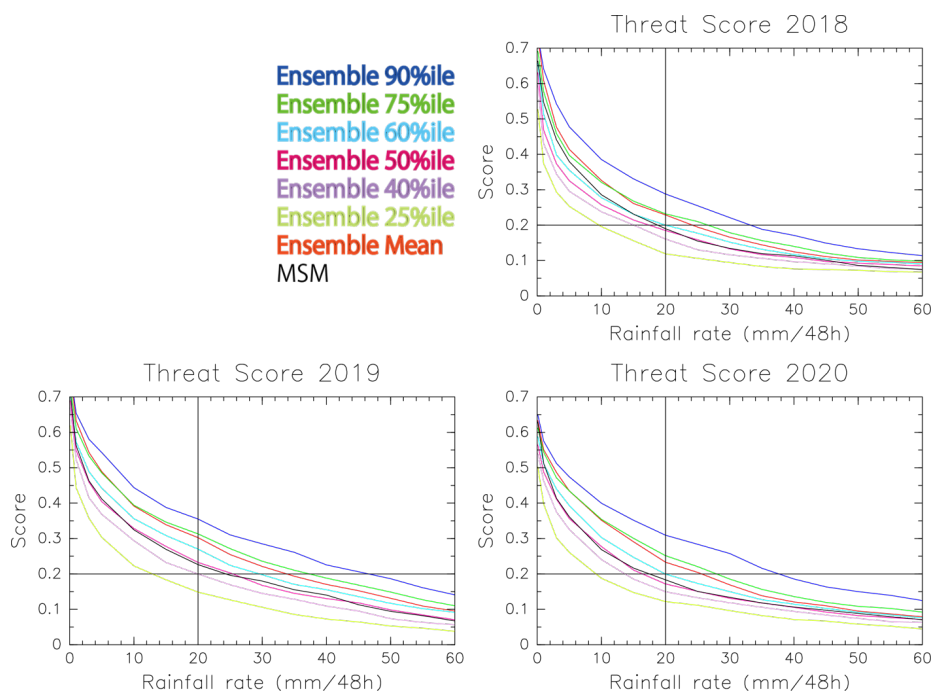


図-3 2018～2020 年度 6 月～10 月における降雨予測精度スレットスコア。大きい値が良い成績を示す。横軸は降雨強度を示す。線の凡例を图中に示す。

(1) 赤線で示されたアンサンブル平均は、緑線(75 パーセントイル値)に近い。

(2) 黒線で示した気象庁メソモデル(MSM)の予測結果は、いずれの年も赤線よりもかなり下にあり、降雨事例を捉えるという点においては、アンサンブル平均の方が MSM よりも優れていた。

(3) 青線で示した 90 パーセントイル値は、すべての線の中で最も大きい。つまり、90 パーセントイル値に注目すれば、多くの場合降雨を捉える確率が上がる。しかし、これは空振りも大きくなることに注意が必要である。

また、年によって異なる点は、以下の通りである。

(4) スコア 0.2 と横軸 20mm/48h を通る十字の補助線に注目すると、各年度における精度の違いが見やすくなる。ここでは、2019 年 > 2018 年 > 2020 年の順に精度が高い。スレットスコアは、大雨イベントがうまく予測できればスコアが高くなるが、大雨イベントの数が少なければそもそもスコアが計算されないため、イベントの数にも依存する値である。そのため、各年の値は単純に比較できるものではない。しかし、上記(1)～(3)で示したように、アンサンブル平均と 75 パーセントイル値との関係、MSM とアンサンブル予測値との関係には、どれも安定した関係が維持されることから、各年度において安定した精度が維持されていたことが示唆される。なお、2019 年から数値予測モデルの設定を改善したが、今回の結果からはモデル改善の効果は明瞭には見られなかった。

#### 4. 利根川を対象とした気象庁 3 ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法の開発

渇水リスクの予測や水資源管理については、数カ月のリードタイムで行う季節予測が非常に有用である。一般に予測リードタイムが長くなると予測精度は低下する。しかしながら、水資源管理は 1 週間から 1 ヶ月単位の長周期の降水量に影響されることから、数日スケールの降水量のずれは無視することができ、季節予測を有効に利用することが期待できる。そこで、本研究では気象庁が提供する 1 ヶ月アンサンブル予測および 3 ヶ月アンサンブル予測データを力学的にダウンスケーリングし、水資源管理に対する有効性を調査した。

領域気象モデルの計算領域を図-4に、利根川流域内の流域分割を図-5に示す。気象庁では、5日に一度 13 アン

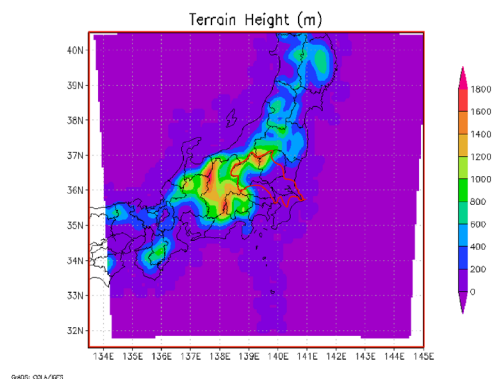


図-4 領域気象モデルの計算領域 (利根川流域を赤線で示す)

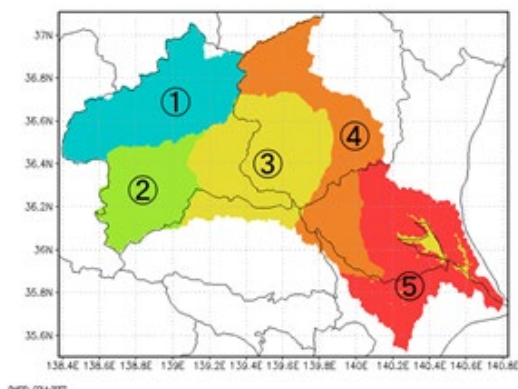


図-5 利根川流域内の支流分割図

サンプルメンバーからなる3~4か月先までの予測を行っている。従って、1ヶ月間には5回~6回予測が発行され、それらを1ヶ月分まとめて65~78メンバーの3ヶ月予測を構成する。例えば、3月の2日、7日、12日...27日まで6回発行された各13メンバーのアンサンブル予測は、4月~6月までを対象とした78メンバーの3ヶ月予測となる。気象庁が3ヶ月予報を計算するGCMは、大気格子間隔約110km、海洋の格子間隔が50~100kmの大気海洋相互作用モデルである。また、提供されるデータは2.5度間隔(約270km間隔)であるため、河川流域の水資源管理に用いるには解像度が粗い。そこで、領域気象モデルWRFを用いて格子間隔15kmまでダウンスケーリングを行い、得られた降水量の評価を行った。なお、このデータは気象庁と気象学会が行っている研究用データ提供の枠組みである気象研究コンソーシアムを通じて2020年2月末から提供されている。

図-6は、2020年6月を初期値とする7月~9月の3ヶ月予測である。赤点線のClimatology(平年値)は、全流域平均の3ヶ月積算値は600mmであった。GCMオリジナルの予測(太黒実線)は650mmとやや大きい。観測値(黒破線)の900mmに比べると過小であった。ダウンスケーリングによる全流域平均値(黒細実線)は900mmで観測と良く一致した。次に、支流別の観測値を見てみると、まず上流側の①沼田上流、②八斗島上流、③渡良瀬川では3ヶ月積算値が900~1000mmと大きめであり、④鬼怒川、⑤下流域では3ヶ月積算値が400~500mmと小さめであった。また、ダウンスケーリング予測値の支流別の値は、観測値に近い値を示しており、予測値が適切であったことがわかる。以上のように、気象庁3ヶ月予報のダウンスケーリングによって、有効な予測値が得られる可能性が示された。今後より多くの事例について調査を続ける必要がある。

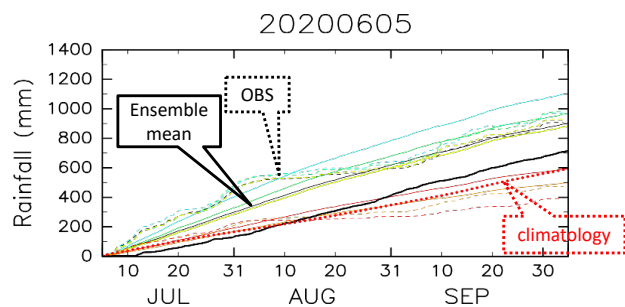


図-6 3ヶ月予測による積算降水量、2020年7月~9月の例。黒太実線はGCMオリジナルの全流域平均雨量、赤点線はClimatology(平年値)の全流域平均、他の細線は実線がダウンスケーリング、破線は解析雨量による観測値、色は黒は全流域、①水色、②黄緑、③黄色、④オレンジ、⑤赤は図-4に対応する支流域。

## 5. 大気と陸面の水文過程を精緻に表現した降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)の開発と検討

### 5.1 検討手法

積雪は水資源として重要な役割を担っており、その融雪流出量の推定における信頼性の向上は、年間を通じた発電効率の向上のためのダム操作のために必須である。

本検討では、まず、降水が個体か液体か(雪か雨か)を判別するために、標高が増加することによって気温が低下する割合(気温減率)の変化が、大気中の水蒸気圧と気温の絶対値に依存していることに着目し、気象庁の長期再解析結果(JRA55:地上・衛星観測データを最新の数値気象予測モデルに同化して得られる再解析結果)を用いて各標高の気温減率を算定し、数少ないアメダス地上観測所の気温観測データと組み合わせて対象山岳流域の毎時の3次元的な気温分布の推定手法を確立する。次に、この毎時3次元気温分布情報を用いて、対象の山岳領域全体で降雪が発生しない降雨のみである暖候期を特定し、その期間のレーダ観測値を地上雨量計による観測値でキャリブレーションして、定量的な毎時の降雨の平面分布を推定する。このように得られた高精度の雨量データをWEB-DHM-Sに入力して河川流出量を算定し、観測した河川流出量と比較して、WEB-DHM-Sで使用している透水係数等のモデルパラメータを同定する。

WEB-DHM-Sは、地表面でのエネルギー収支と水収支を計算し、土層での水の鉛直流動や斜面方向や河道での水平流動を物理的に表すことができる。したがって、降雨の時空間分布が適切に入力されると、河川流量観測値とモデル推定値との比較により、モデルのパラメータは物理的に推定が容易である。降雪・積雪・融雪計算サブシステムは、雪面でのエネルギー収支や、積雪粒子の変態によるアルベド変化、融雪水の積雪層内での鉛直流動や再凍結等



を物理的に表すことができる。また非積雪期にパラメータ推定が完了した WEB-DHM と組み合わせることで、土壌水分や河川流量を物理的に推定することが可能であり、国際的な積雪モデル相互比較実験(SnowMIP1)や国内外の様々な流域スケールの検証実験において優れた性能を示している。

## 5.2 WEB-DHM-4cS の校正と検証

### 5.2.1 犀川での検証

本手法を犀川流域に適用した。融雪出水の影響がない暖候期を対象に低水と洪水に着目しモデルを校正し、次に降雪・積雪・融雪の影響がある寒候期を対象にモデルを校正する。その後、年間を通し長期で連続的にモデルを実行し検証した。まず、融雪期を含む寒候期(2017年11月1日～2018年6月30日)でWEB-DHM-4cSを実行し、推定された積雪域とMODISで観測した積雪域の比較を行い積雪域の校正をした。次に3水文年(2015年8月～2018年7月)でWEB-DHM-4cSを実行し、高瀬ダム地点で検証した。結果を図-7に示す。なお、観測流量のマイナス値は、高瀬ダムが揚水発電設備を有し、流入量を時間当たりのダム貯水量の増減とダム放流量(プラス値)、下池からの揚水量(マイナス値)の和で計算したことによる影響である。図-7より高瀬ダム地点において各年ともに夏期(7～10月)の出水、冬期(11～3月)の低水、融雪期(4～6月)の融雪出水が良く一致していることを示した。



図-7 WEB-DHM-S の検証結果 (2015年8月～2018年7月(3年間)における高瀬ダム地点でのWEB-DHM-4cS実行結果。(上:ハイドログラフ、黒線:観測流量、赤線:解析流量、水色線:降水量)なお、高瀬ダムでは揚水発電の影響で観測流量にマイナスを含む)、下:積雪面積分布の衛星観測値、推定値。)

### 5.2.2 大井川での検証

本手法を大井川上流域に適用した。2013年10月～2015年9月の2年間に於いてモデルパラメータを調整(キャリブレーション)し、2015年10月～2017年9月に適用しモデル検証(バリデーション)したハイドログラフ、積雪面積分布の衛星観測値、推定値の結果を図-8に示す。

図-8の上段のグラフは、青が降水量、黒が観測流量、赤がWEB-DHM-Sで推定した計算流量を示す。2015年10月～2017年9月において出水のピークの立ち上がり、ピーク流量、また、融雪期における流量が観測値と合い適切に表現されている。下段の図は流域内における積雪域の空間分布を時系列で示している。上にMODIS(人工衛星に搭載された可視・近赤外域のセンサ)で観測した積雪域で下にWEB-DHM-Sで計算した積雪域を示す。水色が積雪域、赤色が雲域(MODISのみ)、緑色が積雪以外の地域を表している。水色の積雪域がMODIS、WEB-DHM-Sともに合っており、積雪期、融雪期における積雪域の分布が良く推定されていることが示された。

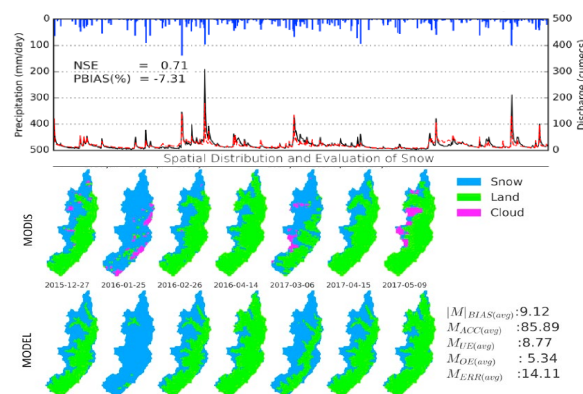


図-8 WEB-DHM-Sの検証結果(2013年10月-2015年9月の2年間のキャリブレーションで得られたパラメータを用いて2015年10月-2017年9月に適用し検証した結果)。上からハイドログラフ・積雪面積率(いずれも黒線が観測値、赤線が推定値)、積雪面積分布の衛星観測値、推定値。

## 6. 犀川流域生坂ダムにおけるアンサンブル流入量予測

### 6.1 検討手法

大気と陸面の水文過程を精緻に表現し融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-4cS)に、牛山らによる領域アンサンブル降雨予測(アンサンブル降雨予測データ(3km空間解像度、39時間先まで1時間時間解像度、32アンサンブル))を入力することで生坂ダムを対象とし暖候期の降雨による流入量予測に焦点をあて実施した。

6.2 生坂ダムにおける2018年9月出水での検討

「第三類」の生坂ダム(ダム湖の規模が小さくゲート操作が複雑なダム)における出水を対象に洪水量(洪水を規定する流入量 800m<sup>3</sup>/s)の予測をした。ハインドキャストの中で39時間先予測のうち、最初の6時間を気象庁の降水短時間予報を、残りの33時間を32アンサンブルで予測をした。ゲート操作を効率的に実施するために生坂ダムへの洪水量を6~10時間前に予測することが指標として挙げられ、洪水量に到達した2018年9月30日~10月1日の台風24号による降雨の事例で検討した。検討結果を図-9と表-1に示す。図-9で黒線は観測流入量、赤線はアンサンブル平均、水色線が32の各アンサンブルの流入量を示す。生坂ダム地点において洪水量に到達した時刻を2018年10月1日 02:00とし予測状況を検討した結果、アンサンブル平均で7~31時間前に洪水量を予測するとともに、それぞれ28以上のアンサンブルで洪水量を予測しダム操作のニーズに答えることを示した。

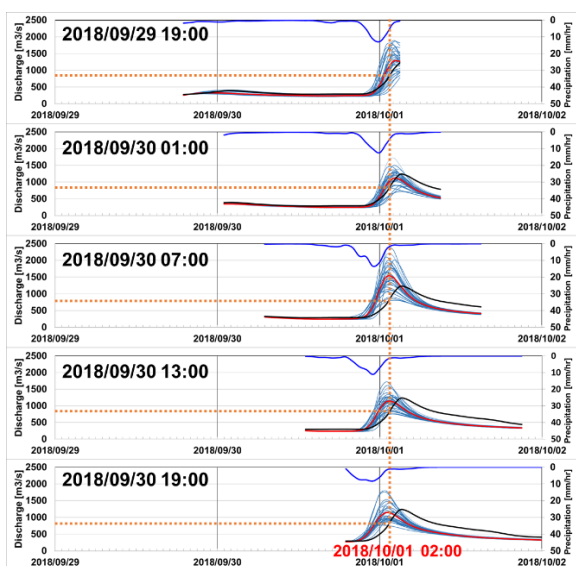


図-9 2018年9月30日~10月1日における生坂ダム洪水量(800m<sup>3</sup>/s)予測結果 [青:アンサンブル平均雨量、黒:観測流量、赤:アンサンブル平均流量、水色:アンサンブル流量]

表-1 生坂ダムへの洪水流入量800m<sup>3</sup>/s 予測結果 (アンサンブル平均で予測した場合を「○」、予測したメンバー数、予測しなかったメンバー数をそれぞれ記載)

| 予測時刻<br>(5パターン)  | リードタイム<br>(時間) | 流入量(800m <sup>3</sup> /s)予測状況 |     |      |
|------------------|----------------|-------------------------------|-----|------|
|                  |                | 平均                            | 予測数 | 未予測数 |
| 2018/09/29 19:00 | 31             | ○                             | 28  | 4    |
| 2018/09/30 01:00 | 25             | ○                             | 28  | 4    |
| 2018/09/30 07:00 | 19             | ○                             | 32  | 0    |
| 2018/09/30 13:00 | 13             | ○                             | 30  | 2    |
| 2018/09/30 19:00 | 7              | ○                             | 31  | 1    |

6.3 高瀬ダムにおける2018年7月出水での検討

「第一類」の高瀬ダム(河川の従前の機能の維持のための洪水貯留を要求されるダム)を対象に2018年7月~9月における出水から、大・中・小の規模の出水を選択し流入量予測をした。結果を図-10に示す。図-10において黒線は観測の流入量、赤線が気象庁解析雨量(観測値)を入力した流入量、水色線が32のアンサンブル平均の39時間先の流入量を示す。特に中・小規模出水においてピークの立ち上がりや流量が減少するタイミングが良く表現できていることを示した。なお、本検討結果はフィードバック(予測結果を当該の観測時刻の最初の流入量にシフトし合わせたもの)を適用したものである。

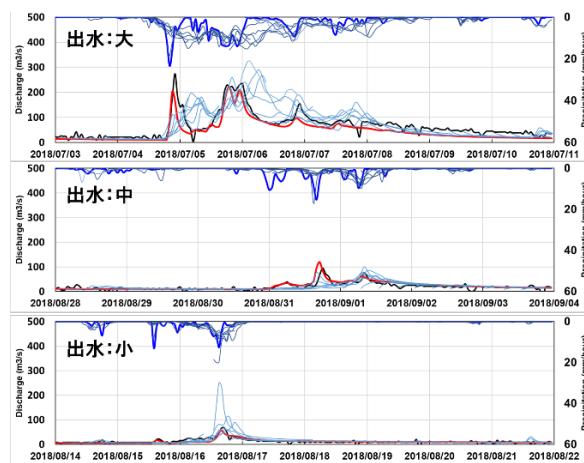


図-10 高瀬ダムにおけるハインドキャスト結果 (黒線:観測流量、赤線:解析雨量による流量、水色線:32のアンサンブル平均流量)(上:大規模、中:中規模、下:小規模)

第一類ダムの場合、貯水池の空き状況に応じて流入量を貯め込むことが可能であることから、ピークの到達時刻ではなくピークまでの積算流入量(ボリューム)の予測も重要となる。そこで、流入量をボリュームの指標で整理することとした。ピーク流量の発生時刻の手前30時間、24時間、12時間、6時間を選びその時間に予測した最大39時間先までの予測流入量の積算値と同時間帯での実測流入量の積算値の比をとり、精度が5%、10%、15%という指標を設定し評価することとした。結果を表-2に示す。

表-2 高瀬ダムにおけるピーク発生時までの積算流入量(比率=予測値/実測値):黄色15%,水色10%,緑5%の誤差

| イベント名  | ピーク流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | ピーク発生時刻          | ボリューム比較 (比率=予測/実測) |       |       |       |
|--------|------------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|
|        |                              |                  | 30時間前              | 24時間前 | 12時間前 | 6時間前  |
| 1 出水:大 | 274.6                        | 2018/07/04 22:00 | 0.505              | 0.421 | 0.883 | 1.096 |
| 2 出水:中 | 95.5                         | 2018/08/31 18:00 | 0.733              | 0.976 | 0.977 | 0.982 |
| 3 出水:小 | 66.5                         | 2018/08/16 17:00 | 1.230              | 1.110 | 0.897 | 1.287 |

流入量での検討では、中規模出水において 24 時間前、12 時間前、6 時間前において 5%以内の誤差で予測、小規模出水では 24 時間前、12 時間前で 15%以内の誤差で予測、大規模出水では 12 時間前 6 時間前で 15%以内の誤差と高精度での流入量予測結果を示した。

## 7. 大井川を対象とした発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法の検討

### 7.1 検討手法

WEB-DHM-4cS にアンサンブル降雨予測データを入力し得られる 32 のアンサンブル予測流入量の幅を考慮し、1)洪水調節に重きを置く場合は上位 25%程度を、増電のための水量確保に重きを置く場合は下位 25%程度の流量時系列を用いること、2)既存の操作規定に従って運用した場合に予測期間中にダムから安全に放流できる流量を超えるかどうか、3)予測開始時点で予測時間内の流入量の積算値が貯留可能な容量を超えるかどうか、の各計算をし、4)超える場合は超過量を予測期間内で均等にダムから発電使用水量を優先し放流する、5)超えない場合は 39 時間先までの予測流入量の平均値を次の 1 時間の発電使用水量とする、という操作を設定した。

洪水調節については、目標とする洪水時上限ゲート放流量を  $600\text{m}^3/\text{s}$  とした場合、ダム湖の水位が常時満水位以下となるかどうかで評価した。発電については、発電使用水量ではなく発電量で比較することが望ましい。発電出力は、発電使用水量、有効落差、そして合成効率(水車効率と発電効率を合成したもの)から求まるが、比較には合成効率は不要である。そこで、「発電量指標:発電使用水量に有効落差の指数(水位に従って線形的に増大し、計画高水位(HWL)で 1.0 となる)を乗じたものの時間積算値」を設けて、その指標の変化で増電効果を求めることとした。

任意の水量  $Q(\text{m}^3/\text{s})$  と有効落差  $He$  における発電出力  $P$  は、式-(1)で計算される。

$$P=9.8 \times Q \times He \times \eta \quad (1)$$

ここで、 $P$ : 発電出力 (kW)、

$Q$ : 任意の水量( $\text{m}^3/\text{s}$ )、

$He$ : 任意の使用水量時の有効落差(m)、

$\eta$ : 水車効率と発電効率の合成効率

そこで、実績とシミュレーションの発電量を簡易に比較するため、式-(2)に示す「発電量指標」で評価した。

$$P_{index} = \left( 1.0 - \frac{HWL - h}{H_{emax}} \right) \times Q_p \quad (1)$$

ここで、 $P_{index}$ : 発電量指標、

$h$ : 貯水位(m)

$H_{emax}$ : 最大有効落差 (m)

$Q_p$ : 発電使用水量( $\text{m}^3/\text{s}$ )

### 7.2 畑薙第一ダムにおける 2018、2019 年出水での検討

2018 年、2019 年暖候期(7~10 月)でダム操作を連続的に適用した結果を図-11 に示す。この 2 暖候期に  $600\text{m}^3/\text{s}$  を超す出水は、2018 年 9 月 30 日~10 月 1 日と 2019 年 10 月 12~13 日の 2 回発生しており、その期間の詳細を図-12 に示す。

2018 年は予測開始時のダム湖の水位が高い場合の事例です。ダム湖の水位が予備放流水位とほぼ同等な状態下で予測された流入量を洪水が起こる前日の 29 日の午前(ピンク色範囲)に事前放流を実施することで貯水位(グレーの点線)を適時に下げて、流入量(青の実線)ピーク時のゲート放流量(ピンク色範囲)を既定の  $600\text{m}^3/\text{s}$  以下に抑えることに成功している(なお、事前放流をしない場合、オレンジ色範囲のようにゲート放流量は  $600\text{m}^3/\text{s}$  を超えている)。

2019 年は予測開始時のダム湖の水位が低い場合の事例です。貯水能力が見込める中で、常時満水位(赤の点線)まで効果的に事前に水を貯留し、ゲート放流量を  $600\text{m}^3/\text{s}$  以下に抑えることに成功している。

なお、発電量指標では暖候期(7~10 月)平均で、2018 年は 12.8%、2019 年は 3.7%の増電を示すことができた。

## 8. まとめ

本研究では、領域アンサンブル降雨予測技術の改善、大気と陸面の水文過程を精緻に表現し降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)の改善をし、予測された降雨を WEB-DHM-S に入力することでダムへの流入量を予測し、その予測流入量に基づき発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法を検討した。

領域アンサンブル降雨予測については、予測システムの運用と 2018 年 4 月以降現在までの連続計算データを作成し、基準雨量強度を超える雨の予測をスレットスコアで評価し精度の向上を示した。また、利根川を対象とした気象庁 3 ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法を検討し、有効な予測値が得られる可能性を示した。

流入量予測については、犀川流域の生坂ダム(第三類)、高瀬ダム(第一類)地点における 2018 年 7~9 月の出水イ

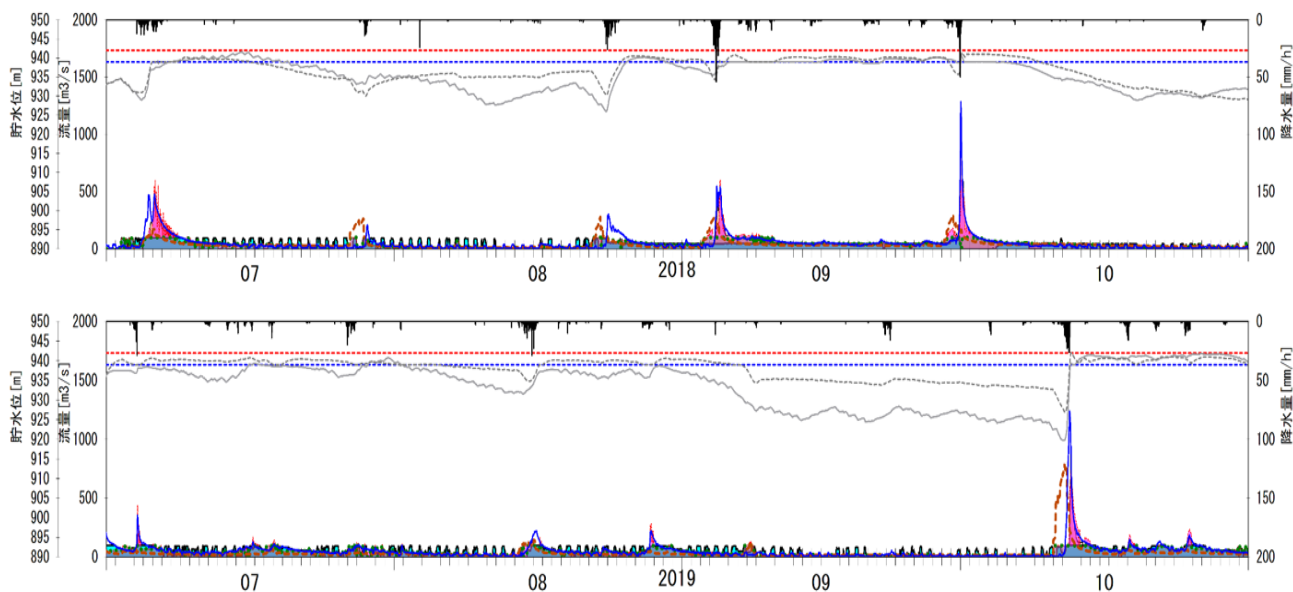


図-11 2018年(上図)と2019年(下図)暖候期(7~10月)の時間降水量(黒棒)・流入量(青実線)・貯水位(黒実線)・発電使用量(水色範囲)の観測値と、ダム操作支援システムによるアンサンブル流出予測値(赤破線、予測先行時間内平均)・追加発電使用水量(青色範囲)・ゲート放流量(ピンク色範囲)・貯水位(黒破線)。赤点線は常時満水位、青点線は予備放流水位。

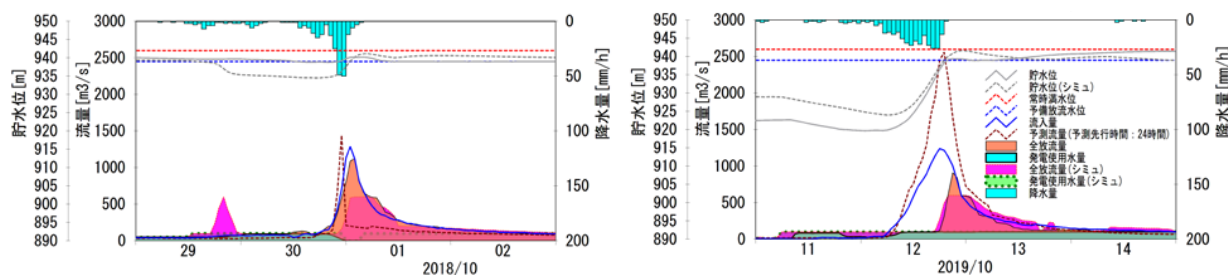


図-12 :ゲート放流量が600m³/sを超した出水の詳細(2018年9月30日~10月1日(左図)と2019年10月12~13日(右図))時間降水量(水色棒)・流入量(青実線)・貯水位(黒実線)・ゲート放流量(オレンジ範囲)・発電使用量(青色範囲)の観測値と、予測開始時刻から24時間先のアンサンブル流出予測(茶破線)・ゲート放流量(ピンク色範囲)・追加発電使用水量(紫色範囲)・ダム貯水位。赤点線は常時満水位、青点線は予備放流水位。

メントを対象に流入量予測をした。生坂ダム地点ではリードタイム 7~31 時間で洪水量(800m³/s)を予測するケースを示し、高瀬ダム地点ではピークまでの積算流入量(ボリューム)で、中規模出水において24時間前、12時間前、6時間前でそれぞれ5%以内の高精度で予測した。

アンサンブル流入量予測を基にした効率的なダム操作については、洪水が見込まれるとなった場合に、事前に発電ダムの使用水量を増やし発電量を増加するとともに、ダム水位を低下させ洪水を効率的に貯留するダムの操作方法を検討した。大井川畑薙第一ダムを対象に、2018年は予測開始時のダム湖の水位が高い場合は事前に放流、2019年の予測開始時のダム湖の水位が低い場合は効果的に水を貯留し、ゲート放流量を600m³/s以下に抑えたとともに発電量が事前に水を利用しなかった場合と比較し、発電使用水量が9%増加(発電量指標は6%増加)すると

もに発電量指標では暖候期(7~10月)平均で、2018年は12.8%、2019年は3.7%の増電を示した。

参考文献

- 1) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: 「Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter.」 Physica D, 230, 112-126, (2007).
- 2) Miyoshi, T., and M. Kunii: 「The local ensemble transform Kalman filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observation.」 Pure Appl. Geophys. DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, (2011).
- 3) 牛山 朋来, 小池 俊雄, 大井川・犀川流域の効率的ダム操作支援を目的とした領域アンサンブル降雨予測の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 74 巻, 4 号, p. I\_103-I\_108, 2018.



- 4) 牛山朋來、小池俊雄、利根川流域を対象とした気象庁1か月アンサンブル予報のダウンスケーリング、日本気象学会2020年度春季大会、2020年5月。
- 5) Shrestha, M., Koike, T., Hirabayashi, Y., Xue, Y., Wang, L., Rasul, G., & Ahmad, B.: 「Integrated simulation of snow and glacier melt in water and energy balance-based, distributed hydrological modeling framework at Hunza River Basin of Pakistan Karakoram region」, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4889-4919, (2015), <https://doi.org/10.1002/2014JD022666>
- 6) A Moiz, Z Wei, RAE Acierto, A Naseer, A Kawasaki, T Koike: Modeling seasonal snow hydrology using vertical air temperature profiles from reanalysis, AGU Fall Meeting Abstracts 2019, C33C-1594.
- 7) Naseer, A., Koike, T., Rasmy, M., Ushiyama, T., & Shrestha, M. Distributed hydrological modeling framework for quantitative and spatial bias correction for rainfall, snowfall, and mixed - phase precipitation using vertical profile of temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 4985-5009, 2019.
- 8) 玉川 勝徳, MOHAMED Rasmy, NASEER Asif, 牛山 朋來, 中村 茂, Cho Thanda NYUNT, MOIZ Abdul, 大沼 克弘, 小池 俊雄, 犀川流域におけるダム流入量のアンサンブル予測手法の検討, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 77 巻, 2 号, p. I\_61-I\_66, 2021.
- 9) 小池 俊雄, 中村 茂, Cho Thanda Nyunt, 牛山 朋來, Rasmy Mohamed, 玉川 勝徳, 伊藤 弘之, 池内 幸司, 生駒 栄司, 喜連川 優: 発電ダムの洪水調節と発電操作支援システム, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 77 巻, 2 号, p. I\_79-I\_84, 2021.



## 2. 1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

### 2. 1. 3 人工衛星及び土砂水理学モデルを活用した水災害ハザード推定技術の開発に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、伊藤弘之、大沼克弘、萬矢敦啓、山崎祐介、南雲直子、郭榮珠、原田大輔、Robin K. BISWAS、秦夢露、Kattia Rubi Arnez Ferrel、江頭進治

#### 【要旨】

本研究では、土砂移動を含む水災害を対象にした数値モデルを開発し、同時に人工衛星データや現地調査から計算条件を作成する手法を開発し、これらを用いて数値計算を行い、水災害ハザードを推定する手法を示すことを目的に研究を行った。降雨に伴う流域からの土砂流出予測法の提案、連行の概念を用いた浮遊砂浮上量式の提案、人工衛星と水位計データから河道地形を作成する手法の提案を行った。これらを用いてバングラデシュのジャムナ川と五福谷川において洪水再現計算を行った結果、提案する手法が対象地域の水災害ハザードを推定する上で有用であることが示された。

キーワード：土砂水理学モデル、人工衛星、水災害ハザードの推定、土砂・洪水氾濫、浮遊砂

#### 1. はじめに

近年、国内外で土砂移動を伴った水災害が頻発している。この状況は、今後気候変化の影響を考慮すると、ますます強まることが懸念されている。一方、これらの国・地域では洪水災害予測の基礎となる水文・水理データの観測密度や蓄積が乏しく、特に、洪水災害の拡大要因となる土砂輸送を伴う洪水、洪水・土砂氾濫に関する知見は十分とは言えない。

国内では、2017年の九州北部豪雨による筑後川水系赤谷川の災害に見られるように、豪雨に伴い山間部で土砂・流木が多量に生産され、これらが河道沿いに堆積すれば、生産された土砂・流木が洪水流に伴って下流に流出し、下流部の洪水氾濫被害を助長する<sup>1)</sup>。しかし、こういった現象を解析し、ハザードを評価する手法は十分とは言えない。

国外では、例えばバングラデシュでは、ブラマプトラ川のような大河川において、毎年のように大規模な流路・河床変動が生じ、河岸侵食によって多くの土地が失われている。このような水災害ハザードに対して、数値解析技術を用いて砂州の挙動やそれに伴う河岸侵食を予測することができれば、多くの効果的な対策を立てることができるはずである<sup>2)</sup>。

このような状況をふまえ、本研究では土砂移動を含む水災害を対象にした数値モデルを開発し、同時に人工衛星データや現地調査から計算条件を作成する手法を開発し、これらを用いて数値計算を行い、水災害ハザードを推定する手法を示すことを目的に研究を行った。

#### 2. 手法

##### 2.1 降雨に伴う土砂流出解析法(Rainfall-sediment-runoff (RSR) model)の開発

降雨に伴う流域全体からの土砂流出を解析するために、合流点間を単位河道とするモデル<sup>3)</sup>と、分布型降雨流出氾濫モデル(RRIモデル)<sup>4)</sup>とを統合し、河川流域からの土砂流出を容易に解析できるモデルを開発した。

図-1のように、上流側の合流点( $x_j$ と $y_j$ )を含み、下流側の合流点( $x_{j+1}$ )を含まない区間を単位河道とする。単位河道を直列及び並列に配置することによって、樹枝状に分岐する河道網を表現する。このモデル化によって、貯留型の支配方程式を得ることができ、複雑な河道網における土砂流出予測を容易に行うことができる<sup>3)</sup>。

本研究ではRRIモデル<sup>4)</sup>の河道セルのうち1つ又はその複数を連結して単位河道を構成する。各単位河道の流量、勾配、川幅といった物理量について、RRIモデルの $x_j$ 、

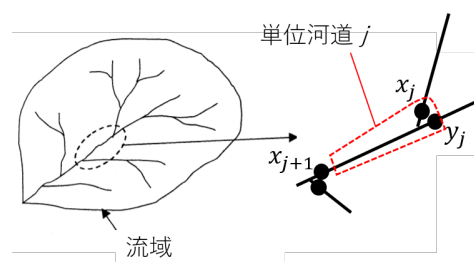


図-1 単位河道モデルの概念図(文献<sup>3)</sup>に加筆)

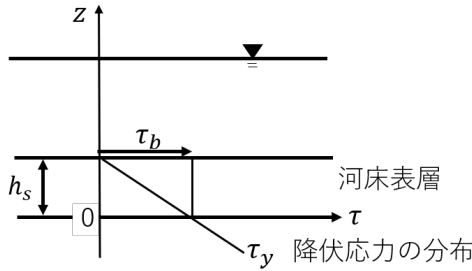


図-2 河床表面層の応力分布に関する模式図

$y_j$ 地点に相当する河道セルのうち集水面積の大きい方と  $x_{j+1}$ 地点の平均値を採用する。すなわち、河道の土砂輸送能力の評価には、RRI モデルの解析結果を用いている。これらを用いて土砂輸送を評価する手順は以下の通りである。

浮遊砂の輸送については、次式により算出する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hc_i}{\partial t} \\ &= \frac{1}{B_j L_j} \{c_{si}(x_j)Q(x_j) + c_{si}(y_j)Q(y_j) \\ & - c_{si}(x_{j+1})Q(x_{j+1})\} + E_i \\ & - D_i \end{aligned}$$

ここに、 $c_{si}(x_j)$ : 単位河道  $j$  の  $i$  粒径階の浮遊砂濃度、 $Q(x_j)$ : 単位河道  $j$  の流量、 $B_j$ : 川幅、 $L_j$ : 単位河道長、 $h$ : マニング則により算出される水深、 $D_i$ :  $i$  粒径階の堆積速度であり  $c_i$  と沈降速度の積により算出、 $E_i$ :  $i$  粒径階の侵食速度であり、後述する。

次に、以下の式によって河床位の変化を評価する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_i \frac{1}{(1-\lambda)B_j L_j} \{ & Q_{bi}(x_j) + Q_{bi}(y_j) - Q_{bi}(x_{j+1}) \} \\ & - E_i \\ & + D_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $z_b$ : 河床高、 $Q_{bi}(x_j)$ : 単位河道  $j$  における  $i$  粒径階の掃流砂量であり、江頭らの式<sup>5)</sup>に  $p_i$  を乗じて算定する。河床位の変化に伴って、河床材料の粒度分布が変化する過程について、竹林ら<sup>6)</sup>の研究と同様に、掃流砂層と堆積層との間に遷移層を介在させ、掃流砂層と遷移層における各粒径階の土砂粒子の質量が保存されるよう計算を行う。なお、本モデルでは式(4)の計算により単位河道内の河床セルの河床位が変化し、RRI モデルの流出計算がその影響を受ける形となっている。

## 2.2 連行の概念を用いた浮遊砂浮上量式の開発

数十 $\mu\text{m}$ 程度の微細な土砂が多量に供給され、これを扱

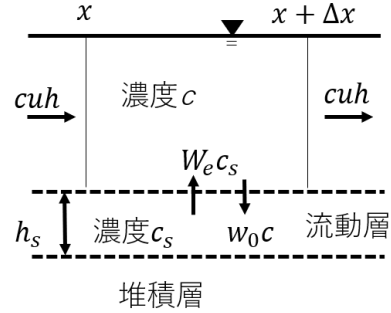


図-3 流水中の極微細土砂の收支

う必要がある場合、ほとんどの既往の式が浮遊砂の浮上量を極端に大きく評価してしまう。これは、これらの式が粘着力を考慮していないこと、また、微細土砂は従来ウォッシュロードとして扱われ、従来の評価式においてはあまり研究対象となつてこなかった経緯があると考えられる。そこで、微細土砂の解析を可能にするために、連行の概念を用いた浮遊砂の解析モデルを新たに提案し、実験を行ってその妥当性について検討した。

図-2 は、微細土砂が緩く堆積している河床表面層の応力分布の模式図であり、河床表面にはせん断応力  $\tau_b$  が作用している。降伏応力の深さ方向の分布は、見かけの内部摩擦角  $\phi$  を導入して次式のように表される。

$$\tau_y = \rho(\sigma/\rho - 1)c_s g(h_s - z)\tan\phi \quad (3)$$

ここに、 $\tau_y$ : 降伏応力の深さ方向の分布、 $\rho$ : 水の密度、 $\sigma$ : 土粒子の密度、 $g$ : 重力加速度である。 $c_s$  は流動層の砂粒子断面平均濃度であり、運動量保存則に水と砂礫の混合体の構成則を適用することによって求められるもので、ここでは便宜上平均濃度を用いる。

図-2 を参照し、河床に作用するせん断応力  $\tau_b$  と  $\tau_y$  が等しくなるところを  $z = 0$  とすると、流動層の厚さ  $h_s$  について、次式を得る。

$$\frac{h_s}{h} = \frac{i_e}{(\sigma/\rho - 1)c_s \tan\phi} \quad (4)$$

ここに、 $\tau_b = \rho g h i_e$  としており、 $i_e$  はエネルギー勾配である。領域  $0 < z < h_s$  (流動層) における流れを層流とすれば、流れは次式で与えられる。

$$\rho \nu \frac{\partial u_s}{\partial z} = \tau_b - \tau_y \quad (5)$$

ただし、 $\nu$ 、 $u_s$  はそれぞれ領域  $0 < z < h_s$  (流動層) における動粘性係数および流速である。

式(4)、(5)より、

$$\frac{\partial u_s}{\partial z} = \frac{u_*^2}{\nu} \frac{z}{h_s} \quad (6)$$

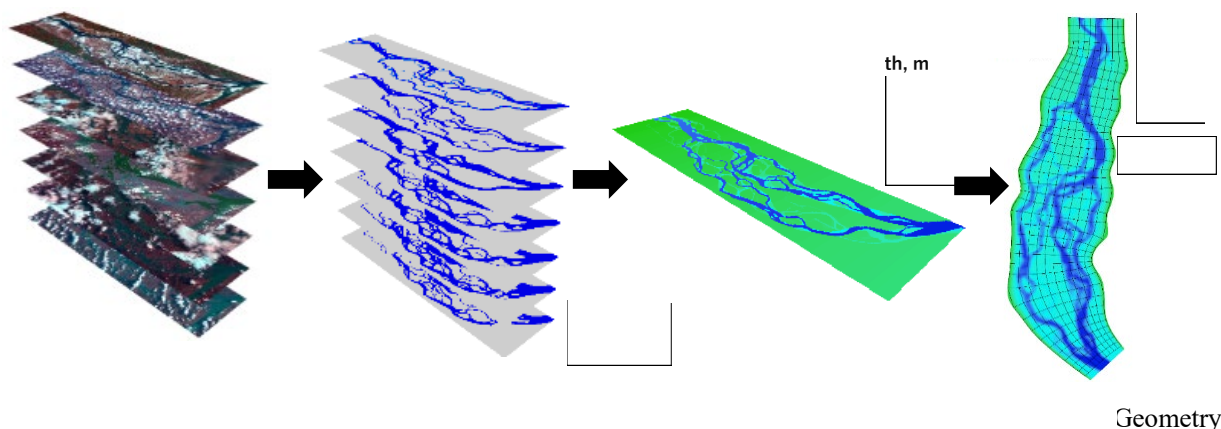


図-4 人工衛星データを用いたDSMの作成手法の概要 (バングラデシュ、ブラマプトラ川の例)

従って、 $0 < z < h_s$ における流速分布 $u_s(z)$ 及び平均流速 $V$ は以下のものである。

$$u_s(z) = \frac{1}{2} \frac{u_*^2}{v} \frac{z^2}{h_s} \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{6} \frac{u_*^2}{v} h_s \quad (8)$$

流砂量 $q_b$ は、 $q_b = c_s V h_s$ であることから、

$$q_b = \frac{c_s u_* h_s}{6 v} u_* h_s \quad (9)$$

と表される。

次に、掃流の場合と同様に、微細土砂から構成される河床表層上の一次元流を考える。この場合、図-3に示すように連行によって微細土砂が流水中に取り込まれ、一方、流水中の土砂は沈降によって河床表層に戻るものとする。このとき、流水中の微細土砂の質量保存は次の移流分散方程式で記述される。

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cuh}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + W_e c_s - w_0 c \quad (10)$$

ここに、 $c$ ：水中の土砂粒子の濃度、 $u$ ：平均流速、 $\varepsilon$ ：分散係数、 $W_e$ ：連行速度、 $w_0$ ：沈降速度である。また、水流の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = W_e - w_0 \frac{c}{c_s} \quad (11)$$

と表される。式(10)、式(11)より、土砂濃度 $c$ は次のように記述される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = & \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon h \frac{\partial c}{\partial x} \right) \\ & + \frac{1}{h} \left\{ W_e c_s \left( 1 - \frac{c}{c_s} \right) - w_0 c \left( 1 - \frac{c}{c_s} \right) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

連行による流水中への土砂の取り込みと沈降による河床への堆積が釣り合った状態、すなわち $\partial c / \partial t = 0$ 、 $\partial c / \partial x = 0$ の状態では、平衡濃度 $c_e$ が次のように得られる。

$$c_e = \frac{W_e}{w_0} c_s \quad (13)$$

ここで、成層密度流の連行現象に関する研究成果<sup>7)、8)</sup>を用いて連行速度 $W_e$ を評価できるものとする、連行速度は次式で与えられる。

$$\frac{W_e}{u} (= e) = \frac{K}{R_{i*}} \quad (R_{i*} = \frac{\Delta \rho}{\rho} gh / u^2) \quad (14)$$

ここに、 $R_{i*}$ はリチャードソン数、 $e$ は連行係数、 $\Delta \rho$ は密度差である。芦田ら<sup>9)</sup>によれば、 $K = 1.5 \times 10^{-3}$ とされている。

式(13)及び式(14)に、マンシングの抵抗則を導入して整理すると、次式を得る。

$$c_e = \frac{K}{(\sigma/\rho - 1) n \sqrt{g}} Fr^2 \frac{u_*}{w_0} \quad (15)$$

ここに、 $n$ はマンシングの粗度係数である。なお、 $c_e \ll c_s$ としている。

### 2.3 人工衛星データを用いたDSM作成手法の開発

バングラデシュを流れるブラマプトラ川のような大河川では、年間を通じて水位の高低差が非常に大きい。渇水期には河床の多くの部分が陸地となる一方、洪水期には

大半の砂州が水面下に入る。この高低差を利用して、人工衛星データを用いた水域抽出による DSM の作成手法を提

### 3.1 実験の概要及び実験条件

表-1 実験ケース一覧

| 実験ケース | 設置長 L (m) | 土砂粒度分布 | 流量 (L/s) | 水深 (cm) | 設置高 h (cm) | 水深平均濃度 (%) |
|-------|-----------|--------|----------|---------|------------|------------|
| 1-1   | 1.0       | 土砂1    | 3.5      | 8.0     | 9.0        | 12.0       |
|       |           |        |          |         |            | 17.0       |
|       |           |        |          |         |            | 22.0       |
|       |           |        |          |         |            | 22.0       |
| 1-2   | 7.0       | 8.0    | 10.0     | 12.0    |            |            |
| 1-3   | 7.0       | 8.0    | 7.0      | 12.0    |            |            |
| 1-4   | 5.0       | 7.0    | 8.0      | 8.0     |            |            |
| 1-5   | 1.0       | 土砂1    | 10.0     | 10.0    | 7.0        | 5.9        |
|       |           |        |          |         |            | 8.0        |
|       |           |        |          |         |            | 10.0       |
|       |           |        |          |         |            | 12.0       |
|       |           |        |          |         |            | 13.8       |
|       |           |        |          |         |            | 14.9       |
|       |           |        |          |         |            | 15.9       |
|       |           |        |          |         |            | 17.0       |
|       |           |        |          |         |            | 19.0       |
|       |           |        |          |         |            | 22.0       |
| 1-6   | 3.0       | 土砂1    | 5.0      | 7.0     | 8.0        | 8.0        |
| 12.0  |           |        |          |         |            |            |
| 17.0  |           |        |          |         |            |            |
| 22.0  |           |        |          |         |            |            |
| 1-7   | 10.0      | 10.0   | 7.0      | 8.0     |            |            |
| 1-8   | 5.0       | 10.0   | 8.0      | 8.0     |            |            |
| 2-1   | 1.0       | 土砂2    | 3.5      | 8.0     | 7.0        | 14.6       |
|       |           |        | 7.0      | 8.0     | 8.0        |            |
|       |           |        | 10.0     | 10.0    | 8.0        |            |
| 2-2   | 1.0       | 土砂2    | 3.5      | 8.0     | 7.0        | 29.4       |
|       |           |        | 7.0      | 8.0     | 8.0        |            |
|       |           |        | 10.0     | 10.0    | 8.0        |            |
| 3-1   | 1.0       | 土砂3    | 10.0     | 10.0    | 7.0        | 23.0       |
|       |           |        | 3.5      | 8.0     | 8.0        |            |
|       |           |        | 7.0      | 8.0     | 8.0        |            |
| 4-1   | 1.0       | 土砂4    | 10.0     | 10.0    | 7.0        | 28.7       |
|       |           |        | 3.5      | 8.0     | 7.0        |            |
|       |           |        | 7.0      | 8.0     | 8.0        |            |
| 4-1   | 1.0       | 土砂4    | 10.0     | 10.0    | 8.0        | 57.4       |
|       |           |        | 3.5      | 8.0     | 7.0        |            |
|       |           |        | 7.0      | 8.0     | 8.0        |            |

案したものが図-4である。

まず、図-4(a)のように、一年間のうち、雨季と乾季の両方を含むように、複数枚の人工衛星データを抽出する。今回は、2010年の人工衛星 (Landsat) 画像のうち7枚を抽出した。これらのデータから、水域と陸域の境界を抽出する。画像が撮影された日の水位データを領域内の水位計から取得し、水面が川底に平行であると仮定し、水位計からの距離と河床勾配から各水際地点の標高を求めることができる。こうして求めた水域—陸域境界の標高を7枚重ね合わせることで、河道地形のデータ (Digital Surface Model, DSM) を得ることができる。このようにして得られた DSM は、後述するように、河岸侵食や砂州の移動を含む河床変動計算を行うのに実用的な精度を有している。

### 3. 浮遊砂の侵食に関する実験とその考察

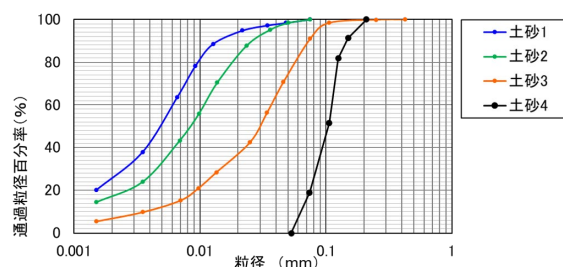


図-5 実験に用いた土砂の粒度分布

2.2節において、連行の概念を用いた浮遊砂浮上量式を提案した。本手法は、微細土砂で構成される河床の変動を予測するのに有用な手法と思われるが、式(14)はブシネスク近似が成り立つ2流体間における成層密度流の研究成果に基づくものであり、この関係が河床表層と水流層の間に形成されている土砂の密度躍層にも適用できるか否かが、連行速度を用いた浮遊砂の解析法の妥当性を決定づける。このことを確認するために、以下のように微細土砂を用いた水理実験を行う。本実験では図-5に示す粒度分布の異なる4種類の河床材料を用い、土砂と水の混合物が流水に連行される速度についての計測を行っている。土砂の密度は2.65~2.77(g/cm<sup>3</sup>)程度である。図-6に示すような実験装置を製作し、水理実験を行った。実験水路は全長約11m、水路幅0.2m、最大流量：20l/s程度である。実験水路の中ほどに貯留空間を設け、ここに予めよく混ぜておいた微細土砂と水の混合物を設置した後に、水路の全体にわたり、堆積土砂 (水と土砂の混合物) が乱れないよう注意して湛水する。

通水中は図-6に示す7つの地点で流水中の土砂濃度を計測した。計測方法については、流水を10秒間採水チューブを用いて直接採取し、これを乾燥させて流水中の土砂濃度を求めている。通水開始後一定程度の時間が経過して侵食率が概ね一定と判断された時点で計測を開始する。採水用チューブの先端に付ける呑口形状は幅10mm、高さ5mmの四角形状のものを用いた。なお、図中の計測点4、5、6、7については鉛直方向にそれぞれ2割、4割、6割、8割水深で呑口を設置している。実験結果に採用する流水中の土砂濃度は、計測点4、5、6、7の濃度を平均したものである。なお、計測点2、3については掃流砂の影響を調べるため底面付近に設置したものの、実際にはここで計測しているものが掃流状態であるかどうか不明な上に、浮遊砂量に対して掃流で輸送される量は無視できる程度であるため、ここでは計測点2、3

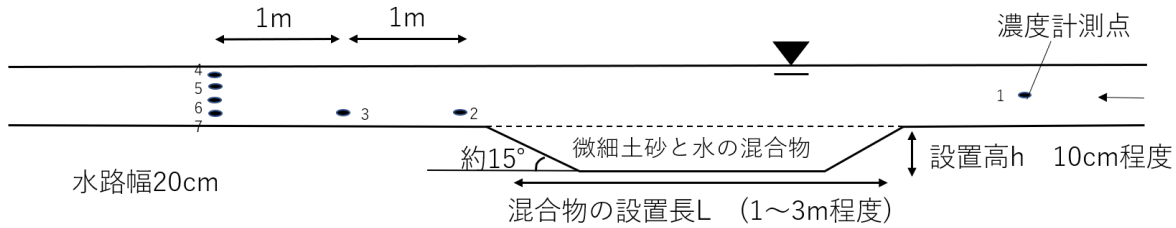


図-6 実験水路の模式図

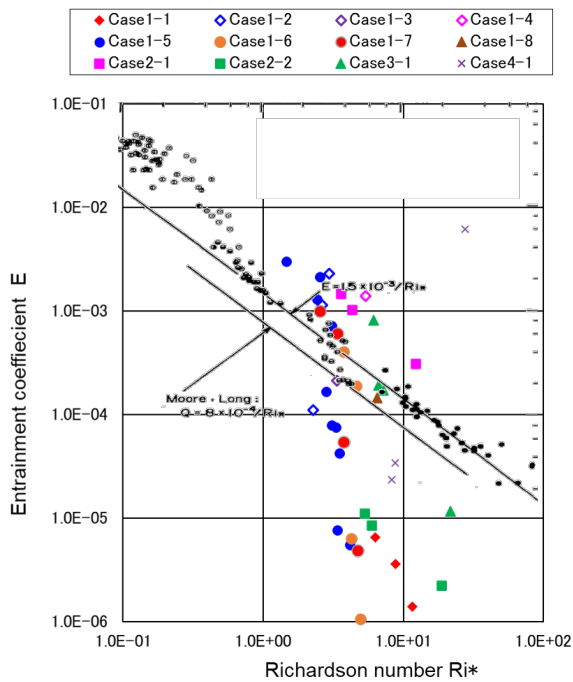


図-7 実験結果と既往の連行に関する研究との比較 (芦田ら<sup>8)</sup>に加筆) (縦軸は連行係数、横軸はリチャードソン数)

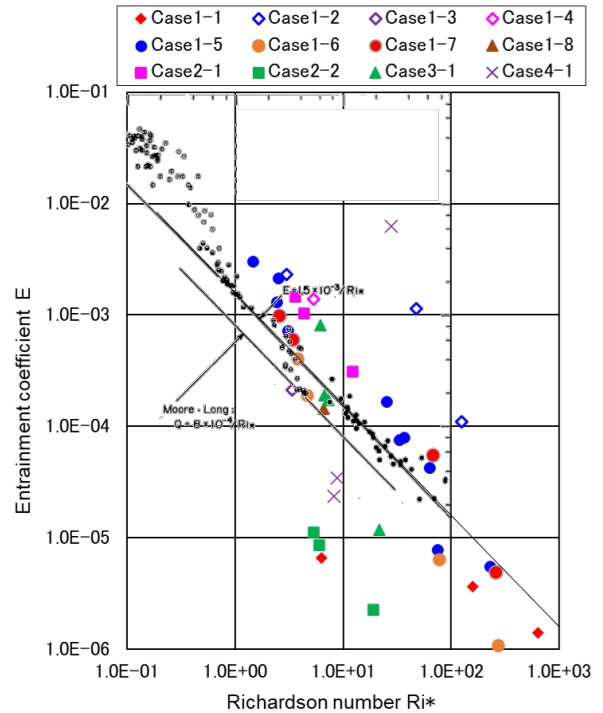


図-8 修正 Ri\*に対する連行係数の実験結果 (芦田ら<sup>8)</sup>に加筆) (縦軸は連行係数、横軸は修正リチャードソン数)

のデータについては検討を行わない。

図-6 に示す土砂と水の混合物の貯留空間については長さを変更できる構造とし、まず 1m の設置長での実験を行い、その後設置長を 3m として実験を行った。これは、設置長が長いほど連行される土砂の量が多くなることから、連行係数に対する設置長の影響について調べるためである。なお、水路内の混合物貯留空間に設置する土砂については、各種類の土砂についていくつかの濃度の混合物を作成して、実験を行っている。

実験ケースの一覧について、表-1 に示す。表中の「貯留高さ」について、通水を開始すると界面のせん断力により貯留空間の下流側の混合物が浮き上がり、混合物が貯留空間をはみ出して下流側に堆積してしまう。このことを避けるために、混合物の貯留高さを水路床の高さよりも

やや下げて通水を行っている。

### 3.2 実験の結果

式(10)に基づいた以下の式(16)を用いて、連行速度 (連行係数) を算出する。

$$q \frac{\partial c}{\partial x} = W_e c_s - \alpha w_0 c \quad (16)$$

ここに、 $q$ は単位幅流量で $q = uh$ 、 $\alpha$ は $\alpha = c_a/c$ 等で表現される補正係数であり、土砂 4 は土砂の粒径が大きく粒子沈降の影響が無視できそうにないように思われるため、これを導入している。 $c_a$ は基準面濃度であり、ここでは Rouse 分布を用いて算出している。土砂 4 以外の土砂の場合、土粒子の沈降が無視できるほど小さいため、式



(16)は以下のように変形される。

$$W_e = c(l)q / c_s L \quad (17)$$

$c(l)$ は計測地点における鉛直平均濃度、 $L$ は水と土砂の混合物と水流層が接する距離 (図-6 参照) である。一方、土砂 4 のように粒径が粗い場合、粒子沈降の影響を無視できないため、式(16)の解は次のようになる。

$$W_e = \frac{aw_0 c(l)}{c_s} e^{aw_0 l / q} \frac{1}{1 - e^{-aw_0 L / q}} \quad (18)$$

上記の方法により求めた連行速度から式(14)により連行係数を求め、既往の成層密度流の連行現象に関する研究成果<sup>8)</sup>と比較したものが図-7である。図において、同一ケースでは濃度が大きいほど連行係数が小さい。図より、それぞれのケースについて、概ね連行係数が $R_{i*}$ に反比例するという式(14)の関係が確認できる。しかし、いくつかのケース、特に最も粒径の小さい Sediment 1 を用いた場合に、混合物の濃度が大きいケースにおいては既往の成層密度流の実験結果 ( $K = 1.5 \times 10^{-3}$ の線) と比較してかなり小さい。これは、濃度が大きい場合に粘着力が強く作用し、侵食が抑制されているためと考えられる。

この粘着力の影響を補正するために、いくつかの方法が考えられる。ここでは一つの方法として、以下のように補正を行う。

連行速度を規定する重要な要素は 2 層の境界に作用するせん断応力 $\tau$ であり、その仕事率の一部により連行が起きるとすれば、以下のように表される。

$$\tau u \sim \Delta \rho g h W_e \quad (19)$$

式(19)を変形すると、次式を得る。

$$\frac{W_e}{u} \sim \frac{\tau}{\Delta \rho g h} \quad (20)$$

境界面では乱流運動が抑制されると考えれば、ここでのせん断応力は動粘性係数を用いて評価することができ、式(20)は次式のように変形される。

$$\frac{W_e}{u} \sim \frac{\nu}{u^2} \frac{1}{R_{i*}} \quad (21)$$

従来の成層密度流における連行現象とここで対象とする連行現象が同じ機構で起こっているものだとすると、境界近傍の流れは両者が相似であると推察され、次の関係が期待される。

$$\frac{\nu_0}{u^2} \frac{1}{R_{i*0}} = \frac{\nu_c}{u^2} \frac{1}{R_{i*c}} \quad (22)$$

ここに、 $\nu_0$ 、 $R_{i*0}$ はそれぞれ水の動粘性係数及びリチャードソン数、 $\nu_c$ 、 $R_{i*c}$ はそれぞれ水と土砂の混合物の層の動

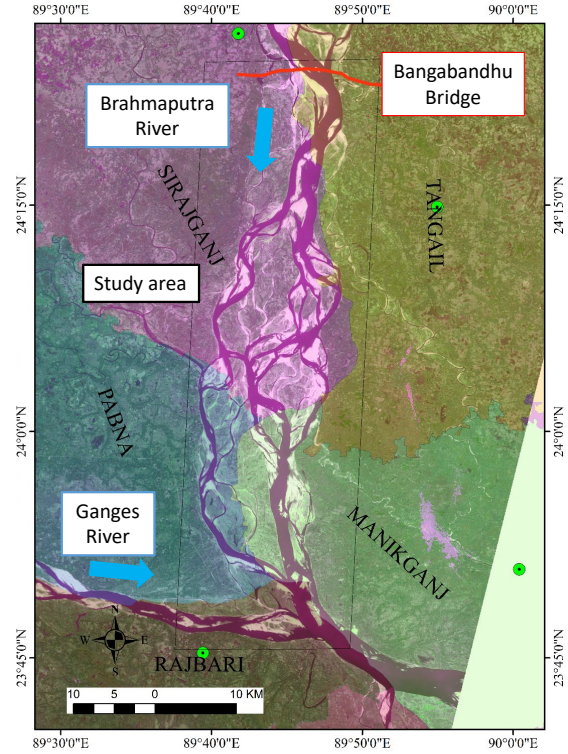


図-9 ブラマプトラ川の対象地域、Tangail 地区と Manikganj 地区

粘性係数及びリチャードソン数である。以上より、次式を得る。

$$R_{i*c} = \frac{\nu_c}{\nu_0} R_{i*0} \quad (23)$$

式(23)の関係に基づいて、Sediment 1 の結果についてリチャードソン数の補正を行ったものが図-8である。 $\nu_c/\nu_0$ の値については、芦田ら<sup>10)</sup>が同じ土砂を用いた実験で得た値を読み取り、これを用いている。

修正リチャードソン数を横軸に用いた図-8 では、連行係数が概ね修正リチャードソン数に反比例する関係であることが示されている。すなわち、連行の概念は微細土砂により構成される河床にも適用可能であり、本研究で提案する手法が有用であることが示されている。

## 4. ブラマプトラ川における河床変動解析—河岸侵食に着目して—

### 4.1 対象河川の概要

前章までに、微細土砂を含む河床を解析的に扱う手法を提案し、また人工衛星データから DSM を作成する手法の開発について説明した。本章ではこれらの手法を用いて、バングラデシュを流れるブラマプトラ川の河床変動解析を行った結果について述べる。

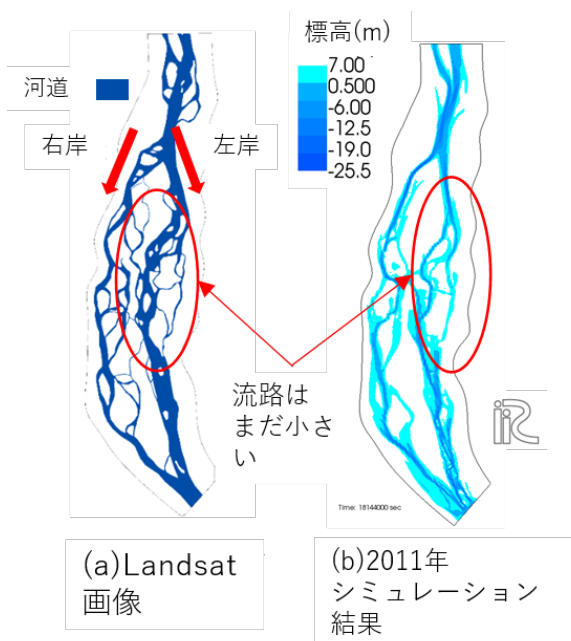


図-10 2011年の洪水について、流路の衛星画像と計算結果の比較

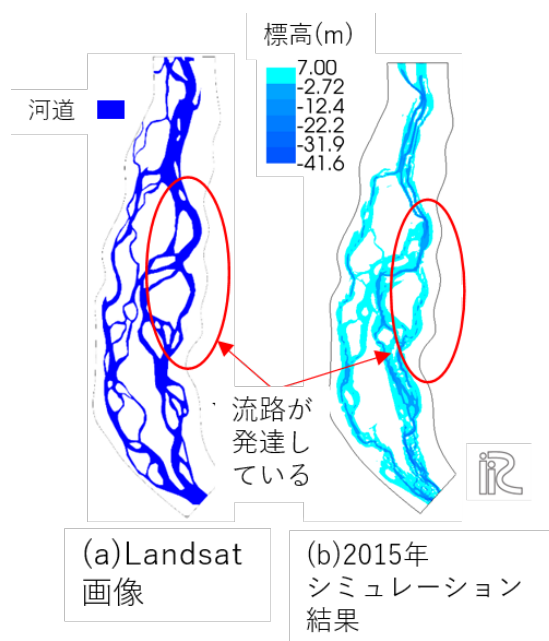


図-11 2015年の洪水について、流路の衛星画像と計算結果の比較

ブラマプトラ川は、バングラデシュで最も大きな網状流路河川である。バングラデシュは流域の下流端に位置し、河床材料の平均粒径は約0.25mmである。そのため河床変動は極めて活発であり、河岸侵食によって毎年数百ヘクタールの農地の損失が引き起こされている<sup>11)</sup>。そのため、河川の特徴を把握し、侵食が起こる前に脆弱な箇所を予測し、対策を実施することが重要である。ここでは、これまでに述べた手法を用いて、平面二次元解析により、河床変動解析を行い、砂州の挙動と河岸侵食の関係について検討を行う。対象地域は、図-9に示すように、ブラマプトラ川沿いのTangail地区とManikganj地区である。この地域は、河道の網状化が著しく、浮遊砂の挙動が支配的である。

#### 4.2 計算条件

平面二次元解析には、iRIC-Nays2DH<sup>12)</sup>を著者らが一部改変したものを用いる。上流端流量として、平均年最大流量である65,000m<sup>3</sup>/sをピークとする波形の洪水ハイドログラフを与える。計算領域は図-4(d)に示す65km×12kmの領域とし、その他の条件として、グリッドサイズ:100m×100m、タイムステップ(dt):0.5s、河床材料の粒径:0.25mm、マンニングの粗度係数:0.025、としている。初期河床地形として、2.3節で示した手法により、2010年のLandsatデータを用いて2011年洪水の初期河床を作成し、また2014年のLandsatデータを用いて2015年洪水の初期河

床を作成した。それぞれの地形データを初期条件として、2011年、2015年の河床変動計算を行い、衛星データとの比較を行った。

#### 4.3 結果と考察

図-10、図-11は、それぞれ2011年洪水と2015年洪水について、シミュレーション結果と、洪水終了時の衛星観測データとを比較したものである。いずれのケースも、複列砂州のパターンが観測結果とよく似ていることから、シミュレーション結果は流路パターンの観点からは概ね妥当と考えられる。

対象河川は解析区間の上流側で左右2つの流路に分かれているため、左右の水路の定義を赤い矢印で示している。2011年(図-10)と2015年(図-11)を比較すると、2015年の方が左岸側流路の流路幅が広がり、ここに広くて深い流路が形成されつつあることが分かる。このことは、図-10に示す一年間の計算からも明らかである。特に赤丸の2011年の洪水後は、観測結果、シミュレーション結果ともに左岸側流路が小さく、浅くなっている。その後、2015年の洪水の後では、左岸側流路(図-11(a)、図-11(b)の赤丸)は広く、深くなっていることがわかる。

このため、左岸側流路では、著しい河岸侵食が生じている。このような河岸侵食の予測を行うために、2018年のLandsatデータを用いて2019年洪水の初期河床を作成し(図-12(a))、2019年洪水のシミュレーションを行った。河岸侵食について、Robinら<sup>12)</sup>が提案した手法で計算す

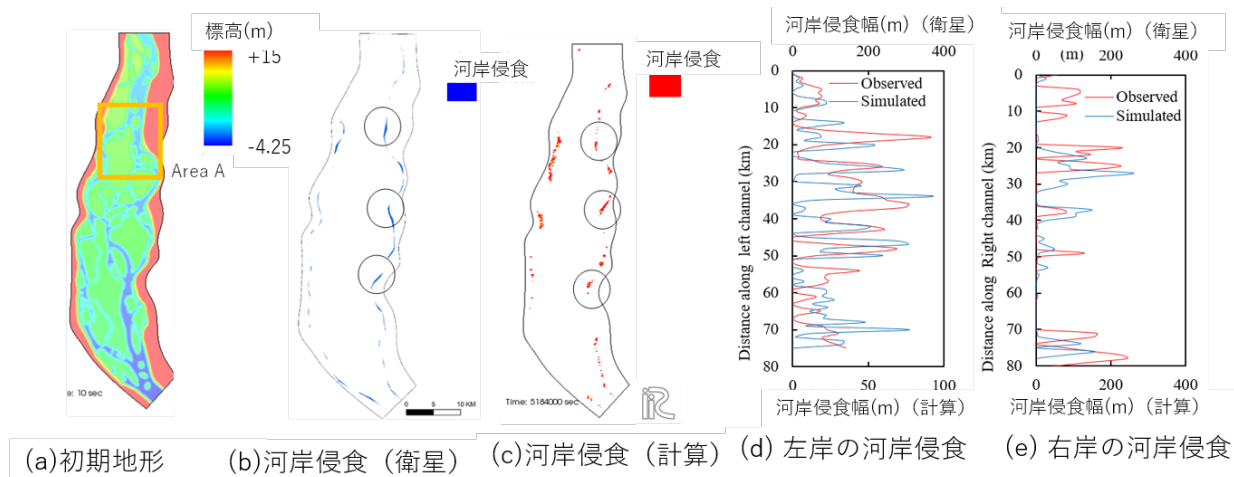


図-12 2019年洪水の河岸侵食シミュレーション

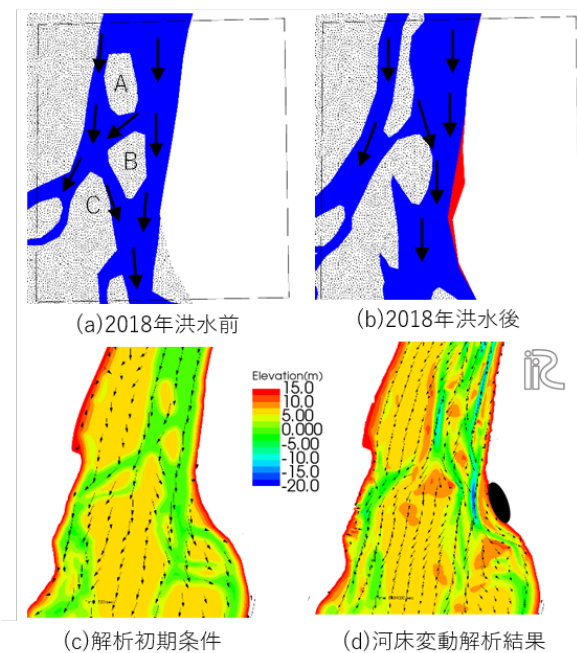


図-13 2018年の洪水について、流路の衛星画像と計算結果の比較

る。この方法では、河岸格子における土砂の侵食と堆積から河岸の移動量を評価している。上流側の流量について、2019年の流量観測データを得ることができなかったため、65,000m<sup>3</sup>/sの定常流を二か月間与えた。図-12(b)は、2019年に観測された河岸侵食をLandsat画像から抽出したものである。図-12(c)は計算終了時の河岸の位置、図-10(d)、(e)は左岸と右岸の河岸侵食の観測値と計算結果の比較である。

図-12(b)、(c)に見られるように、特に○で示した領域は、シミュレーションによる侵食のパターンが観測とよく似ていることがわかる。図-12(d)、(e)によれば、特に

左岸において、河岸侵食の計算結果は観測値の1/2~1/3程度であるものの、侵食が起こりやすい箇所について、その傾向は一致していることが確認できる。

既に述べたように、2011年以降、左岸側流路の流量は徐々に増え、それと共に左岸側流路の流路変動と河岸侵食は著しくなっている。その原因を考察するために、より局所的な範囲に着目したものが図-13である。図-13は、図-12(a)に「Area A」と示した部分を拡大したものであり、(a)、(b)は、2018年の洪水前後の衛星画像から水域と陸域を抽出したものである。図-13(a)では、A、B、Cの3つの砂州が別々に存在している一方、図-13(b)（洪水後）では、砂州Aは細くなり、上流側へと延びている。砂州Aの上流には明確な砂州はなく、砂州Aと砂州B間の流路は洪水前より狭くなり、砂州Bと砂州Cは統合されている。そのため、左岸側流路により多くの流れが集まるようになっている。それに伴い、(b)の赤い部分が強い流れの作用を受け、河岸侵食が発生している。シミュレーションの結果（図-13(d)）でもこのような現象が起きており、シミュレーション結果からも左岸側流路の発達について説明することができる。このように、数値シミュレーションと衛星画像とを組み合わせることで、河岸侵食が起きる可能性が高い箇所を予測することができ、洪水前に適切な対策を行うことで、多くの河岸侵食を防止できる可能性がある。

## 5. 中山間地河川における豪雨時の土砂流出とそれが洪水流に及ぼす影響—五福谷川洪水を例に—

### 5.1 五福谷川洪水の概要

2019年10月12日から13日にかけて東日本を通過した台風19号により、阿武隈川水系の内川流域（宮城県丸



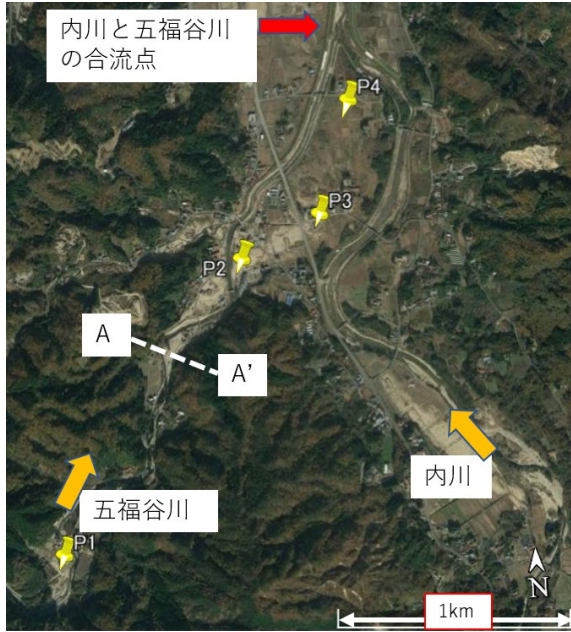


図-14 五福谷川と内川の合流点付近の状況  
画像はGoogle Earth より取得。

森町、流域面積約 106km<sup>2</sup>) に位置する筆甫観測所では総降雨量が 594.5mm に達し、山間部では多数の崩壊・土石流が発生した。特に内川支流の五福谷川では(流域面積約 24km<sup>2</sup>) 崩壊・土石流の発生箇所が多い。このような土砂が河道に堆積し、堆積土砂が洪水流によって侵食され、多量の土砂が下流に流出し、下流域の被害を助長したと考えられる。図-3 に五福谷川と内川の合流点付近の状況を示す。この領域内では、洪水流と共に多量の土砂が氾濫し、土砂の堆積厚さは場所によって 1m を超えている。

このような洪水氾濫を評価する手法として、河床変動を伴う平面二次元洪水流解析が用いられることが多い。その際、基本的に計算区間の上流端を氾濫発生が予想される地点の少し上流に設定し、その計算区間上流端での平衡流砂量を境界条件とする。しかし、上述した災害では上流からの土砂供給は非平衡性が強く、微細土砂の供給により上流端の河床材料も時々刻々と変化している。したがってこのような現象を解析するためには、山地部からの微細土砂の流出を適切に評価する必要がある。そこでここでは、2.1 節で述べた方法によって、流域からの土砂流出を求めつつ、算出した土砂濃度を上流端境界条件として平野部で平面二次元流れの解析を行い、流域からの土砂流出が洪水流に及ぼす影響について検討する<sup>13), 14)</sup>。

### 5.2 計算条件

図-15 に P1~P4 地点で採取した表層土砂の粒度分布を示す。著者らは約 35 箇所度粒度分布を調査したが、こ

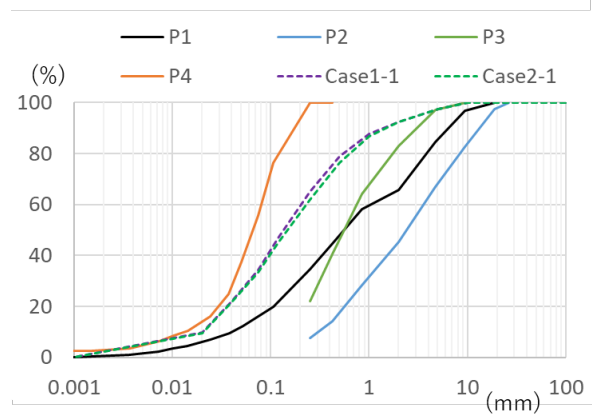


図-15 五福谷川の氾濫域で採取した土砂の粒度分布及び計算結果の粒度分布

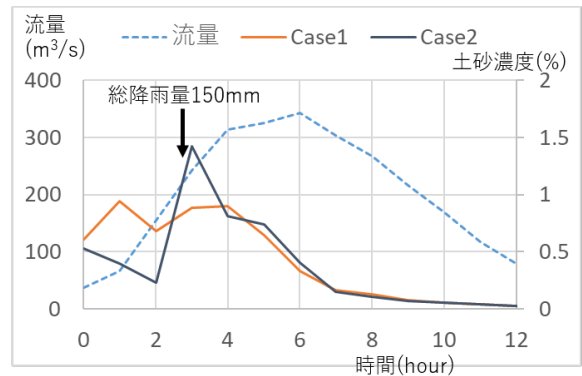


図-16 図-14 中 A-A' 断面の土砂濃度及び流量の時間変化。流量は Case1-1 の計算結果を示す。

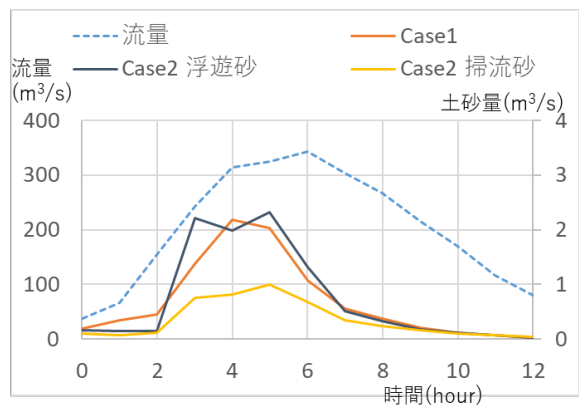


図-17 掃流砂量及び浮遊砂量の時間変化

では代表的な 4 箇所について示す。P1 は河道沿いに堆積している土石流堆積物表層の粒度分布である。P2 から P4 は内川と五福谷川に挟まれた堤内地に流入した土砂の粒度分布であり、僅か 1km 程度の区間内でありながら著しい分級が生じていることが特徴的である。

2.1 節で述べた方法で流域からの土砂流出を得るため

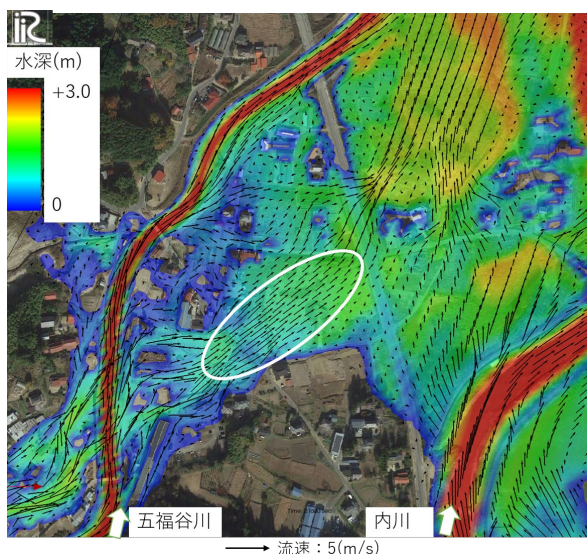


図-18 ピーク流量時の流況

に、流域土砂流出モデルで設定する初期河床粒度分布について、流域全体を調査して各地点の粒度分布を設定するのが望ましいが、データが限られているため、図-15の中で上流域の粒度分布に最も近いと考えられるP2地点の粒度分布を流域全体に与える。ただし、上流域の勾配が急な河道では河道堆積物や崩壊地が少ないことから、勾配が1/10よりも急な河道には河道堆積物がなく、岩盤が露出しているものとする。なお、五福谷川の流域は25の単位河道に分割して土砂の計算を行っている。

五福谷川の流域では本川及び支川に大規模な土石流によって河道に土砂が堆積している箇所が3つの単位河道にわたって確認できるため、両方のモデルにおいて、これら三ヶ所からの土砂流出を想定する。流域土砂流出モデルでは、これら三ヶ所の単位河道にはP1の粒度分布を初期条件として設定し、それ以外の全ての単位河道にP2の粒度分布を設定した。

### 5.3 流域からの土砂流出

流域からの土砂流出計算結果について、土砂濃度の時間変化を示したものが図-16であり、図-17は土砂量の時間変化を示したものである。また、A-A'断面を通過した浮遊砂の総量の粒度分布を図-15に示している (Case1)。

図-15によれば、幅広い粒度分布を持つ土砂が浮遊砂として流出していることが分かる。一般には流量が大きくなるにつれて浮遊砂濃度が上昇することが知られている<sup>15)</sup>。しかし図-16、図-17によれば、計算では出水の初期に浮遊砂濃度が大きく、時間を経るにつれて徐々に小さくなっている。また、出水の初期に初期条件として設定した河道堆積物から多くの細粒土砂が浮遊砂として流出し、

その後は粗粒化の進行に伴って浮遊砂の流出が抑制されると考えられる。

すなわち、流域土砂流出モデルでは粒度分布が時々刻々変化する計算を行っているために、時系列上のどのタイミングで崩壊・土石流により生産された微細土砂が河道に堆積するか、その設定方法が重要である。一般に土石流の発生限界は降雨強度や実効雨量等によって判断される<sup>16)</sup>。ここでは簡易的に、流域全体の初期河床材料をP2の粒度分布とした上で、総降雨量が150mmを超えた段階で上述した3つの単位河道の表層(掃流砂層)の粒度分布をP1のものに置き換える。これをCase2とし、Case2の結果を図-15、図-16、図-17に示している。浮遊砂の流出量は総降雨量が150mmを超えた時点の直後に急激に増加し、ピーク流量の少し前に多量の土砂が供給されている。このことから、流域土砂流出モデルでは河道に細粒土砂を供給するタイミングが結果に影響するものの、この与え方では浮遊砂の総量や粒度分布にはさほど影響しないとも言える。

### 5.4 土砂流出が洪水流に及ぼす影響

前節で説明した土砂流出の計算結果について、その妥当性を検討する方法は非常に限られている。土木学会調査団の資料<sup>17)</sup>によると、五福谷川流域の崩壊面積は約48万 $\text{m}^2$ である一方、Case2ではA-A'断面を通過する掃流砂・浮遊砂を合算して約16万 $\text{m}^3$ であり、オーダーとしては一定程度妥当と言える。一方で、計算された土砂流出量を境界条件として平面二次元流れの解析を行うことによっても、妥当性をある程度検討できるはずである。そこで、図-15中のA-A'断面を上流端境界として上記Case2のA-A'断面における交換層粒度分布、浮遊砂濃度の計算結果を境界条件として用いて平面二次元流れの解析を行い、流域からの土砂流出が洪水流に及ぼす影響について検討する。

解析にはiRIC-Nays2DH<sup>18)</sup>を著者が一部改変したものをを用いる。解析区間は、図-15中のA-A'断面から内川・五福谷川の合流点までとする。上流端境界において、Case2の計算によって得られる流量を内川・五福谷川の両方に与える。掃流砂層粒度分布・浮遊砂濃度の境界条件としては、内川では平衡条件を与え、五福谷川ではA-A'断面の計算結果(Case2)を粒径別に時系列で与える。初期河床形状は、出水前の航空レーザー測量に基づく国土地理院基盤地図情報5mメッシュ数値標高モデル<sup>19)</sup>を用いる。粗度係数は計算区間の全域で0.03とする。初期河床材料は出水前のものを与えるのが望ましいが、データが限られているためここでは河道外を含む計算区間の全域で図



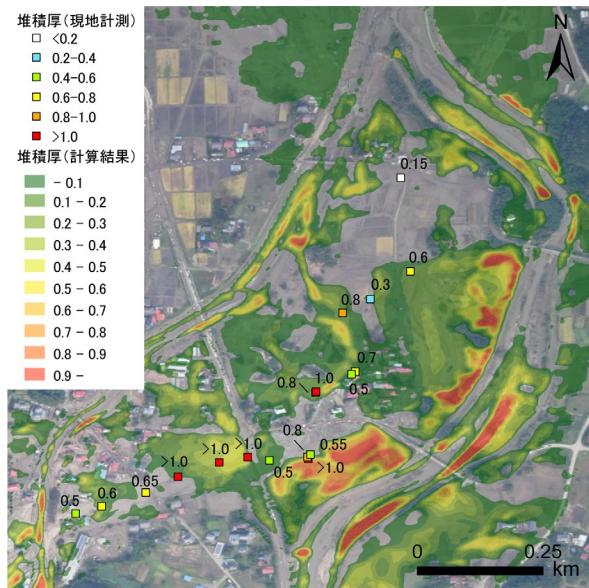


図-19 土砂の堆積厚について、計算結果と現地の比較

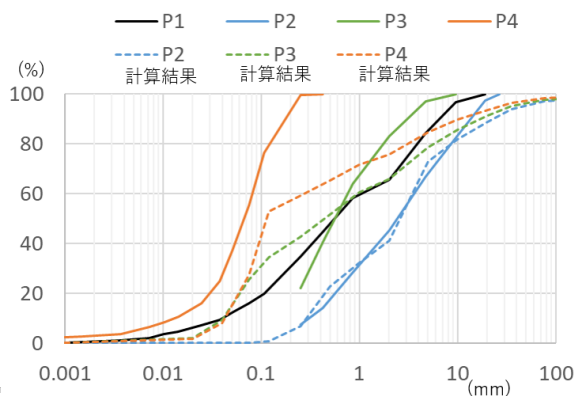


図-20 河床表層土砂の粒度分布について、計算結果と現地の比較 (点線は計算結果を表す)

-15 の P2 の粒度分布を与える。なお、堤内地の建物は不透過な障害物として設定している。

ピーク流量時の流況を図-18 に示す。内川と五福谷川に囲まれた領域は、両河川から氾濫した洪水流が合流し、複雑な流況を呈している。建物の下流側に相当する場所や、内川と五福谷川からの氾濫流に挟まれた場所で土砂が堆積するため、洪水氾濫流は狭い範囲を速い流速で流下する(図中の白い丸で囲まれた部分)。図-19 では計算終了時の土砂堆積厚(初期地盤高からの変化)について、計算結果と現地で検土杖で調査した土砂堆積厚を比較している。図-20 は表層土砂の粒度分布について、計算結果と現地の土砂とを比較したものである。

図-19 によれば、計算された土砂堆積厚は現地調査の結

果よりもやや小さい傾向である。Case2 では河床表層の土砂を 1 度だけ細粒土砂に入れ替えたが、実際には豪雨時に複数回の崩壊・土石流が発生し、生産土砂が河道に供給されたはずである。これらをモデル上でより適切に評価できれば、より現地の状況に近い結果が得られると考えられる。また、図-9 の粒度分布をみると、P2 地点は計算結果と現地調査結果が概ね対応するが、P4 地点の計算結果は現地調査結果よりも少し粗い。計算が流量  $100(\text{m}^3/\text{s})$  付近で終了していることから、より小さい流量になるまで計算を継続すれば、細粒土砂の沈降・堆積が進行し、現地に近い粒度分布となる可能性がある。

## 6. 結論

本研究では土砂移動を含む水災害を対象にした数値モデルを開発し、同時に人工衛星データや現地調査から計算条件を作成する手法を開発し、これらを用いて数値計算を行い、水災害ハザードを推定する手法を示すことを目的に研究を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- ・極微細土砂が卓越する河川での浮遊砂の解析を行うために、連行の概念を用いた浮遊砂浮上量式を提案した。実験結果については、粘着力の修正を行ったリチャードソン数を用いることで、連行係数が概ね修正リチャードソン数に反比例する関係であることが示され、本手法の有用性が示された。

- ・バングラデシュのジャムナ川において、人工衛星データを用いて地形の初期条件を作成し、河岸侵食を含む洪水流解析を行った。ジャムナ川では 2010 年代以降、左岸側流路の発達とそれに伴う河岸侵食問題が顕在化しているが、本モデルを用いて左岸側流路が発達する過程を示し、また河岸侵食が生じやすい箇所を抽出することができた。

- ・流域からの土砂流出を解析するモデルを提案し、これを 2019 年の五福谷川洪水に適用し、流域からの土砂流出が洪水流に及ぼす影響について検討した。流域土砂流出計算の結果、洪水のピークを迎える前に多量の浮遊砂が下流に流出している。また、多量の土砂が堆積する結果、洪水氾濫流はより狭い範囲をより速い流速で流下するという特徴をもつことを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 原田大輔, 江頭進治: 流砂・流木を伴う洪水流の解析—2017 年 7 月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—。土木学会論文集 B1 (水工学), vol.74(4), I\_937-I\_942, 2018.
- 2) Masbahul, I. M., Yorozuya, A., Harada, D., & Egashira, S.

- (2022). A Numerical Study on Bank Erosion of a Braided Channel: Case Study of the “Tangail and Manikganj Districts Along the Brahmaputra River”. *Journal of Disaster Research*, 17(2), 263-269.
- 3) 江頭進治, 松木敬:河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740, 2000.
- 4) Sayama, Takahiro, et al. "Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin." *Hydrological Sciences Journal* 57.2, pp.298-312, 2012.
- 5) 江頭進治, 宮本邦明, 伊藤隆郭:掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集第41巻, pp.789-794, 1997.
- 6) 竹林洋史: 河川中・下流域の河道地形. 日本流体力学会誌「ながれ」, 24.1: 27-36, 2005.
- 7) Ellison T. H., Turner, J. S. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 6.3: pp.423-448, 1959.
- 8) 芦田和男, 江頭進治:非一様密度場における濁度物質の拡散と貯留機構. 水理講演会論文集第20巻, pp.173-178, 1976.
- 9) 芦田和男, 藤田正治:平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, 第375号, pp.107-116, 1986.
- 10) 芦田和男, 山野邦明, 神田昌幸:高濃度流れに関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, B-2, pp.367-377, 1986.
- 11) M. Ferdous, A. Wesselink, L. Brandimarte, K. Slager, M. Zwartveen and G. Di Baldassarre, "The Costs of Living with Floods in the Jamuna Floodplain in Bangladesh," *MDPI*, vol. 11, 2019.
- 12) R. K. Biswas., A. Yorozuya. and a. S. Egashira, "Numerical Model for Bank Erosion in the Brahmaputra River," *Journal of Disaster Research*, 2016.
- 13) 原田大輔, 江頭進治:中山間地河川における豪雨時の土砂流出評価法. 土木学会論文集 B1 (水工学), 77(2), I\_601-I\_606, 2021.
- 14) 原田大輔, 江頭進治, 柿沼太貴, 南雲直子, 伊藤弘之、2019年台風19号による阿武隈川水系五福谷川における多量の土砂を含む洪水流の特徴, 河川技術論文集, No.26, pp.609-614, 2020.
- 15) 江頭進治, 芦田和男, 金屋敷忠儀:微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究, 水理講演会論文集, 第25巻, pp.481-487, 1981.
- 16) 寺田秀樹, 中谷洋明:土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法, 国土技術政策総合研究所 資料, 第5号, 2001.
- 17) 土木学会水工学委員会:令和元年台風19号豪雨調査団 速報会資料「宮城県丸森町における流木災害の状況」, 2019.
- 18) iRIC ソフトウェア : <https://i-ric.org/ja/>
- 19) 国土地理院:基盤地図情報,<http://www.gsi.go.jp/kiban/>

## 2.1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

### 2.1.4 リモートセンシング技術を用いた融雪期の水資源管理の高精度化に関する研究

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

研究担当者：新目竜一、村山雅昭、巖倉啓子、谷瀬敦

野上毅、村上泰啓、西原照雅、山田嵩

#### 【要旨】

本研究では、航空レーザ測量による積雪分布の計測、風による雪の移動を考慮した融雪流出解析、深層学習による融雪期のダム流入量予測、ダム管理を高精度化するシステムの検討を行った。その結果、森林限界未満の樹林帯では積雪深は標高と線形関係があり、森林限界以上の高標高帯では地上開度との間で線形関係がある事を示した。さらに、風による雪の移動を考慮する事で融雪流出解析の精度が向上した。深層学習においても24時間先までの予測を行い、これらの成果と積雪面積率を用いて融雪期のダム管理を高精度化するシステムを提案した。

キーワード：積雪分布、航空レーザ測量、融雪流出解析、深層学習

#### 1. はじめに

積雪寒冷地においては融雪水をダムに貯留して夏にかけての水需要をまかなう等、水資源を融雪水に依存している。一方、融雪水は融雪出水や土砂災害の要因となる。このことから、融雪が始まる直前の積雪ピーク期までに山間部に蓄積された積雪分布を正確に把握することは、水資源管理及び防災の面で重要である。

Yamada<sup>1)</sup>は、北海道各地の山間部において積雪調査を行い、樹林帯においては、標高の増加とともに積雪相当水量が線形に増加することを示した。標高と積雪相当水量の線形の関係を用いれば、積雪調査の結果から山間部における積雪分布を簡易に推定できることから、ダム管理の現場において、流域における積雪包蔵水量を推定する手法に用いられている。しかし、冬季に直接入山する積雪調査は、雪崩等の危険を伴うことから、調査可能な地点が限られる。特に、冬期に立入りが困難である、森林限界以上の高山帯においては、積雪深の観測例が少なく、積雪分布の特徴が明らかになっていない。

また、山地斜面における降雪は、風、重力、地形の影響を受けて再分配される<sup>2)</sup>。森林限界以上の高標高帯では強風により、雪の移動が生じて降雪分布と積雪分布が一致しなくなる。そのため、積雪が流域外に移動した場合には流出量が減少、高標高帯に移動した場合には流出が遅れる等の現象が生じると考えられる。

融雪流出解析モデルは多数提案されているが、その多くは融雪量を計算するモデルと流出量を計算するモデ

ルの組み合わせ<sup>3) 4)</sup>であり、一般的な融雪流出解析モデルでは雪の再分配は考慮されていない。そのため、雪が高標高帯に移動した事による流入の遅れや流域外への移動による流入の減少は考慮できていない。

そのため、ダム流域の積雪量を精度良く推定することは困難であり、融雪量を精度良く推定することができず、ダム管理が経験的に行われている面がある。さらに、融雪後期に融雪の中心となる高標高帯における積雪量の推定精度が特に低いため、積雪量を過小評価した場合の貯留過剰による治水機能の低下、過大評価した場合の過剰放流による渇水リスクが常に存在する。

近年の計算機性能の向上等に伴い、AIの活用が進められており翻訳や画像認識の分野では実用化されている。水文分野においても、深層学習を河川水位やダム流入量予測に活用する研究<sup>5) 6) 7)</sup>がなされている。また、深層学習モデルと分布型流出解析モデルを併用したハイブリッドモデルも提案されている<sup>8)</sup>。一方で、融雪期のダム流入量予測を実施した研究は事例が少なく、日単位での予測となっている<sup>9) 10)</sup>。

ダム流域における積雪量の推定精度を向上させ、融雪流出解析の精度向上を行うとともに深層学習によるダム流入量の予測を行い、これらの成果により融雪期のダム管理を高精度化することが本研究の目的である。

#### 2. 高標高帯における積雪分布の特徴の解明

##### 2.1 はじめに

ここでは北海道大雪山系旭岳周辺において、流域界

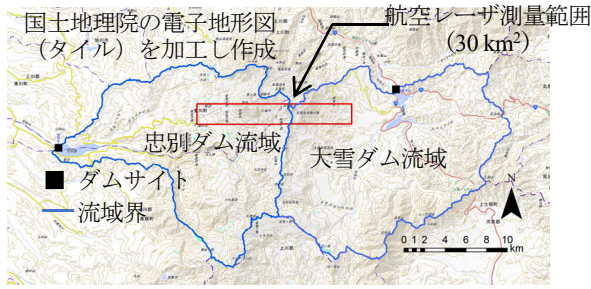


図-1 航空レーザ測量範囲

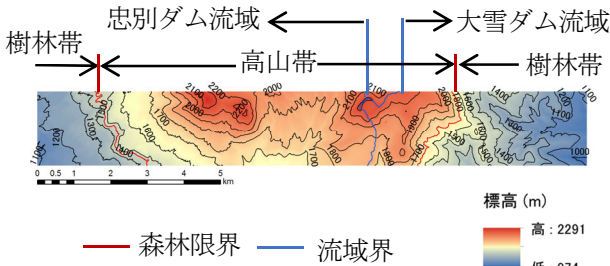


図-2 航空レーザ測量範囲の標高分布

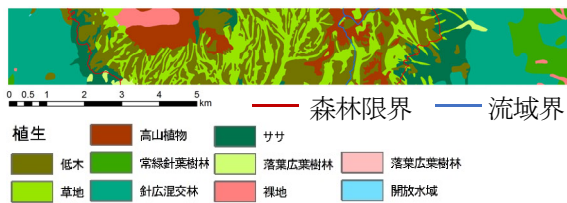


図-3 航空レーザ測量範囲の植生分布

である尾根を跨ぐ範囲を対象に、2カ年のピーク期に、航空レーザ測量により計測された積雪分布を分析し、得られた成果について述べる。

## 2.2 航空レーザ測量

図-1に航空レーザ測量を実施した範囲を示す。測量範囲は、北海道大雪山系に位置し、石狩川上流域に位置する忠別ダム及び大雪ダムの流域に含まれる南北に2 km、東西に15 km、面積30 km<sup>2</sup>の範囲である。図-3.2に測量範囲の標高分布を示す。忠別ダム側の標高帯は概ね1100m～2300m、大雪ダム側は概ね1000m～2300mであり、旭岳山頂を含む。図-3.3に測量範囲の植生分布を示す。これは、環境省の自然環境保全基礎調査を用い、植生を10分類したものである。忠別ダム側の森林限界は標高1450 mであり、大雪ダム側の森林限界は標高1700 mである。忠別ダム側は測量範囲の23%が樹林帯、78%が高山帯に位置し、大雪ダム側は70%が樹林帯、30%が高山帯に位置している。測量範囲においては、積雪期の荒天時における卓越風向は北西から西である<sup>11)</sup>。このため、流域スケールにおいては、荒天時の卓越風向に対して、忠別ダムと大雪ダ

ムの流域界である尾根が概ね直角に交わり、忠別ダム側が風衝斜面、大雪ダム側が風背斜面となる。以降、流域スケールにおいて区分した風衝斜面を「忠別ダム」、風背斜面を「大雪ダム」と表記する。

航空レーザ測量は、無雪期である2008年9月12日～10月16日、積雪ピーク期である2017年3月13日及び2018年3月21日に行った。無雪期における測量データから地表面のDEM (Digital Elevation Model)を、積雪ピーク期における測量データから積雪表面のDEMをそれぞれ作成した。DEMの水平解像度は5mとした。積雪深は積雪ピーク期におけるDEMから無雪期におけるDEMを引いた値とし、この値がマイナスとなったメッシュはデータから除外した。なお、傾斜が55°以上の斜面には積雪が堆積しない<sup>12)</sup>ことが報告されていることから、該当するメッシュにおける積雪深は0とした。加えて、人工構造物が多い旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺をデータから除外した。なお、測量範囲に含まれる旭岳温泉に国土交通省が設置している積雪深計によると、航空レーザ測量日における積雪深は、2017年が3.18 m、2018年が3.03 mであった。

## 2.3 積雪深の分析方法

積雪分布の分析は、分布の特徴が異なる範囲に区分して行う。樹林帯及び高山帯における積雪分布は特徴が異なる<sup>1)、13)、14)、15)</sup>ことから、測量範囲を風衝斜面(忠別ダム)及び風背斜面(大雪ダム)に区分し、さらに、それぞれの斜面を樹林帯及び高山帯に区分する。水平解像度5 mの積雪深データはサンプル数が多く、そのままでは積雪分布の特徴を捉えることが困難である。このため、地形パラメータを幅を持った区間(例えば標高25m区間)に区分し、この区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値と地形パラメータの中央値との関係を分析する<sup>13)</sup>。また、西原・谷瀬<sup>13)</sup>は、対象範囲においては、風衝斜面及び風背斜面ともに、樹林帯においては標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること、高山帯においては地表面の地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少することを示している。ここで地上開度とは、横山ら<sup>16)</sup>が開発した指標であり、着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものである。着目地点が谷の場合に地上開度 $\phi < 90^\circ$ 、尾根の場合に $\phi > 90^\circ$ となる。測量範囲の高山帯における地表面の地上開度の出現割合を図-3.4に示す。出現割合は、忠別ダム及び大雪ダムのそれぞれ高山帯の面積に対す



る、それぞれの範囲において地上開度 1°区間に含まれたメッシュの面積の割合である。忠別ダム流域においては、地上開度が 45°~110°、大雪ダムにおいては地上開度が 59°~105°に分布している。両ダム流域ともに 80°~90°の出現頻度が高く、忠別ダム流域においては 74.1%、大雪ダム流域においては 77.2%がこの区間に含まれる。本研究では、西原・谷瀬<sup>13)</sup>の報告を踏まえ、標高及び地上開度と積雪深との関係を中心に分析を行うこととする。積雪分布の類似度に関しては、同一メッシュにおける 2 カ年の積雪深の関係に対して、原点を通る(切片=0)の直線を当てはめる回帰分析を行った結果から評価する。

また、高山帯を対象に、地上開度の出現割合が大きい範囲を対象とした直線回帰式から、積雪深を推定する手法を検討し、推定した積雪深の精度を評価する。

## 2. 4 結果と考察

### 2. 4. 1 積雪分布の特徴

図-5 に航空レーザ測量データから求めた積雪深の分布を示す。図の白抜きとなっている範囲は、積雪期における DEM から無雪期における DEM を引いた際に値がマイナスとなったメッシュ、旭岳温泉地区及び旭岳ロープウェイの施設周辺の分析から除外したメッシュである。対象範囲 (30 km<sup>2</sup>) に対する除外したメッシュの割合は、2017 年が 5.7%、2018 年が 7.6%であった。

図より、樹林帯における積雪分布の特徴と高山帯における積雪分布の特徴が異なることが明瞭である。樹林帯においては、2017 年及び 2018 年、忠別ダム流域及び大雪ダム流域いずれの場合も、1 m~6 m の積雪深が全体の 95%以上の出現割合を占め、積雪深のばらつきが小さい。一方で、高山帯においては、積雪深が 0 の箇所や積雪深が 10 m を超える箇所が見られ、積雪深のばらつきが大きい。2017 年及び 2018 年の積雪分布を概観すると、同様のパターンが見られており、積雪が堆積しにくい箇所及び積雪が堆積しやすい箇所は年によらず同じである可能性がある。

### 2. 4. 2 標高と積雪深の関係

図-6 に標高と積雪深との関係を示す。図示した積雪深は標高 25 m の区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。図には、樹林帯における標高と積雪深との間の回帰直線を併せて示している。図を見ると、樹林帯においては、風衝斜面及び風背斜面ともに、標高の増加とともに積雪深が線形に増加している。回帰式の決定係数は、忠別ダム側の 2017 年が 0.77、2018 年

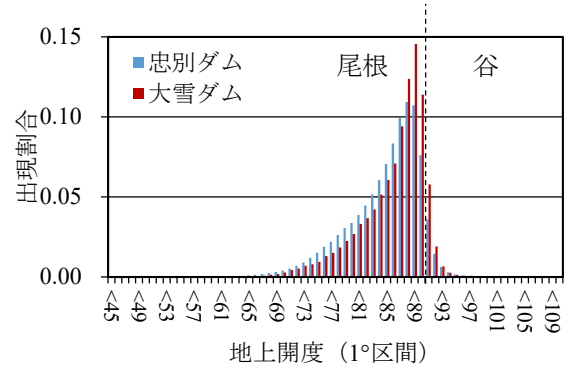


図-4 地表面の地上開度の出現割合

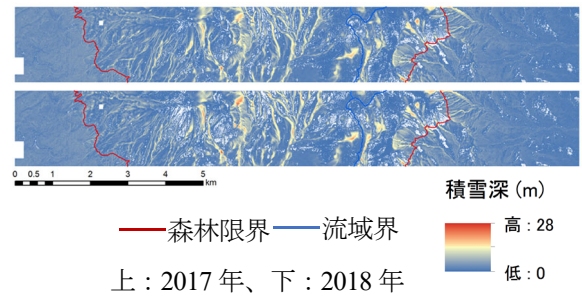


図-5 航空レーザ測量データから求めた積雪分布

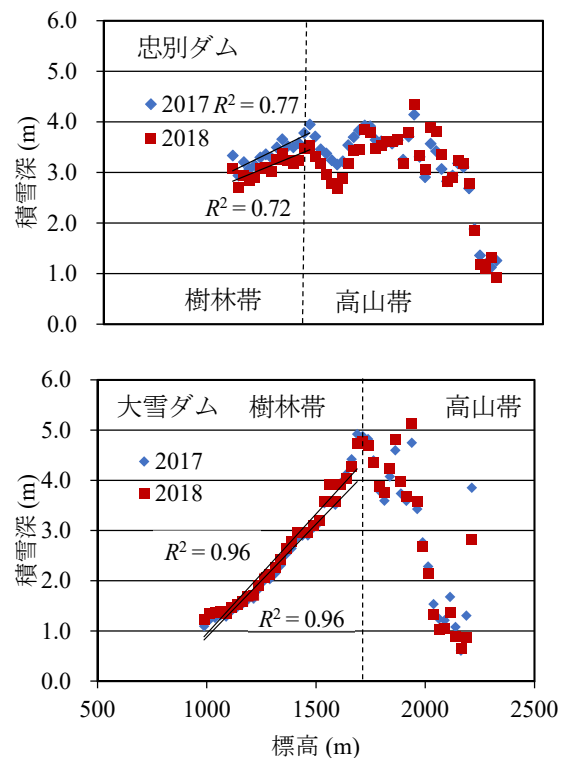


図-6 標高と積雪深の関係

が 0.72、大雪ダム側は 2017 年及び 2018 年ともに 0.96 であった。一方、森林限界以上の高山帯においては、

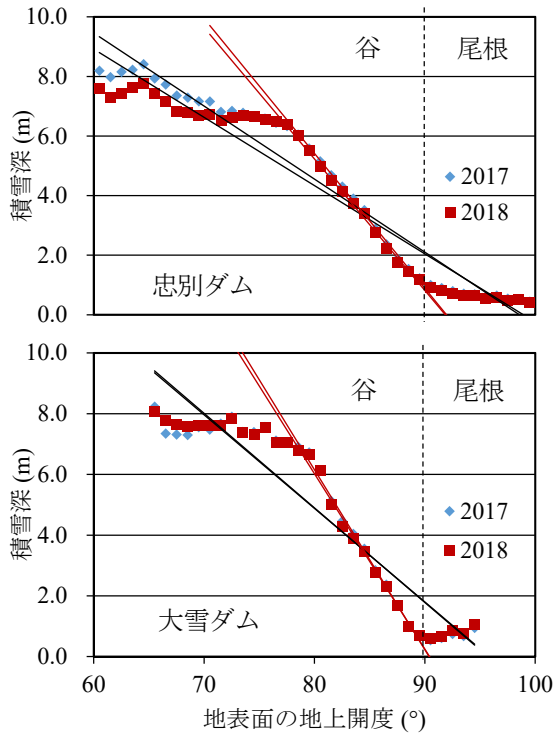


図-7 高山帯における地上開度と積雪深の関係

表-1 積雪分布の類似度

| 決定係数 | 忠別ダム | 大雪ダム |
|------|------|------|
| 樹林帯  | 0.84 | 0.96 |
| 高山帯  | 0.91 | 0.92 |

| 傾き  | 忠別ダム | 大雪ダム |
|-----|------|------|
| 樹林帯 | 0.93 | 1.11 |
| 高山帯 | 0.98 | 0.99 |

標高と積雪深との間に線形の関係は見られず、標高の増加に対して積雪深が不規則に増減している。両年の航空レーザ測量日に旭岳温泉において観測された積雪深より、両年の積雪深は概ね同等であると考えられるが、図-3.6 に示した標高に対する両年の積雪深は概ね同等であり、積雪深の増減の傾向も概ね一致している。

### 2.4.3 高山帯における地上開度と積雪深の関係

森林限界以上の高山帯における地表面の地上開度と積雪深との関係を図-3.7 に示す。図示した積雪深は地上開度 1°の区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。サンプル数が少ない場合、積雪深が極端に大きい値や小さい値となることがあるため、概ね 100 サンプルが得られた区間を図示している。図の黒線は、図示した全区間を対象とした回帰直線である。図を見ると、風衝斜面及び風背斜面ともに、地上開度

が増加する、つまり地形が谷から尾根に変化するに伴い、積雪深が線形に減少している。回帰式の決定係数は、忠別ダム側は 2017 年が 0.95、2018 年が 0.92、大雪ダム側は 2017 年が 0.88、2018 年が 0.89 であった。また、地上開度が 90°を超えると、積雪深がほぼ 0 になっている。航空レーザ測量により積雪深を計測した高山帯においては、計測時に植生が積雪下に完全に埋没しており、荒天時に強風が吹き抜けることから、積雪は谷に堆積しやすく、尾根に堆積しにくいと考えられる。標高の場合と同様に、地上開度に対する両年の積雪深は概ね同等であり、積雪深の増減の傾向も概ね一致している。

### 2.4.4 積雪分布の類似度

同一メッシュにおける 2 カ年の積雪深について、2017 年の積雪深を x 軸、2018 年の積雪深を y 軸とし、切片=0 の直線を当てはめる回帰分析を行った結果(決定係数 $R^2$ 及び直線の傾き)を表-1 に示す。決定係数(上表)は 0.84~0.96 となっており、風衝斜面及び風背斜面ともに、両年の積雪分布のパターンの類似度が高いことを示している。また、両年の積雪深が概ね同等であるため、直線式の傾き(下図)は 0.84~1.11 となっており、風衝斜面及び風背斜面ともに、1 に近い値となっている。

### 2.4.5 高山帯における積雪深を推定する手法の検討

図-7 の黒で示した線形回帰直線を見ると、決定係数は大きいものの、地上開度 78°付近及び 90°付近において残差が大きくなっている。これら残差が大きい範囲には、地上開度の出現割合が大きい範囲(図-4)が含まれる。

西原・谷瀬<sup>13)</sup>は、傾斜が大きく、極端に大きい積雪が堆積している箇所が影響している可能性を示唆しているが、本研究では、地上開度の出現割合が大きい範囲を対象とした回帰式から、簡易に積雪深を推定する手法を検討し、推定した積雪深の精度を評価する。

図-7 の赤で示した直線は、出現割合が大きい地上開度が 80°~90°を対象に作成した回帰直線である。決定係数は、0.98~0.99 である。赤色の直線をそのまま積雪深の推定に適用すると、地上開度が小さい範囲における積雪深が過大に計算されてしまうが、図を見ると、概ね地上開度 80°以下の範囲においては、積雪深がほぼ一定になっている。図より、赤色の直線は地上開度 78°程度までの適合度が高いと考えられることから、地上開度 78°未満の範囲については、積雪深を一律 7 m とした。また、地上開度が 90°を超える範囲に赤色の直



表-2 高山帯における積雪深の推定結果

| 積雪の総量の相対誤差 |    | 2017    | 2018    |
|------------|----|---------|---------|
| 忠別ダム       | 黒線 | 0.0379  | 0.0193  |
|            | 赤線 | 0.0087  | 0.0101  |
| 大雪ダム       | 黒線 | 0.0877  | 0.0934  |
|            | 赤線 | -0.0244 | -0.0267 |

| RMSE |    | 2017 | 2018 |
|------|----|------|------|
| 忠別ダム | 黒線 | 2.93 | 3.20 |
|      | 赤線 | 2.85 | 3.11 |
| 大雪ダム | 黒線 | 3.25 | 3.43 |
|      | 赤線 | 3.11 | 3.31 |

線を適用すると、積雪深がマイナスとなる場合があるが、積雪深がマイナスとなったメッシュの積雪深は 0 とする。

表-2 に航空レーザ測量データから計算した値を真値とし、忠別ダム及び大雪ダムのそれぞれの高山帯全域について、積雪の総量の相対誤差(上表)及びメッシュの積雪深の RMSE(下表)を算出した結果を示す。積雪の総量を算出する場合、積雪深を合算する際に正の誤差と負の誤差が相殺されるため、黒線の式を用いた場合も総量を精度良く推定しているが(相対誤差 1.9%~9.3%)、赤線の式を用いた場合は、相対誤差が -2.7%~1.0%となっており、若干精度が向上している。RMSE は、赤線を適用した場合に、黒線を適用した場合と比較して若干の精度向上が見られるが、高山帯の積雪深は変動幅が大きく、これを平均化して推定式を作成しているため、RMSE のようにメッシュ単位で誤差を評価した場合、誤差が小さくなりにくいと考えられる。

### 3. 風による積雪の移動を考慮した融雪・流出モデルの高精度化

#### 3.1 はじめに

ここでは、積雪変質モデルを用いた、雪の再分配を考慮した積雪水量の推定を行い、実流域における流出量との比較により、雪の再分配が積雪水量に与える影響を評価した結果について述べる。

#### 3.2 対象領域

対象領域は北海道内で最高峰の旭岳を流域内に有する流域面積 238.9 km<sup>2</sup> の忠別ダム流域である。対象領域周辺の標高分布を図-8 に示す。図中の■は気象観

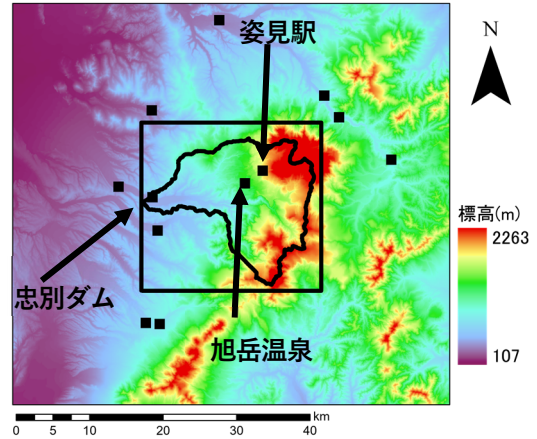


図-8 対象領域周辺の標高分布

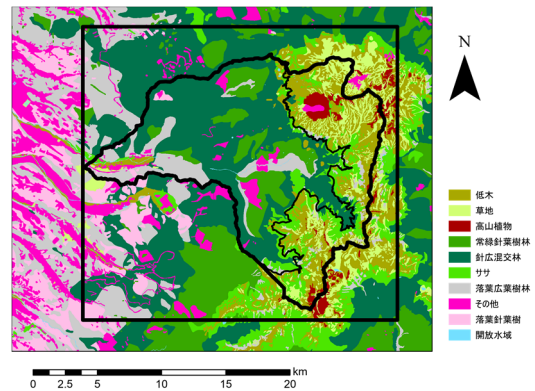


図-9 対象領域周辺の植生分布



図-10 複合気象センサー

測点を表している。また、図-9 には環境省の自然環境保全基礎調査を基に 10 分類した植生分布を示す。森林限界は概ね標高 1450 m である。

旭岳ロープウェイ姿見駅では、図-10 に示す複合気象センサー (VAISALA 社製 WXT536) を設置して 2017 年 8 月から気象観測を実施している。取得した気象要素は、気温、湿度、風向・風速、気圧、降雨量である。

### 3. 3 風の影響を考慮した積雪分布シミュレーション

#### 3.3.1 シミュレーションモデルの概要

積雪分布のシミュレーションには、スイス連邦雪・雪崩研究所により開発された Alpine3D<sup>17)</sup>を用いた。Alpine3D は積雪変質モデルである SNOWPACK<sup>18)</sup>を3次元拡張したモデルであり、山岳地形上の大気、雪及び土の間で起こる物理過程をシミュレーションできる。SNOWPACK の主要な物理過程を図-11 に示す。海外にて複数の適用事例<sup>20), 21)</sup>があり、日本でも栃木県的那須岳を対象にした適用した検討事例<sup>2)</sup>、北海道を対象にした検討事例<sup>22), 23)</sup>がある。

#### 3.3.2 入力データ

入力データには標高、土地の被覆情報及び気象データが必要である。気象データには降水量、気温、湿度、風速・風向及び長短波放射量が必要である。ただし、気温、湿度、長短波放射量は同時に観測している必要がある。

標高データには国土地理院の基盤地図情報 10mメッシュ (標高) を用いた。尚、入力する標高値は整数値である必要があるため、四捨五入して整数値としている。

土地の被覆情報には、図-9 に示した環境省の自然環

境保全基礎調査の結果を基に 10 分類した植生分布を用いた。ただし、「その他」に分類されるメッシュに関しては目視による最近隣法により再分類し、Alpine3D の被覆情報に対応付けた。尚、Alpine3D では水域のメッシュ (ダム貯水池等) においては積雪深の計算がされない。

気象データには姿見駅での観測値、対象領域周辺の気象庁アメダス及び国土交通省による気象観測値を用いた。データの時間解像度はいずれも 1 時間である。本研究にて用いた観測所の諸元を表-3 に示す。また、観測されていない長波放射量は太田<sup>24)</sup>の手法を用いて推定した。対象地点は姿見駅、忠別ダム管理所及び大雪ダム管理所である。

気象データの空間分布は逆距離加重法により作成しているが、風速・風向は ListonWindAlgorithm を用いており、気温及び長波放射量は標高による補正を、降水量は捕捉損失補正及び標高補正を行っており、詳細は後述する。ListonWindAlgorithm は逆距離加重法に加えて、局所的な曲率と傾斜により補正を行うアルゴリズムであり、G. E. Liston and K. Elder の手法<sup>25)</sup>を実装したものである。

気温減率は積雪分布推定や流出解析において重要

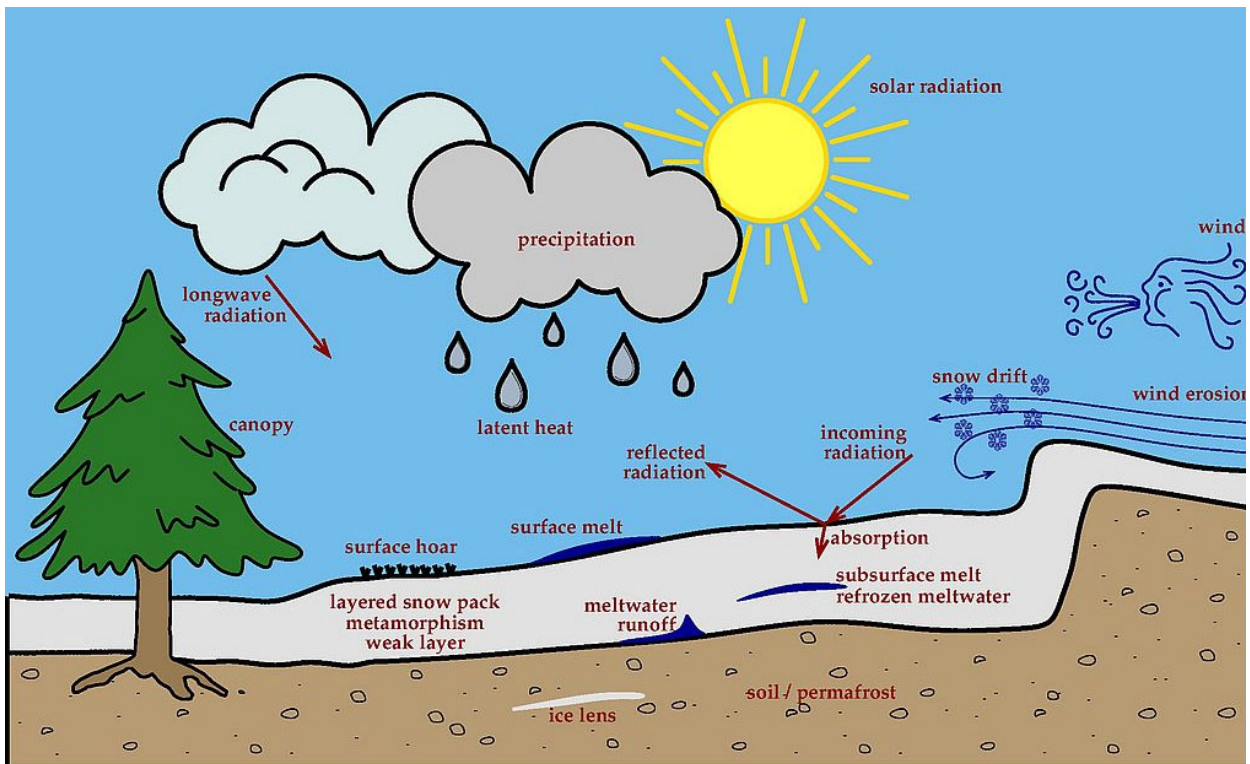


図-11 SNOWPACK の主要な物理過程 (SLF サイト<sup>19)</sup> より)

表-3 観測所の諸元

| 地点名  | 管理者   | 標高<br>(m) | 観測種目 |    |       |    |     |     |
|------|-------|-----------|------|----|-------|----|-----|-----|
|      |       |           | 降水量  | 気温 | 風速・風向 | 湿度 | 日射量 | 積雪深 |
| 姿見駅  | 寒地土研  | 1594      | ×    | ○  | ○     | ○  | ×   | ×   |
| 志比内  | 気象庁   | 310       | ○    | ○  | ○     | ×  | ×   | ○   |
| 上川   | 気象庁   | 324       | ○    | ○  | ○     | ×  | ×   | ○   |
| 白金   | 気象庁   | 658       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 瑞穂   | 気象庁   | 289       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 層雲峡  | 気象庁   | 540       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 俵真布  | 国土交通省 | 409       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 白金   | 国土交通省 | 688       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 層雲峡  | 国土交通省 | 628       | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ×   |
| 旭岳温泉 | 国土交通省 | 1077      | ○    | ×  | ×     | ×  | ×   | ○   |
| 忠別ダム | 国土交通省 | 439       | ○    | ○  | ○     | ○  | ○   | ○   |
| 大雪ダム | 国土交通省 | 813       | ○    | ○  | ○     | ○  | ○   | ○   |

なパラメータであるが、多くの場合標準大気の気温減率である  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  が用いられている。一方で、気温減率には季節性、地域性が存在することが指摘されているが<sup>26)</sup>、ここでは  $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  の一定値として扱うこととした。この値は計算期間中の各観測点の平均気温を標高毎にプロットし、その回帰直線の勾配から求めたものである。平均気温と標高プロット図は回帰直線と併せて図-13 に示す。その結果、勾配は  $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  となり、一般的に用いられる  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  より若干小さくなった。

降水量は風による捕捉損失があり、風速にもよるが雨の場合には  $2\% \sim 10\%$  程度、雪の場合には  $10\% \sim 50\%$  程度と見積もられているため<sup>27)</sup>、降水量には捕捉損失補正が必要となる。本研究では、捕捉損失補正には風速が観測されている地点では観測値を、されていない地点では、Alpine3D にて空間補間した風速値を用いることで捕捉損失補正を行っている。また、雨雪判別に用いる気温も Alpine3D にて空間補間した値である。

横山の式<sup>28)</sup>を用いた捕捉損失補正式を式(1)に示す。

$$P_{gu} = A \times P \quad (1)$$

$$A = (1 + mU) \quad (2)$$

ここで、 $P_{gu}$  は補正後の降水量(mm)、 $A$  は降水量補正係数、 $P$  は観測降水量(mm)、 $m$  は測器毎の係数、 $U$  は風

速(m/s)である。尚、 $m$  には RT-3 の係数である  $0.346$  を用いた。

また、降水量は標高比例することから標高補正が必要である。本研究では、入力データに用いた降水量と標高の関係性を参考に補正を行った。まず、各観測点

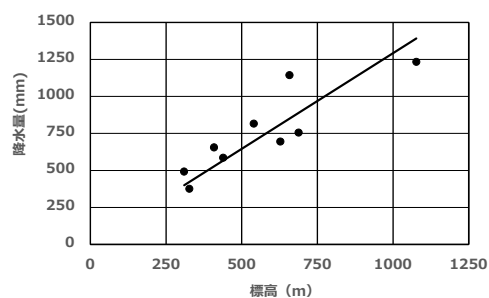


図-12 降水量と標高の関係

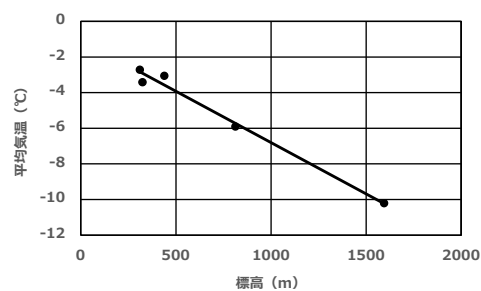


図-13 平均気温と標高の関係

の降水量を気温により 2°C を閾値に (菅谷<sup>29)</sup> を参考にした)、雨雪判別して捕捉損失を行い、計算期間中の総和を計算回帰直線を作成した。降水量と標高のプロット図は回帰直線と併せて図-6 に示す。ただし、欠測期間のあった瑞穂及び大雪ダムのデータは除外しているこの回帰直線の勾配を計算時間で除算することで補正係数とした。その結果、補正係数は 0.000273 となり、標高 1000 m あたり 0.273 mm 増加する設定とした。本研究では、流域内の降水量の観測点は 2 地点となるため、流域外の観測点も用いて補正係数を計算している。

### 3.3.3 シミュレーション条件

計算期間は 2017 年 11 月 1 日 1 時から 2018 年 4 月 30 日 24 時までである。計算範囲は忠別ダム流域が収まる範囲として図-8 及び図-9 中の内側の黒枠線として設定した。また、Alpine3D での解像度は計算負荷を考慮して 150 m メッシュとした。

本研究では風・地形の影響を考慮するため、Alpine3D に付属している、固体降水量の再分配を計算するアルゴリズムである、Winstral<sup>30)</sup> 及び SnowPSUM<sup>31), 32)</sup> を用いた。Winstral は、地形と風の影響を考慮して、メッシュの降水量を計算するアルゴリズムであり、地形ベースのパラメータにより風上地形の様々な側面を定量化している。具体的には、各メッシュが風上地形により風に晒されるか保護されるかを定量化しており、スイスにて適用実績<sup>33)</sup>がある。

SnowPSUM は局所的な勾配及び曲率により固体降水量の再分配を行うアルゴリズムである。比較のために、Winstral 及び SnowPSUM を用いないケースでの計算も行った。以後、Winstral 及び SnowPSUM を用いた計算を風あり計算、用いない計算を風なし計算という。

### 3.3.3 再現性検証

Alpine3D の再現性を検証するために、ダム流入量から流域積雪水量を推定した。この推定手法について述べる。

流域積雪水量の推定式は式(3)に示す。

$$SWE_{basin} = Q_{in} - P_{rain} + E_{pt} \quad (3)$$

ここで、 $SWE_{basin}$  は流域積雪水量(m<sup>3</sup>)、 $Q_{in}$  はダム流入量(m<sup>3</sup>)、 $P_{rain}$  は降雨量(m<sup>3</sup>)、 $E_{pt}$  は可能蒸発量(m<sup>3</sup>)である。計算期間は旭岳温泉地点の積雪深がピークを迎えた 3 月 22 日から 6 月 30 日までである。降雨量には、各観測点の降水量を雨雪判別し、ティーセン法により加重平均した流域平均降雨量を用いた。そのため、標高補正は行っていない。可能蒸発量の計算にはマッキンク式<sup>34)</sup>を用いた。この手法にて推定した流域積雪水

量の値をダム推定値とする。

マッキンク式による可能蒸発量の推定式を式(4)に示す。

$$E_{ptm} = a \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{R_s}{L} \right) + b \quad (4)$$

ここで、 $E_{ptm}$  は可能蒸発量(mm/d)、 $R_s$  は全天日射量(MJ/m<sup>2</sup>・d)、 $L$  は蒸発潜熱(MJ/kg)で、 $L = 2.5 - 0.0025T$ 、 $T$  は気温(°C)、 $\gamma$  は乾湿計定数(hPa/°C)、 $a$ 、 $b$  は地点毎に異なる定数である。無次元の係数は次式<sup>35)</sup>にて近似した。

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} = \frac{1}{1.05 + 1.4 \exp(-0.0640T)} \quad (5)$$

また、 $a$ 、 $b$  は永井<sup>36)</sup> が全国の気象官署を対象に値を推定しており、全国平均の値でも十分な精度がある事を確認している。本研究では全国平均の値である、 $a = 0.8$ 、 $b = 0.5$ (mm/d)を用いた。

## 3.4 融雪流出モデルへの応用

### 3.4.1 融雪流出モデルの概要

本研究にて用いた融雪流出モデルは菅原<sup>37)</sup>のタンクモデルをベースにしており、山田ら<sup>38)</sup>により構築されたものである。概念図を図-14 に示す。最上段のタンクへの入力量は、降雨量と融雪量の和から蒸発量を引いた値である。各タンクの貯留量が一定の高さを超えていけば、側面の穴から流出が発生し、各タンクの流出量の総和が流出モデルの流出量となる。各タンクの貯留量が一定の高さに到達するまでは、そのタンクからの流出は発生せず下方のタンクへ流入する仕組みとなっている。

本研究では、Alpine3D での計算と同様にダム流域を

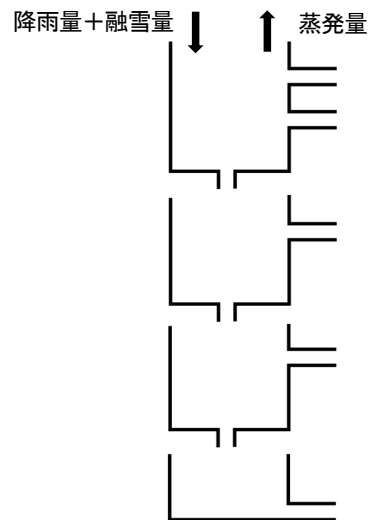


図-14 タンクモデルの概念図



150 m のメッシュに分割し、メッシュ毎に融雪量や流出量を計算している。ただし、メッシュ間の水の移動は考慮しておらず、流出量は全メッシュの平均値である。

融雪モデルには小池ら<sup>39)</sup>のモデルをベースに、長波放射量の計算の太田<sup>24)</sup>のモデルを適用し、積雪下面からの底面融雪を考慮したモデルを用いた。融雪量の計算式を式(6)に示す。

$$M = M_r + M_t + M_r + M_b \quad (6)$$

ここでMは総融雪量(mm)、 $M_r$ は放射収支による融雪量(mm)、 $M_t$ は顕熱による融雪量、 $M_r$ は降雨による融雪量、 $M_b$ は底面融雪量(mm)である。尚、底面融雪量は試行錯誤的に 2 mm/day の一定値として設定している。

アルベドは熱収支・融雪に大きな影響を与える。アルベドモデルには式(7)及び式(8)に示す山崎ら<sup>40)</sup>のモデルを用いた。

$$ref_n = (ref_{n-1} - ref_{min}) \exp\left(\frac{1}{k}\right) + ref_{min} \quad (7)$$

$$ref_0 = ref_{max} \quad (8)$$

ここで、 $ref_n$ は降雪があった日から n 日経過した日の日平均アルベド、 $ref_{max}$ 、 $ref_{min}$ はアルベドの最大値、最小値、kはアルベドの低下の速さを表すパラメータである。降雪判定は日降水量が 3 mm 以上かつ日平均気温が 2 °C以下を条件に行われる。kは以下の式で計算される。

$$k = \begin{cases} -4.9T_{mean} + 4.5(T_{mean} \leq 0.1 \text{ °C}) \\ 4.0(T_{mean} \geq 0.1 \text{ °C}) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 $T_{mean}$ は日平均気温である。

蒸発モデルにはマッキング式<sup>11)</sup>を用いた。

本研究での計算期間は、2010 年 1 月 1 日から 2018 年月 30 日までであり、10 月 1 日から 9 月 30 日を 1 水文年とした。2010 年 1 月 1 日から 2015 年 9 月までを流出解析モデルの状態変数を安定させるための助走期間とし、2015 年 10 月から 2018 年 9 月を解析期間とした。解析期間の内、2016 水文年をモデルパラメータの同定期間とし、2015 水文年にて流出解析モデルの再現性検証、2017 水文年にて Alpine3D の計算結果による補正処理を行った。

### 3.4.2 入力データ

融雪流出モデルにおける入力データは Alpine3D における入力データと概ね同様であることから、変更点のみを記述する。

まず、気象データとして入力しているのは降水量、気温及び日射量である。空間分布は最近隣法(計算メッ

シュから最も近い観測所のデータを入力し、メッシュの値としている)により作成している。ただし、降水量及び気温に関してはそれぞれ補正を行っている。

降水量の補正は降雪と判定された場合に行っており、補正式を式(10)に示す。

$$P_{mesh} = A[1 + B(H_{mesh} - H_{gauge})]P_{gauge} \quad (10)$$

ここで、 $P_{mesh}$ は補正後の降雪量(mm)、 $P_{gauge}$ は最も近い観測所の降水量(mm)、 $H_{mesh}$ はメッシュの標高(m)、 $H_{gauge}$ は最も近い観測所の標高(m)、Aは捕捉損失補正係数、Bは標高補正係数である。

気温に関しては Alpine3D と同様に気温減率による補正を行っている。

### 3.4.3 モデルパラメータの同定

パラメータ同定は 2016 水文年を対象に、試行錯誤

表-4 同定したパラメータ

| パラメータ名              | パラメータ値 |
|---------------------|--------|
| 1 段目タンク上部流出係数 : r1  | 0.1    |
| 1 段目タンク下部流出係数 : r2  | 0.1    |
| 1 段目タンク上部流出孔高さ : h1 | 60 mm  |
| 1 段目タンク下部流出孔高さ : h2 | 15 mm  |
| 1 段目タンク浸透係数 : b1    | 0.1    |
| 2 段目タンク流出係数 : r3    | 0.025  |
| 2 段目タンク流出孔高さ : h3   | 20 mm  |
| 2 段目タンク浸透係数 : b3    | 0.025  |
| 3 段目タンク流出係数 : r4    | 0.05   |
| 3 段目タンク流出孔高さ : h4   | 60 mm  |
| 3 段目タンク浸透係数 : b3    | 0.005  |
| 4 段目タンク流出係数 : r5    | 0.001  |
| 捕捉損失補正係数 : A        | 1.8    |

表-5 計算パターンの定義

| 計算パターン    | 補正処理                   |
|-----------|------------------------|
| オリジナル計算   | なし                     |
| 風あり補正計算 1 | 風あり計算による補正を全メッシュに実施    |
| 風あり補正計算 2 | 風あり計算による補正を高標高帯メッシュに実施 |
| 風なし補正計算 1 | 風なし計算による補正を全メッシュに実施    |
| 風なし補正計算 2 | 風なし計算による補正を高標高帯メッシュに実施 |

的に行った。モデルパラメータは計算期間中一定値として同定しており、同定したパラメータを表-4に示す。標高補正係数は0.0007の一定値を用いている。また、モデルパラメータは全メッシュ一定値として設定している。各タンクの初期貯留量は0である。

### 3.4.4 Alpine3Dの計算結果による補正

本研究での計算パターンの定義を表-5に示す。本研究では、風あり計算及び風なし計算の2018年3月22日12時時点での積雪水量の計算結果を、流出解析モデルに反映する事で補正を行っている。具体的には流出解析モデルでの積雪水量を、Alpine3Dにより計算された積雪水量で置換する処理を行っている。これは、Alpine3Dの積雪水量は雪の再分配を考慮しているのに対し、流出解析モデルでは考慮できていない事から、流出解析モデルの積雪水量を置換する事で雪の再分配を考慮するためである。積雪深分布は森林限界を境に異なる事から、補正処理は全メッシュを対象とした場合及び森林限界以上の高標高帯メッシュを対象とした2パターンを行っている。

### 3.4.5 Alpine3Dの計算結果による補正

ダム流入量の再現性検証には Nash and Sutcliffe<sup>41)</sup>の効率係数(以後、NS値という)を用いた。NS値は1に近ければモデルの精度がよいとされ、0.7以上で再現性が高いとされている<sup>42)</sup>。NS値の計算式を式(11)に示す。

$$NS = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal}(i) - Q_{obs}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{ave})^2} \right) \quad (11)$$

ここで、NSはNS値、 $Q_{cal}$ は日平均計算ダム流入量( $m^3/s$ )、 $Q_{obs}$ は日平均実測ダム流入量( $m^3/s$ )、 $Q_{ave}$ は計算期間中の実測ダム流入量の平均値( $m^3/s$ )である。NS値の計算は融雪期と考えられる4月1日から7月31日

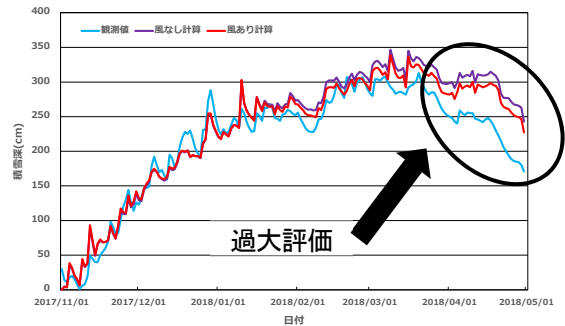


図-15 積雪深の計算結果(旭岳温泉地点)

までを対象とした。計算は1時間毎の計算値を日平均値に変換して行った。

また、水収支についても検証を行っている。水収支の検証はNS値と同様に計算ダム流入量と実測ダム流入量を用いて行っている。水収支誤差(%)は式(9)で計算している。

$$E = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_{cal}(i) - \sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)} \right) \times 100 \quad (12)$$

水収支誤差の計算期間はNS値と同様に、融雪期と考えられる4月1日から7月31日までである。

## 3.5 結果と考察

### 3.5.1 Alpine3Dの計算結果

積雪深の計算結果を旭岳温泉地点における観測値と比較したグラフを図-15に示す。積雪深は1時間単位で計算または観測されており、その値を24時間平均したものである。図-15を見ると積雪深は、3月上旬までは計算値と観測値は概ね一致している。一方で、3月下旬以降においては計算値が過大評価になっている。また、風なし計の方が風あり計算より若干過大となった。平均相対誤差は風なし計算が23.9%、風あり計算が22.0%となった。

図-16にAlpine3Dにより計算した2018年3月22日

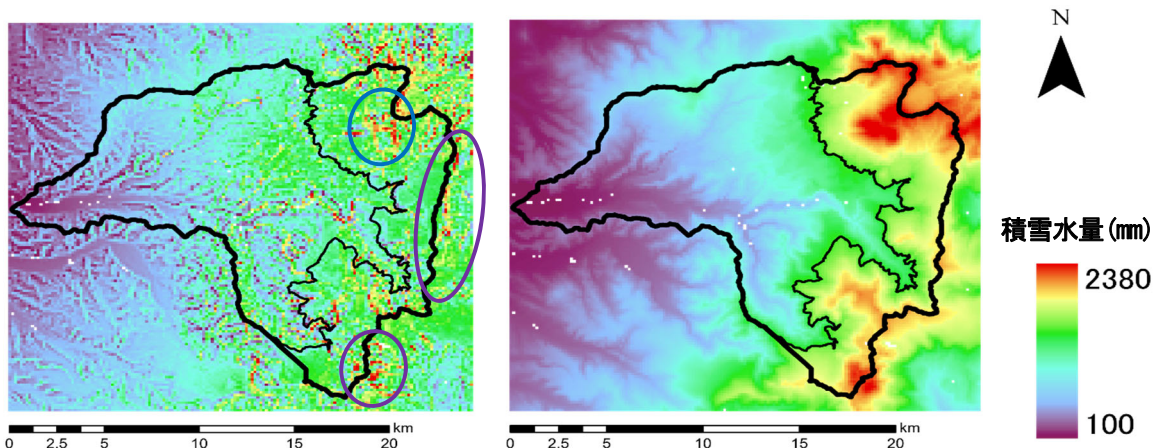


図-16 積雪水量の分布図(左:風あり計算, 右:風なし計算)

表-6 流域積雪水量の計算結果

| 計算種別  | 流域積雪水量                         | ダム推定値との<br>相対誤差 | 風あり計算と<br>風なし計算の相対差 |
|-------|--------------------------------|-----------------|---------------------|
| 風なし計算 | $3.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ | 36.8 %          | -23.1 %             |
| 風あり計算 | $2.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ | 6.53 %          |                     |
| ダム推定値 | $2.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ | —               | —                   |

の積雪水量の分布図を示す。図-16 を見ると、風なし計

算では標高分布と概ね一致している一方で、風あり計算では地形等の影響が確認できる。紫枠線においては大雪ダム側の積雪水量が大きいことが分かる。また、青枠線においては、流域内だが、局所的に積雪水量が大きいことが確認できる。

表-6 には流域積雪水量の計算結果を示す。表-6 を見ると、風・地形の影響を考慮することで流域積雪水量が減少するとともに、前述のダム推定値との差が減少し再現性が向上していることが分かる。また、風なし計算と風あり計算とでは、20%程度の差が生じている。風なし計算と風あり計算の差分値は  $7.6 \times 10^7 \text{ m}^3$  であり、忠別ダムの有効貯水容量の  $7.9 \times 10^7 \text{ m}^3$  とほぼ同じ値である。

図-15 の計算積雪深の変化を見ると計算期間の前半は概ね旭岳温泉地点での観測値を再現できている、一方で計算期間後半の再現性は悪くなっており、Alpine3D における融雪過程の再現性に課題があることが示唆される。既往事例<sup>8)</sup>でも融雪期の積雪深は過大評価となっていた。流域積雪水量は過大評価となっており、降水量を含めた入力データの誤差の影響も考えられる。ただし、局所的な変化の大きい積雪深を、ポイントと 150 m メッシュの値を比較している影響も考えられる。計算期間を延長し消雪までの計算を行うこと、高解像度化、降水量補正の見直しが必要と考えられる。

積雪水量の分布を見ると、風なし計算では標高分布と概ね一致しており、積雪深が標高比例した結果と考えられる。流域積雪水量においては風・地形の影響を考慮することで、流域積雪水量が減少し再現性が向上した。これは主に地形の影響により降雪量が減少した事、風の影響を受けて雪が流域外へ移動したことが要因と考えられる。さらに、風あり計算と風なし計算の相対差は 23.1% であり、差分値は忠別ダムの有効貯水容量とほぼ同じ値となった。すなわち、忠別ダムにおいては雪の再分配が水資源量に与える影響は大きいと

考えられる。また、森林限界以下の樹林帯では、高標高に比べて積雪水量分布に大きな差が見られない。これは樹林帯では標高と積雪深には線形関係がある事<sup>24)</sup>が要因と考えられる。

### 3.5.2 融雪流出モデルの計算結果

構築した流出解析モデルの再現性検証を行った 2015 水文年における NS 値は 0.75、水収支誤差は 2.26% であり、本研究にて構築した流出解析モデルの再現性は良好であるといえる。計算結果は図-17 に示す。図-17 を見ると計算値は融雪初期にて過小評価となっているものの、概ね実測値を再現できている。融雪初期に計算値が過小評価になっているのは、2016 水文年においても同様である。後述する 2017 水文年では融雪初期の流入量を概ね再現できていることから、原因として下段タンクの貯留量が完全には安定していないことが考えられる。

表-7 には 2017 水文年における計算値一覧表を示す。2017 水文年では風あり補正計算 1、2 共にオリジナル計算よりも NS 値が高くなり、再現性が向上したことが分かる。これは、Alpine3D の計算結果を反映した事により、主に森林限界以上の高標高帯の積雪水量が、実際の積雪水量分布に近くなったためと考えられる。ただし、水収支誤差においては特に風あり補正計算 2 の再現性が低下している。後述するが、これはピーク流入量の再現性が改善したためである。一方で、風な

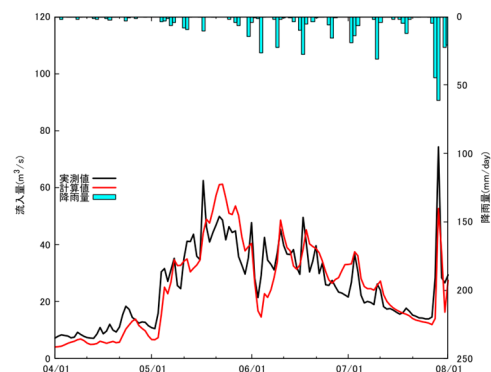


図-17 ダム流入量の計算結果 (2015 水文年)

表-7 2017 水文年における計算値一覧表

| 指標    | オリジナル計算                                | 風あり補正計算 1 | 風あり補正計算 2 | 風なし補正計算 1 | 風なし補正計算 2 |
|-------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NS 値  | 0.68                                   | 0.73      | 0.78      | 0.52      | 0.65      |
| 水収支誤差 | 3.37 %                                 | 3.57 %    | -9.65 %   | 24.3 %    | 4.27 %    |
| 計算流入量 | 1514 mm                                | 1517 mm   | 1323 mm   | 1820 mm   | 1538 mm   |
| 実測流入量 | 1464 mm (融雪期のみの総和), 2491 mm (水文年全体の総和) |           |           |           |           |

し補正計算では再現性が低下している。この理由としては、風なし計算では流域積雪水量が過大評価<sup>9)</sup>であったからであると考えられる。水収支誤差においても風なし補正計算は、過大評価となっている。2017 水文年における結果を図-18 に示す。尚、図-18 の流入量及び降雨量の範囲は図-17 とは異なる。これは、流入量及び降雨量の最大値が異なるためであり、図-17 の流入量の範囲上限は 120 m<sup>3</sup>/s、降雨量の範囲上限は 250 mm/day、図-18 はそれぞれ 500 m<sup>3</sup>/s、500 mm/day となっている。図-18 の上図は全メッシュの補正をした計算結果、下図は高標高帯メッシュの補正をした計算結果である。また、図-19 に 2017 水文年のピーク流入量発生時の積雪水量分布を示す。

2017 水文年ではどの計算結果においても、計算値は実測値を再現できているが、ピーク値を過大評価している。また、風あり補正計算 1、2 共に、他の計算値と

比較してピーク値が低くなり、実測値に近くなっていることが分かる。そのため風あり補正計算 2 では NS 値が高くなった一方で、ピーク値以外で流入量が増加しなかったため水収支誤差は悪化している。このピーク値は融雪期後半に生じている事から、高標高帯の融雪の影響と考えられる。ただし、このピーク値には降雨の影響も含まれているが、日流入量が 50 m<sup>3</sup>/s を超えた 6 日間における、オリジナル計算での流出量に対する融雪量の割合は約 20 %であり融雪の影響も無視できないと考えられる。ピーク流入量発生時の積雪水量分布においても、積雪水量が確認できるのは高標高帯のみである。この原因として Alpine3D の積雪水量が樹林帯では過大評価、高標高帯では過小評価であったことが考えられる。そのため、風あり補正計算 1 では水収支誤差に大きな影響がなく、風あり補正計算 2 では悪化したと考えられる。ピーク流入量発生時の積雪水量分布は大きく異なっており、オリジナル計算に比べて風あり補正計算 2 の積雪水量は少ないことが分かる。流域積雪水量はオリジナル計算が  $1.89 \times 10^7$  m<sup>3</sup>、風あり補正計算 2 が  $2.38 \times 10^6$  m<sup>3</sup> であり、風あり補正計算 2 ではオリジナル計算の 12.6 %となっていた。今後検証の必要があるが、風あり補正計算ではピーク流入量が改善していることから、風の影響を考慮することで積雪水量分布が改善された可能性がある。また、ピーク値以外ではオリジナル計算と風あり補正計算とで大きな違いは見られず、風あり補正計算 1 では融雪初期等の再現性が若干低下している。この原因として、

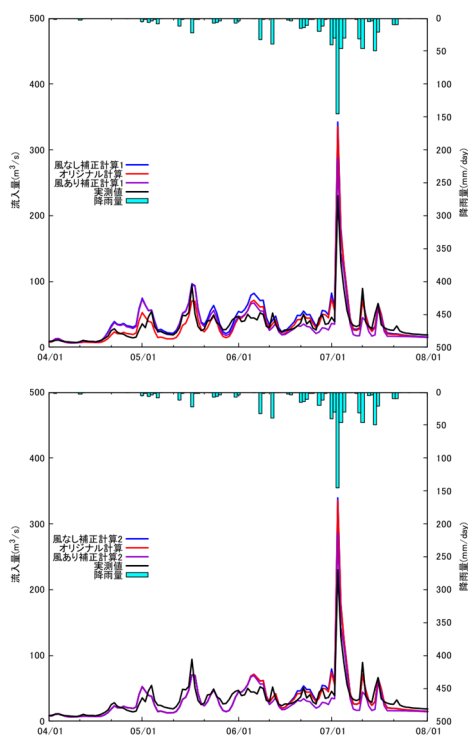


図-18 ダム流入量の計算結果 (2017 水文年)  
上: 補正計算 1、下: 補正計算 2

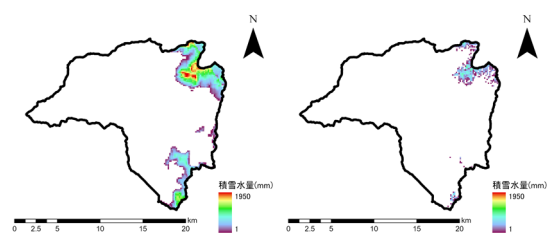


図-19 ピーク流入量発生時の積雪水量分布 (2017 水文年)  
左: オリジナル計算 1、右: 風あり補正計算 2



Alpine3D による樹林帯における積雪水量の計算誤差が考えられる。

#### 4. 深層学習による融雪流出の予測

##### 4.1 はじめに

ここでは、深層学習を用いて融雪期のダム流入量予測を行った結果について述べる。

##### 4.2 対象領域

本研究における対象流域は北海道札幌市にある定山溪ダム流域である。定山溪ダムは豊平川上流域に位置しており流域面積は 104 km<sup>2</sup> である。また、定山溪ダム流域の標高帯は概ね 400 m～1300 m である。定山溪ダム流域周辺の標高分布図を図-20 に示す。

##### 4.3 入力データ

本研究では、入力データとして定山溪ダム管理支所にて観測された気象データを用いた。データの使用期間は 2010 年から 2020 年の各年における 3 月 1 日から 6 月 30 日であり、2018 年については欠測データが多数存在した事から除外している。データの時間解像度は 1 時間であり、使用期間における欠測データは線形補間を行っている。

本研究では山田ら<sup>43)</sup>の研究を参考に気象庁アメダス観測所でも観測されており、入手が容易で重要度の高いデータとして降水量、気温及び積雪深を選定した。一般に深層学習を含む機械学習では入力データの前処理が必要となる。前処理とは入力データを学習しやす

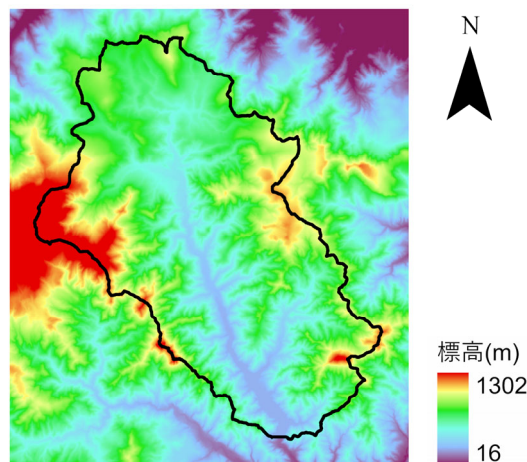


図-20 定山溪ダム流域周辺の標高分布

い形に処理する事であり、欠測データへの対応やデータの範囲を揃えるスケーリングが代表的な処理である。本研究では、スケーリング処理として標準化を行っている。標準化は平均を 0、分散を 1 にする処理であり式(13)で計算される。

$$Y_s = \frac{X_s - \mu}{\sigma} \quad (13)$$

ここで  $Y_s$  は標準化後の値、 $X_s$  は元データの値、 $\mu$  は平均、 $\sigma$  は分散である。

##### 4.4 深層学習モデル

本研究では深層学習モデルの構築にプログラミング言語 Python3.9.7 を用いており、ライブラリとして PyTorch を用いた。

深層学習モデルの 1 種である RNN(Recurrent Neural Network)は時系列データを扱う事に適していることが知られている。一方で、長期的なデータの記憶保持に課題があり、この問題を解決したモデルとして LSTM(Long Short-Term Memory)がある。本研究では、この LSTM モデルを用いてモデルを構築した。モデルのハイパーパラメータは表-8 に示す。

本研究にて構築した LSTM モデルは前 24 時間分のデータを入力し、24 時間先までの予測を行うモデルと

表-8 深層学習モデルのハイパーパラメータ

|          |       |
|----------|-------|
| 学習回数     | 50000 |
| バッチサイズ   | 64    |
| 最適化手法    | Adam  |
| 中間層数     | 3     |
| ユニット数    | 64    |
| 活性化関数    | Tanh  |
| 損失関数     | MSE   |
| ドロップアウト率 | 0.1   |

表-9 深層学習モデルにおける入力値及び出力値

| 項目    | 入力値       |                   | 出力値                    |
|-------|-----------|-------------------|------------------------|
|       | 前 24 時間まで | 1 時間先から 24 時間先予測  |                        |
| 降水量   | 実測値       | 実測値を用いて完全予測値として入力 | 1 時間先から 24 時間先までのダム流入量 |
| 気温    |           |                   |                        |
| 積雪深   |           | 深層学習モデルによる予測値を入力  |                        |
| ダム流入量 |           |                   |                        |

なっている。現在時刻以降の気象データに関しては完全予測値として実測値を入力しており、ダム流入量に関してはLSTMモデルによる予測値を次の入力値としている。深層学習モデルの学習年は2010年から2017年までとし、2019年を検証年としている。表-9には深層学習モデルにおける入力値及び出力値を示す。

#### 4.5 再現性検証

再現性検証には前述のNS値を用いた。NS値の計算期間は予測を行っている2019年3月2日から2019年6月30日までである。

#### 4.6 結果と考察

図-21にはダム流入量の予測結果を示す。ただし、ダム流入量は日平均に変換して作成している。図-21を見ると予測結果は概ね実測値と一致しており、高い再現性がある事が分かる。表-10にはNS値の一覧表を示す。表-10を見るとNS値はいずれも0.8以上となっており、高い再現性がある事が分かる。そのため、24時間先予測までであれば、実務上利用可能な予測と考えられる。

今後は、予測精度向上を目指すとともに予測の長時間化や他流域・他シーズンでの適用性を検討する必要がある。

### 5. 融雪期のダム管理を高精度化するシステムの構築

#### 5.1 はじめに

ここでは、融雪期のダム管理を高精度化するシステ

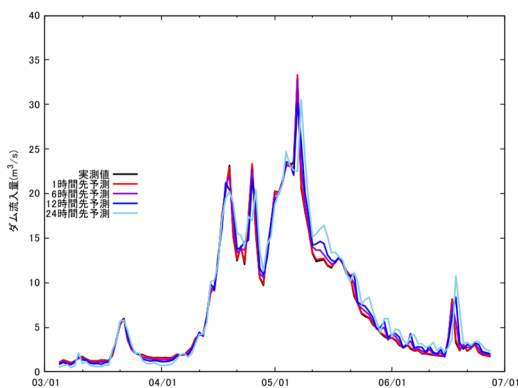


図-21 2019年におけるダム流入量の予測結果

表-10 NS値の一覧表

| 予測時間  | NS 値 |
|-------|------|
| 1 時間  | 0.99 |
| 6 時間  | 0.95 |
| 12 時間 | 0.91 |
| 24 時間 | 0.85 |

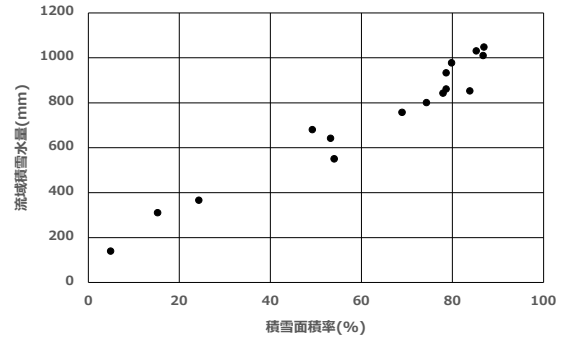


図-22 積雪面積率と流域積雪水量の散布図

ムの検討について述べる。前述のまでの内容により、融雪期における短時間のダム流入量予測精度向上は概ね実現した。一方で、融雪期のダム管理においては流域に残存する積雪水量を正確に推定し、その変化を把握しておく事も重要である。

そこで本研究では、ダム流域における積雪面積率と流域積雪水量との関係性を分析し、流域積雪水量の推定を行った。

#### 5.2 積雪面積率と流域積雪水量の関係性分析

流域積雪水量の推定は前述の式(3)により行っている事からここで記述は省略する。

本研究では積雪面積率は人工衛星画像を用いた積雪判読を行う事で推定している。積雪面積率の把握に人工衛星画像を用いた場合、ダム流域全体の情報が得られる一方で、衛星の飛来頻度や天候の影響により情報が得られる回数が少ないという問題がある。これらの課題に対する検討は今後の課題である。積雪面積率推定の具体的な手法については西原・谷瀬、山田らを参考にされたい。

#### 5.3 結果と考察

図-22には忠別ダム流域における積雪面積率と流域積雪水量の散布図を示す。データの使用期間は2019年及び2020年である。図-22を見ると積雪面積率と流域積雪水量には強い相関関係があり、積雪面積率から流域積雪水量を推定する事は十分可能であると考えられる。ただし、この手法では積雪面積率を100%となるような積雪ピーク期における流域積雪水量を推定する事は困難であるため、あくまでも融雪期以降を対象とした手法である。

今後は、この手法を他流域でも検証するとともに、人工衛星画像以外の手法を用いた流域積雪水量の推定手法の検討が必要である。

## 6. まとめ

本研究では、融雪期におけるダム管理の高精度化に向けて、高標高帯における積雪分布の特徴の解明、風による積雪の移動を考慮した融雪・流出モデルの高精度化、深層学習による融雪流出の予測、融雪期のダム管理を高精度化するシステムの構築を行った。

その結果、樹林帯では積雪深が標高に比例し、森林限界の高標高帯では積雪深が地上開度に比例する事を示した。また、これらの特徴は2か年において確認され積雪ピーク期におけるパターンは同じであった。さらに、風による雪の移動を考慮した積雪分布を融雪流出モデルに反映させる事で、ダムのピーク流入量の再現性が向上した。深層学習モデルによる融雪流出の予測では、24時間先までのダム流入量を高精度に予測する事に成功した。さらに、融雪期におけるダム管理の高精度化に向けて、積雪面積率から流域積雪水量の推定を推定する手法を構築した。

今後はこれらの手法の他流域へ適用性を検討するとともに、ダム管理所への実装を進める必要がある。

## 参考文献

- 1) Yamada, T.: Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain regions, Hokkaido, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A31, pp.1-33, 1983
- 2) 上石勲: 2017年3月27日に栃木県那須町で発生した雪崩災害に関する調査研究、平成29年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書、2018
- 3) 陸旻皎、小池俊雄、早川典生: アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発、水工学論文集、第42巻、pp.121-126、1998
- 4) 中山恵介、伊藤哲、藤田陸博、斉藤大作: 融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究、土木学会論文集、N0.691/II-57、pp.25-41、2001
- 5) 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、No. 4、pp. I\_187-I\_192、2016
- 6) 田村和則、加納茂紀、三浦心、山脇正嗣、金子拓史: ダム流入量長時間予測への深層学習の適用ーダム防災操作の効率化を目指してー、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74、No. 5、pp. I\_1327-I\_1332、2018
- 7) 樽林利晃、萱場祐一: AI を用いた河川水位予測モデルの特異な洪水波形に対する適応性評価、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 77、No. 2、pp. I\_1237-I\_1242、2021
- 8) 一言正之、桜庭雅明: 深層ニューラルネットワークと分布型モデルを組み合わせたハイブリッド河川水位予測手法、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 73、No. 1、pp. 22-33、2017
- 9) 滝口修司、キムスンミン、立川康人、市川温、萬和明: ニューラルネットワークを用いた積雪地域の河川流量予測における重要入力因子の抽出、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74、No. 4、pp. 877-882、2018
- 10) 込山晃市、山本隆広、武樋力: 深層学習を用いた融雪流出量の推定の試み、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 77、No. 2、pp. I\_1225-I\_1230、2021
- 11) 菊地時夫、金田安弘、山田知充: 大雪山における積雪期の気象状況について、天気、26、pp.751-757、1979
- 12) Schimer, M., Wirz, V., Clifton, A. and Lehning, M.: Persistence in intra-annual snow depth distribution: 1. Measurements and topographic control, Water Resour. Res., 47, W09516, doi: 10.1029/2010WR009426, 2011
- 13) 西原照雅、谷瀬敦: 航空レーザ測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、I\_883-I\_888、2018
- 14) 西原照雅、谷瀬敦: 3回の航空レーザ測量結果から分析した山間部における積雪分布の特徴、雪氷研究大会講演要旨集、237、2017
- 15) 西原照雅、谷瀬敦: 航空レーザ測量データを用いた山間部における積雪分布の統計的解析、土木学会北海道支部平成29年度年次技術研究発表会、B53、2017
- 16) 横山隆三、白沢道生、菊池祐: 開度による地形特徴の表示、写真測量とリモートセンシング、第38巻4号、26-34、1999
- 17) Michael Lehning, Ingo Völksch, David Gustafsson, Tuan Anh Nguyen, Manfred Stähli, Massimiliano Zappa: ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology, Hydrological Processes, 20,2111-2128, DOI: 10.1002/hyp.6204,2006.
- 18) Michael Lehning, Perry Bartelt, Bob Brown, Tom Russi, Urs Stöckli, Martin Zimmerli: snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations, pp145-157,

- Volume 30, Issues 1-3, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00022-1), 1999.
- 19) SNOWPACK: <https://www.slf.ch/en/services-and-products/snowpack.html>、2022年6月10日最終アクセス。
- 20) Rebecca Mott, Michael Lehning: Meteorological Modeling of Very High-Resolution Wind Fields and Snow Deposition for Mountains, *Journal of Hydrometeorology*, Volume11, Issue4, pp934-949, DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JHM1216.1>, 2010.
- 21) Rebecca Mott, Françoise Faure, Michael Lehning, Henning LÖWE, Bernhard Hynek, Gernot Michlmayer, Alexander Prokop, Wolfgang Schöner: Simulation of seasonal snow-cover distribution for glacierized sites on Sonnblick, Austria, with the Alpine3D model, *Annals of Glaciology*, Volume49, pp155-160, DOI: <https://doi.org/10.3189/172756408787814924>, 2008
- 22) Hiroyuki Hirashima, Kouichi Nishimura, Emiko Baba, Akihiro Hachikubo, Michael Lehning: SNOWPACK model simulations for snow in Hokkaido, Japan, *Annals of Glaciology*, Volume38, pp.123-129, DOI: <https://doi.org/10.3189/172756404781815121,2004>
- 23) 山田嵩, 西原照雅, 村上泰啓: 忠別ダム流域における降雪の再分配を考慮した積雪水量の推定, 河川技術論文集第26巻, pp.655-660, 2021
- 24) 太田岳史: 森林内外における積雪面上の純放射量の推定と表層融雪量, 水文・水資源学会誌, Vol.5, NO.4, pp.19-26, 1962
- 25) Glen E. Liston and Kelly Elder: A Meteorological Distribution System for High-Resolution Terrestrial Modeling (MicroMet), *Journal of Hydrometeorology*, Volume 7: Issue 2, pp217-234, DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM486.1>, 2006
- 26) 長谷川力: 本邦の山岳における気温の特性, 地球科学, Vol. 24, No. 1, pp. 35-39, 1970.
- 27) Sevruk, B.,1985: Summary report. Correction of Precipitation Measurements, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 13-23
- 28) 横山宏太郎、大野宏之、小南靖弘、井上聡、川方俊和: 冬期における降水量計の捕捉特性、雪氷、Vol. 65、No. 3、pp. 303-316、2003
- 29) 菅谷博: 暖地積雪面の微細気象的特性とそれに基づく積雪質量推定モデル、北陸農業試験場報告、32、pp43-64、1990
- 30) Adam Winstral, Kelly Elder, Robert E. Davis, Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters, *Journal of Hydrometeorology*, Volume 3, pp524-538, DOI: [https://doi.org/10.1175/15257541\(2002\)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15257541(2002)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2),2002.
- 31) Jan Magnusson, Daniel Farinotti, Tobias Jonas, Mathias Bavay: Quantitative evaluation of different hydrological modelling approaches in a partly glacierized Swiss watershed, *Hydrological Processes*, Volume25, Issue13, pp2071-2084, DOI: <http://doi.org/10.1002/hyp.7958>, 2011.
- 32) Matthias Huss, Daniel Farinotti, Andreas Bauder, Martin Funk: Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate, *Hydrological Processes*, Volume 22, Issue19, DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7055>, 2008
- 33) Schirmer, M., Wirz, V., Clifton, A., Lehning, M, Persistence in intra-annual snow depth distribution: 1. Measurements and topographic control, *Water Resources Research*, Volume47, Issue 9, DOI: 10.1029/2010WR009429., 2011.
- 34) Makkink GF: Ekzamen de la formula de Penman. *Netherl.J. Agric, Sci.* 5: 290-305,1957.
- 35) 角屋睦、永井明博: 長短期流出両用モデルの永源寺ダム流域への適用と考察、農業土木学会論文集、1988巻、37号、pp.71-78、1988
- 36) 永井明博: Makkink式による計器蒸発量の推定と考察、水文・水資源学会誌、Vol. 6、No. 3、pp238-243、1993
- 37) 菅原正巳: 水文学講座7 流出解析、共立出版、1972
- 38) 山田嵩、西原照雅、村上泰啓: 忠別ダム流域を対象とした雪の再分配を考慮した融雪流出解析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 77、No. 2、pp. I\_1369-I\_1374、2021
- 39) 小池俊雄、高橋裕、吉野昭一: 融雪分布のモデル化に関する研究、土木学会論文集、1985
- 40) 山崎剛、田口文明、近藤純正: 積雪のある森林小流域における熱収支の評価、*天気*, 41(2), pp.71-77, 1994.
- 41) Nash JE, Sutcliffe JV.: River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol.10, No.3, pp.282-290,1970



- 42) 日本学会会議：回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価－公開説明会－（質疑）、p.10、2011
- 43) 山田 嵩、阿部 真己、滝口 大樹、谷瀬 敦、矢部

浩規：ランダム・フォレストを用いた融雪期のダム流入量予測における入力データの検討、河川技術論文集、Vol. 26、pp.89-94、2020

## 2. 2 様々な自然・地域特性における洪水・渇水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発

### 2. 2. 1 データ不足の補完等を考慮したリアルタイム流出氾濫予測精度向上技術に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：大沼克弘、望月貴文、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、宮本守、筒井浩行、Maksym Gusyev

#### 【要旨】

世界には地上観測データの空白域が未だに存在し、洪水・渇水等の水災害リスク評価の妨げとなっている。本研究では、このような空白域の一つである西アフリカを対象に、データ不足を解消するために再解析気象データや衛星マイクロ波データを効果的に活用した植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)を用いて渇水解析を行い、西アフリカにおける渇水状況・主要穀物の収穫量とシミュレーション値との間に良好な整合性を見出した。

キーワード：渇水、データ同化、植生水分量、穀物収穫量

#### 1. はじめに

世界には地上観測データの空白域が未だに存在し、洪水・渇水等の水災害リスク評価の妨げとなっている。本研究では、このような空白域の一つである西アフリカを対象に、データ不足を解消するために再解析気象データや衛星マイクロ波データを効果的に活用した植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)を用いて渇水解析を行う。

#### 2. 西アフリカへの CLVDAS の適用

##### 2. 1 西アフリカの現状

西アフリカは、チャーニー効果(草が減少することにより地表面が露出すると、地表面反射率が増加すると共に降水量が減少し、それにより草原の縮小がさらに促進されるフィードバック効果, Charny; 1975<sup>(1)</sup>)により渇水が強まる地域である。また西アフリカのサヘル-内陸域(図-1)において、主要穀物であるパールミレット収穫量(Chad, Niger, Nigeria, Benin, Burkina Faso, Mali の合計)とその正規化指数( $NI_i$ , 式-1)の年々変動を計算したが(図-2)、2011年以降の収穫量が2008年に比べ約半分まで減少していることが分かる。

$$NI_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

ここに、 $x_i$ は任意の月日( $i$ )の変数、 $\mu$ と $\sigma$ は任意の月日( $i$ )における2003年から2018年までの期間の $x_i$ の平均値と標準偏差である。

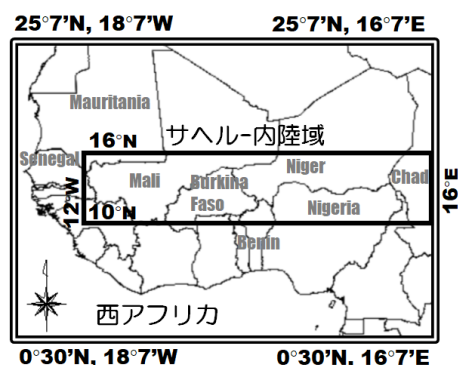


図-1 西アフリカ対象領域(緯度N0°30'-N25°7', 経度W18°7'-E16°7') および研究エリア(サヘル-内陸域: 緯度N10° - N16°, 経度W10° -E16°)

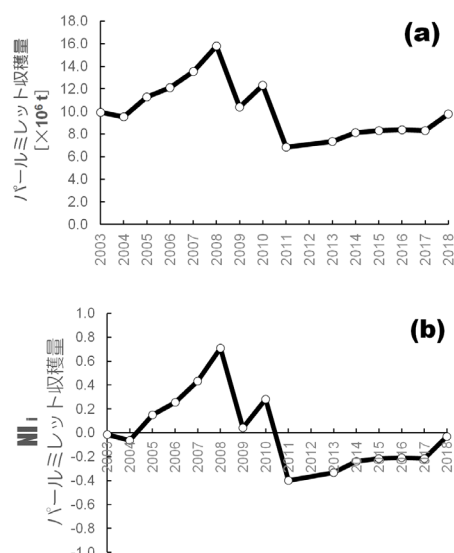


図-2 (a) パールミレット収穫量と (b) その正規化指数( $NI_i$ ) (Chad, Niger, Nigeria, Benin, Burkina Faso, Mali の合計)の年々変動

このように西アフリカは、渇水の影響を強く受け食糧生産を低下させ易い地域であると言える。本研究では、CLVDAS により植生動態水文量(特に植生水分量)を推定し、それを渇水指標として 2003 年から 2018 年までの期間の西アフリカ(図-1)における渇水について議論した。図-3 は、サヘル-内陸域におけるパールミレット収穫量と CLVDAS シミュレーションに基づく植生水分量(9月における時間・領域空間平均)の正規化指数( $NI_i$ , 式-1)の年々変動を比較した結果である。2003-2004 年にパールミレット収穫量の $NI_i$  が負を示す一方で植生水分量の $NI_i$  が正を示すことが分かった。そこで渇水以外の外的な要因について調査したところ、2003-2004 年に深刻な蝗害(バッタの異常発生)が西アフリカに発生していたことが分かった(Ulman (2004)<sup>(2)</sup>, Ceccato et al.(2007)<sup>(3)</sup> および FAO Locust watch (<http://www.fao.org/ag/locusts/en/archives/briefs/index.html>)). 具体的には、FAO Locust watch より、サヘル-内陸域における 10 以上の発生地点数を持つバッタの年間発生日数を読み取り、その $NI_i$  を計算した。その結果、2005 年以降は負の値を示したが、2003 年・2004 年の蝗害の発生日数は、それぞれ 1.31・3.47 を示した。そこで本研究では、蝗害という外的影響を受けた可能性の高い 2003-2004 年を除外し、それ以外の期間(2005-2018 年)を対象に西アフリカにおける渇水評価を行うこととした。

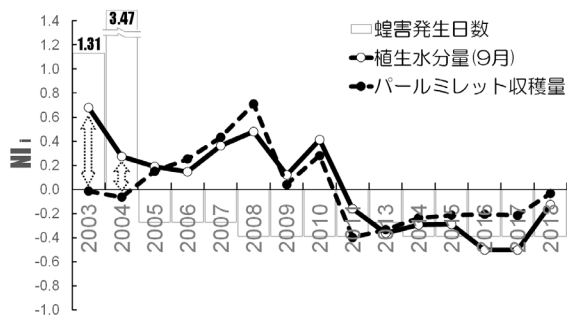


図-3 サヘル-内陸域におけるパールミレット収穫量と CLVDAS シミュレーションに基づく植生水分量(9月における時間・領域空間平均)の正規化指数( $NI_i$ )の年々変動

## 2.2 検討手法

本研究では、西アフリカ(緯度  $N0^{\circ}30'-N25^{\circ}7'$ 、経度  $W18^{\circ}7'-E16^{\circ}7'$ )をシミュレーション領域として選定した。また農業が盛んなサヘル-内陸域(緯度  $N10^{\circ}-N16^{\circ}$ 、経度  $W10^{\circ}-E16^{\circ}$ )を渇水評価のための研究エリアに選定した(図-1)。加えて、2003 年から 2018 年までの期間にシミュレーションを行い、データセットを作成する。渇水評価期間としては、前述の通り 2005 年から 2018 年を対象とした。

本研究において適用した CLVDAS は、Sawada and Koike (2014)<sup>(4)</sup>と Sawada et al. (2015)<sup>(5)</sup>により開発されたシステムである。図-4 に示すように、本システムでは、気象フォーシングデータを陸面モデル(EcoHydro-SiB)<sup>(6),(7)</sup>に入力して、様々な植生動態水文量を計算する。この陸面モデルにより計算された植生動態水文量は、マイクロ波放射伝達モデル(RTM)<sup>(8),(9)</sup>に入力され、推定マイクロ波輝度温度が推定される。推定マイクロ波輝度温度と衛星観測マイクロ波輝度温度との差が、同化スキーム<sup>(10),(11)</sup>によって地表面で同化され、結果として最適な植生動態水文量(表層土壌水分量、根茎層土壌水分量、蒸発散量、葉面積指数(LAI)、植生含水量)が推定される。一般に、衛星マイクロ波センサは、地表面の土壌水分量しか検出できないが、CLVDAS の陸面モデルは、降水の浸透、根域での貯水、根からの吸水、植生の成長を表す植生動態水循環を評価することができる。これは、このシステムの大きなメリットである。CLVDAS の性能については、これまで Agoufou (Mali), Bayantsagaan (Mongolia), Vaira Ranch (USA), New South Wales (Australia), Ceará state (Brazil)において検証され、以下の推定精度が達成された:(1) 土壌水分量において RMSE  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$  以下・Bias  $0.045 \text{ m}^3/\text{m}^3$  以下;(2) LAI において RMSE  $0.12 \text{ m}^2/\text{m}^2$  以下・Bias  $0.14 \text{ m}^2/\text{m}^2$  以下<sup>(4),(5),(12),(13)</sup>。本研究では、CLVDAS により表層土壌水分量(深さ  $0\sim 3\text{cm}$ :  $\text{m}^3/\text{m}^3$ )・根茎層土壌水分量(深さ  $3\sim 20\text{cm}$ :  $\text{m}^3/\text{m}^3$ )・植生水分量( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )を推定し、植生動態水循環や農業的な渇水について議論する。また一般的に根から十分な水分を吸収した穀物は、より多くの収穫量を生産する。ゆえに本研究では、農業的な渇水指標として植生水分量( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )に注目した。西アフリカでは、自給用穀物の天水農業が盛んであり、その中でもパールミレットは最も主要な穀物である。ゆえに本研究では、渇水指標としてパールミレットを選定した。また西アフリカにおいてパールミレットは、6-7月に播種され、8-9月に成長し、10月以降に収穫される。ゆえに最盛期から結実期までの期間に相当する9月が、農業的な渇水の評価の上で重要であると考え、9月の植生水分量とパールミレット収穫量を重要な指標として設定した。また土壌水分量、植生水分量、穀物収穫量などの様々な変数を定量的に比較することはできないため、2003年から2018年までの各日の正規化指数( $NI_i$ )を計算した(式-1)。

## 2.3 使用データ

CLVDAS には、陸面モデルのための全球気象フォー

シングデータ [降水量(mm/s), 気温(K), 気圧(mbar), 短波放射量 (W/m<sup>2</sup>), 長波放射量 (W/m<sup>2</sup>), 風速 (m/s), 比湿(kg/kg)]とデータ同化のための全球衛星観測マイクロ波輝度温度データが必要である。これまで、CLVDAS シミュレーション<sup>(4),(5),(12),(13)</sup>において、Global Land Data Assimilation System version 2.1 (GLDAS 2.1) 全球気象フォーシングデータの有用性が示された。ゆえに、本研究では、この GLDAS 全球気象フォーシングデータを用いた。時間分解能は3時間であり、空間分解能は、CLVDAS 出力と同じ0.25°グリッドである。

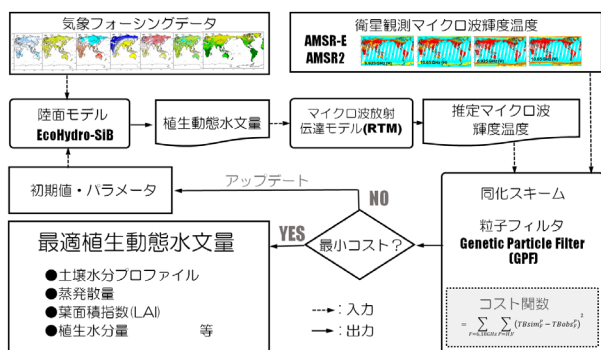


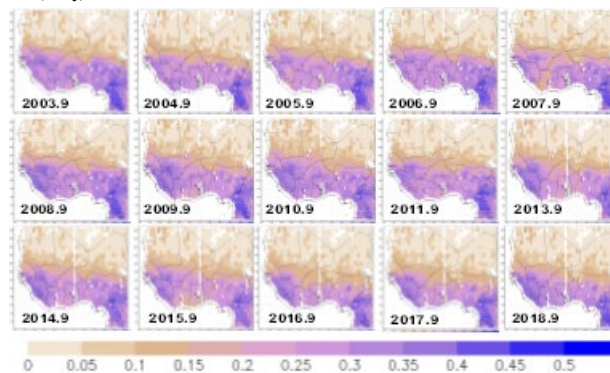
図-4 CLVDAS 概略図

衛星観測マイクロ波輝度温には、Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E, 観測期間：2003年～2011年9月)・高性能マイクロ波放射計2 (AMSR2, 観測期間：2013年～現在)のマイクロ波輝度温度[6.925GHz・10.65GHz・18.7GHz(水平・垂直偏波)]を適用した。時間分解能は1日であり、空間分解能は、CLVDAS 出力と同じ0.25°グリッドである。2011年10月から2012年12月までの期間は、AMSR-E から AMSR2 への移行期間であったためマイクロ波輝度温度が衛星観測されずデータ同化を実施できなかった。ゆえに本期間の植生動態水文学量は CLVDAS からは出力されない。また穀物情報としては、Food and Agriculture Organization of the United Nation の穀物収穫量データを用いた。

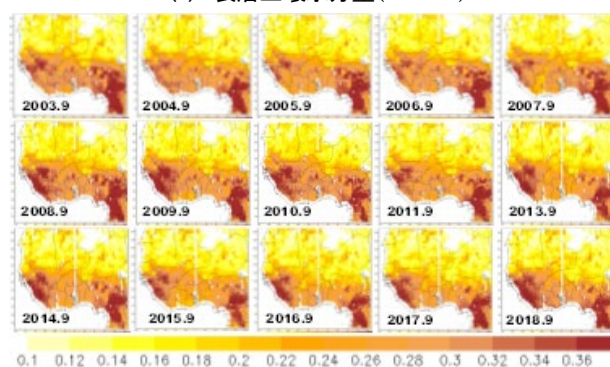
## 2.4 検討結果

2003年1月1日から2018年12月31日までの期間において、CLVDAS により表層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)・根茎層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)・植生水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)を推定し、そのデータセット(時間分解能は日、空間分解能は0.25°グリッド)を作成した。図-5は、9月平均の各植生動態水文学量の空間分布である。また式-1により各植生動態水文学量の正規化指数(NI<sub>i</sub>)を各グリッドで計算した。図-6は、9月平均の各植生動態水文学量の正規化指

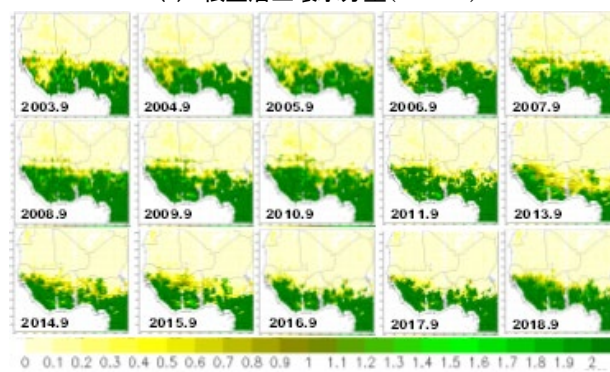
数(NI<sub>i</sub>)の空間分布である。



(1) 表層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)



(2) 根茎層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

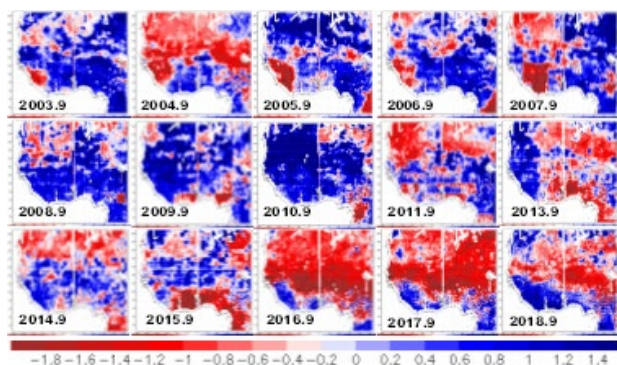


(3) 植生水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

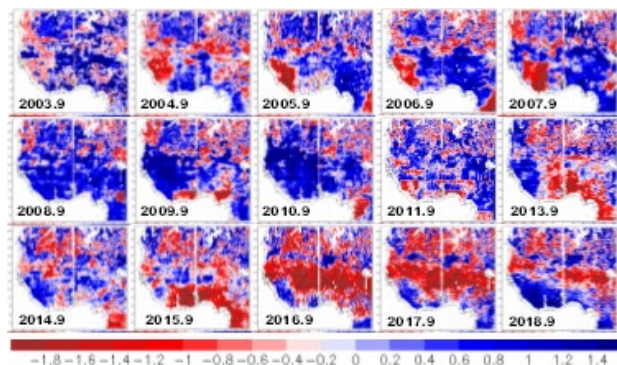
図-5 CLVDAS からの出力である(1)表層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)・(2)根茎層土壌水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)・(3)植生水分量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)の空間分布：2003年から2018年までの各年の9月平均,空間分解能は0.25°グリッド

さらに図-7は渇水評価期間(2005-2018年)のサヘル-内陸域において、9月の時間平均・領域空間平均の植生水分量の正規化指数(NI<sub>i</sub>)の年々変動である。前述の通り、Food and Agriculture Organization of the United Nation より、パールミレットのサヘル-内陸域における穀物収穫高の年々変動を調査し、その正規化指数(NI<sub>i</sub>)を計算した(図-2)。次に渇水評価期間(2005-2018年)のNI<sub>i</sub>を抽出して、植生水分量の正規化指数(NI<sub>i</sub>)と比較した(図-8)。その結果、両者の変動の良好な整合が確認された。

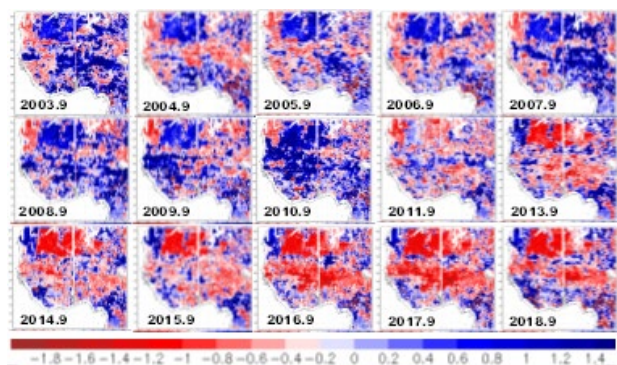




(1) 表層土壌水分量



(2) 根茎層土壌水分量



(3) 植生水分量

図-6 CLVDAS からの出力である (1) 表層土壌水分量( $m^3/m^3$ )・(2) 根茎層土壌水分量( $m^3/m^3$ )・(3) 植生水分量( $m^3/m^3$ )に対する正規化指数 ( $NI_i$ ) の空間分布: 2003 年から 2018 年までの各年の 9 月平均, 空間分解能は  $0.25^\circ$  グリッド

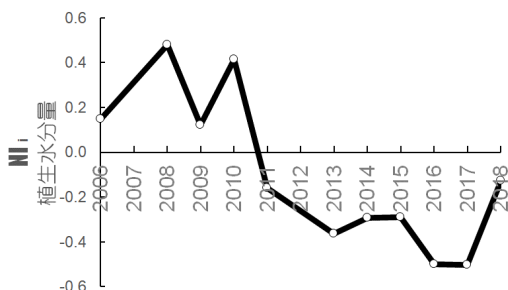


図-7 サヘル-内陸地域における植生水分量( $m^3/m^3$ )に対する正規化指数( $NI_i$ )の年々変動

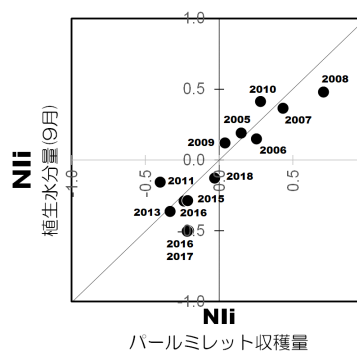
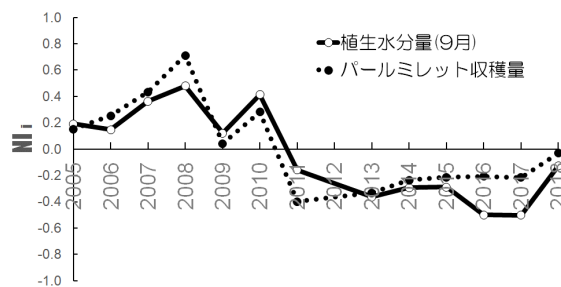


図-8 植生水分量(9 月,  $m^3/m^3$ )とパールミレット収穫量の正規化指数( $NI_i$ )の比較

さらにサヘル-内陸域の渇水評価期間(2005-2018 年)における降水量と、推定された植生動態水文量(表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・植生水分量)の正規化指数 ( $NI_i$ )の変動を調査し(図-9, 図-10)、以下のような傾向が確認された。

- ① 渇水評価期間の前半(図-9)では、2005 年・2008 年・2009 年を除いた期間において植生水分量がほぼ正を示しており渇水の影響が小さく、後半(図-10)では、特に 2016 年以降、植生水分量が負を示しており渇水の影響が強く示された。
- ② 降水量・土壌水分量・植生水分量の負のピークを比較すると、それぞれのピークにタイムラグが生じていることが分かる(図-9・図-10 黄色マーク・ライン)。これは以下のプロセスにより引き起こされる：(i)降水量の不足は直ぐに表層土壌を乾燥させる。(ii)表層から水が供給されないので一定のタイムラグを経て根茎層土壌水分量が減少する。(iii) 植生が根から根茎層土壌水分を吸収することができないので一定のタイムラグを経て植生水分量が減少する。
- ③ 2016 年 4 月に降水量が正を示した後、成長期・収穫初期(5 月-10 月)が負に転じており、これが土壌水分量と植生水分量を同時に負に導いている(図-10 緑色ライン)。
- ④ 2016 年 12 月後半の豪雨により降水量が一時的に正を示したが、直ぐに負に転じた。表層土壌水分

量もその挙動を追随した。それに対して根茎層には降水が貯留され、1月から4月までの4ヵ月間、正を示した。それにより植生が成長し、4月には植生水分量の正のピークが示された(図-10 青色ライン)。すなわち降水量が根茎層に水分が十分に蓄えられれば植生は成長する。CLVDASは、このようなメカニズムを評価できるということを示している。

- ⑤ 2017年は、降水量が少なかったために表層に土壤水分が蓄えられなかった。その後、2018年3月に降水イベントがあり、表層土壤水分量は一時的に回復(正)した。しかし根茎層土壤水分量や植生水分量は、それまでの渇水の影響を受け、回復することは無かった(負)。すなわち過去の水不足の記憶の保有期間が長いために根茎層土壤水分量や植生水分量が長期間な負を示したものと考えられる(図-10 赤色ライン)。

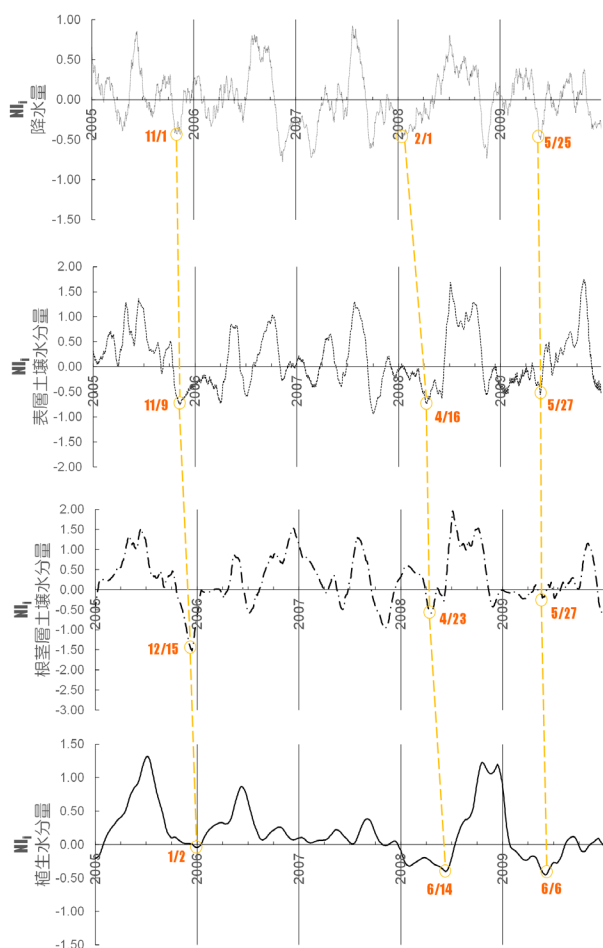


図-9 サヘル-内陸域における渇水評価期間の前半(2005-09年)における降水量・表層土壤水分量・根茎層土壤水分量・植生水分量の正規化指数( $NI_i$ )の比較

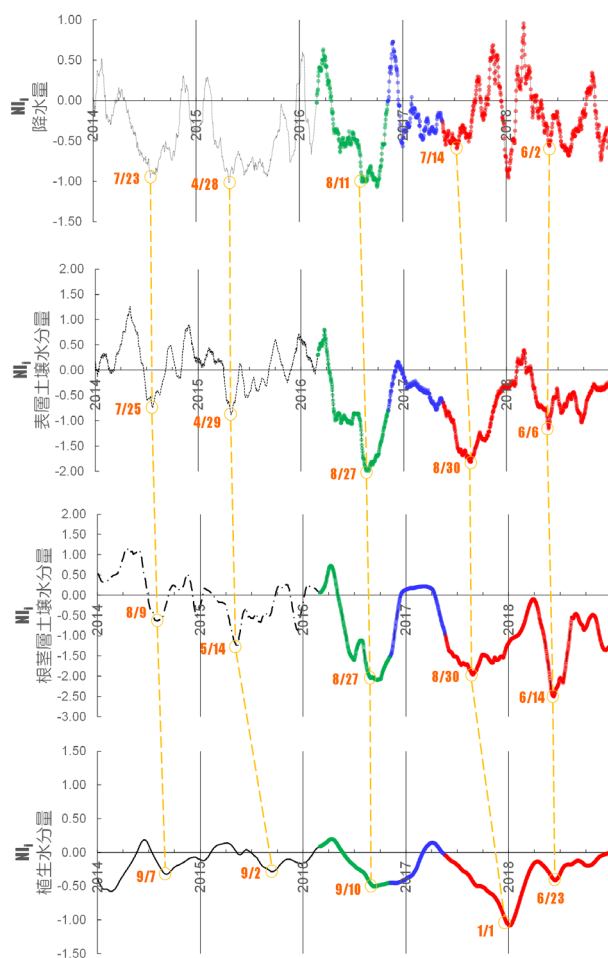


図-10 サヘル-内陸域における渇水評価期間の後半(2014-18年)における降水量・表層土壤水分量・根茎層土壤水分量・植生水分量の正規化指数( $NI_i$ )の比較

このように、CLVDASによる水文水循環(降水の根茎層土壤層への浸透と根によるその吸収)と植生の成長メカニズムの正確な評価により「パールミレット収穫量と推定された植生水分量との良好な整合性」を導くことができたということが分かった。加えて、根茎層における水の貯留状態に依存はするものの、数ヵ月前の降水量と穀物収穫量との関連性を見出す可能性をも示唆している。

### 3. まとめ

本研究では、世界的な地上観測データの空白域である西アフリカを対象に、データ不足を解消するために再解析気象データや衛星マイクロ波データを効果的に活用した CLVDAS を用いて渇水解析を行った。2003年から2018年までの期間の西アフリカへの適用検討では、FAO Locust watch に基づく調査により、2003年・2004年にサヘル-内陸域において、蝗害が発生していた可能性が高いことを理解した。そこで蝗害という外的影響が含まれる2003年・2004年を除外した2005年から2018年までの期間を対象に、サヘル-内陸域における渇水評価を実施した。その結果、渇水評価期間(2005-2018年)のサヘル-内陸域におけるパールミレット収穫量と植生水分量との良好な整合が確認された。

### 参考文献

- 1) Charney, J.; Stone, P. H.; Quirk, W. J. Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism. *Science*, Vol.187, pp.434-435, 1975.
- 2) Ulman, M.: Diabatic heating, African Desert Locusts in Morocco in November 2004. *Brit. Birds*, 99, 489-491, 2006.
- 3) Ceccato, P.; Cressman, K.; Giannini, A.; Trzaska, S.: The desert locust upsurge in West Africa (2003-2005): Information on the desert locust early warning system and the prospects for seasonal climate forecasting. *International Journal of Pest Management*, 53(1), 7-13, DOI: 10.1080/09670870600968826, 2007.
- 4) Sawada, T.; Koike, T.: Simultaneous estimation of both hydrological and ecological parameters in an ecohydrological model by assimilating microwave signal. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8839-8857, doi:10.1002/2014JD021536, 2014.
- 5) Sawada, Y.; Koike, T.; Walker, J. P.: A land data assimilation system for simultaneous simulation of soil moisture and vegetation dynamics. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol.120, pp.5910-5930, doi: 10.1002/2014JD022895, 2015.
- 6) Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G.J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L. : A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation, *J. Clim.*, Vol. 9, pp.676-705, 1996.
- 7) Wang, L., Koike, T., Yang, D. and Yang, K. : Improving the hydrology of the Simple Biosphere Model 2 and its evaluation within the framework of a distributed hydrological model, *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 54(6), pp.989-1006, 2009.
- 8) Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T. J., Wang J. R. and T. J. Jackson: A Model for Microwave Emission From Vegetation-Covered Fields, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, pp.11 229-11 237, 1982.
- 9) Kuria, D., N., Koike, T., Lu, H., Tsutsui, H. and Graf. T. : Field-Supported Verification and Improvement of a Passive Microwave Surface Emission Model for Rough, Bare, and Wet Soil Surfaces by Incorporating Shadowing Effects, *IEEE Trans. Geosci. Remote.*, Vol. 45, pp.1207-1216, 2007.
- 10) Duan, Q. Y.; Gupta, V. K.; Sorooshian, S.: Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76, 501-521, 1993.
- 11) Qin, J.; Liang, S.; Yang, K.; Kaihotsu, I.; Liu, R.; Koike, T.: Simultaneous estimation of both soil moisture and model parameters using particle filtering method through the assimilation of microwave signal. *J. Geophys. Res.*, 114, D15103, doi: 10.1029/2008JD011358, 2009.
- 12) Sawada, Y.; Koike, T. Towards ecohydrological drought monitoring and prediction using a land data assimilation system: a case study on the Horn of Africa drought (2010-2011). *Journal of Geo-physical Research Atmospheres*, 121, 8229-8242, 2016.
- 13) Tsutsui, H.; Sawada, Y.; Ikoma, E.; Kitsuregawa, M.; Koike, T.: Study on the estimation of crop production and required irrigation water based on long-term drought simulation by using the coupled land and vegetation data assimilation. *The Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1*, 75, 2, I\_283-I\_288, 2019.

## 2. 2 様々な自然・地域特性における洪水・渇水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発

### 2.2.2 様々な自然・地勢条件下での長期の統合的水資源管理を支援するシミュレーションシステムの開発に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、伊藤弘之、大沼克弘、津田守正、菊森佳幹、吉野広郷、

Abdul Wahid Mohamed Rasmy、牛山朋來、宮本守、海野 仁、山崎祐介、Liu Tong、  
玉川勝徳、Maksym GUSYEV、Achirto Ralph Allen、柿沼太貴

#### 【要旨】

ICHARM では、日本を含むアジアモンスーン地域のほか、熱帯・乾燥帯・半乾燥帯や高標高の積雪・氷河地帯等様々な自然・地勢条件下における河川流域において適正な水資源管理を支援するシミュレーションモデルの開発を行っている。このため、ICHARM において開発した RRI の機能を拡充し統合的水資源管理の解析機能を向上させた WEB-RRI モデルの開発を行った。地球温暖化に伴う水資源量変化を見積もるため、GCM による気候実験結果に対して力学的および統計的ダウンスケーリングを実施し、水文モデルの計算に耐えうる高解像度データを作成した。得られた降水量等を RRI や WEB-RRI モデルに導入し、河川流量や氾濫面積の計算を行い、水資源量や水災害リスクの見積もりを行った。主な対象は、ベトナム、フィリピン、インドネシア、タイである。

キーワード： RRI、洪水予警報、統合的水資源管理、渇水リスク、気候変動、GCM、BTOP モデル、米作作付け面積モデル、東南アジア、ベトナム、ダウンスケーリング、洪水氾濫、フィリピン、インドネシア、洪水流出

#### 1. はじめに

近年、地球温暖化は確実に進行し、その影響による豪雨・大雨災害の激甚化も顕著になっている。安全・安心な国土・社会の形成のためには、将来の気候条件を予測し、社会全体で適応していく必要がある。一方で、将来(例えば 21 世紀末)の気候条件を正確に予測することは今日の科学をもってしても不可能である。様々な予測結果に関わる不確実性について認識・把握しながら、将来シナリオの想定やリスク評価を行うことが重要である。

本研究では、主要研究、ADB プロジェクト、統合プログラムの一環として行ったベトナム、フィリピン、インドネシア、タイの対象流域に対して、現在気候と将来気候の推定とその不確実性の評価、及び対象流域における流出の変化について検討した。

#### 2. 手法

##### 2.1 水資源管理を支援するシミュレーションモデルの開発

###### i) IFAS-Snow の開発

インダス川のように、上流域が標高 6,000~7,000m 級の高山地帯で構成される流域では、長期水循環解析、モンスーン期の洪水対応を行う上で融雪の影響を考慮することが重要である。前中期期間において、融雪量計算機能を

組み込んだ IFAS を開発し、Degree-Day 法、熱収支法を用いて融雪量を計算する機能と、観測等で得られた融雪量をインポートする機能を導入した。

このうち、Degree-Day 法は気温、アルベド、放射を考慮して融雪量を計算する。融雪が発生する範囲は、NASA が提供する人工衛星観測プロダクト MODIS の積雪範囲データを用いる。MODIS は雲等の影響がある場合には地表面の状態を確認できないため、1 日ごとのプロダクトに加えて、雲等の影響を除去した 8 日ごとのプロダクトが公開されている。図-1 に示すようにインダス川上流域を対象に、プロダクト間の積雪面積を比較したところ、8 日プロダクトと 1 日プロダクトには 2 割程度の差があり、1 日プロダクトは過小評価されている可能性があることが示唆された<sup>1)</sup>。

8 日プロダクトを用いてインダス川上流部の河川流量を計算した結果、融雪を考慮することにより流出流量の計算精度が大幅に向上することが確認された(図-2)。

また、IFAS の乾燥帯への適用性を確認した(図-3)<sup>2)</sup>。スーダン国の Gash ワジを対象に人工衛星観測雨量(GSMaP NRT)を用いて計算を行い、パラメータ調整により乾燥帯にも適用できる可能性があるという結果を得た。



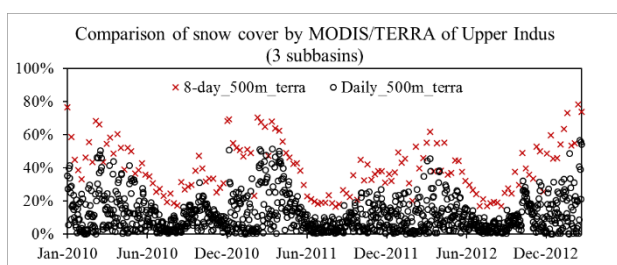


図-1 MODIS プロダクト間の積雪面積率の比較(インダス川上流域)

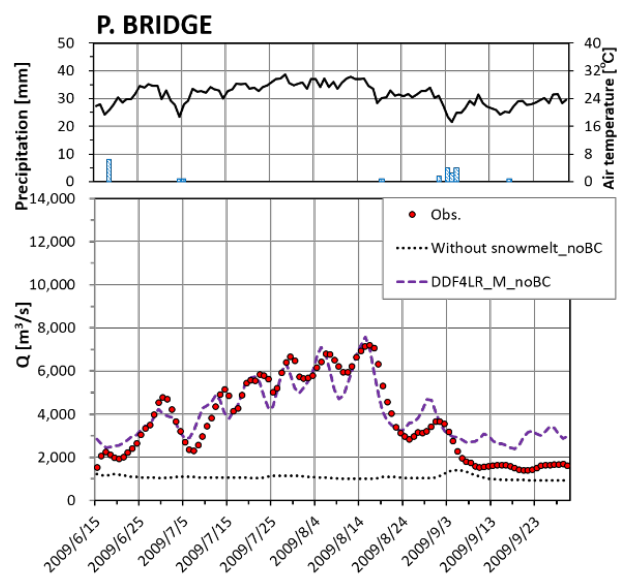


図-2 融雪を考慮した場合のIFASによる河川流量の計算結果(2009年P. Bridge地点)

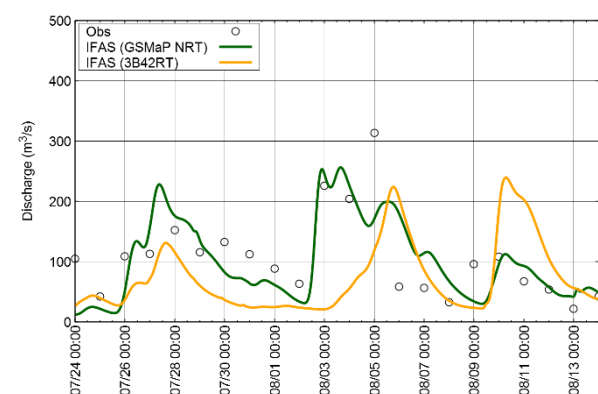


図-3 IFASによる乾燥帯のワジ出水の計算結果(2010年スーダン、Gashワジ)

ii) WEB-RRIの開発

水災害による死者や経済被害は、地球温暖化や人口増加により急激に加速している。水資源の効率的運用や、温暖化影響への適応・軽減策の作成のため、水文リスク(ハザード、脆弱性、露出の3要素からなる)を評価できる水資

源・水災害情報が政策決定者にとって必要である。降雨流出氾濫(RRI)モデルは、洪水の早期警戒システムや洪水ハザードマップの開発、洪水リスク管理と被害評価等、洪水情報を作成する上で非常に有益で効果的なツールである。しかしながら、RRIモデルは流域スケールの水収支の保存のみを考慮しており、水-熱エネルギーに関する基本要素や物理過程(土壌水分、キャピリー相互作用、蒸発散、土壌-植生-大気の相互作用等)が考慮されていないことによってモデルの不確実性が主に生じている。これらは、洪水に関する適用を行う場合においても、乾燥域や準乾燥域においては非常に重要な要素である。例えば、土壌水分量は、降雨の表面流出と地下浸透への分配を決めており、また水収支の中でも土壌と植生の蒸発散を正確に見積もることが、土壌-植生水分貯蔵・河川流出・湛水深の予測精度にとって非常に重要である。その結果、洪水リスク評価のため、各洪水事例に対するモデル検証を繰り返す必要がある。現実の洪水監視や予測活動に用いられる時、その出力は十分な注意の下に扱わなければならない。RRIモデルは温暖化による長期的な水収支変化を反映できないため、気候変動評価に用いるのは疑問が残る。これらの問題は、RRIモデルを水資源や水災害管理に用いる場合の大きな欠点として認識されてきた。

従って、本研究はhydro-SiB2モデルとRRIモデルの2次元流出方程式を統合したWater and Energy Budget-based RRI (WEB-RRI)モデルを開発する(図-4参照)。それは、水熱収支過程・地表-植生-大気相互作用、複数層の土壌水分力学過程、降水遮断・蒸発散・浸透・流出・氾濫過程を改善する2次元流出を組み込む。Hydro-SiB2モデルを用いることで、WEB-RRIモデルは干ばつの評価にも用いることが出来、大気モデルと結合して流出予測や、将来気候シナリオにおける評価を行うことができる。モデル構造や主要な要素、モデル検証などの詳細は参考文献3), 4), 5)を参照されたい。このモデルは、水資源や水文極端現象の気候変動影響の評価や、適用策軽減策の開発に利用されている。

2.2 気候変動予測と予測に関わる不確実性について

気候変動予測については、全球気候モデル(GCM: Global Climate Model、図-5)による予測実験が基本となる。このような実験は、過去気候では観測された温室効果ガス濃度を与え、将来気候についてはあらかじめ決められたシナリオに基づく温室効果ガス濃度を与えて気候状態が計算される。温室効果ガス排出シナリオは、政策的な温室効果ガスの緩和策を前提として、将来の温室効果ガス安定化レベルとそこに至るまでの経路のうち代表的なものを選んだシナリオが

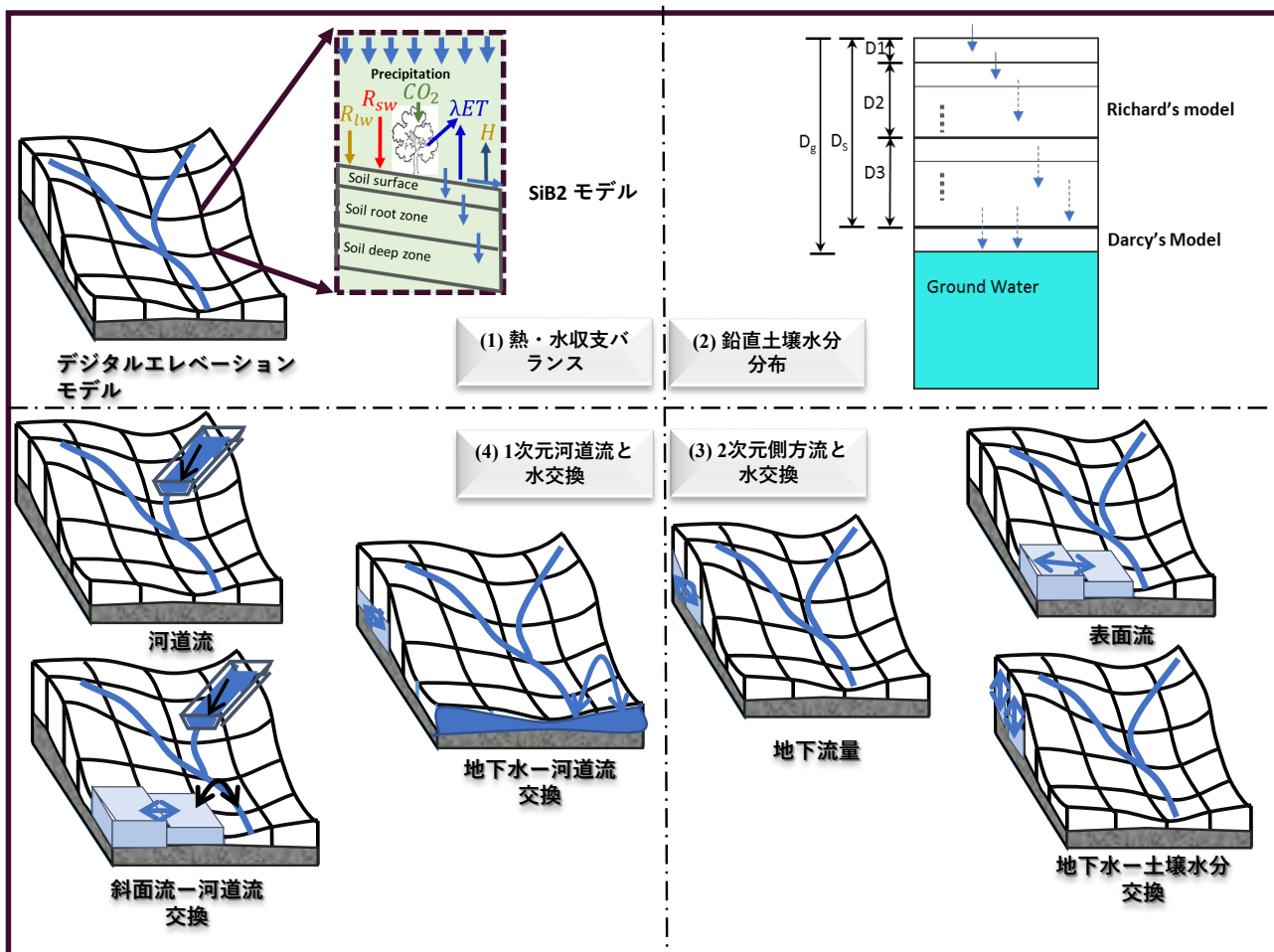


図-4 WEB-RRI モデルの概念図。(1) SiB2 モジュールは各格子点における地表面-大気間の鉛直熱エネルギーと水フラックス変換を処理、(2) 鉛直土壌水分分布モジュールは、リチャードの式とダルシーの式で地下水の再充填を計算、(3) 2次元拡散波流出モジュールは、表面流と地下流出を計算、(4) 一次元拡散波河川流出モジュールが河川流を計算。

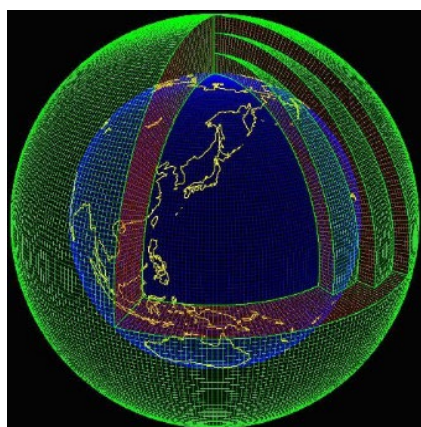


図-5 GCMの一般的構造

作られており(図-6)、IPCC 第5次報告書で示された RCP (Representative Concentration Pathways)シナリオがよく用いられる。RCP シナリオでは、2100 年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」(RCP8.5)から 2100 年までにピークを迎えその後減少する「低位安定化シナリオ」(RCP2.6)の範囲に4シナリオが立案されている。

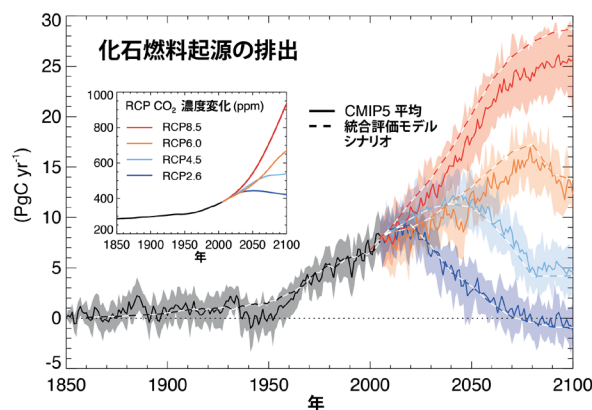


図-6 RCPシナリオ

通常は、大気と海洋の両方を計算する大気海洋結合モデルが用いられるが、気象研究所では日本域の複雑な海陸分布や地形の影響を評価するため、解像度を優先して大気のみを計算する大気GCMも用いられる。この場合の海洋部分の境界条件は、過去気候では観測された海水面温度が、将来気候は多くの結合 GCM から得られた海水面温度を与えて計算されている。

このシミュレーションには様々な不確実性が内在する。代表的なものとして、①将来までの温室効果ガスの排出量シナリオによるもの、②使用する GCM に内在する不確実性がある。

このうち①については、RCP シナリオによって表現される。本研究では、RCP シナリオの最上位、最下位に位置付けられる RCP8.5、2.6 を使用する。前者は、最も温暖化影響が大きい時の影響を把握するためであり、後者は 2015 年の気候変動枠組条約 COP21 パリ協定で採択された、気温上昇を 2°C より十分低く保つという目的に合うシナリオである。

②は使用するモデルの構造や、対流や地表面過程などの細かい現象の扱い方(パラメタリゼーション)に起因するものである。世界各国の機関が GCM を開発し、予測計算を行っているが、これらのモデルの構造や設定、解像度はそれぞれ異なるため計算結果に差異が生じる。これが GCM に起因する不確実性である。

### 2. 2. 1 GCM の選定

世界には数多くの GCM とその予測結果があるが(例えば CMIP5)、利用できる全ての GCM について詳細に分析するのは非効率であり、対象地域の気候特性を良好に表現するモデルを予め選定することが有効である。選定基準としては、対象地域を含む周辺エリアの気候特性を代表する気象要素である降雨、上向き長波放射、海面気圧、気温(850hPa 面)、東西風(850hPa 面)、南北風(850hPa 面)について、観測データとの相関係数及び RMSE により個々に適合性を評価し、これらを合算した総合点数の高い GCM を選定する。この作業においては、CMIP5 に提供された 31 機関の 61 種類のモデルを対象とし、観測値としては GPCP、JRA55 や NOAA の観測データを使用した。モデル選定においては、これらのデータや相関解析等を行うツールが整備された DIAS<sup>®</sup>を利用した。

### 2. 2. 2 ダウンスケーリング

一般に、GCM の計算結果は現実の気候条件を表現するものではなく、100km 程度の解像度による平均的な気候特性値が算出される。このため、GCM の気候特性値から対象地域の将来気候条件を想定するためには、ダウンスケーリング(DS)という方法により、空間解像度を高めるとともに、バイアス補正を行い日平均降雨量や日平均気温等を算出する必要がある。この方法には一般に力学的 DS と統計的 DS があるが、力学的 DS は GCM で表現できないミクロスケール現象の補完を含む力学的整合性において、統計的 DS は計算負荷の少なさに長所を有しており、それぞれの特徴を活用することにより、将来降雨シナリオの立案と不確実性の評価を行う。

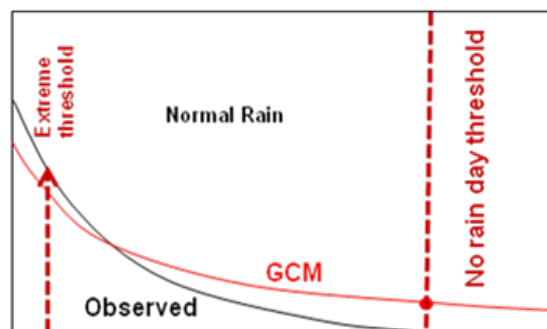


図-7 統計的バイアス補正の方法

#### 統計的バイアス補正の手順の概要

日降雨量の観測値及び計算結果について、最大値から最小値までを順に並べる。

- 無降雨：観測データより無降雨日数を設定し、その期間の雨量をゼロとする。
- 大雨：上位 1% 程度を極端事象とし、極値分布（一般パレート分布）を適合させる。※（20 年間約 7300 日のうち、1% の 73 日をデフォルトで豪雨としている）
- 平常時：上記 a), b) 以外の平常時の降雨について、ガンマ確率累積関数を適合させる

#### 2.2.2.1 統計的 DS による GCM 間の不確実性の評価

統計的 DS とは、「広域の気象場とローカルな気象要素との経験的あるいは統計的關係を仮定し、その関係式に基づいて GCM のデータから空間解像度の高いデータへの変換を行う方法」である。GCM で表現できない高解像度の地形や大気運動等を考慮できないため、力学的整合性に劣るが、簡便かつ計算負荷が少ないため、複数の GCM や多数の地点への適用等が可能である。統計的バイアス補正については、Nyunt<sup>7)</sup>等の方法を使用した。この方法では、観測地点において日降雨量の大小で順に並べ、無降雨、大雨(極端現象)、平常時降雨の三領域においてそれぞれ GCM の計算結果の補正を行うものである(図-7 参照)。

#### 2.2.2.2 力学的ダウンスケーリング

力学的ダウンスケーリングは、対象地域を包含する領域を対象に、領域気候モデル(RCM)を作成し、GCM では表現できない小規模スケールの物理現象を再現し、より現実的な地形の影響を考慮した計算結果を得る手法である。GCM の結果を境界条件として RCM に与えて計算することにより、GCM の計算結果を反映した、高解像度の降水分布等を得ることができる。

本研究が対象とする複雑地形を伴う小さな河川流域では、数 10km 以上の解像度を持つ GCM では、降水量の再現が困難である。このような複雑地形に伴う降水を表現するには 5km 程度の解像度が望ましい。そこで、力学的ダウンスケーリングを用いて、5km 解像度の降水等のデータを求め、豪雨や渇水の特性を調査した。RCM は、対象地域の降水特性等



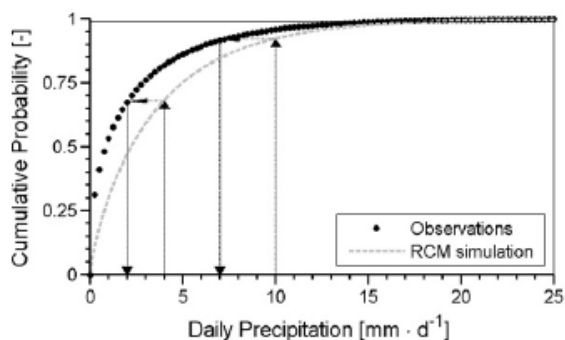


図-8 降水量バイアス補正の手法(文献8)より

に合った設定にする必要があり、ベトナム、フィリピン、インドネシアを対象とするにあたり、それぞれの地域に対して適切な設定を行い、観測値と比較検証した。

力学的ダウンスケーリングの結果得られた降水量や気温等のデータは、GCMの出力よりも気候現象をよく再現するものと考えられる。しかしながら、RCMにおいても5km程度の解像度では降水過程の表現に限界があり、降水量の季節変動や、降水強度の出現比率などについて観測値を正確に再現できるとは限らない。このような降水量の特徴について、観測値とのずれが大きい場合、降水量データを水文流出モデルに導入して河川流量を計算した場合に、将来予測について大きなバイアスを生じる可能性がある。そこで、領域気候モデルによる降水量や気温などの出力のバイアスを、観測値を用いて補正することが検討される。

バイアス補正の一般的な手法は、図-8で示したように、観測とRCM出力の結果を大きさ順に並べ、同じ順位(または順位の比率)の値に変換する方法である。図-8では、縦軸が雨量の大きさ順に相当するので、例えばRCMで4mmであった場合は、順位が約0.7となり、同じ順位0.7の観測値は2mmである。従って、RCMで4mmの雨量を補正すると、2mmに補正される。同様に、RCMの10mmは7mmに補正される。本研究では、文献9)の方法に従って、各月毎に変換を行った。ただし、上位0.5%の大きな降水量に関しては、月に関係なく年間の順位を用いて変換した。なお、将来気候については観測値が存在しないため、過去気候の変換率をそのまま適用し、補正を行った。

力学的ダウンスケーリングは、多くの計算資源を必要とするため、数多くのGCMについて計算することはできない。そこで本研究では、世界で数多く行われている気候実験の中でも最も高い解像度で計算されている気象研究所大気GCM(MRI-AGCM)のバージョン3.2S(SはSuper high resolutionの意味、20km解像度)と、バージョン3.2H(HはHigh resolutionの意味、60km解像度)を境界条件として用いた。2種類のGCMについてダウンスケーリングを行い、予



図-9 ベトナムの対象都市 (Ha Giang, Vinh Yen, Hue) と対象流域 (Red River, Perfume River)

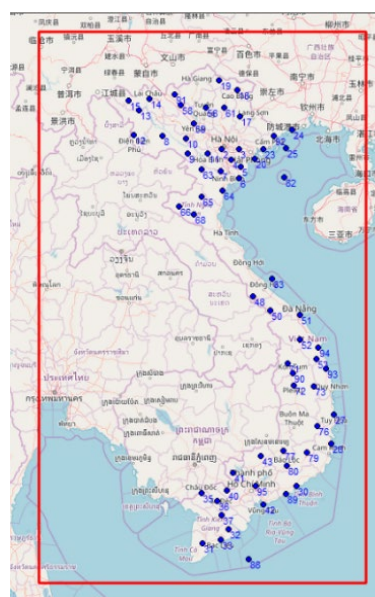


図-10 ベトナム全土の利用可能な雨量観測地点

測の不確実性を考慮した。計算期間は、過去気候が1979～2003年の25年間、将来気候が2075～2099年の25年間である。

### 3 ベトナム流域の降水の温暖化影響

本研究では、ADBプロジェクト<sup>10)</sup>の一環として行ったベトナム(図-9参照)を対象に、将来気候条件の予測とその不確実性の評価、及び対象流域における氾濫条件の変化について検討した。

#### 3.1 統計的ダウンスケーリングによる結果

図-10に示すベトナム全土で利用可能な降雨観測地点に対して統計的バイアス補正を行い、その結果を内挿することによりDSした結果を示す(図-11参照)。



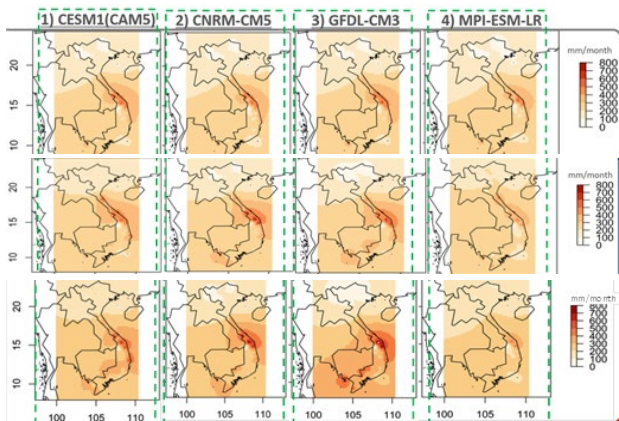


図-11 降雨の統計的DSの結果  
(上：過去，中：将来RCP2.6，下：将来RCP8.5)

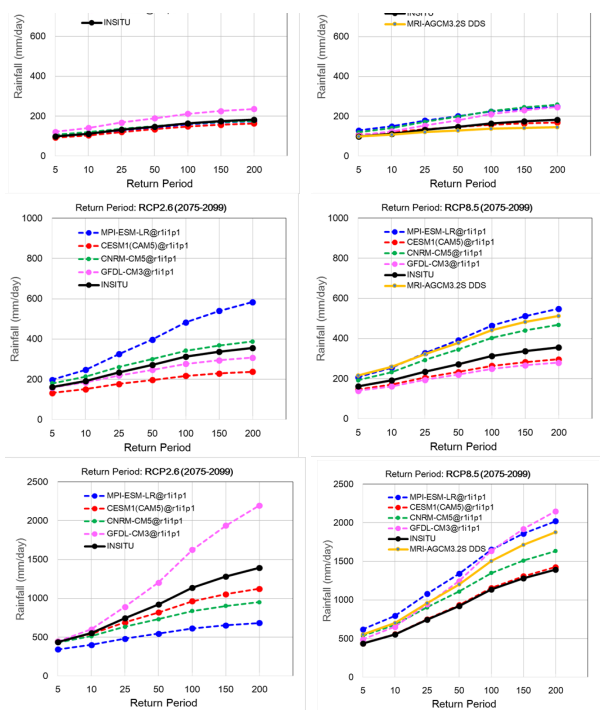


図-12 バイアス補正により得られた代表地点  
(左段：RCP2.6，右段：RCP8.5)

上:Ha Giang(Bao Lac), 中:Vinh Yen(Ha Dong), 下:Hue  
における将来(2075~2099)の日降雨量の発生頻度

RCPの違い、GCMモデルの違いにより、特に中部沿岸域や南部において将来の降雨条件に不確実性が見られる。また、南北方向の代表3地点における統計的バイアス補正結果を図-12に示す。いずれのモデルもHa Giangで降雨が少なく、Hueで多いという地域的傾向を示した。将来気候においては、極端事象(大雨)ほど結果の幅が大きくなり、1/100相当の降雨規模では、RCP8.5はRCP2.6の1.5~2倍程度の大きな予測結果を示している。

### 3.2 力学的DSによる詳細シナリオの作成

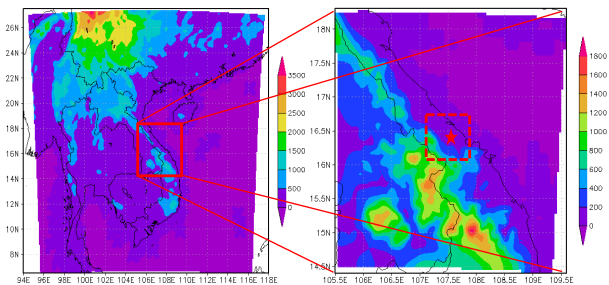


図-13 力学的DSの計算領域  
(Pefume River流域を対象とした場合)

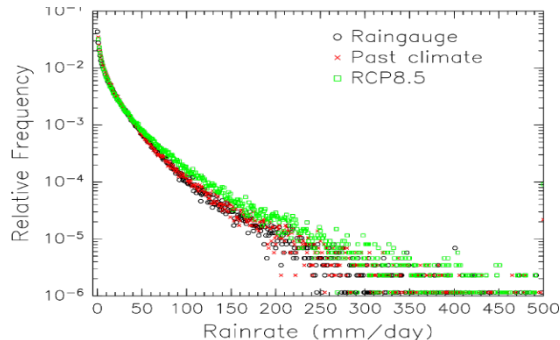


図-14 力学的DSの結果(バイアス補正後)

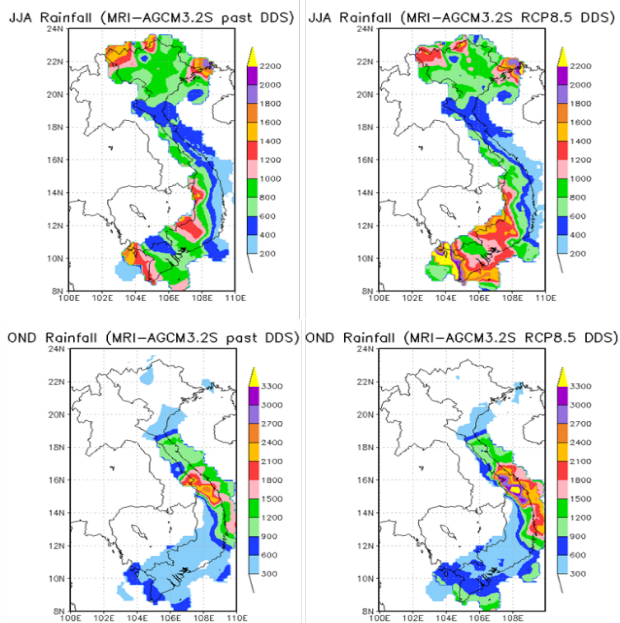


図-15 力学的DSによる降雨(3ヶ月雨量)の将来予測  
上：夏季(6~8月)、下段：冬季(10~12月)、左：過去(1979~2003)、右：将来(2075~2099)

力学的DSは、対象地域を包含する領域に解像度の高い気象モデルを作成し(図-13参照)、GCMの計算結果を境界条件とすることにより、GCMでは表現できない小規模スケールの物理現象を補完し、解像度の高い計算結果を得ることができる。

一方で、計算量が膨大になるため、利用できる計算機により

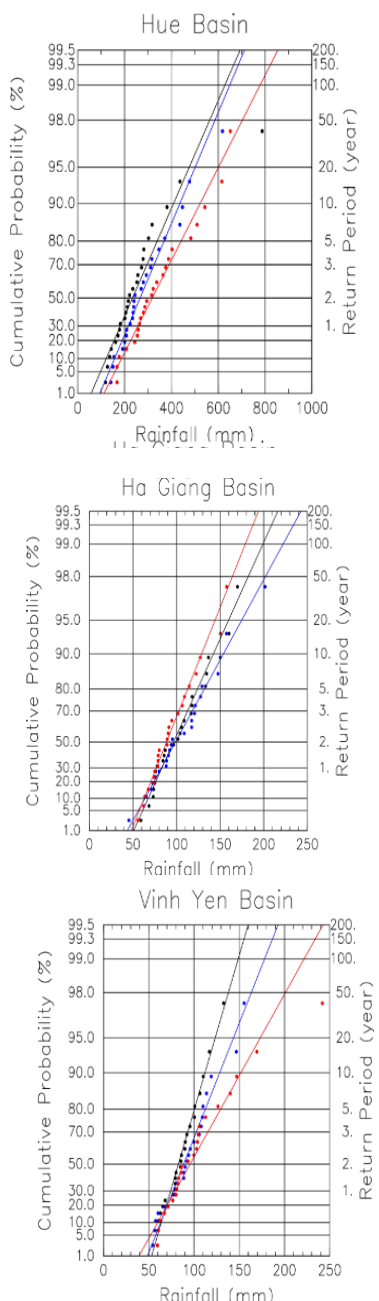


図-16 日降雨量の発生確率の将来予測  
黒(観測値)、青(計算:過去)、赤(計算:将来)

適用ケース数が限定される。また、境界条件の設定のため、対象とするGCMの全ての出力結果を取得する必要がある。このため、本手法は適応策検討等における詳細シナリオの作成に使用するものとし、必要なデータが得られる MRI-AGCM モデルによるRCP8.5の結果について行った。力学的 DS の結果に、必要に応じてバイアス補正(観測値の確率関数に合わせて計算結果を補正)することにより、過去の降雨条件を概ね再現できた(図-14 参照)。

力学的 DS の結果では、図-15 に示す通り夏季(6~8月)に南部において、冬季(10~12月)に中部海岸部において降雨量の増加が予想されている。また地点毎に見ると、北部

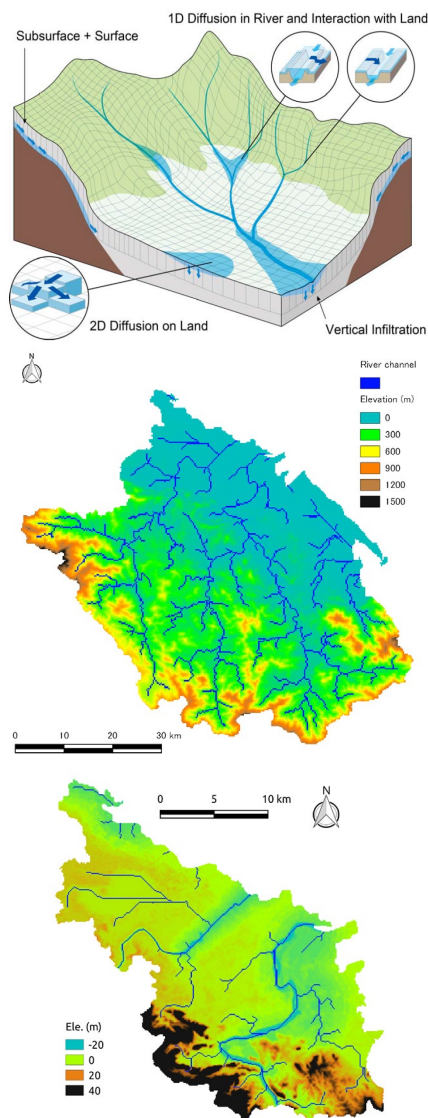


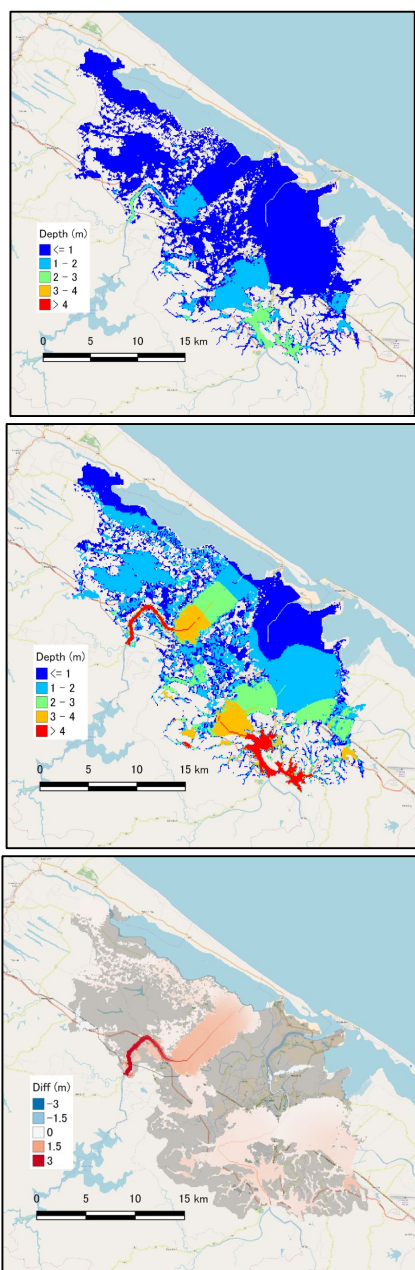
図-17 上:RRI モデル概念図、中:流域スケールモデル  
下:地域スケールモデル

の Ha Giang では豪雨の発生頻度の減少が、一方で Hue、Vinh Yen では増加が予測されている(図-16 参照)。なお、不確実性を評価した統計的 DS との比較では、図-12(黄色)に示す通り、北部・中部では比較的高位、南部では比較的低位に位置し、モデル間の範囲に収まっている。

### 3.3 将来の洪水予測の変化

水災害対策の観点からは、降雨等の気候条件だけでなく、洪水等による浸水域の変化について予測することが重要となる。このため、力学的 DS から得られた詳細シナリオの降雨条件をもとに、佐山等が開発した降雨流出氾濫解析モデル RRI(Rainfall Runoff Inundation)モデルを使用して現在と将来における同一生起確率(1/100)規模の洪水による氾濫域を計算した。

力学的 DS 結果より現在と将来における 1/100 相当の流



図一18 Hue 市周辺の浸水域及び浸水深の比較  
(上：過去、中：将来、下：将来と過去の差分)

域平均日雨量を設定し、現在と将来で流出流量が最大となる 1983 年と 2088 年の洪水を、それぞれ現在および将来の降雨パターンとした。

Hue 市を含む Perfume 川流域を対象に流域スケールの RRI モデルを構築し上記の降雨条件を与えることにより洪水流出量を計算する。次に Hue 市を中心とした地域(Hue Province)スケールの RRI モデルを構築し(図-17 参照)、上記で算定した洪水流量を境界条件として与えることにより、Hue 市周辺の浸水状況を詳細に計算した(図-18 参照)。Hue における浸水域と浸水深の計算結果を示す。1m 以上の浸水面積が拡大し、4m 以上の浸水する箇所が生じている。

### 3.4 まとめ

本検討ではベトナムの都市を対象に将来気候条件の予測とその不確実性の評価、及び対象流域における氾濫条件の変化について検討した。まず、CMIP5 のモデルセレクション、バイアス補正、統計的ダウンスケーリングを行い季節降雨特性の異なる北部と中部を対象にモデル間での影響を考察した。次に、力学的ダウンスケーリングを用いて、同様に北部と中部を対象とした降水量の将来の影響を調査した。さらに、力学的ダウンスケーリング DS から得られた詳細シナリオの降雨条件をもとに、降雨流出氾濫解析モデル(RRI)を用いて現在と将来における同一生起確率(1/100)規模の洪水による氾濫域を計算した。その結果、次に示す結果を得た。

#### (1) 統計的 DS による GCM 間の不確実性の評価

RCP の違い、GCM モデルの違いにより、特に中部沿岸域や南部において将来の降雨条件に不確実性が見られる。いずれのモデルも Ha Giang で降雨が少なく、Hue で多いという地域的傾向であった。将来気候においては、極端事象(大雨)ほど結果の幅が大きくなり、1/100 相当の降雨規模では、RCP8.5 は RCP2.6 の 1.5~2 倍程度の大きな予測結果を示している。

#### (2) 力学的 DS による詳細シナリオの作成

力学的 DS の結果では、夏季(6~8月)では南部において、冬季(10~12月)では中部海岸部において降雨量の増加を示した。北部の Ha Giang では豪雨の発生頻度の減少、一方で Hue, Vinh Yen では増加を示した。

#### (3) 将来の洪水予測の変化

Hue における浸水域と浸水深の計算結果より、1m 以上の浸水域の拡大、また、4m 以上の浸水箇所を示した。

## 4 フィリピン・ダバオ川流域の降水の温暖化影響

フィリピン・ダバオ川流域は、図-19 に示されるように、ミンダナオ島中央部の、流域面積 1760km<sup>2</sup> の比較的小さな流域である。図-20 に示された地形にみられるように、ミンダナオ島には西岸と東岸および中央部に山脈が走り、ダバオ川流域は中央の山脈に沿って流れている。また、この地域は、夏季は西風モンスーン、冬季は東風モンスーンが支配的となることから、海岸沿いの山脈の影響を強く受ける。実際には、西風モンスーンが流域付近まで入るために、夏季に降水量が多い(図-20 参照)。

### 4.1 力学的ダウンスケーリングの結果



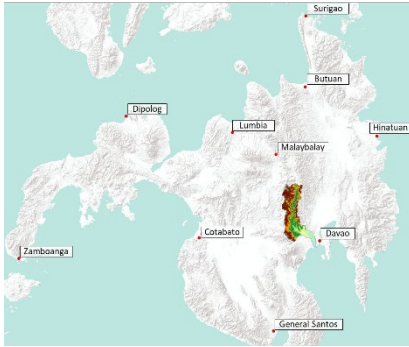


図-19 ミンダナオ島におけるダバオ川流域と雨量計地点

今回バイアス補正を行う場合の基準となる観測雨量として、Chirps (Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations)<sup>11</sup>衛星雨量を用いた。ダバオ川流域には地上雨量計が河口付近の1点しかないため、雨量計の観測値を補間しても、流域雨量の分布を正しく再現できない可能性がある。Chirps 衛星雨量は、赤外衛星データから求めた雨量分布を地上雨量計で補正していることから、値と水平分布について雨量計よりも優れた値が期待できる。

図-20 は RCM の計算領域である。RCM として Weather Research and Forecasting model (WRF)<sup>12</sup>を用いた。水平解像度は 5km、鉛直 40 層である。積雲パラメタリゼーションは用いないこととした。

図-21 は力学的ダウンスケーリングの結果による流域平

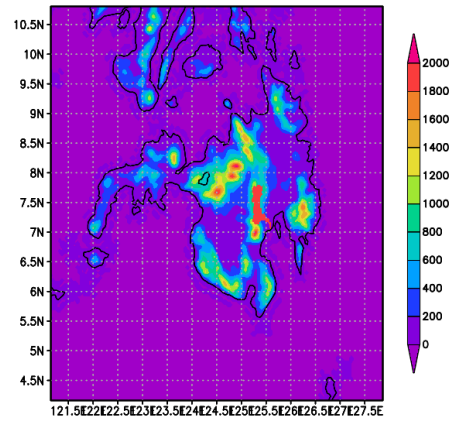


図-20 ダバオ川流域を対象とした WRF モデル領域。左は 15km メッシュ、右は 5km メッシュ領域。色は地形を表す。右中央の赤領域はダバオ川流域。

均月降水量である。左列は MRI-AGCM3.2H の RCP8.5 シナリオをダウンスケーリングした結果である。上段のバイアス補正前の結果は、観測値に比べてやや過大であるとともに、年最大値が現れる月が観測と異なっていた。また、過去気候では夏季の7月～9月の降水量がその前後の月と比べて小さくなっていた。この結果をバイアス補正したものが、左列下段の図である。過去気候の結果は、観測値と非常に良く一致しているが、将来気候では7月～9月の降水量が過去気候よりも大きい値となった。

図-21 右列は MRI-AGCM3.2H の RCP2.6 シナリオをダ

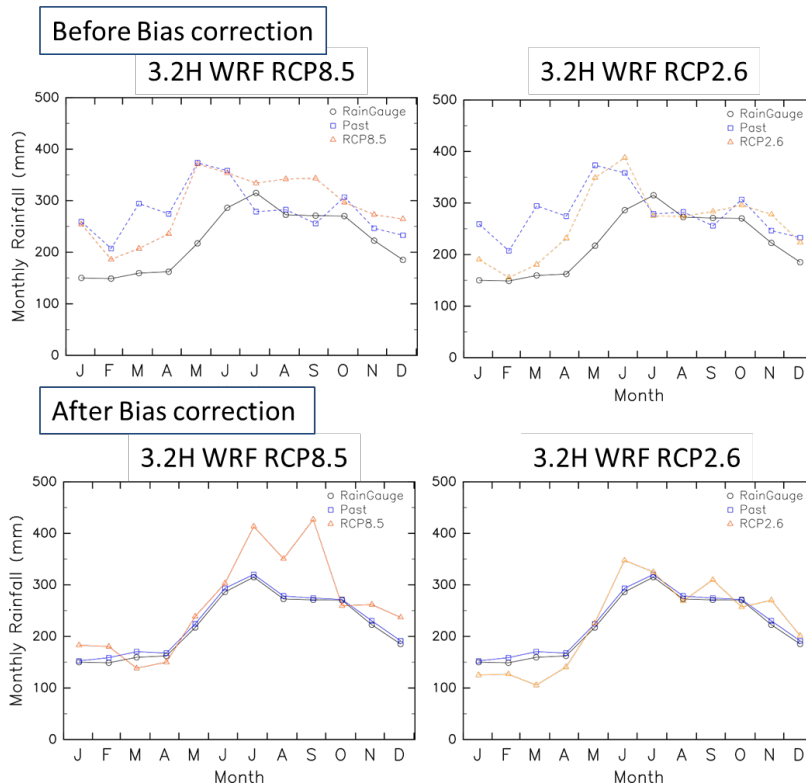


図-21 ダバオ川流域平均降水量の季節変化。黒線は Chirps 衛星雨量、青線は過去気候、赤線は将来気候である。上段が補正前、下段がバイアス補正後である。左は RCP8.5、右は RCP2.6 をそれぞれ境界条件に用いたものである。



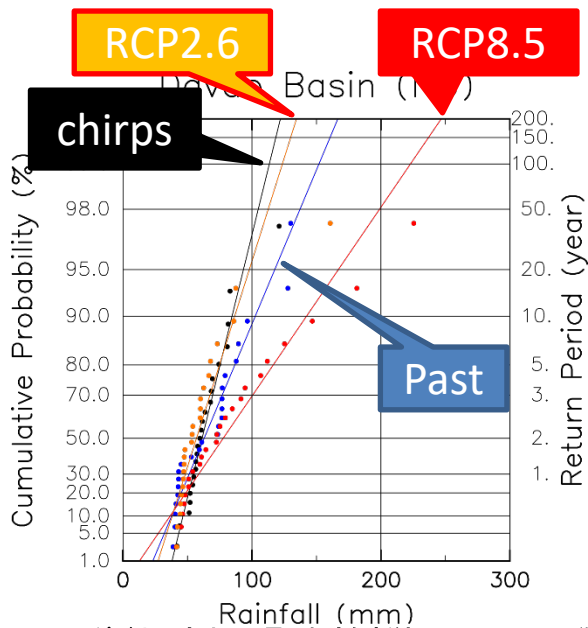


図-22 ダバオ川流域日雨量の頻度解析結果。黒はChirps衛星雨量、青は過去気候、赤は将来気候 RCP8.5、オレンジは RCP2.6 である。

ウンスケーリングした結果である。上段の補正前の値は、RCP8.5 と同様に特に1月から6月までが観測に対して過大評価であった。バイアス補正後の将来気候の値は過去気候に比べて6、9、11月の雨量がやや多く、1~4月の雨量が小さかった。冬季の雨量は、夏季に比べて元々小さい値であるが、RCP2.6 ではさらに減少するため、将来渇水リスクが高まる恐れがある。

なお、MRI-AGCM3.2S のダウンスケーリング結果は、バイアス補正後の夏季雨量の現在と将来の差が非常に大きなものになってしまった。その原因として、GCM 自身が持つバイアスの影響が大きいと考えられた。

図-22 は、ダバオ川流域の年最大日降水量の頻度解析

の結果で、MRI-AGCM 3.2H の過去気候と将来気候 RCP8.5 と RCP2.6 を対象としたものである。なお、頻度解析に用いる降水量を日雨量としたのは、ダバオ川流域が小さく、1 日程度で降水が流出してしまうため、流出量と日雨量の相関が高いためである。

今回の解析では、過去気候とChirps衛星雨量の結果が一致しなかった。その原因として、年最大雨量をもたらす豪雨事例が、モデルの中では観測に比べて水平規模が大きかったことが考えられる。バイアス補正は格子点毎に実施しているため、年最大豪雨の水平規模が異なると、流域平均雨量は一致しない。

頻度解析の結果の中で、過去気候と将来気候 RCP8.5 を比較すると、将来極端雨量は増加することがわかった。50年確率雨量は137mmから200mmと、50%以上増加した。一方、将来気候の RCP2.6 では極端雨量は過去気候に比べて減少することを示しており、50年確率雨量は過去気候の137mmから113mmと20%近く減少した。これらの結果は、図-4の月平均雨量の結果と直感的に必ずしも一致するものではないことに注意が必要である。

今後は、これらの降水量データを水文流出モデルに導入して、流出計算を行い、洪水氾濫リスク等の検証を行う予定である。

#### 4.2 統計的ダウンスケーリングの結果

将来の水災害リスクの評価における GCM の予測方法自体に内在する不確実性を評価するため、統計的ダウンスケーリングを行った。手法としては、DIAS<sup>®</sup>を利用する方法も用いた。

選択した上位6つのモデルを対象に、降雨の統計的バイアス補正とダウンスケーリングを行い、ダバオ川流域を対象とした確率降雨の将来変化を RCP2.6, RCP8.5 で比較した。バイアス補正には PAGASA より提供されたミンダナオ島内

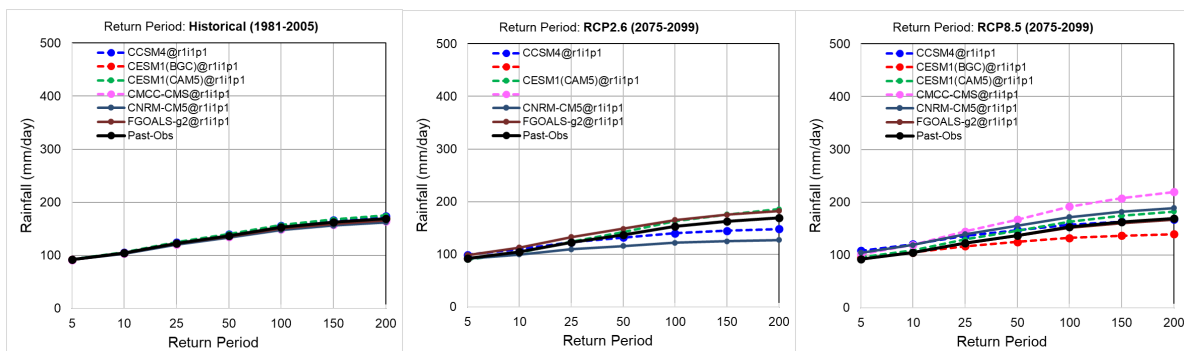


図-24 ダバオ川流域を対象とした確率降雨(左: 現在気候(1981年~2005年), 中: 将来気候 RCP2.6 (2075年~2099年), 右: 将来気候 RCP8.5 (2075年~2099年)), 図中の黒線は過去のダバオ側流域平均の観測降雨での値を示し、他の線は選択された6つのモデルを示す。なお、CESM1(BGC)とCMCC-CMSではRCP2.6では出力が無いため図中には表示していない

10 地点の地上観測データをティーセン分割し、ダバオ川流域内平均の雨量データを作成し使用した。バイアス補正の期間は、力学的ダウンスケーリングに合わせ現在気候、将来気候ともに 25 年とした。なお、力学的ダウンスケーリングでは MRI-AGCM3.2S 現在気候(1979 年～2003 年)と将来気候 RCP2.6, RCP8.5(2075 年～2099 年)の各 25 年間としているが、統計的ダウンスケーリングでは CMIP5 が可能な現在気候(1981 年～2005 年)と将来気候 RCP2.6, RCP8.5(2075 年～2099 年)の各 25 年間とした。CMIP5 はモデル毎に複数のアンサンブル計算が行われているが、本解析では r1i1p1 を対象とした。結果を図-24 に示す。図の左が現在気候(1981 年～2005 年)におけるバイアス補正後の確率降雨、真ん中が将来気候 RCP2.6(2075 年～2099 年)におけるバイアス補正後の確率降雨、右が将来気候 RCP8.5(2075 年～2099 年)におけるバイアス補正後の確率降雨を示す。図中の黒線は過去のダバオ側流域平均の観測降雨での値を示す。

図-24 より、選択された 6 つのモデルのうち、RCP2.6 では将来 2 つのモデル(CESM1(CAM5) と FGOALS-g2)が増加傾向、2 つのモデル(CCSM4 と CNRM-CM5)が減少傾向を示した。なお、CESM1(BGC)と CMCC-CMS は RCP2.6 では出力されていないため図中には表示していない。RCP8.5 では将来 5 つのモデル(CCSM4 , CESM1(CAM5), CMCC-CMS, CNRM-CM5, FGOALS-g2)が増加傾向、1 つのモデル(CESM1(BGC))が減少傾向を示した。例えば 100 年確率降雨に着目すると、過去の観測(黒線)は 150mm/day であるのに対し、RCP2.6 の増加傾向の 2 つのモデル CCSM4 と CNRM-CM5 は 165mm/day であった。RCP8.5 では、増加傾向を示す 5 つのモデルのうち CMCC-CMS が 192mm/day と最も大きな値となった。減少傾向を示すモデルでは RCP2.6 では CNRM-CM5 で 122mm/day, RCP8.5 では 132mm/day となった。

また、FGOALS-g2 のように RCP2.6 では 100 年確率降雨で 165mm/day であるが、RCP8.5 では 151mm/day と RCP8.5 で減少傾向を示すモデルもあった。

以上のことから、RCP8.5 は RCP2.6 と比較し 将来の確率降雨は増える傾向にあるものの、モデルによっては逆の挙動を示すなど確率降雨の将来変化の不確実性が高いことが示された。

### 4.3 流出洪水解析

フィリピン・ダバオ川流域を対象に降雨流出氾濫(WEB-RRI)モデルを構築すると共に、より詳細な浸水状況を把握するために、バラングイスケールの RRI モデルを構築した。そして、前述の力学的ダウンスケーリング結果を用いて将来

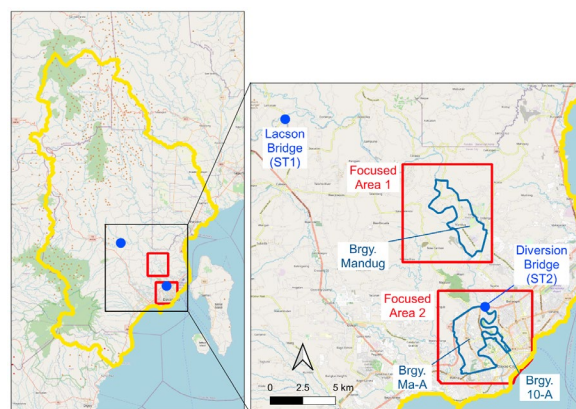


図-25: WEB-RRI モデルによる流域スケール(左図の黄色枠線)と RRI モデルによるバラングイスケールモデル(右図の赤色枠線)の概要図。

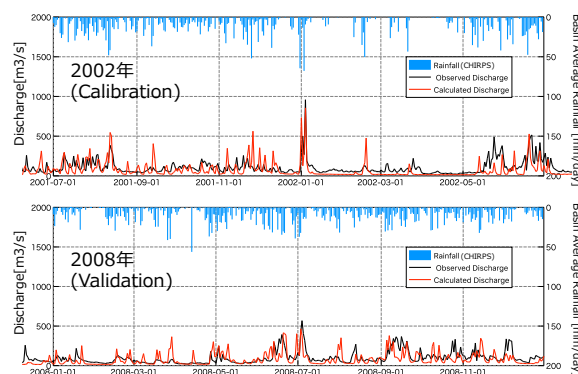


図-26 Lacson 地点における WEB-RRI モデルパラメータのキャリブレーションおよび検証結果。

の洪水被害リスクの推定を行った。

本検討では流域スケールとバラングイスケールの 2 種類のモデル構築を行った。流域スケールでは、ダバオ川流域のみではなく他の流域からの洪水流入も考慮し、ダバオ川流域周辺の流域を含むエリア(流域面積 3,644 km<sup>2</sup>)を MERIT Hydro データを用いて 6s 格子(約 180m)モデルを構築した。バラングイスケールに関しては、より詳細な洪水状況を把握するために 3 つのバラングイ(Mandug, Ma-A, 10-A)を対象に IfSAR データを用いて 40m 格子のモデルを構築した。各モデルの領域や流量観測点を図-25 に示す。モデルの再現性に関しては、対象エリアは現地雨量データが乏しいことから CHIRPS の衛星雨量データを用いて Lacson 地点(図-25 の ST1)における計算流量と実測流量を比較することで、WEB-RRI モデルの河道・斜面粗度係数等のパラメータを同定した後、2008 年の洪水イベントで同定したモデルの妥当性を確認した。その結果、対象イベントのピーク流量や波形を再現できるモデルが得られた(図-26)。



2 国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発

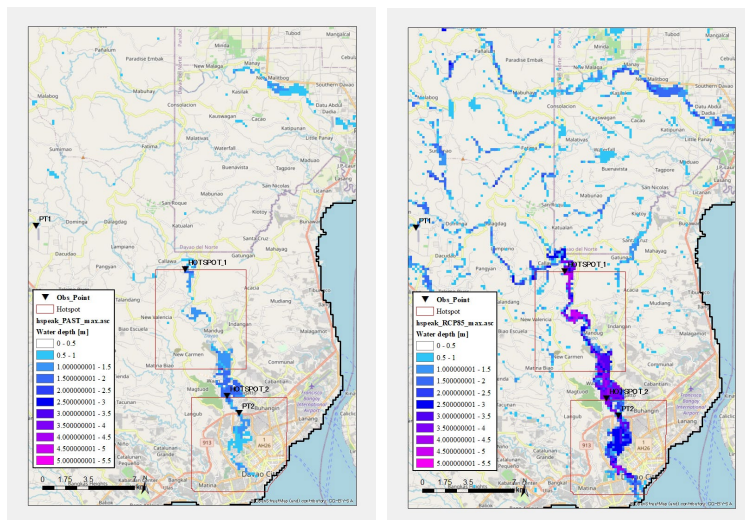


図-27 WEB-RRI モデルによる流域スケールの過去気候と将来気候における最大浸水深。

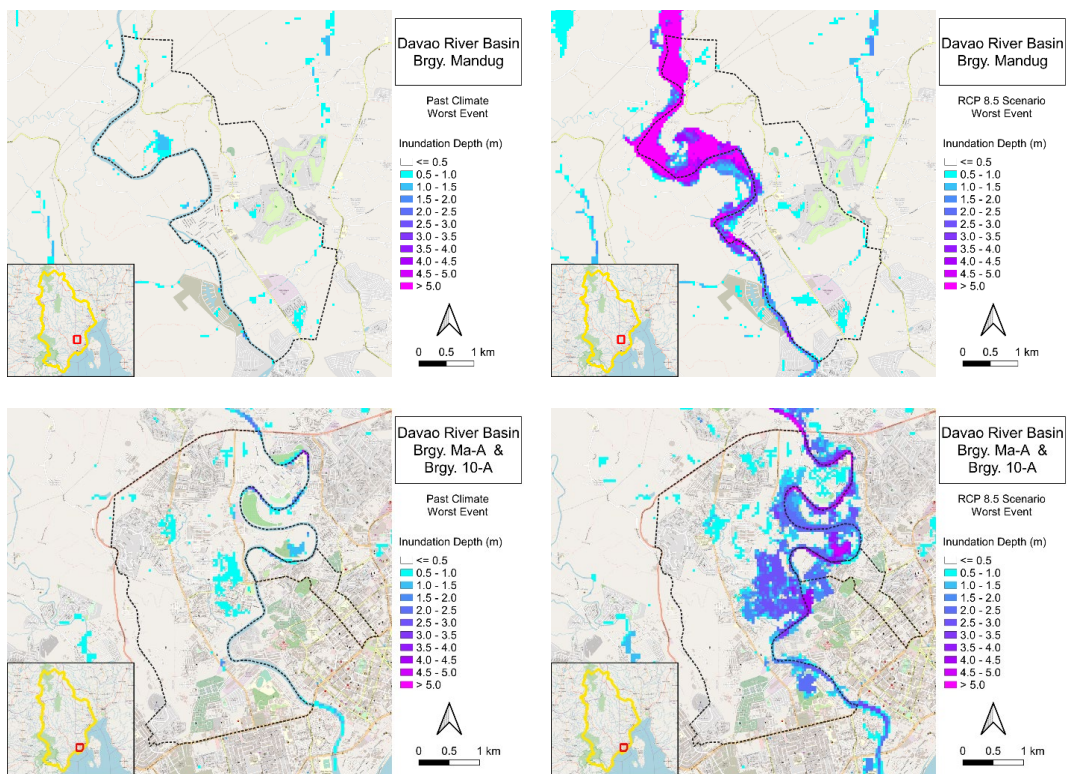


図-28 RRI モデルによるバラングスケールの過去気候と将来気候における最大浸水深。

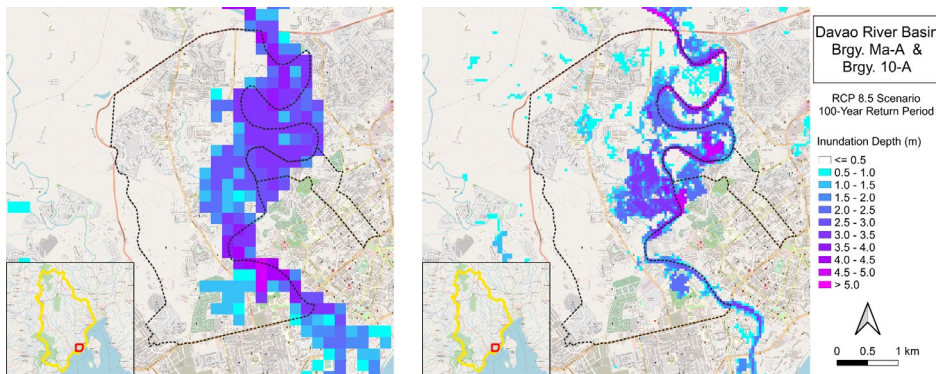


図-29 流域スケールモデル(左図)とバラングスケール(右図)の最大浸水深。

流域スケールモデルからバラングスケールモデルへのデータの受け渡し方法として、流域スケールモデルで得られた計算流量をバラングスケールモデルの上流端境界条件として与えた。

次に、前述の力学的ダウンスケーリング結果を用いて将来の洪水被害リスクの推定を行った。具体的には、過去気候と将来気候における洪水被害リスクの比較を行うために、過去気候 25 年間(1979～2003 年)、RCP8.5 シナリオの 25 年間(2075～2099 年)のうち、それぞれ 24 時間降雨量が最大となった年のイベントを対象とした。なお、過去気候のダバオ流域における年最大 24 時間降雨量は 127.7 mm、将来気候は 225.4mm であり、降雨パターンも異なる。まず、流域スケールの最大浸水深の計算結果を図-27 に示す。将来気候は過去気候より年最大 24 時間降雨量が約 1.8 倍と大きいことや降雨がダバオ川流域に集中していることから、過去気候に比べ将来気候では浸水域が広くかつ浸水深が深いことが分かる。これらの得られた計算流量を用いてより詳細なバラングスケールモデルによる最大浸水深の計算結果を図-28 に、流域スケールモデルとバラングスケールモデルの計算結果を比較した図を図-29 に示す。図から、より詳細に浸水状況が表現できていることが見て取れる。過去気候の場合、対象とするバラング地域においてはいずれも河川からの氾濫は発生せず、河川沿いの窪地等に降雨の集積によって浸水深が 0.5m 程度の浸水が見られた。将来気候では、いずれの地域においても河川からの氾濫が発生しており、上流の Mandug エリアでは河川敷に 5.0m 以上の浸水が発生しているが、市街地は高台になっていることからほとんど浸水は見られなかった。一方、下流の Ma-A エリアでは、河川周辺やエリアの中心に位置する市街地が 2.0m 以上の浸水が発生することが分かった。なお、過去・将来気候におけるピーク流量の差としては、Mandug エリアの上流において、過去気候 1,087m<sup>3</sup>/s、将来気候 2,883m<sup>3</sup>/s と約 2.6 倍の差であった。

以上の検討から、2つのスケールの異なる WEB-RRI モデルと RRI モデルを組み合わせることで全体の水収支を考慮しつつより詳細な浸水状況を表現することが可能となった。そして、過去気候および将来気候における洪水シミュレーションを実施し、将来気候において浸水が発生するエリアや浸水深等の洪水情報を抽出することが可能となり、将来への洪水被害リスクの軽減に資する知見が得られた。

## 5. インドネシア・ソロ川流域の降水の温暖化影響

インドネシアのソロ川流域は、図-30 に示されているジャワ島中部から東部に位置している。この地域は、南緯

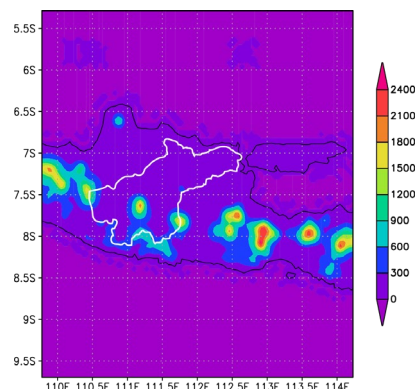


図-30 インドネシア・ソロ川流域を対象とした WRF モデル 5km メッシュ領域。白線は流域界、色は地形を表す。

7～8 度に位置しており、北はボルネオ島との間に挟まれたジャワ海、南はインド洋に面している。ソロ川流域は図-30 に白線で示されている。島にはいくつかの火山が東西に連なり、3 つの火山に挟まれた 2 つの支流が北に流れ、それらが合流して東に流れてジャワ海に注ぐ。この地域は、熱帯雨林であると同時に、海洋の影響を強く受ける点の特徴である。

### 5.1 力学的ダウンスケーリングの結果

今回の対象となるジャワ島のソロ川流域は、比較的狭い島の中の地域であるため海洋の影響を強く受けること、海洋の海面温度が高く大量の水蒸気量をもたらされること、島の上では日中地表面温度が高まることで激しい日変化による対流が発生すること、などが考えられる。

次に図-31 にソロ川流域内の雨量計観測地点における日雨量の出現頻度を示す。最初は図-30 とは異なり、外側格子間隔 15km、内側格子間隔 5km の一般的なモデル設定で予備実験を行った。しかし、図-31 の通り雨量計観測値と計算値が最初うまく一致しなかった。そこで、WRF モデル設定の中で、降水特性に大きく影響する積雲パラメタリゼーションのスキームを何種類か (Kain&Fritsch, Tiedtke, Grell-Freitas, Grell 等) 試すことによって、適切な降水特性が得られるよう調整を試みた。なお、積雲パラメタリゼーションは、粗い格子間隔のモデルでも降水を生じさせるために用いるものであるが、降水特性にバイアスを生じさせる作用もある。そこで、今回は対流パラメタリゼーションを用いない計算も試した。このような特徴的な対流現象を既存の積雲パラメタリゼーションでうまく表現することができなかったが、積雲パラメタリゼーションを用いない方法で計算したところ、雨量強度別出現率が雨量計と良い一致を示した(図-31 の右下のパネル)。そこで、この方法でダウンスケーリングを行うこととした。

図-32 に、ソロ川流域平均降水量の季節変化を示す。上の図がバイアス補正前、下がバイアス補正後である。バイア



2 国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発

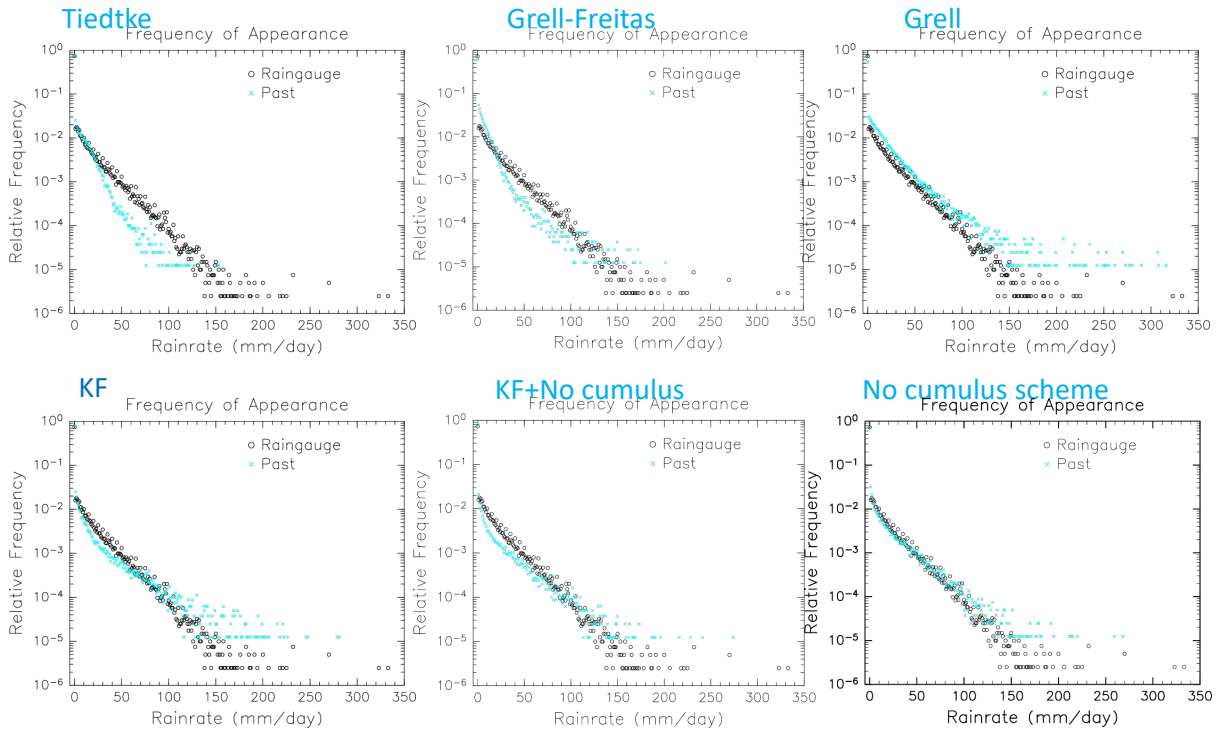


図-31 ソロ川流域内の雨量計観測点における日雨量の出現確率、黒は雨量計、青は力学的ダウンスケーリング(MRI-AGCM3.2S 過去気候)の結果。期間は1979~1983年の5年間。各図の左上の文字は、積雲パラメタリゼーションの種類を示す。右下の図は、5kmメッシュ領域のみで計算し、それ以外は15kmの外側領域と5kmの内側領域の2重ネスティングで計算した。

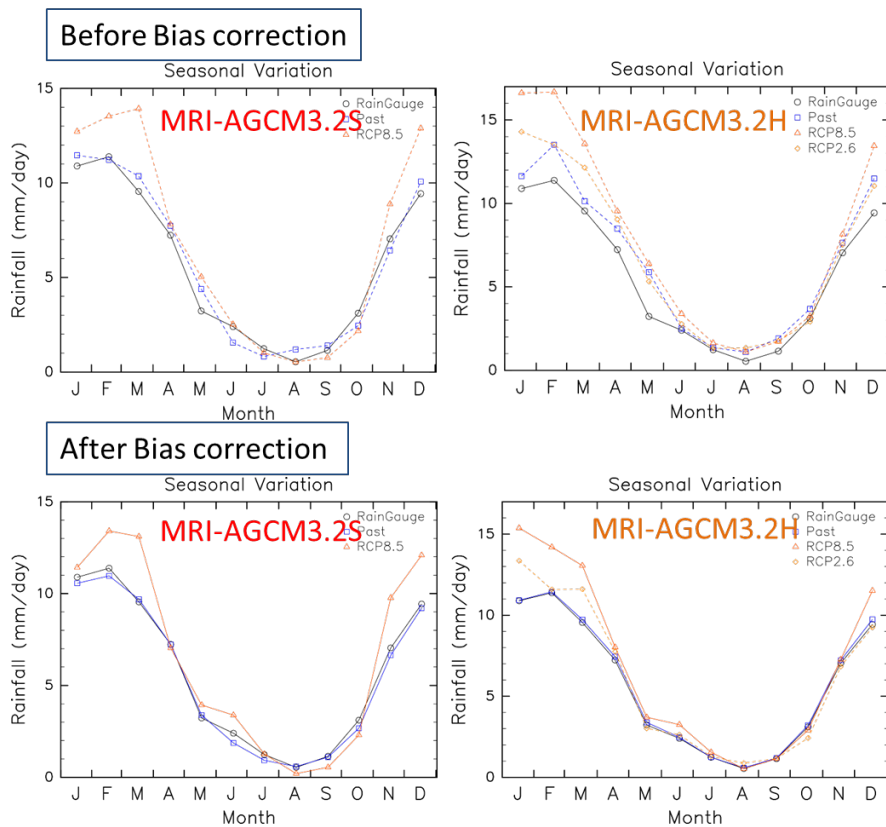


図-32 ソロ川流域平均降水量の季節変化。上図はバイアス補正前、下図はバイアス補正後である。左はMRI-AGCM3.2S、右はMRI-AGCM3.2Hのダウンスケーリング結果である。黒は雨量計、青は過去気候、赤実線は将来気候RCP8.5、赤破線はRCP2.6である。

ス補正前の上図においても、過去気候の値は雨量計観測値とよく一致しており、今回のダウンスケーリング計算が対象

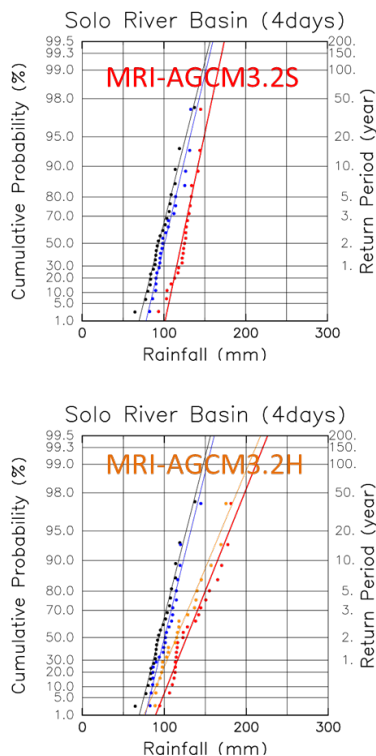


図-33 ソロ川流域平均4日降水量の頻度解析。上図はMRI-AGCM3.2S、下図はMRI-AGCM3.2Hである。黒は雨量計、青は過去気候、赤実線は将来気候 RCP8.5、赤破線は RCP2.6 である。

地域の降水現象をよく再現していることを表している。この地域では、11月から3月が雨季であり、5月から10月が乾季と増加することを示している。また、乾季については5月～7月は将来やや増加し、8月～10月は減少する傾向を示している。乾季においては、元々降水量が少ないために、わずかな違いが増加や減少に転じてしまう傾向となっている。

図-32 下のバイアス補正後の図を見てみると、バイアス補正前に比べて大きな変化はないが、過去気候が観測値と一致したため、将来における増減傾向がバイアス補正前より

もわかりやすく表現された。

将来気候 RCP8.5 シナリオでは、MRI-AGCM3.2S と 3.2H で多少の違いはあるものの、基本的にはよく似た分布となった。すなわち、12月～3月の雨季には将来雨量が増加傾向であった。また、乾季では、前半の5月～7月には将来やや増加傾向にあり、乾季后半の8月～10月に減少傾向となっていた。雨季の降水量は元々大きいところ、将来さらに増加するため洪水リスクが増大する可能性が考えられる。乾季には、後半の8月～10月にかけては、元々降水量が少ないところでさらに減少に転じるため、渇水の可能性が増大することが考えられる。

図-32 右の破線で描かれた結果は、MRI-AGCM3.2H の RCP2.6 の結果である。低位安定化シナリオ (RCP2.6) は、高位参照シナリオ (RCP8.5) と過去気候との中間の値となっていることが分かった。この地域では、RCP2.6 では洪水渇水リスクともに RCP8.5 の場合よりも抑制されることが示唆された。

図-33 は、ソロ川流域平均年最大4日降水量の頻度解析結果である。4日降水量としたのは、ソロ川流域の大きさから、下流の流量が4日雨量との相関が高いためである。図-33 上図のMRI-AGCM3.2S、下図の3.2Hともに、将来気候の極端雨量は過去気候に比べて増大する結果となった。一方、増加幅は3.2Sと3.2Hでは異なっており、3.2Hの方が大きかったことから、極端雨量の将来における増加幅には不確実性が残ることを示している。増加幅は、3.2Sでは50年確率雨量では過去気候の140mmから160mmに増加し、3.2Hでは140mmから200mmに増加した。月平均降水量が雨季に増加することと合わせて、この地域では将来洪水リスクの増加の恐れが考えられる。

### 5.2 WEB-RRI モデルの開発

ソロ川流域は、ジャワ島では最長の河川で、600kmの長さを持つ(図-34 参照)。源流は Lawu 山と Sewu 山などの南

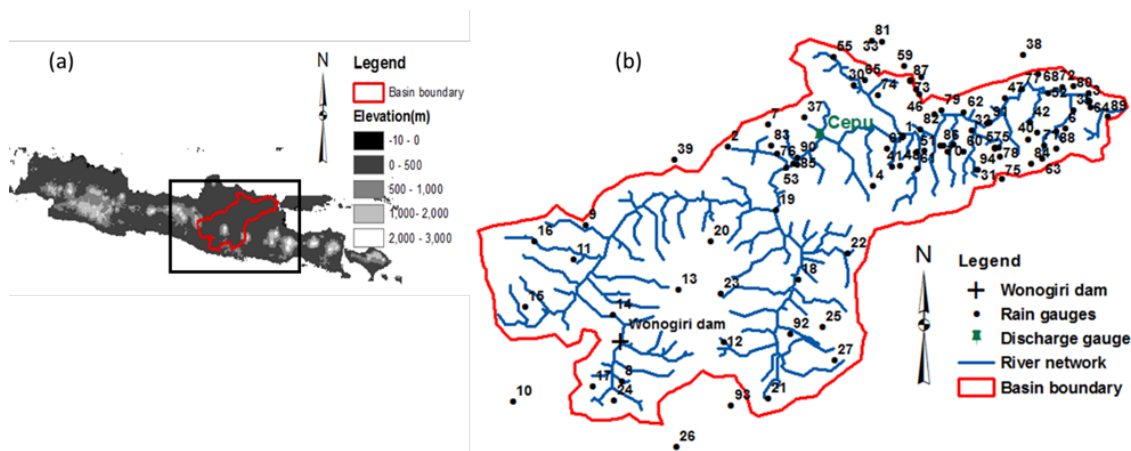


図-34 ソロ川流域の位置と観測点、(a)ジャワ島地図とソロ川流域の位置、(b)ダム、雨量計、Cepuの流量観測点。

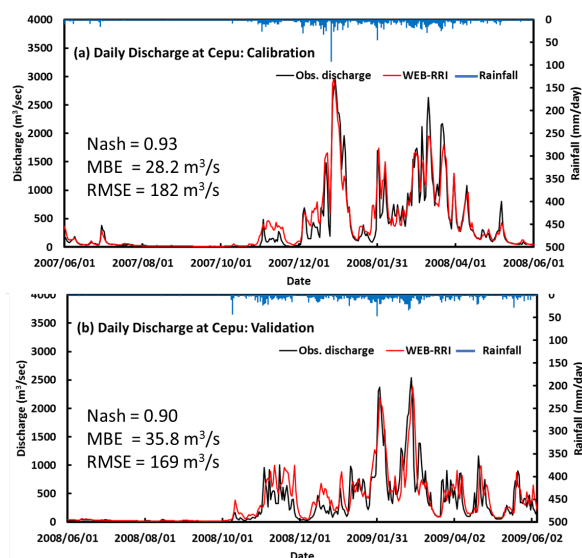


図-35 Putapaula 観測地点における観測流量と計算流量の比較、(a) 2007～2008 年のモデル校正期間、(b) 2008～2009 年の検証期間。

から始まり、中部ジャワ州と東ジャワ州を流下し、スラバヤでジャワ海に注いでいる。流域面積は約 16000 km<sup>2</sup>、年平均降水量は約 2000 mm である。上流の Wonogiri ダムは 7.3 億 m<sup>3</sup> の貯水量を持つ多目的ダムである。流域では、主に稲作やコーヒーなどの換金作物の農業が行われている。過去 30 年農業の発展は大きな進歩を見せているが、流域の水文過程に関してはほとんど研究されていない。

デジタル標高モデル、流向、積算面積等の地形データは、USGS が発行している HydroSHEDS と呼ばれるスペースシャトルによる観測データを用いた。HydroSHEDS は、NASA による Shuttle Radar Topography Mission (STRM) による 3 秒解像度の観測を基にしている。本研究では、元の SRTM データから水文モデル用に整備された 15 秒間隔データ(約 450m 解像度)を用いた。土壌種類、土地利用、植生データは、地表・地中・河川を計算する上で重要である。土壌分布は、FAO の 9km 解像度データを用いた。また、このデータセットに付随する、地表・植物根層・地下水層における各飽和透水係数、飽和土壌水分量、残余土壌水分量、Van Genuchten パラメータ等も用いた。土地利用データは、USGS の 1km 全球データを用いた。Sib2 モデルは USGS の土地利用と植生分布を再構成して利用する。Sib2 モデルは、地表面エネルギー・水・炭素収支過程の推定に、葉面積指数(LAI)と光合成有効放射(FPAR)も必要とする。本研究では、Terra 衛星の MODIS 全球プロダクトの MODI15A2 による 8 日合成した 1km 解像度の LAI と FPAR を用い、モデル格子点に変換して植生生物気候を求めた。

気温・比湿・風速・下向き短波放射・長波放射・地上気圧等

の気象学的強制力は、JRA55 を利用した。JRA55 は洗練されたデータ同化システムと過去の全球観測データを用いて気象庁によって作成された、日本における第 2 世代の全球再解析データである。データ期間は、ラジオゾンデ観測が日常的に始まった 1958 年から 55 年間であり、世界の半世紀をカバーする最も高解像度で均一なデータセットの一つである。JRA55 は、気温・比湿・風速・地上気圧は 3 時間毎 0.125° 間隔であり、下向き放射は 0.56° 間隔で提供される。これらのデータは、モデルに合わせて 450m 間隔 1 時間毎に線形補間して与えた。

WEB-RRI モデルの校正のため、歴史的洪水イベントを含む 2007 年 6 月～2008 年 5 月の期間の水文応答を計算した。図-28 は、モデル校正期間の 2007 年 6 月 1 日～2008 年 5 月 31 日までと、モデル検証の 2008 年 6 月 1 日～2009 年 5 月 31 日について、観測日流量と WEB-RRI モデルによる計算値を比較したものである。なお、ウォノギリダムからの流量を上流端の境界条件として使用している。2007 年には、1 月初めと 3 月に二つの洪水ピークがあった。モデルは Cepu 観測点の値について、洪水応答を十分良く再現し、Nash 値は 0.93、MBE は 28.2 m<sup>3</sup>/s、RMSE は 169 m<sup>3</sup>/s であった。特に 6 月から 10 月の乾季の基底流量と、雨季のピーク流量が良く校正されていた。検証期間の土壌や河川パラメータは一定としたモデルを用いて 2008 年について計算し、同じ地点の観測流量と比較した。検証期間についても、結果は観測と良く一致しており、Nash 係数は 0.90、MBE は 35.8 m<sup>3</sup>/s、RMSE は 169 m<sup>3</sup>/s であった。さらに、計算された洪水期間のピーク流量や、乾季の低水流量も WEB-RRI モデルの検証期間でうまく再現された。

さらに、20 年間のソロ川流域の水文応答について計算し、長期間のモデル検証を行った。モデルによる計算値は観測値と良く一致し、モデル成績もよい値を示した(Nash = 0.52, MBE = 82 m<sup>3</sup>/s, RMSE = 201 m<sup>3</sup>/s)。

図-36 は WEB-RRI モデルの計算結果である。用いた雨量データは、MRI-AGCM3.2H の過去気候と将来気候 RCP2.6、RCP8.5 を力学的ダウンスケーリングし、バイアス補正したものである。11 月～3 月の雨季は、将来月雨量が増加するため、流量も増加している。一方、月雨量が将来減少する乾季後半の 8 月～10 月は、流量も減少している。Cepu では RCP2.6 では 11 月～12 月も過去気候より流量が減少しており、渇水リスクが懸念される。また上流域の Wonogiri dam における流量は、RCP2.6 と 8.5 の両シナリオで 10 月～12 月に減少傾向にある。

図-37 は地点における全期間の日流量について、横軸を過去気候、縦軸を将来気候として対比させた図である。

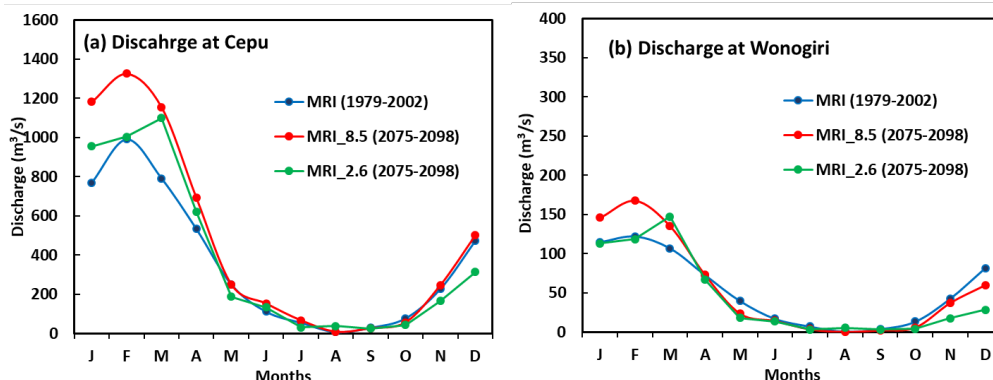


図-36 ソロ川流域のWEB-RRI モデル計算による地点流量。(a) 中流の Cepu 地点、(b) 上流の Wonogiri dam.

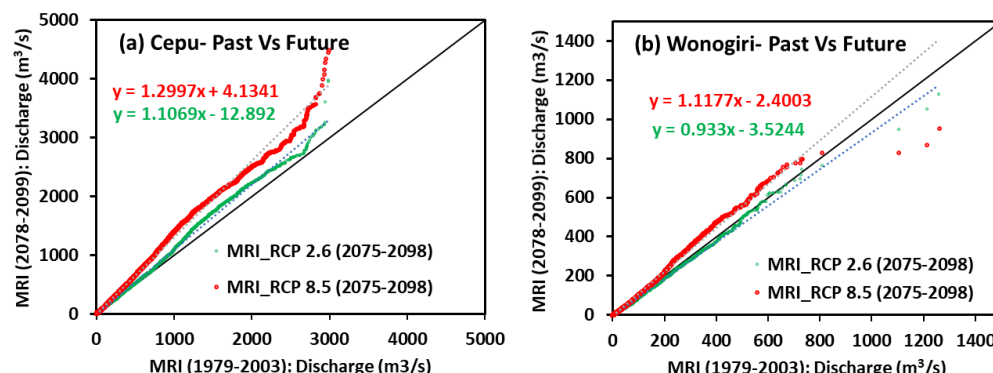


図-37 ソロ川流域地点の過去と将来の流量対比図。(a) 中流の Cepu 地点、(b) 上流の Wonogiri dam.

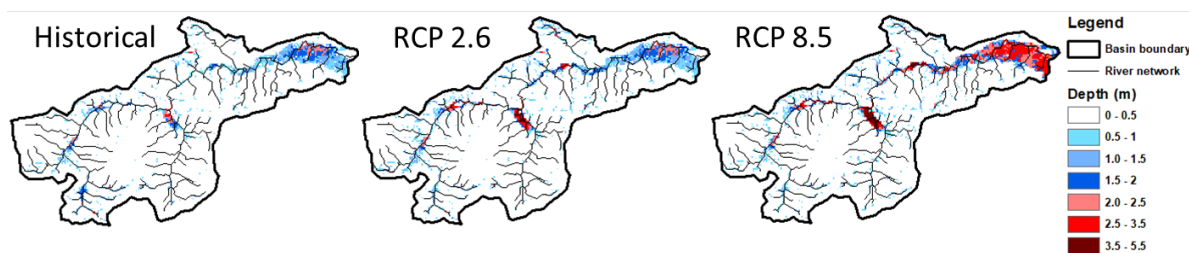


図-38 ソロ川流域の最大浸水深の比較。左から、過去気候、RCP2.6、RCP8.5。

Cepu 地点では、将来の流量は全般として増加し、特に RCP8.5 の日流量の上位値は大幅に増加している。これにより、将来洪水規模や頻度が高くなることが推測される。Wonogiri 地点では RCP8.5 では全般的に増加、RCP2.6 では減少傾向にあることがわかる。

図-38 は WEB-RRI モデルによって計算された最大浸水深の分布である。図から最大浸水深や浸水範囲が増加していることがわかる。特に中流域や上流域で顕著である。また、RCP8.5 では浸水深が大幅に増加するが、RCP2.6 では変化は小さい。この結果に基づいて、温暖化適応策や影響の軽減策を立案し、温暖化における持続的発展を目指す必要がある。

### 5.3 ソロ川における湯水リスクの評価

ソロ川流域を対象に、分布型流出解析モデルである

BTOP モデルを構築し、Wonogiri ダムへの流入量を再現した<sup>13)</sup>。Wonogiri ダムはソロ川上流域に位置し、総貯水容量 7.35 億 m<sup>3</sup>、有効貯水容量 6.15 億 m<sup>3</sup>を有する洪水調節、灌漑および発電を主目的とする多目的ダムで、下流地域の約 300km<sup>2</sup>の農地に灌漑用水を供給している。BTOP モデルの定数の同定には、Wonogiri ダム上流ならびにその近傍の 3 地点で実測された日降雨量とダム管理者がまとめた日平均流入量(実測値)を用いた(図-39 参照)。

次に、気候モデルによる気候変動予測データを活用して、BTOP モデルで将来の水供給をシミュレートした。ここで用いた気候データは、創生プログラムにおいて計算した統計的ダウンスケーリングによるものである。水供給のシミュレーションは、貯水池への流入を計算する BTOP モデルと貯水池運用モデルとを組み合わせて実施した(図-40 参照)。貯水池運用モデルは、Wonogiri ダムの灌漑用水供給計画を参



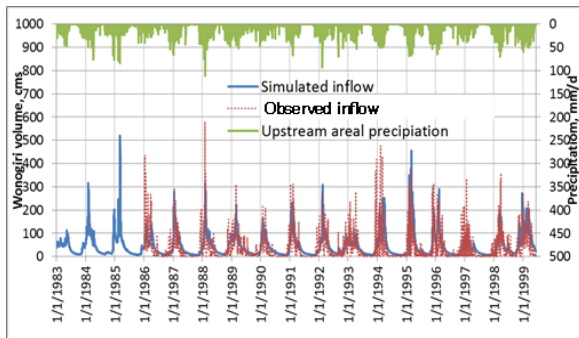


図-39 Wonogiri ダム流入量の実測値と計算値の比較

渇水リスク評価の概念図

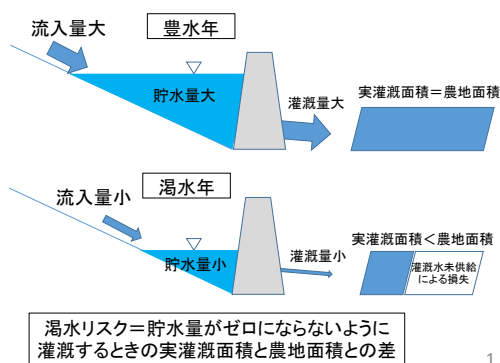


図-40 渇水リスク評価における実灌漑概念図

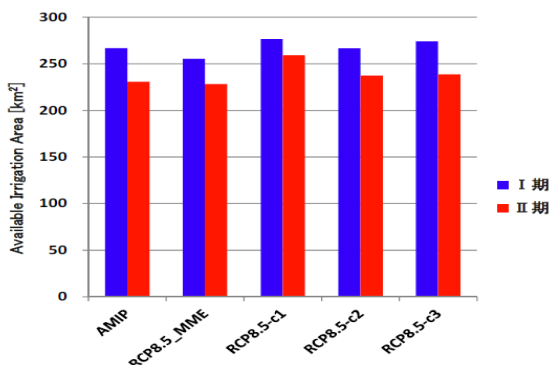


図-41 現在気候 (AMIP) と将来気候 (4つ SST) における平均灌漑面積の比較

考とし、放流量 (= 灌漑用水供給量と本川下流への維持流量の合計値) を設定し、日平均流入量と日平均放流量からダムの貯留量の変化を求めた。また、Wonogiri ダム下流域では、11月から2月までをI期(WET)、3月から6月までをII期(DRY)とし、各期当初のダムの貯水量に応じて灌漑区域を決定し、決定された灌漑面積に応じて灌漑用水を供給する計画となっている。

現在気候と将来気候における比較では、貯水池運用モデルで計算した貯留量に対応する灌漑面積を比較した(図-41参照)。現在気候再現計算と将来気候予測計算のそれぞれ25年間のI期・II期の灌漑面積を求めて、それらの平均

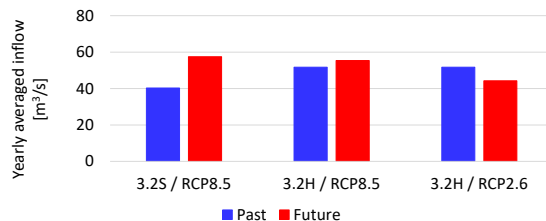


図-42 Wonogiri ダム年平均流入量の比較 (過去気候、将来気候)

値を比較した(図-41 参照)。I期(WET)における灌漑可能面積は、現在気候に比べ mme では 4% 減少するものの、c1,c2, c3 ではほぼ変わらないか微増が見られた。またII期(DRY)における灌漑可能面積は mme では 1% 減少するものの、c1 で 12%, c2, c3 では 3% 程度増加する。渇水リスクについては、将来的に低下する傾向が見られた。

さらに、5.1章で述べた力学的ダウンスケーリングによって得られた降水等の気候データを用いた渇水被害リスクの解析も行った。

過去気候と将来気候における、Wonogiri ダム年平均流入量を比較する(図-42)。3.2S / RCP8.5および3.2H / RCP8.5では将来、Wonogiri ダム上流域の年平均降水量が増加すると見込まれることから、年平均流入量も将来、増加する結果となった。一方、3.2H / RCP2.6では将来、Wonogiri ダム上流域の年平均降水量が減少すると見込まれることから、年平均流入量も将来、減少する結果となった。3.2H / RCP2.6のケースでWonogiri ダム上流域の降水量が減少する理由としては、将来風の吹き方が変わるため、ジャワ島付近の風の収束が弱まることが考えられる。ジャワ島付近の降水は、ジャワ島の北側からと南側からの風の収束によって雨域が形成されるが、特にインド洋からの南風が弱まるため、ジャワ島南部で降水量が減少するものと考えられる。

次に、半月ごとの流入量を比較する(図-43)。3.2S / RCP8.5では将来、乾期のうち8月~10月には減少するものの、雨期を中心に流入量が大きく増加することから、年平均でも大きく増加すると推定された。3.2H / RCP8.5では将来、11月、12月を中心に流入量が減少する一方、雨期の1月から3月にかけて流入量が大きく増加することから、年平均でも若干増加すると推定された。3.2H / RCP8.5では将来、11月、12月を中心に流入量が大きく減少する一方、雨期の流入量の増加は3月前半から4月前半に限られることから、年平均では減少すると推定された。

Wonogiri ダムへの流入量、Wonogiri ダムからの放流可

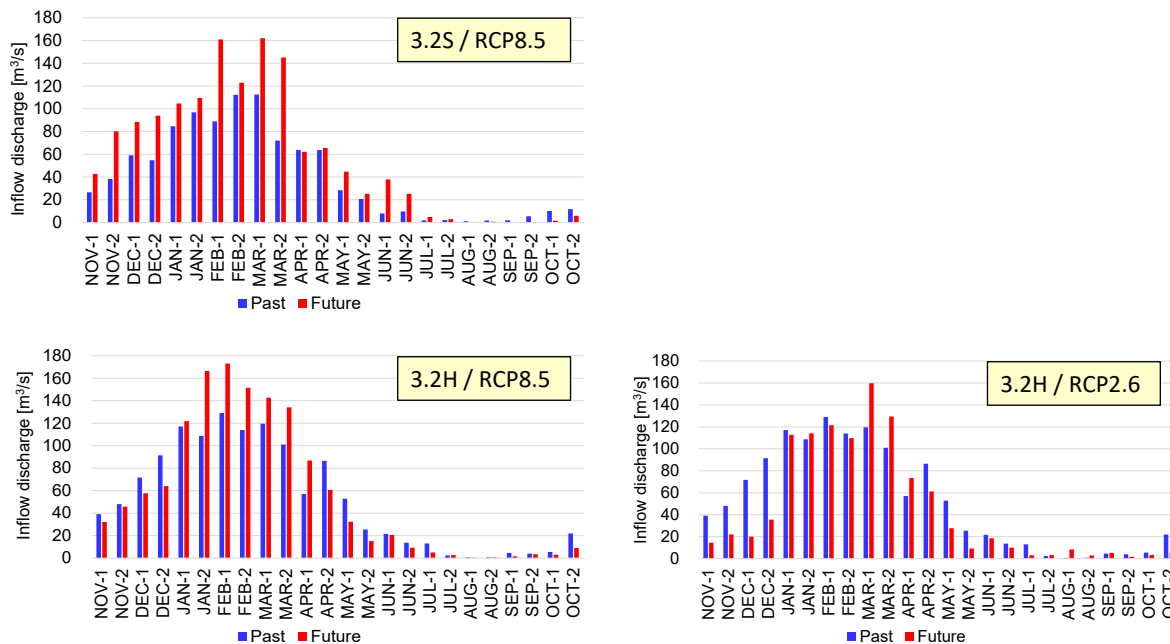


図-43 Wonogiri ダム半月平均流入量の比較(過去気候, 将来気候)

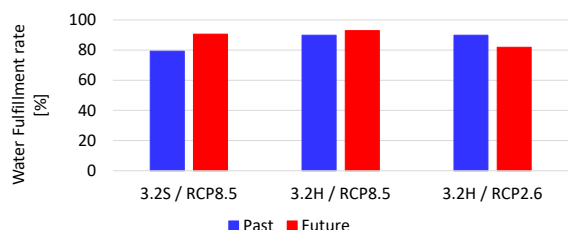


図-44 Wonogiri ダム下流取水地点における水充足率の比較(過去気候, 将来気候)

エネルギー、Wonogiri ダムの貯水量を半月単位で計算し、過去気候と将来気候における年間の水充足率を比較する(図-44)。3.2S / RCP8.5 では将来、年平均流入量が大きく増加することから、水充足率も 79.29% (過去) から 90.61% (将来) へと大きく増加した。3.2H / RCP8.5 では将来、年平均流入量が若干増加することから、水充足率も 89.88% (過去) から 92.93% (将来) へと若干増加した。3.2H / RCP2.6 では将来、年平均流入量が減少することから、水充足率も 89.88% (過去) から 81.84% (将来) へと減少した。3.2H / RCP8.5 では将来、11月、12月を中心に流入量が大きく減少する一方、雨期の増加は3月前半から4月前半に限られることから、年平均では減少する結果となった。以上より、RCP8.5 の排出シナリオでは将来、水充足率が向上する一方、RCP2.6 の排出シナリオでは、水充足率が低下するという対称的な推定結果が得られた。

Wonogiri ダム下流の灌漑区域では、11月から2月まで

をⅠ期(MT1)、3月から6月までをⅡ期(MT2)、7月から10月をⅢ期(MT3)とし、年間を通じて水稻を作付している。なお、水源が確保できない年については、Ⅲ期にキャサパ、コーンなどの裏作作物を作付けしている。過去気候、将来気候における年別、期別の水充足率を元に、作付け可能な面積を推定した結果を図-45に示す。なお、当該区域の水田の灌漑面積は、最大で24,492ha(2010 - 2015各年の計画値)である。作付け可能な面積は、過去気候ではⅡ期、Ⅰ期、Ⅲ期の順で広い結果となる。将来気候では、3.2S / RCP8.5 および3.2H / RCP2.6 のケースで、Ⅱ期、Ⅰ期、Ⅲ期の順で広い結果となる一方、3.2H / RCP8.5 のケースでは、Ⅱ期、Ⅲ期、Ⅰ期の順で広い結果となった。Ⅱ期の作付け可能な面積が広い理由は、雨期にダムに貯留した水を十分活用できるためと考えられる。Ⅰ期における作付け可能な面積の欠損は、11月、12月に貯水池への流入が十分回復せず、作付けを開始できる面積が限られたことによると考えられる。Ⅲ期における作付け可能な面積の欠損は、当該期は元々乾期作であり、Ⅲ期初頭にダムに貯留されている水量に応じて作付面積が抑制された結果と考えられる。将来気候における作付け可能な面積の推定値は、3.2S / RCP8.5 および3.2H / RCP8.5 のケースで過去気候における推定値を上回る一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは過去気候における推定値を下回る結果となった。3.2S / RCP8.5 および3.2H / RCP8.5 のケースでは、8月から10月にかけて貯水池への流入量が減少するにもかかわらず、ダムの貯留効果により将来、灌漑可能な面積の増大

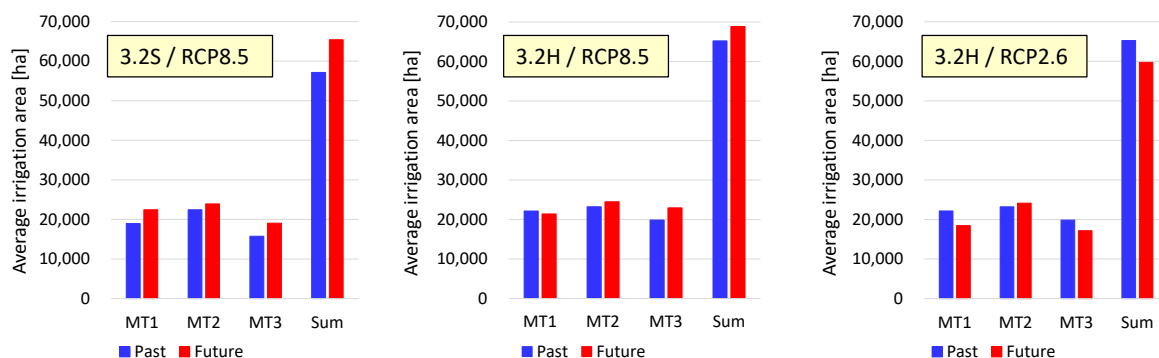


図-45 Wonogiri ダム下流灌漑区域における灌漑可能面積の比較 (I 期, II 期, III 期, 通年)

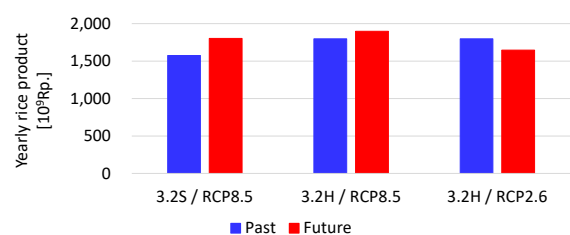


図-46 Wonogiri ダム下流灌漑区域における年間コメ出荷額の比較 (過去気候, 将来気候)

が予測される結果となった。

過去気候、将来気候におけるコメ出荷額を予測した結果を、図-46 に示す。ここで、単位面積あたりのコメ生産高は、Wonogiri ダム下流の灌漑区域の位置する 5 県 (Kab. Klaten, Kab. Sukoharjo, Kab. Wonogiri, Kab. Karanganyar, Kab. Sragen) における 2010 年 - 2014 年の実績値の平均より、1 ヘクタールあたり 5.865 トンとした。また、単位重量あたりのコメ価格は、農場出口で取引されるモミの形状のコメの取引価格で、インドネシア全土における 2015 年各月の価格の平均値より、1 トンあたり 4.70 百万ルピアを採用した。Wonogiri ダム下流の灌漑区域におけるコメ出荷額は、例えば 3.2S / RCP8.5 のケースでは、過去気候で 1.58 兆ルピアと予測されるのに対し、将来気候で 1.80 兆ルピアと予測され、渇水被害リスクは将来、低減するものと推定された。また、3.2H / RCP8.5 のケースでも、コメ出荷額は将来増大し、渇水リスクは低減すると推定された。一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは、過去気候で 1.80 兆ルピアと予測されるのに対し、将来気候では、1.65 兆ルピアと予測され、渇水被害リスクは将来、増大するものと推定された。

## 6. チャオプラヤ川流域

チャオプラヤ川流域の上流には、Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの 2 つ大きなダムがあり、流域内の灌漑面積は

この 2 つのダムの貯水量に大きく依存している。渇水ハザード評価は、BTOP モデルを用いて貯水池への流入を計算し、流況の変化を調査した。

各気候シナリオにおいて Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの貯水位から放流量を推定し、それを使って灌漑可能面積を算出した。なお、2011 年、2012 年時点で乾季の計画最大灌漑面積は 11,978km<sup>2</sup> であるが、ここでは将来の灌漑施設の拡充等も考慮し、計画最大値を超えても用水量から灌漑面積を算定することとした。調査地点は、タイ国の乾季における計画放流量は、Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値で規定されていることから Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値とした。考察にあたり、タイの気候特性は雨季と乾季がはっきり区別でき、12 月から 3 月まではほとんど雨が降らないことや、収穫量は雨季盛期の降水量と高い相関関係があることから雨季の流量にも着目することにした。

渇水リスク評価の指標として灌漑可能面積を比較した。計算期間(25 年間)における灌漑可能面積の平均値、25%値、75%値及び最大値・最小値を表-1 に示す。将来気候のすべてのシナリオで、平均値は増加傾向がみられ、25%値は現在気候の平均値を上回っていた。将来気候の最悪の状況を調べるため、現在気候の平均値と各シナリオの最小値との比較を行う。その結果、現在気候に対する将来気候における灌漑面積は、平均値で 1.3~1.4 倍程度の増加、最小値でも 1.1~1.4 倍程度の増加となっており、渇水による灌漑可能面積の減少リスクが緩和される傾向がみられた。

表-1 現在気候及び将来気候における灌漑可能面積

| シナリオ      | 平均     | 25%    | 75%    | 最大値    | 最小値   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|
| AMIP (現在) | 9,673  | 7,398  | 11,663 | 15,112 | 5,846 |
| C1        | 12,714 | 10,406 | 15,303 | 15,911 | 7,161 |
| C2        | 13,449 | 11,852 | 15,560 | 15,937 | 6,384 |
| C2        | 13,892 | 12,949 | 15,560 | 15,933 | 8,200 |

7. メコン下流域

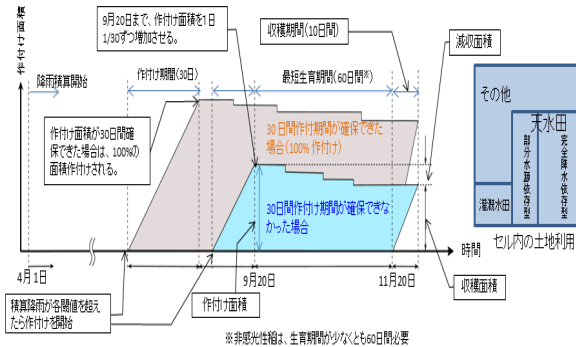


図-42 作付け・収穫面積モデル(農研機構・農工研)

表-2 作付け開始積算雨量

| 水田の種類 |         | 作付け開始積算降水量 |
|-------|---------|------------|
| 灌漑水田  |         | 500mm      |
| 天水田   | 部分水源依存型 | 341mm      |
|       | 完全降水依存型 | 625mm      |

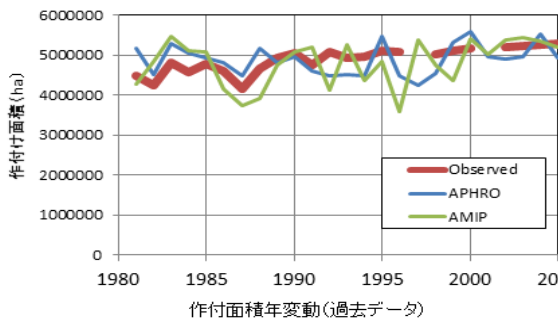


図-43 現在気候におけるモデルの再現性

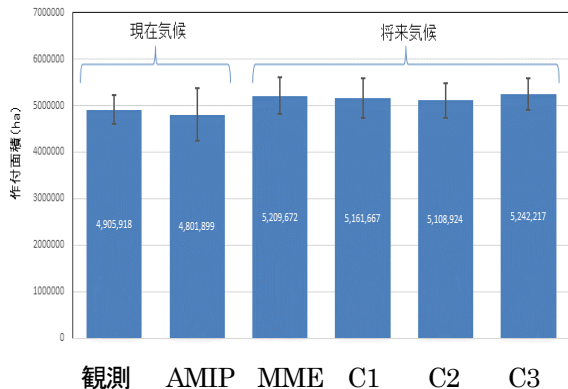


図-44 現在気候と将来気候の米作作付け面積の比較

タイ東部のメコン川を対象として、気候変動が米作に与

える影響について調査した。当該地域は、灌漑田に比べて天水田の比率が低いことから、農研機構・農工研究所で開発された降水状況から米作作付け面積を推定するモデルを活用し(図-42 参照)、将来の米作作付け面積を推定することとした。当モデルでは、積算起算日(4月1日)からの積算雨量が閾値を超えると、稲が生育するために十分な土壌水分が確保されたと見なし、作付けを開始することとなっている。作付け開始後は1日あたり水田面積の1/30ずつ作付け面積を増加させ、乾季に入る前までに稲の生育および刈り取り期間を確保するため、9月20日までを作付け可能期間としている。当該モデルは、水田の種類(完全降水依存型水田、部分降水依存型水田(完全降水依存型水田に接続し、完全降水依存型水田からの水が供給される水田)、灌漑水田)ごとに、作付け開始積算雨量が設定されているが(表-2 参照)、最大作付け可能面積は設定する必要がある。このため、西暦2000年前後の平均的な作物別耕作面積を緯度経度0.25度(約9km)の解像度で記録しているMERCA2000から得られたメッシュ毎の灌漑水田と天水田の割合を設定した上で、1980年から2013年までのモデルの計算結果が、タイ国農業協力省から得られた県別の作付け面積を各メッシュに按分した作付け面積に合致するように(図-43 参照)、最大作付け面積を各メッシュ毎に設定した。このモデルを使用し、各メッシュに日雨量のデータの値を与えることにより、各メッシュの日ごとの作付け面積を計算した。APHRODITE(アジア地域の日降水量グリッドデータ)および現在気候モデル(AMIP)の降水量データによる作付け面積計算結果は、実績値とよく一致していることが確認できる(図-44 参照)。

現在気候と将来機能の対象地域の作付けの比較を示す(図-44 参照)。左の2本のグラフがそれぞれ、現在の実績値(タイ国農業協力省)とAMIP(MRI-AGCM3.2の現在気候データの降雨データ)を用いた作付け面積である。右側の4本のグラフは、RCP8.5地球温暖化シナリオにおける4種類のSST(c1、c2、c3とmme)を用いた気候予測モデルの将来降水量による米作作付け面積である。グラフ上のバーは、対象期間のデータの標準偏差分の上下幅である。降雨量の増加にともない、すべてのSST分布に対して、現在気候に比べて将来の方が増加する傾向となった。SSTの違いによる増加率の範囲は6~9%程度であり、標準偏差も同程度である。

参考文献

- 1) Tong Liu, Morimasa Tsuda, and Yoichi Iwami : A study on flood forecasting in the Upper Indus Basin considering snow and glacier melt water, Journal of Disaster Research,



- Vol.12 No.4. pp.793-805, 2017, doi: 10.20965/jdr.2017.p0793.
- 2) Tsuda, M., Iwami, Y. : Application of Flood Forecasting and Analysis Model (IFAS) for Wadi Flash Flood, The Second International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems.
  - 3) Iwami, Y., Rasmy, M. : ICHARM's Initiatives for Effective Flash Flood Forecasting and Management in Arid and Semi-arid Region, The Second International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems.
  - 4) モハメ ドラスミー、岩見洋一、佐山敬洋、Lawford Peter、小池俊雄 : Preliminary investigation of Water and Energy based Rainfall-Runoff Inundation (WEB-RR1) Model in the Lower Kinu River Basin, Japan、水文水資源学会 2016 年度研究発表会、2016 年 9 月
  - 5) Mohamed Rasmy, Takahiro Sayama, and Toshio Koike: Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RR1) and its verification in the Kalu and Mundeni River Basins, Sri Lanka, Journal of Hydrology, 579, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124163>
  - 6) 山本昭夫、喜連川優 : マルチ気候モデルによる気候変動予測のための可視化・解析システムの構築、情報処理学会第 74 回全国大会、pp.4-401-4\_402, 2012.03
  - 7) Nyunt, C. T., Koike, T., Yamamoto, A., Nemoto, T., and Kitsuregawa, M. : Application of statistical bias correction method to the Yoshino river basin, Annual Journal of Hydraulic Engineering (JSCE), Vol. 58, pp.I\_193-I\_198, March 2014
  - 8) Teutschbein, C. and J. Seibert: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, Journal of Hydrology, pp. 456-457, 2012.
  - 9) Inomata, H., K. Takeuchi, and K. Fukami: Development of a statistical bias correction method for daily precipitation data of GCM20, Annual Journal of Hydraulic Eng. JSCE, 55, pp. S\_247-S\_252, 2010.
  - 10) Asian Development Bank (ADB) Report : SC 109094 REG : Climate Change and Flood Hazard Simulation Tools for ADB Spatial Application Facility, 2018
  - 11) Funk, C., and others, 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. Scientific data 2, 150066 DOI:10.1038/sdata.2015.66/
  - 12) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. ,2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, In Technical Report (Issue June). <https://doi.org/10.5065/D6DZ069T>
  - 13) 海野 仁・Maksym GUSYEV・長谷川聡・千田容嗣 : 気候変動がインドネシア国ソロ川流域の利水に及ぼす影響評価 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I\_121-I\_126, 2018.

## 2. 2 様々な自然・地域特性における洪水・濁水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発

### 2.2.3 グローバルに通用する多面的な水災害リスクの評価及び評価に基づく強靱な社会構築手法に関する研究

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：藤兼雅和、大原美保

#### 【要旨】

「グローバルに通用する多面的な水災害リスクの評価及び評価に基づく強靱な社会構築手法に関する研究」では、達成目標の一つ目である「多面的な災害リスクの高精度・高度な推計手法の提案」に関する検討の一環として、2015年関東・東北豪雨災害で鬼怒川が氾濫した茨城県常総市、2016年台風第10号災害で小本川が氾濫した岩手県岩泉町において、被災後の住宅・生活の回復状況等についての住民アンケート調査を行った。回答データに基づき、発災からの月数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復曲線の推定を行った。自宅の補修や自宅の建て替えが済んでいても、多くの住民は毎日の生活が元に戻ったとは感じていないという実態を把握した。また、2018年7月豪雨災害で被災した事業所へのアンケート調査も行き、事業所活動の回復曲線の推定も行った。これらの結果に基づき、早期の回復を阻害する要因の分析を行い、強靱な社会構築に向けた示唆を得た。

キーワード：2015年関東・東北豪雨災害、2016年台風第10号災害、住宅再建、生活再建、レジリエンス

#### 1. はじめに

プロジェクト研究「グローバルに通用する多面的な水災害リスクの評価及び評価に基づく強靱な社会構築手法に関する研究」は、達成目標として、以下の3つを掲げている。

- ・多面的な災害リスクの高精度・高度な推計手法の提案
- ・各種の防災施策・投資による減災効果を総合的に評価するリスク指標の提案
- ・国内外における強靱な地域社会の構築手法の提案

災害による社会的影響は、図-1に示す通り、時間軸に沿って変動する。発災直後は、主に物理的被害により、社会的機能の稼働率が低下する。構造物の対策などの「致命的な被害を負わない強さ」を向上させる対策により、これらの稼働率の低下に歯止めをかけることが必要である。その後、復旧対応等により、これらの稼働率は徐々に回復する。この際、「速やかに回復するしなやかさ」を向上させる対策により、稼働率が低下している時間を短縮させるとともに、「よりよい復興」を目指した施策により、社会的機能の稼働率100%を上回る地域の発展を達成することが望まれる。一方、予警報の発表がある場合は、避難や工場等の生産ラインの事前停止などの緊急対応により、被害を未然に防止することができる。

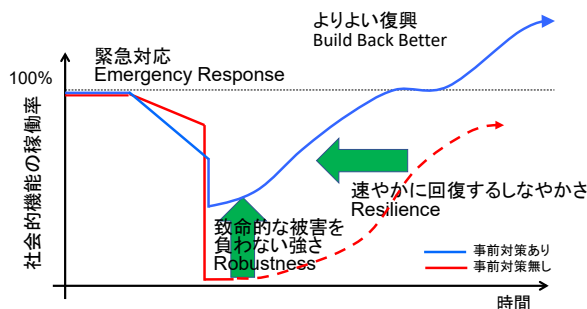


図-1 水災害による社会的影響と対策の効果

災害による社会的影響とは、図-1において、社会的機能の稼働率が100%を下回る領域を時間軸に沿って積分した面積に相当する。よって、望ましい施策を検討するにあたり、評価すべき「多面的な水災害リスク」とは、図-1に示した社会的機能の稼働率がいかにして変動・回復・向上するかに相当する。

2015年関東・東北豪雨災害で鬼怒川が氾濫した茨城県常総市、2016年台風第10号災害で小本川が氾濫した岩手県岩泉町において、被災後の住宅・生活の回復状況等についての住民アンケート調査を行った。これらに基づき、災害後に、住家の補修・建て替えや日常生活、地域活動の回復がどのように進展したかという実態を把握するとともに、早期の回復を阻害する要因の分析を行い、強靱な社会構築手法に向けた示唆を得た。

また、平成30年7月豪雨（2018年）で被災した

広島県・岡山県の事業所を対象としたアンケート調査も実施し、災害後の被災事業所の営業再開や生産活動・売上げの回復状況についての実態も把握した。これより、地域経済の観点からの強靱な社会構築手法に向けた示唆も得た。

## 2. 住民向けの2つのアンケート調査の方法

### 2.1 関東・東北豪雨災害後の茨城県常総市での住民アンケート調査

2015年9月の関東・東北豪雨は、南北に伸びた線状降水帯により、茨城県・栃木県・宮城県・福島県での記録的な豪雨をもたらした。茨城県常総市では、9月10日朝6時頃に鬼怒川左岸25.35km付近（常総市若宮戸）で溢水した後、12時50分頃に左岸21km付近（常総市三坂町）で堤防が決壊し、市の約1/3の面積に相当する約40km<sup>2</sup>が浸水した。浸水深さは、決壊点の三坂町から常総市役所のある水海道地区の間に立地する低地の大生地区で最も深くなり、約3mに達した。これらの地区では湛水は1週間以上に及んだ。2016年3月時点での常総市の被害は、死者2名、建物の全壊53、大規模半壊1,578、半壊3,476、床上浸水148、床下浸水3,072である<sup>1)</sup>。浸水地域では、16日夜までの約1週間に渡り停電が発生した。また、石下地区の東部配水場や大生地区の相野谷浄水場の浸水により、21日に仮復旧するまでの10日間に渡り断水が継続した。

水害による日常生活・住まいへの影響を把握することを目的として、水害から約2年強が経過した2017年11月中に、中央大学理工学部河川・水文研究室の協力を得て、住宅被害を受けた住民へのアンケート調査を行った。調査対象は、中央大学理工学部河川・水文研究室が2015年11月に調査を行った常総市内の516世帯のうち、持ち家かつ浸水を受け、今回の調査への協力が得られた世帯である。アンケート調査の概要は以下の通りである。

- ・実施方法：訪問によるインタビュー、不在の場合は、調査票を渡して、郵送にて回収
- ・実施時期：2017年11月中
- ・対象数：516
- ・回収数：218（有効回答は207）
- ・回収率：42.2%（有効回答での割合：40.1%）

アンケート調査の回答者の基本属性を記す。2015年11月に実施した調査は、住民の避難行動についての調査であり、調査対象は浸水域内におけるラン

ダムサンプリングにより選定している。しかし、この際、住宅の被害程度はサンプリング条件にはしていないため、今回の調査において、改めて自宅の被害程度を尋ねたところ、自宅に何らかの被害を受け対応を行った回答者数は139となった。これらの回答者の住家の被害認定での判定結果は図-1である。

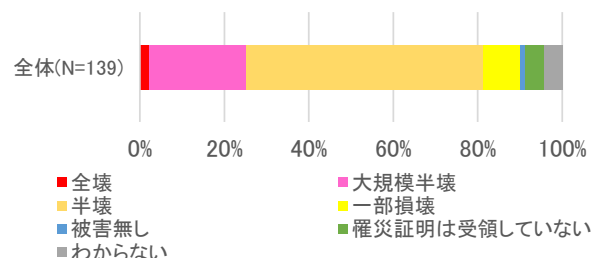


図-1 H27関東・東北豪雨での常総市の回答者の被害

### 2.2 2016年台風第10号災害後の岩手県岩泉町での住民アンケート調査

2016年台風第10号は、1951年の統計開始以来、初めて東北地方の太平洋側へ上陸した台風である。これにより、岩手県内では小本川が氾濫し、岩泉町の高齢者福祉施設の入所者9名を含めて、死者・行方不明者24名が発生し、多くの住家被害をもたらした。岩泉町内での住家被害は、全壊452、大規模半壊236、半壊255、半壊に至らない41である<sup>2)</sup>。2016年は、台風第10号に先行して台風第7号、台風第9号、台風第11号が相次いで上陸しており、北海道においても、多くの河川が氾濫・決壊した。北海道への3つの台風上陸も統計開始以来、初めてのことであり、記録的な年であった。

2016年台風第10号による被災後、岩手県岩泉町内では様々な水害・土砂災害対策が進められてきた。また、2019年10月11-13日には台風第19号が東日本に上陸し、岩泉町内でも被害が発生した。

国立研究開発法人 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)と岩泉町は、2019年2月に連携・協力協定を締結した。本協定に基づく活動として、2016年台風第10号以降の町民の生活や災害意識・対策実施の現状を把握するため、以下に示す町民へのアンケート調査を実施した。

- ・実施方法：岩泉町広報誌とともに全世帯に調査票を配布、郵送による回答の回収
- ・実施時期：2019年12月～2020年2月末
- ・配布数：配布4,159
- ・回収数：回収826
- ・回収率：19.9%

アンケート調査の回答者の基本属性を記す。岩泉町は、岩泉・小川・大川・小本・安家・有芸という6地区で構成されており、前述した小本川沿いの高齢者福祉施設は岩泉地区に存在していた。アンケート調査の回答者の居住地区は岩泉地区が45.3%と最も多く、続いて、小川・小本となった(図-3)。

2016年台風第10号で自宅が被害を受けた回答者は、安家地区で最も高く約50%、次いで小川地区で40%弱であった。何らかの自宅被害を受けたと回答した186件についての住家の被害認定での判定結果は図-5ととなり、全壊被害は、小本地区、安家地区、岩泉地区の順に多い有芸地区での被害程度は軽微である。自宅被害を受けた回答者のうち、「補修した」割合は64%であり、地域別では有芸地区を除き50%以上であった。また、「建て替えた」割合は8%となり、地域別では安家地区で最も多く16%であった。

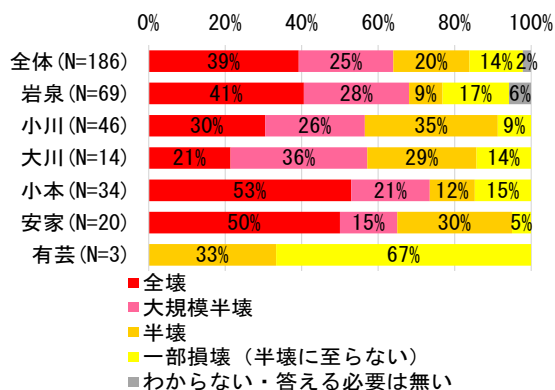


図-2 H28台風第10号での岩泉町の回答者の被害

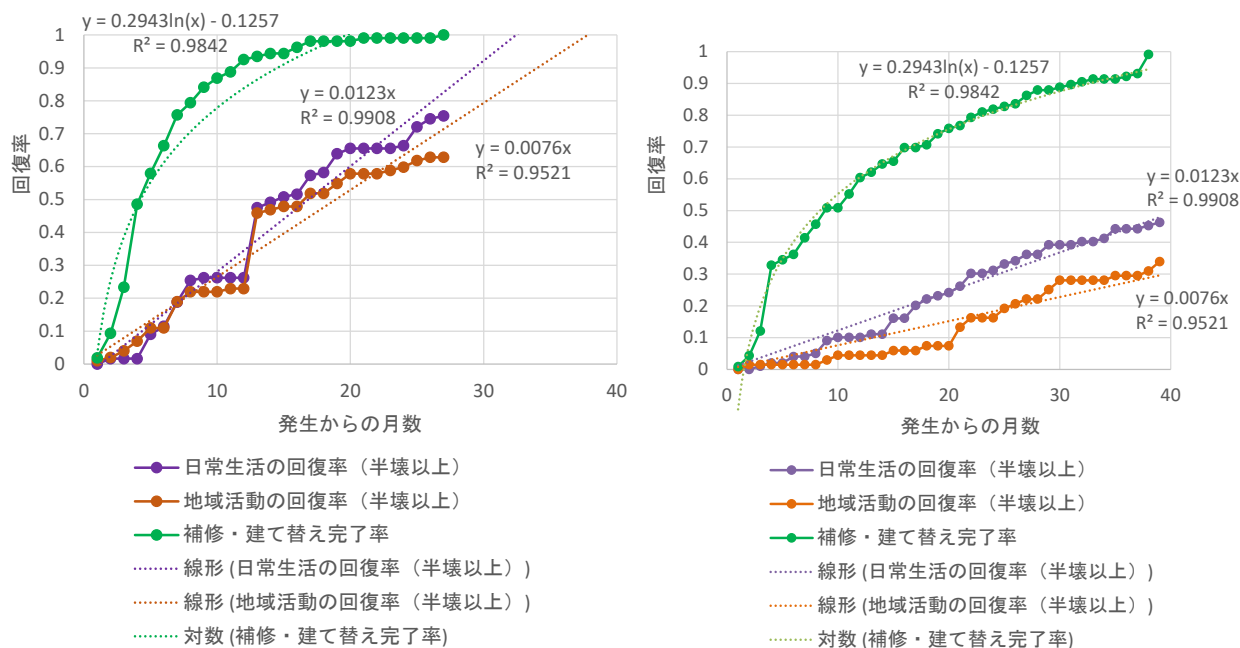


図-3 被災後の補修・建て替え完了率および日常生活・地域活動の回復 (左: 常総市、右: 岩泉町)

### 3. 常総市・岩泉町における被災後の住宅再建および日常生活・地域活動の回復の推移

#### 3.1 回復の推移の分析

常総市および岩泉町の回答者に対して、「自宅の補修・建て替え等は完了しましたか?」「毎日の生活が落ち着いたと思いますか?」「地域の活動が元に戻ったと思いますか?」という3点を尋ねるとともに、それらの完了/達成時期を尋ねた。これら回答データに基づき、発災からの月数と、毎日の生活及び地域の活動が元に戻った割合及び補修・建て替えの完了割合をプロットすると、図-3の通りとなった。縦軸は、元に戻った状態または完了を「1」としている。図中には近似曲線も描いた。図-3で、「元に戻っていない割合」や未完了に相当する部分が、災害による影響(損失)となる。住宅再建率は、おおむねS字曲線を描くのに対して、生活回復・地域活動回復は概ね線形である。

これより、住宅再建、日常生活の回復、地域活動の回復の順に時間を要することがわかった。また、常総市と岩泉町を比較すると、岩泉町の方が著しく回復が遅い傾向が見られた。この要因としては、岩泉町の方が全壊・大規模半壊に相当する被災住宅の割合が大きい点(図-1・図-2)や、河川沿いの道路も被災して交通や物流への影響も大きかった点が推測される。



表-1 発災からの月数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復程度（実績値より）

|         | 常総市             |                 | 岩泉町             |                 |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|         | 50% 回復値<br>(実績) | 80% 回復値<br>(実績) | 50% 回復値<br>(実績) | 80% 回復値<br>(実績) |
| 住宅再建    | 5か月             | 9か月             | 9か月             | 22か月            |
| 日常生活の回復 | 15か月            | 未               | 未               | 未               |
| 地域活動の回復 | 17か月            | 未               | 未               | 未               |

表-1 は、発災からの月数に応じた住宅再建及び日常生活・地域活動の回復を表-1 に示した。回復の50%回復率、80%回復率の指標で見ると、住宅再建に関しては、常総市では、80%回復に9か月かかったが、岩泉町では22か月を要した。日常生活の回復については、常総市では50%回復に15か月かかったが、岩泉町では調査時点でまだ達成されていなかった。同様に、地域活動の回復については、常総市では50%回復に17か月かかったが、岩泉町では調査時点でまだ達成されていなかった。

### 3.2 回復を早めるために必要な要因の分析

アンケート調査では、補修や建て替え時に役に立った要因も尋ねた。これらの回答と、「毎日の生活が落ち着いたかどうか」の回答のクロス集計を取ると、図-4の通りとなった。常総市では、「毎日の生活が落ち着いた」グループでは、特に「水害前から付き合いのある大工さん等に相談できた」や「市からの生活再建支援金や応急修理費用が役立った」が多くなった。

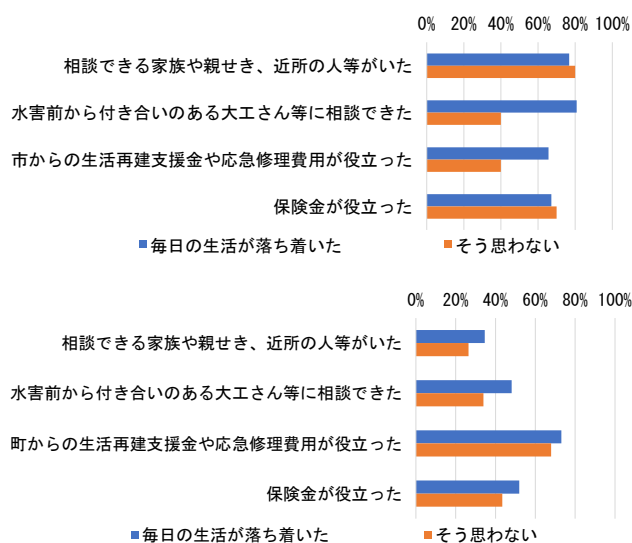


図-4 補修等で困った要因・役立った要因  
(上：常総市、下：岩泉町)

岩泉町では、毎日の生活が落ち着いたと回答したグループの方が、「落ち着いたと思わない(そう思わない)」と回答したグループよりも、役立った要因を挙げる割合が高かった。また、「町からの生活再建支援金や応急修理費用が役立った」を挙げた回答者が多かった。

これより、補修や建て替え等について相談できる環境や、生活再建支援金や応急修理費用等の経済的な環境が、住宅再建やこれに伴う日常生活の回復、地域活動の回復を加速化する可能性が示唆された。

## 4. 事業所向けのアンケート調査の方法及び結果

### 4.1 アンケート調査の方法

2018年6月28日から7月8日にかけて、停滞した前線や台風第7号の影響により、西日本を中心に広域に渡る記録的な大雨となった。西日本の各地で河川氾濫や土砂災害等が発生し、これらは死者263名、住家の全壊被害6,783、半壊被害11,346という甚大な被害をもたらした<sup>3)</sup>。岡山県倉敷市真備町では、一級水系高梁川の支川の小田川等が広域に氾濫し、死者51名の被害をもたらした<sup>4)</sup>。広島県では、三原市で沼田川が氾濫をした他、県内各地で土砂災害が多発した<sup>5)</sup>。西日本での被災は広域に渡り、停電、断水や道路閉塞により日常生活への支障が生じた。

事業所活動の回復状況を把握することを目的とし、広島県・岡山県内の主な被災地及び周辺地域内に本社がある事業所を対象とした郵送アンケート調査を実施した。全半壊住家被害数が多かった岡山県倉敷市真備町・総社市、広島県三原市・呉市・安芸郡坂町を「主な被災市町村」とし、本社がある事業所は全数抽出とした。これらに隣接する岡山県倉敷市の真備町以外・小田郡矢掛町、広島県尾道市・東広島市・竹原市・安芸郡海田町・熊野町を「周辺市町村」とし、従業員が20人以上の事業所は全数抽出、従業員19人以下の事業所は10%サンプリングによる抽出として、市販の企業情報データベース（株式会社東京商工リサーチのTSR企業情報ファイル）を用いた事業所の抽出を行った。

アンケート調査の概要は以下の通りである。

- ・実施方法：市販の企業情報データベースを用いて抽出した調査対象への郵送アンケート調査
- ・実施時期：2019年11月26日～2020年2月13日
- ・配布数：配布 6,686
- ・回収数：回収 1,146

#### 4.2 事業所の回復状況及び回復の促進要因の分析

回答した事業所数は、本社が主な被災市町村にある事業所は岡山県内で113、広島県内で578で、計691（60.3%）である。周辺地域にある事業所数は、岡山県内で222、広島県内で233、計455（39.7%）である。従業員数が20人以上の事業所数は407（35.5%）、19人以下は739（64.5%）である。周辺地域では、19人以下の事業所は10%サンプリングを行ったため、従業員数20人以上の事業所の割合は、実際よりも高いと言える。

回答した事業所の直接・間接被害の状況を分析したところ、本社・主な支社・支店、生産拠点のいずれかに直接被害または間接被害を受けた事業所（以下、何らかの被害有り事業所と呼ぶ）は516、本社が直接被害または間接被害を受けた事業所は462、主な支社・支店が直接被害または間接被害を受けた事業所は128、主な生産拠点が直接被害または間接被害を受けた事業所は145となった。図-5に、回答した事業所と何らかの被害有り事業所の業種を示す。両方とも、製造業・建設業が20.0～27.6%強と多く、続いて卸売・小売業と不動産業・サービス業が多い。何らかの被害有り事業所516社では、図-6の通り、約4割弱が直接・間接被害の両方、約半数が間接被害のみを受けており、間接被害の影響も大きかった。

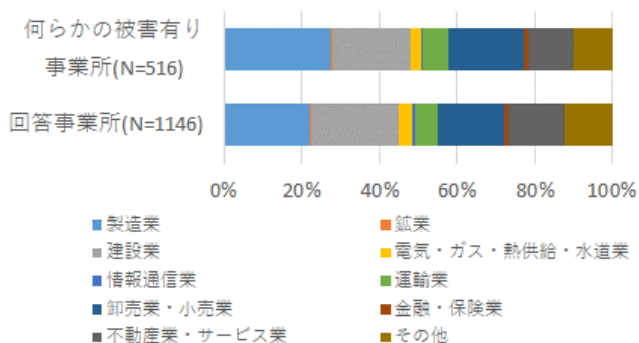


図-5 回答事業所及び被害あり事業所の業種

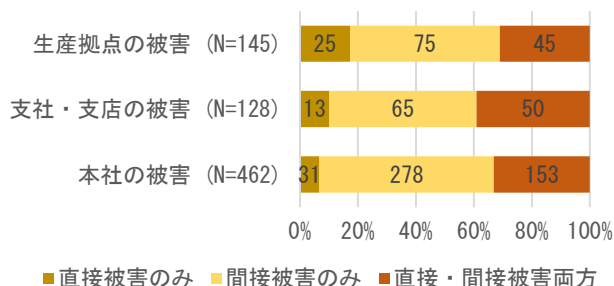


図-6 本社、支社・支店、生産拠点での被害状況<sup>1)</sup>

図-7は、直接被害有り（直接被害のみ、または直接被害・間接被害の両方）、間接被害のみでの回答差に着目して、本社、主な支社・支店、主な生産拠点（工場等）の営業再開曲線を作成したものである。本社、支社・支店、生産拠点ともに、直接被害を受けた場合は営業再開が遅い。表-2には、被害状況に応じた本社、支社・支店、生産拠点の営業再開状況を示す。図-5の営業再開曲線から、事業所数の50%、80%、90%が営業再開している状況に至るまでの発災からの日数を算出したところ、表-2に示した通り、80%の営業再開には約1-2か月、90%の営業再開には2か月～1年程度かかったことがわかった。なお、支社・支店の90%が営業再開するには331日かかっており、10%は1年以内に営業再開していない。図-6の横軸は1年（365日）としているが、支社・支店の全てが営業再開したのは419日後となった。支社・支店は、被害の甚大さや顧客の状況等に応じて早期に再開せず、他支社・支店で機能を代替させることも可能と考えられ、一部に早期の回復をあきらめるケースがあると推測された。

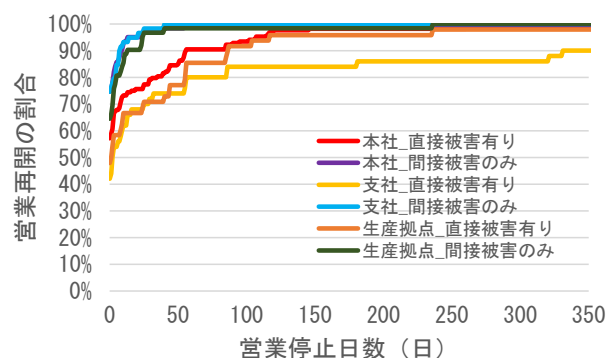


図-7 本社、支社・支店、生産拠点の営業再開曲線

表-2 本社、支社・支店、生産拠点の営業再開状況

| 分類    | 被害状況   | 発災直後の営業再開 (%) | 営業再開に要した日数 (日) |           |           |
|-------|--------|---------------|----------------|-----------|-----------|
|       |        |               | 営業再開率 50%      | 営業再開率 80% | 営業再開率 90% |
| 本社    | 直接被害有り | 57.1          | -              | 35        | 56        |
|       | 間接被害のみ | 74.7          | -              | 3         | 9         |
| 支社・支店 | 直接被害有り | 42            | 3              | 56        | 331       |
|       | 間接被害のみ | 74.6          | -              | 5         | 8         |
| 生産拠点  | 直接被害有り | 47.9          | 2              | 56        | 87        |
|       | 間接被害のみ | 64.5          | -              | 5         | 13        |

さらに 何らかの被害のあった事業所に対して、被災直後、2週間後、1か月後、2か月後、半年後、1年後のタイミングにおいて、被災前を100%として比較して、生産能力・売上額・職場の環境がどのように変化したと思うかを尋ねた。

図-8～10は、何らかの被害有り事業所516社、このうち、本社、支社・支店、生産拠点のいずれかの直接被害があった事業所259社、生産拠点に直接被害があった事業所70社、間接被害のみがあった事業所257社での各時期での平均値をプロットした結果である。これより、直接被害有りの場合は、間接被害のみの場合よりも、回復が遅いことが確認された。なお、本社、支社・支店、生産拠点のいずれかに直接被害があった場合と、生産拠点に直接被害があった場合では、回復にはそれほど大きな差は見られなかったが、職場の環境は差が見られた。以上より、直接被害・間接被害の状況に応じて、生産能力・売上額・職場の環境の回復には差が生じることが確認された。営業再開・生産活動等の回復では、ともに、建屋の床上被害、設備被害、車両被害などの直接被害による影響は大きく、直接被害を回避するための事前対策の重要性が示唆された。

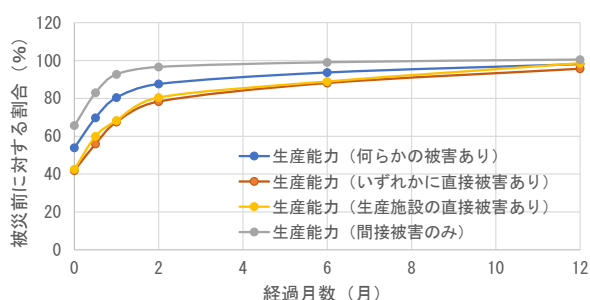


図-8 被害状況に応じた生産能力の回復状況

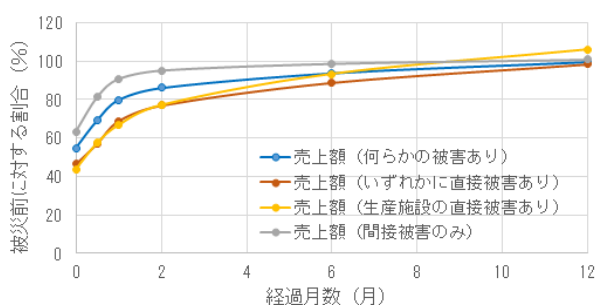


図-9 被害状況に応じた売上額の回復状況

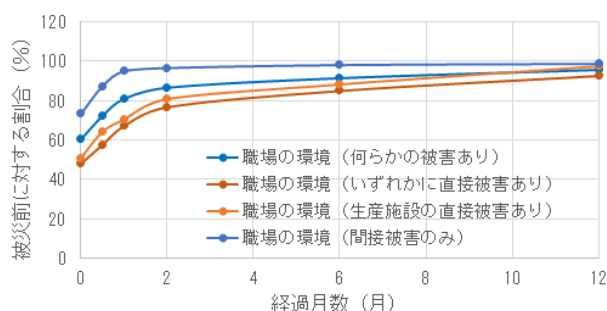


図-10 被害状況に応じた職場の環境（設備等）の回復状況

また、売上額が100%まで回復していない時期の売上低下額の累計が、損失額となるため、本曲線の活用により、被災後の売上額損失の推計が可能となる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、2015年関東・東北豪雨災害で鬼怒川が氾濫した茨城県常総市、2016年台風第10号災害で小本川が氾濫した岩手県岩泉町において、被災後の住宅・生活の回復状況等についての住民アンケート調査を行った。また、2018年7月豪雨災害で被災した広島県・岡山県の事業所へのアンケート調査も行った。

住民アンケート調査の回答に基づき、発災からの月数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復曲線の推定を行った結果、自宅の補修や自宅の建て替えが済んでいても、多くの住民は毎日の生活が落ち着いたとは感じていないという実態を把握することができた。また、住宅再建及び日常生活・地域活動の回復に関して、50%回復率、80%回復率などの指標を提唱し、実績値での算出を行った。これにより、岩泉町においてこれらの回復が遅い状況を定量的に表現した。

また、事業所アンケート調査の回答に基づき、直接被害・間接被害の状況や被災の詳細に応じた営業再開曲線の作成や、生産能力・売上額・職場の環境などの生産活動に関する回復曲線の作成も行った。住民アンケート調査と同様に、50%回復、80%回復の視点から、50%営業再開、80%営業再開等の指標の算出を行った。

更に、回復を早め、強靱な地域社会を実現するために必要な要因の分析も行った。

住民アンケート調査からは、補修や建て替え等について相談できる環境や、生活再建支援金や応急修理費用等の経済的な環境が、住宅再建やこれに伴う日常生活の回復、地域活動の回復を加速化する可能性を示唆した。被災後に、早期の段階でこれらの支援を行き渡らせることで、地域全体の早期の回復につながるのではないかと考えられる。

事業所アンケート調査に基づく直接被害や間接被害の有無別での回復曲線の比較からは、間接被害のみでも発災当初に営業停止が生じることや、特に直接被害を回避するための事前対策の重要性を示唆した。今後、本研究で作成した回復曲線を用いて、被災後の売上額損失の推計を行うことも可能である。

なお、これらの知見は、あくまで本アンケート調

査の対象とした被災地で得られたものであり、今後さらに他の被災地の事例にて検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 茨城県防災・危機管理課：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による本県の被害及び対応について（3 月 16 日現在）、2016.
- 2) 岩手県岩泉町：平成 28 年台風 10 号豪雨災害復旧の記録「ふるさと岩泉への再生へ」、2018.
- 3) 消防庁：平成 30 年 7 月豪雨及び台風第 12 号による被害状況及び消防機関等の対応状況（第 60 報）、令和元年 8 月 20 日版、2019.
- 4) 岡山県：平成 30 年 7 月豪雨災害記録誌、2020.
- 5) 広島県：平成 30 年 7 月豪雨災害による被害等について（第 58 報）、2018.
- 6) 大原美保・南雲直子・藤兼雅和：平成 30 年 7 月豪雨災害による被災事業所の直接被害・間接被害の実態分析、土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 77、No.2、p.I\_1387-I\_1392、2021.



## 2.3 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発

### 2.3.1 水災害情報が乏しい地域での防災・減災活動を支援する水災害リスク情報提供システムに関する研究（防災・災害情報の創出・活用）

担当チーム：水災害研究グループ（リスクチーム）

研究担当者：藤兼雅和、傳田正利

#### 【要旨】

本研究では、わが国の中山間地や発展途上国などの災害情報が乏しい地域において、災害に対する市町村の防の防災・減災活動を支援するために、地域の災害に対する脆弱性を可視化する「洪水カルテ」、防災担当者や住民間の災害情報を共有する「災害情報共有システム」及びVRを用いた「仮想洪水体験システム」を開発後、現地適用し、その有効性を確認した。

キーワード：防災・減災、ICHARM 災害リスク情報共有システム（IDRIS）、洪水カルテ、仮想洪水体験システム

#### 1. はじめに

洪水などの水災害は近年激甚化・多様化しているが、地震とは異なり、流域への降雨開始から発災に至るまでには、ある程度の時間が見込める。そのため、発災前に様々な情報を収集・分析し、発災までの時間を考慮しながら活用することで、防災担当者や住民が効果的に防災・減災活動を実施し、被害を軽減できる可能性がある。特に、中山間地の市町村においては、以下の課題を抱えているため、防災情報の有効活用が求められている。

- 堤防等の施設整備が遅れている。
- 急峻な地形で降雨発生から流出までの時間が比較的短いため、入手した情報を整理し、避難行動や防災活動につなげる時間的余裕が少ない。
- 水位観測や洪水予報などが行われていない区間が多い。
- 市町村防災担当部局は、防災対応の経験が乏しい場合が多く、防災の詳しい知識を持つ防災担当者が少ない。
- 平成大合併で市域が拡大し、担当者が馴染みのない地域が多くなるとともに、現地の状況把握により時間がかかるため、対応策の決定（優先順位付け）に手間取ることがある。
- コミュニティの中には高齢者が多く、いざという際の避難活動に、より多くの配慮が必要で、共助のニーズが高い場合が多い。

以上の背景を踏まえ、本研究では、我が国の中山間地や途上国など、気象・水文に関するリアルタイム情報や予測情報が乏しい地域において、防災担当者や住民による防災・減災活動を支援する、水災害リスク情報提供システムに関する研究を行った。その主要な成果は、洪水リスクがある地区がどのような種類の外力に対し、どのような観点で脆弱かを明らかにすることが出来る手法「洪水カルテ」、さまざまな災害情報を集積し、災害に関するリスク情報を共有することを可能とした「災害情報共有システム」（ICHARM Disaster Risk Information System :IDRIS）、及び、仮想現実（Virtual Reality :VR、以下、「VR」と記述する。）を活用し、日常生活では想像しにくい洪水を仮想体験できる「仮想洪水体験システム」を開発した。これらの開発した技術の現地適用を行い、その実用性を確認することができた。

中期期間中の研究を整理すると以下の流れとなる。

2016年度は、洪水カルテの開発とIDRISの基本システムの開発を行った。

2017年度は、IDRISの開発と新潟県東蒲原郡阿賀町（以降、「阿賀町」と記述する。）における適用研究・実証実験HPであるARIS（Aga town Risk Information System）の開設を通して、IDRIS(ARIS)の有効性を確認した。同時に、「洪水カルテ」の適用を行った。

2018年度は、IDRISの普及に向けたシステムの基礎仕様の整理、「洪水カルテ」の簡便な作成方法の検討を行った。

2019年度は、IDRISの普及に向けた阿賀町における実証実験を通して、問題点の抽出及び改良を行った。その後、改良したIDRISの岩手県下閉伊郡岩泉町(以下、「岩泉町」と記述する。)への適用を行った。

2020年度は、IDRISの普及化にむけシステムの検証とコスト分析を行った。同時に、平成30年度より開発を進めているVRを発展させ、実空間データを用いて水災害時の被災地の状況を再現できる仮想洪水体験システムを概ね完成させた。

2021年度は、IDRISの普及化にむけた実証実験として、山形県鶴岡市とのIDRISの共同開発を行った。VRに関しては、VRのリアリティの向上を行った。

以下に、第4期中期計画におけるIDRIS,洪水カルテ及びVRに関する研究の概要を報告する。

## 2. IDRISの研究・開発, 実証実験及び普及化

### 2.1 IDRISの基本システムの構築

2017年度から、新潟県阿賀町において、「e-コミュニティ・プラットフォーム」のシステムを活用した情報共有システム構築に関する基礎検討を、関係各所との意見交換会等を開催しながら、実施した。

平成30年度には、前年度に基礎仕様を検討した「ICHARM 災害リスク情報共有システム (ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS)」のプロトタイプとして、新潟県阿賀町での利活用を想定した「阿賀町水災害情報共有システム (Aga town disaster Risk Information System: ARIS)」を試作した。ARIS試作後、阿賀町の防災関係者にアンケートを行い、地区防災への有用性を確認した。

### 2.2 スマートフォン対応のIDRISのテストシステム構築

2019年8月には、ARISの一般公開を行った。2019年台風19号時、ARISが停止するトラブルが発生した。ARISの停止は、水位データ等を提供するリンク先のサーバの停止が要因であるなどARISの技術的問題を抽出した。IDRISの安定した稼働の確保と普及化を目指し、基礎仕様の整理と近年のWEB技術に対応するための方法を検討した。その結果、IDRISの安定稼働のためには、近年のWEB技術と整合をとるのに労力を要するe-コミュニティ・プラットフォームを用いずに



図-1 一般公開開始時のARIS画面



図-2 スタートホン対応版IDRIS(鶴岡市)

クラウドサービスの機能を活用することが必要であることが確認できた。また、WEB の画面設計は、スマートフォン等、多くのユーザーが使うモバイル機器への対応を優先させ設計する「モバイルファースト」の開発方針を採用し、IDRIS 画面設計の大幅な変更を行った。同時に、阿賀町の防災関係者と協議を行い、水防災時に防災関係者が確認する順序で閲覧できる画面構成と情報閲覧機能に変更し、防災担当者とその有用性を確認した。以下に、その詳細を示す。

### 2. 3 IDRIS のスマートフォンへの本格的な対応

令和2年度には、モバイルファーストの改良を進めて、モバイルデバイスからデスクトップパソコンまで、扱いやすレシポンシブデザインに画面変更をした。同時に、「e-コミュニティ・プラットフォーム」のサポート終了に対応するため、e-コミュニティ・プラットフォーム上での IDRIS の構築を取りやめ、ASP.NET.CORE(Microsoft 社)とクラウドサーバを用いた仕様に変更した。変更した仕様の IDRIS を山形県鶴岡市に適用し、水災害対応訓練システムとしての改良を行った (図-2)。

類の外力に対し、どのような観点で脆弱かを明らかにすることが出来る手法を開発した。洪水危険度診断の意味を込めて「洪水カルテ」という名称を用いて提案した。

図-3 に、洪水カルテの算出フローを示す。地区の設定および地区特性の把握の段階においては、対象となる地区の設定、対象地区における評価地点の設定及び基礎資料の設定を行う。

RRI モデルを用いて、様々な外力パターン（本川流量と降水量の組み合わせ）を設定し氾濫計算を行う。氾濫計算により得られた氾濫域、浸水深及び湛水期間から対象地区の評価地点における氾濫開始時間、氾濫深及び湛水期間などを算出する。最後に、設定した評価指標に関する閾値を用いて、ランク評価し得点化した「洪水カルテ」を算出後、外力パターンごとに各評価軸の得点を合計し、リスク小計値を算出する。リスク小計値を用いて、クラスター分析を行い各地区を類型化した後、洪水危険度が最も高いグループを抽出し、「洪水ホットスポット」を算出する。

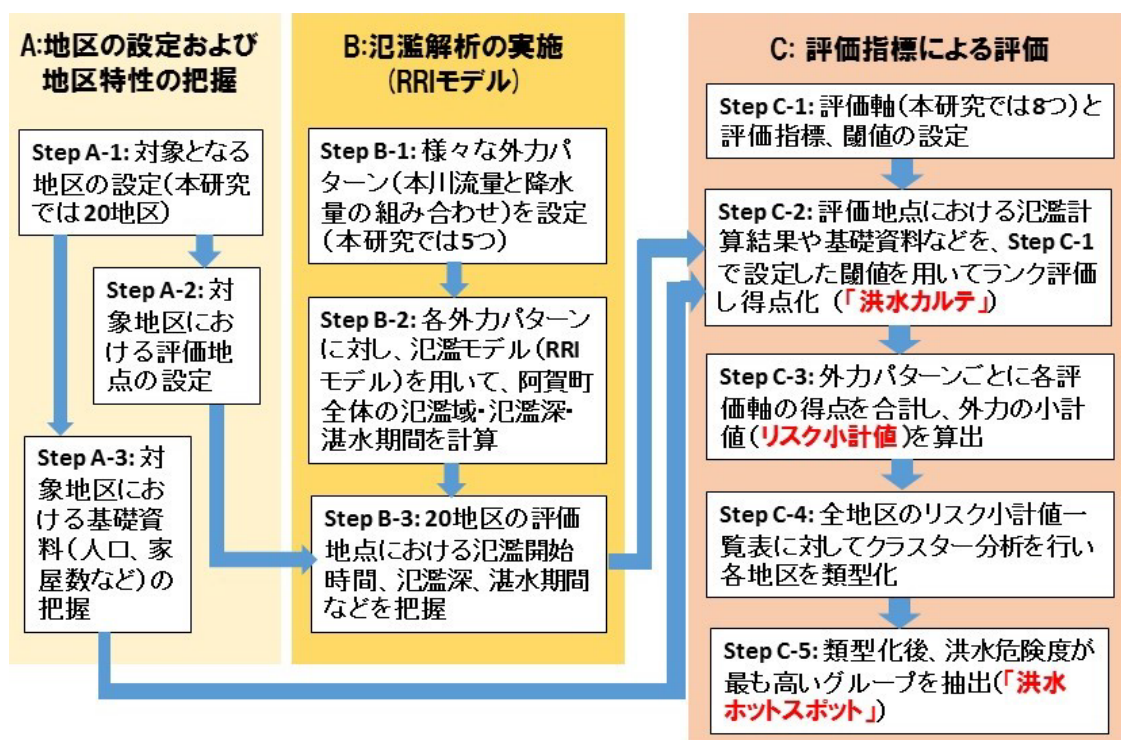


図-3 地区危険度評価のフロー

## 3. 洪水カルテの概要と新潟県阿賀町における適用事例

### 3. 1 洪水カルテの概要

本研究では、洪水リスクがある地区がどのような種

## 3. 2 新潟県阿賀町における適応事例

### 3. 2. 1 地区の設定および地区特性の把握

阿賀町との協議の上、鹿瀬地区を分割して1地区(深

戸)を加え、20 地区を対象とした(図-4)。

阿賀町防災担当者と現地視察および協議を行い、各地区で最も早く浸水が始まると地元住民に認識されている地点(橋など)や、駅前や交差点などのわかりやすい地点を代表地点として設定した。

### 3.2.2 外力パターンの設定

地区危険度を検討するための外力パターンとして、降雨と阿賀野川本川流量の組み合わせを考慮した。

降雨は阿賀町において、近年最大の洪水被害を生じさせた「2011 洪水時の実績降雨」と、「想定最大外力相当降雨」、および「ゲリラ豪雨」の3パターンを設定

表-2 設定した5つの外力パターン

| 降雨   | H23<br>実績降雨 | 想定最大外力相<br>当降雨(H23降雨<br>の2.5倍) | ゲリラ豪雨      |
|--|-------------|--------------------------------|------------|
| 豊実ダム<br>放流量(ピーク流量)                               | ○<br>パターン1  | ○<br>パターン2                     |            |
| H23実績放流量<br>(約7,500m <sup>3</sup> /s)            |             |                                |            |
| 河川整備基本方針引<br>延ばし放流量<br>(約9,800m <sup>3</sup> /s) | ○<br>パターン3  | ○<br>パターン4                     |            |
| 平常時流量<br>(約360m <sup>3</sup> /s)                 |             |                                | ○<br>パターン5 |

る、2011 洪水時の実績放流量パターンを河川整備基本方針規模の流量まで引延ばしたパターンとした。これらを表-2のように組み合わせ、合計5パターンを設定した。

### 3.2.3 区危険度評価における8つの評価軸

3.2.1で抽出した各地区に対し、表-3に示す8つの評価軸と指標で評価を行う。これらはいずれも各地区の洪水被害規模や洪水対策への影響を指標化したものであり、地区の洪水対策立案に直接寄与するものと考え追加した。

各指標の閾値は、それぞれ国土交通省マニュアルや阿賀町防災担当者へのヒアリングの結果などをもとに、根拠のある値となるよう設定を試みた。

②、⑥、⑦、⑧についてはそのような設定が難しかったため、地区間比較を可能とするよう今回は便宜的に相対的な閾値を設定した。

これらの閾値により、各指標はランク a~d で評価され(③のみ aa ランクを設定)、得点化される。いずれの指標でもランク a になるほど洪水脆弱性が高いと評価される。

表-3 地区危険度評価における8つの評価軸

| 評価軸             | 評価地点   | 指標                            | 評価(ランク) | 閾値            | 閾値の設定根拠                                      | 指標の算出方法  |
|-----------------|--------|-------------------------------|---------|---------------|--|--|
| ① 避難開始までの余裕時間   | 地区内代表点 | 浸水深が0.1mから0.5mに達するまでの時間       | d (0点)  | (0.5mに達しない場合) | 3時間:事前対応が可能となる時間(阿賀町担当者ヒアリングによる)             | RRIモデルによる計算結果  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 6時間以上         | 6時間:阿賀町における将来の独居高齢者の増加を踏まえ、便宜的に3時間の倍の時間として設定 |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 3時間以上6時間未満    |  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 3時間未満         |  |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0.1日未満        |  |  |
| ② 避難が必要な期間      | 地区内代表点 | 浸水深0.5m以上の継続時間                | d (0点)  | 0.1日以上~0.5日未満 | RRIモデルでの計算値を参考に、地区間相対比較が可能なように設定             | RRIモデルによる計算結果  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 0.5日以上~1.0日未満 |  |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 1.0日以上        |  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  |               |  |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0.1m未満        |  |  |
| ③ 地区の浸水深さ       | 地区内代表点 | 最大浸水深                         | d (0点)  | 0.1m未満        | 国土交通省マニュアル                                   | RRIモデルによる計算結果  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 0.1m以上0.5m未満  | 0.1m:RRIモデル上で浸水と判断する水位                       |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 0.5m以上1.7m未満  | 0.5m:1階床の高さ                                  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 1.7m以上3.2m未満  | 1.7m:0.5m+1.2m(死亡率が低い安全水位深さ)                 |  |
|                 |        |                               | aa (4点) | 3.2m以上        | 3.2m:0.5m+2.7m(1階部分の高さ)                      |  |
| ④ 避難所の危険度       | 地区内避難所 | 避難所の最大浸水深                     | d (0点)  | 0.1m未満        | 国土交通省マニュアル                                   | RRIモデルによる計算結果  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 0.1m以上0.3m未満  | 0.1m:RRIモデル上で浸水と判断する水位                       |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 0.3m以上0.5m未満  | 0.3m:自動車が行き困難になる水位                           |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 0.5m以上        | 0.5m:徒歩による移動が困難になる水位                         |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0.1m未満        |  |  |
| ⑤ 地区と役場支所との交通途絶 | 地区内代表点 | 地区と町役場・支所を結ぶ道路の最大浸水深          | d (0点)  | 0.1m未満        | 国土交通省マニュアル                                   | RRIモデルによる計算結果  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 0.1m以上0.3m未満  | 0.1m:RRIモデル上で浸水と判断する水位                       |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 0.3m以上0.5m未満  | 0.3m:自動車が行き困難になる水位                           |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 0.5m以上        | 0.5m:徒歩による移動が困難になる水位                         |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0人            |  |  |
| ⑥ 浸水最大孤立者数      | 地区全体   | 50cm以上の浸水域に居住し、かつ避難しない人数      | d (0点)  | 0人            | 地区間相対比較が可能なように設定                             | 下記情報を用いて国土交通省マニュアルにより算出<br>・RRIモデルによる計算結果<br>・地区別家屋数<br>・地区別人口分布<br>・避難率(40%と設定) |
|                 |        |                               | c (1点)  | 10人未満         |  |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 50人未満         |  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 50人以上         |  |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0人            |  |  |
| ⑦ 浸水の影響を受ける要配慮者 | 地区全体   | 30cm以上の浸水域に居住する要配慮者の人数        | d (0点)  | 0人            | 地区間相対比較が可能なように設定                             | ・RRIモデルによる計算結果<br>・地区別家屋数<br>・地区別人口分布  |
|                 |        |                               | c (1点)  | 10人未満         |  |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 50人未満         |  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 50人以上         |  |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0t            |  |  |
| ⑧ 洪水後の廃棄物       | 地区全体   | 50cm以上の浸水域に存在する家屋数から推計される廃棄物量 | d (0点)  | 0t            | 地区間相対比較が可能なように設定                             | 下記情報を用いて国土交通省マニュアルにより算出<br>・RRIモデルによる計算結果<br>・地区別家屋数                             |
|                 |        |                               | c (1点)  | 50t未満         |  |  |
|                 |        |                               | b (2点)  | 150t未満        |  |  |
|                 |        |                               | a (3点)  | 150t以上        |  |  |
|                 |        |                               | d (0点)  | 0t            |  |  |

した。

阿賀野川本川流量については、実務上最大流量とな



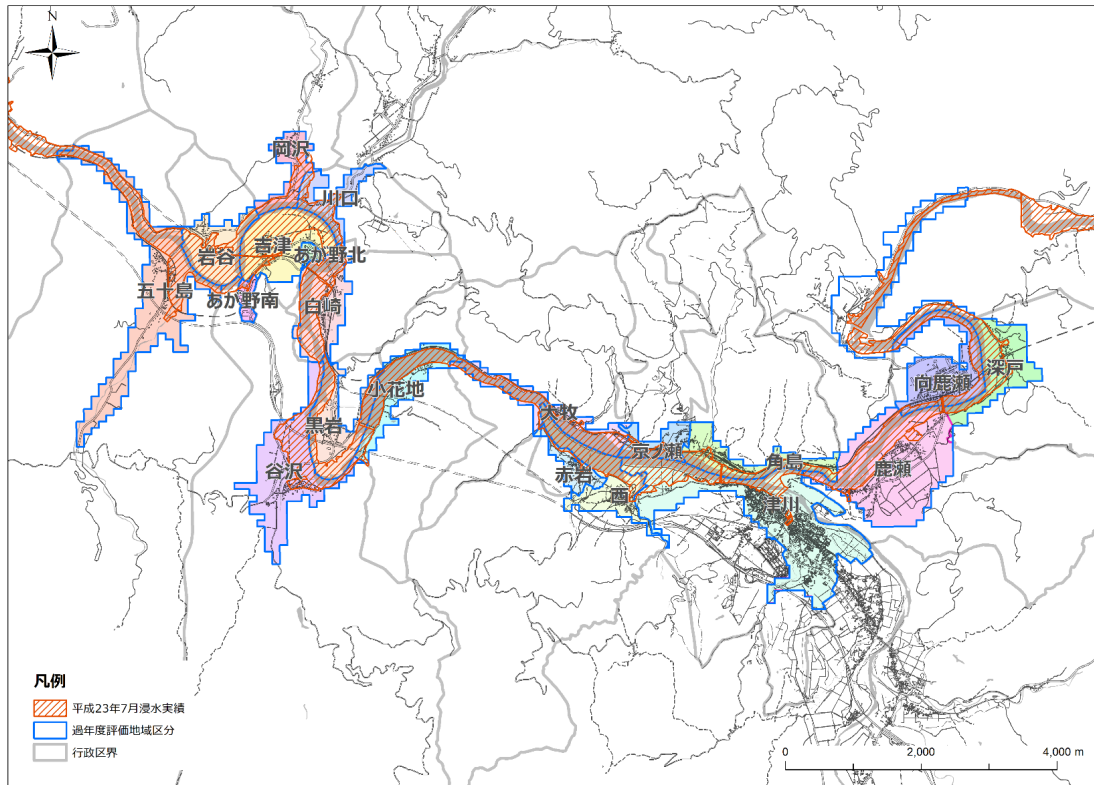


図-4 対象とする20地区の位置図

### 3.2.4 洪水の脆弱性に応じた地区のグループ化

地区のグループ化にはいくつかの方法があるが、例えば各地区の5つのリスク小計値を合計したもの（総合得点）に対して閾値を設定して20地区をいくつかのグループにする方法が考えられる。ただし発生確率が異なる外力に対するリスク小計値をそのまま合計して評価することの合理性の説明や意味づけが困難となる欠点がある。本研究では、各地区のリスク小計値に対してクラスター分析を行い、洪水の脆弱性に依拠して地区を客観的にグループ化する。

洪水対策は、20地区それぞれに対して立案することが望ましいが、時間と労力を要する。それに対して、20地区を洪水脆弱性に依拠していくつかのグループ化することにより、グループごとに優先的にどのような対策に行政が取り組むべきかが明らかに出来、効率的な対応が可能となる。

### 3.2.5 「洪水ホットスポット」の特定

前項の地区のグループ化により、洪水脆弱性が最も高いと判断されたグループを「洪水ホットスポット」として特定する。「洪水ホットスポット」と特定された地区については、最優先での対策が必要とされる。

### 3.2.6 「洪水カルテ」の作成結果

前章の手法を用いて阿賀町の20地区を対象に、「洪水カルテ」をそれぞれ作成した。例としてH23洪水で激甚な被害を受けた地区である谷沢地区、五十島地区および吉津地区の結果を表-3, 4, 5に示す。

### 3.2.7 洪水カルテによる診断例

前述のように、「洪水カルテ」により、各地区の洪水特性を把握することが可能である。ここでは谷沢地区（表-3）、五十島地区（表-4）、および吉津地区（表-5）を例にとると、谷沢地区は①避難のための時間はc評価が多いが、⑥最大孤立者、⑦災害時要配慮者、⑧廃棄物の指標での評価がa評価が多い。すなわち、谷沢地区では要配慮者を含め影響者は多くなるが、避難のための時間は比較的ゆとりがあるため、要配慮者を支援しながらの避難が可能と思われる。また、五十島地区は①避難のための時間、②避難が必要な期間、③最大浸水深の指標での評価が高いのが特徴である。五十島地区では、余裕時間があまりなく最大浸水深もかなり深くなるため、無理な避難はせず、垂直避難も選択肢となるとと思われる。吉津地区は外力パターン1でのリスク小計値は低い、外力パターン2, 3, 4ではかなり高くなる。これは、H23洪水後、吉津地区にお

表-3 谷沢地区における「洪水カルテ」

| 評価軸 \ 外力パターン                          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5 |
|---------------------------------------|----|----|----|----|---|
| ①避難開始までの余裕時間                          | b  | c  | c  | c  | d |
| ②避難が必要な期間                             | b  | b  | b  | a  | d |
| ③地区の浸水深さ                              | b  | a  | a  | aa | c |
| ④避難所の危険度                              | d  | d  | d  | d  | d |
| ⑤地区と役場支所との交通途絶                        | a  | a  | a  | a  | a |
| ⑥浸水最大孤立者数                             | b  | a  | a  | a  | c |
| ⑦浸水の影響を受ける要配慮者                        | b  | a  | a  | a  | b |
| ⑧洪水後の廃棄物                              | b  | a  | a  | a  | b |
| リスク小計値<br>(aa:4点,a:3点,b:2点,c:1点,d:0点) | 15 | 18 | 18 | 20 | 9 |

表-4 五十島地区における「洪水カルテ」

| 評価軸 \ 外力パターン                          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5 |
|---------------------------------------|----|----|----|----|---|
| ①避難開始までの余裕時間                          | a  | c  | a  | b  | d |
| ②避難が必要な期間                             | b  | b  | a  | a  | d |
| ③地区の浸水深さ                              | a  | aa | aa | aa | c |
| ④避難所の危険度                              | d  | d  | d  | d  | d |
| ⑤地区と役場支所との交通途絶                        | a  | a  | a  | a  | b |
| ⑥浸水最大孤立者数                             | b  | a  | b  | a  | b |
| ⑦浸水の影響を受ける要配慮者                        | b  | a  | a  | a  | b |
| ⑧洪水後の廃棄物                              | b  | a  | a  | a  | b |
| リスク小計値<br>(aa:4点,a:3点,b:2点,c:1点,d:0点) | 17 | 19 | 21 | 21 | 9 |

表-5 吉津地区における「洪水カルテ」

| 評価軸 \ 外力パターン                          | 1 | 2  | 3  | 4  | 5 |
|---------------------------------------|---|----|----|----|---|
| ①避難開始までの余裕時間                          | d | a  | a  | c  | d |
| ②避難が必要な期間                             | d | b  | b  | b  | d |
| ③地区の浸水深さ                              | d | aa | aa | aa | d |
| ④避難所の危険度                              | d | d  | d  | d  | d |
| ⑤地区と役場支所との交通途絶                        | b | a  | a  | a  | a |
| ⑥浸水最大孤立者数                             | d | a  | a  | a  | d |
| ⑦浸水の影響を受ける要配慮者                        | b | a  | a  | a  | c |
| ⑧洪水後の廃棄物                              | b | a  | a  | a  | c |
| リスク小計値<br>(aa:4点,a:3点,b:2点,c:1点,d:0点) | 6 | 21 | 20 | 19 | 5 |

いては新潟県によって築堤整備がなされており、そのため2011洪水時の外力規模となる外力パターン1では河川からの浸水は生じないため値が小さくなっているものである。このように、築堤のような防災投資の効果が「洪水カルテ」に反映されている。

これらのように、「洪水カルテ」により、各地区の洪水特性の把握や、それに応じた洪水対策が立案可能である。

### 3.2.8 地区のグループ化と「洪水ホットスポット」の抽出

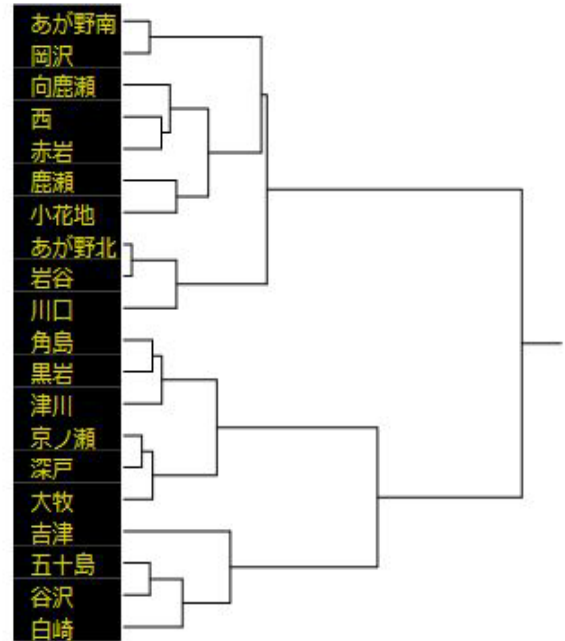


図-5 クラスタ分析結果

クラスタ分析を施し、20地区をいくつかのグループに分類することを試みる。なお、用いたソフトは「エクセル統計」で、距離計算は基準化されたユークリッドの距離を適用している。この結果、図-5のように樹形図が作成され、表-7の結果と併せると、20地区を大きく以下の5グループに分類することが出来た。

グループA：洪水脆弱性が最も低いグループ

グループB：洪水脆弱性は全体的に低い、ゲリラ豪雨にやや弱いグループ

グループC：外力パターン4に特に弱いグループ

グループD：洪水脆弱性が全体的に高いグループ

グループE：洪水脆弱性が全体的に極めて高いグループ

分類の結果、グループEは、20地区の中でも洪水脆弱性が極めて高いグループとして抽出されたと判断でき、これらの地区を「洪水ホットスポット」として特定した。これらの4地区はいずれも2011年洪水で床上浸水による被害が発生するなど大きな被害を被った地区であり、「洪水カルテ」による評価の妥当性を表現していると言える。

## 4. VR

### 4.1 VRの有効性の検証

2019年度には、水災害リスクの認知を目的とし、「つくばちびっこ博士」における土木研究所公開イベント時の水災害VR体験を通して、VRの可能性を評価した(図-6)。その結果、水災害VRは日常生活では気づかない水災害の危険性の疑似体験を通じて、水災害の危険性の認知を上げる効果を確認した(図-7)。

### 4.2 実際の洪水の仮想体験を可能にするVRの開発

2020年度には、水災害VRのリアリティを向上するため、空間情報学・水工学水を用いて、実際の水災害状況を定量的に再現するシステムへの改良を行った。国土数値情報、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)、TLS(Terrain Laser Scanner)及びフォトグラメトリを用いて、正確かつリアリティの仮想空間を再現した。

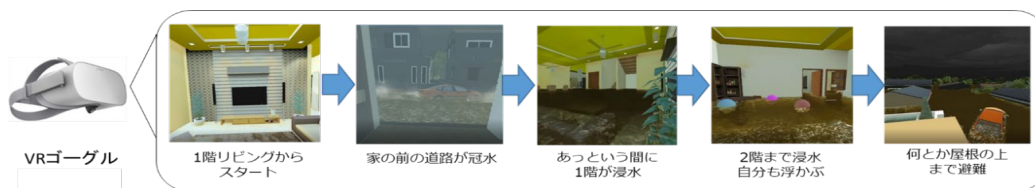
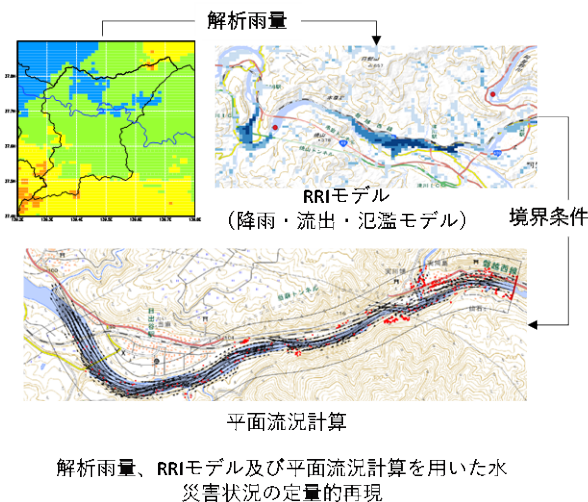


図-6 VRの概要



図-7 VRの効果の検証

#### ■降雨・流出・氾濫データの作成



#### ■空間データの作成



#### 仮想洪水体験システム



雨雲、降雨・洪水等の状況を正確に再現。複数人により忠実に再現した仮想洪水の体験や避難・救助訓練が可能。

図-8 開発した仮想洪水体験システムの開発





改良前

改良後

図-9 開発した仮想洪水体験システムの開発

その後、仮想空間の地形データに基づき RRI モデルを用いて流出計算を行い RRI モデルの流出量を上流端流量として、iRIC-Nays2DH モデルを用いて平面流況シミュレーションを行い、洪水時の流況を再現するシステムへと改良した。最終的に、仮想区間と洪水状況をゲームエンジン (Unreal Engine Versin4:Epic 社) 上で結合した。ゲームエンジンを用いたことで、複数の体験者が遠隔地からインターネットを介して仮想空間にアクセスし、アバター (仮想空間内の分身) を用いて仮想洪水を体験することが可能となった (図-8)。

#### 4. 3 VR のリアリティの向上

2021 年度には、新潟県阿賀町の調査地区において、2019 年台風 19 号時に被災した地区住民へのヒアリングを通じた VR の水災害状況再現に関してリアリティ評価・改良を行い、水災害状況の再現性に関して高評価を得た (図-9)。

#### 5. まとめ

本研究では、わが国の中山間地や発展途上国などの災害情報が乏しい地域において、災害に対する市町村の防の防災・減災活動を支援するために、地域の災害に対する脆弱性を可視化する「洪水カルテ」、防災担当者や住民間の災害情報を共有する「災害情報共有システム」及び VR を用いた「仮想洪水体験システム」を開発した。

その有効性を検証するために、研究協定を結び新潟県阿賀町において、「洪水カルテ」、災害情報共有システム (IDRIS)、仮想洪水体験システムを適用し、その有効性を確認した。IDRIS に関しては、岩手県岩泉町及び山形県鶴岡市への適用を行い、防災関係者から良好な評価を得た。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：阿賀野川水系河川整備計画,2016
- 2) 阿賀町ホームページ 「阿賀町の概要」.
- 3) 広報あが,平成 29 年 4 月号.
- 4) 新潟県福祉保健部福祉保健課：高齢者の現況 (平成 28 年 10 月 1 日現在) .
- 5) 佐山敬洋、建部祐哉、藤岡 奨、牛山朋来、萬矢敦啓、田中茂信：2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 1, 14-29, 2013.
- 6) 栗林大輔,佐山敬洋,近者敦彦,中村要介,工藤俊,澤野久弥：阿賀野川における降雨流出氾濫モデルの適用について、水文水資源学会研究発表会,210-211,2015.
- 7) 栗林大輔、佐山敬洋、近者敦彦、中村要介、澤野久弥：阿賀野川における降雨流出氾濫モデルの適用と浸水開始時刻の再現性検証について、土木学会第 71 回年次学術講演会,239-240, 2016.
- 8) 栗林大輔,大原美保,佐山敬洋,近者敦彦,澤野久弥：氾濫解析モデルを用いた地区レベルの洪水脆弱性把握手法の提案,平成 28 年地域安全学会梗概集 No. 38, 171-174, 2016.
- 9) 国土交通省：新たなステージに対応した防災・減災のあり方, 2015.
- 10) 国土交通省 水管理・国土保全局：浸水想定 (洪水、内水) の作成等のための想定外力の設定手法, 2015.
- 11)国土交通省 水管理・国土保全局：水害の被害指標分析の手引 (H25 試行版), 2013.
- 12) e コミュニティ・プラットフォーム ホームページ <http://ecom-plat.jp>
- 13) 新潟県福祉保健部福祉保健課 「高齢者の現況 (平成



- 29年10月1日現在)
- 14) 国土交通省北陸地方整備局 阿賀野川水系河川整備計画 (平成28年2月)
  - 15) 「信濃川下流域・阿賀野川情報共有プラットフォーム」  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/shinage/platform/public/>
  - 16) 「新潟県防災ポータル 防災マップ」  
<http://www.bousai.pref.niigata.jp/contents/gaikyou/gaikyou.html>
  - 17) スマホ版「新潟県土木防災情報システム」  
[http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen\\_s/index.html](http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen_s/index.html)
  - 18) 「新潟県土砂災害警戒情報システム」  
<http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/sabou/>
  - 19) 「新潟県河川防災情報システム」  
<http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen/>
  - 20) e-コミュニティ・プラットフォーム ホームページ  
<http://ecom-plat.jp/>
  - 21) 栗林大輔、大原美保、岩崎貴志、徳永良雄：「平常時から緊急時までのシームレスな利用を考慮した自治体向け災害情報共有システムの提案」、地域安全学会論文集、Vol.33、pp.247-257、2018
  - 22) 栗林大輔、大原美保、近者敦彦、澤野久弥：「洪水カルテ」による地区危険度評価手法の提案、地域安全学会論文集 No.31、pp.299-307、2017
  - 23) 栗林大輔、崔国慶、大原美保、藤兼雅和：浸水過程を考慮した地区単位での簡便な洪水リスク評価システムの開発、地域安全学会梗概集 No.44、pp.35-38、2019.5
  - 24) 岩手県下閉伊郡岩泉町：岩泉町ホームページ、<https://www.town.iwaizumi.lg.jp/> (2019年3月閲覧)
  - 25) 平成28年台風10号豪雨災害「復旧の記録」ふるさと岩泉の再生、岩手県岩泉町、(2019年3月閲覧)
  - 26) 総務省統計局：政府統計の総合窓口「e-Stat」、<https://www.e-stat.go.jp/> (2019年3月閲覧)
  - 27) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2019年3月閲覧)
  - 28) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報サイト、<https://www.gsi.go.jp/kiban/> (2019年3月閲覧)
  - 29) 国土交通省：地点別浸水シミュレーションシステム検索システム (浸水ナビ)、<https://suiboumap.gsi.go.jp/> (2019年3月閲覧)
  - 30) 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM：  
<https://top-aris.com/> (2020年3月閲覧)
  - 31) 新潟県東蒲原阿賀町：阿賀町ホームページ、  
<http://www.town.aga.niigata.jp/gyousei/kouhou/index.html> (2020年3月閲覧)
  - 32) 国立研究開発法人防災科学研究所：e コミュニティ・プラットフォーム、<https://ecom-plat.jp/> (2020年3月閲覧)
  - 33) ソーシャルオープンプラットフォーム利用推進フォーラム：ソーシャルオープンプラットフォーム利用推進フォーラム、<https://ecom-plat.jp/> (2020年3月閲覧)
  - 34) 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM：  
<https://idris-iwaizumi.jp/index.php/> (2020年3月閲覧)
  - 35) Miho OHARA,Daisuke KURIBAYASHI,Masatoshi DENDA,Yoshimasa MOROOKA,Tsuyoshi KOYABU:Disaster Awareness Improvement by Flood Simulated Experience in Virtual Reality,World Bosai Forum2019,Poster Session,2018
  - 36) 栗林大輔、大原美保、小藪剛史、澤野久弥：イメージ映像での洪水疑似体験による洪水意識及び減災行動意欲向上に関する考察、日本災害情報学会誌「災害情報」Vol.18No.1、pp.35-45、2020
  - 37) 傳田正利・諸岡良優・藤兼雅和：災害「我がこと感」を醸成する洪水リスクコミュニケーションシステム、建設マネジメント技術3月号、pp.22-25、2020
  - 38) 傳田正利・諸岡良優・藤兼雅和：災害「我がこと感」を醸成する洪水リスクコミュニケーションシステム、建設マネジメント技術3月号、pp.22-25、2020.
  - 39) 傳田正利・諸岡良優・藤兼雅和:国土数値情報等と氾濫シミュレーションを用いた仮想洪水体験システムの開発、安全工学シンポジウム2020 講演予稿集,pp.96-97,2020
  - 40) グーグル合同会社:<https://www.google.co.jp/maps> (2021年3月閲覧)

## 2.3 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発

### 2.3.2 水災害情報が乏しい地域での防災・減災活動を支援する水災害リスク情報提供システムに関する研究（水害対応における総合化手法の開発）

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：藤兼雅和、大原美保、傳田正利

#### 【要旨】

円滑な災害対応を行うには、過去の災害の教訓から学び、起こり得る困難をあらかじめ予測して必要な事前対策を講ずる必要がある。労働災害や事故に関する分野では、「事故が起こるかもしれないと思ってヒヤッとしたり、ハッとしたりした事例（ヒヤリ・ハット事例）」を収集し、災害や事故の再発防止・予防に役立てている。そこで本研究では、災害対応担当者が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥って、円滑な災害対応に支障をきたした状況を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」として新たに定義し、過去の災害対応検証報告書から事例を抽出して、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成した。防災担当部署内でこれらの状況をあらかじめ予測しておくことにより、必要な事前対策や能力向上による円滑な災害対応が実現できると考える。

キーワード：災害対応 危機管理 訓練 災害対策本部

#### 1. はじめに

円滑な災害対応を行うには、過去の災害の教訓から学び、起こり得る困難をあらかじめ予測して必要な事前対策を講ずることができるよう、防災担当職員の能力向上を図る必要がある。本研究では、防災担当職員の能力向上手法に関する研究の一環として、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成した。

労働災害や事故に関する分野では、「事故が起こるかもしれないと思ってヒヤッとしたり、ハッとしたりした事例（ヒヤリ・ハット事例）」を収集し、災害や事故の再発防止・予防に役立てている。一方、地方自治体の防災担当職員は、図-1 に示すように災害時に「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥りつつも、災害対応を継続せざるを得ない立場にある。本研究では、このような防災担当職員が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥る事例を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」として新たに定義し、地方自治体が公表している過去の水害対応の検証資料（災害対応検証報告書など）からこれらの事例の抽出を行った。防災担当部署内でこれらの状況をあらかじめ予測しておくことで、必要

な事前対策や能力向上による円滑な災害対応が可能になると期待される。

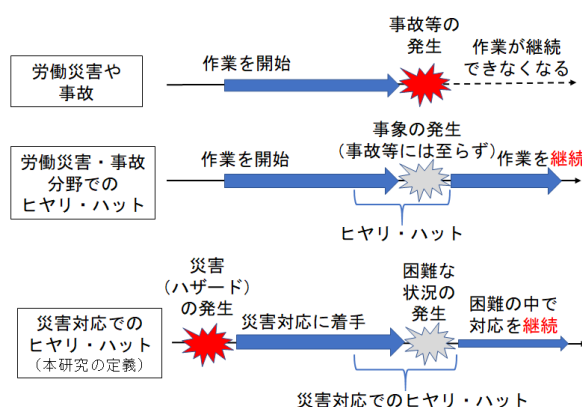


図-1 災害対応ヒヤリ・ハットの定義

#### 2. 過去の災害対応事例から学ぶ必要性

近年、水害が頻発しているが、全国の1,724（2019年12月1日現在）の市区町村の中でみれば、実際の災害対応が生じる市区町村は限られている。一般財団法人日本防災・危機管理促進協会の調査<sup>1)</sup>によれば、2000年から2014年にかけて災害救助法が適用

されたことがある地方自治体は、全自治体の25%である。また、国土交通省の「防災に関する市町村支援方策に関する有識者懇談会」<sup>2)</sup>によれば、約4割の市町村が、過去10年間に災害復旧事業を実施した回数が1回以下である。しかしながら、災害はいつでもどこで発生するかわからないため、過去の自他の自治体の災害経験から学び、次なる災害に備えておく必要がある。一方で、自治体の職員が災害対応を経験したとしても、近年、市町村の職員数が減少しており、災害対応の経験を自治体内で継承していくことが困難になっている。2016年地方公共団体定員管理調査<sup>3)</sup>によれば、全国的な人口減少に伴い、地方公共団体の総職員数は、1995年から2010年にかけて連続して減少しており、対1994年比で約17%減である。

このような現状に対して、内閣府防災担当は、「市町村のための水害対応の手引き」<sup>4)</sup>の作成や、防災スペシャリスト養成研修の開催などの取り組みを行っている。また、消防防災科学センターによる市町村防災研修、阪神・淡路大震災記念人と防災未来センターによる災害対策専門研修（一財）河川情報センターによる災害危機管理研修など、他にも様々な研修が提供されている。研修等を提供する上でも、過去の災害でどのような困難が繰り返し発生してきたかなどを分析し、同じような困難や問題を繰り返さないような研修を行っていくことが重要である。国土交通省では、交通事故や鉄道事故、海運事故を対象としたヒヤリ・ハット情報の収集や、活用法に関するマニュアルの公開を行っている<sup>5)</sup>。災害対応の遅れは、状況次第では二次災害の発生等の更なる問題につながりかねない。本研究では、図-1に示したように、防災担当職員が災害対応の中で「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥る事例を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」を新たに定義し、過去の水害で被災した地方自治体が発行した災害対応検証報告書からこれらの事例の抽出を行う。対象は、まずは比較的発生件数の多い風水害として、事例を取りまとめた「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成する。収集した事例を分類・整理して、これらに対応したしかるべき対策の検討・実施や能力向上を図ることにより、将来の災害時における円滑な災害対応が可能になると考えている。

### 3. 水害対応ヒヤリ・ハット事例集の作成

#### 3.1 水害対応ヒヤリ・ハット事象の収集方法

本節では、水害対応ヒヤリ・ハット事象の収集方法について記す。まず初めに、2000年以降に、「激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律」に基づく激甚災害及び局地激甚災害の指定を受けた風水害イベントをリストアップした。なお、2014年9月11日の札幌市での豪雨は激甚災害には指定されていないが、北海道内で初めて大雨特別警報（浸水害、土砂災害）が発表され、札幌市として33年ぶりとなる市災害対策本部を設置し、札幌市として災害対応の検証も行ったため、対象に含めた。

次に、これらの風水害イベントに対して、被災自治体が災害対応の検証報告書や、災害対応の課題を取りまとめた資料等を発行しているかをWEB上で検索し、45件の資料を特定した。事例抽出に際しては、そもそも自治体自らが職員が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥ったり、円滑な災害対応に支障をきたしたりしたことを認識している必要があるため、自治体が刊行した文書に基づいて、事例を集めることとした。

これらには、「検証報告書」の冊子、「検証結果」をタイトルに含む文書、「記録誌」や「記録集」などの名称の冊子など、様々な形態の文書が含まれる。これらを更に精査し、災害の時系列対応は記録されているが対応の検証は含まない文書を除外した結果、28点の災害対応検証資料が得られた。都府県の文書が11点、市町村の文書が17点である。総ページ数は1933ページである。し

#### 3.2 ヒヤリ・ハット事象のデータベース化

本節では、水害対応ヒヤリ・ハット事象の収集方法について本研究では、上述した28点の災害対応に関わる文書をレビューし、「水害対応ヒヤリ・ハット事象」として、データベースに整理した。この作業にあたっては、畑村(2005)<sup>6)</sup>における「失敗から教訓を学び、これを未来の失敗防止に生かしたり創造の種にしたりするには、一つには失敗を事象から総括まで脈絡をつけて記述するという、もう一つには失敗を「知識化」する作業が必要である」という「失敗学」の考え方を参考にした。本文献では、下記に列記する「事象・経過・原因・対処・総括・知識化」の6項目による失敗の記述を提唱している。

- ・事象（どのような事故、失敗が発生したのか）
- ・経過（どのように失敗が進行したか）

- ・原因（失敗を起こしたと推定される原因）
- ・対処（失敗に際して行った応急措置）
- ・総括（失敗の再発を防ぐための総合的な見解）
- ・知識化（今後失敗を繰り返さないための教訓）

表-1 に、上記の考え方に基づいて抽出・整理した水害対応ヒヤリ・ハット事象の一例（抜粋版）を示す。この事象は、平成 27 年関東・東北豪雨後に、鬼怒川の堤防決壊による水害被害を受けた茨城県常総市が刊行した災害対応検証報告書 7) から抽出したものであり、「安全安心課が電話対応に忙殺されてしまったため、本来担うべき災害対策本部の事務局・参謀機能をほとんど果たせなかった」という内容である。表 1 には、紙面の都合から、要点のみを抜粋して示す。表のうち、「事象の概要」のみは、事象を端的に説明するために抽出者が要約しているが、それ以外の項目は、文献から該当箇所をそのまま抜粋して、データベースに格納している。

「失敗学」では、上記の通り、経過（どのように失敗が進行したか）も記述することを提唱している。本研究では、「経過」については、災害対応の時系列の経過だけでなく、雨量・河川水位等の災害現象としての時系列の経過についてもあわせて理解できるよう、災害対応検証報告書の記述箇所を抽出した。なお、本研究では、即座の判断を求められる緊迫した状況下での事例を中心に収集することとし、事例収集の対象とするフェーズは避難所開設及び避難所の収容までとする。すなわち、避難所の運営や生活再建支援等に関する事例は含まないこととする。

表-1 常総市における事象記述の例（抜粋版）

| 項目    | 災害対応ヒヤリ・ハット事象   |
|-------|---|
| 事象の概要 | 安全安心課が電話対応に忙殺されてしまったため、本来担うべき災害対策本部の事務局・参謀機能をほとんど果たせなかった。   |
| 経過状況  | 平素の市代表電話番号への着信は一日あたり400～500件程度である。災害当日、電話交換手が勤務した7時40分頃から18時30分頃までの代表電話への着信件数は2,058件に上り、その大半が安全安心課への転送を求めるものだった。安全安心課には計6回線の電話があったが、ほぼ常時、全回線が使用中となった。なお、18時30分以降については具体的なデータはない。(p75)   |
| 結果    | 安全安心課は市民等から殺到する電話への対応に忙殺されてしまい、情報の集約や全体的な状況分析、あるいは関係各機関への能動的な情報提供にまでは手が回らなかった。<br>電話交換手は通話の内容から他部署に電話をつなごうと試したこともあったが、「災害対応についてはこちらではわからないので、安全安心課へ回して欲しい」と断られがちだった。(p75-6)   |
| 原因    | 庁内において「災害情報の処理は、安全安心課が担うべきもの」との意識が強く働き過ぎ、同課に電話対応の負担が過剰に偏った。殺到する通話について「情報のトリアージ」が行われなかった。(p76)   |
| 教訓    | 災害対策本部設置時には、安全安心課における電話対応は他部署の職員が代行し、安全安心課職員は災害対策本部の事務局・参謀機能に徹させるべきである。<br>「災害情報に関する電話は安全安心課へ」という意識を変え、災害時には外部からの連絡・問い合わせに対して全庁的な体制で対応することが必要である。<br>電話で寄せられる情報については、その内容の意義や重要性によりスクリーニングを行い、内容によっては安全安心課のみでなく、各関連部署へ電話をつなぐ工夫が必要である。他地域からの叱咤激励的な通話は、電話交換の段階でお引き取り願うことも躊躇すべきでない。(p76) |
| 出典    | 平成27年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告書、平成28年6月13日、常総市水害対策検証委員会  |

### 3.3 水害対応ヒヤリ・ハット事象の分類

3.2 の手順に従い、水害対応ヒヤリ・ハット事象のデータベース化を行った結果、約 500 件の事象が抽出された。国土交通省の交通事故や鉄道事故、海運事故を対象としたマニュアル 5) によれば、図-2 の通り、ヒヤリ・ハットに関する事象収集の後、集めた事象を分類・整理し、ヒヤリ・ハット事例（類型）を抽出した上で、この根本的な原因を分析し、具体的な対策の検討と実施を行うことが重要である。以上の考え方に基づき、データベース化した各事象を分類・整理することにより、同一内容のもの集約・統合をはかり、ヒヤリ・ハット事例（類型）として整理した。この際、既存の文献を参考に、8 つの大カテゴリー（初動・災害対策本部運営・庁内体制・情報収集・情報伝達・関係機関との連携・避難勧告等の発令・避難所）を選定するとともに、大カテゴリーの下に、更なる中・小カテゴリーを設定して、整理した。

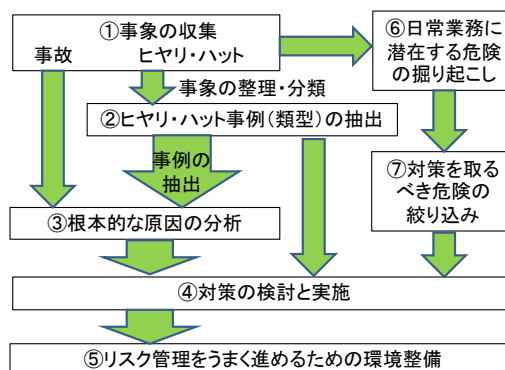


図-2 リスク管理の手順  
(文献 5 の図に筆者が加筆)

### 3.4 水害対応ヒヤリ・ハット事例集の作成

3.3 において、各事象に基づき、ヒヤリ・ハット事例（類型）を整理したものの、地方自治体職員が一度に学ぶにはいささか量が多すぎるため、複数の自治体で繰り返し起こっている事象を更に選定し、これらをわかりやすく学ぶことができる事例集を作成することとした。最終的に選定した水害対応ヒヤリ・ハット事例を表 2 に示す。8 つの大カテゴリー（初動・災害対策本部運営・庁内体制・情報収集・情報伝達・関係機関との連携・避難勧告等の発令・避難所）ごとに、複数の事例を選ぶようにした。また、各データベースには表-1 に示したように「事象の概要」を記述しているが、読者がさらに容易に状況を



イメージできるよう、各事例に対してはわかりやすいタイトルをつけるように工夫した。

図-3 及び 4 に、作成した事例集の表紙及び紙面例を掲載する。各事例の説明は、A4 の見開きページとし、左側には、事例として取り上げた災害対応事象の概要、経過状況、原因、結果を記した。これらはデータベースに基づき、紙面のスペースも鑑みて、分かりやすく説明を記載したものである。左側の紙面の末尾には、取り上げた事象と類似しているその他の事象の紹介も行った。具体的には、類似の事象が見られた他市町村の名称や災害名、災害対応検証資料の名称を挙げている。右側の紙面には、紙面に取り上げた事象及び類似の事象から示唆された教訓や必要な対策例、解説を記述した。作成した事例集は、土木研究所 ICHARM の HP ([https://www.pwri.go.jp/icharm/special\\_topic/20200625\\_flood\\_response\\_collection\\_j.html](https://www.pwri.go.jp/icharm/special_topic/20200625_flood_response_collection_j.html)) に掲載している。なお、地方自治体編に加えて、別冊「新型コロナウイルス感染症への対応編」も作成しており、英語翻訳版も公表している。

表-2 事例集に掲載したヒヤリ・ハット事例

| 章           | ヒヤリ・ハットのタイトル                           |
|-------------|--|
| 1. 初動       | 1.1 役場が水に浸かりそうだと庁舎が浸水想定区域内だと知っていたのに・・・ |
|             | 1.2 災害対応なんて誰もやったことないぞ!どうすればいいんだ!       |
|             | 1.3 雨がひどくなってきたぞ!いつ災害対策本部に移行すればいいんだ?    |
|             | 1.4 災害が起きそうなのに、職員みんながなかなか集まらない!        |
| 2. 本部運営     | 2.1 狭くて遠い本部室で、今、何が起きてるんだ?              |
|             | 2.2 本部室なのに、ホワイトボードもテレビもない!             |
|             | 2.3 うちの班は何をすればいいんだ?あの班は何してるんだ?         |
|             | 2.4 情報が山のようにきているぞ!どれが重要な情報なんだ?         |
|             | 2.5 電話対応ばかりで、災対本部の業務ができない!             |
|             | 2.6 応援に来たけど、何をしたらいいんだろう?               |
| 3. 庁内体制     | 3.1 今の状況、誰が説明してよ!                      |
|             | 3.2 なんで、自分だけこんなに忙しいだ!あの班暇そうぞ!          |
| 4. 情報収集     | 4.1 水位計が故障しているかも?どうすればいいんだ?            |
|             | 4.2 町の中が水浸しだった?夜なので分からないぞ!             |
| 5. 情報伝達     | 5.1 情報は出したけど、住民にうまく伝わっていないようだ!         |
|             | 5.2 こんな雨の中じゃ、外の防災行政無線の音なんて聞こえないよ!      |
|             | 5.3 この情報をあの要配慮者施設は知っているのか?             |
|             | 5.4 この情報、外国人の方も理解できているかな?              |
|             | 5.5 廊下にいるマスクの取材姿勢でもできない!               |
| 6. 関係機関との連携 | 6.1 この情報って関係機関にどう伝えればいいんだっけ?           |
|             | 6.2 県と市で記者発表の内容が違うぞ!                   |
| 7. 避難勧告等の発令 | 7.1 避難勧告って、いつ出せばいいんだっけ?                |
|             | 7.2 まだ避難所が開いていないけど、避難勧告を出していいのかな?      |
|             | 7.3 市外にも広域避難させないと!でも、どうやって?            |
| 8. 避難所      | 8.1 この避難所って、浸水するんじゃないの?                |
|             | 8.2 この避難所全部をこれから職員が開けるのか!?             |
|             | 8.3 避難所までの道が水に浸かってるらしいぞ!               |
|             | 8.4 あ、避難所にテレビがインターネットあったっけ?            |



図-3 事例集の表紙

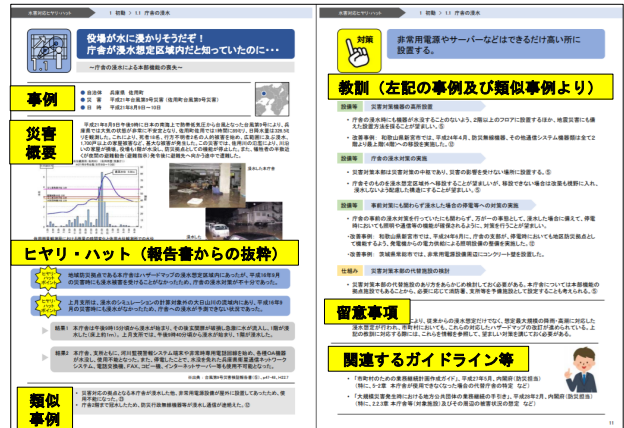


図-4 事例集(地方自治体編)の紙面例

#### 4. 水害対応ヒヤリ・ハット事例集の活用

本事例集をダウンロードできるウェブサイトには、公表後から 2021 年度末までに、7,799 件のアクセスがあった。また、本事例集は、土木研究所の令和 2 年度・3 年度の重点普及技術に選定され、技術展やセミナー等の機会を通じた普及啓発活動を行った。以下に、本事例集の普及に向けて実施した主な活動を列記する。

##### ○事例集を紹介したセミナー等の機会 (日本語)

- ・消防庁主催：2022 年度 全国防災・危機管理トップセミナー (市区長向け) (2022 年 6 月 1 日予定)
- ・内閣府防災主催の行政職員向け防災スペシャリスト養成研修の地域研修 (鳥取県共催) での紹介
- ・先進建設・防災・減災技術フェア in 熊本 2021 での講演 (2021 年、会場での聴講者約 100 人)
- ・土木研究所主催の技術展 (土木研究所重点普及技術としての紹介、各地域ブロックで開催、各 100 名以上)

##### ○事例集を紹介したセミナー等の機会 (英語)

- ・水と災害に関するハイレベルパネル (High Level Experts and Leaders Panel on Water and Disasters (HELP)) : 「The

## 2 国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発

International Online Conference to Address Water-related Disaster Risk Reduction (DRR) under the COVID-19 Pandemic」(2020年、日本国天皇皇后両陛下をはじめ、40カ国から約300名が視聴)

- ・ブラジル国ミナスジェライス州・JICA ブラジル等の共催：「The VIII International Seminar on Disaster Risk Management」(2021年、約300名が視聴)
- ・アジア土木学会連合協議会のウェビナー：「Transdisciplinary Approach for Building Societal Resilience to Disasters under and after COVID-19」(2020年、約250名が視聴)

### ○地方自治体等の職員向けの研修(日本国内)

- ・一般財団法人 全国建設研修センターの研修「事例から学ぶ水災害に備えた市町村の対応」(2021・2022年)
- ・名取川・阿武隈川の大规模氾濫時の減災対策協議会(2021年、流域の14市町の首長及び関係者が出席)
- ・神奈川県川崎市危機管理担当職員向けの研修(2020年、約50人参加)
- ・国土交通省関東地方整備局東京国道事務所職員向けの研修(2021年、約50人参加)
- ・愛知県豊田市職員向けの研修(2021年、約100人参加)  
本研修内容に関して、令和3年度国土交通省 国土技術研究会 一般発表「活力」部門の優秀賞を受賞。

### ○地方自治体等の職員向けの研修(海外)

- ・UNESCO 西アフリカプロジェクト(WaDiRe-Africa)で

の洪水防災eラーニング(2021年、288人参加)

- ・フィリピン・ダバオ市水防災関係職員へのeラーニング(文部科学省統合プログラム、2021年、30人参加)
- ・インドネシア防災関係機関職員向けのeラーニング(文部科学省統合プログラム、2021年、48人参加)
- ・インドネシア防衛大学校関係者及び学生向けのeラーニング(2020年、2021年、各50人参加)

## 5. 水害対応ヒヤリ・ハット事例を効率的に学習・点検できるWEBシステムの開発

水害対応ヒヤリ・ハット事例は近年の水災害の頻発に対応し、ICHARMのHPを介して活発なダウンロードを記録している。印刷媒体を介しての普及も有効である。最新の研究成果を適時に配布するためには、PDFのような媒体だけでなく、IDRIS(ICHARM Disaster Risk Information System: 災害情報共有システム)のような情報基盤を介して配布する方法もあるのが望ましい。

そのため、別課題で開発するIDRISのコンテンツとして、水害対応ヒヤリ・ハット事例を格納する初歩的な取り組みを令和3年度に実施した(図-5)。IDRISとヒヤリ・ハット事例集の連携は、初歩的な段階であるが、今後の社会的要請を考慮し、本格的な連携を検討する予定である。



図-6 IDRIS(鶴岡市)とヒヤリハットの連携イメージ図

## 6. まとめ

本研究では、災害対応担当者が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥ったり、円滑な災害対応に支障をきたしたりする状況を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」として定義し、過去の水害で被災した地方自治体が発行した災害対応検証報告書から事例を抽出し、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成した。

なお、ヒヤリ・ハット事象は、当事者や当該組織内で問題として認識されなければ、事象としては抽出されない。今回は、自治体から公表されている災害対応検証報告に基づいて事例を抽出しており、これらの報告書内では取り上げられていないことは網羅できていない可能性もあることに留意しておく必要がある。

## 謝辞

本研究では、自治体の災害対応検証報告を利用して検討を行った。災害対応検証に携わった自治体関係者の皆様に敬意を表するとともに、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 一般財団法人日本防災・危機管理促進協会：地方自治体における災害対応経験の継承に関する調査研究—自治体規模と被災経験が災害対応準備に与える影響—、2017
- 2) 国土交通省 防災に関する市町村支援方策に関する有識者懇談会：防災に関する市町村支援方策のあり方について(提言)、2016
- 3) 総務省：平成 28 年地方公共団体定員管理調査、2016
- 4) 内閣府（防災担当）：市町村のための水害対応の手引き、2016
- 5) 国土交通省大臣官房運輸安全監理官室：事故、ヒヤリ・ハット情報の収集・活用の進め方～事故の再発防止・予防に向けて～（自動車モード編）、2009
- 6) 畑村洋太郎：失敗学のすすめ、講談社文庫、2005  
常総市水害対策検証委員会：平成 27 年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告書—わがこととして災害に備えるために—、2016