

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。

さらに令和元年度には、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洪水予測システムについて、潮位変動の影響を受ける河川に適用するための H-Q 式の逐次修正手法の開発、解析雨量と速報版解析雨量を効果的に組み合わせる方法の開発、危機管理型水位計を活用した観測水位の同化手法の開発等を行うとともに、令和2年度新たに構築した 60 河川のモデル含めた計 95 河川のモデルの予測精度検証を行い、7 割以上の河川で 2 時間以上のリードタイムの確保できたことを確認した。

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について検討した。大井川ではアンサンブル降雨予測システムの運用に向けた検討と 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結果をスレットスコアで評価したところ、気象庁の MSM 予測よりも高い精度を示した。また、利根川を対象として気象庁 3 ヶ月予報のダウンスケーリングによる季節予測手法について検討し、水資源管理に有効な予測が得られる可能性を示した。さらに、犀川流域における高瀬ダムで流入量のアンサンブル予測を 2018 年 7 月～9 月の暖候期において行い、中規模出水で 24 時間前、12 時間前、6 時間前で誤差 5% 以内で流入量を予測した。

数十 μm 程度の微細土砂から巨石に及ぶ幅広い粒径を有する中山間地河川の流砂量を適切に評価するために、連行速度を用いた微細土砂の侵食率の評価法を提案するとともに、4 種類の異なる河床材料を用いた水理実験を行い、連行の概念が微細土砂により構成される河床に適用可能であることを示した。また、本手法を用いて 2019 年の東日本豪雨における五福谷川の災害の平面二次元解析を行った結果、浸水範囲や地形変化を概ね表現することができた。

山間部のダム流域を対象に、地上レーザー測量及び UAV 写真測量を行い、積雪分布を計測し、計測手法の比較とシミュレーションによる再現を行った。その結果、積雪分布計測において UAV 写真測量に優位性があり、シミュレーションにより積雪分布を概ね再現可能である事を示した。

(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

ブラジルを対象に適用性を確認した植生動態－陸面結合データ同化システム (CLVDAS) による渇水評価について、異なる気候区域や農作域への適用性について検討するため、西アフリカとグアテマラ共和国への適用について検討した。その結果、推定値と穀物収穫量との間に良好な整合性を見出すことができた。

フィリピン・ダバオ川流域とインドネシア・ソロ川流域を対象に地球温暖化による将来の降雨条件を推計し、気候変化影響による洪水・渇水リスクを評価した。全球モデルの中では高解像度で気候変動計算が実施された気象研究所の全球気候モデル (MRI-AGCM) の将来予測結果をもとに、領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリングによって、5km メッシュの降水量や気温等のデータを作成した。また、降水量データから、気候変動にともなう豪雨や少雨の出現傾向を調査するとともに、得られた降水量等の情報を WEB-RRI モデルに導入し、

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

将来における浸水域の拡大や無降雨日数の増加について計算を行った。

平成 28 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の分析を行い、発災からの経過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おらず、住宅再建、生活回復、地域活動の順に、回復には時間を要することが把握できた。

(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

「ICHARM 災害リスク情報共有システム (ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS)」の普及に向けた新潟県阿賀町における実証実験の実施・令和元年台風第 19 号におけるシステム稼働評価を行うとともに、VR 技術を活用した仮想洪水体験システムの効果に関する検証を行い、その効果を確認した。

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.

In the fifth year of this program (FY2020), 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：大沼克弘、望月貴文、柿沼太貴、沼田慎吾、玉川勝徳

【要旨】

令和元年度までに開発した、中小河川を対象とした安価・簡便な洪水予測システムについて、以下の拡張・改良を行った。潮位変動の影響を受ける河川への対応として、H-Q 式を逐次修正する手法を適用した。実績雨量として、精度の高い解析雨量と、配信間隔が短く豪雨が捕捉できる可能性があり配信遅延の少ない速報版解析雨量を効果的に組み合わせる方法を開発した。河道形状が要因となり精度が得られないと思われるケースについては、必要に応じて実測断面をモデルに反映する方法を開発した。実際の土壌地質を踏まえた代表パラメータセットの選択や、水田や畑をパラメータ最適化の対象とすることとし、その方法をとりまとめた。令和2年度新たに追加した60河川のモデル構築と令和元年度までに構築した35河川のモデルの改良を行うとともに、これらの河川の予測精度の検証を行った。危機管理型水位計の特性（一定の水位以上になった時点で観測を開始する）を踏まえた観測水位の同化手法の開発を行った。

キーワード：中小河川、水位予測、RRI、粒子フィルタ、解析雨量、速報版解析雨量、危機管理型水位計

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。

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

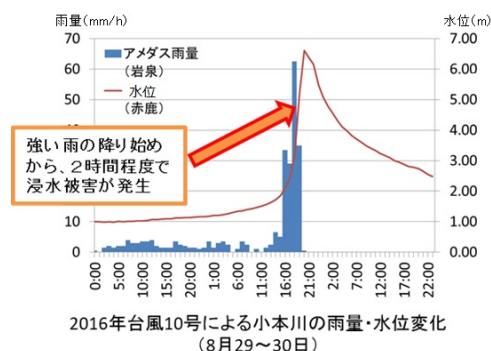


図-1 中小河川における急激な水位上昇

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¹⁾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²⁾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 式が作成されていたり、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ふ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³⁾。

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逡減部までの期間、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³⁾。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⁴⁾⁵⁾。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まれている⁶⁾⁷⁾。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⁸⁾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⁸⁾。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・描画・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、計算結果の描画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。この事例では、7 月 14 日 1:30

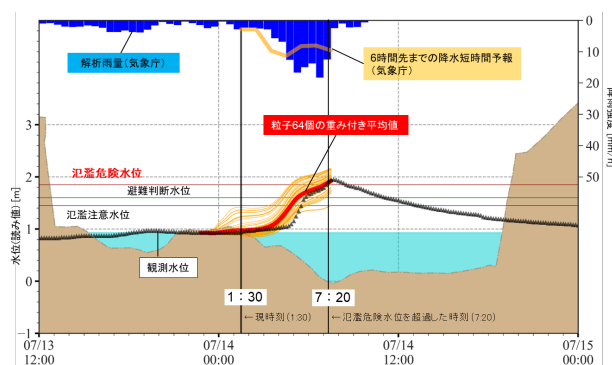


図-2 洪水予測の事例

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。結果的に、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できている。

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、計算機資源を効率的に配分し各計算機の負荷を均衡化する手法の検討を進めている

3. 課題と検討状況

令和2年度に掲げられた課題及びその検討状況について以下に示す。

3.1 潮位変動の影響を受ける河川への対応

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。本研究ではこれまで、洪水中の河床変動が顕在化する河川を再現するため、H-Q式を逐次推定する手法について検討を行ってきた。この手法を応用し、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-3(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。今後は、洪水中の河床変動が顕著な河川等で本手法の検証・改善を行っていく。

3.2 降雨量データの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。組み合わせ方法として有効であると考えられるもの図-4に示す。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。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。

3.3 河道設定方法の開発

洪水解析には、河道幅・水深が必要となり、これまで、安価・簡便に河道形状を決定するためにレジーム則が採用されていたが、その方法では表現できない河道がみられた。具体的には、実測断面として、

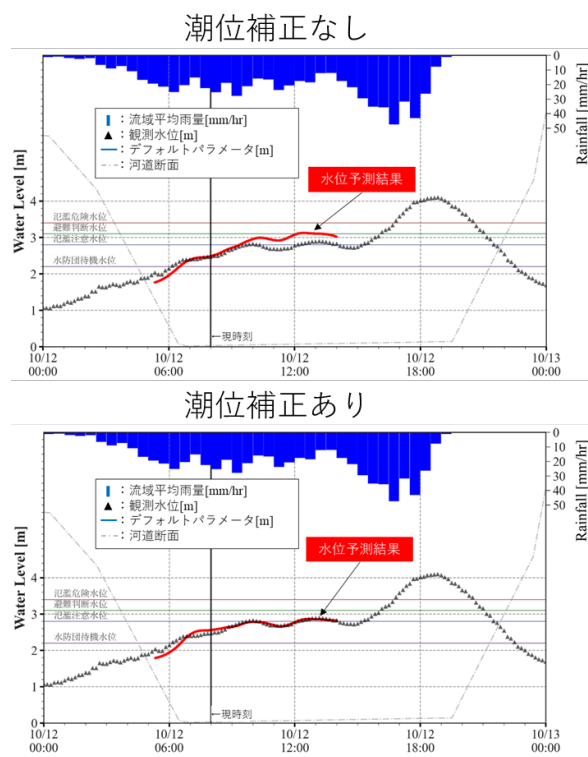


図-3 潮位補正なし(上)とあり(下)の水位予測結果

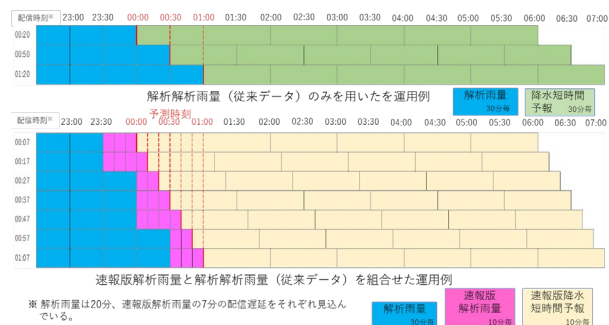


図-4 データの組み合わせ方法

国土地理院地図および Google 航空写真から河道幅と水深を設定し、その結果をレジーム則と比較した結果、とくに下流域ではレジーム則と乖離が見られた(図-5 参照)。このように河道形状が要因となり精度が得られないと思われるケースについては、必要に応じて実測断面をモデルに反映することとし、その手法を整理した。これにより、断面形状が要因で精度が確保できなかった河川の改善が期待される。

3.4 土地利用(水田、畑等)の設定方法の開発

中小河川においては、流域の土地利用の大半が山地の河川が多く、これまではパラメータ最適化の対象を山地に絞った検討を行ってきた。(その他の土地利用はデフォルトパラメータ)しかし、水田や畑の割合が多い河川では、デフォルトパラメータでは十分な再現性が得られないことがある。そういった場合は、実際の土壌地質を踏まえた代表パラメータセットの選択や、水田や畑をパラメータ最適化の対象とすることとし、その方法を取りまとめた。例えば、デフォルトでは畑は「Loam」、水田は「Clay」であるが、表層地質図等を参考に、実際の土質地質を踏まえた代表パラメータに変更することとした。さらに、水田や畑をパラメータ最適化の対象とすることも検討している。

3.5 新たに追加した 60 河川を含む 95 河川のモデル構築・改良や予測精度の検証

令和 2 年度は、台風 19 号による被災を受けた河川を中心に、60 河川を対象に新たにモデル構築を行った。モデル化する 60 河川の決定のためのデータ収集・整理を行い、モデル化の条件等を整理し、モデル化する河川の選定を行った。(約 150 の候補河川から随時選定) 60 河川について、モデル構築、パラメータ最適化 (SCE-UA 法)、粒子フィルタの設定を行った。令和元年度までに構築した河川と合わせ

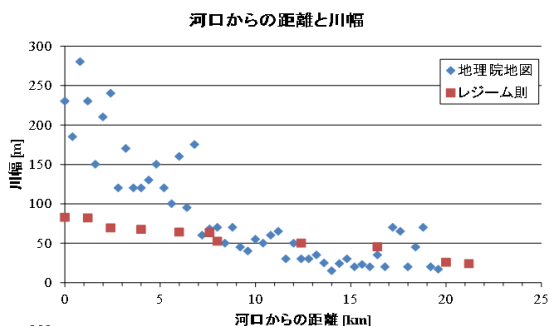


図-5 レジーム則では河道を表現できない事例

て、95 河川で精度の検証を実施した。降雨データに実績雨量(解析雨量)を用いた検証では、7 割以上の河川において、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⁹⁾。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 95 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。

3.6 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)手法が必要となる。

令和 2 年度はその導入として、代表河川において粒子フィルタによるデータ同化に既存の水位計データに加え、一つの危機管理型水位計データを用いてさらに水位予測の精度を高める予測計算を試行した。2 地点を同時に評価する多地点同化方式と、流域を 2 つに分けて順番に解くカスケード方式の(図-6 参照)についてそれぞれの特徴を整理した。その結果、カスケード方式では 2 つの流域があるため、パラメータも 2 種類存在し、より実態に近い再現計算が可能となること、また、多地点同化では危機管理型水位計の観測が開始された時点から計算方法が変わるため、計算が安定しない場合があることから、既存の水位計地点の水位予測には、カスケード式を採

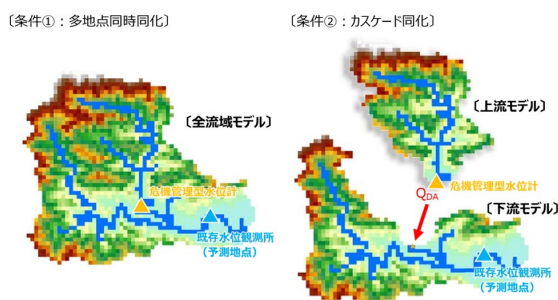


図-6 多地点同時同化とカスケード同化

用することが有効であると考えられた。今後も引き続き危機管理型水位計の有効な活用方法について検討を進める。

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。中小河川では河道情報や洪水の観測データが不足している河川が多く、そのような河川においてもモデル構築を行う手法を開発するため、今後は河川の特徴からパラメータを推定する手法の開発を行う予定である。さらに、全国展開へ向けて、都道府県等の河川管理者等が自らモデル構築を行うことを支援するための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。

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 巻 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 巻、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：大沼克弘、牛山朋來、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するものである。令和 2 年度は大井川ではアンサンブル降雨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た。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。さらに、犀川流域における高瀬ダムでアンサンブル流入量の予測を 2018 年 7 月～9 月の暖候期で検討した。その結果、中規模出水で 24 時間前、12 時間前、6 時間前で誤差 5%以内で流入量を予測した。

キーワード： アンサンブル降雨予測、WEB-DHM-4cS、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。

本研究は 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するものである。

令和元年度は、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。

令和2年度は、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「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)」の成果の一部を記したものである。

2. 対象流域

本検討では、領域アンサンブル39時間降雨予測の運用を大井川上流域、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検討を利根川流域、39時間先アンサンブル流入量予測手法の検討を犀川流域を対象に実施した。

3. 大井川上流域を対象とした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

大井川上流域領域気象モデルの対象領域を図-1 に示す。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 重ネスティングとした。

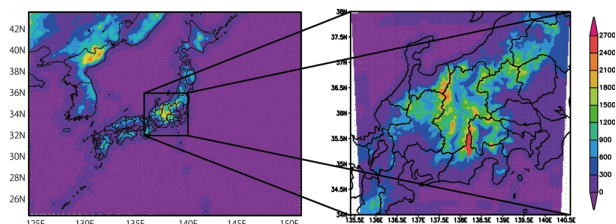


図-1 領域気象モデルの計算領域
(左: 外側領域: 格子間隔 15km、
右: 内側領域: 格子間隔 3km)

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.,2007¹⁾、Miyoshi and Kunii 2011²⁾)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 領域アンサンブル降雨予測の運用

令和元年度までに、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した。令和2年度は、この数値天気予報システムを用いた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月以降現在の連続計算データを作成した。

2018～2020年のスレットスコアを雨量強度別に描いた図を図-2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について、

(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。

(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。

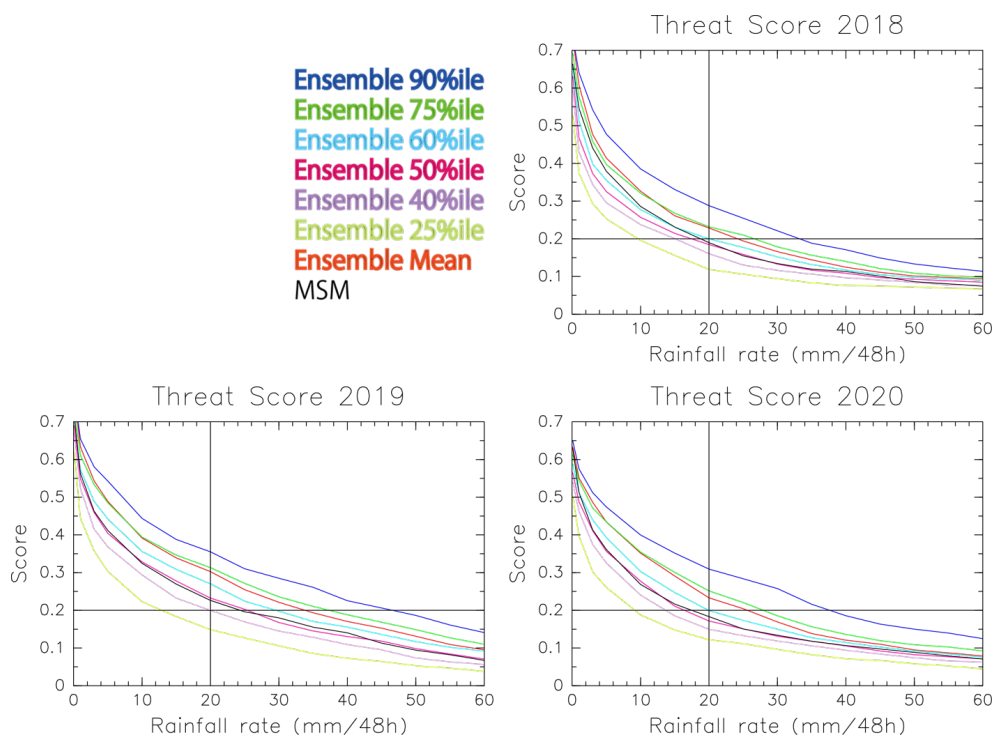


図-2 2018～2020年度6月～10月における降雨予測精度スレットスコア。大きい値が良い成績を示す。横軸は降雨強度を示す。線の凡例を図中に示す。

(3)青線で示した 90 パーセンタイル値は、すべての線の中で最も大きい。つまり、90パーセンタ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 パーセンタイル値との関係、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。

本検討では、利根川を対象とした 3 ヶ月予測の結果を紹介する。領域気象モデルの計算領域を図-3に、利根川流域内の流域分割を図-4に示す。気象庁では、5 日に一度 13 アンサンブ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

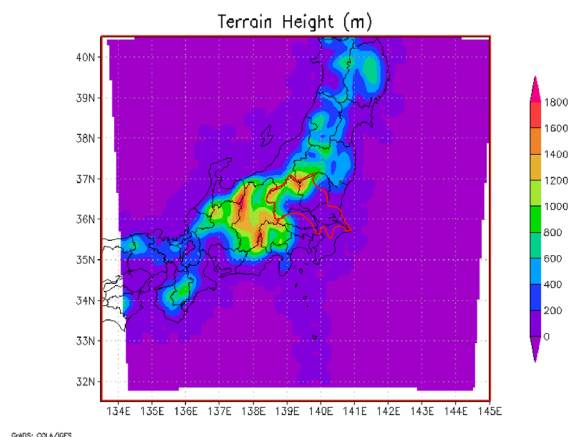


図-3 領域気象モデルの計算領域
赤枠は利根川流域である。

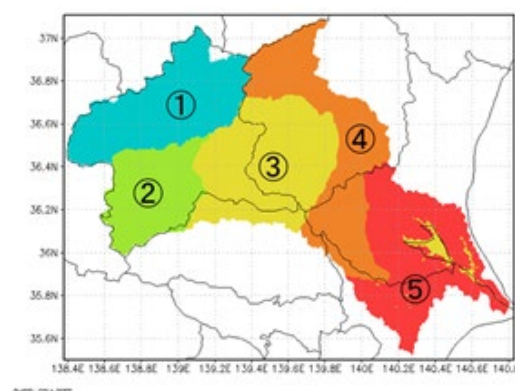


図-4 利根川流域内の支流分割図

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-5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 20200605

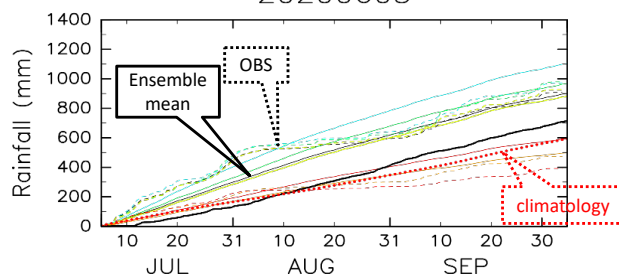


図-5 3ヶ月予測による積算降水量、2020年7月~9月の例。黒太実線はGCMオリジナルの全流域平均雨量、赤点線はClimatology (平年値) の全流域平均、他の細線は実線がダウンスケーリング、破線は解析雨量による観測値、色は黒は全流域、①水色、②黄緑、③黄色、④オレンジ、⑤赤は図-4に対応する支流域。

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。また、今後は得られた降水量を水文流出モデルに導入し、河川流量や水資源管理の効果について、有効性を調査していきたい。

5. 犀川流域高瀬ダムにおけるアンサンブル流入量予測

令和元年度は、大井川上流域を対象に、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-4cS)の開発、また、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を畑薙第一ダムを対象に実施した。

令和2年度はその横展開として、犀川流域においてWEB-DHM-4cSを開発し、暖候期を対象に上流域の高瀬ダムにおけるアンサンブル流入量予測を実施した。犀川流域の位置と流域内におけるダムの位置を図-6に示す。

5.1 検討手法

高瀬ダムは「第一類ダム」(河川の従前の機能の維持のための洪水貯留を求められるダム)に分類される。今回、効果的な発電と下流の洪水調節に資するためのダム操作の検討にあたり、年間を通して低水、洪水、融雪出水まで

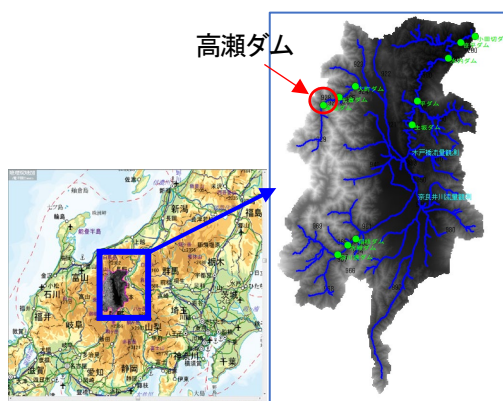


図-6 犀川流域の位置図と流域内ダムの位置図

推定可能な流出モデルを構築しダムへの流入量を精度良く予測する必要がある。そこで本研究では大井川同様、Shrestha et al³⁾, Moiz et al⁴⁾, Naseer et al⁵⁾により開発・検証された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)を構築し、牛山らによる領域アンサンブル降雨予測を入力することで高瀬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。

5.2 WEB-DHM-4cSの校正と検証

まず、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、年間を通して長期で連続的にモデルを実行し検証した。

寒候期の降雪・積雪・融雪は不確定性の高い水文量である。暖候期で良く校正された流出モデルが寒候期で計算流量が観測値と合わない原因は融雪出水の推定精度と考えられる。そのため、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。結果を図-7に示すように期間を通してWEB-DHM-4cSで積雪域が良く再現されている。

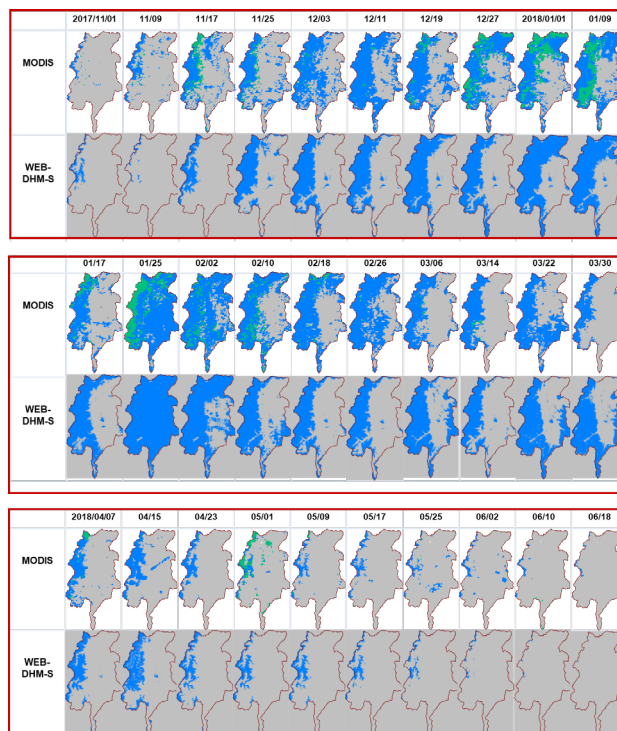


図-7 2017年11月~2018年6月における積雪域の比較
(赤枠線内の上段:人工衛星MODISが観測した積雪域、
下段:WEB-DHM-4cSが計算した積雪域)

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-8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-8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。

5.3 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-9に示す。図-9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

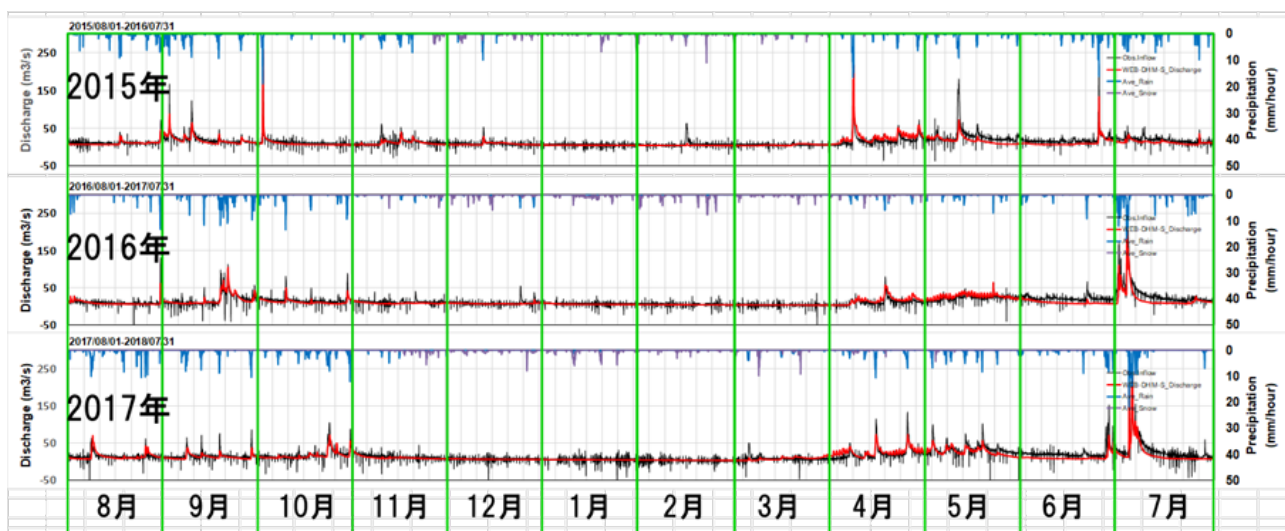


図-8 2015年8月~2018年7月(3水文年)における高瀬ダム地点でのWEB-DHM-S実行結果

(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

[Nash係数 2015年:0.53, 2016年:0.63, 2017年:0.55]

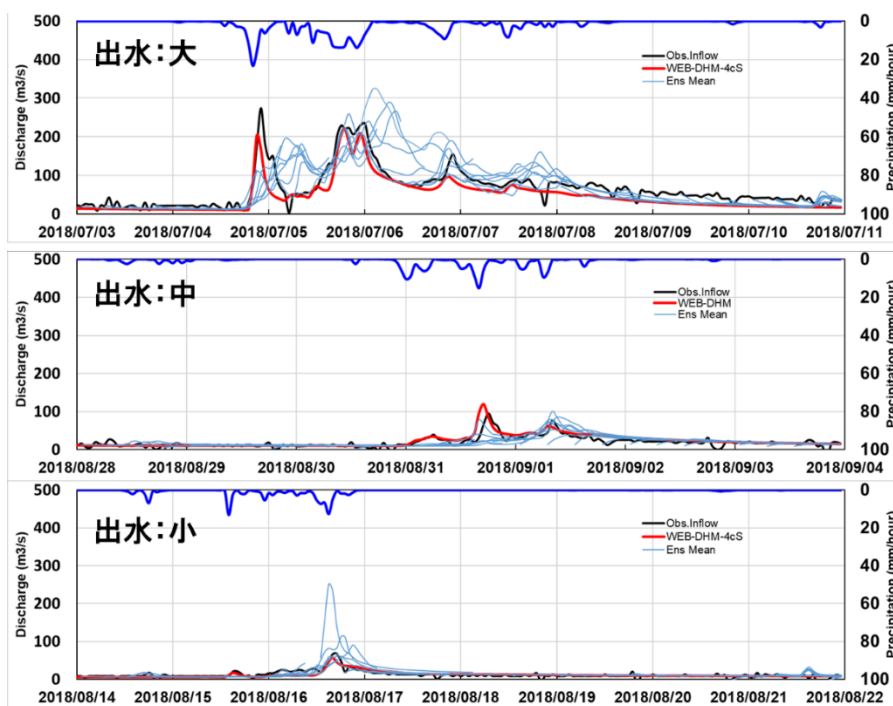


図-9 高瀬ダムにおけるハインドキャスト結果

(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)

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。

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-1 に示す。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。今後は別の出水イベントでも検討することとする。

表-1 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 (m ³ /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

6. まとめ

令和元年度までに、アンサンブル降雨予測では 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した。

令和 2 年度はこの数値天気予報システムを用いた運用を行った。さらに、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。基準雨量強度を超える雨を予測できたかどうかについてスレットスコアで検討し、1) アンサンブル平均は、緑線(75 パーセンタイル値)に近い、2) 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)90 パーセンタ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。という共通点が見られた。

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が示された。しかしながら、今回検討した結果は一例であり、予測精度は必ずしも常に高いわけではないため、今後より多くの事例について調査を続ける必要があることが課題である。

犀川流域において WEB-DHM-4cS を開発し、2018 年 7 月～9 月の暖候期を対象に上流域の高瀬ダムにおいて、大中小の出水を対象にアンサンブル流入量予測を実施した。中規模出水で 24 時間前、12 時間前、6 時間前で誤差 5% 以内で予測するなど高精度での予測結果を示した。また、他の出水事例でも検証することを課題とした。

参考文献

- 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).
- 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).
- 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>
- 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.
- Naseer, A., Koike, T., Rasmy, M., Ushiyama, T., & Shrestha, M. (2019). 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. <https://doi.org/10.1029/2018JD029811>.

2.1 洪水予測並びに長期の水収支解析の制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：大沼克弘、原田大輔、南雲直子、Robin K. BISWAS、江頭進治

【要旨】

本研究では、数十 μm 程度の微細土砂から巨石に及ぶ幅広い粒径を有する中山間地河川の流砂量を適切に評価するために、連行速度を用いた微細土砂の侵食率の評価法を提案した。その手法の妥当性を検討するために、4種類の異なる河床材料を用いた水理実験を行った結果、連行の概念が微細土砂により構成される河床に適用可能であることが示された。本手法を用いて2019年の東日本豪雨における五福谷川の災害の平面二次元解析を行った結果、浸水範囲や地形変化を概ね表現することができ、微細土砂の挙動が洪水流に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：微細土砂、連行速度、土砂・洪水氾濫、河床変動、平面二次元洪水流解析

1. はじめに

2017年の九州北部豪雨における赤谷川の災害¹⁾や2019年の東日本豪雨における五福谷川の災害²⁾に見られるように、豪雨時に山間部に崩壊・土石流が発生すれば、これの堆積土砂が洪水流によって侵食されて、多量の土砂が下流に輸送される。下流域の比較的勾配が緩い区間で氾濫が生じれば、これらの土砂は河道の内外に堆積し、著しい河床変動や流路の分裂を引き起こし、洪水氾濫の被害を助長させる。中山間地河川でこのような土砂・洪水氾濫が頻発する中、流砂量及びそれに伴う地形変化を適切に予測する手法が求められており、洪水想定被害図の作成にあたってもこのような土砂水理現象を考慮していくことが求められている。

このような現象を水深平均二次元場を取り扱うためには、流水および流砂に関する支配方程式が用いられる。これらのうち、流水中の浮遊砂の質量保存則は次の移流拡散方程式で記述される。

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cuh}{\partial x} + \frac{\partial cvh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + E - D \quad (1)$$

ここに、 c ：浮遊砂の濃度、 h ：水深、 u 、 v ：それぞれ x 、 y 方向の流速、 ε_x 、 ε_y ：それぞれ x 、 y 方向の分散係数、 E 、 D ：それぞれ河床表層土砂の侵食率及び河床への堆積率である。堆積率は、土粒子の沈降速度と基準面濃度で評価される。侵食率については非常に多くの研究が行われ、基準面土砂濃度に関して多くの式が提案されてき

た^{3),4),5)}。しかし、赤谷川の災害や五福谷川の災害に見られるように、数十 μm 程度の微細な土砂が多量に供給され、これを扱う必要がある場合、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。中山間地河川の土砂水理現象を扱うためには、数十 μm 程度の微細な土砂から砂礫・巨石をも含む幅広い粒径の土砂の流砂量を適切に評価する必要がある。とりわけ微細土砂を扱うことのできる手法は不足しており、その開発が求められている。そこで本研究では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する。そのうえで、提案するモデルを水深平均二次元場に適用して、その有用性について検討する。

2. 微細土砂の掃流と浮遊

(1) 河床表層土砂の掃流

図-1は、微細土砂が緩く堆積している河床表層の応力分布の模式図であり、河床表面にはせん断応力 τ_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 ϕ を導入して次式のように表される。

$$\tau_y = \rho(\sigma/\rho - 1)c_s g(h_s - z)\tan\phi \quad (2)$$

ここに、 τ_y ：降伏応力の深さ方向の分布、 ρ ：水の密度、 σ ：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

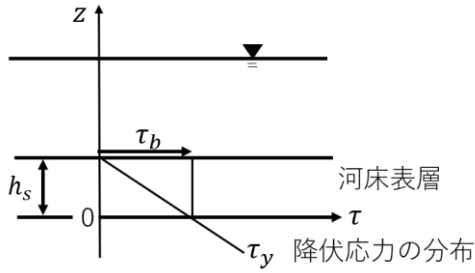


図-1 河床表層の応力分布に関する模式図

で、ここでは便宜上平均濃度を用いる。

図-1 を参照し、河床に作用するせん断応力 τ_b と τ_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。

$$\frac{h_s}{h} = \frac{i_e}{(\sigma/\rho - 1)c_s \tan\phi} \quad (3)$$

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。

$$\rho \nu \frac{\partial u_s}{\partial z} = \tau_b - \tau_y \quad (4)$$

ただし、 ν 、 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(3)、(4)より、

$$\frac{\partial u_s}{\partial z} = \frac{u_*^2 z}{\nu h_s} \quad (5)$$

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。

$$u_s(z) = \frac{1}{2} \frac{u_*^2 z^2}{\nu h_s} \quad (6)$$

$$V = \frac{1}{6} \frac{u_*^2}{\nu} h_s \quad (7)$$

流砂量 q_b は、 $q_b = c_s V h_s$ であることから、

$$q_b = \frac{c_s u_* h_s}{6} \frac{u_* h_s}{\nu} \quad (8)$$

と表される。

(2) 表層土砂の浮遊と平衡土砂濃度

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-2 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。

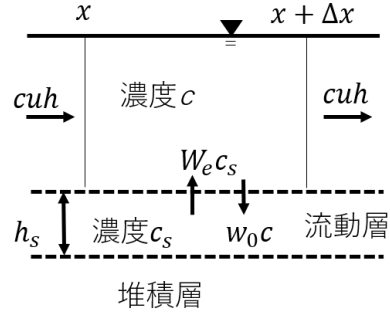


図-2 流水中の極微細土砂の収支

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cuh}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + W_e c_s - w_0 c \quad (9)$$

ここに、 c : 水中の土砂粒子の濃度、 u : 平均流速、 ε : 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、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = W_e - w_0 \frac{c}{c_s} \quad (10)$$

と表される。式(9)、式(10)より、土砂濃度 c は次のように記述される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \left\{ W_e c_s \left(1 - \frac{c}{c_s} \right) - w_0 c \left(1 - \frac{c}{c_s} \right) \right\} \quad (11)$$

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。

$$c_e = \frac{W_e}{w_0} c_s \quad (12)$$

ここで、成層密度流の連行現象に関する研究成果⁸⁾、⁹⁾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。

$$\frac{W_e}{u} (= e) = \frac{K}{R_{i*}} \quad (R_{i*} = \frac{\Delta\rho}{\rho} gh/u^2) \quad (13)$$

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・江頭⁹⁾によれば、 $K = 1.5 \times 10^{-3}$ とされている。

式(12)及び式(13)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。

$$c_e = \frac{K}{(\sigma/\rho - 1) n \sqrt{g}} F_r^2 \frac{u_*}{w_0} \quad (14)$$

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

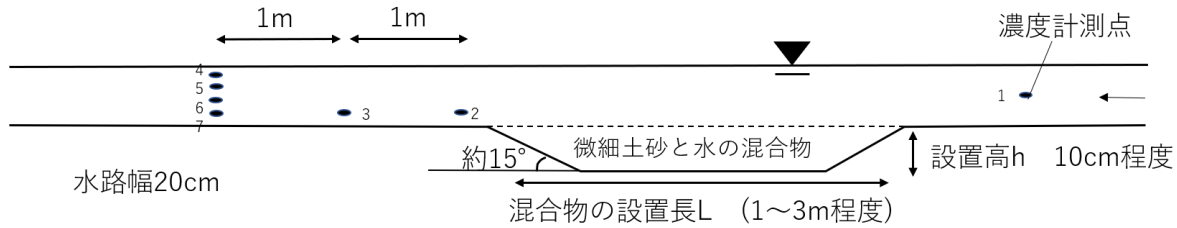


図-5 実験水路の模式図

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
1-2	1.0	土砂1	7.0	8.0	10.0	12.0
						17.0
						22.0
1-3	1.0	土砂1	7.0	8.0	7.0	12.0
1-4	1.0	土砂1	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
1-7	3.0	土砂1	10.0	10.0	7.0	8.0
						12.0
						17.0
1-8	3.0	土砂1	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
						10.0
2-2	1.0	土砂2	3.5	8.0	7.0	29.4
						7.0
						10.0
3-1	1.0	土砂3	10.0	10.0	7.0	23.0
						3.5
						7.0
4-1	1.0	土砂4	3.5	8.0	7.0	57.4
						7.0
						10.0

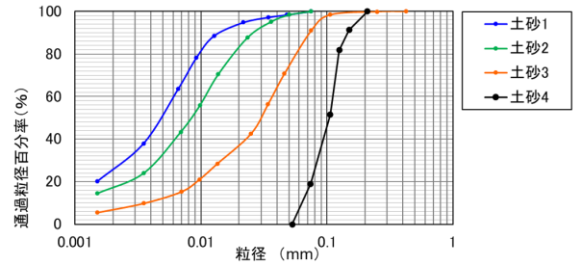


図-4 実験に用いた土砂の粒度分布

では図4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/cm³)程度である。図5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5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だが、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のデータについては検討を行わない。

図5に示す土砂と水の混合物の貯留空間については長

している。

3. 浮遊砂の侵食に関する実験

(1) 実験の概要

式(13)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

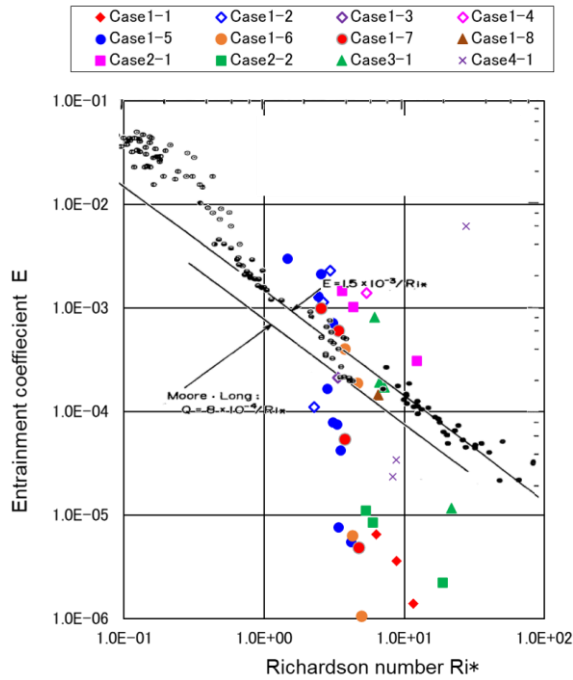


図-6 実験結果と既往の連行に関する研究との比較
(芦田ら⁶⁾に加筆) (縦軸は連行係数、横軸はリチャードソン数)

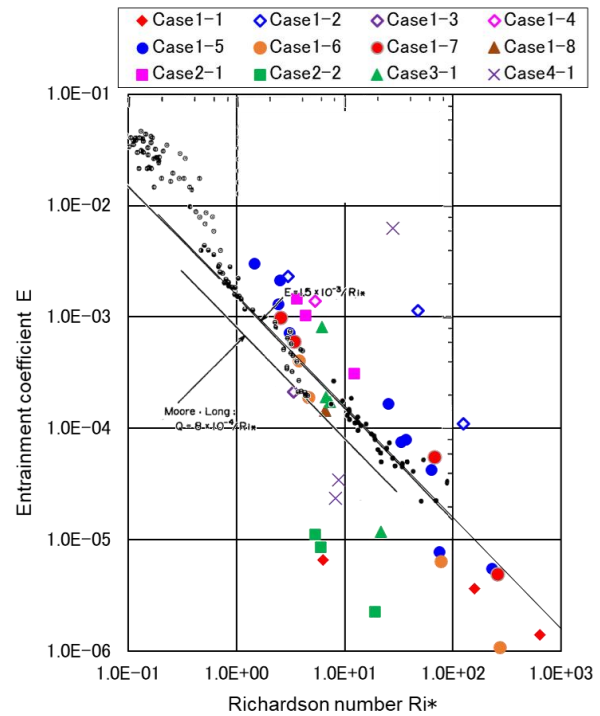


図-7 修正 Ri*に対する連行係数の実験結果
(芦田ら⁶⁾に加筆) (縦軸は連行係数、横軸は修正リチャードソン数)

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。

(2) 実験の結果

式(9)に基づいた以下の式(15)を用いて、連行速度(連行係数)を算出する。

$$q \frac{\partial c}{\partial x} = W_e c_s - \alpha w_0 c \quad (15)$$

ここに、 q は単位幅流量で $q = uh$ 、 α 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と思われるため、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(18)は以下のように変形される。

$$W_e = c(l)q / c_s L \quad (16)$$

$c(l)$ 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-5 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(15)の解は次のようになる。

$$W_e = \frac{\alpha w_0 c(l)}{c_s} e^{\alpha w_0 l / q} \frac{1}{1 - e^{-\alpha w_0 L / q}} \quad (17)$$

上記の方法により求めた連行速度から式(13)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⁶⁾と比較したものが図-6 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 Ri_* に反比例するという式(16)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 τ 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。

$$\tau u \sim \Delta \rho g h W_e \quad (18)$$

式(18)を変形すると、次式を得る。

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

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(19)は次式のように変形される。

$$\frac{W_e}{u} \sim \frac{\nu}{u^2} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{1}{R_{i*}} \quad (20)$$

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とする、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。

$$\frac{\nu_0}{u^2} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{1}{R_{i*0}} = \frac{\nu_c}{u^2} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{1}{R_{i*c}} \quad (21)$$

ここに、 ν_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、 ν_c 、 R_{i*c} はそれぞれ水と土砂の混合物の層の動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。

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

式(22)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-7である。 ν_c/ν_0 の値については、芦田ら⁷⁾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-7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. 災害事例への適用

(1) 災害の概要及び計算条件

本研究で提案する手法を2019年の東日本豪雨における五福谷川の災害に適用し、その有用性について検討する。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(宮城県丸森

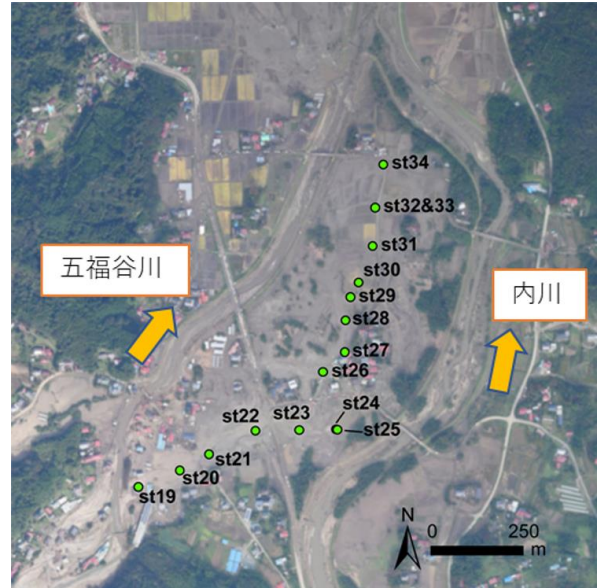


図-8 土砂の採取地点

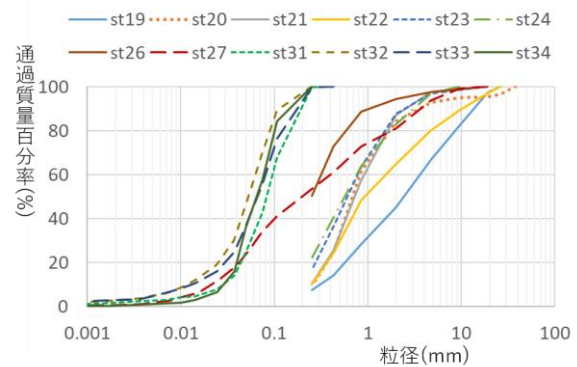


図-9 採取した河床材料の粒度分布(線がほぼ重なるため図-5に示す採取地点のうち一部のデータを省略している。また、一部の試料は沈降分析を実施していないため線が途中で切れている。)

町、流域面積約106km²)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24km²)崩壊・土石流の発生箇所が多い。

著者らが図-8に示す範囲で表層の土砂を採取した結果を図-9に示す。特にst31地点よりも下流側では表層に100 μ m以下の微細土砂が堆積しており、これらの土砂が洪水期間中に上流から多量に供給されていることが示唆される。これらの微細土砂の挙動を解析する場合、これまでウォッシュロードとして扱われていたが、本研究の手法を用いることで侵食率 E を直接評価することができる。

五福谷川の平野部分、概ね図-8に示す範囲において、平面二次元の洪水流解析を行った。解析にはiRIC-

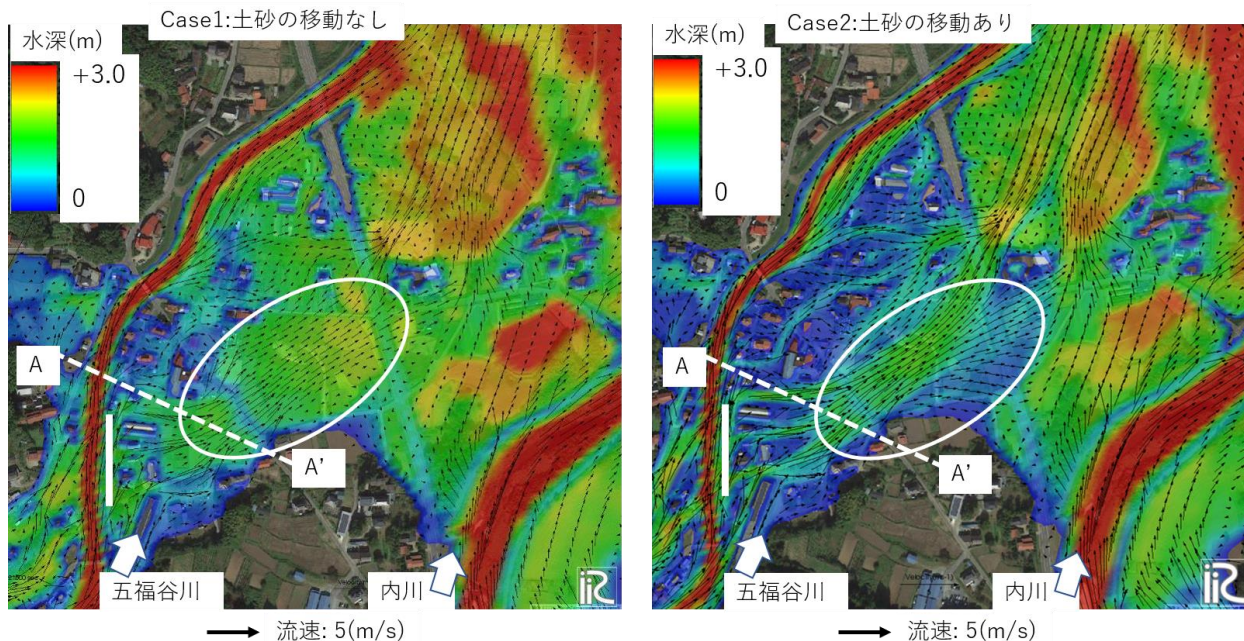


図-10 ピーク流量時の流況について、土砂移動の有無による比較（背景画像は Google map を利用）

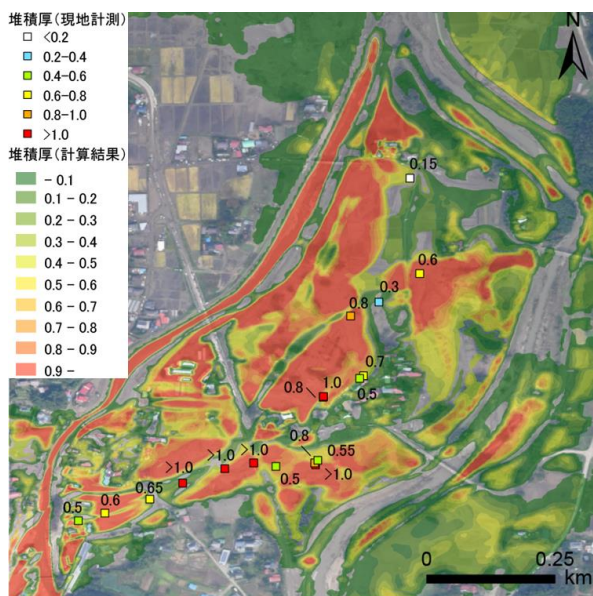


図-11 土砂の堆積厚について、計算結果と現地の比較

Nays2DH[®]を一部改変したものをを用いている。計算区間上流端で与える流量について、RRI モデル⁹⁾により地上雨量計のデータを用いて降雨流出計算を行い、これを上流端境界において内川・五福谷川の両方に与える。五福谷川では上述したように多量の細粒土砂の供給が生じたとみられるため、解析区間上流端の微細土砂の境界条件について、文献²⁾のように上流域の一次堆積土砂の侵食に伴って供給されるものとして与える。計算ケースとして、流れのみを計算する場合 (Case1) と土砂の移動と地形の

変化を伴う場合 (Case2) の計算を行っている。ここで、Case2 では計算の途中で土砂の移動に伴って堤防が侵食されるが、その場合 Case1, 2 の比較は堤防の侵食と河道の土砂堆積による河積の減少の両方の影響を含む事となる。本研究では後者の影響のみをみるために、Case1, 2 共に計算開始前に図-10 中に白い実線で示す部分の堤防高を周囲の地盤高と合わせている。

(2) 計算結果と考察

図-10 はピーク流量時の解析結果について、Case1 と 2 を比較したものである。図に示す範囲は内川と五福谷川に囲まれた領域であり、両河川から氾濫した洪水流が合流して、複雑な流況を呈している。Case2 では、建物の背後 (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といったところで比較的掃流力が小さくなり、そのような場所に多くの土砂が堆積し、水深が浅くなっていることが分かる。その結果、洪水氾濫流はより狭い範囲をより速い流速で流下している (図-10 中の白い丸で囲まれた部分)。

計算結果を検証するデータは極めて限られているものの、計算終了時の土砂堆積厚について、計算結果と著者らが現地で検土杖により調査した土砂堆積厚を比較したものを図-11 に示す。図によれば、多くの箇所計算結果と現地の状況が対応しており、本研究で提案する細粒土砂の解析モデルの適用性を一定程度示すことができていると考えられる。

5. 結論

本研究では中山間地河川の流砂量を適切に評価するために、微細土砂の解析法について、連行速度を用いた新しい手法を提案し、その妥当性を検討するために水理実験を行った。さらに、提案する手法を2019年の東日本豪雨における五福谷川の災害に適用し、その有用性について検討した。

連行速度を用いた手法の妥当性を検討するために、4種類の異なる河床材料を用いた水理実験を行った。その結果、概ね連行係数はリチャードソン数に依存することが確認されたものの、特に粒径が細かい場合には、粘着力が強く作用するために浮遊砂の浮上量が抑制されていた。そこで粘着力を修正する方法を提案し、これを用いることで連行速度によって浮遊砂の浮上量を評価できることが示された。提案する手法を用いて2019年の東日本豪雨における五福谷川の災害の平面二次元解析を実施したところ、五福谷川と内川に挟まれた領域での複雑な流況を再現することができ、土砂の挙動を考慮する場合としない場合とで流況が大きく異なることを示した。

本研究で提案した手法を用いることで、数十 μm 程度の微細な土砂から数十 cm 程度の大きい粒径に至るまで幅広い粒度分布を有する山地河川の流砂量、及びそれに伴う地形変化について、これらを掃流砂・浮遊砂として適切に評価することが可能になる。今後、提案した手法を用いて山地流域全体の流砂量を評価し、合わせて浸水が想定される箇所での平面二次元解析を行うことにより、土砂水理現象を考慮した洪水被害想定域図の作成が可能になることが期待される。

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, No.4, I_937-I_942, 2018.
- 2) 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.
- 3) Rijn, L. C. V.. Mathematical modeling of suspended sediment in nonuniform flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(6), 433-455, 1986.
- 4) 芦田和男, 道上正規. 浮遊砂に関する研究 (1)—河床付近の濃度—, 京都大学防災研究所年報, 第13号B, pp.63-79, 1970.
- 5) 板倉忠興, 岸力, 柳屋圭吾: 河床波をもつ流れの浮遊砂の研究, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-301, 1981.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Shimizu, Y., Nelson, J., Amez Ferrel, K., Asahi, K., Giri, S., Inoue, T., Iwasaki, T., Jang, C.L., Kang, T., Kimura, I. and Kyuka, T.: Advances in Computational Morphodynamics Using the International River Interface Cooperative (iRIC) Software. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020.
- 9) Sayama, T., 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.

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：巖倉啓子、野上毅、村上泰啓、山田嵩

【要旨】

積雪寒冷地では、融雪水をダムに貯留して水需要を賄う一方で、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における積雪状況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。本研究では、山間部のダム流域を対象に、地上レーザー測量及び UAV 写真測量を行い、積雪分布を計測し、計測手法の比較とシミュレーションによる再現を行った。その結果、積雪分布計測において UAV 写真測量に優位性があり、シミュレーションにより積雪分布を概ね再現可能である事を示した。

キーワード：積雪深、積雪分布、地上レーザー測量、UAV 写真測量、高山帯

1. はじめに

積雪寒冷地において積雪は非常に重要な水資源であり、春から夏にかけて長期間安定した水を供給している¹⁾。一方、融雪期の豪雨による融雪出水や土砂災害の要因となる場合もある、このため、山間部における積雪の量及びその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。

最近、UAV 写真測量や地上レーザー測量が急速に普及している。UAV 写真測量による地表面の計測は、コストが低く、機動性が高いことから、高頻度の観測が可能である。

UAV 写真測量での積雪の計測については、内山ら²⁾が雪崩災害調査に雪崩災害調査に適用した例や、小花和ら³⁾が山地斜面を対象に計測した例がある。これらによると、UAV 写真測量により、高解像度で高精度の積雪分布のデータが高頻度で得られるといったメリットが示されている²⁾ ³⁾。しかし、以上の事例で使用された UAV は、航続時間が短いことから観測範囲が狭いこと、強風や降雪等により視界が悪い時に計測が難しいといった課題や、積雪表面からの太陽光の反射により写真のコントラストの低下を防止する必要があることが示されている²⁾ ³⁾。

一方で、地上レーザー測量は機材が高価であり、観測の際に機器を設置した位置から死角になる範囲の計測ができないといったデメリットがある。一方で、多少の強風時や降雪時には計測が可能であることから、山間部の高山帯のような、積雪期に晴天日が少ない範囲において定期的に積雪分布を計測することは可能に

と考えられる。例えば、Fey et al⁴⁾はオーストリアの山岳地帯において、2014 年～2018 年にかけて 23 回の地上レーザー測量により積雪分布を計測している。この中で、積雪調査により計測した積雪深を用いて、地上レーザー測量から求めた積雪深の精度が高いことが検証されている⁴⁾。また、このようなデータセットは、積雪分布の時間的な変化の特徴から風による再堆雪プロセスを解明すること、積雪を観測している地点の代表性を検証することや、積雪分布を計算するモデルのキャリブレーション等に活用できることを示している⁴⁾。

他にも、雪崩発生の前兆を検知することや雪崩対策の効果を検証するために地上レーザー測量により積雪分布を複数回計測した例⁵⁾や、山間部において融雪期に積雪が減少していく様子を地上レーザー測量及び UAV 写真測量を同時に行って追跡した例⁶⁾もある。さらに、西原・谷瀬⁷⁾は旭岳を対象に地上レーザー測量を行い、積雪分布を計測し、積雪分布の特徴から、積雪ピーク時期における積雪分布の推定に活用への可能性を示した。

また、山地斜面における積雪は、風及び重力により再分配される⁸⁾。しかし、この影響は一般的な融雪流出解析モデルや流域の積雪包蔵水量推定には考慮されていない。

本研究では、北海道の旭岳ロープウェイ姿見駅周辺の高山帯において、地上レーザー測量及び UAV 写真測量を同時に行い、積雪分布を計測する事で、計測手法の優位性を検討し、積雪分布の計測結果をシミュ

レーションモデルにより再現し、風の影響を評価することを目的とした。

2. 対象範囲

対象範囲を図-1に示す。また、図-2には標高分布を示す。計測範囲及び解析範囲は黒枠で示した、旭岳ロープウェイ姿見駅周辺である。対象領域における主たる植生は、樹高が1m～2m程度のハイマツ、高山植物であり、一部に裸地や露岩している箇所がある。積雪期には、これらの植生等は積雪下に完全に埋没した状態になる。

対象範囲周辺における気象データは、姿見駅の屋根の上に図-3に示す複合気象センサー（VAISALA社製WXT536）を設置して取得した。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。加えて、対象領域からは離れているが、旭岳温泉（旭岳観測所）にて、旭川開発建設部が降水量及び積雪深を観測している。また、観測データの明らかな異常値は除外し、欠測データと合わせて線形補間した。

3. 地上レーザー測量

地上レーザー測量による積雪の計測は、2020年1月～3月にかけて、概ね1ヶ月間隔で3回実施するよう計画した。対象範囲は冬期に見通しの良い晴天日がほとんどないため、実際に計測ができた日は、2020年1月7日、2020年2月10日、2020年3月2日であった。計測に使用し

た地上レーザースキャナは、RIEGL社製のVZ-1000である（図-4）。最長測定距離が1,400mのモードで水平方向（360°）及び鉛直方向（100°）を0.03°ピッチで計測した。1回の計測に要する時間は約24分である。雪面上に三脚を設置する際、脚を深く雪中に入れて固定し、計測中に機器の姿勢が変化しないようにすること、気温と機器の温度差により、レーザー照射面が曇らないようにすることに留意した。また、機器を設置した位置から死角になる範囲は計測できないため、図-1.2に示した4箇所から計測を行い、データの欠損が少なくなるようにした。

計測により得られた点群データは、日ごとに1つの

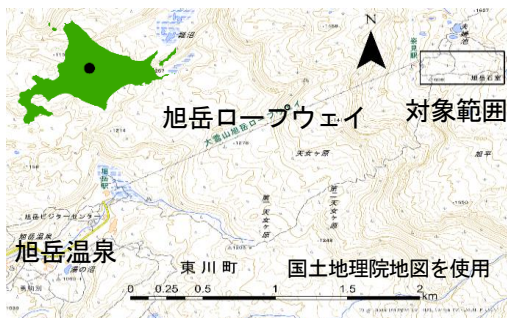


図-1 対象領域

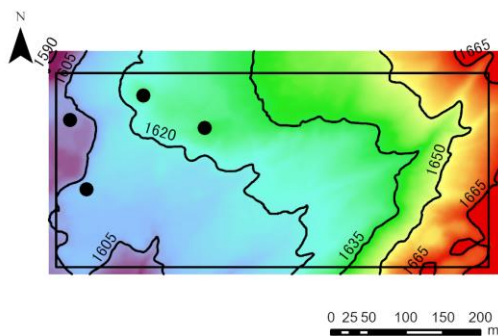


図-2 対象領域の標高分布



図-3 複合気象センサー

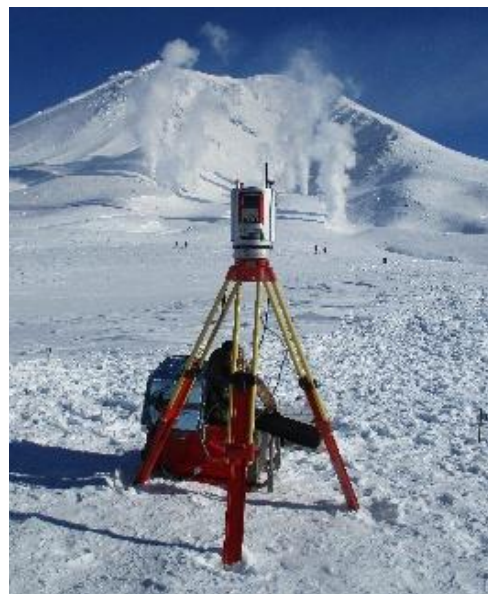


図-4 地上レーザースキャナ

データに合体した。合体した点群データの位置合わせには、旭岳ロープウェイ姿見駅及び旭岳石室の屋根及び壁面を使用した(図-5左)。具体的には、2018年9月4日に、屋根や壁面上の位置を特定しやすい点(例えば三角屋根の頂点)の座標を予め計測しておき、この中から点群が取得できた点を標定点として使用し、点群データを平面直角座標系12系に変換した。なお、屋根上の積雪や壁面への積雪の付着により、予め座標を計測した点が冬期に視認できない可能性があるため(図-5右)、できるだけ多くの点の座標を取得するよう留意した。位置合わせ後の点群データに対し、ロープウェイの施設等の地物取り除くフィルタリングを行い、積雪表面から反射したデータを抽出した。2月の計測時には弱い降雪があったが、空中の降雪粒子から反射したデータはここで取り除かれている。

次に、積雪表面から反射した点群データから TIN(不整三角網)を作成した。地上レーザー測量により得られる点群データの特徴として、機器を設置した位置から離れるにしたがい点密度が小さくなる傾向があることや、死角による欠損があることが挙げられる。このため、点を取得できなかった範囲が内挿されることを防ぐため、作成された TINのうち、最大辺長が2mを超える TIN を除外してから積雪表面の DEM(Digital Elevation Model)を作成した。積雪深は積雪表面の DEM と地表面の DEM の標高差とする。旭川開発建設部から提供を受けた地表面の DEM の水平解像度が1mであったことから、これに合わせて積雪表面の DEM の水平解像度は1mとした。なお、積雪表面の DEM と地表面の DEM の標高差がマイナスとなったメッシュはデータから除外した。

4. UAV 写真測量

UAV 写真測量は地上レーザー測量と同時に実施した。UAV には DJI 社の INSPIRE2 を用いており、カメラには同じく DJI 社の ZENMUSE X4S(有効画素数2000万画素)を用いた。それぞれ図-6及び図-7に示す。UAV には後処理方式高精度測位 GNSS を搭載しており、隣接空中写真との重複度がオーバーラップ80%以上、サイドラップ60%以上になるように撮影を行った。また、撮影する空中写真の地上画素寸法は0.02m以内を目安とした。飛行高度は68m~132mである。積雪表面の形状は降雪及び強風により変化するため、各回、標定点及び検証点を設置及び観測し、UAV による空中撮影後に撤去した。また、低温環境下であることから、バッテリーの温度低下防止のために、電子カ



図-5 位置合わせのために計測した点の例
(実際に位置合わせに使用した点ではない)



図-6 DJI 社製 INSPIRE2



図-7 DJI 社製 ZENMUSE X4S

イロ等を用いた。

撮影した空中写真及び標定点を用いて、計測日ごとに1つのデータに合成した。撮影した写真の位置情報は仮想電子基準点を用いた後処理キネマティック方式で処理している。このデータを0.5mメッシュにフィルタリングし、地物等を除去した後、点群データを抽出し、積雪表面の DEM を作成した。座標系は平面直角座標12系であり、水平解像度は1mである。積雪深は地上レーザー測量と同様に、国土交通省から提供を受けた地表面の DEM との差分を取ることで作成した。

5. 積雪分布の再現計算

5.1 モデル概要

積雪分布の再現計算には、スイス連邦雪・雪崩研究所により開発された Alpine3D⁹⁾を用いた。Alpine3D は3次元積雪・地表モデルであり、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できる。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⁸⁾がある。Alpine3Dの主要な物理過程を図-8に示す。

5. 2 入力データ

入力データには気象データとして降水量、気温、湿度、風速・風向、長短波放射量が必要である。このうち、気温、湿度、長短波放射量は同時観測している必要がある。他の入力データとして、土地の植生情報及び標高が必要である。

(1) 気象データ

気象データについては、基本的には姿見駅にて観測しているデータを用いており、不足するデータは降水量及び長短波放射量である。

これらの内降水量は旭岳温泉の観測データ(標高:1077 m)を、短波放射量は忠別ダム管理所の観測データを用いており、長波放射量は太田¹¹⁾の手法を用いて推定した。データの時間解像度はいずれも1時間である。また、降水量は雨雪判別を行い、降雪となった場合の降雪量の補正式は下記に示す。

$$P_s = A[1 + B(H_{point} - H_{gauge})]P_{gauge}$$

ここで P_s は補正後の降雪量(mm)、 A は捕捉率補正係数、 B は標高補正係数、 H_{point} は姿見駅の標高(m)、 H_{gauge} は旭岳温泉の標高、 P_{gauge} は観測降雪量(mm)である。また、本研究では試行錯誤的に $A = 1.1$ 、 $B = 0.0007$ とした。

(2) 土地の植生情報及び標高データ

土地の植生情報には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。また、標高データには先述の国土交通省より提供を受けた、地表面のDEMを用いた。ただし、標高値は整数値である必要があるため、小数点以下を切り捨てて整数値としている。

5. 3 計算条件

計算期間は2019年11月1日1時から2020年4月30日24時までである。計算範囲はUAV写真測量の範囲が収まる範囲として設定した。また、Alpine3Dでの解像度は計算負荷を考慮して5mメッシュとした。

本研究では風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、Winstral¹²⁾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、スイスにて適用実績¹³⁾がある。比較のために、Winstralを用いないケースでの計算も行った。以後、Winstral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。さらに、実際の積雪分布を用いて固体降水量の再分配を計算するアルゴリズムであるALS_SCALING¹⁴⁾を用いた。積雪分布は多雪年・少雪年の違いはあるが、積雪分布パターンは毎年同じ傾向にある。そのため、対象範囲の積雪分布データが1つでもあれば、別シーズンの予測も可能である。今回は、実測積雪分布データとして2月10日のUAV

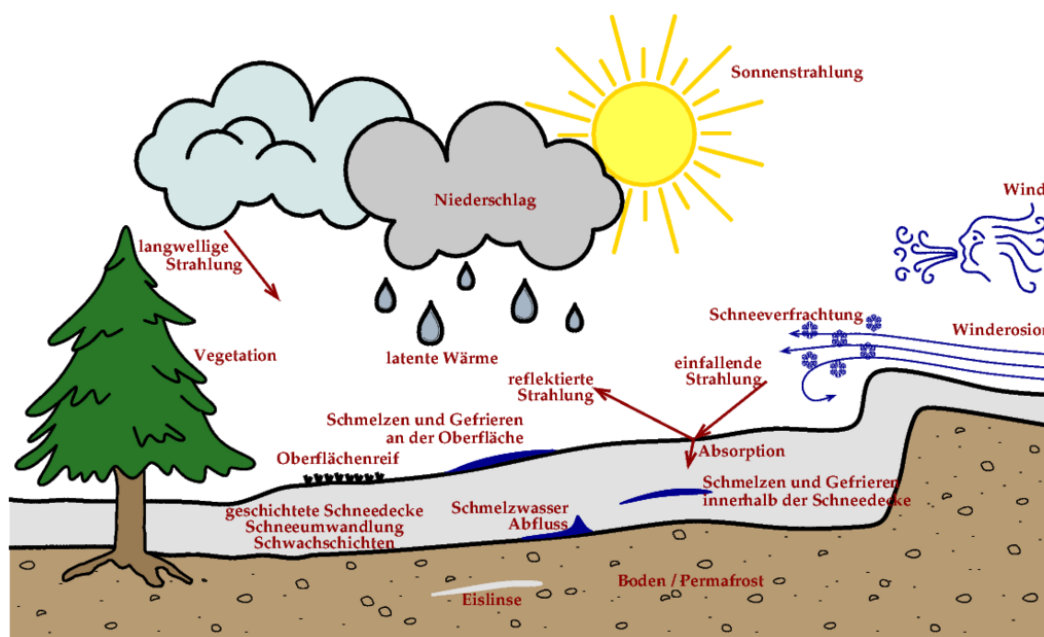


図-8 Alpine3Dの主要な物理過程 (SLF サイト¹⁰⁾ より)

写真測量による計測結果を用いた。この ALS_SCALING を用いた計算を、実測補正計算という。

後述するが、再現性検証にはより広範囲の計測結果が得られた UAV 写真測量による積雪分布を用いた。

6. 結果と考察

6.1 気象観測結果

図-9 に旭岳温泉の実際の積雪深を示す。これを見ると積雪深は11月頃から増加し始めて、地上レーザー測量及び UAV 写真測量を行った1月から3月は、概ね1.5mから2.5mの範囲で推移している。また、積雪深の最大値は2.6mである。2009年から2019年の積雪深の平均値は3.2mであり、最小値は2.8mであることから、今シーズンは非常に少雪であったといえる。

図-10 には姿見駅の気温を、図-11 には風速をそれぞれ示す。まず、気温を見ると11月以降から5月までほとんど期間で氷点下を下回っている。今回の計測にて用いた地上レーザーキャナのレーザー波長は1550nmであり、融雪等により水分が多い積雪から反射しにくい特性があることが指摘されている⁴⁾。しかしながら、対象期間の気温は氷点下を大きく下回っており、融雪が生じたとは考えにくく、この影響はほとんど無いと考えられる。風速を見ると、頻りに10m/s以上の強風が観測されている。積雪粒子は風速4m/s~5m/s以上になると転動や跳躍を開始し、風速8m/s~9m/s以上になると浮遊する粒子が現れることが報告されており¹⁵⁾、計測範囲においては積雪の再移動が頻りに発生している可能性がある。

図-12 には姿見駅の風配図を示す。期間は2019年11月1日から2020年4月30日までである。主に北西方向の風が卓越しており、「西高東低」の冬型の気圧配置の影響と考えられる。

6.2 地上レーザー測量

3回の計測により得られた積雪分布を図-13に示す。対象範囲をできるだけカバーできるように、4箇所から計測したが、計測地点から離れた範囲（計測範囲の東側）に欠損が多く見られる。これは、観測地点から死角になる範囲を計測できないことが要因である。また、積雪により死角となる範囲が毎回異なるため、欠損となった範囲は毎回異なる。特に2月10日の計測では東側が大きく欠測となっている。

積雪分布を見ると、全体的に1月から3月に向かって積雪深が増加していく傾向が見られる。特に、北西部や谷に沿った範囲（図中赤枠）に局所的に積雪深が

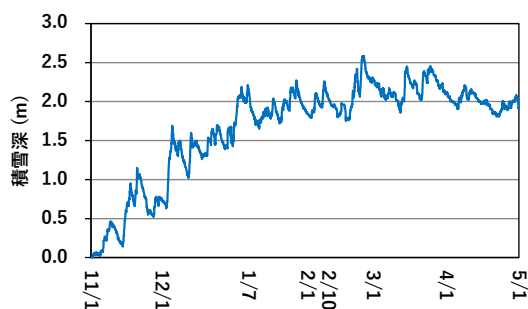


図-9 旭岳温泉の積雪深 (2019年-2020年)

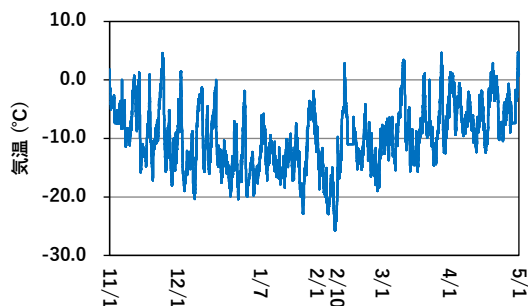


図-10 姿見駅の気温 (2019年-2020年)

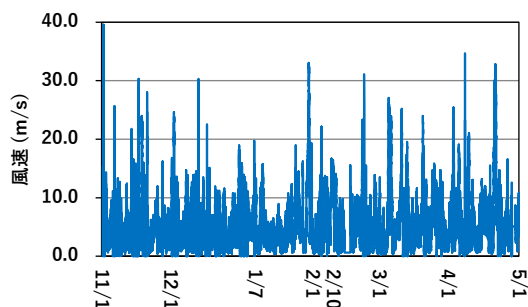


図-11 姿見駅の風速 (2019年-2020年)

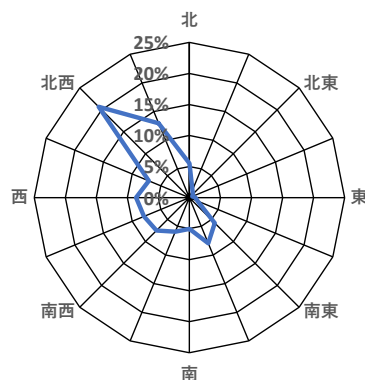
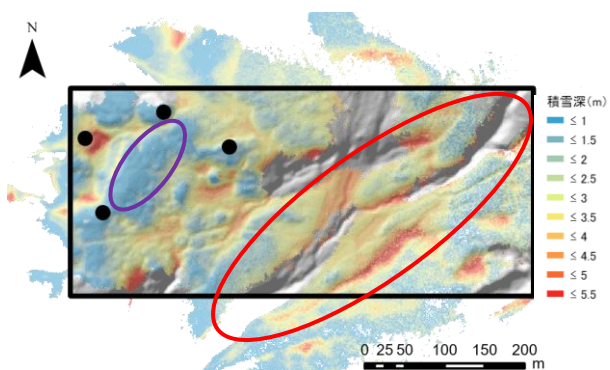
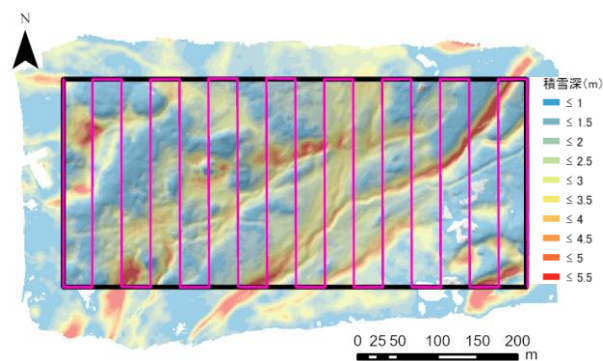


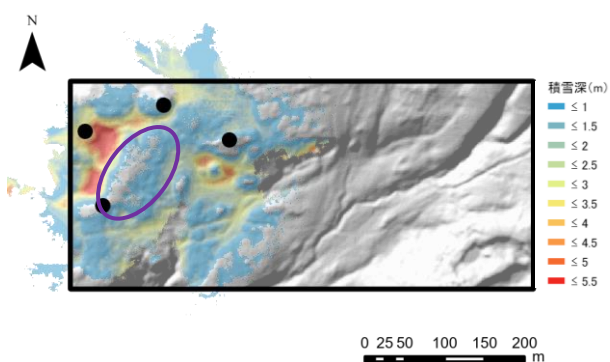
図-12 姿見駅の風配図 (2019年-2020年)



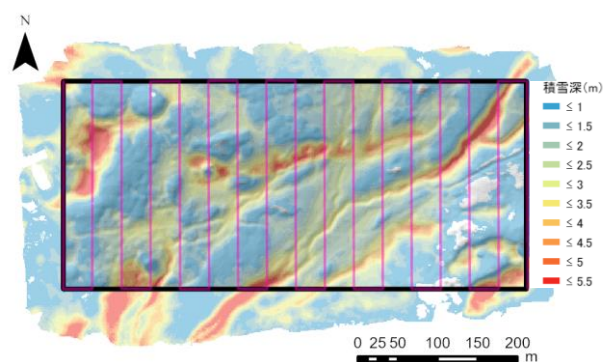
2020年1月7日



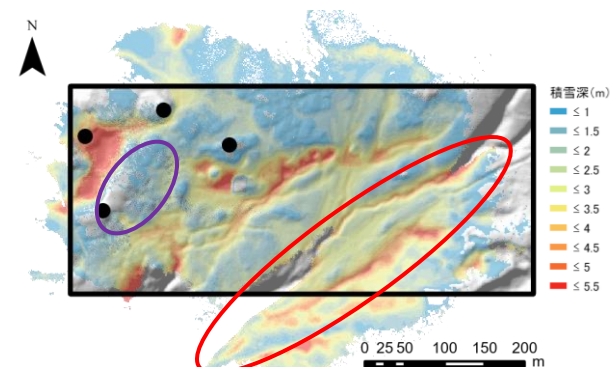
2020年1月7日



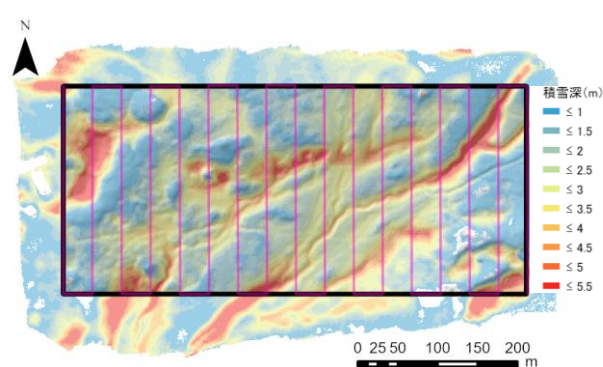
2020年2月10日



2020年2月10日



2020年3月2日



2020年3月2日

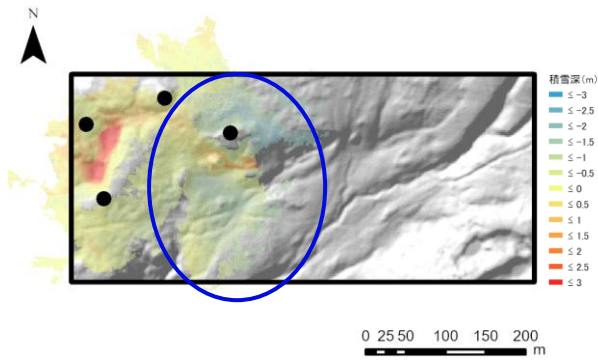
図-13 地上レーザー測量による積雪深分布
(背景には陰影起伏図を用いている)

図-14 UAV写真測量による積雪深分布
(図中の赤紫色線はUAVの飛行コースであり、
背景には陰影起伏図を用いている)

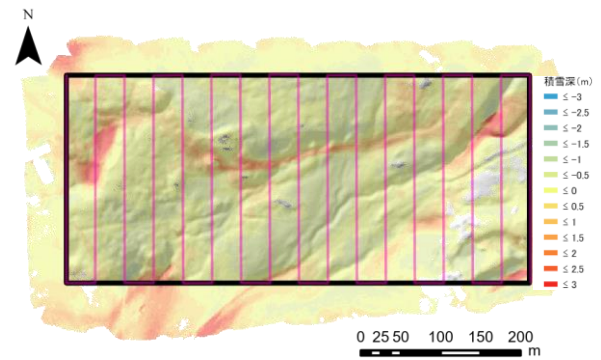
大きい箇所が見られる。一方で、平坦な地形の範囲(図中紫枠)では、積雪深に大きな変化は見られない。この結果は昨年の計測結果⁷⁾と概ね一致している。また、2月10日の計測結果において、欠測範囲が多いのは気象条件の影響と考えられる。計測開始時点では晴天であったものの、途中から雲がかかり、降雪もあったためレーザーが十分に届いていなかった。

6. 3 UAV 写真測量

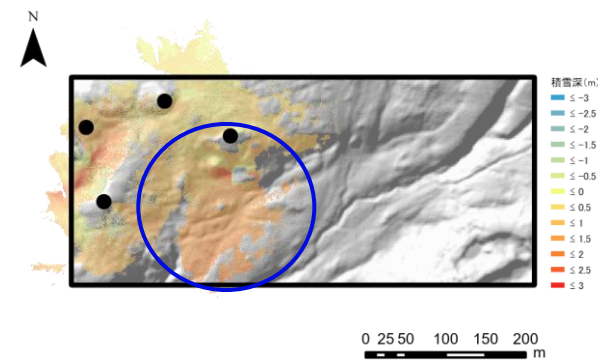
図-14に UAV 写真測量による積雪分布を示す。図-13と同様に陰影図を背景に用いている。地上レーザー測量の計測結果と比較して、計測面積が大きくなっていることがわかる。一部では欠測となっているが、計測範囲を概ねカバーできており、地上レーザー測量と比較しても、堆積傾向は概ね一致している。特に、地上レーザー測量では、東側がほとんど計測できなかった2020年2月10日においても、計



(1) 2020年1月7日～2月10日

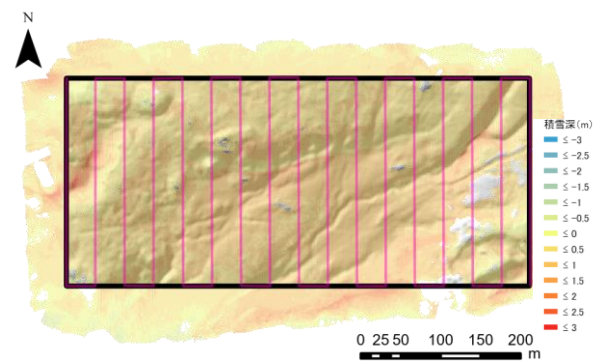


(1) 2020年1月7日～2月10日



(2) 2020年2月10日～3月2日

図-15 地上レーザー測量での
積雪深の変化量の空間分布
(背景には陰影起伏図を用いている)



(2) 2020年2月10日～3月2日

図-16 UAV写真測量での積雪深の変化量の空間分布
(図中の赤紫色線は UAV の飛行コースであり
背景には陰影起伏図を用いている)

測範囲を概ね計測できている。また、今回の計測においては、地上レーザー測量よりも短時間で計測ができた。

6. 4 積雪深の差分値

図-15には地上レーザー測量による積雪分布の変化量を、図-16にはUAV写真測量による積雪分布の変化量をそれぞれ示す。積雪分布の変化量を見ると、地上レーザー測量及びUAV写真測量共に、1月7日から2月10日の変化については、計算範囲の中央部付近にて減少傾向が見られる。一方で北西部においては、堆積傾向が見られる。2月10日から3月2日の変化については、どちらも全体的に増加傾向が見られる。

地上レーザー測量及び UAV 写真測量の結果を比較すると概ね一致しているが、1月7日～2月10日の期間においては、中央部（図中青枠）の積雪の減少量が地上レーザー測量では UAV 写真測量に比べて多くなっている。また、2月10日～3月2日においては、中央部（図中青枠）において積雪の増加量が UAV 写真測量に比べて多くなっている。これは、2月10日の

地上レーザー測量の精度の影響と考えられる。前述の通り2月10日の計測では天候の影響により、地上レーザー測量では十分な計測が行えていない。そのため、計測点から離れた領域の点密度が小さくなり、精度が低下したと考えられる。その結果、差分を取った際に、UAV 写真測量に比べて中央部が過大・過小となったと考えられる。

6. 5 計測手法の比較

本研究では、地上レーザー測量及び UAV 写真測量から求めた積雪深分布には、大きな差は見られなかった。一方で、UAV 写真測量の方が地上レーザー測量に比べて広範囲の計測ができており、より短時間で計測を行っていた。また、地上レーザー測量においては気象条件による、精度低下の可能性があった。

作業量においては、地上レーザー測量では調査地点へ機材を運搬し、設置・計測・撤去をする必要がある。これを調査点数分行う必要がある。一方で、UAV写真測量では、一度対空標識を設置すれば、UAVを目視可能な地点から操縦するだけで良い。そのため、本研究

では現地計測が短時間かつ低労力で、広範囲のデータが取得できるUAV写真測量が、積雪分布の計測に適していると考えられる。ただし、気象条件や低温環境への注意が必要である。

6. 6 積雪分布の計算結果

図-17、図-18 及び図-19 に Alpine3D による積雪分布の計算結果を、図-20 には UAV 写真測量による積雪分布を示す。ここで、図-17 と図-18、図-19 及び図-20 の凡例は異なる。風あり計算では全体的過大評価ではあるが、図中に示す赤枠の堆積傾向は概ね再現できている。さらに、実測補正計算では積雪分布をほぼ再現できている。すなわち、既往研究¹⁴⁾と同様に1回でも積雪分布の高精度なリモートセンシングデータがあれば、高精度なシミュレーションが可能と考えられる。ただし、この手法の有効性は積雪分布のリモートセンシングデータの品質に依存する¹⁴⁾。一方で、風なし計算では、積雪分布を全く再現できておらず、積雪深の範囲

も限定されている。すなわち、積雪分布のリモートセンシングデータが存在するのであれば可能な限り利用し、存在しない場合でも雪の再分配を考慮する事で高精度な積雪分布推定が可能になると考えられる。

表-1 には UAV 写真測量及び積雪分布計算の解析範囲における各メッシュの積雪深の総和を示す。風なし計算では過大評価だが、風あり計算及び実測補正計算では UAV 写真測量の値に近づいている。また、計算値同士を比較すると、風あり計算及び実測補正計算の方が風なし計算よりも小さくなっている。これは風により降雪が流域外へ移流した量が、流域内へ移流した量を上回ったことが原因と考えられる。すなわち実際の流域でも、高山帯においては降雪が流域外へ移流、あるいは流域内へ移流している可能性が示唆される。

7. まとめ

本研究では、旭岳ロープウェイ姿見駅周辺の高山帯において、地上レーザー測量及び UAV 写真測量によ

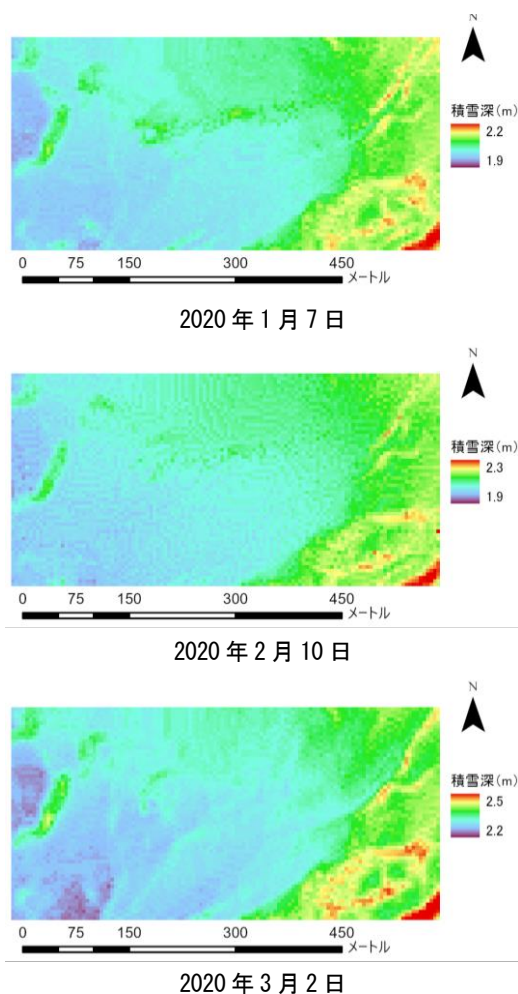


図-17 Alpine3Dによる積雪深（風なし計算）

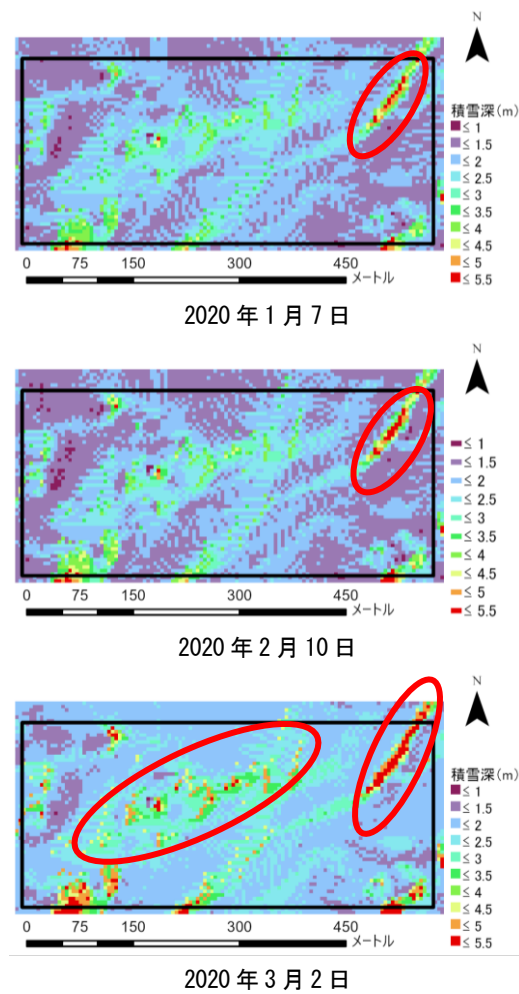
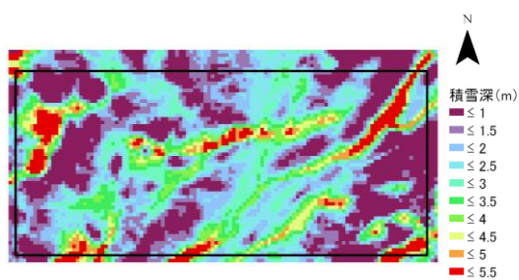
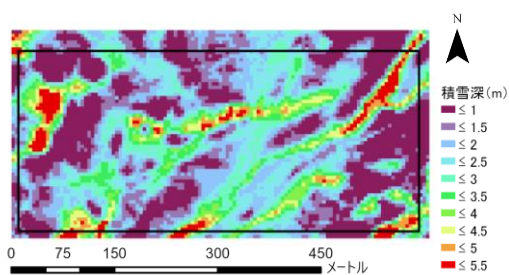


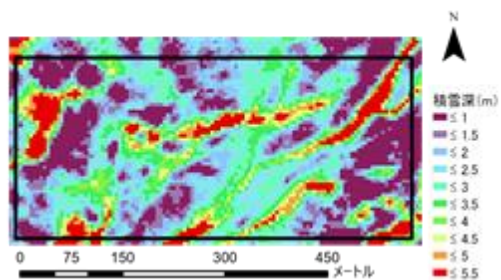
図-18 Alpine3Dによる積雪深（風あり計算）



2020年1月7日

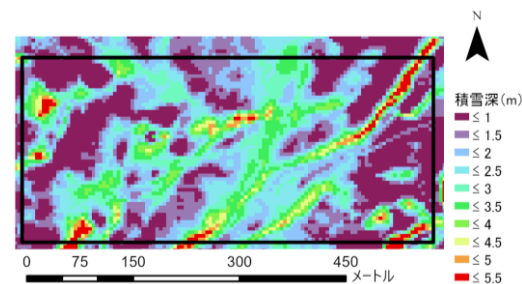


2020年2月10日

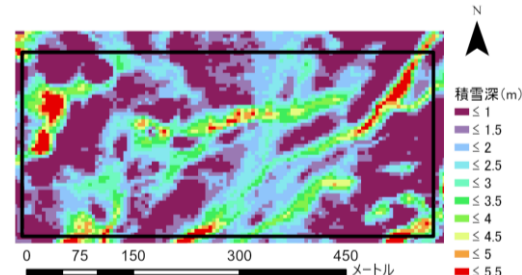


2020年3月2日

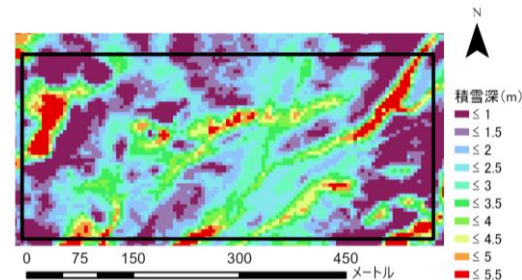
図-19 Alpine3Dによる積雪深(実測補正計算)



2020年1月7日



2020年2月10日



2020年3月2日

図-20 Alpine3Dによる積雪深
(UAV写真測量)

り積雪分布を計測し計測手法の優位性を検討した。また、積雪分布の計測結果をシミュレーションモデルにより再現し、風の影響を評価した。その結果、地上レーザー測量に比べて UAV 写真測量の方が積雪分布の計測において優位性があると考えられた。また、シミュレーションにおいては、風なし計算では UAV 写真測量の計測結果を全く再現できず、風あり計算では、堆

積傾向を概ね再現でき、実測補正計算では積雪分布をほぼ再現できた。このため、1回でも対象範囲の積雪分布を高精度に計測することで、以降の積雪分布シミュレーションを高精度化できる可能性がある。また、計算値同士でも風あり計算及び実測補正計算の方が、積雪深の総和が小さくなっていた。すなわち実際の流域でも、高山帯においては降雪が流域外へ移流、ある

表-1 解析範囲における各メッシュの積雪深の総和

日付	積雪深の総和 (m)			
	UAV 写真測量	風なし計算	風あり計算	実測補正計算
1月7日	13451	15027	14459	14604
2月10日	12302	15204	14411	14305
3月2日	15601	17952	16756	17123
RSME (平均)	—	1.294	1.178	0.527

いは流域内へ移流している可能性が示唆される。

謝辞: ワカサリゾート(株)旭岳事業部に測量場所を提供して頂いた。また、1mメッシュのDEM、忠別ダム管理所及び旭岳温泉の気象データは国土交通省に提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小野延雄, 石川信敬, 新井正, 若土正暁, 青田昌秋: 雪氷水文現象 (基礎雪氷学講座VI), 前野紀一・福田正巳編, 古今書院, p.17, 1994.
- 2) 内山庄一郎, 鈴木比奈子, 上石勲, 中村和樹: 雪崩災害調査への UAV-SfM の適用: 2017 年那須町雪崩災害の事例, 自然災害科学 JJSNDS, 37, 特別号, 119-135, 2018.
- 3) 小花和宏之, 河島克久, 松元高峰, 伊豫部勉, 大前宏和: 小型 UAV を用いた積雪分布の三次元計測, 雪氷, 78 巻, 5 号, pp.317-328, 2016.
- 4) Fey,C,Schattan,P.,Helfricht,K and Schöber,J.: A compilation of Multitemporal TLS Snow Depth Distribution Maps at the Weisssee Snow Research Site(Kaunertal, Austria), Water Resources Research,55,pp.5154–5164.,<https://doi.org/10.1029/2019WR024788>,2019.
- 5) Deems,J.S.,Gadomski,P.J.,Vellone,D.,Evanczyk,R.,LeWinter,A.L.,Birkeland,K.W.and Finnegan,D.C. : Mapping starting zone snow depth with a ground-based lidar to assist avalanche control and forecasting,Cold Regions Science and Technology,Vol. 120,pp.197-204,<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.002>, 2015.
- 6) Eker, R.; Bühler, Y.; Schlögl, S; Stoffel, A. and Aydın, A.: Monitoring of Snow Cover Ablation Using Very High Spatial Resolution Remote Sensing Datasets, Remote Sens., 11, p.699, doi: 10.3390/rs11060699, 2019.
- 7) 西原照雅・谷瀬敦: 地上レーザースキャナを用いた高山帯における積雪分布の連続計測, 令和元年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 76 号, B-03, 2019.
- 8) 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.
- 9) Michael Lehning, Ingo Völksch, David Gustafsson, Tuan Anh Nguyen,Manfred Stähli, Massimiliano Zappa: ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and it's application to snow hydrology,Hydrological Processes,20,2111–2128,DOI: 10.1002/hyp. 6204,2006.
- 10) Alpine3D : <https://www.slf.ch/de/services-und-produkte/alpine-3d.html>, 2021 年 6 月 17 日最終アクセス.
- 11) 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, pp19-26, 1992.
- 12) Adam Winstral, Kelly Elder, Robert E. Davis : Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters, Journal of Hydrometeorology, Volume 3, 524-538, DOI:[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2), 2002.
- 13) 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.
- 14) Christian Vögeli, Michael Lehning, Nander Wever and Mathias Bavay : Scaling Precipitation Input to Spatially Distributed Hydrological Models by Measured Snow Distribution, Front. Earth Sci., 16 December,DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00108>,2016.
- 15) 亀田貴雄、高橋修平: 雪氷学: 古今書院, pp.258-259, 2017.

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. 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】

これまでブラジルを対象に植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)による濁水評価を行ってきた。しかし CLVDAS の適用事例は、ブラジルのみであるため、その検討を行う前に様々な気候区分や農作域への適用性について検討する必要がある。そこで令和2年度は、西アフリカとグアテマラ共和国への適用性について検討した。その結果、推定値と穀物収穫量との間に良好な整合性を見出すことができ、他の気候区分・農作域への適用性も確認することができた。

キーワード：濁水、データ同化、植生水分量、穀物収穫量

1. はじめに

これまでブラジルを対象に植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVDAS)による濁水評価を行ってきた。次のステップでは、CLVDAS によりマイクロ波輝度温度を同化した確度の高い植生動態水水量を初期値として水文流出モデルに導入する手法の検討を行う予定にある。しかし CLVDAS の適用事例は、ブラジルのみであるため、その検討を行う前に様々な気候区分や農作域への適用性について検討する必要がある。そこで令和2年度は、西アフリカとグアテマラ共和国への適用性について検討した。

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, Chamy; 1975⁽¹⁾)により濁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、 μ と σ 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。

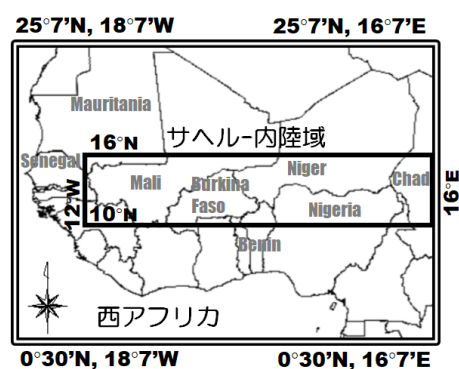


図-1 西アフリカ対象領域(緯度N0°30'-N25°7', 経度W18°7'-E16°7') および研究エリア(サヘル-内陸域: 緯度N10° - N16°, 経度W10° -E16°)

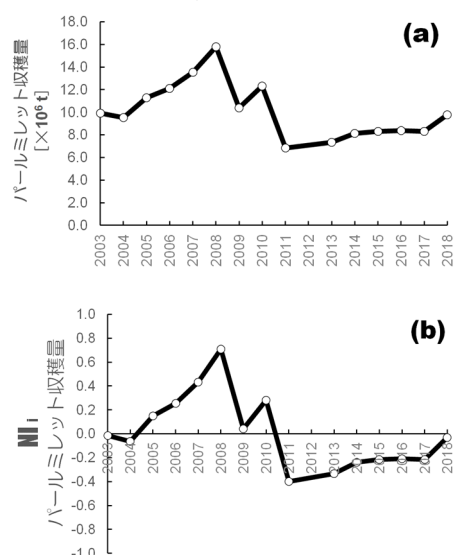


図-2 (a) パールミレット収穫量と (b) その正規化指数 (NI_i) (Chad, Niger, Nigeria, Benin, Burkina Faso, Mali の合計) の年々変動

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)⁽²⁾, Ceccato et al.(2007)⁽³⁾ 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。

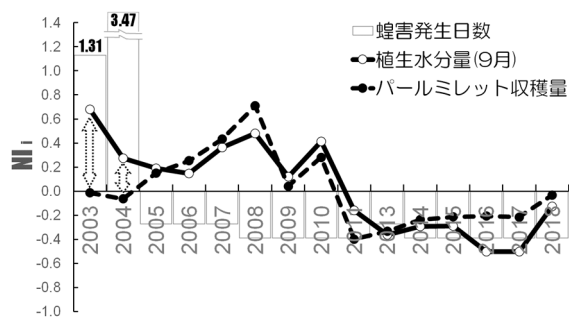


図-3 サヘル-内陸域におけるパールミレット収穫量と CLVDAS シミュレーションに基づく植生水分量(9月における時間・領域空間平均)の正規化指数(NI_i)の年々変動

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)⁽⁴⁾と Sawada et al. (2015)⁽⁵⁾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)^{(6),(7)}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)^{(8),(9)}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^{(10),(11)}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^{(4),(5),(12),(13)}。本研究では、CLVDAS により表層土壌水分量(深さ $0\sim 3\text{cm}$: m^3/m^3)・根茎層土壌水分量(深さ $3\sim 20\text{cm}$: m^3/m^3)・植生水分量(m^3/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(m^3/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/m²), 長波放射量 (W/m²), 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^{(4),(5),(12),(13)}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。

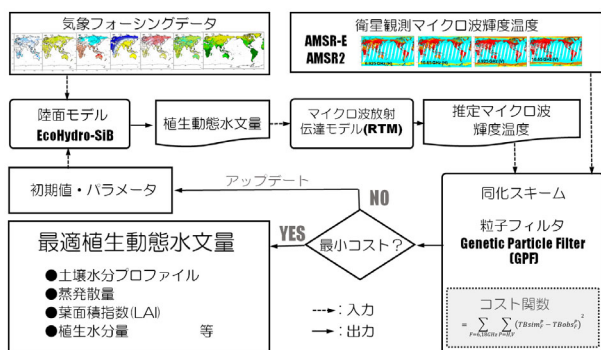


図-4 CLVDAS 概略図

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水量は 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(m³/m³)・根茎層土壌水分量(m³/m³)・植生水分量(m³/m³)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水量の空間分布である。また式-1により各植生動態水水量の正規化指数(NI_i)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水量の正規化指

数(NI_i)の空間分布である。

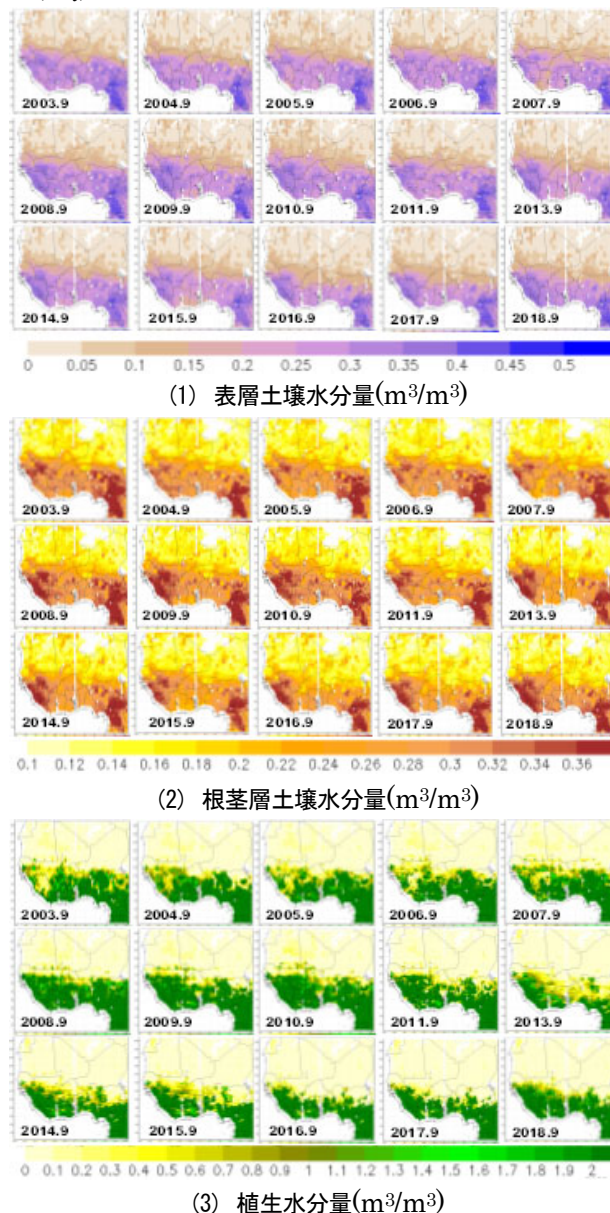
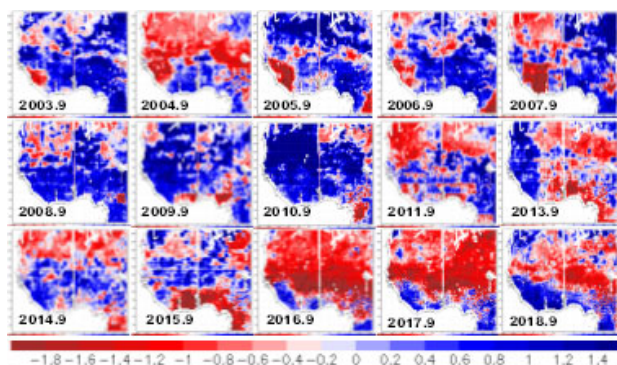
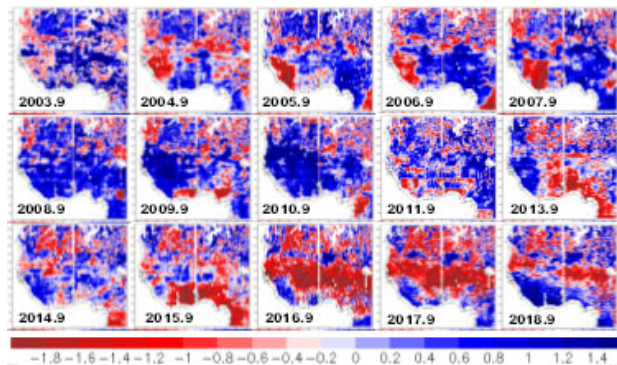


図-5 CLVDAS からの出力である (1) 表層土壌水分量(m³/m³)・(2) 根茎層土壌水分量(m³/m³)・(3) 植生水分量(m³/m³)の空間分布：2003年から2018年までの各年の9月平均, 空間分解能は0.25°グリッド

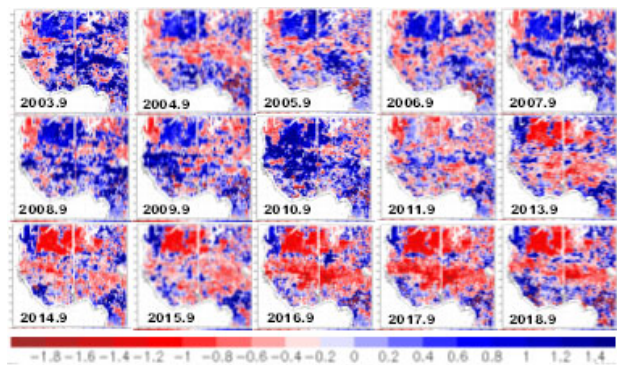
さらに図-7は渇水評価期間(2005-2018年)のサヘル-内陸域において、9月の時間平均・領域空間平均の植生水分量の正規化指数(NI_i)の年々変動である。前述の通り、Food and Agriculture Organization of the United Nation より、パールミレットのサヘル-内陸域における穀物収穫高の年々変動を調査し、その正規化指数(NI_i)を計算した(図-2)。次に渇水評価期間(2005-2018年)のNI_iを抽出して、植生水分量の正規化指数(NI_i)と比較した(図-8)。その結果、両者の変動の良好な整合が確認された。



(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° グリッド

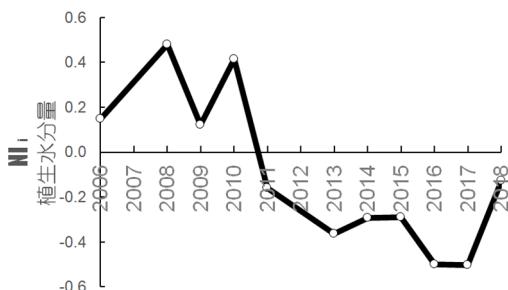


図-7 サヘル-内陸地域における植生水分量(m^3/m^3)に対する正規化指数(NI_i)の年々変動

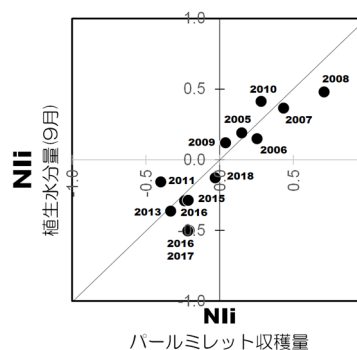
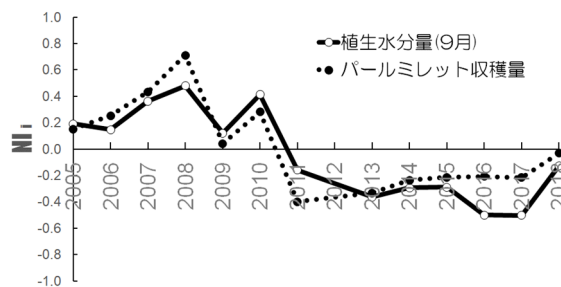


図-8 植生水分量(9 月, m^3/m^3)とパールミレット収穫量の正規化指数(NI_i)の比較

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)。

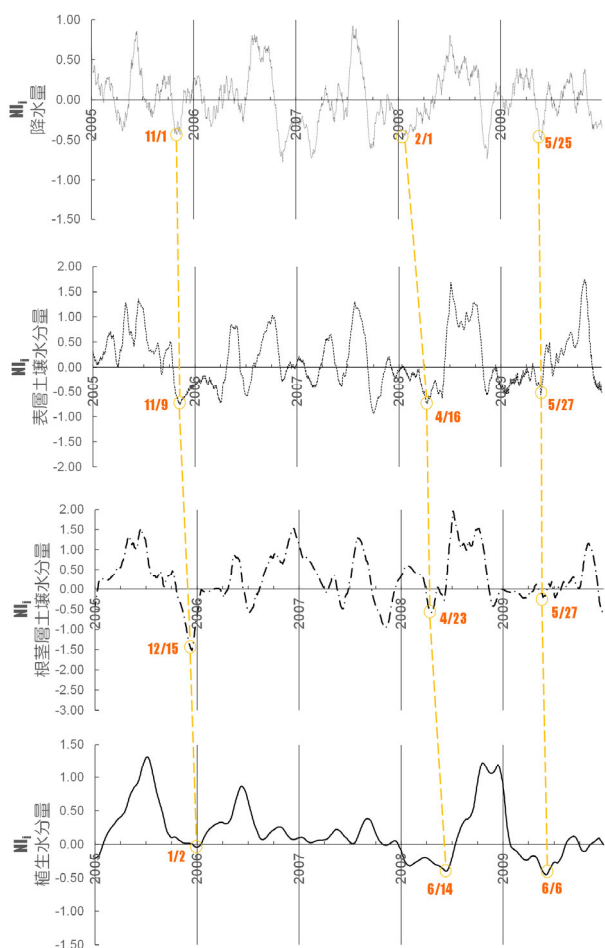


図-9 サヘル-内陸域における渇水評価期間の前半(2005-09年)における降水量・表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・植生水分量の正規化指数(NI_i)の比較

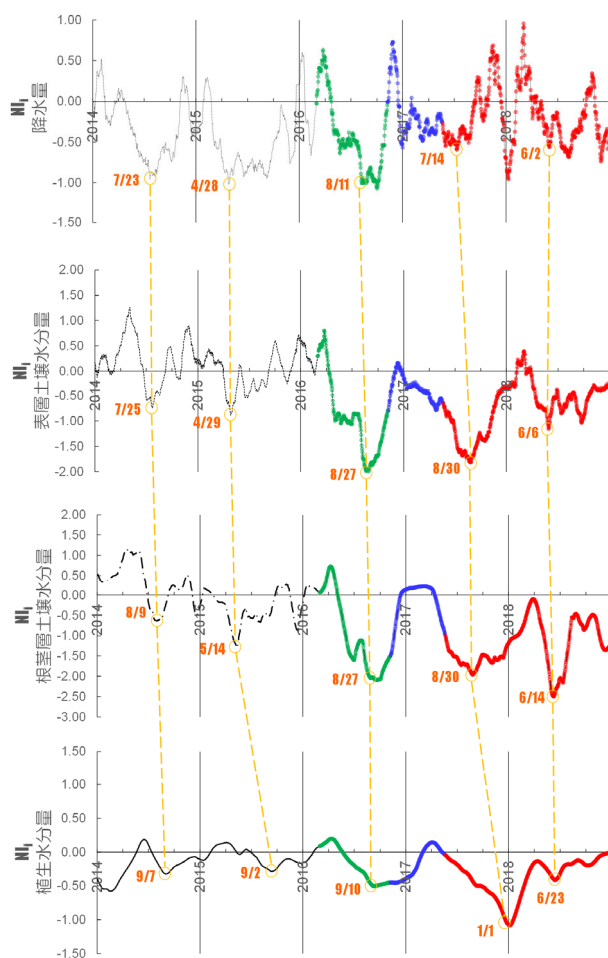


図-10 サヘル-内陸域における渇水評価期間の後半(2014-18年)における降水量・表層土壌水分量・根茎層土壌水分量・植生水分量の正規化指数(NI_i)の比較

このように、CLVDASによる水文水循環(降水の根茎層土壌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も示唆している。

3. グアテマラ共和国への CLVDAS の適用

3.1 グアテマラ共和国の現状

グアテマラ共和国は、エルニーニョの影響を受けやすく、深刻な早魃が発生する「乾燥回廊」として広く知られている(2017年には南端に位置するアテスカテンパ湖の水が完全に干上がったと言われている)。また農業では、コーヒー豆が主要農産物として広く栽培されている。

3.2 検討手法とその結果

本研究では、グアテマラ共和国全域(図-11)を対象に、第2章の西アフリカと同様の検討手法・使用データで CLVDAS シミュレーションを行った。主要農産物であるコーヒー豆を選定して Food and Agriculture Organization of the United Nation より収穫量を入力し、正規化指数(NI_i)を計算した。一方、2003年から2018年までの期間を対象に CLVDAS により植生水分量を推定し、その正規化指数(NI_i)を計算した。なお、この際、コーヒー豆の収穫期は10月から2月までであるため、その前の最も重要な成長・結実期である9月の平均値を用いた。この両者の NI_i を比較した結果、コーヒー豆の収穫量と植生水分量との間に良好な整合性を確認し、また両者の減少がエルニーニョの発生とほぼ同期していることが分かった(図-12)。



図-11 グアテマラ共和国対象領域(緯度 N13.125°-N18.125°, 経度 W88.125°-E92.875°)

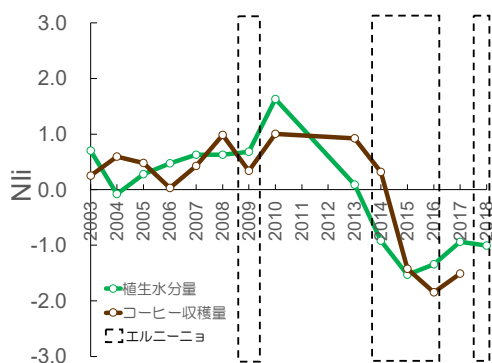


図-12 グアテマラ共和国における植生水分量(9月, m^3/m^3)とコーヒー収穫量の正規化指数(NI_i)の比較

4. まとめ

本研究では、これまで検討を進めてきたブラジル以外の様々な気候区分や農作域への CLVDAS の適用性を検討するために、西アフリカとグアテマラ共和国への CLVDAS シミュレーションを実施した。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性が確認された。さらに2003年から2018年までの期間のグアテマラ共和国への適用検討でも主要農産物であるコーヒー豆の収穫量と植生水分量との間に良好な整合性を確認し、また両者の減少とエルニーニョの発生との同期が確認された。このように CLVDAS は、ブラジルだけではなく、アフリカやグアテマラ共和国のような様々な気候区分や農作域へも適用可能であることが分かった。

そこで令和3年度は、次のステップとして CLVDAS によりマイクロ波輝度温度を同化した確度の高い植生動態水文量を初期値として水文流出モデルに導入する手法の検討を行ない、高空間分解能・高精度の植生動態水文量(土壌水分量・植生水分量)の推定を目指す。

さらに将来的には、長期再解析気象フォーシングデータを入力値としたブラジル・アフリカ・グアテマラ共和国における渇水モニタリングにおいて確認した CLVDAS による推定植生動態水文量(特に植生水分量)と主要穀物収穫量との関係に、将来気候季節予測データと CLVDAS により得られる植生動態水文量の季節予測値を入力することにより数カ月先の主要穀物収穫量を予測し、また営農支援情報を提供したいと考えている。

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 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

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：大沼克弘、吉野広郷、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、牛山朋來、宮本守、海野 仁、玉川勝徳、Maksym GUSYEV、Achirto Ralph Allen

【要旨】

本検討ではフィリピン・ダバオ川流域とインドネシア・ソロ川流域を対象に現在気候と将来気候の変化を算出し、気候変動影響による洪水・渇水リスクを調査した。全球モデルの中では高解像度で気候変動計算が実施された気象研究所の全球気候モデル (MRI-AGCM) の将来予測結果をもとに、領域気候モデルを用いて力学的ダウンスケーリング手法によって、5km メッシュの降水量や気温等のデータを作成した。それにより、対象地域の複雑な地形に伴う降水を精度よく表現することができた。降水量データから、気候変動にともなう豪雨や少雨の影響を調査した。さらに、得られた降水量等の情報を WEB-RRI モデルに導入し、水循環について過去気候と将来気候の比較検討を行った。

キーワード： 気候変動、ダウンスケーリング、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、統合プログラムの一環として行ったフィリピン・ダバオ川流域とインドネシア・ソロ川流域を対象に、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 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、全球を対象とした気候モデル (GCM: Global Climate Model) による推定シミュレーションが行われている。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、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作られ

ている。近年は IPCC 第 5 次報告書で示された、RCP (Representative Concentration Pathways) シナリオが使われており、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。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℃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。

本研究で用いる力学的ダウンスケーリングという手法は、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

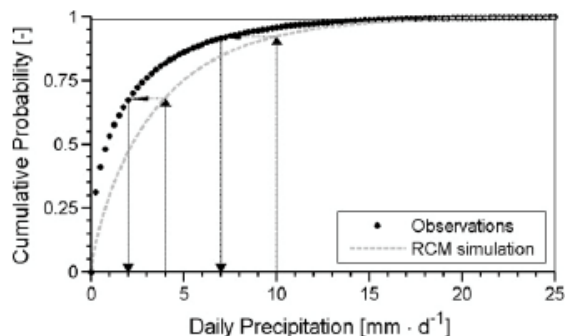


図-1 降水量バイアス補正の手法(文献1)より

ケーリングを行い、予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。

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、一般的に数 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に合った設定にする必要があり、今回フィリピンとインドネシアの 2 か所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-1 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-1 では、縦

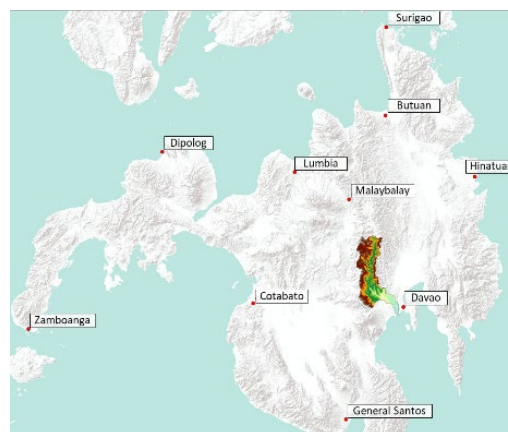


図-2 ミンダナオ島におけるダバオ川流域と雨量計地点

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

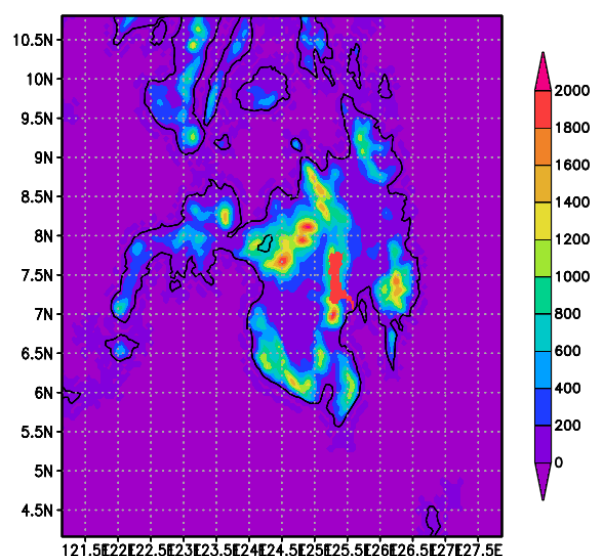


図-3 ダバオ川流域を対象とした WRF モデル領域。色は地形を表す。中央の赤領域はダバオ川流域。

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 2)の方法に従って、各月毎に図-1 のような変換を行った。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。

3 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-2 に示されるように、ミンダナオ島中央部の、流域面積 1760km²の比較的小さな流域である。図-3 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

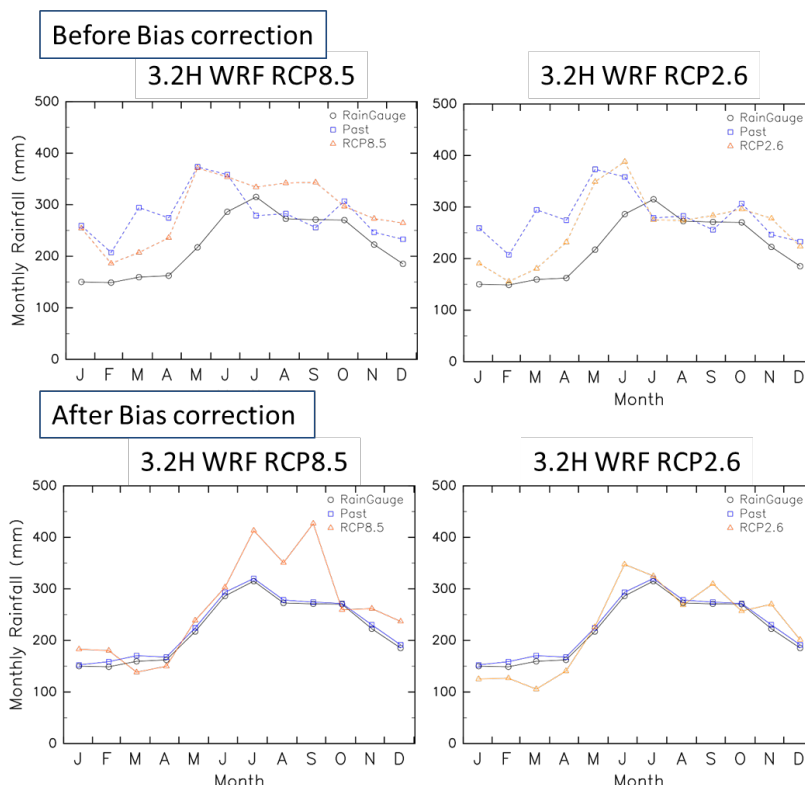


図-4 ダバオ川流域平均降水量の季節変化。黒線はChirps衛星雨量、青線は過去気候、赤線は将来気候である。上段が補正前、下段がバイアス補正後である。左はRCP8.5、右はRCP2.6をそれぞれ境界条件に用いたものである。

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-4参照)。

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)³⁾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-3はRCMの計算領域である。RCMとしてWeather Research and Forecasting model (WRF)⁴⁾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-4は力学的ダウンスケーリングの結果による流域平均月降水量である。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

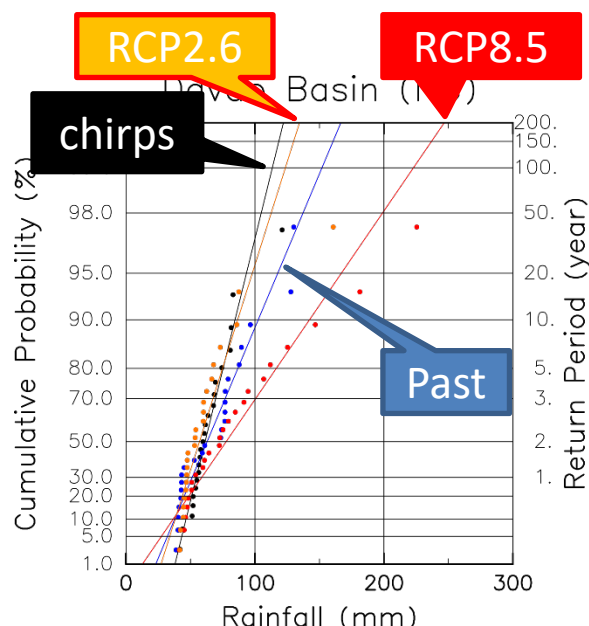
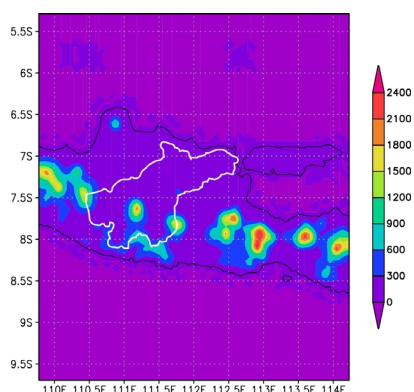


図-5 ダバオ川流域日雨量の頻度解析結果。黒はChirps衛星雨量、青は過去気候、赤は将来気候RCP8.5、オレンジはRCP2.6である。

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った。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—6 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。

図—4右列はMRI-AGCM3.2HのRCP2.6シナリオをダ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—5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-AGCM3.2H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. インドネシア・ソロ川流域の降水の温暖化影響

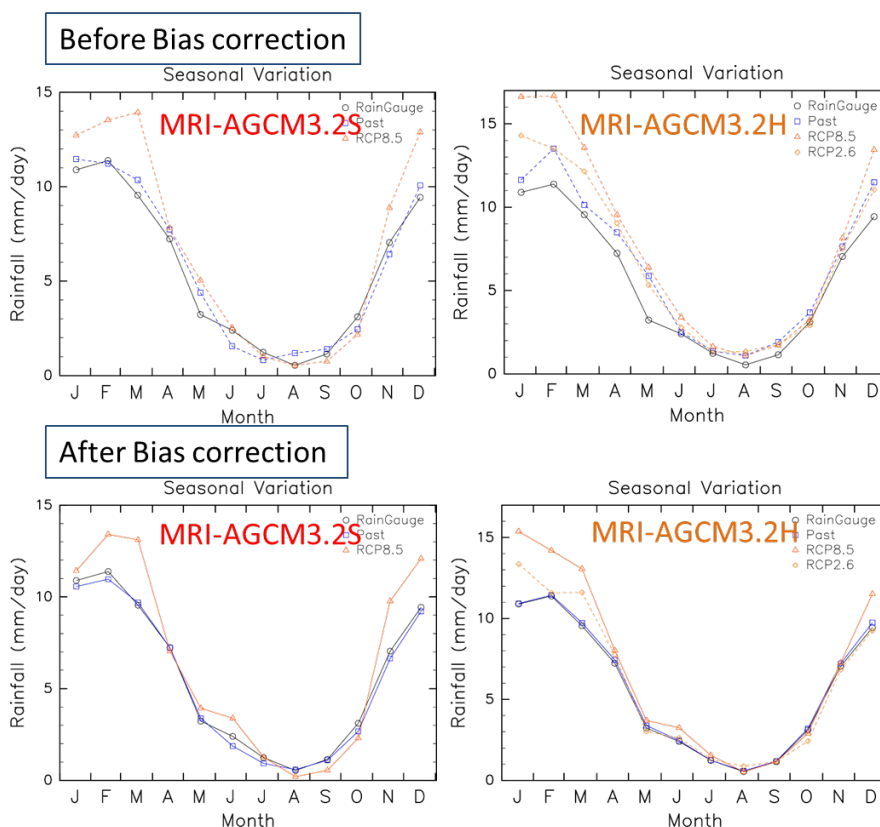
インドネシアのソロ川流域は、図—6に示されているジャワ島中部から東部に位置している。この地域は、南緯7~8度に位置しており、北はボルネオ島との間に挟まれたジャワ海、南はインド洋に面している。ソロ川流域は図—6に白線で示されている。島にはいくつかの火山が東西に連なり、3つの火山に挟まれた2つの支流が北に流れ、それらが合流して東に流れてジャワ海に注ぐ。この地域は、熱帯雨林であると同時に、海洋の影響を強く受ける点が特徴である。

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、海洋の海水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。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。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—7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、下の図がバイアス補正後である。バイア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—7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、乾季後半の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

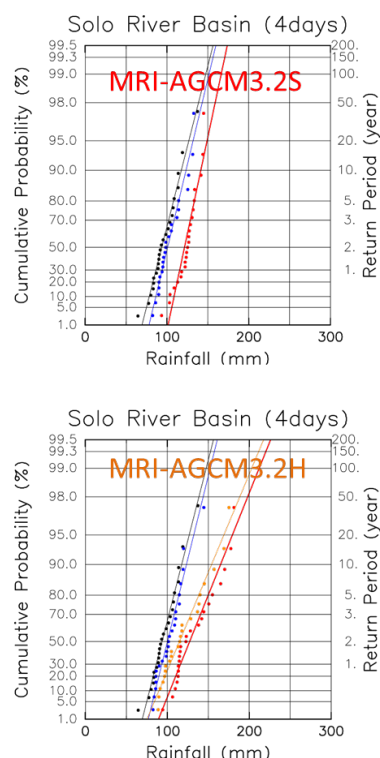


図一七 ソロ川流域平均降水量の季節変化。上図はバイアス補正前、下図はバイアス補正後である。左はMRI-AGCM3.2S、右はMRI-AGCM3.2Hのダウンスケーリング結果である。黒は雨量計、青は過去気候、赤実線は将来気候 RCP8.5、赤破線は RCP2.6 である。

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。

図一七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。

図一八は、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。図一八上図の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。



図一八 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。

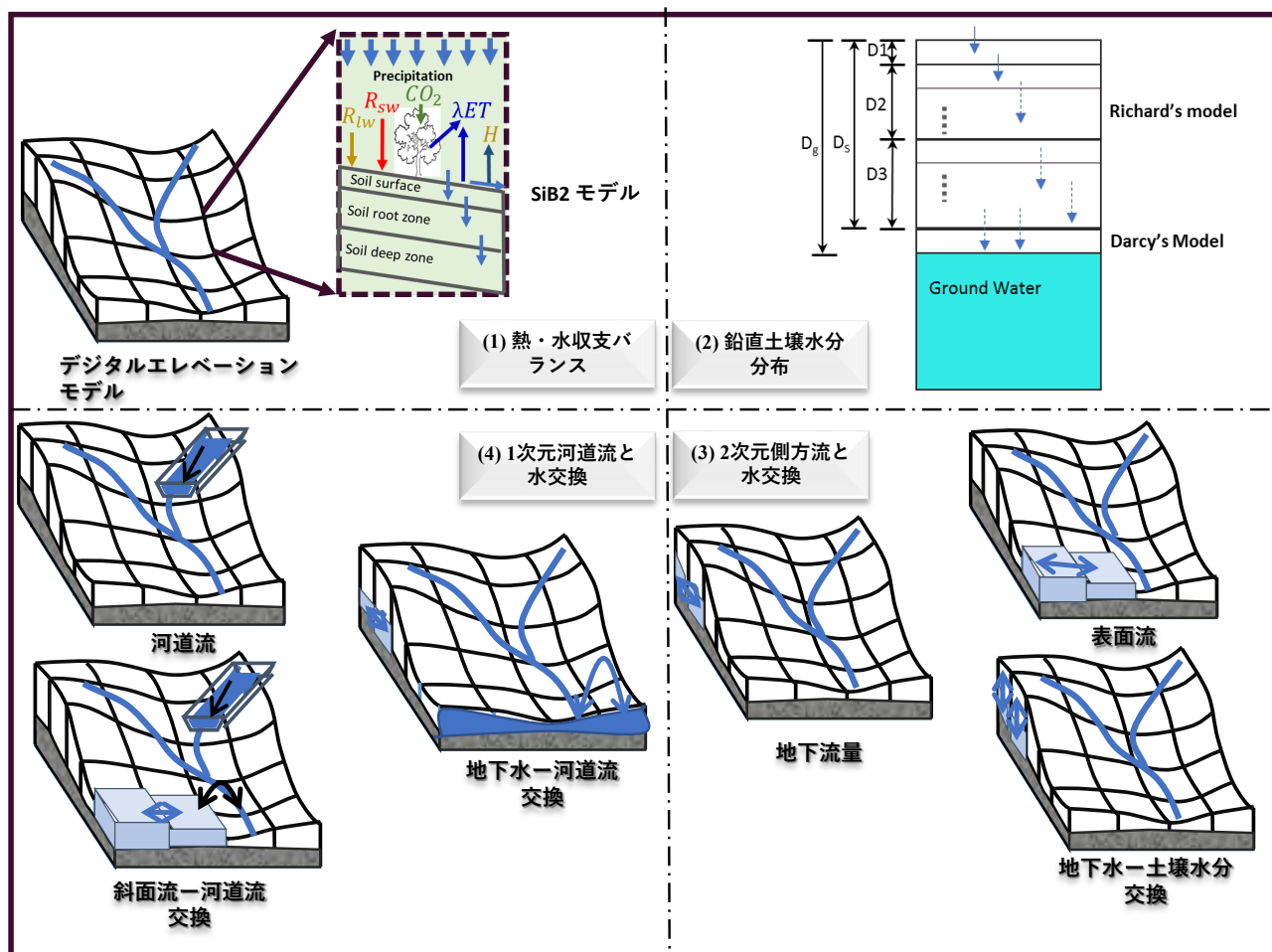


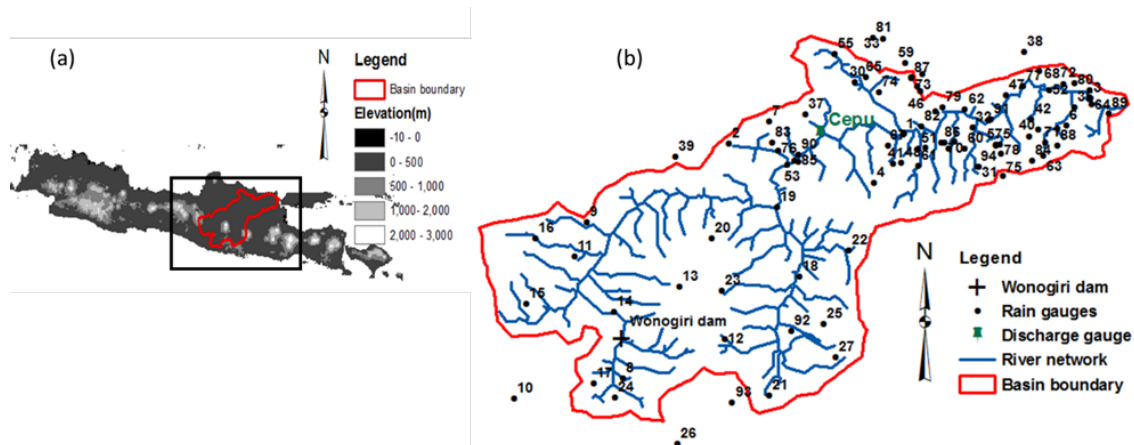
図-9 WEB-RRI モデルの概念図。(1) SiB2 モジュールは各格子点における地表面-大気間の鉛直熱エネルギーと水フラックス変換を処理、(2) 鉛直土壌水分分布モジュールは、リチャードの式とダルシーの式で地下水の再充填を計算、(3) 2次元拡散波流出モジュールは、表面流と地下流出を計算、(4) 一次元拡散波河川流出モジュールが河川流を計算。

5. インドネシア・ソロ川流域における WEB-RRI モデルの開発

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、キャノピー相互作用、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。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-9参照)。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

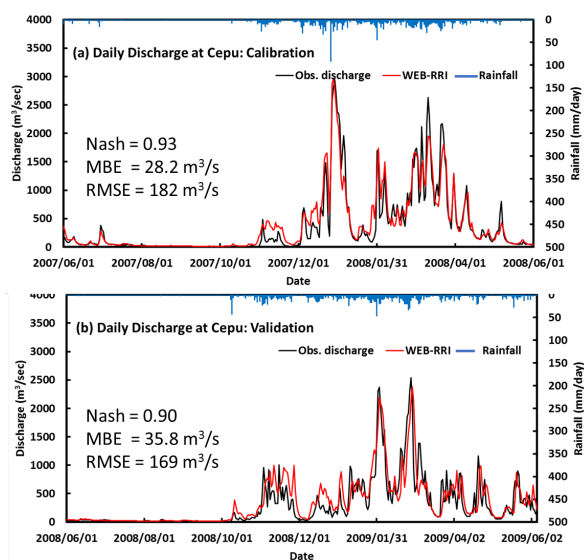


図一 10 ソロ川流域の位置と観測点、(a) ジャワ島地図とソロ川流域の位置、(b) ダム、雨量計、Cepu の流量観測点。

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 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。

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(図一10参照)。源流は Lawu 山と Sewu 山などの南から始まり、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 km²、年平均降水量は約 2000 mm である。上流の Wonogiri ダムは 7.3 億 m³ 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。

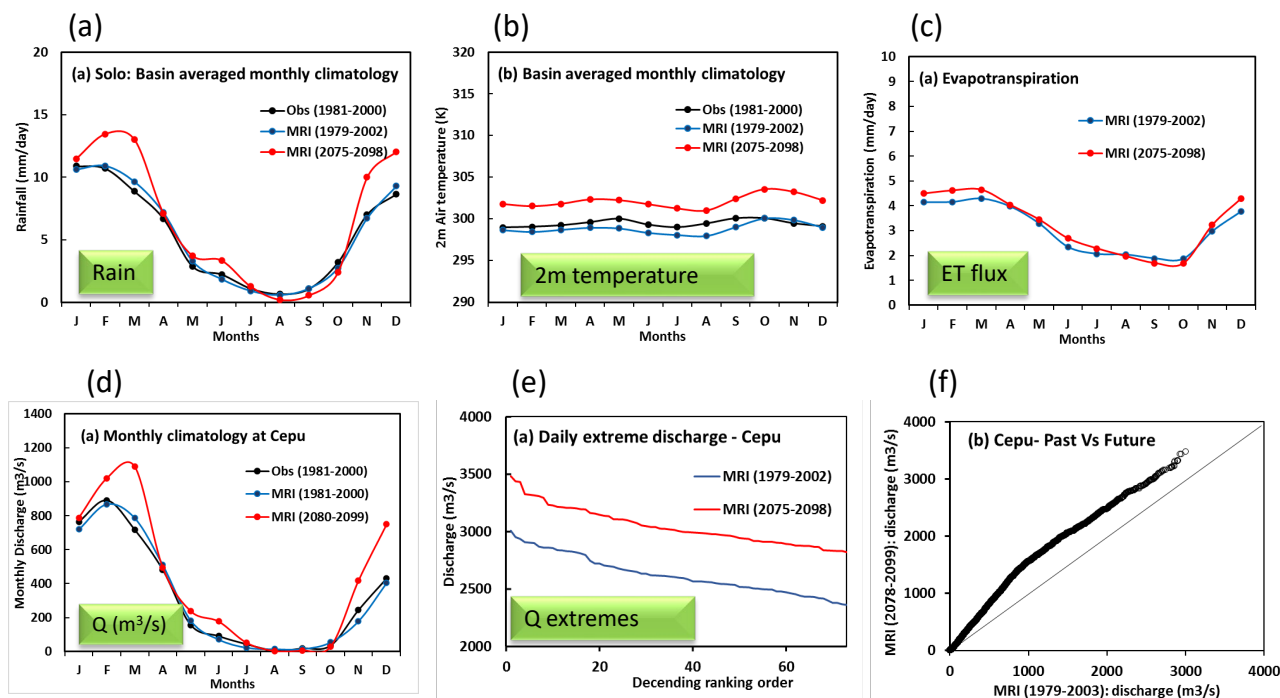
デジタル標高モデル、流向、積算面積等の地形データは、USGS が発行している HydroSHEDS と呼ばれるスペースシャトルによる観測データを用いた。HydroSHEDS は、NASA による Shuttle Radar Topography Mission (STRM)による 3 秒解像度の観測を基にしている。本研究では、元の SRTM データから水文モデル用に整備された 15 秒間隔データ(約 450m 解像度)を用いた。土壌種類、土地利用、植生データは、地表・地中・河川を計算する上で重要である。土壌分布は、FAO の 9km 解像度データを用いた。また、このデータセットに付随する、地表・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



図一 11 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。

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。



図一12 ソロ川流域のWEB-RRI モデル計算結果。(a) 流域平均雨量、(b) 2m 高さ気温、(c) 蒸発散、(d) Cepu 地点流量、(e) Cepu 地点最大流量、(f) Cepu 地点流量の過去と将来の比較。

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。図一11 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 m³/s、RMSE は 169 m³/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 m³/s、RMSE は 169 m³/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。

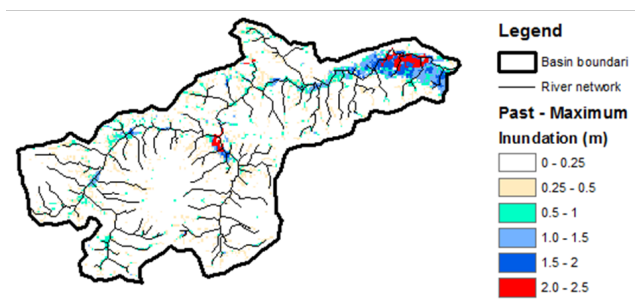
さらに、20 年間のソロ川流域の水文応答について計算し、長期間のモデル検証を行った。図一12 は Cepu 地点におけるシミュレーション結果と観測を比較しているが、モデルによる計算値は観測値と良く一致し、モデル成績もよい値を示した (Nash = 0.52, MBE = 82 m³/s, RMSE = 201 m³/s)。

図一12 は WEB-RRI モデルの計算結果である。用いた雨

量データは、MRI-AGCM3.2S の過去気候と将来気候 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。(a)の流域平均雨量は、図-7(左下)と同じものである。(b)は 2m 高さの気温である。将来気温は過去気候に比べて約 2°C 上昇している。(c)は蒸発散である。将来は、月雨量が増加する月は蒸発散も増加し、雨量が減少する 9 月 10 月は蒸発散も減少している。(d)は、下流の Cepu 地点における流量である。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。また、乾季の前半も同様である。一方、月雨量が将来減少する乾季后半の 8 月～10 月は、流量も減少しており、渇水リスクが懸念される。(e)は、Cepu 地点における全期間の日流量を大きさ順に並べたもので、99 パーセントイルに該当する 1 位～73 位までを示している。図から、日流量の上位値は将来大幅に増加することがわかる。(f)は、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。将来日流量が大幅に増加することが理解できる。

図一13 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。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。

(a) MRI – PAST Maximum Inundation



(b) MRI – FUTURE Maximum Inundation

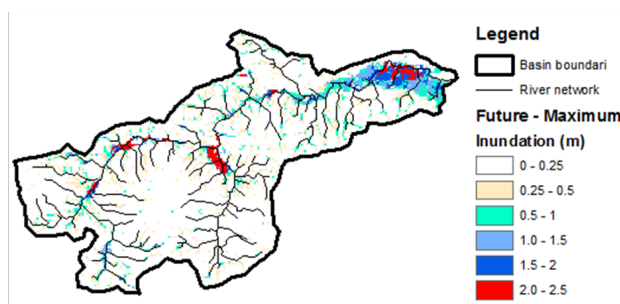


図-1.3 ソロ川流域の最大浸水深の比較。(a)過去気候、(b)RCP8.5。

6. まとめ

本検討ではフィリピン・ダバオ川流域とインドネシア・ソロ川流域を対象に力学的ダウンスケーリングを行い、過去気候における降水特性の再現、将来気候における過去気候に対する変化、そしてソロ川流域においてはWEB-RRIモデルの開発と、モデル校正・検証、および過去気候と将来気候の流量や氾濫浸水深の比較を行った。

主な結果は以下の通りである。

(1) フィリピン・ダバオ川流域における力学的ダウンスケーリングによる降水特性

力学的ダウンスケーリングの方法として、前年までの日本域で使われているKF積雲パラメタリゼーションスキームを使う方法から、積雲パラメタリゼーションを使用しない方法に変更した。バイアス補正の基準として前年までは地上雨量計を補間したものを使用していたが、今回Chirps衛星雨量を用いることに変更した。MRI-AGCM3.2Sのダウンスケーリング結果は、モデルのバイアスが非常に大きいことから今後の解析には用いないこととし、MRI-AGCM3.2Hのダウンスケーリング結果を用いて議論した。

月雨量は、RCP8.5では雨季に増加し、RCP2.6では乾季に減少する傾向が顕著であった。年最大1日降水量の頻度解析から、極端雨量の出現は、RCP8.5では過去気候に比べて増加するのに対して、RCP2.6では減少する結果となった。

(2) インドネシア・ソロ川流域における力学的ダウンスケーリングによる降水特性

ソロ川流域においては、WRFモデルを用いて積雲パラメタリゼーションを用いない方法によってダウンスケーリング計算を行った。得られた月平均降水量は、雨量計の観測値を良く再現した。また、バイアス補正を行うことによって、過去気候は雨量計の値と良く一致し、特に乾季の過去と将来の関係が明瞭になった。すなわち、RCP8.5で

は月雨量は雨季には増加、乾季後半に減少する傾向であった。RCP2.6では月雨量はRCP8.5と過去気候の間であった。

年最大4日雨量の頻度解析から、将来極端降水量は増加する傾向が明らかになった。しかし、増加幅はMRI-AGCM3.2と3.2Hで異なっており、不確実性が残された。雨季の月降水量の増加と極端降水量の増加の両方の影響により、この地域では将来洪水リスクの増加の恐れが示唆される。

(3) ソロ川流域におけるWEB-RRIモデルの開発、および校正と検証

気候変動影響を検証することが出来る、土壌や植生に関わる水・熱収支を計算することができるSib2モデルと、河川流出・浸水、氾濫を同時に計算することが出来る分布型水文モデルRRIモデルを統合し、WEB-RRIモデルを開発した。RRIモデルは、洪水の早期警戒やハザードマップ作成等について非常に有効なモデルであるが、WEB-RRIモデルを開発したことにより、水・熱エネルギーに関する土壌水分や植生による蒸発散などの物理過程を精緻に表現することができるようになり、気候変動影響調査など、長期間の連続計算や干ばつ計算が可能となった。

WEB-RRIモデルをインドネシア・ソロ川流域に対して構築し、モデルの校正と検証をそれぞれ2007～2008年の洪水シーズンと、2008～2009年のシーズンについて行った。計算された河川流量は、観測流量と比較して非常に満足できる精度であった。

このモデルを力学的ダウンスケーリングによるMRI-AGCM3.2Sの1979年～2002年と2075～2098年RCP8.5のそれぞれ24年間に適用し、過去気候と将来気候における比較を行った。河川流量については、月雨量変動を概ね反映したものとなった。また、日流量は、全期間において将来増加することが明らかとなった。

流域内の最大浸水深を過去気候と将来気候で比較した

結果、浸水深や浸水範囲が将来増加することがわかった。特に、中流域や上流域で増加が顕著であった。得られた水文データを用いて、洪水渇水リスク評価や、農業に対する水資源の変動についての議論が行われる予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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/
- 4) 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>
- 5) Mohamed Rasmy, Takahiro Sayama, and Toshio Koike: Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RRR) 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>

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、平成 28 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の分析を行った。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おらず、住宅再建、生活回復、地域活動の順に、回復には時間を要することが把握できた。
キーワード：平成 28 年台風第 10 号災害、小本川、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ことが必要である。さらに、「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も望まれる。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、社会的機能の稼働率を人為的に低下させるものの、被害を未然に防止することができる。

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んして変動・回復・向上するかに対応する。

令和 2 年度は、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、平成 28 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・生活の回復状況やその後の水害対策について尋ねた住民アンケート調査回答の分析を行った。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し、発災からの時間経過に応じた地域社会のレジリエンスに関する実態把握と客観的な実績値の把握を目指した。

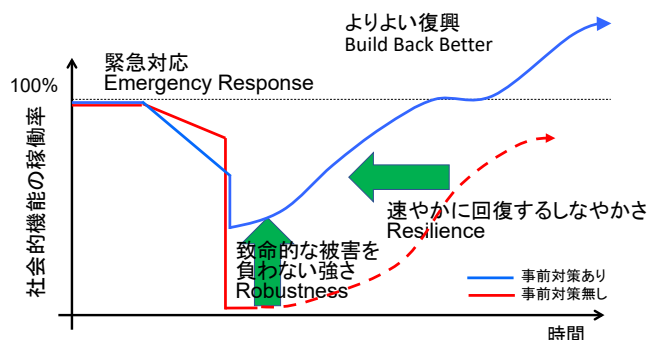


図-1 水災害による社会的影響と対策の効果

2. 岩手県岩泉町でのアンケート調査の結果

2.1 調査の概要

平成 28 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 23 名が発生し、多くの住家被害をもたらした。平成 28 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。

平成 28 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、令和元年 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。図-2 に、岩手県岩泉町の位置を示す。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、平成 31 年 2 月に連携・協力協定を締結した。よって、本協定に基づく活動として、平成 28 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、町民へのアンケート調査を実施した。アンケート調査の概要は以下の通りである。

- ・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%

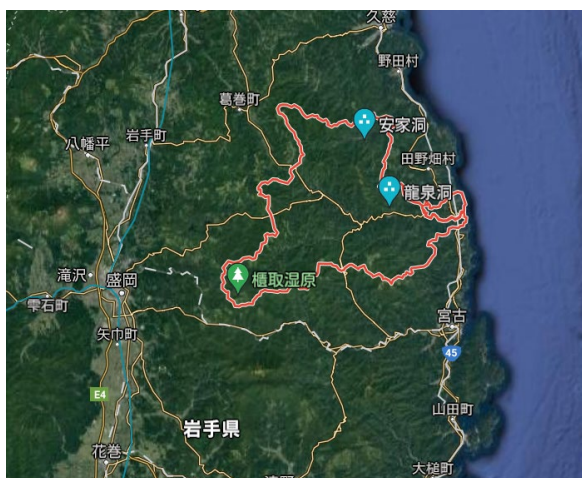


図-2 岩手県岩泉町の位置図 (Google Map より)

2.2 回答者の基本属性

本節では、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小本地区に存在していた。岩泉町役場は、岩泉地区に立地している。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)。回答は、世帯主または世帯主に近い人による回答を依頼しており、回答者は70代が31.4%、60代が29.1%と多くなった。男性が55.8%、女性が38.6%、答える必要は無いが2.1%、未回答が3.5%となった。

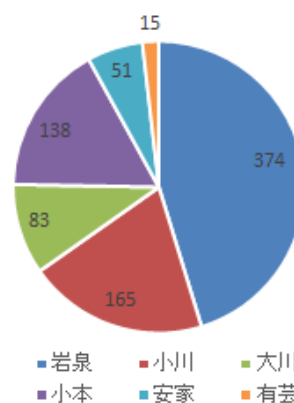


図-3 地区別回答数

2.3 被災者の住宅再建の状況

平成28年台風第10号で自宅が被害を受けた回答者は、図-4の通りとなった。回答者のうち、何らかの被害を受けた世帯の割合は、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。

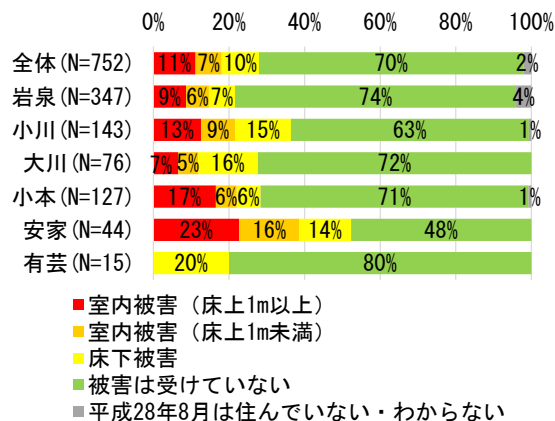


図-4 H28台風第10号の被害

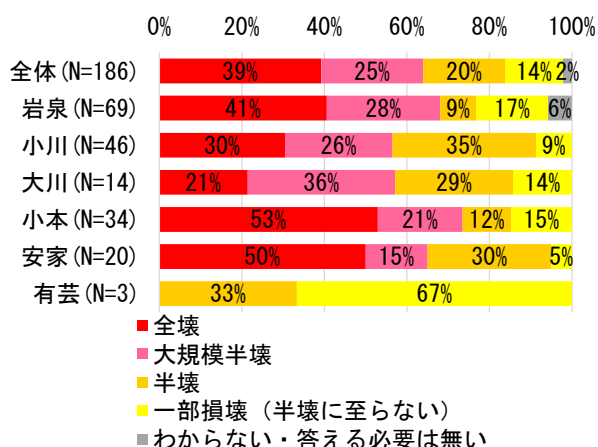


図-5 H28台風第10号での被害の内訳

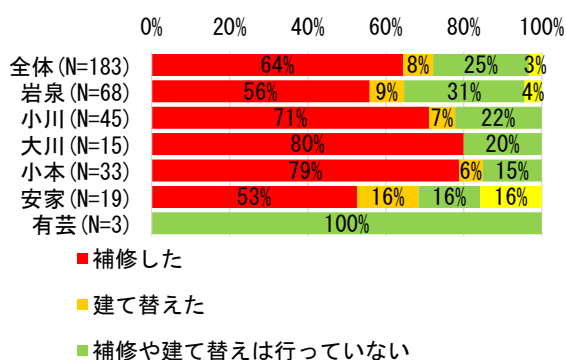


図-6 自宅被災後の補修・建て替えの状況

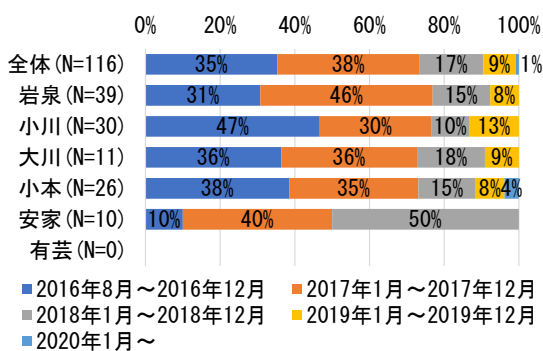


図-7 自宅被災後の補修・建て替え時期

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-6)。

補修や建て替えの時期については、2016年8月の発災後に2016年中に完了した割合が35%、2017年までに完了した割合が73%、2018年までが90%となった。安家地区では2018年と回答した割合が50%で、他地域よりも時間を要している(図-7)。

2.4 平成28年台風第10号災害後の生活の回復

現在、毎日の生活が落ち着いたと思うかどうかを尋ねたところ、「毎日の生活が落ち着いた」と思う割合は、回答者の約半分に残った(図-8)。また、地域の活動が元に戻ったと思うかどうかを尋ねたところ、「地域の活動が元に戻った」と思う割合は、有芸地区を除いて50%を下回り、安家地区では最も少なく20%以下であった(図-9)。両図ともに、安家地区での割合が少ないが、カイ二乗検定の結果、それぞれ $p=0.453$ 、 $p=0.181$ で0.05を上回り、地域別の回答差は有意ではなかった。平成28年の台風の影響が長期にわたって続いていることが把握できた。

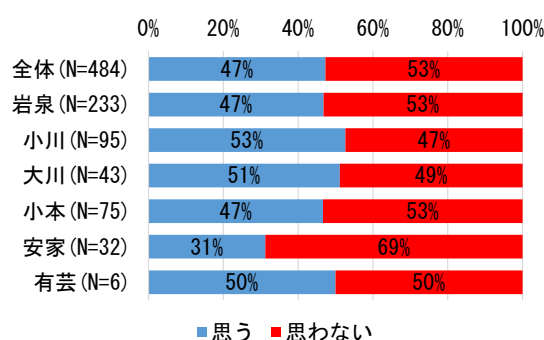


図-8 毎日の生活の回復状況

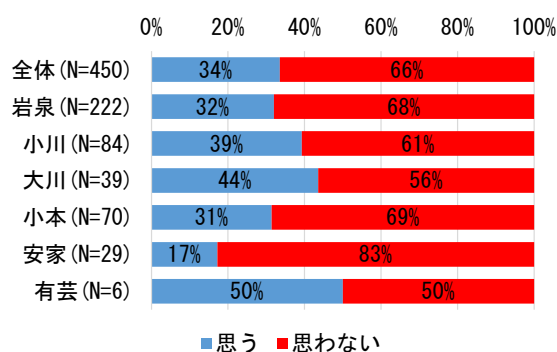


図-9 地域の活動の回復状況

「毎日の生活が落ち着いた」と回答した人について、落ち着いたと思う時期を尋ねたところ、図-10の通り、2016年8月の発災後の2016年中が8%、2017年中までが35%、2018年中までが72%、2019年中までが97%となった。落ち着いたと思えている人であっても、そのように思えるようになるまでには、発災から長い時期がかかっていることが把握できた。

同様に、「地域の活動が元に戻った」と回答した人に落ち着いたと思う時期を尋ねたところ、図-11の通り、2016年中が6%、2017年中までが24%、2018年中までが66%、2019年中までが98%となったが、地区によるばらつきがみられた。

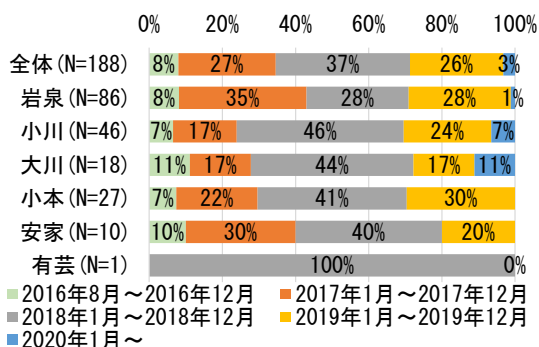


図-10 毎日の生活が回復した時期

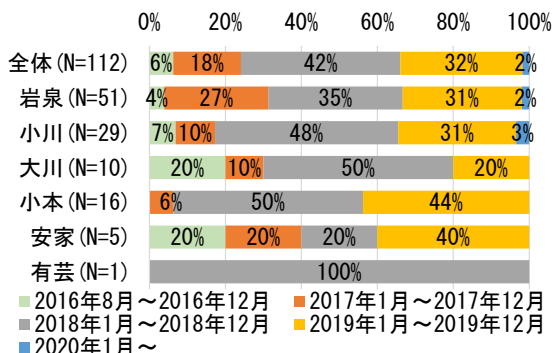


図-11 地域の活動が回復した時期

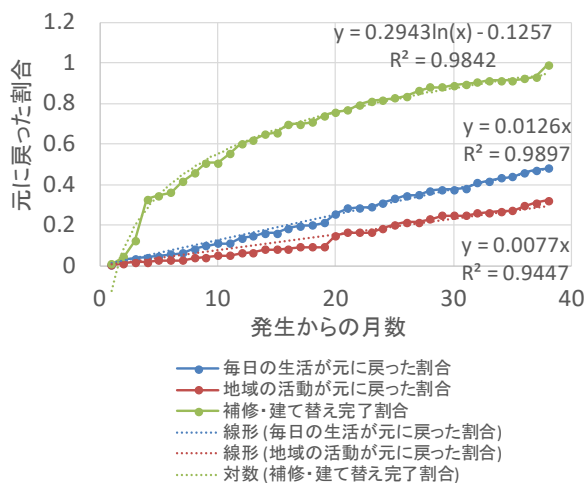


図-12 発災からの月数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復曲線

表-1 発災からの年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）

	補修・建て替えの完了割合	毎日の生活が元に戻った割合	地域の活動が元に戻った割合
1年目(12か月)	0.603	0.136	0.061
2年目(24か月)	0.819	0.311	0.183
3年目(36か月)	0.922	0.460	0.294

これらのデータを用いて、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-12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。また、発災からの年数に応じた住宅再建及び生活・地域活動の回復を表-1に示した。住宅再建、生活回復、地域活動の回復の順に時間を要することがわかった。図-12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。

2.5 平成 28 年台風第 10 号災害後の生活の変化

「あなたは、平成28年台風第10号の災害の後、日常生活に変化が生じたと感じていますか？」と尋ねたところ、自宅被害を受けた場合は94%、受けていない場合も67%が変化を感じていると回答した。具体的にみると、「近所の家が少なくなった」、「まちに活気がなくなった」、「また水害にあうのではと不安だ」と回答した割合が高く、全体の40%以上であった。地域別に見ると、以下の回答はカイ二乗検定で有意であり、地域別で回答差が見られた。残差分析の結果、また水害にあうのではと不安だ（ $p=0.016$ ）は小本地区で有意に高かった。また、「近所の家が少なくなった」（ $p=0.000$ ）は、安家地区、小川地区で有意に高かった(図-13)。

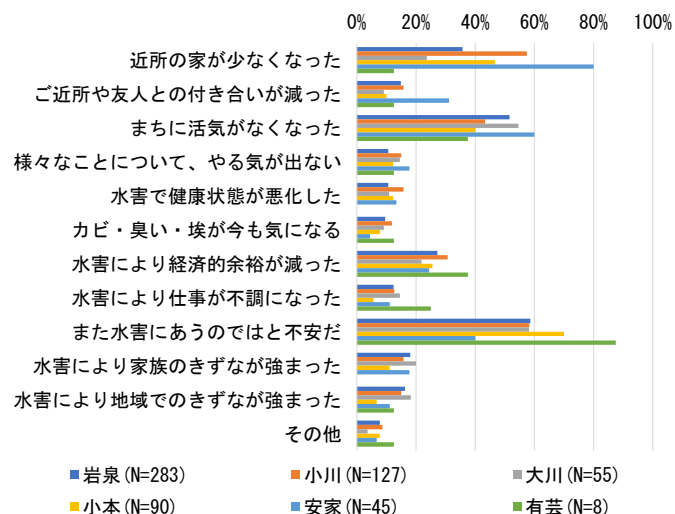


図-13 H28台風第10号での被害別に見た日常生活の変化

3. まとめと今後の課題

令和2年度は、平成28年台風第10号災害で小本が氾濫した岩手県岩泉町での住民アンケート調査結果に基づき、災害後に、住民の生活環境がどのように回復したかを分析し、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。なお、得られた曲線は本災害の場合であるため、地域・災害特性については更に検討する必要がある。

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

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、気象・水文に関するリアルタイム情報や予測情報等水災害情報が乏しい地域において、水災害に対する市町村の防災担当者や住民の防災・減災活動を支援するために、氾濫モデルによる解析結果などを考慮した新たな水災害リスク評価指標を設定する。さらに、それらの情報を防災担当者や住民と共有し、利活用するため、「水災害情報共有システム」を開発する。本年度は、「ICHARM 災害リスク情報共有システム (ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS)」の普及に向けた新潟県阿賀町における実証実験の実施・令和元年台風第 19 号におけるシステム稼働評価を行った。同時に、VR 技術を活用した仮想洪水体験システムの効果に関する検証を行い、その効果を確認した。

キーワード：防災・減災、ICHARM 災害リスク情報共有システム (IDRIS)、阿賀町、VR、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、「災害情報共有システム」(ICHARM Disaster Risk Information System :IDRIS)を開発し、地域防災計画などへの利活用方法について検討することを目的とする。

平成 29 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) を通して、IDRIS (ARIS) の有効性の確認を報告した。同時に、「洪水カルテ」（地区単位で洪水リスク評価が可能としたもの）の開発とその有効性を報告した。

平成 30 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。2 章において IDRIS の普及に向けたシステムの基礎仕様の整理、3 章において、「洪水カルテ」の自動作成ツールの概要を報告する。

平成 31 年度（令和 1 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」という）への適用を行った。また、防災・災害情報の創出・活用手法として、近年注目される仮想現実（Virtual Reality:VR、以下、「VR」と記述する。）を用いた仮想洪水体験システムの開発を行った。

令和 2 年度は、IDRIS の普及化にむけたシステムの検証とコスト分析、より全国へ展開するため、データ統合・解析システム（Data Integrated Analysis System : DIAS）との連携システムへの構築を行った。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。以下に、その概要を報告する。

2. IDRIS の普及に向けたシステム検証と DIAS との連携の構築

2.1 IDRIS の普及に向けたシステム検証とコストの分析

IDRIS の普及化にむけた阿賀町における実証実験において、ARIS（IDRIS）の表示エラー・機能停止

等の不具合が確認された。そのため、IDRIS のシステムそのものを検証することとした。その結果、IDRIS の機能停止は、①外部情報の参照先の仕様変更によるもの 1 件、②セキュリティレベルの不一致によるもの 1 件、③リンク切れによるもの 1 件、が要因であった。①については、IDRIS の外部情報の参照先との仕様の整合性の確認、③に関しては、定期的なリンク確認・更新作業が必要であることが確認できた。これらの対策としては、一元的な外部参照先を決め、参照先の仕様と整合させる定期的メンテナンスで対応可能であると考えられる。

コスト分析に関しては、土木研究所で契約したレンタルサーバに IDRIS と同じ環境を構築し、その運用コストを検証した。その結果、IDRIS はメインサーバとして Linux サーバ、データ・解析サーバとして Windows サーバで構成されるが、Linux サーバは安価に構築・維持できるのに対し、Windows サーバは約 4 倍の構築費・維持費が必要となる。また、雨量等のデータ購入が必要となる。Windows サーバを Linux サーバに置き換えること、データ購入の必要性を縮小することで、安価な IDRIS の供給が可能となると考えられた。

■ 現状IDRISの問題点

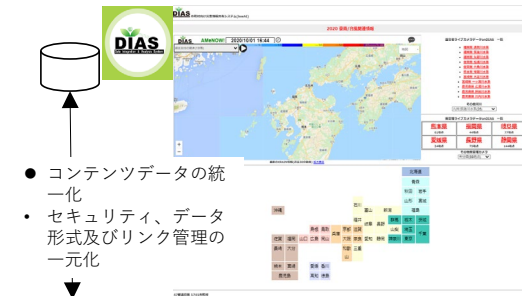
■ データ参照先の技術仕様の変化するとリンク切れ等が生じる。

- 雨量データ等の有料コンテンツデータ参照先
- セキュリティ変更
- データ形式変更
- リンク変更
- 生じる問題点
- データ表示が不可
- リンク切れ
- データ表示が不可



■ IDRISの改良の方向性

■ DIAS 上のIDRIS



- コンテンツデータの統一化
- セキュリティ、データ形式及びリンク管理の一元化

■ ローカールスケールのIDRIS



図-1 現状の ARIS（IDRIS）の問題点と IDRIS 改良の方向性

2.2 DIAS との連携の構築

上記の検討を踏まえると、データ統合・解析システム DIAS (Data Integration and Analysis System) との連携が技術的・コスト的に有効な手段であると考えられる。

一方、試験的に構築された IDRIS は、近年の WEB 技術と今後の技術トレンドを俯瞰した WEB 技術で構成されている。また、DIAS 内に収集・構築される水災害に関する情報は、一元化されているので、前節①の問題へ対応できる。

次に、コストの問題であるが、学術利用に限っては雨量データ等が活用できる点も DIAS との連携の利点である。本格的な普及に向け、防災等学術利用以外の場合に、どのように DIAS との連携を図るかという課題は残るが、IDRIS の普及に向けて DIAS との連携によって大きな前進があった。

しかし、DIAS は、全国の地方自治体のローカルな取り組みまでは、十分に対応できていない面がある。多くの地方自治体は、避難所・避難場所や詳細なハザードマップを作成する。これらの個別の取り組みを反映するには、ローカルに整備される詳細な地域の災害情報を掲載し、スマートフォンのアプリ等のような親しみやすい環境の構築が重要となる。

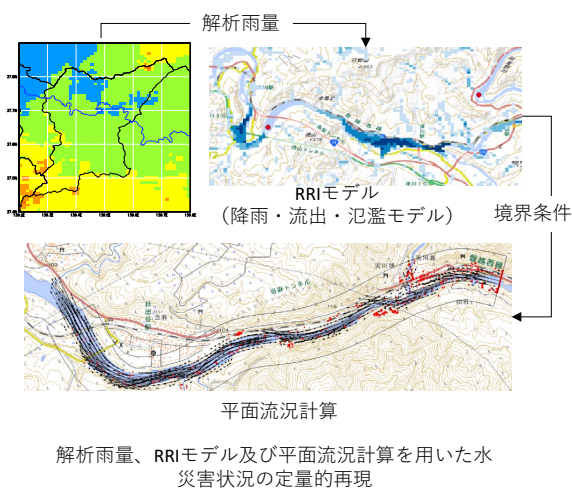
令和 3 年度には、スマートフォンアプリの開発、災害時の標準処理手順 (Standard Operation Procedure: SOP) の機能の組み込みや ICHARM が公開している水害対応ヒヤリ・ハット事例集の情報掲載を行い、より有用なシステムへ発展させる (図-1)。

3. VR 技術の活用した洪水疑似体験ツールの改良

3.1 VR の概要

近年洪水被害が毎年のように頻発しており、特に逃げ遅れによる人的被害が数多く発生している。その要因の一つとして、災害が自らの身に降りかかるものと考えることができない、水害「我がこと感」の欠如が挙げられる。平成 31 年度 (令和 1 年度) は、仮想の住宅地に仮想の洪水が生じた場合に起こる現象を創出した VR の基礎システムを構築した。令和 2 年度は、よりリアリティのある VR を実現するため、新たな VR を構築した。VR は、空間情報部 (国土数値情報、基盤地図情報等)、水工計算部 (流出・氾濫モデル、流況計算) 及び VR 部で構成される^{1) 2)}。

■ 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



図-2 開発した仮想洪水体験システムの開発

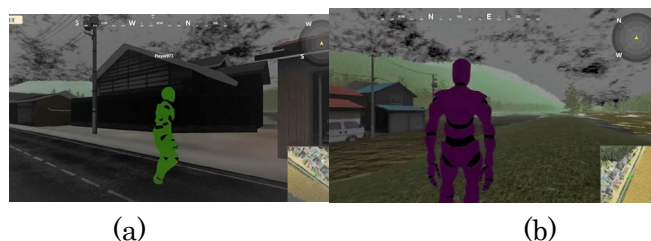


図-3 仮想洪水体験システムを用いた避難行動の違いによる避難困難度の比較

空間情報部は、国土数値情報（数値地図）から流域地形を作成し、基盤地図情報の建築物・道路のデータを重ね、市街地等を再現する。その上に、UAV、TLS の点群データ、フォトグラメトリを用いた市街地の詳細な再現等を可能にしている。

流出・氾濫モデルは、気象庁の提供する雨量データを入力データとして、流出・氾濫を一体的に解く氾濫モデル（Rainfall-Runoff-Inundation:RRI Model）を使用し、その計算結果を境界条件（上流端流量）とする流況計算を、iRIC(Nays2DH)を用いて行った。（図-2）。

上記の過程で得たデータ群をゲーム開発エンジンの一つであるUnity（ユニティ・テクノロジー社）上で合成し、仮想洪水状況を推定する。また、VRは、推定した仮想洪水状況下での避難行動訓練や避難時の行動選択を決定した心理等を記録する機能を持ち、また、複数人が同時に体験できる機能を追加した。さらに、行動心理学・行動経済学に関するデータを取得できる機能も有する。

3.2 VRの改良結果

図-3に2019年台風第19号により被災した阿賀町に適用した事例を示す。図-3(a)は、被災集落周辺の阿賀野川の水位が上がり始めた際に、川の様子などを見に行かず避難した場合を示す。被災集落の道路には、冠水が生じておらず安全に避難できることがわかる。一方、図-3(b)は、水災害が生じた際に、川の様子を見に行った場合、つまり、避難行動が遅れると避難路となるべき道路が冠水し、避難できない状態を示している。

図-3に示す結果は、コロナ禍の影響で現地における聞き取り調査等が実現できていないため、現時点では、シミュレーション結果から推定したイメージ動画に過ぎない。しかし、実在する地域での水災害状況の再現・予測が可能である仮想洪水体験システムは、生活する地域で起こりえる水災害状況を理解できる点で大きな進歩である。コロナ禍の状況を考慮しながら、現地のヒアリング調査等を行い、仮想

洪水体験システムのリアリティの向上、仮想洪水下での避難行動実験等を最終年度に実施していく。

4. 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の開発に向けて

これまでの研究を通じて、本個別課題が目指す3つの目標である、①新たな災害リスク評価指標の設定、②水災害情報共有システム、③行政・住民との水災害の危険性の共有を実現できた。

令和3年度以降は、これらの成果（洪水カルテ、IDRIS及びVR技術）を組み合わせ総合化して、行政（研究者）・住民間のリスクコミュニケーションを行う現地実験等を予定している。

現中長期の最終年度は、研究協定を締結している阿賀町、岩泉町との連携を深め、現場での実践と通じて、より活用しやすい水災害リスク情報システムの実現を目指す予定である。

5. まとめ

令和2年度においては、①IDRISの本格的な普及に向けてIDRISの問題点と改良点の抽出を行った。②VR技術の改良を行い、VRと実空間データを用いて2019年台風19号時の阿賀町の水災害の再現し、インターネットを介して複数人が再現した仮想空間内での避難行動実験等を行えるシステムを開発した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) グーグル合同会社：
<https://www.google.co.jp/maps>（2021年3月閲覧）