

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 深見和彦

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「仙台防災協カイニシアティブ」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。

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、令和元年度は(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、令和元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安価・簡便な洪水予測システムを開発することを目的に、流出解析モデル (RRI モデル) にリアルタイム水位観測データを使用したデータ同化 (粒子フィルタ法) を組み合わせた手法を開発するとともに、避難等に必要リードタイムを確保するため、複数の雨量データの比較、洪水中の河床変動に追従するための H-Q 式の逐次推定の手法や、流出モデルの再現性を効果的・効率的に高めるためのパラメータ最適化手法として SCE-UA 法の適用について検討を行った。さらに、簡便・効率的に水位予測モデルを作成するためのグラフィック・ユーザ・インターフェイス (GUI) の試作および自動演算・配信システムを試作し、実河川を対象にリアルタイム演算・配信を試行した。

発電ダムを対象にアンサンブル降雨予測と流出モデル (WEB-DHM-s) を用いてダム流入量を予測することにより、発電量の増加と治水効果の発現のためのダム操作方法について検討を行った。アンサンブル降雨予測を流出モデルに入力し、洪水が見込まれるとなった場合に事前放流により発電水量を増やし発電量を増加させるとともに、ダム水位を低下させ貯留容量を増加させるダムの操作方法を、既存のダムを対象に提案した。

令和元年の台風 19 号による災害で被害を受けた宮城県の阿武隈川水系五福谷川の災害現象を再現するため、計算対象河川の上流端における多量の土砂を含む洪水流を設定し、下流の土砂・洪水氾濫現象を計算した。上流端境界条件の設定に当たっては、現地調査の結果、山間部で生産された土砂が洪水流によって下流に大量に輸送され、下流の氾濫域に堆積したことから、一次堆積土砂に作用する掃流力を用いて河床侵食に伴う微細土砂の流出量を設定した。

山間部のダム流域を対象に、複数回の地上レーザ測量により積雪深を計測し、積雪の堆積過程を分析した。その結果、積雪深の変化量の空間分布が、当時の気象条件から概ね推定可能であったことを示した。

(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

平成 24 年から数年間続く深刻な渇水が発生したブラジル北東域を対象に植生動態-陸面結合データ同化システム (CLVDAS) を用いて算定した 25km グリッド LAI を、植生動態モデルを結合した水エネルギー収支分布型水循環モデルである WEB-DHM-Veg を併用することにより高空間分解能 1km グリッドの LAI に再配分する手法を考案した。この 1km グリッドを用いて地区スケールの LAI を計算し、穀物生産高・最適灌漑水量などの農業支援情報の提供について検討した。

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変化を算出し、気候変動影響による洪水・渇水リスクについて検討した。気象研究所の全球気候モデル (MRI-AGCM) による将来予測結果をもとに、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。さらに、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するため、得られた降水量等の情報から水循環現象を評価できる WEB-RRI モデルを導入した。

過去の水災害における人口・地域総生産の変動を分析した。総人口では全国的な人口減少の傾向が顕著に出るが、転出者数には災害後の影響が表れやすいと考えられた。地域総生産に関しては、全半壊率の高い被災市町村で、①顕著に総生産が減少、②周辺の自治体より総生産が増加、③総生産に変化が無い、という 3 つの傾向が見られた。産業別の地域総生産に着目すると、建設業等の総生産が大幅に増加した業種と、製造業等の総生産が減

少した業種との間で、総生産の変動が相殺されており、市町村全体の総生産の変動につながっていることが確認された。

(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、新潟県阿賀町における実証実験の実施・令和元年台風 19 号におけるシステム稼働評価を行った。また、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。

さらに、円滑な災害対応を行うには、過去の災害の教訓から学び、起こり得る困難をあらかじめ予測して必要な事前対策を講ずる必要がある。災害対応担当者が「困る・焦る・戸惑う・迷う・悩む」などの状況に陥って、円滑な災害対応に支障をきたした状況を「災害対応ヒヤリ・ハット事例」として新たに定義し、過去の災害対応検証報告書から事例を抽出して、「水害対応ヒヤリ・ハット事例集（地方自治体編）」を作成した。

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
FUKAMI Kazuhiko

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 fourth year of this program (FY2019), 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：伊藤弘之、菊森佳幹、望月貴文、柿沼太貴、中村要介

【要旨】

中小河川を対象とした安価・簡便な洪水予測システムを開発・導入することを目的として、流出解析モデル(RRIモデル)に水位観測データを使用したデータ同化(粒子フィルタ)を組み合わせた手法を開発した。また、リードタイムを確保できないケースへの対応のため、複数の雨量データの比較、洪水時の河床変動に追従するためのH-Q式の逐次推定の手法について検討した。また、パラメータ調整を効率的に実施するため、パラメータ最適化手法としてSCE-UA法の適用について検討を行った。さらに、簡便・効率的に水位予測モデルを作成するためのグラフィック・ユーザ・インターフェイス(GUI)の試作および自動演算・配信システムを試作し、実データを用いたリアルタイム演算・配信を試行した。

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、SCE-UA法

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モデル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

2.1 流出解析モデルの選定

降雨条件から河川流量を計算するためには、流出解析モデルが必要となる。本研究では、リアルタイムで配信されるレーダ雨量計データや気象庁短時間降雨予報等より得られる時空間分布を反映できること、無料での利用が可能なこと、実流域への適用を

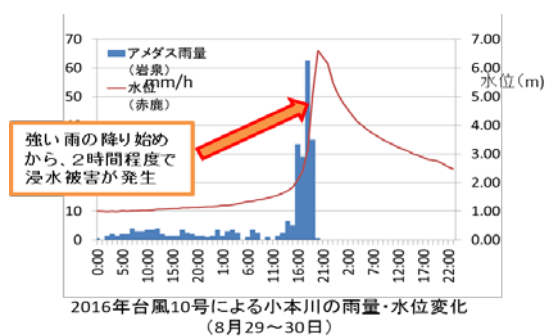


図-1 中小河川における急激な水位上昇

支援するユーザ・インターフェイス等があることや表面流出・中間流出等の流出現象を表現できる一方で、調整すべきパラメータの数が少ないこと等、安価・簡便な点や、既往研究が多く信頼性が高いことに着目し、RRIモデル¹⁾(図-2 参照)を採用した。

2.2 河道水位計算方法の検討

流出解析では、降雨から流量が計算されるが、これを河川氾濫の危険性に直結する水位情報に換算する必要がある。一級河川のように主だった出水時に流量観測が行われH-Q式が作成されていたり、測量により河道データが充実している河川では、H-Q式を利用したり、不等流計算等を行い、流量から河道水位を算定することができるが、中小河川では河川測量や流量観測が行われていない場合が多く、H-Q式の利用や不等流計算モデルの構築は一般に困難である。このため、上記の手法でH-Qが作成されていない河川においては、水位観測地点の断面データから等流を仮定したH-Q式を算出し、過去の洪水等からH-Q式を推定することとした。

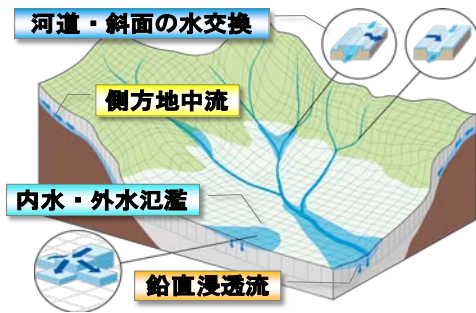


図-2 RRIモデルの概要

表-1 モデル河川における評価結果

河川	洪水イベント	リードタイム
A川(東北)	2016年8月台風第10号	5時間
B川(九州)	2012年7月3, 14日九州北部豪雨, 2017年7月九州北部豪雨	20分、1時間、2時間
C川(東北)	2016年8月台風第7号・第10号	2時間、3時間、50分
D川(近畿)	2013年9月台風第18号	2時間30分
E川(九州)	2016年9月台風第16号, 2017年9月台風22号	3時間、1時間
F川(近畿)	2018年7月西日本豪雨	1時間
G川(近畿)	2018年7月西日本豪雨	2時間
H川(中国)	2013年7月山口・島根豪雨	3時間
I川(四国)	2018年7月西日本豪雨	1時間
J川(九州)	2012年7月13日、14日九州北部豪雨	2時間、5時間

2.3 水位観測データを使用したデータ同化の検討

本方式では平常時から洪水時までの河川水位の連続計算を想定しているが、計算を長期間続けていると計算値と観測値の乖離が大きくなり、水位予測精度の低下が懸念される。このため、水位観測データを水位計算に逐次反映し、観測値に対する追従性を確保する(水位データ同化)方法として、非線形の水位予測モデルの状態量やパラメータへの適用が可能であり、応用性の高い粒子フィルタ法(PF)²⁾(図-3 参照)を選定した。観測値に近い粒子(ある状態量やパラメータによる計算結果)の重みを大きく、離れた粒子を小さく(又は消滅)することで、観測値と整合する状態量やパラメータの設定による予測計算を可能としている。RRIモデルの河道粗度係数、透水係数、不透水層からの水深にそれぞれ適用したところ、不透水層からの水深に対して適用するのが効果的と評価された。不透水層からの水深に対して適用した結果を図-4に示す。初期水位や水位上昇時における計算結果(点線)が実測水位(▲)に近づいている。

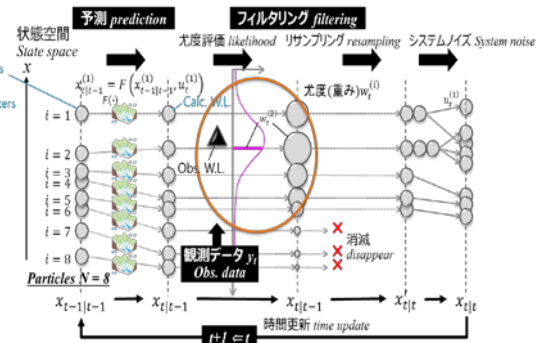


図-3 粒子フィルタ(PF)の基本原則

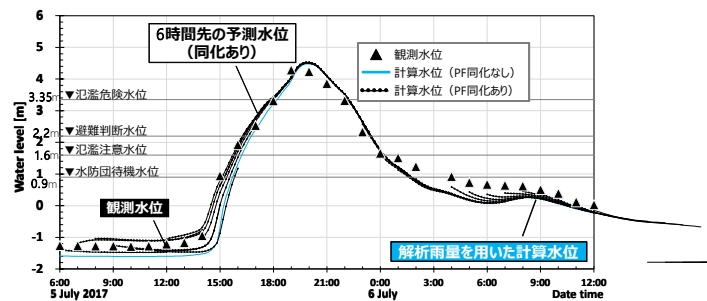


図-4 粒子フィルタ(PF)の適用事例

2.4 水位予測精度の評価

2.1 から 2.3 の方法を組み合わせて、水位予測モデルを構築し、モデル河川の過去洪水に適用することにより、その精度を評価した。流出解析モデルの構築に当たっては、山崎ら³⁾により開発された日本域流表面流向マップを使用した。これを使用することで、通常の DEM から地形勾配で得られるものよりも、正確かつ詳細な河道ネットワークを表現することが可能となる。また、降雨データについては 30 分毎に配信される気象庁解析雨量及び降水短時間予報(6 時間先まで)を使用した。

全国から 10 のモデル河川を選定し、過去の洪水イベントを対象とした水位予測を行った結果の一覧を表-1 に示す。15 イベント中 10 イベントにおいて 2 時間以上のリードタイム（河川水位が氾濫危険水位を超過することを何時間前に予測できたか）が得られた一方で、特に、以下のような課題も明らかとなった。

- a) 気象庁解析雨量では、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。
- b) 洪水時の河川水位を計算するためには、H-Q 式が必要となるが、洪水時の河床変動が顕在化する河川では、あらかじめ設定した水位・流量の関係が洪水に変化し、水位を正しく算定できない他、河床掘削等による河道断面変化等により、H-Q 式の精度が低下する場合がある。
- c) RRI モデルのパラメータ調整が不十分であり、水位上昇時における流出解析モデルの精度不足の原因となることがある。

3. 課題と検討状況

3.1 豪雨等捕捉のための雨量データの組み合わせ方法

2.4a)については、解析雨量、降水短時間予報に加え、更新時間間隔が 10 分間の速報版解析雨量、速報版予測降雨及び更新時間間隔が 1 分間の Xrain のデータの組み合わせ方法について検討している。速報版解析雨量は 2017 年 7 月から、速報版降水短時間予報は 2018 年 3 月から配信されているためデータの蓄積が少ないが、豪雨イベントに着目し精度、配信時間等データの特徴を把握した上で、使用方法について検討する。一事例として解析雨量と速報版解析雨量の同一流域におけるデータを比較したものを、図-5 に示す。この事例においては、流域平均雨量、

ピーク時の空間分布とも解析雨量と速報版解析雨量で同程度の精度があると考えられた。

なお、時間解像度の高い降雨データを使用することは、予測計算回数の増加や 1 回の予測計算時間の短縮が必要となるため、予測精度の向上と計算機資源等との兼ね合いの検討も必要となる。

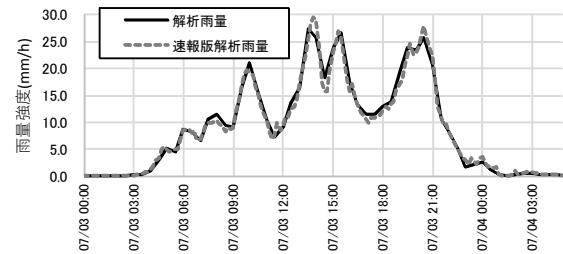


図-5 解析雨量(30分間隔)と速報版解析雨量(10分間隔)の比較

3.2 河床変動等への対応

2.4b)の洪水時の河床変動については、河床高を粒子フィルタ(PF)によって逐次推定する方法や簡易な河床変動モデルの適用について検討している。一例として、粒子フィルタ(PF)の状態変数に河床高を導入することにより、H-Q 式を逐次推定することが可能となり、結果として観測水位への追従性が高くなった(図-6 参照)。複数の赤線は、各時刻での予測計算結果を示す。一方で、この方法は粒子数が増加することにより計算負荷が増加するほか、他の河川への適用性等については検証が十分でないため、さらに事例を追加し検討を行う。

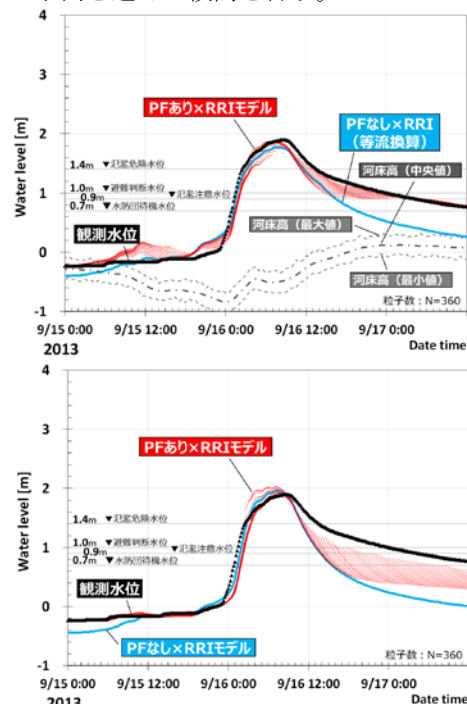


図-6 ピークの過大評価、下降時の乖離(上)
ピークから下降時の改善(下)

3.3 RRIモデルのパラメータ最適化手法の検討

2.4c) については、モデル作成の担当者が RRI モデルの設定したパラメータ毎にその計算結果と観測値を比較し、試行錯誤を繰り返しながらパラメータを調整するのが通常である。この方法では、担当者に一定の知見や技能を要することから、多数の河川への適用は困難と考えられる。このため、客観的かつ効率的なパラメータ調整が期待できる最適化アルゴリズムの適用について検討する。

本研究では、流出モデルへの適用事例が多く、また、アルゴリズムのソースコードが公開されている SCE-UA 法⁴⁾を採用した。SCE-UA 法は、遺伝的アルゴリズムに類似した競争進化、集団混合の概念を組み合わせた最適化手法であり、複数のパラメータ候補をグループに分けて各グループ内での最適化と、結果に応じた新しいグループの分け直しを繰り返して最適パラメータを探す手法である。

SCE-UA 法を使用し、H-Q 式による誤差の影響が含まれないダム流入量のデータを使用して、試行的に計算を行った結果を図-7 に示す。標準的なパラメータセットの RRI モデルに SCE-UA 法を適用した結果、精度評価指標 (Nash-Sutcliffe (NS) 係数) が 0.89 から 0.99 に改善し、最適化アルゴリズムの効果が確認できた。(適用前: ケース A、適用後: ケース B)。本研究開発の趣旨である住民避難に資するという観点からは、避難氾濫水位に到達するまでの洪水の立ち上がりを精度よく再現することが重要である。今後は SCE-UA 法を水位上昇局面のみに適用する、NS 係数に加え、ピーク水位の計算結果と観測結果の差分を目的関数に加える等、最適化を適用する適切な期間や目的関数の設定方法について、さらに検討を行う。

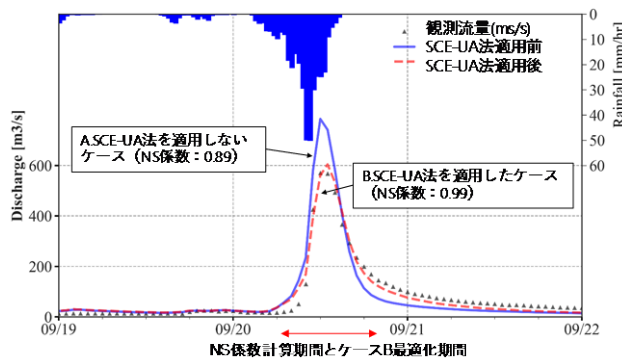


図-7 SCE-UA 法の適用事例 (2016 年 9 月、K ダム流入量、目的関数: Nash-Sutcliffe (NS) 係数)

【最適化パラメータ】 ①②河道・斜面の粗度係数、③土層厚、④飽和空隙率、⑤不飽和空隙率、⑥飽和透水係数

3.4 水位予測モデル構築支援ツールの整備

全国の中小河川への水位予測モデルの適用を支援するために、簡便・効率的に水位予測モデルを作成するためのグラフィック・ユーザ・インターフェイス (GUI) を試作した (図-8 参照)。この GUI は、日本域表面流向マップからの流出解析モデルの作成、降雨データ (解析雨量バイナリーファイル) のフォーマット変換、河道断面座標からの H-Q 式の作成、精度検証結果の表示等の一連の機能を有している。今後当該 GUI を使用した水位予測モデルの試作や検証等を行うとともに、ユーザビリティの観点からの改良を行うこととしている。



図-8 RRI-GUI により作成された河道モデル (全国の河川について地形・流向・土地利用データを有する流域モデルの自動作成が可能)

3.5 自動演算システムの検討

予測手法の検討と併せて、東京大学のデータ統合・解析システム DIAS 上に自動演算・配信システムを試作した。本システムにこれまでに構築したモデル河川を適用し、実データを用いたリアルタイム演算・配信を試行し、実測値との比較・検証を行っている。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。また、出水時は計算負荷が増加するが、その中でも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する方法など、今後の普及に向けたシステムの検討を併せて行っている。

4. おわりに

当該研究開発は、従前の水位予測技術に対して、速やかな普及のための安価・簡便を開発目的に加えたものであり、その開発状況について述べた。従来技術を適切に組み合わせることにより、危機管理としての実用性と安価・簡便性の両立を目指している。

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) 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.
- 3) 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
- 4) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. : Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Research,28,pp.1015-1031,1992.

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

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：伊藤弘之、牛山朋來、菊森佳幹、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、海野 仁、Achirto Ralph Allen、Asif Naseer、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。具体的には、アンサンブル降雨予測を流出モデルに入力し、洪水が見込まれるとなった場合に、事前に発電ダムの使用水量を増やし発電量を増加するとともに、ダム水位を低下させ洪水を効率的に貯留するダムの操作方法を検討した。大井川畑薙第一ダムを対象に、2018年の暖候期で検討した結果、発電量が事前に水を利用しなかった場合と比較し、発電使用水量が9%増加（発電量指標は6%増加）するとともに洪水期末期ではダム貯水位を回復させ、さらには下流へのゲート放流量を低下させることができた。

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

1. はじめに

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

そこで本研究では、1)領域アンサンブル降雨予測技術の改善、2) 大気と陸面の水文過程を精緻に表現し降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)の改善 をし、予測された降雨をWEB-DHM-Sに入力することでダムへの流入量を予測し、その予測流入量に基づき発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法を検討した。なお、本報告は、文部科学省 地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として平成31年度「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム(水課題アプリケーションの開発)」のもと、土木研究所、東京大学、日本工営株式会社、中部電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社の協働で実施した成果の一部を記したものである。

2. 対象流域

本検討では、中部電力株式会社が水力発電施設を有する大井川上流域を対象とした。

3. 領域アンサンブル降雨予測技術改善の検討

3.1 検討手法

領域アンサンブル降雨予測は、米国NCAR等で開発された領域気象モデル(WRF: Weather Research and Forecasting)を用いて実施した。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。領域気象モデルの計算領域と対象とした大井川流域の位置を図-1に示す。

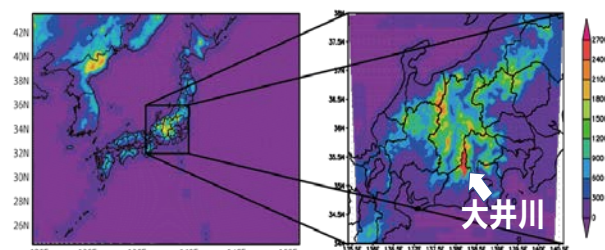


図-1 領域気象モデルの計算領域
(左：外側領域：格子間隔15km、
右：内側領域：格子間隔3km)

外側領域(15kmメッシュ)を対象に、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いたデータ同化およびアンサンブル初期値の更新を行なった。ここで用いたEnKFは、LETKF(局所アンサンブル変換カルマンフィルター、Hunt et al.,2007, Miyoshi and Kunii 2011)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。この9時間予報をさらに延長し、さらに内側の3kmメッシュ領域も計算することで、48時間先までの高解像度の予測データを得るものである。

3.2 検討結果

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

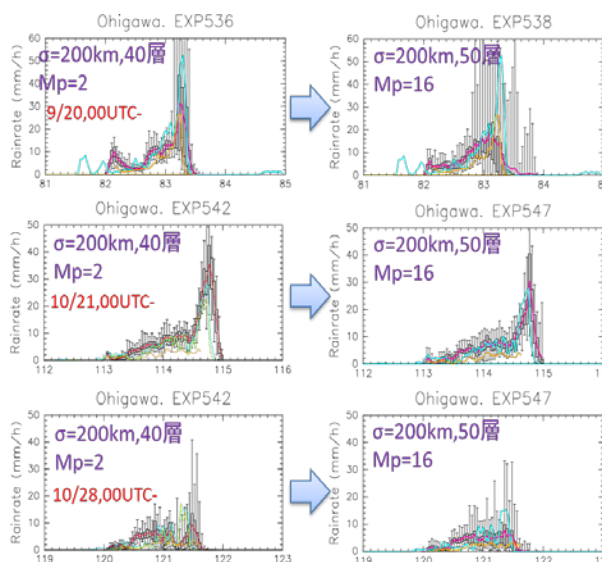


図-2 モデル設定変更前(左)と変更後(右)の大井川流域平均予測降水量

- (上から2011/09/11, 2017/10/23, 2017/10/28の結果)。
- ・横軸の数字は7/1を1とする日付である。
 - ・黒がアンサンブル予測。
 - ・灰色塗りつぶし部分は25～75パーセンタイル値。
 - ・赤がアンサンブル平均。
 - ・水色がレーダ観測雨量。
 - ・黄色は気象庁MSMの予測結果である。
 - ・Mp=2は雲物理パラメタリゼーションでLinスキーム。
 - ・Mp=16はWDM6を示す。

再現性が最も良好となった。

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

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

4.1 検討手法

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

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

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

デル相互比較実験(SnowMIP1)や国内外の様々な流域スケールの検証実験において優れた性能を示している。

4.2 検討結果

本手法を大井川上流域に適用した。2013年10月～2015年9月の2年間に於いてモデルパラメータを調整(キャリブレーション)し、2015年10月～2017年9月に適用しモデル検証(バリデーション)したハイドログラフ、積雪面積率、積雪面積分布の衛星観測値、推定値の結果を図-3に示す。

図-3の上段のグラフは、青が降水量、黒が観測流量、赤がWEB-DHM-Sで推定した計算流量を示す。2015年10月～2017年9月において出水のピークの立ち上がり、ピーク流量、また、融雪期における流量が観測値と合い適切に表

現されている。中段のグラフは流域内における積雪面積率を表しており、黒点が衛星から観測した値、赤線がWEB-DHM-Sでの推定した値である。積雪期(11月～2月頃)に積雪面積率が上昇し、また、融雪期(3月～5月頃)における減少する傾向が一致している。下段の図は流域内における積雪域の空間分布を時系列で示している。上にMODIS(人工衛星に搭載された可視・近赤外域のセンサ)で観測した積雪域で下にWEB-DHM-Sで計算した積雪域を示す。水色が積雪域、赤色が雲域(MODISのみ)、緑色が積雪以外の地域を表している。水色の積雪域がMODIS、WEB-DHM-Sともに合っており、積雪期、融雪期における積雪域の分布が良く推定されていることが示された。

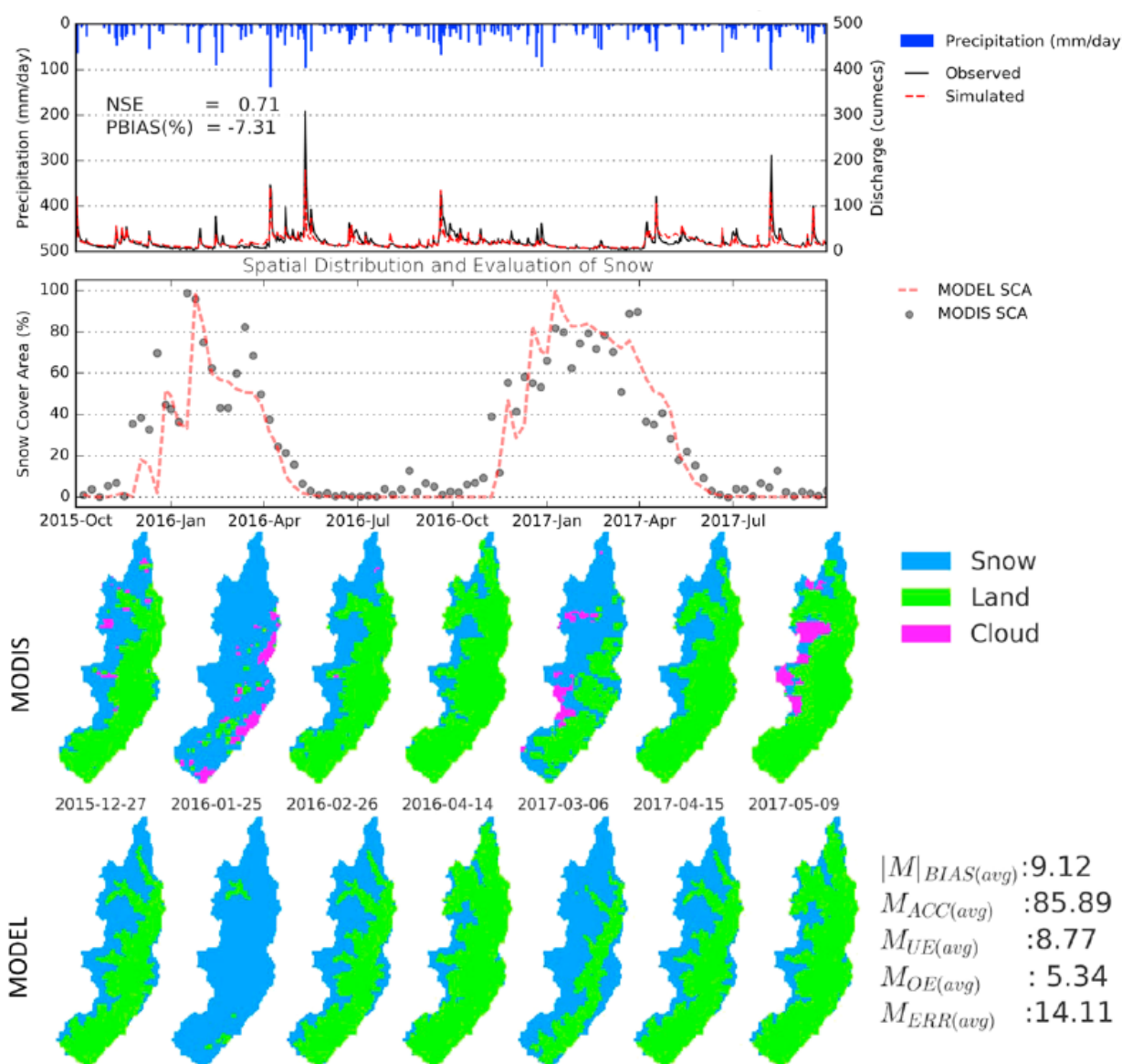


図-3 WEB-DHM-Sの検証結果 (2013年10月-2015年9月の2年間のキャリブレーションで得られたパラメータを用いて2015年10月-2017年9月に適用し検証した結果)。上からハイドログラフ・積雪面積率 (いずれも黒線が観測値、赤線が推定値)、積雪面積分布の衛星観測値、推定値。

5. 発電と下流における洪水調節のための効率的なダム操作手法の検討

5.1 検討手法

「3. 領域アンサンブル降雨予測技術」で検討した予測降雨を「4. 大気と陸面の水文過程を精緻に表現した降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)」に入力し、39 時間先までのアンサンブル流入量を予測し、その予測流入量情報を用いた発電ダムの効率的な操作手法を検討した。

本検討では 1) 増電のみに着目した最適ダム運用の考え方、また、2) 増電に加え下流の洪水防御も考えた最適ダム運用の考え方の 2 つのパターンを検討した。増電のみに着目した最適ダム運用の考え方の概念を図-4 の①～④に示す。また、増電に加え下流の洪水調節を考慮した最適ダム運用の考え方の概念を図-5 の①～③に示す。

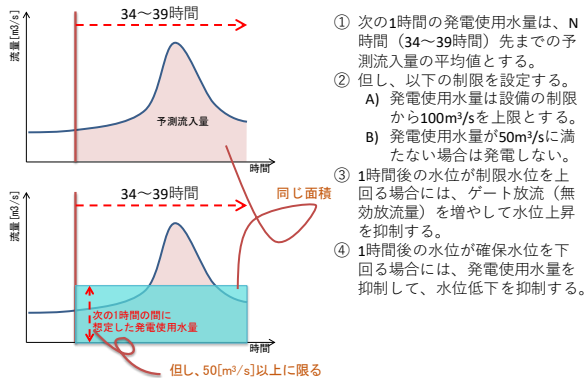


図-4 増電のみに着目した最適ダム運用の考え方の概念

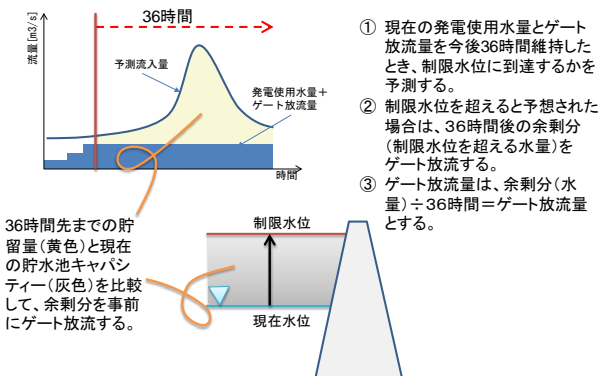


図-5 増電に加え下流の洪水調節を考慮した最適ダム運用の考え方の概念

このような運用を行うと、発電使用水量は増加するが、貯水水位が運用前と比較し低下してしまうこととなる。これは有効落差に左右される発電量を、逆に低下させてしまうことが懸念される。そこで、効果を発電使用水量ではなく発電量で比較することが望ましい。発電出力は、発電使用水量、有効落差、そして合成効率(水車効率と発電効率を合成したもの)から求まるが、比較には合成効率は不要である。そこで、新

たに「発電量指標: 発電使用水量に有効落差の指数(水位に従って線形的に増大し、計画高水位(HWL)で 1.0 となる)を乗じたものの時間積算値」を設けて、その指標の変化で増電効果を求めることとした。

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

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

ここで、 P : 発電出力 (kW)、

Q : 任意の水量 (m^3/s)、

He : 任意の使用水量時の有効落差(m)、

η : 水車効率と発電効率の合成効率

そこで、実績とシミュレーションの発電量を簡易に比較するため、式-(2)に示す発電量指標を計算した。

$$P_{index} = \left(1.0 - \frac{HWL - h}{H_{emax}} \right) \times Q_p \quad (2)$$

ここで、 P_{index} : 発電量指標、

h : 貯水水位 (m)

H_{emax} : 最大有効落差 (m)

Q_p : 発電使用水量 (m^3/s)

5.2 検討結果

畑薙第一ダムの 2018 年 7 月～10 月をサンプルとして、アンサンブル流入量予測情報を用いて増電、及び増電に加え下流の洪水防御を図った場合のシミュレーションを実施した。その結果を表-1 にシミュレーション結果の一覧、図-6、に流入量予測情報を用いて増電効果を図った運用シミュレーション結果を、図-7 に流入量予測情報を用いて増電効果と下流洪水防御を図った運用シミュレーション結果を示す。なお、シミュレーションに用いた予測情報は 32 アンサンブルメンバーの平均値を用いた。

図-6、図-7 において出水イベントの手前に水色で塗られている部分が増電操作による発電使用水量の増加部分である。オレンジ色に塗られた部分は、ゲート放流量の実績、同じ部分に黄色く塗られている部分は増電操作を実施した場合のゲート放流量である。また、ゲート放流量の実績(オレンジ色)と増電操作を実施した場合の放流量のシミュレーション(黄色)が重なる部分が、薄い黄土色で示されている。出水イベントの手前で発電向けに水が先使われるため、ゲート放流量は減少している。増電のみを考えた場合、この 4 ヶ月間の増電効果は+6%と推定された。

表-1: シミュレーション結果一覧

	実績	増電	増電+洪水防御
発電使用水量[m ³]	378,420,516	414,300,919 (+9%)	414,300,919 (+9%)
発電量指標	99,634	105,277 (+6%)	105,240 (+6%)

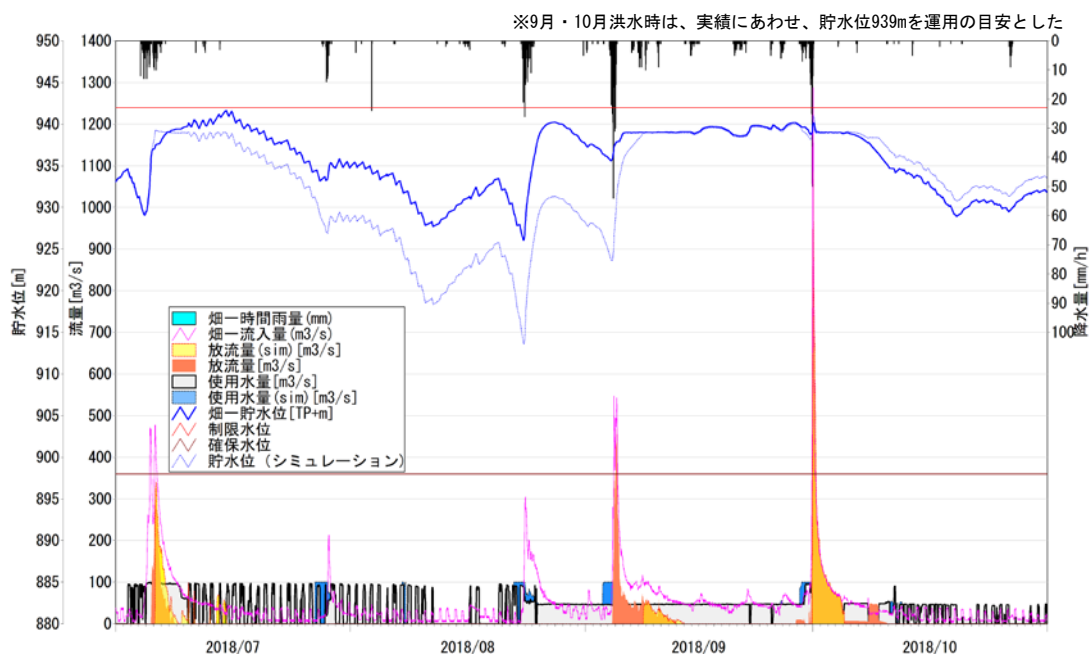


図-6 大井川畑窪第一ダムの期間（2018年7月～10月）流入量予測シミュレーション結果を用いて、流入量予測情報を活用した「増電操作」のシミュレーション結果。

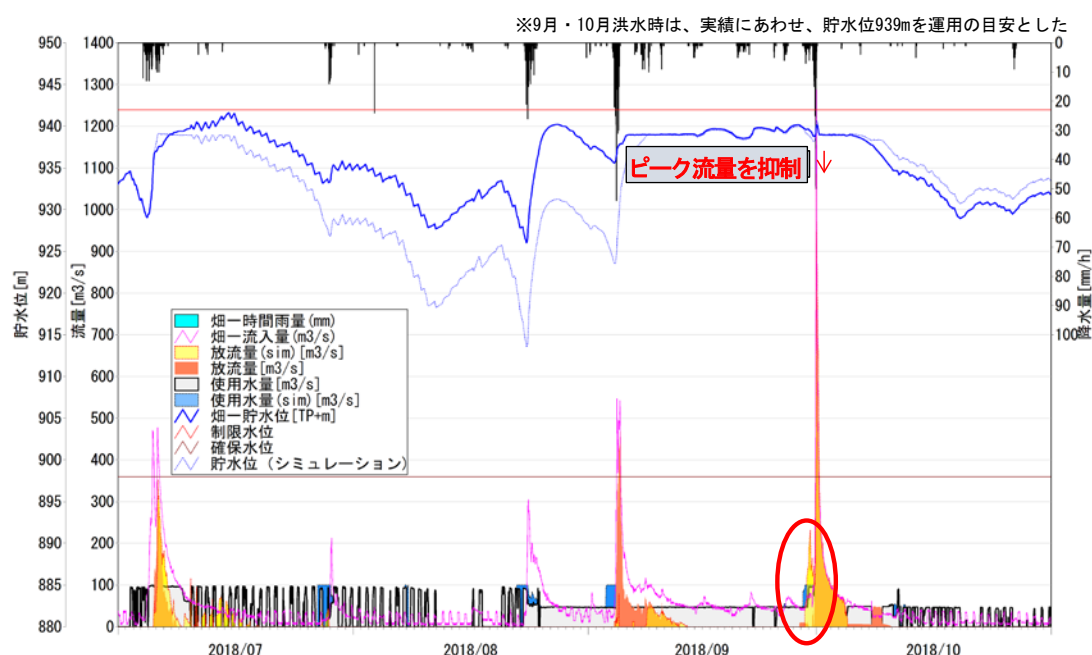


図-7 大井川畑窪第一ダムの期間（2018年7月～10月）流入量予測シミュレーション結果を用いて、流入量予測情報を活用した「増電効果と下流洪水調節」を図った運用シミュレーションの結果。

また、下流の洪水防御を図るために出水時間帯の事前にゲート放流を増大させた場合においても+6%の増電効果が期待できることが示された。特に、「増電効果と下流洪水調節」の効果は図-7の赤丸部に示されており、2018年10月1日の出水において、事前に(9月30日に)ゲート放流をすることで、約 $16\text{m}^3/\text{sec}$ ($1,125 \rightarrow 1,109\text{m}^3/\text{sec}$)のピーク放流量を抑えることを示した。

サンプルとして示した4ヶ月間には、いわゆる降水量予測の空振りも含まれているが、それらの影響を相殺してプラス側の効果が期待できることが示された。

本検討により、運用結果を発電使用水量から発電量指標に差し替え、より実践的な効果を推定できることとなった。この結果から、年間の出水イベントが多く、無効放流(ゲート放流)が実施されるような年であれば、増電効果は非常に大きいことが推定される。なお、今回は下流ダムの貯水位等の状況は考慮せず、畑薙第一ダムを単独で見た時の効果を例として挙げたが、下流ダムを含めたダム群としての効果を確認する必要がある。

6. まとめ

令和元年度において、①領域アンサンブル降雨予測技術改善の検討を行い、降雨予測精度を改善し、それを、②大気と陸面の水文過程を精緻に表現した降雪・積雪・融雪を考慮した流出モデル(WEB-DHM-S)に入力し、39時間先までのアンサンブル流入量を予測し、その予測流入量情報を用いた発電ダムの効率的な操作方法を検討した。検討に当たっては、1) 増電のみに着目した最適ダム運用の考え方、また、2) 増電に加え下流の洪水防御も考えた最適ダム運用の考え方の2つのパターンを、大井川畑薙第一ダムにおける期間(2018年7月~10月)に適用し検討した。その結果、増電のみを考えた場合、この4ヶ月間の増電効果は+6%と推定された。また、下流の洪水防御を図るために出水時間帯の事前にゲート放流を増大させた場合においても+6%の増電効果が期待できることが示され、洪水時の無効放流の削減、発電効率の向上、洪水後の貯水容量確保の最適化を実現する事例を提示することができた。

参考文献

- 1) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: 「Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter.」 *Physica D*, 230, pp.112-126, 2007
- 2) Miyoshi, T., and M. Kunii: 「The local ensemble transform Kalman filter with the weather research and forecasting

model: experiments with real observation.」 *Pure Appl. Geophys.* DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, 2011

- 3) Lin, Y-L, R. D. Farley, and H. D. Orville: 「Bulk parameterization of the snow field in a cloud model」 *Journal of Climate and Applied Meteorology*, pp.1065-1092, 1983
- 4) 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), pp.4889-4919, 2015, <https://doi.org/10.1002/2014JD022666>

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：伊藤弘之、原田大輔、南雲直子、Robin K. BISWAS、江頭進治

【要旨】

本研究は、2019年の台風19号による災害で被害を受けた宮城県の阿武隈川水系五福谷川の災害の解析を通して、多量の土砂を含む洪水流の解析法を新たに提案するものである。現地調査の結果、山間部で生産された土砂が洪水流によって下流に大量に輸送され、下流の氾濫域に堆積していた。そこで、一次堆積土砂に作用する掃流力を用いて河床侵食に伴う微細土砂の流出量を評価し、対象河川上流端の境界条件を設定する手法を提案した。この手法で下流河川への土砂の供給条件を与えて洪水流解析を行った結果、計算区間に流入した土砂は氾濫域の広範囲に厚く堆積した。河道に土砂が堆積したことにより河道容量が減少しており、氾濫域への洪水流や土砂の流入が助長される様子が計算された。

キーワード：土砂・洪水氾濫、土砂供給、河床変動、洪水流解析、微細土砂

1. はじめに

2019年の台風19号による災害では、東日本の広範囲で河川の氾濫が発生し、甚大な被害が発生した。中でも阿武隈川水系の内川流域（宮城県丸森町、流域面積約106km²）では山間部で多数の崩壊・土石流が発生し、山間部に立地する集落の孤立等が生じた。上流域で生産された土砂の一部は洪水流によって下流に流出し、下流の平野部での洪水流による被害を助長したと考えられる。著者らが現地調査を行ったところ、内川流域の中でも支流の五福谷川（流域面積約24km²）では特に土砂流出量が多く、下流の平野部には多量の土砂が厚く堆積していた。五福谷川が平野部を流下する区間は僅か2km程度であるが、この2kmの区間のうち上流側では氾濫域における河床材料の主体が粗砂である一方、下流側では氾濫域における河床材料の主体が微細砂であり、2km程度の区間において著しい縦断分級が生じている。

本研究では五福谷川に着目し、現地調査と数値計算によってこの土砂・洪水氾濫災害のメカニズムを明らかにすることを目的とする。既に述べたように五福谷川の災害の特徴は上流からの多量の土砂供給であることから、下流平野部での洪水氾濫の計算においては、平野部の上流端における山間部からの土砂供給量を評価する必要がある。また、平野部における上下流での縦断分級が評価できることも重要である。本研究では五福谷川での災害の計算を通して、これらの現象を評価する方法を提案する。

2. 災害の概要

(1) 降雨及び出水の概況

2019年10月12日から13日にかけての総降雨量は、内川の上流に位置する筆甫観測所において594mmに達した。図-1に示すように対象流域の山間部では多数の崩壊・土石流が発生しており、とりわけ五福谷川の上流域の山間部では多数の場所で発生していることが分かる。土木学会水工学委員会の調査団の報告²⁾によると、速報値であるものの、流域面積に対する崩壊面積の割合は2%程度である。その崩壊密度は2017年の九州北部豪雨で甚大な被害が生じた赤谷川流域の半分程度であり、内川流域の他の支川と比較しても特に多くの崩壊が生じている。

各観測所における観測水位を図-2に示す。内川の水位計は五福谷川との合流部直下に位置するが、ピーク流量の観測後に欠測している。そのため内川の東隣に位置する雉子尾川（流域面積約66km²）の山居観測所のデータを併記している。また、館矢間観測所は内川及び雉子尾川の合流点よりも上流側に位置する阿武隈川の観測所である。阿武隈川の出水のピークは内川のピーク水位が発生した凡そ7時間程度後に発生していることが分かる。

(2) 五福谷川の土砂・洪水氾濫

図-3には内川と五福谷川の縦断図を示す。五福谷川の6km付近より上流側は山間部を流下し、その勾配は概ね1/20である。内川・五福谷川共に山間部から平野部に入ったところで急激に河床勾配が変化し、ここでの氾濫が顕著である。



図-1 対象流域の斜面崩壊・堆積分布図（赤く塗られている部分）（国土地理院の判読結果¹⁾に加筆）（図中の黒点線が五福谷川流域の範囲，詳細な流域界は文献³⁾を参照）

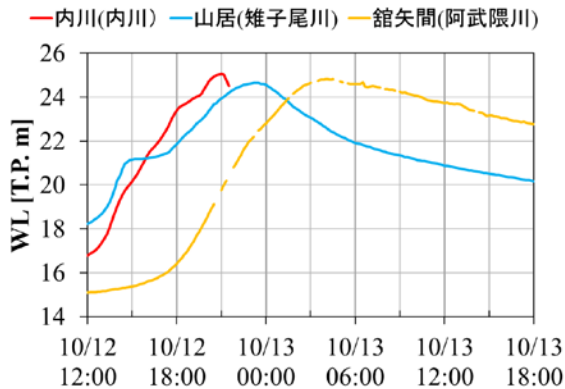


図-2 各観測所の水位（国土交通省水文水質データベース及び宮城県河川流域情報システムより）（データが連続していない部分は欠測）水位は各観測所の基準高を基にT.P.に変換している

図-4 には五福谷川の谷の出口から平野部にかけての氾濫の状況を示す。谷の出口付近よりもやや下流側の河道が湾曲している箇所付近において破堤が生じており、ここから下流側に向けて土砂と洪水流が氾濫したと考えられる。なお、五福谷橋の橋梁には多量の流木が集積しており、流木の集積による水位上昇が破堤・氾濫を助長したと推察されている³⁾。

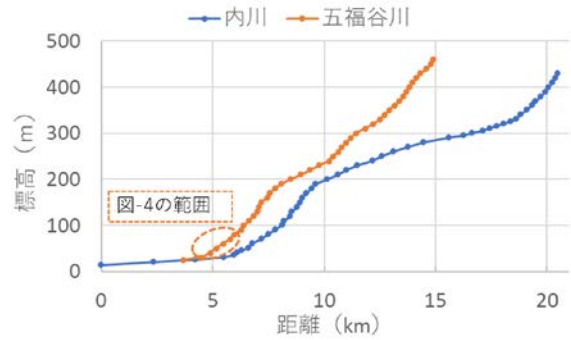


図-3 内川と五福谷川の縦断面図（2万5千分の1地形図より判読）



図-4 五福谷川の氾濫状況（2019年12月5日撮影）

著者らは五福谷川の氾濫堆積物の河床材料について粒度分布の調査を行った。調査地点について図-5 に示す。これらは五福谷川の右岸氾濫域で顕著な土砂堆積が見られた範囲である。各地点で河床表層の土砂を採取して持ち帰り、ふるい分け分析を行い、一部のサンプルに対しては沈降分析を行った。それらの結果を図-6 に示す。これによれば、氾濫域の上流側では細礫～粗砂が堆積しているのに対して、下流側ではシルトが堆積しており、僅かな区間内で著しい縦断分級が生じていることが分かる。

なお、図-5 の氾濫域には内川の左岸から氾濫した洪水流も流入しているが、その影響はここで調査対象とした区間ではさほど大きくないと著者らは考えている。その理由としては、この区間では五福谷川からの氾濫流の痕跡や土砂の氾濫痕跡が卓越しているためである。また、内川と五福谷川の合流点よりも下流側では、内川からの越水により大規模な落堀が見られる一方で、図-5 の範囲内では内川の氾濫によるこうした大規模な落堀が見られな

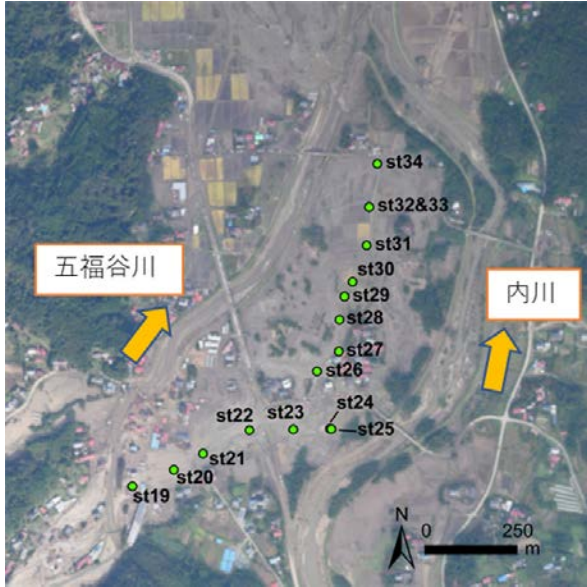


図-5 土砂の採取地点

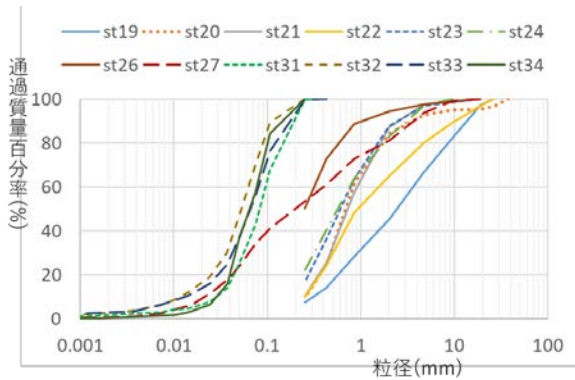


図-6 採取した河床材料の粒度分布（線がほぼ重なるため図-5に示す採取地点のうち一部のデータを省略している。また、一部の試料は沈降分析を実施していないため線が途中で切れている。）

い。また、内川左岸の氾濫地点の堤内地側には五福谷川から輸送された土砂が小規模なデルタを形成していることから、内川の破堤氾濫の流れは弱く、単に湛水しているところに、五福谷川の多量の土砂を含んだ洪水氾濫水が流れ込んだものと思われる。

3. 数値解析

(1) 微細土砂流出量の評価

既に述べたように、五福谷川の上流では多数の崩壊・土石流が発生しており、河道に流入した土砂が洪水流によって輸送され、輸送された土砂が下流の氾濫域に堆積したと考えられる。とりわけ、氾濫域に多く堆積している細粒土砂について、計算区間へのその流入量を評価する

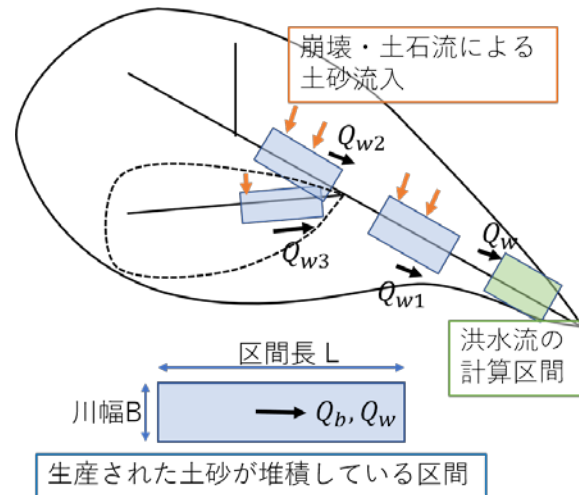


図-7 堆積土砂からの微細土砂の流出に関する模式図

ことが、洪水流の計算を行うにあたって重要である。その方法としては、流域全体の水系網をモデル化する方法⁴⁾や、崩壊堆積土砂からの微細土砂流出量を推定し、これを足し合わせる方法⁵⁾などが提案されているが、ここではより簡便にこれらを推定する方法について検討する。

土石流は一般に勾配 $4^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 程度の範囲に堆積すると考えられ⁶⁾、これを一次堆積土砂と呼ぶこととする。これは堆積した段階では流水による選別作用（水成作用）を受けていない。一次堆積土砂が洪水流による水成作用を受け、侵食されるのに伴い、そこに含まれる微細土砂が洪水流に取り込まれてウォッシュロードとして流出するものとする。ここでは、このプロセスを簡単に評価するために、この堆積土砂が図-7のように、長さ L 、幅 B の区間内に堆積しているとする。この場合、堆積土砂からの単位時間あたりの微細土砂の流出 Q_w は次式のように表される。

$$Q_w = -p_f c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} BL \quad (1)$$

ここに、 c_* ：土砂濃度、 z_b ：河床高、 p_f ：一次堆積土砂に含まれる微細土砂の存在率で、ここでは $100\mu\text{m}$ 以下の粒径を対象とする。

一方、式(1)の河床侵食 $\partial z_b / \partial t$ が掃流砂によって引き起こされるものとし、河道堆積物が侵食されると同時に、一次堆積土砂の間隙に存在する微細土砂がウォッシュロードとして流出するものとするれば、この区間から単位時間あたりにウォッシュロードとして流出する微細土砂量 Q_w は以下のように与えられる。

$$Q_w = p_f Q_{bj} \quad (2)$$

ここに、 Q_{bj} はその地点 j の水理量を用いて評価される掃

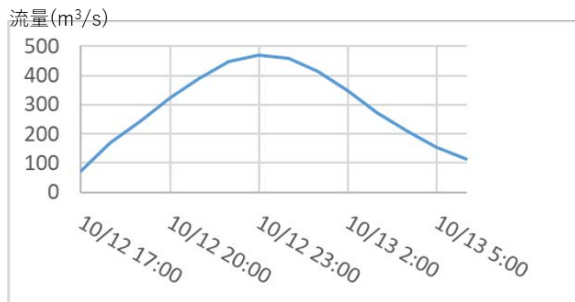


図-8 計算区間上流端で与えた流量

流砂量である。

五福谷川のように崩壊・土石流が流域の多くの場所で発生している場合には、図-7のように流域内の複数の河道に生産土砂が堆積している状況となる。このような場合に、流域を合流点を基準として分割して、合流点の上流側の河道 i から単位時間当たりに流出する微細土砂の量 Q_{wi} を算出し、これらを洪水伝播時間を考慮した上で足し合わせることで、計算区間に流入する微細土砂の総量 Q_w を算出することができる。

$$Q_w(t) = Q_{w1}(t - \tau_1) + Q_{w2}(t - \tau_2) + \dots + Q_{wn}(t - \tau_n) \quad (3)$$

$$Q_{wi} = p_{fi} Q_{bi}(t - \tau_i) \quad (4)$$

ここに、 p_{fi} ：地点 i の一次堆積土砂に含まれる微細土砂の存在率、 Q_{bi} ：地点 i の掃流砂量で、ハイドログラフから得られる流量を用いて算定、 τ_i ：地点 i から洪水流の計算区間上流端までの洪水伝播時間である。

(2) 計算条件

五福谷川の平野部分、概ね図-5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-Nays2DH⁷⁾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⁸⁾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、これを与えた。ただし内川の水位計は出水中に欠測しているため、出水のピーク流量値は宮城県⁹⁾が算出した $470(\text{m}^3/\text{s})$ とし、流出計算結果はピーク流量がこれに一致するようにしている(図-8参照)。

解析では掃流砂及び浮遊砂の計算を行い、河床変動計算を行っている。掃流砂量式として、計算対象区間で著しい縦断分級が生じていることから、掃流砂量が無次元掃流力の $5/2$ 乗に比例するため分級を評価しやすい江頭らの式⁹⁾を用いた。計算区間の上流端から流入するウォッシュロードについて、式(3)により算出し、 $100\mu\text{m}$ 以下の粒径についてはこれを濃度の境界条件として与え、それ

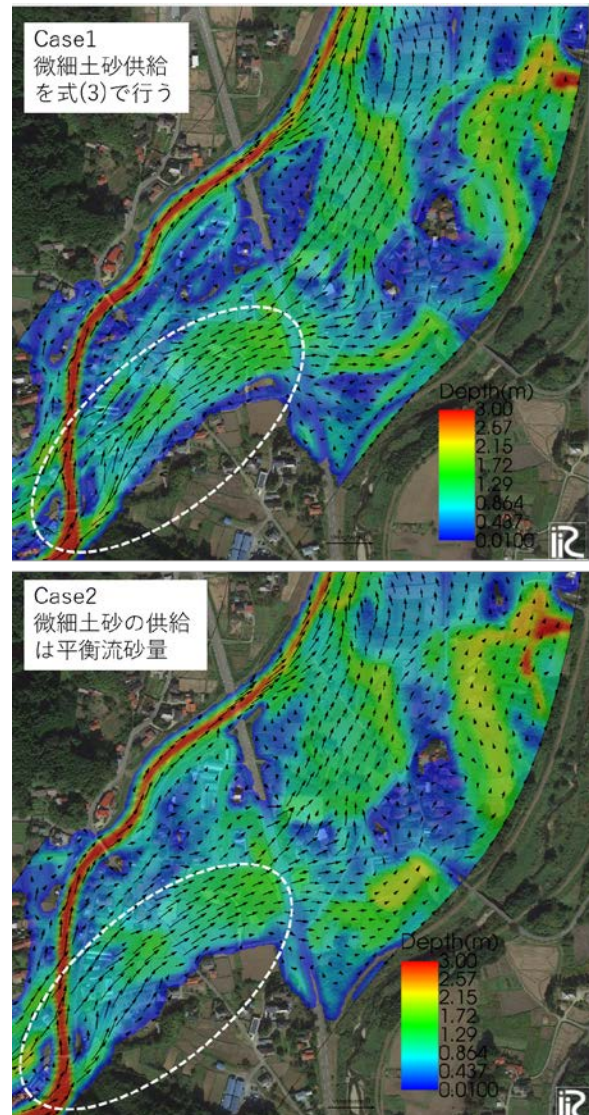


図-9 計算結果：ピーク流量時の水深コンター図及び流速ベクトル図

より大きい粒径の浮遊砂濃度については平衡条件を与えている。ここで、式(3)中の $Q_w(t)$ は山地区間の下流端、北側の支流、南側の支流の三ヶ所で計算を行ったものを足し合わせている。なお、流域が小さいため洪水伝播時間 τ_i については無視する。

初期河床形状は、出水前の航空レーザー測量に基づく国土地理院基盤地図情報 5m メッシュ数値標高モデル¹⁰⁾を用いて作成した。粗度係数は計算区間の全域で 0.03 とした。計算区間の初期河床材料は、図-6の st19 の粒度分布を与えている。

4. 結果と考察

(1) 微細土砂流出量

計算区間に流入する微細土砂の量を式(3)により算出したところ、その総量は約 15.4 万 m^3 と算出された。一方

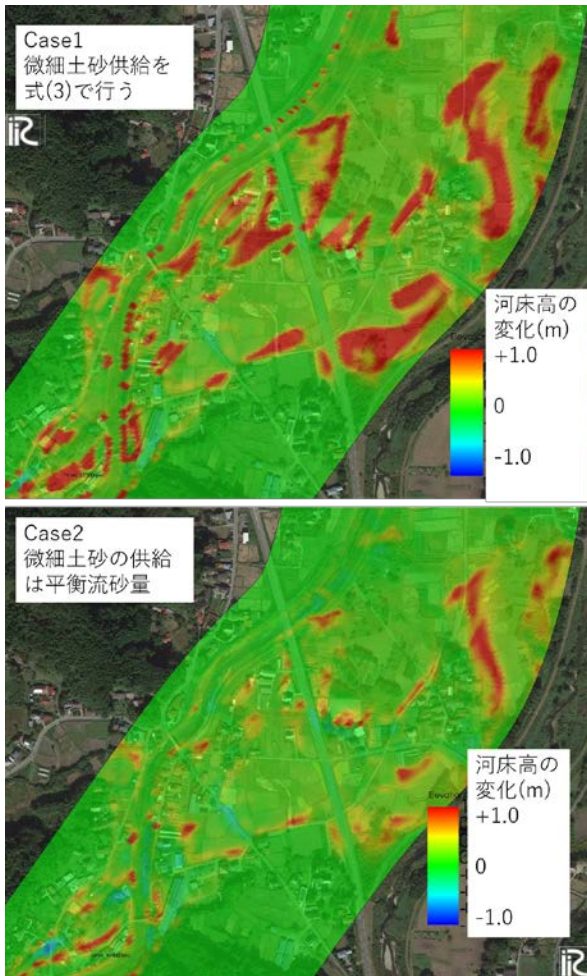


図-10 計算結果：計算開始前後での河床高の変化

で、土木学会調査団速報会の資料²⁾によると、五福谷川流域の崩壊面積は 48 万 m^2 であり、例えば崩壊地の堆積厚を 1m とすれば、崩壊土砂の約 3 割が微細土砂として流出し、これが計算区間に流入したとして、洪水流の解析を行っている。この土砂流入の影響をみるために、ここでは微細土砂の流入を考慮する場合(Case1)と考慮しない場合(Case2)の2つのケースの計算を行い、比較する。なお、Case2 では計算区間の上流端で平衡流砂量を与えている。

(2) 平面二次元解析の結果

計算結果について、ピーク流量時の水位コンターを図-9 に示す。図-9 においては白点線で囲ってある部分の河道に近い箇所です福谷川の氾濫・破堤が発生しており、ここから堤内地、五福谷川と内川に囲まれた部分に多量の流水と土砂が流入している。Case1 と Case2 とを比較すると、Case1 では特に白点線で囲まれている部分において比較的強い流れが生じている。これは図-10 に示す河床高の変化からも分かる通り、河道内に土砂が堆積した結

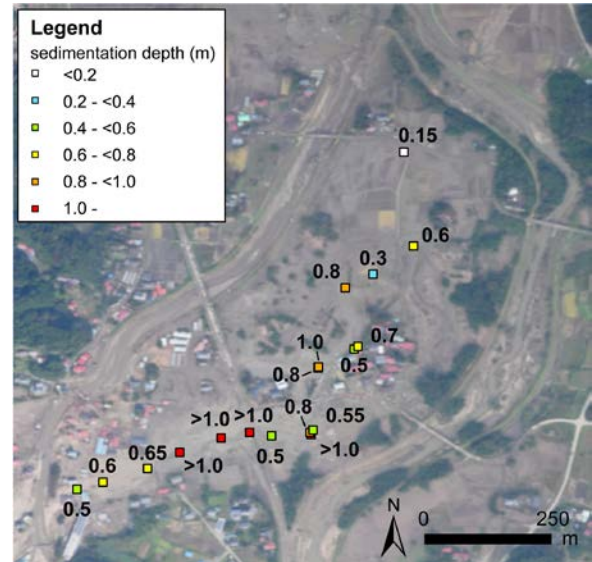


図-11 現地調査で計測した土砂堆積厚の分布

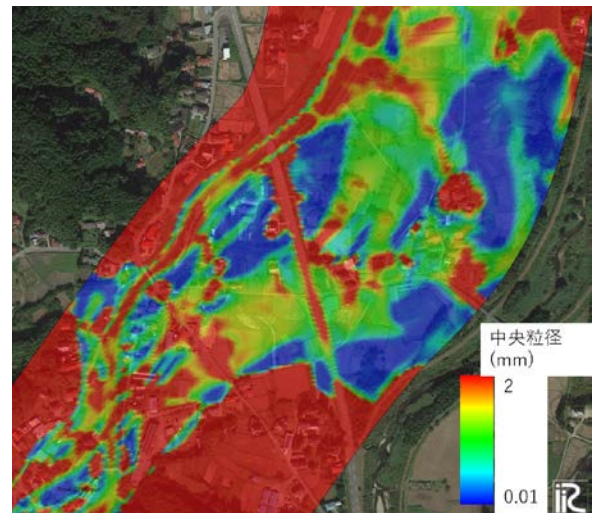


図-12 計算結果：表層土砂の中央粒径の空間分布(Case1、計算終了時)

果、河道の容量が減少しているためであり、そのことで破堤・氾濫がより顕著になっていることが分かる。

図-10 に示す土砂堆積厚について、Case1 と Case2 とを比較すると、Case1 では微細土砂の流入を考慮しているために多くの土砂が氾濫域に堆積していることが分かる。図-11 は、著者らが現地調査を実施した際に検土杖を用いて堆積した土砂の厚さを計測したものである。場所によっては 1m 以上の厚さで土砂が堆積していることが分かる。図-10 で赤く着色されている部分は 1m 以上の土砂堆積が計算されている場所であり、Case1 の方が Case2 よりも現地の堆積状況(図-10)に近いことが分かる。

氾濫域で顕著に見られた上下流での縦断分級について、

計算結果がどの程度再現できているかを確認するために、図-12にはCase1の表層河床材料の粒度分布の空間分布を示している。図において、赤く着色されているところは中央粒径が2mm以上と計算されている領域であり、青く着色されているところは表層に極微細な土砂が堆積しているところである。図-12（計算結果、紙面の都合で中央粒径の空間分布のみ）と図-6（現地の状況）を比較すると、氾濫域の上流側（図の左下）で比較的粗く、下流側（図の右上）で比較的細かくなっており、上下流での分級現象を概ね評価することができている。

5. 結論

2019年の台風19号による災害で甚大な被害を受けた宮城県の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を明らかにすることを目的に、現地調査を行うと共に、洪水流の解析を行った。特に山地区間からの微細土砂の流出について、堆積土砂からの河床侵食に伴う微細土砂の流出量を評価する手法を新たに提案した。この方法により算出された微細土砂の量は、山地区間で生産された土砂の3割程度と推定され、この手法は概ね妥当であると考えられる。

洪水流解析を行った結果、計算区間に流入した土砂は氾濫域の広範囲に厚く堆積していた。河道に土砂が堆積したことにより、河道の容量は減少しており、そのことによって氾濫域への洪水流や土砂の流入が助長されていた。土砂の堆積厚について計算結果と実際の堆積厚を比較すると、計算結果は現地の堆積厚を概ね再現することができていると考えられる。また、氾濫域で顕著に観察された土砂の縦断分級は良好に再現できている。

以上のように多量の土砂供給を含む洪水氾濫現象について明らかにした。しかし従来の洪水ハザードマップでは洪水氾濫に土砂水理現象は考慮されておらず、そもそもハザードマップが整備されていない中小河川も多い。

今後、土砂水理現象を考慮した水災害ハザード推定技術の開発に向け、土砂流入量の推定法を確立等、一層の検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 国土地理院：令和元年(2019年)台風19号に関する情報、<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19gou.html> (2020年4月閲覧)
- 2) 土木学会水工学委員会：令和元年台風19号豪雨調査団 速報会資料「宮城県丸森町における流木災害の状況」、2019。
- 3) 宮城県：令和元年台風第19号により被災した河川管理施設等の技術検討会（第4回）説明資料、2020
- 4) 原田大輔、江頭進治：ダム流域における流砂・河床変動の評価法に関する研究、河川技術論文集、第25巻、pp.711-716、2019
- 5) 江頭進治、原田大輔、南雲直子、山崎祐介、萬矢敦啓：崩壊・土石流による堆積土砂に着目した微細砂の流出予測法—2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷川を対象として—、土木学会論文集 B1(水工学)、74(4)、I_925-I_930、2018
- 6) 江頭進治、松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法、水工学論文集、第44巻、pp.735-740、2000
- 7) Shimizu, Y., Nelson, J., Arnez 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
- 8) Sayama, Takahiro, et al.: "Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin." Hydrological Sciences Journal 57.2, pp.298-312, 2012
- 9) 江頭進治、宮本邦明、伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈、水工学論文集第41巻、pp.789-794、1997
- 10) 国土地理院：基盤地図情報、<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (2020年4月閲覧)

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：村山雅昭、谷瀬敦、西原照雅

【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、地上レーザ測量等のリモートセンシング技術を用いて積雪を計測し、積雪の堆積過程を分析した、その結果、積雪ピーク時期の積雪分布の推定に活用できる可能性を見いだした。

キーワード：積雪深、積雪解析、地上レーザ測量、高山帯

1. はじめに

積雪寒冷地では融雪水をダムに貯留し、春先から初夏にかけての水需要を賄い、水資源を融雪水に依存している。一方で融雪水は、融雪出水や地すべり等の土砂災害の要因にもなる。そのため、山間部における積雪量やその分布、融雪期のダム流入量の高精度な予測は、水資源管理及び防災面から重要である。

山間部での積雪調査は日本全国で以前から実施されている。例を挙げると山田ら¹⁾は北海道大雪山系の旭岳、松山²⁾及び島村ら³⁾は新潟県の巻機山において積雪調査を行い、樹林帯においては標高と積雪深との間に線形の関係があることを報告している。一方で、森林限界以上の高山帯では積雪深及び積雪相当水量と標高との間に樹林帯において見られたような関係はなく、山田ら¹⁾は、高標高帯においては強い風が高頻度で吹いているため、積雪の堆積、剥離及び再堆積が活発に起こり、積雪は凹部では多く、凸部では少なく、全体として地表面の凹凸を平坦化するように堆積することを報告している。

近年では、航空レーザ測量の普及により広範囲の地表面を、高解像度・高精度で計測できるようになった。国内でも西原ら⁴⁾が北海道の大雪山系旭岳周辺において、航空レーザ測量により積雪分布を計測し、樹林帯においては標高と積雪深との間に線形の関係があること、高山帯においては地表面の地上開度⁵⁾と積雪深との間に線形の関係があることを報告している。しかしながら、航空レーザ測量はコストが高く定期的に積雪分布を計測することは困難であり、西原ら⁴⁾の計

測も積雪のピーク期に行われたのみである。

近年では地上レーザ測量やUAV写真測量の普及が進んでいる。これらの技術による地表面の計測では、広範囲の計測は困難であるが、コストが低く機動性も高いことから、高頻度での計測が可能である。

UAV写真測量での積雪の計測については、内山ら⁶⁾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⁷⁾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^{6),7)}。しかし、主として既事例で使用されたUAVは運航限界に起因し、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^{6),7)}。

地上レーザ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 al.⁸⁾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⁷⁾。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⁸⁾。

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測量により積雪分布を複数回計測した例⁹⁾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測量及び UAV 写真測量を同時に行って追跡した例¹⁰⁾もある。

R1 年度の研究では、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、積雪の過程を捉えることを目的に、複数回の地上レーザ測量により積雪分布を計測する事で、積雪の面的堆積プロセスを明らかにすることを試みた。

2. 対象領域

対象範囲を図-1.1 に示す。地上レーザ測量に必要な機材の運搬や天候が急変した際の安全確保のため、赤枠で示した旭岳ロープウェイ姿見駅周辺とした。図-1.1 下に示した対象範囲周辺の標高分布（国土交通省提供の1mメッシュDEM）によると、姿見駅周辺に比較的平坦な範囲があり、ここから北側及び東側に向かって標高が高くなる。対象範囲における主な植生は、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-1.2 に示す複合気象センサー（VAISALA 社製 WXT536）を設置して観測した。観測した気象要素は、気温、湿度、風向風速、気圧、降水量である。また、対象範囲からは多少離れているが、旭岳温泉において国土交通省が積雪深を観測している。

3. 地上レーザ測量

地上レーザ測量による積雪の計測は、2019年1月~4月初旬にかけて、概ね1ヶ月間隔で3回実施している。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、2019年1月13日、2019年2月20日~21日（以降2月20日と表記）、2019年4月2日であった。強風や降雪により積雪分布が変化する可能性があることから、計測は1日で実施することが望ましい。しかしながら、2月20日は断続的に弱い降雪と霧により視界が悪くなったため、計測に2日間を要した。

計測に使用した地上レーザスキャナは、図-1.3 に示

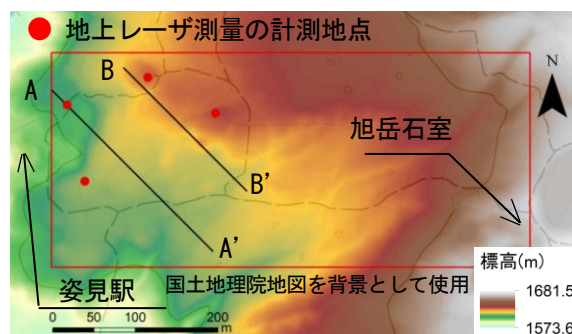


図-1.1 地上レーザ測量の対象範囲

す RIEGL 社製の VZ-1000 である。最長測定距離が 1400 m 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、外気と機器の温度差により、レーザ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-1.1 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-1.2 複合気象センサー



図-1.3 地上レーザスキャナ

データに結合した。結合した点群データの位置合わせには、図-1.4 に示す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。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(具体的には三角屋根の頂点)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、図-1.4の右側に示すように冬期に視認できない可能性があるため、9月の計測の際は、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、降雪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を作成した。地上レーザ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。国土交通省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

図-1.4 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)

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. 結果

4.1 気象観測結果

図-1.5 に旭岳温泉地点の積雪深を示す。図-1.5より、2018年11月～12月の間に積雪深が徐々に増加し、地上レーザ測量を行った期間に当たる2019年1月～4月の間は多少の増減はあるものの、積雪深が2m～3mの間で推移している。積雪深のピークは3.01mであった。同地点における過去10年間の積雪深のピークは、最大で3.57m、最小で2.80m、平均で3.22mであり、2019年は平均よりも若干積雪が少ない年であったと考えられる。

図-1.6 に姿見駅において観測した10分平均の気温及び風速を示す。気温を見ると、同地点においては11月～4月に間に気温が0℃を上回ることがほとんどなく氷点下であり、地上レーザ測量を行った日の気温は-10℃～-20℃であった。使用した地上レーザスキャナのレーザの波長は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⁸⁾。しかし、対象期間の気温は氷点下を大きく下回り、この影響はほとんど無かったと考えられる。風速を見ると、頻繁に強風が観測されている。気温にもよるが、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¹¹⁾、計測範囲においては、積雪の再堆積が頻繁に発生していると可能性がある。また、図-1.7には2019年3月27日～4月1日までの姿見駅の風速を示す。ただし、図-1.7は図-1.6の一部を拡大したものであり、縦軸の範囲が異なる。

図-1.8 に姿見駅の風配図を示す。期間は2018年11月1日から3回目の計測の前日(2019年4月1日)で

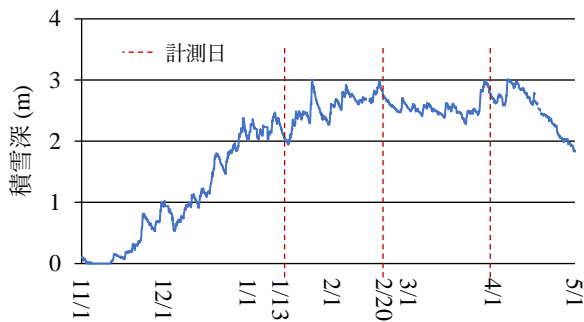


図-1.5 旭岳温泉地点の積雪深 (2018年-2019年)

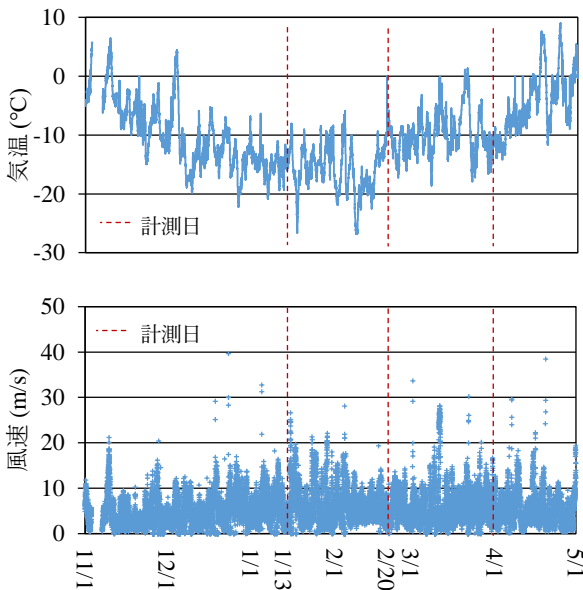


図-1.6 姿見駅の気温 (上) 及び風速 (下) (2018年-2019年)

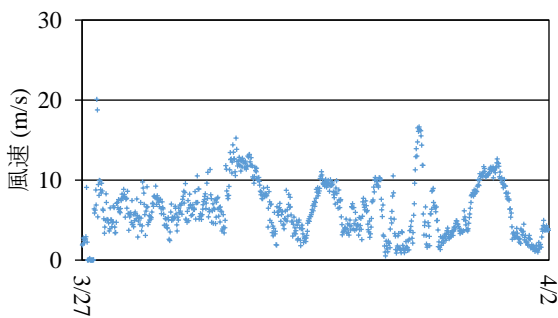


図-1.7 姿見駅の風速 (3/27~4/1)

ある。本図より、対象範囲付近の主風向は北西であり、積雪分布は北西風に強い影響を受けることが予想される。

4.2 地上レーザ測量結果

図-1.9に3回の計測により得られた積雪分布を示

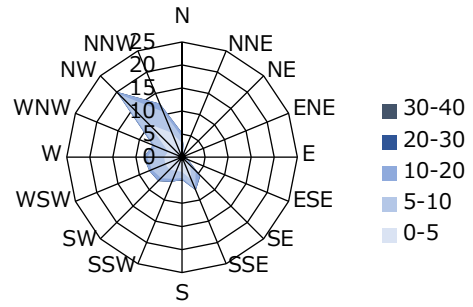
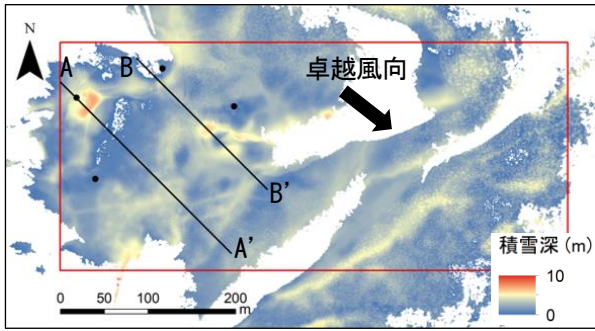


図-1.8 姿見駅の風配図 (2018年-2019年)

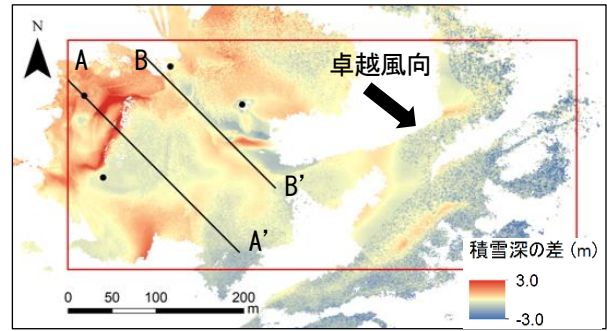
す。図中の赤線は計測対象範囲を示している。対象範囲をできるだけカバーできるように、4箇所から計測したが、計測地点から離れた範囲(計測範囲の東側)に欠損が多く見られる。これは、観測地点から死角となる範囲を計測できないことが要因である。また、積雪により死角となる範囲が毎回異なるため、欠損となった範囲は毎回異なる。

積雪分布を概観すると、全体的に1月から4月に向かって積雪深が増加していく傾向が見られるが、池のような窪地の周辺、展望台のような上に凸な地形の周辺、谷に沿った範囲に局所的に積雪深が大きい箇所が見られる。一方で、平坦な地形の範囲では、積雪深がほとんど変化していない。

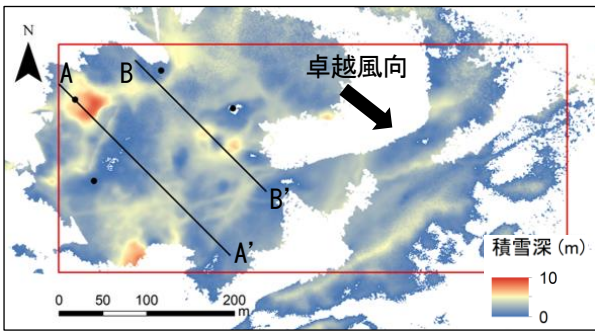
図-1.10に3回の計測により得られた積雪分布の変化を示す。こちらも図中の赤線は計測対象範囲を示している。5mを超える変化を示した地点があるが、わずかであったため、全体の傾向を見やすいよう-3m~3mのレンジで図示した。また、図-1.11には積雪深の変化が大きい範囲を通り、主風向(北西)と平行な測線における地表面及び積雪表面標高(積雪の断面図)を示す。図-1.10より、対象範囲の北西側に、積雪が多く堆積している箇所があるが、ここには、北西からの主風向に概ね正対する向きに傾斜の大きい斜面があり、この手前は窪地になっており、無雪期は池になっている。ここは、図-1.11上図の始点から0m~100m付近が対応するが、斜面に吹き付ける雪が風上から風下に向かって堆積し、徐々に池が埋まっていく様子が見てとれる。さらに、図-1.11を見ると、深い窪地以外の地表面の凹凸上には、1月13日の時点で、平滑化された積雪表面が形成されており、これに続く2月20日、4月2日にかけて積雪表面の形状はほとんど変化していない。実際に図-1.10(a)の対象範囲内の79%の領域において、積雪深の増減は±1m以内であった。



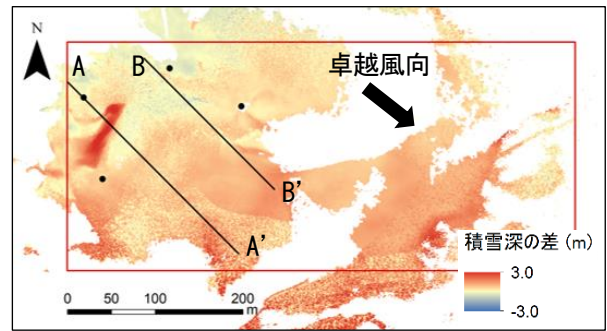
(a) 2019年1月13日



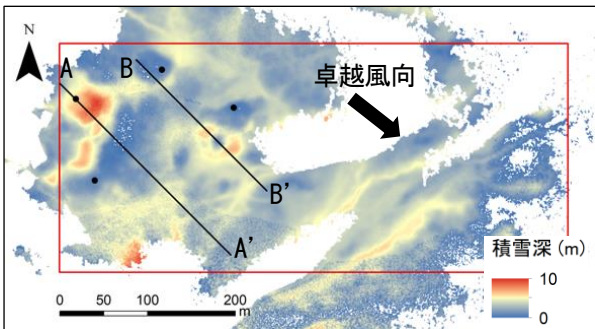
(a) 2019年1月13日~2月20日



(b) 2019年2月20日



(b) 2019年2月20日~4月2日



(c) 2019年4月2日

図-1.9 積雪分布

図-1.10 積雪深の変化量の空間分布

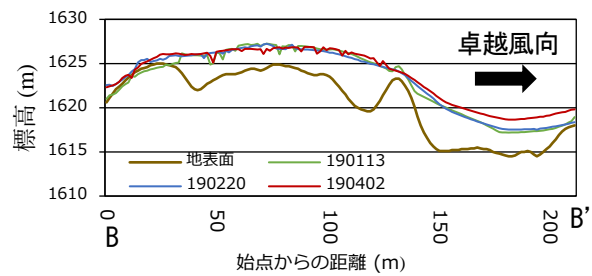
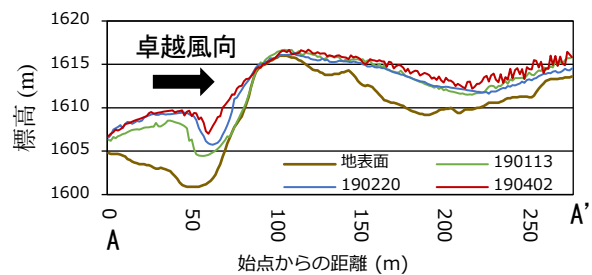


図-1.11 積雪深の変化 (上: 測線A-A', 下: 測線B-B')

5. 考察

図-1.10の1月13日~2月20日の積雪深の変化量は空間的にばらつきがあるのに対し、2月20日~4月2日の変化はほとんどの領域で積雪深の増加を示していた。これは、降雪の量や時期、風による積雪の再移動が影響している可能性がある。実際に、図-1.5及び図-1.6を見ると、1月13日~2月20日は頻繁に積雪深の増加や10m/s以上の強風が観測されており、この期間は積雪の再移動が生じていたことが推察される。このことにより積雪深の変化量に空間的なばらつきが見られたと考えられる。

一方、2月20日~4月2日は、計測日直前の3月27

日にまとまった降雪が観測されている(図-1.5)のみである。また、30m/s以上の強風も観測されているが、降雪イベント後の3月27日以降は10m/s以上の強風があまり観測されていない(図-1.6及び図-1.7)こともわかる。また、まとまった降雪の数日前ではあるが、3月下旬に気温が0℃を超えた日があり(図-1.6)、積

雪表面の雪質は、ざらめ雪に変化していた可能性が示唆される。すなわち、2月20日～4月2日の積雪深の変化は、積雪の移動が起こりにくいざらめ雪の上に、降雪があり、10 m/s以上の強風は少なくさほど積雪の再移動が生じなかったため、全体的に増加傾向となったと推察される。

6. まとめ

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、複数回の地上レーザ測量により積雪深を計測し、積雪の堆積過程を分析した。今回の計測では、深い窪地を除き、積雪期の前半に概ね平坦な積雪表面が形成され、以降は積雪表面の形状に大きな変化が見られなかった。また、積雪深の変化量の空間分布は、当時の気象条件から概ね推定可能であった。今後、多雪年での積雪計測結果と合わせて、これらの特徴から、積雪ピーク時期における積雪分布の推定に活用できる可能性があると考えられる。

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) 山田知充、西村寛、水津重雄、若浜五郎：大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程、低温科学物理篇 37、pp.1-12、1979
- 2) 松山洋：巻機山における積雪密度・積雪水当量の季節変化と高度分布、水文・水資源学会誌、第11巻、2号、pp.117-127、1998
- 3) 島村雄一、泉岳樹、松山洋：スノーサーベイとリモートセンシングに基づく山地積雪水資源量の推定、水文・水資源学会誌、第18巻、4号、pp.411-423、2005
- 4) 西原照雅、谷瀬敦：航空レーザ測量を用いた風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の分析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、I_883-I_888、2018
- 5) 横山隆三、白沢道生、菊池祐：開度による地形特徴の表示、写真測量とリモートセンシング、第38巻4号、pp.26-34、1999
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) Deems, J. S., Gadowski, 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
- 10) Eker, R.; Bühler, Y.; Schögl, 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
- 11) 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・渇水等の水災害ハザードの分析技術の適用による水災害リスク評価手法及び防災効果指標の開発

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：伊藤弘之、望月貴文、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、宮本守、筒井浩行、Maksym Gusyev

【要旨】

2012 年から数年間続く深刻な渇水が発生したブラジル北東域を対象に植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVIDAS)を用いて算定した 25km グリッド LAI を、植生動態モデルを結合した水エネルギー収支分布型水循環モデルである WEB-DHM-Veg を併用することにより高空間分解能 1km グリッドの LAI に再配分する手法を考案した。そして、この 1km グリッドの LAI を用いて地区スケールの LAI を計算し、地区スケールの穀物生産高・最適灌漑水量などの農業支援情報を推定する手法を検討した。これにより昨年度の州平均値による解析だけでは理解することができなかった特性を理解することができた。また本来必要であった作付面積や灌漑水量などを推定し、深刻な渇水条件下であっても、今後の農業に活用できる地区スケールの水資源情報の提供について可能性を確認した。

キーワード：渇水、植生動態－陸面結合データ同化システム(CLVIDAS)、葉面積指数(LAI)、穀物生産高、灌漑水量

1. 本研究の目的

2012 年から数年間続く深刻な渇水が発生したブラジル北東域を対象に、マイクロ波衛星観測を統合してマイクロ波輝度温度を同化し、植生動態と土壌水分量を同時、かつ高精度に推定するよう開発された植生動態－陸面データ同化システム [Coupled Land and Vegetation Data Assimilation System (CLVDAS)]^{1)~3)}を適用した長期(2003-2017 年)渇水解析を昨年度に実施した。さらにブラジル北東域の中でも特に大きな被害を被った Ceará 州の州平均を対象に CLVDAS の出力値である LAI(葉面積指数, m^2/m^2)推定値から穀物生産高と本来必要とされた最適な灌漑水量を推定する手法の検討を行い、その有効性を確認することができた。しかし CLVDAS 出力の空間分解能は 25km(0.25 度)グリッドであり、また本手法は Ceará 州平均を対象としたものであった。しかし穀物生産高・最適灌漑水量などの農業支援情報は、各農場経営者に提供すべきものであり、そのためには少なくとも地区(District)スケールの情報に変換して提供すべきである。そこで本年度は、25km グリッドの CLVDAS LAI 出力値を高空間分解能 1km グリッドの LAI に再配分する手法を検討した。そして 1km グリッドの LAI を用いて地区スケールの LAI を計算し、地区スケールの穀物生産高・最適灌漑水量などの農業支援情報を推定する手法を検討

した。

2. 対象領域

図-1 に本研究における対象領域を示す。(a)に第 3 章に示す CLVDAS によるシミュレーションを行ったブラジル北東域のドメイン(南緯 2.25° -11.25° , 西経 46.5° -34.5°)とその中で最も渇水被害を被った Ceará 州の位置を示す。(b)には、第 3 章に示す WEB-DHM-Veg によるシミュレーションにおいて対象とする Banabuiu 川流域の位置を示す。本流域は、Ceará 州の中央に位置し、その中央を東西に走る Banabuiu 川沿いに灌漑域が広がる農業の盛んな流域であるが、その一方の Banabuiu 川から遠く離れる地域では天水農業が行われる灌漑農業と天水農業が混在したユニークな流域である。さらに第 5 章において行う地区スケールの農業支援情報の検討を行う天水地区(Rain-fed district 379)と灌漑地区(Irrigated district 337)の位置を示す。天水地区(Rain-fed district 379)は、(b)・(c)に示されるように Banabuiu 川から離れ、数少ない湖沼や貯水池からの灌漑を細々と行う以外は、天水条件下で農業を行っている。灌漑地区(Irrigated district 337)は、(b)・(d)に示されるように中央に Banabuiu 川が走り、灌漑農業が比較的盛んに行われている。

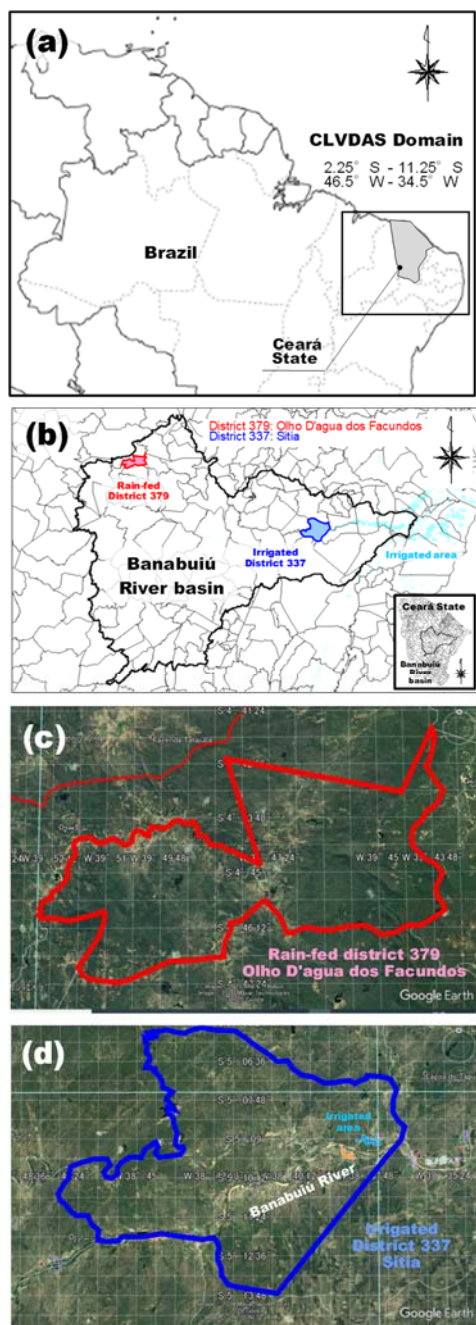


図-1 (a) CLVDAS によるシミュレーションを行ったブラジル北東域のドメイン(南緯 2.25° -11.25° , 西経 46.5° - 34.5°)と Ceará 州, (b) WEB-DHM-Veg によるシミュレーションにおいて対象とする Banabuiu 川流域と地区スケールの農業支援情報の検討を行う天水地区 (Rain-fed district 379)・灌漑地区 (Irrigated district 337), (c) 天水地区 (Rain-fed district 379), (d) 灌漑地区 (Irrigated district 337)

3. 高解像度 LAI の計算

図-1(a)に示すブラジル北東域ドメインを対象に CLVDAS による長期渇水解析を行った。本年度は昨年度に 2018 年を加え 2003 年から 2018 年までの LAI を

算定した。CLVDAS では、植生動態と土壌水分量の変化を推定するために EcoHydro-SiB⁴⁾ [植生動態モデル (Dynamic vegetation model)と Simple Biosphere model 2 の水文モジュールが改良された Hydro-SiB⁵⁾ が結合されたモデル]が陸面モデルとして用いられている。Hydro-SiB により計算された炭素固定量と土壌水分量鉛直プロファイルが植生動態モデルに渡される。その後、植生動態モデルは、土壌水分量鉛直プロファイルに応じた水ストレスに基づく炭素減少量を計算し、炭素固定量から差し引くことによりバイオマス量を計算・更新する。またマイクロ波輝度温度を計算するためにマイクロ波輝度放射伝達モデル [RTM; 植生における放射伝達プロセスを評価する $\omega - \tau$ モデル⁶⁾と地表面における表面散乱を評価する Shadowing effect を考慮した Advanced Integral Equation Model (AIEM)⁷⁾が結合されたモデル]が適用されている。しかし CLVDAS の出力である LAI は 25km グリッドであるため、より小さい地区スケールの検討はできない。

そこで、図-1(b)に示す Banabuiu 川流域を対象に植生動態モデルを結合した水エネルギー収支分布型水循環モデルである WEB-DHM-Veg によるシミュレーションを行ない、1 km グリッドの LAI を推定した。通常の水エネルギー収支分布型水循環モデル (WEB-DHM)は、陸面モデルとして Hydro-SiB⁵⁾ が適用されているため LAI を計算することができない。しかし WEB-DHM-Veg には、陸面モデルとして CLVDAS と同じく Hydro-SiB⁵⁾ に植生動態モデルが結合された EcoHydro-SiB⁴⁾ が適用されているため、気象フォーシングデータを入力し、降雨の根茎層土壌への浸透から植生の根による水の吸収とその成長までの水・エネルギー循環を解析した結果として得られる Banabuiu 川最下流における流出量推定値と観測値をチューニングすることにより 1km グリッドの LAI も同時に推定される。

このように CLVDAS と WEB-DHM-Veg の 2 種類の LAI が計算される。そこで 1 km グリッド WEB-DHM-Veg LAI [$L_{01}(n)$]とその平均値 [M]との差 [$\delta(n)$]を 1km グリッド単位で計算し、同時に 25 km グリッド CLVDAS LAI [L_{25}]と 1 km グリッド WEB-DHM-Veg LAI の平均値 [M]との比率 [L_{25}/M]を計算した。そして両者の積を 25 km グリッド CLVDAS LAI [L_{25}]に足すことにより精度の高い 25km グリッド CLVDAS LAI を WEB-DHM-Veg LAI の持つ 1 km グリッドの空間分布に再配分し、Banabuiu 川流域における 1 km グリッド LAI [$LAI_{c01}(n)$]を計算した(図-2, 3)。

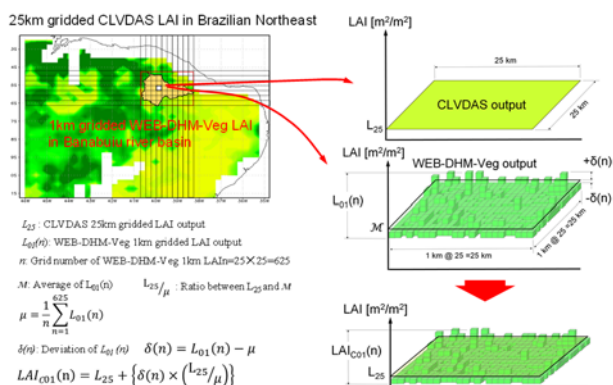


図-2 25km グリッド CLVDAS LAI の精度と 1km グリッド WEB-DHM-Veg LAI の空間分布を尊重した Banabuiu 川流域における 1 km グリッド LAI の算定手法

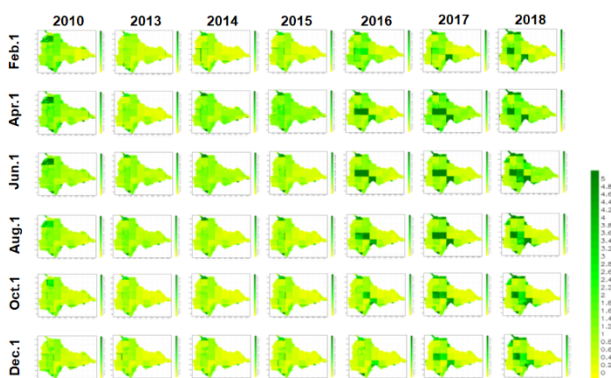


図-3 25km グリッド CLVDAS LAI の精度と 1km グリッド WEB-DHM-Veg LAI の空間分布を尊重した Banabuiu 川流域における 1 km グリッド LAI の算定手法による算定事例:2010 年、2013-2018 年の 2, 4, 6, 8, 10, 12 月の 1 日

4. 穀物統計データ

穀物統計データとしては、Northeast States Meteorology and Water Resources Foundation (FUNCEME)より提供された Northeast Drought Monitor (NEDM, monitordesecas.ana.gov.br)を用いた。NEDMには、ブラジル北東に位置する Ceará 州における Municipality/District に対応する穀物タイプ・穀物カレンダー・作付面積(ha)・穀物収穫高(kg)が 2010 年から 2018 年にかけてデータベース化されている。

5. 地区スケール農業支援情報の検討

5.1 対象穀物タイプの選定

NEDM に基づき天水地区(Rain-fed district 379)と灌漑地区(Irrigated district 337)における穀物データを調査した結果、天水地区ではフェジョン豆・コーンが栽培されており、灌漑地区では、フェジョン豆・コーン・

綿花・ごまが栽培されていることが分かった。また両地区で共通して 2010 年から 2018 年まで通して栽培されているのは、フェジョン豆のみであることが分かった。そこで本研究における対象穀物タイプとしてフェジョン豆を選定した。

5.2 評価指標の選定と算定

穀物の中には、根から供給される水分量が少なくても良く育つ穀物も存在するが、結実前に葉・茎が十分な水分を有する穀物が、良好な成長と大量の収穫を達成することは一般的な現象である。ゆえに植生水分量(VWC)が、穀物生産高などの農業支援情報推定のための重要な指標となる。VWCは葉面積指数(LAI)から経験式(式1)により算定することができるため、本研究においては農業支援情報推定のための指標としてLAIを選定する。

$$VWC = \exp\left(\frac{LAI}{y}\right) - 1 \quad (1)$$

ここに、VWCは植生水分量(m³/m³)、LAIは葉面積指数、yは様々な植生(小麦・ソバ・枝豆・燕麦・とうもろこし・金木犀など)を対象とした地上マイクロ波放射計による観測実験により求められた係数(=1.16)。

第3章において計算した Banabuiu 川流域における 1 km グリッド LAI を天水地区・灌漑地区の範囲内で抽出した。その結果、天水地区では 83 個、灌漑地区では 157 個の 1km グリッドが存在することを確認し、その平均値を求めた(図-4)。なお、入手することのできた NEDM 穀物統計データは 2010 年から 2018 年までの 9 年間であるので、本 LAI についてもこの 9 年間を対象とした。しかし CLVDAS においてデータ同化する衛星マイクロ波輝度温度は、AMSR-E から AMSR2 へ移行した 2011 年・2012 年のデータが年間を通して存在しないため本研究においては、対象から除外した。ゆえに 2010 年と 2013~2018 年の 7 年間の LAI 平均値を用いて、各日の 7 年間の平均値(M)と標準偏差(σ)を計算し、各年の LAI 偏差 $=[(LAI-M)/\sigma]$ を計算した(図-5)。

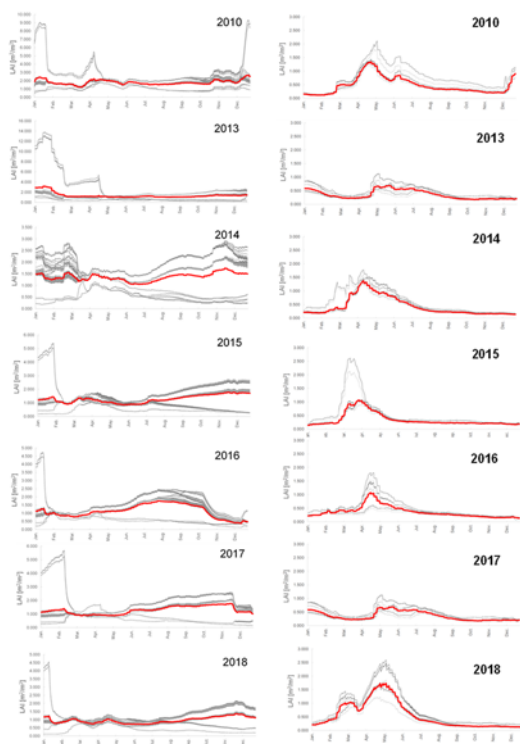


図-4 天水地区・灌漑地区における1kmグリッドLAIとその平均値の季節変動：[左段]天水地区(Rain-fed district 379), [右段]灌漑地区(Irrigated district 337), 灰線は各1kmグリッド(Rain-fed district: 83 grids, Irrigated district: 157 grids)であり、赤線はその平均値

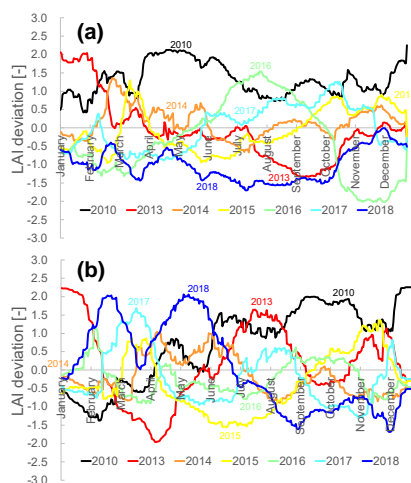


図-5 LAI 偏差：(a) 天水地区, (b) 灌漑地区

次に収穫前の最終成長期を収穫日までの15日間に設定し、NEDMから各地区・各年の最終成長期を抽出した(表-1)。さらに最終成長期に対応するLAI偏差の平均(δr)を計算し、これを農業支援情報の評価指標とした(図-6)。

表-1 最終成長期：(a) 天水地区, (b) 灌漑地区

	(a) Rain-fed District 379	(b) Irrigated District 337
2010	April 22 - May 7	April 22 - May 7
2013	April 30 - May 15	April 30 - May 15
2014	April 30 - May 15	April 27 - May 12
2015	April 12 - April 27	June 13 - June 28
2016	April 12 - April 27	May 10 - May 25
2017	June 15 - June 30	June 15 - June 30
2018	May 5 - May 20	May 5 - May 20

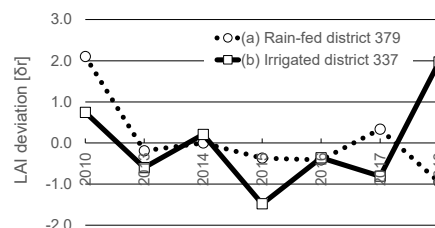


図-6 最終成長期に対応するLAI偏差の平均(δr)：(a) 天水地区, (b) 灌漑地区

5.3 NEDM 穀物生産高

NEDMより2010年と2013~2018年の7年間の穀物(フェジョン豆)の生産高(図-7)を調査した。

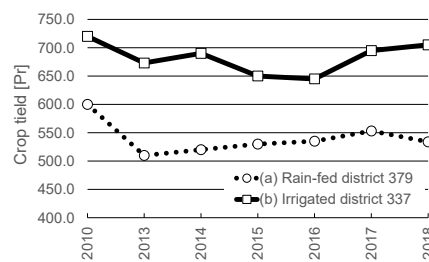


図-7 NEDMに基づく穀物(フェジョン豆)生産高(Pr)：(a) 天水地区, (b) 灌漑地区

5.4 初期穀物モデルと最適作付面積

評価指標である最終成長期に対応するLAI偏差から穀物生産高を推定するためには、両者の関連性を表現するモデルが必要となる。そこで両者の関連性を調べ、初期穀物モデルとして求めた(図-8)。なお2010年と2013年~2018年の7サンプルしか無く、高次のモデルを求めるに学術的な意味を持たないため、本研究では線形近似を適用した。本図に示されるように灌漑地区は天水地区に比べて高い生産高を示すことが明瞭に示されている。また天水地区ではLAI偏差の増加に伴い生産高が比較的大きく増加する(1:25.65)のに対して、灌漑地区では、灌漑により比較的安定した生産高を維持しているため、その割合が1:16.82と小さいことが分かる。このような違いは、作年度の州平均を対象とした検討では理解することができなかったが、本年度、LAIの高空間分解能化による地区(District)スケールでの検討を行うことによりはじめて明らかに

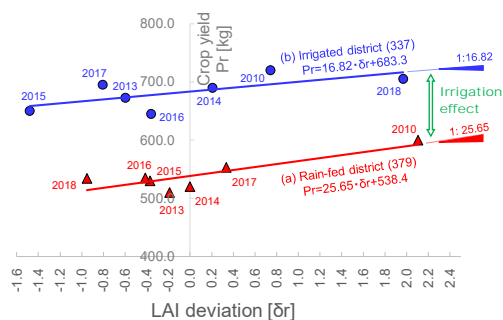


図-8 初期穀物モデル：(a) 天水地区、(b) 灌漑地区

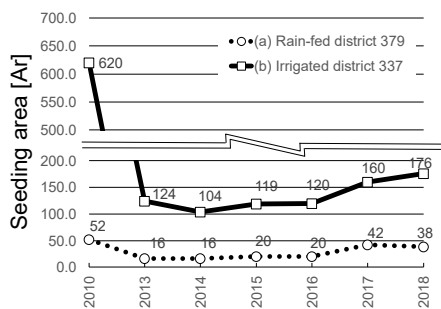


図-9 NEDMに基づく穀物(フェジヨン豆)作付面積(Ar)：
(a) 天水地区、(b) 灌漑地区

することができた。

また NEDM より 2010 年と 2013 年～2018 年の 7 年間の穀物(フェジヨン豆)の作付面積(図-9)について調査した。ブラジル北東域の深刻な渇水は、2012 年から始まった。本研究では前述の通り 2012 年のシミュレーションは実施できないが、天水地区では、その 2012 年の深刻な渇水を受け、「2013 年・2014 年に広く作付けを行ったとしても、2012 年のような深刻な渇水条件下では、収穫に期待が持てない。」という判断による作付面積の削減が行われたものと考えられる。これは経験に基づく人為的操作であったため適切な作付面積に設定できずに 2013 年・2014 年の生産高減少が引き起こされたものと考えられる。一方、灌漑地区においては、天水地区と同様に 2013 年・2014 年は経験的に作付面積を削減し、それが効果的に働き適切な生産高を維持することができた。しかし、経験に基づく人為的操作であるため 2015 年・2016 年・2018 年に作付面積の過少設定による生産高の減少が生じている。このように生産高-LAI 偏差と作付面積との関係から作付面積削減という現地における人為的操作を理解し、削減した作付面積を適切な面積に補正して農業支援情報の一つとして提案することも重要である。そこで次のような補正方法で作付面積の最適値を推定する。作付面積(Ar)と穀物収穫高(Pr)との線形近似式を求め(図

-10)、作付面積の変動に伴う穀物生産高の変動割合(天水地区 1.78、灌漑地区 0.10)を求めた。さらに変動割合を用いて初期穀物モデルを下回る天水地区における 2013 年・2014 年、灌漑地区における 2015 年・2016 年・2018 年の作付面積を増加させ、初期穀物モデル相当の生産高を得るに必要な作付面積を増加すべき面積を求めた。その結果を図-11 に示す。天水地区では、2013 年 13 ha・2014 年 10 ha、灌漑地区では、2015 年 91 ha・2016 年 323 ha・2018 年 121 ha を増加させた作付面積が最適であったと考えられる。

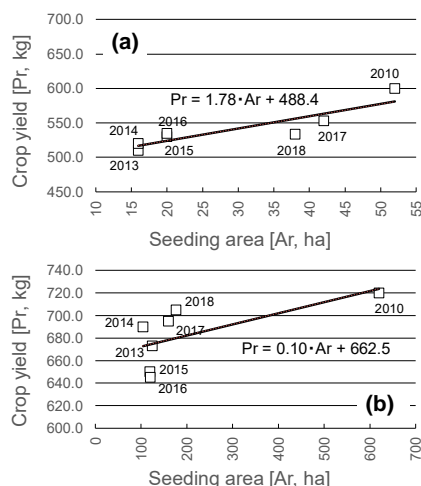


図-10 NEDM 穀物(フェジヨン豆)生産高(Pr)と作付面積(Ar)との関係：(a) 天水地区、(b) 灌漑地区

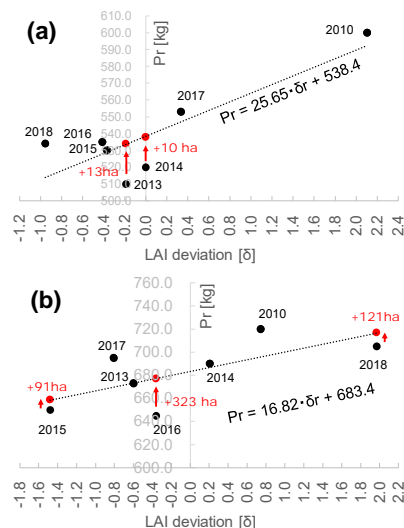


図-11 初期穀物モデルによる生産高を得るために必要な最適な作付面積：(a) 天水地区、(b) 灌漑地区

5.5 補正穀物モデルと必要灌漑水量

前節における作付面積補正後の NEDM 穀物生産高と LAI 偏差より、再度、穀物モデルを求め、それを補正穀物モデルとした(図-12)。このように不適切な作付

面積が補正された補正穀物モデルを用いて、目標とする穀物生産高を得るために、本来必要であった灌漑水量を次のように求めた。目標とする穀物生産高であるが、本来、ステークホルダーや現地農家が決定すべきものである。しかし、その情報が無いため、本研究では、7年間(2010年・2013-2018年)の補正穀物生産高(図-12)の平均値を目標生産高に設定した。その結果、天水地区と灌漑地区それぞれの目標穀物生産高は、それぞれ540.29kgと682.57kgとなった。

CLVDASは、各種気象データと共に降水量を入力することによりLAIをはじめとするEcophysiological variableを計算する。ゆえに灌漑の効果をEcophysiological variableの推定に反映する場合は、降水量に灌漑水量を付加すれば良い。そこで、図-13に示すフローに従い目標生産高を満たすために必要な灌漑水量を検討した。灌漑水量(i)が0(mm/day)の時の補正穀物生産高(Pe_0)が目標穀物生産高(Pt)よりも大きい場合、灌漑が不要であるため必要灌漑水量は0(mm/day)となる。しかし、補正穀物生産高(Pe_i) < 目標穀物生産高(Pt)の場合は、灌漑水量(i)を1(mm/day)単位で増加させて降水量データに付加する。そして付加した灌漑水量(i)に対応するLAI偏差(δr)をCLVDASにより計算する(図-14a、図-15a)。そして補正穀物モデル(天水地区: $Pr = 26.56 \delta r + 543.8$, 灌漑地区: $Pr = 16.98 \delta r + 690.9$)を用いて付加した灌漑水量(i)に対応する穀物生産高を計算する。次に灌漑水量(i)とそれに対応する穀物生産高との線形近似式を求めて、その傾きが正(>0)になるまで繰り返す(図-14b、図-15b)。天水地区の場合、2015年・2016年・2018年の灌漑水量(i)は、いずれも最大3(mm/day)であり、他は灌漑の必要の無いことが分かる。また灌漑地区の場合、2013年・2015年・2017年の灌漑水量(i)は、それぞれ最大2,1,3(mm/day)であり、他は灌漑の必要無しであることが分かる。

次に必要灌漑水量の推定を行う。天水地区と灌漑地区の推定プロセスを図-16と図-17にそれぞれ示す。付加した灌漑水量(i)とそれに対応する推定穀物生産高との関係から線形近似式を求めた。そして、その線形近似式に目標穀物生産高を入力することによって必要灌漑水量を推定した。

その結果、天水地区においては、目標とする穀物生産高540.29kgを得るために2015年・2016年・2017年にそれぞれ1.85, 3.09, 2.87(mm/day)の灌漑水量が必要であることが分かった。また灌漑地区では、目標とする穀物生産高682.57kgを満たすために2013年・2015年・2017年にそれぞれ0.51, 3.28, 0.68(mm/day)の灌漑

水量が不足していたことを理解することができた。

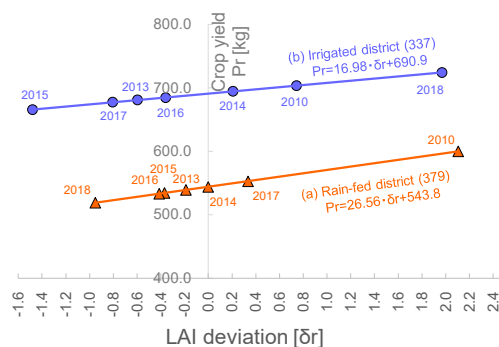


図-12 補正穀物モデル：(a) 天水地区，(b) 灌漑地区

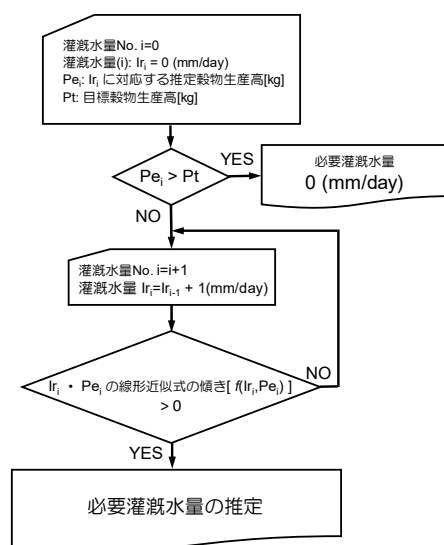


図-13 目標穀物生産高を得るために必要な灌漑水量の算定フロー

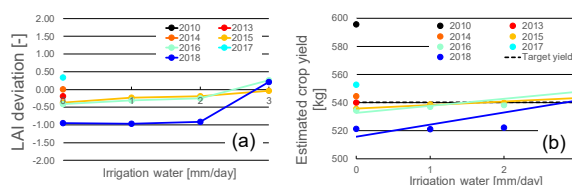


図-14 天水地区における灌漑水量の増加に伴うLAI偏差(a)と補正穀物モデル($Pr = 26.56 \delta r + 543.8$)により推定される穀物生産高(b)の変化

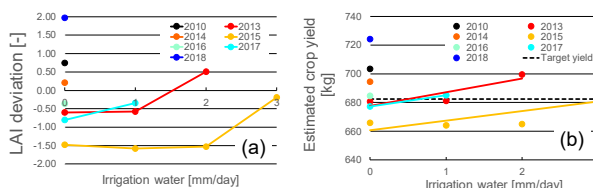


図-15 灌漑地区における灌漑水量の増加に伴うLAI偏差(a)と補正穀物モデル($Pr = 16.98 \delta r + 690.9$)により推定される穀物生産高(b)の変化

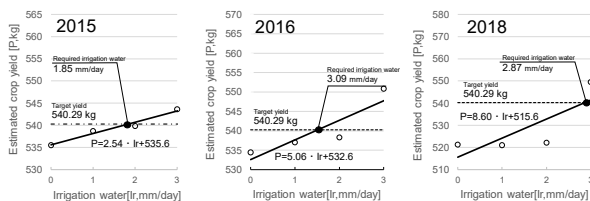


図-16 必要灌漑水量算定フローに基づく天水地区における2015年・2016年・2017年における目標穀物生産高(540.29kg)を得るために必要な灌漑水量の推定

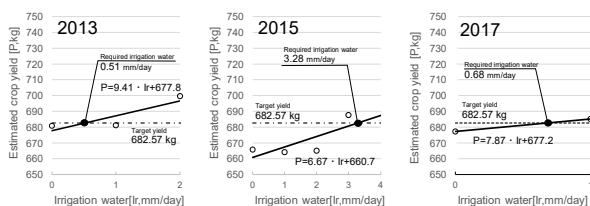


図-17 必要灌漑水量算定フローに基づく灌漑地区における2013年・2015年・2017年における目標穀物生産高(682.57kg)を得るために必要な灌漑水量の推定

6. まとめ

本年度は、植生動態モデルを結合した水エネルギー収支分布型水循環モデルである WEB-DHM-Veg の1kmグリッドLAIを併用することにより25kmグリッドのCLVDAS LAI出力値を1kmグリッドのLAIに高空間分解能化した。そして、1kmグリッドのLAIを用いて地区スケールのLAIを計算し、地区スケールの穀物生産高・最適灌漑水量などの農業支援情報を推定する手法を検討した。これにより、「天水地区と比べた時の灌漑地区における灌漑の効果」や「経験に基づく人為的操作による作付面積の不適切な削減」など、昨年度の州平均値による解析では理解することができなかった特性を理解することができた。また、天水地区(Rain-fed district 379)と灌漑地区(Irrigated district 337)を対象に適切な作付面積を検討した結果、天水地区では2013年13ha・2014年10ha、灌漑地区では2015年91ha・2016年323ha・2018年121haが実際の作付面積で不足していた可能性があることが分かった。さらに過少な作付面積の補正後、目標とする穀物生産高を得るために本来必要とされた灌漑水量を推定した結果、天水地区においては、2015年・2016年・2017年にそれぞれ1.85, 3.09, 2.87 (mm/day)の灌漑水量が必要であったことが分かった。また灌漑地区では、2013年・2015年・2017年にそれぞれ0.51, 3.28, 0.68 (mm/day)の灌漑水量が不足していたことを理解することができた。このように深刻な渇水条件下においても、今後の

農業に活用できる地区スケールの水資源情報を提供できる可能性を確認できた。

参考文献

- 1) Sawada, Y. and Koike, T.: Simultaneous estimation of both hydrological and ecological parameters in an eco-hydrological model by assimilating microwave signal, Journal of Geophysical Research – Atmospheres, Vol.119, pp.8839-8857, 2014
- 2) Sawada, Y., Koike, T. and Walker, J. P. : A land data assimilation system for simultaneous simulation of soil moisture and vegetation dynamics, Journal of Geophysical Research – Atmospheres, Vol. 120, pp.5910-5930, 2015
- 3) Sawada, Y. and 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 Geophysical Research – Atmospheres, Vol. 121, pp. 8229-8242, 2016
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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, 200

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：伊藤弘之、菊森佳幹、吉野広郷、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、宮本守、海野 仁、玉川勝徳、牛山朋来、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。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°C より十分低く保つという目的に合うシナリオである。

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

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~

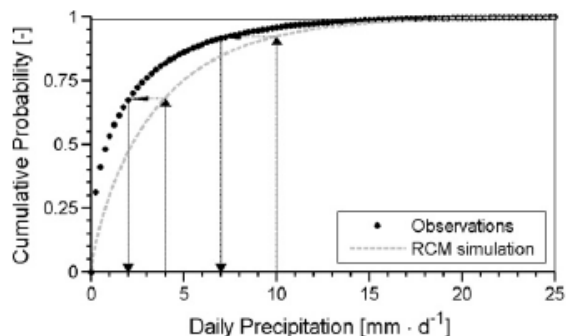


図-1 降水量バイアス補正の手法(文献1)より

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、豪雨や渇水の特徴を調査した。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 の出力よりも自然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、深刻な影響を及ぼす可能性がある。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

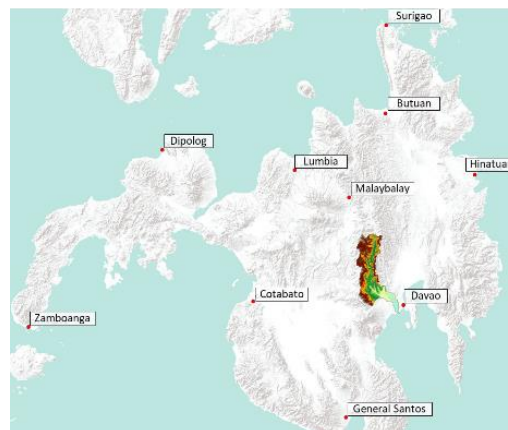


図-2 ミンダナオ島におけるダバオ川流域と雨量計地点

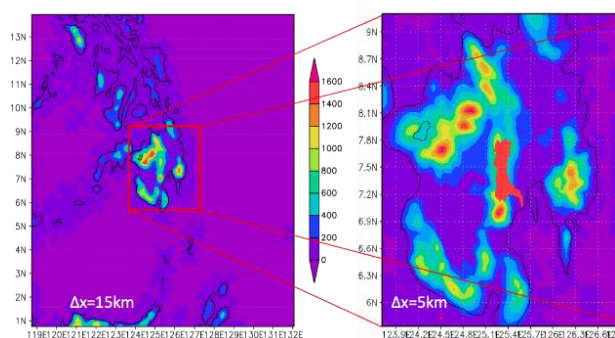


図-3 ダバオ川流域を対象とした WRF モデル領域。左は 15km メッシュ、右は 5km メッシュ領域。色は地形を表す。右中央の

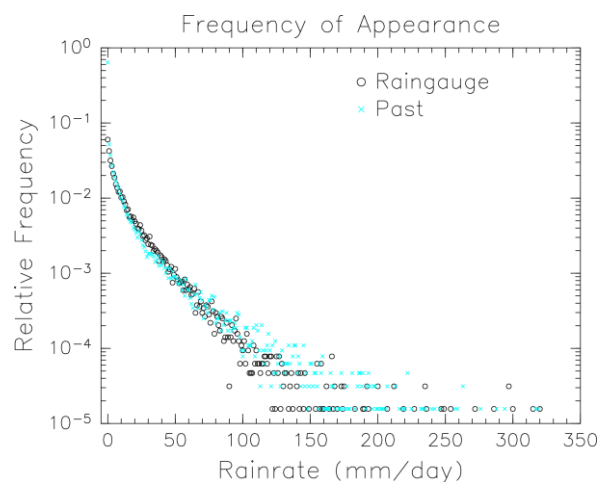
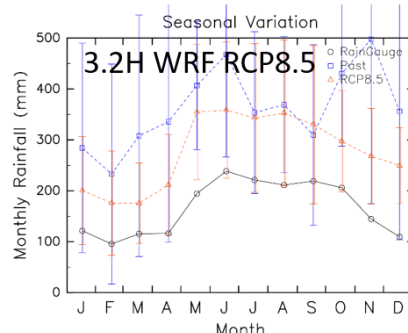
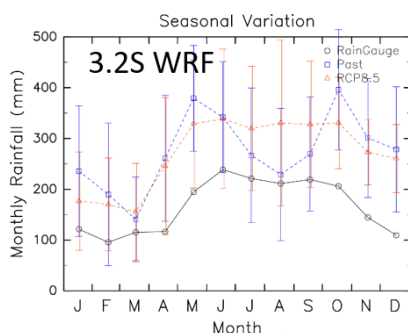
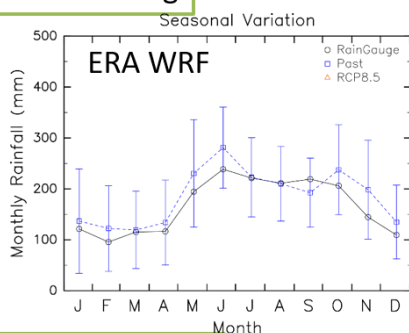


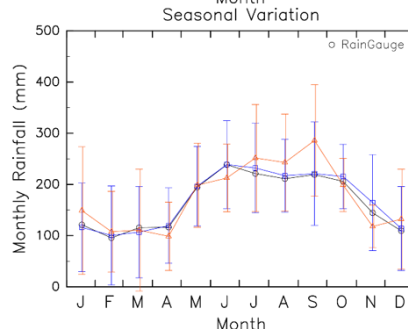
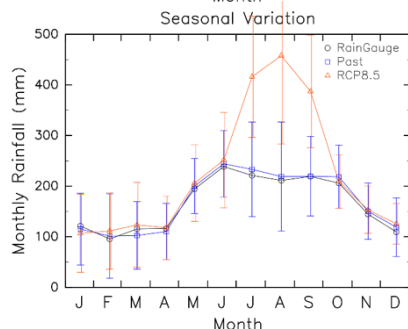
図-4 雨量計観測点における日雨量の出現確率、黒は雨量計、青は力学的ダウンスケーリング(MRI-AGCM3.2S 過去気候)の結果。

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

Downscaling



Bias correction



図—5 ダバオ川流域平均降水量の季節変化。黒線は雨量計、青線は過去気候、赤線は将来気候 RCP8.5 である。上段が補正前、下段がバイアス補正後である。左は ERA-interim、中央は MRI-AGCM3.2S、右は MRI-AGCM3.2H をそれぞれ境界条件に用いたものである。

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—5 参照)。

図—3 は RCM の計算領域である。RCM として Weather Research and Forecasting model (WRF)³ を用いた。水平解像度は外側 15km、内側 5km の 2 重ネステイング、鉛直 40 層である。積雲パラメタリゼーションは気象庁の予報モデルでも使用されている日本域を対象にチューニングした Kain&Fritsch スキーム⁴ を用いた。

力学的ダウンスケーリングの結果の雨量の出現確率を雨量計観測と比較したのが図—4 である。縦軸が出現確率であり、弱い雨ほど多く出現し、強い雨になるほど指数関数的に出現確率が下がっていく様子が表れている。観測とダウンスケーリングの結果は、完全に一致しているわけではないが、一部を除いて非常に良く一致し、RCM が現地の降水特

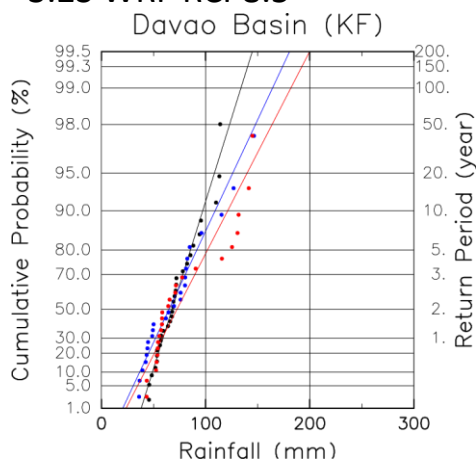
性をよく再現していると言える。

図—5 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を示している。左上の図は境界条件に欧州中期予報センターが作成した再解析データ (ERA-interim) を用いたものである。バイアス補正を行わなくても RCM の計算値と雨量計の観測値は近い値であり、WRF モデルの設定が適切であることを示唆している。

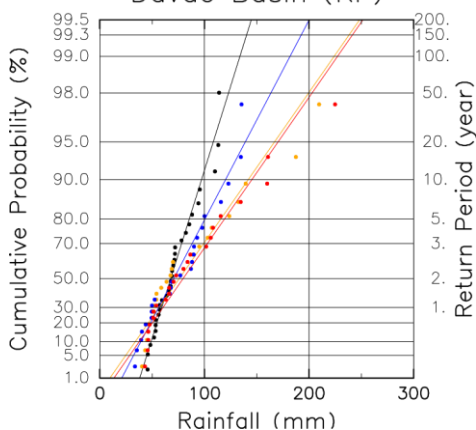
次に、図—5 の中央列は MRI-AGCM3.2S をダウンスケーリングした結果である。上段のバイアス補正前の結果は、観測値に比べて大幅に過大であった。また、過去気候では夏季の 7 月～9 月の降水量がその前後の月と比べて大幅に小さくなっていった。左列の ERA-interim のダウンスケーリングでは観測値と比較的一致しているのに、MRI-AGCM3.2S のダウンスケーリングでは観測よりも大幅に大きいことから、この過大評価の原因は MRI-AGCM3.2S のバイアスであることが考えられる。この結果をバイアス補正したものが、中央列下段の図である。過去気候の結果は、観測値と非常に良く一致しているが、将来気候では 7 月～9 月の降水量が大幅に大きい値となった。これは、補正前の過去気候と将来気候の値の差が 7 月～9 月に大きくなっており、過去気候を無理に観測値に近づけたために、将来気候の値に歪が出てしまったものと考えられる。

図—5 右列は MRI-AGCM3.2H 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、3.2S と同様観測に対して過大評価であるが、過去気候の変動は夏季に小さくなっ

3.2S WRF RCP8.5



3.2H WRF RCP8.5+RCP2.6

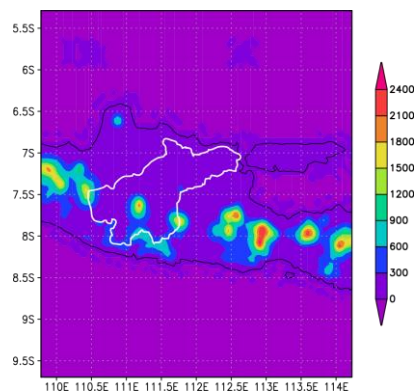


図一六 ダバオ川流域日雨量の頻度解析結果。黒は雨量計、青は過去気候、赤は将来気候 RCP8.5、オレンジは RCP2.6 である。上は MRI-AGCM3.2S、下は MRI-AGCM3.2H のダウンスケーリング結果である。

ているものの 3.2S ほど激しくなかった。バイアス補正後の将来気候の値は過去気候に比べて 7 月～9 月に多少降水量が増える程度であり、3.2S の場合のような大幅な変化は見られなかった。

図一五の結果から、MRI-AGCM3.2S、3.2H のダウンスケーリング結果は、GCM 自身が持つバイアスの影響により、月降水量が観測値に比べて過大評価となった。バイアス補正後の値は、3.2S では将来気候と過去気候の違いが夏季に非常に大きい値となったのに対して、3.2H ではそれほど大きな違いは現れなかった。これらのことから、3.2S のバイアス補正後の将来気候の夏季降水量の大幅な増加は信頼性が低く、これをもとに議論を進めることは間違った結論を引き出す恐れがある。従って、降水量の季節変化については 3.2H の結果を中心に議論を進めることとする。

図一六は、ダバオ川流域の年最大1日降水量の頻度解析の結果である。上段の MRI-AGCM3.2S は、過去気候と将来



図一七 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。

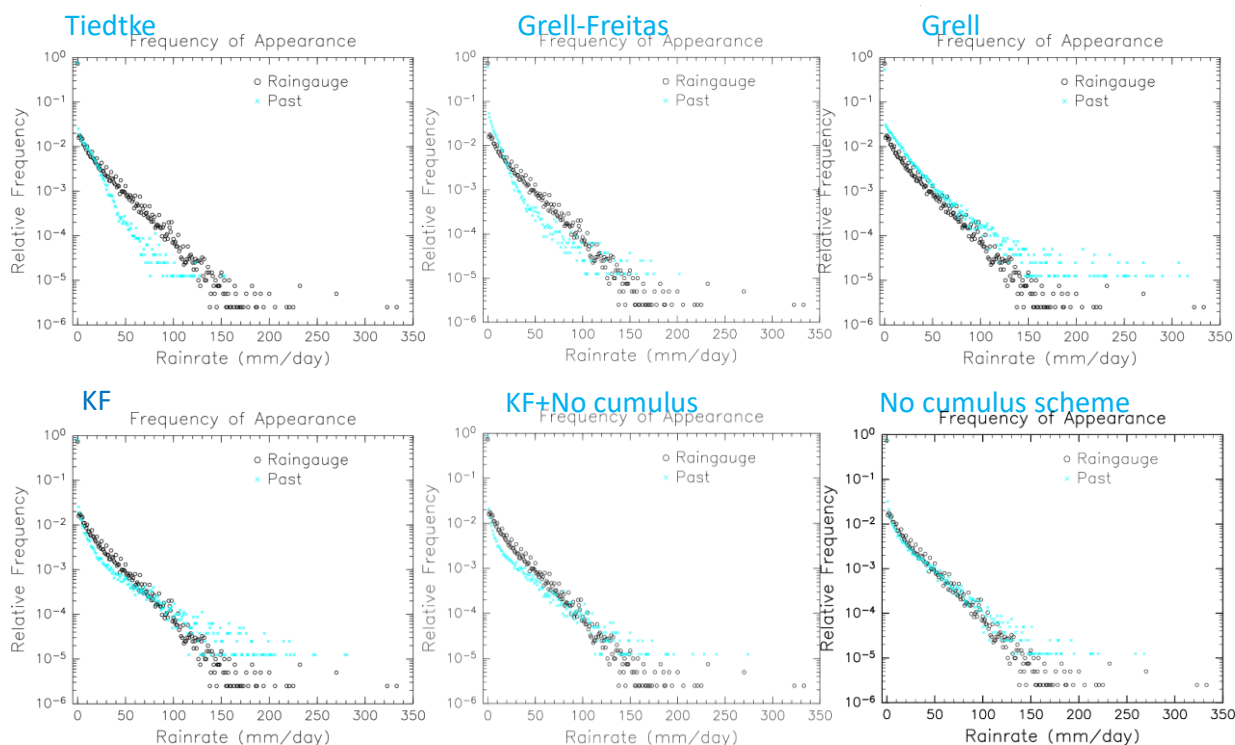
気候 RCP8.5、下段の 3.2H は過去気候と将来気候に RCP8.5 と RCP2.6 の結果を表示した。なお、頻度解析に用いる降水量を日雨量としたのは、ダバオ川流域が小さく、1 日程度で降水が流出してしまうため、流出量と日雨量の相関が高いためである。

上段の MRI-AGCM3.2 と下段の 3.2H で共通しているのは、両者とも過去気候では観測に比べての同じ出現頻度の降水量が大きめであったこと、そして将来気候の値は過去気候に比べてさらに大きかったことである。また、過去気候、将来気候ともに 3.2H の方が 3.2S よりも大きな降水量値を示した。また、3.2H では RCP8.5 と RCP2.6 との間にはほとんど差が見られなかった。バイアス補正を行ったにもかかわらず過去気候の値が観測値と合わないのは、バイアス補正が格子点毎に実施しているため、流域平均が必ずしも観測と一致しないことが挙げられる。しかし、過去気候の結果は観測値とそれほど離れてはおらず、今後の議論に役立つ結果が得られたと考えられる。将来気候の結果が過去気候に比べてわずかに増加したことは、将来極端降水の規模が増大することを示しており、洪水リスクが増加すると考えられる。また、図一五の右列下段の降水量変化からも、夏季の多雨期の平均降水量が増加することから、こちらも洪水リスクの増加の可能性が示されている。

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、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、図一七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。ソロ川流域は図一七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、



図—8 ソロ川流域内の雨量計観測地点における日雨量の出現頻度、黒は雨量計、青は力学的ダウンスケーリング(MRI-AGCM3.2S 2S 過去気候)の結果。期間は1979～1983年の5年間。各図の左上の文字は、積雲パラメタリゼーションの種類を示す。右下の図は、5kmメッシュ領域のみで計算し、それ以外は15kmの外側領域と5kmの内側領域の2重ネスティングで計算した。

それらが合流して東に流れてジャワ海に注ぐ。この地域は、熱帯雨林であると同時に、海洋の影響を強く受ける点の特徴である。

次に図—8 にソロ川流域内の雨量計観測地点における日雨量の出現頻度を示す。ソロ川流域の場合、ダバオ川で得られたような良好な結果(図—4)が容易に得られなかった。そこで、WRF モデル設定の中で、降水特性に大きく影響する積雲パラメタリゼーションのスキームを何種類か(Kain&Fritsch, Tiedtke, Grell-Freitas, Grell 等)試すことによって、適切な降水特性が得られるよう調整を試みた。なお、積雲パラメタリゼーションは、粗い格子間隔のモデルでも降水を生じさせるために用いるものであるが、降水特性にバイアスを生じさせる作用もある。そこで、今回は対流パラメタリゼーションを用いない計算も試した。

ソロ川流域の場合、長期間連続してデータが得られている雨量計は44点と、ダバオ川流域に比べて豊富に存在する。最初は、ダバオ川流域と同様に、15kmと5kmメッシュ領域の2重ネスティングで計算を行った。ダバオ川流域と同じKain&Fritschスキーム⁴⁾を使った場合、MRI-AGCM3.2Sのダウンスケーリング結果は、図—8 左下のように、降雨強度100mm/d以下では過少、100mm/d以上では過大となるなどの著しい不一致が見られた。図—8 左上のTiedtkeスキーム⁵⁾では、全体的に激しい過小評価傾向が見られ、Grell-

Freitasスキーム⁶⁾でも大きな過小評価傾向が見られた。Grellスキーム⁷⁾では全体として過大評価傾向が目立った。以上15kmメッシュ外側領域と5kmメッシュ内側領域の両方に積雲パラメタリゼーションを適用した場合、いずれも計算値と雨量計観測値が良く一致しなかった。そこで、図—8 中央下の図のように、外側領域はKain&Fritschスキーム⁴⁾を適用し、内側領域は積雲パラメタリゼーションを適用しないで計算を行うと、外側内側の両方にKain&Fritschスキーム⁴⁾を適用した場合よりもやや改善が見られた。しかし、100mm/d以下で過小評価傾向が残った。そこで、さらに領域を5kmメッシュの内側領域のみとし、積雲パラメタリゼーションを適用せずに計算を行うと、図—8 右下のように、これまでで最もよく一致することがわかった。

今回の対象となるジャワ島のソロ川流域は、比較的狭い島の中の地域であるため海洋の影響を強く受けること、海洋の海面温度が高く大量の水蒸気量をもたらされること、島の上では日中地表面温度が高まることで激しい日変化による対流が発生すること、などが考えられる。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ため、積雲パラメタリゼーションを適用しないモデルの方が良い成績を取ったものと考えられる。今回MRI-AGCM3.2のダウンスケーリングを行う上では、5kmメッシュ領域のみで、積雲パラメタリゼーションを適用せずに

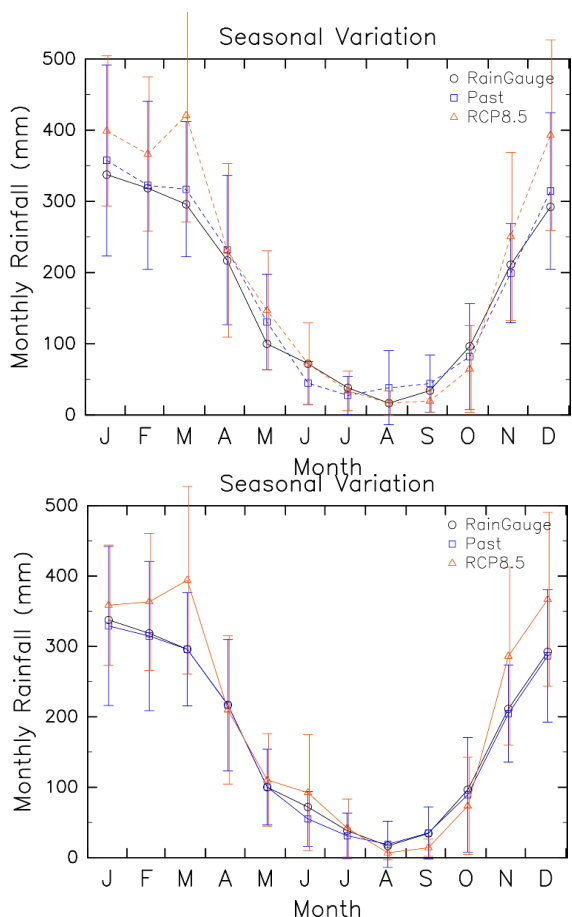


図-9 ソロ川流域平均降水量の季節変化。上図はバイアス補正前、下図はバイアス補正後である。黒は雨量計、青は過去気候、赤は将来気候 RCP8.5 である。

計算を行うこととした。

図-9 に、ソロ川流域平均降水量の季節変化を示す。上の図がバイアス補正前、下がバイアス補正後である。バイア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月が乾季となっている。図-9 上図の結果は、雨季の降水量は将来より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-9 下のバイアス補正後の図を見てみると、雨季の降水量の増加傾向は、バイアス補正前に比べて、1月については小さくなったが、11月は大きくなった。しかし、全体的な傾向はバイアス補正前と比べて大きな変化はなかった。乾季については、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。すなわち、乾季の前半の5月～7月には将来やや増加傾向にあり、乾季后半の8月～10月

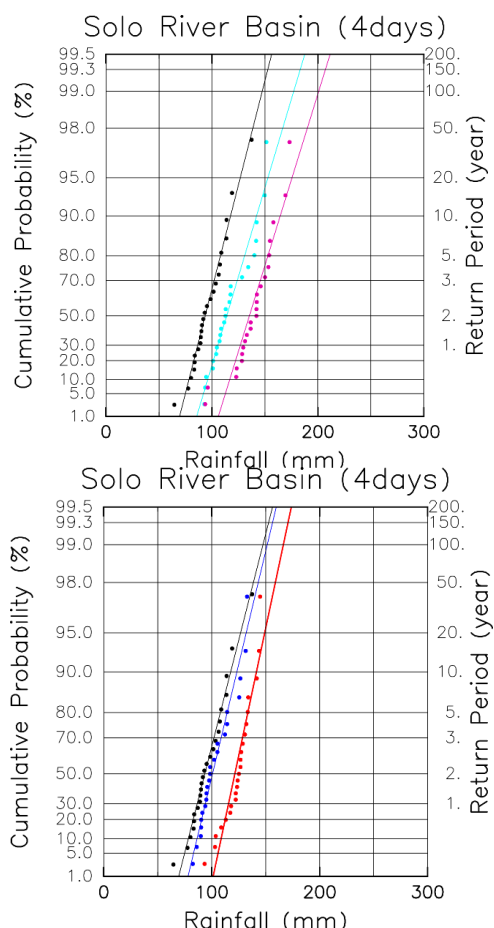


図-10 ソロ川流域平均4日降水量の頻度解析。上図はバイアス補正前、下図はバイアス補正後である。黒は雨量計、青は過去気候、赤は将来気候 RCP8.5 である。

には減少傾向にあった。特に8月～10月にかけては、元々降水雨量が少ないところ、さらに減少に転じるため、渇水の可能性が増大する恐れが考えられる。

図-10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-10 上図のバイアス補正前の値は、過去気候の分布が雨量計よりも大きめの値となった。また、将来気候では過去気候に比べて、すべてのリターンピリオドで平均して20mm程度増加するという結果であった。一方、バイアス補正後の結果では、過去気候の値は雨量計の値に近いものとなった。また、将来気候の値は、バイアス補正前と同様に、平均して約20mm程度増加する結果となった。具体的には、50年確率雨量では過去気候の140mmから160mm増加し、100年確率雨量では150mmから170mmに増加する結果となった。これらは、13～14%の増加であり、将来極端豪雨の値はある程度の増加がある可能性が示された。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。

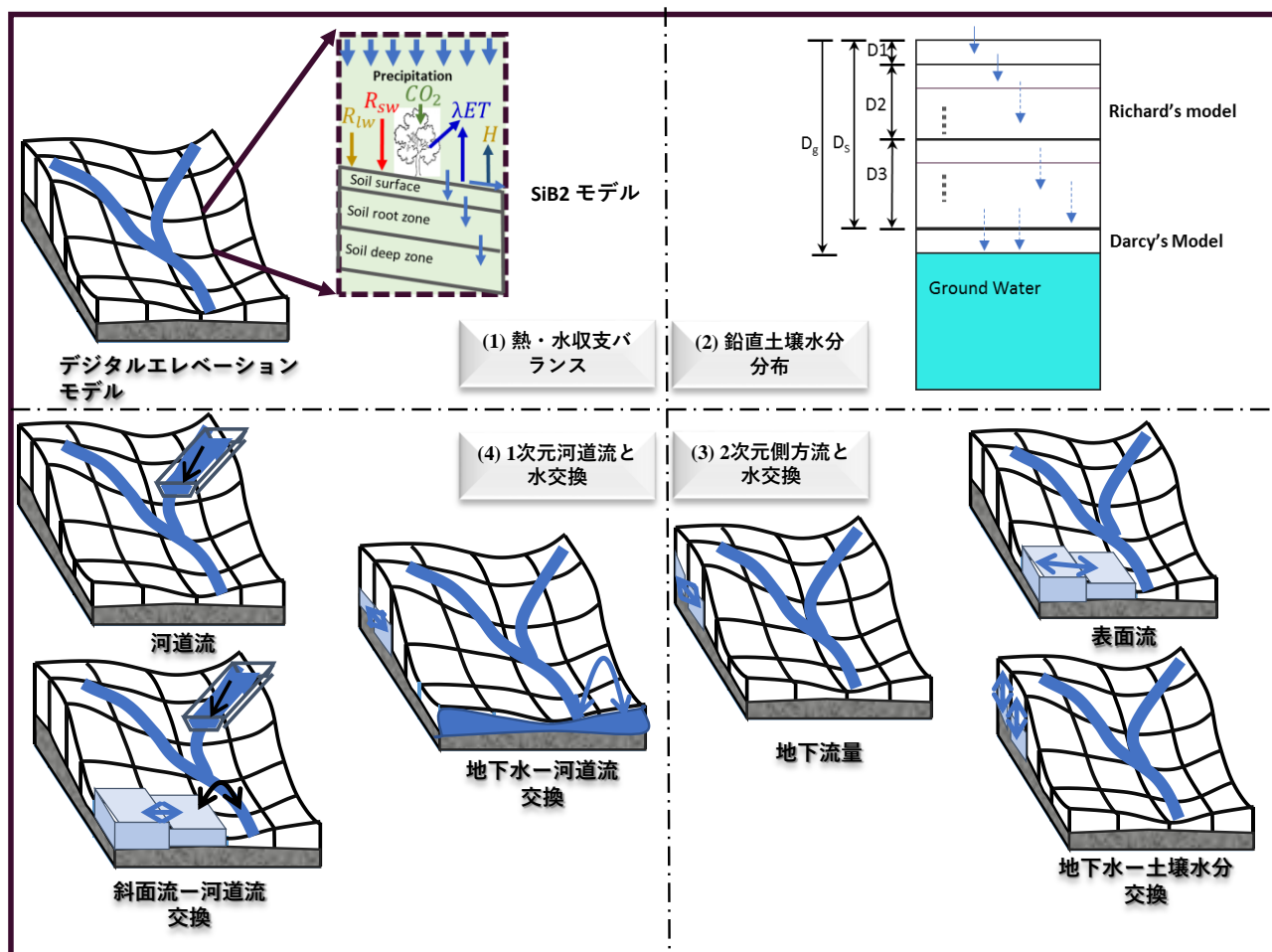


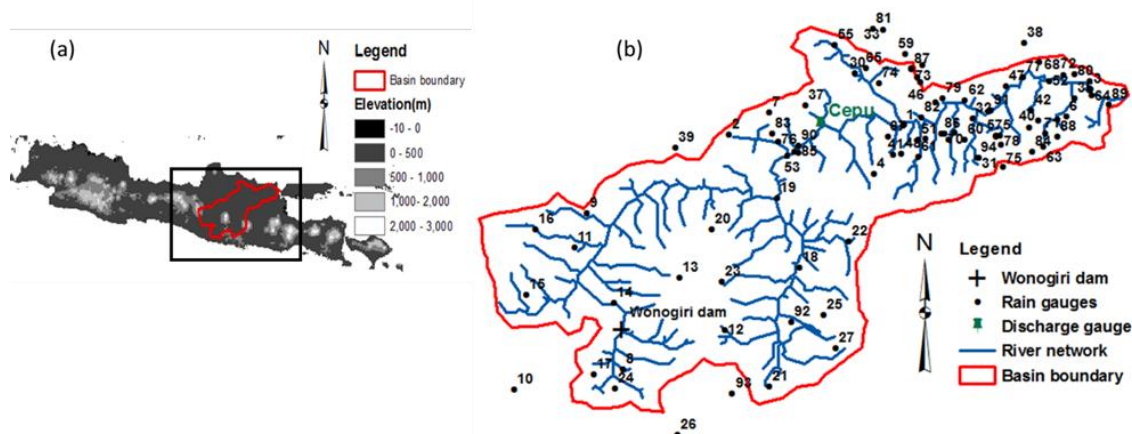
図-1-11 WEB-RRI モデルの概念図。(1) SiB2 モジュールは各格子点における地表面-大気間の鉛直熱エネルギーと水フラックス交換を処理、(2) 鉛直土壌水分分布モジュールは、リチャードの式とダルシーの式で地下水の再充填を計算、(3) 2次元拡散波流出モジュールは、表面流と地下流出を計算、(4) 一次元拡散波河川流出モジュールが河川流を計算。

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、キャピリー相互作用、蒸発散、土壌-植生-大気の相互作用等）が考慮されていないことによってモデルの不確実性が主に生じている。これらは、洪水に関する適用を行う場合においても、乾燥域や準乾燥域においては非常に重要な要素である。例えば、土壌水分量は、降雨の

表面流出と地下浸透への分配を決めており、また水収支の中でも土壌と植生の蒸発散を正確に見積もることが、土壌-植生水分貯蔵・河川流出・湛水深の予測精度にとって非常に重要である。その結果、洪水リスク評価のため、各洪水事例に対するモデル検証を繰り返す必要がある。現業の洪水監視や予測活動に用いられる時、その出力は十分な注意の下に扱わなければならない。さらに、RRIモデルは温暖化による水収支変化を計算していないため、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。それは、水熱収支過程・地表-植生-大気相互作用、複数層の土壌水分力学過程、降水遮断・蒸発散・浸透・流出・氾濫過程を改善する2次元流出を組み込む。Hydro-SiB2モデルを用いることで、WEB-RRIモデルは干ばつの評価にも用いることが出来、大気モ

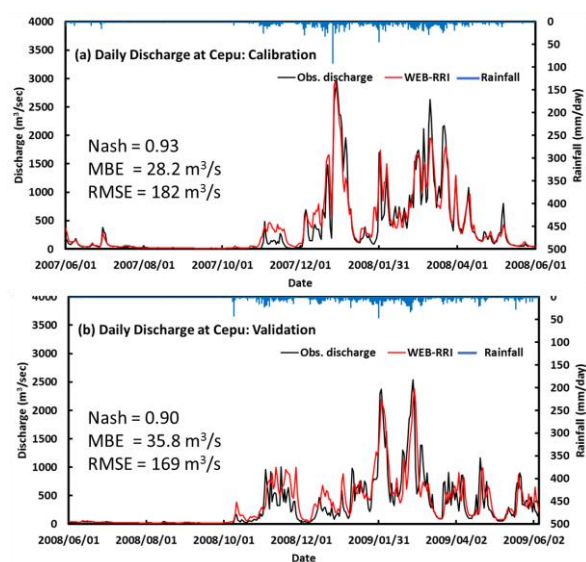


図一 12 ソロ川流域の位置と観測点、(a)ジャワ島地図とソロ川流域の位置、(b)ダム、雨量計、Cepu の流量観測点。

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 8)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(図一12 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。

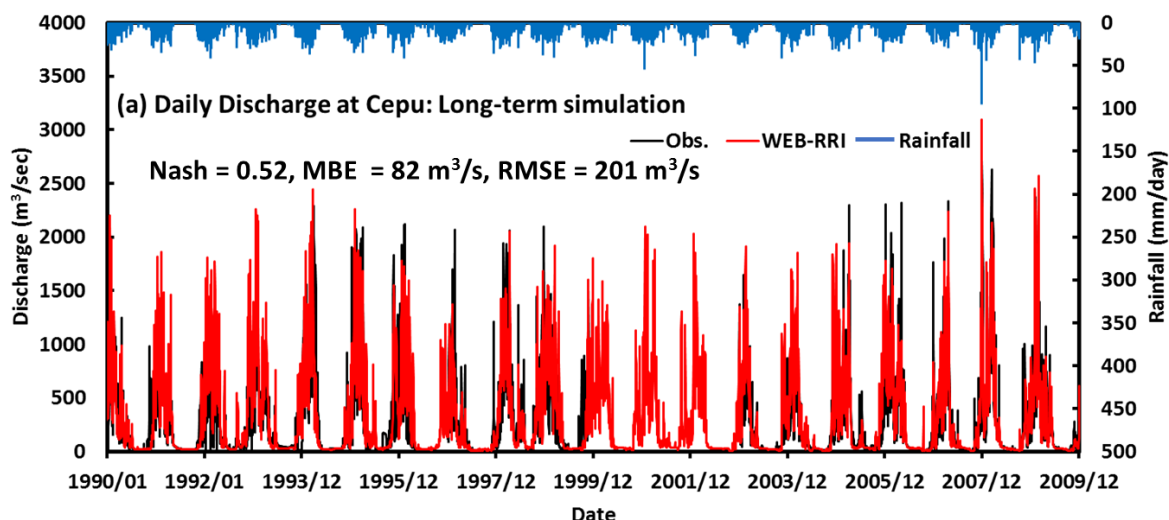
デジタル標高モデル、流向、積算面積等の地形データは、USGS が発行している HydroSHEDS と呼ばれるスペースシャトルによる観測データを用いた。HydroSHEDS は、NASA による Shuttle Radar Topography Mission (STRM)による 3 秒解像度の観測を基にしている。本研究では、元の SRTM データから水文モデル用に整備された 15 秒間隔データ(約 450m 解像度)を用いた。土壌種類、土地利用、植生データは、地表・地中・河川を計算する上で重要である。土壌分布は、FAO の 9km 解像度データを用いた。また、このデータセットに付随する、地表・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



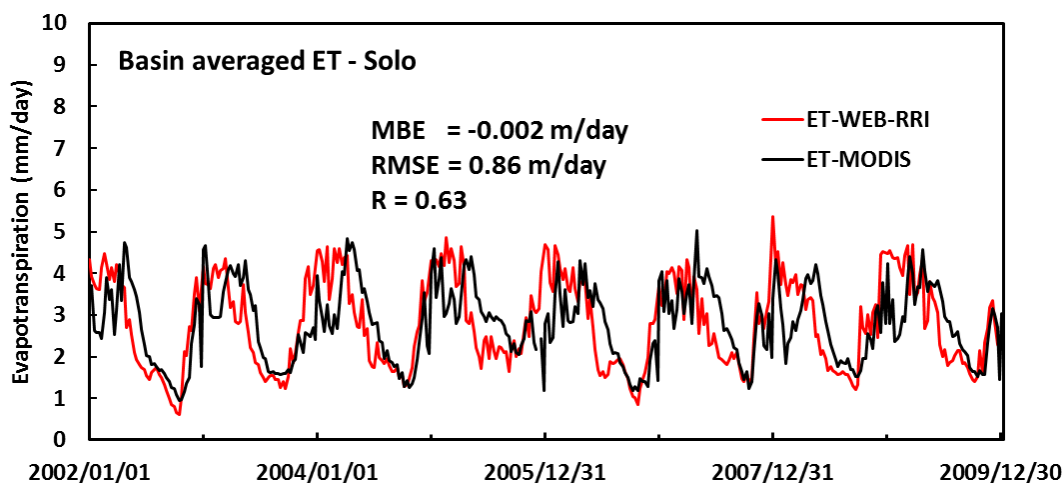
図一 13 Putapaula 観測地点における観測流量と計算流量の比較、(a)2007～2008 年のモデル校正期間、(b)2008～2009 年の検証期間。

日合成した 1km 解像度の LAI と FPAR を使い、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、全球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 1 4 ソロ川流域 Cepu における長期観測流量とシミュレーションの比較 (1990~2009 年の 20 年間)



図一 1 5 8 日間平均の蒸発散フラックスの比較、WEB-RRI と MODIS 推定値のソロ川流域の 2002~2009 年の値

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。図一13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。ウォノギリダムからの流出量を境界条件として使用し、下流域の水文応答を調べた。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 $28.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RMSE は $169 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 $35.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、RMSE は $169 \text{ m}^3/\text{s}$ 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。図一14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 = $82 \text{ m}^3/\text{s}$, RMSE = $201 \text{ m}^3/\text{s}$)。

分布型水文モデルの水収支の中でも蒸発散の正確な推定が土壌水分・洪水ピーク・乾季の低水流量・温暖化シナリオにおける気候変動影響等の予測にとって重要である。WEB-RRI モデルの蒸発散推定に関する性能を評価するため、ソロ川流域スケールの MODIS による蒸発散推定値と比較した。Sib2 モデルは 4 つの異なる蒸発散構成要素(土壌からの蒸発、土壌遮断水の蒸発、植生遮断水からの蒸発、

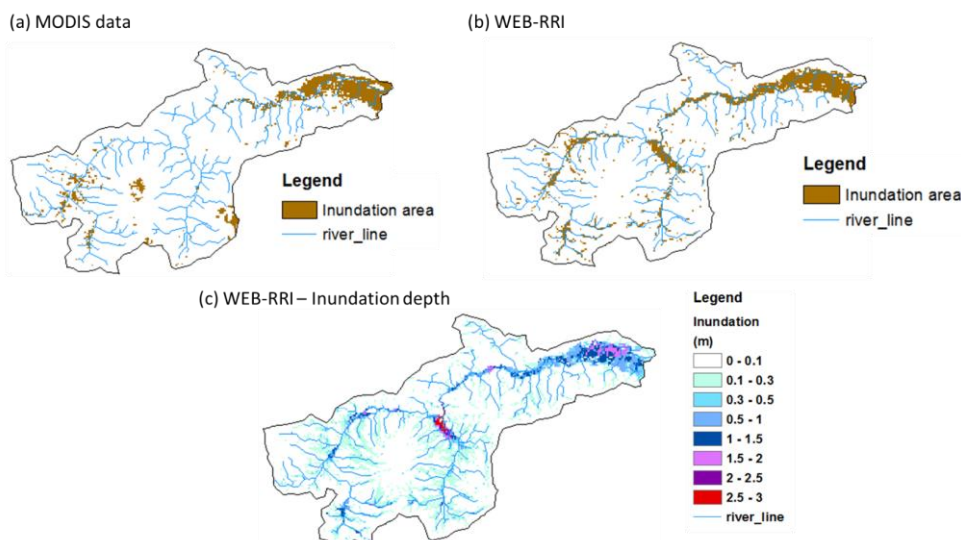


図-16 2007年洪水事例についての氾濫域の比較。(a)MODIS データ、(b)WEB-RRI モデルによる氾濫域、(c)WEB-RRI モデルによる氾濫域の浸水深(m)

植生からの蒸散)からの蒸発散を個別に計算することができる。この機能は、将来気候変動によって土地利用や灌漑方法が変化した場合に、その影響を調べる機会を与えてくれる大きな利点となる。MODIS とモデルの蒸発散フラックスを比較する上では、4 つの構成要素の和をとり、流域スケールの 8 日平均を求めた。

図-15 は 2002～2009 年の 8 年間の比較結果である。MODIS の値とモデル計算値は 0.5～5mm/day の間を変動し、両者のトレンドはよく一致していた。蒸発散フラックス全体的なモデル性能は、 $MBE = 0.002 \text{ mm/day}$, and $RMSE = 0.86 \text{ mm/day}$, $R=0.63$ であった。誤差の一部は、中流から下流域における乾季の水田耕作のための灌漑の実施である。一般的に、モデルの計算値は植生の生物気候と土壌水分力学がモデルで適切に取り入れられていることを確認しており、それらの影響は蒸発散フラックスの推定の中で適切に計算されていた。このように、WEB-RRI モデルは蒸発散フラックスを適切に計算することができることから、入力データを改善することでさらに蒸発散フラックスの改善が可能である。これらの結果は、さらに WEB-RRI モデルを過去や現在の洪水監視を行い、将来の農業干ばつや土地利用変化や気候変動影響評価に用いることで検証される。

2007 年に 12 月 27 日から 2008 年 1 月 6 日かけて大規模な洪水事例が報告された。MODIS の表面反射率データは洪水氾濫域を推定するのに用いられ、モデルによる推定値と比較したのが図-16 である。図のように、観測されたほとんどの氾濫域はソロ川の主川と下流に沿って発生していた。モデルによる計算値は概ね観測値と一致していた。

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

ERA-interim 再解析データのダウンスケーリングでは、流域平均月降水量は観測とよく一致し、WRF モデルの校正は成功した。しかし、MRI-AGCM3.2S や 3.2H のダウンスケーリングでは、月平均降水量を大幅に過大評価したため、GCM のバイアスの影響が大きいことが示唆され、バイアス補正実施の重要性が大きかった。雨量計を用いてバイアス補正を行った結果、MRI-AGCM3.2S と 3.2H の結果は大幅に異なった。3.2S で将来夏季の降水が大幅に増加するのは現実性が低いと考えられ、今後 3.2H を採用すべきと判断した。年最大 1 日降水量の頻度解析から、将来極端降水の出現は、3.2S の RCP8.5、3.2H の RCP8.5、RCP2.6 のすべてにおいて、将来わずかに極端降水量が増加する傾向にあることがわかった。リターンピリオド 50 年の年最大 1 日降水量は、3.2S は過去気候の 150mm から将来 170mm に増加し、3.2H は過去気候の 170mm から将来 RCP8.5 2.6 とともに 200mm に増加することが示唆された。

(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 モデルを用いて降水の出現

率を再現することに苦勞し、いくつかの試行錯誤による実験からMRI-AGCM3.2Sの力学的ダウンスケーリングでは、5kmメッシュ領域のみで積雲パラメタリゼーションを用いない設定が最も観測値をよく再現することがわかった。

ダウンスケーリングによって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非常に良く一致するようになり、特に乾季の過去と将来の関係が明瞭になった。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。50年確率雨量では過去気候の140mmから160mmに増加し、100年確率雨量では150mmから170mmに増加するなど、13~14%の増加という結果が得られた。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、土壌や植生に係る水・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製等について非常に有益なモデルであったが、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にも耐えうるモデルが完成した。

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1990年~2009年の20年間に適用したところ、満足できる精度が得られた。さらに、蒸発散フラックスについてMODISによる推定値と比較したところ、良い一致を見た。一部誤差があるところは、流域の中下流で行われている、乾季の水田の灌漑実施による影響が考えられる。さらに、2007年末~2008年初めにかけての大洪水イベントにおける氾濫域について、観測とシミュレーション結果を比較したところ、比較的良い一致を得ることができた。

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) 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>
- 4) Kain, J. S. and J. M. Fritsch: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization, *Journal of Atmospheric Sciences*, 47, 23, 2784-2802, 1990
- 5) Zhang, C. and Y. Wang: Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model, *J. Climate*, 30, pp.5923-5941, 2017
- 6) Grell, G. A. and Freitas, S. R.: A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, pp.5233-5250, 2014, doi:10.5194/acp-14-5233-2014
- 7) Grell, G. A, D. Devenyi: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1693, 2002
- 8) Mohamed Rasmy, Takahiro Sayama, and Toshio Koike: Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RRI) 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、達成目標の一つである「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」の一環として、過去の水災害における人口・地域総生産の変動を分析し、社会的影響を表現できるリスク指標の検討を進めた。発災前後での人口変動に関しては、発災前後2年での転出者数の比に着目した結果、特に、2015年の関東・東北豪雨災害で被災した常総市において人口の大幅な転出が確認された。地域総生産に関しては、全半壊率の高い被災市町村において、①顕著に総生産が減少、②周辺の自治体より総生産が増加、③総生産に変化が無い、という3つの傾向が見られた。産業別の地域総生産に着目すると、市町村全体の総生産に大きな減少が見られない場合であっても、産業別の総生産には大きな変動が生じていることが確認された。

キーワード：災害リスク、統計データ、人口、地域総生産、社会的影響

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・向上するかに相当する。

令和元年度は、達成目標の二つ目である「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」に関する検討の一環として、過去の水災害における人口・地域総生産の変動を分析し、これらの分析を通して、水災害による災害後の人口・地域総生産への影響を表現するリスク指標の検討を進めた。

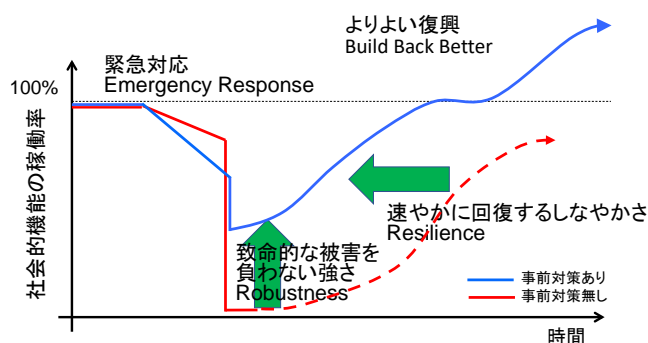


図-1 水災害による社会的影響と対策の効果

2. 統計データに基づく過去の水災害後の社会的影響の分析

2.1 分析対象とする災害と分析方針

過年度の分析においては、2015年の鬼怒川水害での茨城県常総市における災害後の社会の変化に着目し、災害後の地区別の人口変動と産業別の地域総生産の変動に関する分析を行った。人口変動の分析では、鬼怒川決壊に加えて八間堀川の決壊も影響も受け、浸水深が最大で約3mに達し、約10日程度浸水が継続した大生地区において、発災前の2015年4月1日時点に対する人口比が、2016年度は0.942、2017年度は0.947となり、人口の減少が確認された。また、茨城県市町村民経済計算のデータに基づく産業別の地域総生産の分析では、2015年の製造業の総生産が減少した一方、建設業及び電気等・廃棄物処理業の総生産は増加し、業種による差があることが確認された。

以上の分析は、2015年の鬼怒川水害での常総市だけの傾向であったため、令和元年度は、過去の水災害に対して同様の分析を行い、傾向の比較を行うこととした。分析対象として、過去20年間で全半壊戸数が300以上の気象災害を抽出した上で、これらの各災害で全半壊戸数が最大となる被災市町村を選んだ。これらを表-1に示す。

2.2 災害後の人口変動の分析

住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数調査の結果に基づき、表-1に挙げた市町村での発災前後での人口変動を把握した。図-2は、発災年の1月

1日の人口を1として、発災の前後それぞれ3年間の人口比を縦軸にとって、人口変動を図示したものである。なお、表-1に挙げた市町村のうち、対象災害より、発災前後3年に市町村合併があった自治体は除外しており、これにより図中の市町村数は10となっている。我が国は長期的な人口減少直面しているため、総人口を示した図-2は、なだらかの右肩下がりの傾向を示す。総人口には、人口の自然増減とともに、転出・転入などの社会増減が含まれるため、図-3には転出者のみを示した。この図では、発災前年の転出者数を1として、発災前後での変化を示している。発災後の転出者数の増加は、2012年の九州北部豪雨での阿蘇市、2015年の関東・東北豪雨災害での常総市、2011年の台風第12号での那智勝浦町、2017年の九州北部豪雨での朝倉市の順に多くなった。

図-4には、発災2年後の人口と全半壊率の関係を示す。なお、図中で、2018年（平成30年）7月豪雨で被災した倉敷市は、分析時点では2年分のデータ無いため、発災1年後の人口を用いてプロットしている。名古屋市・広島市等は全半壊率が小さく、総人口が1を超えており、市町村単位で見れば、災害後の人口減少は見られない。

図-5には、発災前後2年での転出者数の比と全半壊率の関係を示す。2015年の関東・東北豪雨災害での常総市は、災害後の転出者・全半壊率ともに特に多かった。一方、2016年台風第10号での岩手県岩泉町は転出者が少なかった。近年の水災害の中では、常総市は特に大きな人口流出を経験したと言える。

表-1 分析対象とした過去の水災害及び被災市町村

平成	西暦	災害をもたらした気象事例	期間	市町村	全半壊戸数
30	2018	※平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等)(速報)	6月28日～7月8日	岡山県倉敷市	5492
29	2017	梅雨前線及び台風第3号による大雨と暴風(速報) ※平成29年7月九州北部豪雨(7月5日～7月6日)	6月30日～7月10日	福岡県朝倉市	1003
28	2016	台風第7号、第11号、第9号、第10号及び前線による大雨・暴風(速報)	8月16日～8月31日	岩手県岩泉町	944
27	2015	台風第18号等による大雨(速報) ※平成27年9月関東・東北豪雨(9月9日～9月11日)	9月7日～9月11日	茨城県常総市	5163
26	2014	前線による大雨(速報) ※平成26年8月豪雨	7月30日～8月26日	広島県広島市	396
24	2012	平成24年7月九州北部豪雨	7月11日～7月14日	熊本県阿蘇市	1181
23	2011	台風第12号による大雨	8月30日～9月6日	和歌山県那智勝浦町	1008
23	2011	平成23年7月新潟・福島豪雨	7月27日～7月30日	新潟県三条市	410
21	2009	熱帯低気圧・台風第9号による大雨	8月8日～8月11日	兵庫県佐用町	891
18	2006	台風第13号	9月15日～9月20日	宮崎県延岡市	460
18	2006	平成18年7月豪雨	7月15日～7月24日	鹿児島県さつま町	581
17	2005	台風第14号、前線	9月3日～9月8日	宮崎県宮崎市	2753
16	2004	台風第23号、前線	10月18日～10月21日	兵庫県豊岡市	3161
16	2004	平成16年7月新潟・福島豪雨	7月12日～7月14日	新潟県三条市	515
12	2000	停滞前線、台風第14・15・17号	9月8日～9月17日	愛知県名古屋市	9949

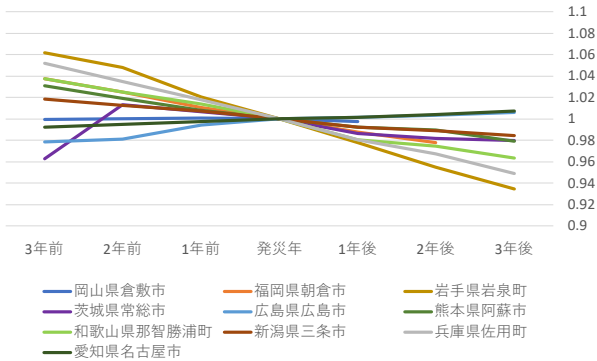


図-2 発災前後の人口変動

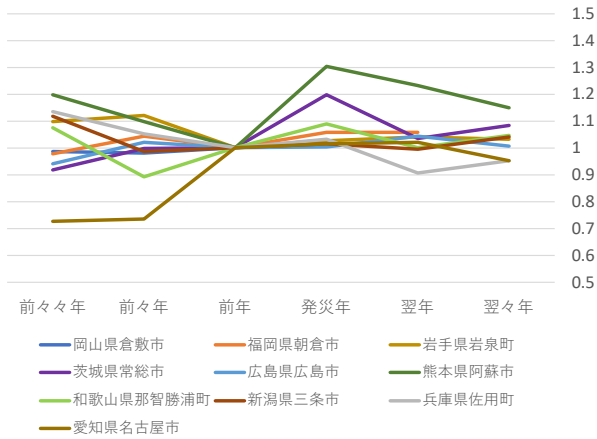


図-3 発災前後の転出者数

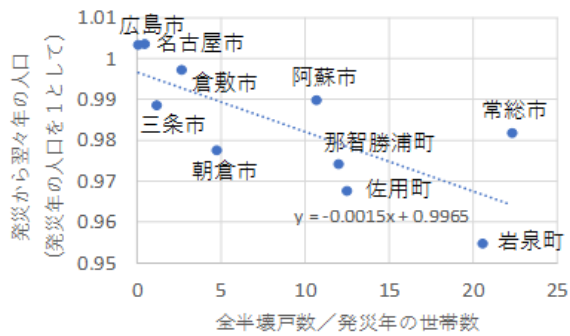


図-4 発災2年後の人口と全半壊率の関係

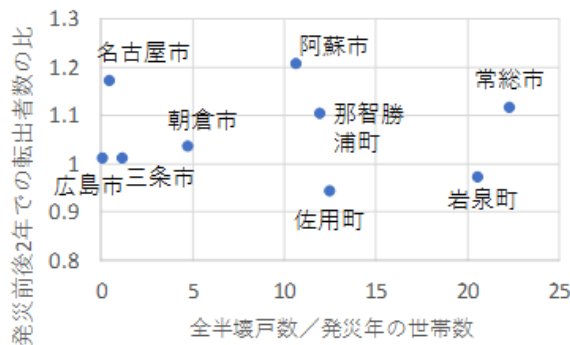


図-5 発災前後2年での転出者数の比と全半壊率

の関係

2.3 災害後の産業別地域総生産の分析

続いて、市町村民経済計算データを用いて、発災前後各5年間で市の町村の地域総生産の変化を分析した。図-6には、発災前後に市町村合併があった市町村以外について、当該市町村、周辺の同一経済圏に含まれる市町村の合計地域総生産、同一都道府県内の地域総生産の傾向を示した。なお、愛知県はダウンロードできるデータが2006年以降のみであったため、名古屋市は除いた。

図-6に示した通り、被災市町村の地域総生産の変動には、以下の3つの傾向の事例が見られた。

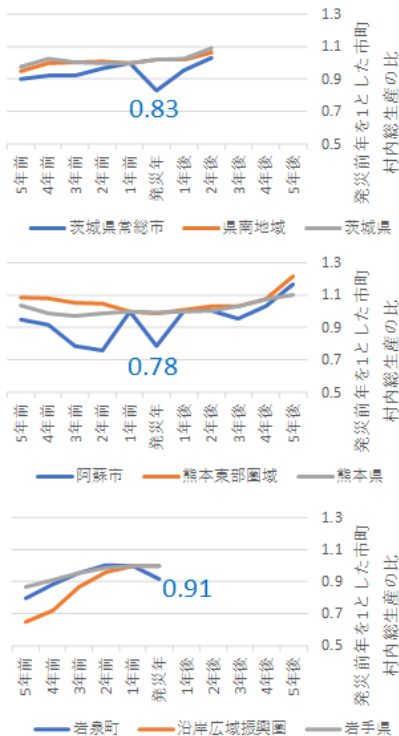
- ①全半壊率の高い被災市町村で、顕著に総生産が減少した例
- ②全半壊率の高い被災市町村で、周辺より総生産が増加した例
- ③全半壊率の高い被災市町村で、総生産に変化がなかった例

①のグループは、常総市・阿蘇市・岩泉町となり、いずれも発災年に顕著に総生産が減少した。一方、②のグループは、那智勝浦市、三条市、佐用町となり、全半壊率の高い被災市町村において、周辺市町村の総生産より微増となった。③のグループは、広島市であり、あまり変化がなかった。

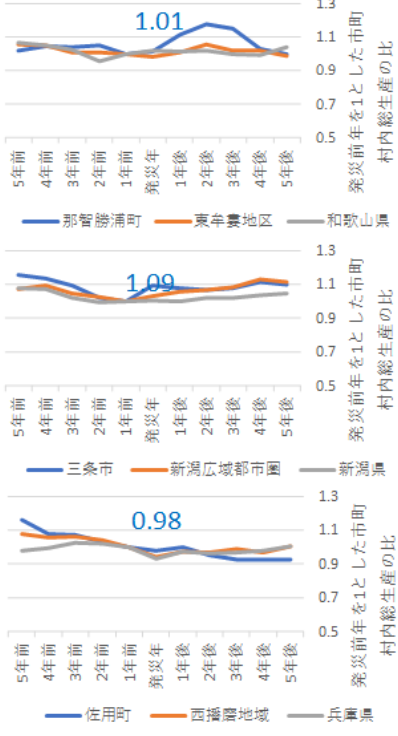
図-7は、①のグループの常総市での産業別の地域総生産の変動傾向を図示したものである。建設業、電気・ガス・水道・廃棄物業が増加し、製造業、宿泊・飲食サービス業、農業が減少しており、これらの総計として地域総生産が顕著に減少したと考えられる。とりわけ、発災年の製造業の地域総生産は、前年度に比べて0.7程度まで落ち込み、発災翌年も1を下回っており、影響が複数年に渡って続いていることがわかる。

一方、図-8は、②のグループの那智勝浦市での産業別の地域総生産の変動傾向を図示したものである。建設業の総生産は大幅増加したが、発災年の製造業は0.8程度まで落ち込んだ。建設業での総生産の大幅増加により、製造業の減少が相殺され、市町村としての地域総生産としては「1」程度となり、むしろ周辺市町村と比べても微増という結果になっている。しかしながら、図-8からもわかる通り、産業別にみれば、地域総生産の変動が生じていることがわかった。

①全半壊率の高い被災市町村で、
顕著に総生産が低下した例



②全半壊率の高い被災市町村で、
周辺より総生産が増加した例



③全半壊率の高い被災市町村で、
総生産に変化がなかった例



図-6 発災前後5年での地域総生産の変化

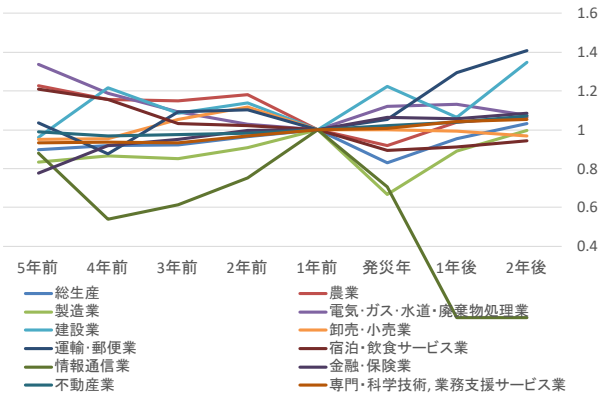


図-7 常総市での地域総生産の変化

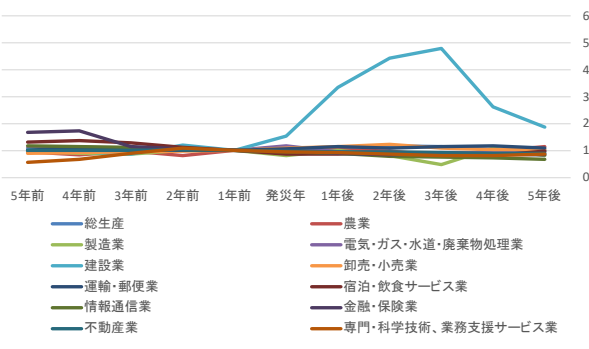


図-8 那智勝浦市での地域総生産の変化

3. まとめと今後の課題

令和元年度は、過去の水災害における人口・地域総生産の変動を分析した。住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数調査データに基づく分析により、総人口では全国的な人口減少の傾向が顕著に出るが、転出者数には災害後の影響が表れやすいと考えられた。今後は、各災害で、全半壊率が大きい被災自治体とそれに隣接する自治体、及び都道府県での発災前後での人口変動について、更に分析を深める予定である。地域総生産に関しては、全半壊率の高い被災市町村で、①顕著に総生産が減少、②周辺の自治体より総生産が増加、③総生産に変化が無い、という3つの傾向が見られた。産業別の地域総生産に着目すると、建設業等の総生産が大幅に増加した業種と、製造業等の総生産が減少した業種との間で、総生産の変動が相殺されており、市町村全体の総生産の変動につながっていることが確認された。被害にあった地域内における特定の業種の分布などによっても、産業別の総生産および市町村全体の総生産の変動が変わってくる考えられた。今後も引き続き、産業別の傾向分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 総務省：住民基本台帳に基づく人口，人口動態及び世帯数調査，https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/daiyo/jinkou_jinkoudoutai-setaisuu.html（2020年6月15日閲覧）

2. 3 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発

2.3.1 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、諸岡良優

【要旨】

本研究では水災害に対する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反映した新たな水災害リスク評価指標について検討する。さらに、それらの情報を防災担当者や住民が共有し、防災・減災活動で利活用するための「水災害情報共有システム」を開発する。令和元年度は、「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・台風第 19 号におけるシステム稼働評価を行った。また、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った。

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・土砂災害などの水災害は近年激甚化・多様化しているが、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という特徴を有する。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、以下の課題を踏まえて、防災情報の有効活用と、それを活用した地区防災計画策定が求められる。

- 施設対策には多額の予算と時間を要する。
- 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。
- 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く、防災の詳しい知識を持つ防災担当者が少ない。
- 自治体の統合により、行政区域が拡大し、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。

- 中山間地のコミュニティでは高齢者が多く、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。

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流域において、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な表）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。

平成 31 年度（令和 1 年度）は、IDRIS の普及に向けて新潟県東蒲原郡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への適用を行った。

また、平成 30 年度より防災・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ている。

以下、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、新潟県東蒲原郡阿賀町における実証実験の概要と問題点の概要、および IDRIS の岩手県下閉伊郡岩泉町への適用の概要を報告する。3 章において、「洪水カルテ」の自動作成ツールの概要及び VR の概要とその効果について報告する。4 章において IDRIS の普及と仮想洪水体験システムの活用に向けた今後の課題を検討する。

2. 新潟県東蒲原郡阿賀町及び岩手県下閉伊郡岩泉町における実証実験の概要

2.1 消防団等の水防活動参加者への利用促進

ARIS の一般公開を前に、現場における阿賀町の水防活動の中核となる消防団の訓練に参加し ARIS の概要説明と、スマートフォンを用いた画像等のアップロード機能（以下、「アップロード機能」と記述する。）の仕様説明等を行った。ARIS の概要に関して理解を得られた。

しかし、アップロード機能の操作に関しては、スマートフォンの操作に慣れた一部の消防団員に限られ、年齢層の高い消防団員等も利用しやすいツールの開発等の課題を把握できた（図-1）。



図-1 消防団への説明状況

2.2 ARIS 公開及び阿賀町での実証実験

平成 29 年度より試験運用を行っていた ARIS を、2019 年 8 月 15 日より一般公開した¹⁾。一般公開は、



図-2 広報あがへの掲載状況



図-3 一般公開開始時の ARIS 画面

記者発表、阿賀町の広報誌「広報あが」及び阿賀町役場の HP により周知された（図-2）²⁾。平常時における ARIS の運用状況は概ね良好であった（図-3）。

2.3 台風 19 号時の問題点の抽出と改善

2019 年 10 月 12 日～2019 年 10 月 13 日の西～東日本の広い範囲で大雨・強風となった。阿賀町においても洪水が発生し、2 世帯が全壊する等の被害が

あった。台風 19 号時、ARIS は、一部の機能が利用できない状態となる不具合を確認した。下記に不具合の概要、要因及び現状での対応状況を示す。

不具合は、大別すると、不具合 1: IDRIS のプログラムの不具合、不具合 2: IDRIS が基盤とする e コミュニティ・プラットフォームの不具合、以上の 2 分類であった。

不具合 1 に関しては、IDRIS のソースプログラムを改良することで対応できている。不具合 2 (e コミュニティ・プラットフォーム由来の問題) に関しては、より詳しい技術調査と他の WEB-GIS 技術への置き換えを検討していく必要がある。

e コミュニティ・プラットフォーム³⁾は、防災科学技術研究所のプロジェクトからソーシャルオープンプラットフォーム利用推進フォーラム (Social Open Platform Promotion Forum: SOPPF) に管理が移行している。SOPPF による e コミュニティ・プラットフォームの最新 WEB 技術への対応が期待されるが⁴⁾、未知数な部分も多いのが現状である。

e コミュニティ・プラットフォームの WEB-GIS の機能を活用せず、他の WEB-GIS 機能を実装する選択肢もあるため、IDRIS の一次モデルの仕様化の段階で技術的な検討を行う予定である。

2.4 IDRIS の岩手県下閉伊郡岩泉町への適用の成果の概要

2.3 節において改良した ARIS を基に、岩手県岩泉町における IDRIS (以下、「IDRIS-Iwaizumi」と記述する) のサイト構築を行い、2020 年 1 月 31 日より一般公開を行った¹⁾。平常時の現在、大きな問題なく運用されているが、令和 2 年度の出水期の検証等を通じて、システムの堅牢性を検証していく予定で

ある。

3. VR 技術の活用した洪水疑似体験ツールの開発とその効果の検証

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。

そこで、住民の水害「我がこと感」を醸成し、住民や防災関係者による効果的・効率的な防災・減災活動に資することを目的にして、近年進展が著しい仮想現実 (VR) 技術を用いて、洪水時の臨場感や危機感を疑似体験できる「洪水疑似体験ツール」を開発した。そして、これまで洪水災害を見たり経験したりしたことのない住民が、本ツールにより洪水を疑似体験することで、洪水に対する意識や行動意欲に変化が生じるかを検証するため、国総研・土研一般公開 (2019 年 4 月 19 日) に来場した一般の方々 111 人に実際に VR を体験いただき、アンケートを実施した (図-4)。

その結果、本ツールによる洪水疑似体験は、特に今まで洪水に対する経験がない被験者に、強い洪水の恐怖感を与えることが分かった。また、半数以上の被験者について、本ツールによって洪水災害に対する心配度合いが向上し、さらに、本ツールで洪水をより強く恐怖に感じられた人の方が、ハザードマップを見ようとする意識がより高くなることが分かった。これにより VR 技術を用いた洪水疑似体験が、防災意識の向上に大いに貢献できる可能性が示された (図-5)。



図-4 VR の概要

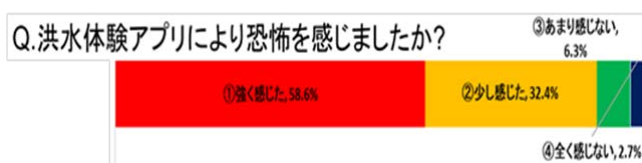


図-5 VR の概要

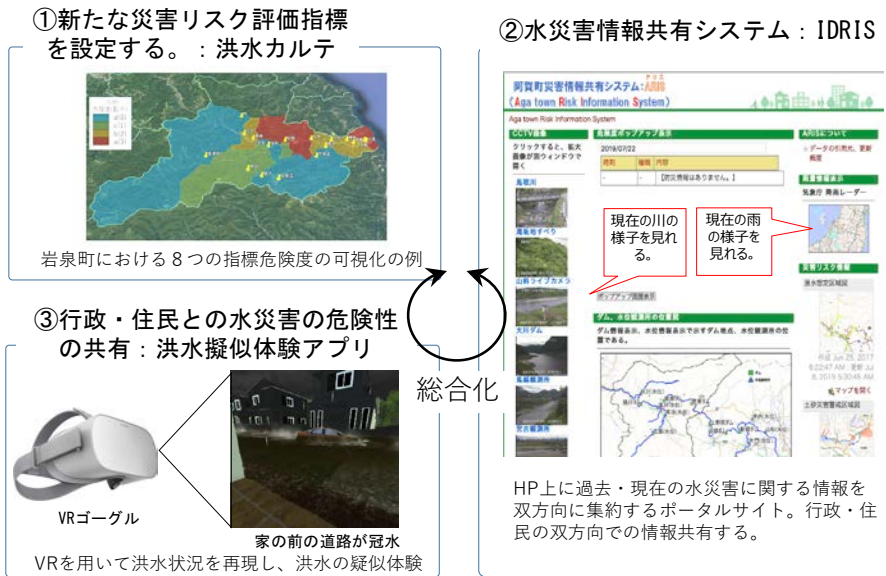


図-6 本個別課題の目標とこれまでの取り組みの対応関係

4. 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を設定する⁶⁾、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^{7) 8)}、に具体的成果が対応しつつある(図-6)。次年度以降は、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支援する取り組みが必要となる⁹⁾。

次年度以降は、研究協定を締結する新潟県阿賀町、岩手県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

令和元年度においては、①新潟県阿賀町におけるIDRISの実証実験の実施と東日本台風時の検証を行い、IDRISの問題点と改良点の抽出を行った。②災害が自らの身に降りかかるものとする「水害我がこと感」を醸成するVR技術の開発を行い、水災害の危険を伝達する効果を確認した。

参考文献

1) 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM : <https://top-aris.com/> (2020年3月閲覧)

2) 新潟県東蒲原阿賀町：阿賀町ホームページ、<http://www.town.aga.niigata.jp/gyousei/kouhou/index.ht>

ml (2020年3月閲覧)

3) 国立研究開発法人防災科学研究所:e コミュニティ・プラットフォーム、<https://ecom-plat.jp/> (2020年3月閲覧)

4) ソーシャルオープンプラットフォーム利用推進フォーラム：ソーシャルオープンプラットフォーム利用推進フォーラム、<https://ecom-plat.jp/> (2020年3月閲覧)

5) 国立研究開発法人土木研究所 ICHARM : <https://idris-iwaizumi.jp/index.php/> (2020年3月閲覧)

6) 栗林大輔、崔国慶、大原美保、藤兼雅和：浸水過程を考慮した地区単位での簡便な洪水リスク評価システムの開発、地域安全学会梗概集 No.44、pp.35-38、2019.5

7) Miho OHARA,Daisuke KURIBAYASHI,Masatoshi DENDA,Yoshimasa MOROOKA,Tsuyoshi KOYABU:Disaster Awareness Improvement by Flood Simulated Experience in Virtual Reality,World Bosai Forum2019,Poster Session,2018

8) 栗林大輔、大原美保、小藪剛史、澤野久弥：イメージ映像での洪水疑似体験による洪水意識及び減災行動意欲向上に関する考察、日本災害情報学会誌「災害情報」Vol.18No.1、pp.35-45、2020

9) 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. 3 防災・減災活動を支援するための、効果的な防災・災害情報の創出・活用及び伝達手法の開発

2.3.2 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（水害対応における総合化手法の開発）

担当チーム：水災害研究グループ
研究担当者：藤兼雅和、大原美保

【要旨】

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

キーワード：災害対応 危機管理 訓練 災害対策本部

1. はじめに

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

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

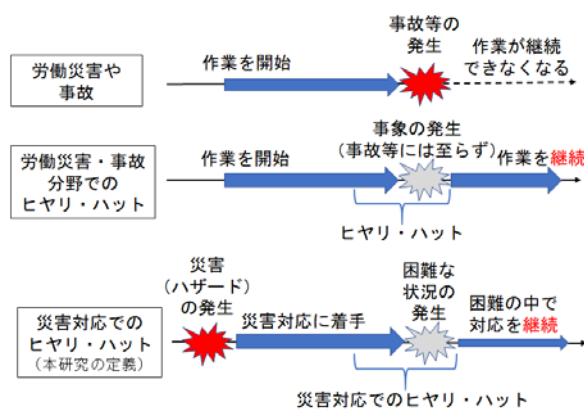


図-1 本研究における災害対応ヒヤリ・ハットの定義

2. 過去の災害対応事例から学ぶ必要性

近年、水害が頻発しているが、全国の1,724（令和元年12月1日現在）の市区町村の中でみれば、実際の災害対応が生じる市区町村は限られている。一般財団法人日本防災・危機管理促進協会の調査¹⁾によれば、2000年から2014年にかけて災害救助法が適用されたことがある地方自治体は、全自治体の25%である。また、国土交通省の「防災に関する市町村支援方策に関する有識者懇談会」²⁾によれば、約4割の市町村が、過去10年間に災害復旧事業を実施し

た回数が1回以下である。しかしながら、災害はいつどこで発生するかわからないため、過去の自他の自治体の災害経験から学び、次なる災害に備えておく必要がある。一方で、自治体の職員が災害対応を経験したとしても、近年、市町村の職員数が減少しており、災害対応の経験を自治体内で継承していくことが困難になっている。平成28年地方公共団体定員管理調査³⁾によれば、全国的な人口減少に伴い、地方公共団体の総職員数は、平成7年から22年にかけて連続して減少しており、対平成6年比で約17%減である。

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

3. 水害対応ヒヤリ・ハット事例集の作成

3.1 水害対応ヒヤリ・ハット事象の収集方法

本節では、水害対応ヒヤリ・ハット事象の収集方法について記す。まず初めに、2000年以降に、「激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する

法律」に基づく激甚災害及び局地激甚災害の指定を受けた風水害イベントをリストアップした。なお、2014年9月11日の札幌市での豪雨は激甚災害には指定されていないが、北海道内で初めて大雨特別警報（浸水害、土砂災害）が発表され、札幌市として33年ぶりとなる市災害対策本部を設置し、札幌市として災害対応の検証も行ったため、対象に含めた。

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

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

3.2 ヒヤリ・ハット事象のデータベース化

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

- ・事象（どのような事故、失敗が発生したのか）
- ・経過（どのように失敗が進行したか）
- ・原因（失敗を起こしたと推定される原因）
- ・対処（失敗に際して行った応急措置）
- ・総括（失敗の再発を防ぐための総合的な見解）
- ・知識化（今後失敗を繰り返さないための教訓）

表-1に、上記の考え方に基づいて抽出・整理した水害対応ヒヤリ・ハット事象の一例（抜粋版）を示

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

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

表-1 常総市における事象記述の例（抜粋版）

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

3.3 水害対応ヒヤリ・ハット事象の分類

3.2の手順に従い、水害対応ヒヤリ・ハット事象のデータベース化を行った結果、約500件の事象が抽出された。国土交通省の交通事故や鉄道事故、海

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

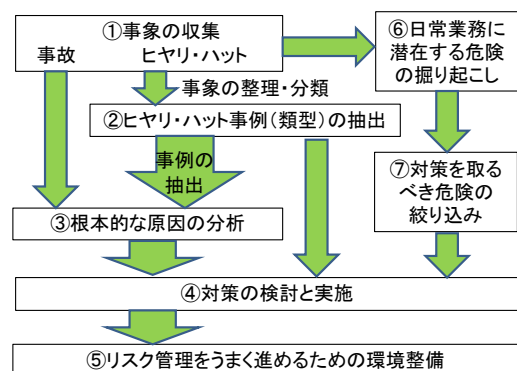


図-2 リスク管理の手順
(文献5)の図に筆者が加筆)

3.4 水害対応ヒヤリ・ハット事例集の作成

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

図-3に、作成した事例集の画面イメージを掲載する。各事例の説明は、A4の見開きページとし、左側

には、事例として取り上げた災害対応事象の概要、経過状況、原因、結果を記した。これらはデータベースに基づき、紙面のスペースも鑑みて、分かりやすく説明を記載したものである。左側の紙面の末尾には、取り上げた事象と類似しているその他の事象の紹介も行った。具体的には、類似の事象が見られた他市町村の名称や災害名、災害対応検証資料の名称を挙げている。右側の紙面には、紙面に取り上げた事象及び類似の事象から示唆された教訓や必要な対策例、解説を記述した。作成した事例集は、2020年出水期前までに土木研究所 ICHARM の HP (http://www.icharm.pwri.go.jp/index_j.html) に掲載する予定である。

表-2 事例集に掲載したヒヤリ・ハット事例

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



図-3 事例集の紙面の例

4. まとめ

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

今後は、事例集を活用した自治体職員の能力向上のための訓練等の手法についての検討も予定している。なお、ヒヤリ・ハット事象は、当事者や当該組織内で問題として認識されなければ、事象としては抽出されない。今回は、自治体から公表されている災害対応検証報告に基づいて事例を抽出しており、これらの報告書内では取り上げられていないことは網羅できていない可能性もあることに留意しておく必要がある。

謝辞

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

参考文献

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