

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～33 年度

プログラムリーダー：水災害研究グループ長 澤野久弥

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・激甚化してきており、地上気温は 21 世紀に渡って上昇、多くの地域で極端な降水が強くなり、頻繁となる可能性も予測されている。(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からの答申「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ている。

さらに、同じく、社会資本整備審議会からの答申「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) が策定されたところである。

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べきとされている。

これらのことから、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開発が必要である。

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研究の範囲とし、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、平成 29 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、平成 29 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

途上国等の降雨観測データの不足する地域において、降雨の空間分布の把握に優れた衛星データを雨量の定量的把握に優れた地上雨量計データで補正する方法や、WRF 等の気象モデルを構築し降雨現象の把握・予測計算を一連で行う方法について検討した。これらの研究成果を活用し、2017 年 5 月に大規模な洪水・土砂災害が発生したスリランカ南西部を対象に、リアルタイム洪水予測シミュレーションの構築及び洪水予測データ等の試験配信を行った。

また、洪水到達時間が短い一方で、洪水予測のシステムの整備が遅れている我が国の中間地河川を対象に、速やかな洪水予測システムの整備・普及を目指す観点から、簡便なモデルである合理式モデルと RRI モデルを実流域に適用するとともに既往の出水の再現性やリードタイムを評価し、洪水予測手法としての適用性について検討した。さらに、2017 年 7 月の赤谷川で見られたような土砂・流木が混在した洪水の氾濫特性を再現するため、土砂と流木の流入及びそれらの洪水流に伴う挙動を解析的に取り扱う手法を開発し、現地の洪水現象を再現した。

加えて、北海道旭岳周辺において、冬期に日本海側から進入する降雪に対し、風衝斜面及び風背斜面に跨がる範囲の積雪分布を航空レーザ測量により計測した。樹林帯においては尾根の遮蔽により風背斜面の積雪が少ないこと、森林限界以上の高山帯においては遮蔽による影響が明瞭ではないことを示した。

(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

時空間的な渇水（土壌水分量）のモニタリング・季節予測を行う上で、マイクロ波輝度温度を同化する陸面データ同化システムがあり、代表的な陸面データ同化システムとして植生動態－陸面結合データ同化システム（CLVDAS）が開発されている。本研究では、最も渇水による影響を受け易い地域の一つとされているブラジルの北東部を対象に CLVDAS を適用し、2005 年に発生した歴史的な渇水現象を再現することにより、CLVDAS のブラジルの渇水評価への有効性を示した。

また、地球温暖化に伴う降雨条件の変化による東南アジア諸国のうちタイのチャオプラヤ川、メコン川、インドネシアのソロ川等を対象に渇水リスクを評価した。将来の降雨条件については、RCP8.5 シナリオによる GCM 計算結果に降雨バイアス補正手法等を行なったデータを使用し、BTOP 流出モデル及び天水による米作作付け面積モデルを使用することにより、将来における渇水リスクとして灌漑面積の変化を算定した。

さらに、水災害リスクの評価や評価に基づく強靱な社会構築手法の検討を進めるため、水害に強いまちづくり施策に注目し、国内外での既存事例のレビューを行った。国内の事例では「浸水を考慮した居住誘導・水害対策への助成・融資」、「開発行為制御、建築規制」、「情報公開・情報提供・地区計画・届け出」、という 3 つの施策、海外においては「情報公開・情報提供・建築規制」、「保険加入義務や対策実施時の保険料率融通」という施策をレビューした。

(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

前年度に基礎仕様を検討した「ICHARM 災害リスク情報共有システム（ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS）」のプロトタイプとして、新潟県阿賀町での利活用を想定した「阿賀町水災害情報共有システム（ARIS）」を試作した。試作に先立ち、阿賀町に関連する既存の防災情報共有システムについて整理した。ARIS 試作後、阿賀町の防災関係者にアンケートを行い、地区防災への有用性を確認した。

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
SAWANO Hisaya

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 characterize 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 second year of this program (FY2017), we proceeded (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 methods will be used 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, RRI model, IFAS, national resilience, risk information system

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、江頭進治、原田大輔、中村要介

【要旨】

近年、日本各地で未曾有の規模の洪水が発生し、多数の死者・行方不明者等を含む甚大な被害が発生している。このような状況において、安全な避難誘導體制の強化が求められており、その有効な方策の一環として洪水予測システムの導入により避難のためのリードタイムを確保することが考えられている。一方で、既往の出水時の水位・流量等データの入手が困難な中小河川等においては、流出モデルの適用が困難であることが課題となっている。このため、本研究においては比較的パラメータの少ない合理式モデル及びRRIモデルを用いることとし、パラメータの標準値を設定することによる洪水予測手法を提案した。ここでは、近年発生した洪水を対象として、提案した方法の適用性について検討した結果を報告する。

キーワード：中山間地河川、合理式、RRIモデル、リードタイム

1. はじめに

2016年8月台風10号により、岩手県小本川流域において発生した洪水災害では、流域全体で死者19名、行方不明者2名の犠牲者を出している。同様の災害は、2017年7月の九州北部豪雨災害、2014年8月豪雨等においても見られており、近年中山間地における水災害が顕在化している。

大河川においては洪水予報や水位周知が行われているものの、規模の小さい中山間地河川については、洪水予測はおろか水位観測も行われていない河川が多く、洪水に対する適切な避難を誘導するトリガー情報が不足し、多くの住民が洪水リスクに曝されていると考えられる。現在、国土交通省を中心に、中小河川を対象とした危機管理型水位計（洪水時の水位観測に特化した低コストの水位計）の整備が進められているが、降雨流出時間が極めて短く水位上昇速度の大きい中山間地河川では水位の周知だけでなく、降雨予測情報に基づく洪水予測情報の提供が重要と考えられる。

一方で、洪水予測を行うためには、専門的な知識を要する流出モデルの構築や降雨等データの出入力・演算をリアルタイムで行うシステムが必要である。また、出水に関する既往のデータや河道断面等のデータが不足している場合が多く、これが洪水予測導入の障害になっている。

このような状況を踏まえ、データ不足を考慮した中山間地河川における洪水予測手法を提案し、現地河川を対象とした検証を行っている。

2. 中山間地用洪水予測システムの概要

2.1 洪水予測システムの構成

本洪水予測手法を稼働させるための洪水予測システムは、図-1に示すとおり「降雨データインポート」、「降雨流出解析」および「流量－水位変換」の3つの部分から構成される。

降雨データインポートでは、現時刻までの実績雨量と予測雨量を取得し、降雨流出解析モデルに入力できるようにフォーマット変換を行う。

降雨流出解析では、降雨データを用いて洪水予測対象地点の河道断面における流量を算出する。降雨流出解析モデルとしては、本手法では合理式¹⁾とRRIモデル²⁾を提案している。また流量－水位変換については流量観測に基づくH-Q式もしくは等流近似により作成されたH-Q式の使用を想定している。

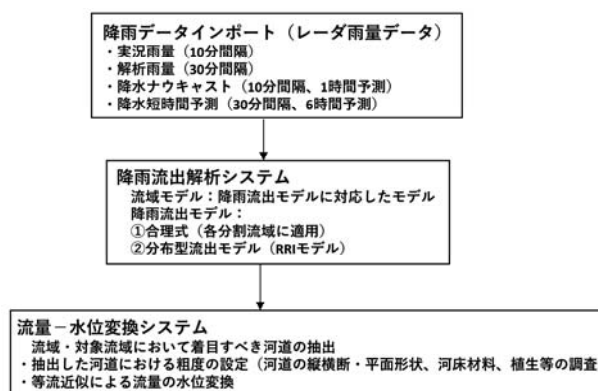


図-1 洪水予測システムの構成

2.2 リードタイム

中山間地河川における洪水予測システムの有効性を評価する指標として、リードタイムを用いることとする。ここで、リードタイムとは、河川水位が危険な状態（例えば、氾濫危険水位や堤防の整備が十分でない場所では堤防越水が発生する水位や氾濫原の地盤高に達する水位等を超える状態）に達すると予測された時刻とそれを予測した時刻の時間差もしくは実際に危険な状態に達した時刻と予測した時刻の時間差の短い方と定義する。沿川住民の避難に要する時間を確保するためには、危険な状態をより早期に予測して、リードタイムをできるだけ長く確保することが有効である。例えば図-2において、建物床高に水位が達し、洪水被害が発生し始める水位を危険な状態の水位とすると、14:00 時点において 19:30 頃に、この水位に達することを予測しており、実際に水位が建物床高に達したのは、20:00 であるので、この場合リードタイムは5時間30分となる。

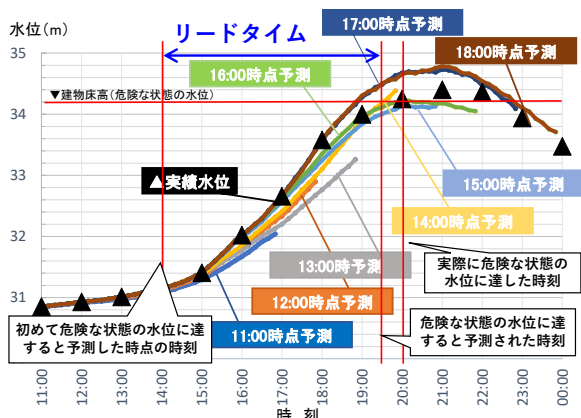


図-2 リードタイムの定義

3. 流量－水位変換

洪水による危険度を示すためには、流出計算等から得られる流量よりも、住民が観測結果や目視等により知覚できる河川水位に変換することが重要である。流量と水位の関係については、河川管理者による流量観測等により得られた H-Q 式の使用が基本となるが、過去に大きな出水が観測されていない場合や、流量観測が行われておらず流量－水位関係が作成されていない場合は、当該河道断面において等流近似等を行うことにより流量－水位関係を得ることができる。河道の横断面において、粗度の分布を考慮する場合は、断面分割法を用いることができる(図-3 参照)。係数をそれぞれ、 A_1 、 S_1 、 $R_1=A_1/s_1$ 、 n_1 のようにすると、断面の合成粗度 n は、各断面に

Manning 則を適用することにより求められる。

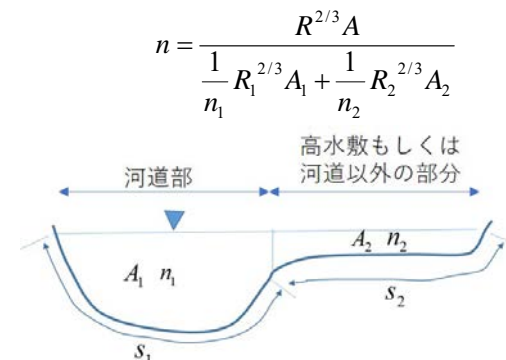


図-3 断面分割と合成粗度の算出

4. 降雨流出解析モデル

降雨流出解析モデルについては合理式と RRI モデルの2つのモデルを取りあげる。合理式は、斜面流出を主体とした集中型モデルであり、パラメータ調整等の扱いが容易であり、流域の土地利用に応じてパラメータの標準値が提案されている。しかしながら、緩勾配の流域には適さず、前期降雨を評価できない等、対象流域や対象洪水が限定的である。一方、RRI モデルは分布型モデルであり、斜面流出のほか地中流も表現できるので対象流域は合理式よりも適応範囲が広いが、パラメータ調整等の取扱いは合理式に比べ簡易ではない。

4.1 合理式

合理式は、パラメータ調整が容易であり、出水履歴が入手できず、既往洪水によるパラメータ調整が困難である中山間地河川にはおいては、有効な手法の一つと考えられる。以下に合理式モデルを用いて時系列雨量データから対象地点の流量時系列データ(流量ハイドログラフ)を得る方法について述べる。

(1) 流域分割・雨量データ作成

流域全体の雨量の空間分布を考慮できるように流域を概ね50km²以下になるように分割し、分割流域ごとに平均雨量の時系列データを作成する。

(2) 分割流域の流量時系列データの算出

時系列雨量データからそれぞれの時刻ごとにピーク流量式と洪水到達時間式(角屋式²⁾)から流量と洪水到達時間を求め(図-4参照)、それぞれの時刻から洪水到達時間後の時刻におけるピーク流量をプロットする。各プロットの包絡線を結んで各分割流域ごとの流量時系列データを得る。

角屋式の流域特性によって定まる係数(C)については、山林の値である290を基本とする。流出係数(f)は、河道計画検討に用いられる山林の値である0.7を

標準値として設定した。

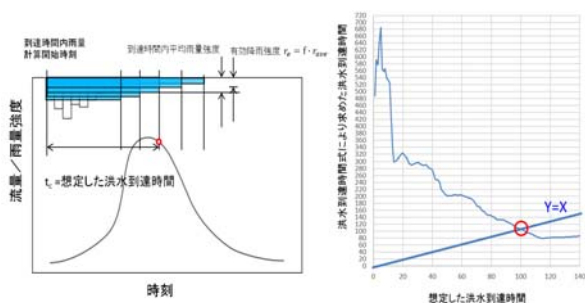


図-4 洪水到達時間の算定方法

(3) 分割流域の流量の合成

各分割流域の流量ハイドログラフを洪水の流下時間を考慮して合成する。流下時間の算定には、クラークヘンズ式⁴⁾を用いる。

(4) 合理式による解析事例

図-5に合理式の洪水解析事例を示す。本解析は、1kmメッシュ解析雨量・降水短時間予報GPV5)の雨量データを用いて、2016年8月の台風10号豪雨により多数の犠牲者が出た小本川乙茂地区地点における水位を予測したものである(流量から水位の変換は等流近似を用いた)。建物床高を被害が発生し始める時刻とすると、12:00時点で17:20ごろに建物床高に達することを予測しており、既往の調査では18:00頃に建物床高に水位が達したとされているので、リードタイムは5時間20分ということになる。本事例では降雨の予測精度が高かったことにより、比較的早い段階から危険な状態の水位に達することを予測できたと考えられる。

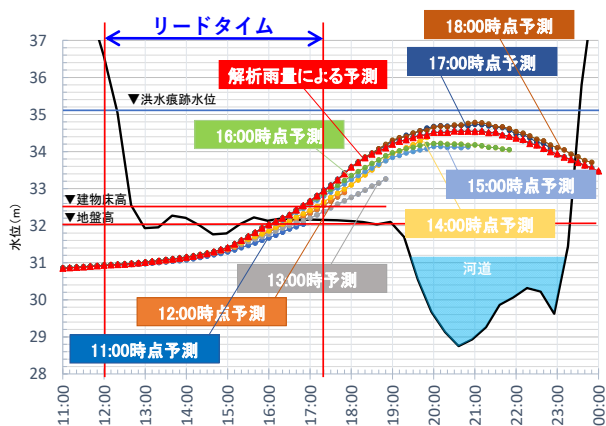


図-5 合理式による水位予測事例

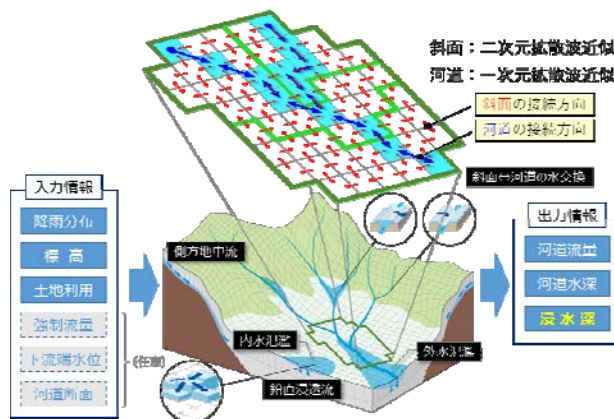
4.2 RRIモデル

RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルは降雨を

入力条件とし、河道流量から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できる分布型モデルである。以下に、このモデルの中小河川洪水予測への適用について述べる。

(1) RRIモデルによる流出解析

RRIモデルは、国土地理院のHPよりダウンロードできるメッシュ標高データを用いて表層地形を表現し、降雨流出も平面二次元流れとして解析するものである。そのため、降雨流出特性をメッシュ単位で表現でき、降雨の空間分布の影響も考慮できる(図-6参照)。斜面流出過程については、山地のように側方地中流が卓越する区域と平地のように鉛直浸透流が卓越する区域を土地利用条件等から選択することができるが、中山間地河川では流域の大半が山地であると考えられるため、ここでは土地利用の分類はすべて山地として取り扱っている。本モデルでは、



斜面や河道の流出過程は移流項を省略した運動方程式において、Diffusion wave 近似によって追跡され、洪水氾濫域と河道との水交換も考慮されている。

図-6 RRIモデルの概念図

表層土壌に係るパラメータについては、当面の標準値を以下の通り設定した。なお各河川においては、出水を経験する度にパラメータ調整を行い、より適切な値とすることを目指すこととしている。

- $S_d = 0.5[m]$ 土層厚
- $n = 0.030[m^{-1/3}s]$ 粗度係数(河道)
- $N = 0.6[m^{1/3}s]$ 粗度係数(斜面)
- $k_g = 0.01[m/s]$ 飽和透水係数(水平)
- $k_m = 0.0025[m/s]$ 不飽和透水係数(水平)
- $d_g = 0.30$ 飽和空隙率
- $d_m = 0.12$ 不飽和空隙率

河道メッシュの任意の地点において流量の出力ができるため、当該地点において水位流量関係式を作

成すれば、その地点の河川水位を算出できる。

(2) RRIモデルによる解析事例

図-7に2017年7月九州北部豪雨における花月川の花月水位観測所地点の水位予測結果を示す。

降雨データは1kmメッシュ解析雨量・降水短時間予報GPVを用いて、流量-水位変換は、既往の出水履歴から作成した。図-7によれば、観測水位がピークを迎える19:00より6時間程度前の12:30の時点の予測(図中⑤)以降から予測水位が上昇し始め、RRIモデルによる計算水位は観測水位とよく一致している。しかし、15:30までの時点では、予測時点から2時間程度先以降は下降に転じ、過小評価となっている(図中⑤~⑪)。これは、予測時点における予測雨量が実績雨量より小さかったためである。その後、予測雨量が豪雨を捉え予測雨量の精度が向上することにより、予測によるピーク水位やその発生時刻が観測値に近づいている。16:00時点の予測(図中⑫)で、19:00頃に氾濫危険水位を超えることを初めて予測しているが、実際に氾濫危険水位に到達したのは18:00であるので、リードタイムは2時間程度と言える。なお、小本川にRRIモデルを適用した結果では、リードタイムは5時間以上となっており、合理式と同様な結果が得られた。

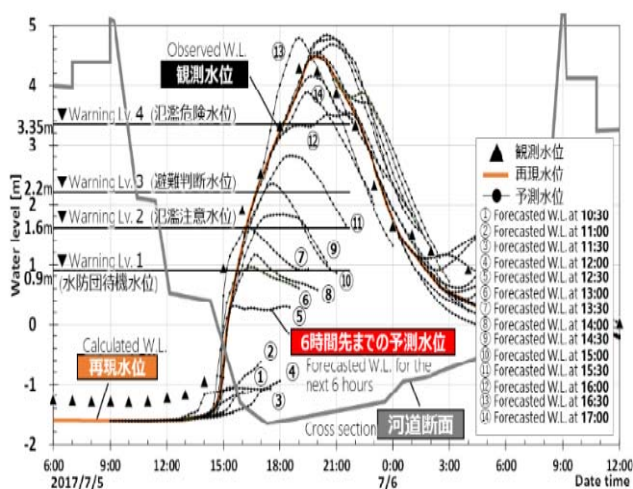


図-7 RRIモデルによる水位予測事例

5. まとめ

本研究においては、中山間地河川を対象に既往の出水等のデータが利用できない場合を想定した洪水予測手法を提案するとともに、リードタイムを確保する観点から、実河川において適応性を検討した。検証事例は少ないが比較的良好な結果が得られたと考えている。また、導入が進んでいる危機管理型水位計のデータを用いて、データ同化を行うことによ

り、洪水予測精度のさらなる向上が期待できる。

ここで提案した手法については、コンセプトを明確にし、河川管理者や有識者等から広くご意見等を頂けるよう手引書¹⁾をまとめた。今後は、本予測手法の実河川への試験的適用・検証を進めるとともに、避難勧告の発出等洪水危機管理の観点から予測精度の検向上を図ることを課題としている。

参考文献

- 1) 角屋睦、福島晟：中小河川の洪水到達時間、京大防災研究所年報第 19 号 1B、1976
- 2) T. Sayama, G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka, K. Fukami: Rainfall- runoff- inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin., Hydrological Sciences Journal 57.2, pp.298-312, 2012
- 3) 日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準(案) 同解説・調査編、pp.88、1998
- 4) 気象庁予報部：配信資料に関する技術情報(気象編) 第 193 号~1km メッシュ解析雨量・降水短時間予報 GPV の提供について~、2005
- 5) 伊藤弘之、江頭進治、菊森佳幹、原田大輔、中村要介、池内幸司：中山間地河川における洪水予測手法の開発、土木研究所資料第 4376 号、2018

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：筒井浩行、伊藤弘之、望月 貴文、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、宮本守、山崎祐介、Maksym Gussyev

【要旨】

渇水・洪水氾濫の時空間的なモニタリングや季節予測を行う上で、マイクロ波輝度温度を同化する陸面データ同化システムは有用である。代表的な陸面データ同化システムとして LDAS-UT が挙げられるが、その後植生の影響も併せて評価するため、植生動態モデルを結合した植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDas)が開発された。ここでは、CLVDAS の適用事例としてブラジルの渇水評価の可能性について検討した。ブラジルは、最も渇水による影響を受けやすい地域の一つであり、気候学的には、渇水に代表される経年的な極端な気候変動に対して脆弱であり、21 世紀後半の降水量不足と乾燥化による大きな影響を受ける地域と言われている。その結果、CLVDAS によるブラジルにおける渇水評価の有効性が示された。

キーワード：LDAS-UT、植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDas)、干ばつ、ブラジル

1. はじめに

渇水・洪水氾濫のモニタリング・季節予測や、これらの水災害による農業への影響評価など、水資源管理を統合的に行う上で、常時から土壌水分量を持続的に把握し続けることが重要になる。広域の土壌水分量を持続的に推定する上で衛星マイクロ波リモートセンシングが有効であるが、この方法では表層の土壌水分量のみしか推定することができない。一方、陸面モデルは表層のみならず根茎層の土壌水分量も評価することができるが、初期条件や入力気象フォーシング、特に降水量の不確実性により土壌水分量の推定精度が低下する可能性がある。そこで両者の欠点を補うよう陸面モデルによるモデルパラメータおよび表層から根茎層の土壌水分量の不確実性を、地表面におけるマイクロ波輝度温度を衛星データとシミュレーション値との同化により解消する陸面データ同化システムが開発された。

2. システム概要

地表面におけるマイクロ波輝度温度の同化に基づき広域かつ持続的な土壌水分量を推定する陸面データ同化システムとしては、東京大学(Yang et al.; 2007)において開発された LDAS-UT が代表的なものとして挙げられる。LDAS-UT は、陸面モデルとして Simple Biosphere model 2 (SiB2: Sellers et al; 1996)、地表面における表面散乱を評価する Shadowing 効果が

考慮された Advanced Integral Equation Model (AIEM: Kuria et al.; 2007)が結合されたマイクロ波放射伝達モデル(RTM)、また同化スキームとして Schuffled Complex Evolution 法(SCF 法)が適用された陸面データ同化システムであるが、その後、根茎層における土壌水分の吸収から植生の成長までの植生動態-水循環プロセスを評価するために、SiB2 における水文モジュールが改良された Hydro-SiB (Wang et al.; 2009)に植生動態モデルが組み込まれた陸面モデル EcoHydro-SiB (Sawada et al.; 2014)と植生における放射伝達過程を $\omega - \tau$ モデル(Mo et al.; 1982)を使用して評価する RTM が結合された植生動態-陸面結合データ同化システム(CLVDas: Sawada and Koike; 2014, Sawada et al.; 2015, Sawada and Koike; 2016)が開発された。本システムは、2 つのステップで構成されており、1 つ目のステップでは、EcoHydro-SiB・RTM における未知のモデルパラメータを SCF 法を用いたマイクロ波輝度温度の同化によって最適化する。さらに、このステップで見出した最適モデルパラメータを用いて、2 つ目のステップでは、表層から根茎層までの土壌水分量プロファイル・水ストレス・蒸発散量・葉面積指数(LAI)・植生水分量などの植生動態-水循環変数を粒子フィルタ(Genetic Particle Filter: Qin et al.; 2009)による衛星観測マイクロ波輝度温度の 5 日おきの逐次的同化により精度良く推定する。植生動態過程が大きく改良された本陸

面データ同化システムにより、これまで New South Wales(オーストラリア)・Vaira Ranch(米国)・Bayantsagaan(モンゴル)・Agoufou(マリ)を対象とした検証において、本システムの高い性能と推定精度を得ている(土壌水分表層および根茎層: RMSE $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ 以下・bias $0.045\text{m}^3/\text{m}^3$ 以下、LAI: RMSE $0.16\text{m}^2/\text{m}^2$ 以下、bias $0.13\text{m}^2/\text{m}^2$ 以下)。またアフリカ東部やアフリカ北部における渇水モニタリング・予測に本システムが有用であることが示唆されている。

3. システムの適用事例

ブラジル北東域において 2005 年に発生した 100 年に一度と言われた歴史的渇水(Lewis et al.; 2011)を対象に調査を行った。本調査では、ブラジル連邦共和国北東域 Ceará 州および Piauí 州を対象とした(図-1)。CLVDAS に GLDAS 気象データ(降水量、気温、短波・長波放射量、風速、気圧)と Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E)マイクロ波輝度温度を入力し、AMSR-E 衛星観測期間 2003 年 1 月 1 日から 2011 年 12 月 31 日に対応する期間を対象とした再現シミュレーションを行った。

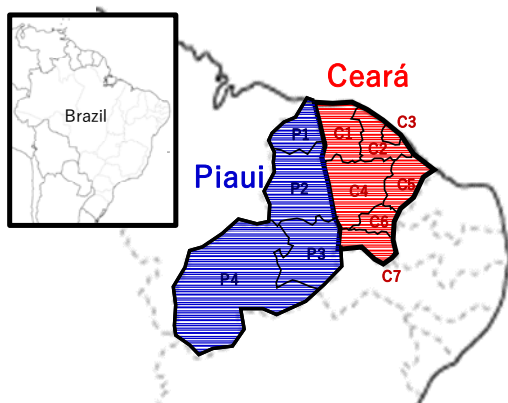


図-1 対象地域:ブラジル連邦共和国 北東域 Ceará・Piauí 州

図-2 は 100 年に一度と言われた歴史的渇水年である 2005 年と通常年の代表としての 2006 年の(a)降水量($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)と(b)CLVDAS により計算された LAI の月変化を示したものである。また図-3 は歴史的渇水年(2005 年)における降水量($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)・根茎層土壌水分量(SMC Root; m^3/m^3)・水ストレスファクター(-; 詳細は Sawada and Koike; 2014, Sawada et al.; 2015, Sawada and Koike; 2016 に記述されている)・LAI(m^2/m^2)の Standardized Anomaly (SA)指数の月変化を示したものである。なお SA 指数は、各物理量の様々な確率

分布関数を求めて、対数最尤法により評価指数が最小となる最適な確率分布関数を選定した上で確率分布が正規分布となるように変換し、その上で正規化された偏差($=\frac{x-\mu}{\sigma}$, x:変数, μ :平均値, σ :標準偏差)

をとったものである。図-2 の降水量に見られるように、通常年の 2006 年は 2 月から 4 月にかけて降水量が多いが、渇水年(2005 年)の 2 月と 4 月は降水量が少ない。この降水量の減少が 4 月以降の渇水年 2005 年の LAI の減少に影響を与えているものと考えられる。図-3 に示すように降水量が土壌水分として根茎層に浸透し植物の根から吸収される。そして通常年よりも少ない水の供給が水ストレスとなって植物の成長に影響を与える。このプロセスは、図-4 における SA 指数の負のピークに明瞭に示されている。8 月にあった降水量の負のピークが、根茎層土壌水分量・水ストレスファクターでは 1 カ月遅れた 9 月となり、LAI では 11 月までずれ込んでいる。すなわち穀物の生産にとって最も重要な成長期から収穫期にかけて植生への影響が強まっていることが分かる。このように CLVDAS は、降水の根茎層への浸透と根からの吸収、そして穀物の力学的な成長を評価することのできるシステムであることが分かる。また図-5 に LAI とその 2003 年から 2007 年までの平均値との偏差(m^2/m^2)を示すが、ブラジル北東域における 100 年に一度と言われた歴史的渇水が発生した 2005 年における渇水傾向が分布として明瞭に現れ、また 2007 年にも渇水傾向が現れていることが分かる。

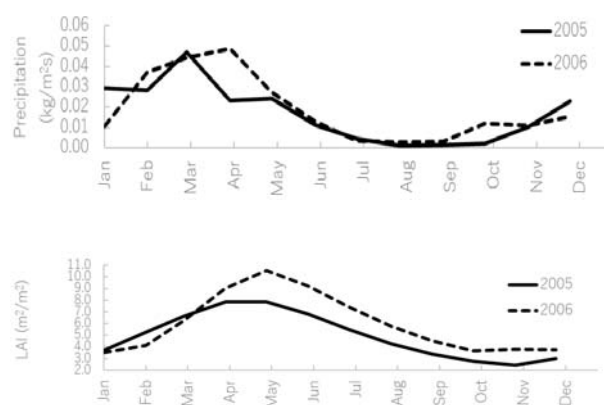


図-2 CLVDAS による(上段)降水量($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$:GLDAS 気象フォーシングデータを活用)と(下段)葉面積指数(LAI; m^2/m^2)の月変化:対象期間は歴史的渇水年である 2005 年と通常年 2006 年の 1 月から 12 月, 対象範囲はブラジル連邦共和国北東域の平均

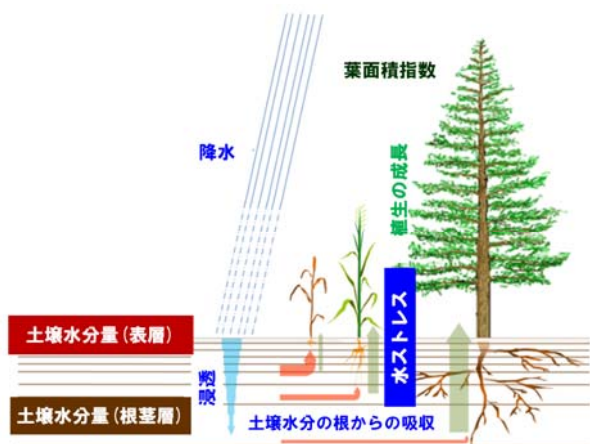


図-3 Eco-Hydrological 水循環

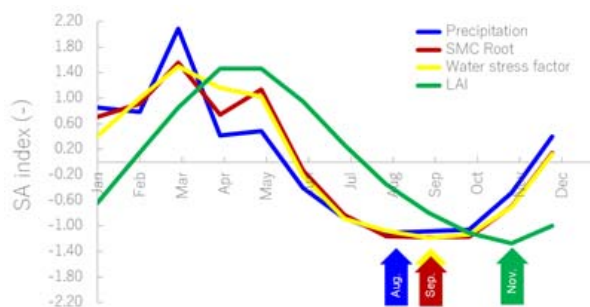
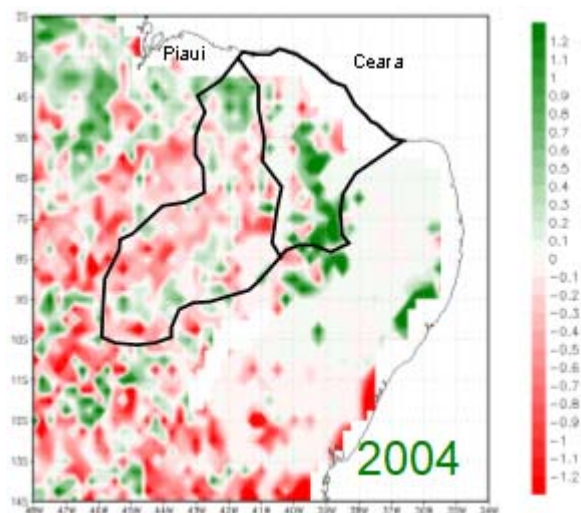
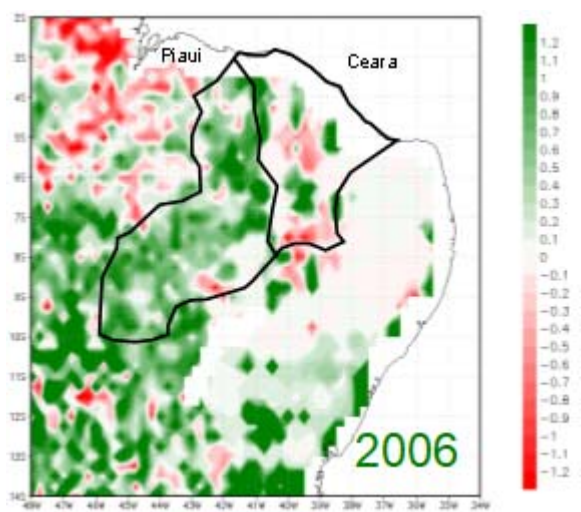
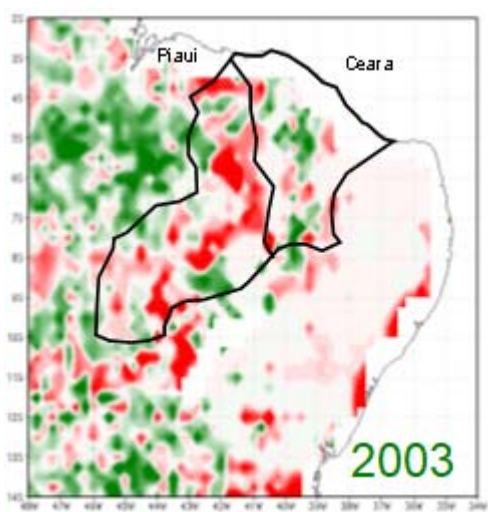
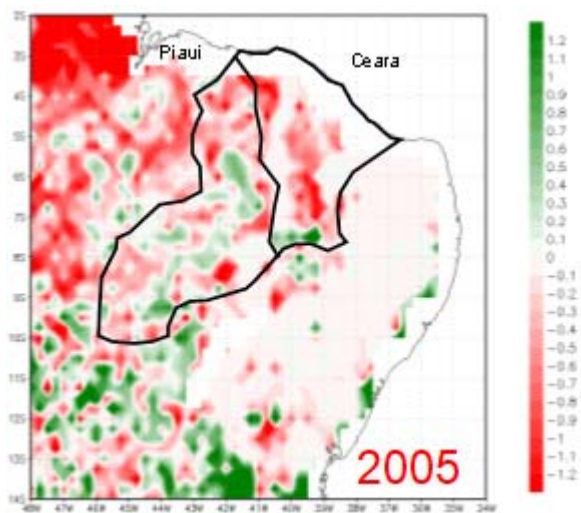


図-4 歴史的渇水年(2005年)における降水量(kg/m²s:GLDAS 気象フォーシングデータを活用)・土壌水分量(m³/m³)・水ストレスファクター(-)・LAI(m²/m²)の Standardized Anomaly(SA)指数の月変化:対象範囲はブラジル連邦共和国北東域の平均



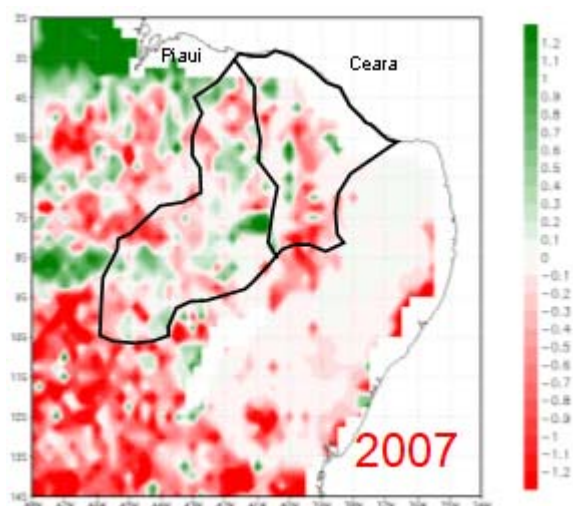


図-5 LAIとその2003年から2007年までの平均値との偏差(m^2/m^2)の分布図:9月から11月までの平均

4. まとめ

以上のように、CLVDASは、降水の根茎層への浸透と根からの吸収、そして穀物の力学的な成長を評価することができるシステムであり、また、そのシミュレーションを長期的に実施することによりブラジル北東域における渇水年を特定し、それを評価する上で有効なシステムであることが分かる。さらに世界銀行プロジェクト(Technical Assistance in Implementing a Pilot of Agriculture Drought Monitoring and Prediction)では、Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)衛星マイクロ波輝度温度を用いてCLVDASにより2012年から2016年まで続いた深刻な渇水の評価・検討を行い、CLVDASをコアとしたブラジル北東域渇水モニタリング・予測システムを開発する予定にある。本プロジェクトに係る調査の結果、州レベルからプランテーション・個人農家までが、渇水に対する高い危機感を持ちながら農業に従事している実態を理解し、同時に現在の粗い空間分解能(25kmグリッド)のCLVDASシミュレーションでは、個人農家1軒1軒への渇水情報として不十分であることを理解した。そこで本プロジェクトでは、個人農家1軒1軒へのCLVDAS渇水モニタリング・季節予測情報の提供を目的に、Rayleigh-Jeansの法則に基づくマイクロ波放射特性を用いたマイクロ波輝度温度の1km高空間分解能化を図る予定である。また、この高空間分解能化の確立は大きな意味を持っており、これまで空間分解能の粗さが問題となり適用することのできなかつた

日本の流域へのCLVDASの適用を可能とする。さらにCLVDASの日本の流域への適用は、渇水・洪水氾濫に対する対策と長期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を大きく前進させる可能性を持つ。

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) Sawada, Y., Koike, T. and Jaranilla-Sanchez, P.A. : Modeling hydrologic and ecologic responses using a new eco-hydrological model for identification of droughts, Water Resources Research, Vol. 50, pp.6214-6235, 2014
- 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, 2007
- 8) Qin, J., Liang, S., Yang, K., Kaihotsu, I., Liu, R. and Koike, T. ; Simultaneous estimation of both soil moisture and model parameters using particle filtering method through the assimilation of microwave signal, J. Geophys. Res., Vol. 114, D15103, doi: 10.1029/2008JD011358, 2009

2.1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：原田大輔、伊藤弘之、萬矢敦啓、郭山崎祐介、南雲直子、郭 栄珠、江頭進治

【要旨】

2017年7月の赤谷川の災害では、上流の山地域からの大量の土砂と流木の流入が被害を激甚化させた。本研究では土砂と流木の流入及びそれらの洪水流に伴う挙動を解析的に取り扱う手法を構築した。この方法において、上流から多量の細粒土砂が供給される条件での解析を行い、また、流木については、これを移流・拡散方程式に基づいて記述して、流木の挙動及びその堆積過程を解析した。その結果、上流から下流にかけての土砂分級現象も再現でき、これは現地の状況とも対応している。流木の挙動を考慮した場合には、これらの橋梁部への捕捉によって流路・河床変動及び洪水流の挙動への影響が顕著に見られた。

キーワード：洪水氾濫、河床変動、数値流体解析、土砂供給、流木、赤谷川

1. はじめに

2017年7月5日、梅雨前線に伴う豪雨により、九州北部地方、特に筑後川上流部の複数の支川では甚大な被害が生じた。ICHARMでは災害発生直後から数回にわたる現地調査を行い、以下のような知見を得ている^{1),2),3)}。筑後川右岸のいくつかの支川では、元々の流路の容量をはるかに超えて、谷底低地の一面を洪水流が流下していた。これらの支川においては、土石流や斜面崩壊によって大量の土砂や流木が谷底低地に流入し、被害を助長したと考えられる。このような甚大な災害は今後も国内外で頻発する可能性があり、適切な洪水対策、及びそれを支援する技術の開発が求められている。

本研究では、上記の現象を解析的に取り扱う手法の提案を行っている。特に、流木を伴う洪水流の挙動を明らかにするために、移流・拡散方程式に基づいた流木モデルを提案している。また、上流で生産された細粒土砂が大量に河道に供給された場合に、それらが下流の洪水流に及ぼす影響について明らかにする。これらの解析モデルを用いて、筑後川水系赤谷川で生じた洪水を対象として、本災害で生じた洪水流を再現する解析を実施する。

2. 解析モデル

2.1 解析の概要

赤谷川は約20km²の流域面積を持ち、筑後川との合流点から3.5kmほど上流の地点において乙石川が合流している(図-1参照)。被災後の乙石川には巨礫から細砂まで様々な粒径の土砂が堆積している。一方、合流点下流の赤谷川の主要な河床材料は砂であり、上流側では粗砂、下流



図-1 赤谷川の流域図に航空写真から判読した崩壊地の位置を重ねたもの(文献²⁾に加筆)

側では中砂から細砂が堆積していた(図-2参照)。ここでは、赤谷川と乙石川の合流点を上流端、筑後川との合流点を下流端として、その間の約3.5kmを解析対象区間とする。

初期流路の縦横断形状は、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(DEM)⁴⁾を用いて作成した。流量については、RRIモデル⁵⁾による降雨流出解析結果を用い、これを上流端の境界条件とした(図-3の実線)。なお、筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会では同出水について、大山川合流前のピーク流量を400(m³/s)、乙石川合流前のピーク流量を180(m³/s)と推定しており、図-3のハイドログラフ(乙石川合流地点)はこの結果と整合している。これらの条件下で、基本的に既存のモデル^{6),7)}を用いて、平面二次

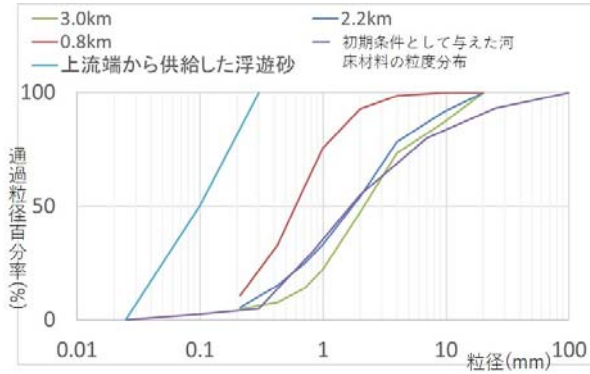


図2 赤谷川の土砂粒度分布及び解析条件として与えた粒度分布 (凡例の数字は筑後川合流点からの距離)

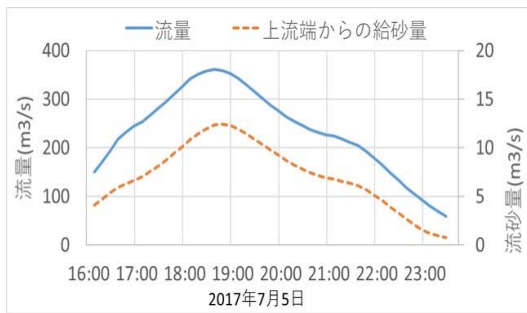


図3 上流端で与えた流量ハイログラフ及び上流端から供給した浮遊砂量

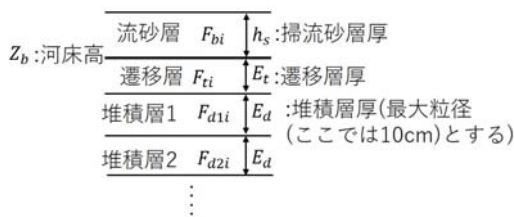


図4 流砂層, 遷移層, 堆積層の概念図

元洪水流解析及び河床変動計算を行っている。なお、氾濫域の大半が田畑であることを考慮して、粗度係数は解析区間の全域で0.05とした。

赤谷川には多量の細粒土砂が堆積しており、図2から分かるように、その粒径は上流から下流にかけて細くなっている。これらの分級現象を表現するためには、流砂の供給条件の設定及び河床の粒度分布の決定方法が重要となる。そこで、河床材料の粒度分布については、掃流砂層厚を江頭らの式⁸⁾(1)によって評価する。掃流砂層と遷移層における各粒径階の砂粒子の質量が保存されるよう、竹林らの方法⁹⁾に基づいて、式(2)~(5)により粒度分布を決定する。

$$\frac{h_s}{d} = \frac{1}{\bar{c}_s \cos \theta \tan \phi_s - \tan \theta} \tau_* \quad (1)$$

$\partial z_b / \partial t > 0$ の場合 (河床上昇時)

$$\bar{c}_s h_s \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{bi} \frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bi}}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{bi} \frac{\partial E_t}{\partial t} \quad (3)$$

$\partial z_b / \partial t < 0$ の場合 (河床低下時)

$$\bar{c}_s h_s \frac{\partial F_{bi}}{\partial t} = -(1 - \lambda) F_{ti} \frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (E_t F_{ti})}{\partial t} = F_{ti} \frac{\partial E_t}{\partial t} \quad (5)$$

ここに、 h_s : 掃流砂層厚、 \bar{c}_s : 掃流砂層内の土砂濃度、 d : 掃流砂層の平均粒径、 τ_* : d に対する無次元掃流力、 θ : 流下方向の局所河床勾配、 ϕ_s : 土粒子の内部摩擦角、 F_{bi} 、 F_{ti} : 掃流砂層及び遷移層における i 粒径階の存在率、 λ : 空隙率 (0.4 とした)、 q_{bi} : i 粒径階の掃流砂量である。 F_{ti} 、 E_t については $\partial E_t / \partial t = \partial z_b / \partial t$ の関係に基づいて式(3)、(5)より導かれる。

掃流砂層と遷移層の概念は図4のようであり、 F_{di} 、 E_d については、多数の層を予め用意し、河床低下時に $|\partial z_b / \partial t| > E_t$ の場合に下位の堆積層を遷移層として用い、河床上昇時に $E_t > E_d$ の場合には堆積層を一つ追加する。掃流砂量式としては、式(5)と掃流砂の力学の整合を図るため、江頭ら⁸⁾の式を用いる。

$$q_{b*i} = \frac{4}{15} \frac{K_1^2 K_2}{\sqrt{f_a + f_f}} \tau_{*i}^{5/2} \quad (6)$$

ただし、 q_{b*i} : i 粒径階の無次元掃流砂量、 τ_{*i} : i 粒径階の無次元掃流力とした。式(6)中のその他のパラメータについては、文献⁸⁾と同じものを用いた。また、浮遊砂の浮上量式として、板倉・岸の式¹⁰⁾を用いている。

2. 2 河床材料の粒度分布と微細砂の供給条件

解析区間の初期河床の粒度分布としては、現地調査により得られた粒度分布を参照して、図2のように与えた。ここで、図1からも明らかなように、対象区間には多量の土砂が供給されており、特に細粒土砂の供給は顕著であった。そこでその影響を検討するため、解析区間の上流端では平衡流砂量の条件に加えて、次のように微細砂の供給条件を設定し、これを給砂している。¹⁾

崩壊・土石流による輸送土砂が本川沿いに堆積していることに着目し、堆積土砂の侵食に伴い微細砂が流出するものとする。すると、一箇所の崩壊もしくは土石流堆積領域から流出する微細砂量 q_{sw} は次式で表される。

$$q_{sw} = p_{fD} c_{*D} \left[-A \frac{\partial z_b}{\partial t} \right] = p_{fD} (q_{bx} l_y + q_{by} l_x) \quad (7)$$

ここに、 p_{fD} 、 c_{*D} : 堆積土砂における微細砂の含有率及び

土砂濃度、 A :堆積領域の面積、 z_b :堆積領域表面の標高、 q_{bx} , q_{by} :掃流砂の x , y 成分、 l_x , l_y : x , y 方向の堆積領域の長さ、である。上式(7)を基礎として、地形則を導入し、問題の単純化を図り、RRIモデル⁵⁾により算出した流量ハイドログラフに対応して微細砂の供給条件を設定している(図-3の破線参照)。ただし、微細砂の粒度分布は図-2のように定めた。

2.3 流木の解析モデル

河道における流木の挙動については、粒子法に基づく後藤らの研究¹¹⁾、流木を個別要素法を用いて表現し、これと平面二次元流れを組み合わせて解析する清水らの研究¹²⁾、流木を剛体として水流との相互作用を考慮して解析する中川らの研究¹³⁾など、優れた研究がある。これらの研究に対して本研究では、流木が多量に供給され、なおかつ激しい河床変動が生じる場を対象とした解析を行うために、取り扱いの容易な水深平均の移流拡散方程式を用いて流木の挙動を表現することにする。

式(8)~(11)について、著者らは河道における流木の侵食および堆積は、土砂の侵食及び堆積に対応して起こるとしてモデル化し、移流拡散方程式に対してこれらを導入すると共に、流木の橋梁への捕捉項を導入することによって、流木の挙動を記述している。これらの式と流木の河床への貯留方程式は、それぞれ以下のとおりである。

$\partial z / \partial t > 0$ の場合 (河床上昇時)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) \\ &- c_* \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y) \\ &- v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} C_{drf} r(t, x, y)$$

$$+ v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (9)$$

$\partial z / \partial t < 0$ の場合 (河床低下時)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{drf} u h}{\partial x} + \frac{\partial C_{drf} v h}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial C_{drf}}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial C_{drf}}{\partial y} \right) \\ &- c_* \frac{\partial z}{\partial t} r(t, x, y) \\ &- v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} r(t, x, y) + v_n C_{drf} p_b \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (11)$$

ここに、 C_{drf} :単位体積の流れに含まれる流木の濃度、 c_* :土砂粒子濃度、 S :単位面積あたりの河床に存在する流木体積、 v_n :障害物(橋梁)に対する鉛直方向の流速、 D :流木が存在する表土層の深さで、ここでは当面、流木の直径程度と考え、0.4mとしておく。 $r(t, x, y)$ について、河床低下時でも水深が浅い場合は流木の流水中への取り込みは生じず、河床上昇時でも水深が深い場合には流木の河床への堆積は生じない。 $r(t, x, y)$ はそのような現象を考慮したもので、ここではその限界値は水深が流木直径の2倍程度となる場合であると考え、 $r(t, x, y)$ を図-5のように与える。

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の流木の拡散係数であって、これらは流木の幾何学的スケールと流れの時空間スケールから定まるはずである。中川ら¹⁴⁾や後藤ら¹⁵⁾は実験により拡散係数を算出しているが、両研究の拡散係数の値は10倍程度異なっており、現状では適切な評価法が見当たらない。そこで当面、以下の式により与える。

$$\varepsilon = (\kappa / 6) u_* h \quad (12)$$

ここに、 κ :カルマン定数(0.4)、 u_* :摩擦速度である。

δ 関数は、障害物による流木の集積を表したもので、障害物のあるところ(位置 (x_i, y_i))では流木が捕捉されると考えて $\delta=1$ とし、それ以外では0としている。

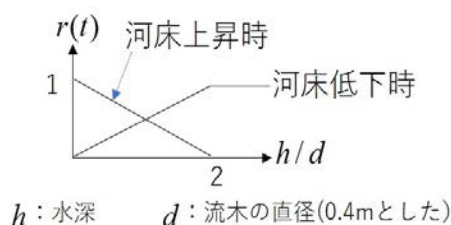


図-5 関数 r の与え方について

表-1 解析ケース

Case1	固定床 (河床変動なし)
Case2	移動床 (平衡流砂量を給砂 流木あり)
Case3	移動床 (図-3に基づいて浮遊砂を給砂 流木あり)

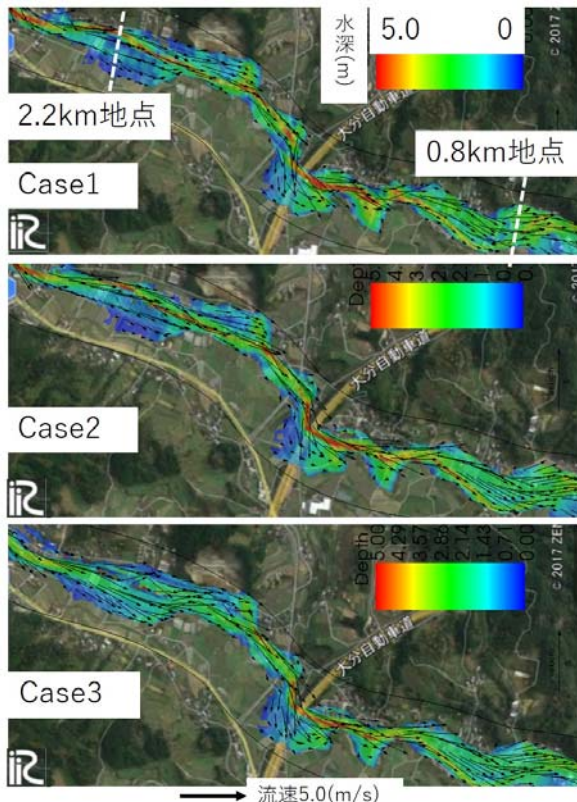


図-6 ピーク流量時の流況について各ケースの比較

ただし、流木は障害物で必ずしも捕捉される訳ではなく、例えば橋梁部では、流木長と径間の比、桁下クリアランスといった要素が流木の捕捉の有無に影響を及ぼすことが知られている。 p_b はこのような要素を考慮したもので、0から1の値を与える。

流木の初期・境界条件は、次のように設定している。計算区間の全域で計算開始時に $S=0$ として、上流端から一定の濃度で流木を供給し続けた。その濃度としては、計算格子(x,y 方向に各々10m)1 つにつき1本 (長さ30m、直径40cm 程度とした) が含まれる程度のものを想定して、計算区間上流端において常に $C_{drf}=0.01$ とした。

2. 4 解析ケース

表-1 に示す3 ケースの解析を行った。なお、Case2 では上流端から掃流砂、浮遊砂共に平衡流砂量を与え、Case3 では掃流砂については平衡流砂量を与えて、浮遊砂については図-3 のように与えている。

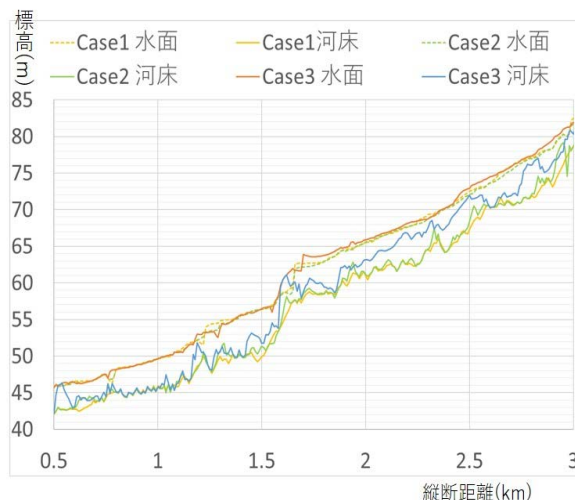


図-7 ピーク流量時における滞筋の水位及び河床高

3. 解析結果と考察

3. 1 洪水水位及び河床変動の結果

Case1-3 のピーク流量時の洪水流の解析結果を図-6 に示す。同じ時刻の滞筋部分における河床高と水位を抽出したものが図-7 である。

Case1 と Case2 とを比較すると、Case2 では図-7 から分かる通り河床変動が生じているものの、変動が小さいため、図-6 では大きな違いがない。一方で、Case3 では顕著な河床変動が生じ、その結果、洪水流が大きく変化しており、上流からの浮遊砂の供給が河床変動に大きな影響を与えていることが示唆される。

図-8 は、Case1 と Case3 について、ピーク流量時の2.2km 地点及び 0.8km 地点の2つの横断面を抽出したもので、図-9 は通水前と通水終了時の河床高を比較したものである。これらの結果から、Case3 では特に解析区間の上流側において、大量の土砂流入によって滞筋が埋まり、そのことによって滞筋の位置が右岸側に変化していた。このことは、定性的にはあるものの、被災後の航空写真や現地視察の結果と合致している。一方、解析区間の下流側では、右岸側の元の流路では洪水容量を処理できず、流れの主要部が左岸側へと移動したため、左岸側に比較的多くの土砂が堆積している。

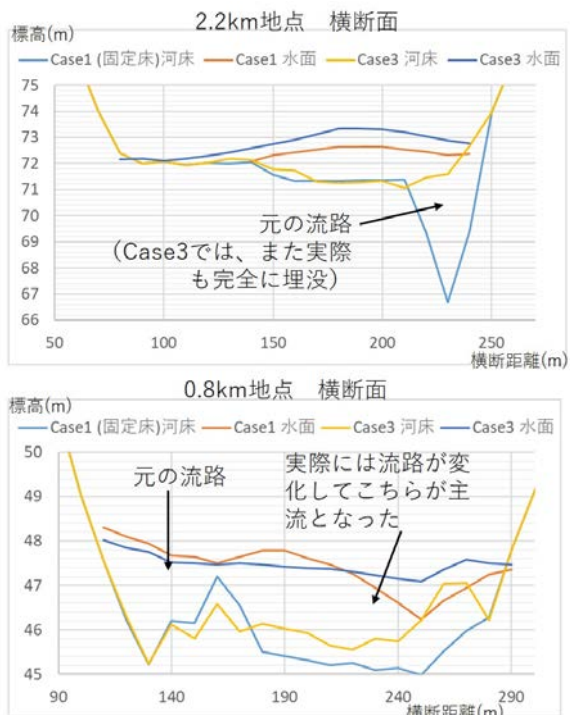


図-8 Case1,3について、横断面の比較

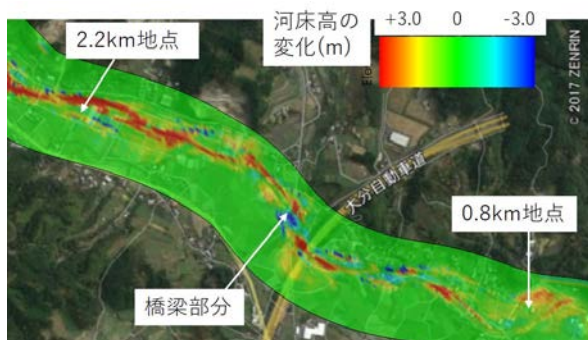


図-9 通水前後の河床高の変化(Case3)

表-2 解析区間の上流端と下流端の流砂量

単位：万m ³	上流端	下流端	差
掃流砂量	21.5	4.0	17.5
浮遊砂量	39.2	14.2	25.0
合計	60.7	18.2	42.5

3.2 土砂の堆積と分級の状況について

図-9 から分かるとおり、解析区間には全体的に土砂が堆積し、場所によっては3mを超える河床上昇が生じている。表-2 は Case3 における解析区間の上流端と下流端の流砂量について示したもので、解析区間には合計で42.5(万 m³)の土砂が堆積している。今後の測量等に基づいて河床変動量が計測されれば、これは本解析の検証データとなる。

また、流砂の分級について、現地で採取した土砂の粒度分布と解析結果とを比較したものが図-10 である。図-10 によれば、Case2 では上下流の分級現象が表現できていないのに対して、Case3 では実際と比較すると若干細かいものの、上下流での土砂の分級が生じた結果、その粒度分布は上流側で粗く、下流側で細かいという状況を表現することができている。

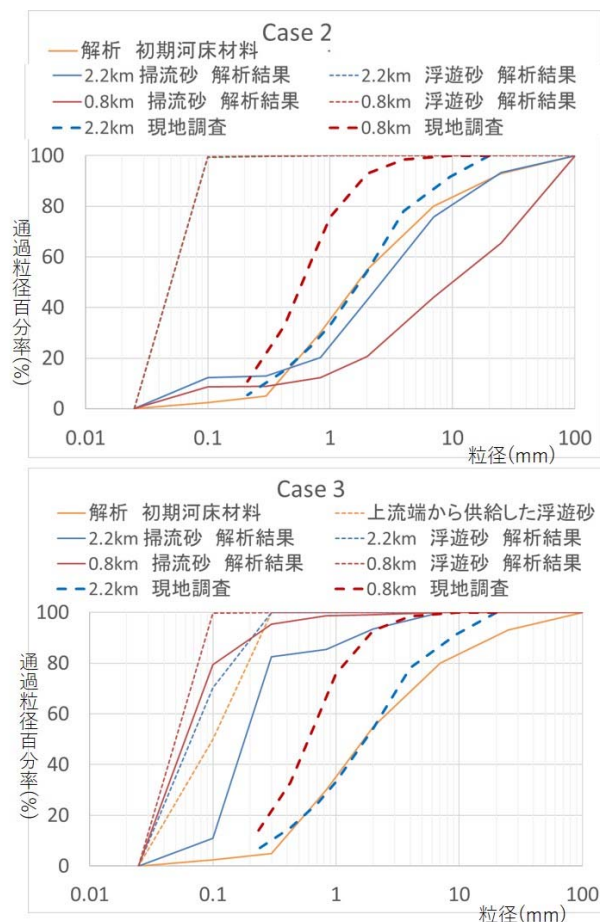


図-10 掃流砂、浮遊砂の粒度分布について解析結果と現地河川との比較

3.3 流木の堆積とその洪水流に対する影響

図-11 は、流木の堆積状況に関する計算結果、及び出水直後に撮影された航空写真¹⁶⁾である。これより、流木は主として解析区間上流側の主流路沿いや、橋梁部及びその影響で流れが迂回している付近に堆積している。航空写真では、主流路沿いの流木の堆積、橋梁部への大量の流木の集積、またその下流の拡幅部(高速道路の橋脚付近)の右岸側への多くの流木の集積が示されており、これは解析結果と一致している。

次に、橋梁部での流木の捕捉による流れへの影響について、図-6 の一部を拡大してピーク流量時の流況を Case2

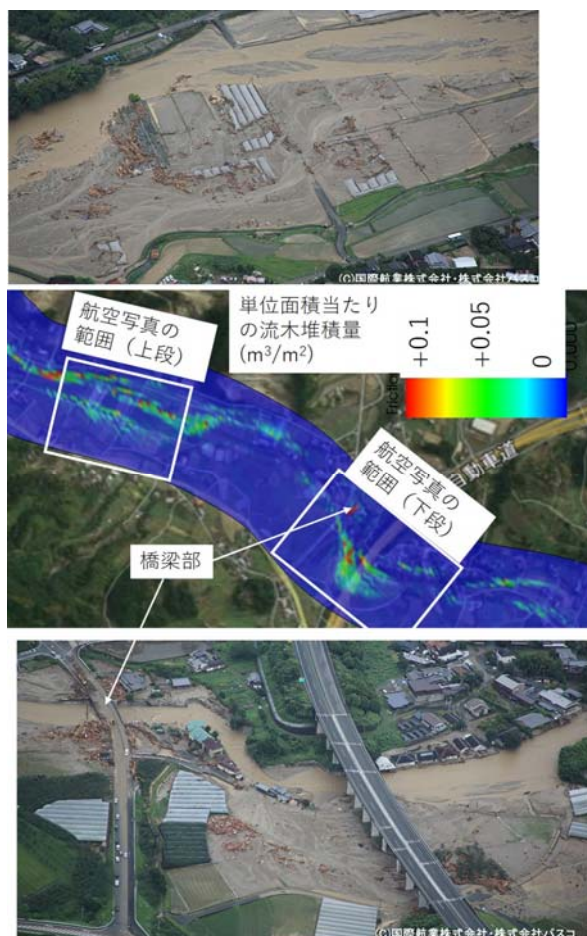


図-11 流木の堆積状況及び航空写真¹⁴⁾との比較

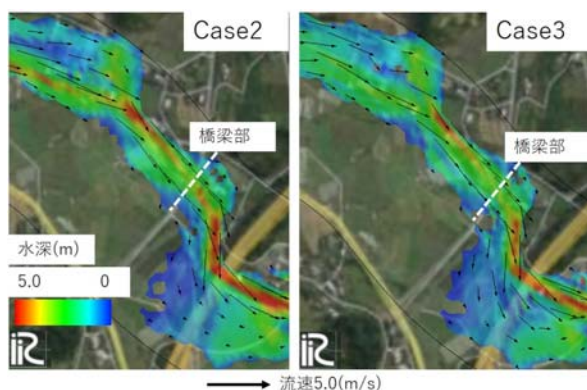


図-12 橋梁部の流木集積による流れへの影響

と3の結果を比較した(図-12参照)。ピーク流量時には既に解析上では橋梁部に最大量の流木が集積していた。そのためCase3ではCase2と比較して、橋梁部の上流側で水深・流速が共に減衰しており、そのことによる土砂堆積の影響が相当程度あったものと考えられる。また、橋梁部の下流側では流れの広がりに伴い、Case3ではより右岸側の流れが発達し、ここが水深の浅い土砂堆積域となったために、この領域により多くの流木が集積している。

4. 結論

中山間地河川における流砂・流木及び河床変動を伴う洪水流の挙動を明らかにするために、移流・拡散方程式に基づく流木モデルを提案し、上流端における流砂・流木の供給に対する下流の応答を解析し、次のような事柄が明らかにされた。

- ・赤谷川における河床変動及び洪水流の計算では、上流側からの浮遊砂の流入を考慮する場合に顕著な流路・河床変動が生じ、洪水流に大きな影響を及ぼしている。

- ・流木の流入量やその堆積過程については今後詳細に検討する必要があるが、これを考慮した場合には橋梁部への流木の集積が生じることによって、上下流の洪水流に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

参考文献

- 1) 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) Vol.74, No.4, I_925-I_930, 2018.
- 2) 南雲直子, 江頭進治: 2017年九州北部豪雨による赤谷川流域の土砂流出と被災状況, 日本第四紀学会 2017年九州北部豪雨災害調査報告発表要旨集, 2017.
- 3) 原田大輔・江頭進治: 流砂・流木を伴う洪水流の解析 —2017年7月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として—. 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_937-I_942, 2018.
- 4) 国土地理院: 基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 5) 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.
- 6) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士, 寺岡充夫: 給水・給砂の非定常性と植生の繁茂を考慮した砂州及び流路の形成水理条件, 土木学会水工学論文集, 第50巻, pp.973-978, 2006.
- 7) iRIC ソフトウェア: <http://i-ric.org/ja/>
- 8) 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.
- 9) 竹林洋史: 河川中・下流域の河道地形. 日本流体力学会誌 「ながれ」, 24.1: 27-36, 2005.
- 10) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments. Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 11) 後藤仁志, 酒井哲郎, 林稔: 粒子法による流木群の堰止め過程の Lagrange 解析, 水工学論文集第45巻, pp.919-924, 2001.
- 12) 清水義彦, 長田健吾: 流木形状を考慮した個別要

素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集第 51 巻, pp.829-834, 2007.

- 13) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹: 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第 38 巻, 1994.
- 14) 中川一, 高橋保, 池口正晃: 洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集第37巻, pp.379-384., 1993.
- 15) 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫: 津波による木材の流動, 海岸工学研究発表会論文集, 第29巻, pp.491-495, 1982.
- 16) 国際航業株式会社・株式会社パスコ: 災害調査活動への取り組み
http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201707_north_kyushu/index.html

2.1 洪水予測並びに長期の水収支解析の精度を向上させる技術・モデルの開発

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

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境保全チーム）

研究担当者：新目竜一，谷瀬敦，西原照雅

【要旨】

航空レーザ測量により，流域界である尾根を挟み風衝斜面及び風背斜面に跨がる範囲の積雪分布を計測し，計測された積雪分布と地形及び植生との関係を分析した．流域スケールにおいては，尾根の遮蔽効果により，風衝斜面と比較して風背斜面における積雪深が小さいことがわかった．しかし，高山帯における積雪深には，樹林帯における積雪深に見られたような尾根の遮蔽による影響が明瞭ではなかった．

同一範囲において，3カ年の積雪ピーク期に航空レーザ測量により計測した積雪分布と，地形及び植生に関する変数との関係について統計解析を行った．積雪深に対する地形及び植生に関する各変数の相対的な重要度を評価した．結果，樹林帯においては標高の重要度が最も高いこと，高山帯においては地上開度の重要度が最も高いことを示した．同一メッシュにおける2カ年の積雪深を線形回帰分析した結果から，積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似度が高いことを定量的に示した．

キーワード：ピーク期の積雪分布，樹林帯，高山帯，風衝斜面，風背斜面，統計解析，標高，地上開度

1. はじめに

積雪寒冷地においては融雪水をダムに貯留して夏にかけての水需要をまかなう等，水資源を融雪水に依存している．一方，融雪水は融雪出水や土砂災害の要因となる．このことから，融雪が始まる直前の積雪ピーク期までに山間部に蓄積された積雪分布を正確に把握することは，水資源管理及び防災の面で重要である．Yamada¹⁾は，北海道各地の山間部において積雪調査を行い，樹林帯においては，標高の増加とともに積雪相当水量が線形に増加することを示した．標高と積雪相当水量の線形の関係を用いれば，積雪調査の結果から山間部における積雪分布を簡易に推定できることから，ダム管理の現場において，流域における積雪包蔵水量を推定する手法に用いられている．しかし，冬季に直接入山する積雪調査は，雪崩等の危険を伴うことから，調査可能な地点が限られる．特に，冬期に立入りが困難である，森林限界以上の高山帯においては，積雪深の観測例が少なく，積雪分布の特徴が明らかになっていない．

近年，レーザ測量技術の発達により，広範囲における地表面を，高解像度で高精度に計測できるようになった．本研究では，北海道旭岳周辺の樹林帯及び高山帯が含まれる範囲において，積雪ピーク期に航空レーザ測量により積雪分布を計測した結果を用い，積雪深と地形及び植生との関係を分析し，山間部における積雪分布の特徴を明らかにすることを目的とする．

2. 風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の特徴

2.1 はじめに

近年，航空レーザ測量が普及してきたことから，航空レーザ測量により積雪分布を計測し，地形や植生との関係を分析した例が国内外で報告されている．西原ら²⁾は北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面において積雪ピーク期に積雪分布を計測し，樹林帯においては標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること，森林限界以上の高山帯においては地表面の凹凸を表現するパラメタである地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少することを示した．Zheng et al.³⁾は樹林帯において積雪期に実施した航空レーザ測量から得られた点群データを用い，樹林の開空率に類似した指標としてキャノピーの Penetration fraction を提案した．これを用い，樹林帯においては，Penetration fraction が大きくなる（開空率が大きくなることに相当）に伴い，積雪深が増加することを示した．Tennant et al.⁴⁾は，積雪深に最も影響するパラメタは，森林限界以下の範囲においては標高及び斜面方位であり，森林限界以上の範囲においては斜面方位であることを示した．Grünwald et al.⁵⁾は，高山帯においては標高，傾斜及び斜面方位が積雪深に強く影響するものの，その影響の程度は調査範囲によって異なり，すべての調査範囲に適用可能なモデルの構築は困難であったことを報告している．最近では，高山帯の尾根周辺における積雪分布を計測し，その特徴を分析した結果が報

告されている。流域スケールにおいては、尾根の遮蔽効果により風背斜面と比較して風衝斜面における積雪深が大きい傾向がある⁹⁾が、局所スケールにおいては、局所地形の影響を受けた地表面近傍の風の場が影響し、積雪分布は複雑になる。Mott et. al.⁶⁾は、荒天時における卓越風向と直角に交わる尾根の上には強い降雪をもたらす雲が形成されること、風衝斜面及び尾根近傍は風速が早いために積雪が堆積しにくく、風衝斜面に風速が遅く積雪が堆積しやすい箇所が形成されることを示し、尾根周辺の積雪分布はこれらの相互作用に支配されていることを示した。一方、Schirmer et. al.⁷⁾は、積雪期に数回発生する荒天時における卓越風向が、積雪ピーク期の積雪分布に強く影響し、積雪ピーク期には毎年類似した積雪分布のパターンが見られることを示した。このため、積雪ピーク期における積雪分布の特徴を分析することは、積雪深を支配している要因の特定及び積雪深を精度良く推定する手法の開発につながると考えられる。

日本列島は、中央部に日本海側と太平洋側を分ける脊梁山脈が位置し、積雪期の荒天時における卓越風向に対し風衝斜面である日本海側と風背斜面である太平洋側において、積雪分布の特徴が異なると考えられる。しかし、両斜面を含む範囲の積雪深を広範囲に計測し、その特徴を分析した例はない。そこで、北海道大雪山系旭岳において、流域界である尾根を跨ぐ範囲を対象に、航空レーザ測量により、積雪ピーク期に計測した積雪深と地形及び植生との関係を分析し、風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の特徴を明らかにすることを目的とする。

2.2 航空レーザ測量

図-1 に航空レーザ測量を実施した範囲を示す。測量範囲は、北海道大雪山系に位置し、石狩川上流域に位置する忠別ダム及び大雪ダムの流域に含まれる南北に2km、東西に15km、面積30km²の範囲である。図-2 に測量範囲の標高分布を示す。忠別ダム側の標高帯は概ね1100m~2300m、大雪ダム側は概ね1000m~2300mであり、旭岳山頂を含む。図-3 に測量範囲の植生分布を示す。これは、環境省の自然環境保全基礎調査を用い、植生を10分類したものである。特定した方法は後述するが、忠別ダム側の森林限界は標高1450m、大雪ダム側の森林限界は標高1700mである。忠別ダム側は測量範囲の23%が樹林帯、78%が高山帯に位置し、大雪ダム側は70%が樹林帯、30%が高山帯に位置している。測量範囲においては、積雪期の荒天時における卓越風向は北西から西である⁸⁾。このため、流域スケールにおいては、荒天時の卓越風向に対して、忠別ダムと



図-1 航空レーザ測量範囲

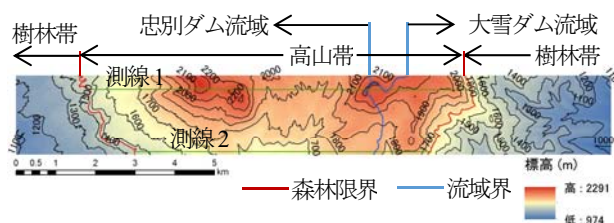


図-2 航空レーザ測量範囲の標高分布

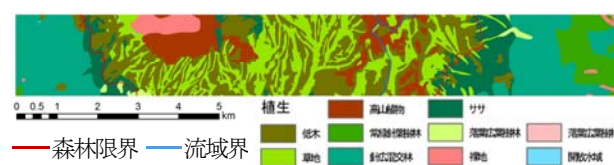


図-3 航空レーザ測量範囲の植生分布

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

航空レーザ測量は、無雪期である2008年9月12日~10月16日及び積雪ピーク期である2017年3月13日に行った。無雪期における測量データから地表面のDEM (Digital Elevation Model)を、積雪ピーク期における測量データから積雪表面のDEMをそれぞれ作成する。DEMの水平解像度は5mとした。積雪深は積雪ピーク期におけるDEMから無雪期におけるDEMを引いた値とした。なお、傾斜が55°以上の斜面には積雪が堆積しない⁹⁾ことが報告されていることから、当該斜面における積雪深は0とした。計測機器の誤差(±15cm)から算出した積雪深の計算精度は±21cmである。

2.3 積雪深の分析方法

樹林帯及び高山帯における積雪分布は特徴が異なる^{2,4,10)}ことから、測量範囲における森林限界を特定し、測量範囲を樹林帯及び高山帯に区分する。森林限界は、積雪ピーク期における航空レーザ測量から得られた点群データを用いて求めた、樹木のキャノピーのPenetration fraction³⁾から特定する。この点群データは、主に積雪表面及び樹木か

ら反射したものである。しかし、測量範囲のうち、森林限界以上の高山帯においては、植生の高さと比較して積雪深の方が大きく、植生は積雪下に埋没している。このため、高山帯においては、ほとんどのレーザが積雪表面から反射していると考えられる。Penetration fraction は、このような点群データの性質を利用し、水平解像度 5m のメッシュ内において、反射した全点数に対する積雪表面から反射した点数の比とする。この定義により、樹木や樹冠の密度が大きいほど Penetration fraction は小さくなり、植生が積雪下に埋没している高山帯においては、Penetration fraction がほぼ 1 になると想定される。森林限界は、標高に対する Penetration fraction の変化から特定する。

積雪分布の分析は、分布の特徴が異なる範囲に区分して行う。基本は、忠別ダム側及び大雪ダム側の斜面をそれぞれ樹林帯及び高山帯に区分した 4 斜面とする。水平解像度 5m の積雪深データはサンプル数が多く、そのままでは積雪分布の特徴を捉えることが困難である。このため、地形パラメタを幅を持った区間（例えば標高 25m ピッチ）に区分し、この区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値と地形パラメタの中央値との関係を分析する²⁾。また、西原ら²⁾は、忠別ダム側の斜面のうち、樹林帯においては標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること、高山帯においては地表面の地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少することを示している。ここで地上開度とは、横山ら¹⁾が開発した指標であり、着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものである。着目地点が谷の場合に地上開度 $\phi < 90^\circ$ 、尾根の場合に $\phi > 90^\circ$ となる。測量範囲における地上開度は概ね $45^\circ \sim 115^\circ$ に分布し、 $80^\circ \sim 90^\circ$ の出現頻度が高い。本研究では、西原ら²⁾の報告を踏まえ、標高及び地上開度と積雪深との関係を中心に分析を行う。また、樹林帯においては樹木が積雪深に与える影響や標高と降雪量との関係を分析するため、Penetration fraction を用いて樹林帯を樹木や樹冠の密度に応じて 5 つに区分し、標高と積雪深との関係を分析する。加えて、高山帯においては、局所地形が積雪分布に影響することから、尾根を跨ぐ測線を設けて積雪深と地形との関係を分析する。

2. 4 結果と考察

2. 4. 1 森林限界の特定

図-4 に測量範囲の Penetration fraction の分布を示す。なお、積雪表面から反射した点が無い (Penetration fraction=0) メッシュの数は全メッシュの 0.7% であった。図-4 を見ると、ある境界線を境に、Penetration fraction のばらつきが



図-4 航空レーザ測量範囲の Penetration fraction

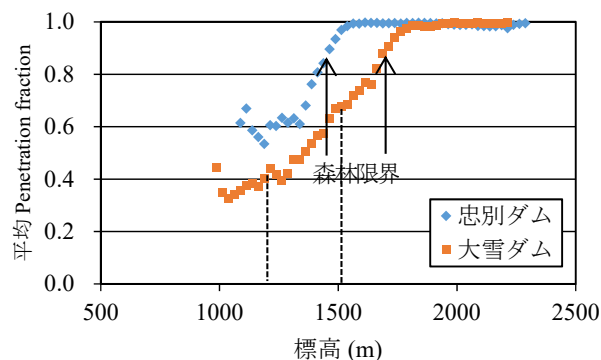


図-5 標高と Penetration fraction の関係

大きい範囲とほぼ 1 の値が多く分布している範囲に分かれているように見える。樹林帯においては、常緑樹と落葉樹との間の樹幹密度の差や局所的な空地の存在により Penetration fraction がばらつくと考えられること、高山帯においては、植生が積雪下に埋没しており Penetration fraction がほぼ 1 になると考えられることから、この境界線が森林限界と考えられる。標高 50m 毎にこの境界線に近い等高線を探索したところ、忠別ダム側においては標高 1450m、大雪ダム側においては標高 1700m の等高線が境界線に最も近い線であった。このことから、忠別ダム側においては標高 1450m を、大雪ダム側においては標高 1700m を森林限界と特定した。図-5 に標高と Penetration fraction との関係を示す。図示した Penetration fraction は標高 25m ピッチの区間に含まれるメッシュの Penetration fraction の平均値である。図中の矢印は森林限界とした標高を示す。図を見ると、標高が高くなるに伴い Penetration fraction が増加し、森林限界における Penetration fraction は 0.8~0.9 である。森林限界以上の高山帯全域における Penetration fraction の平均値は、忠別ダム側が 0.99、大雪ダム側が 0.99、標準偏差は忠別ダム側が 0.049、大雪ダム側が 0.070 であり、高山帯においては、1 に近い値が多く分布している。一方で、樹林帯における Penetration fraction は流域間で差が見られる。同じ標高帯において比較すると、忠別ダム側に比べて大雪ダム側の Penetration fraction が小さい傾向があり、標高の増加に対して Penetration fraction が緩やかに増加している。

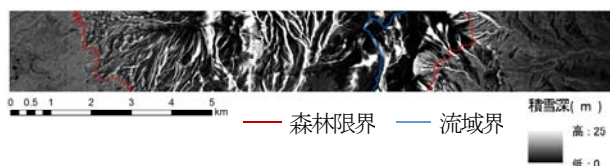


図-6 航空レーザ測量データから求めた積雪分布

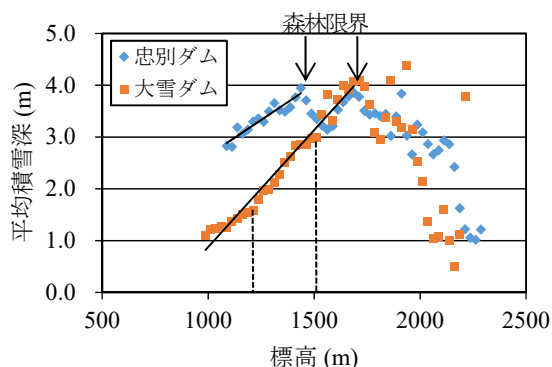


図-7 標高と積雪深の関係

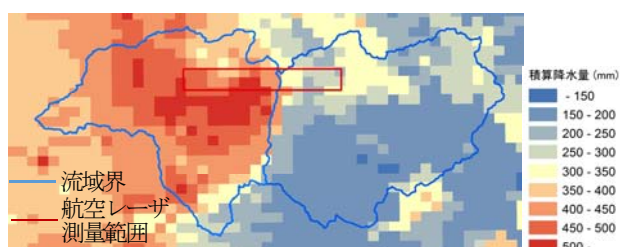


図-8 積雪期 (2016.11~2017.3) における積算降水量の分布

2. 4. 2 積雪分布の特徴

図-6 に航空レーザ測量データから求めた積雪深の分布を示す。図より、樹林帯における積雪分布の特徴と高山帯における積雪分布の特徴が異なることが明瞭である。樹林帯においては、1m~5m の積雪深が全体の60%の出現頻度を占め、積雪深のばらつきが小さい。一方で、高山帯においては、積雪深が0の箇所や積雪深が10mを超える箇所が見られ、積雪深のばらつきが大きい。森林限界付近の積雪分布に着目すると、概ねこの付近において積雪分布の特徴が変化しており、Penetration fraction から特定した森林限界は妥当であると考えられる。

2. 4. 3 標高と積雪深の関係

図-7 に標高と積雪深との関係を示す。図示した積雪深は標高25mピッチの区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。図には、樹林帯における標高と積雪深との間の回帰直線を併せて示す。図を見ると、樹林帯においては、既往研究²⁾において報告されている通り、標高の増加とともに積雪深が線形に増加している。回帰式の決定係数は、忠別ダム側が0.90、大雪ダム側が0.97であった。一

方、森林限界以上の高山帯においては、標高と積雪深との間に線形の関係は見られず、標高の増加に対して積雪深が不規則に増減している。両ダムの樹林帯同士で比較すると、忠別ダム側と比較して大雪ダム側の積雪深が小さい。

Yamada¹⁾は旭岳周辺の忠別ダム側における斜面(風衝斜面)と本研究において航空レーザ測量を実施した範囲の北側を東西に通過している国道39号沿いのオホーツク海側に位置する斜面(風背斜面)における積雪相当水量を比較すると、オホーツク海側の斜面における積雪相当水量が小さいことを示した。これは、日本海側とオホーツク海側を分ける脊梁山脈により、日本海側から侵入する降雪が遮蔽されたことが要因であると指摘している。また、図-8 に気象庁の解析雨量を用いて、測量範囲における積雪期と考えられる2016年11月~2017年3月までの5カ月間の積算降水量を示したが、流域界を境界として、忠別ダム側の降水量と比較して大雪ダム側の降水量が少ない。以上より、忠別ダムと大雪ダムの流域界である尾根により日本海側から侵入する降雪が遮蔽され、忠別ダム側と比較して大雪ダム側の積雪深が小さくなったと考えられる。一方で、高山帯における積雪深には、樹林帯における積雪深に見られたような尾根の遮蔽による影響が明瞭ではない。

2. 4. 4 樹木と積雪深の関係

図-7 に示した樹林帯における標高と積雪深との関係を詳細に見ると、忠別ダム側においては標高が増加するとともに概ね一定の割合で積雪深が増加している。対して、大雪ダム側においては、標高1200mまでの区間と比較して標高1200m~1525mまでの区間は標高の増加に対する積雪深の増加率が若干大きくなり、標高1525m~1700mの区間においては、標高の増加とともに積雪深が増加する傾向があるものの、積雪深のばらつきが大きくなる(図中点線)。標高に対する同様の傾向は図-5 に示した Penetration fraction にも現れており(図中点線)、標高の増加に対する Penetration fraction の増加率が、標高の増加に対する積雪深の増加率に影響している可能性がある。大雪ダム側においては、標高1200mまでの区間と比較して、標高1200m~1525mの区間は標高の増加に対する Penetration fraction の増加率が若干大きいことから、標高の増加に対する積雪深の増加率が大きくなったと考えられる。Penetration fraction の増加に伴い積雪深が増加することは、Zheng et. al.³⁾の報告と一致する。標高の増加とともに降雪量が増加することが、標高の増加とともに積雪深が増加する一因と考えられるが、標高の増加とともに Penetration fraction が増加することは、地表面においても標高の増加とともに積雪が堆積

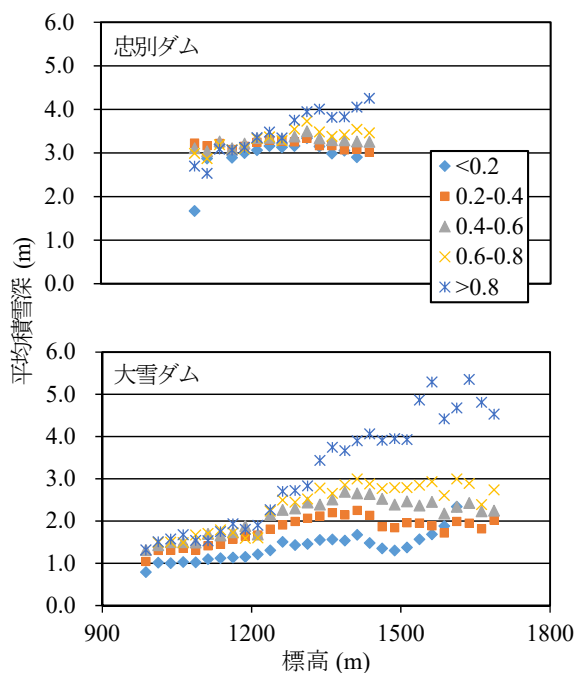


図-9 標高と積雪深の関係 (樹林帯・Penetration fraction 別)

しやすい環境になることを示しており、このことが標高の増加とともに積雪深が増加する一因と考えられる。森林限界に近い標高帯においては、忠別ダム側と比較して大雪ダム側の Penetration fraction が標高に対して緩やかに変化している。このため、大雪ダム側においては樹林帯及び高山帯における積雪分布の特徴の両方を併せ持った区間、つまり、標高の増加とともに積雪深が増加するものの積雪深のばらつきが大きい区間を挟み、積雪分布の特徴が樹林帯における特徴から高山帯における特徴に変化したものと考えられる。図-9 には、Penetration fraction を 0.2 以下、0.2～0.4、0.4～0.6、0.6～0.8、0.8 以上の 5 区間に区切り、区間ごとの標高と積雪深との関係を示した。図を概観すると、Penetration fraction が大きいほど積雪深が大きくなっており、この傾向は Zheng et. al.³⁾ が示した傾向と一致する。また、Penetration fraction が 0.8 以下の範囲においては積雪深のばらつきが小さく、0.8 以上の範囲においては積雪深のばらつきが大きい。Penetration fraction が 0.8 を境に積雪深のばらつきが大きくなることは、前述したように森林限界における Penetration fraction が 0.8～0.9 であったことに対応していると考えられる。

2. 4. 5 樹木帯における標高と降雪量の関係

Penetration fraction を用いて区分すると、区分した区間内においては、樹木が積雪深に与える影響が一定になると考えられることから、図-9 には標高と降雪量との関係が強

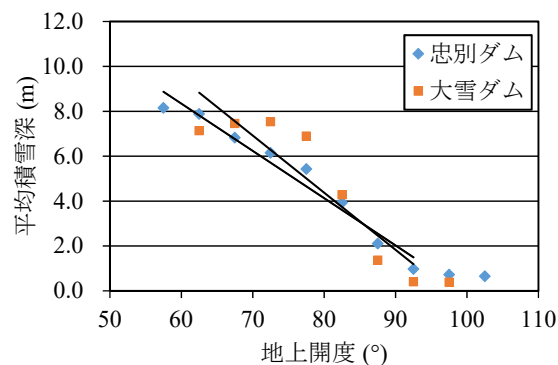


図-10 地上開度と積雪深の関係 (高山帯・流域別)

く現れていると考えられる。Penetration fraction が 0.8 以下の範囲では、忠別ダム側においては標高 1300m 付近、大雪ダム側においては標高 1400m 付近において、標高の増加に対する積雪深の増加が概ね頭打ちになっている。

Penetration fraction が小さい範囲においては、風の影響が少なく、積雪は最初に降雪した地点に留まりやすいと考えられることから、これらの標高帯において標高に対する降雪量の増加が頭打ちになっている可能性が示唆される。しかし、大雪ダム側の Penetration fraction が 0.8 以上の範囲のように、積雪深が大きく増加するケースも見られることから、今後の検証を要する。

2. 4. 6 高山帯における積雪分布

森林限界以上の高山帯における地表面の地上開度と積雪深との関係を図-10 に示す。図示した積雪深は地上開度 5°ピッチの区間に含まれるメッシュの積雪深の平均値である。図には、地上開度と積雪深との間の回帰直線を併せて示す。回帰式の決定係数は忠別ダム側が 0.96、大雪ダム側が 0.82 である。図を見ると、地上開度が増加する、つまり地形が谷から尾根に変化するに伴い、積雪深が線形に減少している。また、地上開度が 90°を超えると、積雪深がほぼ 0 になっている。これは、高山帯においては強風が吹き抜けるため、積雪は尾根に堆積しづらいことを示す。図-10 の線形回帰式を見ると、大雪ダム側の地上開度 70°～80°の範囲において、残差が大きい。この要因を特定するため、荒天時の卓越風向に概ね平行で、積雪深が 10m を超えた箇所を通る 2 測線 (図-2) に沿って標高、積雪深、地上開度、傾斜の関係を分析する。図-11 及び図-12 に測線 1 及び測線 2 の標高、積雪深、地上開度、傾斜をそれぞれ示す。測線 1 は旭岳山頂付近を通過し、旭岳山頂付近及び忠別ダムと大雪ダムの流域界付近に 2 つの尾根があり勾配が急である。一方、測線 2 は緩やかな傾斜が続く。地上開度は地表面及び積雪表面の値を示したが、高山帯にお

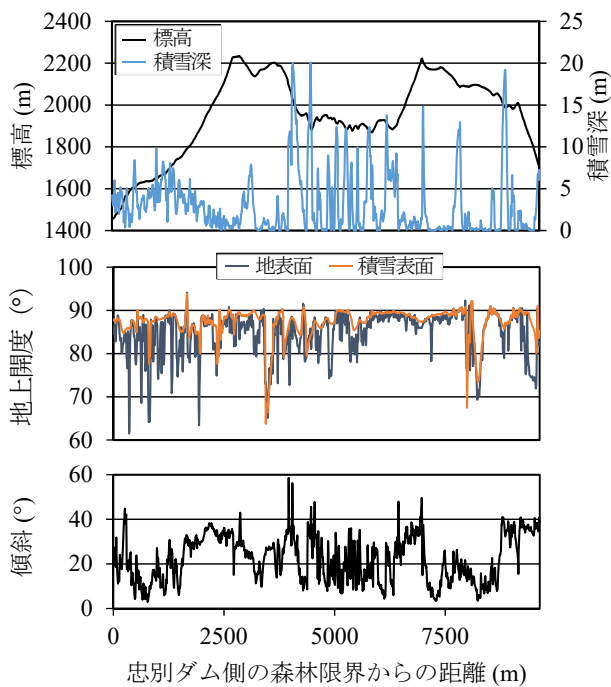


図-11 積雪と地形の関係 (測線1)

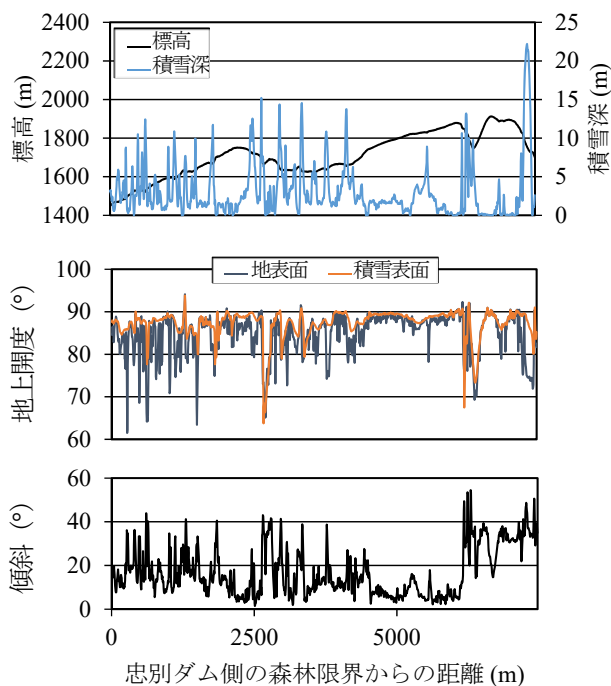


図-12 積雪深と地形の関係 (測線2)

ける積雪は地表面の凹凸を平坦化するように堆積する¹⁰⁾ため、積雪が堆積するに伴い積雪表面の地上開度が90°に近づく傾向がある。両図を見ると、小さな浅い窪地においては、積雪表面の地上開度が概ね90°になっており、これらの窪地は積雪により概ね埋まっていると考えられる。全体的な傾向として、風衝斜面に大きな積雪が見られないこと、尾根にほとんど積雪が見られないこと、風背斜面に大

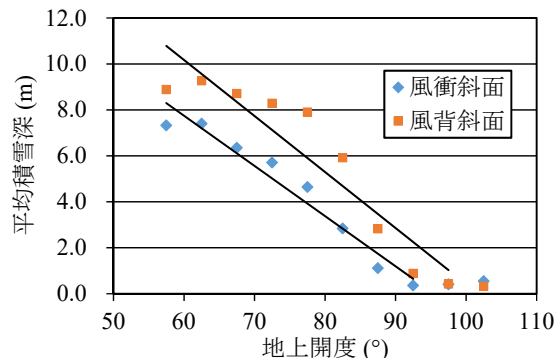


図-13 地上開度と積雪深の関係 (高山帯・風衝風背斜面別)

きな積雪が見られることがわかる。図示した範囲の標高差は800 m程度であるが、Grünewald et al.⁹⁾の報告と同様に、標高による積雪深の差は見られない。両図の積雪深には、図-8に見られた尾根による遮蔽効果が見られないが、Scipión et al.¹²⁾は、高山帯における積雪分布は風の影響を受けるため、高解像度の気象レーダーが捉えた降雪分布と比較した場合においても傾向が一致しないことを示している。10mを超える極端に大きい積雪深は、風背斜面の傾斜が大きい箇所によく見られる。この箇所は概ね地上開度が70°~80°の範囲にあり、図-10において線形式の残差が大きい範囲と対応する。流域スケールにおいては、忠別ダム側は風衝斜面、大雪ダム側は風背斜面であるが、局所的には忠別ダム側に風背斜面が、大雪ダム側に風衝斜面が存在しており、これらの斜面における積雪深が図-10に示した平均積雪深に影響したと考えられる。このため図-13に、両流域に跨る高山帯全体を風衝斜面及び風背斜面に区分して地上開度と積雪深との関係を示した。図には地上開度と積雪深との間の回帰直線を併せて示したが、回帰式の決定係数は風衝斜面が0.95、風背斜面が0.87である。しかし、風背斜面の地上開度が70°~80°の範囲において残差が大きい傾向は解消されなかった。風背斜面においては、地上開度に加えて傾斜を考慮し、傾斜が大きく極端に大きい積雪が堆積する箇所の影響を考慮する必要があることが示唆される。

2.5 まとめ

2017年3月に北海道大雪山系旭岳周辺において、航空レーザ測量により風衝斜面及び風背斜面に跨る範囲の積雪分布を計測し、地形及び植生との関係を分析した。

- ・ 樹林帯における標高と積雪深との線形の関係及び高山帯における地上開度と積雪深との線形の関係は、風衝斜面及び風背斜面の両方において確認された。ただし、高山帯の風背斜面においては、地上開度に加えて傾斜

を考慮し、極端に大きい積雪が堆積する箇所の影響を考慮することが必要と示唆された。

- ・ 流域スケールにおいては、尾根の遮蔽効果により、風衝斜面と比較して、風背斜面における積雪深が小さいことを定量的に示した。
- ・ 樹林帯においては、樹木や樹幹の密度が大きいほど積雪深が小さいことを定量的に示した。

3. 積雪分布の統計的解析

3.1 はじめに

近年、航空レーザ測量が普及してきたことから、航空レーザ測量により積雪分布を計測し、地形や植生との関係を分析した例が国内外で報告されている。西原ら²⁾は北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面において積雪ピーク期に積雪分布を計測し、樹林帯においては標高の増加とともに積雪深が線形に増加すること、森林限界以上の高山帯においては地表面の凹凸を表現するパラメタである地上開度の増加とともに積雪深が線形に減少することを示した。海外においても航空レーザ測量により計測した積雪分布を分析した例が多数報告されている。Zheng et al.³⁾はシエラネバダ山脈の複数の範囲において計測した積雪深を対象に、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fraction³⁾を説明変数として統計解析を行った。結果、積雪深に最も影響する変数は標高であること、重回帰分析を行った結果、変数を標高のみとした場合に決定係数が最大で 0.43 となったこと、すべての変数を用いた場合に決定係数が最大で 0.57 となったことを報告している。Tennant et al.⁴⁾はシエラネバダ山脈の複数の範囲において計測した積雪深を対象に、標高、Eastness, Northness, 傾斜、樹高を変数として統計解析を行った。結果、樹林帯及び高山帯における積雪分布には統計的に有意な差が見られること、樹林帯においては標高及び斜面方位が積雪深に与える影響が大きいこと、高山帯においては斜面方位のみが重要であることを示した。また、Schirmer et al.⁷⁾は、アルプス山脈において計測した積雪深を分析し、積雪期に数回発生する荒天時における卓越風向が、積雪ピーク期の積雪分布に強く影響し、積雪ピーク期には毎年類似した積雪分布のパターンが見られることを示した。

以上のように、海外においては、山間部における積雪分布の特徴を解明するため、航空レーザ測量により計測した積雪分布と地形及び植生に関する変数との関係性を評価する統計解析が多数行われているが、国内においてこのような解析を行った事例はほとんど無い。そこで、北海道大雪山系旭岳周辺において、3カ年の積雪ピーク期に航空レー



図-13 航空レーザ測量範囲

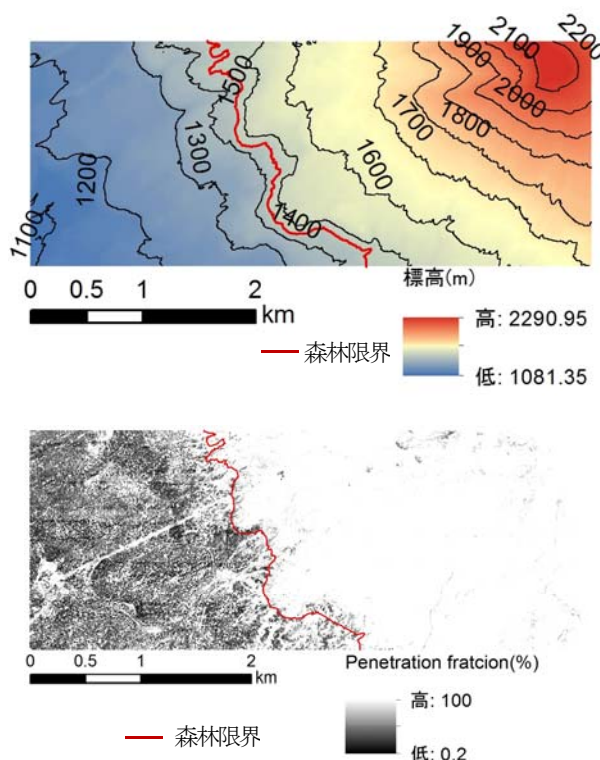


図-14 測量範囲の標高（上）、Penetration fraction（下）

ザ測量により計測した積雪分布と、地形及び植生に関する変数との関係性を評価する統計解析を行い、積雪ピーク期における積雪分布の特徴を明らかにすることを目的とする。

3.2 航空レーザ測量範囲

図-13に航空レーザ測量を実施した範囲を示す。測量範囲は、北海道大雪山系旭岳周辺に位置し、石狩川上流域に位置する忠別ダムの流域に含まれる 10km²の範囲である。

(図-1に示した航空レーザ測量範囲 (30km²) のうち、西端から 5km までの範囲) 測量範囲の標高帯は概ね 1100m～2300m であり、標高 1450m 付近に森林限界がある (図-14)。航空レーザ測量は、無積雪期の 2009 年 9 月 22 日～

25日、積雪ピーク期の2012年3月10日、2015年3月27日、2017年3月13日に実施した。積雪深は積雪ピーク期及び無積雪期の二時期の標高差とした。データの水平解像度は5mである。計測された積雪量は2017年が最も多く、2015年、2012年の順に積雪量が少なくなる。測量範囲においては、積雪期の荒天時における卓越風向は北西から西であるため⁸⁾、測量範囲は主に風衝斜面で構成される。

3.3 積雪分布の分析方法

航空レーザ測量範囲の積雪分布については、西原ら²⁾により、樹林帯及び高山帯において積雪分布の特徴が異なること、樹林帯においては標高と積雪深の間に線形の関係があること、高山帯においては地上開度と積雪深の間に線形の関係があることが示されている。このことから、測量範囲を森林限界である標高1450mを境界に、樹林帯及び高山帯に区分して分析を行う。

樹林帯において、積雪分布を分析する際に適用する地形及び植生に関する変数は、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fraction³⁾とする。Penetration fractionは2017年3月13日に実施した航空レーザ測量により取得した点群データから作成した(図-14)。

樹林帯においては、積雪深に与える影響が最も大きい変数は標高と考えられることから、はじめに、標高を1mピッチに区切り、各標高帯における平均積雪深を算出し、標高の中央値と平均積雪深の線形回帰分析を行う。得られた線形回帰式から推定した各メッシュの積雪深を、航空レーザ測量により計測された同一メッシュの積雪深から差し引いて求めた残差と傾斜、斜面方位、Penetration fractionとの関係を分析する。この際、傾斜及び斜面方位は1°ピッチ、Penetration fractionは1%ピッチに区切り、これらの区間に含まれる残差の平均値を用いる。残差が正である場合は、航空レーザ測量から得られた積雪深が、当該メッシュの標高において代表的な積雪深より大きいことを示し、残差が負である場合は、航空レーザ測量から得られた積雪深が、当該メッシュの標高において代表的な積雪深より小さいことを示している。

次に、重回帰分析により、標高、傾斜、斜面方位、Penetration fractionを変数として各メッシュの積雪深を推定する回帰式を作成し、同式の決定係数を評価する。加えて、統計ソフトRを用い、Random forest法により、積雪深に対する各変数の相対的な重要度を評価する。以上の分析は3カ年のデータに対してそれぞれ行う。

最後に、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似度を評価するため、同一メッシュにおける2カ年の積雪深の

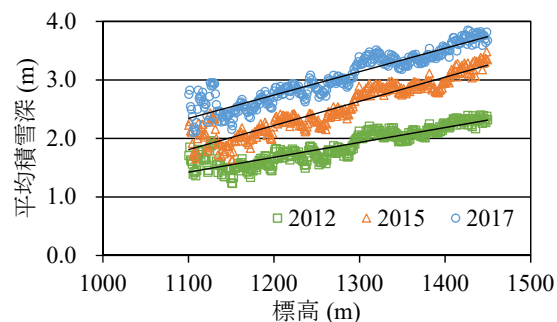


図-15 標高と積雪深の関係 (樹林帯)

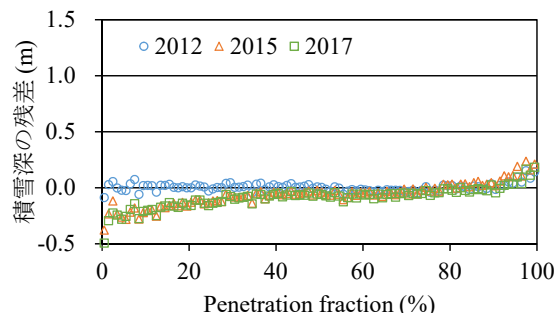
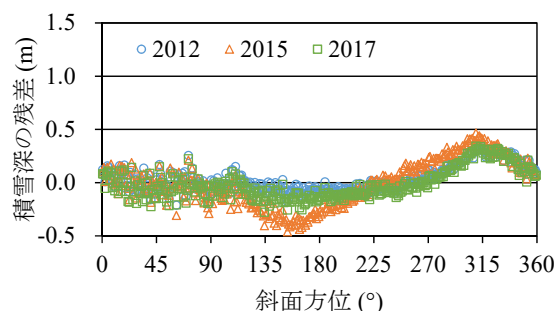
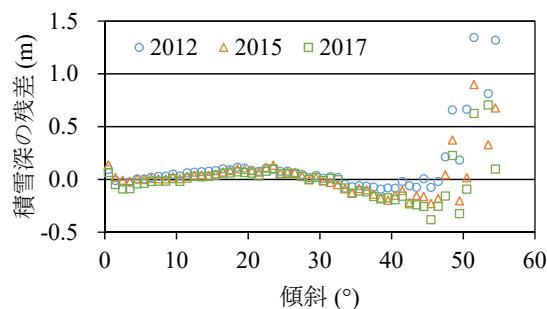


図-16 標高から推定した積雪深の残差 (樹林帯)

関係に対して、原点を通る(切片=0)の直線を当てはめる回帰分析を行い、決定係数を評価する。

高山帯においては、積雪分布を分析する際に適用する地形に関する変数は、地上開度、標高、傾斜、斜面方位とする。分析する内容は、樹林帯における分析と同一であるが、高山帯においては、積雪深に与える影響が最も大きい変数は地上開度と考えられることから、地上開度と積雪深との間の線形関係を用いて全メッシュの積雪深を推定し、航空レーザ測量から得られた積雪深との残差を求める。

3. 4 結果と考察

3. 4. 1 推定した積雪分布の残差の特徴

図-15 に樹林帯における各年の標高と積雪深との関係を示す。極端な値が含まれること避けるため、50 以上のサンプルが得られた標高帯のデータをプロットした。図中の直線は回帰直線である。回帰直線の決定係数は、2012 年が 0.800, 2015 年が 0.888, 2017 年が 0.883 である。残差と傾斜、斜面方位、Penetration fraction との関係を図-16 に示す。斜面方位は北を 0° とし時計回りに 360° 表記した。

図を概観すると、積雪量が最も少ない 2012 年の残差が小さい傾向がある。傾斜と残差の関係を見ると、傾斜が 40° を超えると残差が急激に大きくなる。これは、傾斜が大きい範囲の積雪深を標高のみを変数として推定した場合、積雪深が過小に推定される傾向があることを示していると考えられる。斜面方位と残差の関係を見ると、北向き斜面において残差が正となり、南向き斜面において残差が負となる傾向が見られる。これは、標高のみを変数とした積雪深の推定式が、日射の影響を受けにくい北向き斜面において積雪深を過小に推定し、日射の影響を受けやすい南向きの斜面における積雪深を過大に推定したことが要因と考えられる。Penetration fraction と残差の関係を見ると、2012 年を除き、概ね Penetration fraction が 40% 以下の範囲において残差が負となっている。Penetration fraction が小さい範囲は樹木や樹冠の密度が大きい範囲であるが、降雪量が多いほど樹冠によって遮断される降雪量が大きくなる¹³⁾ことが報告されており、このことにより、標高のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過大に推定した可能性が示唆される。Penetration fraction が 90% 以上の範囲において残差が正となっているが、この範囲は樹林内に局所的に存在する空地であり、空地においては積雪深が大きくなる傾向があることから、標高のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過小に推定したと考えられる。

図-17 に高山帯における各年の地上開度と積雪深との関係を示す。樹林帯と同様に、50 以上のサンプルが得られた地上開度帯のデータをプロットした。図中の直線は回帰直線である。回帰直線の決定係数は、2012 年が 0.904, 2015 年が 0.952, 2017 年が 0.959 である。樹林帯と同様の方法で求めた残差と標高、傾斜、斜面方位との関係を図-18 に示す。図を概観すると、樹林帯とは異なり、積雪量が最も少ない 2012 年の残差が小さい傾向は見られない。標高と残差の関係を見ると、標高 2100m から 2200m の区間に大きな正のピークが見られる。この標高帯には、旭岳山頂付近の風背斜面が含まれる。また、斜面方位と残差の関係を見ると、風背斜面である東向き斜面において残差のば

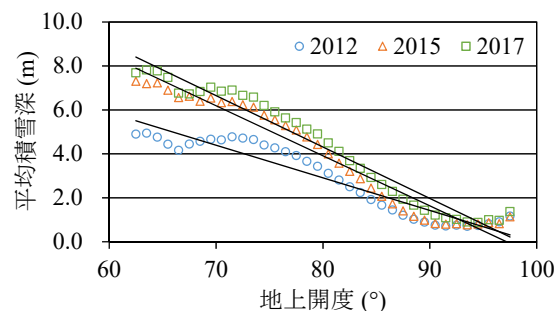


図-17 地上開度と積雪深の関係 (高山帯)

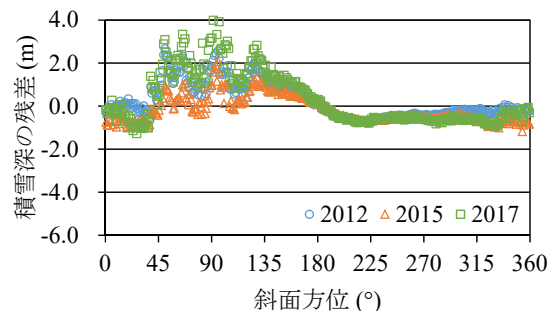
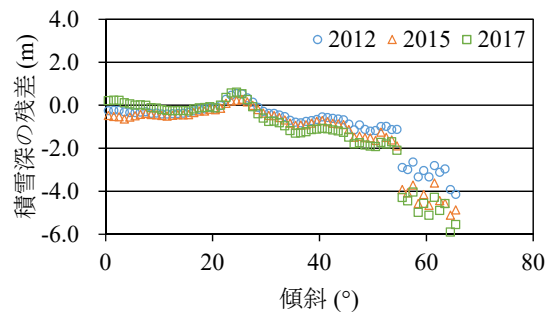
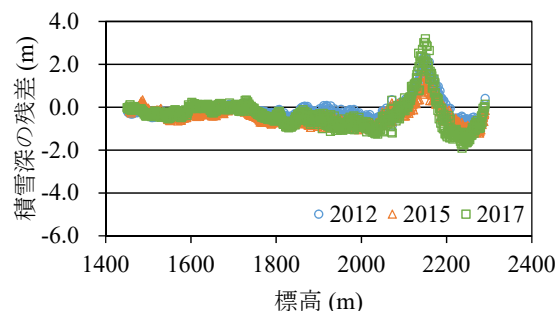


図-18 地上開度から推定した積雪深の残差 (高山帯)

らつきが大きく、大きな正の値が見られる。風衝斜面と比較して風背斜面における積雪深が大きい傾向があるが、測量範囲は主に風衝斜面であることから、地上開度を変数とした積雪深の推定式は、風背斜面における積雪深を過小に推定する可能性がある。このことが、標高 2100m から 2200m の区間及び東向き斜面において大きな正の残差が見られた要因と考えられる。傾斜と残差の関係を見ると、傾斜が概ね 50° を超えると、残差が極端に大きな負の値となっている。風衝斜面の傾斜が大きい範囲においては、地

表-1 重回帰分析の結果 (決定係数 R^2)

	樹林帯		高山帯	
	標高のみ	全変数	地上開度のみ	全変数
2012	0.085	0.099	0.320	0.364
2015	0.133	0.178	0.450	0.477
2017	0.142	0.165	0.336	0.406

表-2 積雪分布の類似度 (決定係数 R^2)

樹林帯			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.760	1	
2017/3/13	0.686	0.712	1
高山帯			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.764	1	
2017/3/13	0.835	0.772	1
全域			
計測日	2012/3/10	2015/3/27	2017/3/13
2012/3/10	1		
2015/3/27	0.754	1	
2017/3/13	0.813	0.765	1

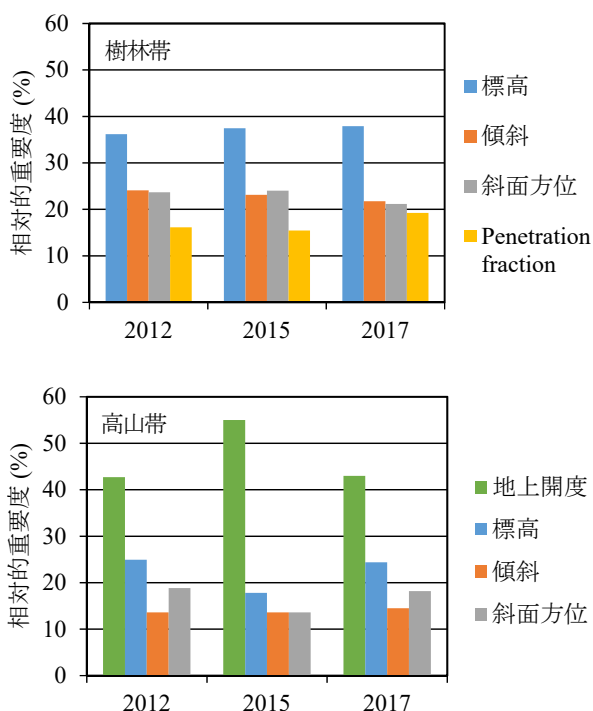


図-19 Random forest 法により求めた積雪深に対する各変数の相対的重要性

地上開度のみを変数とした積雪深の推定式が積雪深を過大に推定する可能性があることを示していると考えられる。

3. 4. 2 重回帰分析

3.4.1 において樹林帯及び高山帯を対象にそれぞれ選定した地形及び植生に関する変数を用い、重回帰分析により各メッシュの積雪深を推定する式を作成した。作成した式の決定係数 R^2 を表-1 に示す。比較のため、樹林帯においては標高のみ、高山帯においては地上開度のみを変数とした場合の決定係数を併せて示す。樹林帯においては決定係数が 0.085 から 0.165 に、高山帯においては決定係数が 0.320 から 0.450 に分布している。局所的なばらつきが大きい積雪深の推定に高解像度のメッシュを適用したことから、決定係数は大きくないが、ほぼ同一の変数及び解像度のメッシュを適用した Zheng et al.³⁾の報告と同程度の決定係数が得られている。

3. 4. 3 各変数の相対的重要性

3.4.1 において樹林帯及び高山帯を対象にそれぞれ選定した地形及び植生の変数を対象に、Random Forest 法により求めた相対的な重要度を図-19 に示す。樹林帯においては、既往研究^{3,4)}と同様に標高の相対的重要性が最も高く、次いで傾斜及び斜面方位、Penetration fraction の順となった。一方、高山帯においては、地上開度の相対的重要性が突出して高く、次いで標高及び斜面方位、傾斜の順となった。このような分析に地上開度が適用された例は無く、比較はできないが、高山帯においては、地上開度が積雪に与える影響が大きいことが示された。

3. 4. 4 積雪ピーク期における積雪分布の類似性

同一メッシュにおける2カ年の積雪深の関係に対して、直線を当てはめる重回帰分析を行った結果(決定係数 R^2)を表-2 に示す。決定係数は0.686 から 0.835 の間に分布している。Veitinger et al.¹⁴⁾はアルプス山脈における積雪分布を対象に同様の分析を行った結果、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似性が高いことを報告しているが、表-2 に示した決定係数は Veitinger et al.の報告とほぼ同等である。このことから、旭岳周辺においても積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似性が高いことが確認された。

3. 5 まとめ

北海道大雪山系旭岳周辺の風衝斜面において、3カ年の積雪ピーク期に航空レーザ測量により計測した積雪分布と、地形及び植生に関する変数との関係について統計解析を行った。

樹林帯及び高山帯それぞれに、積雪分布に対して最も影響が大きい変数を用いて推定した積雪深と航空レーザ測量により計測された積雪深の残差を求め、地形及び植生に

関する変数との関係を分析した。結果、傾斜が大きい範囲、高山帯における風背斜面において残差が大きい傾向が見られた。

重回帰分析を行い、地形及び植生に関する変数から積雪深を推定する式を作成した。決定係数は大きくならなかったが、シエラネバダ山脈における積雪深を対象に、ほぼ同一の変数とメッシュ解像度を適用した場合と同程度の決定係数が得られた。

Random forest 法を用い、積雪深に対する地形及び植生に関する各変数の相対的な重要度を評価した。結果、樹林帯においては標高の重要度が最も高いこと、高山帯においては地上開度の重要度が最も高いことを示した。

同一メッシュにおける 2 カ年の積雪深を線形回帰分析した結果から、積雪ピーク期における毎年の積雪分布の類似度が高いことを定量的に示した。

4. まとめ

航空レーザ測量により計測した積雪分布を分析し、風衝斜面及び風背斜面における積雪分布の特徴の差異を定量的に評価した。

さらに、複数年の航空レーザ測量により計測した積雪分布を分析することにより、樹林帯においては標高、高山帯においては地上開度が積雪深に対して最も重要なパラメータであることを示した。また、毎年のピーク期の積雪分布は類似したパターンとなることを示した。

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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Yamada, T.: Studies on accumulation-ablation processes and distribution of snow in mountain regions, Hokkaido, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A31, 1-33, 1983.
- 2) 西原照雅, 谷瀬敦: 3 回の航空レーザ測量結果から分析した山間部における積雪分布の特徴, 雪氷研究大会講演要旨集, 237, 2017.
- 3) Zheng, Z., Kirchner, P. B. and Bales, R. C.: Topographic and vegetation effects on snow accumulation in the south-em Sierra Nevada: a statistical summary from lidar data, The Cryosphere, 10, 257-269, doi: 10.5194/tc-10-257-2016, 2016.
- 4) Tennant, C. J., Harpold, A. A., Lohse, K. A., Godsey, S. E., Crosby, B. T., Larsen, L. G., Brooks, P. D., Van Kirk, R. W. and Glenn, N. F.: Regional sensitivities of seasonal snowpack to elevation, aspect, and vegetation cover in western North America, Water Resour. Res., 53, doi: 10.1002/2016WR019374, 2017.
- 5) Grünewald, T., Stötter, J., Pomeroy, J. W., Dadić, R., Moreno Baños, I., Marturià, J., Spross, M., Hopkinson, C., Burlando, P. and Lehning, M.: Statistical modeling of the snow depth distribution in open alpine terrain, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 3005-3021, doi: 10.5194/hess-17-3005-2013, 2013.
- 6) Mott, R., Scipión, D., Schneebeli, M., Dawes, N., Berne, A. and Lehning, M.: Orographic effects on snow deposition patterns in mountainous terrain, J. Geophys. Res. At-mos., 119, 1419-1439, doi: 10.1002/2013JD019880, 2014.
- 7) Schimer, M., Wirz, V., Clifton, A. and Lehning, M.: Per-sistence in intra-annual snow depth distribution: 1. Measurements and topographic control, Water Resour. Res., 47, W09516, doi: 10.1029/2010WR009426, 2011.
- 8) 菊地時夫, 金田安弘, 山田知充: 大雪山における積雪期の気象状況について, 天気, 26, 751-757, 1979.
- 9) Farinotti, D., Magnusson, M., Huss, M. and Baudar, A.: Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modeling, Hydrol. Processes, 24, 2087-2097, doi: 10.1002/hyp.7629, 2010.
- 10) 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, 低温科学物理編, 37, 1-12, 1979.
- 11) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, 第38巻4号, 26-34, 1999.
- 12) Scipión, D. E., Mott, R., Lehning, M., Schneebeli, M. and Berne, A.: Seasonal small-scale spatial variability in alpine snow fall and snow accumulation, Water Resour. Res., 49, 1446-1457, doi: 10.1002/wrer.20135, 2013.
- 13) Schmidt, R. A. and Haupt, H. F.: Snowfall interception on branches of three conifer species, Can. J. For. Res., 21, 1262-1269, 1991.
- 14) Veitinger, J., Sovilla, B. and Purves, R. S.: Influence of snow depth distribution on surface roughness in alpine terrain: a multi-scale approach, The Cryosphere, 8, 547-569, doi: 10.5194/tc-8-547-2014, 2014.

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

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：牛山朋來、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、玉川勝徳、伊藤弘之、菊森佳幹、望月貴文、宮本守、山崎祐介、洪尾欣弘、原田大輔、中村要介

【要旨】

洪水被害の回避・軽減のためには、洪水を予測し早めの避難や対応に資することが重要である。途上国等の降雨観測データの不足する地域における洪水予測について水災害研究グループでは、降雨の空間分布の把握に優れた衛星データを雨量の定量的把握に優れた地上雨量計データで補正する方法や、対象地域に対して WRF 等の気象モデルを構築し、降雨の把握・予測を一連で行う方法について検討を進めてきた。また、気象モデルを用いたアンサンブル計算を行い、降雨の予測計算を行う方法についても検討している。平成 29 年度には、2017 年 5 月にスリランカ南西部で発生した豪雨とそれに伴う洪水・土砂災害を受けて、スリランカに対してこれら手法を適用したので、その結果について報告する。

キーワード：洪水予測、降雨予測、GSMAP, リアルタイムシステム、スリランカ

1. はじめに

海外における洪水・土砂災害の多くは、災害対策インフラ整備が遅れている発展途上国で起きている。そのような地域では水文・気象観測施設が少なく、洪水の予測が極めて困難であり、被害も甚大となる傾向がある。このような地域においても、衛星観測雨量や数値気象計算データの降水量を用いて有効な洪水予測を行うことが可能であり、水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) ではそのような技術開発を行っている。

2017 年 5 月下旬、スリランカ南西部では記録的豪雨が発生し、それに伴う大規模な洪水・土砂災害が発生、甚大な被害が生じた。ICHARM ではこれまでの研究成果を活用し、スリランカに対して洪水対策に資する情報提供を行い、今後の効果的な洪水対策に役立ててもらうことを目的として支援活動を行った。

2. 数値天気予報を活用した洪水予測

発展途上国等の気象観測データが限られる地域では、降雨状況の把握が困難であり、このため、予報精度も低くなる場合が多い。一方で、現在行われている天気予報は、気象庁のような各国の気象機関が世界中の気象観測データを集め、正確な現在の大気状態を推定し、それを初期値として大気大循環モデル GCM (General Circulation Model) や領域モデルを用いて大気の時間発展を計算している。また、観測データを GCM 計算の

初期値に取り入れるデータ同化技術はかなり発達してきており、一般的には地域によらず相当程度の精度で予報値が得られるようになっている。従って、スリランカのような観測データが少ない地域においても、数値天気予報を利用することにより、高精度で洪水を予測できる可能性がある。

一般的に、GCM では比較的粗いモデル格子 (数十 km 以上) を使用しているため、局地的豪雨等の空間スケールの小さい表現することはできない。しかし、ダウンスケーリングと呼ばれる手法を用いることにより、限定された地域に対して領域モデルを構築し高解像度 (格子スケール: 数 km 程度) で計算を行うことにより、より空間スケールの小さい現象を表現できるようになり、局地的豪雨等も洪水予測に耐えうる精度で降水量を予測することが可能になると考えられる。

ICHARM では、今回のスリランカ豪雨事例を対象に、領域モデルを用いた予測計算を行い、豪雨の発生メカニズムや予測可能性を調べた。また、豪雨発生の後、1 日 1 回リアルタイムで予測計算を行い、インターネット上に結果を掲載するシステムを構築し、スリランカへの支援を行っている。

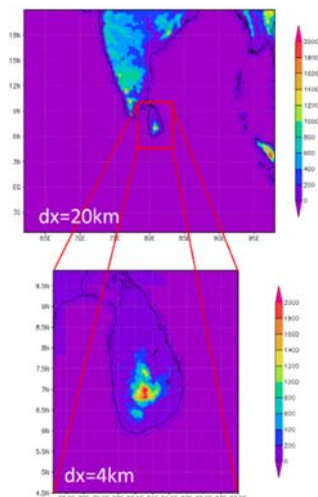


図-1. モデル計算領域
左が外側領域, 右が内側領域. 色は標高(m)を表わす.

表-1. WRF モデル設定

格子数	外側 201×151×4 内側 151×151×40
水平格子間隔	外側 20km/内側 4km
解析計算時間	2017年5月24日00時~5月27日00時 UTC
初期, 境界条件	ERA-interim, NCEP GFS 等
雲物理過程	外側 Lin / 内側 Lin
境界層過程	MYNN2.5 スキーム
土地利用分布	USGS 30 秒間隔

2.1 2017年5月スリランカ豪雨の予測計算

領域モデルとして、Weather Research and Forecasting (WRF) model ver.3.7.1 を用いて、予測計算を行った。設定したモデル領域は図-1の通りであり、外側を20km、内側を4km 格子間隔の2重ネスティング領域とした。外側領域は、ベンガル湾からインド洋までの海域を含む領域とし、Madden Julian Oscillation (MJO)などの赤道波を表現できるようにした。境界条件として用いたのは、ヨーロッパ中期気象予報センター (ECWF) が提供するリアルタイムで提供される全球大気の再解析データ ERA-interim、米国環境予報センター (NCEP) の全球予報(GFS)である。その他の WRF モデルの設定詳細は表-1にまとめた。

ERA-interim 再解析を境界条件とした数値再現計算結果を紹介する。図-2左は GSMaP_NRT (Near Real Time: 4時間遅れの準リアルタイムデータ)による衛星観測降水量である。スリランカの島の南西部に降水が集中して

いる様子が見て取れる。一方、図-2右の数値計算結果は、南西部の山地に降雨を計算しているが、衛星観測結果に見られるような大規模な豪雨は再現できていない。続いて、図-3は東経80~81度、北緯6~7.5度のスリランカ南西部における平均降水量の時間変化を示している。積雲スキームは4種類を使用し、比較している。図-3上は GSMaP_NRT による衛星観測降水量である。5月25日21時から26日3時 UTC に豪雨が集中している。現地時間は UTC+5.5h であるため、豪雨期間は現地時刻では26日2時30分~8時30分の未明から朝にあたる。なお、この値は南北約150km×東西約100kmの平均値であるため、ある地点における最大1時間降水量を表すものではない。一方、領域モデルを用いた予測計算の結果(図-3下)は、緑線で表した

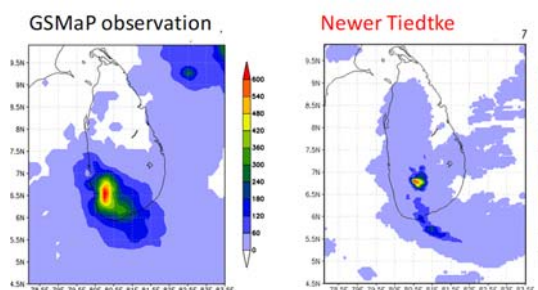


図-2. 右は豪雨期間(25日00時~26日12時)の積算降水量。左は GSMaP による衛星観測降水量、右は再現計算結果。

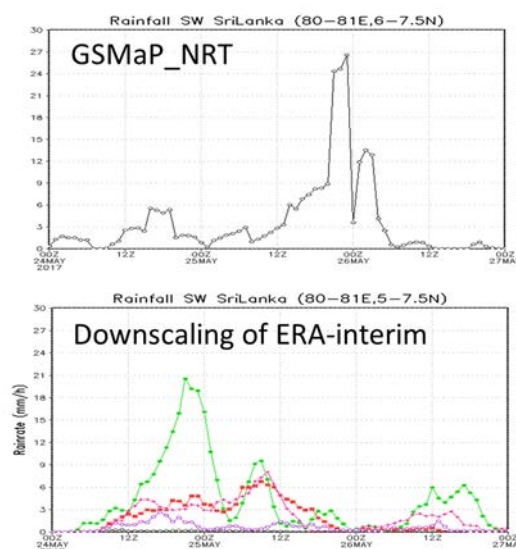


図-3. 豪雨期間前後の GSMaP 衛星観測雨量(上)と、同期間のシミュレーション雨量(下)。色は積雲スキームの種類の違いを表し、緑: Grell3D、赤: Newer Tiedtke、ピンク: Modified Tiedtke、紫: Grell-Devenyi である。

Grell3D 以外は 25 日 9 時 UTC 頃に降水発生を算出しており、観測された 26 日 0 時前後の降水は再現していなかった。

なお、赤線で示した積雲スキームの中で、Newer Tiedke が過大な降水量をシミュレートせず、最も適切と考えられたため、以後の数値計算ではこのスキームを用いることとした。さらにモデルの解像度依存性について調査するため、内側モデル領域の中に、さらに高解像度の 1.3km 領域を設定した 3 重ネスティングによる計算を行った。その結果、豪雨の位置が若干観測位置に近づいたものの、降水発生時刻や降水量について改善は見

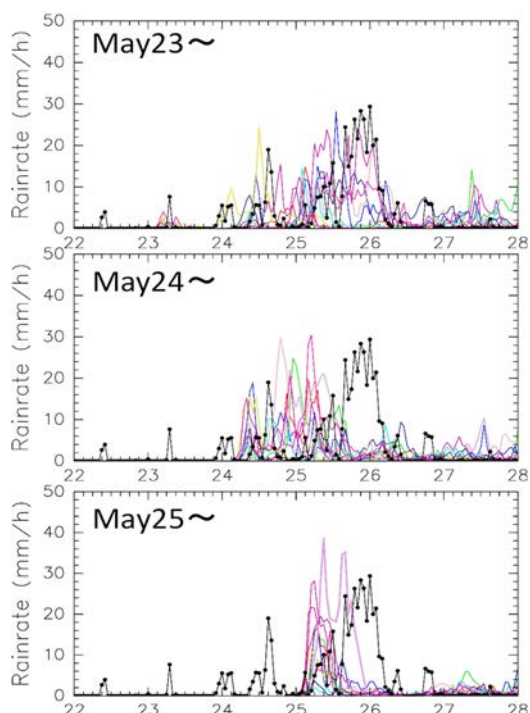


図4. アンサンブル予測計算による Kalu 川流域降水量。黒丸+黒線は雨量計による観測値、色付きの線は各アンサンブル予測降水量を示す。

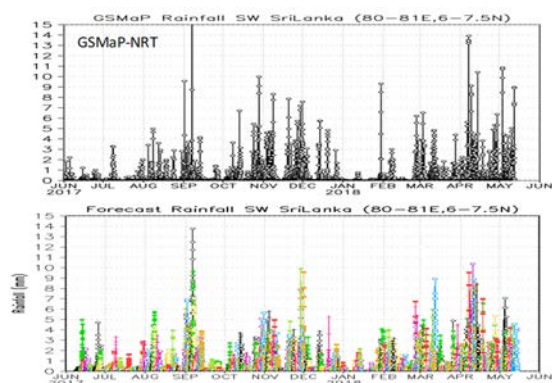


図5. リアルタイム降水予測と観測の比較。上が GSMaP 観測降水量、下がリアルタイム予測降水量。

られなかった。

さらに、異なる境界条件による精度向上を試みるため、NCEP によって提供された全球アンサンブル予報 (GEFS) を境界条件とした予測計算を行った。GEFS は、1 日 4 回 21 メンバーのアンサンブル予報が提供されているが、本研究では 00 時 UTC を初期時刻とする予報の 21 メンバーから 11 メンバーを選び、ダウンスケーリング計算を行った。結果を図-4 に示す。上からそれぞれ 5 月 23 日、5 月 24 日、5 月 25 日を初期時刻とする予測結果である。5 月 23 日を初期時刻とする予測は、多くのアンサンブルメンバーは観測降水量を再現できなかったものの、紫色の線で示されたメンバーは観測降水量を量、時刻ともによく再現した。一方、5 月 24 日、25 日を初期時刻とする予測は、1 日から半日早い豪雨の発生を予測した。一部のメンバーは、豪雨の降水量的予測に成功していたものもあったが、ピーク出現時刻を再現できなかった。このように、3 種類の初期時刻から計算した 11×3 個のアンサンブル予測を行った結果、豪雨の発生時刻については 12~24 時間程度早めとなるものの、雨量については比較的多くのアンサンブルメンバーで良好に再現しており、1 つのメンバーについては発生時刻と雨量の双方について良好に予測できた。

2.2 リアルタイム降水予測

2017 年 5 月の豪雨の発生を受けて、ICHARM では 1 日 1 回 72 時間先までの予測計算を行い、Web 上に掲載することにより、スリランカへの洪水情報提供の支援を行っている。この計算は、NCEP GFS の 18UTC を初期時刻とする予報を境界条件として用いる。予報が提供されるのが日本時間の 7 時前であるため、7 時から計算を開始し、9 時 30 分には結果を提供することができる。リアルタイム予測結果と GSMaP 観測降水量を合わせて図-5 に示す。期間は 2017 年 6 月から 2018 年 5 月の約 1 年間である。図では、一つ一つの降水イベントを比較すると、予測降水量、特にピーク降水量は必ずしも観測と一致していなかった。しかし、数日から 1 週間程度の降水変動はよく再現していた。従って、ある程度の予測精度の幅を許容すれば、十分有用な予測値を提供できると考えられる。

図-3、図-4 で示したように、豪雨をピンポイントで予測することは困難であったが、図-5 のように豪雨の傾向を予測することが可能であった。今後、さらに予測精度を向上させるための調査を進める予定である。

3. スリランカにおける衛星降雨データの精度向上と洪水予測データ情報共有システムに係る取り組み

スリランカ カル川流域における洪水予測・早期警戒とデータ・情報共有システムの開発と運用に向けたプロトタイプの実装について、JAXA のプロジェクトのもとで以下の活動を実施した。また、諸外国における衛星降雨データの利用拡大や水災害対策の拡充を目的として国内外における技術移転を行うとともに、これら成果を APRSAF-ESCAP SDGs Luncheon、スリランカのステークホルダー会議、APRSAF-24 で発表した。

(1) リアルタイム地上観測雨量データ及び地上観測雨量データを用いて、GSMaP_NRT のバイアスや提案されている複数の補正手法による精度改善効果を把握するために、いくつか豪雨イベントを選定し補正手法の適用と検証を実施した。リアルタイム地上観測雨量計の設置地点を図-6 に示す。



図-6. リアルタイム地上観測雨量計設置地点(スリランカ南西部に9地点を設置)。

(2) カル川流域におけるリアルタイムの地上観測雨量データを用いて GSMaP を補正し、水エネルギー収支降雨流出氾濫モデル(WEB-RRR)に入力し流量を計算する洪水モニタリングシステムを開発した。また、2章で検討した降雨予測データを WEB-RRR に入力し、リアルタイムで流量を計算することにより、洪水予測と早期警戒運用のためのシステムを開発した。これらはデータ統合・解析システム(DIAS)上で実施した。

あわせて、2014年と2017年の洪水を対象にリアルタイムでの洪水推定のためのパフォーマンスを検証した。その結果、2017年5月の豪雨・洪水について地上雨量計により補正された GSMaP_NRT を入力値とすることにより、洪水を再現できることを示した(図-7 参照)。

(3) スリランカ灌漑局が、科学者・組織・政策立案者間における観測データと情報の共有、支援、フィードバックのためのシステムを ICHARM と DIAS の支援

のもと灌漑局のサーバ上に構築した。2018年3月26日に実施されたステークホルダー会合の場で、システムのテストバージョンが紹介された。スリランカ灌漑局からビッグデータの扱いやウェブサイトでのリアルタイムデータ・情報公開のための、データ処理やデータアクセス方法に関する技術的な問題が提案され、ICARM と DIAS へ今後も引き続き技術支援の要請があった。スリランカ灌漑局が構築した洪水モニタリング・予測情報のウェブサイトの一例を図-8 に示す。

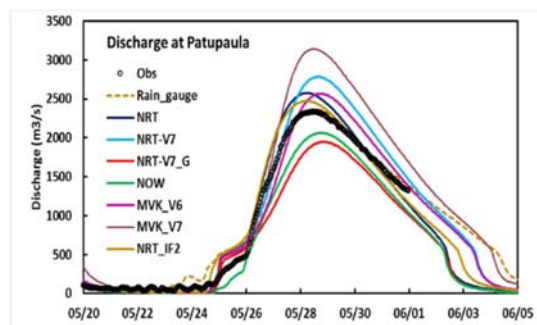


図-7. 2017年5月の豪雨・洪水におけるWEB-RRR計算結果。黒丸が観測流量を示し、その他は入力した雨の違いによる推定結果を示す。



図-8. スリランカ灌漑局が構築した洪水モニタリング・予測情報の配信のためのウェブサイトの一例

(4) 灌漑局の技術者を対象に、降雨流出氾濫モデル(RRI)開発とリアルタイム洪水予測のための GSMaP の適用のためのワークショップ(写真-1)やハンズオントレーニングを実施した。(2016年5月, 2016年8月, 2017年3月, 2017年8月, 2018年3月)



写真-1 GSMaP 補正のための技術講習

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：菊森佳幹、伊藤弘之、吉野 広郷、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、宮本守、海野 仁、牛山朋來、山崎祐介、Maksym GUSYEV

【要旨】

地球温暖化に伴う降雨条件の変化による渇水リスクについて、東南アジア諸国のうちタイのチャオプラヤ川、メコン川、インドネシアのソロ川等を対象に影響評価を行った。将来の降雨条件については、RCP8.5 シナリオによる GCM 実験結果をもとに降雨計算結果のバイアス補正等を行ったデータを使用した。渇水リスクについては、BTOP 流出モデルによる長期降雨条件の変化に伴うダム貯水量の変化や天水による米作作付け面積モデルを使用し、灌漑面積の変化を算定した。

キーワード 渇水リスク、気候変動、GCM、BTOP モデル、米作作付け面積モデル、東南アジア

1. はじめに

地球温暖化による水災害への影響としては、豪雨・大雨の激化・多発化だけでなく、少雨の極端化による渇水被害も懸念されている。特に、東南アジア諸国においては、経済活動の多くを農業に依存している側面があり、将来における渇水による農業被害は無視できないリスクとなる。

このため、長期的な水資源管理を支援する観点から、RCP8.5 シナリオによる GCM(Global Climate Model)の予測計算結果より将来の降雨条件を想定し、対象地域における渇水リスクの評価を試みた。渇水ハザード評価については、貯水池への流入を計算する BTOP モデルと貯水池運用モデルを組み合わせ用いた他、天水に頼る農業形態の場合は農工研で開発された作付面積モデルを使用し、灌漑面積の変化率で評価することにした。ここでは、インドネシアのソロ川流域、タイのチャオプラヤ川流域、メコン川下流域について検討結果を報告する。

表一 対象流域における年間降水量変化率及び月別降水量の特徴

流域	年間降水量の変化率	月別降水量の特徴
ソロ流域	+16±10%	雨季(冬場)に降水量がやや増加し、乾期(夏場)に若干減少。
チャオプラヤ流域	+15±2.5%	雨季(夏場)に降水量が増加、乾季(冬場)は変化なし。
メコン流域	+10±1%	雨季(夏場)に降水量が増加、乾季(冬場)は変化なし。

2. 将来の降雨条件の想定

気候変動予測データとしては、気象研究所で開発された 20km 四方の超高解像度大気大循環モデルである MRI-AGCM3.2S のデータを用いた。現在気候再現計算(1979-2003 年)では、観測された海面水温や海水の分布や温室効果ガス濃度などを境界条件とした。MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量データは、現地観測雨量データを用いてバイアス補正した後に BTOP モデル等の入力として用いた。

将来気候予測計算(2075-2099 年)では、RCP8.5 シナリオを用いた。海面水温や海水の分布の違いによる不確実性を考慮し、CMIP5 で海面水温を予測した 28 種類のモデルを対象に、クラスター解析による 3 種類(c1、c2、c3)の異なる海面水温と海水の分布 (SST, Sea Surface Temperature)と CMIP5 の全アンサンブル平均 mme の計 4 種類を境界条件とした。これら 28 種類のモデル全てから求めた海面水温分布と比較すると、8 モデルからなる c1 では南北半球ともほぼ一様に温暖化傾向を示し、14 モデルからなる c2 では赤道太平洋付近でエル・ニーニョに似た温暖化パターンを、6 モデルからなる c3 では南半球より北半球でより温暖化が進む海面水温分布を示す。同じ温室効果ガス排出シナリオ(RCP8.5)であっても、これら異なる海面水温や海水の分布によって、MRI-AGCM3.2S の応答が変化し、異なる将来降水量が求められる。MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量データは、現在気候再現計算と同様のバイアス補正をした後に流出モデル等の入力として用いた。

3. ソロ川流域における渇水リスクの評価

ソロ川流域を対象に、分布型流出解析モデルである BTOP モデルを構築し、Wonogiri ダムへの流入量を再現した¹⁾。Wonogiri ダムはソロ川上流域に位置し、総貯水容量 7.35 億 m³、有効貯水容量 6.15 億 m³を有する洪水調節、灌漑および発電を主目的とする多目的ダムで、下流地域の約 300km²の農地に灌漑用水を供給している。BTOP モデルの定数の同定には、Wonogiri ダム上流ならびにその近傍の 3 地点で実測された日降雨量とダム管理者がまとめた日平均流入量(実測値)を用いた(図-1 参照)。

次に、気候モデルによる気候変動予測データを活用して、BTOP モデルで将来の水供給をシミュレートした。水供給のシミュレーションは、貯水池への流入を計算する BTOP モデルと貯水池運用モデルとを組み合わせる実施した。貯水池運用モデルは、Wonogiri ダムの灌漑用水供給計画を参考とし、放流量(=灌漑用水供給量と本川下流への維持流量の合計値)を設定し、日平均流入量と日平均放流量からダムの貯留量の変化を求めた。また、Wonogiri ダム下流域では、11 月から 2 月までを I 期(WET)、3 月から 6 月までを II 期(DRY)とし、各期当初のダムの貯水量に応じて灌漑区域を決定し、決定された灌漑面積に応じて灌漑用水を供給する計画となっている。

現在気候と将来気候における比較では、貯水池運用モデルで計算した貯留量に対応する灌漑面積を比較した(図-2 参照)。現在気候再現計算と将来気候予測計算のそれぞれ 25 年間の I 期・II 期の灌漑面積を求めて、それらの平均値を比較した(図-3 参照)。I 期(WET)における灌漑可能面積は、現在気候に比べ mme では 4% 減少するものの、c1,c2,c3 ではほぼ変わらないか微増が見られた。また II 期(DRY)における灌漑可能面積は mme では 1% 減少するものの、c1 で 12%、c2,c3 では 3% 程度増加する。渇水リスクについては、将来的に低下する傾向が見られた。

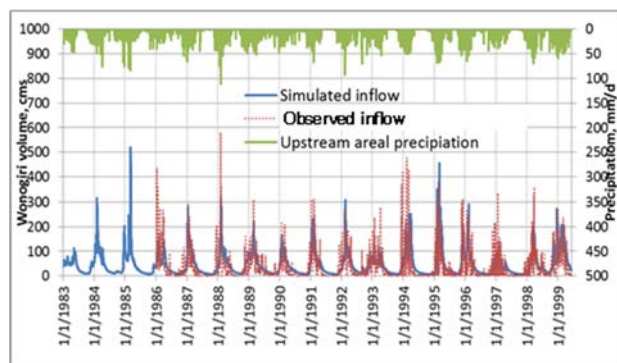


図-1 Wonogiri ダム流入量の実測値と計算値の比較

渇水リスク評価の概念図

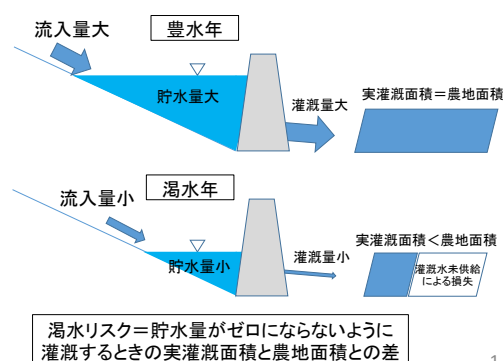


図-2 渇水リスク評価における実灌漑概念図

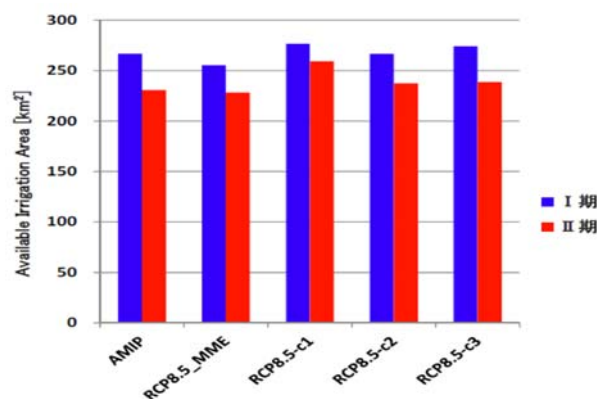


図-3 現在気候 (AMIP) と将来気候 (4つ SST) における平均灌漑面積の比較

4. チャオプラヤ川流域

チャオプラヤ川流域の上流には、Sirikit ダム及び Bhumibolダムの2つ大きなダムがあり、流域内の灌漑面積はこの2つのダムの貯水量に大きく依存している。渇水ハザード評価は、BTOP モデルを用いて貯水池への流入を計算し、流況の変化を調査した。

各気候シナリオにおいて Sirikit ダム及び Bhumibolダムの貯水位から放流量を推定し、それを使って灌漑可能面積を算出した。なお、2011 年、2012 年時点で乾季の計画最大灌漑面積は 11,978km² であるが、ここでは将来の灌漑施設の拡充等も考慮し、計画最大値を超えても用水量から灌漑面積を算定することとした。調査地点は、タイ国の乾季における計画放流量は、Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値で規定されていることから Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値とした。考察にあたり、タイの気候特性は雨季と乾季がはっきり区別でき、12 月から3月まではほとんど雨が降らないことや、収穫量は雨季盛期の降水量と高い相関関係があることから雨季の流量にも着目することにした。

渇水リスク評価の指標として灌漑可能面積を比較した。計

算期間(25 年間)における灌漑可能面積の平均値、25%値、75%値及び最大値・最小値を表-2 に示す。将来気候のすべてのシナリオで、平均値は増加傾向がみられ、25%値は現在気候の平均値を上回っていた。将来気候の最悪の状況を調べるため、現在気候の平均値と各シナリオの最小値との比較を行う。その結果、現在気候に対する将来気候における灌漑面積は、平均値で 1.3~1.4 倍程度の増加、最小値でも 1.1~1.4 倍程度の増加となっており、渇水による灌漑可能面積の減少リスクが緩和される傾向がみられた。

表-2 現在気候及び将来気候における灌漑可能面積

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

5. メコン下流域

タイ東北部のメコン川を対象として、気候変動が米作に与える影響について調査した。当該地域は、灌漑田に比べて天水田の比率が低いことから、農研機構・農工研究所で開発された降水状況から米作作付け面積を推定するモデルを活用し(図-4 参照)、将来の米作作付け面積を推定することとした。当モデルでは、積算起算日(4月1日)からの積算雨量が閾値を超えると、稲が生育するために十分な土壌水分が確保されたと見なし、作付けを開始することとなっている。作付け開始後は1日あたり水田面積の1/30ずつ作付け面積を増加させ、乾季に入る前までに稲の生育および刈り取り期間を確保するため、9月20日までを作付け可能期間としている。当該モデルは、水田の種類(完全降水依存型水田、部分降水依存型水田(完全降水依存型水田に接続し、完全降水依存型水田からの水が供給される水田)、灌漑水田)ごとに、作付け開始積算雨量が設定されているが(表-3 参照)、最大作付け可能面積は設定する必要がある。このため、西暦 2000 年前後の平均的な作物別耕作面積を緯度経度 0.25 度(約 9km)の解像度で記録している MERCA2000 から得られたメッシュ毎の灌漑水田と天水田の割合を設定した上で、1980 年から 2013 年までのモデルの計算結果が、タイ国農協協力省から得られた県別の作付け面積を各メッシュに按分した作付け面積に合致するように(図-5 参照)、最大作付け面積を各メッシュ毎に設定した。このモデルを使用し、各メッシュに日雨量のデータの値を与えることにより、各メッシュの日ごとの作付け面積を計算した。APHRODITE(アジ

ア地域の日降水量グリッドデータ)および現在気候モデル(AMIP)の降水量データによる作付け面積計算結果は、実績値とよく一致していることが確認できる(図-5 参照)。

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

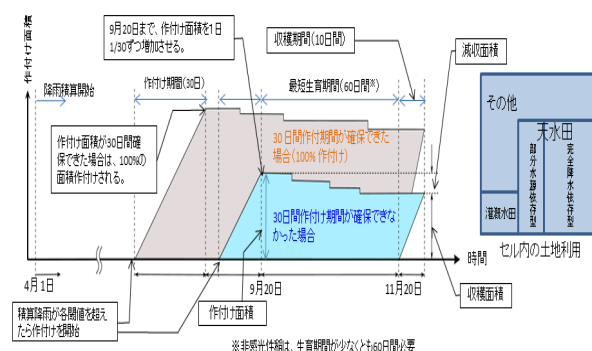


図-4 作付け・収穫面積モデル(農研機構・農工研)

表-3 作付け開始積算雨量

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

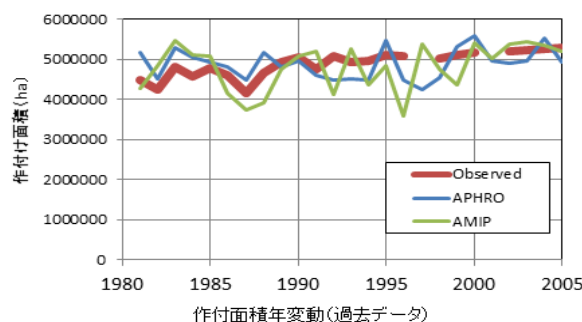


図-5 現在気候におけるモデルの再現性

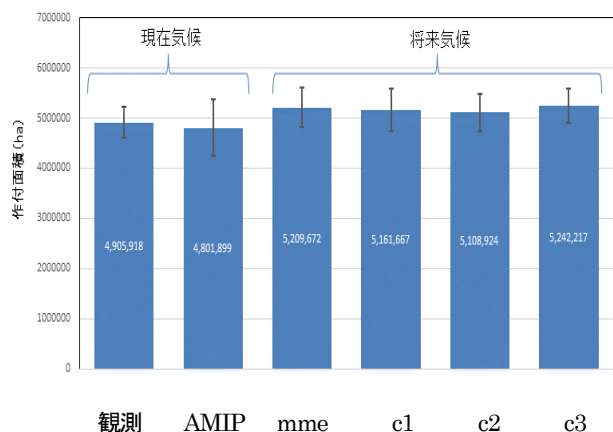


図-6 現在気候と将来気候の米作作付け面積の比較

参考文献

- 1) 海野 仁・Maksym GUSYEV・長谷川聡・千田容嗣：気候変動がインドネシア国ソロ川流域の利水に及ぼす影響評価 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_121-I_126, 2018.

6. まとめ

長期的な水資源管理を支援する観点から、RCP8.5 シナリオによる GCM 計算結果より将来の降雨条件を想定し、対象地域における渇水リスク評価を試み、以下の結果を得た。

(1) ソロ川流域 (Wonogiri ダム)

Wonogiri ダムの貯水量を計算し、灌漑面積を比較した結果、ダムの貯水に大きく依存する 2 期 (DRY) において、将来気候 c1, c2, c3 とも灌漑面積が増大する傾向が見られ、渇水リスクの減少が見込まれる結果となった。

(2) チャオプラヤ川 (Sirikit ダム及び Bhumibol ダム)

Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの流入量を計算し、灌漑可能最大面積を比較した結果、将来気候においては平均値、最小値 (25 年間の中の最小灌漑面積) とも現在気候よりも増加しており、渇水リスクの低下が示唆された。

(3) メコン川下流域

将来気候において、作付け期間中の降雨が増加することにより、米作作付け面積も増加する傾向となった。

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：徳永良雄、大原美保、栗林大輔

【要旨】

今年度は、国内外における強靱な地域社会の構築手法のうち、水害に強いまちづくり施策に着目し、国内外での既存の事例のレビューを行った。国内の事例には、誘導効果を期待した「浸水を考慮した居住誘導・水害対策への助成・融資」、対策の徹底を期待して規制を課す「開発行為制御、建築規制」、情報によるコミュニケーションにより関連主体による対策を期待した「情報公開・情報提供・地区計画・届け出」、という3つの施策タイプが確認された。海外においても「情報公開・情報提供・建築規制」の事例がある一方、「保険加入義務や対策実施時の保険料率融通」という日本国内には見られない施策も見られた。

キーワード：国土強靱化、水害に強いまちづくり、水害リスク情報、土地利用、建築規制

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

今年度は、前年度に引き続き、高精度・高度な災害リスク推計手法やリスク評価指標に関する検討を継続して行うとともに、国内外における強靱な地域社会の構築手法についての検討に着手した。国土交通省が2010年に発行した「洪水に関する気候変化の適応策検討ガイドライン」によれば、気候変化に対する適応策には「A.氾濫の危険性を低減させる対策、B.氾濫流を制御する対策、C.氾濫域において被害を軽減させる対策、D.避難・誘導等のための対策、E.応急対応、F.復旧・復興を迅速に行う対策」という6種類がある。当研究ではガイドラインに基づき、適応策のメニューを表1にまとめた。「A.氾濫の危険性を低減させる対策、B.氾濫流を制御する対策」には主として構造物の対策が挙げられており、「C.氾濫域において被害を軽減させる対策」以降には計画立案や教育・訓練等の構造物以外の対策も含まれ

表1 気候変化に対する適応策のメニュー

分類	項目	施策
A.氾濫の危険性を低減させる対策	河道の改修等による対策（河川を中心とした対策）	河道掘削
		引堤・築堤
		放水路・捷水路 水門等 内水処理対策
	河川への流出を抑制する対策（河川を中心とした対策）	ダム
		遊水地 既存施設の有効利用（既存ダム等）
	河川への流出を抑制する対策（河川を中心とした対策）流域を中心とした対策	貯留・浸透施設
B.氾濫流を制御する対策		二線堤
		霞堤
		輪中堤・宅地嵩上げ
		河畔林（水害防御林）
C.氾濫域において被害を軽減させる対策		土地利用規制
		建築物の高床化
		電気・機械設備の高所設置
D.避難・誘導等のための対策		避難・誘導
		予警報
		河川情報の提供
		ハザードマップの整備
		避難施設
		訓練 教育
E.応急対応		水防団員の確保・訓練
		水防対策
		決壊箇所の締切体制・工法
		排水対策（ポンプや水門等）
F.復旧・復興を迅速に行う対策		防災拠点の確保
		輸送ネットワークの確保
		防災業務計画
		業務継続計画
		水害廃棄物の処理
		緊急被災状況調査
		二次災害防止対策
		災害復旧工法の支援（TEC-FORCE等）

ている。「C.氾濫域において被害を軽減させる対策」に挙げられている土地利用規制・建築物の高床化・電気機械設備の高所設置等の水害に強いまちづくり対策は、あらかじめ予測された水害ハザード情報に基づいて計画的に実施することにより、未然に被害発生を防ぐことにつながる。これらの対策は、一般に、堤防・ダム等の建設等の構造物の対策に比べれば費用が少ないため、人口減少問題に直面する今後の日本において、ますます重要となる対策である。しかしながら、実際にどのようにして土地利用規制や高床化を行ったらよいか、具体的な施策については理解が不十分であるため、平成 29 年度は、これらの水害に強いまちづくり施策について、既存の国内の事例及び海外の事例のレビューを行い、今後の対策手法の検討を行った。

2. 日本国内における水害に強いまちづくり施策の事例のレビュー

本節では、日本国内における水害に強いまちづくり施策の事例をレビューする。文献レビュー及びインターネットでの検索を通して事例の収集を行ったところ、規制を課すもの、間接的な誘導を図るものなど、多様な施策が見られた。また、施策の対象範囲についても、都道府県レベルで行っているもの、市町村全域のレベルで行っているもの、市町村内のある地区レベル或いは建物単体レベルで行っているものなど、いくつかの施策レベルが見られた。よって、得られた事例について、施策が対象とする空間スケール（自治体全体・地区・単体）を縦軸に、施策の強制力（規制から誘導まで）を横軸にとり、プロットしたところ図1の通りになった。

自治体の創意工夫により様々な施策が展開されているが、①浸水リスクの高い区域に対する「建築規制」、②浸水リスクの高い区域に対する「開発行為の制御」、③浸水を考慮した「居住誘導」、④高床化などの住まいの水害対策等への「助成・融資」、⑤水害リスク情報の「情報公開」、⑥宅地建物取引業者による不動産取引時の水害リスク情報の「情報提供」⑦地区内での自発的な対策を期待する「地区計画」、⑧水害対策の実施状況に関する「届け出」という8種類の施策が見られた。図1のプロットからは、誘導効果を期待した「浸水を考慮した居住誘導・水害対策への助成・融資」、対策の徹底を期待して規制を課す「開発行為制御、建築規制」、情報によるコミュニケーション

により関連主体による自発的な対策の推進を期待した「情報公開・情報提供・地区計画・届け出」という3つの施策タイプが確認された。

一つの自治体で単一の施策を展開している場合もあるが、複数の施策を同時に展開している場合もある。滋賀県は、2014年3月31日に「滋賀県流域治水の推進に関する条例（流域治水条例）」の公布・一部施行を行い、身近な水路までも対象として10・100・200年確率の浸水予測を行った「地先安全度マップ」に基づき、浸水警戒区域の指定による建築規制（第13条）、10年確率の降雨により想定浸水深さが0.5m以上である土地は市街化区域に含めないものとする開発行為の制御を目的とした都市計画の変更（第24条）、宅地建物取引時における水害リスク情報提供の努力義務（第29条）などの新たなまちづくり手法を定めている。規制から誘導まで、自治体全体から単体まで、色々な観点での複数の施策を同時に展開している点が稀有である。水害リスクの程度は自治体によっても異なるため、水害リスクの程度や自治体の問題意識に応じて、規制・誘導等の多様な施策を組み合わせる展開していくことが必要である。

3. 海外における水害に強いまちづくり施策の事例のレビュー

本節では、海外における施策をレビューし、前節と同様に、プロット図（図2）に整理した。諸外国の中でも、特にイギリス、EU諸国のフランス・オランダ・オーストリア、アメリカを中心に事例の収集を行った。海外においても、日本国内の事例と共通するものとして、「情報公開・情報提供・建築規制」が見られたが、制度の詳細に関しては日本の事例との違いも存在した。一方、日本には見られない事例として、水害リスクの高い区域における「保険加入義務や対策実施時の保険料率融通」という施策が見られた。

① 人的リスクに関わる情報公開

「情報公開」に関しては、EU 加盟国は「洪水リスク評価と管理に関する欧州議会・理事長指令」（洪水指令、Flood Directive）に基づき、洪水リスクマップ公表、水害リスクに応じた土地利用、建築規制・誘導等の先進的な取り組みを行っている。EU の法体系には、「規則（regulation）」、「指令（Directive）」、「決定（Decision）」という3種類があり、「指令（Directive）」

とは、加盟国に対して当該の目的を達成する法律を定めることを求めるものである。指令では各項目について期限を決め、各国に関連する法整備を義務付けており、この洪水指令では下記を義務付けている。

- ・予備的な洪水リスクアセスメントの実施：2011年12月まで
- ・洪水ハザードマップと洪水リスクマップの作成：2013年12月まで
- ・洪水管理計画の作成：2015年12月まで

洪水ハザードマップは、「(a) 低頻度あるいは極端な出来事のシナリオ、(b) 中頻度の洪水（再現期間約100年以上）、(c) 高頻度の洪水」のシナリオの下に、(a) 洪水の範囲、(b) おおまかな水深、(c) 適切な場所における流速あるいは主要な水の流れを示すものとされている。また、洪水リスクマップについては、(a) 影響人口、(b) 影響を受ける可能性のある地域の経済活動のタイプ、(c) 環境保護と関係する施設、(d) その他加盟国が有用とみなす情報（土石流等の起きうる地域や深刻な汚染源に関する情報など）を示すものとされている。

浸水深さ等を示したハザードマップだけでなく、影響人口など人的リスクに関わるような情報提供も行っている点が特徴的である。

EU諸国の一つでもあるオランダは、国土の4分の1が海拔0m以下であり、2011年から毎年、水害リスク管理と淡水供給を目的としたデルタプログラム（Delta programme）という水災害対策の方針を公表している。Delta programme 2014では、水害リスク管理に関する3つの目標が明確にされている。

- ・リスクベースのアプローチ（Risk-based approach）の手法を用いて、デルタ地域に住む住民が洪水で死亡する確率を10万分の1にする。
- ・経済的な損害や人的被害を軽減するため、社会的な混乱を避ける。
- ・公共施設や病院のような重要な施設や脆弱な場所の欠損を防ぐ。

この目標のもと、オランダ政府はこれまでのダイク・リングごとの安全水準を廃止し、デルタ地域に住む住民が洪水で死亡する確率を10万分の1にするというリスクベースのアプローチにもとづき、一定の「堤防延長区分」ごとに安全水準を決める方針に変更した。人的リスクに関わる情報を作成するだけでなく、それらに基づきインフラの安全水準を決定するという点で、一歩進んだ事例と言える。

② 保険業界と連携した情報公開

イギリス環境庁（Environment Agency）は2000年以降、全国の洪水地図をホームページで公開しており、2013年12月以降は「河川及び海からの洪水危険地図」（Risk of Flooding from Rivers and the Sea Map）として公表している。洪水の危険度は4段階（高・中・低・非常に低い）で評価され、表示されるようになっている。個別の民間保険会社は、環境庁が公表するこの土地のリスク情報を利用し、さらに物件ごとのリスク評価を加える形で保険料率を設定し、顧客に水害保険を提供している。水害土地利用規制と保険とは法制度として直接リンクしているわけではないが、公的機関による情報提供と保険業者のリスク評価を通じて両者が間接的に連動している点が特徴的である。

オーストリアにおいても、このような保険会社との連携の事例が見られる。オーストリアでは、2002年に発生した大規模な洪水を契機として、国レベルでの洪水マップ作成プロジェクト、HORAが発足した。HORAとは、Hochwasser Risikoflachen Austriaの略であり、英訳するとFlood Risk Zone in Austriaとなる。EU諸国は、EUによる洪水指令に基づき、洪水リスクゾーンを示したマップの作成が義務付けられている。HORAプロジェクトは、EU洪水指令に基づきオーストリア政府がマップを作成するという目的だけでなく、オーストリアの保険業協会が洪水保険を適応する際の保険料算定の手段およびツールを得るという目的も兼ねており、政府と保険業者の双方の目的のもと、両者がパートナーシップを組んで洪水マップの作成・公表を行うという、欧州では他に例をみないプロジェクトに発展している。

③ 情報提供

「情報提供」に関しては、イギリス・フランス・アメリカ合衆国カリフォルニア州において、不動産取引時に水害リスク情報の提供を求める制度が存在する。

イギリスでは、不動産売買の際に、英国法律協会は、売主（不動産業者に限定されない）に対して、英国法律協会が定める不動産情報様式（TA6）の提出を求める。TA6は、売主が取引対象物件の詳細情報を説明するための様式である。環境に関する項目の中に水害に関する情報欄があり、取引対象の土地についての過去の水害の有無、水害の種類、水害リスク

報告書作成の有無などの情報により構成される。これは、取引対象の土地における災害履歴等の認識の有無に関して嘘偽りなく回答することを求めるものである。

フランスでは、予見可能な自然災害の防止計画 (Plan de prevention des resques naturels previsibles、PPR) が認可、即時適用ないし起草されている地域で不動産の売買・賃貸をしようとする所有者は、契約に際して、譲渡人・賃借人に対して以下の情報を提供する義務を負っている。

- ①物件の場所、PPRの法的状態(認可されたものかどうか等)、考慮されている災害の種類(洪水、地震、雪崩等の別)等を記した書類
- ② 保険金の支払いを受けた過去の災害

国土整備省はこの手続きのための書式雛形を用意しており、当事者はこれに必要事項を記載し、署名することになっている。この義務は不動産業者であるかどうかは問わない。譲渡人・賃借人が上記の義務を怠った場合、譲受人・賃借人は契約を解除するか裁判所に減額請求ができることとされている。

米国カリフォルニア州では、1972年に制定された活断層ゾーン法をはじめとして、洪水・土砂災害・森林火災などの災害リスクに応じた土地のゾーニングが進んでいる。1998年にはカリフォルニア州法 (California Civil Code) であるハザード情報公開法 (The Natural Hazards Disclosure Act) が制定され、宅地建物取引時に売主が買主に対して、物件が特別洪水危険区域、活断層ゾーン等の危険ゾーン内に存在しているかどうかを「はい・いいえ」により明示した、「ハザード説明書 (Natural Hazard Disclosure Statement)」等を渡して、情報を告知することが義務付けられた。適用は売買及び類似の取引に限定されており、賃貸は含まれていない。

④建築規制

イギリスでは、国の計画方針枠組み (National Planning Polict Framework, NPPF) に、洪水対策に関する政府・住民・事業所等の関係者の責任分担が明確に示されており、「洪水リスクのある地域での不適切な開発は避けられるべきである」と明記されている。イギリスでは、これに基づき、通常の都市計画の体系の中で、水害リスクをふまえた土地・建物の規制が行われている。国は、地方計画庁等が都

市計画を策定する際のガイドラインとなるPSP(Planning Policy Statement)の一つとしてPPS25を発出し、洪水確率による危険度に応じて、都市計画の対象となる区域を4つに区分している。PPS25では、洪水リスク脆弱性に応じた土地利用の分類がなされ、ゾーン区分と洪水リスク脆弱性をもとに、どの区分でどのような土地利用・施設立地が可能であるかが示されている。地方計画庁はPPSを尊重しなければならないが、例外テスト (Exceptional Test) に合格すれば、計画許可申請に対して例外的に許可を下すこともでき、地方計画庁の裁量が働く余地がある。

オーストリア連邦政府では、2015年1月に公表した水害リスク管理計画の素案において、水害リスク管理の施策として22の施策を挙げており、PREVENTION (予防的対策) の中で、1)洪水危険区域の指定、2)危険区域の空間計画への反映、3) 危険区域の流域管理計画との連携、4)耐水建築物などによる適応策、5)対策を進める地域組織や社会的な仕組みを挙げている。スケール1:5000を基準とした洪水ハザード・ゾーンマップが、水害リスクが特に高い区域の土地利用を規制するための根拠を与えるマップとして使用され、原則として、再現期間30年の区域は建築禁止、100年の区域は住宅や重要な施設の建設禁止、などの建築規制が課されている。ただし、マップ策定済みのエリアは特定の居住区域に限定されている。

アメリカでは、1/100年確率の洪水により浸水する区域を特別洪水危険区域 (Special Flood Hazard Zone、1/100 確率の洪水) または高リスク区域 (high risk area) として規定している。河川沿いの特別洪水危険区域は洪水保険料率地図上で A ゾーンと呼ばれており、1/100年確率洪水により浸水する池状であるAE区域と、1/100年確率洪水により平均1-3フィートが浸水するAH区域、1/100年確率洪水により平均1-3フィートが浸水する傾斜地であるAO区域に分けられる。Aゾーン内の新規建築物又は大規模改良又は大規模に破損した既存建物の最も低い(地下室を含む)床高さは基準洪水位以上としなくてはならない。Aゾーン内の非居住用建物については、必ずしもかさ上げではなく、洪水に耐えうる構造とすることも可能である。

イギリス・オーストリアの事例では、区域の水害リスクの程度に応じて立地可能な建物を規定してい

るのに対し、アメリカの事例は床高を規定している点が特徴的である。

⑤ 保険加入義務及び対策実施時の保険料率優遇

アメリカでは、1968年の国家洪水保険法(National Flood Insurance Act, NFIP)に基づき、保険を通じた個人の洪水被害に対する補償、州及びコミュニティによる氾濫原管理規制を通じた将来の洪水被害の低減、災害援助及び構図時対策のための連邦政府の支出削減を目的として、国家洪水保険が創設された。NFIP1315節は、氾濫原管理基準に合致またはより厳しい氾濫原管理規制をコミュニティが採用しない限り、FEMA(連邦危機管理庁)に洪水保険提供を禁じている。1973年洪水災害防御法は連邦機関及び連邦政府が保証または管理している融資業者に対して、NFIPに参加しているコミュニティの特別洪水危険区域内の建物の取得・建築のためのすべての助成及び貸付において、洪水保険を要件とするように求めている。また、これらの区域においては、水害対策を実施した場合には保険料率の優遇を受けられる制度も存在する。

日本においては、水害保険は強制加入ではなく、対策の程度に応じた優遇制度等は存在しない。水害保険の加入率の拡大を目指して、このような浸水リスクの程度に応じた水害保険の誘導を行うことも必要ではないかと考えられる。

4. まとめ

今年度は、国内外における強靱な地域社会の構築手法についての検討に着手した。国土交通省が2010年に発行した「洪水に関する気候変化の適応策検討ガイドライン」によれば、気候変化に対する適応策には「A.氾濫の危険性を低減させる対策、B.氾濫流を制御する対策、C.氾濫域において被害を軽減させる対策、D.避難・誘導等のための対策、E.応急対応、F.復旧・復興を迅速に行う対策」という6種類がある。このうち、「C.氾濫域において被害を軽減させる対策」に焦点をあて、水害に強いまちづくり施策について、既存の国内の事例及び海外の事例のレビューを行い、今後の対策手法の検討を行った。

既存の国内の事例をレビューした結果、誘導効果

を期待した「浸水を考慮した居住誘導・水害対策への助成・融資」、対策の徹底を期待して規制を課す「開発行為制御、建築規制」、情報によるコミュニケーションにより関連主体による自発的な対策の推進を期待した「情報公開・情報提供・地区計画・届け出」、という3つの施策タイプが確認された。

海外における施策をレビューした結果、日本国内の事例と共通するものとして、「情報公開・情報提供・建築規制」が見られたが、特に情報公開において人的リスクに関わる情報の公開・活用、保険業界と連携した情報公開などの、新たな方向性が見られた。一方、日本には見られない事例として、水害リスクの高い区域における「保険加入義務や対策実施時の保険料率融通」という施策が見られた。これらの日本には見られない事例については、引き続き、日本における適用可能性について検討していく必要がある。

謝辞：国内外の既存事例の収集のうち、特に海外の事例について芝浦工業大学の中村仁教授、兵庫県立大学の馬場美智子准教授のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：洪水に関する気候変化の適応策検討ガイドライン、2010.
- 2) 吉田恭・古本一司・馬場美智子：イギリスにおける水害土地利用規制・誘導と関連諸制度に関する研究、都市計画学会論文集、45巻1号、pp.63-71、2010.
- 3) 吉田恭・古本一司・馬場美智子：フランスにおけるPPRを中心とした防災型土地利用規制に関する研究、都市計画学会論文集、46巻1号 pp.88-98、2011.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国総研プロジェクト研究報告 第56号、河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究－「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとして－、2017.4

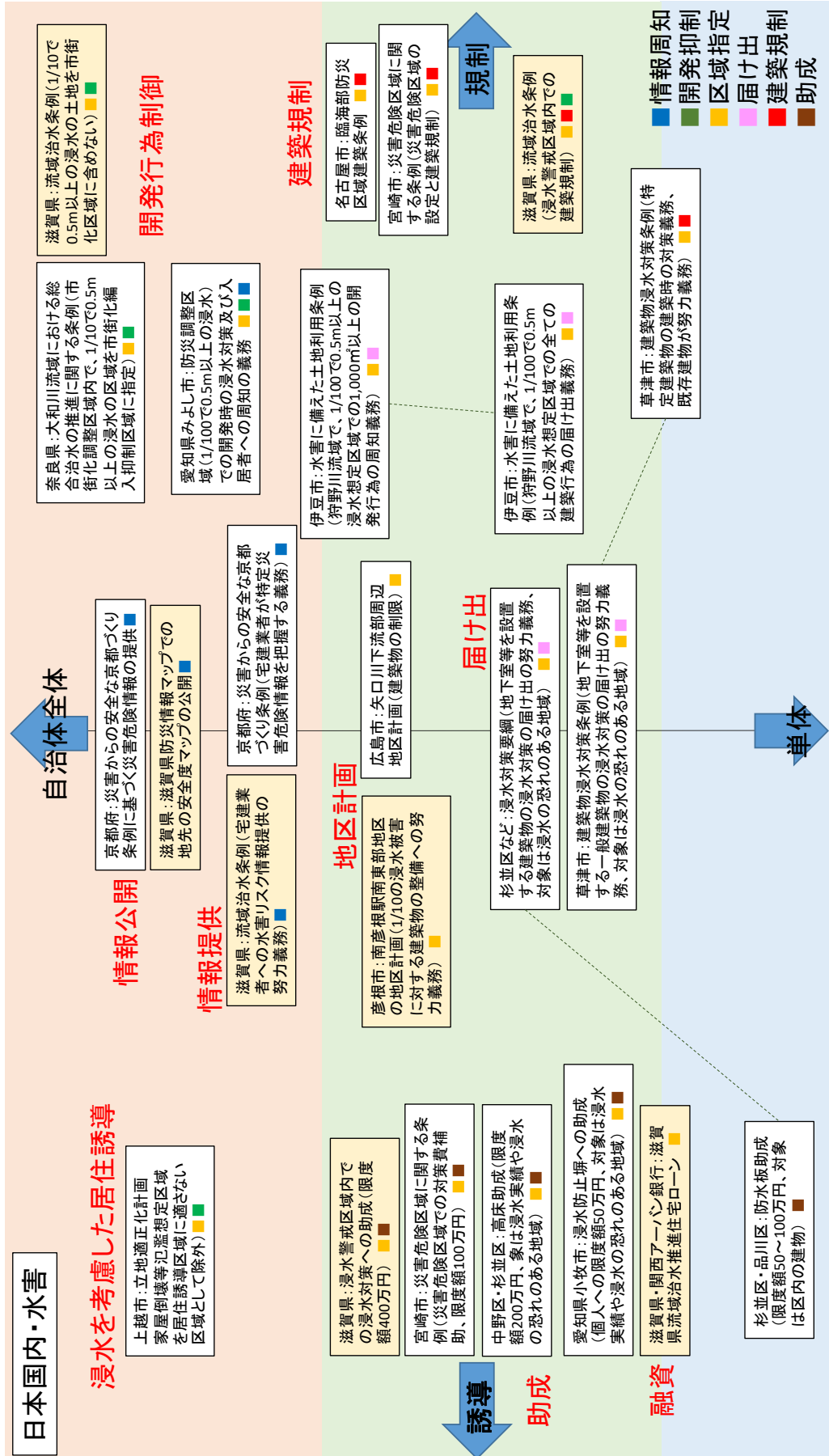


図1 日本国内における水害に強いまちづくり施策の事例

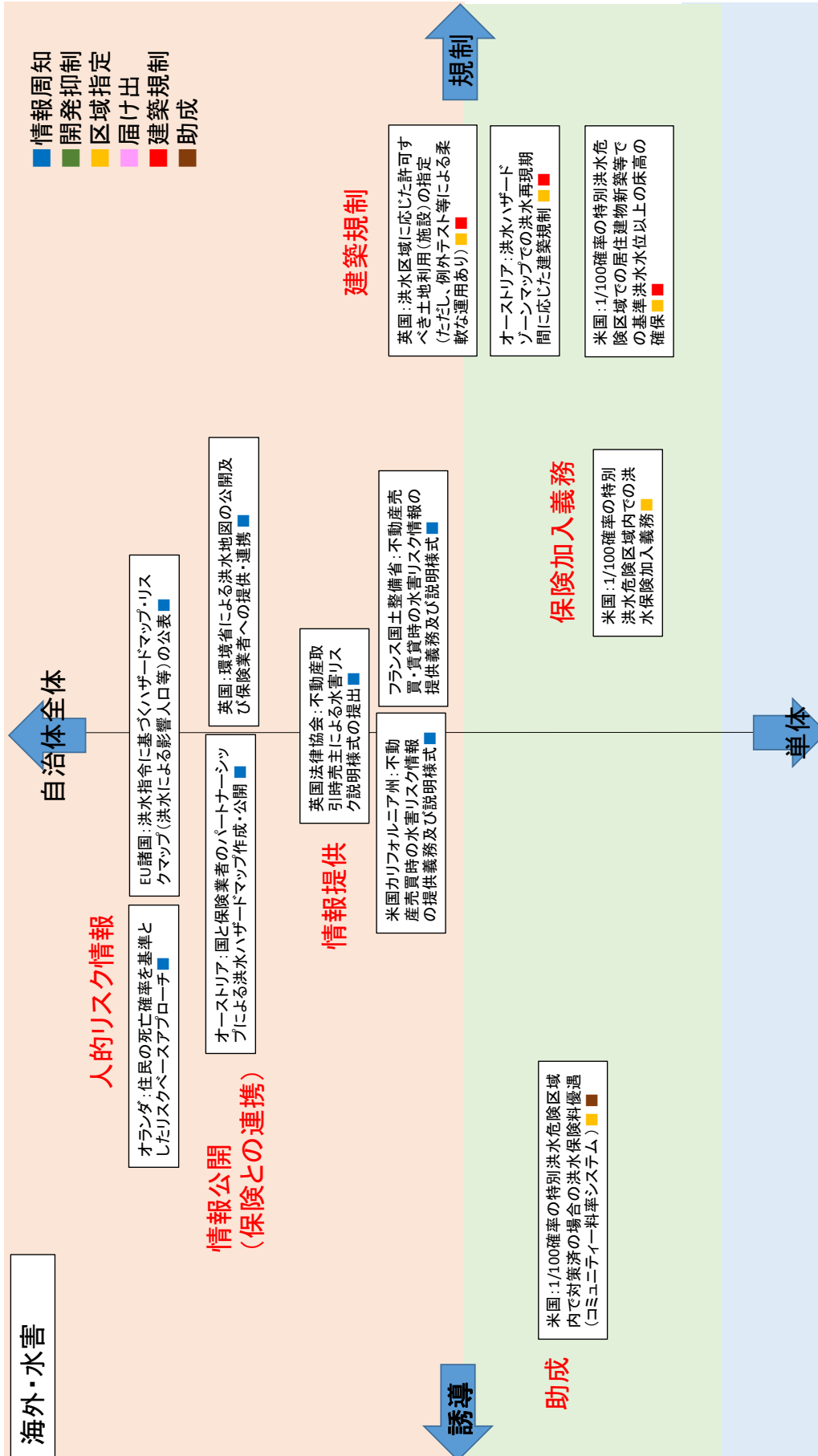


図2 海外における水害に強いまちづくり施策の事例

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：徳永良雄、栗林大輔、大原美保

【要旨】

本研究では、わ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、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考慮した新たな水災害リスク評価指標を設定する。さらに、それらの情報を防災担当者や住民と共有し、防災・減災活動で利活用するため、「水災害情報共有システム」を開発する。

本年度は、前年度に基礎仕様を検討した「ICHARM 災害リスク情報共有システム (ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS)」のプロトタイプとして、新潟県阿賀町での利活用を想定した「阿賀町水災害情報共有システム(ARIS)」を試作した。試作に先立ち、阿賀町に関連する既存の防災情報共有システムについて整理した。ARIS 試作後、阿賀町の防災関係者にアンケートを行い、地区防災への有用性を確認した。

キーワード：防災・減災、災害リスク情報共有システム、阿賀町

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。そのため、発災前に様々な情報を収集・創出し、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、災害被害を軽減できる可能性が高い。特に、中山間地の市町村においては、以下の課題を抱えているため、防災情報の有効活用と、それを活用した地区防災計画策定が求められている。

- 構造物対策に多額の予算をかけられない
- 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には、防災対応の経験が豊富で防災の詳しい知識を持つ防災担当者が少ない
- 平成大合併で市域が拡大し、担当者が馴染みのない地域が多くなるとともに、現地の状況把握により時間がかかるため、対応策の決定（優先順位付け）に手間取ることがある

- 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、わ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」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。

2. 対象地域の概要

新潟県東蒲原郡阿賀町は、町の中央を阿賀野川とその支流の常浪川が流れ、その沿岸の段丘を中心に開けた山間地域にある（図 1）。中心部は比較的平坦であるが、周辺は急峻な山岳地帯に囲まれている。面積は 952.89km²（新潟県 3 位）、高齢化率は 47.3%（新潟県 1 位（新潟県平均 31.3%）¹⁾）であり、災害に対する脆弱性が高い。平成 23 年 7 月には新潟・福島豪雨による洪水が発生し、町内で最大 933 人が避難し、一般住宅 329 棟が被災するなど甚大な被害を被った。この災害を契機に、東北電力のホームページ上での 1 時間おきのダム情報の公開が開始された。また、阿賀町より下流部分の阿賀野川は、国土交通省阿賀野川河川事務所、および上流部分は同阿賀川河

図1 阿賀野川流域概要図²⁾

川事務所の管理となるが、阿賀町付近の区間は新潟県が管理しており、水位周知河川に指定されているが洪水予報河川ではない。国の直轄河川管理区間と比較すると防災情報は質・量とも少ないのが現状である。

3. 阿賀町に関する既存の災害情報共有サイト

本項では、新潟県阿賀町に関する災害情報を提供している国や県による5つの災害情報共有サイトを調査し、これらのサイトに掲載されているコンテンツと、そうでないコンテンツを比較する。なお、阿賀町では独自に管理する災害情報共有サイトは有していない。

国の河川管理者たる国土交通省は、①「信濃川下流域・阿賀野川情報共有プラットフォーム」³⁾を管理・運営している。また新潟県では各部局が、河川情報だけでなく、洪水や土砂災害に関する防災情報を以下のサイトで公開している。

- ② 新潟県防災ポータル 防災マップ⁴⁾
- ③ スマホ版「新潟県土木防災情報システム」⁵⁾
- ④ 新潟県土砂災害警戒情報システム⁶⁾
- ⑤ 新潟県河川防災情報システム⁷⁾

表1に、①から⑤のサイトの利便性やコンテンツについて、「A. システムの利便性」「B. 平常時の防

災意識向上に関する情報」「C. 緊急時の災害対応に必要な情報(リアルタイム情報)」「D. 国・自治体等による災害対応の情報」の4つの観点で分類し、それぞれの細項目ごとに内容を整理した。なお、他のサイト(気象庁など)にリンクすることで情報を提供している場合も該当するものとして含んだ。表1からは以下のことがわかる。

「A. システムの利便性」については、ほとんどのサイトは、背景地図の拡大・縮小が自由にでき、背景地図を複数から選択できる。スマートフォンでの操作性は③以外はあまり考慮されていない。多言語対応については、②のみ対応している。また、ログインシステムによる利用者に応じた情報の選択提供は、どのサイトでも行われていない。

「B. 平常時の防災意識向上に関する情報」については、どのサイトもあまり考慮されていないようである。土砂災害警戒区域図は②・③・④で掲載されているが、浸水想定区域図は上記サイトのいずれでも掲載されていない。浸水想定区域図は新潟県土木部河川管理課の別サイト(「新潟県の浸水想定区域図」)で公開されているものの、例えば現在の降雨の分布状況を見ながら自宅が浸水想定区域に含まれるかどうかを知りたい利用者にとっては、別々のホームページを閲覧する必要がある。

「C. 緊急時の災害対応に必要な情報(リアルタイム情報)」については、Bとは逆に、気象庁のホームページにリンクを張るなどして、出来るだけ多くの情報を得られるよう配慮されている。予測降雨については、気象庁サイトがあるからか、掲載しているサイトは少ない。ダム情報については、県管理ダムに関する情報は②・③・⑤で掲載されているものの、他の主体によるダム(電力ダム)の情報は掲載されていない(電力ダムの情報自体は、電力会社のホームページで閲覧可能)。

「D. 国・自治体等による災害対応の情報」については、現地の状況を知るために、①・②・③ではCCTVによるカメラ映像が共有されている。また、自治体から発信される情報は、①・②で掲載されている。

各サイトのシステムやコンテンツを整理すると以下のことがわかる。まず、「A. システムの利便性」に関しては、多言語対応が可能なのは②のみである。また、スマートフォンでの操作性が高いのは③である。ログインシステムを設けているサイトはなく、利用者のレベルに応じた情報提供は行われていない。

「B. 平常時の防災意識向上に関する情報」に関して

表2 本研究で開発する災害情報共有システムに含める機能/コンテンツ（予定含む）

表1の分類	機能/コンテンツ	ARISにおけるデータ提供元
A. システムの利便性	A-1. 背景地図の選択機能 A-2. ログインシステム（利用者選択）機能 A-3. マップ情報の拡大縮小・重ね合わせ機能 A-4. スマートフォン対応機能	
B. 平常時の防災意識向上に関する情報	B-1. 土砂災害警戒区域図 B-2. 浸水想定区域図 B-3. 阿賀野川の過去の洪水の実績浸水図と等雨量線図 B-4. 過去の災害写真アーカイブ B-5. 様々な洪水による氾濫シミュレーション結果 B-6. 阿賀町の情報（公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等）	新潟県土木部砂防課 新潟県土木部河川管理課 新潟県土木部河川管理課・気象庁 阿賀町住民 筆者ら 阿賀町役場
C. 緊急時の災害対応に必要な情報（リアルタイム情報）	C-1. レーダーによるリアルタイム降雨情報 C-2. レーダーによる予測降雨情報 C-3. 河川流量・水位予測情報〔予定〕 C-4. 県管理河川水位情報（4か所） C-5. 電力ダム情報（3か所、水位・貯水量） C-6. リアルタイム氾濫予測情報〔予定〕 C-7. 現地のリアルタイム写真情報	気象庁 気象庁 筆者ら 新潟県 東北電力 筆者ら —
D. 国・自治体等による災害対応の情報	D-1. 町からのお知らせ D-2. 町内各地区の情報（避難情報など）	阿賀町役場 阿賀町役場

下の観点により、「eコミュニティ・プラットフォーム」を基盤システムとして採用することとした。

- ① 「eコミュニティ・プラットフォーム」は、オープンソースソフトウェアであり、IT技術の進歩に合わせたプログラムソースの改善・向上が期待できる
 - ② 「eコミグループウェア」は、各パーツで構成されているため初心者でも操作やレイアウトの変更が容易である
 - ③ 「eコミマップ」は、利用者制限を行いながら参加型で地図を作製したり情報を登録できるため、利用者を選択して災害情報を提供することが可能である
 - ④ 「eコミマップ」は、スマートフォンでの操作性が高いため、一般住民でも利用しやすい
 - ⑤ 「eコミマップ」には、「ファイル倉庫」機能があるため、過去の災害写真のアーカイブを作成することが容易である
 - ⑥ 言語ファイルを変えれば他言語でもシステムを提供できるため、海外への展開も容易である
- これらの点を踏まえ本研究では、「eコミグループウェア」を基盤システムとしてシステム構築を行い、災害情報を提供する主要パーツとして「eコミマップ」を活用することとした。

4.3 「IDRIS」におけるコンテンツの考え方

一般的に災害情報共有システムは、緊急時の利用が主であるが、平常時にもシステムに触れ、防災意識を向上してもらうとともに、緊急時の活用を円滑にする必要がある。そのため、本研究で提案する災害情報共有システムは、既存の災害情報共有システムと比べて「B. 平常時の防災意識向上に関する情報」をより充実させ、平常時から緊急時までシームレスな情報提供・利用を可能としたのが大きな特徴である。すなわち、緊急時に必要となる降雨情報や河川水位情報などのリアルタイム情報はもちろん、平常時から利用できるように、土砂災害警戒区域図や浸水想定区域図、過去の浸水区域図や過去の災害の写真など、過去の実例を振り返って将来の防災意識向上につなげることのできるコンテンツを多く含めている。これらは地区レベルの地区防災計画作成や小中学校での防災教育にも活用できる。

4.4 「IDRIS」のプロトタイプ試作：阿賀町水災害情報共有システム(ARIS)

以上のような検討を踏まえ、「IDRIS」では表2に挙げる機能やコンテンツを備えることとし、阿賀町を対象にプロトタイプを試作した。システムの名称は、阿賀町との協議のもと、「阿賀町水災害情報共有システム（Aga town Risk Information System: ARIS（アリス）」とした。「ARIS」は「IDRIS」の阿賀町版という位置づけである。主要なコンテンツ



図2 「阿賀町水災害情報共有システム (ARIS)」のトップページ画面 (上部部分)

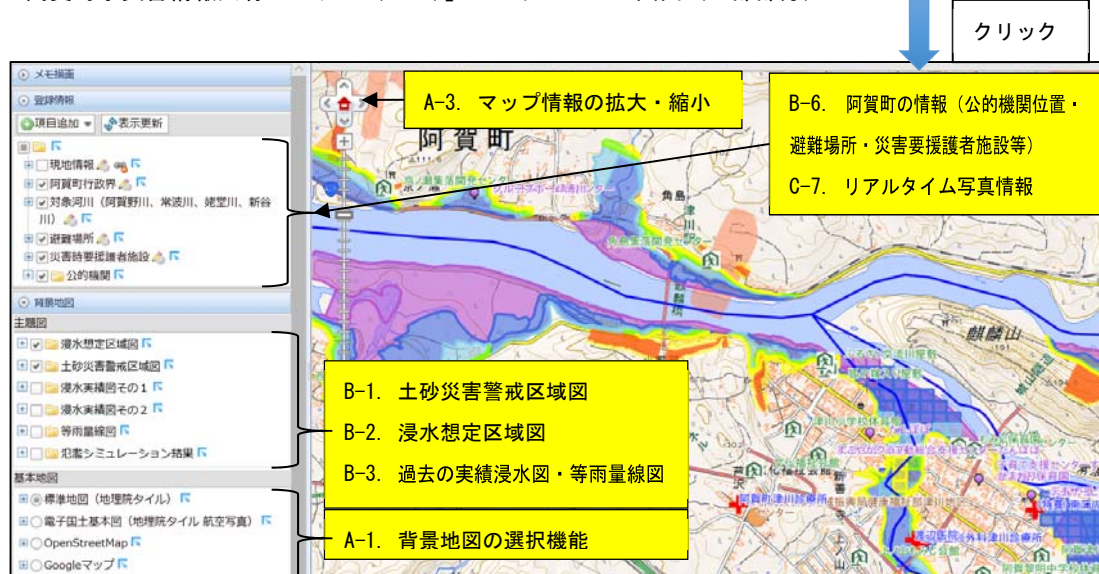


図3 「B-1. 土砂災害警戒区域図」、「B-2. 浸水想定区域図」および「B-6. 阿賀町の情報 (公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等)」の3つのコンテンツを重ね合わせた「リスクマップ」の一例

を以下説明する。

まず、「A.システムの利便性」に関しては、e コミの機能を最大限生かし、「A-1.背景地図の選択機能」、「A-2.ログインシステム（利用者選択）機能」、「A-3.マップ情報の拡大縮小・重ね合わせ機能」、「A-4.スマートフォン対応機能」を備えたシステムとなっている。特に、「A-2.ログインシステム（利用者選択）機能」を採用したことが大きな特徴である。これにより、閲覧者を限定したコンテンツ（氾濫予測結果などを想定）を表示することが可能で、例えば、阿賀町においては町役場の防災担当者・水防団関係者・区長・住民などのカテゴリに応じて閲覧できるコンテンツを制限できる。「A-3.マップ情報の拡大縮小・重ね合わせ機能」によって、後述のように様々なリスク情報を重ね合わせて表示でき、災害リスクの理解が容易に可能になる。さらに「A-4.スマートフォン対応機能」により、屋外でも、あるいは観光客のような外来者でも簡単に災害情報を共有できる。以前阿賀町役場防災担当者からは、観光客などの外来者に対する防災情報の提供が課題であると伺ったこともあり、ARISはその解決の一つの手段となる。

「B.平常時の防災意識向上に関する情報」に関しては、他の災害情報共有システムとの差別化を図るため、多くのコンテンツを含むようにした。特に、「B-3.過去の洪水の実績浸水図と等雨量線図」、「B-4.過去の災害写真アーカイブ」、「B-5.様々な洪水による氾濫シミュレーション結果」を含めたのが大きな特徴である。「B-4.過去の災害写真アーカイブ」は、重要な資料でありながら散逸しがちな災害時の写真をストックしておく「器」として、e コミマップの「ファイル倉庫」機能を活用して用意したものである。また、「B-5.様々な洪水による氾濫シミュレーション結果」は、筆者らが過去に阿賀町で実施した、5 ケースの氾濫シミュレーションの最大浸水深結果を地図上に示したものであり、想定最大外力相当降雨による町全体の氾濫情報などを確認できる。

これらの他、「B-1.土砂災害警戒区域図」、「B-2.浸水想定区域図」および「B-6.阿賀町の情報（公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等）」を含んでいる。「B-1.土砂災害警戒区域図」と「B-2.浸水想定区域図」は、それぞれ新潟県砂防課と河川管理課のホームページで別々に公開されており、現在はそれぞれを重ね合わせて表示できないが、ARISにより重ねあわせて表示することが可能で、洪水と土砂災害のリスクを同時に把握できる。

「B-4.過去の災害写真アーカイブ」以外のコンテンツについては、レイヤー形式で重ね合わせることが可能である。例えば「B-1.土砂災害警戒区域図」、「B-2.浸水想定区域図」および「B-6.阿賀町の情報（公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等）」の3つのコンテンツを重ね合わせ、「リスクマップ」の一例として表示している。これにより、洪水・土砂災害の災害リスクを住民が一目で簡単な形で理解できる（図3で表示）。

「C.緊急時の災害対応に必要な情報（リアルタイム情報）」に関しては、既存の災害情報共有システムにも含まれているリアルタイム情報に関するコンテンツを多く収録し、緊急時にも十分利用可能となっている。特に、「C-1.レーダーによるリアルタイム降雨情報」、「C-2.レーダーによる予測降雨情報」では、地図上の降雨メッシュの一つをクリックすれば、そのメッシュにおける過去1時間の10分降雨と将来1時間の10分降雨が折れ線グラフで表示される。なお、これらの情報表示については、e コミマップでのアニメーション表示に技術的な検討を要しているため、現時点では、ARISからリンクさせた別のシステムでの表示としている。

「C-5.電力ダム情報（3か所、水位・貯水量）」は、既存の災害情報共有システムには含まれていないコンテンツである。事前の阿賀町へのヒアリングにより、電力ダム情報は、防災活動の重要な目安として重視されていることが分かっている。特に、平成23年7月洪水で大きな被害を受けた、揚川ダムの下流地区では、揚川ダムの放流量で避難勧告等が発令されるため、阿賀町の防災関係者および住民にとっては最も重要な災害情報の一つであるため、ARISに採用することとした。表示場所は、目立つようにARISのトップページの右上とし、表中のダム名をクリックすると、現時刻までの1時間ごと48時間分の貯水位・全流入量・全放流量の各データが折れ線グラフと共に表示される。なお、東北電力のホームページでも同じ情報は閲覧できる。

新潟県が管理している「C-4.県管理河川水位情報（4か所）」のリアルタイム情報も、ダム情報と同様の形式で表示される。

「C-7.現地のリアルタイム写真情報」は、参加型の共有システムであるARISの大きな特徴の一つである。これは、災害が起こりそうな際に地元の区長や水防団員が危険な状況となっている箇所の写真を撮り、その場でARISにアップロードし、役場の防災担当

者を含めた関係者間で共有し、迅速な減災対応に繋げようとするものである。現在我が国での多くの実際の災害対応では、住民から被害の通報が役場や警察に電話でなされ、その後役場職員が現地まで赴いて状況を確認し、役場に戻って対応策を協議することが多く、非常に労力と時間を費やしている。また、最近では市町村合併により市域が拡大した自治体が多く、現場に赴くだけでも大変な労力である。これに対し、ARISにより現地の状況がほぼ瞬時に、労力少なく関係者に共有されれば、これまでにない迅速な対応が可能になると思われる。

「D.国・自治体等による災害対応の情報」に関しては、防災に関する町からのお知らせや、地区ごとの避難に関する情報などを掲載することが出来る。

これらのコンテンツを閲覧者の負担が少なくなるよう、レイアウトを工夫し、ARIS トップページを図2のように構成した。左列には、上からログインシステム、カレンダー機能、災害アーカイブと並んでいる。中央には町からのお知らせや地区の情報が表示される。右列には、上からダム情報、水位情報が表示されるようにし、防災上重要なリアルタイム情報としてすぐに閲覧できる位置に配置している。その下には「B.平常時の防災意識向上に関する情報」として、eコママップで作成した各マップのサムネイルを表示し、それをクリックすれば、図3のように別ウィンドウでマップ画面が開き、各マップの閲覧とそれらを重ね合わせて表示することが可能となる。

5. 阿賀町防災関係者へのアンケート

ARIS 完成後、阿賀町役場の防災担当者、消防本部担当者および洪水に脆弱な地区の区長という防災関係者を対象に、ARIS に対するデモンストレーションとアンケートを実施した。まず、ARIS の開発経緯とその特徴を説明し、実際に ARIS 画面を見ながら、利用のデモンストレーションを行い、その後その場でアンケートを行った。アンケートの要領は以下の通り。

- 日時：平成 30 年 3 月 22 日（木）13:30-14:30
- 場所：阿賀町役場会議室
- 参加者：計 14 名 [阿賀町消防本部所属（6 名）、阿賀町役場所属（5 名）、区長など(3 名)、すべて男性]
- 質問項目：付録に示す計 7 つの質問

以下、主要な質問の回答結果について考察する。なお、回答者は全員、一般住民の防災に何らかの責任を

有するため、防災に対する意識はそもそも一般住民より相当高いことに留意する必要がある。

質問 A-3 では、平成 23 年 7 月洪水の際に入手した情報を尋ねている。その結果図 4 のように、現在の雨の情報、気象警報、阿賀町内ダムと上流域ダムの放流情報、河川水位は多くの回答者が入手していたことが分かった。数時間後の雨の情報や周辺自治体の被害状況は、いずれも半数程度の回答であり、防災関係者でもあまり入手されていなかったようである。

質問 A-4 では、災害時に特に重要な情報について、5 つまで回答して頂いた。その結果図 5 のように、「阿賀町における現在の雨の情報」「阿賀町における数時間後の雨の情報」「現在の河川水位」「ダムの放流情報」が特に重要視されていることが分かった。これら 4 つの情報は、いずれも ARIS に含まれているコンテンツである。これらは、別々のサイトで情報を入手できるものの、ARIS のようなシステムで一元的に情報を閲覧できることは、防災活動を行う上で効果的・効率的であると考えられる。

質問 B-1 では、ARIS の主な 7 つの機能について、それぞれの役立ち度を 4 段階（ほとんど役立たない・あまり役立たない・そこそ役に立つ・かなり役に立つ）で尋ねた。結果を図 6 に示す。いずれの機能についても役に立つとの回答を頂いたが、特に、「災害に関するいろいろな情報を重ね合わせて見られる機能」「スマートフォンでも見られる機能」「災害に関するいろいろな予測情報が見られる機能」「災害が起こりそうな際に現地の情報を写真で共有できる機能」の評価が高かった。

質問 B-2 では、災害時に ARIS で見る頻度が上がる情報について尋ねた。結果を図 7 に示す。「雨量予測情報」が最も回答数が多く、次いで浸水予測や河川水位・流量予測情報であった。各種リアルタイム情報も同程度の回答数であった。また、ARIS 独自の提供情報である「危険個所の写真」も回答数が多く、期待度が高いことがうかがえた。

質問 B-4 では、ARIS を用いて防災教育や防災意識啓発活動を行うことで、住民の防災意識向上になるかどうかを尋ねた。その結果、「強く思う」が 6 名、「まあそう思う」が 7 名となり、ARIS を活用した防災意識向上へのニーズが高くあることがうかがえた。

以上の結果、阿賀町防災関係者からは ARIS の各機能を高く評価頂くとともに、活用に対する期待も高いことがうかがえた。

2 国内外で頻発、激甚化する水災害に対するリスクマネジメント支援技術の開発

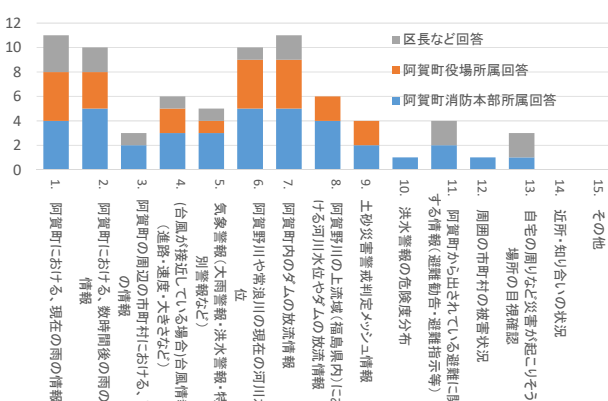
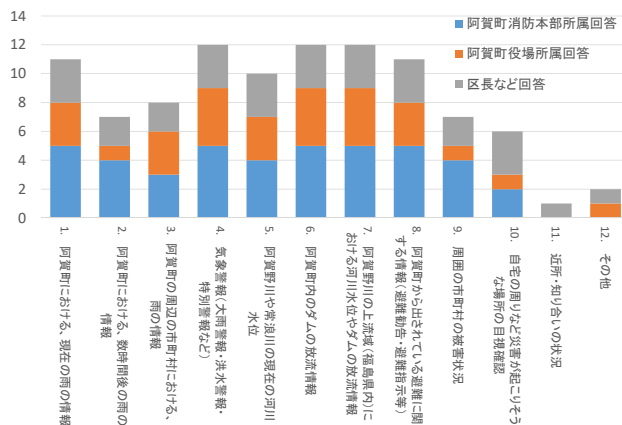


図4 平成23年7月洪水に際し入手した情報（複数選択） 図5 災害時に特に重要な情報（5つまで複数回答）

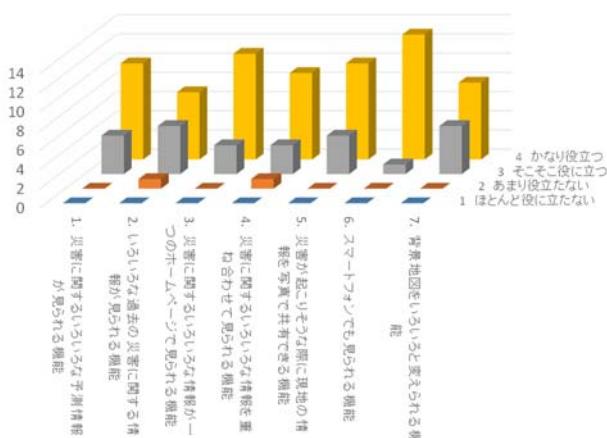


図6 役立つと思われるARISの機能

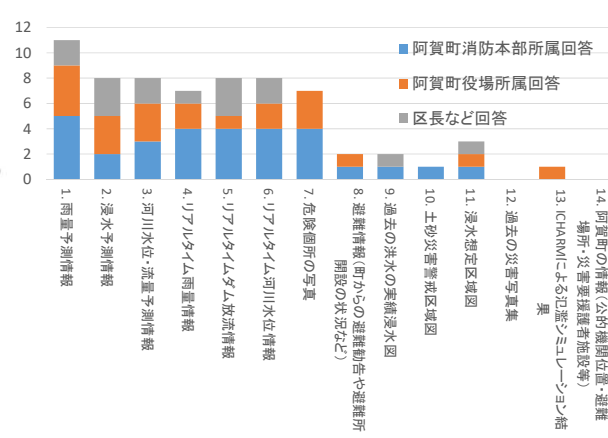


図7 緊急時にARISで見る頻度が上がる情報

6. まとめ

本年度は、前年度に基礎仕様を検討した「ICHARM災害リスク情報共有システム（ICHARM Disaster Risk Information System: IDRIS）」のプロトタイプとして、新潟県阿賀町での活用を想定した「阿賀町水災害情報共有システム（ARIS）」を試作した。試作に先立ち、阿賀町に関連する既存の防災情報共有システムについて整理した。ARIS試作後、阿賀町の防災関係者にアンケートを行い、地区防災への有用性を確認した。

参考文献

- 1) 新潟県福祉保健部福祉保健課 「高齢者の現況（平成29年10月1日現在）
- 2) 国土交通省北陸地方整備局 阿賀野川水系河川整備計画（平成28年2月）

- 3) 「信濃川下流域・阿賀野川情報共有プラットフォーム」
<http://www.hrr.mlit.go.jp/shinage/platform/public/>
- 4) 「新潟県防災ポータル 防災マップ」
<http://www.bousai.pref.niigata.jp/contents/gaikyou/gaikyou.html>
- 5) スマホ版「新潟県土木防災情報システム」
http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen_s/index.html
- 6) 「新潟県土砂災害警戒情報システム」
<http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/sabou/>
- 7) 「新潟県河川防災情報システム」
<http://doboku-bousai.pref.niigata.jp/kasen/>
- 8) e-コミュニティ・プラットフォーム ホームページ <http://ecom-plat.jp/>

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

付録 阿賀町アンケート項目

質問 A: 「災害関連情報の入手状況」について		質問 B: 「阿賀町水災害情報共有システム (ARIS)」を用いた防災活動・避難活動への活用について	
質問事項	回答選択肢	質問事項	回答選択肢
質問 A-1: 右記情報通信機器の日常の使用頻度	テレビ、ラジオ、携帯電話、パソコン・タブレット、スマートフォン、阿賀町 TV 電話	質問 B-1: 右記 ARIS の各機能の役立ち度	1. 災害に関するいろいろな予測情報が見られる機能 2. いろいろな過去の災害に関する情報が見られる機能 3. 災害に関するいろいろな情報が一つのホームページで見られる機能 4. 災害に関するいろいろな情報を重ね合わせて見られる機能 5. 災害が起こりそうな際に現地の情報を写真で共有できる機能 6. スマートフォンでも見られる機能 7. 背景地図をいろいろと変えられる機能 選択肢: ほとんど役立たない・あまり役立たない・そこそこ役に立つ・かなり役に立つ
質問 A-2: 右記主要情報の閲覧有無	浸水想定区域図、土砂警戒区域図、過去の洪水の浸水域、河川水位情報、ダム放流情報、洪水ハザードマップ、土砂災害ハザードマップ		
質問 A-3: 平成 23 年 7 月の洪水の際に入手した情報の種類(全て選択)	現在の雨の情報、数時間後の雨の情報、周辺市町村の雨の情報、気象警報、河川水位、ダム放流情報、上流域の河川水やダム放流情報、避難に関する情報、周辺市町村の被害状況、自宅周辺、近所・知り合いの状況	質問 B-2: 災害時に ARIS で見る頻度が上がる情報 (5 つまで選択)	雨量予測情報、 浸水予測情報、 河川水位・流量予測情報、 リアルタイム雨量情報、 リアルタイムダム放流情報、 リアルタイム河川水位情報、 危険個所の写真、 避難情報、 過去の洪水の実績浸水図、 土砂災害警戒区域図、 浸水想定区域図、 過去の災害写真集、 様々な洪水による氾濫シミュレーション結果、 阿賀町の情報 (公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等)
質問 A-4: 災害時に特に重要な情報 (5 つまで選択)	現在の雨の情報、 数時間後の雨の情報、 周辺市町村の雨の情報、 台風情報、 気象警報、 河川水位、 ダム放流情報、 上流域の河川水やダム放流情報、 土砂災害警戒判定メッシュ情報、 洪水警報の危険度分布、 避難に関する情報、 周辺市町村の被害状況、 自宅周辺、 近所・知り合いの状況	質問 B-3: 平常時に ARIS で見る頻度が上がる情報 (3 つまで選択)	雨量予測情報、 リアルタイム雨量情報、 リアルタイムダム放流情報、 リアルタイム河川水位情報、 過去の洪水の実績浸水図、 土砂災害警戒区域図、 浸水想定区域図、 過去の災害写真集、 様々な洪水による氾濫シミュレーション結果、 阿賀町の情報 (公的機関位置・避難場所・災害要援護者施設等) 阿賀町からのお知らせ
		質問 B-4: ARIS を活用した住民の防災意識向上	強く思う、 まあそう思う、 あまり思わない、 思わない