

## 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 三宅且仁

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。

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 28 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 28 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

WRF モデルによる領域アンサンブル予測で得られた降水予測を降雨流出氾濫モデル(RRI Model)に導入し、アンサンブル洪水予測を行う手法を開発した。この手法を平成 27 年 9 月の鬼怒川洪水に適用した結果、24 時間以

上のリードタイムにおいても、低い確率ながら豪雨による高い洪水ピークが発生しうることを予測した。また、18時間以下のリードタイムでは、洪水ピークをある程度の確率にて予測できることが確認できた。

IFAS、RRIの機能を拡充し統合的水資源管理の解析機能を向上させるため、上水道の用途別日需要量を精度良く推計する技術の開発を行うとともに、メコン川を対象に人工衛星観測データによる土壌水分量の推計値とIFASによる計算値の比較を実施した。

加えて、現地計測から得られた知見から河床粗度の変化をモデル化しRRIモデルに実装し、メコン川下流を対象として洪水氾濫現象を再現した。人工衛星を用いた氾濫域の算定結果と比較すると概ね正しい結果を得ることができた。

さらに、航空レーザ測量により同範囲の積雪深を2回計測した結果を分析し、地形と積雪深の関係から、1地点の積雪深を用いてダム流域の積雪分布を推定する手法を構築した。

### (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

気候変動影響による洪水氾濫形態の将来変化を明らかにすることを目的として、フィリピンのパンパンガ川流域を対象に時空間的な洪水氾濫特性を分析した。

RRI Model に、詳細な蒸発散、浸透計算機能を組み込んだWEB-RRI (Water and Energy Based RRI)を開発した。鬼怒川洪水により検証した結果、良好な再現性が得られた。本モデルは土壌水分量等の初期条件を詳細に表現できるため、洪水予警報の精度向上が期待でき、気候変動影響予測等へも活用が可能である。

また、鬼怒川洪水での浸水被害地域の被害発生度合及び回復力を評価するため、常総商工会の協力のもと、ランダムに抽出した60社を対象としたインタビュー調査を行い、浸水時の対応、被害状況、再開状況、浸水前後での水害対策の実施状況などを把握するとともに、今後の水災害対策への示唆を得た。

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

新潟県阿賀町を対象自治体として、RRIモデルを活用した、8つの評価軸による地区ごとの洪水脆弱性評価を表す「洪水カルテ」の考え方および、特に洪水に脆弱な地区を「洪水ホットスポット」として抽出する手法を提案した。さらに、阿賀町における、水災害に関する様々なリスクを一元的に共有できる「情報共有システム」の基礎仕様を検討した。これらの研究については、関係各所と意見交換しながら実施した。

## 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  
MIYAKE Katsuhito

**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 first year of this program (FY2016), 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 hazards to cause water-related disasters 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, risk assessment, hazard information

## 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 (アンサンブル気象予報を活用した洪水予測)

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、宮本守、牛山朋來

#### 【要旨】

近年の領域アンサンブル予報技術の著しい進歩は、豪雨や洪水を長いリードタイムで予測できる可能性を秘めている。そこで、アンサンブル洪水予測システムを開発し、適用性を調べた。大気部分は、アンサンブルカルマンフィルターを用いて領域アンサンブル予報を行い、水文部分は降雨流出氾濫（RRI）モデルを用いた。このシステムを2015年の鬼怒川洪水に適用した結果、リードタイムが21～15時間の場合は洪水による流出ピークを定量的に予測でき、リードタイムが33～27時間の場合は確率が低いものの洪水発生の可能性を予測できた。アンサンブル予報は、いずれの場合も気象庁の現業メソモデル（MSM）より優れている結果になった。

キーワード：関東・東北豪雨、鬼怒川洪水、数値気象予測、アンサンブル予報、アンサンブルカルマンフィルター

#### 1. はじめに

近年の数値天気予報は、予報精度向上のためアンサンブル予報を取り入れている。これは、単独の予報計算からなる決定論的予報に対し、わずかに異なる初期値から複数の予報を同時に行う手法である。複数の予報結果から、1) 確率予報による信頼度情報が得られる、2) 豪雨のような顕著現象の見逃しが減る、3) アンサンブル平均としての予報精度が決定論的予報よりも高い、と言った利点がある。我が国の気象庁では、1990年代から全球アンサンブル予報を1ヶ月予報や週間予報に用いている。さらに、豪雨の予報精度を向上させた解像度5kmのメソアンサンブル予報が試験運用中である。著者らはこれまで領域アンサンブル予報システムを開発し、洪水予測の精度評価を行ってきた<sup>1)2)</sup>。アンサンブル予報の初期摂動の作成およびデータ同化には、アンサンブルカルマンフィルターを用いる。これは、欧州で行われている、全球アンサンブル予報を単純にダウンスケーリングする手法ではなく、日本の気象庁と同様に、高解像度領域モデル上でデータ同化と摂動生成を行う手法である。今回は、2015年9月の平成27年関東・東北豪雨に伴って発生した鬼怒川洪水を対象に、アンサンブル洪水予測を行なった。そして、鬼怒川中流域と上流のダム地点における流量予測の精度検証を行った。

#### 2. 平成27年関東・東北豪雨と鬼怒川洪水の概要

2015年9月に日本に接近または襲来した台風第17号、

第18号にともなって、西日本から東日本の広い範囲で大豪雨となり、全国で死者8名、家屋被害2万棟という甚大な被害が発生した。9月7日から11日にかけて総雨量は関東地方で600mmを超え豪雨が集中した鬼怒川流域では、上流部で最大700mmを越える記録的な雨が降ったため、甚大な洪水被害が発生した。

#### 3. 予測手法

本研究では、領域アンサンブル予報により降水量を予報し、その雨量情報を水文流出モデルに導入する。

##### 3.1 領域アンサンブル予報

領域アンサンブル予報の手法として、アンサンブル摂動生成とデータ同化には、アンサンブルカルマンフィルターを用いる。これは、モデルの予報誤差と観測誤差から適切な重みを求め、予報値と観測値の近傍にある解析値を求める手法である。本研究で用いたアンサンブルカルマンフィルターは、三好らによって開発された局所アンサンブル変換カルマンフィルター（LETKF）<sup>3)4)</sup>である。これは、誤差共分散の局所化により並列化効率を高めるなどの先進的な機能を持つ。数値予報のために用いた領域気象予報モデルは、米国で開発され、これまでに多くの実績を持つWRF（Weather Research and Forecasting）ver. 3.4.1である。

LETKFによって同化したデータは、米国NCEP（National Centers for Environmental Prediction）によって収集整理された地上海上航空機観測（風、気温、気圧）、ラジオ

ゾンデ(気圧、風、気温、比湿)、衛星追尾風、さらにGPS可降水量である。LETKFによるGPS可降水量の同化手法は、Seko et al. (2013)<sup>5)</sup>の方法を用いた。データ数は6時間分で東西風・南北風・気温は2000~7000個前後である。アンサンブルメンバー数は33とした。

計算領域として、図-1のような、鬼怒川流域を中心とした2重の計算領域を設定した。WRFモデルの主要設定を表-1に示す。

WRF-LETKFによるデータ同化とアンサンブル摂動を求める解析は、次の手順で行う。まず、33個のWRFモデルによる9時間予報を行ない、その後半6時間に対して、1時間毎の観測値をLETKFによって同化すると同時に33個の解析値を作成する。この解析値は次の9時間予報の初期値として用いる。以後同様に、6時間毎に同化解析サイクルを繰り返す。最初に15km解像度の解析サイクルを8月29日12UTCから開始し、10日程度の助走期間を含めて、9月11日までの解析値を求めた。次に、15km解像度の解析値を境界条件として、3km解像度の解析サイクルを7日00UTCから開始し、11日まで行った。解析サイクルの最初の初期値は、気象庁週間アンサンブル予報を24時間積分して作成した。なお、領域モデル内のばらつき(アンサンブルスプレッド)を維持するため、初期値から取り出した摂動を、側面境界摂動として与えた。

ここまでの過程で得られたアンサンブル解析値を初期値として、豪雨が終わるまでの9月11日までの降水予報計算を行った。予報計算の境界条件は気象庁の現業全球モデル(GSM)を用い、上記の側面境界摂動を与えた。予報開始時刻は、7日00時~8日18時まで6時間毎の様々な時刻から行った。

### 3.2 流出予測

領域アンサンブル予報で得られた降水量を用いて流出計算を行った。用いたモデルは、分布型降雨流出氾濫モデル Rainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデルである<sup>6)</sup>。地表面流については2次元拡散波近似解析を行い、鉛直浸透流を反映している。対象流域は図-2の鬼怒川流域(流域面積1760 km<sup>2</sup>)である。標高情報は国土地理院による数値標高モデルを用いて、100m分解能で計算した。本研究では降水予報の精度向上が流出予測に及ぼす影響を分析することを目的としているため、RRIモデルのパラメータについては対象洪水時に観測された地上雨量を入力して観測流量を再現できるように設定した。

なお、上流の湯西川・五十里・川俣・川治の4ダムは、今回の洪水時に洪水調節を行っており、貯留により流出量を抑えている期間がある。そこで、予測期間中各ダム

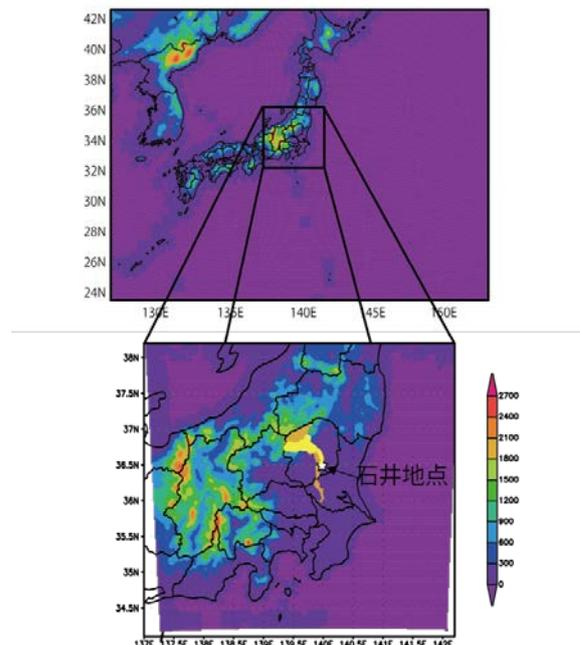


図-1. モデル計算領域  
 上が外側領域、下が内側領域。色は標高(m)を表わす。  
 下の枠内のオレンジ色が鬼怒川流域。

表-1. WRFモデル設定

格子数	外側 201×151×40/内側 151×151×40
水平格子間隔	外側 15km/内側 3km
解析計算時間 (外側領域)	2015年8月29日12時~9月11日00時UTC
解析計算時間 (内側領域)	2015年9月7日00時~11日00時UTC
初期、境界条件	気象庁 GSM
雲物理過程	外側 WSM 3class / 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



図-2. 鬼怒川流域  
 星印はダムおよび流量計測地点

の下流側についてはダム流出量を境界条件として与えた。

洪水流出予測では、洪水予測の現状をふまえ、数値天気予報による予報降水量と、予報時点までのレーダーデータを RRI モデルに与えた。つまり、その時点における最も信頼できる降水量情報を用いて、流出計算を行った。なお、降水量の予報期間以降は、RRI モデルに与える降水量はゼロとした。

#### 4. 予測結果

図-3 に、15km および 3km 解像度の LETKF 解析による流域平均降水量の時系列を示す。全体的に、アンサンブル解析値は観測雨量を下回っているが、観測による 9 日 9 時から 18 時頃までの豪雨の変動を良く再現しており、データ同化が適切に働いたと考えられる。また、3km 解像度ではアンサンブル解析値がより大きく、0~100 パーセンタイルの範囲に観測降水量が含まれており、解像度が上がったことによる改善がみられた。

図-3 で計算した値を初期値として、アンサンブル予測を行った結果を図-4 に示す。この図では、見易くするためアンサンブル予測の結果を確率密度で表示した。色は横 32 (3 時間毎) × 縦 30 個の点に存在するアンサンブル予測の数を示している (図-5 も同様)。上 2 段の 8 日 0 時・6 時を初期値とする予報と、下 2 段の 12 時・18 時を初期値とする予報とでは結果が大きく異なった。上 2 段の予報降水量図-4 (a, b) では、アンサンブル予報の確率密度の中心部は、観測に対して大幅に過小評価であった。しかし、黒い領域で示されたように、一部のアンサンブルメンバーは観測されたピーク降水量を予報した。言い換えると、ほとんどの予報メンバーでは雨を予報しなかったが、一部のメンバーでは比較的正確な雨を予報しており、これがアンサンブル予報の最大値を押し上げた。

これらの予報降水量を RRI モデルに導入し、流出予測を行った結果が図-4 (e, f) である。すべての予測値が 9 日 6 時以降約 800m<sup>3</sup>/s 以上の値を示しているのは、上流のダムからの放出量を考慮しているためであり、雨が降らない場合でも一定の流量が表示される。流出予測も、降水予報と同様に、確率密度の中心部は大幅に過小評価となった。しかしながら、一部のメンバーは観測に近い流量を予測した。これは、アンサンブル予報の利点が現れたと考えられ、予報メンバーの大半が外れていても、一部のメンバーが洪水の発生を予測し、前もって洪水発生の可能性を知ることができた。しかも、豪雨のピークを 9 日 9 時、洪水のピークを 9 日 18 時と考えると、8 日 0 時の予報は、降水ピークの 33 時間前、洪水ピークの 42

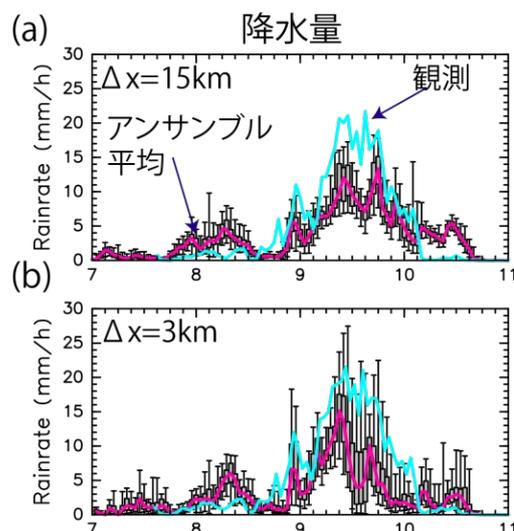


図-3. LETKF15km 解像度 (a) と LETKF3km 解像度 (b) による流域平均降水量解析値の時系列  
青はレーダー観測雨量、縦棒はアンサンブル解析値の 0~100 パーセンタイル値、灰色四角は 25~75 パーセンタイル値、ピンクはアンサンブル中央値。横軸は日付

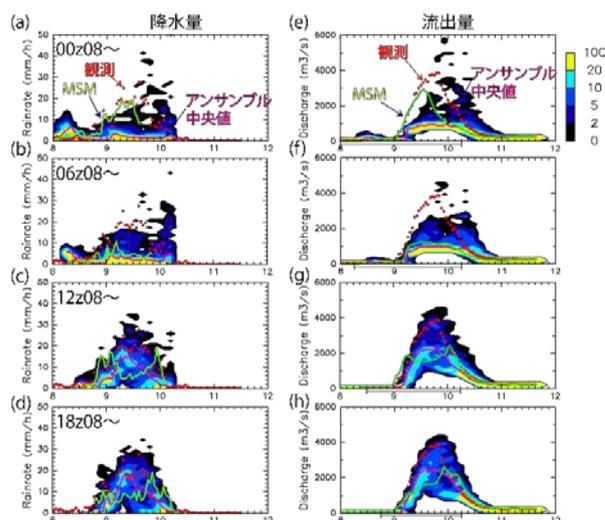


図-4. 鬼怒川流域平均雨量の時系列 (a) ~ (d) と、石井地点の流量のアンサンブル予報 (e) ~ (h)  
予報初期時刻は、(a, e) 8 日 00 時、(b, f) 8 日 06 時、(c, g) 8 日 12 時、(d, h) 8 日 18 時である。赤丸はレーダー観測、緑は気象庁 MSM、黒から緑色で示した領域は確率密度 (格子点近傍の予測の数)、ピンク色はアンサンブル中央値である。(e) ~ (h) の横軸の下線分は降水予報期間、横軸は日付 (UTC)

時間前に予測できたことになる。ただし、計算時間を考慮すると、予測値が得られるのはもう少し遅くなる。

一方、緑線で描かれた気象庁 MSM の予報結果は 8 日 0 時初期値の図-4 (a) では、観測に近い値を示した。ここで MSM がアンサンブル予測の中心よりも精度が高かったのは、MSM はアンサンブル予測の境界条件として用いた GSM に比べてより多くの観測データを同化しているため、精

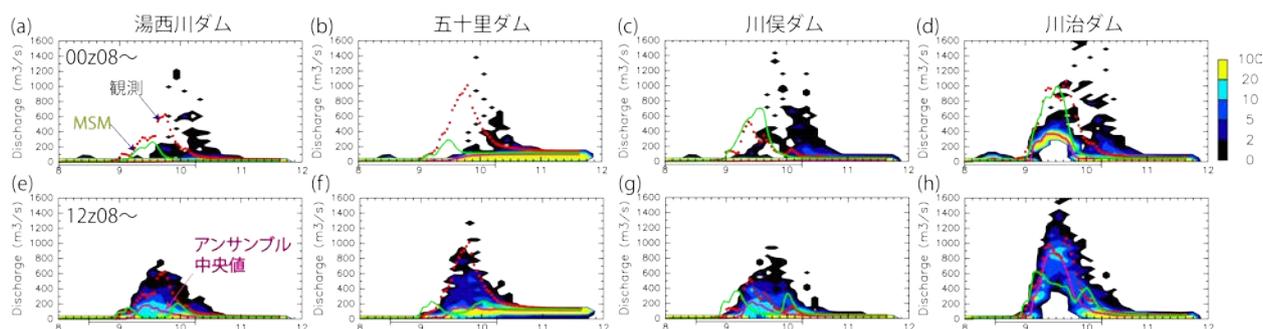


図-5. 鬼怒川上流4ダムのアンサンブル流出予測

赤丸はレーダー観測・緑は気象庁MSMによる流出計算結果、黒から緑色で示した領域はアンサンブル予測の確率密度（格子点近傍の予測の数）、ピンク色はアンサンブル中央値、横軸の下の線分は降水予報期間、横軸は日付(UTC)。上段(a)～(d)は8日0時を初期値とする予測、下段(e)～(h)は8日12時を初期値とする予測

度が良かったと考えられる。しかし、後に示すように、アンサンブル予報の中心に比べて常に精度が良いとは言えない。一方、6時初期値の図-4(b)では大幅過小評価であった。MSMは39時間先までの予報であるため、図-4(a)では予報値が9日15時までとなっており、図-4(e)の流出予測でも観測流量には達しなかった。

続いて、図-4(c, d)の8日12時・18時の予報降水量を見てみると、アンサンブル予報の確率密度の中心部は観測にかなり近づいており、予報精度が高いことがわかる。また、確率分布の範囲は観測を含んでおり、少なくともいくつかのメンバーは豪雨を予報していた。

図-4(g, h)の流出量予測では、予測の確率密度の範囲が観測値の変動によく一致し、確率密度の中心もより観測値に近くなった。図からは読み取れないが、流出予測のアンサンブルメンバーのうちの約25%は、観測流量に良く一致していた。また、図-4(g, h)では、図-4(e, f)に存在した、観測を上回る予測メンバーが少なくなり、予測の信頼性が高まった。アンサンブル予測の確率密度の分布範囲が、観測に基づく流量と良く一致しており、これが河川管理にとって有用な情報であると考えられる。また、図-4(g, h)では降水ピークの21時間前または15時間前の時点で、豪雨や洪水の発生可能性を高い精度で予測することができた。長いリードタイムで洪水の予測ができたことは、河川管理にとって有用である。

図-4(g, h)の緑線で描かれたMSMによる流出予測は、観測に比べてかなり過小評価となっており、アンサンブル予測に比べて精度が悪かった。また、リードタイムが短くても予測精度に顕著な変化が見られなかった。

図-5は、上流の4つのダムにおけるアンサンブル流出予測である。なお、湯西川ダムの下流には五十里ダムがあり、川俣ダムの下流には川治ダムがある。五十里ダムと川治ダムの下流にはダムは無く、図-2のように、石井

地点を通過して下流に達している。図-5(a)～(d)は8日0時を初期値とする降水予報を用いた流出予測である。アンサンブル予測の確率密度の中心部やアンサンブル中央値は観測に比べて大幅に過小評価となっているが、黒い領域で示されるように、一部の予測メンバーが観測を越える流量を予測している。しかし、予測された流量はかなり過大評価しているものも多く、不確実性が大きい。この段階では、洪水が発生する可能性を知ることができるが、その定量的な規模を見積もることは困難である。

一方、図-5(e)～(h)の8日12時を初期値とする流出予測では、予測精度が大幅に向上している。図-5(e)の湯西川ダムと図-5(f)の五十里ダムでは、図-4(g, h)で見られたように、アンサンブル予測の確率密度の分布範囲が観測流量とよく一致した。一方、図-5(g)の川俣ダムでは予測確率密度は過大評価した部分も多いが、確率密度の中心が観測に近くなり、図-5(h)の川治ダムでは確率密度の中心が観測に近づいた。これら2組のダムで、このような特徴の違いが出たのは興味深い。いずれにせよ、上流のダム流出量についても、リードタイムが短くなると予測精度が向上し、信頼性の高い予測値が得られることが確認できた。

## 5. 議論

今回行った領域アンサンブル予報に基づくアンサンブル洪水予測は、洪水発生を早い段階で予測することができ、有用な情報が得られることがわかった。また、リードタイムによってアンサンブル予測の分布が変わり、予測精度や不確実性が変化する興味深い点が見られた。

図-4の石井地点における流出予測では、リードタイムが長い時には、一部の予測メンバーが現実的な豪雨を予測できたが、それらの予測メンバーは時に観測を過大評価した。一方、リードタイムが短くなると、より多くの

予測メンバーが観測に近い流出ピークを示すようになり、さらにそれまでであった過大評価傾向が減少した。これはリードタイムが短くなるにつれて、精度の良い予測メンバーが増え、さらにその精度も向上したと考えられる。この関係が常に成り立つと仮定すれば、アンサンブルメンバーの最大値または確率密度の範囲に注目することで、信頼性の高い洪水ピークの予測が可能になる。

一方、図-5の上流のダムにおける流出予測では、湯西川・五十里ダムではこの各予測メンバーの最大値と観測値が一致する関係が成り立ったものの、川俣・川治ダムでは成り立たなかった。この理由を説明する十分なデータは用意できないが、次のように考察することができる。図-5(g)の川俣ダムの観測流量は他のダムに比べて小さかったが、一部の予測メンバーが示す通り  $800\text{m}^3/\text{s}$  以上の流量に達する潜在的可能性はあった。しかし、偶然雨域が逸れたため、 $500\text{m}^3/\text{s}$  程度の流量に収まった。図-5(h)の川治ダムも同様に、 $1600\text{m}^3/\text{s}$  の流量に達する潜在的可能性はあったものの、偶然  $1000\text{m}^3/\text{s}$  の洪水で収まった。これらに対して、湯西川ダムと五十里ダムでは、潜在的に起こりうる最大の豪雨が結果としてダム流域の範囲内で発生したため、アンサンブル予測の中でも最大の流量が発生した。以上のように考えると、アンサンブル予測流量と観測値の関係をうまく説明することができる。

今回アンサンブルメンバー数は 33 とした。過去の報告<sup>12)</sup>では、21 メンバーを採用していたが、今回 33 メンバーに増やしたところ著しい精度向上がみられた。アンサンブルカルマンフィルタは、メンバー数が多いほど予報誤差の近似が良くなり、精度が上がることが知られている<sup>4)</sup>。しかし、メンバー数が増えると計算コストも増大することから、適切なメンバー数を調査することも重要な課題である。今回採用した 33 メンバーは、LETKF によるデータ同化に一定の効果があることが確認できた。

## 6. 結論

領域モデル WRF とアンサンブルカルマンフィルタの一つである LETKF を用いたアンサンブル予報と、RRI モデルによる流出計算を組み合わせたアンサンブル洪水予測システムを、2015 年 9 月の鬼怒川洪水に適用した。鬼怒川中流域の石井地点における流量予測を行ったところ、豪雨発生の 33 時間または 27 時間前におけるアンサンブル予測は、多くの予測メンバーは豪雨を予測できず、一部のメンバーのみが洪水の発生を予測した。しかし、信頼性は低いものの、長いリードタイムにおいて洪水の規

模と発生時刻を予測することができた。一方、21 時間または 15 時間前におけるアンサンブル予測は、全 33 メンバーのうち約 25%のメンバーが高精度で洪水ピークを予測することができた。また、各予測確率密度分布の中に観測流量が含まれており、河川管理上有用な情報として利用できる可能性を示した。一方、上流のダムにおける流出予測では、アンサンブル予測のばらつきが大きかった。これは流域面積が小さいことが一つの原因と考えられる。気象庁の現業モデル MSM の予報値と比較した結果、アンサンブル予測の優位性が明らかになった。

今回の事例では、アンサンブル洪水予測の効果の高さが示された。今後さらに多くの事例に対して検証を行い、精度改善と現業への適用について調査を進めたい。

## 参考文献

- 1) 牛山朋来, 佐山敬洋, 岩見洋一, 平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨に伴う阿賀野川洪水のアンサンブル洪水予測実験, 土木学会論文集 B1 (水工学) 72(4), I\_157-I\_162, 2016
- 2) Ushiyama, T., T. Sayama, and Y. Iwami, Ensemble flood forecasting of typhoons Talas and Roek at Hiyoshi dam basin. *Journal of Disaster Research*, in press, 2016
- 3) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112-126, 2007
- 4) 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
- 5) Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito, and T. Miyoshi: Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. II), doi 10.1007/978-3-642-35088-7\_20, pp.489-507, 2013
- 6) Sayama, T., G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka, and K. Fukami: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrol. Sci. J.*, 57, pp.198-312, 2012

## 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（長期的流況変化評価技術の確立）

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、津田守正、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、  
宮本守、山崎祐介、Liu Tong、  
Maksym Gusyev

### 【要旨】

水災害・リスクマネジメント国際センター（以下、ICHARM）では、日本を含むアジアモンスーン地域のほか、熱帯・乾燥帯・半乾燥帯や高標高の積雪・氷河地帯等様々な自然・地勢条件下における河川流域において適正な水資源管理を支援するシミュレーションモデルの開発を行っている。このため、ICHARM において開発した IFAS、RRI の機能を拡充し統合的水資源管理の解析機能を向上させることにより、国内外流域の水資源管理に関わる諸問題への適用を進める計画である。平成 28 年度はメコン河を対象に、流出解析上重要な土壌水分量について人工衛星観測データから土壌水分量を推計するとともに、当該流域に適用した IFAS による計算値の比較を実施した。また、人口の増減等を踏まえた将来の水資源需要量を推計する観点から、上水道の用途別日需要量を高精度で推計する技術の開発を行った。

キーワード：IFAS、RRI、統合的水資源管理、土壌水分量、水需要予測

### 1. はじめに

近年、少雨や豪雨の振れ幅が大きく、この極端現象の傾向は将来的にさらに進行することが予想されている。このような状況の中で、長期にわたる適正な水資源管理について検討を行うためには、気候変化の影響を踏まえた陸面の水文過程の精緻な表現機能の他、統合的な貯水池運用や事前放流に関わる解析機能等のモデルの改良や、将来的な水需要の推計技術とその反映等が重要となる。

また、多様な国際的ニーズに ICHARM の技術が対応できるためには、日本を含むアジアモンスーン地域はもとより、熱帯、乾燥帯・半乾燥帯や高標高の積雪・氷河地域等の様々な気候・地勢条件下の河川流域においても適用できるようシミュレーションモデルの汎用性や適用性の強化が必要である。

これまで、ICHARM では、発展途上国で頻発する洪水・渇水といった水関連災害の軽減に貢献するため、IFAS（総合洪水解析システム）をベースとしながら、現地の問題解決に必要な機能を適宜追加し、統合的水資源管理を支援するツール、すなわち、流域の水資源を定量的に把握できる統合的水資源管理システムを開発してきた。さらに、河川氾濫を表現できる RRI（降雨・流出・氾濫）モデルを開発し、任意の流域で迅速な氾濫解析を実施するための GUI（グラフィック・ユーザー・インターフェイス）の開発等を進めてきた。

本研究課題では、IFAS（Integrated Flood Analysis System：総合洪水解析システム）、RRI（Rainfall Runoff Inundation:降雨流出氾濫モデル）による統合的水資源管理のさらなる解析機能向上のための研究・開発を行い、開発された機能を用いて、国内外流域への適用を進める。また、上記の研究成果は洪水や渇水が経済・社会・環境等へ及ぼす影響評価を行う上での基礎的検討手法としても活用される。

平成 28 年度は、メコン河を対象に人工衛星観測データによる土壌水分量の推計手法の検討とデータ収集を行った。また、将来の水需要量の推計手法として、上水道の用途別日需要量を精度良く推計する技術の開発を行った。

## 2. 衛星観測データの活用による土壌水分量の検討

### 2.1 土壌水分量の推計

東京大学により開発された LDAS-UT（Land Data Assimilation System developed at the University of Tokyo）は、人工衛星から観測された土壌水分量や地表面温度を人工衛星観測雨量等の情報を用いて補正・補間することにより確度の高い土壌水分量等を推計することができる<sup>1)2)</sup>。JAXA が提供する人工衛星観測雨量（GSMaP\_NRT）を地上雨量計で補正した上、NASA が提供する気温、放射、風速、相対湿度等のデータを用いて、

メコン河流域における土壌水分量を推計した(図-1)。この結果と、IFAS により算出された不飽和層タンク水位と比較したところ、類似した傾向が得られた。今後はさらに検討を進め、土壌の乾燥状況等を IFAS を用いて簡易に指標化し、流出現象に反映する方法について検討する。

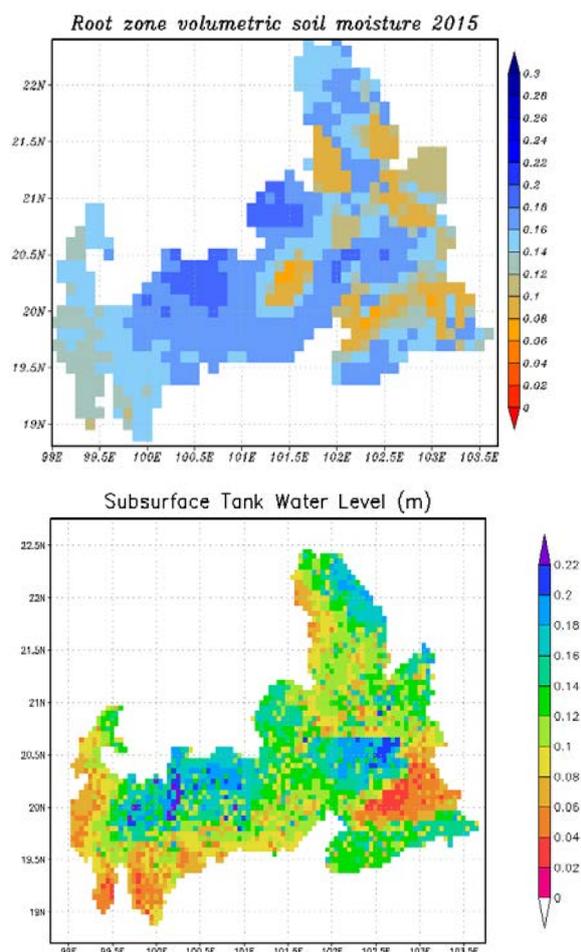


図-1 2015年のメコン河上流部におけるLDASによる土壌水分量(Root zone)推計結果(上)とIFASによる不飽和層のタンク水位(下)

### 3. 統合的水資源管理のための機能強化

#### 3.1 将来の水需要量の推計技術の開発

家庭等における節水型機器の普及や水の再利用等の水使用形態の変化により、渇水時に実施される時間給水や減圧給水といった給水制限による使用水量抑制効果に変化する。こうした変化を、貯水池の利水運用や長期的な水資源開発計画等に考慮することが河川管理において重要になってきている。

上水道からの給水は家庭や業務など様々な用途に利用され、各用途の構成割合は経年的に変化しているため、上水需要量は用途別に検討することが重要である。また、

上水道の給水量は夏場に多く、冬場に少ない等の季節変動を示すことから、季節変動の経年変化を考慮することも重要である。しかし、我が国の上水道使用水量の用途別の集計値は月単位の調定水量のみであり、季節変動や給水制限の影響を詳細に把握するうえで用途別日使用水量が必要とされていた。

給水制限時の上水道の用途別日使用水量の要請に応じて、従来提案されている手法を改良し、精度良い推計値が得られるようにした<sup>3)</sup>。図-2に示すように、新たな手法(Rossi法)により、週変動や降雨による水使用量の増減も含めて、渇水時の上水道の用途別日使用水量を推計できることを示した。

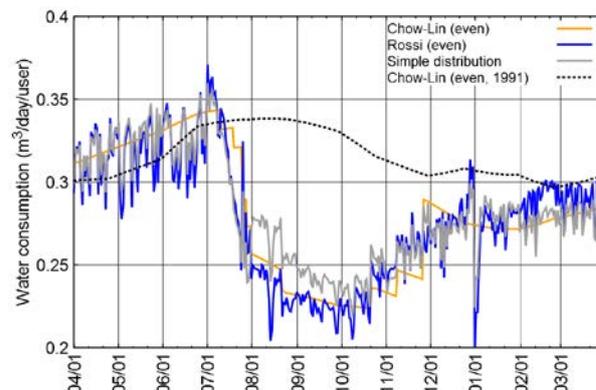


図-2 上水道の家庭用日使用水量の推計結果(1994年、松山市)

また、推計した上水道家庭用日使用水量を用いて、社会経済特性が変化した場合のダム貯水池運用への影響についての検討に着手した<sup>4)</sup>(図-3)。

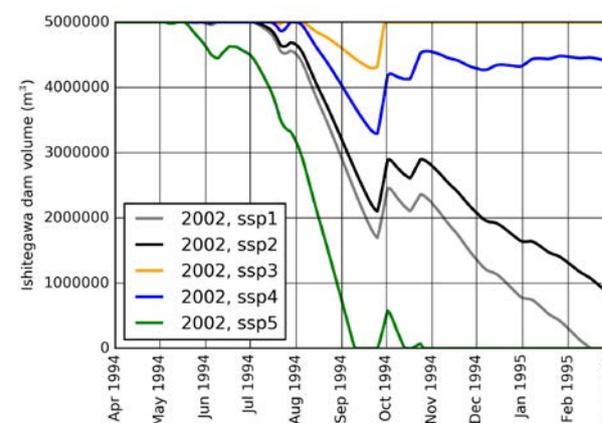


図-3 社会経済シナリオの違いによるダム貯水池運用の相違(松山市・石手川ダム貯水量の比較)

### 4. まとめ

ICHARM では、日本を含むアジアモンスーン地域の

ほか、熱帯、乾燥帯・半乾燥帯など多様な気候や高標高の積雪・氷河地域など様々な自然・地勢条件下での河川流域においても、適正な水資源管理を行うために必要となる、シミュレーションモデルの開発を行っている。これまで ICHARM において開発を進めてきた IFAS、RRI による統合的水資源管理の解析機能向上のための更なる研究・開発を行い、開発された機能を用いて、国内外流域への適用を進める。

平成 28 年度は上水道の用途別日需要量を精度良く推計する技術の開発を行った。また、メコン河を対象に人工衛星観測データによる土壌水分量の推計値と IFAS による計算値の比較を実施した。

### 参考文献

- 1) Yang, K., Watanabe, T., Koike, T., Li, X., Fujii, H., Tamagawa, K., Ma, Y., and Ishikawa, H.: Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85A, 229-242, 2007.
- 2) Yang, K., Koike, T., Kaihotsu, I., and Qin, J.: Validation of a dual-pass microwave land data assimilation system for estimating surface soil moisture in semiarid regions, *J. Hydrometeor.*, 10, 3, pp. 780–793, 2009.
- 3) 津田守正・入江政安・岩見洋一：上水道の用途別日使用水量の推計における多変量時間的配分手法の適用，土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.73, No.4, I\_271-I\_276, 2017.
- 4) 津田守正・紀伊雅敦・石塚正秀・岩見洋一：社会経済特性の変化がダム貯水池の上水道利水運用に与える影響に関する解析、第 53 回土木計画学研究発表会・講演集。

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

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、萬矢敦啓、小関博司、  
山崎祐介、原田大輔

#### 【要旨】

本研究はメコン川下流の氾濫原を対象として土砂水理現象を考慮した洪水氾濫現象を把握するものである。洪水氾濫現象を把握するためには洪水氾濫の元となる河川の流下能力を適正に評価する必要がある。流下能力は河積と河床粗度で決定するためにこれらを把握し実装する必要がある。一方途上国に代表される河川においては河道内の地形データが必ずしも十分ではない。本研究はこのような河川において、最低限の観測を実施することで洪水氾濫解析である RRI モデルに観測結果を実装する手法を提案するものである。またリモートセンシング技術を活用して同モデルで得られた氾濫域の算定結果を検証するものである。

キーワード：洪水氾濫、数値シミュレーション、河床粗度、ADCP 観測、リモートセンシング

#### 1. はじめに

本研究はメコン川下流の氾濫原を対象として土砂水理現象を考慮した洪水氾濫現象を把握するものである。洪水氾濫現象を把握するためには洪水氾濫の元となる河川の流下能力を適正に評価する必要がある。流下能力は河積と河床粗度で決定するためにこれらを把握し実装することで、実現象を考慮したモデルとなることが期待される。

河床粗度は河道断面の変化や植生によるもの、小規模河床波に応じて変化し、それらを考慮することで適切な河床粗度を考慮することができる<sup>1)</sup>。これら三つの項目で現地による状況を鑑み、採用すべき項目を選択する必要がある。これまで本研究グループは現地調査から小規模河床波を起因とするもの<sup>2)</sup>だけを考慮してきた<sup>3)</sup>。本研究課題で記述している土砂水理現象とは、ここで議論する小規模河床波による河床粗度係数の変化を示すものである。また河積を把握するためには河床形状に関する情報が必要となるが、途上国に代表される河川においては河道内の地形データが必ずしも十分ではない。このような条件においては河川の全断面を計測することなく、分流、合流等を含まない条件において最低限の測量により観測できる手法を検討している。このような検討は、現地における観測結果によるものであるが、ICHARM は当該地点に対して 2013 年からこれまでの間、計 4 回の観測を実施し、それらの知見の実装を試みている。

また本検討で使用する洪水氾濫モデルは佐山らが開発した Rainfall Runoff Inundation (RRI) model<sup>4)</sup>を採用している。ここでは前述の河道の地形データのみならず氾濫原の地形も必要であるが、多くの場合人工衛星から得た

Digital Surface Model (DSM)を活用している。また河床せん断力に応じた河床粗度の変化をモデル化し実装している<sup>5)</sup>。

リモートセンシングを活用した洪水氾濫域の特定は多くの研究者が実施している。しかしながらそれらの結果を検証することはそれほど簡単ではない。著書らは水域と陸域が混在し、人工衛星から得られた情報よりも十分に広い領域を持つ場所で、水域を特定する技術開発を実施した<sup>6)</sup>。ここではこの手法を展開して氾濫原の地形、水域の情報を組み合わせることで水面形状及び水面勾配、平均流速を得ることに成功している。これらの検討と洪水氾濫解析を比較することで氾濫流の水理量の比較している<sup>6)</sup>。

本研究で対象とするのは途上国に代表される現地データが十分でない流域である。このような流域において洪水氾濫現象を把握し、氾濫域図を作成することを目的としている。ここでは人工衛星から得られた数値情報、RRI 等による数値実験、現地における観測、さらに人工衛星から得た結果を用いた手法を採用している。本報告はメコン川下流の氾濫原を対象に上記の手法を構築し、検証した結果を概説するものである。

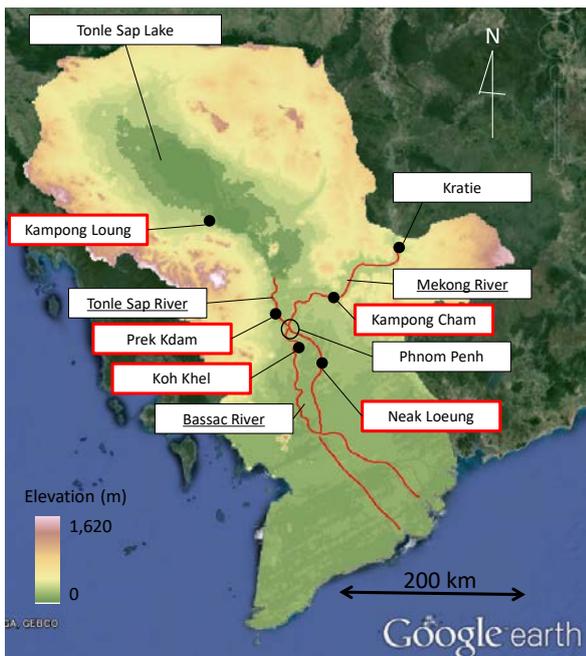


図-1 解析対象範囲



図-2 2014年10月12日、13日の観測における船の航路、ここで示すChroy ChangvarはPhnom Penhを意味する。(背景画像はGoogle earthより)

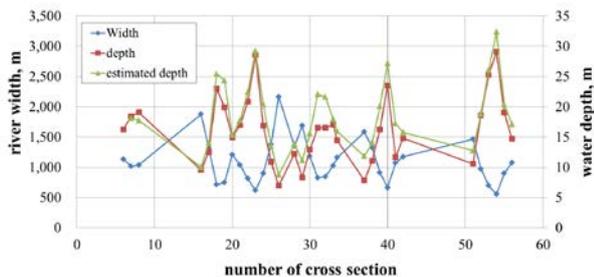


図-3 川幅、実測平均水深、計算水深の関係

## 2. 河床形状と河床粗度

本検討で採用した RRI モデルは河道の水理現象を一次元の流れとしてモデル化している。同モデルの実用に資する情報として河道内の河道に関する情報が必要となる。図-1 は解析対象範囲を示すが、本検討で特に着目しているのはメコン川本川の両岸における氾濫原である。

本研究グループは2013年12月から2016年10月にかけて計4回の ADCP を用いた観測を実施した。観測はプノンペン周辺で実施し、主に横断観測により流量と断面形状を得つつ、縦断方向に大きく移動する際には河床高計測を目的とした縦断観測も併せて実施した。このとき Chroy Changvar (Phnom Penh) から Kampong Cham の間の約100km 区間を 2km ピッチで測定している。図-2 には観測時の航路の一例を示す。またプノンペン近傍はメコン川、トンレサップ川、バサック川が存在し、メコン川本川の水位変動に応じて流量配分が変化する複雑な流況となる。これらの観測の詳細は萬矢ら<sup>7)</sup>を参照されたい。2009年にはメコン河委員会事務局(以下、MRCS)によりカンボジア国内の複数の水位計設置地点で流量観測が集中的に実施された<sup>8)</sup>。ここではこれらの観測から得られたデータを用いて河道特性の分析を行う。

### 2.1 河床形状の縦断分布

図-3はChroy Changvar から Kampong Cham まで約2 km 間隔の観測により得られた川幅と平均水深の縦断分布である。ここで、平均水深は流積を川幅で除したものである。図中に水と土砂の連続式、マンニングの平均流速公式、流砂量式から導出した川幅と水深の関係式<sup>9)</sup>から推定した計算水深を示す。計算式は次の通りである。

$$h_{n+1} = h_n \cdot \left( \frac{B_{n+1}}{B_n} \right)^{-24/35} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、h、Bはそれぞれ水深、川幅を表し、n、n+1 はある任意地点とその上流または下流地点を意味する。

同式によれば、川幅が大きい地点では水深が小さく、川幅が小さい地点では水深が大きい関係にあることがわかる。計算水深と実測平均水深の比較より、両者は良好に一致することがわかる。このことは、衛星情報から得た川幅分布とある一点の水深の計測結果があれば、連続式を満たす区間内では水深分布を推定できることを表す。

### 2.2 河床粗度

小規模河床波による河床粗度の変化は流水抵抗に関する検討がある<sup>2)10)11)</sup>。本検討では観測結果からメコン川における流水抵抗 ( $\tau_* - \tau'_*$  関係) を検討し、それを粗度係数の変化として RRI にモデル化している。

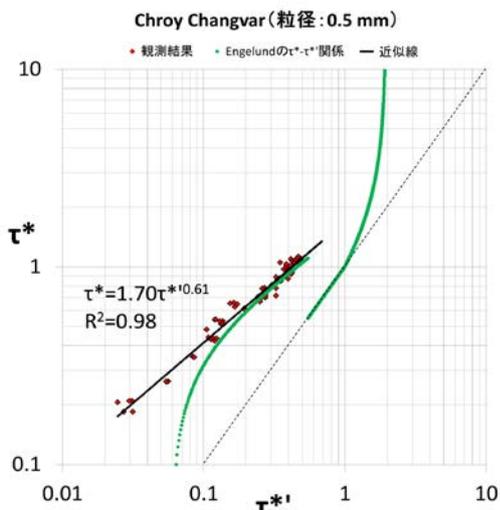


図-4  $\tau_* - \tau_*'$  の分析結果

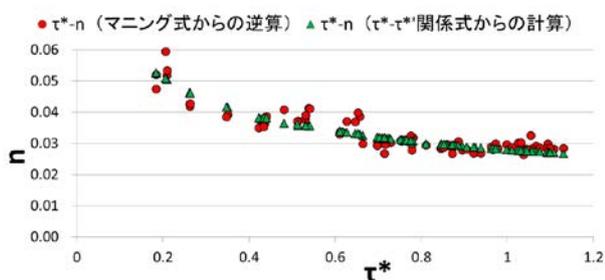


図-5  $\tau_*$  と粗度係数の関係

図-4はChroy Changvar地点(図-2参照)における観測データの断面平均値を用いて関係を分析した結果を示す。ここで、 $\tau_*$ は無次元掃流力のことであり、 $\tau_*'$ は無次元有効掃流力と呼ばれる平坦河床見合いの水理量である。すなわち、両者の関係の分析から、表面抵抗と形状抵抗それぞれが全抵抗に対しどれほど寄与するか把握できる。なお、粒径はプノンベン周辺で実施された竹林ら<sup>12)</sup>の観測結果を参考に0.5mmを用いる。観測結果から得られるデータとEngelund<sup>11)</sup>が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係を比較すると、観測データは特に $\tau_*$ が0.4以上の範囲においてEngelundが提案したものと良く一致している。一方で $\tau_*$ が小さい場合は両者に乖離が見られる。図のように、観測データの $\tau_*$ は大きく、 $\tau_*'$ は小さい。観測データの中で最小の $\tau_*'$ は約0.025となる。また、Shieldsダイアグラムから無次元限界掃流力を調べると約0.03であり上述の $\tau_*'$ とほぼ同一の値となる。そこで、このような領域で土砂移動を前提とした粗度変化を議論することが妥当であるか精査するために $\tau_*'$ の横断分布を調べると、流心では $\tau_*'$ は約0.045であった。これより、流心付近では土砂移動が発生すると考えられ、

河床波等による粗度変化が起こると推測される。そこで、本研究では観測結果を両対数における直線近似で表した式、すなわち $\tau_* = 1.70\tau_*'^{0.61}$ を用いて粗度変化を計算する。図-5は、Chroy Changvar地点の $\tau_*$ と粗度係数の関係である。粗度係数はマンニングの平均流速公式から逆算したものと、上述の $\tau_* = 1.70\tau_*'^{0.61}$ から計算したものを示す。これより、両者は良く一致することがわかる。また、粗度係数は $\tau_*$ の増加に伴い小さくなることが特徴的である。

筆者らのADCP観測ではChroy Changvar地点よりも上流側において、河床高計測を目的とした縦断観測を実施した。その結果によると、乾季である2013年12月15日の平均的な河床波の波長は87m、波高は3.1mである。一方で、洪水期である2014年10月12日の平均的な河床波の波長は111m、波高は1.7mである。両者を比較すると洪水期の方が波長が長く波高は低い。すなわち、洪水期の方が河床波による流水抵抗が小さく、これは粗度係数が $\tau_*$ の増加に伴い低下することと整合する。なお、河床変動の状況を分析するために、Chroy Changvar地点における2013年12月14日と2014年10月10日の平均河床高を比較した結果、その差は約3cmであった。これは2回の観測結果の比較であるため更なる検証が必要であるものの、当該地点では大規模な河床変動は確認されなかった。

### 3. 手法

#### 3.1 降雨流出解析

本報では降雨流出汎濫(RRI)モデル<sup>4)</sup>を用いた。このモデルは、以下に示す通り、二次元の連続式と運動方程式を拡散波近似して解く。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $q_x, q_y$ はx、y方向の単位幅流量、hは水深、rは降雨強度、fは鉛直浸透強度、Hは水位、nはマンニングの粗度係数、sgnは符号関数である。

標高分布は、USGSが公開し標高及び河道網情報が得られるHydroSHEDSから、SRTMデータを入手した。鉛直浸透流はGreen-Amptモデルを用いており、パラメータは当該地点の土性を勘案し、クレイロームに相当する値を用い

た。斜面の等価粗度係数は $0.4 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とし、河道の粗度係数は工藤ら<sup>3)</sup>の手法を用い、無次元掃流力に応じて時々刻々と変化させた。降水量は地上雨量計による観測結果をThiessen法で補間した。境界条件は、図-1におけるKratie地点で、H-Q式から換算した流量を上流端境界条件として与えた。また、河道の幅と深さについては、現地観測結果に基づき、縦断的に分布した値を設定した<sup>7)</sup>。

### 3. 2 MODIS を用いた氾濫水量の推定

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) から得られる反射率データを用いて氾濫域を推定する。これまで、NDWI、LSWI など、複数の周波数帯の反射率データを駆使して水域を検出する手法が提案されてきた。これらの技術はある閾値を設けた上で、その値を境に水域と陸域を判別する。適切な閾値を設定できる場合は水域を良好に検出できるが、そのためには思考錯誤を重ねる必要があり、設定した閾値の客観性の説明が難しい場合もある。これは各ピクセルにおける反射率を直接用いる手法である。一方、本報ではGradient Based Method (GBM) と呼ばれる手法に着目し、これを修正した。GBM は画像解析手法の一つで、データの空間的な勾配を利用する。また、本技術はMODISのband1 (可視域赤) とband2 (近赤外域) の差の勾配に着目した。band1 とband2 は日データとして公開されており、空間解像度は250mである。他の周波数帯は8日毎のデータとなる8-day composite データであり、空間解像度は500 m である。より詳細な時空間解像度データを使用することも、本手法の大きな利点の一つである。以下、手法の概略を説明するが、さらに詳細な説明はBiswas et al<sup>5)</sup>を参照されたい。式(4)は反射率の差の勾配を表し、これの絶対値は式(5)で表わされる。

$$\bar{G}(x, y) = \left( \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} \right) f(x, y) \dots\dots\dots (5)$$

$$M(x, y) = \sqrt{\left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\bar{G}(x, y)$ は反射率の差の勾配、 $f(x, y)$ は反射率の差、 $M(x, y)$ は $\bar{G}(x, y)$ の絶対値である。

これは勾配に着目することから、土地被覆の境界を強調できる。一方、土地被覆そのものの判別は難しい。そこで、本報では反射率の差に加重平均を付加した項を導入した。式(6)は式(4)を修正したものであり、式(7)は式(6)の絶対値を表す。

$$\bar{G}'(x, y) = \left\{ \left( \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + W \right) + \left( \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + W \right) \right\} f(x, y) \dots\dots (7)$$

$$M'(x, y) = \sqrt{\left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + [W]f(x, y) \right)^2 + \left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} + [W]f(x, y) \right)^2} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\bar{G}''(x, y)$ は反射率の差の勾配を修正したもの、 $M'(x, y)$ は $\bar{G}''(x, y)$ の絶対値である。ここから得られた  $M'$  の平面分布から、水域と陸域の判定をすることができる。

### 3. 3 流速場の算定と流量値の計算

3.2から得られた水域とDSMデータを組み合わせることで氾濫水の水位分布を算定する。これらを得ることで平面的な水面勾配及び水深を算定していることになるが、この結果からマンニングの平均流速公式を採用し、適切な粗度係数を与えることで流速場を算定する。水位分布の推定手順は、初めに、氾濫域と陸域の境界の地盤標高をその地点の水位とし、境界に沿った線状の水位分布を得た上で、それを空間内挿して氾濫域内の面的な水位分布を得た。さらに流速場を推定するために、水位分布から求めた水面勾配分布、水位から地盤標高を差し引いて求めた水深分布を用いて、等価粗度係数を $0.4 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ としたマンニング式から流速場を推定した。

## 4. 結果

### 4. 1 河道内の水位及び流量

図-7及び-8に水位、流量の観測結果と計算結果の比較をそれぞれ示す。ここで、図中のNSEはナッシュ効率係数である。水位について、メコン川本川の2地点は、特に洪水期に観測結果と計算結果が良く整合する。一方、支川のBassac川及びTonle Sap川は計算水位が過大となる傾向がある。これは、主に河道条件の設定、特に粗度係数の設定に起因すると考えられる。今回は、上述の通り無次元掃流力に応じて粗度係数を時々刻々と変化させた。それにあたり、粒径を与える必要があり、今回はメコン川本川で竹林ら<sup>12)</sup>により観測された結果を参考に0.5 mmを一律で与えた。一方、支川では粒径が異なる可能性があり、特にTonle Sap川では粒径が本川よりも小さい<sup>12)</sup>。工藤ら<sup>3)</sup>によると、当該地点は無次元掃流力が大きくなると粗度が低下するため、粒径が小さい場合には無次元掃流力が大きく、粗度が低下し水位が低下する。すなわち、粒径の空間分布を考慮することで水位の再現性が向上すると期待できる。また、Tonle Sap湖の結果に着目すると、一部では計算水位が観測水位を良好に再現するが、計算水位が過少となる。これは、湖底の形状の設定に起因すると考えられる。今回は、SRTMを一律で掘り下げたものを使用したが、より緻密な湖底形状を反映することで、湖の水位と湛水量の関係がより正確となり、水位の再現性の向上が期待できる。

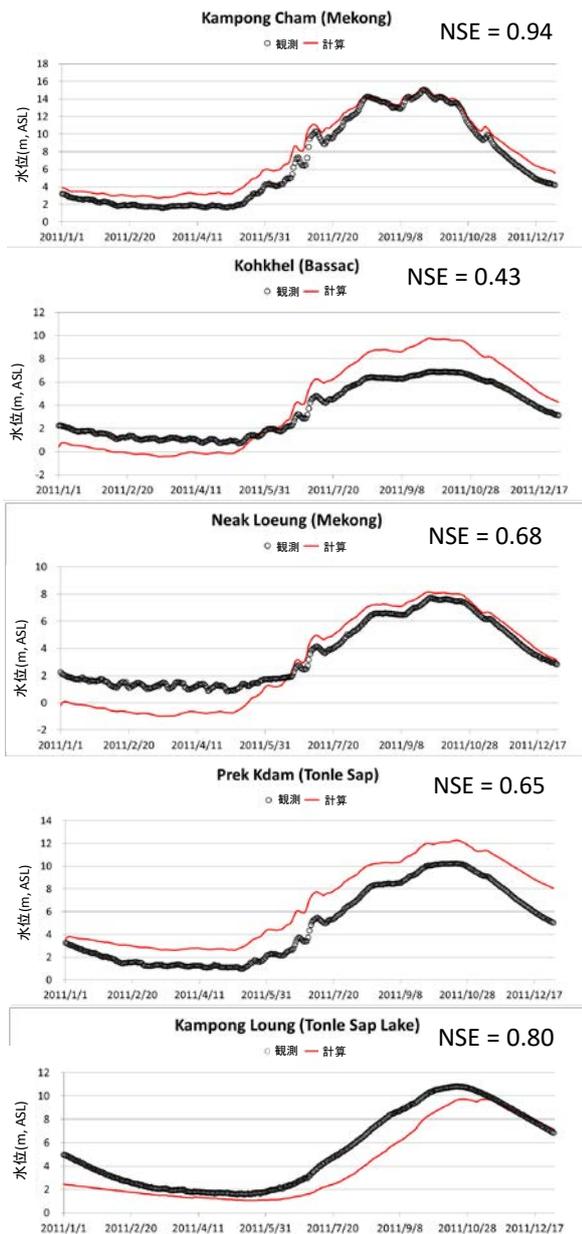


図-7 水位の計算結果

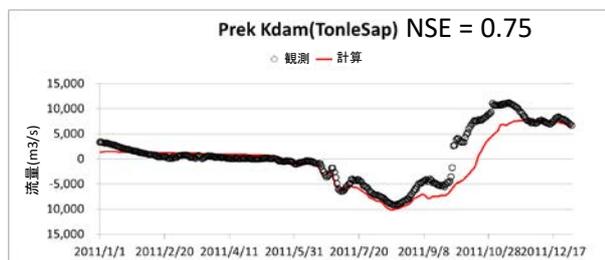


図-8 流量の計算結果

流量については、Kampong Loung 地点は湖上の水位観測地点のため、これ以外の地点で観測データと計算結果を比較したその結果、いずれも良好に計算できることを確認した。図-8はNSEが最も低い値となったPrek Kdam地点

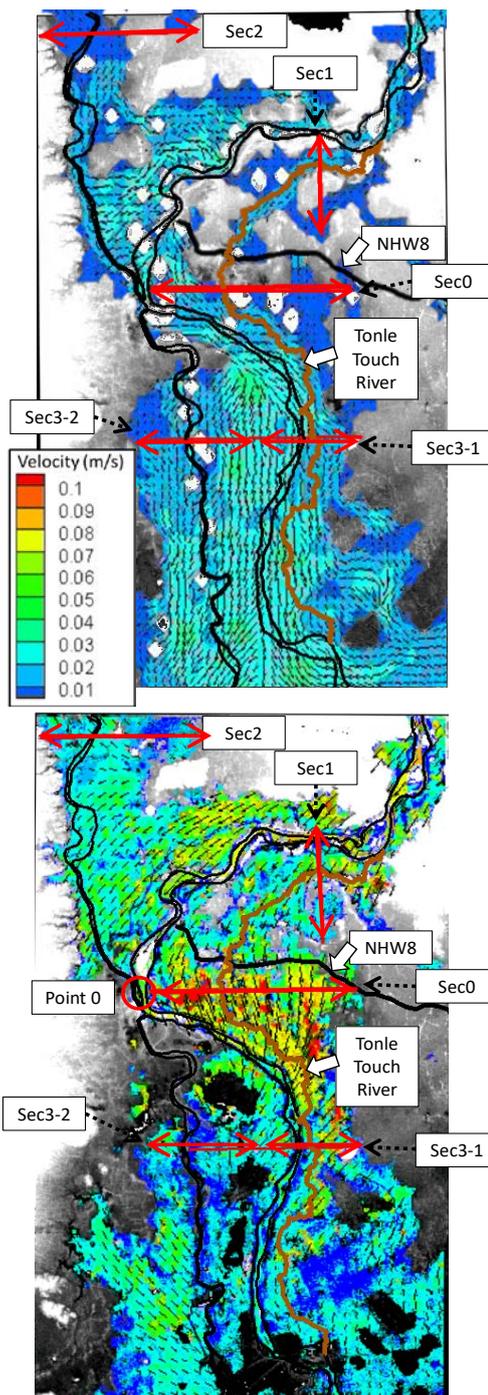


図-9 氾濫域及び流速場の推定結果

(上：RRIモデル(2011年10月7日)、

下：MODIS(2011年9月30日～10月7日の8day composite))

の結果である。洪水期から乾季への移行期間は計算流量が過少になり、これはTonle Sap湖の計算水位の過少に起因すると考えられる。一方、Tonle Sap川の逆流も再現されており、傾向を良好に捉えた結果であることが確認できる。

#### 4.2 洪水氾濫の水理量の算定

図-9に、当該地点に対して本手法を適用した結果を示す。また、RRIモデルによる推定結果を併せて示す。なお、

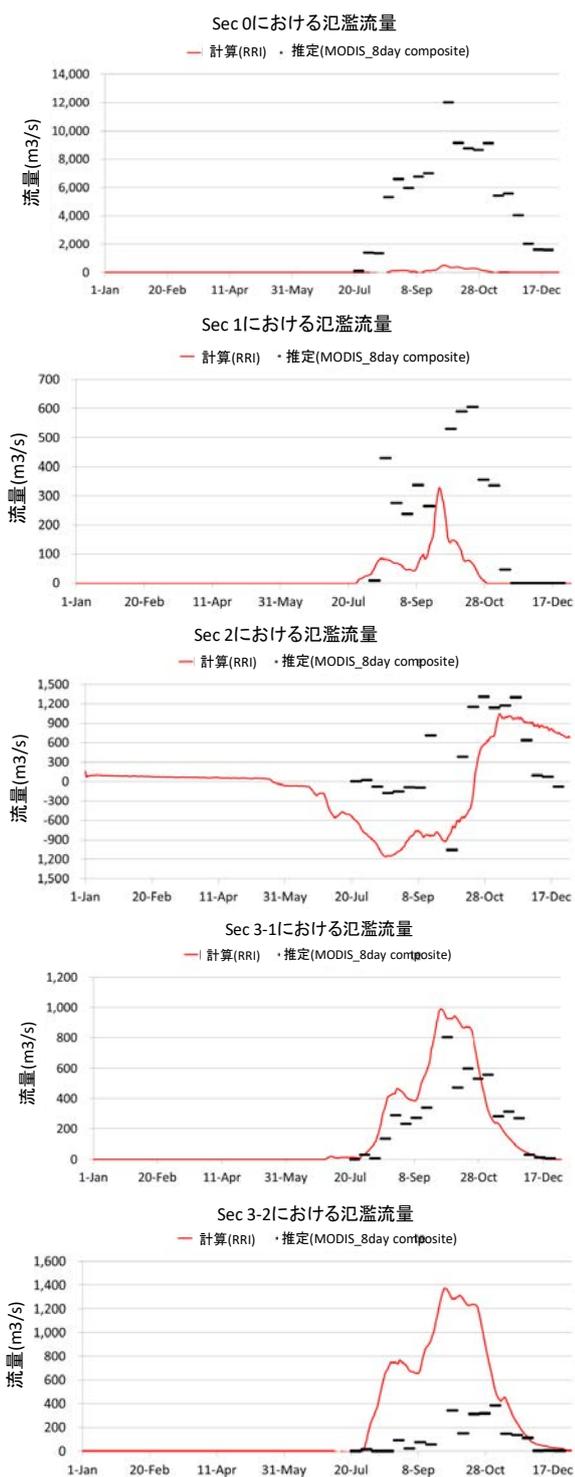


図-10 氾濫流量の計算結果

コンター図が存在する箇所が同手法で検出された水域となる。また同コンター図は流速の絶対値を示しており、詳細は後述する。図を比較すると、下流域において若干の差が見受けられるものの、全体としては良好に整合することが確認できる。

また同様に図-9 に MODIS から得た流速場と RRI モデルから得た流速場を示す。両者を比較すると、全体としては

概ね同様の傾向を再現するが、特に国道 8 号線 (NHWS) の下流側では MODIS から推定した流速が大きい結果となった。また以下に得られた流速分布と水深分布から氾濫流量を推定する。

図-9 に示す通り Sec0~Sec3-2 を定義し、それぞれの氾濫流量を図-10 に示す。Sec2 と Sec3-1 は RRI モデルによる氾濫流量と MODIS による氾濫流量が概ね良好に一致する。Sec2 は Tonle Sap 川周辺の氾濫流量であり、洪水期に流れ方向が逆転する特徴を RRI モデルと MODIS の両者が再現する。一方で Sec0 に着目した場合、両者が乖離する。Sec0 はメコン川本川左岸側の氾濫原にあるが、当該箇所は NHWS やトンレトーチ川が存在し、氾濫水が複雑な挙動を示す地点である。また、当該地点は灌漑用の小規模な水路が多数存在し、これによる氾濫原への導水効果をモデル化することで、計算精度の向上が期待できる。

## 5. まとめ

本報は、頻繁に洪水氾濫が発生するメコン川下流域を対象に流出氾濫解析を実施した。そして河道内の水位と流量の検証のみならず、氾濫原上の水の流量を衛星情報から推定し計算結果と比較した。この技術は特に途上国の大規模流域の洪水氾濫現象把握に役立つと期待できる。今後は、モデルによる計算と衛星情報による推定結果が合わない部分について検討を進める必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 工藤俊, 萬矢敦啓, 原田大輔, 笹田俊治: 小本川における洪水時の流水抵抗変化がハイドログラフに及ぼす影響, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.49-54, 2017 年 6 月
- 2) 工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 笹田俊治, 中津川誠: 実河川における流水抵抗の分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, I\_769-I\_774, 2017.2
- 3) 工藤 俊・萬矢敦啓・E.D.P PERERA・小関博司・岩見洋一・中津川誠, メコン川下流域の洪水氾濫に対する観測結果を反映した河道条件の影響分析, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.72, No.4, I\_145-I\_150, 2016
- 4) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信: 2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.1, pp.14-29, 2013.
- 5) Robin K. BISWAS, Atsuhiko YOROZUYA, Shinji EGASHIRA, MODIFIED GRADIENT BASED METHOD FOR MAPPING SANDBARS IN MEGA-SIZED BRAIDED RIVER USING MODIS IMAGE, , Journal

of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 72, No. 4, L\_931-L\_936, 2016.

- 6) Shun Kudo, Atsuhiko Yorozuya, Hiroshi Koseki, Yoichi Iwami, Makoto Nakatsugawa “Inundation Process in the Lower Mekong River Basin,” Journal of Disaster Research, Vol.11, pp.1062-1072, 2016.
- 7) 萬矢敦啓, 本永良樹, 岩見洋一 : 大陸河川における ADCP を用いた流況・流量・河床高観測の注意点と観測結果の一例, 河川流量観測の新時代, 第4巻, pp.48-56, 2014.
- 8) Mekong River Commission Secretariat: FINAL REPORT on IMPLEMENTATION OF DISCHARGE MEASUREMENTS ON THE MEKONG MAINSTREAM, THE TONLE SAP RIVER AND BASSAC RIVER IN THE KINGDOM OF CAMBODIA, 2010.
- 9) A. Yorozuya, Md. Islam, M. Kamoto and S. Egashira : Influence of Jamuna Bridge on river morphology, Advances in River Sediment Research, Fukuoka etal.(eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 299-308, 2013.
- 10) 岸力, 黒木幹男 : 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1972.
- 11) Engelund, F: Hydraulic resistance of alluvial streams, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Volume 92, No. HY-2, pp.315-326, 1966.
- 12) 竹林洋史, 中元達也, 藤田正治 : 粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性 - トンレサップ川を対象として、京都大学防災研究所年報 第 52 号 B、pp.637-645、2009.

## 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】

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なかっていること、融雪水は災害の原因となることから、融雪期が始まる前に山間部の積雪分布をできるだけ正確に把握することが重要である。本研究では、同一範囲を対象とした2回（2012年3月及び2015年3月）の航空レーザ測量により計測された積雪分布の類似性に着目し、ダム流域における積雪分布の推定方法を検討した。結果、複数年の積雪分布から共通する基礎的な成分を抽出することにより、毎年の積雪分布を精度良く推定することができる可能性が示された。本手法を応用することにより、ダム流域等の山間部において、簡易にかつ低コストで精度良く積雪分布を推定することができる可能性がある。

キーワード：積雪分布、パターンの類似性、ダム、航空レーザ測量

### 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なかっている。加えて、融雪水は融雪出水及び土砂災害の原因となる。このため、融雪期が始まる前に山間部の積雪分布をできるだけ正確に把握することは、水資源管理及び融雪期における防災の両面で非常に重要である。

山間部の積雪分布に関しては、1970年代頃から、調査者が厳冬期に入山して行う積雪調査が日本全国で行われてきた。いくつかの例を挙げると、山田ら<sup>1)</sup>は北海道大雪山系の旭岳、松山<sup>2)</sup>及び島村ら<sup>3)</sup>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の増加とともに積雪深及び積雪相当水量が線形に増加することを報告している。また、森林限界以上の高標高帯においては、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<sup>1)</sup>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、積雪の堆積と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。樹林帯における標高と積雪相当水量との関係は、ダム管理の実務において、流域における春先の積雪量を推定する際の標準的な手法<sup>4)</sup>とされており、現場への適用がなされている。しかし、積雪調査は厳冬期に行われ、雪崩等の危険を伴うことから、調査可能な地点は限られており、得られるデータには限界がある。

近年、リモートセンシング技術が発達し、冬季に立ち入り困難な範囲についても、積雪分布を計測することが可能となった。中でも、航空レーザ測量は三次元空間データ

を高密度にかつ高精度で得ることが可能な手法である。航空レーザ測量による積雪分布の計測例として、花岡ら<sup>5)</sup>が富山県立山、鈴木ら<sup>6)</sup>が長野県上高地、西原ら<sup>7,8)</sup>が北海道大雪山系の旭岳において計測を行い、積雪深と地形との関係を分析した例が挙げられる。西原ら<sup>7,8)</sup>は、同一範囲を対象として2回（2012年3月及び2015年3月）実施した計測結果を基に、過去に積雪調査により解明した積雪分布の特徴を検証するとともに、森林限界以上の高標高帯においては、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、強風時に積雪が移動して再堆積する影響により、地上開度が同じ場合でも風衝斜面と比較して風背斜面の積雪深が大きいことを報告している。さらに、計測年が異なる積雪分布の間に類似したパターンが見られたことを報告している。

これまで、同一範囲を対象とした複数回の航空レーザ測量による積雪分布の計測例が無かったため、積雪分布のパターンの類似性に着目した研究例は無いが、パターンの類似性を活用することにより、簡易に積雪分布を推定できる可能性がある。そこで本研究では、航空レーザ測量により計測した積雪分布のパターンを分析し、この結果を用いて積雪分布を推定する手法の検討を行った。具体的には、2回の航空レーザ測量により計測された積雪分布から、対象範囲の積雪分布を支配している基礎的な成分を抽出し、この基礎的な成分を用いて航空レーザ測量範囲の積雪分布を再現すること、航空レーザ測量範囲における基礎的な成分から、ダム流域を対象とした基礎的な成分を作成し、これよりダム流域における積雪分布を推定してその推定精度を検証することである。

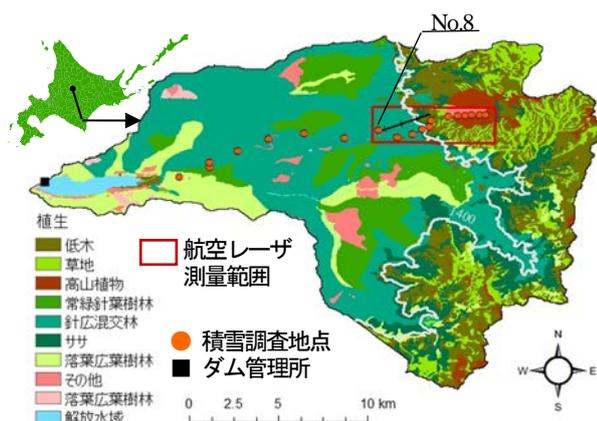
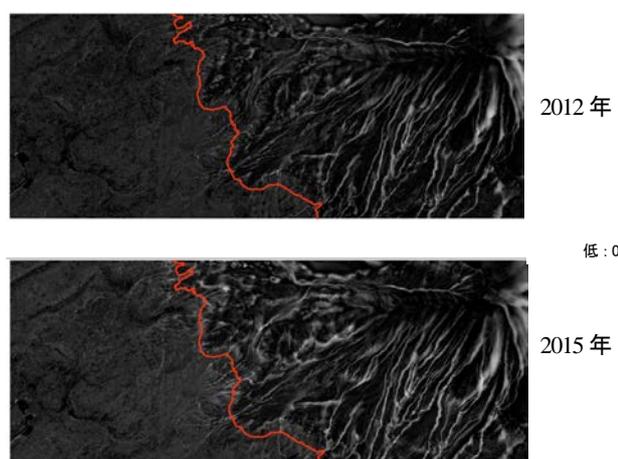


図-1 対象ダム流域（忠別ダム流域）

図-2 計測された積雪分布<sup>8)</sup>

## 2. 対象流域及び基礎資料

対象流域は図-1 に示す忠別ダム流域である。忠別ダムは、石狩川水系忠別川流域の上流部に位置し、流域面積は239km<sup>2</sup>、流域の標高帯は400m～2,300m付近である。図-1には、自然環境保全基礎調査の結果を用いて10分類した植生を示している。図中の白線は標高1,400mの等高線であるが、標高1,400m付近を境に主たる植生が森林から草地やササといった森林以外に変化する。流域面積の約6割が森林、約4割が森林以外である。

次に、分析に使用した資料を示す。航空レーザ測量は図-1の赤枠で示す範囲で実施した。測量範囲の面積は10km<sup>2</sup>、標高帯は1,100m～2,300m付近の主に西向き斜面である。測量範囲の植生は標高1,450m付近を境に森林と森林以外に分かれ、標高1,450m以上の範囲では、98%が森林以外である。航空レーザ測量は、無積雪期の2009年9月22日～25日、積雪期の2012年3月10日及び2015年3月27日に実施し、積雪深は積雪期及び無積雪期の二時期の標高差として求めた。データの水平解像度は5mである。測量

に使用した機器の計測精度を基に算出した積雪深の計測精度は±30cmである。

忠別ダム流域における積雪分布の推定にあたっては、地形情報として水平解像度が10mである基盤地図情報の数値標高モデル及び毎年行われている積雪調査の結果を用いた。また、水収支はダム管理所において連続観測されている気象・水文データを用いて計算した。

## 3. 積雪分布の類似性及び基礎的な成分の抽出

航空レーザ測量を用いて2012年及び2015年に計測した積雪分布を図-2に示す<sup>8)</sup>。図中の赤線は森林限界であり、赤線の左側が樹林帯、右側が森林限界以上の高標高帯である。両年の図を概観すると、樹林帯と高標高帯の積雪分布が異なること、樹林帯においてはほとんどが暗色であることから積雪深が小さく、狭い範囲に分布しているのに対し、高標高帯においては明暗が明瞭であることから積雪深が幅広く分布し、尾根に沿って積雪の少ない箇所、谷に沿って積雪の多い箇所が分布していることといった両年の積雪分布に同様のパターンが見られる<sup>8)</sup>。また、西原ら<sup>7)</sup>は図-2のデータを用いて標高と積雪深との関係、地表面の地上開度<sup>9)</sup>と高標高帯における積雪深との関係、斜面方位別の積雪深等の分析を行っているが、両年の傾向が概ね一致したことを報告している。

以上のように同一範囲における積雪分布に類似性が見られる要因として、両年の積雪分布に共通する1つの基礎的な成分があり、この基礎的な成分に対して各年の降雪量等を反映した成分が作用して、各年の積雪分布が決まっていることが考えられる。本稿では、簡単のため、各年の全メッシュの積雪深を定数で除した場合に、両年に共通する基礎的な成分が抽出できると考え、試行錯誤の上、後述するRMSEが最小となった、航空レーザ測量を実施した範囲における各年の積雪の総量を、各年の全メッシュの積雪深を除す定数とした。ここで、積雪の総量は各メッシュの積雪深にメッシュの面積(25m<sup>2</sup>)を乗じて航空レーザ測量範囲にわたり合算したものであり、2012年は $2.12590 \times 10^7$  m<sup>3</sup>、2015年は $2.70945 \times 10^7$  m<sup>3</sup>である。ただし、数mである積雪深に対して、扱いやすい桁数の結果を得るために、2012年は2.12590、2015年は2.70945(以降、これらの定数を「積雪倍率」をいう)で除した。以降、全メッシュの積雪深を積雪倍率で除した分布を「積雪基礎ラスタ」、積雪基礎ラスタの各メッシュの値を「積雪基礎ラスタ値」という。なお、上記の方法により求めた積雪基礎ラスタ値は次元を持つが、本稿では、積雪基礎ラスタ値に積雪倍率を乗じるといった、簡易に積雪分布を推定する手法の検討を

重視し、各パラメタの次元については追求しない。

2012年及び2015年のデータより抽出した積雪基礎ラスタの類似性は、積雪基礎ラスタ値の総量の相対差及び積雪基礎ラスタ値の対象範囲におけるRMSEを用いて評価した。はじめに、積雪基礎ラスタ値の総量の相対差は航空レーザ測量範囲全体で $-8.02 \times 10^{-7}$ であり、樹林帯及び高標高帯における総量の相対差はそれぞれ $1.59 \times 10^{-2}$ 、 $1.22 \times 10^{-2}$ であった。次に、RMSEは航空レーザ測量範囲全体で0.331であり、樹林帯及び高標高帯におけるRMSEはそれぞれ0.183、0.407であった。樹林帯と比較して高標高帯において積雪基礎ラスタの一致度が若干低い。試みに2015年のデータから作成した全積雪基礎ラスタ値に0.01から0.01きざみに2.00まで増加させた値を乗じ、RMSEが最少となる値を求めると0.99であった。以上より、積雪倍率を用いることにより、両年に共通する1つの積雪基礎ラスタを概ね抽出できたと考えられる。

#### 4. 積雪基礎ラスタを用いた積雪分布の推定

3章では積雪基礎ラスタの抽出を試みた。高標高帯において積雪基礎ラスタの一致度が低いといった課題が残るものの、本章ではこのような簡易な方法で抽出した積雪基礎ラスタを用いて、どの程度の精度で積雪分布の推定が可能であるかを検討する。

はじめに、他年の積雪基礎ラスタを用いた積雪分布の再現である。2015年の積雪分布の再現を例にすると、2012年の航空レーザ測量結果から作成した積雪基礎ラスタに2015年の積雪倍率を乗じて2015年の積雪分布を再現することであり、2012年の積雪分布を再現する場合は両年のデータを入れ替えた手順となる。航空レーザ測量により計測された積雪深を真値として求めた、各年の積雪深の推定値の総量の相対誤差及びRMSEを表-1及び表-2にそれぞれ示す。積雪の総量が非常に高い精度で再現されている。各メッシュの相対誤差を見ると、樹林帯においては両年の平均で79%のメッシュが相対誤差 $\pm 20\%$ 以内であったのに対し、高標高帯では39%のメッシュが相対誤差 $\pm 20\%$ 以内であった。

ここまで、水平解像度が5mのデータを用いて積雪基礎ラスタの抽出及び積雪分布の推定を行ったが、融雪・流出モデルに適用されるメッシュの大きさは1km程度が多いこと、水平解像度を小さくすることにより正負の誤差が打ち消され、積雪深の推定誤差を小さくすることが期待されることから、水平解像度を小さくした場合の検討を行った。水平解像度を小さくする際、対象とする水平解像度の各メッシュに含まれる5mメッシュの積雪深の平均値を各

表-1 推定した積雪の総量の相対誤差

	全体	樹林帯	高標高帯
2012	$-8.02 \times 10^{-7}$	$1.59 \times 10^{-2}$	$-1.22 \times 10^{-2}$
2015	$8.12 \times 10^{-7}$	$-1.57 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-2}$

表-2 推定した積雪深のRMSE

	全体	樹林帯	高標高帯
2012	0.705	0.389	0.865
2015	0.899	0.496	1.102

表-3 水平解像度と推定した積雪深のRMSEの関係

水平解像度	2012	2015
10m	0.667	0.850
20m	0.613	0.782
50m	0.503	0.641
100m	0.409	0.521
200m	0.313	0.399
500m	0.183	0.233
1000m	0.124	0.158

メッシュの積雪深とした。また、メッシュの境界線が航空レーザ測量範囲に一致するよう、水平解像度は10m, 20m, 50m, 100m, 200m, 500m, 1000mとした。このため、水平解像度を小さくした場合でも積雪の総量(積雪倍率)は変化しない。これまでと同様に、各解像度の航空レーザ測量により得られた積雪分布を積雪倍率で除して積雪基礎ラスタを作成し、積雪基礎ラスタに他年の積雪倍率を乗じて他年の積雪分布を再現した。前述のとおり、解像度を小さくしても積雪の総量は変化しないことから、積雪の総量の推定精度は変化しない。水平解像度別に、航空レーザ測量結果を真値とし、推定した積雪分布のRMSEを求めた結果を表-3に示す。水平解像度を小さくすると積雪深の局所的な変動が平均化されるため、水平解像度を小さくするに伴い、RMSEが小さくなったと考えられる。融雪・流出モデルに適用する積雪分布を推定する際は、水平解像度を小さくし、簡易に積雪分布を推定することが可能であると考えられる。

#### 5. ダム流域における積雪分布の推定手法の検討

4章までは、航空レーザ測量を実施した範囲を対象に積雪分布の推定手法を検討した。同手法をそのままダム流域に適用する場合、流域全域の積雪分布を複数回にわたり航空レーザ測量により計測し、積雪基礎ラスタを作成する必要があるが、コストが高く現実的ではない。そこで、航空レーザ測量を行った忠別ダム流域を対象に、流域内の一部

において行われた航空レーザ測量の結果からダム流域の積雪基礎ラスタを作成する方法を検討する。

既往研究によると、樹林帯における積雪深は標高との間に線形の関係があること、森林限界以上の高標高帯における積雪深は地上開度との間に線形の関係があることが報告されている<sup>8)</sup>。4章までに作成した積雪基礎ラスタは、積雪深を定数で除しただけであり、得られた積雪基礎ラスタ値と標高及び地上開度との間には線形の関係が保持されている。また、ある地域全体の積雪分布を把握する方法の一つに、代表的な地点の積雪深と標高との間の関係式を作成し、この関係式から求めた標高帯別の積雪深にその標高帯の面積を乗じて、流域面積について合算する方法がある<sup>10)</sup>。この方法は、標高を地上開度に置き換えても適用可能である。そこで、2012年及び2015年の両年の積雪基礎ラスタ値を用い、樹林帯については積雪基礎ラスタ値と標高、高標高帯については積雪基礎ラスタ値と地上開度との関係からそれぞれ線形式を作成し、ダム流域を樹林帯及び高標高帯に分け、これらの式を適用することとした。

はじめに、線形式の作成であるが、データ数が多いため、全メッシュのデータを図にプロットすると傾向を捉えることが困難である。そこで、データを標高25mのような区間に区切り、この区間に含まれる平均値を用いて、標高及び地上開度と積雪基礎ラスタ値との関係式を作成することとした<sup>8)</sup>。また、4章において示した通り、水平解像度を小さくすると、積雪分布の推定誤差が小さくなることから、水平解像度を小さくした複数のケースの線形式を併せて作成する。なお、水平解像度を小さくするとサンプル数が少なくなるため、水平解像度を小さくするに伴い、区分する幅を大きくしている。また、サンプル数が少なく、線形式の作成が困難になったため、水平解像度は200mを上限とした。図-3に樹林帯における標高と積雪基礎ラスタ値との関係、図-4に高標高帯における地上開度と積雪基礎ラスタ値との関係をそれぞれ示す。図には、水平解像度を変化させた6ケースの結果をプロットしている。樹林帯においては、標高と積雪基礎ラスタ値の間に線形の関係があること、高標高帯においては地上開度と積雪基礎ラスタ値の間に線形の関係があることが確認できる。さらに、水平解像度を変化させた場合でも、ほぼ同一の線形式を作成することが可能であることがわかる。しかし図-4を見ると、水平解像度を小さくするにともない地形の凹凸が平滑化されるため、地上開度のとり得る範囲が狭くなる。例えば、水平解像度を200mとした場合、地上開度がとり得る範囲は概ね80°~90°となっており、地上開度

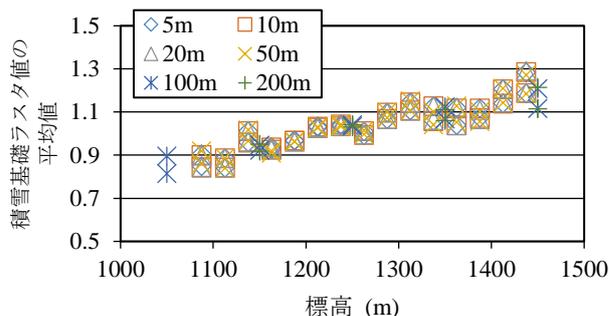


図-3 標高と積雪基礎ラスタ値の関係 (樹林帯)

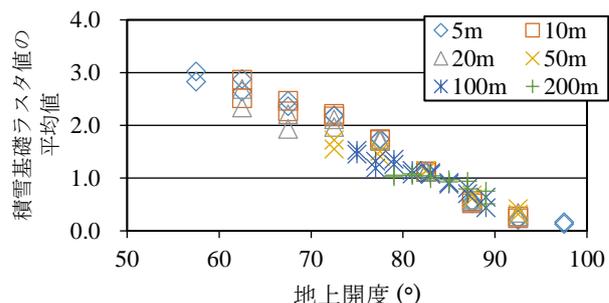


図-4 地上開度と積雪基礎ラスタ値の関係 (高標高帯)

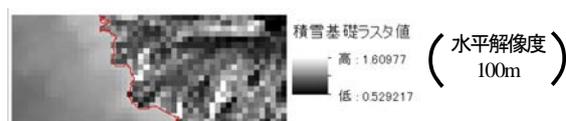


図-5 線形式から作成した積雪基礎ラスタ

が80°以下の範囲において、低解像度のデータから作成した線形式と高解像度のデータから作成した線形式の間に差が出る可能性がある。例として図-5に水平解像度を100mとした場合の積雪基礎ラスタを示す。図中の赤線は森林限界であるが、ここを境に樹林帯及び高標高帯において異なる作成方法を適用したため、積雪基礎ラスタ値の分布が大きく異なる。各解像度の積雪基礎ラスタに各年の積雪倍率を乗じて航空レーザ測量を実施した範囲における積雪分布を推定し、航空レーザ測量の結果を真値として、推定した積雪分布の総量の相対誤差及びRMSEを算出した結果を表-4に示す。水平解像度を小さくするに伴い、総量の相対誤差、RMSEともに小さくなっており、総量の相対誤差は数%である。このことから、図-3及び図-4から作成した線形式を用いて積雪基礎ラスタを作成した場合にも積雪分布を精度良く推定できることが確認された。

次に、航空レーザ測量範囲において作成した線形式を用いて、ダム流域を対象に積雪基礎ラスタを作成する。なお、水平解像度は、基盤地図情報の数値標高モデルと同一の10m及び図-3及び4から低解像度のデータを用いた場合とほぼ同等のラスタが得られると考えられた100mの2

表-4 水平解像度と RMSE の関係

水平解像度	総量の相対誤差		RMSE	
	2012	2015	2012	2015
5m	0.061	0.061	1.345	1.487
10m	0.032	0.032	1.397	1.493
20m	0.020	0.020	1.189	1.326
50m	0.013	0.013	1.010	1.123
100m	-0.012	-0.012	0.835	0.904
200m	-0.026	-0.047	0.741	0.695

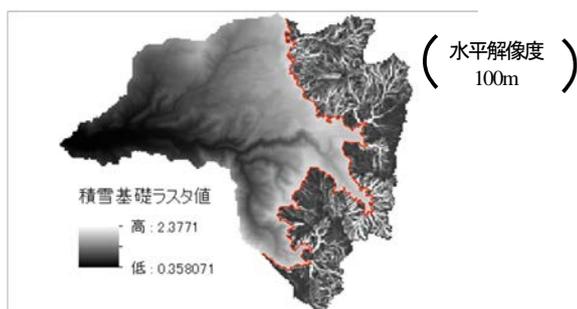


図-6 線形式から作成したダム流域の基礎ラスタ

ケースとした。なお、ダム流域のうち標高400m~1,050m付近は航空レーザ測量範囲に含まれていないが、この標高帯は樹林帯であるため、図-3 から作成した線形式を適用した。例として、水平解像度を100mとした場合の積雪基礎ラスタを図-6に示す。図-5に示した積雪基礎ラスタと同様に、赤線で示した森林限界を境に分布の傾向が異なり、高標高帯においては尾根及び谷が確認できる。この積雪基礎ラスタに各年の積雪倍率を乗じればダム流域の積雪分布を推定することができるが、テレメータにより積雪深を連続観測している地点等の観測値を積雪倍率として適用できれば、実務にとって有用である。忠別ダム流域においては、ダム管理所地点において積雪深が連続観測されており、毎年3月に19地点において積雪調査が行われている。2012年及び2015年の観測値を概観すると、積雪調査地点No.8の観測値は、2012年に2.31m、2015年に2.78mであり、航空レーザ測から得られた積雪倍率に近い値が得られている。そこで、積雪調査地点No.8の観測値を積雪倍率とし、2008年~2015年の積雪分布を推定した。推定した積雪分布は、この分布からダム流域全体における積雪相当水量の総量(積雪包蔵水量)を求め、水収支と比較することにより評価する。積雪相当水量を計算するには積雪密度が必要になるが、国内各地で行われた積雪調査結果から、積雪密度は観測時期が同じであれば標高に関わらずほぼ一定値となる(例えば小池ら<sup>11)</sup>)ことが示されているため、ダム管理所が実施した積雪調査から、森林内に位置する

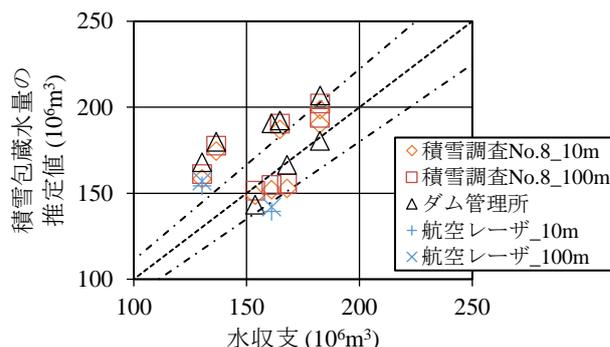


図-7 ダム流域の積雪包蔵水量と水収支

11 地点の平均値を用いた。水収支はダム流入量から降水量を除き、Hamon 法による可能蒸発散量を加えることにより求め、期間は積雪調査の翌日から同年の6月30日までとした。詳細は、ガイドライン<sup>9)</sup>を参照されたい。結果を図-7に示す。図には、積雪調査の結果を基に標高をパラメータとする手法を用いてダム管理所が推定した値、2012年及び2015年については航空レーザ測量結果から得られた積雪倍率を用いて推定した値を併せて示す。図中の斜線は水収支を真値とした場合に相対誤差が10%である範囲を示している。図より、水平解像度を変化させても積雪包蔵水量の推定値はほとんど変化していない。また、水収支と比較すると、積雪基礎ラスタに積雪調査地点No.8の観測値を積雪倍率として推定した値は、ダム管理所が推定した値と比較してほぼ同等もしくは高い精度となっている。積雪基礎ラスタの抽出方法及び積雪倍率の設定方法に検討の余地はあるが、本手法により、簡易にかつ低コストで精度良く積雪分布を推定することができる可能性があることが示された。

## 6. 定山溪ダムへの適用

### 6. 1. 流域の概要と使用データ

定山溪ダム流域の概要を図-8に示す。定山溪ダム流域は豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は104km<sup>2</sup>、流域の標高帯は概ね300m~1,300mである。

図-8には、環境省による自然環境保全基礎調査の結果を用いて9分類した植生を示したが、流域の多くが森林である。しかし、図中の丸で囲んだ範囲のように、標高が高く、尾根に近い範囲においては、草地やササといった森林以外の植生が主たる植生となっている。

流域内における積雪深の観測は、テレメータによる連続観測及び毎年3月に行われる積雪調査により実施されている。このうちテレメータによる観測は、図-8の黒丸で示した2地点において行われ、積雪調査は図-8のオレンジ丸で示した2コース計8地点において行われている。い

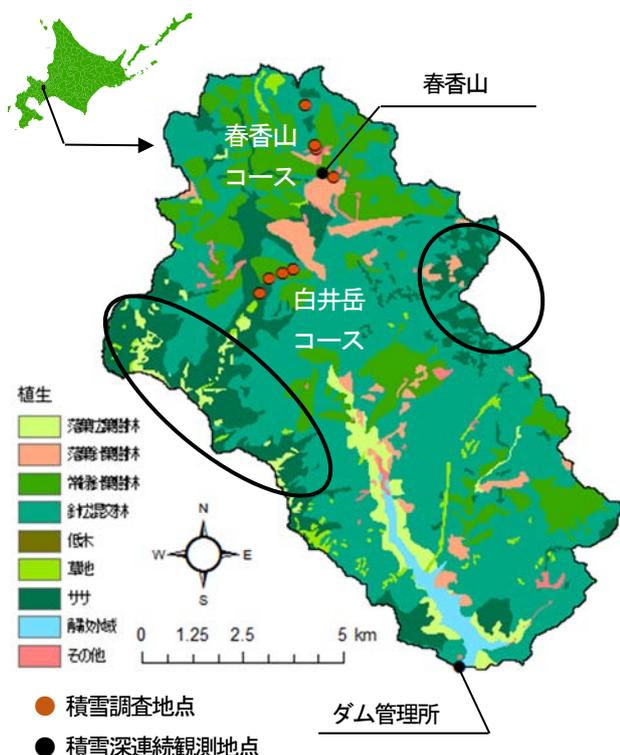


図-8 定山溪ダム流域と積雪深観測地点

ずれの地点も樹林帯に位置し、標高は概ね400mから850mである。流域の積雪分布の推定の際に必要な地形データは、国土院が公開している基盤地図情報数値標高モデル（水平解像度10m）を用いて求めた。また、積雪分布の推定、水収支の計算及びダム流入量の計算には、ダム管理所において観測されている気象・水文データ及び積雪調査の結果を用いた。

### 6.2 積雪分布を推定する手法の概要

定山溪ダム流域においては、複数回の航空レーザ測量による積雪分布の計測が行われていないことから、北海道大雪山系の旭岳において行われた航空レーザ測量結果から作成された線形式（図-3及び図-4）をそのまま定山溪ダム流域に適用する。また、水平解像度を変化させても積雪分布の推定精度がほとんど変化しないことから、積雪基礎ラスタの水平解像度は100mとする。線形式は樹林帯及び高標高帯に分けて適用する必要があることから、図-8に示した植生分布を用いてダム流域を樹林帯及び高標高帯の2つに区分する。区分する方法は6.3に示す。樹林帯においては基盤地図情報数値標高モデルから求めた地表面の標高、高標高帯においては同モデルから求めた地上開度をを用い、前述した線形式からダム流域の積雪基礎ラスタを作成する。積雪倍率を計算する地点は4地点選定し、これらを用いて求めた積雪分布の推定精度を6章において評価する。

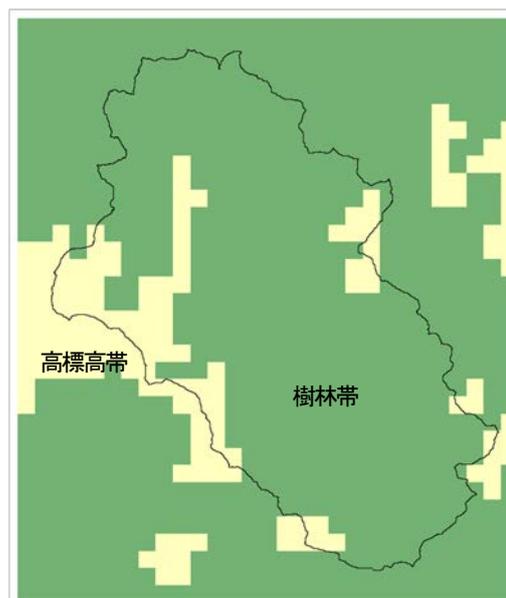


図-9 樹林帯と高標高帯に区分後のダム流域  
(目視による区分後)

### 6.3 ダム流域を樹林帯と高標高帯に区分する方法

図-8に示した定山溪ダム流域の植生分布を概観すると、ある標高により明瞭に樹林帯及び高標高帯に区分されるような特徴を有していない。積雪分布の特徴は、樹林帯と高標高帯において異なるが、局所的な植生の変化に対応して積雪分布の特徴が変化するとは考えにくく、ある程度まとまった範囲を対象として樹林帯及び高標高帯を区分すれば良いと考えられる。また、融雪・流出モデルに用いられるメッシュの大きさは数100mから1km程度である。これらを踏まえ、ダム流域を樹林帯と高標高帯に区分する際に使用するメッシュの水平解像度は500mとした。図-8に示した植生分布から各メッシュに占める各植生の面積の割合を計算し、最も面積が多い植生の属性を基に、樹林帯と高標高帯に区分した。具体的には、最も面積が多い植生が低木、草地及びササの場合は高標高帯、これら以外の場合は樹林帯に区分した。なお、同手法により区分した結果、最も面積の多い植生が解放水域もしくはその他となったメッシュや広範囲の樹林帯の中に1メッシュだけ高標高帯に区分されたメッシュがあった。このため、最終的には目視による確認を行い、例えば、周辺のメッシュがすべて樹林帯に区分されている中に、最も面積の多い植生がその他であるメッシュや高標高帯に区分されたメッシュがある場合、当該メッシュは樹林帯に区分した。

図-9に定山溪ダム流域を樹林帯及び高標高帯に区分した図を示す。これは、目視による確認後の図である。図を見ると、流域の大部分は樹林帯に区分され、図-8の丸で示した標高が高く、尾根に近い範囲において高標高帯に区

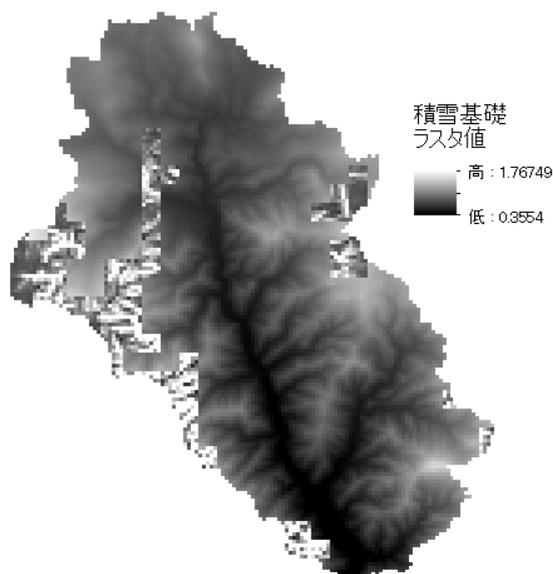


図-10 定山溪ダムの積雪基礎ラスタ  
(水平解像度 100m)

表-5 積雪深観測地点の積雪基礎ラスタ値

ダム管理所テレ	春香山テレ
0.371	0.501
春香山 No.9	白井岳 No.5
0.721	0.619

分されたメッシュがある。

#### 6. 4. 積雪分布の推定方法

忠別ダム流域における積雪分布を推定する際に積雪倍率を求めることとした地点は、標高約 1,100m の樹林帯に位置しており、毎年 3 月の積雪深が 2m を超える地点である。また、積雪倍率を求める地点は、テレメータにより積雪深を観測している地点のように、継続して観測が行われている地点や、冬季における立ち入りが容易である地点とすることが望ましい。そこで、定山溪ダム流域において積雪深を観測している地点から、テレメータにより積雪深を観測している 2 地点（ダム管理所地点：標高 393m、春香山地点：標高 568m）、積雪調査が行われている 2 コースそれぞれの最も標高が高い地点（白井岳コース No. 5：標高 700m、春香山コース No. 9：標高 850m）の計 4 地点を、積雪倍率を計算する地点に選定した。なお、積雪調査は毎年 3 月に 1 回行われているのみであることから、積雪倍率を求める地点をテレメータにより積雪深を連続観測している地点とする場合を含め、積雪調査が行われた日の積雪分布を求める。

3 章及び 4 章に示した方法により作成した定山溪ダムの積雪基礎ラスタを図-10 に示す。図-9 の区分に従い流域を

樹林帯及び高標高帯に区分したため、それぞれの区域において積雪基礎ラスタの特徴が異なる。積雪倍率を計算する 4 地点の積雪基礎ラスタ値を表-5 に示す。すべての地点が樹林帯に位置しているため、標高が高い地点ほど積雪基礎ラスタ値の値は大きくなっている。各地点の積雪調査日における積雪深を表-5 に示した積雪基礎ラスタ値で除すことにより、積雪倍率が得られる。この積雪倍率を図-10 に示した積雪基礎ラスタの全メッシュの値に乘じることで、流域の積雪分布が求まる。

#### 6. 5. 推定した積雪分布の評価

はじめに、6.4.において設定した各地点を、積雪倍率を求める地点として設定し、その他 3 地点における積雪深を求め、その推定精度を評価する。対象日は 1997 年から 2016 年までの 20 年間の積雪調査日である。表-6 に結果を示す。表中の相対誤差は積雪深の観測値を真値として積雪基礎ラスタから推定した積雪深の相対誤差を求め、その絶対値を 20 年間で平均したもの、RMSE は 20 年間の RMSE である。表を見ると、積雪倍率を計算する地点を白井岳 No.5 もしくは春香山 No.9 とした場合に相対誤差及び RMSE が小さく、他の 3 地点における積雪深の推定精度が高い。また、積雪倍率を求める地点としてダム管理所を選定した場合も、前述した 2 地点と比較して若干劣るが、比較的高い精度で他の 3 地点における積雪深を推定している。

次に、各地点を、積雪倍率を求める地点として設定して推定した積雪分布を用いてダム流域における積雪包蔵水量（ダム流域全体における積雪相当水量の合計値）を求め、その推定精度を評価する。対象期間は 1997 年から 2016 年までの 20 融雪期である。積雪包蔵水量は推定した積雪分布の各メッシュの積雪深に積雪密度を乗じて各メッシュの積雪相当水量を求め、ダム流域全体にわたって合算して求めた。なお、積雪密度に関しては、国内各地で行われた積雪調査結果から、観測時期が同じであれば標高に関わらず積雪密度はほぼ一定値となる（例えば小池ら<sup>11)</sup>）ことが示されている。定山溪ダム流域において 1997 年から 2016 年までの 20 年間に行われた積雪調査の全結果を確認したところ、積雪調査日における積雪密度は概ね 300 kg/m<sup>3</sup> から 450kg/m<sup>3</sup> の間に分布していた。各年では、8 地点の積雪密度の平均値は概ね 320 kg/m<sup>3</sup> から 430kg/m<sup>3</sup> の間に分布し、標準偏差は概ね 7kg/m<sup>3</sup> から 24kg/m<sup>3</sup> の間に分布していた。8 地点の積雪密度の標準偏差は平均値と比較して数% であることから、定山溪ダム流域においても、標高に関わらず積雪密度がほぼ一定値となっていると考え、積雪密度は対象とした年に行われた積雪調査の結果から 8 地点の平均値とした。

表-6 積雪深の推定精度

積雪倍率：ダム管理所テレ		
	相対誤差	RMSE (m)
春香山テレ	0.216	0.618
春香山 No.9	0.106	0.411
白井岳 No.5	0.144	0.512
平均	0.156	0.514
積雪倍率：春香山テレ		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.288	0.457
春香山 No.9	0.214	0.781
白井岳 No.5	0.122	0.470
平均	0.208	0.569
積雪倍率：白井岳 No.5		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.185	0.307
春香山	0.103	0.381
春香山 No.9	0.106	0.374
平均	0.131	0.354
積雪倍率：春香山 No.9		
	相対誤差	RMSE (m)
ダム管理所テレ	0.125	0.211
春香山	0.170	0.542
白井岳 No.5	0.093	0.321
平均	0.129	0.358

推定した積雪包蔵水量は、ダム管理所において観測している気象・水文データより求めた水収支を真値として評価する。水収支はダム流入量から降水量を除き、Hamon 法による可能蒸発散量を加えることにより求めた。各年の計算期間は積雪調査の翌日から6月30日までとした。詳細はガイドライン<sup>4)</sup>を参照されたい。図-11に水収支と推定された積雪包蔵水量をプロットした図を示す。比較のため、ダム管理所が積雪調査の結果から標高と積雪相当水量の直線の関係を用いて推定した積雪包蔵水量を併せて示す。図中の点線は水収支に対して相対誤差が20%以内の範囲を示している。表-7には20融雪期を対象とした積雪包蔵水量の推定値のRMSEを示した。これらの図表を概観すると、積雪倍率を計算する地点を春香山 No.9 とした場合に積雪包蔵水量の推定精度が最も良く、次いで積雪倍率の計算地点を白井岳 No.5 もしくはダム管理所とした場合に積雪包蔵水量の推定精度が良い。図-11を見ると、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合に積雪包蔵水量を過小推定している年が散見され、積雪倍率を計算する

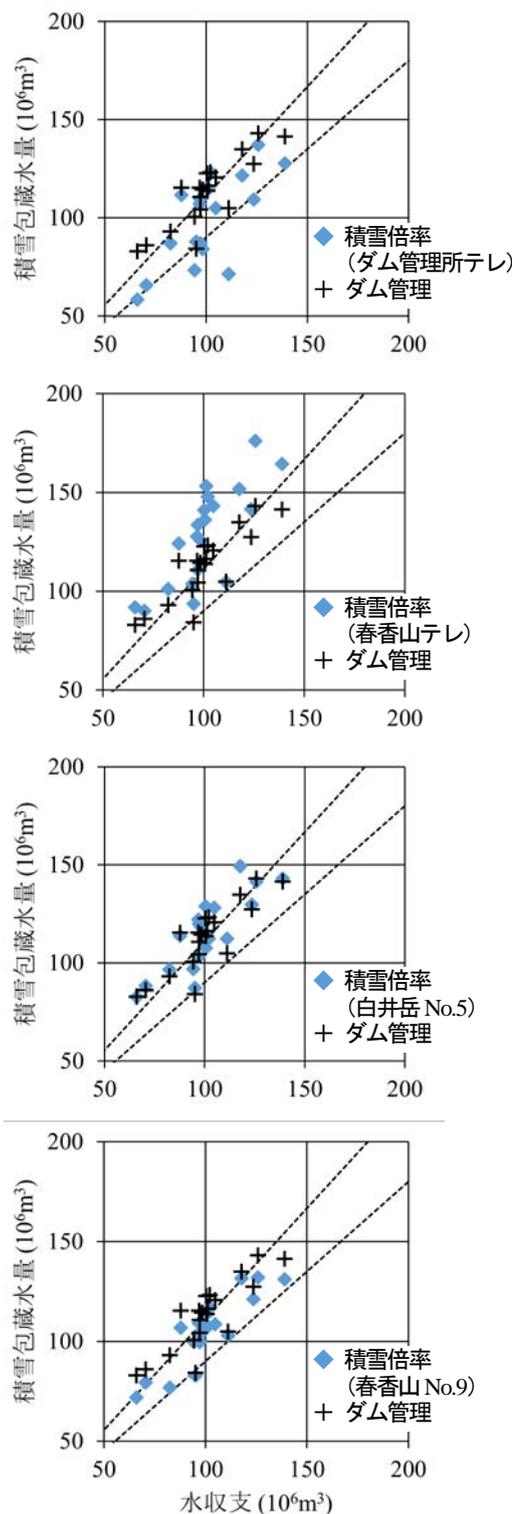


図-11 積雪包蔵水量の推定値と水収支との比較

地点を白井岳 No.5 とした場合に積雪包蔵水量を過大推定している年が散見されるが、このことが積雪倍率を計算する地点を春香山 No.9 とした場合との精度の差の要因と考えられる。積雪倍率を計算する地点を春香山 No.9 とした場合、20融雪期の積雪包蔵水量の推定値は、水収支と比較して相対誤差が概ね20%以内となっている。ダム管理

表-7 積雪包蔵水量の推定値のRMSE (10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)

ダム管理所テレ	春香山テレ
15.580	31.530
春香山 No.9	白井岳 No.5
9.458	17.399
ダム管理	
15.207	

所が推定した積雪包蔵水量の精度と比較すると、積雪倍率の計算地点を白井岳 No.5 もしくはダム管理所とした場合に精度が同程度であり、積雪倍率の計算地点を春香山 No.9 とした場合に精度が良くなっている。

最後に、各地点を、積雪倍率を求める地点として設定して推定した積雪調査日における積雪分布を初期値として融雪・流出モデルに入力し、ダム流入量を求め、その精度を評価する。使用した融雪・流出モデルは、白谷ら<sup>12)</sup>が開発したモデルである。融雪・流出モデルにおいては、ダム流域を 1km メッシュに分割し、メッシュ毎に標高が与えられ、融雪量が計算される。このため、春先に気温が高くなるのが早い標高の低い範囲から、気温が高くなるのが遅い標高の高い範囲に向かって融雪が進行し、消雪となる過程が反映されることから、積雪分布の推定精度が高いほどダム流入量が精度良く計算される傾向があると考えられる。積雪密度は、積雪包蔵水量を推定した際と同様に、対象とした年に行われた積雪調査の結果から 8 地点の平均値とした。対象とした期間は、計算に必要なデータが電子化されている 2003 年から 2016 年の 14 融雪期とした。結果を表-8 に示す。表中の「Nash」は Nash-Sutcliffe 指標、「E<sub>v</sub>」は流出ボリューム誤差<sup>12)</sup>である。流出ボリューム誤差は、ダム流入量の総量の相対誤差を表す指標であり、計算された総流入量が観測された総流入量と比較して過大の場合に負、過小の場合に正となる。両指標は積雪調査日の翌日からモデル計算における消雪日までを計算期間とした。また、流出ボリューム誤差の平均は、各年の値の絶対値の平均である。表を見ると、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合にダム流入量の計算精度が最も良く、次いで積雪倍率の計算地点を春香山 No.9 とした場合が続く。Nash-Sutcliffe 指標は 0.8 を超えていれば精度が高いと判定される指標であるが、この 2 地点を積雪倍率の計算地点とした場合は、2008 年を除き Nash-Sutcliffe 指標が 0.7 を超えていること、標準偏差が小さいことから、毎年安定して精度良くダム流入量が計算されている。

以上、北海道大雪山系の旭岳において行った航空レーザ測量の結果を基に、定山溪ダム流域の積雪基礎ラスタを作

表-8 ダム流入量の計算精度

	ダム管理所テレ		春香山テレ	
	Nash	E <sub>v</sub>	Nash	E <sub>v</sub>
2003	0.862	-0.035	0.679	-0.200
2004	0.721	0.133	0.514	-0.011
2005	0.702	0.149	0.828	-0.023
2006	0.940	0.061	0.855	-0.128
2007	0.883	-0.037	0.851	-0.264
2008	0.461	-0.271	0.071	-0.526
2009	0.865	-0.162	0.487	-0.424
2010	0.871	-0.154	0.632	-0.349
2011	0.807	-0.097	0.720	-0.333
2012	0.896	-0.139	0.870	-0.192
2013	0.864	-0.121	0.600	-0.308
2014	0.757	-0.295	0.436	-0.488
2015	0.800	-0.132	0.552	-0.306
2016	0.704	-0.286	0.389	-0.427
平均	0.795	0.148	0.606	0.284
標準偏差	0.126	0.146	0.231	0.164
	白井岳 No.5		春香山 No.9	
	Nash	E <sub>v</sub>	Nash	E <sub>v</sub>
2003	0.735	-0.162	0.856	-0.049
2004	0.649	0.073	0.751	0.188
2005	0.791	0.088	0.727	0.135
2006	0.905	-0.062	0.931	-0.010
2007	0.795	-0.316	0.861	-0.252
2008	0.136	-0.501	0.349	-0.390
2009	0.695	-0.321	0.850	-0.190
2010	0.725	-0.289	0.708	-0.301
2011	0.780	-0.280	0.758	-0.300
2012	0.900	-0.132	0.912	-0.097
2013	0.851	-0.143	0.878	-0.094
2014	0.813	-0.225	0.795	-0.255
2015	0.574	-0.294	0.740	-0.190
2016	0.778	-0.237	0.767	-0.246
平均	0.723	0.223	0.777	0.192
標準偏差	0.200	0.165	0.146	0.173

成し、複数の積雪倍率を計算する地点を設定し、推定した積雪分布の精度を評価したところ、積雪倍率を計算する地点を春香山 No.9 もしくはダム管理所地点とした場合に、積雪分布を精度良く推定できることがわかった。試行錯誤が必要な点はあるが、対象とするダム流域において航空

レーザ測量により積雪分布を計測しなくても西原らの方法を適用できる可能性があることが示された。ダム流域のような山間部を対象とした場合、地形が変化することはほとんどないと考えられることから、積雪基礎ラスタは長期にわたって使用が可能であると考えられる。また、定山溪ダム流域においては、積雪倍率を計算する地点をダム管理所とした場合にも比較的精度良く積雪分布を推定することができるが、この場合、積雪調査を実施する必要が無い。積雪密度は流域内においてはほぼ一定値と考えて良いことから、アプローチが容易な安全な箇所において計測を行えば良い。本手法の適用により、多大な労力と危険を伴う作業を回避した上で、簡易に低コストで精度良く積雪分布を推定できる可能性がある。

なお、北海道大雪山系の旭岳において実施した航空レーザ測量は、3月下旬の積雪深が概ねピークの時期に実施したことから、本手法はピークの時期の積雪分布を推定する際に適用するものと考えている。積雪倍率を計算する地点を、テレメータにより積雪深を連続観測している地点とすれば、本手法により融雪期における積雪分布の変化を簡易に追跡できる可能性があるが、これは今後の課題である。

## 7. まとめ

航空レーザ測量により計測された2カ年の積雪分布の類似性に着目し、ダム流域における積雪分布の推定方法を検討した。結果、複数年の積雪分布から共通する積雪基礎ラスタを抽出し、これに積雪を観測している地点の積雪深を積雪倍率として乗じることにより、積雪分布を精度良く推定できることを示した。本手法を札幌市近郊の定山溪ダムに適用し、積雪分布の推定精度を評価したところ、多大な労力と危険を伴う積雪調査を行わずに、簡易に低コストで精度良く積雪分布を推定できる可能性があることがわかった。

謝辞：ワカサリゾート(株)旭岳事業部、国土交通省忠別ダム管理支所及び豊平川ダム統管理事務所に協力を頂いた。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, p.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, p.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, p.411-423, 2005.

- 4) (独)土木研究所寒地土木研究所: ダムにおける積雪包蔵水量推定ガイドライン(案), 2012.
- 5) 花岡正明, 本間信一, 渡正昭, 飯田肇: レーザ計測を用いた積雪深分布解析, 平成19年度砂防学会研究発表会概要集, p.524-525, 2007.
- 6) 鈴木啓助, 佐々木明彦: 上高地梓川流域における積雪深分布推定, 2012年雪氷研究大会概要集, p.145, 2012.
- 7) 西原照雅, 谷瀬敦, 渡邊和好: 森林限界以上の高標高帯における積雪分布と融雪・流出計算に適用する降雪分布について, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I\_475-I\_480, 2016.
- 8) 西原照雅, 谷瀬敦: 2カ年の航空レーザ測量結果を用いた山間部における積雪分布と地形の関係に関する研究, 北海道の雪氷第35号, pp.131-134, 2016.
- 9) 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, p.26-34, 1999.
- 10) 日本雪氷学会編: 積雪観測ガイドブック, 2010.
- 11) 小池俊夫, 高橋裕, 吉野昭一: 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, p.165-174, 1985.
- 12) 白谷友秀, 中津川誠, 星清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, 第20巻, 第2号, p.93-104, 2007.

## 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（洪水氾濫特性の分析）

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、宮本守、牛山朋來

#### 【要旨】

気候変動影響による洪水氾濫形態の将来変化を明らかにすることを目的としてフィリピンのパンパンガ川流域を対象に時空間的な洪水氾濫特性を分析した。氾濫解析には RRI モデルを適用し、降雨は MRI-AGCM3. 2S (RCP8. 5) を領域気象モデルで 5km にダウンスケーリングし地上雨量でバイアス補正した。その結果、将来気候では浸水面積が約 1.2 倍に増大するが平均浸水時間は短くなることがわかった。これは浸水面積が増大したことで湛水が早く解消するグリッドが増えたことも一因であるが、将来気候において降雨の時空間的な偏りが大きくなる傾向も考えられるため、浸水時間を考慮した洪水被害リスクの評価手法が重要である。

キーワード：洪水浸水時間、RRI モデル、WRF モデル、MRI-AGCM、気候変動

#### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 5 次報告書第 2 作業部会報告書<sup>1)</sup>には、「アジアにおけるインフラや居住に対し広範な被害をもたらす河川沿い、沿岸域、都市部での氾濫の増加」が将来のリスクとして報告されている。特に極端気象による洪水被害の拡大は重要な課題であり、気候変動影響を考慮した上で洪水被害リスクを軽減するための対策が求められている。将来気候下における洪水リスクを軽減するためには、洪水氾濫の発生頻度および規模に加えて氾濫形態の変化を明らかにする必要があり、そのためには氾濫外力の時間的、空間的な変化傾向も適切に評価しなければならない。

本研究では、台風および南西モンスーンの影響により毎年のように洪水氾濫被害が発生しているフィリピンのパンパンガ川流域においてダイナミックダウンスケーリングした全球気候モデル (GCM) の結果を用いて極端気象下における洪水氾濫の将来変化を分析した。洪水氾濫の評価には浸水時間を考慮したハザード評価値を定義し、50 年確率および 100 年確率の降雨に対する洪水氾濫の時空間特性の将来変化を分析した。

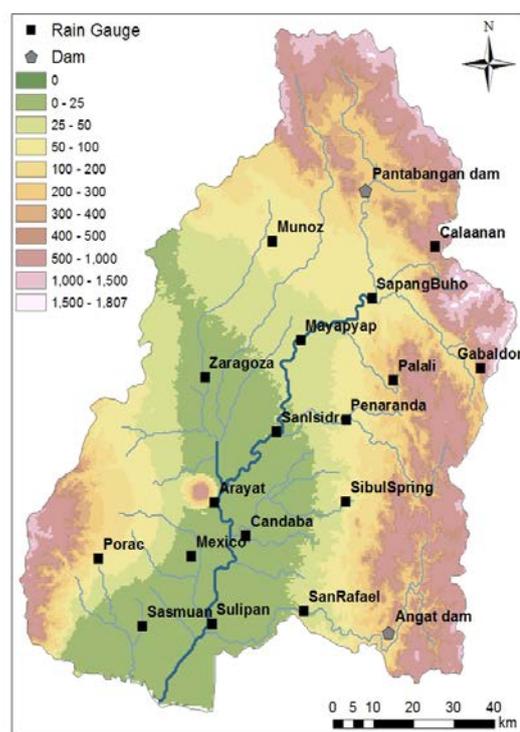


図-1. パンパンガ川流域の概要

#### 2. パンパンガ川流域の概要

フィリピンの首都マニラの北部に位置するパンパンガ川流域は流域面積 10,434 km<sup>2</sup> のルソン島で 2 番目の大きさの流域である。図-1 に示すように、流域内には 17 地点の地上雨量観測所が設置されている。パンパンガ川

流域では年降水量の約 83% が雨期である 5 月から 10 月に集中しており、台風と南西モンスーンが主な洪水発生の原因となっている。また広大な穀倉地帯である対象流域は土地利用の大部分が農地であるため洪水氾濫による農業被害は深刻な問題となっている。したがって洪水被

害リスクを推定する上で浸水時間は重要な項目である。流域内には二つの大規模な多目的ダムが建設されており、北部に位置するパンタバンガンダムは主として流域の農業活動に伴う水需要を支え、下流に位置するアンガットダムは首都マニラに対する水資源供給源として重要な役割を担っている。また流域内には大規模な湿地帯が二つ存在しており、地形的な理由から雨季の間は長期間にわたって雨水が浸水する。特に下流側の Candaba 観測所周辺に位置する約 250 km<sup>2</sup>の湿地帯 Candaba Swamp ではほとんどの住居が嵩上げされており、パンパンガ川本川の越流堤から人為的に導水し湛水させることで漁業や養殖を行う生活様式が確立されている。そのため、洪水氾濫解析の際は湿地帯による氾濫水の貯留効果も考慮する必要がある。

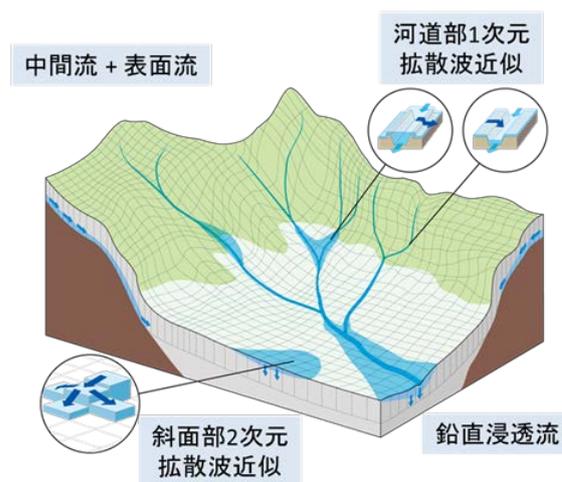


図-2. RRI モデルの概念図

表-1 同定パラメータ

パラメータ	単位	森林	農地	水面
河道粗度	$n_{river}$	0.035	0.035	0.035
斜面粗度	$N$	0.35	0.3	0.2
土層厚	$d$	1.0	1.0	1.0
鉛直飽和透水係数	$K_v$	5.55E-7	5.55E-7	0
空隙率	$\Phi$	0.471	0.471	0.471
土壌吸引圧	$S_f$	0.3163	0.3163	0.3163

### 3. RRI モデルによる氾濫解析

本研究ではパンパンガ川流域の洪水氾濫解析に RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルを適用した。RRI モデルの概要図を図-2 に示す。RRI モデルは降雨を入力として斜面流出から洪水氾濫までを一体的に解析するモデルである。RRI モデルではグリッド分割した対象範囲を河道と斜面に分けて取扱い、河道が存在するグリッドセルには河道と斜面の両方が存在すると仮定している。主な特徴として、二次元拡散波近似を解析に使用していること、側方地中流と鉛直浸透流を反映していること、河道と斜面のインタラクションを考慮していることが挙げられる。基礎式等のモデル詳細は既往論文<sup>2),3)</sup>を参照されたい。パンパンガ川流域のモデルのメッシュサイズは15秒角(約450m)とし、標高データはフィリピンの National Mapping and Resource Information Authority (NAMRIA) から提供された IfSAR (5mメッシュ)をアップスケールして使用した。水文パラメータは、流域の土地利用を森林、農地、水面の3種類に大別して2009年と2011年に実際にパンパンガ川流域で発生した洪水で同定した値を使用した。本解析で使用したパラメータを表-1に示す。

### 4. 流域降雨量の分析

本研究では洪水氾濫形態の将来変化を明らかにすることを目的として、MRI-AGCM(Meteorological Research Institute -Atmospheric General Circulation Model) 3.2S(super high resolution in 20 km)のRCP8.5シナリオの現在気候25年分(1979年から2003年)と将来気候25年分(2075年から2099年)の結果を降雨データとして

用いた<sup>4),5)</sup>。海面水温の設定はMME(Multi-Model Ensemble)とした結果を使用した<sup>6)</sup>。

#### 4.1 WRF モデルによるダイナミックダウンスケーリング

パンパンガ川の流域面積は10,434km<sup>2</sup>であるため、20kmメッシュのMRI-AGCMの出力降雨データを領域気象モデル(WRF)により5kmメッシュにダイナミックダウンスケーリングした。WRFモデルの積雲パラメタリゼーションには、近年のパンパンガ川流域における洪水時の再解析雨量のダウンスケーリングで最も再現性に優れていたGrell3Dアンサンブルスキームを使用した<sup>7)</sup>。

#### 4.2 地上雨量計との比較によるバイアス補正

パンパンガ川流域では1980年から1982年までと1992年以降(1994年と2008年を除く)に地上雨量観測が実施されているため時間雨量データが存在する。これらの22年分の地上雨量観測の時間雨量データとダイナミックダウンスケーリングした降雨データを比較した結果、出現頻度に差異が確認されたためダイナミックダウンスケーリング結果のバイアス補正を行った<sup>8)</sup>。バイアス補正では、ダウンスケーリング結果の空間的な降雨分布は補正せず、各月ごとに同じ出現頻度の流域平均日降水量が地上雨量と同じ値になるように補正した。ただし、

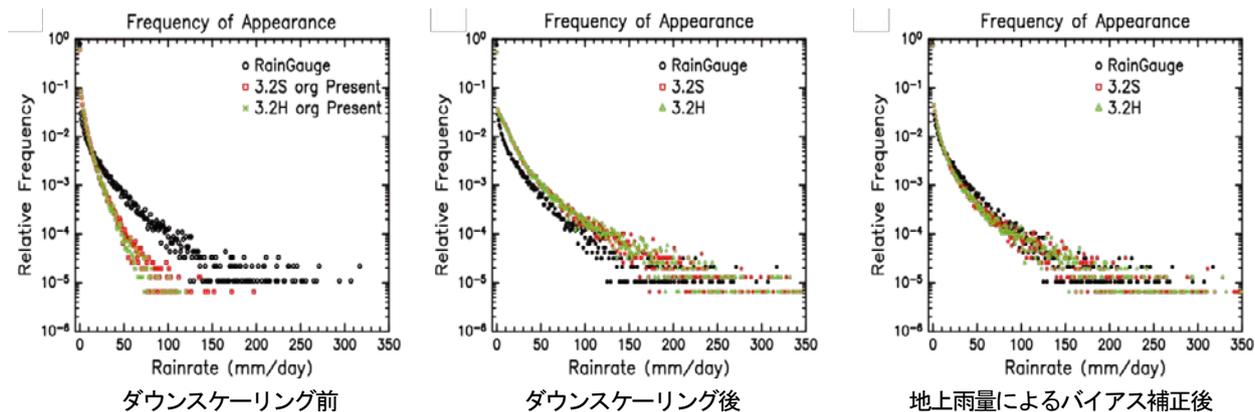


図-3. 降雨強度と出現頻度の関係

年間を通して上位 0.5%の降水量は月別に扱わずに通年で地上雨量と比較し同じ値になるように補正した。図-3はダウンスケーリング前とダウンスケーリング後、バイアス補正後の降雨強度と出現頻度の関係である。ダウンスケーリング前のGCMの結果は特に降雨強度が高い雨量が地上観測雨量より過少になっているが、ダウンスケーリング後は地上観測雨量に近くなっている。さらにバイアス補正を行うことで、やや過大になっていた出現頻度は地上雨量とほぼ一致した。

#### 4. 3 現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量の比較

積雲パラメタリゼーションに起因するバイアスを考慮して前節で述べたバイアス補正手法を将来気候の降雨にも適用した上で、現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量を比較した。図-4は現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量の頻度解析結果の比較である。図中には Gumbel と GEV の結果を示しているが、50 年確率降雨や 100 年確率降雨の作成を想定して一般に非超過確率が高いフィッティングに優れている GEV を本研究では採用した。50 年確率の 48 時間降雨量は現在気候の 312 mm に対して将来気候は 450 mm であり約 1.4 倍、100 年確率の 48 時間降雨量は現在気候の 345 mm に対して将来気候は 557 mm であり約 1.6 倍となっており、将来気候下において顕著に増加していることが示された。

現在気候において年最大 48 時間雨量が最大となったのは 2001 年の 300.9 mm であり、将来気候において年最大 48 時間雨量が最大となったのは 2087 年の 526.4 mm であった。これらの最大ケースの 0.5 m 以上の浸水範囲および浸水深を図-5 に示す。現在気候では流域面積の 29.6%が 0.5 m 以上浸水したのに対して将来気候では流域面積の 38.8%が 0.5 m 以上浸水しており約 610 km<sup>2</sup> 増大している。

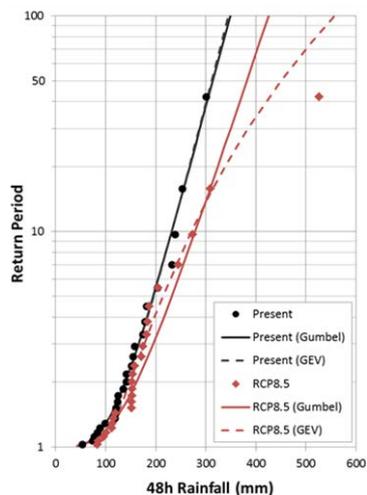
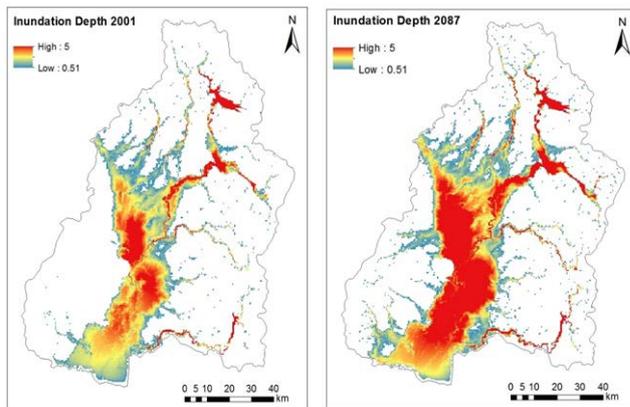


図-4. 現在気候と将来気候の頻度解析結果の比較 (年最大 48 時間雨量)



現在気候 (2001 年) 将来気候 (2087 年)  
図-5. 年最大 48 時間雨量の最大ケースの浸水深

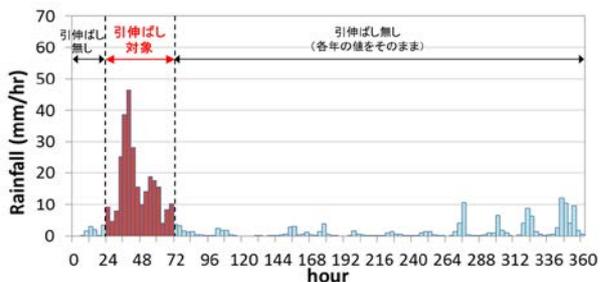


図-6. 降雨の引き伸ばし対象範囲 (2090 年の事例)

表-2. 年最大 48 時間雨量が上位 10 件の氾濫解析結果（最大ケースを太字で表記）

		50年確率						
	降雨パターン	48h雨量 (mm)	引き伸ばし後 (mm)	引き伸ばし倍率 (-)	浸水面積 (km <sup>2</sup> )	平均浸水時間 (h)	ハザード評価値 (km <sup>2</sup> ・day)	
現在	1	2001	300.9	311.7	1.04	3054.6	139.9	17812
	2	2003	252.7	311.7	1.23	3108.8	138.4	17925
	3	1992	238.5	311.7	1.31	3570.1	112.6	16752
	4	2002	232.6	311.7	1.34	<b>3581.3</b>	153.5	22912
	5	1996	203.3	311.7	1.53	3134.0	176.3	<b>23020</b>
	6	1984	181.9	311.7	1.71	3275.8	110.7	15116
	7	1991	178.2	311.7	1.75	3209.2	147.1	19673
	8	1998	174.5	311.7	1.79	2708.6	<b>182.4</b>	20586
	9	2000	157.7	311.7	1.98	3111.3	126.3	16374
	10	1986	154.8	311.7	2.01	3200.3	117.1	15614
	平均	207.5	311.7	1.57	3195.4	140.4	18578	
将来	1	2087	526.4	450.3	0.86	3665.1	121.4	18541
	2	2078	309.3	450.3	1.46	2743.5	131.5	15029
	3	2077	273.8	450.3	1.64	4070.9	142.0	24090
	4	2090	244.7	450.3	1.84	4190.3	114.2	19932
	5	2076	204.1	450.3	2.21	3956.5	125.3	20653
	6	2092	186.9	450.3	2.41	3692.0	125.5	19311
	7	2089	184.0	450.3	2.45	4033.0	117.9	19807
	8	2099	182.3	450.3	2.47	<b>4240.0</b>	106.1	18752
	9	2098	174.7	450.3	2.58	3867.9	<b>162.9</b>	<b>26253</b>
	10	2088	171.6	450.3	2.62	4058.3	126.6	21409
	平均	245.8	450.3	2.05	3851.7	127.3	20378	

		100年確率						
	降雨パターン	48h雨量 (mm)	引き伸ばし後 (mm)	引き伸ばし倍率 (-)	浸水面積 (km <sup>2</sup> )	平均浸水時間 (h)	ハザード評価値 (km <sup>2</sup> ・day)	
現在	1	2001	300.9	344.8	1.15	3224.7	137.6	18492
	2	2003	252.7	344.8	1.36	3254.3	136.0	18444
	3	1992	238.5	344.8	1.45	3725.5	111.9	17378
	4	2002	232.6	344.8	1.48	<b>3748.5</b>	150.4	<b>23487</b>
	5	1996	203.3	344.8	1.70	3270.2	172.4	23487
	6	1984	181.9	344.8	1.90	3452.3	110.2	15850
	7	1991	178.2	344.8	1.93	3360.0	144.9	20285
	8	1998	174.5	344.8	1.98	2787.2	<b>180.9</b>	21008
	9	2000	157.7	344.8	2.19	3282.6	125.5	17168
	10	1986	154.8	344.8	2.23	3378.0	116.2	16358
	平均	207.5	344.8	1.74	3348.3	138.6	19196	
将来	1	2087	526.4	556.5	1.06	4027.0	118.4	19861
	2	2078	309.3	556.5	1.80	3031.6	130.4	16471
	3	2077	273.8	556.5	2.03	4356.1	137.7	24984
	4	2090	244.7	556.5	2.27	<b>4584.8</b>	111.0	21213
	5	2076	204.1	556.5	2.73	4272.9	122.8	21865
	6	2092	186.9	556.5	2.98	4108.4	120.9	20697
	7	2089	184.0	556.5	3.03	4483.6	112.9	21084
	8	2099	182.3	556.5	3.05	4539.4	105.0	19867
	9	2098	174.7	556.5	3.19	4158.0	<b>158.2</b>	<b>27408</b>
	10	2088	171.6	556.5	3.24	4371.0	124.1	22603
	平均	245.8	556.5	2.54	4193.3	124.1	21605	

## 5. 洪水氾濫の将来変化

### 5.1 確率年降雨の作成

洪水氾濫の将来変化を定量的に評価することを目的として、図-4に示した50年、100年確率の48時間雨量による洪水氾濫解析を実施した。確率年降雨の作成では、多様な降雨パターンを考慮するために25年分の上位10件を対象として年最大48時間雨量が50年確率および100年確率と同じ値になるように引き伸ばし倍率を乗じた。解析期間は流域内の湿地帯等による貯留効果を考慮して15日間としたが、降雨の引き伸ばしは図-6に示すように年最大48時間雨量のみとし、降雨の空間分布はそのまま使用した。50年確率および100年確率への引き伸ばし倍率が2倍以上になるケースも見受けられたが、今回は降雨パターン数の確保を優先して引き伸ばし倍率の上限は設けず、上位10件を対象とすることとした。

### 5.2 将来変化の評価

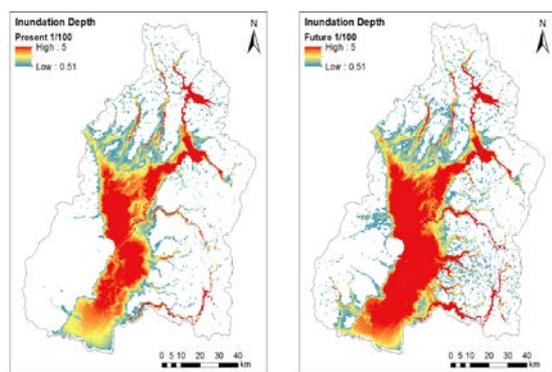
本解析では洪水被害リスクの推定のための氾濫外力として浸水深、浸水面積、浸水時間が重要な要素であると考え、氾濫外力の程度を示す指標として、基準となる浸水深を超える浸水面積と浸水時間を乗じたハザード評価値を次式により定義した。

$$E_d = A_d \cdot D_d \quad (1)$$

ここに、 $E_d$ : 基準深さ  $d$  に対するハザード評価値(km<sup>2</sup>・day)、 $A_d$ : 基準深さ  $d$  を超える浸水面積(km<sup>2</sup>)、 $D_d$ : 基

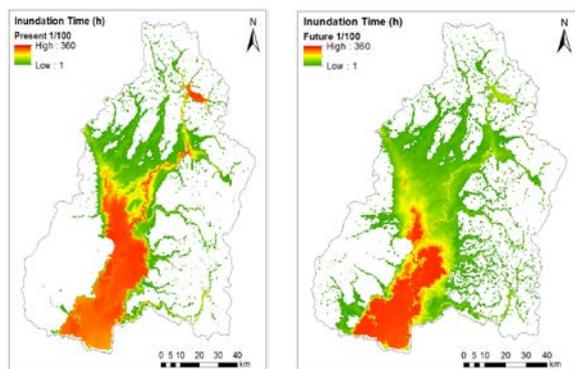
準深さ  $d$  を超える浸水時間(day)である。なお、本解析では、フィリピンにおける農業被害額の算定の際に被害が発生する高さを参考に基準浸水深を0.5mとした。

現在気候と将来気候の各25年分の上位10件を50年確率と100年確率に引き伸ばした降雨による氾濫解析結果を表-2に示す。表中の平均浸水時間は解析期間15日間のうち浸水したメッシュの総浸水時間の平均値である。50年確率降雨の浸水面積に関して、最大ケースは1.18倍、10件の平均は1.21倍現在気候より将来気候が増大している。100年確率降雨では最大ケースは1.22倍、10件の平均は1.25倍現在気候に対して将来気候の浸水面積が増大している。図-7は浸水面積が最大となった2002年と2090年の100年確率降雨に対する対象期間を通じての最大浸水深である。浸水面積と浸水深ともに将来気候下での増加傾向が表れている。その一方で、表-2では0.5m以上浸水した面積の平均浸水時間は50年確率と100年確率の両方で将来気候の方が短くなっている。将来気候において平均浸水時間が短くなったのは、浸水面積が増大したことで湛水が早く解消するグリッドが増え浸水領域全体での平均浸水時間が短くなったことが一因であるが、将来気候下において年最大48時間雨量が時間的・空間的に集中する傾向も考えられるためこの点に関してはさらなる検証が必要である。図-8は2002年と2090年の100年確率降雨に対する浸水時間の空間分布である。2090年の事例のように浸水時間が長いエリアは



現在気候 将来気候

図-7 現在気候(2002年)と将来気候(2090年)の



現在気候 将来気候

図-8 現在気候(2002年)と将来気候(2090年)の  
100年確率降雨の浸水時間

下流部の湿地帯や低平地に集中しており空間的な偏りが大きい流域全体として浸水時間が短い事例も確認された。図-9は100年確率降雨の2002年と2090年の浸水日数別の浸水面積である。2090年の結果は浸水時間が短い面積の比率が相対的に高く、2002年の結果は10日以上浸水する面積の比率が相対的に高くなっている。2090年の事例で14日間(336時間)の浸水度数が突出しているのは、湿地帯および低平地における貯留効果であると考えられる。前述したように、Candaba Swampでは氾濫水が貯留する地形になっており、住民も貯留水を利用する生活様式を採っている。図-10は100年確率降雨の上位10件の平均の浸水面積を浸水日数別に示している。将来気候で増加しているのは浸水日数が短い面積であり、浸水日数が長い面積は同程度である。このことから、将来気候での浸水面積の増加には浸水日数が短い氾濫の増加が寄与しており、それに伴い浸水時間の平均値は小さくなっていると考えられる。以上のように、浸水面積と浸水時間の将来変化傾向は一致しているとは言えず、流域の洪水被害リスク推定のための氾濫外力に対しては浸水面積と浸水時間の両方を考慮した時空間的な評価手法が必要であると考えられる。

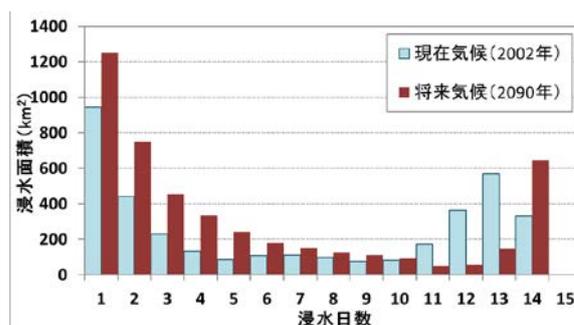


図-9. 現在気候(2002年)と将来気候(2090年)の  
浸水日数別の浸水面積

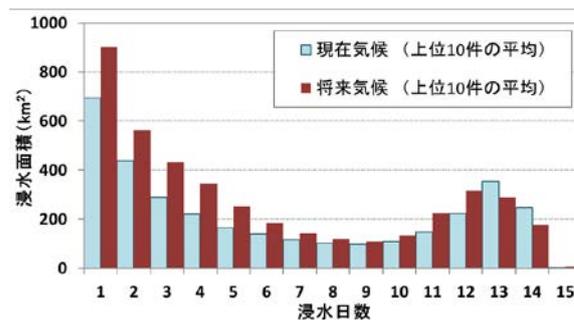


図-10. 現在気候と将来気候の浸水日数別の浸水面積  
(上位10件の平均)

## 6. まとめ

本研究では、フィリピンのパンパンガ川流域を対象として気候変動影響による洪水氾濫外力の将来変化を浸水時間を考慮して評価した。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- 1) MRI-AGCM3.2SのRCP8.5シナリオをWRFによりダウンスケーリングし地上観測雨量でバイアス補正した結果を用いて年最大48時間雨量の頻度解析を行った。その結果、将来気候の50年確率48時間雨量は約1.4倍の450mmとなり、100年確率は約1.6倍の557mmとなることがわかった。
- 2) 年最大48時間雨量が最大となった2001年と2087年の0.5m以上の浸水範囲および浸水深を比較した結果、将来気候では流域面積の38.8%が浸水しており現在気候より約610km<sup>2</sup>大きい結果となった。
- 3) 年最大48時間雨量が上位10件を50年確率と100年確率に引き伸ばした降雨で氾濫解析した結果、将来気候では浸水面積は増大するが平均浸水時間は短くなった。これは将来気候下において湛水が早く解消するグリッドが増えることで浸水時間の平均値が小さくなったことが一因であると考えられる。
- 4) 浸水面積と浸水時間の将来変化傾向は異なっていることがわかった。したがって、例えば気候変動の将

来影響に対する適応策等の検討や洪水被害リスク推定のための氾濫外力の評価の際はハザード評価値のような時空間的な特性を考慮した手法が必要である。

## 7. 今後の課題

本研究では将来気候下において浸水面積が増大する一方で浸水時間が短くなるという結果が得られた。その一因として湛水が早く解消する面積が増えることで浸水時間の平均値が小さくなることを挙げているが、その背景にはパンパンガ川流域において将来の気温上昇に伴う放射対流平衡により極端気象が時間的・空間的に集中することに起因している可能性も考えられる。この点に関しては今後 MRI-AGCM3.2S の極端気象の時空間分布を慎重に分析し将来変化傾向についてさらなる検証が必要であると考えている。

## 参考文献

- 1) IPCC Working Group II: CLIMATE CHANGE 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability (Summary for Policymakers), 2014
- 2) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信: 2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.1, 14-29, 2013
- 3) 佐山敬洋, 藤岡奨, 牛山朋来, 建部祐哉, 深見和彦: インダス川全流域を対象とした 2010 年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_493-I\_498, 2012
- 4) Kitoh, A. and Endo, H.: Changes in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model., *Weather and Climate Extremes*, 11, 41-52, doi:10.1016/j.wace.2015.09.001. 2016
- 5) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., Kusunoki, S. and Kitoh, A.: Climate simulations using MRI-AGCM3.2S with 20-km grid., *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A: 233-258. 2012
- 6) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, 807 10, 167-171, doi:10.2151/sola.2014-035. 2014
- 7) Grell, G. A., and Devenyi, D: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.* 29, DOI:10.1029/2002GL015311. 2002
- 8) Ushiyama, T., Hasegawa, A. and Iwami, Y.: Dynamical Downscaling and Bias Correction of Rainfall in the Pampanga River Basin, Philip-pines for Flood Risk Change on Global Warming. *Proceeding (CD) of The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016)*. Kyoto, Japan: S02-15. 2016

## 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（統合的水資源管理を支援するシミュレーション技術）

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、津田守正、Abdul Wahid Mohamed Rasmy、  
宮本守、山崎祐介、Liu Tong、  
Maksym Gusyev

### 【要旨】

水災害・リスクマネジメント国際センター（以下、ICHARM）では、日本を含むアジアモンスーン地域のほか、熱帯・乾燥帯・半乾燥帯や高標高の積雪・氷河地帯等様々な自然・地勢条件下における河川流域において適正な水資源管理を支援するシミュレーションモデルの開発を行っている。このため、ICHARM において開発した IFAS、RRI の機能を拡充し統合的水資源管理の解析機能を向上させることにより、国内外流域の水資源管理に関わる諸問題への適用を進める計画である。平成 28 年度は統合的水資源管理のための機能強化を図るため、国外のダム運用の調査を行った。また、高山帯における融雪計算の精度向上や、乾燥帯における詳細な蒸発散、浸透量を計算できるモデル開発に着手した。

キーワード：IFAS、RRI、洪水予警報、統合的水資源管理

### 1. はじめに

近年、少雨や豪雨の振れ幅が大きく、この極端現象の傾向は将来的にさらに進行することが予想されている。このような状況の中で、長期にわたる適正な水資源管理について検討を行うためには、気候変化の影響を踏まえた陸面の水文過程の精緻な表現機能の他、統合的な貯水池運用や事前放流に関わる解析機能等のモデルの改良や、将来的な水需要の推計技術とその反映等が重要となる。

また、多様な国際的ニーズに ICHARM の技術が対応できるためには、日本を含むアジアモンスーン地域はもとより、熱帯、乾燥帯・半乾燥帯や高標高の積雪・氷河地域等の様々な気候・地勢条件下の河川流域においても適用できるようシミュレーションモデルの汎用性や適用性の強化が必要である。

これまで、ICHARM では、発展途上で頻発する洪水・渇水といった水関連災害の軽減に貢献するため、IFAS（総合洪水解析システム）をベースとしながら、現地の問題解決に必要な機能を適宜追加し、統合的水資源管理を支援するツール、すなわち、流域の水資源を定量的に把握できる統合的水資源管理システムを開発してきた。さらに、河川氾濫を表現できる RRI（降雨・流出・氾濫）モデルを開発し、任意の流域で迅速な氾濫解析を実施するための GUI（グラフィック・ユーザー・インターフェイス）の開発等を進めてきた。

本研究課題では、IFAS（Integrated Flood Analysis

System：総合洪水解析システム）、RRI（Rainfall Runoff Inundation:降雨流出氾濫モデル）による統合的水資源管理のさらなる解析機能向上のための研究・開発を行い、開発された機能を用いて、国内外流域への適用を進める。また、上記の研究成果は洪水や渇水が経済・社会・環境等へ及ぼす影響評価を行う上での基礎的検討手法としても活用される。

今年度は統合的水資源管理のための機能強化として、国外のダム運用のモデル化のための調査を行った。また、高山帯における融雪計算の精度向上や、乾燥帯における蒸発散量、浸透量が考慮できるモデル開発に着手した。

## 2. 統合的水資源管理のための機能強化

### 2.1 ダム運用のモデル化

統合的水資源管理を支援するためのツールとして治水・利水機能の高度化を図るためには、個々のダム操作ルールに基づく運用を詳細に表現する機能が必要であり、複雑なダム操作方法を簡単に入力する機能の構築が課題となる。例えばインダス川においては、パキスタン国内に Tarbela ダム（有効貯水容量約 120 億 m<sup>3</sup>）、Mangla ダム（有効貯水容量約 90 億 m<sup>3</sup>）という 2 基の巨大ダムが存在（図-1）し、東部支川のインド領域内には複数のダムが存在する。



図-1 マングラダム(パキスタン、  
2015年12月3日撮影)

現在、ICHARM はユネスコパキスタンプロジェクトフェーズ2において、パキスタン政府機関、大学研究者らと共同で、インダス川東部支川を対象とした洪水予警報システムの構築を進めているが、洪水時の河川流況を予測する上でもダム運用の適切なモデル化が課題となっている。前中期期間の2015年12月には、Manglaダムの現地調査を行い、標準的な操作ルール等の資料収集を行った。今後は、パキスタン技術者・研究者と連携のもとで、これらのダム運用のモデル化を進め、それをもとにIFAS等の機能に反映する予定である。

### 3. 様々な気候区分を有する国内外の河川を対象としたモデルの適用性向上

IFAS、RRIを降雪地、乾燥地等の様々な気候区分、地域に適用するには、融雪氷量や蒸発散量に関する高度なモデルの導入や、気候区分、土地条件に対応した、流出モデルのパラメータ設定の標準化を進める必要がある。

IFASに組み込んだ融雪計算機能を用いてインダス川の河川流量計算における精度検証を行った。

また、アラブ地域の乾燥帯における流況の再現のため、詳細な蒸発散、浸透が計算できるWEB-RRIの開発に着手するとともに、IFASの適用性を確認した。

#### 3.1 融雪量計算精度向上

インダス川のように、上流域が標高6,000~7,000m級の高山地帯で構成される流域では、長期水循環解析、モンスーン期の洪水対応を行う上で融雪の影響を考慮することが重要である。前中期期間において、融雪量計算機能を組み込んだIFASを開発し、Degree-Day法、熱収支法を用いて融雪量を計算する機能と、観測等で得られた融雪量をインポートする機能を導入した。

このうち、Degree-Day法は気温、アルベド、放射を考慮して融雪量を計算する。融雪が発生する範囲は、

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

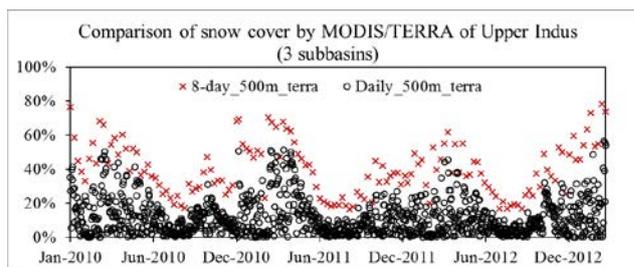


図-2 MODISプロダクト間の積雪面積率の比較(インダス川上流域)

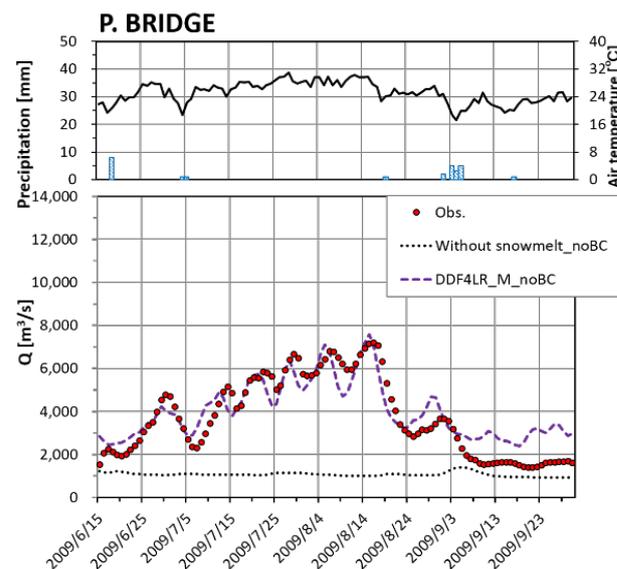


図-3 融雪を考慮した場合のIFASによる河川流量の計算結果(2009年P. Bridge地点)

現行のIFASは1日毎のプロダクトを採用していることから、今後、8日プロダクトを利用できるよう改良を行う予定である。8日プロダクトを用いてインダス川上流域の河川流量を計算した結果、融雪を考慮することにより流出流量の計算精度が大幅に向上することが確認された(図-3)。今後、さらなる計算精度の向上のため、融雪とあわせて氷河融解を考慮する予定である。

#### 3.2 乾燥帯の流出の再現性

降雨流出氾濫モデル(RRI)に、詳細な蒸発散、浸透

計算機能を組み込んだ WEB-RRI (Water and Energy based Rainfall-Runoff-Inundation) の開発に着手した<sup>2)</sup> (図-4)。そして、Oman 国 Al Khouda ワジを例に、乾燥帯における適用性を確認した (図-5)。この結果、おおむね良好な結果が得られたものの、浸透能をどのように設定するか等の課題が明らかとなった。

なお、WEB-RRI については、乾燥域だけでなく日本のような湿潤域においても適用可能である。図-6は、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨時の鬼怒川洪水について WEB-RRI によりシミュレーションを行った結果であり、高い再現精度が得られることが確認された<sup>4)</sup>。

また、IFAS の乾燥帯への適用性を確認した (図-7)<sup>3)</sup>。スーダン国の Gash ワジを対象に人工衛星観測雨量 (GSMaP NRT) を用いて計算を行い、パラメータ調整により乾燥帯にも適用できる可能性があるという結果を得た。

平成 29 年度からは、京都大学等と共同でエジプト東部 Abadi 谷を対象に、乾燥帯におけるフラッシュフラッドモデリングを実施する予定であり、こうした取り組みを通じて、引き続きモデル精度向上を図る。

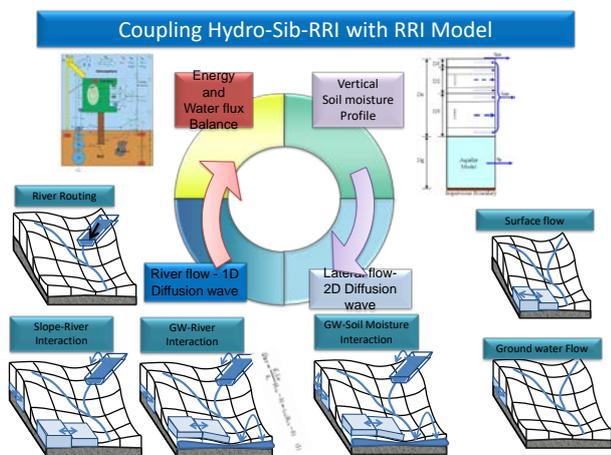


図-4 Web-RRI のコンセプト

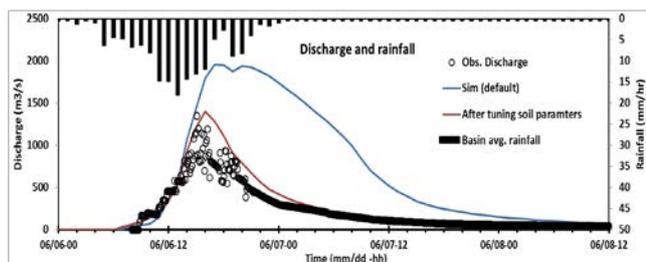


図-5 Web-RRI による計算結果 (2007 年オマーン、Al Koudh ワジ)

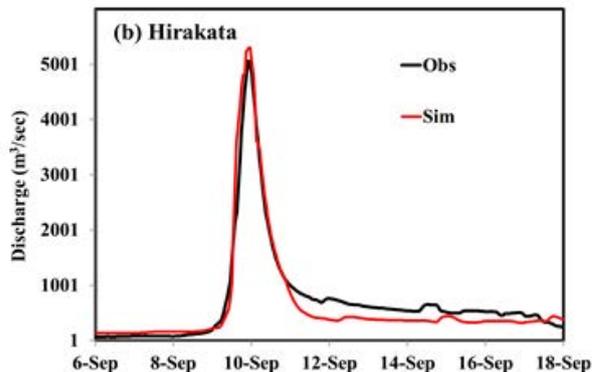


図-6 Web-RRI による計算結果<sup>4)</sup> (平成 27 年 9 月関東・東北豪雨)

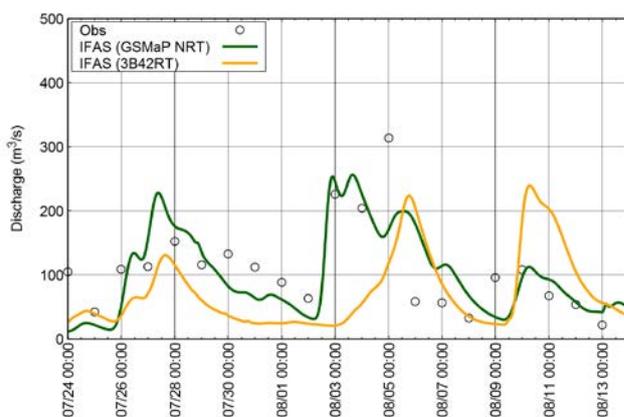


図-7 IFAS による乾燥帯のワジ出水の計算結果 (2010 年スーダン、Gash ワジ)

#### 4. まとめ

ICHARM では、日本を含むアジアモンスーン地域のほか、熱帯、乾燥帯・半乾燥帯など多様な気候や高標高の積雪・氷河地域など様々な自然・地勢条件下での河川流域においても、適正な水資源管理を行うために必要となる、シミュレーションモデルの開発を行っている。

これまで ICHARM において開発を進めてきた IFAS、RRI による統合的水資源管理の解析機能向上のための更なる研究・開発を行い、開発された機能を用いて、国内外流域への適用を進める。

平成 28 年度は統合的水資源管理のための機能強化として、ダム運用モデル化のための調査を行った。

また、高山帯における融雪計算の精度向上を図るため、パキスタン国インダス川上流を対象に解析を行った。さらに、乾燥帯におけるフラッシュフラッド計算のため、降雨流出氾濫モデル (RRI) に、詳細な蒸発散、浸透計算機能を組み込んだ WEB-RRI の開発に着手した。IFAS の乾燥帯への適用性についても検討した。

本年度は計画の初年度であり、次年度以降も引き続き様々な自然・地勢条件を対象とした水文モデル開発を進め、併せて多様な河川流域でのデータ収集・適用性検証を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Tong Liu, Morimasa Tsuda, and Yoichi Iwami : A study on flood forecasting in the Upper Indus Basin considering snow and glacier melt water, Journal of Disaster Research, Vol.12 No.4. (in printing).
- 2) Iwami, Y., Rasmay, M. : ICHARM's Initiatives for Effective Flash Flood Forecasting and Management in Arid and Semi-arid Region, The Second International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems.
- 3) Tsuda, M., Iwami, Y. : Application of Flood Forecasting and Analysis Model (IFAS) for Wadi Flash Flood, The Second International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems.
- 4) モハメドラスミー、岩見洋一、佐山敬洋、Lawford Peter、小池俊雄 : Preliminary investigation of Water and Energy based Rainfall-Runoff Inundation (WEB-RRD) Model in the Lower Kinu River Basin, Japan、水文水資源学会 2016 年度研究発表会、2016 年 9 月

## 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：澤野久弥、大原美保、栗林大輔

### 【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方法を検討するにあたり、まず初めに、我が国での水災害が社会にもたらす影響の実態を調査することで、具体的なリスクの内容を把握する必要がある。本研究では、2015年9月の関東・東北豪雨での鬼怒川の堤防決壊により甚大な被害を受けた茨城県常総市に着目し、常総市商工会の協力のもと、商工会会員である事業所へのインタビュー調査を行った。この結果、浸水被災地における「致命的な被害を負わない強さ」・「速やかに回復するしなやかさ」・「減災のための緊急行動」の実態を把握するとともに、今後の水災害対策への示唆を得た。

キーワード：国土強靱化、水災害、リスク評価、常総市水害、インタビュー調査

### 1. はじめに

国土強靱化基本計画<sup>1)</sup>によれば、国土の強靱化には、「致命的な被害を負わない強さ」と「速やかに回復するしなやかさ」が重要である。また、水災害時には、洪水予報等の予測情報に基づき、被害が生じる前に何らかの対策を取ることも可能であるため、「減災のための緊急行動」により影響を軽減することも重要である。強靱な社会を構築するためには、図1に示す通り、事前の対策により、これらの3つの要素を強化して災害による社会的な影響を最小化する必要がある。

本研究課題は、研究期間内において、水災害リスクを多面的な観点から評価し強靱な社会を構築する手法を提案するとともに、グローバルに通用する手法の展開を目指す。平成28年度は、まずは日本国内において水災害の発生が及ぼす社会的影響の把握を目指し、平成27年9月の関東・東北豪雨で鬼怒川の堤防が決壊し甚大な被害が生じた茨城県常総市を対象とした調査研究を行った。

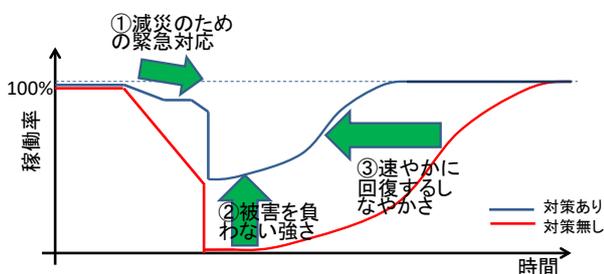


図1 水災害の社会的影響と対策効果

### 2. 常総市内の事業所の被災状況に関するインタビュー調査の概要

#### 2.1 常総市での事業所の被災状況

平成27年9月の関東・東北豪雨は、南北に伸びた線状降水帯により、茨城県・栃木県・宮城県・福島県での記録的な豪雨をもたらした。茨城県常総市では、9月10日朝に鬼怒川左岸25.35km付近（常総市若宮戸）で溢水した後、12時50分頃に左岸21km付近（常総市三坂町）で堤防が決壊し、市の約1/3の面積に相当する約40km<sup>2</sup>が浸水した<sup>2)</sup>。一部の地域では湛水が1週間以上続き、9月16日10時20分の時点でも約2km<sup>2</sup>の区域が浸水していた。茨城県からの平成28年3月1日時点での報告によれば、常総市内での建物被害数は全壊53、大規模半壊1,578、半壊3,476、床上浸水148、床下浸水3,072である<sup>3)</sup>。

広域に及んだ浸水は、地域の地場産業である農業や商工業にも深刻な影響を与えた。市内の商工会会員の事業所は約1,700社であり、鬼怒川東側には約1,000社が立地した。2016年9月30日時点での報告によれば、鬼怒川東側で582社が被害を受けた。水害後の10月27日に、常総市は中小企業被害に関して局地激甚災害（局激）の指定を受けた。局激は、市町村内の中小企業関係被害額が当該市町村の中小企業所得推定額の1割を上回る場合に指定される。常総市商工会の取りまとめによれば、中小企業関係被害額は、基準となる中小企業所得推定額の103.3億円を大きく超え、12月3日時点で183.7億円（再調達価格ベースでの被害額）と報告されている<sup>4)</sup>。また、更に茨城県が低利子融資制度や最大50万円の補助金制度も創設した<sup>5)</sup>。補助金制度は、被災した中小企業の事業再開に必要な設備取得や修繕等の経費に対して、県と市の双方が負担して補助を行うものである。事業所からは、東日本大震災の被災地で運用されたグループ化補助

金の仕組みを要望する声も挙がったが、これは実現しなかった。

## 2. 2 インタビュー調査の方法

被災地における「致命的な被害を負わない強さ」・「速やかに回復するしなやかさ」・「減災のための緊急行動」の実態を把握するため、常総市内における事業所の被災状況に着目し、常総市商工会の協力のもと、商工会会員である事業所へのインタビュー調査を行った。

調査では、「事業所の基本的な状況、浸水時の状況、被害状況、事業所活動の再開・継続状況、浸水前後での水害対策の状況」を把握することを目指した。調査実施前に常総市商工会へのヒアリングを行ったところ、地域の事業所の特徴として、「①大量生産型の事業所は中国などの台頭により既に淘汰されているため、付加価値の高い製品を造る事業所が多い、②狭い敷地で付加価値の高い製品を造るため特注の機械が多い、③古い償却資産を有する事業所が多く、事業主の高齢化が問題である」などの状況を把握することができた。よって、本調査は、事業所それぞれの多様性を把握できるよう、質問紙による回答集計を基本とする調査ではなく、調査員が実際に現地を訪問し、事業主へのインタビューを行いながら事業所の実態を把握する形式により実施することとした。

インタビュー調査の方法を以下に示す。

- ・ 調査方法：訪問面接方式  
(調査票を事前に郵送、面接時に回収)
- ・ 調査時期：プレ調査 7月27日及び8月1日  
本調査 9月1日～11月30日
- ・ 対象事業所数： 60社  
(内訳：鬼怒川東側56社、西側4社)

調査では、商工会会員で鬼怒川東側で被災した582社のうち、約1割相当へのインタビューを行うこととした。個人情報保護の観点から常総市商工会に所属する会員名簿を閲覧することができないため、事業所の選定は商工会に依頼し、市内の様々な業種の事業所の実態を把握できるよう、業種・地区ともにランダムに選定してもらうよう依頼した。インタビュー調査を進める過程では、選定した事業所から辞退の連絡を受けることもあったため、途中段階で事業所を更に追加選定し、最終的には鬼怒川東側で56社のインタビューを実施した。また、比較のために、浸水していない鬼怒川西側からも4社を選定し、インタビューを実施した。

## 2. 3 インタビュー調査を実施した事業所の概要

経済センサス（H26基礎調査）<sup>6)</sup>の常総市内のデータを集計したところ、市内の非農林漁業（公務・教育・医療福祉・複合サービス業以外）の事業所数は2,731であり、鬼怒川東側で1,473、鬼怒川西側で1,258となった。鬼怒川東側の事業所の業種構成を図2右側に示すとともに、インタビュー調査を行った鬼怒川東側の56社の業種構成（図2左側）と比較した。前節に述べた通り、事業所のランダム抽出を行った結果、立地する様々な業種へのインタビューを実施することができた。なお、図2では、インタビュー調査対象の事業所では、経済センサスデータに比べて製造業が多く、かつ卸売業・小売業が少ない。インタビューした結果、実態としては製造かつ小売りをしている事業所が多く、いずれに分類すべきか判断がつかなかったため、製造かつ小売りをしている事業所は図2では製造業に分類している。

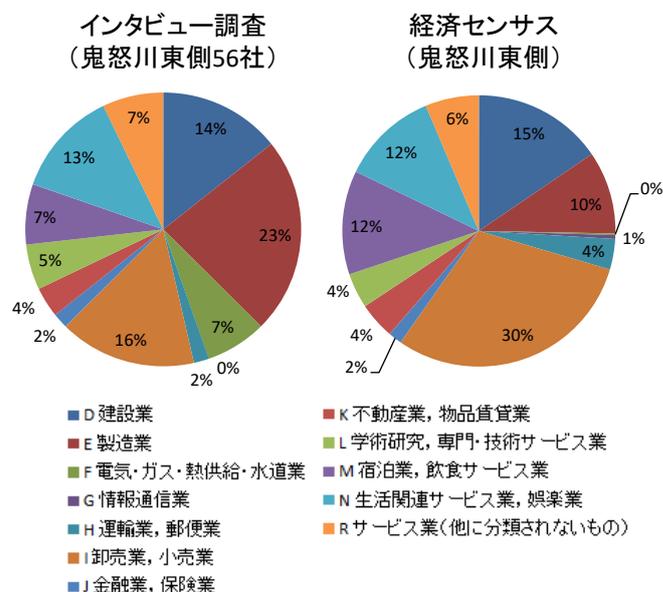


図2 経済センサスでの業種構成とインタビュー対象の事業所の比較

図3は、佐山（2015）<sup>7)</sup>による推定浸水深の分布図の上にインタビューを実施した事業所をプロットしたものである。事業所の立地は、①9月10日朝に溢水した常総市若宮戸周辺、②10日の12時50分頃に堤防が決壊した常総市三坂町周辺、③常総市役所も立地する水海道駅周辺、④水海道以北の低地で浸水が長期化した大生地区周辺、⑤鬼怒川西側という5地区に分かれる。

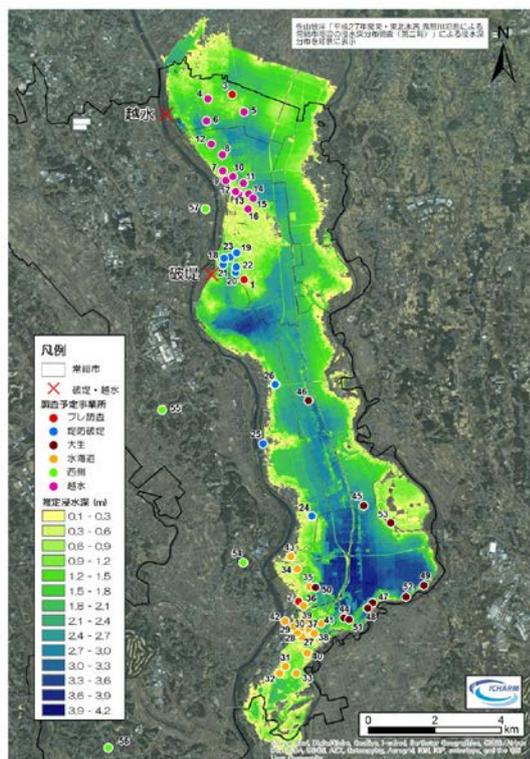


図3 インタビューを実施した事業所の分布

### 3. 減災のための緊急行動の実態

前章で述べた5地区のうち、若宮戸周辺では、9月10日1:40に避難準備情報(本石下等)が出された後、2:20に避難指示へ切り替わり、4:00に避難勧告(大房等)が出された。その後、6:00頃に溢水したと報告されている。一方、堤防が決壊した三坂町周辺は、12:50に堤防決壊し、決壊後の13:08に鬼怒川東地区を対象とした避難指示が出された。よって、三坂町以南に位置する三坂町及び大生地区周辺は、事前の避難情報が無かった地域と言える。これらの地区より南に位置する水海道周辺では9月10日9:50に避難指示が出されたものの、堤防決壊した三坂町から実際に水が流れてきて浸水したのは10日夜から翌朝にかけてである。

インタビュー調査では、事業主に対して、「浸水の危険性がある」と認識した時、浸水防止対応を開始した時、従業員に指示を出した時、一斉避難した時などの、浸水当日の時系列での対応を尋ねた。図4は、9月10日0時を起点として、事業所にいた事業主やその代理にあたる人が浸水の危険に気付いた時間を、事業所内の主な建物の浸水深さ別にプロットしたものである。調査では、事業所に関して主な役割を担っている建物を挙げてもらい、調査員がこの建物について図5に示したA~Cの3種類の高さを計測した。図4での主な建物の浸水深さとは、

床面から浸水痕跡までの高さ(C)である。なお、製造業の場合は、主な事務所と主な工場(作業所等)をそれぞれ尋ねており、図4には主な工場(作業所等)の高さ(C)を採用した。

若宮戸周辺では、2:20に避難指示が出ているものの、多くの事業所で、「浸水の危険性がある」と認識できたのは実際に溢水した後である。また、三坂町以南や水海道周辺においても、12:50に決壊してから、多くの事業所で「浸水の危険性がある」と認識するまでには時間差があったことがわかった。避難情報を聞いても浸水の危険性を認識できず、対応行動に遅れが生じていた可能性がある。インタビュー調査からは、「浸水しないと思っていた」という事業所が9割に及んでおり、その理由には「堤防の決壊や越水によって氾濫した水はここまでは来ないと思っていたから」や「過去のこの場所は浸水したことがあると聞いていないから」などの考えが多かったことがわかった。情報を聞いた事業所が速やかに対応行動を開始できるようにするための事業所関係者の意識啓発や避難情報の伝え方の改善が必要である。

「浸水の危険性がある」と気付いた後は、回答した事業所の60%は「浸水がひどくなる前に、浸水被害を減らすための対応を行う時間はあった」と答えた。最も多い対応時間は1-3時間で、対応を行った事業所の44%を占めた。図6は、これらの事業所が行った具体的な対応を示したものである。「重要な物を2階などの高い所に移した」と「車を高いところに移動させた」が多くなった。しかし、常総市は平らな土地柄であるため、「高いところ」といっても敷地内や近くの高いところが多く、結局、車が浸水してしまった事業所が多く見られた。

調査回答からは、浸水防止のために何らかの対応を行った事業所が多かったことがわかったが、実際のリスクの状況を適切に把握していないと命の危険や空振りのリスクもある。インタビュー調査では、「溢水した」などの情報を聞いても、まず「溢水」という言葉は初耳なのでどのような状況なのか判断がつかなかった、という意見が多く聞かれた。また、操業停止や従業員への指示のタイミングを判断するためには、どの程度危険なのかや、あとどのくらいで水が来るのかなど、実際に直面しているリスクの程度や進行状況を詳しく知る必要がある、との意見も聞かれた。浸水前後のタイムラインの中でどのような対応を行うべきかをあらかじめ事業主に想定してもらおうとともに、事業主的確な判断につながるような付加情報の提供を行うことへのニーズは高いと考えられた。

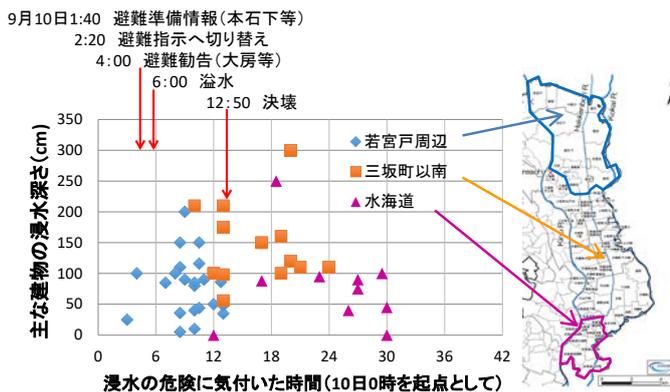


図4 インタビューを実施した事業所の分布

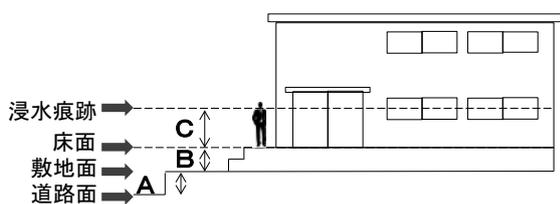


図5 浸水痕跡等に関する調査方法

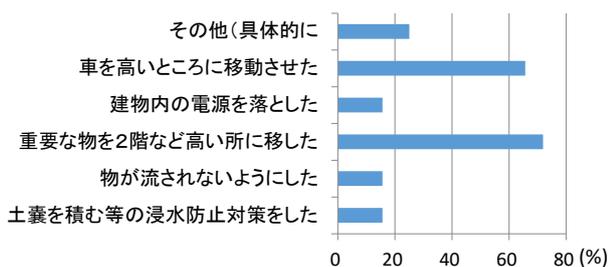


図6 浸水防止対応

#### 4. 被害を負わない強さの実態

被害を負わない強さについては、建物別の浸水状況、最も重要な建物での浸水深さ、機械や設備、事務用機器・車両の被災状況・修理や買換えの状況、困ったこと、棚卸資産の被害額、ライフラインの支障状況などの質問を行った。ここでは、修理や買換えが必要となった機械や設備・事務用機器の状況を紹介します。図7は、回答したそれぞれの事業所において修理や買換えが必要となった機械や設備・事務用機器の割合と、主な建物の床上浸水深さとの関係をプロットしたものである。

我が国では、堤防やダム等の治水施設の整備事業に際して、平成17年に刊行された治水経済調査マニュアル<sup>8)</sup>に基づく費用便益分析が行われている。事業所については、浸水深さに応じた被害率を用いた償却・在庫資産への直接被害の推計や、営業停止・停滞に伴う損失など

の間接被害の推計が行われている。図7中の赤線は、治水経済調査マニュアルで想定されている償却資産の浸水深別被害率(表1)をプロットした結果である。マニュアルでは、床上の浸水深さが100-199cmの場合は、償却資産の被害率は0.789 (=78.9%)であるが、インタビュー調査の結果では、80~100%の機器の修理や買換えが必要となった事業所が多かった。

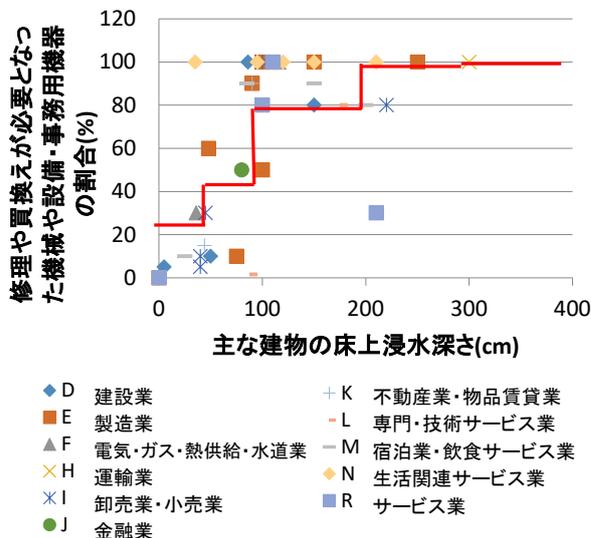


図7 修理や買換えが必要となった機械や設備・事務用機器の割合と床上浸水深さの関係

表1 治水経済調査マニュアルでの浸水深別被害率<sup>8)</sup>

表-4.4 浸水深別被害率

資産	浸水深	床上					土砂堆積(床上)		
		床下	50cm未満	50~99	100~199	200~299	300cm以上	50cm未満	50cm以上
償却		0.099	0.232	0.453	0.789	0.966	0.995	0.54	0.815
在庫		0.056	0.128	0.267	0.586	0.897	0.982	0.48	0.780

注：平成5年~平成8年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。(ただし、土砂堆積は従来の被害率)

浸水が1mを超えると、過半数が修理や買換えが必要となり、致命的な被害が目立ってくる。立って作業をする機械の場合は、作業員の腰以上の位置に駆動部がある場合が多く、これらの高さ以上の浸水では致命的な被害を生じる例が多いと考えられる。また、一斉避難する際には、机の上に重要書類やパソコンのデスクトップ本体を上げてから避難した事例が多く、机の上の高さ以上に浸水した場合、これらの物品への被害が甚大となったようである。浸水したパソコンについては、データ復旧できた事例も多かったが、浸水が1週間を超えた大生地区等ではデータ復旧も困難だった事例が多く見られた。

事前の対策においては、致命的な被害が生じないよう、建物自体を嵩上げする、機械の駆動部が高い位置に来る

ように機械自体を嵩上げする、日頃からコントローラーや配線等を高い位置に設置しておくなどの対策が必要である。

### 5. 速やかに回復するしなやかさの実際

速やかに回復するしなやかさに関しては、清掃活動、本格再開及び仮再開の状況、再開や継続の妨げになった要因・役立った要因、特別な支出、売上額・利益・生産能力・職場の環境の回復状況、事前の浸水対策の有無などの質問を行った。ここでは、事業所の本格再開までの日数と売上額等の回復状況についての結果を紹介する。

図 8 は、事業所が本格的に再開するまでに要した日数（日）と、主な建物の床上浸水深さとの関係をプロットしたものである。

前述した治水経済調査マニュアル<sup>8)</sup>（平成 17 年）では、営業停止・停滞に伴う損失などの間接被害の推計が行われており、表 2 に示した浸水深別の営業停止日数及び停滞日数が用いられている。図 8 中の赤線は、これらの日数を加筆したものである。図 8 からは、治水経済調査マニュアルで想定されている営業停止・停滞日数を大幅に上回る期間の営業停止・停滞を余儀なくされた事業所が多数存在したことがわかる。治水経済調査マニュアルは、平成 7・8 年に我が国で発生した水害でのアンケート調査に基づき算出されているが、昨今はインターネットやライフライン環境が当時とは大きく変化している。事業所の再開までの日数は長期化する傾向にあると考えられ、今後のマニュアル改定の必要性が示唆された。

図 8 には、床上の浸水はほとんど無かったにも関わらず、本格再開までに 1 か月以上を要した事業所も見られた。常総市では広域に及ぶ浸水により、浄水場も浸水被害に遭い、断水が長期化し、事業所の清掃活動に大きな影響を及ぼした。事業所自身の対策に加えて、ライフライン施設の配置なども含めた水害に強い地域づくりも必要である。

また、事業所の売上額及び職場の環境が 100%まで回復した時期及び調査時点での回復状況を尋ねたところ、100%まで回復した事業所の割合の時間推移は図 9 の通りとなった。職場の環境は売上額より早く回復しており、2016 年 5 月のゴールデンウィーク明けには回復したという意見が多かった。しかし、水害から 1 年後の 2016 年 9 月時点でも、売上が 100%に回復した事業所は約半数程度しかない。図 9 からは、地域経済は今も回復の途上にあることがわかる。

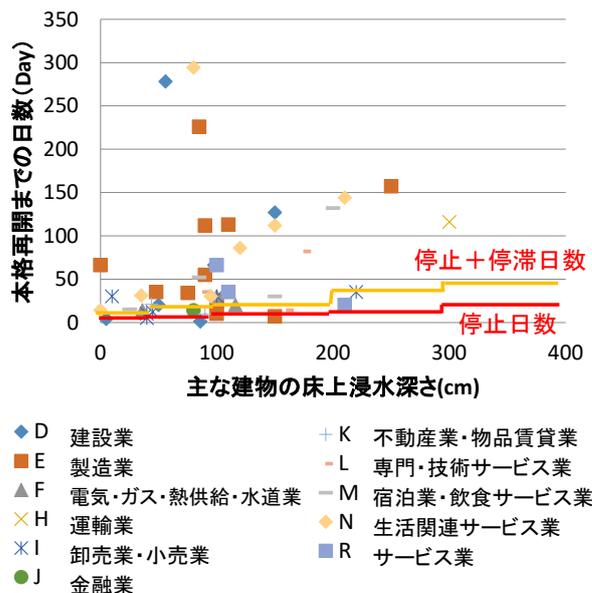


図 8 本格再開までの日数と床上浸水深さの関係

表 2 治水経済調査マニュアルでの停止日数及び停滞日数<sup>8)</sup>

浸水深	床下	床上				
		50cm未満	50～99	100～199	200～299	300cm以上
停止日数	3.0	4.4	6.3	10.3	16.8	22.6
停滞日数	6.0	8.8	12.6	20.6	33.6	45.2

注：平成 7、8 年災を対象に実施した「水害に関するアンケート調査」より

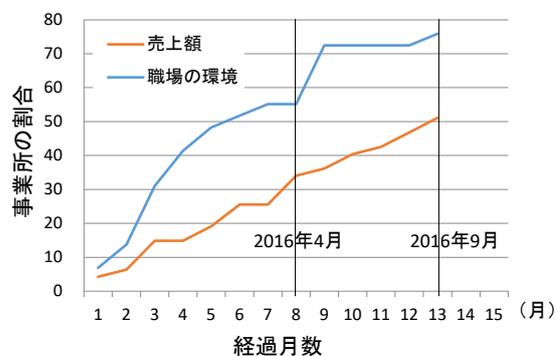


図 9 売上額及び職場の環境が 100%まで回復した事業所の割合の時間推移

調査では、再開や継続の妨げになった要因や役に立った要因も尋ねた。再開や継続の妨げになった要因についての主な回答を以下に列記する。

#### <再開や継続の妨げになった要因>

- ・浸水から長期間に渡り機械が使えず。その後もちゃんと直っているわけではない。元通りの性能はメーカーが保証してくれず今も時々調子が悪くなるので不安だ。

- ・断水で清掃が進まなかった。停電で事務作業も進まなかった。固定電話が不通で、中々連絡が取れなかった。
- ・市内からの米などの材料調達が大変。いつも通りの数がそろえられない。
- ・従業員も浸水被害。体調不良により出勤できなくなり、生産力が減った。
- ・お得意さまも被災した。お客様が減った。

常総市商工会へのヒアリングからも挙げられたように、狭い敷地で付加価値の高い製品を造るため特注の機械を持つ事業所が多く、機械の交換・修理に時間がかかった。また、古い償却資産が多いため、壊れた部品の新規調達や交換には多大なる困難が生じた。元々の事業所の現状に起因するこれらの事情は、営業再開が遅れる大きな要因になった。今回の調査では、廃業した事業所へのインタビューは実施できていないが、商工会へのヒアリングによれば、事業主の高齢化や二重ローンへの懸念から廃業をした事業所も多数生じたという。

再開や継続の役に立った要因については、図 10 に示す通り、茨城県の補助金（最大 50 万円）が最も多く、現金支援を期待する声は多かった。また、取引先・近所の人・同業者等による清掃活動等にあたっての人的・物的な支援をあげる声も多かった。保険金の支払いについては、「総合保険に入っていたが、水害で保険金が出るのを知らなかった」という声が多数聞かれた。浸水前の保険加入にあたって、災害に対する保険の内容についての知識が不十分であったと考えられ、これらの意識啓発が重要である。なお、浸水後は新たに保険に加入したり、保険を見直したりした事業所が多かった。

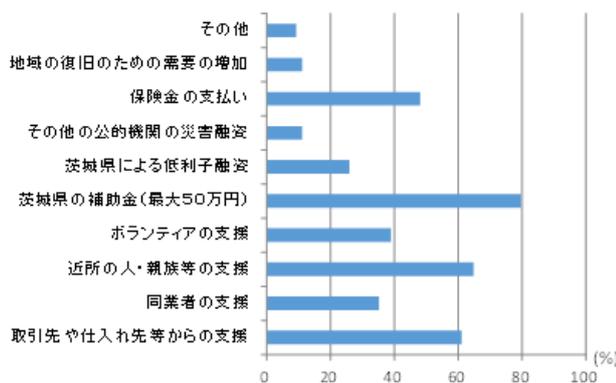


図 10 再開や継続の役に立った要因

## 6. まとめ

本研究では、2015 年 9 月の関東・東北豪雨にて鬼怒川の堤防が決壊して広域に渡る浸水被害にあった茨城県

常総市に着目し、浸水被災地における「致命的な被害を負わない強さ」・「速やかに回復するしなやかさ」・「減災のための緊急行動」の実態を把握するため、常総市商工会の協力のもと、商工会会員である事業所へのインタビュー調査を行った。

「被害を負わない強さ」については、床上 100 cm を超えるとほぼ 8 割が修理や買換えが必要となったことがわかり、事前の建物や機械等の嵩上げにより、床上浸水の影響を軽減しておくことの重要性が示唆された。

「速やかに回復するしなやかさ」については、事業所の本格再開までの日数の実態と、治水経済調査マニュアルでの想定を比較した結果からは、マニュアルの想定が過小評価である可能性が考えられ、時代にあったマニュアルの改訂の必要性が示唆された。事業所の活動の回復状況については、水害から 1 年後でも売上が 100% に回復した事業所は約半数に留まり、地域経済は回復の途上にあることが確認された。

「減災のための緊急対応」については、避難情報聞いても浸水の危険性を認識できず、対応行動につながっていないという実態を把握することができた。情報入手後に迅速に適切な判断を行えるよう、事前の意識啓発や発災時の情報提供内容を検討しておく必要がある。

なお、以上の結果は、あくまで常総市における現状を把握したに過ぎない。これらの実態を踏まえて、我が国及び国際社会が今後目指すべき強さやしなやかさについて、引き続き議論していく必要がある。

## 謝辞

常総市での調査にあたっては、常総市商工会にご協力をいただくとともに、商工会会員の事業所関係者の方々にはインタビュー調査にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 内閣官房国土強靱化推進室：パンフレット 国土強靱化とは？, 2015.
- 2) 国土地理院：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に関わる茨城県常総地区の推定浸水範囲の変化, 2015.
- 3) 茨城県防災・危機管理課：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による本県の被害及び対応について（3 月 16 日現在）, 2016.
- 4) 常総市：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による常総市被災状況, 2015.
- 5) 茨城県：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害により被災された中小企業の皆様に対する支援措置,

## 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

<https://www.pref.ibaraki.jp/shokorodo/sansei/sangyo/shosei/hisai.html> (平成 29 年 6 月 26 日参照)

- 6) 総務省統計局：経済センサス (H26 基礎調査)  
<http://www.stat.go.jp/data/e-census/2014/> (平成 29 年 6 月 26 日参照)
- 7) 佐山敬洋：平成 27 年関東・東北豪雨水害 鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水深分布調査 (第二報), 2015.
- 8) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル (案), 2005.

## 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：澤野久弥、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（RRI 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開発する。さらに、それらの情報を防災担当者や住民と共有し、彼らの防災・減災活動で利活用するため、「水災害リスク情報提供システム」を開発する。本年度は、新潟県阿賀町を対象自治体として、RRI モデルを活用した、8つの評価軸による地区ごとの洪水脆弱性評価を表す「洪水カルテ」の考え方および、特に洪水に脆弱な地区を「洪水ホットスポット」として抽出する手法を提案した。さらに、阿賀町における、水災害に関する様々なリスクを一元的に共有できる「情報共有システム」の基礎仕様を検討した。これらの研究については、関係各所と意見交換しながら実施した。

キーワード：RRI モデル、洪水脆弱性評価、阿賀町、洪水カルテ、洪水ホットスポット、情報共有システム

#### 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。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
- 急峻な地形のため降雨発生から流出までの時間が比較的短い
- 洪水予報などが行われていない区間が多い
- 平地に比べて降雨から災害発生に至る時間が短く、入手した情報を整理する時間的余裕がない
- 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、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）に資する情報が速やかに入手で

きない

- 中山間地のコミュニティでは高齢者が多く、行政の目がいきわたらない上に、いざという際の避難活動が困難であり、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洪水や土砂災害等に対する防災・減災活動を支援する、「水災害リスク情報提供システム」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. 地区ごとの洪水リスク評価手法の提案

##### 2.1 対象地域の概要および用いた氾濫解析手法

###### 2.1.1 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である（図-1, 2）。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952.89km<sup>2</sup>（新潟県3位<sup>2)</sup>）、人口は11,678人（2017年3月末現在<sup>3)</sup>）、高齢化率は46.4%（新潟県1位（新潟県平均30.6%）<sup>4)</sup>）であり、災害に対する脆弱性が高い。阿賀町付近の阿賀野川は、新潟県管

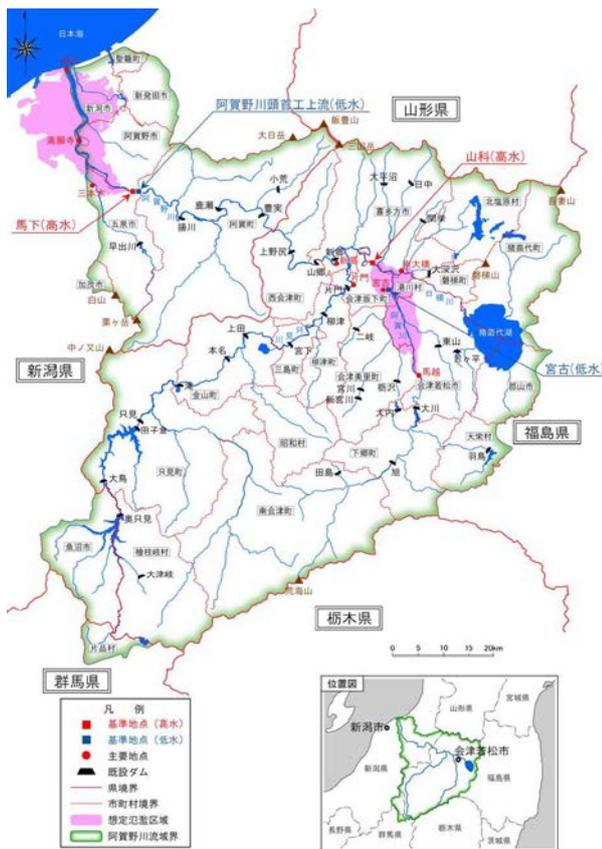


図-1 阿賀野川流域概要図 (参考文献 1 に加筆)

### 2.1.2 降雨流出氾濫モデルによる氾濫計算

本研究における洪水氾濫解析には、佐山ら<sup>5)</sup>によって開発された降雨流出氾濫モデル (RRIモデル) を用いている。RRIモデルは、山地・平野を問わず流域全体をグリッドセルに分割し、降雨流出から洪水氾濫までを流域を一体的に解析することを目的に開発した流出・氾濫一体型解析モデルである。降雨分布や標高、土地利用などに関するデータを入力情報とし、河道流量や水位に加え、任意の氾濫原の浸水深なども出力できる。ただし、RRIモデルは堤防の越水は考慮できるが破堤は考慮していない。

RRIモデルの対象地域範囲は、図-2の実線に囲まれる、上流端を豊実ダム、下流端を馬下水位観測所とする、阿賀町全域と同等な範囲 (約950km<sup>2</sup>) である。モデルのキャリブレーションにおいては、前項で述べた、近年で最大の洪水被害を引き起こしたH23洪水を対象とし、国土交通省水文水質データベース、国土交通省河川事務所、新潟県および東北電力から入手した降雨や水位、流量データを用いた。なお、地形データには、H23洪水後に新潟県が実施した、H23洪水規模に対応できる築堤 (延長・高さ) が反映されている。本モデルによる流量や氾濫域、氾濫のタイミングなどの再現性の高さは、栗林ら (2015)<sup>6)</sup>、(2016(1))<sup>7)</sup>で確認している。

## 2.2 地区危険度の評価手法

### 2.2.1 評価フロー

図-3に、本研究で提案する地区危険度評価のフロー図を示す。本評価手法は3つの部分から成る。

まず、「A. 地区の設定および地区特性の把握」では、対象とする地区を設定し (本研究では図-4に挙げる、阿賀野川本川沿いの、洪水に脆弱と考えられる20地区)、各地区の基礎資料 (人口、家屋数など) を把握する。次いで「B. 氾濫解析の実施」では、様々な外力パターン (本研究では後述の5つ) に対して、RRIモデルによって得られた20地区の氾濫開始時間、氾濫深、湛水期間などを把握する。さらに、「C. 評価指標による評価」では、評価軸 (本研究では後述の8つ) と評価指標、閾値を設定し、評価地点における氾濫計算結果や基礎資料などを、設定した閾値を用いてランク評価し得点化する。この表が、各地区において各外力に対する各評価軸での評価結果を表す「洪水カルテ」となる。そして、外力パターンごとに各評価軸の得点を合計し、外力別の小計値 (以下、リスク小計値という) を算出する。そして、全

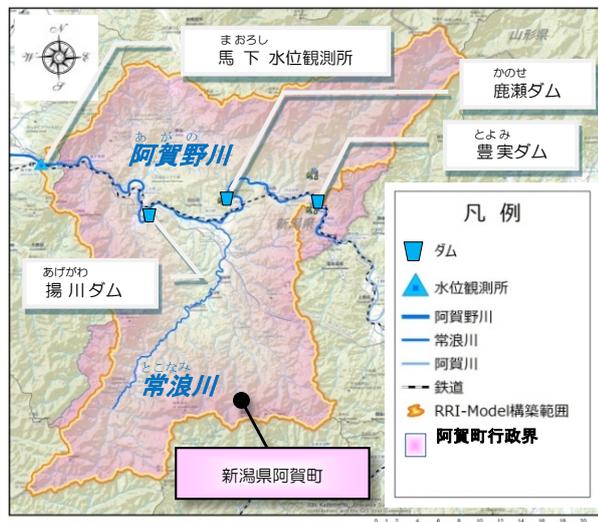


図-2 阿賀町位置図

理区間で、水位周知河川に指定されているが、洪水予測は行われていない。

このように阿賀町は、現在および今後の我が国の中山間地が抱える洪水対策の課題を総合的に有していると考えられたため、本研究の対象地として選択した。

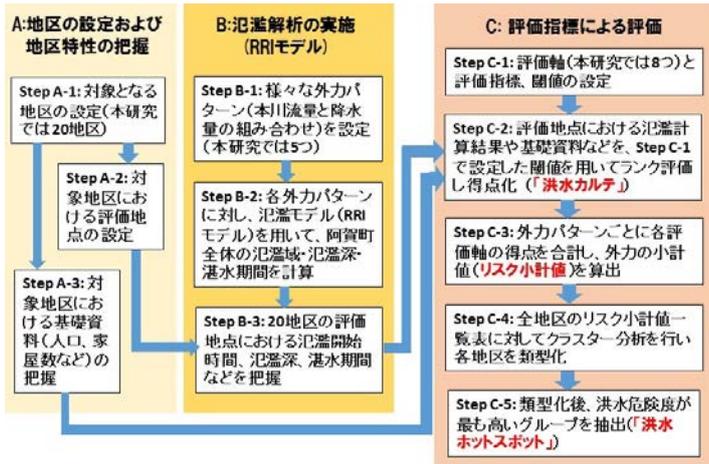


図-3 地区危険度評価のフロー

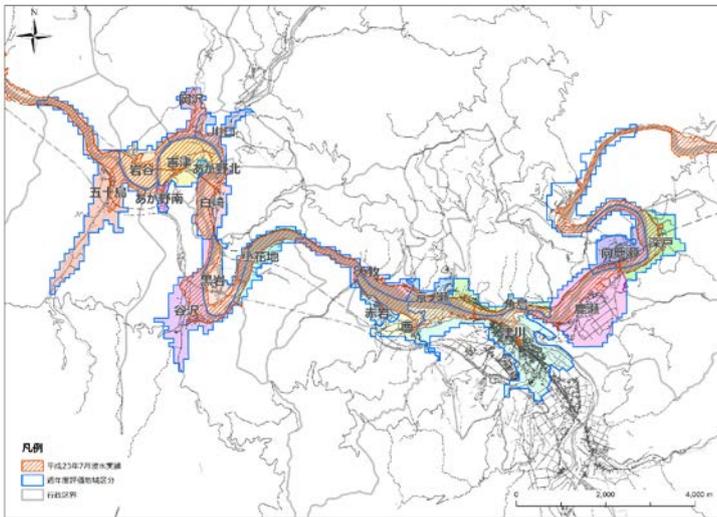


図-4 対象とする20地区の位置図

表-1 各地区の代表点と避難所

地区名	各地区の代表点	各地区の避難所
あが野南	町宮あが野田地	あが野ニュータウン集会所
あが野北	三川IC入口交差点より少し南	あが野ニュータウン集会所
岡沢	岡沢集落開発センターより少し北側	岡沢集落開発センター
角島	横沢川と国道の橋付近(最近最大の浸水メッシュ)	角島集落開発センター
岩谷	岩津交差点(道の駅「みかわ」)	岩谷集落開発センター
吉津	国道49号下の交差点	吉津集会所
京ノ瀬	京ノ瀬会館下の国道49号	京ノ瀬集落開発センター
五十島	JR五十島駅前	五十島集会所
向鹿瀬	田部駅前	向鹿瀬ゆずり葉センター
黒岩	谷花浄化センター	黒岩ふれあいセンター
鹿瀬	前田川との橋(最近最大の浸水メッシュ)	鹿瀬区民センター
小花地	小花地集落開発センター	小花地集落開発センター
西	西之沢橋	西会館
赤岩	赤岩橋	赤岩集落開発センター
川口	集会場	みかわ会館
大牧	大沢川との橋	多賀神社
谷沢	谷沢神社前(バス停)	三川B&G海洋センター
津川	伊勢宮橋(最近最大の浸水メッシュ)	ふるさと交流川屋敷、津川小学校、阿賀津川中学校など
白崎	阿賀町役場三川支所	白崎集会所
深戸	宮古沢川と県道が交差するところ	深戸ふれあいセンター

地区のリスク小計値一覧表に対してクラスター分析を行い、各地区を類型化する。その結果、洪水危険度が最も高いグループを「洪水ホットスポット」として抽出する。

本研究で提案するこの地区危険度評価手法では、その地区がどのような種類の外力に対し、どのような観点で脆弱かを明らかにすることが出来るため、洪水危険度診断の意味を込めて「洪水カルテ」という名称を用いている。

### 2.2.2 地区の設定および地区特性の把握

栗林ら(2016(2))<sup>8)</sup>では19地区を設定したが、阿賀町との協議の上、鹿瀬地区を分割して1地区(深戸)を加え、20地区を対象とした。

地区内の代表点について、著者ら(2016(2))<sup>8)</sup>においては、地区の中でH23洪水による浸水深が最も大きいメッシュを代表点としていたが、今年度において阿賀町防災担当者と現地視察および協議を行い、各地区で最も早く浸水が始まると地元住民に認識されている地点(橋など)や、駅前や交差点などのわかりやすい地点を代表地点として設定した。

また、各地区の避難所および年代別人口分布は阿賀町からデータ提供を頂き、家屋分布はゼンリン住宅地図を用いた。なお、RRIモデルにおけるメッシュごとの人口データは直接入手できなかったため、地区内人口と地区内家屋数から家屋1軒当たりの人数を推計した。

表-1に各地区の代表点と避難所一覧を示す。

### 2.2.3 外力パターンの設定

地区危険度を検討するための外力パターンとして、降雨と阿賀野川本川流量の組み合わせを考慮した。すなわち、降雨は阿賀町において近年最大の洪水被害を生じさせた「H23洪水時の実績降雨」と、「想定最大外力相当降雨」、および「ゲリラ豪雨」の3パターンを設定した。「想定最大外力相当降雨」については、洪水災害に対する国土交通省等の近年の対応や動向等(例えば「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」<sup>9)</sup>や平成27年5月水防法改正)を踏まえ、地域ごとの過去の大規模な降雨量を踏まえて設定された国土交通省マニュアル<sup>10)</sup>を参考に、北陸地方における過去の最大降雨量を考慮

し、H23 洪水時の降雨パターンを 2.5 倍に引き伸ばしたものとした。ゲリラ豪雨については、同マニュアルを参考に、3 時間集中波形 (48.6mm/h、74.7mm/h、36.4mm/h) の降雨を対象域全域に与えた。

阿賀野川本川流量については、豊実ダムでの放流量とし、「H23 洪水時の実績放流パターン」と「想定災害外力相当降雨を考慮した放流パターン」の 2 パターンを検討したが、後者については上流域での降雨パターンを設定することが困難であったために、実務上最大流量となる、H23 洪水時の実績放流量パターンを河川整備基本方針規模の流量まで引延ばしたパターンとした。なお、ゲリラ豪雨時の豊実ダム放流量は、馬下水位観測所における 2013 年の平常時流量 (358.6m<sup>3</sup>/s) を与えた。これらを表-2 のように組み合わせ、合計 5 パターンを設定した。

表-2 設定した 5 つの外力パターン

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

### 2.2.4 地区危険度評価における 8 つの評価軸

2.2.2 で抽出した各地区に対し、表-3 に示す 8 つの評価軸と指標で評価を行う。昨年度に検討した 5 つの評価軸と比較すると、「⑤地区と役場支所との交通途絶」「⑥浸水最大孤立者数」「⑦浸水の影響を受ける要配慮者」「⑧洪水後の廃棄物」を新たに追加した。これらはいずれも各地区の洪水被害規模や洪水対策への影響を指標化したものであり、地区の洪水対策立案に直接寄与するものと考え追加した。

「⑤地区と役場支所との交通途絶」では、役場支所からの人員派遣や物資輸送の困難さを評価するため、事前に阿賀町に確認して設定した、地区代表点と役場支所の経路上における最大浸水深を指標として設定した。「⑥浸水最大孤立者数」では、洪水により直接被害を受けると想定される人数を指標とした。具体的には国土交通省マニュアル<sup>11)</sup>を参考に、避難率を 40%と設定した上で、徒歩での移動が困難となる浸水 50cm 以上の浸水域に居住する人数を算出した。「⑦浸水の影響を受ける要配慮者」では、昨年度では地区における要配慮者 (高齢者と乳幼児) の割合としていたが、本研究ではより直接的に地区における洪水の影響を把握するため、同じく国土交通省マニュアル<sup>11)</sup>を参考に、車での移動が困難となる浸水 30cm 以上の浸水域に居住する要配慮者を指標として算出した。「⑧洪水後の廃棄物」では、同じく国

表-3 地区危険度評価における 8 つの評価軸

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

土交通省マニュアル<sup>11)</sup>を参考に、50cm以上の浸水域に存在する家屋数を把握したうえでマニュアルの算定式を適用し、廃棄物量を算出した。洪水後の廃棄物の処理は自治体にとって大きな負担となるため、浸水家屋に対する指標を洪水後の廃棄物として、洪水対策を立案する上で必要な評価軸を追加したものである。

各指標の閾値は、それぞれ国土交通省マニュアル<sup>11)</sup>や阿賀町防災担当者へのヒアリングの結果などをもとに、根拠のある値となるよう設定を試みたが、②、⑥、⑦、⑧についてはそのような設定が難しかったため、地区間比較を可能とするよう今回は便宜的に相対的な閾値を設定した。これらの閾値により、各指標はランク a~d で評価され（③のみ aa ランクを設定）、得点化される。いずれの指標でもランク a になるほど洪水脆弱性が高いと評価される。

### 2.2.5 洪水の脆弱性に応じた地区のグループ化

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

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

### 2.2.6 「洪水ホットスポット」の特定

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

## 2.3 阿賀町における地区危険度評価結果

### 2.3.1 「洪水カルテ」の作成結果

前章の手法を用いて阿賀町の20地区を対象に、「洪水カルテ」をそれぞれ作成した。例として H23 洪水で激甚な被害を受けた地区である谷沢地区、五十島地区および吉津地区の結果を表-4, 5, 6 に示す。

また、これら3地区を含めた、全20地区のリスク小計値を表-7に示す。なお、見やすくするため8点以上を薄く、14点以上を濃く塗りつぶしている。

### 2.3.2 洪水カルテによる診断例

前述のように、「洪水カルテ」により、各地区の洪水特性を把握することが可能である。ここでは谷沢地区（表-4）、五十島地区（表-5）、および吉津地区（表-6）を例にとると、谷沢地区は①避難のための時間はc評価が多いが、⑥最大孤立者、⑦災害時要配慮者、⑧廃棄物の指標での評価がa評価が多い。すなわち、谷沢地区では要配慮者を含め影響者は多く

表-4 谷沢地区における「洪水カルテ」

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

表-5 五十島地区における「洪水カルテ」

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

表-6 吉津地区における「洪水カルテ」

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

なるが、避難のための時間は比較的ゆとりがあるため、要配慮者を支援しながらの避難が可能と思われる。また、五十島地区は①避難のための時間、②避難が必要な期間、③最大浸水深の指標での評価が高いのが特徴である。五十島地区では、余裕時間があまりなく最大浸水深もかなり深くなるため、無理な避難はせず、垂直避難も選択肢となると思われる。吉津地区は外力パターン1でのリスク小計値は低いですが、外力パターン2, 3, 4ではかなり高くなる。これは、H23洪水後、吉津地区においては新潟県によって築堤整備がなされており、そのためH23洪水時の外力規模となる外力パターン1では河川からの浸水は生じないため値が小さくなっているものである。このように、築堤のような防災投資の効果が「洪水カルテ」に反映されている。

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

### 2.3.3 地区のグループ化と「洪水ホットスポット」の抽出

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

することが出来た。

グループA：洪水脆弱性が最も低いグループ

グループB：洪水脆弱性は全体的に低い、ゲリラ豪雨にやや弱いグループ

グループC：外力パターン4に特に弱いグループ

グループD：洪水脆弱性が全体的に高いグループ

グループE：洪水脆弱性が全体的に極めて高いグループ

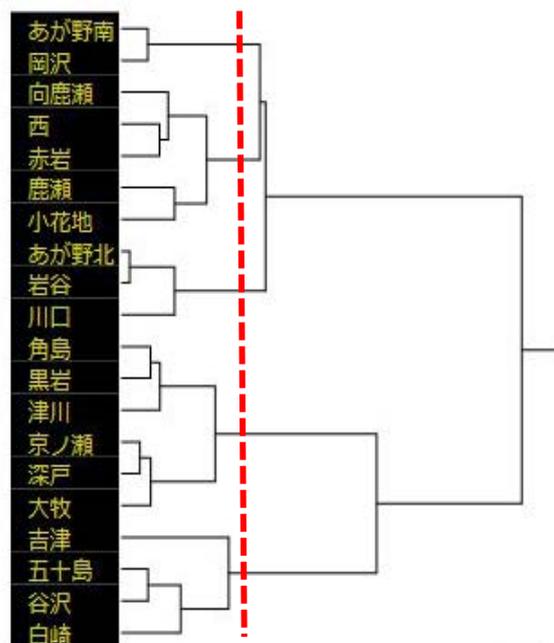


図-5 クラスター分析結果

表-7 各地区のリスク小計値一覧表

外力パターン \ 地区名	1	2	3	4	5
あが野南	4	8	5	8	8
岡沢	6	7	7	7	7
向鹿瀬	4	6	6	8	3
西	3	6	6	12	1
赤岩	1	3	2	12	2
鹿瀬	3	3	13	15	2
小花地	2	7	8	18	4
あが野北	2	3	3	3	3
岩谷	3	3	3	3	3
川口	0	2	2	3	0
角島	7	12	13	15	1
黒岩	6	12	13	14	3
津川	7	12	8	13	2
京ノ瀬	13	14	13	17	1
深戸	14	14	14	16	2
大牧	11	12	14	16	1
吉津	6	21	20	19	5
五十島	17	19	21	21	9
谷沢	15	18	18	20	9
白崎	11	22	22	23	9

表-8 リスク小計値に基づく地区グループ分け結果

	外力パターン	1	2	3	4	5
	地区名					
グループA	あが野北	2	3	3	3	3
	岩谷	3	3	3	3	3
	川口	0	2	2	3	0
	平均	1.7	2.7	2.7	3.0	2.0
グループB	あが野南	4	8	5	8	8
	岡沢	6	7	7	7	7
	平均	5.0	7.5	6.0	7.5	7.5
グループC	向鹿瀬	4	6	6	8	3
	西	3	6	6	12	1
	赤岩	1	3	2	12	2
	鹿瀬	3	3	13	15	2
	平均	2.6	5.0	7.0	13.0	2.4
グループD	角島	7	12	13	15	1
	黒岩	6	12	13	14	3
	津川	7	12	8	13	2
	京ノ瀬	13	14	13	17	1
	深戸	14	14	14	16	2
	平均	9.7	12.7	12.5	15.2	1.7
グループE	吉津	6	21	20	19	5
	五十島	17	19	21	21	9
	谷沢	15	18	18	20	9
	平均	12.3	20.0	20.3	20.8	8.0

分類の結果、グループEは、20地区の中でも洪水脆弱性が極めて高いグループとして抽出されたと判断でき、これらの地区を「洪水ホットスポット」として特定した。これらの4地区はいずれもH23年洪水で床上浸水による被害が発生するなど大きな被害を被った地区であり、「洪水カルテ」による評価の妥当性を表現していると言える。表-8に、表-7と図-5を踏まえた地区のグループ分けとグループごとの平均値を示す。グループごとに差異があることが読み取れる。

### 3. 「e-コミュニティ・プラットフォーム」を活用した情報共有システムの基礎検討

本年度においては、「e-コミュニティ・プラットフォーム」<sup>12)</sup>のシステムを活用し、新潟県阿賀町における様々な災害リスクに関する情報を、自治体の防災担当者や住民が共有できるシステム構築に関する基礎検討を行った。

「e-コミュニティ・プラットフォーム」は、国立研究開発法人 防災科学技術研究所が提供するシステムであり、自治体の防災担当者等によって地域コミュニティ Web サイトを構築するなどの利用場面を想定して開発されたシステムである。

各種ツールは、防災科学技術研究所のホームページで公開されており、申請すれば無料でだれでも利用できる。また、web 上で作動するシステムなので、パソコンやタブレット、スマートフォンからの閲覧が可能である。また、閲覧者のレベル(防災担当者、区長・水防団、住民など)を設定し、閲覧可能ページを限定したり、各種災害情報をレイヤー上で重ね合わせて表現することが可能である。

本研究では、上記のような特徴を有する「e-コミュニティ・プラットフォーム」を活用し、情報共有システムを試験構築した。システムの名称は、阿賀町と協議の上、「阿賀町災害情報共有システム：ARIS (アリス、Aga town Risk Information System)」とした。システムのコンテンツとしては以下を含む。

#### ①. 阿賀町の情報

- 公的機関位置
- 避難場所
- 災害時要援護者施設

#### ②. 過去の災害履歴

- 昭和 33 年 9 月洪水 浸水域
- 平成 16 年 7 月洪水 浸水域
- 平成 23 年 7 月洪水 浸水域

#### ③. 現在の想定被害区域

- 浸水想定区域図(新潟県作成、おおむね 100 年に 1 回程度発生する降雨に対応)
- 土砂災害警戒区域図(新潟県作成)

#### ④. 河川情報

- 町内 3 ダムの水位・放流量など
- 町内 4 か所の河川水位

#### ⑤. 現地情報

- 現地のスマートフォンやパソコンなどからアップロードされた状況写真やそれに関するコメントを地図上で表示

#### ⑥. 氾濫シミュレーション結果

- ICHARM が実施した阿賀町における氾濫シミュレーション結果(最大浸水深)

その他、システム開発の進捗に合わせて、気象情報、町や河川管理者からの情報、洪水カルテの結果、過去の災害アーカイブなどを順次追加する予定である。

ARIS はスマートフォンでの閲覧が可能であり、阿



図-6 阿賀町における防災情報共有システム (ARIS) の画面

賀町防災担当者から要望があった、町への外来者への情報提供を可能としている。また、阿賀町では、全戸に「防災 TV 電話」を配布しており、この画面上で閲覧を可能とすることも検討している。

#### 4. 関係者との意見交換

本研究は現地実装を目指しているため、自治体関係者や河川管理者、および住民の皆様と意見交換を行い、現地のニーズを把握しながら進めている。平成 29 年 3 月 3 日には、阿賀町防災担当者並びに洪水ホットスポットの地区の区長に参加して頂き、本研究の結果について意見交換会を行った。なお、地区の区長とは、これが初めての意見交換会となる。意見交換会においては、本手法に対して理解を得るとともに、結果の公表についても、「公表することで住民に災害リスクを知ってもらうのは重要で、逆に防災対策も進む可能性もある」との意見を頂いた。

また、新潟県、国土交通省北陸地方整備局河川部、阿賀野川河川事務所、阿賀川河川事務所、東北電力、福島県などと適宜情報共有と協力依頼を行っている。



写真-1 阿賀町防災担当者と各区長との意見交換

#### 5. まとめ

本年度においては、昨年度までに提案した、「洪水カルテ」の考え方による地区危険度評価手法を改良し、阿賀町に適用した。さらに、「e-コミュニティ・プラットフォーム」のシステムを活用した情報共有システム構築に関する基礎検討を行った。加えて、関係各所との意見交換会を実施した。

今後は、本研究での検討結果に基づく地区防災計画の立案に向けた取り組みを推進していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：阿賀野川水系河川整備計画,2016
- 2) 阿賀町ホームページ 「阿賀町の概要」.

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