調査報告

フィリピンの洪水常襲地帯における洪水氾濫解析とGISマッピング —災害対応計画作成に向けた取り組みと課題—

Flood Simulation and GIS Mapping in Flood-prone Region of the Philippines:
Efforts and Issues in Contingency Planning

南雲 直子・大原 美保・バドリ バクタ シュレスタ・澤野 久弥
NAGUMO Naoko, OHARA Miho, SHRESTHA Badri Bhakta and SAWANO Hisaya

(2016年5月17日受付 2016年6月26日受理)

洪水常襲地帯であるフィリピン共和国パンパンガ川下流域のブラカン州カルンピット市をモデル地域に、降雨流出氾濫モデルによる洪水氾濫解析とGISマッピングを実施し、地域の住民避難や時系列の洪水災害対応計画に役立つリソースマップ、浸水想定マップ、浸水確率マップ、浸水チャートを作成した。こうした資料の作成には、高解像度数値標高モデルをはじめとする地理空間情報と洪水記録の蓄積が必須である。また、地域の浸水危険性の把握には洪水氾濫解析結果だけでなく、地理学的視点からの土地の成り立ちへの理解も重要で、同時に住民が自ら考え行動できるよう継続的な支援を行っていくことが洪水被害の軽減に役立つ。

This paper targeted the flood-prone Calumpit municipality, Bulacan province, in the Pampanga River basin, Republic of the Philippines, and prepared a resource map, inundation map, inundation probability map, and inundation chart for time-series flood contingency planning by flood simulation using the rainfall-runoff-inundation model and GIS mapping. For preparing these materials to support local evacuations, GIS data such as high-resolution digital elevation models and accumulated flood records are required. In addition, to show local inundation vulnerability, understanding landform development based on the geographical point of view as well as flood simulation is important. Simultaneously, continuous support for local people to improve their skills in thinking and acting by themselves at the time of floods will help mitigate damage.

キーワード: 洪水氾濫解析, GISマッピング, 災害対応計画, パンパンガ川
Key words: flood simulation, GIS mapping, contingency plan, Pampanga River

I はじめに

雨季と乾季が定期的に訪れるモンスーン影響下の人々は、周期的な水資源量の変化や洪水の発生に順応しながらリスクを最小化し、しなやかに暮らす伝統的生活スタイルを構築してきた。ところが、東南アジア諸国に見られるような急速な経済発展と人口増は、ライフスタイルの変化や洪水脆弱地帯への都市域の拡大をもたらし、地域の洪水危険性を増大させている。

一方、IPCC第5次評価報告書(IPCC 2014)¹⁾では、気候変動に伴って陸域における大雨の頻度・強度、降水量が増加しており、アジアではインフラ、生計、居住に対する洪水リスクが高まることが指摘されている。実際に、2011年にはタイやカンボジアで大規模洪水(たとえば、小森ほか2012; 南雲・久保2013)が

発生し、2013年にはフィリピンで台風30号(国際名Haiyan, フィリピン名Yolanda)の直撃と高潮による多数の死者がでるなど(たとえば、Tajima et al. 2014; 呉ほか2014)、近年大きな被害が度々発生している。

洪水被害の発生は気象条件が誘因となるが、素因として低地の地形や河川の挙動といった自然的要素と、土地利用や家屋形態といった人文的要素の双方が関係する。また、地震災害や火山噴火災害に比べ、洪水の場合は降雨から氾濫が発生し、実際に被害が起こるまでにある程度の時間的猶予がある場合が多い。そのため、対象地の自然・人文条件を把握し、相対的に危険性の高い地域を抽出した上で、時系列の対応計画を事前に構築しておくことが被害軽減に役立つ。これには、現地調査や地理空間情報を用いた地域の現状理解、洪水氾濫解析による浸水域や浸水深の定量的把握

図1 調査対象地域位置図

Fig. 1 Location map of the study area

に加え、その結果を解りやすく地図上に表現し、関係者間で事前に共有しておくことが有効である。

日本では2012年3月に新たに閣議決定された地理空間情報活用推進基本計画の中で、地域防災力向上や災害時の援護対応、災害予測・災害監視の高度化など、持続可能な国土づくりのために地理空間情報を活用していくことが明記された。実際に、多くの自治体が地理空間情報やGISを活用してハザードマップを作成・公開しているほか、地理院地図や浸水ナビといったGISポータルサイトの整備（たとえば、登坂ほか2014; 廣瀬ほか2015）なども進められ、誰でも容易に防災に関する情報を得られるようになってきている。日本は防災先進国として、こうした国内の地理空間情報の活用事例を紹介するとともに、その有用性を国際社会に示し、国外の減災にも役立てていくことが求められている。

このような背景のもと、著者らは途上国の洪水常襲地帯に適応できる、コミュニティの洪水災害対応計画作成の手法開発を目的に、フィリピン共和国パンパンガPampanga川下流域（図1）を対象に研究を進めてきた。ルソン島中央平原の大部分を占めるパンパンガ川は太平洋で発生した台風の通過ルート上に位置し、家屋の浸水を伴う洪水が毎年のように発生することから、この流域の洪水被害軽減はフィリピンの防災上重要な課題の一つとなってきた。著者らは、これまでに下流域に位置するブラカンBulacan州カルumpit

図2 パンパンガ川流域の地形分類図 (Nagumo and Sawano 2016をもとに作成)

Fig. 2 Land classification map of the Pampanga River basin (reproduced from Nagumo and Sawano 2016)

Calumpit市をモデルサイトとして、流域の地形分類 (Nagumo and Sawano in press) や、降雨流出氾濫モデル Rainfall-Runoff-Inundation model (RRI model) Sayama et al. 2012) を用いた洪水氾濫解析および農業被害評価 (Shrestha et al. 2015a; 2015b) を行い、洪水災害対応計画案の作成を進めてきた (大原ほか2015a; 2015b)。この研究の過程で、著者らは地理空間情報を用いた洪水氾濫解析およびGISマッピングを実施し、現地で開催したワークショップを通じて繰り返し意見交換を行いながら、災害対応計画作成に資する解りやすい浸水マップを作成した。本稿では、その成果および課題について報告したい。

II 調査対象地域の概要

1. パンパンガ川の洪水と災害対応

図2に示したように、パンパンガ川は流域面積

図3 カルンピット市域

Fig. 3 Area of Calumpit Municipality

10,500 km², 流長265 kmをもち、流域北部および東部の山地・丘陵、西部の火山（ピナツボPinatubo山・アラヤットArayat山）に囲まれた盆地状の平野を南西～南に流下した後、マニラ湾へと注いでいる。平野の幅が最も狭くなるアラヤット山付近には、遊水地として機能するサンアントニオSan Antonio湿地、カンダバCandaba湿地が形成され、最下流部にはデルタ地帯が広がっている。アラヤット山より下流の河床勾配は1/10,000以下と非常に緩く（国際協力機構2011）、右岸のみが築堤されている。そのため、この付近のパンパンガ川左岸では洪水が頻繁に発生する。

モデルサイトであるカルンピット市は洪水常襲地帯に位置し、面積56.25 km², 人口101,068人（2010年）、29のバラングайBarangay²⁾ から構成される。パンパンガ川のデルタ上に広がる市域の標高は10 m以下で、市街は河道沿いに帯状に展開する。また、アンガットAngat川、パンパンガ川と、そのショートカット河道であるスリパンSulipan放水路、それらを結ぶバグバグBagbag川が市内を流下するが、市内には無堤区間も多く、住民はつねに洪水に脅かされてきた（図3）。そのため、バラングайポブラシオンPoblacion、バルンガオBalungao、スコールSucol、コラゾンCorazonに広がる中心市街地は、ポケットダイクPocket Dikeと呼ばれる堤防に囲まれた輪中となっている。近年では、2011年9月に流域を横断した台風17号（国際名Nesat、フィリピン名Pedring）によって大洪水が発生し、バルンガオに位置する市庁舎Municipal hallはおよそ1.2 m浸水した。

フィリピンでは、マニラ首都圏に甚大な被害をもた

らした2009年の台風16号（国際名Ketsana、フィリピン名Ondoy）を契機に、2010年に国の防災の法律である災害リスク軽減・管理法Republic Act No. 10121: Disaster Risk Reduction and Management Actが制定された。これには、自治体や学校を含むすべての災害関連機関に災害リスク管理事務所Disaster Risk Reduction Management Office（DRRMO）を置くことが明記され、国家災害リスク軽減管理評議会National Disaster Risk Reduction and Management Council（NDRRMC）を中心に、広域行政地区、州、市、バラングайに、それぞれ災害リスク軽減評議会Disaster Risk Reduction Council（DRRMC）が階層的に設置されることとなった。また、それらすべてのレベルにおいて、アメリカ式の統一された危機対応システムIncident Command System（ICS）が導入・実用化され、災害時には各部署が連携して災害対応を行っている（Ohara and Sawano 2015）。

同法に基づき、2012年には国家災害リスク管理計画National Disaster Risk Reduction and Management Plan 2011–2018が策定され、（1）災害予防と軽減、（2）災害に対する備え、（3）災害対応、（4）災害復旧と復興の4項目に関するガイドラインとともに、市民防衛局Office of Civil Defense（OCD）を中心に災害リスク軽減に向けた活動を促進していくことが示された（NDRRMC 2012）。カルンピット市でも、市とバラングайにそれぞれ災害リスク軽減評議会が設置され、市災害リスク管理事務所Municipal Disaster Risk Reduction Management Office（MDRRMO）が市内における防災の中心的役割を果たしている。

カルンピット市では上述の国家災害リスク管理計画に基づき、2014年に災害対応計画Calumpit Municipal Disaster Risk Reduction and Management Contingency Planを策定した。この中で、2011年9月の台風17号による洪水を想定したシナリオを設定し、それに合わせた部署ごとの災害対応を示している（Calumpit Municipality 2014）。また、市には図4に示した電柱を利用した独自のコミュニティ警報システムColors of Safety Markersがある。これは、電柱を地表から2 ftごと³⁾に着色（下から黄、赤、緑）して目盛り代わりとし、洪水時に浸水深を確認して避難を促すためのもので、市内に少なくとも約190本が存在する（図3）。各電柱

図4 カルンピット市の電柱を利用した警報システム (Colors of Safety Markers)

Fig. 4 Alert system of the “Colors of Safety Markers” using electric poles in Calumpit Municipality

図5 カルンピット市の災害対応計画に示されたハザードマップ

Fig. 5 Hazard map shown in the contingency plan of Calumpit Municipality

には洪水時に市災害リスク軽減管理事務所へ浸水状況を報告する責任者が決められており、住民は浸水が大型トラックの通れなくなる高さ（赤：4 ft）に達する前に安全な場所に避難することが求められている。

2. マッピングの課題

このように、フィリピンでは災害対応の仕組みが整備されてきており、洪水常襲地帯であるカルンピット市では独自の警報システムや災害対応計画をもつなど、防災意識は比較的高い。その一方、市の災害対応計画でハザードマップ⁴⁾として示された地図（図5）

図6 バランガイのハザードマップの例（バランガイサンタルチア）

Fig. 6 An example of barangay hazard map (Barangay Sta. Lucia)

図7 鉱山地球科学局で作成された洪水マップ（ブルカン州）

Fig. 7 Flooding map prepared by MGB (Bulacan Province)

は、浸水のタイミングごとにバランガイをグループ分けした図で、浸水域や浸水深は想定されていない。また、多くのバランガイが独自に作成・掲示しているハザードマップ（図6）には教会や学校などの主要施設や道路、浸水域が示されているものの、地図の縮尺や精度、どのような洪水を想定して作成されたものなのかは不明で、この地図を利用して地域の浸水危険性を把握するのは難しい。

また、環境天然資源省 Department of Environment and Natural Resources (DENR) 鉱山地球科学局 Mines and Geoscience Bureau (MGB) ではブルカン州の洪水マップを作成し（図7）、予想される浸水域を、地形的に低位で豪雨時に1 m以上の浸水が数時間続く”High Susceptibility”（赤色）と、豪雨が長引いた際に1 m未満の浸水がある”Low to Moderate Susceptibility”

(紫色)の二つに区分している。しかし、このマップは縮尺1:400,000と小縮尺で、バランガイレベルの洪水リスクを把握するには適していない。

さらに、市では部署別の対応計画をすでに作成しているが(Calumpit Municipality 2014)、洪水氾濫解析は行っておらず、浸水深の変化や時系列の概念を含んだ対応計画にはなっていない。

ところで、2012年にアメリカ東部を襲ったハリケーンサンディを契機に、日本では大規模洪水の発生による浸水被害を最小化するため、いつ、だれが、何をするのか、を時系列で整理した事前対応計画(タイムライン)をあらかじめ策定し、災害時に各部署が連携しながらその計画を実践していくことが推進されるようになった(たとえば、国土交通省2014)。この事前対応計画の先進的な事例の一つとして、「荒川下流タイムライン」がある。この計画では、荒川下流に位置する北区、足立区、板橋区を対象に荒川堤防の破堤を想定した洪水氾濫解析を行い、洪水が到達するまでのリードタイムを示している。これに基づき、交通機関の運行停止や広域避難の呼びかけなど、洪水発生前から関係する部署がいつ、どのような対応をすべきか、時間ごとの対応計画が示されている(荒川下流タイムライン検討会2016)。また、「佐賀平野大規模浸水危機管理計画」(佐賀平野大規模浸水危機管理対策検討会2011)では、佐賀平野の主要河川の破堤を想定した洪水氾濫解析を利用し、時系列の浸水域・浸水深の変化を示した上で発生が予想される事象や各機関が実施すべき施策を整理しており、現在はタイムラインの策定も進められている。

カルumpit市では大規模洪水を想定した災害対応計画(Calumpit Municipality 2014)がすでに作成され、独自の警報システム(Colors of Safety Markers)をもつなど、洪水対策を積極的に進めている。これに加え、上述したような(1)浸水危険性が正確に把握できる地図、(2)浸水深の時間変化がわかる浸水チャート、を作成し、住民や市の担当者らと議論を重ねながら(3)時系列の概念を含んだ対応計画を作成・提案していくことにより、将来の一層の被害軽減につながると著者らは考えた。

III 活用できる地理空間情報

フィリピンの地理空間情報の作成・管理を担うのは、環境天然資源省に属する国家地理資源情報庁National Mapping and Resource Information Authority (NAMRIA)である。同庁のウェブサイト⁵⁾からは縮尺1:250,000, 1:50,000, 1:10,000の地形図が閲覧・ダウンロードできる。市レベルの概況把握に役立つ縮尺1:50,000の地形図は、旧米国陸軍地図局作成の地形図に1950年前後の空中写真情報を加えた711シリーズ、さらに1970年代後半の空中写真情報を加えた701シリーズ、1980年末から開始されたNTMSシリーズが掲載されている。このうち、パンパンガ川下流域はJICAプロジェクトの一環として2006年撮影の空中写真および2003～2006年撮影のSPOT-5画像を基に作成されたNTMSシリーズの地形図(国際協力機構2008)が掲載されている。このほか、テキサス大学図書館デジタルアーカイブでは旧米国陸軍地図局作成の702シリーズの一部が閲覧できる。なお、フィリピン国内に16カ所ある国家地理資源情報庁の地図販売事務所Map Sales Officeでは、紙媒体の地図や出版物を外国人でも購入可能である。

そのほか、容易に入手できる数値標高モデルDEMとして、SRTM DEM (90 mメッシュ)やASTER GDEM (30 mメッシュ)、ALOS World 3D DEM (30 m, 5 mメッシュ)などの全球モデルがある。これに加え、国家地理資源情報庁では2013年に航空機搭載型合成開口レーダー Airborne Interferometric Synthetic Aperture RadarによるIfSAR DEM (5 mメッシュ)をフィリピン全土で取得している。また、フィリピン大学を主体としたDREAM Program (Disaster Risk and Exposure Assessment for Mitigation Program)では、2012～2014年に国内の18の主要流域において、航空機搭載型LiDAR (Airbone Light Detection And Ranging)を用いたDEM (1 mメッシュ)を取得しており、Project NOAH (Nationwide Operational Assessment of Hazards Project)⁶⁾による流域レベルの洪水ハザードマップ作成などに活用されている。

このうち著者らは、SRTMで取得されたDEMのエラー値を除き、水文解析用に処理されたHydroSHEDS DEM (450 mメッシュ)および、国家地理資源情報庁

より提供を受けたパンパンガ川流域のIfSAR DEM (5 mメッシュ) を洪水氾濫解析に用いることにした。

IV 手法

1. 研究の流れ

著者らは、インターネット上で入手できる1:50,000地形図および衛星写真 (Google Earth, ALOS PRISM画像) を利用してカルンピット市周辺の微地形や河道状況等の自然条件を把握したあと、現地を訪問して洪水関係資料の収集や住民・市の担当者らへのインタビュー調査を行い (2014年7月, 2015年1~2月), 重要施設の分布, 過去の洪水状況や住民の対応, 住み方等を把握した。また, 2011年9月洪水時の雨量観測データを用いた流域の洪水氾濫解析と再現期間別 (10年, 30年, 100年) の氾濫解析も実施した。解析結果はArcGIS ver. 10.2を用いてリソースマップ, 再現期間別の浸水想定マップ (10年, 30年, 100年), 浸水確率マップとして表現し, 浸水深の時間変化を把握できる時系列の浸水チャートを作成して, 洪水リスクの把握と部署別の災害対応計画案の作成に活用した。また, 現地では市災害リスク軽減事務所の防災担当者や地域住民らが出席するワークショップを開催し, 作成したマップや部署別災害対応について繰り返し意見交換を行った上で, 最終的な洪水災害対応計画案の作成を進めた (図8)。

2. 降雨流出氾濫モデルによる洪水氾濫解析

洪水氾濫解析に使用した降雨流出氾濫モデル (RRI model: Sayama et al. 2012) は, 堤防やダムなど人工構造物の影響や流域内での水のやり取りをモデル化し, 山地・平野を問わずに降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で予測することができる。また, さまざまな気候条件下の洪水予測が可能で, 降雨分布, 標高, 土地利用, 河道断面を入力すると, 設定時間ごとの河川流量, 河川水位, 浸水深が出力される。

そこで, 本研究ではこのモデルを利用し, まずフィリピン気象地球物理宇宙庁Philippine Atmospheric Geophysical and Astronomical Services Administration (PAGASA) がパンパンガ川流域の17地点で観測した雨量データとHydroSHEDS DEM (450 mメッシュ) を用いて, 台風17号による2011年9月の洪水の氾濫解析を行い, 洪水がいつどこにどれくらいの水深で達したのかを再現した。解析された河川流量は実際の流量と比較してモデルのキャリブレーションを行ったあと, 市内で計測された浸水深を用いてモデルのパラメーターを調整してさらに解析精度を向上させた (Shrestha et al. 2015a; 2015b)。しかし, 樹木や建物がDEMの精度に大きく影響している場所があったこと, バランガイや家屋単位での避難を検討するにはメッシュサイズが大きすぎるとの指摘が現地で挙げたこと, その後より解像度の良いIfSAR DEMを入手できたことから, これを用いて再度洪水氾濫解析を行い, その結果をマッピングに用いることとした (図9)。そして, 2011年9月の雨量観測データを用いて頻度解析を行い, 再現期間10年, 30年, 100年の48時間最大雨量を求めた。この頻度解析の結果, 2011年9月の洪水は再現期間およそ30年と推計されたことから, 10年 (日常的な洪水), 100年 (最大規模の洪水) に加え, 30年 (2011年9月洪水に相当) の三つの再現期間による氾濫解析を実施することにした。

降雨流出氾濫モデルによる洪水氾濫解析の結果はメッシュごとの最大浸水深が出力される。5 mメッシュを用いればより詳細な結果が得られる一方, 計算には時間を要する。そこで流域全体の計算は5 mメッシュのIfSAR DEMをアップスケールした200 mメッシュで行い, 得られた浸水深に200 mメッシュの標高値を加えて浸水位を求めたあと, 5 mメッシュの標高

図8 本研究の流れ

Fig. 8 Work flow of this research

図9 降雨流出氾濫モデルで計算した台風17号による2011年9月洪水の最大浸水深 (IfSAR, DEM, 5 m メッシュ)

Fig. 9 Maximum inundation depth by Typhoon Pedring in September, 2011, calculated by RRI model (IfSAR DEM, mesh size: 5 m)

値を差し引くことでカルンピット市周辺における5 m メッシュの浸水深を計算した。そして、計算上、浸水がなくなる18日目までの12時間ごとの浸水深を示した時系列ファイルと、各メッシュにおける計算期間中の最大浸水深を示したファイルを再現期間ごとにGIS上で処理し、得られた浸水深の変化を地図上に表現した。

V 氾濫解析結果のGISマッピング

1. GISを用いた地図の作成

ASCII形式の氾濫解析結果（再現された2011年9月の洪水、再現期間10年、30年、100年の洪水）の各ファイル（12時間ごとの時系列ファイル、最大浸水深を示したファイル）をGIS上で変換し、マッピング用のベクターデータを作成した。これに道路や教会などの主要施設などのデータを重ね、市の担当者や住民が身近な浸水危険性を正確に把握できるよう、最終的に図10に示した3種類の地図を作成した。これらはカルンピット市に29あるすべてのバランガイごとに作成し、市内の様子を俯瞰できるよう、それらを統合し

て市全体を示した地図も準備した。なお、市内のほとんどの住民は英語でのコミュニケーションが可能であるが、日常会話以外の専門的な英語は理解できない場合もあることから、これらの地図の表記には現地の言語であるタガログ語を用いた。また、地図の判読に不慣れた住民も多いことから、背景には衛星写真を用いた。

図10aはESRI社による衛星画像⁷⁾を背景に、主要道路、河川堤防、バランガイホール、バランガイ境界、そして各ブロック²⁾に少なくとも1本はあるColors of Safety Markersや避難所となり得る重要施設の分布を重ねたリソースマップである。バランガイの中心地区と河川との位置関係が理解しやすいよう縮尺や表示範囲を調整し、バランガイを越えた避難も想定して、隣接バランガイの施設も合わせて表示することとした。また、マッピングにあたり、市災害リスク管理事務所や各バランガイでは重要施設やバランガイ境界等のGISデータを所有していなかったため、現地で収集した紙ベースの資料やハンディGPSを用いた踏査によって著者らが新たにGISデータを作成してマッピングに利用した。この地図により、住民は居住するブロックと河川、緊急時に避難できる重要施設の正しい位置関係を把握できる。

図10bは再現期間30年の最大浸水深を表した浸水想定マップで、2007年2月撮影のALOS PRISM画像に各バランガイの計算結果を重ね合わせて表現した。現地での意見交換時に再現期間の概念を理解することが難しい住民もいたこと、住民や市の担当者から再現期間の異なる浸水想定マップが複数あると混乱する、との意見があったことから、住民の間で最も印象に残っている2011年9月の洪水とほぼ同等の再現期間30年の計算結果を採用して、浸水想定マップを作成した。浸水深はColors of Safety Markersの色に合わせ、2 ftごとに黄・赤・緑にメッシュを塗り分けて表現し、「2011年9月の洪水とほぼ同じ規模の洪水」との説明を付記するとともに、降雨状況によってこれ以上・以下の洪水が起こり得ることを住民に説明した。

また、図10cは再現期間10年、30年、100年の洪水によって2 ft以上浸水する地域をそれぞれ塗り分けた浸水確率マップである。著者らがこれまでに実施した家屋調査により、カルンピット市ではコンクリート造

図10 作成した3種類の地図。上からa: リソースマップ, b: 浸水想定マップ, c: 浸水確率マップ (バラングアイサンタルチア)

Fig. 10 Prepared three types of map. From top to bottom; a: resource map, b: flood inundation map, and c: inundation probability map (Barangay Sta. Lucia)

り1階建て家屋が多く、その平均床高は0.54 m、2階建て家屋の場合には0.17 mであることが明らかになっている (大原ほか2015a)。このため、Colors of Safety Markersの黄色 (2 ft) の高さが1階部分の床上浸水を示す目安となることから2 ftを閾値とし (図11)、家屋の浸水や避難のタイミングと関連づけて表示することにした。

図11 家屋調査によるカルンピット市の平均家屋高さ (大原ほか2015a)

Fig. 11 Average house height of Calumpit Municipality by household survey (Ohara et al. 2015a)

この地図では、2 ft以上の浸水が再現期間10年で起こる地域を“madalas” (頻繁に起こる)、30年で起こる地域を“paminsan” (時々起こる)、100年で起こる地域を“madalan” (まれに起こる) として浸水確率を表現し、再現期間の概念が理解できなくても洪水規模によって浸水域・浸水深が異なることをイメージできるよう平易な説明を加えた。また、いずれの再現期間においても2 ft以下の洪水しか予想されない地域を塗り分け、相対的に安全な場所を簡単に把握できるようにした。

2. 浸水チャートの作成

図10に示した地図に加え、再現期間ごとに計算された時系列浸水深を利用してバラングアイの代表地点における浸水深の変化を示す浸水チャート (図12) を作成した。本研究ではカルンピット市内の全29バラングアイのうち、パイロット地区として2バラングアイ (ブルサン、サンタルチア) をこのチャートの作成対象とした。

図12の上段は横軸を時間、縦軸を場所に設定した表で、バラングアイ運営の拠点であるバラングアイホールのほか、Colors of Safety Markersの位置を各ブロックの代表地点とし、12時間ごとの浸水深の変化を、数字とColors of Safety Markersに合わせた2 ftごとの色 (黄・赤・緑) で塗り分けて示した。これにより、バラングアイホールとそれぞれのブロックにおける再現期間別の浸水の様子と、それがどのくらい継続するのかを簡単に把握することができる。また、各再現期間は Ordinary Flood (再現期間10年)、High Flood (再現期間30年)、Extreme Flood (再現期間100年)、といったように解りやすく示し、2011年9月の洪水を再現した

図12 作成した浸水チャート（バランガイサントルチア）

Fig. 12 Prepared inundation chart (Barangay Sta. Lucia)

氾濫解析結果も同時に示した。一方、下段にはリソースマップと再現期間10年、30年、100年と2011年9月の洪水を再現した浸水想定マップおよび浸水確率マップを並べて示した。さらにその下には、カルンピット市の家屋基本データ（床高、天井高等）の模式図（図11）を配置した。これらを1枚の用紙に収まるように作成したことで、バランガイ内の浸水危険箇所を一目で理解できるようになった。また、洪水氾濫解析に基づく定量的な浸水深の変化を住民のColors of Safety Markersに基づいた洪水感覚に結びつけ、家屋の浸水と合わせて考えることができるようになった。

3. 住民の反応と作成資料の活用

図10および図12に示した浸水想定マップや浸水チャートは、著者らが現地で開催した市のワーク

図13 市のワークショップにおける地図の配布（2016年2月）

Fig. 13 Delivering prepared maps at workshop of municipal level (February 2016)

ショップ（2015年2月）やパイロット地区（バランガイブルサン、バランガイサントルチア）で実施したバランガイのワークショップ（2015年7月、2016年1月）を通じ、洪水氾濫解析の妥当性やマップの表現について議論を重ねながら修正を続けて完成したものである。同時に、浸水危険性を把握できるこうした資料の作成意義や作成手順、その読み解き方を繰り返し説明してきた。住民からは、Colors of Safety Markersの色と合わせた3色で示してあるため、バランガイで作成していた既存のハザードマップよりもわかりやすいと好評を得ており、バランガイホールにぜひ掲示したいとの意見があった。そこで、作成した3種類の地図はA1サイズにそれぞれ印刷し、2016年2月に市で開催した研究プロジェクトの最終ワークショップにて、市災害リスク管理事務所および市内のすべてのバランガイに配布し、地域の防災に役立ててもらおうとした（図13）。

すべてのバランガイの住民が参加したこのワークショップのアンケート調査では、著者らの洪水氾濫解析結果が自身の洪水経験と整合的である、作成した地図がバランガイの洪水被害軽減に役立つ、活用していきたい、との意見が多数を占めており、著者らの取組みは一定の成果を上げたといえる（図14）。また、これまで実施してきたバランガイのワークショップでは、作成した地図や浸水チャートをもとに各再現期間の洪水で予想される地域の課題や、洪水の前後でとるべき対策についてのディスカッションも行い（図15）、市の担当者や住民には、洪水氾濫解析によって時系列の浸水変化を把握し、対応の事前検討を進める

図 14 著者らが作成した地図に関するアンケート結果 (2016年2月, n=37)

Fig. 14 Result of questionnaire survey about maps prepared by authors (February 2016, n=37)

図 15 バラングイのワークショップ (ブルサン) でのディスカッション (2016年1月)

Fig. 15 Workshop discussion at Barangay Bulusan (January 2016)

重要性を理解してもらうことができた。その結果、浸水チャートを作成した二つのバラングイ (サンタルチア、ブルサン) では、すでに作成されていたバラングイの災害対応計画 Barangay Disaster Risk Reduction and Management Plan に、著者らが作成した地図と浸水チャートが新たに追加されることになった。

一方、著者らは洪水氾濫解析で明らかになった浸水の時系列変化に合わせ、災害対策本部や医療対応といった19部門における市の災害対応計画案を作成し、地図や浸水チャートと共に災害対応シナリオとして市に提案もしている (大原ほか2015b)。また、カルンピット市での活動を例に、洪水氾濫シミュレーション

から現地への普及までを含む一連の手法を他の洪水常襲地帯へも適応すべく、手法のマニュアル化を進めているところである。

VI 課題

地理空間情報を用いた洪水氾濫解析で時系列の浸水深分布を把握し、GISマッピングによって洪水常襲地帯の浸水危険性を可視化することは、起こり得る洪水のイメージを自治体の担当者や住民が事前に共有するとともに、実際に役立つ災害対応計画を作成していく上でも有用である。以下には、著者らが用いてきた手法をアジアの洪水常襲地帯へ水平展開する上で予想される課題を述べる。

1. 地理空間データの整備と利用

衛星データに基づいて全球レベルで整備されているDEMは無償で容易に入手できるものも多く、その利用は地理空間情報の乏しい地域の地形情報を広く得るには有効である。一方で、このような全球モデルは一般にメッシュサイズが粗く、またデータの正確さには幅がある。そのため、これを用いてコミュニティレベルでの住民避難の動機づけや、災害対応計画策定の根拠となる水準の洪水氾濫解析を行うには慎重を要する。著者らも当初はHydroSHEDS DEMを用いて、その精度や解析時間を考慮しながら洪水氾濫解析を行ってきた。しかし、家屋やColors of Safety Markersに対応した精度の浸水深は得られず、住民からもより詳細なメッシュサイズでの検討が必要との意見があり、最終的にIfSARによるDEMを用いて再度解析を行うこととなった。その結果、図16に示したように、バラングイレベルの意思決定に役立つ精度の解析結果を得ることができた。このように、地域レベルでの洪水氾濫解析を進めるには、できるだけ高解像度のDEMを入手する必要がある。

また、一般に洪水氾濫解析には便宜的に区切られたメッシュの標高データを使用し、一つのメッシュに含まれるエリアの標高は一律とみなして浸水深が計算される。そのため、メッシュサイズによっては隣接地の影響を強く受けてしまい、対象とする場所の浸水を正しく評価できない場合がある。この点に注意を払い、

図 16 SRTM DEMを基にしたHydroSHEDS DEM（上：450 mメッシュ）とIfSAR DEM（下：5 mメッシュ）による洪水氾濫解析結果の比較（2011年9月洪水）

Fig. 16 Comparison of flood simulation results using HydroSHEDS DEM based on SRTM DEM (top; mesh size: 450 m) and IfSAR DEM (bottom; mesh size: 5 m) (September 2011 flood case)

住民らにも地図の読み解き方を十分に説明しておく必要がある。

一方、フィリピンの地理空間情報を管轄しているのは前述のように国家地理資源情報庁であり、地形図や空中写真といった基本的な地理空間情報は入手可能である。しかし、地理空間情報は国家地理資源情報庁を中心とした体制で作成されるのではなく、公共事業道路省Department of Public Works and Highways (DPWH) や農業省 Department of Agriculture (DA) などの他の省庁でも独自にGISやデータベースが構築・運用されている場合が多く、フィリピン国内の地理空間情報は分散しているのが現状である（国際協力機構2008）。そのため、データの入手や、有無の把握でさえ難しい場合がある。本研究でも重要施設やバラングイ境界、各ブロックの代表点となりうるColors of

Safetyの位置など、データの有無が十分に把握できなかったものが多く、洪水氾濫解析結果に重ね合わせたのは著者らが整備したオリジナルのものが多い。このように、アジア諸国では地理空間情報の入手は日本ほど容易ではなく、自ら新規に作成しなければならない場合がある点に留意する必要がある。

2. 浸水深データの蓄積

洪水氾濫解析では実際の浸水深を用いたモデルのキャリブレーションが必須である。著者らもカルンピット市の災害対応計画（Calumpit Municipality 2014）に記載された2011年9月の洪水の実測値を用いてキャリブレーションを行い、その解析精度を確認している。ところが、市で把握しているのは各バラングイから報告された最大浸水深のみで、バラングイのどこでいつ計測されたものなのかは記録されていない。また、市内各所にあるColors of Safety Markersはおおよそその浸水深を把握して避難を促すためのもので、その位置情報とともに浸水深を定量的に記録することは行われてこなかった。同じバラングイであっても浸水深は地形の凹凸によって当然変化するため、位置が特定できる地物を目印に計測された浸水深データの収集や、それをアーカイブ化していく仕組みが地域の洪水特性の把握や洪水氾濫解析の精度向上に役立つ。カルンピット市の場合、確実に場所を特定できるバラングイホールやColors of Safety Markersを利用して洪水ごとに浸水深を記録・蓄積していくことが考えられる。

3. GISによるデータ処理と体制

降雨流出氾濫モデルによる解析結果のうち、本研究で用いたのは12時間ごとの浸水深を示した時系列ファイルと各メッシュにおける計算期間中（18日間）の最大浸水深を示したファイルである。このうち、時系列ファイルは一つの再現期間に対し36あり、GISを用いたファイルの変換作業や指定箇所での浸水深の読み取り作業をそれぞれの計算結果（2011年9月の洪水、再現期間10年、30年、100年の洪水）で行い、同時に29バラングイ分のマッピングを手作業で行うには相当の時間と労力を要した。

一般にコンピューター上でのマッピング作業はGISを用いた作業が前提となっている。しかし、特に途上

国ではGISを使用できる環境にない自治体も多く、誰しもが地理空間情報に関する知識や技術を有する訳ではない。このような状況で地理空間情報や洪水氾濫解析結果を活用するには、氾濫解析結果から浸水危険性を示す地図や浸水深チャートを誰でも効率よく作成・出力できるソフトウェアや、さまざまな地理空間情報と重ね合わせてリスクを把握できるウェブGISシステムの導入などの工夫が必要であろう。同時に、洪水氾濫解析から計画策定、コミュニティへの普及までを最終的には支援なしに進めていけるよう、国や自治体、各防災関連機関との間での役割分担や技術者の能力開発について検討していくことも課題である。

4. 洪水氾濫解析結果の解釈

これまでみてきたように、洪水氾濫解析は降水量や洪水規模等、ある一定の前提条件を与えて計算することで具体的な浸水深を算出できるため、洪水の定量的な把握や再現期間ごとの評価には適している。しかし、洪水氾濫解析はさまざまな条件下で発生する洪水を必ずしも正確に予測できるわけではなく、浸水の恐れがないという結果が出た場所が絶対に安全というわけではない。また、解析結果はメッシュ単位で出力されるが、機械的に区切られたメッシュ境界は地域の浸水特性を把握する上で大きな意味をもたない場合が多く、解析結果が何を示しているのか正しく理解しなければ浸水危険性を過小評価してしまう可能性もある。

この問題には、地理学が得意とするように地形発達を考えを念頭に土地の履歴を示し、なぜその場所が浸水するのかを洪水氾濫解析結果と合わせて論理的に説明していくことが役立つ。同時に微地形を読み解き、同じメッシュ内でも浸水深が異なる可能性を説明していくことも重要である。また、洪水氾濫結果を誰にでも理解しやすいよう、正しく地図上に示していくことや、それを読み解く技術を住民や自治体担当者が身につけられるよう、ワークショップなどを通じて継続的に支援していくことが重要である。

VII おわりに

本研究では、フィリピンの洪水常襲地帯であるパンガ川下流域のカルンピット市をモデルサイトと

し、地理空間情報を用いた洪水氾濫解析とGISマッピングを行い、住民にもわかりやすく表現した再現期間ごとの浸水想定マップや浸水確率マップ、浸水深の変化を示した浸水チャートを作成した。これらはワークショップを通じて市や住民と共有し地域の課題把握に活用したほか、災害対応シナリオの作成にも役立てた。

大規模洪水発生危険性がある洪水常襲地帯では、洪水発生時の迅速な対応と速やかな復旧のために、本稿で実施したような事前検討を十分にしておく必要がある。そのためには、該当地域の高解像度DEMをはじめとする地理空間情報や降水量、実測された浸水深を収集して洪水氾濫解析を行い、住民の実感にあった浸水を再現してマッピングに活用していくことが必要である。また、洪水の発生は平野の発達と密接に関係していることから、洪水氾濫解析と合わせて地形の成り立ちへの理解を進め、住民が洪水時に自ら考え、行動できる知識を身につけられるよう支援していくことが重要である。

謝 辞

本稿は、国立研究開発法人土木研究所プロジェクト研究「水災害からの復興までを考慮したリスク軽減手法に関する研究」の成果の一部である。研究を進めるに際し、カルンピット市およびフィリピン気象地球物理宇宙庁の関係諸氏には大変お世話になった。また、洪水氾濫解析に使用したIfSAR DEMは国家地理資源情報庁に提供していただいた。深く感謝申し上げます。

注

- 1) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省により、「気候変動2014統合報告書政策決定者向け要約」として翻訳・公開されているhttp://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf。（最終閲覧日：2016年5月16日）
- 2) フィリピンの行政区は、広域行政地区Region、州Province、市City and Municipality、バランガイと階層的に区分され、バランガイが予算をもつ最少の行政単位である。各バランガイはいくつかのプロックPurokから構成される。

- 3) フィリピンの長さの単位は「ft (フィート)」が使用されており、1 ft は 0.3048 m に換算される。
- 4) 国土交通省 (2013) では洪水ハザードマップの条件として、浸水想定区域が記載されていること、避難情報が記載されていること、市町村長が作成主体となっていること、を挙げているが、現地ではハザードマップと呼ぶ地図はこれとは異なる。
- 5) 国家地理資源情報庁のウェブサイト
<http://www.namria.gov.ph/> (最終閲覧日: 2016年5月16日)
- 6) Project NOAHのウェブサイト
<http://blog.noah.dost.gov.ph/> (最終閲覧日: 2016年5月16日)
- 7) 衛星写真は、ESRI社によるWorld Imageryレイヤーを用いた。

文 献

- 荒川下流タイムライン検討会 2016. 荒川下流タイムライン (試行案).
- 大原美保・南雲直子・Shrestha, B. B.・澤野久弥 2015a. 地域データの乏しいアジアの洪水常襲地帯における簡便な洪水リスク評価手法に関する研究——フィリピン共和国パンパンガ川流域を対象として. 地域安全学会論文集 27: 225–235.
- 大原美保・Shrestha, B. B.・南雲直子・澤野久弥 2015b. 洪水常襲地帯における洪水災害対応シナリオ作成手法の提案——フィリピン共和国パンパンガ川流域での取り組み. 土木学会年次学術講演会講演概要集 70: II-239, 477–478.
- 呉 修一・Suppasri, A.・Yi, C. J.・Mas, E.・Bricker, J.D.・越村俊一・真野 明 2014. 台風ハイエンに伴うレイテ島沿岸部の人的被害状況. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 70(2): I_1446–I_1450.
- 国際協力機構 2008. フィリピン国国土総合開発計画促進に関する地図製作支援行政整備調査. 最終成果品第1編要約.
- 国際協力機構 2011. フィリピン共和国パンパンガ川流域統合的水資源管理計画調査最終報告書. 第1巻要約.
- 国土交通省 2013. 洪水ハザードマップ作成の手引き (改訂版). 国土保全局河川環境課水防企画室.
- 国土交通省 2014. 大規模災害に備えたタイムライン (防災行動計画) の策定に向けて. <http://www.mlit.go.jp/river/bousai/bousai-gensai/bousai-gensai/pdf/bousai-gensai-timeline.pdf> (最終閲覧日: 2016年5月16日)
- 小森大輔・木口雅司・中村晋一郎 2012. 2011年タイ国チャオプラヤ川大洪水の実態および課題と対策. 河川 68(1): 18–25.
- 佐賀平野大規模浸水危機管理対策検討会 2011. 佐賀平野大規模浸水危機管理計画.
- 登坂 昇・嶋田勝也・宇根 寛 2014. 地域防災のための地理空間情報活用の取り組み——避難所等情報について. 国土地理院時報 126: 87–91.
- 南雲直子・久保純子 2013. カンボジア, メコン川下流平野における2011年洪水と河川微地形. E-journal GEO 8: 141–152.
- 廣瀬 勝・佐藤壮紀・稲澤容代・山本洋一 2015. 地点別浸水シミュレーション検索システム (浸水ナビ) の開発. 国土地理院時報 127: 123–128.
- Calumpit Municipality 2014. *Calumpit municipal disaster risk reduction and management contingency plan*.
- IPCC 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report: Summary for Policymakers. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf (最終閲覧日: 2016年5月16日)
- Nagumo, N. and Sawano, H. 2016. Land classification and flood characteristics of the Pampanga River Basin, central Luzon, Philippines. *Journal of Geography* in press.
- National Disaster Risk Reduction and Management Council (NDRRMC) 2012. *National disaster risk reduction and management plan* (NDRRMP) 2011–2018.
- Ohara, M. and Sawano, H. 2015. Current issues regarding the Incident Command System in the Philippines. *Journal of Disaster Research* 10: 238–245.
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka S. and Fukami, K. 2012. Rainfall-Runoff-Inundation analysis of Pakistan flood 2010 at the Kabul River Basin, *Hydrological Sciences Journal* 57: 298–312.
- Shrestha, B. B., Okazumi, T., Miyamoto, M. and Sawano, H. 2015a. Flood damage assessment in the Pampanga River basin of the Philippines. *Journal of Flood Risk Management*: doi: 10.1111/jfr3.12174.
- Shrestha, B. B., Sawano, H., Ohara, M. and Nagumo, N. Rice-crops flood damage assessment in the Pampanga River Basin of the Philippines. *Advances in River Engineering, JSCE* 21: 497–502.
- Tajima, Y., Yasuda, T., Pacheco, B. M., Cruz, E. C., Kawasaki, K., Nobuoka, H., Miyamoto, M., Asano, Y., Arikawa, T., Ortigas, N. M., Aquino, R., Mata, W., Valdez, J. and Briones, F. 2014. Initial report of JSCE-PICE joint survey on the storm surge disaster caused by Typhoon Haiyan. *Coastal Engineering Journal* 56: 1450006.

〈著者略歴〉

南雲 直子（なぐも なおこ）

国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）専門研究員，博士（環境学）．
東京大学大学院新領域創成科学研究科特任助教を経て，2014年1月より現職．専門は自然地理学，河川地形．

大原 美保（おおはら みほ）

国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）主任研究員，博士（工学）．
東京大学生産技術研究所准教授を経て，2014年4月より現職．専門は防災計画，防災情報．

Badri Bhakta Shrestha（ばどり ばくた しゅれすた）

国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）主任研究員，博士（工学）．
土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター専門研究員，研究員を経て，2015年4月より現職．専門は
水理・水文学，洪水リスク評価．

澤野 久弥（さわの ひさや）

国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）上席研究員．国土交通省北
陸地方整備局信濃川河川事務所長，インドネシアJICA専門家等を経て，2014年4月より現職．専門は河川管理，
水資源開発．