

5.3 人工衛星を用いた広域洪水氾濫域、被害規模および水理量推定技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
 研究期間：平 23～平 27
 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、工藤俊、郭栄珠

【要旨】

水災害リスクマネジメント国際センター（以下、ICHARM）は、限られた情報しか持たない開発途上国において、広域洪水氾濫及び被害に対して人工衛星観測技術（リモートセンシング）を用いた準リアルタイム洪水観測・予測技術の開発を行っている。本研究では、水害発生後、人工衛星観測による洪水観測・水災害関連情報（氾濫域、氾濫水理量＝水深、流量、氾濫量等）創出から復旧活動支援等への実利用システム構築を目指して基礎的な検討を行った。人工衛星観測による時系列洪水モニタリングに加えて、氾濫水理量の観測技術開発のため、最新の人工衛星データの活用および現地観測も並行することで、氾濫流の実現象・特性を定量的に解明するとともに、氾濫計算の検証等にも活用できた。本研究の年次課題の相互関連性を考慮しつつ、連続的な情報共有・提供を行うことのできるシステム構築のために、過去の大洪水災害を事例に、復旧活動支援等への実利用システムについて統合的枠組みを検討した。
 キーワード：リモートセンシング、広域洪水、復旧活動支援、氾濫水理量、洪水モニタリング

1. はじめに

ICHARM は国内はもとより、アジア諸国等の大規模流域を対象として、短期・長期の災害対応・復旧活動支援に資する情報を提供し、途上国支援に貢献している。本研究では以下に示す人工衛星観測技術（リモートセンシング）を用いた五つの研究課題を平成 23 年度より平成 27 年度まで行った。

- (1) 衛星による洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムの開発（平成 23～25 年度）
- (2) 時間解像度向上のための複数センサーデータ活用手法の検討（平成 23～25 年度）
- (3) 衛星による家屋数把握及び流出家屋位置・戸数推定アルゴリズムの開発（平成 24～26 年度）
- (4) 氾濫水理量の観測技術開発（平成 25～27 年度）
- (5) 復旧活動支援等への実利用システムの検討（平成 26～27 年度）

上記のうち、(1)については、メコン川下流域のカンボジア平原を対象域として、衛星画像による洪水氾濫域の自動抽出と自動抽出アルゴリズムの妥当性について、分光器観測データを用いて比較、検証した。(2)については、複数センサーとして、光学画像に加えて、分光放射計と合成開口レーダ（SAR）を活用し、タイ国チャオプラヤ川の洪水マップを試作した。(3)については、高分解能衛星画像を用いた流出家屋推定アルゴリズムを開発、陸前高田市の流出家屋推定に実験的に適用し、光学衛星画像と合成開口レーダ（SAR）との比較検討を行い、建物フィル

タリングの変換処理を改善して、流出家屋プロキシマップを試作した。(4)については、カンボジア国内のメコン川流域において、河床高縦断現地計測を実施し、洪水氾濫解析に反映することを検討した。(5)については、被害規模の把握、迅速な水防活動、減災体制に対応する復旧活動支援等への実利用システムのフレームワークを提案し、水災害復旧活動支援プロセスの一環として過去の洪水災害（タイ国チャオプラヤ川の 2011 年大洪水）を事例に、災害発生から災害情報提供まで一連のプロセスの適用を試みた。図-1 は、本研究課題(1)～(5)の相互関連性を考慮しつつ、連続的な情報共有・提供が可能な統合水災害情報実利用システムのフレームワークである。

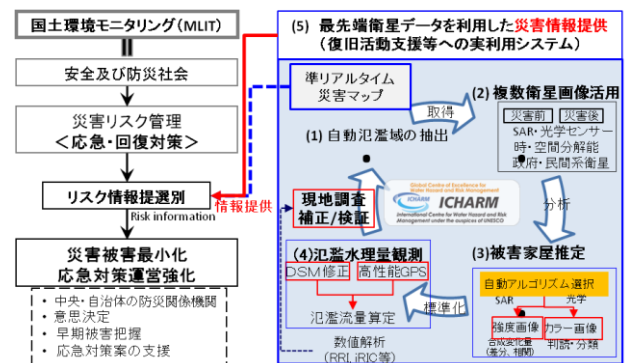


図-1 統合水災害情報実利用システムのフレームワーク

2. 衛星による洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムの開発

5.3 人工衛星を用いた広域洪水氾濫域・被害規模および水理量推定技術の開発

本研究では、多時期の MODIS(中分解能撮像分光放射計: Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer、NASA)/AQUA の MYD09A1 (8 日間合成画像、解像度 500m) 地表反射率(Surface Reflectance)観測データを用いて、2011 年タイ国チャオプラヤ川流域(面積:約 16 万 2,000 平方キロ(利根川の約 10 倍))における大洪水の地表面の氾濫域に関するスペクトル反射率と分解能を考慮して、洪水氾濫域を自動抽出した¹⁾。その際、土地被覆タイプと区別に、地表洪水指数 MLSWI(Modified Land Surface Water Index: $(1-NIR-SWIR)/(1-NIR+SWIR)$)が有効に働き、地表面における氾濫域の自動検出ができた²⁾。MLSWI 指数の閾値を用いて 1 次氾濫域を自動判読した結果、水域(清水、濁水;泥、洪水、湖)とその他(土、雪、雲、植生)の被覆タイプを区別する閾値分類手法より、洪水による氾濫域の抽出精度が高く特定できた。しかしながら、氾濫域にも関わらず市街地や植生などにより水が判読できない場合があった。この問題を解決するため、標高データの比高に基づくアルゴリズムを開発して、氾濫域のピクセルの判読精度の向上を図り、その結果、最大洪水氾濫域を求めることが可能となった。図-2 は、数値標高モデル SRTM DEM を組み合わせることにより氾濫域の自動抽出を改善した 3 次元氾濫域の判読結果である。

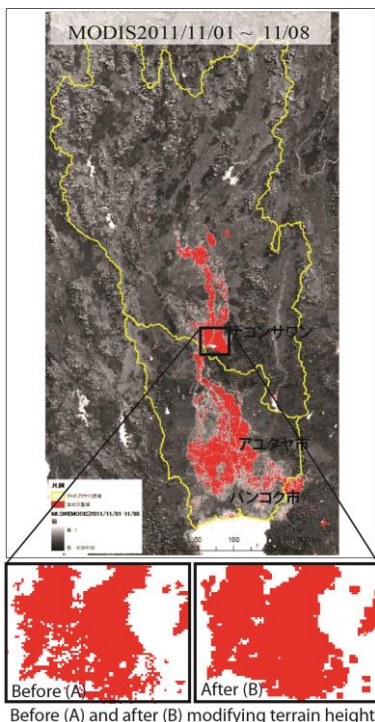


図-2 MODIS 画像から 1 次氾濫域の抽出(A)と標高データによる改善(B)の 2 次氾濫域の自動抽出結果

3. 時間解像度向上のための複数センサーデータ活用手法の検討

本研究では、二つ以上の衛星センサーでほぼ同時期に撮影されたデータを調べ、選んだ画像データを用いて氾濫域の水域抽出および比較を行った。本研究で主に使用した衛星データは、限られた情報しか持たない開発途上国においてもウェブから無償で取得可能な情報かつ国レベルの広域にわたる時系列分析が可能な MODIS データである。MODIS が持つ高い時間分解能と広い観測範囲を保持しつつ、ASTER(光学センサー: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer、JAXA)の持つ約 15m の高い空間分解能を補完的に利用することにより、MODIS の画素内に混在している洪水氾濫域を抽出する手法を評価した。特に、大規模な洪水イベントが発生した時に、より迅速に判読精度の高い洪水氾濫域マップを作成するという課題については、複数センサーデータによる土地被覆タイプのスペクトル特徴から、地表の細かいレベルの道路、小河川、大規模の堤防と水田の排水路などを識別することで対応できる可能性が得られた。図-3 は MODIS に加え分解能 15m の光学センサー THEOS (Thailand Earth Observation Satellite) 及び ASTER を用いた市街地氾濫状況を比較している。一つの衛星画像でカバーできない部分を複数の衛星を適切に組み合わせることにより洪水氾濫域を自動抽出し、さらに MODIS 時系列データを用いて、200km 以上の大洪水に対し迅速に(一日遅れ) 広大な洪水氾濫域の全体像を把握することができた。一方、本研究の調査に用いた光学センサーは、10 月から 11 月の雨季、洪水氾濫域の上空を通過する場合、特定の気候や悪天候(雲被覆時)、植生被覆域(森林や水田の区別)などにおいて浸水範囲の抽出精度が低下するといった課題がみられ、これを解決するため、合成開口レーダ(SAR) データと連携する方策を模索した。

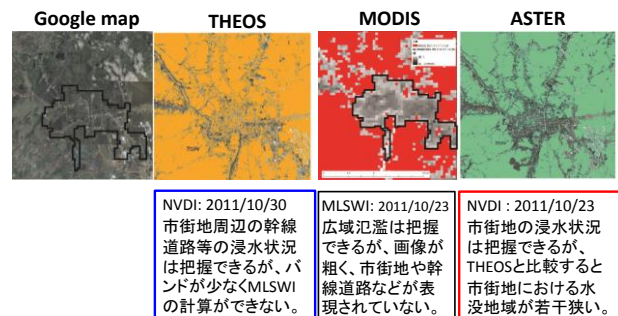


図-3 MODIS に加え分解能 15m の光学センサー THEOS 及び ASTER を用いた市街地氾濫状況検討(アユタヤ市周辺水域抽出結果)

4. 衛星による家屋数把握及び流出家屋位置・戸数推定アルゴリズムの開発

5.3 人工衛星を用いた広域洪水氾濫域・被害規模および水理量推定技術の開発

本研究では SAR 衛星データによる流出家屋位置・戸数を定量的に推定できる自動アルゴリズムの開発・適用を検討した。2011 年 3 月 11 日、三陸沖を震源とした M9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した際に、被害が大きかった岩手県陸前高田市を対象として事例研究を実施した。流出家屋を個別に判別し、数を推定するには、震災前後の超高分解能画像（約 2.5m）が必要となるため、後方散乱係数(backscatter)の強度差分処理から建物フィルタ変換処理の改善・検証まで一連の家屋倒壊・流出位置を特定するアルゴリズムについて検討・設計を行った。図-4 は津波前後の 2 時期の高解像度衛星（COSMO-SkyMed-X：イタリアと GeoEye1：アメリカ）を比較し、検出された家屋被害マップである。SAR 画像のみで建物を抽出し、判読することは困難であるため、高分解能光学画像（GeoEye1）を用いて浸水域の中にある建物の倒壊・流失有無をサンプリングした。更に、国土地理院が公開した 10 m メッシュの数値標高モデル (DEM) を用い、湛水域と標高との関係性を調べ、災害復興計画基図の詳細な現地調査結果（建物輪郭データを含む）に基づいて被害後の建物戸数を推定した³⁾。特に、建物抽出は正確な位置精度を要するため（高分解能 SAR 強度画像は屋根の形状と材料に依存）、スペックルノイズ低減のフィルタ処理と建物抽出のフィルタ処理が非常に重要なことから、1 棟単位の建物輪郭データを用いて建物の輪郭内における後方散乱係数の相関を定量的に算出する手法も検討した。自動アルゴリズムにより流出家屋位置・戸数推定は可能であることがわかったが、建物の倒壊の程度は判読できず、輪郭が合わない、被害が検出できないなど様々な改善点は残っている。

このように、浸水および流出家屋の位置・戸数を把握することで、途上国でも必要に応じて定量的分析に基づいた的確な災害復旧対策立案が可能となる。

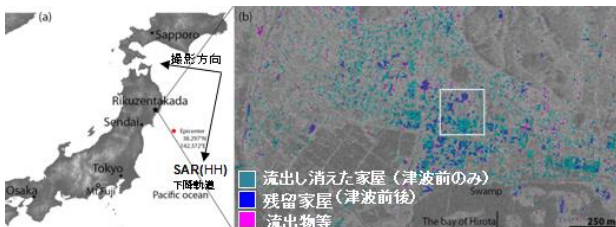


図-4 衛星観測範囲内（陸前高田市の沿岸部）で推定した家屋：津波前後の2時期カラー合成SAR画像(2.5m)

5. 氾濫水理量の観測技術開発

本研究では、観測データが不十分な地域での洪水氾濫

規模の定量的評価手法としての氾濫水理量算定技術の開発を目指した。本研究が示す氾濫水理量とは、氾濫水位、氾濫水の流速、氾濫流量である。これらの水理量を求めるため、特に人工衛星を用いた観測技術を開発する際の研究課題の全体像を図-5 に示す。特に、氾濫水理量の観測技術を示す i)～vii) の項目は、i) 高性能 Global Positioning System (GPS) を用いた現地観測、ii) ALOS PRISM 又は SRTM 等 Digital Surface Model (DSM) の修正、iii) 人工衛星を用いた氾濫域の算定、iv) DSM 及び氾濫域を用いた氾濫水位の算定、v) SAR データを用いた表面流速の算定、vi) 河川容量の把握、vii) 氾濫流量の算定である。人工衛星データから得られる情報（SRTM DEM 標高データ、MODIS 光学衛星画像）と現地の水位データを用いて MODIS データとデジタル地形データ（修正標高 DSM）を組み合わせることで広域での大域的な氾濫水位分布を面的に推定する手法を開発した。また、氾濫流量を算定するため、粗度係数を一定と仮定した上で、面的な水位の分布、水面勾配、水深を計算することで流速の面的な分布まで算定できた。

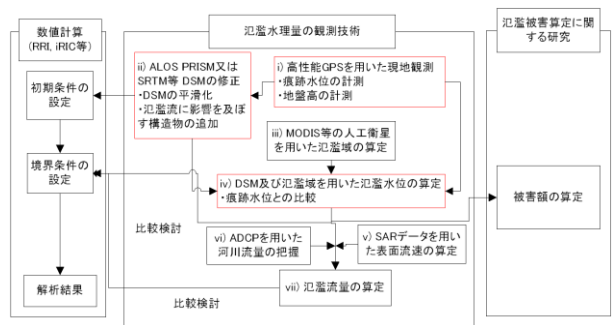


図-5 氾濫水理量の観測技術開発の全体

本研究では、河道から氾濫原に溢れ出した流水の水理量を算定する技術を開発した。このような技術を検討する場合、河道を通過する流量、氾濫原を流れる流量を把握する必要がある。河道の横断形状及び粗度係数は河道の流下能力に直接的に関係するため、洪水氾濫解析においてこれを的確にモデル化することは重要である。その一方で、発展途上国の流域では観測データは限られるため、このような流域ではモデルの構築においては単純化する必要がある。本研究ではメコン川下流域を対象として、人工衛星データを用いた氾濫水位分布の算定、同水位分布から派生する流速分布の算定、さらには流量の算定を試みた⁴⁾。同時に acoustic Doppler current profiler（超音波ドップラー式三次元流速計、以下 ADCP）を用いた観測を実施し、観測結果から得られた河道条件をモ

5.3 人工衛星を用いた広域洪水氾濫域・被害規模および水理量推定技術の開発

デルに反映した計算し、その影響を分析した。具体的には、川幅、河道高さ、河道の粗度係数に着目し、観測結果を踏まえてこれらの河道条件を緻密にモデルに反映した場合に、単純化させる仮定を用いる場合に対して河道流量、氾濫域、氾濫水深がどの程度変化するかを分析した。同流域における洪水氾濫計算を実施した結果⁵⁾、図-6に示したように MLSWI スペクトル反射率に基づく閾値でなく、MODIS 反射率の空間的な変化割合から氾濫域を推定した氾濫水流速分布⁶⁾と図-7に示す RRI (Rainfall Runoff Inundation model) シミュレーション⁷⁾による流速分布及び計算氾濫域が適正に一致することを確認した。

このように検討が困難な現象を把握するためには、直接的な手法、数値計算と組み合わせるような間接的な手法を実施するために人工衛星データを活用した検討を進める上で最も重要になるものは現地観測による現象の把握と上記数値計算を実施するための初期・境界条件の作成である。そのような観点から、著者らはカンボジア国メコン川下流において河床高の縦断的な観測と ADCP を用いて河道内の流量観測を実施し、計算氾濫域の氾濫水理量算定を試みた。

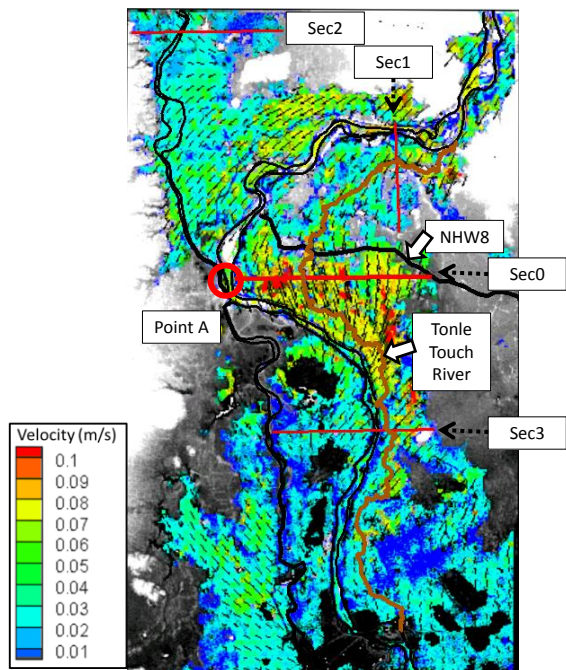


図-6 DSM と MODIS 8 日間合成画像(9月30日~10月7日)によるカンボジアメコン川下流域の氾濫水流速(氾濫水理量)分布

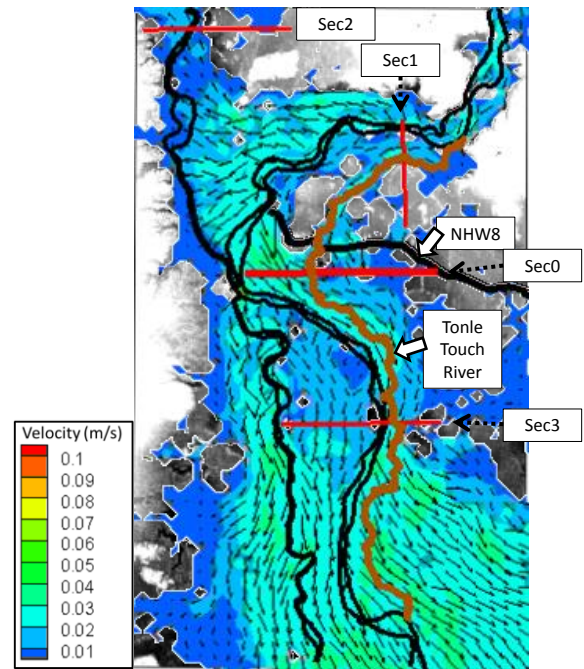


図-7 RRI model による (10月7日)カンボジアメコン川下流域の氾濫水流速(氾濫水理量)分布

6. 水災害復旧活動支援等への実利用システムの検討

近年、我が国では、新宇宙基本計画(平成27年1月9日)が策定され、宇宙利用の拡大・重視が打ち出された。これに従って、国民生活の質の向上や安全安心、安全保障等と関連して、水災害分野でも宇宙利用の観点が重要視されている。平成27年3月14~18日、第3回国連防災世界会議が仙台市で開催され、仙台防災枠組2015-2030(Sendai Framework for Disaster Risk reduction)が採択された。これに基づき、我が国の防災分野に対する具体的施策も、特に、災害リスク評価、災害の観測、予測、予警報のための技術、つまり、情報通信技術(ICT)、地球観測(宇宙技術)・地理空間情報などを活用して、ハードとソフト両面を適切に組み合わせた防災協力を推進する方針が打ち出された。

このような防災の主流化に従って、特に、リモートセンシングに係る衛星運用システムから災害現況・リスク情報まで、より迅速・的確・標準的に情報提供が可能になるプロセスを取りまとめ、災害地支援のために最大限活用可能な実利用システムを適用した検討例を提案した。

6.1 災害発生から情報共有化に至る一連のプロセスの適用事例

表-1 タイ 2011 年大洪水時、衛星の運航状況調査の一覧事例
 (○: 調査に適しているデータ、△: 調査に困難なデータ、×: 調査に不向きなデータ、-: データ無しを表す)

Platform	TERRA	LANDSAT7	TERRA	THEOS	SPOT4	IKONOS2	QuickBird2	RADARSAT2
Sensor	MODIS	ETM+	ASTER	Multispec	HRVIR	Multispec	Multispec	SAR
再周期	16日	16日	16日	26日	26日	11日	1~3.5日	24日
再撮影頻度	1日	-	-	2日	-	3日	3日	2~3日
Swath	2330km	185km	60km	90km	60km	11.3km	16.5km	300km
10月8日	○	-	-	×	×	-	-	-
10月9日	○	-	-	×	-	-	-	-
10月10日	○	-	-	-	-	-	-	-
10月11日	○	-	-	-	-	-	△	○
10月12日	○	-	-	-	-	-	-	-
10月13日	○	-	-	×	-	-	-	-
10月14日	○	-	-	×	-	-	-	-
10月15日	○	-	-	×	-	-	×	-
10月16日	○	×	-	×	-	×	-	○
10月17日	○	-	-	-	-	-	-	-
10月18日	○	-	-	×	×	-	-	-
10月19日	○	-	-	○	○	-	-	○
10月20日	○	-	-	×	×	-	-	-
10月21日	○	-	-	△	-	△	-	○
10月22日	○	-	-	×	-	-	-	-
10月23日	○	-	-	-	-	-	-	-
10月24日	○	-	-	△	△	-	△	-
10月25日	○	-	-	△	-	-	-	○
10月26日	○	-	-	△	-	-	-	○
10月27日	○	-	-	△	-	○	-	-
10月28日	○	-	-	-	-	-	-	○
10月29日	○	-	-	×	△	-	-	-
10月30日	○	-	-	△	-	△	-	-
10月31日	○	-	-	△	-	-	-	-
11月1日	○	○	△	△	-	-	-	-
11月2日	○	-	-	-	-	-	-	-
11月3日	○	-	-	△	○	-	-	-
11月4日	○	-	-	△	-	○	-	○
11月5日	○	-	-	×	-	-	-	-
11月6日	○	-	-	-	-	-	-	-
11月7日	○	-	-	-	-	-	-	-
11月8日	○	-	△	×	△	-	-	-

統合水災害情報実利用システムのフレームワーク案(図-1)に従って水災害発生直後、流域・防災・危機管理者の意志決定を支援するため、被災状況の緊急情報(浸水域・支援道路・避難経路等)を即時に提供できる仕組みづくりを目指した。また、復旧活動支援等への実利用システムの検討に関して、平成23年度より今まで研究成果を基に人工衛星を用いた広域洪水氾濫域・被害規模および水理量推定技術、早期被害把握・緊急対策案の情報提供を支援するため、過去の洪水災害(タイ国チャオプラヤ川の2011年大洪水)を例に、災害発生から災害情報提供まで一連のプロセスを適用した。

Step 1 では、日本国内で取得可能なすべての衛星の運行状況、撮影結果の良否、撮影日時、画像の詳細情報を調査した。表-1に示す衛星一覧のように洪水の規模とデータ可用性を考慮すると、MODIS と SAR 除いて、データ取得が非常に困難であることがわかる。

Step 2 では、当時の調査により、2011年7月28日から12月1日まで、流域スケールで大洪水の現況が把握できるMODISを主に選定し、時系列データを用いて、被害が拡大していたチャオプラヤ川流域全体をモニタリングした。

Step 3 では、洪水期は雨雲など制約があるにもかかわらず、

長期氾濫域を自動抽出・判読・分類し、THEOS、ASTER、SOPT5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre「地球観測衛星」、フランス)といった複数センサーによりほぼ同時期に撮影されたデータを用いて氾濫域を比較しつつ、地形データと水田マスク処理をしながら洪水氾濫域検証と誤分類除去を行った。

最後にStep 4で、衛星観測による災害情報が提供できる準リアルタイム(1日から一週間遅れ)の水害マップ(氾濫域、浸水深等)を試作した。図-8は準リアルタイム(1日から一週間遅れ)MODISデータによる洪水氾濫域の時系列変化のモニタリング情報と連携した動的洪水マップの一部である。この洪水マップは、現地水害調査を目的とした災害専門家の派遣、被害規模の把握、水防活動の支援に有効であると同時に、氾濫数値シミュレーション予測結果と比較することで、パラメータの補正などが可能になり、シミュレーションの精度向上を図るのにも有益である。

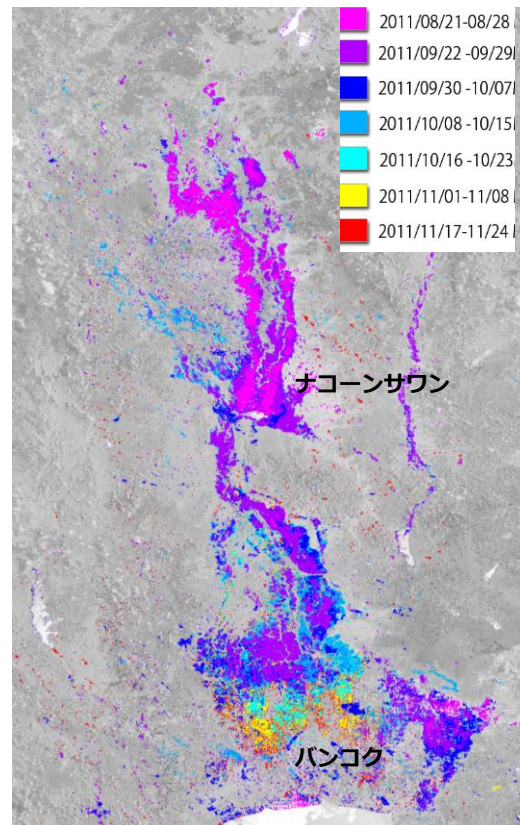


図-8 準リアルタイム(1日から一週間遅れ)MODISデータによる洪水氾濫域の時系列変化のモニタリング情報と連携した動的洪水マップ

7. まとめ

本研究では、大規模氾濫に対する氾濫域自動抽出のため、水域検出精度の向上や複数の異なる衛星画像による時間分解能の向上を図りつつ、地表洪水指数 MLSWI (Modified Land Surface Water Index) のアルゴリズム開発を行ったことで、迅速に洪水氾濫域を把握でき、時系列的な洪水氾濫域の抽出も可能であることを確認した。また、洪水氾濫水位の面的な分布から水面勾配や氾濫水の流速分布値を考慮した氾濫水理量の推定技術を提案した。このように最新の人工衛星データと現地観測を組み合わせることで、氾濫流の実現象・特性を定量的に解明するとともに、氾濫計算の検証等にも活用できることを確認した。さらに、高分解能の合成開口レーダ (SAR) を活用した家屋被害 (流出・浸水家屋) 抽出アルゴリズムを検討し、想定臨時マップを試作するとともに、結果を高分解能光学衛星画像で検証した。本研究の年次課題の相互関連性を考慮しつつ、連続的な情報共有・提供を行うことのできるシステム構築のために、過去の大洪水災害を事例に、災害発生から災害情報提供 (被害規模の把握、迅速な水防活動) まで一連のプロセスを適用した準リアルタイム (1 日から一週間遅れ) のモニタリング情報と連携した動的洪水マップを作成する統合水災害情報実利用システムのフレームワークを検討・提案した。今後の課題として、洪水時、夜間・悪天候時 (雲被覆時) や植生被覆域 (森林や水田の区別) で衛星観測に制限があるため、迅速に災害現況・リスク情報が提供可能な陸域観測技術衛星 2 号 (だいち 2 号: ALOS-2) SAR データの分析手法の開発が急務である。また、正確かつ詳細な氾濫水理量の観測と被害状況を把握するため、最先端高分解能光学画像処理及び SAR 干渉解析技術の開発や SAR 強度画像のフィルタリング改善、SAR と光学衛星画像とのフュージョン技術の開発など、多くの研究課題がある。

参考文献

- 1) Y. Kwak, J Park, A Yorozuya, K Fukami, Estimation of flood volume in Chao Phraya river basin: Thailand from MODIS images coupled with flood Inundation level, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, pp.887-890.
- 2) Y. Kwak, J Park, K Fukami, Near Real-time Flood Volume Estimating from MODIS Time-series Imagery in the Indus River Basin, IEEE Journal of Selected

Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing Vol.7 No.2: pp.578-586.

- 3) 国土地理院GSI:
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html.
- 4) 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
- 5) S. Kudo, A. Yorozuya, E.D.P. Perera, H. Koseki, Y. Iwami & M. Nakatsugawa, Estimation of discharge in river channel and distributions of water velocity and depth over floodplain, River Flow 2016-Schleiss et al. (Eds) @2016 Taylor & Francis Group, London (accepted)
- 6) K. Robin BISWAS, A. Yorozuya, S. 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, I_931-I_936, 2016.
- 7) T. Sayama, Y. Tanabe and S.Tanaka. 2015. An emergency response-type rainfall-runoff-inundation simulation for 2011 Thailand floods. Journal of Flood Risk Management: 1-14.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ESTIMATING FLOOD AREA,
VOLUME AND SCALE OF DAMAGE USING REMOTE SENSING DATA**

Budget : Grants for operating expenses, General account

Research Period : FY 2011-2015

Research Team : Water related disaster research group

Author : Yoichi IWAMI

Atsuhiko YOROZUYA

Syuun KUDO

Youngjoo KWAK

Abstract : The International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) has been involved in the development of an accurate methodology using remote sensing data to observe and forecast a broad inundation area and damage to buildings for developing countries. This research aims to facilitate emergency rescue activity right after a water-related disaster with use of advanced super high-resolution remote sensing observation using both optical and radar images. Additionally, this study aims to utilize estimation of flood volume (e.g. inundation depth, discharge amount of floodwater, floodwater velocity) in quantitative analysis on actual phenomena and the characteristics of flood flow and verification of inundation simulation. Finally, we suggest a framework for an integrated approach using advanced remote sensing technology to establish a practical water-related risk information system used for emergency rescue activity.

Key words: Remote sensing, large flood, emergency rescue, flood volume, flood monitoring