

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：深見和彦、萬矢敦啓、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、広域洪水氾濫を対象にし、できる限り短い時間間隔での氾濫域の抽出および被害規模の推定が可能となる衛星観測技術（リモートセンシング）や、観測データが不十分な地域での洪水氾濫規模の定量評価手法としての氾濫水理量（水面勾配・氾濫流量等）算定技術の開発を目指している。平成 24 年度は、光学衛星及び合成開口レーダ（SAR）画像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と、氾濫水理量の観測技術開発について検討を行った。

キーワード：リモートセンシング、氾濫域、水理量、合成開口レーダ（SAR）

1. はじめに

近年海外では巨大ハリケーンや熱帯モンスーン等の影響により、多くの大規模洪水氾濫災害が発生している。途上国において洪水氾濫域が広域に及ぶ場合、交通網の遮断をはじめとした様々な理由により、現地調査を通じての氾濫被害の把握は困難であることが多く、災害復旧に支障を及ぼすこともある。この問題解決のための技術として、従来人工衛星による災害発生後の面的な氾濫域の検出に関する検討は研究レベルでは行われ始めている。しかし航空機 SAR（合成開口レーダ：Synthetic aperture radar）が臨機応変に使えず、モニタリングすべき対象域が極めて広域にわたる途上国での、大流域スケールにおける実利用に向けたシステム開発は行われていない。植生被覆がある場合の浸水範囲の抽出精度の低下や、洪水予警報や氾濫予測への基礎データとなる氾濫水理量算定にも技術的な課題を残している。また、単一の人工衛星が洪水氾濫発生時にタイミング良く上空を通過するとも限らないため、単一の人工衛星からのみ洪水氾濫域を抽出する方法では、実際の被害発生地域を的確に把握できないことも多い。ICHARM はこれらの技術的課題を克服し、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、アジア等の支援に貢献している。夜間・悪天候時を含め広域的な氾濫域の、できる限り短い時間間隔での抽出および被害規模の推定が可能となる衛星観測技術や、観測データが不十分な地域での洪水氾濫規模の定量評価手法としての氾濫水理量（水面勾配・氾濫流量等）算定技術の開発を行う。

以上を踏まえ、本研究では以下に示す研究課題を設定し、平成 23 年度より研究を開始した。

- (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、平成 24 年度は(3)、(4)の 2 課題を実施したため、これらの成果をそれぞれ報告し、各項目毎に結論を述べる。

2. 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

2.1 研究手法

本研究課題は、1) 衛星による洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムと合成開口レーダ（以下、SAR）センサーの利点を活かして、2) 湛水家屋および流出家屋位置・戸数推定アルゴリズムを検討し、その可能性を提案、3) 建物被害まで算定できる合成画像（Image Fusion）の作成を目標としている。湛水および流出家屋の位置・戸数を把握することにより、途上国においても必要に応じて的確な災害復旧対策を立てることが可能となる。そこで、

SAR の洪水前後データについて調べ、その後方散乱係数 (backscatter) の差分から、家屋の倒壊・流出位置を特定するアルゴリズムについて検討・設計し、その有効性と技術的課題を文献レビューを通して明らかにすることとした。

2.2 合成開口レーダ(SAR)の概要と特性

マイクロ波を利用した SAR センサーは、二次元相関処理による高分解能映像センサである。SAR は移動しながら一定の繰り返し周波数でパルスを送信し、観測対象物からの反射信号を受信している。つまり、分解能の非常に悪い(例えば 10km 四方)データを、その位相の時間変化を忠実に表現した参照関数と積和演算して、分解能を数メートル単位に引き上げるものである。高分解能にするためには、1) 機器の安定性、2) 機器を搭載したプラットフォームと観測対象物の相対運動の時間安定性が要求される。この条件で、SAR は映像化され同時に位相情報もピクセル毎に保存される¹⁾。

SAR の原理は 1950 年代に米国で登場した²⁾。当時、レンズを組み合わせた光学処理で映像化されたが、1978 年に打ち上げられた Seasat-SAR 以降はデジタル処理が主流となり、処理の多様化・高精度化が進んだ。SAR の単偏波画像は白黒で情報量に乏しいが、全天候性(観測時の天候に左右されない)で昼夜観測が可能(アクティブセンサ、太陽光不要)、コヒーレント性(位相のそろい具合)が高いため、災害等の緊急対応に適する。また空間分解能の向上も目覚ましく、地上解像度 1~3m の COSMO-SkyMed や TerraSAR-X が打ち上げられ、レーダ画像からも詳細な地表面の状況把握が可能となった。SAR 処理の文献は非常に多いが、大きく 1) 前処理、2) レンジ相関、3) アジマス相関に分類される。1) 前処理では、軌道・観測データの解析を行い、ドップラー周波数、その時間変化、衛星姿勢(ヨー角)の推定を行う。これは原画像のデジタルナンバー(DN)から、単位面積における放射輝度を表す係数(σ_0)に変換する処理である。補正後の画像の後方散乱係数は、いずれも一定の範囲を持つ。2) レンジ相関では、受信信号を送信信号の複素共役信号と積和演算して、レンジ分解能を高める。3) アジマス相関では、アジマス方向に参照信号と積和演算して分解能を高める¹⁾。レンジドップラー処理方法³⁾は高速処理が可能、メモリをあまり要しない、アルゴリズムがわかりやすい等の理由でよく用いられる。

松岡・山崎^{4)、5)}は、1995 年兵庫県南部地震の前後に観測された ERS/SAR 強度画像と建物被害の詳細な現地

調査結果に基づいて、後方散乱係数の変化と街区レベルの建物被害率の関係を調べ、被害の甚大な地域を検出す

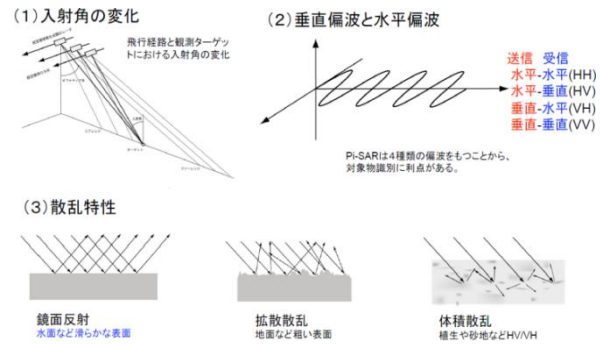


図-2-1 合成開口レーダー(SAR)の特性

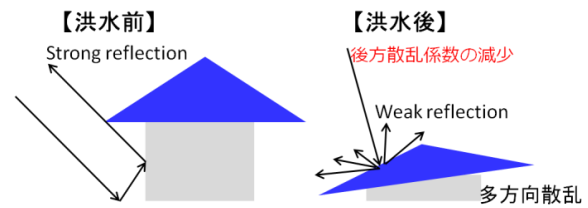


図-2-2 合成開口レーダー(SAR)の後方散乱係数の特性

る手法を提案した。Horritte ら⁶⁾はトーンとテクスチャ情報を用いて、単一の SAR 画像からスムーズな水域輪郭を検出する動的輪郭モデルを構築した。Ahtonen ら⁷⁾と Matgen ら⁸⁾はそのモデルを利用して、洪水の遡上域を検出した。SAR 画像は水域における特性が明瞭であるため、対象物の入射角依存性や偏波特性を利用して浸水域の抽出に用いられることとなった。JAXA^{9)、10)}は空港機 Pi-SAR-L によるテスト観測した結果、30° 40° 50° の異なる入射角で撮影すると(図-2-1(1)の入射角の変化)、40° による撮像が水域の判読を最も明瞭にした。また、4 偏波間(水平-垂直、水平-垂直あるいは垂直-水平、垂直-垂直:図-2-1(2))の異なる相関性の分析により、水域を明瞭に抽出できる。2 偏波観測で解析できない場合があるので、水面では高い相関値を持つ垂直観測(HV)と水平観測(VH)のように、4 偏波での観測が必要であるとしている。一方、図-2-2 は洪水前後の家屋に対する無被害地域と被害地域との建物形状の相関が、強い後方散乱係数特性を示すことを表している。被害前の建物の構造では後方散乱が強く、明るく反射することに対して、被害後に建物の構造が変形すると後方散乱強度が弱くなり、建物について形状が把握できる。

2.3 浸水・流出家屋数推定アルゴリズム

SAR 画像のみで建物の抽出は困難であるため、高分解能光学画像を用いる合成画像(Image Fusion)を作成す

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

ることで浸水域と建物の抽出精度が改善できる。洪水前

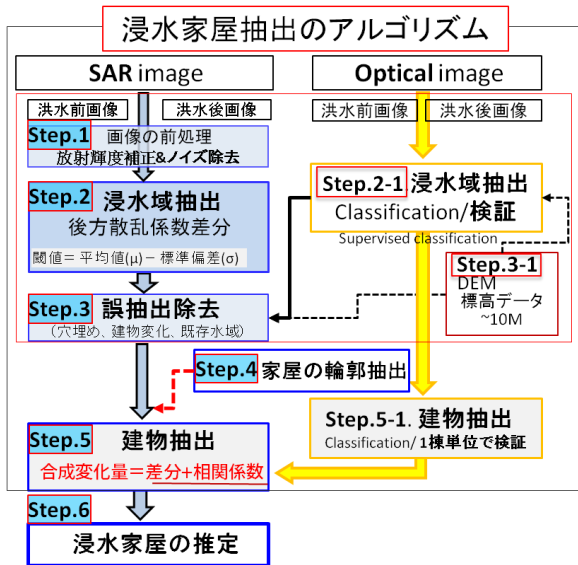


図-2-3 浸水家屋算定のアルゴリズム

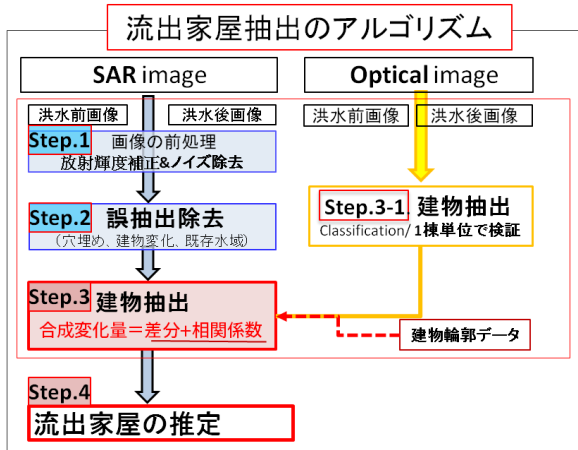


図-2-4 流出家屋算定のアルゴリズム

後の 2 枚以上の SAR 画像を用いて位相差 (phase difference) を利用する相関係数 (correlation coefficient) と干渉性 (coherence) を求め、図-2-3 に示した家屋数算定のアルゴリズムの流れにより、浸水域抽出 (Step.2) と建物抽出 (Step.5) を行う。短時間かつ早い流速で発生す

表-2-1 合成に必要な高分解能光学画像及び SAR 画像一覧

高分解能多偏波 SAR 画像				高分解能光学衛星画像			
SAR 衛星名	提供機関	範囲	分解能	光学衛星名	提供機関	範囲	分解能
TerraSAR-X (X-band)	DLR ドイツ	30km × 50km	約 0.8 ~ 1.0m	IKONOS	Geo-Eye USA	11km × 595km	Pan 0.82 m Multi 1.3m
COSMO-SkyMed (X-band)	イタリア	40km × 40km	約 3 m	Geo-Eye-1	Geo-Eye USA	15km × 595km	Pan 0.41 m Multi 1.64m
RADARSAT-1,2 (C-band)	カナダ	50km × 50km	約 1 ~ 3m	WorldView-2	Digital globe USA	96km × 110km	Pan 0.46 m Multi 1.85m
ALOS (L-band)	JAXA 日本	70km × 70km	約 10 m	QuickBird	Digital globe USA	18km × 18km	Pan 0.65 m Multi 2.6m

る流出家屋算定も図-2-4 のように浸水家屋抽出のアルゴリズムの流れで建物の有無を判別する。そのため、表-2-1 に示した高分解能多偏波 SAR 画像中、H (水平) 偏波と V (垂直) 偏波のデュアル偏波画像を選んで、高分解能光学衛星画像の範囲とオーバーラップさせる。SAR 画像枚数と種類は、表-2-1 から、高分解能画像を活用して組み合わせることにより、都市域においてもより詳細な洪水氾濫の把握と建物の抽出が可能になると期待される。湛水域範囲の中にある建物の被害を推定するためには、一般的な建物の特徴 (feature) を強調すべきである。建物の周りにはコントラスト (最も暗い部分と、最も明るい部分) の輝度の差があるため、図-2-3 に示したように光学画像では、建物によるシャドウ (shadow) や植生 (vegetation) の有無、線形的な壁や建物の造り (line segment) などが識別できる。SAR 画像ではレイオーバー (layover) やレーダシャドウ (shadow) など、特有な幾何学的性質がある。しかし全ての建物で適用できないため、光学センサーのパンクロ (panchromatic) とマルチ (Multi) 画像と、SAR 画像と合成したフュージョン (Fusion) 画像解析が必要になる^{11), 12), 13)}。単純化したモ

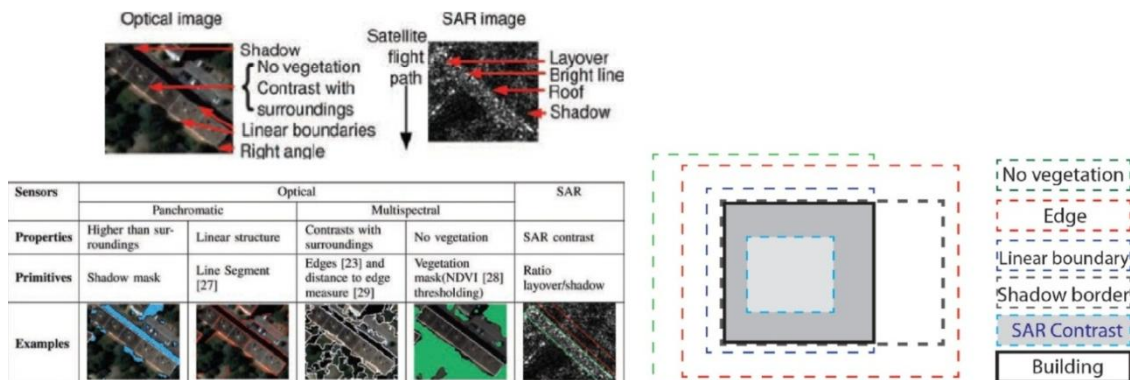


図-2-5 Optical及びSAR画像の建物抽出の特徴(左)と単純化モデル(右)

デルは図-2-5に示すように焦点を建物の中心にし、パラメタ調整を最適化しながら各レイアを重ね合わせることで総合判読する。

$$r = \frac{N \sum_i I_{ai} \cdot I_{bi} - \sum_i I_{ai} \sum_i I_{bi}}{\sqrt{\left(N \sum_i I_{ai}^2 - \left(\sum_i I_{ai} \right)^2 \right) \left(N \sum_i I_{bi}^2 - \left(\sum_i I_{bi} \right)^2 \right)}} \quad (3)$$

2. 4 SAR 画像を用いる浸水域の抽出と建物の抽出

2.4.1 TerraSAR-X の事例^{13), 14)}

2011年3月11日に、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。震源位置は北緯 38.322°、東経 142.369°、深さ約 32 km であった。この地震によって巨大津波が発生し、北海道から千葉県にかけて大津波が押し寄せ、海岸線から最大約 6 km の内陸まで遡上した。とくに岩手県・宮城県・福島県の 3 県では、沿岸の市街地、住宅地、村落が津波に襲われ、約 2 万人の死者・行方不明者が出た。国土地理院の調査によると、全国で約 561 km² の範囲が津波によって浸水した¹⁵⁾。リュウら^{13), 14)}は、地震前後に撮影された高解像度衛星 TerraSAR-X の強度画像を用いて、津波による湛水域と建物被害の抽出を行った。後方散乱係数が極めて低いという水域の特性を利用し、地震前後画像から平均差分が減少した地域を湛水域として抽出した。その後 1 棟単位の建物輪郭データを用いて、輪郭内における後方散乱係数の平均差分と平均相関を算出し、浸水域内における建物被害を抽出した。

(1) 津波による湛水域の抽出

TerraSAR-X のカラー合成図から、津波により湛水した範囲が容易に確認できる。その理由は、水域は表面が平坦であるため、ほかの土地被覆より後方散乱係数が極めて低いという特徴があるからである。地震前画像と 3 月 13 日に撮影した画像の差分図から、差分値が T 値 [dB] 以下のエリアを 3 月 13 日時点の湛水域として抽出した。

$$T = \mu - \sigma \quad (1)$$

ここで、ヒストグラムの平均値 (μ) と標準偏差 (σ) を用いた式(1)により閾値 (T) を求める。次に、国土地理院が公開した 5 m メッシュと 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た。

(2) 建物被害の検出

高解像度衛星 TerraSAR-X の強度画像を生かし、地震前後に撮影された画像と建物の輪郭データを用いて、津波で被害を受けた建物を 1 棟単位で検出した。後方散乱係数と相関係数 (r)、2 時期画像粒子の後方散乱強度の差分 (d) を式(2)で求め、

$$d = \bar{I}a_i - \bar{I}b_i \quad (2)$$

2 時期画像の後方散乱強度の相関係数 (r) を式(3)で求める

$$z = \left| \frac{d}{\max |d|} \right| - c \cdot r \quad (4)$$

ここで、 d は平均差分 [dB] であり \max は検討範囲における最大値を表す。 r は式(3)で求められた相関係数であり、 c は 0 から 1 の範囲の重みである。 i はピクセル番号であり、 I_{ai} と I_{bi} は地震前と地震後の画像における後方散乱係数である。 \bar{I} は N ピクセルのウィンドウ内における後方散乱係数の平均値である。

リュウ・山崎¹⁴⁾が提案した差分と相関係数を合成した変化量、線形式を組合せた合成変化量 (z) を導入し計算した。図-2-6 に地震前後に撮影された高解像度衛星 TerraSAR-X の強度画像を用いた被害状況を示すが、

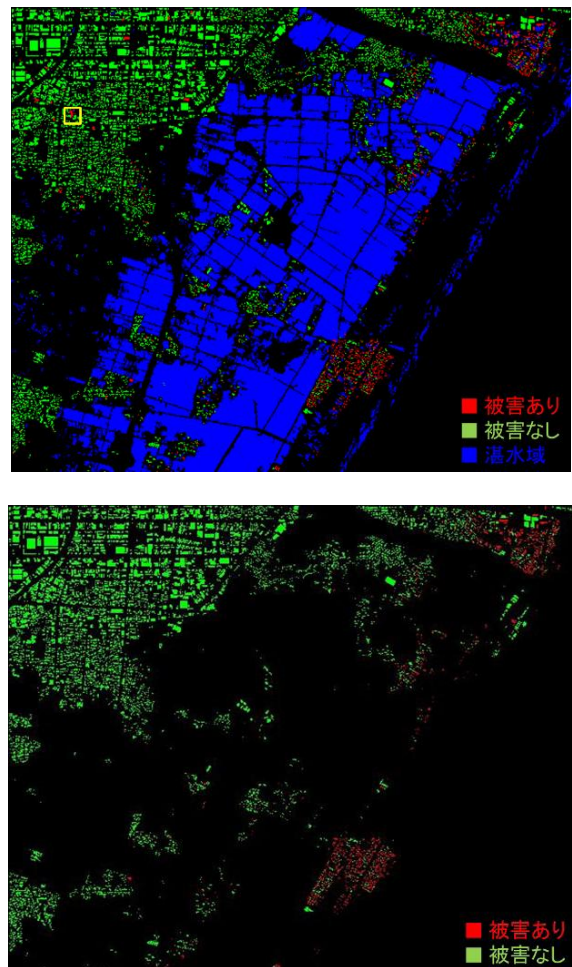


図-2-6 建物被害の分類結果と 3 月 13 日時点の湛水域(上) ; 修正した建物被害の分布(下)

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

浸水域を完全にカバーすることができないことや、建物の面積より小さい湛水域やノイズを含めているピクセルは、検出結果の精度に影響を与えてしまうという問題点がある。この誤検出を防ぐため、対象域にある水域や建物などを分類する検証データを確保することも重要である。

2.4.2 ALOS PALSAR の事例

ALOS/PALSAR は観測幅 70km の広範囲観測により、防災機関等の初動対応における被災状況の全体把握に利用され、特に地震による山間部の土砂崩れ、洪水による冠水・浸水の状況把握に優れている。レーダを使った干渉解析に利用が可能であり、地震発生メカニズムの解明を行うことができ、将来の予防・減災活動に有効である。

(1) 東北大震災の事例¹⁶⁾

日本の ALOS は発災後から電力異常を発生した 4 月 22 日までに、搭載された 3 つのセンサで合計約 450 シーンを観測した。PALSAR センサは 3 月 12 日から 4 月 23 日までの観測画像を提供した。国際災害チャータから提供された光学及び SAR 衛星共のシーン数は合計、5、000 以上であった。国際災害チャータから提供された SAR 衛星一覧を、表-2-2 に示す。震災前後の ALOS AVNIR-2 及び PALSAR を用いて、仙台平野の湛水域の抽出を行った。図-2-7 には、PALSAR カラー合成画像を用いた宮城県から福島県の各地の拡大図 (R: 地震前、B/G: 地震後) を示しており、各画像サイズは 10km 四方である。

表-2-2 国際災害チャータから提供された SAR 衛星一覧

衛星名	提供機関	国	分解能
ALOS (L-band)	JAXA	日本	約 10m
ENVISAT (C-band)	ESA	欧州	約 30m
RADARSAT- 1、2 (C-band)	DLR	カナダ	約 1m~100m
TerraSAR-X (X-band)	CSA	ドイツ	約 0.8~1.0m

(2) ペルー沖地震の事例¹⁷⁾

2007 年 8 月 15 日に、チンチャ市の 40km 北西の沖合で発生したペルー沖地震 (M8.0) では 500 名以上の死者・行方不明者、35、000 棟以上の建物が全壊するなどピスコ市内とその周辺の地域で大きな被害が生じた。建物全壊率推定モデルを、2007 年ペルー沖地震を観測した ALOS/PALSAR 画像 (地上分解能は約 10m、地震前:

2007 年 7 月 12 日、地震後:2007 年 8 月 27 日) に適用し、

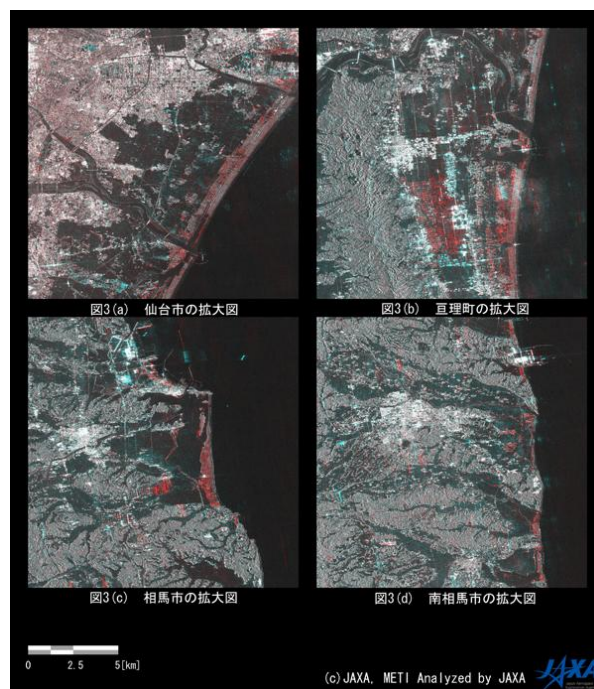


図-2-7 宮城県から福島県まで各地の PARSAL 画像から解析した湛水域の拡大図 (災害前: 赤、2007 年 6 月 21 日、災害後: 緑と青、2011 年 3 月 13 日)

震度情報と統合処理結果、実際の被害状況を比較してモデルの妥当性を検証した。図-2-8 に示したように、ALOS/PALSAR 画像による判別では、計算ウィンドウのサイズが 13×13 ピクセル (約 130m 四方) と大きいため、市中心部の被害地のように、ある程度広い範囲に被害建物が集まっていないと検出できないという課題が残る。よって被害域の大きさと、検出能力の関係などを合わせた被害関数を適用することが望ましい。

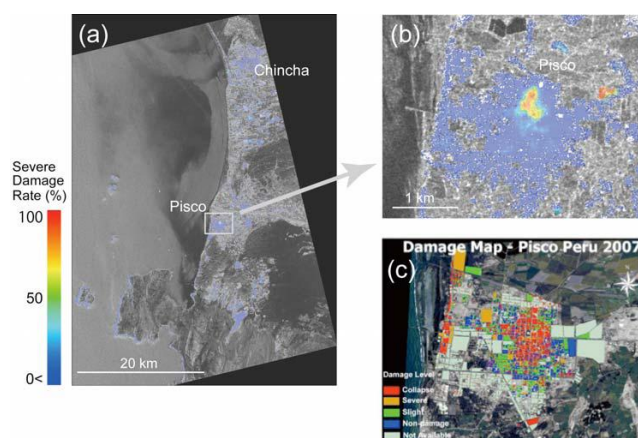


図-2-8 PALSAR 画像と震度情報、統合処理結果から推定した全壊率 (平均値) の分布 (画像全域 (a)、ピスコ市の拡大図 (b)) と被害調査データの比較 (c)



図-2-9 SAR2時期カラー合成画像(1m)

2.4.3 COSMO-SkyMed 衛星の事例¹⁸⁾

同条件で撮像した東日本大震災の津波前後(同条件で撮像) 2 時期の COSMO-SkyMed 画像の前処理を行った後、カラー合成する事により 2 時期変化を可視化することができた(図-2-9)。2 時期の条件は、撮影モード: SPOTLIGHT-2、偏波:HH、空間分解能:1m、入射角:56.71°、ルック方向:右、処理レベル Level 1A、撮影時 2011 年 3 月 17 日 17:22 撮影、2012 年 3 月 06 日 17:18 撮影である。COSMO-SkyMed の SAR 画像の 2 時期分析を比較するため、2011 年 3 月 17 日撮影した IKONOS 画像 (1m) を用いて検証した。

2.5 結論

SAR センサの洪水前後データを用いて、その後方散乱係数(backscatter)の差分から家屋の倒壊・流出位置を特定するアルゴリズムについて検討・設計し、その有効性を検討した。建物に対して輪郭が合わない、輪郭から外れて被害が検出できない、被害を受けていない建物を湛水域を含めて誤検出してしまうといった問題が生じるなど、高分解能では様々な細かい問題が生じると予測できる。画像分析の限界はあるが、建物輪郭データ、建物の高さ、土地利用図、国土基本図、精密標高データなどに加え、合成画像や詳細な観測により、人命救助、被害戸数把握等の現場対応における被災状況の把握に利用が可能であり、特に都市災害(ビル・家屋の倒壊、橋の崩落、道路の寸断など)の状況把握に優れている。

3. 氾濫水理量の観測技術開発

3.1 研究手法

本研究課題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ことが、本研究課題となる。同研究課題の全体像を図-3-1に示す。さらに同研究項目と水災害グループの他の研究項目の関連性を考える。研究項目として大きく分けると、「氾濫解析」、「氾濫被害算定に関する研究」、さらに同課題である「氾濫水理量の観測技術開発」となる。これらの関連を示しながら、以下に示すように図-3-1を説明する。

氾濫水理量の観測技術は以下に示す①～⑦の項目に分類できる。それらは、①高性能 Global Positioning System (GPS)を用いた現地観測、②ALOS PRISM 又は SRTM 等 Digital Surface Model(DMS)の修正、③人工衛星を用いた氾濫域の算定、④DSM 及び氾濫域を用いた氾濫水位の算定、⑤SAR データを用いた表面流速の算定、⑥河川容量の把握、⑦氾濫流量の算定となる。

①に関して、Navcom 社の StarFire GPS ; SF-3050 を採用する。この GPS は北緯 76° から南緯 76° の範囲内において鉛直方向精度が±15cm 又はそれ以下を確保する。一般的な RTK-GPS と異なり、位置の補正情報を特定の衛星から取得することでこの精度を確保しているため、実際の計測はあたかも単独測位をしているかのようなのである。また計測結果の一つとして誤差値を出力することが特徴である。詳細は参考文献を参照されたい¹⁹⁾。著者らの経験によると同 GPS の精度はクリアランスに大きく依存する。GPS の上空に木や歩道橋など遮蔽物が存在すると誤差は大きくなるが、クリアランスの良い条件で 30 分程度とどまると、鉛直方向の誤差が±10~20cm 程度まで下がる。またクリアランスが良ければ、通常の乗用車が走る 100km/h までの速度であっても同程度の精度で計測をした。ここで GPS を使用して現地における計測を実施する目的は氾濫現象に支配的となる構造物及びその標高値を正しく把握すること、標高の平面分布を修正するための情報を得ることである。また道路盛土のアンダーパスに関しても解析のための条件として正しく設定する必要がある。さらに、現地におけるヒアリング、家屋、橋梁等から洪水痕跡水位を測定する。ここでは車に搭載した同 GPS を基準にして、簡易レーザー測量 (Laser Technology 社の TruPulse) を実施する。これらの結果は、②の DSM の修正、④で算定する氾濫水位の算定の結果に活用されることになる。

②に関しては、衛星から得られた DSM に特徴的である

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

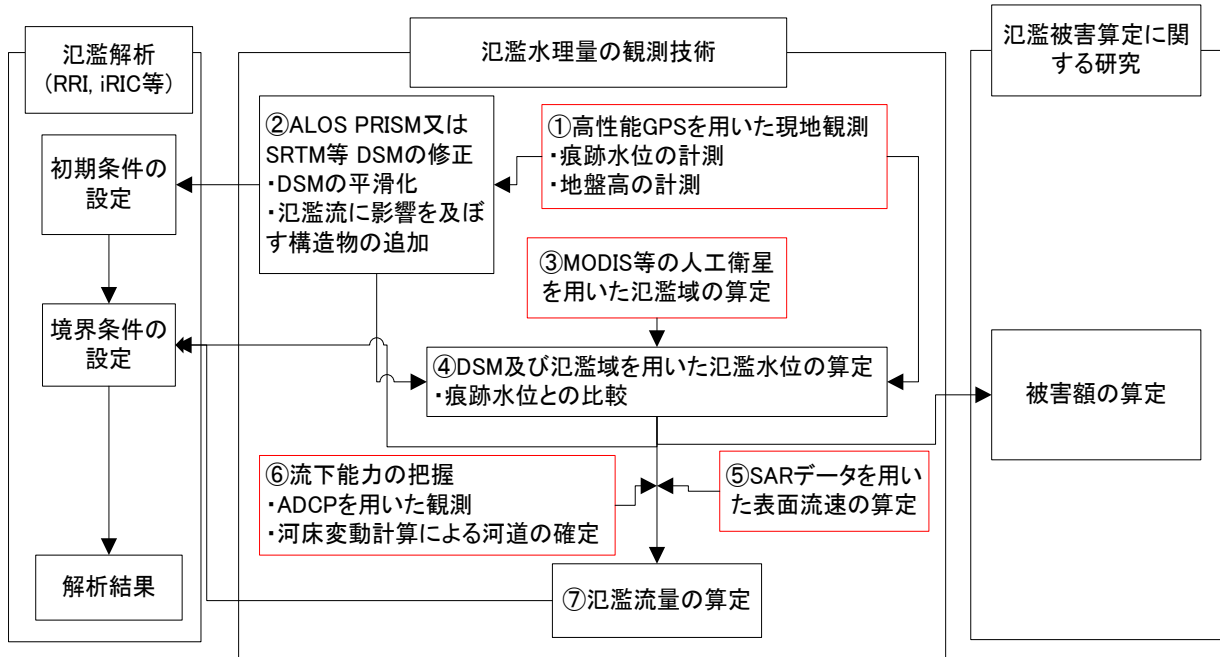


図-3-1 研究課題；氾濫水理量の観測技術開発の全体

ノイズを除去することで DSM を平滑化する。また氾濫現象に大きく影響を及ぼす道路盛土等の構造物を DSM に埋め込む。これらは①の結果を利用することになる。ここから出る結果については、水災害研究グループの氾濫解析を実施しているチームに受け渡し、ここでは氾濫計算の初期値として与えられる。詳細は後述する。

③に関して、本研究の研究課題として「衛星による洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムの開発」で平成 23 年度に開発した技術を用いて氾濫域を算定した。

④に関して、②で修正した DSM、③で求めた氾濫域から、氾濫水位を算定する。ここで算出した結果は、水災害研究グループの氾濫被害算定・リスクマネジメントの検討を実施しているチームに受け渡すが、これらは被害額算定のための外力として使用される。

⑤に関して、SAR の特徴であるドップラーシフト値を利用することで、地球上の流れを⑥の項目は、流下能力を概算することになる。この情報から換算した対象河川の河川内流量、④から求めた氾濫流量を算定することで、氾濫時の流域が持つ全水のボリュームを把握することである。流下能力を概算するため現地における ADCP を用いた計測、河床変動計算等を用いた河道の作成が必要となる。将来的には、例えば気候変動による降雨の将来予測、それにより得られた河川流量の将来予測結果から、氾濫流量を算定することができる。⑥の項目は、流下能力を概算することになる。この情

報から換算した対象河川の河川内流量、④から求めた氾濫流量を算定することで、氾濫時の流域が持つ全水のボリュームを把握することである。流下能力を概算するため現地における ADCP を用いた計測、河床変動計算等を用いた河道の作成が必要となる。将来的には、例えば気候変動による降雨の将来予測、それにより得られた河川流量の将来予測結果から、氾濫流量を算定することができる。

⑦は④で算出した氾濫水位及びそこから算出される氾濫水深、⑤から得られる表面流速から氾濫流量を算出することになる。一般的には氾濫水位から算出する水面勾配、氾濫水深、氾濫原の河床粗度を仮定することで氾濫流量を算定できる。水面勾配の算定の難しさ、河床粗度の大胆な仮定など、有意な数字を得ることはそれほど簡単ではない。一方⑤の技術は、これらの仮定を考慮せず、直接的に計測値を得ることが特徴的である。この結果と④から算出する水深から氾濫流量を求めることになる。以上⑦を得るためには二つの手法がある。a) ④の結果から水面勾配、水深、河床粗度を一定と仮定して求める方法、b) ④の水深、⑤の流速値から算出するものである。前述の通り、後者の方が高い精度を得ることが容易に想像できる。ここで得られた結果は氾濫解析チームに受け渡され、計算の境界条件、又は初期条件として使用される。詳細は後述する。以上ここでは、本研究課題の全体構想を、図-3-1 を用いて概説した。平成 24 年度は、このうち、②及び④に関する技術開発を行い、その手法、成果、結論をそれぞれ以下に述べる。

3. 2 ALOS PRISM 又は SRTM 等 Digital Surface Model (DSM) の修正

3.2.1 はじめに

近年の日本国における氾濫解析はレーザープロファイラデータ (Laser Profiler data ; 以下 LP データ) 基盤整備の充実、数値計算の発展とともに、より精度の高い解析が実施され^{20), 21)}、それらはハザードマップの作成等に大きく貢献してきている。また無料で配布されている二次元の数値計算モデル²²⁾は適用方法によっては十分な精度を確保されていると考えられる。このような状況において精度の高い Digital Surface Model(DSM)もしくは Digital Elevation Model(DEM)さえあれば、ある程度の精度を持った氾濫解析を実施することはそれほど難しいことではない。

全球における DEM は Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)が代表的であり、90m メッシュ値を無償で手に入れることができる。現にこれらのデータを用いた全球スケール²³⁾、アジア大陸など地域毎²⁴⁾及び流域規模²⁵⁾又は河道の一部²⁶⁾等のあらゆるスケールに応じた氾濫解析も多数実施されていて、このデータの高い貢献が窺える。一方で、JAXA が発行する Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM)から得られたデータを基にステレオマッチング処理を用いて作成する DSM (以後球での計測実績が十分にあること²⁷⁾、安価に手に入る PRISM DSM) は 10m メッシュデータであること、全ことが特徴的である。また著者らが用いた DSM は鉛直方向に 1m の解像度を持つ。この詳細な DSM を用いた氾濫解析の結果は、コミュニティーレベルの政策決定者がリスクマネジメントを実施する際に、実用に資する技術となる可能性を持つ。しかしながら PRISM DSM が持つ鉛直方向の精度は 6m 程度である²⁸⁾ため、氾濫解析の DSM データとして採用するには若干の修正を必要とすることになる。猪股ら²⁹⁾はこれを用いた氾濫解析を実施しているが、PRISM DSM のノイズである標高値の凹凸が主な原因で良好な解析結果を得ることができなかった。しかし同時に河川、堤防の位置が正しく計測されていることを指摘している。

PRISM DSM のノイズに関しては Takaku and Tadono の論文に詳しい³⁰⁾。ここでは 1km 及び 100m 程度の波長を持つジッタノイズがあり、これらは明確な周波数を持つため FFT 等でフィルターをかけることが有効であることを指摘している。また明確な周期性のないノイズについても Goldstein and Werner は FFT

を用いたフィルターを使用したノイズ除去に成功している³¹⁾。しかしながら、この手法では河川堤防、道路盛土等の構造物も除去の対象となる可能性があるため注意が必要となる。また Yamazaki et al. は局所的な窪みの除去、流れの連続性から DEM を修正している²⁶⁾。一方、メコン川やチャオプラヤ川の下流域のデルタ地帯における氾濫現象を考えると、多くは緩勾配を流れる水面形を取ることが考えられる。この流れに支配的となるのは、流れの方向を決定するような広いスケ-

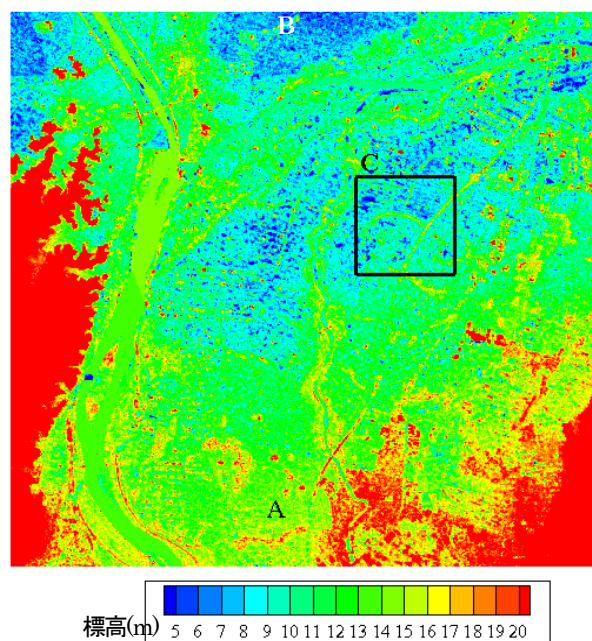


図-3-2 対象領域の PRISM DSM (12×12km)

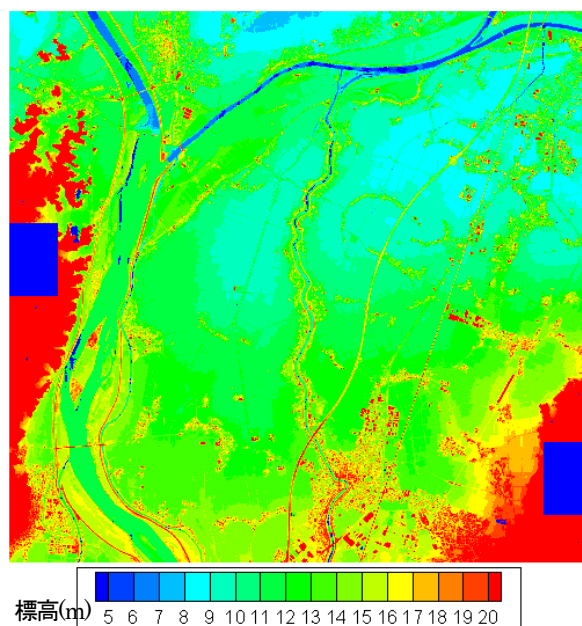


図-3-3 対象領域の LP (12×12km)

ルの氾濫原の地形勾配と河川堤防や道路盛土に代表される構造物である。その他の細かい構造物は粗度としては正しく評価する必要があるものの、数週間程度続き、かつ大規模な洪水を対象とする場合、水面形を決定づける要因とはならない。

これらの背景から、本研究は PRISM DSM を用いて氾濫現象に支配的な構造物が反映された DSM を作成すること、高精度 GPS を用いた現地計測をベースにした DSM の修正方法を確立することを目的としている。またこの技術を用いてメコン川、チャオプラヤ川下流に代表される発展途上国の洪水氾濫が頻発する地域における氾濫水位を算出し、この情報をコミュニティーベースのリスクマネージメントに活用することを意図している。

3.2.2 対象領域

本検討では LP データが取得されていること、洪水氾濫を経験していること、土地利用が著者らのターゲットエリアに近いことから、新潟県長岡市中之島地区近辺を対象領域とした。また対象とする氾濫は平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨に起因する、刈谷田川の破堤によりおきた氾濫による浸水である。またここで意図する浸水状況の再現は、川口らが実施したような市街地内の流れ²⁰⁾ではなく、破堤点から信濃川本川にかけて広がった流水の流れである。

3.2.3 手法

(1) ALOS PRISM から作成した DSM の採用

PRISM DSM は、10m のメッシュサイズを持ち、鉛直方向に 6m 程度の誤差を持つ。詳細は参考文献を参照されたい²⁸⁾。ここでは同 DSM の特性に関して図-3-2 を用いて議論を進める。

図-3-2 は 2. で示した対象領域における PRISM DSM を示す。これは縦横が 12km の範囲内において地形の標高を 5~20m のコンターで示した図である。図には信濃川中流、大河津分水、信濃川下流、刈谷田川が明確に示されている。また図の中央下には、平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨災害時の刈谷田川破堤点付近の湾曲部、その周辺の長岡市中之島近辺の市街地が明確に示されている。さらに図左上から中央下にかけて北陸自動車道及び上越新幹線が示されている。図-3-3 は図-3-2 と同じ領域の LP データを 10m に単純平均した結果を示したものである。両者を比較すると画像として見たときに図-3-2 の方がピンボケしているかのような印象を受

けるが、PRISM DSM は猪股ら²⁹⁾が指摘するように河川堤防を含めた人工的な構造物、市街地の位置、農地の位置が明確に表現されている。また図-3-2 の地点 A 及び B における PRISM DSM と LP データの標高値を比較すると、LP データはそれぞれ 14m、8m に対して、PRISM DSM は 12m、4m であり、それぞれの差は地点 A において 2m、地点 B において 4m となる。以後、LP データを真値として議論をすすめるが、PRISM DSM にこのような標高値のエラーがある場合、氾濫域の勾配の精度に影響を及ぼすことから氾濫解析を実施する上で多少の問題が生じる可能性がある。図-3-4 は図-3-2 の領域 C を拡大し、図-3-2 の右上から左下に向けて三次元的に示したものである。ここでは上越自動車道と 1/4 円状に分布する家屋が表示されている。またその周囲の多くは水田を中心とした農地であるが、5m 程度の波長を持つ不連続な凹凸が存在する。これは前述のジッタノイズのようなものである。以上 PRISM DSM の特徴として、1) 構造物は正しく計測されていること、2) 標高の分布にエラーが生じていること、3) 連続した帯状の凹凸が存在することがあげられる。これらの特徴の中で、構造物が正しく計測されていることが、本論文で PRISM DSM を採用した主たる理由である。

(2) GPS による計測

これは前述の①に述べた。

(3) DSM の修正

PRISM DSM の修正方法を以下に示す。なお、一連の作業フローを図-3-5 に示した。フロー内の a~e の数字は下記の見出し番号に対応している。

a) patch サイズの plain の作成

ここで示す plain とは、地盤高を代表するものであり、河川構造物や市街地等を取り除いたものである。これを作成するために、領域（以下、patch、図-3-4 参照）の範囲を設定し、この patch 内の全 PRISM DSM を用いて最少二乗法により三次元の平面を決定する。この patch は、平面の凹凸が無視できるほど十分狭く、地盤高としての代表性がある程度確保できる範囲であること、決定した平面が河川構造物の局所的な地形変化の影響を受けないほど十分広い範囲であることに注意をしながら特定する必要がある。これは解析を実施する地域によって異なる値を持つことが考えられるが、本解析の対象領域では一律 2km とした。図-3-6 は patch サイズの修正 DSM の一例を示すが、ここで図-3-4 から凹凸を取り除いた平面が、ここで作成する plain である。さらに、この凹凸が次に示す structure である。

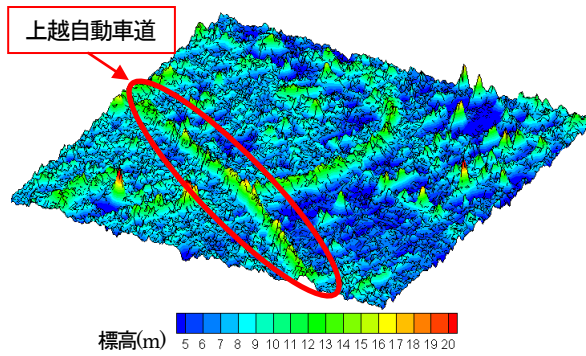


図-3-4 PRISM DSM の一例 (図-3-2 の領域 C の拡大図、2×2km)

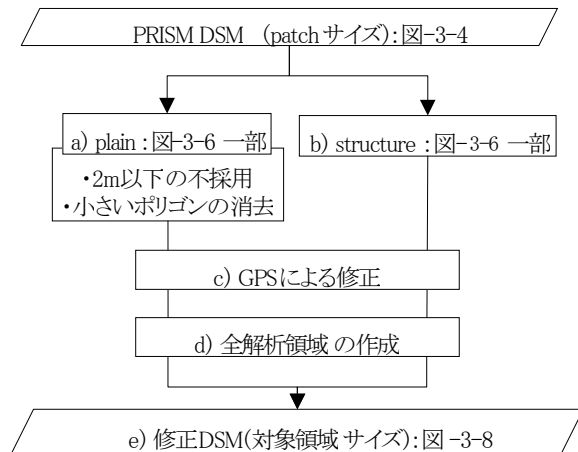


図-3-5 修正 DSM 作成のフロー

b) patch サイズの structure の抽出

ここで抽出するための structure は、河川堤防、道路盛土、市街地等を含めた構造物である。まず初めに PRISM DSM の生データから a) で決定した plain を除去する。ここで得られるデータは、構造物、正及び負の値を持つ凹凸で構成される。ある閾値以下のデータを全て無視することで、ある程度の凹凸を消すことができる。この刈谷田川流域では、堤防・道路盛土等の構造物の比高を鑑み、閾値を 2m とした。この操作では消去しきれない小さな塊の凹凸が存在する場合がある。より正しい DSM を作成するために、これらの凹凸をポリゴン化し、そのポリゴンが structure よりも小さいものを消去する。ここでポリゴンの作成には樺らの手法を採用した²¹⁾。ここで消去の判断は、例えば Google earth の画像を見ながら決定する。最終的に算出された structure は図-3-6 から plain を取り除いたものである。図-3-4 と比較するとわかるように多くの凹凸は消去され、代表的な構造物が残っている様子が理解できる。

c) GPS を用いた plain 及び structure の修正

PRISM DSM に関して 3.2.3(1) で議論した 2 番目の

特徴に対処するため、3.2.3(2) で説明した GPS を用いて plain の修正を実施する。ここでは a) で作成した plain 全体を鉛直方向に動かし、GPS による測量値に合わせる。仮に二点以上の測点が存在する場合は、それらの平均値を用いることになる。このことから GPS の計測を実施する際に注意すべきことは、a) の patch と同程度の範囲内に一つの測量値があること、水平方向の精度はそれほど重要ではないこと、測量の際に堤防・家屋近辺をさげ、農地のようにターゲットとするポイントを代表する点、すなわち地盤高と思われる場所で計測することである。

また structure の修正に関して氾濫流に支配的である構造物上を線として計測する。氾濫実績のある地域では過去の調査結果、リモートセンシング等からこれらを特定することができる。これらの計測結果を DSM に修正する方法はいくつか考えられるが、直接 DSM を書きなおす方法、氾濫解析を実施する際に条件として設定する方法がある。

d) 対象領域の plain 及び structure の作成

patch 内の範囲で作成した plain 及び structure を対象領域全体で作成する。Goldstein and Werner は FFT に最適な大きさの patch を決定し、75%の重複率及び重み平均を採用し、x 及び y 方向に平面的な移動平均をかけ、対象領域の DSM を作成している³¹⁾。本検討ではこれを参考にしながら DSM の修正を検討したが、最終的には 96%の重複率を用いた単純な移動平均を実施した。

e) 修正 DSM の作成

d) で作成した対象領域の plain 及び structure を足し合わせることで最終的な修正 DSM を完成する。ここでは GPS 補正の効果を確認するために、GPS による plain の補正を実施しなかった場合の結果を図-3-7 に示す。図-3-2 と比較すると、信濃川、刈谷田川周辺の河川構造物、市街地等はそのまま示されていること、エラーとみなされる凹凸は消去されていることが理解できる。また図中の C 及び D 周辺は大きな窪みになっていることがわかる。図-3-2 を見直すと、PRISM DSM はここで示すような値を持つことからこのような標高値となる事は必然である。一方図-3-3 の LP データは、この周辺が同様に若干の窪地であることを示しているものの、標高はそれほど低くはない。図-3-8 は GPS による plain の補正を実施した修正 DSM を示す。図中に示した●は著者らが計測した GPS のポイント、また二つのラインは著者らが乗用車で線計測した場所である。

図-3-8 は GPS による plain の補正を実施した修正 DSM を示す。図中に示した●は著者らが計測した GPS のポイント、また二つのラインは著者らが乗用車で線計測した場所である。着目すべき点は、●で囲まれている領域において、標高値が修正されていることが理解できる。しかしながら、●の外の領域ではそうはなっていない。例えば図-3-7 で示した B 近辺の標高はそれほど大きくは改善されていない。ここでは刈谷田川の左岸側が破堤したときの氾濫流を再現することを目的としているため、その外側である地点 B の周辺を修正するための計測を実施していないことが原因である。また本検討では、ラインで計測した結果を DSM の修正には使用せず、氾濫解析の条件設定に反映させた。

次に図-3-9 は図-3-7 が示す地点 A から B の標高の縦断図を示す。ここでは修正前の PRISM DSM、LP データ、GPS 補正有りの修正 DSM 及び plain を示す。図が示すように、PRISM DSM は大きく振動しているが、これらの移動平均に近い plain が凹凸の間を通過している。LP データはほとんどところどころに大きなスパイクを持つものの、PRISM DSM と比較するとなだらかな曲線である。これらのスパイクは図-3-3 にあるように、住宅地や信濃川本川の河川構造物であることがわかる。LP データと plain の標高差を見ると、A 付近では 2m 程度の差を持つが、窪地である D 及び B 周辺では 3~4m 程度の差があることがわかる。また GPS による補正を実施した結果を見ると、全体的に LP データにかなり近いことがわかる。しかしながら A の右、E の付近等、LP データが示すスパイク近傍では若干のずれが生じている。これらは地形の凹凸が大きい場所であることから、同近傍を代表とする平面のサイズが大きすぎるのが原因であり、これは patch サイズを全領域一律としていることに派生している。

3.2.4 氾濫解析を用いた結果の考察

3.2.3(3)で作成した修正 DSM を用いて氾濫解析を施す。ここではフリーのソフトウェアである iRIC の一つである Nays2DFlood²²⁾を用いる。これは平面二次元数値モデルであり、また乱流場の計算にはゼロ方程式モデルを採用している。氾濫原におけるマンニングの粗度係数は、土地利用の面積率などに応じた加重平均及び建物の占有率で補正する考え方が提案されている³²⁾が、ここでは単純に農地では 0.03、宅地では 0.04 を用いた。なお、農地と宅地の判定は Google earth の

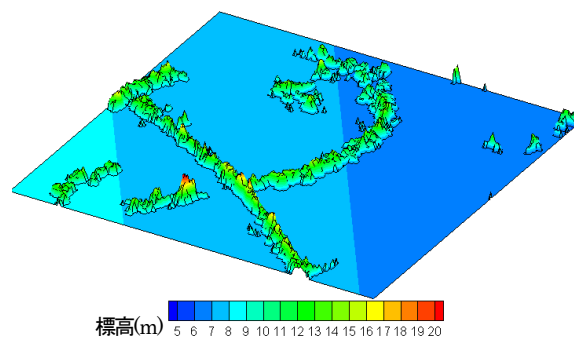


図-3-6 修正 DSM の一例(2×2km)

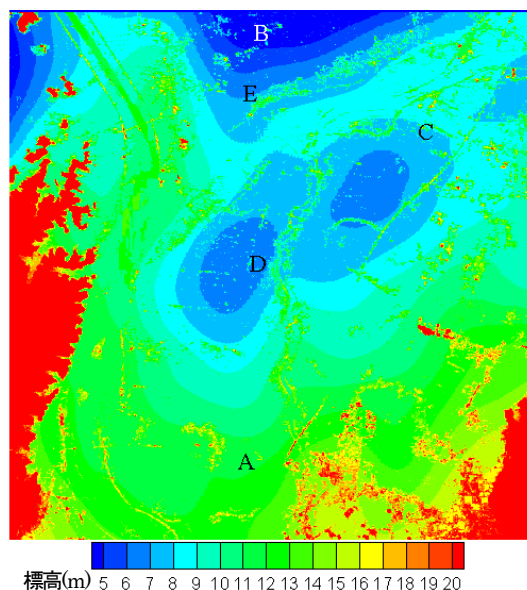


図-3-7 修正 DSM(GPS による補正無し、12×12km)

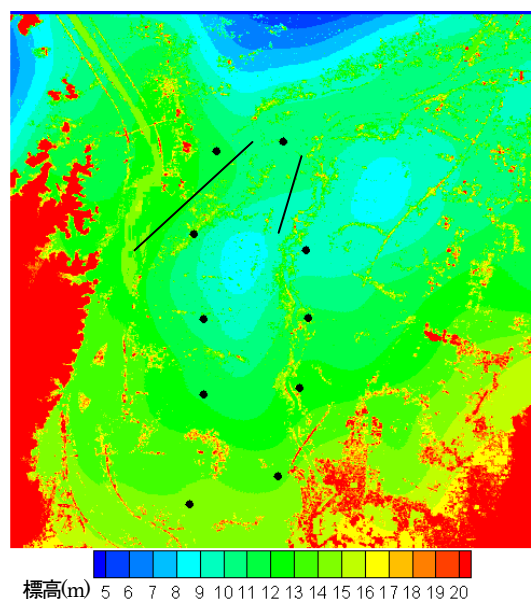


図-3-8 修正 DSM(GPS による補正有り、12×12km)

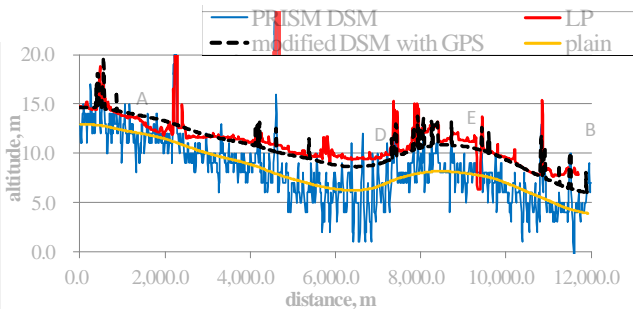


図-3-9 PRISM DSM、GPS 補正有りの修正 DSM、plain、LP データの標高縦断面図 (図-3-7 の A-B の断面)

画像データを参考にして決定した。図-3-10 は氾濫解析に用いた計算格子と氾濫解析の結果を示す。計算領域は幅 4km、流下方向に長さ 11km を設定し、流下方向に 51、横断方向に 21 の格子を作成した。また両側の側方境界条件及び下流端水位を自由流出とした。その他の計算条件として、初期水面形は水深ゼロ、計算タイムステップを 0.01 秒、移流項の差分方法は CIP 法を用いた。破堤後の氾濫原への流入流量に関して、猪股らの用いた流量ハイドログラフを採用した²⁹⁾。この流入は図に示す inflow が示す矢印と同じ向きの流れとした。さらに図-3-8 で示した GPS によるライン計測の結果、その近辺における比高が計算水位よりも十分高いため、ここでは障害物セルとして設定した。

図-3-10 の計算メッシュ内のコンター図は計算結果の一例を示す。解析結果の妥当性を検討するために、国土地理院の報告書を参考に³³⁾し、それを図-3-11 に示す。ここでは浸水域の痕跡水位が示されているため、図-3-10 においても計算終了時における氾濫解析の最大水深を示すにとどめる。解析結果と氾濫実績の形状は概ね等しい。特に氾濫域上・下流部は等しい。しかしながら中流地点では氾濫解析結果が若干広いように見える。猪股ら²⁹⁾は PRISM DSM 等を用いて氾濫解析を実施し、PRISM DSM を用いることの難しさを説明しているが、図-3-10 の解析結果は洪水氾濫実績とも限りなく近い結果を得ることができていることがわかる。

3.2.5 結論

本検討で議論した内容に関して以下にまとめる。

1) 本検討では全球での計測実績のある PRISM DSM を用いて氾濫解析を実施するための DSM の修正方法に関する検討を実施した。2) ここでは洪水氾濫流に支配的な影響を及ぼす氾濫原全体の勾配、構造物の正しい反映に関して特に注意を払い修正方法の確立を試みた。3) この手法は、DSM 修正を含め、氾濫解

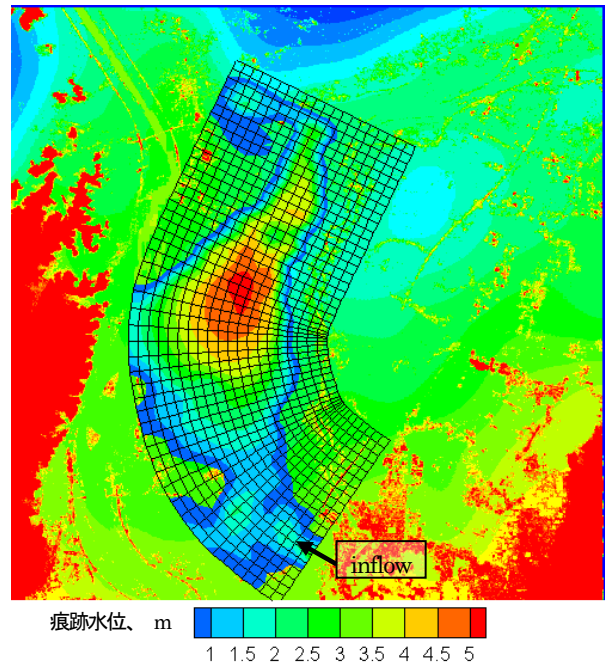


図-3-10 氾濫解析の計算格子と結果 (図中央には氾濫解析に用いたメッシュと計算中の最大水深を示す。)

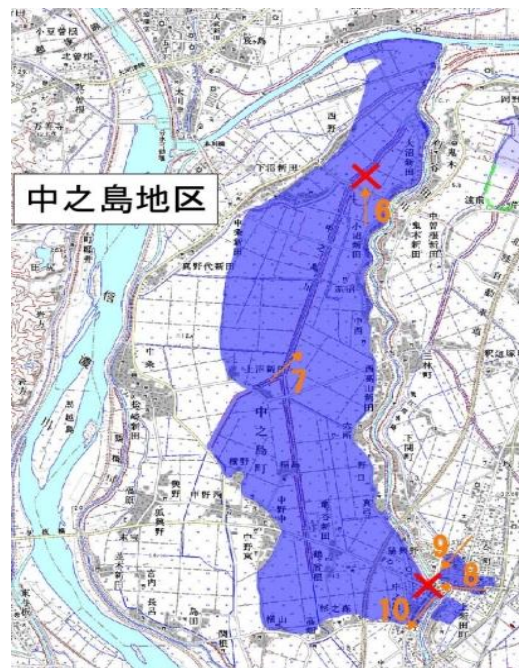


図-3-11 洪水氾濫実績¹⁶⁾

析の条件設定の作成のための現地計測を必須としている。ここでは鉛直方向に±15cm 程度の精度を持つ GPS を使用した。4) GPS の観測値を用いることで氾濫原の平面を修正した。また氾濫解析の条件設定に構造物の計測結果を反映させた。5) 平面の修正結果を LP データと比較すると、概ね正しく修正されているが、大きな構造物周辺では修正しきれない部分が生じた。これ

は patch サイズが GPS の計測地点数に拘束されていることに起因している。これを改善するためには同計測数を増やし、patch サイズを小さくすることで改善できると考えられる。6) 修正 DSM 及び現地計測を反映させた氾濫解析を実施した結果、過去の氾濫実績と同等の解析結果を得た。7) 本論文で検討した DSM の修正方法は GPS の計測精度、PRISM DSM の入手状況を考慮しても発展途上国において活用することが十分可能な技術である。また本検討のための現地計測は 8 時間程度であった。

3.3 人工衛星データを用いた洪水氾濫水位の算出手法の検討

3.3.1 はじめに

氾濫水域を算定する手法として、人工衛星を用いた手法があげられる。例えばAls DorfらはLandSat、Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)、SPOTに代表されるイメージセンサーを用いた手法、SAR画像を用いた手法を紹介し、これらはいくつか限界はあるものの実用に資する技術であることを指摘している³⁴⁾。また Kwak et al.はMODISから氾濫水を検出するための指標をつくり、それを用いて氾濫水域を算出している³⁵⁾。カンボジア国メコン川下流域における洪水氾濫解析に関してFujii et al. は各氾濫域にZoneを設定し、水バランスを算定し、数値計算により氾濫現象を議論している³⁶⁾。本検討では同氾濫地域に対して、2011年の洪水氾濫を対象に、観測結果を基にした氾濫水位の算出を試みる。ここでは、MODISを用いた郭らの手法³⁵⁾による氾濫水域を算定し、SRTMのDSMを組み合わせることで氾濫原における氾濫水位を算出することを試してみる。

3.3.2 対象領域

本検討の対象領域をカンボジア国のメコン川流域とし、それを図-3-12に示す。また対象洪水は同流域において近年で最も大規模な洪水であった2011年の出水とした。メコン川はチベット高原を源流として、中国、ミャンマー・ラオス国境、ラオス・タイ国境、カンボジア、ベトナムを経て南シナ海に流れ込む。同川はカンボジア国の首都であるPhnom PenhでTonle Sap湖から流れるTonle Sap川と合流し、Bassac川と分流する。またKampong Chamからメコン川沿いに10km下流付近の図中のDivergeから、Tonle Touch川が分流する。Kampong Chamにおけるメコン川の川幅が約1、200mであるのに対して、Divergeにおけるトンレトーチ川は70m程度である。メコン川本川には、Kampong Cham、Phnom Penh、Neak Luongに、

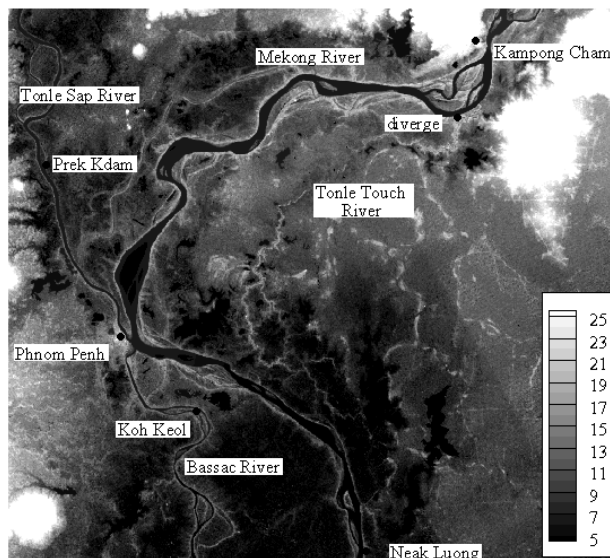


図-3-12 対象領域 (100km×90km)

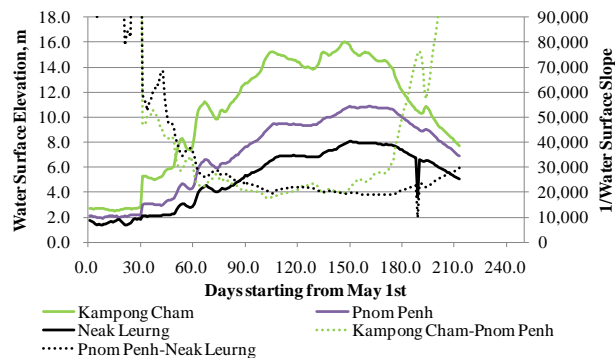


図-3-13 メコン川本川のハイドログラフ

Tonle Sap川にはPrek Kdamに、Bassac川には、Koh Keolに水位計がある。

図-3-13は2011年のKampong Cham、Phnom Penh、Neak Luongにおける水位変化、その時の水面勾配を示す。Kampong Chamにおける水位は、低水時の2.67mから徐々に水位をあげ、9月25日最大の水位となる。このときの値は16.02m、9月22日から30日まで一週間の平均水位は15.74mであった。またPhnom Penhにおける水位は位相差が出るため、ピーク水位は10月10日で、その時の水位は10.86mとなる。また9月25日のNeak Leurgにおける水位は7.84m、9月22日から30日まで一週間の平均水位は7.89mであった。このときの水面勾配は概ね1/20,000程度となる。

3.3.3 手法

(1) MODISを用いた氾濫域の算出と氾濫域の特徴

本検討の対象領域における氾濫域を算定するために、

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

MODISの8日間のコンポジットデータを用いた。これはほぼ全球においてデータが存在すること、500mメッシュ値であること、8日間のうちで雲などを取り除いた観測値であることが特徴的である。データは2011年5月下旬から2011年11月下旬までのデータを用いた。氾濫域の算出にはKwak et al.の手法³⁵⁾を採用し、式(5)に適用される。始めにMODISのband2(近赤外; NIR)及びband7(短波長赤外; SWIR)を用いて濁水を示す指標であるModified Land Surface Water Index (MLSWI)を式(5)を用いて算出する。

$$MLSWI = \frac{A_{SWIR} - R_{NIR}}{A_{SWIR} + R_{NIR}} \quad (5)$$

ここで A_i 、 R_i はそれぞれの波長の吸収率、反射率を示す。またこの i はNIR及びSWIRを示す。これらは A (absorption ratio) = $1 - R$ (reflection ratio)の関係があることから、使用する式が導出される。次にMLSWIの閾値を設定する。これは通常、0.5から0.8程度の数字を持つ。この値は、分光計などを用いた現地計測によるもの、又はDSM及び現地の水位データとの整合性から決定される。本検討では後者の考え方を採用し0.64を採用した。詳細は後述する。

図-3-14は2011年9月30日の結果を示す。図-3-12で示したSRTMのDSMのコンターに、MLSWIが0.64以上を示す全ての領域、氾濫域のZoneを示す。メコン川の氾濫は、Kampong Chamのさらに上流であるメコン川本川からの流入と、Tonle Sap湖から流れるTonle Sap川からの流入に大きく影響を受ける。紙面の都合上ここでは示さないが、2011年5月から同年11月までの時系列を見ると、氾濫域を図に示す複数のZoneにわけること対象領域の氾濫現象を分類できる。Zone1はMekong川の右岸に位置する領域で、領域内をMekong川の自然堤防で囲まれていること、Mekong川流域の特徴である灌漑システム(コルマタージュ)が複数存在することが特徴的である³⁷⁾。この領域はMekong川の水位が比較的低い7月下旬から領域内の水域の広がり確認できる。これは灌漑システムの一部であるため必ずしも氾濫として認識されるものではないが、コルマタージュが有効に機能していることになる。結果、Mekong川と氾濫域内の水位は強い関連があり、特に本検討の洪水のような大規模出水においては、両者の最大水位は等しいとして議論することも可能になる³⁸⁾。Zone2はFujii et alによるとTonle Sap湖の影響を大きく受ける領域である³⁶⁾。Zone3はMekong川左岸の氾濫原である。この氾濫原は7月下旬から8月初旬にかける水位が

低いとき、トンレトーチ川沿いの一部に氾濫水の広がりを確認することができる。それ以上の水位になると図-3-12が示すDiverge周辺の自然堤防を越えて、メコン川から氾濫水が入りこむようになる。これはあたかも図-3-14の□で示すラインを中心とした氾濫水の流れのようになることを推察させる。また猪原らの報告³⁷⁾にもあるように、Mekong川沿いにはZone3に流入する複数のコルマタージュが存在するが、その長さはMekong川から数kmである。これらのことからZone3の氾濫水の多くはdiverge周辺からの流入水であることが理解できる。Zone4及び5はZone1と同様の傾向を持つ。特にZone5は猪原³⁷⁾によると、コルマタージュの数が最も多い領域であるため、河川水位と氾濫水位の関連性は、Zone1以上に強いことになる。

(2) 氾濫水位の算定方法

図-3-15は図-3-12と同じコンター、□は氾濫流の中心として決定したライン、□を中心とした円の範囲内の氾濫水位、◆はDSMとMLSWIの接続点を示す。これらの情報から本検討の氾濫水位の算定方法を以下に述べる。

a) ターゲットとする氾濫現象を考慮して□を決定する。ここでは□の上流端付近においてKampong Chamの水位計があること、下流端付近においても若干離れているものの観測水位が推定できることが特徴的である。ここでは特に同両端の間の水面形を意識して□を配置する。

b) □を中心とした検査円の範囲内においてMLSWI値が閾値をまたぐ点を探す。ここではその検査円の半径を7500m、閾値を0.64とした。この結果、自動検出された地点を図-3-15の◆で示す。ここではMLSWIが閾値以下になる理由を、その地点が周囲と比べて高いため水没していないと仮定する。

c) ◆の地点におけるDSMの標高値を算出し、それをW-DSMとする。ここで◆のMLSWIは0.64をまたぐ地点ではあるが、必ずしも0.64の閾値を持つわけではない。ここではその隣のピクセルにおけるMLSWIとSRTMの関係が線形に決まると仮定し、MLSWIの閾値が0.64に対応するW-DSMを算定する。

d) □の水位及び地盤高を決定する。ここではそれぞれの◆を最も近い□にグループ化し、グループ内のすべてのW-DSMを平均し□の水位; AW-DSMとする。同時にそのときの標準偏差 σ も算出する。また□の位置における地盤高をDSMから取り出し、それをB-DSMとする。最後にe) AW-DSMの平面分布を決定する。ここでは□が受け持つb)の検査円内のグリッドの水位をAW-DSMと定義それを氾濫水位とする。上記のa)からe)の過程を踏むことで氾濫水位の平面分布が算出できた。

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

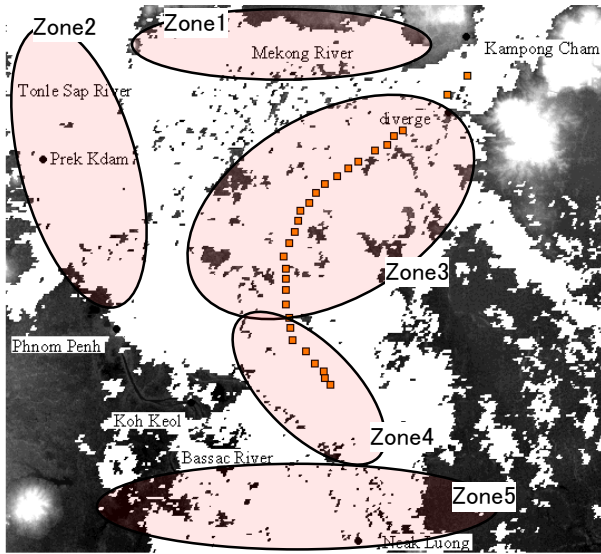


図-3-14 MLSWIの平面分布と氾濫域のZone

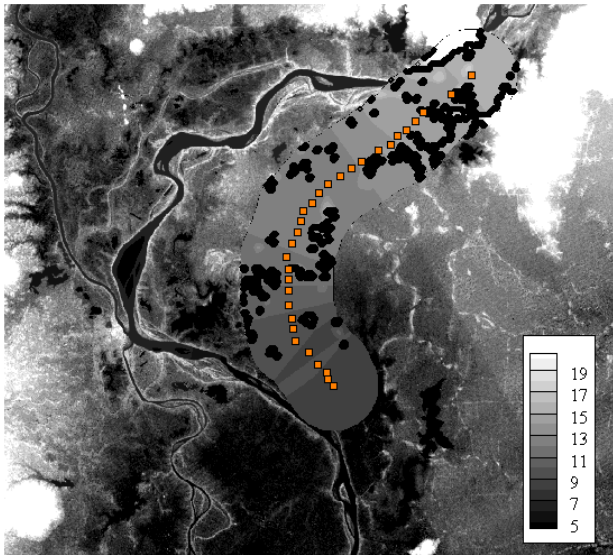


図-3-15 推定された氾濫水位

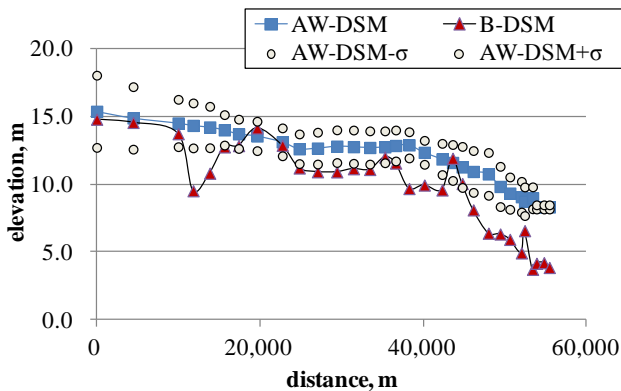


図-3-16 水位の縦断分布

次にd)で算出した、AW-DSM、 σ 、B-DSMを縦軸に、□の最上流端からの距離を横軸に描画したものを図-3-16に示す。図-3-16の上流端における算定水位は15.4m、下流端における算定水位は8.33mとなった。一方、図-3-13で示したようにKampong Cham、Neak Luongの9月下旬における計測水位はそれぞれ15.74m、7.89mである。図-3-16の下流端に対応する位置からNeak Luongの距離は20km程度であるため、そのときの水面勾配が1/20、000程度であることを考慮し、下流端における計測水位を8.89mとした。その結果、図-3-16の両端における算定及び計測水位の差は、上流端で0.34m、下流端で0.56mとなった。

3.3.4 考察

図-3-16の水位の縦断分布を決定するにあたり、3.(2)で説明した算定手法の過程の中で、b)で採用した検査円の半径、SRTMの質、MLSWIの閾値によってAW-DSM、 σ は異なる値を持つことが想定される。例えば検査円の半径が大きすぎると異なるzoneの氾濫現象を拾い、逆に小さすぎると拾えない。サンプリングの良し悪しは図-3-15の◆の分布状況で判断することができる。本検討ではこの円の半径を5kmから9kmに変化させて感度分析を実施した。結果、AW-DSM、 σ の変化は微小であるものの、5kmを選択した場合、不自然な水面形になった。この結果を受け、本検討では検査円の半径を7.5kmとした。

次にSRTMの質に関して議論を進める。例えばSRTMの生データを使用すると、水位の標準偏差が大きくなる。これはDSMが持つジッタノイズを含んだ、ばらつきのある大きな標高を拾うことに起因する。このようなノイズを消すために、萬矢らが提案した手法³⁹⁾の一要素である検査窓のサイズを変化させる感度分析を実施した。同サイズを5×5、10×10、25×25、50×50と4段階に変化させた結果、図-3-16の30km近辺の標準偏差に着目すると、それぞれ2.3m、2.0m、1.3m、0.93mとなった。この結果を受け、ここでは25×25を採用した。

最後にMLSWIの閾値である。これは水域の分布に大きな影響を及ぼす値である。ここではこれまでの議論とは逆説的ではあるが現地の水位データに合うように閾値を決定した。

結果として得られた図-3-16が示す水面形は以下の特徴を持つ。0から22kmまで1/10k、22kmから40km付近までほぼ平坦、40kmから下流端までが1/4k程度の水面勾配を持つ。また図-3-16の44kmにおいて東西に国道8号線が位置する。この道路は比高差が4～5m程度の道路盛土を持つ。ところどころアンダーパスがあるため氾濫流を完全に阻

害することにはならないが、図-3-16の水面形を平坦にする要因はこの道路盛土によるものであることが推定できる。

3.3.5 結論

結論を以下に示す。1) 人工衛星から得られる情報を用いて洪水氾濫水位の算出を試みた。対象領域をカンボジア国内のメコン川下流域とし、2011年洪水に関して分析をした。2) 使用したデータはSRTM、MODIS及び現地の水位データである。3) Kwak et al. の提案するMLSWIを用いて5月下旬から11月下旬の氾濫現象を分析し、氾濫域を区分けし、本論文で検討する領域を決定した。4) MLSWIから算出した水域とSRTMのDSMから氾濫水位を面的に算出した。この結果を用いて水位の縦断分布を考察した結果、現地の河川構造物から水面形の妥当性を得た。

4. まとめ

今年度は「氾濫解析」、「氾濫被害算定に関する研究」、「氾濫水理量の観測技術開発」に着目し、観測データが不十分な地域において、大洪水氾濫規模の定量評価手法開発を行うことで以下の成果が得られた。

1) 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：合成開口レーダ(SAR) センサの洪水前後データを用いて、その後方散乱係数(backscatter)の差分から家屋の倒壊・流出位置を特定するアルゴリズムを設計した。

2) 氾濫水理量の観測技術開発：衛星データ(SRTM、MODISなど)を用いて氾濫水位を面的に算出し、現地の河川水位データ、GPS 標高観測データと氾濫水位の関連性を分析するとともに、氾濫水理量(水面勾配・氾濫流量等)も算出した。

参考文献

- 1) 島田政信：合成開口レーダー処理、測地学会誌、45(4)、pp. 277-281, 1999
- 2) Wiley, C. A. : Pulsed Doppler Radar Methods and Apparatus, U. S. Patent 3,196,436. Filed August 13, 1954, patented July 20, 1965
- 3) Wu, C. : A digital approach to produce imagery from SAR data, presented at the AIAA Syst. Design Driven by Sensors, Pasadena, Ca, OCT. pp.18-20, 1976
- 4) 松岡昌志, 山崎文雄：1995年兵庫県南部地震での建物被害地

域における人工衛星 SAR 強度画像の特徴, 日本建築学会構造系論文集, No. 546, pp. 54-61, 2001

5) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星 SAR 強度画像による建物被害地域の検出手法, 日本建築学会構造系論文集, No. 551, pp. 53-60, 2002

6) Horritt, M.S. : A statistical active contour model for SAR image segmentation, Image and Vision Computing, Vol.17, pp.213-224, 1999

7) Ahton, P., Euro, M., Hallikainen, M., Solbø, S., Johansen, B., and Solheim, I. : SAR and optical based algorithms for estimation of water bodies, Technical report, Flood Man Project, 2004

8) Matgen, P., Schumann, G., Henry, J.-B., Hoffmann, L., and Pfister, L. : Integration of SAR-derived inundation areas, high precision topographic data and a river flow model toward real-time flood management, Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9, pp.247-263, 2007

9) Sobue S., Kawano N., Oyoshi K., Shimada M., Mukaida A., Isoguchi S., Yamanokuchi T., Ogawa T., Nakata T., Tomiyama N. : Thai Flood Disaster Monitoring by Airborne SAR (Pi-SAR-L), 日本リモートセンシング学会誌, 32(1) pp.22-26, 2012

10) JAXA, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jpi-sar_thai_nov2011_2.htm

11) Amarsaikhan, D. H. H. Blotvogel, J. L. van Genderen, M. Ganzorig, R. Gantuya & B. Nergui : Fusing high-resolution SAR and optical imagery for improved urban land cover study and classification, International Journal of Image and Data Fusion, 1(1), pp.83-97, 2010

12) Vidal, A. & Moreno, M. R. : Change detection of isolated housing using a new hybrid approach based on object classification with optical and TerraSAR-X data, International Journal of Remote Sensing, 32(24), pp.9621-9635, 2011

13) リュウ・ウエン, 山崎文雄, 郷右近英臣, 越村俊一: 高解像度 SAR 画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波湛水域と建物被害の抽出. 日本地震工学会論文集, 12(6), 2012

14) Liu, W., Yamazaki, F. : Object-Based Shadow Extraction and Correction of High-Resolution Optical Satellite Images, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(4), pp.1296-1302, 2012

15) 国土地理院 GSI : http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html

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

- 16) JAXA, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_tohokueq_110313.htm
- 17) 松岡昌志, 能島暢呂: 人工衛星LバンドSARに基づく建物の地震被害推定モデルの構築とALOS/PALSAR画像への適用. 日本地震工学会論文集, 10(3), pp. 73-86, 2010
- 18) 日本スペースイメージング: 東日本大震災特設サイト http://www.spaceimaging.co.jp/EastJapanEarthquake/record_collection/one-year/cosmo_skymed/tabid/681/Default.aspx
- 19) <http://www.navcomtech.com/StarFire/>
- 20) 川口ら: 2004年7月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫流に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp. 577-582, 2005年2月
- 21) 椿ら: 航空レーザー測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析, 土木学会論文集No. 810/II-74, pp. 91-102, 2006
- 22) 河川シミュレーションソフトiRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 23) 竹内ら: 気候変動に伴う全休及び特定脆弱地域への洪水リスク影響と減災対策の評価, 21世紀気候変動予測革新プログラム, 平成23年度研究成果報告書, 平成24年3月
- 24) Youngjoo Kwak et al.: A new approach to flood risk assessment in Asia-Pacific region based on MRI-AGCM outputs, Hydrological Research Letters 6, pp. 70-75, 2012
- 25) 佐山ら: 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B, 印刷中
- 26) Dai Yamazaki et al.: Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling, Journal of Hydrology, pp. 436-437, 2012
- 27) Takeo Tadano et al.: Update calibration results of PRSISM and AVNIR-2 onboard ALOS 'Daichi', IEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, , pp.5029-5032, 2012
- 28) T. Tadono, M. Shimada, H. Murakami, and J. Takak: Calibration of PRISM and AVNIR-2 Onboard ALOS "Daichi", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47(12), pp.4042-4050, Dec. 2009
- 29) 猪股ら: 人工衛星地形データの精度評価および洪水氾濫シミュレーションへの適用, 水工学論文集, 第54巻, pp. 925-930, 2010年2月
- 30) Junichi Takaku, Takeo Tadono: High resolution dsm generation from alos prism - processing status and influence of attitude fluctuation, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, 10.1109/IGARSS.2010.5653527, pp.4228-4231, 2010
- 31) Richard M. Goldstein, Charles L. Werner: Radar interferogram filtering for geophysical applications, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 25, NO. 21, P. 4035, 1998
- 32) 栗城ら: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案) -シミュレーションの手引き及び新モデルの検証, 土木研究所資料, 第3400号, 1996
- 33) 国土地理院: 平成16年7月新潟・福島豪雨による冠水区域図(三条・見附・中之島地域), <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/SAIGAI/16niigata/higai-zyoukyou-niigata-suigai.html>
- 34) Alsdorf, D. E., E. Rodriguez, and D. P. Lettenmaier: Measuring surface water from space, Rev. Geophys., 45, RG2002, 2007
- 35) Kwak, Y. et al.: Estimation of flood volume in Chao Phraya river basin, Thailand from MODIS images coupled with flood inundation level, IEEE-IGARSS2012, pp. 887-890, 2012
- 36) Fujii et al.: Hydrological roles of the Cambodian floodplain of the Mekong River, International Journal of River Basin Management, Vol. 1(3), 2003
- 37) 猪原: カンボジアにおけるコルマタージュの持つ洪水緩和機能の定量的評価, 平成19年度鳥取大学農学部卒業論文要旨
- 38) Shrestha et al.: Development of flood vulnerability indices for lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, I_1-I_6, 2013
- 39) 萬矢ら: 氾濫解析のためのPRISM DSMの活用とGPSを用いたその修正方法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I_1549-I_1554, 2013

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY 2011-2015

Research Team : Water related disaster research group

Author : Kazuhiko FUKAMI

Atsuhiko YOROZUYA

Youngjoo KWAK

Abstract : ICHARM has been involved in the development of a method for estimating flood area and damage in a short period of time by using remote sensing techniques and a method for estimating flood volume in areas with insufficient ground data to assess flood magnitude quantitatively. In FY2012, we worked on the development of a method and algorithm for estimating flood areas and extracting damaged houses during an extreme flood by using fusion images combining high resolution optical images with SAR images. In addition, we tested and improved the flood-volume estimation method developed in the previous year, e.g. MLSWI from MODIS image.

Key words : remote sensing, flood area, flood volume, SAR (Synthetic aperture radar)