

表-2-1 使用した衛星画像データ

| 画像 | Acquisition time (UTC) | 地上分解能 |
|----------------|-------------------------|------------------------------|
| CSK 2 (SAR) | 22 March 2011 08:33 津波後 | 2.5 m (40km×40km) |
| | 22 May 2010 08:37 津波前 | Multi look |
| GE 1 (光学) | 13 March 2011 10:19 津波後 | Pan 0.41 m |
| | 23 July 2010 10:32 津波前 | Multi 1.64 m (15km×595km) |

表2-1に示したように津波前後の2時期の画像を用いて、特に、SAR(COSMO-SkyMed)データは下降軌道からHH偏波、観測角度 40.12° であり、Stripmap Himage モード(ルック方向:右側)で撮影された。空間分解能 2.5m (40km×40km)Multi look である。

2.1.1 合成開口レーダ(SAR)データの前処理

マイクロ波を用いた SAR 画像の前処理として、放射輝度補正とノイズの除去を行った。放射輝度補正は、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後方散乱係数(backscatter : σ^0)に変換処理し(式 1)、震災前後の 2 時期の後方散乱係数は、-58.64dB から 37.68dB と-38.08 dB から 38.04 dB の範囲であった。また、3×3 ピクセルのウィンドウ幅を持つ標準偏差フィルター処理でノイズの除去を行った。

$$\sigma^0(i,j)_{dB} = 10 \times \log_{10}(\sigma^0(i,j) \times (R_{ref}^{(2 \times R_{exp})}) \times \sin(\alpha_{ref}) \times (1/F^2)) \quad (1)$$

ここで、 R_{ref} はスラントレンジ、 R_{exp} はスラントレンジ指数、 α_{ref} は入射角、 F は換算係数である。

2.1.2 被害域の流出家屋数推定

流出家屋の数を推定するには、震災前後の画像を用いて後方散乱強度の差分処理が最もシンプルかつ有効であるため、式2により建物の閾値 I [dB]は0.48 (震災前)と0.61 (震災後)以上を設定し、建物ピクセルと1棟単位で検出した²⁾³⁾。閾値 I が異なるのは後方散乱係数(強度画像)が観測日によって微妙に違うからである。

$$I(i,j)_{dB} = \mu(i,j)_{dB} - c \times \sigma(i,j)_{dB} \quad (2)$$

ここで、ヒストグラムの平均値(μ)と標準偏差(σ)、 c は1.0~2.0の範囲の調整係数である。建物被害は後方散乱強度の変化量が大きいほど、変化した可能性が高いので津波前後の 2 時期画像の後方散乱強度変化指数(normalized change index : NCI)を式(3)で求める。しかし、建物の位置は建物の高さと同比例、レーダの入射角

と反比例するため、一棟ごとに建物の高さ情報があれば位置精度が高くなるが、今回は建物の高さを 10m (東へ4ピクセル、北へ2ピクセル移動)と見なすことにする。

$$NCI = \frac{\frac{I_{post}}{\text{Max}(I_{post})} - \frac{I_{pre}}{\text{Max}(I_{pre})}}{\frac{I_{post}}{\text{Max}(I_{post})} + \frac{I_{pre}}{\text{Max}(I_{pre})}} \quad (3)$$

ここで、 I_{post} と I_{pre} は津波前と津波後の画像における後方散乱係数から建物の閾値であり、Max は検討範囲における最大値を表す。

2.2 流出家屋の推定結果

SAR 画像観測範囲内(陸前高田市の沿岸部)で推定した家屋や建物は、図-2-2 に示したように高田町と米崎町沿岸部で NCI が-0.0188 以上のピクセル差が発生した場合、建物や人工物(橋やコンクリート構造物など)の変化があると判断した。その結果、自動アルゴリズムにより流出家屋は 3,168 戸と推定できた。空色は流出して消えた建物、青色は残留家屋や建物、赤いピクセルは流出物などと推定できる。図-2-3 は津波前後の 2 時期の高解像度衛星(SAR と GeoEye)を比較し、検出されたサンプルを示す。しかし、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(GeoEye)を用いて浸水域の中にある建物の流出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⁴⁾。

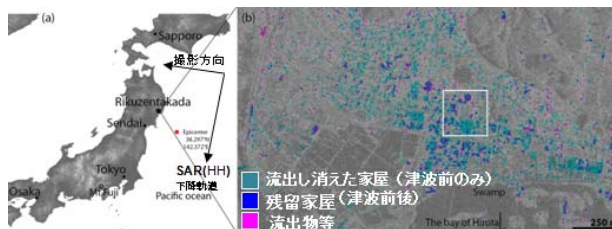


図-2-2 衛星観測範囲内(陸前高田市の沿岸部)で推定した家屋:津波前後の2時期カラー合成SAR画像(2.5m)

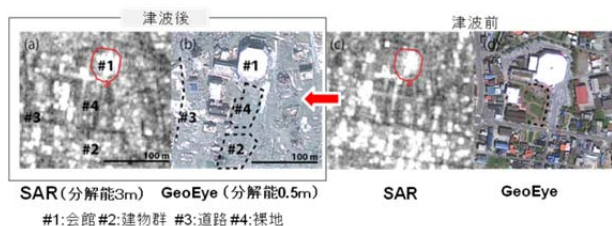


図-2-3 津波前後の2時期の高解像度衛星(COSMO-SkyMed : SAR(a, c)とGeoEye : 光学衛星(b, d))の比較の例

2. 3 結論

本研究は 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を開発・適用した。自動アルゴリズムにより流出家屋位置・戸数推定ができたが、建物に対して倒壊程度は判読できず、輪郭が合わない、被害が検出できないなど様々な改善すべき点は残っている。抽出された建物の結果より、(1)ピクセル単位の家屋の判定は困難であるため、建物単位の流出率推定アルゴリズム、(2)判読分析(検証)を行うため高分解能画像のオブジェクト(Object)に分割した上でのクラス分類、(3)建物の棟数で評価した精度と面積で評価した精度の比較、など今後の課題も明らかになってきた。このような研究は事例も少なく、非常に高い位置精度を要するため、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変化(相関)を定量的に算出し、抽出した家屋件数を高解像度光学画像とサンプル比較したり、陸前高田市の現地調査データと比較し、データ処理法の改良の可能性についても今後検討する。

3. 氾濫水理量の観測技術開発

3. 1 研究地域

本研究の対象領域は平成24年度に試行した範囲と同様で(図-3-1:メコン川のカンボジア平原 Lower Mekong Basin, 2011年の洪水)洪水氾濫特性(経年変化)・氾濫形態・灌漑システムであるコルマタージュの位置関係に応じて5つZoneに分類されている⁵⁾。Zone 1は、Kampong Cham から15 km程度下流から始まるMekong River右岸側の氾濫域である。Zone 2はTonle Sap River沿い、Zone 3はBassac River右岸、Zone 4はBassac RiverとMekong Riverの間に挟まれた氾濫域、Zone 5はMekong River左岸の領域である。

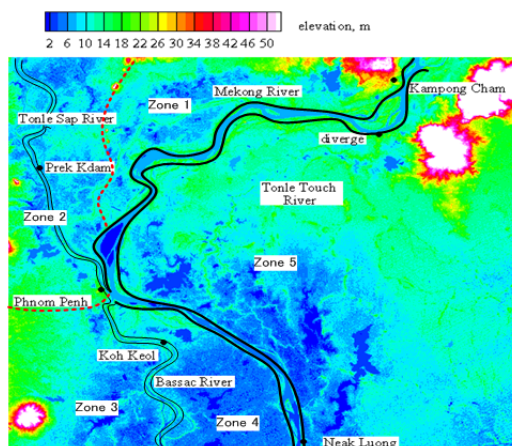


図-3-1 検討対象領域 (100km×90km)

3. 2 研究手法

図-3-2に示したように人工衛星データを活用した洪水氾濫水位を算出し、氾濫水位の面的な分布から算出する水面勾配から氾濫水の流速を算出することを試みる。氾濫域、氾濫水位、氾濫水の流速を算出するため500 mメッシュのMODISの8日間コンポジットデータをニアレストネイバーで100 mグリッドにしたもの、既設の水位計の水位データ、90 mメッシュのSRTM DSMを同様にニアレストネイバーで100 mグリッドにしたものを使用する。

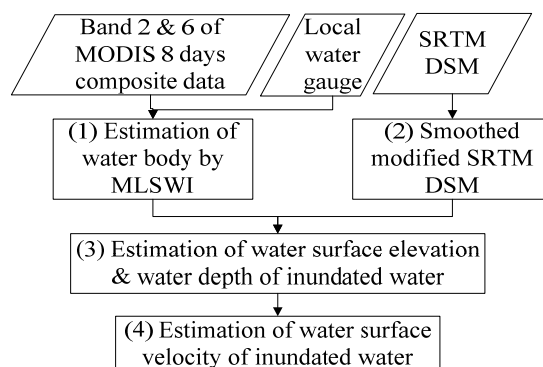


図-3-2 氾濫域、氾濫水位、氾濫水流速算定のフロー

3.2.1 MODISを用いた氾濫域の算出

Kwak et al.の手法Modified Land Surface Water Index (MLSWI)を用いて氾濫域を算出し⁶⁾、MLSWIの閾値を設定する。MLSWIが水域とした領域と水位データが示す水位以下の標高を持つ領域、両者の閾値が一致することが整合性があることを意味する。本検討では図-3-1で示した各Zoneに少なくとも一つ存在する水位計とDSMを用いてMLSWIの閾値を決定した。これらの値を表-3-1にまとめる。

3.2.2 SRTM DSMのスムーズ化

PRISM DSMやSRTM DSMはある程度のノイズを含むものの自然堤防や道路盛土等の氾濫現象に大きく影響を及ぼす構造物が計測されていることがわかる。萬矢らはPRISM DSMを氾濫解析の実用に資する数値データとするために、ノイズは除去するが、構造物は残す処理方法を提案した⁷⁾。本検討では同手法をSRTM DSMに適用することで、全ての領域に対して500 m×500 mのサイズでSRTMを平坦化した。

表-3-1 水位・流速算出に使用したパラメーター

| Zone | Threshold value of MLSWI | Size of moving window | |
|------|--------------------------|-----------------------|-------------|
| | | i direction | j direction |
| 1 | 0.64 | 300 | 300 |
| 2 | 0.74 | 300 | 300 |
| 3 | 0.45 | 500 | 200 |
| 4 | 0.45 | 500 | 500 |
| 5 | 0.64 | 150 | 150 |

3.2.3 氾濫域の水位及び水深の算出

Zone毎に算出した氾濫域、修正DSMを用いて氾濫域の水位及び水深を算出する。はじめに、閾値以上のMLSWIの分布と修正DSMの分布からMLSWIの端におけるDSMの値が水位の標高値であると仮定する。ここではその近傍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の値が閾値に相当するDSMの標高を水位とする。次に、これらの複数の水位から最小二乗法により三次元の平面を決定する。これで一つの2 km × 2 km程度のサイズの検査領域内の水面を示す平面が決定した。この検査領域は表-3-1に示すように、Zone毎に異なる値を使用した。これらを96%の重複率で面的に移動平均を実施する。このようにしてZone内全域における水面形が作成されたことになる。最後に、ここで作成された水面形と修正DSMを差し引きすることで水深の平面分布が求まる。

3.2.4 氾濫域の流速値の算出

氾濫域の流速値を算出するためにマンニングの平均流速公式を用いる。マンニングの粗度係数は0.03で固定とした。勾配は水面勾配として3.2.3と同様に検査領域を設定し、水位の分布から内部の三次元平面を算出する。同平面のX方向、Y方向をそれぞれの方向96%の重複率で面的に移動平均を実施して、Zone内全域における水面勾配を求めた。ここで算出した水面勾配、水深、マンニングの粗度係数から各地点における流速が求まる。

3. 3 研究結果

3.3.1 水位の算出結果

図-3-3はDSMのコンター図に、水位(Water Surface Elevation: WSE)の分布を示したものである。Zone 1にはメコン川本流の上流から下流方向にかけて3m程度の水位差がある。このZoneは氾濫原の水域の多くがコルマタージュから入る流れにより影響を受ける領域で、メコン川の水位が低くても氾濫水が存在する。Zone 1及びZone 2の境

界にコンター図が示すところの2段階程度の差が存在する。現地調査をした結果、道路盛土と所々にアンダーパスが存在するため、大きな河積阻害となる。両者を別のZoneに分けて水位分布を作成したためこのように階段状の水位変化をもたらす結果となったが、実際にはこの程度の水位変化はあっても不思議ではない。Zone 2の領域内では1 m程度の水位差しか存在しない。ここでは図-3-3が示すように地形勾配と比較すると流れが逆向きであることが特徴的である。Zone 3, 4はそれぞれBassac川の右岸、Bassac川とメコン川の間で、コルマタージュが多く存在する領域であり、領域内にも大きな水位変化が見られない。Zone 5はKampong Cham州周辺でメコン川から溢れた水が直接流れ込む領域である。水位はメコン川から徐々に水位を下げ、氾濫原に乗り上げると大きく広がる。地点A近傍は局所的に水位が高く、そこから特に南へ向けて水位差を持つことがわかる。ここから少し下流には国道8号線(National High Way 8: NHW8)がある。これは4~5 m程度の比高を持つ道路盛土とところどころに数十 m から100 m程度の広さを持つ橋梁が存在する。この橋梁は氾濫水を完全に遮断しないようにするためのものであるが、大きな河積阻害になりえる。NHW8の上流側と下流側のコンターの間隔を比較すると下流側の方が狭くなっていることがわかる。

次にZone 5の氾濫原にあるTonle Touch川に並行するようにプロットした一連の□から水位の縦断変化を議論する。図-3-4はそれぞれの□における水位の平均、標準偏差、その点における標高値を示す。水位の縦断分布から水面形は0から22 kmまで1/13k、22 kmから34 km付近までほぼ平坦(特にNHW8)、34 kmから52 km付近まで1/6.4k程度、52 kmから下流端までが1/1.7k程度の水面勾

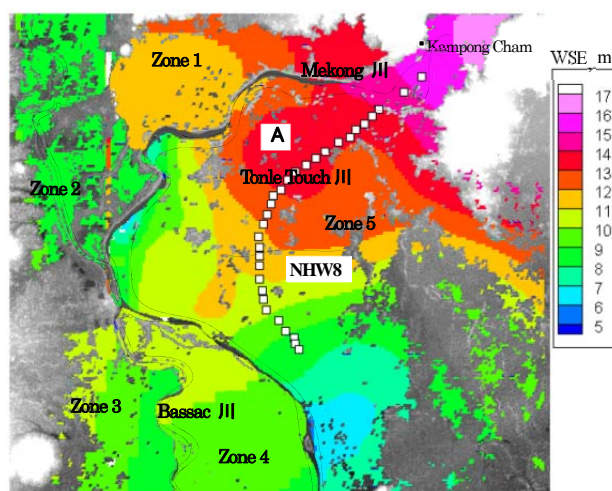


図-3-3 水位分布 (100km×90km)

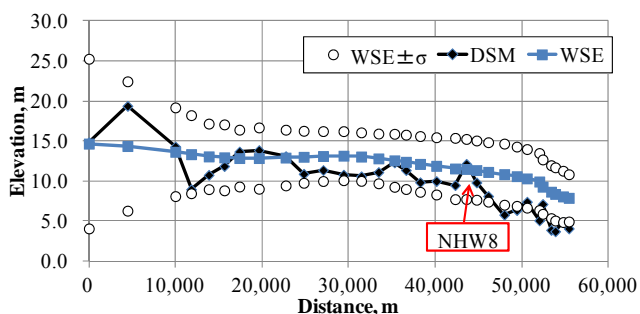


図-3-4 水位の縦断分布

配の特徴を持つ（最上流端から最下流端までの勾配は1/8k）。また、図-3-4 上流端における算定水位は14.67 m、下流端における算定水位は7.89 mとなった。一方、図-3-1 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15.74 m、7.89 mである。下流端に対応する位置から Neak Luong の距離は20 km程度であるため、そのときの水面勾配が1/20k程度であることを考慮し、下流端における計測水位を8.89 mとすると、両端における算定及び計測水位の差は、上流端で1.07 m、下流端で1.00 mとなった。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。

3.3.2 流速の算出結果

図-3-5 は DSM のコンター図に、算出された流速の絶対値のコンターとベクトルを示したものである。Zone 1 や5 では1.0 m/s を超えるような大きな流速値が発生している。一方、Zone 2 の流速値は1.0 m/s 以下の小さな流れである。Zone 3 及び4 の流速値はほとんど検出されないぐらい小さい値を取る。Area A での流速分布は、メコン川で流下しきれなくなった河川水が氾濫原にあふれている様子が良く示されている。ここは Kampong Cham 近傍の領域であるが、それよりも上流部でメコン川が山地にはさまれているところから氾濫原が広がる部分である。一方、メコン川の内部で大きな流速を示すことがある。これは DSM の計測時に出る特徴を表していて、水面下の標高値が適切に計測されていないことに起因している。このような場所では周囲と比較すると水深が極端に大きくなることもあり、流速値としても大きな値を取ることが多い。この他にも湖沼があるような場所においても同様のことが起きる。Area B は局所的に水深が高く、かつ水面勾配が平坦に近い領域である。それに対応するように流速値も低く氾濫水が広がっている様子がわかる。Area C は本手法でも難しさを示

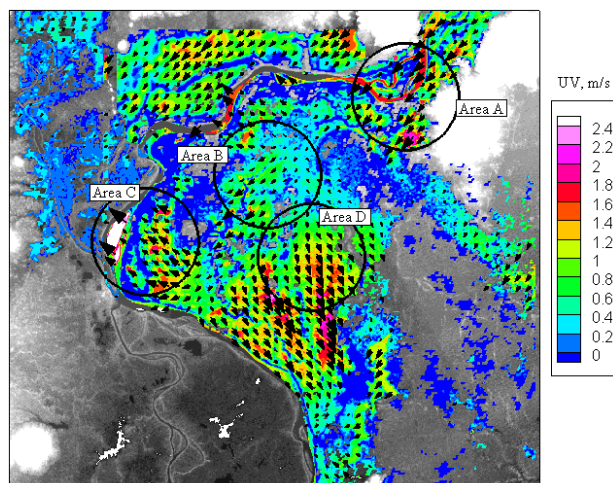


図-3-5 氾濫水の流速分布 (100km×90km)

す象徴的な領域である。メコン川に大きな水深を持つため、大きな流速を持つことになる。また流向も河川の上流から下流への流れではない。この流向に関する矛盾点は Zone の境界付近で起きる問題である。またメコン川の流れの向きを考慮していないことも課題の一つである。Area D はNHWSの下流側であり、強い水面勾配を持つ。ここでは流速が早く流向も安定し、北から南へ流れている。

3.4 結論

本検討により、人工衛星から得られる情報 (SRTM, MODIS) と現地の水位データを用いて Kwak et al. の提案する MLSWI から算出した水域と萬矢らの提案した修正 DSM から氾濫水位を面的に算出できた。氾濫流量を算定するため、まず、面的な水位の分布、水面勾配、水深を算出した。粗度係数を一定と仮定した上で、流速の面的な分布まで算定した。本検討のように過去の大きなイベントに関して検討する場合、水位分布の妥当性が流速値の妥当性を検討したことになる。流速値の算出に当たってはいくつかの課題が残っているものの、部分的には妥当な流況を示している。今後、これらの結果から得られた流速値は水位の算出で起きるエラーに大きく影響を受けてしまうので、マスコン法などを取り入れる必要がある。また、氾濫流量を算出のため、メコン本流の流量に関して現地における流量値の妥当性も含めて検討を実施し、氾濫原全体に存在する水の総量を算定することを検討する。

4. まとめ

2013

今年度は「流出家屋位置・戸数推定アルゴリズムの開発」、「氾濫水量の観測技術開発」に着目し、大規模水災害の定量的な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:平成 24 年度に設計した自動アルゴリズムを改善して津波による流出家屋数を推定した。

2) 氾濫水量の観測技術開発:平成 24 年度に試行した手法を発展させ人工衛星を活用した洪水氾濫水位を算出し、氾濫流量を算定するため、氾濫水位の面的な分布から水面勾配、氾濫水の流速分布値まで検討した。

本研究は、洪水氾濫や家屋被害等の衛星画像分析技術を活用し、復旧活動支援等の実利用に役立てるための手順・手法をとりまとめ提案する。今後、衛星による洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムの検証（分光器による MODIS 画像処理の妥当性を検証）を行うとともに、氾濫流量を算出する観測技術について、総合的な手法を検討しとりまとめる。

参考文献

- 1) 陸前高田市, “復興計画”, 2013
<http://www.city.rikuzentakata.iwate.jp/kategorie/fukkou/fukkuou.html>
- 2) 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
- 3) リュウ・ウェン, 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
- 4) 国土地理院 GSI:
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html
- 5) 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
- 6) Kwak, Y., Park J, Fukami K: Near Real-time Flood Volume Estimating from MODIS Time-series Imagery in the Indus River Basin, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 7(2): pp.578 - 586, 2014
- 7) 萬矢敦啓・郭栄珠・白鳥昭浩・深見和彦: 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,

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ESTIMATING FLOOD AREA, VOLUME AND 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

Youngjoo KWAK

Abstract : The International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) has been involved in the development of an accurate methodology to observe a broad inundation area or damage on flooded buildings by using remote sensing using satellite information. This research is aiming to facilitate emergency rescue activity in the developing countries. Additionally, this study is aiming to utilize estimation of flood volume (e.g. water depth, discharge amount) in the quantitative study on actual phenomena and characteristics of flood flow and verification of calculation of inundation simulation. In FY 2013, we worked on development of a method to estimate related to location of damaged building and an algorithm to estimate the number of damaged buildings by using multi-temporal images from the Synthetic Aperture Radar (SAR). In addition, we tested and improved the estimation method for floodwater velocity and flood depth, which developed in the previous year (e.g. modified DSM and MLSWI from satellite data).

Key words : SAR (Synthetic aperture radar), building loss, floodwater velocity, flood depth