DSM の半自動作成による2011 年津波時の 沿岸被害把握の試み

有働 恵子¹・武田百合子²・越村 俊一³

¹正会員 東北大学准教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: udo@irides.tohoku.ac.jp

²東北大学産官学連携研究員 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: takeda@irides.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

現時点におけるDSM作成の最先端技術を用いた沿岸域被害把握の可能性を探るため、2011年の東北地方沖地震津波により甚大な被害を受けた仙台湾南部海岸を対象に、リモートセンシングソフトウェアERDAS IMAGINEによって半自動作成したDSMと、航空レーザ測量により作成された数値標高モデルDEMを比較することにより、作成したDSMの精度を検証するとともに、被災前後の被害推定の妥当性を確認した。半自動作成したDSMの妥当性は、同時期に取得されたDEMとの残差と土地被覆状況を比較することにより確認した。被災前後のDSMの残差特性から、地表物の少ない低平地の被害を把握することは困難であったものの、海岸林領域や住宅地領域の被害把握は可能であった。また、被災前のDSMに代えてより精度の高いDEMを用いることにより、津波による海岸堤防周辺の被害把握が可能であった。

Key Words : DSM, ALOS PRISM, tsunami disaster, coastal forest damage, seawall breach

1. 緒言

近年の衛星技術の急速な発展により、衛星画像の解像度は最高で数10 cm程度、回帰日数は数十日まで向上し、詳細かつ迅速な情報が入手できるようになった。さらに、災害時には衛星による緊急観測が行われており、衛星画像から迅速かつ簡便に被害状況を把握するリモートセンシング技術の開発も盛んに行われている。

衛星画像には、様々な観測波長帯のものがあり、用途に応じて使い分けられる。災害時に用いられる画像としては、主に光学衛星画像と合成開口レーダ(SAR)画像があり、それぞれの長所を生かした被害把握技術の進展が期待される。SAR観測は、天候によらず地表面の観測が可能であるという優れた長所を有しており、2011年の東北地方太平洋沖地震津波における浸水域や建物被害把握においても、良好な精度を有する被害把握技術が開発されている^{1) 2)}。一方、光学衛星画像は天候に左右され、雲量が多い場合には被害状況把握が困難であるという欠点はあるものの、カラー画像は視覚的にわかりやすく、ステレオペア画像を用いれば海岸のような狭域においても比較的精度の高い地表面高さデータ(Digital Surface Model, DSM)作成が可能であるなど、より多くの情報

を入手できるという長所を有する。

衛星画像から作成したDSMの精度検証についての研究は多数行われ、全球地形データの整備等に応用されている^{3) 4) 5)}。しかし、ALOS/PRISM(空間分解能2.5 m)を用いて自動作成された最新の全球高精度デジタル3D地図(ALOS World 3D)⁶⁾の数値標高モデルであっても、解像度は5 mと高いものの、高さ精度は5 mであり、海岸のような微地形の再現においては十分な精度であるとは言い難い。精度を向上させるためには手動でGCP(地上基準点)設定を行う必要がある⁷⁾。よって、沿岸域における衛星画像を用いたDSMによる被害把握については、研究例⁸⁾が少なく、活用されていないのが現状である。

本研究では、現時点におけるDSM作成の最先端技術を用いた沿岸域被害把握の可能性を探るため、2011年の東北地方沖地震津波により甚大な被害を受けた仙台湾南部海岸を対象に、リモートセンシングソフトウェアERDAS IMAGINEによって半自動作成したDSMと、航空レーザ測量により作成された数値標高モデルDEMを比較することにより、作成したDSMの精度を検証するとともに、被災前後の被害推定の妥当性を確認することを目的とする。

表-1 被災後のDSM作成に使用した衛星画像と被災前のDEMデータ

作成データ名	DSM2006	DSM2011
取得日	2006年12月28日	2011年4月10日
シーンID	ALPSMN049302835 ALPSMB049302890	ALPSMN277442835 ALPSMB277442890
分解能	2.5m	
使用データ名	DEM2006	DEM2011
測量方法	航空レーザ測量	航空レーザ測量
取得日	2006年	2011年3月
分解能	5.0m	

2. 解析方法

被災前後の衛星画像を用いた解析の概要を図-1に示す。まず、リモートセンシングソフトウェアERDAS IMAGINEを用いて作成されたDSMの精度を検証するため、2006年および2011年の衛星画像を使って作成したDSM（以下、それぞれDSM2006およびDSM2011と記す）と同時期の数値標高モデル（東北地方整備局提供；以下、それぞれDEM2006およびDEM2011と記す）をDSMより差し引くことにより土地利用別に残差特性を調べ、また、DSM2011からDSM2006を差し引くことにより、土地利用別に被災前後の残差特性を調べ、被害推定の妥当性を確認することとした。なお、DEMの高さ精度は30 cm以内とされている。

DSM作成に使用した衛星画像およびDEMデータの詳細は表-1のとおりで、2006年12月28日と2011年4月10日に仙台湾で観測されたALOS/PRISM（直下視）の衛星画像データをそれぞれ図-2(a)および2(d)に示す。空中三角測量においては、RPC（精密幾何モデル係数）ファイルの誤差補正のための地上基準点（GCP）設定が必要となる。ここでは、既存の研究^{8) 9)}を参考に、なるべく均等に5点程度のGCPを正確に設定できるように、DSM作成領域を約1.5 km四方のグリッドに分割し、各グリッドに存在する道路の交差点や橋の中央など高低差の少ない地表面であり、かつ季節変化や経年変化が起こらない地点を選定して手動で設定することとした。次に、直下視画像と後方視画像とのステレオ画像対応点であるタイポイントを自動で生成するが、ERDAS IMAGINEではイメージマッチング処理により画素の濃度差などからこれを生成する。タイポイントは、ステレオ画像間の同一地点を定義してマッチング精度を高めるためのもので、空中三角測量の精度に影響する。そのため、配置が適切でないポイントについては手動で調整を行った。以降はDSM作成まで自動処理される。

DSMから地物の高さを含んでいないDEMを差し引いた残差は、建物や樹木等の地表物の高さとしなすことが

作成したDSMの妥当性の確認

図-1 解析概要

でき、その残差特性から土地被覆状況把握の妥当性の検証が可能である。土地被覆状況は国土地理院20万分の1土地利用図を用いて確認し、土地利用別に対象領域を区分して残差特性を調べた。被災前後のDSMの残差特性については、目視判読により得られた被害状況の解析結果¹⁰⁾と比較することとした。

なお、ALOS/PRISMを用いて作成したDSMには、現実にはない縞状のノイズが生じることが広く知られている。これらは、人工衛星の微弱な振動を原因として発生するジッタノイズであると考えられる。このノイズについては、2時期比較データに離散フーリエ変換処理を行うことで除去が可能である¹¹⁾一方で、堤防や道路盛土等の構造物も除去の対象となる可能性があることが報告されている⁶⁾。したがって、ここではこのノイズ除去は行わないこととした。

3. 解析結果

(1) 半自動作成DSMの精度検証

半自動作成した2006年および2011年のDSMを、それぞれ図-2(b)および2(e)（以下、それぞれDSM2006およびDSM2011と記す）に示す。前述のようにジッタノイズの補正はしていないため、縞状のノイズが捉えられている。DSMからDEMを差引いて得られた、海岸林、住宅地、水田、ならびに砂浜の各被覆別の残差分布を図-3に示す。

被災前（2006年）の残差分布（図-3(a)）においては、海岸林領域では6 m～12 mの範囲で出現頻度が高く、クロマツ等の樹高を反映した妥当な地物高さが得られたと考えられる。住宅地領域においては3 m～6 mの範囲で出現頻度が高く、一般的な1～2階建て住宅の高さである5～8 m程度と比して小さい値となった。住宅地領域には道路等も含まれることから、これを反映して比較的小さい値も出現したものと考えられる。一方、砂浜や水田においては、残差は0に近い値となることが期待されるものの、若干大きい0～5 mの範囲で出現頻度が高くなった。

被災後（2011年）の残差分布（図-3(b)）においては、

図-2 2006年12月28日に撮影された(a)ALOS/PRISM衛星画像とこれを用いて作成した(b)DSM (DSM2006) および2011年4月10日に撮影された(d)ALOS/PRISM衛星画像とこれを用いて作成した(e)DSM (DSM2011) , レーザー測量による(c)2006年のDEM (DEM2006) および(f)2011年のDEM (DEM2011) .

図-3 (a)DSM2006からDEM2006を差し引いた残差および(b)DSM2011からDEM2011を差し引いた残差の土地被覆別頻度分布.

図-4 (a) DSM2011からDSM2006を差し引いた残差の空間分布, (b) 目視解析による海岸林被害の空間分布¹⁰⁾, (c) DEM2011からDEM2006を差し引いた残差の空間分布.

図-5 DSM2011からDSM2006を差し引いた残差の頻度分布.

水田では0～3 mの範囲で、それ以外の領域では0～5 mの範囲で出現頻度が高くなった。対象領域では、津波により多くの地物が流出しており、それを反映した妥当な結果が得られたものの、被災前と同様に全体的に若干大きな残差となった。

被災前後のいずれにおいても、地表物が少ない場所で残差が想定より大きくなった原因としては、直下視画像と後方視画像間のステレオ対応点（タイポイント）を自動的に決定する際の誤差が大きかったことが考えられる。ERDAS IMAGINEでは、画素値の変化特性から自動的に対応点を特定することによりタイポイントを決定する。水田や砂浜等のように標高の空間変化が小さく、かつ地表物のような目印も少ない場所では、画素値の空間分布の変化も小さくなるため、ステレオ画像間の対応点を取り難くなる。さらに、砂浜においては、時間帯によって汀線やその付近のボアの状況が変化することから、対応

点の精度が低くなったことも考えられる。

(2) DSMを用いた津波前後の被害把握

DSM2011からDSM2006を差し引いた残差の空間分布を図-4(a)に示す。国土交通省東北地方整備局提供の空中写真の目視解析により得られたUdoら¹⁰⁾の被災直後の海岸林被害分布（図-4(b)）と比較すると、残差が負値で被災前後の変化が大きい領域は海岸林の被災領域と一致しており、妥当な結果が得られた。海岸林領域の残差の頻度分布（図-5）をみると、特に-8 m～-4 mの範囲で出現頻度が高くなった。

砂浜および水田の領域においては、被災前後のDSMの変化（図-4(a)）がDEMのそれ（図-4(c)）と同様の結果になることが期待される。しかし、これらは大きく異なり、半自動作成したDSMのみを用いた解析では、既存の研究¹²⁾で確認されている砂浜の被害状況を十分な精度で把握することは困難であり、また、水田においても実際には存在しない起伏が生じた。この一因としては、被災後の衛星画像の砂浜や水田における画素値は津波の遡上の影響で小さくなっており、十分な精度でタイポイントを決定できなかったことが考えられる。

住宅地領域では、-3 m～+1 mの範囲で出現頻度が高くなっており、建物の流出やがれきなどを反映したものになっているとも考えられる。しかし、水田の頻度分布とも類似しており、残留した建物とDSMとの対応も認められないことから、ジッターノイズの影響を反映した分布となっている可能性が高い。

DSM同士の差し引きでは十分な精度が得られない場合でも、我が国においては全国で5mメッシュのDEMが

図-6 (a) DSM2011からDEM2006を差し引いた残差の空間分布、(b)(a)に示す黒枠内の拡大図および(c)2011年4月10日撮影の衛星画像、ならびに(d) (a)に示す岸沖方向測線（黒点線）上の断面地形変化。黄色破線は堤防位置を示す。

整備されており、少なくとも被災前についてはこれを使用することもできる。土地被覆が砂浜に分類される領域のDSMはDEMに相当することから、DSM2006ではなくDEM2006をDSM2011から差し引くことで、砂浜における侵食状況の把握を試みることにした。DSM2011からDEM2006を差し引いた残差の空間分布を図-6(a)に示す。山元海岸には、被災前T.P. + 6.2 mの海岸堤防が存在したが、津波によりその多くが破堤した。DSM2011からDEM2006を差し引いた残差の空間分布では、被災前の堤防位置に沿った水路形成が捉えられ（図-6(a)）、DEM2011からDEM2006を差し引いたものとも概ね一致していた（図-6(d)）。DEMを用いることで堤防周辺の被害把握が可能であった。

以上のように、本手法にはジッタノイズのような現時点で解決困難な問題が存在するものの、被災前後ともに

DSMを用いた残差特性からは、地表物の状況を反映した海岸林や住宅地の被害把握が可能であり、被災後のDSMと被災前のDEMとの残差特性からは津波による堤防周辺の被災状況の把握が可能であることを確認した。

4. 結言

本研究では、2006年12月28日と2011年4月10日に仙台湾で撮影されたALOS/PRISMのステレオペア衛星画像から、ERDAS IMAGINEを使用して2011年津波前後のDSMを半自動作成し、作成した2時期のDSMの残差から、2011年津波による沿岸被害把握を試みた。半自動作成したDSMについては、同時期に取得されたDEMとの残差と土地被覆状況を比較することによりその妥当性を確認した。被災前後のDSMの残差特性から、地表物の少ない低平地の被害を把握することは困難であったものの、海岸林領域や住宅地領域の被害把握は可能であった。また、被災前のDSMに代えてより精度の高いDEMを用いることにより、津波による海岸堤防周辺の被害把握が可能であった。

今後は、ALOS/PRISMよりも高解像度で取得された衛星画像を用いた、より高精度のDSM作成を行い、適切な地上基準点（GCP）の設定や幾何補正のパラメータ設定の手法確立を目指す。ここではジッタノイズ除去についての詳細な検討を行っていないが、今後検討する必要がある。

謝辞：ALOS/PRISM衛星画像については、宇宙航空研究開発機構（JAXA）より提供いただいた。本研究の一部は、気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）により実施された。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 郷右近英臣, 越村俊一: L-バンド合成開口レーダによる津波被災地の建物被害推計手法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.I_1723-I_1728, 2015.
- 2) Gokon, H., J. Post, E. Stein, S. Martinis, A. Twele, M. Muck, C. Geiss, Koshimura, S. and Matsuoka, M.: A Method for Detecting Devastated Buildings by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Using Multi-temporal TerraSAR-X Data, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, doi: 10.1109/LGRS.2015.2392792, 2015.
- 3) NASA: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, 2016/6/30(参照).
- 4) 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構: ASTER 全球 3 次元地形データ, <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/J/>, 2016/6/30(参照).
- 5) Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K. and

- Iwamoto, H.: Precise Global DEM Generation By ALOS PRISM, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp 71-76, Vol.II-4, 2014.
- 6) 萬矢敦啓, 郭榮珠, 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, pp.I_1549-I_1554, 2013.
 - 7) 石黒聡士, 杉村俊郎: 大規模津波災害直後における迅速な微地形把握のための IKONOS と QuickBird の単画像の組み合わせによる細密 DSM 作成, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.28, No. 3, pp.265-273, 2008
 - 8) 一般財団法人リモートセンシング技術センター: リモートセンシング技術研修テキスト, 地球観測衛星データ解析実習, 2013.
 - 9) 池田良生: ALOS/PRISM 画像を使用した標定精度および DSM 精度の検証, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 48, No.2, 2009.
 - 10) Udo, K., Sugawara, D., Tanaka, H., Imai, K. and Mano, A.: Impact of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami on beach morphology along the Northern Sendai Coast., *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250009-1-1250009-15, 2012.
 - 11) Takaku, J. and Tadono, T.: High resolution DSM generation from alos prism - processing status and influence of attitude fluctuation -, *Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE International, 10.1109/IGARSS.2010.5653527, pp.4228-4231, 2010.
 - 12) 有働恵子, 田中仁, 真野明, 武田百合子: 東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I_1391-I_1395, 2013.

(2016.3.16 受付)

DETECTION OF COASTAL DAMAGE DUE TO THE 2011 TSUNAMI USING SEMI-AUTOMATICALLY GENERATED DSM

Keiko UDO, Yuriko TAKEDA and Shunichi KOSHIMURA

Detection of coastal damage due to the 2011 tsunami at Yamamoto Coast was attempted by the state-of-art remote sensing technology using ALOS PRISM satellite images. The digital surface model (DSM) was generated semi-automatically using the remote sensing software EADAS IMAGINE and its accuracy was confirmed by comparing with the digital elevation model (DEM) generated by aerial laser measurement. The coastal damage detected by residual of DSMs before and after the tsunami was verified statistically for each land use of residential district, rice field, coastal forest, and beach. It was difficult to detect the damage in the low land area where ground objects were scarce; however, it was possible to detect the damage of the coastal forest and residential district. Furthermore, the erosion around seawall could be detected using the DEM instead of the DSM before the tsunami since the former has higher accuracy than the latter.