

SAR フルポラリメトリを用いた津波水害領域の抽出に関する研究

Extraction of Water Hazard Areas Remaining from Tsunami Using Full Polarimetric SAR Data

打田欽也、細井文樹、大政謙次*

Kinya Uchida, Fumiki Hosoi and Kenji Omasa*

東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

The University of Tokyo, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,

1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

(2014年10月10日受付、2015年2月10日受理)

ABSTRACT

SAR (Synthetic Aperture Radar) images can show ground features, even when they were taken at night or in cloudy weather. Therefore, it has been said that SAR images may have a great potential use for disaster remote sensing. In this paper, we used only full polarimetric SAR data taken after the March 11, 2011 earthquake in eastern Japan to evaluate the inundated areas. First, we derived a coherency matrix for each pixel from the scattering matrix of the SAR data. The image was then classified into 4 classes (water, vegetation, field, and urban area) based on the elements of the coherency matrix. After that, the inundated areas were extracted by masking rivers and lakes included in the water area. As a comparison, AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-II) image was also classified into the same 4 classes with its inundated areas extracted. Ground validation data was retrieved from Google Earth images. As a result, the overall accuracy and kappa coefficient was 74% and 0.65 respectively for the full polarimetric SAR and 95% and 0.93 respectively for the AVNIR-2. Results indicate that the full polarimetric SAR image after the earthquake was useful enough to estimate inundated areas.

Key words : ALOS, Full polarimetry, SAR, Tsunami

1. はじめに

津波等の大規模な自然災害が発生した際に被害状況を迅速に把握することは、更なる被害の防止や救援物資配分の適正化など様々な面で重要である。被害状況を把握するうえで最も精度の高い方法は現地踏査である。しかし災害が起こった直後の現場への立ち入り調査は困難を極める。また被災エリアが広大であればこのような調査を行うには多くの時間や労力がかかる。そこで災害被害状況の調査を効率よく行うには、現場に立ち入らずに広域の空間情報を取得できる衛星リモートセンシングが有

用であると考えられる。これまでも衛星により取得された可視近赤外画像を用い、津波被害地域の把握に関する研究がおこなわれてきた (Chen et al., 2005, Nakao et al., 2012)。こうした可視近赤外画像による災害リモートセンシングでは比較的安価に広域の範囲を観測できるが、夜間や雨天時には地上の様子を把握できないという問題点がある。合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR、以降 SAR と呼ぶ) は全天候型センサーであり、観測時に雲があっても、または夜間であっても対象地域のマイクロ波散乱強度に関する情報を取得できる特徴をもつ。緊急時において SAR を用いて天候や太

*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-5340, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

陽光の有無に左右されずに地上の被害状況を分析する手法は大変有用であると考えられる。SAR は単偏波による観測以外に HH, HV, VH, VV (H, V はそれぞれ水平および垂直偏波を示す。例えば HH とは、水平偏波を送信した際に対象物から返ってきた水平偏波をさす。) といった複数の偏波を同時観測する多偏波モードが存在する。多偏波モードは対象物に関する各偏波の散乱強度や位相情報を記録しているため、単偏波の場合よりも対象物に関する情報をより多く取得できる利点を持つ。多偏波モードにはフルポラリメトリ機能があり、対象の4偏波特性をすべて観測することができる。これまでも震災前と震災後の二時期の SAR のフルポラリメトリ画像を比較した津波浸水領域と偏波の特徴との関係を示した研究がおこなわれた (Park et al., 2012)。しかし被災前後のデータセットから二時期の差分抽出を行う際に、SAR センサーの飛行方向や偏波の入射角、撮影された時期など様々な要因が影響を及ぼし、誤差につながる可能性がある。また観測頻度の関係から、対象地域の震災前 SAR フルポラリメトリ画像データを入手できない可能性もある。以上を踏まえ本稿では災害後の SAR フルポラリメトリ画像のみを用いて津波浸水領域の判別を行い、可視近赤外画像との精度を比較しながらその適用可否について検討を行う。

2. 計測対象および使用データ

研究対象地域は石巻市(経度 141.17–141.51 度, 緯度 38.37–38.58 度)を含む約 625 km² の領域である。この地域は海岸に面した石巻市の都市部とその北に広がる田畑、太平洋に流れる北上川河口域と山々によって形成されている。石巻市都市部や北上川河口域は東日本大震災における津波の浸水被害が大きかったところである。本研究で使用した SAR フルポラリメトリ画像は陸域観測技術衛星 (ALOS) に搭載されたフェーズドアレイ式 L バンド合成開口レーダー (PALSAR) により取得されたもので、偏波モードは HH, HV, VH, VV、処理レベルは 1.1、画像取得日は 2011 年 4 月 8 日である。この画像のレンジ分解能は 27–29.7 m、アジマス分解能は 5.06 m である。SAR フルポラリメトリの比較のために ALOS 搭載の光学センサー AVNIR-2 が取得した衛星画像を使用した。画像は可視 3 バンドおよび近赤外 1 バンドの 4 バンド画像で、画像取得日は 2011 年 3 月 14 日である。この画像の地上分解能は 10 m である。検証には、AVNIR-2 および SAR の撮影日と最も近い地上データとして、Google Earth の 2011/3/14 と 2011/4/6 の画像を用いた。

3. 方法

SAR フルポラリメトリ画像の散乱行列 S は以下のよう に定義される (Yamaguchi et al., 2005; Yamaguchi et al., 2007)。

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} , S_{VV} は HH, HV, VH, VV 偏波モードに対する散乱行列要素である。(1)の散乱行列から平均化 Coherency 行列は以下のように導かれる。

$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}+S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH}+S_{VV})(S_{HH}-S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}^*(S_{HH}+S_{VV}) \rangle \\ \langle (S_{HH}-S_{VV})(S_{HH}+S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH}-S_{VV}|^2 \rangle & \langle 2S_{HV}^*(S_{HH}-S_{VV}) \rangle \\ \langle 2S_{HV}(S_{HH}+S_{VV})^* \rangle & \langle 2S_{HV}(S_{HH}-S_{VV})^* \rangle & \langle 4|S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで * は複素共役、 $\langle \rangle$ は集合平均を示す。ここでは $S_{HV}=S_{VH}$ の関係を用いている。本研究で用いる SAR フルポラリメトリ画像について、式(2)を用い隣接するピクセルを平均化することで平均化 Coherency 行列を算出した。平均化 Coherency 行列の成分に関して $\langle |S_{HH}-S_{VV}|^2 \rangle$ をバンド 1 (表示色は赤)、 $\langle 4|S_{HV}|^2 \rangle$ をバンド 2 (表示色は緑)、 $\langle |S_{HH}+S_{VV}|^2 \rangle$ をバンド 3 (表示色は青) に割り当てた。こうして割り当てられた 3 バンド画像に対し、J. S. Lee Sigma フィルター処理を施してスペckルノイズを除去した (J. S. Lee., 1983)。そして緯度経度の情報をもとに投影変換した。以上の処理を行ったあと、水、市街地 (建物や人工物の複合体)、森林、田畑の 4 カテゴリーで最尤法による教師つき分類を行った。その際に既知である海域についてはマスクをかけ、解析から除外した。先に各カテゴリーに相当する領域から教師用のエリアを選択し、残った領域を検証用のエリアとして、解析結果の検証を行った。教師エリアの選択には Google Earth からもっとも日付の近かった 2011 年 4 月 6 日の画像を参照した。4 カテゴリーによる分類の後、震災前から存在している川や湖に相当する領域にマスクをかけ、浸水領域を抽出した。AVNIR-2 画像の解析については可視近赤 4 バンドについて最尤法による教師つき分類を行った。教師エリアの選択には 2011 年 3 月 14 日の Google Earth の画像を参照した。その後、SAR 画像同様に浸水領域を抽出した。このようにして得られた 2 種類の衛星画像解析結果につき、エラーマトリックスを作成し、比較を行った。

4. 結果と考察

まずは対象となる 4 つのカテゴリーすべてに対して述べ、SAR ポラリメトリの分類に関する特徴を明らかに

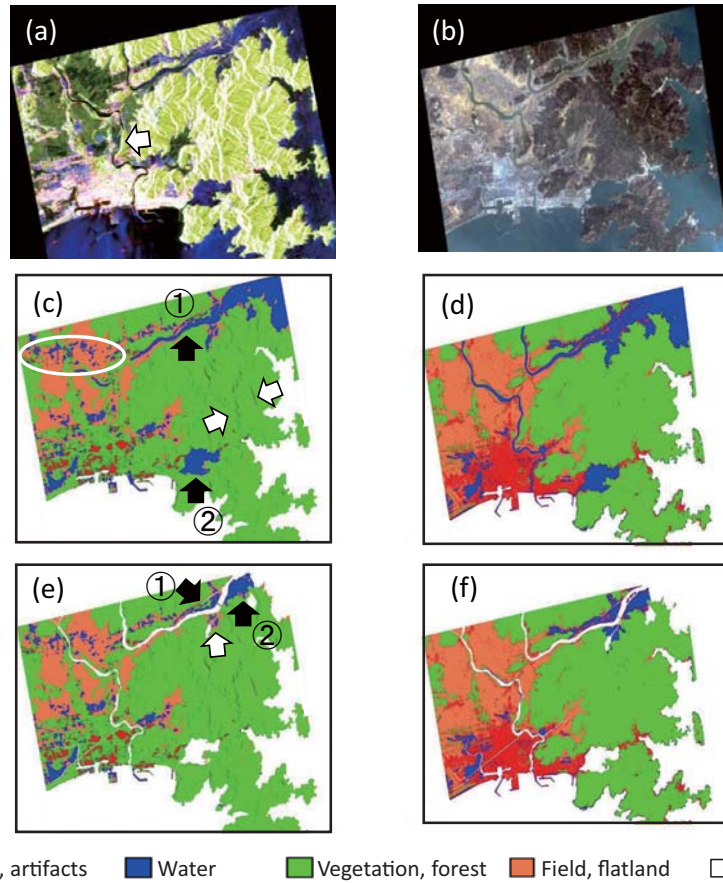


Fig. 1. Satellite images of flooded areas shown in their respective category supervised classification. (a) An image derived from the coherency matrix of full polarimetric SAR image taken April 8th, 2011 (Red: $\langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle$, Green: $\langle 4|S_{HV}|^2 \rangle$, Blue: $\langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle$) (b) An AVNIR-2 image taken March 14th, 2011 (Red: 0.61~0.69 μm , Green: 0.52~0.60 μm , Blue: 0.42~0.50 μm) (c) Classification of full polarimetric SAR image, (d) Classification of AVNIR-2 image, (e) Classification of full polarimetric SAR image, whose rivers and lakes are masked, (f) Classification of AVNIR-2 image, whose rivers and lakes are masked.

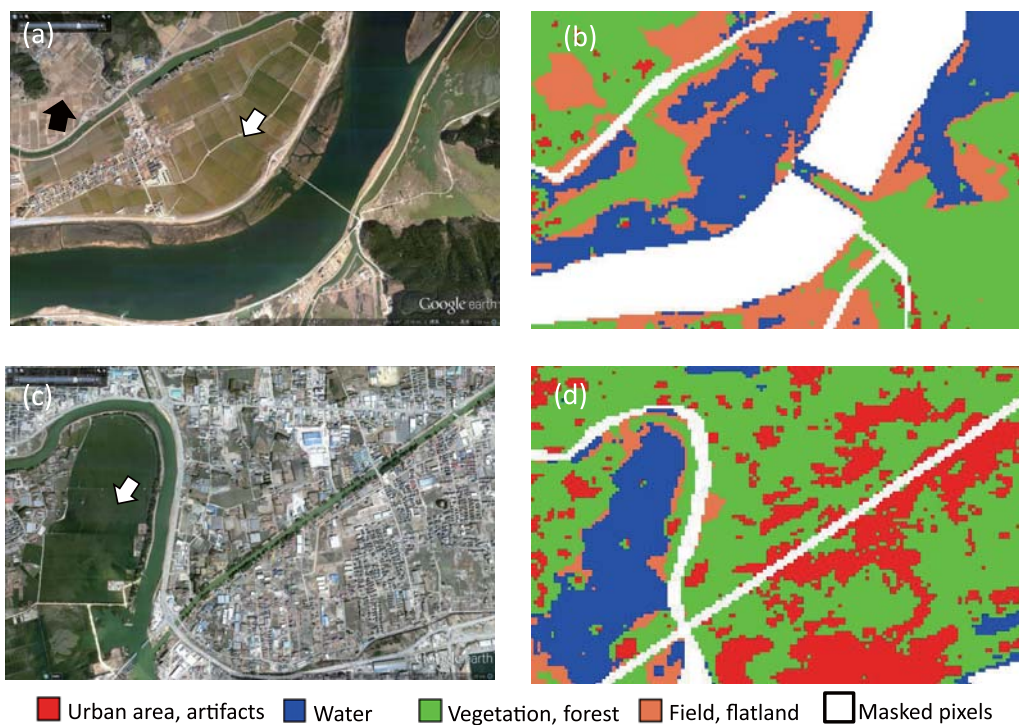


Fig. 2. (a), (c) The Google Earth images and (b), (d) results of 4 category supervised classification of full polarimetric SAR images of the same areas respectively.

Table 1. An error matrix for classification results in each satellite image. UA: User's Accuracy, PA: Producer's Accuracy, OA: Overall Accuracy, κ : Kappa coefficient. ()[†]: PA, UA of inundated area.

	SAR Full Polarimetry			κ	AVNIR			κ
	PA	UA	OA		PA	UA	OA	
urban area, artifacts	33%	88%			89%	92%		
field, flatlands	82%	82%			95%	90%		
vegetation, forest	98%	65%			98%	98%		
water	74% (75%) [†]	79% (61%) [†]			96% (92%) [†]	99% (98%) [†]		
			74%	0.65			95%	0.93

したのち、水カテゴリーから川や湖を除いた浸水領域について述べる。Fig. 1にSARフルポラリメトリおよびAVNIR-2の画像と、それぞれの画像から分類された結果を、Table 1に分類結果に関するエラーマトリックスを示す。

SARフルポラリメトリとAVNIR-2のOA (Overall Accuracy) は、それぞれ74%、95%、 κ 係数はそれぞれ0.65、0.93であった。

SARフルポラリメトリの分類結果 (Fig. 1(c)) については以下のような特徴がみられた。まず研究エリアを東西に流れる川 (Fig. 1(c) 黒矢印①) や内海 (Fig. 1(c) 黒矢印②) などの水域は水のカテゴリーに正しく分類されている。その一方で研究エリアを南北に走る河川 (Fig. 1(a) 矢印) については、その一部が田畑のカテゴリーに分類され、川をはっきりと判別することができない。また研究エリア北西の田畑の一部 (Fig. 1(c) 楕円内) など、水のカテゴリーに誤分類されている領域も存在する。こうした誤分類によって水はPA (Producer's accuracy)、UA (User's accuracy) とともに70%台となり、田畑のカテゴリーについてはPA、UAとも82%となった。

つぎに市街地は、その多くが森林カテゴリーに誤分類される結果となった。本来なら赤く表示されるはずの市街地が緑色に表示されている。また山々の稜線が市街地と誤分類された結果、南北に線状の赤の領域がみられる (Fig. 1(c) 矢印)。このような誤分類により市街地のPA、UAはそれぞれ33%、88%であった。このことから、市街地を市街地のカテゴリーにもれなく分類することはできていないが、市街地のカテゴリーと分類されたピクセルの中に含まれる誤分類は少ないことがわかった。

森林についてはPAが98%と高く、UAが65%となった。水カテゴリーのうち、河川や湖を除いた浸水領域 (Fig. 1(e) 青色部分) については以下のような特徴がみられた。まず浸水領域の多くが水のカテゴリーに正しく分類された。特に研究エリアを東西に流れる川の、川沿いの田畑 (Fig. 1(e) 黒矢印①) や河口部の中州 (Fig. 1(e)

黒矢印②) が浸水した様子をはっきりわかる。その一方で浸水しているのに田畑に誤分類されている場所も存在した (Fig. 1(e) 白矢印)。また上述した通り、浸水していない田畑が浸水領域となっているところもある (Fig. 1(c) 楕円内)。その結果、浸水領域のPAは75%、UAは61%であった。

AVNIR-2の分類結果 (Fig. 1(d)) については、4カテゴリーのどれもPA、UAとも高い値を示し、高精度で分類されていることがわかった。Fig. 1(d)では研究エリアを流れる二本の川をはっきりと判別できる。市街地についても森林や他のクラスに誤分類されたものは少ない結果となった。またFig. 1(f)の浸水領域についても、浸水している田畑や中州が正しく抽出されている。浸水領域のPA、UAはそれぞれ92%、98%となった。

Fig. 2(a), (b)に研究エリア北東に位置する北上川河口部のGoogle Earthの2011年4月6日の画像とSARフルポラリメトリの画像から分類された結果の拡大画像を示す。Fig. 2(c), (d)には研究エリア南西の石巻市周辺のGoogle Earthの2011年4月6日の画像とSARフルポラリメトリの画像から分類された結果の拡大画像を示す。

北上川河口部 (Fig. 2(a)) では川沿いの水田が浸水しているのがみてとれる (Fig. 2(a) 白矢印)。Fig. 2(b)については同地域が浸水領域に正しく分類されていることがわかる。また水没していない水田 (Fig. 2(a) 黒矢印) はFig. 2(b)で田畑のカテゴリーに分類されている。石巻市周辺では西側を蛇行する川沿いの田畑が浸水しているのがわかる (Fig. 2(c) 白矢印)。Fig. 2(d)については同地域が浸水領域に正しく分類されていることがわかる。

SARフルポラリメトリについて、市街地が森林カテゴリーに誤分類されたのは、該当する人工物の二回反射散乱成分より体積散乱成分を多くかえし、植生と似たような後方散乱特性を示したためだと考えられる。市街地に偏波が当たった場合、地面と建物の壁面とで2回反射がおき、(2)式の2回反射成分である $\langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle$ が他の成分より大きくなる。しかし上空のSARセンサーの

飛行方向と地上の建物の壁面が平行関係からずれているときに、体積散乱成分である $\langle 4|S_{HV}|^2 \rangle$ が $\langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle$ より大きくなることが報告されている (Yamaguchi et al., 2010)。このような現象により、体積散乱成分が多く観測されたものと考えられる。

浸水領域について、浸水していない田畑が水のカテゴリに誤分類された原因として以下の可能性があげられる。ひとつは該当する田畑の表面粗度が送信波長に対して小さく、水面と同じように入射エネルギーのほとんどが前方へ反射したためであると考えられる (Iisaka et al., 1998)。もうひとつは土壌中の水分量が分類に影響を及ぼした可能性が考えられる。これまでに表層土壌の水分量が L バンドの後方散乱強度に影響を及ぼすことが報告されている (Nakaegawa et al., 1993; Shi et al., 1997)。該当する誤分類は、一度浸水し水がひいたあとの水田や水路の近傍に多く見られる傾向にある。これらの土壌中の水分が各偏波の後方散乱強度に影響を及ぼし、浸水していない水田を水カテゴリーに誤分類させた可能性がある。これらの要因を検証するためには今後現場において土壌水分量や表面粗度の計測を行い、SAR データの分類結果と比較していく必要がある。

AVNIR-2 の OA が高かったのは、4つのクラスの分光反射特性が明確に異なっていたため、AVNIR-2 の RGB と可視近赤外の 4 バンドの画像にその違いが反映されたためと考えられる。これら 4つのクラスの分類精度が高かったため、浸水領域についても高い精度の分類ができたものと考えられる。

5. おわりに

本研究では災害後の SAR フルポラリメトリ画像のみを用いて対象地域の土地被覆分類を行った後に津波浸水領域の抽出を行い、可視近赤外画像との精度を比較しながらその適用可否について検討した。SAR は全天候型のセンサーであり、災害発生時に即座に地上の様子をセンシングできる利点を持つ。さらにフルポラリメトリモードでは、対象の情報を単偏波モードよりも多く保持しており、より正確に震災状況を把握できる可能性がある。SAR フルポラリメトリ画像の浸水領域の分類精度については、AVNIR-2 ほどの精度ではないが被害の概要を把握するには十分な精度を有することが示された。被災前後で季節や撮影条件が同じ画像を用意するのは困

難であり、被災後の SAR フルポラリメトリ画像のみを使用した本稿の手法は大変有用であると考えられる。今後さらなる精度の向上のためには、標高データなど他の情報の導入が有効であると考えられる。

引用文献

- Chen, P., Liew, S. C., and Kwok, L. K., 2005: Tsunami damage assessment using high resolution satellite imagery: A case study of Aceh, Indonesia. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, **2**, 1405-1408.
- Iisaka, J., 1998: *Synthetic Aperture Radar Imagery Handbook*. Asakura, Tokyo, 86-88 (飯坂譲二、合成開口レーダ画像ハンドブック. 朝倉書店, 東京, 86-88).
- Lee, J. S., 1983: Digital smoothing and the Sigma Filter. *Computer vision, graphics, and image processing*, **24**, 255-269.
- Nakaegawa, T., Fuchigami, G. and Koike, M., Oki, T., and Musaike, K., 1993: Extraction of soil moisture information from SAR satellite data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment, International*, **4**, 1797-1799.
- Nakao, Y. and Sawada, H., 2012: Tsunami-Inundated Area Estimation Using High Resolution Satellite Data. *Monthly journal of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo*, **64**, 455-459.
- Park, S. E., Yamaguchi, Y. and Kim, D., 2012: Polarimetric SAR remote sensing of the 2011 Tohoku earthquake using ALOS/PALSAR. *Remote Sensing of Environment*, **132**, 212-220.
- Shi, J., Wang, J., Hsu, A. Y. and O'Neill, P. E., 1997: Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **35**, 1254-1266.
- Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M. and Yamada, H., 2005: Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **43**, 1699-1706.
- Yamaguchi, Y., 2007: *Basics and application of radar polarimetry*. IEICE, Tokyo, 182 (山口芳雄、レーダポラリメトリの基礎と応用. 電子情報通信学会, 東京, 182).
- Yamaguchi, Y., Sato, A., Sato, R. and Yamada, H., 2010: A new four-component scattering power decomposition applied to ALOS-PALSAR PLR data sets. *Proceedings of synthetic aperture radar (EUSAR)*, 1-4.