

二偏波合成開口レーダー画像を用いた耕作放棄地の推定

**Estimation of Abandoned Rice Paddies
Using a Dual-polarimetric SAR Image**

山城 悠、細井文樹、大政謙次*
Yu Yamashiro, 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-ku, Tokyo 113-8657, Japan

(2014年4月2日受付、2014年5月30日受理)

ABSTRACT

Dual-polarimetric SAR (Synthetic Aperture Radar) was used for estimating abandoned rice paddies. First, ground validation data was prepared based on the data reported in a previous study and a google earth image. Second, a dual-polarimetric SAR image taken just after water filling in rice paddies was prepared and the lexicographic covariance matrix was calculated in each pixel from the scattering elements of the SAR image. Third, classification of three categories (rice paddies, abandoned rice paddies, residential area) was conducted to the image based on each element of the covariance matrix. For the comparison of the classification, the classification was also conducted using other two satellite images, i.e. the ones of AVNIR-2 and single-polarimetric SAR. As a result, overall accuracy and kappa were 55%, 63% and 22% and 0.32, 0.48, -0.04 for dual-polarimetric SAR, AVNIR-2, and single-polarimetric SAR images, respectively. In the dual polarimetric SAR image, abandoned rice paddies were overestimated, while rice paddies were underestimated.

Key words : Abandoned rice paddy, ALOS, Dual-polarimetric, SAR

1. はじめに

我が国の農地面積は減少を続けている。平成22年度に減少した農地の約4割が耕作放棄によるものであり (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2011)、耕作放棄地を解消していくことが重要な課題となる。そのために、まずは耕作放棄地がどの地域にどれだけあるかを正確に把握する必要がある。耕作放棄地の調査は前年の調査結果や市販の地図を活用し、現地を目視した結果を一筆の土地ごとに記録するが、このような調査を広範囲に行う場合、時間や労力など多大なコストがかかる。耕作放棄地の調査を低コストに効率よく行うために、広範囲の空間情報を取得可能な衛星リモートセンシングの活用が有用と考えられる。これまでに Terra/MODIS や

ALOS/AVNIR-2、Landsat/TM などの衛星搭載光学センサーを用い、耕作放棄地の判別が試みられてきた (Kato et al., 2003; Mino et al., 2005; Zukemura et al., 2011)。光学センサーを用いた方法では、水田と耕作放棄地の分光特性、特に冠水初期の水田と雑草の生えた耕作放棄地の分光特性の違いに着目し、判別を行う方法などが報告されている (Zukemura et al., 2011)。こうした方法は比較的高い精度で耕作放棄地の判別を可能とするが、雲がかかっている場合には利用できないため、水田冠水初期などの決まった時期に確実にデータを取得できるかどうか分からないという問題がある。光学センサーに加え、合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar : SAR、以降 SAR と呼ぶ) による耕作放棄地や水稲作付地の判別も行われている (Takeuchi et al., 2000; Ishitsuka, 2006, Yang

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

et al., 2008)。SAR を使った方法としては、水田冠水時に単偏波 SAR 画像を取得し、冠水水田の後方散乱強度が耕作放棄地のそれよりも低くなる特性を生かして判別を行うといった方法がある。SAR は全天候性のセンサーであり、観測時に雲があっても対象のマイクロ波散乱強度に関する情報を取得でき、情報抽出に最も適した時期に確実にデータ取得ができる。本方法では冠水水田と耕作放棄地の判別に後方散乱強度の閾値を決定する必要があるが、それを適切に決定することが難しい (Ishitsuka, 2006)。また、対象領域内にブラッグ散乱などによる高い散乱強度の物体が含まれると、判別結果がその物体の散乱強度の影響を受けてしまうといった問題もある (Ishitsuka, 2006)。SAR には単偏波観測以外に、HH や HV、VH、VV (H、V はそれぞれ水平及び垂直偏波を示す) といった複数の偏波を同時観測する多偏波観測モードが存在する。対象に関する各偏波の散乱強度や位相の情報を取得できるため、単偏波の場合よりも対象に関する情報をより多く取得できる。多偏波 SAR を利用する際には、全偏波の情報を取得可能な全偏波モード (HH、HV、VH、VV の 4 つの偏波モードを同時に取得するモード) の画像を利用することが望ましいが、観測頻度の関係から、決められた時期に全偏波モードの画像を入手することは容易ではない。そこで本稿では、比較的データ数が多く入手しやすい二偏波モード (HH、HV など二つの偏波成分を取得するモード) の SAR 画像を用いて耕作放棄地の判別を行い、光学衛星画像や単偏波 SAR 画像の判別結果と比較しながら、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

研究対象地域は千葉県長生郡長南町蔵持地区 (経度 140.14 度、緯度 35.22-35.23 度) を含む約 4 km² の領域である。この地域の水田は山の谷筋の狭いエリアに広がっており、その水田を取り囲む形で住宅地が点在している (Fig. 1(a))。この地域の田植えは 4 月の中旬から 5 月の上旬である。2004 年における本対象地域の耕作放棄地は、先行研究において公表されている (Takada, 2006)。しかし、後述する衛星センサーの画像は 2008 年と 2009 年に取得されたものであり、2004 年のデータをそのまま検証に適用することはできない。そこで、2012 年の Google Earth 画像から目視で耕作放棄地を同定し、Takada (2006) のデータと比較し、2004 年と 2012 年ともに耕作放棄地であるエリアを見出した。このエリアを 2004 年から 2012 年まで耕作放棄地のままであったとみ

なし、その間の 2008 年と 2009 年に取得された衛星画像のための検証エリアとした。

本研究で使用した二偏波 SAR 画像は ALOS に搭載された L バンド PALSAR により取得されたもので、偏波モードは HH と HV、画像取得日は 2008 年 5 月 13 日である。この画像の地上分解能は 14 ~ 88 m である。二偏波 SAR の比較のために 2 種類の衛星画像を使用した。一つは ALOS 搭載の光学センサー AVNIR-2 により取得された可視 3 バンド、近赤外 1 バンドの 4 バンド画像である。画像取得日は 2009 年 5 月 20 日で、地上分解能は 10 m である。もう一つは ALOS 搭載 PALSAR により取得された HH モード単偏波 SAR 画像で、データ取得日は 2008 年 5 月 31 日、画像の地上分解能は 7 ~ 44 m である。なお、どの画像の取得時期も、水田への冠水直後であった。

3. 方法

Pol-SAR 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, 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) の行列要素から平均化 Covariance 行列は以下のように導かれる (Yamaguchi et al., 2005; Yamaguchi, 2007)。

$$\langle [C] \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{HV}S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VV}S_{VV}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

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。本研究で用いる二偏波 SAR 画像について、式 (2) を用い隣接するピクセル値を平均することで平均化 Covariance 行列を算出した。なお、使用した画像は二偏波であるため、式 (2) の VV 成分に関する要素をすべて 0 として計算を行った。

平均化 Covariance 行列の成分に関して、 $\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle$ をバンド 1 (表示色は赤) に、 $\langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle$ をバンド 3 (表示色は青) に割り当てた。またバンド 2 (表示色は緑) については $|\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle + \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle - 2\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle|$ を割り当て、 $\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle$ 成分が 0 に近くなる自然植生 (Yamaguchi, 2007) で値が大きくなるようにした。二偏波 SAR Covariance 画像を Fig. 1(b) に示す。ここで $\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle$ は HH と HV の位相関係を反映する要素である。こうして割り当てられた 3 バンド画像に対し、水

田、耕作放棄地、住宅地（住宅と人工構造物の複合体）の3カテゴリでの最尤法による教師付分類を行った。その際、森林に相当する領域にはマスクをかけ、解析から除外した。各カテゴリに相当する領域から教師用のエリアをまず選択し、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。

AVNIR-2 画像と単偏波 SAR 画像（それぞれ Fig. 1(c) と (d)）の解析については、前者が可視・近赤 4 バンドについて、後者が HH の散乱強度情報のみの 1 バンド画像について、最尤法による教師付分類を行った。教師、検証エリアはどちらも二偏波 SAR と同じ領域を用いた。このようにして得られた 3 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

Fig. 2 に検証データと 3 種類の衛星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。

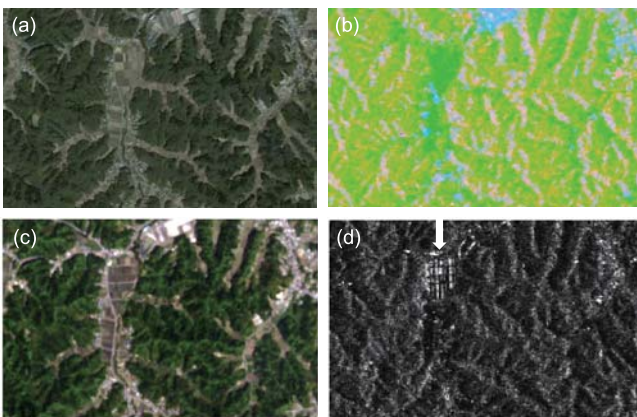


Fig. 1. Satellite images for estimating abandoned rice paddies. (a) A Google earth image (b) An image derived from the lexicographic covariance matrix of dual-polarimetric PALSAR image (Red: $\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle$, Green: $\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle + \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle - 2\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle$, Blue: $\langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle$) (c) An AVNIR-2 image, (Red: 0.61~0.69 μm , Green: 0.52~0.60 μm , Blue: 0.42~0.50 μm) (d) A single polarimetric PALSAR image (HH mode Backscattering image).

二偏波 SAR の分類結果 (Fig. 2(b)) については、実際の耕作放棄地 (Fig. 2(a) の検証データ参照) よりも広い領域が耕作放棄地に分類された。この領域に含まれる誤分類によって、UA (User's accuracy) は 40% となったが、実際の耕作放棄地の大部分がこの領域に含まれていたため、PA (Producer's accuracy) は 87% であった。水田と住宅地は耕作放棄地と分類された領域があったため、PA はそれぞれ 47% と 29% であったが、UA はそれぞれ 90% と 69% であり、特に水田では分類された領域の中に含まれる誤分類は少ないことがわかった。AVNIR-2 の分類結果 (Fig. 2(b)) については、耕作放棄地は検証データと比較的よい一致が見られ、UA、PA とともに約 80% と高い精度を示していた。一方、実際の住宅地よりも広い領域が住宅地と分類されているため、住宅地の UA は 41% に留まっている。PA については 98% であり、住宅地に相当する領域は概ね住宅地として分類されていることがわかる。水田については住宅地に誤分類された領域が多く、PA は 37% となったが、水田として分類された領域内の誤分類は少なく、UA は 97% と高い値を示した。単偏波 SAR の分類結果 (Fig. 2(d)) については、一見して検証データとかなり食い違っているこ

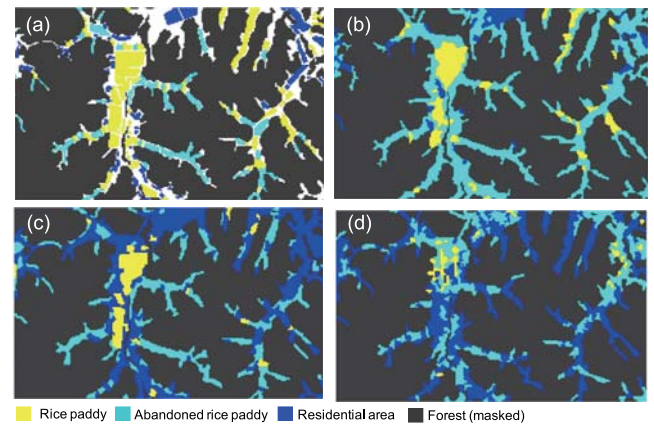


Fig. 2. Results of three category classification. (a) A validation data and results of (b) a dual-polarimetric PALSAR image, (c) AVNIR-2 image and (d) single polarimetric PALSAR image.

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.

	PALSAR Dual Polarimetry				AVNIR-2				PALSAR Single Polarimetry			
	UA	PA	OA	κ	UA	PA	OA	κ	UA	PA	OA	κ
Abandoned rice paddy	40%	87%			79%	83%			28%	36%		
Rice paddy	90%	47%			97%	37%			56%	7%		
Residential area	69%	29%			41%	98%			15%	40%		
			55%	0.32			63%	0.48			22%	-0.04

とがわかる。水田と分類された領域は少なく、一方で住宅地は過剰に分類されていた。耕作放棄地については、住宅地に分類された領域が多く見られた。また、水田が耕作放棄地に分類された領域も見られた。水田の UA が 56% である以外はいずれの UA、PA も 40% 以下であった。OA (Overall Accuracy) は二偏波 SAR、AVNIR-2、単偏波 SAR、でそれぞれ 55%、63%、22%、 κ 係数はそれぞれ 0.32、0.48、-0.04 であった。

3 種類の画像のうち、最も高精度に耕作放棄地を判別できたのは光学センサーである AVNIR-2 の画像であった。冠水直後の水田はまだイネがそれほど生育していないため、土壌により濁った水の分光反射特性を有している。一方、耕作放棄地にはこの時期雑草が繁茂し、主として植物の分光反射特性を有している。住宅地についてはコンクリートなどの分光反射特性を有している。これら 3 カテゴリーの分光反射特性の違いは比較的明確であり、それが分類結果に現れたものと考えられる。単偏波 SAR については、耕作放棄地の分類精度が高くなかった。冠水期の水田は鏡面反射によって後方散乱強度が小さくなり、それによって水田と耕作放棄地の区別ができると報告されているが (Ishitsuka, 2006; Yang et al., 2008)、本研究の単偏波 SAR 画像では、水田の領域のうち、後方散乱強度がまわりより高くなっている領域 (Fig. 1(d) の白矢印) がある。この領域の水田には狭い間隔の畦が複数存在しており、畦間のブラッグ散乱により、後方散乱強度が高くなった可能性が考えられる (Ishitsuka, 2006)。単偏波 SAR では、ビルなどの大規模構造物においてしばしば高い後方散乱強度を示すが、本対象エリアの住宅地はまばらに家屋が存在している状態であり、ビルなどのような高い後方散乱強度を示していなかった。そのため、住宅地は耕作放棄地と似た後方散乱特性を示していた。このように、各カテゴリーを散乱強度で特徴づけることが難しくなり、分類精度を悪化させた可能性が考えられる。二偏波 SAR 画像については、水田において単偏波 SAR 画像のように局所的に散乱強度が高い領域は見られず (Fig. 2(b) 参照)、水田で鏡面反射により後方散乱強度が低下するという性質が分類に反映されたものと考えられる。耕作放棄地については雑草が繁茂していたため、植物群落に近い偏波特性を有していたものと考えられる。植物群落の場合、葉や枝がランダムに空間分布しているため、HH 成分だけでなく、HV 成分も観測される。また、植物群落では HH と HV 間の位相差がランダムになるため、その積算である $\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle$ 成分はゼロに近づき (Yamaguchi, 2007)、

$|\langle S_{HH}S_{HH}^* \rangle + \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle - 2\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle|$ を割り当てた緑のバンドの値が大きくなる。このような偏波特性が分類に反映されたものと考えられる。一方、住宅地内の建物では、地面と壁面とで 2 回反射が起き、建物壁面の法線方向と SAR センサーの飛行方向とのなす角が直角に近いとき、HH 成分が多く検出され、HV 成分はあまり検出されなくなる。しかし本研究の場合、SAR センサーの飛行方向に対して建物壁面の法線方向が直角からずれていた状態であったと考えられる (Yamaguchi et al., 2010)。このような場合、2 回反射した際に HH 成分だけでなく、HV 成分の反射が生じる。実際、二偏波 SAR の Covariance 画像には HV 成分が強い、住宅地に相当する領域 (例えば Fig. 1(b) の中央上部にある青の領域) が見られた。以上のように、分類カテゴリー毎に特徴的な偏波特性があり、それらが分類に反映され、単偏波の場合よりも分類精度が高くなったものと考えられる。しかし、その精度は AVNIR-2 画像の分類精度には及ばなかった。SAR 画像においては、散乱強度の高い物体があると、その周りの物体の散乱強度も引き上げられることがある (Ishitsuka, 2006)。本研究の二偏波 SAR 画像の場合、冠水している水田よりも耕作放棄地の散乱強度の方が高く、その影響によって耕作放棄地の周りにある水田の散乱強度が高くなり、誤分類を生じさせた可能性が考えられる (Ishitsuka, 2006)。二偏波 SAR 画像による分類では耕作放棄地が過剰に分類されるため、耕作放棄地もしくはその疑いのある領域という判定に利用可能であると考えられる。しかし、実際に耕作放棄地がどのぐらいの面積存在しているのかという定量的な解析を行うためには、二偏波 SAR 画像の分類精度をさらに改善していくことが必要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では二偏波 SAR 画像による 3 カテゴリーの分類を行い、その結果から耕作放棄地の判別が可能かどうかを AVNIR-2 画像や単偏波 SAR 画像の分類結果と比較しながら、検討した。二偏波 SAR 画像では二偏波モードによる対象の偏波特性に基づく分類を行った。その分類結果は単偏波 SAR の散乱強度のみから行う分類よりも高い精度であったが、AVNIR-2 画像の分光情報に基づく分類の精度よりは低く、二偏波 SAR 画像を実際の耕作放棄地の判定に利用するためには、さらなる精度改善が必要と考えられた。精度改善のために、レーダー波長や空間分解能の異なる二偏波 SAR 画像の検討を行ったり、農地情報図などを利用して初めから対象エリア

を農地に限定し、水田と耕作放棄地の2カテゴリでの分類を行うといった方法の検討が必要であると考えられる。こうした検討を行いながら、二偏波 SAR 画像による耕作放棄地判定精度の改善を行っていく必要があると考えられる。

引用文献

- Ishitsuka, N., 2006: Using synthetic aperture radar (SAR) to measure the area of rice cultivation. *Report of National institute for agro-environmental science*, **24**, 95-151.
- Kato, J., Uehara, Y. and Tanimoto, T., 2003: Distinction of devastated paddy fields using satellite data. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **23**, 550-554.
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries., 2011: Present status of cultivation abandonment fields. At http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkitil/pdf/genjou_1103r.pdf. Accessed 1 April 2014. (農林水産省, 2011: 耕作放棄地の現状について)
- Mino, N., Suda, M., Katano, J. and Hongo, C., 2005: Synergetic use of Landsat TM/SPOT HRVIR and IKONOS data for terrace rice fields monitoring. *Journal of the Japanese society of photogrammetry and remote sensing*, **44**, 37-45.
- Takada, A., 2006: Expansion of abandoned cultivated lands and its background in Kuramochi Chonan Town, Chiba Prefecture. *Bulletin of geo-environmental science*, **8**, 37-46.
- Takeuchi, S., Konishi, T., Suga, Y. and Oguro, Y., 2000: Rice-planted area estimation in early stage using space-borne SAR data. *Journal of the Japanese society of photogrammetry and remote sensing*, **39**, 25-30.
- 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., 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)*, pp. 1-4.
- Yamaguchi, Y., 2007: *Basics and application of radar polarimetry*. IEICE, Tokyo, pp. 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, pp.182).
- Yang, S., Shen, S., Li, B., Toan, T. L. and He, W., 2008: Rice mapping and monitoring using ENVISAT ASAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens Letters.*, **5**, 108-112.
- Zukemura, C., Motohka, T. and Nasahara, K. N., 2011: Detection of abandoned rice paddies with satellite remote sensing. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **31**, 55-62.