

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420411

研究課題名(和文) ALOS2によるマイクロ波リモートセンシングでの植生モニタリング技術の確立

研究課題名(英文) Agricultural monitoring by using ALOS2/PALSAR2 polarimetric data

研究代表者

森山 敏文 (MORIYAMA, Toshifumi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20452873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、L-bandマイクロ波偏波合成開口レーダの多偏波・多時期データを用いた植生のモニタリングについて検討した。テストサイトとして、長崎県諫早市の中央干拓地とした。そして、2014年5月に打ち上げられた陸域観測技術衛星ALOS2に搭載された偏波合成開口レーダPALSAR2のデータを用いて、農作の解析を行った。2015年の8月と9月に観測が行われた。偏波解析ではエントロピー・アルファ法や4成分分解法を用いて、干拓地で栽培されている野菜等の偏波情報を評価した。その結果、オフナディア角や解析方法、耕作物の形態などによる偏波特徴への影響を知ることができた。

研究成果の概要(英文)：This report discusses a polarimetric data analysis for agricultural monitoring by using multi-temporal L-band spaceborne polarimetric synthetic aperture radar data. On May 24, 2014, Advanced Land Observing Satellite 2 (ALOS2) was launched. ALOS2 is the follow-on satellite of ALOS and has the Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 2 (PALSAR2). PALSAR2 provides an image with a higher resolution (maximum: 6m) in polarimetric mode as compared with the image of former L-band SAR (PALSAR) and its revisit time is 14days. Then, it is expected that PALSAR2 is used for agricultural monitoring. In order to do it, we determined a test site was a reclaimed land in Isahaya bay where there is large cultivated land and have examined the field survey and polarimetric data analysis. In this report, we used two polarimetric PALSAR2 data which were acquired in August and September, 2015 and analyzed them by two decomposition techniques. The good results were obtained.

研究分野：計測工学

キーワード：偏波合成開口レーダ 植生モニタリング 偏波データ解析 PALSAR2

1. 研究開始当初の背景

1990年代から日本や世界で航空機搭載型のマイクロ波偏波合成開口レーダ(Polarimetric Synthetic Aperture Radar: POLSAR)が開発され、2006年からは日本の陸域観測技術衛星ALOSに搭載されたPALSAR(L-band)を始め、RadarSAR-2(カナダ,C-band)や Terra-SAR X(ドイツ,X-band)が打ち上げられた。これらのSARには、偏波観測モードが付加され、単偏波でなく水平偏波と垂直偏波の送受組み合わせた測定が可能となった。その結果、世界各地のPOLARSARデータの定常観測が可能になってきた。主な用途は、災害観測や植生モニタリング、国土保全用(地図作成や海洋観測)の観測などである。航空搭載SARの場合、レーダの性能は高いが、観測に大きなコストがかかり観測頻度が低い。一方、衛星搭載SARでは、観測頻度が高く、広い観測領域により、植生モニタリングや地図作成などの応用が期待された。しかし、従来の衛星搭載SARは、レーダの性能が不十分であったため、多偏波で観測を行っても植生モニタリングで十分な成果を得ることができなかった。特に日本のような小さい規模の田圃や畑では、数十ピクセルで一つの田圃を表現するため、高分解能の航空機POLARSARで得られるような解析対象の情報を抽出できなかった(航空機搭載SARでのPOLARSARデータ解析では、植生や都市域、また樹種の解析で偏波による特徴が明瞭に確認できた)。そのため、PALSARの場合、国内外の研究では、熱帯雨林などの大規模の領域の分類で精度の向上を確認できたが、稲や野菜などの植生モニタリングでは十分な成果が得られなかった。そこで衛星搭載SARの解析では、分解能が大きな問題と感じていた。また、これまでの研究では、観測した偏波データの特徴の差異を示すだけに利用され、定量的な植生の成長や生産量の評価の検討は行われてこなかった。しかし、来年度にPALSARの後継SARであるALOS2が打ち上げられ、分解能が6m、観測周期も最短で16日となる。そこで、ALOS2では、標準で農作地の面積把握を目指しているが、それ以上の偏波データによる稲や野菜などのモニタリングが可能との着想に至った。そこで、この研究では、長崎諫早干拓の大規模農作地をテストエリアとして、農作物の成長の定量的な評価をALOS2のPOLARSARデータで行うことを提案した。

2. 研究の目的

本研究では、L-bandマイクロ波偏波合成開口レーダの多偏波・多時期データを用いた植生のモニタリングに関する研究を行う。2013年に陸域観測技術衛星ALOSの後継のALOS2が打ち上げられた。ALOS2は4偏波観測機能を有し、観測周期の短縮(46日から14日)、地上分解能も向上(2.3倍)した。そのため、日本で従来困難だった稲に加えて野

菜等のモニタリングが可能となる。そこで、この研究では、現地調査で植生の分布や植生の高さなどを調べ、多時期の多偏波データを利用した植生データの定量的な解析法を検討する。テストデータとして、長崎の諫早の大規模干拓農地のデータを利用し、最新のPolInSARなどの解析方法も利用し、ALOS2による植生モニタリング技術を確立する。

3. 研究の方法

本応募の研究では、長崎県諫早市にある大規模干拓農地付近をテストサイトとして、多時期のPOLARSAR観測データを用い、以下の点について検討を行う。

具体的には、長崎諫早干拓の大規模農作地(中央干拓地)をテストエリアとして、農作物のモニタリングの可能性を検討することにした。本報告では、今年の8月と9月にPALSAR2で観測された干拓地のデータを利用し、エントロピー・アルファ法と4成分分解法(Yamaguchi decomposition technique)で解析を行った。以下にその解析方法を説明する。

偏波データは、HH,HV,VH,VVの4つの組み合わせであり、これらから散乱行列が定義される。

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

また、偏波間の2次統計量を取り扱うため、散乱行列から、Covariance行列[C(HV)]やCoherency行列[T(HV)]が導出される。

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

$$[T(HV)] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle \\ \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2 \langle S_{HV}^*(S_{HH} + S_{VV}) \rangle \\ \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2 \langle S_{HV}^*(S_{HH} - S_{VV}) \rangle \\ 2 \langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4 \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は、ピクセル間での平均化を表す。これらの行列をもとに、エントロピー、アルファ角の算出や4成分分解により測定データを表面散乱、2回散乱、体積散乱等に分解できる。次に、偏波データの解析法を簡単にのべる。

3.1 散乱モデルによる電力分解(4成分分解)

平均化されたCovariance行列やCoherency行列を4つのモデル(表面散乱, 2回反射散乱, 体積散乱, ヘリックス散乱)の散乱行列と分布関数を基に分解して、ターゲットの特徴を評価する方法がある。この方法は、

JPL の Freeman と Durden による三成分分解を拡張したものであり, Y4R,S4R,G4U などのバージョンがある. ここでは, G4U を利用する. G4U は, 最初に式(3)を以下の角度からユニタリ回転を行う.

$$2\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\text{Re}\{T_{23}\}}{T_{22} - T_{33}} \right) \quad (4)$$

$$\langle [T(\theta)] \rangle = [R(\theta)] \langle [T] \rangle [R(\theta)]^\dagger \quad (5)$$

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

また,

$$2\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\text{Im}\{T_{23}\}}{T_{22} - T_{33}} \right) \quad (7)$$

$$\langle [T(\varphi)] \rangle = [U(\varphi)] \langle [T(\theta)] \rangle [U(\varphi)]^\dagger \quad (8)$$

$$[U(\varphi)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & j \sin 2\varphi \\ 0 & j \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

の演算を行う. その結果, $T_{23}=0$ となり,

$$\langle [T'] \rangle = \langle [T(\varphi)] \rangle = \begin{bmatrix} T'_{11} & T'_{12} & T'_{13} \\ T'_{21} & T'_{22} & 0 \\ T'_{31} & 0 & T'_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

と Coherency 行列は変形される. ここで, 式(5)を考慮した行列分解を考える.

$$\langle [T(\theta)] \rangle = f_s \langle [T] \rangle_{\text{surface}} + f_d \langle [T] \rangle_{\text{double}} + f_v \langle [T] \rangle_{\text{vol}} + f_c \langle [T] \rangle_{\text{helix}} \quad (11)$$

ここで, f_s, f_d, f_v, f_c は表面散乱, 2面反射散乱, 体積散乱, そしてヘリックス散乱の係数を表す. この結果に対して, 式(13)を適用する.

$$\begin{aligned} \langle [T'] \rangle &= \langle [T(\varphi)] \rangle = [U(\varphi)] \left(f_s \langle [T] \rangle_{\text{surface}} + f_d \langle [T] \rangle_{\text{double}} + f_v \langle [T] \rangle_{\text{vol}} + f_c \langle [T] \rangle_{\text{helix}} \right) [U(\varphi)]^\dagger \\ &= f_s \langle [T(\varphi)] \rangle_{\text{surface}} + f_d \langle [T(\varphi)] \rangle_{\text{double}} + f_v \langle [T(\varphi)] \rangle_{\text{vol}} + f_c \langle [T(\varphi)] \rangle_{\text{helix}} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)をもとにした f_s, f_d, f_v, f_c から各散乱メカニズムの電力を求める方法を G4U とする. この方法は, Freeman と Durden によるオリジナルの方法と比べて, 負の電力の発生, 体積散乱の過大評価, 都市域の2面コーナーリフレクタ散乱の過小評価を低減できる, 大変優れた方法である.

4. 研究成果

この研究では, ALOS2/PALSAR2 の偏波観測データを利用した. ALOS2 は, 2006年に打ち

上げられた世界最初の L-band 偏波合成開口レーダを搭載した衛星 ALOS の後継衛星であり, 2014年5月24日に打ち上げられ, 初期校正期間を終え, 同年11月から定常運用が行われている. ALOS2には, 様々な観測シナリオがあるため, 残念ながら日本で偏波データを取得できる期間は少ない. 1サイクル14日として定常の観測シナリオでは, 日本での偏波観測期間を2年間で5サイクルが用意されている. なので, 残念ながら農業モニタリングに利用するような14日周期での同じ領域の観測は, 現状では困難な状況である. 今年の8月3日から10月11日までが, 偏波観測の5サイクルの期間に対応し, 4章で述べる長崎県諫早市の中央干拓地の観測は, 8月14日と9月30日の0時過ぎに行われた. それぞれのオフナディア角は25.5度と35.3度である. 両画像の干拓地付近のHH偏波画像を図1に示す.



(a)



(b)

図1 ALOS2/PALSAR2による諫早中央干拓地のHH偏波画像:(a)8月14日観測,(b)9月30日観測

ALOS2/PALSAR2の偏波データで植生モニタリングを行うために, 大規模の農業が実施されている長崎県諫早市諫早湾の大規模な干

拓地である中央干拓地をテストサイトとすることにした。中央干拓地では、農業法人が野菜を1年を通して栽培している。又野菜の栽培期間は短い、もし14日の観測期間が実現すれば、収穫までに3,4度の観測が可能である。3章に述べたように8月14日と9月30日にPALSAR2による観測が行われた。図1を見ると明瞭に耕作地の区画が確認でき、同じ場所でも二つのデータで後方散乱係数が大きく変化していることが確認できる。観測に際しては、図1(a)のデータについては前日の8月13日に、図1(b)のデータについては一週間後の10月7日に現地に赴き、耕作物の写真の取得を行った。その結果、耕作地の様子と栽培されている野菜等を対応付けられるようにした。8月ではトモロコシ、紫蘇、大豆、玉ねぎ等、9月ではトモロコシ、大豆、ブロッコリー、キャベツ、レタス、ひまわり等が栽培されているのを確認した。また、土壌が露出、又雑草だけ生えている耕作地もあった。参考に図2に現地調査時に撮影した大豆の写真を示す。同じ大豆であるが、撮影場所は8月と10月で異なり、違う時期に植えられたものである。



(a)



(b)

図2 諫早中央干拓地の現地調査(大豆)の写真:(a) 8月13日撮影、(b) 10月7日撮影

解析ではPOLSRPRO Ver.5.0を利用し、2章で示した偏波解析法での各耕作物の特徴を調べた。結果は、8月と9月とでデータを分けて表2,3に示した。参考に、土壌、雑草、ビニールハウスが占める領域の特徴も参

考に示す。各耕作物について4成分分解の表面散乱、2回反射散乱、体積散乱の割合(%), 全電力(dB:後方散乱係数に対応), エントロピーHとアルファ角を示した。また、8月はオフナディア角25.5度、9月はオフナディア角35.3度で観測されており、同じ条件での観測では無い。また、データにはLee Refined filterのスペックルフィルターを適用している。また、4成分分解では、ヘリックス散乱の成分が弱いため、残りの三成分で合計が100%になるように割合の計算をした。

最初に4成分分解法と全電力で比較してみる。8月を見ると土壌と大豆は、全てのパラメータでほぼ同じような結果になり、表面散乱が強く、次に体積散乱となった。2回散乱は6%程と非常に小さかった。トモロコシは体積散乱の割合が大きく、2回反射散乱も大きかった。全電力の値もビニールハウスを除くと一番高くなった。また、紫蘇と雑草もほぼ同じような結果となり、ここでは体積散乱と表面散乱が大きくなった。しかし全電力は雑草のほうが大きく紫蘇が一番小さい。紫蘇は、二つの耕作領域のみで栽培されており、サンプル数が少なくばらついた可能性がある。次に、玉ねぎは表面散乱と体積散乱の割合がほぼ等しい。

9月は8月よりも耕作物の種類が増えている。9月の特性として、全体で二回散乱の割合が大きくなった。これは、オフナディア角(近似的に入射角)が大きくなったことで、2回散乱が起こりやすくなったものと考えられる。土壌と同じような特性を示したのはレタス(収穫期)とブロッコリーであった。これらは、表面散乱と体積散乱で構成されており、全電力も-13.9dB前後となった。トモロコシは8月に比べ体積散乱が減って、表面散乱と二回散乱の割合が高くなっていった。また、ひまわりは、構造がトモロコシと同になるためか、同じような偏波特性を示した。また、雑草、大豆は同じような特性となっているが、表面散乱と体積散乱で若干の差異があり、大豆は体積散乱、雑草は表面散乱が大きかった。キャベツは、2回散乱が一番小さくなった。エントロピー・アルファ角では、8月と9月の両方でエントロピーが高い結果となった。これは、スペックルフィルターの処理の仕方が影響したと思われる。また、アルファ角は、ビニールハウスを除いて50度よりも小さい値になっている。土壌は、8月で25.6度、9月で36.6度となっており、入射角などが影響して変化した可能性が有る。

以上の結果から、オフナディア角が変わることにより、比較の土壌の偏波特性が大きく変わるため、植生のモニタリングでは、観測モードが同じで観測する必要があることが解った。また、エントロピー・アルファ法よりも4成分分解法の方が、耕作物による変化が大きく、作物の特徴を調べるのに適していることが解った。特に、ひまわりやトモロコシでは2回散乱、大豆や紫蘇などは体積散乱、

キャベツでは，2 回散乱が非常に小さくなるなどの偏波特徴を確認できた．但し，サイズが小さい苗のような作物や土壌は同じ偏波特性，全電力の特性を示し，違いを確認できなかった．

表 2 8 月の耕作物の偏波特徴

	4成分分解(%)			全電力 (dB)	Entropy	Alpha (Degree)
	表面散乱	2回散乱	体積散乱			
土壌	0.61	0.07	0.33	-11.33	0.59	25.64
ビニールハウス	0.09	0.15	0.76	-3.98	0.83	50.29
雑草	0.35	0.16	0.49	-10.08	0.77	39.42
トーマロコシ	0.15	0.26	0.60	-7.72	0.87	48.91
大豆	0.55	0.06	0.39	-11.54	0.65	27.33
玉ねぎ	0.46	0.08	0.46	-9.68	0.69	31.91
紫蘇	0.31	0.20	0.49	-13.02	0.82	42.34

表 3 9 月の耕作物の偏波特徴

	4成分分解(%)			全電力 (dB)	Entropy	Alpha (Degree)
	表面散乱	2回散乱	体積散乱			
土壌	0.42	0.14	0.44	-13.98	0.77	36.56
土壌 (表面: 粗)	0.50	0.13	0.37	-12.05	0.72	33.51
ビニールハウス	0.24	0.14	0.62	-8.11	0.82	42.78
雑草	0.31	0.22	0.47	-12.49	0.81	43.45
トーマロコシ	0.33	0.35	0.32	-8.92	0.73	45.92
大豆	0.24	0.21	0.55	-10.74	0.83	44.83
玉ねぎ	0.29	0.19	0.52	-14.23	0.84	42.46
ひまわり	0.27	0.39	0.34	-10.52	0.80	48.77
ブロッコリー	0.37	0.13	0.50	-14.29	0.80	38.89
キャベツ	0.37	0.10	0.54	-12.17	0.80	37.53
レタス (収穫期)	0.41	0.13	0.46	-13.84	0.79	38.00
大根	0.33	0.18	0.49	-15.98	0.82	40.69

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- [1] Toshifumi Moriyama, Makoto Satake, Compensation of Phase Error Caused by Ground Height among Polarimetric Channels of Pi-SAR-X2, IEICE Electronics Express, Vol.11, No.21, pp.1-8 査読有(2014.11)
- [2] Toshifumi Moriyama, Makoto Satake, Compensation of Phase Error among Polarimetric Channels of Pi-SAR-X2, IEICE Communications Express, Vol.3, No.10, pp.317-323 査読有(2014.10)
- [3] Toshifumi Moriyama, Lorenzo Poli, Nicola Anselmi, Marco Salucci, Paolo Rocca, Real Array Pattern Tolerances from Amplitude Excitation Errors, IEICE Electronics Express, Vol.11, No.17, pp.1-8 査読有(2014.9)
- [4] Toshifumi Moriyama, Giacomo Oliveri, Marco Salucci, Takashi Takenaka, A Multi-Scaling Forward-Backward Time-Stepping Method for Microwave Imaging, IEICE Electronics Express, Vol.11, No.16, pp.1-12 査読有(2014.8)

〔学会発表〕(計 9 件)

- [1] 白石 謙照, 森山 敏文, ALOS2/PALSAR 2 の偏波データを用いた諫早湾干拓地での農業モニタリングのための偏波解析, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 長崎県立美術館, 長崎 (2016, 1/22)
- [2] 森山 敏文, 中村 和也, PALSAR-2 の偏波データの校正と検証 - その 2 -, 電子

情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 大阪工業大学ナレッジセンター, 大阪 (2015, 10/30)

- [3] Toshifumi Moriyama, Polarimetric calibration of PALSAR2, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy (2015, 7/28)
- [4] M. Stake, J. Umemoto, T. Matsuoka, T. Kobayashi, S. Kojima, T. Umehara, T. Moriyama, Polarimetric calibration of Pi-SAR2: Experimental results of 2013 to 2015 observations, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy (2015, 7/29)
- [5] 森山 敏文, 中村 和也, PALSAR-2 の偏波データの校正と検証, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 長崎県立美術館, 長崎 (2015, 1/22)
- [6] 森山 敏文, インターフェロメトリックデータを用いた Pi-SAR2 偏波データの位相校正, 電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会, 新潟大学 (ときめいと), 新潟 (2014, 8/29)
- [7] 森山 敏文, Pi-SAR X-band SAR の位相誤差の補正について, 電子情報通信学会総合大会, 新潟大学, 新潟 (2014, 3/21)
- [8] Toshifumi Moriyama, Fast Calculation of Adaptive-Non-Negative-Eigenvalue Decomposition employing Particle Swarm Optimization, 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Tsukuba, Japan (2013, 9/25)
- [9] Toshifumi Moriyama, Applying Particle Swarm Optimization to Polarimetric Decomposition Technique with Phase Rotation of Covariance Matrix, Progress In Electromagnetic Research Symposium 2013, Stockholm, Sweden (2013, 8/12)

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/labs/emlab/moriyama/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森山 敏文 (MORIYAMA, Toshifumi)

長崎大学 工学研究科 准教授

研究者番号: 20452873