イネの3次元構造を考慮した多偏波マイクロ波散乱の4成分分解

Four component decomposition of polarimetric microwave scattering of rice using three dimensional structural data

須崎 純一*・河谷 嘉文**

Junichi SUSAKI and Yoshifumi KAWATANI

Abstract : In the present research, the authors examined the effects of the probability distribution of the target shape to the results of four component decomposition. The four component decomposition method decomposes polarimetric microwave data into four components, i.e. surface scattering, double bounce scattering, volume scattering and helix scattering. Prior to the present research, three dimensional structure of the rice was measured and modeled. The model was used to calculate the probability density function of the rice leaves at a viewpoint of arbitrary zenith and azimuth angles. With this probability density function, a covariance matrix of volume scattering for the rice was developed. This covariance matrix was embedded in the four component decomposition, and it was applied for the polarimetric X-band scattering data of rice, measured in an anechoic radio wave chamber in Niigata Univ. during September 25 to 26, 2007. It was found that the proposed four component decomposition produced more volume scattering and less surface scattering than the results produced by the standard four component analysis. As a result, it is concluded that the probability distribution of the target shape should be considered.

1. はじめに

安定的な食糧確保や水資源問題、またメタンガスの排出源などの観点から世界規模で水田のモニタリングが求められている。水田の定量的な把握及び監視方法の確立には、広範囲を継続的、定期的に観測できる衛星リモートセンシングが有効である。日本を含むアジアモンスーン下においてイネの生育期間中は雨天・曇天が多い。そのため、雲の影響を受けやすい光学センサを用いた観測には、実用化の上では困難が伴う。そこで、天候に左右されず、10m程度の高い空間分解能を有する合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) データの使用が研究されている (石塚ら, 2003) (石塚ら, 2006)。

2006年に打ち上げられた Advanced Land Observ-

ing Satellite (ALOS) に搭載され、Lバンドの多偏波データを観測する Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) は、地表面の様々な散乱特性を得られる可能性が期待されている。中でも、多偏波合成開口レーダ (Polarimetric Synthetic Aperture Radar : POLSAR) が、森林のバイオマスや土壌水分など様々な物理量を推定可能として注目を集めている。さらに多偏波データから効果的に情報を抽出する手法として、観測された偏波行列データを、既知の散乱メカニズムに対応したモデル行列の和に分解して散乱電力を評価する電力分解手法が研究されてきた。3成分分解手法 (Freeman and Durden, 1998) や4成分分解手法 (Yamaguchi *et al.*, 2005) といった電力分解手法を用いると、多偏波データを表面散乱、2回反射、体積散乱に分解でき、地表面の複雑な散乱をより定性的に把握できる。この3成分・4成分分解手法では体積散乱を計算するために、地表面上の物体の形状が反映された確率密度関数が用いられている。垂直成分が支配的な形状、水平成分が支配的な形状、あるいは全ての方向にランダムに分布している形状が

* 京都大学大学院地球環境学堂

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂

**三菱スペース・ソフトウェア

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 47, NO. 6, 2008

仮定されている。

しかしながら、POLARS を用いた精確な植生モニタリングを実現するためには、対象とする植生の3次元形状を考慮した計算が求められる。そこで本研究では、既に作成したイネの3次元構造モデルを用いて、イネの形状を反映した4成分分解手法の適用を試みた。第2節では4成分分解手法の概要とイネの形状を考慮する場合の4成分分解手法を説明し、第3節では実験結果を報告する。第4節で考察、第5節で結論を述べる。

2. 4 成分分解手法

本稿では Reflection symmetry 条件が成り立たない場合でも使え、より一般的な電力分解手法である4成分分解手法を取り上げる。4成分分解法は、観測された偏波行列を表面散乱・2回反射・体積散乱・螺旋散乱の4つの散乱過程を表す基本行列の和に分解し、それらの展開係数を決定することで4つの散乱成分を決定する。

実際のレーダ測定では HV 基底がよく使われ、その Covariance 行列を $C(HV)$ と表現する。空間的にアンサンブル平均化した $\langle [C(HV)] \rangle$ は、表面散乱・2回反射・体積散乱・螺旋散乱に対応した4つの Covariance 行列の線形和に変形できると仮定する。

$$\begin{aligned} \langle [C(HV)] \rangle &= f_s [C]_{\text{surface}}^{hv} + f_d [C]_{\text{double}}^{hv} \\ &\quad + f_v [C]_{\text{vol}}^{hv} + f_s [C]_{\text{helix}}^{hv} \\ &= f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha^* \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & |\alpha|^2 \end{bmatrix} \\ &\quad + f_v [C]_{\text{vol}}^{hv} + f_s \begin{bmatrix} 1 & \pm j\sqrt{2} & -1 \\ \mp j\sqrt{2} & 2 & \mp j\sqrt{2} \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $[C]_{\text{surface}}^{hv}$ ・ $[C]_{\text{double}}^{hv}$ ・ $[C]_{\text{vol}}^{hv}$ ・ $[C]_{\text{helix}}^{hv}$ は表面散乱・2回反射・体積散乱・螺旋散乱の Covariance 行列を、 f_s ・ f_d ・ f_v ・ f_c は各散乱電力の未知定数を、 α は2回反射に関する未知の複素数、 β は表面散乱に関する未知の複素数を意味する。

本研究では、イネの形状を考慮した体積散乱を表現する Covariance 行列を求める。そのために、順を追って説明する。

2.1 対象物の形状を考慮した Covariance 行列

まず、レーダで計測される散乱行列を

$$[S(HV)] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c \\ c & b \end{bmatrix} \quad (2)$$

と仮定する。この $[S(HV)]$ を角度 θ だけ回転した行列 $[S(\theta)]$ は、

$$\begin{aligned} [S(\theta)] &= \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

と、 $[S(HV)]$ と回転行列の積で導かれる。

ここで、平均 Covariance 行列 $\langle [C(\theta)] \rangle^{hv}$ は、対象物が確率密度関数 $p(\theta)$ で分布するダイポールの集合体とみなすと、

$$\begin{aligned} \langle [C(\theta)] \rangle^{hv} &= \begin{cases} \int_0^{2\pi} [C(\theta)] p(\theta) d\theta & \text{連続型確率密度関数の時} \\ \sum [C(\theta)] p(\theta) & \text{離散型確率密度関数の時} \end{cases} \\ &= \langle [C(hv)] \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

と表現できる。一方、

$$\begin{aligned} \langle [C(hv)] \rangle &= \begin{bmatrix} \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & 2 \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

であり、式(3)を用いると行列(5)の各成分を計算できる。

$$\begin{aligned} \langle |S_{hh}|^2 \rangle &= |a|^2 I_1 + |b|^2 I_2 + |c|^2 I_3 + 2 \operatorname{Re}(ab^*) I_4 \\ &\quad + 2 \operatorname{Re}(ac^*) I_5 + 2 \operatorname{Re}(bc^*) I_6 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \langle |S_{vv}|^2 \rangle &= |a|^2 I_2 + |b|^2 I_1 + |c|^2 I_3 + 2 \operatorname{Re}(ab^*) I_4 \\ &\quad - 2 \operatorname{Re}(ac^*) I_5 - 2 \operatorname{Re}(bc^*) I_5 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\langle |S_{hv}|^2 \rangle = \frac{|b-a|^2}{4} I_3 + |c|^2 I_7 + \operatorname{Re}\{c^*(b-a)\} I_8 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle &= (|a|^2 + |b|^2) I_4 + |c|^2 I_3 + ab^* I_1 \\ &\quad + a^* b I_2 + (b^* c - ac^*) I_5 + (a^* c - bc^*) I_6 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle = & a \frac{b^* - a^*}{2} I_5 + b \frac{b^* - a^*}{2} I_6 \\ & + c \frac{b^* - a^*}{2} I_3 + ac^* I_{10} + bc^* I_9 + |c|^2 I_8 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle = & a^* \frac{b - a}{2} I_6 + b^* \frac{b - a}{2} I_5 \\ & - c^* \frac{b - a}{2} I_3 + ca^* I_9 + b^* c I_{10} - |c|^2 I_8 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\langle S_{hh}^* S_{vv} \rangle = \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle^* \quad (12)$$

$$\langle S_{hh}^* S_{hv} \rangle = \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle^* \quad (13)$$

$$\langle S_{hv}^* S_{vv} \rangle = \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle^* \quad (14)$$

2.3節で説明するように、イネの3次元構造モデルから葉の向きの確率密度関数を計算すると、離散型の確率密度関数 $p(\theta)$ が得られた。よって、以下では離散型の確率密度関数に基づく $I_i (i=1, \dots, 10)$ の計算式を記載する。

$$I_1 = \sum \cos^4 \theta p(\theta) \quad (15)$$

$$I_2 = \sum \sin^4 \theta p(\theta) \quad (16)$$

$$I_3 = \sum \sin^2 2\theta p(\theta) \quad (17)$$

$$I_4 = \sum \sin^2 \theta \cos^2 \theta p(\theta) \quad (18)$$

$$I_5 = \sum \cos^2 \theta \sin 2\theta p(\theta) \quad (19)$$

$$I_6 = \sum \sin^2 \theta \sin 2\theta p(\theta) \quad (20)$$

$$I_7 = \sum \cos^2 2\theta p(\theta) \quad (21)$$

$$I_8 = \sum \sin 2\theta \cos 2\theta p(\theta) \quad (22)$$

$$I_9 = \sum \sin^2 \theta \cos 2\theta p(\theta) \quad (23)$$

$$I_{10} = \sum \cos^2 \theta \cos 2\theta p(\theta) \quad (24)$$

このようにして、対象物の形状を反映する確率密度関数 $p(\theta)$ を用いて、体積散乱を表現する Covariance 行列を求めることができる。

2.2 Covariance 行列による4成分分解

式(1)の中で体積散乱に関する Covariance 行列 $[C]_{vol}^{hv}$ は、木の幹や枝、植物の葉などをダイポールの集合体とみなして表現できる。例えば、木の枝や植物の葉を天頂角 0 度から見ると、ダイポールがランダム方向に分布していると仮定しても差し支えない。この時のダイポールの確率密度関数は、

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad (25)$$

と表現できる。Yamaguchi *et al.* (2005) にしたがって、

$$\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

と表現される V ダイポールを想定する時の体積散乱の Covariance 行列は、

$$\frac{1}{8} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

と導ける。同様に、垂直方向を向くダイポールが支配的な時には、ダイポールの確率密度関数を

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin \theta & (0 < \theta < \pi) \\ 0 & (\pi \leq \theta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (28)$$

と置ける。V ダイポールを想定する時の体積散乱の Covariance 行列は、

$$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 8 & 0 & 2 \\ 0 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

である。また水平方向を向くダイポールが支配的な時には、ダイポールの確率密度関数を

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos \theta & \left(0 < \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} < \theta\right) \\ 0 & \left(\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (30)$$

と置ける。V ダイポールを想定する時の体積散乱の Covariance 行列は、

$$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 2 \\ 0 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (31)$$

が得られる。

Yamaguchi *et al.* (2005) の4成分分解手法では、

$$P = 10 \log \langle |b|^2 \rangle / \langle |a|^2 \rangle \quad (32)$$

の値を基準にして、採用する体積散乱の Covariance 行列を決定している。

- $P < -2.0\text{dB}$ の時：垂直成分が支配的な時の Covariance 行列 (式29)
- $-2.0 < P < 2.0\text{dB}$ ：ランダム方向に分布する時の Covariance 行列 (式27)
- $P < 2.0\text{dB}$ ：水平成分が支配的な時の Covariance 行列 (式31)

2.3 イネの3次元構造モデルから計算した Covariance 行列

須崎らは、誤差を含む3次元座標データから植生の3次元構造モデルを作成する手法を構築し、イネを対象に実施した適用結果を報告した(須崎ら, 2008)。現地計測の経験から、葉や茎は xy 平面ではほぼ直線, xz や yz 平面では2次曲線と仮定して、イネの3次元構造を推定した。ここではデカルト座標系の xyz 座標系を対象とし, xy 平面は水平, z 軸は鉛直方向を意味するものとする。イネの中心線上の点 (x, y, z) の座標値に対し, まず xy 平面で主成分分析を適用して第1主成分 u を以って葉の向きを決定し, uz 平面上の点データから2次曲線を推定した。 uz 平面の2次曲線の推定には、曲線への距離の2乗和が最小となる「距離の2乗和の最小二乗法」を用いた。2007年8月14日の計測データを対象にして検証し結果、 -7.4% の葉の長さの推定精度、 -6.8% の葉面積の推定精度と判明した。天頂角60度で方位角が210度と240度の時のイネの3次元モデルを図1に示す。

このイネの3次元構造モデルから、入射角 $0 \cdot 35 \cdot 90$ 度の時の葉の向きの離散型確率密度関数を求めた。ある入射角の時に方位角を0度から359度まで1度ずつ変えて、投影される葉の向きを計算した。イネの3次元構造モデルでの葉は中心線と輪郭から構成され、短い直線区間で近似されている。この直線ベクトルから葉の向きを決め、0度以上1度未満、1度以上2度未満というように1度間隔で離散型確率密度関数を求めた。入射角 $0 \cdot 35 \cdot 90$ 度の時の葉の向きの離散型確率密度関数が極座標で図2に示されている。比較対象として、式25で表されるランダム分布、式28の垂直成

Zenith angle = 60 (deg), Azimuth angle = 210 (deg)

Zenith angle = 60 (deg), Azimuth angle = 240 (deg)

図1 イネの3次元構造モデルの一例(須崎ら, 印刷中)。
z軸の座標値はトランスミッターと呼ばれる機器からの相対的な高さを表す。

分が支配的な時の確率分布、さらに式30の水平成分が支配的な時の確率分布に対して、1度間隔の離散型確率密度関数を計算した。これらの確率密度関数が極座標で図3に示されている。

図2 イネの3次元構造モデルから計算された、入射角0・35・90度の時の葉の向きの離散型確率密度関数。1度間隔で計算した。角度 θ と確率 p の極座標で表現されている。

図2の入射角35・90度の時の確率密度関数からは、イネの葉は $\theta = \pi/2$ の垂直方向を中心に分布していることが分かる。 $\theta = 0$ の軸へ回転させて考えると、 $\theta = 0$ ではイネの葉は水平方向に伸びる形を有するので、イネの葉をHダイポールと仮定できるとした。したがって、Hダイポールを想定した上で入射角35度の葉の向きの離散型確率密度関数を用いて、式(15)~(24)の $I_i (i=1, \dots, 10)$ を求めた。この結果、式(33)に示すイネの体積散乱のCovariance行列が得られた。

$$\begin{bmatrix} 0.140 & 0 & 0.0875 \\ 0 & 0.175 & 0 \\ 0.0875 & 0 & 0.685 \end{bmatrix} \quad (33)$$

このCovariance行列を組み込んだ4成分分解手法を、イネの多偏波散乱データに適用する。

図3 式(25)で表されるランダム分布、式(28)の垂直成分が支配的な時の確率分布、式(30)の水平成分が支配的な時の確率分布に対する離散型確率密度関数。図2と同様に1度間隔で計算した。角度 θ と確率 p の極座標で表現されている。連続確率密度関数と比較して確率の値が異なることに注意されたい。ここでのランダム分布時の確率密度関数と図2の入射角0度の時の確率密度関数は一致することが確認された。

3. 実験

2007年9月25・26日に、新潟大学情報工学科・波動情報研究室で独自に開発されたFM-CW SAR計測システム(Nakamura *et al.*, 2007)を使用し、同研究室が所有する電波暗室内で計測を行った。システムには水平偏波の送受信に2つ、垂直偏波の送受信に2つ、計4つのアンテナが搭載されている。アンテナは直線上を動きながらマイクロ波を送受信し、計測後に合成開口処理がなされる。システムの諸元を表1に示す。

衛星搭載SARのように同一のアンテナで送受信するモノスタティックレーダでは、HV偏波とVH偏波では等しい値を計測する。一方、本実験で使用した計測システムでは、異なるアンテナで送受信するバイスタティックレーダが使われた。したがって導体球等を用いた偏波校正の後でも、僅かながらHV偏波とVH偏波の計測値は異なった。そこで、4成分分解手法と同様にVH偏波とHV偏波の計測値は等しいと仮定し、HV偏波の値を使用した。

京都大学吉田キャンパス農学部圃場において、2007年5月31日に15cm×30cm間隔で移植されたヒノヒカ

表1 Xバンドにおける計測の諸元

中心周波数	10GHz
掃引周波数	2 GHz
掃引時間	5 msec
FFT ポイント ¹	16384
アジマスポイント数	256
レンジ確度	0.11cm
アジマス確度	0.93cm
レンジ分解能	7.50cm
アジマス分解能	5.70cm

1：FFT ポイント数はレンジポイント数×2

図4 電波暗室でのFM-CW SAR計測システムを用いたイネの散乱計測。幅56cm・奥行き36cm・高さ25cm・厚さ2.5cmの発砲スチロールの容器に土を敷き詰め、Xバンド（10GHz）で計測した。

りを9月23日に採取し、計測の対象とした。イネの散乱特性を計測するにあたり、イネと土以外の要素から生じる散乱の影響を極力排除するために発砲スチロール製容器を使用した。容器の寸法は、幅56cm・奥行き36cm・高さ25cm・厚さ2.5cmであった。発砲スチロールの容器に土を敷き詰め、発砲スチロールの幅の制約から3株のイネを移植して計測した。計測の様子を図4に示す。

合成開口処理が施されたHH・HV・VVの偏波データごとにレンジ方向のずれを校正し、アジマス方向で有効なデータが計測されている区間を切り出した。アジマス方向に対しレンジ方向ではサンプル数が多いため、16ルック数のレンジ圧縮を行った。その後、4成分分解手法を適用し、各散乱成分が電力値として算出された。散乱成分を算出する際には、スペククルノイズ除去のため、各画素に対して5×5のウィンドウサイズで平滑化した。導体球を計測した時の全体電力の

最大値を基準とし、計測された電力値を正規化した。

Yamaguchi *et al.* (2005) の4成分分解手法を適用して得られた結果と、イネの形状を考慮した体積散乱のCovariance行列を取り込んだ4成分分解手法を適用した結果を比較した。各々の表面散乱、2回反射、体積散乱のdB表示の電力値をRGB合成した画像を図5に示す。縦横120×120画素の領域で、縦軸はアジマス方向、横軸はレンジ方向を示し、-30～-10dBまでの電力値を0～255の1バイトの画像輝度値へ変換した。また図5のレンジ幅17.6cm領域において正規化電力値の平均値を計算し、アジマス幅65.1cmにわたる変動を調べた。Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法を適用した場合と、イネの形状を考慮した4成分分解手法を適用した場合の結果を図6に示す。この時の各散乱成分の構成割合を表2に示す。

4. 考 察

本研究では、発砲スチロールを用いた供試体に先立ち、通常浴槽として使用される繊維強化プラスチック（fiber reinforced plastic：FRP）製の幅70cm・奥行き60cm・高さ60cmの容器を用いて水田を模した供試体を作成した。この供試体の計測の結果から、浴槽の縁から強い散乱が生じていると確認された。それを踏まえて、散乱の影響が小さいといわれる発砲スチロールを容器として使用した。

図5からは、画像中の散乱は大きく3列に分かれていることが読み取れる。イネの背丈は約90cmであり、図4に示されているように真上から見るとランダム方向にイネの先端が広がっている。この散乱の様子を理解するために、背丈約30cmの観葉植物（ヒノキ科ウィルマ）を計測し、4成分分解を適用した。その計測の様子が図7に、4成分分解結果が図8に示されている。本来は観葉植物の葉の向きの確率密度関数を求めて適用すべきだが、ここではイネの確率密度関数を適用した。図8と比較すると、図5の左列（ニアレンジ）がイネの先端で右列（ファーレンジ）がイネの根元に対応していると判断できる。先端では体積散乱が支配的であることが分かり、植生の散乱の特徴を考慮すると妥当な結果であるといえる。一方、図5の中央列はイネの背丈方向の中央部分に該当する。このレンジでは体積散乱に加えて表面散乱が幅広く見られ、局所的に2回反射も起こっていることがわかる。このようにX

図5 イネの2回反射, 体積散乱, 表面散乱のdB表示の電力値をRGB合成した画像。RGBの各バンドは-30~-10dBの電力値に対応し, 画像横方向がレンジ方向, 縦方向がアジマス方向を意味している。(左) Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法を適用した結果, (右) イネの形状を考慮した4成分分解手法を適用した結果。

図6 図5のレンジ幅17.6cm領域における正規化電力値の平均値の変動。導体球を計測した時の全体電力の最大値を基準とし, 計測された電力値を正規化した値を正規化電力値としている(無次元)。(上) Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法を適用した結果, (下) イネの形状を考慮した4成分分解手法を適用した結果。

バンドでは少ないながらも2回反射が起こっていることが確認できた。

4成分分解にて仮定する確率密度関数が与える影響を検討する。図5・6および表2からは, イネの形状

表2 Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法を適用した場合と, イネの形状を考慮した4成分分解手法を適用した場合の各散乱成分の構成割合。

	Yamaguchi <i>et al.</i> の 4成分分解	イネの形状を考慮した 4成分分解
表面散乱	45.7%	35.5%
2回反射	10.3%	12.0%
体積散乱	31.8%	40.2%
螺旋散乱	12.2%	12.3%

図7 電波暗室でのFM-CW SAR計測システムを用いた観葉植物(ヒノキ科ウィルマ)の散乱計測。

図8 観葉植物(ヒノキ科ウィルマ)の2回反射, 体積散乱, 表面散乱のdB表示の電力値をRGB合成した画像。RGBの各バンドは-30~-10dBの電力値に対応し, 画像横方向がレンジ方向, 縦方向がアジマス方向を意味している。(左) Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法を適用した結果, (右) イネの形状を考慮した4成分分解手法を適用した結果。

を反映した確率密度関数を採用すると, 表面散乱に分類されていた成分が体積散乱に分類されていることが読み取れる。自然植生では表面散乱より体積散乱の成分がより多く見られる傾向が報告されている(山口,

2007)。また表面散乱はアンテナの方向に向いている面からの反射であり、イネの葉の形状を考慮すると表面散乱より体積散乱の占める割合が大きくなると推察される。よって、体積散乱が支配的に分類されることは、より適切に4成分分解された可能性が高いと考えられる。

POLSAR データからは、従来の単偏波データよりも多面的でかつ物理的現象に結びつくデータを得やすい。さらに4成分分解手法を適用することで各散乱成分の寄与する割合が分かり、土地被覆分類などより効果的な活用に発展できる可能性を秘めている。今回の研究で、対象物の形状を反映した確率分布の与え方によって分解成分の構成割合が変化することが明らかになった。4成分分解手法自体は HV 基底の散乱行列を、回転した hv 基底の散乱行列へ変換する処理に基づいている。この計算過程では対象物の形状を反映した確率密度関数が利用されるため、仮定する確率密度関数が4成分分解の結果にも影響を与える。

本研究では適切な確率分布の選択とその影響という観点で、4成分分解手法のより効果的な適用に関する知見を報告した。衛星や航空機の POLSAR 画像への現実的な適応を考えると、例えば土地被覆分類を目標にする場合、様々な土地被覆が混在する中で最適な確率分布を選択しながら土地被覆分類を実施することは難しい。土地被覆が大まかに分かった段階で、あるいは予め対象とする土地被覆が限定された状況では、本研究で報告した内容は参考になると考えられる。例えば、水田などの農地に限定して、植生の生長量を把握するような場合には、本研究のように適切な確率分布を利用することでより正確な生長量を把握できると考えられる。

最後に螺旋散乱について言及する。Yamaguchi *et al.* の4成分分解手法の特徴に、体積散乱の計算において確率分布関数を考慮したことと、螺旋成分を組み込んだことが挙げられる。表2からは、確率密度関数の選択に関係なく、螺旋散乱が約12%と無視できないほどの大きさで発生していることがわかる。植生からは円偏波を発生させる螺旋散乱過程は起こらないはずであるが、この発生要因は現時点では明確ではない。今後更なる実験を通じて検証したい。

5. 結 論

本研究では、POLSAR を用いた正確な植生モニタリングを念頭に、イネを対象としてイネの形状を反映した4成分分解手法の適用を試みた。電波暗室内で、発泡スチロール製容器に移植されたイネの X バンドの多偏波散乱特性を計測した。一方、イネの3次元構造モデルから葉の向きの離散型確率密度関数を計算し、得られた体積散乱の Covariance 行列を4成分分解手法に組み込んだ。この4成分分解手法と従来の4成分分解手法を計測データに適用し、両者の散乱結果を比較した。その結果、イネの形状を考慮することで、表面散乱成分が減少し、代わって体積散乱が増加していることが判明した。厳密な検証は実現できていないものの、植生では体積散乱成分が多いという従来の知見に合致する結果となった。

現時点では幅広い適用という観点ではまだ不十分であるため、今後も多偏波の散乱特性に関する実験を更に進めていく予定である。今回の実験では発泡スチロール容器の大きさの制約のためイネを3株しか配置できず、さらに湛水状態での計測を行っていない。今後は、 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 程度の大きな発泡スチロール容器を使用した供試体を作成し、またそこに水を張って湛水状態を設定することで、水田の状況をより忠実に再現する実験を計画している。さらに、計測システムの関係から X バンドでの実験となったが、ALOS/PALSAR データへ4成分分解の適用を想定して、可能であれば L バンドでの計測にも取り組みたい。

謝 辞

本研究は、京都大学生存圏研究所平成19年度萌芽ミッションプロジェクト「マイクロ波散乱計測による水田の土壌水分推定モデル構築と合成開口レーダ画像からの広域土壌水分推定」の支援を受けて実施された。また新潟大学工学部情報工学科山口芳雄教授をはじめ、新潟大学波動情報研究室の方々に実験設備や処理システムを使用させて頂き、また4成分分解手法についてご指導頂き、感謝を申し上げます。

(受付日2008.5.5, 受理日2008.11.7)

参考文献

- [1] Freeman, A., and Durden, S.L., “A three-component scattering model for polarimetric SAR data”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 3, pp.356-369, 1998.
- [2] Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., and Yamada, H., “Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 43, no. 8, pp.1699-1706, Aug. 2005.
- [3] Nakamura, J., Aoyama, K., Ikarashi, M., Yamaguchi, Y., and Yamada, H., “Fully polarimetric and interferometric FM-CW SAR system and its preliminary measurement results”, Proceedings of ISAP2007, pp.816-819, 2007.
- [4] 石塚直樹, 水稻作付面積計測への合成開口レーダ (SAR) の利用, pp.95-151, 農業環境技術研究所報告, 2006.
- [5] 石塚直樹, 齊藤元也, 大内和夫, Glen Davison, 毛利健太郎, 浦塚清峰, Pi-SAR による水田の多波長・多偏波解析, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 23, no. 5, pp.473-490, 2003.
- [6] 山口芳雄, レーダポーラリメトリの基礎と応用—偏波を用いたレーダリモートセンシング—, 電気情報通信学会, 2007.
- [7] 須崎純一, 幸良淳志, 田村正行, マイクロ波散乱解析のためのイネの3次元構造の計測とモデル化, 写真測量とリモートセンシング, vol. 47, no. 5, pp.42-52.