

レーダポーラリメトリにおけるデータ利用方法について

山口 芳雄^{†a)}

On the Utilization of Fully Polarimetric Data in Radar Polarimetry

Yoshio YAMAGUCHI^{†a)}

あらまし リモートセンシング分野では世界的に偏波合成開口レーダ (POL SAR) の開発が進められている。POL SAR で取得されるデータは 2×2 の複素散乱行列である。本論文では、散乱行列から導かれる二次統計量を要素とする各種の偏波行列、及びその利用方法について述べる。散乱行列により独立な偏波二次統計要素は 9 個出現するが、それらの回転不変成分を調べると独立情報は 4 個に減少する。これらの成分を考慮した偏波情報の利用方法・指標として、円偏波基底の相関係数、固有値解析、散乱電力分解を紹介する。

キーワード リモートセンシング、レーダポーラリメトリ、POL SAR、偏波行列、分解

1. ま え が き

レーダポーラリメトリは偏波情報を利用し、ターゲットの分類や識別に役立たせるリモートセンシング分野の技術である [1]。理論的な検討は 1950 年代に始まったが [2]、1980 年代に NASA-JPL の航空機搭載レーダ AIRSAR によって偏波データ (散乱行列) が取得され、その有効性が確認されてから急速に普及してきた [3]。日本では、航空機搭載 Pi-SAR (NiCT/JAXA の共同開発) [4] が 1997 年から実験用として飛行を続け、データ提供を行っている。2006 年 1 月 24 日には世界初の L-band 偏波レーダを搭載した ALOS-PALSAR が打ち上げられた。レーダリモートセンシング分野で世界に対する日本の貢献は大きく、その成果が待たれている。

本論文では散乱行列をもとに導かれる二次統計量、各種の偏波行列、及びその利用方法について述べる。散乱行列から導かれる偏波行列 (Kennaugh 行列、Covariance 行列、Coherency 行列など) の独立な二次統計要素は 9 個になるが、それらの平均値 (あるいは回転不変量) を調べると独立情報は 4 個に減少する。これらが含まれる偏波指標として例えば円偏波基底の相関係数がある。円偏波相関係数は人工物検出 [5] や地表の傾斜の導出 [6], [7] に有効である。また、平均化さ

れた偏波行列をもとに、散乱モデル (表面散乱, 2 回反射散乱, 体積散乱, Helix 散乱) を仮定して全散乱電力を三つあるいは四つの散乱電力の和に分解することができる [8] ~ [10]。更に、偏波基底に依存しない固有値・固有ベクトル展開により Entropy, angle alpha, anisotropy パラメータもよく使われている [11] ~ [13]。本論文ではこれらの手法を概観し、Pi-SAR によって取得された中越地震の POL SAR 画像を例にとり、具体的な分解結果を示す。

なお、レーダポーラリメトリ進展の中で、偏波の定義の違いに起因する各種の混乱が生じた。例えば、円偏波回転方向の事例 [14] がある。また、直線偏波と円偏波の変換は、行列式が +1 のユニタリ変換となるべきであるが、現在でも IEEE の偏波定義 [15] を含めユニタリ変換を満たしていない記述もある [16], [17]。更に、散乱行列でも研究者によって異なる表現も見られた。通常は水平偏波 H が先に指定されているが、垂直偏波 V を先に用いたり [17]、円偏波基底では右回り R と左回り L のどちらを先に定義すべきかなど統一されていない点もある。レーダポーラリメトリでは位相を含めた基底変換を扱うので、変換による位相保持は非常に大切な事柄である。ここでは、ユニタリ変換を満たし、かつ現時点で世界中の radar polarimetry community で支持されている記述方法を採用する [1], [18]。

データ取得とその取扱いは直線偏波ベースで行われることが多い。直線偏波で考えると散乱現象などは分

[†] 新潟大学工学部, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: yamaguch@ie.niigata-u.ac.jp

かりやすいが、別の偏波基底で事象を考えなくてはならないこともある。その際に基底変換が出現するが、起こり得る変換ミスをなくするために、また、見通しをよくするために必要なパラメータは直線偏波要素で記すことにする。

2. 二次統計量要素の偏波行列

POLSAR データとは散乱行列あるいはそれと等価なベクトルや偏波行列からなるデータであり、POLSAR 画像データはピクセルごとに一つの散乱行列が対応する二次元データである。散乱行列 $[S]$ は次式のように定義されている。

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

ただし、 E^t は送信電界、 E^s は散乱電界を表し、座標の原点はレーダ側にある。この定義式から分かるように、下添字の最初の記号は受信、2 番目の記号は送信を表している。通常、レーダ観測では直線の水平偏波 H 、垂直偏波 V が多く使われる。本論文では送受信アンテナが同じ位置にある monostatic レーダのデータを扱う。後方散乱の場合は相反定理から $S_{HV} = S_{VH}$ となる。式の簡単化のために本論文を通して散乱行列要素を次のようにおく。

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

この要素から二次統計量を要素にもつ各種の偏波行列が作られる。よく用いられる偏波行列は次の Kennaugh 行列、Covariance 行列、Coherency 行列である。

[Kennaugh 行列]

$$\langle [K] \rangle = \frac{1}{n} \sum \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

ただし、

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{1}{2}(|a|^2 + 2|c|^2 + |b|^2) \\ k_{12} &= k_{21} = \frac{1}{2}(|a|^2 - |b|^2) \\ k_{13} &= k_{31} = \text{Re}\{c^*(a+b)\} \\ k_{14} &= k_{41} = \text{Im}\{c^*(a-b)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{22} &= \frac{1}{2}(|a|^2 - 2|c|^2 + |b|^2) \\ k_{23} &= k_{32} = \text{Re}\{c^*(a-b)\} \\ k_{24} &= k_{42} = \text{Im}\{c^*(a+b)\} \\ k_{33} &= |c|^2 + \text{Re}(ab^*) \\ k_{34} &= k_{43} = \text{Im}(ab^*) \\ k_{44} &= |c|^2 - \text{Re}(ab^*) \end{aligned} \quad (3b)$$

Kennaugh 行列は 4×4 の実数要素をもつ対称行列で、データ処理では扱いやすい。主に偏波状態を変数とした受信電力図：Polarization signature を描く際に使われ [3]、更にコントラスト強調 [19] や散乱電力分解 [20] にも使われる。対称性を考慮すると 9 個の独立要素がある。しかし、もともとは同じ散乱行列から導かれているので、含まれる情報量は次の Covariance 行列や Coherency 行列と同じである。最近の偏波解析には 3×3 の Covariance 行列と Coherency 行列がよく用いられる。

[Covariance 行列]

$$\begin{aligned} \langle [C] \rangle^{HV} &= \frac{1}{n} \sum k_{HV} k_{HV}^\dagger \\ &= \begin{bmatrix} \langle |a|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle ac^* \rangle & \langle ab^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle ca^* \rangle & 2\langle |c|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle cb^* \rangle \\ \langle ba^* \rangle & \sqrt{2} \langle bc^* \rangle & \langle |b|^2 \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 k_L は散乱行列と等価な散乱ベクトルであり、

$$k_L = \begin{bmatrix} a \\ \sqrt{2}c \\ b \end{bmatrix} \quad (5)$$

\dagger は複素共役転置を表す。Covariance 行列は 3×3 エルミート正定値行列で、要素は偏波チャネル電力と相関係数に直結している。基底変換により他の偏波基底での表現も可能 (図 1 参照) で、電力のコントラスト強調 [21] や散乱電力分解にも使用される。

[Coherency 行列]

$$\begin{aligned} \langle [T] \rangle &= \frac{1}{n} \sum k_P k_P^\dagger \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |a+b|^2 \rangle & \langle (a+b)(a-b)^* \rangle & \langle 2c^*(a+b) \rangle \\ \langle (a-b)(a+b)^* \rangle & \langle |a-b|^2 \rangle & \langle 2c^*(a-b) \rangle \\ \langle 2c(a+b)^* \rangle & \langle 2c(a-b)^* \rangle & \langle 4|c|^2 \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

散乱ベクトル k_P は直交性をもち、理想ターゲットに

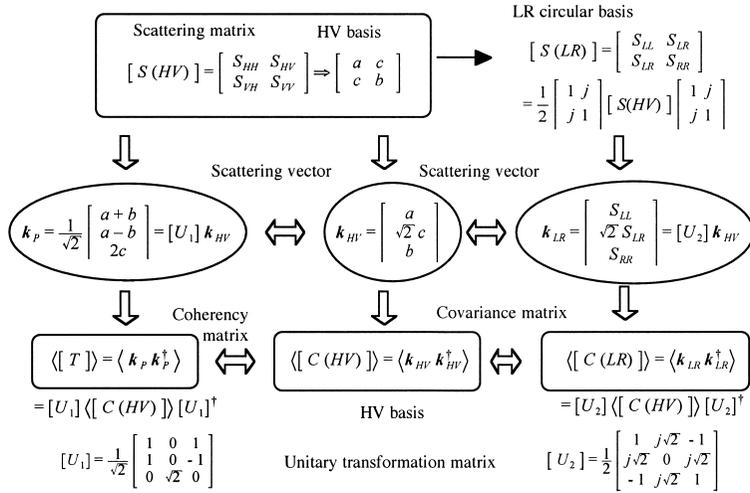


図 1 偏波行列の関係
Fig. 1 Relationship among polarization matrices.

対して散乱メカニズムを表す。

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} a+b \\ a-b \\ c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Coherency 行列もエルミート正定値行列で，固有値解析によって Entropy, alpha angle, anisotropy による分類が行われている [12], [13], [22] .

これら三つの偏波行列で実部と虚部を別々に数えると独立要素は 9 個存在する．Covariance 行列と Coherency 行列は図 1 に示すように互いにユニタリ変換の関係にある．直線偏波だけでなく円偏波基底でも Covariance 行列を作ることができる．偏波情報を扱う際，偏波基底の変換や各種の行列が出現するために複雑に思われるが，データ利用・解析の観点からは図 1 に示す関係だけで十分である．なお，これらの行列の Trace と散乱ベクトルのノルムは全電力と等しい．

3. 平均化行列と回転不変量

合成開口画像では振幅・位相揺らぎによるスペックルノイズが大きい．また，一般の雑音も加わる．それらの影響を避けるために，POLARS 解析ではデータの集合平均を扱う．偏波行列の集合平均を評価する際，あらかじめどのような値になるか理論値を調べておくことは重要である．理論値を求めるには，図 2 のように二次統計量を積分すればよい． θ だけ角度回転した散乱行列は次のようになる．

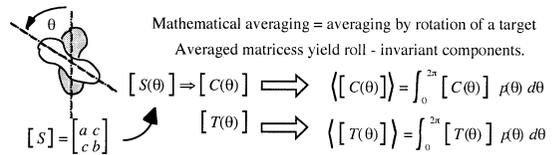


図 2 偏波行列の数学的平均化
Fig. 2 Mathematical averaging of polarization matrices.

$$[S(\theta)]^{HV} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & c \\ c & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

これから必要な項を導出し，確率密度関数 $p(\theta)$ を乗じて積分する．

$$\langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle = \int_0^{2\pi} S_{hh} S_{hh}^* p(\theta) d\theta \quad (9)$$

確率密度分布が一様 ($p(\theta) = 1/2\pi$) と仮定すると次の行列が得られる．回転不変な成分だけが残る．

[Kennaugh 行列]

$$\langle [K(\theta)] \rangle = \begin{bmatrix} \langle k(\theta)_{11} \rangle & 0 & 0 & \langle k(\theta)_{14} \rangle \\ 0 & \langle k(\theta)_{22} \rangle & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \langle k(\theta)_{33} \rangle & 0 \\ \langle k(\theta)_{41} \rangle & 0 & 0 & \langle k(\theta)_{44} \rangle \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\langle k(\theta)_{11} \rangle = \frac{1}{2}(|a|^2 + 2|c|^2 + |b|^2)$$

$$\langle k(\theta)_{22} \rangle = \langle k(\theta)_{33} \rangle = \frac{1}{4}|a + b|^2$$

$$\langle k(\theta)_{14} \rangle = \langle k(\theta)_{41} \rangle = \text{Im}\{c^*(a - b)\}$$

$$\langle k(\theta)_{44} \rangle = |c|^2 - \text{Re}\{ab^*\}$$

[直線偏波基底 Covariance 行列]

$$\langle [C(\theta)] \rangle^{HV} = \begin{bmatrix} \langle C(\theta)_{11}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{12}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{13}^{HV} \rangle \\ \langle C(\theta)_{21}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{22}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{23}^{HV} \rangle \\ \langle C(\theta)_{31}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{32}^{HV} \rangle & \langle C(\theta)_{33}^{HV} \rangle \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle C(\theta)_{11}^{HV} \rangle &= \langle C(\theta)_{33}^{HV} \rangle \\ &= \frac{1}{8}|a + b|^2 + \frac{1}{4}(|a|^2 + |b|^2) + \frac{1}{2}|c|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle C(\theta)_{13}^{HV} \rangle &= \langle C(\theta)_{31}^{HV} \rangle \\ &= \frac{1}{8}|a + b|^2 + \frac{1}{2} \text{Re}(a^*b) - \frac{1}{2}|c|^2 \end{aligned}$$

$$\langle C(\theta)_{22}^{HV} \rangle = \frac{1}{4}|a - b|^2 + |c|^2$$

$$\langle C(\theta)_{12}^{HV} \rangle = \langle C(\theta)_{23}^{HV} \rangle = \frac{j\sqrt{2}}{2} \text{Im}\{c^*(a - b)\}$$

$$\langle C(\theta)_{21}^{HV} \rangle = \langle C(\theta)_{32}^{HV} \rangle = -\frac{j\sqrt{2}}{2} \text{Im}\{c^*(a - b)\}$$

[円偏波基底 Covariance 行列]

$$\begin{aligned} &\langle [C(\theta)] \rangle^{LR} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} |a - b + j2c|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2|a + b|^2 & 0 \\ 0 & 0 & |a - b - j2c|^2 \end{bmatrix} \quad (12) \end{aligned}$$

[Coherency 行列]

$$\begin{aligned} &\langle [T(\theta)] \rangle \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \frac{|a + b|^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}|a - b|^2 + |c|^2 & j \text{Im}\{c^*(a - b)\} \\ 0 & -j \text{Im}\{c^*(a - b)\} & \frac{1}{4}|a - b|^2 + |c|^2 \end{bmatrix} \quad (13) \end{aligned}$$

表 1 に式 (11) ~ (13) に基づく代表的なターゲットの平均化偏波行列を示す．これらの基本ターゲットは散乱メカニズム・散乱モデルの基礎になっている (5.2 参照)．

表 1 代表的な基本ターゲットの偏波行列

Table 1 Averaged polarization matrices of representative elementary targets. $\text{Trace}\langle [C(\theta)] \rangle = \text{Trace}\langle [T(\theta)] \rangle = 1$

	Scattering matrix $\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$	Covariance matrix $\langle [C(\theta)] \rangle^{HV}$	Covariance matrix $\langle [C(\theta)] \rangle^{LR}$	Coherency matrix $\langle [T(\theta)] \rangle$
Plate, Sphere	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Dihedral CR	$\begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Dipole	$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & -\frac{1}{2} \sin 2\theta \\ -\frac{1}{2} \sin 2\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$	$\frac{1}{8} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Left-helix	$\frac{e^{j2\theta}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -j\sqrt{2} & -1 \\ j\sqrt{2} & 2 & -j\sqrt{2} \\ -1 & j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -j \\ 0 & j & 1 \end{bmatrix}$
Right-helix	$\frac{e^{-j2\theta}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} & -1 \\ -j\sqrt{2} & 2 & j\sqrt{2} \\ -1 & -j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & j \\ 0 & -j & 1 \end{bmatrix}$

Covariance 行列と Coherency 行列は互いに同じ固有値をもつ。それゆえ、円偏波の Covariance 行列 (12) から直ちに固有値が導かれる。

$$\begin{aligned}\lambda_1^{ave} &= \frac{1}{2}|a+b|^2, & \lambda_2^{ave} &= \frac{1}{4}|a-b+j2c|^2, \\ \lambda_3^{ave} &= \frac{1}{4}|a-b-j2c|^2\end{aligned}\quad (14)$$

また、(10) ~ (13) の行列を比較し、共通する独立要素を調べると次の四つに集約される。

$$\frac{1}{2}|a+b|^2, \frac{1}{4}|a-b|^2, |c|^2, \text{Im}\{c^*(a-b)\} \quad (15)$$

固有値表現 (14) では 3 個であるが、 $\text{Im}\{c^*(a-b)\}$ の項目が陽に現れていないので、分類には四つが妥当と思われる。これらに対応する基本ターゲットは表 1 に示したように、それぞれ、Plate, Dihedral corner reflector, Dipole, Helix である。

実際の画像データ平均では有限のピクセル数の集合平均であり、更に同じターゲットが一様に分布しているわけではない。したがって POLSAR データの集合平均をとっても偏波行列は必ずしも (12) のような対角行列になるとは限らない。十分大きなデータ数をとれば、(12) の行列に収束することが予想されるが、平均化データ数を増やすことは、逆に画像分解能を犠牲にすることになり、高分解能解析と相反する。それゆえ、レーダ分解能を考慮してシーンやターゲットの大きさ、種類によって最適な平均化データ数を選ぶことが重要となる。

4. 相関係数

POLSAR データ解析では相関係数がよく使われる。固有値あるいは四つの独立情報が関係する相関係数は次のようになる。

- HV 偏波基底

$$\gamma_{HH-VV} = |\gamma_{HH-VV}| \angle \varphi_{HH-VV} = \frac{\langle a^*b \rangle}{\sqrt{\langle |a|^2 \rangle \langle |b|^2 \rangle}} \quad (16)$$

この γ_{HH-VV} は λ_1^{ave} に直結した値であり、以下のように奇数回反射と偶数回反射を区別するために用いられてきた [8]。

$$\text{奇数回反射: } \text{Re}\langle a^*b \rangle > 0 \quad (17a)$$

$$\text{偶数回反射: } \text{Re}\langle a^*b \rangle < 0 \quad (17b)$$

更に、実験的事実として平地における自然植生ター

ゲットでは次の Reflection Symmetry 条件が成り立つことが知られている [11]。

$$\langle c^*a \rangle \approx \langle c^*b \rangle \approx 0 \quad (18)$$

この条件下で、例えば式 (6) と (13) を比較すると理論的な平均値 (13) では $c^*(a+b)$ の項は消滅するが、 $\text{Im}\{c^*(a-b)\}$ の項は消滅しない。この $\text{Im}\{c^*(a-b)\}$ が Helix 成分に対応してくる [10]。

- 45° ~ 135° 直線偏波基底

HV の直線偏波基底を 45° 傾けた基底を XY 基底とすると、相関係数は次のようになる。

$$\begin{aligned}\gamma_{XX-YY} &= |\gamma_{XX-YY}| \angle \varphi_{XX-YY} \\ &= \frac{\langle |a+b|^2 - 4|c|^2 \rangle + j4 \text{Im}\langle c^*(a+b) \rangle}{\sqrt{\langle |a+b+2c|^2 \rangle \langle |a+b-2c|^2 \rangle}}\end{aligned}\quad (19)$$

$$\varphi_{XX-YY} = \tan^{-1} \frac{4 \text{Im}\langle c^*(a+b) \rangle}{\langle |a+b|^2 - 4|c|^2 \rangle} \quad (20)$$

- LR 円偏波基底

$$\begin{aligned}\gamma_{LL-RR} &= |\gamma_{LL-RR}| \angle \varphi_{LL-RR} \\ &= \frac{\langle 4|c|^2 - |a-b|^2 \rangle - j4 \text{Re}\langle c^*(a-b) \rangle}{\sqrt{\langle |a-b+j2c|^2 \rangle \langle |a-b-j2c|^2 \rangle}}\end{aligned}\quad (21)$$

$$\varphi_{LL-RR} = \tan^{-1} \frac{4 \text{Re}\langle c^*(a-b) \rangle}{\langle |a-b|^2 - 4|c|^2 \rangle} \quad (22)$$

平均化サイズを大きくすると $|\gamma_{LL-RR}|$ は 0 に近づくが、その位相角 (22) は独立要素に関係しており、有意な偏波情報を提供することが分かる。この位相角はターゲットの散乱特性に非常に敏感に反応する要素からなっており、人工物体の検出に適していることが知られている [5], [23]。

5. 偏波行列の分解

POLSAR 画像で偏波情報を利用したターゲットの分解・分類を行う場合、数学的なアプローチと物理的なアプローチがある。代表的な数学的アプローチは、Entropy, Angle alpha, Anisotropy として知られている固有値・固有ベクトルを使うものである [11] ~ [13]。この場合、偏波基底は平均行列ごとの固有基底となる。一方、物理的アプローチでは散乱メカニズムに対応する基本偏波行列を作成しておき、それに fitting する方法である。三成分散乱モデル分解 [9] や四成分散乱モデル分解 [10] などがある。ここでは、数学的な固有値分解法と物理的な散乱モデル分解法を紹介する。

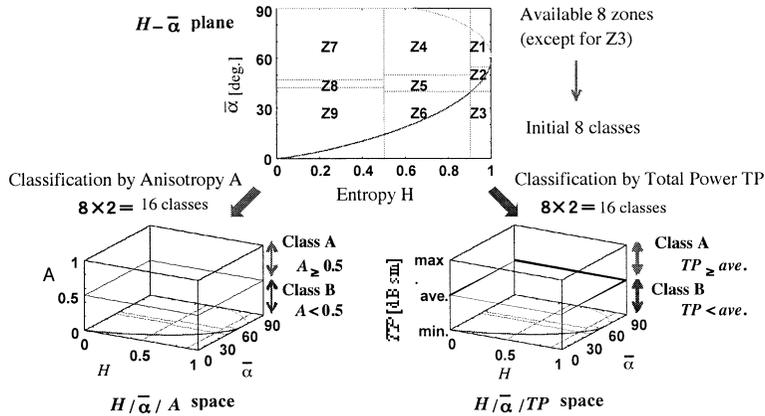


図3 三次元分類手法
Fig. 3 Classification method by 3-D parameters.

5.1 固有値展開

Covariance 行列, Coherency 行列ともに変換可能なので, $\langle [T] \rangle$ で代表する. 測定値 $\langle [T] \rangle$ は次のようにユニタリ行列 $[U_3]$ によって対角化できる.

$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{n} \sum \mathbf{k}_P \mathbf{k}_P^\dagger \quad (23a)$$

$$= [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^\dagger = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^\dagger \quad (23b)$$

ここで,

$$[U_3] = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 e^{j\delta_1} & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 e^{j\delta_2} & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 e^{j\delta_3} \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 e^{j\delta_1} & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 e^{j\delta_2} & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 e^{j\delta_3} \end{bmatrix} \quad (24)$$

(23a) はデータに基づく表現, (23b) は数学的表現である. この統計モデル (23a) は Bernoulli-process として表され, 散乱現象は確率

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (25)$$

で起こる $[U_3]$ の列ベクトル $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_3$ として表現される. つまり 3 個の独立した散乱現象の和として表される. この確率を使って Entropy, Angle alpha が定義されている.

$$\text{Entropy } H = - \sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i \quad (0 \leq H \leq 1) \quad (26)$$

$$\text{Angle alpha } \bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i \quad (0^\circ \leq \bar{\alpha} \leq 90^\circ) \quad (27)$$

Entropy は 0 から 1 までの範囲をとり, 散乱のランダム性を表している. $H = 0$ で一つの散乱メカニズム (表面散乱) が発生することを表し, $H = 1$ で三つの散乱メカニズムが同程度で発生する (完全にランダムな散乱である) ことを表している.

Angle alpha は偏波依存性を表す値で, 0° で Plate, 45° で Dipole, 90° で Dihedral corner reflector, Helix になる. 偏波依存性の強い Dipole と Dihedral corner reflector が同じ角度に現れることはない.

固有値が与えられれば, 反射波の全電力 (Total power), Anisotropy も導ける.

$$\text{Total Power } TP = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (28)$$

Total Power は偏波行列の対角成分の和に等しい.

$$TP = \text{Trace} \langle [T] \rangle = \langle \text{Span}[S] \rangle = \text{Trace} \langle [C(\theta)] \rangle^{HV} = \text{Trace} \langle [C(\theta)] \rangle^{LR} \quad (29)$$

$$\text{Anisotropy } A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (30)$$

ターゲットの分類にはこれらの偏波指標のうち, 図3のように Entropy, Angle alpha による二次元平面を作り, 三次元目の座標として Anisotropy [13], あるいは Total Power [22] を使う手法が提案されており, 良好な分類結果が得られている.

5.2 散乱モデルに基づく散乱電力分解

物理的な散乱メカニズムに対応する基本行列を作成しておき, その行列で取得されたデータ行列を展開す

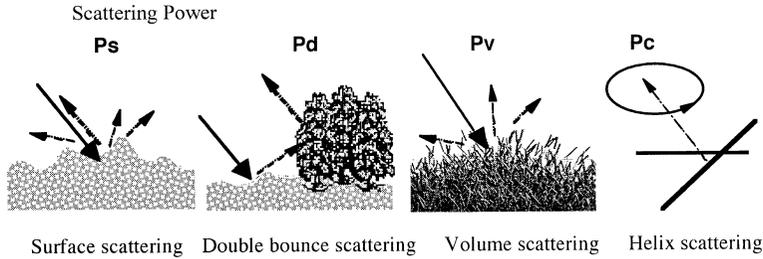


図 4 散乱メカニズムによる四成分散乱電力分解
Fig. 4 4-scattering models and the corresponding scattering powers.

る方法がある．従来は Reflection Symmetry 条件 (18) 下で三成分 (表面, 2 回反射, 体積) 散乱モデル分解 [9] がよく用いられてきたが, Reflection Symmetry の制約条件を取り払った四成分散乱モデル分解法 [10] が提案された．四成分分解法は三成分分解法に Helix 散乱を加えて適用範囲を拡張したものである．ここでは Coherency 行列による四成分分解法を示す．

[四成分散乱モデル分解]

図 4 のように四つの散乱メカニズムを考える．四つの散乱は以下の内容を表している．

- 表面散乱：地面，海域などの表面で引き起こされる 1 回 (奇数回) 反射の散乱過程．
- 2 回反射：地面と幹，道路と建物の壁などで引き起こされる 2 回 (偶数回) 反射の散乱過程．
- 体積散乱：絡み合った枝などランダムに向いた線状物体の集合から引き起こされる散乱過程．
- Helix 散乱：直線偏波を円偏波に変える散乱過程．人工構造物表面から多く発生する．

これらの散乱過程に基づいて，対応する Coherency 行列を構成し，実測値を次のように展開する．

$$\begin{aligned} \langle [T] \rangle &= f_s [T]_{surface} + f_d [T]_{double} + f_v \langle [T] \rangle_{vol} \\ &\quad + f_c \langle [T] \rangle_{helix} \\ &= f_s \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{f_v}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{f_c}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \pm j \\ 0 & \mp j & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{31}$$

ただし， f_s, f_d, f_v, f_c は電力寄与成分で， α, β は未定定数である．行列要素を比較して次式が得られる．

$$\frac{f_c}{2} = |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \tag{32}$$

$$\frac{f_v}{4} = 2\langle |c|^2 \rangle - |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \tag{33}$$

また，

$$f_s |\beta|^2 + f_d = D = \frac{1}{2} \langle |a-b|^2 \rangle - 2\langle |c|^2 \rangle \tag{34a}$$

$$f_s + f_d |\alpha|^2 = S = \frac{1}{2} \langle |a+b|^2 \rangle - \frac{f_v}{2} \tag{34b}$$

$$f_s \beta^* + f_d \alpha = C = \frac{1}{2} \langle (a+b)(a-b)^* \rangle \tag{34c}$$

3 本の方程式に対して四つの未知数が残る．未知数を減らすために近似として物理的な散乱メカニズム条件 (17) を利用する．式 (17) は行列展開の結果，次のように変形される．

$$\text{Re}\{ \langle ab^* \rangle - \langle |c|^2 \rangle + |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \} > 0 \text{ なら}$$

$$\beta^* = 0, f_d = D, \alpha = \frac{C}{f_d}, f_s = S - \frac{|C|^2}{D} \tag{35a}$$

$$\text{Re}\{ \langle ab^* \rangle - \langle |c|^2 \rangle + |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \} < 0 \text{ なら}$$

$$\alpha = 0, f_s = S, \beta^* = \frac{C}{f_s}, f_d = D - \frac{|C|^2}{S} \tag{35b}$$

各散乱電力は展開行列の Trace であり，次のように求めることができる．

$$\text{表面散乱電力 } P_s = f_s (1 + |\beta|^2) \tag{36a}$$

$$\text{2 回反射散乱電力 } P_d = f_d (1 + |\alpha|^2) \tag{36b}$$

$$\text{体積散乱電力 } P_c = 2 |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \tag{36c}$$

Helix 散乱円偏波電力

$$P_v = 8\langle |c|^2 \rangle - 4 |\text{Im}\langle c^*(a-b) \rangle| \tag{36d}$$

このように，Coherency 行列による四成分分解では散乱行列要素から散乱電力を直接計算できる利点がある．なお，確率密度関数が一様でない場合，Covariance 行列展開を使って更に適用範囲の広い方法も示されている [12]．

6. Pi-SAR データ解析

2004年10月23日に新潟県中越地方で巨大地震が発生した。10月26日と11月3日に緊急観測した Pi-SAR データを使い、四成分散乱電力分解を試みた。表面散乱電力を Ps (青色), 2 回反射電力を Pd (赤色), 体積散乱電力を Pv (緑色) に割り当てた Pi-SAR X-band 画像を図 5 に示す (Pc は寄与が小さいので略す)。場所は山古志村種芋原地区で、筆者の出生地で

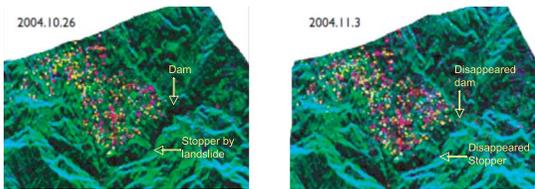


図 5 Pi-SAR X-band データの散乱電力分解結果：表面散乱電力 Ps (青色), 2 回反射電力 Pd (赤色), 体積散乱電力 Pv (緑色)

Fig. 5 Decomposed result of Pi-SAR X-band data: Surface scattering power Ps (blue), Double bounce scattering power Pd (red), Volume scattering power Pv (green).



図 6 種芋原地区の光学写真画像

Fig. 6 Optical photo image of Tanesuhara Area.



図 7 せき止められた災害現場

Fig. 7 Disaster area by landslide.

もある。体積散乱の緑色が多い画像の中で、家屋からは 2 回反射電力 Pd (赤色) 成分が強く示され、点にしている家の場所が確認できる。比較のために光学写真画像を図 6 に示す。光学写真では判別しにくい家屋も POLSAR 画像では明りように識別され、1 軒ごとの検出が可能である。更に地震直後に貯水したダムの影響で、10 月 26 日の画像データでは黒く映っている場所が 11 月 3 日にはなくなっていることも確認できる。せき止められた箇所の写真を ground truth として図 7 に示す。

7. む す び

本論文では散乱行列をもとに導かれる二次統計量、各種の偏波行列、及びその利用方法について述べた。主に 3×3 の Covariance 行列と Coherency 行列についてその平均値 (回転不変量) を調べ、POLSAR データには独立情報が 4 個存在することを示した。POLSAR データ解析において円偏波相関係数は人工物検出に有効である。また、ターゲットの分解には四成分散乱モデル分解法が簡便であり、Coherency 行列を使うことにより表面散乱、2 回反射散乱、体積散乱、Helix 散乱電力を散乱行列から直接計算できるメリットがある。今後、人工衛星搭載 ALOS-PALSAR のデータが利用可能になるとと思われる。PALSAR データによってリモートセンシング技術の向上、偏波情報の有効活用に資することを期待したい。

謝辞 レーダポラリメトリで長年お世話になっているイリノイ大学名誉教授 W.M. Boerner 先生に感謝する。また、E. Pottier, J. Yang, J.S. Lee 先生をはじめとする世界中の Polarimetry Community 諸氏に感謝する。また、POLSAR データを提供して頂く NICT/JAXA に感謝する。この研究の一部は科学研究費補助金による。

文 献

- [1] F.M. Henderson and A.J. Lewis, Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, third ed., vol.2, Ch.5, pp.271-357, John Wiley & Sons, 1998.
- [2] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized radar waves," Proc. IRE, vol.38, pp.148-151, 1950.
- [3] J.J. van Zyl, H.A. Zebker, and C. Elachi, "Imaging radar polarization signatures: Theory and observation," Radio Science, vol.22, no.4, pp.529-543, 1987.
- [4] T. Kobayashi, T. Umehara, M. Satake, A. Nadai, S. Uratsuka, T. Manabe, H. Masuko, M. Shimada,

- H. Shinohara, H. Tozuka, and M. Miyawaki, "Airborne dual-frequency polarimetric and interferometric SAR," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E83-B, no.9, pp.1945–1953, Sept. 2000.
- [5] K. Kimura, Y. Yamaguchi, and H. Yamada, "Circular polarization correlation coefficient for detection of non-natural targets aligned not parallel to SAR flight path in the X-band POLSAR image analysis," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.10, pp.3050–3056, Oct. 2004.
- [6] D.L. Shuler, J.S. Lee, and G. DeGrande, "Measurement of topography using polarimetric SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.34, no.6, pp.1266–1277, 1996.
- [7] D.L. Shuler, A.L. Anisworth, and J.S. Lee, "Topographic mapping using polarimetric SAR data," *Int. J. Remote Sensing*, vol.19, no.1, pp.141–160, 1988.
- [8] J.J. vanZyl, "Unsupervised classification of scattering mechanisms using radar polarimetry data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.27, no.1, pp.36–45, 1996.
- [9] A. Freeman and S.L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.36, no.3, pp.936–973, May 1998.
- [10] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, "Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.43, no.8, pp.1699–1706, Aug. 2005.
- [11] S.R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.34, no.2, pp.498–518, March 1996.
- [12] S.R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.1, pp.68–78, Jan. 1997.
- [13] E. Pottier and J.S. Lee, "Application of the $\langle\langle H/A/\bar{\alpha} \rangle\rangle$ polarimetric decomposition theorem for unsupervised classification of fully polarimetric SAR data on the Whishart distribution," *CEOS SAR WG Workshop*, 1999.
- [14] J.R. Pierce, *Almost Everything about Waves*, pp.130–131, MIT Press, Cambridge, MA, 1974.
- [15] *IEEE Standard 145-1983, IEEE Standard Definition of terms for Antennas*, 1983.
- [16] W.L. Stutzman, *Polarization in Electromagnetic Systems*, p.52, Artech House, 1993.
- [17] F.T. Ulaby and C. Elach, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Norwood, MA, 1990.
- [18] E. Pottier and F. Famil, *Polarimetry from basics to applications*, *Tutorials of IGARSS2003*, 2003.
- [19] J. Yang, Y. Yamaguchi, H. Yamada, M. Sengoku, and S.-M. Lin, "The optimal problem for contrast enhancement in polarimetric radar remote sensing," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E82-B, no.1, pp.174–183, Jan. 1999.
- [20] Y. Dong, B.C. Foster, and C. Ticehurst, "A new decomposition of radar polarization signatures," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.36, no.3, pp.933–939, March 1998.
- [21] J.A. Kong, A.A. Swartz, H.A. Yueh, L.M. Novak, and R.T. Shin, "Identification of terrain cover using the optimal polarimetric classifier," *J. Electromag. Waves*, vol.2, no.2, pp.171–194, 1988.
- [22] K. Kimura, Y. Yamaguchi, and H. Yamada, "Unsupervised land classification using $H/\bar{\alpha}/TP$ space applied to POLSAR image analysis," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.6, pp.1639–1647, June 2004.
- [23] T. Moriyama, Y. Yamaguchi, S. Uratsuka, T. Umehara, H. Maeno, M. Satake, A. Nadai, and K. Nakamura, "A study on polarimetric correlation coefficient for feature extraction of polarimetric SAR data," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E88-B, no.6, pp.2353–2361, June 2005.
- [24] M. Qong, "A new scattering mechanism enhancement scheme for polarimetric SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.40, no.12, pp.2582–2592, 2002.

(平成 18 年 1 月 5 日受付, 3 月 10 日再受付)



山口 芳雄 (正員)

昭 51 新潟大・工・電子卒, 昭 53 東工大大学院修士課程了。同年新潟大学工学部助手。助教を経て平 7 同大工学部教授, 現在に至る。トンネル内伝搬, 損失媒質内伝搬, 合成開口レーダ, レーダポーラリメトリの研究に従事。工博・IEEE フェロー。