

## グラントルースデータと光学センサ画像データで検証した 災害観測手法としての多周波・多偏波 SAR 画像データの有用性

實測哲也\*

### Feasibility of the Multi Frequency, Full Polarimetric SAR Image Data as a Disaster Observation Technique Verified by Ground Truth Data and Optical Sensor Image Data

Tetsuya JITSUFUCHI

*Advanced Technology Research Group,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

#### Abstract

We examined the feasibility of multi frequency, full polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) image data from Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) around the southern part of Ibaraki prefecture for possible application to disaster observation. For comparative analysis of this SIR-C image data, we used ground truth data and optical sensor (LANDSAT TM) image data acquired in the same region. We then analyzed five ground cover types to confirm the classification ability of the SIR-C image data. The polarization synthesis images and the polarization signature diagram classified these cover types well. The radar backscatter characteristics of scattering mechanisms for the different surface types could be compared with the ground survey. We also compared the SIR-C image data with the LANDSAT TM image data by principal component analysis. We found that the synergistic use of the SIR-C and the LANDSAT TM image data increases the amount of information on ground cover types.

**Key words :** Multi frequency, full polarimetric SAR, Optical sensor, Ground truth, Polarization signature

#### 1. はじめに

衛星や航空機に搭載される合成開口レーダ (SAR) は、地表の画像が取得できるイメージングレーダである。

SAR は航空機や人工衛星に搭載され、上空から地表へ照射したマイクロ波の反射波 (散乱) を計測し、地表の画像を取得する。SAR はマイクロ波を利用するため、太陽の反射光を利用する光学センサと原理的に異なり、昼夜天候に関わらず対象 (地表面) の映像が取得できる。この特徴を有する SAR は災害時の観測手法として利用価値が高い。SAR は 1990 年代から地球観測に用いられるようになった。現行の SAR は単一周波数・単一偏波のマイクロ波を使用する SAR である。

ところが、単一周波数・単一偏波 SAR 画像データは光学センサ (LANDSAT TM 等) 画像データと比較して、

地表被覆の分類能力は高くない。例えば、単一周波数・単一偏波 SAR では滑らかな地面と水面の識別が困難になる場合もある。この問題を解決する手法として、多数の周波数・偏波を利用する多周波・多偏波 SAR が考案された。

多周波・多偏波 SAR は周波数ごとに、各偏波 (HH, VV, HV) の振幅と位相を計測することで、地表面の各周波数、各偏波に対する電波散乱特性 (以後これを偏波散乱特性と呼ぶ) を計測できる。このため地表被覆の分類能力が大きく向上する。現在、多周波・多偏波 SAR の研究は原理的な基礎研究の段階を過ぎ、次世代 SAR としての実利用を目指したデータ取得実験が国内外において行われつつある。また我が国では、2004 年に多偏波 SAR の衛星搭載化も予定されている (ALOS PALSAR)。

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 防災基盤科学技術研究部門

災害時の観測手法として多周波・多偏波 SAR を実用する場合、多周波・多偏波 SAR 画像データが示す物理量の検証や災害状況把握へ利用できる知見の蓄積が重要である。この知見が多いほどデータの有用性が向上する。そのためには、災害時を想定した解析が有益である。解析に使用するデータは、多周波・多偏波 SAR システムのキャリブレーション済みの画像データでかつその地上検証データ（グラントルースデータ）を伴うデータであることが望ましい。しかし、現状では、この条件を満たす多周波・多偏波 SAR 画像データやその解析事例<sup>1,2)</sup>は少ない。またそれらのうち、災害状況把握への利用可能性を検証した事例はない。

以上の背景を踏まえ、本報告では、多周波・多偏波 SAR 画像データを災害観測手法として将来的に利用する観点に立ち、多周波・多偏波 SAR センサである Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) によって 1994 年 4 月に取得されたシステム校正済みの茨城県南部地域の地表画像データ (SIR-C 画像データ) を解析した。主として、SIR-C 画像データを現地のグラントルースデータおよび同時期に得られた光学センサ (LANDSAT TM) による地表画像データ (LANDSAT TM 画像データ) にもとづき検証した。特に本報告では、洪水氾濫時の土地被覆分類に利用できる知見を蓄積することを目的とした検討を行った。そのために、各画像データに対して共通の 5 つの解析土地被覆対象 (河川、湖沼、アシ原、草地、市街地) を評価地点として設定した。はじめに、SIR-C 画像データの疑似カラー合成画像の作成、偏波散乱特性の計算結果をグラントルース

スデータ、LANDSAT TM 画像データと対応させて行い、SIR-C 画像データから判読される地表被覆状況を調べた。これに加え、SIR-C 画像データと LANDSAT TM 画像データの両者を用いた疑似カラー合成画像の検討を行った。特に解析土地被覆対象について、SIR-C 画像データと LANDSAT TM 画像データそれぞれの分類能力を主成分分析によって比較した。また、2 つの対象物のコントラストを最大にする偏波の送受信条件を利用するコントラスト強調処理による解析土地被覆対象の識別を行い、その効果を検証した。

## 2. 使用データおよび解析地域

### 2.1 使用データ

使用した多周波・多偏波 SAR 画像データは、NASA/JPL より提供された 1994 年 4 月 17 日取得の千葉・茨城県境付近の画像データである。本画像データは NASA/JPL が 1994 年の 4 月と 10 月に SIR-C をスペースシャトルに搭載し観測フライトを行った際に得られた画像データ<sup>3)</sup>の一部である。表 1 に本報告で使用した SIR-C の画像データに関する主なパラメータを示した。本画像データの各画素は散乱行列のクロスプロダクトである 10 個の値より構成され、MLC data といわれる。

SIR-C 画像データとの比較解析のために LANDSAT TM 画像データを使用した (表 1)。この TM 画像データは、SIR-C の観測と近接した時期である 1994 年 4 月 22 日に同一地域を計測したものである。一般に TM 画像データは、各バンドの画像データと実際の地表面との対応関係に関する知見の蓄積が多い。したがって SIR-C 画

表 1 SIR-C と TM のシステムパラメータ

Table 1 SIR-C and TM System Parameters.

SIR-C			
Data Acquisition	1994. 04. 17		
Radar Freq. / Pol	L 1. 275GHz / HH, HV, VV, VH C 5. 304GHz / HH, HV, VV, VH		
Track Ang.	37. 6 dg. E of North		
Incidence Ang.	51. 3 dg.		
Antenna Direction	Left (North) Looking		
Orbit Direction	Ascending		
Pixel Spacing	12. 5m		
TM			
Data Acquisition	1994. 04. 22		
Subsystem	Band No.	Spectral Range	Resolution
		( $\mu$ m)	(m)
VNIR (visible to near infrared)	1	0.45~0.52	30
	2	0.52~0.60	30
	3	0.63~0.69	30
	4	0.76~0.90	30
	5	1.55~1.75	30
	7	2.08~2.35	30
TIR (thermal infrared)	6	10.4~12.5	120

像データにどのような地表がどのように計測されるのかを解釈する場合、同一地点の TM 画像データがその判断基準として利用できる。また同一地域の画像データを比較することで、両画像データの融合的な利用可能性も検討できる。

さらに、同地域を 1997 年 4 月 25 日、5 月 11 日に訪れ、地上調査を行い、SIR-C 画像データと TM 画像データに計測された地上の被覆状態を現地で確認した。

## 2.2 解析地域と解析対象土地被覆

解析地域は SIR-C 画像データ中の茨城県小見川町周辺地域を選定した。ここは、利根川とその河川敷、外浪逆浦（そとなさかうら）、水田、建物密集地、丘陵地等で構成される起伏の少ない地域である。

本報告では、解析地域において洪水氾濫域の偏波散乱特性を予備的に検討するために、解析対象土地被覆として以下の 5 つの土地被覆を選定した。まず、湛水の識別を想定し、その解析対象として利根川の水面 (water1) および現地調査で確認した利根川河岸の草丈約 30cm の草地 (grassland) と草丈約 1.5m の葦原 (reedy land) を選んだ。現地調査と実際の画像が取得された時期との間に約 3 年の隔りがあるが、選定した地表は土地利用の変遷がなく、当時と同様の被覆であると仮定した。また洪水氾濫域の水面形状による識別の可能性を検討するため、利根川の水面に加えて外浪逆浦の水面 (water2) を選び解析した。最後に災害時の市街地等の状況把握で必要になると思われる建物密集地域の偏波散乱特性を検討するために小見川町の市街地 (urban) を選んだ。

## 3. 理論と解析手法

### 3.1 電界ベクトルと散乱行列の理論

SAR は対象からの電磁波の後方散乱を計測する。後方散乱は偏波状態に注目した場合、散乱波の電界ベクトル  $E^{sc}$  と入射波の電界ベクトル  $E^{in}$  及び散乱行列  $S$  を用いて (1) 式のように記述できる (係数項は省略。以下の式でも同様)。

$$E^{sc} = SE^{in} \quad (1)$$

ここで、

$$E^{sc} = \begin{pmatrix} E_h^{sc} \\ E_v^{sc} \end{pmatrix}$$

$$E^{in} = \begin{pmatrix} E_h^{in} \\ E_v^{in} \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix}$$

であり各成分は複素数で記述される。ここで、 $E_h$  は水平偏波成分 (一般に h または H は水平偏波を示す horizontal の頭文字を意味する)、 $E_v$  は垂直偏波成分 (一般に v または V は垂直偏波を示す vertical の頭文字を意味する) である。散乱行列  $S$  は電波が入射した面の偏波に対する応答特性 (偏波散乱特性) を表す。  $S$  の各要素の添え字は入射波、散乱波の添え字に対応する。また、(1) 式の

座標系は z 方向を電波の進行方向にとった右手座標系である。

多周波・多偏波 SAR システムでは、観測対象物に関する  $S$  の各要素が計測される。  $S$  が求めれば、(1) 式よりどのような偏波の組み合わせについても対象物の応答 (散乱波) が計算できる。

ところが次節で述べるように、多周波・多偏波 SAR では、計測した後方散乱 ( $S$ ) から、様々な偏波状態に対応する散乱波のパワーに対応した値を計算し、その濃淡で画像を形成する。この画像形成において、各画素 (対象) の偏波散乱特性に関する加算平均操作が頻出する。このとき、偏波散乱特性を担う  $S$  は加算的に扱うことができないため、  $S$  による表記はデータ処理において不便となる。

### 3.2 ストークスペクトルとストークス行列の理論

散乱波のパワーの画像を利用する多周波・多偏波 SAR 画像データの解析では、各画素の加算平均操作を可能とする偏波散乱特性の表記法が提唱されている<sup>3,4)</sup>。これは、散乱波や入射波の偏波の状態を以下に示すストークスパラメータ ( $I, Q, U, V$ ) を用いて表記する方法である。

$$I = |E_h|^2 + |E_v|^2$$

$$Q = |E_h|^2 - |E_v|^2 = I \cos(2\chi) \cos(2\psi)$$

$$U = 2\text{Re}(E_h E_v^*) = I \cos(2\chi) \sin(2\psi)$$

$$V = 2\text{Im}(E_h E_v^*) = -I \sin(2\chi)$$

ここで、 $\psi$ 、 $\chi$  は、**図 1** に示した単色平面波の電界ベクトルの軌跡に関する量で、 $\psi$  は偏波の楕円方位角 (ellipse orientation angle)、 $\chi$  は楕円率角 (ellipticity angle) である。またアスタリスク (\*) は複素共役を意味する。このストークスパラメータを用い、ストークスペクトル  $J$  を以下の様に定義する。

$$J = (I, Q, U, V)^T$$

ここで T は転置を意味する。

ストークスペクトルでの表記を利用すると、(1) 式で示した電磁波の散乱の記述は、

$$J_s = MJ, \quad (2)$$

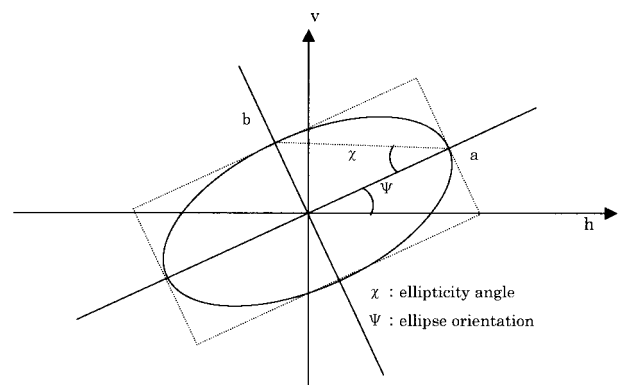


図 1 偏波を表示するための楕円

Fig. 1 Polarization ellipse.

と表現できる．ここで、 $J_s$  は散乱波のストークスベクトル、 $J_i$  は入射波のストークスベクトルである． $M$  はミューラー行列 (Mueller matrix) と呼ばれる 4 行 4 列の実行列で、 $S$  と同様に電波が入射した面の偏波散乱特性を表現する．

多周波・多偏波 SAR において、散乱波のパワーの値は、受信アンテナの受信電力  $P_r$  と比例する．ストークスベクトルの表記を利用すると任意の送受信偏波に対しての  $P_r$  は、

$$P_r = J_r^T M_s J_i \quad (3)$$

となる．ここで  $J_i$  は送信 (入射) 波のストークスベクトル、 $J_r$  は受信アンテナの偏波を示すストークスベクトルである． $M_s$  はストークス行列 (Stokes matrix) と呼ばれる (この  $M_s$  の呼称は、NASA/JPL の方式<sup>3,4)</sup> に従った、 $M_s$  はケノー行列 (Kennaugh matrix) と呼ばれる場合もある)．(3) 式は送信アンテナが送信する電波の進行方向を基準とする 1 種類の座標系で記述しており、 $M_s = U_4 M$  である．この  $U_4$  は、

$$U_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

なる座標変換行列である． $M_s$  は 4 行 4 列の実対称行列で  $M$  と同様に電波が入射した面の偏波散乱特性を表現する．

$M_s$  の各成分は、 $S$  の要素から計算により求める．すなわち、 $M_s$  の成分を  $m_{sij}$  とすると、 $m_{sij}$  は  $S$  の各成分と以下の関係がある<sup>4)</sup>．

$$\begin{aligned} m_{s11} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* + S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s12} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* - S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s13} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* + S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s14} &= -0.25j (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* - S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s22} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* - S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s23} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* - S_{vh} S_{vh}^* + S_{hv} S_{hv}^* - S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s24} &= -0.25j (S_{hh} S_{hh}^* - S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s33} &= 0.25 (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* + S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s34} &= -0.25j (S_{hh} S_{hh}^* + S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* - S_{vv} S_{vv}^*) \\ m_{s44} &= -0.25 (S_{hh} S_{hh}^* - S_{vh} S_{vh}^* - S_{hv} S_{hv}^* + S_{vv} S_{vv}^*) \end{aligned}$$

$M_s$  は (3) 式から分るようにパワーに関する表現であり、複数の対象物についての  $M_s$  を加算平均できる．

一般に、面的に分布する対象 (地表面) を観測する多周波・多偏波 SAR では、各画素値は、面的に分布する対象からの受信電力  $P_r$  を適宜、加算平均 (マルチルック処理) し求められる．これは、コヒーレントな電波を用いて面的に分布する対象を計測した場合に原理上生じる画素値のゆらぎ (スペックルノイズ) を低減するためである．最終的に、散乱波のパワーに関する多周波・多偏波 SAR 画像データの各画素値は、対象の単位面積あたりの散乱波のパワーである後方散乱係数  $\sigma^0$  で記述される．

$M_s$  が加算平均可能であることは、マルチルック処理や  $\sigma^0$  の計算において役に立つ．マルチルック処理で複数の対象からの受信電力  $P_r$  を加算平均することは、複数の対象の  $M_s$  を加算平均し (3) 式を計算することと等価となる．つまり画素の強度は、 $M_s$  を加算平均した平均的な偏波散乱特性から計算できる．また  $\sigma^0$  と  $M_s$  には以下の (4) 式の関係がある．

$$\sigma^0 = J_r^T \langle M_s \rangle J_i \quad (4)$$

ここで、 $\langle M_s \rangle$  は複数の対象物の平均ストークス行列を意味する．

上述のように、散乱波のパワー画像を利用する多周波・多偏波 SAR 画像データの解析では、ストークスベクトル  $J$  を導入し、偏波散乱特性を  $M_s$  によって表現する表記法が便利である．本報告ではこの表記法を解析に利用した．

### 3.3 多周波・多偏波 SAR 画像データの解析手法

#### 3.3.1 疑似カラー合成表示

多周波・多偏波 SAR 画像データの後方散乱係数は (4) 式からわかるように、 $\sigma^0(\psi_r, \chi_r, \psi_i, \chi_i)$  で表される 4 変数から定まる値となる．ただし、 $J_i$  の偏波の楕円方位角を  $\psi_i$ 、楕円率角を  $\chi_i$ 、 $J_r$  の偏波の楕円方位角を  $\psi_r$ 、楕円率角を  $\chi_r$  とした．本報告では、値の異なる 4 変数の 3 つのセットを用いることで多周波・多偏波 SAR 画像データの疑似カラー合成表示を行った．例えば  $\sigma^0(0, 0, 0, 0)$  は HH、 $\sigma^0(90, 90, 0, 0)$  は HV、 $\sigma^0(90, 0, 90, 0)$  は VV を意味し、3 つのセットとして HH、HV、VV を赤 (red)、緑 (green)、青 (blue) に対応させ疑似カラー合成ができる．ここで HH、HV、VV とは送信波、受信波に利用した偏波の組み合わせを意味し、その表記は送信偏波を後に、受信偏波を先に記す．例えば HV は V 偏波で送信し、H 偏波で受信することを意味する．

本報告では、これらの多周波・多偏波 SAR 画像データの疑似カラー合成表示によって画像を構成した．また、その結果の画像と TM 画像データの疑似カラー合成表示結果との比較解析を行った．さらに、多周波・多偏波 SAR 画像データと TM 画像データの両者を利用する疑似カラー合成表示も検討した．

#### 3.3.2 偏波シグネチャ表示

疑似カラー合成表示では、多くのパラメータを持つ多周波・多偏波 SAR 画像データを十分には利用できていない．そこで先に述べた  $\sigma^0$ 、 $\psi$ 、 $\chi$  の関係を、3 次元グラフとして表す偏波シグネチャダイアグラムが提唱された<sup>3,4)</sup>．この 3 次元グラフの形状から対象の偏波散乱特性を評価できる．一般に偏波シグネチャダイアグラムで表される特性を偏波シグネチャ (polarization signature) とよぶ．偏波シグネチャダイアグラムはあらゆる偏波に対する散乱体の振る舞いを記述するが、特に偏波シグネチャの表現として利用されるのは、送受信アンテナの偏波が同一な場合の copolarized signature ( $\psi_r = \psi_i$ ,  $\chi_r = \chi_i$ ) と直交する場合の cross-polarized signature ( $\psi_r = \psi_i$ ,



+ 90°,  $\chi_r = -\chi_i$ ) である。

本報告では、copolarized signature と cross-polarized signature の 2 つの偏波シグネチャダイアグラムを解析に使用し、これらを地表の被覆状態の識別手段として利用する場合の有用性を調べた。

### 3.3.3 SIR-C 画像データと TM 画像データの情報量比較

SIR-C 画像データの 1 画素は  $M_s$  の上三角成分である 10 個のパラメータを持つ。また TM 画像データの 1 画素は、7 バンドの情報である 7 個のパラメータを持つ。

本報告では、5 つの解析対象土地被覆について、SIR-C 画像データと TM 画像データの情報量を主成分分析により比較した。ここでは寄与率が高い主成分が多くかつ 1 つの主成分に集約されないほど、5 つの解析対象土地被覆を識別するための情報がデータに多く含まれるとし比較を行った。ただし、主成分は相関行列から計算したため、生データの絶対値の情報は評価していない。

### 3.3.4 コントラスト強調処理

多周波・多偏波 SAR 画像データでは 2 つの対象物のコントラストを最大にする送受信条件を求めることができる。すなわち、対象物 1 の平均ストークス行列を  $\langle M_{S1} \rangle$ 、対象物 2 の平均ストークス行列を  $\langle M_{S2} \rangle$  とすれば、それらの比  $(J_r^T \langle M_{S1} \rangle J_r) / (J_r^T \langle M_{S2} \rangle J_r)$  を最大または最小とする  $\psi_r, \chi_r, \psi_i, \chi_i$  の組み合わせが求められる。これより識別したい特定の対象物とその他の対象物との画素値の比を最大化できる。

本報告では、1 つの地表被覆とそれ以外の地表被覆とのコントラスト強調効果を検証した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 疑似カラー合成画像の構成結果

#### 4.1.1 SIR-C 画像データによる疑似カラー合成

C バンド、L バンドそれぞれに、赤色に HH ( $\sigma^0(0, 0, 0, 0)$ )、緑色に HV ( $\sigma^0(90, 90, 0, 0)$ )、青色に VV ( $\sigma^0(90, 0, 90, 0)$ ) を割り当てた疑似カラー合成画像を図 2(a), (b) に示した。ここで、5 つの解析対象土地被覆は、water1 を W1, water2 を W2, grassland を G, reedy land を R, urban を U とし、それぞれ図 2 中に四角枠で表示した。図 2 より、マイクロ波領域の偏波散乱特性にもとづく後方散乱強度でも地表の被覆状態の差異によって様々な色相が出現し、ある程度の画像判読が目視によってできることがわかる。以下に判読できる特徴を述べる。

C バンド、L バンドともに HV 偏波を緑色に割り当てた地表が緑色に発色した部分は、図 2(c) に示した TM 画像データの疑似カラー合成画像 (赤色: band3, 緑色: band4, 青色: band1) の緑色に発色している部分とよく一致している。この TM 画像データの緑色部分は、既存の知見から葉緑素が存在する植生である。このことから SIR-C の画像で緑色に発色した部分は植生であると推定される。また HV 偏波は HH 偏波、VV 偏波よりも植生からの後方散乱が強い。

SIR-C 画像データにはデータ取得時の飛行方向 (北から時計回り 37.6 度の方位に ascending で飛行) や電波照射方向 (飛行方向に向かって左直角方向) と地上構造の方向や形状との相関が強い後方散乱があると思われる。これは、東関東自動車道 (HIGASHIKANTOU High Way), JR 鹿島線 (JR KASHIMA Line) の高架構造等が白色に発色していることから考えられる。これらの高架構造は地表と 2 面コーナーリフレクタを構成することおよびその敷設方向が SIR-C の飛行コースと平行に近い関係であるために後方散乱強度が大きくなったと考えられる。

利根川と外浪逆浦にはさまれた地域に見られる格子状のパターンと長方形の暗いパターンは水田地帯 (PADDY) である。ここでも飛行方向に平行な畦が比較的明るく計測されている。現地調査で取得した水田地帯の写真 (写真 1(a)), から SIR-C 画像が取得された 4 月下旬は、この地域の田植えの準備期であり、水が張られた水田、耕起したのみの状態の水田、アシ (REED)、草地 (GRASS) 等が点在していた。図 2(a), (b) の水田地帯を計測した画像にはこれらの状態が映し出され、水面は暗いパターン、その他は水面よりも明るいパターンとして散在している。

小見川町市街地 (OMIGAWA-CHO) は地表面と 2 面のコーナーリフレクターを構成し、どの偏波に対しても、比較的后方散乱強度が大きく、白色に発色していることがわかる。

SIR-C の画像中には、極端に明るく計測されるものがあった。たとえば、画像左上部付近の利根川にかかる金属性の橋梁は HH の散乱波の強度が大きい。この橋梁の敷設方向も SIR-C の飛行コースと平行に近い。さらにその周囲には、橋梁で散乱された電磁波が結果的に水面で後方散乱したと思われる輝線がある。この輝線のある場所の地表が実際に後方散乱が強いことを示すことではないので、このように極端に明るく計測される対象の周辺で生じた輝線の解釈は注意が必要である。

C バンドと L バンドの差異は画像の中央上部の国道 365 号 (R356) 上部付近に濃淡の強弱として見られる。現地調査の結果、この付近は低い山林の間に開かれた耕地およびゴルフ場から構成される地表であった。一般に地表の凹凸の程度 (粗度) が電磁波の波長以下である様な面は電磁波に対して鏡面的に振る舞い、後方散乱が弱くなる。逆に、地表面の粗度が電磁波の波長以上である様な面は電磁波に対して拡散反射面として振る舞い、後方散乱は強くなる。現地調査の結果と地表の粗度と後方散乱の関係を考慮すると、C バンドは波長が約 5cm であるために、山林、耕地は同程度に拡散的に反射され濃淡のない画像として計測されたと思われる。一方、L バンドは波長が約 20cm であるために、山間の耕地は鏡面的な振る舞いを見せ暗く計測され、山林は樹冠表面および内部の枝からの散乱が強いために明るく計測されコントラストを生じたと思われる。またゴルフ場の芝は C バンドと L バンドに対して共に鏡面的に振る舞うため、両バンドとも暗く計測されたと考えられる。

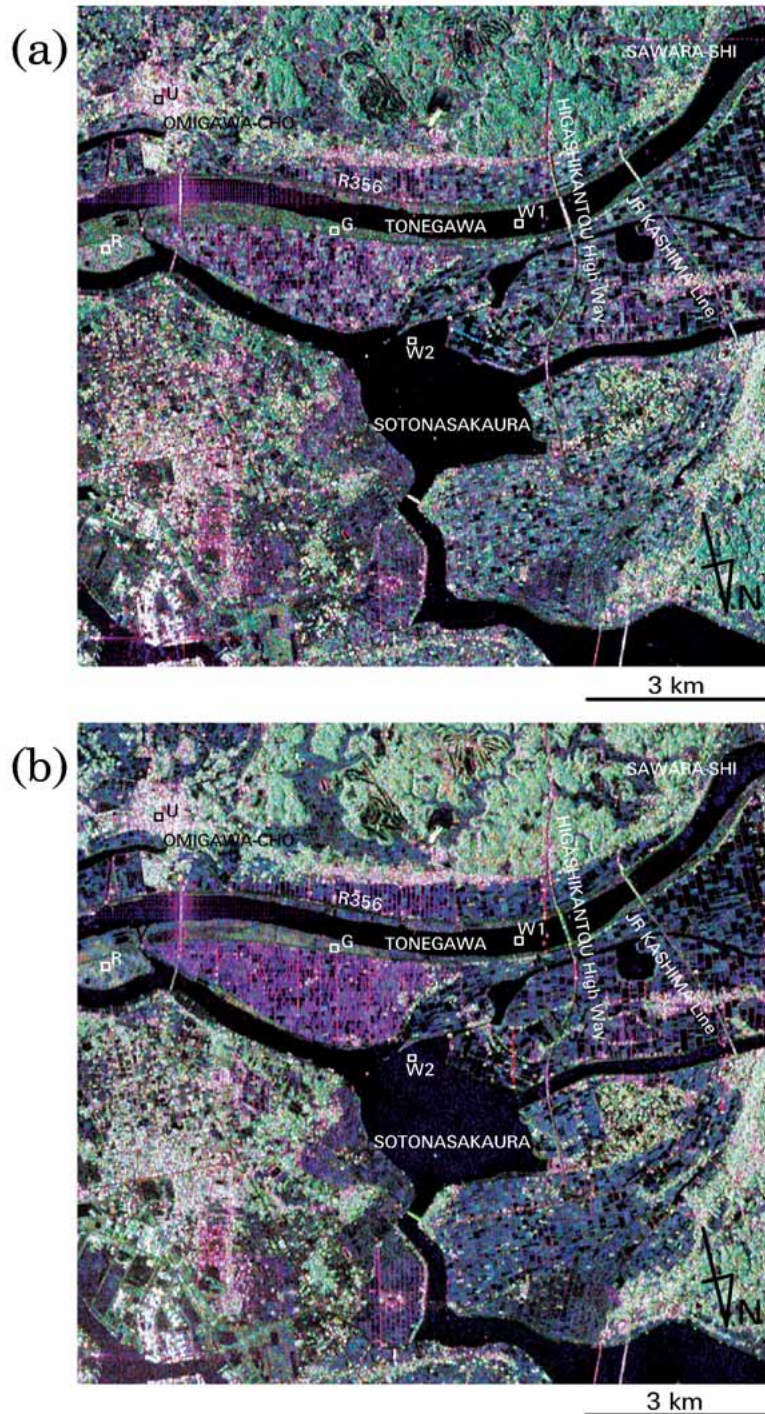


図 2 (a) C バンドの SIR-C 画像データの疑似カラー合成画像 (CHH (赤色), CHV (緑色), CVV (青色)). 利根川と外浪逆浦が画像の中央付近に映っている. (b) L バンドの SIR-C 画像データの疑似カラー合成画像 (LHH (赤色), LHV (緑色), LVV (青色)). 画像上方部分の濃淡は L band のデータの方が C band のデータよりも大きい.

Fig. 2 (a) C-band SIR-C color composite image of the test site. The image is composed of CHH (red), CHV (green) and CVV (blue). The Tone River and Sotonasakaura are seen in the middle of the image. (b) L-band SIR-C color composite image of the test site. The image is composed of LHH (red), LHV (green) and LVV (blue). The upper side of the L-band image has much more contrast than that of the C-band image.



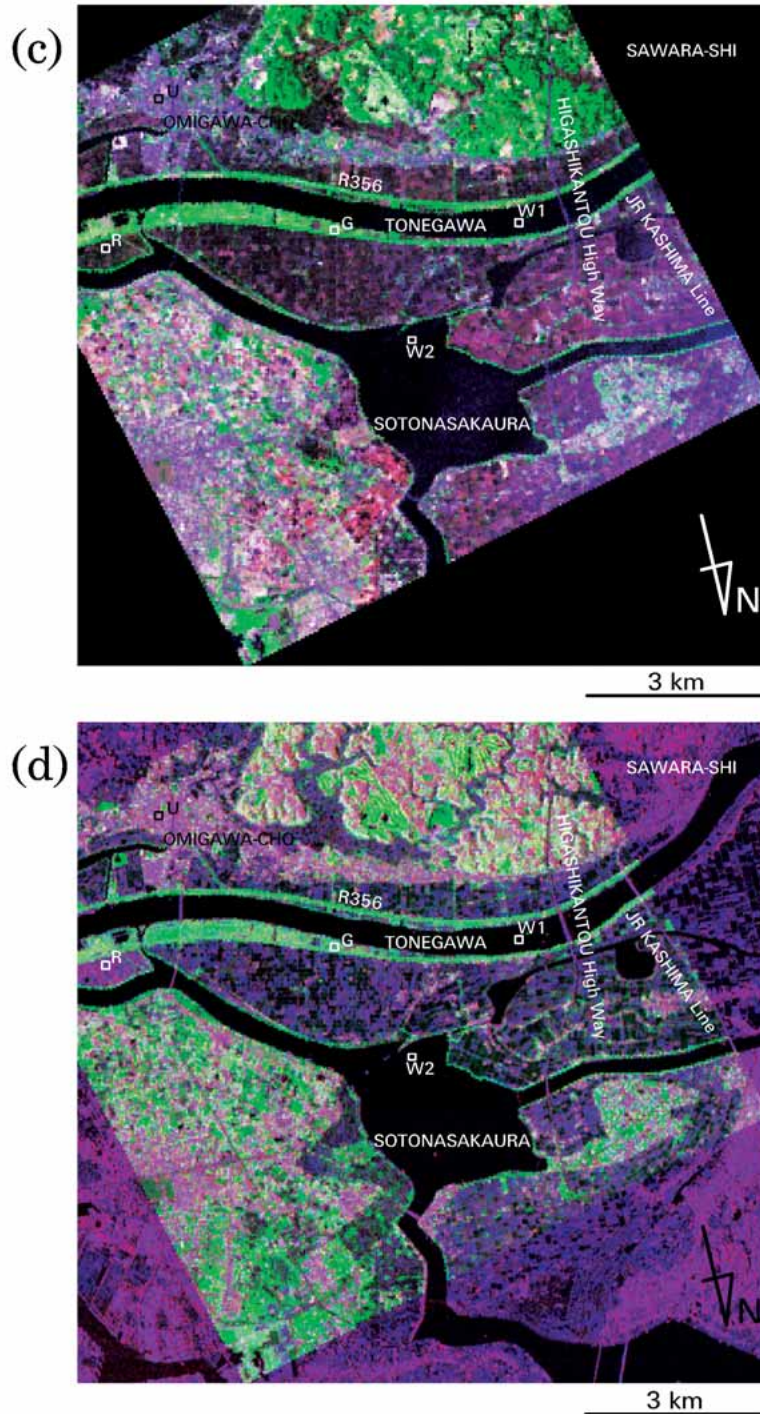


図2 (c) LANDSAT TM 画像データの疑似カラー合成画像 (band3 (赤色), band4 (緑色), band1 (青色)). 画像中, 緑色の区域はクロロフィルを含む植生を示している. (d) L バンドおよび C バンドの SIR-C 画像データと LANDSAT TM 画像データとを融合した疑似カラー合成画像 (LHV (赤色), TM band4 (緑色), CHV (青色)). 画像上方の植生を示す領域のカラー情報が増加している. すべての図において, 5つの解析対象土地被覆を四角枠で示した (W1: water1, W2: water2, G: grassland, R: reedy land, U: urban).

Fig. 2 (c) LANDSAT TM color composite image of the test site. The image is composed of band 3 (red), band 4 (green) and band 1 (blue). The green region shows vegetation with chlorophyll. (d) SIR-C L and C band and LANDSAT TM composite image of the test site. The image is composed of LHV (red), TM band4 (green) and CHV (blue). Information on the color of the vegetation region has increased in the upper part of the image. In all figures, the five test ground cover types are indicated by the square frames (W1, water1; W2, water2; G, grassland; R, reedy land; U, urban).

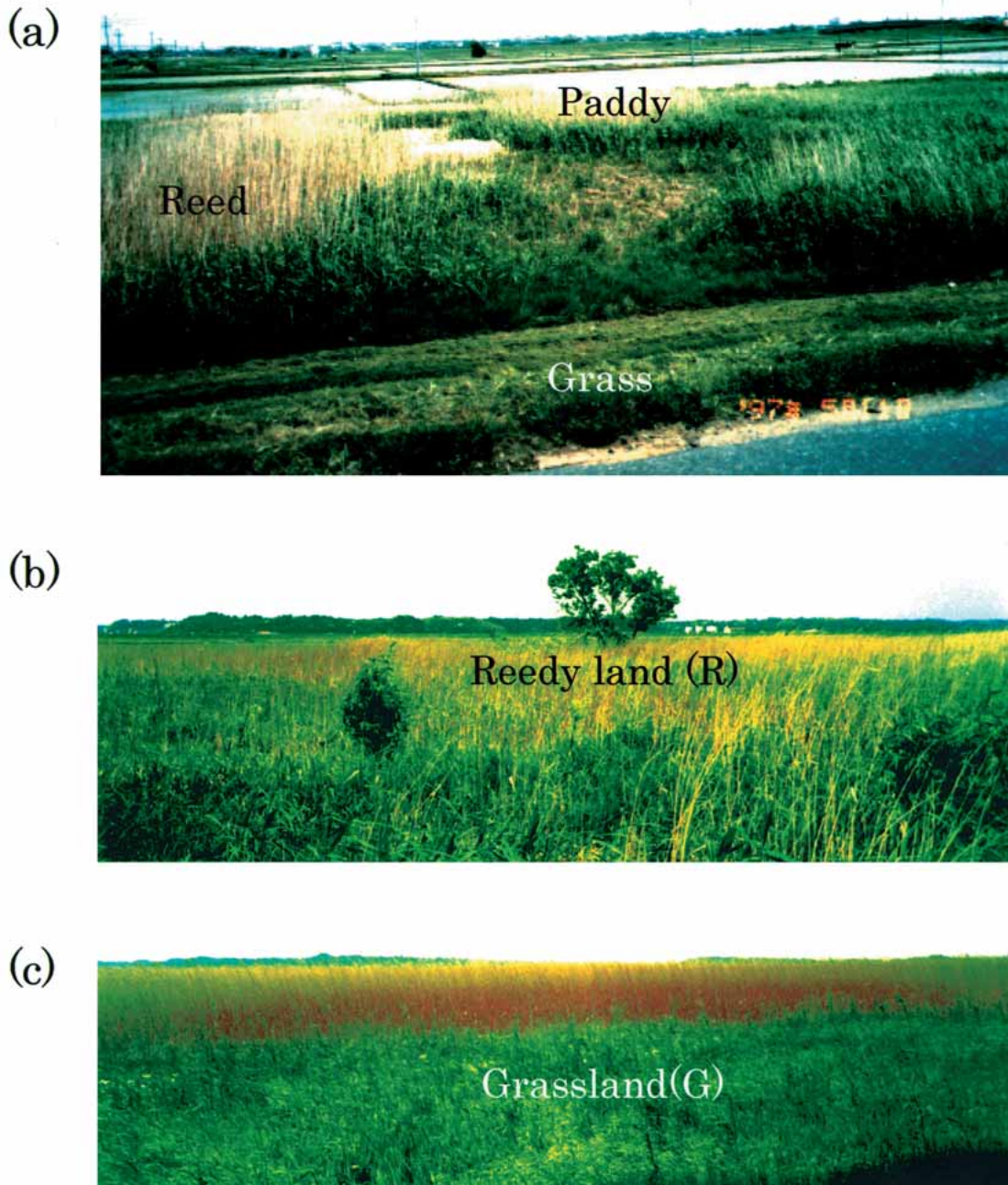


写真 1 現地調査で撮影した解析対象地域の写真。(a) 水田地帯。(b) ストークス行列の平均を計算したアシ原 (R)。(c) ストークス行列の平均を計算した草地 (G)。

Plate 1 Photographs of the test site taken for ground truth data. (a) Paddy field. (b) Reedy land (R) used to calculate the mean stokes matrix. (c) Grass land (G). Used to calculate the mean stokes matrix.



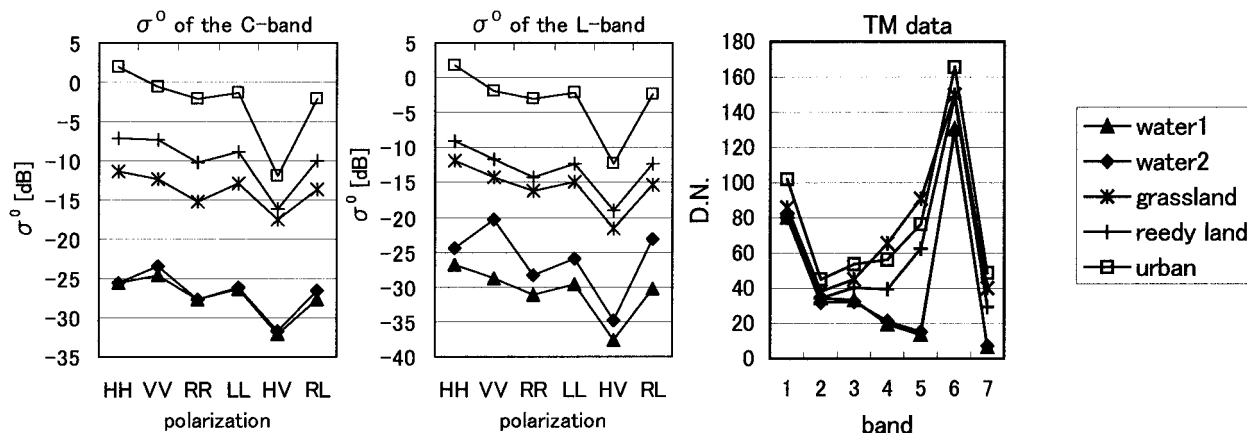


図3 5つの解析対象土地被覆 (図2参照) についての規格化した後方散乱係数  $\sigma^0$  (HH, VV, RR, LL, HV, RL 偏波) と TM のデジタルナンバーデータ

Fig. 3 Normalized backscattering coefficients ( $\sigma^0$ ) of HH, VV, RR, LL, HV and RL, and TM digital number (DN) for the five test ground cover types (see Fig. 2).

以上で解釈した図2の結果を踏まえ、本報告で設定した洪水氾濫域の解析に必要な水域と陸域の識別結果に着目すると、水域は陸域との識別が容易であることがわかる。すなわち利根川 (TONE GAWA)、外浪逆浦 (SOTONASAKAURA) の水面は暗く表示されその他の領域とのコントラストも大きい。境界領域の解析対象として想定した、水辺のアシ (R) や草地 (G) も、水域とは異なるそれぞれの色調で識別が可能である。その他、小見川町の市街地が明るく計測されている事実から、災害時の市街地は、それ以外の地域との識別が容易であると思われる。

#### 4.1.2 SIR-C 画像データと TM 画像データによる疑似カラー合成

上述したゴルフ場はCバンドとLバンドでは、暗く写るため裸地等の滑らかな地表面との識別が困難である。この識別を可能にする一例として図2(d)にSIR-C画像データとTM画像データとの融合利用例を示した。ここでは赤色にL band HV、緑色にTM band4、青色にC band HVを割り当てた。この画像で植生の地表面は、樹冠の形状や枝ぶりがSIR-Cの画像データにより赤色と青色で、また葉緑素の分布が緑色で発色していることになる。両画像データを融合的に利用した結果、両画像データを単独利用した場合に比べ、ゴルフ場の芝の目視判読が容易である。

### 4.2 偏波シグネチャの解析結果

#### 4.2.1 代表的な偏波状態の散乱強度

5つの解析対象土地被覆 (W1, W2, G, R, U) に関して、各々計算された代表的な偏波状態に対する  $\sigma^0$  の値と TM 画像データの輝度値を図3に示した。ここで、5つの解析対象土地被覆として選定した図2の各画像に白色または黒色の四角枠で示した領域は、現地調査の結果より解析対象土地被覆がほぼ一様に存在すると仮定できる領域とした。この領域で、各画素の  $M_i$  の平均を計算し、平均ストークス行列  $\langle M_i \rangle$  を計算した。なお TM

画像データはSIR-C画像データと同一のピクセルサイズにリサンプリングし、その平均を求めた。

図3より、5つの解析対象土地被覆は、SIR-C画像データの代表的な偏波状態 (HH, VV, RR, LL, HV, RL) の後方散乱強度の大小パターンに相違がある。特にW1とW2の水面については、TM画像データではほとんど相違がないが、LバンドSIR-C画像データでは相違がある。

以上より本報告で設定した洪水氾濫域の解析が必要となる5つの解析対象地域については、代表的な偏波状態の後方散乱特性を利用し識別できる。

#### 4.2.2 偏波シグネチャダイアグラムによる識別

5つの解析対象土地被覆 (W1, W2, G, R, U) について、(3)式を用いてそれぞれ偏波シグネチャダイアグラムを計算した結果を図4(a)-(j)、図5(a)-(j)に示した。縦軸は最大の後方散乱係数で規格化したRelative  $\sigma^0$  とした。

図4(a)-(j)より、Cバンドのcopolarized signatureを5つの対象について比較すると、個々の対象によってグラフの形状に差があることがわかる。一方、Lバンドのcopolarized signatureでは外浪逆浦 (W2) のグラフ形状が大きく異なる以外は、似通ったグラフ形状である。また図5(a)-(j)をみると、CバンドとLバンドともcross-polarized signatureでの対象によるグラフ形状の相違傾向は同様で、Cバンドの方が対象ごとの違いが大きい。さらに、同一対象についてCバンドとLバンドの偏波シグネチャダイアグラム形状の比較をすると、すべての対象において偏波シグネチャの形状に違いがある (water2の形状は比較的似通っているが、両者の  $\sigma^0$  のバイアス成分が異なる)。これらの結果は、5つの対象の空間形状の特性とCバンドとLバンドの波長との大小関係により生じたと考えられる。また同一の対象を異なる波長で観測することの有効性を示している。

本報告で得られたいくつかの偏波シグネチャダイアグ

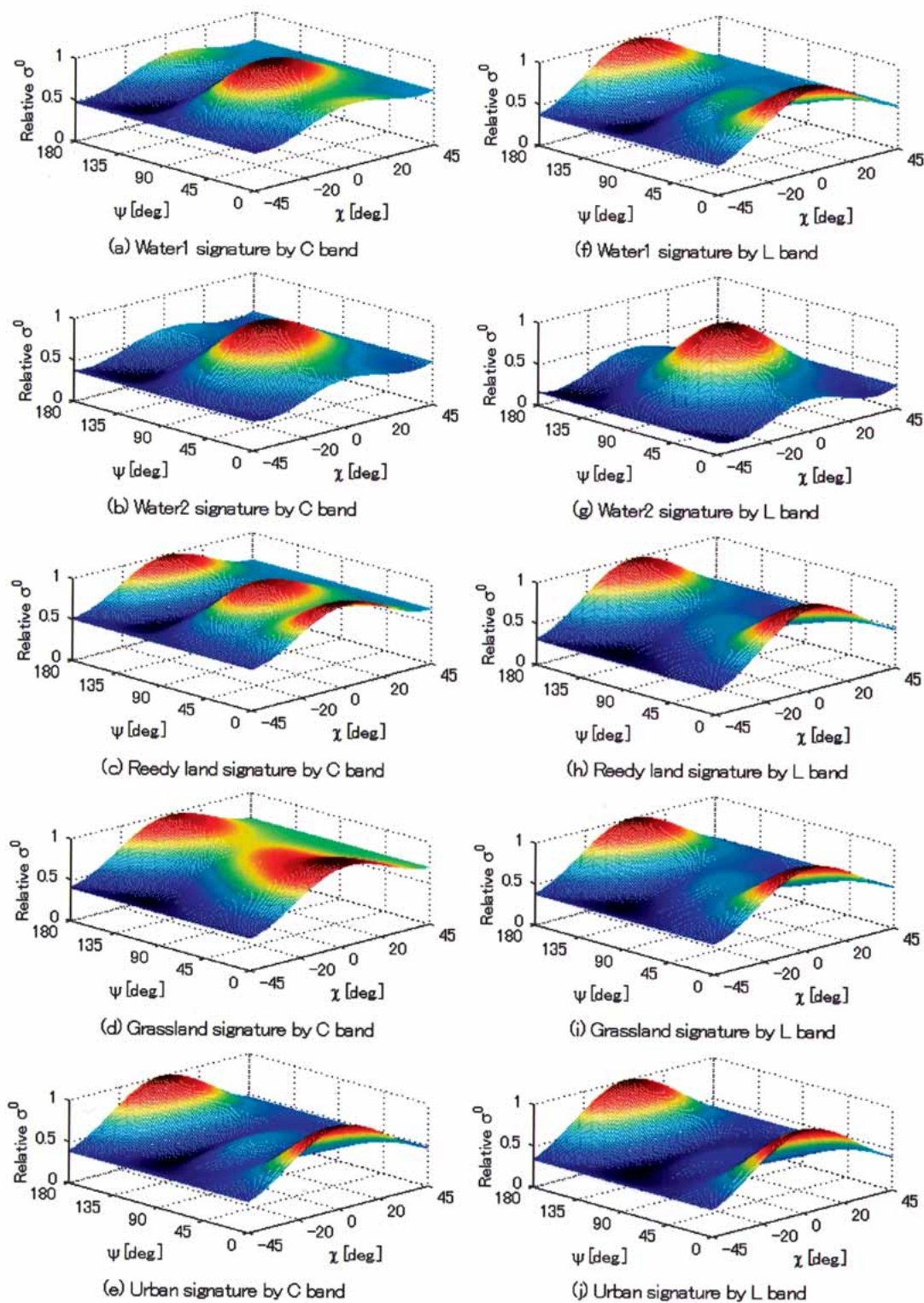


図 4 5つの解析対象土地被覆(図2参照)に関する偏波シグネチャダイアグラム(Copolarized signature). water1とwater2の水域の偏波散乱特性が異なっている. 特にwater2の偏波散乱特性はブラッグ散乱の特性に類似している. 他と比較して, アシ原と草地の偏波散乱特性には $\sigma^0$ に平坦なバイアス成分がある. 市街地の偏波散乱特性は2面コーナーリフレクタの散乱機構を示している.

Fig. 4 Copolarized signatures for each of the five test ground cover types (see Fig. 2). The polarization signatures of water 1 and water 2 are different. We note that the observed signature of water2 resembles the Bragg signature. The polarization signatures of reedy land and grassland in C-band have a greater flat bias of relative  $\sigma^0$  than those of other areas. The urban signature exhibits a dihedral-type return.



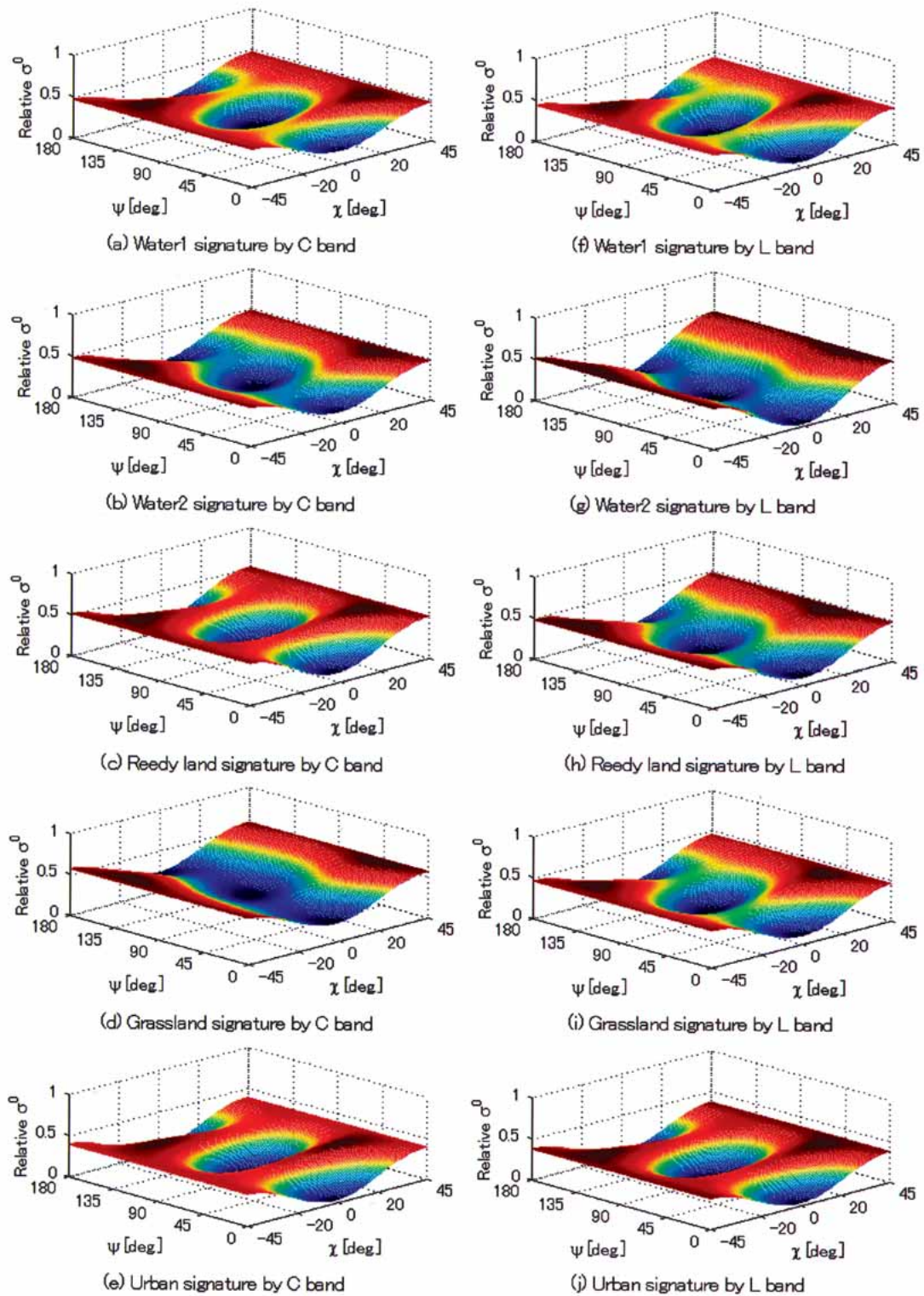


図 5 5つの解析対象土地被覆 (図 2 参照) に関する偏波シグネチャダイアグラム (Cross-polarized signature) これらの偏波散乱特性の結果は、図 4 で推察された散乱機構が Copolarized signature で示す特性と矛盾していない。

Fig. 5 Cross-polarized signatures for each of the five test ground cover types (see Fig. 2). Results for the five test sites generally agree with the results of the scattering mechanism presumed by copolarization signatures (Fig. 4).

ラムからは、その散乱機構が推察できる。

利根川 (W1) と外浪逆浦 (W2) の水面では、**図 4 (a), (b), (g)** の copolarized signature において VV の Relative  $\sigma^0$  が大きい。このパターンの出現を説明する散乱機構として、ブラッグ共鳴散乱<sup>6)</sup>が考えられる。すなわち、観測波長を  $\lambda$ 、水面の周期構造の間隔を  $L$ 、マイクロ波の入射角を  $\theta$ 、 $n$  を自然数とすると、 $2L \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$  すなわち  $2L \cdot \sin \theta$  が  $\lambda$  の  $n$  倍であると、共鳴 (干渉) 効果で後方散乱は強めあう。本報告で用いた SIR-C の入射角は 51.3 度であるので、C バンド (波長約 5.66 cm) では、約 3.6cm の整数倍の周期構造で共鳴する。L バンド (波長約 23.53cm) では、約 15.1cm の整数倍の周期構造で共鳴する。したがって、利根川の水面 (W1) には約 3.6cm の整数倍程度の周期構造が存在するが、約 15.1cm の整数倍程度周期構造は少ないこと、外浪逆浦の水面 (W2) には約 3.6cm と約 15.1cm の整数倍程度の周期構造が存在することが考えられる。これは、利根川と外浪逆浦で波浪のスケールが異なることを示唆する。

C バンドを使用した草丈約 1.5m のアシ原 (R) と草地 (G) の偏波シグネチャダイアグラムには大きな差異が認められる (**図 4 (c), (d)**)。これらの偏波シグネチャダイアグラムの差異を考察するため、偏波シグネチャダイアグラムを取得したエリアの写真として、エリア (R) のアシ原の写真を**写真 1 (b)** に、エリア (G) の草地の写真を**写真 1 (c)** に示した。この現地調査より、この時期のアシは 1 年前に伸長した直径約 5 ~ 8mm、高さ 1 ~ 2m 程度の棒状の茎のみを残し枯死した形状で密生していること、およびその中ほどに春に出た新しい茎葉 (葉は笹の葉に似た長披針形状) が見られることが確認できた。草地は、葉の長さ 30cm 程度、葉の幅 2cm、草丈 30cm 以下の草が多く、それらの葉は全方向ヘランダムに伸長していることが確認できた。

以上の現地調査で確認したアシ原と草地の形状を参考にすれば、アシ原と草地の偏波シグネチャダイアグラムのパターンを説明する散乱機構が推察できる。

C バンドで計測したアシ原の偏波シグネチャダイアグラムは、**図 4 (c)** より HH と VV にピークがある。さらに対象と比較してグラフのバイアス成分が大きいことがわかる。また**図 5 (c)** では、直線偏波のうち 45 度直線偏波成分が大きい。アシ原の形状を参考にすれば、この偏波シグネチャダイアグラムのパターンを説明する散乱機構として以下の 3 つが考えられる。1 つは垂直な棒状の物体からの後方散乱は VV 偏波が卓越すること<sup>7)</sup>で説明される反射機構である。この棒状の物体として、アシ原において昨年に枯死した茎がその役目を果たしていると思われる。2 つめは、観測波長よりも大きな空間スケールでランダムに配向した対象が示す多重散乱機構<sup>3,4)</sup>である。その特徴として  $\psi$ 、 $\chi$  によらない一定値 (バイアス成分) が相対的に大きくなる。アシ原では、アシの葉の空間分布がこの反射機構を生じたと考えられる。もうひとつは 2 面コーナリフレクタで説明される反射機構である。2 面コーナリフレクタとしての散乱機構の特

徴として cross-polarized signature で 45 度直線偏波成分が相対的に大きくなる。アシ原では、アシの昨年の茎とその下にある新葉との間で、2 回の反射機構が構成され、2 面コーナリフレクタとしての散乱機構が生じたことが考えられる。

一方、C バンドで計測した草原の偏波シグネチャダイアグラムは**図 4 (d)** より、 $\psi$ 、 $\chi$  によらない一定値 (バイアス成分) が大きい。しかし、アシ原の様に VV 偏波は卓越していない。草地の形状を参考にすれば、この偏波シグネチャダイアグラムのパターンを説明する散乱機構としては、主として先に述べた多重散乱機構が考えられる。この結果は、草地の葉はアシ原に比べランダムな配向であり、特に卓越する形態がなかった現地調査結果と矛盾しない。

小見川町市街地 (U) の偏波シグネチャダイアグラムは C バンド、L バンドともに似通っている。両者は cross-polarized signature で 45 度直線偏波成分が相対的に大きい。このパターンも、先に述べた 2 面コーナリフレクタとしての散乱機構が存在する場合の結果に類似していることからその散乱機構は 2 面コーナリフレクタの機構が主である。

以上より本報告で設定した洪水氾濫域の解析が必要となる 5 つの解析対象土地被覆については、偏波シグネチャダイアグラムを利用し識別が可能である。

#### 4.3 SIR-C 画像データと TM 画像データの情報量比較

5 つの解析対象土地被覆に関する SIR-C 画像データと TM 画像データの情報量について主成分分析を用いて比較した結果を表 2 に示した。

TM 画像データと単バンド (C バンドもしくは L バンド) の多偏波 SIR-C 画像データの寄与率を比較すると SIR-C 画像データの方が第一主成分に分散情報が集約されている。これは**図 3** の波形のパターン (相対値) が SIR-C 画像データの方が 5 つの対象間で類似していることと矛盾しない。

SIR-C 画像データで多バンド (C バンドと L バンドの両方) を利用した場合では、単バンドのみの場合よりも第 3 ~ 第 4 主成分の寄与率が増加する。このことから C バンドと L バンドそれぞれがになう独立な情報量が存在することがわかる。

C バンド、L バンドおよび TM 画像データをすべて利用した場合は第 3 主成分の寄与率が大きくなり、第 2 主成分までのデータの集約率が小さい。これは SIR-C 画像データと TM 画像データには 5 つの対象について独立な情報量が存在し両画像データを同時に利用した場合に分散情報が増加するためである。

以上より本報告で設定した洪水氾濫域の解析が必要となる 5 つの解析対象土地被覆の識別において、対象のマイクロ波の散乱特性と可視、近赤外、熱赤外領域の光の反射、放射特性の融合利用は、識別精度の向上に有効である。

#### 4.4 コントラスト強調処理の結果

利根川の水面 (W1) に対して、他の 4 つの対象物との



コントラストを最大にする  $\Psi_r, \chi_r, \Psi_l, \chi_l$  を求めた結果を表 3 に示した。いずれの対象物に関しても利根川の水面に対する差を図 3 に示した代表的な  $\sigma^0$  の値を利用する場合よりも大きくすることができ、コントラスト強調処理が可能になったことがわかった。

以上より、実際の洪水氾濫域の解析でもコントラスト強調処理は有効であると考えられる。

### 5. まとめ

本報告では、災害観測に利用する観点から、多周波・多偏波 SAR 画像データの有用性について考察を行った。

本報告は、日本国内の多周波・多偏波 SAR 画像データを現地調査とともに解析し、多周波・多偏波 SAR 画像データの洪水氾濫解析への利用可能性を検討した初めての例である。以下に、多周波・多偏波 SAR 画像データを洪水氾濫時の地表の解析に利用する観点から、本報告の結果を要約する。

(1) 多周波・多偏波 SAR を用いれば、洪水氾濫時の地表の状況把握に利用できる疑似カラー合成画像情報が取得できる。特に、多周波・多偏波 SAR 画像データでは、水域とその他の対象とのコントラストは高

く、湛水域の境界の特定に有用である。また、コントラスト強調処理は特定の識別対象の分離精度を向上できることも、災害領域の抽出に有効である。

(2) TM 画像データではほとんど差異がない水面でも多周波・多偏波 SAR 画像データを用いれば差異が検出できる。すなわち、CバンドとLバンドのデータで、利根川の水面と外波逆浦の水面の偏波シグネチャダイアグラムが異なる事実(図 4)は、水面をその表面形状で分類できることを示唆する。この分類能力の応用として、例えば水流の相違で水面の形状が他の水域と異なると思われる決壊地点の検出等が考えられる。

(3) 多周波・多偏波 SAR 画像データと光学センサ画像データの融合的な利用は、両者を単独で利用する場合に比較してより多くの情報を提供できる。このことは洪水氾濫時に想定される 5 つの土地被覆(利根川の水面、外浪逆浦の水面、アシ原、草地、市街地)に関しての両データの主成分分析で検証できた。両画像データの効果的な融合利用法の検討は今後の課題である。

表 2 5 つの解析対象土地被覆(図 2 参照)について計算した SIR-C 画像データと TM 画像データの主成分の比率

Table 2 Ratio of principal components of SIR-C data and TM data calculated from the five test ground cover types (see Fig. 2).

PRINCIPAL COMPONENT (-)	LANDSAT TM (%)	SIR-C C band (%)	SIR-C L band (%)	SIR-C C and L band (%)	SIR-C and LANDSAT C,L band and TM (%)
1	88.725	96.933	94.375	95.602	87.845
2	9.734	2.511	5.449	3.421	9.258
3	1.316	0.556	0.160	0.933	2.729
4	0.226	0.000	0.016	0.044	0.168
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 3  $|\sigma^0 - \sigma^0_{w1}|$  を最大にする楕円方位角 ( $\Psi_r, \Psi_l$ ) と楕円率角 ( $\chi_l, \chi_r$ ) の計算結果。ここで  $\sigma^0_{w1} = J^T \langle M_{S1} \rangle J$ ,  $\sigma^0 = J^T \langle M_{S2} \rangle J$  であり、 $M_{S1}$  は water1 のストークスマトリクスを、 $M_{S2}$  は S2 のストークスマトリクスを意味する。

Table 3 Ellipse orientation angle ( $\Psi_r, \Psi_l$ ) and ellipticity angle ( $\chi_l, \chi_r$ ) to maximize  $|\sigma^0 - \sigma^0_{w1}|$ .  $\sigma^0_{w1} = J^T \langle M_{S1} \rangle J$ ,  $M_{S1}$  stands for water1's stokes matrix,  $\sigma^0 = J^T \langle M_{S2} \rangle J$ , and  $M_{S2}$  stands for S2's stokes matrix.

S2	band	$\Psi_l$ [deg.]	$\chi_l$ [deg.]	$\Psi_r$ [deg.]	$\chi_r$ [deg.]	$\sigma^0$ [dB]	$\sigma^0_{w1}$ [dB]	$\sigma^0 - \sigma^0_{w1}$
water2	C	85.0	-35.0	70.0	35.0	-26.90	-25.58	-1.32
	L	112.5	-30.0	110.0	7.5	-31.25	-22.37	-8.88
grassland	C	175.0	0.0	110.0	10.0	-15.87	-30.27	14.39
	L	92.5	-20.0	177.5	-10.0	-19.35	-34.49	15.14
reedy land	C	35.0	-15.0	152.5	0.0	-9.85	-28.84	19.00
	L	172.5	-7.5	77.5	-20.0	-16.38	-33.67	17.29
urban	C	150.0	-2.5	22.5	-12.5	-0.11	-28.26	28.16
	L	0.0	-25.0	145.0	-35.0	-1.56	-29.99	28.44

## 謝辞

本報告で使用した SIR-C 画像データの提供にご尽力いただいた NASA/JPL Radar data Center の関係者の皆様に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 星 仰・山田貴浩・藤田正晴 (1999) : SIR-C ポラリメトリック画像データによるテクスチャ特徴量の分析. 電子情報通信学会論文誌 B, **J82-B-2**, 283-291.
- 2) 伊藤陽介・大松 繁 (1997) : ニューラルネットワークによるポラリメトリック SAR データの分類. 写真測量とリモートセンシング, **36-3**, 13-22.
- 3) Zebker, H.A., Van Zyl, J.J., and Held, D.N. (1987) : Imaging Radar Polarimetry From Wave Synthesis. J. Geophys. Res., **92-B1**, 683-701.
- 4) Van Zyl, J.J., Zebker, H.A., and Elachi, C. (1987) : Imaging radar polarization signatures : Theory and observation. Radio Science, **22-4**, 529-543.
- 5) Stofan, E.R., Evans, D.L., Schmullius, C., Holt, B., Plaut, J.J., Van Zyl, J., Wall, S.D., and Way, J. (1995) : Overview of Results of Spaceborne Imaging Radar-C, X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR). IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **33-4**, 817-828.
- 6) 廣澤春任 (1992) : 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ⑤ 合成開口レーダ (SAR), 67-70, 資源観測解析センター.
- 7) 山口芳雄 (2001) : アンテナ・伝播における設計解析手法ワークショップ (第21回) テキスト ポラリメトリックレーダ入門コース, 69-79, 電子情報通信学会.

(原稿受理 : 2001 年 12 月 26 日)

## 要 旨

災害観測に利用する観点から, 多周波・多偏波 SAR 画像データの有用性について考察を行った. 使用した多周波・多偏波 SAR 画像データは, Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) が取得した茨城県南部地域の地表画像データである. この SIR-C 画像データとの比較解析データとして, 同地域のランドトランスデータおよび光学センサ (LANDSAT TM) 画像データを使用した. これらの画像中には, 洪水氾濫時の土地被覆と想定できる 5 つの異なる地点を評価地点として設定した. これらの評価地点は, 多周波・多偏波 SAR 画像データの偏波合成画像や偏波散乱特性によって良好に識別できた. また, いくつかの評価地点の偏波散乱機構は, ランドトランスデータと対応付けが可能であった. さらに 5 つの評価地点に関する SIR-C 画像データと LANDSAT TM 画像データの情報量を主成分分析により比較した. その結果, 両者の融合的利用は土地被覆に関する情報量を増加させることがわかった.

キーワード : 多周波・多偏波 SAR, 光学センサ, ランドトランス, 偏波散乱特性