

# 偏波SAR画像の高感度な 時系列分析

Maximization of Sensitivity to Time-series Polarimetric SAR Image

\*情報技術総合研究所(博士(工学))

## 要 旨

グローバルな気候変動対策や災害時の復興支援のために地球の日々の変化を把握することは、人類にとって喫緊の課題である。三菱電機が長年開発に携わってきた合成開口レーダー(SAR: Synthetic Aperture Radar)は、昼夜天候問わず観測可能であり、定期的な観測を通じて地表面の変化を差分として検出することに優れている。さらに、SARの送受信アンテナの偏光性を利用した偏波SAR画像は、観測対象の構造や材質等の推定を可能にする。当社は、時系列に観測された偏波SAR画像群から、対象の状態の変化に対する感度を高めて、わずかな違いも見落とすことなく定量的に測定する技術を開発した。この手法を人工衛星だいち2号で撮影した偏波SAR画像に適用し、北海道の広葉樹林の季節変化を定量的に計測できることを示した。

## 1. ま え が き

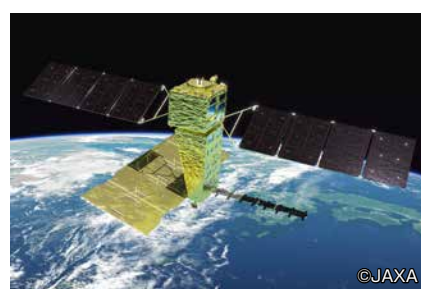
宇宙から地球を観測する場合、一度の観測から得られる絶対量よりも、軌道の再帰性を利用した時系列画像から得られる日々の相対変化の方が重要である。光学カメラと異なり、昼夜天候問わず観測可能なSARは、地上の観測対象が変化しなければ同じ電力を受信できる可能性(再現性)が高いことに加えて、送受信時に偏波特性を切り替えることで観測対象の形状や材質への感度も向上する。特に人工衛星に搭載された偏波SARは、地表面の微細な変化を捉えることに優れている。当社は、これまでに国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)による偏波SAR機能を搭載した全ての人工衛星開発に携わってきた(図1)。偏波SAR観測の最大のメリットは、一旦直交する二偏波で観測すれば、オフラインで任意の送受信偏波に対応する受信電力を再現できることにある。当社は、このような偏波SAR画像の基本特性に改めて着目し、観測対象の微細な変化を、これまでにない感度で定量的に計測する技術を開発した。



だいち1号



だいち2号



だいち4号

図1-偏波SAR衛星

## 2. 偏波SARの受信電力

電磁波の基本特性である偏光性は、その伝搬方向に直交する面内での電場や磁場の規則的な振る舞いのことである。そのような電磁波は、偏波と呼ばれ、一般に楕円(だえん)の形になる(図2)。図2で、伝搬方向は、紙面垂直である。

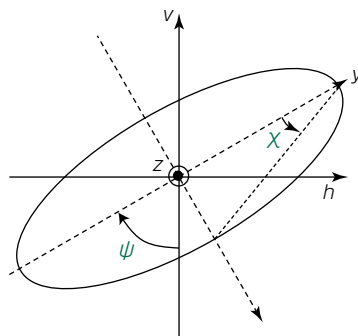


図2-偏波状態を規定する二つの角度

偏波状態 $\vec{p}$ は、楕円を特徴づける傾き角 $\psi$ と楕円率角 $\chi$ を変数として次のように表現できる。

$$\vec{p}^i = \begin{pmatrix} p_h^i \\ p_v^i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi^i & \sin \psi^i \\ -\sin \psi^i & \cos \psi^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \sin \chi^i \\ \cos \chi^i \end{bmatrix} \quad i = t, r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $t$ と $r$ は、送信と受信を表し、レーダー装置を構成する送信アンテナと受信アンテナのそれぞれについて、偏波状態を定めることができる(図3)。図3の“ $v_1, v_2, \dots$ ”は、観測対象の物理量(土壌水分や植物の生育状況等)を示す。

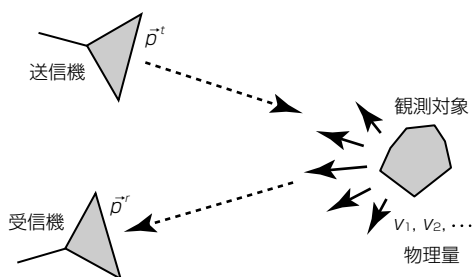


図3-偏波SAR観測の様子

すなわち、観測に用いる偏波状態は、四つの角度( $\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r$ )を変数として規定できる。実際の偏波SAR観測では、水平偏波と垂直偏波(図4)が広く用いられ、送受信の際に偏波状態を逐次切り替えながら観測する。

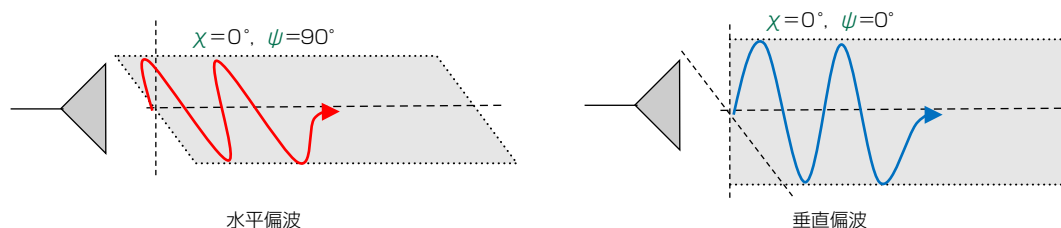


図4-直交する二偏波の例

例えば、垂直偏波を送信し、観測対象からの散乱を水平偏波で受信した信号は、HV偏波と呼ばれ、偏波SAR観測を通じて、HH, HV, VH, 及びVV偏波(以下“標準偏波”という。)を記録する。なお、従来のSARは、どれか一つの偏波だけを記録する。受信電力 $P$ は、送受信偏波状態を表す( $\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r$ )で構成される四次元のアンテナベクトル $\vec{A}$ と、観測対象の電波散乱情報で構成される4行4列の共分散行列 $C$ を用いて、次のように記述できる。

$$P = \vec{A} (\vec{p}^t(\psi^t, \chi^t), \vec{p}^r(\psi^r, \chi^r))^T C(v_1, v_2, \dots) \vec{A} (\vec{p}^t(\psi^t, \chi^t), \vec{p}^r(\psi^r, \chi^r))^* \quad \dots\dots\dots (2)$$

スカラーである $P$ は、偏波SAR画像の各画素の明るさと考えてよい。観測によって構成される共分散行列を、偏波シグネチャー<sup>(1)</sup>で可視化できる。今回、送信と受信の偏波状態が同じ(Co-Pol)場合( $\vec{p}^t = \vec{p}^r$ )、及び直交する(Cr-Pol)場合( $\vec{p}^t \cdot \vec{p}^r = 0$ )について、 $\psi^t$ と $\chi^t$ を変えながら $P$ を次々と算出することで可視化した(図5)。

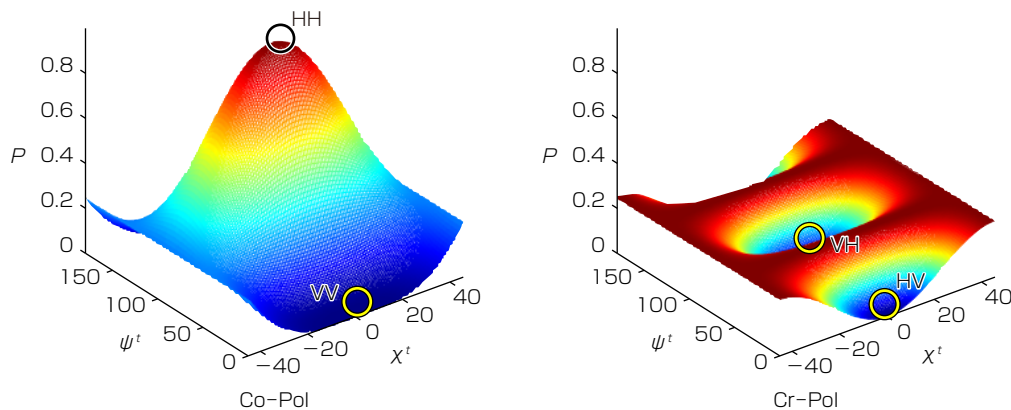


図5-90°傾いた双極子の偏波シグネチャー

標準偏波は、図5の4点に対応する電力である。従来のSARでは、どれか1点だけを観測する。しかし、偏波SARで得られる共分散行列は、それ以外にも多くの情報を含んでいる。すなわち、一旦直交する二偏波で共分散行列を構成すれば、机上で任意の送受信偏波状態の電力を再現できることを示している。この性質は、偏波SARの最大の特徴の一つであり、例えば、同じ画像中の2種類の観測対象(船舶と海面など)のコントラストを強調する手法<sup>(2)</sup>として活用されてきた。本稿では、この性質を時系列偏波SAR画像の高感度で定量的な変化検出に応用する。なお、図5では、偶然HH偏波( $\chi^t = 0^\circ$ ,  $\chi^t = 90^\circ$ )で電力最大値を捉えているが、観測対象の状態によっては、必ずしもそうではない。

### 3. 差分への感度最大化手法

3章では、観測時期の異なる2シーンの偏波SAR画像で検討する。この期間の観測対象の状態変化に伴う電力差分を次のように記述できる。

$$\Delta P = P(t_1) - P(t_0) = \vec{A}(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r)^T \{C(t_1) - C(t_0)\} \vec{A}(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r)^* \dots\dots\dots (3)$$

これは、観測対象に変化がある限り、適当に $\vec{A}$ を選択することで、次のように電力差分を最大化できることを示している。

$$(\psi_{opt}^t, \chi_{opt}^t, \psi_{opt}^r, \chi_{opt}^r) = \max_{\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r} \left| \frac{\partial P(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r, \dots)}{\partial t} \right| \dots\dots\dots (4)$$

最適な偏波状態は、Lagrange未定乗数法を適用して求めることができる。

この原理を適用した具体的な処理方法について、同一地域を $t_0$ から $t_3$ の期間で4回観測したケースを例に示す(図6)。

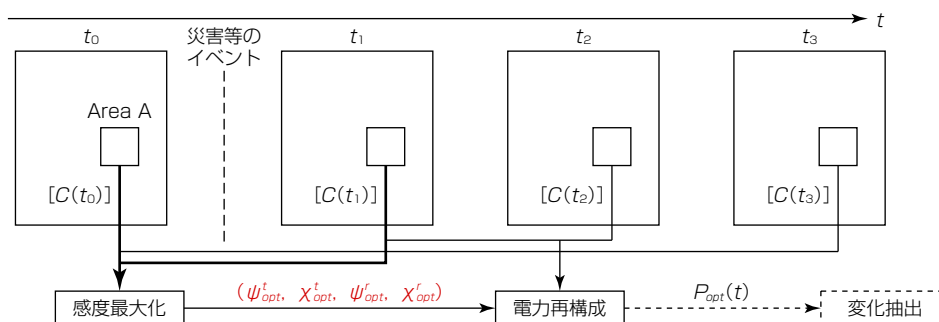


図6-偏波感度最大化手法の実現手法

$t_0$ と $t_1$ の間で、災害等のイベントで大きな変化が発生し、その後、 $t_2$ 、 $t_3$ と徐々に復旧が進み、イベント発生前 $t_0$ の状態に戻ることを仮定する。まず、最大の変化を伴う $t_0$ と $t_1$ の偏波SAR画像から、差分を最大化する最適角( $\psi_{opt}^t$ ,  $\chi_{opt}^t$ ,  $\psi_{opt}^r$ ,  $\chi_{opt}^r$ )を求めて、画素ごとに登録する。次に、登録した最適角を2章の式(2)に適用することで、各時期の電力を再構成する。このように全期間で同じアンテナベクトル $\vec{A}(\psi_{opt}^t, \chi_{opt}^t, \psi_{opt}^r, \chi_{opt}^r)$ を使用することで、変化の比較基準を定め、対象の変化を $\{C(t_1) - C(t_0)\}$ に局在化できる。再構成された4枚の偏波SAR画像の任意の画像間の差分は、対象の状態変化として定量分析可能である。一方、最適角そのものは、観測対象の状態を表す新たな物理パラメータになり得る。

#### 4. 妥当性検証～森林の成長に対する感度最大化～

北海道の苫小牧市にある広葉樹林を3時期( $t_0$ :2018年12月30日,  $t_1$ :2019年1月27日,  $t_2$ :2019年8月11日)にわたってだいち2号で観測した。その偏波SAR画像に、3章で検討した手法を適用する。この地域は、図7のスナップ写真のとおり、落葉樹特有の顕著な時系列変化を確認できる。



図7-苫小牧市広葉樹林帯のスナップ写真

同地域のHH偏波画像を図8に示す。 $t_0$ から $t_1$ にかけては、冬季のひと月分の差であり微小な変化にとどまるが、 $t_1$ から $t_2$ にかけては、冬から夏にかけての葉の成長に伴い、明るさが顕著に増加している。

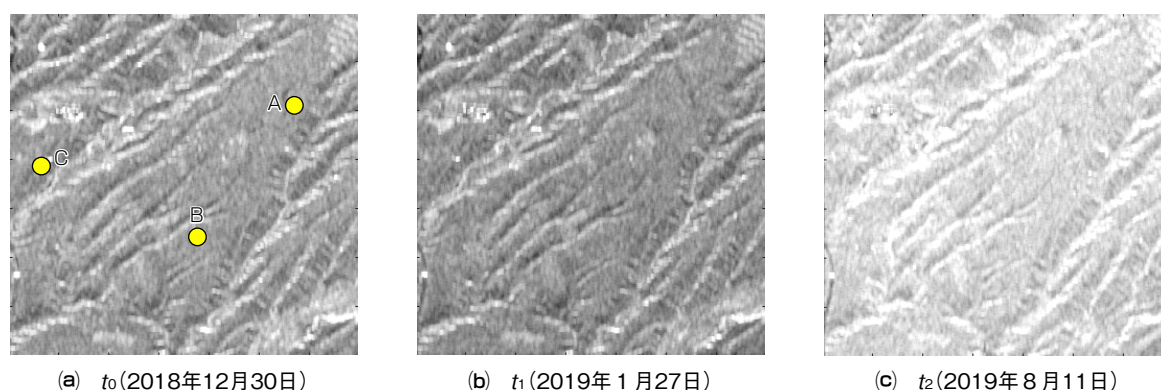


図8-だいち2号による時系列偏波SAR画像(HH偏波)

ここでは、最大の変化が期待される $t_0$ と $t_2$ で感度最大化を行う。図8(a)に示すA～C地点について、感度最大化後の電力再構成した結果を図9に示す。なお、感度を強調するため、任意時刻と $t_0$ での電力差分として図8(b)(c)を図示する。

どの地点でも、成長に従って受信電力が増加傾向を示す。また、再構成された電力( $P_{OPT}$ )は、 $t_2$ で最大になり、 $t_1$ を含めて自然な変化を見せており、妥当な結果が得られている。この手法は、期間中の比較基準が同じであるため、任意のペアの差分から対象地域の物理的变化を定量的に分析できる。



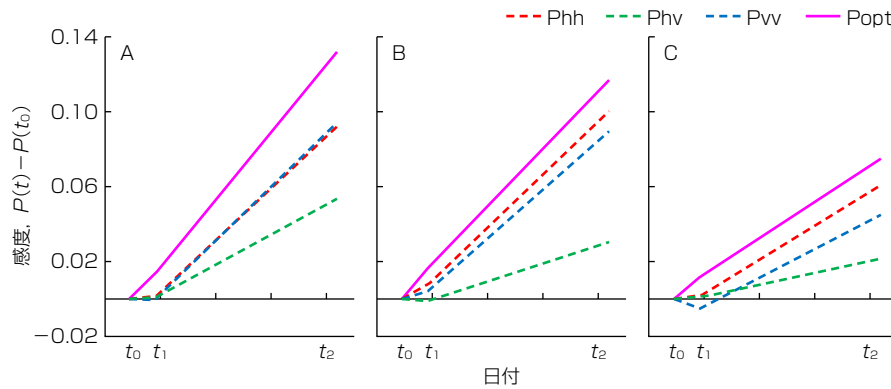


図9-苫小牧市のA～C点(図8(a))での感度最大化結果

この手法の画像全体での妥当性検証のため、電力再構成後の $t_0$ と $t_2$ の差分画像を図10に示す。

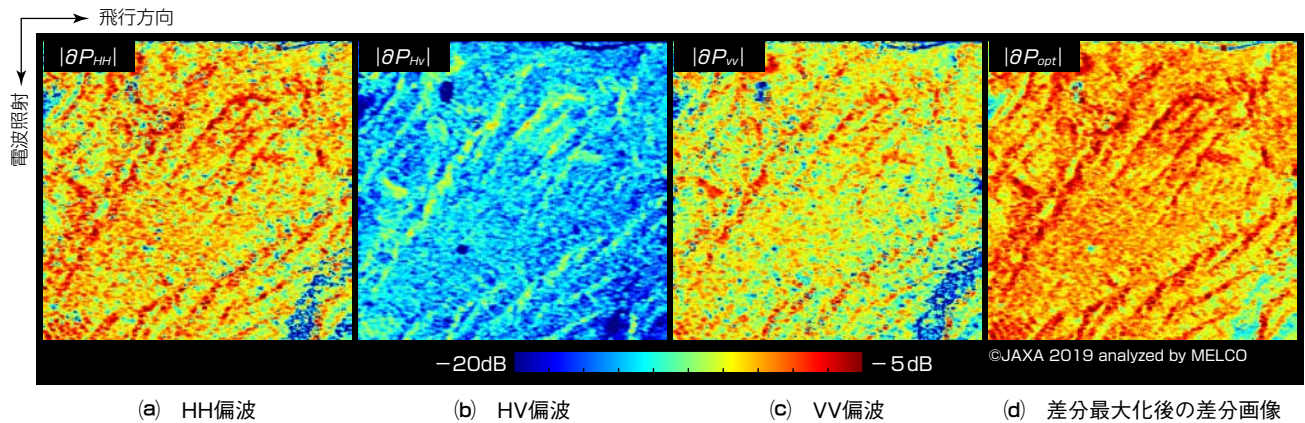


図10-電力再構成後の $t_0$ と $t_2$ の差分画像

HH画像(図10(a))は、図8(a) $t_0$ と(c) $t_2$ の差分である。画像の領域全体にわたり、提案手法による変化の大きさ(図10(d))が最大であることが分かる。また、得られた最適角を新たな物理量として送受信偏波状態の成す角を次のように定義する。

$$\cos\gamma_{opt} = \frac{\vec{p}_{opt}^t \cdot \vec{p}_{opt}^r}{|\vec{p}_{opt}^t| |\vec{p}_{opt}^r|} \dots\dots\dots (5)$$

だいち2号画像(図8)の画像領域内の $\psi_{opt}$ 、 $\chi_{opt}$ 、及び $\gamma_{opt}$ のヒストグラムを図11に示す。

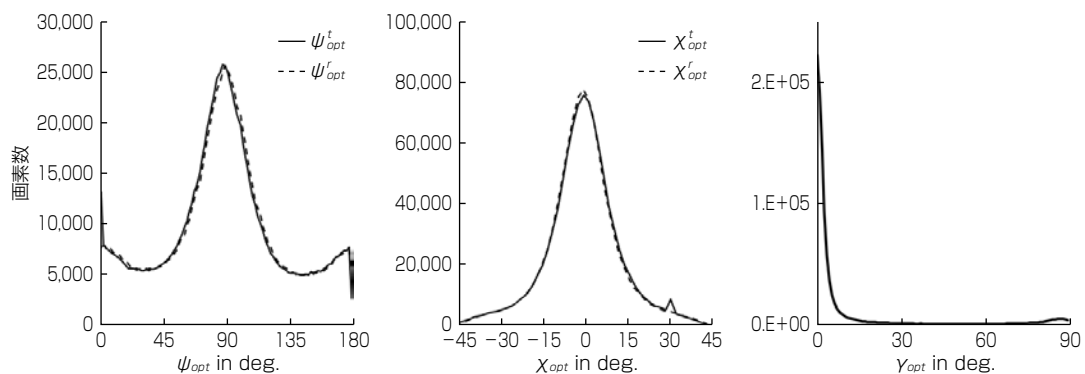


図11-だいち2号画像(図8)の $\psi_{opt}$ 、 $\chi_{opt}$ 、及び $\gamma_{opt}$ のヒストグラム

$\psi_{\text{opt}}$ と $\chi_{\text{opt}}$ は、送信と受信ではほぼ等しい分布を示しており、それぞれ $90^\circ$  (水平偏波)と $0^\circ$  (直線偏波)付近を平均値に持つ。また、 $\gamma_{\text{opt}}$ は、ほとんどの画素が $0^\circ$  (送受信の偏波状態が等しい)を示しており、当該地域は全体としてHH偏波( $90^\circ$ )に感度が高いが、それ以外の傾き角にも相当分布していることが、定量的に明らかになった。

## 5. む す び

偏波SAR画像について、時系列感度を最大化し、任意の観測対象に対する変化を定量的に計測する手法を述べた。提案手法について、だいち2号で時系列観測された偏波SAR画像に適用し、差分を最大化できることを確認した。また、各画素について得られた最適偏波状態そのものを利用して、より多面的な観測対象の分析ができることも示した。当社は、地球温暖化対策に向けた森林生育状況の把握や、近年急増する線状降水帯による洪水等に伴う被災域の抽出などにこの技術を適用し、培ってきた偏波SAR衛星開発技術と組み合わせることで、地球規模のグローバルな地表の変化を定量的かつ精緻に把握できる技術の提供に引き続き取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) Jakob, J. van Zyl : On the Importance of Polarization in Radar Scattering Problems, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology (1985)
- (2) Swartz, A. A., et al. : The Optimal Polarizations for Achieving Maximum Contrast in Radar Images, Journal of Geophysical Research, **93**, No.B12, 15252~15260 (1988)

~~~~~