

偏波レーダによる
土砂災害箇所検出に関する研究

平成28年

新潟大学大学院 自然科学研究科

柴山卓史

目 次

1. 序論	1-1
1.1 研究の背景.....	1-1
1.2 研究の目的.....	1-6
1.3 本論文の構成.....	1-7
2. 偏波合成開口レーダ	2-1
2.1 概説.....	2-1
2.2 レーダの概念.....	2-1
2.3 合成開口レーダの概念.....	2-3
2.3.1 合成開口処理とアジマス分解能.....	2-3
2.3.2 パルス圧縮とレンジ分解能.....	2-6
2.4 偏波合成開口レーダ.....	2-8
2.4.1 偏波と偏波合成開口レーダ.....	2-8
2.4.2 PolSAR システムの実例.....	2-11
2.5 結語.....	2-14
3. 偏波合成開口レーダデータの解析	3-1
3.1 概説.....	3-1
3.2 偏波行列.....	3-2
3.2.1 散乱行列.....	3-2
3.2.2 偏波行列.....	3-3
3.2.3 散乱ベクトル.....	3-4
3.2.4 偏波行列（偏波平均化行列）.....	3-5
3.3 偏波相関係数.....	3-7
3.4 固有値解析.....	3-9
3.5 散乱モデルによる電力分解.....	3-13

3.5.1	散乱電力分解の原理.....	3-14
3.5.2	回転化 coherency 行列による四成分散乱電力分解.....	3-15
3.6	結語.....	3-20
4.	土砂災害調査における偏波合成開口レーダ利用の現状と課題	4-1
4.1	概説.....	4-1
4.2	土砂災害等の調査におけるリモートセンシングの研究事例.....	4-1
4.3	土砂災害等の調査における偏波合成開口レーダ利用の現状.....	4-3
4.3.1	偏波相関係数を利用した土砂災害の検出事例	4-3
4.3.2	固有値解析による土砂災害の検出事例.....	4-6
4.3.3	散乱モデル電力分解による土砂災害の検出事例.....	4-7
4.4	偏波合成開口レーダによる土砂災害箇所検出の課題	4-14
4.5	結語.....	4-16
5.	土砂災害箇所における偏波散乱特性	5-1
5.1	概説.....	5-1
5.2	対象地域と使用データの諸元.....	5-1
5.2.1	対象地域.....	5-1
5.2.1	使用データの諸元.....	5-2
5.3	解析手法	5-5
5.4	土砂災害箇所における偏波散乱特性	5-6
5.4.1	四成分散乱モデル電力分解結果	5-6
5.4.2	局所入射角と散乱電力の関係	5-13
5.4.3	表面散乱の入射角依存性.....	5-18
5.5	土砂災害箇所検出の精度向上.....	5-21
5.5.1	土砂災害箇所検出のための条件設定	5-21
5.5.2	複数の閾値設定による土砂災害箇所検出の精度評価.....	5-22
5.6	結語.....	5-32

6. 結論	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 今後の課題.....	6-3

1. 序論

1.1 研究の背景

社会的な課題として災害対応がある。この 10 年あまりの期間に限っても、中越地震，岩手・宮城内陸地震，四川大地震，東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）等の大地震が日本国内だけでなく，世界各地で発生している。また，台風やハリケーン等の規模や発生頻度は年を追うごとに大きくなってきている。ひとたび災害が発生すると，その影響は被災地における人的・物的被害に留まらず，経済的な影響として，ときには国をまたいで波及する。

これらの自然災害は自然現象であるため，完全に防止することは困難である。しかしながら，できるだけ早期に災害の全容を把握し，適切な対策をとることができれば，その被害を軽減（減災）することができると考えられる。このような背景のもと，被害の状況把握や災害監視（disaster monitoring）の高度化・高精度化に向けた技術開発が期待されている。

リモートセンシングとは，ある物体あるいは現象に関する情報を直接触れることなく，検知装置（センサ）によって取得すること [1] であり，電磁波エネルギーを画像の形で保存し，地表面に関する情報を得ることができる。災害発生時に，現地に立ち入ることは危険をとまなうが，リモートセンシングを活用することで，被災地に立ち入ることなく，上空から被災地の状況を把握することができる。また，地上での踏査では広域を短期間

に調査することが難しい。一方、リモートセンシングでは、より広い範囲を同時に観測することが可能であるほか、本研究の主題となる合成開口レーダ (synthetic aperture radar; SAR) のような能動型のセンサを用いることで、昼夜を問わず、また、ある程度の雲や雨を透過して地表面の情報を得ることができる。緊急性や確実性が重要視される災害対応・災害監視において、広域性・同時性・全天候性という特徴を持つリモートセンシング、とくに SAR を活用することが有効であると考えられる。

実際に、これまで、災害時の緊急的な被災状況の把握に SAR は活用されてきており、とくに複数時期に観測された SAR データを用いて被災状況把握を行った事例やその特徴、制限などがレビューされている [2]。1980 年から 2012 年に発生した自然災害のうち、被災者 (死者) の多い災害として、地震と熱帯性低気圧 (台風, サイクロン, ハリケーン) に着目している。そして、それらによって引き起こされた被害の検出を複数時期 (原則として災害前の 2 時期と災害後の 1 時期の 3 時期以上) に観測された単偏波 SAR データを用いて、強度 (振幅) 画像の相関 (intensity correlation) や位相情報も含む複素相関係数 (coherence ; コヒーレンス) により、災害前後で変化した箇所を災害による被災箇所として検出する手法が広く用いられていることを示している。強度相関 (intensity correlation) ρ は、振幅 (amplitude) A の二乗として定義される intensity $I (= A^2 = Re^2 + Im^2)$ により、次のように表現される [3],[4]。

$$\rho = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2 \rangle \langle I_2^2 \rangle}} \quad (1.1)$$

ここで、添え字の 1, 2 は観測時期の違い（たとえば、災害前を 1, 災害後を 2 とするなど）を表し、 $\langle \cdot \rangle$ は画像内のある領域での平均化処理を表す。同様に、コヒーレンス γ は次のように表すことができる。

$$\gamma = \frac{\langle c_1 c_2^* \rangle}{\sqrt{\langle c_1 c_1^* \rangle \langle c_2 c_2^* \rangle}} \quad (1.2)$$

ここで、 c_i は SAR 画像の値（複素数）であり、添え字の意味は強度相関の場合と同様である。また、 $*$ は複素共役を表す。これら ρ, γ をそれぞれ、Fig. 1.1 に示す $t_1 - t_2$ の組（災害前）と $t_2 - t_3$ の組（災害前後）で求めることができる。そして、災害前と災害前後の ρ, γ を用いて **normalized differences** を求めることができる。すなわち、正規化強度相関 ND_ρ および正規化強度相関 ND_γ は次のように表すことができる。

$$ND_\rho = \frac{\rho_{pre} - \rho_{co}}{\rho_{pre} + \rho_{co}} \quad (1.3)$$

$$ND_\gamma = \frac{\gamma_{pre} - \gamma_{co}}{\gamma_{pre} + \gamma_{co}} \quad (1.4)$$

ここで、 x_{pre} は災害前の時刻 t_1, t_2 に観測されたデータから得られた値、 x_{co} は災害を挟む災害前後の時刻 t_2, t_3 に観測されたデータから得られた値を示している。そして、これら ND_ρ または ND_γ のいずれか、または両方を用いて、適切な閾値を設定することにより、被災箇所の検出が行われ

ている (たとえば, [5]).

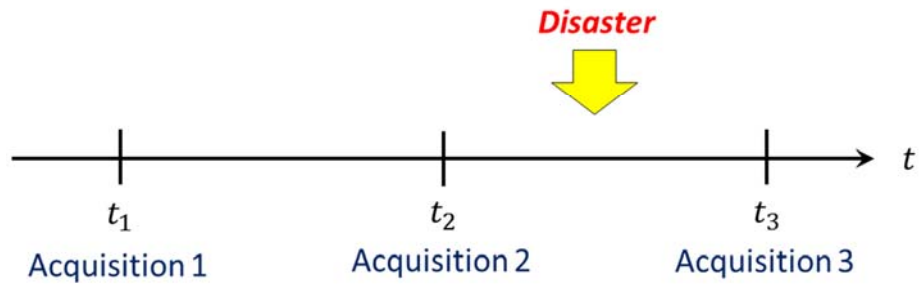


Fig. 1.1 Multi-temporal SAR acquisitions for disaster assessment

また, Hoffmann [6] により, coherence change index $\tau = \gamma_{pre}/\gamma_{co}$ が提案されている. これらの強度やコヒーレンスに基づく被災箇所検出精度 (overall accuracy ; 全体精度) はおよそ 45%から 60%であり, SAR に加えて光学画像や GIS データを組み合わせることで, その精度は 77%から 88%程度まで向上することが知られているが, これらの手法にはいくつかの制約 [2] がある. なかでも重要と思われる事項は以下の 3 点である.

- 少なくとも 3 回の観測データが必要であること (災害前に 2 回, 災害後に 1 回)
- 3 回 (以上) の観測がすべて同じ観測条件 (ジオメトリ, 観測モード, マイクロ波の波長) でなければならないこと
- 災害発生の予測 (とくに地震) は難しいため, 継続的な観測が行われていなければならないこと

これらの制約に対する解決策としては, [2]にも述べられているように, 複数の同型の SAR 衛星により, 観測機会・頻度を大幅に向上させることが考えられるが, 少なくとも現時点では, 地球上の任意の場所において上記

の条件を満たすデータセットが存在する保証はない。災害時の対応を想定すると、災害後の 1 時期の観測データのみで被災箇所を検出できる手法が望ましい。また、同じく [2] でも述べられているように、災害時の迅速な対応のため、教師なし分類 (unsupervised classification) 等による自動化も重要であると考えられる。

強度相関やコヒーレンスとは異なるアプローチとして、SAR の偏波情報を利用する方法 [7] も知られている。同手法では、対象とする災害は土砂災害 (深層崩壊とそれに伴う河道閉塞箇所) に限られているが、2 つの偏波 (HH, HV) を用いることにより、災害後の 1 時期のみの SAR データから土砂災害箇所を目視判読することが可能であり、[7] にはそのための方法・留意点等が示されている。2 偏波の SAR 画像で土砂災害箇所の判読が可能になるのは、土砂災害箇所とその周辺の森林 (非・土砂災害箇所) では、マイクロ波の散乱プロセスが異なるため、ライク偏波 (HH, VV) とクロス偏波 (HV, VH) を合成した画像で両者の見え方の違いが明瞭となるためである。第 3 章で詳述するが、近年は偏波 SAR データを用いてターゲットの電波散乱特性等の情報を抽出するより洗練された手法が開発・提案されており、その代表的な手法の 1 つが散乱電力分解法である。同手法は画像解析手法という観点でみると教師なし分類の一種であるといえる。そして、実時間での処理が可能であることなどから、複数時期の SAR データを用いる強度相関・コヒーレンスによる方法における制約事項がなく、災害対応への適応性が高い手法であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、災害対応への SAR データの活用の 1 つとし

て、偏波 SAR データによる土砂災害検出に関して検討することとした。

1.2 研究の目的

前節で述べた背景を踏まえ、本研究では SAR、とくに SAR の偏波情報を活用し、広域で発生する土砂災害を効率的に検出する手法の開発を目的とする。

第 3 章で詳述するように、偏波 SAR データの解析手法は近年、数を多く提案されており、さまざまな対象・地域に適用されている。偏波情報を土砂災害の検出に利用した研究も既にいくつか知られている（第 4 章で詳述）が、その絶対数は必ずしも多いとは言えない。さらに土砂災害箇所の偏波散乱特性を詳細かつ定量的に調査した事例は少ないため、土砂災害箇所や非・土砂災害箇所（森林等）の偏波散乱特性については不明な点が残されている。とくに SAR の観測方向と土砂災害の発生した斜面との幾何学的な関係性に着目した事例はなく、どのような条件で偏波 SAR データにより土砂災害の検出が可能であるかといった検討は十分になされていない。しかしながら、SAR の偏波情報には、ターゲットの形状や向きに関する情報も含まれるため、SAR の観測方向と斜面の方位・勾配との関係性を正しく認識し、適切な補正を施すことや条件設定を加えることにより、土砂災害の検出精度向上が図られるものと考えられる。

そのため、本研究では、SAR の観測条件と SAR データの解析によって得られる地表面の物体における散乱プロセスとの関係を明らかにし、その過程で得られた知見をもとにして、SAR による土砂災害検出の精度向上に資

する解決策を提案することを目的とした。

1.3 本論文の構成

第 2 章では、レーダおよび合成開口レーダの概念を整理するとともに、合成開口レーダにおける画像生成過程について述べる。さらに、偏波合成開口レーダの特徴や主要諸元を整理する。第 3 章では、偏波合成開口レーダによって取得されるデータの解析手法を述べる。第 4 章では、土砂災害箇所検出における偏波合成開口レーダの利用の現状および課題を整理し、本研究で取り扱う問題を明らかにする。第 5 章では、土砂災害箇所およびその周辺の森林等の植生部における偏波散乱特性を明らかにし、偏波合成開口レーダによる土砂災害検出手法を提案する。結論（第 6 章）において、本研究で得られた成果をまとめるとともに今後の課題を整理する。

文 献

- [1] 日本リモートセンシング研究会（編），リモートセンシング用語辞典，共立出版（株），東京，1989.
- [2] S. Plank, “Rapid Damage Assessment by Means of Multi-Temporal SAR — A Comprehensive Review and Outlook to Sentinel-1,” *Remote Sens.*, vol. 6, no. 6, pp. 4870-4906, 2014.
- [3] C. Yonezawa, S. Takeuchi, “Detection of Urban Damage Using Interferometric SAR Decorrelation,” in *Proc. of 1999 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 1999)*, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999.
- [4] S. Stramondo, C. Bignami, M. Chini, N. Pierdicca, and A. Tertulliani, “Satellite radar and optical remote sensing for earthquake damage detection: Results from different case studies,” *Int. J. Remote Sens.* vol. 27, no. 20, pp. 4433–4447, 2006.
- [5] Y.C. Tzeng, S.H. Chiu, D. Chen, K.S. Chen, “Change Detections from SAR Images for Damage Estimation Based on a Spatial Chaotic Model,” in *Proc. 2007 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, Barcelona, Spain, 23–27 July 2007.
- [6] J. Hoffmann, “Mapping damage during the Bam (Iran) earthquake using interferometric coherence,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 28, no. 6, pp. 1199–1216, 2007.
- [7] 水野正樹，神山嬢子，江川真史，佐藤匠，蒲原潤一，2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法(案)，国土交通省国土技術政策総合研究所，茨城，2014.

2. 偏波合成開口レーダ

2.1 概説

本章では，次章以降で述べる偏波合成開口レーダ (polarimetric synthetic aperture radar; PolSAR) による観測データの解析に先立ち，レーダ (radio detecting and ranging; radar) の原理，合成開口レーダの信号処理および画像生成の概要をおもに文献 [1], [2] に基づき整理する．また，PolSAR システムの具体例として，本研究で使用する PolSAR データの観測にも用いられた ALOS/PALSAR, ALOS-2/PALSAR-2 および Pi-SAR-L2 の諸元を整理する．

2.2 レーダの概念

レーダとは電波を使ってターゲットまでの距離を求め，反射波の強度によってターゲットを検出する装置である．レーダのうち，送信アンテナと受信アンテナが同じ位置にあるものをモノスタティックレーダ (monostatic radar) という．これに対し，送受信のアンテナが異なる位置にあるものをバイスタティックレーダ (bistatic radar) という．SAR もレーダの一種であり，モノスタティックとバイスタティックの両方が使われているが，本研究では同じプラットフォーム (人工衛星や航空機) に搭載された SAR アンテナで送受信を行う場合，すなわちモノスタティックの

ケースをおもに扱う。

一般にレーダはアンテナから幅の短いパルスを送信し、ターゲットから戻ってくる反射波を受信する。ここで、レーダとターゲット間の距離を R とすると、電波は速度 c で空間を伝搬するため、パルスの往復に要する時間（遅延時間） τ は

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2.1)$$

となる。この遅延時間を測定して距離 R を求めることができる。また、反射波の振幅と位相を測定することも可能である。反射波の電力はレーダ散乱断面積（radar cross section; RCS）と呼ばれ、ターゲットの検出・認識に用いられる。RCS は記号 σ を用いて次のように定義される。

$$\sigma = \sigma(\theta, \varphi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{\mathbf{E}^s(\theta, \varphi)}{\mathbf{E}^i} \right|^2 \quad (2.2)$$

ここに、 r, θ, φ はそれぞれターゲットまでの距離および球座標成分、 \mathbf{E}^i は入射電界、 $\mathbf{E}^s(\theta, \varphi)$ は散乱電界である。 $\sigma(\theta, \varphi)$ はターゲットに入射したエネルギーがどの方向にどれだけの強度で散乱するかを表している。あらゆる方向に散乱される電波のなかで、レーダに戻ってくる波を後方散乱波という。この後方散乱波にターゲットの情報が含まれている。

2.3 合成開口レーダの概念

SAR はレーダを発展させ、ターゲットの反射波の振幅・位相を二次元分布の画像として得ることを目的としたレーダである。二次元画像とするために 2 つの座標軸が必要となるが、その 1 つは電波を照射する方向でレンジ (range) 方向とよばれる。もう 1 つがクロスレンジ (cross range) 方向である。SAR は進行方向の真横下方にマイクロ波を照射しながら直線的に移動するが、その真横下方がレンジ (スラントレンジ ; slant range) 方向であり、それと直交するレーダの進行方向がクロスレンジ方向である。クロスレンジ方向はアジマス (azimuth) 方向とも呼ばれる。

高分解能な 2 次元イメージングを達成するためには、レンジ方向・アジマス方向ともに高分解能化が必要となる。SAR ではおもにパルス圧縮技術 (レンジ方向) と合成開口処理 (アジマス方向) により高分解能化を達成している。そこで、次の 2.3.1, 2.3.2 ではそれぞれ SAR におけるアジマス分解能とレンジ分解能について述べる。

2.3.1 合成開口処理とアジマス分解能

合成開口と対になる概念として、実開口がある。実開口レーダでは 1 つのアンテナから対象物に電波 (ビーム) を照射する。このビームはアンテナからの距離に比例して広がりを持つ。その電力半値角は $\Delta\theta_A = \lambda/D_A$ と定義される。ここで、 λ はマイクロ波の波長、 D_A はアンテナの開口長であ

る。このとき、アジマス分解能 ΔR はアンテナから対象物までのスラントレンジ距離 R_0 に比例し、

$$\Delta R = \Delta\theta_A \cdot R_0 = \frac{\lambda R_0}{D_A} \quad (2.3)$$

となる。分解能を高めるためには、アンテナの開口長 D_A を大きくする必要があるが、SAR を搭載するプラットフォーム（人工衛星、航空機）に搭載可能なアンテナの物理的な大きさや重量には制限があるため、 D_A を大きくすることは現実的でない。

一方、合成開口レーダではレーダがアジマス方向に進行しながら複数回のビームを対象物に照射し、散乱波を観測する。これは、アジマス方向に伸びた大きな（実開口の）アンテナがあり、その大きなアンテナからビームを照射することと等価な効果を得ることができる。このとき、合成された開口長 L は $L = \lambda R_0 / D_A$ と表現できる。また、この合成されたアレーアンテナのビーム幅は同じ開口の実開口アンテナの半分になる。すなわち、この合成開口されたアンテナの電力半値角は $\Delta\theta_A = \lambda / 2L$ となる。この $\Delta\theta_A$ を(2.3)のに代入し、

$$\begin{aligned} \Delta R &= \Delta\theta_A \cdot R_0 \\ &= \frac{\lambda R_0}{2L} = \frac{\lambda R_0}{2(\lambda R_0 / D_A)} \\ &= \frac{D_A}{2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

を得る。したがって、アジマス分解能は $\Delta R = D_A / 2$ となる。実開口の場合と異なり、スラントレンジ距離 R_0 が含まれない形となるため、分解能が

距離に依存しない. 実開口レーダと合成開口レーダの分解能の概念図を Fig. 2.1 に示す.

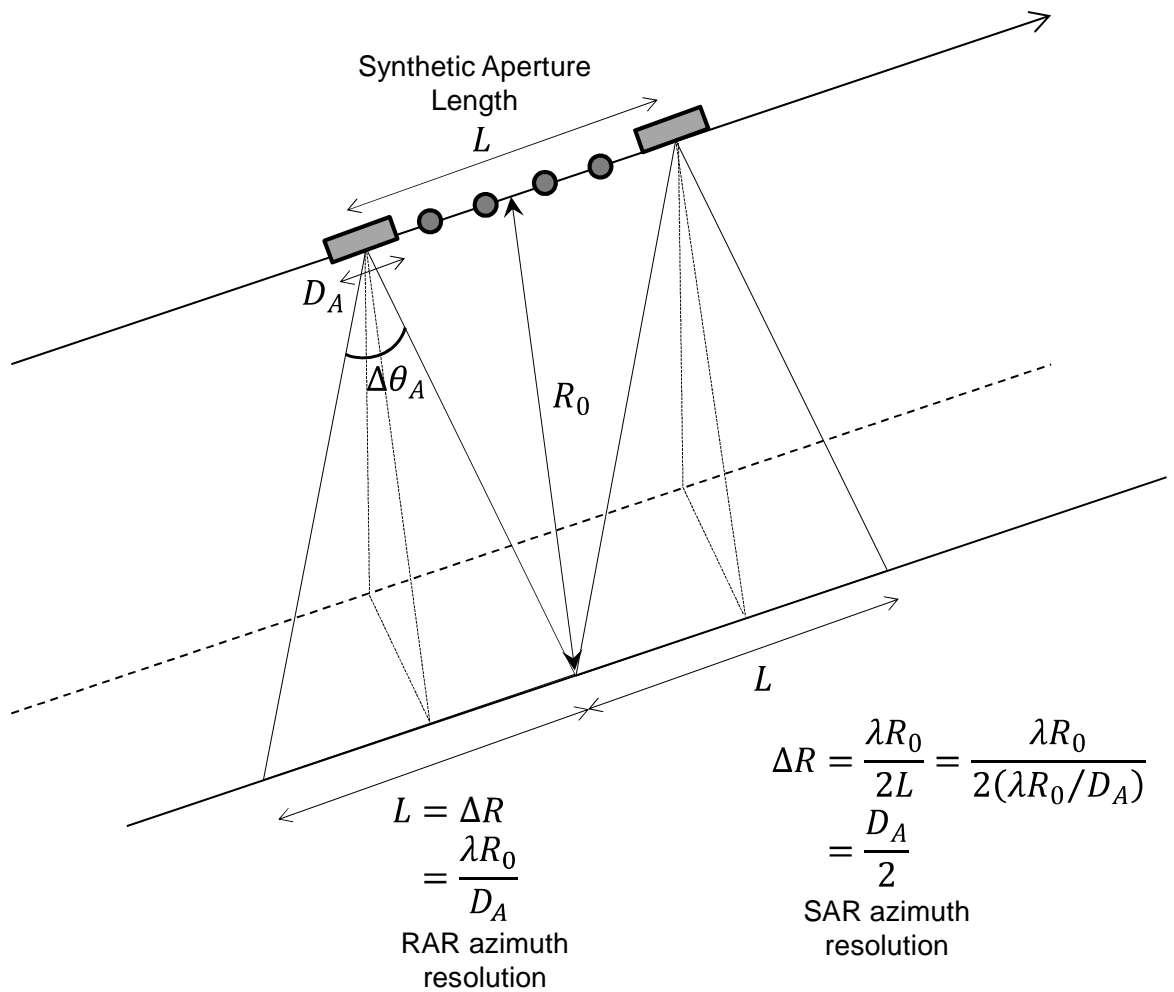


Fig. 2.1 Conceptual diagram of along-track (azimuth) spatial resolution for real and synthetic aperture radars.

また, 合成開口処理は次のように解釈することもできる. アジマス方向に速度 v で直進している開口長 D_A のアンテナがあり, ある地点 (距離) R_0 にターゲットがあることを想定する. このとき, 物体とアンテナとの距離は時間の関数として,

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2} \approx R_0 + \frac{v^2}{2R_0} t^2 \quad (2.5)$$

と表すことができる。このとき位相 $\varphi(t)$ は $\varphi(t) = 2R(t) \cdot 2\pi/\lambda$ であるから、

$$\varphi(t) \approx -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \frac{2\pi v^2}{R_0 \lambda} t^2 \quad (2.6)$$

となり、これを微分して、瞬時周波数 $f(t) = -(2v^2/R_0\lambda)t^2$ が得られる。ここで、電力半値角 θ_A を用いて、ターゲットに電波が照射されている時間 τ_A を $\tau_A = \theta_A R_0/v = \lambda R_0/D_A v$ と表すことができる。また、 $f(t)$ より、 τ_A の時間に変化する周波数幅 B_D は $B_D = (2v^2/\lambda R_0)\tau_A$ となるため、アジマス圧縮後に $B_D \tau_A = 1$ となることを考慮すると、距離分解能 ΔR は次式で表されることとなる。

$$\Delta R = v\tau_A = \frac{v}{B_D} = \frac{D_A}{2} \quad (2.7)$$

すなわち、距離分解能 ΔR はレーダからターゲットまでの距離 R_0 やレーダから送受信される電波の波長 λ とは直接的には関係せず、アンテナの物理的な大きさ D_A のみの関数で表される。

2.3.2 パルス圧縮とレンジ分解能

SARのアンテナからは時間的に周波数を変調したチャープ信号と呼ばれるパルスが照射される。ここで、アンテナからの距離 R_1, R_2 ($R_1 < R_2$)にそれぞれターゲットがあると仮定する。まず、時刻 $t_0 = 0$ にアンテナからパルスが照射されたとき、 R_1 にある物体で反射されたパルスが返ってくるまでの時間 t_1 は $t_1 = 2R_1/c$ であり、同様に R_2 にある物体から反射波が返ってくるまでの時間 t_2 は $t_2 = 2R_2/c$ となる。このとき、送信信号と受

信信号の周波数の差をとり，それぞれをビート信号は f_{b1} , f_{b2} とする．時間とともに周波数が高くなるチャープ信号を送受信しているため， $f_{b1} < f_{b2}$ となる．このビート信号をフーリエ変換すると Sinc 関数の形 (beat spectrum) になり，距離に比例したビート周波数が得られる．この変換は，パルス信号 $f(t)$ を $f(t) = f_0 + (B/T_s)t = f_0 + Mt$ と置いた場合に， T_s を $2/B$ にすること，すなわち， T_s を $1/(BT_s/2)$ 圧縮することに相当する．得られた Sinc 関数は $\text{Sinc}(\pi B(t - \tau))$ となる．レンジ方向の分解能とは，隣り合う 2 つの Sinc 関数のピークが互いの半値幅だけ離れる距離と定義すれば，以下の式によりレンジ方向の分解能 ΔR が得られる．

$$\pi B(t - \tau) = \frac{2\pi B}{c}(R - z_0) = \frac{2\pi B}{c}\Delta R = 2.78 \quad (2.8)$$

ここで，2.78 は 3 dB ダウン，すなわち $\text{Sinc}(x)$ において $\text{Sinc}(x) = 1/2$ となる x の値である．よって， ΔR は次のように得られる．

$$\Delta R = 2.78 \cdot \frac{c}{2\pi B} \cong 0.88 \cdot \frac{c}{2B} \cong \frac{c}{2B} \quad (2.9)$$

したがって，レンジ分解能は周波数帯域幅 B のみの関数であり，アジマス分解能と同様に，レンジ分解能もアンテナからターゲットまでの距離には直接関係しない量となる．このような特徴は光学センサと大きく異なるものであり，全天候性（雲や雨などの影響を受けにくい）と併せてレーダを用いる際の大きな利点の 1 つであると考えられる．

2.4 偏波合成開口レーダ

2.4.1 偏波と偏波合成開口レーダ

ここでは、電波が平面波として、デカルト座標系において $+z$ 方向に伝搬することを仮定する。その際、平面波の電界は横断面内で 2 つの直交成分 (x 方向, y 方向) に分解できる。このような電波の進行方向の後ろ側からみたとき、ある断面で時間とともに電界の描く軌跡のことを偏波という。瞬時電界 $\varepsilon(z, t)$ を次のように表現する。

$$\varepsilon(z, t) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(z, t) \\ \varepsilon_y(z, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x| \cos(\omega t - kz + \phi_x) \\ |E_y| \cos(\omega t - kz + \phi_y) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ここで、 $|E_x|, |E_y|$ は振幅、 ϕ_x, ϕ_y は絶対位相を表す。偏波の定義にしたがって、 $z = 0$ の定位置で観測した場合を仮定し、さらに時間因子の ωt の項を消去すると、次のような楕円の式が得られる。

$$\frac{\varepsilon_x^2(t)}{|E_x|^2} - \frac{2\varepsilon_x(t)\varepsilon_y(t)}{|E_x||E_y|} \cos\phi + \frac{\varepsilon_y^2(t)}{|E_y|^2} = \sin^2\phi \quad (2.11)$$

ここに、位相差 $\phi = \phi_y - \phi_x$ である。すなわち、偏波状態の一般形は楕円として表現できることがわかる。ここで、Ellipticity angle ε と Tilt angle τ を Fig. 2.2 のように定義する。

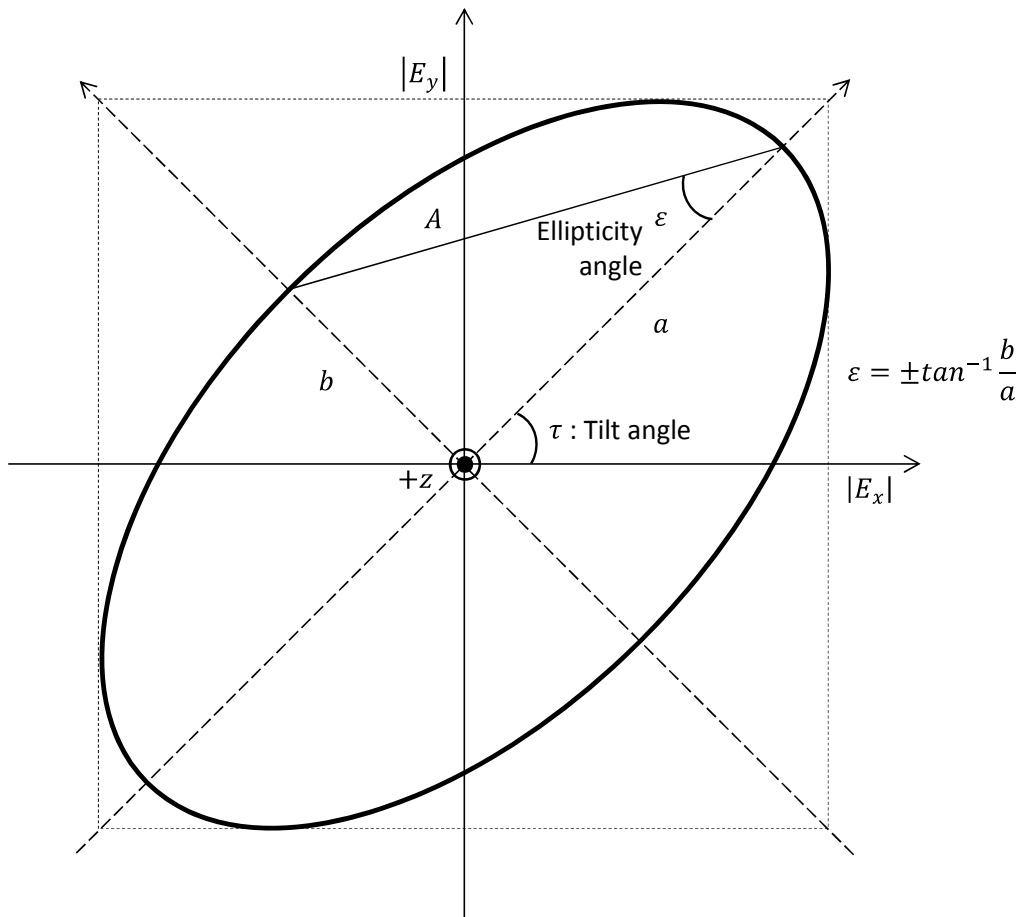


Fig. 2.2 Geometric parameters of an ellipse

この Ellipticity angle ε と Tilt angle τ を用いて偏波状態を Fig. 2.3 のように表現できる. このように, 電波は多様な偏波状態をとるが, $\varepsilon = 0$ となるものは直線偏波と呼ばれ, とくに, $(\varepsilon, \tau) = (0, 0)$ であるものは水平偏波 (horizontal polarization; H), $(\varepsilon, \tau) = (0, \pi/2)$ であるものは垂直偏波 (vertical polarization; V) と呼ばれる.

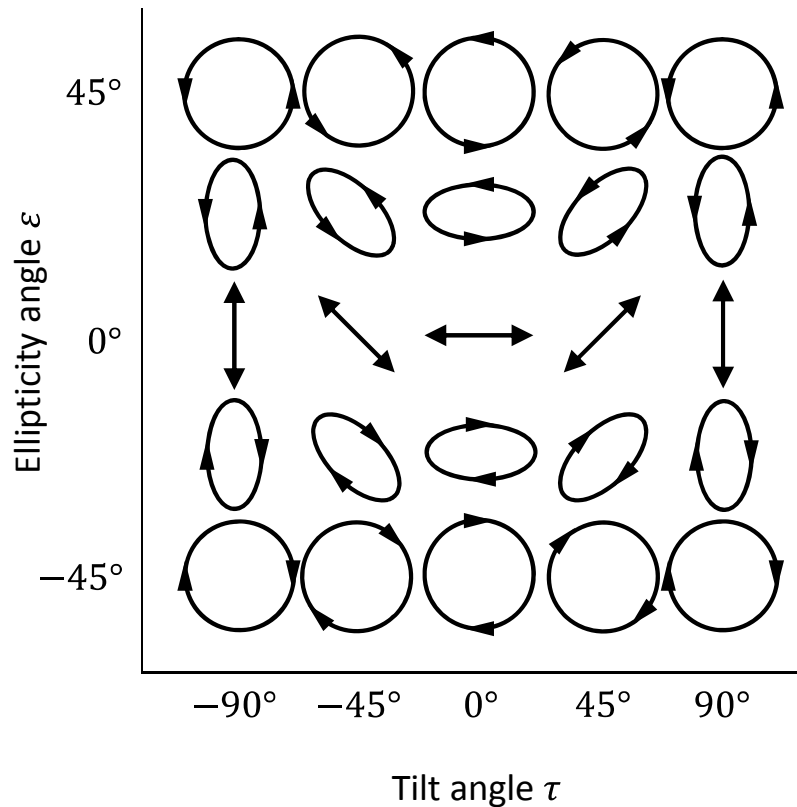


Fig. 2.3 2-Dimensional representation of polarization state

電力による散乱表現（たとえば，(2.2)）の問題点は，電磁波の重要な性質である電界方向が考慮されていないことである．たとえば，垂直に立てて並べた金属格子に水平偏波と垂直偏波を入射させた場合，垂直偏波では大きな反射波が得られるが，水平偏波では通り抜けてしまい反射波は得られない．また，斜めの線状物体にある偏波の電波を入射させると，入射電界に対して垂直な成分が新たに発生する．そのため，1つの偏波成分しか利用しない場合（たとえば，水平で送信し、水平で受信）には，ベクトルの性質を持つ電波の情報を一部しか利用できていないことになるが，ベクトル量である偏波情報をすべて計測することにより，ターゲットに関するより詳細な情報を得ることができる．

以上のような考えのもと，複数の偏波を利用する SAR を偏波合成開口

レーダ (polarimetric synthetic aperture radar; PolSAR) と呼び、直交する 4 つの偏波成分で送受信するもの (たとえば, 受信・送信の順に, HH, HV, VH, VV) は全偏波合成開口レーダ (fully polarimetric synthetic aperture radar) と呼ばれる。なお, 全偏波での観測はフルポラリメトリ観測と呼ばれることがある。

散乱現象を取り扱う基本成分は電界であり, 振幅だけでなく位相の情報も含まれるものである。そのため, 振幅のみ, あるいは電力のみではターゲットに関する十分な情報が得られない。そこで, レーダ方程式を電界の各偏波方向の振幅と位相まで立ち戻って, 再構築が始められたのが 1950 年代である。そして, 1980 年代になり, NASA/JPL の航空機搭載 PolSAR システム AIRSAR [3] が開発された。AIRSAR による PolSAR 観測データによって偏波情報の重要性が実証されて以来, PolSAR に関する技術が急速に発展を遂げている。

2.4.2 PolSAR システムの実例

本項では, 具体的な PolSAR システムの例として, 本研究で使用した PolSAR データの取得に用いられた 3 つの PolSAR システムの諸元を整理する。なお, ここで述べる 3 つの PolSAR システムはすべて国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace eXploration Agency; JAXA) によって開発されたものである。

(1) ALOS/PALSAR

PALSAR (フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ ; Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) [4] は, 陸域観測技術衛星「だいち」(Advanced Land Observing Satellite; ALOS) に搭載された3つのセンサの1つであり, 地球資源衛星1号(JERS-1) に搭載されたSARの機能・性能をさらに向上させたものである。観測モードは, 高分解能モード(地上分解能: 7 m~), 広観測域モード(観測幅: ~350 km) および実験モードとして多偏波モードを有している。この多偏波観測モードでは, 地上分解能は24 m程度ながら, 全偏波での観測(フルポラリメトリ観測)が可能である。

(2) ALOS-2/PALSAR-2

PALSAR-2 (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar -2) [5] は, ALOSの後継機であるALOS-2(だいち2号) に搭載されたSARであり, PALSARなどの従来の衛星搭載型L-band SARと比較して, 送信電力の強化, 使用する周波数帯域の拡大, 2つの独立したビームで受信を行うデュアルビーム方式, 複数の種類の信号を送信するチャープ変調などの新しい技術の採用により, 高い分解能, 広い観測幅, 高い視認性を達成した世界に類を見ない高性能のセンサである。PALSARでは, フルポラリメトリ観測は実験モードであったが, PALSAR-2では, 高分解能観測モード(地上分解能: 6 mおよび10 m)でフルポラリメトリ観測が可能となっている。

(3) Pi-SAR-L2

航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR; Polarimetric and Interferometric Airborne Synthetic Aperture Radar) L2 [6] は, 1996 年~2011 年に渡って運用された Pi-SAR-L の改良版であり, 分解能や感度を 2013 年に打ち上げられた ALOS-2 に対応したものに引き上げた航空機 SAR である. L-band の許容帯域幅である 85 MHz を使用し, スラントレンジ分解能の 1.76 m という L-band としてはきわめて高い分解能でレーダ映像を取得することができる. 観測モード 1 では HH または VV の単偏波観測であるが, 観測モード 2 ではフルポラリメトリ観測が可能となっている.

以上の 3 つの SAR システムの主要諸元を Table 2.1 に示す. なお, Table 2.1 の諸元値はフルポラリメトリ観測時のものである.

Table 2.1 Specifications of the PolSAR systems in fully polarimetric mode

	PALSAR [4]	PALSAR-2 [5]	Pi-SAR-L2 [6]
Platform	Satellite (ALOS)	Satellite (ALOS-2)	Aircraft (Gulfstream-II)
Band width	14 MHz	42 MHz	85MHz
Image width	65 km	40 km	20 km
Incidence angle	8°– 30 °	20°– 40 °	10°– 62 °
Slant range resolution	10.71 m	3.57 m	1.76 m
Azimuth resolution	4.5 m	4.3 m	0.8 m
Polarization	HH, HV, VH, VV	HH, HV, VH, VV	HH, HV, VH, VV

2.5 結語

本章では、レーダの原理、合成開口レーダの信号処理および画像生成の概要を整理した。また、具体的な PolSAR システムの例として、本研究で使用する PolSAR データの観測にも用いられた ALOS/PALSAR, ALOS-2/PALSAR-2 および Pi-SAR-L2 の諸元を整理した。

文 献

- [1] 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 -, (社) 電子情報通信学会, 発行所, 発行都市名, 2007.
- [2] 山口芳雄, 偏波(ポーラリメトリック)レーダの基礎と応用, (株) リアライズ社, 東京, 1998.
- [3] JPL/NASA, AIRSAR, <http://airsar.jpl.nasa.gov/>.
- [4] 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (JAXA/EORC), ALOS について- PALSAR, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/jpalsar.htm>.
- [5] 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (JAXA/EORC), ALOS-2 プロジェクト / PALSAR-2, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/jpalsar2.htm>.
- [6] 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (JAXA/EORC), Pi-SAR-L2, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/Pi-SAR-L2/>.

3. 偏波合成開口レーダデータの解析

3.1 概説

PolSAR システムにより観測されたデータ（以下、PolSAR データという）からターゲットに関する情報を抽出することができる。PolSAR システムによる観測，すなわちレーダポーラリメトリ（radar polarimetry）に関する研究は 1950 年代から始まり，1990 年代以降はその観測データである散乱行列の分解によってターゲットの情報を得る解析手法，あるいは PolSAR データを 2 次元の画像データと捉えて解析する画像解析手法が数多く提案されている。

本章では，それらの PolSAR データ解析手法のうち代表的なものを概観するとともに，本研究の目的である土砂災害の検出に有効な解析手法について考察する。そこで，まず，PolSAR システムで取得される散乱行列から始め，散乱行列から導かれる偏波行列の種類や特徴について述べる。そして，偏波行列から得られるパラメータとそのパラメータを求めるための代表的な解析手法についてその特徴を記載する。

3.2 偏波行列

3.2.1 散乱行列

前章と同じく，ここではモノスタティックレーダを仮定する．レーダ（送信 \mathbf{T}_x ，受信 \mathbf{R}_x ）とターゲットの座標系をそれぞれ (x_1, y_1, z_1) ， (x_3, y_3, z_3) ， (x_2, y_2, z_2) とする． \mathbf{T}_x の送信電界をジョーンズベクトルで表すと，

$$\mathbf{E}^t = \begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{y1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

これが，距離 r だけ伝搬し，ターゲットの入射波となる．

$$\mathbf{E}^i = \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{4\pi r}} \mathbf{E}^t \quad (3.2)$$

そして，ターゲットに当たり，散乱する．ターゲットでレーダ側に向かう後方散乱波は次のように変換される．

$$\mathbf{E}^s = \begin{bmatrix} E_{x2}^s \\ E_{y2}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x2x1} & A_{x2y1} \\ A_{y2x1} & A_{y2y1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{y1} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

これがレーダに向かって，送信とは逆の向きに伝搬する．この波を受信座標系 (x_3, y_3, z_3) で表現すると，

$$\mathbf{E}^s = \begin{bmatrix} E_{x3}^s \\ E_{y3}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x3x1} & S_{x3y1} \\ S_{y3x1} & S_{y3y1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{y1} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

と書くことができる．ここではモノスタティックレーダを仮定しているため，送受信系の座標系が等しくなるので， $(x, y, z) = (x_1, y_1, z_1) = (x_3, y_3, z_3)$ として， $\begin{bmatrix} S_{x3x1} & S_{x3y1} \\ S_{y3x1} & S_{y3y1} \end{bmatrix}$ は (3.5) のように表すことができる．こ

れは Sinclair 散乱行列 [1] と呼ばれている.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

これがレーダ座標によって定義される散乱行列である. 偏波特性に着目する場合は定数項を省略して, 次のように表されることが多い.

$$\mathbf{E}^s = [S]\mathbf{E}^t \quad (3.6)$$

散乱行列の要素は複素数で, 互いに独立な量である. バイスタティック散乱の場合は 4 つの複素数要素となるが, モノスタティックの場合は, 相反定理により $S_{xy} = S_{yx}$ が成り立つため 3 つの複素数要素となる. 座標系として, x を水平方向 (horizontal; H), y を垂直方向 (vertical; V) とおくと, 直線偏波による散乱行列は次のように表すことができる.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

通常は, 散乱行列要素は HH 成分が正の実数となるように相対表示される. 行列全体にかかる位相量はアンテナとターゲットの距離によって変化するため無視することが多い. すなわち, 要素間の関係だけが重要な意味を持つこととなる. 散乱行列はこのように HH 成分を基準としたターゲット固有の偏波散乱特性を表している.

3.2.2 偏波行列

PolSAR システムを用いて観測を行うと, (3.7) のような散乱行列が取得される. PolSAR データの解析では, 散乱行列そのものよりも, $\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle$

などの二次統計量を要素とする **covariance** 行列 $\langle [C] \rangle$, **coherency** 行列 $\langle [T] \rangle$ などの偏波行列が用いられることが多い。これらの偏波行列は散乱行列 $[S]$ から導くことができる。

3.2.3 散乱ベクトル

散乱行列の要素を使って散乱行列と等価なベクトルを作ることができる。散乱ベクトル \mathbf{k}_L は散乱行列の要素を順に並べたもので、直線偏波基底 (HV 基底) の場合には、次のように表現できる。

$$\mathbf{k}_L = \mathbf{k}_{HV} = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

添え字 L は **Lexicographic** の頭文字である。第二要素に $\sqrt{2}$ が付けられているが、これはベクトルのノルムが散乱行列の **Span** と等しくなるようにするためである。これによって、散乱行列との同等性が保証される。

$$\|\mathbf{k}_L\|^2 = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 = \text{Span}[S] \quad (3.9)$$

また、直交散乱ベクトルとして、パウリ (Pauli) 散乱ベクトル \mathbf{k}_P が定義されている。パウリ散乱ベクトル \mathbf{k}_P は散乱行列と Pauli 基底行列の積の **trace** をとり、

$$\mathbf{k}_P = [\text{Trace}([S]\sigma_0), \text{Trace}([S]\sigma_1), \text{Trace}([S]\sigma_2)]^T \quad (3.10)$$

ここに、 σ_i :Pauli 基底行列であり、

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

この散乱ベクトルは **coherency** ベクトルともいい、ベクトルの各要素は散乱行列の要素を用いて次のように表現できる。

$$\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

このパウリ散乱ベクトル \mathbf{k}_P もノルムは散乱行列の **Span** と等しい。また、第一要素の $S_{HH} + S_{VV}$ は奇数回反射、 $S_{HH} - S_{VV}$ は偶数回反射の散乱メカニズムを表している。なお、 \mathbf{k}_P と \mathbf{k}_L との間にはユニタリ変換行列 $[U_P]$ によるユニタリ変換の関係がある。

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_P &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \\ &= [U_P] \mathbf{k}_L \\ [U_P] &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.2.4 偏波行列（偏波平均化行列）

PolSAR データでは、 $S_{HH}S_{VV}^*$ のようにある要素と複素共役の積の形式でデータが保存されることが多い。これは、複素共役をかけることによって、伝播距離による位相誤差が打ち消され、その集合平均はノイズに強い特徴があるためである。同じ要素同士なら電力を表し、異なる要素同士であれば相関を表すことになるため、二次統計量として利用できる。前項の \mathbf{k}_{HV} や \mathbf{k}_P を使って、二次統計量を要素に持つ **covariance** 行列 (3.14) や **coherency** 行列 (3.15) が作られる。

$$\begin{aligned}
\langle [C] \rangle^{HV} &= \frac{1}{n} \sum (\mathbf{k}_{HV} \mathbf{k}_{HV}^\dagger) \\
&= \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \sqrt{2} \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & 2 \langle |S_{HV}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \sqrt{2} \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle [T] \rangle^{HV} &= \frac{1}{n} \sum (\mathbf{k}_p \mathbf{k}_p^\dagger) \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & \langle 2S_{HV}^*(S_{HH} + S_{VV}) \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & \langle 2S_{HV}^*(S_{HH} - S_{VV}) \rangle \\ \langle 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & \langle 4|S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.15)
\end{aligned}$$

これらの偏波行列からターゲットの分類、識別に有効なパラメータが導かれる。たとえば、**covariance** 行列の対角成分は電力に対応しているが、非対角成分は異なる偏波同士の相関を表す。同様に **coherency** 行列の対角成分は散乱メカニズムに対応した電力を表す項となっている。**covariance** 行列と **coherency** 行列はユニタリ変換で結ばれているため、数学的には等価であるが、後述する電力分解を行う場合などには、角度回転などの数学的操作が行いやすいため、**coherency** 行列を用いるほうがよい場合がある。

3.3 偏波相関係数

複素信号を取り扱う信号処理では、相関やコヒーレンスといった概念がある。複素信号 $s_1(x)$, $s_2(x)$ では以下の関係式が成り立つことが知られている。

$$0 \leq \frac{\left| \int_a^b s_1(x) s_2^*(x) dx \right|}{\sqrt{\int_a^b |s_1(x)|^2 dx \int_a^b |s_2(x)|^2 dx}} \leq 1 \quad (3.16)$$

PolSAR データの解析においては $s_1(x)$, $s_2(x)$ をそれぞれ S_{HH} , S_{VV} に置き換えることにより、HH 偏波と VV 偏波の複素相関係数 γ_{HH-VV} が得られる。

$$\gamma_{HH-VV} = \frac{\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle}} \quad (3.17)$$

同様に HH と HV の相関係数 γ_{HH-HV} や VV と HV の相関係数 γ_{VV-HV} が定義できる。ここで covariance 行列 (3.14) の $\langle |S_{HH}|^2 \rangle$ を $\sigma_{HH} = \langle |S_{HH}|^2 \rangle$ とおき、 σ_{HH} によって、 $\langle |S_{VV}|^2 \rangle$ と $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ を次のように正規化した電力比 g, e とおく。

$$g = \frac{\langle |S_{VV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle}, \quad e = \frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle} \quad (3.18)$$

これらのパラメータにより、covariance $\langle [C] \rangle^{HV}$ は次のように表現できる。

$$\langle [C] \rangle^{HV} = \sigma_{HH} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2e} \gamma_{HH-HV} & \sqrt{g} \gamma_{HH-VV} \\ \sqrt{2e} \gamma_{HH-HV}^* & 2e & \sqrt{2eg} \gamma_{HV-VV} \\ \sqrt{g} \gamma_{HH-VV}^* & \sqrt{2eg} \gamma_{HV-VV}^* & g \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

さらに，自然ターゲットに対して **reflection symmetry** 条件が成り立つことを仮定すると，

$$\langle [C] \rangle^{HV} = \sigma_{HH} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sqrt{g} \gamma_{HH-VV} \\ 0 & 2e & 0 \\ \sqrt{g} \gamma_{HH-VV}^* & 0 & g \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

したがって， g, e および $\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle$ が測定できれば，相関係数 γ_{HH-VV} を求めることができる．

偏波相関係数は複素数であるため，振幅と位相の情報で構成されていると考えることができる．たとえば，円偏波相関係数 γ_{LL-RR} の位相角 φ_{LL-RR} は散乱行列の成分を用いて次のように表すことができる．

$$\varphi_{LL-RR} = \tan^{-1} \frac{4 \operatorname{Re} \langle S_{HV}^* (S_{HH} - S_{VV}) \rangle}{\langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 - 4|S_{HV}|^2 \rangle} \quad (3.21)$$

この角度は **Reflection symmetry** を区分する意味のある値であり，この位相を利用して，斜面の傾きを検出する手法 [2] が知られている．

また，これらの偏波指標をターゲットの分類に用いることができる．森林領域に対して物理的・数学的な散乱電力の分解モデルが提案されている [3],[4]．この電力分解については，3.5 に詳述する．

3.4 固有値解析

covariance 行列, coherency 行列は 3 行 3 列の (半) 正定値エルミート行列である. そのため, 実数の固有値を持ち, 固有値・固有ベクトルによって展開が可能である. また, その固有値は前節でも述べたように電力に対応している. さらに, 各固有値に属する固有ベクトルは互いに直交し, 散乱メカニズムを表す. このような特徴に着目して, 集合平均した coherency 行列は固有値の数に応じて 3 つの成分による直交分解が可能であることが知られている [5], [6].

coherency 行列 $\langle [T] \rangle$ は次のように直交ユニタリ行列 $[U_3]$ によって対角化できる.

$$\begin{aligned} \langle [T] \rangle &= [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^\dagger \\ &= \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^\dagger \end{aligned} \tag{3.22}$$

ここで, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ であり, 直交ユニタリ行列 $[U_3]$ は

$$\begin{aligned} [U_3] &= [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3] \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 e^{j\delta_1} & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 e^{j\delta_2} & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 e^{j\delta_3} \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 e^{j\delta_1} & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 e^{j\delta_2} & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 e^{j\delta_3} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.23}$$

この統計モデルは Bernoulli process として表され, 散乱現象は確率 $P_i (i = 1, 2, 3)$ 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. これは, 3 つの独立した散乱現象の和を表している.

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (3.24)$$

この確率を用いエントロピー H ($0 \leq H \leq 1$), アルファ角 $\bar{\alpha}$ ($0 \leq \bar{\alpha} \leq \pi/2$) が定義されている.

$$H = \sum_{i=1}^3 -P_i \log_3 P_i \quad (3.25)$$

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i \quad (3.26)$$

これらのパラメータを用いて, ターゲットの分類が行われている. とくに Fig. 3.1 に示す H と $\bar{\alpha}$ を軸にとった図 ($H - \bar{\alpha}$ plane) により, 散乱過程を 9 つの領域 (zone) に分類することができる.

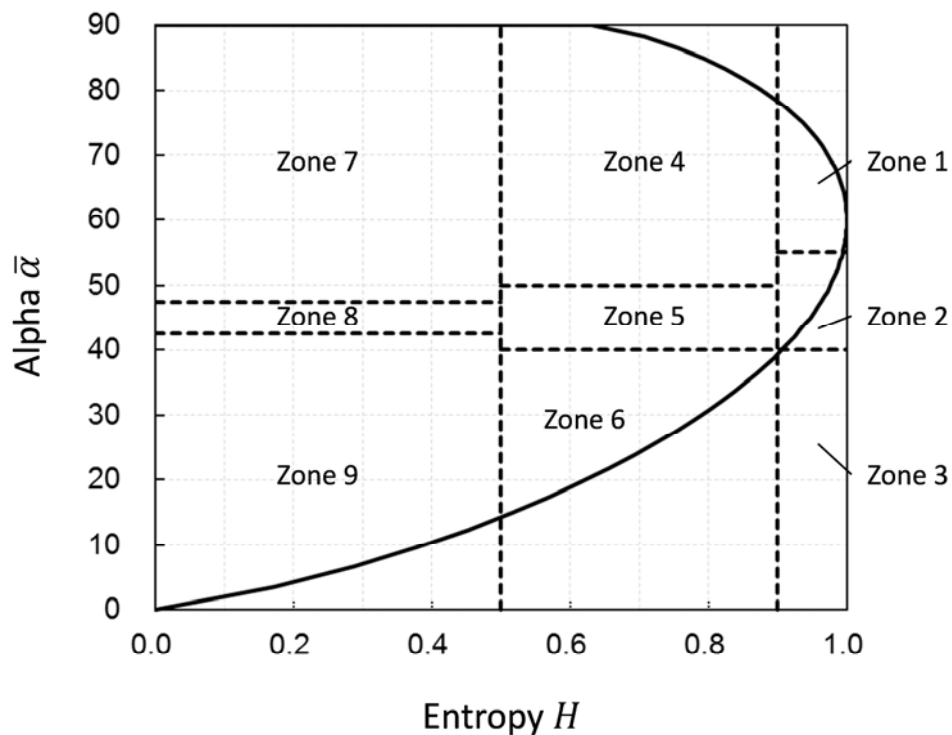


Fig. 3.1 The $H - \bar{\alpha}$ classification plane.

各領域には次のような名称が割り当てられている.

- Zone 9: Low Entropy Surface Scatter
- Zone 8: Low Entropy Dipole Scattering
- Zone 7: Low Entropy Multiple Scattering Events
- Zone 6: Medium Entropy Surface Scatter
- Zone 5: Medium Entropy Vegetation Scattering
- Zone 4: Medium Entropy Multiple Scattering
- Zone 3: High Entropy Surface Scatter
- Zone 2: High Entropy Vegetation Scattering
- Zone 1: High Entropy Multiple Scattering

たとえば, Zone 9 は Bragg 散乱や鏡面散乱に対応するため, 代表的なターゲットは水面や海氷などであり, Zone 5 には植生に覆われた地表面などが該当する. また, $\bar{\alpha}$ の大きい領域 (Zone 1, 4, 7) は二回反射散乱や多重散乱のメカニズムに対応しており, 森林や市街地等が含まれる. なお, Fig. 3.1 の曲線はパラメータ m ($0 \leq m \leq 1$) を用いて, coherency 行列 $[T]$ をそれぞれ,

$$[T]_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, 0 \leq m \leq 1 \quad (3.27)$$

$$[T]_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2m \end{bmatrix}, 0 \leq m \leq 0.5 \quad (3.28)$$

$$[T]_{II} = \begin{bmatrix} 2m - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, 0.5 \leq m \leq 1 \quad (3.29)$$

とした場合の H , $\bar{\alpha}$ のとり得る範囲の境界を示している. Fig. 3.1 では曲線の左側が H , $\bar{\alpha}$ のとり得る範囲である. すなわち, $H = 0$ では, $0 \leq \bar{\alpha} \leq \pi/2$ であるが, H が大きくなるにつれて $\bar{\alpha}$ のとり得る値の範囲は

狭まり、 $H = 1$ の場合には $\bar{\alpha}$ のとり得る値は $\bar{\alpha} = \pi/3$ の一点のみとなる。したがって、実際に H と $\bar{\alpha}$ がとり得る値の領域は Zone 3 を除く 8 つの領域である。

以上のように、 $H - \bar{\alpha}$ plane に基づくターゲットの分類が可能である。しかし、 H には $\lambda_2 \neq \lambda_3$ の場合に同じ H を与える λ_2, λ_3 が一意に定まらないという問題点がある。そこで、この問題を解決するため、Anisotropy A が導入された。

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (3.30)$$

この A によって、同じ H の値を与える固有値の組み合わせでも区別できるようになる。この 3 つのパラメータで構成される空間は $H/\bar{\alpha}/A$ space と呼ばれている。しかしながら、 A を導入しても H が小さい領域では、 A もノイズの影響を大きく受けるため、 $\lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$ の場合は同じターゲットとして認識してしまうことがある。そのような場合には、次のように定義される全電力 (Total Power) TP (3.31) を $H/\bar{\alpha}/A$ space の A に置き換えた $H/\bar{\alpha}/TP$ space を用いることが提案されている[7]。

$$TP = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \quad (3.31)$$

3.5 散乱モデルによる電力分解

前節で述べた固有値・固有ベクトルを用いた数学的な偏波行列の分解 (decomposition) と並んで、偏波行列を物理的な散乱メカニズムに対応した複数のモデル行列に分解する方法が提案されている。この方法を散乱電力分解 (scattering power decomposition) と呼ぶ。散乱電力分解法は Freeman and Durden [4] による 3 成分 (表面散乱, 二回反射散乱, 体積散乱) の散乱電力分解に始まり, Yamaguchi *et al.* [8] によって 4 つめの成分 (Helix 散乱) が加えられた。この Helix 散乱成分を考慮することにより, reflection symmetry が成り立たないような人工構造物等のターゲットなどを正しく分類することが可能になった。さらに, Yamaguchi *et al.* [9] では orientation angle compensation [10]-[12] が導入された。これにより, coherency 行列 (または, covariance 行列) に含まれる独立なパラメータは 9 つから 8 つに減少し, そのうち 6 つのパラメータ (6/8) を考慮することができるようになった。結果として, レーダに対して斜めに配列している市街地等で発生する体積散乱成分が補正され, 本来の散乱メカニズムである 2 回反射成分が卓越するターゲットとして区分できるようになるなど, 分類精度が大きく向上した。その後も, すべてのパラメータを利用する四成分電力分解法 [13], 固有値・固有ベクトル解析を組み合わせる負の電力に関する問題点に対応した電力分解法 [14], [15] などのいくつかのモデル分解法が提案されているが, 本研究では対象地域・ターゲットの特性, および本研究の目的を踏まえ, Yamaguchi *et al.* [9] の方法を主に扱う。

3.5.1 散乱電力分解の原理

Freeman and Durden [4] により三成分散乱モデル電力分解が提案される以前にも、PolSAR 画像を分類する手法は存在していたが、ground truth に基づく多くのパラメータをインプットとして必要とする点に課題があった。また、数学的な手法によって得られる分解・分類結果の多くは物理的な散乱現象に結び付けづらく、直感的な理解が困難なものであった。このような問題を解決するため、物理的な散乱モデルにフィットした電力分解が考案された。[4] では、canopy (volume) scattering (体積散乱) は次のようにモデル化されている。

$$\begin{cases} \langle |S_{HH}|^2 \rangle = \langle |S_{VV}|^2 \rangle = 1 \\ \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle = \langle |S_{HV}|^2 \rangle = 1/3 \\ \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle = 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

また、double-bounce scattering (2 回反射散乱) は次のように VV 成分で正規化した形でモデル化され、

$$\begin{cases} \langle |S_{HH}|^2 \rangle = |\alpha|^2, & \langle |S_{HH}|^2 \rangle = 1 \\ \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle = \alpha, & \langle |S_{HV}|^2 \rangle = 0 \\ \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle = 0 \\ \alpha = e^{j2(\gamma_H - \gamma_V)}(R_{gH}R_{tH}/R_{gV}R_{tV}) \end{cases} \quad (3.33)$$

さらに、surface scattering (表面散乱) は一次 Bragg 散乱モデルとして、

$$\begin{cases} \langle |S_{HH}|^2 \rangle = |\beta|^2, & \langle |S_{HH}|^2 \rangle = 1 \\ \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle = \beta, & \langle |S_{HV}|^2 \rangle = 0 \\ \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle = 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

とモデル化される。これらを足し合わせることにより、以下の関係が成り立つ。

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle |S_{HH}|^2 \rangle = f_s |\beta|^2 + f_d |\alpha|^2 + f_v \\ \langle |S_{VV}|^2 \rangle = f_s + f_d + f_v \\ \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle = f_s \beta + f_d \alpha + \frac{f_v}{3} \\ \langle |S_{HV}|^2 \rangle = \frac{f_v}{3} \\ \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle = 0 \end{array} \right. \quad (3.35)$$

ここで、 f_s, f_d, f_v はそれぞれ、表面散乱、2 回反射散乱、体積散乱の VV 成分に対する寄与を表す係数である。4 つの方程式に対して、5 つの未知数が含まれる。そこで、 $Re(S_{HH} S_{VV}^*)$ の符号が正の場合は、表面散乱が卓越すると仮定して $\alpha = -1$ とおき、負の場合は 2 回反射散乱が卓越すると仮定して $\beta = 1$ とする。これにより、全電力と各散乱成分の関係は次のように表される。

$$\begin{aligned} TP &= P_s + P_d + P_v = \langle |S_{HH}|^2 \rangle + 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle \\ \text{where } \begin{cases} P_s &= f_s(1 + |\beta|^2) \\ P_d &= f_d(1 + |\alpha|^2) \\ P_v &= 8f_v/3 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.5.2 回転化 coherency 行列による四成分散乱電力分解

三成分散乱モデル電力分解 [4] では、自然ターゲットを対象とし、**reflection symmetry** を仮定している。そのため、市街地など人工構造物に対して電力分解を適用すると、必ずしも正しい結果が得られないという問題があった。そのため、4 つめの成分として **Helix** 散乱成分を加えて、**reflection symmetry** の制限を取り払った四成分散乱モデル電力分解 [8] が提案された。しかし、この四成分散乱モデル電力分解を用いても、レー

ダと建物が正対していないような条件，たとえば，レーダの進行方向に対して斜めに配列した市街地等においては，HV 成分が多く発生するため，結果として 2 回反射散乱に分類されるべき市街地（建物）が本来は植生を表すはずの体積散乱に分類されてしまうという問題があった．この問題を解決するために，電力分解を行う前に，偏波行列の回転により HV 成分を最小化する方法が検討された [9]．この HV 最小化は，orientation angle compensation と等価であり，PolSAR データの解析の前処理，データ補正として重要な操作であることが Lee *et al.* [10] などによって明らかとなっている．なお，はじめの四成分散乱モデル電力分解 [8] は，偏波行列として covariance 行列を分解するものであったが，[9] においては，HV 最小化，すなわち偏波行列の回転という操作を行う上で有利な coherency 行列が用いられる．

coherency 行列の回転操作は次のように行われる．まず，回転前の coherency 行列 $\langle [T] \rangle$ を次のようにおく．

$$\langle [T] \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

ここで，Fig. 3.2 で示す観測ジオメトリを想定する．coherency 行列 $\langle [T] \rangle$ を電波の入射方向 (slant range) を軸 (Fig. 3.2 の I_1) 周りに，azimuth 方向の軸 I_2 と 3 つめの軸 I_3 (I_1, I_2 と直交) で構成される平面上で回転する．このとき，回転された coherency 行列 $\langle [T(\theta)] \rangle$ は次のように表すことができる．

$$[T(\theta)] = [R_p(\theta)][T][R_p(\theta)]^\dagger \quad (3.38)$$

ただし, $[R_p(\theta)]$ は

$$[R_p(\theta)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

であり, 回転角 θ は次のように求められる.

$$2\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\operatorname{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} \right) \quad (3.40)$$

この角度 θ は Fig. 3.2 で示す観測ジオメトリにおいて, 地表面の azimuth 方向の傾斜角 $\tan \omega$, 同じく地表面の ground range 方向の傾斜角 $\tan \gamma$, およびレーダの入射角 ϕ によって, (3.31)のように表される角度と同じである.

$$\tan \theta = \frac{\tan \omega}{-\tan \gamma \cos \phi + \sin \phi} \quad (3.41)$$

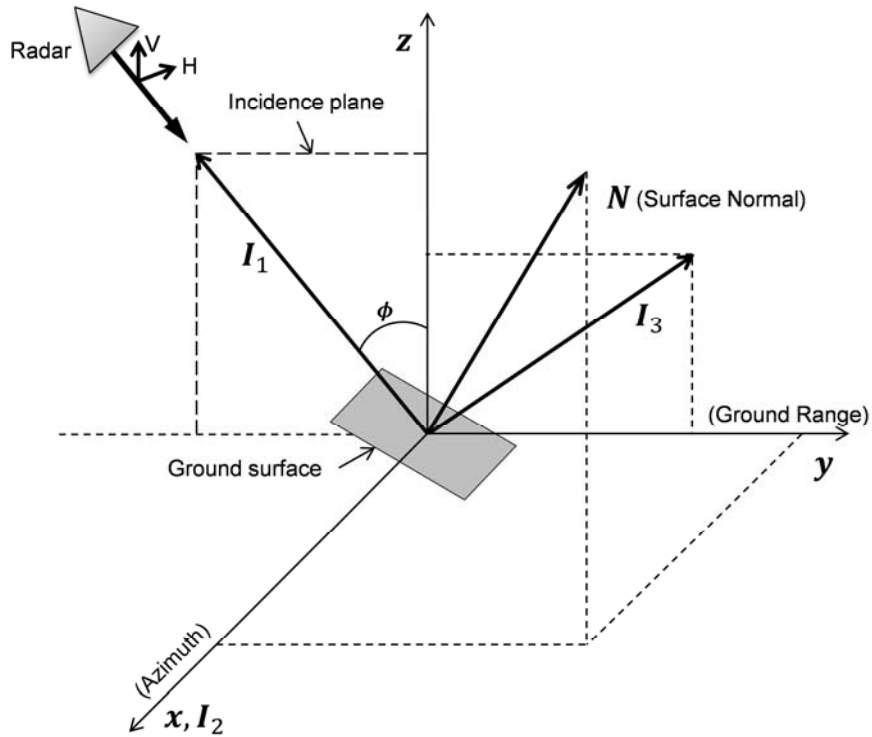


Fig. 3.2 Schematic diagram of the radar observation geometry

この回転化 coherency 行列をインプットとして，四成分散乱モデル電力分解 [8] と同様のアルゴリズムにより，4つの散乱電力に分解できる．

$$\begin{aligned} \langle [T(\theta)] \rangle = & f_s [T(\theta)]_{surface} + f_d [T(\theta)]_{double-bounce} \\ & + f_v [T(\theta)]_{volume} + f_c [T(\theta)]_{helix} \end{aligned} \quad (3.42)$$

回転化 coherency 行列を用いた四成分散乱モデル電力分解 [9] では，“傾いた”市街地なども2回反射成分が卓越する領域として正しく分類できることが確かめられている．前述のとおり，その後も解析の対象に応じて，いくつかの電力分解アルゴリズム（たとえば，[13]，[14]，[15]など）が提案され続けている．したがって，複数ある電力分解アルゴリズムから，対象や明らかにしたい事柄を考慮して，適切なアルゴリズムを選択することが重要である．

本研究で対象とする現象は自然ターゲットであるため，自然ターゲットを想定してモデル構築がなされた三成分散乱モデル電力分解 [4] を用いることも 1 つの選択肢となり得るが，本研究では，レーダと斜面との 3 次元的位置関係に着目するため，不要な交差成分を抑制するアルゴリズムが適していると考えられる．そのため，三成分散乱モデル電力分解やオリジナルの四成分散乱モデル電力分解 [8] ではなく，**orientation angle compensation** を考慮した回転化 **coherency** 行列を用いた四成分散乱モデル電力分解 [9] を採用することとした．

3.6 結語

本章では、PolSAR システムを用いて取得される散乱行列からはじめ、その二次統計量を用いる偏波行列のうち、広く利用されている **covariance** 行列と **coherency** 行列について述べた。また、偏波行列から有用な情報を抽出する手法として、偏波行列の固有値・固有ベクトルを利用する分解法、および物理的な散乱モデルにフィットさせる散乱モデル電力分解法を概観した。さらに、本研究で主に扱う解析手法を検討し、散乱モデル電力分解法のうち、回転化 **coherency** 行列による四成分散乱モデル電力分解を採用することとした。

文 献

- [1] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized radar waves," in *Proc. of IRE*, vol. 38, pp.148-151, 1950.
- [2] D. L. Schuler, J.-S. Lee, and G. D. Grandi, "Measurement of topography using polarimetric SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 5, pp.1266-1277, Sep. 1996.
- [3] J. J. van Zyl, "Unsupervised classification of scattering mechanisms using radar polarimetry data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 27, no. 1, pp.36-45, Jan. 1989.
- [4] A. Freeman and S. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp.963-973, May 1998.
- [5] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorem in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp.498-518, Mar. 1996.
- [6] 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.
- [7] K. Kimura, Y. Yamaguchi and H. Yamada, "Unsupervised land classification using H/alpha/TP space applied to POLSAR image analysis," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E87-B, no. 6, pp.1639-1647, Jun. 2004.
- [8] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, "Fourcomponent scattering model for polarimetric SAR image decomposition," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 8, pp. 1699-1706, Aug. 2005.
- [9] Y. Yamaguchi, A. Sato, W. M. Boerner, R. Sato, and H. Yamada, "Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 6, pp. 2251-2258, Jun. 2011.
- [10] J.-S. Lee, D. L. Schler, and T. L. Ainsworth, "Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 5, pp. 2153-2163, Sep. 2000.
- [11] J.-S. Lee, D. L. Schler, T. L. Ainsworth, E. Krogager, D. Kasilingam, and W.-M. Boerner, "On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 1, pp. 30-41, Jan. 2002.
- [12] J.-S. Lee and T. L. Ainsworth, "The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decompositions," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 1, pp. 53-64, Jan. 2011.
- [13] G. Singh, Y. Yamaguchi, O. Shimotoso, and S.-E. Park, "General four-component scattering

power decomposition with unitary transformation of coherency matrix,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 5, pp.3014–3022, May 2013.

- [14] M. Arii, J. J. van Zyl, and Y. Kim, “Adaptive model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 3, pp.1104–1113, Mar. 2011.
- [15] Y. Cui, Y. Yamaguchi, J. Yang, H. Kobayashi, S.-E. Park, and G. Singh, “On the complete model-based decomposition of SAR coherency matrix data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 4, pp.1991–2001, Apr. 2014.

4. 土砂災害調査における偏波合成開口レーダ利用の 現状と課題

4.1 概説

PolSAR データは幅広い分野で利活用が進んでいる。災害監視も PolSAR データの利用分野の 1 つである。

そこで、本章では、土砂災害箇所検出における PolSAR 利用の現状および課題を整理し、本研究で取り扱う問題を明らかにする。

4.2 土砂災害等の調査におけるリモートセンシングの研究 事例

土砂災害 (landslide) の調査には空中写真をはじめとして、高分解能の光学衛星画像、LiDAR (light detection and ranging) などさまざまなリモートセンシング技術が用いられている [1]。SAR も土砂災害の調査に有効なリモートセンシングの 1 つであり、とくに干渉 SAR (SAR interferometry; InSAR)、差分干渉 SAR (differential InSAR; DInSAR) は地すべりの微細な変動を面的に捉えられる技術として注目されている。しかしながら、[1] において PolSAR に関する事例は 1 件 [8] が取り上げられているのみであり、当該分野における PolSAR の研究事例は限られたものであることが推

察される。前章で述べたとおり、PolSAR データの解析結果からは散乱メカニズムに関する情報が得られるため、地上のターゲットの識別、地被状況の分類等が可能であり、土砂災害の検出等のための有望なリモートセンシング技術の 1 つである。次節では、土砂災害等の調査において PolSAR が利用されている研究事例を示す。

4.3 土砂災害等の調査における偏波合成開口レーダ利用の 現状

ここでは、文献 [2]-[8] に基づいて、地すべり等の土砂災害の調査における PolSAR を利用した研究事例の概要を示す。

4.3.1 偏波相関係数を利用した土砂災害の検出事例

Shimada *et al.* [2] では、Pi-SAR-L2 と 2 つの衛星搭載型 SAR (TerraSAR-X, CosmoSky-Med) で観測された PolSAR データを用いて土砂災害の形態の 1 つである深層崩壊の検出を試みている。対象地は紀伊半島に位置する奈良県五條市と同県吉野郡の各村にまたがる地域である。同地域では、2011 年 (平成 23 年) の 9 月、台風第 12 号 (Talas) によってもたらされた降雨により、多数の深層崩壊 (土砂災害の形態の 1 つ) が発生した (紀伊半島大水害)。この深層崩壊が多発・集中した地域を対象として、航空機や地球観測衛星に搭載された SAR による観測が行われた。[2] では上述の各 SAR システムによって観測された PolSAR データを使って、Table 4.1 に示す 5 種類の解析画像・偏波指標を作成している。

Table 4.1 Comparative parameters [2]

Parameters	Contents
Color composites	HH-HV-VV for R-G-B and visual interpretation
Correlation	Correlation of the HH-VV, HH-HV, HV-VH
Freeman decomposition	Decompose into the surface, double bounce, and volume scatterings
Entropy Alpha	Randomness and the phase of the scattering target
Power ratio	HH/HV, HH/VV, VV/HV

これらのうち，Pi-SAR-L2 (L-band) の PolSAR データについては，Entropy, HH と VV の偏波相関係数 $\text{Coh}(\text{HH-VV})$, HV と VH の偏波相関係数 $\text{Coh}(\text{HV-VH})$, 偏波比 (HH/HV), 三成分散乱モデル電力分解の体積散乱成分の 5 つについて，土砂災害箇所との対応状況を調べている．また，2つの X-band SAR の PolSAR データについては， $\text{Coh}(\text{HH-VV})$ を採用して，各偏波指標の感度分析を行っている．その際，感度を示す指標 R を次のように定義している．

$$R = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (4.1)$$

ここに， μ_1, μ_2 はそれぞれ森林，深層崩壊における各指標の平均値， σ_1, σ_2 はそれぞれ森林，深層崩壊における各指標の標準偏差であり， R の値が大きいくほど森林と深層崩壊を分離（区分）することが容易となる．その結果，X-band より L-band のほうが感度は高く，また，L-band に適用

した指標のうちでは, Entropy, Coh(HH-VV), および HH/HV が比較的大きな R の値を示したことが報告されている.

本事例では, 局所入射角 (local incidence angle) が小さい場合 (20°– 30°) のほうが大きい入射角 (80°– 90°) よりも感度がよくなることが示唆されているが, L-band と X-band の比較や各種指標の感度の比較を主に扱っているため, 局所入射角依存性についての詳細は言及されていない.

4.3.2 固有値解析による土砂災害の検出事例

地震によって引き起こされた大規模な地すべりを PolSAR で観測した事例がある。1999 年 9 月 21 日、台湾中部の南投県集集鎮付近を震源とする地震（集集地震；Chi-Chi earthquake）が発生した。この地震の本震と余震によって、およそ 10,000 の崩壊・地すべりが発生した [3]。そのうち最も大きな地すべりは Tsaoling（草嶺）地すべりと呼ばれている。Czuchlewski *et al.* [4] は、NASA/JPL の AIRSAR によって取得された L-band PolSAR データに固有値解析を適用し、 $H - \bar{\alpha}$ plane で Tsaoling（草嶺）地すべりの周辺における森林、（地すべりの）発生域、土砂の堆積域の分類に利用している。また、森林などの植生を表す指標として、radar vegetation index V と pedestal height Φ を導入し、 $V > 0.6, \Phi > 0.15, \text{ and } H > 0.8$ となる箇所が森林とよく対応することを示している。 V は次のように定義される。

$$V = \frac{8\sigma_{hvhv}}{\sigma_t} \quad (4.2)$$

ここで、 σ_{hvhv} は HV 成分の正規化レーダ断面積（radar cross section; RCS）であり、 σ_t は全電力を表している。また、 Φ は covariance 行列の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ を用いて次のように定義される。

$$\Phi = \frac{\min(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} \quad (4.3)$$

この事例でも入射角に関する検討はなされていない。単一の大規模な地すべりを対象としており異なる入射角の条件を比較できないためであるこ

と、また、固有値解析は偏波基底に依らない回転不変量を扱うためと考えられる。

4.3.3 散乱モデル電力分解による土砂災害の検出事例

(1) 2004 年新潟県中越地震

2004 年 10 月に発生した新潟県中越地震の被災地を対象として、PolSAR データを用いてその被災状況等を調査した事例 [5] がある。この事例では、X-band と L-band の SAR を搭載した Pi-SAR による観測データを用いている。四成分散乱モデル電力分解を X-band と L-band の PolSAR データに適用している。電力分解を行った結果として得られた表面散乱電力 P_s , 2 回反射散乱電力 P_d , 体積散乱電力 P_v , および Helix 散乱電力 P_c のうち、 P_s, P_d, P_v をそれぞれ青 (B), 赤 (R), および緑 (G) に割り当てた RGB カラー合成画像として表示すると、地すべり等の発生していない森林の画像 (画素) は緑に見えるのに対し、土砂災害 (斜面崩壊, 地すべり) やその他の裸地は青に見えることが現地調査を通じて明らかにされた。これは、森林においては他の成分と比較して P_v が強く発生すること、また、裸地においては P_s が卓越することによる。画素ごとの各散乱電力の全電力に対する割合として、正規化散乱電力 p_x を次のように定義する。

$$p_x = \frac{P_x}{P_s + P_d + P_v + P_c} = \frac{P_x}{Total\ Power} \quad (4.4)$$

ここで、 P_x は求めたい成分の散乱電力であり、たとえば、表面散乱成分の割合を求めたい場合には、 P_s を代入して表面散乱成分の正規化散乱電力 p_s を得る。前述の電力分解結果をもとに表面散乱成分の正規化散乱電力 p_s

を求めると、L-band, X-band とともに $p_s > 0.6$ となる箇所（画素）が地すべり等による裸地によく対応することが現地調査に基づくグランドトゥールースとともに示されている。

なお、本事例においても、入射角の影響はとくに検討されていない。

(2) 2008 年岩手・宮城内陸地震

PolSAR データを用いて 2008 年 6 月に発生した岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害を検出した事例として、[2]-[6], [8] および [参 1], [参 2] などがある。

Shibayama and Yamaguchi [参 1], [参 2] は災害発生前（2006 年 5 月 19 日）と災害後（2008 年 8 月 24 日）に ALOS/PALSAR によって観測された PolSAR データを用いて、とくに栗駒山の南西に位置する麿香熊沢における崩壊に着目して、災害前後の散乱電力の変化を求めている。麿香熊沢周辺の電力分解結果を Fig. 4.1 に示す。災害前の状態と比べ、災害後には白枠で囲まれた領域で表面散乱を示す青いピクセルが現れていることがわかる。また、Fig. 4.1 の断面 A における各散乱電力のプロファイルは Fig. 4.2 のとおりである。表面散乱、および体積散乱成分 p_s, p_v は森林の領域において災害前後で大きな変化は見られないが、表層崩壊の箇所では大きく変動したことがわかる。表面散乱のピークは $p_s \cong 0.6$ であり、事例 [5] とほぼ同じ値となっている。

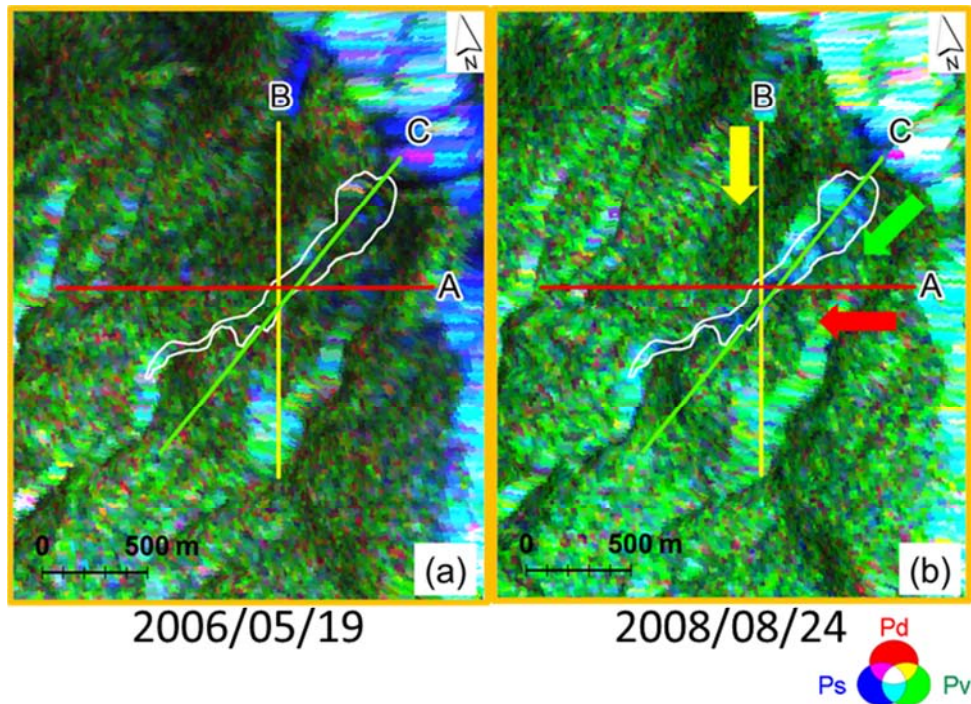


Fig. 4.1 Decomposition results of Jakoukuma-sawa ([参 2], modified).

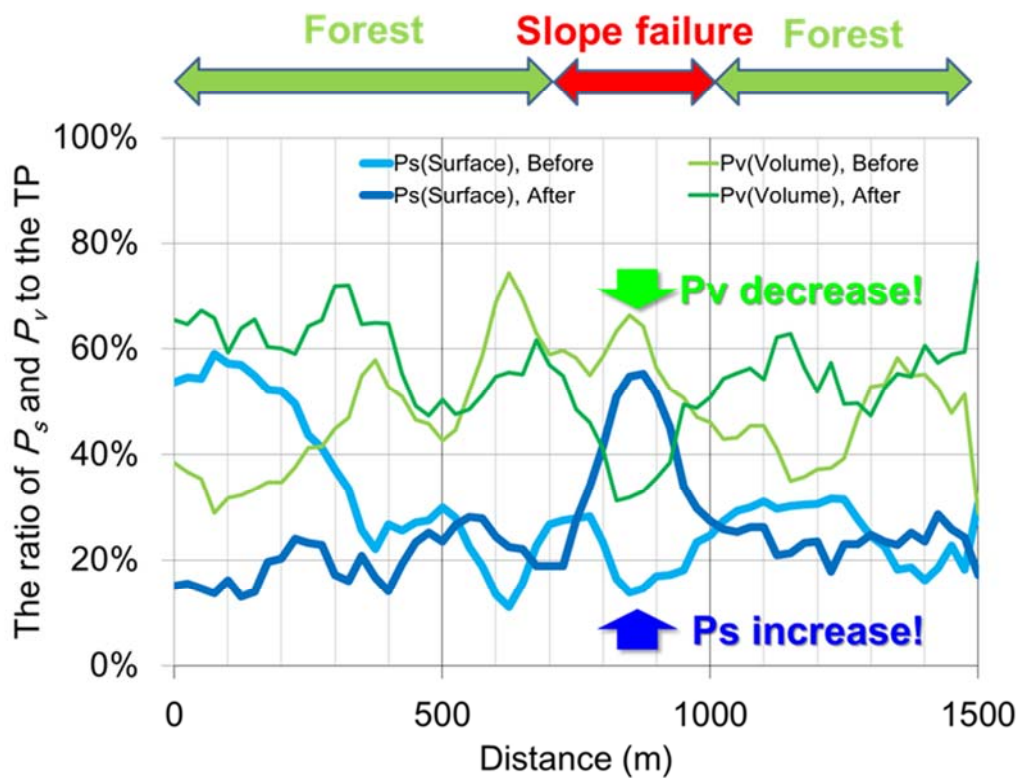


Fig. 4.2 Profile of scattering power P_s and P_v along cross-section A in Fig. 4.1 ([参 2], modified).

また, Watanabe *et al.* [6] は, ALOS/PALSAR によって観測された地震発生前後の PolSAR データに三成分および四成分散乱モデル電力分解を適用した. その結果, P_s, P_d, P_v をカラー合成した画像で, 地震発生前には P_v が卓越していた箇所のうち, 地震発生後に P_s が卓越するように変化した箇所が地すべりによって裸地化した箇所に対応することを示している. また, 対象地域内のドゾウ沢で発生した土石流 (土砂災害の形態の 1 つ) により裸地化した範囲で, 各正規化散乱電力 p_x の値が Table 4.2 のように変化したと報告している.

Table 4.2 Changes of the normalized scattering powers derived from three-component scattering power decomposition ([6], modified).

Acquisition	p_s	p_d	p_v
Before Earthquake	0.043	0.031	0.927
After Earthquake	0.438	0.039	0.523

また, 地震後の土砂災害によって裸地化した他の 2 領域においても, p_s はそれぞれ 0.349, 0.463 となり, これらは豪雨による土砂災害の事例 [7] における p_s の値 ($0.14 \leq p_s \leq 0.38$) と近い値であるとしている. 新潟県中越地震の事例 [5] と比べると p_s の値はやや小さいが, 土砂災害によって裸地化した箇所では p_s が比較的大きな値をとることがわかる. これらの結果を利用して, 画像全体から土砂災害の検出を試みている. 土砂災害箇所候補の条件は次のとおりである.

$$\begin{cases} p_s \geq 0.1 \\ p_d \leq 0.1 \\ p_v \leq 0.65 \end{cases} \quad (4.5)$$

この条件を満たすピクセルに 1, 満たさないピクセルに 0 を割り当て, 11 × 11 ピクセルのウィンドウ内での密度計算を行い, 密度が 0.7 以上となる領域を土砂災害箇所候補としている. さらに, VH 偏波の後方散乱係数 σ_{VH}^0 と地表面の roughness および土壌の比誘電率 (dielectric constant) の関係式

$$\sigma_{VH}^0 = 0.11M_v^{0.7}(\cos\theta)^{2.2}[1 - \exp(-1.32(s_k)^{1.8})] \quad (4.6)$$

を用いた検出精度向上を検討している. ここに, M_v は土壌水分量, θ は入射角, s は surface roughness 高さの二乗平均平方根 (root mean square; RMS), k は波数 (wave number) である. 水面と土砂災害で σ_{VH}^0 を計測し, $\sigma_{VH}^0 > -17 \text{ dB}$ を閾値として(4.5)により検出した土砂災害候補から, この条件を満たすピクセルの絞り込みを行い, 実際に土砂災害が発生した箇所が抽出された.

この事例においても, (4.6) には入射角が含まれているが, 土砂災害の検出条件は画像全体で(4.5)の条件を一律に適用しており, 個々の土砂災害(崩壊, 地すべり)における局所入射角は考慮されていない.

同じく岩手・宮城内陸地震を対象とした ALOS/PALSAR の PolSAR データを利用した研究事例として, Yonezawa *et al.* [8] があり, 地震前後の観測データのほか, 異なる軌道 (descending, ascending) から観測されたデータの比較を行っている. また, 解析手法として, 三成分散乱モデル電力分解と固有値解析の両方を検討している. 固有値解析に関しては, [4] の

結果と同様に、 $H - \bar{\alpha}$ plane で、土砂災害や耕作地等の裸地の H , $\bar{\alpha}$ の値が森林と比較して小さく、また、水面や積雪と比較すると両者が大きいという特徴により、土砂災害箇所や耕作地等が検出できるとしている。三成分散乱モデル電力分解に関しては、対象地に含まれる 2 つの領域 (A: ドゾウ沢, B: 産女川^{うぶすめ}) で地震前後および Ascending と Descending 軌道から観測データに対して、各成分の散乱電力がどのように変化したのかを示している。その結果をまとめたものが Table 4.3 である。なお、原文では、表中の値は百分率で示されているが、ここでは正規化散乱電力 p_x の値に書き換えた。また、軌道の項目を追加している。

Table 4.3 Percentage of dominant scattering mechanism in areas associated with landslides following the 14 June 2008 Earthquake ([8], modified)

Acquisition date	Orbit	A: Dozou-sawa			B: Ubusume-gawa		
		p_s	p_d	p_v	p_s	p_d	p_v
19 May 2006	Descending	0.138	0.045	0.817	0.141	0.050	0.810
24 Aug. 2008	Descending	0.328	0.037	0.635	0.286	0.046	0.669
9 Oct. 2008	Descending	0.319	0.049	0.632	0.288	0.052	0.660
24 Nov. 2008	Descending	0.300	0.041	0.659	0.287	0.043	0.670
4 Jun. 2009	Ascending	0.246	0.062	0.692	0.165	0.048	0.787

地すべりおよび土石流によって裸地化した箇所で p_v が減少し、 p_s が増加すること、また、裸地では $p_s \cong 0.3$ と比較的高い値を示しており、[6]の結果とも整合している。Descending と Ascending を比較すると、

Ascending で p_s の値が小さく（または p_v の値が大きく）なっているが、この理由が明確には [8] では言及されていない。ドゾウ沢、産女川ともに軌道（azimuth）方向に対して、垂直の方向、すなわち range 方向に傾斜をもった谷地形となっている。そのため、Descending と Ascending で局所入射角を比較すると、Ascending のほうが局所入射角は大きくなっていると推測される。このことから、軌道（観測方向）の違いによる散乱電力の変化は、入射角の違いが1つの要因であることが推察される。

4.4 偏波合成開口レーダによる土砂災害箇所検出の課題

前節では、PolSAR による土砂災害検出に関する調査・研究事例の概要を述べた。これらの事例から、土砂災害によって裸地化した箇所（その他の裸地、たとえば耕作地や河床なども含まれる）において、以下に示すような知見が得られている。

- HH 偏波と VV 偏波の相関の高い（偏波相関係数の値が大きい）
- 比較的強い表面散乱が発生する
- 土砂災害前後の PolSAR データが存在する場合、土砂災害によって森林が裸地となった箇所では、体積散乱に代わって、表面散乱が卓越する変化が起きる

裸地（作付けされていない耕作地）において HH 偏波と VV 偏波の複素相関係数 γ_{HH-VV} が大きな値をとることは、[9] でも示されているとおりである。 γ_{HH-VV} が大きな値をとるためには、HH と VV の位相が揃っている（同相）か、または、逆相に近い状態であることを示している。同相に近い状態であれば、その散乱メカニズムは表面散乱（一次 Bragg 散乱）であるため、土砂災害によって裸地化した箇所で強い表面散乱が発生することと整合する。

一方、既往の事例では明らかとなっていない事項として、以下のような点が挙げられる。

- 局所入射角によって散乱電力（正規化散乱電力）がどのように変化するか

土砂災害による裸地で表面散乱が発生することは上記の事例などから明らかであるが、いずれの事例においても局所入射角との関係は十分に検討されていない。しかし、表面散乱を仮定すると、その後方散乱強度は入射角が小さい場合にはより大きく、反対に入射角が大きい場合にはより小さくなることが予想される。そのため、起伏に富んだ山間地で発生する土砂災害を検出するには、個々の斜面における局所入射角を考慮して、電力分解により得られた散乱電力（正規化散乱電力）を評価することが重要になる。

このような散乱電力の局所入射角依存性を明らかにすることは、PolSARによる土砂災害箇所検出の精度向上につながると考えられる。

4.5 結語

本章では，土砂災害の調査に着目し，当該分野におけるリモートセンシングの利用状況，PolSAR の利用状況を述べた．

PolSAR による土砂災害箇所を検出等に関する調査・研究は既に行われており，散乱モデル電力分解における表面散乱成分が，土砂災害によって形成された裸地によく対応することがわかってきた．しかしながら，どの程度の強さ（または，全電力に対する割合）の表面散乱電力が土砂災害に対応するのかといった定量的な分析は必ずしも十分ではない．表面散乱が発生するような単純な形状のターゲットの場合，レーダと正対している場合には強い後方散乱が得られるが，斜めになっているとその強さは変化すると考えられる．そこで，本研究では，土砂災害箇所における散乱電力の入射角依存性を明らかにし，PolSAR データによる土砂災害検出の精度向上に貢献する知見を得ることを目的とする．

文 献

- [1] M. Scaioni, L. Longoni, V. Melillo, and M. Papini, “Remote sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives,” *Remote Sens.*, vol. 6, no. 10, pp. 9600–9652, 2014.
- [2] M. Shimada, M. Watanabe, N. Kawano, M. Ohki, T. Motooka and Y. Wada, “Detecting mountainous landslides by SAR polarimetry: A comparative study using Pi-SAR-L2 and X-band SARs,” *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, vol. 12, no. ists29, pp. Pn_9-Pn_15, 2014.
- [3] J.-J. Hung, “Chi-Chi earthquake induced landslides in Taiwan,” *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, vol. 2, no. 2, pp. 25–33, Sep. 2000.
- [4] K. R. Czuchlewski, J. K. Weissel, and Y. Kim, “Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan,” *J. Geophys. Res.*, vol. 108, no. F1, pp. 7-1–7-11, 2003.
- [5] Y. Yamaguchi, Y. Yajima, H. Yamada, S. Uratsuka, T. Umehara, and T. Moriyama, “X- and L-band Pi-SAR observations to Chuetsu Earthquake region, Japan,” in *Proc. of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Dresden, Germany, May 2006.
- [6] M. Watanabe, C. Yonezawa, J. Iisaka, and M. Sato, “ALOS/PALSAR full polarimetric observations of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake of 2008,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 33, pp. 1234–1245, 2012.
- [7] M. Watanabe, M. Shimada, T. Moriyama, and T. Tadono, “An detectability of debris flow by using PALSAR and Pi-SAR (L-band) data (in Japanese),” *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, vol. 27, no. 4, pp. 386–393, 2007.
- [8] C. Yonezawa, M. Watanabe, and G. Saito, “Polarimetric decomposition analysis of ALOS-PALSAR observation data before and after a landslide event,” *Remote Sens.*, vol. 4, pp. 2314–2328, 2012.
- [9] F. Mattia, T. L. Toan, J. –C. Souyris, G. De Carolis, N. Floury, F. Posa, and G. Pasquariello, “The effect of surface roughness on multifrequency polarimetric SAR data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 4, pp. 954–966, 1997.

参考論文

[参1] T. Shibayama, Y. Yamaguchi, “An application of polarimetric radar analysis on geophysical phenomena,” in *Proc. of 2013 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2013)*, Melbourne, VC, Australia, 21–26 July 2013.

[参2] T. Shibayama, Y. Yamaguchi, “A landslide detection based on the change of scattering power components between multi-temporal POLSAR data,” in *Proc. of 2014 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2014)*, Quebec, QC, Canada, 13–18 July 2014.

5. 土砂災害箇所における偏波散乱特性

5.1 概説

本章では、PolSAR データを用いた土砂災害検出の精度向上を念頭に、実際に土砂災害が発生した地域を対象として観測された PolSAR データの解析によって、土砂災害箇所の偏波散乱特性を明らかにする。そして、土砂災害箇所の検出における適切な閾値の設定について、土砂災害箇所の偏波散乱特性に基づいて考察するとともに、より精度の高い土砂災害箇所検出アルゴリズムを提案する。

5.2 対象地域と使用データの諸元

5.2.1 対象地域

前章で述べたように、本研究の目的は、土砂災害箇所における散乱電力の入射角依存性を明らかにし、PolSAR データによる土砂災害検出の精度向上に貢献する知見を得ることである。そのため、以下の条件を満たす地域として、対象地域を 2011 年に台風 12 号のもたらした豪雨によって甚大な被害が生じた紀伊半島のうち、奈良県五條市および吉野郡十津川村を含む奈良県南部地域とした。

- 土砂災害が（集中的に）発生した地域であること

- PolSAR システムにより異なる方向から観測されていること
- 土砂災害の位置などのグランドトゥルースが存在していること

対象地域（奈良県内）では、2011 年の台風 12 号 (Talus) による豪雨のため、崩壊面積 10,000 m² 以上の深層崩壊が 54 箇所が発生したことが確認されている [1] . そのうち、崩壊面積で上位 5 位までの崩壊の所在地と面積を Table 5.1 に示す.

Table 5.1 Largest deep-seated landslides in the study area ([1], modified)

Location	Area (m ²)
Kuridaira, Totsukawa, Nara	355,260
Akatani, Gojo, Nara	293,840
Shimizu, Gojo, Nara	245,830
Nojiri, Totsukawa, Nara	188,230
Nagatono, Totsukawa, Nara	183,050

5.2.1 使用データの諸元

使用した PolSAR データは Table 5.2 に示すとおりである. いずれも災害発生後に観測されたものであり、もっとも新しいデータは災害発生から約 3 年後のデータである. 小規模な土砂災害の場合、時間の経過とともに植生が侵入し、裸地化した箇所が植生（おもに草本）に覆われてしまう場合があるが、本研究で対象とする深層崩壊においては、3 年経過後も裸地が明瞭に存在することが光学衛星画像などから確認されている.

Table 5.2 Description of the PolSAR data. The angles of the azimuth (or flight) and range (or illumination) direction are defined as the angles from the north in the clock-wise direction ([参 1], modified).

	Scene ID	Acquisition Date	Azimuth Direction (°)	Range Direction (°)	Pixel Spacing Azimuth, Range (m)
PALSAR-2 Descending (Dsc.)	ALOS2013902890	26 August 2014	195	105	3, 5
PALSAR-2 Ascending (Asc.)	ALOS2014120670	27 August 2014	354	79	
Pi-SAR-L2 Nara	L200501	18 June 2012	270	180	0.5, 1.7
Pi-SAR-L2 Yoshino	L204006	8 August 2014	225	135	

Table 5.2 に示した range direction の角度は、真北を 0°として、時計回りに計った角度を表しており、たとえば、Pi-SAR-L2 Nara (L200501) の 180° とは、真北から真南に向けて電波が照射されたことを表している。同様に、90° であれば、真西から真東にむけて電波が照射されたことを表すため、PALSAR-2 の 2 シーン (range direction: 105°, 79°) はいずれもほぼ西から東に向けて電波が照射されたことを表しているが、両者の間には 26° の違いがある。また、Pi-SAR-L2 Yoshino (L204006) は北西から南東に向けて電波が照射されており、他のデータと方向が大きく異なることがわかる。各データの観測範囲と深層崩壊箇所の位置図を Fig. 5.1 に示す。

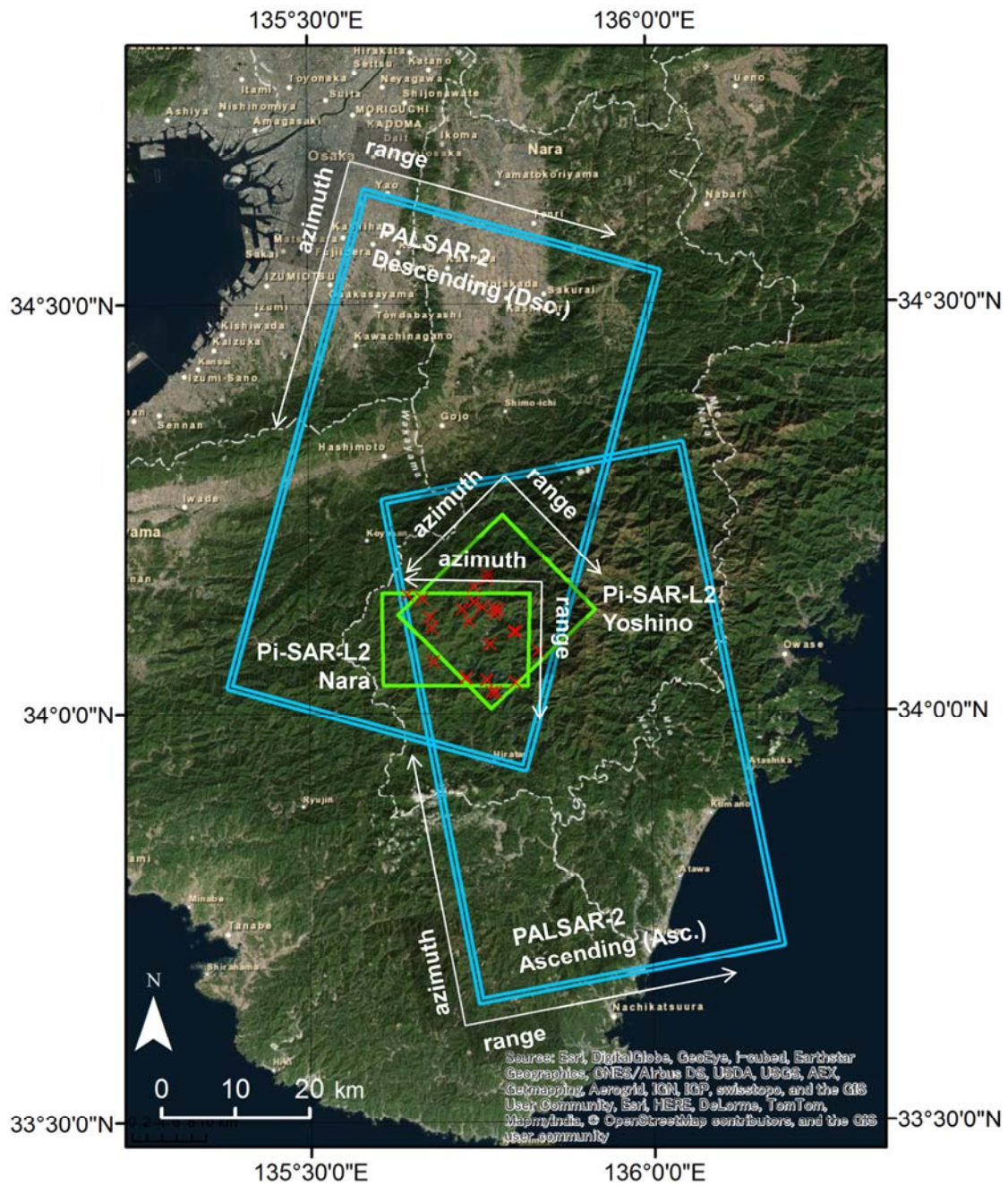


Fig. 5.1 Red crosses indicate deep-seated landslides, which were triggered by torrential rain caused by Typhoon Talas in September 2011 in the study area. Blue and green rectangles show the coverage of PALSAR and Pi-SAR-L2 images, respectively. The flight (azimuth) and the illumination (range) direction for each PolSAR observation are indicated by arrows with labels ([参 1], modified).

5.3 解析手法

Table 5.2 に示した各データに 3.5.2 で述べたとおり回転化 coherency 行列による四成分散乱モデル電力分解を適用することとした。散乱電力分解を実施する際には、二次統計量を得ること、およびノイズを低減することを目的とし、マルチルック処理を行った。また、処理結果としての画像の pixel が地上に投影した場合に概ね正方となること、高分解能性を損ねないこと、妥当な分解結果が得られること等を考慮して、Look 数は 30 程度となるよう調整した。結果として、PALSAR-2 については、5 look (range) × 7 look (azimuth) でマルチルック処理を行うこととした。また、Pi-SAR-L2 データについては、range 方向に 3 look, azimuth 方向に 11 look のマルチルック処理を行った。そのため、処理後の画像の 1 ピクセルの大きさは、それぞれ地上に投影した場合に 500 m²/pixel, 30 m²/pixel となった。

5.4 土砂災害箇所における偏波散乱特性

5.4.1 四成分散乱モデル電力分解結果

各データ (PALSAR-2 Descending (ALOS2013902890), PALSAR-2 Ascending (ALOS2014120670), Pi-SAR-L2 Nara (L200501), Pi-SAR-L2 Yoshino (L204006)) の電力分解結果 (全体) をそれぞれ Fig. 5.2 - Fig. 5.5 に示す。これらの図では, P_s , P_d , P_v をそれぞれ赤 (R), 青 (B), 緑 (G) に割り当てて表示している。そのため, Fig. 5.2 - Fig. 5.5 の各電力分解画像において, 赤い領域が深層崩壊に対応している。たとえば, Fig. 5.2 では, 中央下部に赤い領域が点在することが確認できる。また, Fig. 5.3 では, 右上部に赤い領域が点在することが確認できる。これらの画像には市街地が含まれるが, それらは二回反射散乱を表す青で表示されており, 正しく電力分解がなされていることが確認できる。さらに, Pi-SAR-L2 の電力分解結果 (Fig. 5.4, Fig. 5.5) は画像全体に深層崩壊を示す赤い領域が多数存在し, 緑で表された植生 (森林) の領域と区分・分類されていることが確認できる。

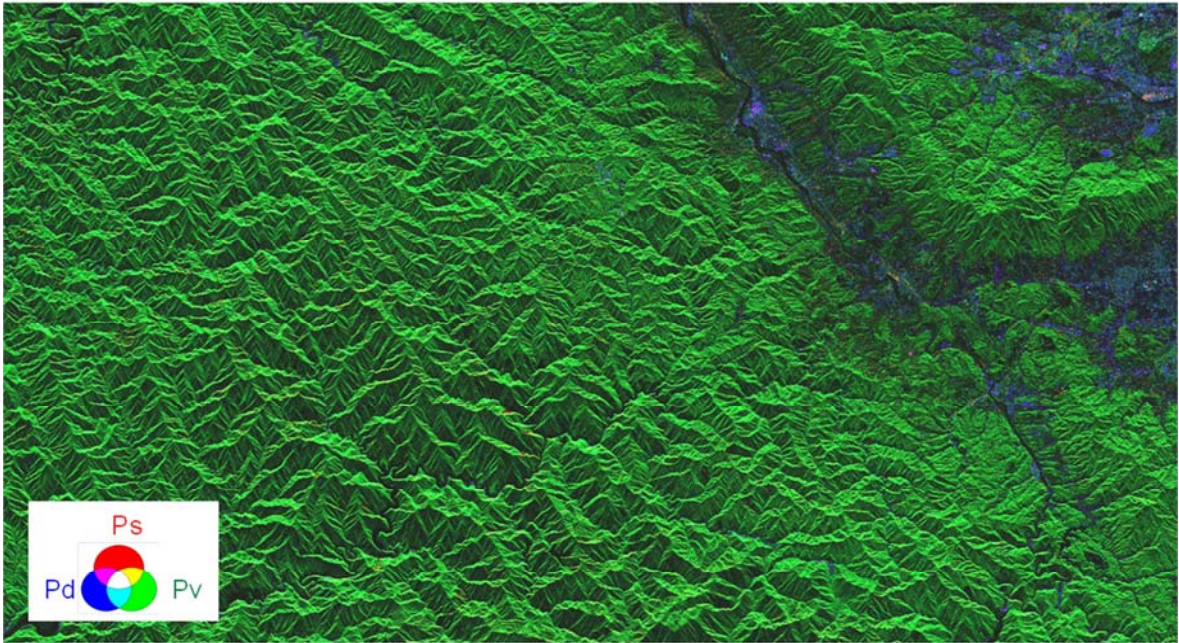


Fig. 5.2 Decomposition result for PALSAR-2 (ALOS2013902890)

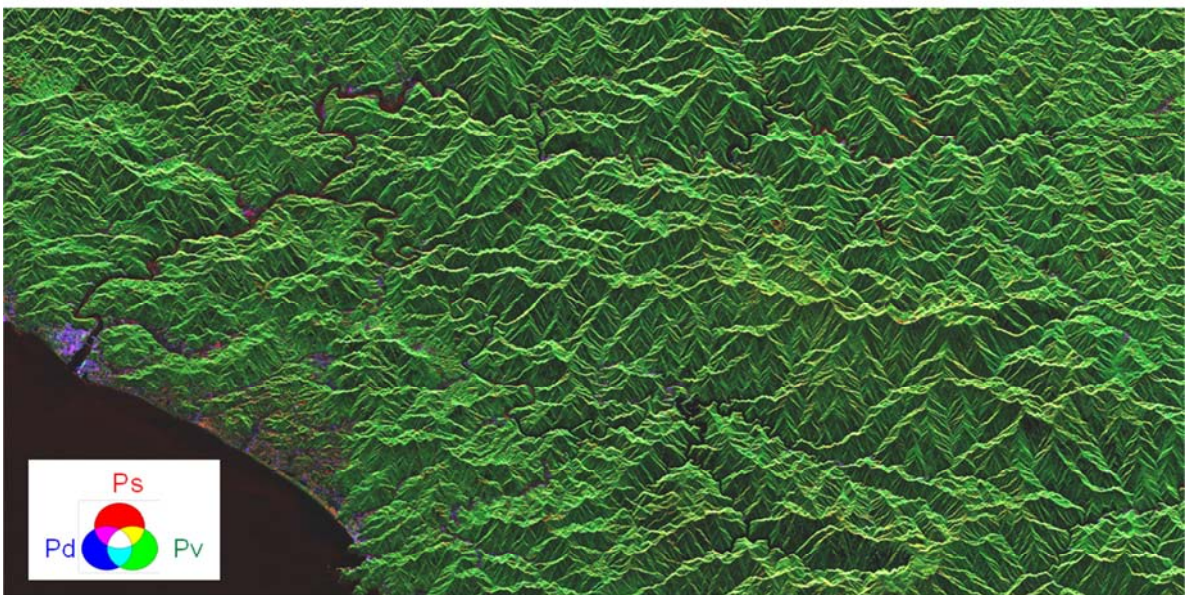


Fig. 5.3 Decomposition result for PALSAR-2 (ALOS2014120670)

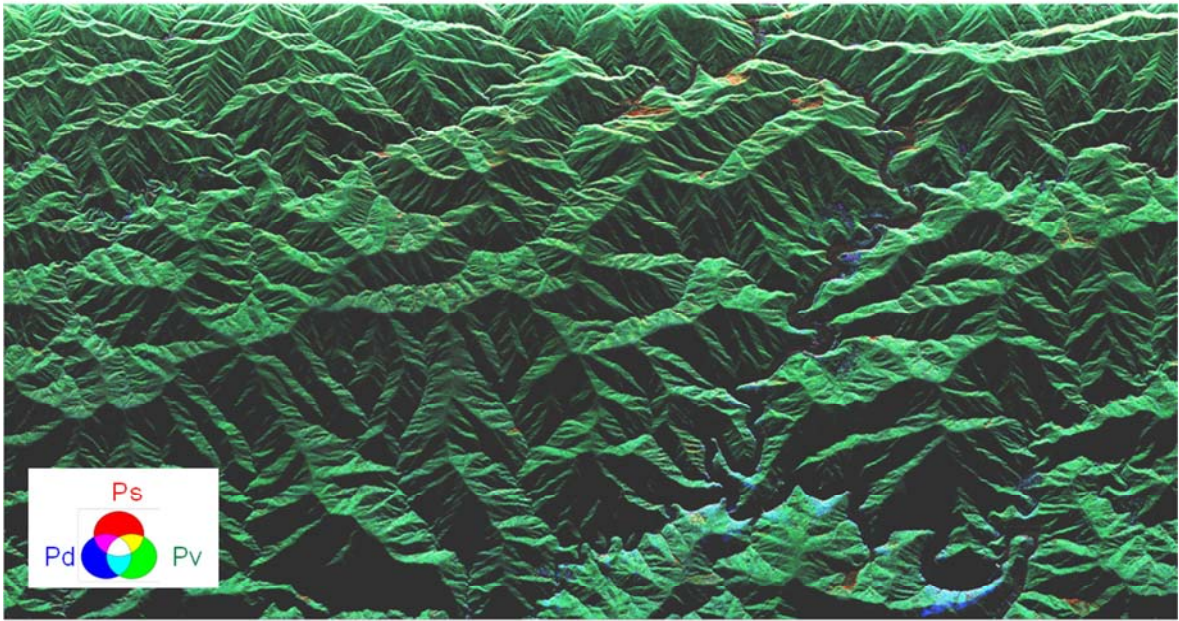


Fig. 5.4 Decomposition result for Pi-SAR-L2 Nara (L200501)

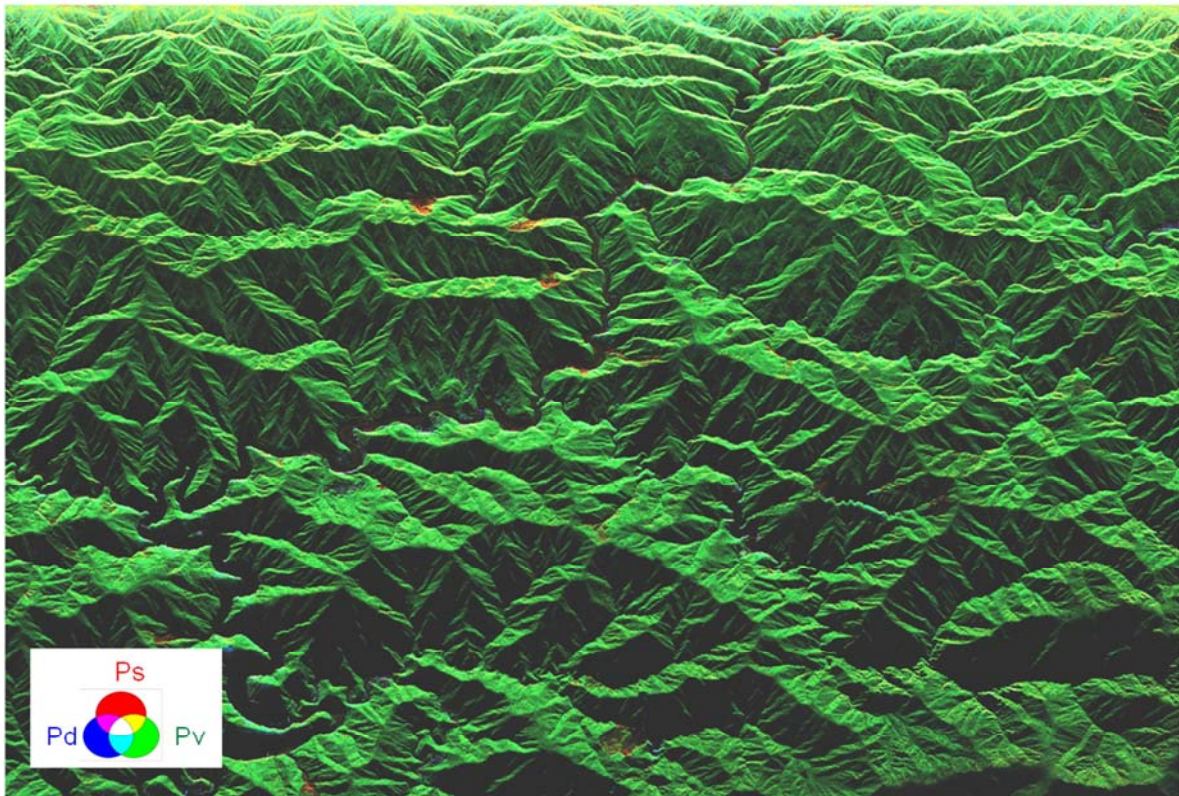


Fig. 5.5 Decomposition result for Pi-SAR-L2 Yoshino (L204006)

次に、2つの崩壊箇所を拡大した PALSAR-2 データの電力分解結果を Fig. 5.6 に示す。対象とした崩壊は五條市大塔町清水の赤谷地区で発生したもの、および吉野郡天川村坪内の冷水地区で発生したものであり、それぞれ Fig. 5.6 では No. 5, No. 12 に対応している。まず、Fig. 5.6 (a) と (b) を比較すると、崩壊地であっても表面散乱の強さが異なっていることがわかる。また、Fig. 5.6 (a) と (c) を比較すると、同じ崩壊地であるにもかかわらず、表面散乱の強さが異なっていることがわかる。そこで、(a)~(d) の各画像において、崩壊地内と崩壊地に隣接する森林で正規化散乱電力の値を計測した。その結果をまとめたものが Table 5.3, Table 5.4 である。前章で述べたように、既往の研究事例などから、崩壊（にともなう裸地）では表面散乱成分が発生し、森林では体積散乱成分が発生することから、Table 5.3, Table 5.4 ではそれぞれ p_s, p_v の値を示している。

Table 5.3 より、Descending 軌道から観測した崩壊地 No. 5 (Fig. 5.6 (a)) では、 $p_s = 0.70$ と大きな値になっていることが確認できる。それに対して、崩壊地 No. 12 では、いずれの軌道から観測されたもの(Fig. 5.6 (b, d)) も $p_s \cong 0.3$ となっており、相対的に小さい値となっている。Fig. 5.6 の各図では、レンジ方向は紙面の上から下に向けての方向に揃えてある。したがって、Descending 軌道から観測した崩壊地 No. 5 (Fig. 5.6 (a)) は概ねレーダに対して正対した斜面で発生した崩壊であるのに対し、崩壊地 No. 12 はいずれもレーダから遠ざかる方向に傾斜した斜面で発生した崩壊であることがわかる。そのため、同様な崩壊であっても表面散乱の強さが異なる要因の 1 つとして、斜面の向きが異なっていることが考えられる。また、

同じ崩壊地 No. 5 でも、Ascending 軌道から観測されたもの (Fig. 5.6 (c)) では、 $p_s = 0.51$ であり、Descending 軌道のもの (Fig. 5.6 (a)) より小さな値をとることがわかる。Table 5.2 で示したように、Descending と Ascending で観測間隔は 1 日であるため、その間に崩壊地の状態が大きく変化したとは考えにくい。したがって、この崩壊地 No. 5 の見かけ上の変化は別の理由によるものと考えられる。そこで、Descending と Ascending の観測条件の違いに着目する。Ascending 軌道から観測された崩壊地 No. 5 (Fig. 5.6 (c)) は、レーダに対して横を向いた斜面で発生している。そのため、崩壊地 No. 12 ほど顕著ではないが、局所入射角が大きくなったため表面散乱成分が小さくなったと考えられる。

一方で、森林における p_s の値は $p_s = [0.11, 0.20]$ の範囲内に収まっており、崩壊地と比較すると大きな変化がないことがわかる。また、崩壊地での p_s の最小値は $p_s = 0.32$ であり、森林における p_s の最大値 ($p_s = 0.20$) と比べても大きい。すなわち、 p_s は崩壊で大きく、森林では相対的に小さいことが確認できる。このことは既往の研究事例とも調和的である。

次に、Table 5.4 にまとめた結果をもとに p_v について考察する。森林における体積散乱成分は、 $p_v = [0.63, 0.71]$ の範囲となっており、いずれも大きな値をとることがわかる。それに比べて、崩壊地の p_v は小さいが、崩壊地 No. 12 では $p_v \cong 0.5$ であり、比較的大きな値をとることがわかる。

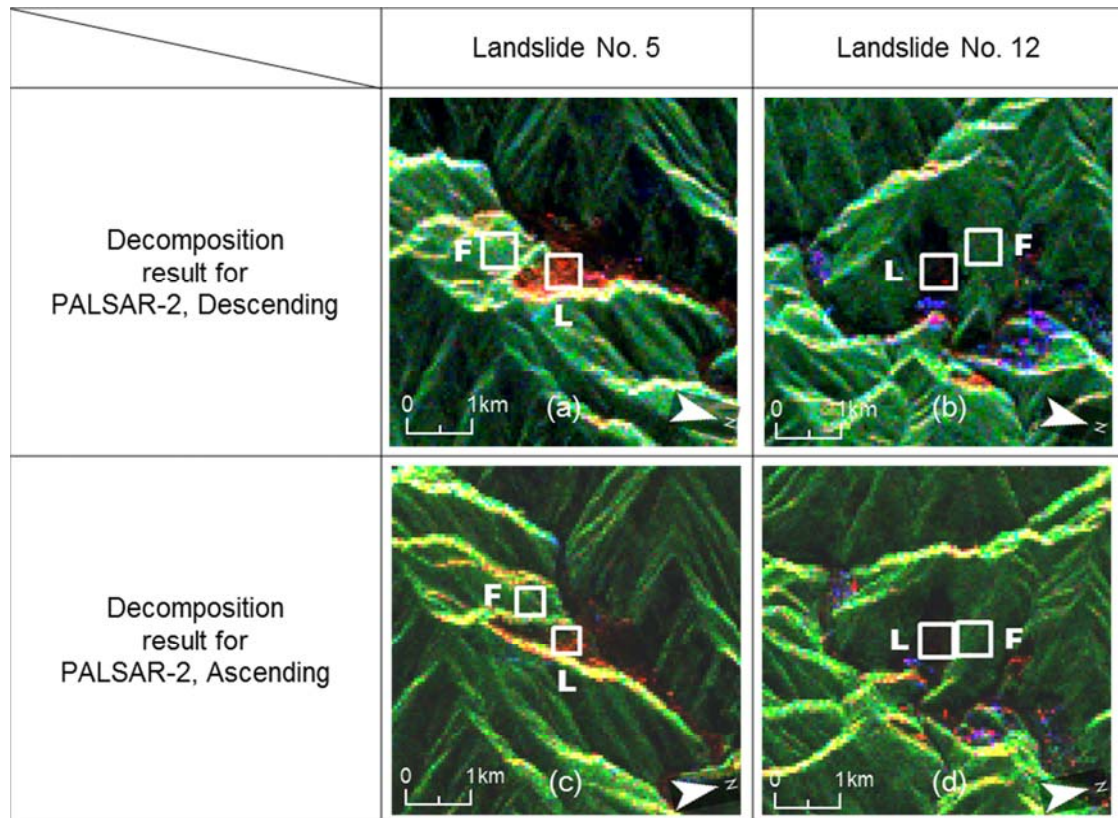


Fig. 5.6 Scattering power decomposition results for PALSAR-2 data in (a,b) descending and (c,d) ascending orbit observations. Landslide No. 5 (a,c) is on the slope facing toward the radar as contrasted to landslide No. 12 (b,d), which is on the slope facing away from the radar. The values of P_s for landslides (L) and those of neighboring forest (F) were sampled in the white rectangles on the images ([参 1], modified).

Table 5.3 Statistics of the normalized surface scattering power p_s in landslides and those of neighboring forest ([参 1], modified).

PolSAR Data	Landslide No. 5		Landslide No. 12		Forest Adjacent to Landslide No. 5		Forest Adjacent to Landslide No. 12	
	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	
PALSAR-2, Descending	0.70 (0.16)	0.32 (0.18)	0.18 (0.17)	0.12 (0.13)				
PALSAR-2, Ascending	0.51 (0.23)	0.35 (0.19)	0.20 (0.13)	0.11 (0.11)				

Table 5.4 Statistics of the normalized volume scattering power p_v in landslides and those of neighboring forest ([参 1], modified).

PolSAR Data	Landslide No. 5		Landslide No. 12		Forest Adjacent to Landslide No. 5		Forest Adjacent to Landslide No. 12	
	Mean (SD)		Mean (SD)		Mean (SD)		Mean (SD)	
	PALSAR-2, Descending	0.24	(0.14)	0.47	(0.18)	0.66	(0.19)	0.70
PALSAR-2, Ascending	0.39	(0.19)	0.46	(0.20)	0.63	(0.15)	0.71	(0.15)

以上で得られた知見を定性的にまとめると次のようになる。

1. 森林と比較して、崩壊地の p_s は大きい、かつ、 p_v は小さい
2. レーダに対して斜め、または遠ざかる方向の斜面上の崩壊では、 p_s が小さい、かつ、 p_v は大きい
3. 森林では斜面の向きに依らず p_s, p_v の変動は小さい（ほぼ一定値となる）

1. に関しては、地震前後の散乱電力を比較した [3] でも知られているとおりであるが、定量的に確認することができた。2. と 3. については、これまでほとんど検討されてこなかった事項である。そこで、2. と 3. の知見が他の崩壊地およびその周辺の森林でも成り立つかを調査することとした。

5.4.2 局所入射角と散乱電力の関係

前節で得られた知見 2. と 3. はいずれも、レーダとターゲットとなる斜面との 3 次元的位置関係の影響を示唆するものであるため、レーダと斜面の位置関係を表すパラメータとして、Fig. 5.7 に示す局所入射角 φ を導入する。

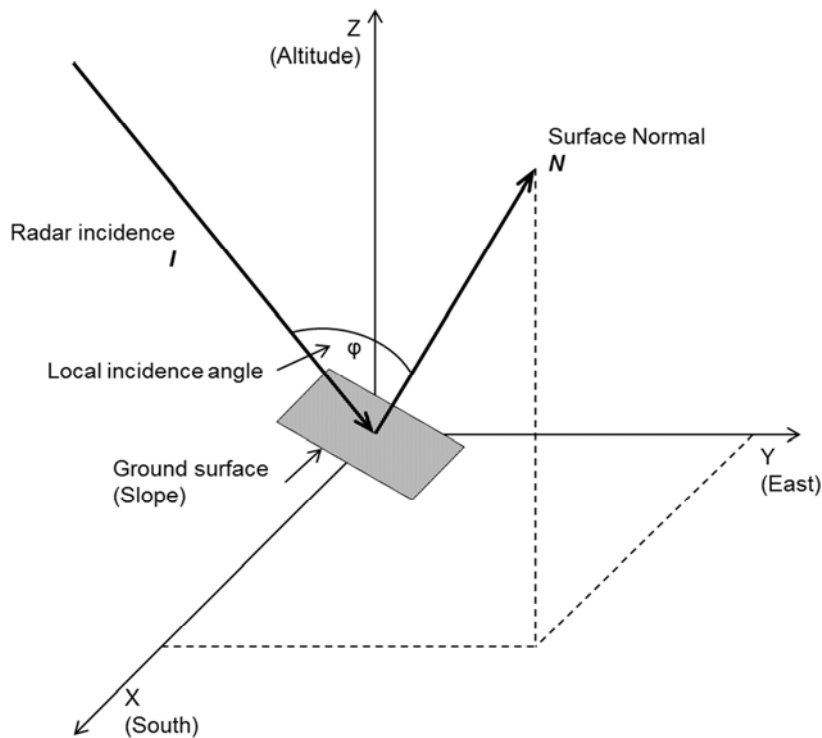


Fig. 5.7 Schematic diagram of the radar observation geometry to relate the local incidence angle φ to the ground surface. The angle φ can be derived by the inner product of radar incidence direction N and ground surface normal I vectors ([参 1], modified).

Fig. 5.7 より、局所入射角 φ はレーダの視線方向 (line of sight; LOS) I と斜面の法線ベクトル N のなす角として、次のように定義される。

$$\cos\varphi = \frac{N \cdot I}{|N||I|} \quad (5.1)$$

ここで、 I はレーダ (SAR) の range 方向とオフナディア角で計算できる。

また、 N は数値地形モデル (digital elevation model; DEM) より算出できる。本研究では、基盤地図情報 (数値標高モデル) [2] を利用した。DEM のメッシュサイズは約 10 m である。

Fig. 5.8 に、PALSAR-2 データの解析結果をもとに、崩壊地 No. 5, No. 12 を含む 22 の崩壊地およびその周辺の森林で計測した p_s , p_v と局所入射角 φ との関係を散布図として示す。まず、崩壊地 (Fig. 5.8 (a)) では、入射角が大きくなるとともに、 p_s が小さくなる傾向が読み取れる。たとえば、 $\varphi \cong 15^\circ$ では $p_s \cong 0.7$ となっているが、 $\varphi \cong 30^\circ$ では $p_s \cong 0.6$ となり、さらに $\varphi \cong 45^\circ$ では $p_s \cong 0.4$ まで減少している。この値は同じ局所入射角における p_v と同程度である。反対に、 p_v は入射角とともに緩やかに大きくなっている。一方、森林 (Fig. 5.8 (b)) では、入射角が小さい場合 ($\varphi \leq 15^\circ$) を除き、 p_s , p_v はほぼ一定の値をとることがわかる。すなわち、 p_s , p_v の値の範囲はそれぞれ $p_s = [0.1, 0.2]$, $p_v = [0.6, 0.7]$ となっている。同様に、Pi-SAR-L2 データについても、22 の崩壊地とその周辺の森林で計測した p_s , p_v と局所入射角 φ との関係を散布図 (Fig. 5.9) で示す。全体的な傾向は PALSAR-2 の場合と一致している。すなわち、崩壊地では p_s は φ とともに減少し、反対に p_v は増加傾向がみられるのに対し、森林においては、 p_s , p_v とともにほぼ一定の値を示すことがわかった。ただし、PALSAR-2 の場合と比較すると、とくに崩壊地において p_s , p_v の値にバラつきがみられる。PALSAR-2 と Pi-SAR-L2 では、電力分解後の 1 ピクセルが表す地上での面積が大きく異なる。Pi-SAR-L2 の 1 ピクセルは地上で 30 m² の面積であり、10 m メッシュ (面積 : 約 100 m²) の DEM と比較して

もより狭い領域での散乱メカニズムを表していると考えられる。そのため、そのより狭い領域での局所入射角の変化が影響している可能性がある。一方、PALSAR-2 の場合は相対的に広い領域で平均化された散乱電力の値を計測していることになるため、局所入射角との関連性がより明瞭に現れたと考えられる。

以上のとおり、PALSAR-2 と Pi-SAR-L2 の解析結果から、崩壊およびその周辺の森林において、以下のような偏波散乱特性がみられることが確認できた。

1. 森林と比較して、崩壊地の p_s は大きい、かつ、 p_v は小さい
2. レーダに対して斜め、または遠ざかる方向の斜面上の崩壊では、 p_s が小さい、かつ、 p_v は大きい
3. 森林では斜面の向きに依らず p_s , p_v の変動は小さい（ほぼ一定値となる）

PolSAR データにより森林に覆われた山間地で発生した土砂災害箇所を検出する際には、崩壊箇所と森林とを確実に区分することが求められる。そのため、上記の 1. ～3. に示した偏波散乱特性を考慮して、解析結果を解釈することが重要である。

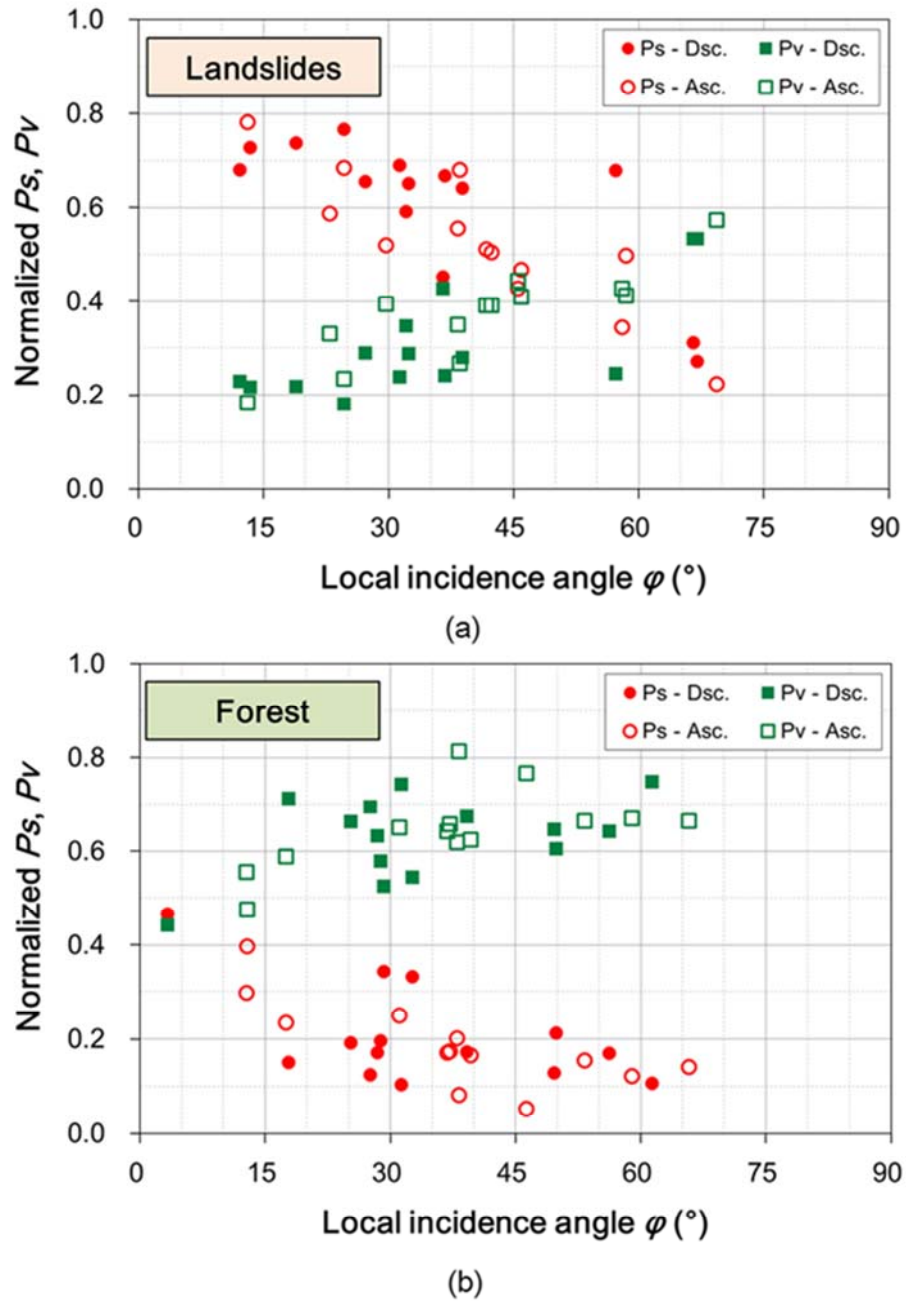
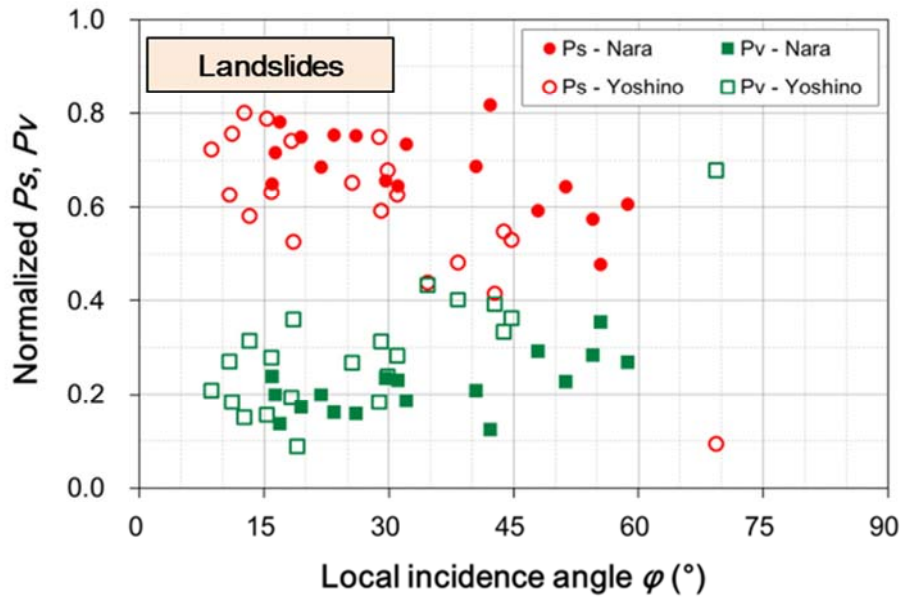
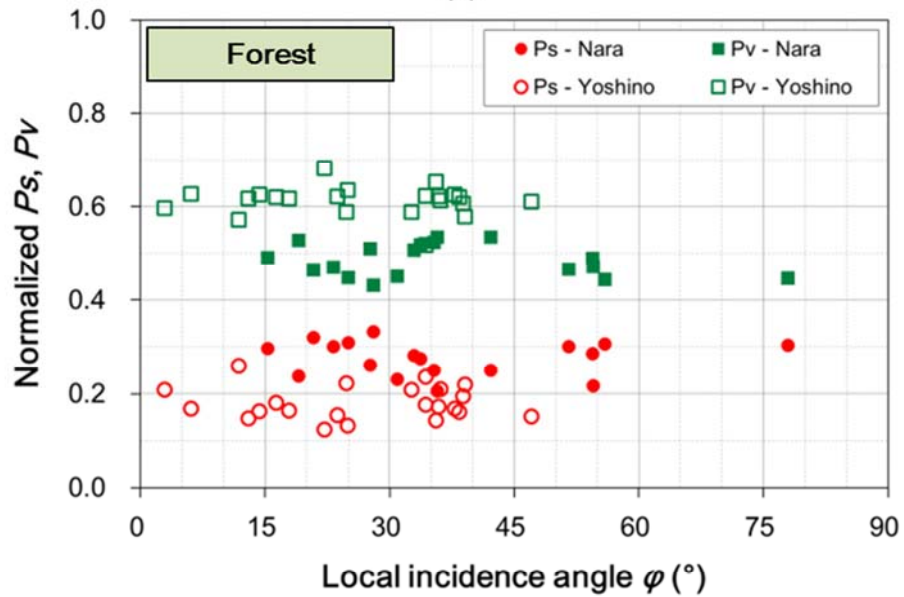


Fig. 5.8 Normalized powers of the surface and the volume scattering components' (p_s and p_v) contribution to the total power with respect to the local incidence angle in (a) landslides and (b) forested areas for PALSAR-2 data acquired with ALOS-2 from its descending and ascending orbits ([參 1], modified).



(a)



(b)

Fig. 5.9 (a) Normalized powers of the surface and the volume scattering components' (p_s and p_v) contribution to the total power with respect to the local incidence angle in landslides; (b) the p_s and the p_v contributions in forested areas for the Pi-SAR-L2 datasets named "Nara" and "Yoshino" ([参 1], modified).

5.4.3 表面散乱の入射角依存性

以上の検討結果から、土砂災害を特徴づける散乱メカニズムは表面散乱であることが確かめられた。また、本研究により、土砂災害箇所における表面散乱は入射角によって大きく変動することが明らかとなった。そこで、ここでは、表面散乱メカニズムについて考察する。

表面散乱の散乱角特性は表面の粗さ（粗度，roughness）によって決まることが知られている。粗度の指標として、粗度の高さ変動を用いたレイリー基準（Reileigh criterion）が知られている。ランダムな面において、表面上の 2 点によって反射された波の位相差がどの程度であるかによって、全散乱のうち後方散乱への寄与を求めることができる。レイリー基準では、2つの反射波の位相差 $\Delta\Phi$ が $\pi/2$ 以下であれば、表面はなめらかであると考える。すなわち、 $\Delta\Phi = 2k\Delta h\cos\theta < \pi/2$ から、

$$\Delta h < \lambda/8\cos\theta \quad (5.2)$$

ここに、 Δh はランダムな面の高さ方向の二乗平均平方根（RMS）高さであり、 λ は波長、 k は波数（ $k = 2\pi/\lambda$ ）、 θ は入射角である。ここで、PALSAR-2 や Pi-SAR-L2 で用いられている L-band の波長 $\lambda = 0.23$ m を代入すると、 $\theta < 75^\circ$ において、 $\Delta h \leq 0.1$ m である。崩壊地の表面における Δh を実際に計測することは難しいが、一般に 10^{-2} m \sim 10^0 m の直径をもつ礫が散在する状況であるため、 $\Delta h > 0.1$ m となっていることが想定できる。そのため、崩壊地の表面は L-band のマイクロ波にとって粗い面であると仮定する。そのような粗い面は、鏡面反射の成分はわずかとなり、

拡散成分が卓越するランバート面 (Lambertian surface) であるとする、その散乱係数 $\sigma^0(\theta_i, \theta_s)$ は以下の式により求めることができる。

$$\sigma^0(\theta_i, \theta_s) = \sigma_0^0 \cos\theta_i \cos\theta_s \quad (5.3)$$

ここに、 θ_i, θ_s はそれぞれ入射角と散乱角、 σ_0^0 は垂直入射のときの散乱係数である。後方散乱の場合は、 $\theta_i = \theta_s$ である。そこで、この $\sigma^0(\theta_i, \theta_s)$ を Fig. 5.8 (a), Fig. 5.9 (a) に重ねて表示すると、Fig. 5.10 のようになる。ただし、 σ_0^0 が求められていないため、 p_s の最大値をとり、 $\sigma_0^0 = 0.8$ とした。Fig. 5.10 より、崩壊地における p_s はおおむね $\sigma^0(\theta_i, \theta_s)$ に沿って分布することがわかる。このことから、上記で仮定したとおり、崩壊地の表面は L-band にとってランバート面と解釈してよい可能性がある。また、azimuth 方向に傾斜した地形から交差偏波が発生することが知られており [4], [5] , 崩壊地において、 p_v が入射角とともに大きくなったのは、この交差偏波が寄与していると考えられる。

一方、森林における散乱メカニズムは無数の散乱体（葉や枝、幹および地表面など）によるランダムな方向への散乱であるため、入射角に対する依存性が顕著に現れなかったものと解釈できる。

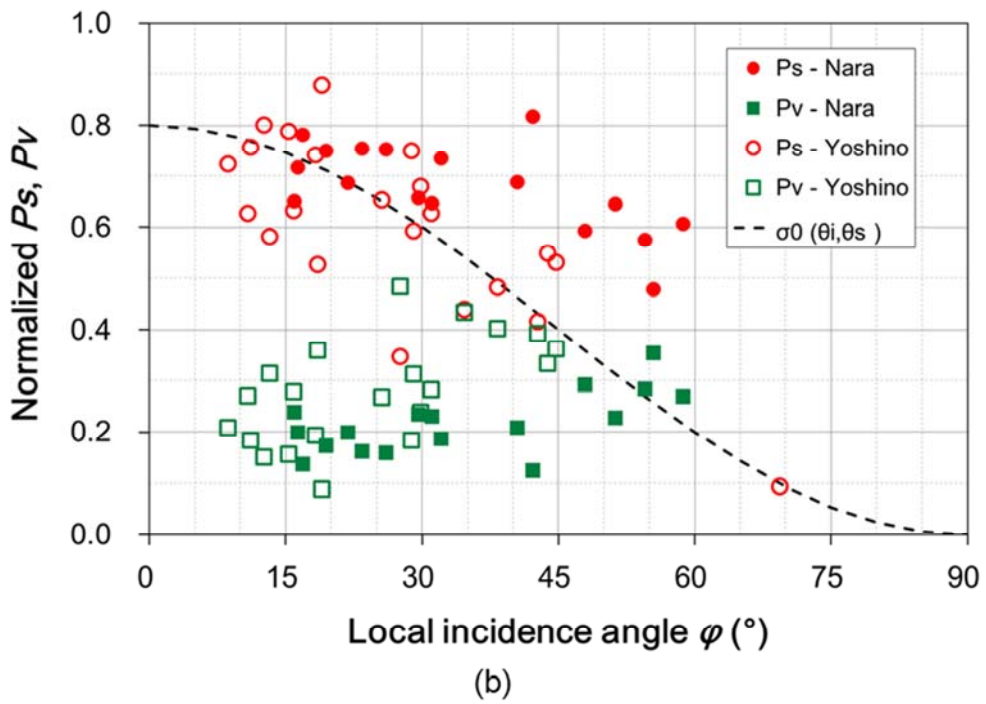
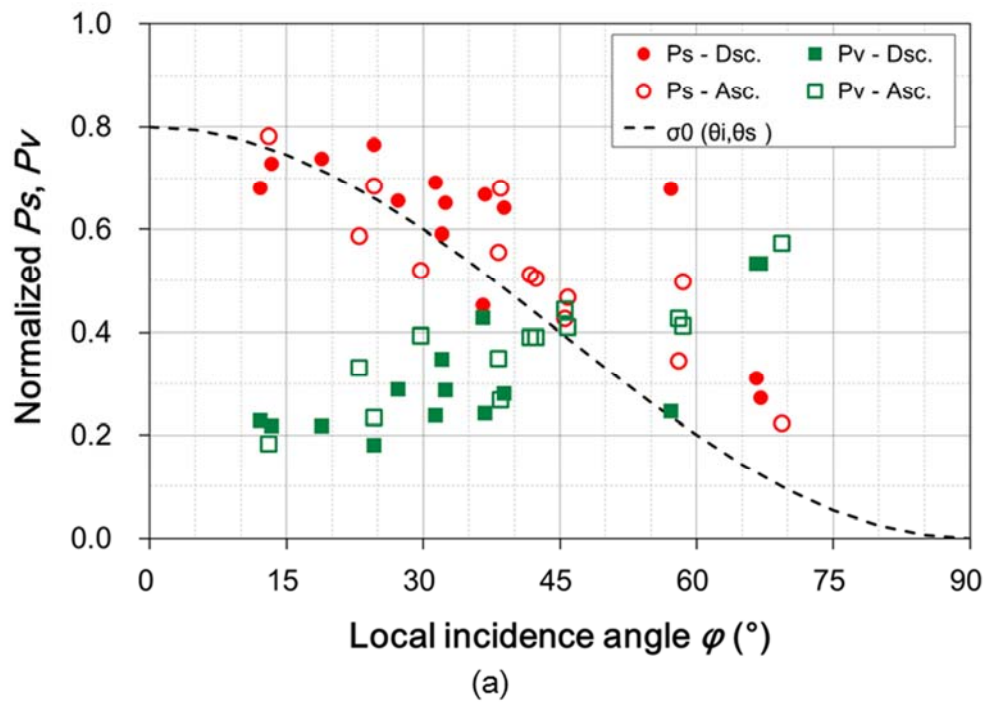


Fig. 5.10 Relationship between the scattering coefficient $\sigma^0(\theta_i, \theta_s)$ and the normalized surface scattering power p_s for landslides.

5.5 土砂災害箇所検出の精度向上

前節までに得られた知見を踏まえ、PolSAR データを用いた土砂災害箇所検出の精度向上について考察する。

5.5.1 土砂災害箇所検出のための条件設定

既往の研究例 [6], [7] では、 p_s を用いて単一の閾値によって土砂災害箇所の検出を行っている。しかし、本研究で明らかとなったように、 p_s の値は局所入射角により変化するため、単一の閾値では検出漏れや過剰検出することが想定される。そのため、局所入射角に応じて、複数の閾値を設定することが有効であると考えられる。また、 p_s と p_v の大小関係も考慮して、Table 5.5 に示す閾値の設定を提案する。

Table 5.5 Proposed conditions for landslide detection utilizing PolSAR data ([参 1], modified).

Condition	Range of local incidence angle φ	Relationship between p_s and p_v	Threshold of p_s
1	$\varphi < 30^\circ$	$p_s > p_v$	$p_s > 0.6$
2	$30^\circ < \varphi < 60^\circ$	$p_s > p_v$	$p_s > 0.4$
3	$60^\circ < \varphi$	$(p_s \leq p_v)$	Not detectable

5.5.2 複数の閾値設定による土砂災害箇所検出の精度評価

本節では、Table 5.5 で提案した p_s と p_v および φ をパラメータとした土砂災害箇所検出の条件（閾値設定）における土砂災害箇所検出精度の評価を行う。

(1) 比較対象とする土砂災害検出条件の設定

提案する検出条件の比較対象として、 p_s のみをパラメータとした条件 [6] を Condition 1, p_s , p_v および p_d をパラメータとした条件 [7] を Condition 2 とし、本研究で提案する p_s と p_v および φ をパラメータとする条件を Condition 3 とする。各条件は Table 5.6 に示すとおりである。

Table 5.6 Conditions for landslide detection utilizing PolSAR data.

Condition	Range of local incidence angle φ	Relationship between p_s and p_v	Threshold of p_s	Threshold of p_v	Threshold of p_d
1 [6]	—	—	$p_s > 0.6$	—	—
2 [7]	—	—	$p_s > 0.1$	$p_s < 0.65$	$p_d < 0.1$
3	a $\varphi < 30^\circ$	$p_s > p_v$	$p_s > 0.6$	—	—
	b $30^\circ < \varphi < 60^\circ$	$p_s > p_v$	$p_s > 0.4$	—	—
	c $60^\circ < \varphi$	$(p_s \leq p_v)$	Not detectable	—	—

なお、文献 [7] では、Table 5.6 の Condition 2 に示した条件に加え、平坦な裸地等を過剰に抽出することを抑制するため、VH 偏波の後方散乱係数 σ_{VH}^0 を用いているが、ここで評価の対象とする土砂災害（深層崩壊）および森林はいずれも山地斜面であるため、 σ_{VH}^0 は考慮しないこととした。ま

た、Condition 2 に示した正規化散乱電力の値は三成分電力分解での値であるため、本研究で用いている四成分電力分解により得られる散乱電力の値とは厳密には比較できないことに注意が必要であるが、4 つめの成分 p_c はその他の成分と比べて小さいため、ここでは無視できると考えた。

(2) 精度検証の方法

5.4.1 に示したように崩壊およびその周辺の森林で、4 つの PolSAR データの電力分解によって得られた各散乱電力の値を計測した。また、DEM を用いて崩壊および森林の局所入射角を計測した。これらの値に Table 5.6 の各条件を適用し、土砂災害箇所を検出の可否を判定した。

(3) 精度検証結果

まず、PALSAR-2 の Descending 軌道で観測された PolSAR データ (Scene ID ALOS2013902890) での土砂災害検出の判定結果を Table 5.7 に示す。表中の A, B, C, D および Z は、各条件において次のように判定されたことを表している。

- A : 正しく検出 (土砂災害箇所が) された
- B : 過剰検出 (森林が土砂災害箇所として判定された)
- C : 検出漏れ (土砂災害箇所が土砂災害箇所として検出されなかった)
- D : 森林が森林として正しく分類された
- Z : 条件に合わないため、判定不能 (Condition 3c の場合のみ)

したがって、A と D は多いほど、また B, C, Z が少ないほど精度よく検出できたことを表すことになる。

Table 5.7 Landslide detection results for PALSAR-2 (Dsc.). The judgment results such as “A,” “B,” “C,” “D,” and “Z” are given in columns Cond. 1, Cond. 2, and Cond. 3, respectively. Each character denotes as follows; A: successfully detected (classified as a landslide), B: over extraction (commission error), C: undetected (omission error), D: successfully classified as forest, and Z: undetectable (unclassifiable).

No.	p_s	p_v	p_d	φ (°)	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Landslide	1	0.45	0.43	0.07	36.5	C	A	A
	4	0.69	0.24	0.06	31.3	A	A	A
	5	0.66	0.29	0.04	27.2	A	A	A
	12	0.27	0.53	0.15	67.0	C	C	Z
	14	0.65	0.29	0.04	32.4	A	A	A
	19	0.68	0.23	0.06	12.2	A	A	A
	20	0.67	0.24	0.06	36.8	A	A	A
	24	0.64	0.28	0.05	38.9	A	A	A
	26	0.59	0.35	0.03	32.1	C	A	A
	33	0.68	0.25	0.04	57.2	A	A	A
	34	0.77	0.18	0.04	24.6	A	A	A
	35	0.31	0.53	0.08	66.6	C	A	Z
	38	0.73	0.22	0.03	13.4	A	A	A
	40	0.74	0.22	0.03	18.9	A	A	A
Forest	1	0.10	0.74	0.09	31.3	D	D	D
	4	0.34	0.53	0.09	29.2	D	B	D
	5	0.12	0.70	0.12	27.6	D	D	D
	12	0.17	0.64	0.09	56.2	D	B	D
	14	0.17	0.67	0.11	39.2	D	D	D
	19	0.19	0.66	0.09	25.3	D	D	D
	20	0.20	0.58	0.14	28.8	D	D	D
	24	0.47	0.44	0.05	3.3	D	B	D
	26	0.13	0.65	0.12	49.6	D	D	D
	33	0.21	0.61	0.12	49.9	D	D	D
	34	0.17	0.63	0.10	28.5	D	D	D
	35	0.11	0.75	0.08	61.4	D	D	Z
	38	0.33	0.55	0.07	32.6	D	B	D
	40	0.15	0.71	0.08	17.8	D	D	D

Table 5.7 より, Condition 1 では, 森林はすべて正しく森林に分類 (非・土砂災害箇所として判定) されているが, 検出漏れが 4 箇所となった. Condition 2 では, 検出漏れは 1 箇所であるが, 過剰検出が 4 箇所となった. それに対して, Condition 3 では, 局所入射角 φ が 60° を超える箇所が 3 箇所 (土砂災害箇所が 2 箇所, 森林で 1 箇所) あるため判定不能となったが, 他の箇所はすべて正しく土砂災害または森林 (非・土砂災害) として判定された. 同様に PALSAR-2 の Ascending 軌道で観測された PolSAR データ, Pi-SAR-L2 の 2 つのデータについて, 土砂災害検出を判定した結果を Table 5.7–Table 5.11 に示す. データごとに箇所数の増減があるが, これは観測範囲がそれぞれ異なるため, 画像内に含まれる崩壊箇所が異なること, また, 空間分解能を考慮して, PALSAR-2 については幅がおおむね 200 m 以上の崩壊を対象としているのに対し, Pi-SAR-L2 では約 200 m 未満の崩壊も対象としているためである.

全体的な傾向として, PALSAR-2 (Dsc.) と Pi-SAR-L2 (Nara) のデータに対しては, いずれの条件でも精度よく崩壊の検出および森林の分類ができていたが, PALSAR-2 (Asc.) と Pi-SAR-L2 (Yoshino-D) ではやや検出精度が低くなった. 個々の検出条件の特徴としては, Condition 1 は検出漏れ (C) が他の条件に比べて多く, 一方で, Condition 2 では抽出漏れは少ないものの, 過剰検出 (B) がみられる点が挙げられる. 本研究で提案する Condition 3 は, 過剰検出がなく, 抽出漏れも Condition 1 より少ないという観点で検出精度の向上が図られたものと考えられる.

Table 5.8 Landslide detection results for PALSAR-2 (Asc.). The judgment results such as “A,” “B,” “C,” “D,” and “Z” are given in columns Cond. 1, Cond. 2, and Cond. 3, respectively. Each character denotes as follows; A: successfully detected (classified as a landslide), B: over extraction (commission error), C: undetected (omission error), D: successfully classified as forest, and Z: undetectable (unclassifiable).

No.	p_s	p_v	p_d	φ (°)	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Landslide	1	0.43	0.44	0.08	45.6	C	A	C
	4	0.51	0.39	0.06	41.7	C	A	A
	5	0.68	0.27	0.03	38.5	A	A	A
	12	0.35	0.43	0.17	58.0	C	C	C
	19	0.69	0.23	0.05	24.6	A	A	A
	20	0.59	0.33	0.05	23.0	C	A	C
	24	0.47	0.41	0.08	45.9	C	A	A
	26	0.51	0.39	0.06	42.3	C	A	A
	33	0.50	0.41	0.05	58.5	C	A	A
	34	0.56	0.35	0.05	38.3	C	A	A
	35	0.22	0.57	0.13	69.4	C	C	Z
	38	0.78	0.18	0.02	13.0	A	A	A
40	0.52	0.39	0.04	29.7	C	A	C	
Forest	1	0.17	0.66	0.10	37.2	D	D	D
	4	0.17	0.64	0.11	36.8	D	D	D
	5	0.17	0.62	0.14	39.6	D	D	D
	12	0.05	0.77	0.10	46.3	D	D	D
	19	0.20	0.62	0.12	38.0	D	D	D
	20	0.30	0.56	0.08	12.7	D	B	D
	24	0.40	0.48	0.07	12.8	D	B	D
	26	0.12	0.67	0.13	58.9	D	D	D
	33	0.15	0.67	0.11	53.3	D	D	D
	34	0.08	0.81	0.04	38.2	D	D	D
	35	0.14	0.67	0.11	65.8	D	D	Z
	38	0.23	0.59	0.09	17.5	D	B	D
40	0.25	0.65	0.05	31.1	D	B	D	

Table 5.9 Landslide detection results for Pi-SAR-L2 (Nara).

No.	p_s	p_v	p_d	φ (°)	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Landslide	4	0.72	0.20	0.05	16.4	A	A	A
	5	0.75	0.17	0.05	19.4	A	A	A
	14	0.65	0.23	0.09	51.2	A	A	A
	15	0.46	0.38	0.12	15.9	C	C	C
	16	0.78	0.14	0.06	16.9	A	A	A
	19	0.78	0.15	0.05	32.1	A	A	A
	20	0.58	0.28	0.09	54.5	C	A	A
	21	0.65	0.23	0.08	31.1	A	A	A
	22	0.79	0.13	0.06	26.1	A	A	A
	23	0.65	0.24	0.07	16.0	A	A	A
	24	0.59	0.29	0.06	47.9	C	A	A
	25	0.75	0.16	0.05	23.4	A	A	A
	28	0.61	0.27	0.08	58.7	A	A	A
	31	0.69	0.21	0.06	40.4	A	A	A
	32	0.48	0.35	0.09	55.5	C	A	A
	33	0.65	0.24	0.06	29.6	A	A	A
34	0.82	0.12	0.03	42.2	A	A	A	
59	0.69	0.20	0.08	21.8	A	A	A	
Forest	4	0.25	0.52	0.15	35.3	D	D	D
	5	0.27	0.52	0.13	33.7	D	D	D
	14	0.29	0.49	0.15	54.4	D	D	D
	15	0.26	0.51	0.15	27.7	D	D	D
	16	0.32	0.47	0.14	20.8	D	D	D
	19	0.30	0.49	0.14	15.3	D	D	D
	20	0.31	0.44	0.17	55.9	D	D	D
	21	0.28	0.51	0.14	32.9	D	D	D
	22	0.30	0.47	0.16	51.6	D	D	D
	23	0.30	0.47	0.15	23.2	D	D	D
	24	0.25	0.54	0.13	42.2	D	D	D
	25	0.24	0.53	0.16	19.1	D	D	D
	28	0.30	0.45	0.16	78.0	D	D	Z
	31	0.23	0.45	0.22	31.0	D	D	D
	32	0.22	0.47	0.22	54.6	D	D	D
	33	0.33	0.43	0.16	28.1	D	D	D
34	0.21	0.54	0.16	35.7	D	D	D	
59	0.31	0.45	0.16	25.0	D	D	D	

Table 5.10 Landslide detection results for Pi-SAR-L2 (Yoshino-D) (Landslide).

No.	p_s	p_v	p_d	φ (°)	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Landslide	2	0.35	0.48	0.11	27.6	C	C	C
	3	0.55	0.33	0.07	43.8	C	A	A
	4	0.79	0.16	0.03	15.3	A	A	A
	5	0.88	0.09	0.02	19.0	A	A	A
	15	0.42	0.39	0.12	42.7	C	C	A
	16	0.63	0.28	0.05	15.9	A	A	A
	19	0.72	0.21	0.04	8.6	A	A	A
	20	0.48	0.40	0.07	38.3	C	A	A
	21	0.76	0.18	0.03	11.1	A	A	A
	22	0.63	0.27	0.06	10.8	A	A	A
	23	0.53	0.36	0.06	44.8	C	A	A
	24	0.58	0.32	0.06	13.2	C	A	C
	25	0.75	0.18	0.04	28.8	A	A	A
	26	0.59	0.31	0.05	29.1	C	A	C
	31	0.68	0.24	0.05	29.9	A	A	A
	32	0.53	0.36	0.06	18.5	C	A	C
	33	0.74	0.19	0.04	18.3	A	A	A
	34	0.80	0.15	0.03	12.6	A	A	A
36	0.09	0.68	0.14	69.3	C	C	Z	
37	0.63	0.28	0.05	31.0	A	A	A	
55	0.65	0.27	0.04	25.6	A	A	A	
59	0.44	0.43	0.07	34.7	C	A	A	

Table 5.11 Landslide detection results for Pi-SAR-L2 (Yoshino-D) (Forest).

No.	p_s	p_v	p_d	φ (°)	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	
Forest	2	0.17	0.62	0.12	35.9	D	D	D
	3	0.16	0.62	0.12	38.4	D	D	D
	4	0.21	0.60	0.12	2.9	D	D	D
	5	0.20	0.61	0.11	38.8	D	D	D
	15	0.24	0.52	0.15	34.3	D	D	D
	16	0.22	0.59	0.11	24.8	D	D	D
	19	0.17	0.63	0.13	6.1	D	D	D
	20	0.21	0.61	0.10	36.2	D	D	D
	21	0.26	0.57	0.10	11.8	D	D	D
	22	0.14	0.65	0.12	35.6	D	D	D
	23	0.17	0.63	0.13	37.8	D	D	D
	24	0.15	0.62	0.14	13.0	D	D	D
	25	0.16	0.62	0.13	17.9	D	D	D
	26	0.18	0.62	0.11	34.3	D	D	D
	31	0.15	0.62	0.12	23.7	D	D	D
	32	0.16	0.63	0.12	14.3	D	D	D
	33	0.21	0.59	0.12	32.7	D	D	D
	34	0.13	0.64	0.13	25.0	D	D	D
36	0.15	0.61	0.14	47.1	D	D	D	
37	0.18	0.62	0.12	16.4	D	D	D	
55	0.12	0.68	0.11	22.2	D	D	D	
59	0.22	0.58	0.11	39.1	D	D	D	

(4) 精度検証結果に対する考察

上述のように、本研究で提案する Condition 3 による崩壊箇所の検出・判定精度は、Condition 1 に比べて検出漏れが少なく、また、Condition 3 のような過剰検出が発生しにくい傾向があることがわかった。

Condition 1 では $p_s > 0.6$ という条件のため、局所入射角が比較的小さい場合（たとえば、 $\varphi < 30^\circ$ ）には有効に機能するが、たとえば、PALSAR-2 (Dsc.) データにおける崩壊 No. 1 は $\varphi = 36.5^\circ$ の斜面で発生しており、 $p_s = 0.45$ であったため、検出漏れとなってしまった。Condition 3 では $\varphi > 30^\circ$ のとき、 $p_s > 0.4$ であれば“土砂災害箇所”と判定できるため、No. 1を検出することができている。他のデータに対しても同様に、入射角に応じて p_s の閾値を選択的に変更することで検出できた箇所が Condition 1 に比べて増えていることがわかる。

また、過剰検出に対しては、同じく PALSAR-2 (Dsc.) データにおける森林 No. 4 のように $p_s = 0.34$, $p_v = 0.53$ と p_s が比較的大きくなる森林においても $p_s < p_v$ の条件から“非・土砂災害箇所”と判定できるため、過剰検出が発生しにくくなるものと考えられる。実際に、 $\varphi > 60^\circ$ となり判定不能な箇所を除き、すべてのデータで森林の箇所は漏れなく“非・土砂災害箇所”として分類されている。

ただし、Condition 3 の課題として、Condition 2 に比べて検出漏れがやや多いことが挙げられる。Condition 2 で検出されるにも関わらず、Condition 3 で検出できなかった箇所は Table 5.12 の 5 箇所である。いずれも $p_s > 0.5$ であるが、 $\varphi < 30^\circ$ であったため、Condition 3a ($p_s > 0.6$)

の条件に満たず，“非・土砂災害箇所”と判定された。なお，No. 40 (PALSAR-2 Asc.) と No. 26 (Pi-SAR-L2 Yoshino-D) は $\varphi \cong 30^\circ$ のため，Condition 3b ($\varphi > 30^\circ, p_s > 0.4$) が適用されれば検出することができた箇所である。

Table 5.12 Specifications of landslides undetectable with proposed Condition 3.

PolSAR	Landslide No.	p_s	p_v	φ (°)
PALSAR-2 Asc.	20	0.59	0.33	23.0
	40	0.52	0.39	29.7
Pi-SAR-L2 Yoshino-D	24	0.58	0.32	13.2
	26	0.59	0.31	29.1
	32	0.53	0.36	18.5

このように閾値（境界条件）の周辺ではわずかな値の違いによって検出・非検出が左右されることになるため，さらに局所入射角の範囲を細分し，それに対応した p_s や p_v の値（閾値）を設定することでさらなる精度向上が期待される。ただし，そのような閾値設定のためには，さらに異なる地域・データでの検証が必要となるため，今後の課題とする。

5.6 結語

本章では、2011年の「紀伊半島大水害」により多数の深層崩壊が発生した地域を対象として観測された PolSAR データの解析を行い、土砂災害箇所およびその周辺の森林における偏波散乱特性の検討を行った。

崩壊地においては、従来から知られているとおり、主に表面散乱が発生することが確かめられた。また、表面散乱の強さは局所入射角によって変化することが明らかとなった。これは、崩壊地の表面をランバート面と仮定できることを示唆している。一方、森林における表面散乱、体積散乱には入射角依存性が確認されなかった。そのため、PolSAR データを用いて土砂災害箇所を検出する場合には、このような崩壊と森林の偏波散乱特性を考慮することが重要である。精度の高い検出を実現するためには、PolSAR データに加え、数値地形モデル (DEM) を利用して局所入射角を求め、局所入射角に応じた複数の散乱電力の閾値の設定すること等が有効であると考えられる。そこで、電力分解結果をもとに、局所入射角の範囲に対応した複数の表面散乱および体積散乱の閾値を設定し、土砂災害箇所の検出精度を評価した。その結果、既往研究で提案されている単一の閾値に基づく検出と比較して、提案法では検出漏れや過剰検出が低減されることが確認された。ただし、提案法においても検出漏れが発生することが確認された。さらなる精度向上のためには、入射角の範囲を細分し、それに応じた閾値を検討することが必要であると考えられる。

文 献

- [1] 奈良県, 紀伊半島大水害に関する情報, <http://www.pref.nara.jp/16688.htm>.
- [2] 国土交通省国土地理院, 基盤地図情報サイト, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>.
- [3] C. Yonezawa, M. Watanabe, and G. Saito, “Polarimetric decomposition analysis of ALOS-PALSAR observation data before and after a landslide event,” *Remote Sens.*, vol. 4, pp. 2314–2328, 2012.
- [4] S.-E. Park, “The effect of topography on target decomposition of polarimetric SAR data,” *Remote Sens.*, vol. 7, no. 5, pp. 4997–5011, Apr. 2015.
- [5] S.-E. Park, W. M. Moon, E. Pottier, “Assessment of scattering mechanism of polarimetric SAR signal from mountainous forest areas,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 11, pp. 4711–4719, May 2012.
- [6] Y. Yamaguchi, Y. Yajima, H. Yamada, S. Uratsuka, T. Umehara, and T. Moriyama, “X- and L-band Pi-SAR observations to Chuetsu Earthquake region, Japan,” in *Proc. of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Dresden, Germany, May 2006.
- [7] M. Watanabe, C. Yonezawa, J. Iisaka, and M. Sato, “ALOS/PALSAR full polarimetric observations of the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake of 2008,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 33, pp. 1234–1245, 2012.

参考論文

- [参1] T. Shibayama, Y. Yamaguchi and H. Yamada, “Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle,” *Remote Sens.*, vol. 7, no. 11, pp. 15424–15442, Nov. 2015.

6. 結論

6.1 結論

本研究では、全偏波合成開口レーダを用いた土砂災害箇所検出の精度向上について検討を行った。

第一章「序論」では、本研究の背景として、全偏波合成開口レーダを用いた土砂災害箇所検出に関する研究の重要性、必要性について述べるとともに、本研究で取り扱う課題、目的を設定した。

第二章「偏波合成開口レーダ」では、第三章に記述した全偏波合成開口レーダ (PolSAR) によって得られるデータの解析手法や解析によって抽出できる情報の基礎となる、レーダおよび合成開口レーダ、および偏波情報の概念を整理した。また、現在までに開発・運用された具体的な PolSAR システムのうち、本研究で使用したデータの取得にも用いられている 3 つのシステムの主要諸元を整理した。

第三章「偏波合成開口レーダデータの解析」では、PolSAR により得られる散乱行列から出発し、散乱行列から導かれる偏波行列について概観するとともに、ターゲットの散乱メカニズム等の情報を抽出するための解析手法として、広く用いられている (偏波行列の) 固有値・固有ベクトルを用いる手法と偏波行列を散乱メカニズムに対応した散乱電力に分解する手法について述べた。

第四章「土砂災害調査における偏波合成開口レーダ利用の現状と課題」

では、既往研究事例として土砂災害検出にリモートセンシングが用いられている事例のほか、偏波合成開口レーダを使って土砂災害の散乱特性を検討した事例等を取り上げ、偏波合成開口レーダによる土砂災害の検出における現状と未だ明らかとなっていない課題について整理した。

第五章 「土砂災害箇所における偏波散乱特性」 では、第四章で示された課題について、実際に大規模な土砂災害（深層崩壊）が発生した地域を対象として観測されたデータを散乱電力分解により解析した。次に、電力分解結果より、土砂災害とその周辺における森林の偏波散乱特性を明らかにした。既に知られているように、崩壊地の表面では表面散乱が卓越することが確認され、また、その表面散乱の強さは局所入射角によって変化することが明らかとなった。一方、森林においては散乱メカニズムの入射角依存性は顕著でないことがわかった。

これらの結果から、より精度の高い土砂災害検出を実現するための方策として、従来から用いられている画像全体に一律の閾値ではなく、個々の斜面における局所入射角に応じた各散乱強度の閾値を複数設定することを提案した。

6.2 今後の課題

本研究で明らかとなった山間地における崩壊および森林での偏波散乱特性を考慮することにより，電力分解結果（電力分解画像）を目視判読することで，土砂災害箇所の検出は可能であると考えられる．さらに，全偏波合成開口レーダを用いた土砂災害箇所検出を実用的なものとするために，以下のような事項について検討することが重要である．

1. 全偏波合成開口レーダ画像と数値地形モデルの精度のよい重ね合わせ手法の検討
2. 同手法を実現するプログラムの開発
3. 開発されたプログラムによって得られた検出結果の精度検証

なお，第五章で提案した閾値は，本研究で対象とした現象（深層崩壊）および観測条件（たとえば，L-band SAR であること等），解析時のパラメータ設定（たとえば，空間平均する際のウィンドウサイズ等）に依存するものである可能性があるため，さまざまな形態の土砂災害に対応するためには，今後，さらに異なる条件で検討を行うことも重要であると考えられる．

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，新潟大学・教授 山口 芳雄 先生には，全般にわたりご指導，ご鞭撻を賜りましたことを心より感謝いたします。また，本論文を取り纏めるにあたり，新潟大学・教授 山田 寛喜 先生，同・教授 中野 敬介 先生，同・准教授 西森 健太郎 先生の各位には貴重なご討論とご助言をいただきました。深く感謝いたします。

学会・研究会等の場においては，大阪工業大学・教授 小林 弘一 先生，長崎大学・准教授 森山 敏文 先生にご議論いただき，本研究を進めるうえで示唆に富む有益なご指摘を頂戴しました。また，新潟大学 波動情報研究室のメンバー各位には，解析データの手配のほか，さまざまな面で多大なるご協力をいただきました。

株式会社パスコ取締役・（前）衛星事業部長 笹川 正 博士，同・衛星事業部長 三徳 昭弘 氏，同・副事業部長 福永 哲雄 氏および同・部長 吉川 和男 氏には学位取得にあたり，特段の便宜を図っていただきました。また，三五 大輔 氏，草野 駿一 博士，ならびに稲見 麻央 氏をはじめとして，衛星事業部および研究開発本部の各位には，論文全般にわたる数多くの有益なご助言を賜りましたことを記して感謝いたします。