

リモートセンシング技術の地盤工学への応用

5. 合成開口レーダーの概要と応用例(2)

岡谷 隆基 (おかたに たかき)
国土交通省国土地理院

村木 広和 (むらき ひろかず)
㈱イメージワン GEOソリューション部 部長

5.1 干渉画像

5.1.1 干渉画像処理

本章冒頭の説明のとおり、合成開口レーダーは、アンテナから電波を放射し、観測する対象物に当たって反射された電波を観測するものである。

反射された電波は、振幅と位相の情報を含んでいる。電波の強さを示す振幅からは、対象物の大きさや表面の性質を知ることができ、位相は対象物までの距離の情報を含んでいる。

ただ、位相情報は距離そのものではなく、アンテナから地物までの往復の距離を、レーダーの波長で割った「あまり」であるため、波長の整数倍の部分が分からない限り距離を求めることは不可能であるが、一般的にこれは困難であり不確定要素となっている。

一方、同じ場所で2回観測を行えば、アンテナと地物の距離変化を捉えることは可能である。

図-5.1は、上空からマイクロ波を照射し、地表で反射してアンテナに戻るまでの様子を示したものである。図-5.1のように隆起が起ると、地表はアンテナに近づくため、マイクロ波の移動距離はアンテナに向かう方向への変動量の2倍だけ短くなる。

合成開口レーダーで用いられる波長は TerraSAR-X などに代表される Xバンド (波長約3 cm)、RADARSAT などに代表される Cバンド (波長5~6 cm)、ALOS/PALSAR などに代表される Lバンド (波長20~30 cm) などがある。地震などに伴う地殻変動などでは地表変動が数十 cm から数 m に及ぶため、XバンドやCバンドでは波長が短く、先に述べた不確定要素と

なる波長の整数倍の部分が増えすぎてしまう。また、波長が短いと葉の表面などで跳ね返り、地表変動以外の变化を捉えてしまう可能性が高くなる。これらのことから、国土地理院ではLバンドのデータをこれまで利用しており、近年ではALOSのPALSAR (波長23.6 cm) を用いている。

干渉 SAR で捉えられる距離変化は、アンテナ方向への地物の移動量の2倍をレーダーの波長で割った「あまり」であるため、ALOS/PALSAR の場合は、11.8 cm ごとに「あまり」が0に戻ることになる。

この処理による地表変動の表現はしばしば口絵写真-17のような縞状のカラー画像として表現される。このような画像を SAR 干渉画像と呼ぶ (口絵写真-17は平成19年に発生した能登半島地震について示したものである)。

先にも述べたとおり、11.8 cm ごとに位相は元に戻ることから、口絵写真-17も11.8 cm ごとに同じ色が現れるように表現されている。この変動と SAR 干渉画像の対応を模式的に示したものが図-5.2と図-5.3である。

図-5.2では、地震等によって地表が隆起した際のアンテナと地表の位置関係の変化と、干渉処理によって得られるモデル的な SAR 干渉画像を示している。一方、図-5.3ではALOS/PALSAR の干渉処理で得られる位相変化を示している。口絵写真-17や図-5.2に見られる縞模様は図-5.3に示すように0~360度の位相が複数回繰り返すことで、数十 cm に及ぶ変動が表現されていることが分かる。具体的には図-5.2のケースで言えば、図-5.2下部にある矢印のように干渉縞を追跡すると、

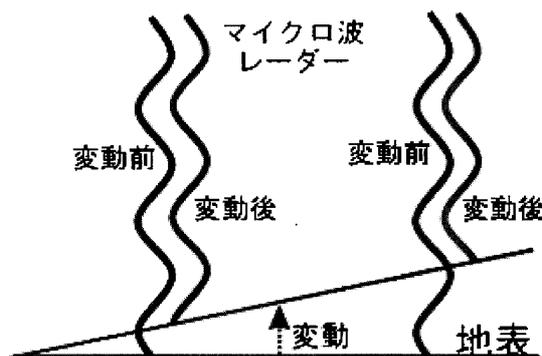


図-5.1 マイクロ波レーダーの波と地表変動
(国土地理院, 2011⁶⁾による)

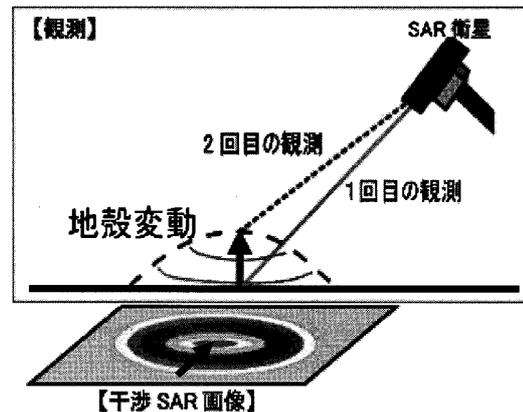
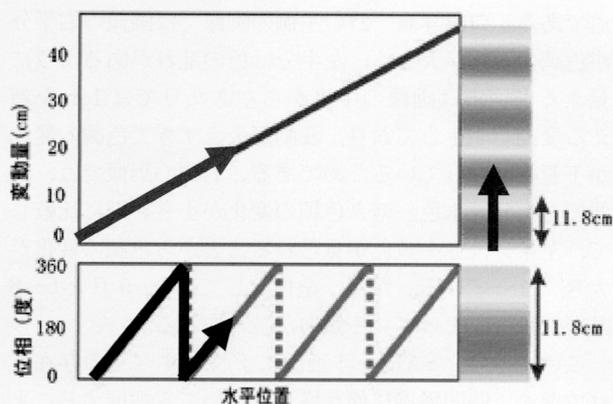


図-5.2 地殻変動と SAR 干渉画像
(国土地理院, 2011⁶⁾による)



図—5.3 ALOS/PALSAR の干渉処理で得られる位相変化
(国土地理院, 2011⁶⁾を一部改変)

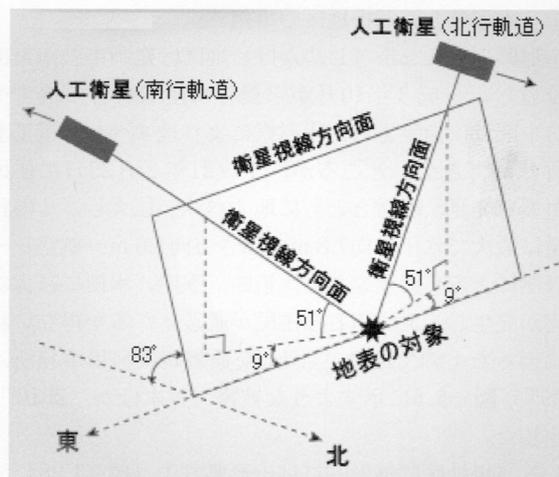
図—5.3の矢印のように周囲から真ん中に向かってアンテナに半波長の1.5倍程度(約18 cm)近づいたことを縞模様から読み取ることが可能である。

ところで、合成開口レーダーによる観測は通常真上ではなく右か左の斜め上方から行われる。例えば、ALOS/PALSARでは図—5.4のとおりほぼ真東又はほぼ真西の上空から地表に向けてレーダーが照射される。このため、衛星のある方向によって、地表の移動方向と衛星と地表の距離変化の対応が異なる。具体的には、東側上空から観測した場合は、東向きの移動や隆起は衛星との距離が短くなるのに対し、西向きの移動や沈降は衛星との距離が長くなる。一方、西側上空からの観測では、隆起で距離が短くなり沈降で距離が長くなるのは同じだが、東向きの移動は距離が長くなり、西向きの移動は距離が短くなる。ちなみに、南北方向の移動は衛星と地表との距離変化にほとんど影響がないため干渉縞にはほとんど表現されない。

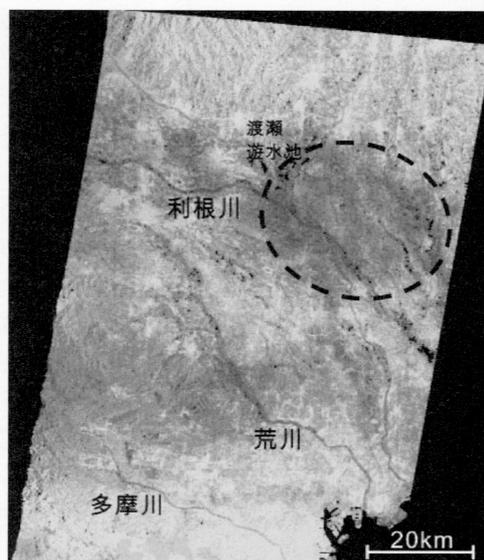
口絵写真—18はこれらを踏まえた、地表変動と干渉画像の関係である。衛星と地表が近づく方向の色変化は青→黄→赤→青、遠ざかる方向の色変化は青→赤→黄→青となる。ALOS/PALSARでは衛星が北に向かう場合に西側から観測を行い、南に向かう場合に東側から観測を行っているためこのようになる。衛星の進行方向と、地表変動のパターンが与えられれば口絵写真—18上部のように対応する地表変動の様子が推定可能となる。

この原理により、国土地理院では、地震や火山活動に伴う地表変動や地盤沈下、地すべり把握などに干渉SARを活用してきた。最近の成果としては、口絵写真—17で示した地震のケースの他、図—5.5に示す地盤沈下の把握などが挙げられる(図—5.5は栃木県から茨城県にかけての地盤沈下を1995~1997年のデータの干渉処理により捉えたものである。図の利根川や渡良瀬遊水地の文字の右側の変色域が衛星から遠ざかった部分=沈下した部分となっている)。

このように、国土地理院では干渉SARを用いて様々なモニタリングを実施してきたが、応用例の紹介として、以下ではSAR干渉画像を用いた地すべり把握について紹介を行う。



図—5.4 人工衛星の軌道と地表の対象との位置関係
(国土地理院, 2011⁶⁾による)



図—5.5 SAR干渉画像で地盤沈下を捉えた例
(国土地理院, 2011⁶⁾による)

5.1.2 干渉画像による応用例

これまで述べてきたものは、地震や地盤沈下など数十kmから場合によっては100 km以上にわたる空間スケールの比較的大きな地表変動に干渉SARを用いたものであったが、地すべりのように比較的狭い範囲で発生するものについてもSAR干渉画像で抽出できる可能性が指摘されてきている。

近年では、宇根ほか(2008)³⁾により平成19年3月に発生した能登半島地震に伴う能登半島各所での地すべり性の変動が、ALOS/PALSARデータのSAR干渉解析によって未知の地すべりも含め把握できることが示されるなど、活動の継続的、一時的を問わず地すべり性変動の存在が干渉SARにより把握できることが分かってきた。

以下では、干渉画像による応用例として、SAR干渉画像により地すべり性変動を捉えたと見られる、山形県七五三掛(しめかけ)地区の事例と秋田県東成瀬地区の事例について紹介する。

講座

① 山形県七五三掛地区の事例

山形県の七五三掛（しめかけ）地区は鶴岡市の南東部に位置し、平成3年10月から農林水産省所管の地すべり防止区域に指定され、山形県により地すべり対策工事が行われてきた。ところが、平成21年2月25日に住民が亀裂を発見、融雪とともに地すべりが拡大し、その移動量は最大で水平方向7.8 m、高さ方向1.6 m（航空レーザ計測による）に及ぶなど、道路、家屋、水田に甚大な被害が発生し、5戸25名の住民が避難せざるを得ない状況に至ったものであり、（国土交通省新庄河川事務所、2009⁸⁾）図—5.6に示すような被害（鈴木ほか、2010⁹⁾）が生じた。

七五三掛地区は地形的には山形県月山（標高1984 m）の西麓に位置する（図—5.7右下の挿図参照）。図—5.7(a)のとおり、七五三掛地区は梵字川北岸の大規模地すべり地帯の中央付近に位置し、斜面は主に南西を向いている。また、本地区周辺には小規模な地すべりが多数分布している。なお、七五三掛地区近傍の上村地区では、1906～1910年と1935年に大規模な地すべりが生じていた（経済企画庁、1964⁵⁾）。2009年2月下旬以降発生した地すべりは、これが再活動したものである。

当該地域周辺において、大規模地すべりの発生の前後に取得された SAR 干渉画像は口絵写真—19～21のとおりである。口絵写真—19は大規模な地すべりが発生する前の SAR 干渉画像である。左側が北行軌道（2006.6.6～2008.10.27）によるもので右側が南行軌道（2006.9.12～2008.9.17）によるものである。いずれも七五三掛地区は画像の左上に位置し、周囲とは異なる色調が確認される。画像中央下部に同様に色調が異なる場所があるが、こちらも志津地すべりとして知られる活動的な地すべり地である。

口絵写真—20は口絵写真—19について七五三掛地区を拡大したものである。左側の画像はやや色調が乱れているが、いずれも画像の右半分に赤や黄などの発色が見られ、大規模な地すべりが発生する前から地表変状が発生していたと考えられる。

一方、口絵写真—21は2009年の大規模地すべり発生以降の SAR 干渉画像である。左側が（2009.3.20～5.5）、右側が（2009.5.5～8.5）のものであり、いずれも南行軌



図—5.6 地すべりによる路面の被害
（鈴木ほか、2010⁹⁾）

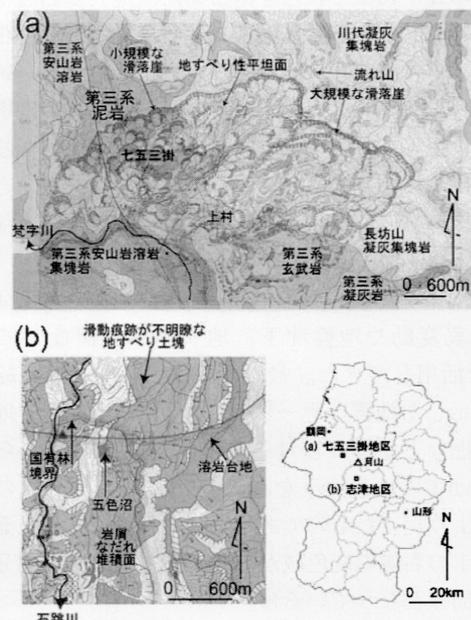
道である。口絵写真—21の左側の画像では画像の右半分が色調の変化が大きく、左半分は色の乱れがあるように見えるが、実は画像の中央から左あたりでは1 mを超える変動が発生しており、変動が大きすぎて色調の変化が不連続になっているためである。右側の画像では、画像の右半分が水色～紫と色調の変化が小さいのに比較して、左半分は赤や黄色が見られることから色調の変化が大きくなっている。ただ、全体としては3～5月と5～8月で変動が収まっている傾向が読み取れる。

このように、SAR 干渉画像により地すべりの存在だけでなく、時間経過に伴う盛衰についても把握することが出来ることが示された。

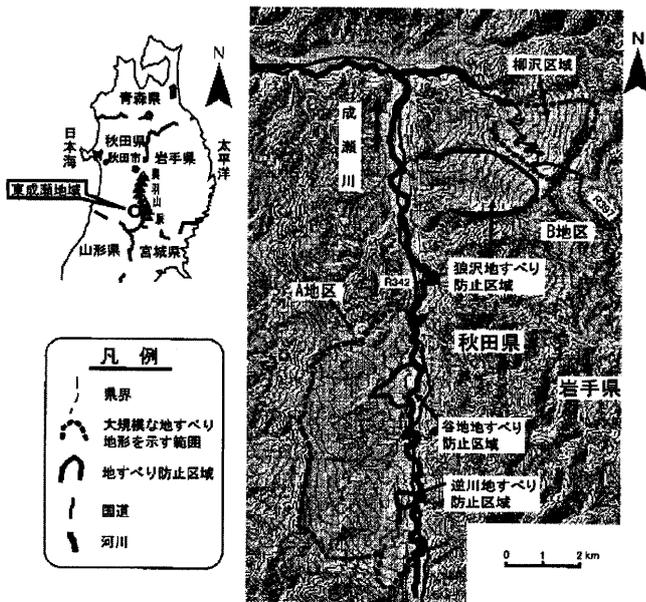
② 秋田県東成瀬地区の事例

東成瀬村は秋田県南東部に位置し、村の中央部では南部から北部に向かって北上する形で成瀬川が流れている（図—5.8）。谷地すべりや狼沢地すべりなどに代表される地すべり地はこの成瀬川が南北に流れている部分に沿って存在する。成瀬川には谷底はほとんどみられず、河床から10～40 mの高さの河岸段丘が両岸に発達する。さらに、右岸側ではこれらの段丘面から40～60 mの高さに高位の段丘が断片的にみられる。また、両岸に数多くの地すべり地形が形成されている。以下では近年10 cmを超える変動が見られる狼沢地すべりについて述べる。

狼沢地すべりは、奥羽脊梁山脈の一つを成す真昼山に位置し、秋田県と岩手県の県境の稜線を成す大森山（1149.5 m）などの南北性で標高約1000 mの小起伏面が成瀬川に向かって西側に緩く傾斜している斜面にあたる。周辺の地形は、大森山南方の稜線を成す山地は西方の成瀬川に向かって傾斜し、これらの斜面には柳沢や狼沢、豊ヶ沢、畑松沢、明通沢などの西向き谷が発達し



図—5.7 対象地区の地形、(a)七五三掛地区、(b)志津地区、右下：対象地区の位置図。（鈴木ほか、2010⁹⁾、山形県商工労働部商工課、1979¹³⁾、国土交通省新庄工事事務所、2002⁷⁾による）。



図—5.8 秋田県東成瀬地区周辺の地形 (森屋, 2005¹²⁾を一部改変)

ている。北部の柳沢や狼沢沿いでは幼年期的な緩傾斜の斜面が広くみられ、概して西向きの地すべりが顕著に発達している。手倉集落東方の柳沢では大森山と大森山トンネルにかけての稜線から西方に発達する地すべりがみられる。その南側の樺台東方の狼沢や豊ヶ沢では、滑落崖や移動土塊、引張り亀裂、圧縮じわなどの地すべりに特有の新鮮な微地形が多数発達している。狼沢地すべりの南側では畑松沢、明通沢はやや壮年期的な深い谷となって地すべり地形はほとんどみられなくなる。

狼沢地すべり自体は幅約1.3 km、長さ約2.3 kmの規模を有し、北西に傾斜する斜面の平均傾斜は約13°であり、斜面は凹凸に富み、湿地が点在するとともに、狼沢や豊ヶ沢が斜面を侵食している (森屋ほか, 2005¹²⁾)。この狼沢地すべりについては継続的にその挙動が追跡されている。分布する地層は、東北地方の新第三紀の標準層序 (北村, 1985⁴⁾) における中新世前期～中期の西黒沢層に対比される西小沢層 (武藤, 1965¹¹⁾) と、中新世中期の女川層に対比される山内層 (早川ほか, 1954¹⁰⁾) で、硬質な泥岩からなっている (臼田ほか, 1981¹⁾)。

口絵写真—22は狼沢地すべり周辺における SAR 干渉画像であり、左図が平成18～19年(2006.4.27–2007.4.30)、右図が平成20～21年 (2008.7.16–2009.6.3) に対応するものである。

口絵写真—22の結果から、秋田県東成瀬地区の狼沢地すべりの場合、SAR 干渉画像の結果から変動している範囲が比較的明瞭であり、H18–19では太楕円範囲において変動量が30 cm 程度と大きいものの、10 cm 以上にわたる変動が広い範囲 (細楕円) で確認され、H20–21ではH18–19において太楕円で示した範囲のみに変動が縮小していることが分かる。すなわち、H20–21ではH18–19と比較して変動する範囲が東側に縮小しつつ限定されていることが明確である。

山形県七五三掛地区の事例では、大規模地すべり発生

後の地すべり性変動の盛衰等が SAR 干渉画像から判読できることについて述べたが、秋田県東成瀬地区の事例からは、経年的な変動や、変動範囲の変化についても SAR 干渉画像から判読できることが示された。

5.1.3 干渉画像処理のまとめ

いずれのケースでも、地すべりに伴う地表変動に対応した SAR 干渉画像上の色調の変化が確認され、干渉 SAR により地すべりが捉えられることを示している。これらの結果は、干渉 SAR によるモニタリングは広域にわたる変動だけでなく局地的な変動についても適用可能であることを示している。

ALOS は本年5月に運用を停止したが後継機である ALOS-2 の早期の打上げが望まれるところである。

5.2 偏波の概要と特性

電磁波は、直交した電界と磁界から成る波で、電界の振動の向きと電磁波の伝播方向を含む面を「偏波面」と言う。この偏波面が地面に対して垂直な場合を垂直偏波 (図—5.9を参照) と言い、水平の場合を水平偏波 (図—5.10を参照) と言う。

5.2.1 偏波の散乱依存性

従来は、レーダー方程式など電力量による散乱断面積を用いたターゲットの分類等を行ってきた。この電力量による散乱表現の問題点としては、電界方向が考慮されていない点である。この電界方向 (電界の振動方向) を考慮した定式化が必要となる。そこで、式(1)に偏波方向 p, q (horizontal = h 成分, vertical = v 方向) を現すと以下の式(2)となる¹⁶⁾。

$$\sigma = \sigma(\theta, \varphi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^4 \cdot \left| \frac{E_p^s(\theta, \varphi)}{E_i^s} \right| \dots \dots \dots (1)$$

- σ : 電力反射係数 (散乱断面積)
- r : アンテナとターゲットの距離
- E^s : 入射電界成分
- E^i : 散乱電界成分
- θ, φ : 球座標成分

$$\sigma_{pq} = \sigma_{pq}(\theta, \varphi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^4 \cdot \left| \frac{E_p^s(\theta, \varphi)}{E_q^i} \right| \dots \dots \dots (2)$$

例えば、 $p = h, q = v$ の場合は、 σ_{pq} は、 v 偏波を入射したときに h 偏波成分の散乱電力の大きさを表す。以下の電力反射係数が得られる。式(3)参照

$$\begin{bmatrix} P_h^s \\ P_v^s \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \sigma_{hh} & \sigma_{hv} \\ \sigma_{vh} & \sigma_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_h^t \\ P_v^t \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

- p : 電力
- k : 定数
- t, s : 送信, 散乱を表現
- h, v : 水平, 垂直を表現

式(3)は、ターゲットの偏波依存性を表し、定式化したものである。この式でも電界方向はスカラー量であるので、電界の振動方向まで含めた式が以下の式(4)と式(5)である。

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \sqrt{K} \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{hh}} e^{j\phi_{hh}} & \sqrt{\sigma_{hv}} e^{j\phi_{hv}} \\ \sqrt{\sigma_{vh}} e^{j\phi_{vh}} & \sqrt{\sigma_{vv}} e^{j\phi_{vv}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

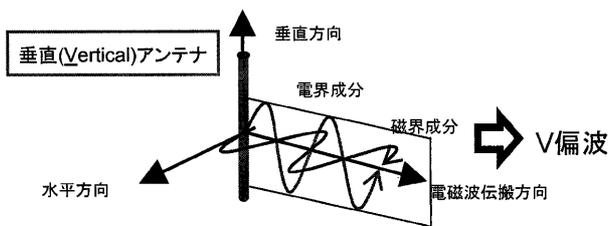


図-5.9 垂直偏波（電界方向が偏波面）

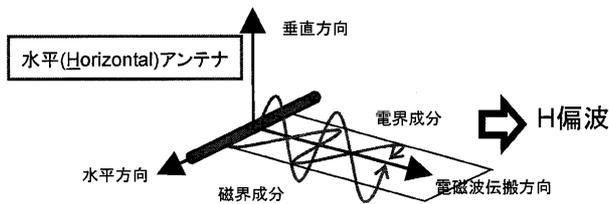


図-5.10 水平偏波（電界方向が偏波面）

σ : 位相（振動方向を表す）

E : 電界成分

$$E^s = SE^t \dots\dots\dots (5)$$

以下に S の散乱行列を示す。

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

この散乱行列は、ターゲットの形状が（棒状，平面，2面コーナリフレクタ等）によって以下のような行列となる。

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{ターゲットが棒状の場合の散乱行列}$$

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{ターゲットが平面の場合の散乱行列}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{ターゲットが2面の場合の散乱行列}$$

5.2.2 フル偏波解析とは

フル偏波解析では、エントロピー（ H ：散乱の乱雑さ）、アルファ角（ α ：表面散乱+ワイヤ散乱+2回散乱）、 H_{α} 面を組み合わせたゾーン分類（口絵写真—23 ゾーン分類図を参照）による火山災害における降灰範囲の特定を紹介する¹⁶⁾。

以下の偏波合成画像では、固有値解析を用いてゾーン分類したものであり、Covariance 行列（あるいは Coherency 行列）を固有値ベクトルに展開したものである。SAR データとしては、2011年2月7日に新燃岳の噴火後に RADARSAT-2 衛星を用いてフル偏波モードで撮影を行ったものである。

口絵写真—24では、観測したフル偏波データの内、赤色に HH 偏波を割り当て、緑色に VH 偏波を割り当て、青色に VV 偏波を割り当てたものを、国土地理院の10 mDEM を用いてオルソ化を行ったものである。この画像から裸地や火山灰に覆われた場所（1回散乱箇所）が、紫色として確認できる。特に火山灰に覆われていると思われる高千穂峰の山頂付近は、紫色となっていることが確認できる^{14),15)}。

謝 辞：

本稿をまとめるにあたっては、秋田県雄勝振興局農林部より提供された移動杭データを使用した。また、ALOS/PALSAR データは経済産業省及び宇宙航空研究開発機構により開発された同センサーによる観測データについて宇宙航空研究開発機構より提供を受けたものを国土地理院で解析したものである。さらに、本稿においてデータや内容の取りまとめについて国土地理院測地部宇宙測地課及び国土地理院地理地殻活動研究センター地理情報解析研究室のメンバー等の協力を得た。これらについてここに謝意を示すものである。

参 考 文 献

- 1) 白田雅郎・村山 進・岡本金一・白石建雄・高安泰助・乗窟一雄・狐崎長狼・山脇康平：5万分の1秋田県総合地質図幅「稲庭」同説明書，秋田県，1981。
- 2) 宇根 寛・佐藤 浩・矢来博司：衛星合成開口レーダー画像で抽出された平成19年（2007年）能登半島地震に伴う地形変化．国土地理院時報，113，pp. 41～47，2007。
- 3) 宇根 寛・佐藤 浩・矢来博司・飛田幹男：SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析．日本地すべり学会誌，45，pp. 125～131，2008。
- 4) 北村 信：東北地方の基盤地質．地すべり学会東北支部，pp. 1～36，1985。
- 5) 経済企画庁：5万分の1土地分類基本調査（地形・表層地質・土じょう調査），湯殿山，1964。
- 6) 国土交通省国土地理院：“国土地理院干渉 SAR”，<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/> (accessed 25 Oct. 2011)，2010。
- 7) 国土交通省新庄工事事務所：寒河江川流域微地形分類図，2002。
- 8) 国土交通省新庄河川事務所：直轄地すべり防止区域の概要，http://www.thr.mlit.go.jp/shinjyou/03_sabou/jisuberi/jisuberi.html#a (accessed 25 Oct. 2011)，2009。
- 9) 鈴木 啓・雨貝知美・森下 遊・佐藤 浩・小荒井衛・関口辰夫：山形県月山周辺における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出．国土地理院時報，120，pp. 1～7，2010。
- 10) 早川典久・舟山裕士・斎藤邦三・北村 信：岩手県北上山地西縁より脊梁山に亘る地域の新第三系の地質，東北鉱山学会，Vol. 1, No. 10，pp. 56～68，1954。
- 11) 武藤 章：秋田県南部地域の新第三系の層序，地質学雑誌，Vol. 71，pp. 389～400，1965。
- 12) 森屋 洋・羽沢大樹・阿部真郎・佐藤康彦：秋田県東成瀬地域の珩質泥岩層の地すべり，日本地すべり学会誌，Vol. 42, No. 1，pp. 40～50，2005。
- 13) 山形県商工労働部商工課：5万分の1地質図幅説明書，湯殿山，46p.，1979。
- 14) 米澤千夏・齋藤元也・石塚直樹・村木広和・根岸正浩・小川茂男：RADARSAT-2の全偏波観測による水稻の生長，第47回（平成21年度秋季）学術講演会論文集，(社)日本リモートセンシング学会，SAR1，pp. 27～28，2009。
- 15) 米澤千夏・齋藤元也・渡邊 学・石塚直樹・根岸正浩・村木広和・東 健太・小川茂男：RADARSAT-2の単偏波・全偏波観測データによる水田モニタリング，第48回（平成22年度春季）学術講演会論文集，(社)日本リモートセンシング学会，2010。
- 16) 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，pp. 45～51，2007。