

第1編 合成開口レーダ（SAR）画像に関する基本事項

1. 合成開口レーダ（SAR）

1.1 SARの観測原理

衛星に搭載された「合成開口レーダ：Synthetic Aperture Radar」は、衛星の進行方向を（アジマス方向）に対して直角方向（レンジ方向）に斜め下方へマイクロ波を照射する（図-1.1.1）。

衛星の鉛直直下と衛星のマイクロ波照射方向のなす角度を「オフナディア角」と呼び、対象物の天頂方向から見た衛星のマイクロ波照射方向のなす角度が「入射角」である（図-1.1.1）。観測時のオフナディア角を可変とする衛星が多く、傾斜地においては図-1.1.2に示すように斜面の法線とマイクロ波照射方向のなす角度を「局所入射角」と呼ぶ。なお、平地においても地球が球体であるためオフナディア角<入射角の関係が成り立つ。

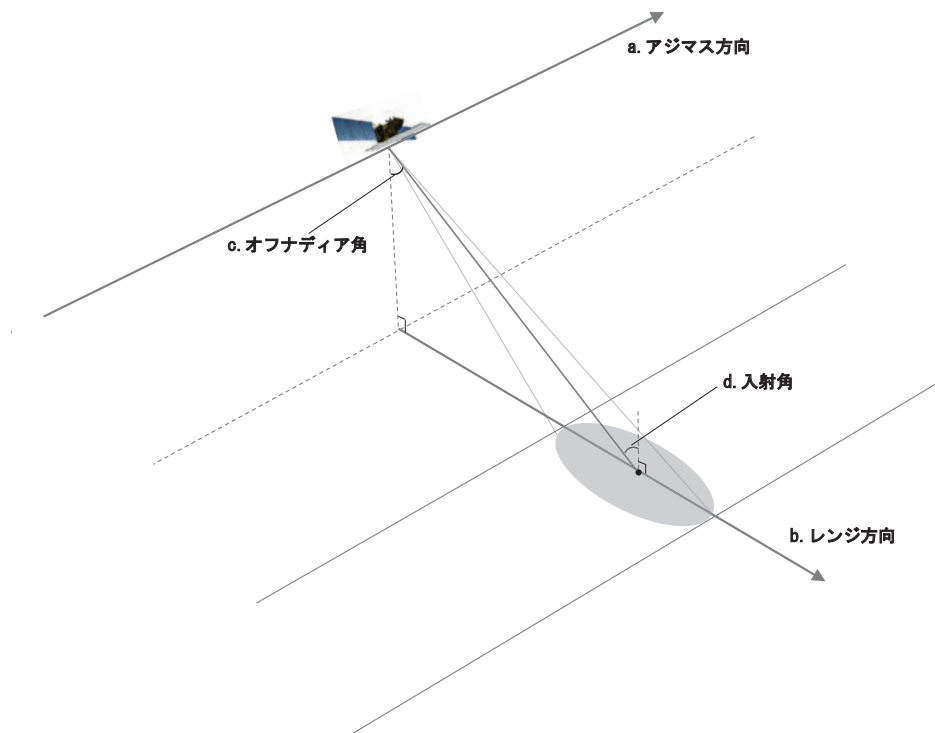


図-1.1.1 SAR観測に関する用語と概念図

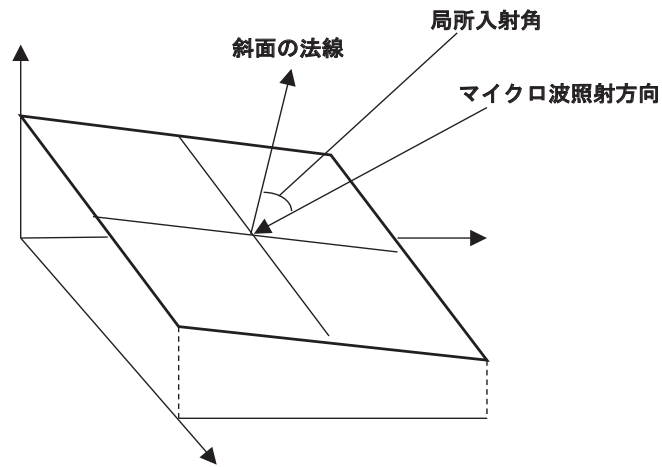


図-1.1.2 局所入射角

合成開口技術は衛星等の安定した高速飛行を利用した連続観測を行うことで、アンテナの物理的長さ（実開口長（ D_r ））よりも長い仮想アンテナ（合成開口長（ D_s ））で観測した結果と同等の効果を実現する（図-1.1.3）。また、理論上はSARのアジマス空間分解能は実開口長（ D_r ）の半分の値となり、高分解能な観測データを取得することができる。

また、SARは画像レーダであり、観測対象を画像化（イメージング生成）するセンサである。

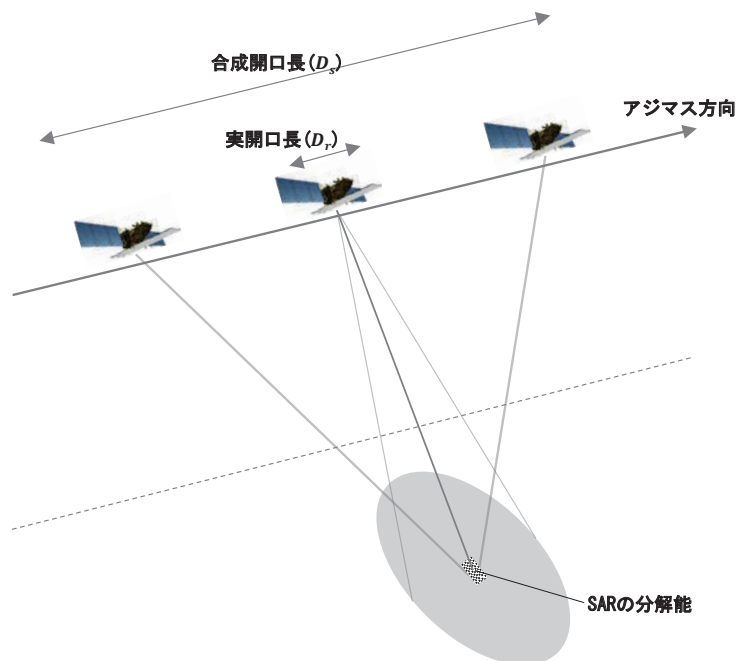


図-1.1.3 合成開口技術の原理

1. 2 SAR の特徴

SAR による観測は、レーダのアンテナ自体からマイクロ波を観測対象物に向けて照射し、観測対象物によって散乱した電磁波エネルギーをアンテナで受信する能動型センサ (active sensor) である。太陽から放射された電磁波エネルギーを利用する受動型センサ (passive sensor) ではないため昼夜の別なく観測ができる。また、SAR は雲や雨等の大気中にある粒子の大きさよりも長い波長のマイクロ波 (図-1.1.4) を照射するため被雲等の影響を受けづらい。

このように SAR は「全天候性」という特長があり、時間帯や気象状況に依存することなく観測することができる利点がある。

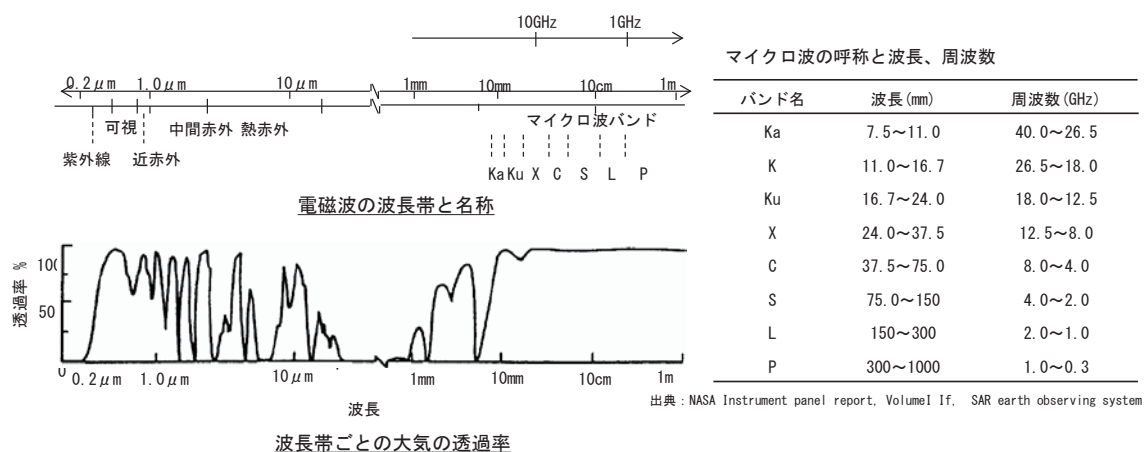


図-1.1.4 マイクロ波と大気・雲・雨の関係

出典: リモートセンシング技術研修テキスト 「マイクロ波リモートセンシング」

1. マイクロ波の特徴 マイクロ波と大気・雲・雨の関係 (RESTEC 製作・編集) より

1. 3 波長 (バンド)

SAR は電磁波の中でもマイクロ波 (波長が約 0.1~100cm) が使われる。波長に応じて図-1.1.5 に示すバンド名称に細分類されている。

Xバンドのような比較的波長が短いマイクロ波は草地や樹冠、樹木の葉表面で散乱が発生する。一方で、Lバンドのように波長が長い場合は草地や樹冠を透過し、樹幹や地表面で散乱が発生する。波長による散乱特性の違いについては「第1編 1.4 散乱特性」で述べる。

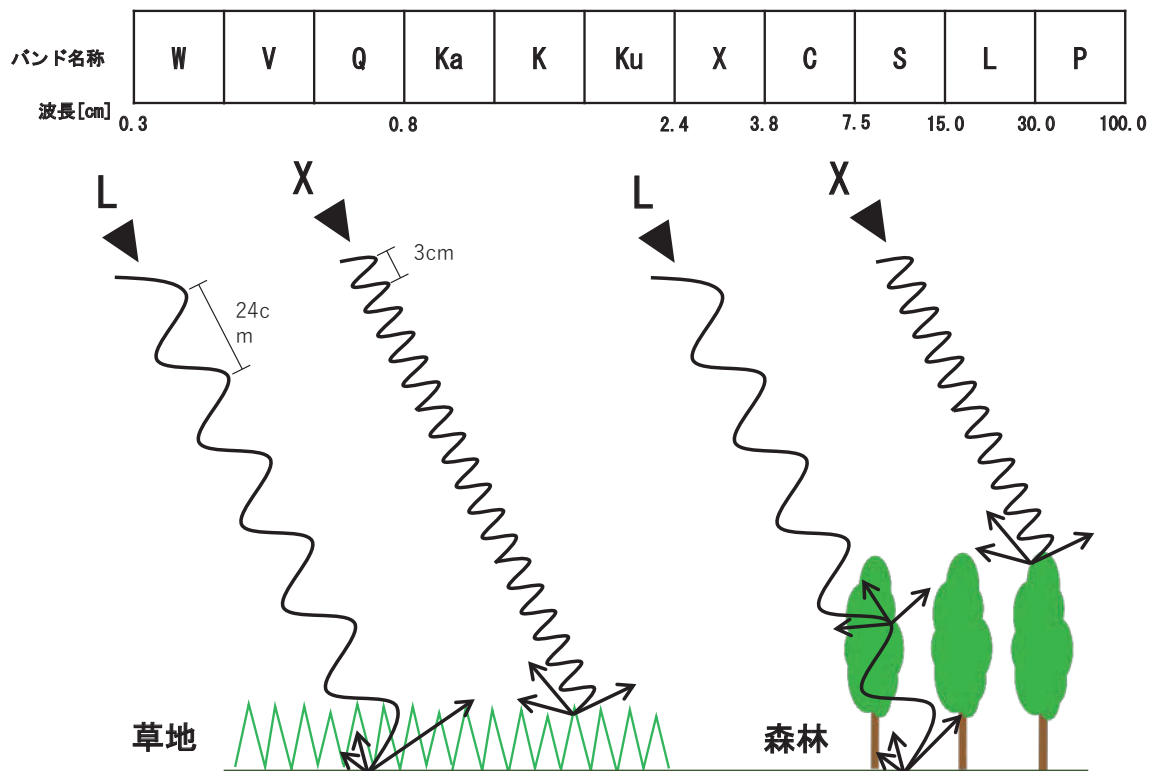


図-1.1.5 バンド名称と波長の分類と特徴

1. 4 散乱特性

照射されたマイクロ波が地表面等で散乱した後に、照射方向側に戻るマイクロ波の強さを「後方散乱強度」と呼び、SAR 観測データには「後方散乱係数」として記録されている。後方散乱係数は散乱面の粗さに応じた入射角依存性がある。

後方散乱係数については以下のとおりである。

送信電力を P_t 、波長を λ 、アンテナからの距離を R 、アンテナ・ゲインを G 、レーダ断面積を σ とすると、SAR は単一アンテナによる電波の送受信を行うためモノスタティック・レーダー方程式が適用されて、受信電力を P_r は式-1.1.1 で表される。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad \text{式-1.1.1}$$

後方散乱係数 (σ^0) は散乱面の単位面積 (A) あたりのレーダ断面積 (σ) であるため、式-1.1.2 で表される。

$$\sigma^0 = \frac{P_r (4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2 A} \quad \text{式-1.1.2}$$

1.4.1 表面散乱

SAR から照射されたマイクロ波が地表などの境界面で散乱することを「表面散乱」という。表面散乱は境界面の粗さの影響を受ける。滑らかな表面に対してはマイクロ波の照射方向と反対側への散乱（前方散乱）が大きくなり、粗い境界面に対してはマイクロ波の照射方向側への散乱（後方散乱）が大きくなる特性がある（図-1.1.6）。

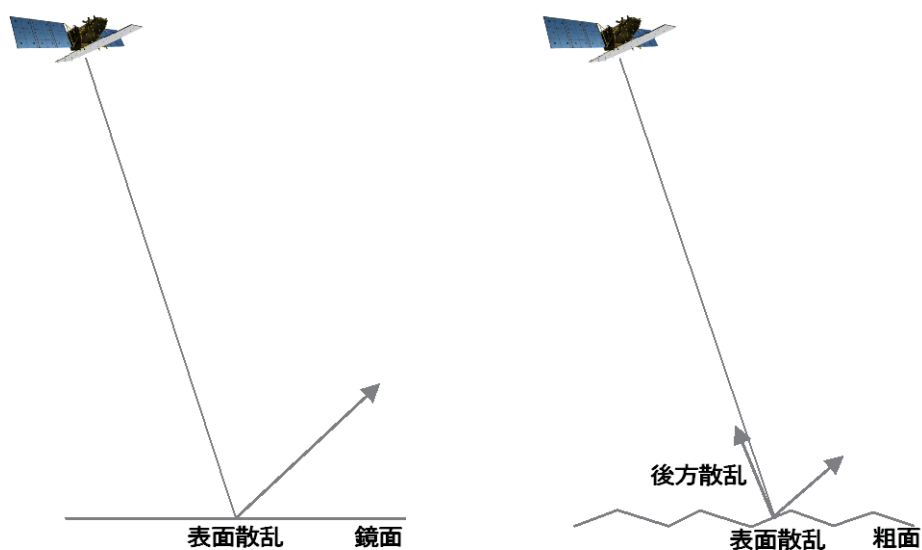


図-1.1.6 表面散乱の概念図

1.4.2 体積散乱

SAR から照射されたマイクロ波が境界部を透過して進入し、内部の誘電率の不均一性によって散乱が生じることを「体積散乱」という。マイクロ波が内部に侵入して発生する現象であるため、波長が長いマイクロ波を扱う場合で、表面散乱が生じづらい誘電率の低い滑らかな境界面を持つ対象を観測する場合に留意する必要がある。

Lバンドの場合には森林内部における体積散乱が典型例であり、樹木内部での体積散乱と地表面での表面散乱を同時に考慮する必要がある（図-1.1.7左）。

1.4.3 二重散乱

図-1.1.7右に示すように、表面散乱した後に再度散乱が生じて、後方散乱が大きくなる「二重散乱」という現象がある。建物や構造物などに対してマイクロ波の照射方向が正対する場合などに強く発生することがある。

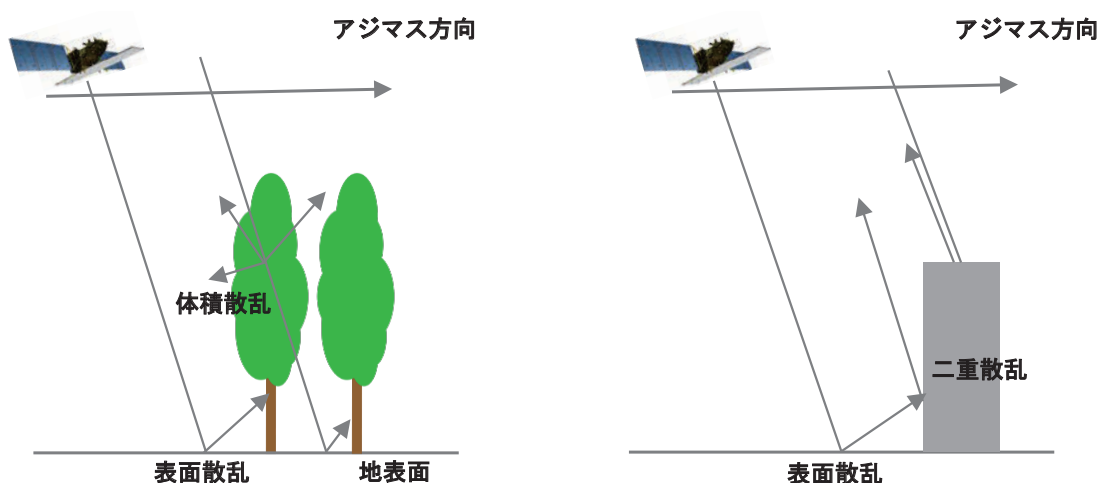


図-1.1.7 体積散乱と二重散乱の概念図

1. 5 偏波特性

電磁波は電界の方向を含む面（偏波面）により水平偏波（振幅が進行方向に対して水平の面をもつ：H）と垂直偏波（振幅が進行方向に対して垂直の面をもつ：V）に分類され（図-1.1.8）、送受信の組合せでHH、HV、VH、VVと表現される（1文字目：照射、2文字目：受信）。

電磁波は対象の幾何学的形状によって、反射や散乱する際に偏波の状態が変化する場合がある。マイクロ波を使用するSARの場合、水平偏波と垂直偏波で生成された画像が異なる特徴がある。

森林のような立体構造がある対象について水平偏波（H）を照射した場合、一部が回転して垂直偏波（V）として反射し、垂直偏波（V）を照射した場合も一部が水平偏波（H）として反射する性質がある。HHおよびVVを「ライク偏波」と呼び、この偏波特性によって森林等の体積散乱が卓越する観測対象に対しては後方散乱が小さくなる。一方で、HVおよびVHを「クロス偏波」と呼び、森林等に対しては後方散乱が大きくなる。

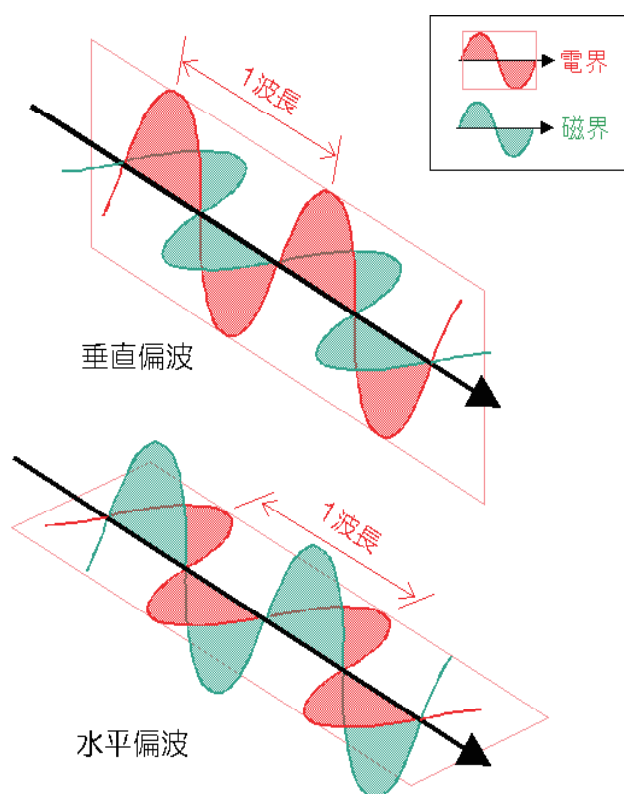


図-1.1.8 水平偏波、垂直偏波の概念図

出典：リモートセンシング技術研修テキスト「マイクロ波リモートセンシング」

3-2. SAR 画像の特徴 ポラリメトリ（RESTEC 製作・編集）より

2. SAR 画像

2. 1 SAR 画像の生成

SAR によって観測された地表の各点における後方散乱強度に応じた濃淡レベルを各画素として可視化したデータが「SAR 画像」である。ある偏波についての後方散乱強度を示した SAR 画像を「単偏波 SAR 画像」という。

図-1.2.1 は単偏波 SAR 画像である。単偏波 SAR 画像からは馬蹄形を呈した滑落崖のような地形的特徴を確認することができる。また、滑落崖直下の南北方向に流れる河道内には後方散乱が強いことを意味する淡い色が支配的であり、土砂が堆積している可能性がある。さらに、崩積土の上流側（北側）には湛水域と考えられる後方散乱が著しく低い濃い色で示された範囲を僅かながら確認することができ、河道閉塞による天然ダムが形成されている状況を推察することができる。

以上のように、空間分解能が高い単偏波 SAR 画像を用いた地形判読によって平面投影面積が概ね 10,000m²以上の大規模斜面崩壊等に起因した河道閉塞箇所を抽出できる場合が多い。詳細については国総研資料第 760 号を参照されたい。

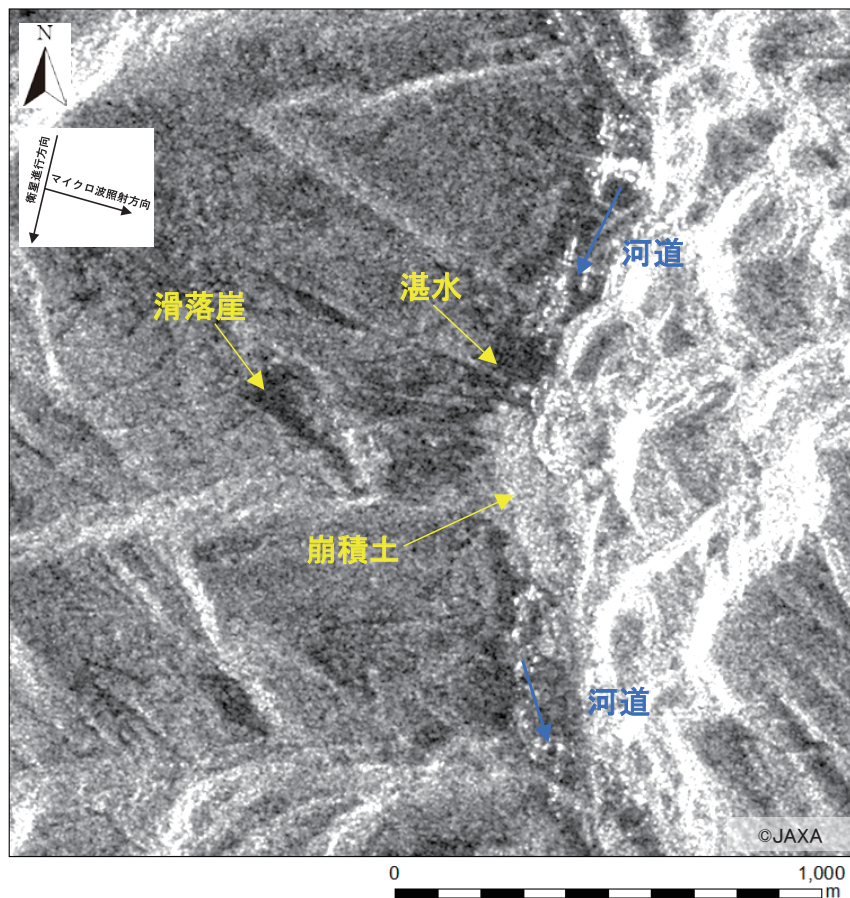


図-1.2.1 単偏波 SAR 画像の例 (大分県日田市)

2. 2 SAR 画像の特徴

「第1編 1. 1 SAR の観測原理」で前述した要因によって、SAR 画像は歪みのある（地形が倒れ込むように投影）鳥瞰図のような見え方となる。また、SAR 画像で可視化される後方散乱強度は散乱面となる土地被覆やそのテクスチャに対応した濃淡で示されるため、観測対象物の直感的な解釈が難しい。図-1.2.2 の単偏波 SAR 画像において、祖谷川の屈曲部は顕著に歪み、森林と農地等を区別することは困難である。

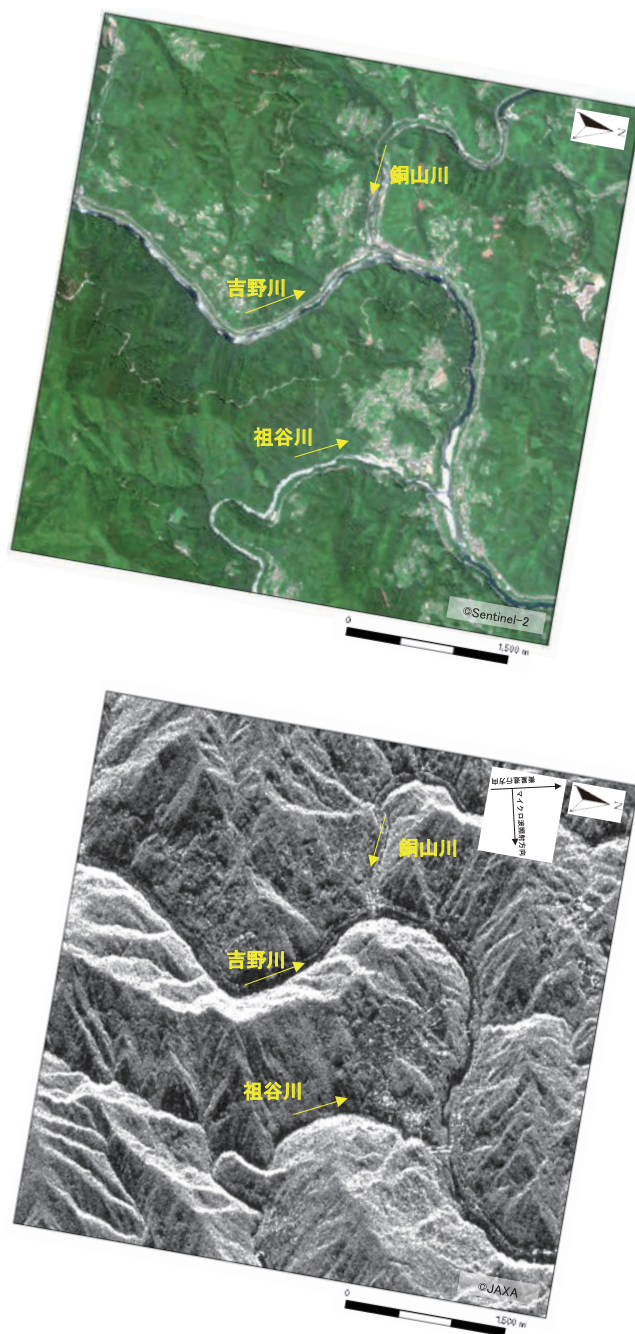


図-1.2.2 光学画像（上）と単偏波 SAR 画像（下）の見え方の違い（徳島県三好市）

2. 3 SAR 画像の留意点

「第1編 1. 1 SAR の観測原理」で前述したマイクロ波の照射方向が斜め下方であることと地形との幾何学的な関係によって、SAR 画像内には歪みの発生やそれに起因した不可視範囲が発生することがある。この影響は「ジオメトリック画像変調」と総称され、以下の3点について解説する。

2. 3. 1 フォアショートニング

SAR における観測対象物の画像上での位置はマイクロ波の送受信に所要する往復時間で決定する。観測対象物に高さがある場合はマイクロ波の送受信時間が短くなる分だけ手前側に投影され、SAR 画像上の標高を持つ対象物はマイクロ波の照射方向側に倒れ込んだように見える。この現象を「フォアショートニング」という。

図-1. 2. 3 に示した富士山を事例に解説すると、標高が高い山頂を示す点Aは実際よりもマイクロ波照射方向側（西側）の点A'の位置まで倒れ込むように投影される。一方で、標高が低い場所はフォアショートニングの影響が小さく、実際の位置点Bと点投影位置B'はほとんど変わらない。

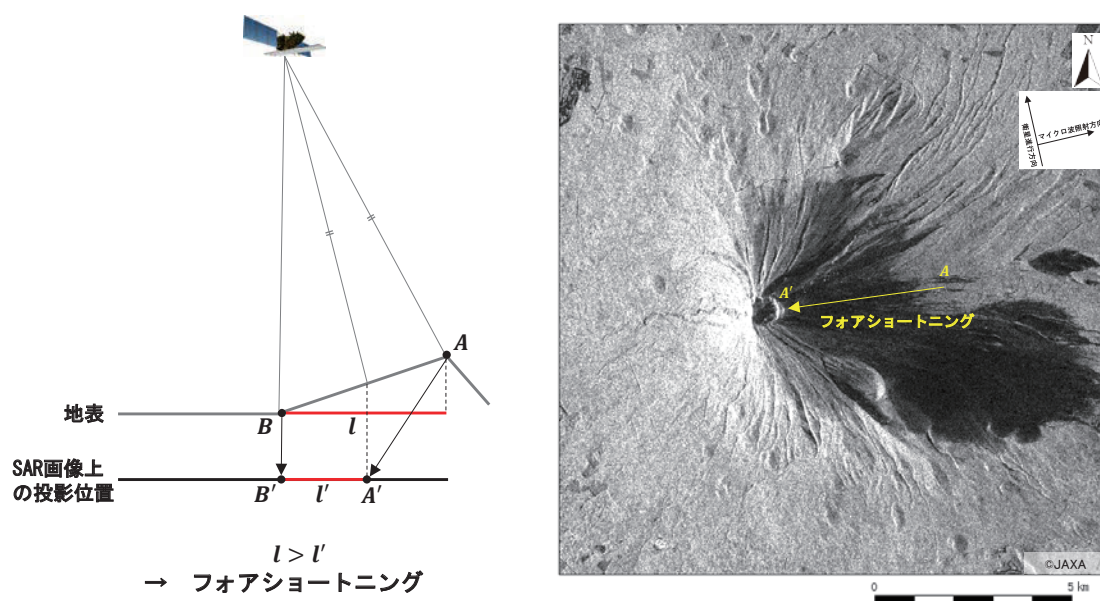


図-1. 2. 3 フォアショートニングの模式図と単偏波 SAR 画像による事例（富士山周辺）

2.3.2 レイオーバ

斜面の傾斜度が大きくなると、フォアショートニングの効果が大きくなって斜面の上端と下端の位置関係が逆転して投影される場合がある。この現象を「レイオーバ」と呼ぶ。

図-1.2.4に示した富士山を事例に解説すると、富士山山頂の点Aは西側に大きくフォアショートニングが発生し、西側斜面の点Bに覆うように投影されて西側斜面（区間AB-BC）が広く不可視範囲となる。また、レイオーバが発生する西側斜面は散乱が密になっているため、SAR画像上では大きな後方散乱強度があるかのように顕著な淡い色で表示されることが特徴的である。

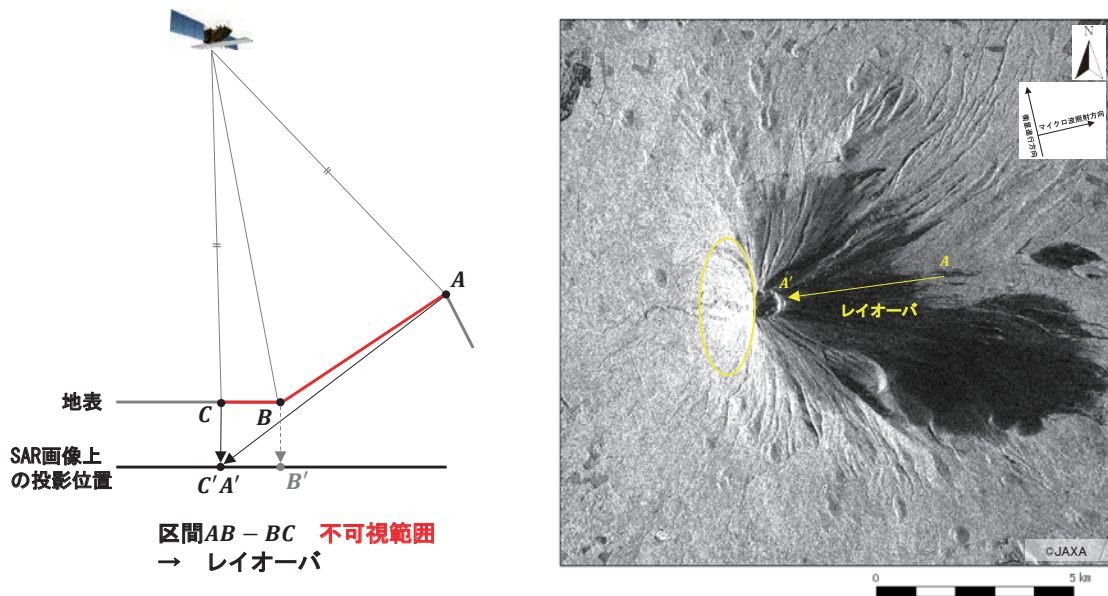


図-1.2.4 レイオーバの模式図と単偏波 SAR 画像による事例（富士山周辺）

2.3.3 レーダーシャドウ

斜面の陰となってマイクロ波が照射されない場所では散乱が一切発生せず、SAR画像上では陰影効果が生じたように投影される。これを「レーダーシャドウ」と呼び、この範囲は不可視である。オフナディア角が大きくなると、レーダーシャドウが発生する範囲も拡大する。

図-1.2.5 に示した富士山を事例に解説すると、富士山の山頂Aから東側斜面はマイクロ波が地表面まで届かず、レーダーシャドウが生じる。レーダーシャドウ部は散乱するマイクロ波がないため、SAR画像上では後方散乱が著しく低い濃い色で示される。水面等の滑らかな平地部で発生する表面散乱と視認性が類似するため、その識別には留意する必要がある。

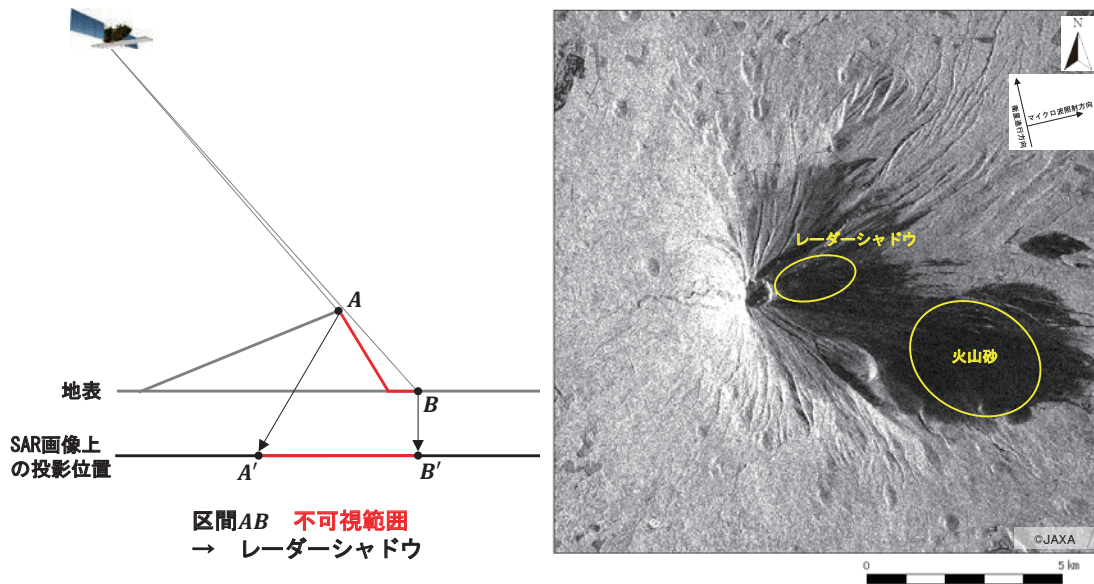


図-1.2.5 レイオーバの模式図と単偏波 SAR 画像による事例（富士山周辺）

2. 4 SAR 画像の分解能

点 A と点 B の 2 点間距離が十分にある場合はそれぞれで散乱したマイクロ波を識別することができるが、点 A と点 B の位置関係が近づいていくと各散乱状況を識別できなくなる（図-1.2.6）。この識別できる限界の 2 点間距離が分解能と呼ばれる。

ただし、SAR 画像の分解能と判別できる観測対象の大きさは異なり、一般的に特定の対象を視認するためには分解能の 10～20 倍程度の規模が必要であると考えられている。

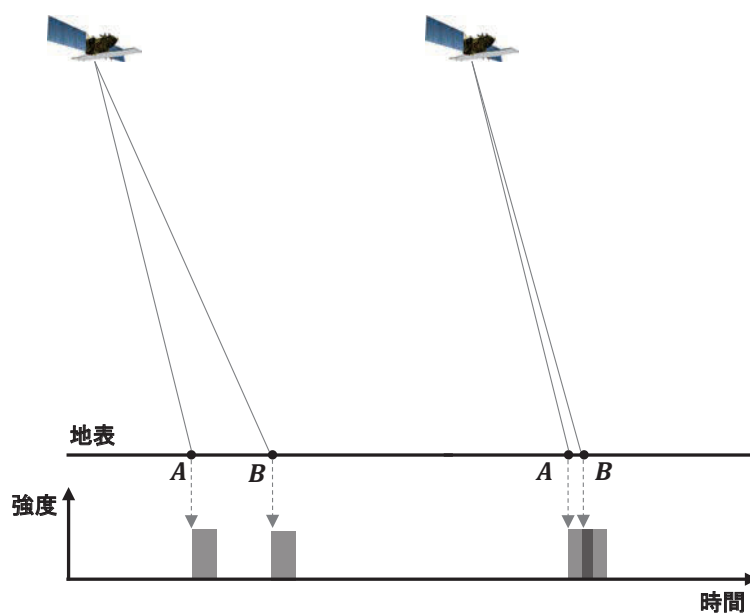


図-1.2.6 分解能の概念図

SAR 画像の分解能 R [m] は式 1.2.1 で示され、理論上は入射角が大きくなるほど分解能が高くなる。

$$R = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad \text{式-1.2.1}$$

c [m/s] : マイクロ波の空気中での速度（光の速度）、 B [Hz] : チャープ信号の帯域幅、 θ [°] : 入射角

2. 5 SAR 画像の解析と種類

複数の偏波による SAR 画像を合成することや異なる時期に観測された SAR 画像を比較することで、地物や地表被覆の状況をより高度に判別できる SAR 画像が生成される。本資料では表-1.2.1 に示す 3 種類の SAR 画像を扱う。

表-1.2.1 本資料で扱う SAR 画像の種類と特徴

| 種類 | 特徴 |
|-------------|--|
| 単偏波 SAR 画像 | <ul style="list-style-type: none">・ 1 時期における単偏波の後方散乱強度を可視化・ 濃淡で表現される画像 |
| 2 偏波 SAR 画像 | <ul style="list-style-type: none">・ 1 時期における各偏波の散乱特性の違いを可視化・ 単偏波 SAR 画像より空間分解能が低下 |
| 強度差分 SAR 画像 | <ul style="list-style-type: none">・ 異なる時期の単偏波の後方散乱強度変化を可視化・ 観測時期以外が同一条件の単偏波 SAR 画像が必要 |

2.5.1 単偏波 SAR 画像

単偏波 SAR 画像はマイクロ波の散乱強度を表した基本となる濃淡画像である。HH の他に、HV、VV、VH という各偏波成分の単偏波 SAR 画像を生成することができる。なお、HH 偏波の単偏波 SAR 画像は図-1.2.1 で前示している。

単偏波 SAR 画像では、後方散乱の強度を示した濃淡からおおよその地形・地表被覆状況を把握することができる。特に、水域では後方散乱強度が著しく低くなる特徴があるため、天然ダムの形成による河道域内の湛水域を判読することができる場合がある。

2.5.2 2 偏波 SAR 画像

2 偏波 SAR 画像は異なる 2 種類の偏波の散乱特性の異方性を可視化した画像である。ライク偏波の単偏波 SAR 画像とクロス偏波の単偏波 SAR 画像を RGB カラー合成処理することで作成することができる。

国総研資料第 791 号に従い、R (赤) : HH 偏波、G (緑) : HV 偏波、B (青) : HH 偏波で RGB カラー合成処理して作成した 2 偏波 SAR 画像図-1.2.7 を示す。森林域は緑色、森林がない裸地域は赤紫色で表現され、森林と崩壊地を含む裸地を画像色から識別することが可能となる。

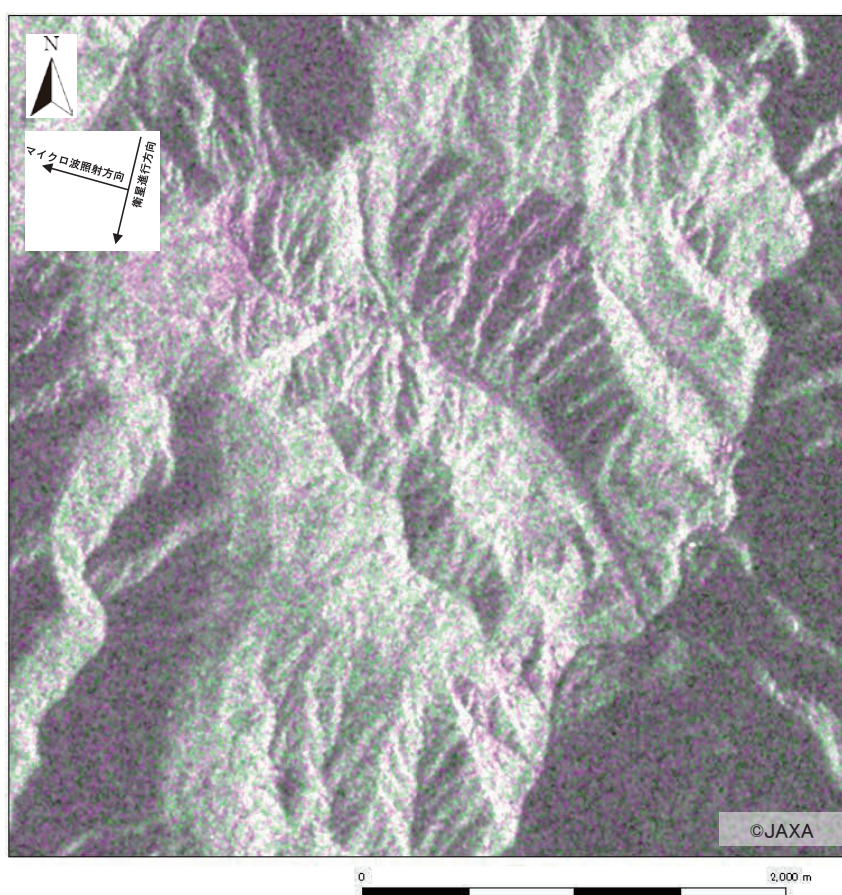


図-1.2.7 2 偏波 SAR 画像の例 (静岡県静岡市葵区)

2.5.3 強度差分 SAR 画像

強度差分 SAR 画像は異なる時期に観測された単偏波 SAR 画像間の後方散乱強度の変化を可視化した画像である。観測時期以外の観測条件が同一の 2 つの単偏波 SAR 画像を RGB カラー合成処理することで作成することができる。

本資料では、R (赤) : アーカイブ画像、G (緑) : 新規観測画像、B (青) : 新規観測画像を割り当てて強度差分 SAR 画像を作成する (図-1.2.8)。2 時期において後方散乱強度が低下したところは赤、後方散乱強度が増大した場所はシアン (水色に近い青緑色) で表現され、土砂災害発生状況を画像の色変化から識別することが可能となる。

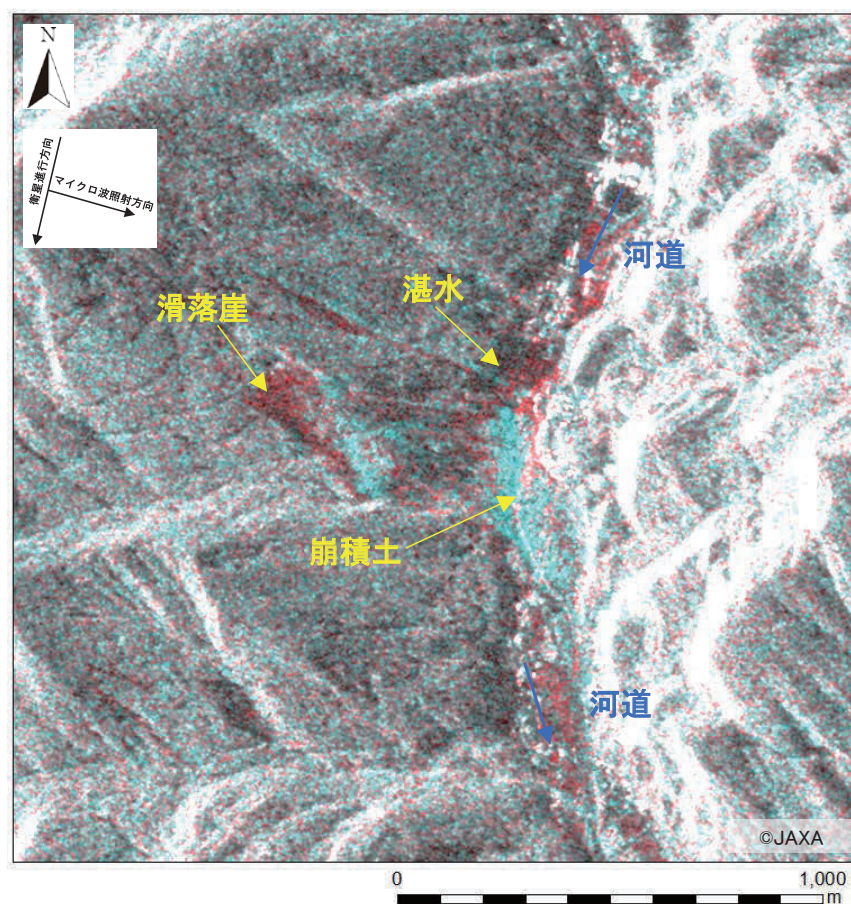


図-1.2.8 強度差分 SAR 画像の例 (大分県日田市)

3. 土砂災害判読調査への SAR 画像の活用

3. 1 土砂災害判読調査に適した SAR 画像の観測条件

「第1編 2. 2 SAR 画像の特徴、2. 3 SAR 画像の留意点」で前述したとおり、SAR 画像は観測原理に由来した特徴的なゆがみや地形の倒れ込みによる不可視範囲が存在する。この不可視範囲は観測条件を考慮することで、その影響を一部軽減することができる。表-1. 3. 1 に土砂災害判読調査に適した SAR 画像の観測条件を示す。

表-1. 3. 1 土砂災害判読調査に適した SAR 画像の観測条件

| 観測条件 | 推奨値 |
|----------|-------------------|
| オフナディア角 | 30° ～45° 程度 |
| 分解能 | ～3m 程度 |
| 波長 (バンド) | 3～30cm 程度 (X・C・L) |

オフナディア角が小さくなるとレイオーバの影響が大きくなり、オフナディア角が大きくなるとレーダーシャドウの影響が大きくなる。このため、土砂災害判読調査の対象となる山地地域においてはオフナディア角 30° ～45° 程度で観測された SAR 画像を用いることが適当である。

一般的に地物や地表被覆の判別が容易になることから、より分解能が高い SAR 画像を土砂災害判読調査に活用することが望ましい。本資料では分解能 3m 程度の SAR 画像を使用して確認した土砂災害判読調査手法について解説する。

土砂災害の発生を判別する際に、X～L バンドにおける視認性の差は小さい。そのため、本資料で解説する土砂災害判読調査手法は X～L バンドで観測された SAR 画像であれば活用できると想定する。

3. 2 SAR 画像を土砂災害判読調査に活用する際の留意点

3.2.1 SAR 画像内の不可視範囲

「第1編 2. 3 SAR 画像の留意点」で前述したとおり、SAR 画像は地形の倒れ込み等が発生することによって不可視範囲が存在する。土砂災害判読調査の対象となる山地地域においては、この影響がより顕著に表れる。

図-1. 3. 1 は土砂災害発生状況と強度差分 SAR 画像の視認性を対比させている。このように、SAR 画像による土砂災害判読調査では崩壊地を判読できない範囲があることに留意してマイクロ波の照射方向と斜面の向きを意識した判読調査結果の取り扱いが必要である。

なお、この不可視範囲は「第1編 2. 5 SAR 画像の解析と種類」で述べた SAR 画像の種類に問わず生じる。

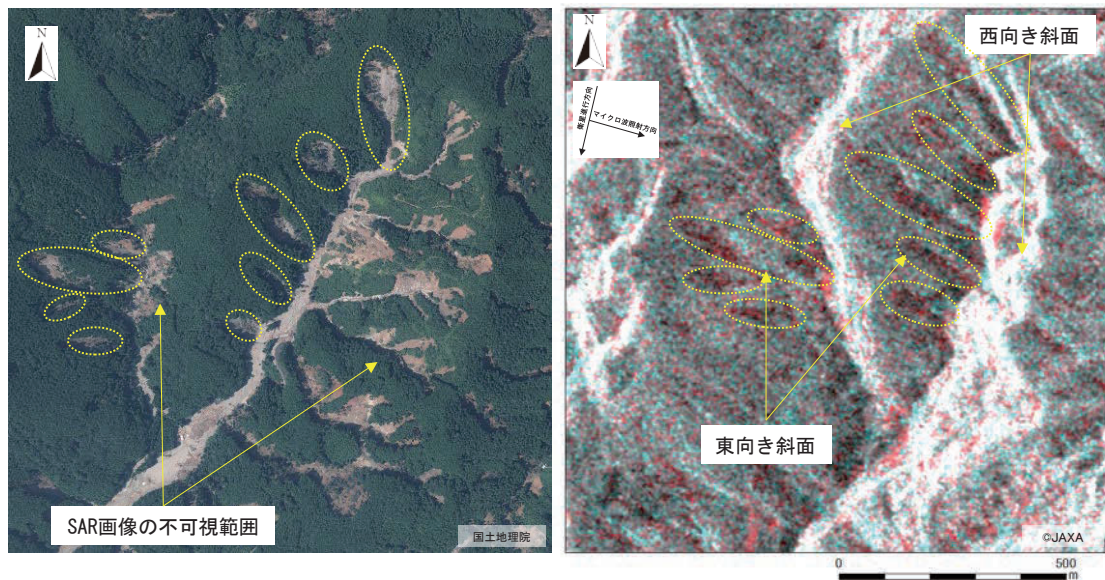


図-1. 3. 1 SAR 画像における不可視範囲の一例 (福岡県朝倉市)

3.2.2 SAR 画像による地物識別における課題

山地地域を対象に土砂災害判読調査を実施する場合、SAR 画像から得られた偏波の特性や後方散乱強度の変化の中には土砂災害の発生と類似した様相を呈する場所があり、見誤って判読する可能性がある。

2 偏波 SAR 画像では伐採地や既崩壊地などの裸地との識別が困難であり（図-1.3.2）、強度差分 SAR 画像では 2 時期における人工改変（森林伐採・地形改変など）や季節変化（農地の湛水など）に留意する必要がある（図-1.3.3）。強度差分 SAR 画像の変化に対する解釈については第 2 編で詳述する。

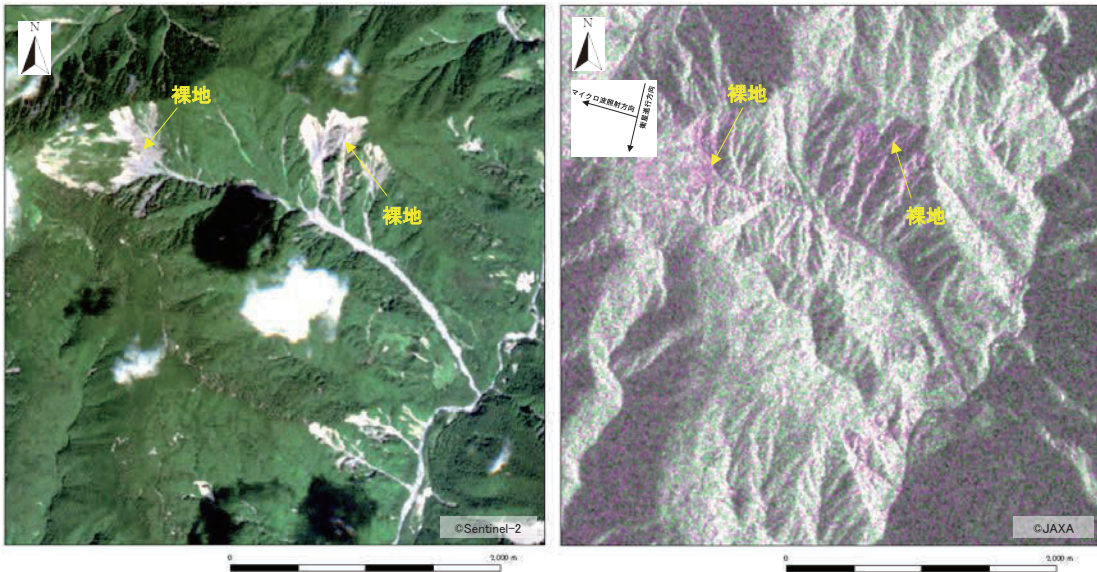


図-1.3.2 2 偏波 SAR 画像における裸地の様子（静岡県静岡市葵区）

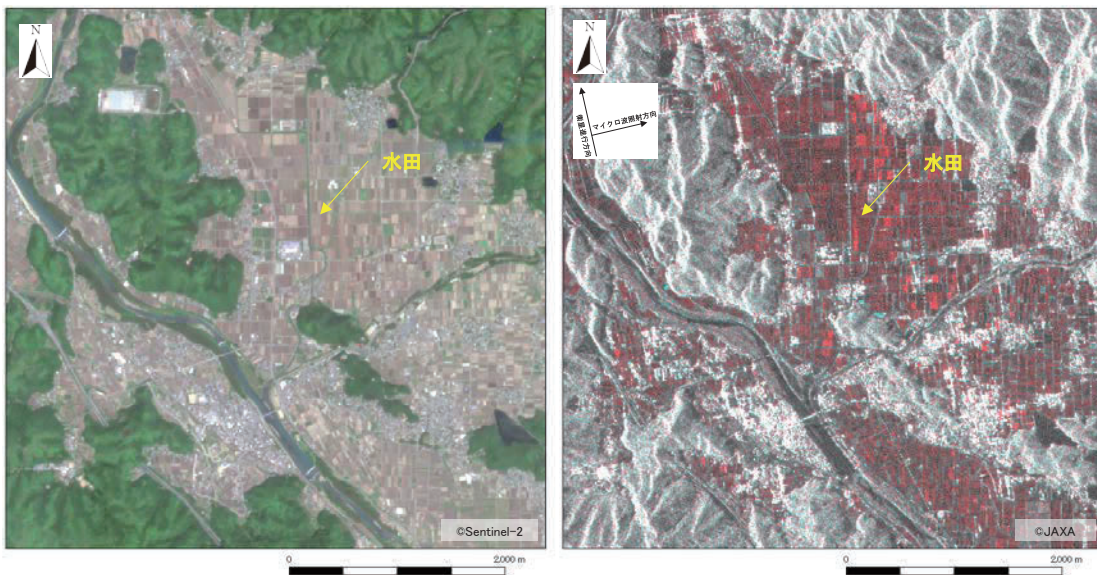


図-1.3.3 強度差分 SAR 画像における水田の様子（京都府南丹市）