

1. SAR 画像の特徴と留意点

1.1 SAR の原理

河道閉塞箇所判読に用いる SAR とは、Synthetic Aperture Radar の略であり、日本語では合成開口レーダーと呼ばれる。SAR は、マイクロ波を地表面に斜めに照射し、地表面からの後方散乱波を受信する能動型センサである。SAR 衛星のマイクロ波は、雲を透過することができ、観測に太陽光を必要としないため、全天候で観測でき、夜間の観測も可能である（図-1.1.1）。

以下、本資料は、人工衛星搭載 SAR による SAR 画像撮影を前提としているが、航空機搭載 SAR で撮影された SAR 画像への適用も可能である。

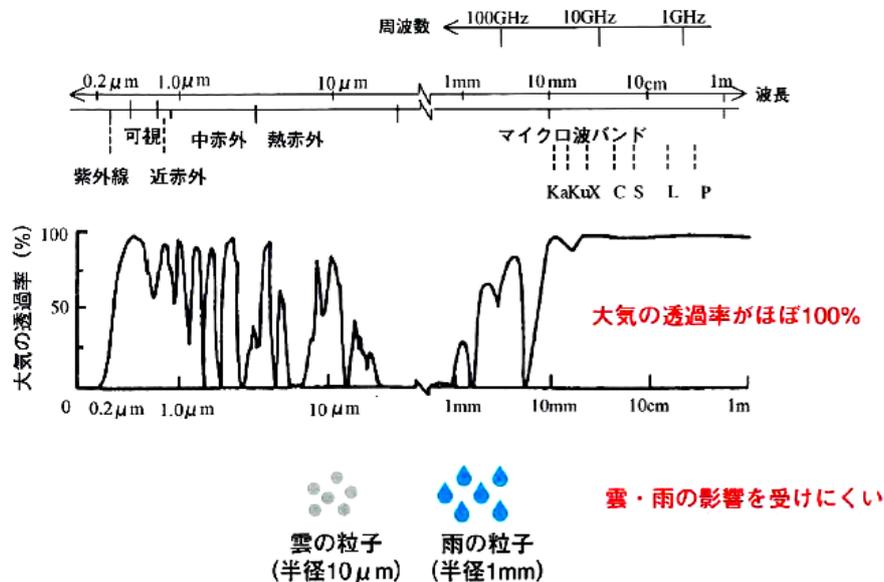


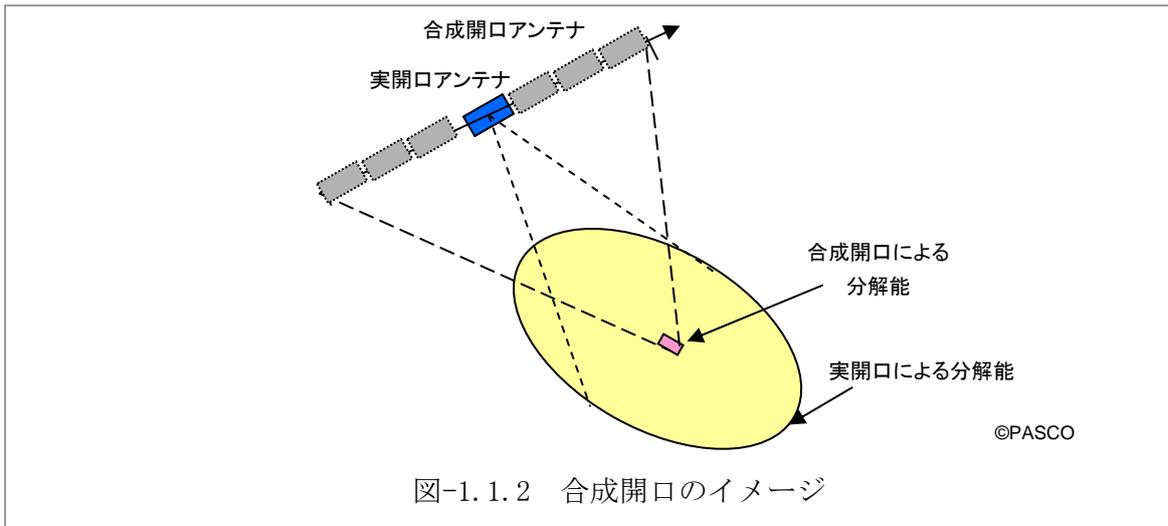
図-1.1.1 マイクロ波と大気・雲・雨の関係

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

ここで、「合成開口」の意味は以下のとおりである。一般に画像の解像度は、アンテナが大きいほど高い。しかしアンテナの物理的なサイズに限界があるためアンテナを大きくすることで解像度を上げることは限界がある。そこで、小さなアンテナを移動することにより、仮想的に大きなアンテナを合成する技術が、合成開口である（図-1.1.2）。

能動型センサとは受動型センサに対するもので、以下のように区別される。

- 1) 能動型：対象物に向けて電磁波などを照射し、その反射波を受信して地表面の状態を把握する。レーザ計測や SAR がこれに当たる。
- 2) 受動型：対象物から反射、放射される電磁波を計測する。通常の光学画像がこれに当たる。

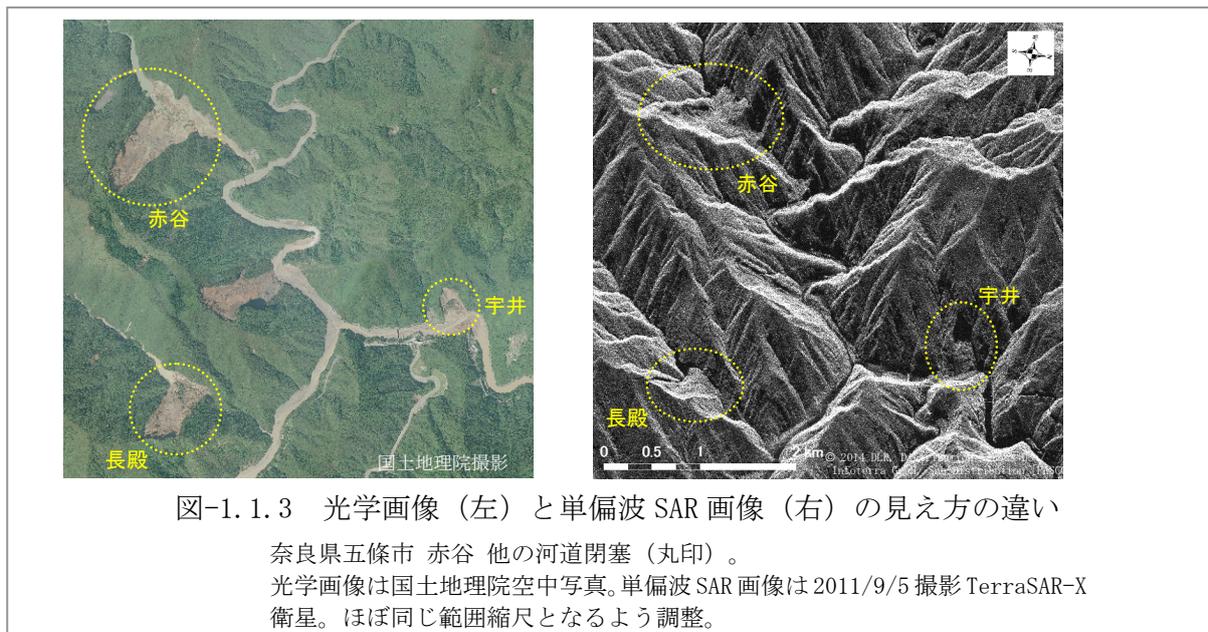


1.2 SAR画像と光学画像の違い

図-1.1.3 に同一箇所の光学画像と SAR 画像（単偏波：HH）を並べて示した（単偏波 SAR 画像の詳細については、「1.4 偏波」を参照）。

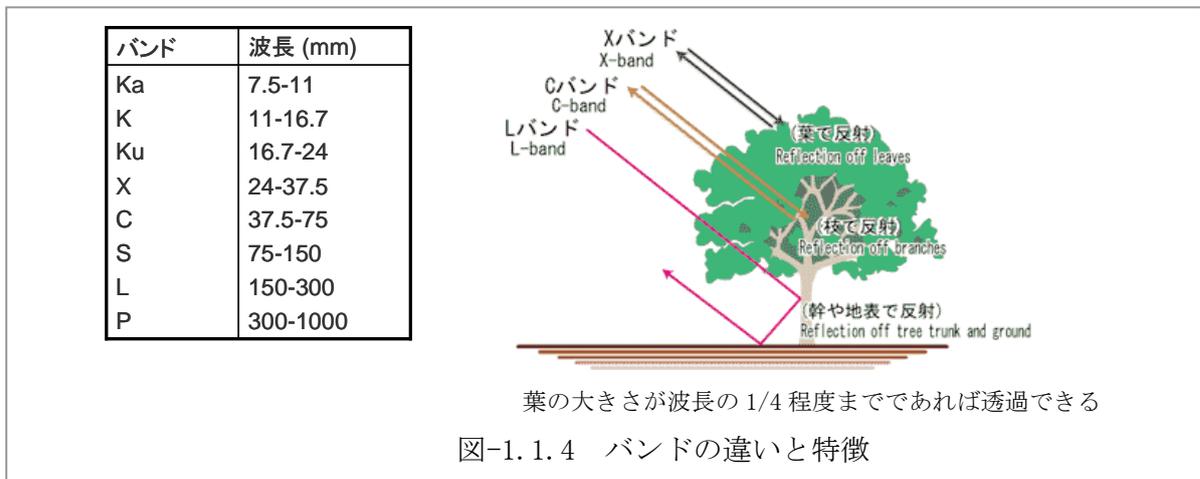
SAR 画像と光学画像の主な違いは以下のとおりである。

- ・ SAR 画像はマイクロ波の反射強度を表すモノクロ画像であり、光学画像と比較すると、直感的な地被状況の判別（裸地と植生の違い等）が困難。
- ・ SAR 画像は斜め下方に撮影するため、鳥瞰図のようなイメージとなり、画像のゆがみや倒れ込み等が特徴的である（詳細は「1.6 SAR 画像の特徴」を参照）。



1.3 波長（バンド）

電磁波は波長により図-1.1.4のように呼ばれる。現時点で運用されている SAR 衛星では主に L、C、X バンドが用いられている。波長の長い電磁波の方が樹木などを透過しやすい。



出典：SRTMの観測原理(詳細)その1 (JAXA) <http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_principle_1.html>に加筆

1.4 偏波

偏波とは、時間的に変動する電場の振幅と振動方向の関係を記述するものであり、電界ベクトルの向きにより水平偏波（振幅が進行方向に対して水平：H）と垂直偏波（振幅が進行方向に対して垂直：V）に分類され、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）。これら HH、HV、VH、VV のいずれか1つの偏波による後方散乱強度を示したグレースケール画像を単偏波 SAR 画像という。ここで、後方散乱強度とは、SAR 衛星のアンテナから照射したマイクロ波が対象物で散乱してアンテナ方向へ戻ってくる強度を示している。

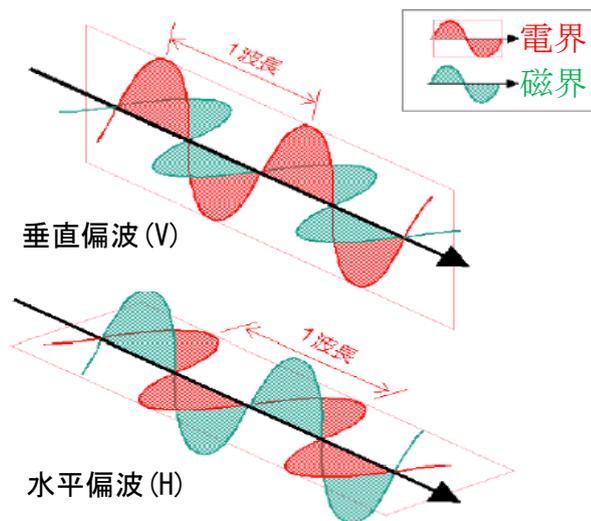


図-1.1.5 水平偏波、垂直偏波の概念図

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

1.5 2 偏波 SAR 画像の作成

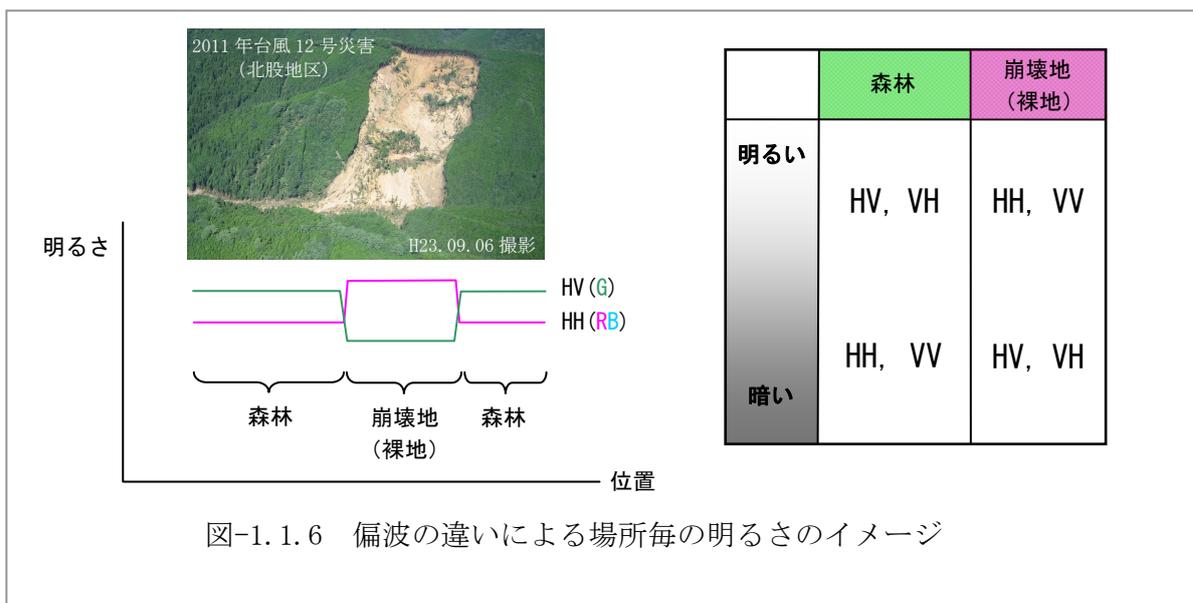
例えば、SAR 衛星のアンテナから水平偏波 (H) を照射した場合、崩壊地のような裸地等では、主に水平偏波のまま強く反射 (表面散乱が卓越) し、森林等では立体構造の影響により、一部が回転して垂直偏波として反射 (体積散乱が卓越) するといった性質がある。これは垂直偏波 (V) を入射した場合も同様の性質を有する (裸地等では主に垂直偏波、森林等では一部が回転して水平偏波として反射)。

つまり、HH、HV、VH、VV の偏波には主に以下の特徴が挙げられる (図-1.1.6 参照)。

- HH、VV (ライク偏波) は、崩壊地で後方散乱強度が大きく、森林では小さくなる。
- HV、VH (クロス偏波) は、森林で後方散乱強度が大きく、崩壊地では小さくなる。

河道閉塞箇所の抽出には、森林の中からその要因となる崩壊地を抽出することが鍵となる。ライク偏波とクロス偏波の SAR 画像を組み合わせた RGB カラー合成画像を作成することで、偏波毎の後方散乱強度の強弱が色の違いとして表現されるため、崩壊地と森林の識別精度が向上すると考えられる。

本資料では、取得可能な地球観測衛星数が多く、かつ処理の簡便性を考慮して、特に **HH 偏波と HV 偏波とを組み合わせた 2 偏波の RGB カラー画像合成** を基本とする。カラー合成する際には、画像の見た目を可視画像に近く、崩壊地を際立たせるために、R (赤) : HH 偏波、G (緑) : HV 偏波、B (青) : VH 偏波を割り当てることで、森林を緑色、崩壊地を赤紫色で表現している (図-1.1.7)。このように複数の偏波を色合成することにより、崩壊地を「形」や「肌理 (テクスチャ)」ではなく、「色」で識別することが可能となる。ただし、山地内の伐採地や既崩壊地等においても、崩壊地と同様の赤紫色で表現されることから、可能であれば災害前のオルソや衛星画像等を参考にしながら判読することが望ましい。



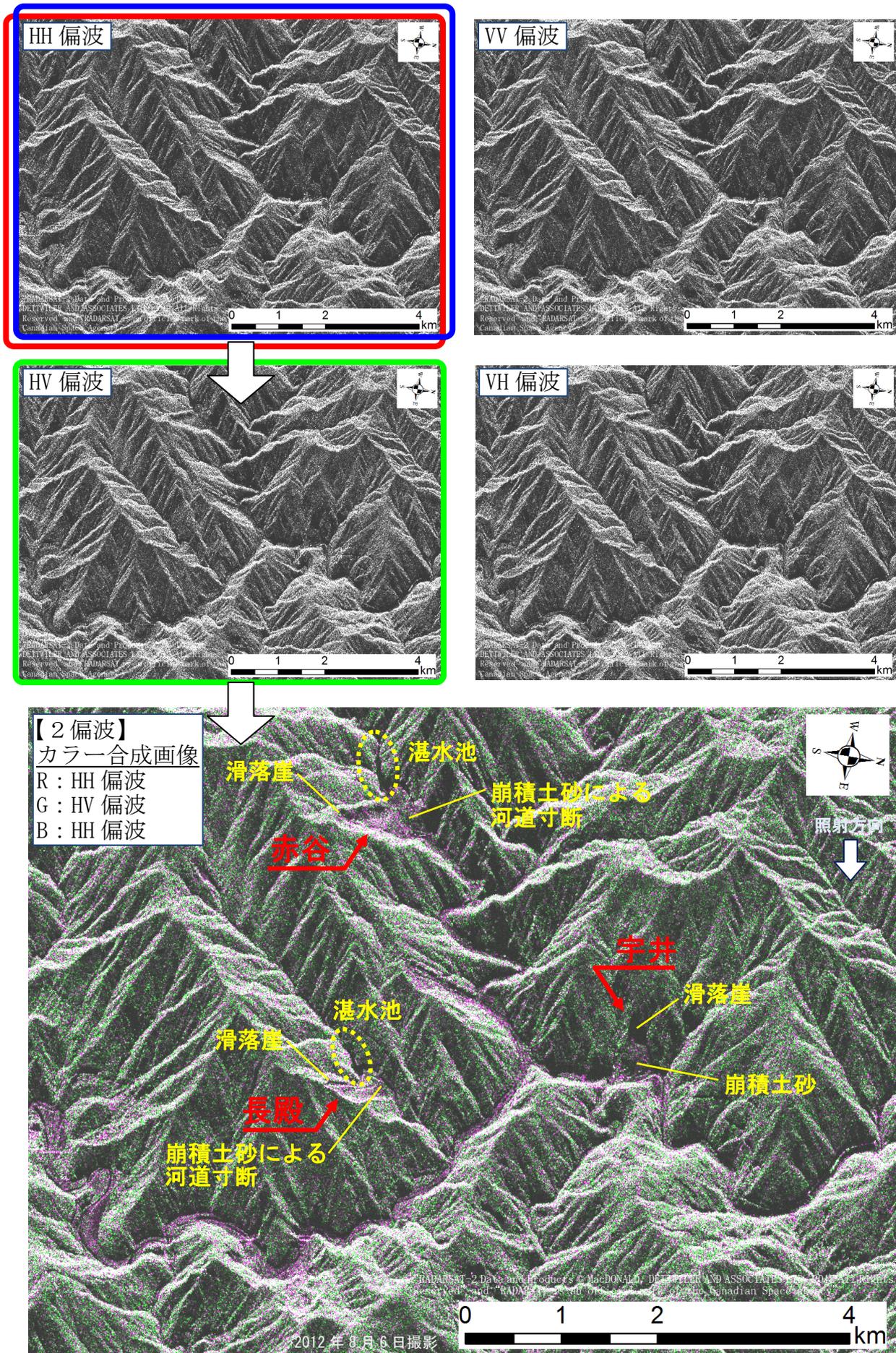


図-1.1.7 2偏波 SAR 画像（平成 23 年台風 12 号災害、奈良県五條市付近の事例）

1.6 SAR 画像の特徴

SAR 衛星は衛星の進行方向(アジマス方向)に対し、直角方向 (レンジ方向)に斜め下方にマイクロ波を照射する(図-1.1.8)。入射角(鉛直線とマイクロ波の照射方向のなす角度)が可変の衛星が多い。

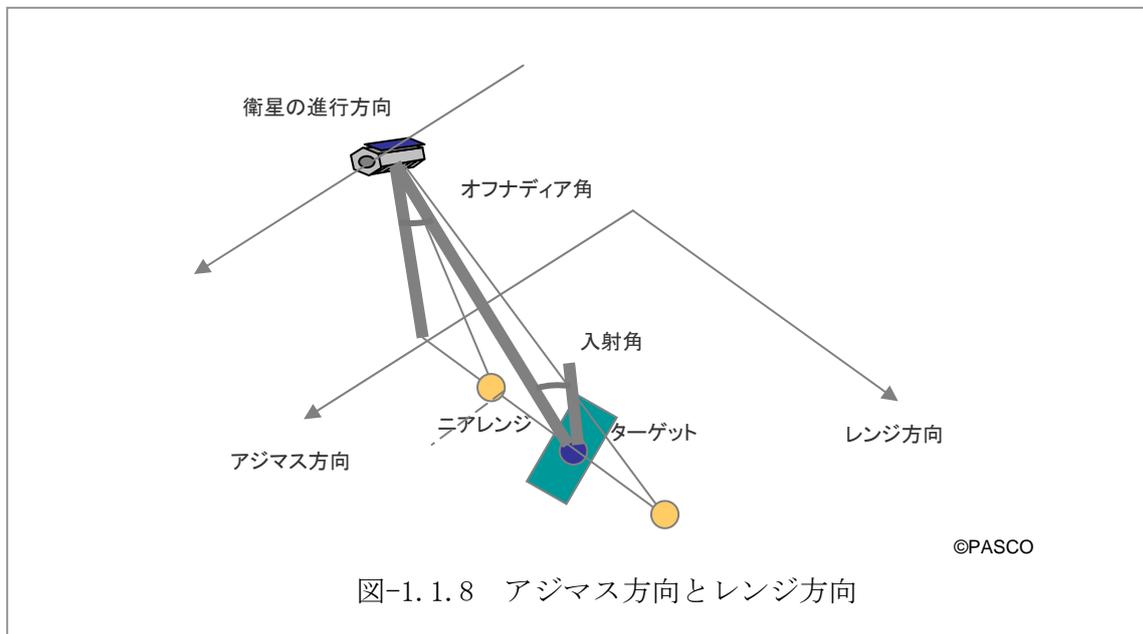


図-1.1.8 アジマス方向とレンジ方向

- ・ オフナディア角：衛星の鉛直直下と衛星のレーダー照射方向のなす角度
- ・ 入射角：対象物の天頂方向から見た衛星のレーダー照射方向のなす角度
- ※地球が球体であるため、オフナディア角と入射角は異なり、入射角>オフナディア角 となる。

対象物からの散乱は表面散乱であり、媒質と媒質の境界面で散乱する。媒質の誘電率が大きいほど散乱は強く、後方散乱は表面の粗さが大きいほど強い(図-1.1.9左)。また、人工構造物(建物など)による二重散乱も発生する(図-1.1.9右)。

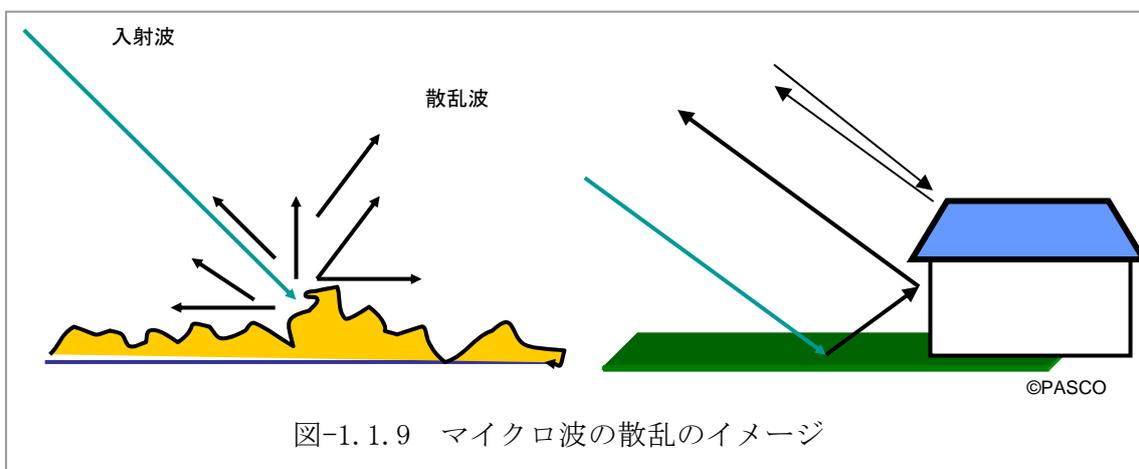


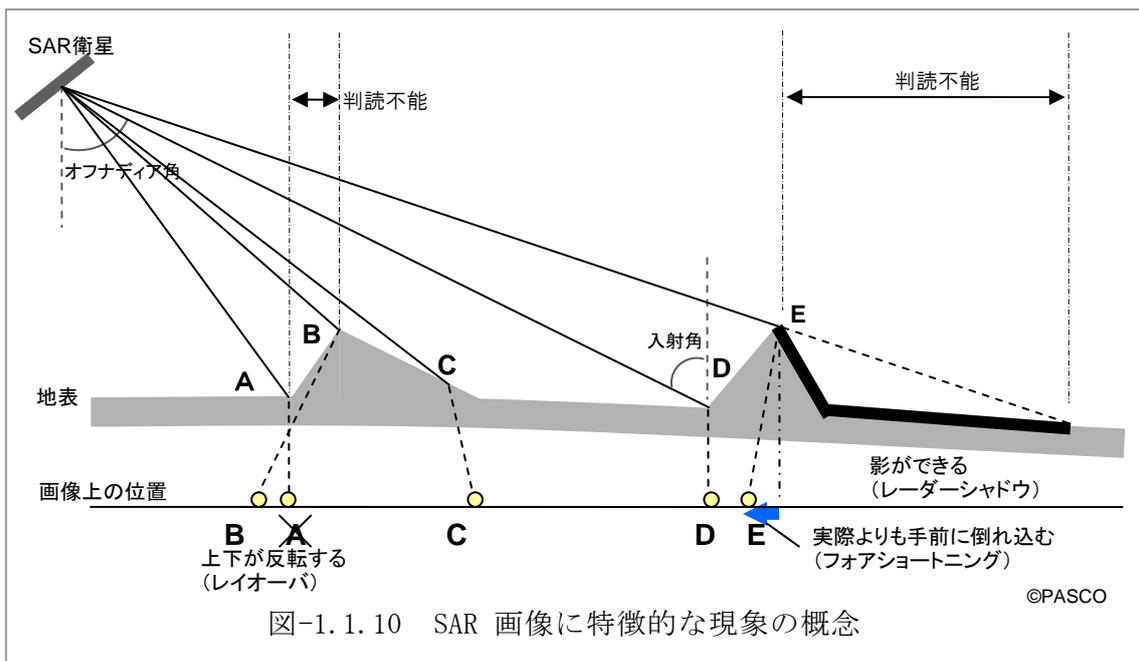
図-1.1.9 マイクロ波の散乱のイメージ

SAR 画像の特徴的な現象として図-1. 1. 10 に見られるものがある。

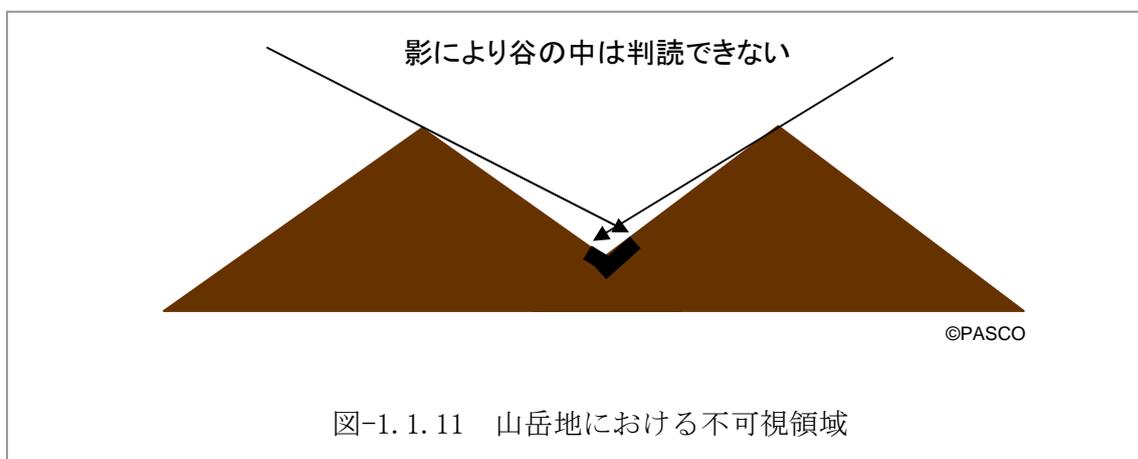
図-1. 1. 10 の E は、高い建物や山などが実際の平面位置よりアンテナに近い位置に表示される現象である(フォアショートニング)。

図-1. 1. 10 の B は、建物の壁や急斜面など(入射角よりも急な勾配を持つマイクロ波に**正対する面**)では上部の方が下部よりもアンテナに近くなるため(通常は上部の方がアンテナから遠い)、画像上で上下が反転し白くつぶれる現象である(レイオーバ)。

図-1. 1. 10 の E より衛星アンテナから遠い箇所は、電磁波照射源の反対側斜面が陰影部となる現象である(レーダーシャドウ)。



このような関係があるので、急峻な山岳地においては、対象物の位置、形、向き、勾配によっては見えづらい地形・地物がある。レーダーシャドウは影であるから、画像上で真黒くなり、その中にあるものは一切見えない。



また、レーダーシャドウに画像上で類似するものとして、なめらかで平坦な面が上げられる。平滑な水面、駐車場、グラウンドなどは、照射した電波が鏡面反射して、反射波がアンテナに帰ってこない。そのため、これらは画像上で黒くなりレーダーシャドウに類似する。周辺の状態から判断する必要がある。

レイオーバも画像上では白くつぶれてしまい、情報を得ることができない。フォアショーツニングは対象物の形をゆがめるので、判読の際は常にそのことを念頭に置き、実際の形状を復元しながら判読を進める。

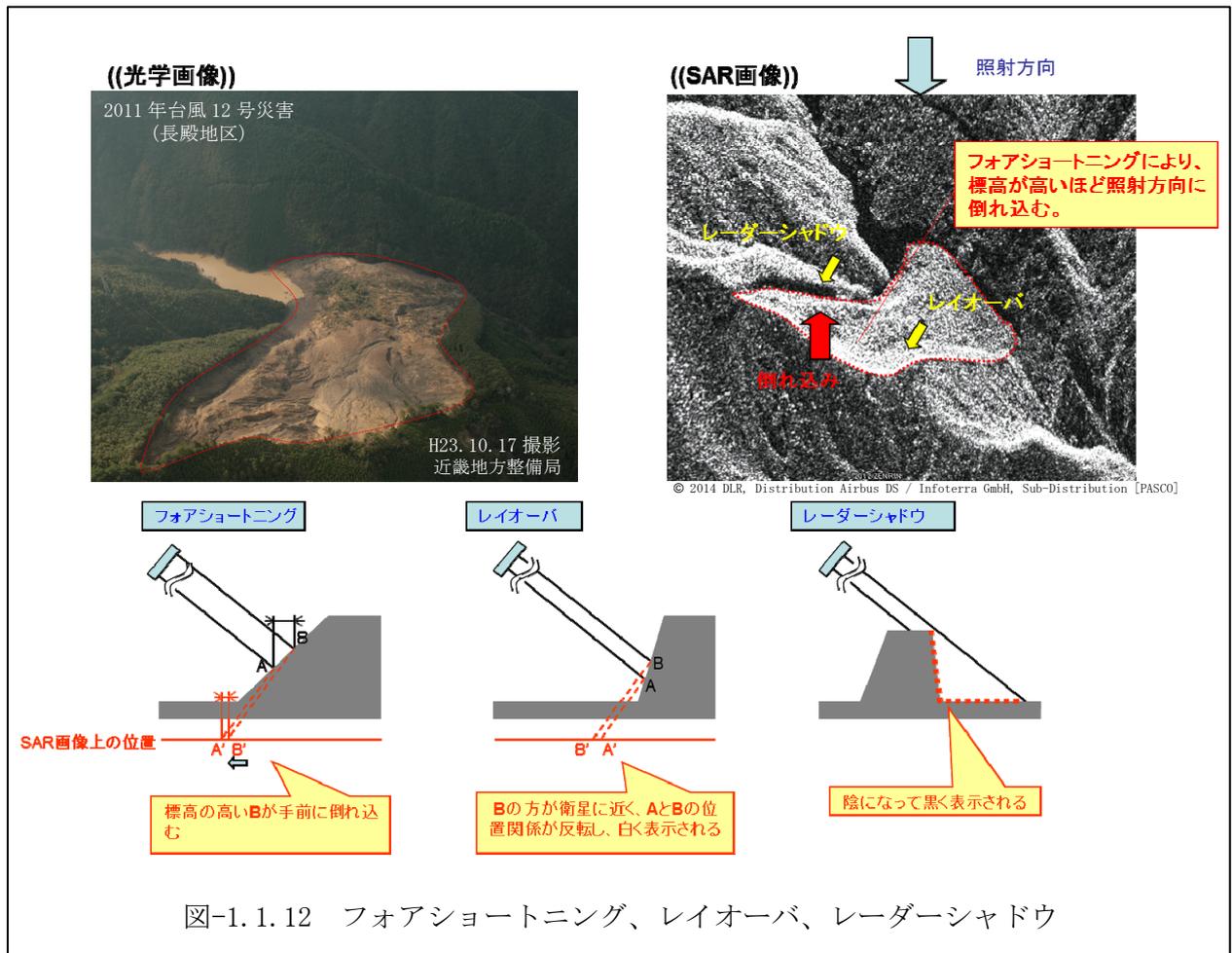


図-1.1.12 フォアショーツニング、レイオーバ、レーダーシャドウ

2. 衛星画像利用の留意点

2.1 観測条件

人工衛星に搭載された SAR の波長帯や分解能、撮影条件等のスペックの違いを考慮し、大規模崩壊および河道閉塞箇所の判読に適した条件を以下に示す。

A) 照射方向

SAR 画像は、照射方位と崩壊斜面方位の関係により抽出率に偏りが生じ、照射方向が片側のみの SAR 画像では 50~70%程度の抽出率となる。このため、片側照射方向の画像では読みとれない範囲において大規模崩壊および河道閉塞が発生している可能性を考慮する必要がある。時間を追って逆側からの照射画像を取得する等により、見逃しを減らすことが望ましい。

B) 入射角

SAR 画像取得時の入射角は、小さくなるとレイオーバとなり、大きくなるとレーダーシャドウとなり抽出に影響を及ぼすため、一定程度の入射角を確保する必要がある。そこで入射角は、35° ~45° 程度とする。

C) 判読可能な崩壊発生規模

紀伊半島における平成 23 年台風 12 号災害の判読結果からは、平面投影面積 1ha 程度未満の現象規模は、SAR 画像から確認が困難である。このため、SAR 画像から抽出された大規模崩壊および河道閉塞は、概ね 1ha 以上の深層崩壊等によるものと解釈する必要がある。

D) 分解能

大規模崩壊および河道閉塞を抽出する際の SAR 画像の空間分解能は、8m 程度より高い必要がある（主な衛星の画像仕様は、巻末資料 1.2 の表-1.3、表-1.5、表-1.7 を参照）。

E) バンドの違い

L バンド、C バンド、X バンドの違いによる視認性の差は生じないので、災害発生時には画像入手が早い衛星画像を選定することが望ましい。

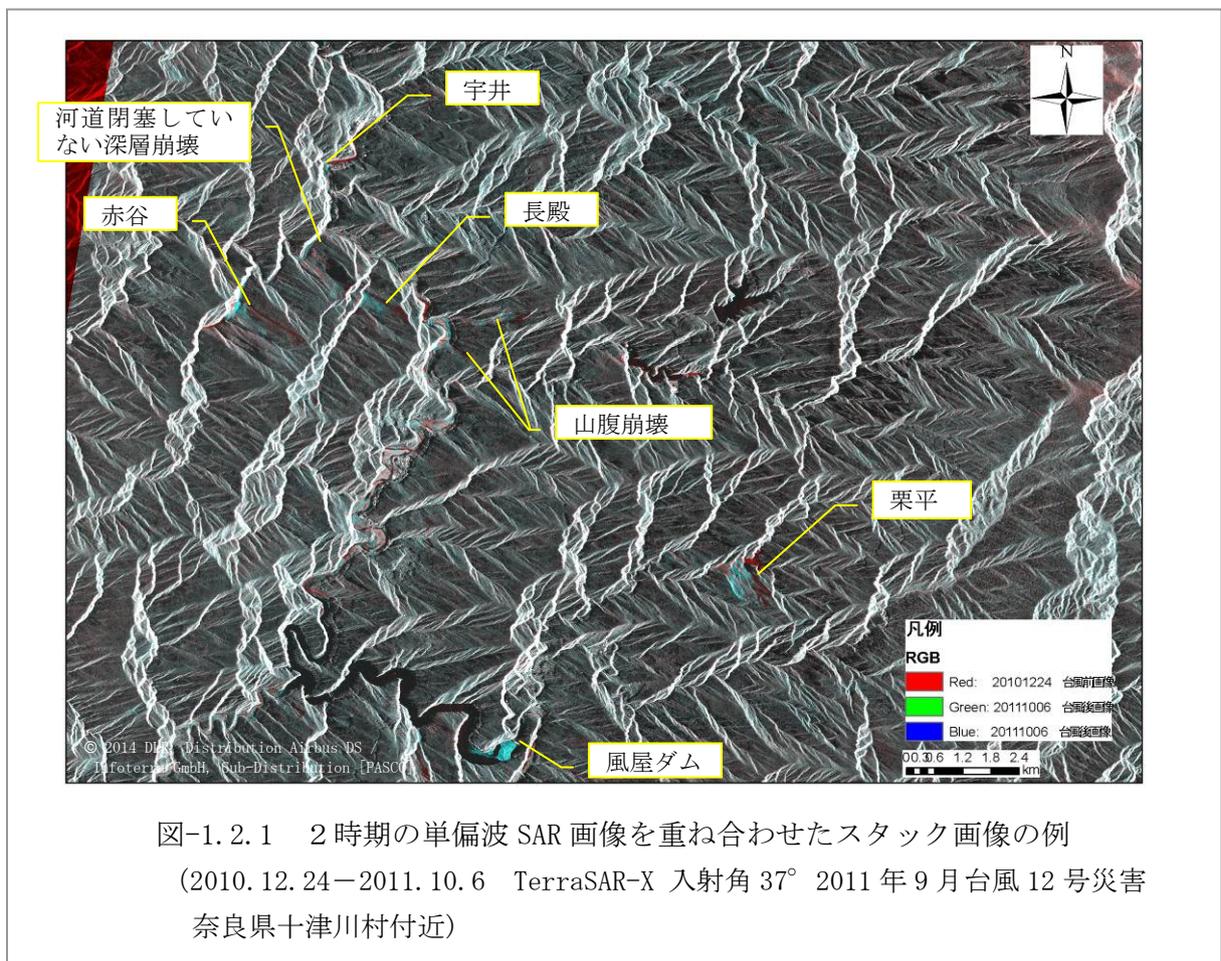
F) 偏波の組み合わせ

偏波の組み合わせは、取得可能な地球観測衛星数が多く、処理がより簡単な HH、HV とし、赤 R、緑 G、青 B に R:HH、G:HV、B:HH を当てはめた合成画像を用いると良い。

2.2 アーカイブ画像（災害発生前）の活用

緊急撮影されたものと同じ仕様（衛星、モード、軌道、入射角など）の SAR 画像アーカイブがあれば、画像を重ね合わせたスタック画像を作ることによって、二期間の変化を容易に抽出することができる（ここでは複偏波観測ではなく、より高分解能な画像が取得可能な単偏波観測を想定）。

図-1.2.1 は奈良県十津川村付近のスタック画像の例である。赤のバンドに平成 23 年台風 12 号災害前の 2010 年 12 月 24 日撮影の画像を、緑・青のバンドに台風災害後の 2011 年 10 月 6 日の画像を当てはめるとこのような画像が得られる。この画像では、前の画像よりも暗くなったところは赤く、明るくなったところは青く表現されるので、新たに生じた河道閉塞の湛水面（黒くなるので）は赤くなり、崩壊地は裸地化（明るいトーンになる）して青くなるので、簡単に見分けることができ、判読スピードと効率が著しく上昇する。2 偏波画像と 2 時期のスタック画像を組み合わせることで抽出精度と効率を向上させることができる。



3. 大規模崩壊および河道閉塞箇所の地形的特徴

大規模崩壊および河道閉塞は、山腹斜面での地すべりや深層崩壊が発生し、河道が土砂で塞ぎ止められ、上流側に湛水する現象である（図-1.3.1）。判読の際の鍵として、他の土砂災害とは異なる地形的な特徴を挙げると次のようである。

①深層崩壊や地すべりなど大規模な斜面崩壊が発生する。

→大きな裸地、露岩地が出現する。崩れた後が馬蹄形、板状などの形状を呈し、凹地が出現する。

②崩壊土砂が斜面直下に堆積したり、河道沿いに移動して谷をせき止める。

→谷を塞ぐ大規模な堆積物が出現する（水みち、谷の連続性が絶たれる）。

③河道閉塞の上流に湛水域が形成され、時間とともに広がる。

④越流が始まればガリ等が形成されたり、土石流が発生することもある。

⑤斜面下部の道路、橋梁、集落等の人工構造物を埋没させる。

→これらが消滅する。道路などの連続性が絶たれる。

つまり、大きな凹地形（滑落崖）と明瞭な地形境界（裸地化による樹木との高さの差、滑落崖や亀裂による段差）の出現、大きな凸地形（堆積物）、これら新たな裸地による周辺との地被状況の差、谷・水道や道路の連続性の消滅、湛水域の形成といった地形要素が判読の鍵となる。

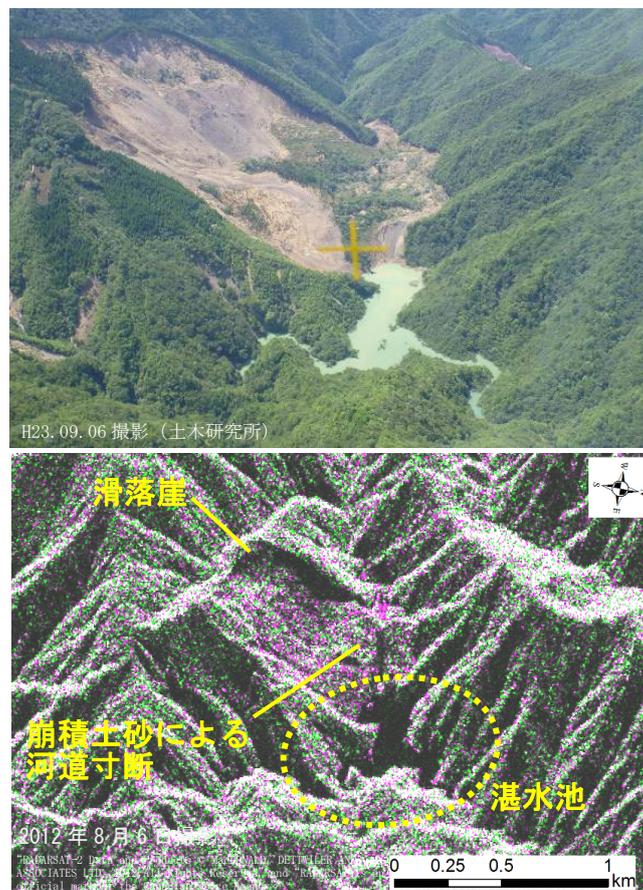
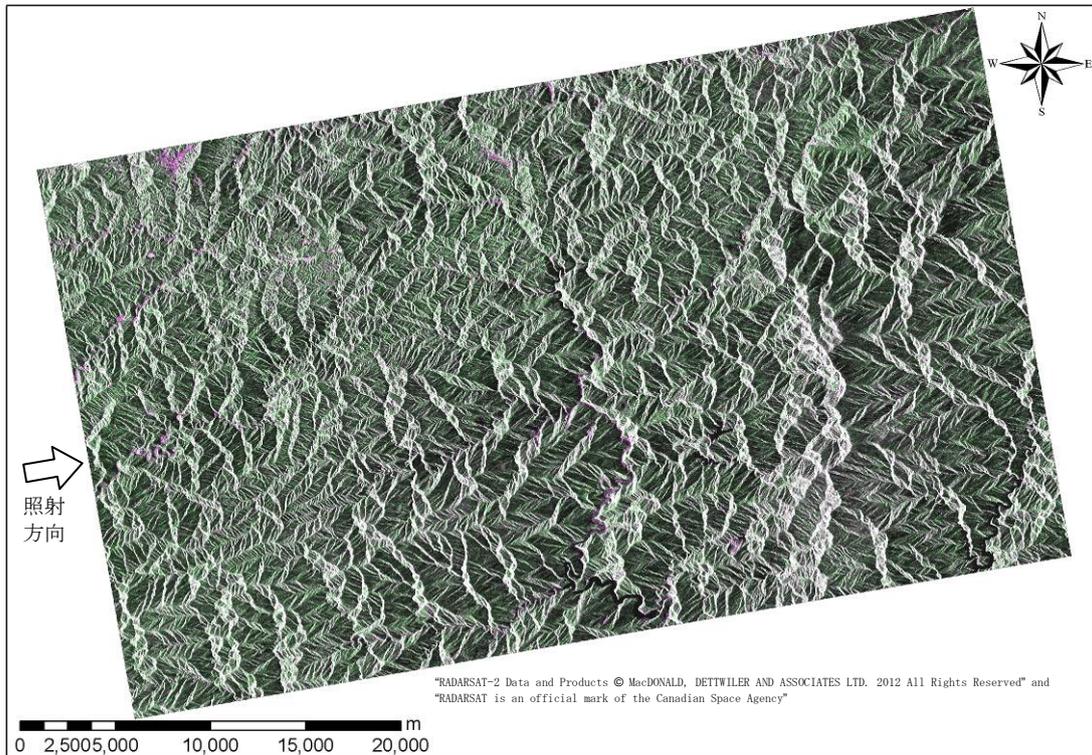


図-1.3.1 河道閉塞発生状況（奈良県十津川村栗平）

（上：斜め写真、下：2偏波 SAR 画像）

4. 2 偏波画像の事例

2 偏波画像 (HH+HV 合成図、RADARSAT-2) の事例を以下に示した。



< 諸元 >

衛星	RADARSAT-2
撮影期日	2012/8/6
バンド	Cバンド
軌道	北行軌道
照射方向	東向き
撮影モード	Fine Quad-Pol
分解能(m)	8
入射角(deg)	39.6
偏波	HH,HV,VH,VV

*そのうち HH, HV を使用して図化

図-1.4.1 2 偏波 SAR 画像の事例 (奈良県十津川村付近)