

## 1. 業務概要

平成 30 年 4 月 11 日に、大分県中津市耶馬溪町で発生した民家裏の地すべりにより、幅 160m、長さ 220m にわたり斜面が崩壊した。この地すべりの特徴としては、災害前に降雨等がほとんど見られない(アメダスでは 4 月 6 日～7 日に 6mm で、11 日までに 0.5mm 以上の降雨は観測されていない) という状況で発生したことが挙げられる。

差分干渉 SAR 解析は、人工衛星から照射されるマイクロ波の反射波を 2 時期分取得し、干渉させることで、cm レベルの変位を検出する技術で、広域 (ALOS-2 の場合で、約 50km×50km) に解析することができる。また、人工衛星のデータは過去のデータもアーカイブしているため、災害前の情報も取得できるという優位点もある。

ここでは、今回の地すべり災害において、①災害後の対象地周辺斜面における変位の有無の確認および、②災害前の前駆現象の有無を確認するため差分干渉 SAR 解析を実施した。



図 1.1 対象地域

## 2. 合成開口レーダ

### 2.1 人工衛星の種類と詳細

人工衛星には、以下に示す通信衛星や測位衛星等様々な種類がある。本業務では地球観測衛星により取得されたデータを用いて解析を行う。

表 1 人工衛星の種類

種類	目的	備考
科学衛星	◇ 地球だけでなく太陽系の惑星探査や宇宙全般を対象にした科学的探査を行う衛星	▶ はやぶさ ▶ かぐや など
通信・放送衛星	◇ 遠くはなれていて直接通信できない2か所を、電波の中継所としてつないでいる衛星	▶ ゆり ▶ さくら など
気象・ <a href="#">地球観測衛星</a>	◇ 天気予報などの精度を向上させるため、地球上の気象現象を観測する衛星 ◇ 地球上の資源の探査、環境・公害などの監視、海洋現象の観測などを行う衛星	▶ ひまわり ▶ ふよう ▶ <a href="#">だいち</a> 、 <a href="#">だいち2号</a> ▶ みどり など
測位衛星	◇ 位置を確認するための衛星 ◇ 人工衛星からの電波を受信することで、自分の位置を確定する	▶ GPS ▶ みちびき など

※参考：JAXA 宇宙情報センター

### 2.2 センサの種類と特徴

地球観測衛星に搭載されているセンサには、以下の種類がある。

#### ① 可視・赤外光センサ（光学衛星）

可視・赤外センサは、太陽からの光が対象物から反射することによる光を計測するタイプのパッシブセンサである。アメリカでは1970年代からLANDSATシリーズが運用されており、中解像度程度ではあるが多くの観測データを利用できる。近年では、高解像度（数10cm～数m）の光学センサの衛星が運用されており、地図の作成や植生分布の解析などに利用されている。日本では情報収集衛星があるが、非公開である。

#### ② 合成開口レーダ（SAR衛星）

合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar：SAR）は、衛星から斜めに地上へ向けてマイクロ波を照射し、対象物からの反射を計測するタイプのアクティブセンサである。1990年代に運用されていたJERS-1（ふよう）はSAR衛星で地上分解能は低かったが、近年では波長の短い（Xバンドなど）の衛星も運用されており、1m程度の高解像度データを得られるようになった。日本では比較的波長の長いLバンドの衛星（ALOS-2）が運用されている。マイクロ波は雲を透過して地上に届くため、災害後の悪天時の状況把握に活用されている。また、複数時期のデータによる差分干渉SAR解析による地上変動量把握も実用化されている。



### ③ その他

降雨レーダなど気象や地球環境の観測などに利用されている降水観測センサなどがある。

図 2.1 に可視・光学センサによる画像と合成開口レーダによる画像の見え方の違いを示す。可視・光学センサでは写真のように地上の状況が見えるのに対して、合成開口レーダでは、そのような状況を確認することはできないことがわかる。

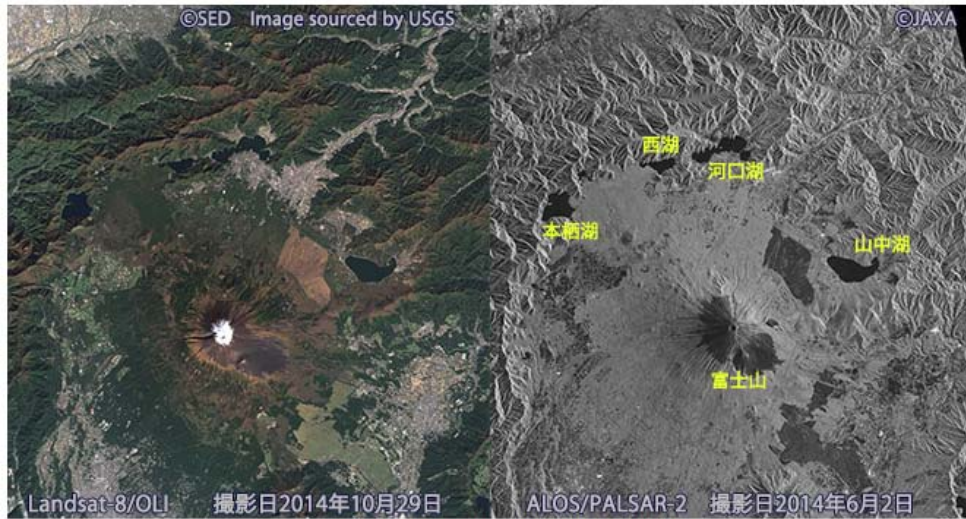


図2.2-1 ほぼ同じ範囲の光学画像とSAR画像

図 2.1 可視・光学センサと合成開口レーダの見え方（宇宙技術開発株式会社ウェブサイトより）

また図 2.2 のように、合成開口レーダでは地形が衛星のある方向に倒れ込んで見えていることがわかる。

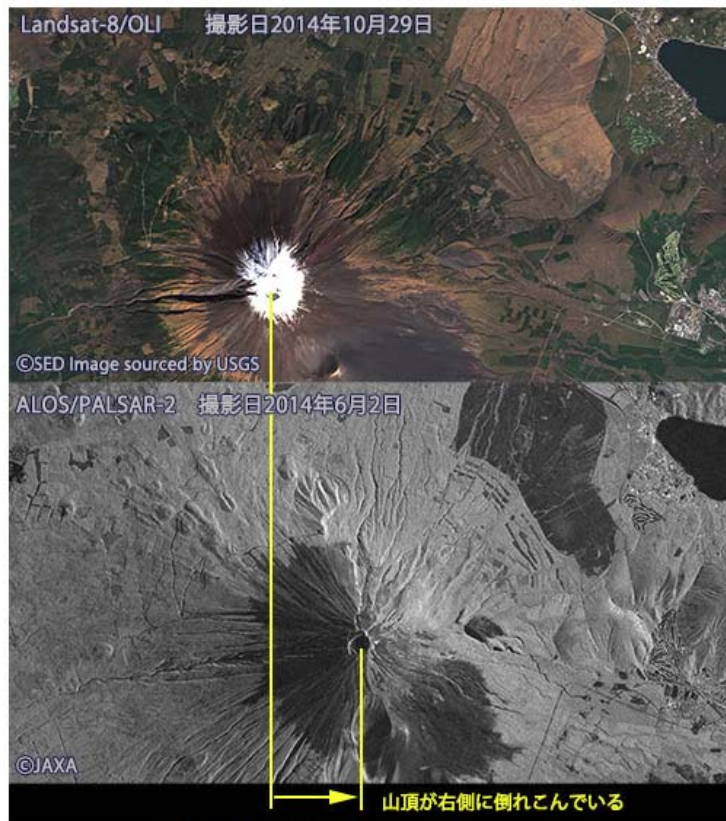


図2.2-2 衛星方向（ビーム照射方向）への倒れこみ

図 2.2 可視・光学センサと合成開口レーダの見え方（宇宙技術開発株式会社ウェブサイトより）

## 2.3 合成開口レーダ（SAR 衛星）の特徴

### 2.3.1 SAR 衛星で使われる基礎用語

図 2.3 に SAR 衛星で使われる基礎用語のイメージを示す。①～④は図 2.3 の番号の説明と同じである。

#### ① アジマス方向

SAR 衛星の進行方向をいう。

#### ② スラントレンジ

SAR 衛星から地上の対象物までの線で、対象物からの反射波はこの線上のデータとなる。また、[差分干渉 SAR 解析による変位量はこのスラントレンジ上の変位量](#)となる。

#### ③ グランドレンジ

SAR 衛星の直下から地表面上の対象物の位置の方向をいう。

#### ④ 入射角

対象物の法線と対象物から衛星まで引いた線とがなす角をいう。図 2.3 では、 $70^\circ$  となる。

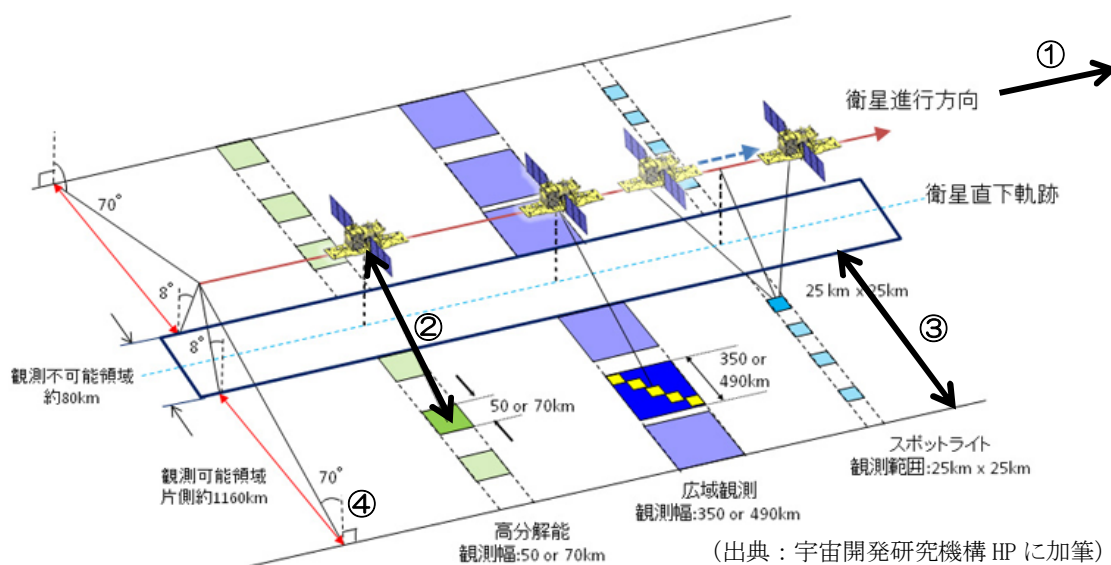


図 2.3 SAR 衛星の基礎用語 (1)

#### ⑤ アセンディング（北行軌道）とディセンディング（南行軌道）

アセンディングは、衛星が南から北へ向かう軌道を言い、北行軌道とも呼ばれる。ディセンディングは北から南へ向かう軌道を言い、南行軌道と呼ばれる。

アセンディングとディセンディングは地球の自転により同じ箇所を交互に観測する。

日本を撮影するのは、午前・午後 10 時半頃（ALOS-2 は、午前 12 時頃と午後 0 時頃）である。



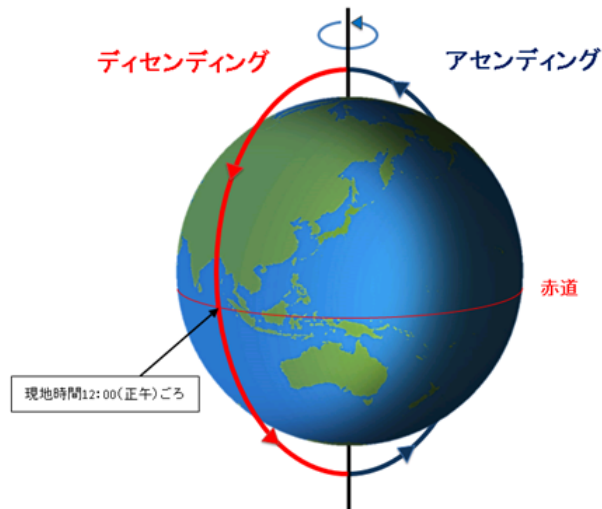


図 2.4 アセンディングとディセンディング ((株)パスコウェブサイトより)

⑥ パス番号とフレーム番号

図 2.5 に示すように、衛星の軌道に連続した番号を振り、それをパス番号という。1 パスを通過中に衛星が連続して観測している地上の範囲を 1 提供単位ごとに連続番号を振り、これをフレーム番号という。



図 2.5 パス番号とフレーム番号

⑦ マイクロ波の波長

マイクロ波は、7.5mm～1,000mm の波長を持っており、衛星で利用されるのは、図 2.7 に示す X バンド、C バンド、L バンドである。

X バンドは波長が短いため、樹木に照射された場合は葉で反射する。C バンドは、葉は透過するが、枝や幹で反射し、L バンドでは枝は透過し、幹や地表まで到達し反射する。日本においては、森林面積が大きいので、過去の国産衛星はLバンドが利用されている。  
本業務で利用する ALOS-2 はLバンドのマイクロ波を利用している。

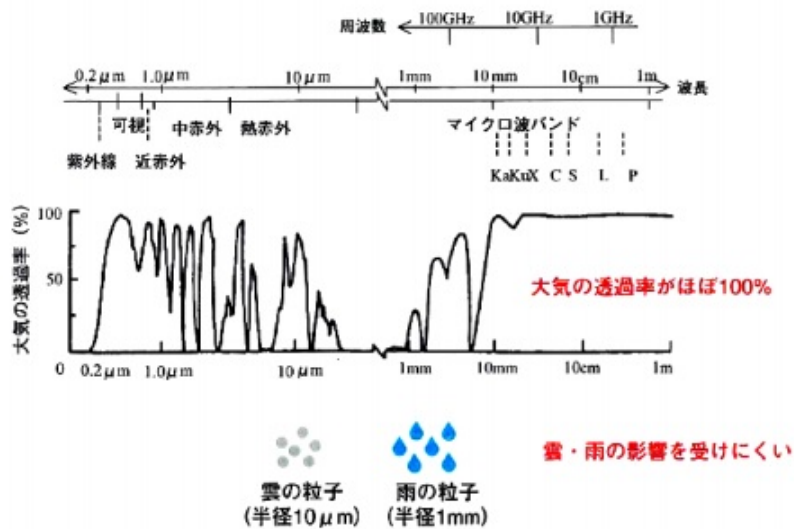
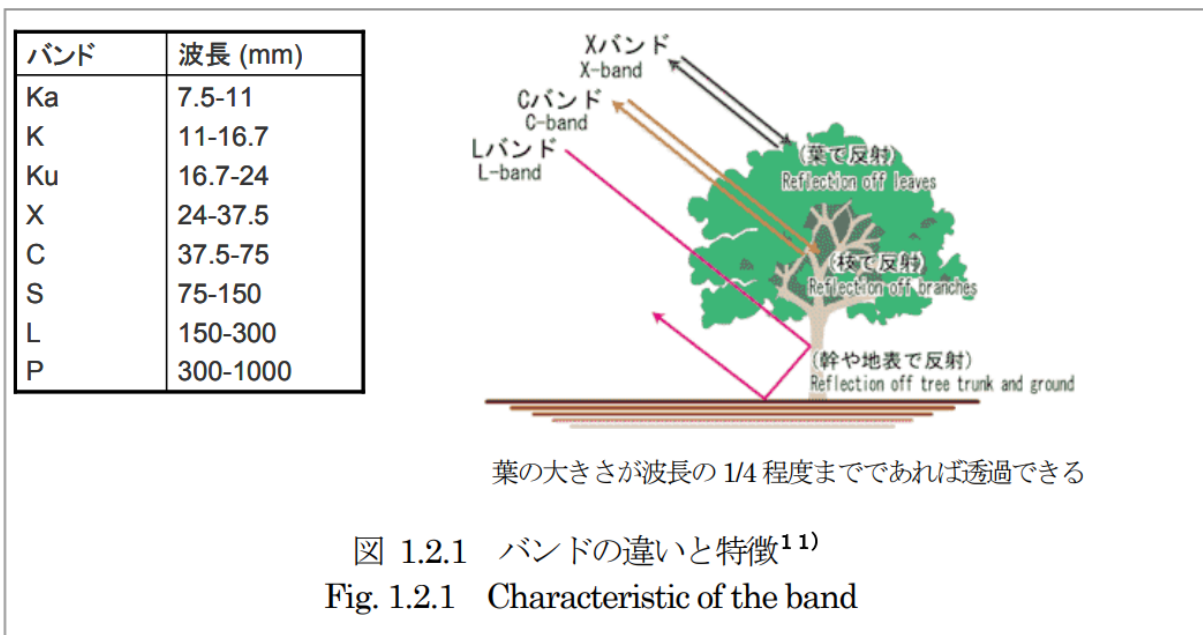


図 2.6 可視光・赤外線・マイクロ波の波長帯 (国総研資料 第 791 号)



出典：宇宙航空研究開発機構(JAXA)：SRTMの観測原理(詳細)その1、1999年8月27日  
<[http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis\\_principle\\_1.html](http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_principle_1.html)>に加筆

図 2.7 マイクロ波の波長とその特徴 (国総研資料 第 791 号)

### ⑧ 後方散乱

衛星から照射されるマイクロ波が地表面にあたり、衛星のセンサに戻ってくる信号のことをいう。この信号には、後方散乱（実数情報）の他に位相情報（複素数情報）も含まれており、後方散乱の強弱のみを表す強度画像を後方散乱強度画像という。

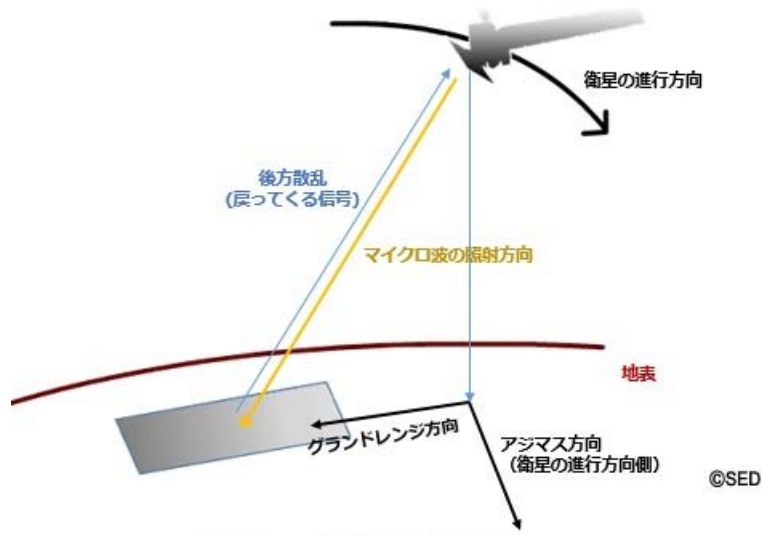


図1.2-1 データ取得イメージ

図 2.8 後方散乱波のイメージ（宇宙技術開発株式会社衛星画像データサービス 学習帳 9\_0 より）

### ⑨ スラントレンジとグラウンドレンジ

未補正の SAR 画像では距離方向は SAR アンテナからターゲット（地物）までの電波伝播の到達時間で表現される。これをスラントレンジと呼ぶ。このスラントレンジで地形を表現すると、衛星に近いほど SAR 画像のレンジ方向の距離が詰まって見える。図 2.9 にスラントレンジとグラウンドレンジの関係を示す。スラントレンジに対応する画素は衛星に近くなるほどサイズが大きい。そのため、レンジ方向の分解能は、衛星に近い場所の方が遠い場所より悪くなる。

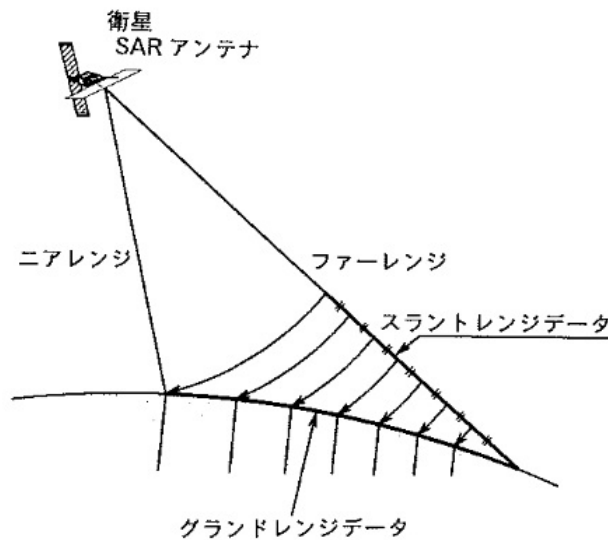


図 2.9 スラントレンジとグラウンドレンジの関係（出典：飯坂讓二監修，1998，合成開口レーダ画像ハンドブック，朝倉書店，東京，208p）

### ⑩ 位相について

合成開口レーダでは、マイクロ波を地上に照射し、その後方散乱波と位相を取得している。マイクロ波は電波であるため、周期的に繰り返すパターンを持つ。波の性質に周期があり、1 周期とは繰り返すパターンで、その長さを波長という。位相は、1 周期の波の位置を表し、通常角度で表現される。

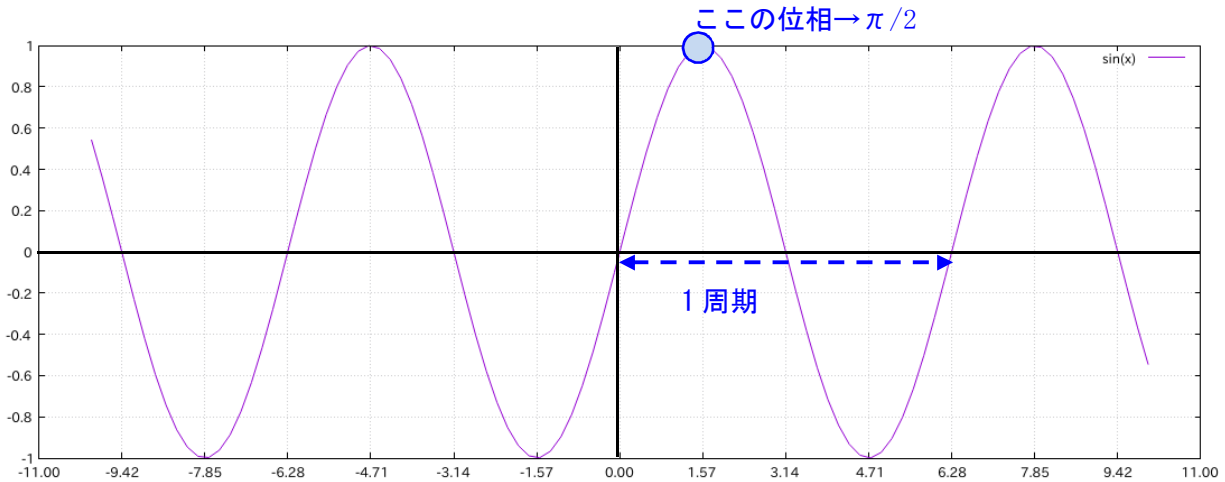


図 2.10 位相

### ⑪ マルチルック処理とノイズ

SAR 衛星で取得されたデータにはスペックルノイズというごま塩状のランダムなゆらぎが生じる。これは、衛星から照射されるマイクロ波が地上の物体に反射するときに、位相がランダムに異なる波となり、これが多数重なり合うことで生じるものである。SAR 画像では、1 画素中に存在する多数の散乱点（建物や地形の起伏など）からの反射波が重なりあうことで生じる。

このようなノイズを低減するため、SAR の合成開口長を  $N$  分割してそれぞれの開口で独立に処理を行い、 $N$  個の再生画像を重ね合わせる。このときの分割数  $N$  を  $N$  ルック処理といい、シングルルック処理とは  $N$  が 1 のとき、 $N$  が 2 以上のときをマルチルック処理という。マルチルック処理をした場合は、空間分解能が低くなる。

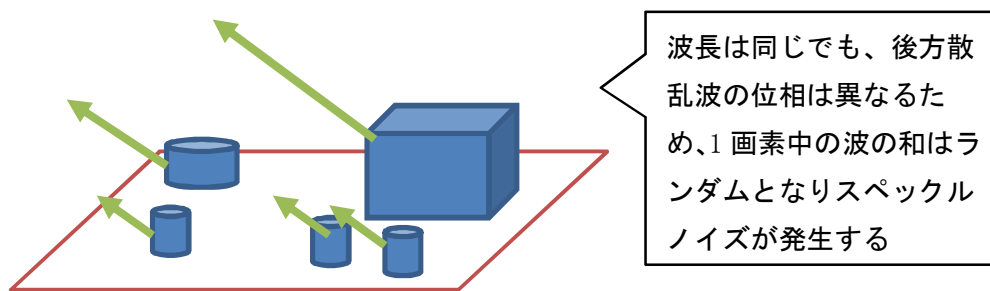


図 2.11 1 画素中の反射波のイメージ



## ⑫ 垂直基線長

基線長とは、1回目と2回目の観測の SAR 衛星の軌道間距離を表す。図 2.12 の B が該当する。差分干渉 SAR 解析では、基線長の垂直成分が重要で、垂直基線長 (Bperp) と呼ばれている。干渉性は、垂直基線長 (Bperp) が長いほど悪くなる。ALOS-2 は、高い精度で軌道の調整を行っているため、垂直基線長 500m 以内に抑えられており、高い干渉性を得やすい。

また、一般的に、垂直基線長 (Bperp) が 1500m を超えると地形誤差が大きくなるため、干渉しなくなることが多い (国土地理院 HP「干渉 SAR についてのよくある質問とその回答」より)。

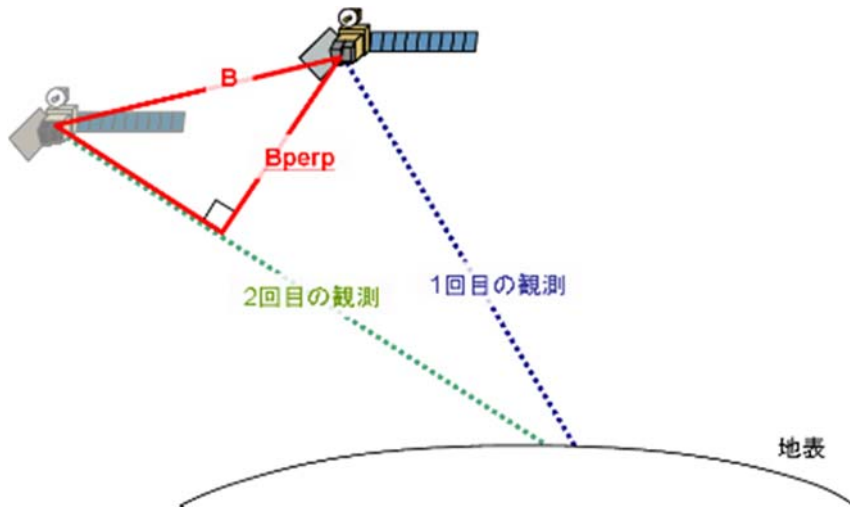


図 2.12 垂直基線長 (Bperp) のイメージ (国土地理院 HP)

## ⑬ コヒーレンス

コヒーレンスとは、衛星から照射されたマイクロ波の後方散乱強度の相関係数で表される。相関係数で表現されるため、2 時期のデータが必要となる。その値は、0 から 1 となる。後方散乱強度は大気中の雲やエアロゾル、地表面の粗度や誘電特性、植生の成長、マイクロ波の波長や衛星の軌道間距離の垂直成分 (垂直基線長) に依存している。2 時期間の地表面の変化を見たとき、被覆の状態が変化するとマイクロ波の後方散乱強度が変化する (散乱の変化) ため、コヒーレンスは低くなる。一般的に、建物やダムなどの人工構造物は変化が少ないためコヒーレンスは高くなり、反対に山地や耕作地など被覆の変化が起きやすいところはコヒーレンスが低くなる。コヒーレンスが高いと干渉性も高くなる。

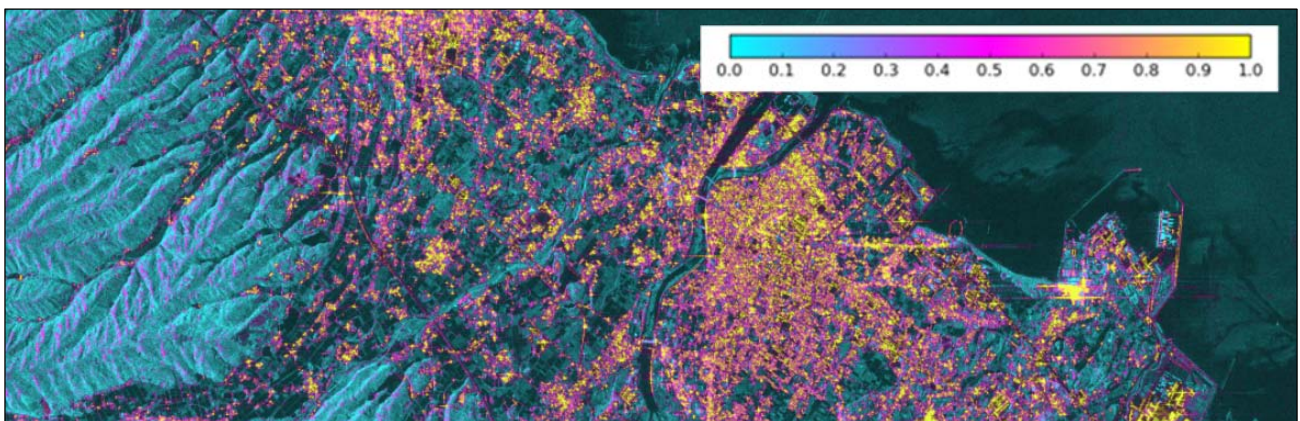


図 2.13 コヒーレンスの例

### 2.3.2 合成開口レーダとは

合成開口レーダとは、マイクロ波を発射し、戻ってきた電波を受診して地上などを観測する技術である。一般に、マイクロ波は波長が光に比べて長いため、分解能（解像度）を上げることが難しい。合成開口レーダは、多くの受信アンテナによって電波の位相の違いを図ることにより、分解能を飛躍的に高めることができる。

以下に、分解能について説明する。

幅  $DA$  のアンテナから放射された波長  $\lambda$  のマイクロ波によるレンジ距離  $R$  でのアジマス方向のビーム幅は  $\lambda R/DA$  となる。図 2.14 左にあるように、もし2つの点散乱体  $D$  と  $E$  の距離  $\Delta X$  がビーム幅より離れていると  $D$  と  $E$  からの受信信号は識別できる。しかし、この距離がビーム幅より狭いと2つの受信信号が重複し識別できない。つまり、アジマス方向の分解能  $\Delta X$  はビーム幅に相当し以下の式となる。

$$\Delta X = \lambda R/DA \quad (1)$$

式(1)から、波長が短くなるにつれて、そしてアンテナ  $DA$  が長くなるにつれてアジマス方向の分解能が向上する。例えば、波長  $\lambda=3$  cm の X-バンド SAR で  $DA=10$  m のアンテナでは  $R=10$  km での分解能は 30 m であるが、波長  $\lambda=25$  cm の L-バンドでは  $\Delta X=250$  m となる。もし、この L-バンドレーダを衛星に搭載したとすると、 $R=700\sim 800$  km では、 $\Delta X=18\sim 20$  km となり実用的ではない。18~20 km の長いアンテナを使えば 10 m の分解能が得られるが、衛星にはそのようなアンテナは搭載できない。そこで考案されたのが、移動する短いアンテナを使って受信した信号を適切に処理することで仮定の長いアンテナを合成し高分解能を達成する合成開口技術である。

図 2.14 右に長い開口を合成する原理を示す。レーダはプラットフォームがアジマス方向に移動しながらパルスの送受信を繰り返す。パルス送信時刻とターゲットからの受信時刻との差はアジマスの位置によって次の近似で  $t_2$  に比例して変化し、この変化を受信信号の位相として記録する。そうすると、受信信号は位相が  $2\pi$  ごとに折り返されるので、周波数がアジマス時刻  $t_2$  とともに変化するチャープ信号となる。

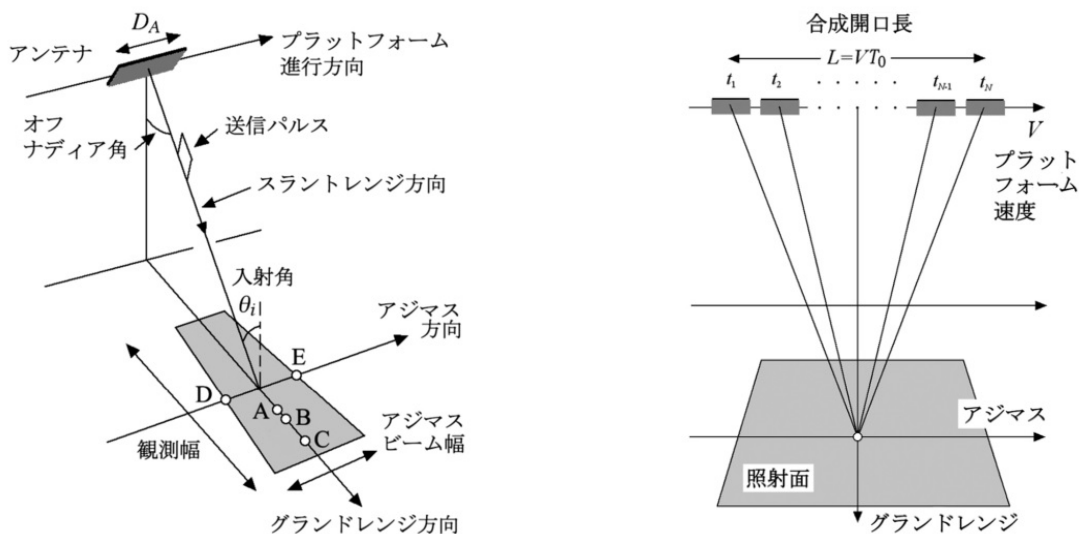


図 2.14 合成開口レーダの説明

(Journal of The Remote Sensing Society of Japan Vol. 36 No. 4 (2016) pp. 440-445)