

授業でお使い下さい



Science Plaza

## 合成開口レーダー (SAR) による地表変動の把握

お茶の水女子大学 文理融合 AI・データサイエンスセンター研究協力員  
(元・国土地理院 地理地殻活動研究センター長)

宇根 寛

## 1. 令和6年(2024年)能登半島地震に伴う地殻変動

2024年1月1日、年明けの日本列島を大きく揺らがせた能登半島地震。地震の翌日、能登半島で最大約4mの隆起を観測したと国土地理院が発表したというニュースが飛び込んできました(図1)。この観測は、

地上約600kmの上空を飛ぶ人工衛星「だいち2号」に搭載された合成開口レーダーを用いて行われたものです。地震による通信や交通路の分断で、被害状況もわからず、現地に入ることもままならない状況の中で、地震に伴う地表の変動を詳細に明らかにした地図が地

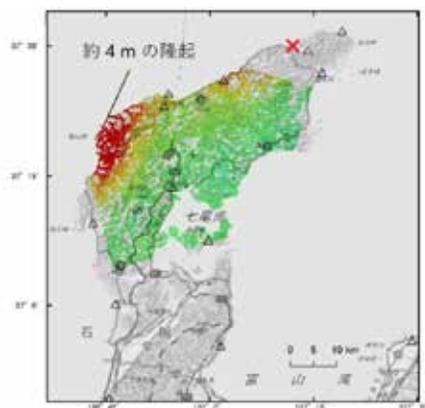


図1 SARによる能登半島地震に伴う地殻変動(準上下成分)  
(1月2日発表)。国土地理院 HP より。



写真1 隆起した鹿磯漁港(輪島市)  
人物の持つ標尺は3m。その約1m上の、貝殻が付着している白っぽい範囲の上端がかつての海面。2024年2月23日宇根撮影。

## Contents

## Science Plaza

## 合成開口レーダー(SAR)による地表変動の把握

お茶の水女子大学 文理融合 AI・データサイエンスセンター研究協力員  
(元・国土地理院 地理地殻活動研究センター長) 宇根 寛 1

## Topics

## 連載:PER実践紹介 第1回 PERとは何か

東京学芸大学理科教員高度支援センター(ASCeST)  
専門研究員・特命教授 新田 英雄 6

## メタンの直接分解によるターコイズ水素製造技術

あいち産業科学技術総合センター 鈴木 正史 10

## 植物と昆虫の関係の歴史

京都大学大学院理学研究科 今田 弓女 14

## 太陽フレアが与える影響

サイエンスライター・Vtuber 彩恵 りり 18

## 高校生へ私が選んだ1冊の本

「宇宙になぜ、生命があるのか  
宇宙論で読み解く「生命」の起源と存在」 20

震の翌日に示されたことは驚くべきことでした。また、観測された約4mの隆起は、過去の地震に伴う地殻変動と比べて極めて大きなものでした。

その後、現地調査等により、漁港に残された海面の痕跡(写真1)などから「だいち2号」の合成開口レーダーにより観測された地殻変動量と整合する海岸の隆起があったことが示されました。はるか宇宙からの観測により、地表の変動が、短時間のうちに正確に明らかにされたことが証明されたのです。

## 2. 合成開口レーダー (SAR) とは

レーダーとは、電波を対象物に向けて発射し、その反射波の強度と反射時間を測定することにより、対象物までの距離や対象物の位置、形状を測る装置です。レーダーの分解能は、アンテナを大きくすることで向上しますが、人工衛星などに大きなアンテナを搭載することはできないため、人工衛星や飛行機などが移動しながら電波を繰り返し送受信して、口径(開口)の大きなアンテナを仮想的に合成することによって分解能を向上させたレーダーが「合成開口レーダー」(Synthetic Aperture Radar ; SAR (サー) と略称される)です。これと併せて、送信する電波を圧縮することにより幅を小さくすることで、移動方向と直交する方向の分解能を向上させ、比較的小さなアンテナでも高い分解能を実現しています。

SARは、電波を自ら送信し反射波を観測する能動的センサーであるため、太陽光の反射波を観測する光学センサーと異なり、夜間でも観測することができ、また、電波が雲などを通過するため天候に左右されずに観測することができます。

SARで得られた地表からの反射波の強度を画像化したものがSAR強度画像です。電波の反射強度の小さい場所は黒く、大きな場所は白く写ります。太陽光の反射強度を画像化したモノクロ写真と同様、地形や地表の建物などを判別することのできる画像が得られますが、特に、水域については、水の表面で電波が散乱してしまい、黒っぽく写ります。能登半島地震では、

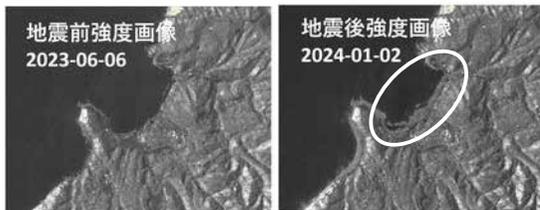


図2 SAR強度画像の比較による能登半島地震に伴う輪島市皆月の海岸線の変化。国土地理院 HP より。

隆起により海岸が干上がって、地震前には海域であった場所が陸地になったため、地震前後のSAR強度画像を比較することにより、海岸線が変化した地域を確認することができました(図2)。

## 3. 干渉 SAR

SARが送受信する電波は一定の振幅の波であり、山と谷が同じサイクルを繰り返しています。波のサイクル中のどの位置にあるかを示す値を「位相」と呼びます。SARでは、太陽光などより波長(山から山までの長さ)が長いマイクロ波が用いられており、波長3cmのもの(Xバンド)、6cmのもの(Cバンド)、24cmのもの(Lバンド)が使われています。波長が長いほど分解能は低下しますが、樹木などの植生を透過することから、森林に覆われた日本で利用する場合にはLバンドが有利であり、日本が打ち上げたSAR衛星はすべてLバンドのSARを搭載しています。

人工衛星に搭載されたSARにより、上空のある地点から送信された電波が地表で反射してきた受信波と、後日衛星が同じ軌道を通じた際に同じ地点から同じ方法で送信された電波の反射波は、衛星と地表の距離が変化しなければ全く同じ位相になります。しかし、この2回の観測の間に地表の何らかの変動が起り、衛星と地表の距離が変化すると、位相にずれが生じます。この位相のずれを用いて地表の変動を観測する手法を干渉SAR(SAR InterferometryまたはInSAR)と言い、位相のずれを画像化したものをSAR干渉画像(SAR Interferogram)と言います。SAR干渉画像では、通常、位相のずれがその程度に応じた色で着色され、青→赤→黄→青(またはその逆)が並ぶ縞模様(干渉縞)の画像が作成されます。この虹色のひと回りが、衛星と地表との往復距離が1波長分、すなわちLバンドであれ

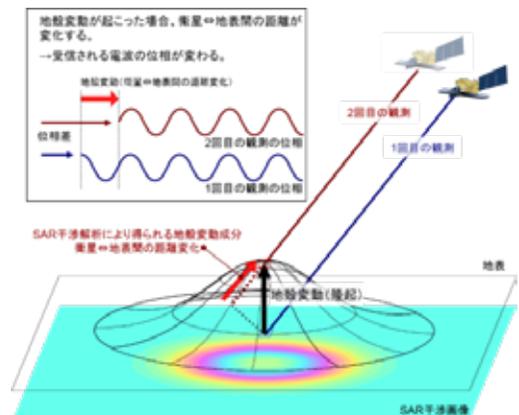


図3 SAR干渉画像の原理。国土地理院 HP より。

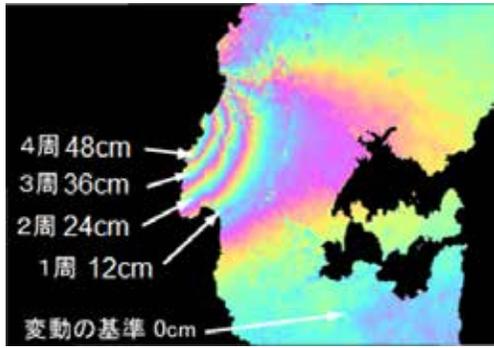


図4 SAR干渉画像の見方。同じ色の場所は波長の半分(12cm)の整数倍の変動量を示す。すなわち虹色の模様が一週して元の色に戻ると12cmの地表変動があったことを示す。2007年能登半島地震の際の事例。国土地理院HPより。

ば24cm(衛星と地表との距離は12cm)変化したことを示します(図3, 図4※小社HPにてカラー画像公開)。

また、SARでは、原理上、衛星の真下の観測ができず、衛星から進行方向斜め右下に向かって電波が送信されます。このため、干渉SARで観測される衛星と地表との距離の変化は、衛星から斜め右下方向への距離の変化です。(「だいち2号」と「だいち4号」では、衛星を回転させ姿勢を変えて観測できるので、進行方向斜め左下方向の観測をすることもできます)。衛星はほぼ南北方向に移動しながら観測を行うので、観測は、対象地域を西方上空から東向きに観測するか、東方上空から西向きに観測するかのどちらかになります。例えば、西方上空からの観測では、地表が隆起しても、西向きに水平に変位する変動があっても、衛星と地表の距離の短縮が観測されることになり、1組の観測だけでは地表がどの方向に変動したのかを決めることができません。また、地表が衛星の移動方向(南

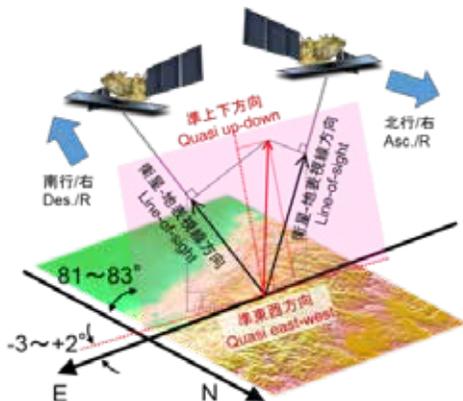


図5 2.5次元解析のイメージ。国土地理院HPより。

北方向)に水平に変位した場合には、変動を観測することができません。西方上空からの観測と東方上空からの観測の2組の観測結果があれば、それをほぼ上下方向(準上下方向)とほぼ東西方向(準東西方向)の変動に変換することができます(2.5次元解析(図5))。

#### 4. 干渉SARによる地表変動観測事例

SARは、もともとは、能動的センサーにより天候に左右されずに地表のようすを観測する手法として開発されました。1970年代以降、このような目的でいくつかの人工衛星にSARが搭載され、日本が1992年に打ち上げた「ふよう1号」にもSARが搭載されていました。

1993年に、フランスの研究者が、ヨーロッパのSAR衛星を用いて、1992年にカリフォルニアで発生したランダース地震に伴う地表の変動を捉えたSAR干渉画像を作成することに成功し、この画像が科学雑誌Natureの表紙を飾りました。これを皮切りに、干

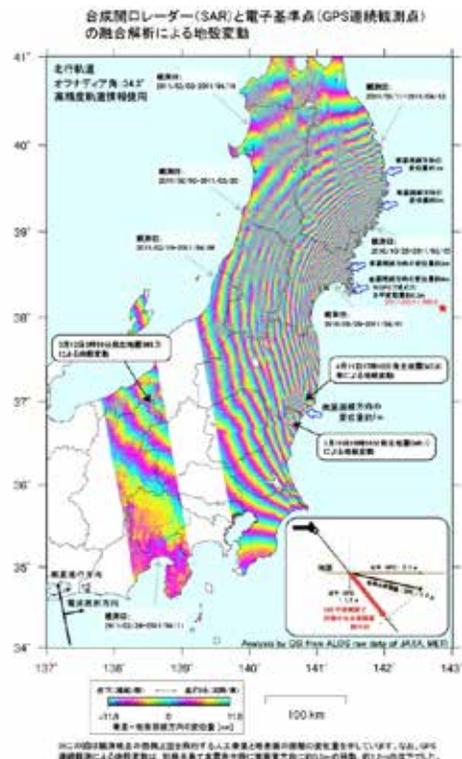


図6 「だいち」のSARによる2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地表変動のSAR干渉画像。地殻変動の範囲がきわめて広域であったため、多数のペアによるSAR干渉画像を合成して作成された。本震による大きな地殻変動のほか、誘発されたと考えられる多くの局所的な地震による地殻変動が示されている。国土地理院HPより。

渉 SAR が地震や火山活動に伴う地表変動を把握する手法として用いられるようになりました。日本でも、1995 年に発生した兵庫県南部地震に伴う地殻変動が「ふよう 1 号」の SAR を用いて明らかにされました。

「ふよう 1 号」は 1998 年に運用を終了しましたが、SAR が地震や火山活動等に伴う地表の変動に関する極めて有効な情報を提供することが明らかになったことから、2006 年に打ち上げられた人工衛星「だいち」には、可視光の観測を行う光学センサー等とともに SAR が搭載され、2007 年能登半島地震（図 4）、2007 年新潟県中越沖地震、2008 年中国・四川省の地震、2008 年岩手・宮城内陸地震、2011 年東北地方太平洋沖地震（図 6）等に伴う地殻変動を明らかにしました。「だいち」は 2011 年に運用が終了しましたが、その後継衛星として、SAR に特化した「だいち 2 号」が 2014 年に打ち上げられました。設計寿命は 5 年でしたが、2024 年 7 月現在も正常に稼働しており、2014 年長野県北部の地震、2015 年ネパールの地震、2016 年熊本地震（図 7）、2016 年ニュージーランドの地震、2018 年北海道胆振東部地震、2023 年トルコの地震、2024 年能登半島地震や、2014 年御嶽山、2015 年箱根山（図 8）、2015 年口永良部島などの火山活動、さらに、地すべりや地盤沈下等に伴う地表の変動を明らかにしてきています。

干渉 SAR による地表変動の観測の特徴をまとめると、次のようになります。

① 地表に特別な観測施設はまったく必要ありません。

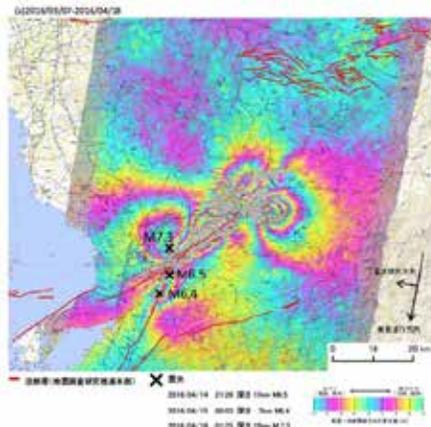


図7 「だいち 2 号」の SAR による 2016 年熊本地震に伴う地表変動の SAR 干渉画像。震源断層である布田川・日奈久断層を境に地表変動のパターンが大きく食い違っているほか、横ずれ断層の特徴である断層末端部の隆起、沈降が表れている。また、震源域北東部では、震源断層とは別に多数の並行線状の地表変動が表れており、震源断層の活動に誘発された「お付き合い」地震断層の活動と考えられる。国土地理院 HP より。

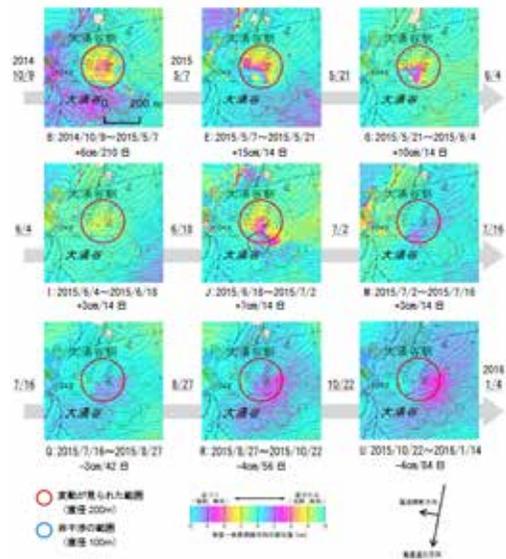


図8 2015 年に活化した箱根山、大涌谷の火山活動に伴う地表変動をほぼ 14 日ごとに「だいち 2 号」の SAR により観測した画像。大涌谷に火山活動に伴う隆起が観測されたが、隆起が限定された範囲に留まっていることがわかる。町では、この情報をもとに、立ち入り禁止区域の設定や立ち入り禁止の解除などの防災対策を実施した。国土地理院 HP より。

- ② 地表変動の情報を一度に面的かつ広範囲に取得することができます。
- ③ 同じ地点から同じ方法により観測された、地震等の発生を挟んだ 2 つの観測データがなければ干渉させることができません。「だいち 2 号」や「だいち 4 号」では、衛星が同じ軌道を飛ぶのは 14 日後ですので、それまで待たなければなりません。このため、通常時からあらかじめ計画的にさまざまなパターンのデータを取得してアーカイブしておき、地震等の発生後にできるだけ早く同じパターンのデータを取得できるよう準備が行われています。
- ④ 数 cm の地表変動があれば捉えることができます。ただし、変動があまりにも大きいと、干渉することができず、ザラザラの砂模様が表れます。2024 年能登半島地震でも、能登半島の北部では地殻変動がきわめて大きかったため、干渉 SAR の虹色の縞模様の画像を得ることができませんでした（図 9）。その場合には、情報の解像度は落ちますが、ピクセルオフセット法という方法で変動量を把握することができる場合もあります。2 枚の SAR 強度画像の位置合わせ（画像マッチング）を行い、残った局所的な位置ずれを地表変動とみなして計測する方法です。図 1 はピクセルオフ

セット法により速報的に求めた上下変動量で、その後の観測結果も加えてピクセルオフセット法と2.5次元解析により能登半島全体の準上下方向と準東西方向の動きを捉えたものが図10です。

- ⑤ 求められる変動量は1つの画像の中での相対値であり、変動量の絶対値は得られません。

### 5. 「だいち4号」の打ち上げと今後の動向

2024年7月1日、種子島宇宙センターから先進レーダー衛星「だいち4号」を搭載したH3ロケット3号機が打ち上げられ、衛星は無事軌道に投入されました(図11)。

「だいち4号」は「だいち」や「だいち2号」と同様のLバンドのSARを搭載した衛星として開発されたもので「だいち2号」の資産を引き継ぎ「だいち2号」

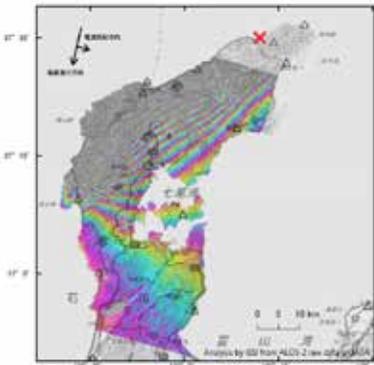


図9 2024年能登半島地震に伴うSAR干渉画像。半島南部には明瞭な干渉縞が表れたが、北部は変動がきわめて大きかったため干渉の縞模様を得ることができなかった。国土地理院HPより。

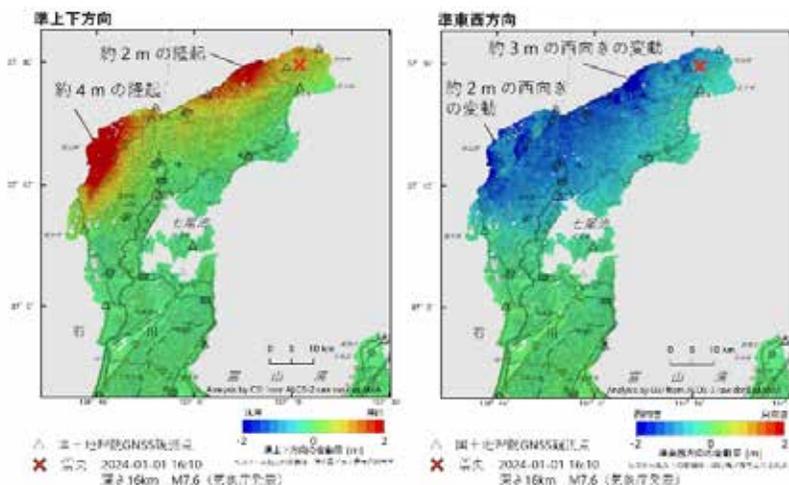


図10 ピクセルオフセット法と2.5次元解析を用いて計測された2024年能登半島地震に伴う地表変動。半島北部に大きな隆起と西向き移動が観測された。国土地理院HPより。

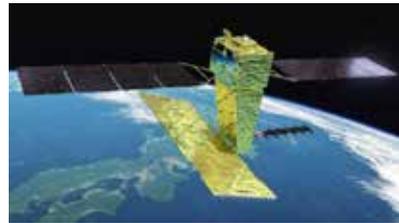


図11 先進レーザー衛星「だいち4号」JAXA HPより。のアーカイブを用いて干渉SARを行うことができるよう設計されていることに加えて、軌道上の観測幅が「だいち2号」の4倍に広がり、データの取得機会が大きく向上したことが大きな特徴です。「だいち4号」の打ち上げ成功により、衛星SARによる地震、火山、地すべり、地盤沈下などの監視が「だいち2号」から中断することなく継続することができました。いつ起きてもおかしくない自然災害に備えるための重要な体制が整えられたと言えるでしょう。

また、今後の動向として注目すべきは超小型SAR衛星の投入です。SAR衛星は、夜間や天候の影響を受けずに地表の観測ができること、地表の変動を面的に監視することができることから、きわめて有用な衛星ですが、大型であることから開発や打ち上げに時間と経費がかかり、複数の衛星を投入することは困難です。このため、超小型のSAR衛星を開発し、民間の参入も視野に入れ、多数のSAR衛星を宇宙に投入することが研究されています。

- 1) 図1, 図2, 図7, 図8, 図9, 図10の作成には「だいち2号」のデータが用いられています。解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA
- 2) 図4, 図6の作成には「だいち」のデータが用いられています。解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA, METI