

国土地理院における干渉SARによる地殻変動検出技術の進展

Progress in SAR Interferometry for the Detection of
Crustal Deformation by the Geographical Survey Institute

測地部 村上真幸・藤原 智・飛田幹男・新田 浩・中川弘之

Geodetic Department

Masaki MURAKAMI, Satoshi FUJIWARA, Mikio TOBITA,
Koh NITTA, Hiroyuki NAKAGAWA

地殻調査部 小沢慎三郎・矢来博司

Crustal Dynamics Department

Shinzaburo OZAWA, Hiroshi YARAI

要旨

国土地理院において地殻変動検出を目的とした干渉合成開口レーダー（干渉SAR）解析技術の開発を行っている。この技術を用いることにより、軌道高度580kmの人工衛星から地表のわずか数センチメートルの変動を広い地域に渡って捉えることができる。国内においては、1995年兵庫県南部地震に伴う地殻変動の検出にこの技術が初めて適用された。本論では、干渉SARの原理を解説し、また地震・火山活動に伴う地殻変動のこれまでの検出例を紹介するほか、最近の解析技術の進展や解析結果を用いた地震断層モデルの作成について報告する。

の出現によって、従来の観測手法では決して見ることはできなかったような地殻変動の面的な分布が定量的に把握でき、地震や火山噴火のメカニズムの解明にまったく新たなデータを提供することとなったのである。この技術により国土地理院では、1994年のアメリカのカリフォルニア州ノースリッジ地震に伴う地殻変動を検出した（Murakami *et al.*, 1996）。国内においては、1995年兵庫県南部地震に伴う地殻変動の検出にこの技術を初めて適用し、野島断層を中心とした地域に数十センチメートルを超える変動を確認している（村上ほか, 1995）。

1. はじめに

国土地理院では、宇宙開発事業団と衛星を利用した地球観測に関する共同研究を1994年に開始し、共同研究の一環として、同事業団と通産省が1992年に打ち上げた国産の地球資源衛星「ふよう1号」の合成開口レーダー（SAR: Synthetic Aperture Radar）のデータを用いて、地殻変動検出の研究を行ってきた。この研究により、軌道高度580kmの人工衛星から地表のわずか数センチメートルの変動を広い地域に渡って捉えることができるようになった。このことが地殻変動研究の新たな展望を開くことになった。

たとえば、地震は地下の断層運動によって引き起こされており、地表で地殻変動として観測される。従来の地殻変動の観測は、三角点および水準点での測地測量や、歪み計や伸縮計などによる観測が主体である。最近では、GPSの連続観測により地殻変動の時間変化を詳細に求めることができるようになったが、地殻変動の空間的分布については、やはり観測点上のみの離散的データしか得られない。観測点を密に分布させることにより、空間的分布についても詳細なデータが得られるようになるが、費用や労力の点で限界がある。

SARを用いた地殻変動観測によれば、地表に特別な観測点を設けることなく、地殻変動を数十キロメートル四方に渡って面的に捉えることができる。つまり、SAR

2. 干渉SARの原理

2.1 合成開口レーダー（SAR）

SARは、対象物に直接接触することなく、計測を実施するリモートセンシング技術の一種である。マイクロ波のレーダーを対象物に照射し、その反射波を解析することにより、対象物の起伏や構造を明らかにするものである。マイクロ波は雲などを通過するので、航空写真と違って天候に左右されることなく観測ができ、資源探査その他の分野で幅広く利用されている。また、光学センサーと違い、マイクロ波を自ら送信するという能動的センサーであるために、目的に最適なパラメーター（波長など）を選択することができる。

レーダーを利用して観測を行う場合、用いるアンテナの大きさ（開口）が大きければ大きいほど、アンテナの分解能は向上する。つまり、より細かな対象物を判別できる。ところが、地表に対して数十メートルの分解能を持つようなアンテナはその開口が優に1kmを超えてしまい、現実には人工衛星に搭載することは不可能になってしまう。このため、人工衛星が移動しながらマイクロ波を発射しつつ、その反射波を受信することにより、大きな開口を持ったアンテナと同等の分解能が得られるように信号を「合成」する。これが「合成開口レーダー」と呼ばれる技術で、これにより人工衛星の軌道に平行な方向の分解能を上げている。また、SARにおいては、軌道と直交する方向の斜め下に向けてパルス状のマイクロ

波を放射し、地表からの反射波が場所ごとに僅かな時間差を持って戻ってくることを利用して、軌道と直交する方向の距離を判別する。この時、パルス幅が狭いほど分解能が高くなるが、SARではパルス圧縮という方法を用いてこれを実現し、軌道と直交する方向の分解能を上げている。

これら二つの処理により、SARでは、地表の画像を $10\text{m} \times 10\text{m}$ 程度（分解能に相当）のサイズの格子状の画素によって構成し、ひとつひとつの画素毎に反射波の強度と位相を測定している。

2.2 干渉処理技術

地表からの反射波の強度を画像化することにより、地表の起伏や構造物等をイメージ化したり、土地利用など地表の様子を調査することができる。

もう一つの情報である反射波の位相を利用して、高精度に標高や地殻変動を測定する技術が干渉SARである。この技術は、米国のジェット推進研究所（JPL）においてSEASAT（1978年打ち上げ）のデータを用いた先駆的な実験が行われた結果、その有効性が実証されていた。その後、1992年カリフォルニア・ランダース地震に伴う地殻変動の様子をヨーロッパのERS-1を使用して明らかにした、Massonnet *et al.*（1993）およびZebker *et al.*（1994）の業績によって、脚光を浴びるようになった。

ここで位相とっている測定量は放射波と反射波の搬送波の位相の差を指しているが、これは、レーダーパルスが伝播したアンテナと地表の間の往復距離をマイクロ波の波長で割ったときの端数（あまり）にあたる。つまり、この測定量は衛星と地上の対象物との間の距離に関する情報を含んでいる。しかしながら、整数分まで含ん

だ波数の全体ではなく、端数分しか分からないため、このままでは情報としての利用が難しい。このため、地表の同一の場所に対して2回のレーダー観測を実施し、得られた2つの位相の差をとること、すなわち干渉させることによって、距離の情報を再現する。これが干渉SAR技術である。位相の干渉を用いて高精度な距離測定を行う点はGPSと非常に似通っている。

図-1に干渉SARの概念図を示す。SARの干渉処理を実施するためには最低1対の観測が必要である。人工衛星を利用する場合は、ほぼ同一の軌道を飛行した異なる時期の観測が利用される。こうして、2つの観測の差をとることによって、位相情報を地殻変動量検出に利用する。

2.3 地殻変動の視覚化

図-2に見られるように、干渉画像の縞模様は周期的に変化する色から成り立っている。同じ色の縞をつなげると一つの曲線を構成する。この曲線を地殻変動の「等値線」と考えることができる。ここでの「等値線」とは、地殻変動の結果生じた衛星-地表間の距離の変化について、その値が同じ点をつなぎあわせて構成した曲線という意味である。「等値線」の間隔が狭い部分は、大きな地殻変動が発生したことを表している。縞模様の変化の1周期分がマイクロ波の波長の $1/2$ （ふよう1号では 11.8cm ）の大きさの変動に相当する。また、色の変化の方向性（赤→黄→青、またはその逆）を調べることで、地殻変動の方向が衛星に近づく向きか遠ざかる向きかを決定することができる。この干渉画像から分かるのは、あくまで衛星と地表との直線距離の変化であり、これは一般に上下成分や水平成分の地殻変動が重なった結果生じるものであるため、単純に上下変動と水平変動に分離することはできない。

このような縞模様で表した変動の大きさを、地形図のような等高線で表すためにはさらに一工夫必要となる。それは、干渉により得られる変動量の数値がゼロから半波長（ふよう1号では 11.8cm ）の範囲に限定されるため、半波長を越えると変動量を表す数値はまたゼロから開始される。地形図の等高線のように連続する数値に直すには、縞模様で表される「等値線」の色の変化の方向性を判断し、縞の数をカウントする必要がある。このような処理を位相アンラッピングという（4.1.節）。この処理を確実に行うアルゴリズムはまだ完全には確立されていないが、断層モデルを作成したり標高データを得たりするなど、干渉SARの結果を定量的に解釈するには必須の技術である。

2.4 誤差要因

干渉SAR画像の変動検出精度が低下するのには以下の4つの原因がある（Fujiwara *et al.*, 1997）。

(a) 機器のノイズ、地表の変化による干渉の低下

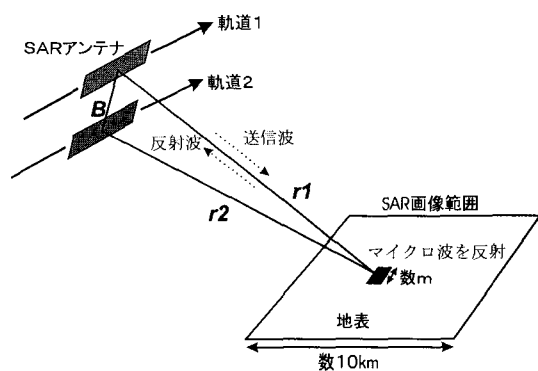


図-1 干渉SAR概念図

飛行するSARアンテナからマイクロ波を送信し地表の対象からの反射波を受信する。軌道1のアンテナ-対象間の距離 $r1$ と軌道2のアンテナ-対象間の距離 $r2$ の差 $r1 - r2$ を干渉SARで求める。この差にはアンテナ-対象間の距離の変化と地形の影響が含まれる。

Bは2つのアンテナ間の空間的位置関係でbaseline（基線）と呼ばれる。

- (b) 大気中の水蒸気分布による遅延
- (c) 人工衛星の軌道位置の推定誤差
- (d) 標高データ (DEM) や地表基準点 (GCP) の誤差

したがって、地殻変動を検出するためには、これらの誤差要因を除去または低減する必要がある。(a)に関しては、短波長マイクロ波 (Cバンドなど) を使うSARの場合、発射したマイクロ波が植生により反射されるため、植生が成長し地表の状態が変わると干渉の度合い (コヒーレンス) が大きく低下する。ふよう1号のSARのように長波長マイクロ波 (Lバンド) を用いる場合、マイクロ波は植生を通過して地面で反射されるため、比較的影響を受けにくい。しかしながら、良い干渉を得るためには、Lバンドであってもできるだけ期間をおかずに1対の観測を行うことが重要である。(b)に関しては、水蒸気の不均一な分布により地殻変動量に換算して10cmもの誤差が生じることが分かっている (Zebker *et al.*, 1997)。今のところ、水蒸気の空間分布を推定する有効な手段がないため、水蒸気遅延を補正することはできないが、後述するように (3.3節) 異なる時期に取得した複数のデータを平均化することにより影響を低減できる。また、(c)に関しては、2つの時期の人工衛星の軌道間の位置関係 (基線) と地表の対象物の位置から、軌道のずれに起因して発生する干渉縞を再現できるので、これを利用して補正する。この時、軌道の推定誤差が大きいと補正が困難となる。これについては4.2節で述べる。また、(d)に関して、地形に起因して発生する干渉縞は、DEMがあれば、理論的な計算によって補正が可能である。日本では、国土地理院の50mメッシュのDEMが北海道以外の地域をすべてカバーしている。また、全世界の陸域をカバーする1kmメッシュ (30"×30") のDEMが米国地質調査所から提供されている。GCPに誤差がある場合、あるいはGCPと衛星画像の合わせ込みが不十分な場合には、地形の影響による干渉縞が残ることがあるので十分な注意が必要である。また、DEMの誤差が大きい場合にも地形の影響による干渉縞が残ることがあるので、このような場合は、逆に干渉SARにより精密なDEMを作成して補正に用いることもある。

3. 地殻変動検出の事例

本節では、ふよう1号のSARにより取得したデータを用いて行った地殻変動検出の例をいくつか紹介する。ふよう1号では、波長23.5cmのLバンドのマイクロ波を伏角55度で被撮影地の東方より送受信している。Lバンドのマイクロ波は植生に対する透過性が強く、植生があっても地面を直接観測していると考えられるので、より短い波長 (Cバンド) を利用するヨーロッパ (ERS-1, 2) やカナダ (RADARSAT) の衛星に比べ、日本のような植生が多い地域についても有効性が高い。なお、データは地表の約75km四方を1単位として提供される。ふよう1号は44日ごとに同一地点上を飛行するの

で、時期の異なった2つの画像の干渉処理を行い、その期間の地殻変動を求めている。

3.1 1995年兵庫県南部地震

図-3に1995年1月17日の兵庫県南部地震に伴う地殻変動の検出の例を示す。これは、地震前のSARデータとして1992年9月9日の画像、地震後として1995年2月6日の画像を使用して得られたものである。用いたデータは以前に解析したもの (村上ほか, 1995) と同じものであるが、処理技術の向上により、広い範囲を高い精度で解析できるようになった。縞が狭い範囲内に密集している場所ほど大きな地殻変動が生じている地域である。この図で、神戸周辺に幅数km長さ20kmほどの帯状の地殻変動が見られる。この変動は断層の右横ずれ運動によるものとして説明できる。また、淡路島では同心円状の変動が野島断層を中心とした地域に見られ、野島断層の右横ずれおよび南東側隆起によるものと説明できる。

3.2 1995年サハリン北部の地震

図-4に1995年5月27日のサハリン北部ネフチェゴルスク付近の地震による地殻変動を示す。画像の取得時期は、1995年4月28日と6月11日である。画像の中央あたりを右横ずれ断層が南北に長さ35kmにわたって地表に出現したことが分かっている。干渉画像には、断層東側の南端部における2つのピークを持った隆起構造が明瞭に現れている。上方のピークはその隆起の大きさが1mに及ぶものと推定できる。一方、断層東側の北端部には1mに及ぶ沈降があると推定できる。また、断層西側全体が30~45cm程度隆起したことが推定できる。砂をばらまいたようにざらついている場所は、2つの画像がうまく干渉しなかった場所である。コヒーレンスが低下する原因は様々であるが、断層周辺では地盤動が大きく、地面が狭い範囲内でもばらばらな方向にずれたためにコヒーレンスが低下したと考えられる。同様な現象は、図-3の淡路島北西部の野島断層沿いにも見られる。

3.3 1993年の伊東沖の群発地震

上に紹介した2つの事例は、最大で1mに及ぶような地殻変動を伴う大きな地震の結果である。伊豆半島の伊東市周辺では、水準測量やGPSの連続観測により、1993年の伊東沖の群発地震に伴って数cm~十数cmの地殻変動が起こっていることがすでに判明している。図-5に伊豆半島、富士山を含む地域の干渉SAR画像を示した。伊豆半島東部に見られる変動は実際の地殻変動を表しているものと考えられるが、その他の地域に見られる変動は地殻変動では説明がつかない。その地理的なパターンから、大気中の水蒸気擾乱、つまり気象の影響であることが推定される。この気象の影響が時間についてはランダムであるとするれば、異なった時期の干渉SAR画像と平均をとることで擾乱を小さくすることができる。図-6に、2画像を平均したものを示した。この平

おり、干渉SARを実用的に行うことができなかった。

基線を解析的に推定するためには、地殻変動を生じていない地域を含むできるだけ広い範囲を同時に処理する。この広範囲の画像について位相アンラッピングを行い、DEMから地表のターゲットの標高を求める。このときに図-10のような位置関係になり、未知数となる基線を最小自乗法で決定する。この手法の開発により、ほぼ自動で高精度な軌道推定ができるようになった。

4.3 フィルタリング

干渉SARの画像に現れるノイズを低減するため、多くの場合フィルター操作を行う。以前は、隣り合ういくつかの画素に重みをつけて移動平均を取っていた。この場合、当然ながらノイズの低減と引き換えに空間分解能を犠牲にすることになる。Goldstein and Werner (1997) は空間分解能を損ねることなく、ノイズを低減する新しいフィルターを考案した。これは干渉SARの画像をフーリエ変換によりいったん周波数領域に移した後、背景ノイズに対して信号の強度を強調し、その後もう一度空間領域に戻すというものである。この操作により、細かな干渉縞が空間分解能を落とさずにより明瞭になるとともに、もともとコヒーレンスが低く干渉縞が現れないところは、不自然に平滑化されることなくノイズがそのまま残ることになる。3. 節で紹介したほとんどの画像にはこのフィルター操作を行っている。

4.4 標高データの作成

図-11はサハリン北部の標高データを段彩図にしたものである。1995年5月サハリン北部地震後の1995年7月25日と9月7日の再生画像（フルシーン）を干渉処理して作成した。この画像ではコヒーレンスが非常に高く、標高の精度は約7mであると推定している。すなわち、ふよう1号の干渉SARでも、水平方向の分解能が約100m、標高精度7mのDEMが作成できる。標高精度に関していえば、国土地理院が刊行している「数値地図50mメッシュ（標高）」のデータと同等のものが得られるわけである。

しかも、これは干渉SARの限界を示すものではない。

ふよう1号は、もともと干渉SARを想定して設計されていないし、SARが光学系より優先順位が低いことも性能低下の要因となっている。また、送受信系のトラブルで所期の性能を出していないことも考え合わせると、干渉SARの潜在能力は今以上に大きいことがわかる。一例をあげれば、スペースシャトルに搭載されたSARシステムSIR-Cでは、地形の感度1mを越えるデータも報告されている。

しかし、この性能がいつでもどこでも発揮できるかというそうはいかない。DEM作成には位相アンラッピング処理が必要であり、この処理が成功するには、干渉画像のコヒーレンスが高いことが必要である。コヒーレンスは、ふよう1号の場合、データ取得時期よりむしろ、基線の長さに依存する。より厳密に言えば、地物と衛星を結ぶ視線方向と垂直な基線ベクトル成分 $B_{\perp}$ が小さければ小さいほど、コヒーレンスは良くなる。しかし、その一方、地形に対する感度（meter/フリンジ）は $B_{\perp}$ に反比例し、 $B_{\perp} = 0$ （ゼロ基線と呼ぶ）では地形に対する感度がなくなる。つまり、 $B_{\perp}$ は長すぎても、短すぎてもいけない。ふよう1号で地形データを作成する場合、経験的には $B_{\perp} = 100 \sim 500\text{m}$ が良いようである。

5. 観測結果の解析の高度化

5.1 GPS連続観測網との連携

国土地理院では、1994年4月に南関東・東海地方を対象としたGPS連続観測網の運用を開始して以降、全国を対象にGPS連続観測網を増設してきている。観測網は、1997年3月には全国で約900点、平均点間距離約25kmの密度の高い網となった（飯村ほか、1997）。このGPS連続観測網で観測される広域の変動に対して、より詳細で面的な変化を捕捉したい地域については更にSARで観測することにより、効率的に広域の変動を詳しく知ることが可能となる。また、SARの観測からは視線方向の変動しか分からないが、GPS観測からは変動の3次元成分が得られる。したがって、これら2つの測地技術は相補的なものであり、これらを組み合わせて利用することによって、地殻変動に関する情報量を飛躍的に増加させることができる。SARとGPS連続観測網

表-1 GPSと合成開口レーダーによる観測の比較

技術 比較要素	GPS	合成開口レーダー
観測量	地殻変動の三成分（上下、水平）	衛星から地表までの距離の変化（1成分）
時間分布	実質上、連続 （毎日、必要であれば毎秒）	周期的 （44日毎）
空間分布	離散的 （25kmに一点）	実質上、面的 （100mに一点）
観測地域必要設備	地上に受信機	不要

の特徴を表-1に比較して示した。

5.2 断層モデルの作成

1997年3月鹿児島県北西部の地震について、SARとGPSによるそれぞれの地殻変動観測結果をもとに地殻変動を引き起こした原因である地震断層のモデルを決定した。求められた断層は、ほぼ東西方向に12kmの長さを持ち断層の上縁が深さ4kmでほぼ垂直に11kmの幅を持つ断層で0.46mの左横ずれである。図-12は干渉SARにより観測された地殻変動とこの断層モデルから計算によりシミュレートした地殻変動の比較の図である。この断層モデルは、地殻変動のデータだけを用いて、断層が矩形で一様な滑りを起こしたということだけを仮定して、決定したものである。これはまだ予備的な解析結果ではあるが、地震のデータから求めたモデルともよく一致している。干渉SARという空間的に密度の高い地殻変動観測とGPSという測位精度の高い地殻変動観測との組み合わせは、従来の三角点や水準点での測地データでは到底得られなかったほど詳細な情報をもたらし、地震を理解する新しい手段を提供している。

6. おわりに

干渉SARの利用は、ここで述べた地殻変動検出やDEM作成以外にも、火山噴火の前兆現象や地盤沈下、地すべり、雪崩の監視、氷河の変動の観測、さらには気象観測の分野においても、新しい可能性を切り開くものである。

これらの期待される応用分野の広さにもかかわらず、SARデータの利用が始まったころは画像再生処理ソフト

ウェアが入手困難であった。しかし、最近ではフリーウェアや市販のソフトウェアが容易に入手できるようになってきたうえ、ワークステーション上だけではなく、一般のパソコン上で動くものも開発されている。このため、SARを利用した研究は、計算機資源に恵まれた研究者だけのものではなくなりつつある。現在、1992年に打ち上げられたふよう1号が、設計寿命の2年をはるかに越えて運用され、得られたデータからは予想以上の成果が得られている。一方、SARを搭載した衛星ミッションが各国において計画されている。例えば、米国ではスペースシャトルを利用したSARミッションやSAR専用衛星の打ち上げが計画されている。我が国においては、2002年の打ち上げを目標とするALOS/PALSAR計画がプロジェクトへの移行時期にさしかかっている。これらを背景として、干渉SARを利用した研究分野の拡大と研究者層の増大が飛躍的に進むことが期待される。GPS技術の進展が我が国の多数の研究者をGPSを利用した地殻変動観測へと駆り立て、観測から得られた多大な成果が更にGPSの普及と進展を促すという相乗効果を生んでいるように、干渉SARの技術開発とそれを利用した研究が今後我が国でもさらに進展することを願い、それに多少なりとも貢献できることを願うものである。

謝辞

ここで紹介した干渉SAR画像は、宇宙開発事業団から、同事業団と国土地理院とで実施している共同研究の推進のために提供を受けたデータを利用して作成したものである。ここに、同事業団の島田政信氏ほかの関係者に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- Fujiwara, S., P. A. Rosen, M. Tobita and M. Murakami, Crustal Deformation Measurements Using Repeat-pass JERS 1 SAR Interferometry near the Izu Peninsula, Japan, accepted by J. Geophys. Res., 1997.
- Goldstein, R. M., H. A. Zebker, and C. L. Werner, Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping, Radio Sci., 23, 713-720, 1988.
- Hiramatsu, A., The shortest discharge tree problem for 2D-image, Memo of Hiramatsu on January 10, 1992.
- 飯村友三郎, 宮崎真一, 佐々木正博: 高密度電子基準点網の構築, 国土地理院時報, 87, 37-49, 1997.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364, 138-142, 1993.
- 村上 亮, 藤原 智, 齊藤 隆: 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, 国土地理院時報, 83, 24-27, 1995.
- Murakami, M., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito and H. Masaharu, Coseismic crustal deformations of 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS 1 synthetic aperture radar, J. Geophys. Res., 101, 8605-8614, 1996.
- Goldstein, R. M. and C. L. Werner, 1997.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner, On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry; The Landers earthquake, J. Geophys. Res., 99, 19617-19634, 1994.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen and S. Hensley, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, J. Geophys. Res., 102, 7547-7563, 1997.

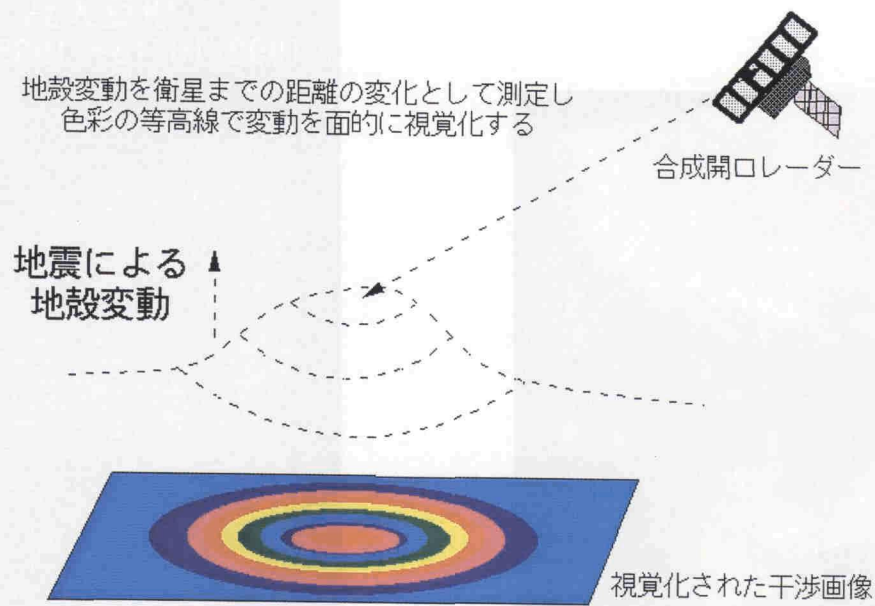


図-2 干渉SARにより検出される地殻変動の視覚化

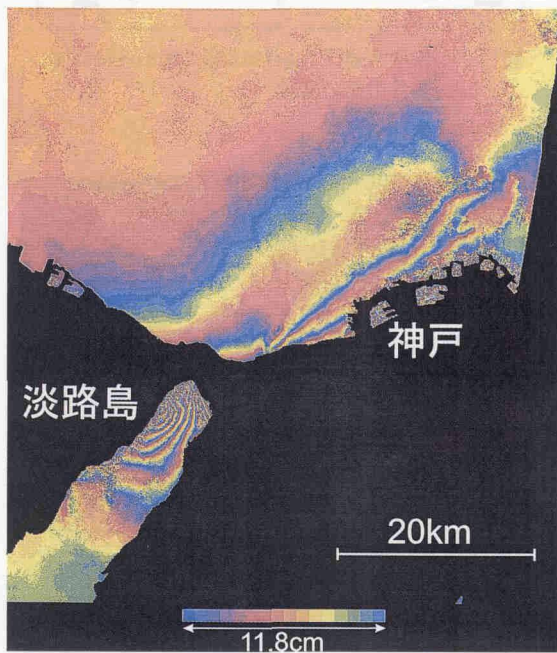


図-3 1995年兵庫県南部地震に伴う地殻変動

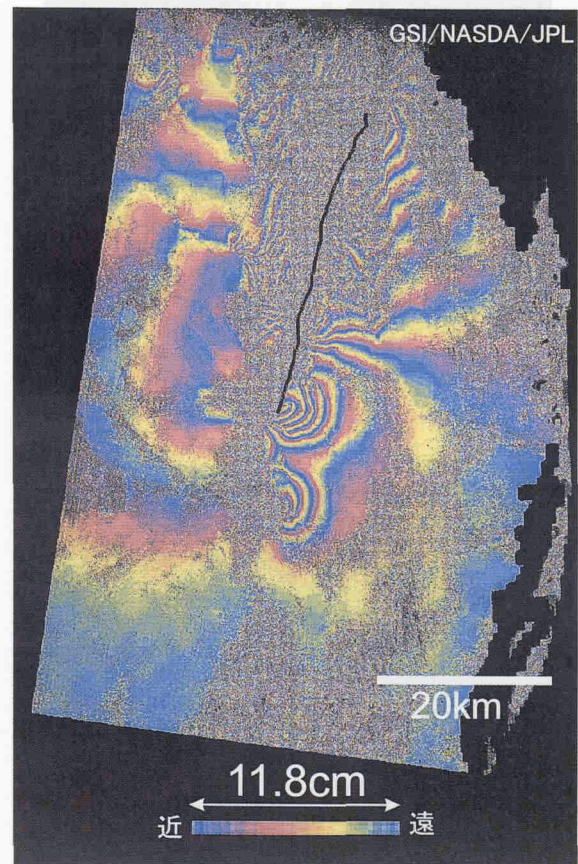


図-4 1995年サハリン北部の地震に伴う地殻変動

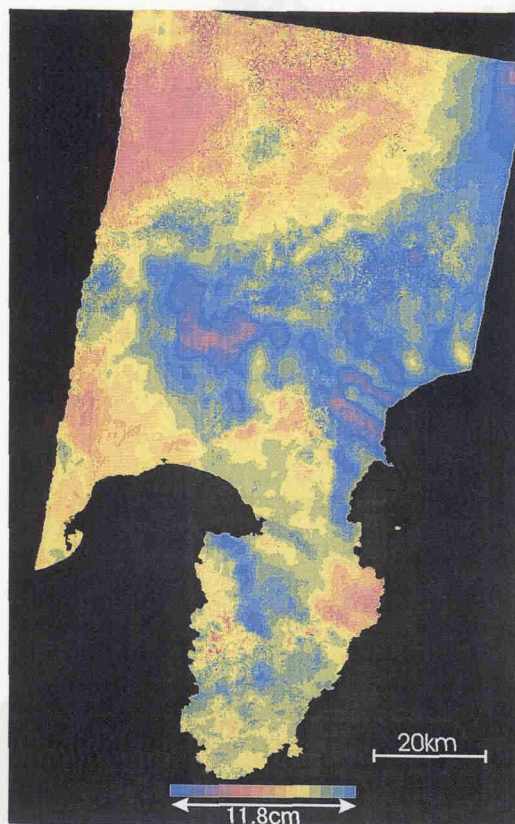


図-5 富士山、伊豆半島地域における1993年8月から11月の干渉SAR画像
変動の大部分は大気中の水蒸気による擾乱である。

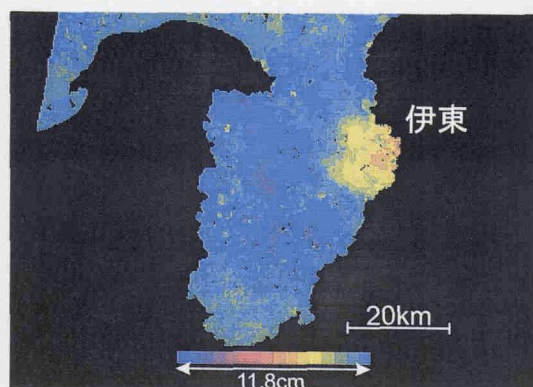


図-6 伊東周辺の地殻変動
2画像（1993年2月から1994年2月および1993年8月から11月）の平均化によって大気中の水蒸気擾乱によるノイズを軽減化している。

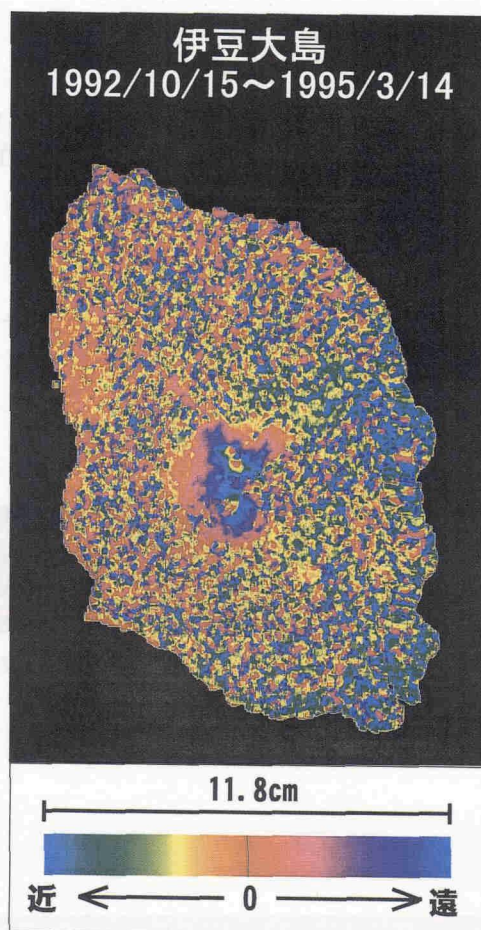


図-7 伊豆大島火口の1992年10月から1995年3月の間の変動

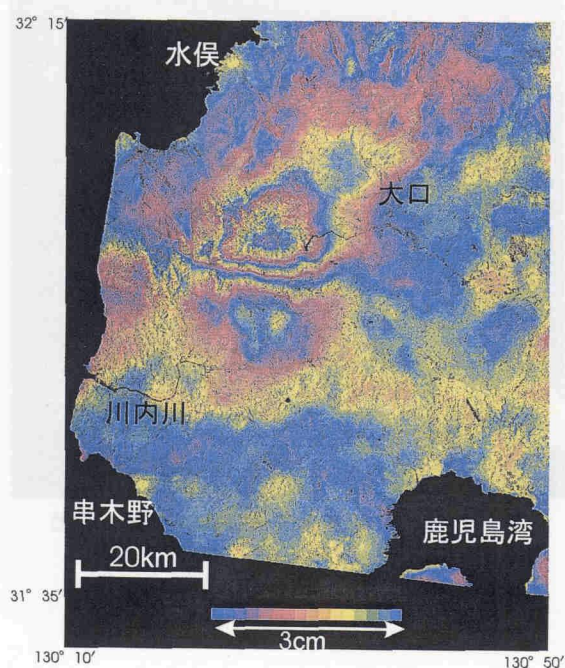


図-8 1997年3月鹿児島県北西部の地震に伴う地殻変動

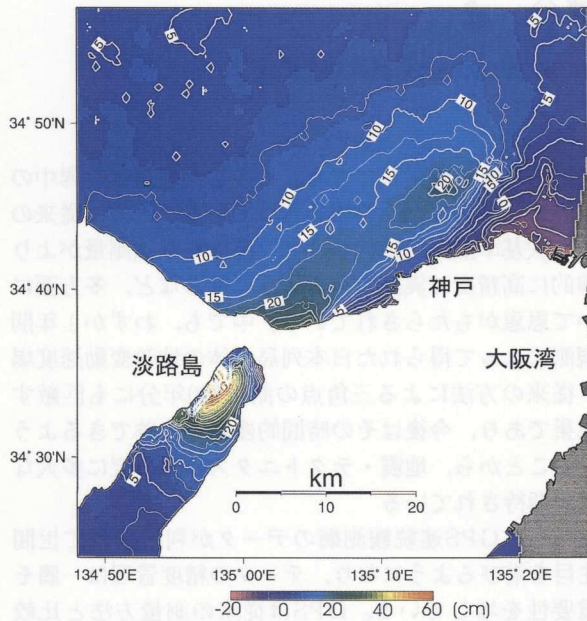


図-9 位相アンラッピング処理により等高線を引いた
1995年兵庫県南部地震に伴う地殻変動

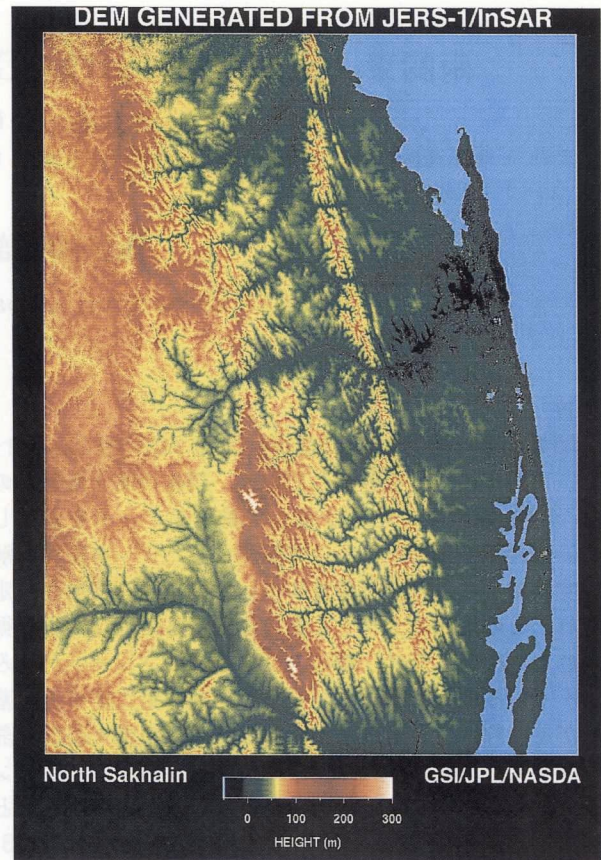
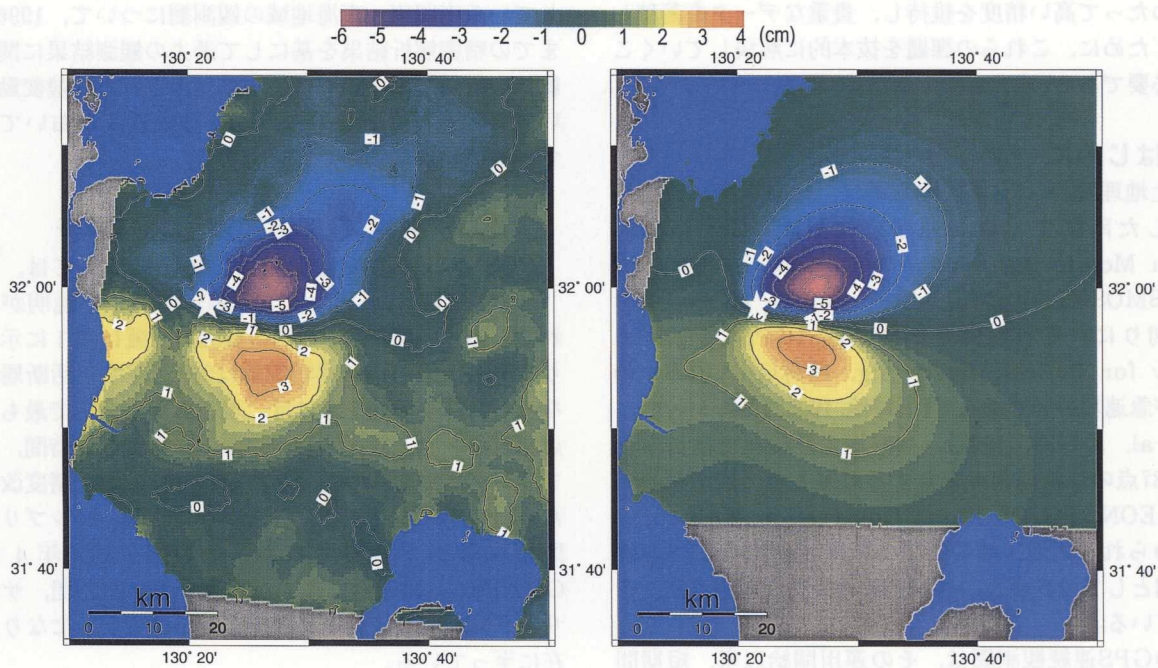


図-11 ふよう1号の干渉SARによるサハリン北部の標
高データ



(a) 干渉SARによる観測が捉えた変動

(b) 断層モデルから計算した変動のシミュレーション

図-12 1997年3月鹿児島県北西部の地震に伴う地殻変動