

干渉 SAR による全国の地盤沈下検出に向けて Detecting Land Subsidence in Japan using Synthetic Aperture Radar Interferometry

測地部 藤原 智・仲井博之

Geodetic Department Satoshi FUJIWARA and Hiroyuki NAKAI

地理地殻活動研究センター 飛田幹男

Geography and Crustal Dynamics Research Center Mikio TOBITA

要 旨

地盤沈下は地下水の過剰くみ上げ等の人為的原因で発生することが多く、被害を最小限にするためにも、広域の地盤沈下監視は欠かせない。地盤沈下監視には水準測量が有効であるが、空間的・時間的に監視の密度を高めるためには費用と労力の点で限りがある。これに対して、人工衛星から観測する干渉 SAR は面的に広域の地盤沈下の監視が可能な画期的な技術である。なお、SAR（「サー」と発音）とは、英語の Synthetic Aperture Radar の頭文字で、日本語では「合成開口レーダー」である。

国土地理院では 1994 年（平成 6 年）から主に研究・開発の目的で干渉 SAR を実施してきており、最近では、実用化・事業化の方向に転換してきている。具体的には、平成 16 年度から始まった新しい基本測量長期計画の中で、干渉 SAR による地表変位の検出を「高精度地盤変動測量」と位置付け、地盤・地殻変動地域では 1 年周期、全国土は 5 年周期で観測実施することを目標としている。

干渉 SAR の実用化・事業化にはデータと解析技術の充実が必要不可欠である。まもなく宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって SAR センサーを搭載した人工衛星 ALOS が打ち上げられ、干渉 SAR に必要なデータが日常的に入手できるようになる。

解析技術については、国土地理院独自の技術開発を続けており、特に 1992 年から 1998 年まで運用されていた JERS-1 のデータを用いて、全国の地殻変動・地盤沈下の検出と精度検証等を行っている。ここでは、干渉 SAR 画像に含まれる誤差の性質を考慮した解析技術の開発や解析時に留意すべき事項の抽出を行っており、必要な解析システムの整備も併せて ALOS 打ち上げ後に干渉 SAR で地盤沈下を定常的に監視することを目指している。

1. はじめに

干渉 SAR は、宇宙（人工衛星）から地球表面の変動（変位）を監視する画期的な技術であり、地震や火山噴火等に伴う地球表面の変位の分布を目に見える形で捉えることができる。

干渉 SAR は地表の変位の可視化という点では非常に強力なツールであるが、1990 年代初めに現在の技

術の基礎が確立したものの、今のところ一般に普及し実用化されたといえる状況ではない。

そこで、干渉 SAR の実用化に必要なものは何かを考えてみる。まず、同じく宇宙技術と電波を使用して位置や変位の測定を行う GPS の成功例を見てみよう。

GPS 衛星の数が少なかった初期段階には、観測可能な時間が限られていたが、その後、衛星の数が増え、いつでも GPS が利用できるようになった。また、国土地理院が日本全国に 1200 点を超える電子基準点（GEONET）を展開し（測地観測センター、2004）、観測点の密度が高まり、どこでも GPS が利用できるようになった。さらに、これらのデータが RINEX と呼ばれる世界共通のフォーマットに変換されインターネット上で公開された。このように、必要な時期・場所のデータを誰もが容易に利用できるようになったのである。GPS の成功の主要因は以上のようなデータの充実であるが、さらに解析技術の進歩も大きく貢献した。現在では GPS 利用者が解析方法の詳細について注意を払う必要がないほど、精密解析ソフトウェアが充実している。

こうしてみると干渉 SAR の実用化にも、データの充実と解析技術の進歩が必要不可欠であろう。

干渉 SAR 解析に使用するデータは主に人工衛星が取得する。日本の宇宙開発事業団（現 JAXA）が打ち上げたふよう 1 号（JERS-1）は、日本の国土のように植生が多い地域での地表の変位検出に適した波長（Lバンド）をもつ SAR センサーを搭載しており、数多くのデータを残した。しかし、JERS-1 が運用された 1992 年から 1998 年の後、日本の国土に適した SAR センサーを搭載した人工衛星はなく、現在までの 7 年間は実用的に使える SAR データを取得できない状況である。

日本のみならず世界中の干渉 SAR 関係者が待ち望んだ Lバンド SAR センサー搭載の人工衛星がまもなく打ち上げられる。JAXA が平成 17 年度に打ち上げを予定している陸域観測技術衛星 ALOS（Advanced Land Observing Satellite：エイロス）である。

国土地理院では、ALOS の SAR データを利用した地表変位検出を実用化しようと、解析ソフトウェアや大量のデータを処理するシステムの開発を進めてい

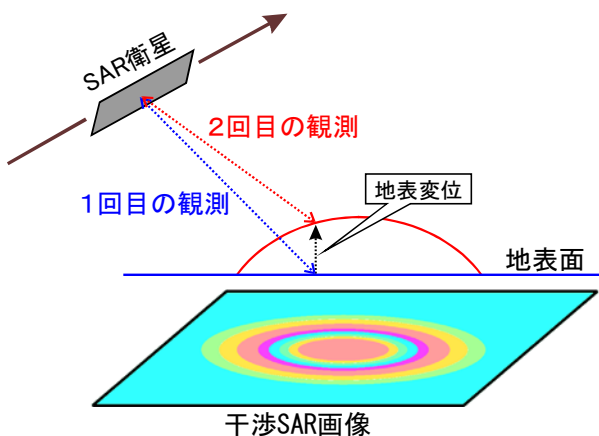
る。これらのシステムが稼働すれば、地震や火山活動に伴う変位の検出も日常的に可能になるが、本稿では、より定常的・実用的な対象として、特に地盤沈下検出に向けての実用化について述べる。

2. 地盤沈下検出と干渉 SAR

2. 1 地盤沈下検出

地盤沈下は、軟弱地盤等において、地下水の過剰くみ上げや天然ガスの採取、埋め立てなどの主に人為的な原因によって発生する。一旦沈下が発生すると、原因である地下水のくみ上げなどを中止しても元に戻らず、沈下したままであることが多い（飛田他, 2004）。したがって、地盤沈下の防止には、用水のくみ上げ等の規制が重要であり、規制を実効化するためにも広範囲な地盤沈下の監視が必要である。

従来、地盤沈下の分布を求めるには地表に固定された水準点の高さを繰り返し測定すること（水準測量）が行われてきた。近年では GPS 受信機を設置すれば連続的に変位を mm レベルで測定できるようになった。しかしながら、こうした手法では測定機器のある場所（点）だけの測定値しか得られず、面的に広く、かつ詳細に地盤沈下を測定するには費用と労力の点で限界がある。これに対し、地表に何ら測定機器を設置せず、面的に地盤沈下を測定できる画期的な手段が干渉 SAR である。干渉 SAR を使うと地盤沈下の分布を目に見える形で捉えることができる。



図一 干渉 SAR による地表変位検出の概念図
同心円状に地表が隆起した場合の干渉 SAR 画像を表す。

2. 2 干渉 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り、人工衛星などから地表をめぐって電波を発射し、地表で反射・散乱した後方散乱波を画像化する特殊なレーダーである。電波は雲などを通過するので、航空写真等の光学観測と異なり夜間や雨天でも観測がで

きる。さらに、地表の同一の場所に対して 2 回の SAR 観測を実施し、位相の差をとること（干渉）によって、この距離差の情報を利用することが可能になる。これが干渉 SAR である（図一）。

2. 3 干渉 SAR は何に役立つのか

干渉 SAR は地球表面の動きを測定できる。地震による地殻変動を測定すれば、地表の変位の分布から、地下の見えない断層の動きを明らかにすることができる。結果的に、地震がどのように発生したのかわかり、今後の地震発生の予測などに役立つ。火山の山体の変位を測定すれば、地下のマグマの動きを推定することができ、今後の火山活動を予測することに役立つ。また、地すべりや氷河の移動を捉えることもできる。こうした自然現象を解明するだけではなく、たとえば、地盤沈下のように人為的な地下水くみ上げや大規模工事の影響による現象をも捉えることができる。

なお、干渉 SAR では、観測や解析の工夫により、地形（標高）や大気中の水蒸気分布の測定も可能である。

2. 4 干渉 SAR と他の測量との違い

地表の変位の測定は、GPS や水準測量といった他の測量方法でも可能であるが、干渉 SAR の特長は、

1) 面的に測定可能

2) 地表に観測機器が不要

である。人工衛星を利用する干渉 SAR は、数十 km 四方が一度に測定できる上に、その範囲に機器を設置する必要がない。そのため、

1) 経費が抑えられる

2) 人間が立ち入ることのできない場所でも測定ができる

これらは他の地上測量にはまねのできない、大きな長所といえる。

3. 地盤沈下検出のための干渉 SAR 解析技術

3. 1 誤差要因

干渉 SAR を地盤沈下検出に用いる場合、干渉 SAR に含まれる誤差をいかに取り除くかが重要である。誤差にはいろいろあるが（藤原・飛田, 1999）、影響が大きいものは以下の 3 つである。

1) 人工衛星の軌道情報の誤差

2) 大気遅延の不均一分布

3) 干渉 SAR 画像の画質低下

したがって、これらの誤差を除去する方法が正確でないと地盤沈下検出量に誤差を生じるため、解析時には注意が必要である。

3. 1. 1 人工衛星の軌道情報の誤差

利用した2回の人工衛星の軌道が完全に同一でない場合、軌道縞と呼ばれる人工衛星軌道間の位置関係のずれ(基線値)による誤差と、地形縞と呼ばれる地表の形状に起因する誤差(藤原他, 1999)が生じる。軌道縞に関しては、基線値と衛星-地表の位置関係から厳密にパターンが再現できるので、これを利用して補正する(藤原他, 1999)。また、地形縞についても、地表のデジタル標高データ(DEM)があれば、同様に幾何的な数値計算によって補正が可能である(Massonnet *et al.*, 1993)。日本では、国土地理院の50mメッシュのデジタル標高データが全国をカバーしており、十分な分解能と精度を持っている(飛田, 2003)。

2回の軌道が完全に同一であれば、軌道縞も地形縞もゼロになるのだが、実際に軌道が同一になることはなく、cmオーダーの精度で地表の変位を検出するためには、軌道情報もcmオーダーの精度が必要とされる。しかし、衛星の軌道情報は、ときには100mを越えるような誤差を持っていることもあり、軌道縞を確実に除去するために、標高が既知である点の干渉SAR画像のデータを用いて基線値推定を行うなどの、さまざまなノウハウ(Rosen *et al.*, 1996; Fujiwara *et al.*, 1998; 藤原他, 1999)が必要とされる。

JERS-1はGPS受信機等の位置を精密測定する機器を搭載していなかったために、軌道推定技術の精度が干渉SAR画像の精度に大きく影響したが、GPS受信機を搭載するALOSは、大きな軌道情報の誤差は生じない。ただし、厳密な軌道推定技術は必要である。

3. 1. 2 大気遅延の不均一分布

SARに使用される電波は大気中の水蒸気により遅延が発生する。この遅延は非常に大きく、特に気象現象によって発生する空間的・時間的な不均一が大きいことが、干渉SARの誤差として問題となる(Massonnet and Feigl, 1995; Zebker *et al.*, 1997; Fujiwara *et al.*, 1998; 藤原他, 1998)。

大気遅延による誤差の影響で第一に問題になるのが、遅延量分布そのものが直接与える影響である。大気遅延による誤差と地表変位は本質的に分離不可能であり、大気遅延の大きさが直接誤差になる。富士山、伊豆半島などの高温多湿で地形の複雑な地域では、10cmを越える大気遅延による誤差が見つまっている(藤原他, 1998)。

第二の問題は前述の軌道推定に与える影響である。現在、軌道は干渉SAR画像の地表変位分布と標高データを元に推定しており、地表変位分布に誤差があると、軌道推定値にも誤差が生じる。軌道推定は1

画像中からまんべんなく参照データを取得することで、干渉SAR画像の大きさ(約数十km四方)より十分小さい空間スケールの大気遅延の影響は除去される。しかし、画像の大きさと同じか、それ以上の空間スケールを持つ大気遅延の影響はそのままでは除去が困難である。

なお、SARは雲があっても観測できることが長所となっているものの、実際のところ、雲が多い悪天候時ほど大気遅延の誤差が大きくなりがちである。したがって、データを入手する際に、好天時のデータを選んで取得するように注意すべきである。

3. 1. 3 干渉SAR画像の画質低下

干渉SARにおける画質の低下とは、ピクセル(画素)ごとのデータに不規則なノイズが加わることである。干渉SARの画質の低下の原因にはいくつかある。まず、SAR画像にはスペckルノイズと呼ばれるSAR特有のノイズがあるほか、SAR受信システムの熱雑音など避けられないノイズがある。しかし、干渉SARの画質を決定的に低下させるのは2回の観測の間に地表面の状態が変化してしまうことである。

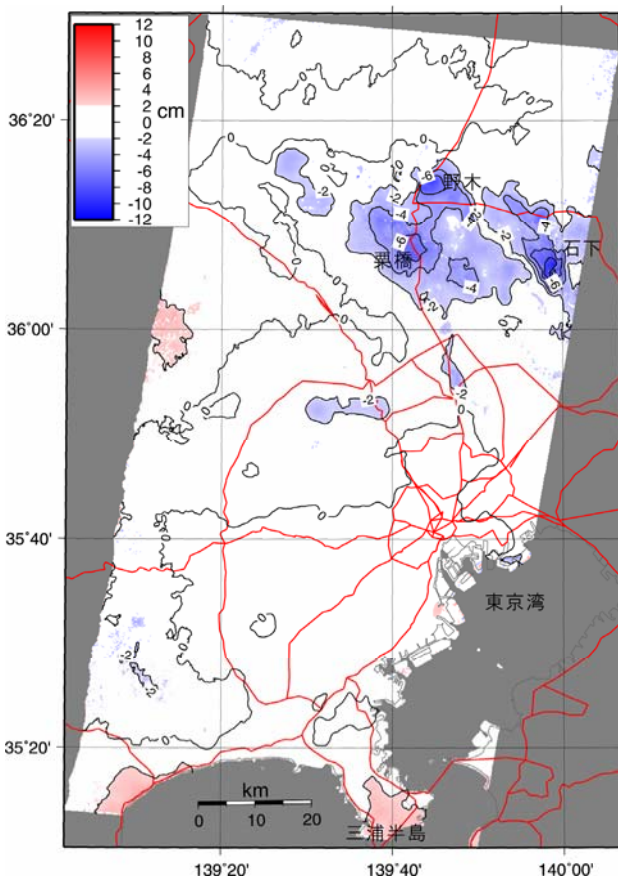
地表面の状態変化とは、たとえば植生の変化、降水・風などによる変形、凍結・解凍、耕作など様々な原因がある(Zebker *et al.*, 1994; Fujiwara *et al.*, 1998; Tobita *et al.*, 1998)。地表面の状態が変化すると干渉SAR画像の画質劣化のみならず、最悪の場合はまったく干渉画像が得られないという結果を引き起こし、干渉SAR画像のコヒーレンス(相互相関)の低下となって現れ、「干渉が悪い」とか「コヒーレンスが低い」(位相の値がバラバラに分布し、干渉SAR画像は砂をまいたようにざらざらした状態)画質となる。コヒーレンスの低下は、基線値の増大によっても引き起こされる。この原因は、基線値が大きいほど、別の角度からの観測をしている状況になり、同じ地表面と認識できるデータを得られないためである。地形が険しいとこの影響はさらに急激に増大するため(Fujiwara *et al.*, 1998)、山岳部でのコヒーレンスの低下を抑えるには基線値の短いデータを使うほかない。

干渉SARに使用される電波は波長によってXバンド(約3cm)、Cバンド(約6cm)、Lバンド(約24cm)などに分けられる。波長が短いほど地表変位検出の分解能が高くなる。しかし、波長が短いほど前述の基線値増加に対するコヒーレンスの低下の割合が大きくなり、画質の低下の点で波長の短さは不利となる。さらに問題となるのは、波長が短いほど光の性質に近づき、たとえば、葉や草を通過することができなくなることである。植物は時間とともに変化(生長、落葉など)し、また風などで動揺するため、植物の表面で電波が反射していると2回のSAR観測で

反射場所・状態が異なり、コヒーレンスが低下する。Massonnet *et al.* (1993) は C バンド衛星の ERS-1 を使用して地震による地表変位を捉えているが、対象となったのはほとんど植生のない砂漠に近い場所であった。日本のように植生が多い場所では、C バンドでの干渉は難しいが、より波長が長い L バンドでは植生の影響をほとんど受けず干渉が得られる (Rosen *et al.*, 1996)。このように L バンドの電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、日本のような植生が多い地域についても有効性が高い。ALOS への期待が高いのは L バンドの SAR を搭載しているためである。

3. 2 誤差を小さくする技術

前述の誤差の影響を最小限にし、干渉 SAR を実用化するために有用な技術を以下に紹介する。



図一 2 干渉 SAR による関東の地盤沈下量図
1995 年 1 月 29 日に対する 1998 年 3 月 18 日の変化。
赤線は国土地理院の水準測量路線を表す。

3. 2. 1 GPS と干渉 SAR の融合

GPS は測定できる場所は限られるものの、3次元で高精度の地表変位量を得ることができる。この GPS と干渉 SAR の融合技術は飛田他 (2005) に詳し

く述べられている。1枚の干渉 SAR 画像中に複数の GPS 連続観測点があれば、軌道誤差や大気遅延による長周期の画像のゆがみを補正することができる。また、干渉 SAR は人工衛星-地表間に沿った 1次元の変位しか捉えないため、GPS の 3次元の変位量情報は極めて有用である。

図一 2 に関東での地盤沈下検出例を示す (飛田他, 2005)。この図には国土地理院の水準測量路線も描かれており、水準測量路線からはずれた場所にも地盤沈下は分布しており、監視能力の高さがわかる。

JERS-1 が運用されていた 1992 年から 1998 年のうち、十分な GPS 観測点が存在したのは後半の時期だけであったので、JERS-1 データについて GPS との融合解析ができる干渉 SAR データは必ずしも多くない。しかし、現在では、日本全国に 1200 点以上が展開している国土地理院の GEONET を使用することで容易にこの補正ができる。したがって、ALOS については GPS との融合解析を定常的に行うことができるインフラが揃ったことになる。

3. 2. 2 画像平均化

空間スケールが数十 km に及ぶような長周期の誤差は GPS との融合解析でかなりの部分を補正することができるが、より短周期の誤差を補正することは困難である。ところで、大気遅延による誤差は時間により刻々と変化していくため、ある程度ランダムな現象として取り扱うことができる。したがって、複数の干渉 SAR 画像の平均をとることで大気遅延を含む各種誤差を小さくすることができる。

図一 3 (b) (c) は別の時期に観測した画像であるが、1994 年に発生した大洪水時の地下水過剰くみ上げによると推定される有明海周辺の地盤沈下を捉えたものである。図一 3 (b) では、A、B 及び C が地盤沈下発生場所である。しかしながら、この画像では D に「隆起」を示す変位が現れている。これら A B C 及び D が真の地表の変位かどうかを確認するため、他の時期の干渉 SAR 画像と比較したところ、D については図一 3 (c) で隆起していないことから、D は大気遅延の影響による可能性が高く、地表の変位ではないことがわかった。このように、単純に他の時期の干渉 SAR 画像と見比べるだけでも、どれが「本物」の地表の変位か見分けることができる。

図一 3 (c) と (b) では (c) のほうが大きい空間スケールの誤差が小さく、大気遅延による誤差は小さいものの、軌道間距離が大きいため山岳地帯を中心に画質低下が多く発生している。E に至っては干渉が得られず、変位量すら求められなかった。また、E 周囲では、変位量のばらつきが大きい (図一 3 (c))、E の周囲の青と赤の点がばらまかれたようになっている地域。

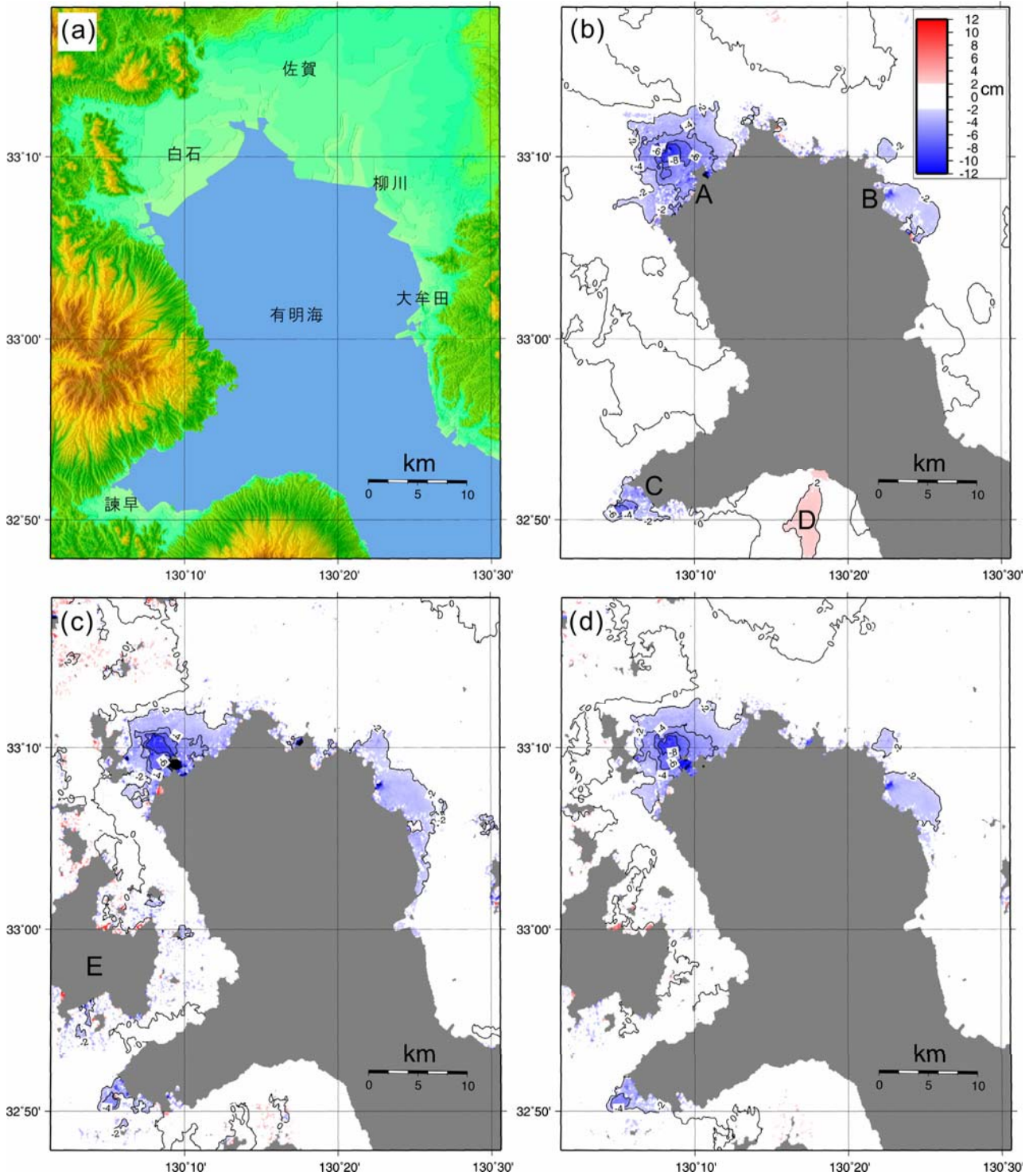


図-3 干渉 SAR による有明海周辺の地表の変位量図

- (a) 地形図
- (b) 1993 年 10 月 18 日に対する 1996 年 4 月 29 日の変化
- (c) 1994 年 1 月 14 日に対する 1996 年 6 月 12 日の変化
- (d) (b) と (c) の平均

図-2 と異なり、人工衛星-地表間の変位量で表示しており (図-4, 5, 6 も同じ)、赤 (プラス) が人工衛星に近づく向き (東または上向き)、青 (マイナス) が人工衛星から遠ざかる向き (西または下向き) の変位を表す。上下方向のみの変位の場合は、この図の約 1.3 倍の変位があったことになる。

(b), (c)の平均をとったのが図-3 (d)である。画像(b)に主に起因していた、地盤沈下場所以外の変位(大気遅延によるもの)がほとんど消滅したほか、画像(c)に起因していた細かい値のばらつき(画質低下によるもの)もほとんどなくなった。このように画像平均化が誤差軽減に有効な場合も少なくない。

4. 干渉 SAR が得意とする地盤沈下検出とは何か

4. 1 干渉 SAR の精度と空間スケールの関係

ここで以下の2つの例を較べてみる。

- 1) 2 cm の地盤沈下が直径 10km で広がっている地域
- 2) 2 cm の地盤沈下が直径 1 km で広がっている地域

この2カ所では、どちらが干渉 SAR でより正確に測定できるであろうか。常識的に考えれば、より広い範囲の地盤沈下のほうが測定点を多くとれるのでより正確な計測ができるように思われる。ところが、上記の2例の場合、日本付近でより正確に測定できるのは、実は後者の直径 1 km の小さい空間スケールのほうである。これには前章で述べた干渉 SAR の誤差の性質に関わりがある。

図-3 (b)をもう一度見てみる。この図は変位量が±2 cm を超える地域に色をつけてある。Dの赤色の地域は前述のように大気遅延による見かけ上の変位を表しており、この地域は数 km の空間スケールを持っている。こうした大気遅延による誤差量は空間スケールが大きくなるほど増大することが知られている (Fujiwara *et al.*, 1998)。つまり、同じ地盤沈下量であれば空間スケールが小さいほど、すなわち空間スケール/変位量が小さいほど干渉 SAR での変位検出精度が高くなる。

ただし、空間スケールが小さくなりすぎると別の誤差要因の影響を受けるようになる。3. 1. 3で述べた画質低下による誤差である。この誤差は大気遅延とは逆に空間スケールが小さいほど大きくなる(図-3 (c))。

大気遅延による誤差と画質低下による誤差のそれぞれの量は画像ごとに異なるため、干渉 SAR における誤差量は一概には言えないが、JERS-1 データを使用した場合には、経験的に数百 m~数 km 程度の空間スケールで最も誤差が小さくなり、その誤差もほぼ 1 cm 以下である。大気遅延が大きいと図-3 (b)のように数 km 以上の空間スケールで数 cm 以上の誤差が発生し、画質低下が大きいと図-3 (c)のように数 km 以下の空間スケールで数 cm 以上の誤差となり、場合によってはEのように値すら得られなくなる。画質低下は画像から計算されるコヒーレンスから見積もることができるが、大気遅延は干渉 SAR 画像だけでは見積もることは困難である。したがって、

干渉 SAR 画像で 10km を超えるような空間スケール現象を確実に検出するためには前述のように GPS 等で検証・補正することや、複数画像の平均化の作業等が必要である。

4. 2 干渉 SAR が得意とする空間スケールの地盤沈下検出例

ここでは干渉 SAR が得意とする空間スケールでの地盤沈下検出例を示す。つまり、ここで示すような地盤沈下は平均化等の解析をしなくてもほぼ確実に誤差ではなく変位であると認められるものである。

4. 2. 1 苫小牧港南部の地盤沈下

図-4 は北海道・苫小牧港の南部に半島状に突き出た地域の地盤沈下である。図の下側の中央から左側にかけて赤と黄色で半円形に縁取られた部分が地盤沈下を示している。青→赤→黄色→青と位相がほぼ1周していることから、人工衛星-地表間の距離で約 12cm、地盤沈下量に換算すると 15cm 以上である。図の上部や右側で砂をまいたように色がばらついて分布している場所はコヒーレンスが低く画質が低下している場所である。地盤沈下地域は南北約 1.5km、東西数 km 程度の広がりをもっており、変位量が大きいことから確実に地盤沈下があったことがいえる。この地域は工業地帯であることから工業用水の過剰くみ上げの可能性がある。

4. 2. 2 北海道・濁川温泉の地盤沈下

図-5 は北海道渡島半島の古くからの温泉地である濁川温泉付近の地盤沈下である。火山のカルデラ底の北西部が沈下している。カルデラ内の変位であることから、火山活動による沈下も考えられるが、カルデラ内ではどこを掘っても温泉が出るほど自家用温泉が多く、温泉水の過剰くみ上げの可能性はある。なお、近くには地熱発電所もあり、地盤沈下の原因究明には沈下場所、時期等の定量的調査が必要である。

4. 2. 3 八戸市内の地盤沈下

図-6 は青森県八戸市内の2カ所の地盤沈下である。どちらの変位も幅が数百 m ほどしかなく、また、比較的良好なコヒーレンスを得ていることから確実な地盤沈下である。八戸市役所によれば、これらの地域の地盤沈下はよく知られており、水準測量等も行われている。2カ所とも旧河川などの低地の沼地を埋め立てて宅地化した場所であり軟弱地盤のため地盤沈下が続いている場所である。

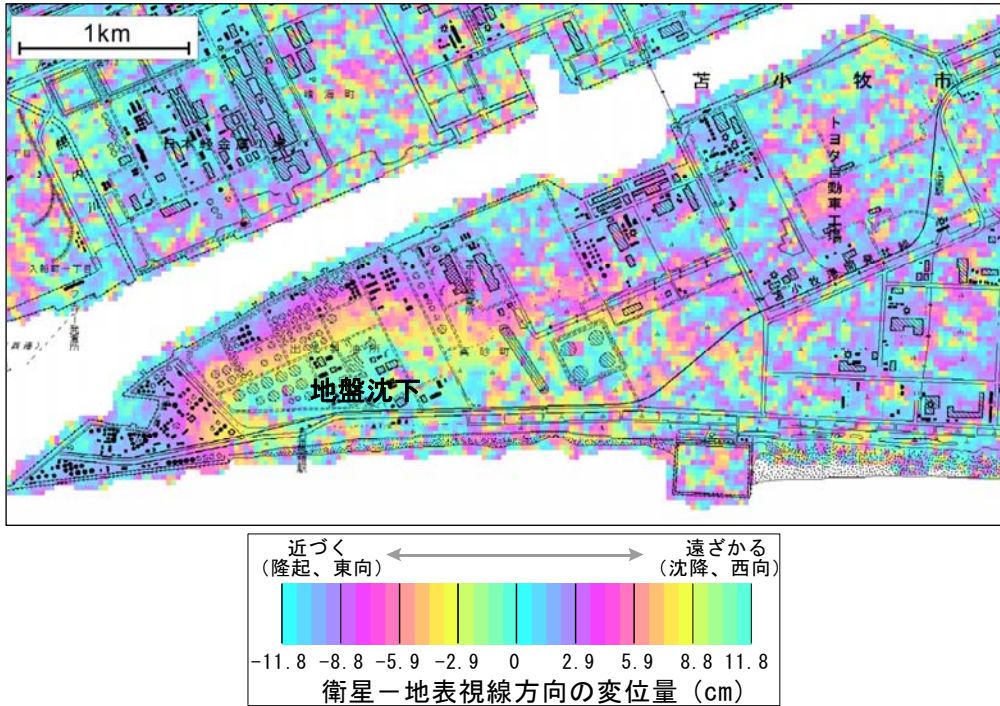


図-4 北海道・苫小牧港南部の地盤沈下を表す干渉 SAR 画像
 1992 年 10 月 14 日に対する 1998 年 4 月 30 日の変化
 色の見方は以下の図-5、6 も同じ

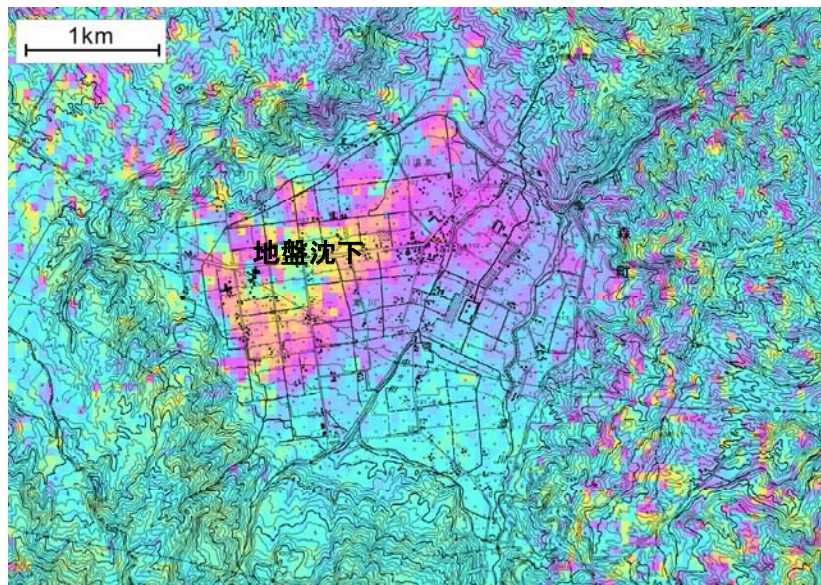
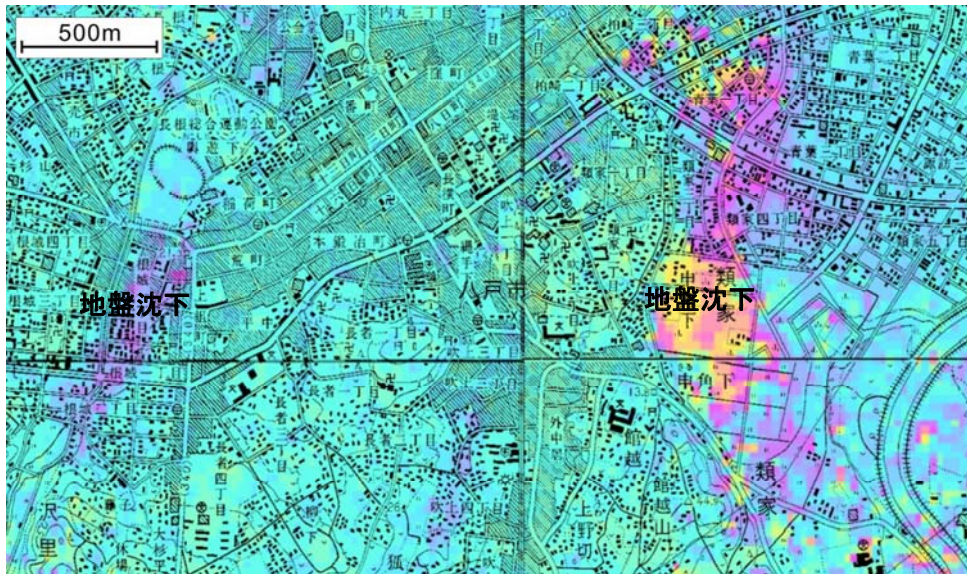


図-5 北海道・濁川温泉の地盤沈下を表す干渉 SAR 画像
 1995 年 10 月 21 日に対する 1998 年 9 月 11 日の変化



図－6 青森県八戸市内の地盤沈下を表す干渉 SAR 画像
1994年9月18日に対する1997年8月9日の変化

5. まとめ ー高精度地盤変動測量の開始ー

国土地理院では1994年から干渉SAR技術の研究に取り組んでおり、本稿に示したほかにも地震や火山活動による変位を中心に数多くの干渉SAR画像を作成してきた(国土地理院干渉SARホームページ参照)。

これまでは、干渉SARを主に研究・開発の目的で実施してきたが、最近では実用化・事業化の方向に転換してきている。具体的には、平成16年度から始まった新しい「基本測量長期計画」の中で、干渉SARによる地表変位の検出を「高精度地盤変動測量」と位置付けた。高精度地盤変動測量は面的な地盤変動(地震・火山活動等による地殻変動、地下水過剰くみ上げによる地盤沈下等)を広範囲に捉え、面的に確度の高い国土監視・管理技術の向上を図り、防災・減災、環境保全対策等に資するものとしている。そして地殻・地盤変動地域では1年周期、全国土では5年周期での測量を実施することと、cmレベルの精度を目標としている。こうした中で、実際に高精度

地盤測量を実施する組織として、平成16年4月に測地部宇宙測地課が発足し、地球変動観測係が新設されている。

国土地理院では、誰もが日本全国どこでも干渉SARで地表変動を求められるようになることを目指している。これには「質」(解析技術)と「量」(データ)の確保が必須となる。このうち、データの確保に関しては、まもなく打ち上げられるALOSの観測データを利用する予定であり、解析技術では、国土地理院独自の解析ソフトウェア(GSISAR)の開発・改良と共に、ALOSからのデータを定常解析処理するためのシステム開発を進めている。

このように、ALOSの打ち上げ後は、干渉SAR技術を用いて、他の測量の計画の参考ともなるように、日本全国の地表変位を定期的に監視していく予定である。そして、GPSが多くユーザーをひきつけ、測地観測の重要なツールに育ったように、干渉SARを実用化できるように推進したいと考えている。

参考文献

- Fujiwara, S., P. A. Rosen, M. Tobita and M. Murakami (1998): Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS 1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 103, 2411-2426.
- 藤原 智, 飛田幹男, 村上 亮 (1998): 干渉SARにおける水蒸気情報の重要性, 気象研究ノート「GPS気象学」(内藤勲夫編), 192, 199-212.
- 藤原 智, 飛田幹男 (1999): 地表変動検出のための干渉SAR画像作成技術, 測地学会誌, 45, 283-295.
- 藤原 智, 飛田幹男, 村上 亮, 中川弘之, Paul A. Rosen (1999): 干渉SARにおける地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正, 測地学会誌, 45, 315-325.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142.
- Massonnet, D and K. Feigl (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's

surface, *Rev. Geophys.*, 36, 441-500.

Rosen, P. A., S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb and E. J. Fielding (1996): Surface deformation and coherence measurements of Kilauea volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 101, 23109-23125.

測地観測センター(2004): 電子基準点 1,200 点の全国整備について, *国土地理院時報*, 103, 1-51.

Tobita, M., S. Fujiwara, S. Ozawa, P. A. Rosen, E. J. Fielding, C. L. Werner, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, and Mak. Murakami (1998): Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, 50, 313-325.

飛田幹男 (2003): 合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用, *測地学会誌*, 49, 1-23.

飛田幹男, 宗包浩志, 海津 優, 松坂 茂, 黒石裕樹, 眞崎良光, 加藤 敏(2004): つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動, *測地学会誌*, 50, 27-37.

飛田幹男, 宗包浩志, 松坂 茂, 加藤 敏, 矢来博司, 村上 亮, 藤原 智, 中川弘之, 小澤 拓(2005): 干渉合成開口レーダーの解析技術に関する研究, *国土地理院時報*, 106, 37-49.

Zebker, H. A., C. L. Werner, P. A. Rosen and S. Hensley (1994): Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32, 823-836.

Zebker, H. A., P. A. Rosen and S. Hensley (1997): Atmospheric artifacts in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *J. Geophys. Res.*, 102, 7547-7564.

国土地理院(2005): 干渉 SAR ホームページ, <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/> (accessed 27 July 2005).