SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動，変動速度，体積変化

Two-dimensional field of Three-dimensional Components of Deformations and Velocities, and Volume Change around Usu Volcano Associated with the 2000 Eruption by Matching of SAR Images

地理地殻活動研究センター　飛田幹男・村上　亮・中川弘之・矢来博司
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mikio TOBITA, Makoto MURAKAMI, Hiroyuki NAKAGAWA and Hiroshi YARAI

文部科学省研究開発局　藤原　智
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
Satoshi FUJIWARA

要　旨

RADARSAT等の人工衛星に搭載された合成開口レーダーの２枚の画像を高精度にマッチングさせ，マッチング後の残差として地殻変動を捉える手法を開発した。有珠山周辺にこの手法を適用して得られた変動成分について，２方向からの情報を合成することによって変動の三次元成分を面的に得ることができた。同時に，地殻変動の変動速度と体積変化を推定した。この手法により，雲，霧，噴煙等の影響を受けることなく，また危険地域に立ち入ることなく，繰り返し行われる衛星観測データを利用して，広い範囲の地殻変動を面的に監視できる。

1. はじめに

火山噴火や地震に伴う地殻変動を面的にマッピングする技術として，干渉SARは広く認知されるようになっており｛火山の例（Massonnet et al., 1995 ; Rosen et al., 1996）；地震の例（Massonnet et al., 1993 ; Zebker et al., 1994 ; Murakami et al., 1996 ; Tobita et al., 1998)｝，2000年春の有珠山噴火の場合にも火山研究者から期待が寄せられた。しかし，今回の地殻変動の場合，その量があまりに大きく，干渉SARでの計測は困難である。フリンジ（変動による位相差の１回転分）の密度が高くなり過ぎ，相関低下（decorrelation）を引き起こすからである。また，現在運用中のSAR搭載人工衛星（RADARSAT，ERS-２）は，搬送波の周波数帯域がCバンドであり，有珠山周辺のような森林の多い場所でコヒーレンスを得ることはさらに困難である。

干渉SARの処理の過程で，２つの画像の位置を正確に合わせる処理（本稿では，“画像マッチング処理”と呼ぶ）があるが，より高いコヒーレンスを得るために，飛田他（1999）は，１ピクセルより細かな分解能（つまり，サブピクセル単位）で画像マッチングを効率的に行うアルゴリズムを開発している。このアルゴリズムは，兵庫県南部地震（藤原他，1997 ; Ozawa et al., 1997），サハリン北部地震（Tobita et al., 1998），鹿児島県北西部地震（Tobita et al., 1997 ; Fujiwara et al., 1998b），伊豆半島の地殻変動（Fujiwara et al., 1998a），GPS気象学（藤原他，1998），JERS－１のコヒーレンス（Tobita et al., 1996）等の研究に用いられている。

この高精度画像マッチングの技術を，今回は干渉SARではなくSARに適用する。RADARSAT衛星のFine Mode SARの場合，SLC（Single Look Complex）画像のピクセル間隔は４～７mである。１ピクセル単位のマッチング処理で地殻変動の検出を試みても，４m単位の変動しか得ることができない。しかし，サブピクセル単位の高精度画像マッチング技術を用いることにより，実際に0.4mの精度の計測が可能である。

画像マッチングを用いた地殻変動検出については，これまでにランダースでの例（Michel and Avouac, 1999）も報告されているが，レンジ方向の変動量がノイズレベル以下のため，アジマス方向の変動成分のみ（つまり変動の一次元成分のみ）を扱っている。

我々は，レンジ方向，アジマス方向の両成分の変動を計測し，さらに，２つの方向からの観測データを組み合わせることにより，はじめて，地殻変動の三次元成分を面的に計測した。同時に，変動速度と体積変化量も推定した。

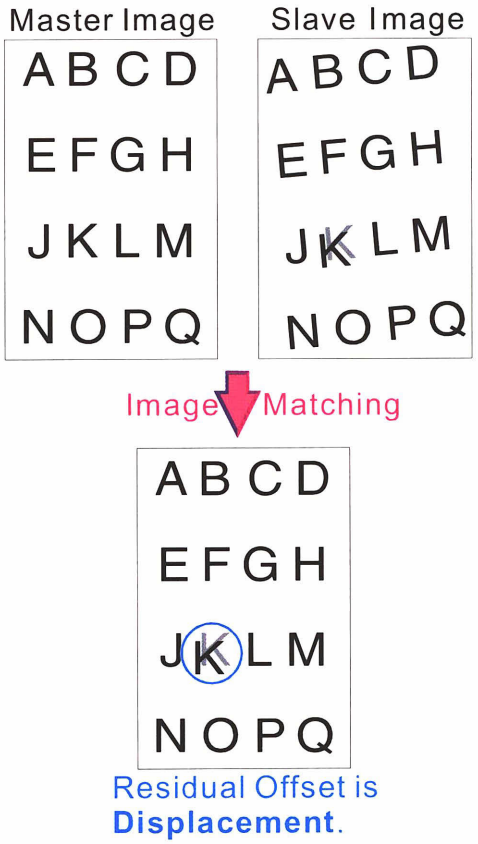
2. SAR画像マッチングによる地殻変動検出

２時期に取得したSARデータの振幅画像を比較すると，通常２つの画像には次のような食い違いがある。(1)画像全体の位置ずれ，回転，大きさの違い。(2)画像の一部が局所的に位置ずれを起こしている。(3)画像の明るさがかなり違って見える。

(1)の原因はデータ取得時のセンサーの位置や姿勢の違いに主に起因している。光学カメラにたとえれば，カメラの位置や向きが違うことに相当する。(3)の原因は，主に地表面や水面の後方散乱の様相が変化したこと，及び，スペックルによる。これらは，地物の位置は同一なので，本論では議論しない。(2)の原因が地物の位置の変化，すなわち地殻変動である。

これら３つの効果の他，センサーの位置の違いに起因するフォアショートニングの大きさの違いによる効果もあるが，本研究では，センサーの位置が比較的近いペアを選別することで，この効果を無視する。

(2)を抽出するには，まず(1)の効果を除去しなければならない。



図－１　画像マッチングの概念図。画像全体の画像マッチングを行った後，残った局所的な位置ずれが“K”で示されている。

図－１は，２つの画像（master, slave）に(1)と(2)の効果がある場合を示している。画像全体の位置ずれや回転等を計測して，slave画像の位置をmaster画像に合わせることを“画像マッチング”と呼ぶ。このように(1)の効果を除去した後に残った局所的な位置ずれ(Residual offsets)が，図では，アルファベットの“K”で示されている。

(1)，(2)のどちらかを問わず，位置ずれを推定するには，master画像中に長方形の窓を設定し，対応する窓をslave画像中から面積相関法によって抽出する方法を用いる。その際，ピクセル（画素）単位でしか位置ずれを推定できないと，変動計測精度は，１ピクセルに相当する例えば約４mしか得ることができない。しかし，飛田等(1999)は，位置ずれを１／32ピクセルの分解能で，推定する方法を開発している。

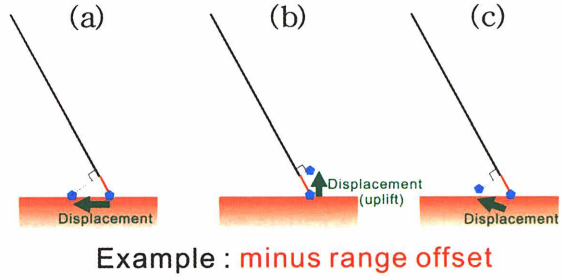
また，彼らは，位置ずれの計測を（会話的ではなく）自動的に行うとともに，画像マッチングに用いるべきでないbad dataを効率的に区別するアルゴリズムも同時に開発しており，本研究ではこれらの技術を採用することにより，効率的に地殻変動検出を行った。

(2)の効果を除去する際に，地殻変動の有る地域の位置ずれデータが混入すると，求められたマッピング関数の標準偏差が小さくならないだけでなく，最終的に得られた(3)の効果が小さめになってしまう。データの混入が起こらないよう注意することが必要であるが，実際には，飛田等(1999)が開発したbad data除去アルゴリズムは不要なデータの混入をほぼ自動で制限してくれる。

以上のようにして画像の位置ずれから得られる地殻変動はどのような方向の成分だろうか。結論から言うと，地殻変動の水平成分だけではなく鉛直成分も混じっている。

SARではその原理上，地上に対して斜めに観測を行う。今回のRADARSATの観測モードの場合には，約45°の高度角から地上を観測している。

位置ずれは画像の横方向（レンジ方向）と縦方向（アジマス方向）の２つの成分からなっている。画像の縦方向の位置ずれは，まさにこの方向の地殻変動成分（つまり水平成分）のみに対応するが，一方，レンジ方向の位置ずれは，衛星と地上を結ぶ線の方向であるレンジ方向の位置ずれに対応している。



図－２　レンジ方向の位置ずれが起こる原因

このようなレンジ方向の位置変化が起こる原因を水平と鉛直成分に分解すると，図－２に示すような３つのパターンが考えられる。水平に衛星に近づく（図－２(a)）とレンジが縮むような位置ずれが計測されるが，鉛直上方に動いた（つまり隆起した）場合（図－２(b)）や，これら２つが合成された場合（図－２(c)）の場合等にも同様の位置ずれが計測されるため，１つの画像ペアから計測された位置ずれデータだけから，水平変動各成分と鉛直変動成分を分離することはできない。

3. 観測データ

本研究で使用した観測データは，表－1のとおりである。

表－1　RADARSATのSARデータ

データ取得日時 (JST)	観測モード	軌道	入射角
2000/04/03 05:37	F4	descending	44.5°
2000/04/05 17:37	F3	ascending	42.5°
2000/04/27 05:37	F4	descending	44.5°
2000/04/29 17:37	F3	ascending	42.5°

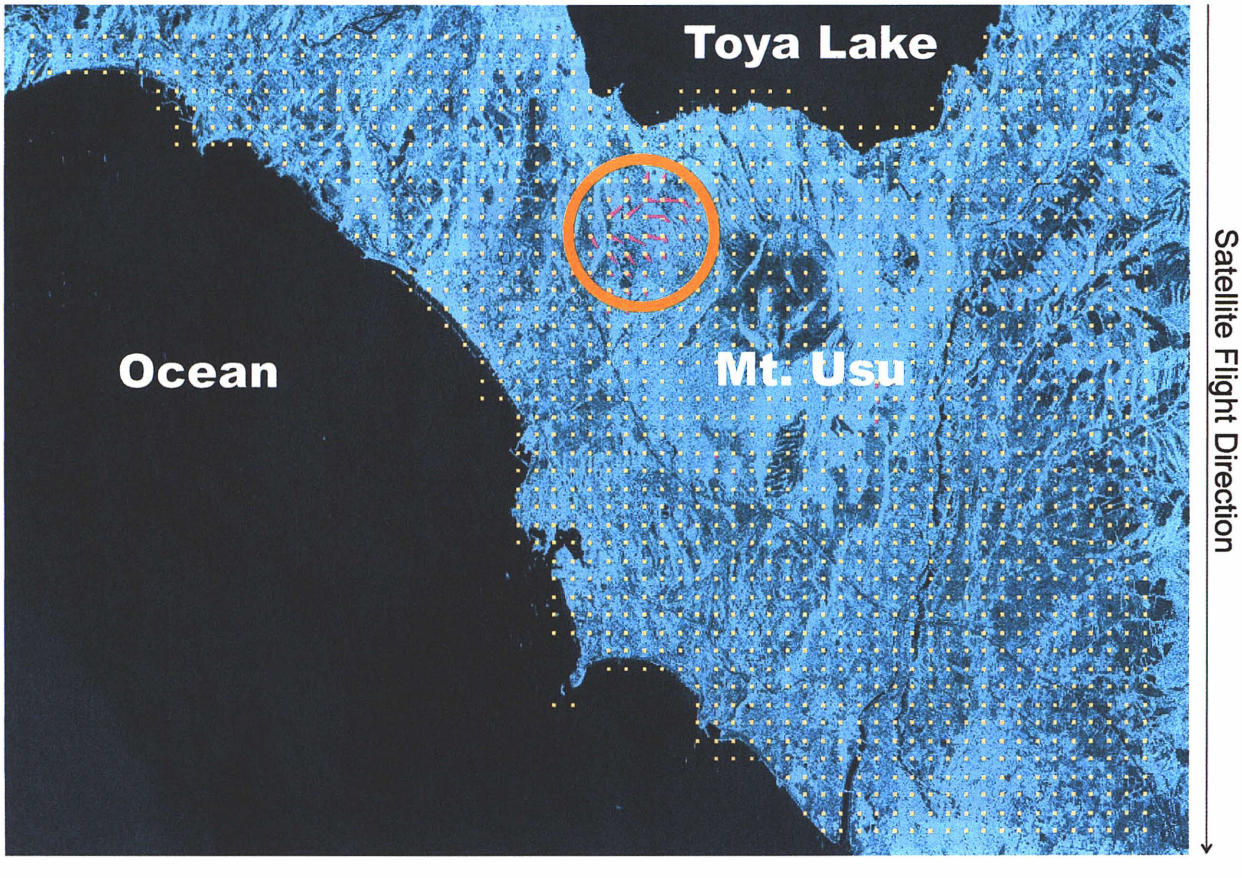
画像マッチングの標準偏差は，0.15ピクセルである。これは，1.1mの地殻変動に相当する。

図－3は，4月3日と4月27日の画像についてマッチングを行った後の残差の位置ずれを表している。黄色い点が計測点の中心でそこから伸びるピンクの線が位置ずれを20倍したものである。黄色の○で囲まれた変動領域以外では，ピンクの線の長さは最大で図上5ピクセルしかなく，これは実寸で0.25ピクセル，つまり，約2mの変動に相当する。図－3からは，変動領域のみにおいて，その他の領域と比較して明らかに有意な変動が捉えられていることが見てとれる。また，フォアショートニングの大きさの違いに起因する位置ずれ（ステレオ視効果のようなもの）がある場合には，標高に依存して現れるが，図－3中にこれらは存在していない。

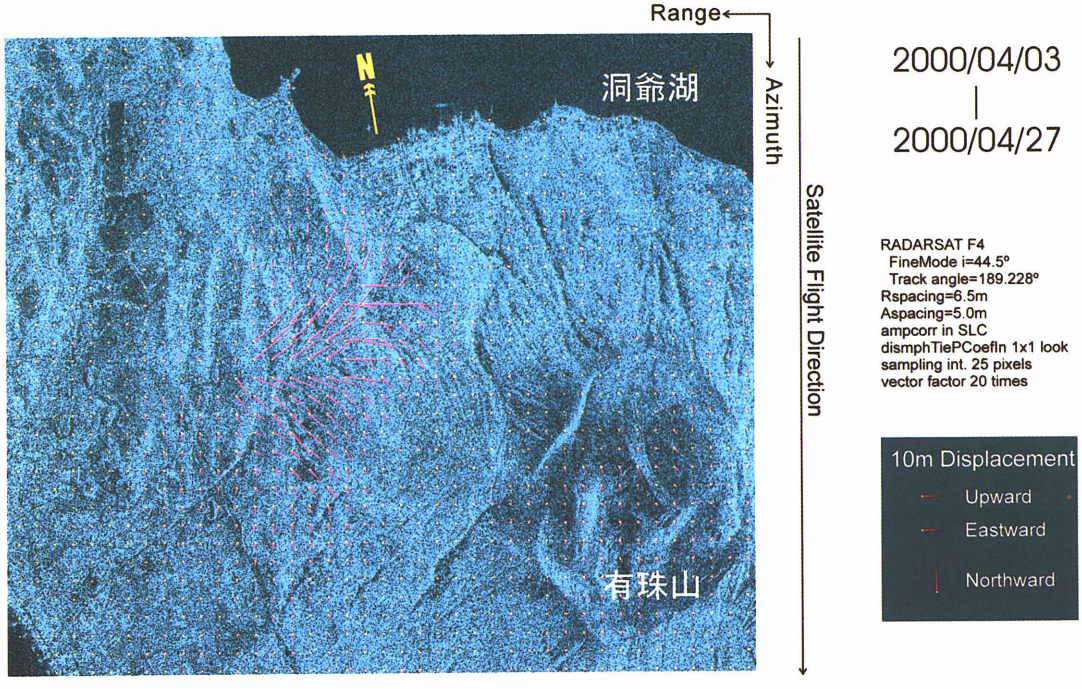
図－4は同じ時期の画像ペアーで，位置ずれの計測点を増やし，図を拡大したものである。西山山麓において全般的に，衛星に近づく向きの変動とともに，南北に開く変動がはっきりと捉えられている。

図－5は，4月5日と4月29日のペアーである。この図においても衛星に近づくレンジ方向の変化とともに，南北に開く成分もとらえられている。

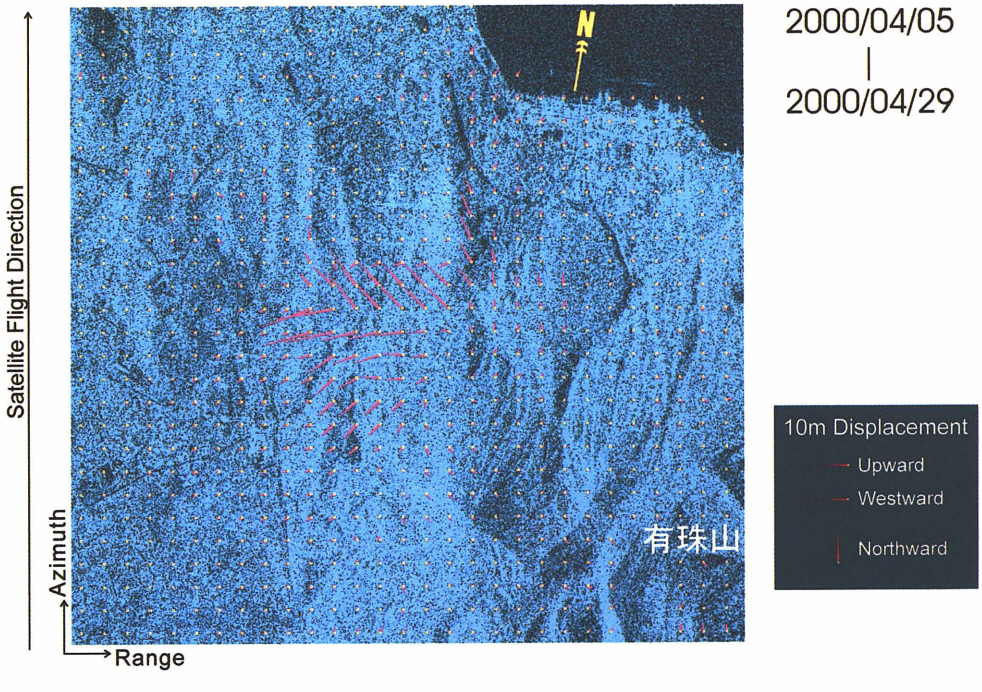
2つの計測画像（図－4と図－5）のレンジ方向の変化を総合すると，水平変動だけでは説明できないことは明らかで，隆起が卓越していることがわかる。このような定性的な議論にとどまらない定量的な解析を次節にて展開する。



図－3　画像マッチング後の位置ずれ。画像はレーダー座標系で横がレンジ方向（左方向が正），縦がアジマス方向（下が正）である。黄色の点が位置ずれの計測点の中心でそこから伸びるピンクの線が位置ずれを20倍に拡大したものである。黄色の○で囲まれた領域に地殻変動に起因した位置ずれが集中している。4月3日に対する4月27日の位置ずれを示している。



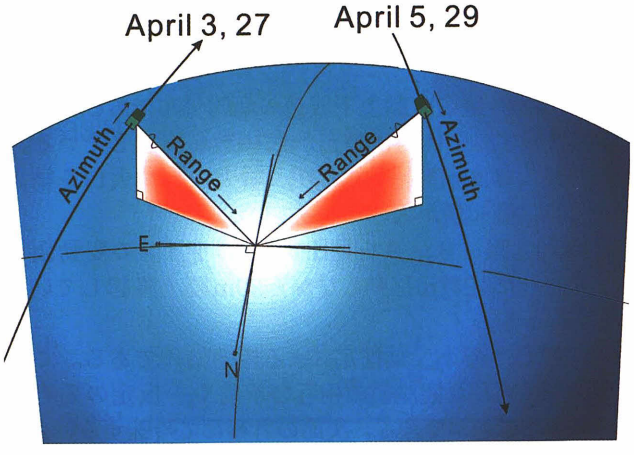
図－4　変動領域周辺の位置ずれ。画像F4モードのレーダー座標系で横がレンジ方向(左方向が正)，縦がアジマス方向(下が正)である。4月3日に対する4月27日の位置ずれを示している。黄色の点が位置ずれの計測点の中心でそこから伸びるピンクの線が20倍に拡大した位置ずれである。地殻変動が上，東，北にそれぞれ10mあった場合に計測される位置ずれを右に示した。隆起は，レンジが短くなる方向なので，この図では右向きに表われる。



図－5　変動領域周辺の位置ずれ。画像はF3モードのレーダー座標系で横がレンジ方向(右方向が正)，縦がアジマス方向(上が正)である。4月5日に対する4月29日の位置ずれを示している。黄色の点が位置ずれの計測点の中心でそこから伸びるピンクの線が20倍に拡大した位置ずれである。地殻変動が上，西，北にそれぞれ10mあった場合に計測される位置ずれを右に示した。隆起は，レンジが短くなる方向なので，この図で左向きに表われる。

4. 三次元化処理

一方向からの計測では，地殻変動のアジマス方向とレンジ方向の成分しか知ることができないが，２つの方向からの計測を合成することによって，三次元成分を分離する三次元化処理について述べる。



図－６　衛星と地上ターゲットとの位置関係。観測方向は，2000年４月３日と27日，４月５日と29日，それぞれがほぼ同一である。

衛星と地上ターゲットの位置関係を図－６に示す。地上ターゲットとは，レーダー電波を後方散乱する地上の物体のことで，ここでは，画像に写し込まれたピクセルに対応した地表面上の点に対応する。４月３日と４月27日の計測は，ディセンディング軌道により東南東から，一方，４月５日と４月29日の計測は，アセンディング軌道により西南西から，それぞれ行われたことがわかる。

２つの位置ずれ（offsets）計測画像１，２があり，それぞれの画像において，アジマス方向の計測値dA（m）とレンジ方向の計測値dR（m）がある。これら４つの計測値をdA_1，dR_1，dA_2，dR_2，それぞれの計測感度の方向を表す単位ベクトルを$\boldsymbol{Str}_1$，$\boldsymbol{TS}_1$，$\boldsymbol{Str}_2$，$\boldsymbol{TS}_2$とおく。アジマス方向は衛星（satellite）のtrack vectorと一致し，また，レンジ方向はターゲット（target）から衛星への方向に一致する。

未知の変動ベクトル$\boldsymbol{M}_1$，$\boldsymbol{M}_2$を仮定すると，計測値は変動ベクトルと計測感度の単位ベクトルとの内積として，

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_1\cdot\boldsymbol{Str}_1&=dA_1\\ \boldsymbol{M}_1\cdot\boldsymbol{TS}_1&=dR_1\\ \boldsymbol{M}_2\cdot\boldsymbol{Str}_2&=dA_2\\ \boldsymbol{M}_2\cdot\boldsymbol{TS}_2&=dR_2\end{aligned}\qquad(1)$$

のように表される。変動ベクトルを２つではなく１つの共通なものとして仮定することも考えられるが，計測時期の始点，終点それぞれが2.5日の差をもっており，特に始点時期の４月３日と４月５日の2.5日間の変動は，他のSARデータの解析やGPS観測からも無視できないくらい大きいことが明らかであるため，２つの別々の値とした。

以上のモデルにおいては，観測値が４つ（dA_1，dR_1，dA_2，dR_2）に対し，未知数は変動ベクトル成分の合計６つである。

ここで，次の仮定を導入する。

$$\boldsymbol{M}_2=k\boldsymbol{M}_1\qquad(2)$$

kは比例係数で画像全体で一定とする。つまり，変動ベクトルの方向は時間変化せず一定であり，２つの期間における変動ベクトルの比は画像全体で一定と仮定する。また，計測時期の終点である４月27日と29日の間の変動は全くないものと仮定する。始点である４月３日と４月５日の2.5日間の変動速度を$\boldsymbol{V}$(m/day)とおくと，

$$\boldsymbol{V}=\frac{\boldsymbol{M}_2-\boldsymbol{M}_1}{2.5}=\left(\frac{k-1}{2.5}\right)=\boldsymbol{M}_1\ (\mathrm{m/day})\qquad(3)$$

という関係が成り立つ。今回は，$k>1$とすることとし，

$\boldsymbol{M}_1$：４月５日～４月29日の変動ベクトル

$\boldsymbol{M}_2$：４月３日～４月27日の変動ベクトル

と定義する。

(3)式から，「変動速度ベクトルは変動ベクトルに比例する」と仮定したと言うこともできる。

これらの仮定により，それぞれの計測点において，観測値が４つ，未知数は（kを含めて）４つになったが，実は「kは画像中一定」との仮定もあることから，画像中に計測点がn個ある場合は，画像全体として，（n－１）個の自由度がある。そのため，未知数は最小二乗推定することが可能である。

モデルをより具体化するために，衛星のtrack角（衛星の進行方向の方位角）をθ，SARの電波の入射角（天頂角。高度角の余角）をIとおくと，計測感度の単位ベクトルは，アジマス方向，レンジ方向について，それぞれ，

$$\boldsymbol{Str}=\begin{pmatrix}\sin\theta\\ \cos\theta\\ 0\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{TS}=\begin{pmatrix}-\sin I\cos\theta\\ \sin I\sin\theta\\ \cos\theta\end{pmatrix}\qquad(4)$$

と表すことができる。

三次元化処理においては，「同一の地表位置」について二方向からの観測量が必要となる。我々は，それぞれの画像について，計測位置の経緯度を得ることによって，この条件を満たした。この作業は一般にgeocodingと呼ばれる。また，三次元化後の変動ベクトルについても，得られたベクトルがどの緯度，経度なのかを示すことは重要なことなので，その意味においてもgeocodingは必要である。

写真測量では，画像中から特徴的なGCPを抽出して，それらに経緯度を与え，画像全体に経緯度を配分する方法がとられることがあるが，SAR画像では，フォアショートニングが大きいため，この方法は使えない。我々は，衛星の軌道情報と国土地理院発行の50m間隔の数値標高データからSAR画像をシミュレーションする際，シミュレーションSAR画像とともに同じ構造の経緯度ファイルを作成し，シミュレーションSAR画像とSAR画像を画像マッチングすることによって，geocodingを実現した。この場合の画像マッチングにも飛田(1999)の方法を利用することができる。

5. 結　　果

前節で述べた方法で求めた変動ベクトル，変動速度ベクトル，及び，それから得られた体積変化について述べる。

比例係数は，$k=1.6$と推定された。このことは，4月3日から4月5日までの2.5日間で，4月5日から4月29日までの24日間の変動の60%の変動が生じたことを意味している。

5. 1　地殻変動三次元成分の面的分布図

以下に示す面的な地殻変動分布は，4月3日から4月27日の変動ベクトル$\boldsymbol{M}_2$である。

図－7に水平変動成分の面的分布を示す。ほぼ東西方向にはしるメインの変動領域の北東に，南西から北東方向にはしるサブの変動領域があることがわかる。

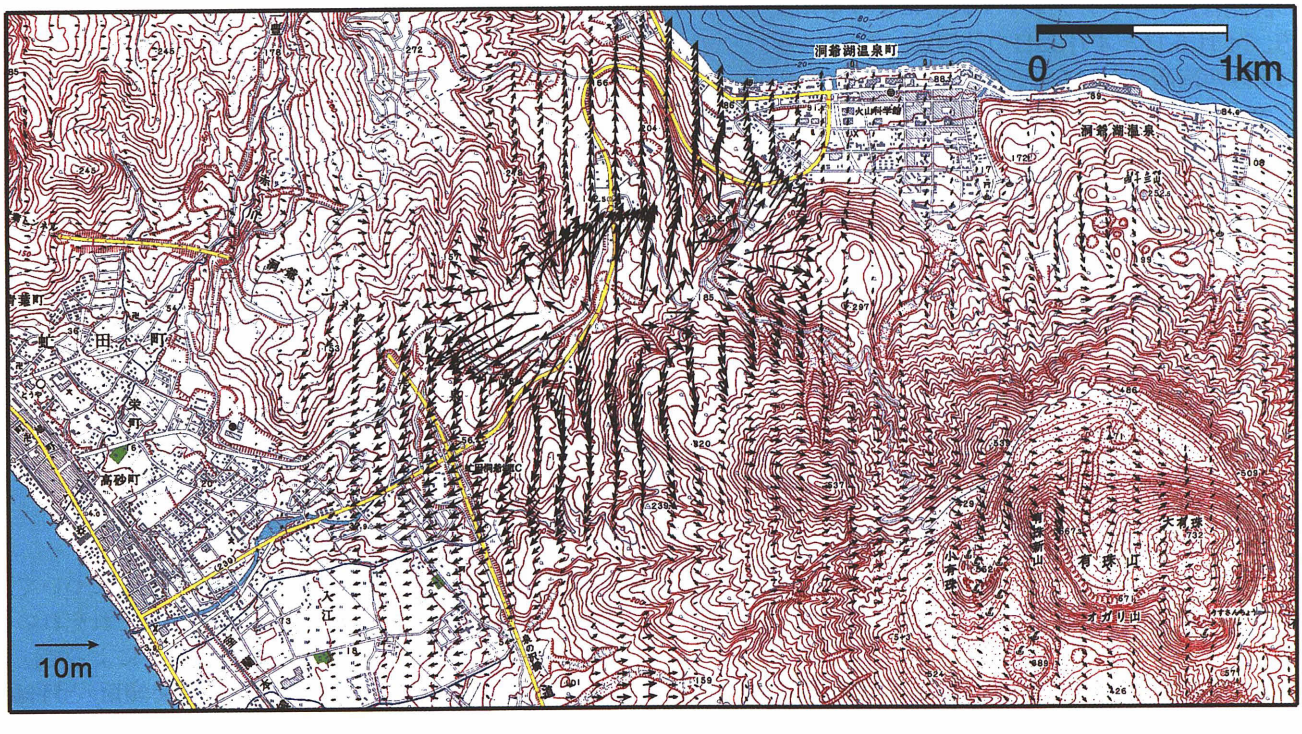
図－8，9に南北成分，東西成分の面的分布を示す。北成分，東成分がプラス（正）の符号となっている。東西に開く向きの数mの変動成分も見られるが，それより大きな10mを超える南北に開く運動があったことがわかる。南北に開く運動は，相対変位では20mを超えている。図では，4mを超える変動のみを着色して表示しているが，1mを越す変動領域は，半径4km程度の広い範囲に及んでいる。

図－10は，地殻変動上下成分の面的分布である。沈降は見あたらず，全体的に数mから10数m隆起している。隆起の最大は20mを超えており，噴火口と噴火口を結ぶ線上で特に隆起量が大きくなっている。

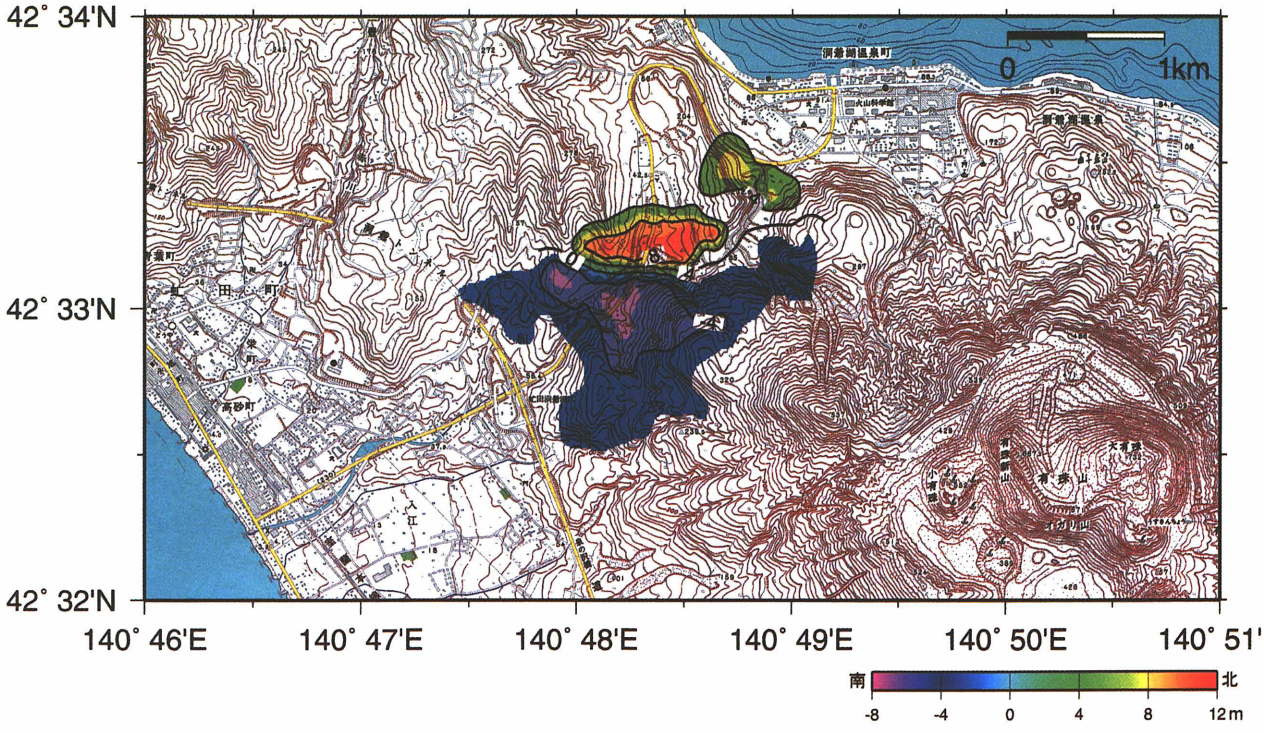
図－10と図－8，9を見比べると，メインの変動領域の北側が北に10数m移動しながら20m以上隆起していることがわかる。

図－11は，最小二乗推定による標準偏差である。これを用いて，冗長な観測値の相互の矛盾や，仮定の妥当性を吟味することができる。次節の考察にて吟味する。

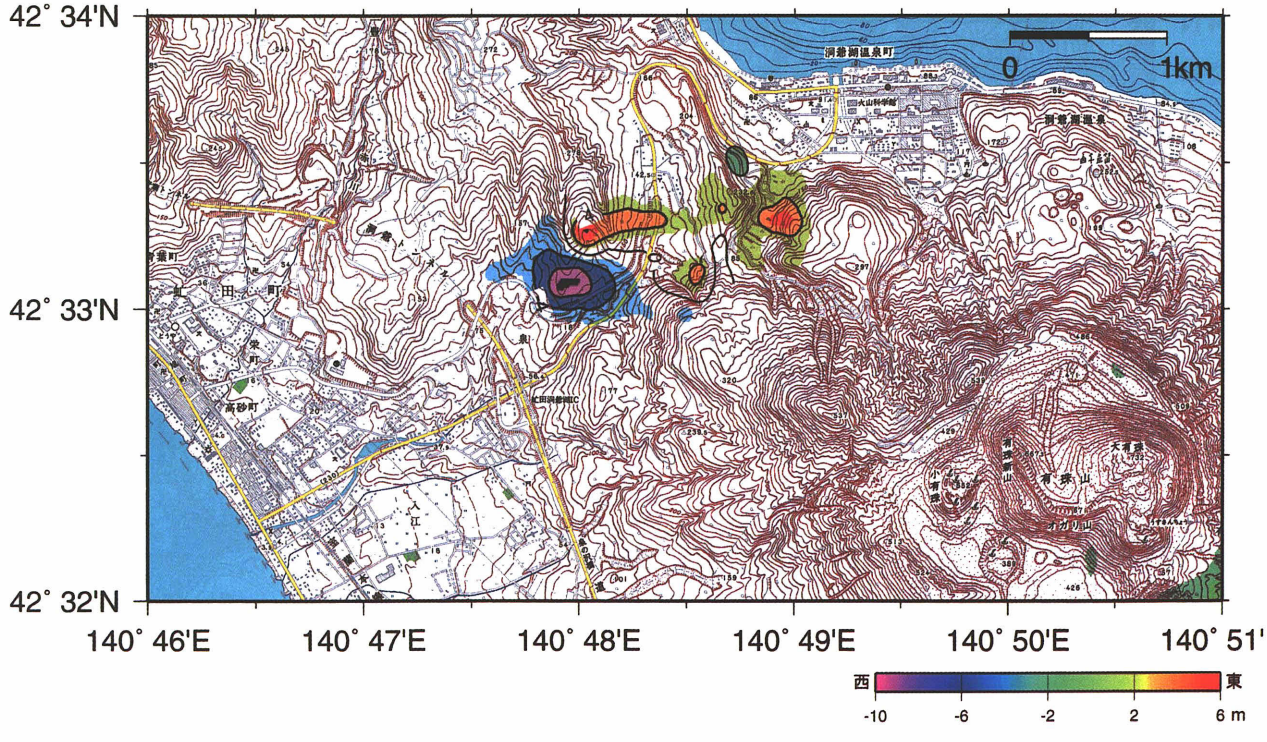
図－12は，地殻変動ベクトルを三次元的に表示したもので，(a)西南西および(b)南東の上空から見たものである。南北に開きながら隆起しており，とくに北側部分の北への運動と隆起が卓越している様子が見て取れる。この三次元表示は，一連のアニメーション画像の一枚である。アニメーション全体は，国土地理院のホームページ（http://www.gsi.go.jp）にて公開されている（2001年1月現在，http://www.gsi.go.jp/WNEW/LATEST/USU/sar/3dmovie.htm）。



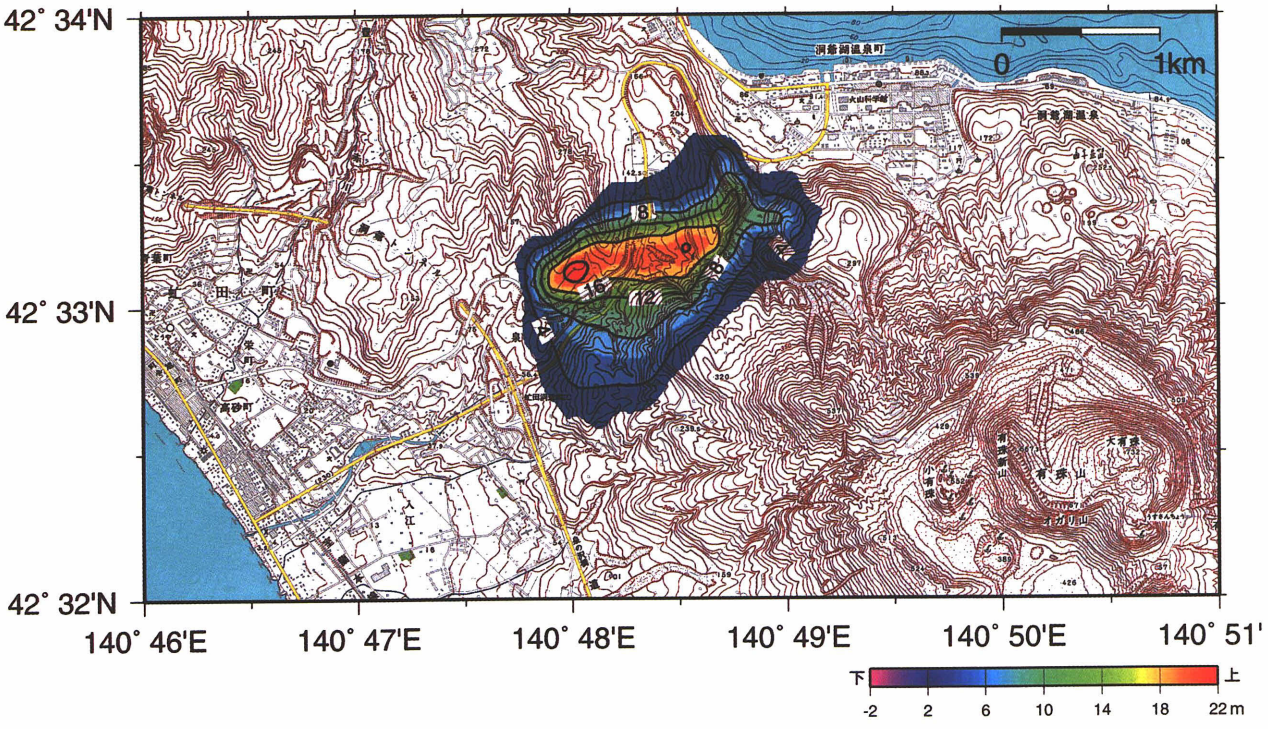
図－7　RADARSATによる2000年4月3日から4月27日の間の地殻変動の水平成分。東西の線を境に南北に20m以上開いている。



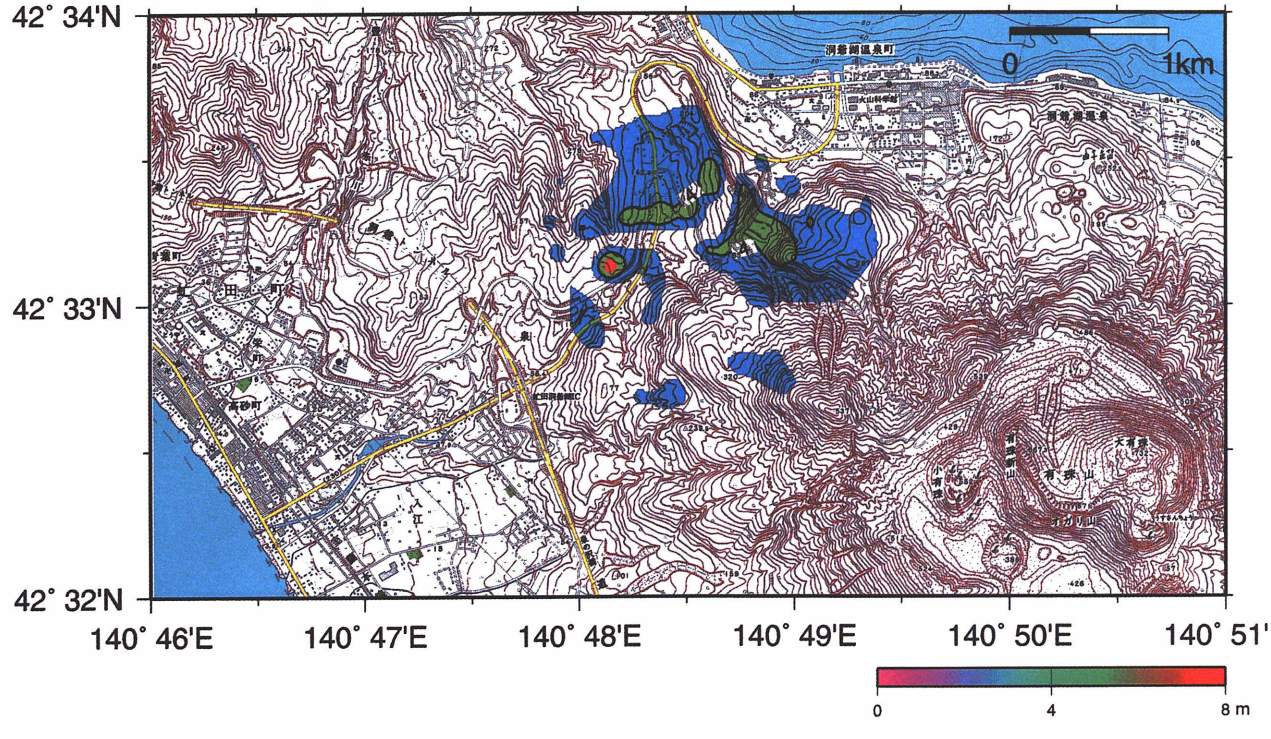
図－8　RADARSATによる2000年4月3日から4月27日の間の地殻変動の南北成分。数m以上の変動のみ，着色して表示。



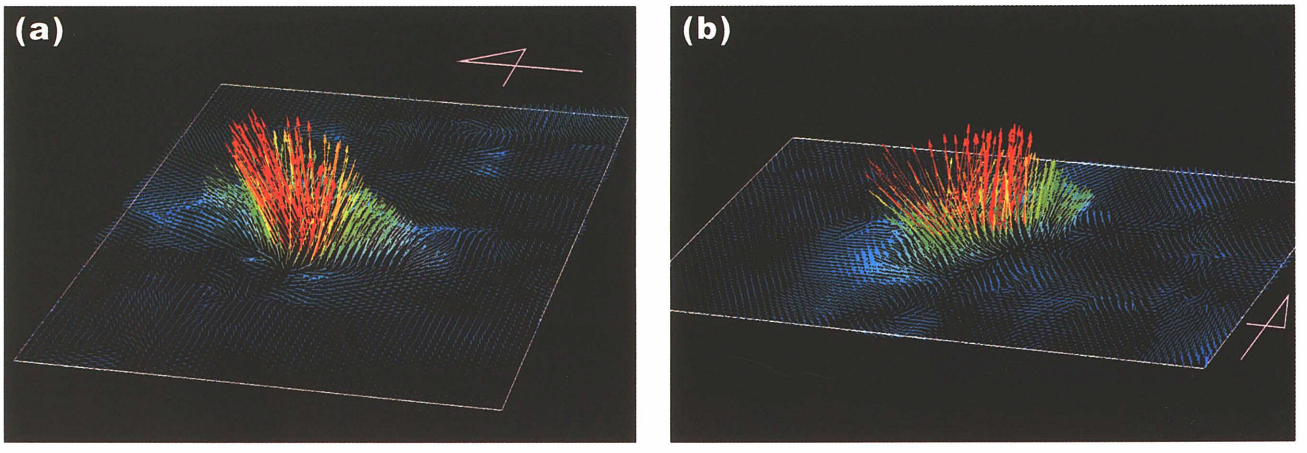
図－9　RADARSATによる2000年4月3日から4月27日の間の地殻変動の東西成分。数m以上の変動のみ，着色して表示。



図－10　RADARSATによる2000年４月３日から４月27日の間の地殻変動の上下成分。数m以上の変動のみ，着色して表示。



図－11　RADARSATによる2000年４月３日から４月27日の間の地殻変動量推定の標準偏差の分布。数m以上の標準偏差のみ，着色して表示。



図－12　RADARSATによる2000年４月３日から４月27日の間の地殻変動の三次元ベクトル表示。(a)西南西および(b)南東の上空から見た図。

5. 2　変動速度

変動速度分布図は図－７，８，９，10，11と同様になるため，割愛する。なぜなら，第４節において，「変動速度ベクトルは変動ベクトルに比例する」と仮定したからである。ただし，大きさは，0.15倍に，単位は「m/day」となる。

変動速度の大きな場所では，隆起速度が3.3m／日，南北方向に開く速度が2.7m／日になることがわかる。

5. 3　体積変化

以上のように地殻変動の三次元成分が面的に把握できると，この地域の体積変化（主に隆起に伴う膨張）が計算できる。図－７～11に示した図中の体積変化は以下のとおりである。

４月３日から４月27日までの体積変化は，$+22.9\times10^6$ m^3，

４月５日から４月29日までの体積変化は，$+14.3\times10^6$ m^3。

ここで，有効数字は小数点以下１桁であるが，後続の計算のため1桁多く示している。

これらから，４月３日から４月５日までの体積変化は，$+8.6\times10^6 m^3$

となり，この期間（2.5日）で割ると，この期間の平均的な体積変化率（速度）は，$+3.4\times10^6 m^3$／dayとなる。

6. 考　　察

有珠山の北西部で見られた今回の地殻変動の原因は，地下のマグマの動きであることが想像される。マグマの動きと地殻変動を結びつける一般的な方法として，茂木のポイントソースモデルの他，ダイクやシルを使ったモデルがあげられる。これらの深さ，向き，大きさ，体積変化等のパラメータがマグマの具体的な活動を表す。地表の地殻変動をきれいに説明できるこれらのパラメータを決定する際には，拘束条件はできるだけ豊富であることが望ましい。

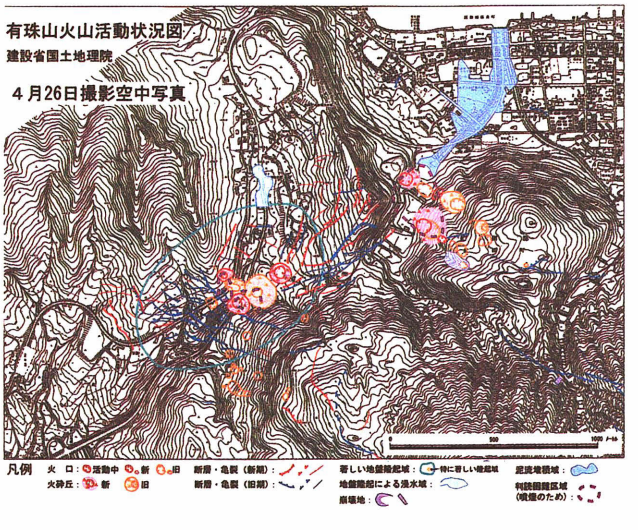
今回，地殻変動の三次元成分の面的な分布が明らかになったことによって，マグマの動きのモデル化に対し，従来より多くの拘束条件を与えることができる。

また，干渉SARの場合の視線方向成分と比較して，変動をよりイメージしやすくなったため，モデルの作成が容易になった。

メインの地殻変動領域では，ほぼ東西に走るシルとダイクが想像される。

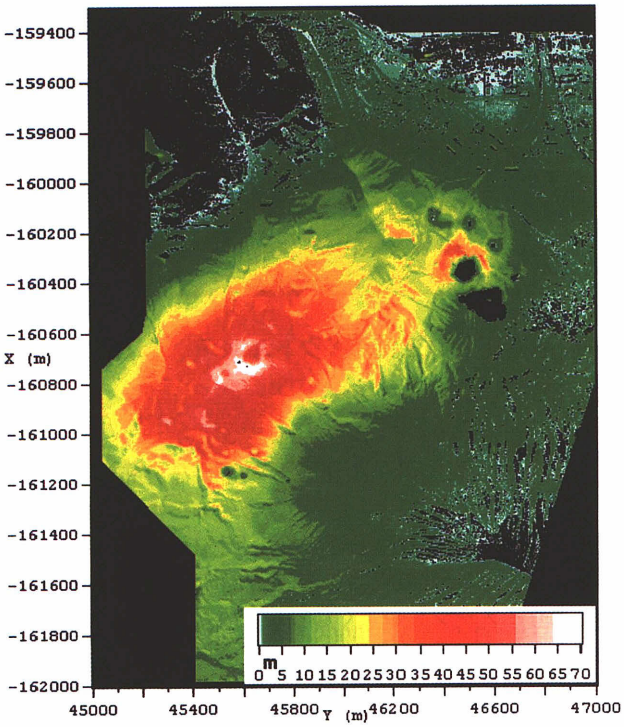
南北開きの境界線は，空中写真判読（図－13）による断層・亀裂と良く一致している。

メインとサブの変動領域は，火口や断層・亀裂の位置と一致している。このような場所で著しい隆起と南北開きが起こっていることが明らかになった。



図－13　空中写真判読に基づく有珠山火山活動情報図（関口と高沢，2000）。東北東－南南西方向の断層（図中央），及び，西北西－東南東方向の断層・亀裂（図中央左下）が見られる。

建設省土木研究所（2000）のレーザ高度計による鉛直方向の変動の計測では，60mを超える隆起が計測されている（図－14）。一方，我々の計測値は最大22mであり，その差はかなり大きい。

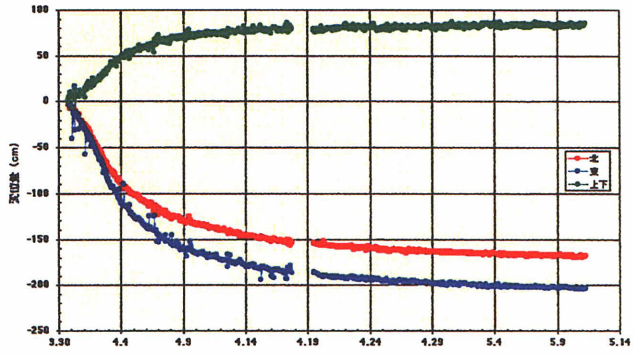


図－14　ヘリコプター搭載レーザー高度計により計測された2000年３月31日に対する４月26日の隆起量（土木研究所(2000)から提供されたディジタルデータから図を作成）。

この差は，以下のように，(1) 観測時期の違い，と，(2) 計測する面積の違いに起因すると仮定して説明できる。

まず，(1)について考察する。レーザ高度計の計測は，３月31日に対する４月26日の変動量であるのに対し，図－10では，４月３日から４月27日の変動である。図－15にGPS観測による壮瞥町公民館（KMK）観測点を基準とした虻田町泉（AKT）観測点の変位量（作成：北海道立地質研究所 岡崎・石丸）を示す。図から，４月３日までに40%，４月３日以降に残りの60%の変動があったことがわかる。つまり，期間の違いから，「SAR計測の変動量／レーザ高度計≒0.6」である。

次に(2)について考察するため，我々はレーザ高度計の１m間隔の隆起量データを用い，相関窓に相当する長方形領域内の隆起量の平均値を計算した。領域の大きさは，128×128ピクセル（約900m×630m）のほか，64×64ピクセル，32×32ピクセル相当として計算を行った。一方，SAR画像のマッチングについても，相関窓の大きさを32×32ピクセル，64×64ピクセル，128×128ピクセル，256×256ピクセルとして，SAR画像での位置ずれ計

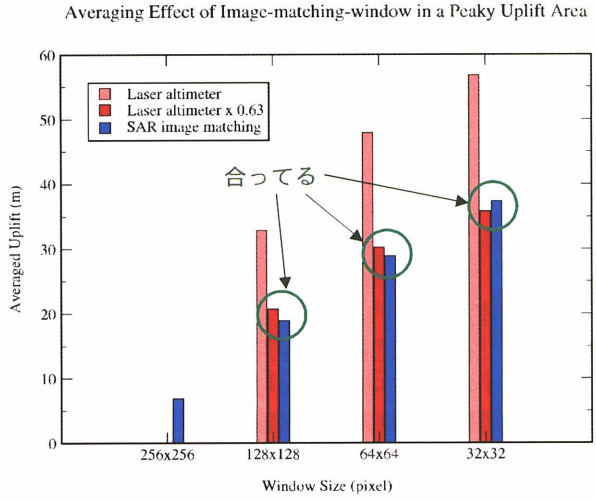


図－15　GPS観測による壮瞥町公民館（KMK）観測点を基準とした虻田町泉（AKT）観測点の変位量（作成：北海道立地質研究所 岡崎・石丸）

測を行った。レーザ高度計では，データ取得領域が小さいため256×256ピクセル相当領域でも計測はできなかった。

この計測結果を図－16に示す。それぞれの窓の大きさについて，レーザ高度計の平均値を0.63倍すると，SAR画像による計測値と良く一致することがわかる。これは，GPS観測による比0.6と整合しており，このことから，計測期間と平均化される計測領域の違いを考慮すれば，我々のSAR画像マッチングによる計測値はレーザ高度計の計測値と調和的であることが示された。

体積変化についても，次のように調和的である。３月31日から４月26日にかけてのレーザー高度計による体積変化は，39.5×$10^6$$m^3$である（建設省土木研究所，2000）。これは，我々の計測値（４月３日から４月27日までの体積変化：22.9×$10^6$$m^3$）の0.58倍に相当しており，GPS観測による比0.6と矛盾していない。



図－16　レーザー高度計の隆起量を窓内で平均したもの，それらを0.63倍したもの，SAR計測隆起量の比較。

図－11に示したように，最小二乗推定の標準偏差は，おおむね数mであるのに対し，一部では８m程度の場所も存在する。この最大の原因は，「画像中で k ＝ 一定」の仮定が破られていることであると考えられる。写真測量による観測や我々の他の日付の計測でも，この傾向は見られており，北東から南西に隆起速度の大きな領域が移動したためと考えられる。

このように一部の標準偏差の大きな領域では，本論の寄ってたつ仮定が正しくないわけであるが，このような場所は変動そのものも標準偏差の３倍程度大きく，推定精度は落ちるものの，有意な変動を捉えていると言うことができる。それ以外の場所では，仮定自体も妥当であるということができよう。

SAR画像を用いて地殻変動の三次元成分を面的に計測した例はこれまでにないと思われる。ここでその長所と短所を考察しておく。

長所は，

(1)危険区域に入ることなく計測可能。
(2)噴煙，雲，霧等に影響されずに計測可能。
(3)コヒーレンスに影響されないため有効な計測結果を得られる確率が高い。
(4)広い範囲を高密度に計測が可能。
(5)地殻変動の三次元成分を分離することができる。
(6)仮定をおくことにより速度を推定できる場合もある。

等である。一方，短所は，

(1)計測精度はSAR画像の分解能に依存するが一般には数mである。
(2)時間分解能は通常10日前後であり，GPS連続観測より劣る。
(3)結果を迅速に得るのは困難で，通常，２～３週間はかかる。

等である。これらの内，(1)は改善が困難である。(2)は２，３日にすることは可能である。(3)は，通信網を整備する他の改善策を施せば，数日程度までに改善は可能であろう。

Fujiwara et al. (2000)は，２つの方向から取得した干渉SAR画像を合成することにより，2.5次元の地殻変動情報を取得している。干渉SARの数cmの精度が生かされている。国土地理院のSARグループは，今回開発した方法とこの方法の２つを実用化しており，地殻変動の量によって，これら２つの方法を使い分けることができるようになった。

7. まとめ

SAR画像の高精度マッチング技術をRADARSATデータに適用することにより，有珠山噴火後の周辺の地殻変動ベクトルの三次元成分を面的に得ることができ，激しく隆起しながら南北に開く変動が検出された。また，変動速度分布も推定され，１日に３mを超える隆起などが計測された。さらに，体積変化も推定され，たとえば，４月３日から４月27日までに＋22.9×$10^6$$m^3$の体積増加があったことなどがわかった。

この手法で求められる変動量は，約900m×630mの長方形領域の平均的なものであり，この性質と計測時期を考慮すれば，レーザ高度計による隆起量計測値と調和的であることがわかった。

謝　辞

本研究で使用したRADARSAT衛星他のSARデータは，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ものです。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します。また，レーザ高度計の高分解能データは，建設省土木研究所から提供を受けました。同研究所の山越隆雄氏ほかの関係者に深く感謝いたします。

引 用 文 献

土木研究所（2000）：有珠山北西山麓レーザ計測による山体変化量について，第85回（2000／５／２）火山噴火予知連絡会提出資料，資料番号65.

Fujiwara, S., P. A. Rosen, M. Tobita, and M. Murakami (1998a) : 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，第192号，199－212.

藤原智，飛田幹男，村上真幸（1997）：干渉SARによる地殻変動検出とDEMの作成，写真測量とリモートセンシング，36, 71－76.

Fujiwara, S., H. Yarai, S. Ozawa, M. Tobita, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, P. A. Rosen, and C. L. Werner (1998b), Surface displacement of the March 26, 1997 Kagoshima-ken-hokuseibu earthquake in Japan from synthetic aperture radar interferometry, Geophysical Research Letters, **25**, 4541－4544.

Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen (2000) : 2.5－D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophys. Res. Lett. , **27**, 2049－2052.

北海道地質研究所（2000）：有珠山噴火，地質研究所ニュース，Vol.16 増刊号，(ISSN1345－1138) 4.

Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaue, (1993) : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, **264**, 138－142.

Massonnet, D. and K. L. Feigl (1995) : Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms, Geophys. Res. Lett., **22**, 1537－1540.

Michel, R. and J-P Avouac (1999) : Measuring ground displacements from SAR amplitude images : application to the Landers earthquake, Geophys. Res. Lett., **26**, 875－878.

Murakami, Mak., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito, and H. Masaharu (1996) : Coseismic crustal deformations of 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometry, J. Geophys. Res., **101**, 8605－8614.

Ozawa, S., Mak. Murakami, S. Fujiwara, and M. Tobita (1997) : Synthetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion, Geophys. Res. Lett., **24**, 2327－2330.

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.

関口辰夫，高沢信司（2000）：有珠山噴火活動に伴う時系列的地形判読について，日本国際地図学会平成12年度定期大会予稿集，32－33.

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, Vol.50, No. 4 , 313－325.

Tobita, M., S. Fujiwara, H. Yarai, S. Ozawa, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, P. A. Rosen, C. L. Werner, and M. Shimada (1997) : Crustal Deformation Associated with March 1997 Kagoshima－ken Hokusei－bu Earthquake Detected by InSAR and GPS, Proceedings of SAR Workshop '97 Tsukuba, 221－228.

Tobita, M., Mak. Murakami, S. Fujiwara, P. Rosen, S. Hensley, and C. Werner (1996) : Correlation studies of JERS－ 1 SAR interferometry (in Japanese), Abstract of 1996 Earth and Planetary Science Joint Meeting, 87.

飛田幹男，藤原智，村上亮,中川弘之，Paul A. Rosen (1999) : 干渉SARのための高精度画像マッチング，測地学会誌，**45**, 297－314.

Zebker, H. A., P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner (1994) : On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, J. Geophys. Res., **99**, 19617－19634.