

空間的に均質な歪場の推定手法 - Nearest Neighbor 法による試み -

道家涼介*・原田昌武*・里村幹夫*

Estimation method of spatially homogeneous strain field: Attempt by using Nearest Neighbor method

by

Ryosuke DOKE*, Masatake HARADA* and Mikio SATOMURA*

1. はじめに

GNSS による地殻変動を表現する手法としては、変位量ないしは変位速度を地図上にベクトルで表現するのが一般的である。ベクトルで地殻変動を表現する場合、地殻変動量がゼロとなる固定点を設ける必要があるが、ローカルな地殻変動を把握したい場合には、地表のいずれかの観測点を固定点として選択する。ここで問題となるのは、固定点の採り方により、地殻変動ベクトルの見え方が変わってしまうということである。その結果、予備知識のない第三者がベクトル図を見た場合に、変位量や変位方向について、誤った解釈をしてしまう可能性がある。一方、歪場の図を示すと、その問題を解決することが可能である。歪は、観測点間の変位の相対値を空間微分した値に等しく、その値は選択した固定点に関係なく一定であるため、固定点に依らず地殻変動による大地の変形を表現することが可能である。

歪は、3つの観測点の相対位置および相対変位から算出される。GNSS 観測点の場合、3つの観測点を結ぶ三角形の領域の歪が算出される。また、観測点の間を補間し、空間的に均質な歪場を算出する手法も開発され(Shen et al., 1996; 井潤・石橋, 2003; 小林, 2009)、GNSS を用いた地殻水平歪(速度)場の把握に広く利用されている。一方で、歪の算出方法については、地殻変動の専門家の間では、その手法を最初に提案した文献を引用するのみで、詳細な算出手順が(特に日本語で)示されていない場合が多い。

筆者らは、温泉地学研究所のGNSS観測の結果から毎日自動的に地殻水平歪を算出・描画するシステムを構築したが(道家ほか, 2013)、その算出手順を資料として残しておくことは重要であると思われる。そこで本稿では、同システムにおける歪の算出手順を記すと共に、同一の算出手法による歪算出結果事例を紹介する。その

内、箱根火山を対象とした例では、温泉地学研究所が高密度に展開しているGNSS観測網が、歪場の推定にどの程度の影響を与えるか検討を行ったので、併せて報告する。なお、算出手順の内、後述する変位の空間補間の方法に関しては、道家ほか(2013)によるシステム構築時とは異なることに留意頂きたい。

2. 歪の算出手順

2.1. 変位の空間補間

日本列島では、国土地理院によるGNSS観測網(GEONET)の観測点が約20km間隔で分布するが、地形的な起伏が激しい日本列島では、必ずしも等間隔ではない。また、独自に密な観測網を展開している場合には、地殻変動を評価すべき空間スケールの中で、観測点数に密度差が生じてしまうことが多い。空間的に均質な歪場を推定するためには、何らかの方法で、歪もしくは変位データを均質な格子点上に補間する必要がある。

井潤・石橋(2003)や小林(2009)は、各観測点における水平変位(南北成分、東西成分)のデータを、GMT (Generic Mapping Tools; Wessel and Smith, 1998)により、各格子点へ補間する方法を提案した。GMTによるデータ補間の代表的なものとして、surface コマンドや triangulate コマンドが挙げられる。surface は、各点のデータから滑らかな曲面を推定しデータの補間を行う手法である。一方、triangulate は各点を結ぶ最適な三角網を構築し、各点を頂点とする平面を推定しデータの補間を行う手法である。小林(2009)は surface、井潤・石橋(2003)は triangulate を用いて変位の補間を行っている。また、道家(2013)においても、データの補間が線型になることから triangulate を採用した。その後、もう一つのデータ補間方法として、nearestneighbor コマンドによる方法を検討したので、本稿ではこれについて紹介

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第46巻, 21-26, 2014

する。

nearneighbor は、Nearest Neighbor 法と呼ばれるデータ補間のアルゴリズムを行うコマンドである。本手法では、補間先である格子点を中心にデータを探索する範囲（半径 R ）を与え、その探索円を複数のセクターに分割し、セクター毎に最も円の中心（格子点）に近い点のデータのみを用いて補間を行う（図 1）。補間の際、格子点からの距離 r に応じた重み $w(r)$ が、以下の式により決定され、その重み付きの平均値として補間値が算出される。

$$w(r) = \frac{1}{(1 + d^2)} \quad (1)$$

$$\text{ここで、} d = 3 \times \frac{r}{R}$$

また、データを含むセクターの数が一定数より少ない場合、その格子点の値は求められない。

以上のようなデータの補間方法であることから、Nearest Neighbor 法を用いた歪の補間には、以下の特徴があると思われる。

- 1) 探索円を広く設定しても、補間に用いられるのは各セクターにおける最近接点のデータのみであるため、観測点分布密度に差がある場合には、観測点密度に応じて探索半径を変えるのと同等の効果が得られる。
- 2) セクター内の最近接点のデータのみを補間に用いるため、空間平滑化処理を組み込んだ手法（Shen et al., 1996 など）に比べ個々のデータが反映されやすく、局所的な歪の変化を把握するのに優れている。反面、地すべりや積雪等による異常値が含まれる場合には、その影響を受けやすい。
- 3) データを含むセクターが一定数より少ない場合にはデータの補間を行わないため、観測網に離島が含まれる場合など、本来データの無い海域などを補間しないようにすることが可能である。なお、triangulate コマンドでは、離島の観測点との間で三角網が構築されてしまい、その間の海域が補間されてしまう。また、surface コマンドでは、観測点の有無に関わらず、全域が補間されてしまう。

本研究で示す算出事例では、補間する格子点の間隔を緯度・経度方向に 0.05 度、探索半径を 15 km、セクター数を 4、データが含まれるセクターの最低数を 2 と設定した。各パラメータは、空間スケールに応じて適切な値を試行錯誤の上検討する必要がある。

2.2. 歪の算出

任意の点の歪を算出する場合、歪テンソルの成分 ε_{xx} 、

ε_{yy} 、 ε_{xy} の算出が必要となる。各成分は、それぞれ X 軸方向の歪、Y 軸方向の歪および剪断歪である。2.1 節で説明した方法で変位データを求めた格子点の内、近接する 3 点を結ぶ直角三角形 ABC を図 2 の様に作成した場合、 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} および剛体回転成分 ω は、各点の並進成分 (u_i , v_i) および各点間の距離 (dx , dy) より、以下のように算出される。

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx} = \frac{u_2 - u_1}{dx} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{dv}{dy} = \frac{v_3 - v_2}{dy} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{u_3 - u_2}{dy} + \frac{v_2 - v_1}{dx} \right) \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{v_2 - v_1}{dx} - \frac{u_3 - u_2}{dy} \right) \quad (5)$$

ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} が求まると、以下の式で任意の方向 θ の歪 ε_θ の算出が可能となる（鷲谷、2002 など）。

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta \quad (6)$$

その際、主歪（ ε_θ が最大・最小）となる方向 θ は、以下の式で表せる。

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} \quad (7)$$

なお、この式で求まるのは最大主歪・最小主歪のどちらかの 1 方向であるが、もう一方については、求めた θ と直交する方向となる。ここで求めた θ_1 及びその直交方向 θ_2 の値を（6）式に代入することで、主歪 ε_1 、 ε_2 が算出される。さらに、面積歪 Δ および最大剪断歪 σ は主歪 ε_1 、 ε_2 より、以下の式で算出される。

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (8)$$

$$\sigma = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2| \quad (9)$$

ここで、剪断歪 σ が最大となる方向は 2 方向存在し、 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ の場合、 ε_1 の方向 θ_1 より反時計回りに 45° 回転した方向が左横ずれ成分が最大となる方向、逆に時計回りに 45° 回転した方向が右横ずれ成分が最大となる方向となる（図 3）。

以上の計算を近接する格子点で構成される三角形毎に行うことにより、空間的に均質な歪場を得ることができる。なお、近接する格子点による三角形は、格子点の採り方で複数のパターンを採り得るが、本事例では、図 2 に示した右下が直角となる三角形のみを計算対象としている。また、各三角形で得られた歪は、以降の算出結果例では、三角形の重心の位置の値として図示している。

3. 歪の算出結果例

以下では、上記手法による地殻水平歪の算出結果例を示す。各例においては、温泉地学研究所が箱根火山および足柄平野周辺に設置している GNSS 観測点を含む（図 5c を除く）。そのため、同地域で 10 ～ 20km の間隔で展開されている GEONET 観測点に対し、神奈川県西部地域における観測点間隔は約 5km 間隔となり、観測点密度に空間的な違いが存在する。

3.1. 伊豆半島周辺の地殻変動

GEONET 函南観測点を固定点とした場合の伊豆半島周辺の定常的な変位速度ベクトルを図 4a に示す（道家ほか、2014）。本図は、2010 年までのデータの内、観測点毎にイベント的な地殻変動を含まない期間を抽出し、観測点毎に定常的な変位速度ベクトルを算出したものである。したがって、ベクトルを示した期間は、観測点毎に異なる。この変位速度ベクトルから算出した主歪速度および面積歪速度を図 4b、最大剪断歪速度を図 4c、剛体回転速度を図 4d に示す。同地域の歪速度場の特徴は以下の通りである。

- 1) 本地域における主歪は、NW-SE 方向の短縮が顕著であり、NE-SW 方向に伸長ないしは弱い短縮が認められる（図 4b）。
- 2) 伊豆半島の東部では、NE-SW 方向の伸長が顕著であり、面積歪速度は膨張 ($0.4 \sim 0.5 \times 10^{-6} \text{yr}^{-1}$) を示す（図 4b）。
- 3) 伊豆半島の東部では、北伊豆断層帯主部（丹那断層）と調和的な南北方向に左横ずれ成分が最大となる剪断歪速度 ($0.3 \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{yr}^{-1}$) が認められる（図 4c）。
- 4) 伊豆半島の中～南部にかけては時計回りの剛体回転を示すのに対し、伊豆半島の東部においては、反時計回りの回転 ($1.0 \sim 3.0 \times 10^{-7} \text{rad/yr}$) が認められる。

3.2. 箱根火山の群発地震時における地殻変動

箱根火山で 2013 年 1 ～ 2 月に発生した群発地震（板寺ほか、2013）を含む期間の変位ベクトルを図 5a に示す。変位量は、2013 年 3 月 11 ～ 20 日と 2012 年 10 月 21 ～ 30 日のそれぞれの平均座標値の差を示している。固定点を山梨県にある GEONET 牧丘観測点としているため、同観測点における東向きの変位の影響を受け、全体として西向きのベクトルが卓越する。一方、箱根火山周辺においては、中央火口丘を中心に外側に広がる変位ベクトルが認められる。なお、富士山頂の GEONET 観測点における南南西の変位ベクトルは、周囲と調和的ではな

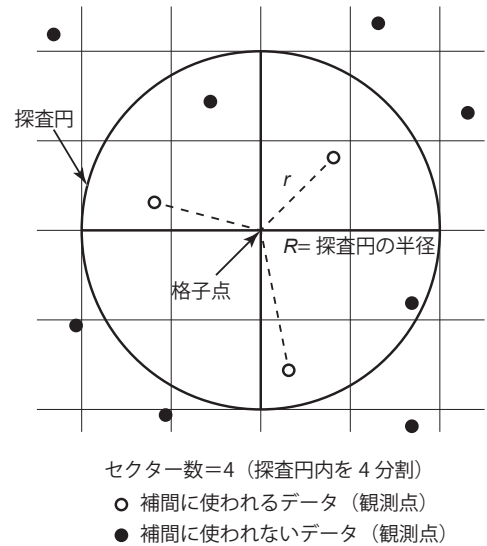


図 1 Nearest Neighbor 法によるデータ補間の概念図。

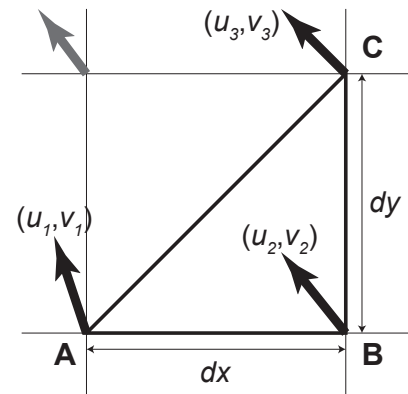


図 2 近接する格子点からなる直角三角形 ABC および変位ベクトル。

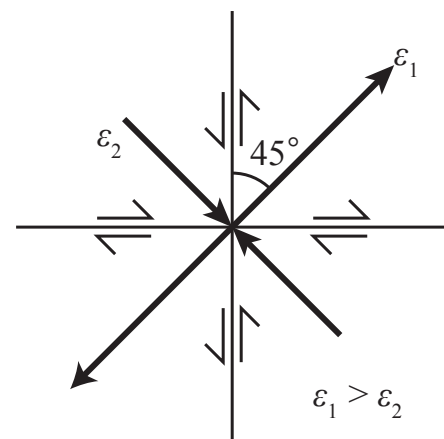


図 3 ε_1 , ε_2 の方向と最大剪断方向およびセンスとの関係。

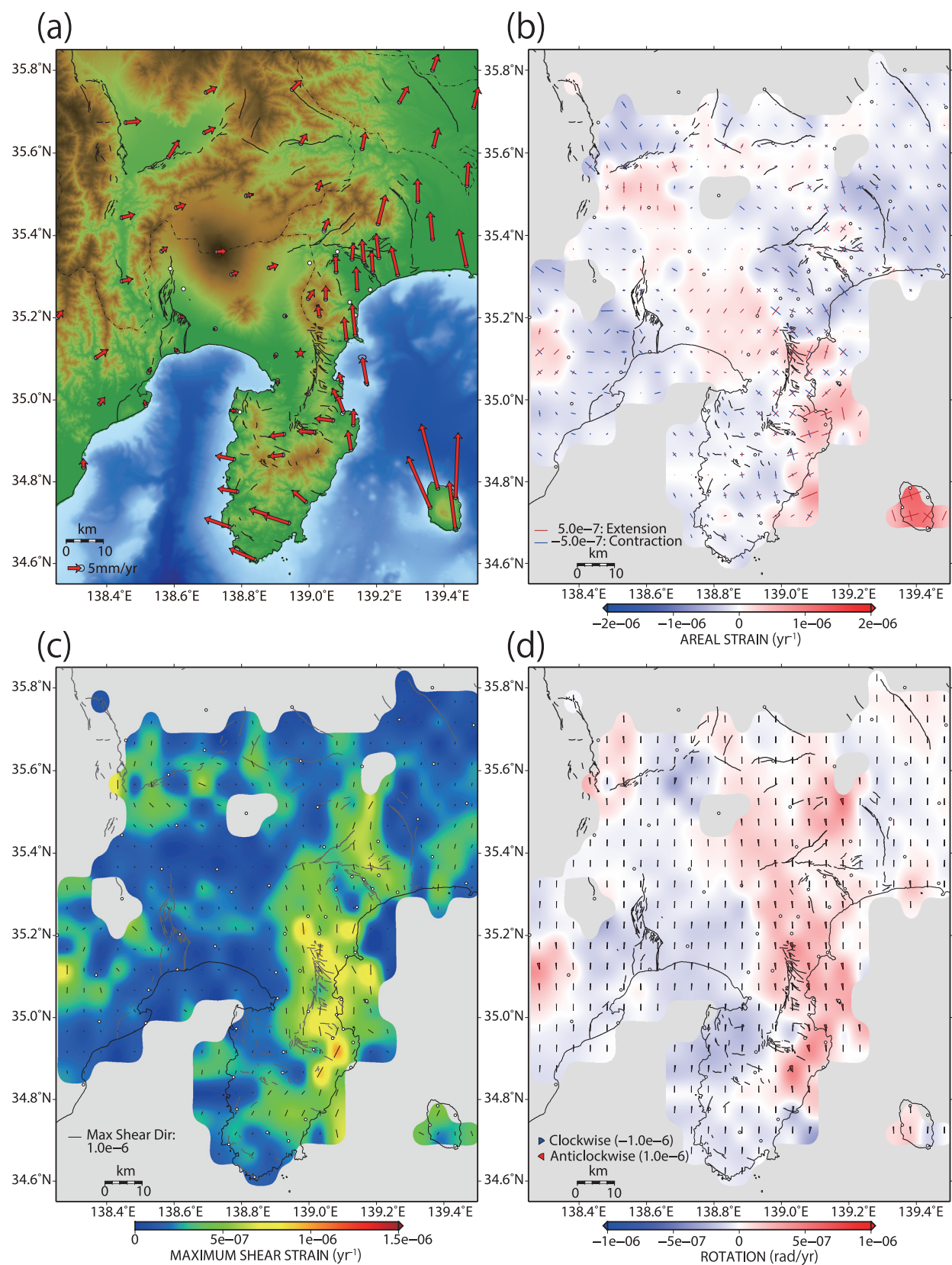


図 4 伊豆半島周辺地域を対象とした歪の算出結果例

(a) 定常時の GNSS 変位速度場 (GEONET 函南を固定)、(b) 主歪速度および面積歪速度、(c) 最大剪断歪速度 (剪断方向は左横ずれの剪断変形が最大となる方向)、(d) 剛体回転速度。図中の丸は観測点位置を示す。(a) における白丸は、2 年以上の安定した期間が得られなかったため除外した観測点を示す。

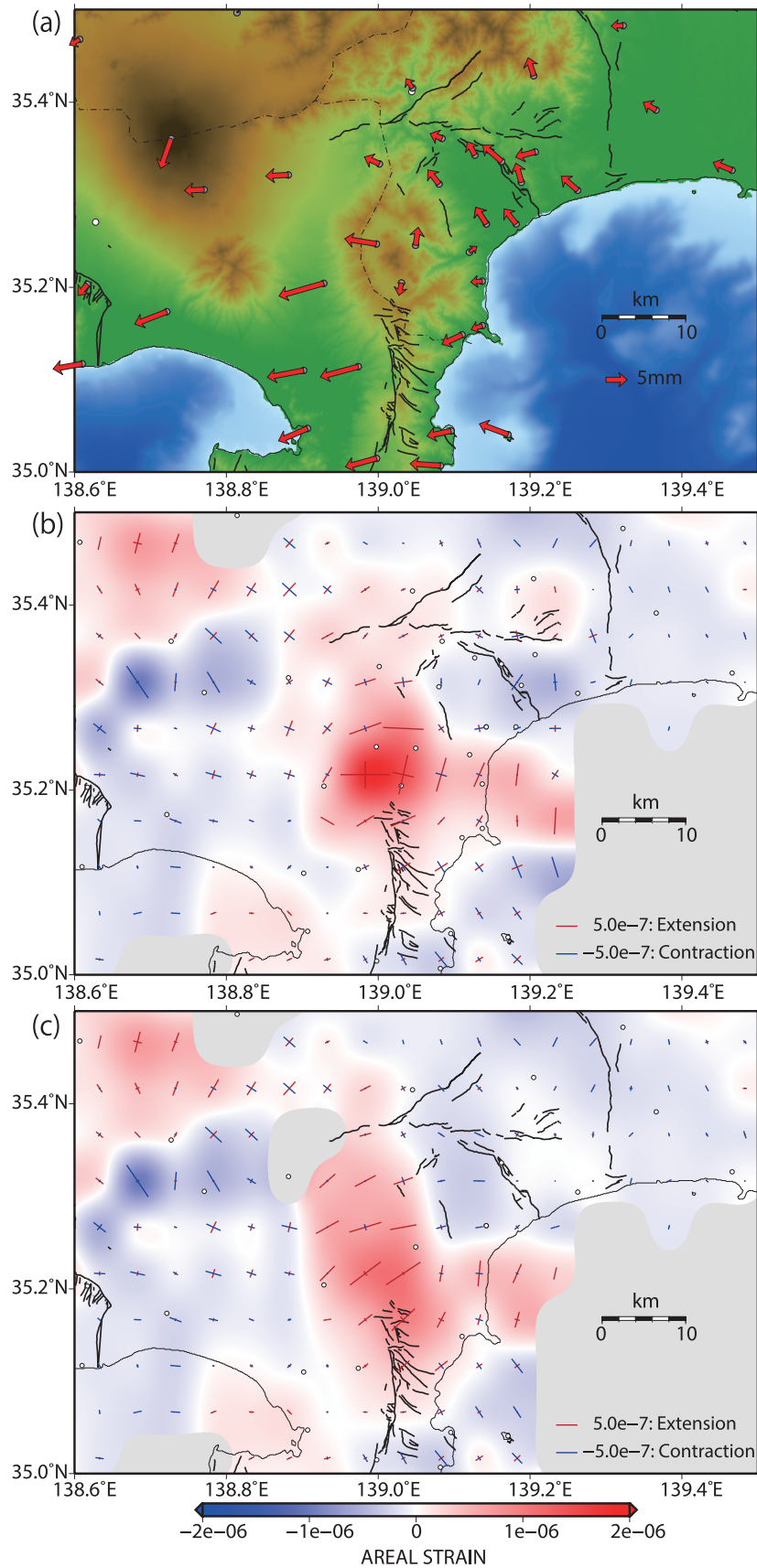


図5 2013年箱根火山群発地震時を対象とした歪の算出結果例

(a) 変位量ベクトル(2013年3月11～20日と2012年10月21～30日の差分、GEONET 牧丘観測点(山梨県)を固定、
 (b) 主歪および面積歪(温泉地学研究所の観測点を含む)、(c) 主歪および面積歪(GEONET 観測点のみ)。図中の丸は観測点位置を示す。(a)における白丸は、期間内は欠測であった観測点を示す。

く、積雪などによる異常な変動をとらえている可能性がある。

この変位ベクトルから算出した主歪および面積歪を図5bに示す。同図に示した範囲の多くの場所で面積歪は収縮を示すが、箱根火山の中央火口丘付近およびその西側で顕著な膨張 ($1.4 \sim 1.8 \times 10^{-6}$) を示す。なお、箱根火山から東側の海域にかけてやや弱い膨張域が認められるが、これは、足柄平野周辺における北向きの変位が影響しているものと考えられる。

一方、図5cは、図5aの変位ベクトルの内、温泉地学研究所による観測点12点を除き、GEONET観測点の変位ベクトルのみで主歪および面積歪を算出した結果である。本図では、膨張を示す地域は図5bと比べ、南北方向（特に北側）に広がって分布する。このことは、箱根火山直下に存在する膨張源の形状および深さを推定する上で、温泉地学研究所の観測点の有無が重要なファクターとなることを示唆している。

箱根火山においては、2001年の群発地震以降、2006年、2008～2009年および2013年と繰り返し群発地震が発生しており、その度に山体の膨張を示す地殻変動が観測されている。その間、温泉地学研究所による観測点は段階的に増設されており、2001年時点は0点（欠測のため）、2006年および2008～2009年時点は4点、2013年時点は12点である。したがって、今後、過去の群発地震時における膨張源をGNSSの観測結果より推定する上では、観測点分布により膨張域が拘束できていない可能性を考慮する必要があるだろう。

4. まとめ

本稿では、Nearest Neighbor法を用いて、空間的に均質な歪場を算出する手法について紹介すると共に、伊豆半島周辺の地殻水平歪速度場および2013年に発生した箱根火山における群発地震時の地殻水平歪場について算出結果を例示した。同手法が、観測点分布密度に差がある地域の歪を算出するのに有効であることを示すと共に、温泉地学研究所が設置しているGNSS観測点群が、箱根火山の群発地震時の地殻変動を捉える上で重要な役割を果たしていることが示された。一方、温泉地学研究所によるGNSS観測点の設置状況が十分でなかった過去の群発地震時の地殻変動から、箱根火山直下の膨張源を推定する際には、観測点分布による効果を考慮する必要があると思われる。

謝辞

小山観測点は、独立行政法人防災科学技術研究所の島田誠一博士との共同研究による観測点である。二名の査読者のコメントにより本稿は改善された。本研究では、国土地理院のGEONET観測点の日々の座標値（F3解）を使用した。また、温泉地学研究所の観測点データは、国土地理院のGEONETおよびInternational GNSS Serviceの観測点のデータと共に、Bernese 5.0により解析を行った。本稿の図の一部は、GMT（Wessel and Smith, 1998）を使用し作成した。ここに記して感謝します。

参考文献

- 道家涼介・原田昌武・宮岡一樹・里村幹夫（2013）神奈川県を対象としたBerneseによるGPS統合解析表示システムの構築，温泉地学研究所報告，**45**，63-70.
- 道家涼介・原田昌武・里村幹夫・宮岡一樹（2014）GPSデータによる伊豆衝突帯北東縁の地殻変動，日本地球惑星科学連合2014年大会，SSS33-P07.
- 坂寺一洋・代田 寧・本多 亮・原田昌武・行竹洋平・道家涼介・宮岡一樹・萬年一剛（2013）2013年1～2月の箱根火山群発地震活動について（概報），神奈川県温泉地学研究所報告，**45**，17-28.
- 井潤陽平・石橋克彦（2003）GEONETデータから求めた伊豆半島～富士山付近の地殻水平歪とテクトニックな考察，地震2，**56**，231-243.
- 小林知勝（2009）クリギング法を用いた歪場の推定の試み，北海道大学地球物理学研究報告，**72**，257-268.
- 鷺谷 威（2002）明治期以降の歪み集中帯，大竹政和・平 朝彦・太田陽子編『日本海東縁の活断層と地震テクトニクス』，東京大学出版会，133-150.
- Shen, Z., Jackson, D.D. and Ge, B.X. (1996) Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J. Geophys. Res.*, **101**, 27957-27980.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools Released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.