

# 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

道家涼介\*・原田昌武\*・宮岡一樹\*・里村幹夫\*

Construction of Analysis and View System for integrated GPS data using Bernese software in Kanagawa Prefecture

by

Ryosuke DOKE\*, Masatake HARADA\*, Kazuki MIYAOKA\* and Mikio SATOMURA\*

## 1. はじめに

温泉地学研究所では、地震・火山活動の観測・監視を目的として、神奈川県西部地域、特に、足柄平野周辺から箱根火山周辺にかけての地域に 12 点の GPS 観測点を設け、定常的に地殻変動の観測を行っている(板寺・原田、2013)。これらの観測点と、同地域に設置されている国土地理院による GNSS 観測網(GEONET)の観測点を合わせると、神奈川県西部地域には、約 5km 間隔で観測点が分布する稠密な GPS 観測網が展開されていることになる(図 1)。

温泉地学研究所と GEONET の観測網を統合して解析を行うことができれば、神奈川県内およびその周辺地域の地殻変動の観測・監視機能の強化ができることは明らかである。この稠密な観測網の能力を効果的に活用するためには、各観測点の座標値を迅速かつ精密に求めることが必要である。加えて結果を様々な形で可視化することも不可欠である。岩國ほか(2009)は、我々と同様の考え方にに基づき、温泉地学研究所と GEONET の GPS 観測データを統合解析している。しかし、その報告では特に箱根火山における火山性の地殻変動に重点を置いており、解析対象とする範囲が限られていた。また、解析処理等を自動化していないためにリアルタイムでのモニタリングについては課題があった。

そこで、筆者らは、神奈川県およびその周辺地域を対象に、温泉地学研究所が所有する観測点および GEONET 観測点における GPS 観測データを用い、Bernese ソフトウェアによる精密解析から Generic Mapping Tools (GMT ; Wessel and Smith, 1998) による解析結果の可視化(図化)までの一連のプロセスを自動で行うシステムを新たに構築した。本報告では、その概要について報告を行う。

## 2. 解析システムの概要

### 2.1. 解析ソフトおよびデータセッティング

本解析システムは、Bern 大学の研究者らにより開発された GPS 解析ソフトウェアの Bernese5.0 による解析をベースとしている。また、本システムでは、Bernese による解析が必要となる各種データの取得、解析結果から各種計算を行い、結果の可視化までを自動で行う(図 2)。Bernese は、測地学分野の研究者により、よく利用される GPS (GNSS) 解析ソフトウェアの一つであり、解析の際、電離層、気象要素などの影響を補正し精密な座標値を決定することが可能である。

解析には、温泉地学研究所が所有する観測点 12 点に加え、国土地理院による GEONET の観測点 29 点(神奈川県内およびその周辺の観測点を選択; 図 1)、International GNSS Service (IGS) の観測点 5 点(つくば、イルクーツク、ウーハン、グアム、テジョン)を使用した。GEONET 観測点 29 点の内 2 点は、神奈川県周辺における大局的な地殻変動の傾向を把握するため、やや離れた地点(山梨県北部の小淵沢と山梨高根)を選択した。

解析に必要な GPS 観測データ(RINEX ファイル)は、解析に先立ち、各機関の FTP サーバーより取得する。また、Bern 大学の FTP サーバーより、Global Ionosphere Model (全球電離層モデル) ファイル、Differential Code Bias (コード間バイアス) ファイルを取得する。加えて、衛星の軌道暦、地球回転パラメータのファイルを、NASA の Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) の FTP サーバーより取得する。衛星の軌道暦は、超速報(Ultra Rapid)暦の取得を毎日、最終(Final)暦の取得を週に 1 回実施している。

Bernese による解析は、同ソフトウェアに備えられている Bernese Processing Engine (BPE) を用いて行う。また、IGS 観測点 5 点における拘束を強くし、これらの観測点

\* 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 45 巻, 63-70, 2013 (この原稿はホームページにてカラーでご覧いただけます。)

における座標値の ITRF2008 座標値からの偏差が最小となるように解いている。超速報暦を用いた解析は、毎日 12 時 5 分から、3 日前～前日のデータについて実施する。ここで、3～2 日前の解析を実施するのは、前日までに

データの不備等で解析ができていない場合や、一部観測点のデータ取得に遅延が生じた場合を想定したバックアップのためである。また、最終暦を用いた解析は、毎週日曜日の 13 時 5 分から、21～15 日前のデータについて

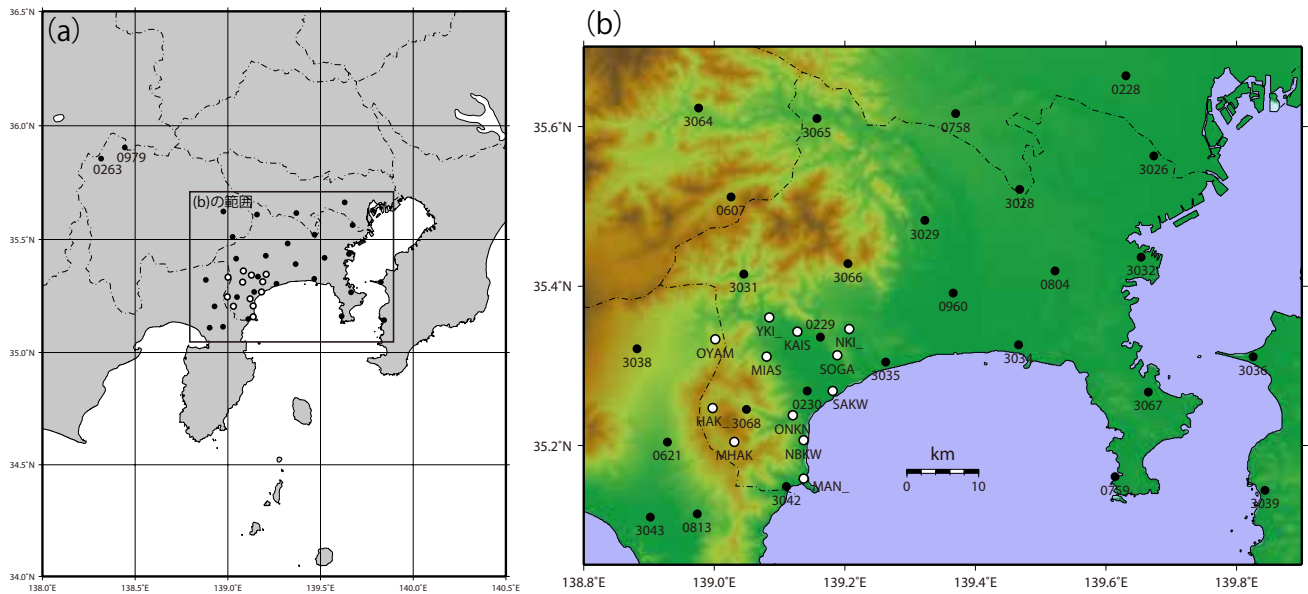


図 1 ルーチン解析に使用している観測点の分布 白抜き丸で示した観測点は温泉地学研究所による観測点、黒丸で示した観測点は国土地理院による GEONET の観測点を示す。

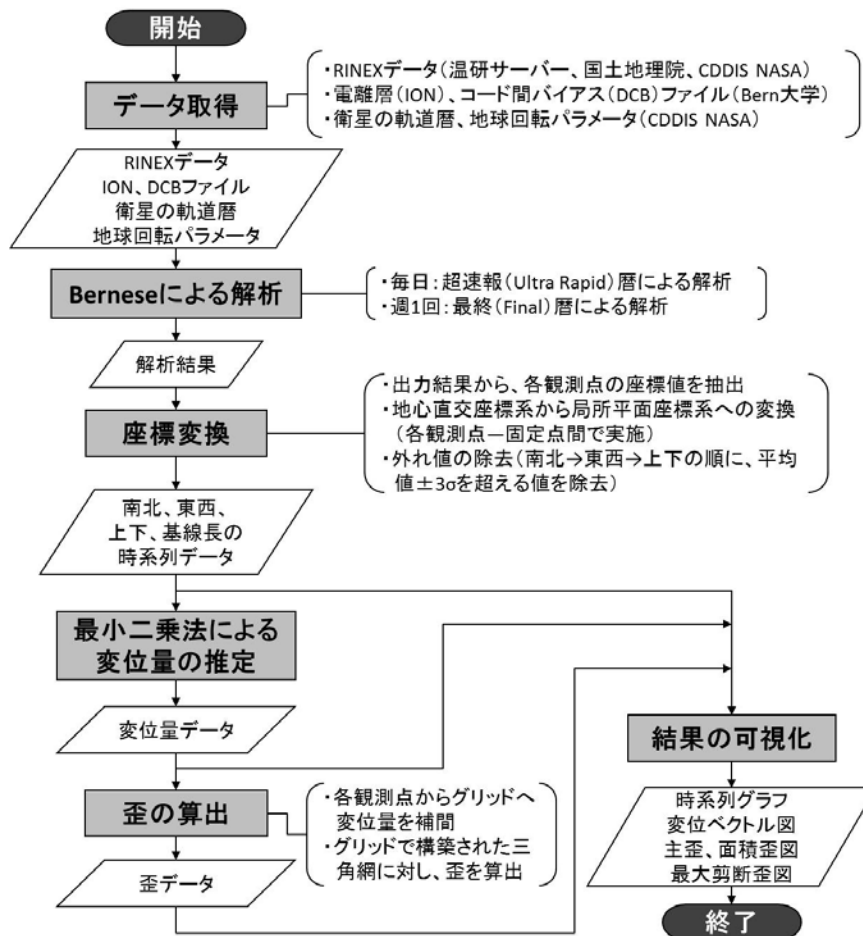


図 2 解析システムにおける概略フロー 四角形が処理、平行四辺形がデータを示す。

て実施する。これは、同週末に公開される3週前の最終暦（一週間分）の期間のデータについて、解析を実施するものである。

## 2.2. 解析結果の処理

以降の処理では、Berneseの解析結果から、データの抽出および座標変換を実施し、結果を可視化するために必要となる各種計算を行う。Berneseによる解析結果は解析日毎に1つのファイルになっており、各観測点の解析値は、地心直交座標系（ITRF2008座標系）におけるX・Y・Zの各座標値および緯度・経度・高さで示される。この解析日毎の結果のファイルから、各観測点の座標値および緯度・経度の抽出を行う。抽出した座標値および緯度・経度をもとに、固定点を原点とした局所平面座標系における各観測点の南北、東西、上下の各成分の座標値および固定点との基線長を算出する。固定点には温泉地学研究所（ONKN）、GEONET小淵沢（0263）の各観測点を選択し、それぞれを固定点とした座標値の差を求めている。

座標差を求めた後、外れ値の除去を行う。GPS解析結果における外れ値は、衛星の状態、気象条件など、様々な要因で発生するものである。外れ値は、特に30日間の変位ベクトル図、歪図の作成（後述）においては、データの母数が限られるため、作図結果に大きな影響を与えてしまう恐れがある。外れ値の除去においては、各成分の値の平均値、標準偏差 $\sigma$ を算出し、各日の観測値と平均値の差が $\pm 3\sigma$ の範囲を超える場合、その日のデータを外れ値として除去する。なお、地震などにより突発的な変位が生じた際には、必要に応じて、手動により外れ値の除去の処理を行わないこととすることも可能である。

## 2.3. 可視化

上述の処理の後、時系列グラフの描画を行う。時系列グラフは、各観測点と固定点間の全組み合わせに対し作成し、南北成分、東西成分、上下成分、基線長について、初日の値を0とした場合の各日の値をプロットする。

次に以下の手順により変位ベクトル図を作成する。まず、各観測点と固定点間における距離の各成分に対し、直線近似を行い、各成分の傾き（変位速度；mm/day）を求める。この変位速度と観測期間（30日間および365日間）との積を計算し、同期間の変位量の算出を行う。このように算出した変位量に基づき、水平、上下の各成分について変位ベクトル図（30日間および365日間）の作成を行う。時系列グラフおよび変位ベクトル図につ

いては、固定点毎に作図する。

このようにして求められた変位ベクトルから歪図の作成を行う。歪図は、GEONET小淵沢観測点（0263）を固定点とした際の変位量の値を用いて作成する。観測点の間を補間し、空間的に連続する歪を計算する手法については、いくつかの手法が提案されているが（例えば、Shen *et al.*、1996）、本システムでは、井潤・石橋（2003）の手法を参考とした。同手法は、観測点間のデータ補間方法が線型的であり、強いフィルタリングや平滑化を行う他の手法より局所的な変動をとらえることが可能と考えられる。したがって、観測点が密に存在する神奈川県西部地域の地殻変動を、観測点間隔と同程度の分解能で把握するのに有効であると考え、同手法を参考とした。歪の計算にあたっては、まずGMTのtriangulateコマンドにて、観測点間を結ぶ三角網を構築し、その三角網内で0.05度間隔のグリッドに対しデータの線型補間を行う。次に、各グリッドの点を結び、均質な三角網を形成し、各三角形を構成するグリッドの変位量から歪の算出を行う。計算結果に基づき、主歪と面積歪、最大剪断歪とその方位の平面分布図（30日間および365日間）を作成する。

## 3. 出力結果例

本システムにおいて出力される図面（2013年9月時点）は、以下の通りである。なお、各図面とも30日間と365日間の2つの期間について作図している。

- ・時系列グラフ（南北、東西、上下の各成分および基線長）
  - I. 温泉地学研究所（ONKN）固定 40観測点の時系列グラフ
  - II. GEONET小淵沢（0263）固定 40観測点の時系列グラフ
- ・変位ベクトル
  - I. 温泉地学研究所（ONKN）固定
    - i. 水平変位ベクトル
    - ii. 上下変位ベクトル
  - II. GEONET小淵沢（0263）固定
    - i. 水平変位ベクトル
    - ii. 上下変位ベクトル
- ・歪
  - I. 主歪・面積歪
  - II. 最大剪断歪とその方位

本システムによる出力結果の例を図3～7に示す。図3は、温泉地学研究所（ONKN）を固定点とした場合の

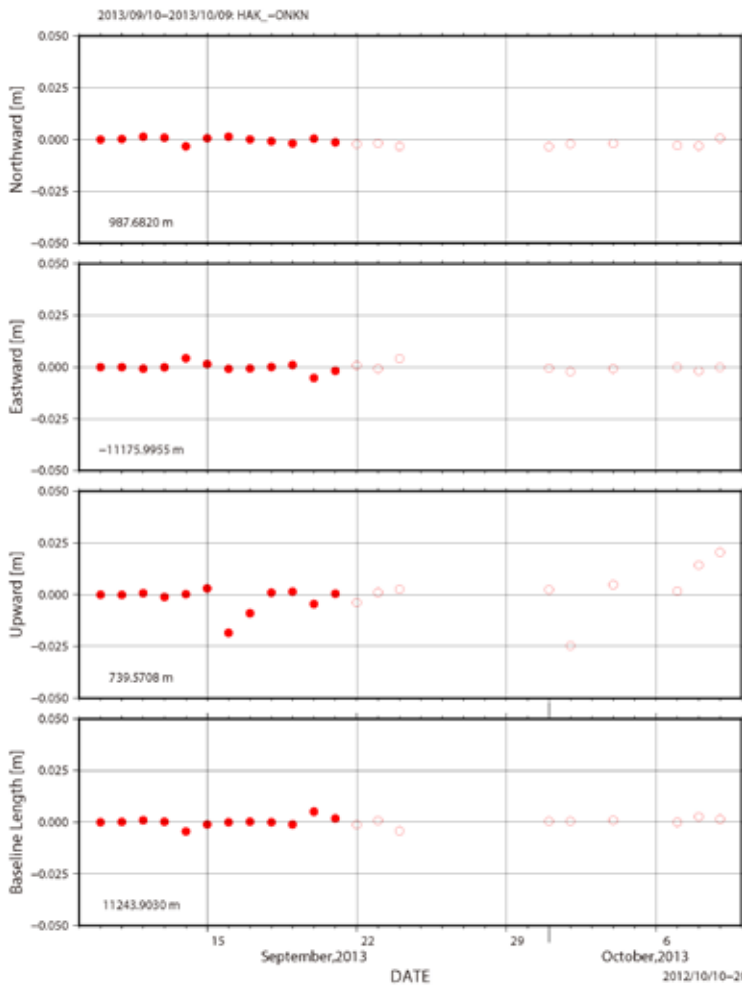


図3 箱根観測点 (HAK\_) における 30 日間の時系列グラフ (ONKN 固定) の表示例 グラフは、上より順に北向き成分、東向き成分、上向き成分、基線長を示す。各グラフの左下に記した数値は、期間の初日の値を示す。グラフ中の白抜き丸は、超速報暦による解であることを示す。

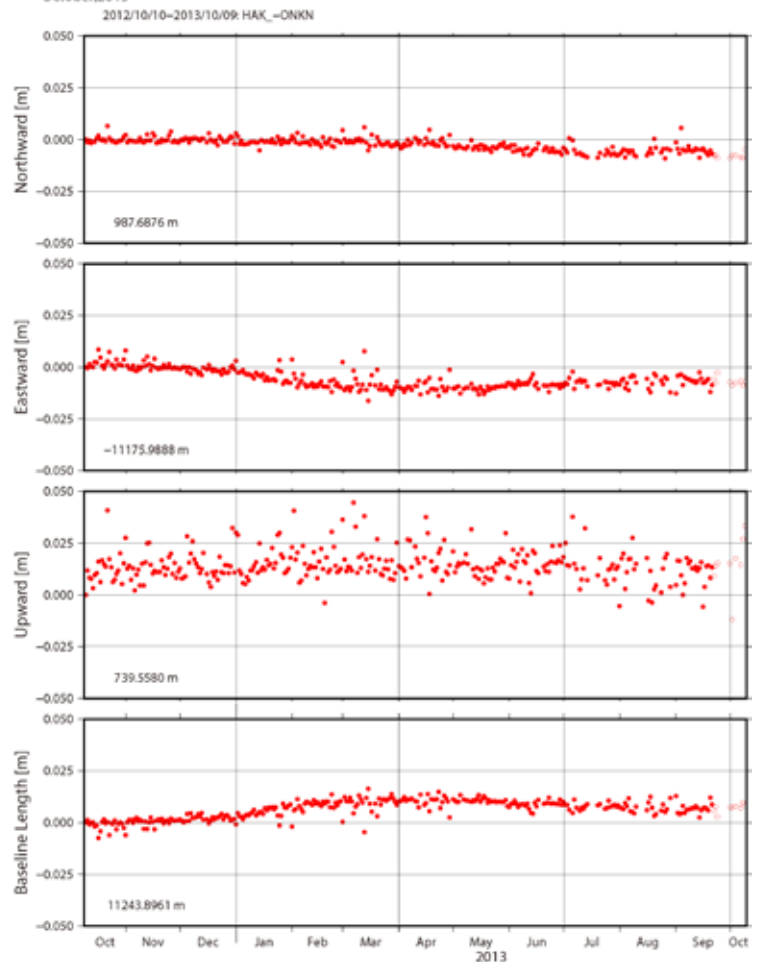


図4 箱根観測点 (HAK\_) における 365 日間の時系列グラフ (ONKN 固定) の表示例 図中の説明に関しては、図3の説明を参照。

箱根観測点 (HAK\_) の 30 日間の時系列グラフである。本グラフでは、南北、東西、上下の各成分と観測点 - 固定点間の基線長のグラフがそれぞれ示されている。ここで、白抜き丸で示されたデータは、超速報暦を用いた解析結果であり、最終暦による解析が、まだ行われていないことを示している。図 4 は、同様に温泉地学研究所 (ONKN) を固定とした場合の箱根観測点 (HAK\_) の時系列グラフであるが、表示期間が 365 日である。なお、本出力結果の表示例では、2013 年初頭に箱根火山で発生した群発地震 (板寺ほか、2013) に対応した、約 1 ヶ月間で西向きに 1cm 程度変位する地殻変動が認められる。

図 5 は、温泉地学研究所 (ONKN) を固定とした際の 365 日間の水平変位ベクトル図である。各変位ベクトルの先端には、最小二乗法により直線近似を行った際の傾きの標準誤差の値に基づき 95% 信頼区間の楕円も併記している。なお、本図では、2012 年後半に行われた GEONET 観測点のアンテナ交換および 2013 年 7 月における酒匂観測点 (SAKW) におけるアンテナ高調整の影響も変位量に含まれている点に留意されたい。

図 6 および図 7 は 365 日間の地殻水平歪を表したもので、図 6 は主歪および面積歪、図 7 は最大剪断歪をそれぞれ示す。主歪より推定される最大剪断歪の方位は、右横ずれと左横ずれのそれぞれが最大となる 2 方向が存在するが、図 7 においては、各グリッドにおいて、左横ず

れの剪断歪が最大となる方向を図示している。なお、右横ずれの剪断が最大となるのは、左横ずれ方向と直交する方向である。

#### 4. 既存システムとの精度の比較

温泉地学研究所では、これまで TOPCON 社製の GPS 自動解析システム Ver.2 を用いて、データの処理を行っていた。その解析結果を用いて基線長の時系列グラフを作成したものが図 8(a) である。既存システムの解析結果では、特に夏季におけるデータのばらつきが大きく、精度良く座標値を求めることができていない状況であった。

一方、本研究にて構築したシステムの解析結果を用いて、既存の解析システムと同様に真鶴観測点 (MAN\_) を固定点とした基線長の時系列グラフを作成したものが図 8(b) である。既存システムの解析結果で認められていたばらつきは、年間を通じて大幅に改善されている。加えて、一部の観測点に見られていた年周変動の影響についても軽減が認められる。これは、Bernese を用いた解析により、気象要素の推定・補正の精度が向上したことにより起因すると思われる。

#### 5. まとめと今後の課題

神奈川県内およびその周辺における地殻変動の観測・監視機能の強化を目的として、Bernese ソフトウェアを

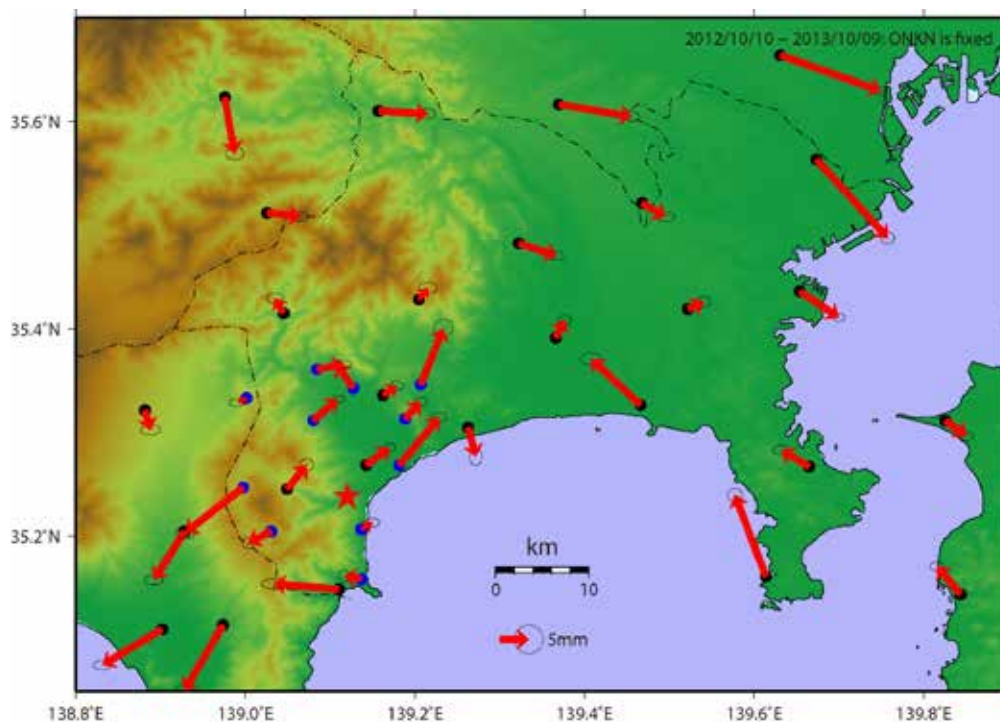


図 5 水平変位ベクトルの表示例 (365 日間、ONKN 固定) 星印は、固定点 (ONKN) の位置を示す。ベクトル先端の楕円は、95% 信頼円を示す。アンテナ交換による座標値の変化を含むことに留意。

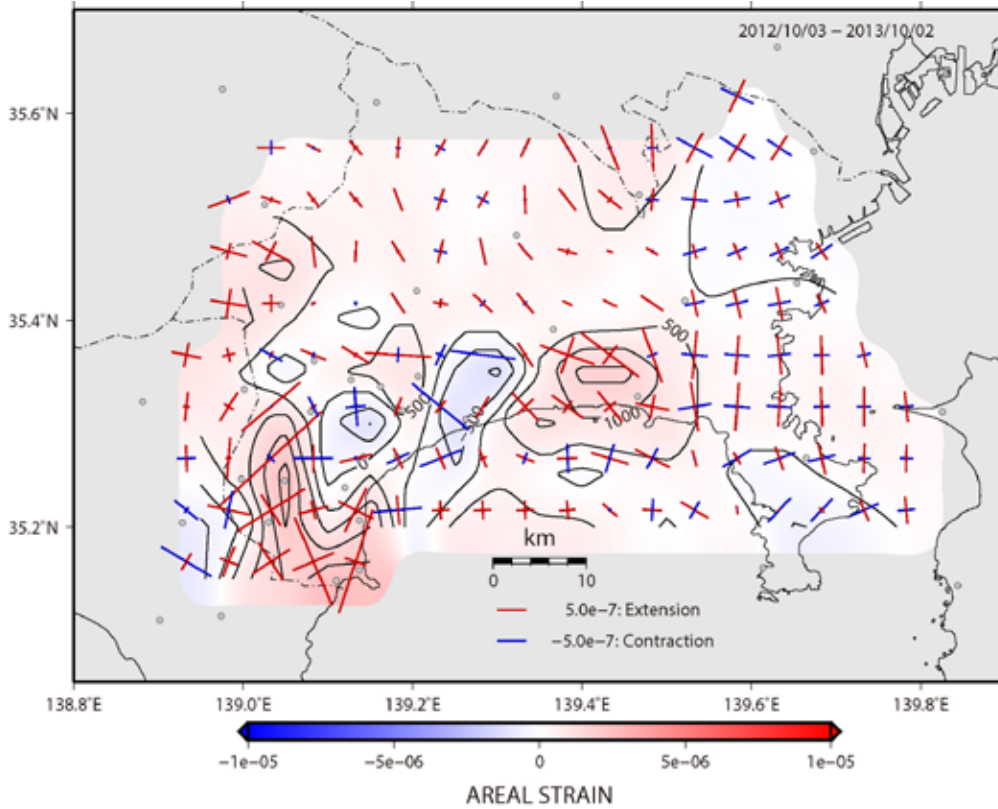


図6 主歪・面積歪の表示例（365日間） 通常のシステムの出力結果にコンターを追加したものである。コンターの値は nanostrain ( $10^{-9}$ )。アンテナ交換による影響を含むことに留意。

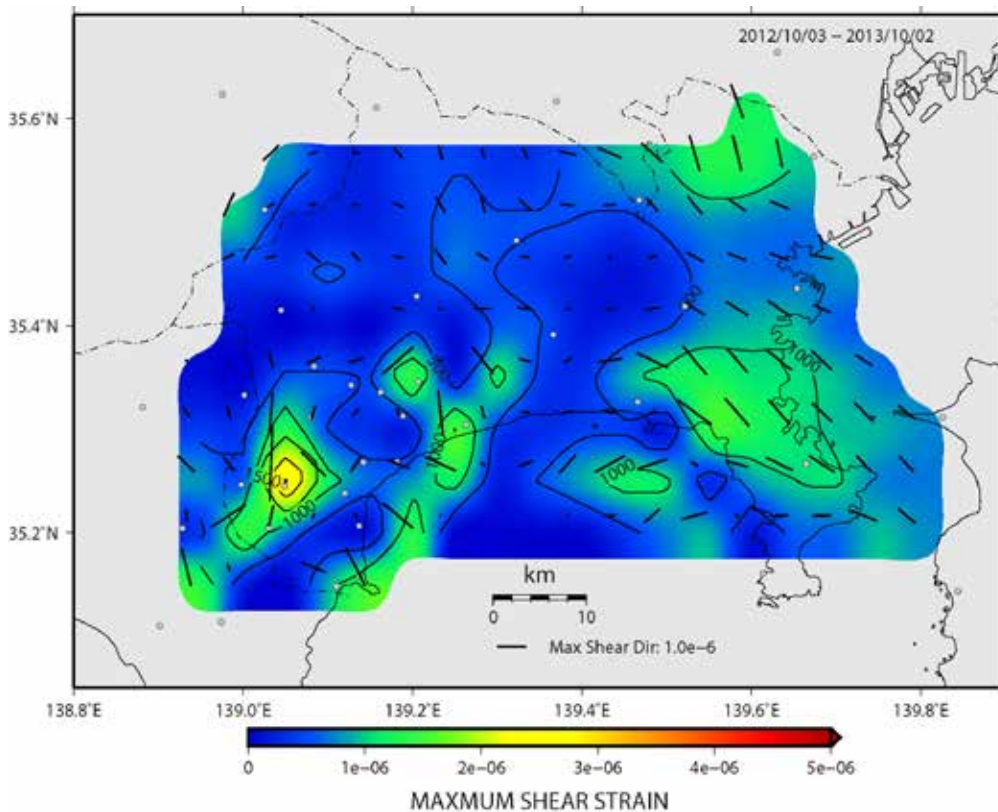


図7 最大せん断歪の表示例（365日間） 通常のシステムの出力結果にコンターを追加したものである。コンターの値は nanostrain ( $10^{-9}$ )。図中の黒線は、左横ずれ方向のせん断歪が最大となる方向をしめす。アンテナ交換による影響を含むことに留意。

用いた GPS 観測データの精密解析を定常的にリアルタイムで行うシステムを構築した。本システムは、自動的に解析に必要なデータを取得し、解析の後、その結果から時系列グラフ、変位ベクトル図、歪図を作図するプログラムを有し、日々の解析結果に基づき、各種図面の更

新を行う。

本システムでは、既存のシステムに比べ、解析精度が大幅に向上したことから、箱根観測点 (HAK\_) を含むいくつかの観測点で、2013 年初頭に箱根火山で発生した群発地震に対応するとみられる地殻変動の様子をとら

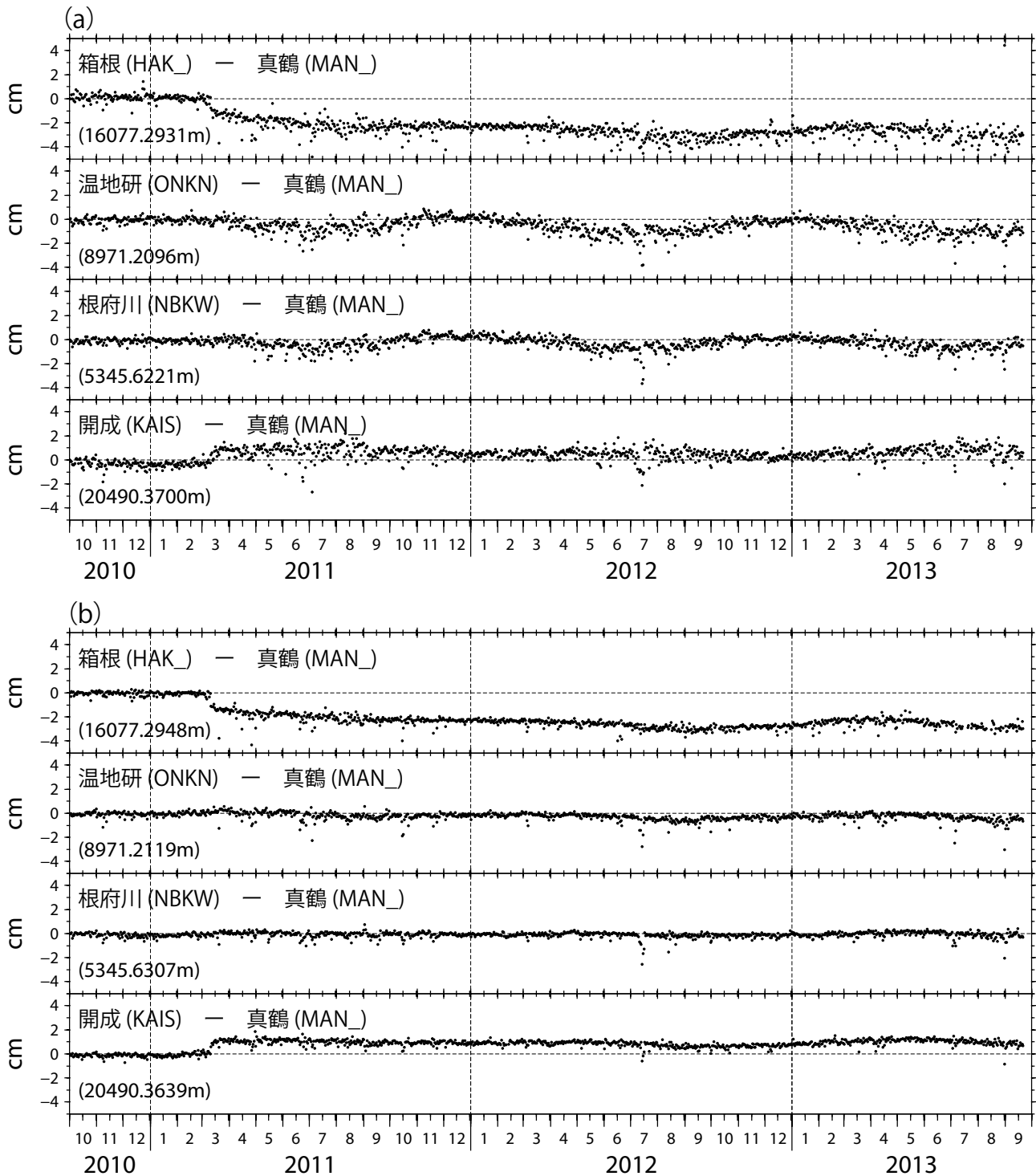


図 8 既存システムと本システムによる解析結果の比較 (a) 既存システムによる解析結果 (真鶴観測点を固定とした基線長変化)。(b) 本研究により作成した解析システムによる解析結果から真鶴観測点を固定とした基線長を計算した結果。なお、精度の比較のため、外れ値の除去は行っていない。

えることができた。一方、GPSによる観測値には年周的な変動が含まれている場合が多く、それらを考慮しつつ、長期的な地殻変動を把握するためには、より長期間にわたる観測および結果の図示が必要となる。したがって、今後は、過去に遡り同様の手法で、データの解析を進めるとともに、数年間の時系列データに基づく作図結果も自動更新される仕組みを検討する必要がある。

#### 謝辞

本研究で構築した解析システムでは、解析の際、国土地理院のGEONET観測点およびInternational GNSS Serviceの観測点のデータを使用しています。小山観測点(OYAM)は、独立行政法人防災科学技術研究所(島田誠一博士)との共同研究により観測を行っています。作図については、GMT(Wessel and Smith, 1998)を使用しています。査読者の有益なコメントにより、本稿は改善されました。ここに記して感謝します。

#### 参考文献

板寺一洋・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), 温泉地学研究所報告, 45, 17-28.

板寺一洋・原田昌武(2013)神奈川県西部地域における2012(平成24)年の地殻変動観測結果, 温泉地学研究所観測だより, 63, 45-52.

井瀬陽平・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.

岩國真紀子・原田昌武・棚田俊收・伊東博(2009)温泉地学研究所と国土地理院のGPSデータの統合解析結果から検出した箱根火山の地殻変動, 温泉地学研究所報告, 41, 51-56.

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.