

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

岩國真紀子*・原田昌武*・棚田俊收*・伊東 博*

Crustal movements in the Hakone volcano detected from the integrated analysis
of Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture
and Geographical Survey Institute GPS data
by

Makiko Iwakuni^{*1}, Masatake Harada^{*2}, Toshikazu Tanada^{*2} and Hiroshi Ito^{*2}

1. はじめに

温泉地学研究所（以降、温地研とする）では神奈川県西部地震の発生メカニズム解明と箱根火山の活動状況をモニタリングするために、箱根火山および神奈川県西部地域を中心に地震・地殻変動の観測をおこなっている（温泉地学研究所、1999）。

地殻変動観測の項目のひとつであるGPS測量は、真鶴と箱根観測点では1991（平成3）年度から、山北と中井観測点では1992（平成4）年度から観測を開始し、現在も継続中である（棚田ほか、2002；丹保ほか、2002；原田・板寺、2009）。観測結果である距離変化（基線長変化）は、温地研のホームページ上で準リアルタイム公開され、神奈川県西部地域の地震・火山活動のモニタリングの為に活用されている（本多、2007）。しかしながら、火山活動による地殻変動が生じた場合、4観測点は箱根火山から最大で20km程度しか離れていないため、基線長解析の固定点そのものが火山活動に伴う地殻変動の影響を受けてしまう可能性がある。

一方、国土地理院（以降、地理院とする）では、GPSを各種測量の基準点として利用、さらには、地震調査研究や火山噴火予知研究のための地殻変動監視を目的として、日本全国に約20km間隔で約1200点の電子基準点の観測網（GEONET）を整備している（測地観測センター、2004）。この観測網により、火山活動による地殻変動が生じた場合でも、変動の影響を受けないような基線長解析のための固定点を選択できる。しかし、箱根火山（カルデラ内）には1カ所のGEONET観測点しか無く、火山活動のような局地的な変動をとらえるためには十分ではない。このような背景から、温地研PGS

データとGEONETによる広域なGPSデータとの統合が望まれてきた。これにより、箱根火山を中心とした基線数が大幅に増え、地殻変動検出能力の向上が期待できる。

本報告では、温地研と地理院の観測点のデータを統合できるシステムを構築し、基線長変化の解析をおこなった。次に、この解析結果から検出された箱根の火山活動にともなう地殻変動について検討した結果を報告する。

2. 解析方法

2001（平成13）年以降、温地研ではLeica社の機器に特化した専用のGPS基線長解析ソフトウェア（CRNet）を用いて、1日1回相対測位の方法で自動解析処理をおこなっている（丹保ほか、2002）。しかし、この専用解析ソフトウェアは、契約した観測点数しか利用できない制約があり、GEONETデータを追加解析することは難しかった。そこでLeica社のソフトウェアで自動解析する方法とは別に、今回はGIPSY-OASIS IIという精密GPS解析ソフトウェア（Lichten and Borders, 1987）を使用した。これにより温地研と他の機関のデータとを結合させた解析ができるようになり、温地研の観測網内部の地殻変動だけでなく、温地研と他の機関の観測点間の地殻変動なども調べることができるようになった。

この温地研と地理院データとを結合させた解析では、精密暦を用いて、各GPS観測点の位置座標を1日1回推定した。解析期間は1998（平成10）年1月から2007（平成19）年3月までの約9年分（3376日分）である。観測点としては温地研4観測点に加え、温地研の観測点を取り囲むように、GEONETの25観測点を使用した。こ

*1（財）日本気象協会 〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン 60 55階

*2 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41巻，51-56，2009.

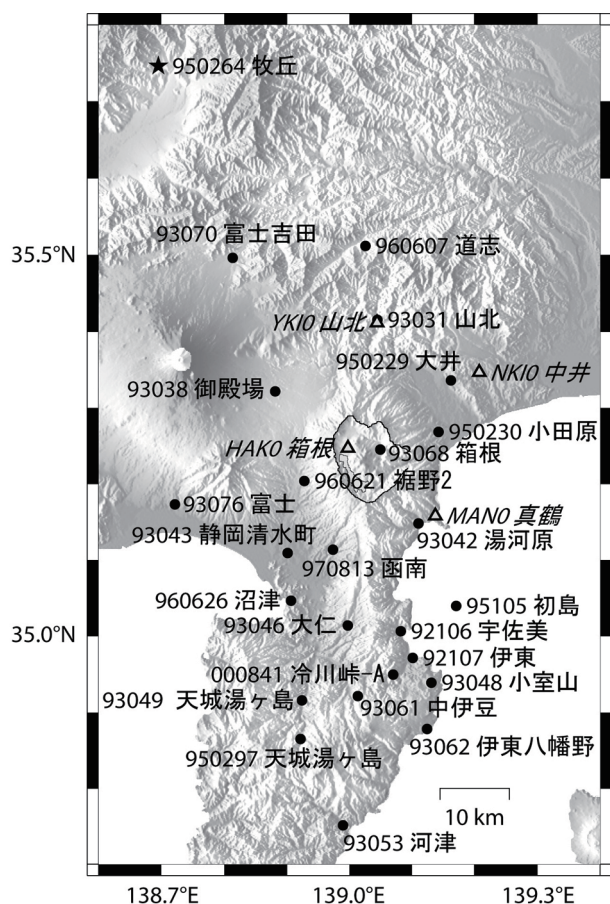


図1 本研究で用いた観測点の配置図。
斜字体は温地研、その他は地理院の観測点 ID
番号。ID 番号の隣は観測点名。

これらの観測点の配置を図1に示す。

3. 温地研と地理院データとを結合させた基線長解析結果

温地研と地理院の GPS データを合わせた基線解析の例として、「牧丘 (950264)」を固定点とした各観測点の位置座標の時系列変化を図2に示す。図2における南北成分・東西成分は、おおよそ観測点位置の南北方向・東西方向の順に並べた (図下側が南方向・西方向)。この配置理由は、伊豆半島東方沖と箱根火山の群発地震活動に伴う地殻変動の影響を分離し易いためである。固定点を「牧丘 (950264)」とした理由も同様である。各観測点の変化の振幅は2001 (平成13) 年1月1日を基準とした相対振幅 (縦軸1目盛り5cm) で示している。

温地研の4観測点は、固定点「牧丘 (950264)」に対し、観測開始の2001 (平成13) 年10月から解析終わりの2007 (平成19) 年8月までおおよそ北北西の方向に縮む傾向であることがわかった。真鶴 (MAN0) と中井 (NK10) では牧丘に対し南北方向に約5cm縮んでいる。

同様な縮みは「小田原 (950230)」と「大井 (950299)」、「湯河原 (93042)」でも観測されている。「山北 (YK10)」の南北方向の縮みは固定点「牧丘 (950264)」に対し3cm程度であった。この傾向は丹沢山地に設置されている GEONET 観測点「山北 (93031)」でも同じである。

一方、「箱根 (HAK0)」や「御殿場 (93038)」は固定点「牧丘 (950264)」に対し、南北方向の縮みは1cm程度と小さい。しかし、「箱根 (93068)」は2001 (平成13) 年6月から8月にかけて2cm程度の縮み方向の緩やかなステップを伴いながら、2007 (平成19) 年8月までに約4cmの縮みを示した。また、「裾野2 (960621)」においては、南側に1cm程度伸びる逆センスであることがわかった。

温地研および GEONET 観測点が近接する山北や中井、真鶴では、両機関が所有する観測点は固定点に対してほぼ同じ経年変化を示すことがわかった。しかし、箱根山やその周辺ではやや複雑な変動パターンや緩やかなステップが観測されており、これらの変化は後述する群発地震の地殻変動に対応するものと考えられる。

真鶴や湯河原より南側の伊豆半島における GEONET 観測点における明瞭な変化は、2006 (平成18) 年1月から続く伊豆半島東方沖群発地震活動によるものである (図2波線枠内矢印)。また、同地域では4月21日にM5.8の地震が発生し、ステップ状の地殻変動が観測された (図2波線枠内の白抜き矢印)。例えば、「伊豆八幡野 (93062)」は、固定点「牧丘 (950264)」に対し、南側に約5cmの伸びを、西側に3cmの縮みを示した。この伊豆半島東方沖群発地震活動に伴う変動やステップは「真鶴 (MAN0)」や「湯河原 (93042)」付近まで認められるが、それ以北の神奈川県西部の観測点では明瞭に現れていない。なお、伊豆半島東方沖群発地震活動および地殻変動の概要については、地震調査研究推進本部 (2007) を参照していただきたい。

4. 箱根火山の地殻変動

図2の各観測点の変位グラフからは、箱根火山周辺において2001 (平成13) 年6月から8月までの期間に顕著な地殻変動が見られる。箱根火山ではこれ以外にも2006年に群発地震活動が活発であった。そこで、それら2回の地殻変動と群発地震活動の概要、およびそれらの地殻変動の差異について説明する。

4.1. 2001 (平成13) 年と2006 (平成18) 年に発生した群発地震活動に伴う地殻変動

箱根火山の地震活動については、テレメータ観測が

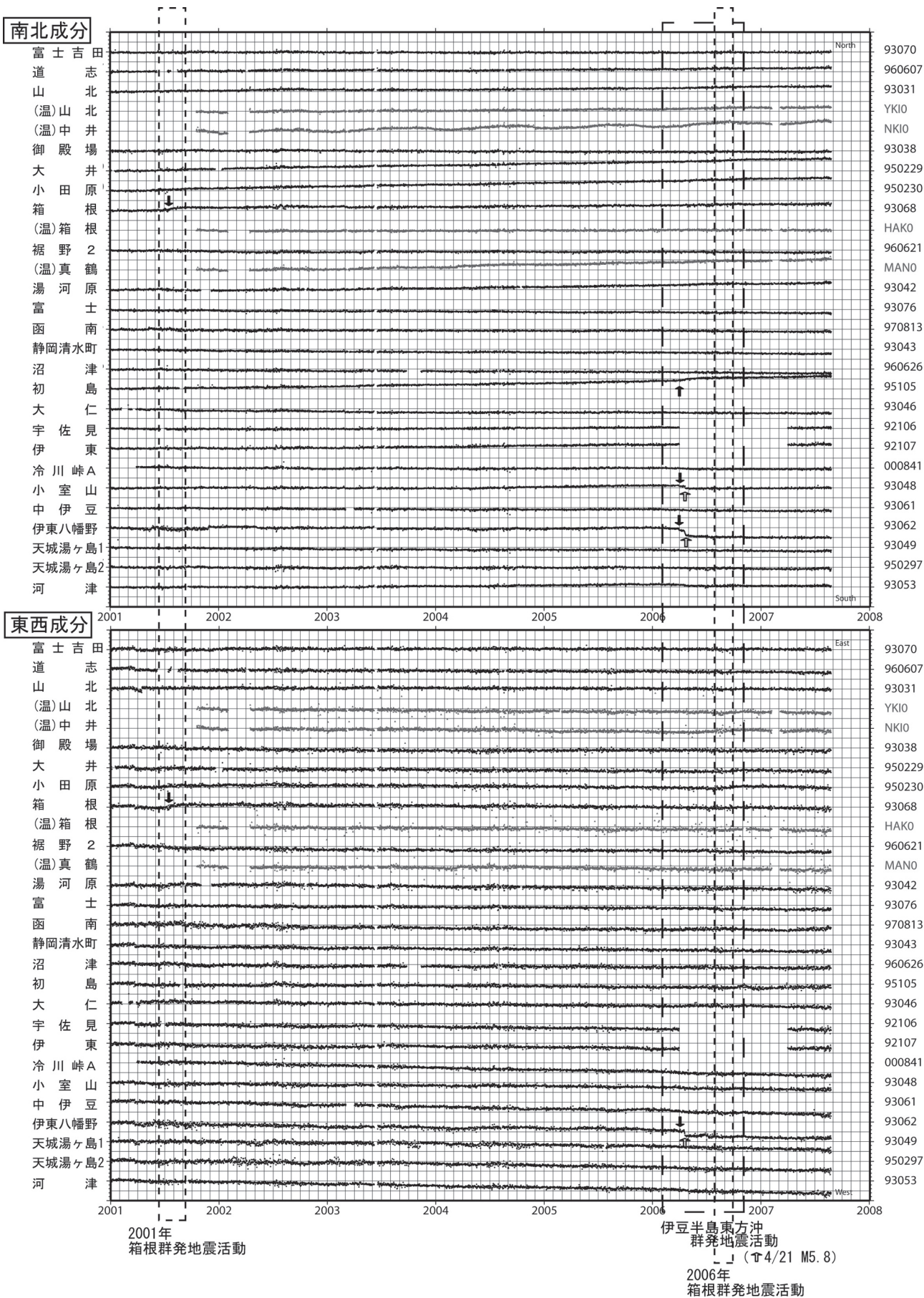


図2 「牧丘」に対する位置座標の変化。縦軸一目盛り5cmの変動を表す。2001(平成13)年と2006(平成18)年の箱根群発地震活動、2006(平成18)年の伊豆半島東方沖の群発地震活動の発生期間を波線の四角で示す。

始まった1989年度以降現在までの間で、2001（平成13）年の活動が地震発生回数や活動期間の長さという点で、最大の活動であった（棚田ほか、2002）。活動期間は6月中旬から約4ヶ月間である。この活動では温地研が観測していた傾斜計やGPS測量や光波測量に加えてGEONETによるGPSデータにも、地震活動と同時期に山体の膨張を示す地殻変動が捉えられた（西村・村上、2001；代田ほか、2002など）。国土地理院（2002）や代田ほか（2009）はそれぞれ6月中旬から9月初旬までの3ヶ月間の地殻変動を、1つの球状圧力源と2つの開口割れ目を用いてモデル化を行った。

2006（平成18）年の地震発生回数は2001（平成13）年の群発地震活動に次いで多く、地震は8月頃から中央火口丘の大涌谷から南の駒ヶ岳にかけて南北に帯状に発生した（棚田ほか、2007）。国土地理院（2006）によれば、この箱根群発地震活動の期間のGEONETデータを解析した結果、深さ7.7kmに開口クラックを推定している。

一方、温地研のGPS観測データには、2006（平成18）年の箱根群発地震活動に伴う地殻変動が顕著ではなかった。このことについて、原田ほか（2007）は2003（平成15）年1月1日から2006（平成18）年12月31日の温地研のGPS観測点同士の基線長変化を解析した。その結果によると、2006（平成18）年8月頃から群発地震に伴う変動があるように認められるが、その変動量が小さく年周補正を行わなければ地震活動との関連性を特定するのは困難であると報告している。

4.2. 2001（平成13）年と2006（平成18）年に発生した群発地震活動に伴う地殻変動の違い

図2における各観測点の南北および東西成分の変位グラフでは、両群発地震活動の変動量を検出し難い。そこで、群発地震の発生直前（基準期間）から終了時（比較期間）の地殻変動量を差し引いた結果を変位ベクトル図として図3に示す。2001（平成13）年の群発地震活動における変位ベクトルの期間は「基準期間（2001/06/01-2001/06/10の平均座標値）—比較期間（2001/09/01-2001/09/09の平均座標値）」である。2006（平成18）年の群発地震活動における変位ベクトルの期間は「基準期間（2006/06/01-2006/06/10の平均座標値）—比較期間（2006/11/26-2006/12/05の平均座標値）」である。なお、温地研のGPSは2001（平成13）年1月から10月まで機器や解析ソフトウェアの変更のため、欠測であった。そのため、2001（平成13）年に発生した群発地震活動に対する温地研の4観測点分の変位ベクトルは図3においては示していない。

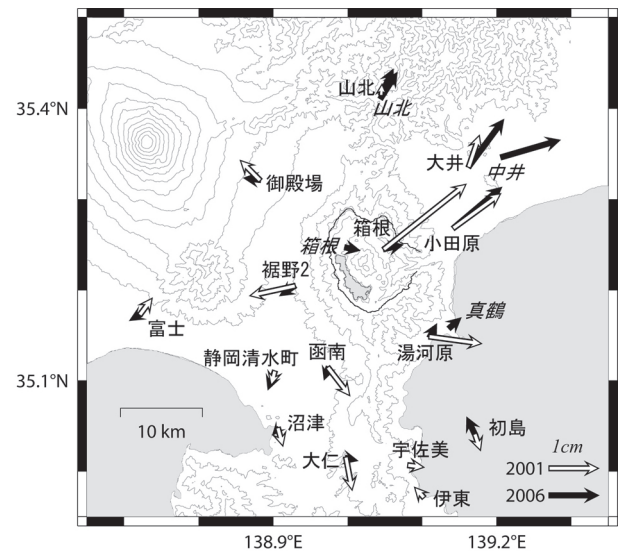


図3 2001年と2006年の箱根群発地震活動に伴う地殻変動

矢印は「牧丘（950264）」を固定点として推定した変位量で、白抜き矢印は2001年、黒色の矢印は2006年の変位量を示す。斜字体の観測点名は温地研の観測点、その他は地理院の観測点。

2001年の基準期間：2001/06/01-2001/06/10 比

較期間：2001/09/01-2001/09/09

2006年の基準期間：2006/06/01-2006/06/10

比較期間：2006/11/26-2006/12/05

2001（平成13）年の群発地震活動における変位ベクトル（図3の白抜きベクトル）は、次のような特徴が挙げられる。箱根火山の北東側の観測点（「小田原（950230）」など）は北東方向へ1～2cm変動した。北西側にある御殿場は0.5cm程度、西側の「裾野2（960621）」は1cm程度西側へ変動した。南東に当たる「湯河原（93042）」は東側へ1cm程度、南側の観測点はおおよそ南へ1cm以下の変位があった。つまり、変位ベクトルは箱根中央火口丘から離れる方向に移動しており、箱根火山を中心に等方的に膨張していることを示唆している。この結果は、Harada et al.（2008）によるGPSから推定される歪場の解析結果とも調和的である。この等方的な膨張という考えは、国土地理院（2002）や代田ほか（2007）が地殻変動データを説明するに当たって中央火口丘直下に球状膨張源を設定した考えと一致している。

2006（平成18）年の群発地震活動における変位ベクトル（図3の黒色ベクトル）は、次のような特徴が挙げられる。西側と北東側の観測点（裾野2（960621）と小田原（950230）など）は、2001（平成13）年の群発地

震活動時とほぼ同じ方向に変位ベクトルが変化している。しかし、北西や南、南東側の観測点（御殿場（93038）、函南（970813）や湯河原（93042））は、変位ベクトルの絶対値が2001（平成13）年の活動と明らかに異なっている。また、3カ所（山北（93031）や大井（950229）、小田原（950230））以外は、変位ベクトルのスカラー量が2001（平成13）年の群発地震活動に比べ小さい。全体としては、箱根火山を中心として、北東-南西方向に膨張するように見える。

これらのことより、2001（平成13）年と2006（平成18）年の群発地震活動における地殻変動データの違いを説明するには、球状圧力源もしくは開口モデルという変動源モデルの違いや変動源モデルは同じでもその深さや体積変化量などのパラメータが異なっているという可能性があることが分かった。

5. 結論

神奈川県西部周辺地域の温地研4観測点と地理院25観測点について精密暦を用いて、各GPS観測点の位置座標を推定した。その結果以下のことがわかった。

1. 2001（平成13）年6月と2006（平成18）年8月から発生した箱根の群発地震活動に伴う地殻変動が確認できた。しかし、この期間以外には、箱根火山の群発地震活動に対する明瞭な変動は認められなかった。
2. これらの群発地震に伴う地殻変動は、箱根火山を中心として山体を膨張させる傾向であった。しかし、群発地震の変動ベクトルを比較した結果、その方向やスカラー量の差異が生じていることが分かった。この違いは、変動源モデルの違い、もしくはモデルパラメータの違いを反映している可能性がある。
3. 2006年1月に発生した伊豆半島東方沖の群発地震活動に伴う地殻変動は、真鶴や湯河原付近の観測点まで影響を受けていることが分かった。

謝辞

本研究では、国土地理院によるGPS観測データを使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 代田寧・棚田俊收・伊東博（2002）2001（平成13）年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動，温地研報告，34，35-44.
- 代田寧・棚田俊收・反保俊哉・伊東博・原田昌武・萬年

一剛（2009）2001年箱根群発地震活動に伴う傾斜変動と圧力源の時間変化，火山，54，223-234.

原田昌武・行竹洋平・棚田俊收・伊東博・本多亮（2007）神奈川県西部地域における2006（平成18）年のGPS・光波測量結果，温地研観測だより，57，13-18.

Harada M., M. Iwakuni, and T. Tanada（2008）Characteristics of Crustal Strain in the Western Kanagawa Prefecture, Japan, International Symposium on GPS/GNSS 2008 Proceedings, 69-77.

原田昌武・板寺一洋（2009）神奈川県西部地域における2008（平成20）年の地殻変動観測結果，温地研観測だより，59，55-62.

本多亮（2007）ホームページを利用した地震・測地データ公開システムの紹介，温地研観測だより，57，31-34.

地震調査研究推進本部（2007）2006年4月の伊豆半島東方沖の地震活動の評価，地震調査委員会報告集2006年1月～12月，111-123.

神奈川県温泉地学研究所（1992）30年のあゆみ，温地研報告，23（1），1-316.

神奈川県温泉地学研究所（1999）温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み，温地研報告，29，3-40.

国土地理院（2002）箱根山とその周辺地域の地殻変動，火山噴火予知連絡会会報，80，30-40.

国土地理院（2006）関東甲信越地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，77，132-141.

Lichten, S. and J. Borders（1987）Strategies for High-precision Global Positioning System Orbit Determination, J. Geophys. Res., 92, 12751-12762.

西村卓也・村上亮・棚田俊收（2001）2001年6月-8月の箱根火山の地殻変動，日本測地学会第96回講演会要旨，121-122.

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.

棚田俊收・代田寧・伊東博・袴田和夫（2002）2001（平成13）年箱根火山の群発地震活動について，温地研観測だより，52，1-4.

棚田俊收・伊東博・代田寧・板寺一洋（2002）神奈川県西部地域におけるGPS観測結果とその特徴について，温地研報告，33，31-42.

棚田俊收・本多亮・原田昌武・行竹洋平・伊東博（2007）神奈川県内およびその周辺における2006（平成18）年の地震活動，温地研観測だより，57，1-12.

丹保俊哉・棚田俊收・代田寧・伊東博（2002）神奈川県
温泉地学研究所における新しいGPS 測量システム
とその精度について , 温地研報告 , 34, 27-34.