

スタッキング法を用いた GNSS 地殻変動監視

宮岡一樹^{*}・原田昌武^{*2}・道家涼介^{*2}

Monitoring of crustal deformation by GNSS data with applying the Stacking method

by

Kazuki MIYAOKA^{*}, Masatake HARADA^{*2} and Ryosuke DOKE^{*2}

Abstract

Earthquake swarm activities accompanied by GNSS baseline changes have occurred frequently at Hakone volcano. In some cases, the baseline changes seem to have started several weeks prior to the earthquake swarms. In this study, we analyzed the GNSS data, applying the stacking method in order to detect these small changes earlier. The stacking method is intended to improve the SN ratio by cumulating the time series data of crustal deformation. By applying this procedure, the signal components are enhanced and the noise ones are depressed. We set two types of combinations. A combination constructed by short baselines is expected to detect crustal deformations due to a shallow pressure source. And the other constructed by long baselines is expected to detect crustal deformations due to a deep pressure source. As a result of this analysis, we found that the start of changes in short baselines combination had preceded the earthquake swarm activity by one month, the start of the long ones had preceded the earthquake swarm activity by 2-3 months. In addition, we calculated the ratio between the short baseline combination changes and the long ones. The difference of the amount of changes between the long baseline combination and the short one seems to indicate the source depth difference. Comparing the difference of the ratio of the four activities in 2001, 2006, 2008 and 2013, we found that the source depths of 2001 and 2013 were shallower than the depths of two others. This result is consistent with previous studies. The stacking method was proved to be useful for monitoring of volcanic activity.

1. はじめに

箱根山ではたびたび群発地震活動が発生している。最近では 2001 年、2006 年、2008 ～ 2009 年、2011 年および 2013 年は比較的規模の大きな活動であった。この中で 2001 年の活動の際にはいくつかの地表面現象も見られるなど、近年発生した中では最も大きな規模の活動であり、また直近である 2013 年の活動もそれに次ぐ規模の大きな活動であった（板寺ほか、2013）

2011 年を除く 5 回では、周辺の GNSS 観測点で群発地震活動に伴う変化が観測されており、地下深部における圧力源の変化を示しているものと考えられる。一方、2011 年の活動は 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって誘発されたとされている（原田ほか、2012）。

これまでの箱根山およびそこで発生する群発地震活動については様々な研究がなされている。行竹ほか(2013)は地震波を用いたトモグラフィー解析から、深さ 10km

付近に低速度の領域があり、そこに溶融体の存在を指摘している。代田ほか（2009）は 2001 年の活動における GNSS および傾斜計データの解析から、球状圧力源が深さ 7km に存在し、さらに地表に近い極浅部に開口割れ目があったことを明らかにした。さらに原田ほか(2011、2013a) は群発地震活動の際の GNSS 基線長の変化がわずかに地震活動に先行する場合があることを報告している。

また Yukutake *et al.*, (2011) は 2009 年の群発地震の際の面上に分布した震源の時間変化から、極浅部のクラック内で流体が拡散することで震源が広がっていったと解釈した。2001 年の活動においては、大涌谷の蒸気井が制御不能となるほど地下の水蒸気圧が高まったり、新しい噴気地熱地帯が広がったりしたことなど（辻内ほか、2003）から、地表に近い場所まで熱水あるいはガスなどが上昇してきていることが示唆されている。

これらのことから、地下深部の圧力が増加し、それに

* 気象庁気象研究所 〒 305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

*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

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 46 巻, 1-8, 2014

よって熱水あるいはガスなどの流体が上昇し、そのことによって浅部で微小な地震が多発するという時間的な推移が推測される。

ここで注目したいのが、地殻変動が地震活動に先行するという点である。地下深部の圧力増加と地震活動にタイムラグがあるということは、群発地震活動を含めた火山活動の活発化を事前に予測できる可能性を示している。また、少しでも早い異常の検知は、活動予測に限らず、その後の迅速な防災対応にも有効であろう。

この様に地下深部での動きと捉え、地震活動の予測および防災対応を行う枠組みの例として、伊豆東部火山群の活動が挙げられる。伊豆東部火山群では、地下深部のマグマの浅部への貫入に伴って活発な地震活動が繰り返し発生してきている (Morita *et al.*, 2006)。この地震活動に先行するひずみ計の変化を捉え、その初期段階の変化量からその後の地震活動の推移を予測し、気象庁が地震活動の見通しに関する情報を発表することになっている (地震調査研究推進本部、2010)。

本論では、地下の圧力源による GNSS の基線長変化を早期に検出できる解析法を箱根山周辺の GNSS データに適用し、2013 年の地震活動に先行する地下深部の圧力増加を検出する試みを行った。

2. 方法

本論では東海地震の固着域周辺で発生する前兆すべりや固着域の深部で発生する短期的ゆっくりすべりなどの微小な変化を捉えるために開発された手法の GNSS データへの適用を試みた。宮岡・横田 (2012) は複数のひずみ計のデータをスタッキング (重ね合わせ) することで SN 比を改善し、それまでノイズに埋もれて検出できなかった小さな歪変化を検出する解析手法 (以下、スタッキング法) を開発している。彼らの解析手順を以下に示す。

1. 各観測点のノイズレベルを算出し、各観測点のデータをノイズレベルで規格化する。ノイズレベルは、シグナルのない調査期間の 24 時間階差の標準偏差を用いている。
2. プレート境界に小断層を仮定し、そこですべりが生じた場合の各観測点での変化の極性および量を算出し、全観測点の変化の極性が同一 (例えば伸び方向) となるよう必要な観測点については極性を反転させる。その際、小断層の走向、傾斜はプレート形状から求め、プレートの進行方向と小断層の走向からすべり角を与える。
3. これらの時系列データを重ね合わせる。

図 1 にその概念図を示した。

本論においてこの方法を GNSS データへ適用するにあたり、いくつか解析手順の修正を行った。なお、ここでは国土地理院が公表している GEONET 電子基準点の F3 解を用いて、適当な 2 点間の基線長データを解析対象とした。

上記 1. のノイズレベルについて、階差時間は対象とする現象の継続期間を考慮する必要がある。群発地震期間は数ヶ月に及ぶことを考慮し、ここでは 30 日をその階差時間とし、2012 年 1 月～9 月の期間の標準偏差をノイズレベルとした。今回の解析に用いた基線長データのノイズレベルを表 1 に示した。

また 2. において仮定するソースを、ここでは茂木モデルによる球状圧力源とした。箱根山直下の深部で球状圧力源が膨張するとした場合、箱根山をまたぐ全ての基線長が伸びの変化を示すことから、複数の基線長データを重ね合わせる際に極性の考慮は不要となる。

重ね合わせる基線の選択にあたっては、浅部と深部を対象とした組み合わせを検討した。基線が短い場合には比較的、浅部の変動によく反応し、長い場合には深部の変動によく反応すると考えられることから、長短の基線

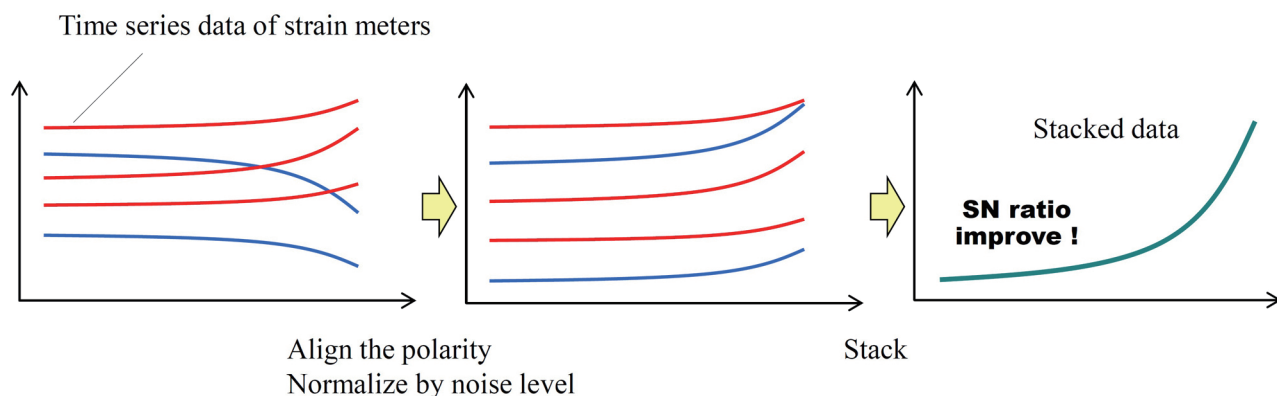


図 1 スタッキング法の概念図。

Fig. 1. Schematic diagram of the stacking method.

を混ぜずに、なるべく同程度の基線の組み合わせを考え
た。またひとつの電子基準点が複数の基線に使われるこ
とを許したが、データの重みが均等になるよう、電子基
準点の採用回数を同一となるようにした。箱根をまたぎ、
かつ短基線を構成できる電子基準点は数が限られるた
め、浅部の圧力源を対象とした組み合わせは1通りのみ
(以下、Short) である。深部を対象とした長基線は多く
の電子基準点の組み合わせを採ることができることから
試行錯誤的に4通りの組み合わせ(以下、Long-1 から
Long-4) を設定した。このような組み合わせを採用する
ことで、各スタッキングデータに現れる変化量の違いか
ら大まかな変動源の深さに関する情報が得られることが
期待される。図2に基線の組み合わせを示す。

3. 結果

まずは、スタッキング解析の効果を確認する。図3に
は例として Short のスタッキングデータとその基となっ
た基線長データおよび最下段には日別地震回数を示し
た。ノイズレベルをおおまかにそろえるため、Short に
ついては振幅を 1/3 にしている。裾野一湯河原、裾野一
小田原など基のデータにも 2013 年 1 月前後の伸びの変
化が見られているほか、一部の基線長データには群発地
震活動が始まる前の 2012 年 12 月頃からのわずかな変
化も見られている。これらをスタッキングしたものが
Short で、そのデータでは 12 月から 2 月にかけての変
化が明瞭になっていることが見て取れる。

図4に Short と各 Long の時系列変化および日別地震
回数を示した。いずれのスタッキングデータにも地震
活動が活発な期間に明瞭な伸びの変化が見られている。
Short では地震活動に約 1 ヶ月先行した 12 月初旬から変
化が始まっており、見方によってはその始まりが 11 月
下旬頃であるかもしれない。一方、各 Long における変
化の始まりは Short のそれより早く、遅くても 11 月に
は伸びの変化が見られていることは明らかで、10 月初
旬にその変化が始まっていた可能性も見て取れる。

4. 考察

上記のような結果を基に、若干の考察を行う。

はじめに、今回、解析に用いた Short と Long-1 ~
Long-4 のソースの深さに対する応答を確認しておく。
図5aには中央火口丘直下の各深さで同じ量の球状圧力
源を仮定した場合の各スタッキングデータの変化量を、
また図5bにはこれを Short に現れる変化量に対する各
Long の変化量の比をそれぞれ示した。図5cには参考の
ために、傾斜計で観測される各深さの圧力源によるの傾

表 1 各基線のノイズレベル。

Table 1. The magnitude of the noise level of each baseline.

Baseline name	(cm)
Susono-Kan'nami	0.198
Susono-Yugawara	0.348
Susono-Odawara	0.304
Susono-Yamakita	0.254
Kan'nami-Yugawara	0.413
Kan'nami-Odawara	0.322
Kan'nami-Ooi	0.266
Kan'nami-Yamakita	0.238
Yugawara-Odawara	0.328
Yugawara-Ooi	0.327
Yugawara-Gotenba	0.329
Odawara-Gotenba	0.325

斜変化を 5km 深における変化量との比で示した。この
計算にあたっては、球状圧力源による各電子基準点の水平
変位を、Okada (1992) を用いて計算し、2章で示し
た方法および組み合わせで変化量の加算を行った。ここ
では深さに対する応答を確認することが目的であるため
体積変化の量は任意で良いが、代田ほか (2009) が示し
た $6.8\text{e}^6 \text{ m}^3$ の値を用いている。スタッキングデータに現
れる変化の絶対量は組み合わせに用いた基線長データの
数で変わる。図5a、図5bでは概して基線長データの
数が多いほど右側にプロットされることとなるが、スタ
ッキングデータの変化の大きさだけでは深さに関する情
報は得られない。圧力源の深さの違いは Short と Long
のスタッキングデータの応答の差に現れる。例えば図5
bにおいて、Long-3 と Short の比 (Long-3/Short) は、深
さ 6km での変動の場合、1.25 程度であるが、深さ 15km
では 1.5 程度と読み取ることができる。この図の中で、
各プロットが右斜め下への傾きをもつことは、それぞれ
の Long のスタッキングデータにおいて、浅部よりも深
部の圧力源への応答が Short より相対的に良いことを示
している。このような特性を持つスタッキング波形は、
仮に変動源の深さが変わらなければ Short および各 Long
の時間的变化は相似形をとるが、変動源が移動もしくは
成長していく場合には上述の様な深さの違いによる応答
の差により相似形にはならないことが期待される。

今回のスタッキング解析(図4)による Long の変化
は 2012 年 10 月頃から現れているのに対し、Short には
11 月下旬もしくは 12 月初旬まで明瞭な変化はない。そ
の後、12 月以降、Short にも明瞭な変化が現れ、2 月中

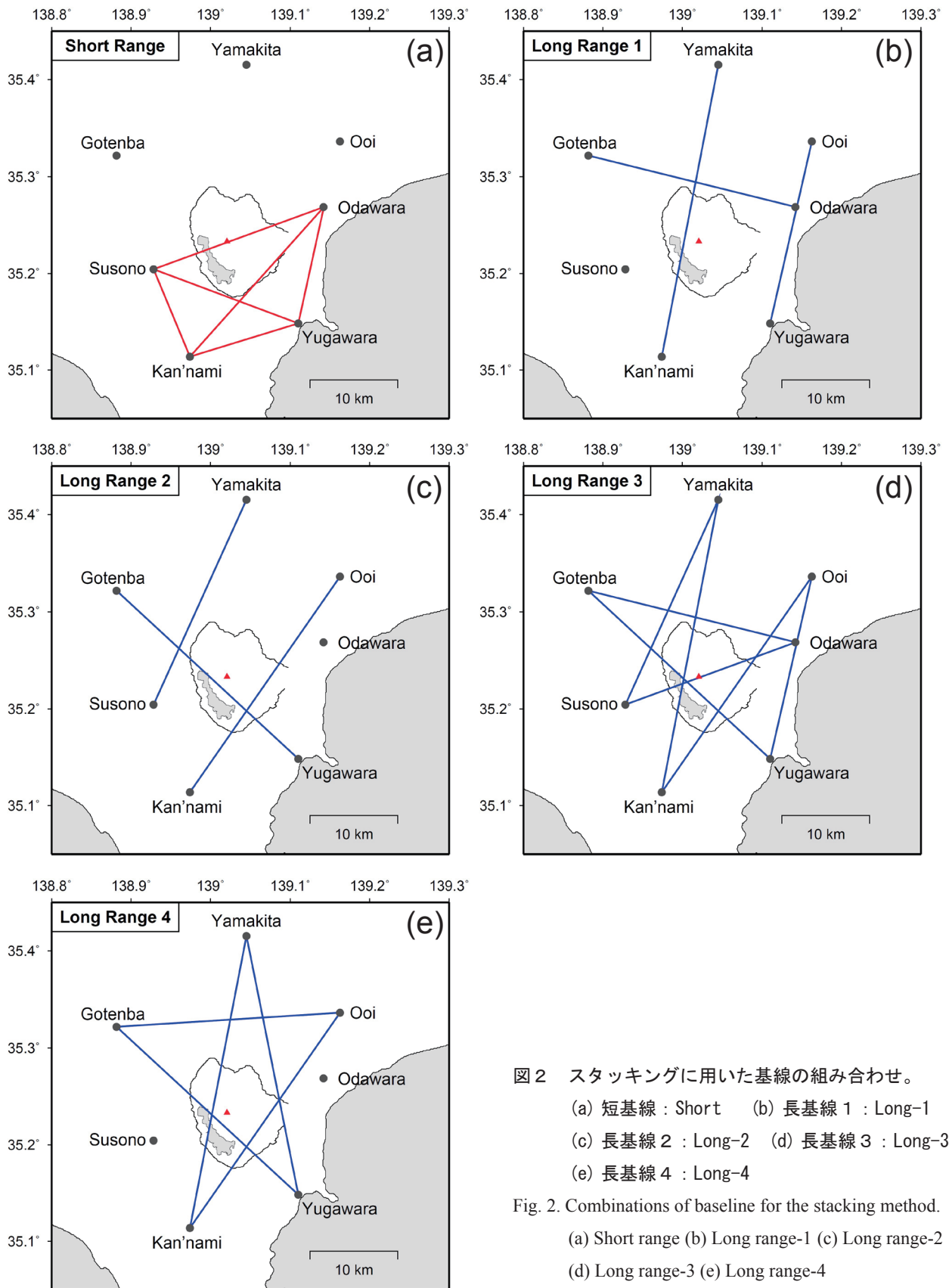


図2 スタッキングに用いた基線の組み合わせ。
 (a) 短基線 : Short (b) 長基線 1 : Long-1
 (c) 長基線 2 : Long-2 (d) 長基線 3 : Long-3
 (e) 長基線 4 : Long-4

Fig. 2. Combinations of baseline for the stacking method.
 (a) Short range (b) Long range-1 (c) Long range-2
 (d) Long range-3 (e) Long range-4

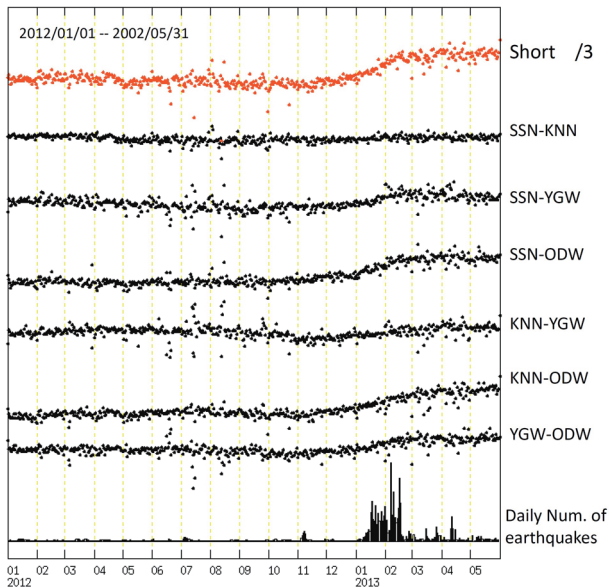


図3 短基線のスタッキングトレース（最上段：振幅は1/3で表示）ともの基線。

Fig. 3. Stacking trace of Short range (top red trace) and original baseline traces (black). The amplitude of top trace was reduced to one third of the original.

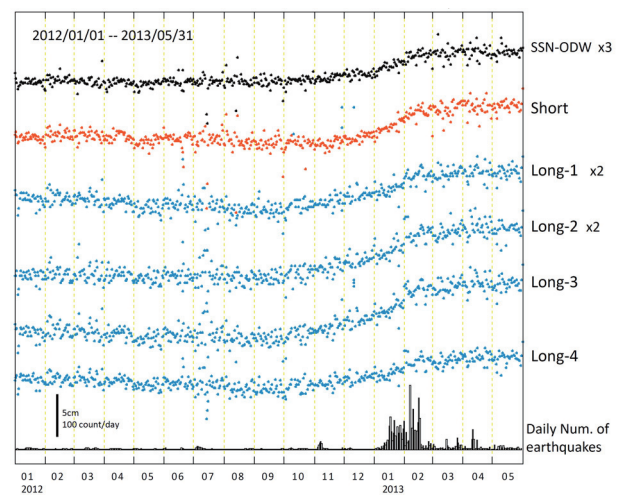


図4 短基線 (Short) と長基線 (Long-1 ~ 4) のスタッキングトレースおよび基の基線の例（裾野－小田原）。最下段は日別地震回数。

Fig. 4. Short range trace (red) and Long range traces (blue) of stacking. The black trace is original baseline for reference. Daily number of earthquakes is also shown in bottom panel.

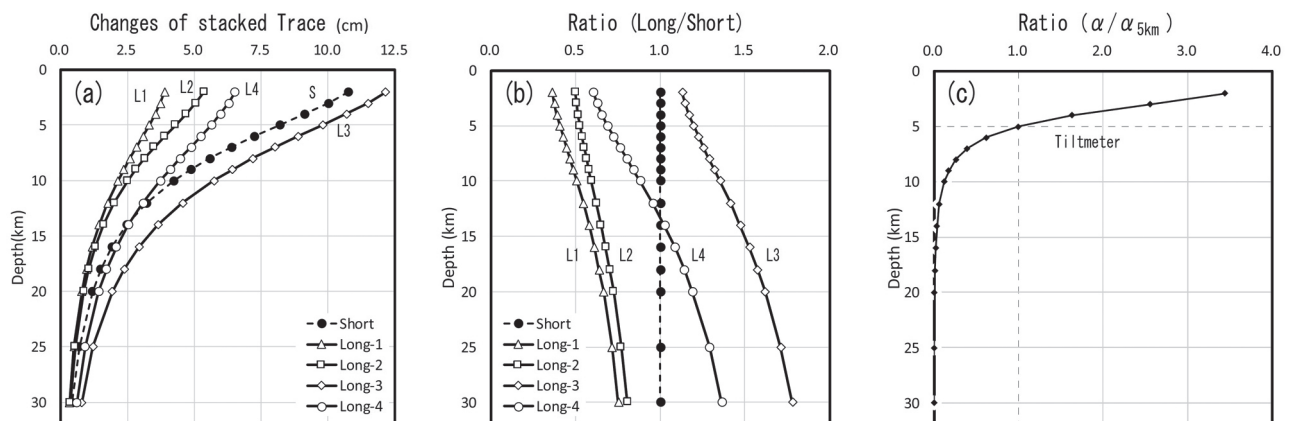


図5 膨張源の深さを変えた場合に計算される各スタッキングトレースの変化量 (a)、短基線に対する長基線の変化量の比 (b) および、傾斜変化量の5kmにおける値との比 (c)。

Fig.5. (a)Expected changes of each stacked trace calculated from a pressure source of various depth, (b) expected ratio of the changes of stacking trace between Long range and Short range and (c)expected ratio of the tilt changes between each source depth and 5km depth.

旬までやや加速的に変化しているように見える。これに対し、Long はそれ以前よりもやや変化速度が上昇したものの、Short ほどの明瞭な変化速度の違いは見られない。このことは、上記の応答の違いを考慮すると、最初に深部での圧力増加によって Long が応答し、その後、浅部での圧力増加によって Short に大きな応答があったことが推測される。今回の結果はマグマ等の溶融体上昇してきている様子を捉えたものと考えている。

東北地方太平洋沖地震に誘発された2011年のものを

除く、過去の群発地震活動（2001年、2006年、2008～2009年）についても同じ解析を試みた。2013年同様、Long と Short の変化の始まりの時間差に着目して見てみる。2001年についても地震活動にやや先行して各スタッキングデータに変化が現れている（図6）。しかし、Long と Short 変化の始まりには大きな時間差は見られない。2006年については2013年ほど明瞭ではないが、Long の変化がやや Short に先行しているように見える（図7）。2008年の活動は散発的で始まりを特定しにく

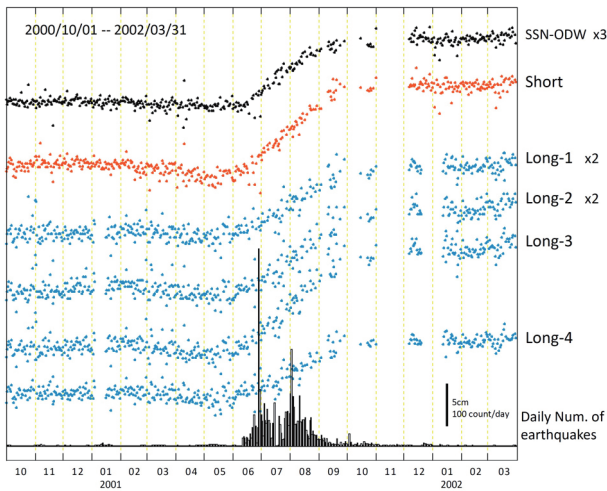


図6 2001年の活動の解析事例。

Fig.6. Case analysis for the 2001 earthquake swarm activity.

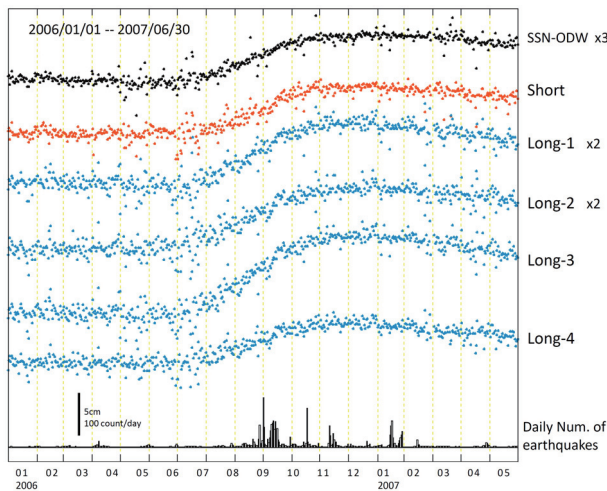


図7 2006年の活動の解析事例。

Fig.7. Case analysis for the 2006 earthquake swarm activity.

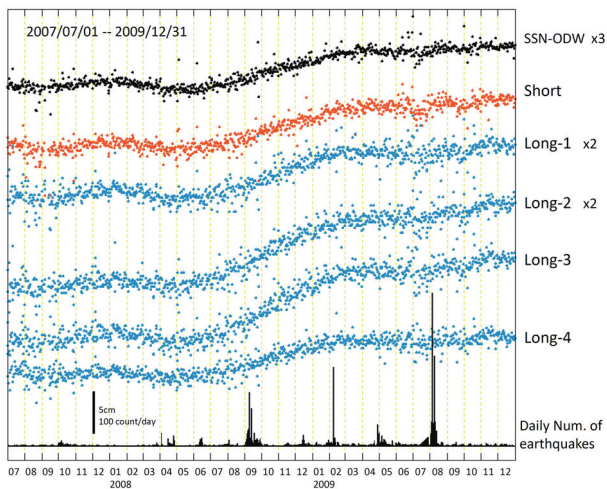


図8 2008～2009年の活動の解析事例。

Fig.8. Case analysis for the 2008-2009 earthquake swarm activity.

く、また2006年の活動以降の下向き（収縮）と上向き（膨張）の周期の長いわずかな変動も見られる中で始まっていることから、LongとShortでの変化の始まりについて言及することは難しい（図8）。

次に深さの推定についても簡単な考察を行う。2001年、2006年、2008年、2013年のそれぞれの活動におけるShortと各Longの変化量の比（Long/Short）を図9に示した。単純なモデルとして相対的に浅い側と深い側の2つのリザーバーを考え、活動毎にその深さは変わらず、それぞれのリザーバーでの体積変化量だけが変わるものと仮定した場合、ここで求めた比は2つのリザーバーの重心の深さに対応すると考えられる。Long/Shortの比が相対的に大きい場合にはソースは深く、比が小さい場合には浅いことを示す。そのように見た場合、いずれのスタッキングデータでも2001年の活動が最も浅く、次いで2013年で、2006年と2008年は前者の2つに比べ深かったという傾向が見て取れる。このことは、2001年の活動の際に新たな噴気地熱地帯が広がるなどの表面現象が現れたことや、極浅部の圧力変化に大きく反応する傾斜計（図5c）で2001年と2013年に変化が観測されたことなどと整合的である。

以上の様に、GNSSデータのスタッキング解析により、圧力増加の時期が深さによって異なることや、圧力源の深さについてのおおまかな情報も得られることがわかった。また、それらの様子は活動期によって異なっていることを示した。原田ほか（2013b）は群発地震活動の様式を震源域や時間変化の違いで分類しており、それによれば2001年、2006年、2013年の活動はES1型、2008年と2009年はES2型に分類されている。今回の解析で、2006年と2013年の活動の際に見られた深部での圧力増加が浅部に先行する様子は2001年には見られないことや、2001年と2013年の活動は2006年や2008年（および2009年）に比べ、圧力源の深さが浅いことなど活動期による違いは見られたが、これらは原田ほか（2013b）の分類とは必ずしも一致していない。このような差異は地震活動と深部圧力源の深さが異なっていることや、圧力増加量の違いなどによる可能性が考えられる。

このように、群発地震を含めた火山活動の活発化の早期検知や火山体深部の状況把握といった観点において、スタッキング解析の有効性が見いだされたものと考えている。そこで温泉地学研究所では火山活動のモニタリングのひとつとして、本手法を用いたシステムを開発し、GNSSデータのスタッキング自動解析を開始した。このモニタリングにより、2012～2013年と同様の活動であれば群発地震活動が始まる数週間前に地下深部での異常

を検知できるものと期待される。ただし、上述の様に群発地震活動の度に 2013 年と同様な時間経過をたどらない場合があることに留意しておく必要がある。

また今回は国土地理院による GEONET の電子基準点のデータのみで解析を行ったが、箱根山周辺には温泉地学研究所が独自に設置した GNSS 観測点もあり、両者の統合処理を行ったデータも蓄積されていることから（道家ほか, 2013）、今後、これらのデータを含めることで SN 比をより向上させることができると考えている。また基線の組み合わせを見直すことでより効果的に変動を検出できるほか、複数のスタッキングデータの変化から変動源の深さの推定が可能になると考えている。なお、今回の深部での挙動の解析は定性的なものにとどまっており、圧力源の深さや量の推定のためには、球状圧力源だけではなく、ごく浅部におけるクラックの開口による変動も併せ、さらに定量的かつ詳細な解析が必要である。

5. まとめ

箱根山の火山活動に伴う地下深部の圧力変化を早期に捉えるため、箱根山周辺に展開されている電子基準点の基線長データのスタッキングによる解析を行った。その結果、2013 年の群発地震活動においては、地震活動に先行する地殻変動の変化がより明瞭になった。また浅部を対象とした短い基線の組み合わせ（Short）と深部を対象とした長い基線の組み合わせ（Long）でその変化を見たところ、Long では Short より 1～2 ヶ月、変化の始まりが早かった。このことは、マグマなどの変動源が深部から浅部への上昇していく様子を捉えたものと考えている。

2001 年や 2006 年の活動についても、地震活動に先行する変動が明瞭に捉えられ、2006 年については 2013 年同様、深部での変動が浅部よりもやや先行する様子が捉えられた。2013 年と同様な活動であれば数週間単位で群発地震に先行する変化を捕捉できる可能性があり、防災対応や観測体制の構築のためのリードタイムが得られるものと期待される。

また、Long と Short の変化量の比から圧力源の深さに関する情報が得られる可能性がある。深さの絶対値は得られていないが、2001 年や 2013 年の活動での圧力源の深さは 2006 年や 2008 年などに比べ相対的に浅いことが示された。

今後は、解析に用いる観測点を増やしたり、スタッキングの基線の組み合わせの最適化を図ったりすることなどで、SN 比のさらなる改善や変動源の深さ推定が可能になることが期待される。

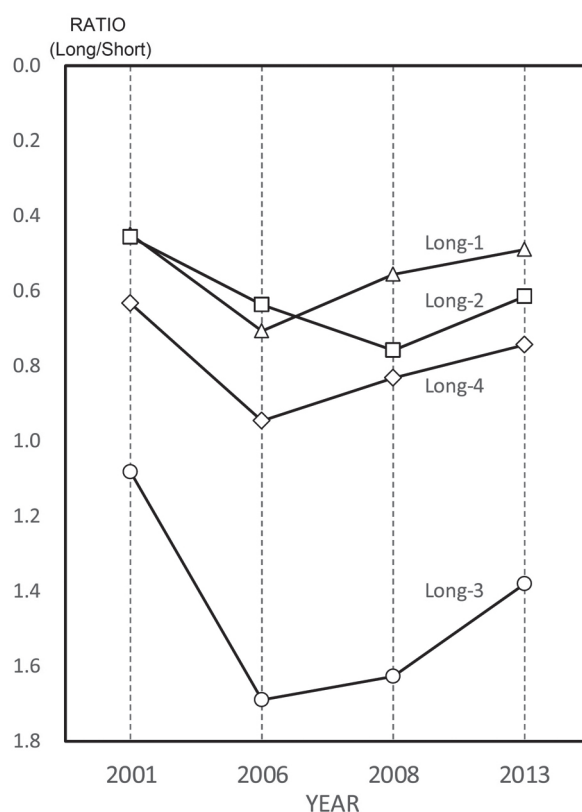


図9 各活動期（2001 年、2006 年、2008 年、2013 年）におけるスタッキングデータ Long と Short の比。

Fig. 9. The ratio between Long stacking changes and Short ones at each swarm activities(2001,2006,2008 and 2013).

謝辞

本解析には、国土地理院が公開している GEONET 観測点データを利用させて頂きました。また 2 人の査読者から本稿をまとめる上での貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 代田 寧・棚田俊收・丹保俊哉・伊東 博・原田昌武・萬年一剛（2009）2001 年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化，火山，**54**, 223-234.
- 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.
- 原田昌武・細野耕司・伊東 博・明田川 保・小林昭夫・本多 亮・行竹洋平・吉田明夫（2011）箱根火山における群発地震活動に先行する地殻の膨張，日本地球惑星科学連合大会，SVC048-P02.

- 原田昌武・明田川 保・伊東 博・本多 亮・行竹洋平・板寺一洋・吉田明夫 (2012) 2011 年東北地方太平洋沖地震によって誘発された箱根火山の群発地震活動, 地震 2, **64**, 135-142.
- 原田昌武・宮岡一樹・行竹洋平・小林昭夫・本多 亮・板寺一洋・伊東 博・明田川 保・吉田明夫 (2013a) 箱根火山における群発地震活動と地殻歪, 日本地球惑星科学連合大会, SVC48-14.
- 原田昌武・行竹洋平・宮岡一樹・本多 亮・板寺一洋・道家涼介・里村幹夫・吉田明夫 (2013b) 箱根火山における群発地震活動の分類, 神奈川県温泉地学研究所報告, **45**, 1-8.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2010) 「伊豆東部の地震活動の予測手法」報告書, http://www.jishin.go.jp/main/yosoku/izu/izu_honpen.pdf.
- 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), 神奈川県温泉地学研究所報告, **45**, 17-28.
- 宮岡一樹・横田 崇 (2012) 地殻変動検出のためのスタンディング手法の開発: 東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用, 地震 2, **65**, 205-218.
- Morita Y., S. Nakao, and Y. Hayashi, (2006) A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **111**, B06208, doi:10.1029/2005JB003860.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 辻内和七郎・鈴木征志・栗屋 徹 (2003) 箱根大涌谷で 2001(平成 13) 年に発生した蒸気井の暴噴事故とその対策, 温地研観測だより, 53, 1-12.
- Yukutake, Y., H. Ito, R. Honda, M. Harada, T. Tanada, and A. Yoshida (2011) Fluid-induced swarm earthquake sequence revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms in the 2009 activity at Hakone volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, **116**, B04308, doi:10.1029/2010JB008036.
- 行竹洋平・本多 亮・原田昌武・里村幹夫 (2013) 箱根火山及びその周辺域の速度構造, 日本地震学会秋季大会 2013, P1-22.