

2015 年箱根火山活動に伴う地震活動と地殻変動の特徴（速報）

原田昌武*・板寺一洋*・本多 亮*・行竹洋平*・道家涼介*

Earthquake swarm activities and crustal movements of the 2015 volcanic event at Hakone Volcano (Rapid results)

by

Masatake HARADA*, Kazuhiro ITADERA*, Ryou HONDA*, Yohei YUKUTAKE* and Ryosuke DOKE*

Abstract

Since April, 2015, the volcanic event has occurred at Hakone volcano. The earthquake swarm activities, crustal movements due to expansion of magma, and a fumarolic activity have occurred in this activity. In this paper, we showed rapid results, especially it is related with earthquake swarm activities and crustal movements. We also attempt extraction of the character of the activity by comparing with that in 2001.

1. はじめに

箱根火山では 2015 年 4 月 26 日頃から地震活動が活発化した。この活動はその後継続・拡大し、山体膨張を示す地殻変動が観測されたほか、5 月 2・3 日頃には、大涌谷において温泉造成用の施設から噴気が勢よく噴出する、いわゆる暴噴現象が発生するなど、噴気異常も確認された。5 月 6 日には、気象庁は箱根火山に噴火警戒レベルを導入した 2009 年以降、初めてレベル 2（火口周辺規制）に引き上げを行っている。その後 6 月に入り、一時的に地震活動や地殻変動の変化は緩やかになったが、6 月 29・30 日にはごく小規模な水蒸気噴火が発生し（写真 1）、6 月 30 日には、噴火警戒レベルは 3（入山規制）とさらに引き上げられた。8 月以降は山体膨張もほぼ停止し、地震活動もやや活発ではあるものの平常時の状態に近づいてきたことから、9 月 11 日に噴火警戒レベルは 2 に、11 月 20 日にはレベル 1 に引き下げられた。

これまで箱根火山では、2001 年や 2006 年、2008 年から 2009 年にかけて、2013 年と数年ごとに比較的規模の大きな火山性の群発地震活動が発生している（原田ほか、2013）。これらの活動のうち、これまでは 2001 年の群発地震活動が最大規模であったが、2015 年の活動では、それを上回る地震活動が観測されているほか、近年発生した上記の活動の際と同様に、地震活動に伴う山体膨張が GNSS 観測で確認されている。さらに、2001 年の活動の際にも大涌谷における暴噴現象が発生しているが（辻内ほか、2003）、2015 年に大涌谷の噴気地帯で明

瞭な噴気異常が確認されたのは、それに続いて 2 回目である。箱根火山で現在のテレメータによる観測が開始されてから最大の活動であった 2001 年の群発地震活動は噴火には至っておらず、2015 年に発生した火山活動、つまり群発地震活動や地殻変動、そしてさらに噴気異常や火山ガスの変化なども含めた総合的な変化は、温泉地学研究所の観測史上、最大の活動となった。

そこで、本研究では 2015 年に発生した火山活動のうち、地震活動と地殻変動の観測結果を速報的に報告する。特に 2001 年の活動と比較することにより、それらの類似点および相違点を整理し、箱根火山活動の特徴を議論する。

なお、解析の時点において（2015 年 10 月 31 日現在）、地震波形の検測処理が終了していない部分があり自動解析結果が含まれているため、より詳細な議論は今後、検討していく予定である。

2. 群発地震活動

2.1. 地震活動

箱根火山における 2015 年の震源分布を図 1(a) に、同様に 2001 年の震源分布を図 2(a) に示す。2015 年の震源域は、駒ヶ岳から大涌谷にかけての中央火口の南北方向で特に活発であり、中央火口丘下での地震の下限は駒ヶ岳の南で 5～6km 程度、大涌谷の北で 3～4km の深さである。これらの特徴は、概ね 2001 年の活動と同じである。全体的な活動域はそれぞれの活動で類似しているが、地域別に見てみると相違点も見られる。2001 年と

* 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 47 巻, 1-10, 2015



写真 1 大涌沢に出現した噴火口（2015 年 6 月 30 日撮影）。

Photo 1. The eruption appeared in Oowakuzawa (June 30, 2015).

比較して 2015 年の活動は、湖尻・芦ノ湖北岸付近、台が岳、金時山の南斜面の領域ではより活発であるように見える。また、中央火口丘周辺の活動も活発である。

2015 年および 2001 年の日別地震数と地震数積算曲線の時間変化を、それぞれ図 1(b)、図 2(b) に示す。これらを比較すると、両活動ともに何度か特に地震数が多い日を繰り返しながら徐々に減衰し、4 ヶ月程度、地震活動は続いている。

また、群発地震活動時の地震の規模別度数分布を図 3 に示す (M-F 図)。この図からマグニチュード (M) 0.1 以上の地震の検知力はほぼ一様であると考えられる。そこで、M0.1 以上の地震のみを使用し、各群発地震の開始 10 日くらい前から 200 日間の地震数積算曲線を比較した (図 4)。これを見ると、今回の活動は 2001 年に比べて群発地震活動の立ち上がりの地震数の伸びが顕著である。また、地震発生数のスピードが速いだけでなく、地震数自体も 2001 年の 2 倍以上であることが明らかである。

表 1 に図 3 から求めた地震活動の統計的な性質を表す b 値の計算結果を示す。マグニチュードの下限を 0.1 とした場合の b 値は、2015 年の活動の場合は 0.84、2001 年の場合は 1.02 となっている。原田ほか(2013)によれば、中央火口丘を中心とした群発地震活動の時は、b 値は

表 1 各群発地震時の b 値。

Table 1. The b values for several cut magnitude for each swarm activity.

群発期間	M $\geq$ 0.1	M $\geq$ 0.3	M $\geq$ 0.5	M $\geq$ 0.8	M $\geq$ 1.0
2001年06月01日～ 2001年11月30日	1.02	1.06	1.12	1.24	1.37
2015年04月01日～ 2015年09月30日	0.84	0.89	0.93	1.00	1.03

1.0 ～ 1.1 程度と報告されているが、2015 年の活動はそれよりも明らかに小さい値となっている。この原因は今のところわからないが、これは湖尻・芦ノ湖北岸を中心とした活動の b 値に近い。そのため、今後は中央火口丘や湖尻・芦ノ湖北岸、金時山周辺などの個々の活動域ごとに b 値の時間変化などを詳細に検討する必要がある。

2. 2. 震源域の時間変化

2015 年の群発地震活動に対して、いくつかの期間に区切った震源分布を図 5 に示す。活動開始直後の 2015 年 4 月 26 日から 5 月 14 日の震源は (図 5a)、大涌谷の浅部で特に活発で、また、大涌谷から駒ヶ岳の深さ 5km 以浅にかけての中央火口丘で地震活動が非常に活発だったことがわかる。5 月 15 日からは中央火口丘での活動もあるものの、湖尻・芦ノ湖北岸地域で非常に活発な状況であった (図 5b)。5 月 26 日からの震源

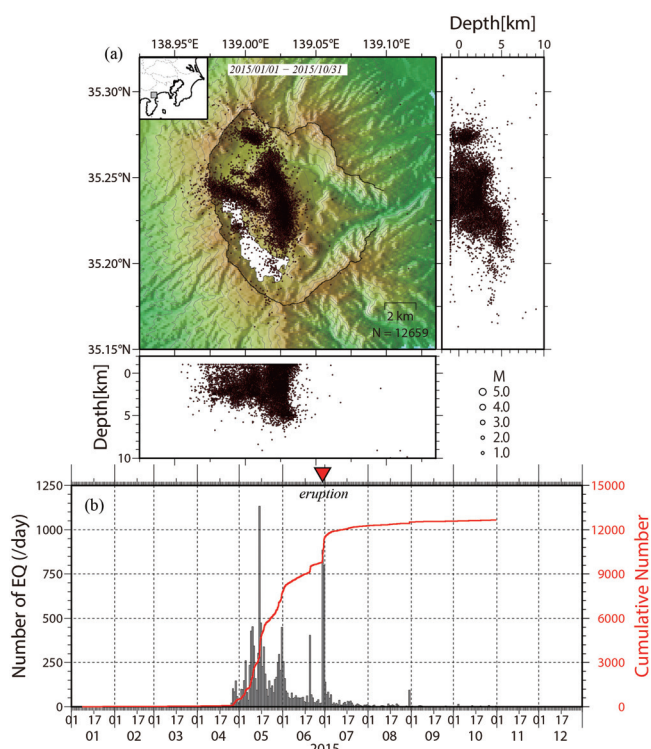


図1 2015年の箱根群発地震活動（2015/01/01～2015/10/31）。(a) 震源分布、(b) 日別の地震発生数と地震数積算回数。

Fig. 1. Earthquake swarm activity in 2015 (January 1 through October 31, 2015). (a) Epicentral map and cross sections of hypocenters in the north-south and the east-west directions. (b) Daily number and cumulative number of earthquakes.

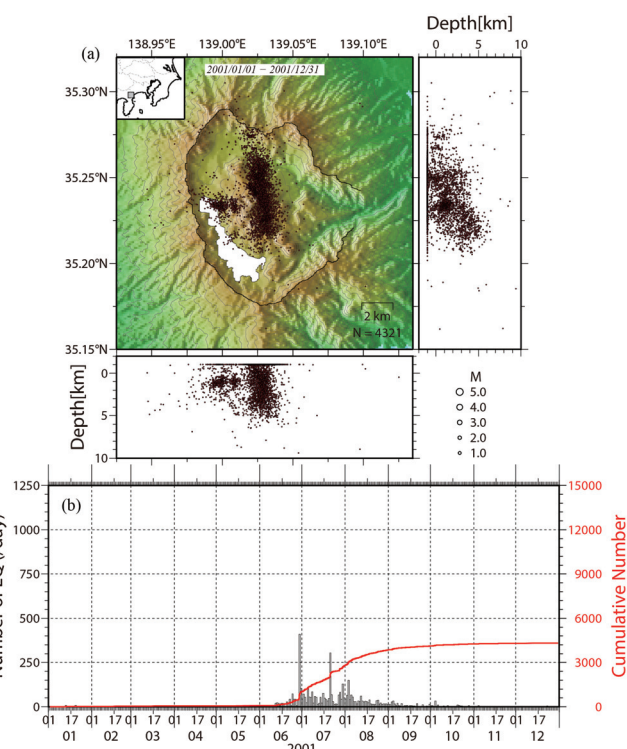


図2 2001年の箱根群発地震活動（2001/01/01～2001/12/31）。(a) 震源分布、(b) 日別の地震発生数と地震数積算回数。

Fig. 2. Earthquake swarm activity in 2001 (January 1 through December 31, 2001). (a) Epicentral map and cross sections of hypocenters in the north-south and the east-west directions. (b) Daily number and cumulative number of earthquakes.

は、カルデラ内北部の金時山周辺や台ヶ岳周辺で活発であり（図5c）、その後は、それまでに比べて比較的地震数は少ない状況で推移しているものの、台ヶ岳周辺のクラスターと駒ヶ岳付近で地震活動が継続している（図5d）。

このような状況であった中で、6月29-30日頃に大涌谷でごく小規模な噴火が発生した。その時の震源は大涌谷のごく浅部に集中しているとともに、神山から駒ヶ岳の深さ5km以浅でも地震活動は活発化している（図5e）。7月2日以降はそれまでに比べて地震活動も低調になり、震源は台ヶ岳周辺や神山から駒ヶ岳にかけての中央火口丘と、仙石原に小規模なクラスターが見られる程度である（図5f）。

このように、2015年の群発地震活動は時間経過とともに、活動域を変えていったとみられる。では、2001年の活動の際はどうだったのであろうか。図5と同様に、

2001年の群発地震活動について、大きく3つの期間に分けた震源分布を図6に示す。

2001年の活動は、地震数が増え始めた6月12日から7月26日にかけての震源域は大涌谷のごく浅部から駒ヶ岳の深さ5km以浅で活発であった（図6a）。7月27日から8月10日にかけては、中央火口丘での活動よりも、むしろ湖尻・芦ノ湖北岸地域で非常に活発な状況であった（図6b）。その後、8月11日からは地震活動は低調になり、再び大涌谷から駒ヶ岳の中央火口丘を震源とする地震活動が観測され（図6c）、噴火することなく活動は終息していった。

2015年と2001年の群発地震活動を見ると、両者ともに大涌谷から駒ヶ岳の中央火口丘を中心とした活発な活動が始まり、その後、湖尻・芦ノ湖北岸地域に活動域を移動させている。2015年の場合は、金時山周辺や台ヶ岳周辺、駒ヶ岳と活動域を移したのちにごく小規模な噴

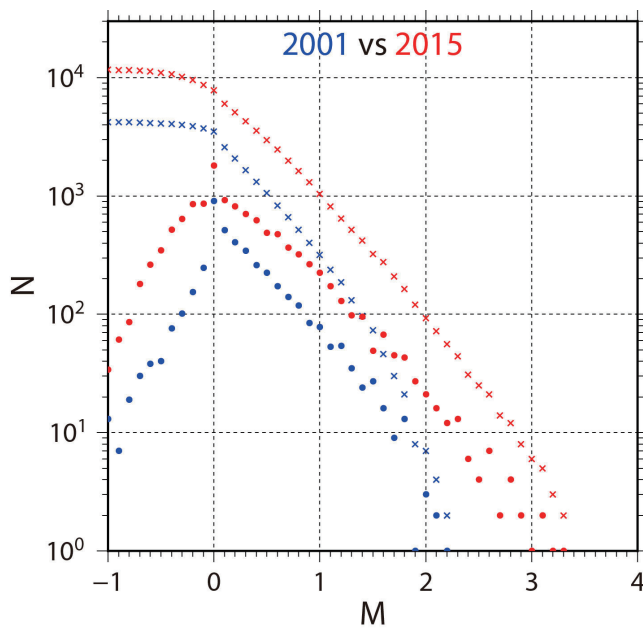


図3 2015年と2001年の群発地震時のマグニチュード別地震数(●)と積算数(×)。赤および青は、それぞれ2015年(04/01～09/30)、2001年(06/01～11/30)の活動。

Fig. 3. Magnitude-Frequency distribution of earthquakes for 2015 and 2001 swarm activities. Crosses and circles represent cumulative number and number of earthquakes at each magnitude of the range 0.1, respectively.

火に発展した。噴火後は台ヶ岳周辺などでクラスターの活動が見られるものの、中央火口丘周辺で比較的低調な地震活動が1ヶ月以上続いていることに関しては、2001年の際にも同様の傾向が見られる。

3. 地殻変動

3.1. 各基線長の時間変化

2001年以降に箱根火山で発生した比較的大きな群発地震活動の際には、深さ7～10kmに推定されているマグマの膨張・活発化に伴う山体膨張がGPSで観測されている(原田ほか, 2010; 板寺ほか, 2013)。図7には温泉地学研究所のGPS観測点を、また、最近3年間に観測された基線長変化を図8に示す。解析にはBernese5.0を使用し(道家ほか, 2013)、真鶴観測点を基点とした基線長変化である。

図8を見ると、年周変化が見られる観測点もあるものの、2015年の箱根火山活動に伴い、小山、南足柄、開成観測点と真鶴観測点を結ぶ基線長には、約1～

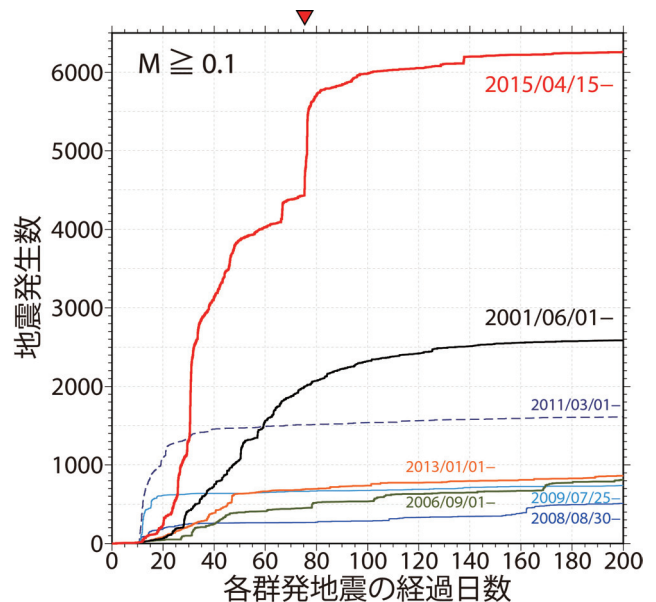


図4 各群発地震の立ち上がり200日間の地震数積算曲線 ($M \geq 0.1$)。

Fig. 4. Cumulative number of earthquakes ($M \geq 0.1$) during the first 200 days for each earthquake swarm activity.

2cm程度の伸びの変化が見られる。それらの変化は、深部マグマの変動による山体膨張を反映し、地震活動が活発化する前の4月上旬くらいから変化している。このように比較的大きな群発地震活動に先行する山体膨張は、これまでも観測されており(原田ほか, 2011; 宮岡ほか, 2013)、2015の活動も同様の特徴があったと考えられる。

3.2. 基線長のスタッキングによる変化

このように各基線長の変化は微小であり、特に地震活動が活発化する前の山体膨張をリアルタイムで検出することは多少困難がある。そこで宮岡ほか(2014)は、箱根火山周辺のいくつかの基線長をスタッキングすることによって変化量が増幅(S/N比が向上)し、微小な変化を早期に検出することができることを明らかにした。そのGPS基線長のスタッキング手法を、2015年および2001年の箱根火山活動に対して適用して計算した結果を図9(a)に示す。これらの計算には、国土地理院によ

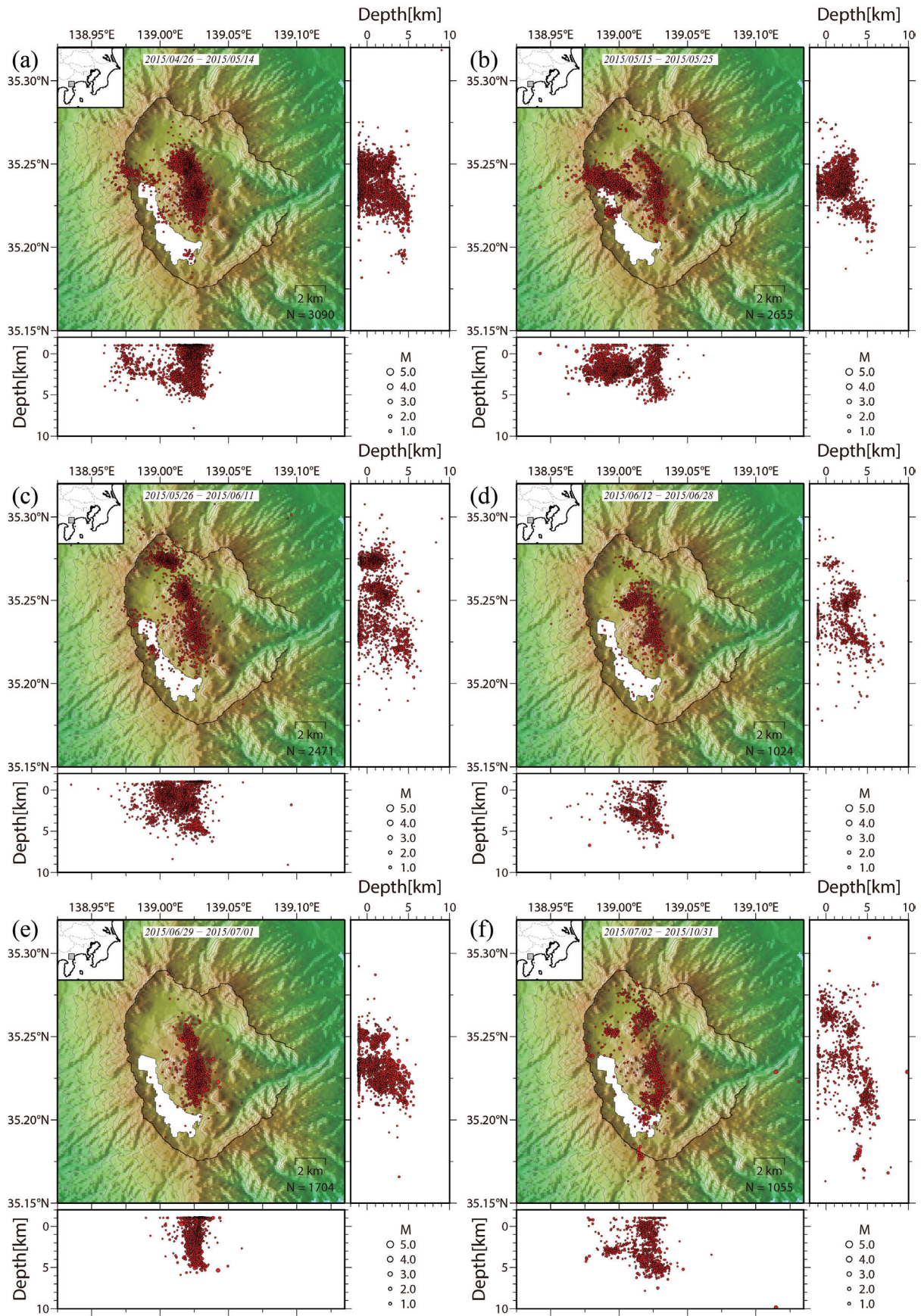


図5 2015年に箱根火山で発生した期間別の地震活動。(a) 04/26 - 05/14、(b) 05/15 - 05/25、(c) 05/26 - 06/11、(d) 06/12 - 06/28、(e) 06/29 - 07/01、(f) 07/02 - 10/31の期間を示す。

Fig. 5. The snapshot of seismicity (2015). Periods are (a) 04/26 – 05/14, (b) 05/15 – 05/25, (c) 05/26 – 06/11, (d) 06/12 – 06/28, (e) 06/29 – 07/01 and (f) 07/02 – 10/31.

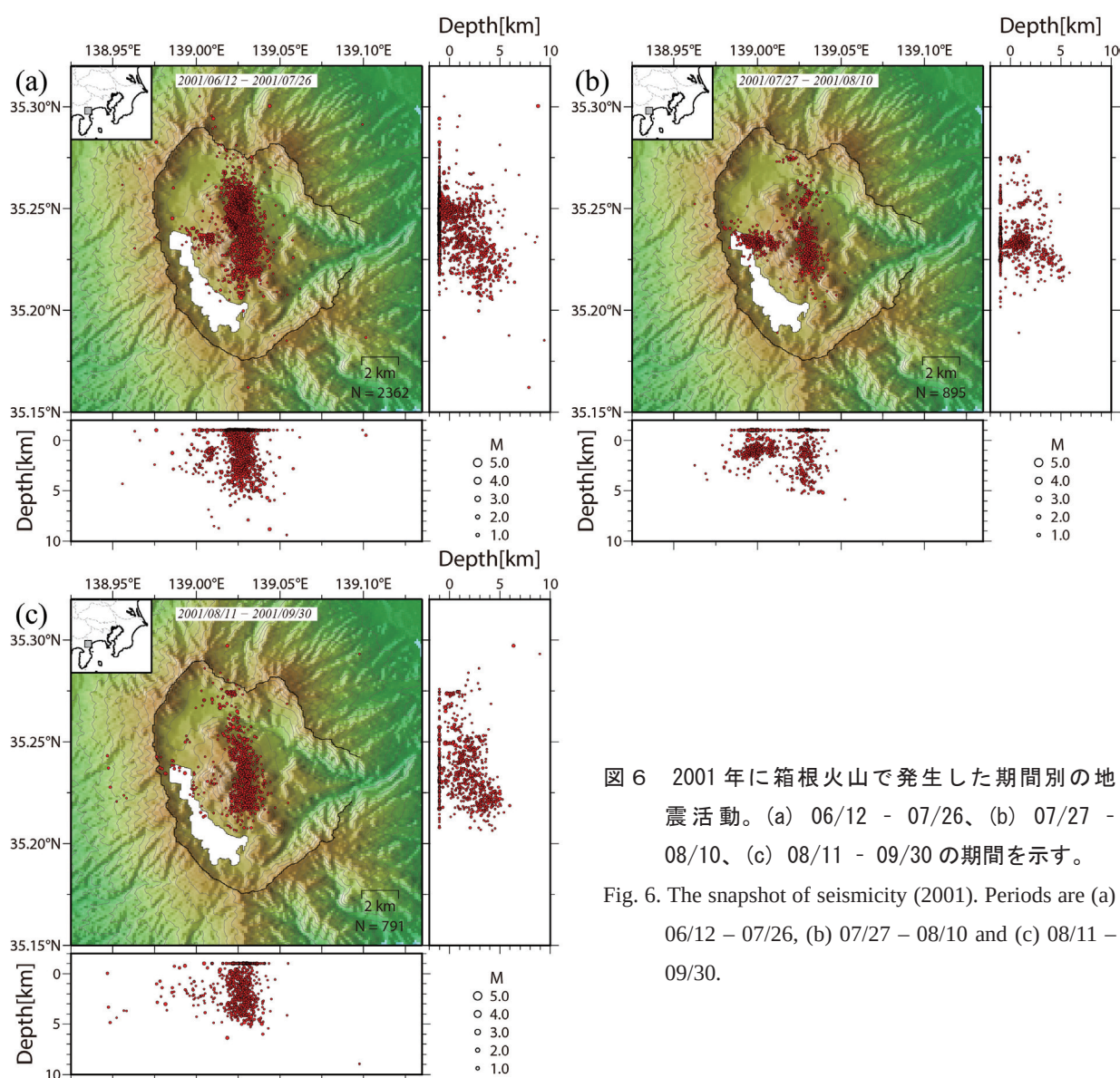


図6 2001年に箱根火山で発生した期間別の地震活動。(a) 06/12 - 07/26、(b) 07/27 - 08/10、(c) 08/11 - 09/30の期間を示す。

Fig. 6. The snapshot of seismicity (2001). Periods are (a) 06/12 - 07/26, (b) 07/27 - 08/10 and (c) 08/11 - 09/30.

る GNSS 観測データを使用している。

図9の(a)と(c)は2015年1月1日からのスタッキング波形および日別地震数を示しているが、これらを見ると群発地震活動に先行する基線長の伸びが明瞭に検出できる。その変化は4月上旬から始まっており、およそ20日程度のリードタイムがあると考えられる。ただし、スタッキングによって微小な変化がより検出しやすくなるが、リアルタイムでノイズレベルを超える伸張への変化点を客観的に判断することは困難であることにも注意が必要である。

同図には、2001年3月11日から1年間のスタッキング波形についても、2015年の場合と縦軸・横軸ともに同一のスケールで重ねて表示している。このようにしてGPSによる基線長のスタッキング波形を見ると、若干

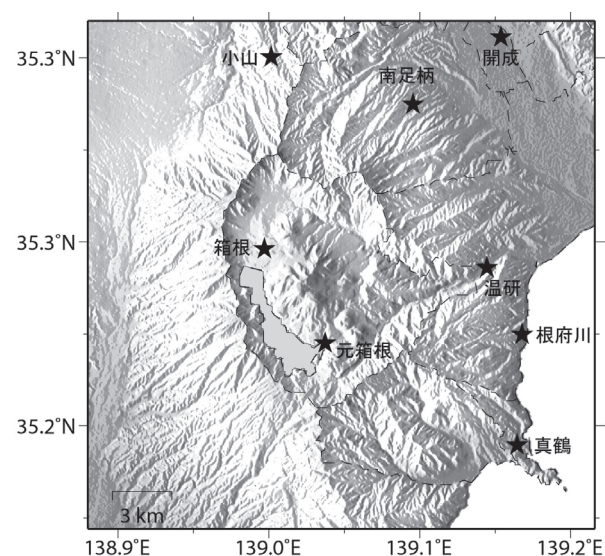


図7 温泉地学研究所のGPS観測点。

Fig. 7. GPS observation sites operated by Hot Springs research institute.

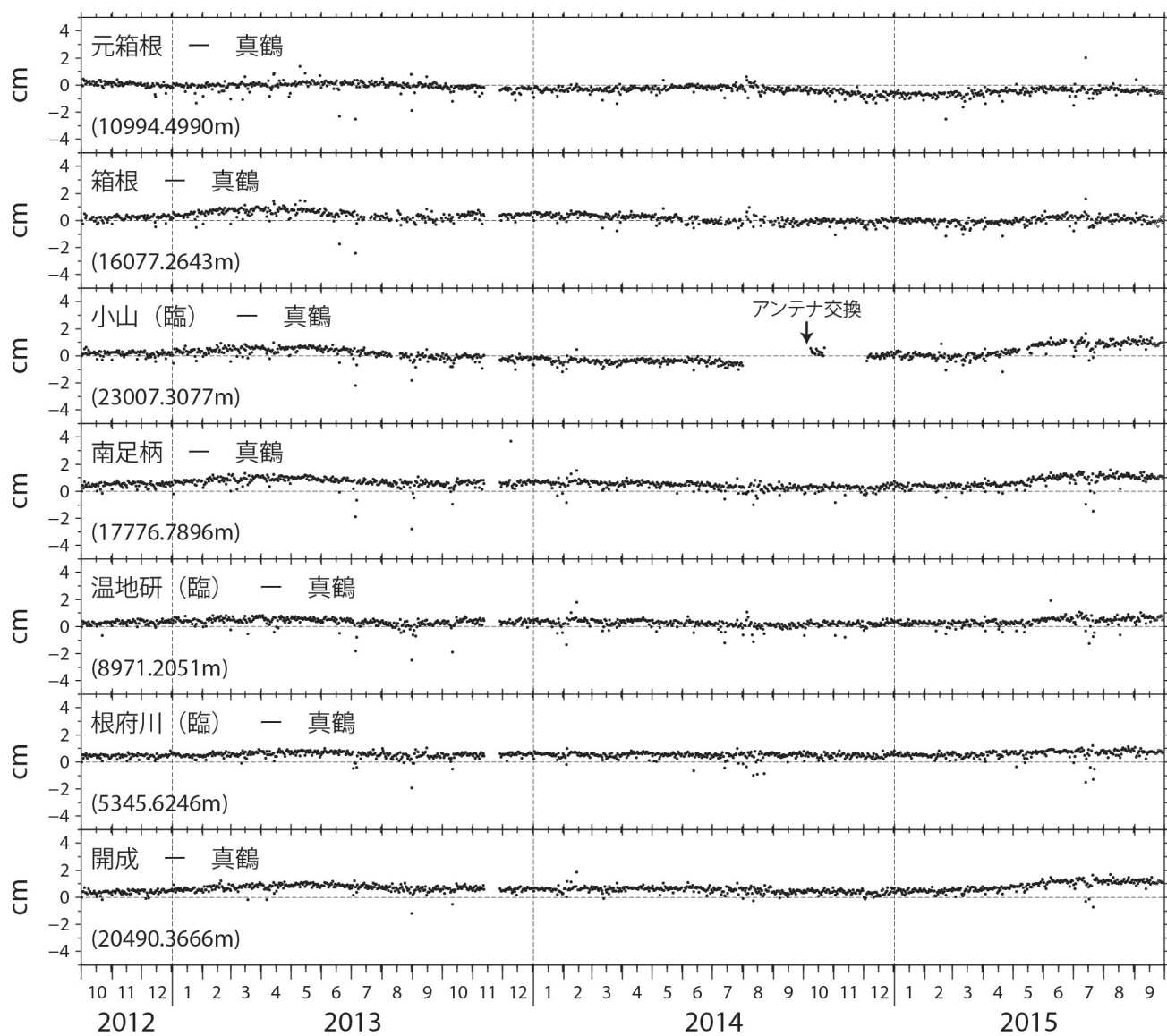


図8 GPSによる基線長変化 (2012/10/01 ~ 2015/09/30)

Fig. 8. Time variation of baseline lengths obtained by GPS in the period from October 1, 2012 to September 30, 2015.

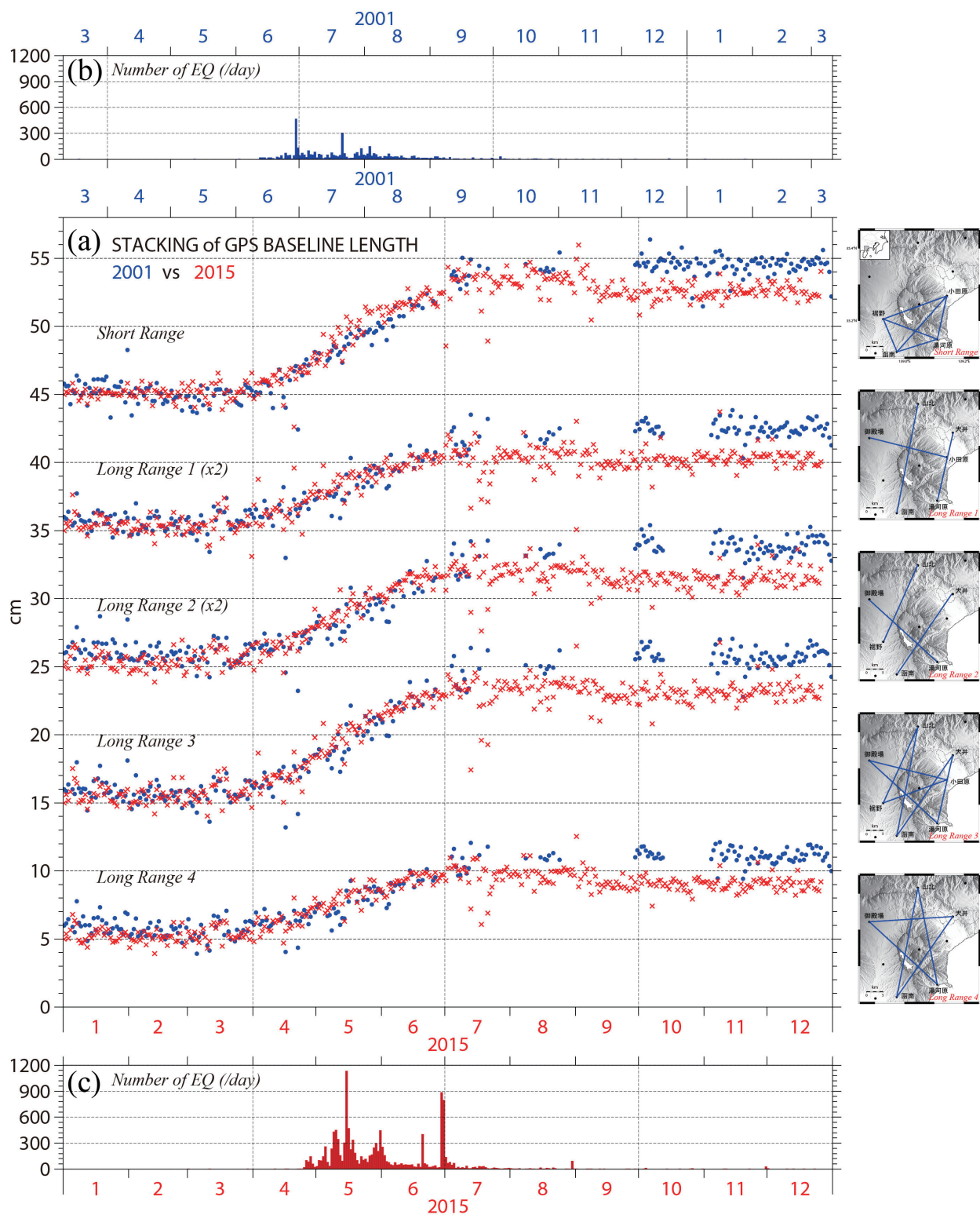


図9 (a) GPS 基線長のスタッキングによる変化。×印、○印は、それぞれ2015年(2015/01/01～10/15)および2001年(2001/03/11～2002/03/10)の変化を示す。(b) 2001年、および(c) 2015年の日別地震数。右側の地図は、それぞれのスタッキング計算に用いた基線長の組み合わせを示す。

Fig. 9. (a) Time variation of stacked baseline lengths. Crosses and circles indicate the 2015 and 2001, respectively. Daily number of earthquakes at (b) 2001 and (c) 2015. The insert map shows network for stacking calculation.

の差異はあるものの、変化のスピードや伸びの期間などがよく一致している。ただし、活動前後の最終的な変化量については、2015 年の伸張量は 2001 年の時に比べてややいくぶん小さいと考えられる。また、2015 年の場合は伸びが停止したのちに若干の縮みに転じているように見えるが、これについては今後さらに検討していきたい。

4. まとめ

箱根火山では 2015 年 4 月上旬から深部マグマの活動に起因する山体膨張が GPS などの地殻変動観測によって捉えられ、4 月下旬には地震活動が活発化した。5 月上旬には大涌谷において噴気異常が確認され、6 月 29、30 日にはごく小規模な水蒸気噴火が発生に至った。その後も噴気活動は継続しているものの、地殻変動や地震活動は 8 月頃には低下している。

これまで箱根火山での最大規模の火山活動は 2001 年に発生しているが、2015 年に発生している活動はそれと同等ないしはそれ以上の変化やイベントが観測されている。2015 年と 2001 年の火山活動について、地震活動と GPS による地殻変動の観測結果を比較し、2015 年の活動の特徴をまとめると以下の通りである。

類似点；

- ・地震活動の震源域は、2015 年と 2001 年ともに中央火口丘の南北方向で活発で、震源の深さは北側の大涌谷で浅く、南側の駒ヶ岳でやや深い。その他、湖尻・芦ノ湖北岸地域や金時山周辺での地震活動もあり、概ね同様の震源域である。
- ・震源域は時間とともにその中心域を移動させる傾向がある。その変化は 2015 年も 2001 年の活動もおおよそ同じで、大涌谷から駒ヶ岳にかけての中央火口丘で活発化したのち湖尻・芦ノ湖北岸地域にその中心域を移し、(2015 年の場合は、金時山周辺や台ヶ岳周辺、駒ヶ岳で活発になり、) 震源域は再び中央火口丘周辺に戻っている。終盤の中央火口丘での地震活動は比較的低調であるものの、1 ヶ月以上継続している。
- ・GPS 観測データによる基線長をスタッキングした結果、2015 年の火山活動に伴う伸びのスピードや継続期間は、2001 年と非常に良く一致している。

相違点；

- ・2015 年の活動は 2001 年に比べて、群発地震活動初期の地震発生数の増加スピードが速く、積算地震数も 2001 年の 2 倍以上である。

- ・2015 年と 2001 年の活動について、マグニチュードの下限を 0.1 とした場合の b 値は、それぞれ 0.84 および 1.02 であり、有意に異なる。
- ・GPS 観測データをスタッキングした結果では、火山活動に伴う変化量が 2001 年の時に比べて 2015 年の活動の方がやや小さい。

これらの観測結果の中には、箱根における火山活動を理解する上でキーポイントになるものもあるかもしれない。しかしながら、本論執筆時点で 2015 年の火山活動(主に大涌谷での噴気活動)は継続しており速報的な結果であるため、それぞれについて今後さらに精査する必要がある。

謝辞

地震データの検出処理には、温泉地学研究所の柴田美奈子氏、手操佳子氏にご協力いただきました。本研究で使用した神奈川県温泉地学研究所の地震カタログでは、当所の地震観測網の他に、周辺の(独)防災科学技術研究所および東京大学地震研究所、気象庁の地震観測データも使用して検出し作成しています。また、国土地理院による GNSS 観測データを使用しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 道家涼介・原田昌武・宮岡一樹・里村幹夫(2013) 神奈川県を中心とした Bernese による GPS 統合解析表示システムの構築, 温地研報告, 45, 63-70.
- 原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫(2010) 富士山周辺及び箱根カルデラの膨張歪と低周波地震活動, 火山, 55, 193-199.
- 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・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(2013) 箱根火山における群発地震活動の分類, 温地研報告, 45, 1-8.
- 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), 温地研報告, 45, 17-28.
- 宮岡一樹・原田昌武・道家涼介(2014) スタッキング法を用いた GNSS 地殻変動監視, 温地研報告, 46, 1-8.

宮岡一樹・原田昌武・道家涼介（2013）箱根火山群発活動に先行する GPS 変化の検出，日本地震学会秋季大会，P2-09.

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，温泉地研観測だより，53, 1-12.