

# 箱根火山における群発地震活動の分類

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\*<sup>2</sup>

The classification of earthquake swarm activities in Hakone volcano

by

Masatake HARADA\*, Yohei YUKUTAKE\*, Kazuki MIYAOKA\*, Ryou HONDA\*,  
Kazuhiro ITADERA\*, Ryosuke DOKE\*, Mikio SATOMURA\* and Akio YOSHIDA\*<sup>2</sup>

## Abstract

Since 2001, earthquake swarm activities have been observed six times in Hakone volcano; ie in 2001, 2006, 2008, 2009, 2011 and 2013. These swarm activities, except for the one in 2011, were accompanied by crustal deformations that were detected by the GPS observation. Investigating spatial and temporal characteristics of each earthquake swarm activity as well as its statistical feature, we found that earthquake swarm activity can be classified into three types. The ES1 type is the one observed in 2001, 2006 and 2013, where earthquakes occurred mainly beneath central cones and the activity lasted for rather a long period. The ES2 type whose seismic activity is mostly confined in the northern part of Lake Ashi and lasts only in a short period was observed in 2008 and 2009. The swarm activity in 2011, which was remotely triggered, is classified as the RT type. The classification is considered to be helpful in evaluating and forecasting volcanic activity in Hakone.

## 1. はじめに

温泉地学研究所では箱根火山とその周辺において、1968年から地震観測を実施している。箱根カルデラ内では、2001年6～10月に発生した近年では最大級の群発地震活動の後、2006年、2008年、2009年、2011年、2013年と、短い間隔で比較的規模の大きな群発地震活動が相次いで発生している。2013年の群発地震活動については、板寺ほか(2013)を参照されたい。温泉地学研究所の地震カタログに基づく、1995年4月1日以降の箱根火山における群発地震活動の震源域および時間変化を図1に示す。この中で、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(M9.0)の直後から群発地震が始まっており、その活動形態や時間的推移の様子から、M9.0の地震によって誘発されたと考えられることが明らかとなっている(Yukutake *et al.*, 2011; 原田ほか, 2012; Yukutake *et al.*, 2013)。このことから、2011年の活動はいわゆる火山性ではない群発地震活動とみなすことができる。

一方、2011年の活動を除く5回の群発地震活動では、GPSによって山体膨張が観測されており、火山性の群

発地震であることは明らかである。この山体膨張は箱根火山深部の圧力源に起因すると推定されるが、その膨張は浅部での群発地震活動よりも先行して生じたことが示されており(原田ほか, 2011, 2013; 宮岡ほか, 2013)、箱根火山の地震・地殻活動について相互の時間的な推移の特徴が明らかとなってきた。

このように我々は箱根火山において6回の群発地震活動を経験し、それらに共通する地殻変動と群発地震活動のメカニズムについて明らかにしつつある。そこで本報告では、2001年以降に箱根火山で発生したこれらの群発地震活動について、震源域や統計的な特徴を比較し、それらの間での差異を検討したのでその結果を報告する。

なお、図1(c)の地震数積算曲線を見ると、2008年から2009年にかけては一連の活動のようにも見え、また、山体膨張を示す膨張歪もこの期間を通じて連続している(原田ほか, 2010)。しかし、明瞭なクラスターが2008年9月と2009年8月にあるため、本論では別々の群発地震活動として扱うこととする。

\* 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

\*2 静岡大学防災総合センター 〒422-8017 静岡県静岡市駿河区大谷 836

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第45巻, 1-8, 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。)

## 2. 群発地震活動の特徴比較

### 2.1. 震源域

2001年以降に発生した6回の群発地震活動の震源分布を図2から図7の各図(a)に示す。これらは、群発地震活動開始の数日前から6ヶ月間の震源分布であり、地震活動の時間変化を示したそれぞれの図の(b)、(c)の期間と一致する。これらの震源分布を見ると、2001年(図2)と2006年(図3)、2013年(図7)の群発地震活動では、駒ヶ岳から大涌谷にかけての中央火口丘直下に地震が集中していたことがわかる。また南北断面より、震源の深さの下限は駒ヶ岳の南斜面付近で5~6kmであり、北に行くにつれて浅く、大涌谷では下限が2~4kmとなる。震源分布がこのような特徴を持つ群発地震活動を、ここではES1型(Earthquake Swarmの略)と呼ぶことにする。

一方、2008年(図4)と2009年(図5)の群発地震活動では、ES1型と異なって、中央火口丘直下の地震は

少なく、活動の中心は芦ノ湖北部から湖尻にかけての地域であった。東西断面を見ると、震源の深さの下限は2~3kmである。2008年と2009年に共通するこのようなタイプの群発地震活動を、ここではES2型と呼ぶことにする。なお、2008年の活動では駒ヶ岳直下にも震源が見られるが、これは2009年2月の地震活動であり、群発活動が始まった2008年9月には芦ノ湖北部で地震が発生している。地震数(図4b)を見てもこの開始時が活動の中心であったことは明らかである。

以上のタイプと異なって、2011年の群発地震活動の震源域は広範囲にわたっており、2001年や2006年、2008年、2009年、2013年の群発地震時の活動域全体が活動したように見える(図6)。この広域的な活動をここではRT型(Remotely Triggered earthquakesの略)と呼ぶことにする。

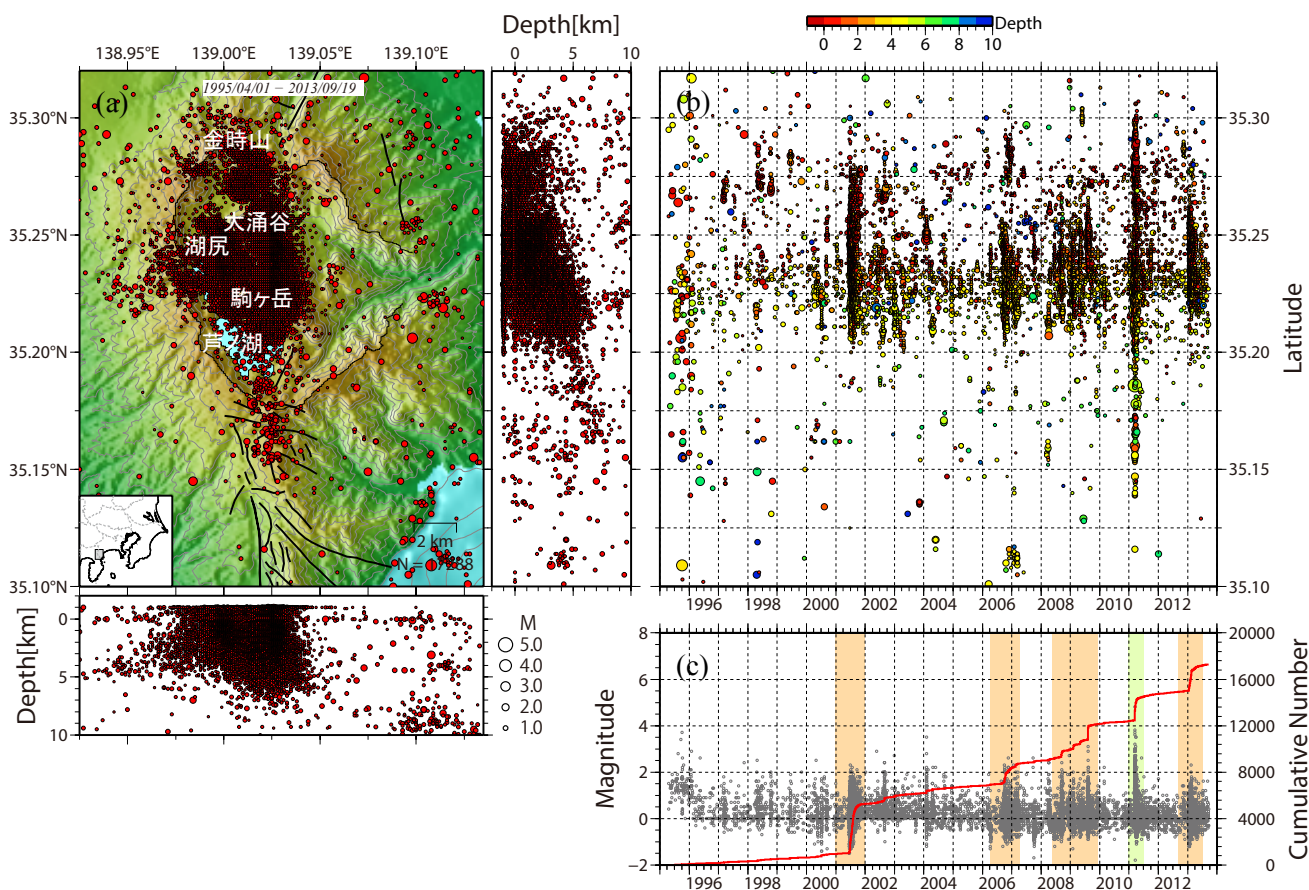


図1 箱根火山における地震の(a)震源分布、(b)時空間変化、(c)M-Tダイアグラムおよび地震数積算回数(1995/04/01-2013/09/19)。(b)の縦軸は緯度を示す。(c)のハッチを付けた部分は規模の大きな群発地震活動。

Fig. 1. Seismic activities in and around Hakone volcano in the period from April 1, 1995 to September 19, 2013. (a) Epicentral map, cross sections of hypocenters in the north-south and east-west directions. (b) Space-time distribution of earthquakes. (c) Magnitude-Time diagram and cumulative number of earthquakes. Hypocentral data were taken from the catalogue of the Hot Springs Research Institute.

## 2.2. 時間変化

群発地震活動開始から6ヶ月間の日別地震数と地震数積算曲線、深さとマグニチュードの時間変化を図2から図7の各図(b),(c)に示す。これらの図から、ES2型(2008年と2009年の群発地震活動)は短期間に集中した地震活動であるのに対し、ES1型(2001年と2006年、2013年の群発地震活動)は比較的長期にわたって継続的に発生し、バースト的な活動を繰り返していることがわかる。

本研究で調査対象とした6回の群発地震活動の地震

の規模別度数分布を図8に示す(M-F図)。この図や図1(c)(M-T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みなすことができる。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100日間の地震数積算曲線を比較した(図9)。これを見ると、ES1型とES2型の地震活動の推移の違いは明瞭である。すなわち、ES1型は立ち上がりから1ヶ月以上一定の地震発生レートを継続しているのに対し、ES2型は活動開始から10日間程度急激

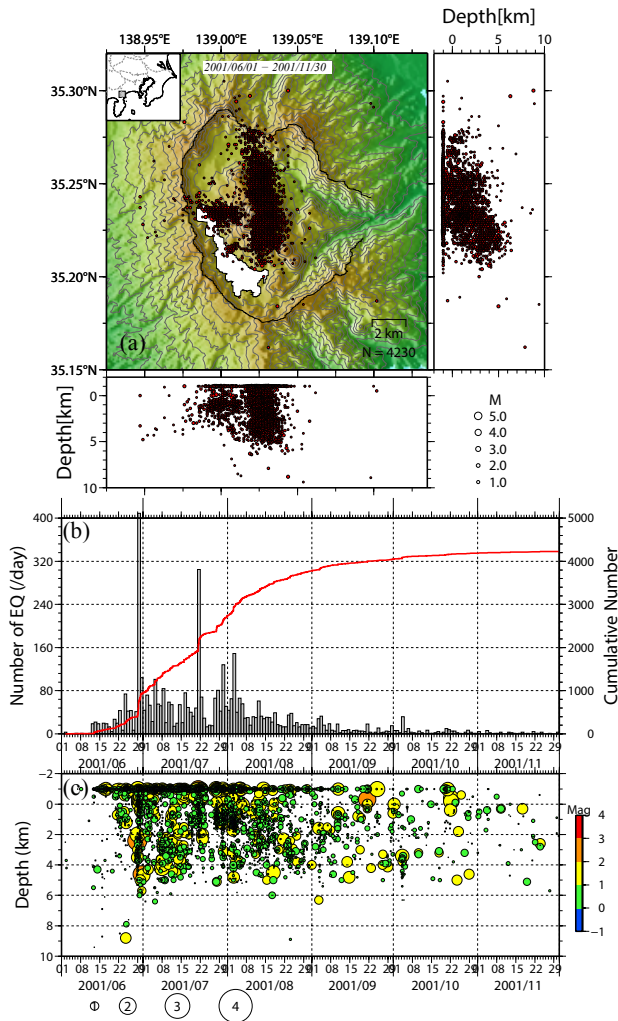


図2 2001年の箱根群発地震活動(2001年6月1日～2001年11月30日)。(a)震源分布、(b)日別の地震発生数と地震数積算回数、(c)深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 2. Earthquake swarm activity in 2001 (June 1 through November 30, 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. (c) Temporal change in the focal depth and magnitude.

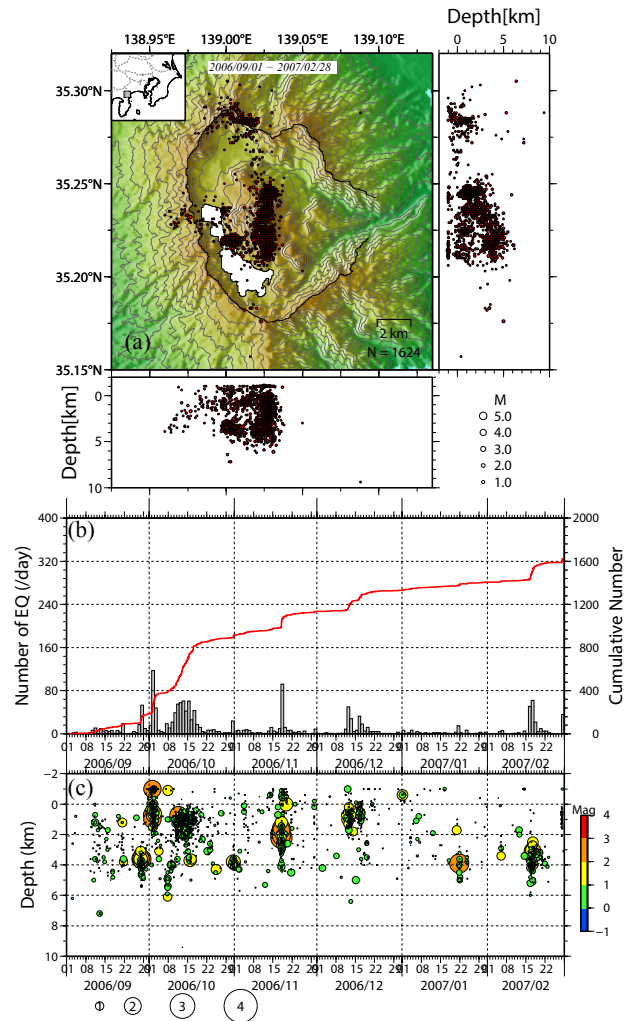


図3 2006年の箱根群発地震活動(2006年9月1日～2007年2月28日)。(a)震源分布、(b)日別の地震発生数と地震数積算回数、(c)深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 3. Earthquake swarm activity in 2006 (September 1, 2006 through February 28, 2007). Each map is the same as that in Fig.2.

に増加するが、その後の地震発生レートは相対的に著しく緩やかとなる。

2011年の群発地震活動（RT型）については、図6(b)や図9から分かるように、本震－余震型の地震活動と非常に良く似ている。この活動の地震発生数は、べき乗で減少していることが明らかとなっている（原田ほか，2012）。

### 3. 群発地震活動の統計的性質

図8には群発地震活動時の地震の規模別度数分布に加えて、Mの下限を変えた時の**b**値も合わせてグラフにしている。また、いくつかの代表的なMの下限に対す

る**b**値を表1に示してある。

前節で述べたように、M0.1以上の地震については全期間を通してほぼ一様の検知力を有しているとみなせるので、下限を0.1としたときの**b**値を比較する。そうすると、群発地震が発生していない期間の**b**値は0.9程度であるのに対し、ES1型の群発地震の**b**値は1.0～1.1程度である。**b**値の大きさは地震発生場の温度や応力を反映していることが知られており（Warren and Latham, 1970; Wyss *et al.*, 1997）、**b**値が大きいことは応力が小さい、あるいは温度が高いことを表すと考えられている。ES1型の**b**値が非群発地震時の**b**値よりも大きいということは、群発地震時に山体膨張をしていることを考慮す

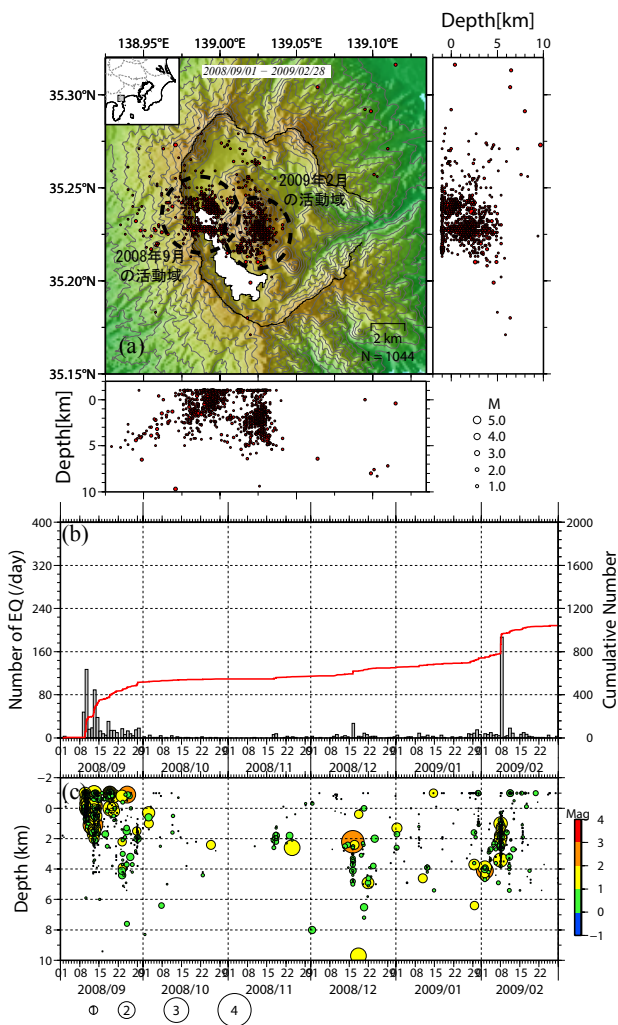


図4 2008年の箱根群発地震活動（2008年9月1日～2009年2月28日）。(a)震源分布、(b)日別の地震発生数と地震数積算回数、(c)深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 4. Earthquake swarm activity in 2008 (September 1, 2008 through February 28, 2009). Each map is the same as that in Fig.2.

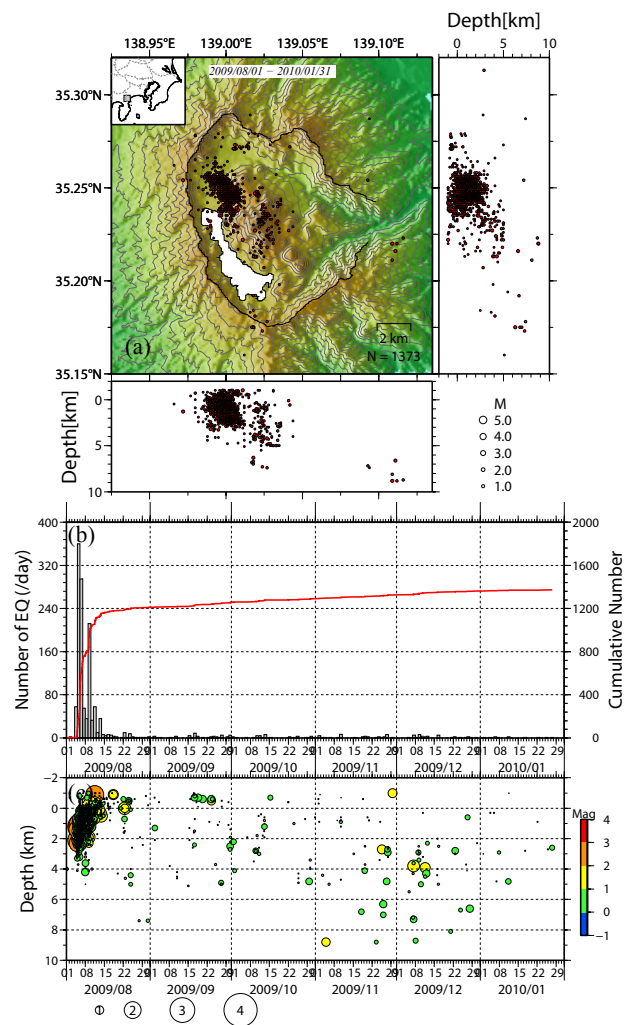


図5 2009年の箱根群発地震活動（2009年8月1日～2010年1月31日）。(a)震源分布、(b)日別の地震発生数と地震数積算回数、(c)深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 5. Earthquake swarm activity in 2009 (August 1, 2009 through January 31, 2010). Each map is the same as that in Fig.2.

れば、震源域が高温になっていたことを示していると推定される。

一方、ES2型の群発地震活動時の $b$ 値は、0.8～0.9程度である。これは非群発地震時の $b$ 値にほぼ等しい。この結果から、ES2型の群発地震活動は非群発地震活動時と同程度の応力・温度条件下で発生したことが示唆される。

ES1型の地震活動の終盤には、ES2型の震源域とほぼ同じ芦ノ湖北部や湖尻周辺などの中央火口丘の西側で地震活動が活発化している。ES1型の2001年、2006年、2013年において、活動の終盤で発生した芦ノ湖北部や湖尻周辺のみでのM0.1以上の地震による $b$ 値は、それぞ

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	タイプ	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	ES1	1.02	1.06	1.12	1.24	1.37
2006年09月01日～ 2006年12月31日	ES1	1.02	1.09	1.20	1.13	0.96
2008年09月01日～ 2008年10月31日	ES2	0.83	0.87	0.82	0.95	1.14
2009年07月01日～ 2009年09月30日	ES2	0.87	0.97	1.02	1.06	1.17
2011年03月01日～ 2011年08月31日	RT	0.55	0.60	0.67	0.74	0.73
2013年01月01日～ 2013年03月31日	ES1	1.06	1.13	1.21	1.22	1.34
群発発 (2003年01月01日～2006年5月31日、 2007年01月01日～12月31日)		0.91	0.99	1.01	0.89	0.96

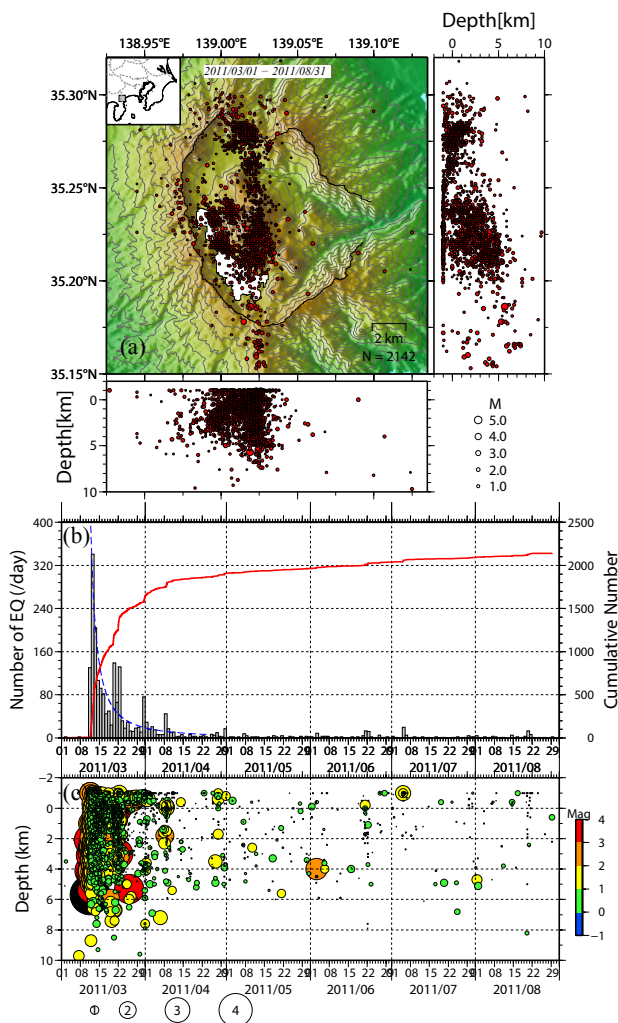


図6 2011年の箱根群発地震活動（2011年3月1日～2011年8月31日）。(a) 震源分布、(b) 日別の地震発生数と地震数積算回数、(c) 深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 6. Earthquake swarm activity in 2011 (March 1 through August 31, 2011). Each map is the same as that in Fig.2.

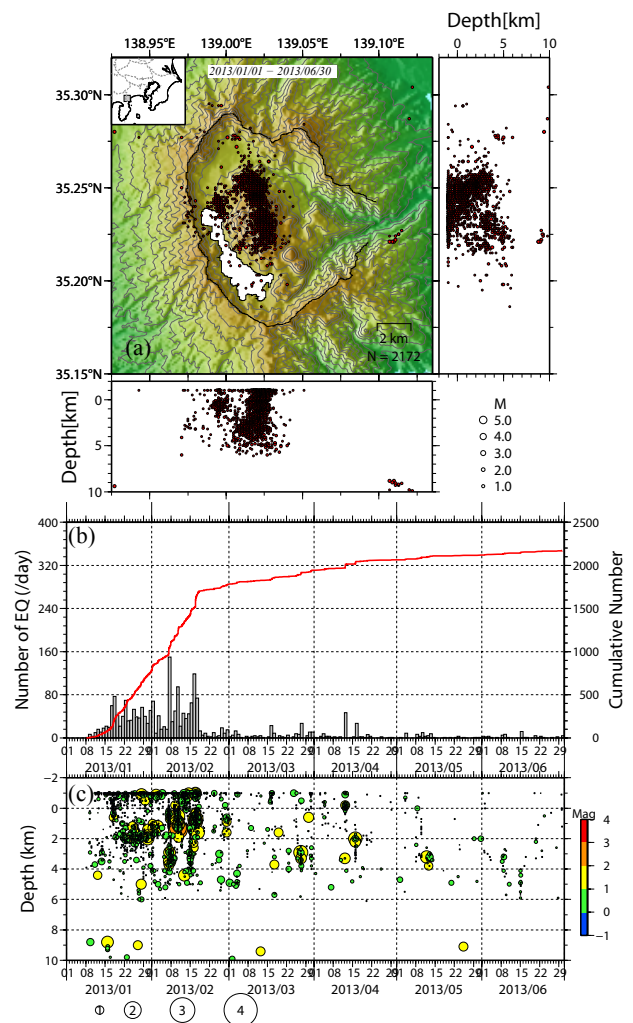


図7 2013年の箱根群発地震活動（2013年1月1日～2013年6月30日）。(a) 震源分布、(b) 日別の地震発生数と地震数積算回数、(c) 深さとマグニチュードの時間変化。

Fig. 7. Earthquake swarm activity in 2013 (January 1 through June 30, 2013). Each map is the same as that in Fig.2.

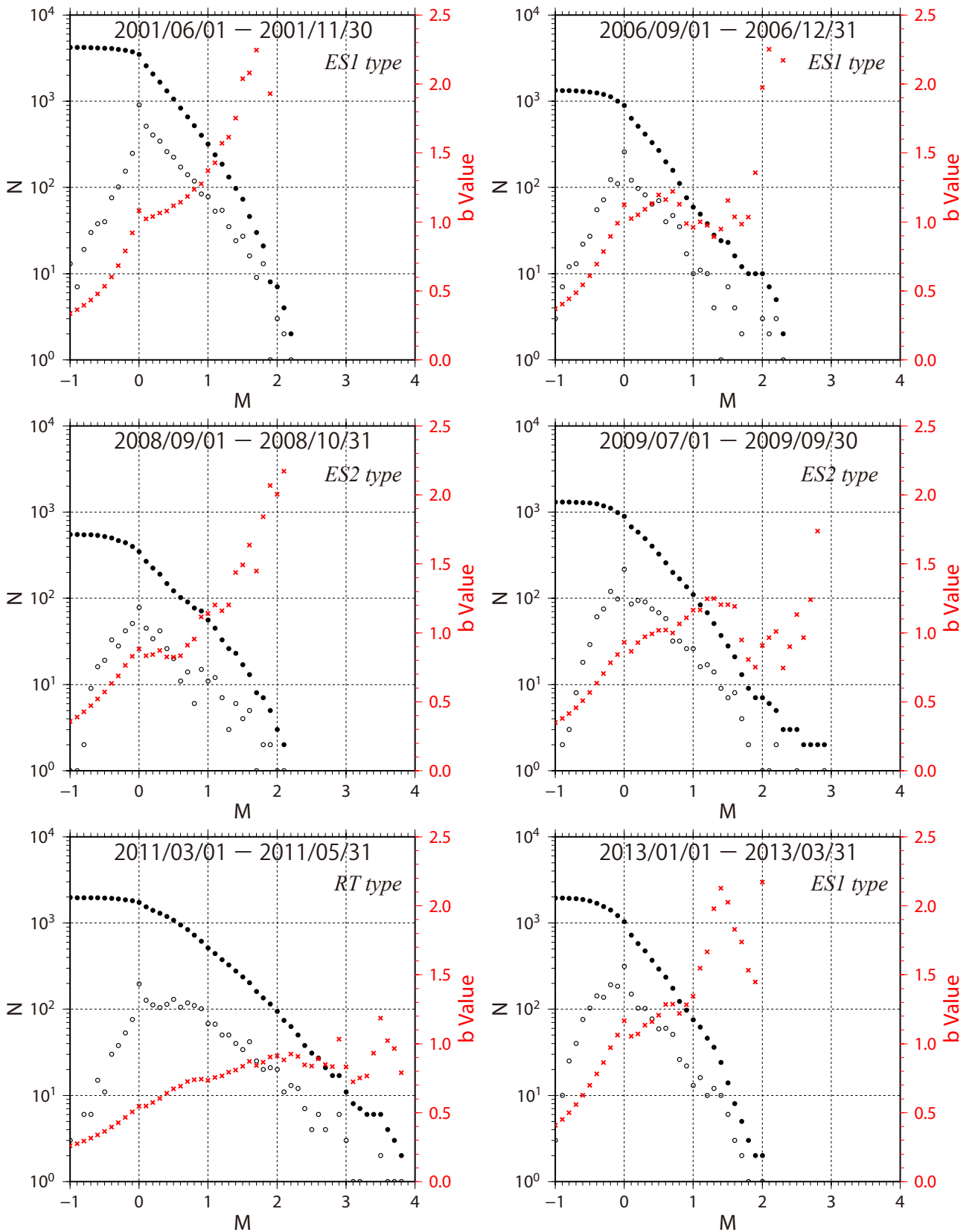


図8 各群発地震時のマグニチュード別地震数 (○) と積算数 (●)、及び  $b$  値 (×)。

Fig. 8. Magnitude-Frequency distribution of earthquakes for each swarm activity. Black and white circles represent cumulative number and number of earthquakes at each magnitude of the range 0.1, respectively. Crosses indicate  $b$  values.

れ 1.14、1.17、0.92 であり、ES2 型の  $b$  値とは異なる。 $b$  値は破碎の度合いによっても異なることが知られており、破碎が進行している場合は  $b$  値が大きくなる (Wyss *et al.*, 1997)。すなわち、芦ノ湖北部や湖尻周辺の地震活動であっても、ES1 型と ES2 型の  $b$  値に違いが生じるのは、 $b$  値が地震活動の地域によって決まるものではなく、火山活動の活動形態によって異なることを示していると思われる。つまり、箱根火山深部の膨張源から上昇する熱や熱水・ガスなどの流体の上昇経路や上昇速度などの違いを反映しているのかもしれない。

なお、RT 型である 2011 年の群発地震活動の  $b$  値は、その他の活動時に比べて低く、0.6 程度である。これは、東北地方太平洋沖地震によって急激に応力が高まり、群発地震活動が誘発されたことを指摘した原田ほか(2012)の結果と調和的である。

#### 4. まとめ

2001 年以降、箱根火山で観測された 6 回の群発地震活動について、震源域や時間変化のパターン、及び、その統計的性質 ( $b$  値) を基に、相互の違いを検討した。その結果、中央火口丘を中心とし 1 ヶ月以上継続する群発地震活動である ES1 型 (2001 年と 2006 年、2013 年の活動) と、芦ノ湖北部や湖尻周辺を中心として短期間でバースト的に活動する群発地震活動である ES2 型 (2008 年と 2009 年の活動) に分類できることが分かった。

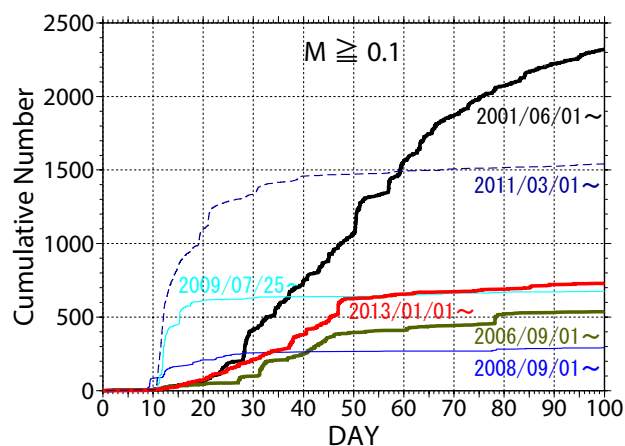


図 9 各群発地震の立ち上がり 100 日間の地震数積算曲線 ( $M \geq 0.1$ )。太線は ES1 型、細線は ES2 型、破線は RT 型。

Fig. 9. Cumulative number of earthquakes ( $M \geq 0.1$ ) during the first 100 days for each earthquake swarm activity. Thick, thin and broken lines represent swarm activity of the type ES1, the type ES2, and the type RT, respectively.

箱根火山ではこの 2 つのタイプに加えて非火山性の群発地震活動、すなわち、遠地地震による誘発型の活動である RT 型 (2011 年の活動) の 3 つのタイプに分類できる。群発地震活動についてのこうした分類は、深部での圧力源の膨張が浅部での群発地震活動に先行することと併せて、火山活動の推移を判断する上で有効な手掛かりになると考えられる。

#### 謝辞

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の地震観測データも使用して検測し作成しています。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 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・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 (2013) 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.
- 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 (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.
- Warren, N. W. and Latham, G. V. (1970) An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity, *J. Geophys. Res.*, 75, 4455-4463.
- Wyss, M., Shimazaki K. and Wiemer S. (1997) Mapping active magma chambers by  $b$  values beneath the off-Ito volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 102, 20413-20422.

Yukutake, Y., Honda R., Harada M., Aketagawa T., Ito H., and Yoshida A. (2011) Remotely-triggered seismicity in the Hakone volcano following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, 737-740.

Yukutake, Y, Miyazawa M, Honda R, Harada M, Ito H, Sakaue M, Koketsu K, Yoshida A (2013) Remotely triggered seismic activity in Hakone volcano during and after the passage of surface waves from the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, *EPSL*, Vol. 373, 205-216.