

富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動

原田昌武*・細野耕司**・小林昭夫***・行竹洋平*・吉田明夫*

(2009年12月1日受付, 2010年7月2日受理)

Extensional Strains around Mt. Fuji and Hakone Volcano
and Low-Frequency EarthquakesMasatake HARADA*, Kohji HOSONO**, Akio KOBAYASHI***,
Yohei YUKUTAKE* and Akio YOSHIDA*

Temporal changes in dilatational strain and the activity of low-frequency earthquakes around Mt. Fuji and Hakone volcano are investigated. It is shown that both cumulative strain and cumulative number of low-frequency earthquakes around Mt. Fuji have been increasing since the end of 2006. The tendency is more notable for relatively larger earthquakes rather than smaller earthquakes. The b value for earthquakes during the period after November 2006 is significantly smaller than the b value during the period from January 2004 through October 2006. These facts suggest that the crustal stress surrounding the source region of low-frequency earthquakes has been increasing. We think this is the cause of the dilatational strain observed around Mt. Fuji. On the other hand, a clear relationship is not seen between extensional strain events observed three times since 2001 and the activity in low-frequency earthquakes around Hakone volcano.

Key words: Mt. Fuji, Hakone volcano, crustal strain, low-frequency earthquake, b value

1. はじめに

富士山を挟む基線では、2008年8月頃からGPSによって伸びが観測されていると指摘されている(気象庁, 2009; 国土地理院, 2010; 西村・他, 2009)。一方、箱根火山周辺では2001年、2006年、2008-2009年に、カルデラ内に圧力源を持つ膨張歪が観測された(代田・他, 2009; 原田・他, 2009; 西村・他, 2009)。富士山直下及び箱根カルデラの北北西側外輪山の下では低周波地震が発生しており(浜田, 1981; Ukawa, 2005)、特に富士山直下では2000年秋に低周波地震活動が顕著に活発化した。それと同時期に富士山周辺を含む伊豆半島北部境界域で膨張歪が観測されたという報告がある(吉田・他, 2006)。

本論では、2001年以降の富士山周辺と箱根火山周辺の膨張歪の経年変化を調べ、それとそれぞれの火山体近傍で発生している低周波地震活動の経年変化を比較して、膨張歪と低周波地震活動との関連性を検討する。

2. 富士山から箱根火山地域にかけての膨張歪

国土地理院(2010)によれば、2008年8月頃から富士山周辺のGPSで観測されている基線長の伸びは、富士山山頂からやや南東部の深さ15.7kmにある球状圧力源モデルで説明できることが示されている。そこで、富士山山頂からやや南東部を中心とする半径20km以内のGPS観測点の変位から求めた、その領域の平均的な面積歪の経年変化をFig. 1に示す。解析には国土地理院によ

* 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586
神奈川県温泉地学研究所
Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture,
586 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan.

** 〒381-1232 長野市松代町西条 3511
気象庁精密地震観測室
Matsushiro Seismological Observatory, Japan Meteorological Agency, 3511 Nishijo, Matsushiro, Nagano 381-1232, Japan.

*** 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1
気象庁気象研究所
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052 Japan.

Corresponding author: Masatake Harada
e-mail: harada@onken.odawara.kanagawa.jp

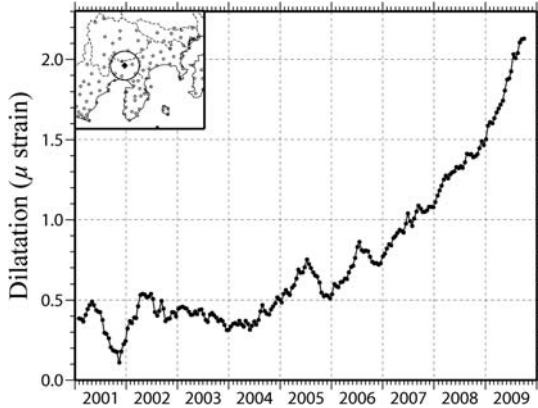


Fig. 1. Temporal change in the dilatational strain around Mt. Fuji. In calculating the strain change, we used average coordinates in 30 days and those in the succeeding 30 days at GPS stations in the circle shown in the inlet map.

る GPS 観測データ (GEONET, F3 解) を使用した。前処理として、観測点ごとにプレートの沈み込みに伴う定常的な変動のみと考えられる期間についてトレンドを求め、それを除去した。例えば、神奈川県の小田原観測点については 1997–1999, 2002–2003, 2007–2008 年、箱根観測点については 1997–1999, 2007–2008 年、静岡県の富士宮 1 観測点については 1998–1999, 2002–2003 年をトレンドの算出期間に使用し、トレンドは期間の長さに応じて重みをつけて平均して求めた。また、面積歪は中村 (1999) の開発したプログラムを用いて、各観測点における前後 30 日間の平均座標値の差から、その間の面積歪を算出した。15 日ずつずらしながらそうした 1 ヶ月間毎の面積歪を計算して、その面積歪の積算を描いたのが Fig. 1 である。富士山周辺では、2006 年末くらいから膨張歪変化が生じており、それは 2009 年 10 月現在も終息せず、むしろ加速する傾向が見えている。

Fig. 2 は箱根火山を中心としてそこから半径 20 km 以内にある GPS 観測点の変位から求めた平均的な面積歪の経年変化である。用いた GPS データおよび面積歪の計算手法は前述の富士山周辺の面積歪を求めたものと同じである。面積歪の経年変化から明らかなように、箱根カルデラ内とその近辺では、2001 年 6 月から 10 月にかけて、2006 年 7 月から 11 月にかけて、そして、2008 年 6 月頃から翌 2009 年の 3 月にかけてと、計 3 回膨張歪が生じている。

この膨張変化を引き起こした力源に関しては、球状圧力源モデルや開口割れ目モデルに基づいた解析がその都度なされているが (例えば、代田・他, 2009; 国土地理

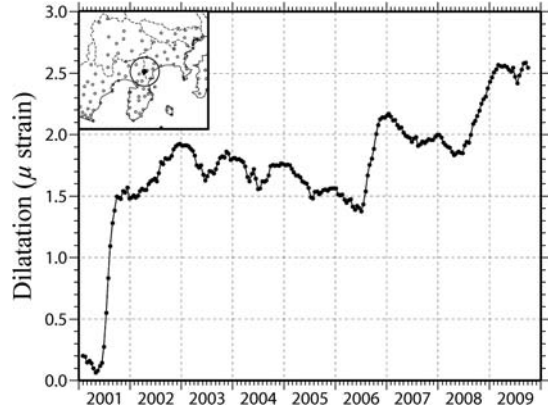


Fig. 2. Same as Fig. 1 except for the dilatational strain around Hakone volcano.

院, 2002; 国土地理院, 2007; 西村・他, 2009), 原田・他, (2009) は中央火口丘直下に北北西–東南東走向の開口割れ目が生じたという考えで、上記 3 回の膨張歪の変化を統一的に説明できることを示した。

3. 富士山及び箱根カルデラ下の低周波地震活動

Fig. 3 (a) は、2001 年以降に気象庁によって検出された富士山及び箱根火山近傍の低周波地震の震央分布である。Fig. 3 (b) に、それぞれの低周波地震活動について、マグニチュード (M) の下限を変えていったときの地震数の分布を示す。 M 0.5 以上の地震を用いて最尤法により求めた b 値は富士山直下の低周波地震について 1.72、箱根カルデラ下の低周波地震について 2.19 で、いずれも、日本列島とその沿岸で発生した地震の余震活動から求めた b 値の平均値 0.84 (細野, 2006) よりもかなり大きい。

Fig. 3 (c), (d) は発生数の積算と M - T 分布, Fig. 3 (e), (f) は深さの時系列で、これらから、低周波地震活動の時間的な経過と発生層の深さの双方に関して、両火山域で明瞭な違いがあることが見てとれる。すなわち、富士山直下の低周波地震は 2006 年末以後、発生数が増加傾向にあるのに対して、箱根カルデラ下の低周波地震は 2006 年末以降、むしろ発生数が減っている。また、富士山直下の低周波地震の深さは 10–20 km であるのに対して、箱根カルデラ下の低周波地震の深さは 20–25 km とそれよりもやや深い。

Fig. 3 (b) から、 M が 0 付近の地震はすべてが検知できていないと見られるので、Fig. 3 (c) の積算図でもって富士山直下の低周波地震活動は 2006 年以後活発化傾向にあると即断するのは問題がある。そこで、Fig. 4 に

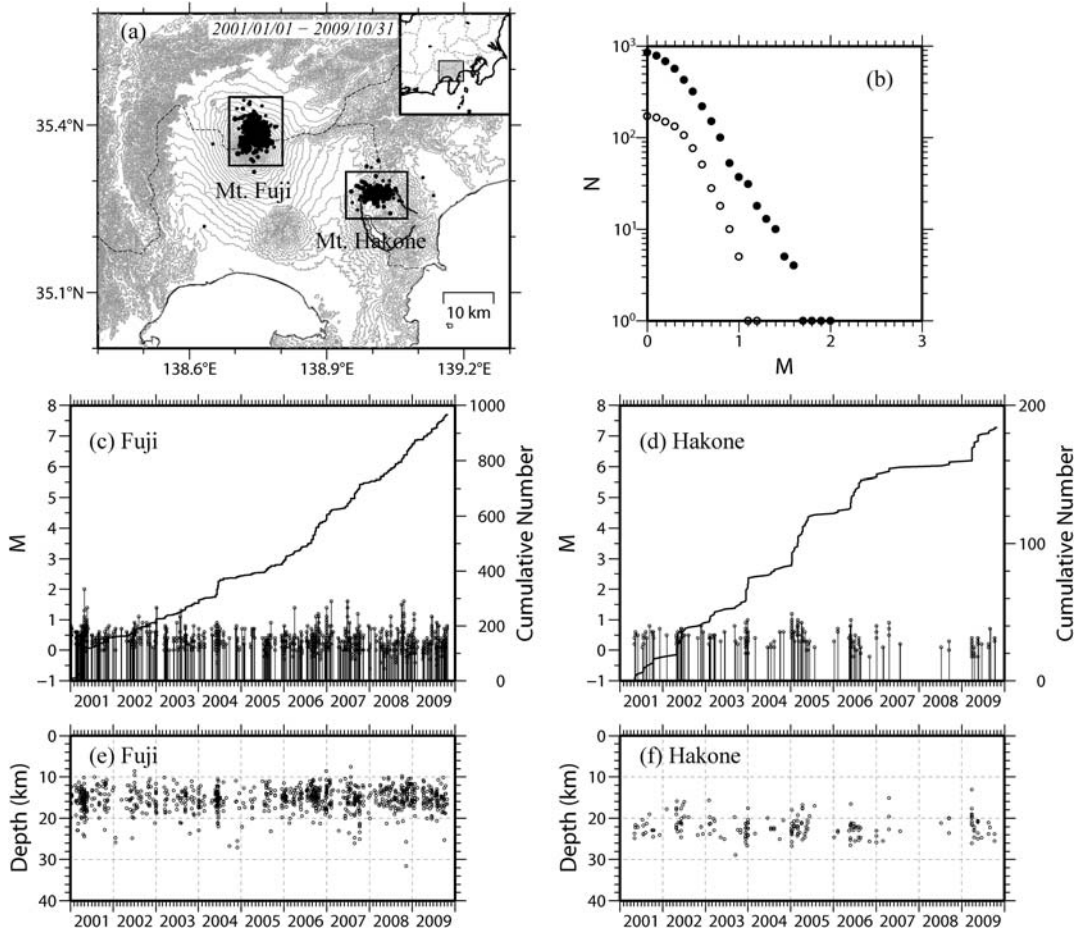


Fig. 3. (a) Epicentral distribution of low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji and Hakone volcano. (b) Number of low-frequency earthquakes above respective threshold magnitude. Black and white circles represent number of low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji and Hakone volcano, respectively. (c) Cumulative number and magnitude - time diagram for low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji, and (d) those beneath Hakone volcano. (e) Depth - time diagram for low-frequency earthquakes beneath Mt. Fuji, and (f) that beneath Hakone volcano. Data are taken from the JMA catalogue.

M の下限を変えていったときの地震数の積算を比較して示す。これらの図で、2006 年半ば過ぎからの増加傾向は、 M の下限を大きくしたときの積算図でより明瞭に認められることがわかる。このことは、富士山直下の低周波地震活動は 2006 年末以降、活発化したと見られるという先の推定を支持する。地震活動の長期的変化傾向を見る上で、積算図は、面積歪の積算図と同様の意味を持っている。半年あるいは 1 年毎に区切ったときの地震発生数が平均よりも常に有意に多くなくても、積算曲線の勾配が次第に大きくなっている場合は、地震活動が長期的な活発化傾向を示していると見てよいだろう。富士

山直下の低周波地震活動は、そうした意味合いで、2006 年末から活発化していると言ってよいと思われる。

富士山直下の低周波地震活動が 2006 年末以降変わったということを示唆するもう一つの事実がある。それは、2004-2006 年 10 月の期間と 2006 年 11 月以降の期間に分けて、 M 0.5 以上の地震を用いて b 値を求めると、前の期間では 2.28、後の期間では 1.39 と大きく異なることである (Fig. 5)。AIC を用いた宇津の評価式 (Utsu, 1999) から、期間を合わせて解析したときの b 値 1.70 から求められる AIC_0 ($= -132.20$) と比べて、前の期間についての AIC_1 と後の期間についての AIC_2 の和 (AIC_{12}

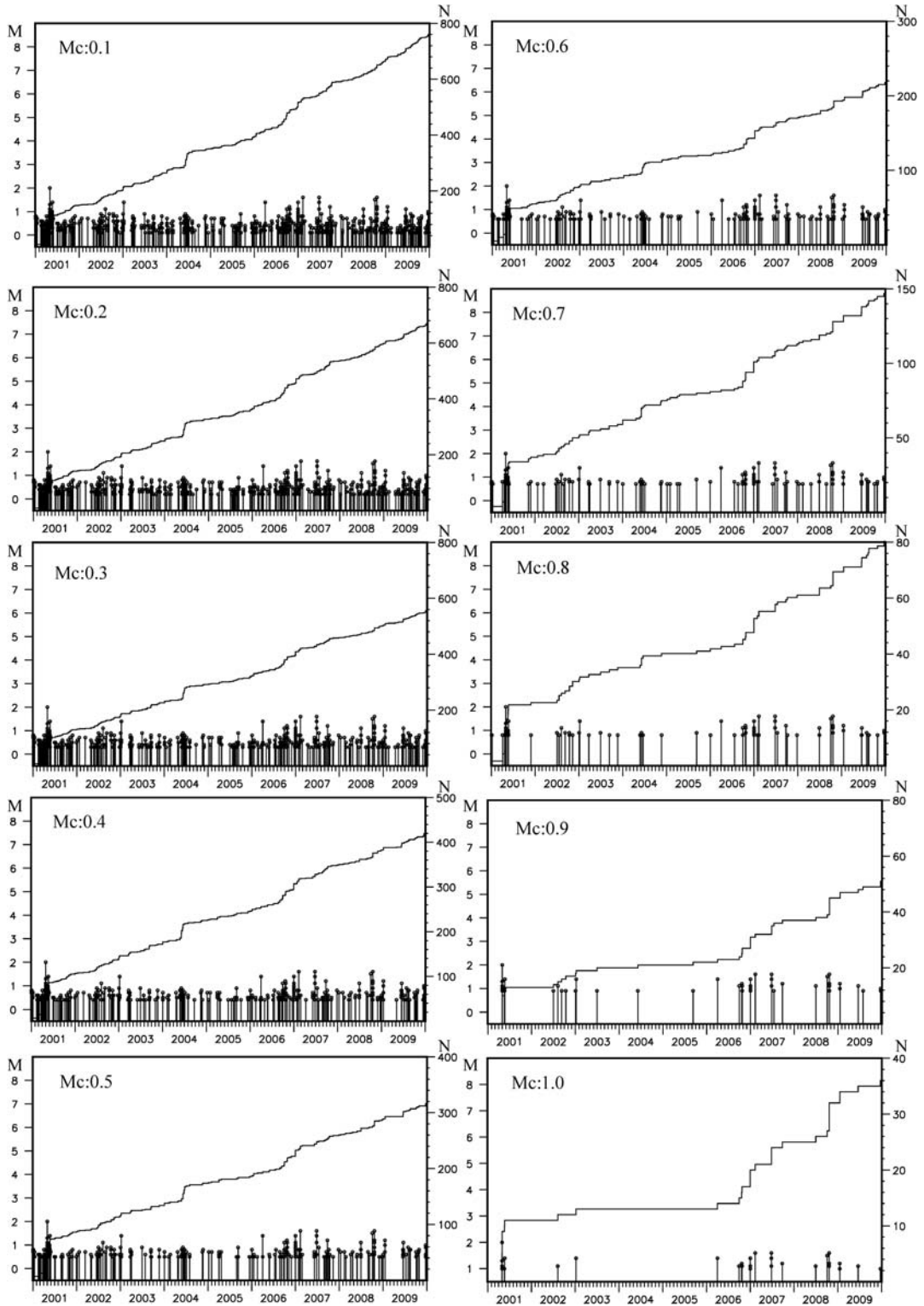


Fig. 4. Cumulative number and magnitude - time diagrams of low-frequency earthquakes around Mt. Fuji larger than or equal to each of the threshold magnitude M_c (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0).

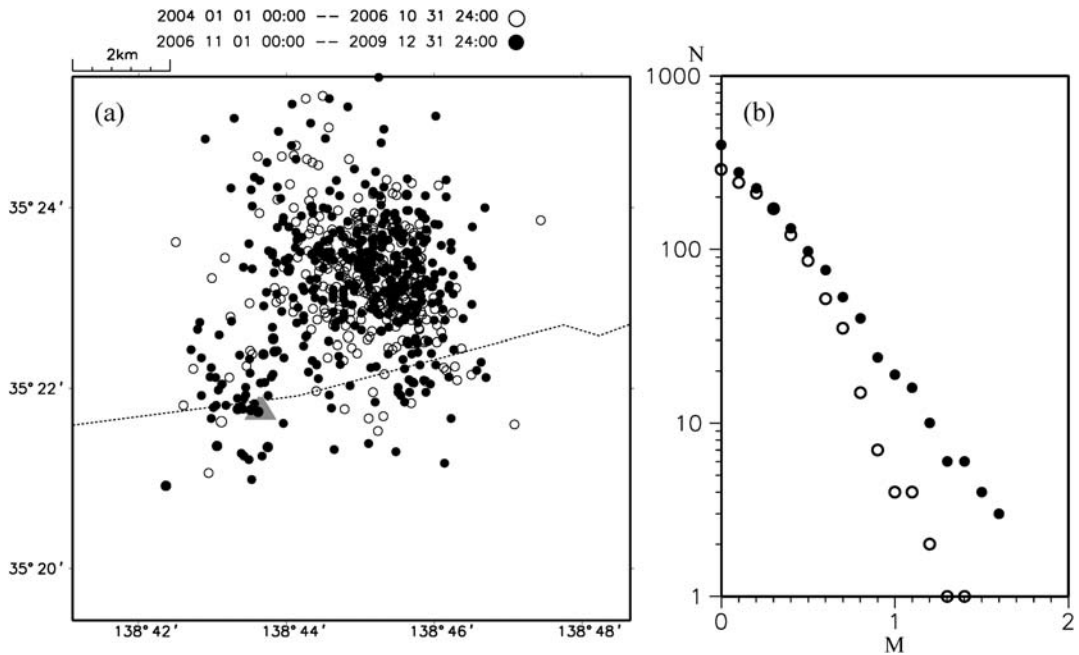


Fig. 5. (a) Epicenters of low-frequency earthquakes near Mt. Fuji in the period from January 2004 to October 2006 (white circles) and those in the period from November 2006 to December 2009 (black circles). Gray triangle indicates the summit of Mt. Fuji. (b) Number-magnitude relationship for low-frequency earthquakes in the two periods. Note that the b value for the latter period is significantly smaller than that for the former period.

$= -141.14$)は有意に小さい値となるので、これから、二つの期間で b 値は変わらないという仮説は棄却される。 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 値が小さいことは応力が大きい、あるいは温度が低いことを表すと考えられている。今の場合、2006年末以後の期間の活動の b 値が小さいことは、地震数が増加したと合わせて、低周波地震発生域の応力が増加したことを示していると推定される。

なお、2000年の活動時の b 値は1.29、2001年から2003年までの活動の b 値は1.74と求まった。これから、2006年末以後の期間の活動は2000年の活動ほどではないとしても、2001年から2003年までの活動と比べても b 値は小さいと言える。

ところでFig. 5 (b)から、2004年-2006年10月の期間に比べて2006年11月以降では M 0.4以下の地震の検知能力が向上している様子が見てとれるので、Fig. 4の $M < 0.4$ 以下の地震の積算に見られる変化については、検知能力が変わったことによる見かけのものであると推定される。しかし、前述の通り、 $M < 0.5$ 以上の地震数の積算の増大や M 0.5以上の b 値の変化から考えて、2006

年末以降に富士山直下の低周波地震活動が活発化したことはほぼ確かと言ってよいと思われる。なお、地震発生場所に関していうと、2006年末以降、富士山頂直下で地震発生数が増えている様子が見える (Fig. 5 (a)).

Fig. 6は箱根カルデラ下の低周波地震について、 M の下限を変えていったときの地震数の積算を見たものである。Fig. 3 (b)から、箱根カルデラ下の低周波地震についても均質に検知されている地震の下限の M は0.5程度であると考えられるので、これらの図から、最近、特に大きめの低周波地震の発生が減っていると言える。

箱根火山周辺では、2001年、2006年、それから2008-2009年に顕著な膨張歪が観測されたが、それに伴って、箱根カルデラ下の低周波地震活動が活発化した様子が見えないのは何故か？ これについては現在、明確な答えを持ち合わせていないが、次の事実に注目している。それは、箱根火山付近の低周波地震の発生域がカルデラ中央部ではなくて北北西側の外輪山の直下、深さ20-25 kmにあること、そして、箱根火山周辺で観測されている膨張歪の力源は、カルデラの中心部をほぼ南北に連なる中央火口丘直下で深さ10-15 kmに生じた、同じく南北走向の開口割れ目と推定されることである (原田・他、

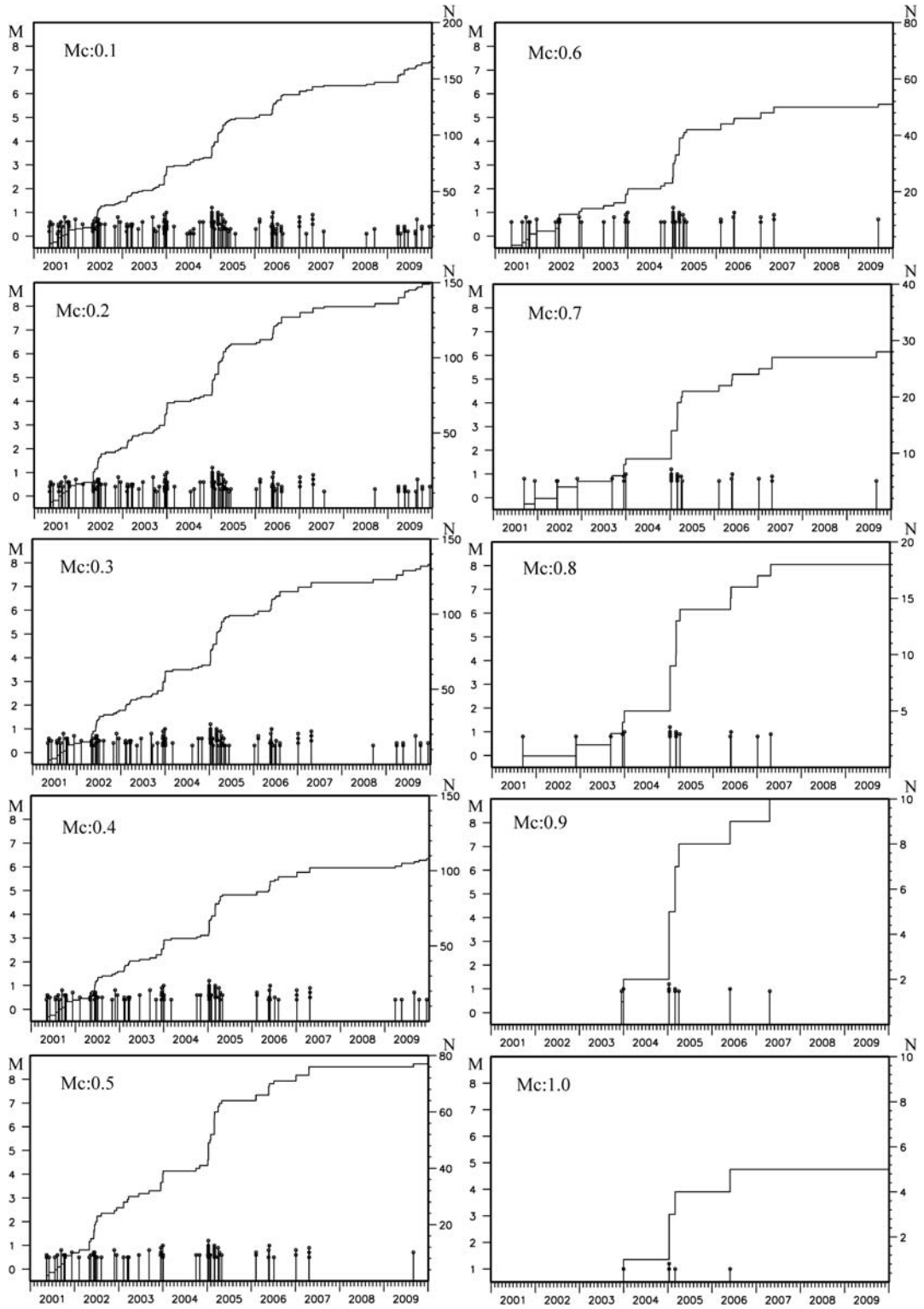


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for low-frequency earthquakes around Hakone volcano.

2009). これに対して, 富士山直下の低周波地震の震源域の深さは10–20 kmと, そのすぐ南側に推定されている球状膨張源とほぼ同じ深さにある(西村・他, 2009). 富士山と異なって, 箱根火山の場合に低周波地震活動と膨張歪の間に関連が見られないのは, 震源域と膨張源の相対的な位置関係が影響している可能性が考えられる.

なお, 箱根火山では2001年に顕著な群発地震活動が発生し(棚田・他, 2002), それ以後, カルデラ内の地震活動が以前よりも活発化している傾向が見られる(原田・他, 2009; 伊東・他, 2009). そして, 2001年以降に3回観測された箱根火山周辺の膨張歪と, このカルデラ内の浅い地震活動(6 km以浅)との間に相関が見られることが指摘されている(伊東・他, 2009).

4. ま と め

富士山周辺では2006年末以降, 膨張歪が継続的に観測されており, その傾向は2008年秋以降, 顕著になっている. そして, その歪の増加傾向に合わせて, 富士山直下の低周波地震活動も活発化している様子が見える. 我々は, 膨張歪の経年変化と低周波地震の積算の双方が2006年末から増大傾向を示しているのは偶然ではなく, 富士山直下のマグマ溜まりの圧力が高まって膨張歪を生じさせるとともに, 低周波地震活動の活発化をもたらしたと考える. 2006年末以降, 低周波地震活動の b 値が小さくなっていることはそうした推定を支持する.

一方, 箱根火山周辺では, 2001年以後, 顕著な膨張歪が3回観測されたが, それに伴って, 低周波地震活動が活発化した様子は見えない.

謝 辞

本研究では, 国土地理院によるGPS観測データ(F3解)を使用しました. 低周波地震の解析には防災科学技術研究所, 北海道大学, 弘前大学, 東北大学, 東京大学, 名古屋大学, 京都大学, 高知大学, 九州大学, 鹿児島大学, 産業技術総合研究所, 国土地理院, 青森県, 東京都, 静岡県, 神奈川県温泉地学研究所, 横浜市, 海洋研究開発機構及び気象庁のデータを, 気象庁・文部科学省が協力して処理した結果を使用しました. また, GPSデータの解析にはPAT-ME(中村, 1999)を使用しました. 査読者である鶴川元雄氏およびもう一人の匿名査読者, 編集者である松島喜雄氏からの適切なご指摘により本稿は大幅に改善されました. ここに記して感謝の意を表します.

引用文献

- 代田 寧・棚田俊収・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.
- 浜田信生(1981) 微小地震観測網で捉えた富士山の地震活動. 火山, **26**, 143.
- 原田昌武・小林昭夫・細野耕司・吉田明夫(2009) 2001年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動. 神奈川県温泉地学研究所報告, **41**, 7–14.
- 細野耕司(2006) マグニチュード改訂に伴う余震パラメータ標準値の再決定. 験震時報, **69**, 171–176.
- 伊東 博・棚田俊収・本多 亮・原田昌武・行竹洋平・杉原英和・吉田明夫(2009) 神奈川県温泉地学研究所の地震観測網の歴史—箱根火山活動の監視—. 日本火山学会 2009年度秋季大会講演予稿集, 55.
- 気象庁(2009) 第114回火山噴火予知連絡会全国の火山活動の評価. 平成21年10月5日, 報道発表資料.
- 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**, 34–40.
- 国土地理院(2007) 関東甲信越地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **77**, 132–141.
- 国土地理院(2010) 関東甲信越地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **83**, 123–134.
- 中村浩二(1999) GPS データ簡易表示プログラム(SEIS-GPS)の開発. 情報地質, **10**, 257–266.
- 西村卓也・矢来博司・岩下知真子・飛田幹男・今給黎哲郎(2009) GEONETによって観測された富士・箱根火山周辺における最近の地殻変動. 日本測地学会第112回講演会要旨集, 61–62.
- 棚田俊収・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. 神奈川県温泉地学研究所観測だより, **52**, 1–4.
- Ukawa, M. (2005) Deep low-frequency earthquake swarm in the mid crust beneath Mount Fuji (Japan) in 2000 and 2001. *Bull. Volcanol.*, **68**, 47–56.
- Utsu, T. (1999) Presentation and analysis of earthquake size distribution: a historical review and some new approaches. *Pure appl. geophys.*, **155**, 509–535.
- 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.
- 吉田明夫・小林昭夫・塚越利光(2006) 富士山直下の低周波地震活動は2000年秋になぜ活発化したか?. 地震2, **58**, 401–406.

(編集担当 松島喜雄)