

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

原田昌武*1・小林昭夫*2・細野耕司*3・吉田明夫*1

Crustal deformations around Mt. Hakone and Mt. Fuji
since the Hakone swarm activity in 2001

by

Masatake HARADA, Akio KOBAYASHI, Kohji HOSONO and Akio YOSHIDA

Abstract

Swarm activities have been frequently observed in the Hakone caldera in recent years, of which the ones in 2001, 2006, 2008 and 2009 were conspicuous and crustal deformations were detected during the periods of the activities by the GPS network of Geographical Survey Institute. We investigate spatial distribution of the crustal strains in and around Hakone volcano associated with the swarm activities. The maximum dilatational strain is calculated to be 4.0×10^{-7} or more in the case of 2001 event, whose value was obtained at the site in the Hakone caldera. In the cases of 2006 and 2008 events, the sites where the largest dilatational strain was observed almost coincide with that in the case of 2001, though the maximum values were a little bit smaller. A notable feature of the crustal strain in the later cases that differs from that in the former case is that inflation extended to wider areas comparatively. This is considered to indicate that the depth of the pressure source for the latter cases was somewhat deeper. In this paper, we estimate pressure sources for the crustal deformations observed at swarm activities in 2001, 2006 and 2008 based on the GPS data and discuss implication of tectonics.

1. はじめに

2001年の箱根群発地震活動は、温泉地学研究所が1968年に箱根火山での地震観測を開始して以来、最大の活動であり、国土地理院のGPS観測網GEONETに加えて、当所がカルデラ内に設置した傾斜計でも顕著な変化が観測された。そのときの地殻変動は深さ7kmの球状圧力源と、大涌谷及び駒ヶ岳付近のごく浅い開口割れ目で説明されている（例えば、代田ほか、2009）。箱根の地震活動はこの2001年以後、活発化した傾向が見られ、特にカルデラ内北西部で浅い地震が増えている（伊東ほか、2009）。箱根火山ではこの間、2006年秋と2008年から2009年にかけてもGEONET観測データによって膨張歪が観測された。2006年の場合には同時期に群発地震活動も発生したが、2008年夏に始まった膨張歪に関しては、それに付随して、2001年や2006年の時のような際立つ地震活動は、特に観測されなかった。しかし、その膨張歪がほぼ収まった2009年8月になって、2006年の活動を凌駕する、2001年以来最大の群発地震活動

が発生した。

また、富士山周辺でも2006年以後、顕著な膨張歪が生じている（国土地理院、2009; 原田ほか、2009）。本報告では、箱根火山周辺で2001年、2006年及び2008～2009年に観測された3回の地殻変動を比較するとともに、最近の富士山周辺の膨張歪も含めて、それらの圧力源の検討を行い、その地学的意味を考察する。

2. 箱根火山の地殻変動と地震活動

2.1 箱根カルデラ周辺の地殻変動の圧力源モデル

2001年と2006年の箱根の群発地震活動時、および2008～2009年にはGPS観測により、いずれも箱根を中心とする非定常な変位が観測されている。これら3回の変位から地殻歪の空間分布を計算した結果を図1に示す。ただし、2009年は富士山直下に源を持つ膨張が顕著になるため、図1には2008年の歪みを示してある。解析には国土地理院によるGPS観測データのF3解を使用し、前処理として、観測点ごとに定常トレンドを求

*1 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 気象庁気象研究所 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

*3 気象庁精密地震観測室 〒381-1232 長野市松代町西条 3511

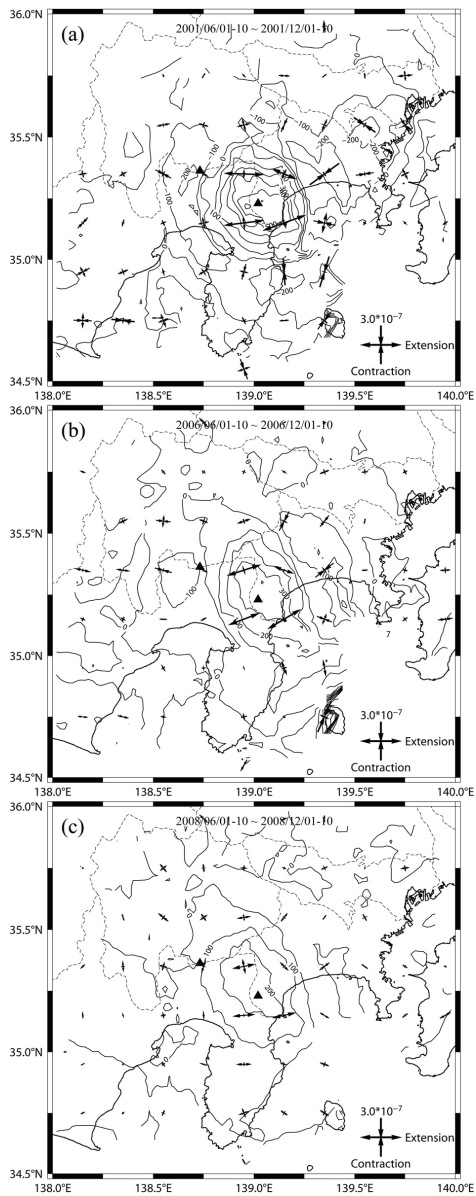


図1 群発地震に伴う地殻歪の空間分布。(a)2001年箱根群発地震活動(2001/06/01~10と2001/12/01~10の平均ベクトルの差)、(b)2006年箱根群発地震活動(2006/06/01~10と2006/12/01~10の平均ベクトルの差)、(c)2008年箱根群発地震活動(2008/06/01~10と2008/12/01~10の平均ベクトルの差)。面積歪の等値線の間隔は100nano-strain。▲は箱根火山と富士山を示す。

Fig. 1. Spatial distributions of dilatational strain accompanied by the Mt. Hakone volcanic earthquake swarm in (a) 2001 (b) 2006 (c) 2008. Interval of equi-strain lines is 100 nano-strain.

めてそれを除去している。また、地殻歪の計算には中村(1999)の開発したプログラムを用い、緯度・経度を1/100度に分割した各グリッド点での変位ベクトルを基に算出した。各グリッド点での変位ベクトルはその点から30km以内のGPS観測点の変位ベクトルを使って、それらに距離の逆数の重みをかけて平均化することにより求めた。図1を見ると、3回とも膨張歪の中心は箱根カルデラ内にあって、歪変化の空間パターンは大局的に

は変わらない。ただし、2001年の時には箱根カルデラ内で傾斜変化が観測されたのに対して、2006年と2008~2009年には観測されなかった。2001年の活動時の地殻変動を解析した代田ほか(2009)は、深さ7kmの球状圧力源の他に、傾斜変化を説明するために浅い開口割れ目の力源を取り入れている。このことから、2006年と2008~2009年には、2001年のときのような浅い開口割れ目の力源を伴わなかったと推定される。

箱根火山における面積歪の膨張域は3回とも北北西-南南東方向に長軸を持つ楕円形の形状をしている。ここで注意したいのは、2006年、2008年の場合、面積歪みの最大値は2001年と比べて小さいのに、膨張域の拡がり方が2001年のときとあまり変わらないことである。また、2001年の場合には膨張歪の北東から東南東および北西から南西にかけて、膨張域を取り囲むように半月状に面積歪の収縮域が分布しているのに対して、2006年と2008年の場合には膨張歪の北東から東南東にかけては収縮域が見られるものの、西側では収縮域ははっきりしない。

上記のような歪場の特徴はどのような地殻変動源で表されるかを調べるために、Okada(1992)の式を用いて試行錯誤的にフォワードによるモデル計算を行った。代田ほか(2009)は2001年群発地震活動に伴ったカルデラ内の傾斜変化を説明するにあたって、浅部に2つの開口割れ目を推定しているが、本研究では広域のGPSデータのみを用いることによって、遠方での歪変化をもたらした深部の変動源について明らかにすることを目的とする。

2001年の地殻変動についてのこれまでの先行研究では、深さ約7kmの球状圧力源モデルが推定されている(国土地理院、2002;代田ほか、2009)。しかし、近傍の観測点が少ないため、GPSデータによる変位場からは、深部の圧力源が球状圧力源か開口割れ目かの判別は難しく、どちらでも同程度に説明することができる(西村・村上、2001)。また、2006年の地殻変動については、国土地理院(2007)により開口割れ目モデルが推定されている。ここでは、面積歪の非対称性に注目し、3回とも開口割れ目を想定してモデルを推定した。

フォワード計算で推定した開口割れ目のパラメータを表1に、また、それらのモデル源による歪の空間分布を図2(a),(b)に示す。図2(a)は、駒ヶ岳の南から北北西の方向に長さ8kmの開口割れ目を想定し、その上端の深さを8kmとして東側にやや傾斜させたときの地殻歪の空間分布である。これと2001年に観測された地殻歪(図1(a))を比較すると、北北西-南南東方向に長軸を

表 1 図 2 の計算に用いた開口割れ目断層モデルのパラメータ。

Table 1. Parameters of the pressure source (dike) used for forward modeling (in Fig. 2).

Longitude [deg.]	Latitude [deg.]	Depth [km]	Length [km]	Width [km]	Strike [deg.]	Dip [deg.]	Rake [deg.]	Slip [m]	Open [m]
139.032	35.215	8.0 (Fig. 2a) 10.0 (Fig. 2b)	8.0	5.0	345	80	0.0	0.0	0.5

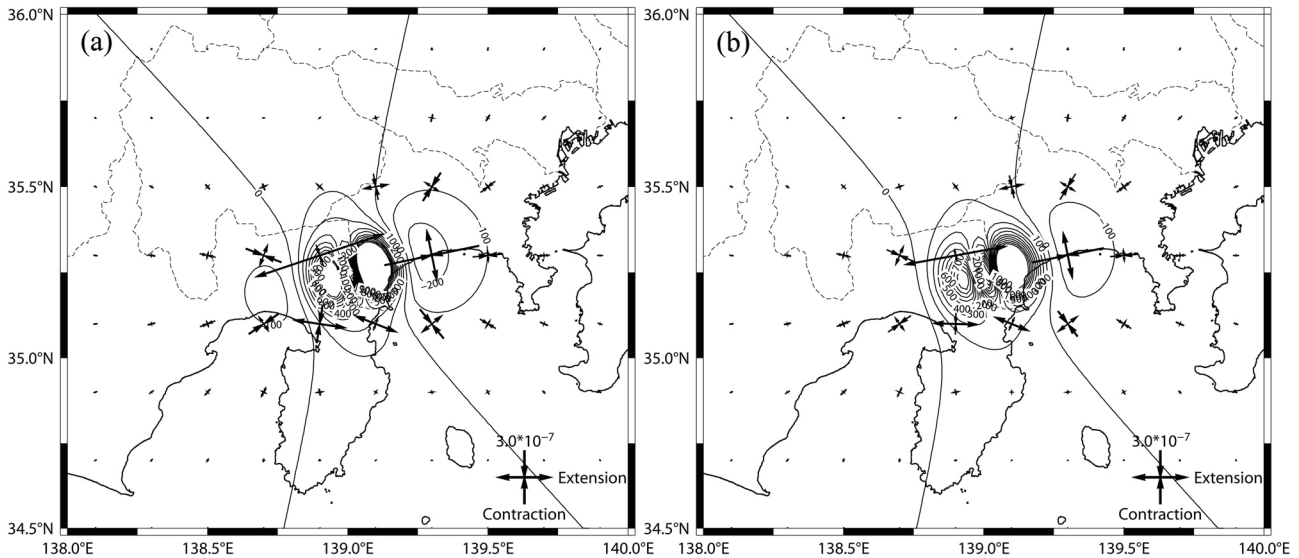


図 2 表 1 の開口割れ目断層モデルによる地殻歪の空間分布。断層面上端の深さ (a) 8km、(b) 10km。数値は nano-strain を表す。

Fig. 2. Spatial distributions of dilatational strain derived from forward modeling using formulas presented by Okada(1992). The source parameters are shown in Table 1. Depth of the source for case (a) and (b) are 8km and 10km.

持つ膨張域や膨張域の範囲などの特徴がおおよそ一致している。膨張域の北東から東南東および北西から南西にかけての面積歪の収縮域の分布や、それらの収縮域が西側よりも東側で若干大きいこと、膨張域の北方と南方では面積歪の変化がほとんどない様子も再現されている。さらに主歪を見ると、膨張域での東西方向の伸長やその東側の収縮域での東北東-西南西方向の圧縮など、空間的な変化のパターンもおおよそ一致している。つまり、2001年の箱根群発地震に伴う広域の歪の変化が、ほぼ再現されていると考えられる。

図 2(b) は断層の上端の深さが 10km であること以外、開口割れ目のパラメータは先ほどと同一として計算した歪変化パターンである。これを図 2(a) と比較すると、膨張域の範囲が東北東-西南西方向にやや広がっていること、また、膨張域の東側に収縮域があって西側にはそれが見られないこと等の特徴が見てとれる。これらの特徴や、主歪の空間パターンは 2006 年、2008 年に観測された地殻歪 (図 1(b),(c)) とよく対応している。つまり、2006 年、2008 年の歪変化パターンは、この開口モデルによっておおよそ再現されている。

上述の解析結果は、2006 年や 2008 年の地殻変動も、2001 年の開口割れ目モデルと同じパラメータを想定して、単にその深さを変えることで説明可能であることがわかった。つまり、2001 年、2006 年、2008 年のどの場合も、北北西走向でやや東側に傾く箱根カルデラ内の高角開口モデルとして大きな矛盾はない。なお、群発地震活動の震源域は 6km 以浅であり、想定された地殻変動の変動源はいずれの場合も震源域より深い。

開口割れ目を想定したモデル計算結果を詳細に見ると、直上の面積歪の二つの膨張域の間に収縮域が現れている。実際の観測データにはそのような収縮域は見られない。球状圧力源モデルを採用すればこのような中心部における収縮域はなく、カルデラ内では球状圧力源の直上を中心とした同心円状の膨張域となる。しかし、図 1 の歪場は半径 20km 以内の GPS 観測点のデータを用いて平均化したものであり、言い換えれば、ある種の空間フィルター処理を施したものである。観測点が密でないときには、ごく狭い領域における収縮歪は周囲の膨張歪との平均操作によって打ち消されて現れてこないことは十分ありうる。膨張域が北北西-南南東方向に伸び

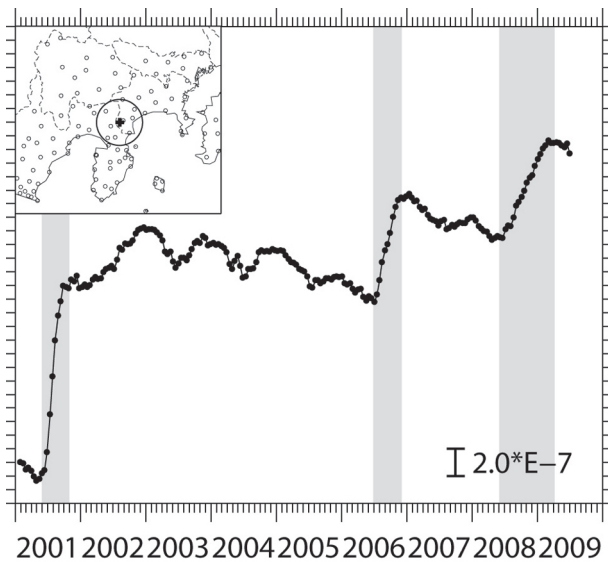


図3 箱根火山を中心とした半径20km以内の領域のGPS変位から求めた平均的な面積歪。

Fig. 3. Temporal change of the average dilatational strain in the circle shown in the inset map. GPS data within 20km from Mt. Hakone are used. Strain changes are calculated by average of coordinates in 30 days and those in the preceding 30 days.

た楕円形であることや、膨張域の北側および南側に収縮域がないことは球状圧力源モデルでは説明できないので、総合的には、球状圧力源モデルよりは開口割れ目断層モデルの方が観測された歪場の空間パターンを良く説明していると考えられる。なお、本研究では歪場の空間分布についてのみ論じている。歪の値については概ね調和的であるものの開口割れ目源の近傍では観測値を大幅に超える膨張歪となる。これについても、各観測点の変位についてはモデルと観測値はほぼ一致しているので、観測値から求めた歪場が空間フィルター処理を行った結果であることを考えれば特に矛盾しない。

2.2 箱根火山地域における面積歪の時間変化と地震活動

箱根火山を中心とした半径20km以内の領域のGPS観測点の変位から求めた平均的な面積歪の、2001年以降の経年変化を図3に示す。用いたGPSデータは前節と同様であり、また、面積歪の計算には中村(1999)の開発したプログラムを用いて、それぞれの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ている。つまり、1ヶ月ごとの面積歪を15日間ずつ移動しながら計算し、その積算を見たときの経年変化である。面積歪の経年変化からは、2001年の場合に

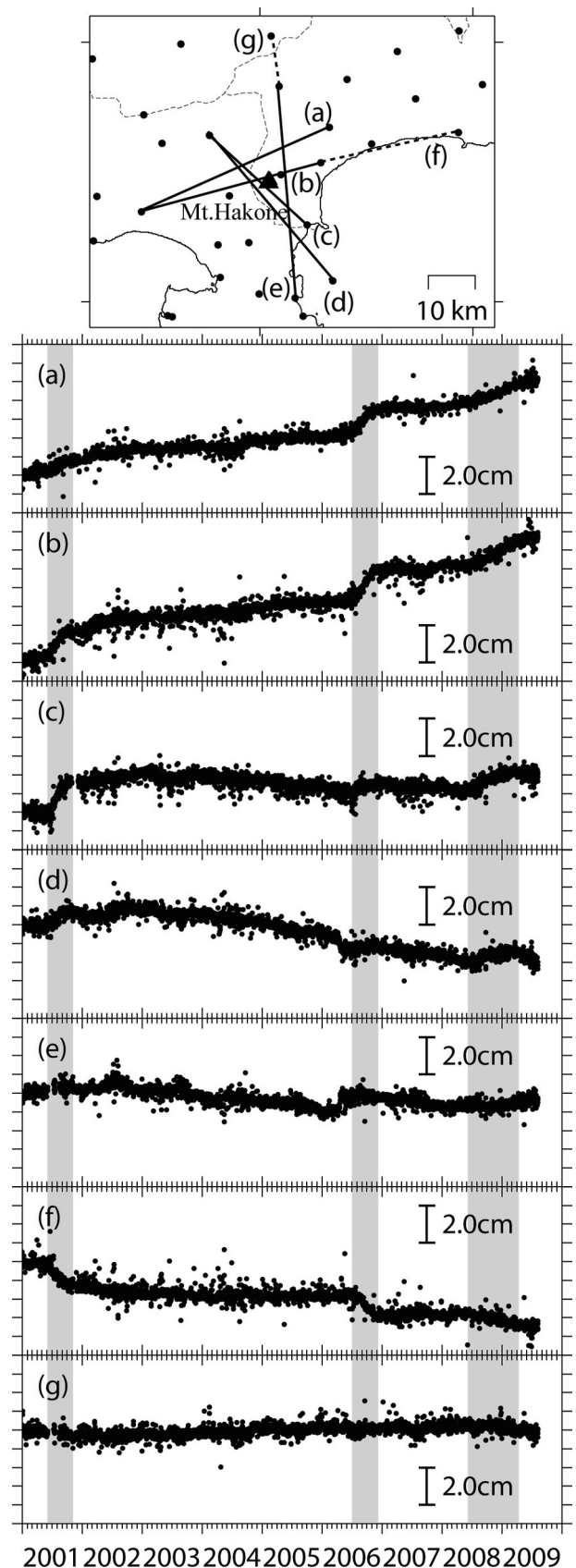


図4 箱根火山をはさむ基線長の変化。

Fig. 4. Time series of changes in baseline lengths across the Mt. Hakone.

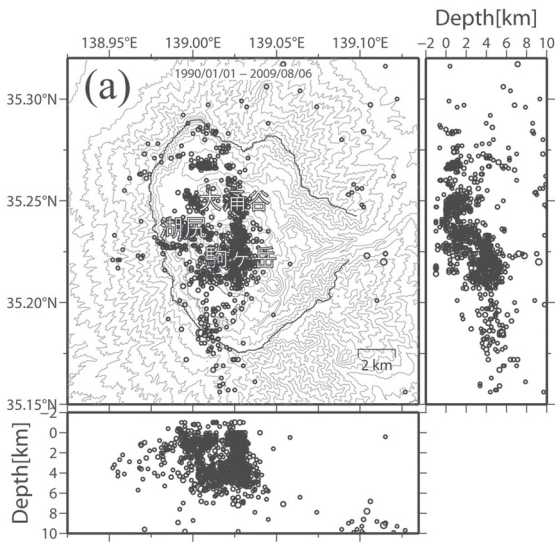
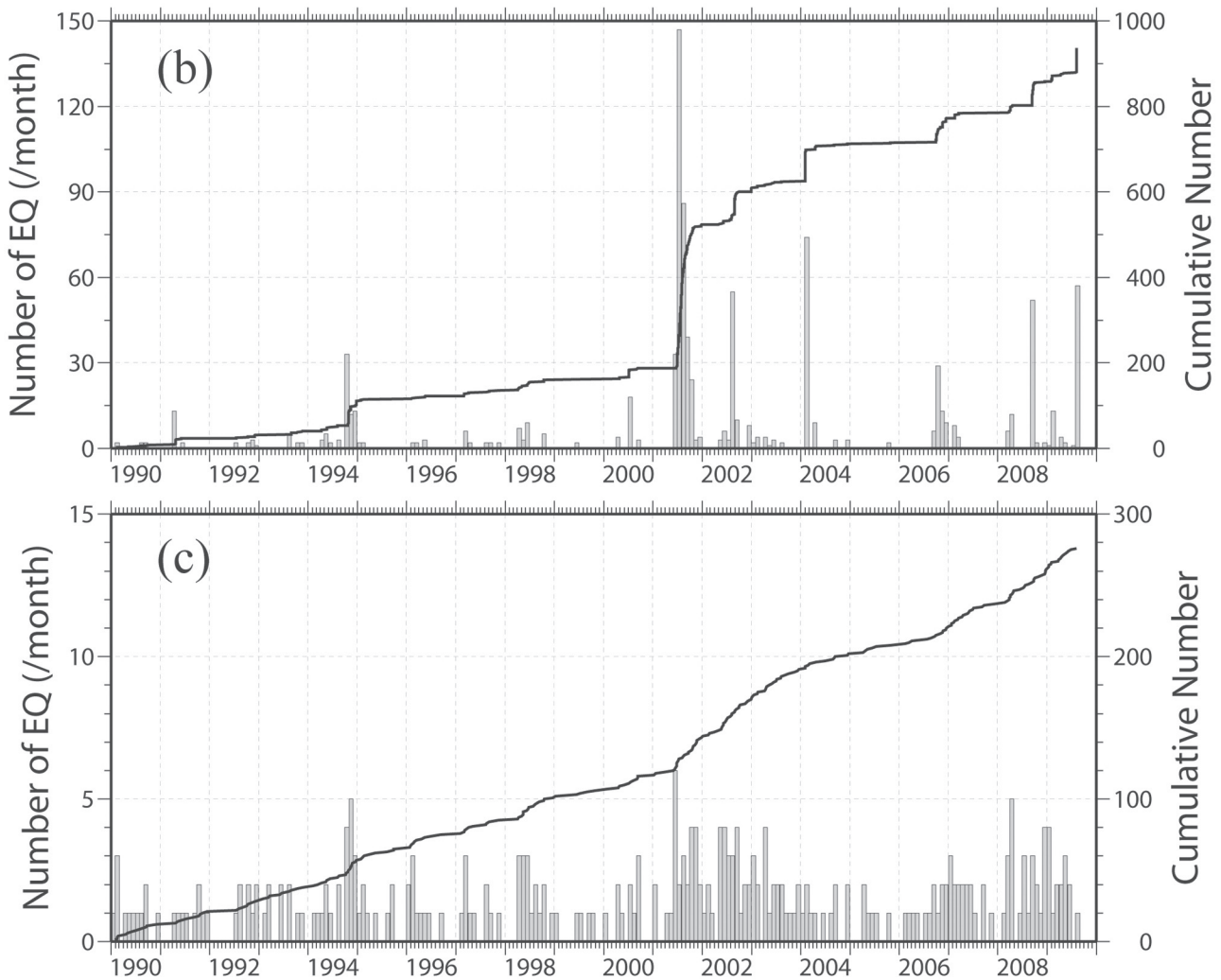


図5 箱根火山におけるM1以上の地震活動。(a)震源分布、(b)クラスター地震活動のM-T図・地震数積算曲線、(c)デクラスター処理をしたM-T図・地震数積算曲線。クラスターは2km、7日のウィンドウを用いている。震源カタログは温泉地学研究所による。

Fig. 5. (a) Seismic activity around Mt. Hakone ($M \geq 1$). (b) Clustered earthquakes. (c) De-clustered earthquakes, where earthquake occurring within 7 days and 2km are removed except the largest one in each cluster. Hypocenters are determined by HSRI.



は6月から10月にかけて、2006年の場合には7月から11月にかけて、そして、2008年の場合は6月頃から翌2009年の3月にかけて膨張歪が生じていることがわかる。2008～2009年の面積歪の膨張変化は、前2回に比べてその継続期間が明らかに長く、変化率が小さい。

箱根火山をはさむ北東-南西方向の基線長の変化を

見ると、3回の群発地震に伴う伸びが観測されている(図4(a)(b))。膨張域に含まれている北西-南東方向の基線長でも同様の伸びが見られる(図4(c))。しかし、膨張域外にある南北方向の基線長では、群発地震に伴う変動はほとんど観測されていない(図4(d)(e))。一方、箱根火山の東側における東北東-西南西方向の基線において

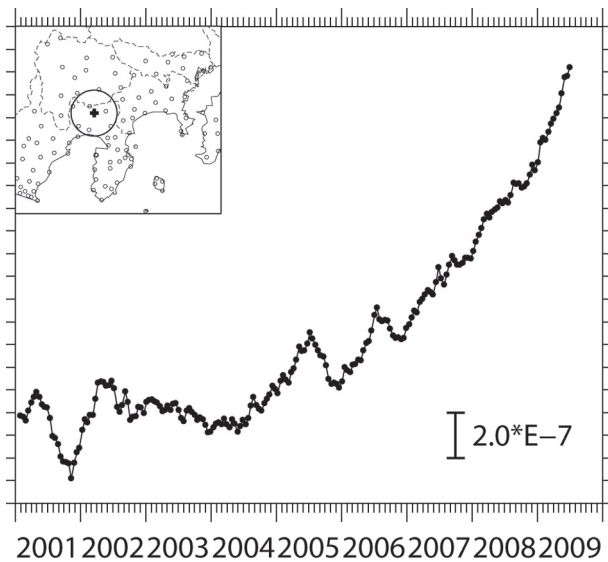


図6 富士山南東麓を中心とした半径20km以内の領域のGPS変位から求めた平均的な面積歪。

Fig. 6. Temporal change of the average dilatational strain in the circle shown in the inleted map. GPS data within 20km from Mt. Fuji are used. Strain changes are calculated by average of coordinates in 30 days and those in the preceding 30days.

は、群発地震に伴って短縮している(図4(f))。箱根火山の南北方向の基線長で変化が見られないことを球状圧力源で説明することは難しい。しかし、これらの基線長の変化の特徴は開口割れ目モデルでは解釈可能である。こうした点も3回の群発地震活動に伴う地殻変動の力源としては球状圧力源よりも開口割れ目モデルの方が適切であることを示唆する。

図5(a)は、温泉地学研究所によって決定された1990年以降の箱根カルデラにおけるマグニチュード(M)1以上の震央分布及びその深さ断面を示したものである。なお、地震観測については1989年のテレメータ観測の開始とともに観測点数が増加して震源決定精度や検知能力は向上している(棚田, 1999)。図5(a)では地震の下限をM1としており、解析期間ではM0.2~0.3の地震まで検知できていると推定されるので(伊東・ほか, 2009)、地震活動の変化を見る上で問題はない。図5(a)を見ると、地震活動は駒ヶ岳から大涌谷の南北方向と湖尻付近で特に活発であり、深さは6kmよりも浅いことがわかる。

これらの地震活動に対し、2kmの範囲内で7日以内に起こった地震をクラスター地震として抽出し、その積算の時間変化を示したものが図5(b)である。クラスター地震活動は、1990年から2001年の群発地震活動が

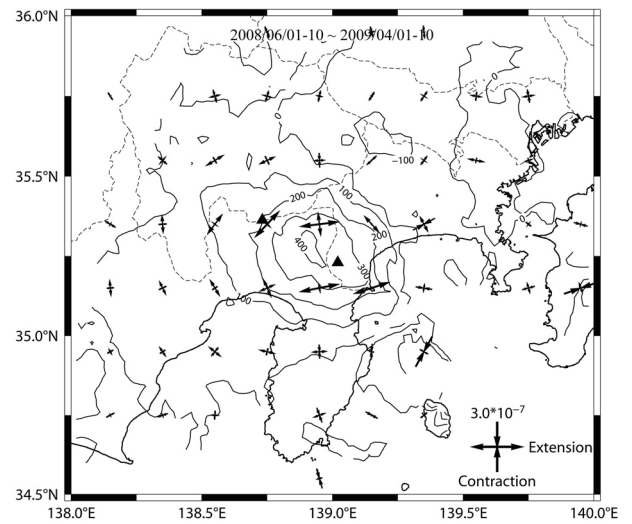


図7 2008/06/01 ~ 10 と 2009/04/01 ~ 10 の平均ベクトルの差から求めた地殻歪。面積歪の等値線の間隔は100nano-strain。▲は箱根火山と富士山を示す。

Fig. 7. Spatial distributions of dilatational strain accompanied by the Mt. Hakone volcanic earthquake swarm from 2008/06/01 to 2009/04/01. Interval of equi-strain lines is 100 nano-strain.

始まる2001年6月までの11.5年間に約200回起きているのに対して、それ以降の8年間では約750回であり、2001年箱根群発地震活動後にクラスター的な地震活動は明らかに増加している。

また図5(c)はデクラスター処理を行って、クラスター活動についてはウィンドウ(2km - 7日)中の最大地震のみを残したときの積算図である。デクラスター処理後の地震活動図は、箱根カルデラにおけるバックグラウンド的な活動の変化を表しているとみることができる。この図の地震積算曲線で注目されるのは、2001年箱根群発地震活動以後、それ以前と比べて地震活動が活発化している様子が見られる。そして、箱根火山を中心とした面積歪の経年変化の2001年、2006年、2008年における膨張の開始時期(図3参照)と、デクラスター地震活動の増加の時期が対応していて、全体的な変化の傾向もほぼ似ていることである(細野・他, 2009)。それに対してクラスター的な地震活動は、面積歪の膨張やデクラスター地震活動の立ち上がりの時期より、時間差は同じではないが、いずれの場合もやや遅れて活発化しているように見える。

これらのことから、2001年の群発地震を境に箱根火山の活動や周辺のテクトニクスに何らかの変化があったことが想定される。その状況の変化は2009年8月現

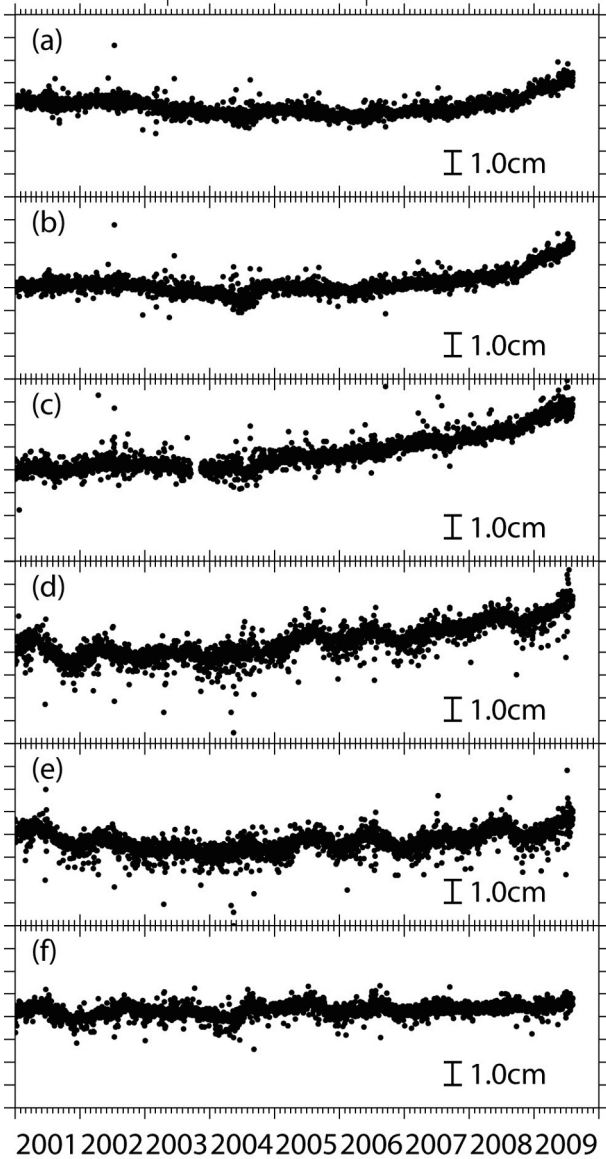
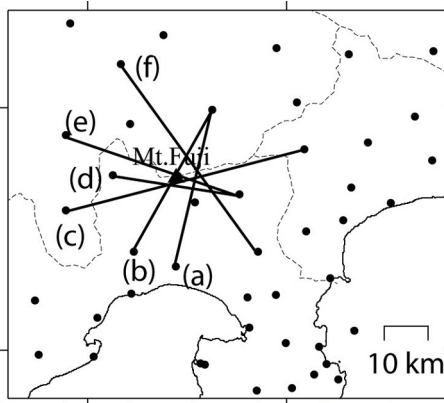


図8 富士山をはさむ基線長の変化。
Fig. 8. Time series of changes in baseline lengths across the Mt. Fuji.

在も続いていて、箱根カルデラ内の活動は2001年以後、それ以前と比べて活発化していると考えられる。

3. 富士山周辺の地殻変動と地震活動

富士山南東麓を中心とする半径20km以内の領域のGPS観測点の変位から求めた平均的な面積歪の、2001年以降の経年変化を図6に示す。富士山周辺では、2006年半ば頃から膨張歪変化が生じていて、その変化は箱根付近と異なって2009年8月になっても収束せず、むしろ更に加速する傾向が見えている。2008-2009年の期間について膨張歪の空間分布を調べると(図7)、箱根から富士山にかけての一带で膨張歪が現われている様子が見える。これは富士山の南側を中心にもつ膨張歪と前節で議論した箱根火山における膨張歪変化が重なっているためと考えられる。図3と図6を比べると、箱根付近と富士山周辺で生じている膨張歪の時間的推移は同じではなく、両地域の膨張の原因は別個にあると推定される。また、富士山を挟むGPS観測点間の基線長変化を見ると(図8)、北北東-南南西方向の基線長は2006年半ば以降の伸びが顕著であるのに対し(図8(a)(b)(c))、西北西-東南東方向の基線長は2004年以降あまり変化が見られない(図8(d)(e)(f))。このことから、富士山周辺の膨張歪に関する圧力源についても、球状圧力源より開口割れ目モデルの方が適切なように思われる。ただし、前述のように同時期に箱根火山周辺でも膨張歪が生じており、それを考慮した上でさらに今後詳しい検討を行う必要がある。

図9は2001年以降の富士山周辺部における低周波地震の地震活動を示したものである。気象庁による一元化以降の震源カタログを用いており、期間を通じて検知能力に変化はないと見てよい。図9からは、2001年4月や2004年6月に低周波地震が多かった時期はあるが、積算曲線は2006年以降の傾きがやや急になっており、同時期から低周波地震活動が活発化している様子が見える。一方、富士山を中心とした膨張歪もほぼ同時期の2006年半ば頃から増加傾向にあり、両者の変化の間には変化の傾向についての類似性が認められる。富士山直下の低周波地震は2000年秋に顕著に活発化した。吉田ほか(2006)は、その活発化を、それと同時期に富士山周辺で見られた面積歪の膨張と関連づけて議論している。2006年以降、低周波地震活動が活発化した様子が見られることと対応して、その周辺の膨張歪変化が増大傾向にあることは、2000年秋の状況と似ていて興味深い。なお、箱根火山の外輪山北部(金時山周辺)の深さ15km付近でも低周波地震が発生しているが、箱根火山を中心とした膨張歪との関連性は、一見して認められない。

4. まとめ

2008～2009年に箱根から富士山にかけての広い範囲で膨張歪が観測された。箱根付近の変化は2009年4月頃には収まったものの、富士山周辺では2009年10月現在もその変化が継続している。箱根付近では2001年、2006年にも膨張歪が観測されたが、2008～2009年の変化はそれらに比べて相対的に継続期間が長く、また、その歪変化がほぼ収まってから活発な群発活動が生じたことなど、前2回の地殻変動と比べて異なっている。主たる力源として、2001年の場合には球状圧力源、2006年の膨張については開口割れ目が推定されているが（例えば、代田ほか、2009；国土地理院、2007）、フォワードによるモデル計算を行った結果、GPSデータに現われた膨張歪のみを考えた場合、2001年の場合も含めて、同じ場所に生じた深さのみの異なる開口割れ目モデルでほぼ説明できることがわかった。

謝辞

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データの解析には中村（1999）によるプログラムを使用しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 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・小林昭夫・吉田明夫（2009）2001年箱根群発地震活動後の箱根から富士山にかけての地殻変動，日本火山学会秋季大会，P12。
- 細野耕司・棚田俊收・伊東博・本多亮・行竹洋平・原田昌武・吉田明夫（2009）箱根カルデラ内地震活動の長期変化、(準備中)。
- 伊東博・棚田俊收・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－，日本火山学会秋季大会，B01。
- 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）箱根山とその周辺地域の地殻変動，

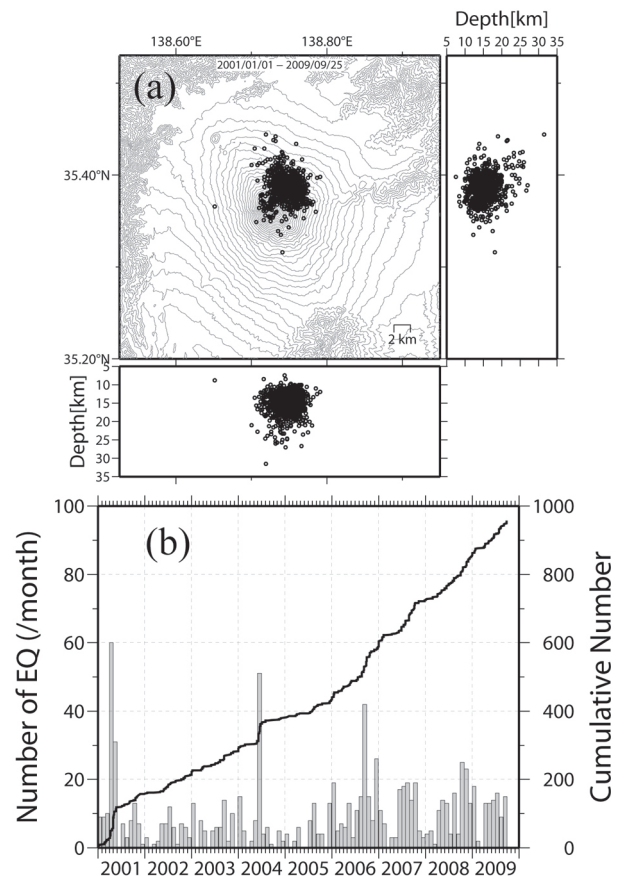


図9 富士山周辺部における低周波地震の地震活動。(a) 震源分布、(b) 月毎の地震数と地震数積算曲線。震源カタログは気象庁による。

Fig. 9. (a) Seismic activity of low-frequency earthquakes around Mt. Fuji. (b) M-T diagram and cumulative number of earthquakes. Hypocenters are determined by JMA.

- 火山噴火予知連絡会会報，-。
- 国土地理院（2009）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，-。
- 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・村上 亮（2001）2001年7月の箱根火山の地殻変動，日本火山学会秋季大会，A43。
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 棚田俊收（1999）温泉地学研究所の地震観測網における震源決定精度と検知能力、温地研報告，29，47-56。
- 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，58，401-406。