

## 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

代田 寧\*・棚田俊收\*・丹保俊哉\*\*・伊東 博\*・原田昌武\*・萬年一剛\*

(2009年3月12日受付, 2009年9月28日受理)

Temporal Change of the Pressure Source Estimated by Tilt Records  
During the 2001 Hakone Swarm ActivityYasushi DAITA\*, Toshikazu TANADA\*, Toshiya TANBO\*\*, Hiroshi ITO\*,  
Masatake HARADA\* and Kazutaka MANNEN\*

Remarkable changes were observed by tiltmeters installed in the Hakone caldera during the 2001 intense swarm activity. Using the records of the tiltmeters as well as the GPS data acquired by the Geographical Survey Institute (GSI), we investigate the pressure source which produced the crustal deformation. We divide the period from May 23 to September 9 into five stages based on the changes in the direction and the rate of tilt at Komagatake Station. The overall model during the whole period is composed of a Mogi-source at a depth of 7 km (volumetric expansion:  $7.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) and two shallow open cracks (depth range 0–0.2 km; volumetric expansion  $0.15\text{--}0.51 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). The tilt changes in each stage, including that in the first stage at the time when the swarm activity had not yet commenced, is well explained by the expansion of the same cracks, which is considered to show the validity of our pressure models. The strike of the crack in owakidani and that near Komagatake are WNW-ESE and NW-SE, respectively. The S-wave splitting analysis (Honda and Tanada, 2006) indicates existence of cracks in those directions around the source region, and many fissures in the NW-SE direction are observed on the surface of the field (Kobayashi *et al.*, 2006). However, local earthquakes are not distributed along the direction, but the epicentral area extends from south to north as a whole. This feature differs from that of the swarm activity occurring in the region east-off Izu Peninsula, in which extension of hypocentral distribution is estimated to correspond to the zone of dike intrusion. We consider that up-rising steam or volcanic gases compelled to open the pre-existing cracks to produce the crustal deformation in the 2001 Hakone swarm activity. It is plausible that the two-crack pressure source of our model represents a set of many small cracks or the largest one in the source region.

**Key words:** Hakone volcano, earthquake swarm, crustal deformation, temporal change, tiltmeter

## 1. はじめに

箱根火山は本州中部の伊豆半島北端部に位置する活火山である。有史のマグマ噴火の記録はないが、多数の有感地震を伴う火山性の群発地震活動がこれまで何度か観測されている。平賀 (1987) によれば、1786年以降約130年間の平穏期を経て、1917年、1920年、1935年、1943年、1952年、1959年に有感地震や地鳴りを伴う規模の大き

な群発地震が発生し、中には噴気異常が認められた活動もあった。1960年以降は小規模な地震活動はあったものの、地鳴りや噴気異常を伴うような群発地震は2001年まで発生していなかった (平賀, 1987; 伊東・棚田, 1999; 萬年, 2003)。2001年の群発地震活動は、約4ヶ月に及ぶ発生期間の長さや地震の体感回数多さ、噴気異常の出現などの点から見て、平賀 (1987) がまとめた過去の顕

\* 〒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.

\*\* 現在: 〒930-1405 富山県中新川郡立山町芦峯寺字ブナ坂 68

立山カルデラ砂防博物館  
Tateyama Caldera Sabo Museum, 68 bunasaka, asikuraji, tateyama, toyama, 930-1405, Japan.

Corresponding author: Yasushi Daita  
e-mail: daita@onken.odawara.kanagawa.jp

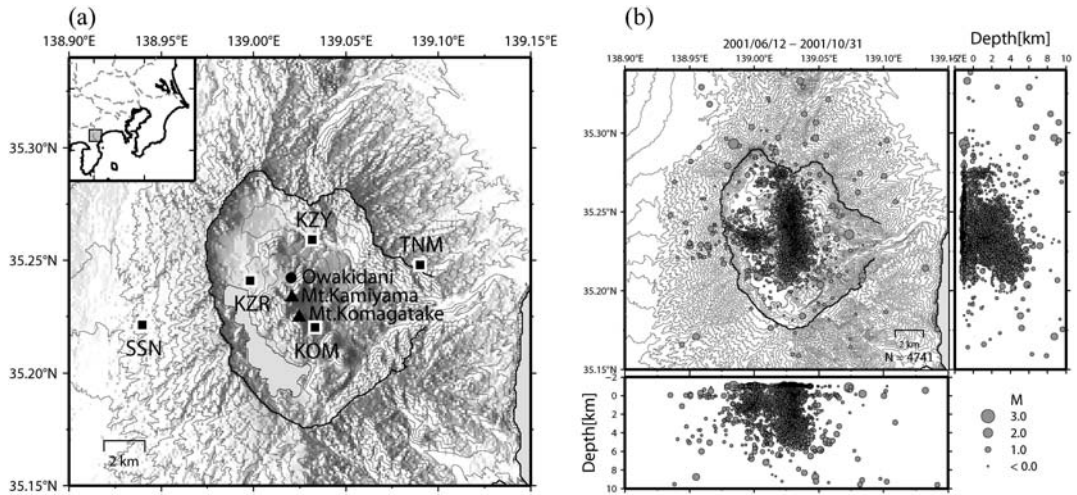


Fig. 1. (a) Location of tiltmeters, and (b) epicenters and cross sections of earthquakes during the period from June 12 through October 31, 2001. KOM, KZR, KZY, TNM and SSN represent Komagatake, Koziri, Kozukayama, Tonomine and Susono, respectively.

著な群発地震活動に匹敵するものであった。以下にその概要を記す。

地震は6月12日17時頃から中央火口丘北側の大涌谷付近を中心とした地域で多発し始め、10月初旬までの約4ヶ月間にわたって活発な状態が続いた。温泉地学研究所（以下、温地研）が観測した総地震数は震源が決定できなかったものも含めて15,000個以上に達したが、ほとんどはマグニチュード1以下であり、最大でもM2.9（7月21日）であった。6月29日は大涌谷付近と駒ヶ岳付近で、7月21日は大涌谷付近で1日に1000個前後の地震が発生し、とくに活発であった。震源は南北方向に帯状分布し、南側から北側に向かって浅くなる傾向を示した。7月下旬から8月上旬にかけては地震が西方の芦ノ湖北岸域に集中して発生し、同時期から大涌谷付近の地震は減少した（Fig. 1; 温泉地学研究所, 2002; 棚田・他, 2002; 鶴川, 2002）。気象庁の発表では、有感地震は7月21日に発生したM2.9の地震だけであるが、温地研が大涌谷の施設で独自に観測している計測震度計や加速度計のデータから、現地で体感したであろう地震は100回以上あったと推定されている（棚田・他, 2002）。地元住民からの有感地震数の問い合わせも多かった（棚田・他, 2002）。こうしたことは、震源の多くが非常に浅かったことを示唆している。

今回の活動の特徴は、地震数が多かったことに加えて、国土地理院のGPS観測網（GEONET）や気象庁の体積歪計、そして温地研の光波測量網によっても、箱根カルデラを中心とした山体の隆起および膨張を示す地殻変

動が観測されたことである（気象庁地震予知情報課, 2002; 気象研究所, 2002; 国土地理院, 2002; 西村・村上, 2001; 西村・他, 2001; 丹保・他, 2005; 吉川・他, 2001）。このような地殻変動が箱根火山で捉えられたのは初めてであった。また、最大の噴気地帯である大涌谷内の蒸気井が暴噴したり（辻内・他, 2003）、震央域の近くに位置する高温の塩化物泉で温度上昇が確認されたりした（石坂・他, 2002）。さらに、大涌谷の東側1.5kmほどに位置する強羅地区の住民から地鳴りを聞いたとの報告もある（辻内・他, 2003）。こうしたことから、今回の群発地震活動は火山活動の活発化に伴うものであったと考えられる。

2001年群発地震活動は、1989年に温地研の地震観測網がテレメータ化され、地殻変動観測も整備された後に発生した。そのため、詳細な震源分布に加え、地殻変動観測においても時間精度の良い変化記録が得られた。特に、中央火口丘の3箇所に設置されたボアホール型の傾斜計は群発地震活動に伴う明瞭な地殻変動を捉えることに成功した（代田・他, 2002b）。国土地理院のGPS観測網（GEONET）によっても、箱根カルデラの中央火口丘をはさむ神奈川県箱根町と静岡県裾野市にある観測点間で約2cmの伸び、そして箱根観測点では約2cmの隆起が、同年6後半から9月中旬にかけて観測されている。

GEONETデータと温地研傾斜データを使って、国土地理院（2002）が6月中旬から9月上旬までの地殻変動を説明する圧力源モデルを提出している。そのモデルは深さ7.4kmの球状圧力源1つと上端の深さが1km前後

の2つの浅い開口割れ目からなり、おおむね観測値を説明できていることから大局的なモデルとしては問題ないと考えられる。しかし、活動期間中に震源が移動したり、傾斜方向が変わったりする変化が見られ、その活動は一様ではない。そこで我々は、傾斜変化パターンや震源分布の変化を基に、群発地震活動開始前の2001年5月から同年9月にかけての期間をいくつかの段階に区分けして、圧力源の時間的推移を考慮した詳しい解析を主に時間分解能の高い傾斜計データを用いておこなった。議論ではその解析結果を踏まえながら、噴気活動との関連や地殻変動をもたらした要因について考察する。

## 2. 傾斜変動と地震活動の時間的推移

温地研では、箱根カルデラ内に小塚山(KZY)、湖尻(KZR)、駒ヶ岳(KOM)の3ヶ所、外輪山外側斜面に塔の峰(TNM)、裾野(SSN)の2ヶ所の合計5ヶ所にボアホール型傾斜計を設置して箱根火山の傾斜変動を連続観測している(Fig. 1)。観測に用いている傾斜計は南北、東西水平2成分の力平衡型振子式で、それぞれ深度約100mの観測孔内に設置している。分解能は $0.007\mu\text{rad}$ (以下、 $\mu\text{rad}$ )、サンプリング間隔は1秒であり、毎正分の瞬時値を観測データとして保存している(八巻・他, 1990)。

2001年1月から12月までの傾斜データをFig. 2に示す。傾斜データは、BAYTAP-G(Tamura *et al.*, 1991)により潮汐成分を取り除いた毎正時値である。図には、温地研の地震波形記録から読み取った1日当たりの発生地震数と積算地震数、および仙石原における日雨量もあわせて示した。群発地震が発生した6月中旬から複数の観測点において明瞭な傾斜変化が観測された。しかし、台風15号が9月11日に神奈川県を通過したことにより、箱根仙石原では9月9日~11日における積算雨量が600mmに達した。その影響により、KZRの両成分とKZYのEW成分では9月中旬から傾斜方向が大きく変化し、群発地震活動に伴う傾斜変化を識別することが困難となった。KZRの両成分とKZYのEW成分は、これまでの観測により降雨の影響が大きいことがわかっており(代田・他, 2002a)、その影響を定量的に取り除くことは難しい。そこで、本報では、地殻変動による変化を現していると考えられる9月9日までのデータについて取り扱うこととした。

傾斜変化の特徴及び地震活動状況を踏まえて、群発地震発生前のI期(5月23日~28日)とII期(5月29日~6月11日)、群発地震活動初期に当たるIII期(6月12日~23日)、群発地震活動が最盛期だったIV期(6月24日~7月23日)、群発地震活動後期のV期(7月24日~9月9日)の5期間に区分けした。以下に各期の特徴を述

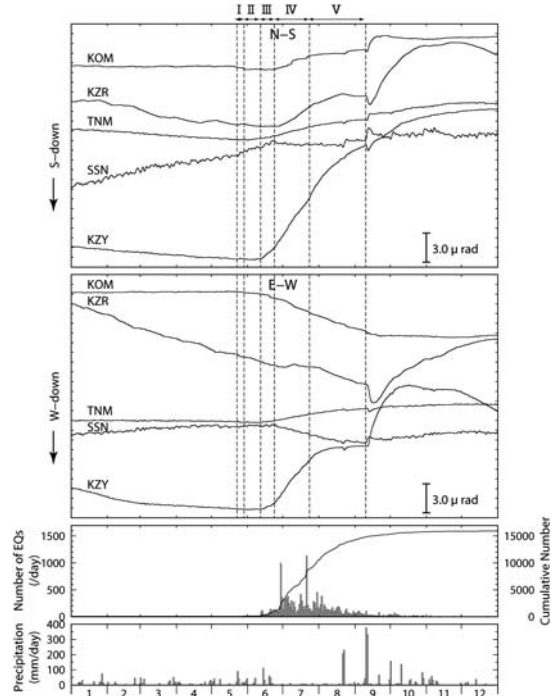


Fig. 2. Tide-removed tiltmeter data for the period from January to December, 2001, with daily numbers of earthquakes and daily precipitation.

べる(Table 1)。なお、各観測点における傾斜変動の詳細は、代田・他(2002b)にまとめてある。

### I期(5月23日~28日): 群発地震活動前の変動(その1)

群発地震活動が始まる3週間前の5月23日からKOMで南西下がりの変動が現れ、その変動量は $0.27\mu\text{rad}$ (変動速度は $0.04\mu\text{rad/day}$ 、以下 $\mu\text{rad/day}$ は1日当たりの変動量(変動速度)を示す)に達した。KOM以外では傾斜変動は認められない。KOMにおける2001年1月から12月までの傾斜ベクトル図をFig. 3に示した。

### II期(5月29日~6月11日): 群発地震活動前の変動(その2)

5月29日頃から、KOMの傾斜方向はそれまでの南西下がりから西下がりになり変わり、 $0.14\mu\text{rad}$ ( $0.01\mu\text{rad/day}$ )の変動が観測された。KOMは降雨時においてもほとんど傾斜変化を生じない安定した観測点であり(代田・他, 2002a)、I期とII期の変化は群発地震活動に先行した変動であった可能性が高いと考えられる。I期と同様に、KOM以外では傾斜変動は認められない。

### III期(6月12日~23日): 群発地震活動前期

群発地震活動が始まった6月12日以後も、KOMに

Table 1. Tilt change and change rate at each observation point over the stage of I to V.

Stage	KOM	KZY	KZR	TNM	SSN	Notes
I (5/23-5/28)	0.27 (0.04)	—	—	—	—	5/23 SW-down tilting started at KOM. 5/24-26 Rise of hot spring temperature was observed (Ishizaka et al., 2002).
II (5/29-6/11)	0.14 (0.01)	—	—	—	—	5/29 Tilt direction at KOM changed to W-down.
III (6/12-6/23)	0.40 (0.03)	1.15 (0.10)	0.37 (0.03)	0.29 (0.02)	0.64 (0.06)	6/12 Swarm activity started. 6/12 NE~NNE-down tilting started at KZY.
IV (6/24-7/23)	2.15 (0.07)	6.91 (0.23)	1.90 (0.06)	1.14 (0.04)	1.11 (0.04)	6/24 Tilt direction at KOM changed to NW-down. 6/24 Tilt direction at KZY changed to NE-down. 6/29 Violent activity (ca. 1000 earthquakes per day) occurred beneath Owakidani and Komagatake. 7/21 Violent activity (ca. 1100 earthquakes per day) including the largest one of M 2.9 in the swarm activity in 2001 occurred beneath Owakidani. 7/21 Uncontrollable discharge started at the steam well in Owakidani.
V (7/24-9/9)	2.41 (0.05)	5.17 (0.11)	1.92 (0.04)	1.05 (0.02)	1.05 (0.02)	7/27 Seismic activity moved to the west (Northern coast of Lake Ashi).

The unit of tilt change is in  $\mu$ rad. The value in parenthesis indicates the tilt change rate in  $\mu$ rad/day.

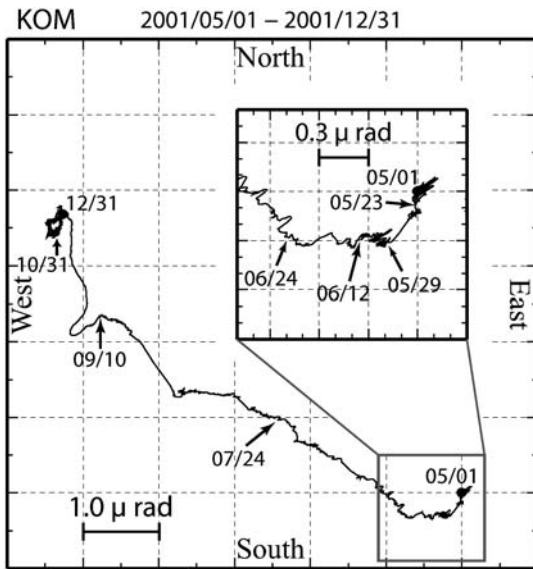


Fig. 3. Tide-removed tilt-down vector diagram at KOM for the period from January to December, 2001.

においてはII期と同じ西下がりの変動が継続し、傾斜方向の変化は見られなかった。ただし、23日までの変動量は $0.40 \mu\text{rad}$  ( $0.03 \mu\text{rad/day}$ )となり1日当たりの変動量はII期に比べて3倍程度に増加した。

大涌谷で地震が多発し始めた6月12日に、KZYではそれまでの定常的な南西下がりの傾斜変動が反転して、北東～北北東下がりとなった。その傾斜変動の反転は、地震の発生より1日半程度先行していた可能性もあるが、ほぼ地震発生と同時期に始まったと見られる(代田・他, 2002b)。この期間のKZYの変動量は $1.15 \mu\text{rad}$  ( $0.10 \mu\text{rad/day}$ )であった。

KZRでは、地震活動前の定常的な南西下がりの傾斜変動が西下がりへと変化している。この間の変動量は $0.37 \mu\text{rad}$  ( $0.03 \mu\text{rad/day}$ )であった。ただし、降雨の影響

が大きい観測点であり(代田・他, 2002a)、必ずしも地殻変動だけを現していたとは言い切れない。

TNMでは、 $0.29 \mu\text{rad}$  ( $0.02 \mu\text{rad/day}$ )の北東下がりの変動が認められた。この観測点は降雨の影響が少なく、通常はほとんど変化をしない安定した観測点である(代田・他, 2002a)。

SSNにおいても、地震活動前の定常的な変化とは異なる変動が観測された。ただし、この観測点においては、NS成分で $0.8 \mu\text{rad/month}$ の北下がり、EW成分で $0.17 \mu\text{rad/month}$ の東下がりのドリフト的な変化が定常的に認められること(代田・他, 2002b)、他の観測点では見えない短周期の変化が見られ、ややノイズの大きな観測点であること(代田・他, 2002a)などから、地殻変動による傾斜変化を抽出するのは難しい。おおむね $0.64 \mu\text{rad}$  ( $0.06 \mu\text{rad/day}$ )の北下がりの変化が生じたと推定される。

#### IV期 (6月24日～7月23日): 群発地震活動最盛期

KOMではIII期とは傾斜方向が変化し、北西下がりとなった。この期間の変動量は $2.15 \mu\text{rad}$  ( $0.07 \mu\text{rad/day}$ )であった。傾斜方向が変化した6月24日は、大涌谷や駒ヶ岳を中心として1日に約1000個の地震が発生した6月29日の直前であり、この変化が地震活動の活発化と関連していた可能性がある。しかし、6月29日と同様の激しい地震活動があった7月21日の前には傾斜方向の変化は認められなかった。

KZYでは6月24日頃から傾斜方向がわずかに変わり、北東下がりとなった。変動量は $6.91 \mu\text{rad}$  ( $0.23 \mu\text{rad/day}$ )であり、最も地震活動が活発だったIV期には、III期よりも1日当たりの変動量が2倍以上大きくなった。地震活動の活発化とKZYの傾斜変動とは対応していたように見える。

KZRでは、傾斜方向が変化して $1.90 \mu\text{rad}$  ( $0.06 \mu\text{rad/day}$ )の北北東下がりとなった。

TNMでは、III期と同じ北東下がりの変動が継続し、変動量は $1.14 \mu\text{rad}$  ( $0.04 \mu\text{rad/day}$ )であった。



SSN では、傾斜方向が変化し、おおむね  $1.11\mu\text{rad}$  ( $0.04\mu\text{rad/day}$ ) の西下がりとなった。

#### V期 (7月24日～9月9日): 群発地震活動後期

KOM では北西下がりの変動が続いており、この期間の変動量は  $2.41\mu\text{rad}$  ( $0.05\mu\text{rad/day}$ ) であった。1日当たりの変動量を比較すると、KOMにおけるIV期以降の変化は小さい。

KZY では、傾斜方向が北北東下がりに変化するとともに、1日当たりの変動量も  $0.11\mu\text{rad}$  と小さくなった。大涌谷付近では7月21日に約1100個の地震が発生したのち地震数は減少したが、傾斜変動も7月21日の直後の7月23日頃に傾斜方向が変化するとともにそれ以後変動が鈍化した。KZYの傾斜変動は、大涌谷近辺で発生する地震活動の消長と対応していたように見える。

KZRにおいては、8月1日を境として、北北西下がりから北西下がりへと傾斜方向が変化した。KZRに近い芦ノ湖北岸域では、7月27日～8月5日の間に1日20個以上の活発な地震活動が観測されている。降雨による年周変化が大きいため明確ではないが、KZRで見られた傾斜変動はこの地震活動に関連していた可能性がある。

TNM および SSN では、傾斜方向はIV期とほとんど変わらず、1日当たりの変動量は半分程度に減少した。

### 3. 地殻変動圧力源の解析

GEONET では、箱根火山中央火口丘を中心とした放射状の変位が観測されており(国土地理院, 2002)、その変動は1つの球状圧力源(茂木モデル; Mogi, 1958)で説明が可能である。しかし、KZY や KOM の傾斜変動を説明するには複数のローカルな圧力源を想定する必要がある。ここでは開口割れ目(Okada, 1992)を仮定して地殻変動源のモデル化を試みる。ローカルな圧力源による変動が大きく寄与する傾斜計データだけでは球状圧力源の解析は難しいため、まず GEONET データから球状圧力源のおおよその位置を求め、その結果をもとに、時間分解能に優れた傾斜計データを使って、傾斜変動を説明する最適モデルを構築する。

最初に、群発地震活動期間の基本的な変動を示すモデルとして、地震が多発し始めるとともに KZY の傾斜変動が観測された6月12日から、台風による影響が現れる前の9月9日までの約3ヶ月間の地殻変動について解析をおこなった。以下ではこれを基本モデルと呼ぶこととし、3-1節でそれについて述べる。次に、圧力源の時間変化を明らかにするために、群発活動最盛期を挟む2001年5月から9月にかけての期間を4つに分け、それぞれの区間について圧力源の解析をおこなった。その区分は、時間の経過とともに傾斜方向が次第に変化した KOM の

変動を基準とした。その解析結果を3-2節で示す。

解析には、気象研究所が開発した火山用地殻活動解析支援ソフトウェア MaGCAP-V (福井, 2008) を使い、計算値と観測値の残差2乗和が最小になるようにグリッドサーチによりパラメータを求めた。実際には、パラメータの数が多いため、最初は刻み量を大きくして計算し、徐々に刻み量を小さくして最適解を絞り込んだ。MaGCAP-V は、標高を考慮した標高補正茂木モデル、Okada (1992) による開口割れ目、およびそれらを組み合わせた複合モデルにより、地殻変動圧力源の推定が可能なソフトウェアである。なお、比較計算に用いた傾斜観測データは、BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) により潮汐成分を取り除いた毎正時値を用いた。

#### 3-1 群発地震活動期間全体の地殻変動モデル(基本モデル)

6月12日から9月9日までの約3ヶ月間の変動について、1つの球状圧力源と、KZY および KOM の変動をそれぞれ説明する2つの開口割れ目を仮定して解析をおこなった。この約3ヶ月間は、おおむね群発地震活動が始まってから終息するまでの期間に相当し、2001年の地殻変動の全体像を示すと考えられる。

まず、GEONET データにより、球状圧力源の緯度、経度、深さ、体積増加量のおおよその値を求める。そうして求めたおおよその球状圧力源と2つの開口割れ目のパラメータ(緯度、経度、上端の深さ、長さ、幅、走向(Strike)、傾斜角(Dip)、開口量)を未知として扱い、傾斜データを用いたフィッティングによって基本モデルを構築した。2つの開口割れ目の走向と傾斜角には制限を設けなかったが、位置(緯度、経度、深さ)については観測された地震活動や傾斜変動から以下のように拘束した。

1番目の開口割れ目モデル(A1)は、KZY の大きな傾斜変動を説明できるように設定した。KZY の傾斜変動は大涌谷付近の浅部地震活動の消長と同調した傾向があることから、開口割れ目は大涌谷の浅部にあると考えた。グリッドサーチの範囲は大涌谷付近の震央域を含む領域で、モデル上端の深さは地震が多発している2kmまでとした。

2番目の開口割れ目モデル(B1)は、KOM の傾斜変動を説明できるように設定した。第2節で述べたように群発地震活動に先行する変動が KOM のみに認められたことから、KOM 付近の浅部に圧力源があると仮定した。また、傾斜方向が活動期間の間に変化していることから、複数のソースを配置することやソースが移動することなども考えられたが、ここでは単純に1つの開口割れ目モデルを採用した。グリッドサーチの範囲は、KOM

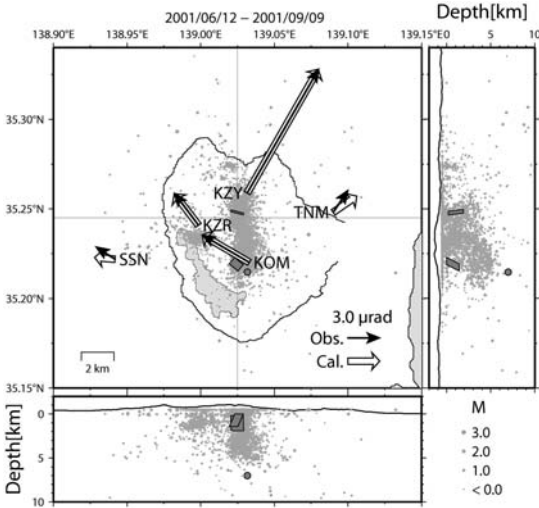


Fig. 4. A source model for the crustal deformation in 3 months from June 12 to September 9, 2001 (Basic model). Gray dots indicate epicenters and cross sections of earthquakes.

付近の震央域とし、上端の深さは2 km までとした。

解析の結果、群発地震活動のほぼ全期間（6月12日から9月9日までの約3ヶ月間）の地殻変動は、Fig. 4に示すように、駒ヶ岳の南東約1 km、深さ7 kmに位置する球状圧力源、大涌谷浅部（上端の深さ0.2 km）の西北西-東南東走向の開口割れ目A1、駒ヶ岳浅部（上端の深さ0 km）の北西-南東走向の開口割れ目B1の3つの圧力源により説明できることがわかった。また、このモデルでは、おおむねGPSの変化も説明できている（Fig. 5）。この基本モデルのパラメータをTable 2に示す。国土地理院（2002）モデルと比較すると、3つの圧力源の位置や深さに関しては大きな相異は無いが、基本モデルでは球状圧力源の体積増加量が国土地理院（2002）モデルの約2倍、一方、駒ヶ岳浅部の開口割れ目の体積増加量は約1/3となっている。

### 3-2 圧力源の時間変化

主として時間の経過とともに傾斜方向が変化したKOMの変動を基に、①KOMの変動が南西下がり示したI期（群発地震開始前）、②西下がり示したII～III期（群発地震直前から初期）、③北西下がり示したIV期（群発地震最盛期）、④KOMの変動は引き続き北西下がりであるが、KZYにおいて傾斜方向と変動量に変化が見られたV期（群発地震後期）の4期間に区切って、圧力源の時間変化を調べた。

(1) 群発地震開始前（I期：5月23日から28日まで）KOMにおける南西下がり0.27  $\mu$ radの変化を説明す

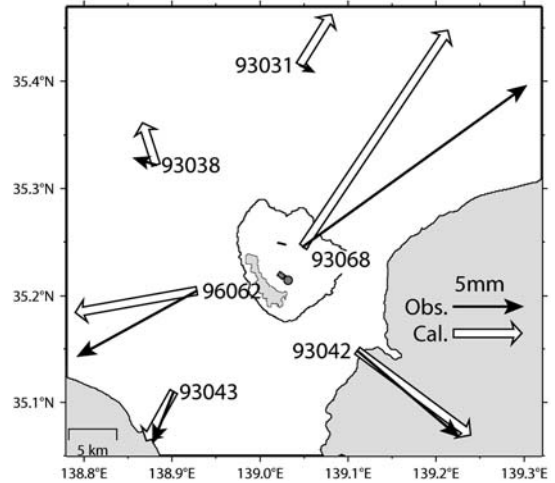


Fig. 5. Comparison of horizontal displacements observed at GPS stations of GSI with those calculated by the basic model.

るモデルを考える。解析に用いるデータがKOMだけのため、uniqueな解が求まるわけではないが、水平位置や深さに関して基本モデルと同様の拘束条件を与えて、KOM付近の浅部に開口割れ目B2を仮定してグリッドサーチをおこなった。その結果（Fig. 6, Table 2）、位置、走向、傾斜角は、B1モデルのそれらとほぼ一致することがわかった。この結果は、地震活動に先行した傾斜変動が、基本モデルで示した開口割れ目B1と同じ圧力源によって生じたと考えて矛盾しないことを示している。なお、深部の球状圧力源はKOMのほぼ真下に推定されているため、球状圧力源ではKOMの南西下がりの変化を説明することはできない。

(2) 群発地震直前から初期（II～III期：5月29日から6月23日まで）

KOMにおいて西下がりの変動を示した5月29日から6月23日まで（II～III期）のモデルを考える。この期間は、他の観測点においても変動が認められることから、基本モデルと同様に球状圧力源と2つの開口割れ目を設定する。

球状圧力源の位置は、基本モデルと同じ位置に固定し、体積増加量のみをTNMの変動量から見積もった。なお、TNMは開口割れ目から5 km以上離れているため、2つの開口割れ目による影響は無視できるほど小さいとした。

2つの開口割れ目（A3, B3とする）については、全てのパラメータを未知としてグリッドサーチをおこなった。解析結果をFig. 7とTable 2に示す。

Table 2. Parameters of each of the source models.

Basic Model											
	Long.	Lat.	D(km)	$V(\times 10^6 \text{m}^3)$	L(km)	W(km)	Strike( $^\circ$ )	Dip( $^\circ$ )	Open(m)		
Mogi source	139.032	35.215	7.0	7.1	—	—	—	—	—		
Open crack (A1)	139.029	35.247	0.2	0.15	0.8	1.7	285	86	0.113		
Open crack (B1)	139.023	35.223	0.0	0.51	0.7	1.5	130	70	0.487		
Temporal change models											
	Stage	Long.	Lat.	D(km)	$V(\times 10^6 \text{m}^3)$ ( $\times 10^3 \text{m}^3/\text{day}$ )	L(km)	W(km)	Strike( $^\circ$ )	Dip( $^\circ$ )	Open(m)	
Mogi source	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	II ~ III	139.032	35.215	7.0	1.2	—	—	—	—	—	
	IV	139.032	35.215	7.0	3.0	—	—	—	—	—	
	V	139.032	35.215	7.0	2.9	—	—	—	—	—	
Open crack (A2)	I	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	(A3)	II ~ III	139.029	35.249	0.2	0.01 (0.9)	0.5	1.7	285	86	0.012
	(A4)	IV	139.026	35.245	0.2	0.10 (3.2)	0.8	1.7	283	81	0.071
	(A5)	V	139.030	35.245	0.2	0.06 (1.2)	0.8	1.7	288	87	0.046
	Open crack (B2)	I	139.024	35.219	0.0	0.01 (1.7)	0.2	1.2	130	80	0.035
(B3)		II ~ III	139.025	35.220	0.0	0.04 (1.6)	0.3	1.4	130	70	0.102
(B4)		IV	139.020	35.225	0.0	0.25 (8.1)	0.7	1.5	134	65	0.239
(B5)		V	139.023	35.223	0.0	0.26 (5.4)	0.7	1.5	127	73	0.243
GSI(2002) Model											
	Long.	Lat.	D(km)	$V(\times 10^6 \text{m}^3)$	L(km)	W(km)	Strike( $^\circ$ )	Dip( $^\circ$ )	Open(m)		
Mogi source	139.033	35.215	7.4	3.8	—	—	—	—	—		
Open crack (A)	139.028	35.241	0.6	0.13	1	1	306	55	0.13		
Open crack (B)	139.024	35.227	1.1	1.5	2	3.5	145	79	0.22		

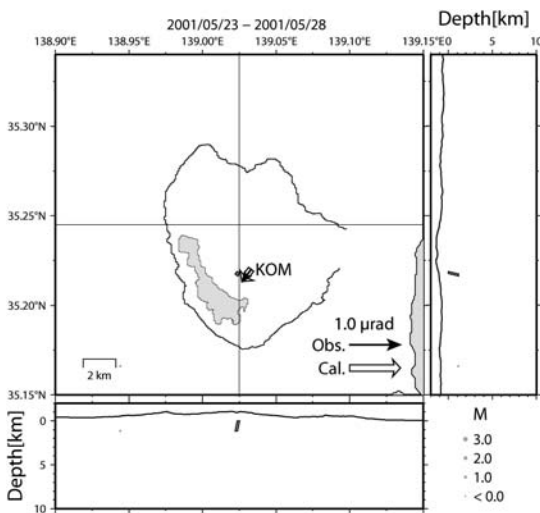


Fig. 6. A source model for the period from May 23 to May 28, 2001, before the swarm activity started (Stage I).

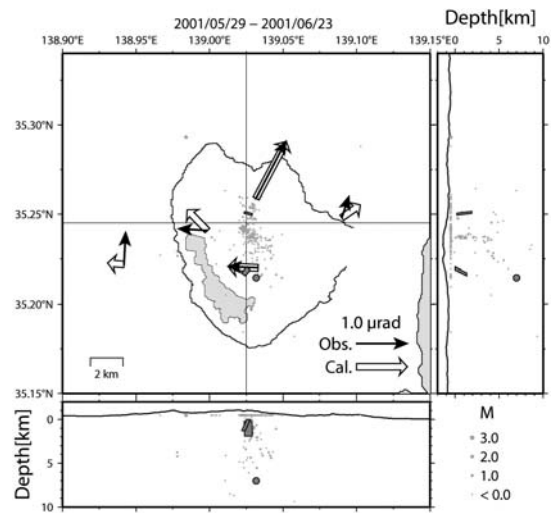


Fig. 7. A source model for the period from May 29 to June 23, 2001 (Stages II and III). Gray dots indicate epicenters and cross sections of earthquakes.

2つの開口割れ目 (A3, B3) のパラメータ (位置, 走向, 傾斜角) は, 基本モデルとほぼ一致した. さらに, 駒ヶ岳浅部の開口割れ目 B3 も B2 モデルとほぼ同じ結果になったことから, KOM の傾斜方向が南西下がりか

ら始まり, 西下がり, 北西下がりへと変化していったのは, 駒ヶ岳浅部の1つの開口割れ目が開口しながら広がっていったことによると考えてさしつかえないことがわかる. なお, SSN や KZR で観測値とずれが大きいのは

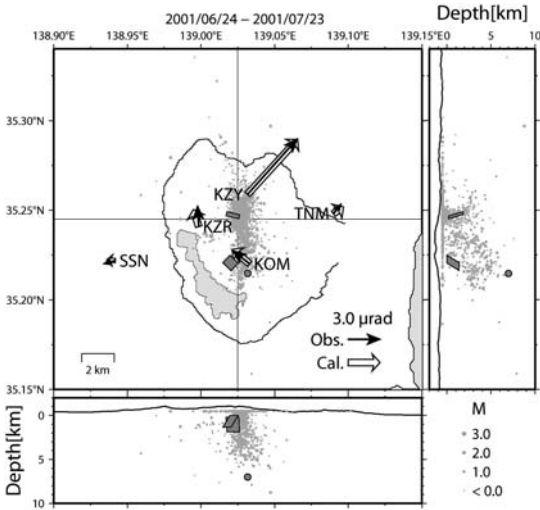


Fig. 8. A source model for the period from June 24 to July 23, 2001 (Stage IV). Gray dots indicate epicenters and cross sections of earthquakes.

は、それらの観測点において降雨の影響や定常的な変化が大きいためと考えられる。

### (3) 群発地震最盛期 (IV期: 6月24日から7月23日)

KOMにおいて北西下がりの変動を示した6月24日から7月23日まで (IV期) の期間について、(2)と同様の条件により球状圧力源と2つの開口割れ目 (A4, B4とする) を仮定して解析した。

結果は Fig. 8 と Table 2 に示してある。2つの開口割れ目は、位置、走向、傾斜角がともに基本モデルや(2)の結果とほぼ一致した。したがって、IV期についても、それぞれ同じ開口割れ目が開口しながら広がっていったとして説明できることになる。1日当たりの体積増加量についてⅡ～Ⅲ期と比較すると、開口割れ目Aでは  $0.9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  が  $3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  へ、Bでは  $2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  が  $8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  へとそれぞれ3倍以上増加しており、群発地震の活発化とよく対応している。

### (4) 群発地震後期 (V期: 7月24日から9月9日)

KZYにおいて傾斜方向と変動量に変化が見られた7月24日から9月9日まで (V期) の期間について、同様に球状圧力源と2つの開口割れ目 (A5, B5とする) を仮定して解析した。この期間はKZRに近い芦ノ湖北岸域で活発な地震活動が発生しており、KZRの傾斜変動にはこの地震活動に関連したローカルな圧力源が影響している可能性がある。実際に、これまでと同様の方法で計算すると解の収束が悪く、KZR付近に別の圧力源を仮定する必要があると思われる。しかしながら、KZRは降雨等による年周変化が大きく、地殻変動による変化だけ

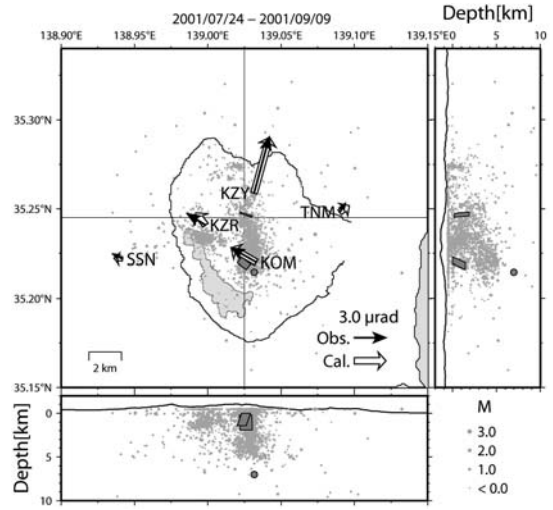


Fig. 9. A source model for the period from July 24 to September 9, 2001 (Stage V). Gray dots indicate epicenters and cross sections of earthquakes.

を抽出するのは難しいため、ここでは取り扱わないこととして、KZRのデータを除いて解析した。

結果は Fig. 9 と Table 2 に示してある。やはりKZRのずれが大きく、ローカルな圧力源の存在が示唆される。2つの開口割れ目のパラメータについては、これまでの結果とおおむね同様であり、やはりそれぞれ同じ開口割れ目が開口しながら広がっていったとして矛盾しない。開口割れ目Aの体積増加量は、1日当たり  $1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  となり、IV期と比較して1/3程度に減少した。この期間は大涌谷を震源とする地震発生数が減少しており、地震活動の変化との対応が見られる。開口割れ目Bも  $5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  に減少しているが、IV期と比較して2/3程度であり、減少率は低い。

なお、期間を区切って解析したモデルの体積増加の積算は、3ヶ月間 (Ⅲ～Ⅴ期) の基本モデルの体積増加とおおむね一致しており、時間的変動モデルと基本モデルは整合している。

## 4. 議 論

### 4-1 本論文の地殻変動圧力源モデルの特長

2001年5月から9月にかけての箱根の地殻変動は、傾斜計で複雑な変化が記録されているにもかかわらず、1つの球状圧力源と2つの浅部の開口割れ目からなる単純なモデルにより全期間を通じてよく説明される。とくに、傾斜方向が時間とともに変化していったKOMの変動を、1つの開口割れ目が拡大していったとすることで説明できる点が本モデルの特長である。



国土地理院 (2002) は、6月中旬から9月上旬までの地殻変動に対して、1つの球状圧力源と2つの開口割れ目からなるモデルを提案している。ほぼ同期間のⅢ～Ⅴ期の解析結果 (基本モデル) と比較すると、おおむね同様のモデルであるが、国土地理院 (2002) のモデルは、われわれのモデルと比べて (1) 球状圧力源の体積増加量が約1/2と小さいこと、(2) 駒ヶ岳浅部の開口割れ目の上端の深さがやや深くて断層幅が長く、その結果、体積増加量が大きくなっている点が異なる。この違いの由来は、GEONETの湯河原 (93042) の変位の扱いにあると考えられる。国土地理院 (2002) モデルでは圧力源の北東-南西方向に位置する箱根 (93068) と裾野2 (960621) の変位は観測値と良く一致しているが、南東に位置する湯河原 (93042) は観測値に対して計算値がかなり小さくなっている (国土地理院 (2002) の第1-2図)。湯河原 (93042) の変位を観測値に合わせようとする、球状圧力源の体積増加量は大きくなり、その分、駒ヶ岳浅部の開口割れ目の体積増加量は減少して、われわれの基本モデルと近いものになると推定される。

#### 4-2 伊豆半島東方沖群発地震との比較

群発地震活動時に浅部の開口割れ目によって傾斜変動が観測された例としては、伊豆半島東方沖の群発地震活動が知られている。伊豆東部単性火山群中の伊東市の沖合では地殻変動を伴う群発地震がしばしば観測され、その活動は深部のマグマだまりからのダイク貫入に起因すると考えられている (西村・村上, 2007; Okada and Yamamoto, 1991; Okada *et al.*, 2000; 上田・他, 2003)。その群発地震活動の特徴は、震源が10 kmよりも浅く、震央分布がほぼ直線状に延びること、それに伴う地殻変動は、震央分布の長径方向に沿うダイクの貫入 (開口割れ目の形成) で説明できることが示されている。鶴川 (1993) は、1989年伊豆半島東方沖の群発地震活動で、ダイクの上昇と地震の浅部への移動時期が一致していたことを指摘するとともに、それは地震が上昇するダイクの上端付近で発生していたことを示すと推定している。西村・村上 (2007) は、これまでに発表された多くの論文をもとに、群発地震時におけるダイクの特徴をまとめている。それによると、ダイク貫入走向はこの地域の応力場の主圧縮軸にはほぼ平行で、北から約110-125度であり、その傾斜角は南南西傾斜の高角 (75-85度) になる場合が多い。

2001年箱根群発地震と伊豆半島東方沖の群発地震は、ともに火山地域での群発地震で、震源が10 kmより浅く、震央分布がほぼ線状に延びていることが似ている。しかし、異なる点もある。例えば、伊豆半島東方沖の場合、ダイク貫入域 (開口割れ目の長さ) と走向) は群発地震域とほぼ一致するのに対して、2001年箱根群発地震の

場合は群発地震の分布方向と開口割れ目の走向が一致せず、南北方向に延びた震源域の中央部と南部の2カ所で、震源分布と斜行する方向の開口割れ目が生じている。また、2001年箱根群発地震の場合には、球状圧力源を伴ったのに対して、伊豆半島東方沖の群発地震活動ではそのような例は知られていない (西村・村上; 2007)。更に、群発活動の当初から、地震は大涌谷のごく浅い (-1 km) とところで発生していて、その後で南北両方向へ発生域が拡大している (棚田・他, 2002)。このような震源の移動パターンは、伊豆半島東方沖のダイク貫入に伴う地震活動の移動パターンと明瞭に異なる。

前述したように、KOMにおけるI期とII期の変化は、群発地震活動に先行した変動であった可能性が高いと考えられる。群発地震活動に先行する傾斜変化は伊豆半島東方沖の場合にも観測されていて、その傾斜変動の向きは群発地震が起き始めてから現われる大きな変動の向きと一致する。このことから、Okada *et al.* (2000) は、先行的な地殻変動は群発地震が発生し始める前に生じた初期のマグマ貫入を傾斜計がいち早く捉えたものと推定している。今回のKOMにおいて見られた先行的変化についても、われわれの解析結果は、開口割れ目が生じて、それが次第に成長していく過程を捉えたものと解釈できることを示している。ただ、伊豆半島東方沖の群発地震活動の場合には、地殻変動は群発地震の数時間前から観測されることが多いのに対し、KOMの変動は群発地震活動の3週間前から始まっている。この先行時間の違いは、伊豆半島東方沖と箱根火山とで、群発地震活動の原因となる流体の地下での移動プロセスが異なっていることを反映しているのかもしれない。

#### 4-3 浅部開口割れ目の成因

2001年箱根群発地震活動の原因は、深部の球状圧力源によって山体が膨張し、その表層部で開口割れ目が生じたことにあると考えられる。群発活動が3ヶ月間という長期間にわたり、その間に多数の地震が発生していることから、解析によって推定された2枚の開口割れ目は、多くの開口割れ目の最大規模のもの、あるいは小さな開口割れ目の積分を表しているとも見てもできよう。球状圧力源についてはマグマだまり等が想定されるが、箱根火山においてはマグマだまりの証拠は見つかっておらず、推定された体積増加がどのような現象の結果なのかは明確ではない。ただ、この深さ領域では地震が発生していないことから、少なくともそこがかなりの高温になっていることは確かだろう。

開口割れ目の走向は、大涌谷浅部では西北西-東南東、駒ヶ岳浅部では北西-南東であり、この地域の広域の応力場とおおむね調和的であると言える。本多・棚田

(2006) は S 波スプリッティング解析から、2001 年の群発地震活動期には LSPD (S 波が異方性媒質中を伝播する際に大きな速度を持つ振動方向のことで、地中にクラックが存在する場合、クラック面と平行な方向がそれにあたる) が、大涌谷で西北西-東南東、駒ヶ岳で北西-南東に卓越していることを見出している。また、神山山頂周辺には北西-南東方向に伸びる割れ目状凹地が多数分布していることも(小林・他, 2006), 同地域の地下にその方向の岩脈群あるいはクラックが存在することを示しているが、群発地震活動が全体としてなぜ割れ目の方向と斜交する南北方向に分布したかについては、今後解明すべき課題である。

2001 年の群発地震活動直後に、大涌谷北側斜面において、新たな噴気が確認された(辻内ほか, 2003)。棚田・他(2005) は、噴気域が本論で推定された開口割れ目の位置にほぼ一致していることを指摘し、新たな噴気は開口割れ目から流出した熱水(火山性蒸気)によって形成されたと考えている。その噴気に火山性ガスが含まれていることも(棚田・他, 2008), 火山性蒸気が開口割れ目を通じて上昇してきた可能性を示唆する。

熱水(火山性蒸気)の関与は、また、噴気域の火山ガス成分の変化からも推定されている。大場・他(2007) は、2006 年 9 月から 10 月にかけて大涌谷付近や駒ヶ岳付近で断続的に発生した群発地震(棚田・他, 2007)の前後において、大涌谷の蒸気井から放出されるガスに見られた  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  比の変化は  $\text{H}_2\text{O}$  の凝縮で説明できるとし、その凝縮は地下から上昇してきた蒸気が新たに生じた冷たい亀裂(クラック)に流入したためかもしれないと考えている。さらに、大場・他(2007) は、大涌谷の蒸気井から放出される火山性蒸気量が、蒸気井が破壊されるほど多かった 2001 年から(温泉水造成装置が未復旧のため測定はされていない)、2002 年は 207 ton/day, 2003 年は 66 ton/day, そして 2006 年には 35 ton/day へと次第に低下したことから、2001 年の群発地震活動時に火山性蒸気の上昇量が著しく増大した、すなわち深部の圧力が大きく上昇したことは明らかであると見ている。

以上のことから、大涌谷噴気域では、深部の圧力上昇によって、かつての岩脈貫入跡の微小なクラックに流体が上昇・流入するか、あるいはそこに貯留されていた水が気化して膨張し、地震を多発させるとともにクラックを開口させて地殻変動をもたらしたものと推察される。さらに、そのクラックから蒸気が放出され、新たな噴気域を形成したと考えられる。間隙水圧の上昇が原因だとすると、封圧の小さい浅部ほど体積増加が生じやすいと考えられ、今回推定された開口割れ目が非常に浅いことも調和的である。またさらに、今回の地震はごく浅い

ところで発生している。浅部へのダイク貫入でよくみられるような深部から徐々に浅くなる震源の移動が認められないことも、ダイクが浅部に貫入したわけではないことを示していると考えられる。

このように大涌谷では、浅い地震や噴気など、浅部における開口割れ目の生成との関係が示唆される現象が観測されているのに対し、駒ヶ岳では浅い地震は少なく、噴気異常などの表面現象も確認されていない。過去においても、駒ヶ岳付近では浅い地震はあまり起きていないが、2006 年 10 月 2~4 日に、2001 年の傾斜変動から推定された開口割れ目に近い駒ヶ岳直下 0~2 km のところで地震が多発した(棚田・他, 2007)。このことから、その付近が必ずしも地震の起きにくい構造になっているというわけではないと考えられる。この地震活動と開口割れ目との関連については明確ではないが、過去にほとんど地震が発生していない場所であることから、2001 年の活動が駒ヶ岳浅部における 2006 年の地震発生の契機となった可能性もある。2001 年の活動で群発地震に先行してなぜ KOM の傾斜変化が見られたかについては、今後の種々の調査の進展を待ちたい。

## 5. ま と め

2001 年の群発活動に伴った地殻変動は、1 つの球状圧力源と 2 つの浅部の開口割れ目からなる単純なモデルにより全期間を通じてうまく説明できる。球状圧力源は駒ヶ岳の南東約 1 km, 深さ 7 km に位置し、開口割れ目は大涌谷および駒ヶ岳浅部の 2 カ所にあつて、その走向はそれぞれ西北西-東南東および北西-南東である。これらの開口割れ目は、その走向が S 波スプリッティング解析から示されるクラックの方向や神山山頂付近に見られる割れ目状凹地の方向とほぼ一致しており、既成のクラックが地下から上昇したガスおよび水蒸気圧によって次第に開いていったことで生じたと推定される。KOM における傾斜方向の変化も、同じ開口割れ目の拡張で説明することができる。ただし、この開口割れ目の位置には、それに沿って地震が分布するという様子は見られなかった。これは、伊豆半島東方沖の群発地震活動時に見られる震源分布と圧力源(ダイク)の関係と異なっている。箱根の場合には、ダイク貫入ではなく、水蒸気や火山性ガスがカルデラ内の既存の構造を利用しながら上昇してきたと考えられ、そのために地表付近で著しい地殻変動は生じたが、開口時に大きな応力が必要とされることはなかったと見られる。本解析では開口割れ目が二つ求められたが、実際には同方向の微小な開口割れ目がたくさん生じて、二つの開口割れ目はそれらを代表したものであるという可能性も十分に考えられる。

## 謝 辞

防災科学技術研究所の岡田義光理事長ならびに山本英二主任研究員、上田英樹博士には傾斜計データの解析にあたってご助言いただいた。解析にあたっては、GEO-NETのデータを使用させていただくとともに、気象研究所が開発した火山用地殻活動解析支援ソフトウェアMaGCAP-Vを利用させていただいた。神奈川県温泉地学研究所長の吉田明夫氏には、解析結果に関して議論していただき、貴重なコメントをいただいた。また、査読者である大場武氏、一名の匿名査読者、編集者である筒井智樹氏からの細部にわたる適切なご指摘により本稿は大きく改善された。ここに記して深く感謝いたします。

## 引用文献

- 代田 寧・伊東 博・棚田俊收・八巻和幸 (2002a) 神奈川県西部地域における最近2年間の傾斜観測結果。神奈川県温泉地学研究所報告, **33**, 43-48.
- 代田 寧・棚田俊收・伊東 博 (2002b) 2001 (平成13) 年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動。神奈川県温泉地学研究所報告, **34**, 35-44.
- 福井敬一 (2008) 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発。気象研究所技術報告第53号「火山活動評価手法の開発研究」, 123-140.
- 平賀士郎 (1987) 箱根火山と箱根周辺海域の地震活動。神奈川県温泉地学研究所報告, **18**, 149-273.
- 本多 亮・棚田俊收 (2006) S波スプリティングの解析から明らかになった神奈川県西部地域の異方性の空間的・時間的变化。神奈川県温泉地学研究所報告, **38**, 47-52.
- 石坂信之・板寺一洋・菊川城司 (2002) 箱根群発地震と温泉温度等の変化。第55回日本温泉科学会大会講演要旨集, 19.
- 伊東 博・棚田俊收 (1999) 箱根火山における最近10年間(1989~1998)の地震活動。神奈川県温泉地学研究所報告, **31**, 45-52.
- 気象庁地震予知情報課 (2002) 箱根山付近の地震・地殻活動 (2001年6月中旬からの変化)。地震予知連絡会会報, **67**, 104-107.
- 気象研究所 (2002) 箱根の微小地震活動 (2001年6月~) に伴う歪変化。地震予知連絡会会報, **67**, 108-114.
- 小林 淳・萬年一剛・奥野 充・中村俊夫・袴田和夫 (2006) 箱根火山大涌谷テフラ群—最新マグマ噴火後の水蒸気爆発堆積物。火山, **51**, 245-256.
- 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.
- 萬年一剛 (2003) 文献による箱根群発地震活動の再検討 (1917~1960); 箱根群発地震活動の地学的意義。火山, **48**, 425-443.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99-134.
- 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2001年度秋季大会講演予稿集, 43.
- 西村卓也・村上 亮 (2007) 水準測量データによる1930年伊東沖群発地震のダイク貫入モデル。火山, **52**, 149-159.
- 西村卓也・村上 亮・棚田俊收 (2001) 2001年6-8月の箱根火山の地殻変動。日本測地学会第96回講演会要旨, 121-122.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Okada, Y. and Yamamoto, E. (1991) Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10361-10376.
- Okada, Y., Yamamoto, E. and Ohkubo, T. (2000) Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 681-692.
- 大場 武・澤 毅・平 徳泰 (2007) 箱根大涌谷地熱地帯における火山ガスの化学組成および同位体比の変化。地球惑星科学関連学会2007年合同大会講演予稿集.
- 温泉地学研究所 (2002) 2001年箱根火山の群発地震活動について。火山噴火予知連絡会会報, **80**, 45-48.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 棚田俊收・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.
- 棚田俊收・代田 寧・原田昌武 (2005) 2001年箱根群発地震活動と箱根大涌谷北側斜面における新たな噴気活動との関係について。日本地震学会2005年度秋季大会講演予稿集, P035.
- 棚田俊收・本多 亮・原田昌武・行竹洋平・伊東 博 (2007) 神奈川県内およびその周辺における2006 (平成18) 年の地震活動。神奈川県温泉地学研究所観測だより, **57**, 1-12.
- 棚田俊收・代田 寧・板寺一洋 (2008) 箱根大涌谷から上湯場付近における硫化水素と二酸化硫黄のガス濃度と地温測定結果。神奈川県温泉地学研究所報告, **40**, 23-28.
- 丹保俊哉・棚田俊收・伊東 博・代田 寧 (2005) 光波測量網で捉えられた2001年箱根火山の群発地震活動に伴う地殻変動。測地学会誌, **51** (1), 45-48.
- 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。神奈川県温泉地学研究所観測だより, **53**, 1-12.
- 上田英樹・山本英二・大久保 正・村上 亮・上野寛・宇平幸一 (2003) 2002年5月伊豆半島東部群発地震活動に伴った地殻変動の開口断層モデル。火山, **48**, 471-477.
- 鶴川元雄 (1993) ダイクの貫入と群発地震。地学雑誌, **103**, 537-547.
- 鶴川元雄 (2002) 箱根火山の深部低周波地震 (2001年5月~2001年10月15日)。火山噴火予知連絡会会報, **80**, 43-44.
- 八巻和幸・小鷹滋郎・伊東 博・棚田俊收・大木靖衛 (1990) 箱根火山・傾斜変化解析システム。神奈川県温

泉地学研究所報告, **21 (3)**, 87-102.  
吉川澄夫・小林昭夫・山本剛靖 (2001) 2001年6月下旬  
からの箱根の地震活動と周辺観測点の歪・地下水変

化. 日本地震学会 2001年度秋季大会講演予稿集, C20.  
(編集担当: 筒井智樹)