

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上田 英樹\*・山本 英二\*・大久保 正\*・村上 亮\*\*  
上野 寛\*\*\*・宇平 幸一\*\*\*

(2002年12月9日受付, 2003年9月16日受理)

Tensile Fault Model of the Crustal Deformation Associated with Earthquake Swarm  
in the Eastern Izu Peninsula in May 2002Hideki UEDA\*, Eiji YAMAMOTO\*, Tadashi OHKUBO\*, Makoto MURAKAMI\*\*,  
Hiroshi UENO\*\*\* and Kohichi UHIRA\*\*\*

From May 8 to 13 in 2002, a small-scale earthquake swarm took place off Ito City, eastern Izu Peninsula, central Japan. Associated with the swarm, changes in the ground tilt as much as  $2.8 \mu\text{rad}$  were detected by several tiltmeters near the swarm area. The change can be approximately interpreted by a tensile fault in the vicinity of the swarm area. We estimated the fault parameters from the tilt and GPS data, assuming that the fault length is 2 km. The depth of the upper bound of the tensile fault and the width are 10 km and 2 km, respectively. The estimated volumetric increase is  $7 \times 10^{-3} \text{ km}^3$ . This tensile fault is confirmed to be a dike intrusion from a deep seated magma reservoir, that is, the same process which had been observed in 1980's to 1990's. The tilt vectors of stations ITO and YOS are quite similar in shape in the period from May 8 to 11, suggesting thickening of the dike without upward elongation during the period.

**Key words:** the eastern Izu Peninsula, earthquake swarm, crustal deformation, tiltmeter, GPS

## 1. はじめに

伊豆半島東岸沖では、1978年6月から1998年までの約20年間、およそ年1回の頻度で繰り返し群発地震が発生していた。その群発地震活動のほとんどに地殻変動が伴ったことが知られており、傾斜計、歪計、水準測量、GPSなどによって観測されている (Okada *et al.*, 2000)。

独立行政法人防災科学技術研究所の伊東傾斜観測点 (ITO) でも、1989年3月の観測開始以来、群発地震に伴って発生した顕著な傾斜変動を何度も捉えている。傾斜変動は、群発地震活動と極めて相関が高いという特徴をもっており、地震の発生域に沿って開口した断層によって説明されている (Okada and Yamamoto, 1991; 山本・他, 1994)。一方、群発地震は、開口断層による周辺の岩盤の応力変化が既存の広域応力場に加わることにより発生したものであると考えられている (鶴川, 1994; Ukawa and Tsukahara, 1996)。

1989年7月の群発地震活動では、 $20 \mu\text{rad}$ を超える傾斜変動が観測され (Yamamoto *et al.*, 1991)、群発地震の発生域で海底噴火が発生した。伊豆半島東部とその東方沖には数多くの単成火山が分布し (荒牧・葉室, 1977; 葉室・他, 1980)、1989年7月の噴火もその1つである。これらの観測事実から、開口断層は深部のマグマ溜りから上昇したダイクであると考えられている (たとえば、Okada and Yamamoto, 1991)。

1998年まで頻繁に群発地震が発生していたが、1998

\* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1  
(独)防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and  
Disaster Prevention, Tennodai 3-1, Tsukuba, Iba-  
raki 305-0006, Japan.

\*\* 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1  
国土地理院

Geographical Survey Institute, Kitasato 1, Tsukuba,  
Ibaraki 305-0811, Japan.

\*\*\* 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4  
気象庁

Japan Meteorological Agency, Otemachi 1-3-4,  
Tokyo 110-8122, Japan.

Corresponding author: Hideki Ueda

e-mail: ueda@bosai.go.jp

年4月の活動以降の約4年間は群発地震が見られなかった。しかし、2002年5月8日から伊豆半島東部の伊東市付近において再び小規模な群発地震が発生した。その活動は5日後の13日にほぼ終息した。これまでの活動と同様に、群発地震と同時期に伊豆半島東部の傾斜観測点で微小な傾斜変動が観測された。また、国土地理院が観測を行っている伊豆半島東部のGPS連続観測点においても微小な地殻変動が観測された。この地域で発生する、地殻変動を伴う群発地震活動がダイク貫入によるものであることはすでによく知られている。今回の活動も、ダイクの貫入に伴う活動である可能性が高い。しかし、個々の活動について、ダイクの位置および規模を明らかにすることは火山噴火を予測する上で極めて重要である。さらに、ダイクの貫入過程の詳細についてはいまだ不明な点が多く、1つ1つの事例について研究を積み重ねていく必要があると考える。本研究では、観測された傾斜変動を詳細に検討し、今回の活動の特徴を明らかにする。さらに、傾斜変動にGPSデータを併せて、地殻変動の開口断層によるモデル化を行う。

## 2. 傾斜変動

Fig. 1 に防災科学技術研究所の伊豆半島東部にある6点の傾斜観測点の位置を示す。これらのうちITO, YOS, OKA, TNG はポアホール式の観測点であり、OKN と

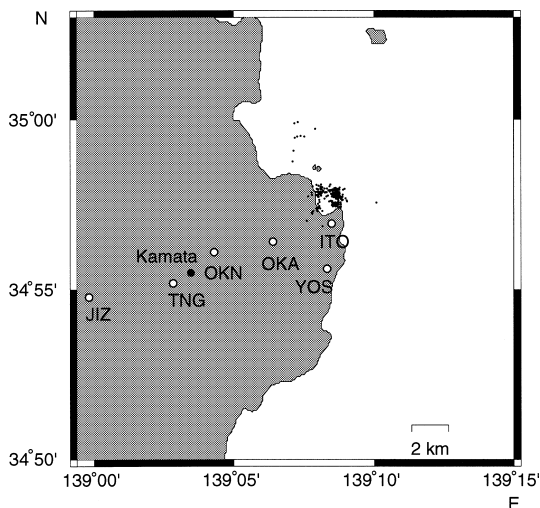


Fig. 1. Map showing the locations of tiltmeter stations (open circles). Solid circle shows the location of Kamata seismic station operated by the Japan Meteorological Agency. Dots indicate epicenters of the seismic swarm located by the Double-Difference method (May 8–May 13, 2002).

JIZ は横穴式の観測点である。Fig. 1 には、気象庁、防災科学技術研究所、東京大学、神奈川県温泉地学研究所のデータを用い、Double-Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) によって決定された群発地震の震央も併せて示す。群発地震の震央はITOの北約1 kmの地点に分布している。Fig. 2 に群発地震活動に伴う地殻変動が捉えられた5点 (ITO, YOS, OKA, TNG, OKN) の傾斜変動データ (正時値) を示す。ただし、OKNのデータにはドリフトが含まれているため、5月1~7日の平均変動レート (EW成分,  $0.13 \mu\text{rad}/\text{day}$ ; NS成分,  $-0.04 \mu\text{rad}/\text{day}$ ) を用いて、ドリフト成分を取り除いてある。JIZの傾斜変動は、群発地震に伴う傾斜変動が見られず、降雨による大きな変動が見られるため示していない (山本・他, 2003)。Fig. 2 には傾斜データに併せて地震の1時間あたりの発生頻度を示している。群発地震は5月8日の19時頃から活発になり、13日にはほぼ終息した。最大マグニチュードは1.9である。群発地震が始まった頃からITO, YOS, OKN, TNGの2成分とOKAのNS成分には明瞭な傾斜変動が見られる。それらの傾斜変動は、YOSのEW成分を除き、群発地震が静穏化した13日頃に終息した。これまでの活動と同様に群発地震の発

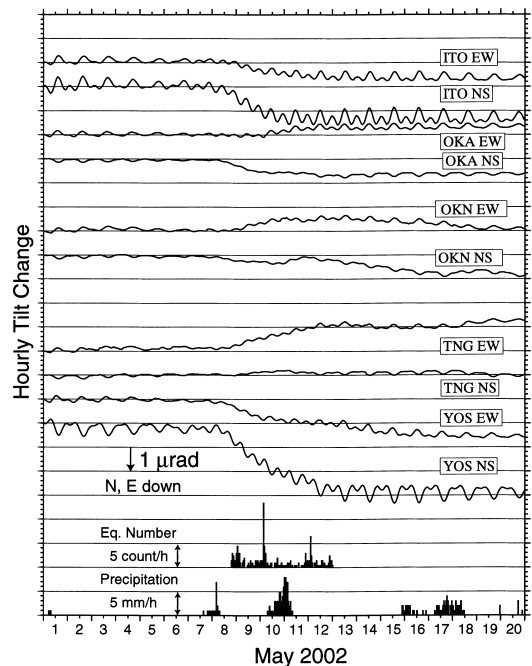


Fig. 2. Tilt records at ITO, OKA, OKN, TNG, and YOS for the period from May 1 to May 20, 2002, compared with the hourly numbers of the located earthquakes and hourly precipitation at JIZ.

生と傾斜変動の相関が極めて高い。

5月8日0時～13日12時の傾斜ベクトルを Fig. 3 に

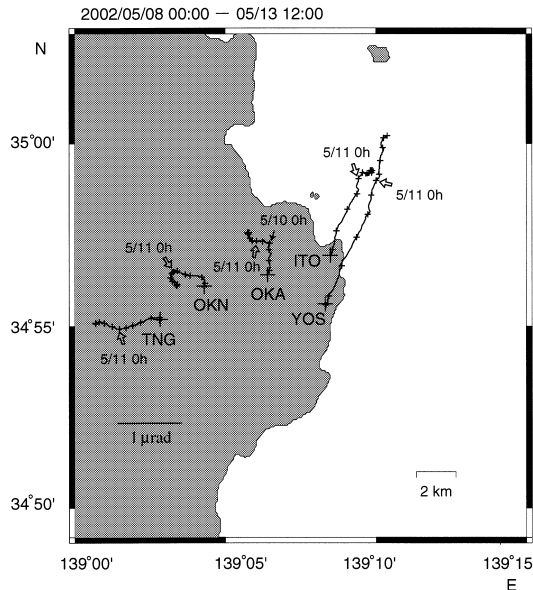


Fig. 3. Tide-removed tilt-down vector diagrams at the tiltmeter stations for the period from May 8 to May 13, 2002. Crosses show the tilt at every 12 hours.

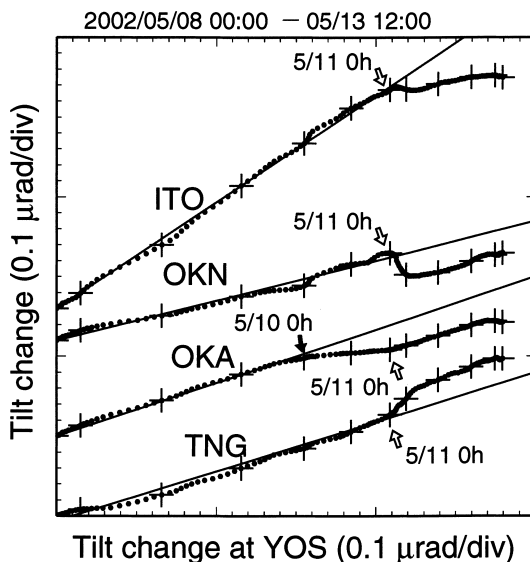


Fig. 4. Comparison of the amount of tilt at YOS with that at ITO, OKN, OKA, and TNG for the period from May 8 to May 13, 2002. Superimposed are lines having trends of  $YOS/ITO=1.5$ ,  $YOS/OKN=4$ ,  $YOS/OKA=3$ , and  $YOS/TNG=3.2$ . Crosses show the tilt at every 12 hours.

示す。この傾斜ベクトルは、BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) を用いてデータから地球潮汐成分を除去して抽出したトレンド成分である。ITOとYOSは北北東、OKAは北北西、OKNは北西、TNGは西方向に傾斜している。傾斜量はYOSで最も大きく $2.8 \mu\text{rad}$ である。いずれの観測点でも11日頃(白矢印)に方向の変化が見られ、OKAではその約1日前(黒矢印)に北傾斜から西傾斜に急に变化している。

各観測点の変動量の相関を Fig. 4 に示す。それぞれのデータに重ねて示した直線は  $YOS/ITO=1.5$ ,  $YOS/OKN=4$ ,  $YOS/OKA=3$ ,  $YOS/TNG=3.2$  の傾きをもつ直線である。10日の0時頃まで、この各観測点の傾斜変動量は一定の比で推移したことがわかる。またOKA以外では、さらに11日の0時頃まで同様の地殻変動が継続した。ITOとYOSの傾斜ベクトルをより詳細に比較するため、ITOのスケールをYOSの1.5倍にした傾斜ベクトル図を Fig. 5 に示した。両者の傾斜ベクトルは5月8日から11日の0時頃まで、方向の微小な変化を含めて極めてよく似ており、ほぼ2:3の相似となっている。しかし11日の0時以降は互いに異なる変動が見られる。

ITOとYOSの傾斜ベクトルがほぼ相似であることは、次の2つを意味する。1つは、2点の11日までの傾斜データは、降雨などに起因する観測点固有の変動を含んでいる可能性が低く、共通の変動源による地殻変動を表している可能性が高いことである。もう1つは、変動

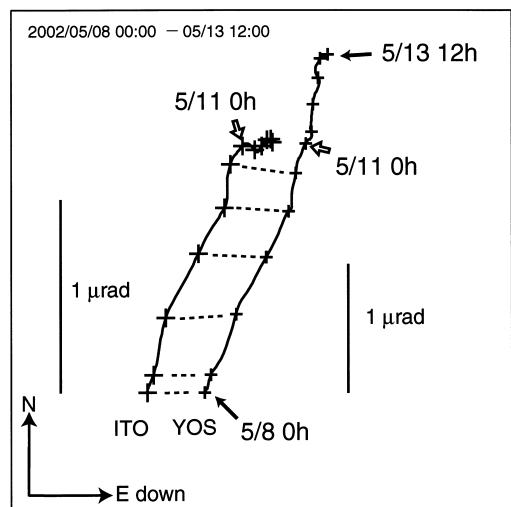


Fig. 5. Comparison of tide-removed tilt-down vectors at ITO and YOS for the period from May 8 to May 13, 2002. The scale for ITO is 1.5 times larger than that of YOS. Crosses show the tilt at every 12 hours.

源を断層や球状圧力源と仮定した場合、変動源の大きさや位置が変動の開始から大きく変化せず、その強さだけが増大したこと示すことである。なぜなら、断層運動による傾斜変動 (Okada, 1992) や球状圧力源の膨張収縮による傾斜変動 (茂木, 1957) は、断層の食い違い量や圧力源の圧力変化量と線形の関係があり、断層や圧力源の位置や大きさとは非線形の関係があるためである。断層や圧力源の大きさや位置が変化せず、食い違い量や圧力の強さだけが変化する場合、各観測点の変動量の比は観測点間で一定である。しかし、断層や圧力源の位置や大きさが変化した場合の変動量の比が変化し、YOS の変動量との比が変化しているのは、同時期の降雨 (Fig. 2 を参照) による観測点固有の変動が観測データに含まれているためと考えられる。

OKN と TNG も 11 日まで傾斜ベクトルの方向と YOS の変動量との比がほぼ一定であり、変動源の位置や大きさが大きく変化していないことを示している。しかし、OKA には降雨の影響と考えられる変動が見られる約 1 日前から傾斜ベクトルの方向が西に約  $90^\circ$  変化し、また YOS との比も変化している (Figs. 3, 4 の黒矢印)。この変動が、観測点固有の変動ではないとすると変動源の位置や大きさに大きな変化があると考えなければならず、他の観測点の傾斜変動とは矛盾する。したがって、OKA の傾斜データには観測点固有の変動が含まれている可能性が高い。

今回の活動とこれまでの活動を比較するために、各活動の規模について Table 1 にまとめた。ITO での傾斜変動観測が開始した 1989 年 3 月以降の活動の、気象庁鎌

田観測点 (Fig. 1) で観測された地震数、群発地震の継続期間、その期間の ITO の傾斜変動量を示している。1994 年 2 月と 1997 年 6 月の活動は、規模が小さくかつ地震発生域が ITO からやや離れているため、傾斜変動が捉えられていない (大久保・山本, 1998)。Fig. 6 は、その 2 つの活動以外について、ITO の変動量に対して地震数と継続期間をプロットしたものである。どちらについても、ITO の変動量に比例する傾向が見られ、高い相関がある。今回の活動もこの傾向から大きく離れていない。したがって今回の活動は、一連の群発地震活動の 1 つである可能性が高い。ただし、これまでに発生した活動の

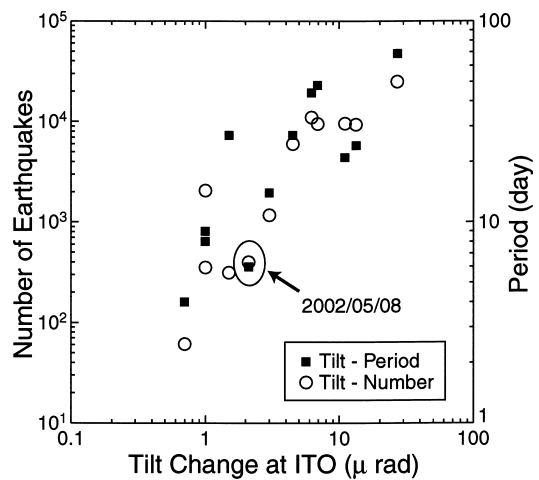


Fig. 6. Scatter plot of tilt changes at ITO associated with the seismic swarms after 1989 with number of the earthquakes counted at Kamata station and the activity periods.

Table 1. Seismic swarm activities occurred after 1989.

Swarm Event		Eq. Number counted at Kamata	Tilt change at ITO ( $\mu\text{rad}$ )
Start Day	Period (day)		
89/05/21	14	1173	3.0
89/06/30	69	24989	27.0
91/08/20	4	61	0.7
91/12/25	8	354	1.0
93/01/10	9	2064	1.0
93/05/26	21	9567	11.0
94/02/27	14	300	0.0
95/09/11	48	9469	6.9
96/07/02	27	315	1.5
96/10/15	27	6005	4.5
97/03/03	24	9334	13.3
97/06/27	19	446	0.0
98/04/20	44	11033	6.2
02/05/08	6	396	2.1

中では比較的小規模な活動といえる。

### 3. 地殻変動の解析

#### 3-1 方法

群発地震の最大のマグニチュードは1.9であり、地震による地殻変動では傾斜変動を説明することは困難である。これまでに伊豆半島東部で群発地震活動に伴って発生した傾斜変動は、ダイクの貫入を表すほぼ鉛直の開口断層で説明されている (Okada and Yamamoto, 1991; 山

本・他, 1994)。そこで、観測された地殻変動を開口断層によるモデル化を試みる。ただし、11日0時以降の傾斜データは降雨の影響を受けていると考えられるので、8日から11日までの傾斜データを使用する。解析には、この傾斜データに加え、国土地理院のGPSデータも併せて使用する。国土地理院のGPS連続観測点でも群発地震に伴った微小な地殻変動が観測されている。Fig. 7に観測された傾斜変動と水平変位を黒矢印で示す。水平変位は、2002年4月の座標値の平均値と5月15日~30日

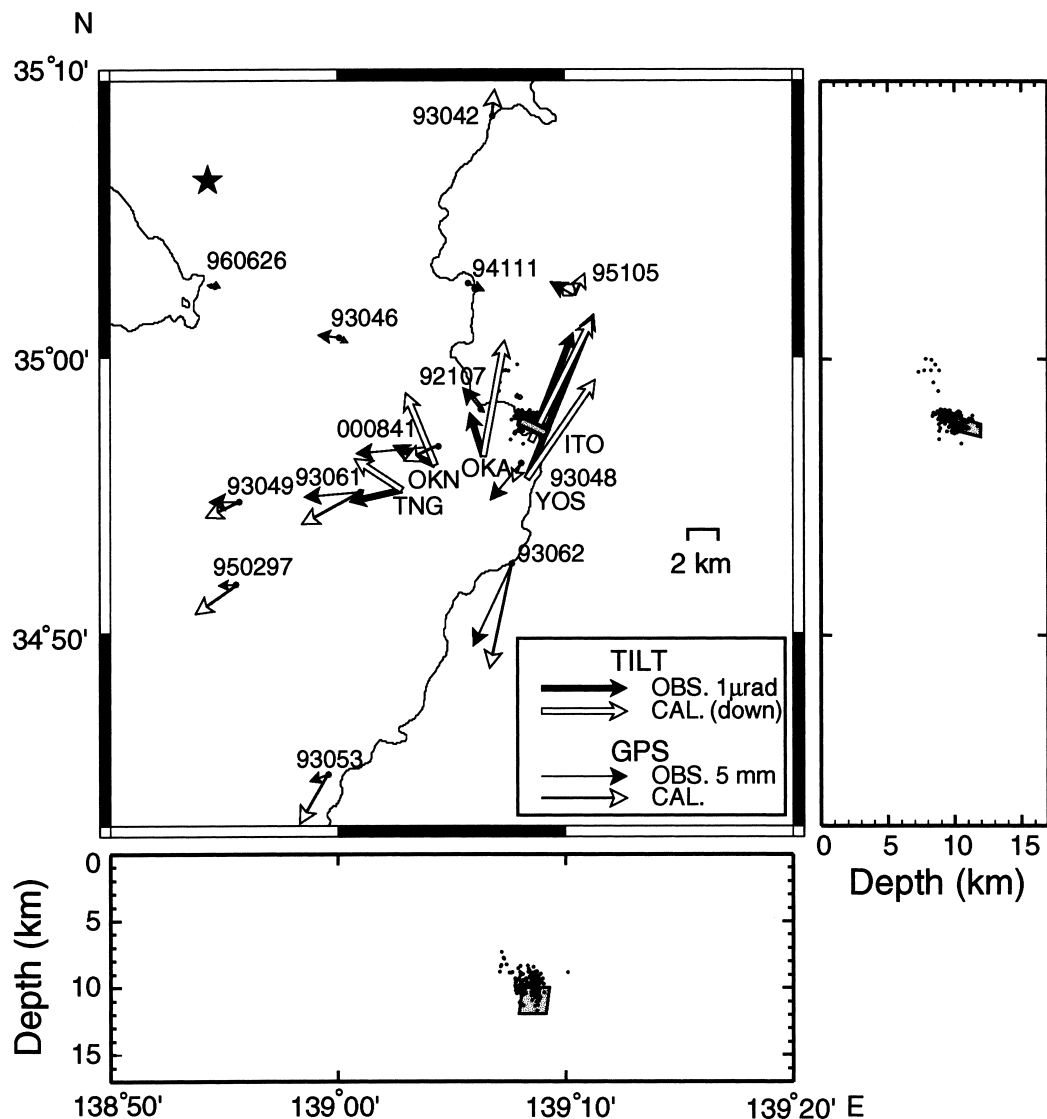


Fig. 7. Comparison of observed crustal deformation (solid arrows) with those calculated (open arrows) by the best-fit tensile fault model (rectangles). Thick arrows show the tilt-down vectors (May 8–May 11, 2002) and thin arrows show horizontal displacements observed at GPS station of the Geographical Survey Institute (April 1–April 30, 2002~May 15–May 30, 2002). Solid star indicates the reference station. Dots show hypocenters of seismic swarm located by the Double-Difference method (May 8–May 13, 2002).

の平均値の差である。伊豆半島東部には、群発地震の発生域付近を中心とした放射状の水平変動が見られる。変位量の最大値は約7 mmであり、誤差は3 mmである。

開口断層のパラメタは、観測された地殻変動とモデルから計算した値を比較することによって推定する。理論値は、半無限弾性体中の矩形の断層を仮定し Okada (1992) の方法を用いて計算を行う。しかし、観測データごとに精度が異なるため、それを考慮する必要がある。OKA の傾斜変動には異常な変動が見られ、OKN の変動にもドリフトの補正の影響が含まれていると考えられる。さらに、傾斜データと GPS データでは物理量が異なる。そこで、観測値と計算値の残差を各データの誤差の逆数で重み付けし、その2乗和を最小とするモデルを最適モデルとする。傾斜ベクトルの誤差は  $0.3 \mu\text{rad}$  (Fujita *et al.*, 2002), OKA と OKN はその倍の  $0.6 \mu\text{rad}$  とする。最適モデルパラメタはグリッドサーチによって選び、パラメタのすべての組み合わせについて適合の可否を調査する。なお、開口断層の上端の中心の位置を  $34.960^\circ\text{N}$ ,  $139.145^\circ\text{E}$ , 長さは地震発生域の広がりと同じ2 km と仮定する。

### 3-2 結果

得られた最適開口断層モデルを Fig. 7 に示す。断層上端深さは10 km, 走向  $\text{N}116^\circ\text{E}$ , 傾斜角  $75^\circ$ , 断層の幅2 km, 開口量180 cm, 体積増加量は  $7 \times 10^{-3} \text{ km}^3$  である。最適モデルから計算した傾斜ベクトルを Fig. 7 に白矢印で示す。得られた最適モデルによって、観測された傾斜変動と水平変位をおおむね再現することができる。水平変位については、観測値と計算値は誤差の範囲内で一致する。しかし、傾斜、水平変位とも系統的なずれが見られる。傾斜ベクトルは計算値が観測値に対して時計回りにずれており、変位ベクトルについては反時計回りにずれている。さらに、OKA と YOS での残差が大きい。系統的なずれは、貫入したダイクが実際には完全な矩形の平面ではなく複雑な形状をしており、さらに開口量も場所によって異なっていることに起因する可能性がある。しかし、これだけでなくデータ自身にも原因があるかもしれない。解析に用いた水平変位は、傾斜変動よりも長い期間の変動である。したがって、水平変位に5月8日～11日の傾斜変動とは異なる傾向の地殻変動が含まれている恐れがある。さらに、OKA と OKN の傾斜変動にはドリフトの影響や観測点固有の変動が含まれている可能性が高い。これらの原因が系統的なずれをもたらしている可能性がある。しかし、観測された地殻変動は近似的には開口断層で説明可能であり、今回の活動もダイクの貫入による地殻変動であると考えられる。

## 4. 議 論

Fig. 1 に示したものと同一群発地震の震源を Fig. 7 に示す。地殻変動から推定された開口断層の深さは、ほぼ群発地震の深さと一致する。したがって、今回の活動では群発地震の発生とともに地殻変動が観測され、その地殻変動は地震活動域に貫入したダイクによっておおむね説明できることが明らかとなった。この特徴は、伊豆半島東部でこれまでに発生した群発地震活動と大変よく似ている。さらに今回の活動は、これまでの活動に見られる ITO の傾斜変動量と群発地震の活動の規模との関係から大きく離れていない (Fig. 6)。したがって2002年5月の活動は、比較的小規模であるが、1978年から続いている一連の群発地震活動の1つであると考えられる。

過去に発生した群発地震活動には、ダイクの上昇を示す地震活動や地殻変動が観測される場合があった。1989年7月の活動では、噴火の約10日前にダイクの浅部への拡大と地震活動の上昇が同時に観測されている (Ukawa and Tsukahara, 1996)。他の活動でも傾斜方向の顕著な変化が観測されており、その変化はダイクの上昇によって説明されている (Okada *et al.*, 2000)。しかし今回の活動では、傾斜データは傾斜変動の開始から11日までダイクの位置・大きさが大きく変化していないことを示している。群発地震も活動開始から活動終了まで水平位置で  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  の領域、深さ7～12 km の範囲内で発生しており、震源の位置の大きな変化はない。したがって、ダイクは、活動初期に深部から深さ10 km 付近まで上昇した後、同じ場所に留まり、その厚さだけが活動終了まで増大し続けたものと推定される。

このように、地震活動や地殻変動からダイクの位置や大きさを把握し、またダイクの上昇などの変化を捉えることは火山噴火を予測するために極めて重要である。本研究によって、高精度で時間分解能が高い傾斜連続観測で捉えられた微小な傾斜変動から、ダイクが貫入したものの同じ場所に留まったことが明らかとなり、傾斜連続観測の有効性が改めて示された。伊豆半島東岸沖では、1978年から断続的に発生している群発地震活動がいまだ継続しており、今後も傾斜連続観測によってこの地域の火山活動を注意深く監視していく必要がある。

## 5. 結 論

2002年5月に伊豆半島東部沖で発生した群発地震に伴った地殻変動を詳細に調査し、そのモデル化を行った。その結果、群発地震発生付近において  $\text{N}116^\circ\text{E}$  の走向をもつ開口断層によっておおむね説明できることが明らかとなった。断層の上端の深さは10 km, 体積増加量は  $7 \times 10^{-3} \text{ km}^3$  である。今回の活動は、群発地震の発生

と同時に地殻変動が観測された点やその地殻変動が地震活動域に沿って貫入したダイクによって説明できる点など、これまでと同様の特徴を有し、今回の活動も1978年以来この地域で繰り返し続いている活動の1つであると考えられる。ただし今回の活動は、過去の活動に比べて小規模な活動であった。活動期間中にダイクの位置や大きさの変化を示す地殻変動や地震活動の変化は認められず、ダイクは貫入後、同じ場所に留まって厚みを増したと推定される。

#### 謝 辞

震源決定には、気象庁、独立行政法人防災科学技術研究所、東京大学、神奈川県温泉地学研究所のデータを使用しました。国土地理院からはGPSデータを提供していただきました。査読者の山岡耕春氏、匿名の査読者、編集委員の後藤章夫氏から有益なコメントをいただきました。これらの方々に深く感謝いたします。

#### 引用文献

- 荒牧重雄・葉室和親 (1977) 東伊豆単成火山群の地質—1975-1977 中伊豆の異常地殻活動について—。地震研究所彙報, **52**, 235-278.
- Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E. and Okada, Y. (2002) Cyclic jerky opening of magma sheet and caldera formation during the 2000 Miyakejima volcano eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2001GL013848.
- 葉室和親・荒牧重雄・加賀美英雄・藤岡換太郎 (1980) 東伊豆沖海底火山群—その1。地震研究所彙報, **55**, 259-297.
- 茂木清夫 (1957) 桜島の噴火と周辺の地殻変動との関係。火山, **1**, 9-18.
- 大久保 正・山本英二 (1998) 関東・東海地域における最近の地殻傾斜変動 (1997年5月~1997年10月)。地震予知連絡会会報, **59**, 167-187.
- 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) Co-swarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 681-692.
- 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.
- 鶴川元雄 (1994) ダイクの貫入と群発地震。地学雑誌, **103**, 537-547.
- Ukawa, M. and Tsukahara, H. (1996) Earthquake swarms and dike intrusion off the east coast of Izu Peninsula, central Japan. *Tectonophysics*, **253**, 285-303.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L. (2000) A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.
- Yamamoto, E., Okada, Y. and Ohkubo, T. (1991) Ground tilt changes preceding the 1989 submarine eruption off Ito, Izu Peninsula. *J. Phys. Earth*, **39**, 165-176.
- 山本英二・岡田義光・大久保 正 (1994) 1993年5~6月の伊豆半島東方沖の群発地震活動とそれに伴う傾斜変動。地震予知連絡会会報, **51**, 336-340.
- 山本英二・上田英樹・大久保 正 (2003) 2002年5月に再発した伊東市周辺における地震・火山活動。火山噴火予知連絡会会報, **82**, 44-47.

(編集担当 後藤章夫)