

## 2004年浅間山噴火活動に伴う傾斜変動について

中禮正明\*・瀧山弘明\*\*

(2005年5月16日受付, 2006年1月16日受理)

Ground Tilt Change Associated with the 2004 Eruption  
at Asamayama Volcano, Japan

Masaaki CHUREI\* and Hiroaki KATAYAMA\*\*

The eruptive activity of Asamayama Volcano started at the summit crater on September 1, 2004. The first eruption was explosive and accompanied with very strong air shock. Before the explosion, significant tilt change was detected by a tiltmeter installed at the northeastern flank of the volcano by JMA. Tilting direction of the signal was in the sense of ground-up toward the west side of the station. BH-type volcanic earthquakes drastically increased at the same time as the start of the precursory tilt change. Including the first one, four remarkable explosive eruptions occurred. In all the cases, significant tilt change and the BH-type volcanic earthquake swarms were observed before the explosive eruptions. The starts of the precursory signals were about 3.5–29 hours before the explosions and the amounts of tilt change were 0.03–0.11  $\mu$  radian. These features suggest that the prediction of explosion may be possible at Asamayama volcano.

We estimated the crustal deformation source using the tilt data associated with the explosive eruption occurred on November 14. The location of the estimated dike intrusion source was about 1 km below sea-level at the summit area. The volume of dike was  $4.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ .

**Key words:** Asamayama, explosion, tilt change, BH-type volcanic earthquake, precursory signal

## 1. はじめに

浅間山では、2004年9月1日20時02分に21年ぶりに爆発的噴火が発生した。山頂火口の南約8 kmにある軽井沢測候所からの高感度監視カメラによる観測では、噴煙は雲のため不明であったが、爆発の瞬間山頂付近が雲を通して明るく見え、赤熱した噴石が火口の西ないし南西側の山腹2 km付近まで飛散するのが観測された。山麓からは火山雷も確認され、また、軽井沢測候所では非常に大きい爆発音と205 Paの空振を観測した。爆発に引き続き、連続的な噴火に伴うと考えられる火山性微動が同日23時頃まで約3時間継続した。

気象庁では、浅間山の火山活動を監視するために山頂から北北東約2.5 kmの地点(以後F点と呼ぶ; Fig. 1)において1985年4月に傾斜観測を開始した。当初は、地

上置き気泡型傾斜計を地下約2 mのコンクリート製の基台に設置・観測していたが、2001年9月からはボアホール型気泡型傾斜計(Pinnacle Technologies Series 5500 Tiltmeter)を深さ約10 mに埋設し観測を行ってきた。9月1日の爆発的噴火では、噴火に先行する約29時間前からBH型地震(短周期の卓越した火山性B型地震)が群発し始めると同時にF点からみて西側が相対的に隆起となる傾斜変化が観測され始め、20時02分に前述の爆発的噴火が発生した。その後、強い空振を伴い山腹まで火山岩塊を飛ばすような爆発的噴火が3回(9月23日, 9月29日, 11月14日)あったが、いずれの爆発的噴火でも爆発に先行してBH型地震の群発とともに西側隆起の傾斜変化が観測された。このようにBH型地震の群発とともに西側隆起の傾斜変化が観測されたのは、

\* 〒950-0908 新潟市幸西4-4-1

新潟地方気象台

Niigata Local Meteorological Observatory, Saiwainishi  
4-4-1, Niigata-shi 950-0908, Japan.

\*\* 〒100-8122 千代田区大手町1-3-4

気象庁地震火山部

Seismological and Volcanological Department, Japan  
Meteorological Agency, Ohte-machi 1-3-4, Chiyoda-ku,  
Tokyo 100-8122, Japan.Corresponding author: Masaaki Churei  
e-mail: mchurei@met.kishou.go.jp

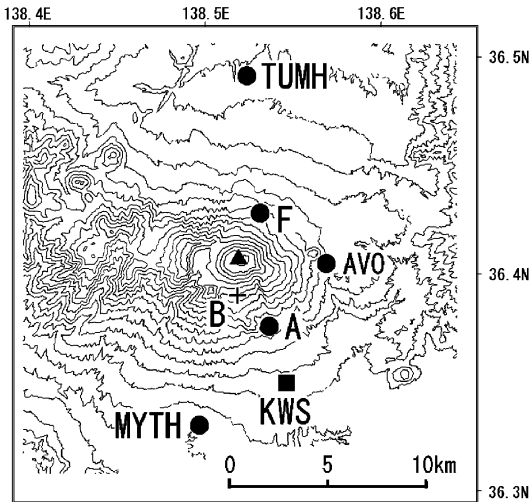


Fig. 1. Location map of observation points at Asamayama. Solid circles indicate tilt observation stations. A and F are operated by JMA, AVO by ERI and TUMH and MYTH by NIED. Plus, solid square and solid triangle indicate the seismic observation station B by JMA, Karuizawa Weather Station (JMA) and the summit crater of Asamayama, respectively.

F 点で傾斜観測を開始して以降初めてであった。

一連の噴火活動に前駆して地殻変動があることは多くの火山で知られている(例えば, 藤田・他, 2002; 村上・他, 2001) が, 個々の噴火の前兆となる地殻変動については桜島の爆発的噴火に前駆した地殻変動一観測坑道内に設置された水管傾斜計による地盤の傾斜変化と伸縮計による地盤の伸び縮み一がよく知られている。桜島では, 噴火の前兆となる地殻変動を検出し個々の噴火を予知する手法の開発・研究を進め, 多くの噴火を予知することに成功した(Kamo and Ishihara, 1989)。

今回, 浅間山においても初めて個々の爆発的噴火に前駆した傾斜変化が観測されたが, このことは浅間山の爆発的噴火の予測の新たな可能性を意味する。本論では, 爆発的噴火に先行して観測された傾斜変化と BH 型地震活動および噴火活動について述べるとともに, 傾斜変化から推定される地殻変動モデルと浅間山における爆発的噴火の予測の可能性について議論する。

## 2. 観測された傾斜変化と噴火活動

### 2-1 傾斜観測の概要

気象庁では, 今回の噴火後山頂火口の南南東約 4 km

にある地震観測点 A 点に新たに F 点と同じ仕様の傾斜計を深さ約 12 m に設置し, 2004 年 10 月から観測を開始した。

Table 1 には気象庁の傾斜計の仕様を示す。傾斜計の最小分解能は 1 nano-radian, サンプリング間隔は 1 秒であるが, 実際の監視には Baytap-G (Tamura *et al.*, 1991) を用いて潮汐成分を取り除いた 1 分ごとのデータ(平均値)を用いている。ちなみに F 点および A 点では, 全振幅で最大約  $0.2 \mu$  radian の半日潮が観測されている。以下に示すデータはすべて潮汐成分を取り除いた 1 分値である。

### 2-2 爆発的噴火に前駆した傾斜変化

浅間山では, 9 月 1 日の爆発的噴火の後, 9 月 14 日から 18 日にかけて連続的な小噴火活動があり, その後 3 回の中規模の爆発的な噴火(本論では, 山腹まで火山岩塊を飛散し, かつ軽井沢測候所で 20 Pa 以上の空振を観測した噴火を中規模の爆発的噴火と呼ぶ)と 11 回の小噴火が発生した。前述のように 9 月 1 日の爆発的噴火を含む 4 回の中規模の爆発的噴火ではいずれも噴火に先行して BH 型地震の群発とともに西側隆起の傾斜変化を観測した。9 月 15 日夜から 17 日にかけては連続的に小噴火が発生し, 火口底へ溶岩を流出するという活動があったが, この活動に対応した明瞭な傾斜変化も観測された。一方, 2005 年 2 月 22~23 日のように, BH 型地震の群発とともに西側隆起の傾斜変化が検知されたものの噴火に至らない場合もあった。小噴火の場合には, 噴火に先行した明瞭な BH 型地震の群発や傾斜変化は観測されなかった。

以下, 観測された傾斜変化と地震活動について詳述する。

#### 2-2-1 2004 年 9 月 1 日 20 時 02 分の爆発的噴火と傾斜変化

浅間山では, 2003 年 2 月から 4 月にかけて 4 回の微噴火があった後, 同年 7 月頃からは火山性地震が 1 日あたり 50 回前後発生するなどやや活発な地震活動が続く状態となった。2004 年 7 月下旬頃からは噴煙量が増加し始め, 微弱な火映現象も観測されるようになった。地震活動も活発な状態が続き, 8 月上旬には火山性微動も多発した。この間傾斜計には火山活動に関係すると思われる異常な変化は観測されなかった。このような状況の中で 9 月 1 日 20 時 02 分に山腹まで火山岩塊を飛ばすような爆発的な噴火が発生した。

Fig. 2 (a) には, この爆発的噴火前後の BH 型地震の活動と F 点における傾斜変化の時間的推移を示す。傾斜のデータには, 8 月 30 日から 31 日にかけて日本海を北東に通過した台風 16 号 (Fig. 2 (d)) による特徴的な傾斜変化に重畳して, 8 月 31 日 15 時頃から東西成分に西

方向上がりの傾斜変化が検知された。地震活動は、西上がりの傾斜変化の開始とほとんど同時にBH型地震が群発し始めた。この群発地震活動は9月1日午前3時頃にピークに達し、地震回数が減少していく過程の20時02分に爆発的噴火が発生した。噴火後はBH型地震の群発

活動はみられなくなった。これらのことから、観測された西上がりの傾斜変化とBH型地震の群発活動は、9月1日の爆発的噴火の前兆現象であったと考えられる。

一般的に傾斜観測においては、観測点毎に気圧の変化や降雨などの影響に特徴がある。9月1日の爆発的噴火

Table 1. Specifications of Pinnacle Technologies Series 5500 Tiltmeter at Asamayama.

Specification	Value
Tilt Resolution at Sensor	1 nano-radian
Range	±10 degrees from vertical
Gain(Max)	1000mV/micro-radian
Leveling Ability	Self leveling
Data Storage Type	Internal A/D & storage
A/D Resolution	24 bits
Sampling Interval	1 second
Orientation	Int. magnetic compass(±2°)
Installation Depth	12m(at A), 10m(at F)
Borehole Diameter	6 inch
Dimensions	φ 6.4 cm × 107 cm
Mass	4 kg
Operating Temperature	-40 ~ 85 °C
Power	DC 12V

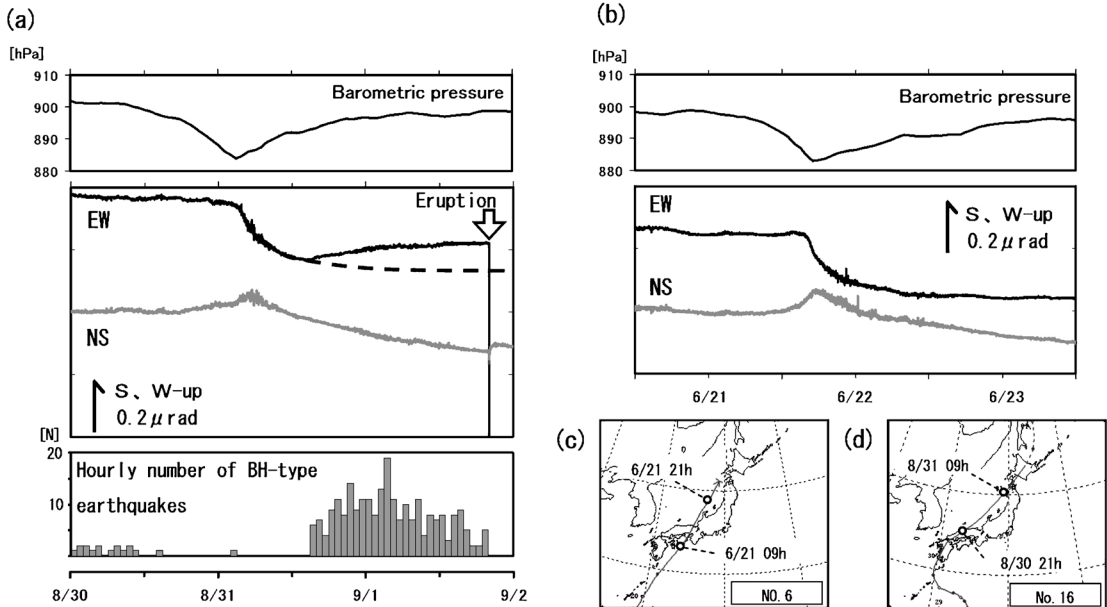


Fig. 2. (a) Tilt changes at F, barometric pressure at KWS and hourly number of BH-type earthquakes at B before and after the eruption on September 1, 2004. (b) Example of the tilt changes at F and barometric pressure at KWS caused by the typhoon No. 6. (c) and (d) The trajectories of typhoons No.6 and No. 16, respectively.

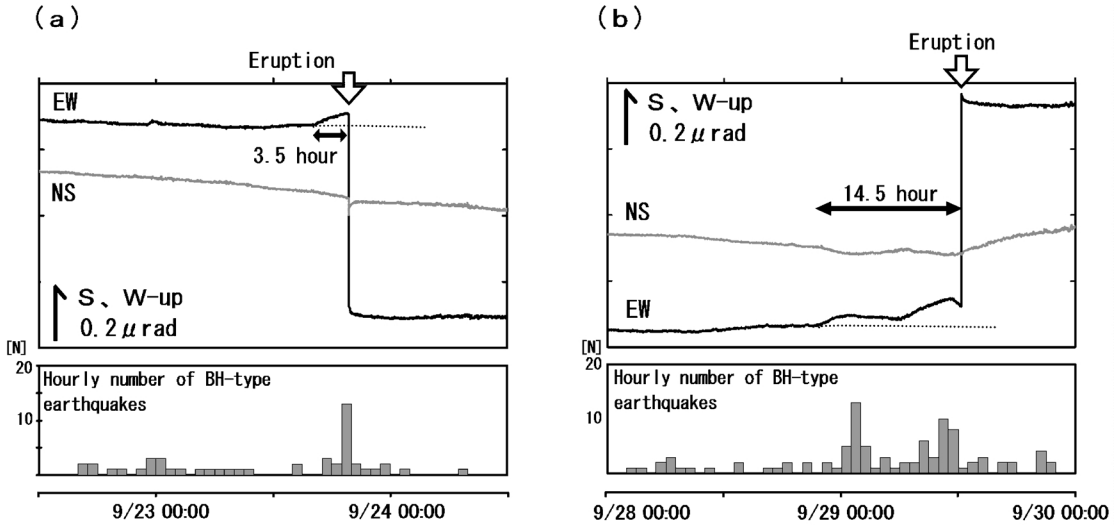


Fig. 3. Tilt changes at F and hourly number of BH-type earthquakes at B before and after the eruptions. (a) September 23, (b) September 29.

は、前述のように、台風16号が日本海を北東進し最接近した約1日半後に起こった。F点では、台風が日本海を北東に通過した場合には台風接近に伴う気圧の低下で南側が隆起し、台風が離れるに伴って気圧が上昇に転じると急激に東北東から北東方向の隆起が起こり、その変化は約1日にわたってゆるやかに減衰していくという特徴がみられる。Fig. 2の(b)には、台風16号とほぼ同様なコースをたどった台風6号(Fig. 2(c))通過時の傾斜変化の例を示す。台風16号通過時の傾斜変化は、BH型地震の群発と傾斜変化が始まる頃までは台風6号通過時の傾斜変化の推移とよく似ていることがわかる。台風16号通過後の傾斜変化も火山活動がなければ台風6号通過後の傾斜変化と同様に推移したと考えて間違いないと推察される。Fig. 2(a)中の破線は、台風6号通過に伴う傾斜変化のパターンを参考に推定した傾斜変化のトレンドである。このトレンドからのズレが噴火に先行した前兆的な傾斜変化と考えられる。噴火に先行した傾斜変化量は、東西成分において約 $0.1\mu\text{radian}$ 、南北成分には明瞭なトレンドの変化はみられなかった。

#### 2-2-2 9月23日19時44分の爆発的噴火と傾斜変化

この噴火でも、9月1日の噴火の場合と同様に、噴火に先行した西上りの傾斜変化とBH型地震の活発化が観測された(Fig. 3(a))。この噴火では、噴火の約3.5時間前から西上りの傾斜変化が始まり、一方、BH型地震の活動は、噴火の約1時間前から活発化した。噴火に先行した西上りの傾斜変化量は、約 $0.03\mu\text{radian}$ と推定された。

#### 2-2-3 9月29日12時17分の爆発的噴火と傾斜変化

この噴火では、噴火までに2段階の西上りの傾斜変化とBH型地震の活発化が観測された(Fig. 3(b))。噴火の約14.5時間前の9月28日21時30分頃から西上りを示す傾斜変化が観測され始め約4時間継続し、一方BH型地震の活動も29日午前0時頃から約3時間活発化した。その後傾斜変化は停滞しBH型地震の活動も一時的に収まったが、9月29日午前6時頃から再び西上りの変化が始まり、BH型地震の活動も活発化した。傾斜変化はBH型地震の活動を伴いながら約6時間続いた後、同日11時30分頃から傾斜の向きが反転し西下りとなり、約45分後に爆発的噴火に至った。噴火に先行した西上りの傾斜変化量は、約 $0.08\mu\text{radian}$ と推定された。

#### 2-2-4 11月14日20時59分の爆発的噴火と傾斜変化

この噴火は、A点で傾斜観測を開始してから初めて発生した中規模の爆発的噴火で、A点でも明瞭な噴火の前兆となる傾斜変化が捉えられた。Fig. 4にはF点とA点における傾斜変化とBH型地震の発生状況を示す。F点では11月13日19時頃から西上りの傾斜変化が観測され始め、ほぼ同時にBH型地震が多発し始めた。西上りの傾斜変化は14日の午前5時頃まで続いたが、その後は横ばいの状態が続いた。また、A点においても、F点で西上りの傾斜変化が観測され始めたほぼ同じ頃から、西上りの傾斜変化が観測され始め、F点と同様に14日の午前4時頃まで続いた後、横ばいの状態が噴火発生まで続いた。

一方、BH型地震は14日9時頃まで活発な状態が続い

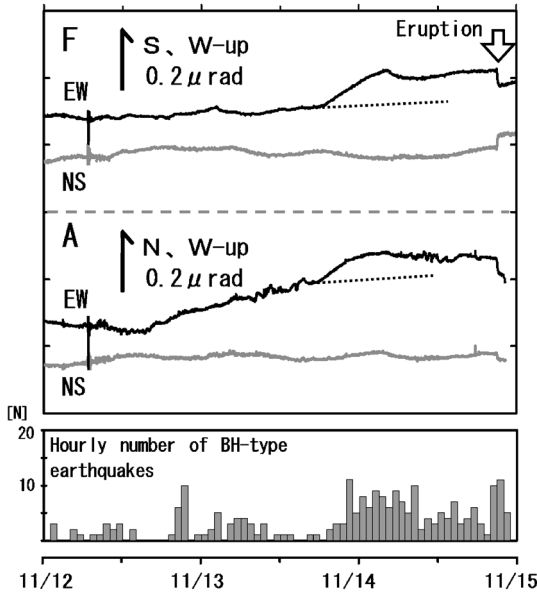


Fig. 4. Tilt changes at A and F, and hourly number of BH-type earthquakes at B before and after the eruption on November 14, 2004.

た後、少し活動は低下したもののやや活発な状態が続く、噴火の約2時間前の14日19時頃から再び活発化した後爆発的噴火が発生した。西上がりの傾斜変化の開始から爆発的噴火の発生までの時間は約27時間、傾斜変化量はF点で約 $0.11\mu$  radian、A点で約 $0.08\mu$  radianであった。

### 2-3 連続的な噴火活動(2004年9月14日~18日)に伴う傾斜変化

9月1日の爆発的噴火後は、地震活動や噴煙活動がやや低調な状態で推移したが、9月14日に2回の微噴火と1回の小噴火が発生した後、翌15日11時53分以降小噴火が頻発するようになった。特に16日未明から17日夕方まではほぼ連続的に小噴火が発生した。その後も小噴火は頻発し18日21時03分まで続いた。この間の小噴火はストロンボリ式の噴火で、噴煙は火口縁上約1,000から1,500m位の高さまで噴きあげられた。この噴火活動に伴い軽井沢測候所では断続的に弱い爆発音と空振(最大9.4Pa)を観測した。

Fig. 5には、9月13日から18日までの噴火活動の推移と傾斜変化の様子を示す。傾斜のトレンドは、9月14日03時30分に発生した最初の微噴火の約12時間前頃からわずかに西~西北西下がりの傾向となり、この微噴火の発生を機に変化の割合が大きくなった。この西~西北西下がりの変化が続く中で15日の昼頃から小噴火が

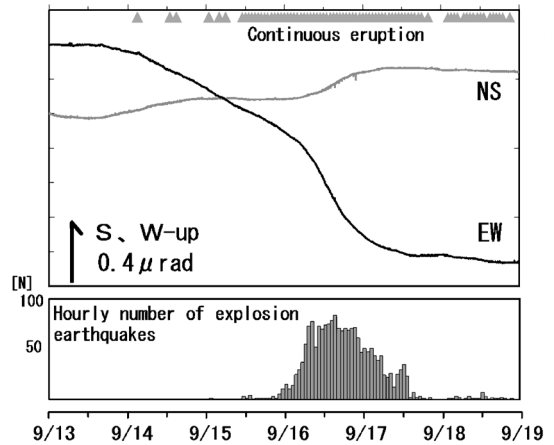


Fig. 5. Tilt changes at B and hourly number of explosion earthquakes at B during the period from Sept. 13 to Sept. 18. Small eruptions of the Strombolian type occurred from 11 h 53 m Sept. 15 to 21 h 03 m Sept. 18, continuously.

頻発するようになった。西~西北西下がりの傾斜変化は、ほぼ連続的な噴火活動となった翌16日未明頃から噴火活動のピークとなった同日夕方にかけて、さらに加速した。噴火活動は16日夕方頃から18日の夜にかけて次第に低下していったが、傾斜変化も次第に鈍化し、17日昼頃からはほとんど変化がみられなくなった。

この間(9月13日15時~18日0時)に観測された傾斜変化の量は、西下がり約 $1.2\mu$  radian、北下がり約 $0.3\mu$  radianであった。観測された傾斜変化の向きが爆発的噴火の前兆となった傾斜変化の向きとほぼ反対であることは、今回の噴火活動のメカニズムを知る上で興味深い。

### 2-4 爆発的噴火に至らなかった傾斜変化

Fig. 6には、爆発的噴火につながった傾斜変化とよく似た傾斜変化とBH型地震の群発がほぼ同時に発生したものの、爆発的噴火に至らなかった例を示す。Fig. 6(a)は10月6日に観測されたF点の傾斜変化とBH型地震活動の推移であるが、傾斜変化は6日06時頃から西~西北西上がりとなり、10時頃まで約4時間続いた後反転して西~西北西下がりとなり、1時間後には6日06時以前のゆるやかな西上がりのトレンドに戻った。06~10時の変化量は、東西成分は約 $0.05\mu$  radianの西上がり、南北成分は東西成分の数分の一程度の北上がりであった。BH型地震の活動は08時頃から活発化したが、傾斜変化が反転する約10分前に収まった。傾斜変化が反転した頃の噴煙活動には特に変化は見られなかった。

Fig. 6(b)には、2005年2月21~23日に観測されたF

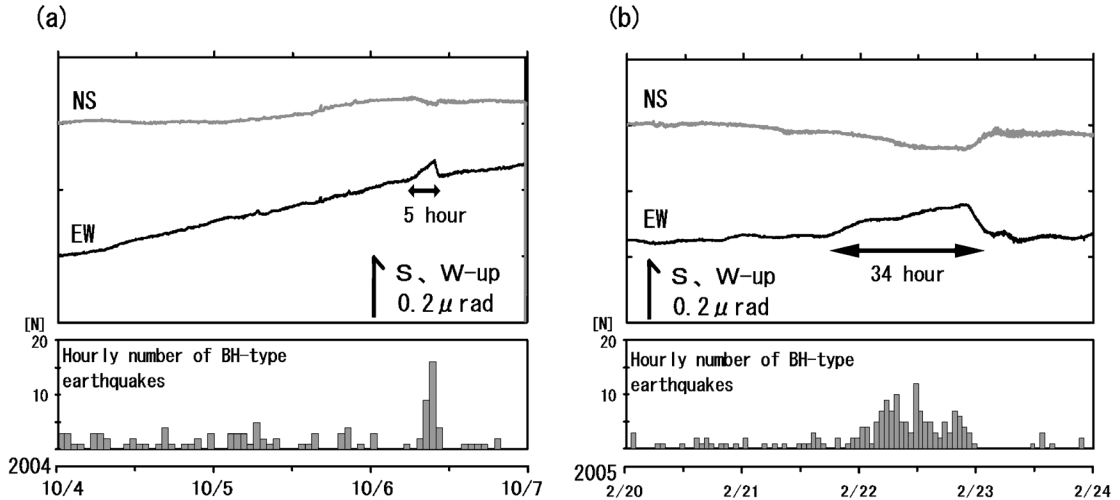


Fig. 6. Tilt changes accompanied with no explosive eruption and hourly number of BH-type earthquakes at B, (a) from October 4, 2004 to 6, (b) from February 20, 2005 to 23.

点の傾斜変化とBH型地震活動の様子を示す。傾斜変化は21日17時頃から西～西北西上がりとなり、翌22日の22時頃まで約29時間続いた後反転して西～西北西下がりとなり、翌23日の3時頃にはほとんど変化がみられなくなり、元のトレンドへ戻った。BH型地震の群発は、傾斜変化から少し遅れた21日22時頃から活発化した。傾斜変化が反転するとともに低下し、その後はほとんど発生しなくなった。21日17時～22日22時までの傾斜変化量は、東西成分で約 $0.1\mu\text{radian}$ の西上がり、南北成分は約 $0.03\mu\text{radian}$ 北上がりであった。

一方、A点でもF点の傾斜変化の推移に同期したような傾斜変化が観測された。A点では21日16時頃から西～西北西上がりの傾斜変化となり、翌22日6時頃までに約 $0.14\mu\text{radian}$ 変化したが、その後横ばい状態になり、同日12時過ぎにステップ状に反転し元のトレンドに戻った。その後、再びわずかながら西～西北西上がりの変化をした後、F点の反転とほぼ同期して、22日22時過ぎから急激に西側下がりへ反転した。この西下がりの動きは約8時間かけて約 $0.9\mu\text{radian}$ に達し、その後2日以上かけて次第にもとのトレンドへ戻った。ただ、この過程で22日12時過ぎに観測されたステップ状の傾斜変化については、同じようなステップ状の傾斜変化が時々観測されていることから、新設したばかりの観測点付近の地盤の不安定性に起因している可能性が高く、今後のデータの蓄積を待って解明する必要がある。

この2月21日から23日にかけての事例では、F点の傾斜変化とBH型地震の発生状況は、前に述べた4回の中規模の爆発的噴火前と良く似た経過をたどった。ま

た、A点でも、22日12時過ぎのステップ状の傾斜変化を除けば、11月14日と同様にF点の傾斜変化と同期したほぼ西上がりの傾斜変化が検知されたが爆発的噴火は発生しなかった。

### 3. 地殻変動モデル

ここでは11月14日の爆発的噴火に先行して観測された傾斜変化と山頂火口底にマグマが噴出した連続的な噴火活動時の傾斜変化について、地殻変動モデルを検討する。

#### 3-1 2004年11月14日の爆発的噴火に先行した地殻変動モデル

11月14日の爆発的噴火は、2-2-4節で述べたように、A点で傾斜観測を開始してから発生した唯一の中規模の爆発的噴火で、A点でも噴火に先行する傾斜変化を観測した。ここでは、この事例について先行した傾斜変化の圧力源モデルを検討する。解析には気象庁のA点とF点、東京大学地震研究所の浅間火山観測所(AVO)(渡辺私信)および防災科学技術研究所の嬬恋村(TUMH)と御代田(MYTH)で得られた傾斜データ(火山噴火予知連絡会資料、藤田私信)を用いた(Fig. 1参照)。

4回の中規模の爆発的噴火に先行したF点の傾斜変化は、相対的に西側が隆起であり火山体が膨らんでいる可能性が示唆される。しかしながら、山頂火口はF点の南南西約2.5kmにあることから、爆発的噴火に先行した傾斜変化を桜島で知られているような山頂直下の等方的な圧力源モデルで説明すること(加茂・石原, 1986)は不可能であり、他のモデルを検討する必要がある。

Fig. 7には、11月14日の噴火に先行して観測された浅

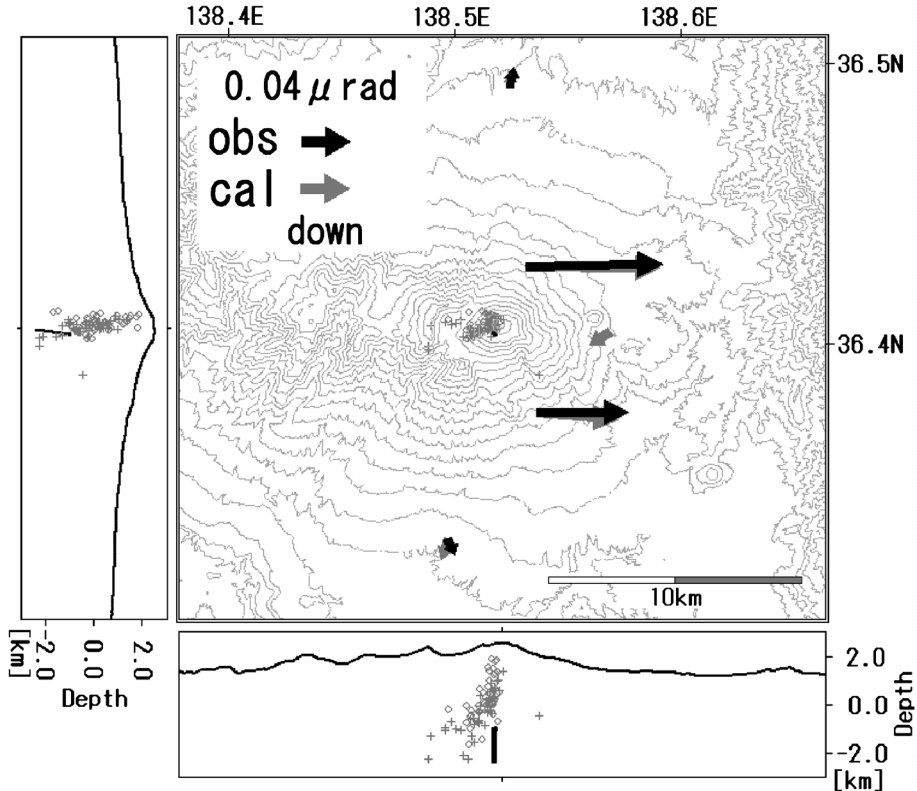


Fig. 7. Comparison of the observation with the dyke model. Solid arrows show the vector diagrams of the observed tilt change and gray arrows show the vector diagrams of the calculated tilt change using the dyke model. Thick line, pluses (+) and open circles (○) indicate the position of estimated dyke, hypocenters of BH-type earthquake and explosion earthquakes from August 1 to December 31, 2004, respectively.

間山周辺観測点における傾斜ベクトル（黒の矢印）を示す。観測された傾斜ベクトルをみると、A点とF点の傾斜ベクトルはいずれも東方向下がりであり、浅間山の北側と南側にあるTUMHとMYTHでは、それぞれ約 $0.02 \mu$  radianの北方向下がりと約 $0.01 \mu$  radianの南南東方向下がりが見出されている。一方、浅間山東山麓にあるAVOではほとんど傾斜変化が見出されていない。これらの特徴から、圧力源は東西方向に走向を持つダイク状のものである可能性が高いと推察される。ここではダイク状の内部圧力源で観測値を説明できるか議論を進める。

観測された傾斜変化の大きさは、山頂に近いA点やF点が大きいため、また爆発地震や爆発に先行して群発したBH型地震の震源は山頂火口直下付近にあること（Fig. 7参照）などから、爆発的噴火に先行する傾斜変化の源は山頂火口直下付近あるいはその近傍にあると考えられる。ここでは山頂火口直下付近にダイク状の圧力源があると仮定し、Okada (1992) による開口割れ目による弾性変形の解析式を用いた計算結果の変位ベクトルと観

測値の変位ベクトルの差の自乗和が最小になるように、グリッドサーチ手法で圧力源のパラメータを求めた。具体的には、ダイクの位置は水平方向には火口を中心とした $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ の範囲、深さ方向にはダイクの上端が標高 $0.1 \text{ km}$ から $-1.3 \text{ km}$ の範囲においてそれぞれ $0.1 \text{ km}$ 間隔、ダイクの幅は $0.2 \text{ km}$ 刻みで最大 $3.8 \text{ km}$ 、長さは $20 \text{ m}$ 刻みで最大 $340 \text{ m}$ 、走向と傾きは $1^\circ$ 刻みでグリッドサーチした。山体の剛性率は $4 \times 10^{10} \text{ Pa}$ とした。解析ツールは、火山用地殻活動解析支援ソフトウェアMaGCAP-V（福井・他、2005）を用いた。最適と推定したダイクのパラメータをTable 2に示す。Fig. 7の灰色の矢印は、推定したダイクによる各観測点の傾斜ベクトルである。観測された傾斜変化は、ダイクの上端が火口の南南西 $500 \text{ m}$ 付近の海拔下約 $1 \text{ km}$ 付近にあり、ほぼ東西方向に走向をもつ少し南に傾いたダイク状の圧力源で説明できることになる。爆発的噴火に先行して山頂直下の海拔下約 $1 \sim 2 \text{ km}$ 付近で山体を南北に押し広げるような内圧の増加があったと解釈される。

### 3-2 連続的な噴火活動（2004年9月14日～18日）に伴う傾斜変動とマグマの流出

2-3項で述べたようにF点では9月15日から17日の連続的な噴火活動に伴って顕著な傾斜変化が観測された。この連続的な噴火活動に伴って浅間山の火口底には約90万m<sup>3</sup>のマグマが流出（国土地理院, 2005; 大木・他, 2005）しており、浅間山の火山体では多量のマグマの移動に起因する地殻変動が引き起こされたと推察され、F点で検知された傾斜変化の意味を知ることは興味深い。

Fig. 8には連続的な噴火活動時に観測されたF点の傾斜変化ベクトル（9月13日12時00分～9月18日00時00分）を示す。F点の傾斜変化ベクトルは、北下りの

成分が少し含まれているものの、爆発的噴火に先行する傾斜変化とほぼ反対の向きであることが注目される。爆発的噴火に先行したF点の傾斜変化も詳しく見ると、例えば11月14日の場合のように変化量は小さいがわずかに北上がりの傾斜変化が含まれているようにみえるものもある（Fig. 4参照）。噴火に至らなかった傾斜変化の例では、わずかに北上がりの傾斜変化があった（2-4節参照）。一観測点のみのデータで詳細な議論はできないが、前項の議論を参考にすれば、連続的噴火に伴う傾斜変化は山頂火口直下の火山体内部でダイク状に収縮が起きたことを示唆している可能性が高い。仮に前項で求めたダイクモデルを用いると、ダイクの開口量のみを変化させることで連続的な噴火活動に伴う傾斜変化（9月13日15時から18日0時までの傾斜変化量）は簡単に説明でき、ダイクの開口量は約6mの縮み、体積の変化量は約50万m<sup>3</sup>の収縮と求められる。火口底に流出したマグマの量約90万m<sup>3</sup>と概ね調和的である。

浅間山のマグマ溜りについては、青木・他（2004）や村上（2005）により、浅間山山頂火口の西方約2.5kmにある黒斑山直下の海拔下1～3km付近に上端を持つダイク状のマグマ溜りが存在、今回の活動との関連性が指摘されている。F点の傾斜観測データからは、上述のとおり、浅間山山頂火口直下の海拔下約1～2km付近で火山体を南北に押し広げるように蓄えられていたマグマが連続的な噴火活動に伴って火口底に流出した可能性も考えられ、浅間山浅部の構造を知る上で興味深い。なお、今回活動したマグマがいつ山頂直下の火山体内部に蓄積されたかについては、F点では雷による停電などで時々欠

Table 2. Optimum parameters for the model in Fig. 7.

Longitude	138.51729° E
Latitude	36.40382° N
Depth	1.0km
Strike	N 89° E
Dip	98°
Length	0.06km
Width	1.4km
Opening	550mm

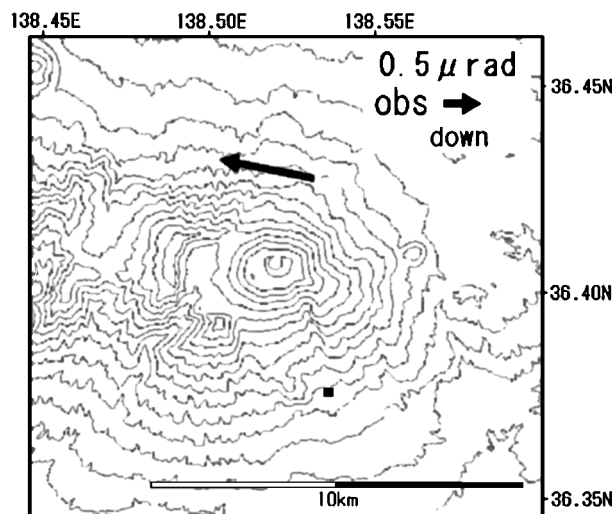


Fig. 8. Solid arrow shows the vector diagram of the observed tilt change accompanied with continuous Strombolian type eruption from 12 h 00 m Sept. 13 to 00 h 00 m Sept. 18, 2004.



Table 3. Major eruptions and significant tilt change accompanied with each eruption.

Date	Time	Eruption Scale	Air-shock (Pa)	Tilt Change (micro-rad)	Increase of BH-type Earthquake	Tilt-step (micro-rad)
2004 9/1	20:02	Middle	205.5	0.1 (W-up) (begin for about 29 hours)	begin for about 29 hours	0.68 (E-up) 0.02 (S-up)
9/15 - 18	Cont.	Small	9.4(max)	-	-	-
9/23	19:44	Middle	72.3	0.03 (W-up) (begin for about 3.5 hours)	begin for about 1 hours	0.61 (E-up) 0.01 (N-up)
9/29	12:17	Middle	29.6	0.08 (W-up) (begin for about 14.5 hours)	begin for about 12 hours	0.62 (W-up) - (NS)
10/10	23:10	Small	18.9	-	-	
11/14	20:59	Middle	73.4	0.11 (W-up) (begin for about 27 hours)	begin for about 27 hours	0.04 (E-up) 0.04 (S-up)

測があり長期的に安定したデータが得られていないことから、傾斜変化のトレンドから評価・議論することは困難である。長期的なマグマの蓄積過程については、GPSを主体にした地殻変動観測から明らかにされていくと考えられる。

#### 4. 議 論

浅間山と桜島は日本を代表する安山岩質の火山で、山頂噴火活動期に類似した火山性地震が発生することが指摘されている(石原・井口, 1989; Shimozuru and Kagiya, 1989; 下鶴・他, 1975)。桜島では、噴火の前兆となる地殻変動があることが知られているが(例えば、加茂・石原(1986)など)、今回浅間山で4回発生した中規模の爆発的噴火においていずれも前兆となる地殻変動を観測したことは、浅間山火山の噴火予知に対して新たな可能性を示唆する。

Table 3には、2004年9月1日から2005年2月末までの間に浅間山で発生した主な噴火と傾斜変化の特徴をまとめてある。爆発発生時に観測された傾斜ステップも合わせて示す。F点で観測された4回の爆発的噴火に前駆した傾斜変化の大きさは、約0.03~0.11 $\mu$  radian、先行した時間は約3.5時間前から29時間で、いずれも顕著なBH型地震の群発を伴っていることが特徴的である。

桜島の爆発的噴火では、噴火の10分~数時間前から山頂付近の地盤が隆起・膨張し、爆発が起こると同時に急激に山頂付近の地盤が下降・収縮し、その後次第にほぼ前兆変化出現前のレベルに戻るということが知られている(加

茂・石原, 1986)。Ishihara (1990)によれば、緩やかな噴火前のinflationと噴火後のdeflationはマグマ溜りの深さに相当する海拔下2~6 kmでの圧力変化によるものであり、爆発直後の急激なステップ状の山体収縮は火口直下深さ500 m付近のガス溜りの破裂に伴うものである。

浅間山の場合にも、爆発の約3.5~29時間前から火山体が緩やかに膨張し、爆発が起こるとほぼ同時にステップ状の急激な傾斜変化が観測されており、またステップ後の傾斜変化についても、例えばFig. 3の9月23日の爆発後のように、数時間から半日程度わずかながら緩やかな西下がりの変化がみられる場合もある。このように浅間山の爆発的噴火前後における傾斜変化の推移は桜島の場合とよく似ていると考えられる。

しかしながら、浅間山の場合にはステップ状の傾斜変化は大きさも向きもまちまちであり(Table 3参照)、9月1日と23日の爆発直後の傾斜ステップは火山体の収縮を示唆するセンスの西下がりであり、その変化量は爆発の前兆となった傾斜変化量の数倍であった。11月14日の爆発直後の傾斜ステップは、爆発の前兆となった傾斜変化量よりやや小さく、傾斜の方向は北西下がりであった。一方、9月29日の爆発時には、膨張を示唆する方向(西上がり)に数倍の大きさの傾斜ステップが観測された。桜島の爆発に伴う傾斜ステップは、変化量は爆発の前兆として観測された傾斜変化量の数分の一程度、変化の向きは山頂火口方向が下がる向きであり、山頂直下に蓄えられた内部圧が爆発で発散されたとして考えられている(Ishihara, 1990)。浅間山の傾斜ステップの様子は、

桜島と比べて大きく異なっているが、その原因の一つとして次のようなことが考えられる。F点の傾斜観測では、浅間山で有感となるような一般の地震、例えば2004年10月23日に発生した新潟県中越地震（マグニチュード6.8、軽井沢測候所の震度Ⅲ）などでもステップ状の傾斜変化が観測されており、今回の浅間山の爆発に伴う地震は軽井沢測候所で有感であったことから、大きな地盤の揺れが傾斜ステップを引き起こしている可能性がある。

浅間山の爆発的噴火直後のステップ状の変化については課題として残るものの、桜島と浅間山の爆発的噴火においては、噴火の準備過程として山頂直下を圧力源とする緩やかなinflationがあり、爆発発生後には緩やかなdeflationを伴うという共通した特徴があると考えられる。

次に地震活動と地殻変動の関連性について桜島の事例と比較して議論する。西(1974)は、桜島では爆発の数時間前から地震が群発し始め、個々の地震の振幅が次第に増大して爆発に至る地震群と、地震が群発してもすぐには爆発せず、地震活動が収まった後で爆発が起こる地震群があることを指摘し、前者を第一種群発地震、後者を第二種群発地震と名づけている。浅間山の今回の爆発的噴火に先行したBH型地震の群発は、桜島の第一種群発地震に類似していることになる。但し桜島の場合には、振幅が次第に増加して爆発に至っているが、浅間山の場合には4回の爆発のいずれにおいてもBH型地震の振幅の増加はみられなかった。京都大学防災研究所附属桜島火山観測所（現在：火山活動研究センター）では、1985年8月に桜島の個々の山頂噴火に対応した地盤変動を捕捉することを目的に観測坑道における精密な地殻変動連続観測を開始した（加茂・石原、1986）が、観測開始以降、顕著なB型地震の群発直後に爆発した例はなく（井口、私信）、第一種群発地震発生と地殻変動の関係については未だ解明されていない。

石原・井口(1989)は、桜島のB型地震を1~3 Hzの周波数帯域が卓越する地震BL型と5~8 Hzの卓越する地震BH型に分類し、地震の発生と地殻変動や表面活動との関連性について詳細に研究している。彼らの研究によれば、桜島ではBH型は、山頂部地盤が隆起する過程で顕著な表面活動を伴うことなく発生し、BL型は山頂部地盤の隆起が停滞あるいは急激に沈降する過程でマグマの噴出を伴いながら群発する傾向がある。前者は桜島火山の深部からマグマが火道に貫入する過程で発生する地震、後者は火口底付近まで達しているマグマが発泡・噴出する過程で発生する地震と考えられている。

今回の浅間山の火山活動では、2-3節や3-2節で述べたように、9月14日から18日にかけて火山体の急激な収縮を示す傾斜変化があり、それに伴って連続的な小噴

火活動そして小噴火に伴うと推定されるBL型の地震が群発し、また火口底へはマグマの流出があった。この過程は、桜島の山頂部の地盤が急激に沈降しBL型が群発する過程に類似しており注目に値する。

もう一つ注目しておきたいことは、2005年2月22日から23日にかけての浅間山の活動経過である。この時には、BH型地震の群発を伴いながら明瞭な山体膨張を示唆する傾斜変化が観測されたが、爆発的な噴火を起こすことなく傾斜は元のトレンドへ戻った（Fig. 6 (b)）。このときには、傾斜変化が反転し元のトレンドへ戻った時刻（22日22時~23日01時頃）に対応して多量の噴煙の噴出があったことが監視カメラの映像で確認されており（飯島、私信）、噴煙を噴出することで内部の圧力を解消したものと推察される。この例は、桜島における山頂部地盤の下降に伴ってBL型が発生する、すなわち噴煙の噴出がみられる過程と類似していると考えられる。

桜島における地震活動および地盤変動の推移を示した石原・井口(1989)のFig. 9によれば、地震活動はBH型地震の群発からBL型地震へ、地盤変動は隆起から沈降へ約半日の間に変化していることがわかる。BL型地震の発生は噴火活動を伴っているため、桜島の場合も、今回の浅間山の活動と同様に、BH型地震の群発を伴って山頂部地盤が隆起して噴火に至ったと考えられる。爆発的な噴火になるかそれとも噴煙噴出的な緩やかな噴火になるかの違いは、火口底浅部の力学的構造やマグマの化学的性質の違いなどが要因として挙げられる。

## 5. まとめ

浅間山の山腹付近まで火山岩塊を放出する爆発的噴火において、噴火に先行した傾斜変化が初めて観測された。この傾斜変化は、火口直下でほぼ東西に走向を持つダイク状の部分が膨らんだものと推定された。また、この傾斜変化はBH型地震の群発を伴って発生したことが特徴的であった。

浅間山と桜島は日本を代表する安山岩質の火山であるが、両火山の山頂噴火において“山頂部の地盤がBH型地震の群発を伴いながら隆起しその後噴火に至る”という類似の噴火プロセスがあるということは、安山岩質火山における噴火予測の可能性が示唆される。気象庁では、今回発生した4回の中規模爆発のいずれでも事前に火山観測情報を発表した。その根拠になったのは、噴煙活動や地震活動が活発な状態が続いている中で、BH型地震の群発を伴いながら山体膨張を示唆する傾斜変化が検知されたことによる。一方、2005年2月21日~23日の場合のように、爆発的噴火に至った場合と同様の準備過程をたどったと推察されても爆発的噴火を起こさない場合

もあり、物理的になにか異なるのか今後の課題である。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東大地震研究所および防災科学技術研究所からは浅間山およびその周辺の観測データをいただきました。東京大学の渡辺秀文氏と防災科学技術研究所の藤田英輔氏には、観測データの評価について貴重なご意見をいただきました。軽井沢測候所飯島 聖氏には噴煙噴出について重要なコメントをいただきました。東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センターの植木貞人氏には、草稿について丁寧な助言をいただきました。また、査読者である京都大学井口正人氏および匿名の査読者からの適切なご指摘により、本論文は大きく改善されました。気象庁地震火山部火山課火山監視・情報センターおよび軽井沢測候所の職員には、今回の浅間山の噴火活動を監視する中で、多くの議論をいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

## 引用文献

- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎 (2004) 2004年浅間山噴火に先行する地殻変動. 日本火山学会 2004年度秋季大会予稿集, 205.
- 藤田英輔・鶴川元雄・山本英二・岡田義光 (2002) 三宅島火山活動の発端となった岩脈貫入のシナリオ. 震研彙報, 77, 67-75.
- 福井敬一・山本哲也・藤原健治・高木朗充・坂井孝行 (2005) 火山用地殻活動解析支援ソフトウェアの開発 (2). 2005年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, V 055-P033.
- Ishihara, K. (1990) Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In *Magma Transport and Storage* (Ryan M. P. ed.), 335-356. John Wiley & Sons, Chichester.
- 石原和弘・井口正人 (1989) 火山体の変形, 表面活動と火山性地震発生の関係 (1)—微小地震の群発現象について—. 京大防災研年報, 32B-1, 1-11.
- 加茂幸介・石原和弘 (1986) 地殻変動連続観測で捕捉された山頂噴火の前駆現象. 京大防災研年報, 29B-1, 1-12.
- Kamo, K. and Ishihara, K. (1989) A preliminary experiment on automated judgement of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Japan. In *Volcanic Hazards, Assessments and Monitoring* (Latter, J. H. ed.), 585-598. IAVCEI Proceedings in Volcanology 1, Springer-Verlag.
- 国土地理院 (2005) 浅間山火口内の地形変化. 火山噴火予知連絡会報, 90, 39-42.
- 村上 亮 (2005) GPS 連続観測結果が示唆する浅間火山のマグマ供給系. 火山, 50, 347-361.
- 村上 亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田 堯 (2001) 2000年有珠山噴火にともなうマグマモデル-GPS 連続観測を主とする地殻変動データによる推定. 国土地理院時報, 95, 99-105.
- 西 潔 (1974) 桜島における微小地震の群発と爆発との関係. 第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集, 345-346.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦部ぼくろう・宮脇正典 (2005) 航空機搭載型合成開口レーダー (SAR) 観測による浅間火山 2004年噴火に伴う火口内の地形変化. 火山, 50, 401-410.
- Shimozuru, D. and Kagiya, T. (1989) Some significant features of pre-eruption volcanic earthquakes. In *Volcanic Hazards, Assessments and Monitoring* (Latter, J. H. ed.), 504-512. IAVCEI Proceedings in Volcanology 1, Springer-Verlag.
- 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・松本時子・長田 昇・寺尾弘子 (1975) 1973年の浅間山噴火活動について. 震研彙報, 50, 115-151.
- 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.

(編集担当 植木貞人)