

富士鳴沢火山活動観測施設における傾斜変動観測

鵜川元雄*・熊谷貞治**

Ground Tilt Change Observation at Fuji-Narusawa Volcano Observational Station

By

Motoo UKAWA* and Teiji KUMAGAI**

****National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*

Abstract

Borehole type tiltmeter was installed at Fuji-Narusawa volcano observational station, which is located at 10 km from the summit of Mt. Fuji in NNW direction, for the purpose of volcanic eruption prediction study of Mt. Fuji. The depth of the tiltmeter is 201 m from ground surface and setting of it into the borehole was done in December 1991. The data have been recorded on analog monitoring charts since the installation and digitally on floppy diskette since August 1992. The digital data for about one year show that drift is $6.7 \mu\text{rad}/\text{yr}$ in NS component and $5.0 \mu\text{rad}/\text{yr}$ in EW component. Apparent amplitude of the earth tide is approximately $0.15 \mu\text{rad}$ on the both components, being comparable to those at inland tilt stations for earthquake prediction study. In order to estimate minimum detection level of tilt change associated with volcanic activity of Mt. Fuji, fluctuation of tilt change was evaluated for one year since August 1992. Tilt data processed with 24-hour-moving average show several steep changes ranging from 0.1 to $0.15 \mu\text{rad}$. Some of them were caused by rainfalls with precipitation of about 100 mm/day, and one by a felt earthquake. Another four cases were probably caused by instrumental and/or site effects. By considering these fluctuations as back-ground noise in the usual period, tilt change exceeding at least $0.2 \mu\text{rad}$ is expected to be detected as an abnormal crustal movement, if another tilt data in Mt. Fuji region is available to distinguish tilt change caused by volcanic activity from instrumental and site effects. Magmatic activity which causes tilt change of this detection level was examined in two cases, that is, dyke intrusion and spherical magma chamber models.

Key words : volcanic eruption prediction, Fuji, tilt
キーワード : 噴火予知, 富士山, 傾斜変動

*防災科学技術研究所 地震予知研究センター

**同 地震予知研究センター 火山噴火予知研究室

1. はじめに

防災科学技術研究所では、活火山であり噴火の社会的影響の大きい富士山の火山活動を調査・研究するために、火山活動観測網の整備を進めている。この計画の第1期においては、短周期と長周期の地震計による広帯域地震観測と孔井式傾斜計による地殻変動連続観測を主体とした観測点を富士山周辺に数カ所設置する。第1観測点が富士山の北北西、山頂から約10 kmの地点に平成2年度から4年度にかけて建設され、観測が開始された。ここでは第1観測点(観測点名、富士鳴沢火山活動観測施設;観測点コード、FJN)で約1年間観測された傾斜変動の特徴について予備的な調査を行ったのでこれについて報告し、これを基に検出可能な地下のマグマ活動を検討する。

2. 観測の概要

富士鳴沢火山活動観測施設(緯度 35.4431°N, 経度 138.6939°E, 標高 1250 m)の位置を図1に示す。設置されている計測器は、短周期地震計と傾斜計が一体となった孔井式地殻活動観測装置(アカシ製 JTS-2型)と STS-2型広帯域地震計、及び雨量計、気圧計である。この傾斜計は地震予知研究のために防災科学技術研究所により関東・東海地殻活動観測網に設置されている孔井式傾斜計(佐藤ほか, 1980)と同じものである。地殻活動観測装置は深度 203 mの観測井に、また STS-2型広帯域地震計は深度 6 mの観測坑井に設置されている。各計測器の設置時期は、地殻活動観測装置(短周期地震計と傾斜計)が1991年12月、STS-2型地震計が1992年3月、雨量計が1990年12月、気圧計は1993年1月である。

傾斜計の設置深度は201 mで、関東・東海地殻活動観測網の傾斜観測点での設置深度(約100 m)より深い。設置点の地質は、古富士の最上部のかんらん岩輝石玄武岩質の溶岩である(宮地, 1993 私信)。地表と傾斜計設置点の間はスコリアと溶岩の互層である。観測井はケーシングされ、孔壁とケーシングの間にはセメントが充填されている。

傾斜計により観測された信号は、1993年2月16日までは現地にて記録・収録され、1993年2月26日以降はNTT専用回線を用いたテレメータによりつくばに伝送され、記録・収録されている。記録・収録の状況を図2に示す。1992年8月17日までは、打点記録計(横河 μ R-180)による可視記録のみ、それ以降はデジタルデータ収録装置(TEAC DR-F1)により、サンプリング・レート 0.1 Hz、分解能 14 ビットでデータを収録した。1993年3月以降は、テレメータによりサンプリング 1 Hz、分解能 16 ビットで伝送されたデータを下位 12 ビットのみ D/A 変換器で再びアナログ信号に戻し、それを DR-F1 に収録するという便宜的な方法で収録している。なお、1993年2月から3月にかけて、テレメータ化に伴い約1ヶ月間断続的な欠測期間がある。

ここでは主として、DR-F1によるデジタルデータのある1992年8月以降のデータにつ

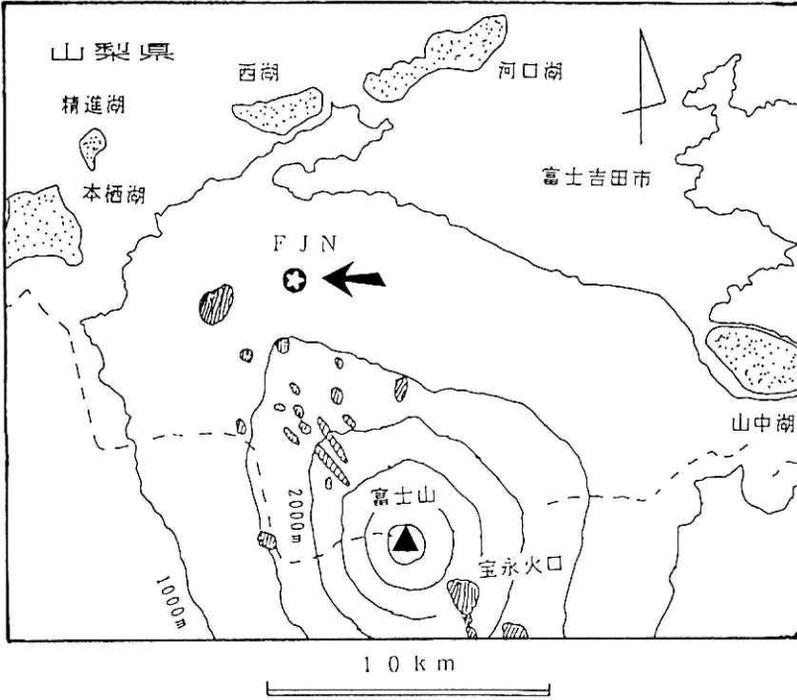


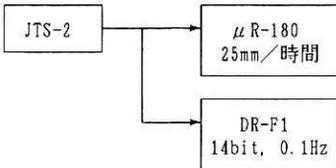
図1 富士山鳴沢火山活動観測施設の位置

Fig. 1 Location of Fuji Narusawa volcano observational station (FJN).

a. 1991/12/26~1991/8/17



b. 1992/8/17~1993/2/15



c. 1993/2/26~



図2 傾斜変動観測データ収録ブロック図

Fig. 2 Block diagram showing acquisition of tilt data.

いて報告する。DR-F1の分解能は0.15 mV/bitであり、これは $7.3 \times 10^{-9} \mu\text{rad}$ に相当するが、実際には収録時に $\pm 1 \times 10^{-7} \mu\text{rad}$ 程度に相当するランダムと思われるノイズが混入している。このノイズを除くため10分間の中央値を60個のデータから計算し、これを基にして傾斜変動の特徴を解析した。以下においてデジタルデータはこの10分値データを指すものとする。またDR-F1はフロッピーディスクにデータを収録するため、約1ヶ月に1回フロッピーディスク交換のために数分間の欠測が生じている。

1時間程度より短周期の変動については、10分値のデジタルデータを用いることができないので、打点式記録計に記録された可視記録を調査した。また雨量と気圧データについては現在デジタルデータによる収録がなされていないので、これらについても打点式記録計のデータを用いた。

3. 傾斜変動の特徴

3.1 ドリフト

1992年8月17日から1993年8月16日までの約1年間の傾斜変動データについて24時間の移動平均を施し(今後このデータを日平均値と呼ぶ)、地球潮汐等、1日より短い周期の変動を除いたデータを図3に示す。ボアホールへの傾斜計設置から約1年間経過しているため、ドリフトはかなり安定してきていることがわかる。南北成分は、この期間、北下りのほぼ直線のドリフトを示し、その値は約 $6.7 \mu\text{rad}/\text{年}$ である。ただし、1993年6月8日に発生したステップ状の変化後は、ドリフト量は約 $2.1 \mu\text{rad}/\text{年}$ (1993年8月の値)に減少している。東西成分は、西下りのドリフトであるが、その量は時間とともに次第に減少している。

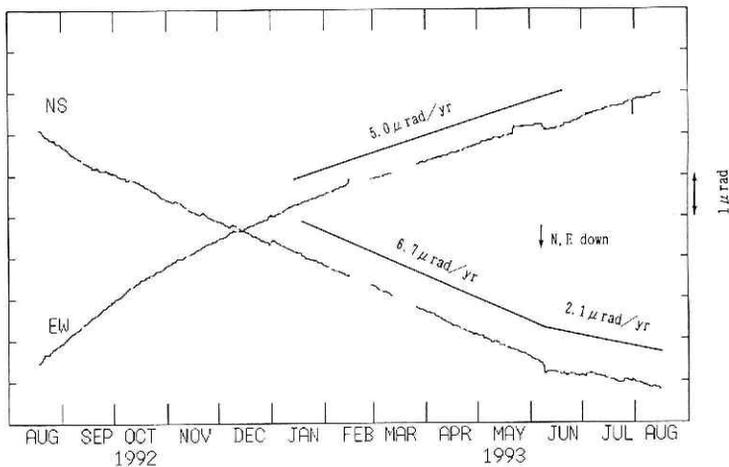


図3 FJNで観測された傾斜変動日平均値

Fig. 3 Daily averaged tilt change observed at FJN.

る。1993年1月以降は約 $5.0 \mu\text{rad}/\text{年}$ である。

関東・東海地域地殻活動観測網の傾斜観測点のドリフト量と比較すると、関東・東海地殻活動観測網では約70%の観測点で東西・南北両成分とも $3 \mu\text{rad}/\text{年}$ であり（関口ほか、1989）、FJNのドリフト量は比較的大きいといえる。

3.2 地球潮汐

1ヶ月間の傾斜観測データを1993年4月と7月について図4に示す。最も顕著な変動は地球潮汐で、そのみかけの振幅は最大 $0.15 \mu\text{rad}$ 程度である。関東・東海地域地殻活動観測網の傾斜観測点の観測値（関口ほか、1989）と比較すると、海洋潮汐の影響の少ない内陸の傾斜観測点（例えばENZ, YMK）の値と同程度である。

3.3 降雨の影響

1992年10月から1993年8月のデータについて、ドリフトを目視により直線で近似して取り除いた日平均値を日雨量（日別積算雨量）とともに図5に示す。南北成分には、日雨量が100 mmを越える場合に、南下がりに $0.1\sim 0.15 \mu\text{rad}$ 程度の明瞭な変動が見られる（図5にR2, R3, R5と示す）。また日雨量は100 mmを越えないが、雨量の多い日が続いた1992年10月と1993年6月から7月にかけても降雨の影響と考えられる変動が見られる（図5にR1, R4と示す）。東西成分にもこれに対応した変動が見られるが、その値は $0.05 \mu\text{rad}$ 程度かそれ以下であり、南北成分より降雨の影響を受けにくいことがわかる。図5の時間軸を拡大したものを2つの期間について図6に示す。降雨の影響は数日から10日程度で回復するようである。

3.4 気圧の影響

気圧データは打点式記録計による可視記録のみであるため、気圧変化と傾斜変化の相関の解析は行わなかった。今後、全ての観測量がデジタルデータとして収録されたときに解析する予定である。

可視記録上で判別可能な1時間以内程度の短周期の気圧変化に対応する傾斜変化はほとんど観測されていないが、1993年9月4日の台風14号の通過時に卓越周期数分程度の気圧変化に対して傾斜南北成分が気圧と同様の变化をした。図7に記録を示す。気圧の振幅は $1\sim 2 \text{ hPa}$ で、対応する傾斜変化は $1\sim 2 \times 10^{-8} \text{ rad}$ である。

3.5 地震の影響

地殻変動の観測において、地震時にステップ状の変動が観測されることがあり、原因として観測点近傍の地盤から計測器まで含めたローカルな影響を受けるためと考えられている

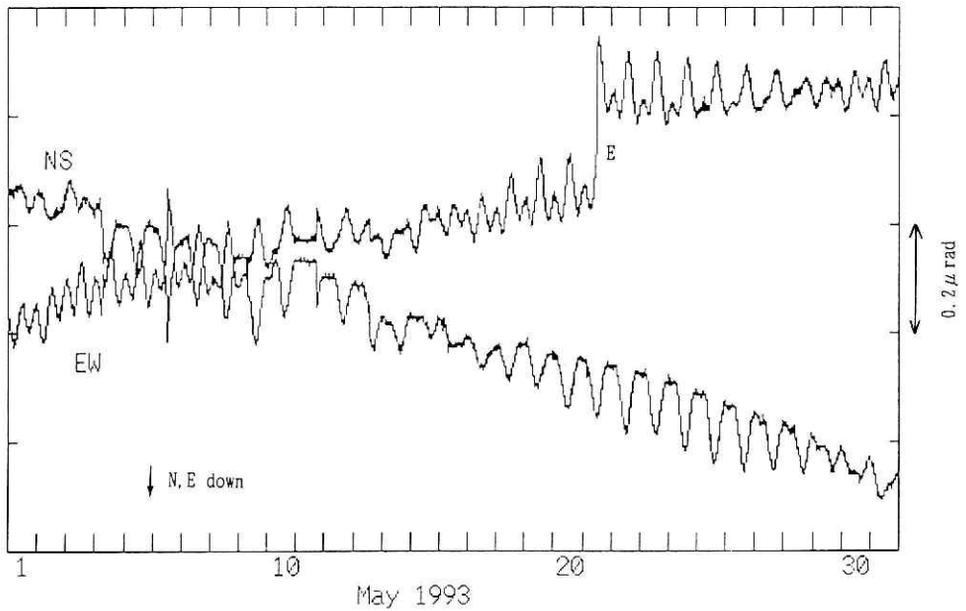
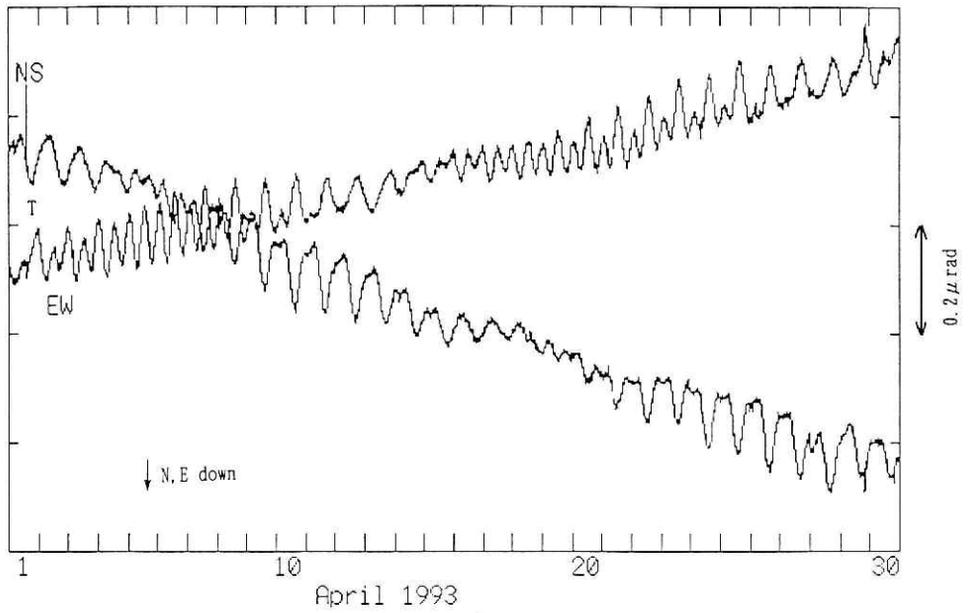


図4 1993年4月と5月の傾斜変動10分値データ。Eは地震によるステップ

Fig. 4 Tilt change data of 10-min-median value for April and May 1993. A step like change caused by an earthquake is indicated by E.

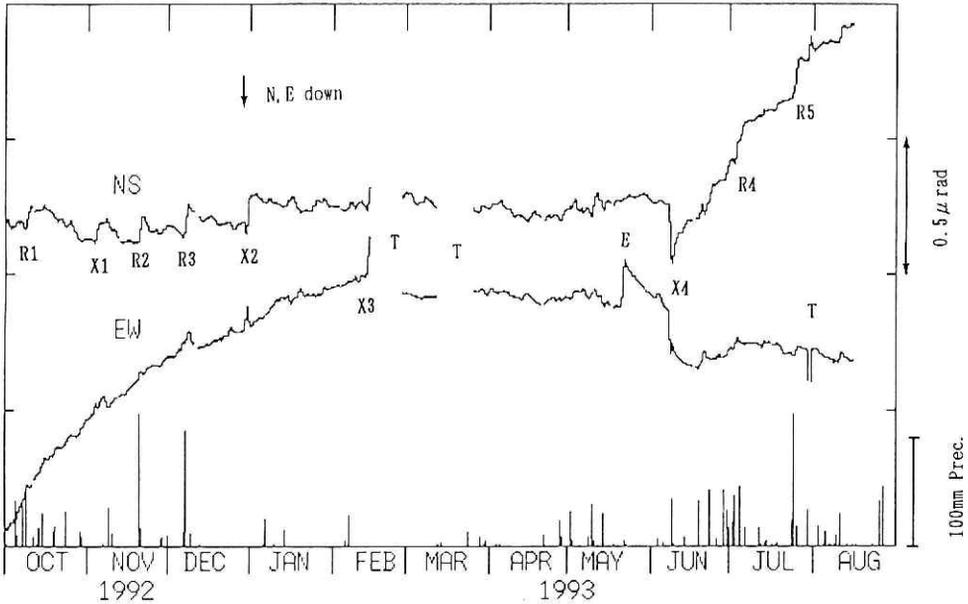


図5 ドリフトを $6.7\mu\text{rad}/\text{年}$ （南北成分）、 $5.0\mu\text{rad}/\text{年}$ （東西成分）で近似し、除去した日平均値。日雨量を棒グラフで示した。Tはテレメータに起因する観測の中断。

Fig. 5 Daily averaged tilt change from which drift component is removed by assuming linear drifts of $6.7\mu\text{rad}/\text{yr}$ for NS and $5.0\mu\text{rad}/\text{yr}$ for EW. Daily precipitations are indicated by vertical bars. T indicates interruption of observation due to trouble of the telemeter.

(岡田, 1980). 富士鳴沢火山観測施設の傾斜変動データでは, 図4に示した期間において $0.1\mu\text{rad}$ 以上のステップ状の変動を生じた地震は, 1993年5月21日11時36分に発生した茨城県南西部の地震(M 5.4, 富士鳴沢火山活動観測施設から東北東に約8 km離れた河口湖で震度II)のみである(図5にEとして示す)。この傾斜ステップは南北成分にのみ見られ, 東西成分には $0.01\mu\text{rad}$ 程度の分解能のある打点式記録計のモニター記録によっても地震によるオフセットは見られない。河口湖で震度がII以上の地震は, この期間にこれを含め8個あったが, これ以外には $0.1\mu\text{rad}$ 以上の傾斜ステップは見られなかった。

3.6 その他の傾斜変動現象

傾斜変動の日平均値(図5)に現れた $0.1\mu\text{rad}$ 程度の顕著な変動で, 降雨や地震と関係が無いように見えるものが4回ある。図5にX1, X2, X3, X4として示すもので, X1は1992年11月4日, X2は1992年12月30日, X3は1993年2月14日, X4は1993年6月8日に発生している。打点記録計に記録されたこの変化を図8に示す。X1とX2は良く似た傾斜変

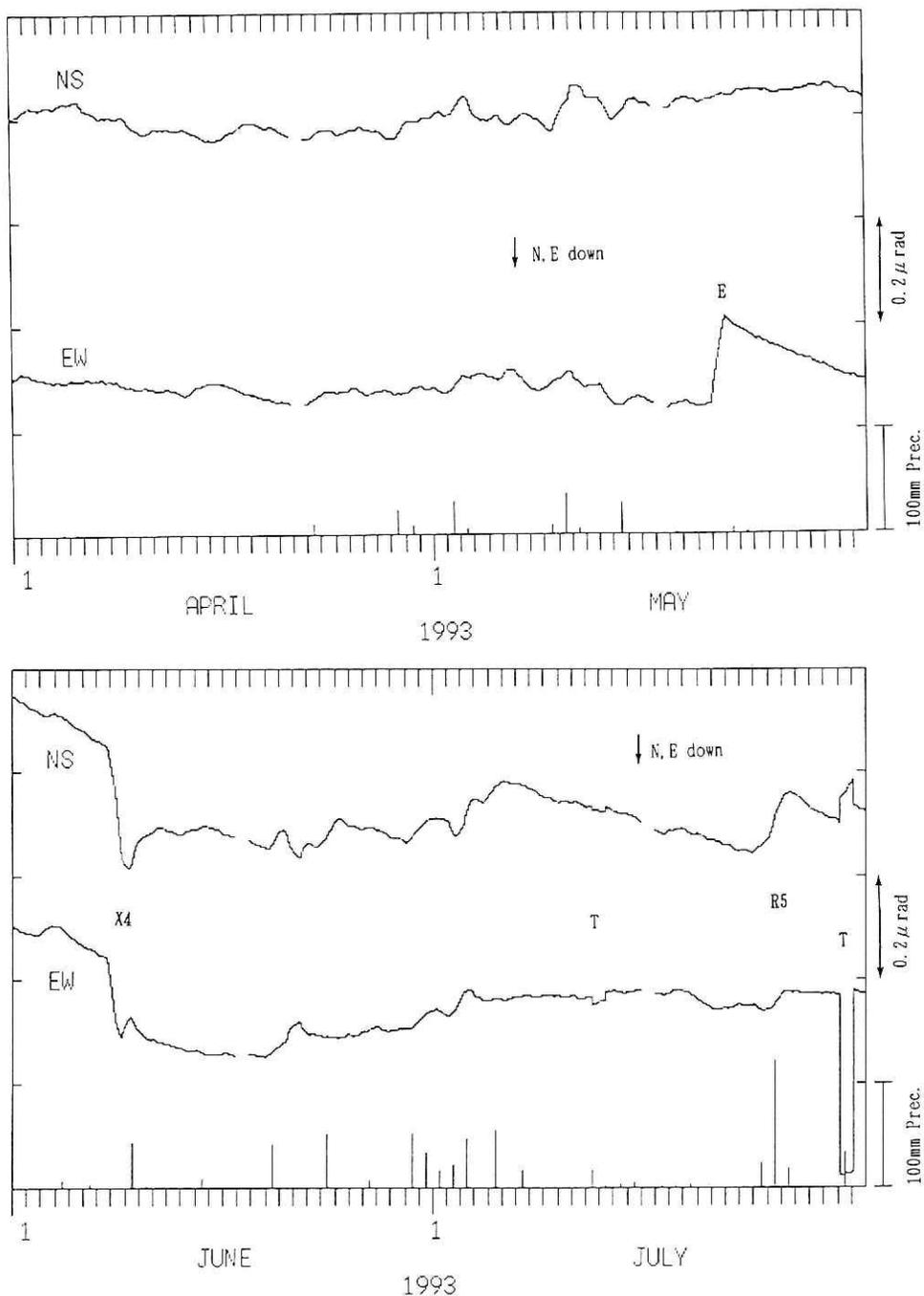


図6 ドリフトを除去した日平均値と日雨量。1993年4月1-5月については図5と同じドリフト量を仮定、1993年6月、7月については $2.1\mu\text{rad}/\text{年}$ （南北成分）と $4.5\mu\text{rad}/\text{年}$ （東西成分）を仮定。

Fig. 6 Daily averaged tilt change without drift components.

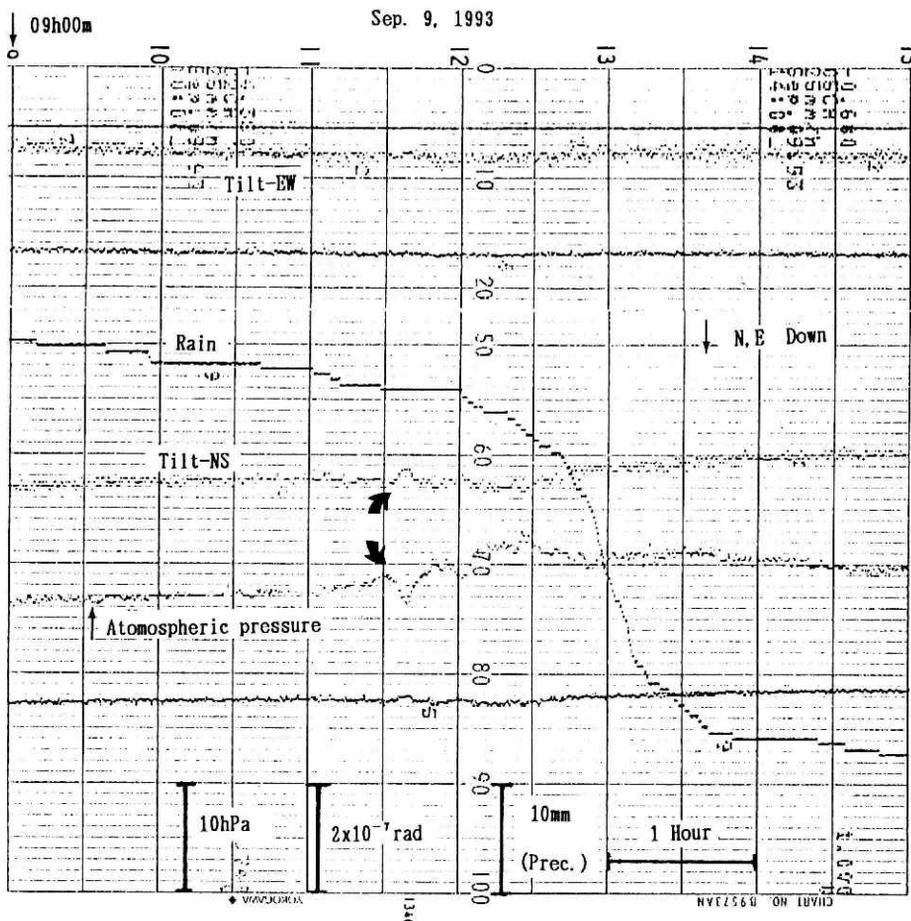


図7 台風14号通過時の気圧変化による傾斜変動 (太い矢印で示す)。

Fig. 7 Tilt change caused by atmospheric pressure change at the time of typhoon.

化で北西下りの変動とその回復を繰り返している。その継続時間は、X 1 では 8 時間程度、X 2 では 15 時間程度で、最大振幅は $0.2 \mu\text{rad}$ 程度になる。これに対し X 3 と X 4 では急激なステップ状の変化が、X 3 では約 2 分間に、X 4 では約 5 分に発生している。X 3, X 4 とともに南北、東西両成分に変化が現れているが、その向きは X 3 は南西下がり、X 4 は東北下がりとは逆である。

X 1, X 2 のような 1~十数時間の時間幅の特徴的な傾斜変化は、この他にも日平均値では検出されないものが、打点式記録計には数多く記録されている。変化の形状は相似形に近く、典型的には 30 分程度北西下りの変化をした後、数時間かけてもとの値に復帰していく。ある場合はこの変化が 1 回だけ現れ、また他の場合は X 1 や X 2 のようにこの変化が連続的に発生する。このような変化は、設置直後の 1992 年前半には振幅が $0.2 \mu\text{rad}$ を越えるものも

Fig. 8-a. X1 Nov. 3-4, 1992

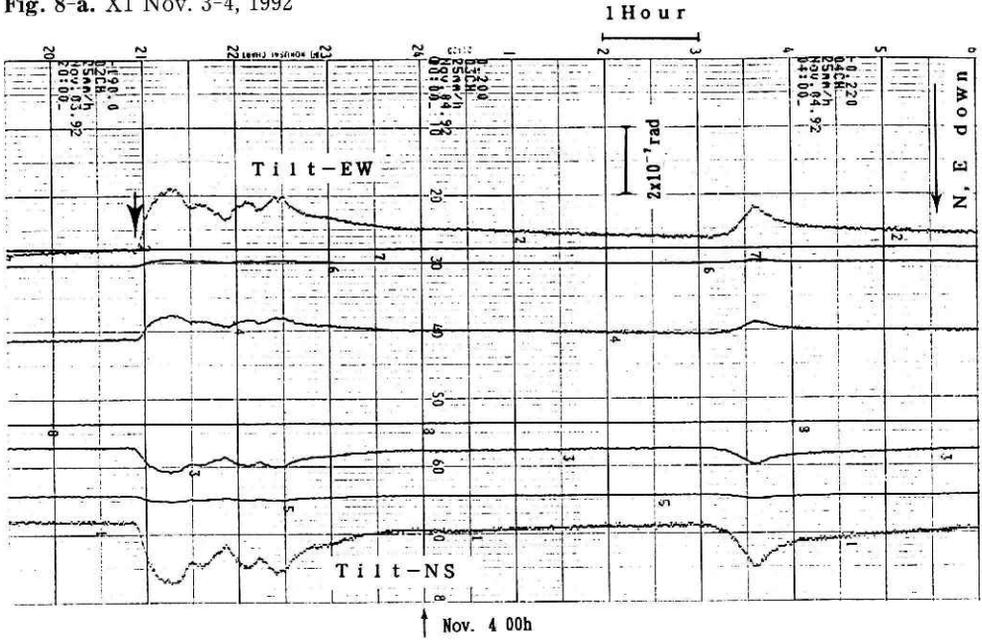


Fig. 8-b. X2 Dec. 30, 1992

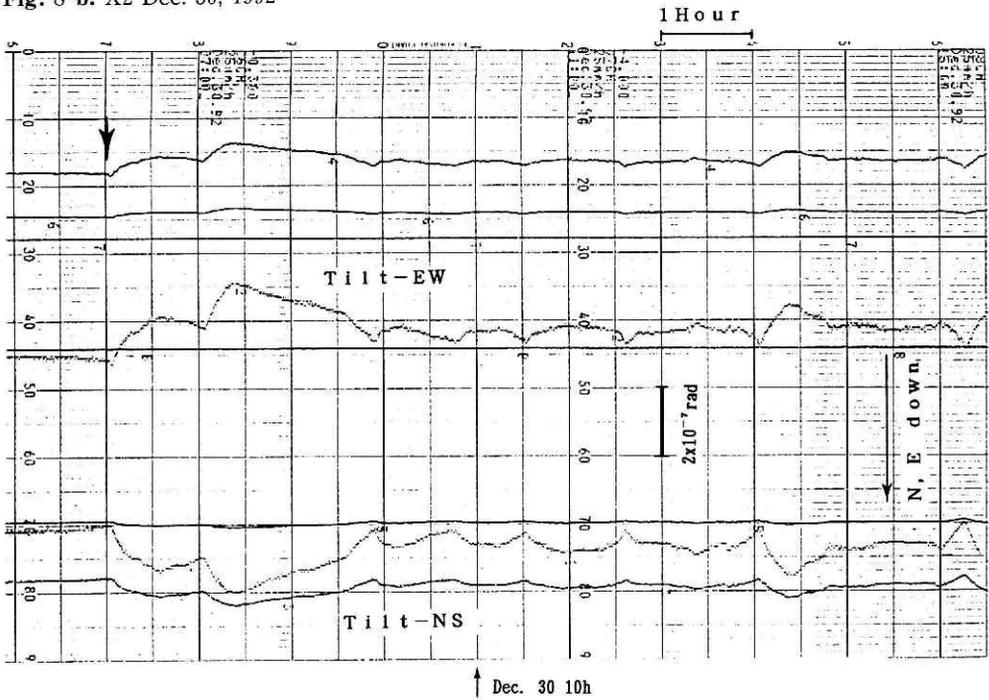


Fig. 8-c X3 Feb. 14, 1993

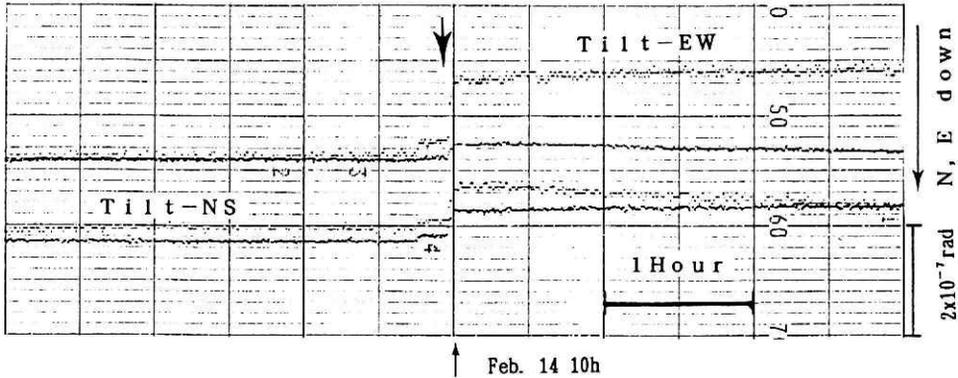


Fig. 8-d X4 June 8, 1993

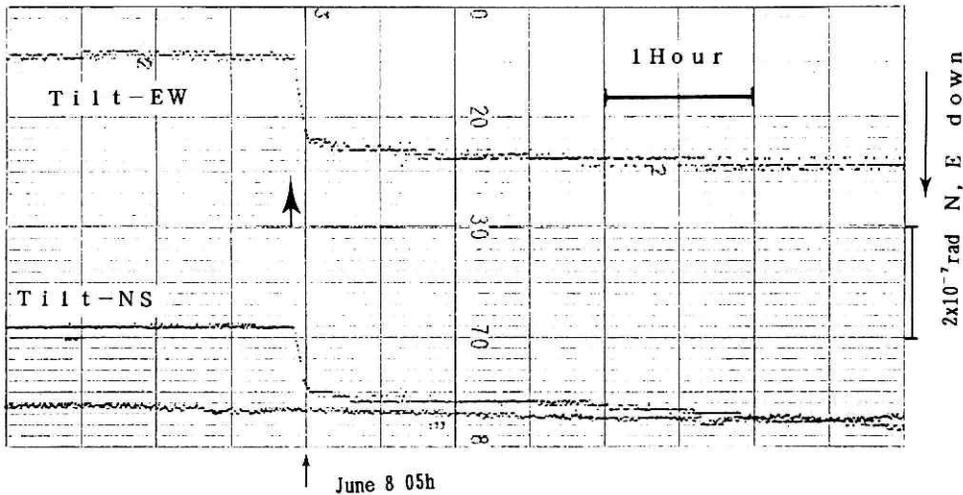


図8 打点記録計に記録された傾斜変動 (図5のX1~X4)。顕著な開始時を矢印で示す。

Fig. 8 Tilt change recorded on analog monitoring charts for X1 to X4 in Figure 5. Arrows indicate initiation of the changes.

多く、頻度も1ヶ月に10回以上であったが、1993年には1ヶ月に0~4回と頻度が減少し、振幅もほとんどのものが $0.1 \mu\text{rad}$ 以下になっている。このように設置時からの時間に伴って減少していることから、設置にともなう計測器やケーシング、ボーリング孔、周辺岩盤等の安定化の過程の現象と考えられるが、実際に何が原因となっているのかは不明である。

X3やX4のようなステップ状の変化はこれら以外には検出されていない。このようなステップ状の変化の原因も現状では不明である。X4ではこれを境にドリフトの量に変化しているが、ドリフトの原因が傾斜計自身あるいは観測井など計測器の極近傍にあるとすると、このような変化も計器の設置にともなう現象であり、広域の傾斜変動ではないと考えられる。

これを実証するには、複数の傾斜計を富士山周辺に設置し、変動の様子を比較することが必要である。

4. 傾斜変動異常の検知可能レベルと対応するマグマ活動

定常的な傾斜変動の観測値から傾斜異常変動の検知可能なレベルを推定し、この検知レベルがどの程度の大きさの地下のマグマ活動に対応するのかを検討する。このためにはマグマの活動をモデル化する必要があるが、ここではダイク貫入と球状マグマ溜まりの圧力上昇の 2 つの場合を考える。

4.1 傾斜変動異常の検知可能レベル

FJN での傾斜変動観測データから、火山活動に伴う傾斜変動の異常を検出する場合の限界値を考察する。この際、異常検出に対して障害となる傾斜変動の要因としては、地球潮汐、降雨、気圧変化、地震によるオフセット、観測点近傍あるいは観測計器の異常、計測器のドリフト等が考えられる。どの程度の傾斜異常変動まで検出できるかは、その異常変動の量と変化率によって異なる。また観測点近傍あるいは計測器自身の異常かどうかの判別には複数の観測点が必要である。ここではマグマの上昇に対応するであろう 1 時間～数日の時間幅の現象に対応する傾斜異常変動を検知することを考え、また複数の観測点により観測点近傍あるいは観測計器の異常は判別できると仮定する。

異常検出の障害となる要因のうち、地球潮汐は予測できる。1 日から数日の傾斜変動の様子は、今回の観測の様子は図 6 からわかるが、主として降雨の影響を受けながら変動し、その変動幅は $0.1 \mu\text{rad}$ 程度である。本来降雨や気圧の傾斜変動に与える影響は経験的に補正して小さくできるものであるが、ここでは気象による変動を越える異常を検知できると考え、検知レベルとして $0.2 \mu\text{rad}$ を採用する。

この異常変動検知レベルは便宜的なものであるが、地球潮汐やこれまでに観測された地震に伴うステップ状の異常も、 $0.2 \mu\text{rad}$ 以下であるので特に異常を検出するための信号検出処理をしていない段階としては、やや大きめの値であるが妥当なものであろう。将来、全ての観測値がデジタル処理され、気象による影響などの補正が即時に可能になれば、 $0.1 \mu\text{rad}$ 以下の変動を異常として充分検出できるようになる。

4.2 ダイクの貫入

検出可能なレベルに対応するダイクモデルを考察する。ダイクモデルとしては、富士山山頂直下に水平方向の長さ 5 km、深さ方向の長さ 5 km の矩形ダイクが垂直に貫入する事を考える。ダイクの走行は側火口の配列方向である $N 40^\circ W$ を仮定した。ダイクの先端の深さが、15 km、10 km、5 km の 3 つの場合について、地表で観測される傾斜変動をダイクの厚さの

関数として計算した。図9にダイクモデルの概念図と傾斜変動の例を示す。図10にはダイクの厚さに対する富士鳴沢火山活動観測施設での傾斜変動を示す。傾斜変動異常検出の下限の $0.2 \mu\text{rad}$ に対応するダイクの厚さは、深さ 15-20 km のダイクの場合は約 50 cm, 深さ 10-15 km の場合は約 25 cm, 深さ 5-10 km では約 10 cm である。

富士山直下では深さ 10~20 km に低周波地震が発生し (鶴川, 1992), 深さ 20 km 以深に地震波速度の小さい領域が見つまっている (Lees and Ukawa, 1992) ことから, マグマ溜まりは深さ 20 km 以深にありマグマはこの深さから地表まで移動して噴火に至る可能性が高い。5 km×5 km の矩形ダイクを考えると, 深さ 20 km でのダイクの貫入を検知できるダイクの厚さは 50 cm 程度以上になる。

4.3 球状マグマ溜まりモデル

別のマグマ活動モデルとして球状マグマ溜まりの内部圧力が上昇する場合を考える。これは桜島の活動に対して, 茂木により適用されたものである (茂木, 1958)。深さ f に半径 a のマグマ溜まりがある時, マグマ溜まり内の圧力変化 P によって水平距離 r の地表での傾斜変動は, 次式によって表される (横山・荒牧, 1979)。

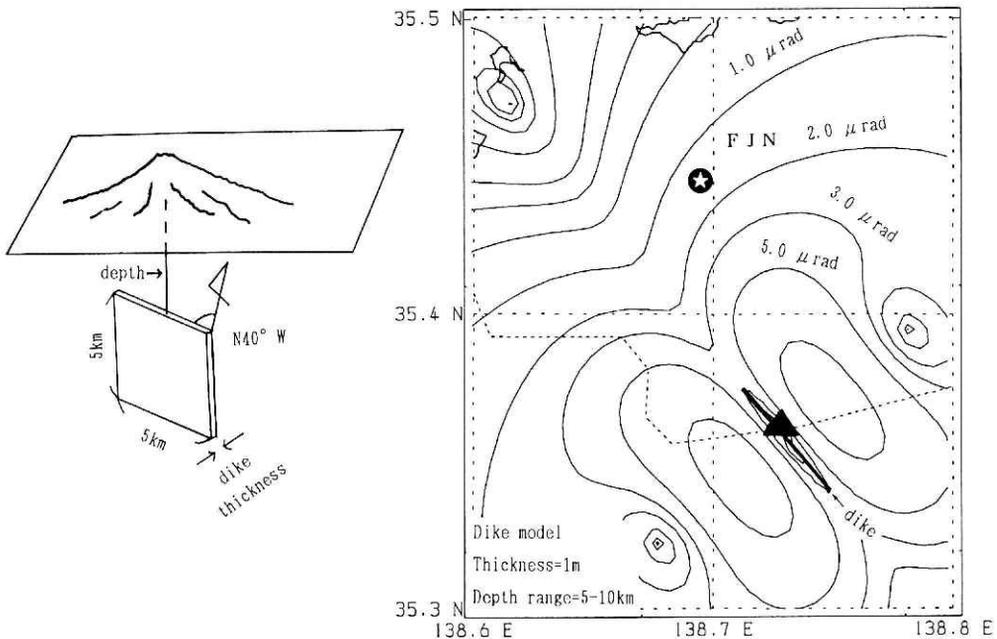


図9 ダイクモデル (左) と最大傾斜変動の分布。

Fig. 9 Dyke model for evaluating of magmatic activity corresponding to the detectable level of tilt change (left) and example of the maximum tilt change due to the model with 1-m-thick dyke.

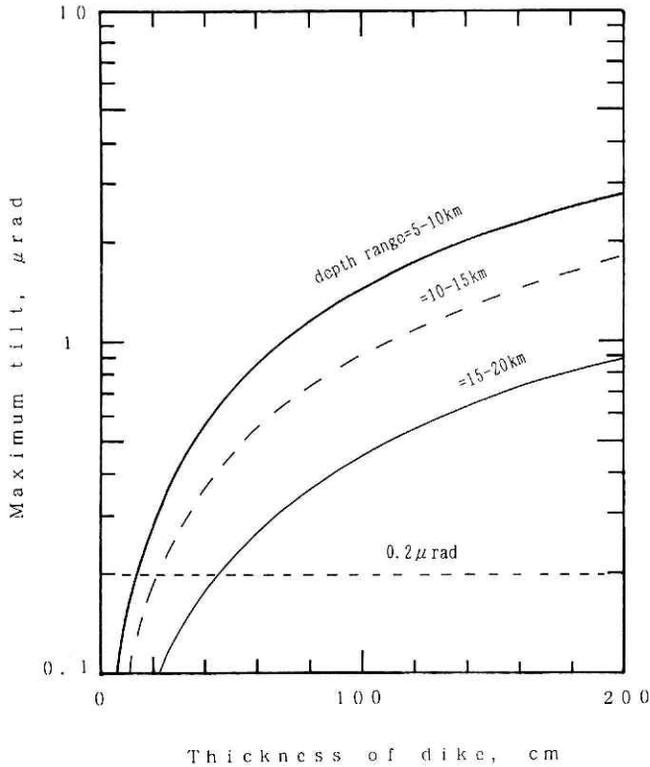


図10 ダイクの厚さと傾斜変動の大きさ。

Fig. 10 Maximum tilt change as a function of dyke thickness.

$$\text{傾斜変化量} = (9/4) (a/f)^3 (P/\mu) \xi / (1 \xi^2)^{5/2},$$

$$\text{ここに } \xi = r/f.$$

マグマ溜まりの深さで規格化されたマグマ溜まりの半径 a/f を一定値(0.05)と仮定したときのマグマ溜まりからの水平距離が 10 km の地点での傾斜変化量を、周囲の岩石剛性率 μ で規格化した内部圧力変化 P/μ に対して図 11 に図示する。マグマ溜まりの深さが、10 km, 15 km, 20 km の 3 つの場合について図示したが、 a/f を一定とすると $\xi=0.5$ で傾斜は最大となるので、 r が 10 km の場合はマグマ溜まりの深さが 20 km のときに傾斜量が最大となる。0.2 μrad 以上の傾斜変化を引き起こすには、周囲の岩石の剛性率の約 0.002 倍 ($f=20$ km) から 0.004 倍 ($f=10$ km) 以上の圧力変化が必要である。これは剛性率を 300 kbar とすれば、0.6~1.2 kbar に対応する。このモデルでは、噴火を引き起こすマグマの余剰圧力が通常どの程度であるかわかっていないので現実との対比が困難である。

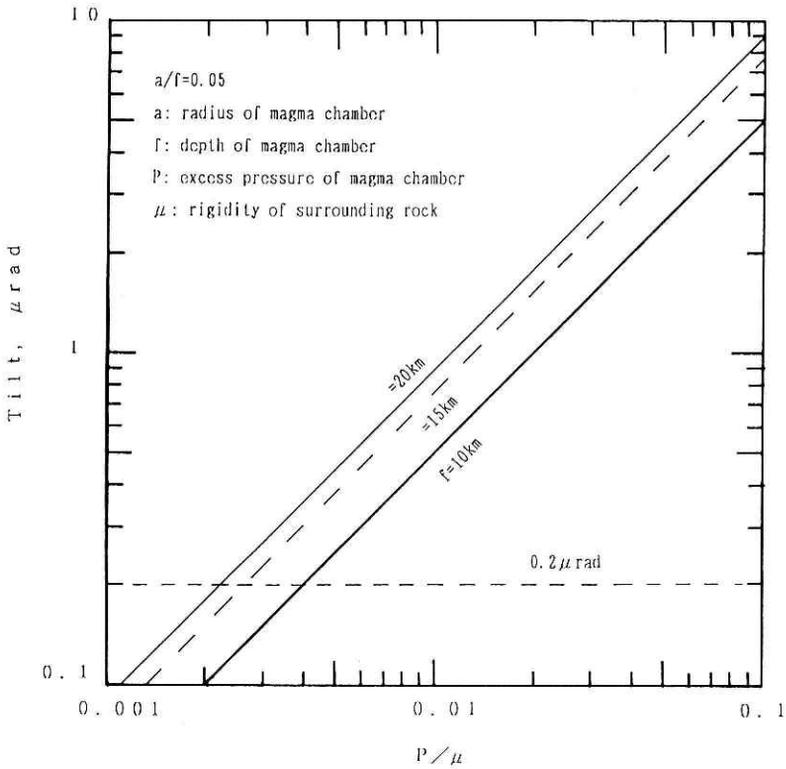


図11 球状マグマ溜まりモデルによる傾斜変動

Fig. 11 Tilt change caused by the spherical magma chamber model.

5. 結 論

FJN に設置されている孔井式傾斜計（設置深度 201 m）で観測された約 1 年間のデータを基に、傾斜変動の特徴について予備的な調査を行った。その結果、次のような特徴がわかった。

- (1) 地球潮汐の振幅は約 $0.15 \mu\text{rad}$ 、数カ月より長期のドリフト量は南北成分が約 $6.7 \mu\text{rad}/\text{年}$ 、東西成分は $5.0 \mu\text{rad}/\text{年}$ である。
- (2) 降雨の影響は、日雨量が 100 mm を越えるとき、あるいは数日のうちに積算雨量が 100 mm を越えるような時に、南北成分に $0.1 \sim 0.15 \mu\text{rad}$ 程度の変化が現れるが、東西成分への影響はこれより小さい。
- (3) 地震の影響としては、茨城県南西部の地震 (M 5.4, 河口湖で震度 II) により、 $0.1 \mu\text{rad}$ のステップが東西成分に観測された。
- (4) 日平均値に $0.1 \mu\text{rad}$ 程度かそれ以上の傾斜変動として記録された原因不明の変化は 4 回ある。そのうち 2 回は 10 時間程度の時間幅を持つ変化で、他の 2 回はステップ状の変化

である。前者のような変化は設置初期に多く観測されたことから設置条件によると考えられる。

このような定常的と考えられる変動レベルを基にすると、1時間～数日の時間幅の異常な傾斜変動は、複数の観測点があれば $0.2\ \mu\text{rad}$ 以上あれば検知できると考えられる。この程度の傾斜変動に対応するマグマ活動としては、山頂直下15 km付近に垂直な $5\ \text{km}\times 5\ \text{km}$ の矩形ダイクを仮定すれば、その厚さは20 cm程度になり、山頂直下10～20 kmに半径が深さの0.05倍の球状マグマ溜まりを仮定すればその圧力上昇は0.6～1.2 kbar程度になる。

今後、データ処理・解析装置の導入と複数観測点の設置が予定されているので、今回の調査結果を基に異常傾斜変動の客観的検出方法の開発と対応するマグマ活動の即時モデル化まで可能なシステムの開発を進めていく予定である。

謝 辞

ダイクの貫入による傾斜変動の計算に、岡田義光地震予知センター長による計算プログラムを使用させていただいたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) Lees, J. M. and Ukawa, M. (1992) : The south Fossa Magna, Japan, revealed by high resolution P - and S-wave travel time tomography. *Tectonophys.*, 207, 377-396.
- 2) 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.
- 3) 岡田義光 (1980) : 1974年伊豆半島沖地震および1978年伊豆大島近海地震に伴った歪・傾斜ステップについて。地震, 33, 525-539.
- 4) 関口涉次・島田誠一・大久保正・山本英二・佐藤春夫 (1989) : 1986年地殻傾斜観測資料集関東・東海地域地殻活動観測網。防災科学技術研究所資料(国立防災科学技術センター), No.133, 250 p.
- 5) 鶴川元雄 (1992) : 富士山直下の低周波地震活動, 地震学会講演予稿集1992年度秋季大会, 81.
- 6) 横山泉・荒牧重雄 (1979) : 火山活動, 岩波講座地球科学7(火山), 横山泉・荒牧重雄・中村一明編, pp.35-81, 岩波書店.