

桜島火山におけるピエゾ磁気効果

山崎 明 (地磁気観測所)

Piezomagnetic Effects on the Sakurajima Volcano

Akira Yamazaki (Kanoya magnetic observatory)

1. はじめに

桜島は有史以来活発な火山活動を続ける日本を代表する活火山である。明治以降の主な噴火に1914年の大正大噴火、1941年の昭和溶岩を流出した噴火がある。特に大正大噴火は大規模であり、噴出物総量は 2.1km^3 に達し、流出した溶岩は瀬戸海峡を埋め地続きとなった。1950年以降は溶岩の流出はないものの、南岳山頂火口で頻繁に爆発を繰り返している(日本活火山総覧, 1984)。

こうした桜島火山では各方面からの火山研究が活発に行われているが、特に水準測量や傾斜計などを用いた測地学的方法による研究が大きな成果を上げている。大正大噴火後の水準測量の結果、鹿児島湾奥でおよそ1mに達する地盤の沈下があったことはよく知られた事実である。MOGI (1958) は山川 (1955) の理論式に基づき、この沈降をマグマ溜りの収縮モデルによって説明した。これ以降、マグマ溜りの膨張と収縮によって地殻に生じる変形を扱う問題は茂木モデルと呼ばれるようになった。最近では、桜島西斜面中腹に位置する春田山の地下に設置された傾斜計と歪計の観測から、南岳直下のマグマ溜りの膨張と収縮が茂木モデルに基づいて論じられている (ISHIHARA, 1990)。このように桜島火山は、茂木モデルによって地下のマグマの活動がうまく説明されている火山である。

マグマ溜りの膨張と収縮はその周囲の地殻の応力場を変えるので、それに伴うピエゾ磁気効果の発生が期待される。本稿では桜島火山における茂木モデルに伴うピエゾ磁気効果と全磁力の観測結果について述べ、ピエゾ磁気効果検出の可能性について考察する。

2. 大正大噴火から推定されるピエゾ磁気効果

1914年の大正大噴火の後、鹿児島湾奥では広範囲にわたり地盤が沈降した(第1図)。この沈降は地下のマグマ溜りから大量の溶岩が地表に噴出したために発生したものである。MOGI (1958) は水準測量による沈降量から、第1図A点の直下10kmに圧力源すなわちマグマ溜りが存在することを推定した。

マグマ溜りの内圧が変化すればマグマ溜りの周囲の地殻の応力場が変化し、これに伴うピエゾ磁気効果が生じる。DAVIS (1976) はキラウエア火山において茂木モデルに伴うピエゾ磁気効果を数値計算によって求めた。また、SASAI (1991) は茂木モデルに伴うピエゾ磁気効果の解析解を導いている。MOGI (1958) が与えたモデルから適当な計算パラメータを設定し、SASAI (1991) の解析解 (TYPE II) を用いてピエゾ磁気効果を計算すると第2図に示した全磁力変化の分布が得られる。計算に用いたパラメータを第1表に示した。ここでキュリー点深度は OKUBO (1985) が航空磁気測量から求めた値を用いた。また地殻の磁化強度は 5.0A/m とし磁化方向は現在の地球磁場方向に一致すると仮定した。第2図を見ると、鹿児島湾奥一帯にプラスの全磁力変化が分布する。このような全磁力変化のパターンはマグマ溜りがキュリー点深度より深い場合におこる。変化の大きさは $+2\text{nT} \sim +6\text{nT}$ 程度である。永原や笹峰の観測点では $+2\text{nT}$ 程度の全磁力の増加があったものと推定される。

大正大噴火後の鹿児島湾奥の上下変動は、第3図に見るように大正大噴火時に大きく沈降した後、

1970年代半ばまで隆起する傾向が続いていたが、その後はほとんど変化していない（江頭・他, 1997）。すなわち、1970年以降はA点下のマグマ溜りはほぼ一定の状態にあると考えられ、この期間のピエゾ磁気効果に伴う磁場変化はほとんどないであろうと推定される。第4図に1980年から現在までの牧神、笹峰、永原測点での全磁力くり返し観測結果を示す。各測点にはそれぞれ磁場のギャップがみられるが、これは測点周辺の人工物の影響であろう。また、個々のくり返し測量データには2～3 nT程度のバラツキがあるが、これは主として基準点である鹿屋との日変化等の地球磁場変動の違いによるものである。各測点の経年変化の傾向は、牧神では -0.1 nT/year 程度で全磁力が緩やかに減少する傾向が認められ、笹峰では $+1.0 \text{ nT/year}$ 程度で増加する傾向がある。永原測点ではほとんど変化は認められない。笹峰の経年変化は異常に大きい、一定の割合で磁場が増大する人工擾乱は考えにくく、この地点のローカルな磁場変化であろうと思われる。

3. 桜島南岳の噴火に伴うピエゾ磁気効果

桜島火山観測所では桜島西斜面の春田山の地下に傾斜計と歪計を設置し地殻変動の観測を行っている。この傾斜計と歪計は南岳が爆発を起こす数時間前から山体が膨張する変化を示し、爆発後火山灰等の噴出と共に収縮する変化を示している。ISHIHARA (1990) はこれらの観測データを基に南岳直下にマグマ溜りを想定し、茂木モデルから噴火を起こした圧力源の深さ（D）とマグマ溜りの膨張体積（ ΔV ）を求めた。その結果、圧力源の深さは2～6 kmに求まり、 ΔV が大きな噴火ほど圧力源が深い傾向のあることを示した（第5図）。

第5図に示されたそれぞれの茂木モデルから求めたピエゾ磁気効果の大きさを第6図に示す。ここで、図示した全磁力変化の大きさは持木と白浜3の全磁力差で与えてある。図から、圧力源が比較的浅く（ $D=4 \text{ km}$ 程度）かつ ΔV が大きなモデルほど期待されるピエゾ磁気効果は大きいことがわかる。しかし、全磁力変化は微小であり最大でも0.05 nT程度と見積もられた。第7図に適当な圧力源のサンプルを選び計算した全磁力変化の分布を示す。計算パラメータは第2表に示した。

次に、観測された傾斜変化と全磁力変化の対応を見てみる。1985年10月14日06時43分の南岳の爆発に前後して典型的な傾斜変化が観測された（第8図 ISHIHARA, 1990）。この傾斜変化から期待されるピエゾ磁気効果の大きさは持木－白浜3の全磁力差で0.05 nTである。第9図に爆発の前後6時間の全磁力毎分データを示す。持木－白浜3の全磁力差のバラツキは約1 nT程度と大きいものの、爆発の前後でやや有意な変化があるように見える。この変化は地球磁場変化とは無相関であることから、火山活動に関連した変化である可能性がある。しかし傾斜変化との対応があまり明瞭ではなく、また推定値の0.05 nTを大きく上回る変化なので、この変化が果たしてピエゾ磁気効果によるものかどうかははっきりしない。噴火に伴う地下水の急激な流動に伴う熱消磁、帯磁の可能性も考えられるし、降下する火山灰の影響もあるかもしれない。いずれにしても今後さらに多くの噴火例について調査する必要がある。

4. まとめ

大正大噴火と最近の南岳の爆発で提出されている茂木モデルからピエゾ磁気効果を見積もった。その結果、大正大噴火では鹿児島湾奥の観測点で $+2 \text{ nT}$ 程度の全磁力変化の発生が推定された。また、南岳の活動で期待されるピエゾ磁気効果は持木と白浜3の全磁力差で最大0.05 nT程度であろうと見積もられた。

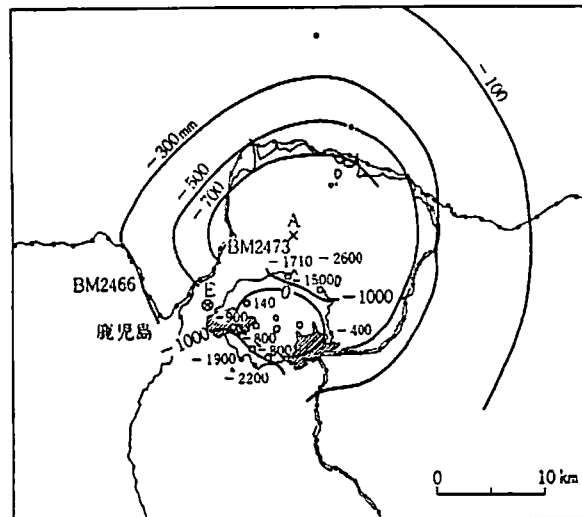
ピエゾ磁気の計算では多くのパラメータが用いられるが、特に応力磁化係数と磁化強度はピエゾ磁

気効果の大きさにリニアに反映される。今回の計算では応力磁化係数に $2.0 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ を用いているが、これは岩石実験から求められた代表的な値である。凝灰岩などの多孔質でもろい岩石では応力磁化係数は一桁程度大きくなるという報告もある (HAMANO et al., 1989)。大志万等 (1991) によるダム水位変化を利用したピエゾ磁気効果の実験では、理論的に予想される変化より一桁程度大きな磁場変化が測定されるという。諸外国での同様の実験でも大きく観測されることが報告されており、大志万等は時定数の長い応力変化では応力磁化係数は一桁程度大きくなる可能性を指摘している。仮にこの指摘が正しいとすれば、大正大噴火では推定値よりさらに大きな全磁力変化があった可能性がある。

一方、現在の桜島南岳の活動に対応するピエゾ磁気効果は最大でも0.05nT程度と考えられ、この微小な変化を分解能0.1nTのプロトン磁力計で検出するのは困難である。しかし、1pTの分解能を有するポタシウム磁力計などの高分解能磁力計を、桜島南部の古里付近などもう少し大きな磁場変化が期待できる地点に設置すれば、桜島の噴火に対応するピエゾ磁気効果を検出できる可能性は十分にあると考えられる。仮に傾斜計のデータと良い対応を示す全磁力変化が検出できれば、茂木モデルからピエゾ磁気効果へといくつかの仮定の基に演繹的に導かれてきた理論が、実際の火山で検出されることになりその意義は大きいと言えよう。

参考文献

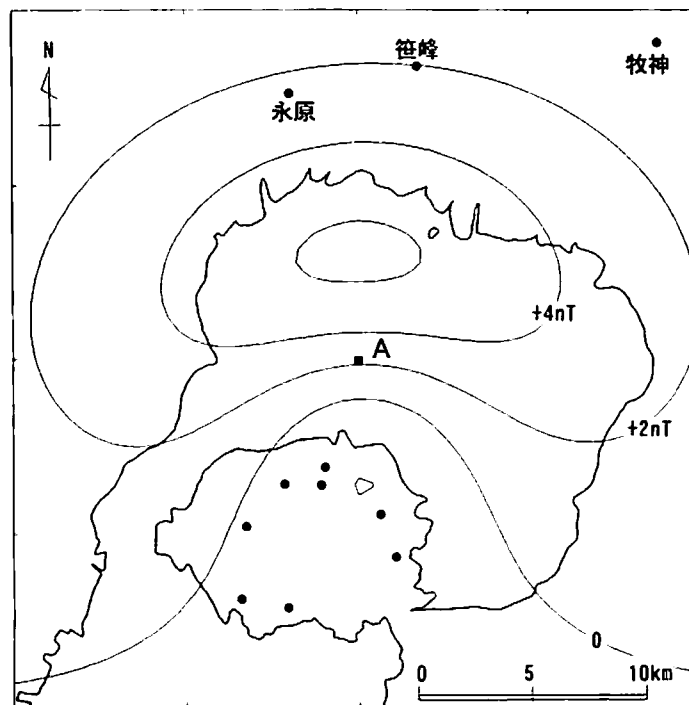
- DAVIS, P. M., The computed piezomagnetic anomaly field for Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 113-122, 1976.
- 江頭庸夫, 高山鐵朗, 山本圭吾, Muhamad HENDRASTO, 味喜大介, 園田忠臣, 松島健, 内田和也, 八木原寛, 王彦賓, 木股文昭, 宮島力雄, 小林和典, 始良カルデラの地盤の再隆起—1991年12月～1996年10月—, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-1, 49-60, 1997.
- HAMANO, Y., R. BOYD, M. FULLER, and M. LANHAN, Induced susceptibility anisotropy of igneous rocks caused by uniaxial compression, *J. Geomag. Geoelectr.*, 41, 203-220, 1989.
- ISHIHARA, K., Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan, *Magma Transport and Storage*, 335-356, 1990.
- MOGI, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 36, 99-134, 1958.
- 日本活火山総覧, 気象庁, 1984.
- 大志万直人, 笹井洋一, 宮腰潤一郎, 西田良平, 塩崎一郎, ダム地磁気効果の観測結果とモデルとの比較 — 鳥取県日南湖 (菅沢ダム) —, *Conductivity Anomaly 研究会1991年論文集*, 137-148, 1991.
- OKUBO, Y., R. J. GRAF, R. O. HANSEN, K. OGAWA and H. TSU, Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding area, Japan, *Geophysics*, 53, 3, 481-494, 1985.
- SASAI, Y., Piezomagnetic field associated with the Mogi model revisited: Analytic solution for finite spherical source, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, 21-64, 1991.
- 山川宜男, 内部力源による半無限弾性体の変形について, *地震*, 8, 84-98, 1955.



第 1 図

1914年の大正大噴火の後発生した鹿兒島湾奥の沈降 (OMORI, 1916による)

A : 推定された沈降の中心 斜線 : 溶岩が流出した地域



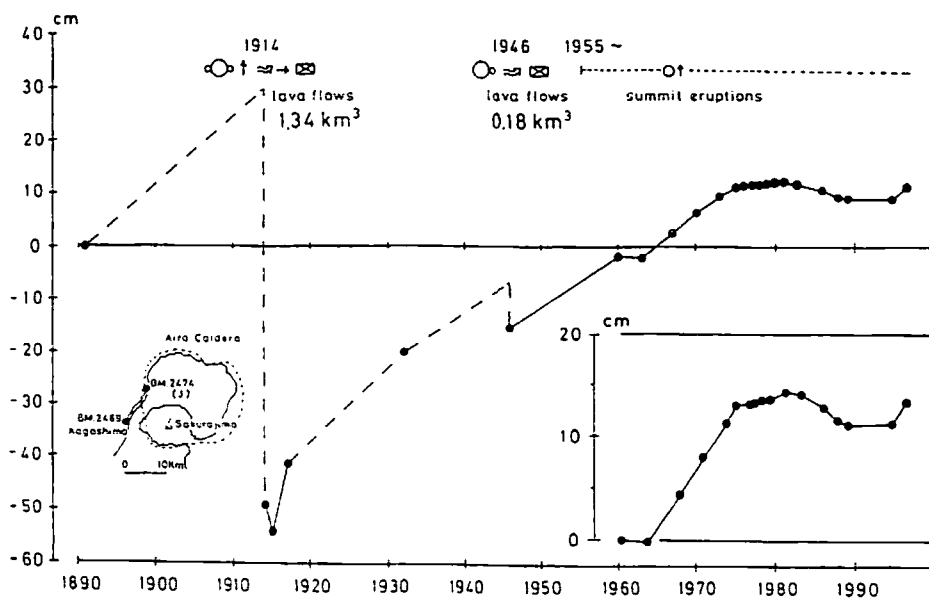
第 2 図

1914年の大正大噴火で推定されるピエゾ磁気効果による全磁力変化. A 点の地下 10km にマグマ溜りの中心が存在するとして計算. コンター間隔 2nT. ●印は全磁力観測点.

第1表

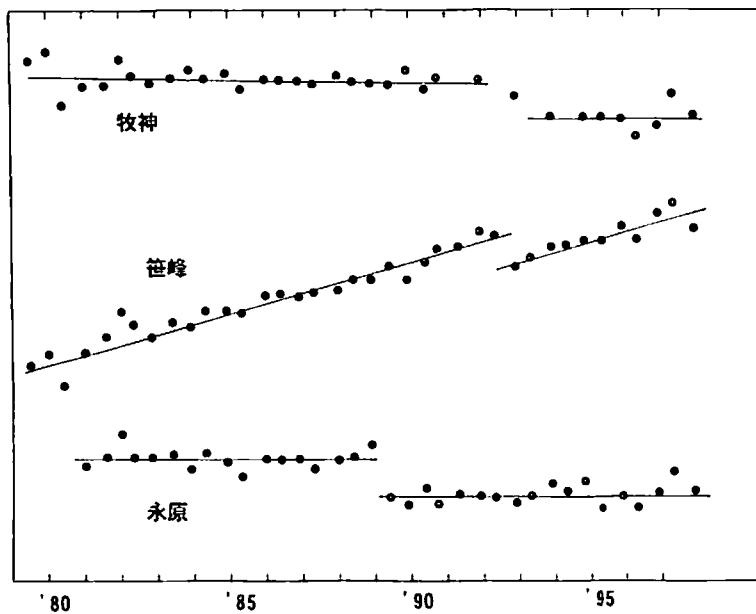
大正大噴火で提出された茂木モデル (MOGI, 1958) によるピエゾ磁気効果の計算パラメータ

マグマ溜りの中心までの深さ	D	10 km
マグマ溜りの半径	a	2773 m
マグマ溜りの内圧の変化	ΔP	-3 kbar
磁気応力係数	β	$2.0 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
ラメの定数	λ, μ	$3.0 \times 10^5 \text{ bar}$
キュリー点深度	H	8 km
地磁気の伏角	I_0	45°
地磁気の偏角	D_0	6° west
磁化強度	J_n	5.0 A/m

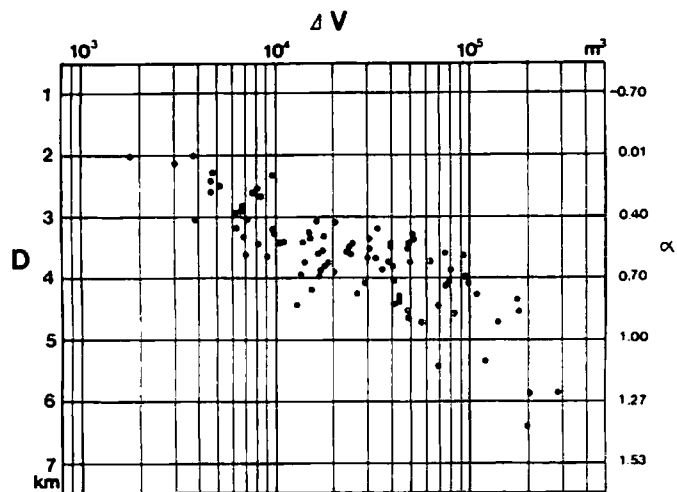


第3図

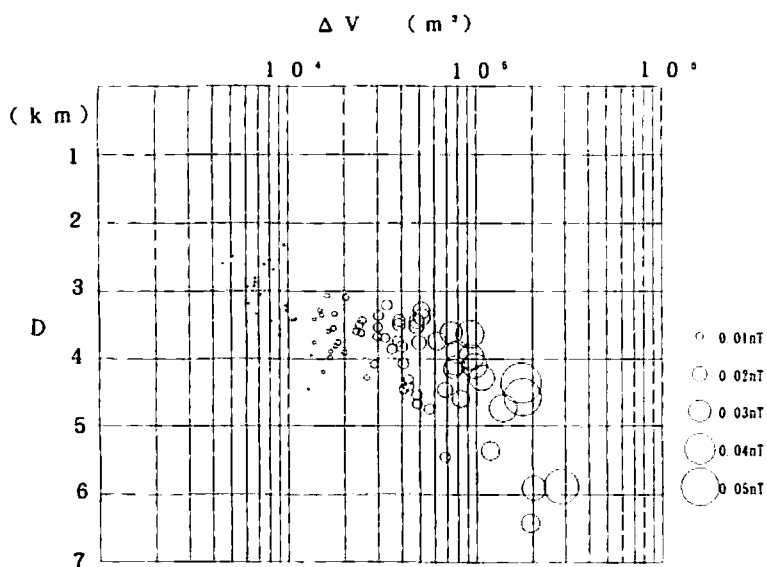
水準測量点 (BM2474) の経年変化 (江頭・他, 1997) . 基準点はBM2469.



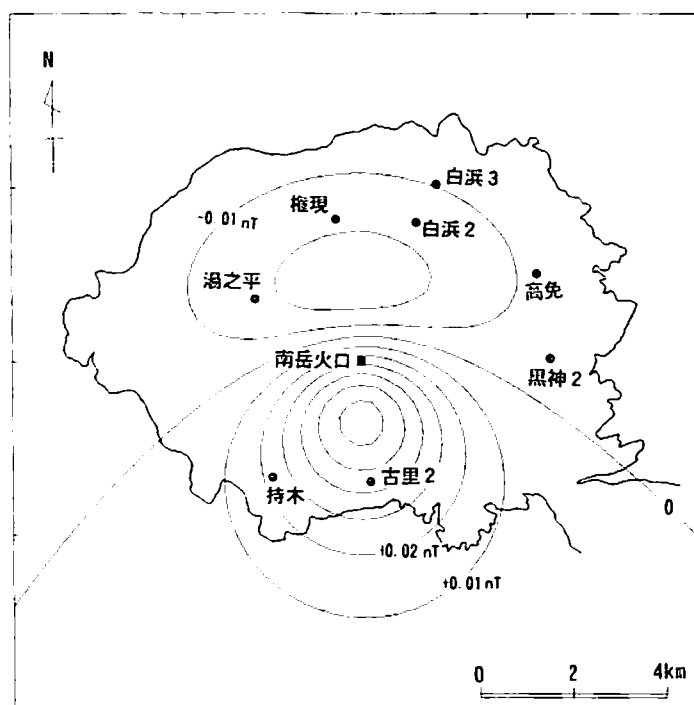
第4図
鹿屋を基準とした全磁力く
り返し観測点（牧神，笹峰，
永原）の経年変化



第5図
南岳の爆発に伴う傾斜および歪の変
化から推定された圧力源の深さ（D）
と膨張体積（ ΔV ）の関係（ISHIHA
RA, 1990）



第6図
第5図に示された茂木モデルから求
めたピエゾ磁気効果による持木－白
浜3の全磁力差の変化



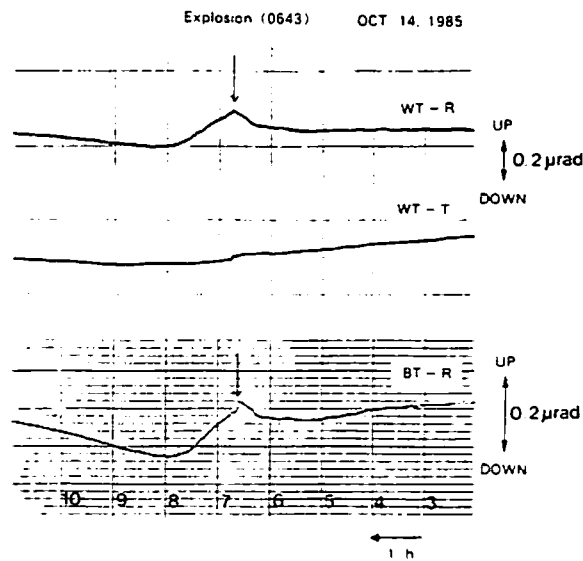
第7図

南岳火口の 4km下にあるマグマ溜りの膨張から推定されるピエゾ磁気効果による全磁力変化 ($D=4\text{km}$, $\Delta V=9.5 \times 10^4 \text{ (m}^3\text{)}$ のモデル) . 全磁力変化は標高ゼロの値. コンター間隔 0.01nT . ●印は全磁力観測点. このうち持木と白浜3は全磁力連続観測点で、その他は全磁力繰り返し観測点.

第2表

南岳の噴火で提出された茂木モデル (ISHIHARA, 1990) によるピエゾ磁気効果の計算パラメータ. 第1表と異なるもののみをリストアップ. ここでDは海面からの深さであり, 南岳頂上からは4kmの深さとなる.

マグマ溜りの中心までの深さ	D	3 km
マグマ溜りの半径	a	126 m
マグマ溜りの内圧の変化	ΔP	3 kbar



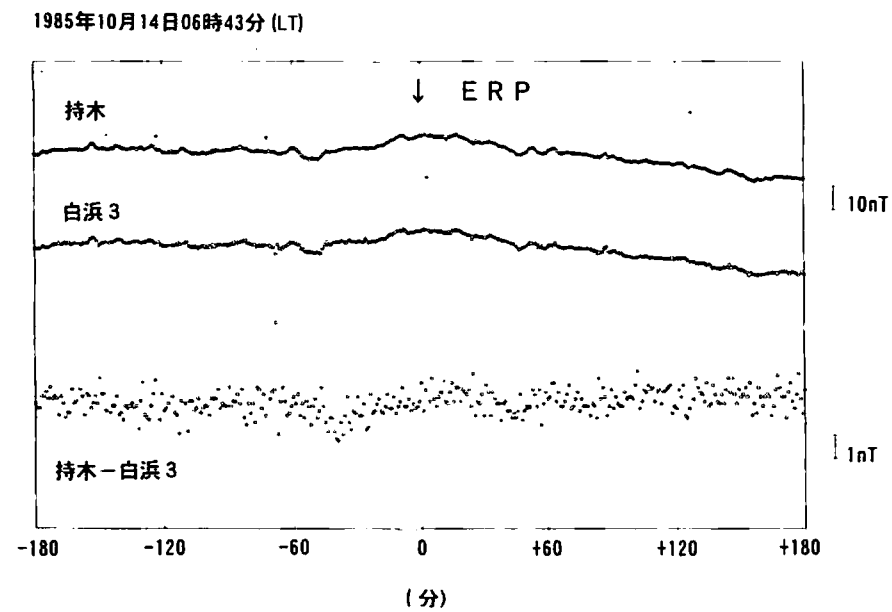
第8図

桜島の爆発に伴う典型的な傾斜変化 (ISHIHARA, 1990)

WT - R : 観測地点から南岳に向いた方向の傾斜変化 (水管傾斜計)

WT - T : WT - Rに直交する向きの傾斜変化 (水管傾斜計)

WT - R : 観測地点から南岳に向いた方向の傾斜変化 (ボアホール型傾斜計)



第9図

桜島の爆発に伴う典型的な傾斜変化が観測された時の持木および白浜3の全磁力変化. 値は毎分値で、爆発の前後6時間をプロット.