

## 2000年三宅島噴火における傾斜ステップに伴う地磁気変化の 再検討 (序報)

Magnetic variations associated with the tilt-step events during the 2000 eruption of Miyake-jima volcano revisited: a preliminary report

笹井洋一 (東海大・海洋研)・ 上嶋誠 (東大・地震研) ・ Jacques

ZLOTNICKI (CNRS・仏)

Yoichi Sasai (IORD, Tokai Univ.), Makoto Uyeshima (ERI, Univ. of Tokyo), Jacques Zlotnicki (CNRS, France)

### Abstract

A new caldera was formed at the summit during the 2000 eruption of Miyake-jima Volcano, central Japan. It began with the collapse on the top and was finally built up until the August 18 largest eruption. During the caldera formation, the ground deformation called the tilt-step occurred once or twice a day. The velocity wave form of the tilt-step was the seismic VLP event with 50 seconds duration. Although the amplitude of VLP event was different one by one, its duration was always constant. Associated with the tilt-step events, the geomagnetic and electric field variations were observed. The magnetic change was an abrupt step-like one similar to the tilt-step itself, while the SP variation had a single wave form with 100 seconds duration. Two different models were proposed for the generating mechanism of the tilt-step, i.e. Kumagai model (a cylindrical piston entering into the magma reservoir) and Kikuchi model (underground explosion of a vapor reservoir injecting fluids into the surrounding rocks). The total intensity changes were explained as due to the piezomagnetic effect accompanying the Mogi model. Forced injection of fluids produced the SP variation owing to the electrokinetic effect. However, a new study on the cause of SP variation was presented by Kuwano et al. (2015), in which the fluid flow was induced within the poroelastic medium by the strain field of the tilt-step source. They employed the Kumagai model, which was approximated by a vertical tensile crack. Recently, we obtained the 3-component magnetometer data on the eastern slope of Miyake-jima Volcano thanks to NIED. Based on new magnetic data as well as a different idea on the tilt-step, we reexamined our previous model for the magnetic variations. We found that 3-component magnetic data contained apparent changes due to the rotation of the sensor, which could explain the

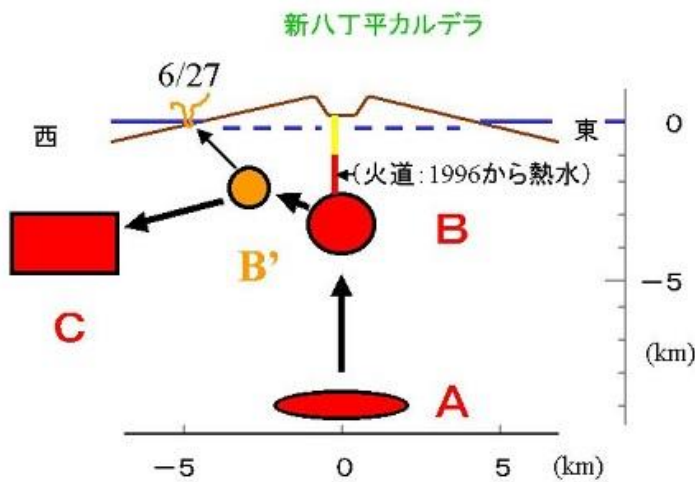
discrepancy among the observations and computed piezomagnetic fields.

### 1. 2000年三宅島噴火のあらまし

三宅島火山は20世紀の間に1940年, 1962年, 1983年そして2000年と4回の噴火をした。噴火の間隔が非常に規則正しく, 1983年噴火の後には火山活動は極めて静穏であったにもかかわらず, 様々な地球科学的な観測が行われ, いわば研究者が待ち構えた中で噴火が起こった。

第1図に2000年三宅島噴火の概念図を示す。1983年噴火の後, 年一回の繰り返し水準測量によって, 三宅島では地下約10km当たりの深部マグマ溜りAに, ほぼ一定の割合でマグマが蓄積されていると推定され, 2000年噴火の数年前からいつ噴火が起こってもおかしくないと考えられていた。1983年噴火では全磁力観測によって山頂直下3kmあたりに熱消磁域=マグマ溜りが形成されたことが明らかになった。

浅部マグマ溜りBから雄山の山頂部に向かって熱水が上昇し, 熱消磁による全磁力変化が1996年頃から顕著になった。



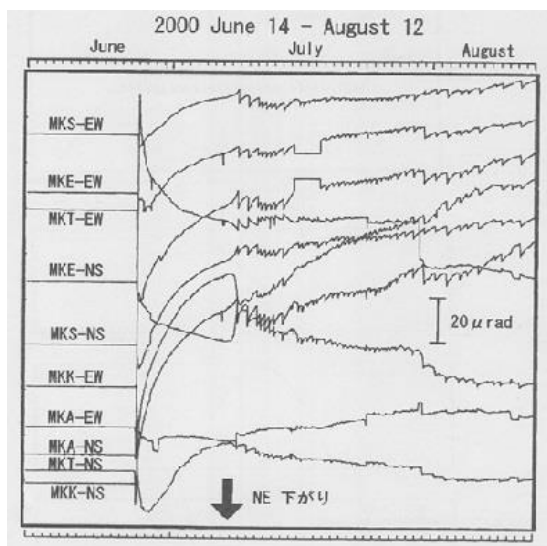
2000年6月26日山頂直下3kmのマグマが活動を始め, 山頂に向けて上昇しようとしたが, 厚い壁に阻止されて西方にダイクとして貫入し, 翌27日朝に三宅島西方の海底で小規模な海底噴火を起こした。マグマは更に西方海底に貫入し, 大規模な群発地震が7月中旬まで続いた。7月8

第1図 三宅島2000年噴火の概念図。

Fig.1. The magma plumbing system of Miyakejima Volcano related to 2000 eruption.

日夕方に雄山山頂部で陥没が発生した。これはBのマグマ溜りに空洞が生じて, 山頂部が落ちこんだものである。陥没孔は拡大を続けて, 8月18日の最大噴火の頃までに約2500年前に形成された八丁平カルデラが再現された。7月14日に最初の噴火が発生したが, マグマの組成は6月27日海底噴火および1983年噴火のそれと同じで, Bの溜りには1983年噴火のマグマが何らの変形や地震も起こさずに眠っていたものとされる。その次に発生した8月10日と8月18日最大噴火のマグマ組成はよりSiO<sub>2</sub>が少なく, B溜りのマグマは深部Aのマグマと置き換えられたものと考えられる。

8月18日最大噴火の頃までに, 新八丁平カルデラの拡大は止まった。8月29日に低温の火砕流が発生し, 更に大量の有毒な火山ガス(SO<sub>2</sub>)が放出されたために, 三宅島の島民は全員が島外に避難し, 4年半にわたって帰島することが出来なかった。

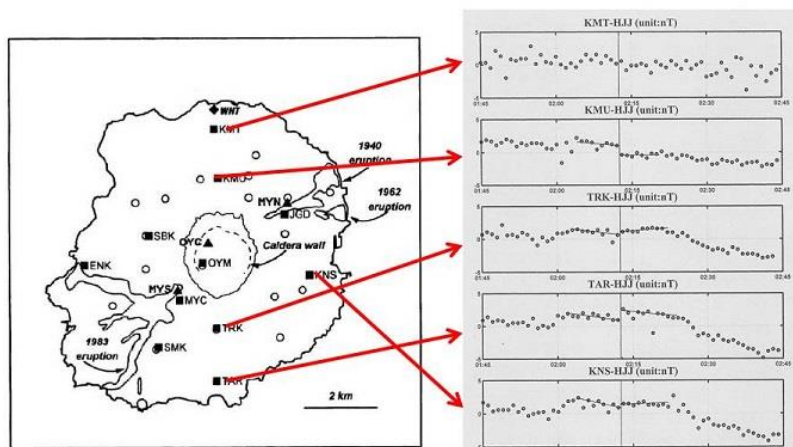


第 2 図. 三宅島の傾斜記録.

Fig. 2. Tilt data on Miyake-jima Volcano.

傾斜ステップに伴って電磁場が変化する. 三宅島では島内 8 か所にプロトン磁力計 (毎分計測) が置かれ, また海岸付近 8 か所と中央部に電極を埋めて, それらを NTT 電話回線をつないで自然電位が測定(10 秒間隔)され, 傾斜ステップに伴う変化が観測された. 自然電位の変化は速度波形とよく似た「ひと波」の変化であるが, 継続時間は 50 秒ではなく, 100 秒以上である.

一方第 3 図にプロトン磁力計による全磁力変化を示す. こちらは傾斜と同様にステ



ップ状の変化で, その変化の空間分布を見ると, 北側で負, 南側で正である. プロトン磁力計は毎分計測なので, 時間変化の詳細は分からないが, 傾斜ステップの様相は山頂

第 3 図 傾斜ステップに伴う全磁力 変化.

Fig. 3. Total intensity

changes associated with the tilt-step.

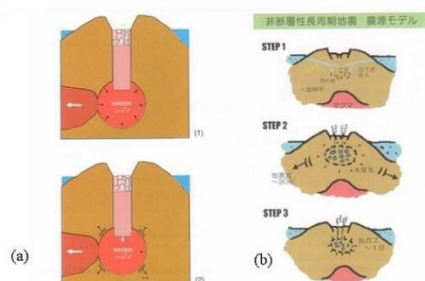
方向を中心とする膨張なので, 球状力源(茂木モデル)が考え易い. 地磁気変化をもたらす原因はピエゾ磁気効果であるとするれば, 膨張する茂木モデルに伴う地磁気変化は正に, 北で減少, 南で増加というパターンになる(Sasai et al., 2002). Currenti et al. (2005) は遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を用いて, 7月14日に観測された最大振幅のステップに伴う全磁力変化について, その最適解を求めた.

### 3. 傾斜ステップの発生機構

傾斜ステップの発生機構については, 2つのモデルがある(第 4 図). Kumagai et al.

(2001)は山頂カルデラの直下につながるピストン状の領域が地下 3km の深さ(非地震領域)にあるマグマ溜りの中に突入し、マグマ溜りを押し広げて傾斜ステップを起こすとした。マグマ溜りからマグマは西方海底に抜け出し、数時間置きにステップが繰り返される。このモデルの長所はマグマの物性やピストン形状を適切に仮定すると、継続時間が 50 秒と一定になることが説明できる点にある。またピストン降下量から陥没量は計算できて、それは山頂部のカルデラ体積とほぼ等しい。

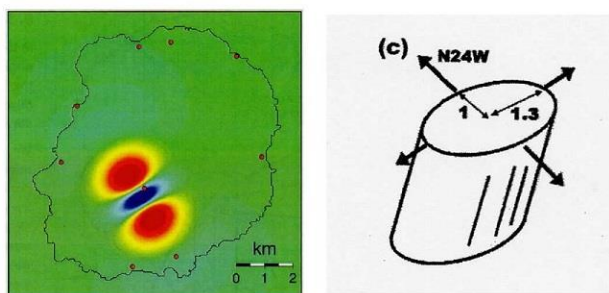
傾斜ステップ: 2つのモデル  
(a)熊谷モデル (b)菊地モデル



第 4 図. 傾斜ステップについての 2つのモデル

Fig. 4. Two different models for the generation mechanism of tilt-step.

一方菊地・他(2001)はピストンの上部に熱水溜りが存在し、その中の水蒸気が急激に膨張することによって傾斜ステップが発生するとしている。これは自然電位の変化を説明すると考えられた。しかしステップの継続時間がほぼ一定になる仕組みは与えられていない。彼らは傾斜ステップに伴う長周期イベントを、三宅島の島内各所に展開した強震計データを用いて詳細に解析し、第 5 図右のような楕円柱力源によって発生したものであることを示した。これは茂木モデルのような一様膨張の力源では無く、水平方向には一様でない変形をする。なお菊地らは得られたモーメント・テンソルは熊谷モデルと矛盾すると指摘している。



第 5 図 傾斜ステップのモーメント・テンソルと等価な楕円柱力源 (右) とそれを開口クラックで近似した力源が誘起する地下水の流れによる電場変化.

Fig. 5. Ellipsoidal cylinder equivalent to the moment tensor of the tilt-step source (right) and SP variation produced by induced water flow due to the source (left).

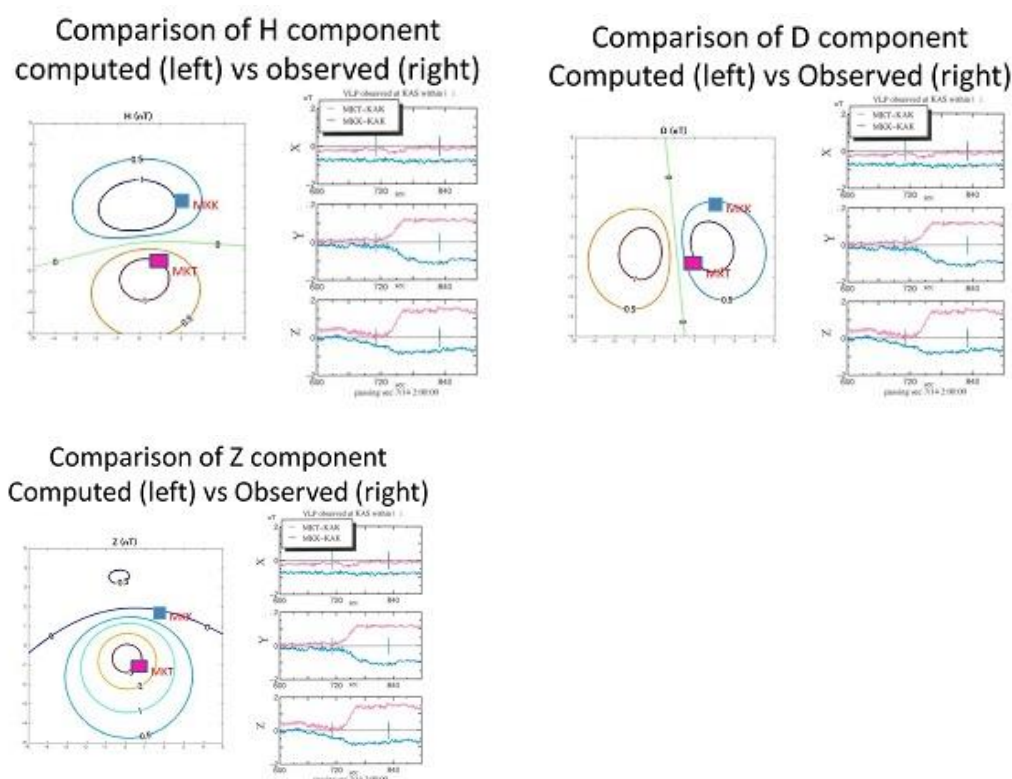


#### 4. Kuwano et al. (2015)による新展開

Kuwano et al. (2015)は傾斜ステップに伴う自然電位変化の発生機構を再検討して、次の事実を明らかにした。Sasai et al. (2002)はマグマ溜りないし熱水溜りから直接熱水が放出され、その流れに伴う界面動電現象で SP が変化した(強制的流体注入 [Forced Fluid Injection: FFI]モデル)と考えた。しかし Kuwano et al. (2015)は傾斜ステップを起こした力源が周囲の多孔質弾性体を歪ませて地下水の流れを誘発し、その流れに伴う界面動電現象で SP が変化したと提案する(多孔質弾性体界面動電効果 [PoroElastic ElectroKinetic: PEEK]モデル)。その力源としては熊谷モデルを採用し、そのモーメント・テンソルを第5図の右(菊地・他の解析結果)で表現されるものとした。更にこの力源を N114° W 走行の開口クラックで近似して、その開口クラックで誘発された地下水流によって作られた SP 変化が第5図の左に示されている。

#### 5. 地磁気変化モデル

Kuwano et al. (2015) によって、傾斜ステップの力源としては茂木モデルは適切でないと指摘された。当然 Sasai et al. (2002) の地磁気変化モデルは再検討を要する。更に我々は新たなデータとして三宅島の東側2か所における地磁気3成分データを得た。このデータも新たに加えて、傾斜ステップ力源モデルの妥当性を検討することにする。

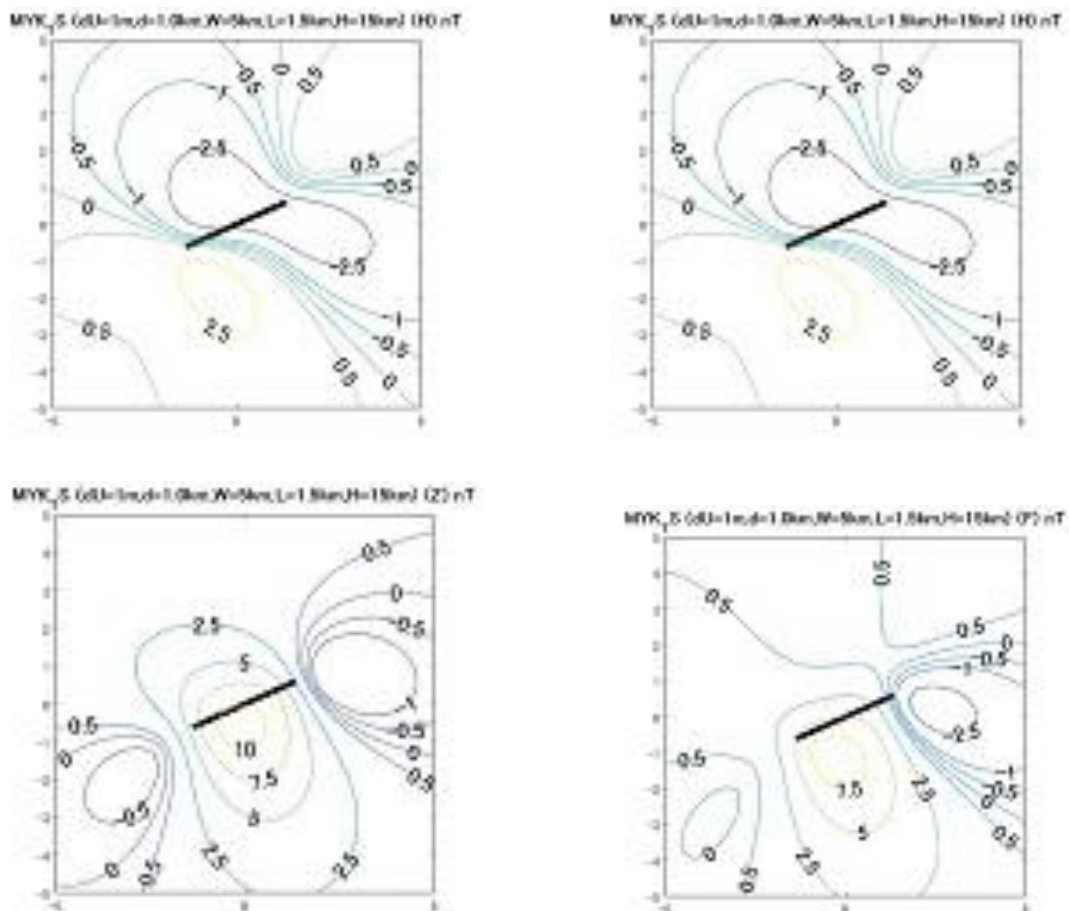


第6図 傾斜ステップに伴うフラックス・ゲート磁力計記録と、茂木モデルによるピエゾ磁気変化。上左：H成分，上右：D成分，下左：Z成分。

Fig. 6. Comparison of H (upper left) D (upper right) and Z (lower left) component associated with the Mogi model.

第6図に7月14日に発生した最大振幅の傾斜ステップに伴うフラックス・ゲート磁力計の観測結果と茂木モデルによるピエゾ磁気変化を示す。NIEDによる3成分磁力計の観測点 MKK と MKT の位置は各図の左側に示してある。磁力計は島津製作所の MB162 Type で、地中 10m の塩ビ・パイプの底に設置されている。毎秒計測でプロトン磁力計に比べて測定精度(0.01nT)も高い。茂木モデルではプロトン磁力計による F 成分の変化はほぼ説明できた。しかしフラックス・ゲート磁力計による H 成分の振幅が小さいこと、および D 成分で MKK と MKT において符号が反転することを説明できない。

そこで Kuwano et al. (2015)と同様に開口クラックを力源として、それによるピエゾ磁気変化を計算したものが第7図である。D 成分に注目すると、ダイク位置の東側では D 成分は同符号であって、このモデルでも MKK と MKT で符号が反転することを説明できない。



第7図 開口クラックによるピエゾ磁気変化. 上左：H成分，上右：D成分，下左：Z成分，下右：F成分。

Fig. 7. Computed piezomagnetic changes due to a vertical tensile crack. Upper left: H component, Upper right: D component, Lower left: Z component, Lower right: F component.

なおダイク・モデルのパラメータは、開口量=1.0m, 上端深さ=1.0km, ダイク長さ=3.0km, 深さ方向の幅=5.0km である.

## 6. 傾動の影響と今後の課題

フラックス・ゲート磁力計は孔底に固定されているので、傾斜変動によって地球磁場の中で回転する. プロトン磁力計であれば、全磁力はセンサーの回転によって影響を受けない. しかしフラックス・ゲート磁力計の直交する3軸は、その回転角だけ見掛けの変化を計測してしまう. 三宅島の主磁場の中では、 $1 \mu\text{-strain}$  の傾斜に対して  $0.3 \text{ nT}$  程度の見掛け変化を生ずる. 7月14日 02hLT 頃の最大イベントでは  $7 \mu\text{-strain}$  の傾斜が観測された. 従って第6図の地磁気変化の中には  $2 \text{ nT}$  程度の見掛け上の変化が含まれていることになる. 島の東側の観測点で D 成分の符号が反転するのは、傾動の影響の可能性が大きい.

我々は当面、傾斜ステップの力源を Kuwano et al. (2015) に従い、開口クラックを仮定して3成分および全磁力変化を説明できるかどうか、調べる積りである. 傾斜ステップは陥没カルデラを形成した地殻変動であるから、菊地モデルの再評価を含めて、その真の姿を追求して行きたい.

### 引用文献

Currenti et al., 2005, *Geophys. J. Int.*, 163, 408-418.

菊地正幸・他, 2001, *地学雑誌*, 110, 204-216.

Kumagai et al., 2001, *Science*, 293, 687-690.

Kuwano et al., 2015, *JGR*, DOI:10.1002/2014JB011740.

Sasai et al., 2002, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203, 769-777.