

三宅島の噴火前後における 3 次元磁気構造変化

植田義夫

Change of three-dimensional magnetic structure of Miyakejima Volcano
associated with the Eruption in 2000

Yoshio Ueda

〒737-8512 広島県呉市若葉町 5-1, 海上保安大学校

Japan, Coast Guard Academy, 5-1, Wakaba-cho, Kure-si, Hiroshima, 737-8512, Japan.

Abstract

A magnetic inversion algorithm is developed for constructing a 3D-magnetic structure of the volcanic edifice. This method consists of two steps, in the first step, an uniform magnetization model throughout the body is assumed for calculating a mean magnetization intensity and residual fields, by subtracting the calculated anomalies from observed ones. In the second steps, the magnetization deviations from the mean value are calculated for each prismatic block constituting the three dimensional body by the refined Conjugate Gradient method. The above algorithm was applied to the airborne magnetic anomalies of Miyakejima Volcano surveyed in 1987, 1999, and in 2001. The derived 3D-magnetic structures show the following characteristics, 1)the nearly N-S trending magnetic basement high at the base part of the volcano, 2)the relatively weak magnetization zones beneath the eastern coastal zone and its offshore area, as well as beneath the western flank of the edifice, 3)the relatively high magnetization zone beneath the northern offshore area. Changes of total intensity magnetic anomalies between 1987 and 1999, amounting to -280nT were found in the southeastern part of the central cone of Miyakejima Volcano. This reduction of magnetic anomalies imply the demagnetization of the edifice. From the difference between the anomalies surveyed in 1999 and 2001, a reverse dipole magnetic anomaly pattern of 520nT in amplitude is recognized just over the caldera region. This change can be explained by a disappearance of a cylindrical body of a radius 0.7km, top is 800m, depth is 350 a.s.l., with a magnetization of 6.0A/m in nearly present field direction. By comparing the 3D-magnetic structures derived from anomalies observed in 1987, 1999, and in 2001, the following changes were recognized that the relatively weak magnetization intensity zones of the uplift above sea level was confined within small zone at the stage of 6th, Nov, 1987. At 25th, Nov. 1999, the weak magnetization zone had spread in the whole zone including the base beneath the crater. Referring to the 3D-magnetic structure at the stage on 20th, June, 2001, the weak magnetization zone was also confined beneath the crater, which may imply the reduction in thermal demagnetization. These results may suggest that the detection of a demagnetization process occurring associated with volcanic activity is promising by conducting airborne magnetic surveys. The present 3D-inversion method also made apparent that the 3D-magnetic structure of Miyakejima Volcano had the Gaussian type normal distribution pattern, rather than lognormal distribution.

Key word: 3D magnetic inversion, magnetic tomography, Miyakejima, magnetic anomaly, airborne geophysics

1. はじめに

三宅島では 2000 年に陥没を伴う噴火活動が発生し(中田・他,2001),現在も硫化ガスの放射が継続している.このような三宅島において噴火に先行して火山体深部で何が進行していたのかを解明することは今後の火山活動の予知にとり重要な課題である.

本論文では水路部(当時)の実施した 1987 年,1999 年及び 2001 年の三宅島の航空磁気測量の結果(鈴木・他,1989; 海上保安庁水路部,2002)を用いて,2000 年の噴火期をへて三宅島の 3 次元磁気構造がどのように変化したのかについて議論する. 三宅島の 3 次元磁気構造を求める試みに関しては,1999 年 11 月の測量成果を用い火山体を 3 次元直方体の積み重ねで近似し,各ブロックの磁化強度を CG 法により求める試みが植田・他(2001)により実施され,三宅島の 3 次元磁気構造モデルが提出された.この結果,三宅島の磁気構造として梵鐘型の構造を有することが求められるとともに,山頂深部では比較的磁化強度が低下していることが報告されている.ただ,この方法では,局所的に負の磁化強度が生じるという不都合な現象が生じるという問題が残されていた. 今回は 3 章で述べる新たな解析法により地磁気全磁力異常から三宅島の 3 次元磁気構造を求めた, また,1987 年から 2001 年までの間における地磁気変化について議論する.

2. データ

Table 1 は本論文で用いた三宅島の航空磁気測量の概要をまとめたものである.航空機はいずれも海上保安庁羽田航空基地所属の YS11 型機(LA701)である.

1987 年 11 月の測量では位置決定は海域部はオメガ,陸域部は対地ビデオと航空写真との対比から決定している.1999 年以降は GPS による測位が用いられている..Fig. 1 には 1999 年と 2001 年の測量成果による磁気異常図を示す.なを,用いた標準磁場はそれぞれ IGRF1995,及び IGRF2000 である.

Table 1 Airborne magnetic surveys on Miyakejima Volcano conducted by Hydrographic and Oceanographic Department

Survey year and date	1987 6th,Nov	1999 25th,Nov	2000 20th,Jun
Height	1160m	1160m	1660m
Positioning method	Land:Video Sea:Omega	GPS	GPS

3. 解析方法

本論文では,直接,観測された磁気異常を 3 次元構造でモデル化する方法ではなく,最初の第一ステップでは,山体の均一磁化モデルでの解析を行い,平均的磁化強度と,均一磁化モデルからのずれとしての残差異常を求める.

第二ステップでは残差異常を 3 次元ブロックモデルで解析し,平均磁化強度からの偏差としての各ブロックの磁気強度分布を求める.

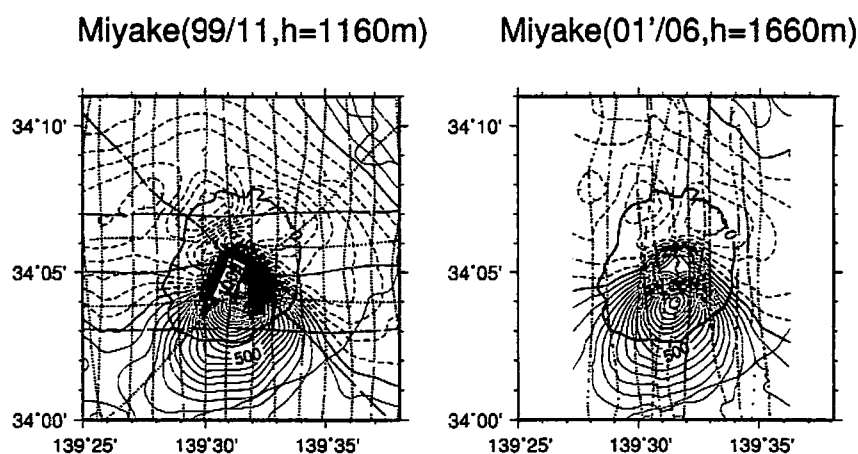


Fig. 1 Magnetic anomalies of total intensity over Miyakejima Volcano. Contour interval is 50nT. IGRF1995 and IGRF2000 are used for reference field model for the surveys in 1999 and 2001, respectively.

このようにして得られた結果から各ブロックの体積と磁化強度から体積平均としての平均磁化強度、体積の比率で表した磁化偏差のヒストグラムを求め、火山の磁化強度分布に関する統計量を推定した。

3-1 第一ステップ (均一磁化モデル)

三宅島を高度 300m以上,0mから 300m,0mから水深 300mまでの 3 層に分割し,標高 300m以上の第一層については 250mメッシュ,0m~300mの第 2 層については 500mメッシュ,0mから水深 300mまでの第 3 層は 1 kmメッシュの地形で 3 次元ブロックモデルを作成した。地磁気異常データは $x-y$ 平面座標系での値に変換し Smith and Wessel(1990)を用いて 500mメッシュデータを作成し入力データとして使用した。

第一ステップでは,三宅島の山体がほぼ現在の磁化方向に均一に磁化していると仮定して磁化方向を伏角 46 度,偏角 0 度として,山体の磁化強度を求めるとともに,観測磁気異常から均一磁化モデルによる計算磁気異常図を差し引いた残差異常を算出した。

各ブロックを k ,観測点を i で表すと,観測点 i の磁気異常(f_i)は次式で表される。

$$f_i = \sum_k A_{ik} \cdot \Delta J_k + b \quad (1)$$

ここで b はバイアス調整項である。

均一モデルの場合には k に関する総和をとり,次式を解くことになる。

$$f_i = \left(\sum_k A_{ik} \right) \cdot J + b \quad (2)$$

解析精度を表す指数としては,一般的な標準偏差(σ)の他に,次式で定義された Goodness-fitting-ratio(GFR)(Uyeda and Richard, 1966) を計算した。

$$GFR = \frac{\sum_i |Obs_i|}{\sum_i |Obs_i - Cal_i|} \quad (3)$$

ここで, Obs_i , Cal_i はそれぞれ i 点での観測磁気異常値と計算磁気異常値である。

第二ステップ (不均一磁化モデル)

残差異常を入力データとして 3 次元ブロックモデルにより各ブロックの磁化強度をもとめる。計算には一般的に用いられている改良 CG 法を用いた(Bjorck,A. and Elfving,T.,1979)。

今,測点 i での残差異常を df_i とし,各ブロック k での磁化強度偏差を ΔJ_k とすると,観測方程式は次式となる。

$$df_i = \sum_k A_{ik} \cdot \Delta J_k + b \quad (4)$$

A_{ik} はヤコビアン行列で,1000x1000 オーダーの大型マトリックスである。

3-3 解の誤差推定法

今回の解析法は最小 2 乗解を厳密に求めたものではないので,一般的な解の誤差計算法を用いることはできない。ここでは近似的な方法で解の誤差を求めることとした。インバージョン法では残差の 2 乗和 (E) を最小にする解を求めるが,このとき各ブロック間での磁化に相関がないとすれば, E の構造変数の 2 階微分は以下の式で観測データの誤差と関連づけられる(Menke,1989)。

$$\text{cov} \Delta J_k = \sigma_d^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial (\Delta J_k)^2} \right]^{-1} \quad (5)$$

上式の E に関する 2 階微分はヤコビアン行列の各要素を 2 乗した k 列の総和として求まるが、その意味するところは、k 番目の構造変数が各観測点に及ぼす磁気異常の 2 乗和を示すもので、ここではその 2 乗和を構造変数 k の寄与率 (Contribution factors of ΔJ_k) と呼ぶこととする。当然寄与率が大きければその構造変数の誤差は小さい。

もう一つの方法は観測方程式から直接推定する方法である。(4) 式から計算誤差の 2 乗は近似的に次式で表すことができる。

$$\delta(df_i)^2 = \sum_k (A_{ik})^2 \cdot \delta(\Delta J_k)^2 \quad (6)$$

計算誤差の分散が残差和のほぼ半分程度であると仮定すれば、(6) 式を解くことにより各ブロックの磁化強度偏差の誤差 $\delta(\Delta J_k)$ を求めることができる。

4. 三宅島の 3 次元磁気構造とその考察

4-1 均一磁化モデルの解析結果

Table 2 Results of analyses by uniform magnetization model

Survey Year	1987	1999	20001
Number of Data ^{*1}	961	1147	1147
Magnetization direction is fixed as : $D_f=0$, $I_f=46$ ^{*2}			
Magnetization J_r (A/m)	10.9	10.2	10.4
Standard deviation σ (nT)	105.7	94.9	71.6
GFR	2.91	2.96	3.16

*1: number of magnetic anomaly data used for analysis.

*2: Present field direction is $D_f=5.6$, $I_f=46$., where unit in deg.

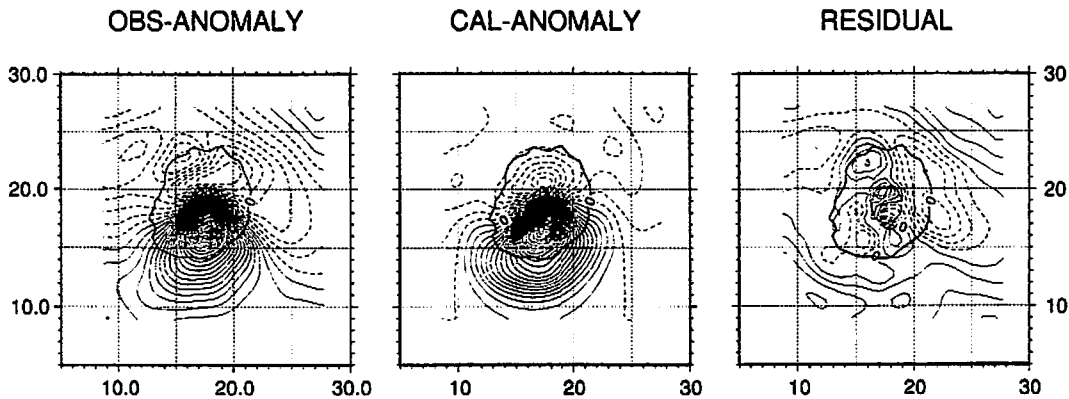


Fig.2 Observed, calculated and residual anomalies derived from survey data on 25th, Nov, 1999.

Table 2 には 1987 年,1999 年および 2001 年の観測データに基づく解析結果をまとめた。この結果から,三宅島の平均的磁化強度は,ほぼ 10.4A/m の強い磁化強度を有することがわかる。また,Fig.2 は 1999 年の観測異常,計算異常,残差異常を示す。

4-2 3次元磁気構造解析から推定される三宅島の内部構造

Table 3 は 3 次元磁気構造解析の結果による各パラメータをまとめたものである。また,Fig.3 は Fig.2 の残差異常の次元磁気構造解析の結果である。

Table 3 Results of analyses by multi-block model

この結果から三宅島の磁気構造の特徴として以下のことが推察される。

- (1) 三宅島の磁化構造は海面以深の火山基底部に比較的強い磁化層が存在し,南～南南東から北～北北西にのびる。
- (2) 宅島の北西沿岸部には局地的に磁化強度の大きい部分が存在する。また,島の東側の基底部分,火口から西側山麓の部分には比較的磁化強度の弱い部分が存在する。
- (3) 三宅島の火口付近は相対的に磁化強度が低く,その部分は 1999 年の時点では第 3 層にまで及んでいる。

Survey Year	1987	1999	2001
Number of blocks ^{*1}	773	773	753
Number of magnetic anomalies	961	1147	1147
Standard deviation σ (nT)	55.6	54.9	39.3
GFR	6.05	5.49	6.05
Radius=4km ^{*2}			
Vollume(km ³)	47.8	47.8	45.2
Vollume-mean Magnetization(A/m)	11.1	10.3	10.5
Total magnetic moment (Am ²) ^{*3}	530.6	495.0	472.7
Norm of ΔJ ^{*4}	55.4	50.7	39.6
Rate of non-uniform Magnetization(%)	10.4	10.3	8.4

^{*1}number of source blocks used for 3D-modelling.

^{*2}Center is located at the center of rater (17.5,18.5).

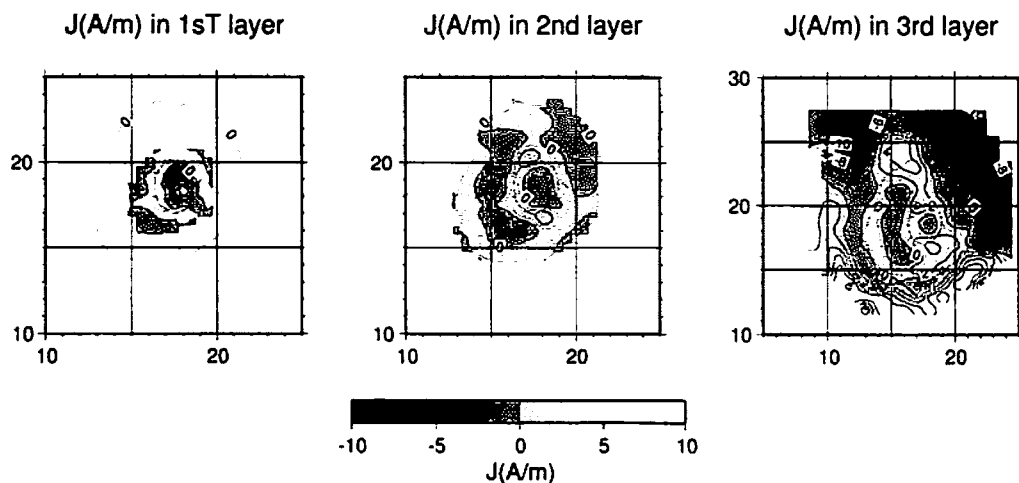


Fig. 3 3D-Mmagnetic structure of Miyakejima volcano derived from survey data on 25th, Nov, 1999.

Left: 1st layer (h>300m a. b. l.)

Middle: 2nd layer (300m>h>0m)

Right: 3rd layer between (0m>h>-300m).

4-3 地磁気異常の変化

(1) 1987年から1999年の変化

Fig.4 は1987年と1999年の全磁力異常の差を1km以下の短波長成分を除去した差を示したものである。この結果から三宅島では2000年噴火に先立つ1987年以降、火口の南南東付近で高度1160mにおいて最大280nTに及ぶ磁気異常の減少が進行していたと推察される。

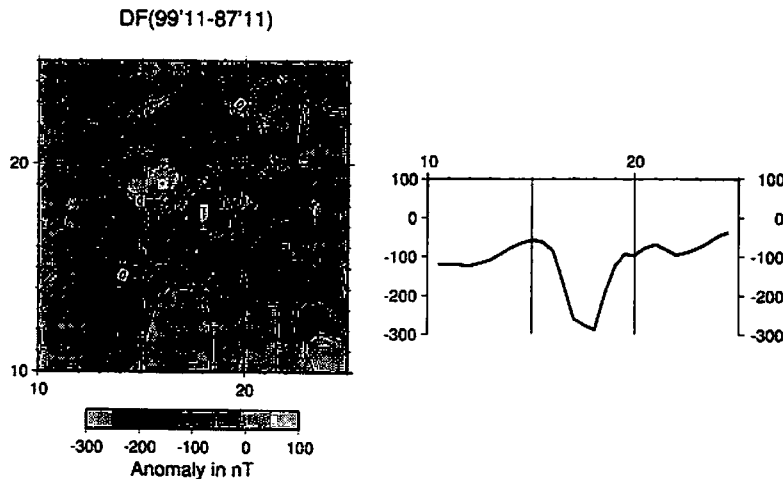


Fig.4

Change of total intensity magnetic anomaly between 1987 and 1999. Contour interval is 50nT. The maximum reduction amounts to -280nT over the southeastern part of the central zone of Miyakejima Volcano.

(2) 1999年から2001年までの変化

Fig.5 は1999年と2001年の高度1660mでの地磁気全磁力の変化の分布図である。この図に表された変化量は山体の陥没による影響が認められる。

この変化量をタルワニ法(Talwani,1965)で解析した結果の一例を Fig.6 に示した。

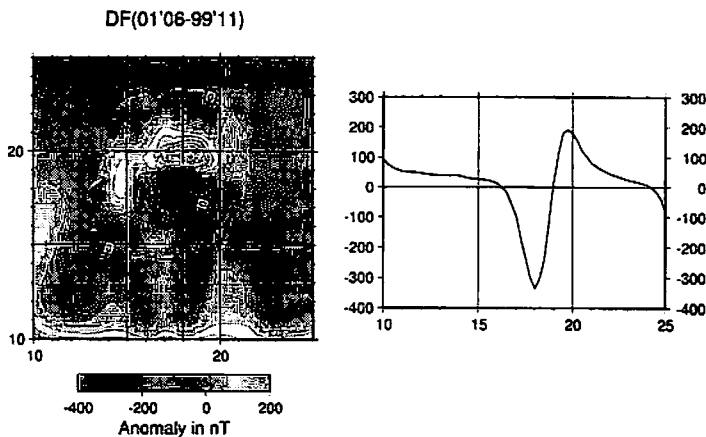


Fig.5

Change of total intensity magnetic anomaly due to caldera formation occurred in 2000 as estimated from the difference between June,2001 and Nov,1999.

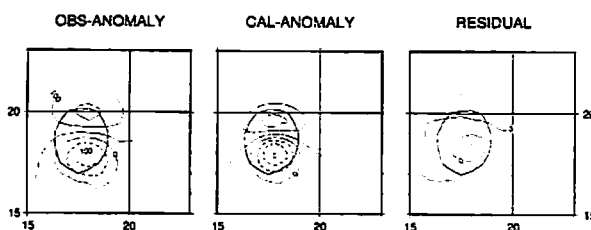


Fig 6.

Fitting the magnetic change in Fig.5 by a cylinder model having a radius of 0.7km, top is 800m, bottom 350. $J=6.01A/m$, $Dec=180$, $Inc=-36.3$ $GFR=3.28$, $\sigma=27.4nT$

この結果、陥没に伴う磁気異常は磁化強度 6.0A/m を有する部分が消失したとすればほぼ説明できることがわかる。ただしこの磁化強度は円柱モデルの底面深度を標高 100m まで深くした場合には 4.6A/m の値で説明できることになり、底面深度の仮定値で異なるためある程度の不確定さを有する。

4-4 3次元磁気構造の経年的変動

各時点での磁化構造を比較した結果、この間に以下にのべる磁気構造の変化が推定された。

(1) 1987年の時点では山頂付近の低磁化強度部分は狭い部分に限定されていたが、1999年の時点では、山頂付近から山体の基底部付近にまで低磁化強度域がひろがっており、この間に火口深部での熱活動による磁化強度の低下が進行していた。

(2) 1999年から噴火以降の2001年の結果では特に顕著な変化は認められないが、概ね低磁化強度域は1999年に比べやや減少し、噴火後は熱消磁の回復過程にあるものと推察される。

以上に述べたことから、2000年の噴火に先立つ1999年には三宅島の火口深部では熱的消磁が進行していたことが推定される。陸上の観測でも、噴火に先立つ1996年頃から火口深部での磁化の減少を示唆する地磁気変化が検出されており（笹井ほか、2001）、今回の結果と調和的である。

5 結論

地磁気異常データから火山体などの3次元磁気構造を求める方法として2段階解析法を提示するとともに、その手法を三宅島の航空磁気異常の解析に応用し、1987年、1999年、2001年の各測量時点における3次元磁気構造を求めた。その結果以下のことが明らかとなった：

(1) 2001年6月の時点での三宅島の平均的磁化強度は 10.4A/m で、火口中心から半径 4km の範囲での総磁気モーメントは $472.7(\times 10^9\text{Am}^2)$ である。

(2) 三宅島の磁化構造は均一度の高い磁気構造を有する。

(3) 三宅島の磁気構造は海面以深の火山体基底部に比較的強い磁化層が存在し南～南南東から北～北北東に延びる磁気基盤が存在する。三宅島の北西沿岸部には局地的に磁化強度の大きい部分が、また、島の東側の基底部分、火口から西側山麓の部分には比較的磁化強度の弱い部分が存在する。

三宅島の1987年から2001年にかけての航空磁気測量から、この間の地磁気異常変化を求めた。

その結果

(4) 1987年から1999年にかけて三宅島の火口付近の南東部を中心に最大 280nT の地磁気の減少が生じていた。

(5) 1999年と2001年の比較では、高度 1660m において振幅約 520nT の逆ダイポール型のパターンを示す地磁気変化が生じていた。この変化量は磁化強度 $J=6.0\text{A/m}$ を有する半径 0.7km の円柱モデルで説明できる。

また、各時点での磁化構造を比較した結果、三宅島深部での熱消磁は1987年から1999年にかけて進行し、山体の基底部付近にまで低磁化強度域が広がっていたことが推定された。その後の2000年の噴火以降の2001年の時点では山体基底部での熱消磁が回復過程にあると推察される。

今回求められた3次元磁気構造は火山活動に伴う山体深部で進行する熱的活動を捉えたものであり、航空磁気測量による火山活動監視がこれからの有効な方法であることを過去の測量の解析結果から示したものと見える。

謝辞

本論文は水路部（現海洋情報部）による永年の航空磁気測量の成果に基づくものであり、この間、航空機の運行を担当された海上保安庁羽田航空基地の方々に改めてお礼申し上げる。また、2001 年の三宅島航空磁気測量とその資料整理を担当された小野寺健英、加藤剛の両氏に感謝の意を表する。

引用文献

- Bjorck, A. and Elfving, T. (1979) Accelerated projection methods for computing pseudoinverse solutions of systems of linear equations, *BIT*, 19, 145-163.
- 海上保安庁水路部 (2002) Aeromagnetic survey, *Data Rept. of Hydrographic Observations*, Series of astronomy and geodesy, 36.
- Menke, W. (1989) Geophysical data analysis: *Discrete Inverse Theory, Revised Edition*. International Geophysics Series, 45, Academic Press, Inc.
- 中田節也・長井雅史・安田敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴—. *地学雑*, 110, 168-180.
- 笹井洋一・上嶋誠・歌田久司・鍵山恒臣・Zlotnicki, Jacques・橋本武志・高橋優志 (2001) 地磁気・地電位差観測から推定される三宅島火山の 2000 年活動. *地学雑*, 110, 226-244.
- Smith, W.H.F. and Wessel, P. (1990) Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55, 293-305.
- 鈴木 進・熊川浩一・長屋好治・植田義夫 (1989) 三宅島の地磁気異常. *水路部技法*, 7, 49-55.
- Talwani, M. (1965) Computation with the help of a digital computer of magnetic anomaly caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, 30, 797-817.
- 植田義夫・中川久穂・小野寺健英・鈴木晃・熊川浩一・久保田隆二 (2001) 2000 年噴火以前の三宅島の 3 次元磁気構造—地磁気トモグラフィーの試み—. *水路部研究報告*, 37, 19-36.
- Uyeda, S. and Richards, M. (1966) Magnetization of four Pacific seamounts near the Japanese Islands, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44, 179-213.