

フィリピン・タール火山・主火口湖の磁気および水深測量：序報

笹井 洋一* 原田 誠** SABIT, Julio P.***
ZLOTNICKI, Jacques**** 田中 良和***** CORDON, Jr. Juan M.***
上田 誠也** 長尾 年恭** SINCIOCO, Jame S.***

Geomagnetic and Topographic Survey of the Main Crater Lake in Taal Volcano (Philippines): Preliminary Report

Yoichi SASAI*, Makoto HARADA**, Julio P. SABIT***,
Jacques ZLOTNICKI****, Yoshikazu TANAKA*****, Juan M. CORDON Jr.***,
Seiya UYEDA**, Toshiyasu NAGAO** and Jame S. SINCIOCO***

Abstract

A geomagnetic and topographic survey of the Main Crater Lake (MCL) on Volcano Island, Taal volcano, the Philippines, was conducted to identify the eruption mechanism of the volcano. A mound at the lake bottom was found near the northern part of MCL, which was not present at the 1986 survey. Called mound M, it was formed between 1986 and 2008 during a period of new fumarole activity, which started on the northeastern shore of MCL in the early 1990's. A geomagnetic survey found no Total Magnetic Field (TMF) anomaly corresponding to the mound, which implies that mound M is non-magnetic. The site coincides with the location of a high-temperature area detected by the ASTER satellite during the early 2005 volcanic crisis. The mound M might contain chemicals (chloride or sulphide?) deposited from volcanic gas. Two continuously-recording proton magnetometers were set up at two geothermal areas on Volcano Island. Recordings of TMF variations obtained over six months on Volcano Island showed excellent stability and precision for monitoring the volcanic activity.

Key words : geomagnetic field, self-potential (SP), Taal Volcano, crater lake, geothermal area
キーワード : 地磁気, 自然電位, タール火山, 火口湖, 地熱地帯

* 東京都総務局総合防災部

** 東海大学海洋研究所地震予知研究センター

*** フィリピン火山地震研究所, フィリピン

**** クレルモンフェラン地球物理研究所, フランス

***** 京都大学理学系研究科地球熱学研究施設火山研究センター

* Disaster Prevention Division, Tokyo Metropolitan Government

** Earthquake Prediction Research Center, Institute of Ocean Research and Development, Tokai University

*** Philippine Institute of Volcanology and Seismology

**** CNRS, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, France

***** Aso Volcanological Laboratory, School of Science, Kyoto University

I. はじめに

タール火山はフィリピン・ルソン島南部 ($120^{\circ} 99 \text{ E}$, $14^{\circ} 00 \text{ N}$, 高さ 311 m) に位置しており, $25 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ のタール・カルデラ湖の中にある Volcano 島が火山活動の中心である (図 1)。この火山は世界で標高は最も低い (海拔 300 m) が危険な火山とされ, いわゆる decade volcano (頻繁に噴火する火山) である。Volcano 島は直径約 5 km の後カルデラ期の中央火口丘で, 中心に直径 2 km の主火口 (Main Crater: MC) を持ち, その中に直径 1.2 km 深さ 80 m の主火口湖 (Main Crater Lake: MCL) が存在する (図 1)。

歴史記録によれば西暦 1572 年から 1977 年までに 33 回の大噴火を起しており, その大部分は水蒸気爆発ないしマグマ水蒸気爆発である (Punongbayan and Tilling, 1989)。主火口は 1754 年と 1911 年に大噴火を起したが, 特に 1911 年の噴火では 1000 人以上の犠牲者と, 同火山から 60 km 北方の首都マニラにまで降灰を及ぼした。Volcano 島の西部にある Mt. Tabarro

では, 1965 年から 1977 年まで噴火が続いた。とりわけ 1965 年のベース・サージ噴火 (水爆のような横なぐりの突風で, 200 人近い死者が出た) は, この種の噴火に関する最初の記載例として名高い (Moor *et al.*, 1966)。1977 年の水蒸気爆発を最後に, タール火山はそれ以降 31 年間にわたって噴火していない。

1990 年代初めから Volcano 島で火山性地震が頻発し始めた。特に 1992 年 2 月には, 20 cm に達する地盤隆起や MCL 湖面での発泡, そして北側斜面 (Daang Kastila 地域) で噴気割れ目が出現したが, 噴火には至らなかった。現在, Volcano 島では主な噴気・地熱地帯が 3 ヶ所存在し, それぞれ MCL 東岸, 北側斜面, MCL 西岸である。タール火山の火山警報は PHIVOLCS (フィリピン火山地震研究所) から発令される。彼らは火山性地震回数・繰り返し水準測量・火口湖の地球化学調査で中期予測を行い, 表面現象の発現を待って, 警報を出している。

PHIVOLCS と EMSEV (Electro Magnetic Study of Earthquakes and Volcanoes) は 2004

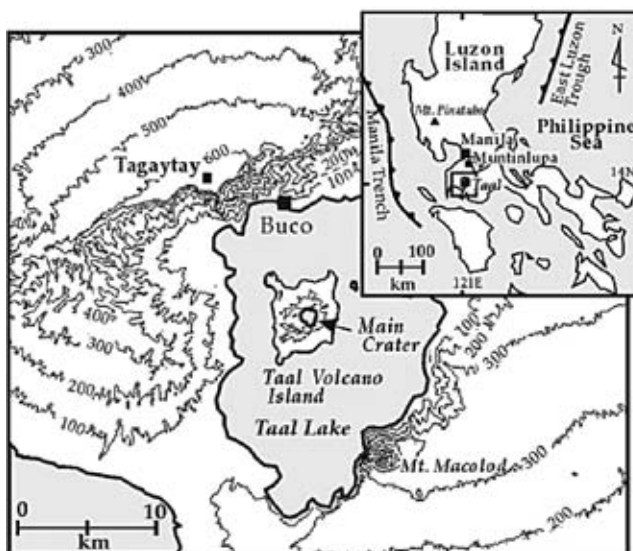


図 1 フィリピン・ルソン島 (右上) 南部のタール火山の地形。

Fig. 1 The topography of Taal volcano at the southern part of Luzon Island, the Philippines.

年 12 月にタール火山に電磁気的手法による火山監視体制を導入することで合意した。EMSEV は IUGG 傘下の 3 協会 (IAGA, IASPEI, IAVCEI) のワーキング・グループで、2002 年に発足した。2005 年 1 月に PHIVOLCS と EMSEV の研究者達が共同して、タール火山の電磁気観測を開始した。タール火山では主火口湖が熱エネルギーの放出や噴火活動を調節する上で、重要な役割を担っていると考えられる。本報告はこのタール主火口湖の水深と地磁気測量結果の序報である。

II. タール火山における電磁気観測の概要

火山の電磁気観測では地磁気測定が最も早くから導入され (Rikitake, 1951, Yokoyama, 1969), 最近でも数多くの報告がある (Sasai, *et al.*, 1990; Tanaka, 1993; Del Negro *et al.*, 2004; Hurst *et al.*, 2004)。比抵抗測定は 1986 年伊豆大島噴火でマグマの上昇を見事にとらえた (Yukutake *et al.*, 1987)。さらに自然電位 (Self-Potential: SP) 観測でも雲仙岳噴火 (Hashimoto and Tanaka, 1995) や、レユニオン島 (仏領インド洋) のピトン・ドラ・フォルネーズ火山でマグマ貫入に伴う変化が観測されている (Michel and Zlotnicki, 1998; Zlotnicki and Nishida, 2003)。最近では地磁気・比抵抗・自然電位の結合観測の有効性が強調されている (Sasai, *et al.*, 2002; Zlotnicki *et al.*, 2003)。

2005 年 1 月の第 1 回観測で、我々は 21 点の繰り返し磁気測量点を設置した。たまたま Volcano 島で有感地震が発生して、多数の住民がボートで島から避難する事態となった。MCL 東岸の地熱地帯にある磁気点で再測定を行ったところ、わずか 5 日間で +2.5 nT と有意な全磁力変化を検出した。その後湖面からの発泡や植生の枯死といった地熱活動の活発化が起こり、1 月末には主火口への立ち入りが禁止された。また自然電位の繰り返し測定でも、電位の上昇が検出された (Harada *et al.*, 2005)。

2005 年 1 月から 2008 年 3 月まで、11 回にわたって繰り返し磁気測量が実施された。過去 3 年間に火山警報レベルが 0 から 1 に格上げされた時期が 2 回あり、(i) 2005 年 1 月から 6 月、(ii)

2006 年 11 月から 2007 年 4 月まで、である。(i) の時期は湖面の沸騰、植生の枯死が起こり、(ii) の時期は MCL 東岸に噴気泉 (geyser) が出現した。また北側斜面 (Daang Kastila) においても全磁力が増加しているが、ここでは噴気活動が活発化している。全磁力の増加は地表から 10 m ないし 30 m の深さに上面を持つ扁平な楕円体が 1% 磁化を失ったことで説明されるが、これは数℃の地温上昇で実現する (Zlotnicki *et al.*, 2008)。

III. 地磁気連続観測の開始

2005 年 11 月に北側斜面 (Daang Kastila: DKT) において、また 2006 年 12 月には MCL 東岸 (MCL-East: MCE) においてコンクリート製の小屋 (シェルター) を建てて、短基線 (150 m) の自然電位と地中温度の連続測定を開始した。我々は 2007 年 12 月に DKT および MCE に Tanaka (1993) が開発・製作した KM62 式プロトン磁力計を設置して、全磁力の連続観測を開始した。記録媒体の ROM を PHIVOLCS の研究者が、約 1 ヶ月に 1 回交換している。

図 2 は MCE と DKT との間の全磁力単純差日平均をプロットしたものである。この約半年間 (2007 年 12 月～2008 年 6 月) において、両者の間にはわずか 0.5 nT 程度のゆっくりした変動が見られる。このグラフは Volcano 島の電磁環境がいかほど優れているかを示す。ここでは商用電源は無く、小型発電機が稼働しているに過ぎない。このように小さな変動は地熱活動の変化を反映したものかもしれないが、気温変化に伴う年周期的・季節的なものである可能性もある (Utada *et al.*, 2000)。いずれにしても Volcano 島の非地熱地帯に、もう 1 台プロトン磁力計を設置する必要があるだろう。

IV. 火口湖の水深・磁気測量

我々は 2008 年 3 月末から 4 月初めにかけて、MCL 湖面上で水深と全磁力の測量を実施した。アウト・リガー付きの小型ボート (FRP 製) の先端部に、プロトン磁力計 (オーバーハウザー型

MCE-DKT

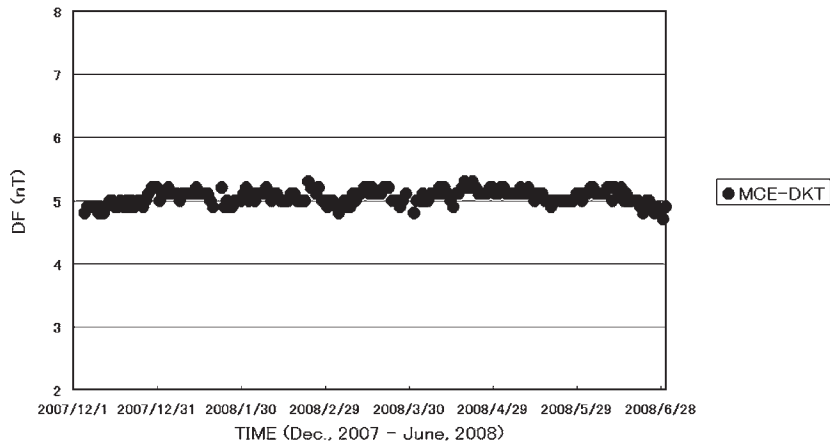


図 2 MCL 東岸と北側斜面 (Daang Kastila) との全磁力単純差日平均の変動 (2007 年 12 月～2008 年 6 月)。

Fig. 2 Variations of the daily mean simple differences between MCE and DKT (December, 2007-June, 2008).

GSM19, 精度 0.01 nT), 超音波測深器, GPS, 水温計を設置した。すべての測定は 5 秒間隔で自動的に行われた。水温計で危険領域を検知するつもりであったが, 40℃を越える高温は検出されなかった。

図 3a は 1986 年に測られた MCL の水深分布 (Ramos, 1986), 図 3b は今回測定されたものを示す。MCL の南西部に Boulder と呼ばれる岩塊が立っている。最深部はこの Boulder から北側に広がる。図 3a と図 3b を見比べると, 水深分布の大勢や最深部の値は互いによく似ている。しかし我々は図 3b において, 水深 40 m の等深線が MCL の北部で図 3a と比べると大きく南に張り出しているのに気付く。この 22 年間にこのあたりの水深は 10-20 m 浅くなったのである。この堆積物 (Mound) を M と呼ぶことにする。

図 4 は MCL 湖面上の全磁力分布を示す。地磁気の日変化は DKT の連続観測データを用いて補正してある。この堆積物 M の存在するあたりに, 特に明瞭な磁気異常は認められない。すなわち堆積物 M は非磁性であるらしい。堆積物 M の成因については 2 つの可能性がある: (a) 北岸の火口

壁で大規模な地すべりが起こった可能性がある。しかし地すべりによる岩塊はいずれにせよ磁気を帯びているであろうし, M の北側の火口壁は急峻な崖で, 地すべり地形ではない。(b) 湖底から出る火山ガスが多量の化学物質を含んでおり, それが非磁性の硫化物もしくは塩化物の塊を作った可能性がある。この堆積物 M のあるあたりは, 2005 年前半の活発期に ASTER 衛星による熱映像で見つかった高温領域に相当する (Zlotnicki *et al.*, 2008)。我々は現在 3 次元の磁気異常解析を行って, 湖底の磁化構造を明らかにしようと試みている。これによって堆積物 M の正体もある程度明らかになるであろう。

V. 結論と今後の課題

(1) Volcano 島は電磁気的手法による火山監視に適した, 優れた電磁環境にある。連続観測による地磁気変化については, 1 nT 以下の検知能力があろう。電場についてもノイズは極めて小さい。Volcano 島に連続測定のプロトン磁力計を設置したことで, 繰り返し磁気測定の精度も向上が見込まれる。

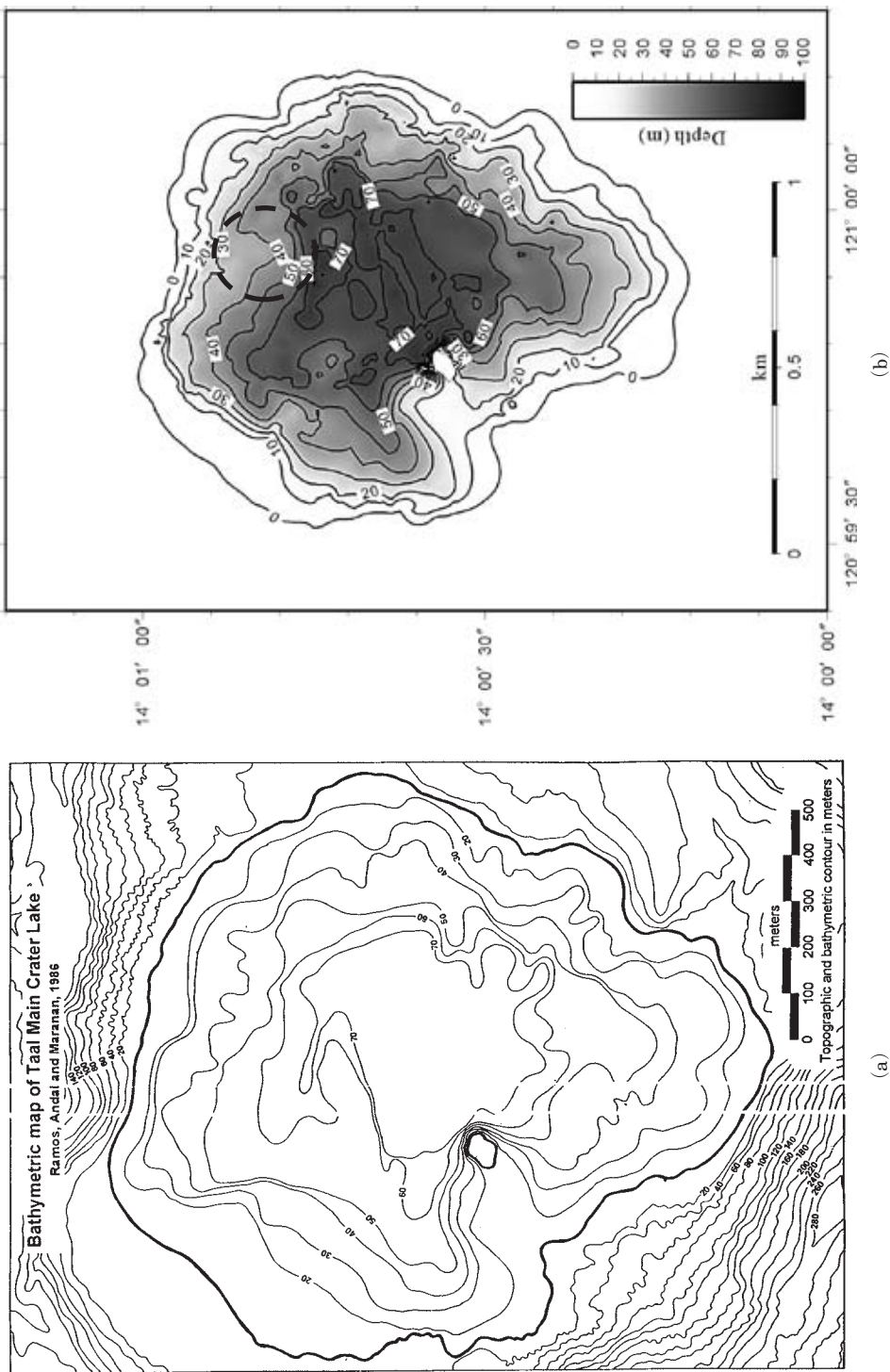


図 3 (a) タール主火口湖の水深分布 (1986 年測定, Ramos, 1986). (b) 2008 年 3 月測定のタール主火口湖の水深分布 (本研究). 図中の円は 1986 年測定と比較して認定されるマウンド M を示す.

Fig. 3 (a) Bathymetric map of MCL drafted in 1986 (Ramos, 1986). (b) Bathymetric map of MCL drafted in March 2008 (present study). The circle indicates the location of Mound M that has appeared since the 1986 bathymetry survey.

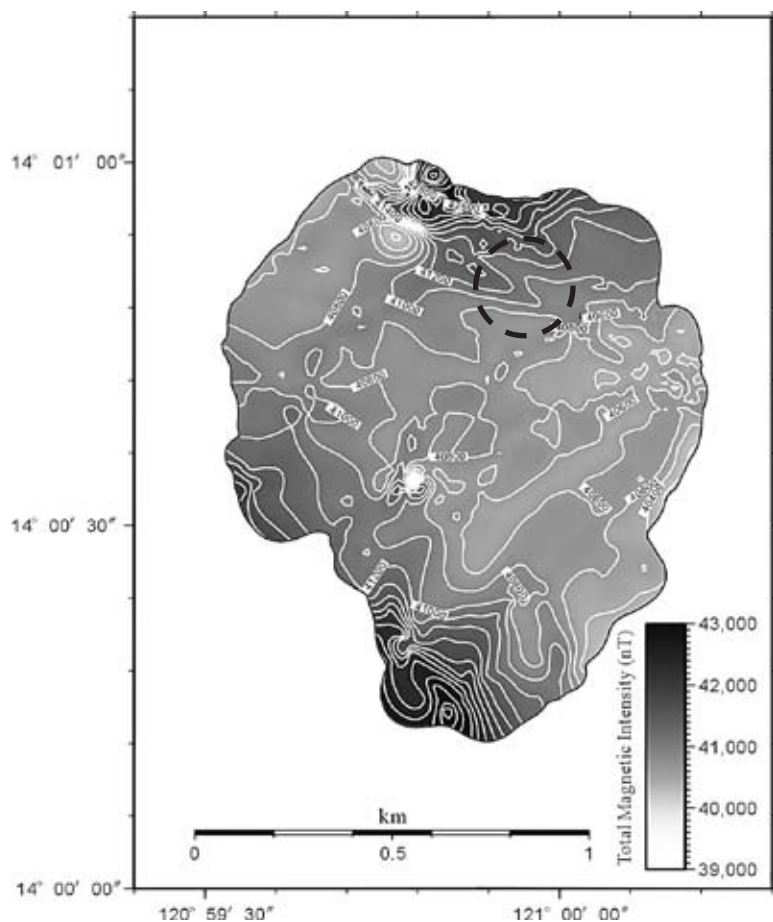


図 4 タール火山主火口湖水面上の全磁力分布 (単位 nT). 図中の円は 1986 年水深測定と比較して認定されたマウンド M の位置を示す.

Fig. 4 The distribution of TMF at MCL (Unit: nT). The circle indicates the location of Mound M that has appeared since the 1986 bathymetry survey.

(2) Zlotnicki *et al.* (2008) は MCL 東岸の地熱地帯と北側斜面のそれとがつながっている可能性を指摘した。連続観測によって、地熱異常がまず MCE で起こり、DKT に伝播することを立証できるかもしれない。

(3) MCL の北岸に近いあたりに、1986 年と 2008 年の間で、何らかの堆積物が出現した。3次元の磁気異常解析によって、その起源を明らかにしたい。

(4) 電磁気観測—とりわけ連続観測を導入したことによって、湖面沸騰などの表面現象が出現

する前に、何らかの異常を検知できることが期待される。既存の地震、地殻変動、地球化学観測と組み合わせることで、より物理的根拠に基づいた火山警報が発令できるであろう。

謝 辞

本研究は東京地学協会平成 19 年度シニア研究助成 (課題名: フィリピン・タール火山の火口湖磁気測量による噴火機構の解明, 研究代表者: 上田誠也) および EMSEV と東海大学の研究支援によった。記して感謝の意を表します。

文 献

- Del Negro, C., Currenti G., Napoli R. and Vicari A. (2004): Volcanomagnetic changes accompanying the onset of the 2002–2003 eruption of Mt. Etna (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, **229**, 1–2, 1–14, doi: 10.1016/j.epsl.2004.10.033.
- Harada, M., Sabit, J.P., Sasai, Y., Alanis, P.K.B., Cordon Jr., J.M., Corpuz, E.G., Zlotnicki, J., Nagao, T. and Punongbayan, J.B. (2005): Magnetic and electric field monitoring of Taal volcano Part I: Magnetic measurements. *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B*, **81**, 261–266.
- Hashimoto, T. and Tanaka, Y. (1995): Self-Potential observations on Unzen volcano, Shimabara peninsula, Kyushu island, Japan. *Geophysical Research Letters*, **22**, 191–194.
- Hurst, A. W., Rickerby, P.C., Scott, B.J. and Hashimoto, T. (2004): Magnetic field changes on White Island, New Zealand, and the value of magnetic changes for eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **136**, 53–70.
- Michel, S. and Zlotnicki, J. (1998): Self-Potential and magnetic surveying of La Fournaise volcano (Reunion Island): Correlations with faulting, fluid circulation and eruption. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 17845–17857.
- Moor, J.G., Nakamura, K. and Alcaraz, A. (1966): The 1965 eruption of Taal volcano. *Science*, **151**, 955–960.
- Punongbayan, R.S. and Tilling, R.I. (1989): Recent case histories, in Volcanic Hazards. in *Short Course in Geology* edited by Tilling, R.I., **1**, 81–101, AGU, Washington D.C.
- Ramos, E.G. (1986): *Bathymetry Map of Taal Main Crater Lake*. unpublished PHIVOLCS internal map.
- Rikitake, T. (1951): The distribution of magnetic dip in Ooshima (Oo-sima) island and its change that accompanied the eruption of volcano Mihara, 1950. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **29**, 161–181.
- Sasai, Y., Shimomura, T., Hamano, Y., Utada, H., Yoshino, T., Koyama, S., Ishikawa, Y., Nakagawa, I., Yokoyama, Y., Ohno, M., Watanabe, H., Yukutake, T., Tanaka, Y., Yamamoto, T., Nakaya, K., Tsunomura, S., Muromatsu, F. and Murakami, R. (1990): Volcanomagnetic effect observed during the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **42**, 291–317.
- Sasai, Y., Uyeshima, M., Zlotnicki, J., Utada, H., Kagi-yama, T., Hashimoto, T. and Takahashi, Y. (2002): Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, central Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 769–777.
- Tanaka, Y. (1993): Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989–1990 activity of Aso volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **56**, 319–338.
- Utada, H., Neki, M. and Kagi-yama, T. (2000): A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals. *Earth, Planets and Space*, **52**, 92–103.
- Yokoyama, I. (1969): Anomalous changes in geomagnetic field on Oosima volcano related with its activities in the decade of 1950. *Journal of Physics of the Earth*, **17**, 69–76.
- Yukutake, T., Yoshino, T., Utada, H., Watanabe, H., Hamano, Y., Sasai, Y. and Shimomura, T. (1987): Changes in the electrical resistivity of the central cone, Miharayama, of Izu-Oshima Volcano, associated with its eruption in November, 1986. *Proceedings of Japan Academy*, **63-B**, 55–58.
- Zlotnicki, J. and Nishida, Y. (2003): Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes. *Surveys in Geophysics*, **24**, 291–338.
- Zlotnicki, J., Sasai, Y., Yvetot, P., Nishida, Y., Uyeshima, M., Fauquet, F., Utada, H., Takahashi, Y. and Donnadieu, G. (2003): Resistivity and self-potential changes associated with volcanic activity: The July 8, 2000 Miyake-jima eruption (Japan). *Earth and Planetary Science Letters*, **205**, 139–154.
- Zlotnicki, J., Sasai, Y., Toutain, J.P., Villacorte, E.U., Bernard, A., Sabit, J.P., Cordon Jr, J.M., Corpuz, E.G., Harada, M., Punongbayan, J.T., Hase, H. and Nagao, T. (2008): Combined electromagnetic, geochemical and thermal surveys of Taal volcano (Philippines) during the period 2005–2006. *Bulletin of Volcanology*, doi: 10.1007/s00445-008-0205-2.