

火山地磁気効果と水蒸気噴火

橋本武志

(北海道大学大学院理学研究院)

Volcano-magnetic effects and phreatic eruptions

Takeshi Hashimoto

(Faculty of Science, Hokkaido University)

Abstract. This paper reviews the volcano-magnetic effects that were observed at several Japanese volcanoes in recent years, with special attention to phreatic eruptions in order to extract common features among such volcanoes that are likely to have shallow hydrothermal systems within. One of the outstanding features which is common to these examples is that remarkable magnetic changes that are localized around active craters and sustain very long time period in one-way. It suggests that the volcano-magnetic effects are not such phenomena that take place only at the time of eruptive events but may also gradually progress during inter-eruptive periods. Integrating these specific examples together, there may be a long-term cycle in which a demagnetizing phase is seen during pre-eruptive preparation periods, followed by a re-magnetizing phase after an eruptive event. Secondly, some of these examples here show an intermittent nature in terms of their rate of change, in some cases with coincidence with episodic acceleration in ground inflation. It implicates intermittent injections of hot gas from depth into a hydrothermal system with subsequent demagnetization and pressurization at a shallow depth. Further field observations combined with other records such as electrical resistivity, gas component, thermal discharge rate including just before eruptive events are necessary to better understand the detailed mechanism of such system and to forecast the timing of phreatic eruptions.

1. はじめに

プロトン磁力計の普及により、信頼性の高い地磁気観測が火山で行われるようになって久しい。近年は、全磁力観測が気象庁の火山現業にも取り入れられるようになり、全国の活火山で長期間にわたる観測データが蓄積されつつある。近年の観測事例をレビューして、水蒸気噴火を繰り返してきた熱水系卓越型火山における火山地磁気効果の特徴について考察する。

2. 水蒸気噴火（水蒸気爆発）の特徴

水蒸気噴火は、山体内に熱水系が卓越する火山でしばしば発生する噴火の形態で、山体浅部に蓄積された熱水ないしは水蒸気が何らかの原因で急激に噴出する現象と考えられている。狭義には、火山灰等の噴出物にマグマ由来の粒子を伴わないもののみを指している。一般に、このような爆発が起こるためには、地下浅部に相当量の水が存在し、それを加熱する熱源がその下位にあり、かつ、圧力を閉じ込める何らかのシール構造が必要であると考えられる。本稿では、このような機構が想定される爆発現象という観点から、噴出物として水蒸気と類質岩由来の粒子を主体としながら、マグマ由来の物質が少量含まれる事例も、水蒸気噴火と同類のものとして取り扱う。

水蒸気噴火は、噴火の規模としては小さいものが多く、本格的なマグマ噴火に前駆して、繰り返し起こることがある。また、マグマ噴火の終息期にも発生することがある。このことから、火道浅部やその周辺に、天水もしくはマグマ起源の水がある程度まとまって存在しうることが、水蒸気噴火の発生環境として好ましいことが想像される。このように地表付近に存在する水が、下位のマグマや高温ガスによって加熱されるという状況を想定すると、温度変化や地盤変動源の位置が地表に近いこと、観測の変化は局所的であることが予想される。変動源が浅いことは、水蒸気噴火の発生環境が、一般に地下浅部に感度・分解能の高い電磁気観測にとって有利であることを意味する。次章では、近年のいくつかの全磁力観測の事例を紹介してその特徴を抽出する。

3. 近年の観測事例

口永良部島では、記録に残されている中では最も古い 1841 年の噴火以来、水蒸気爆発が繰り返し発生している（井口, 2007）。1980 年の噴火以後、1996 年と 1999 年に山頂火口直下で群発地震活動が起こり、火山活動の活発化が懸念されていたが、2014 年 8 月に 34 年ぶりの噴火が発生した。Kanda *et al.* (2010) は、2000 年に全磁力の連続観測を開始し、2007 年までの観測結果を報告している。この期間中に、最大で 60 nT に及ぶ明瞭な消磁傾向が捉えられた。磁場変化の特徴として、数年おきに変化がエピソード的に加速する時期が見られること（間欠性）、基本的に消磁センスのみであること（不可逆性）、火口近傍に局在していること（局所性）があげられる。また、GPS 連続観測に基づく地盤変動（齋藤・井口, 2007）との時間的対応が明瞭で、火口近傍が局所的に膨張する時期に消磁傾向が加速している。

こうした間欠性・不可逆性・局所性は、2007 年以降の十勝岳の 62-II 火口周辺で観測されている地盤変動（GPS 観測による基線長変化：札幌管区気象台, 2014）にも見

られる。十勝岳では、1926年、1962年、1988–89年にマグマ水蒸気噴火～マグマ噴火を経験しているが、それらの噴火間には多数の水蒸気噴火を繰り返している（気象庁, 2013）。また、比較的標高の高い地点にいくつも温泉が湧出していることから、山体内には熱水系が発達しているものと想像される。十勝岳では、北海道大学が気象庁及び道総研地質研と共同で2008年から反復磁気測量を開始し、2009年までに62-II火口を中心とした局所的で大振幅の消磁パターンを検出している（橋本・他, 2009）。その後も年1回の反復測量が続けられ、消磁傾向が不可逆的に継続していることが確認されている。なお、2014年秋からはプロトン磁力計による連続観測が始まり、消磁傾向が加速する時期とやや停滞する時期があるらしいことが明らかになりつつある。

九重山では、500±200年程度の間隔で水蒸気噴火を繰り返していることが最新の地質学的研究から明らかになっている。また、堆積物として保存されない程度の爆発現象はさらに高頻度で発生している可能性も指摘されている（伊藤・他, 2014）。最も新しい噴火は1995年に発生している。初期の火山灰には少量のマグマ起源のガラスが含まれていたが、基本的な特徴は水蒸気噴火の様相を示していた。この噴火の直後から、京都大学がプロトン磁力計による連続観測を開始し、明瞭な帯磁傾向を捉えている。2002年までの観測結果について報告した橋本・他（2002）は、この全磁力変化について、噴火前に蓄積されていた熱が噴気活動によって放出され、地下浅部が冷却しているためであると解釈した。この帯磁傾向は2002年までの7年間で最大約100 nTという大きな変化であり、ほぼ一定の傾きで進行していたが、地温が永久に冷却を続けることは考えられないことから、橋本・他（2002）は、この帯磁はやがて停止して、次の水蒸気爆発に向けての蓄熱過程に移行すると予想した。その後も京都大学と気象庁によって反復測量が続けられていたが、2014年になってこの帯磁傾向がついに反転したことが報告されている（福岡管区気象台, 2014）。

草津白根山では、最も古い噴火記録である1805年以後、頻繁に水蒸気噴火を繰り返している（気象庁, 2013）。この火山では、1976年以後、気象庁地磁気観測所によって全磁力の繰り返し測量が継続されてきた（Takahashi and Fujii, 2014）。ここで注目したいのは、長期間にわたる変化である。大略の傾向で見ると、湯釜火口付近を中心として、1988年頃から1995年頃にかけて消磁センスの変化が見られ、その後2012年まで帯磁傾向に転じている。このことは、数10年に及ぶ噴火間隔の時間スケールに対応するような消帯磁のサイクルがあることを示唆している。ただし、口永良部島で特徴的に見られたような数年周期の間欠的な加速は認められないようである。

阿蘇山は、中岳火口に湯だまりと呼ばれる活動的の火口湖を擁している。湯だまりの湖水は、火口底から供給される火山ガスと熱水を主要な供給源としており、湖水の一部は火口直下の熱水系に再循環していると考えられている（Terada *et al.*, 2012）。この

ため、火道系の最上部に液相の水が豊富に存在することはほぼ確実である。本格的なマグマ噴火期には湯だまりが消失するが、その前後で水蒸気爆発ないしは小規模なマグマ水蒸気爆発を繰り返すことが、近年の噴火の特徴である。阿蘇山では、1989年噴火の頃から中岳火口周辺で全磁力観測が継続されており、1995年頃までは火山活動に関連した明瞭な消磁・帯磁を繰り返していた (Tanaka, 1993; 橋本・他, 2001)。その後も、京都大学や気象庁によって連続観測・反復測量が続けられている。京都大学の観測によれば、1990年代末期以降は、ほぼ一方的な消磁傾向が続くようになり、かつ、一部の観測点では数年おきに間欠的な消磁の加速が起こるといふ、口永良部島に類似した変化が認められた。この期間における火山活動は、湯だまりの湖水量に消長が見られたものの、全体としては比較的静穏であったが、2014年後半から湖水は完全に消失し、21年ぶりのマグマ噴火に移行している。

吾妻山もまた、数10年間隔で水蒸気噴火を繰り返している火山であり、最新の噴火である1977年から既に37年が経過している。2009年以降に噴気活動が活発化しており、数ヶ月～数年おきに群発地震活動も発生している。気象庁は、2003年から大穴火口周辺で年に1～2回の全磁力観測を反復しており、2011年までの8年間で最大約30 nTに及ぶ明瞭で継続的な消磁傾向を捉えている (気象庁地磁気観測所・仙台管区気象台, 2013)。また、その後も、2014年の時点まで同様の消磁傾向が継続しているようである (市來雅啓, 私信)。反復測量のため、変化に停滞期・加速期があるかどうかについては定かではないが、10年スケールで消磁が継続するという点は、口永良部、阿蘇、草津白根等と共通する特徴である。

4. 考察とまとめ

前章にまとめたいくつかの熱水系卓越型火山における全磁力変化の特徴から、いくつかの共通点を見いだすことができる。まず、いずれのケースでも積算の変化量は数10 nT～100 nTの大振幅に及んでおり、かつ、変化は活動火口の周辺に局在している。このことから、変化の源は深さ数100 m程度の火道系浅部に位置しているものと推測される。次に、変化は数年以上の長期間に及び、一方的な変化傾向が継続することである。このことは、火山地磁気効果が、噴火時や噴火の前後にのみ起こる現象ではなく、噴火と噴火の間にも常時進行しているものであることを意味している。十勝岳・口永良部島・吾妻山・草津白根では、火山活動が高まっていく時期に長期間消磁が進行し、九重山では噴火直後から20年にわたって帯磁傾向が続いた後に傾向が反転し始めていることを合わせて考えると、水蒸気噴火に先行する準備過程における消磁、噴火後の終息過程における帯磁、さらに次の噴火に向けての消磁への遷移、というサイクルが浮かび上がってくる。さらに、いくつかの火山 (口永良部島・十勝岳・阿蘇

山)では、消磁傾向に間欠性(停滞期と加速期)が認められる。口永良部島では、消磁の加速期と地盤変動の膨張期が対応している。このことは、浅部熱水系への間欠的な高温ガスの注入とそれに伴う増圧を反映している可能性がある。十勝岳でも同様の間欠性が地盤変動に表れていることが明らかになっており、今後全磁力の連続観測を通じて対応関係が議論できるであろう。ただし、熱水系の振る舞いに見られる周期性は、必ずしも間欠的な熱の注入を必要とせず、定常的な加熱条件の下でも発現するという研究(例えば、Vandemeulebrouck *et al.*, 2005)もあるので、メカニズムを理解するには、様々な観測量からのさらなる検討が必要と思われる。なお、長期間にわたる消磁の原因については、温度上昇による熱消磁の可能性とともに、火山ガスや熱水による火道周辺の化学消磁の可能性を考慮しておく必要がある。ただ、九重山や草津白根山のように、帯磁傾向が観測された事例では、熱磁気効果が最も有力と考えられる。

以上のことは、あくまで全磁力変化に軸足を置いた立場から、一般的な水蒸気噴火の描像に照らして考えられる事柄を述べたものに過ぎない。「浅部熱水系」あるいは「熱水溜まり」が実態としてどのような状態にあるのかや、圧力を閉じ込める「不透水シール」の実態とその形成過程については、まだよく理解されているわけではない。しかしながら、既にこうした問題意識に基づいていくつかの研究が行われている。例えば、火口域地下浅部の高解像度な比抵抗探査(Nurhasan *et al.*, 2006; Kanda *et al.*, 2008; Kanda *et al.*, 2010; Seki *et al.*, 2015)や、火道中の高温ガスと岩石の相互作用を模擬した数値計算(Christensen *et al.*, 2014)などである。今後は、それらの仮説を検証する立場からの観測・実験や、類似する火山における比較研究を通じて、さらに理解が深まるものと思われる。一方、水蒸気噴火の発生予測という見地から考えると、先行準備過程における明瞭な消磁があることだけでは、発生時期の予測は難しい。水蒸気噴火に至る最終段階で、全磁力・比抵抗・ガス成分・噴気放出率などの観測量に何からの変化が起こるのか否かについて、観測事例を積み重ねることが現状では重要だと考える。また、本稿で取り扱った事例が、水蒸気噴火に特徴付けられる現象であると結論するには、マグマ噴火における観測事例との比較を行う必要があり、これは今後の検討課題である。

引用文献

Christensen, B.W., Reyes, A.G., Young, R., Moebis, A., Sherburn, S., Cole-Baker, J and Britten, K. (2010) Cyclic processes and factors leading to phreatic eruption events: Insights from the 25 September 2007 eruption through Ruapehu Crater Lake, New Zealand. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **191**, 15-32.

- 橋本武志・田中良和・宇津木充 (2001) 阿蘇火山における地磁気変化について (1991～2000年). 京都大学防災研究所年報, **44**, B-1, 333-343.
- 橋本武志・宇津木充・坂中伸也・田中良和 (2002) 九重硫黄山の熱放出過程と地磁気変化. 京都大学防災研究所年報, **45**, 617-625.
- 福岡管区气象台 (2014) 九重山の火山活動解説資料 (平成26年10月), 1-8.
- 井口正人 (2007) 2006年口永良部島火山活動の概要. 京都大学防災研究所平成18年度防災研究推進特別事業「口永良部島の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究」報告書, 9-16.
- 伊藤順一・星住英夫・川辺禎久 (2014) 最近5000年間の九重火山における水蒸気噴火の発生履歴. 火山, **59**, 241-254.
- Kanda, W., Tanaka, Y., Utsugi, M., Takakura, S., Hashimoto, T., Inoue, H. (2008) A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **178**, 32-45, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.022.
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T., Shigeno, N. (2010) A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **189**, 158-171, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.11.002.
- 気象庁 (2013) 日本活火山総覧 (第4版).
- 気象庁地磁気観測所・仙台管区气象台 (2013) 吾妻山における地磁気全磁力変化. 火山噴火予知連絡会会報, **111**, 4-7.
- 気象庁 (2014) 火山活動解説資料 (九重山・平成26年10月).
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Bulent Tank, S., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T. and Makino, M. (2006) Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system. *Earth Planets Space*, **58**, 1053-1059.
- 斎藤英二・井口正人 (2007) 口永良部島火山におけるGPS連続観測結果. 京都大学防災研究所平成18年度防災研究推進特別事業「口永良部島の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究」報告書, 29-32.
- 札幌管区气象台 (2014) 十勝岳の火山活動解説資料 (平成26年12月), 1-10.
- Seki, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Tanbo, T., Kobayashi, T., Hino, Y. and Hase, H. (2015) Imaging the hydrothermal system beneath the Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan: implications for structures controlling repeated phreatic eruptions from an audio-frequency magnetotelluric survey. *Earth, Planets, Space*, **67**, DOI 10.1186/s40623-014-0169-8.

- Takahashi, K. and Fujii, I. (2014) Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **285**, 180-194.
- Tanaka, Y. (1993) Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989–1990 activity of Aso volcano. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **56**, 319-338.
- Terada, A., Hashimoto, T. and Kagiya, T. (2012) A water flow model of the active crater lake at Aso volcano, Japan: fluctuations of magmatic gas and groundwater fluxes from the underlying hydrothermal system. *Bull. Volcanol.*, **74**, 641-655, DOI 10.1007/s00445-011-0550-4.
- Vandemeulebrouck, J., Stemmelen, D., Hurst, T. and Grangeon, J. (2005) Analogue modeling of instabilities in crater lake hydrothermal systems. *J. Geophys. Res.*, **110**, B02212, doi:10.1029/2003JB002794.