

水蒸気噴火に先行する熱活動変化の早期把握を目的とした地磁気観測

—背景, 観測成果及び今後の展望—

Geomagnetic Observation for Early Detection of the Precursory Geothermal Activity of Phreatic Eruptions

—Background, Observation Results and Perspectives for the Future—

気象庁地震火山部*, 気象庁地磁気観測所

Seismological and Volcanological Department and Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received September 30, 2020; Accepted September 1, 2021)

ABSTRACT: The preparatory processes of phreatic eruptions are not well understood and their precursory phenomena generally have a small amplitude, making prediction of the timing of these eruptions difficult. Although this is quite a tough problem, it must be resolved to mitigate disasters caused by phreatic eruptions. In order to analyze geothermal conditions and to develop methods to ascertain the precursory geothermal activity of phreatic eruptions, the Japan Meteorological Agency (JMA) has installed geomagnetic observation systems in/around the active craters of six volcanoes (the Tarumaesan, Azumayama, Adatarayama, Ontakesan, Kujusan, and Ioyama volcanoes (Ebino plateau)) since 2015. To date, fine thermomagnetic variations have been observed at the Tarumaesan, Azumayama, Kujusan, and Ioyama volcanoes. In addition, a point worth noting is that the thermomagnetic variation associated with eruptive activity in 2018 was recorded at the Ioyama volcano. In order to effectively use geomagnetic measurements to improve the volcanic forecasts and warnings issued by the JMA, the following two issues to be addressed. One is to elucidate the correlation among sources of thermomagnetic variations, hydrothermal systems, and other geophysical and geochemical phenomena. Such attempts will facilitate a better understanding of the mechanism of phreatic eruptions. The other issue is to obtain consistent geomagnetic measurements by reducing the incidence of device malfunctions, even though the observation systems are affected by severe weather conditions and corrosive volcanic gases

1 はじめに

火山活動の様々な過程を反映した地磁気変化が, 地表面で観測されることがある (火山地磁気効果, Johnston, 1997). 火山地磁気効果による地磁気変化を観測することにより, 火山活動の監視や噴火予測に利用しようという試みがこれまでにもいくつかの火山でなされてきた (例えば, Del Negro et al., 2002; Sasai, et al., 2002).

火山地磁気効果の一つである熱磁気効果は, 温度変化に伴い岩石の磁化強度が変化する現象である. マグ

マやマグマから分離した火山ガス等の高温の火山性流体が, 上昇して火山体浅部(主に地表面から深さ 1km 程度の範囲)を構成する岩石を加熱することにより, 岩石の磁化強度が減少する(熱消磁). 橋本・他(2019)は, 熱消磁が原因と考えられる地磁気変化の事例を収集し, 火山活動との関連性を議論している. 一方, 火山活動の静穏化等により火山体浅部の温度低下が進行する過程で, 岩石は再び地球磁場と同じ方向を持つ磁化を獲得する(再帯磁). 例えば, 草津白根山では, 火山活動が静穏であった 1996 年から 2012 年にか

*高橋幸祐, 地震火山部火山課, Volcanology Division, Seismology and Volcanology Department

現所属: 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department

て、火口湖湯釜近傍の地下で進行していた冷却によって岩石が再帯磁し、それを反映した全磁力（地磁気の大きさ）の変動が継続して観測された（Takahashi and Fujii, 2014）.

熱磁気効果と同様に火山地磁気効果の一つである圧磁気効果は、マグマ貫入等による火山体内部の応力場変動に伴い、岩石磁化が変化することによって引き起こされる（例えば、Sasai, 2001）. これまでに、三宅島（Ueda et al., 2006）やイタリアのエトナ火山（Napoli et al., 2008）などで圧磁気効果による地磁気変化が観測されている.

このように地磁気観測によって、火山体内部の温度変化や応力場変化といった火山活動の変化を検知できる可能性がある. 気象庁は火山地磁気効果のうち、特に熱磁気効果に注目して、水蒸気噴火に先行する熱活動変化を早期に把握する手法の開発を通じて噴火災害の軽減に貢献するため、2015 年以降、樽前山、吾妻山、安達太良山、御嶽山、九重山及び霧島山（えびの高原（硫黄山））（以下、「6 火山」と表記する.）に地磁気観測装置を整備した（Fig. 1）.

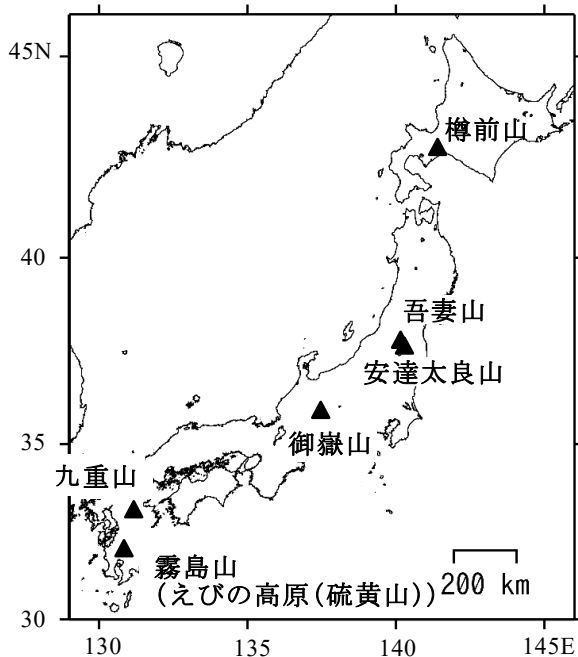


Fig. 1 Map showing the six volcanoes installed geomagnetic observation systems after 2015 by Japan Meteorological Agency (triangles).

本報では、はじめに地磁気観測装置を整備した背景及び 6 火山を選定した理由について述べる. 次に、整

備した観測装置の構成及び機能について紹介する. そしてこれまでに得られた観測成果について紹介するとともに、観測成果を活用して噴火災害の軽減に貢献するために解決すべき課題を提起する. 最後に、これらの課題の解決に向けた今後の展望について論じる.

2 地磁気観測装置を整備した背景

2.1 2014 年に噴火した御嶽山の監視強化

2014 年 9 月 27 日に長野県と岐阜県の県境に位置する御嶽山で発生した水蒸気噴火は、死者及び行方不明者 63 名、負傷者 69 名の人的被害をもたらした（消防庁応急対策室, 2015）. この噴火は山頂（剣ヶ峰）の南西側に新たに形成された火口列で発生した（気象庁地震火山部火山監視・情報センター, 2014）. この噴火を受けて、火山噴火予知連絡会火山観測体制等に関する検討会（2014）は、噴火後の火山活動の推移を把握するため、観測体制強化の必要性などを緊急提言にとりまとめて公表した.

水蒸気噴火の発生後、マグマ水蒸気噴火やマグマ噴火に移行した事例があることから（例えば、及川・他, 2018）、御嶽山でもマグマが直接関与する噴火様式への移行の可能性が考えられた. そのような場合、マグマの上昇による火山体浅部のさらなる高温化が考えられ、岩石の熱消磁に伴う顕著な地磁気変動が噴火に先行して現れる可能性がある. 一方、深部から高温の火山性流体（例えば、マグマ起源の火山ガスや過熱蒸気）の供給が減少して火山活動が収束に向かう場合、火口からの継続的な噴煙活動（放熱）等による浅部の冷却に伴う岩石の再帯磁による地磁気変化を検出することも期待できる. 気象庁は前述の緊急提言に基づき、2014 年噴火後の御嶽山浅部の熱活動の推移の監視体制を強化するため、2015 年末から全磁力連続観測を開始した.

2.2 水蒸気噴火に先行する熱活動変化の早期把握

火山体の地下には、深部に存在すると考えられるマグマの熱を起源とした熱水系が発達している場合がある. 水蒸気噴火は、そのような熱水系のわずかな状態変化によって引き起こされるため、マグマ噴火と比較して一般的に噴火に先行する現象の規模は小さく、このことが噴火の発生予測を困難にしている（Rouwet et al., 2014）.

また、Barberi et al.（1992）によると、世界中の多くの火山では地磁気観測を実施していないため、水蒸気噴火

に先行した地磁気変化の観測事例数は、地震学的及び地球化学的観測から得られた事例数と比較して圧倒的に少ない。近年でも海外で地磁気観測が実施されている火山は稀である(橋本・他, 2019)。

一方、日本国内では全磁力連続観測及び定点での定期的な全磁力繰り返し観測が、気象庁や大学等により多くの活火山で実施されてきた。それらのうちの一つである口永良部島では、2014年8月3日に34年ぶりに噴火が発生した(例えば、鹿児島地方気象台・福岡管区気象台火山監視・情報センター, 2014)。噴火様式はマグマが幾分関与した可能性があるものの、水蒸気噴火であった可能性が高く(防災科学技術研究所, 2014)、その噴火に先行して、山体内部で噴火の準備過程に対応すると考えられる蓄熱の進行が全磁力連続観測により捉えられていたことが明らかになった(Kanda et al., 2010)。

しかし、水蒸気噴火の発生予測に活用できるような噴火に先行する地磁気変化の観測及び解析事例は、必ずしも十分には得られていない。そこで気象庁は、火山噴火予知連絡会火山観測体制等に関する検討会(2014)の緊急提言を踏まえ、火山体浅部の熱活動の変化に対応する地磁気変化の観測事例を蓄積し、水蒸気噴火に先行する熱活動変化を早期に把握する手法の開発による噴火災害の軽減を目指して、2015年から2018年にかけて、過去に水蒸気噴火が繰り返し発生した6火山で全磁力連続観測を順次開始した。

3 地磁気観測装置の整備

気象庁は2章で述べた通り、2015年以降、6火山において今後の噴火発生が想定される火口及びその周辺に地磁気観測装置(以下、「観測点」と表記する。)を整備した(Fig. 2)。

観測点で得られる全磁力連続観測データには、火山活動を起源とする地磁気変化のほかに、電離層及び磁気圏といった地球外部(主に太陽活動)に起源を持つ地磁気変化や地球内部(外核)が起源と考えられる地磁気永年変化が含まれる。これらの火山活動起源以外の地磁気変化は、その起源が観測点を設置した火山体から十分遠方にあるため、火山体周辺ではほぼ一樣と考えられる。したがって、火山活動の影響を受けない活動火口から十分離れた山麓等で地磁気データ(参照値)を取得し、火口周辺の観測点の地磁気データと同時刻の参照値との差を求めることにより、火山活動起源の地磁気変化を検出できる。このような考え方に基

づき、気象庁は6火山それぞれにおいて、観測点から数km離れた地点に参照値を取得するための地磁気観測装置(以下、「参照点」と表記する。)を整備した(Fig. 2)。

以下に、観測点を整備する対象として6火山が選定された理由について述べる。

3.1 樽前山

樽前山では、1909年噴火で山頂部に溶岩ドームが形成されたが、以降の噴火様式はすべて水蒸気噴火である(気象庁, 2013)。札幌管区気象台は、山頂部で1998年より全磁力繰り返し観測を開始し、2011年からは同気象台及び北海道大学が共同で実施している。これまでに溶岩ドーム直下の温度上昇もしくは低下の進行を反映した全磁力変化が観測されており(気象研究所地震火山研究部, 2008; 札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2014)、地磁気観測によって熱活動の変化を検知した事例のある火山である。

さらに山頂部では、過去にマグネトテルリク法探査(Yamaya et al., 2009)及び自然電位測定(宮村・他, 1995)が実施されており、得られた浅部の3次元比抵抗構造や自然電位分布から、水蒸気噴火の発生に重要な役割を果たすと考えられる熱水系の理解も進んでいる火山である。

これらの理由から、樽前山は手法開発(2.2節)を進める上で有利な火山であると考えられる。気象庁は、2015年11月に山頂火口原内の溶岩ドーム周辺に5点及び溶岩ドームから北東に約1.5km離れた位置に観測点を、溶岩ドームから北東に約8km離れた位置に参照点をそれぞれ整備した(Fig. 2a)。

3.2 吾妻山

吾妻山は有史以降、主に大穴火口周辺で噴火が発生しており、そのほとんどが水蒸気噴火であったと考えられる(気象庁, 2013)。仙台管区気象台は、大穴火口地下の熱活動の変化を検知するため2003年以降、年間1回もしくは2回の頻度で全磁力繰り返し観測を実施しており、大穴火口地下の温度上昇による熱消磁現象の進行に伴う全磁力変化が観測された(山崎・他, 2010)。また、2008年11月以降、大穴火口での噴気活動に活発化の傾向が認められ、2014年12月には継続時間約35分の火山性微動が観測されるなど、火山活動の高まりが見られた(仙台管区気象台火山監視・情

報センター, 2015).

全磁力繰り返し観測で大穴火口地下の高温化を検知した実績があること及び近年, 火山活動の活発化が見られることを理由に, 気象庁は 2015 年 11 月に大穴火口周辺の 6 点に観測点を, 大穴火口から北東に約 6km 離れた位置に参照点をそれぞれ整備した (Fig. 2b).

3.3 安達太良山

有史以降の安達太良山の噴火活動として, 1899 年から 1900 年にかけて沼ノ平火口で発生した水蒸気噴火がある (気象庁, 2013). その後, 1996 年 6 月に沼ノ平火口内で泥水噴出が確認されるなど一時的な活動の活発化が認められたものの, 噴火の発生はなく火山活動は概ね静穏に経過している (気象庁, 2013; 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019a).

1997 年から 2003 年にかけて, 全磁力繰り返し観測が概ね年間 2 回の頻度で沼ノ平火口内及び火口縁上で実施されたが, 火口地下の熱活動の上昇及び低下を反映した明瞭な全磁力変化が観測された (山本・他, 2008).

このような長期にわたって静穏な火山への地磁気観測装置の整備は, 活動的な火山への整備と比較して手法開発 (2.2 節) を進める上で不利にも見える。しかし, 橋本・他 (2018) が指摘するように, 静穏期においても各種観測データには火山活動に関連する変動が含まれ, それが火山活動のモデル化及び活動の監視評価に役立つ情報を含む可能性がある。地磁気観測では, 静穏期には冷却による再帯磁に伴う地磁気変化が捉えられる可能性が考えられる。気象庁は, 静穏期における地磁気観測データの蓄積は火山活動のさらなる理解に寄与するとの理由から, 2018 年 6 月に安達太良山の沼ノ平火口内に 3 点及び火口縁上の南側に 1 点の観測点を, 沼ノ平火口から東に約 8km 離れた位置に参照点をそれぞれ整備した (Fig. 2c).

3.4 御嶽山

2.1 節で 2014 年 9 月 27 日に御嶽山山頂部で発生した水蒸気噴火について触れたが, この噴火の他にも, 1979 年, 1991 年及び 2007 年に剣ヶ峰南側で発生した水蒸気噴火が記録に残っている (気象庁, 2013). 気象庁は, 2014 年の噴火発生以降の熱活動の推移を監視強化するため, 御嶽山山頂部にほぼ南北の列をなすよう 6 点に観測点を設置した。Fig. 2d に観測点及び参照点

の位置を 2014 年噴火で形成された火口列 (気象庁地震火山部火山監視・情報センター, 2014) とともに示す。山頂部北側の 3 観測点 (サイノ河原北, サイノ河原南及び二ノ池東 2) 及び参照点は 2015 年 11 から 12 月にかけて, 山頂部南側の 3 観測点 (一ノ池南, 八丁ダルミ 2 及び奥の院下) は 2016 年 9 月にそれぞれ整備した。

3.5 九重山

九重山では, 200 年以上の静穏期の後, 1995 年 10 月 11 日に星生山東山腹で水蒸気噴火が発生し, ほぼ東西に並ぶ火口列が形成された (Fig. 2e, 東京大学地震研究所・他, 1995). その後, 同年 12 月及び翌年 1 月にも噴火が発生している (気象庁, 2013). 橋本・他 (2002) は, 1995 年 10 月噴火の直後から星生山北東山腹の噴気地帯 (通称, 硫黄山と呼ばれる.) で全磁力連続観測を開始した。また, 1999 年以降については, 大学及び福岡管区気象台によって全磁力繰り返し観測が硫黄山及びその周辺で実施され (坂中・他, 2001; 橋本・他, 2002; 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, 2020), 硫黄山の地下では 1995 年 10 月噴火の直後から 2013 年頃まで冷却が進行していたが, 2014 年頃から一転して蓄熱を開始したことが明らかになっている。

また, 特筆すべきこととして, 硫黄山を構成する岩石はデイサイトであり (川辺・他, 2015), 表層の変質が進行していることから岩石の残留磁化は小さく, そのため熱磁気効果による全磁力変化の振幅は小さい, もしくは観測されないことが予想された (橋本・他, 2002). しかし, 観測された冷却による再帯磁に伴う全磁力変化は最大で年間約 50 nT と非常に大きい (橋本・他, 2002).

これまでの全磁力観測の結果から, 2014 年以降, 九重山の硫黄山地下で蓄熱が進行しており, これは噴火の準備過程に対応する可能性がある。また, 冷却による再帯磁の進行を反映した顕著な全磁力変化が観測されたことから, 蓄熱の進行による熱消磁に伴う全磁力変化の振幅も大きいことが期待される。以上の理由から気象庁は, 2017 年 3 月に九重山の硫黄山及びその周辺に 6 点の観測点を, 硫黄山の南東約 4km の位置に参照点をそれぞれ整備した (Fig. 2e).

3.6 霧島山 (えびの高原 (硫黄山))

えびの高原に位置する霧島火山群の硫黄山では、1768年に水蒸気噴火が発生しており、20世紀の初頭から1990年代前半にかけて、噴火は発生していないが噴気活動は活発であった(舟崎・他, 2017)。しかし、1990年代後半から噴気活動の低下が認められ、2007年以降、噴気活動が全く見られない状態となった(舟崎・他, 2017)。このように表面活動のみに注目すると、噴気が消失した2007年以降、見かけ上の硫黄山の火山活動は静穏に経過していたことになる。しかし、2014年8月以降、硫黄山付近を発生源とする火山性微動が時折観測されはじめ、2015年12月には硫黄山火口内

で噴気活動が再開する等、火山活動の活発化が認められた(福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2015)。その後、2018年4月19日に硫黄山の南側で、その7日後の26日に硫黄山の西側でごく小規模な噴火が発生した(Fig. 2f, 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2018)。

2014年以降、火山活動の高まりが認められていることを理由として、気象庁は、2016年2月に硫黄山及びその周辺に6点の観測点を、硫黄山の南東約10kmの位置に参照点をそれぞれ整備した(Fig. 2f)。

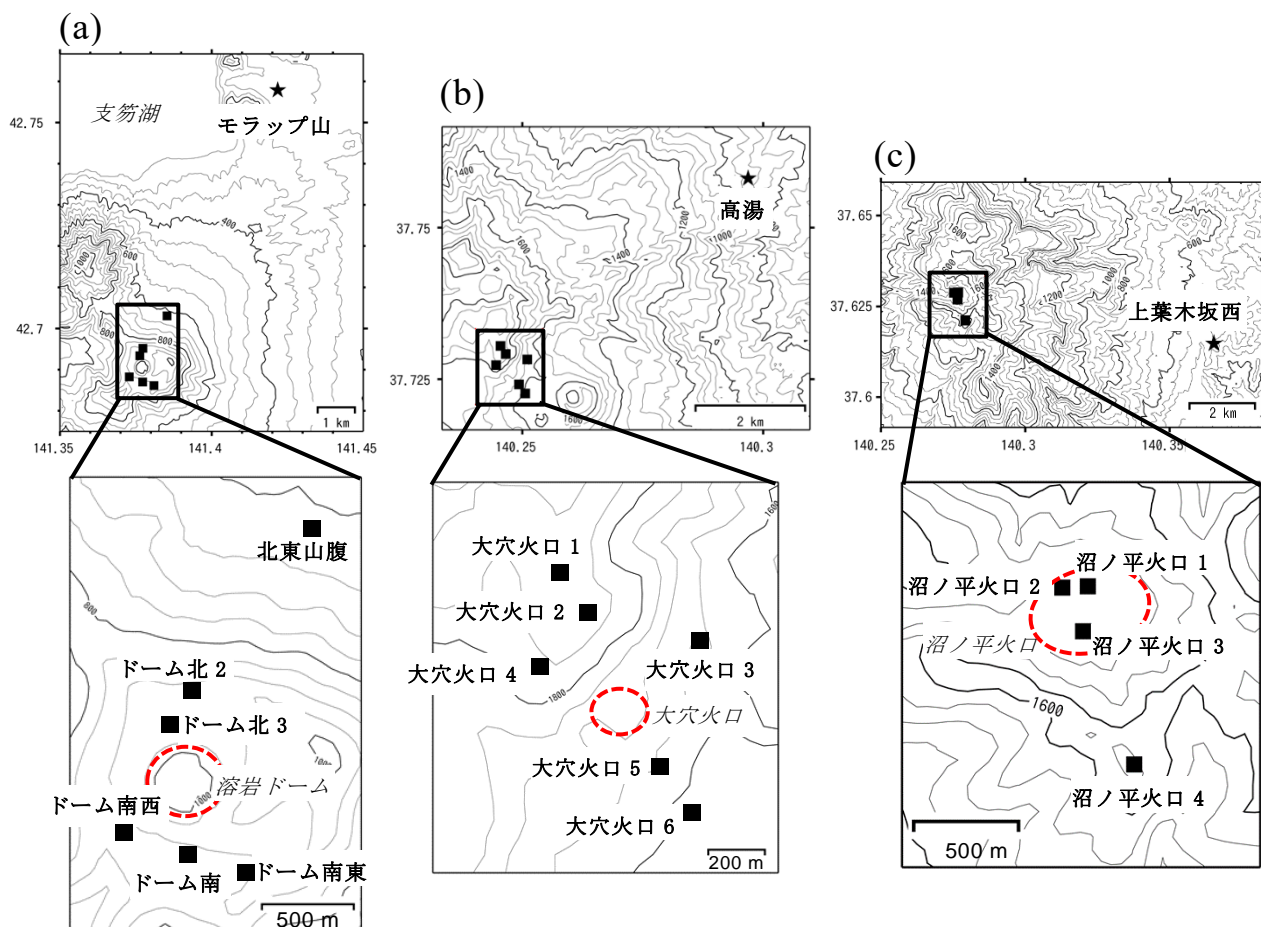


Fig. 2 Locations of geomagnetic observation (squares) and reference (stars) sites. (a) The Tarumaesan volcano, (b) the Azumayama volcano, (c) the Adatarayama volcano, (d) the Ontakesan volcano, (e) the Kujusan volcano, and (f) the Ioyama volcano (Ebino plateau). Red circles indicate active craters, or the vents formed by the recent eruptive events. The contour interval is 50 meters. Figure created using the Digital Map 50-m Grid (Elevation) published by the Geospatial Information Authority of Japan.

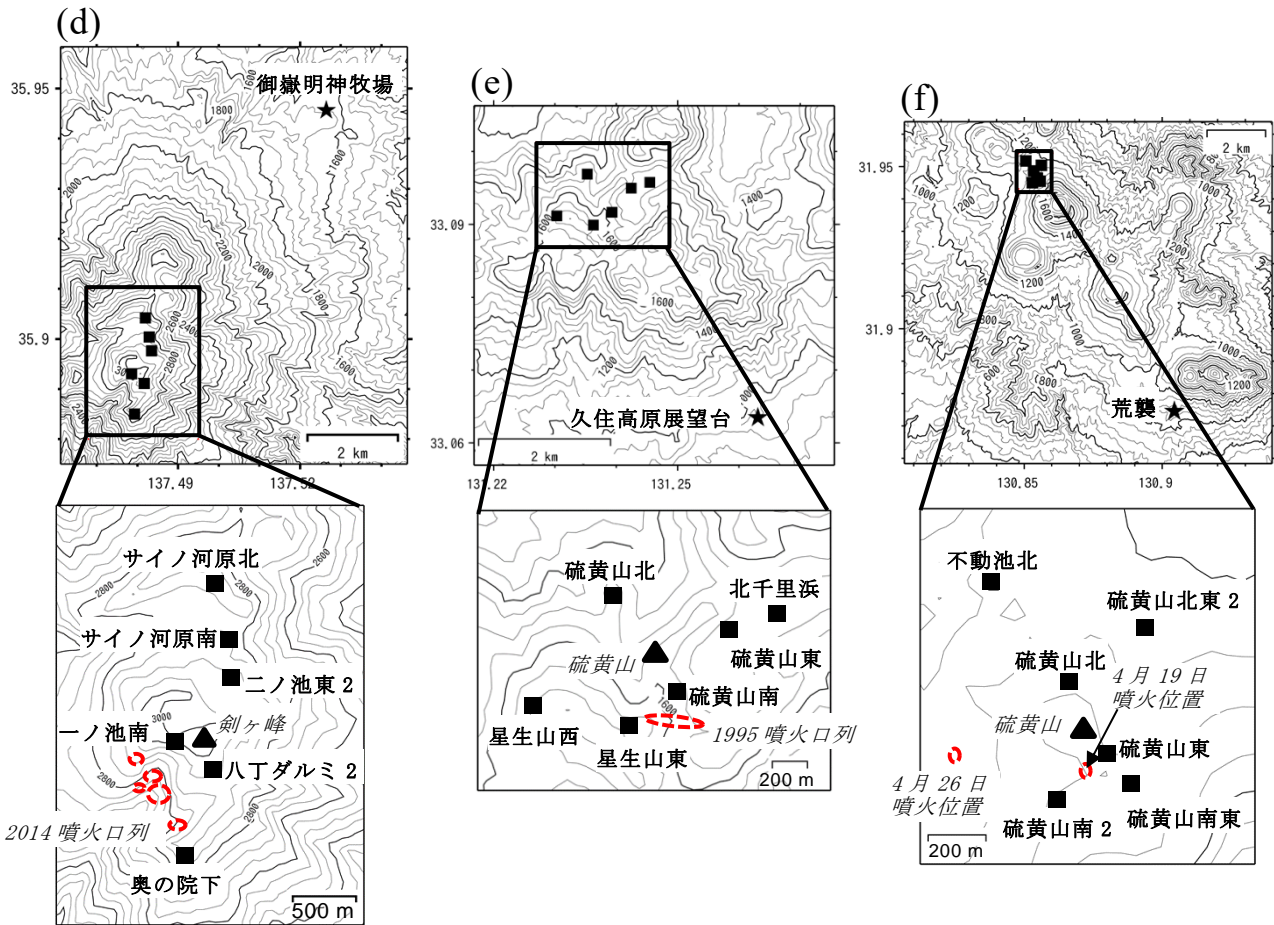


Fig. 2 Continued.

4 地磁気観測装置

4.1 観測点の機器構成及び機能

観測点は全磁力計，データロガー，電源装置及び通信装置から構成される (Fig. 3)。

全磁力計はオーバーハウザー効果を利用して全磁力を計測するカナダの GEM Systems 製 GSM-90 (<http://www.gemsys.ca/scalar-magnetometers/>) を使用している。この全磁力計は、分解能及び観測精度がそれぞれ 0.01 nT 及び 0.2 nT である。計測値のドリフトも無視できる大きさであり (年間 0.05nT 以下)、長期的に高精度の全磁力の計測が可能である。全磁力計は、データロガーから 60 秒間隔で送信される計測トリガ信号を受信したタイミングで全磁力値を計測し、計測値はデータロガーへ送信される (Fig. 3)。全磁力計の感部は全く磁性のないポールに取り付け、地表から 2m の高さになるよう、同じく磁性のない三脚で固定している。例として、安達太良山の沼ノ平火口 3 観測点 (Fi

g. 2c) に設置された全磁力計感部の写真を Photo 1a に示す。全磁力計コンソール部は、太陽電池パネルを取り付けた架台に固定された機器ケース内に収納されている (Photo 1b)。

データロガーは、国内の有限会社テラテクニカによって製作され、時刻同期のための GPS モジュール、CPU (制御部) 及び Linux ボードから構成され、架台に設置された機器ケース内 (Photo 1b) に収納されている。CPU は常時稼働しており、全磁力計から受信した計測値は、CPU 内部の不揮発性メモリに記憶される。Linux ボードは省電力のため 1 日 3 回、設定された 10 分間のみ CPU からの給電で稼働する。Linux ボード起動時に、CPU 内部のメモリに記憶されたデータは、Linux ボード上のデータファイルに書き込まれる。

参照点を含む全ての地磁気観測装置は、商用電力が利用できない位置にある。そのため電源装置は、バッテリーとそれを充電するための太陽電池パネル (Photo

1b) 及び充放電コントローラから構成される (Fig. 3). 冬季には太陽電池パネルへの着氷や積雪によるパネルの埋没により、バッテリー充電が不能になる恐れがある。そのため、無日照でもバッテリーによる電力供給で 100 日間継続して装置が稼働できる仕様としている。

通信装置は、株式会社 NTT ドコモが提供する衛星携帯電話サービスであるワイドスター II もしくは携帯電話サービス FOMA を利用して、データロガーに保

存されたデータファイルを気象庁へ伝送する。通信装置は、データロガーの Linux ボードから給電されて起動するため 1 日 3 回、設定された 10 分間のみ稼働する。このタイミングで前日に観測したデータのファイルは、観測点から気象庁に設置した地磁気データ集積装置まで伝送される (Fig. 3)。

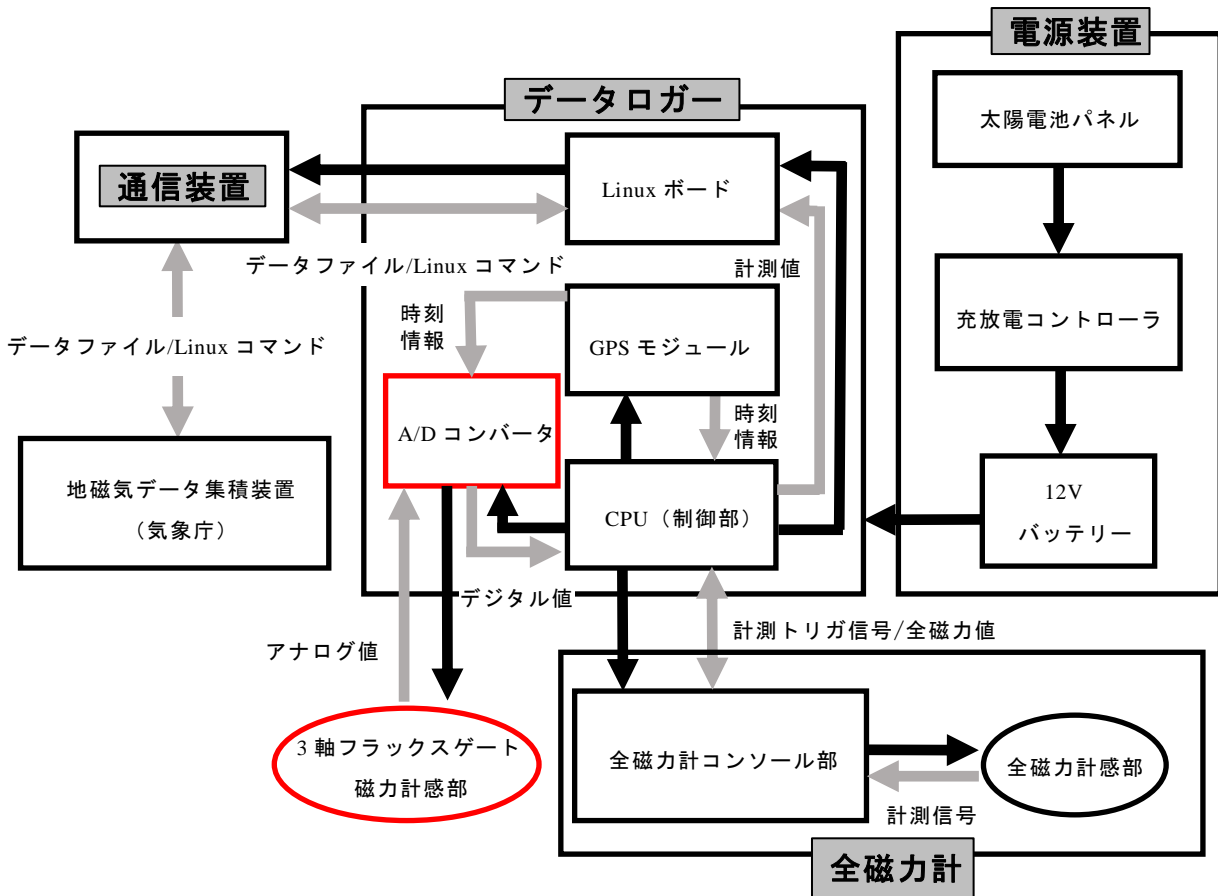


Fig. 3 Block diagram of a geomagnetic observation system. The black arrow indicates the power supply and the gray arrow indicates transmission channels. Components circled in red indicate sensors of a tri-axis fluxgate magnetometer and A/D converter to convert analog signals from the sensors of the tri-axis fluxgate magnetometer into a digital format. These were installed only at the reference sites.



Photo 1 (a) Sensor of the scalar magnetometer and (b) the solar panel stand with the storage boxes for the components of the observation system (Numanodairakakou3 site, Adatarayama volcano (Fig. 2c)).

4.2 参照点の機器構成及び機能

参照点も参照値取得のために全磁力計 GSM-90 を使用しており、データロガー、電源及び通信装置も観測点で使用している装置とほぼ同じ性能を持つ。ただし、参照点は観測点と異なり、全磁力計の他に有限会社テラテクニカによって製作された 3 軸フラックスゲート磁力計 (FRG700, Photo 2a) も取り付けられている (Fig. 3)。この磁力計は地磁気ベクトルの直交 3 成分それぞれの変化量を 1 秒サンプリングで計測し、分解能は 0.001nT 、ノイズレベルは peak to peak 値で約 0.04nT である。3 軸フラックスゲート磁力計の感部は、その底部が地表から約 50cm の深さになるよう埋設設置しており (Photo 2b)、おおよそ磁北とそれと水平面上で直交する方向及び鉛直方向の地磁気 3 成分の変化量を計測する。

一般に、観測点及び参照点の地磁気の方法が異なっていると、同じ自然磁場変動が生じた場合でも、両者の全磁力の差では見かけ上、観測データの全磁力値が変化する (DI 効果, 田中・他, 1978)。このような観測データの見かけ上の変化は、データを解釈する上で障害となる。DI 効果による影響を低減するためには、参照点において全磁力だけでなく、直交する地磁気 3 成分データの観測も必要となる (田中・他, 1978)。気象庁地磁気観測所は、参照点で観測される地磁気 3 成分データを用い、DI 効果の影響をより効果的に低減する手法の開発を進めている (秋元・他, 2019)。

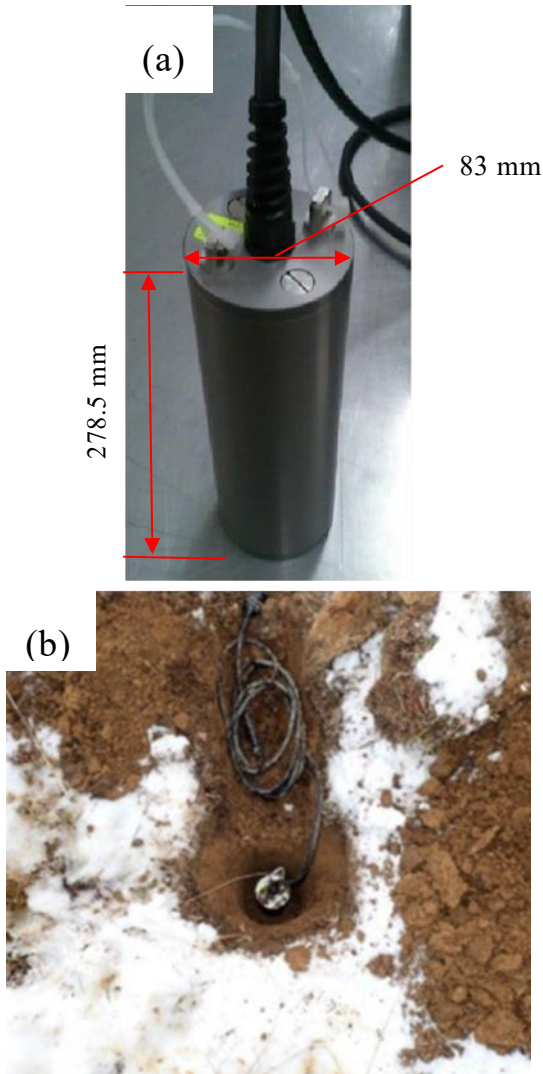


Photo 2 (a) Sensor of the tri-axis fluxgate magnetometer installed at reference sites at the six volcanoes. (b) Sensor of the tri-axis fluxgate magnetometer installed in the ground at the reference site of the Ontakesan volcano.

5 観測成果

観測開始以降、参照値を基準とした6火山の各観測点における全磁力変動を Fig. 4 に示す。ここでは、これまでに火山活動に伴う地下の温度変化を反映していると考えられる全磁力変化の観測成果を紹介する。また火山活動と無関係なノイズが、全磁力データに重畳する観測点及び参照点が存在することも明らかになった。今後、熱活動の変化をよりの確に把握することを目的として、観測点網の再構築が行われる可能性もある。その場合、ノイズ混入の状況も考慮されるべき情報であるため、観測された非火山性の全磁力変動

2例についてもここで示す。

5.1 熱活動の活発化に伴う全磁力変化

5.1.1 吾妻山

吾妻山では、大穴火口周辺の6観測点 (Fig. 2b) で全磁力連続観測を開始した2015年11月以降、2018年中頃まで大穴火口の北側に設置された大穴火口1及び大穴火口3観測点で、年間1から2nT程度の緩やかな全磁力の増加が見られた (Fig. 4b)。一方、同じく大穴火口の北側に位置する大穴火口2観測点では、2017年1月頃から2018年中頃にかけて、約4nTの全磁力の減少が観測された (Fig. 4b)。過去の全磁力繰り返し観測では、大穴火口地下の熱活動の活発化によると考えられる全磁力変動が捉えられたこともあることから (3.2節)、これらの全磁力変動も、大穴火口付近の地下の熱活動の活発化を示す可能性があるとして、我々は注目していた。

このように比較的緩やかであった全磁力変動の様子は、2018年9月頃から明らかに変化した (Fig. 4bの矢印)。仙台管区気象台地域火山監視・警報センター (2019b) によると、2018年9月以降、大穴火口1観測点の全磁力の増加率が大きくなり、これまで全磁力変動が見られていなかった大穴火口5観測点で全磁力の減少が開始した。さらに2018年10月以降、大穴火口4観測点では顕著な全磁力の減少が観測された。これらの全磁力変動は、大穴火口の北西に存在する地熱域の地下浅部に熱消磁 (高温) 域が形成されることで説明できることが明らかになっている (仙台管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019b)。

5.1.2 九重山

九重山では、全磁力繰り返し観測の結果から2014年以降、硫黄山付近の噴気孔群の地下での熱消磁現象の進行を反映すると考えられる全磁力変動が観測されている (3.5節)。2017年3月に硫黄山及びその周辺で開始した全磁力連続観測 (Fig. 2e) でも、以下に示すように同様の結果が得られている (Fig. 4eの矢印)。

観測開始以降、硫黄山の北側及び東側に位置する硫黄山北及び硫黄山東観測点では、緩やかな全磁力の増加が観測された。一方、硫黄山の南側に位置する硫黄山南及び星生山東観測点では、明瞭な全磁力の減少が観測された。これらの観測結果は、全磁力観測網内の地下で熱消磁現象が進行していることを示唆してい

る。星生山東観測点については 2018 年 10 月以降、機器障害による欠測が続いたため比較できないが、観測開始以降、2020 年 5 月までの期間について、熱消磁効果によると考えられる全磁力変動の振幅が一番大きな観測点は、硫黄山に最も近い硫黄山南観測点（約 14nT の減少）である。このことは、全磁力繰り返し観測から得られた結果と同様に、全磁力連続観測から得られた結果も、硫黄山付近の地下で熱消磁現象が進行していることを支持する。

これらの 4 観測点における全磁力は、ほぼ単調増加もしくは単調減少しているのに対し、北千里浜観測点で観測された全磁力は、複雑な変動を示す（Fig. 4e）。この変動が火山活動と関係しているのか不明である。

5.1.3 霧島山（えびの高原（硫黄山））

えびの高原の硫黄山では、硫黄山周辺に整備された全磁力連続観測点 6 点（Fig. 2f）すべてにおいて、2017 年以降、地下における熱消磁現象の進行を反映していたと考えられる全磁力変動が観測された（Fig. 4f の矢印）。硫黄山の北側にある観測点（不動池北、硫黄山北東 2 及び硫黄山北観測点）では全磁力の増加が、硫黄山の南側にある観測点（硫黄山東、硫黄山南 2 及び硫黄山南東観測点）では、全磁力の減少がそれぞれ継続して観測された。日本のような北半球中緯度地域におけるこのような全磁力変動は、熱消磁の進行を示す典型的な空間パターンであり（例えば、吉田・他、2017）、硫黄山付近の地下で熱消磁が進行していたことを示すと考えられる。したがって、硫黄山では 2018 年 4 月に発生したごく小規模な噴火（3.6 節）の発生前より、地下で温度上昇あるいは高温領域の拡大が進行していたのであろう。

鹿児島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター（2019）は、噴火発生前の 2017 年 2 月から 2018 年 2 月及び噴火活動があった 2018 年 4 月を含む 2018 年 2 月から 2019 年 1 月までの 2 つの期間に観測された全磁力変動を説明するための熱源モデルを推定している。前者の期間に推定された熱源の位置は、硫黄山の北西地下の海拔高度約 1100m（地表面から深さ約 150m）であるのに対し、後者の期間では、硫黄山噴気地帯の北側地下の海拔高度約 800m（地表面から深さ約 500m）に熱源が推定されている。

5.2 地下の冷却に伴う全磁力変化

樽前山では、山頂火口原の溶岩ドーム周囲に配置した 4 観測点で、溶岩ドーム地下における岩石の再帯磁、すなわち温度低下の進行を反映していると考えられる全磁力変化が継続して観測された（Fig. 4a の矢印）。観測を開始した 2015 年 11 月以降、概ね溶岩ドームの北側にあるドーム北 2 及びドーム北 3 観測点（Fig. 2a）で全磁力の減少が、溶岩ドームの南側にあるドーム南西及びドーム南観測点（Fig. 2a）で全磁力の増加がそれぞれ継続した。

安達太良山では、全磁力連続観測を 2018 年 6 月下旬に開始したため、他の火山に比べてデータ蓄積期間が短い。沼ノ平火口底内北側の観測点（沼ノ平火口 1 及び沼ノ平火口 2、Fig. 2c）及び火口縁上にある南側の観測点（沼ノ平火口 4、Fig. 2c）で、それぞれ振幅の小さな全磁力の減少及び増加が観測された（Fig. 4c）。これらの変化は、沼ノ平火口の地下で冷却による再帯磁が進行していることを示唆する。

5.3 御嶽山で観測された全磁力変化

御嶽山で観測された全磁力変化は、他の火山と比較して、その空間分布が複雑なため解釈が困難である。剣ヶ峰北側の 2 観測点（サイノ河原北及びサイノ河原南、Fig. 2d）では観測開始以降、4 年間でそれぞれ 6nT 及び 5nT 程度の緩やかな増加が認められる（Fig. 4d）。しかし、サイノ河原南観測点から南側に約 300m 離れた二ノ池東 2 観測点（Fig. 2d）では、これらの観測点のような継続した全磁力の増加もしくは減少は観測されていない。剣ヶ峰北側では噴気活動や地熱異常域の存在などの表面現象は認められていないことから、サイノ河原北及びサイノ河原南で観測された全磁力の増加は、火山活動によるものではないと推測されるが、原因は不明である。

2014 年噴火で形成された火口列の南側に位置する奥の院下観測点（Fig. 2d）では、観測を開始した 2016 年 10 月以降、2019 年 2 月にかけて 14nT の全磁力の増加が見られた（Fig. 4d）。この全磁力変動は、以下に述べるように地下浅部の冷却による再帯磁の進行、すなわち熱活動の低下を示している可能性がある。

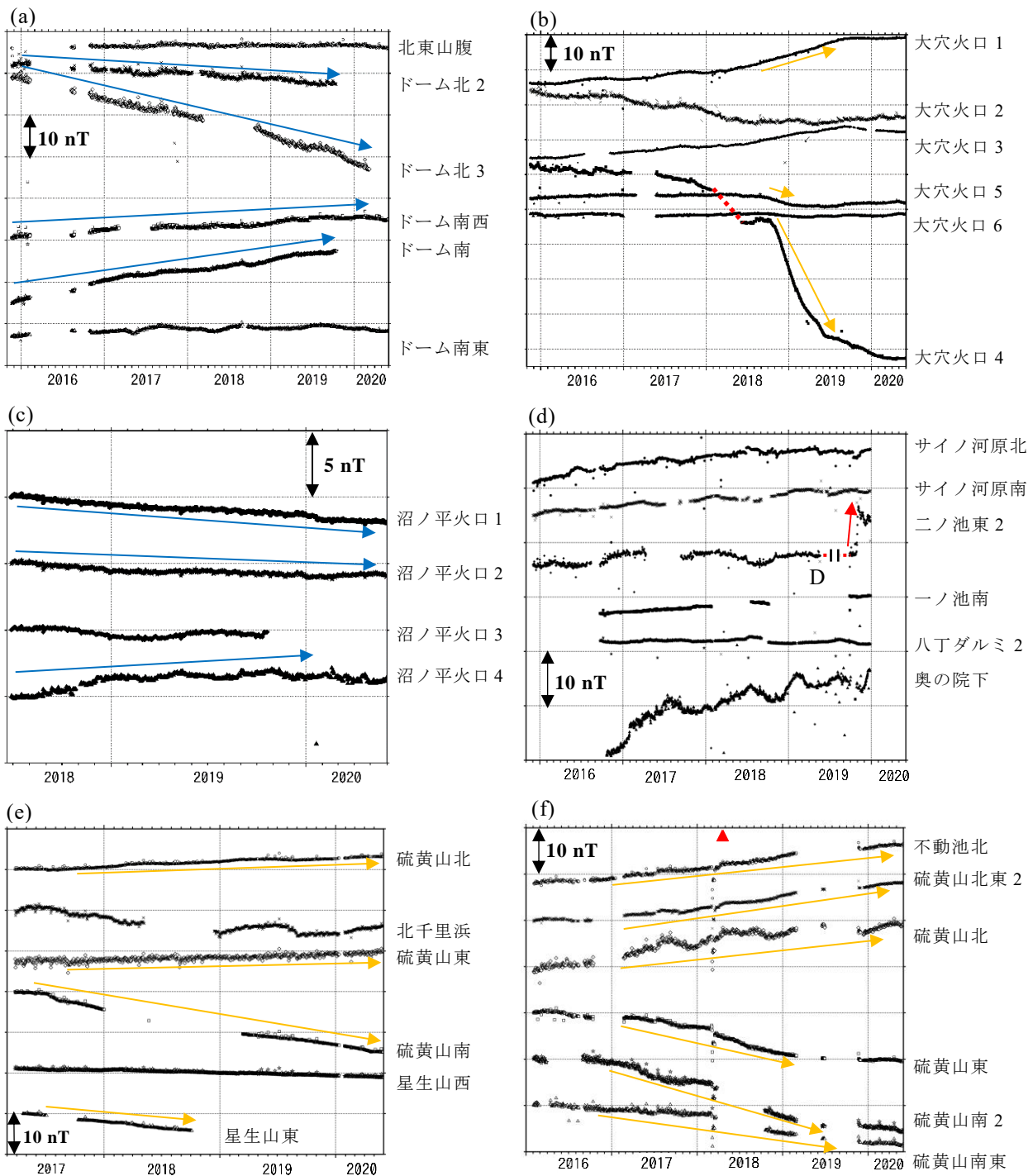


Fig. 4 Nighttime (00:00–02:59 JST) means of the differences between the total magnetic intensity recorded at each observation site and that recorded at the reference sites for each volcano from the date that observations started until May 2020. (a) The Tarumaesan volcano, (b) the Azumayama volcano, (c) the Adatarayama volcano, (d) the Ontakesan volcano, (e) the Kujusan volcano, and (f) the Ioyama volcano (Ebino plateau). Amber and blue arrows denote the thermomagnetic variations due to heating and cooling of rocks, respectively (Section 5). The dotted red line in (b) indicates the artificial variation due to reinstallation of the sensor of the magnetometer. “D” and the red arrow in (d) indicate discontinuity (an amplitude of -57 nT and compensation for that in (d)) as a result of topographic changes around the site due to the debris flow (Kunitomo et al., 2019) and anomalous changes of unknown causes, respectively. Red triangles in (f) denote the two faint eruptive events that occurred on April 19 and on April 26, 2018. Changes in total magnetic intensity at all of the observation sites at the Ontakesan volcano ((d)) are only shown until the end of December 2019 due to a subsequent device malfunction at the reference site (Subsection 7.3).

橋本・他 (2018) によれば、樽前山では GNSS 観測から明らかになった基線長変動が、全磁力変動とほぼ同期して、2010 年頃に始まった。これらの変動はそれぞれ山体収縮と冷却による再帯磁効果に伴うものと見られる。マグマ起源のガスのような、深部から上昇して浅部帯水層へ流入する高温流体の量が減少したことが変動の原因であると推測されている (橋本・他, 2018)。

また、御嶽山では合成開口レーダー観測から、2014 年噴火以降、山頂部で地盤沈降が進行していたことが明らかになっている (Narita and Murakami, 2018)。さらに気象庁地震火山部火山監視・警報センター (2019) によると、2014 年噴火で形成された火口列近傍にある噴気孔内の温度が、2017 年から 2019 年にかけて 89°C から 23°C まで低下し、かつ噴気の勢いも明らかに衰えた。

これら御嶽山における観測結果並びに樽前山の観測事例 (橋本・他, 2018) を考慮すると、奥の院下観測点における全磁力の増加は、火口列地下の温度低下による岩石の再帯磁の進行を反映している可能性がある。例えば、地下深部から 2014 年噴火の火口列へ供給される高温流体の量が減少し、熱の地表等への放出量が深部から輸送される量よりも大きいことによる浅部の温度低下が、この全磁力変動の原因の候補の一つとして考えられる。

5.4 非火山性の全磁力変動

5.4.1 人工ノイズ (九重山)

九重山では冬季を除き、すべての観測点において同時かつ数 nT 程度の同じ振幅を持つ全磁力の外れ値が現れる場合がしばしばある (Fig. 4e)。これら外れ値のいくつかについて調査を行った結果、久住高原展望台参照点 (Fig. 2e) で観測される全磁力値への人工ノイズの重量が原因であることが明らかとなった。その例として、Fig. 5 に 2019 年 7 月 6 日から 7 月 8 日にかけて久住高原展望台参照点で観測された参照値を基準とした場合の、硫黄山北及び星生山西観測点 (Fig. 2e) の 1 分値の全磁力変動を示す。参照値を基準とした場合の硫黄山北及び星生山西観測点を含む全ての観測点の全磁力変化には、7 月 6 日の夜間から翌日の正午付近にかけて Fig. 5 に示すような矩形状の変化が認められた。

原因は、参照値とした全磁力データに矩形ノイズ

が重畳したため、ノイズの形状から、自動車が 7 月 6 日 19 時頃に参照点付近に近寄り、しばらく駐車した後、翌日の 7 日 12 時過ぎに離れたと推定される。これまでに久住高原展望台参照点を受けた人工ノイズの影響は全て、Fig. 5 の例にあるように短時間で解消されている。しかし、今後観測データの評価に影響を及ぼすような長期にわたる、もしくは階段状のような恒久的ノイズが発生した場合は、参照点の移設を検討すべきであろう。

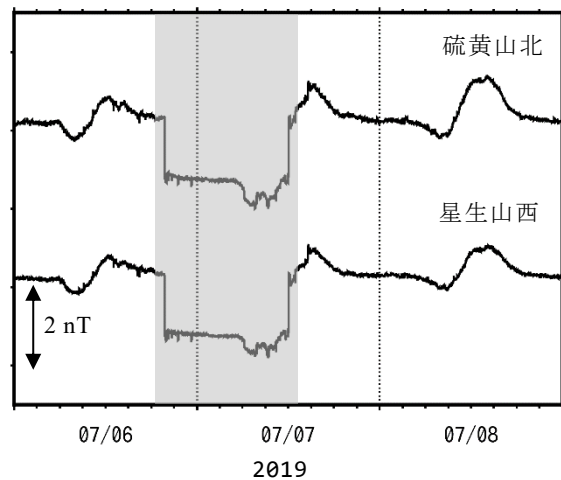


Fig. 5 1-minute values for the differences between the total magnetic intensity recorded at two sites (Ioyamakita and Hossyozannishi, Fig. 2e) and that recorded at the reference site of the Kujusan volcano (Fig. 2e) from July 6–8, 2019 (JST). The shaded area indicates square-shaped noise.

5.4.2 季節変動 (御嶽山)

火山で地磁気観測を行うと、1 年程度の周期を持つ季節変動が観測される場合がある。6 火山のほとんどすべての観測点で観測される全磁力変化には、火山活動の評価に深刻な影響を及ぼすような季節変動は見られない (Fig. 4)。しかし、御嶽山の奥の院下観測点 (Fig. 2d) の全磁力変化には、夏季に上に尖ったユニークな形状をもつ季節変動成分が含まれる (Fig. 4d)。この特徴をより明瞭に示すため、奥の院下観測点で観測された全磁力データから外れ値を除去した後、1 年間のセグメントに分割した上で線形トレンドを除去した (Fig. 6)。

その結果、2017 年及び 2018 年夏季に見られる極値 (尖り) は、両者とも 7 月に認められるが、前者は後者と比較してそれほど明瞭ではない。また、2019 年に

は8月に極値が現れる。このように、季節変動といっても、その規則性はそれほど強くない。この特徴的な季節変動の原因は不明で、除去は困難である。

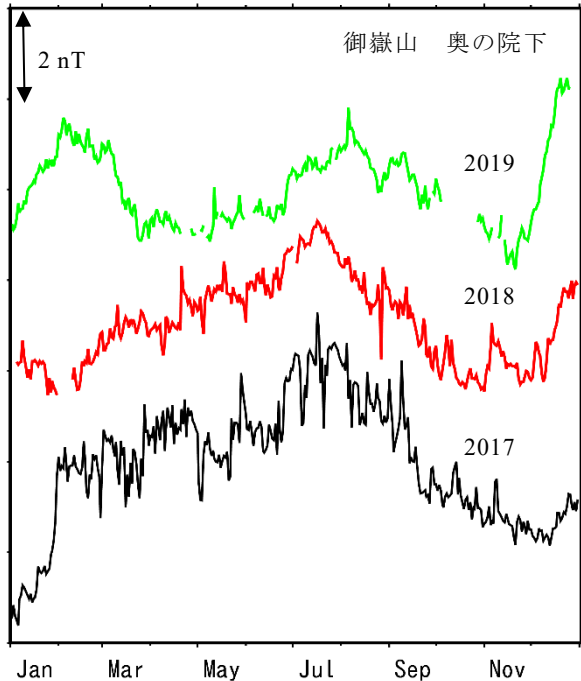


Fig. 6 Nighttime (00:00 – 02:59 JST) means of the difference between the total magnetic intensity recorded at site Okunoinshita (Fig. 2d) and that recorded at the reference site of the Ontakesan volcano (Fig. 2d) in 2017 (black), 2018 (red), and 2019 (green). To highlight the characteristics of seasonal variation, distinct outliers were excluded from the record and each segment 1 year in length was detrended.

6 噴火災害の軽減へ向けて取り組むべき課題

5章で紹介したように、樽前山、吾妻山、安達太良山、九重山及び霧島山（えびの高原（硫黄山））では、地下の熱活動変化を反映すると考えられる全磁力変化が観測された。このようにデータの蓄積が進むにつれ、火山活動の評価に有効と考えられる観測及び解析事例も増えてきている。これまでも火山活動の評価に資するため、これらの事例は火山噴火予知連絡会に報告されている（例えば、仙台管区気象台地域火山監視・警報センター，2019b；鹿兒島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター，2019）。しかし、全磁力観測の成果を活用して水蒸気噴火による災害の軽減に貢献するためには、以下に示すような解決に向けて取り組むべき課題も明らかになってきた。

6.1 噴火予報及び警報の精度向上への寄与

気象庁は2020年現在、噴火災害の軽減を目的として国内111の活火山を対象に噴火予報及び警報を発表している。それらのうち50の活火山では、地震計、傾斜計、GNSS、空振計及び監視カメラ等による常時観測を実施しており（常時観測火山）、噴火予報及び警報の発表は、これらの観測結果及びその評価に基づいて行われている。常時観測火山に含まれる6火山では、テレメータ機能を持つ地磁気観測装置が整備されたことにより、全磁力観測データによる監視もできるようになった。ただし、現在は観測データの蓄積及び水蒸気噴火に先行する熱活動変化を早期に把握する手法開発（2.2節）を進めている段階であるため、噴火予報及び警報発表の根拠としての利用は始まっていない。

我々の目標は、地磁気観測の成果を活用することで、噴火予報及び警報のさらなる精度向上を実現し、水蒸気噴火による災害の軽減に貢献することであるが、はたして全磁力観測から得られた成果のみに基づいてこの目標を達成することは可能であろうか。

寺田（2018）は、草津白根山で発生した水蒸気噴火とそれに関連して観測された諸現象を噴火予知の観点から検討した上で、仮に火山活動の変化を示すデータが観測されたとしても、それらを水蒸気噴火の先行現象として識別することは困難であると指摘した。この指摘は、全磁力観測データにもあてはまる。草津白根山では、1982年から1983年の噴火活動期及び噴火未遂で終わった1989年から1991年の活動期に、水釜近傍地下での熱消磁の進行に伴う全磁力変化が観測された（Takahashi and Fujii, 2014）。これら2つの期間に観測された全磁力変化量を比較すると、前者は後者に比べて明らかに小さい（Takahashi and Fujii, 2014）。この事例は、熱消磁効果による全磁力変化が観測されても噴火に至らない場合があり、全磁力変化量の大きさが必ずしも噴火発生の指標となるとは限らないことを示す。さらに橋本・他（2019）は、全磁力観測から推定された熱消磁源の深さと噴火発生の関係を整理分析して、浅いほど噴火発生の可能性が大きいとは限らず、熱消磁領域の形成された深さにより噴火発生を予測することは困難であるとしている。

すなわち、火山体内部における温度上昇（熱消磁現象の進行）に伴う全磁力変動が観測され、かつ温度上昇領域の位置の推定ができたとしても、その情報のみ

で噴火の危険性を評価することは困難である。したがって全磁力観測の成果のみに着目していたのでは、手法開発 (2.2 節) を通じての噴火予報及び警報の精度向上は期待できないと言える。この課題の解決に向けて、我々が推進すべきことについては 7.1 及び 7.2 節で述べる。

6.2 欠測の少ない観測の実現

地磁気観測の成果が、噴火予報及び警報発表の根拠として利用されるためには、常時、地磁気データによる熱活動変化の監視が可能である必要がある。すなわち、観測装置の機器障害等による観測の停止で、熱活動の評価が不能となる期間が生じてはならない。しかし、6 火山の山頂火口内部及びその周辺に整備された観測点は、強風、積雪、落雷及び火山ガスによる機器の腐食等、過酷な環境にさらされており、これまでもそれらを原因とした観測装置の障害による欠測が発生している。

このような観測環境でも、障害発生頻度を低下させ、欠測の少ない全磁力観測を維持できるように観測装置の改良及びその維持管理方法の改善を進めることは重要である。そのためには、これまでに蓄積された障害事例を解析し、同様の原因による障害発生頻度を減らすための対策を講じることが必要不可欠である。例えば、火山ガスによる腐食で、電源装置を構成する充放電コントローラ (Fig. 3) の故障による欠測がこれまでにいくつかの観測点で発生した。このような観測点については、同じ障害の再発を防ぐため、充放電コントローラを故障発生前に交換するといった対策を進めている。

ただし、様々な対策を講じていても完全に機器障害の発生を防ぐことは不可能であろう。よって欠測が発生したとしても、熱活動変化の監視が不能になることを防ぐ手段を準備することも有効である。そのような取り組みを 7.3 節で紹介する。

7 今後の展望

全磁力観測の成果を活用して水蒸気噴火による災害の軽減を実現するために、我々が取り組むべき課題を 6 章で示した。ここでは、これらの課題の解決に向けての今後の展望について論じる。

7.1 地下構造情報の活用

地磁気観測の成果のみの追求だけでは、噴火予報及び警報のさらなる精度向上に寄与することは困難である (6.1 節)。この課題を解決するためには、全磁力観測から推定される消磁源と火山活動が進行する舞台となる火山体の地下構造、特に水蒸気噴火の発生で重要な役割を果たすと考えられる熱水系に関する情報を持つ比抵抗構造を比較し、水蒸気噴火の発生場及び発生機構に対する新たな知見を増やすことが極めて重要である。例えば、いくつかの火山体の浅部に存在が推定されている熱水貯留層をシールする低比抵抗かつ不透水性の粘土層の下部で温度上昇や増圧が進行した場合に、水蒸気噴火が発生するというモデルも提案されている (例えば, Stix and de Moor, 2018)。相澤 (2016) は、そのようなモデルの妥当性を検証するためにも、地磁気観測から得られる消磁源と熱水系や帯水層分布の情報を持つ比抵抗構造との間の関係を調査することの重要性を指摘している。まだ事例数は少ないが、全磁力観測から推定された消磁源及び比抵抗構造に基づいた水蒸気噴火の発生場や発生機構に関する議論が、例えば口永良部島については Kanda et al. (2010)、雌阿寒岳については Takahashi et al. (2018) によってそれぞれなされている。

えびの高原の硫黄山でも、Tsukamoto et al. (2018) によって地下の 3 次元比抵抗構造が推定され、浅部熱水系の解釈が議論されている。気象庁は、将来、硫黄山で再び火山活動が変化した際、噴火予報及び警報の発表判断における全磁力観測結果の活用を目指して、全磁力観測から推定した消磁源 (鹿児島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019) と比抵抗構造に基づく浅部熱水系の概念モデル (Tsukamoto et al., 2018) の比較検討を通じて、2018 年 4 月噴火の発生場の理解を深め、噴火活動モデルの改良を進めている。例えば、噴火イベントを含む 2018 年 2 月から 2019 年 1 月の期間に形成された消磁源の位置 (鹿児島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019) は、浅部の低比抵抗層に対応する粘土層の下部に推定された。このことは、粘土層の下部で水蒸気噴火を発生させるためのエネルギーが蓄積されるという概念を支持する。

7.2 他の観測種目の成果との関連性の調査

全磁力変化と他の地球物理学的及び地球化学的観

測成果の関連性を明らかにすることも、水蒸気噴火の発生に関する新たな知見を得るために推進すべきである。5.3 節でも触れたが、樽前山では全磁力及び GNSS の繰り返し観測から得られた全磁力変化及び基線長変化の間に高い相関が認められており（山本・他, 2011; 橋本・他, 2018）、この事実を手掛かりとして、橋本・他（2018）は山頂火口原地下の状態変化を推定している。樽前山では現在、全磁力のほかにも地震、GNSS、傾斜変動及び赤外熱映像といった地球物理学的観測が火口原内及びその周囲で連続的に行われており（例えば、札幌管区気象台地域火山監視・警報センター, 2019）、多種目観測が充実している。近年、樽前山では火山活動の静穏期に対応する冷却による再帯磁に伴う全磁力変化が観測されている（Fig. 4a）。観測結果を説明する帯磁源（冷却モデル）を推定するとともに、他の観測種目から得られた観測結果との関係性を明らかにした上で、それらの観測結果を統一的に説明する静穏期の概念モデルを構築し、火山活動の活発化開始の判断に活用するための参考情報とすることも重要である。

6 火山以外ではあるが、草津白根山ではこれまでの観測により、地磁気変化と地球化学的データとの間に強い関連性が見出されている。火口湖湯釜の湖水の化学分析（例えば、Ohba et al., 2008）及び湯釜近傍における全磁力観測（例えば、Takahashi et al., 2014）が、それぞれ 1960 年代及び 1970 年代から開始され、半世紀近く、もしくはそれ以上にわたるデータが蓄積されている。気象庁地磁気観測所が、湯釜北側で実施してきた全磁力繰り返し観測で得られた全磁力変化及び湯釜湖水の塩化物イオン濃度（Ohba et al., 2008）の時間変化を Fig. 7 に示す。1990 年から 1992 年までの期間には、熱消磁の進行及び湯釜への火山性流体の供給に伴う両者の顕著な増加が観測された。Takahashi and Fujii（2014）は、両者の高い相関に注目して地下の火山性流体の上昇過程について議論している。また、気象庁もしくは気象庁地磁気観測所が、全磁力連続観測を行っている吾妻山、草津白根山、御嶽山及び九重山では、多成分火山ガスの連続観測も気象庁によって行われている（堀口・他, 2019）。時間分解能が高いこれらの連続観測データの間には何らかの関係性が見いだされれば、例えば相互相関解析から得られる位相差（タイムラグ）から地下に形成された消磁源から地表面までの火山性流体の輸送に関する定量的議論があ

る程度可能となるかもしれない。

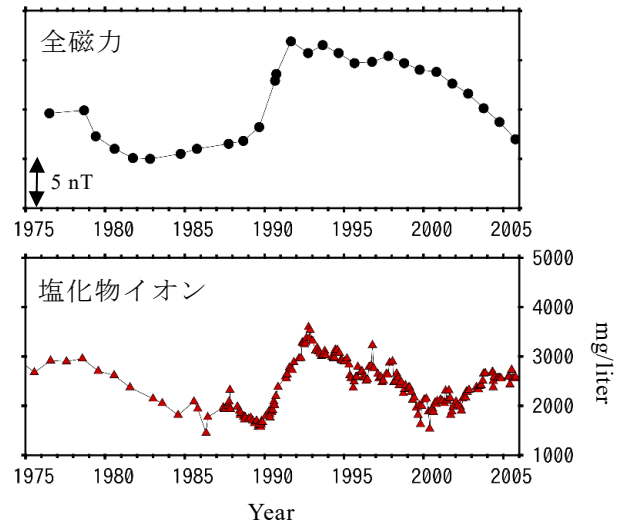


Fig. 7 Upper panel: Thermomagnetic variation at the site of repeated measurement (site YN2 and its location is shown in Fig. 2 from Takahashi and Fujii, 2014) near the Yugama crater lake of the Kusatsu-Shiranesan volcano from 1976 to 2005. Lower panel: Concentration of chloride ions in Yugama lake water from 1975 to 2005 (created using data from Ohba et al., 2008).

7.3 機器障害に備えた代替参照点の調査

御嶽山では 2019 年 12 月末に御嶽山神牧場参照点（Fig. 2d）で機器障害が発生した。冬季にこの参照点への到達手段がないため、障害復旧作業が春以降の実施となり、欠測が長期化した。この間、御嶽山では参照点を基準とした観測点における全磁力変化を評価することができなかった（Fig. 4d）。

参照点で欠測が発生した場合には、観測点の一つを参照点として扱い、他の観測点の全磁力変化を評価することで、熱磁気効果による全磁力変化の有無をある程度判断することができる。しかし、基準とした観測点の全磁力データにも熱磁気効果による全磁力変化が含まれている可能性があるため、それを基準とした他の観測点の全磁力変化は、正確な熱磁気効果による振幅を反映していないおそれがある。このため、観測点の一つを参照点として扱う場合、消磁もしくは帯磁源の推定は困難になる場合がある。

我々は、機器障害による参照点の長期欠測に備えて、火山周辺で観測されている全磁力データについて、参照値として利用可能か調査を行っている。例えば、国土地理院は、御嶽山から約 30km 離れた岐阜県下呂市で地磁気連続観測を実施しており（萩原地球電磁気観

測装置, Fig. 8a), 異常値の補正処理等をしていないデータ(生データ)については, 概ね前日分までをホームページで公開している (https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/observatory_data.html#). 萩原地球電磁気観測装置(以下, 「萩原」と表記する.)で観測された全磁力生データを参照値とした場合の, 御嶽山 6 観測点の全磁力変化を Fig. 8b に示す. なお, Fig. 8b は Fig. 4d と異なり, 夜間帯に観測された全磁力データの平均値ではなく中央値を示している. その理由は以下の通りである. 参照値として利用した萩原の全磁力生データは, ノイズ除去もしくは補正処理される前の生データである. また, 原因は不明であるが, 御嶽山の全磁力データには他の 5 火山と比較してデータの外れ値が多く見られる (Fig. 4). 参照値や観測点でのデータに異常値が混入すると, 平均値では異常値の影響を大きく受ける. そのような場合には, 異常値に対してよりロバストな中央値を採用することにより, 異常値の影響を低減することができる.

Figs. 4d と 8b とを比較すると, すべての観測点における全磁力変化のトレンドがほぼ一致することがわかる. したがって, 御嶽山で参照点が欠測した場合には, 萩原で観測された全磁力データを参照値として全磁力変化を評価することで, 欠測前と同様の熱活動変化の監視を継続することができる. また, 異常値の混入頻度が多い場合には, 中央値を採用することでその

影響を大きく低減でき, 中央値によるデータ評価の有効性も示された.

えびの高原の硫黄山でも 2019 年に荒襲参照点 (Fig. 2f) で長期間欠測が発生したため, その期間は荒襲参照点を基準とした観測点の全磁力変化が評価できなかった (Fig. 4f). 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台 (2019) は, 硫黄山から約 60km 離れた位置にある気象庁地磁気観測所の祓川観測点で観測された全磁力データを参照値として, 荒襲参照点での欠測期間中も硫黄山地下の熱活動評価を継続した. ただし, 荒襲参照点及び祓川観測点それぞれで得られる全磁力データを参照値とした場合の各観測点における全磁力変化 (Fig. 4f 及び福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2019) を比較すると, 前者のノイズレベルは後者のそれより小さい. その理由の一つとして, 荒襲参照点は, 祓川観測点と比較して硫黄山の観測地域により近いため, 荒襲参照点における偏角及び伏角が, 観測地域におけるそれらと大きな差異はない, すなわち DI 効果 (4.2 節) の影響が小さいためであることが考えられる. えびの高原の硫黄山については, 祓川観測点より観測地域に近い荒襲参照点で得られる全磁力値を基準としたほうが, 熱活動評価の面で有利である.

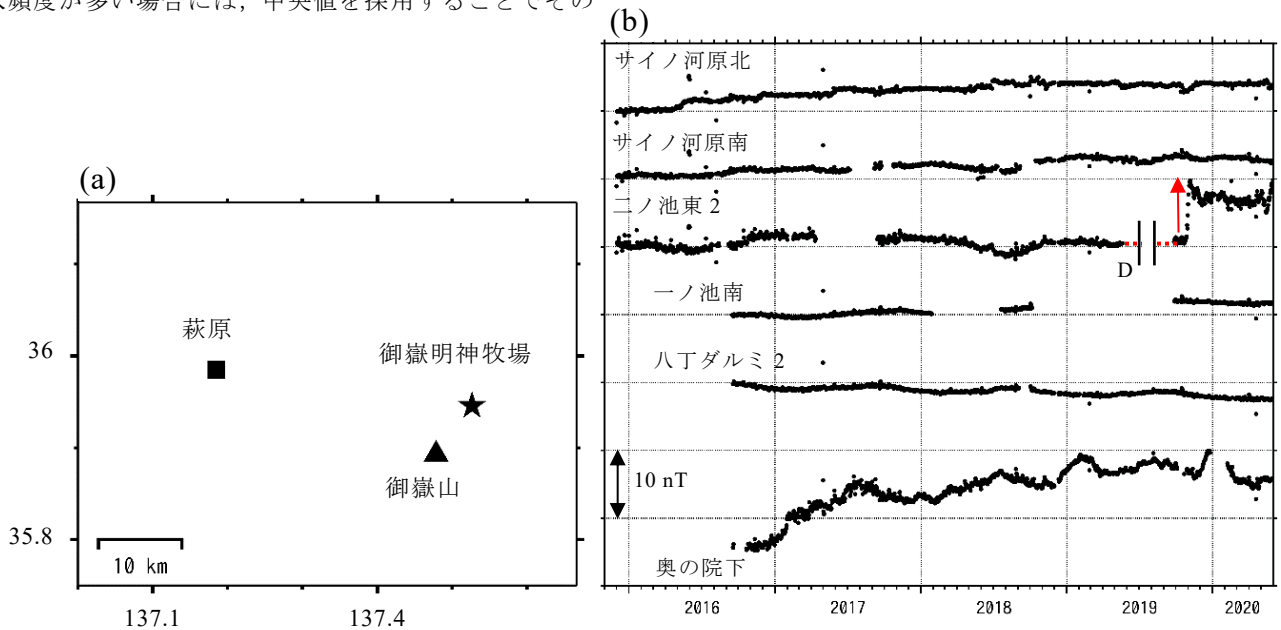


Fig. 8 (a) Location of the Hagiwara geomagnetic observation station operated by the Geospatial Information Authority of Japan (square). The star denotes JMA’s reference site at the Ontakesan volcano. The triangle indicates the summit of the Ontakesan volcano. (b) Medians of the differences between the total magnetic intensity recorded at each observation site in the summit area of the Ontakesan volcano and that recorded at the Hagiwara geomagnetic observation station during nighttime (00:00–02:59 JST) from November 2015 to May 2020. “D” and the arrow are the same as in Fig. 4d.

8 おわりに

気象庁は、地下の熱活動の監視強化及び水蒸気噴火に先行する熱活動変化を早期に把握する手法の開発を通じて噴火災害の軽減に貢献するため、2015年以降、樽前山、吾妻山、安達太良山、御嶽山、九重山及び霧島山（えびの高原（硫黄山））に地磁気観測装置を整備して全磁力連続観測を開始した。

大部分の観測点及び参照点で得られる全磁力データの品質は良好で、熱磁気効果によると考えられる全磁力変化を樽前山、吾妻山、安達太良山、九重山及びえびの高原の硫黄山において観測することができた。特に、えびの高原の硫黄山では、噴火を伴う火山活動の活発化による全磁力変化を捉えることに成功し、極めて貴重な観測事例を得ることができた。6火山では多点で全磁力を連続観測しているため、等価磁気双極子モデルによって熱源を推定することが可能で、実際に推定された熱源モデル（位置及び磁気双極子モーメント強度）は観測データとともに、火山活動の評価に活用されている。

水蒸気噴火に先行する熱活動変化を早期把握するための手法開発を推進して、噴火予報及び警報発表の精度を向上させるために、我々は全磁力観測から得られる消磁・帯磁源と水蒸気噴火の発生に重要な役割を果たすと考えられる熱水系及び他の観測項目から得られた成果との間の関連性の調査を進めている。例えば、えびの高原の硫黄山では、2018年噴火発生の前後に岩石の温度上昇による熱消磁が、比抵抗探査から存在が明らかになった地下浅部の不透水性の粘土層の下部で進行していたことが推定されるなど、噴火活動の理解を深めるために重要であると考えられる新たな知見が得られた。

また、噴火予報及び警報発表の判断根拠として全磁力観測の成果が活用されるためには、常時、熱活動変化の監視が可能である必要がある。そのためには、欠測の原因となる観測装置の障害発生頻度を低下させることが重要である。これまでに得られている障害事例を分析し、観測装置の改良及び装置の維持管理方法の改善を進めるべきである。また、参照点が機器障害により観測を停止した場合、観測地域から比較的近い位置にある他の観測点で得られた全磁力値を参照値として、熱活動変化の監視を継続した例も紹介した。このような手法の調査も有効であろう。

水蒸気噴火の発生予測は、現状では困難な場合が多

い。しかし、本報で提案したように噴火の発生場及び発生機構に関する新たな知見を蓄積し、噴火に先行する熱活動変化の早期把握のための技術開発を着実に進めるとともに、欠測の少ない安定した全磁力観測を実現させることは、噴火予報及び警報発表の判断根拠として全磁力観測の成果が有効に活用できることに繋がり、結果として、水蒸気噴火による災害の軽減に貢献するという目標に近づくことができると考える。

謝辞

御嶽山に整備した地磁気観測装置で観測された全磁力データ処理では、国土地理院の萩原地球電磁気観測装置で観測された全磁力データを使用しました。また、草津白根山における全磁力繰り返し観測で得られたデータ処理のため、東京大学地震研究所八ヶ岳地球電磁気観測所で観測された全磁力データを使用しました。記して感謝申し上げます。本稿を改善するにあたり、高木朗充博士、重野伸昭氏、宮村淳一氏、査読者の山本哲也氏、編集担当の瀧山弘明氏、編集委員長の菅野智之氏からは有益な意見及び提案をいただきました。大部分の図は Generic Mapping Tools (Wessel et al., 2013) を使用して作成しました。

文献

- 相澤広記 (2016): 火山電磁気観測の進展, 火山, **61**, 345-365.
- 秋元良太郎・山崎 明・山崎貴之・浅利晴紀・高橋幸祐 (2019): 活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用, 2019年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 25-32.
- 及川輝樹・大場 司・藤縄明彦・佐々木寿 (2018): 水蒸気噴火の地質学的研究, 地質学雑誌, **124**, 231-250.
- 鹿児島地方気象台・福岡管区気象台火山監視・情報センター (2014): 口永良部島の火山活動—2014年5月~10月—, 火山噴火予知連絡会会報, **119**, 311-346.
- 鹿児島地方気象台・福岡管区気象台地域火山監視・警報センター (2019): 霧島山の火山活動—2017年9月~2019年1月31日—, 火山噴火予知連絡会会報, **132**, 240-311.
- 火山噴火予知連絡会火山観測体制等に関する検討会 (2014): 御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する緊急提言, https://www.jma.go.jp/jma/press/1411/28a/yochiren_kansoku_kinteigen141128.pdf, (参照 2020-07-19).

- 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子 (2015): 九重火山地質図, https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/kuju/map/volcmap19.html, (参照 2020-07-10).
- 気象研究所地震火山研究部 (2008): 火山活動評価手法の開発研究, 気象研究所技術報告, **53**, 303p.
- 気象庁 (編) (2013): 日本活火山総覧 (第 4 版), 気象庁, 1498p.
- 気象庁地震火山部火山監視・情報センター (2014): 平成 26 年 (2014 年) の御嶽山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/2014y/312_14y.pdf, (参照 2020-07-02).
- 気象庁地震火山部火山監視・警報センター (2019): 平成 31 年・令和元年 (2019 年) の御嶽山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/2019y/312_19y.pdf, (参照 2021-05-05).
- 國友孝洋・田ノ上和志・堀川信一郎・山中佳子 (2019): 御嶽山二ノ池で発生したスラッシュ雪崩, 日本火山学会 2019 年度秋季大会講演予稿集, p231.
- 坂中伸也・田中良和・宇津木充・橋本武志 (2001): 九重硫黄山での地磁気変化による噴気火道の形状推定, 秋田大学工学資源学部研究報告, **22**, 25–38.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター (2014): 平成 26 年 (2014 年) の樽前山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/2014y/109_14y.pdf, (参照 2020-07-22).
- 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター (2019): 平成 31 年・令和元年 (2019 年) 樽前山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/2019y/109_19y.pdf, (参照 2020-08-11).
- 消防庁応急対策室 (2015): 御嶽山の火山活動に係る被害状況等について (第 40 報), <https://www.fdma.go.jp/dissaster/info/assets/post760.pdf>, (参照 2020-07-21).
- 仙台管区気象台火山監視・情報センター (2015): 吾妻山の火山活動について (2014 年 10 月～2015 年 2 月), 火山噴火予知連絡会会報, **120**, 34–51.
- 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター (2019a): 平成 31 年・令和元年 (2019 年) の安達太良山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/2019y/214_19y.pdf, (参照 2020-07-22).
- 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター (2019b): 吾妻山の火山活動 (2018 年 10 月 24 日～2019 年 2 月 10 日), 火山噴火予知連絡会会報, **132**, 27–49.
- 田中良和・増田秀晴・河村譜・大地洗・加藤誼司・馬場広成・吉野登志男 (1978): 阿蘇火山地域での全磁力測量 (1977), 阿蘇火山の集中総合観測 (第 1 回 1977) 報告, 31–39.
- 寺田暁彦 (2018): 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山, 地質学雑誌, **124**, 251–270.
- 東京大学地震研究所・熊本大学教育学部・合同観測班地質・岩石グループ (1995): 九重山, 1995 年 10 月噴火についての地質観察, 火山噴火予知連絡会会報, **63**, 45–47.
- 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, **45B**, 617–625.
- 橋本武志・青山 裕・小山 寛・森井敦司・三嶋 渉・荻野 激・高橋 良・岡崎紀俊 (2018): 非噴火時における多項目観測の重要性 (樽前山の事例), 月刊地球, **40**, 163–169.
- 橋本武志・宇津木充・大倉敬宏・神田 径・寺田暁彦・三浦 哲・井口正人 (2019): 非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴, 火山, **64**, 103–119.
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター (2020): 九重山の火山活動解説資料 (令和 2 年 6 月), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/20m06/502_20m06.pdf, (参照 2020-07-22).
- 福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台 (2015): 平成 27 年 (2015 年) の霧島山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/2015y/505_15y.pdf, (参照 2020-07-31).
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台 (2018): 平成 30 年 (2018 年) の霧島山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/2018y/505_18y.pdf, (参照 2020-07-13).
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台 (2019): 平成 31 年・令和元年 (2019 年) の霧島山の火山活動, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/2019y/505_19y.pdf, (参照 2020-09-16).
- 舟崎 淳・下村雅直・黒木親敏 (2017): 霧島連山えびの高原, 硫黄山の明治時代以降の地熱活動資料, 験震時報, **80**: 1.
- 防災科学技術研究所 (2014): 口永良部島 2014 年 8 月 3 日

- 噴火の火山灰質堆積物について, 火山噴火予知連絡会会報, **119**, 350–352.
- 堀口桂香・菅野智之・谷口無我・北川隆洋・風早竜之介・岡田 純・関 晋 (2019): 吾妻山におけるガスセンサーおよび化学分析による火山ガス観測結果の比較, 日本火山学会 2019 年度秋季大会予稿集, p212.
- 宮村淳一・田島義美・山内義敬・田村憲次 (1995): 樽前山の自然電位測定, 駿震時報, **58**, 79–90.
- 山崎 明・中島新三郎・田口陽介・海東恵美・芥川真由美・増子徳道・清水淳平・大和田毅・山崎伸行・長町信吾・大川隆志・仙台管区気象台火山監視・情報センター (2010): 吾妻山における地球電磁気観測, 2010 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 5–11.
- 山本哲也・高木朗充・福井敬一・大和田毅 (2008): 安達太良山の火山活動の総合的観測と推定される熱水活動, 気象研究所研究報告, **59**, 39–64.
- 山本輝明・高橋裕二・松村智之・伏谷祐二・宮村淳一 (2011): 樽前山で最近観測された山頂直下の膨張と熱活動について, 日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, p141.
- 吉田武義・西村太志・中村美千彦 (2017): 火山学 (現代地球科学入門シリーズ 7), 共立出版, 392p.
- Barberi, F., A. Bertagnini, P. Landi, and C. Principe (1992): A review on phreatic eruptions and their precursors, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **52**, 231–246.
- Del Negro, C., R. Napoli, and A. Sicali (2002): Automated system for magnetic monitoring of active volcanoes, *Bull. Volcanol.*, **64**, 94–99.
- Johnston, M. J. S. (1997): Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity, *Surv. Geophys.*, **18**, 441–475.
- Kanda, W., M. Utsugi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, I. Fujii, T. Hasenaka, and N. Shigeno (2010): A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **189**, 158–171.
- Napoli, R., G. Currenti, C. Del Negro, F. Greco, and D. Scandura (2008): Volcanomagnetic evidence of the magmatic intrusion on 13th May 2008 Etna eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22301.
- Narita, S. and M. Murakami (2018): Shallow hydrothermal reservoir inferred from post-eruptive deflation at Ontake Volcano as revealed by PALSAR-2 InSAR, *Earth. Planets. Space*, **70**:191.
- Ohba, T., J. Hirabayashi, and K. Nogami (2008): Temporal changes in the chemistry of lake water within Yugama Crater, Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Implications for the evolution of the magmatic hydrothermal system, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 131–144.
- Rouwet, D., L. Sandri, W. Marzocchi, J. Gottsmann, J. Selva, R. Tonini, and P. Papale (2014): Recognizing and tracking volcanic hazards related to non-magmatic unrest: a review, *J. Appl. Volcanol.*, **3**:17.
- Sasai, Y. (2001): Tectonomagnetic modeling based on the piezomagnetism: a review, *Ann. Geophys.*, **44**, 361–368.
- Sasai, Y., M. Uyeshima, J. Zlotnicki, H. Utada, T. Kagiya, T. Hashimoto, and Y. Takahashi (2002): Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**, 769–777.
- Stix, J. and J. M. de Moor (2018): Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing, *Earth. Planets Space*, **70**:83.
- Takahashi, K. and I. Fujii (2014): Long-term thermal activity revealed by magnetic measurements at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **285**, 180–194.
- Takahashi, K. S. Takakura, N. Matsushima, and I. Fujii (2018): Relationship between volcanic activity and shallow hydrothermal system at Meakandake volcano, Japan, inferred from geomagnetic and audio-frequency magnetotelluric measurements, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **349**, 351–369.
- Tsukamoto, K. K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki, and T. Kishita (2018): Three-Dimensional Resistivity Structure of Iwo-Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 12821–12828.
- Ueda, H., T. Matsumoto, E. Fujita, M. Ukawa, E. Yamamoto, Y. Sasai, M. Irwan, and F. Kimata (2006): Geomagnetic changes associated with the dike intrusion during the 2000 Miyakejima eruptive activity, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 416–426.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe (2013): Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, **94**, 409–410.
- Yamaya, Y., T. Mogi, T. Hashimoto, and H. Ichihara (2009): Hydrothermal system beneath the crater of Tarumai volcano,

Japan: 3-D resistivity structure revealed using audio-magnetotellurics and induction vector, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 193–202.

(編集担当 瀧山弘明)