

九重硫黄山の熱放出過程と地磁気変化

橋本武志*・宇津木充**・坂中伸也***・田中良和*

*京都大学大学院理学研究科

**国土地理院測地課

***秋田大学工学資源学部

要旨

九重硫黄山において 1995～2001 年に観測された地磁気変化から、噴気の放出に伴って地下浅部で冷却帯磁が進行していることが明らかにされた。この冷却現象は、1995 年の水蒸気爆発以前に高温の火山性流体によってあらかじめ加熱されていた領域が、新火口列の開口と噴気の放出に伴って熱を奪われたために発生した現象と推定される。等価帯磁源のある地下数百 m では、地下水の気化と放出が冷却の中心的役割を果たしているらしい。

キーワード：地磁気，火山，九重硫黄山

1. はじめに

近年、軽量かつ省電力のプロトン磁力計が普及したことにより、活動監視や噴火に伴う物理機構の解明を目的として、多くの火山で多点の地磁気の連続観測が行われるようになった。このような取り組みは、1989-1990 年の阿蘇火山噴火における蓄放熱過程の解明 (Tanaka, 1993) や、1991 年雲仙岳噴火の初期にマグマ上昇の検知 (Tanaka, 1995) 等の成果として表れた。一般に、火山における地磁気変化の原因としては、熱による岩石の消帯磁、圧力磁気効果、界面動電現象、磁性鉱物の変質、爆発や陥没による磁化物質の消失など複数の候補が考えられるが、多くの場合、熱の効果が支配的である (例えば、伊豆大島 (Sasai et al., 1990), White Island (Hurst and Christoffel, 1973), 霧島 (鎌山他, 1992))。その理由から、火山における地磁気観測は、しばしば地下の温度変化を間接的に推定するための手段として用いられている。温度変化の推定に地磁気観測を利用するメリットは、磁場という物理量が、空間の磁化が積分されたものであるために、観測点から離れた地点の情報をも検知することができるという点に

ある。従って、温度計による直接測定が不可能な地点の温度変化も捉えることができる。また、直接測定につきものである極めて局所的な温度異常の影響も、空間的に平均化されることで回避できるという利点がある。我々は、水蒸気爆発とその後の噴気活動による地下の温度変化を捉えることを目的として、1995 年 10 月から九重硫黄山において地磁気全磁力の連続観測を展開した。

九重火山は、およそ 14 万年前に活動を開始した多数の溶岩ドームと小成層火山からなる火山群の総称であり、過去に 3 回の大規模な火砕流が噴出したとされている (鎌田, 1997)。九重火山の中西部に位置する星生山の北東麓には従来から噴気活動が確認されており、通称硫黄山と呼ばれている。噴気に硫黄が多く含まれるため、この地域では 1970 年頃まで硫黄の採取が行われていた (江原他, 1981)。1995 年 10 月 11 日に硫黄山の南、星生山の東で水蒸気爆発が発生し、尾根沿いに新しく噴気火口列が形成された (Sudo et al., 1998)。今回の噴火開始以後に行われた地震観測や地殻変動観測からは、明瞭なマグマの関与は認められていないものの、1995 年 12 月に発生した 2 回目の噴火に伴って放

出された火山灰には、新鮮な発泡火山ガラスが検出されたため、今回の噴火にマグマが関与した可能性が指摘されている(波多江他, 1997)。

Kagiyama (1981) は、在来噴気地帯の放熱量について、ブリュームライズ法 (Briggs, 1969) を用いて 120 MW (1978 年当時) という放熱量を報告している。また、江原他 (1981) は 1977~1979 年に九重硫黄山地域の噴気放熱量を測定し、90 MW 程度という値を報告している。1995 年の水蒸気爆発直前には、神宮司・江原 (1996) によって熱赤外映像を用いた噴気エネルギーの推定が行われており、およそ 100 MW であったことが知られている。一方、1995 年 10 月の水蒸気爆発直後には、新火口列で数 GW 級の激しい噴気活動がみられたが、数ヶ月後にその勢いは衰え、放熱量は噴火直後の 10 分の 1 以下となった。その後、新火口を含む硫黄山地域全体で見ると、水蒸気爆発以前と比較して 5 倍程度の放熱量が維持されている (江原, 1998)。なお、2 回目の噴火以後に火山灰の噴出は確認されていない。

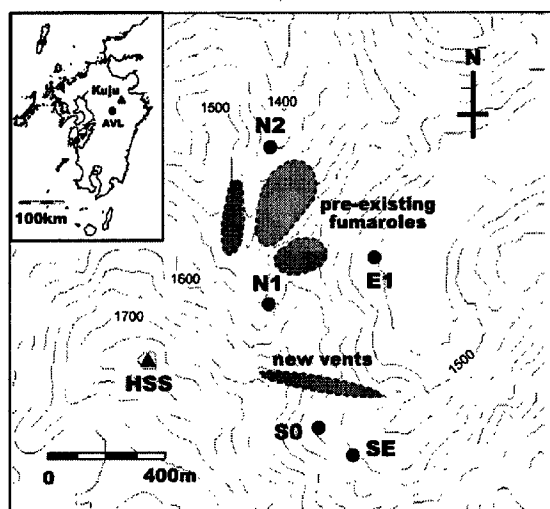


Fig. 1 Locations of geomagnetic stations (solid circles), pre-existing fumaroles and new vents on Kuju Iwoyama Volcano. Reduction is made by referring to AVL (30km SW from Kuju). HSS indicates the peak of Mt. Hossho.

このように、水蒸気爆発の前後に放熱量に明瞭な変化が生じた九重硫黄山ではあるが、山体を構成する岩石が一般に磁性鉱物に乏しいとされるデイサイト質であることに加えて、表層が噴気によって著しく変質を被っていることから、山体そのものが化学的に無帯磁になっている可能性も想定された。従って、この地域において、後述するような明瞭な地磁気変化が検出されたことは、当初はむしろ予想外なことであった。本稿では、主に九重硫黄山の熱放出過程および活動様式の特徴との関わりから、地磁気変化のメカニズムにつ

いて考察する。また、1995 年の水蒸気爆発の意味するところについて、地磁気観測の立場から見解を述べる。

2. 観測結果とその基本的解釈

2.1 観測方法およびデータ

我々は、1995 年 10 月の水蒸気爆発の直後から、新火口および在来の噴気地帯を含む領域に 5 箇所の全磁力連続観測点を展開した。Fig. 1 に主要な地形、火口、噴気活動と観測点の位置を示す。使用した機材はプロトン磁力計 (ソフトビル社製) であり、毎 5 分の観測を行った。日変化の補正には、この地域から南西に約 30 km 離れた阿蘇カルデラ内にある京都大学火山研究センターにおける全磁力値を用い、夜間 (0-4 時) の単純差平均をとって日値とした。

1995 年から 2001 年にかけて観測された各地点の全磁力変化を Fig. 2 に示す。なお、連続観測を補う目的で、オーバーハウザー型磁力計 (GEM 社製) による繰り返し磁気測量も実施している。2000 年末までの観測結果の特徴をまとめると以下の如くである。

- (1) 最も北寄りの観測点 N2 で約 70 nT の全磁力の減少、E1 では ± 5 nT 以下の微小変化、南側の 3 点 (N1, S0, SE) でそれぞれ約 200 nT, 70 nT, 50 nT の全磁力増加を観測した。
- (2) いずれの観測点においても、その変化は直線的であり、約 5 年間に亘ってほぼ一定の割合で変化が進行している。

変化量は他の火山における観測例に比べて大きく、観測点の伏角・偏角の違いに対してリージョナルな地磁気永年変化が影響することによる効果ではないことは明らかである。従って、Fig. 2 に示された変動は九重硫黄山の活動によるものであることは疑いない。ただし、このように長期間に亘って一方的に変化し続ける火山地磁気効果はこれまで世界のどの火山でも報告されたことがない。この特徴が九重硫黄山の特殊性によるものなのかについては、第 3 章で議論する。

観測された全磁力変化はほぼ直線的な変化をしているものの、詳しく見ると E1 や SE 観測点に若干傾きの変化が認められる。このことから、等価ソースの位置が時間とともに移動した可能性がある。ここでは大まかに期間を 3 つに分けて等価磁気双極子の位置と大きさを求めることにする (Table 1)。なお、各時期での地表面への熱放出の様式には顕著な違いはないが、期間 A は水蒸気爆発直後の強い噴気活動も含んでいることを付記しておく。

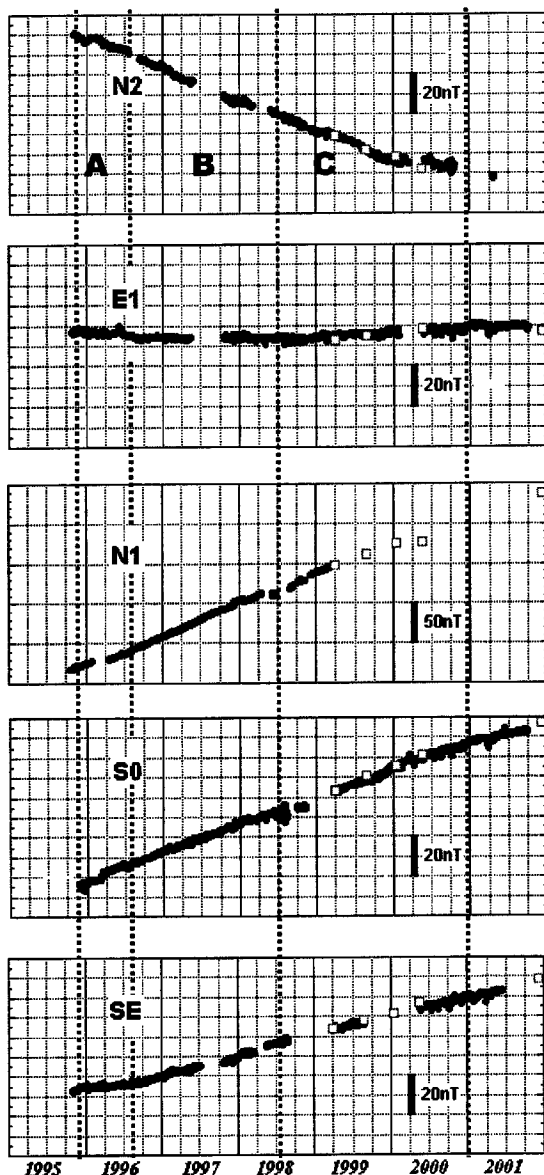


Fig. 2 Geomagnetic changes observed at Iwoyama, Kuju Volcano after reduction. Open rectangles indicate repeated measurements with Overhauser magnetometer. Characters A, B and C in the uppermost panel correspond to the periods shown in Table 1.

Table 1 Observed geomagnetic changes over three successive periods. Unit is nano-tesla.

station name	period A Nov. 95 ~ Aug. 96 (10months)	period B Sep. 96 ~ Aug. 98 (24months)	period C Sep. 98 ~ Dec. 00 (28months)
N2	-12	-31	-38
E1	-4	0	+6
N1	+27	+85	+115
S0	+13	+27	+38
SE	+5	+23	+23

2.2 噴気活動に伴う冷却帯磁

前節で提示した観測結果は基本的に領域の北側で全磁力の減少、南側で増加を示している。従って、定性的には観測領域の中央部に現在の地磁気と同じ向きの等価磁気ダイポールを置くことで説明できそうである。このことは、熱消帯磁の考え方によれば帯磁のセンスであり、地下で冷却が進行していることに対応する。観測点の数が少ないので、あまり複雑なモデルを求めるだけの空間的分解能はない。従って、ここでは球状の単一熱消帯磁モデルを考える。モデル計算では、グリッドサーチによって1つの等価磁気ダイポールの位置とモーメントを試行錯誤的に求めた。観測点と計算値の misfit を次のように定義し、これが最小になるようにソースの位置を求めている。

$$\text{misfit} = \sqrt{\sum_i (\Delta F_i^{\text{obs}} - \Delta F_i^{\text{cal}})^2} \quad (1)$$

ここで添字の obs は観測値を、cal はモデルによる計算値を表す。計算に使用した地磁気の諸元は、伏角 47° 、偏角 $N6^\circ W$ 、外部磁場強度 $47,000 \text{ nT}$ である。使用した観測点の位置座標は Table 2 にまとめた。観測点の位置は携帯型 GPS によって約 $5\sim 10 \text{ m}$ の精度で求めた。標高値については、国土地理院発行の 10 m メッシュ数値地図上で、GPS によって求めた水平位置の標高を読みとることによって求めた。

モデル計算の結果、3つの時期における等価磁気ダイポールの位置は、いずれも在来の噴気地帯と新火口列の間、標高 $1200\sim 1400 \text{ m}$ 程度に求まった (Table 3)。地表面からの深度にすると、およそ $200\sim 400 \text{ m}$ 深さに対応する。従って、いずれの場合も地表面に近い浅部で冷却が進行していることになる。帯磁源の位置決定精度を評価するために、Fig. 3 に、(1)式で定義される misfit 値が、それぞれの期間における磁場変化値の15%以下になる範囲を示した。

期間 A では東西方向の位置決定精度が期間 B および C に比べると悪いものの、いずれの場合も在来噴気地帯の南縁付近であることに変わりはない。期間 B と C

Table 2 Locations of geomagnetic stations. Latitudes and longitudes are presented in GPS-Tokyo coordinates. Reference point of northing and easting is the summit of Mt. Hossho (N33° 05' 15.0'', E131° 14' 06.0'', altitude=1762 m).

station name	latitude	longitude	altitude (m)	northing (m)	easting (m)
N2	N33° 05' 35.6''	E131° 14' 22.1''	1433	635	418
E1	N33° 05' 24.9''	E131° 14' 35.6''	1478	305	768
N1	N33° 05' 20.4''	E131° 14' 22.0''	1559	166	415
S0	N33° 05' 08.8''	E131° 14' 28.2''	1575	-191	576
SE	N33° 05' 06.0''	E131° 14' 32.5''	1551	-277	687

Table 3 Results of model calculations. Definition of northing and easting is the same as Table 2.

	period A	period B	period C
northing (m)	235	335	335
easting (m)	450	595	595
altitude (m)	1182	1352	1352
magnetic moment (emu)	1.3×10^{10}	3.4×10^{10}	4.5×10^{10}
misfit (nT)	2.9	7.8	5.0

ではほとんど同じ地点に帯磁源が推定され、誤差の範囲で一致しているとみなすことができる。

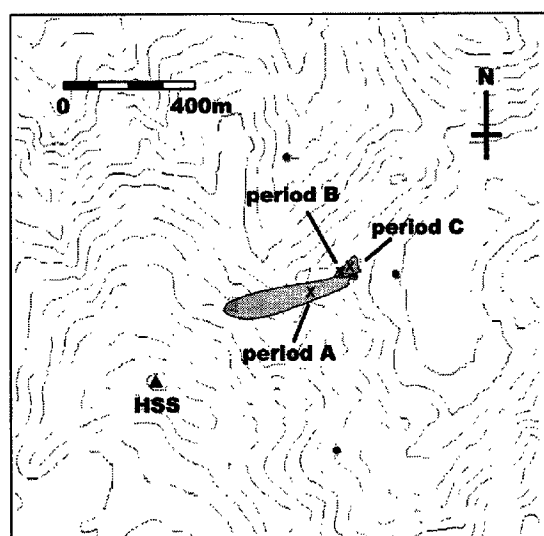


Fig. 3 Locations of single-dipole sources for periods A, B and C (indicated by crosses). Shaded areas indicate location errors in which the misfit values are less than 15% of maximum changes.

ソース位置の時間的推移に注目すると、水蒸気爆発直後の A の期間はやや新火口寄りに位置するが、B, C の時期では在来噴気地帯の南東縁付近にある。また、その深さが 200 m 程度浅くなっている。表面活動の観察によれば、水蒸気爆発直後は新火口を中心とした噴気活動が活発であったが、その後、在来噴気地帯へと活動の中心が移っている。帯磁源位置の移動はこうした活動の推移と関連しているようにも思われ、噴気の放

出に伴って地下浅部が冷却していることを示唆している。

坂中他 (2001) は、1999 年以降に実施した多数点の繰り返し磁気測量から、同様の手法によって帯磁源の位置を推定している。彼らは、密な観測点分布を利用して帯磁源を単一の磁気ダイポールではなく、2 つの独立したダイポールとして推定している。本稿で我々が推定した帯磁源の位置は、坂中他 (2001) の浅い方の帯磁源とほぼ同じである。従って、本稿で用いた 5 箇所の連続観測点による帯磁源の位置決定は、浅いソース（磁場変化の主要部分を占める）に対しては、十分な精度を持っていると考えられる。

2.3 熱磁気効果以外の可能性について

1995 年 10 月の水蒸気爆発以後、この地域では辺長測量および GPS による地殻変動観測が行われている (Nakaboh et al., 2002) が、その結果によれば、この地域の地盤は、我々が求めた地磁気のソースとほぼ同じ位置を中心として収縮傾向にある。従って、応力磁気効果を考えるとすれば減圧力源を考えるのが適切である。既に坂中他 (2001) で議論されているように、この場合、キュリー点深度が十分に深いと仮定すれば、地表面で期待される磁場変化は、力源の北側で全磁力増加、南側で減少となり、観測されたパターンとは逆である。従って、観測された磁場変化がピエゾ磁気効果である可能性は極めて小さい。

噴気活動に伴って岩石中の磁性鉱物に変質し、磁化が減少する可能性がある。しかし、この種の化学的変化は一般に不可逆過程であって、一旦変質した岩石が再び磁化を取り戻すことは考えにくい。九重硫黄山で

観測されている現象は磁化が増加するセンスであることから、こうした化学的なメカニズムが地磁気変化の原因である可能性は低い。

3. 考察

3.1 熱放出量と地磁気変化

前章のモデル計算の結果から、九重硫黄山地域では水蒸気爆発の後、噴気の放出によって地下浅部で冷却が進行していることが推定されたが、冷却に関わるエネルギーと、噴気として地表に放出されているエネルギーの関係はどのようになっているのであろうか。これを考察するため、いくつかの仮定の下に議論をすすめる。

まず、この地域における岩石の平均的磁化は、江原(1993)の地上磁気測量の結果によれば、およそ 5~7 A/m である。本稿でもこれを採用して、常温における平均的磁化を 5~7 A/m と考える。

次に、等価ダイポールが推定される位置(深さ数百 m)とその周辺領域で想定される温度について考える。京都大学が水蒸気爆発以後に実施した噴気温度測定によれば、新火口 b1 で 210~230 °C (1998 年 7 月)(京都大学, 1999)、在来噴気 C 領域で最高 300 °C (2001 年 4 月)(京都大学による未公表データ) という値が得られている。従って、地下浅部においても、噴気火道近傍では少なくとも 200 °C 以上の温度であることが推定される。また、江原・橋本(1981)の熱流量解析によれば、硫黄山直下 5 km 深の高温岩体の温度は 600 °C 程度と推定されているので、ここから分離上昇してくる揮発性ガスの温度はそれ以下であろう。従って、硫黄山直下の地下数百 m において温度変化が生じるとすれば、200~600 °C の範囲内であると考えてよいだろう。よく知られているように、一般に岩石の磁化変化の大半はこの温度範囲で起こる。従って、この地域の場合、磁化の変化は、温度もしくは熱エネルギーの変化にほぼ対応していると考えて差し支えないと思われる。

では、地下の帯磁領域が実際にどの程度の温度低下を受けるかについて考察してみる。噴気火道内部では、最高で 600 °C 程度の高温であることが想定されるが、その周辺部では、ある勾配をもって常温程度までの温

度分布があるはずである。噴気の放出によって地下で冷却が進行していると考えれば、ある広がりをもった高温領域が一様に温度低下するわけではなく、高温領域が縮退して周縁部から火道に向かって徐々に冷却すると考えた方が現実的であろう。その場合の温度低下量の見積もりには不確定さが伴うが、ここでは誤差を考慮して平均的に $\Delta T = 200 \pm 100$ °C の温度低下を仮定する。

この地域の岩石サンプルに関する熱-磁化特性は現在のところ不明である。ここでは、上で仮定した温度低下 ΔT に相当する磁化の増加量を常温での平均的磁化 6 ± 1 A/m の 20~100% であると考え、この場合、 ΔT に対応する磁化(単位体積当たり)の増加 ΔM は、 4 ± 3 A/m ($4 \pm 3 \times 10^{-3}$ emu/cc) ということになる。

さて、Table 3 に示したように、先のモデル計算からは、期間 A, B, C における等価的磁化変化量が求められているので、これを ΔM で除算することにより、温度低下を受けた等価体積 ΔV を算出することができる。また、岩石の体積比熱を C とすると、温度低下 ΔT の冷却に相当する熱エネルギーは、 $C \Delta T \Delta V$ として求められる。Table 4 に各時期の等価体積、等価熱エネルギーと単位時間当たりの冷却率をまとめた (C を 0.5 cal/cc と仮定)。 ΔT および ΔM に不確定さがあるので Table 4 の各値には 1 桁程度の不確定さが残るが、冷却率で比較すると、いずれの期間も 20~350 MW の程度であって、パラメータが時間に関して不変であるならばほぼ一定とみなせる。

一方、1995 年の水蒸気爆発以後、噴気として実際に地表に放出されているエネルギーは、爆発の直後数ヶ月間は数 GW であったが、その後放熱量は減少し、1996 年以降はおよそ 500 MW のレベルで推移している(Nakaboh et al., 2002; 江原, 1998)。これらのことから、水蒸気爆発直後には、地磁気変化から推定される地下浅部の冷却に関わるエネルギーの 10 倍から 100 倍程度の量が噴気として放出されており、その後も同程度から 20 倍程度の噴気放出が行われていることがわかる。すなわち、帯磁現象に関わる地下浅部の冷却のみでは、実際に地表に放出されている熱エネルギーの量はまかなえないのであり、不足分(おそらくは放出エネルギーの大半)は等価帯磁域よりも深部から供給されていると考えるべきである。

Table 4 Results of model calculations for each period. *Averaged value through periods A, B, and C.

	period A	period B	period C	total
equivalent volume (m ³)	2~13 x10 ⁶	5~34 x10 ⁶	6~45 x10 ⁶	1~9 x10 ⁷
equivalent thermal energy (J)	4~82 x10 ¹⁴	1~21 x10 ¹⁵	1~28 x10 ¹⁵	2~57 x10 ¹⁵
equivalent cooling rate (MW)	2~32 x10 ¹	2~34 x10 ¹	2~39 x10 ¹	*2~35 x10 ¹

モデル計算では、帯磁源を球状のものとして考えたが、実際には、より大きな球殻領域の帯磁と数学的には等価である。3つの期間を合計した約5年間では、 $1 \times 10^7 \sim 9 \times 10^7 \text{ m}^3$ の体積が冷却帯磁したことになるが、これは、半径300 mの球で考えれば、10~120 m厚み程度の球殻領域が外側から冷却帯磁したことに相当する。このように球殻領域の冷却を考えた方が、先に引用した江原(1993)の磁気解析の結果(平均的に5~7 A/mであるが噴気地帯で局所的無帯磁となっていると推定)とも整合的であろう。

3.2 地磁気変化の直線性

観測された地磁気変化が直線的であることは、何を意味するだろうか。この変化が冷却帯磁の傾向を示している以上、永久に変化が継続することはあり得ない。この変化は、地下浅部が完全に常温まで冷却されてしまえば止まらざるを得ないことは確実である。5年間以上も帯磁の傾向に鈍りが見えてこないことは、この変化が極めて長い時定数をもっていることを意味するのではなかろうか。

江原・橋本(1992)の地殻熱流量解析やSudo et al.(1996), Sudo and Matsumoto(1998)の地震波速度構造解析の結果によれば、九重地域の地下には約4~7 kmの深さに、現在冷却中の高温岩体があると推定されており、7 km以深には部分熔融の状態も存在すると考えられている。冷却中のマグマからは揮発性成分が分離上昇し、基盤岩内の亀裂を上昇していると考えられている。地下2 km以浅では地表から流入した天水と混合して気液2相の対流ゾーンを形成し、最終的に地表から噴気や温泉水として放出されているとされる(江原・橋本, 1992)。従って、地下浅部への熱の供給は、マグマの移動がない限り、比較的定常的な形で行われると考えて良いだろう。一方、九重硫黄山の活動の歴史を振り返ると、1662年以降、10~100年の間隔で変動を繰り返している(気象庁, 1975)。これらの事実を考え合わせると、この地域では、深部からの一定の熱供給の下で、噴気活動を通じて放熱(冷却)が行われているが、何らかの理由で放熱が追いつかなくなり、10~100年の間隔で、爆発的な熱放出を行っていると考えることができるのではないだろうか。現在、地磁気変化は地下浅部の冷却傾向を示しているが、この傾向はやがて止まり、次の水蒸気爆発までには加熱傾向に転じるのではないかと推測される。ただし、系の熱エネルギー容量が十分に大きければ、次の水蒸気爆発までの時間は長く、冷却の時定数も大きいと考えられる。その場合、最初の数年間の変化が直線的に見えるのは不自然なことではない。

では、逆に、現在の速度(20~350 MW; 200~1,800 万

$\text{m}^3/\text{年}$)のまま冷却が進行した場合、噴気地帯の地下浅部が完全に冷却してしまうまでの時間はどの程度であろうか。地表面での噴気地帯の空間的広がりからみて、最大半径300 mの球状領域が冷却しうると考えると、6~57年で完全に冷却してしまうことになる。冷却期間の後、同程度の時間をかけて再加熱が起こるとすると、爆発の周期はこの2倍の12~120年程度と考えることができ、歴史的な事実とほぼ一致している。以上は、冷却速度を一定と仮定した場合の考察であるが、最大冷却点に向かって徐々に速度が緩くなるような冷却を考えた場合には、さらに倍程度の時間的猶予が想定される。いずれにせよ、硫黄山地域の地下にある高温域は、現在進行中の冷却過程が今後数十年程度は継続し得るだけの熱容量をもっていると考えて良さそうである。

3.3 マグマの直接的関与について

波多江他(1997)によれば、1995年12月に発生した2度目の水蒸気爆発に際して噴出した火山灰には、微量ではあるが新鮮な発泡ガラスが含まれていた。たとえ微量とはいえ、現実には本質的に由来する発泡ガラスが放出されていたことは、少なくとも今期の活動の初期段階においては多少なりともマグマの関与があったと考えざるをえないだろう。しかし、我々の観測した地磁気変化は、最初の水蒸気爆発の直後から一貫して冷却帯磁の傾向を示している。この事実は、水蒸気爆発におけるマグマの関与がどの程度の規模であったのかを推定する上で重要である。一般に、溶融マグマの温度はキュリー点温度に比べて数百℃高い。仮に、水蒸気爆発の時点において数百 mの浅部までマグマ頭位が上昇していたとすれば、火道内のマグマが冷却されてもキュリー点温度を下回るまでは無帯磁の状態であって磁化変化を生じない。これとは逆に、火道周辺部ではマグマの熱によって温度が上昇するため消磁されるはずである。従って、この場合、少なくとも水蒸気爆発直後には帯磁ではなく消磁の傾向が観測されるべきである。こうした状況は既に、地表に溶岩を噴出した1991年の雲仙(Tanaka 1995)における観測でも実証されたとおりである。一方、水蒸気爆発前の加熱がマグマから揮発した高温の流体によって行われていたと考えた場合、地下数百 mに熱を輸送する流体の温度は高々キュリー点温度程度であると考えられるので、爆発の直後からすぐに冷却帯磁が起こっても不自然ではない。

地下浅部に顕著な温度上昇を与えない程度の少量のマグマが水蒸気爆発をトリガーした後、短時間の内に飛散したか深部に後退した可能性を完全に否定することはできないものの、我々の観測結果は、ある程度ま

とまったマグマの関与に対して否定的であると言える。

3.4 地下浅部の水収支について

地磁気変化から推定される冷却率 (20~350 MW) が、深部から供給される高温の火山ガスによる地下水の加熱 (気化) と排出によってもたらされていると考えてみよう。今、6 MPa において 200 °C の液相地下水 (比エンタルピ 850 kJ/kg) が 400 °C の過熱蒸気 (比エンタルピ 3200 kJ/kg) にまで過熱された上で噴気として排出されたと考えると、対応する地下水の量は 740~13,000 ton/day である。この温度・圧力条件における水の密度 (870 kg/m³) を考慮すると、容積にして 850~15,000 m³/day に対応する。

Nakaboh et al. (2002) は硫黄山を含む地域の辺長測量によって、1995 年の水蒸気爆発以後、在来噴気地帯の南縁付近を中心に山体が収縮したことを見出した。彼らによれば、力源を茂木モデルで仮定した場合、その収縮体積は、爆発以後の最初の 3 年間で 1×10^6 m³ と報告されている。この量は、1 日当たり換算すると、およそ 900 m³/day で、地磁気変化から推定される排出地下水量の下限に近い。Nakaboh et al. (2002) が主張するように、力源の収縮体積は、噴気として放出される水量と、深部あるいは周辺から供給される水量の差であると考えられる。従って、周辺から地下水の補給がある場合には、地殻変動には寄与しないが地下浅部の冷却には関係する水があることになり、冷却に関わる水の総量は 900 m³/day よりは大きいと考えるのが妥当であろう。

また、江原 (1998) はこの地域の重力変化から水収支を検討し、水蒸気爆発以後の噴気活動によって地下水が欠損したことを指摘している。江原 (1998) によれば、1995 年 10 月から 1997 年 5 月の暫定的結果として、地下で気化して噴気となった地下水 (天水起源) の量は、53,300 ton/day (1995 年 10 月~1996 年 1 月)、11,700 ton/day (1996 年 2 月~1996 年 5 月)、18,200 ton/day (1996 年 5 月~1996 年 10 月)、14,300 ton/day (1996 年 11 月~1997 年 5 月) と報告されている。これらの値から推定して、平均的には 20,000 ton/day の地下水が加熱・放出されていたことになる。こちらの方は、地磁気変化から推定される量の上限に近い。江原 (1998) の推定した天水の放出量は、平林他 (1996) による噴気の同位体比測定から推定したマグマ水の比率 (約 30%) に基づいていることに注意しなければならない。水蒸気爆発以後、徐々にマグマ水の比率が高くなった (平林他, 1996) ことを考慮すれば、20,000 ton/day という値は想定される上限値を示していると考えべきであろう。

以上のことから、この地域で観測されている冷却帯

磁現象が地下水の気化放熱によって行われているという考えは、他の観測からの推定とも矛盾しないと言える。

ところで、このような地下水の気化と排出による熱放散という形態は、九重硫黄山だけの特殊なものではなく、一般的に多くの火山や地熱地帯で共通して見られる現象である。しかし、九重硫黄山の場合には、その様式が比較的穏やかであり、かつ継続的であることに特徴がある。こうした特徴は、特定の火口から集中的な噴火活動が行われる火山よりも、ある空間的広がりをもった噴気活動を主体とする地熱地帯によく見られるものである。これまで、火山地帯の地磁気観測は、噴火現象をターゲットとして行われる傾向があり、継続的な噴気地帯に注目した長期的観測はほとんど行われてこなかった。今回我々が観測したような長期に亘る一方的な変化がこれまで報告されたことがなかったのは、そうした変化が期待されるフィールドにおける観測例がなかったからではないかと考えられる。逆に、今後、地熱地帯における地磁気観測の例が増えれば、九重硫黄山のようなタイプの火山における地下の熱輸送過程についてさらに理解が深まる可能性がある。こうした取り組みは、既に田中・宇津木 (2001) によって始められている。

4. 結論

著者らの地磁気観測によって、1995 年の水蒸気爆発以後、九重硫黄山地域は一貫して帯磁の傾向を示していることが明らかにされた。帯磁源の位置は在来噴気地帯の南縁部、すなわち、新火口列を含む噴気地帯の中心部にあり、地表からおよそ 200~400 m の深さである。噴火以後ほとんどその位置は変化していない。これらのことから、九重硫黄山では、噴気の放出に伴って地下浅部で冷却が進行しているものと推定される。

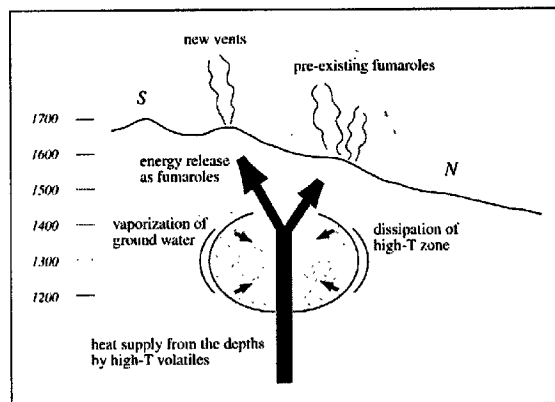


Fig. 4 Schematic image of heat discharging process of Kujū-Iwoyama as inferred from geomagnetic changes.

この冷却に関わる等価エネルギーは、磁化や温度変化量の誤差を考慮すると 20~350 MW と推定され、地表に放出されている噴気の熱エネルギー程度かそれ以下である。この冷却現象は、地下水の気化とその放出によるものであると考えると、地殻変動や重力変動の結果とも矛盾しない。

また、仮に現在の冷却速度が継続すれば、九重硫黄山の噴気地帯の広がりに見合う半径 300 m の球状領域が完全に冷却するまでに 6~57 年かかることになり、冷却帯磁が長い時定数をもって進行しているように見える事実と整合する。さらに、この現象は、帯磁センスであることからして無限に継続し得ず、やがて加熱期が訪れることが示唆される。このことは、硫黄山の噴火が 10~100 年程度の周期性をもって繰り返している歴史的事実とも整合する。

1995 年の水蒸気爆発の直後から地磁気が冷却帯磁を示した事実から考えて、この噴火の直接的熱源は地下浅部に貫入した熔融マグマである可能性は低く、1995 年のイベントは、深部からの揮発性流体による定常的な熱供給と、従来からの噴気活動に伴う熱放散の枠組みの範囲内で発生した周期的な現象の一部であった可能性が高い。

謝 辞

本研究は、九州大学工学研究院地球資源システム工学部門地球熱システム学研究室の協力を得て行われたものである。江原幸雄教授には観測機材の共用等に関してご協力頂いたことを感謝申し上げます。

参考文献

江原幸雄 (1993) : 火山発電に関する基礎的研究—九重火山・九重硫黄山における熱構造・熱過程・熱抽出に関するケーススタディー, 科学研究費補助金(一般研究(A)) 研究成果報告書, pp. 43-48.

江原幸雄 (1998) : 1995 年九重火山噴火とその後の経過, 温泉科学, 第 48 巻, pp. 72-83.

江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎 (1981) : 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれから推定される熱水系と火山ガスの起源, 火山, 第 26 巻, pp. 35-56.

江原幸雄・橋本和幸 (1992) : 活動的な噴気地域の背景の熱構造—九重硫黄山の例—, 日本地熱学会誌, 第 14 巻, pp. 205-221.

鎌山恒臣・歌田久司・増谷文雄・山口勝・笹井洋一・田中良和・橋本武志 (1992) : 霧島火山群・新燃岳 1991-92 微噴火と電磁気観測, CA 研究会論文集, pp.

279-296.

鎌田浩毅 (1997) : 宮原地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 127p.

気象庁 (1975) : 日本活火山要覧, 119p.

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター (1999) : 九重火山の火山活動について (1998 年 5 月~9 月), 火山噴火予知連絡会会報, 第 72 号, pp.99-104.

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, 第 22 号, pp. 25-38.

神宮司元司・江原幸雄 (1996) : 最大噴気直径を利用した火山噴気放出量及び放熱量測定法, 火山, 第 41 巻, pp. 23-29.

田中良和・宇津木充 (2001) : 地磁気変化を利用した地熱の推移に関する研究, 大分県温泉調査研究会報告, 第 52 号, 9-14.

波多江憲治・渡辺公一郎・渡辺一徳・筒井智樹・本村慶信 (1997) : 九重火山 1995-96 年噴火活動に伴う火山灰中の発泡ガラス含有量の経時変化, 火山, 第 42 巻, pp. 345-353.

平林順一・大場武・野上健治 (1996) : 九重山 1995 年 10 月噴火と地球化学的研究, 文部省科学研究費, 突発災害調査研究成果「1995 年 10 月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動の推移の調査・研究(研究代表者 小林芳正)」, pp. 63-73.

Briggs, G. A. (1969) : Plume rise, At. Energy Comm. Washington, D.C., Critical Rev. Ser., Rep. TID-25075.

Hurst, A. W. and Christoffel, D. A. (1973) : Surveillance of White Island Volcano, 1968-1972, New Zeal. J. Geol. Geophys., Vol. 16, pp. 965-972.

Kagiyama, T. (1981) : Evaluation methods of heat discharge and their applications to the major active volcanoes in Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 9, pp. 87-97.

Nakaboh, M., Ono, H., Sako, M., Sudo, Y., Hashimoto, T. and Hurst, A. W. (2002) : Continuing deflation by fumaroles at Kuju Volcano, Japan, Geophys. Res. Lett., submitted.

Sudo, Y., Ono, H., Hurst, A. W., Tsutsui, T., Mori, T., Nakaboh, M., Matsumoto, Y., Sako, M., Yoshikawa, S., Tanaka, M., Kobayashi, Y., Hashimoto, T., Hoka, T., Yamada, T., Masuda, H., and Kikuchi, S. (1998) : Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 81, pp. 245-267.

Sudo, Y. and Matsumoto, Y. (1998) : Three-dimensional

- P-wave velocity structure in the upper crust beneath Kuju Volcano, central Kyushu, Japan, *Bull. Volcanol.*, Vol. 60, pp. 147-159.
- Tanaka, Y. (1993) : Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso volcano, *J. Volcanol., Geotherm. Res.*, Vol. 56, pp. 319-338.
- Tanaka, Y. (1995) : Volcanomagnetic effects on the Unzen Volcano (1990-1992), *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol. 47, pp. 325-336.

Heat Discharging Process and Geomagnetic changes of Iwoyama, Kuju Volcano

Takeshi HASHIMOTO*, Mitsuru UTSUGI, Shin'ya SAKANAKA***
and Yoshikazu TANAKA***

*Graduate School of Science, Kyoto University

**Geographical Survey of Japan

***Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

Synopsis

Our geomagnetic observations on Kuju-Iwoyama Volcano during 1995~2001 revealed shallow cooling and magnetization due to fumarolic activity. It is plausible that this cooling process was triggered by opening of new crater chain at the phreatic event in 1995 preceded by the heating phase associated with high-temperature volatiles from the depth. Vaporization and discharge of ground water seems to play a main role for the cooling at shallow subsurface where the equivalent magnetization source is estimated.

Keywords: geomagnetism, volcano, Kuju Iwoyama