

## 地磁気変化から見た九重硫黄山の熱源の冷却

小澤正幸\*・福岡晃一郎\*・西島 潤\*\*・藤光康宏\*\*・江原幸雄\*\*

Cooling of the Heat Source beneath Kuju-Iwoyama Deduced from Geomagnetic Changes

Masayuki OZAWA\*, Koichiro FUKUOKA\*, Jun NISHIJIMA\*\*,  
Yasuhiro FUJIMITSU\*\* and Sachio EHARA\*\*

### ABSTRACT

We carried out geomagnetic repeat observations at Kuju-Iwoyama, the central part of Kuju volcano in May, July, October and December, 2001. We paid special attention to geomagnetic changes from May to July. In this period, geomagnetic total force decreased on the north of Kuju-Iwoyama and decreased on the south of Kuju-Iwoyama. This change is thought to be caused by the magnetization with cooling of the heat source beneath Kuju-Iwoyama.

### 1. 序論

高温の火山岩が冷却する際に、キュリー点を通過すると、地球磁場の方向と同一方向に帯磁することはよく知られている。この現象を利用して、地表での地磁気観測から、地中で発生する熱的变化に伴う磁気的变化を知ることが可能である。

大分県九重火山の九重硫黄山地域では、1995年の水蒸気爆発以後、地磁気連続観測が開始され、火山岩の冷却に伴う帯磁が原因と見られる1年間で約40nTにも及ぶ全磁力変化が観測されている(田中ほか, 1998)。また、1999年4月から、2000年1月にかけて、計4回地磁気繰り返し観測が実施され、火山岩の冷却に伴う帯磁が原因と見られる全磁力変化が観測されている(坂中ほか, 2001)。

本論文では、2001年に行った地磁気全磁力繰り返し観測の結果から得られた全磁力変化をもとに、その変化を説明する磁気ダイポールを推定し、九重硫黄山地域内部の磁気的および熱的变化の考察を行う。

### 2. 九重火山の概要

九重火山は九州中部に位置し (Fig. 1)、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って形成された典型的な島弧の安山岩質火山である。この九重火山は、東西に22km、南北に24kmに広がっている約20個のドーム状火山体から構成されている。活動の中心は、星生山

の北東山腹にある通称九重硫黄山地域で、活発な噴気活動を行っている。

九重火山の活動は今から30万年前(Watanabe et al., 1987)あるいは14万年前(鎌田, 1997)頃に開始し、数万年前には主要な活動は終了したと考えられている。



Fig. 1 Location map of Kuju-Iwoyama

\*九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻地球熱システム学研究室  
〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

\*\*九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門地球熱システム学研究室  
〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

る。有史以後の活動に関しては、噴気活動の活発化あるいは水蒸気爆発と見られる活動が17世紀半ば以降、60～100年程度の間隔で生じている。このような背景のもと、1995年10月11日九重火山で257年ぶりに火山灰の噴出を伴う噴火活動が開始された。この噴火により、噴気地域(A, B, C-region)の南方300mの地点に新たに火口列(D-region)が東西に350mにわたって形成された。また、同年の12月下旬にも火山灰の噴出を伴う噴火が発生した。

### 3. 地磁気全磁力繰り返し観測

#### 3-1 観測方法

観測は九重硫黄山地域で、2001年5月26日、7月13～14日、10月26～27日、12月25～26日の計4回、行った。Fig. 2に観測点の位置図を示す。

観測には、オーバーハウザープロトン磁力計(GEM社製、GSM-19)を用い、センサーの高さは、地上から2mの位置に固定して、観測を行った。

2001年5月26日、7月13～14日、10月26～27日には、1つの観測点につき10回連続して、観測した。12月25～26日には、1つの観測点につき10秒間隔で5分以上観測した。

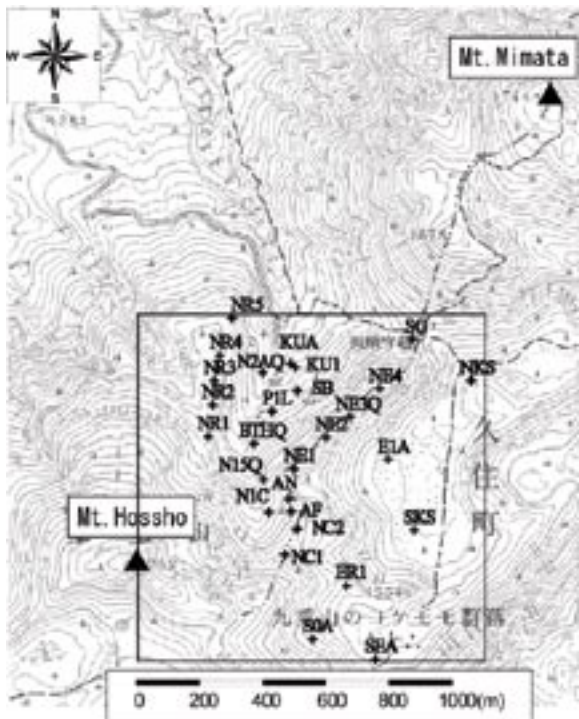


Fig. 2 Location map of observation points.

#### 3-2 補正方法

地磁気の永年変化、磁気嵐、日変化の影響を排除するために、九重硫黄山地域と南西に約30km離れた京都大学火山研究センターでの全磁力値の差を用いた。

#### 3-3 観測結果

2001年の5月、7月、10月、12月に繰り返し観測

を行なった観測点のうち、NIC、PIL、E1Aの観測結果を、Fig. 3に示す。5月、7月、12月の観測結果と比較すると、10月の観測結果にはマイナスの方向に磁気ノイズが混入していると考えられる。磁気ノイズの原因としては、地磁気の季節変化、九重硫黄山地域と基準点とした京都大学火山研究センターの地磁気変化の地域差、地磁気の擾乱などが挙げられ、種々検討したが原因を特定できなかった。この磁気ノイズの問題は今後引き続き検討したい。

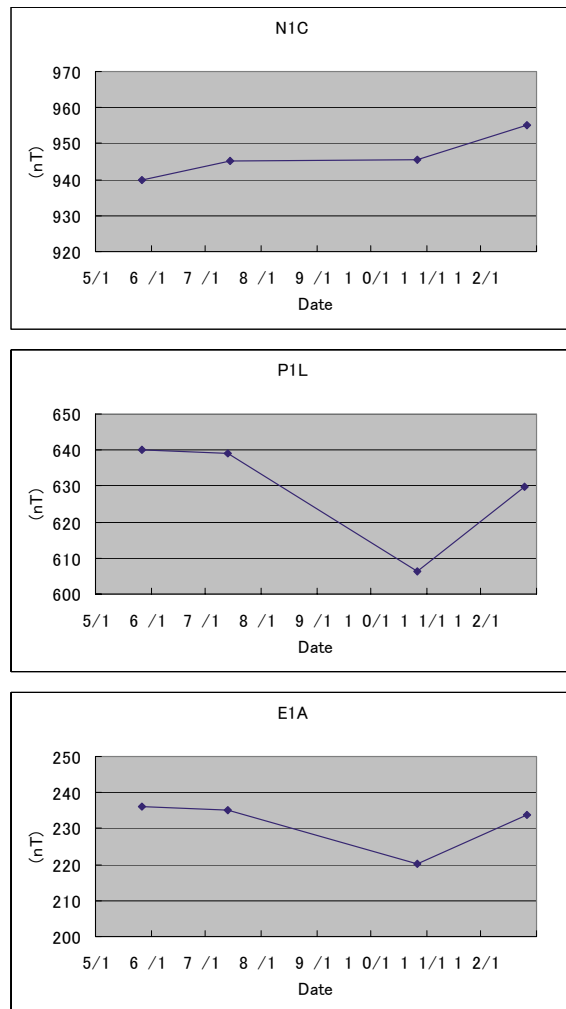


Fig. 3 Geomagnetic changes at NIC, PIL and E1A.

### 4. 磁気ダイポールの推定

10月の観測結果には磁気ノイズの混入が見られ、12月の観測は悪天候のため観測点数が少なかったため、以下では5月26日から7月13日までの全磁力変化に注目して、議論を進める。この期間の全磁力変化の空間分布をFig. 4に示す。

Fig. 4を見ると、全磁力は観測地域の北側で減少し、南側で増加しており、対象領域内に現在の地球磁場方向と同一帯磁方向の磁気ダイポールがある場合と同じ変化と考えられるので、磁気ダイポールの位置と強度を推定した。

磁気ダイポールの位置と強度は、共役勾配法によっ

て最小二乗法的に決定した。決定するパラメータは、磁気ダイポールの x、y、z 座標と、ダイポールモーメントの 4 個である。パラメータの初期値として、磁気ダイポールの位置を星生山の北 100m、東 100m、標高 1000 m とし、ダイポールモーメントの初期値を  $1.0 \times 10^7 \text{Am}^2$  とし、反復計算を行った。残差の減少率が 0.1% 以下になった時点で収束と判定した。この際に用いた地磁気伏角と偏角はそれぞれ、 $+47^\circ$ 、 $-6^\circ$  である。周辺の値とかけ離れた値を示す観測点 NR2、NR3、NC2、AF は、磁気ノイズが大きいと判断して、入力データから取り除いて計算を行った。

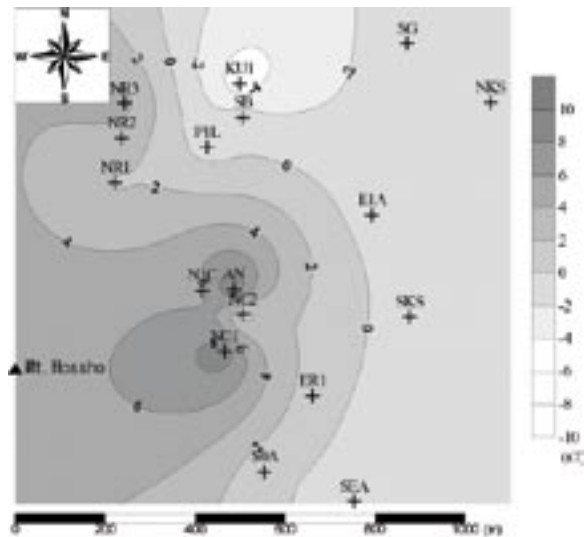


Fig. 4 Distribution of geomagnetic changes from May 26 to July 13, 2001.

その結果、磁気ダイポールの位置は、星生山の北 390 m、東 327 m、標高 1059 m（深さ約 450m）の位置に求まり（Fig. 5）、ダイポールモーメントは、 $8.22 \times 10^6 \text{Am}^2$  となり、田中ほか（1998）や坂中ほか（2001）と同様に 2A/m の磁化を獲得したと考えれば、半径 99.4 m（体積  $4.11 \times 10^6 \text{m}^3$ ）の球が帯磁したものと等価である。観測値と計算値のフィッティングの状態を Fig. 6 に示す。1 個のダイポールだけでは、完全にはデータを説明できていないが、これ以上の収束は見られなかった。

この求められた磁気ダイポールについて考察する。磁気ダイポールが発生した原因を、高温の火山岩が冷却される過程でキュリー温度を通過する際に獲得する帯磁によるものと仮定すると、2001 年 5 月から 7 月にかけての全磁力変化は、A-region の南端の地表下、約 450 m 付近の領域で、火山岩が冷却されて、帯磁したために起こったのではないかと考えられる。

ここでは、田中ほか（1998）や坂中ほか（2001）と同様に 2A/m の磁化獲得を仮定したが、1978 年に行われた豊肥地域内の岩石試料の自然残留磁化、帯磁率測定結果（電源開発株, 1979）中の第四紀涌蓋山溶岩と第四紀花牟札火山岩類の計 7 個の岩石試料から、全磁化（自然残留磁化と地球磁場による誘導磁化との和）

を見積もると、 $8.9 \pm 4.9 \text{A/m}$  となり、この値と比較すると、2A/m の磁化獲得は、やや少ないと考えられる。

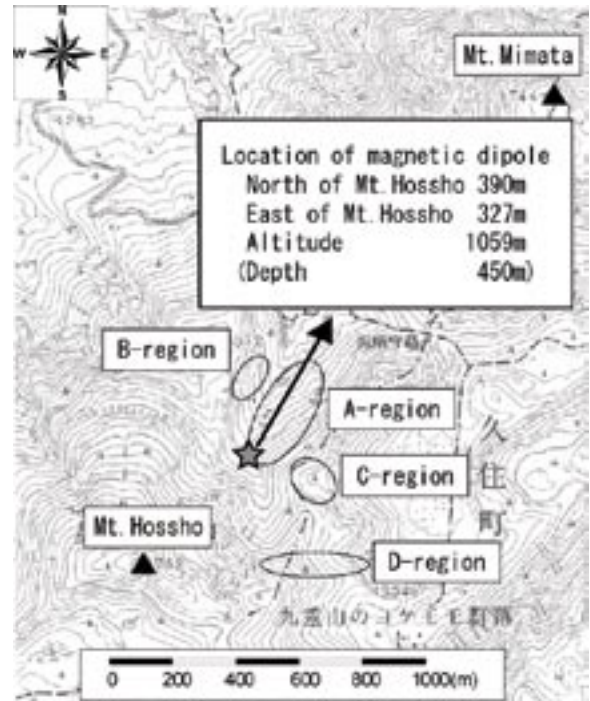


Fig. 5 Location map of the estimated magnetic dipole.

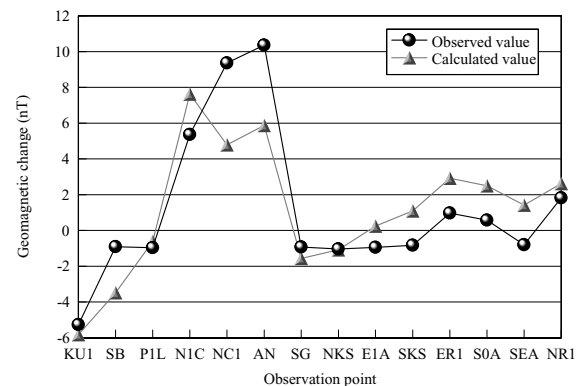


Fig. 6 Comparison of observed and calculated total magnetic intensities.

## 5. 議論

### 5-1 放熱量観測との比較

火山岩の磁化は、磁性鉱物のマグネタイトやチタノマグネタイトによって起き、火山岩の磁化は温度の上昇とともに小さくなり、キュリー温度に達すると完全に磁化を失う。それらの磁性鉱物を含む火山岩が、冷却される際にキュリー温度を通過すれば、地磁気変化としてとらえることができ、逆に地磁気変化から、温度変化及び、磁化に寄与した熱エネルギーを見積もること可能である。

九重硫黄山地域の構成岩石についての残留磁化—温度関係については未測定であるが、田中ほか（1998）は九重硫黄山地域の構成岩石の残留磁化の強さを 2A/m と仮定し、熱エネルギーあたりの磁化変化効率

のよい温度領域が200～400℃であることを考慮して、磁化の獲得には、200℃程度の温度変化が必要であるとして、火山岩の冷却に必要な熱エネルギーを推定した。

同様な方法で、2001年5月26日から7月13日までの全磁力変化から求めた磁気ダイポールから、火山岩の冷却に必要な熱エネルギーを推定した。火山岩の冷却に必要な熱エネルギーは、質量(=体積×密度)×温度変化×比熱で与えられる。火山岩の密度を2300kg/m<sup>3</sup>、比熱を1000J/kg・Kとすると、今回の地磁気繰り返し観測の結果から、火山岩の冷却領域の体積を4.11×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>と推定できたので、九重硫黄山地域で失われた熱エネルギーは、50日間で1.89×10<sup>15</sup>J(=4.11×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>×2300kg/m<sup>3</sup>×200K×1000J/kg・K)となり、時間率に換算すると438MWとなる。

1997年以降九重硫黄山地域の全体の放熱量(Fig. 7)は、約600～1100MWで安定しているの、この傾向が2001年まで続いていると考え、地磁気変化から推定した火山岩の冷却に寄与する熱エネルギー(438MW)の約1.4～2.5倍大きくなる。放熱量と地磁気変化から推定した火山岩の冷却に寄与する熱エネルギーとの差は、地磁気変化から推定した冷却領域よりも深部から供給されている熱エネルギーに起因すると考えられる。

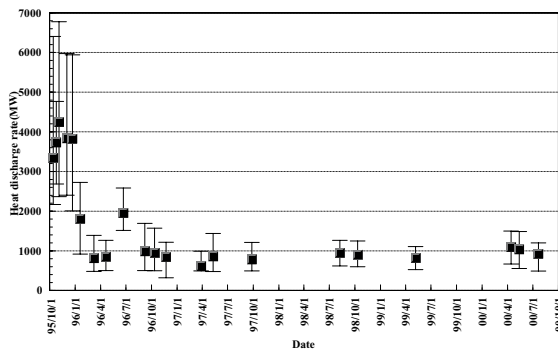


Fig. 7 Temporal variation of total heat discharge rate from Kuju-Iwoyama.

### 5-2 1995年噴火後の九重硫黄山地域の熱源冷却

噴火後の地磁気観測から得られた地磁気全磁力は、田中ほか(1998)、坂中ほか(2001)、そして本研究いずれも、北側で減少し、南側で増加し、帯磁の傾向を示しており、熱源は冷却し続けていると考えられる。

また、噴火後の火口・噴気温度(Fig. 8)は、長期的にみると低下しており、このことから噴火後、火山活動が低下し、地磁気観測と同じく熱源の冷却の傾向がうかがえる。

この冷却について以下のように考えた。1995年噴火後、一貫して冷却が続いていることから、地下の高温部が次第に冷却していると考えられる。また冷却域の形状が分かっていないので、ある大きさの

球が次第に冷却していくことを仮定して、考えることにした。今回の観測結果から、50日間で、体積4.11×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>の火山岩の冷却を推定した。この体積は半

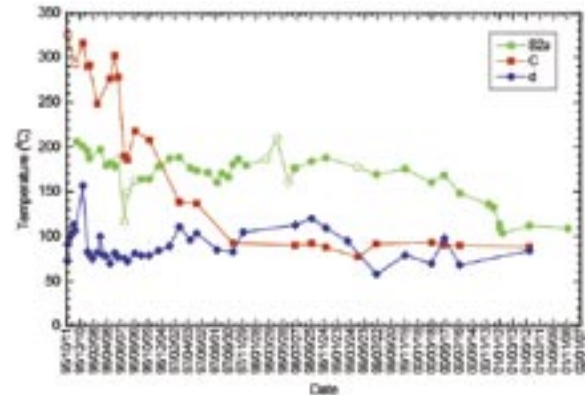


Fig. 8 Representative patterns of temperature change at B-region(B2a), C-region(C) and D-region(d).

径300mの球の場合、外側の厚さ3.7mの球殻の部分、半径250mの球の場合、外側の厚さ5.4mの球殻の部分、半径200mの球の場合、外側の厚さ8.5mの球殻の部分と同じ体積である。球殻の厚さdの部分だけが熱伝導だけで冷却される期間 $\tau_t$ (熱的緩和時間)を以下の式で求めるとそれぞれ40日、84日、209日となり、今回の観測期間は50日間であるので、熱源自身は、熱伝導的に冷却している可能性が考えられる。

$$\tau_t = \frac{d^2}{4\kappa}$$

$\tau_t$ : 時定数 (s)

d: 厚さ (m)

$\kappa$ : 熱拡散率  $1 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$

次に、1995年噴火後から1998年にかけての九重硫黄山地域の水の質量バランス(Fig. 9, 10)が、重力変動量と水蒸気放出量から求められている(Fujimitsu et al., 1999)。Fig. 9, 10から、噴火に伴って地下の流体が大量に大気中に放出されたため、九重硫黄山地域内部は一時的に地下水が欠損し、それを補うように大量の地下水が周囲から供給されていくのがわかる。この

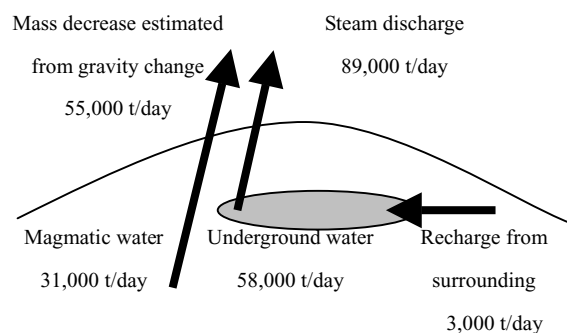


Fig. 9 Mass balance of ground water from mid-October, 1995 to January, 1996. (Fujimitsu et al., 1999)

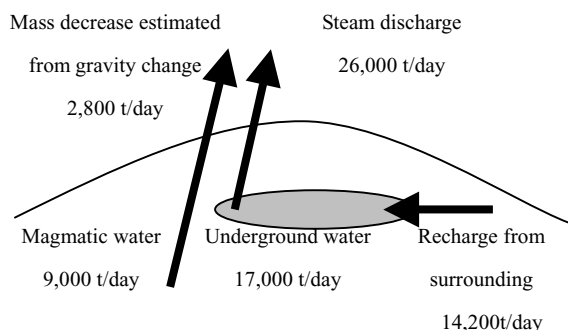


Fig. 10 Mass balance of ground water from January, 1996 to November, 1998. (Fujimitsu et al., 1999)

ことから、1995年の噴火後、九重硫黄山地域の熱源自身は熱伝導的に冷却しているが、周囲から供給される地下水によって、その熱は急速に地表にもたらされていると考えられる。

## 6. 結論

2001年5月、7月、10月、12月の計4回、九重硫黄山地域で地磁気全磁力繰り返し観測を行った。10月の観測結果には磁気ノイズの混入が見られ、12月の観測は悪天候のため観測点数が少なかったため、5月から7月までの全磁力変化だけに注目して、解析を行った。その結果全磁力変化は、熱源の冷却による火山岩の帯磁で説明がつくことがわかった。この変化をもっともよく説明する磁気ダイポールの位置は、A-regionの南端の地表下、約450mとなり、さらに2A/mの磁化を獲得したと考えれば、半径99.4m(体積 $4.11 \times 10^6 \text{m}^3$ )の球が帯磁したものと等価となる。このような全磁力変化は、九重硫黄山地域の周囲から供給される地下水が、熱源を冷却しているために起こっていると考えられる。

今後の課題として、観測を継続し、良質なデータを蓄積すること、及び基準点となる連続観測点を新たに九重硫黄山地域の周辺に設けることなどがあげられる。

## 謝辞

本研究にあたり、京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センターの全磁力連続観測データを利用させていただいた田中良和氏、橋本武志氏、宇津木充氏に、この紙面をおかりして深く感謝の意を表します。

## 参考文献

電源開発株式会社(1979);昭和53年度大規模深部地熱発電所環境保全実証調査報告書, 27-28.

Fujimitsu, Y., Ehara, S., Nakano, Y., Nishijima, J. and Koya, M. (1999); Water discharge and recharge balance of Kuju volcano, Japan, deduced from thermal and gravity measurements, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.23, 415-418.

鎌田浩毅(1997);宮原地域の地質, 地域地質研究報告, 地質調査所, 1-127.

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, 25-38.

田中良和・橋本武志・茂木透・江原幸雄(1998);地磁気変化から推定される九重火山の熱放出, 科学研究費報告書「発達史的観点を取り入れた地熱構造の解明とその地熱資源探査への応用に関する研究」, 217-224.

Watanabe, K., Hayashi, M. and Fujino, T. (1987); Fission track age of volcanoes in the Kuju volcanic region in relation to geothermal activity, Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan, Vol.9, No.3, 207-217.