HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雌阿寒岳ナカマチネシリ火口の全磁力変化と熱活動
Author(s)	田中, 良; 橋本, 武志; 鈴木, 敦生
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 79, 15-23
Issue Date	2016-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.79.15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/60916
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_79_p15-.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 79, March 2016, pp. 15 － 23
doi : 10. 14943 / gbhu. 79. 15

論説

雌阿寒岳ナカマチネシリ火口の全磁力変化と熱活動

田中　良・橋本　武志・鈴木　敦生
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

（2016 年 1 月 29 日受理）

Magnetic total field changes and thermal activity around Nakamachineshiri crater, Meakandake

Ryo TANAKA, Takeshi HASHIMOTO and Atsuo SUZUKI
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 29, 2016)

We performed measurements of the magnetic total intensity at Nakamachineshiri crater of Meakandake volcano, eastern Hokkaido, in 2013, 2014 and 2015. Comparing the three campaigns, we found small but systematic magnetic changes suggesting demagnetization at the shallow subsurface of the crater during 2014-2015. We estimated the best-fit demagnetized source as a sphere with magnetic moment of 2×10^6 Am^2 at a depth of 250 m (960 m a.s.l) beneath the crater. We then considered it was brought by thermal demagnetization, and made an order estimation of the heating rate at the source by assuming a simplistic temperature-magnetization relationship.

In addition, we assessed the surface heat loss due to discharging fumarolic gas, evaporation and radiation from hot ponds, and geothermal anomalies. Total amount of the surface heat discharge rate was estimated to be in a range from a few to 10-odd MW. This might be comparable or one-order smaller than the heating rate based on the crude estimation from magnetic measurements.

Ⅰ. は　じ　め　に

雌阿寒岳は北海道東部の阿寒知床火山列の西南端に位置する標高 1499 m の活火山である（Fig. 1）. 山体はナカマチネシリやポンマチネシリ，阿寒富士などの 8 つの火山から構成される．噴火活動としては，1955 年から 1966 年までナカマチネシリ火口とポンマチネシリ火口において水蒸気爆発が断続的に繰り返されていた（北海道防災会議，1976）. 1970 年代以降は，ポンマチネシリ火口でのみ断続的に水蒸気爆発が発生した（1988，1996，1998，2006，2008 年）.

雌阿寒岳ではこれまで地震，地殻変動，火山ガス，比抵抗などさまざまな観測が行われてきた. 地下の温度状態を反映すると期待される全磁力観測は，気象庁地磁気観測所女満別出張所（当時）が

BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示 - 非営利 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています（http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/）.

1977 年からナカマチネシリ火口と山麓で，1992 年からポンマチネシリ火口で開始した．しかし，観測点が 1 点であったこと，年 1 回の繰り返し測量であったことからナカマチネシリ火口周辺では火山活動に関連したと考えられる有意な変化は観測されなかった（福井・他，1994）．現在はポンマチネシリ火口周辺で稠密な繰り返し観測と連続観測が行われており，2008 年の水蒸気爆発時には噴火活動に関連したと考えられる全磁力変化が観測された（橋本・他，2009）．一方，ナカマチネシリ火口周辺での観測は最近行われていない．しかし，ナカマチネシリ火口では現在も噴気活動や湯沼による熱放出が行われている．この熱放出の供給系，ナカマチネシリ火口地下の温度状況を明らかにすることは，ナカマチネシリにおける噴火活動を理解することのみならず，雌阿寒岳全体の火山活動を理解する上で重要である．これらの問題を明らかにするために本研究ではナカマチネシリ火口周辺に繰り返しの全磁力観測点を複数設置し，地磁気全磁力の時間変化から，山体内部の熱変化率の推定を試みた．同時に，ナカマチネシリ火口からの熱放出率の定量化も試みた．

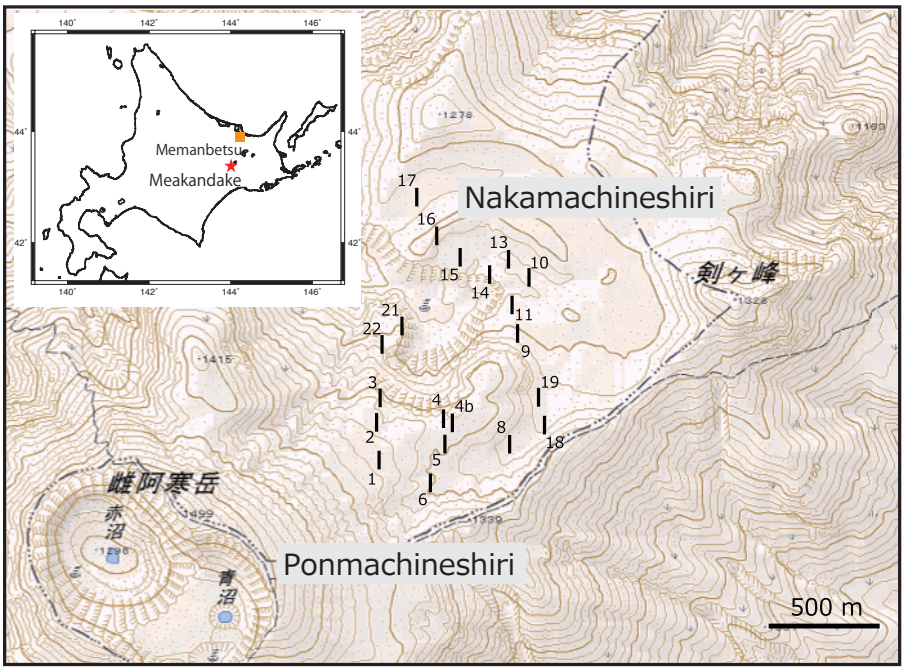


Fig. 1. Location of Meakandake, Memanbetsu Magnetic Observatory（Reference point）and magnetic repeat pegs.

Ⅱ．観　測　方　法

本研究の目的は，地磁気全磁力の時間変化の空間分布を捉えることである．そのためには安定して繰り返し観測することのできる磁気点を多数設置する必要がある，そこで，まず候補地周辺数 m の磁気勾配を測定し，磁気勾配が小さい場所を観測点とした．その結果，20 点あまりの観測点

全てにおいて，磁気勾配を 10 数 nTm^{-1} 以下とすることができた．磁気点として 60 cm 弱のプラスチック杭を使用した．プラスチック杭による磁気点の設置は凍上による忘失が懸念されたため杭にマーカーを引き，高さの復元を可能にした．実際，数カ所の観測点で杭高の変化が認められたために杭の打ち直しや観測点の変更を行った．

磁気測量は北海道大学所有の Gem systems 社製 GSM-19 型オーバーハウザー磁力計 1 台を用いて行った．測定は各地磁気点の全磁力を 5 秒毎に数分測定し，20 ～ 30 個の測定データを取得した．参照点として気象庁地磁気観測所女満別地磁気観測施設の毎秒値を用い，測定データとの単純差平均値を求めた．

観測点の選定，設置と第 1 回の磁気測量を 2013 年 9 月 26 日に行った．2014 年 8 月 20 日に第 2 回を，2015 年 9 月 8 日に第 3 回の磁気測量を行った．磁気点の分布を Fig. 1 に示す．

Ⅲ．測　定　結　果

3 回の磁気測量の結果を時系列として Fig. 2 に示す．3 回の測定結果で一貫した傾向は見て取れず，屈曲した変化を示している．これは 2013 年から 2015 年の間で全磁力変化の傾向が変化したことを示している．また，この屈曲は火口南側，北側の磁気点それぞれにおいて似通った傾向を示しており，全磁力変化に空間的なパターンがあることが示唆される．Fig. 3 は第 2 回と第 1 回，第 3 回と第 2 回の全磁力の変化量を地図上にプロットしたものである．2013 年 8 月から 2014 年 9 月にかけては変化量も小さく，火口直下の消磁や帯磁で典型的に生じる双極子型の変化は見受けられない．一方，変化量としては数 nT とやや小さいものの 2014 年 8 月から 2015 年 9 月にかけては火口北側で全磁力が増加し，火口南側で減少するという火口直下の消磁を示唆するパターンが認められる．

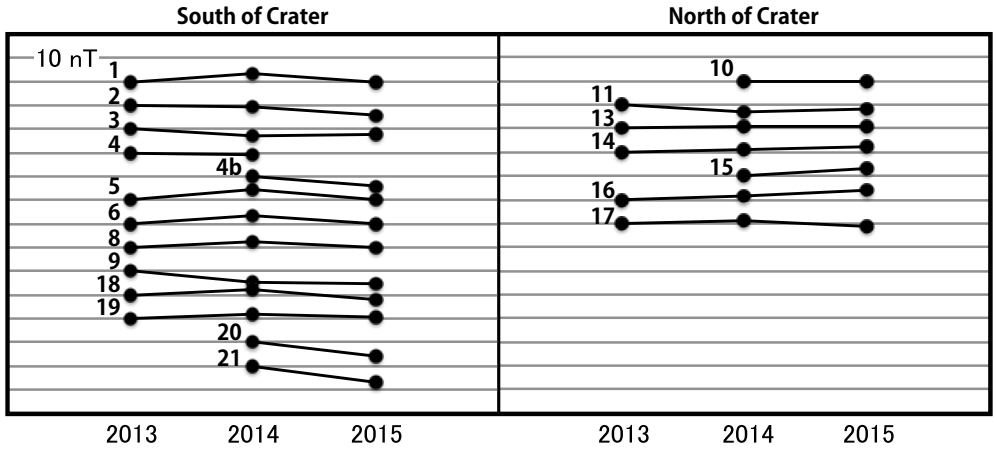


Fig. 2. Magnetic total field changes in 2013 and 2015. One division is 10 nT.

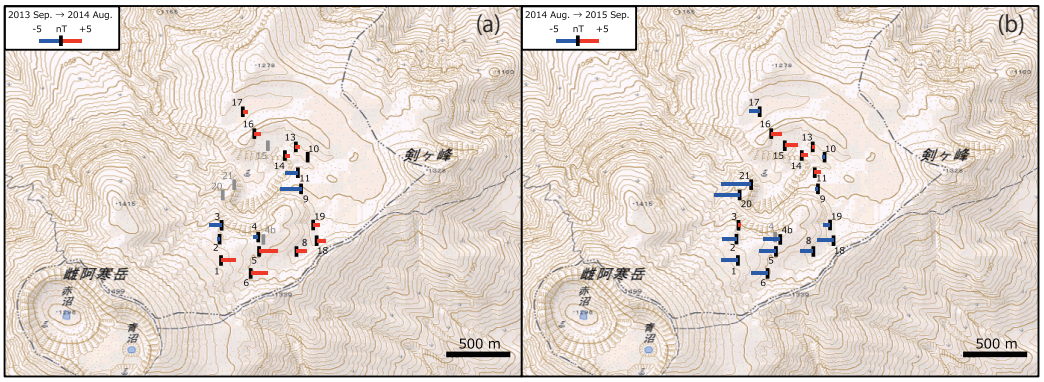


Fig. 3. Spatial distribution of magnetic total field changes in (a) 2013 and 2014, (b) 2014 and 2015.

ここでは2014～2015年の変化についてナカマチネシリ火口地下に球状の消磁源を仮定することでモデル化を試みた．2013～2014年の変化は単純なモデルでは説明できないため，ここでは対象としない．モデルによる計算値と観測値との差の自乗和が最小となるように，消磁球の磁気モーメントと位置の4つの未知数を探索した．モデルによる各観測点での計算値は各観測点の高度が考慮されている．この探索により推定された最適解消磁源の位置をFig. 4に×印で，モデル計算値と観測値を棒グラフで示した．最適解消磁源の位置はナカマチネシリ火口南縁部の標高960 m（深さ250 m）に求まった．消失磁気モーメントは2×10^6 Am^2であり，消失磁化を1 Am^{-1}と仮定した場合の消磁体積は2×10^6 m^3である．これは半径80 mの球に相当する．

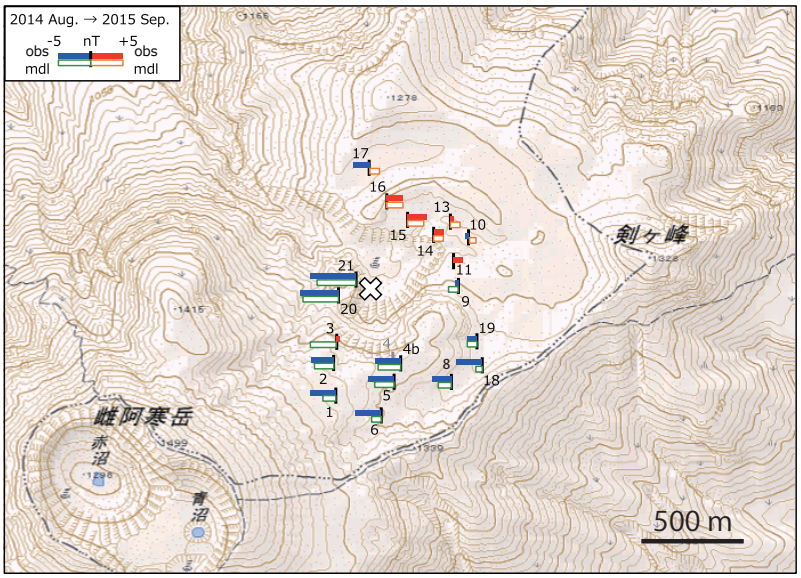


Fig. 4. Comparison of magnetic total field changes between best-fit-model (mdl) and observation (obs). X denotes the location of the demagnetized source (960 m a.s.l., 250 m depth).

Ⅳ．熱消磁の定量的推定

火山における磁気変化をもたらす要因として主に温度変化と応力変化が挙げられる．気象庁のGNSS観測や国土地理院によるSAR干渉解析によれば我々が地磁気観測を行った2013年から2015年にかけては，ナカマチネシリ火口周辺では有意な地盤変動は観測されていない（気象庁，2015）．このことから応力磁気効果の可能性は低い．従って，今回推測された消磁は地下の岩石温度が上昇した，もしくは高温領域が拡大したことによる熱消磁であると考えることができる．そこで，消磁に必要な熱量の推定を試みる．岩石の温度磁気特性は本来，ナカマチネシリを構成する岩石を採取し，測定したものを用いるべきであるが，そのような測定がこれまで行われていない．ここでは，雌阿寒岳と同様，安山岩主体の他火山の岩石磁気測定，または空中磁気データからの推定（山崎・他，1992；宇津木・他，2004；Koyama et al., 2013）に基づいて，ナカマチネシリ火口周辺を構成する岩石の0度における残留磁化を1～5 Am^{-1}と仮定する．岩石が磁化を完全に失う温度をマグネタイトのキュリー温度580℃（小嶋・小嶋，1972）を参考に600℃と仮定する．さらに，磁化－温度特性として0℃から600℃の区間において一定の変化率を仮定すると，単位温度変化当たりの磁化変化ΔJは$2 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}\ Am^{-1}K^{-1}$である．従って，推定された磁気モーメント変化に必要な熱量ΔQは$5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15}$ Jである．ここで，ΔQは次の式を用いて求めた．

$$\Delta Q = C\rho\frac{\Delta M}{\Delta J} \tag{1}$$

Cは岩石の質量比熱 900 $JK^{-1}kg^{-1}$，ρは密度 2500 kgm^{-3}とする．ΔMは推定された消失磁気モーメント$2 \times 10^6\ Am^2$を用いる．第2回と第3回の観測間隔は384日であり，一定の蓄熱を仮定するとその蓄熱率Wは20～80 MWと推定される．ただし，この推定において仮定した磁化温度特性は極めて単純化されたものであり，不確定な要素が強いことを付記しておく．実際に雌阿寒岳を構成する岩石の磁化－温度特性の測定は今後の課題である．

Ⅴ．ナカマチネシリ火口の熱放出率

地下における熱伝導や地下水流動による熱輸送を無視できるものとすると，地下での温度変化は地表からの放熱率と深部からの熱供給率の差によって生じると考えることができる．従って，地下の蓄熱率と地表からの放熱率を比較することは火口下における熱輸送に関する示唆を与える．ナカマチネシリ火口における熱放出率は福富（1967）や江原（1973）が過去に見積もりを行っている．ナカマチネシリにおける熱放出形態は主に噴気活動，湯沼・地温異常域からの放熱が挙げられる．福富（1967）では清野（1959）の噴気による水蒸気放出率測定をもとに噴気放熱率を500 MWと推定した．しかし，福富（1967）は他の火山における放熱率との比較からこの推定値は

過大評価である可能性を指摘している．江原（1973）は 50 cm 深地温を測定し，地温勾配から伝導的熱放出率を 0.017–0.1 MW と推定した．また，火口内に存在する湯沼の表面からの放熱率を 4.2 MW と推定した．これらのことから 1950 年代終わりから 1970 年代初めにかけて，ナカマチネシリ火口からの放熱率は数 100 MW と推定され，噴気による放熱が支配的であったことがわかる．

我々は，現在のナカマチネシリ火口における放熱形態を明らかにするために，現地調査を行った．噴気活動の様子，画像の重合処理によって噴気を除去した湯沼や噴気孔の様子，重合処理によって噴気を除去した熱赤外画像を Fig. 5 に示す．これらの重合処理は橋本・他（2015）の方法に従って行った．Fig. 6 に湯沼と噴気孔の分布を示す．噴気は火口南壁付近に存在する 65I 火口からのもの

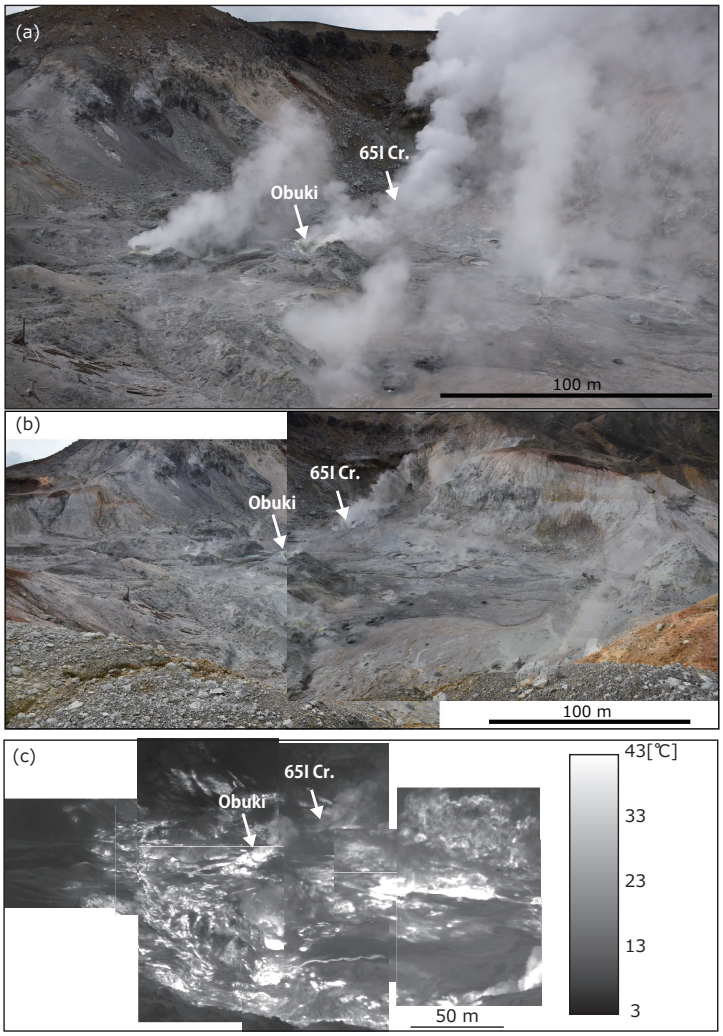


Fig. 5. (a) Picture showing the thermal activity in Nakamachineshiri crater, taken from north. (b) Composite imagery of Nakamachineshiri crater. Plume reduction compositing (Hashimoto et al., 2015) has been applied to unveil the fumaroles and ponds. (c) Composite infrared thermal imagery of Nakamachineshiri crater.

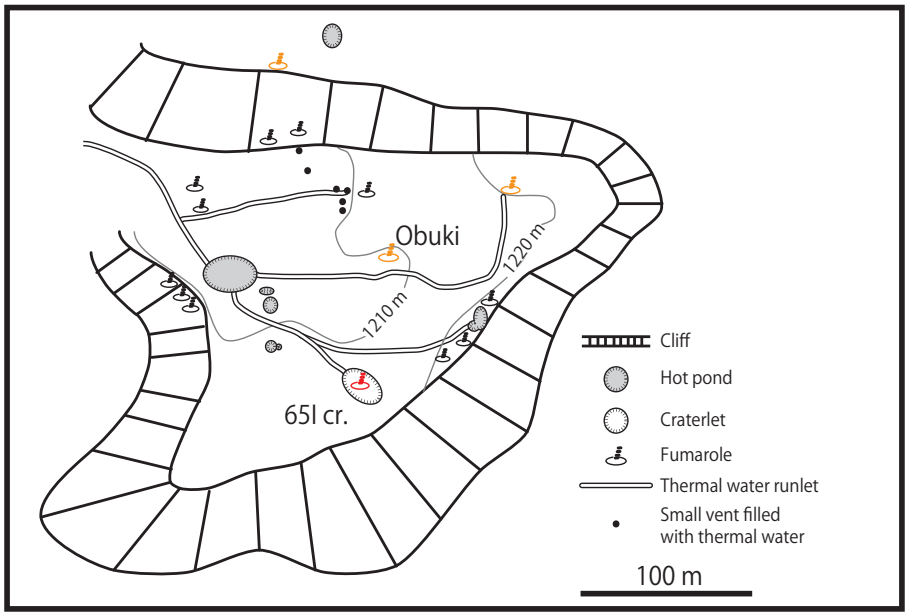


Fig. 6. Sketch showing the locations of fumaroles and hot ponds in Nakamachineshiri crater. Fumarole 65I is largest (red symbol). Obuki and other two fumaroles are moderate (orange symbols). Others are relatively small.

が優勢である．大噴からの噴気はそれに次ぐ規模であり，同程度のものが他に 2 つ見受けられた．湯沼は火口内に点在するが，火口南西部に小規模なものが集中的に存在する．また，地温異常域は火口北東部や火口壁に点在している．

ここでそれぞれの形態における熱放出率を推定する．噴気放熱率は火口北壁から撮影した動画に plume rise 法（鍵山，1978）を適用した．しかし，plume rise 法は地形の影響を強く受けるため，火口壁近くの小規模な噴気に対しては適用できない．そこで，本研究では，ナカマチネシリ火口内で優勢な 2 つの噴気（65I 噴気と大噴噴気）に対して plume rise 法を適用した．その結果，65I 火口噴気の放熱率は 2 MW，大噴噴気の放熱率は 0.2 MW であった．一般に，plume rise 法による放熱率推定には，1 桁程度の誤差が含まれることが指摘されている（寺田，2004）が，65I 火口に対して本研究で用いた画像データの場合には，火口壁の影響が過大評価として表れるセンスにある．このことを考慮すると，火口内からの総噴気放熱率 Q_t は大きくとも数 MW 程度であろう．

湯沼表面からの蒸発と放射による放熱率 Q_y[W] は湯原・瀬野（1969）より次の式で表される．

$$Q_y = 4.2S \times \left[6.7 \times 10^{-10} T^3 L + 1.4 \times 10^{-12} (273.15 + T)^4 \right] \quad (2)$$

ここで T は湯沼の表面摂氏温度であり，近接して撮影した熱赤外画像より 70–80℃とおく．L は水の気化熱，S は湯沼の面積（1 ～ 2 × 10^6 cm^2）である．その結果，湯沼表面からの放熱率 Q_y は 0.6 ～ 2 MW と推定された．

地温異常域からの放熱率 Q_c[W] は Sekioka and Yuhara（1974）の提案した，

$$Q_c = 37 \sum S_i (T_i - T_0) \tag{3}$$

により求める．ここで S_i は地表面温度 T_i[℃] の占める面積 [m^2] を示し，T_0 は基準の地表面温度（8-15℃）である．地表面温度は Fig. 6(c) から推定した．その結果，Q_c は 2 ～ 4 MW と推定された．従って，ナカマチネシリ火口からの総放熱率 $Q = Q_f + Q_y + Q_c$ は数 MW ～ 10 数 MW と推定される．先行研究とは異なりそれぞれの放熱形態がほぼ同程度で寄与している．なお，ナカマチネシリ火口では熱水の表面流出が認められるが，流量が毎分 2 L 程度であり，その放熱率は 0.01 MW のオーダーである．これはその他の放熱形態による放熱率に比べて 2 桁小さいためここでは無視できるものとする．

本章における総放熱率の概算と，前章で地磁気変化から概算した蓄熱率を単純に比較すると，ナカマチネシリ火口からの総放熱率は，蓄熱率とほぼ同程度から数分の 1 であることになる．これに対して，他の火山，例えば阿蘇山では，火口湖の表面からの蒸発熱が地磁気変化に等価な熱エネルギーよりも数倍から 1 桁大きく，火口湖が効率的な熱放出に貢献していることが示されている（橋本，2005）．地磁気変化に基づく蓄熱率推定には磁化―温度特性に大きな不確定性が残っていることから，さらに精度を上げた検討は今後の課題になるが，この結果は，ナカマチネシリ火口浅部の熱輸送系が，深部からの熱供給に対して，効率的な放熱機構を欠いていることを示唆しているのかもしれない．もしそうであるならば，今後の研究の方向として，火口という熱輸送系における表面放熱率と地下の蓄熱率との関係に多様性をもたらす要因は何か，という問題に一般化して発展させることも可能かもしれない．また，ナカマチネシリ火口の地下温度変化のメカニズムを明らかにするために，地磁気全磁力観測，熱活動の定量化を継続的に行う必要がある．

Ⅵ. ま と め

2013 年から 2015 年にかけて 3 回の地磁気全磁力観測を雌阿寒岳ナカマチネシリ火口周辺で実施した．その結果，2014 年 8 月から 2015 年 9 月にかけて火口下に消磁源を持つようなパターンの地磁気全磁力の変化が見られた．推定された消磁球の最適解は火口南壁付近，深さ 250 m（標高 950 m）に位置し，消失磁気モーメントは 2×10^6 Am^2 であった．この磁気消失を地下の温度が上昇したことによる熱消磁と考え，ごく単純化した磁化温度特性を仮定した場合，必要な熱量は 5×10^{14} ～ 3×10^{15}J であり，蓄熱率は 20 ～ 80 MW と推定された．一方，ナカマチネシリ火口内の噴気，湯沼，地温異常域からの放熱率はそれぞれ数 MW であると推定された．これらのことから総放熱率は数 MW ～ 10 数 MW と推定され，蓄熱率に比して数分の 1 から同程度であることが示唆された．

謝辞　参照点データとして気象庁地磁気観測所女満別地磁気観測施設の毎秒値を使用しました．また，地磁気点分布図の作成にあたり，国土地理院発行の 50 m メッシュ数値地図，および 2 万 5 千分の 1 地図画像を使用しました．

文　献

江原幸雄，1973．活火山体地表近くの地温分布，北大地物研報告，**29**，15-32．

福井史雄・橋本雅彦・高田麻美・長谷川一美，1994．雌阿寒岳の地球電磁気的火山観測（1977 ～ 1993），Conductivity Anomaly 研究会論文集，124-128.

福富孝治，1967．北海道地熱地帯の熱量とその探査上の諸問題，地熱，**13**，16-24．

橋本武志，2005．火山の電磁気観測―歴史・意義・展望―，火山，**50**，S115-138．

橋本雅彦・西村三治・有田真・森山多加志・菅原政志，2009．雌阿寒岳の地磁気全磁力観測，月刊地球，**31**, 684-692．

橋本武志・寺田暁彦・田中良，2015．噴気を除去する画像処理，日本火山学会講演予稿集　2015 年度秋季大会，32．

北海道防災会議，1976，雌阿寒岳　火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策，北海道における火山に関する研究報告書第 5 編．

鍵山恒臣，1978．火山からの噴気による熱エネルギーと H_20 の放出量―PlumeRise からの推定―，火山，**23**，183-197.

気象庁，2015．雌阿寒岳，第 133 回噴火予知連絡会資料，3-20．

清野政明，1959．噴気現象の考察（その 1）．火山，**3**，128-135．

Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, A. Watanabe and M. Takeo, 2013. An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth Planet. Space*, **65**, 657-666.

小嶋稔・小嶋美都子，1972．岩石磁気学，共立出版．

Seikoka, M. and K. Yuhara, 1974. Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, *J. Geophys. Res*., **79**, 14, 2053-2058.

寺田暁彦，2004．樽前火山 A 火口の放熱率推定 ： Plume Rise 法を火山噴煙に適用する注意点，北大地物研報告，**67**, 327-335．

宇津木充・田中良和・平林順一・小川康雄・浜野洋三，2004．草津白根山における空中磁気測量，第 4 回 草津白根火山の集中総合観測報告書，159-165．

山崎明・中礼正明・角村悟・中島新三郎，1992，草津白根山における全磁力変化の解析：1990 年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル，地磁気観測所要報，**24**，2，53-66．

湯原浩三・瀬野錦蔵，1969，温泉学，地人書館，140．