



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	十勝岳の全磁力変化と蓄熱過程 (2008 - 2009年)
Author(s)	橋本, 武志; HASHIMOTO, Takeshi; 西村, 三治 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 269-280
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.269
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44480
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_24_p269-280.pdf



十勝岳の全磁力変化と蓄熱過程（2008–2009年）

橋本 武志

北海道大学大学院理学研究院

西村 三治・有田 真

気象庁地磁気観測所女満別出張所

山本 輝明・小木曾 仁

気象庁札幌管区气象台

重野 伸昭

気象庁地震火山部

岡崎 紀俊

北海道立地質研究所

茂木 透

北海道大学大学院理学研究院

(2010年1月8日受理)

Heat accumulation beneath Tokachidake volcano as inferred from magnetic changes

Takeshi HASHIMOTO

Faculty of Science, Hokkaido University

Mitsuharu NISHIMURA, Shin ARITA

Memambetsu Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency

Teruaki YAMAMOTO, Masashi OGISO

Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency

Nobuaki SHIGENO

Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

Noritoshi OKAZAKI

Geological Survey of Hokkaido

and

Tohru MOGI

Faculty of Science, Hokkaido University

(Received January 8, 2010)

We report the recent results of geomagnetic repeat surveys aiming for the detection of subsurface thermal changes at Tokachidake volcano, central Hokkaido, northern Japan. We conducted the first survey in October, 2008. The same pegs and marks were reoccupied in July and September, 2009. During this period a clear dipolar pattern of magnetic changes was detected around the 62-II crater, the present main vent of Tokachidake. This change is quite consistent with the pattern due to a demagnetized sphere placed at a depth of 150 m (1,600 m a.s.l.) beneath the 62-II crater. The change of magnetic moment amounts to $1 - 2 \times 10^6 \text{ Am}^2$. The maximum magnetic change is about 35 nT, overwhelming the errors due to extra-terrestrial changes, secular changes, or seasonal variations. The most likely explanation of this demagnetization is the thermomagnetic effect due to heating beneath the crater.

Considering the moderate fumarolic temperature in the 62-II crater, the thermal demagnetization is not caused directly by magma intrusion. We here propose a model that water vapor supplied from depths is releasing latent heat through condensation at the source depth. The heating rate corresponding to the observed magnetic changes is an order of 10 MW. A more speculative suggestion is that water vapor of $10^7 \sim 10^8 \text{ kg/yr}$ is required to realize this heating rate. Considering the fact that fumarolic activity of 62-II crater has somewhat declined since 2006, the ongoing demagnetization may be attributed to the decrease of heat discharge rate from the crater. If this is the case, elevation of heat supply from depths is not necessarily required.

I. はじめに

十勝岳（海拔 2,077 m）は、北海道中央部の大雪—十勝火山列の南西端に位置する活火山である。最近では、1926 年、1962 年、1988～1989 年にマグマの噴出を伴う噴火を経験している。その後、2004 年には有色噴煙を伴うごく小規模な噴火を起こしたものの、2006 年以降は、熱的活動および地震活動は低調に推移しており、主な噴気活動は大正火口壁と 62-II 火口に収斂している。その一方で、火口原周辺における近年の繰り返し GPS 測量によれば、2007 年頃から、62-II 火口周辺で局所的な膨張性地盤変動が継続していることが報告されている（気象庁、2009）。表面活動には顕著な異変が認められないことから、この変動の実体について更なる調査が待たれていた。このような状況の中、2008 年 9 月に関係機関が協議し、十勝岳の各種合同観測が計画された。本稿にまとめた磁気測量はその一部として実施したもので、観測には、北海道大学、気象庁地磁気観測所、気象庁札幌管区气象台、北海道立地質研の 4 機関が参加した。本研究は、地磁気全磁力の時間変化から、山体内部の温度状態の推定を試みたものである。

火山活動に伴って火口周辺の磁場が変化することは、過去の研究に多数の事例報告がある（橋本、2008）。多くの場合、こうした磁場変化は、火山活動による地下の温度変化が岩石の磁化を変化させる効果（熱磁気効果）と解釈されている。火口直下のある領域が熱消磁すると、磁気モーメントの消失によって周辺の磁場に双極子型の変化が生じる。典型的には、北半球中緯度の場合、火口の南側で全磁力が減少し、北側で増加するという分布になる。十勝岳で観測されている地盤の膨張が地下の温度変化を伴うものであるならば、地磁気変化からその位置や蓄熱率に関して知見が得られるはずである。

II. 観測方法

本研究の目的は、地磁気全磁力の時間変化を空間分布として捉えることにある。そのため、火口周辺に安定した磁気点を多数設置する必要がある。一方で十勝岳では、表層を覆う溶岩類の磁性が強いことに加えて、地形も急峻な場所が多いため、火口周辺域の磁気勾配は概して大きい。例えば、100 nT/m の磁気勾配の中で1 nT の精度で時間変化を検出しようとする場合には、1 cm のセンサー位置再現精度が必要となる。そのため、磁気点の設置にあたっては、まず候補地の周辺数 m の磁場分布を測定し、できる限り勾配の小さな位置を選んでいく。多くの磁気点では、数10 nT/m 以下の位置を見いだすことができたが、火口縁等の磁気点では、100 nT/m を超える場合もあった。

本研究では二種類の方法で磁気点を設置した。ひとつは、90 cm 長の焼丸太杭を地面に打ち込むものである (Fig. 1 a)。この方式は細粒の堆積物があるなど地表の状態が杭の固定に適した場所で採用した。いまひとつは、安定度が高いと思われる数 m 大以上の岩塊に、油性塗料でマーキングするという方法 (Fig. 1 b) である。測定精度を検証する意味で、これら二種の磁気点を近接した位置に併設した地点もある。杭方式には冬期の凍上による亡失が、岩石方式には融雪時に雪が移動して岩を押し流すことが危惧されたが、実際にはこうした問題は発生しなかった。なお、これ以外にも、気象庁他が繰り返し GPS 測量に用いている既存の基点 (岩塊に固定されたボルト) を流用して磁気点とした地点もある。

2008年9月30日～10月2日に磁気点の設置と第1回の磁気測量を行った。2009年6月24～25日に第2回、さらに2009年9月8～9日に第3回の磁気測量を実施した。磁気点の分布を Fig. 2 に示す。図中の Ref は、測量期間中の地磁気日変化等の短周期地球外部起源磁場変動を除去するための参照点である。また、Ref-b は参照点自身の安定性を確認するための補助点として、第2回の測量時に補充した。なお、第3回の測量時には、登山道整備の工事車両が参照点に



Fig. 1 a. An example of magnetic repeat survey on a wooden peg.



Fig. 1 b. An example of magnetic benchmark on a stable rock.

影響を与える可能性があったため、62-II 火口から北へ約 8 km 離れた白金模範牧場の敷地内に、許可を得て設置した臨時の参照点を介して化成を行った。

磁気測量には、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 3 台を使用した。そのうち、1 台は参照点に固定して毎 5 秒の全磁力を自動測定し、残りの 2 台を移動測定用として用いた。火口周辺域では、測定チームは 2 班に分かれて各磁気点の全磁力を毎 5 秒で測定した。各磁気点につき数分間の測量を行い、25~35 個の測定データを用いて参照点との単純差平均値を求めた。いくつかの測定点では亡失に備えて近傍に補助点を設けている。補助点を設けた地点では、主点と補助点でそれぞれの時間変化を求め、その平均を地点の代表値とした。

III. 測定結果

3 回の磁気測量の結果を時系列の形で Fig. 3 に示す。一見して、顕著な変化が 62-II 火口の周辺に認められる。火口の南側で全磁力が減少、北側で増加していることから、火口直下で磁化の消失が起こっていることが推定できる。測点記号に b の付されたものは、補助点であることを示している。いくつかの地点 (T03, T08, T10, T11, T12) では、主点と補助点との比較によって、測定の確からしさやその地点の代表性を検証することが可能である。第 1 回と第 3 回の時間変化で見ると、主点と補助点の食い違いは最大で 5.4 nT、平均 1.7 nT であった。このことから、各磁気点の測定値には数 nT の曖昧さを考慮すべきであろう。ただし、観測された最大変化量が 35 nT と大きいため、以下に述べるモデルの推定には大きな影響はない。

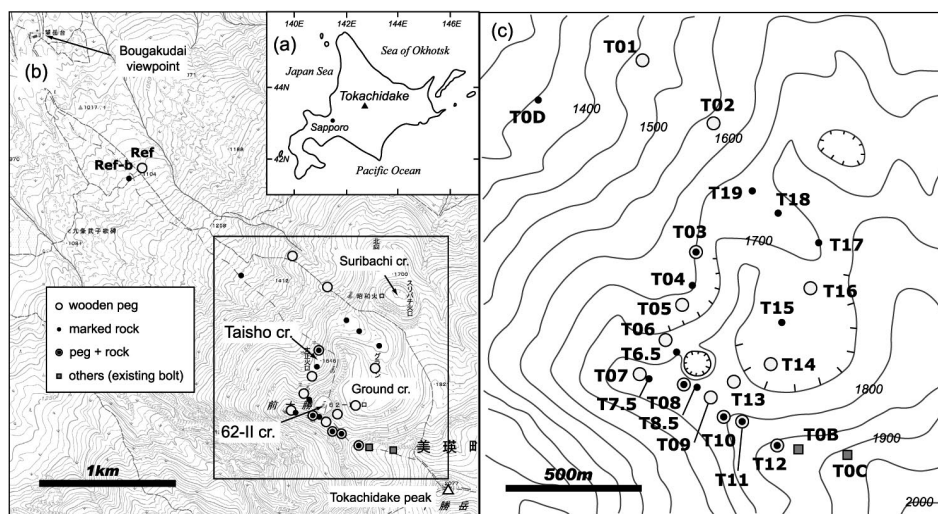


Fig. 2. (a) Location of Mt. Tokachidake. (b) Locations of magnetic repeat pegs and benchmarks. Open circles and dots indicate wooden pegs and benchmarks on stable rocks, respectively. Points with a dot in a circle have both pegs and marked rocks nearby. Squares indicate GPS benchmarks which are also used for our magnetic measurements. (c) Magnified view around the crater area (the inset in the panel-b).

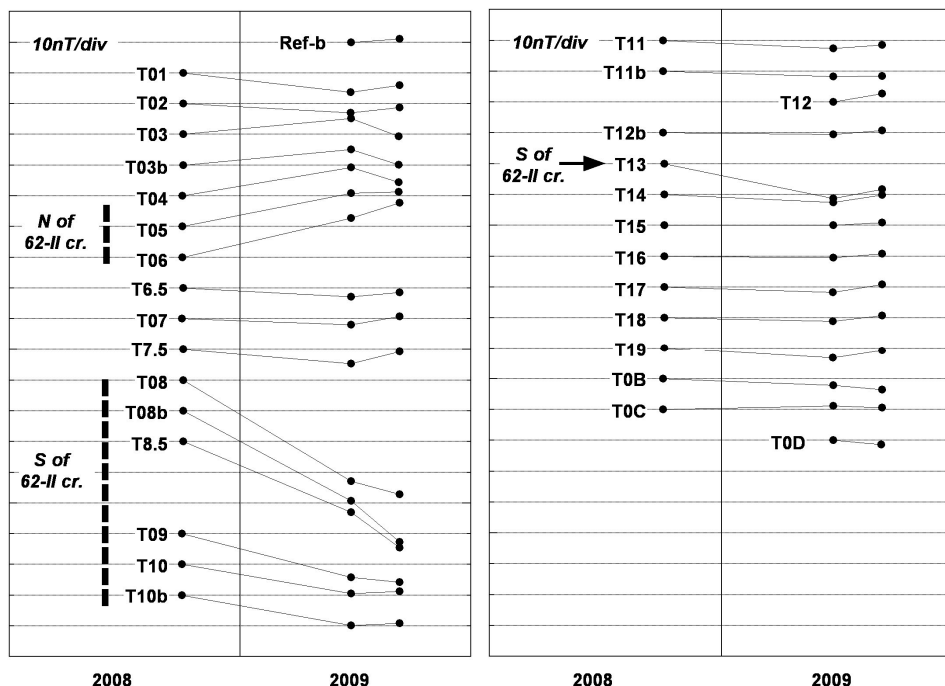


Fig. 3. Magnetic total field changes in 2008 and 2009. One division is 10 nT. All the values are reduced to the reference point (Ref in Fig. 2).

3回の測定結果は、ほぼ直線トレンドに乗っていると見なせるが、詳しく見ると、一部に屈曲した変化を示しているものもある（例えば、T 03, T 13）。この屈曲の原因は現時点で特定できていないが、上述の測定誤差のほか、地点毎の局所的な年周変化である可能性もある。数 nT の年周変化は、表層の岩石が気温の年周変化に伴って熱帯磁することで生じる可能性が指摘されており、伊豆大島 (Utada et al. 2000) やロングバレー・カルデラ (橋本・他, 2003) 等で報告例がある。年周変化のセンスと振幅は、表層の岩石がつくる局所的な磁気異常と、磁気センサとの位置関係に依存するので、磁気点毎にその表れ方はまちまちである。従って、正確な補正のためには、少なくとも数年間の観測を行って年周変化成分を抽出することが必要となるが、現有のデータではこのような処理は不可能である。そこで、ほぼ同じ季節に観測された第1回と第3回のデータで、年周変化成分の位相が一致しているものと仮定して、その差から時間変化率を求めた。以下では、第2回のデータは解析には用いず、第1回から第3回の約1年間の変化が直線的であるとみなして議論を行う。

まず、62-II 火口周辺に見られる顕著な変化を、一様に消磁した球でモデル化する。ここでは、モデル計算値と観測値とのずれの自乗和が最小となるように、その消磁球の磁気モーメントと位置 (未知数4個) を探索した。その際、各磁気点における測定時のデータのばらつき (標準偏差) の逆数で重み付けを行っている。モデル計算では、各磁気点の高度も考慮した。

この探索により得られた最適解消磁源の位置を Fig. 4 内の星印で、最適解による全磁力変化量

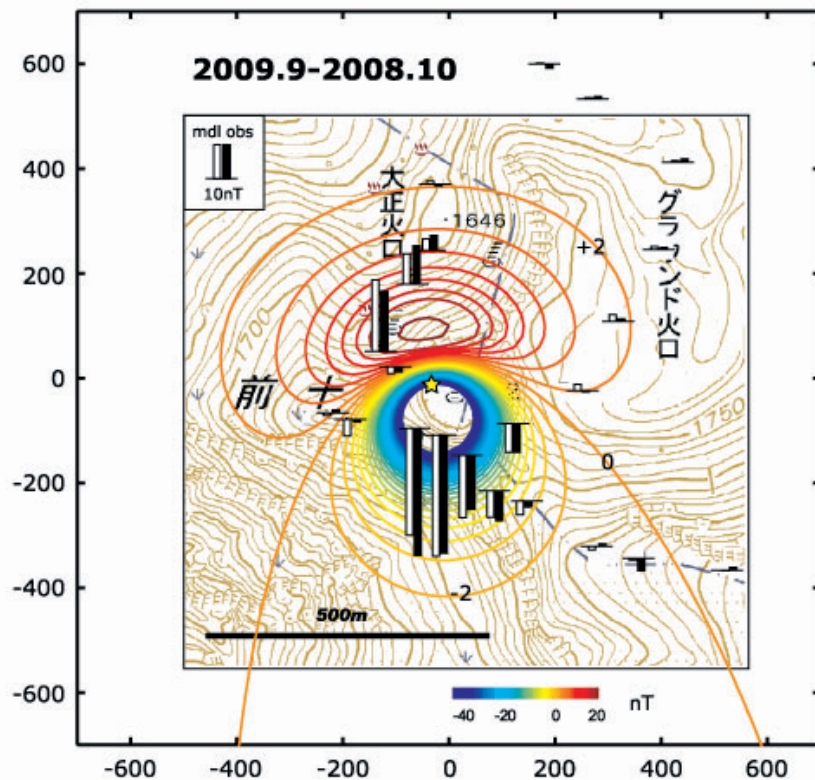


Fig. 4. Comparison of total field changes between the best-fit model (white bars) and observation (black bars). Contour lines represent the modeled values at 1,750 m ASL. Contour interval is 2 nT. The star symbol denotes the location of the demagnetized source. Note that contours are partly omitted in the vicinity of the source for clarity.

計算値と観測値を棒グラフで示した。図中の等値線は、最適解による全磁力変化分布を 62-II 火口の標高面 (1,750 m) で示したものである。全磁力変化の分布は、時系列グラフで見た如く、62-II 火口の南側で明瞭な減少、北側で増加の分布を示している。最適解消磁源は 62-II 火口西縁部の標高 1,600 m (深さ約 150 m) に求まった。消失磁気モーメントは、 $1.3 \times 10^6 \text{ Am}^2$ である。最適モデルと観測値との食い違いは平均 2.2 nT であり、上述の主点と補助点との比較の議論から想定される数 nT の誤差範囲を逸脱していない。

IV. 熱磁気効果の定量的見積もり

我々の観測結果から、62-II 火口の直下では消磁が進行していることが推定された。2007 年頃から 62-II 火口周辺で地盤の局所的な膨張が継続している (気象庁, 2009) ことを考慮すると、観測された磁場変化の原因としては熱磁気効果を考えるのが自然である。ピエゾ磁気効果の場合では、増圧茂木ソースを考えると、磁場変化のパターンは熱消磁とは正負が逆の双極子型になる

ため、観測事実とは相容れない。従って、以下では熱磁気効果モデルによる定量的解釈を試みる。消磁に対応する磁気モーメントの変化量を M とする。消磁体積を ΔV 、消失した磁化を ΔJ とすると、

$$\Delta V = M / \Delta J \quad (1)$$

である。観測から決定されるのは M である。磁気双極子モデルと観測値との残差として 4 nT の error floor を許容すると、消磁源の位置推定誤差は、水平方向、鉛直方向ともに ± 40 m であった。この誤差範囲を考慮した磁気モーメント消失量は $1 \sim 2 \times 10^6$ Am² となる。 ΔV は ΔJ とトレードオフの関係にあって独立には決定できないが、仮に消失磁化を 1 A/m と仮定すると、消磁体積は $1 \sim 2 \times 10^6$ m³ となる。これは、消磁球の半径に換算すると 62~78 m であり、消磁源の深さや火口のサイズから考えても不自然な値ではない。より現実的には、既に消磁された球領域の周縁部 (球殻) が新たに消磁したと考えてもよく、例えば、半径 100 m の場合なら、厚み 7~14 m の球殻部分が新たに消磁されたことと等価である。

次に、消磁に必要な熱量を見積もってみる。岩石の温度磁化特性は曾我 (1997) を参考にする。曾我 (1997) は、十勝岳のいくつかの露頭から得られた噴出物の岩石磁気特性を測定している。ここでは、試料間の磁化方位のばらつきが小さい望岳台付近の火砕流堆積物 (約 3,300 年前にグラウンド火口から噴出した堆積物、藤原・他、2007) に含まれる本質岩片のデータを参照する。各試料の規格化された温度磁化特性を Fig. 5 に示す。ここでは、平均的な温度磁化特性として、0~300°C において 20% の減率で磁化が消失し、300~600°C で残りの磁化が消失するというモデルを仮定する。

十勝岳の地下に推定される消磁域での正確な温度は不明だが、消磁源が浅く、噴気温度も低いことから、ここでは 300°C 以下であるとして考える。Fig. 5 によれば、0°C での残留磁化を J_0 [A/m] として 0~300°C の範囲での温度 T [°C] における磁化 $J(T)$ を式で表すと、

$$J(T) = J_0 \left[1 - \frac{T}{1500} \right] \quad (2)$$

となる。この式から、1 K の温度上昇によって消失する磁化が $J_0/1500$ [A/m] として与えられる。従って、 ΔJ の磁化消失は、

$$\Delta T = 1500 \cdot \Delta J / J_0 \quad (3)$$

の温度上昇を要し、これに対応する熱量 ΔQ [J] は、岩石の質量比熱を C [J/kg/K]、密度を ρ [kg/m³] として、

$$\Delta Q = C \rho \Delta T \Delta V = \frac{1500 C \rho V \Delta J}{J_0} = \frac{1500 C \rho M}{J_0} \quad (4)$$

である。 $C = 900$ J/K/kg、 $\rho = 2,500$ kg/m³ とし、玄武岩質安山岩の自然残留磁化として $J_0 = 10 \pm$

5 A/m を仮定すると、単位温度変化あたりの磁化変化は、 $3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ A/m/K、 M の誤差も考慮した推定蓄熱量は、 ΔQ は $2 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15}$ J となる。

十勝岳の岩石磁気で参照可能な資料として、上記以外にも十勝岳の噴出物を用いて段階熱消磁実験を行った上澤 (2008) の研究がある。この文献には直接示されていないが、上澤による一連の実験では、中央火口丘溶岩の磁化温度特性も測定されている (上澤, 未公表データ)。上澤の用いた試料には、

30 A/m 前後の強い初期磁化を示すものと、15 A/m 前後の相対的に弱い初期磁化を示すものがある。23~250 °C の特性から単位温度変化あたりの磁化変化を計算すると、平均値は 6×10^{-3} A/m/K であり、曾我 (1997) の結果から推定した値の範囲内にある。従って、この値を用いても蓄熱率の推定に大きな違いはもたらさない。ただし、実際に消磁域 (62-II 火口火道とその周辺) を構成する岩石の大半は類質岩、おそらくは前十勝の噴出物であり、中央火口丘溶岩とは異なる特性をもつ可能性も否定できない。前十勝溶岩の温度磁化特性の測定は今後の課題である。

さて、第1回と第3回の測量間の経過時間は約340日であるので、蓄熱率 W は、

$$W = \Delta Q / \Delta t = 8 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7 \text{ W} \quad (5)$$

となる。

V. 熱供給の実体に関する考察

ここまでの磁気解析から、62-II 火口の直下で蓄熱が進行していることは明らかで、その規模は数 10 MW であることが推定できる。この蓄熱は火道内の浅部で起こっていると考えられる。火道を、流体と熱が輸送される通路として見た場合、ある深さで温度が上昇するためには、地表への熱放出よりも深部からの熱供給が大きいのか、その場で発熱している必要がある。物質の輸送を伴わずに、もともと存在した物質によってその場の発熱だけが起こっている可能性は低いので、ここでは深部からの高温流体の供給を前提とする。

まず、消磁源の深さが 150 m と比較的浅いことと、62-II 火口の最高温度が 170 °C 程度 (札幌管区気象台の赤外映像装置による遠隔測定, 第 114 回噴火予知連絡会資料, 2009) であること、

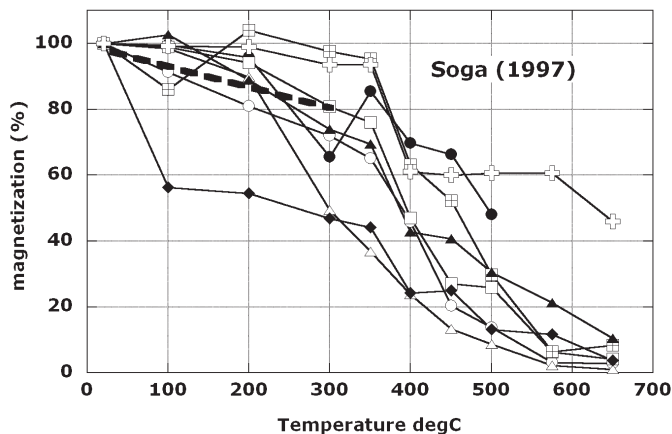


Fig. 5. Temperature dependence of magnetization of some rock samples from Tokachidake (Original data from Soga, 1997). Samples are taken from pyroclastic deposits near Bogakudai.

最近の噴気活動が低調であることを考え合わせると、現時点で消磁源の位置までマグマが上昇してきているとは考えにくい。従って、供給されている流体は、熱水もしくは水蒸気である可能性が高い。また、磁場変化が少なくとも1年間に亘って直線的であることを考えると、流体の供給はエピソード的なものではなく、準定常的なものであろう。すると、熱を供給した流体は、地表に放出されない限り、消磁源周辺に蓄積されるか、深部にリサイクルされている必要がある。

こうした問題を定量的に取り扱うためには、深部から供給される流体の比エンタルピや、消磁源の位置での温度圧力条件等の情報が必要である。本来は、物質科学的な知見や流体輸送の数値モデルから、これらの値を推定した上で、順問題として検討されるべきであるが、本稿では、いくつかのケースを仮定してその妥当性を検討するという手順で、消磁源にもう少し具体的な描像を与えるを試みる。

後述するように、火口周辺で観測されている地盤変動の膨張源は、62-II 火口近傍の地下 700 m 程度の深さに推定されており (気象庁, 2009), 消磁源より深い可能性が高い。従って、消磁源では大きな過剰圧を想定する必要はなく、絶対圧は静岩圧 (約 4 MPa) 以下であると考えられる。実際には、火道内部は鉛直方向の浸透率が高く、空隙に富んでいると考えられるので、消磁源深度での絶対圧は通常静岩圧よりもかなり小さいであろう。仮に 1 MPa の絶対圧を仮定した場合、62-II 火口での噴気温度 200 °C に対して火道内で断熱上昇を考えると消磁源では 560 °C が推定される。H₂O は、1 MPa の圧力条件では 180 °C 以上で気相として存在する。

まず、この水蒸気が気相のまま、蒸気溜まりとして消磁源周辺に蓄積されているとは考えにくいことを示す。蒸気表によれば、1 MPa, 560 °C の H₂O の比エンタルピは、約 3,600 kJ/kg である。一方、1 MPa, 180 °C の H₂O の比エンタルピは、約 2,800 kJ/kg であるから、磁場変化から推定されている蓄熱率をまかなうには、10⁸~10⁹ kg/yr の供給率を要する。これは、容積に換算すると 10⁷~10⁸ m³/yr の水蒸気 (比容積 0.19 m³/kg) に相当し、火口域浅部の空隙に蓄積される量としては非現実的である。また、札幌管区気象台の遠望観測によれば、2006 年以降、62-II 火口からの噴煙高度は低下し、ここ数年は低調に推移している (気象庁, 2009)。従って、深部から供給された水蒸気が消磁源で熱を吐き出した後、気相のまま噴気として地表に放出されているとも考えにくい。

では次に、供給された水蒸気が凝縮して液相となる場合を考えてみる。上述の 1 MPa, 560 °C の水蒸気が消磁源で周辺の岩石に熱を与え、常温まで冷却されるとする。25 °C, 1 MPa の圧縮水の比エンタルピは約 100 kJ/kg である。この場合、相変化に伴う潜熱放出の寄与が大きいので、磁場変化から推定された蓄熱率をまかなうために必要な H₂O の供給率は、10⁷~10⁸ kg/yr で十分である。さらに、気相と比較すると比容積が圧倒的に小さい (0.001 m³/kg) ため、熱水の容積は 10⁴~10⁵ m³/yr のオーダーでよいことになる。これは、例えば空隙率が 0.1 の場合、10⁵~10⁶ m³/yr の領域が熱水で空隙を満たされる場合に対応し、火口の大きさを考えれば不自然な値ではない。

また、液相に変化したものの一部が、火道内を流下して消磁域から排除される場合には、その場で蓄積される熱水はさらに少量でよいことになる。このような系は、蒸気卓越型の地熱系

モデルにおいて、気液二相ヒートパイプ（例えば、White et al., 1971; Schubert and Straus, 1979）として提案されているものである。ヒートパイプが存在すれば、正味の物質移動を伴わずに熱を上方に輸送することができるため、消磁源の位置には地盤変動の膨張源が伴わないことも、矛盾なく説明できる。

本章で提示したモデルは、消磁域で H_2O が気相から液相に変化する理由については何も答えていない。圧力が 1 MPa で一定の条件では、温度を 180°C 以下に低下させるしかないが、消磁源の位置でなぜ効率的にこのような温度低下が起こるのかについては、別途自己矛盾のない説明が必要である。ひとつの可能性としては、ひとたび消磁域で熱水溜まりが形成され始めると、周辺媒質への熱伝達効率が高くなり、新たに付加された蒸気がさらに熱水溜まりを成長させていくというメカニズムが考えられるが、現時点では想像の域を出るものではない。また、この説明のみでは、なぜある時点で熱水溜まりが形成され始めるのかについても不明である。

VI. 噴気活動および地盤変動への示唆

札幌管区気象台観測の噴気高度データによれば、2006 年以降、62-II 火口からの噴気活動は衰え、ここ数年は低調に推移している（気象庁、2009）。遠望観測から推定される噴気放熱率は、2004 年時点で 100 MW 超であったが、2008 年では数 10 MW という試算もある（札幌管区気象台、未公表データ）。磁場変化から推定される蓄熱率は、62-II 火口からの噴気放熱率の減少量に見合っている可能性がある。もしそうであれば、本研究で観測された熱消磁は、必ずしも深部からの熱供給率が増加した結果であると考えする必要はない。熱供給率が不変であっても、前節で提案したように消磁域で熱の蓄積が起こり、同時に火口からの放熱率が減少していれば、熱収支の観点からは矛盾がないからである。

火口周辺における GPS の繰り返し観測から推定されている地盤変動の膨張源は、62-II 火口近傍の地下 700 m 程度の深さに位置しており、茂木モデルを仮定した場合の膨張体積は、 $8.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ と見積もられている（本研究の磁気解析とほぼ同一期間の解析による値。気象庁、2009）。モデルの推定誤差を考慮しても、膨張源の位置は、磁場変化から推定される蓄熱源の位置よりも深いと見るべきであろう。一方で膨張体積は、消磁に必要な熱水の供給率（ $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ ）とはほぼ同程度である。ここから示唆されるのは、消磁源の位置では蒸気相が液相に変化して潜熱を効率的に吐き出しており、冷却された液相が、膨張源と消磁源を繋ぐ二相流ヒートパイプを流下してリサイクルされているという描像である（Fig. 6）。ただし、前章で検討したように、熱水供給率は火道内の温度圧力の仮定に依存するので、このモデルは現時点での可能性のひとつに過ぎない。

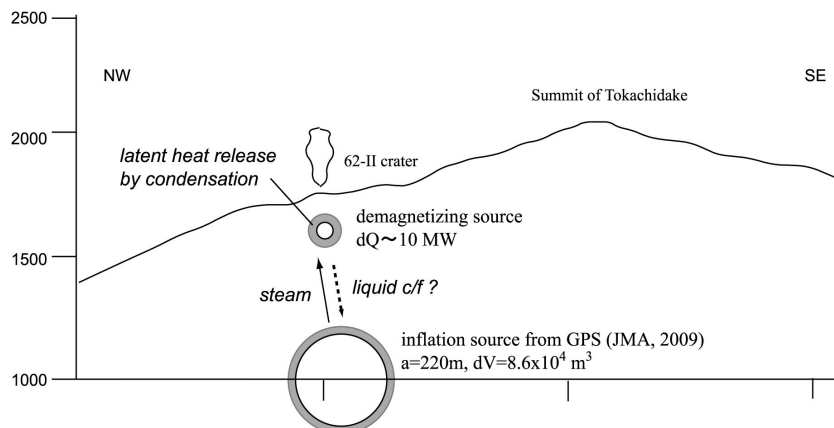


Fig. 6. A schematic model showing heat accumulation and inflation sources beneath the 62-II crater of Tokachidake.

VII. ま と め

2008年および2009年に、十勝岳において3回の全磁力測量を実施した。その結果、62-II火口の周辺に明瞭な双極子型の磁場変化を捉えた。変化パターンは単一の磁気双極子の消失でほぼ近似でき、その位置は62-II火口直下の深さ150mと推定された。この消磁は、火山活動に伴う熱磁気効果であると考えられる。既存の岩石磁気データから磁化温度特性を仮定して推定した蓄熱率は、 $8 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7$ Wである。さらに、いくつかの仮定の下で、消磁源の実体についてオーダー評価による検討を加えたところ、消磁源に供給される熱の大半は、火道内を上昇してきた水蒸気が潜熱を放出することによってまかなわれていることが示唆された。潜熱放出後の液相は、消磁源周辺に蓄積され得るが、火道内を流下してリサイクルされている可能性もある。ただし、消磁源での潜熱放出には、この位置で効率的に温度を低下させる機構が必要であり、今後、火道内流体輸送の数値モデル等によってモデルの妥当性を検証することが必要である。本研究で観測された熱消磁に関わる蓄熱率は、近年の62-II火口からの噴気放熱率の低下量に見合う可能性がある。従って、熱収支の視点から見ると、深部からの熱供給率の増大は必ずしも必要ではない。

謝辞 北海道大学大学院理学院の上澤真平氏には、十勝岳の岩石磁気に関する未公表データを提供していただきました。また、同理学研究院の吉本充宏博士には、本稿をまとめるにあたり有意義な議論をいただきました。なお、磁気点分布図の作成にあたり、国土地理院発行の50m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

- 藤原伸也・長谷川撰夫・中川光弘, 2007. 北海道中央部十勝岳火山の最近 3500 年間の噴火史, 火山, **52**, 253-271.
- 橋本武志, 2005. 火山の電磁気観測—歴史・意義・展望—, 火山, **50**, S 115-138.
- 橋本武志・田中良和・M. J. S. Johnston・宇津木充・笹井洋一・坂中伸也, 2003. ロングバレーカルデラ地域の地磁気全磁力差に見られる年周変化について, 京都大学防災研究所年報, **46**, B-1, 765-777.
- 気象庁, 2009. 第 114 回噴火予知連絡会資料.
- Schubert, G. and J. M. Straus, 1979. Steam-water counterflow in porous media, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1621-1628.
- 曾我智彦, 1997. 火砕噴出物の岩石磁気学的研究—然別火山と十勝岳火山を例にとって—, 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文.
- 上澤真平, 2008. 北海道十勝岳火山 1926 年噴火大正泥流堆積物層序の再検討と古地磁気特性, 火山, **53**, 171-191.
- Utada, H., M. Neki and T. Kagiya, 2000. A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth Planet. Space*, **52**, 91-103.
- White, D. E., L. J. P. Muffler and A. H. Truesdell, 1971. Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems, *Economic Geology*, **66**, 75-97.