HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	無人ヘリを利用した樽前山における繰り返し磁気測量
Author(s)	渋谷, 桂一; 橋本, 武志; 早川, 智也 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 84, 29-39
Issue Date	2021-03-26
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.84.29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80698
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_84_p29-39.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. 84, March 2021, pp. 29 － 39
doi : 10. 14943 / gbhu. 84. 29

論説

無人ヘリを利用した樽前山における繰り返し磁気測量

渋谷　桂一
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻
橋本　武志
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
早川　智也
日本工営株式会社
吉川　契太郎
国土交通省北海道開発局

（2021 年 2 月 25 日受理）

Repeated aeromagnetic surveys of Tarumae volcano using an unmanned autonomous helicopter

Keiichi SHIBUYA
Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
Takeshi HASHIMOTO
Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University
Tomoya HAYAKAWA
Nippon Koei Co., Ltd.
Keitaro YOSHIKAWA
Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

（Received February 25, 2021）

Repeated aeromagnetic surveys using an unmanned autonomous helicopter was conducted at Mt. Tarumae Volcano. In October 2020, we performed the fourth survey following the previous ones in 2011, 2012 and 2013. In this study, we analyzed the aeromagnetic data in 2020 and compared to the previous data in 2011 and 2013 to obtain the temporal changes of the magnetic anomaly between them. The accuracy of the repeated flight was satisfactory as gaps between the actual flight trajectories were mostly within 5 m. After the reduction of the geomagnetic disturbances of extra-terrestrial origins, we obtained the temporal changes in the total magnetic field by taking the simple differences of the selected nearest points between 2013 and 2020. We also calculated the temporal changes for the pair between 2011 and 2013 through the same procedure. Both the pairs showed

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/）.

positive and negative changes in the south and north, respectively, around the summit lave dome, suggesting the cooling re-magnetization. We explained them as a single magnetic dipole source beneath the lave dome with magnetic moment changes of 7.9×10^6 Am^2 and 8.0×10^6 Am^2, respectively for the former and the latter pairs. The comparable amount of the magnetic moment for the two periods suggested the possibility of slowdown in the magnetization rate after 2013. This result was consistent with the ground-based monitoring that was annually performed by the Japan Meteorological Agency and Hokkaido University (Hashimoto et al.,2018). Such a cooling trend in the 2010s was also supported by other monitoring data such as the ground deformation and fumarolic temperatures.

Ⅰ. は　じ　め　に

火山岩は磁鉄鉱などの強磁性鉱物を多く含んでいるが，マグマ状態ではキュリー点を超えるため強磁性を持たず，冷却過程で強磁性が生じてその時の地球の磁場方向の磁化を獲得しながら固結する．そのため，火山体周辺には磁気異常が生じていることが多い．火山の磁気異常は，主に山体の地形や，山体を構成する岩石の不均質な磁化分布に起因するものであるが，山体内部の温度分布もこれに寄与している．従って，磁気異常の空間分布や時間変化を解析することで，地下の温度異常やその時間変化を推定することも可能な場合がある．地磁気の全磁力（磁場の強度）で見た場合，北半球の中緯度では，一般に火山体の南側では磁場が強く，北側では弱いという双極子型の磁気異常を伴う．また，山頂直下で温度が上昇すると，地下で岩石の磁化が弱まる（消磁する）ことに伴い，地表面での全磁力は山頂の北側で増加，南側で減少する（熱消磁）．逆に温度が低下する場合には，地下の岩石が磁化を再獲得する（帯磁する）ため，山頂の北側では全磁力が減少，南側では増加する．磁気異常の観測は地上でも空中でも行うことができ，特に日本では火山の磁気測量もさかんに行われてきた（例えば，Kanda et al., 2010; Koyama et al., 2013）．地上磁気測量の場合，噴火により火口周辺への立ち入りができなくなる場合があるが，無人機を利用した空中磁気測量であれば，立入制限区域外からでも面的に効率よく磁気異常を観測することができる．また，磁気測量を繰り返し行うことで，磁気異常の時間変化から火山体内部での温度の上昇や低下を検出することができる場合がある（橋本・他，2018 など）．

樽前山は北海道南西部に位置しており，約 9000 年前に活動を開始した活火山である（古川・中川，2010）．山体は火砕丘および火砕流堆積物を主体としたなだらかな形状をしている．山頂部には直径約 1.2km の火口原を有し，その中央に 1909 年の噴火によって形成された円錐台状の溶岩ドームが存在している．1909 年のマグマ噴火以降は 1981 年までに 18 回の小規模な水蒸気噴火を発生させた程度で，それ以降の噴火活動は観測されず，穏やかな状態が続いている．

佐久間・村瀬（1956）は，北海道における複数の火山で地磁気の伏角を測定し，その火山体の平均的な磁化を推定している．樽前山については，山頂の溶岩ドームが 6 ～ 8A/m，溶岩ドームを除いた山体が 2 ～ 3A/m と推定されている．樽前山では，1998 年から気象庁札幌管区気象台がほぼ年 1 回の地上磁気測量を行っており，2010 年からは北海道大学も現地観測に加わった．

2010 年以降の地上磁気測量では，帯磁を示唆する全磁力変化が観測された．2010 年から 2016 年までの磁場変化を単一の磁気双極子で近似すると，ソースは溶岩ドーム直下の約 500m 付近に推定され，磁化変化率はおよそ 9.5 × 10^6Am^2/ 年であった（橋本・他，2018）．一方で，近年北海道開発局では，自律飛行型無人ヘリコプターを活用して，北海道内のいくつかの火山で緊急時を想定した各種調査を行っており，空中磁気測量もその項目の一つとなっている（鈴木，2011）．北海道大学もこの調査に協力し，樽前山ではこれまでに 2011 年，2012 年，2013 年に空中磁気測量を実施してきた（橋本・他，2012；2013）．本研究では，2020 年に行われた第 4 回目となる空中磁気測量のデータから磁気異常分布を作成し，2011 年および 2013 年の測量データとの比較によって，磁気異常の時間変化を抽出する．また，その変化を単一の磁気双極子モデルで推定し，地上磁気測量の結果とも比較して議論する．

Ⅱ．測　定　概　要

測定は（橋本・他，2013）と同様に，火山体から少し離れた場所に基地局を設け，そこから自律飛行型の無人ヘリコプターを操作して磁気測量を行う．無人ヘリコプターの機体は北海道開発局所有のヤマハ　RMAX-G1 で，機体の全長は 3.6m，最大搭載量は約 10kg，最大航続時間は約 80 分である．ヘリコプターには機体位置をリアルタイムで把握するための GNSS 受信機が搭載されており，事前にプログラムされた航路に従って数 m 精度での自律飛行が可能である．このため，同一経路で繰り返し実施する空中磁気測量には極めて有効である．飛行域から約 3km 以内に，ワンボックスタイプの車両からなる移動式基地局を設置し，オペレーターは飛行中の機器の状態および周辺の状況を常時把握し，必要に応じて無線でマニュアル操作もできる．この基地局は樽前山の北側斜面の 6 合目付近の駐車場と，南山麓の北海道大学観測坑道付近の 2 点に設置した（Fig.1）．フライトは 3 回に分けて行われ，北側の基地局から 1 回，南側の基地局から 2 回で樽前山の山頂火口原全域を覆うように実施された．飛行ルートの対地高度は約 100 ～ 300m の範囲である．

磁場データの計測は，東京大学地震研究所の所有する Geometrics　G858 光ポンピングセシウム型磁力計を用いて行なった．測定成分は全磁力のみでサンプリング周波数は 10Hz とした．磁力計はヘリコプターに固定し，センサー部分はヘリコプター本体からの磁気的影響を避けるために長さ 4.5m のロープを吊り下げ，その先端に固定し，非磁性のカバーで覆うことで着地時の衝撃に備えた対策を施している．また，事後解析の際に地球外部起源の磁場擾乱を除去するための参照点を地上に設置し，同じく G858 型磁力計を用いて 5Hz サンプリングで全磁力を測定した．参照点の位置は（橋本・他，2013）と同じである（Fig.1）．

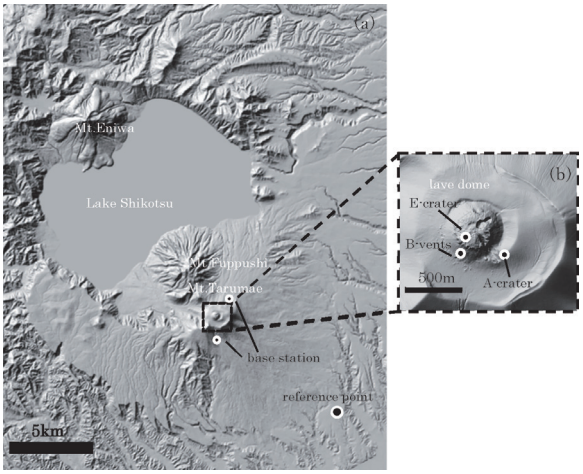


Fig. 1. (a) Location map of the study area. (b) Close view of the summit atrio of Mt. Tarumae Volcano.

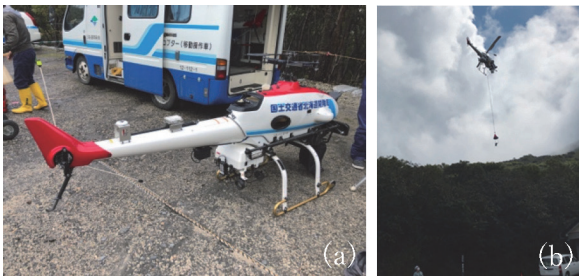


Fig. 2. (a) The unmanned autonomous helicopter (front) and the vehicle-type base station (back). (b) The UAV towing the magnetic sensor with a 4.5m-long wire.

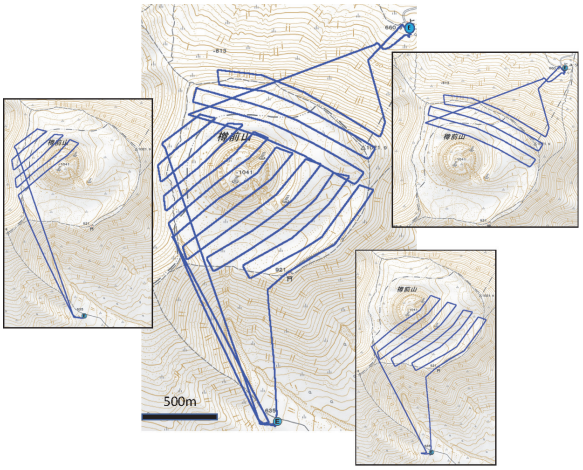


Fig. 3. Actual flight paths of the magnetic survey in 2020. The survey consists of three separate flights shown in the insets. The base stations are indicated by "E" in the maps.

Ⅲ．データ処理手順と解析結果

機体の位置をオペレーターがリアルタイムで把握するために搭載されたGNSS受信機とは別に，過去の測量では，携帯型のGNSS受信機（Garmin製）の時刻情報を定期的に磁力計のシリアルポートに出力し，磁場データのタイムスタンプとすることになっていた．これは，人間が手でコンソールのボタンを押すことによってしか磁力計の内部時計が調整できず，正確な時刻合わせが困難であるためである．GNSSの時刻情報を通じて，磁場データと位置情報を紐付けることが可能になる．しかし，2020年の測量では，コネクタの接触不良により携帯型GNSSの時刻データが磁力計に保存されていないことが事後に判明した．そのため，本研究では以下の手順により，空中の全磁力データの時刻推定を含んだデータ処理を行なった．2020年と同一の飛行経路について，正確な時刻で位置情報と紐付けされた2013年の磁場データ（橋本・他，2013）と，時刻が不正確な2020年の磁場データとの相関が最大になるように，1秒単位で試行錯誤的に時刻補正を行ない，そのときの時刻ずれを補正した磁場データをGNSSの位置データと統合した．次に，おそらくはセンサーの揺れによると思われるばらつきの大きなデータを除去した．この補正は3回の各フライトについてそれぞれ施した．外部起源磁場擾乱の除去は，空中の全磁力データと同時刻の参照点磁場の単純差分を取ることで行った．統合したデータには，時刻・全磁力値・緯度・経度・楕円体高が与えられているが，以後のモデル計算を容易にするため，緯度経度の情報は平面直角座標（12系）へと変換した．

得られた全磁力データの各点に対して，最近接点を2013年のデータから選び出して差分を取ることで時間変化を求めた．航路上での7年間の全磁力変化を示したFig.4を見ると，山頂溶岩ドームより北側で減少，溶岩ドームを含む火口原の中央部から南部にかけては増加という冷却帯磁に典型的な空間パターンが見られる．最近接点ペア間の距離の度数分布をFig.5のようにヒストグラムで表示すると，ほとんどは2m以内であることがわかる．ただし，GNSSのアンテナはヘリコプターの機体に付けられており，ロープで吊り下げられた磁気センサーの位置そのものではない．従って，位置の再現精度は10m程度と考えられる．一方，橋本・他（2012）に示されているように，航路沿いの磁気勾配は，概ね± 1nT/m以内である．これらのことより，± 10nTを超える系統的な変化場は明らかに有意と見てよい．Fig.4では，火口原北側の磁場減少量はピーク値で約 -13nTであるが，空間的になめらかな分布を示しており，双極子型磁気異常の北半分にあたると見なすのが妥当であろう．後述するように，参照点にオフセットがあるものとしてモデル推定した場合には，負の目玉はより明瞭となる．

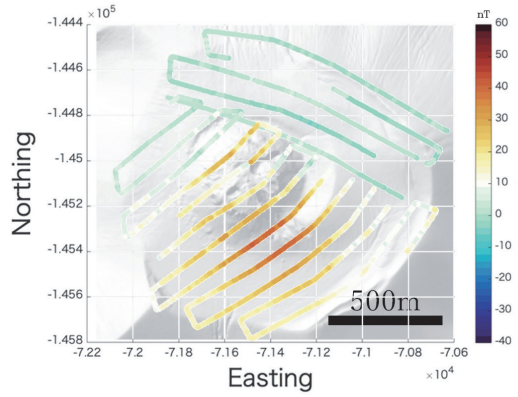


Fig. 4. Differential total magnetic field from 2013 to 2020. Colors of the flight paths indicate the field changes.

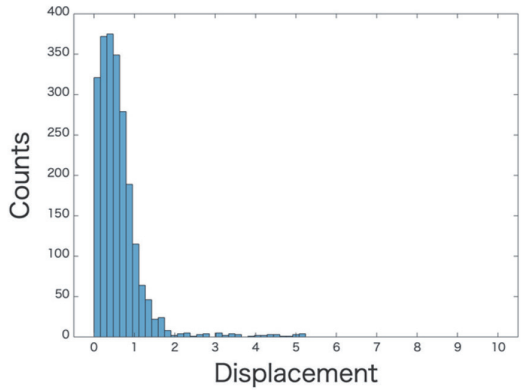


Fig. 5. Histogram of the deviation in the flight paths (the distance of the selected nearest points) between 2020 to 2013.

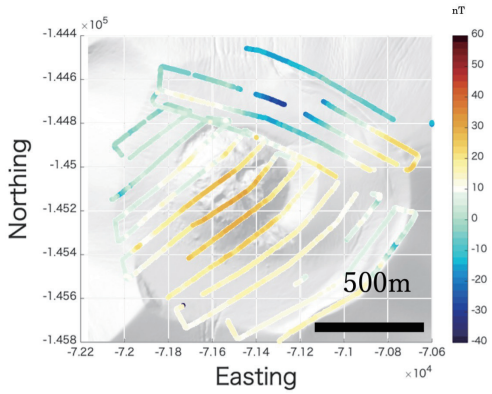


Fig. 6. Differential total magnetic field from 2011 to 2013. Colors of the flight paths indicate the field changes.

Ⅳ．単一磁気双極子を用いた近似

次に，2011-2013 年，2013-2020 年のそれぞれの全磁力変化に対して，単一磁気双極子モデル（一様磁化した球に等価）でソースの位置および磁気モーメント変化量の推定を試みた．単一磁気双極子モデルによる全磁力異常 $F(x,\ y,\ z)$ は，

$$F = (V/R)\{(2c_x - c_y - c_z)x^2 + (2c_y - c_z - c_x)y^2 + (2c_z - c_x - c_y)z^2 + 6c_{xy}xy + 6c_{yz}yz + 6c_{zx}zx\} \quad (1)$$

で求めることができる．ただし，

$$\begin{aligned} &R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ &c_i = c_i p_i \quad (i = x, y, z), \\ &c_{ij} = (e_i p_j + e_j p_i)/2, \\ &\quad ((i, j) = (x, y), (y, z), (z, x)), \end{aligned} \quad (2)$$

ここでは，x 軸が真北，y 軸が真東，z 軸が鉛直下向きのデカルト座標系を考えており，V は球の体積，R は観測点からソースの距離，（p_x, p_y, p_z）は磁化ベクトルの方向余弦，（e_x, e_y, e_z）は外部磁場の方向余弦である．

本研究の処理では，すべてのデータセットについて同一の参照点を使用しているが，その安定性に一部疑がわしい点があったため，空中で観測された変化場に一様なオフセット値を仮定し，それも合わせてソース推定を行うことにした．最適解の推定には，Excel のソルバーに搭載されている GRG（一般化簡約勾配法）を用いて，モデル残差の L1 ノルムを最小化するように最適化を行った．本研究の測量では，無人ヘリの移動速度や風によるセンサーのズレなどで，最近接点が 5m 以下であっても大きな残差になる可能性があるため，大きな外れ値の影響を受けにくい L1 ノルムを最小化する条件でソース推定を行った．モデルと観測値のミスフィットは，

$$\frac{\sum |d^{obs} - d^{mdl}|}{\sum |d^{obs}|} \quad (3)$$

で評価した．ここでは d^{obs} は観測された磁力値，d^{mdl} はモデルにより推定された全磁力値である．その結果，2013 年までの 2 年間の変化はオフセット磁場が 3nT で，磁気モーメント変化量が $8.0 \times 10^6 \mathrm{Am}^2$ の帯磁ソースが，山頂溶岩ドーム部分の深さ約 400m 程度に位置する場合に観測データの全磁力異常分布に最も近似した分布が再現された．(3) 式で評価すると約 0.4 となった .(3) 式はモデル値がどれだけ観測値からズレているかというのを割合で表しているため，ズレは 40%，つまり 60% は再現されていると考えられる．また，この磁気モーメント変化量は 1A/m の磁化で変化する時の半径約 120m の球に相当する．2013 年からの 7 年間の変化はオフセット磁場が 5 nT，磁気モーメント変化量 $7.9 \times 10^6 \mathrm{Am}^2$（1A/m の半径 120m の球に相当）の帯磁ソースが 2011-2013 年のソース位置よりやや南東部の深さ約 400m 程度に位置する場合，観測データの全

磁力異常分布に最も近似した分布が再現され，(3) 式で評価すると約 0.3 となったため 70%は再現されていると考えられる．2011-2013 年のモデルでは，約 68%，2013-2020 年では約 84%の測定点で± 5nT 以内の誤差であった．

一方，橋本・他（2018）は，地上磁気測量のデータを用いて 2010-2016 年の全磁力変化を球モデルで説明している．それによれば，山頂溶岩ドームの直下約 500m の位置に，磁気モーメント変化率 9.5 × $10^6$$Am^2$/ 年のソースが推定されている．磁気モーメント変化率は本研究の単一双極子モデルを用いて推定された 2013-2020 年間の磁気モーメント年変化率に比べて 8 倍程度大きな値を示している．これは本研究ではモデル推定を行うために用いた観測点数は 3145 個だが，橋本・他（2018）での地上磁気測量ではモデル推定に用いた観測点数は 28 個であり，かなりの観測点数の差がある．この観測点数の差により磁気モーメント変化率に推定誤差が生じた可能性が考えられる．しかし，ソース位置の食い違いは水平位置・深さ共に数 100m であり，概ね一致していることが確かめられた．

加えて，本研究の観測結果といくつかの報告された他項目の観測結果について比較を行う．

札幌管区気象台では，山頂溶岩ドームを囲む形で GNSS 観測点を配置し，キャンペーン観測により基線長変化を観測している．それによれば，山頂溶岩ドーム付近を中心として概ね等方的な収縮を示す変化が 2009 年頃から観測されている．また，同じく札幌管区気象台により，赤外放射温度計または赤外熱映像装置，ならびに直接測定により火口温度の観測が行われている．その結果によれば，2010 年頃から 2014 年頃にかけての A 火口の温度は 600℃以上の高温を保っているが 14 年以降では 600℃未満に下がっている．また B 噴気孔群の温度も 2011 年から 13 年頃までは 400 ～ 500℃を保っていたが，それ以降では 400℃以下へと下がっている（札幌管区気象台 , 2019）．これらの結果は，本研究で検出された帯磁傾向が，溶岩ドーム直下の温度低下による熱磁気効果であるという我々の解釈を支持する．

Table 1. Estimated dipole model parameters in this study.
Note that x and y are northward and eastward positions in the plane rectangular coordinate.

	2013-2020	2011-2013
x [m]	-1.451 × 10^5	-1.450 × 10^5
y [m]	-7.147 × 10^4	-7.153 × 10^4
Depth [m]	380	392
Offset Magnetic Field [nT]	5.4	3.3
Magnetic Moment Variation[Am^2]	7.9 × 10^6	8.0 × 10^6
Annual rate of Magnetic Moment Variation[Am^2 / year]	1.1 × 10^6	4.0 × 10^6
Misfit between the observed and modeled fields within ±5nT	84%	68%

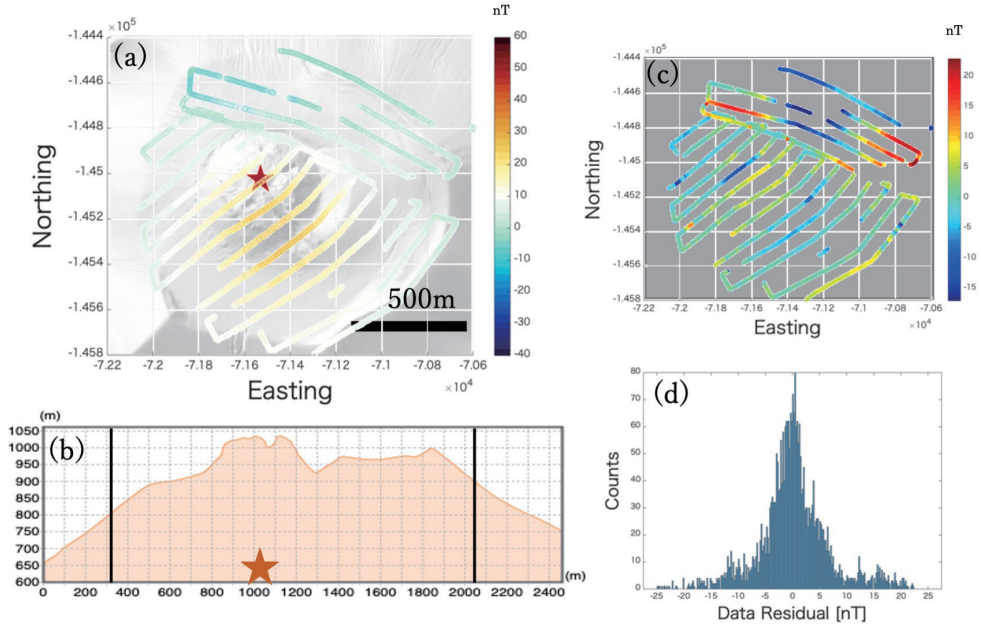


Fig. 7. (a) Magnetic field changes for 2013–2011 calculated from the optimal single dipole model. Red stars indicate the source position. (b) The source location on the east–west cross section across the summit lava dome. (c) Misfit between the observed and modeled fields. (d) Histogram of the misfit.

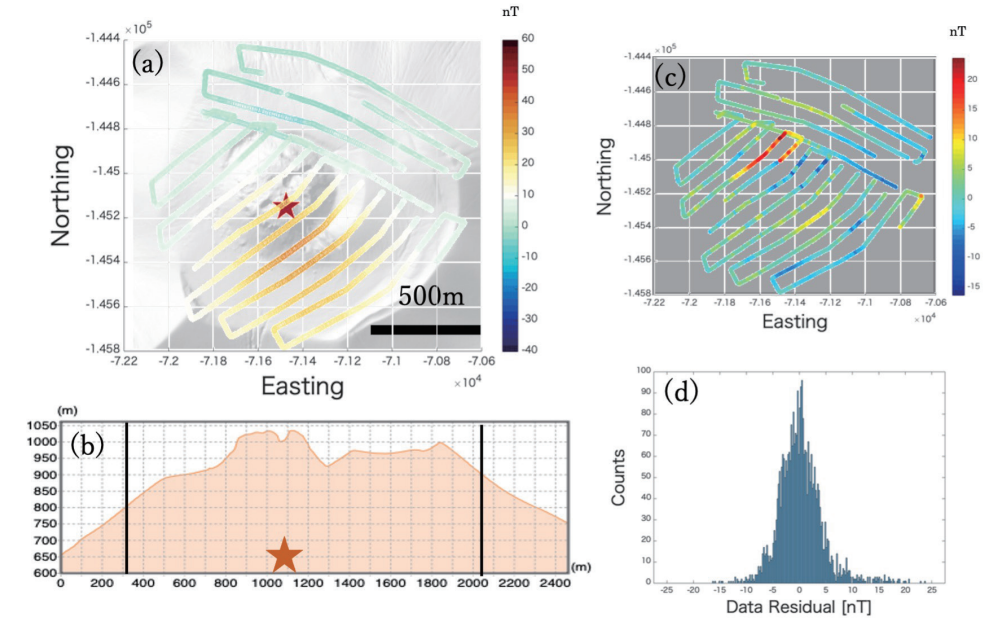


Fig. 8. (a) Magnetic field changes for 2020–2013 calculated from the optimal single dipole model. Red stars indicate the source position. (b) The source location on the east–west cross section across the summit lava dome (c) Misfit between the observed and modeled fields. (d) Histogram of the misfit.

V．まとめと今後の課題

樽前山で４度目となる無人ヘリコプターを利用した空中磁気測量を 2020 年 10 月に行った．飛行経路は前回行われた 2013 年との差が 5m 以下のものがほとんどであり，精度の良い繰り返し測量となった．本研究では，2011 年と 2013 年，2013 年と 2020 年のデータを比較し，それぞれ 2 年間および 7 年間の全磁力変化を推定した．その結果，いずれの期間でも火山体の冷却帯磁を示唆する結果が得られた．全磁力変化が最大となる地点で評価すると，2011-2013 年では約 15nT/ 年，2013-2020 年では約 5.7nT/ 年であった．このことから，2013 年以降は冷却帯磁の傾向が鈍化した可能性がある．気象庁札幌管区気象台と北海道大学が合同で行っている地上磁気測量（橋本・他，2018）でも，2014 年頃を境に全磁力の増加率が低下しており，本研究の空中磁気測量の結果はこれに調和的である．

２つの全磁力変化を単一の磁気双極子による磁気異常で近似すると，ソースはいずれも山頂溶岩ドームの地下に求まり，帯磁センスであった．2011-2013 年については，磁気モーメント変化率が $4.0 \times 10^6 Am^2$/ 年，深さ約 400m の帯磁双極子で観測データの約 60% が再現され，2013-2020 年は磁気モーメント変化率 $1.1 \times 10^6 Am^2$/ 年，深さ約 400m の帯磁双極子で観測データの約 70% が再現された．橋本・他（2018）が 2010-2016 年の地上測量のデータから推定した帯磁双極子は，磁気モーメント変化率 $9.5 \times 10^6 Am^2$/ 年，深さ約 500m であり，上記の 2011-2013 年の空中磁気測量の結果よりやや強く深い．この食い違いは，推定に用いたデータ期間の違いによる可能性もあるが，地上観測と空中測量では，測定点数が大きく異なることに起因するモデルの推定誤差とも考えられる．

本研究により，無人ヘリコプターを用いた空中磁気測量の繰り返しにより，非噴火時の火山活動の消長に伴う磁場変化を捉え，火山活動の監視や状態評価に役立てることが十分可能であることが実証された．

謝辞　東京大学地震研究所から観測機材をお借りしました．ご対応くださった小山崇夫先生に感謝申し上げます．

文　献

古川竜太・中川光弘，2010．樽前火山地質図，独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター，7pp.

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.

札幌管区気象台，2019．平成 31 年・令和元年（2019 年）樽前山の火山活動，2019.

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

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，40，3，163-169.
橋本武志・小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・吉本充宏・鈴木英一・柳澤孝寿，2012．無人ヘリコプターを利用した樽前山の空中磁気測量，北海道大学地球物理学研究報告，75，145-159.
橋本武志・小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・吉本充宏・鈴木英一・柳澤孝寿，2013．自律飛行無人ヘリコプターを利用した樽前山の空中磁気測量，Conductivity Anomaly 研究会論文集，81-87.
佐久間修三・村瀬　勉，1956．北海道火山の地球物理学的研究（その 1）：北海道火山の地磁気伏角測量概報，北海道大学地球物理学研究報告，4，1-24.