HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	無人ヘリコプターを利用した樽前山の空中磁気測量
Author(s)	橋本, 武志; 小山, 崇夫; 金子, 隆之 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 75, 145-159
Issue Date	2012-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.75.145
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49078
Type	departmental bulletin paper
File Information	75-P145-159.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. 75, March 2012, pp. 145－159

無人ヘリコプターを利用した樽前山の空中磁気測量

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
小山　崇夫・金子　隆之・大湊　隆雄
東京大学地震研究所
吉本　充宏
北海道大学大学院理学研究院
鈴木　英一
北海道大学大学院工学研究院
柳澤　孝寿
独立行政法人海洋研究開発機構

（2012 年 1 月 18 日受理）

Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano

Takeshi HASHIMOTO
Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University
Takao KOYAMA, Takayuki KANEKO, Takao OHMINATO
Earthquake Research Institute, University of Tokyo
Mitsuhiro YOSHIMOTO
Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency
Eiichi SUZUKI
Faculty of Engineering, Hokkaido University
and
Takatoshi YANAGISAWA
Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology

(Received January 18, 2012)

The first low-altitude airborne magnetic survey was performed over the summit area of Tarumae Volcano, southwestern Hokkaido, Japan. An unmanned autonomous helicopter was used as the platform for the magnetic survey. Obtained total field anomaly is inverted into a matrix of magnetized prisms, each of which has a uniform magnetization parallel to the present geomagnetic field. Magnetization in the summit atrio ranges from 3 to 8 A/m with an average of 5.3 A/m. The summit lava dome and its vicinity show relatively high magnetization, while the eastern to southwestern part of the atrio is less magnetized. Such variability may be attributed to the difference in magnetization between blocky lava and pyroclastic deposits, as well as to chemical demagnetization due to persistent fumarolic activity at several vents. From the viewpoint of an aeromagnetic survey, high positioning repeatability is one of the most advantageous features of such an unmanned autonomous helicopter. Optimized operation of the system would enable us to detect temporal changes associated with volcanic activity in the future.

Ⅰ．は　じ　め　に

火山岩は一般に強い磁性を有するため，火山体の周辺には磁気異常が生じる．この磁気異常は，火山噴出物の成分や堆積様式，高温や噴気変質による磁化の弱化などに起因する地下浅部の磁化不均質を反映している．空中もしくは地上で測定された磁気異常分布を解析することで，こうした地下浅部の不均質構造や温度異常を推定することができる．岩石の磁化は，高温にさらされると弱くなる性質があり，およそ 600 ℃ 前後で大半の磁化が消失してしまう．この性質を利用すると，地上もしくは空中における磁場の時間変化から，地下の加熱・冷却を検出することも可能な場合がある（例えば，地上観測の例として Tanaka, 1993；Kanda et al., 2010，空中測量の例では Nakatsuka et al., 2009；Hashimoto et al., 2011 等があげられる）．

磁場変化から推定される地下温度変化の情報を，地殻変動や地震活動等と併せて考察することで，火山活動の現況についてよりよく理解することができる．また，仮に噴火中にこうした測量ができれば，噴火活動の推移に対する見通しを与え得るひとつの情報となるであろう．地上における磁気測量では，地形的・労力的な制約が大きいが，ヘリコプター等を用いて空中から同様の磁気測量ができれば，効率的に面的なデータを取得することが可能である．

近年，自律飛行が可能な産業用無人ヘリコプターを利用した火山観測の技術が実用化されつつあり，東大地震研究所を中心としたグループにより，伊豆大島，桜島，霧島新燃岳等で試験観測が行われている（例えば，Kaneko et al., 2011；金子・他，2011）．自律飛行型の無人ヘリコプターそのものは，従来から農薬散布等で産業利用されているほか，防災行政においても，災害発生時の危険区域での被災状況調査等を目的として北海道開発局に配備されている．ただし，火山の山岳部における飛行は，技術的な難易度が相対的に高いこともあり，上述の例を除いてほとんどないのが現状である．山岳部でのオペレーション技術を向上させておくことは，火山砂防および研究観測の両面にとって有益であることから，我々は北海道開発局と共同で，無人ヘリコプターによる火山での飛行実験を実施した．飛行実験は，樽前山の山頂火口原とその周辺を対象として

行われ，空中からの撮像，無線操縦による地震計の設置回収試験のほか，空中磁気測量が実施された（鈴木，2011）．本稿では，このうち空中磁気測量の結果について詳述する．

Ⅱ．樽前山における先行研究

樽前山は，支笏カルデラの南に位置する後カルデラ火山であり，約 9,000 年前に活動を開始したとされている．Fig. 1 に樽前山の位置と主要な地形を示す．山体は主に爆発的噴火の火砕物で構成されているが，山頂部に広がる直径約 1 km の火口原は，西山・東山を含む地形的高まりに縁取られた凹地形を形成しており，その中央部には，1909 年の噴火で形成された溶岩ドームがある（古川・中川，2010）．この噴火の後，現在までの約 100 年間，樽前山は本格的なマグマ噴火を起こしていない．

気象庁による常時の機器観測が開始された 1967 年以後についてみると，1978–1982 年には小噴火とそれに伴う少量の降灰があり，微小地震活動も活発であった．その後，表面的には比較的安定した状態が訪れ，地震活動も静穏期に入った（青山・他，2004）．しかし，1996 年からは再び微小地震活動がやや活発になっている．それを受けるように，1999 年から 2000 年にかけて，山頂域で膨張性の地盤変動と熱消磁を示唆する地磁気変化が観測され，火口温度や地温の上昇，噴気活動の活発化等の表面現象も表れた（札幌管区気象台，1999；2002；気象研究所，2008）．また，2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震の直後には，低周波地震を含む群発地震活動が観測された．2009 年には，1985 年以来となる火山性微動が 3 回観測されている（札幌管区気象台，2009）．

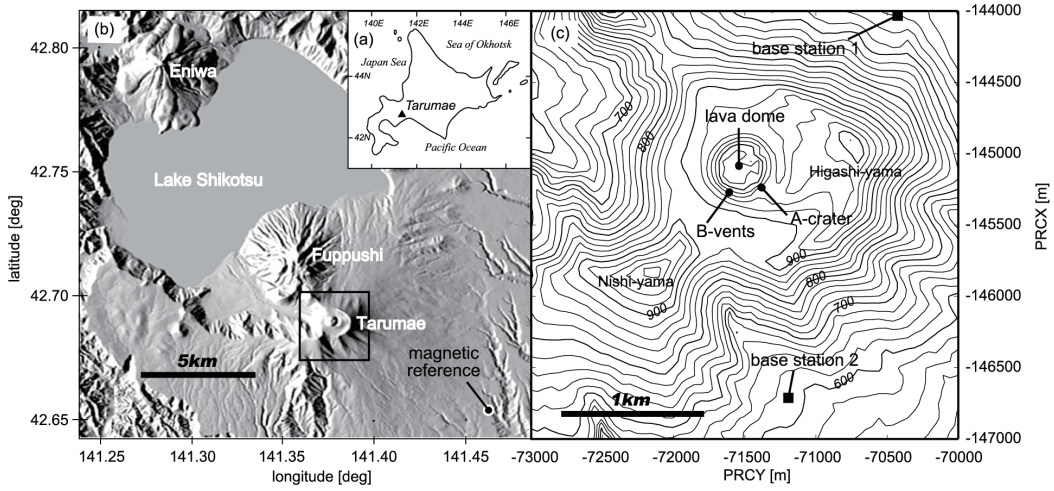


Fig. 1. (a) Location of Tarumae Volcano. (b) Intermediate-scale map around Shikotsu caldera. Magnetic reference station is shown with a solid circle at right bottom. (c) Close-up map of the inset in panel b. Solid squares indicate the base stations for helicopter control and monitoring. Horizontal and vertical ordinates are in the plane rectangular coordinates (PRC) of the 12th system. The direction of PRC-X is approximately 0.5 degrees westward from the geographical north in this area. Contour interval is 20 m.

熱活動については，2009 年から 2010 年にかけて，山頂ドーム南東亀裂から A 火口付近にかけて，新たな噴気孔や地熱異常が出現しているほか，B 噴気孔群の放熱率は 2009 年から 2010 年にかけて 1 桁増大したことが報告されている（北海道大学，2011）．2011 年 5 月には，B 噴気孔群に新たな噴気孔が形成され，高温のガスとともに砂礫が流出した（気象庁，2011）．地上の繰り返し全磁力測量によれば，このイベントの前後で，明瞭な冷却帯磁の傾向が観測されている（北海道大学・札幌管区気象台，2011）．

地盤変動についてみると，山頂域では 1999～2000 年，および 2006 年から 2009 年頃に膨張傾向を示したものの，やや長基線の GPS 測量ではむしろ山頂側が収縮する変動を示している（気象庁，2011）．これらのことを総合すると，1990 年代後半以降，樽前山では深部でのマグマの蓄積傾向は認められないものの，山頂火口原直下への熱の供給がやや増大したのではないかと推測される．

次に，樽前山でこれまで行われてきた磁気観測について述べる．佐久間・村瀬（1956）は，北海道内のいくつかの活火山について地磁気の伏角分布を測定し，山体の磁化を推定している．樽前山については，山頂ドーム溶岩の磁化は 6 ～ 8 A/m，ドームを除く山体の磁化は 2 ～ 3 A/m と推定されている．2000 年には，国土地理院が航空機を用いた空中磁気測量を行っており，樽前山を含むやや広域の全磁力分布が得られている（Fig. 2）．この磁気異常図からは，樽前山－風不

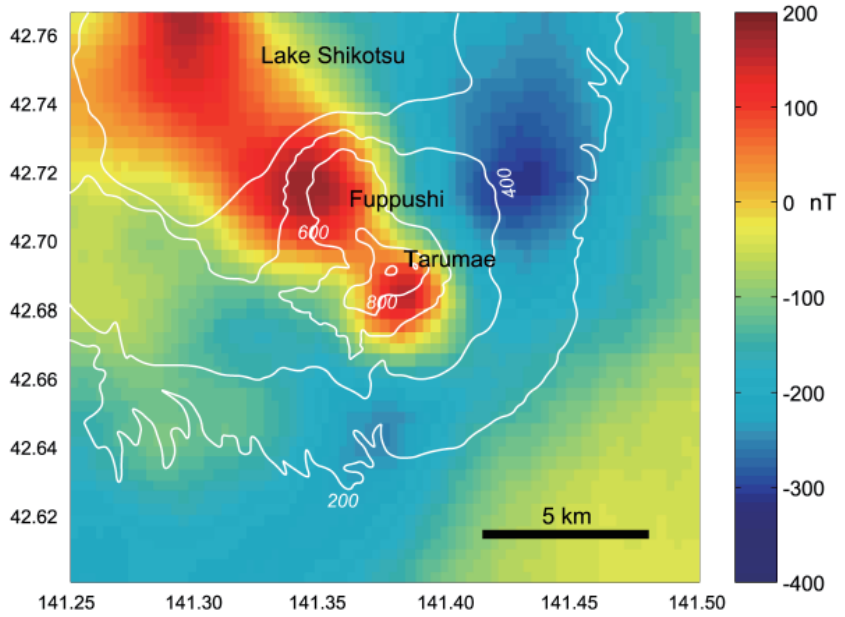


Fig. 2. Magnetic anomaly map around Tarumae Volcano measured at an altitude of 2,000 m ASL by Geospatial Information Authority of Japan (previously Geographical Survey Institute). Drawn from the gridded data produced by GSI (http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/aeromag_data.html). White lines show the shoreline of Lake Shikotsu and topographic contours with 200 m interval.

死岳－支笏湖西部を経て恵庭岳に至る火山列に沿った高磁気異常が明瞭に認識できる．ただし，飛行高度が標高 2,000 m とやや高いため，このデータと，今回取得した樽前山上空の磁気異常データを比較して，樽前山の火山活動との対応を議論するのは難しい．札幌管区気象台は，1998 年から不定期に地上で全磁力観測を行っており，2000 年の前後数年間に，熱消磁を示唆する明瞭な磁場変化が観測されている（札幌管区気象台，2002）．2010 年と 2011 年には，北海道大学も札幌管区気象台と共同して火口原内に磁気点を増設し，測定頻度を上げた測量を行った．その結果，先述の如く，2011 年 5 月の B 噴気孔群から砂礫混じりの高温ガスが流出したイベントに関連すると思われる冷却帯磁が捉えられている（北海道大学・札幌管区気象台，2011）．等価双極子で近似される冷却帯磁源の位置は，山頂溶岩ドーム直下の深さ約 500 m であり，変化した磁化の量は，およそ 1×10^7 Am^2 と推定される．

Ⅲ．測定の諸元と測定結果

今回，北海道開発局の協力により，樽前山では初めてとなる低高度稠密の空中磁気測量が実現し，火口原内のほぼ全域で全磁力分布を測定することができた．磁気測量は，緒言で述べた如く，山岳域での飛行実験の一部として実施したもので，2011 年 9 月 27 日に樽前山頂火口原の上空で行った．プラットフォームとなる機体は，北海道開発局所有の無人ヘリコプター（ヤマハ RMAX-G1）を使用した．機体の全長は 3.6 m，最大搭載量は 10 kg，最大航続時間は 80 分である．機体の離着陸制御にはオペレーターによる操縦が必要である．また，飛行中の機器や周辺の状態を常時監視するためにも，飛行域から約 3 km 以内に，機体との無線通信が可能で見通しの良い地点を選び，基地局を設ける必要がある．本調査では，Fig. 1 に示したように，樽前山北斜面の 6 合目付近と，南麓に位置する北海道大学の観測坑道付近に基地局を設け，それぞれ山頂域の北側，南側の領域を測定した．上述の最大搭載量は平地での公称値であり，樽前山のように標高 1,000 m を超える場合には，空気の密度が小さいために積載可能な重量は制約される．本調査では，燃料を減らして積載量を確保するという方法で対応した．測定当日は視界が良好で風も弱かったことが幸いし，懸念されていた最高到達高度も標高 1,300 m 程度まで上げることができた．Fig. 3 に飛行経路を示す．地形と飛行経路の断面図（Fig. 4）からわかるように，山頂火口原上空での対地高度は，概ね 100～300 m である．自律飛行時の飛行高度はフライト毎にほぼ一定であり，安定していることがわかる．飛行速度は平均約 18 km/h であった．なお，前日の 9 月 26 日にも飛行を試みたが，南風の吹き下ろしにより，山頂域への投入は行うことができなかった．

今回使用した機体は，基地局からの操縦にて調査域に機体を投入した後は，ヘリコプターに搭載された GPS 受信機の実時間測位により自律飛行が可能である．このため，位置精度の高い（絶対位置で 10 m 程度の誤差と考えられる）航行ができる．この機能は，位置再現性という観点から極めて重要であり，空中磁気測量の反復によって，火山性の磁場変化を検出する上で有利である．

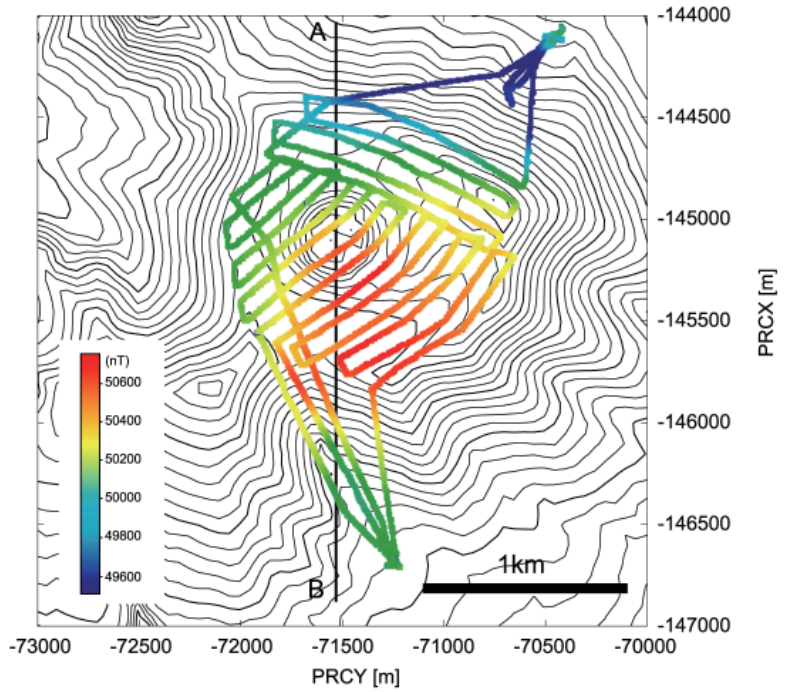


Fig. 3. Flight trajectories with magnetic field strength shown with color.

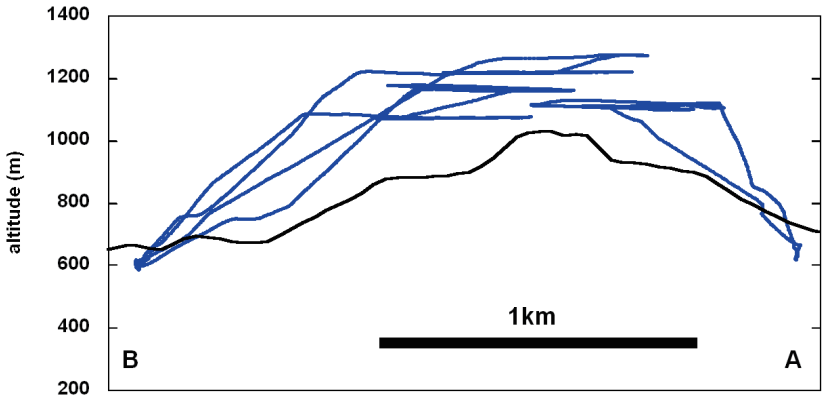


Fig. 4. Flight trajectories shown with topography along the line AB in Fig. 3.

磁場計測は東京大学地震研究所所有の Geometrics G858 光ポンピング磁力計によった．磁場は全磁力のみの測定で，10 Hz サンプリングとした．日変化補正のため，地上（北緯 42 度 39.221 分　東経 141 度 27.756 分　標高 117 m）に参照点を設けて，同型の磁力計で 10 Hz 計測を行った（参照点の位置は Fig. 1 に示した）．測位については，GPS による 10 Hz 測定とし，地上の基地局付近に設置した参照点との間でディファレンシャル測位が行われる．磁力計本体と GPS 受信機

はヘリコプターの機体に固定されている．また，機体に起因する磁気異常の影響を避けるため，Fig. 5 に示したように，磁力計のセンサ部分を機体から約 4.5 m のワイヤーで吊して測定を行った．なお，今回のデータ処理では，機体とセンサの位置のずれは，対地高度に比して誤差範囲内と考えて補正していない．



Fig. 5. Unmanned helicopter operating magnetic survey. Magnetic sensor is suspended with the wire of 4.5 m long.

Ⅳ．データ処理の方法

取得されたデータに対して，以下の手順で前処理を行った．磁場データについては，まず，電離層起源の変動成分を除去するために，同時刻の参照点磁場データ（Fig. 6）との単純差をとる．今回取得した GPS 測位データは，GPS 時刻・緯度・経度・楕円体高で与えられているため，まず，緯度経度を平面直角座標（12 系）に変換した．GPS 時刻に閏秒補正（15 秒）を施し，世界時に変換する．オリジナルのデータは 10 Hz サンプリングであるが，本稿のデータ処理では，1 秒値を抽出して使用した（後述のように，インバージョン解析では，さらにデータを間引いている）．磁化構造インバージョン解析を行うために，地形標高モデルを使用する．ここでは，国土地理院が公開している基盤地図情報の 10 m メッシュ数値標高モデルを，平面直角座標と楕円体高の表現に変換して使用した．一般に平面直角座標の X 方向と地理的北の方向は一致しない．樽前地域では，X 方向は真北に対して 0.586° 西に振っている．この角度は地磁気偏角にも影響するため，磁気異常計算の中で考慮する．

なお，磁気測量の見地からは好ましくないことであるが，調査飛行が行われた 9 月 27 日には，磁気嵐が発生していたことを付記しておく（気象庁の女満別地磁気観測所における日合計 K

指数で「擾乱日」に分類される 25 を記録）．参考のため，測量日を含む 10 日間の地磁気変化を Fig. 7 に示した．9 月 26 日の深夜に磁気嵐が始まり，29 日までは擾乱が大きかったことがわかる．

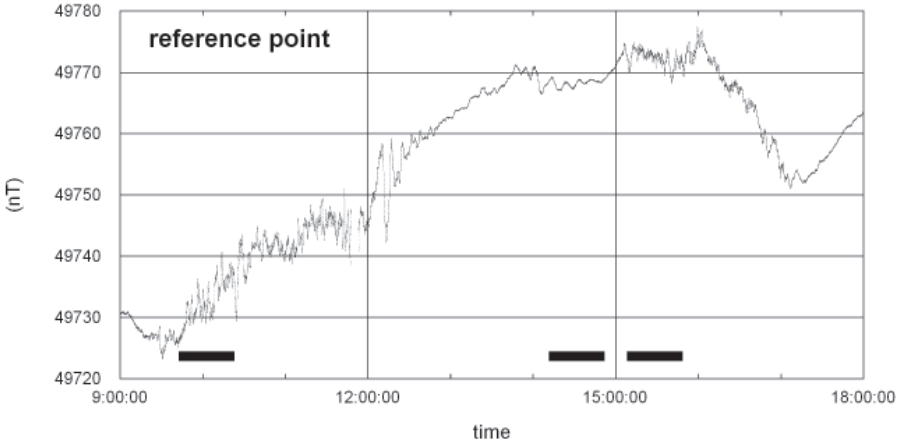


Fig. 6. Magnetic change at the reference point on September 27, 2011 (JST). Bars indicate the period in which helicopter surveys were in operation.

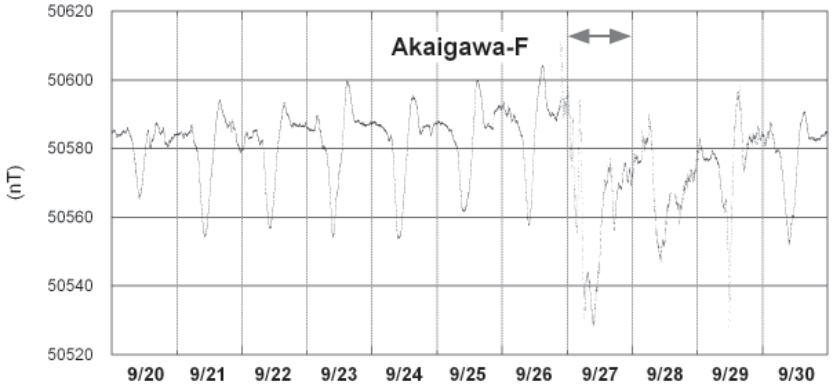


Fig. 7. Magnetic change (total force) at Akaigawa station which is run by Geospatial Information Authority (September 20–30, 2011).

本研究では，著者の一人である小山が開発し，Kaneko et al.（2011）でも用いられている不均質磁化線形インバージョンに若干の改良を加えて，磁化構造解析を行った．このインバージョンは，角柱の集合で地形を近似し，空中での磁気異常を再現すべく，各々の角柱の磁化を推定するものである．角柱内の磁化は一様とし，磁化の方向は現在の地磁気（偏角 9.1° W，伏角 57.1°）と一致しているものと仮定する．また，角柱の底面標高は一定とし，それ以深は無磁化とする．最終的には角柱毎の磁化を求めるが，第一段階では，以下の目的関数 Φ_0 を最小にする一様平均

磁化強度J_0を求める．

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^{N} \left\| {d_{obs}}^{(i)} - {d_{mdl}}^{(i)} \right\|^2 \tag{1}$$

ただし，${d_{obs}}^{(i)}$は上空の測定点$i = 1 \sim N$における全磁力値（主磁場や外部起源磁場変動を除去した磁気異常），${d_{mdl}}^{(i)}$は，M個の角柱（$j = 1 \sim M$）によって，i番目の測定点に生じるモデル磁気異常である．一様に磁化した角柱による磁気異常は，Bhattacharyya（1964）の方法により計算する．第j番目の角柱が，ある観測点座標（x, y, z）の位置につくる磁気異常をΔF_j（x, y, z）とする．角柱はM個あるので，各々の寄与を足し合わせればよい．従って，${d_{mdl}}^{(i)}$は，

$$ {d_{mdl}}^{(i)} = \sum_{j=1}^{M} \Delta F_j(x, y, z) = \sum_{j=1}^{M} J_j X_j = J_0 \sum_{j=1}^{M} X_j \equiv J_0 G \tag{2}$$

の形となる．X_jはj番目の角柱とi番目の観測点の位置関係で決まる係数である．Gは，単位磁化（$J = 1$）の角柱の集合体によって，i番目の測定点に生じる磁場を意味している．(2) 式を (1) 式に代入すると，

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^{N} \left\| {d_{obs}}^{(i)} - G^{(i)} J_0 \right\|^2 \tag{3}$$

となる．ただし，Gは測定点毎に異なる値をとるので，$G^{(i)}$と書いた．Φ_0の最小自乗条件を満たす平均磁化J_0は，以下により求めることができる．

$$J_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} G^{(i)} {d_{obs}}^{(i)}}{\sum_{i=1}^{N} \left(G^{(i)} \right)^2} \tag{4}$$

次に，個々の角柱の磁化を考え，上で求めた平均磁化強度J_0からの偏差をΔJ_j（$j = 1 \sim M$）とする．このΔJ_jのL2ノルム自乗を最小にするという制約をかけつつ，観測データと推定データの残差を小さくする磁化分布を求める．ここでは，目的関数を次のように与える．

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m = \sum_{i=1}^{N} \left\| \Delta {d_{obs}}^{(i)} - \sum_{j'=1}^{M} A_{ij'} \Delta J_{j'} \right\|^2 + \lambda \sum_{j=1}^{M} \left\| \Delta J_j \right\|^2 \tag{5}$$

ただし，

$$\Delta d_{obs} = d_{obs} - G J_0$$
$$\Delta J_j = J_j - J_0$$

であり，A_{ij}はヤコビアン行列である．λはハイパーパラメータで，(5) 式の第１項と第２項のど

ちらの制約条件に重みをかけるかを決めている．様々なλ値について目的関数とABIC（赤池ベイズ情報量基準）を計算し，ABICを最小化するΔJ_jの組み合わせを最適モデルとして採用する．(5)式の正規方程式を行列表式で書くと次のようになる．

$$\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}+\lambda\mathbf{I}\right)\Delta\mathbf{J} = \mathbf{A}^T\Delta\mathbf{d}_{obs} \qquad (6)$$

この正規方程式を解いて$\Delta\mathbf{J}$を求めるために，ここでは特異値分解（SVD）法を用いて$\mathbf{A}$の一般化逆行列を計算している．以上が，本研究で用いたインバージョンの概要である．

観測された磁場の生データには，地球の主磁場成分が含まれている．この主磁場からの偏差分を磁気異常データとしてインバージョンに与えるのであるが，参照点との単純差をとっただけでは，直流成分の一部がオフセットとして残ってしまう．国際標準磁場モデル（IGRF）等を使ってこのオフセット値を見積もることもできるが，IGRFはもともとグローバルなモデルであるので，火山地域のように局所的な磁気異常が強い場所では，正しいオフセット値を与えない可能性もある．そこで，本研究では，オフセット値を少しずつ変えてインバージョン計算を反復し，もっともABICが小さくなるものを最適条件と判断することとした．

なお，本研究では，モデル角柱とデータの空間密度をほぼ一致させてインバージョンを安定させるために，磁場のサンプリングを20秒値に間引いて使用した．また，構造解析に使用する角柱の一辺の長さはDEMのメッシュサイズの10倍（100 m），直方体の底面の深さは海抜0 mとし，それより深部は無磁化であると仮定した．計算領域の外側が無磁化であることで周縁部分の磁場が非現実的になってしまうエッジ効果を避けるために，計算領域は実際の飛行範囲よりもかなり広く設定している．本研究のインバージョン計算に用いたDEMの範囲，不均質磁化を導入した領域，および入力として与えた磁場データ点をFig. 8に示す．

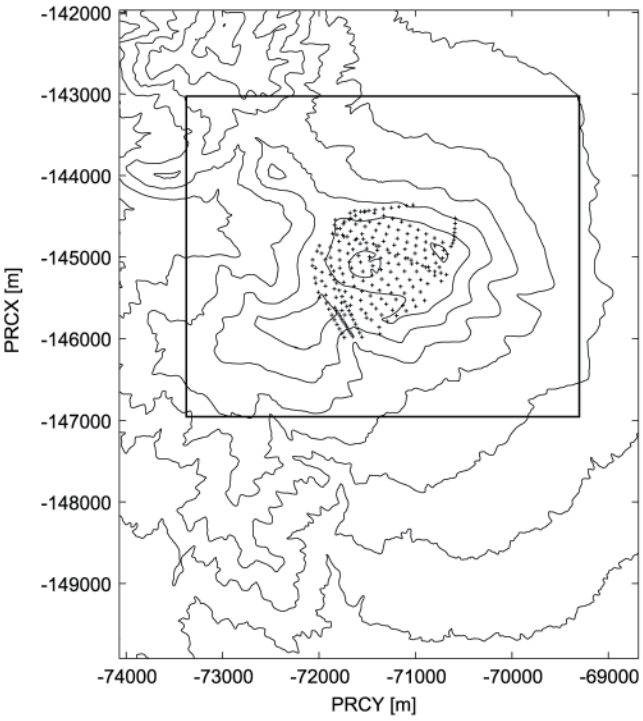


Fig. 8. Modeled area for the inversion analysis. Ordinates are in PRC. The inset indicates the area in which non-uniform magnetization is introduced. Dots show magnetic data points fed into the inversion code.

V. 解　析　結　果

インバージョン解析の結果，ABIC が最小となるのは，参照点との単純差に磁場オフセット値+350 nT を与えた場合であり，均質磁化モデルの磁化値は 5.3 A/m と求まった．様々なオフセット値に対する目的関数 Φ と ABIC の変化を，Fig. 9 に示す．佐久間・村瀬（1956）の地磁気伏角測量によれば，樽前山頂ドーム溶岩の磁化は 6 ～ 8 A/m，ドームを除く山体の磁化は 2 ～ 3 A/m と推定されていることを考えると，今回得られた 5.3 A/m という値は，山頂火口原およびその周辺域の平均磁化として妥当なものといえるだろう．実際に観測された磁場分布を Fig. 10 に，均質磁化モデルにより与えられる磁場分布を Fig. 11 に示す．均質モデルで

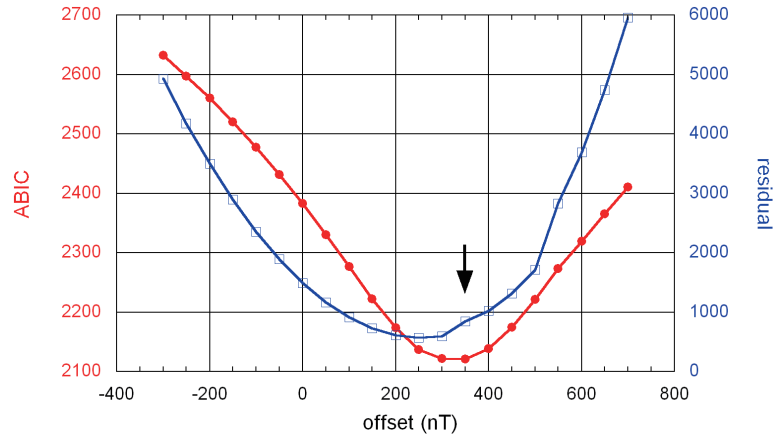


Fig. 9. Variations of residuals (blue) and ABIC (red) with respect to offset values in magnetic field.

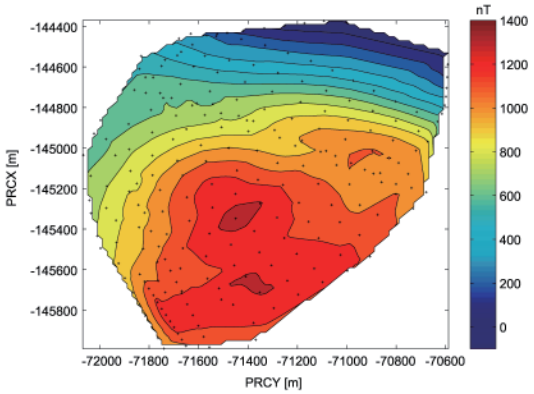


Fig. 10. Observed magnetic field in this study. Contour interval is 100 nT. Crosses indicate the data points. Ordinates are in PRC.

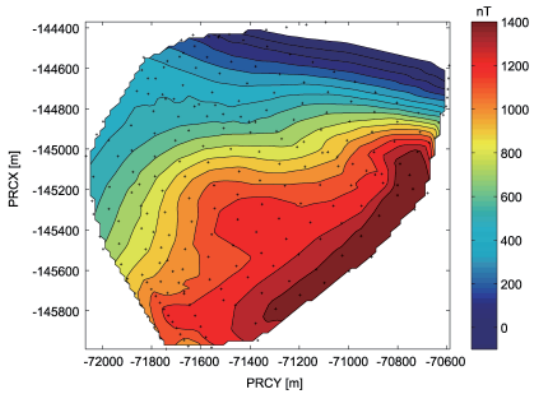


Fig. 11. Calculated magnetic field obtained from a uniform (5.3 A/m) magnetization model. Format is the same as Fig. 10.

は，大まかな磁場分布の傾向は再現されているものの，山頂火口原内部の磁気異常に不一致が残っていることがわかる．

さらに，Fig. 8 の太枠内の領域について不均質磁化を導入したインバージョン解析により，Fig. 12 の磁化分布を得た．この不均質磁化モデルによる磁場分布（Fig. 13）と，Fig. 10 の観測磁場分布の残差を Fig. 14 に示した．殆どの領域で残差は±2 nT 以内であり，最大でも±10 nT 程度である．もともとの磁気異常の振幅が 1,500 nT 程度あることを考えると，不均質磁化モデルによって，観測された磁気異常はほぼ再現されていると言える．推定された磁化分布（Fig. 12）を詳細に見ると，溶岩ドームの磁化は，3 ～ 6 A/m 程度であることがわかる．ドームを除く火口原内の磁化は，3 ～ 8 A/m 程度の幅をもって分布しており，特に南東側には，相対的に磁化の弱い領域が認められる．それに対して，ドームの北西側の磁化は，ドームそのものよりもやや強い（5 ～ 8 A/m）磁化を示している．また，ドーム南東部の A 火口付近や，東山・西山周辺では，特に小さい 2 ～ 4 A/m の磁化が推定された．これらの結果は，佐久間・村瀬（1956）の推定とも矛盾しない．おそらく，火砕物として堆積した火口原の周縁部は，比較的ランダムな方向の残留磁化をもっているのに対し，ドーム溶岩は塊状のまま徐冷したために残留磁化の方向が揃っており，相対的に強い磁化を示しているものと推測される．また，A 火口の周辺や溶岩

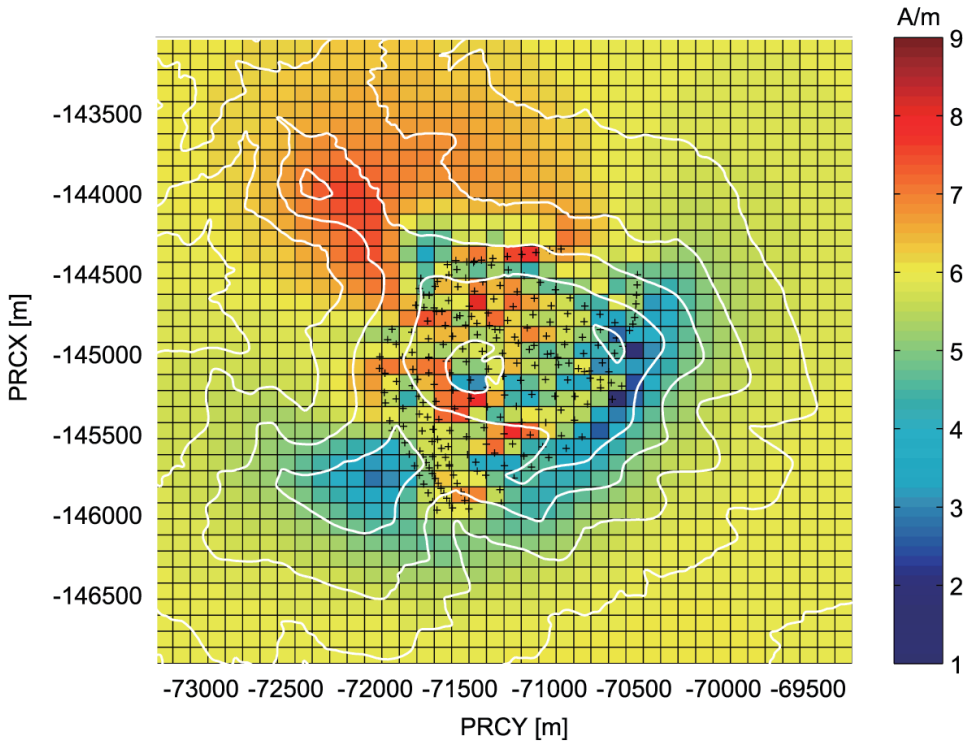


Fig. 12. Modeled magnetization anomaly obtained from the inversion analysis. Topography is superposed with white contours. Crosses indicate the data points. Ordinate units are in PRC.

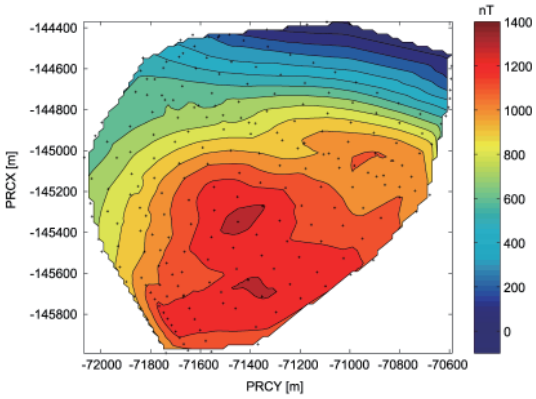


Fig. 13. Calculated magnetic field obtained from a non-uniform magnetization model. Format is the same as Fig.10.

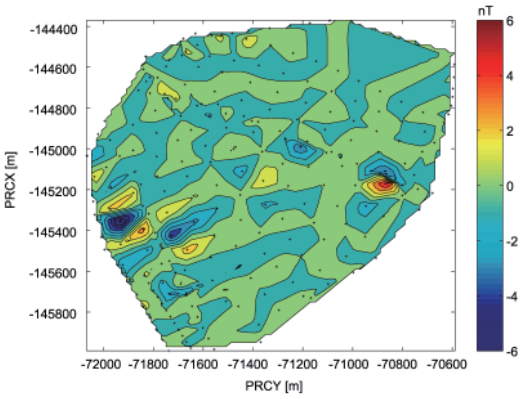


Fig. 14. Difference between modeled (Fig. 13) and observed (Fig. 10) magnetic field. Contour interval is 0.5 nT. Ordinates are in PRC.

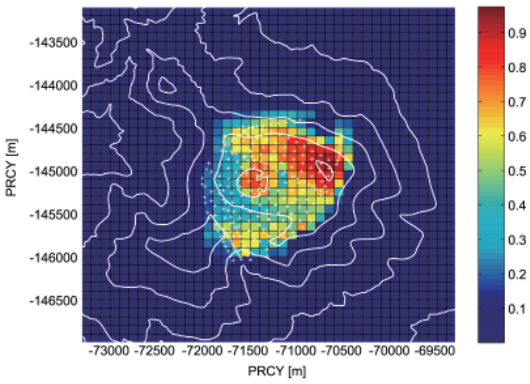


Fig. 15. Distribution of diagonal component of the model resolution matrix obtained from inversion analysis. Crosses indicate the data points. Ordinate units are in PRC.

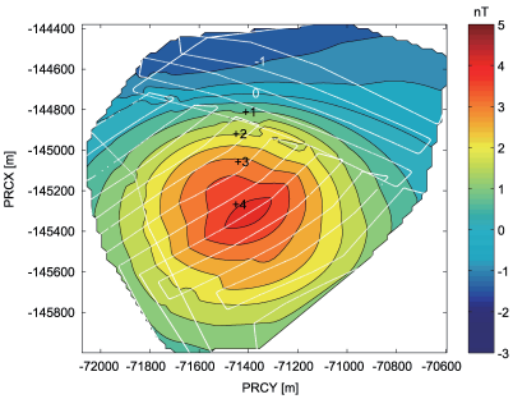


Fig. 16. A synthetic magnetic change due to magnetizing source beneath the summit lava dome at an altitude of 500 m asl. Magnetic values are calculated on the same flight surface as the real one in 2011.

ドームそのものの磁化が，火口原北西部に対してやや小さいことは，約 100 年にわたる継続的な噴気活動によって，磁性鉱物が変質を受けたことを意味しているのかもしれない．推定された磁化分布モデルの信頼性を確認するために，一般化逆行列から計算されるモデル解像度行列の対角成分を各々のモデル角柱について取り出し，地図上に示したのが Fig. 15 である．当然のことながら，測定値の存在しない領域の解像度は，ほぼ 0 になっている．測定領域の北東部および溶岩ドーム域については，解像度が 0.7 以上と高くなっていることから，推定された磁化の信頼性は高いと考えられる．従って，東山付近の磁化が溶岩ドームの周辺域よりも小さいことに関しては，確からしいと言えるだろう．一方，ドームの西側については解像度が 0.3 程度と低く，相対的にモデルの信頼性は低いと考えるべきである．

なお，この解析では，測定値の存在しない領域についても磁化分布が推定されている．とりわけ，樽前山北西部から風不死岳に向かう高磁化が顕著である．これは，観測された磁場分布とモデルとの残差をできるだけ小さくしようとして，インバージョンが出した偽像である可能性もある．ただし，Fig. 2 に示したやや広域の磁気異常図で，樽前山から風不死岳方向に向かって高磁気の領域が伸びていることから判断すると，この方向に磁化の強いブロックが延長していると考えることは，あながち理不尽ではない．

最後に，今後の反復測量による時間変化検出の可能性について述べる．先行研究の章で述べたとおり，樽前山の山頂部では，2010 年 10 月から 2011 年 10 月の約 1 年間に，冷却帯磁を示唆する明瞭な全磁力変化が観測されている．帯磁源を単一の磁気双極子で近似すると，ソースの深さは約 500 m，磁気モーメント変化量はおよそ 1×10^7 Am^2 である．これと同程度の現象を空中で観測するならば，期待される磁場変化は Fig. 16 のようになる．変化量はおよそ -2 〜+5 nT であり，空中磁気測量の反復で検出するにはやや厳しい条件である．一方，本研究の実測によれば，空中での磁気勾配は概ね± 1 nT/m 以内であった．従って，自律飛行型の無線ヘリコプターの位置再現性を 10 m と考えると，反復測量の誤差としては，±10 nT が想定される．以上のことから，上の試算に用いたソースの数倍以上の強度をもつイベントであれば，空中測量によって時間変化を検出できる可能性が高いと考えられる．

VI. まとめと今後の課題

著者らは，北海道開発局と共同で，樽前火山における無人ヘリコプターの飛行実験を実施した．その一部として，2011 年 9 月 27 日に，山頂火口原上空で空中磁気測量を行った．低高度稠密の空中磁気測量は，樽前山では本研究が初めてである．

観測された磁気異常分布を，不均質磁化モデルによるインバージョンで解析した結果，平均的な磁化は 5.3 A/m と推定された．山頂火口原の磁化は，3 〜 8 A/m の範囲で分布し，その中でも，山頂溶岩ドームの周辺は相対的に大きな磁化を示した．また，火口原の東部から南東部（A 火口付近と東山周辺）では，相対的に小さい磁化が推定された．このような磁化の不均質は，噴気活動による磁化の弱化や，溶岩塊と火砕物の差異を反映しているのではないかと推測される．また，今後同様の磁気測量を繰り返し行うことで，火山活動に伴う磁場変化を検出することもできる可能性がある．

北海道開発局現有の機体では，高々度で十分な積載重量を確保することが難しいため，条件によっては山頂域に到達できないことも懸念されたが，本調査では，風が弱く視界も良好であったことが幸いし，ほぼ計画通りの飛行高度・範囲を得ることができた．山岳域における無人ヘリの運用は，天候に大きく左右されることが最大の難点である．操縦車からの距離が 3 km 以内という飛行可能範囲も，実際の運用上は制約が大きい．飛行エリアや調査時の風向きに応じた複数の基地局候補地を，あらかじめ想定しておくことが必要であろう．また，現状では移動操縦車の機

動力に限りがあるため，基地局へのアクセスルートを確保しておくことも，緊急時の迅速な対応には重要な要素となる．

謝辞　空中磁気測量をはじめとする無人ヘリコプター実験に際し，北海道開発局から多大なるご協力をいただきました．とりわけ，室蘭開発建設部治水課，ならびに札幌開発建設部の皆様には，今回の飛行実験を共同で実施するにあたり，様々な形でご尽力いただきました．記して感謝申し上げます．現場でのオペレーションに際し，ヤマハ発動機スカイ事業部には，技術的な支援をいただきました．磁気異常解析および磁気異常図等の作成にあたり，国土地理院発行の 10m メッシュ基盤地図情報の数値標高モデルを使用しました．また，数値標高モデルの前処理にあたり，北海道大学地震火山研究観測センターの奥山 哲研究員にご協力いただきました．Fig. 2 の航空磁気異常図の作成にあたっては，国土地理院が 2000 年に樽前山で実施した測量に基づくグリッドデータ（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/aeromag_data.html）を使用しました．

文　献

青山　裕・大島弘光・鈴木敦生・前川徳光，2004．北海道の活動的火山における最近の地震活動：樽前山，北海道大学地球物理学研究報告，**67**，111-129.

Bhattacharyya, 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics*, **29**, 517-531.

北海道大学，2011，第 121 回火山噴火予知連絡会資料（その８），1.

北海道大学・札幌管区気象台，2011，第 120 回火山噴火予知連絡会資料（その４），53.

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, doi：10. 1016/j. jvolgeores. 2009. 11. 002.

Kaneko, T., T. Koyama, A. Yasuda, M. Takeo, T. Yanagisawa, K. Kajiwara and Y. Honda, 2011. Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *International J. Remote Sensing*, **32**, 1491-1504.

金子隆之・大湊隆雄・小山崇夫・武尾　実・渡邉篤志・嶋野岳人・柳澤孝寿・青木陽介・安田　敦・本多嘉明，2011．自律型無人ヘリにより撮影した新燃え岳火口およびその周辺域，火山，**56**，171-173.

気象研究所，2008．樽前山における地殻変動および地磁気観測データを組み合わせた解析，気象研究所技術報告，**53**，286-306.

気象庁，2011．第 120 回噴火予知連絡会資料（その４），39-51.

Hashimoto, T., M. Utsugi, T. Nakatsuka, S. Okuma, T. Koyama and W. Kanda, 2011. Temporal magnetic changes possibly due to cooling magmas as revealed by repeat helicopter-borne surveys over an active volcano, *Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, Kyoto*, 276-279.

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.

札幌管区気象台，1999．樽前山・恵山・北海道駒ヶ岳・雌阿寒岳，北海道地域火山機動観測実施報告，**20**，118pp.

札幌管区気象台，2002．樽前山・北海道駒ヶ岳，北海道地域火山機動観測実施報告，**22**，86pp.

札幌管区気象台，2009，樽前山の火山活動解説資料（平成 21 年 10 月 16 日 17 時 15 分）.

鈴木英一，2011．火山観測の新しい技術－無人ヘリによる火山観測－，測量北海道支部報，**62**，53-57.

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*. **56**, 319-338.