

樽前火山における反復空中磁気測量

橋本武志（北大理）・小山崇夫・大湊隆雄・金子隆之（東大震研）・柳澤孝寿（JAMSTEC）

吉本充宏（北大理）・鈴木英一（北海道河川財団）

Aeromagnetic repeat surveys over Tarumae volcano

Takeshi Hashimoto (Fac. Sci., Hokkaido Univ.), Takao Koyama, Takao Ohminato,

Takayuki Kaneko (ERI, Univ. Tokyo), Takatoshi Yanagisawa (JAMSTEC),

Mitsuhiro Yoshimoto (Fac. Sci., Hokkaido Univ.) and Eiichi Suzuki (River Center of Hokkaido)

Abstract We repeated aeromagnetic surveys over Tarumae volcano (northern Japan) three times using an unmanned helicopter in cooperation with the Hokkaido Regional Development Bureau. The autonomous flight proved a performance of positioning control within an accuracy of approximately 10 m. This was a great advantage in detecting volcano-magnetic changes from a direct comparison procedure. Comparing the total field maps in 2011 and 2013, we obtained a systematic pattern of temporal changes which suggested the cooling re-magnetization beneath the summit crater. The result was confirmed to be meaningful since the spatial pattern was also consistent with the ground-based repeat measurements. Meanwhile, partial inconsistency was recognized in the spatial distribution and in amplitude of magnetic changes between the aeromagnetic and ground-based results. It may have arisen from insufficient spatial coverage of the ground-based measurements and/or from the simplistic approximation of the ground-based result into a single equivalent magnetic dipole. Our study, following the similar application at Kirishima volcano by Koyama *et al.* (2013), has validated applicability of aeromagnetic repeat measurements by means of an unmanned helicopter to active volcanoes.

1. はじめに

近年、火山観測用プラットフォームとしての産業用無人ヘリコプターの活用可能性が高まっている (Kaneko *et al.*, 2011; 金子・他, 2011; 鈴木, 2011; 橋本・他, 2012; 2013; Hashimoto *et al.*, 2013, Koyama *et al.*, 2013). 噴火時に想定される応用としては、空中からの撮像による噴出物飛散状況の確認と泥流等の二次災害の事前察知、マグマ物質の有無の確認を目的とした噴出物の直接採取、噴火で被災した地表観測装置の代替装置の展開と回収、空中からの物理計測による火山の状態把握と活動推移予測などが挙げられる。無人ヘリコプターはこのように応用可能性に富むシステムではあるが、緊急時において迅速に運用するためには、関係機関の連携体制を平時から構築しておくことが重要であり、遠隔操縦を行うための基地局候補地や進入経路をあらかじめ選定しておくなどの準備が欠かせない。また、噴火に伴う変化を抽出するためには、噴火前の火山の状態を事前に観測して基礎データを得ておくことも必要である。

このような背景のもと、我々は北海道開発局と共同して、自律飛行可能な無人ヘリコプターによる火山の空中調査を 2011 年から試験的に行ってきた。これまでに、北海道南西部の活火山である樽前山（標高 1,041m）において 3 回の調査が実現した。使用機材の概要および第 2 回までの調査結果については橋本・他（2013）にまとめている。本稿では、2013 年に実施した第 3 回目の調査結果をふまえて、空中磁

気測定の反復により検出された全磁力の時間変化について報告する。

2. 本研究の背景となる知見

本研究で調査対象とした樽前山の位置と主要な地形を第1図に示す。樽前山は、支笏カルデラの後カルデラ火山として約9,000年前に活動を開始したとされる活火山で、恵庭岳、支笏カルデラ、風不死岳とともに北西-南東方向の火山列を成している(古川・他, 2010)。その山頂火口原には、1909年噴火で噴出した基底直径約500mの均整のとれた溶岩ドームが鎮座する。最近の約100年間は顕著なマグマ噴火を起こしていないが、溶岩ドームおよびその周辺部からは活発な噴気活動が見られる。国土地理院は、樽前山を中心とした地域でやや広域の航空磁気測量を実施しており、上述の火山列に沿った高磁気異常が存在することが明らかになっている(第2図)。本研究はそのうち樽前山の山頂火口原を低高度・高密度に測量したものであり、第3図に示した全磁力異常の概略は国土地理院の得た結果とも調和的である。樽前山では、札幌管区気象台が1998年から地上反復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を捉えている(札幌管区気象台, 2002)。2010年からは、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てきた。その結果、2011年5月に溶岩ドーム斜面の噴気孔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(第4図; 北海道大学・札幌管区気象台, 2013)。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500mであり、磁化変化率はおよそ $1 \times 10^7 \text{ Am}^2/\text{年}$ と推定されている。なお、その後の地上反復磁気測量によれば、この帯磁様変化は2013年秋までほぼ同じ変化率で継続している(第5図)。本研究の3回にわたる空中磁気測量は、このようにほぼ一定の変化率で進行する冷却帯磁傾向の中で実施したものである。

3. 測定の概要

本研究で使用した無人ヘリコプターは、北海道開発局所有のヤマハ発動機製RMAX-G1である。機体の性能・諸元については既に橋本・他(2013)にまとめているので本稿では詳述しない。これまでに我々はこの機体を用いて、2011年9月27日、2012年9月26, 28日、2013年10月15, 17日の3回にわたって空中磁気測量を実施した。この機体は、離着陸時以外は実時間差分GPSナビゲーションによる自律飛行が可能であり、あらかじめ設定された航路の反復飛行に適している。本研究では基地局側の精密測位を行っていないため、航路の絶対精度は数m~10m程度と考えられる。空中全磁力の測定には、Geometrics社製G858セシウム磁力計を使用し10Hzサンプリングで計測した。磁力計本体はヘリコプターに固定し、磁気センサは機体磁化の影響を避けるために4.5mのロープで機体下部から吊り下げた。また、地上に同型の磁力計による参照点を設け、事後解析時に同時刻の単純差をとることで外部起源磁場擾乱を除去した。ただし、2013年のフライトの一部に対応する時間帯で参照点の磁場データが取得できなかったため、この部分の日変化補正には、国土地理院が運用する赤井川観測点の毎分値データを用いた。ローカル参照点を用いなかったことにより見込まれる誤差は $\pm 5 \text{ nT}$ 程度と考えられる。なお、GPSで測位しているのはヘリコプターの機体位置であり、磁気センサの位置ではないことには注意が必要であるが、本研究ではこの点に関して特別の処理は施していない。

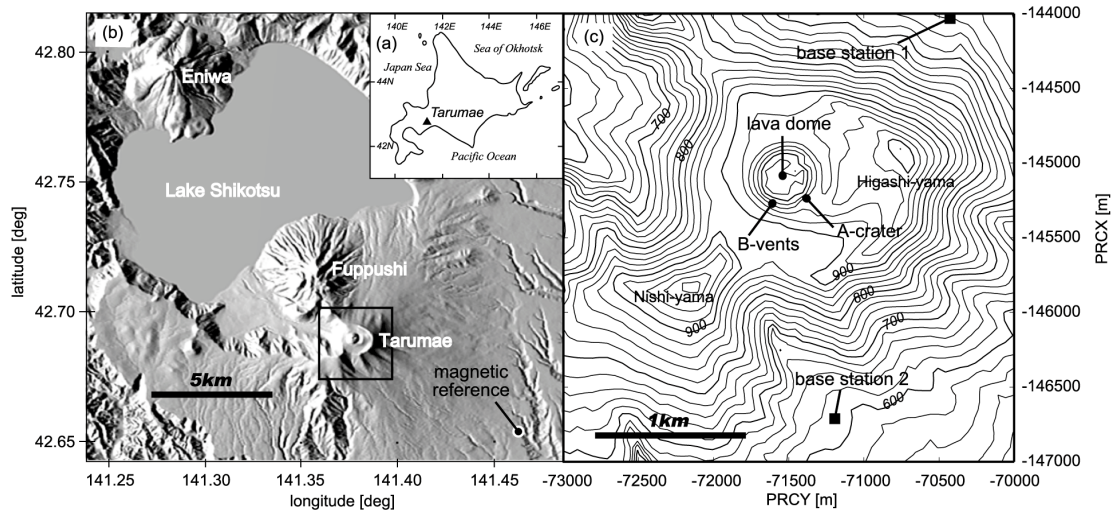


Fig.1 Topography around the survey area. Locations of landmarks, reference station, and base stations (after Hashimoto *et al.*, 2012)

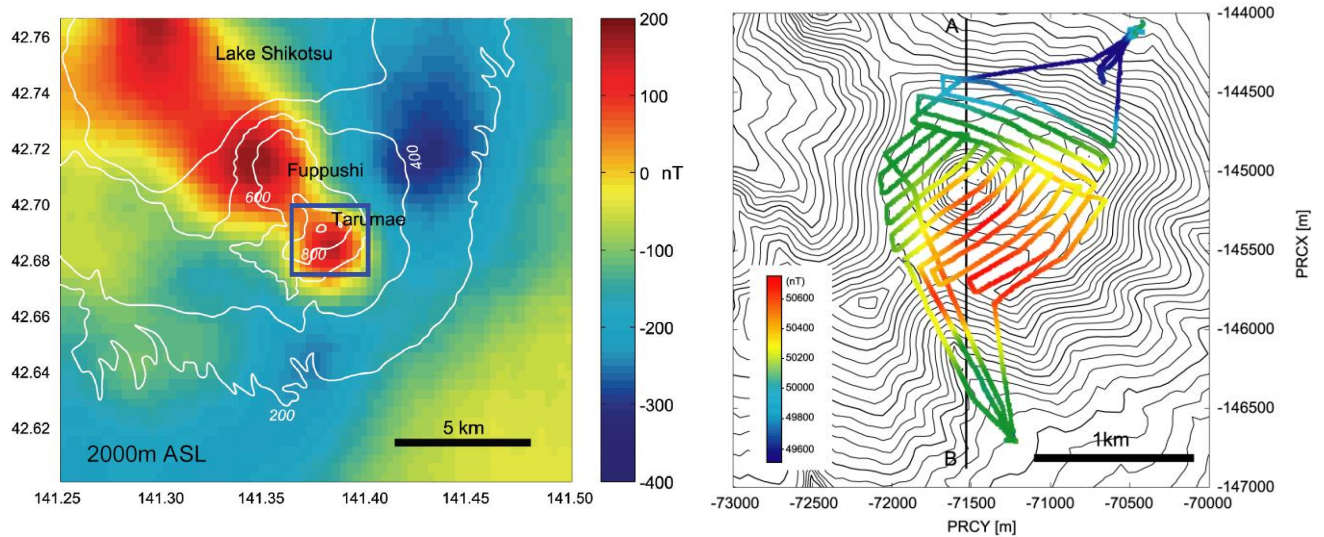


Fig.2 (Left) Total magnetic field anomaly map around Tarumae volcano. Redrawn from the gridded data produced by Geospatial Information Authority. http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/aeromag_data.html. The blue rectangle corresponds to the target area of this study (right panel).

Fig.3 (Right) Magnetic total field along the flight paths in the 2011 survey.

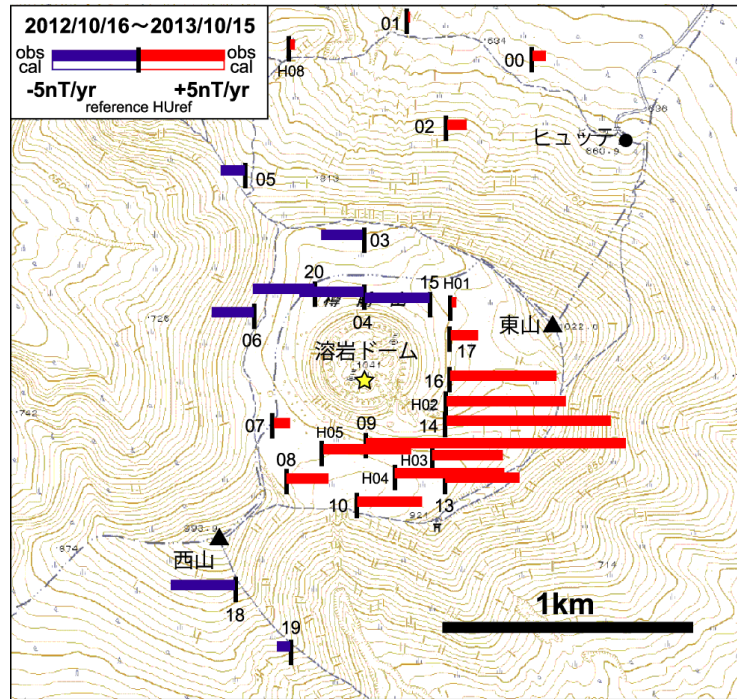


Fig.4 Magnetic total field changes between Oct. 2012 and Oct. 2013 (Hokkaido Univ. and Sapporo District Meteorological Observatory, 2013). The star symbol indicates the location of an equivalent dipole (depth c.a. 500 m).

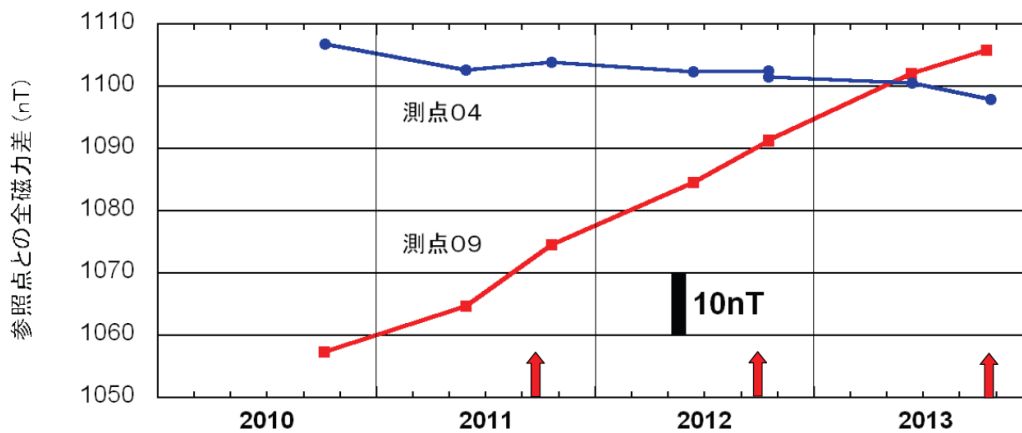


Fig.5 Magnetic total field changes at sites 04 and 09 (Hokkaido Univ. and Sapporo District Meteorological Observatory, 2013). Site locations are shown in Fig.4. Arrows at the bottom indicate the timings of aeromagnetic surveys of this study

4. 測定結果

第6図に測量年度毎の航跡を示す。2012年の測量では、悪天候のため、予定したルートの一部が飛行不可能となり、溶岩ドームの直上など重要な領域についてのみの再測量であった。2013年については2011年と同様に予定したルートのすべてについて再測量を実施することができた。飛行ルートの対地高度は、概ね100~300mの範囲である。フライト航跡の反復性を確認するために、3回の測量航跡を重ね合わせたものを第6図の右端に示す。対象領域である山頂火口原上空での航跡はよく重なっていること

がわかる。ただし、火口原の北側斜面のいくつかの測線では、機体が強風に煽られたことを反映して航跡間に有意なずれが認められる。本研究では、3回の測定のうち、データが完備しており、かつ相対的に大きな時間変化が期待される2011年と2013年のデータを用いて時間変化成分の検出を試みた。本研究では、2013年の航跡上の各測定点のそれぞれについて、もっとも近接した測定点を2011年の航跡上から抽出し、それら最近接ペアの差を求めることによって時間変化成分を抽出した。航跡の一致度を確認するために、最近接ペアの距離について頻度分布をとり第7図に示した。大半のペアは10 m以内の距離を示しておりGPS測位誤差の範囲内にあることがわかる。次に、航跡に沿った全磁力傾度の頻度分布を第8図に示す。航跡上のほとんどの点で磁場傾度は ± 1 nT/m以内となっている。航跡面はほぼ水平面内にあるため、鉛直方向の磁気勾配は不明であるが、対地高度が100~300 mであることから、航跡沿いの磁気勾配の実測値と同程度であると推定される。Hashimoto *et al.* (2013) は、初年度のフライト結果に基づいて、このシステムの反復による時間変化の検出精度を10 nT程度と推定していたが、本研究によってこれが実証的に示されたといえる。

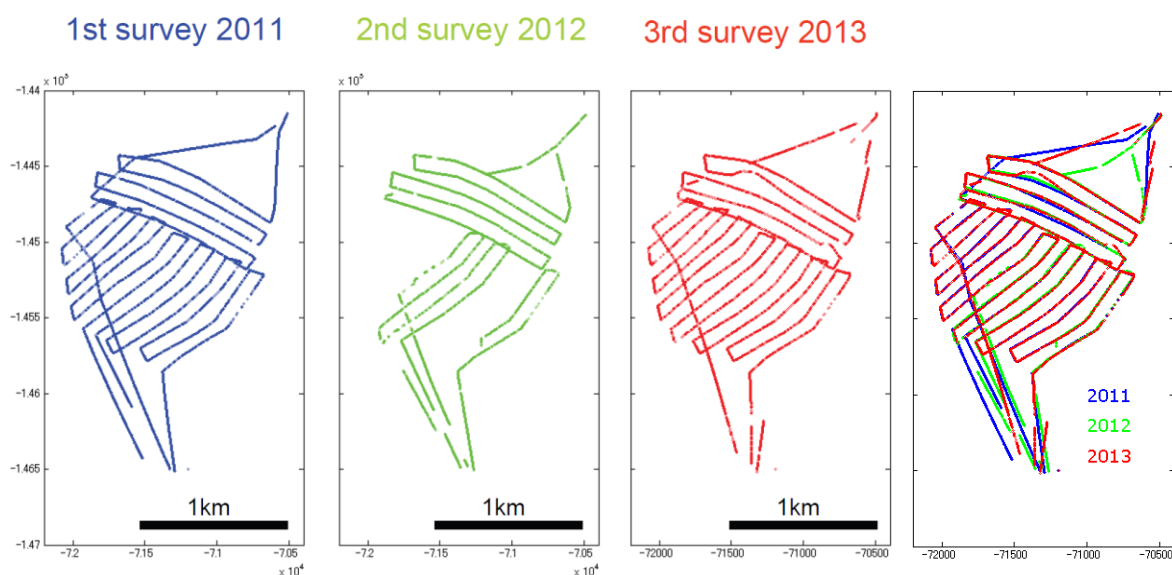


Fig.6 (From left to right) Actual flight paths in 2011, 2012, 2013 and their superposition.

第9図には、距離が5 m以内の最近接ペアを抽出して、2011年と2013年に測定された全磁力の差を示した。この測定結果は、この2年間で溶岩ドームの直上から南側にかけて全磁力が増加、ドームの北側で減少したことを示しており、溶岩ドーム直下で冷却帯磁が進行したことを示唆している。第10図には、地上反復測定の結果(第4図および第5図)から推定された等価磁気双極子(第2章参照)による2年間の全磁力変化を空中の航跡面に投影したものを示した。空中で実測された全磁力変化(第9図)のパターンはこの予測図にほぼ一致しており、地上反復測定が捉えた冷却帯磁が空中での反復測定によって検出できたものと考えられる。ただし、注意深く両者を比較すると不整合がないわけではない。まず、空中の反復測定では最大変化量が約30 nTに達しているのに対して、地上測定からの推定では最大変化量は10 nTに満たない。位置測位精度と磁場傾度から考えて、この食い違い量を測定点のずれだけで説明することは難しい。また、空中測定で調査域の北東縁付近に検出された20 nT程度の増加域は、

地上測量からの推定図には認められない。現時点ではこれらの不整合の原因は明確に特定できていないが、可能性としては、地上測量の測定点数が限られているために、溶岩ドーム頂部や調査域の北東縁付近の局所的な磁場変化が地上測量では捉えられていないことが考えられる。また、第 10 図は、溶岩ドーム直下のある深さに単一の等価磁気双極子を仮定して空中での磁場変化を計算したものであるが、現実には有限の領域に温度変化（磁化変化）の分布があると考えられるので、高度方向の距離減衰が単一双極子とは異なっている可能性もある。このように帯磁源に空間分布を導入することで空中測量と地上測量の不整合を解消できる可能性があるが、現状では未検討である。

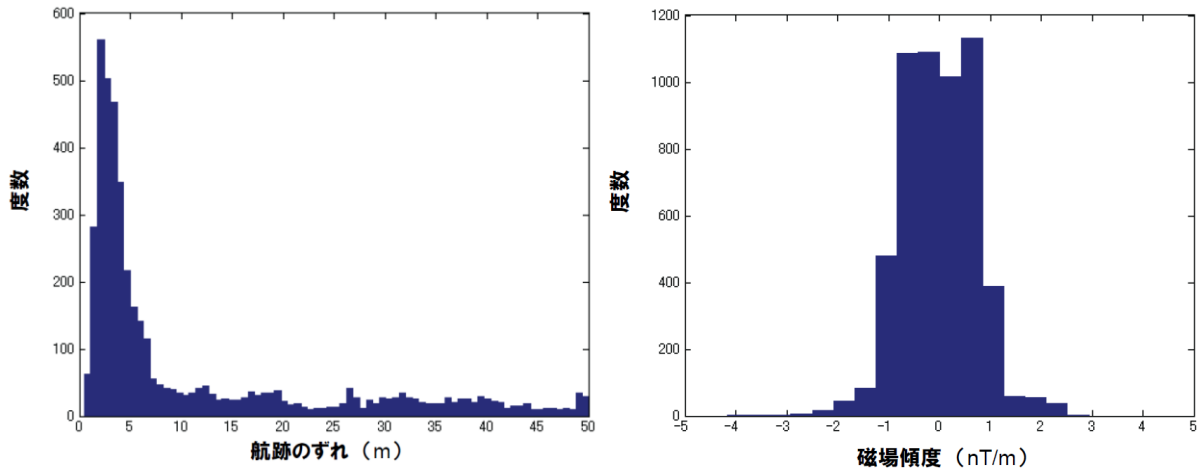


Fig.7 (Left) Histogram of the deviation in the flight paths between the two surveys (2011 and 2013).

Fig.8 (right) Histogram of the gradient in the geomagnetic field along the flight paths.

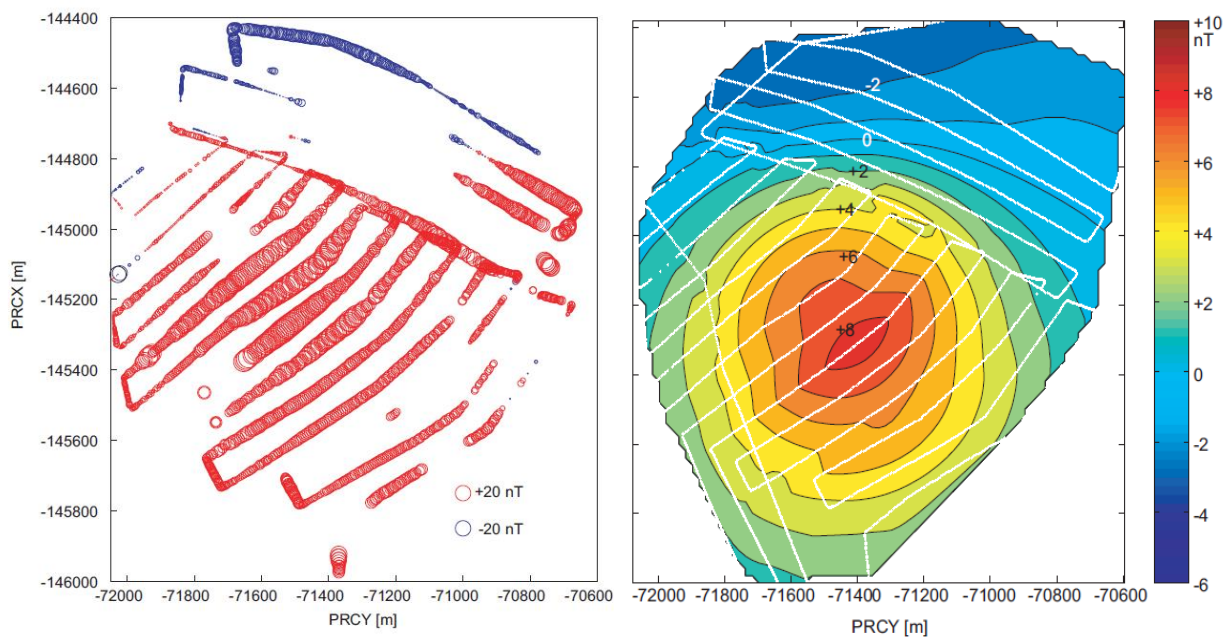


Fig.9 (Left) Differential geomagnetic total intensity between the datasets in 2011 and 2013. The radii of the circles are proportional to the amplitude of magnetic changes. Red and blue circles indicate increase and decrease in the

filed, respectively. Only the measurement positions with small deviation (less than 5 m) between the two surveys are plotted.

Fig.10 (Right) Modeled magnetic changes in the air for the two years which was estimated from the repeat surveys on the ground. A magnetic dipole with a moment of $1 \times 10^7 \text{ Am}^2/\text{y}$ was assumed at a depth of 500 m beneath the summit lava dome. Then the magnetic field along the actual flight paths in 2011 was calculated and contoured.

5. 現状の問題点と改善策

無人ヘリコプターは火山観測用のプラットフォームとして有用性の高いシステムではあるが、実際の運用を通じて浮かび上がってきた課題もある。まず、複雑な地形や厳しい気象条件が伴うことの多い火山地域における無人ヘリコプターの安全な運用には、高度な技術が要求されるため、専門のオペレーターが必要であり、現状では研究者自身が簡便に操縦することはできない。また、現在の機体で運用できるのは、標高 1,000 m 前後のフィールドに限られており、風雨や視界等の気象条件の制約も小さくない。これらの問題点は、現有機体の性能では解決することは難しいが、次世代の機体で推力や安定性が向上すれば、効率的・安定的な運用が可能となることで解消できる可能性がある。なお、現状のシステムでは、基地局から遠隔操縦できる距離が最大で約 3 km となっており、噴火時にしばしば適用される立入規制が運用の障害となる可能性がある。この点についても技術開発の余地は大きいですが、調査対象となる地域において事前に基地局候補地を選定しておくことで、部分的には問題を回避できるであろう。

6. まとめ

著者らは、自律飛行無人ヘリコプターを用いて 3 回の反復空中磁気測量を北海道の樽前火山で実施した。本研究では、時期を隔てた測量から時間変化を検出するために、近接した測定点のペアを抽出して単純差をとるという方法を用いた。この手法は、空中での磁場傾度に対して航跡の反復精度が十分高いことが保証される場合に限り有効である。本研究では、反復飛行の精度は概ね 10 m 以内であり、空中での磁場傾度は概ね 1 nT/m 以下であったことから、磁場の時間変化検出限界は 10 nT 程度と考えられた。2011 年と 2013 年の測量結果を比較することで得られた全磁力の時間変化成分は、双極子型の系統的な空間分布を示し、最大変化量は 30 nT を超えていた。かつ、この分布は、地上の反復測量から推定されていた火口原直下の冷却帯磁による磁場変化のパターンと概ね一致していた。これらのことから、本研究で得た反復空中磁気測量の結果は有意なものと判断した。本研究により、無人ヘリコプターによる反復空中磁気測量の有効性が樽前山においても実証された。これは、Koyama *et al.* (2013) による霧島新燃岳での反復空中磁気測量に続く 2 つめの事例である。一方、空中測量の結果と地上測量からの推定には、部分的な不整合や最大変化量の違いも認められた。地上測量の観測点が調査領域を均等にカバーしていないことや、地上測量の結果を単一の磁気双極子で近似したことが、この不整合の原因である可能性があるが、現時点では詳細は未検討である。

謝辞：本研究の無人ヘリコプター調査に際しご協力いただいた北海道開発局室蘭開発建設部治水課、ならびに札幌開発建設部に感謝申し上げます。本研究の一部は文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました。また、2013 年調査の一部は北海道道河川財団からの公募

研究費を使用しました。磁場データの日変化補正の一部には、国土地理院が運用する赤井川観測点の毎分値全磁力データを使用しました。また、第2図の磁気異常図の作成にあたっては、国土地理院作成の全磁カグリッドデータを使用させていただきました。

参考文献

- 古川竜太・中川光弘, 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, 2010.
- 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, 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, 2012.
- 橋本武志・小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・柳澤孝寿・吉本充宏・鈴木英一, 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 2013 年論文集, 81-87, 2013.
- Hashimoto, T., T. Koyama, T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, M. Yoshimoto and E. Suzuki, Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano, northern Japan, *Explor. Geophys.*, <http://dx.doi.org/10.1071/EG12087>, 2013.
- 北海道大学・札幌管区气象台, 第127回火山噴火予知連絡会資料(その7), 68, 2013.
- Kaneko, T., T. Koyama, A. Yasuda, M. Takeo, T. Yanagisawa, K. Kajiwara and Y. Honda, Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Int. J. Remote Sens.*, **32**, 1491-1504, 2011.
- 金子隆之・大湊隆雄・小山崇夫・武尾 実・渡邊篤志・嶋野岳人・柳澤孝寿・青木陽介・安田 敦・本多嘉明, 自律型無人ヘリにより撮影した新燃岳火口およびその周辺域, 火山, **56**, 171-173, 2011.
- Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, A. Watanabe and M. Takeo, An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth Planets Space*, doi:10.5047/eps.2013.03.005, 2013.
- 札幌管区气象台, 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, 2002.
- 鈴木英一, 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, 2011.