

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

橋本武志 (北大理)・小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄 (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 surveys over Tarumae volcano using an unmanned autonomous helicopter

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

Takao Ohminato (ERI, Univ. Tokyo), Takatoshi Yanagisawa (JAMSTEC),

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

Abstract Volcanic eruptions generally prohibit humans from approaching active craters. Meanwhile, it is important during an eruption to perform visual surveillance, geophysical measurements and material sampling in the vicinity of the craters. Besides scientific purposes, these are also useful in deciding emergency actions such as evacuation or recovery plans considering the ongoing volcanic activity and possible subsequences. We started airborne volcano surveillance using an unmanned helicopter on a trial basis in cooperation with the Hokkaido Regional Development Bureau since 2011. We performed the experiments at Mt. Tarumae (1,041m) in 2011 and 2012. As of 2012, the volcano was not erupting but showed persistent fumarolic activity around the summit lava dome. In this study, we report the results of the repeated aeromagnetic survey. Through our two-year experiments, the unmanned helicopter was proved to be practically useful for volcano surveillance at Mt. Tarumae. In particular, autonomous flight proved a performance of positioning control within an accuracy of approximately 10m. This is an advantage in detecting volcano-magnetic changes from a direct comparison procedure. In application of this vehicle to a future volcanic unrest, it is practically important to find beforehand some candidate sites for a base station from which we control the helicopter, and to perform some preliminary operations to overview an undisturbed condition when a volcano is calm.

1. はじめに

火山噴火の現場では、火口周辺に人間が近づくことは一般に困難になる。その一方で、特に噴火初期における火口近傍の状況把握、被災した観測機器の交換あるいは代替の観測、噴出物の採取・分析等は、噴火現象そのものの研究にとって意義深いだけでなく、その後の火山活動の推移を予測し、それに応じた避難行動の範囲や復旧計画を作成する上で重要な情報を提供しうる。近年、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、この分野への応用に期待が高まっている（例えば、Kaneko *et al.*, 2011; 金子・他, 2011）。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、2011 年 9 月に第 1 回目、2012 年 9 月に第 2 回目の試験調査を実施した。本稿では、この試験調査のうち、空中磁気測量について報告する。

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。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）。その後の約100年間、樽前山は本格的なマグマ噴火を起こしていないが、山頂溶岩ドームとその周辺には継続的な噴気活動がある。第1図に樽前山の位置と主要な地形を示す。

特に最近の熱活動についてみると、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。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た（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 $1 \times 10^7 \text{ Am}^2/\text{年}$ と推定される。なお、この帯磁様変化は、2012年現在もほぼ同じ変化率で継続している。こうした中で、著者らは、無人ヘリコプターによる第1回の空中磁気測量を2011年に実施した（鈴木, 2011; 橋本・他, 2012）。第1回測量の磁気異常データからは、インバージョンにより磁化分布が推定され、上述の佐久間・村瀬（1956）と整合的な結果が得られている。

2. 測定の概要

著者らは、無人ヘリによる樽前山の空中磁気測量をこれまでに2回行った。第1回目は2011年9月27日、第2回目は2012年9月26~28日に実施した。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。全長3.6 m、最大積載重量は約10 kg、最大航続時間は80分である。機体から概ね3 km以内に車載式の基地局を設置し、無線により離着陸時の操縦や調査飛行中の状態監視を行う。無線通信上の制約から、ヘリコプターの運用は基本的に基地局から見通しのある範囲に限られる。また、概ね10 m/s以下の風であることが飛行可能な条件である。GPSの実時間差分測位によって、ヘリコプターは、あらかじめプログラムされた飛行経路を自動航行することができる。第2図に、無人ヘリコプターと基地局地上操縦車の外観を示す。

磁気測量には、Geometrics社製G858光ポンピング磁力計を使用した。1台をヘリコプターに搭載し、別の1台を地上参照点で用いた。携帯型GPSのシリアル出力をタイムスタンプとして磁力計に入れるこ

とで時刻管理を行っている。測位のための GPS 受信機は、NovAtel 社製 OEM4-RT20（相対精度：標準偏差で約 20 cm）である。なお、本研究では、基地局側の精密測位を行っていないため、絶対測位精度は数 m～10 m 程度と考えられる。

全磁力および GPS は 10 Hz 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気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、地上に参照点を設置して 10 Hz で全磁力を測定し、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。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、本稿ではこの点に関して特別の処理は施していない。第 3 図に、2011 年の測量で得られた全磁力分布を、第 4 図に 2011 年と 2012 年それぞれの測量における航跡を示す。2012 年の測量では、悪天候のため、予定したルートのをすべてを飛行することはできなかったが、溶岩ドームの直上など重要な領域については再測量ができています。なお、飛行ルートの対地高度は、概ね 100～300 m の範囲である。

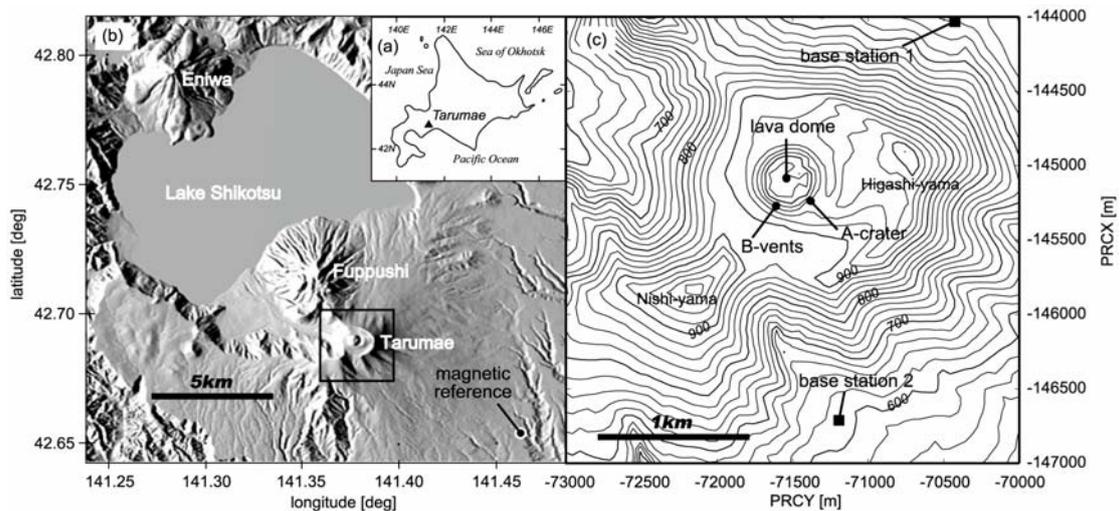


Fig. 1 Topography around the survey area. Locations of landmarks, reference station, and base stations (after Hashimoto *et al.*, 2012)

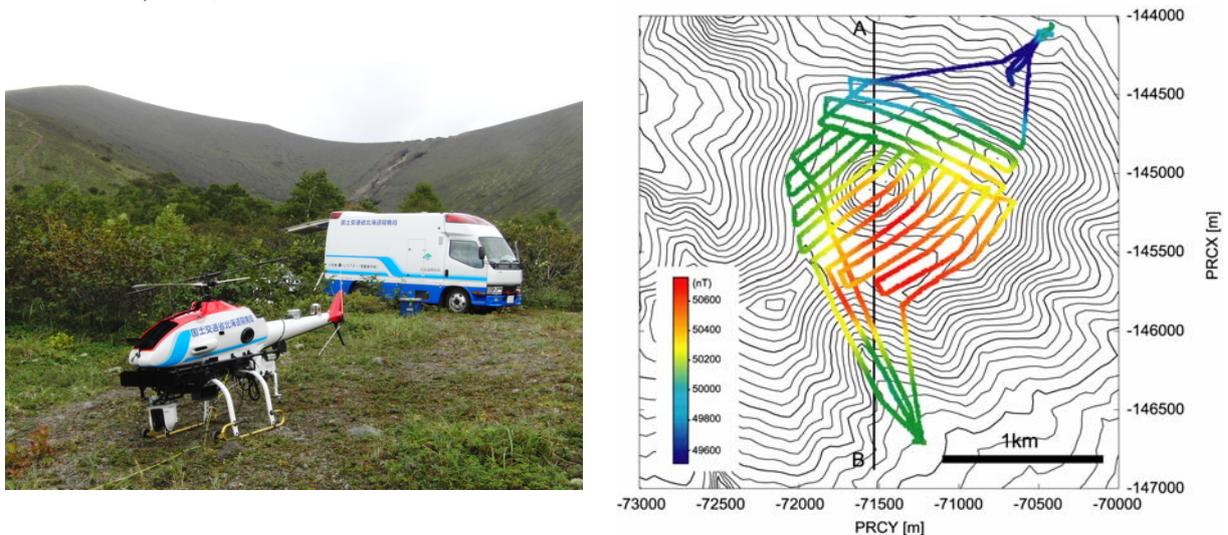


Fig. 2 (Left) The unmanned helicopter and controlling vehicle. Fig. 3 (Right) Magnetic total intensity map obtained from the survey in 2011.

3. データ処理の手順と解析結果

本研究では、2回の磁気異常データを用いて時間変化成分の検出を試みた。まず、空中磁場データから、同時刻の参照点データとの単純差をとり、外部磁場擾乱の影響を除去した。参照点の位置は2011年と2012年で完全に同一ではないため、外部磁場擾乱除去後の磁気異常には、参照点位置の違いによるオフセットが含まれている。樽前地域には地上に固定した連続観測点がないので、西南西に約50 km離れた有珠三豊観測点の永年変化が樽前地域と同じであると仮定し、間接的にこのオフセット値を+237 nTと求めて補正した。次に、2011年のデータ（1秒値に間引いたもの）の各点に対して、2012年のデータ（0.1秒値）のうち、最も距離が近い点のデータを選び出し、それらの差を求めた（第5図）。こうして得られた全磁力変化は系統的な空間パターンを示しており、山頂火口原の北側で減少、南側で増加傾向が認められる。ただし、2回の測量における航跡は完全に同一ではないので、これをそのまま時間変化成分とみなしてよいかどうかは検討を要する。そこで、最近接点間の距離のヒストグラムを作成した（第6図）。それによれば、航跡のずれは5 mで最頻値を示しており、大半は10 m以内に収まっていることがわかる。従って、2回の航跡のずれの大半はGPS測位誤差の範囲内にあると考えてよさそうである。

次に、この航跡のずれに起因する全磁力の変化について検討する。第7図は、実際の空中磁場データから、航跡に沿った磁場傾度のヒストグラムを求めたものである。磁場傾度は、殆どが ± 1 nT/m以内となっており、空中での磁場は極めて滑らかであることがわかる。従って、航跡のずれが10 mの場合には、見かけ上の磁場変化として最大 ± 10 nTが想定される。すなわち、2回の測量による時間変化を考える際に、航跡の不一致に起因する誤差範囲は ± 10 nTと考えるよいであろう。

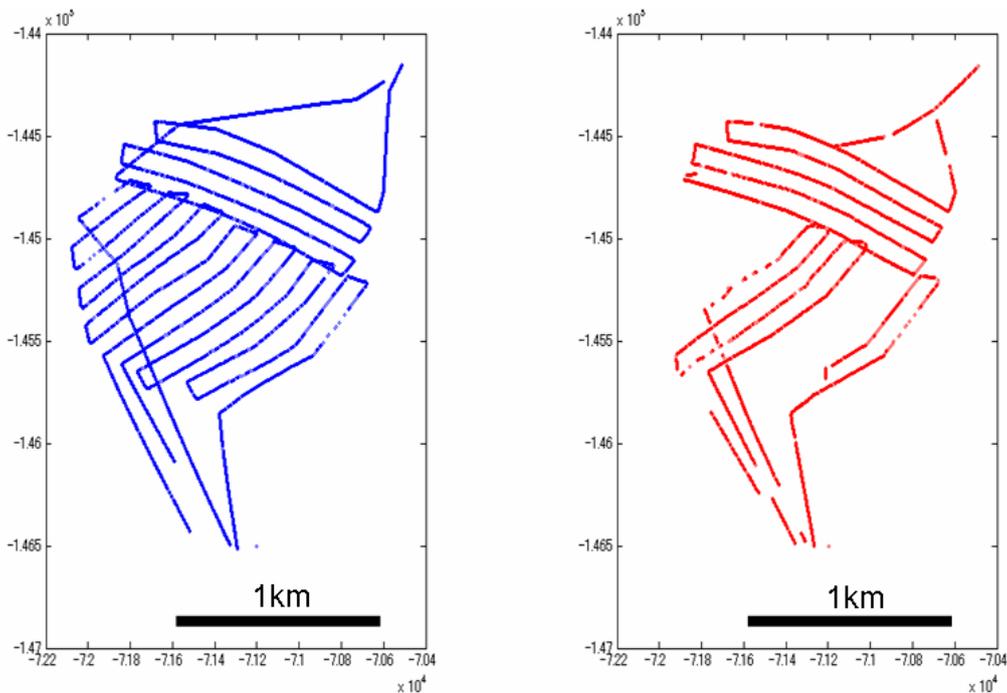


Fig. 4 Actual flight paths in 2011 (left panel) and 2012 (right panel).

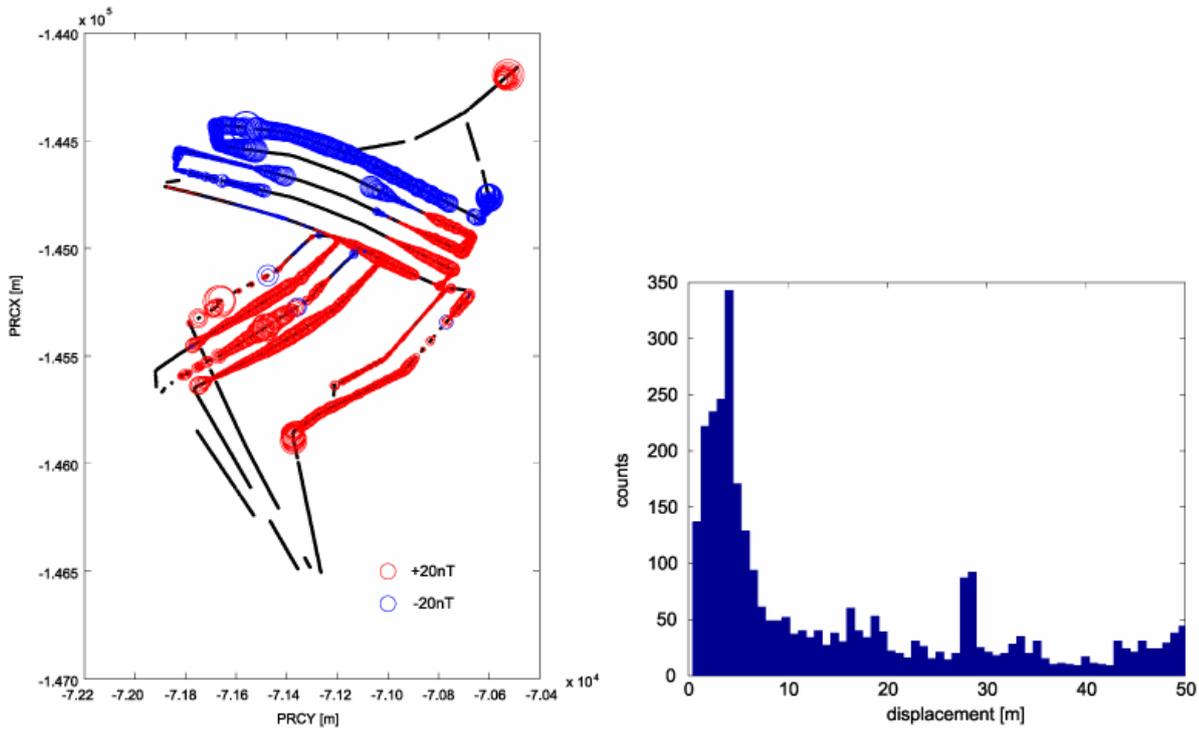


Fig. 5 (Left) Differential geomagnetic total intensity between the datasets in 2011 and 2012. The radius of the circles indicates the amplitude of magnetic changes. Only the data with small (less than 10 m) deviation in the measurement locations are plotted.

Fig. 6 (Right) Histogram of the deviation in flight paths between the two surveys.

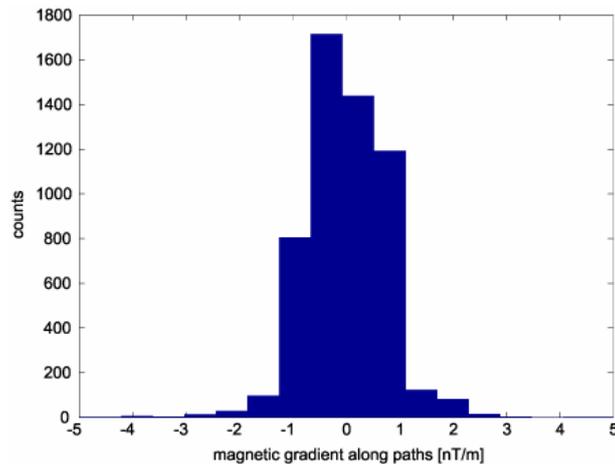


Fig. 7 Histogram of the gradient in the geomagnetic field along the flight paths.

4. 考察

2回の測量における航跡のずれが5 m以内の点だけを選び出し、2011年から2012年の全磁力変化を磁気的な南北断面に投影したものを第8図に示す。横軸は磁北方向の距離で、図の右側が磁北方向である。南側で相対的に全磁力増加、北側で減少の傾向が認められる。この傾向は、地上における繰り返し

磁気測量の結果とも定性的に一致している。地上の繰り返し磁気測量からは、2010年春以降2012年秋まで、ほぼ単調な帯磁傾向が観測されている。帯磁源を地球磁場に平行な単一の磁気双極子で近似すると、山頂溶岩ドーム直下の約550 m深(海拔約480 m)に求まり、その磁気モーメント変化率は $1 \times 10^7 \text{ Am}^2/\text{年}$ と推定されている(橋本・他, 2012)。この結果をもとに、空中で期待される全磁力変化を計算すると第9図のようになる(橋本・他, 2012)。増減の空間パターンは、実際に観測された変化(第5図)に類似しているが、実際の観測結果では、火口原の東縁付近に磁場の増加域が見られることと、山体北部の磁場減少が相対的に強い点がやや異なる。また、予想された磁場変化は、量的には実際の観測結果(p-p値で約30 nT)のおよそ5分の1程度にとどまっている。しかし、観測値の誤差が最大 $\pm 10 \text{ nT}$ 程度であることや、この推定が地上の限られた磁気点での情報に基づいていることを考慮すると、モデルは観測結果と概ね合致していると考えてよいのではないだろうか。ただし、航跡のずれに起因して見かけ上の変化が混入している可能性については、今後さらに慎重に評価する必要がある。

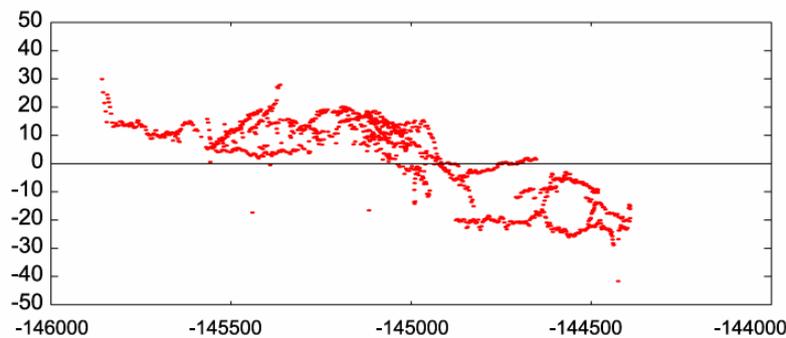


Fig. 8 Differential geomagnetic total intensity between the datasets in 2011 and 2012 which is projected on the geomagnetic north-south cross-section. Horizontal axis indicates the distance toward the geomagnetic north in meter. Vertical axis indicates the magnetic change in nT.

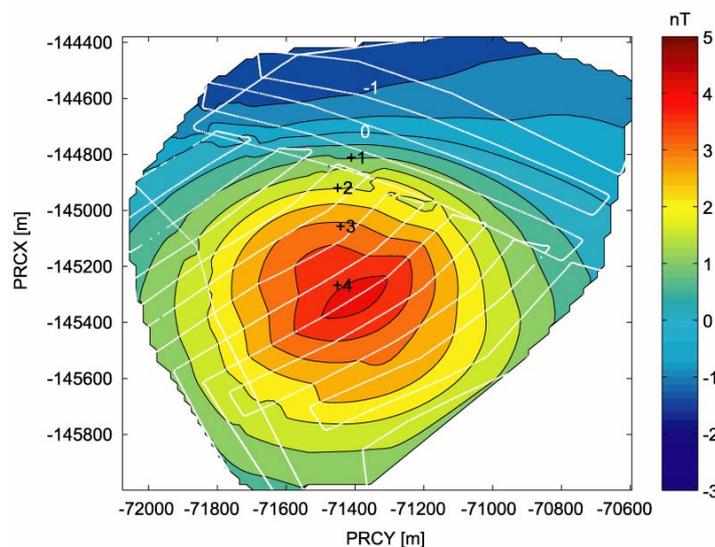


Fig. 9 Modeled magnetic changes in the air which was estimated from the repeat surveys on the ground (after Hashimoto *et al.*, 2012). A magnetic dipole with a moment of $1 \times 10^7 \text{ Am}^2$ was assumed at a depth of 500 m beneath the summit lava dome. Then the magnetic field along the actual flight paths in 2011 was calculated.

5. まとめ

これまで実施した2回の実験により、無人ヘリコプターが樽前山で有効に活用できることが確認できた。自律飛行機能によって、このヘリコプターは、予定した航路をほぼ10 m以内の精度で反復航行することができた。このことは、火山地磁気効果を空中磁気測量の反復によって検出する上で大変有利である。従来の有人機による磁気測量では、高精度で同じ航跡を辿ることは一般に困難であるため、時間を隔てて行われた2つの測量結果を比較するためには、何らかの方法で磁気異常を共通面にリダクションした上で差をとることが必要であった。無人ヘリコプターを利用した磁気測量の場合、このような処理を施すことなく、近接点の磁場を直接的に比較することが可能であることが、この実験を通じてほぼ実証された。また、地上に限られた地点における反復測量には、高精度ながら空間密度が低いという欠点がある。空中磁気反復測量は、この欠点を補完するもので、これまで地上での観測が行われていない溶岩ドーム直上での変化や、火口原東縁部での変化についても新たな知見が得られるであろう。

実際の噴火時に無人ヘリコプターを有効活用するためには、事前に基地局の候補地やアクセスルートを確認しておくことや、本研究のような試験調査を行って平時の状態を把握しておくことも重要と考えられる。

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。

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.
- 北海道大学, 第121回火山噴火予知連絡会資料(その8), 1, 2011.
- 北海道大学・札幌管区气象台, 第120回火山噴火予知連絡会資料(その4), 53, 2011.
- 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, *International Journal of Remote Sensing*, 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.
- 気象庁, 第120回噴火予知連絡会資料(その4), 39-51, 2011.
- 佐久間修三・村瀬 勉, 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, 1956.
- 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.