

平成25年度

小型無人ヘリコプターを利用した 火山調査手法の開発

室蘭開発建設部 治水課 ○甲野 隆紀
山口 昌志
金子 裕幸

火山噴火を起因とした土砂災害の可能性を事前に察知するには、火山の噴火前の状態や噴火中の推移を把握するための調査が重要であるが、有人による調査は噴火により被災する可能性があり調査範囲が制限される。小型無人ヘリコプターは、こうした緊急時の調査に適した機材であるが、火山の調査手法やノウハウの蓄積が発展途上の段階にある。本報告は、小型無人ヘリコプターを利用した火山調査手法の開発の取り組みについて報告するものである。

キーワード：火山噴火、火山砂防、火山調査、小型無人ヘリ

1. はじめに

火山噴火時の火口近傍は、火山活動を把握する上で極めて重要な場所であるが、観測者や監視機器が噴火により被災する可能性があり、監視上の空白域となる場合が多い。この空白域を埋める調査ができれば火山砂防などの防災対策に極めて有効である。わが国では東京大学地震研究所が、これまで小型無人ヘリによる火山観測システムを研究¹⁾してきているが、火山の山岳部における飛行は、技術的な難易度が高いこともあり、東京大学を中心としたグループによる試験観測以外、ほとんど例がないのが現状である。

北海道は、活火山が20火山(北方領土を除く)も有しており、小型無人ヘリによる火山調査が可能となることは、防災対策上大きな前進となる。北海道開発局では災害対策用機械として小型無人ヘリを所有しており、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。

そこで、東京大学の観測システムを北海道内の火山において活用するために火山調査の技術開発に取り組むこととした。技術開発は、東京大学地震研究所の協力のもと、道内の活火山である樽前山をフィールドとして、従来からこの火山で観測研究を続けている北海道大学大学院理学研究院と、樽前山直轄火山砂防事業を実施している北海道開発局室蘭開発建設部が合同して取り組んでいる。平成25年度までに一定の成果を上げることができたため報告するものである

2. 樽前山の概要

樽前山を対象としたのは、火山砂防事業を実施しており火山砂防に活用できることや樽前山の標高が1,041mと小型無人ヘリの飛行性能(標高1,000m程度)から調査が可能なこと、北海道大学による既往の火山観測が行われデータの蓄積があることなどを考慮した。

樽前山は、図-1に示すように支笏洞爺国立公園の東端、札幌より40km南方の道央に位置し、約4万年前の支笏火山の噴火後にできた直径約12kmの支笏カルデラの東南



図-1 樽前山の位置

南縁に誕生した活火山である。

図-2に示すように、樽前山は有史以降も大～中規模噴火が発生し、周囲に重大な影響をもたらした。1667年及び1739年の大規模噴火、1874年や1909年などの中規模噴火、近年においても1978～81年に小噴火、1990年以降は地震活動・地温上昇・山頂溶岩ドーム付近の局所的膨張などの火山性異常が観測されるなど北海道内でも有数の活動的な火山であり、気象庁の常時観測火山として監視観測が続けられている。

火口および噴気孔群では高温の状態が続いており、山頂溶岩ドーム付近の局所的な地殻変動が2006年以降継続し、地震活動は概ね低調だが、2008年以降は僅かな増加が見られる。

樽前山の山麓には人口約17万人の苫小牧市の市街地等が広がり(写真-1参照)、JR 室蘭本線、道央自動車道、国道36号等の重要交通網が位置している。樽前山が噴火した場合、噴火規模が大きく、社会インフラや苫小牧市等の住宅等への影響が甚大なことから、噴火に伴う土砂災害による被害軽減を目的として平成6年度より樽前山直轄火山砂防事業に着手し事業を実施している。

事業実施途上のため、火山噴火のおそれがある場合には、緊急的な減災対策を実施する必要がある。対策実施のためには、火口周辺の変化や火山活動の推移などの把握が必要であり、緊急減災対策の観点からも小型無人ヘリによる火山調査手法の開発が望まれる。

3. 東京大学の小型無人ヘリ調査

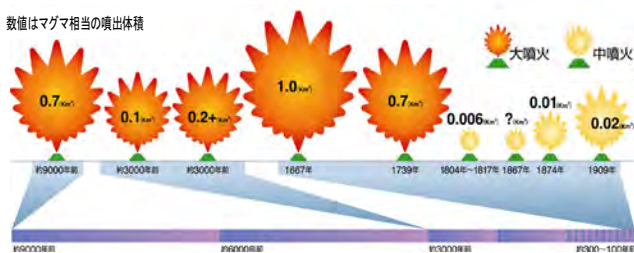


図-2 樽前山の噴火



写真-1 樽前山と山麓

東京大学地震研究所・火山噴火予知研究センターは、これまでに機動的な火口近傍観測を実施する新しい技術として、小型無人ヘリを利用した火山観測システムの開発に取り組んできている。火口近傍への地震計およびGPS 設置、空中磁気測量、可視・赤外面像撮影、試料採取、地形計測などの観測システムを開発している。

平成 23 年 5 月には噴火した新燃岳にて小型無人ヘリを使用して観測を行った。内容は地震計と GPS 設置が中心とし、空中磁気測量、映像撮影(静止画、HDビデオ、赤外面像)についても実施した²⁾。機種はヤマハ発動機(株)の自律型無人ヘリ RMAX-G1 であり、北海道開発局所有の小型無人ヘリと同一機種である。平成 23 年 1 月 26 日噴火により火口近傍の観測点が噴石により破壊されたため、小型無人ヘリにより地震計と GPS モジュールを設置することで、火山性地震を観測し新燃岳の火山活動の推移を迅速かつ的確に捉えることを目的として設置された。小型無人ヘリで設置した観測点と定常観測点の全てを用いた場合と定常観測点のみで震源決定を比較したところ、火口近傍に設置した効果により特に浅い地震の深さがよく決まるような結果が得られ、噴火で失われた観測点の代替として十分に機能していることがわかるなどの成果が得られた¹⁾。

4. 北海道開発局の小型無人ヘリ

北海道開発局では、小型無人ヘリコプターRMAX G1 を 2 機所有しており(写真-3)、これまでも法面崩落緊急点検など有人での飛行が制限される危険区域内での調査や低高度からの迅速で詳細な監視や調査等に使用されてい

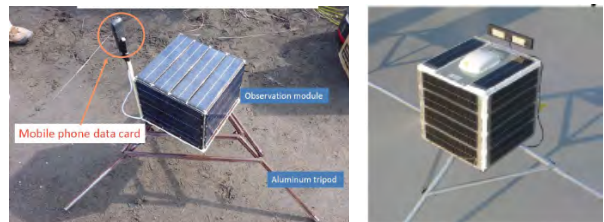


写真-2 地震計モジュール(左)と GPS モジュール(右)
(東京大学地震研究所・火山噴火予知研究センター提供)



写真-3 北海道開発局の小型無人ヘリ

る。この小型無人ヘリの諸元は表-1の通り。さらにホバリングは全方位に対して±3m以下、無線遠隔制御により5km以内の飛行が可能な性能を有している。ヘリコプター下部には、映像収集用のカラーCCDカメラ、デジタルカメラ、赤外線カメラを取り付けることができる仕様になっている。この小型無人ヘリの操作は、写真-4に写っている移動操作車から写真-5のように行うことができる。また飛行中に電波が途絶えた場合には、電波が回復するところまで帰還する機能も備わっている。この機種の小型無人ヘリは日本には数台しかなく、国土交通省内では唯一北海道開発局が所有している。

5. 樽前山の観測

室蘭開発建設部は、北海道大学と東京大学と合同で北海道開発局の小型無人ヘリによる噴火時の観測の可能性を検証するために現地で実際に飛行を行った。

表-1 RMAX G1の諸元

項目	諸元
全長	3.63m
全幅	1.64m
全高	1.22m
全装備質量	94kg
最大搭載量	10kg
最大航続時間	80分
最高高度	150m



写真-4 移動操作車



写真-5 移動操作車からの操作状況

検証にあたっての最大の問題点は飛行高度であった。無人ヘリの積載可能量は平地での値であり、樽前山のように標高1,000mを超える場合には、空気の重さが軽くなり、大幅に低下することとなる。しかし、無人ヘリの軽量化等の改造は航空法上制約が多いため、現時点では、燃料を減らして積載量を確保することしかできないが、実際に可能かどうかは大きな課題であった。

これまで調査は、平成23年9月、平成24年9月、平成25年10月の3回実施しており、1回あたりの調査日数は天候不順の予備日も含めて4日程度である。調査項目は、表-2の通りである。

(1) 映像観測

噴火時に、迅速かつ安全に火口周辺域の状況を映像で確認することは、現況を的確に把握して当面の対策を立てる上で重要である。とりわけ、噴石や火砕流等、爆発的噴火の直接的被害だけではなく、泥石流や土石流といった二次的な災害を予測する上で効果的である。今回は、デジタルビデオカメラとデジタルスチルカメラを小型無人ヘリの下部に装着し、溶岩ドームを含む山頂火口原を詳細に撮影した(写真-6)。これにより、溶岩ドーム上の火口の状況や、亀裂の分布、噴気的位置などを、詳細に明らかにすることができた。定期的な調査により火口の状況変化の把握や火山活動が活発化した際には、変化状況から火口発生位置の予測などへの応用が期待できる。特に立ち入りが制限される火山活動活発化時の状況把握として有効である。

表-2 調査項目

調査項目	H23	H24	H25
空中磁気測量	○	○	○
映像観測	○	○	○
火山噴出物サブリグ		○	○
振動センサー設置試験	○		○



写真-6 ビデオカメラからの樽前山火口 (H23年調査)

(2) 空中磁気測量

火山岩は強い磁性を有しているため、山体周辺では地磁気の強弱などの磁気異常が生じている。この磁気異常は、おそらく表層から数 100m 程度までの地下浅部の高温や噴気変質による弱磁化などの不均質を反映していることが想定される。600°C程度の高温で岩石は磁性を失ってしまう。この性質を利用し、磁性が弱まれば、火山活動が活発化して、新たなマグマが地下浅部に貫入したり、地下深部から高温のガスが供給されたことが推定できるようになる。そのため、磁気異常分布を測定し、解析することにより、こうした地下浅部の構造や温度異常を推定することが可能である^{3) 4) 5)}。

しかし、噴火時には火口原上空の磁場分布を低高度かつ高密度にマッピングして測定することは、ほとんど不可能である。その点、小型無人ヘリは容易に噴

火時に火口上空に近づくことが可能であり、さらに GPS ナビゲーションによる自律飛行方式であるため、絶対位置で 10m 程度の誤差という精度の高い航行が実現できる。このことは、位置再現性の要求される観測を行う際に極めて有利である。

図-3 に調査地域と航跡図を示す。観測した空中磁気測量の磁気の強弱（赤が強く、青は弱い）を示している。これは平成 23 年の調査飛行によるものであり、火口原内のほぼ全域で磁場の分布が測定された。天候に恵まれたこともあり、想定していたよりも広い範囲をカバーし、最高飛行高度も標高 1,350m 程度まで上げることができ、大きな収穫となった。今後の観測の初期状態が測定できたという意味も大きい。

図-4 に平成 23 年から平成 25 年の調査年ごとの航跡図と平成 23 年から平成 25 年の全磁力変化を示す。調査

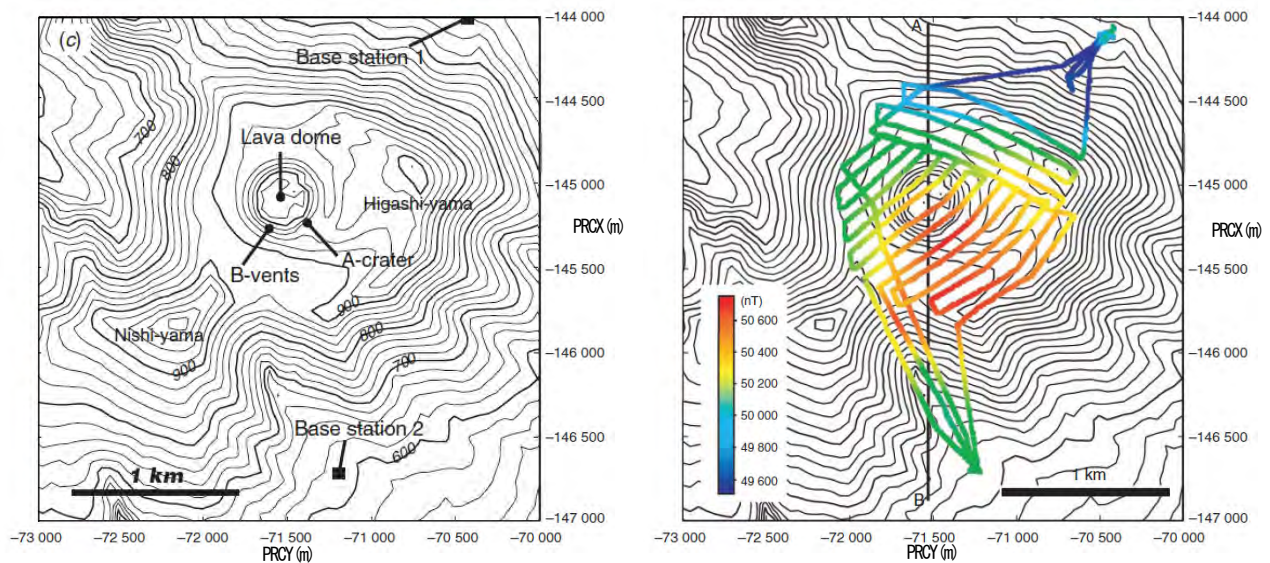


図-3 調査地域(左)と航跡図(右)
(北海道大学大学院理学研究院提供)

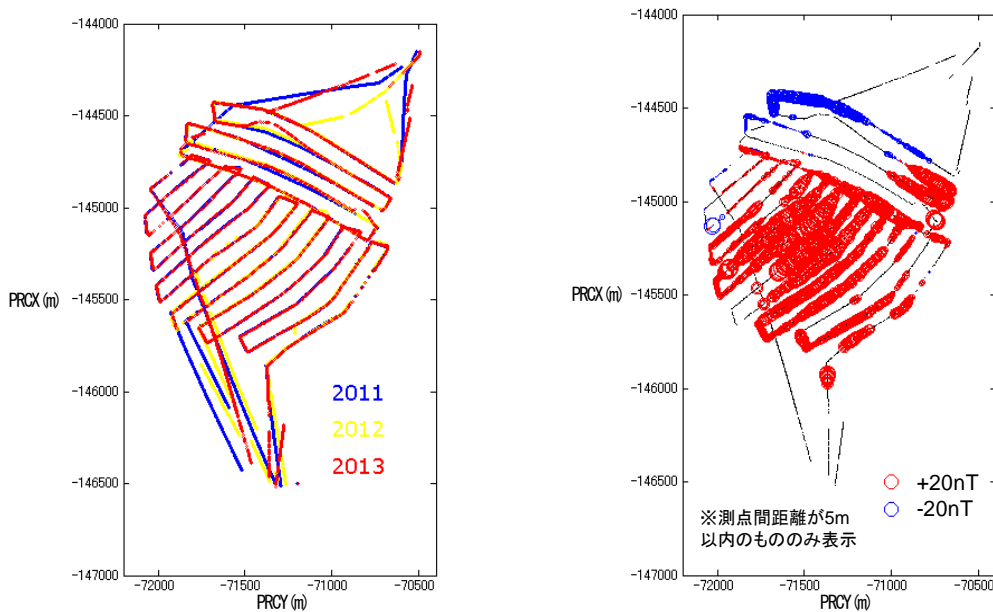


図-4 調査年ごとの航跡図(左)と全磁力変化図(右)
(北海道大学大学院理学研究院提供)

年ごとの航跡図からは、平成 25 年は北側の一部で航跡が乱れているが、全体としては概ね良好で同じ航跡によるマッピングができていているといえる。全磁力変化図からは、山頂域の北部で磁場が減少、南部で増加しており、これはドーム直下(深さは 500m 程度と推定)を中心に、この 2 年間で温度が低下したことを示唆するものである。このような無人機による磁場変化の検出は、新燃岳での成果に続いて世界で 2 例目となる。

このように空中磁気測量(写真-7)を繰り返すことで、地下温度の時間的推移を検出することが可能である。地殻変動や地震活動といった一般的な火山活動監視手法に加えて、空中磁気測量による地下温度変化の推定を加えることができると、火山活動の推移予測において重要な判断材料が加わることになる。噴火の予兆あるいは噴火後に北海道開発局が小型無人ヘリをオペレーションして空中磁気測量を行い、北海道大学が分析をし火山活動の推移予測を行うという連携の構築が可能となる成果が得られた。

(3) 火山噴出物サンプリング

噴火初期の噴出物を採取し分析することは、地下のマグマの状態を知り噴火の推移を予測する上で重要な手がかりとなる。火山噴出物中のマグマ含有量を分析することで、水蒸気爆発で終息するか大規模



写真-7 磁気センサーと空中磁気測量中の状況



写真-8 サンプラー本体と粘着テープによる採取



写真-9 採取した火山噴出物(左:本体、右:粘着テープ)
(北海道大学大学院理学研究院提供)

噴火につながるマグマ噴火に移行するかの予測が可能となり、火山砂防や緊急減災対策上重要なデータが得られる。分析に要する時間は5時間程度であり、北海道開発局で試料をサンプリングし、北海道大学で分析を行うという体制を想定している。

噴火中の小型無人ヘリのオペレーションを念頭におき、サンプリングシステムを用いて、火山灰・火山礫の遠隔サンプリング試験を行った。基地局付近の目視可能な距離において、ヘリ搭載のカメラによるオペレーションを実施し、サンプラーの動きや実際にどの程度の試料が採取できるかを確認した。平成 24 年の試験ではサンプラー本体によるつかみ取りとサンプラー表面の粘着テープによって細粒の試料が採取できた。分析するためには十分な量であったが微量であったため、より確実な採取を可能とするために、平成 25 年試験では粘着テープを2種類貼付し、サンプラーを吊り上げるウィンチを変更するなどにより大量の試料が採取できた。本体では総重量 180g、最大粒径 25mm、粘着テープでは総重量 16g、最大粒径 30mm であった(写真-8,9)。

平成 24 年、平成 25 年の試験を通して、サンプラーが火山噴出物を採取する前に閉じることがあり、採取精度を向上させるため、小型無人ヘリを管理している札幌開発建設部の協力により、サンプリング方法の改良について検討を行う予定である。

(4) 振動センサー設置試験

噴火が始まると、噴石・火山灰・火砕流・土石流等によって火口近傍・渓流域の各種観測点は被災し、機能しなくなる事態が想定される。そのような場合にも、小型無人ヘリにより臨時的な観測機器を安全に設置することができれば、監視体制を維持することが可能となる。簡易的な振動検知センサーを設置することにより、泥石流・土石流センサーとして役立つ可能性が高い。

北海道大学で開発中の小型無人ヘリで展開可能な振動検知システムを用いて、設置試験を行った。振動センサーにより振動を観測し、特定小電力無線を通じて親局にデータを送り、親局で土石流かどうかの判定をして警報を発するシステムである。



写真-10 振動センサー



写真-11 振動センサーを吊り下げた状態

平成 25 年の試験(写真-10, 11)では、小型無人ヘリから振動センサーを吊り下げて飛行し設置するという試験を実施した。システムの中核部分となる特定省電力無線通信により、実際の野外環境でどの程度の伝送距離が得られるかを確認することができた。これにより、今後、アンテナや振動センサの改良、土石流検知のアルゴリズム等を実装していくための基礎データが得られた。

まとめ

北海道の火山で始めて無人ヘリによる火山観測について、可能性や有効性を検証できたことは画期的である。東京大学による先行事例もあり十分に実用できると考えられる。これまで実施した 3 回の試験により、小型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。自律飛行によって、予定した航路をほぼ 10m 以内の精度で反復航行することができ、このことは火山地磁気効果を空中磁気測定の反復によって検出する上で大変有効である。火山噴出物サンプリングでは、ウィンチやサンプラーの改良などにより、サンプリング性能を向上することができ、噴出物の分析による火山活動の推移予測に寄与できることが確認できた。

改善したい点としては、無人ヘリの機体又は機材の軽量化である。北海道には、火口の標高が 1,000m を超える活火山もあり、飛行高度を上げるためには軽量化が有効である。天候に恵まれ、風が弱く視界も良好な条件下では、1,350m と予想以上の飛行高度・範囲を得ることができた。一方、調査日によっては山体に沿って吹き下ろす逆風に抑えられ、山頂火口原まではアクセスできなかった。気象条件さえ良ければ、このままの重量で樽前山でもかなりのことができるということを意味しているが、今後多くの火山で使用するためには、緊急時でもより確実に調査できるようにすることが重要であり、更なる技術開発を進める必要がある。また、小型無人ヘリ操作に高度な操作力を要求されるため、操作可能なオペレーターの育成も課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 東京大学地震研究所, 無人ヘリによる火口周辺の地震・GPS 観測, 平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究 1-1
- 2) 東京大学地震研究所, 無人ヘリカメラによる噴火状態の確認, 平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究 1-2
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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 1 月