

火山噴火時緊急調査手法の高度化について —ICT技術による高度で安全な調査技術の開発—

室蘭開発建設部 苫小牧河川事務所 計画課 ○中村香也
本間雄介
中村洋祐

火山噴火後の緊急調査においては、安全かつ正確な降灰量や火山灰サンプリング等の調査を行うための有効的な手法が課題となっている。室蘭開発建設部では、過年度より小型無人ヘリ等を用いた遠隔による試験飛行を実施、技術の開発を行ってきたところである。本論文では、高度化するICT技術の活用によって調査の安全性・正確性を検証するとともに、蓄積した試験データをもとに小型無人ヘリやドローンの運用方法について報告する。

キーワード：火山砂防、災害情報、危機管理、小型無人ヘリ

1. はじめに

ITCはInformation and Communication Technologyの頭文字で情報通信技術と訳される。ICT技術は急速に高度化し、スマートフォンに代表される情報端末の普及が進み、我々の生活習慣に大きな変化をもたらしている。国土交通省では「i-Construction」を推進し、建設生産プロセスでICT技術等の活用を目指し、測量、設計、施工、検査のすべての段階での適用を図っている。その中で、UAVを用いた三次元測量を取り上げており、小型無人ヘリやドローンの技術がより注目されている（ここでは「UAV（Unmanned Aerial Vehicle）」は無人で飛行する航空機の総称として用い、小型無人ヘリやドローンなどを含むものとする）。

一方、火山噴火を想定した場合、立入規制範囲内の緊急的な調査にUAVの活用は有効であることから、室蘭開発建設部では産官学連携のもと札幌開発建設部所有の小型無人ヘリを用いて樽前山、有珠山、倶多楽の3火山にて調査技術の開発を実施している。これまで、土砂災害防止法に基づく緊急調査項目である降灰量や火山噴出物サンプリングのほか、空中磁気測定、映像監視、振動センサー設置試験、火山ガス濃度計測、採水などの調査を試み、いずれも実用可能であることを確認している。また、近年普及しているドローンの活用について初動時の対応としての検討を始めている。ここでは、これまでの試験飛行による技術開発を紹介し、安全性・正確性の検証及び小型無人ヘリやドローンの運用方法について報告する。

2. 小型無人ヘリ

本調査で用いた小型無人ヘリは、札幌開発建設部所有

NAKAMURA Kouya, HOMMA Yusuke, NAKAMURA Yosuke

の自律型無人ヘリコプター（ヤマハRMAX-G1）である。機体の全長は3.6m、高さは1.2mで、最大飛行時間は約90分である。GPSを用いた自律航行が可能であり、あらかじめ設定した飛行経路を、約10m以下の精度でトレースしながら飛行することができる。また、基地局と操作系無線を接続した状態で飛行しており、飛行経路の変更や無人ヘリ搭載カメラの操作等を随時行うことができるほか、ホバリングは全方位に対して±3m以下の自動制御が可能である。飛行範囲は基地局から半径最大5kmであり、操作系無線が途切れた場合はあらかじめ設定した地点に自動的に帰還するように設定している。最大搭載量は標高0m、気温20℃の場合で10kgと各種のUAVの中でも比較的大きく、5kg程度の観測機器や装置であれば標高1,300m程度まで調査した実績を有する。



図-1 火山の調査に向かう小型無人ヘリ

3. 小型無人ヘリによる調査技術開発

室蘭開発建設部管内には直轄火山砂防事業を実施している樽前山をはじめ、有珠山、倶多楽を含め3つの常時観測火山があり、それぞれ降灰、噴石、火砕流といった直接的な災害のほか融雪型火山泥流や降灰後の降雨に伴

う土石流といった二次的な災害が想定されている。



図-2 室蘭開発建設部管内の常時観測火山

これらの火山の活動が活発化し、降灰により土砂災害の危険性が高まった場合や、噴火の危険性が高まった際には、土砂災害防止法に基づく緊急調査や火山噴火緊急減災対策を講じる必要がある。土砂災害防止法に基づく緊急調査には火山灰厚調査や火山灰サンプリングを実施することとなっており、特に火口周辺は立入規制範囲内となることが想定され、安全な場所から小型無人ヘリ等を用いた遠隔操作による調査が有用である（図-3）。

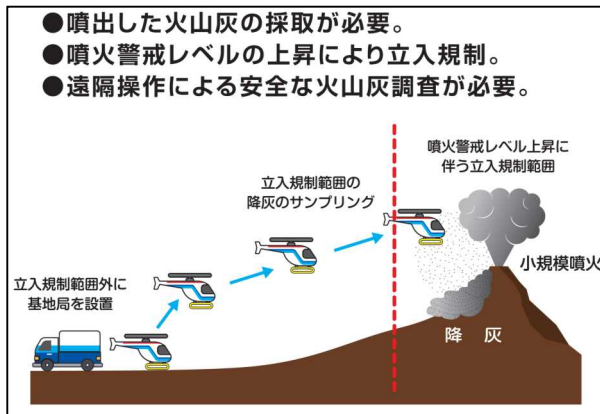


図-3 噴火警戒レベル上昇による遠隔操作の必要性

また、火山噴火緊急減災緊急減災ハード対策等による応急的な重機の稼働などの対応については火山の学術的な見解に基づいた判断が必要とされ、小型無人ヘリを用いた火山の調査技術の開発にあたり北海道大学理学研究科との連携を行っている。表1に本研究を着手した平成23年度から全期間の小型無人ヘリの試験飛行の記録を示した。映像監視は小型無人ヘリのカメラを用いた空中映像の撮影やGoPROを取り付けたインターバル画像と映像の撮影を行っており、噴火時の状況把握として基本となるものである。火山灰厚さ計測と火山噴出物サンプリングは土砂災害防止法に基づく緊急調査として行われるものである。空中磁気測定、火山ガス濃度計測、採水、赤外線カメラ監視は火山の活動度に関連する学術的な調査であり、対策を講じるにあたり今後の噴火の推移を専門家が判断する際に必要となるデータである。振動センサー設置試験は泥石流や土石流の流下を検出するものとし

て緊急減災ソフト対策メニューの一つである。

表-1 小型無人ヘリによる調査技術開発の取り組み

調査項目	H23 2011	H24 2012	H25 2013	H26 2014	H27 2015	H28 2016
	樽前山			有珠山		
映像監視	○	○	○	○	○	○
火山灰厚さ計測						
火山噴出物サンプリング		○	○	○	○	○
空中磁気測定	○	○	○	○	○	○
火山ガス濃度計測				○		○
採水						○
赤外線画像監視						○
振動センサー設置試験	○		○		○	

調査項目	H29 2017	H30 2018	R1 2019	R2 2020	R3 2021
	倶多楽		樽前山		
映像監視	○	○	○	○	○
火山灰厚さ計測		○	○	○	○
火山噴出物サンプリング	○	○	○	○	○
空中磁気測定	○		○	○	○
火山ガス濃度計測	○	○	○	○	○
採水	○		○		
赤外線画像監視	○	○	○		
振動センサー設置試験					

3. 小型無人ヘリによる火山灰厚計測

遠隔操作による火山灰厚計測については降灰マーカを現地に設置しそれを撮影することで火山灰厚を推定する手法¹⁾を採用し試験飛行を行った。図4に降灰マーカを示した。高さ3cmの黄色四角柱、高さ2cmの青色三角柱、高さ1cmの赤色円柱を配置したもので、降灰厚1cmの場合は黄色と青色が火山灰面の上に現れている状態となり、その写真を上空から撮影するものである。

樽前山の試験飛行では噴火警戒レベル3で調査することを想定し、火口から3km地点付近を離発着場とした。目標地点は西山山頂付近及び標高800m付近の南斜面とし、降灰マーカに火山灰を1cm程度まぶして設置し、小型無人ヘリにスティールカメラを取り付け、遠隔操作で上空から撮影した(図-5)。その結果を図-6に示した。上空からの撮影で青色の三角錐および黄色の四角錐は火山灰面より上に現れており、赤色の円錐は火山灰面より下に隠れていることが十分に認識できるレベルであり、ここでは火山灰厚1cmと判断できる。

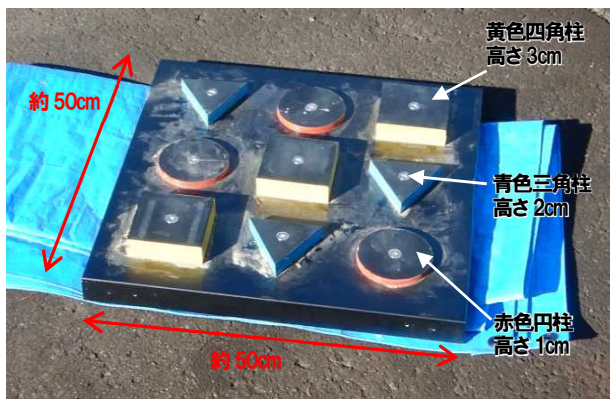


図-4 降灰マーカー

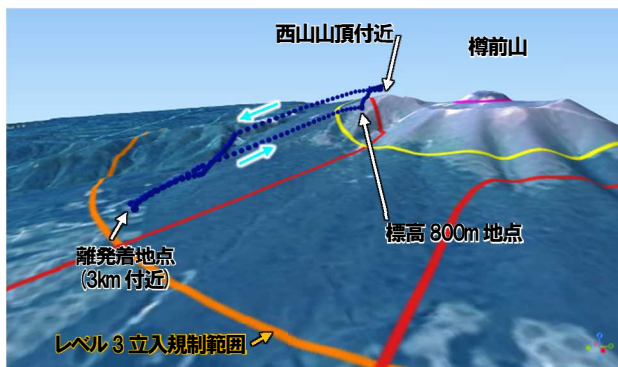


図-5 降灰厚計測のフライトルート



図-6 上空から撮影した降灰マーカー（標高800m地点）

4. 小型無人ヘリによる火山噴出物サンプリング

調査手法は、遠隔操作により小型無人ヘリをサンプリング目標地点に飛行させ、上空でホバリングした状態で、ウインチでサンプラーを地表におろし噴出物を採取し回収するものである。サンプリング時の対地高度はこれまでの実績では50m～120mである。

樽前山での試験飛行では、火山灰厚計測と同様に火口から3km付近を離発着場とし、直線距離で3.05km離れた西山山頂付近をサンプリング地点とし、バケット式サンプラーで調査を実施した。サンプリング地点には2m×2m程度の目標範囲を表示した。サンプラーは風等によ

り振り子のように揺れる状況であったが、オペレーターが操作車内のモニターを見ながらゆっくり降下させ、目標範囲への着地に成功し、火山噴出物の採取に成功した。直線距離で3.05km離れた地点から2m×2mというピンポイントの調査を可能とする飛行技術を有していることがわかる。

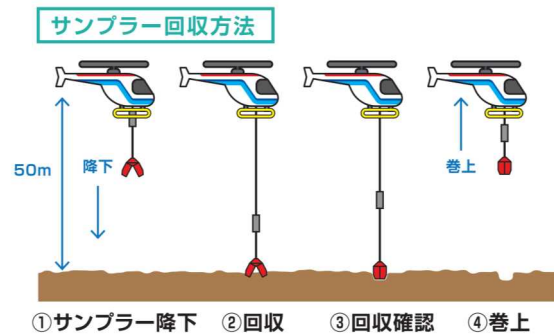


図-7 火山噴出物サンプリング方法

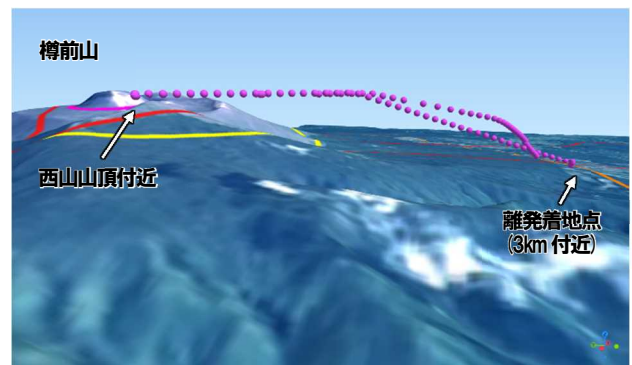


図-8 火山噴出物サンプリングのフライトルート



図-9 ピンポイントのサンプリングに成功

サンプラーは大きく分けて、バケット式とボール式の2種類ある。バケット式は開いた状態のバケットを上空からおろし、中央の突起が地上に着地した瞬間にバケットが閉じる仕組みになっているものである。バケットの

中に火山灰が格納されることを期待したものである。一方、ボール式は漁具に用いる浮き玉の表面に全面的に粘着テープを貼ったものである。火山灰が粘着テープに付着することを期待したものである。

バケットタイプとボールタイプの2種類の比較は有珠山において2015年及び2016年に実施している。2015年はサンプリング地点上にもともと堆積している火山灰をサンプリングした。この火山灰は粒径1cm程度の軽石を含む比較的粗粒なものである。一方、2016年は細粒の火山灰をブルーシート上に撒き出したものを採取した。その結果を表2に示した。

表-2 サンプラーの違いによるサンプリング状況

項 目	2015. 10. 7		2016. 10. 6	
サンプル	粗粒火山灰		細粒火山灰	
サンプラー	バケッ ト	ボール	バケッ ト	ボール
サンプリング 時の飛行高度	575m	560m	540m	540m
比高差	115m	100m	80m	80m
飛行時間	29. 5 分	24. 0 分	23. 5 分	24. 2 分

結果を比較すると、粗粒な火山灰に対してはボール式の方が多くの量を採取できており（図-10）、細粒でルーズな火山灰に対してはバケット式の方が多くの量を採取できている（図-11）。そのことから噴出の粒度に応じてサンプラーを使い分けることが有効であり、新鮮な火山ガラスの有無などの分析を行うのに十分な量のサンプリングが可能であるといえる。



ボール式サンプラー（粗粒用）

図-10 ボール式サンプラー



バケット式サンプラー（細粒用）

図-11 バケット式サンプラー

5. 空中磁気計測

一般に、火山活動が静穏なときの火山体を構成している岩石は地球磁場の方向と同じ向きに磁化した状態で帯磁している。マグマの上昇や火山ガスなどにより火山体内の温度が上昇するにつれて、火山体内部の岩石に熱消磁が起こり、地表で観測される全磁力が変化する。そのため、全磁力の変化を観測することにより、火山体内部の温度を推定する手掛かりを得ることが可能であり、近年火山観測に用いられている。全磁力の測定は地上において人力で実施することも可能であるが、空中から測定することでより広範囲を高密度で測定可能となる。特に、火山活動が活発化した際の測定は無人ヘリを用いることが有用である。

また、自律航行により、くり返し測定する際の位置再現性が高く、そのシステムを用いて樽前山、有珠山及び倶多楽で山頂火口原全域について空中から磁気測定を繰り返し実施している。

樽前山では噴火活動の初動期に実施することを想定し、7合目ヒュッテ及び北大観測坑道を離発着地点とし、樽前山山頂を中心に外輪山全体をカバーする形で試験飛行を行う計測に成功している（図-12）。これらの試験飛行により1.4平方キロの広大な面積をカバーできる面的調査を遠隔操作で実施することが可能であることが確認出来た。

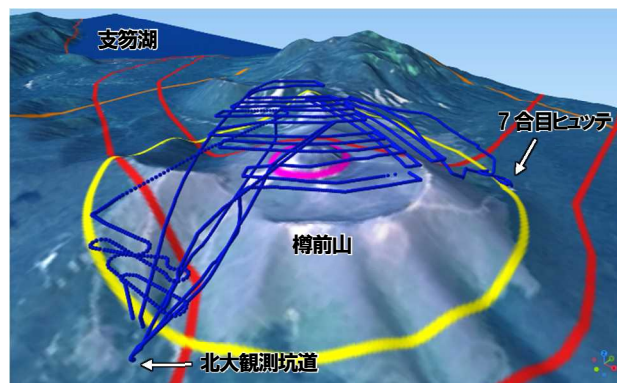


図-12 空中磁気計測のフライトルート

6. ドローンによる試験飛行・性能比較

近年急速にドローンが普及しており、災害時に協定業者による調査では普及型のドローンを用いることも考えられる。そこで、火口から3km地点を離発着地点として樽前山の山頂付近を目指してドローンで試験飛行をおこなってみた。ドローンはDJI製のMAVIC 2 PROを用いた(図-12)。



図-12 使用したドローン (MAVIC 2 PRO)

図-13は同じ離発着地点(3km付近)から小型無人ヘリとドローンを飛行させた際の飛行ルートを示した。小型無人ヘリは最高標高1060mまで飛行することができEL=970m地点(西山)に設置した降灰マーカを撮影することができた。一方、ドローンは離発着地点から比高差500mまでしか上昇できない設定になっていることから最高標高935mで頭打ちとなり、EL=970m地点にはたどり着くことができなかったが、EL=800m地点に設置した降灰マーカの撮影は成功した。小型無人ヘリはアンテナ操作を専属で行うオペレーターの技術もあり、通信が不安定化することがなく全区間飛行することができた。一方、ドローンは距離が遠すぎる場合と飛行高度が低すぎる場合に通信が途切れ、自動帰還モードに切り替わってしまうことがあるが、これにより安全に離発着地点まで帰還出来ることを確認した。

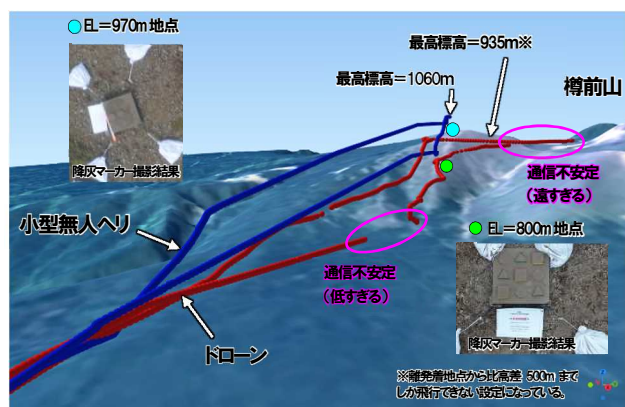


図-13 小型無人ヘリとドローンの飛行ルート

小型無人ヘリについてはアンテナ専属を含む3人のオペレーターが必要であるものの飛行性能を十分に発揮できている。ドローンは飛行高度が頭打ちになり、また遠距離では通信が途切れがちとなるが、オペレーター1名で飛行させることが可能である。

噴火等が発生した際に初動的な状況把握を行う場合は、普及しているドローンでの調査は迅速性の点で有効である。さらに安定した飛行で詳細調査を行う場合は小型無人ヘリでの調査が有効である。

表-3 ドローンと小型無人ヘリの活用

噴火警戒レベル	ドローン 開発局所有/協定業者	小型無人ヘリ 開発局所有
噴火警戒レベル5		
噴火警戒レベル4		●継続的な詳細調査 ●火山灰サンプリング ●火山灰厚計測等
噴火警戒レベル3	●中噴火時の初動調査	●中噴火時の詳細調査 ●火山灰サンプリング ●火山灰厚計測等
噴火警戒レベル2	●小噴火時の初動調査 ●火山灰厚計測等	●小噴火時の詳細調査 ●火山灰サンプリング ●火山灰厚計測等 ●空中磁気計測等

7. 考察：ICT技術を用いた正確で安全な火山調査

(1) 正確な火山調査

これまでの試験飛行により、3km離れた地点に対し2m×2mの目標地点から火山噴出物を採取するようなピンポイントの調査や、空中磁気計測のような火口原をくまなく飛行する面的な調査が可能になった。

表-4 サンプラーの違いによるサンプリング状況

	ピンポイント飛行	面的な飛行
飛行パターン		
応用可能な調査	・量水標の撮影 ・雪尺の撮影 ・監視カメラ等の観測機器の点検 ・監視機器の設置 ・砂防施設等の点検など	・三次元測定の飛行(面的な標高の把握) ・被災者の捜索 ・火山灰などの噴出物の範囲の把握など

このようなICT技術を用いることでさまざまな調査に応

用可能と考えられ、表-4に示すようにピンポイントの飛行であれば、量水標や雪尺を撮影しに行くことが可能であり、立入禁止区域内の観測機器が不調となった場合の外観の点検や砂防堰堤の堆砂数の堆砂状況などの点検などが対応可能であると考えられる。また面的な飛行であれば、写真を等間隔で撮影することで三次元測量が可能となり、地盤高の変動などを把握することで、泥流の流域界の変化の有無などを正確に調査することが可能であるほか、被災者の捜索や噴火した際の噴出物の堆積範囲の把握など応用可能な調査は多岐にわたる。

(2) 安全な火山調査

図-14に小型無人ヘリの操作状況を示した。移動操作車内に小型無人ヘリの制御システムがあり、オペレーターは飛行中車内から操作する。高所作業車に映像系のアンテナを設置し、別のオペレーターがアンテナを小型無人ヘリの方向に合わせる。その他、小型無人ヘリを目視監視するバックアップオペレーターの3名によるフライトが標準である。噴火警戒レベルが上昇した際、離発着地点を立ち入り制限区域外に設置することでオペレーターの安全確保を図ることができる。



図-14 小型無人ヘリ操作状況

図-15に噴火警戒レベルごとの立ち入り規制範囲と小型無人ヘリの飛行ルートを示した。噴火警戒レベル2までは7合目ヒュッテと北大観測坑道での離発着が可能であり、噴火警戒レベル3では火口から3km付近まで離れる必要がある。遠隔操作により火口付近にオペレーターが立ち入ることなく安全に火山の詳細調査が可能であり、小型無人ヘリやドローンといったICT機器を用いる最大の利点である。

一方、噴火警戒レベル3で火砕流が発生した場合は赤いラインの範囲で被災が想定されている。火山活動の推移が早まった場合などを考えるとより遠方からの飛行が望まれる。

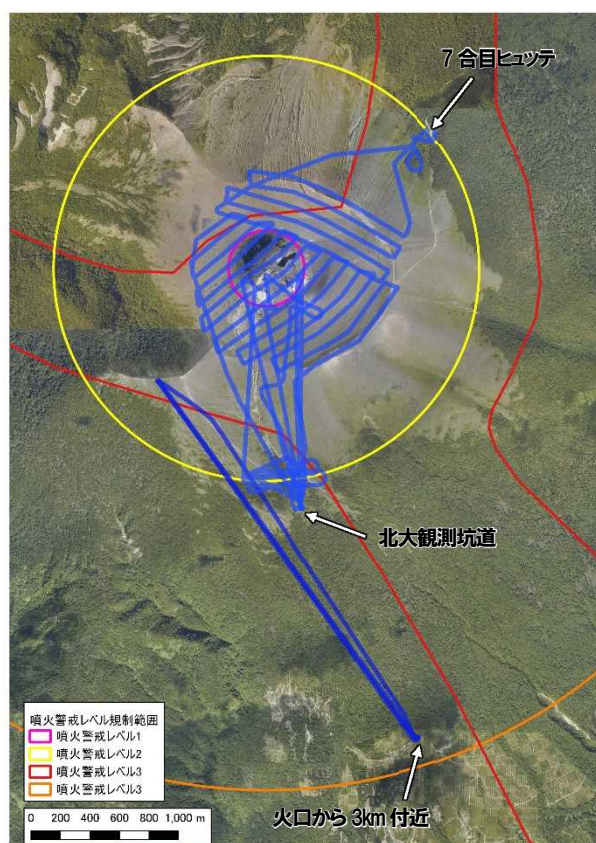


図-15 噴火警戒レベル規制範囲と試験飛行ルート

(3) 将来への展望

ICT技術の急速な進歩により、これまでのような2.4GHz帯の通信による操作機材とUAVとの直接通信だけではなく、携帯電話回線（LTEや5G回線）や衛星通信回線を用いた通信の利用が普及し始めている。航空法等の課題はあるが、図-16のように支笏湖の対岸から離発着し、遠隔で操作することも技術的には可能であり、より安全性の高い調査が期待できる。最新の技術動向に着目し、正確で安全な火山調査技術の構築を図っていきたい。



図-16 噴火警戒レベル規制範囲と試験飛行ルート

参考文献

- 1) 堤ほか(2019); UAV を用いた火山灰堆積状況および浸透能の概略把握の試み(その2); 第68回砂防学会研究発表会概要集 P-168

〇月〇日 差し替え版