

無人ヘリを活用した火山泥流感知システムのための 無線通信システムの試験

Experiment of Wireless Communication Systems for Development of Volcanic Mud-flow Detection System using an Unmanned Helicopter

吉本 充宏¹・渡辺 康二²

Mitsuhiro YOSHIMOTO, Koji WATANABE

¹ 山梨県富士山科学研究所 主任研究員

² シモレックス株式会社

要 旨

火山泥流は火山災害の中で最も頻度の高い現象の一つであり、繰り返し発生する特徴を持つ。そのため、既設のワイヤーセンサーなどの感知システムが機能喪失した場合の代替えシステムの開発が急がれる。本研究では、噴火が継続中にも使用可能な、無人ヘリコプターで運搬可能な省電力小型無線を使用した火山泥流システムの開発を試みている。本システムは複数台の子機で検知したシグナルを無線通信システムで親機に転送するため、本年度は、親機1台対子機10台の無線通信システムの試作を行った。まず、本システムでは子機の時刻を同期するため、GPSを使わない時刻同期システムを試した。つぎに、親機1台に対して、10台の子機の通信を行う実験を行った。その結果、時刻同期には成功し、子機10台との通信に成功したものの、安定的に動作させることには失敗した。これは、今回50Hz、3チャンネルのデータを送信しており、そのデータ量の多さが原因の可能性が高いことが明らかとなった。

《キーワード：火山泥流；振動センサー；無人ヘリコプター》

1. はじめに

火山の火口周辺に設置している火山観測用の計器類は、噴火発生時の噴火によって破壊されることがある。このような火口周辺の観測点は、噴火を予測する場合や噴火現象を明らかにするために重要な地点であるが、噴火継続時にはこれらの観測点を修復することは非常に危険である。こうした状況下で、最近では無人ヘリコプターによって計測機器を運搬、設置し観測を継続することが可能となってきた⁹⁾。火山泥流は、火砕流や降下火山灰の堆積後、降雨によって繰り返し発生する。火山泥流の災害を軽減するため、ワイヤーセンサーなどの泥流感知センサーが発生源に近い河川上流部に設置されている。しかし、これらの固定型の泥流感知システムは、火山泥流が発生した場合、第1波の火山泥流の検知には有効であるが、後続の第2波、第3波の火山泥流に対応するためには、再度ワイヤーの設置が必要である。しかし、噴火中には火口に近い地域では噴出物が到達する可能性が高いため、地上からの人力による設置は極めて危険である。このような場合、前述のような無人ヘリコプターによる泥流感知センサーの設置が期待される。しかしながら、これまで軽量の移動型の火山泥流感知システムは開発されてこなかった。本研究では、後続の第2波、第3波の火山泥流の対応可能な泥流感知システムの開発を目的として北海道開発局所有の無人ヘリコプターに搭載可能な省電力小型火山泥流システムの開発を行う。本研究により火山泥流感知システムが開発できれば、噴火発生時、これまで既存の感知システムの設置されていない流域や既存の監視システムが火山泥流の第1波によって破壊された流域に、迅速かつ安全にセンサーが設置可能となる。また、既存の監視システムが火山泥流の第1波によって破壊され、その修復に行く場合の安全確保のためにも役立つ。既存の監視システムと本研究で開発予定のシステムを組み合わせれば、より災害の軽減を図ることが可能になる。さらに、本システムは振動を伴う洪水や土石流、地滑り、雪崩などの発生の検知にも応用可能であると考えている。

なお、本研究は北海道開発局と北海道大学、東京大学地震研究所により進められている、無人ヘリコプターを活用した総合的な火山観測の試験調査に関連した研究に当たる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。この試験調査では、北海道開発局所有の無人ヘリコプターに既存の計測装置や試料採取装置を搭載して、緊急時の火山観測の可能性を拡張することを主な目的としている。本研究は、無人ヘリコプターによる観測項目の多様化を図るために観測装置の開発を担っている。

2. 泥流感知線システムとこれまでの研究結果

開発を計画した火山泥流感知システムは、火山泥流に伴って発生する振動を感知するセンサーと、特定小電力電波による双方向通信が可能な小型の通信機から構成される。火山灰堆積地域に数百m間隔で親機1台と10台程度の振動感知センサーを搭載した子機を配置し、子機が振動を検知した際、親機に信号を送る。親機はさらに監視センターに転送する。上流側から下流側のセンサーの順に振動を感知した場合、火山泥流が発生したと判断し、アラートを出す(図1)。

この構想を基にこれまで、2.4GHzの周波数帯を使ったデータ転送システムの構築を行い、親機1台と子機2台の試作を行った。さらに、野外における無線通信テストおよびヘリコプターへの搭載テストを行い、無線通信では野外で100m以内の範囲での通信テストに成功した。センサーのバッテリーを除く重量は、予定重量10kgより十分に軽い3kgとなり、ヘリコプターへの搭載テストも成功している。一方、十分に安全な地点から観測するためには通信距離をより長くする必要があり、この課題が明らかとなった。これらの課題を解決する一つの案は、親機1台に対して直列に配置した子機10台の通信が可能となれば、数十mの通信距離であっても数百mの通信距離を獲得することができる。そのためには、まず親機1台と子機10台の通信を可能にする必要がある。また、本システムでは上流側から下流側のセンサーの順に振動を感知した場合に泥流と判断させることから、子機同士の時刻を正確に保つ必要がある。時刻を正確に保つ手段としてGPSの搭載が有効であるが、一方で消費電力が増加してしまう問題点が残

る。本研究では、親機に搭載したGPSを使用して子機の時刻構成を行うこととした。

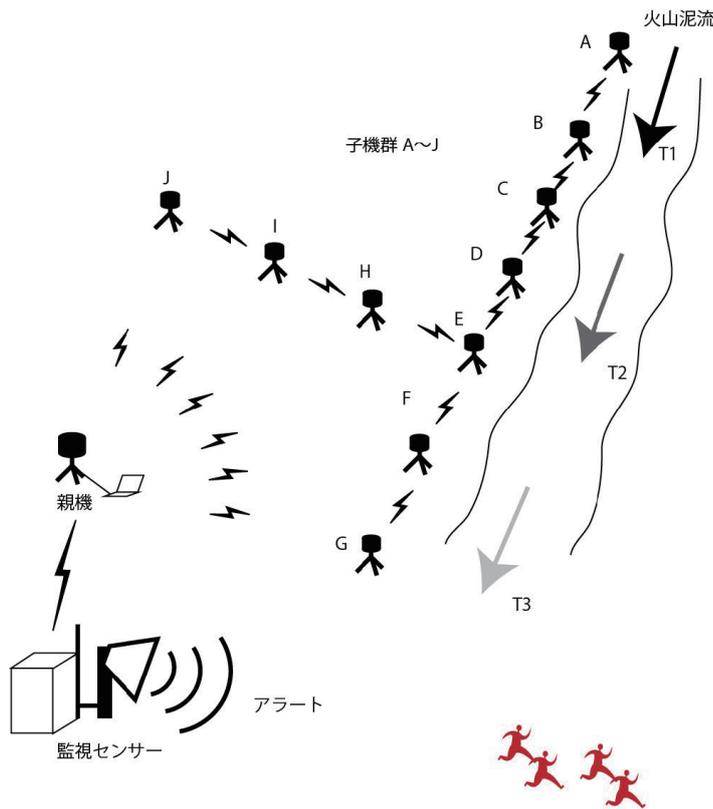


図1 火山泥流検知システムの構想の概念図

A~Jは子機を示す。T1, T2, T3は火山泥流の到達時刻を示す。火山泥流が発生した場合、時刻T1の時点では子機A、Bの順に振動が検知される。時刻T2の時点ではさらに子機C、D、Eの順位振動が検知され、時刻T3の時点ではさらに子機F、Gの順位振動が検知される。子機H、I、Jは時刻T2の時点で、振動しないか、振動の強度が順に弱まることが期待される。

3. 親機1台対子機10台の通信システムの構築

無人ヘリに搭載可能なセンサーの開発を目的としており、軽量化、消費電力の省力化が重要であることから2.4GHz周波数帯での簡便な通信方式と蓄積装置を持たない機器を試作した。これらの装置で親機1台と子機10台での時刻同期と通信におけるパケットの破綻有無の見極めを行うための実験を行った。

(1) 親機1台と10台の子機との通信

親機1台と10台の子機との通信を行うために、図2の接続概念図のようにGPSを搭載した親機1台、12ビットのAD変換器を持つ子機10台を無線通信で結び(図3)、データをPCに送りデータの欠測を観測することとした。子機が親機に送るデータは、サンプリング数50Hz、3チャンネルとした。これは振動検知に必要と考えられる100Hz、1チャンネルよりデータ量は多く、パケット数は同等の値である。また50Hzより低いサンプリングの時はこれよりパケット数が少なるためこのサンプリング数とチャンネル数を選択した。

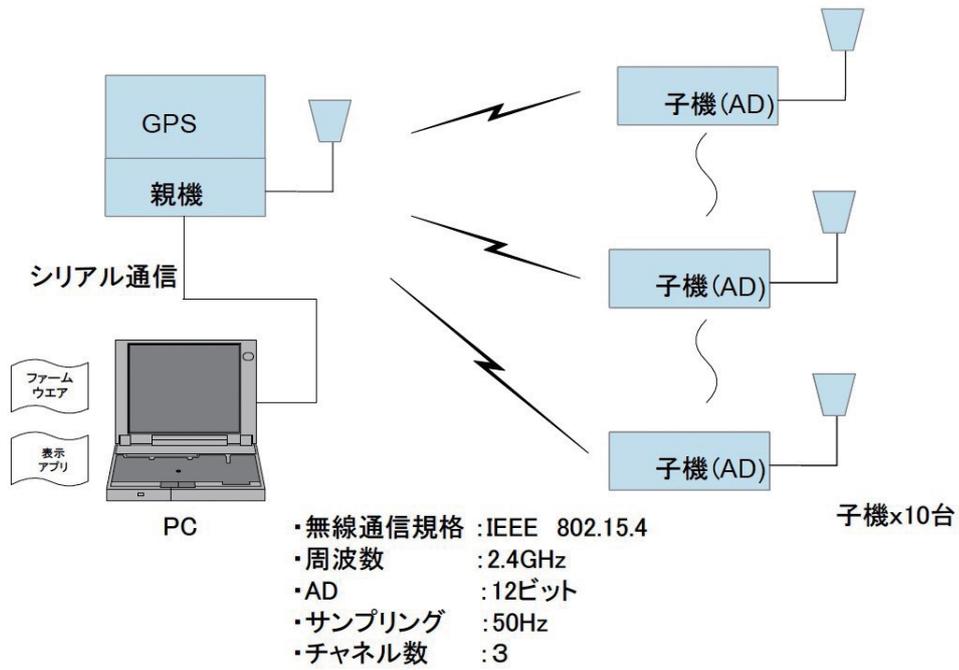


図2 親機と子機の接続概念図

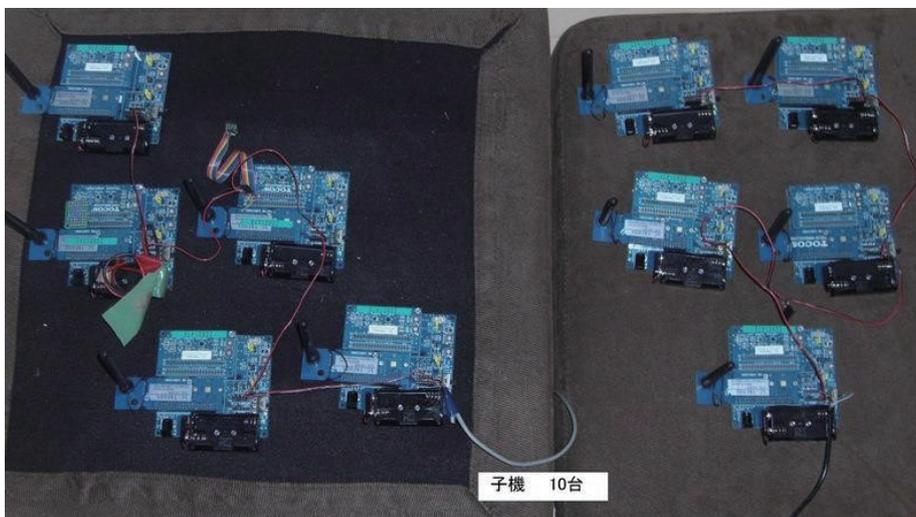
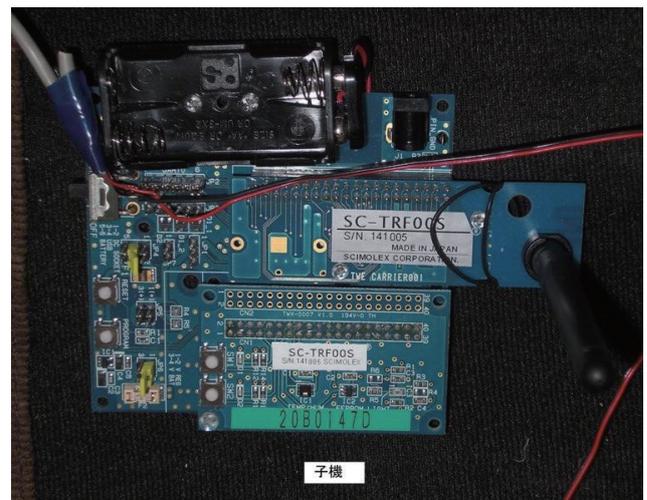
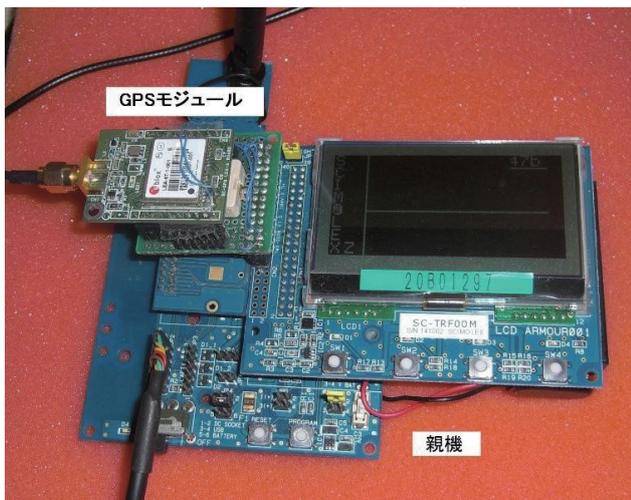


図3 基板ベースの試作品
上左が親機、上右が子機、
下は子機10台。親機には
GPSモジュールを搭載した。

(2) 時刻の同期

本研究では、IEEE1588の規格に従い、以下のように親機に搭載したGPSユニットの時刻を基準時刻とし、子機へのデータ転送時間の遅延時間を正確に計測することによって、子機の時間を正確に保つ方法を利用することとした(図4)。

まず、親機は搭載したGPS ユニットからの1PPS 信号で割り込みをかけ、その時の電源オンしてからの1PPS のカウント数と割り込みがかかった時の連続で動作している高速カウンターの値をパケットに組み込みブロードキャスト (T1) する。ブロードキャストされたパケット (T2) を受信した子機はこれを記憶し、子機は親機と子機のパケット遅延を計測するため、遅延計測用パケット (T4) を親機に送信する。親機は子機からの遅延計測パケットを受信すると、受信したときの高速カウンターをパケット (T3) に入れて子機に送信する。子機は一連のパケットによるデータ交換で親機との遅延を計測して自身の高速カウンター値での割り込みを設定する。子機がこの高速カウンターの割り込みが発生した時を子機の基準秒時刻とする。これらの通信を繰り返す。

IEEE 1588手順

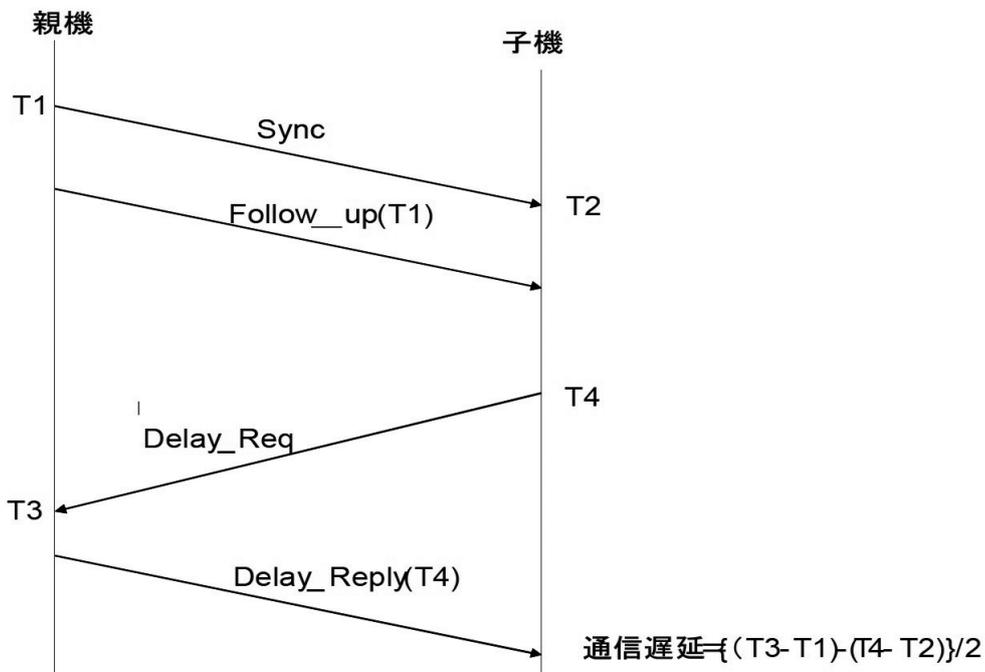


図4 時刻同期の概念図、親機と子機の通信手と順遅延測定

(3) 子機のデータパケット

子機は親機との時刻同期に成功すると計測を開始する。20msecごとにAD変換し、データが10個たまると親機にデータパケットを送る。データパケットは1秒に5回で200msecに1回の割合である。データパケットには子機の固有のIDと3チャンネルのデータと1秒間での何番目を示す序数、親機の秒数などをつけて送る。

パケットが親機に到達されないと判断されたときは再送信する。この機能は通信規格仕様に含まれる機能を利用し、専用のプロトコルは搭載していない。また子機は何ら蓄積装置をもたないので、通信が失敗すればデータ欠落が発生する。

表1 無線モジュール規格

無線規格	IEEE802.15.4準拠
周波数帯	2.4GHz
チャンネル数	16チャンネル
変調方式	O-PQSK, DSSS
通信速度	250kbps (IEEE802.15.4)/500kbps/667kbps
送信出力	+9.08dBm (25°C, 3V, Typ, SWGコネクタ)
受信感度	-100dBm (25°C, 3V, Typ, SWGコネクタ)
暗号化	AES-128ビット、AES-256ビット (ソフトウェア)
電波認証	ARIB-STD-T66 工事設計認証 (技適)

(4) 親機とPC インターフェースと表示

子機からのデータパケットを受信した親機はこれをシリアル通信でPCへ転送する (図5)。PCはデータパケットの到達時刻をPCの時刻と付け替え、表示ソフトに送る。このためにはPCはNTPプロトコルにより数msec以内でGPSと同期している必要がある。表示ソフトは送られてくるデータを順次装置毎、チャンネルごとに表示する。送信データが複数あったとしても表示する。

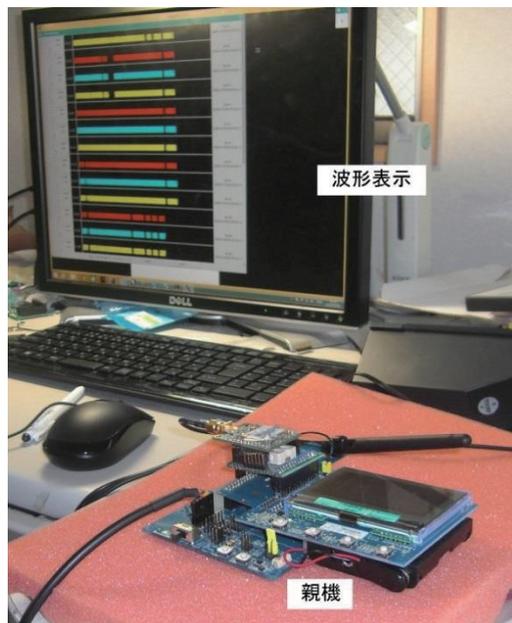


図5 親機とPCの表示画面

(5) 通信実験の結果

今回の通信実験の表示結果を見ると時々欠落1%程度 (100パケットに1パケット程度) がみられる (図6)。また、まれではあるが、接続されていない子機のデータがまぎれ込み表示を停止してしまう現象が1日1回ほど現れた。これはPC側で接続されている子機をあらかじめ登録しておくことで防ぐことが可能である。しかし、無線通信を使用し、蓄積装置を子機に持たせないでデータを送る装置ではパケットの欠落が発生する。また、本来は屋外でかつ距離を長くして使用する予定であるが、今回は、屋内か

つ近距離での実験である。屋外では、距離による感度の低下、それによるパケットの欠落の増加が考えられるため、安定稼働とするために、通信量の軽減等の工夫が必要とされる。今回のような簡便な装置で観測を行う場合、GPSを親機に搭載するだけの無線での時刻同期とデータ通信の方法には使用価値があると考えられる。

一方、今回の装置では電源のON・OFF時にファームウェアが消えてしまうという不具合があり、この対策は検討課題である。また、親機と子機を離して設置ルータを介して通信をするとき、パケット数が増え、欠落の発生原因になるので注意が必要である。



図6 データの表示画面

子機 x 10台からのデータ（加速度計信号、ノイズ入力）を親機で受信しパソコン画面上にソフトウェアで波形として表示。波形は1画面内に表示をしているが、説明上画面を3枚に分けている（画面1、画面2、画面3）。波形表示右側にテキストでチャンネル番号とXYZの成分表示。1チャンネル x 3成分 x 10台表示（Y軸：子機アナログ入力、X軸：60秒）

4. 結果と課題

親機1台対子機10台の無線通信システムの実験を行った結果、GPSを使わない時刻同期自体は成功した。一方で、親機1台に対して、10台の子機の通信実験では、通信に成功したものの、データの欠落やデータの割り込みなどの不具合やファームウェアの不良など様々な問題点が上がった。そのため、当初予定していた振動センサーを用いた実験には至っていない。現行の2.4GHzの無線モジュールを使ったシステムは通信距離が100m以内と短いため、通信距離を伸ばすために子機同士のマルチホップ通信を

検討していたが、子機の数が増えればデータ量がその分増える。今回の無線通信の不具合の原因の一つにデータ量の多さが考えられることから、通信システム自体の見直しが必要である。

H26年度の結果を受けて、検知システムの設計変更を検討する。まず無線通信は2.4GHzの無線モジュールよりも通信距離の長い920MHz帯のモジュールが比較的安価（市場価格で1万円程度）になっているため、920MHz帯のモジュールの検討を行う。ただし、920MHz帯のモジュールは通信速度が遅いため、送信できるデータ量が減少する。いずれにしてもサンプル数やチャンネル数の検討が必要になる。また、無線通信に関してはアンテナをできるだけ地表から離れた高いところに設置し、一方でセンサーの方は地表面に設置する。そこで、センサー部と無線モジュールの分離も視野に入れた検討を行う。分離する場合はセンサー部分の作製コストが新たにかかるため、センサーはスマートフォンなどに組み込まれている加速度センサーの使用を検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、H25年度の親機1台子機2台に加え、子機8台を試作し、親機1台対子機10台の無線通信システムの試作を行った。親機子機間の時刻の同期は、消費電力の問題から当初予定していたセンサーにGPSを搭載する形式を採用せず、GPSを使わない時刻同期システムを試行し、成功した。一方、親機1台に対して子機10台の通信実験では、全ての子機10台との通信に成功したものの、安定的に通信を維持することには成功しなかった。これらの課題を受け、システム自体の設計変更を検討する必要がある。研究開始当時普及していた現在使用している2.4GHzの無線モジュールは、通信距離が短いため子機の台数を増やし、直列につなぐ必要があった。一方、最近普及してきたより通信距離の長い920MHz帯のモジュールを使用すれば、子機を直列につなぐ必要が無く、データ通信システムを組みやすくなると考えられる。無人ヘリに搭載可能な小型で軽量かつ省電力のセンサーを開発するには、今後は、920MHz帯のモジュールを使用したシステムの構築が望まれる。

謝辞：本研究の無人ヘリコプター搭載試験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。本研究は北海道道河川財団からの公募研究費を使用しました。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.