

## 無人飛行機の火山噴煙観測への利用 Volcanic plume measurement with UAV

篠原 宏志<sup>1\*</sup>, 金子 隆之<sup>2</sup>, 大湊 隆雄<sup>2</sup>

Hiroshi Shinohara<sup>1\*</sup>, Takayuki Kaneko<sup>2</sup>, Takao Ohminato<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, Tokyo Univ.,

マグマ中のガス成分の発泡は火山爆発の原動力であり、火山活動監視や火山噴火機構の解明のためには火山ガス組成の定量は重要である。大規模な噴煙活動により放出された火山ガスの組成の定量化は、最近になりガスセンサーを組み合わせた携帯型の観測装置 (Multi-GAS) の開発により可能となった。日本でも三宅島、浅間山、阿蘇など活発な噴煙活動を行っている火山の火山ガス組成が定量化され、火山ガスの供給過程や噴火活動との関連が検討され始めている。本装置は、周囲の外気中を吸引し大気中 (噴煙中) の火山ガス成分の変動に基づき、火山ガス組成の定量を行うため、観測のためには本装置を噴煙中に設置する必要がある。通常は観測者が装置を山頂火口周辺に持参し観測を実施するため、噴火などの危険性がある場合も急峻な地形などの理由で山頂に登山できない条件下では観測を実施することができない。しかし、噴火の可能性が高い火山こそ、火山ガス組成の定量化が必要である。これらの困難を克服するために、有人・無人の飛行機などを用いた火山噴煙の観測が実施されている。有人飛行機を用いた火山噴煙観測は、米国やニュージーランド等で繰り返し実施されており、主に CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S などの放出量およびそれらの濃度比の観測が行われてきた。我が国でも、三宅島において気象庁や自衛隊の協力の下で、ヘリコプターに比較的大型の機器を搭載して、火山噴煙中の CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> 比の繰り返し観測が実施された (Shinohara et al., 2003)。しかし、有人機などでは噴火の危険性がある条件下での観測は不可能であり、また特に我が国では外気採取用のパイプなどを外部に設置するなどの航空機の改造には多額の経費が必要となるなど、有人機の火山噴煙観測には様々な困難がある。そのため、これらの困難な条件下での火山噴煙観測を実現するために無人飛行機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の利用を進めている。

現在、産総研で火山噴煙観測に使用している Multi-GAS は、赤外吸収による CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O ガス分析計、SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S 化学センサー、H<sub>2</sub> 半導体センサーを組み合わせた、重量が電源込みで 3-6kg の装置である。この Multi-GAS を UAV に搭載し火山噴煙中を飛行観測することにより、火山ガス組成の定量が出来る。本観測に必要な UAV の性能要件は、3kg 以上の搭載重量、火山噴煙高度での飛行、外気吸入口に排気ガスの影響がないこと等があげられる。特に排気ガスには高濃度の H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> が含まれているためその影響は深刻である。現在までに下記の 3 種類の UAV を用いて火山噴煙観測が試みられてきた: 気象庁の運用による三宅島でのカイトプレーン (スカイリモート)、霧島新燃岳での無人飛行機 (エアフォートサービス)、東大地震研の運用による桜島での無人ヘリコプター (ヤマハ)。いずれの場合も、排気ガスの混入の軽減や飛行経路の選択などの改善が望ましいことは示されたものの、噴煙組成の定量が可能である事が明らかとなった。地上での噴煙観測では、大気中の H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> 濃度の変動が大きいいため、火山ガス起源の H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> を定量するためには高濃度の噴煙中での観測が必要であるが、UAV を用いた上空の観測では、大気中のバックグラウンド濃度の変動が小さいため、比較的低濃度でも火山ガス組成の定量が可能であるなどの利点も明らかとなった。例えば、新燃岳では、ブルカノ式噴火が繰り返されていた 2011 年の 3 月と 5 月に、火口直上を含む領域での飛行観測を実施し、火山ガスの主成分組成を明らかにすることができた (H<sub>2</sub>O=97, CO<sub>2</sub>=1.5, SO<sub>2</sub>=0.2, H<sub>2</sub>S=0.24, H<sub>2</sub>=0.006 mol%, 2011 年 5 月 18 日)。本組成から、新燃岳の火山ガスは CO<sub>2</sub> 濃度が比較的高いために、比較的深部でマグマから分離されたガスである可能性が高いが、見かけの平衡温度が 400 と低く、地表まで上昇中の冷却に伴い化学反応が進行している事などが推定された。今後、UAV を用いた火山噴煙により、火山ガス観測による火山活動監視や噴火過程解明の研究の進展が期待される。しかし、今までに使用している UAV でも、火山灰を含む噴煙中の飛行はできないため、噴火時に放出される火山ガス組成の定量は困難である。特に、大規模な爆発的噴火の火山ガス組成の定量は、噴火発生過程の解明に必要なであるが、高濃度の火山灰を含む乱流の噴煙中に観測機器を持ち込む手段は現在のところ無く、新たな手法の開発も必要である。

キーワード: 火山噴煙, 火山ガス, UAV, Multi-GAS, 火山観測

Keywords: Volcanic plume, Volcanic gas, UAV, Multi-GAS, Volcano monitoring

## 無人ヘリコプタを用いた重力・磁気探査システムおよびデータ処理手法の開発 A Development of Airborne Survey of Gravity and Magnetism on an Unmanned Helicopter and Its Data Processing

盛川 仁<sup>1\*</sup>, 徳江 聡<sup>1</sup>, 小倉 祐美子<sup>1</sup>, 松田 滋夫<sup>2</sup>, 佐伯 昌之<sup>3</sup>, 大澤 英里<sup>3</sup>, 鈴木 拓也<sup>3</sup>, 横井 勇<sup>4</sup>, 楠本 成寿<sup>5</sup>, 野口 竜也<sup>6</sup>, 駒澤 正夫<sup>7</sup>

Hitoshi Morikawa<sup>1\*</sup>, Satoshi Tokue<sup>1</sup>, Yumiko Ogura<sup>1</sup>, Shigeo Matsuda<sup>2</sup>, Masayuki Saeki<sup>3</sup>, Eri Ohsawa<sup>3</sup>, Takuya Suzuki<sup>3</sup>, Isamu Yokoi<sup>4</sup>, Shigekazu Kusumoto<sup>5</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>6</sup>, Masao Komazawa<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> クローバテック株式会社, <sup>3</sup> 東京理科大学, <sup>4</sup> 株式会社東京測振, <sup>5</sup> 富山大学, <sup>6</sup> 鳥取大学, <sup>7</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Clover Tech Inc., <sup>3</sup>Tokyo University of Science, <sup>4</sup>Tokyo Sokushin Co.,Ltd., <sup>5</sup>Toyama University, <sup>6</sup>Tottori University, <sup>7</sup>Geological Survey of Japan, AIST

It is important for the regional earthquake disaster prevention to make a model of ground structure and clarify the non-fairing nature of the ground in detail. For this purpose, gravity and magnetic surveys can be used to estimate the deep and vast velocity and density structures of the ground because of quick observations.

Nowadays, since these implements such as gyroscopes, accelerometers, computers and GPS measurement system are dramatically improved, observation system becomes much smaller and higher-performance. We now aspire to make observation system simple, which sensors installed directly on the carrier, then correct the observed data by post processing from the accurate posture data. Furthermore, the new accelerometer sensor "D-servo," which has enough dynamic range for the carrier disturbance and resolution for detection of gravity anomaly had been developed as shown in Yokoi et al.(2012).

To discuss the sensitivity and practicability of the exploration system, airborne survey has been carried out. We set the observation system on an autonomous-cruise-type uninhabited helicopter and navigate it over a huge concrete gravity dam, which makes large gradient in gravity, with some magnetic body as flood spillway. By means of GPS data of each cruise, theoretical gravity is calculated from terrain model made of 50m-mesh rectangular parallelepiped which height is altitude. Effects of stored water and dam itself are also considered.

As results from the observation, it is observed that sensitivity of the magnetic survey was quite well, though, inclination correction seems to be required for the gravity survey. For the accurate correction, we should consider some suitable way of the calibration of sensors. Improved method for gravity analysis is also proposed and the result has quite good agreement with theoretical gravity in phase and period of the signal. An measurement and algorithm might be required to determine the accurate inclined angles for the correction as future development.

Acknowledgments: A part of this study is supported by JSPS KAKENHI (21671003).

キーワード: 重力探査, 磁気探査, 空中探査, 無人ヘリコプター, Hilbert-Huang 変換 (HHT)

Keywords: gravity survey, magnetic survey, airborne survey, unmanned helicopter, Hilbert-Huang transform (HHT)

## 南極 Deception 島での小型無人飛行機による空中磁気観測

### Aeromagnetic survey by a small unmanned airplane over northern part of Deception Island

坂中 伸也<sup>1\*</sup>, 船木 實<sup>2</sup>, 東野伸一郎<sup>3</sup>, 中村 教博<sup>4</sup>, 岩田 尚能<sup>5</sup>, 小原徳昭<sup>6</sup>, 桑原幹夫<sup>7</sup>

Shin'ya Sakanaka<sup>1\*</sup>, Minoru Funaki<sup>2</sup>, HIGASHINO Shin-ichiro<sup>3</sup>, Norihiro Nakamura<sup>4</sup>, Naoyoshi Iwata<sup>5</sup>, OBARA, Noriaki<sup>6</sup>, KUWABARA, Mikio<sup>7</sup>

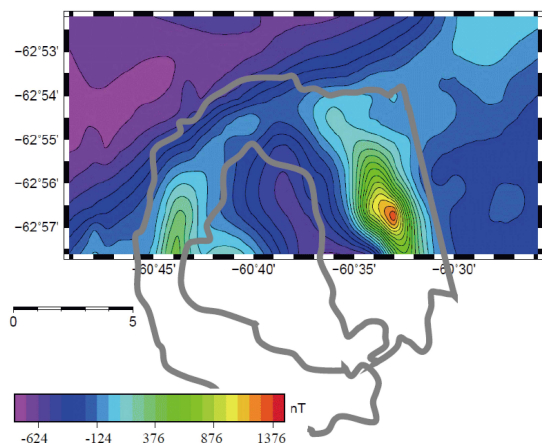
<sup>1</sup> 秋田大学大学院工学資源学研究所, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 九州大学工学研究院, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>5</sup> 山形大学理学部地球環境学科, <sup>6</sup> ロボティスタ, <sup>7</sup> RC サービス

<sup>1</sup>Department Graduate school of Engineering and Resource Science, Akita University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Graduate School of Engineering, Kyushu University, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, <sup>6</sup>robotista, <sup>7</sup>RC service

国立極地研究所を中心とし、チリ、韓国、ブルガリア、スペインの各国の極地研究チームの協力を得て、南極サウスシェトランド諸島において小型無人飛行機飛行実験を行った。2010年暮れから2011年のはじめにはキングジョージ島にて、また2011年暮れから2012年のはじめにかけてリビングストーン島で新たに開発した無人飛行機の飛行を試みた。ここでは、主に2011年12月の飛行で得られた、デセプション島上空での磁気探査の結果を紹介する。デセプション島上空に投入された機体は Ant-Plane 3 と名付けられたもので、翼幅約 3m、86cc のガソリンエンジンで 500 分の連続飛行が可能である。リビングストーン島にある St. Kliment Ohridski 基地 (ブルガリア) の氷河を滑走路として、Deception 島北部上空での空中磁気観測と航空写真撮影に成功した。三成分小型フラックスゲート磁力計 (FLFG 27-03: テラテクニカ社製) に GPS とデータロガーを組み合わせた観測システムを用いた。東西方向に 18km の長さの飛行測線を 10 本設定し、自動飛行を行った。2 か所で短絡飛行があったが、島の北半分 9 × 18km の範囲を高度 780m で順調に飛行した。飛行時間は 3 時間 07 分 08 秒、総飛行距離は 302.4km であった。観測データには旋回中の高度変化に起因する磁気ノイズ等があったが、これらのノイズを取り去り、国際標準地球磁場を差し引くことで、磁気異常図を作成することができた (図 1)。この結果はデセプション島周辺海域の磁気異常と調和的で、地質構造を反映した結果と思われる。Deception 島の飛行は、無人機が南極の地平線を越えて科学観測をした最初の例である。暴風圏南端の過酷な気象条件の中で成功したことは、無人飛行機による南極での航空機観測が安全かつ経済的に行われることを実証した。

キーワード: デセプション島, 空中磁気探査, 無人飛行機, フラックスゲート磁力計

Keywords: Deception Island, aeromagnetic survey, unmanned aerial vehicle, fluxgate magnetometer



## 2011年噴火後の新燃岳における無人ヘリ繰り返し空中磁気測量

## Repeated aeromagnetic survey of Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan, after the 2011 eruption using unmanned autonomo

小山 崇夫<sup>1\*</sup>, 金子 隆之<sup>1</sup>, 大湊 隆雄<sup>1</sup>, 柳澤 孝寿<sup>2</sup>, 渡邊 篤志<sup>1</sup>, 武尾 実<sup>1</sup>

Takao Koyama<sup>1\*</sup>, Takayuki Kaneko<sup>1</sup>, Takao Ohminato<sup>1</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>2</sup>, Atsushi Watanabe<sup>1</sup>, Minoru Takeo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>Earthquake Reserach Institute, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We conducted the highly resolved aeromagnetic surveys around Shinmoe-dake, Kirishima volcano twice by using the unmanned autonomous helicopter, when it was after the magmatic sub-plinian eruptions.

First survey was carried out in the end of May covering 3 by 3 km area of western Shinmoe-dake. The flight altitude is as low as about 100 m above the ground and spacing of flight lines are as close as almost 100 m. Total flight distance is about 85 km. The cesium optically-pumping magnetometer was installed by hanging below the helicopter to measure the geomagnetic total intensity. Due to this survey, we detected a large geomagnetic total intensity anomaly as 1000 nT. Using these data, the horizontal map of magnetization intensity was obtained beneath the survey area. We found the followings;

- 1) The average value of the magnetization is as low as 1.5 A/m;
- 2) Northwestern Shinmoe-dake has lower magnetization than average;
- 3) Strong magnetization appears the area corresponding the lava at the foot of Karakuni-dake.

Second survey was carried out about 5 months later than the first survey, in the end of October to the beginning of November, in order to detect temporal change of geomagnetic total intensity. By comparing both data, we could detected a dipole-like change as large as about  $\pm 100$ nT around the crater of Shinmoe-dake. This change can explain by magnetization enhancement with  $2.3 \times 10^7$  Am<sup>2</sup> in the crater. In the 2011 eruptions of Shinmoe-dake, a large pancake-like lava was found in crater with  $1.5 \times 10^7$  m<sup>3</sup> (Nakada et al., submitted), and the cooling of this lava probably causes this magnetization enhancement.

キーワード: 繰り返し空中磁気測量, 無人ヘリコプター, 新燃岳

Keywords: repeated aeromagnetic survey, unmanned autonomous helicopter, Shinmoedake

## 無人ヘリコプターを利用した樽前火山の空中調査

### Airborne surveillance using an unmanned autonomous helicopter at Tarumae volcano

橋本 武志<sup>1\*</sup>, 大湊 隆雄<sup>2</sup>, 金子 隆之<sup>2</sup>, 吉本 充宏<sup>3</sup>, 柳澤 孝寿<sup>4</sup>, 鈴木 英一<sup>5</sup>, 小山 崇夫<sup>2</sup>, 松本 征海<sup>1</sup>

Takeshi Hashimoto<sup>1\*</sup>, Takao Ohminato<sup>2</sup>, Takayuki Kaneko<sup>2</sup>, Mitsuhiko Yoshimoto<sup>3</sup>, Takatoshi Yanagisawa<sup>4</sup>, Ei'ichi Suzuki<sup>5</sup>, Takao Koyama<sup>2</sup>, Masami Matsumoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北大理地震火山センター, <sup>2</sup> 東大地震研, <sup>3</sup> 北大理地惑システム, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 北海道河川財団

<sup>1</sup> ISV, Fac. Sci. Hokkaido Univ., <sup>2</sup> Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>3</sup> Earth Planet. System Sci., Fac. Sci., Hokkaido Univ.,

<sup>4</sup> JAMSTEC, <sup>5</sup> River Center of Hokkaido

1. はじめに: 火山噴火の現場では、多くの場合火口周辺に人間が近づくことは困難になる。その一方で、特に噴火初期における火口近傍の状況把握、被災観測機器の交換あるいは代替観測、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のみならず、その後の火山活動の推移予測に基づいて避難行動の範囲や復旧計画を考える上でも重要な情報を提供しうる。我々は、北海道開発局との共同により、自律飛行可能な無人ヘリコプター（ヤマハRMAX-G1）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、北海道の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。樽前山は、2012年現在で噴火していないが、1909年に形成された山頂溶岩ドームとその周辺では継続的な噴気活動が見られる。本研究では、2回の空中磁気測量と噴出物サンプリング動作試験の結果について報告する。

2. 空中磁気測量: 2011年9月に、山頂火口原とその周辺域で、センサ吊り下げ方式による空中全磁力測量を行った。無人ヘリは、ディファレンシャルGPSによるナビゲーションにより、予めプログラムした航路を対地高度100-300mで自律飛行させた。2012年9月に行った第2回の測量でも同じ航路を自律飛行させて時間変化の検出を目指した。第2回の測量では、悪天候のため再測量できない部分が生じたが、火口原の主要な領域をカバーすることに成功した。2回の測量における実際の飛行位置を比較して、実測部分での航路ずれの頻度分布を調べたところ、5m前後の頻度が最も高く、大半が10m以内に収まっていた。一方、実測された磁場データによれば、航路に沿った磁場傾度はほぼ±1nTの範囲内であった。このことから、2回のデータセットから最も近接した位置にある測定値を抽出して比較することにより、概ね±10nTの精度で時間変化が議論できるものと考えた。実際にこうした直接比較の処理により、火口原北側で磁場の減少、南側で増加を示す系統的なパターンが約30nT (p-p)の振幅で検出された。変化の空間分布は、地上における反復磁気測量の結果（北海道大学と札幌管区気象台の観測による）とよく一致している。ただし、地上測量の結果から推定される磁化変化を仮定した場合に空中で期待される変化の振幅はその5分の1程度である。この振幅の違いの原因についてはさらなる精査を要するが、上方接続等の処理を経ない直接比較による時間変化検出の可能性が開かれたことは、噴火時における迅速な状況判断を行う上で有益であろう。

3. 噴出物サンプリング: 第2回の試験調査では、北海道開発局が所有する掴み取り方式のサンプリング装置の試験を基地局付近にて行った。この装置は、採取予定地点の上空でホバリングする機体からウインチで降下させる。地表に着底した際にロックが解除されてグラブバケットの口が閉じるように設計されている。本来は固形物または泥質試料を採取するものであるが、火山灰にも対応するため、バケット表面に両面粘着テープを貼り付けて採取を試みた。ロック解除機構やオペレーションの方法など今後改良すべき点はいくつかあるものの、今回の試験では1回につき数cm大の岩片数個と数グラムの火山灰粒子を採取できることが確認された。仮に将来の噴火時に運用できた場合、初期噴出物に新鮮なマグマが含まれているかどうかを分析し、その後の活動推移を検討するには十分な量といえる。

4. まとめ: 2回の試験を通じて、無人ヘリコプターによる火山調査は、樽前山においても十分実用性があることが実証的に示された。とりわけ、自律飛行により航跡の再現精度が高いことは、反復空中磁気測量による火山性磁場変化の検出という点で有利である。今後、実際の噴火時に無人ヘリを有効活用するためには、基地局の候補地点やアクセスルート等を事前に検討しておくことや、静穏時の状態を把握する調査を実施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てご協力いただいた、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。

キーワード: 樽前火山, 無人ヘリコプター, 空中調査, 地磁気, 時間変化, 試料採取

Keywords: Tarumae volcano, unmanned helicopter, airborne surveillance, geomagnetic field, temporal change, material sampling

## 地表ソース型空中電磁法と空中磁気法によるトンネル地山の地質評価事例 Case study of geotechnical estimation by GREATTEM and a helicopter-borne magnetic survey over a tunnel construction site

岡崎 健治<sup>1\*</sup>, 伊東佳彦<sup>1</sup>, 茂木 透<sup>2</sup>, 橋本武志<sup>2</sup>, 山谷祐介<sup>3</sup>, 宇津木 充<sup>4</sup>, 伊藤久敏<sup>5</sup>, 海江田秀志<sup>5</sup>, 佃 十宏<sup>5</sup>, 結城洋一<sup>6</sup>, 城森 明<sup>7</sup>

Kenji Okazaki<sup>1\*</sup>, Yoshihiko Ito<sup>1</sup>, Toru Mogi<sup>2</sup>, Takeshi Hashimoto<sup>2</sup>, Yusuke Yamaya<sup>3</sup>, Mitsuru Utsugi<sup>4</sup>, Hisatoshi Ito<sup>5</sup>, Hideshi Kaieda<sup>5</sup>, Kazuhiro Tsukuda<sup>5</sup>, Youichi Yuuki<sup>6</sup>, Akira Jomori<sup>7</sup>

<sup>1</sup>(独)土木研究所寒地土木研究所, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>産業技術総合研究所, <sup>4</sup>京都大学, <sup>5</sup>電力中央研究所, <sup>6</sup>応用地質(株), <sup>7</sup>ネオサイエンス(株)

<sup>1</sup>CERI, PWRI, <sup>2</sup>Hokkaido Univ., <sup>3</sup>AIST, <sup>4</sup>Kyoto Univ., <sup>5</sup>CRIEPI, <sup>6</sup>OYO Co. Ltd., <sup>7</sup>Neoscience Co. Ltd.

### 1. はじめに

近年、広域での調査やアクセスが難しい山岳地帯などでの調査において、ヘリコプターを利用した物理探査手法が適用され、その地下地質構造の推定や火山活動のモニタリングなどに活用されている。一方、トンネルの地質調査では、通常、地質踏査、屈折法弾性波探査およびボーリング調査の結果から、トンネル設計に向けた地質モデルを構築するが、実際の施工時には、地山深部のより精度が高い多くの情報が不可欠である。本調査では、北海道北部のトンネル建設計画箇所において、ヘリコプターを利用した地表ソース型空中電磁法ならびに空中磁気法を実施し、既存の地質調査結果との対応を整理することで、本手法の土木地質調査への適用性について検討したので、その事例を報告する。

### 2. 調査概要

調査は、延長 2.7km、最大土被り厚さ 380m の国道トンネルを対象とした。トンネル箇所の地質は、堆積岩類とこれに進入する蛇紋岩からなる。蛇紋岩は、トンネル中央部の南北に伸びる尾根に分布し、その両側に堆積岩類が分布する。蛇紋岩は、一般にトンネル掘削にともなう緩みや内空変位量の増大など、施工では問題の多い地質である。このような蛇紋岩の地山深部での分布状況を評価する手法として、地表ソース型空中電磁法を選定して実施した。あわせて、蛇紋岩は、強い磁性を有することから、堆積岩類との分布の違いを明確にするため、空中磁気法も同時に行った。本調査では、これらの探査の結果とトンネル事業者が実施した比抵抗法 2 次元探査、CSAMT 法、地表での磁気探査、ボーリング調査、電気検層およびコアの比抵抗測定の結果との対応を整理し、トンネル施工時における留意点を抽出することで、本手法のトンネル地質調査への適用性について検討した。

### 3. 調査結果

地表ソース型空中電磁法の結果、比抵抗分布は、表層～深度 100m 程度において相対的に高く、それ以深では相対的に低いことを確認した。比抵抗法 2 次元探査、CSAMT 法および電気検層の結果では、浅部で相対的に高く、深部で低い傾向にあり、地表ソース型空中電磁法の結果は、これらの従来の手法による結果と同様な傾向を示すことを確認した。また、地表ソース型空中電磁法の結果、トンネル掘削位置において、比抵抗のコントラスト(比抵抗が高～低と混在する箇所、比抵抗が変化する箇所など)を抽出した。ここで、トンネル中央部などで実施したボーリング調査では、塊状～角礫状を主体とする蛇紋岩、葉片状を主体とする蛇紋岩を確認している。また、それらのコアの比抵抗は、前者で相対的に高く、後者で相対的に低い。このため、トンネル掘削位置における比抵抗のコントラストは、形態の異なる岩石の分布に対応していると評価した。また、このような箇所におけるトンネル掘削では、断層、破砕帯、地質の変化にともなう偏圧、湧水の発生などが想定され、トンネル施工時には、より留意が必要といえる。

次に、空中磁気法の結果、磁力強度(ヘリ飛行時の最高高度付近である標高 900 m に上方接続)の分布は、トンネル地山の両側で低く、中央部に向かうに従い高くなる傾向を確認した。このことから、トンネル地山の中央部では、高く磁化した地質体が存在することを推定できる。ここで、磁力強度の高い値が認められる箇所は、地質図幅やこれまでの地質調査結果に示される蛇紋岩の存在する位置と概ね一致している。また、林道、沢およびトンネル計画測線に沿って、携帯型オーバーハウザー磁力計により地磁気全磁力を測定した結果、トンネル地山の中央付近で、直行方向に高い磁力強度の分布が確認できたことから、これらの箇所は、蛇紋岩の分布に対応すると判断した。ただし、磁力強度の分布は、深部における磁力の積算値を平面的に示していることから、磁力強度だけによる深度方向の地層の分布や構造についての評価は難しいといえる。

以上のことから、地表ソース型空中電磁法と空中磁気法の結果をあわせて評価することで、トンネルの施工時に発生が想定される地質工学的な問題の整理が可能といえる。また、このような一度の探査飛行で同時に比抵抗と磁力強度の物理量を取得できる本手法は、トンネルの地質調査において有効であり、適用は十分可能であるといえる。今後は、実際のトンネルの掘削で判明する地質性状との対応について検証を進めたい。

キーワード: 地表ソース型空中電磁法, 空中磁気法, ヘリコプター, トンネル, 地質調査

Keywords: GREATTEM, HMS, Helicopter, Tunnel, Geological investigation

## 東北地方 2011 年津波被災地における空中電磁探査

### Helicopter-borne EM survey over coastal areas inundated by the tsunami of March 11, 2011, in northeast Japan

大熊 茂雄<sup>1\*</sup>, 上田 匠<sup>1</sup>, 光畑 裕司<sup>1</sup>, 神宮司 元治<sup>1</sup>, 内田 利弘<sup>1</sup>

Shigeo Okuma<sup>1\*</sup>, Takumi Ueda<sup>1</sup>, Yuji Mitsuhata<sup>1</sup>, Motoharu Jinguji<sup>1</sup>, Toshihiro Uchida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

2012年6月に2011年津波被災地(仙台平野南部と福島県松川浦地域)における塩水の地下への浸透状況およびその下位の淡水性地下水の分布を把握することを目的として、ヘリコプターによる空中電磁探査を実施した。本調査は、2004年スマトラ沖地震の後にBGR(ドイツ連邦地球科学・天然資源研究所)がスマトラ島で行った同様の調査に次ぐ、世界でも二例目の調査である。

調査では、100m間隔で設定した東西方向の測線上で5周波数(340 Hz, 1.5, 6.9, 31, 140 kHz)の水平コイルと1周波数(3.3 kHz)の鉛直コイルで磁場を送受信し、電磁応答データを測定した。測定データを処理し、見掛け比抵抗データを周波数毎に作成した。

最も高い周波数(140 kHz)の見掛け比抵抗分布は地下の極浅部(~5m程度)の分布を示すもので、仙台平野南部の海岸線付近では4.0 ohm・m以下の非常に低い比抵抗を示し、塩水くさびのためと考えられる。海岸線から西方に数kmの内陸に渡る地域では、20ohm・m程度以下の低比抵抗層が広く分布し、その分布範囲の陸側境界は津波浸水域の末端部に良く一致する。これは、塩水(比抵抗0.25 ohm・m)の浸水が土壌や浅部地質(通常は数10 ohm・m以上)の比抵抗を低下させているものと考えられる。松川浦地域においても、同様であるが、湖岸線より内陸に仙台平野南部より広い範囲で4.0 ohm・m以下の非常に低い比抵抗を示す。これは、当該地域が仙台平野南部地域より海水が長く滞留していたためと考えられる。

また、仙台平野南部地域の地下20~30m以深では、2.0~11.0 ohm・mの低比抵抗層が海岸線付近から内陸にむけて伸びており、農業用排水路など所々では地下浅部でも顕著であり、塩水くさびや化石塩水に対応すると考えられる。これらの低比抵抗層に囲まれた相対的な高比抵抗層も分布し、淡水性地下水の存在を示唆する可能性がある。

当該地域では、空中電磁探査による見掛け比抵抗分布の妥当性の検討のため、またより深部の比抵抗構造を明らかにするため、地上で電磁探査と高密度電気探査を実施している。今後はこれらのデータと比較検討を行うとともに、ボーリングを実施し、空中電磁探査の結果明らかとなった低比抵抗層に囲まれた相対的な高比抵抗層が、淡水性地下水の存在によるものか等を確認する予定である。

キーワード: 空中電磁探査, 比抵抗, 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 地下水環境, 塩害

Keywords: airborne EM survey, resistivity, the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, tsunami, groundwater environment, salt damage

## Three-dimensional electromagnetic modeling of topographic effects on electromagnetic field induction by GREATEM surveys Three-dimensional electromagnetic modeling of topographic effects on electromagnetic field induction by GREATEM surveys

Sabry Abd Allah<sup>1\*</sup>, Toru Mogi<sup>1</sup>, Elena Fomenko<sup>2</sup>  
Sabry Abd Allah<sup>1\*</sup>, Toru Mogi<sup>1</sup>, Elena Fomenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ISV, Faculty of science- Hokkaido university, <sup>2</sup>Moscow state university, Russia

<sup>1</sup>ISV, Faculty of science- Hokkaido university, <sup>2</sup>Moscow state university, Russia

A grounded electrical source airborne transient electromagnetics (GREATEM) survey was performed at Kujukuri beach in central Japan, where an alluvial plain is dominated by sedimentary rocks and shallow water. A reliable resistivity structure was obtained at a depth range of 300-350 m both on land and offshore, in areas where low-resistivity structures are dominant (Ito et al., 2011). Another GREATEM survey was performed at northwestern Awaji Island, where granitic rocks crop out onshore. Underground resistivity structures at depths of 1 km onshore and 500 m offshore were revealed by this survey. The absolute resistivity found onshore was much lower than existing results. To circumvent this problem and understand the reason for the inaccurate results, we used a three-dimensional (3D) electromagnetic (EM) modeling scheme based on the staggered-grid finite-difference (FD) method (Fomenko and Mogi, 2002) to study the effects of oceanic saltwater (or the sea effect) on EM field induction when conducting GREATEM surveys at coastal areas with topographic features. Topography in our model was represented as an anomaly ( $1\text{E}-8$  S/m) in the air layer. We selected a 3D-topographic model consisting of a topographic feature ( $1\text{E}-2$  S/m) placed on top of a uniform half-space earth medium ( $1\text{E}-3$  S/m). The resistivity contrast was  $1\text{E}+6$  times between the air and the topography. In the topographic area we used X: 50 x Y: 50 x Z: 25 m cells. Outside the topographic area, irregular cells were used. The total number of nodes was  $52 \times 38 \times 32 = 63232$  cells. The computation was done for four topographic slope angles (90, 45, 26.5 and 14 Degree). A horizontal electric dipole source was directed along the y-axis situated at the origin ( $x = -1500$ )

The most significant effect of topography on EM field induction occurs at low flight altitudes and gradually decreases with increasing the flight altitude. The topographic effect of steep slope angles (e.g., 90 and 45 Degree) is higher than for gentler slopes (e.g., 26.5 and 14 Degree). Furthermore, the area of the topographic feature closer to the dipole source has a larger effect on EM field induction for several meters.

キーワード: Airborne EM, coast effect, Topography effect, 3D resistivity modeling, GREATEM surveys

Keywords: Airborne EM, coast effect, Topography effect, 3D resistivity modeling, GREATEM surveys



## 水平加速度補正のための厳密解とその使用法 Precise formula for horizontal acceleration correction and method for its effective use

楠本 成寿<sup>1\*</sup>, 瀬川 爾朗<sup>2</sup>  
Shigekazu Kusumoto<sup>1\*</sup>, Jiro Segawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部 (理学), <sup>2</sup> 東京海洋大学

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama, <sup>2</sup>Tokyo University of Marine Science and Technology

We provide a precise formula for horizontal acceleration correction and discuss a method for its effective use in airborne gravity measurements using the SEGAWA airborne (helicopter-borne) gravimeter.

In order to determine a gravity anomaly from the observed acceleration data using a gravimeter, it is necessary to perform vertical acceleration correction, Eotvos correction, normal gravity correction, free-air reduction, and horizontal acceleration correction. These corrections (with the exception of the vertical acceleration correction and horizontal acceleration correction) each have precise individual formulas. The precise formula for the horizontal acceleration correction has not yet been presented because it is considered to be an optional correction. In fact, horizontal acceleration correction is unnecessary if the gravimeter sensor remains vertical at all times.

In previous horizontal acceleration corrections, the equations that give the component acceleration vectors acting on the gravimeter with a platform off-level angle and that give the off-level angle of the platform were linearized. Of course, the linearization of the equations is a valid technique for simplifying calculations and for finding the essence of the problem. In the present horizontal acceleration correction, the linearized equations are normally used because the off-level angle is generally kept very small using a gyroscope. However, this equation cannot deal effectively with sudden large acceleration changes caused by turning which changes the measurement profile.

In this study, we first provide the precise formula mentioned above for horizontal acceleration correction without linearization and evaluate the effects of the nonlinear terms in a new solution. In addition, we suggest a method for estimating the true values of the gravity and the off-level angle by successive iteration because our equation requires the true values to estimate the correction amount by deriving the true gravity value and the off-level angle.

キーワード: 航空重力測定, 水平加速度補正

Keywords: Airborne gravity measurement, Horizontal acceleration correction, Precise formula for horizontal acceleration correction

## 観測データ信号と外的信号の統計的な独立性を用いた重力異常データからのノイズ除去についての基礎的検討 Denoise of Severely Contaminated Gravity Anomaly Data Using Statistical Independence of Source and Perturbation Signals

本田 利器<sup>1\*</sup>, プレム カトリ<sup>1</sup>, 盛川仁<sup>2</sup>  
Riki Honda<sup>1\*</sup>, Prem Prakash Khatri<sup>1</sup>, Hitoshi Morikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup> Univ of Tokyo, <sup>2</sup> Tokyo Institute of Technology

### 1. Introduction

Gravity anomaly, which is caused by the spatial distribution of stiff (heavy) layer, is used for the estimation of ground structure. For the improvement of usability and applicability, Morikawa et al.[1] has been working on the development of compact gravity observation system using force-balance (FB) accelerometer. It has a difficulty that the observed data is severely contaminated by various kinds of disturbances such as tilting motion of the carrier vessel. This report presents a scheme to extract the gravity anomaly signal from the noise-contaminated observed data, by exploiting the statistical independent property of gravity anomaly data and other perturbation signals. Although the final objective is to measure the gravity anomaly by using the air plane or some other aviation carrier, as a basic study of the research, this paper works on the results obtained by the ship in the Toyama Bay.

### 2. Methodology

As a scheme of considering independence of signals of source and other signals, blind source separation (BSS) techniques are used. Second Order Blind Identification method (SOBI)[2] separates signals from different sources by exploiting the statistical property of data. It separates the target source by assuming that source and unwanted data are un-correlated at various time-lags. Similar scheme is also implemented with the Independent Component Analysis (ICA), which separates the sources by maximizing the independence of linearly transformed observed signals. The method is referred to as ThinICA[3].

### 3. Data Observation

The presented schemes are applied to the data obtained by the field survey which was conducted at The Toyama Bay area, Japan. The carrier vessel was a middle size ship of 55 long. As the reference for comparison, we use the data generated based on the reliable data measured by AIST (National Organization of Advanced Industrial Science and Technology) by considering the Eotvos effect due to the location of the carrier and the free air anomaly, etc.

### 4. Results

It was found that application of low pass filtering (LPF) is efficient as a pre-process of observed data. Both SOBI and ICA worked well after the data is processed by low pass filter (LPF). As for the applicability of devices, combination of VSE data and vertical component of accelerometer Titan (Taurus-Z) were found to be suitable for our data set. It was also discussed that the motion of the carrier vessel influences the performance of noise removing algorithm. Under certain conditions, the proposed method was not able to salvage the gravity anomaly data from the observed data with the accuracy sufficient for the purpose of identification of gravity anomaly distribution. It was difficult, for example, to salvage the gravity data from the data obtained during the ship is stopped. Comparison of the LPFed observed data and the data extracted by the presented method using SOBI and ThinICA show that they are at acceptable level for the purpose of subsurface modeling. It would require, however, improvement for the application for the data obtained by the aviation carrier devices such as unmanned helicopter.

### 5. Conclusion

The noise removal method for the highly contaminated data to salvage the target data is discussed. The method is applied to the observed data from Toyama. It requires the condition for the mobility of carrier vessel. For the purpose of data obtained using the aviation device, considerable improvement of performance is required.

### REFERENCES

- [1] Matsuo, H. et al. Proc. 31st JSCE Earthq Engng Sympo, pp. Paper No. 17052, 11 2011. (in Japanese).
- [2] Belouchrani, A. et al. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 45, pp. 434-444, 1997.
- [3] Cruces, S. and Cichocki, A. ICA2003, 4 2003.

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



STT55-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月22日 18:15-19:30

キーワード: 重力異常, 独立成分分析

Keywords: Gravity Anomaly, Independent Component Analysis

## 直交座標系における固有関数展開を用いた空中磁気データの正則化 Regularization of the aeromagnetic data using eigen-function expansion in Cartesian coordinate system

宇津木 充<sup>1\*</sup>Mitsuru Utsugi<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科<sup>1</sup> Kyoto Univ.

地殻中の岩石磁化分布による磁気異常を計測する有力な手法の一つに空中磁気観測がある。これは磁力計を飛行機などに搭載し空中から地磁気分布を計測するものである。しかしこうした観測では飛行高度の調整が難しいため得られるデータは非平面上のデータとなる。さらに近年、特に火山における観測では、詳細な磁気異常分布を計測する為ヘリコプターを用い低速で地形に沿った飛行を行う方法が多く用いられている。しかしこうした観測では、観測面の曲率により磁気異常分布が歪められる為飛行高度の補正を行う必要がある。

磁場や重力などのポテンシャルデータは、ある面上で稠密な観測が行われた場合そのデータを用いその面周辺の3次元的な場を推定する事が出来る。観測面上方の場の推定を上方接続、下方の推定を下方接続という。こうした方法を用い、地形に沿った等高度面上などの磁気異常分布を推定する事が行われている。非平面で得られたデータの上方・下方接続には等価磁気ソースを用いたインバージョンで場を推定する方法が一般に用いられる。しかしこの方法の問題点は、インバージョンにより解くべき観測方程式が疎行列で表されるため計算コストが大きくなるという点にある。この点を改良すべく、本研究ではラプラス方程式の固有関数を用いたデータ正則化手法を提案する。この方法では、観測方程式が疎行列で表し得るので計算コストの軽減が期待できる。

一般に、ソースを含まない領域中でポテンシャルはラプラス方程式を満足するが、その解は領域の境界で与えられる境界条件により決まる。本研究では、領域  $V = \{(x,y,z): -L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq L_y, z_0 \leq z \leq z_1\}$  を考え、その境界で以下の条件を課した。

$$(x = \pm L_x, y, z) = 0, \quad (x, y = \pm L_y, z) = 0, \quad (x, y, z = z_0) = 0$$

一般に地磁気は距離の減衰の効果が大きいので、観測対象領域内にソースを持つ磁気異常の振幅は十分遠方で殆ど0となる。上の条件はこの事を考慮している。

ラプラス方程式を変数分離し、上の境界条件を課す事で基本解が得られる。その場合、解は  $x$ - $y$  平面において2次元ラプラス方程式の固有関数となり、これに  $z$  の exponential を掛けたものが3次元の基本解となる。またこの基本解は、 $V$  内での体積積分で表される内積について直交関係を持つ。こうして領域  $V$  内のポテンシャル分布を基本解の重ね合わせで表現する事が出来、さらに直交性から  $V$  内の体積積分でその展開係数を求める事が出来る。この関係のある観測面で得られた稠密な磁場データに適用する事で、展開係数を見積もり  $V$  内の3次元的な磁場分布を推定する事が出来る。この操作は、観測データから展開係数を逆問題で解く事に帰着される。

この計算方法の利点は、基本解が固有値  $\times z$  の exponential で表されるので固有関数の次数が高くなると十分速く減衰する為、適当な閾値で打ち切る事で解くべき観測方程式が疎行列で表現される事にある。

但し上記の方法だけでは、データにノイズが含まれている場合それが磁場分布の推定結果にそのまま反映されてしまう。この為本研究では、展開係数が波数空間上で滑らかな分布を持つと仮定し波数空間における平滑化拘束条件を付与する事でノイズリダクションのスキームを与えた。この際、拘束条件の重み係数の選択に任意性が残るので赤池ベイズ情報量基準 (ABIC) を用い最適な係数 (ハイパーパラメータ) を選択した。ABIC は観測方程式を直接法で解かなければならないが、先に述べたように観測方程式が疎行列で表現されるため現実的な時間で解を求める事が出来る。

本発表ではこの計算方法の理論計算例、実観測データに適用した例を紹介し、その有効性について議論する。

キーワード: 空中磁気観測, 上方接続, 下方接続, データ正則化

Keywords: aeromagnetic observation, upward continuation, downward continuation, regularization

## 空中磁気探査による雲仙岳の磁化構造解析 Analysis of the magnetization intensity in Mt. Unzen using an air-borne magnetic survey data

結城 洋一<sup>1\*</sup>, 黒木 瑞昭<sup>1</sup>, 中山 英二<sup>1</sup>  
Youichi Yuuki<sup>1\*</sup>, Mizuaki Kuroki<sup>1</sup>, Eiji Nakayama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup> OYO Corporation

国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所が発注した「平成24年度空中物理探査解析外業務」において、今後の防災対策の基礎資料とするために、雲仙岳溶岩ドーム及びその周辺の空中物理探査及び解析、航空レーザ測量を実施した。

空中物理探査は空中電磁探査、空中磁気探査を実施したが、空中磁気探査結果について三次元インバージョン解析を行い、地表から深度1000m程度までの磁化構造を求めた。また、1999年に長崎県島原振興局が実施した空中磁気探査結果との変化を見るために磁気異常の差分を求めた。さらに、差分結果に対して三次元インバージョンを行い、地下の磁化構造の変化を三次元的に捉えた。

本発表では、2時期に実施した空中磁気探査結果から求めた磁化構造の変化から、雲仙岳の地表面及び深部の地下構造を推定した結果を発表する。

キーワード: 空中磁気探査, 空中物理探査, 三次元インバージョン, 雲仙岳, 溶岩ドーム, 斜面崩壊

Keywords: Airborne magnetic survey, Airborne geophysics, Three-dimensional inversion, Mt. Unzen, Lava dome, slope failure

## 姫川流域における深層崩壊の発生の恐れのある斜面に対する空中電磁探査 The airborne electromagnetic survey to the slope with high risk of deep catastrophic landslide in the Himekawa basin

一色 弘充<sup>1\*</sup>, 森田 耕司<sup>1</sup>, 石塚 忠範<sup>1</sup>, 判田 乾一<sup>2</sup>, 石川 一栄<sup>2</sup>, 宮澤 和久<sup>2</sup>, 伊藤 哲雄<sup>3</sup>, 滝川 義治<sup>3</sup>  
Hiromitsu ISSHIKI<sup>1\*</sup>, MORITA, Kouji<sup>1</sup>, ISHIDUKA, Tadanori<sup>1</sup>, HANDA, Kenichi<sup>2</sup>, ISHIKAWA, Kazuei<sup>2</sup>, MIYAZAWA, Kazuhisa<sup>2</sup>, ITOH, Tetsuo<sup>3</sup>, TAKIGAWA, Yoshiharu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ, <sup>2</sup> 国土交通省北陸地方整備局 松本砂防事務所, <sup>3</sup> 株式会社キタック  
<sup>1</sup>Public Works Research Institute, <sup>2</sup>MLIT Matsumoto Sabo Office, <sup>3</sup>Kitac Corporation

姫川流域では、稗田山の崩壊をはじめとして、過去に大規模な深層崩壊が多数生じており、多くの地すべりや大規模崩壊跡地が分布している地域である。国土交通省では、「深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル(案)」に基づき調査を行い、渓流レベル評価結果を公表しているが、姫川流域では相対的に危険度が高い渓流が抽出されている。

さらに深層崩壊の発生の恐れのある斜面の絞り込みに対して、空中写真判読や数値標高モデルから抽出する手法や、レーザープロファイラー地形図を用いた評価手法などが研究されているが、広範囲に地下構造を取得し深層崩壊の深度方向の情報を得るためには空中電磁探査を用いた評価手法が有効である。

本研究では、姫川流域のうち、特に深層崩壊の恐れの高い浦川上流域および大所川中流域を対象として空中電磁探査を行い、三次元比抵抗分布の把握を行った。そして、ある特定の斜面に対してボーリング調査や孔内試験を行い、空中電磁探査結果による比抵抗分布図と比較することで、深層崩壊の恐れのある層厚の抽出手法について検証した。

キーワード: 深層崩壊, 空中電磁探査, 比抵抗, 微地形, 飽和度

Keywords: deep catastrophic landslide, airborne electromagnetic survey, resistibility, microtopography, saturation