

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04967

研究課題名(和文) 小型無人機を用いた繰り返し空中磁気観測による火山活動モニタリング

研究課題名(英文) Monitoring of the volcanic activity by repeated aeromagnetic observation using drone.

研究代表者

宇津木 充 (Utsugi, Mitsuru)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：10372559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：2019年度に九重火山に於いてドローンを用いた空中磁気観測を行った。この観測データと、2004年に観測された友人ヘリコプターを用いた空中磁気観測データの比較により、2004年-2019年の間に、九重火山の活動に関係して生じたと考えられる磁場(全磁力)時間変化を検出した。この為に、高度の異なる繰り返し空中磁気観測データから磁場の時間変化を検出する為の計算スキームを構築すると共に、スパースインバージョンの手法を用いて、検出された時間変化のソース位置を求めた。検出された時間変化の振幅、パターンは、京都大学や気象庁などが行っている地上磁場観測から得られた時間変化の結果と調和的であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無人機を用いた繰り返し観測から、磁場時間変化を検出する為の計算方法と、その結果得られた磁場時間変化の変化源位置を求める為の計算スキームを構築した。この方法は他の火山地域においても適用可能で、且つ飛行経路や高度が異なるデータにも適用可能な汎用的手法である。磁場変化から推定される地下温度状態の変化は火山活動の推移をモニタリングするための有力な手法の一つであるが、本研究により無人機を用い遠隔からの観測で磁場の時間変化を検出することが可能となったことで、そうした情報を火山活動が活発化した後も継続して取得できるようになった事は、今後の火山防災の観点からも重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：Aeromagnetic observations using a drone were made at Kuju volcano in 2019. By comparing this observation data with the aeromagnetic observation data using a friend's helicopter observed in 2004, we detected temporal changes in the magnetic field (total force) between 2004 and 2019, which may have been caused by the activity of Kokonoe Volcano. For this purpose, we developed a computational scheme for detecting temporal changes in the magnetic field from repeated aeromagnetic observation data at different altitudes and obtained the source location of the detected temporal changes using the sparse inversion technique. The amplitude and pattern of the detected time variation were consistent with the results of ground-based magnetic field observations by Kyoto University and the Japan Meteorological Agency, and the position of the center of gravity of the source of the variation was also consistent with the results obtained from previous ground-based observations.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：火山磁気変化 熱消磁 繰り返し空中磁気観測 磁場時間変化 スパース磁気インバージョン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山における空中磁気観測は、従来有人ヘリコプターなどに磁力計を曳航させる方法が用いられて来たが、全く同じ航路を飛行する事は不可能であったため時間変化を議論することが難しかった。また仮に複数回の観測でほぼ同じ地点を飛行できたとしても、飛行速度が速いのでその点で数個程度の磁場データしか取得できず、時間変化を議論する為に十分な数のデータを取得することが出来なかった。一方、近年ドローンの技術開発が目覚ましく進み、従来では考えられなかった精度で飛行させることが可能となっている。このため GPS による自動飛行で、低速度且つ安定して磁気異常観測が可能になって来た。そこで本研究では、ドローンを用いた空中磁気観測で火山活動に起因する磁場時間変化を捉えるための観測・解析技術の開発を試みた。

2. 研究の目的

ドローンを用いた繰り返し空中磁気観測データから、火山活動起因の磁場時間変化を捉えるためには、観測点位置、高度の違いを補正して比較を行わなければならない。この方法には Nakatsuka et al. (2009) による拡張交点コントロール法が利用可能である。本研究では、この方法を更に発展させ、Nakatsuka and Okuma (2006) の上方接続の連立方程式を構築し、背景磁気異常項と時間変化項の分離を行い時間変化検出を試みる。これらの項の分離の際、解像度向上のために L1 ノルムを用いたペナルティを与えた最適化問題を設定した。その解法として本研究では確率的勾配法と F0B0S (Forward Backward Splitting) を用いた。この方法は、所与のペナルティ付き最適化問題について、ペナルティなしの最小化を行ったのちにその解をペナルティで表される実行可能領域に投影させることを繰り返し行う方法である。こうしたフレームワークの上で、ドローンなどで計測される高度や位置の違う二つの空中磁気データから、面的な磁場時間変化を検出する方法を開発する事を研究目的とした。またこうして開発された方法を、九重火山の 2004 年及び 2019 年のデータに適用し、磁場時間変化の解析を行った。

3. 研究の方法

阿蘇火山における火山活動の活発化により、当初予定していた阿蘇火山における観測研究に代わり、九重火山におけるドローン観測の結果を用いて磁場時間変化検出を試み、その計算スキームを提案した。

九重火山では、1995 年の水蒸気爆発以来磁場連続及び繰り返し観測点が行われ、九重硫黄山西側の地下浅部(数百 m) にソースを持つ顕著な磁場時間変化が観測されている。九重火山では 2004 年 12 月に硫黄山周辺部において高密度空中磁気観測が京都大学により実施された。この観測では、有人ヘリコプターに磁力計を曳航させ硫黄山周辺の 2km x 2km の領域で上空(対地高度およそ 150m) から磁気異常(磁場全磁力)を観測した。2004 年の観測時からの磁場時間変化を検出する為に 2019 年 10 月に硫黄山周辺でドローンを用いた空中磁気観測が実施された。なお、この観測は文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一環として行われた。本観測では(有)テラテクニカ社のドローン空中磁気測定システム GSMP35U-DR を用いて全磁力の測定を行った。この観測システムを用い硫黄山周辺の東西約 1km、南北約 2km の領域において、海拔高度 1750m の一定高度で空中磁気観測を行った。これらのデータに対し

Nakatsuka and Okuma (2006) の拡張交点コントロール法を応用した解析方法を提案し、九重火山の2004年-2019年の期間の磁場時間変化の検出を試みた。

4. 研究成果

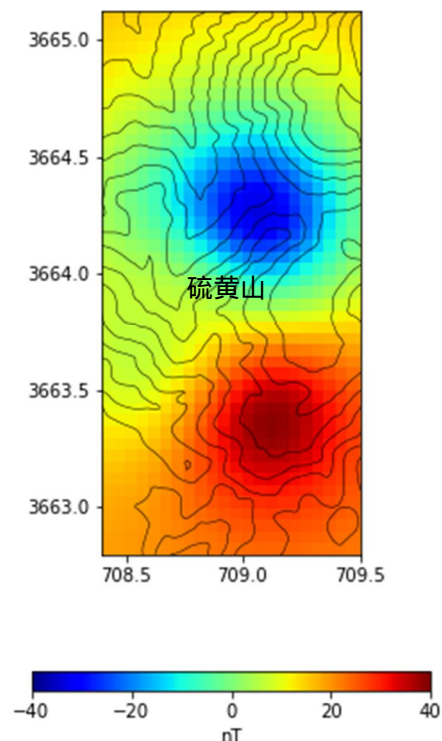
2004年と2019年の空中磁気データから磁場時間変化を検出するためNakatsuka et al. (2009)による交点コントロール手法をベースとした解析を行った。この方法では、観測された2つの期間の磁気異常を、この期間で不変の磁気異常(背景磁気異常項)と、2019年データのみに含まれる時間変化項に分離し、両期間のデータ全てを用いた上方接続についての連立方程式を構築して解くことを試みた。

ここで航空機、ドローンに搭載した磁力計は高サンプリングで取得しているため、観測データ数は2004年データで約30,000点、2019年で約40,000点に上る。しかしこれらのデータをすべて使って上記連立方程式を解くことは、要求されるメモリ量の関係から不可能となる。そこで空間的な平均を取り、それを入力データとして計算を行ったが、その結果、平均の取り方により計算結果に差異が生じる事が分かった。これは、特に磁気異常の勾配が大きい領域において平均の取り方によりエイリアスが生じる事が原因と考えられる。こうした事を回避するため、平均を取らず直接データを入力とした。この際、確率的勾配法という手法を用いた。この方法では、データの一部を復元抽出でランダムにサンプリングし、そのデータについて上方接続の方程式を構築してモデル(等価磁気ソースの強度分布)を更新する。このプロセスを解が収束するまで繰り返して計算を行った。

背景の磁気異常と時間変化の分離を行う際、適切な条件を与えなければ得られる時間変化に、特に短波長の擾乱が含まれてしまう事が分かった。この為本研究では、背景磁気異常、時間変化の両項の相関が低くなる拘束を与えた。具体的には、背景磁気異常と時間変化項を表す等価ソース強度ベクトルの内積の絶対値をペナルティに与えた。一般的に、背景磁気異常と時間変化は、磁場分布のパターンが独立であると考えられる。背景磁気異常は、ターゲットエリア地下の磁化分布に依るのに対し、火山活動起因の時間変化は、その磁化の(主に温度変化に依る)強度変化によって作られる。従って両者の磁場ソースの形状は独立であり、したがってそれによりつくられる磁場パターンが独立となる事が予想される。

以上の計算手順で時間変化を検出する計算手順を構築した。その具体的な方法として FOBOS (Forward Backward Splitting; Duchi and Singer, 2009) という計算方法を用いた。本研究で導入した無相関を要請するペナルティは、ペナルティを構成する各項が複数の解ベクトル要素を含むため、通常の L1 ノルム正則の解法を用いることが出来ない。

図1. 上方接続により推定された海拔1750m等高度面における磁場時間変化



そこでこうした複雑なペナルティを与えた最適化問題を解くために FOBOS を導入した。この方法では、ペナルティなしの最小化を行ったのちにその解をペナルティで表される実行可能領域に投影させることを繰り返し行う方法で、確率的勾配法に正則化を行う際によく用いられる方法である。この磁場時間変化の解析手法を開発し(宇津木ほか,2021)、九重火山の2004年及び2019年のデータを用いて磁場時間変化の解析を行った。この結果硫黄山上空で地上観測の結果と調和的で、かつ短波長な擾乱を除いた時間変化が検出された(図1)。この解析結果を元に、時間変化の原因となるソースの位置、形状を磁場三次元インバージョンの手法(Utsugi, 2019)を用いて見積もった。その結果、硫黄山の地下400m付近に重心を持つ領域で磁化増加が起こったことが示された(図2)。これは橋本ほか(2002)が地上観測結果から見積もったソース位置と調和的である。

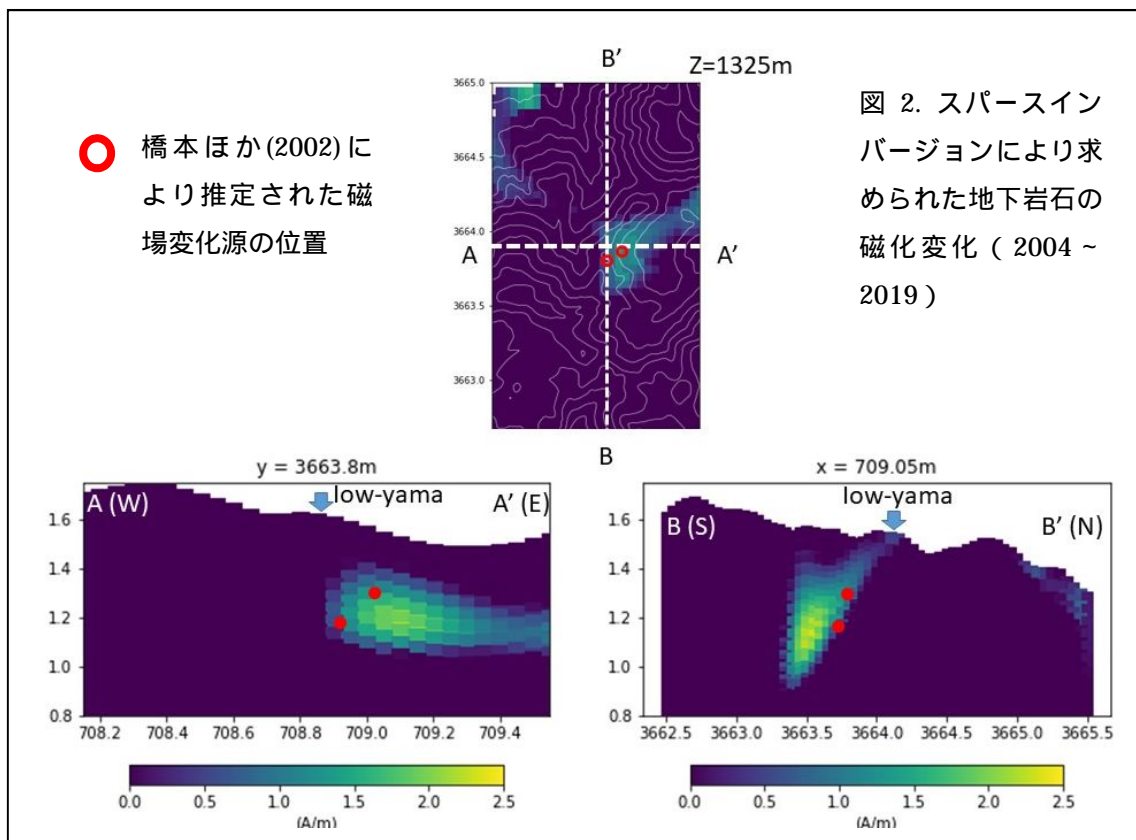


図 2. スパースインバージョンにより求められた地下岩石の磁化変化(2004~2019)

参考文献：

- ・橋本武志, 宇津木充, 坂中伸也, 田中良和, 2002, 九重硫黄山の熱放出過程と地磁気変化, 京都大学防災研究所, vol.45B, pp.617-625.
- ・Nakatsuka, T., Utsugi, M., Okuma, S., Tanaka, Y. and Hashimoto, T., 2009, Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: An application of the generalized mis-tie control method. *Tectonophys.*, 478, 3-188.
- ・Duchi, J. and Singer, Y., 2009, efficient online and batch learning using forward backward splitting, *Journal of Machine Learning Research*, vol.10, pp.2899-2934.
- ・Utsugi, M., 2019, 3-D inversion of magnetic data based on the L1-L2 norm regularization, *Earth, Planets and Space*, vol.71, article number:73.
- ・宇津木充, 橋本武志, 多田訓子, 太田豊宣, 吉川慎, 井上寛之, 2021, ドローンを用いた九重火山における繰り返し空中磁気観測により見積もられた磁場時間変化について, SGEPS2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Utsugi Mitsuru	4. 巻 228
2. 論文標題 Magnetic inversion to recover the subsurface block structures based on L1 norm and total variation regularization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 510 ~ 537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggab355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koyama Takao, Kanda Wataru, Utsugi Mitsuru, Kaneko Takayuki, Ohminato Takao, Watanabe Atsushi, Tsuji Hiroshi, Nishimoto Taro, Kuvshinov Alexey, Honda Yoshiaki	4. 巻 73
2. 論文標題 Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01466-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shingubara Ryo, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 412
2. 論文標題 Development of a drone-borne volcanic plume sampler	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107197 ~ 107197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsushima Nobuo, Utsugi Mitsuru, Takakura Shinichi, Yamasaki Tadashi, Hata Maki, Hashimoto Takeshi, Uyeshima Makoto	4. 巻 72
2. 論文標題 Magmatic?hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01180-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shingubara Ryo, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Nakagawa Fumiko, Yoshikawa Shin, Utsugi Mitsuru, Yokoo Akihiko	4. 巻 412
2. 論文標題 Development of a drone-borne volcanic plume sampler	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107197 ~ 107197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Utsugi Mitsuru	4. 巻 71
2. 論文標題 3-D inversion of magnetic data based on the L1-L2 norm regularization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1052-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Wataru, Ishitsuka Kazuya, Mogi Toru, Utsugi Mitsuru	4. 巻 218
2. 論文標題 Surface displacements of Aso volcano after the 2016 Kumamoto earthquake based on SAR interferometry: implications for dynamic triggering of earthquake?volcano interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 755 ~ 761
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 宇津木充, 橋本武志, 多田訓子ほか
2. 発表標題 ドローンを用いた九重火山における繰り返し空中磁気観測により見積もられた磁場時間変化について
3. 学会等名 SGEPSS第150回総会及び講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuru Utsugi
2. 発表標題 A MAGNETIC INVERSION METHOD TO RECOVER THE SUBSURFACE BLOCK STRUCTURES BASED ON L1-TV1 REGULARIZATION
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇津木 充、橋本 武志、佐藤 彰紀、多田 訓子、太田 豊宣、吉川 慎、井上 寛之
2. 発表標題 ドローンをを用いた九重火山における繰り返し空中磁気観測
3. 学会等名 JpGU2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsuru Utsugi
2. 発表標題 The sparse inversion of the magnetic data to recover subsurface block structure.
3. 学会等名 JpGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsuru Utsugi
2. 発表標題 3D magnetic structure of Aso volcano
3. 学会等名 JpGU2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大倉 敬宏、吉川 慎、井上 寛之、横尾 亮彦、宇津木 充、ほか
2. 発表標題 阿蘇火山における水準測量2018
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇津木 充
2. 発表標題 阿蘇火山の3次元磁化構造解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南 拓人、宇津木 充、歌田 久司、鍵山 恒臣
2. 発表標題 ACTIVE観測結果から見る2014-2016年阿蘇山活動期の地下熱水系の変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松島 喜雄、宇津木 充、高倉 伸一、山崎 雅、畑 真紀、橋本 武志、上嶋 誠
2. 発表標題 広帯域MT法データから推定される阿蘇火山のマグマ供給系と浅部熱水系
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sabry Abdallah、Mitsuru Utsugi、Koki Aizawa、Makoto Uyeshima、Wataru Kanda、Takao Koyama
2. 発表標題 Three-dimensional electrical resistivity structure of kuju Volcano, Central Kyushu, Japan revealed by Magnetotelluric survey data
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南 拓人、宇津木 充、歌田 久司、鍵山 恒臣
2. 発表標題 ACTIVEから推定される2014-2015年阿蘇山マグマ噴火時における連続的な比抵抗構造時間変化モデル
3. 学会等名 SGEPSS2019年秋学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇津木 充
2. 発表標題 阿蘇火山中央火口丘の磁化構造について
3. 学会等名 SGEPSS2019年秋学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------