

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01992

研究課題名(和文)人工電磁周波数コム信号による火山の精密モニタリングシステムの構築

研究課題名(英文)Precise volcano monitoring by actively controlled electromagnetic signal using frequency comb

研究代表者

小川 康雄(Ogawa, Yasuo)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：10334525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：精密に制御された周波数コム信号を用いた電磁探査観測システムを構築し、その実証実験を草津白根火山で行った。火山の南麓に送信ダイポールを設置し、5km離れた山頂域に電磁受信機を配置した。送信源は、東西および南北方向の2つの電流ダイポールであり、周波数0.02Hzから4.6Hzの範囲で、対数等間隔になるような周波数列からなるサイン波を送信した。ファンクションジェネレータをGPS信号で同期することで、送信信号を長時間に渡って高精度で繰り返し送信できることが可能となった。また、受信信号から、微弱な繰り返し信号成分を取り出すために、ノイズの逆数を重みとして使用したスタッキング法が有効であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火山噴火予測研究、特に水蒸気噴火の予測のために、流体や蒸気の分布に敏感な比抵抗構造をモニタリングすることは重要である。既存の自然信号を用いる方法では、不安定な信号強度や人工ノイズの混入によって常時モニター観測が困難であった。本研究では、精密に制御された信号を繰り返し送信することによって、小さなパワーの送信源でありながら、革新的な精度で電磁気観測が可能になることを示している。同時に複数の送信源から送信することも可能であり、受信信号からテンソル情報を引き出すことができることもメリットである。この観測手法は、火山活動モニタリングの新たな方法として、今後防災研究にも大きく貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：An electromagnetic monitoring system using precisely controlled frequency comb signals was constructed and was demonstrated at Kusatsu-Shirane volcano. Two transmitter dipoles were installed at the southern foot of the volcano, and electromagnetic receivers were placed around the peak. The distances between the transmitters and receivers are approximately 5 km. The current dipoles were in two directions one in the east-west direction and the other in the north-south direction, transmitting sine waves consisting of frequency sets with logarithmic equal intervals in the frequency range of 0.02 Hz to 4.6 Hz. By synchronising the function generator with a 10 MHz GPS signal, the transmitted signal could be repeated with high accuracy over a long period of time. The stacking method using the inverse of the noise as weights was found to be effective in extracting weak repetitive signal components from the received signals, and the response functions could be easily obtained.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：火山モニタリング 人工電磁探査 周波数コム信号

## 1. 研究開始当初の背景

火山噴火予知研究には、マグマや熱水系の存在をイメージし、その時間的な変動を監視観測する事が重要である。比抵抗はマグマや熱水の空間的な分布に敏感な物理量であり、電磁気探査によって検知することができる。近年、自然信号を使った MT 法探査から火山体の 3 次元構造がイメージされるようになった。また、自然信号を使った MT 法探査から、火山活動に伴う比抵抗変動を捉える研究も行われ、マグマからの揮発性成分が熱水系に混入してイオン濃度が上昇することによって、比抵抗が変動する観測例が報告されている。しかしながら、これらの時間変動研究では、観測点の数が 1-2 点に限られており情報が限定的である。また自然信号を使うために信号強度が不安定であること、人工ノイズの混入によって高い S/N 比の観測データを確保することが難しい。また、特定の周波数あるいは特定の信号成分に関する議論にとどまっている。これらの現状の問題点を克服し、火山体の流体やマグマの 4 次元撮像をするためには、人工信号源を用いる高精度な 3 次元比抵抗構造モニタリングシステムの構築が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、精密に制御された周波数コム信号を用いた革新的な精度の電磁探査観測システムを構築し、その実証実験を草津白根火山で行うことである。学術的な独自性は、周波数コム信号を用いた信号システム（いわゆる ACROSS 信号 Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）を用いて、革新的な精度の観測システムを構築することにある。送信する信号は、特定の周波数  $f(i)$  ( $i=1, n$ ) のサイン波の重ね合わせからなり、周波数領域では  $n$  個の線スペクトルからなるコム信号である。このコム信号の合成波形を、繰り返し時間  $T$  秒で送信し続ける。繰り返し時間が  $T$  秒であれば、フーリエ変換によって得られる最小の周波数は  $1/T$  (Hz) であり、周波数分解能  $1/T$  (Hz) で信号を分解することができることになる。 $T$  を長くし、周波数分解能を高め、さらにフーリエ成分をスタッキングすることによって、微弱な信号をバックグラウンドノイズ（自然電磁場および人工ノイズ）から、革新的な精度で取り出すことができる。このためには長時間にわたって、安定したラインスペクトル系列信号を送信するシステムが必須である。

コム信号を用いることによって、送信信号を複数地点から同時送信することができることも本研究の特徴である。複数の送信点から、それぞれわずかに周波数が異なるコム信号を送信する。受信点では、複数の送信源による信号が混ざって受信されるが、フーリエ変換によって、複数の送信源による応答を分離することが可能になる。すなわち、複数送信源からの信号を混信することなく分離して受信することが可能となる。これによって複数送信源から同時送信し、複数受信点で“常時、同時に”受信できる電磁観測システムが構築される。このような観測システムはこれまで構築されたことがなく、新規性が極めて高い。

また火山学的新規性としては、電磁気探査を通じて、火山深部の流体の 2 つのキャップ構造をこれまでにない革新的な精度でモニター解明することが期待される。1 つは、地表下 200-300m までにある熱水系のキャップとなる不透水かつ低比抵抗を示す粘土層であり、もう一つが深度 2km より深部にある高塩濃度水とそれをシールするシリカキャップ層である。

特に後者の深度のモニタリングのためには、従来の自然電磁場観測では、周期 1-100 秒の信号を計測する。しかしこの周期帯では、(1) 自然信号の強度が太陽風の活動により変動すること、(2) この帯域は鉄道などからの人工ノイズの混入が強いこと、によって精密な連続モニタリングが困難となる。これを解決するには人工信号を用いることが不可欠である。

## 3. 研究の方法

草津白根火山の南麓に送信ダイポールを設置し、草津白根山湯釜火口周辺に電磁受信機を配置する観測システムを構築した。送受信間はおよそ 5km 離れている。まず送信源として、草津白根山南麓に東西 1083m および南北 394m の 2 つの電流ダイポールを設置した。長期にわたって安全に信号を送信するために、50m ごとに電柱を設置し、2 方向の電流ダイポール線を電柱に懸架した。また、電流電極の設置抵抗を低減させるために、それぞれの電流電極において、設地抵抗を低減させるために、10m x 10m のエリアを 2m 掘削の後にトタン板を埋設し、さらに 1m グリッドで 1m の鉄棒を地表から打ち込んだ。電流ダイポールに供給する信号波形は、周波数 0.02Hz から 4.6Hz の範囲で、対数等間隔になるような周波数列からなるサイン波を合成して作成した。2 つのダイポールには、わずかに異なる周波数系列を用いることとした。これによって、受信信号を周波数解析することによって、それぞれのダイポールからの信号の寄与が、分離できるようにした。この信号波形は、ファンクションジェネレータで出力され、さらにパワーアンプで 80 倍に増幅してから、ダイポールに供給された。ここで、高精度な電流信号を長時間に渡って繰り返し出力するために、GPS 時計の 10MHz 信号を用いてファンクションジェネレータを同期、同調した。以上の装置の電源はすべて商用の交流電源である。送信電流は、パワーアンプの絶縁モニターを介して、データロガーに収録された。草津白根山周辺は夏季に落雷が多く、特にパワーアンプについては、電源線および電流電線自体から落雷を拾うため、アレスターを用いることが重要である。受信機は、広帯域電磁場受信装置（Phoenix 社 MTU5C）を用い、草津白根山の湯釜火口周辺の 9 カ所に設置した。長期観測のためにソーラパネルを電源とした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 人工電磁周波数コム信号を用いたモニタリングシステムの構築

2つのダイポールから出力される信号は、各観測点でそれぞれ受信することが可能となり、人工電磁周波数コム信号による火山の精密モニタリングシステムの構築を果たすことができた。受信される電磁場信号の時系列を1時間単位で取り出し、周波数解析することによって、送信信号に対応する周波数の振幅、位相情報を取り出すことができた。一方バックグラウンドノイズは、送信周波数の周辺でのノイズの振幅から取り出すことができる。ノイズは雷や地磁気変動による自然信号の成分に加えて、ソーラパネルのコントローラのノイズも混入し、非定常である。従来は、異なる時間窓ごとのインピーダンスを複素平面上にプロットして、異常値を排除しつつスタッキングしていたが、ノイズの大きさを考慮しにくいこと、スタック数が減少することのデメリットがあった。これに対し、変動するノイズのパワーの逆数を重みとして使用し、信号成分をスタッキングする方法を用いることによって、変動するノイズの影響を減らすことが容易に達成できることがわかった。この方法によって、各観測点の電磁場5成分と、送信ダイポール2成分との間のテンソル応答関数を安定して求められることができた。求められた応答関数を入力として、有限要素法を用いた3次元電磁誘導モデリングによって、3次元比抵抗構造を逆問題として求める。

##### (2) 副次的な自然電磁場のモニタリングデータの取得

この観測手法で用いる人工信号源は、離散的な周波数からなるサイン波であるため、用いている周波数以外では通常の世界の電磁場信号が計測できる。そのため、この方法では副次的に自然電磁場を用いたMT法の連続モニタリングも行うことができることとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ishizu, K., Y. Ogawa, T. Mogi, Y. Yamaya and T. Uchida	4. 巻 96
2. 論文標題 Ability of the magnetotelluric method to image a deep conductor: Exploration of a supercritical geothermal system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geothermics.2021.102205	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 Terada, A., W. Kanda, Y. Ogawa, T. Yamada, M. Yamamoto, T. Ohkura, H. Aoyama, T. Tsutsui, S. Onizawa	4. 巻 73
2. 論文標題 The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01475-4	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 Ishizu, K., Ogawa, Y., Nunohara, K., Tsuchiya, N., Ichiki, M., Hase, H., Kanda, W., Sakanaka, S., Honkura, Y., Hino, Y., Seki, K., Tseng, K.H., Yamaya, Y., Mogi, T.	4. 巻 127
2. 論文標題 Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: a case study from Yuzawa geothermal field, NE Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB022911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB022911	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 Ishizu, K., and Ogawa Y.	4. 巻 86
2. 論文標題 Offshore-onshore resistivity imaging of freshwater using a controlled source electromagnetic method: A feasibility study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysics	6. 最初と最後の頁 E391
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1190/geo2020-0906.1	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 Iwamori, H, Ueki, K., Hoshide, T., Sakuma, H., Ichiki, M., Watanabe, T., Nakamura, M., Nakamura, H., Nishizawa, T., Nakao, A., Ogawa, Y., Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, T., Takahashi, E	4. 巻 126
2. 論文標題 Simultaneous Analysis of Seismic Velocity and Electrical Conductivity in the Crust and the Uppermost Mantle: A forward Model and Inversion Based on Grid Search	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB022307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB022307	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 Tseng Kuo Hsuan, Ogawa Yasuo, Nurhasan, Tank Sabri Bulent, Ujihara Naoto, Honkura Yoshimori, Terada Akihiko, Usui Yoshiya, Kanda Wataru	4. 巻 72
2. 論文標題 Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu-Shirane volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01283-2	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 該当する
1. 著者名 Hill Graham J., Bibby Hugh M., Peacock Jared, Wallin Erin L., Ogawa Yasuo, Caricchi Luca, Keys Harry, Bennie Stewart L., Avram Yann	4. 巻 47
2. 論文標題 Temporal Magnetotellurics Reveals Mechanics of the 2012 Mount Tongariro, NZ, Eruption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL086429	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 該当する
1. 著者名 Yamaya, Y., Suzuki, Y., Murata, Y., Okamoto, K., Watanabe, N., Asanuma, H., Hase, H., Ogawa, Y., Mogi, T., Ishizu, K., Uchida, T	4. 巻 103
2. 論文標題 3-D resistivity imaging of the supercritical geothermal system in the Sengan geothermal region, NE Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/essoar.10509292.1	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 Hill GJ, Wannamaker PE, Maris V, Stodt JA, Kordy MA, Unsworth MJ, Bedrosian P, Wallin E, Uhlmann DF, Ogawa Y, Kyle PR	4. 巻 13
2. 論文標題 Trans-crustal structural control of CO2-rich extensional magmatic systems revealed at Mount Erebus Antarctica	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nat Commun	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30627-7	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 該当する

1. 著者名 Suzuki, Y., Akatsuka, T., Yamaya, Y., Watanabe, N., Okamoto, K., Osato, K., Kajiwara, T., Ogawa, Y., Mogi, T., Tsuchiya, N., Asanuma, H.	4. 巻 105
2. 論文標題 Estimation of an ultra-high-temperature geothermal reservoir model in the Kakkonda geothermal field, northeastern Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2022.102525	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22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Serita, S., Ogawa, Y., Ishizu, K., Tseng, K.H., Kunitomo, T., Minami, T., Ichihara, H, Caldwell, T.G., Heise, W., Bertrand E.A.
2. 発表標題 EM-ACROSS System: Installation at the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan
3. 学会等名 EMIW 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

home page <a href="https://sites.google.com/view/yasuogawatitech">https://sites.google.com/view/yasuogawatitech</a>
--

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
研究分担者	市原 寛  (Ichihara Hiroshi)  (90553074)	名古屋大学・環境学研究科・講師    (13901)	
研究分担者	南 拓人  (Minami Takuto)  (90756496)	神戸大学・理学研究科・助教    (14501)	
研究分担者	石須 慶一  (Ishizu Keiichi)  (80880054)	東京工業大学・理学院・研究員    (12608)	

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			
ニュージーランド	GNS Science			
ドイツ	Maximilians-University, Munchen			
チェコ	Czech Academy of Sciences			