様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９　(共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　６ 月 １９ 日現在

機関番号：３３３０２
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：２０Ｋ０５０５３

研究課題名（和文）10Hz以下の超低周波領域に着目した地震電磁波モニタリングに関する研究

研究課題名（英文）A Study on monitoring of seismic EM waves focusing on a low-frequency range below 10 Hz

研究代表者
河合　淳（KAWAI, JUN）

金沢工業大学・先端電子技術応用研究所・教授

研究者番号：１０４６８９７８

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）：高感度なSQUID磁力計を2台用いて、白山市、輪島市、珠洲市において地震現象に関連した電磁気現象の検出を目的として観測を行った。その結果、離れた場所でのSQUID磁力計がグローバルな電磁気現象を等しく検出すること、両者の差分を取ることでローカルな信号が判別できる可能性などが確認できた。また、2022/6/19に珠洲市で発生したM5.4の地震の際には、破壊開始時刻から珠洲市の観測地点へのP波到達前にかけて鉛直成分の信号に急激な変化が検出され、断層の破壊に伴うピエゾ磁気効果による信号と考えられる。本研究を通じてSQUID磁力計が地震活動に関連した電磁波信号のモニタリングに有効なことが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
超高感度なSQUID磁力計を用いて、地震活動に伴う電磁信号の検出を目的に観測を行った。様々な信号が検出され、地震とは関係なく別の自然現象として同定されるものもあれば、不可解な信号も多く見られた。またM5.4の地震の際には断層破壊によって発生する信号が検出された。この現象は過去にM7.2の地震の震源直近でSQUIDよりも感度の低い磁力計で検出されていることが報告されているが、SQUID磁力計を用いれば、小さい規模の地震や、遠くで発生する地震の場合にも検出できることが期待される。地震波の到達前にこの信号が検出できることは、SQUID磁力計が防災や地震活動の研究において有効であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We performed comparative observations of week natural electromagnetic signals including the geomagnetic field, focusing on seismic activities, using two highly sensitive SQUID magnetometer systems, in Hakusan City, Wajima City, and Suzu City. We confirmed that correlated signals because of the global electromagnetic phenomenon were detected at both sites, and local signals can be separated by comparing the data obtained at different site. When the M5.4 earthquake occurred in Suzu City on June 19, 2022, a sudden change in the signal was detected in the period from the rupturing time to the arrival time of the P-wave. We speculate that the piezomagnetic signal associated with the rupture of the fault was detected. Through this study, we think the SQUID magnetometer is available for monitoring electromagnetic signals associated with seismic activities.

研究分野：微小磁気計測

キーワード：SQUID　電磁波　地震　ピエゾ磁気効果　シューマン共鳴　電離層アルフヴェン波共鳴

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

地震活動に伴う電磁波を観測し、短期地震予測（予知）に役立てようとする研究が進められている。観測対象や手法は様々で、（１）地震によって発生する放射電磁波の直接検出（２）放射電磁波の影響による環境電磁波の変化の検出（３）地震活動が引き起こす電離層擾乱によって変化する環境電磁波の検出（４）地震活動によって地表付近に発生する荷電粒子の影響による環境電磁波の伝搬特性の変化、などが挙げられる。これらの研究では対象としている電磁波の周波数帯域はULF帯やVLF帯が主流である。

２．研究の目的

100Hz以下の帯域は、商用周波数を除けばラジオ波など人工ノイズの影響を受け難く、自然現象の観測に適した比較的静かな“窓”帯域である。従来より、この帯域での地震電磁波観測の重要性が指摘されているが(早川　2005)、低周波領域での観測には主として誘導コイルが用いられている（例えばOta 2013)。しかし、誘導コイルの原理として低周波になるほど感度が下がりノイズが増加するという弱みがある。Ota らの研究で用いられた高感度な誘導コイルでも 10Hz でのノイズは50fT/√Hzであり、ノイズは周波数の低下とともに増加する。

本研究の目的は、ELF帯域、特に10Hz以下の周波数帯域において、従来には無い低いノイズレベルで電磁波の精密観測を行うことで、従来注目されているULFやVLF帯域以外での地震電磁波のモニタリングの可能性を確立する。

３．研究の方法

地震活動と電磁気現象の関係性を一ヶ所での観測結果のみで議論することは難しく、同等の精度で計測された2か所以上のデータとの比較・精査が必要である。そこで本研究では、2 台の SQUID磁力計を二地点に設置し、長期間の比較観測を行うことで局所的な信号と遠方からの信号を切り分け、より正確に電磁波信号と地震との相関を検証することを試みた。

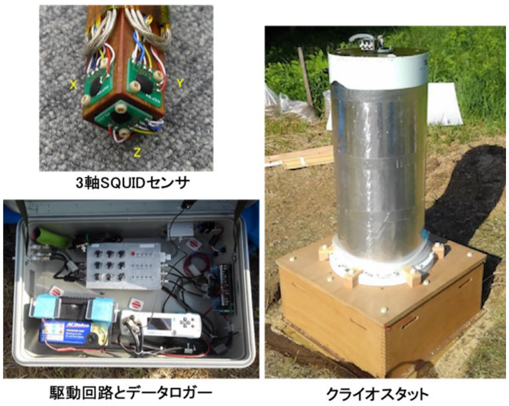


図１ SQUID磁力計の構成
3軸 SQUID センサがクライオスタット内に装着され、液体ヘリウムで満たされる。電源はバッテリで供給され、ロガーで収録するデータはネットワーク経由で取得する。

図１に本研究で使用したSQUIDシステムを示す。3軸SQUIDセンサ、クライオスタット、低ノイズの SQUID 駆動電子回路および高性能データロガーで構成されている。全ての機器はバッテリで駆動している。観測データは3Gの携帯電波を用いたテレメトリによってほぼリアルタイムに研究所に届き、データロガーの GPS 機能によってそれぞれの観測地から得られるデータは同期している。

本研究期間中の観測地を図2に示す。2020年度と2021年度については白山市白峰西山（NSY）と輪島市門前皆月（MNZ）で観測を行い、2022年度は後述するように輪島市門前皆月（MNZ）と珠洲市唐笠町（SUZ）で行なった。NSYとMNZの直線距離は約150km、MNZとSUZは約45kmである。

４．研究成果

2020 年度は、新型コロナウィルスの蔓延に伴う緊急事態宣言下での出張制限の影響等を受け、MNZ の装置設置は 6 月末にずれ込み、制限解除された後の 6/25 からの開始となった。地震活動に関しては、同時観測期間において観測地点の近傍では M4 クラス以上の地震活動は発生せず、M1～M2 クラスがほとんどであった。短い期間ではあったが、両観測地で微弱な磁気変化を明瞭に観測できており、本観測手法に大きな問題が無いことが確認できた。ただし、M1～M2 クラスの地震活動においては、地震に関連していると思われる明瞭な信号は確認できなかった。

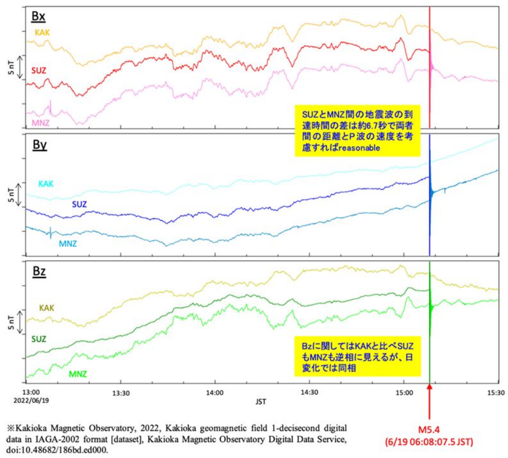
図 2　研究期間中の観測地
NSY(白山市):2020～2021
MNZ(輪島市):2020～2022
SUZ(珠洲市):2022

2021 年度は前年度に引き続き、MNZ と NSY で観測を行った。同時観測期間は 6/9 から積雪期に入る 11/15 までであった。特に、8 月頃より能登半島の先端付近（珠洲市）での地震活動が活発化し、同時観測期間に M4 以上の地震が計 7 回発生した。M5.1 の地震が発生した 9/16 18:42(LT)の MNZ と NSY の観測結果を周波数解析（FFT 解析）し、振幅の比を取ったところ、地震発生時頃より約 20 分間において MNZ における 70～90Hz 付近の信号強度が一時的に強くなっていることが確認できた。これを持って地震関連信号と結論づけることは早計だが、地震発生時に MNZ と 100km 以上離れた NSY とで異なる信号が検出されたことは地震電磁波現象のモニタリングに期待が持てる結果と捉えている。

2021 年度の観測期間の途中から NSY の設置場所であった白山高山植物園の駐車場で地滑りが発生し 2022 年は同場所での観測を行うことが難しくなった。他方、2021 年度後半から能登半島の先端、珠洲市付近で群発地震活動が活発になった。そこで、最終年度である 2022 年度は NSY での観測を珠洲市での観測に変更した。新しい観測場所は、群発地震の 4 つの震源クラスタ領域に囲まれた場所である。MNZ の観測地からは直線で約 45km 離れており、MNZ のデータを参照データとして SUZ との比較を行うことで地震活動に関連する電磁信号の検出を試みた。MNZ および SUZ での同時観測期間は 2022/4/28 から 10/28 までの 6 ヶ月間で、一時期液体ヘリウム不足による欠測期間があったものの、ほぼ連続したデータが得られた。

観測期間中の 6/19　15:08:07.5(JST)には、珠洲市北部を震源とする震度 6 弱（M　5.4、深さ 13km）の地震が発生し、同市に大きな被害をもたらした。図 3 は当該地震発生の約 4 時間前からの SUZ、MNZ および気象庁柿岡（KAK）地磁気観測所（http://www.kakioka-jma.go.jp/）の南北（Bx)、東西（By)、鉛直（Bz）の各成分における信号変化である。尚、地震による激しい揺れのため SUZ のデータは地震発生直後に飽和している。（約 15 分後に復活）この図からわかるように、nT レベルので信号変化においては MNZ も SUZ も大きな違いは見られず、KAK と同様の信号が観測されている。

次に、更に時間を拡大して、地震直前（6/19 15:00～15:10 JST）の SUZ と MNZ の信号波形を比較したものを図 4 に示した。全て 0.5Hz～30Hz のバンドパスフィルタ処理を施している。尚、Bz のグラフには、防災科学研究所の Hi-net 高感度地震観測網（https://www.hinet.bosai.go.jp/）における珠洲（H.SUZ）の地震計データを合わせて表示した。



※Kakioka Magnetic Observatory, 2022, Kakioka geomagnetic field 1-decisecond digital data in IAGA-2002 format [dataset], Kakioka Magnetic Observatory Digital Data Service, doi:10.48682/186bd.ed000.

図 3 2022/6/19 15:08:07(JST)に発生した M5.4 の地震の約 4 時間前からの磁気変化。nT レベルでは MNZ も SUZ も大きな違いは見られず、KAK とほぼ同じ変化を示している。

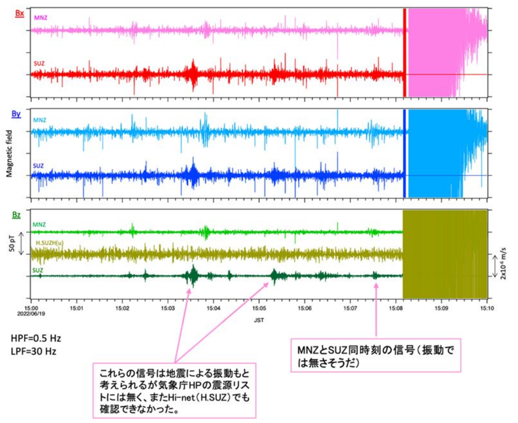


図 4 2022/6/19 15:00～15:10 の MNZ および SUZ の信号波形。振動によるものや、振動とは異なると思われる信号が散見される。

図 4 より、50pT 以下の様々な信号が検出されていることがわかる。ここで、同じような信号でも SUZ と MNZ で時間差がある場合には地震振動による信号（地磁気中で SQUID が振動することで発生する信号）の可能性が高い。すなわち SUZ 近辺に震源がある場合には、地震波の速度と考慮すると MNZ の方が約 5～10 秒遅れて観測され、振幅も SUZ に比べ小さくなる。例えば、図 4 において、SUZ に 15:03:35 付近に検出されている信号と同様の信号が MNZ では約 10 秒遅れて検出されており、振幅も ZUZ のものに比べ若干小さい。この信号は、非常に微弱な地震振動と考えられる。ただし、気象庁 HP の地震リストにも Hi-net（H.SUZ）の地震計でも確認できなかった。

一方で、15:07:35 付近に見られる信号は SUZ でも MNZ でも同時に観測されている。信号の周期は約 10 秒で、Schumann 共鳴とは異なるようである。また、振幅は SUZ の方が若干大きい。この地震の破壊開始時刻は 15:08:07.5 (JST)であるので、この信号は約 22 秒前に当たるが、この信号の同定を含め地震発生に関連付けて議論するのは難しい。しかしながら、高感度な観測によってこのような“得体の知れない”信号が検出できることは高感度な SQUID 磁力計による観測の成果であると考えている。これらの結果は、日本地震学会（2022/9/24）にて発表した。

また、この地震の前後の期間である 2022/6/11 から 7/3 までの信号の長期トレンドを確認したところ、図 5 に示したように地震発生後に SUZ の直流成分が MNZ に比べ変動していることがわかった。グラフは MNZ と SUZ での 6/21 00:00(JST)の値をそれぞれゼロとして描いている。これは地震によって SUZ の磁力計設置場所の地盤がゆっくりと傾いたことを示唆していると考えられ、本観測における課題の一つであると認識している。

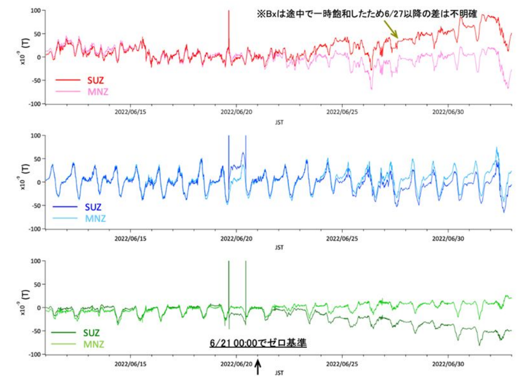


図 5 2022/6/11-7/3 までの信号の長期トレンド 6/19 の地震以後、直流成分がゆっくりと変動しており、地盤の傾きを示唆している。（6/21 00:00JST の値をゼロ基準として描いている）

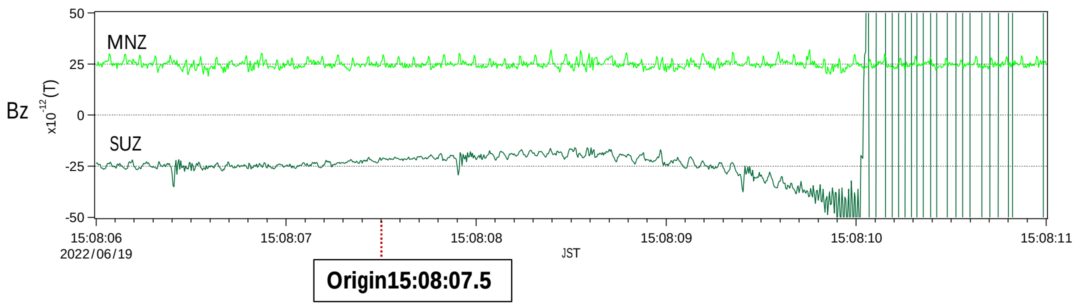


図 6 2022/6/19 M5.4 地震発生時の MNZ と SUZ の信号波形(60Hz ノッチフィルタと 0.2Hz ハイパスフィルタ処理をしたもの) SUZ には Piezo 磁気効果によると思われる信号変化が検出されている。

尚、地震後の期間中、南北成分（Bx）が一時飽和してしまったので、傾いた方向を正確に見積もることは難しいが、鉛直成分（Bz）が 12 日間で約 50nT 変動したことから、少なくとも SQUID センサは約 0.1 度程度傾いたのではないかと推定している。

さらに、SUZ のデータにおいてこの地震の破壊時刻から P 波の到達までの約 2 秒間の間に鉛直成分（Bz）において 10～15pT 程度の急激な信号の変化を確認した(図 6)。同時刻の MNZ では変化が確認されず、SUZ でのこの信号変化は、2008/6/14 に発生した岩手・宮城内陸地震の際に、Okubo らが震源の近傍でフラックスゲート磁力計によって検出したピエゾ磁気効果（K Okubo 2011）による信号と類似している可能性が高い。本研究では地震発生前の信号に着目していたので、地震発生後の信号に関しては解析が不十分であり、引き続き他の地震における信号も精査する予定である。上記の成果は、2023/5/24 の日本地球惑星科学連合大会（JpGU2023）で発表した。

このように、高感度な SQUID 磁力計を 2 台用いて地震発生期間に微弱な自然電磁気現象の比較観測を行なった結果、地震発生前には様々な信号が検出されたものの、地震活動に関連する信号かどうかの同定までは至らなかった。その一方で、発生直後に破壊に伴うピエゾ磁気効果と思われる信号が検出された。

本研究で得られたデータ量が膨大なため更に解析を進めなければならないが、SQUID 磁力計が地震関連電磁波信号の高感度モニタリングに有効なことが確認されたことから、引き続き観測も続ける重要性を感じている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり以下の関係各所に心より感謝いたします。（敬称略）

・白山市および白山高山植物園
・輪島市
・珠洲市松田牧場
・気象庁
・国立防災科学技術研究所
・金沢工業大学夢工房

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計4件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 河合　淳、河端美樹、宮本政和
２．発表標題 能登半島群発地震の震源域近傍におけるSQUIDを用いた高感度磁場計測
３．学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
４．発表年 2022年

１．発表者名 Jun Kawai
２．発表標題 Simultaneous observation of natural magnetic fields using SQUID magnetometer systems
３．学会等名 SQUID Workshop, Avignon Universite, Avignon, France
４．発表年 2022年

１．発表者名 河合　淳、河端美樹、宮本政和
２．発表標題 能登半島での群発地震発生期間におけるSQUID磁力計を用いた地磁気観測
３．学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
４．発表年 2023年

１．発表者名 河合　淳、河端美樹、宮本政和
２．発表標題 SQUID磁力計による2地点での地磁気同時観測
３．学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
４．発表年 2021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