

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 14 日現在

機関番号：33302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610143

研究課題名(和文) SQUID磁力計を用いた微小地磁気変動観測に関する研究

研究課題名(英文) Observation of very week geomagnetic fields using SQUID magnetometers

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微小な地磁気現象を観測することを目的として、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた地磁気計測システムを開発した。このシステムを用い、石川県白山市白峰にて観測試験を行った結果、6次までのシューマン共鳴および電離層アルフベン波共鳴を検出することができた。この結果より、本SQUID磁力計システムが微小な地磁気現象の観測に十分な性能を有することが確認され、従来の磁力計では解像し得なかった地磁気現象の観測を可能にすることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer system for high-sensitive observation of geomagnetic fields. We succeeded on observation of Schumann Resonance (SR) up to 6th mode and Ionospheric Alfvén Resonance (IAR) using this system in Shiramine, Hakusan-city, Ishikawa Prefecture. In these results, we have confirmed that the system has a good performance to detect very week geomagnetic magnetic field variation. We also expect that this system is useful for observation of geomagnetic phenomena that has not been detected with conventional magnetometers.

研究分野：超伝導

キーワード：SQUID磁力計 地磁気 シューマン共鳴 電離層アルフベン波共鳴 高感度

1. 研究開始当初の背景

近年、地殻変動に起因する様々な地磁気変化が示唆されるようになり、2004年のスマトラ地震に伴って発生した重力音波共鳴 (Iyemori et al., 2005)、2011年の東北地方太平洋地震の津波が電離圏に誘起した波動 (Utada et al., 2011)、津波による海水のダイナモ効果 (Hamano et al., 2011) など、報告が相次いでいる。他方、地震発生前に電離層の電子密度に異常が現れる現象や、断層近傍での応力変化による磁場変化については、信号の微小さから確たる観測例がないのが現状である。このような微小な磁場変化を検出するには従来の磁力計に比べ更に高感度な磁力計が必要となる。

先行研究では SQUID センサを用いた地磁気変動計測システムを試作し、金沢市の郊外 (当研究所敷地内) にて計測試験を行いながらシステムの性能や信頼性の検証を進めてきた。(河合 2012 地球惑星科学連合大会、2013CA 研究会) 現在のところシステム性能として、計測帯域 DC~100Hz、最大計測磁場±200nT、最小磁場分解能 0.1pT/√Hz (1Hz)、連続計測期間 1ヶ月を実現し、1pT/√Hz 以下のレベルに観測されるシューマン共鳴が検出できることを確認した。

しかしながら①金沢市の都市ノイズの影響、②データロガーの分解能 (14bit) による制限、③電子回路の低周波ノイズ等によって SQUID 本来の磁場分解能 (0.02pT/√Hz 以下) までの計測には至っていない。

図1は先行研究で得られた地磁気変動のスペクトルの一例 (南北成分) と現状の計測限界を制限している要因を示している。先行研究においてシューマン共鳴を含む 1pT/√Hz 以下の信号が検出できている。ただし①で示すように先行研究で使用しているデータ収録の分解能が 14ビットであることから最小磁場分解能は約 0.15pT/√Hz が限界となっている。(磁気嵐を想定し、計測ダイナミックレンジを±200nTとして計測) この課題についてはデータ収録を 24ビット化することで十分な分解能の向上を図ることができる。

図2には先行研究で得られた約4日間の金沢市内 (本研究所内) における地磁気計測結果のスペクトログラムの例を示す。現在の観測場所では特定の強いノイズがほぼ常時存在していることがわかる。また図1の②および図2で示すように、10Hz以下の信号は夜間のスペクトル強度が下がることから都市活動のノイズが大きく影響していることが考えられる。従って、システムの性能をより詳しく評価するためには磁気ノイズの静かな場所での計測を行うことは必須である。

一方、磁気シールドを施して計測したシステムノイズは図1の③で示すように計測値に比べ約一桁小さいものの SQUID を駆動する電子回路 (FLL 回路) の低周波ノイズ (1/f ノイズや温度ドリフト) によって制限されている。従って低周波ノイズを低減した電子回路

を新規に開発することで SQUID センサ本来の分解能に近づけることができる。

以上、これらの背景のもと、本研究を遂行した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導 SQUID 磁力計による高感度な地磁気変動計測の手法を確立し、微小な地磁気変動計測を目指すものである。先行研究で行った試作システムによる試験結果をもとに、より高感度化に必要な要素を洗い出し、システム性能の改良および磁気環境の静かな場所における試験観測を行いながら従来の磁力計では解像が難しいと思われる 0.1pT/√Hz 以下の地磁気変動を計測することに挑戦する。

これらの課題を解決しながら SQUID 本来の性能を確認し、SQUID 磁力計によって従来の計測限界よりも2桁以上高感度な地磁気変動計測の可能性を示す。また、都市ノイズの影響が少ない場所 (能登半島や白山麓など) において高感度な地磁気変動計測を行い、これまで確認することのできなかった信号の検出を試みる。

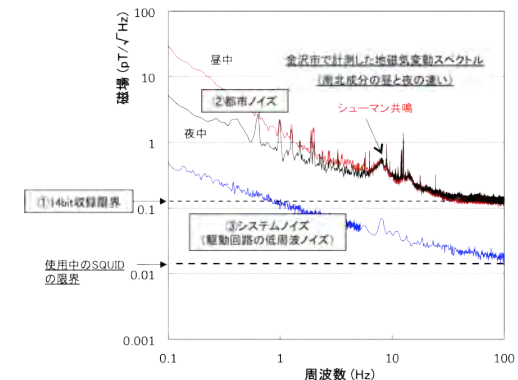


図1 先行研究で得られた地磁気変動南北成分 (2012.1.9 13:00 からの30分) の周波数スペクトルと分解能を制限している要因

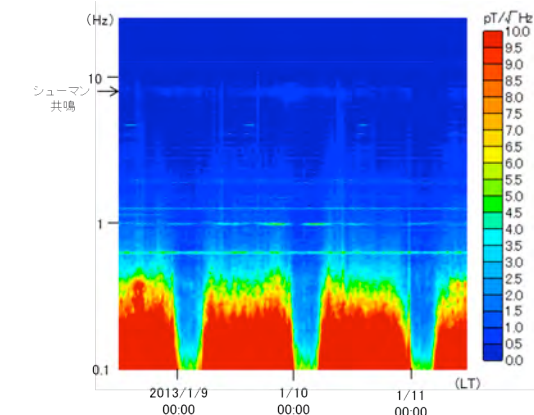


図2 先行研究で得られた金沢市内における地磁気変動南北成分のスペクトログラム (2013.1.8-11)

3. 研究の方法

(1) 原理

磁力計には様々な種類があるが、前述のように超伝導磁力計は SQUID センサを用いた磁力計であり SQUID 磁力計とも呼ばれ (以後 SQUID 磁力計と表記), 現在の磁力計の中では最も感度が高い。その感度は fT ($10^{-15} T$) のオーダーであり, 計測可能な周波数帯域は直流 (DC) ~ 数 kHz と広く, ms の時間分解能での計測が可能である。SQUID センサには, 液体ヘリウム温度 ($-269^{\circ}C$) で動作する低温 SQUID と, 液体窒素温度 ($-196^{\circ}C$) で動作する高温 SQUID があるが, 本研究ではより感度の高い低温 SQUID を用いている。

SQUID センサは液体ヘリウム中 (4.2K) に浸っているため, センサの温度変化は気にする必要が無いというメリットがある。また, SQUID 磁力計はその動作原理により静磁場の絶対値を計測することはできず, 磁場の変化のみを検出する。

(2) 地磁気計測用 SQUID システム

図 3 に本研究で使用した SQUID センサおよび液体ヘリウムを充填するクライオスタットを示す。SQUID センサは $2.5mm \times 2.5mm$ (厚さ $0.35mm$) のシリコン基板の上に薄膜で作製されたマグネトメータであり (図 1 の左上), 磁場を検出する検出コイルのサイズは $2.25mm \times 2.25mm$ で, $10mm$ 四方のプリント基板上に実装されている。この SQUID センサを超伝導シールドした場合のノイズは $15 \sim 20 fT/\sqrt{Hz}$ @ $1kHz$ であった。

SQUID センサは XYZ の 3 軸構成に実装され (図 1 左下), 各 SQUID センサの直後には配線経路で入ってくる高周波ノイズをカットする RF フィルタが装着されている。また, RF フィルタ以降, 室温に取り出す配線は熱侵入を押さえるために高抵抗線を使用した。

この 3 軸 SQUID センサをクライオスタット (図 1 右) に装着し, 液体ヘリウムを入れて冷却する。高周波応答の良い SQUID を野外環境下で安定に動作させるためには, 環境の高周



図 3 地磁気計測用 SQUID センサとクライオスタット

波ノイズの影響を低減する必要があり, SQUID センサの周りには銅箔による電磁シールドを施している。

クライオスタットのサイズは直径約 $42cm$, 高さ $1m$ で, 液体ヘリウム容量は約 $35L$ である。1 日当たりの液体ヘリウムの蒸発量は約 $1L$ で, 約 1 ヶ月間の連続冷却が可能である。

(3) 低周波ノイズを低減した FLL の開発

SQUID センサを磁力計として動作させるためには Flux-Locked-Loop (FLL) 回路と呼ばれる電子回路が必要であるが, 地磁気のように超低周波の信号を計測する上で非常に重要なことは, FLL の初段アンプの低周波ノイズ (温度ドリフト) を低減することである。

今回, 従来の直接読み出し方式と呼ばれる FLL をベースに, SQUID 磁束計を構成した場合の低周波ノイズを低減する低ドリフト FLL を考案した。図 3 は開発した FLL の回路構成である。SQUID に供給するバイアス電流を $20kHz$ でスイッチングし, それと同期して SQUID からの出力をサンプル&ホールドする。バイアス電流が ON の場合には SQUID からは「磁気信号+ノイズ」が出力されるが, 一方バイアス電流が OFF の場合には SQUID からは「ノイズ」のみが出力される。積分器の前で前者から後者を差し引くことによってノイズが除去された信号のみを検出することができる。

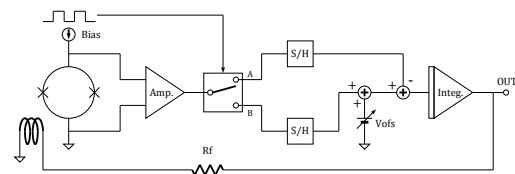


図 4 開発した低周波温度ドリフトの回路構成

(4) データ収録の 24 ビット化

データ収録に関しては, 新たにバッテリー駆動の $24bit$ データロガーを採用し, システムノイズより十分小さい分解能での計測が可能となった。また, データロガー自身が GPS 機能を備えており, 小電力でも野外での位置情報および正確なユニバーサル時間の計測が可能となった。

(5) システムの防水・防風化とバッテリー駆動

先行研究では木製観測棟内での観測実験であったが, 今回システムの完全防水化とバッテリー駆動化を行い, 電源の無い野外での観測実験を行えるように改良した。バッテリーによる連続計測期間は 1 週間とし, データ回収時に交換することとした。また, 野外での高感度な観測においては風による振動も問題になるため, 非磁性材料による防風対策も施した。図 5 にシステムの構成図を示す。

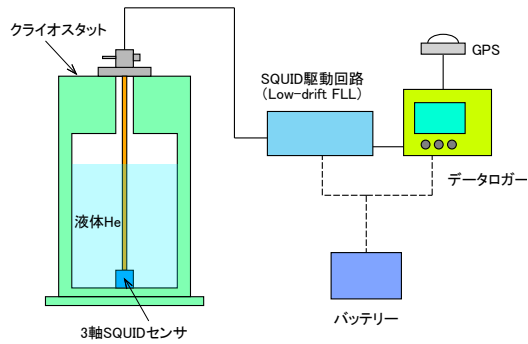


図5 システム構成

4. 研究成果

(1) 開発した低ドリフト FLL の特性

図6に SQUID センサを従来の FLL で駆動した場合と今回開発した FLL で駆動した場合の温度ドリフトの比較を示す。超伝導磁気シールドを施した SQUID センサを両 FLL で駆動し、外気温による出力信号の変動を計測したものである。従来方式の FLL による出力信号は環境の温度変化に応じて変動しているが、低ドリフト FLL による出力信号は温度変化に関係なく安定していることがわかる。出力の温度ドリフトは従来方式で $6.4 \text{ pT}/^\circ\text{C}$ であったのに対し、新しく開発した FLL では $0.2 \text{ pT}/^\circ\text{C}$ と、約 $1/30$ 以下に改善できた。

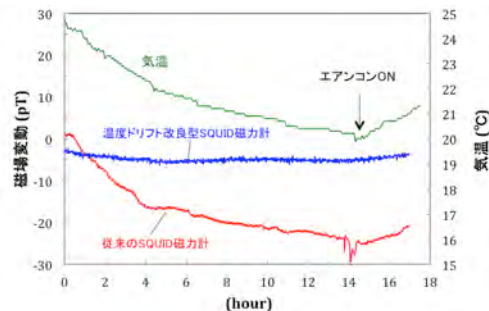


図6 SQUID 磁力計の低周波ドリフトの比較 (従来方式と本研究で開発した FLL)

(2) 金沢市内における観測試験結果

本研究にて開発・改良したシステムを用いて、まずは先行研究と同じく金沢市 (本研究所敷地内の木製観測棟) において地磁気変動の観測試験を行った。観測日時は 2015/3/1 00:00~24:00 (UT) である。データ収録時のサンプリング周波数は 200 Hz で、収録後に $0.01 \sim 50 \text{ Hz}$ フィルタ処理を行った。

図7は 15:00~16:00 (UT) における地磁気の南北 (X)、東西 (Y)、鉛直 (Z) の各成分の周波数スペクトルを示している。先行研究に比べシステムの性能は改良されているはずだが、金沢市の都市雑音が多く観測され、シューマン共鳴は3次までしか確認できず、

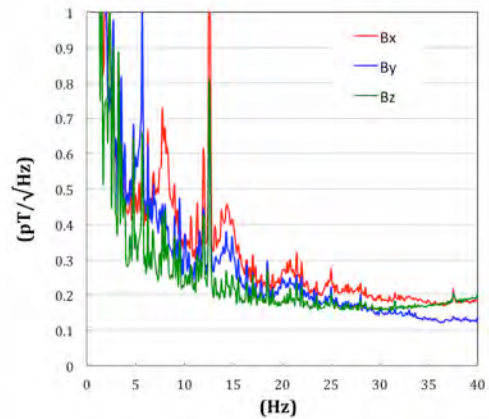


図7 金沢市内 (本研究所敷地内) で観測した地磁気スペクトル (2015/3/1 15:00-16:00UT)

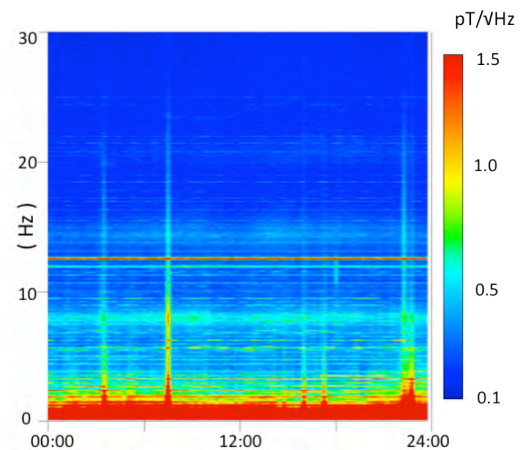


図8 金沢市内 (本研究所敷地内) で観測した地磁気のスペクトログラム (2015/3/1 UT)

観測場所に問題があることが確認できる。

また図8には24時間の南北成分について5分ごとにFFTした結果 (スペクトログラム) を示した。終日を通じ多くのノイズ成分が観測されている。

この結果から、改良したシステム性能を確認するためには、さらに静かな環境で観測の必要性が確認された。

(3) 白山麓における観測試験結果

金沢市の都市ノイズから離れるために、石川県白山市白峰地区において観測試験を行った。観測場所は福井県との県境で、金沢市中心部からは直線で約 30 km 離れている。GPSにより確認した標高は海拔 770 m の地点であった。自動車の往来がほとんどない林道の脇で、白峰地区の居住地域からも直線で約 3 km 離れている。この場所にシステムを設置し、2015年9月30より10月末まで1ヶ月間の連続観測を行った。

図9はシステムの設置状況である。地面に



図 9 白山市白峰に設置したシステム (2015/9/30~10/31UT) 白いカバーの中にクライオスタットが、ブルーシートの下に FLL やデータロガー、バッテリーケースが設置してある。

置いた石のブロックの上にクライオスタットを設置した。また、クライオスタットはプラスチックのカバーで覆い、風で揺れないようにした。防水された FLL とデータロガーのケースおよびバッテリーケースは、ケーブルを地面に埋めた上で約 1m 離して設置した。

図 10 に 10/4 15:00~16:00 (UT) における地磁気の南北 (X)、東西 (Y)、鉛直 (Z) の各成分の周波数スペクトルを示している。データ収録条件等は本章 (2) と同じである。図 7 で示した金沢市内での結果に比べ人工的と思われるノイズはほとんどなく、シューマン共鳴が 6 次まで確認できていることがわかる。ただし、バックグラウンドは $0.2\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と金沢市内での観測結果と比べ大差ないことがわかった。

図 11 は 10/4 15:00~16:00 (UT) のスペクトログラムである。図 8 で示した金沢市内での結果に見られたようなノイズは見られず、静かな環境であることが確認できた。また、昼間と夜間でのバックグラウンドノイズの違いが顕著で、特に夜間に関しては、電離層アルフベン波共鳴に由来すると思われる特徴的な周波数の高調波構造が確認できる。電離層アルフベン波共鳴の信号レベルは低緯度

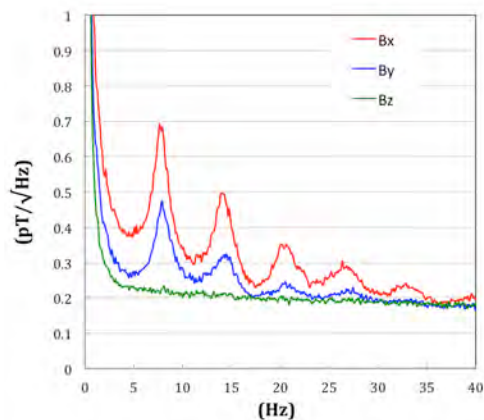


図 10 白山市白峰で観測した地磁気スペクトル (2015/10/4 15:00-16:00UT)

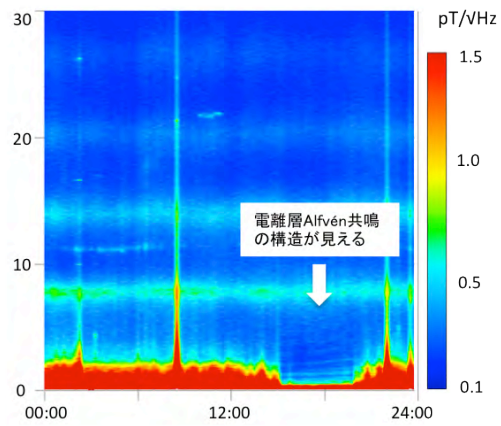


図 11 白山市白峰で観測した地磁気のスぺクトログラム (2015/10/4UT)

ほど弱いことがわかっており、この結果から本システムが微弱な地磁気変動現象を検出することができることが証明できた。

(4) まとめと今後の展望

先行研究で試作した SQUID 地磁気計測システムの性能を改良し、磁氣的に静かな環境において観測試験を行った結果、シューマン共鳴や電離層アルフベン波共鳴といった微弱な地磁気現象が観測できた。この結果、本システムが微小磁場計測に十分対応できることが確認できた。

一方、 $0.1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下のノイズレベルを目標としたものの、静かな環境下においてもバックグラウンドは $0.2\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。これは SQUID センサに施した RF シールドの熱雑音の可能性もあるが、自然界に由来するものか、システムに由来するものかを今後評価・検討する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 河合 淳, 宮本政和、河端美樹, 春田康博, 上原 弦, 「SQUID 磁束計を用いた高感度地磁気計測 (II)」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 (2015 年 9 月, 名古屋国際会議場)
- ② 河合 淳, 河端美樹, 足立善昭, 上原 弦, 「高感度地磁気計測 SQUID システムにおける性能の改良」, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会 (2015 年 11 月, 東京大学)

6. 研究組織

(1) 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