

LTS-SQUID を用いて計測した地磁気データの検討

河合 淳, 足立善昭, 河端美樹, 宮本政和, 小山大介, 樋口正法, 上原 弦(金沢工大)

Geomagnetic field measurement using LTS-SQUID magnetometers and its evaluation

Jun Kawai, Yoshiaki Adachi, Miki Kawabata, Masakazu Miyamoto,
Daisuke Oyama, Masanori Higuchi, Gen Uehara (Kanazawa Institute of Technology)

Abstract

We have demonstrated measurement of geomagnetic field variation using highly sensitive LTS-SQUID magnetometer system. The magnetic field resolution of the system is $0.15 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz, which is 10 times smaller, compared to conventional magnetic sensors such as fluxgate magnetometers and proton magnetometers. The detectable frequency bandwidth of the system is from dc to 200 Hz. The system is being operated in rural area of Kanazawa city and stable measurement has been performed. The FFT results of the measurement data show that Schumann resonance is detected with the system.

1. はじめに

地磁気の計測には従来からフラックスゲート磁力計やプロトン磁力計が利用されている。一方で、これらの磁力計よりも高感度な SQUID を地磁気計測に応用しようという試みは SQUID が発明された直後の 1970 年代にはすでに行われていた[1][2]。残念ながら当時の SQUID 技術では野外での動作維持が難しく、実験的なものに終わり実用化はされなかった。その後、地震や噴火といった地殻変動に起因する電磁気現象が示唆されるようになり、また液体窒素で動作する HTS-SQUID の開発により SQUID の可搬性が増したことで、再び高感度な SQUID をフィールドでの電磁気検出に応用しようという試みがなされた [3][4]。しかしながら、環境ノイズによる誤動作の問題や寒剤の保持期間の短さなどにより、短期間の実験で SQUID の有効性が検証されたとは言い難い。当研究所でも過去に地磁気計測に向けた SQUID を開発し、実験室内での動作検証を行ったが[5]、クライオスタットの容量や設置環境の問題などもあって野外での実用検証までは至らなかった。

他方、SQUID は脳磁計(MEG)をはじめとする生体磁場計測への応用が進み、並行して電子回路や低温技術などの関連技術も進歩してきた。当研究所では MEG 開発で培った技術をもとに、2012 年 4 月より SQUID 磁力計による高感度な地磁気計測の実用化を目指して試作システムを開発し、実際に野外での長期試験を行いながらシステムの評価を行っているので、その結果を報告する。

2. SQUID 地磁気計測システムの概略

試作した地磁気計測システムは、地磁気の XYZ 成分を検出する 3 軸の SQUID マグネトメータ、クライオスタット、SQUID を動作させる FLL (Flux Locked Loop) 回路、増幅回路、およびアナログフィルタで構成

されている。

SQUID マグネトメータは 2.5mm×2.5mm の Si 基板上に集積化された磁束伝達方式と呼ばれる Nb 系の薄膜 SQUID であり、液体ヘリウム(4.2K)中で動作する。この SQUID マグネトメータを 3 軸に構成したセンサプローブをクライオスタット内に挿入し、液体ヘリウム中に浸して冷却する。尚、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、環境の高周波ノイズの影響を低減する必要があり、SQUID マグネトメータの周りには銅板による電磁シールドを施している。SQUID を冷却するための FRP 製のクライオスタットは、直径 0.42m、高さ 1m で、液体ヘリウムの容量は 35L である。液体ヘリウムは徐々に蒸発するが、約 1 ヶ月間の連続冷却が可能である。

FLL 回路は直接読み出し方式と呼ばれる方法を採用しており、高いスループットが得やすい反面、プリアンプの温度ドリフトの影響を受け易い。現在のところ温度ドリフトは 3 チャンネル(X, Y, Z)の平均で約 6.5pT/°C であり、プリアンプの温度の日変動は 2012 年 12 月の実測値で平均 3.7°C/day であった。従って、この期間に検出されるデータには約 24pT/day のドリフトの影響が含まれている。FLL の後段には APS (Analog Signal Processor) と呼ばれるフィルタ回路を配置しており、何種類かのカットオフ周波数を持つローパスフィルタ、ハイパスフィルタ、および 60Hz のノッチフィルタを用意した。検出される地磁気信号は、保証値 14bit、最大サンプリング 1kHz の市販のデータロガーで収録し、データは数日おきに USB メモリで回収することにした。

現在このシステムを当研究所敷地内の山林に建築した木造の小屋の中に設置し、計測実験を行っている。当研究所は金沢市郊外の山の上であり、後背地は富山県、岐阜県との県境につながる山地である。クライオスタットは小屋内部で地面に掘り下げた深さ 1.5m の穴に設置し、SQUID マグネトメータは地表から約 1m 下方に位置している。尚、GPS から求めた小屋の地理的位置は 36° 30' 1" N, 136° 41' 52" E, 標高 199m であった。

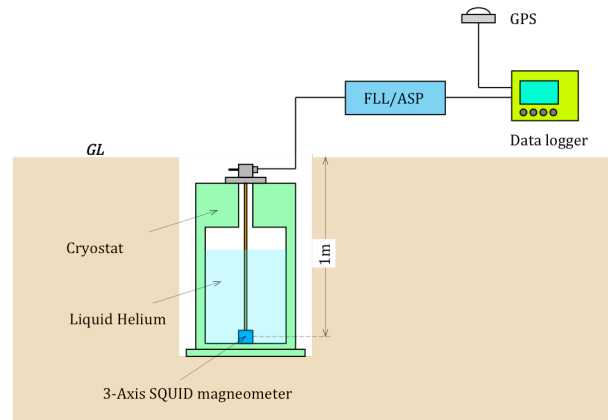


図 1 SQUID 計測システムの構成

Fig. 1 Configuration of the SQUID system

This system is housed in a wooden cabin built in the woods. The geophysical location of the system is 36° 30' 1" N, 136° 41' 52" E and 199 m above sea level.

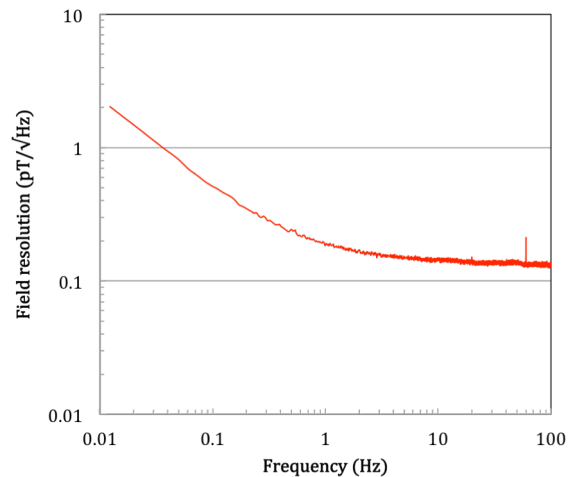


図 2 システムの磁場分解能

Fig. 2. Field resolution of the system.

The field resolution is limited with the preamplifier noise of the FLL circuit and the resolution of the data logger.

システムの磁場分解能は図 2 に示したように、 $2\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@0.01\text{Hz}$ 、 $0.15\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ である。この値は従来のフラックスゲート磁力計やプロトン磁力計に比べると 10 倍かそれ以上高感度である。ただし、10Hz 以上の高域は使用しているデータロガーの分解能で制限されており、10Hz 以下では FLL のプリアンプのノイズが支配的である。一方、使用している LTS-SQUID マグネトメータの固有ノイズは約 $20\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ とシステムノイズに比べれば 1 桁低く、まだ SQUID 本来の性能を引き出せているとは言い難い。より高感度な計測に向けて今後の改良が課題である。また、システムの検出周波数帯域は FLL 回路の周波数帯域、クライオスタットの熱シールドおよび SQUID マグネトメータを遮蔽している電磁シールドの遮蔽効果で決定され、現在のところ約 200Hz である。

3. 計測結果

図 3 に 2012 年 12 月 28 日 11:00～12 月 31 日 8:00 (JST) の地磁気 3 成分の連続データを示す。Bx (赤), By (青), Bz (緑) はそれぞれ磁場の南北, 東西, 鉛直の各成分である。ローパスフィルタを 20Hz に設定し計測帯域を DC～20Hz とした。サンプリング周波数は 200Hz である。尚, SQUID は絶対値の計測はできず, FLL 動作開始時からの変動磁場のみを計測することができるが, 動作開始時には出力にオフセットが生じる。図 3 においてデータの開始時がほぼゼロから始まっているのは, データ収録開始時にオフセットをゼロ調整していることによる。計測された信号には, SQUID の FLL 動作において問題になる磁束ジャンプやロック外れといった現象もなく, 2 日半にわ

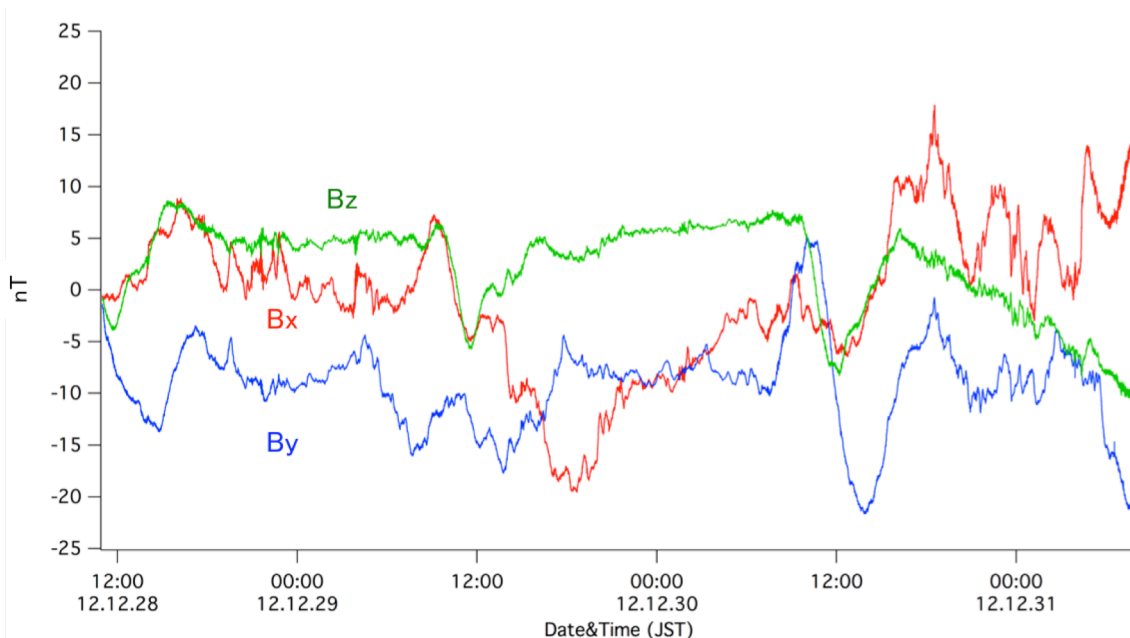


図 3 SQUID システムで計測した地磁気変動の例
(2012/12/28 12:00～2012/12/31 11:00 JST)

Fig.3 An example of geomagnetic field variation detected with the SQUID system.

Bx (red), By (blue) and Bz (green) are south and north, east and west, and vertical components of the magnetic field, respectively. The bandwidth of the measurement was set to be DC to 20 Hz and the sampling frequency was 200 Hz. No flux jumps due to unlocked operation are not seen during the measurement.

たつて地磁気が安定に計測できていることが確認できた。ただし、他の期間のデータを検証した結果、落雷を伴うような大きな雷が発生した際には FLL のスループレートが追いつかず、磁束ジャンプを生じることがわかった。今後、FLL の高スループレート化を進めることで改善を目指す予定である。

図 4 には図 3 で示したデータのうち 12 月 30 日の 12:00~12:30 の 30 分間について各成分を FFT 解析した結果を示す。図 2 に示したシステムの磁場分解能に比べると、各成分において 1 桁以上大きなペクトラムが得られており、計測周波数帯域で有意な計測ができていることがわかる。ただし検出磁場には自然界および環境人工雑音の両方が含まれているので、その切り分けが必要である。現在のところ図 4 に見られる様々な周波数の信号について同定できているのは、各成分の 12~13Hz に見られる比較的大きな信号および Z 成分に見られる 9Hz とその高調波であり、これらはシステムの振動に由来するものである。常時存在する地盤振動が原因と考えている。それ以外のピークは、1 日のうちに変化するものもあれば常に観測されるものもあり、今後の計測を通じて同定を進めるとともに、ノイズ対策あるいは観測場所の変更も含めて検討する必要がある。

また、図 4 の Bx, By には 6Hz~9Hz および 13Hz~15Hz の周波数範囲にブロードな盛り上がりが見える。他の期間のデータを解析した結果からも、これらの信号は常時観測されている。この盛り上がりの中心周波数は 7.8Hz および 14.1Hz であることから、この信号は Schumann 共鳴[6]によるものであると考えている。

4. まとめ

LTS-SQUID を用いた地磁気の高感度計測の実用化に向けて、システムを試作し、計測試験を行った。

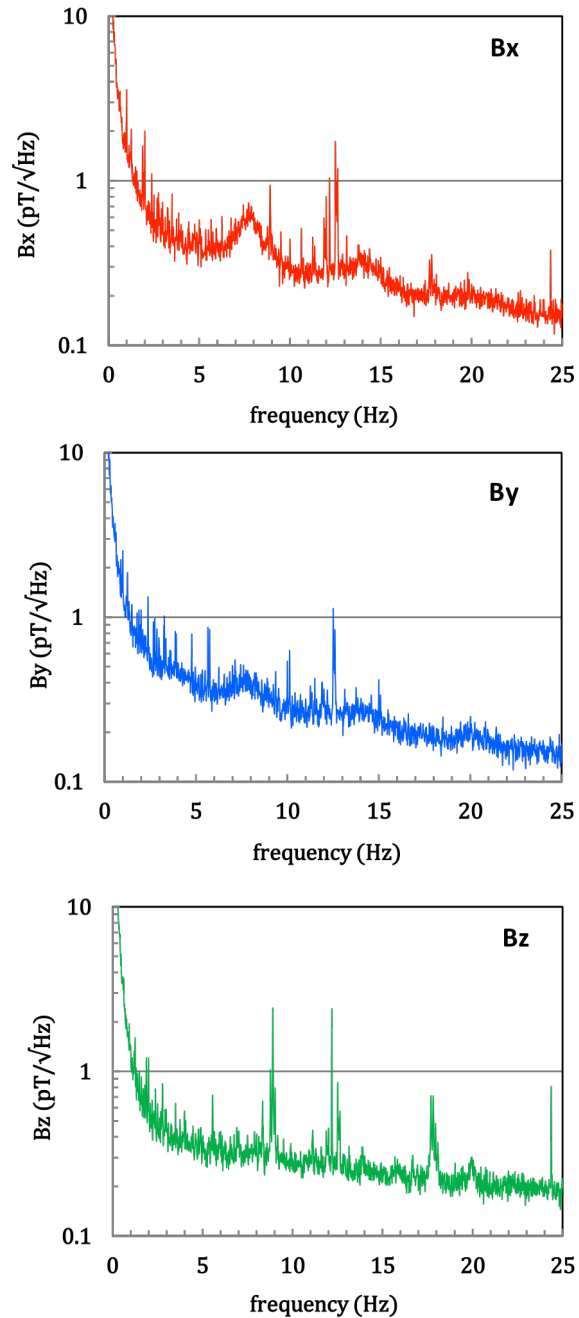


図 4 SQUID システムで計測した地磁気データの FFT 解析結果 (2012/12/30 12:00-12:30)

Fig. 4 FFT analysis of the data measured with the system. (2012/12/30 12:00-12:30)

The main peaks at around 9 Hz and 12 Hz are due to vibration of the system. Other peaks are not identified yet. The broad peaks at around 8 Hz and 14 Hz in Bx and By spectrum are thought to be Schumann resonance.

現在のところシステムの磁場分解能は FLL 回路やデータロガーで制限されているものの、フラックスゲートに比べ十分高感度な連続計測ができることが確認できた。今後は、さらにシステムに改良を加えながらデータを蓄積し、検証を続ける予定である。

5. 謝辞

本研究の一部は、公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金により行われた。

参考文献

- [1]北村 泰一, SQUID 磁力計の地球宇宙科学への応用, *日本物理学会誌*, **22**, No. 11, 922-930 (1975)
- [2]J. E. Zimmerman and W. H. Campbell, Tests of cryogenic SQUID for geomagnetic field measurements, *Geophysics*, **40**, No. 2, 269-284 (1975)
- [3]鎌田清孝, 土井俊哉, 尾形久直, 賀戸 久, 湯之口万友, 白樂善則, SQUID 磁束計を用いた桜島火山での地磁気計測, *日本応用磁気学会誌*, **24**, 867-870 (2000)
- [4]N Kasai, Y. Fujinawa, H. Iitaka, K. Nomura, Y. Hatsukade, S. Sato, H. Nakano, T. Doi, T. Nemoto and A. Ishiyama, Development of the HTS-SQUID system for measuring ULF band magnetic field changes related with earthquakes, *Supercond. Sci. Technol.* **14**, 1135-1139 (2001)
- [5]J. Kawai, Gen Uehara, Toshiyuki Korin, Hisanao Ogata, Hisashi Kado, Three axis SQUID magnetometer for Low-Frequency Geophysical Applications, *IEEE Trans. on Magn.*, 35, No. 5, 3974-3976 (1999)
- [6]Colin Price, Olga Pechony, Eran Greengerg, Schuman Resonance in Lightning Research, *Journal of Lightning Research*, **1**, 1-15 (2007)