

高空間分解能化に向けた走査型 SQUID 顕微鏡の改良

Improvement in a scanning SQUID microscope for higher spatial resolution

金沢工大¹, 産総研², 茨城大³ ○河合 淳¹, 小田啓邦², 福與直人², 谷元瞭太^{2,3}, 河端美樹¹

KIT-AEL¹, AIST², Ibaraki Univ.³ ○Jun Kawai¹, Hirokuni Oda², Naoto Fukuyo², Akihiro Tanimoto^{2,3}, Miki Kawabata¹

E-mail: j-kawai@neptune.kanazawa-it.ac.jp

はじめに

我々は、2015 年から古地磁気学の研究ツールとして、走査型 SQUID 顕微鏡の開発を行ってきた[1-2]。SQUID 顕微鏡を用いて岩石などの地質学的サンプルに保存されている過去の地磁気情報を精密に検出・解析することで、太古の地球環境を読み解くことができる[3-5]。岩石中の微細な磁気構造を正確に検出するためには、高感度だけでなく高い空間分解能が要求されるが、そのためには SQUID 顕微鏡における SQUID チップと室温サンプル間の距離（リフトオフ）を極力短くする必要がある。先に開発したシステムで達成した最短のリフトオフは約 190 μm で、それ以下に近づけることが困難であった。理由の一つとして、熱伝導冷却用サファイアロッドの先端に取り付けた SQUID チップと、同ロッド上のメタライズ配線の間で電気的接続を取っていた導電性ペーストの盛り上がりが障害になっていたことが判明した。また、冷却のたびに導電性ペーストと各端子間の接触抵抗が一定にならず大きな値を取る場合があり、SQUID 磁力計としての特性に影響を与えるという問題もあった。

本研究では、リフトオフを更に縮めること、および電気的接続における接触抵抗を安定させることを目的に、SQUID チップの実装方式の改良を行い、冷却試験を行ったので報告する。

開発した手法

今回考案した実装方式では、従来 1 本であったサファイアロッドを二分割した。SQUID チップを実装するロッド（第 2 ロッド）は直径 6mm ϕ で、SQUID チップを実装する先端部は円錐形をしている。円錐部の先端径は 1.2mm ϕ で、中心には 0.8mm $\times$ 0.8mm、深さ 0.1mm の窪みが形成されており、この窪みからロッド側面にかけて、幅 0.5mm、深さ 0.4mm 程度の縦溝が形成されている。

SQUID はワッシャ型のマグネトメータで、チップサイズは 0.75mm $\times$ 0.75mm、厚さ 0.25mm である。この SQUID チップにあらかじめ直径 25 μm ϕ 、長さ 10mm 程度のアリミワイヤを複数本ボンディング接続した。アリミワイヤを付けた SQUID チップを第 2 ロッド先端の窪みにグリスを用いて固定し、アリミワイヤをロッド側面の縦溝に埋めるように沿わせながら導電性ペーストで固定した。SQUID チップを実装した第 2 ロッドは、液体ヘリウムリザーバと熱的接続されている第 1 ロッドに接続される。アリミワイヤの終端部は直径 0.3mm の金線と導電性ペーストで接続され、金線は最終的に電子回路から配線されている銅線に接続される。

冷却試験結果

上記の手法で SQUID チップを実装した走査型 SQUID 顕微鏡に液体ヘリウムを注入して冷却試験を行った。図 1 に液体ヘリウムを注入後の SQUID の磁束-電圧特性（電圧は 1000 倍）を示す。最大出力電圧は約 62.3 μV で、これは直接液体ヘリウム中で計測した際の出力電圧の約 80% であった。既存の低ドリフト FLL 回路で動作させた際の磁場ノイズは約 4pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz で感度は約 660nT/V であった。また、SQUID とケーブルを含めた抵抗値は液体ヘリウム注入後約 48 時間で安定し、ケーブルなどの抵抗を差し引いた端子間抵抗も十分低くなった。今後、直線電流磁場による計測を通じ、最短のリフトオフを実現する予定である。

参考文献

- [1] J. Kawai, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 26:1600905 (2016).
- [2] H. Oda, et al., Earth, Planets and Space, 68:179 (2016).
- [3] A. Noguchi, et al., Geophys. Res. Lett., 2017GL073201 (2017).
- [4] J. A. Tarduno, et al., PNAS, 117, 2309-2318 (2020).
- [5] N. Fukuyo, et al., Earth, Planets and Space, 73:77 (2021).

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤 A (21H0452300) の助成を受けたものである。

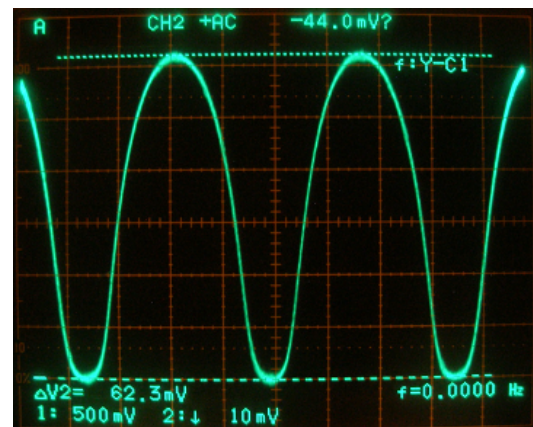


Fig. 1 Flux-to-Voltage characteristic of the SQUID magnetometer in the improved scanning SQUID microscope.