

マイスナー効果に着目した微小磁場シールド

FAINT MAGNETIC FIELD SHIELD USING THE MEISSNER EFFECT

岩下芳久^{#, A)}, 栗山靖敏^{A)}, 不破康裕^{B)}

Yoshihisa Iwashita^{#, A)}, Yasutoshi Kuriyama^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}

^{A)} KURNS, Kyoto University

^{B)} JAEA/J-PARC

Abstract

Magnetic fields play an important role in many physics studies, and many measurement items in physics experiments require control of micro magnetic fields. Although superconducting accelerating cavities can generate high electric fields at low power, the material niobium is a type-II superconductor, and trapping the ambient magnetic flux during the superconducting transition increases the operational losses. For this reason, micro magnetic shielding is important, and strengthening micro magnetic shielding is essential when aiming for further power saving. Conventionally, high permeability magnetic materials are used for magnetic shielding, but even materials for cryogenic temperatures tend to lose their magnetic shielding effect at cryogenic temperatures and in micro magnetic field regions due to a decrease in permeability. In addition, they are expensive and sensitive to mechanical distortion, making them difficult to handle. Therefore, we have begun to study the shielding effect of micro magnetic fields based on the Meissner effect of superconductors, which are perfectly antimagnetic. We have selected a highly sensitive AMR (Anisotropic-Magneto-Resistive) type 3-axis sensor, drive five 3-axis sensors under cryogenic temperature, and bring their signals to the room temperature side with nine cables, including the power supply, by multiplexing. The signals were calibrated with the output of the FluxGate under cryogenic conditions. Preliminary results show that the amount of flux rejection is generally monotonically increasing with temperature gradient.

1. はじめに

超伝導加速空洞は、RF の消費電力が少ないことから昨今普及が進んでいる。この空洞のほとんどは第 II 種超伝導体であるニオブでできており、超伝導転移の際に環境磁束を捕捉する。捕捉された磁束が空洞内壁の RF 電磁場で揺らぐと発熱し、極低温システムの電力負荷が増加する。この影響は空洞の Q 値が高くなるほど顕著になるが、微弱な磁場でも影響が大きく、これを遮蔽することが不可欠となる。しかし、極低温用の高透磁率磁性材料は高価で機械的歪みに敏感で扱いにくい[1]。また、極低温や極低磁場では透磁率が低下する。一方、超伝導体は完全な反磁性を持ち、高透磁率材料による磁気遮蔽と補完的な作用をする。ニオブは純金属の中で最も高い転移温度を持つ (Table 1 参照)。Pb の転移温度は 2 番目に高いが、十分に高純度な素材の入手が困難であり、また Pb は RoHS (特定有害物質使用制限) 等の規制物質である。このような事情から、ニオブはフラックスをトラップする可能性があることを除けばシールド材として第一候補である。

Table 1: Superconductivity Transition Temperature of Pure Metals

材質	Nb	Pb	La	V	Ta	Hg
温度[K]	9.2	7.2	5.9	5.3	4.5	4.2
Type	II	I	?	II	I	I

2. 超伝導材による磁気シールド

近年、磁束の排斥が、温度勾配下で空洞を超伝導転

移させることで誘起されることが明らかになっている[2-6]。空洞が転移温度に達する前に十分な温度勾配で冷却できれば、従来の高透磁率材を使ったシールドを補完する微弱磁場シールドとして機能する可能性がある[5]。これを機能させるには、いずれにしても冷却時には空洞本体よりシールド材を先に超伝導転移させる必要がある。空洞壁は機械的強度を確保するために約 3 mm の厚さがある。例えば約 0.5 mm の薄いニオブシートを想定すれば、空洞壁に比べて小さな熱容量を持つことになり、先行して冷やすのは容易になるであろう。Fig. 1 は、1 セルを覆う Nb シートカバーの形状例 (1 枚のニオブ板円筒に接続された 2 枚のワッシャー - 太い緑線で示した) を空洞壁の形状と共に磁束線と、磁場の壁面法線成分 B_{normal} を示している[7]。右側のフルセルはピルボックス型の中空カバーで覆われており、比較のために遮蔽のない左側のハーフセルが示されている。完全反磁性のため、磁束は Nb シートを迂回せざるを得ず、囲われたセルの赤道付近の壁面法線方向のフラックス成分 B_{normal} は小さくなっている。一方、アイリス近傍では迂回した磁束

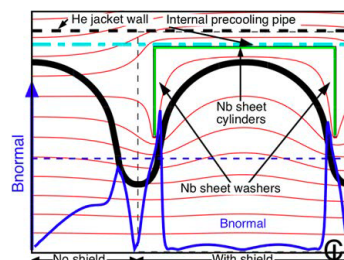


Figure 1: Possible geometry for the magnetic field shield with superconducting sheet.

[#] iwashita.yoshihisa.4x@kyoto-u.jp

集中で増えている領域があるが、磁場の少ない領域故、影響は少ないだろう。遮蔽壁をさらに内側まで伸ばせばこの領域はさらに内側に移動できるが、空洞強度を補強するための強め環との干渉を考慮する必要がある。横方向磁場成分に関しては効果的に迂回させられるのは自明であろう。

ここでは、隣接するセルからの影響は小さいので、比較を容易にするためもあり、1回の計算で両方の形状を計算している。シールドカバーは1枚のニオブ板円筒に接続された2枚のワッシャー(太い緑線)で構成されている。左端のハーフセルにはシールドがない。黒い太線はキャビティ壁を示しているだけで磁場計算には含まれない。赤い細線は、軸に沿ったような磁場中にあるという条件で計算された磁束線である。遮蔽効果は透磁率を0.0001に設定してシミュレートしている。キャビティ表面に垂直な磁気成分 B_{normal} もプロットしており、これは元の磁界に対する相対値である。細い破線は浸磁場のレベルを示す。He ジャケット壁の位置は太破線で、内部の予冷パイプの位置は一点鎖線で示されている。予冷パイプがすべてのシールドカバーに接触していればここから冷えていくことになる。Nb シート筒の継ぎ目をこれと反対側に設けておけば、磁束排斥の際に、逃げ場を失って磁束が捕捉される懸念も減るはずである。継ぎ目からの磁束漏れ自身は継ぎ目で素材を十分な幅重ねて隙間を減らすようにすれば、磁気抵抗が増えるため、大きな問題とはならないはずである。シールドカバーの設計案については[8]を参照のこと。

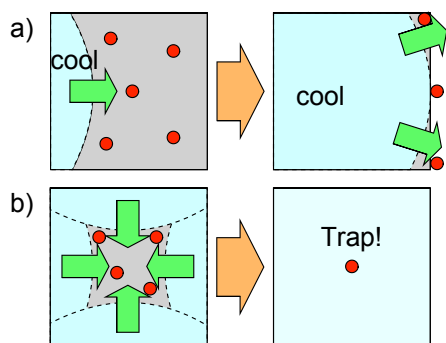


Figure 2: Image of flux ejection during cooling. a) When cooled from one side, flux is ejected from the material. b) When the normal-conducting region is surrounded by the superconducting region, the flux will be trapped.

3. 実験

Figure 3 のような装置を用いて実験を行った。AMR(Anisotropic-Magneto-Resistive)型の3軸センサーを選出し、5個の3軸センサー(HMC1053)をセンサープリント基板上に実装した。5個のチップ内のそれぞれ2個のリセットコイルを並列接続し、5個のチップ分は直列にして制御基板上に設けたドライバーMCP1406/MCP1407(High-Speed Power MOSFET Drivers)を用いて一度に駆動する。15個のセンサーブリッジはアナログマルチプレクサー74HC4067を用いて順次+5Vで駆動し、ブリッジ差動信号はおなじく74HC4067を2個用いて室温側へ取り出している。アナログマルチプレクサーの駆動は74HC393を用いていて、クロックは室温側から与えてい

る。これら回路はすべて極低温下で稼働させる。それらの信号を多重化により電源含め、9本のケーブルで室温側に持ってくることに成功している。室温側でブリッジ差動信号の差を取り、12bitADCを使ってオーバーサンプリングして平均値を取り、16ビット相当以上の分解能を得た。FluxGate計測器をセンサー基板の直上に置き、極低温下で磁場を周りに置いたコイルで変化させ FluxGate計測器の出力と比較して較正值を得ている(Fig. 4)。

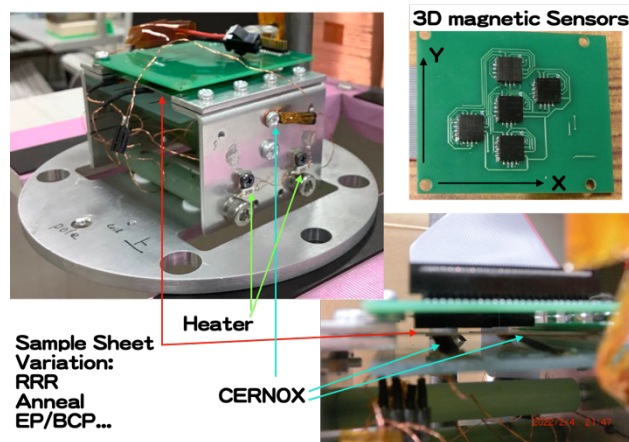


Figure 3: Setup for experiment of flux expulsion.



Figure 4: Coil and Flux Gate for calibration.

サンプルは両端をアルミ製治具でそれぞれ挟んで固定し、それぞれのアルミ製治具は下方へタブを伸ばし、液体ヘリウムに漬けて冷却を行い、ヒーターで加熱して温度を制御する。両端の温度勾配をつけながら温度を下げてゆき、15点のセンサーの磁場の変化を測る。磁場センサー及び CERNOX とサンプルの位置関係を Fig. 5 に示す。5個の磁場センサーは千鳥に配置してあるが、X方向に変化がなければ、Y方向には等間隔での磁場分布を示すはずである。Figure 6 は得られた典型的なデータである。上段はC2,C3での温度、中断はその差をプロットしてある。下段は中央での磁束変化で、ジャンプが見える。センサーの温度は実際の試料温度変化より5秒ほど遅れているように見える。これは、センサー自身

の温度変化の遅れと、温度読み出し系の応答に依るものであろう。Figure 7 にこのときの B_z , B_y 成分のベクトルプロットを示す。温度が下がるにつれ、中央部の磁場の向きが変わるのが、磁束排斥の様子を示していると思われる。温度が下がってきたところは磁場の絶対値が減っているのがわかる。温度勾配と磁束変化の予備的結果を Fig. 8 に示す。予備の結果であるが、温度勾配に単調な変化を示している。今後詳細なデータを集める予定である。

本研究は一部 JSPS 科研費 19K21877 の助成を受けたものです。

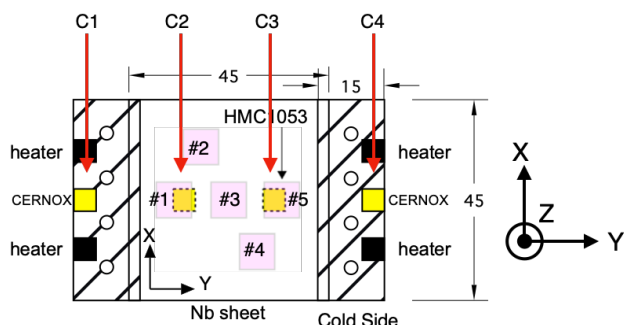


Figure 5: Layout of magnetic sensors and CERNOX sensors.

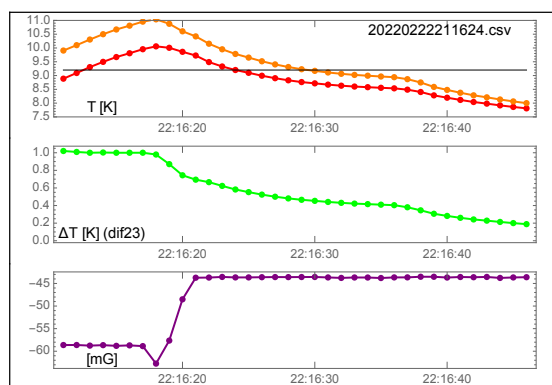


Figure 6: Typical data for temperature changes and magnetic field jump. Top figure shows temperatures at C2 and C3. Center figure shows the difference. Bottom figure shows the magnetic field of #3.

参考文献

- [1] M. Masuzawa, OHO セミナー-2014, http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOtxt/OHO-2014/11_Masuzawa_Mika.pdf
- [2] A. Romanenko, A. Grassellino, O. Melnychuk and D. A. Sergatskov, “Dependence of the residual surface resistance of superconducting radio frequency cavities on the cooling dynamics around T_c ,” J. Appl. Phys. 115 (2014) 184903.
- [3] A. Romanenko *et al.*, “Ultra-high quality factors in superconducting niobium cavities in ambient magnetic fields up to 190 mG,” Appl. Phys. Lett. 105 (2014) 234103.
- [4] S. Huang, T. Kubo and R. L. Geng, “Dependence of trapped flux-induced surface resistance of a large-grain Nb superconducting radio-frequency cavity on spatial temperature gradient during cooldown through T_c ,” Phys. Rev. Accel. and Beams 19 (2016) 082001.

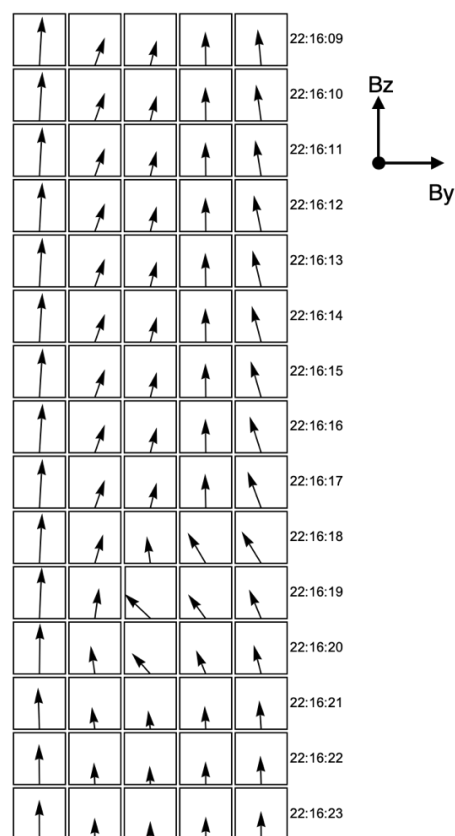


Figure 7: Vector plot of magnetic field component B_z and B_y .

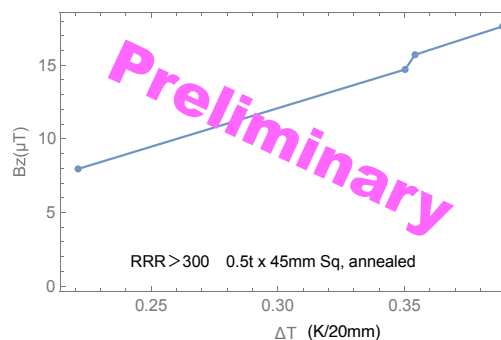


Figure 8: Field jump as a function of temperature gradient.

- [5] T. Kubo, “Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient,” Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 053G01 (2016).
- [6] I. Itoh, K. Fujisawa and H. Otsuka, NbTi/Nb/Cu Multilayer Composite Materials for Superconducting Magnetic Shielding—Superconducting Performances and Microstructure of Nb Ti Layers”, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 85 JANUARY 2002. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/8522.pdf>
- [7] Y. Iwashita, Y. Kuriyama, H. Tongu, and Y. Fuwa, “Magnetic Field Shielding with Superconductors”, IEEE TRANS. ON APPLIED SUPERCOND. Vol. 32, No. 6, 3500404, Sept. 2022. doi:10.1109/tasc.2022.3167623
- [8] Y. Iwashita, Y. Fuwa, Y. Kuriyama, and H. Tongu, “Magnetic Field Shield for SC-Cavity with Thin Nb Sheet”, in Proc. IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 3090-3092. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-THPOMS052