

識別番号 P 1 4

研究課題 超伝導マグネットにおける磁束格子の安定化

研究代表者 後藤貴行（理工学部，機能創造理工学科）

共同研究者 高尾智明（同学科）・中村一也（同学科）

Summary Quantum fluctuation often brings a non-trivial physical state to atoms or solids at low temperatures, represented by liquid helium, which persists to be liquid even at the absolute zero, where the quantum fluctuation prevents solidification. In this project, we investigate the effect of the quantum fluctuation on the magnetic flux penetrating superconductors. The flux form a lattice at low temperatures, and melts at high temperatures just like real crystals. Does the flux lattice always solidify at the absolute zero ? We expect that the quantum fluctuation will bring the novel and exotic state of the flux lattice at low temperatures. The study of this flux lattice is also important for applied research, because the zero-resistance, which is indispensable for the application of the superconductivity, is maintained only when the flux lattice solidifies. In the presentation, we quantitatively estimated magnets AC losses which eas a main issue in electromagnetic phenomena including magnetic flux behaviors.

1. はじめに

本研究課題の主題である磁束格子(flux lattice)は，超伝導体に強い磁場を印加した際に，超伝導体内部を貫通する磁力線のことである。磁束格子は温度が高いと液体のように融解し，低温で結晶化するなど，実在の粒子のように振舞うことが知られている。磁束格子の密度は磁場に比例するため，高磁場では粒子間隔が小さくなり，その間隔が，磁束線のゆらぎの振幅に達すると融解する。この振る舞いも実在の固体の融解を表すリンデマン則と一致する。このように，いわば仮想粒子として振舞う磁束線の状態を理解することは，超伝導の理解に不可欠であるとともに，一方，工学的な面においても重要な意味を持つ。なぜなら，超伝導体に電流を流した際に，ローレンツ力によって磁束線が動いてしまうと電圧が発生し，超伝導のホールマークである電気抵抗ゼロが実現せず，ジュール損失によって超伝導が不安定となるためである。このため，工学的見地からは磁束の固定化（＝ピン留め）が最も重要な課題とされる。

本研究の目的は，磁束状態への量子揺らぎの影響という理学的な興味の対象を，基礎・応用サイドの両面から調べ，理解を深めることで，将来の応用を含めたブレークスルーにつなげることである。特に今年度は応用サイドを中心として，熱損失，機械的歪，交流応答，臨界電流測定というマクロ量的物理量の測定により，このエキゾチックな相における有効なピン留め効果を探索する。

2. 応用サイドからのアプローチ<交流機器応用での超伝導マグネット安定性>

上述のように，超伝導体に電流を流した際に，ローレンツ力によって磁束線が動き起電力が発生し，その結果ジュール損失によって超伝導の温度が上昇する現象は電力機器応用では重要な課題である。例えば国のプロジェクトにおける SMES 用超伝導マグネットの開発では，マグネット電流を周期的に増減させて損失が発生してもマグネット安定性が確保されるか検討されている。

このような損失は，交流磁界中あるいは交流通電すれば超伝導体単独でも生じる損失であ

る。一方、コイルを形成してはじめて発生する損失もある。その一つが線材と構造材料や絶縁材料との摩擦により生じる機械損である。これはコイル巻線部に機械的な振動が発生することによる摩擦発熱と考えることができる。このような巻線の振動は、巻線の固定状態によって大きく異なる。すなわち、きつく巻いてあれば振動は小さく、逆にゆるい巻線であれば大きく振動して摩擦発熱も大きくなる。このような摩擦発熱に起因する機械損を低減するためには、巻線時の張力を大きくするのが一方策である。そこで、我々は巻棒材料の機械的特性を工夫することにより交流損の低減を試みた。応用機器を志向するときは冷却昇温が何度も繰り返されるため、熱疲労による張力の劣化や超伝導線自身の劣化も併せて検討する必要がある。そこで、冷却昇温を 100 回繰り返す際の、超伝導マグネットの臨界電流および磁束の周期的移動などに起因する損失を測定した。

試験用の巻き棒（外径 55mm、高さ 50mm）は、温度低下につれて膨張する DGFRP60、温度低下につれて収縮する DFRP30、および膨張も収縮も生じない DFRP45 を用いた。超伝導線は一般的な Bi2223 高温超伝導線（幅 4.1mm、厚さ 0.22mm、銀比 2.2）で、これを巻き棒に約 3.5 ターン巻いた。このマグネットを液体窒素に漬けて、直流電流を流して臨界電流を、交流電流を流して交流損失を測定した。

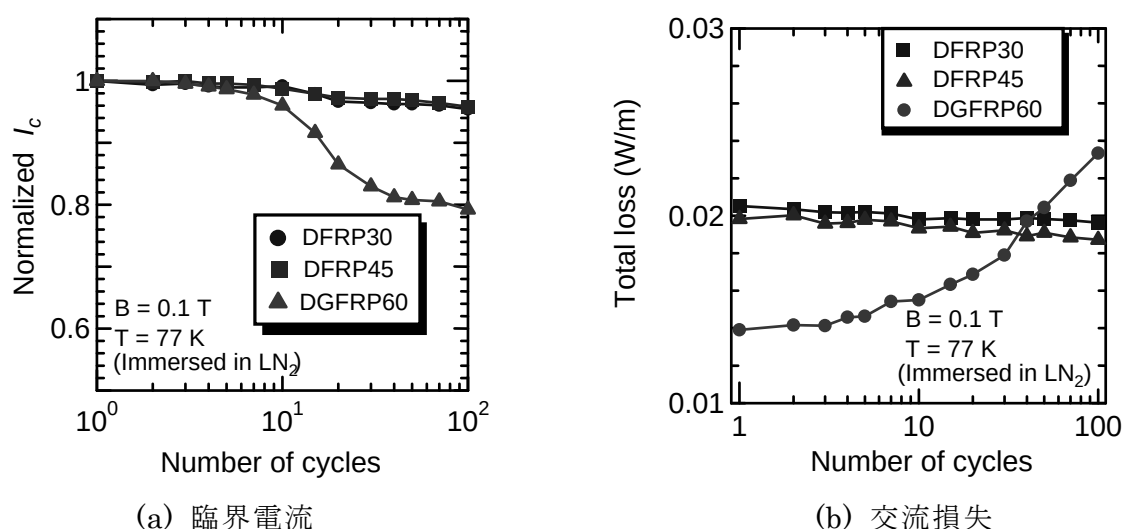


図 1 臨界電流と交流損失の熱疲労による変化

それらの測定結果を図 1(a)と(b)に示す。(a)より 100 回の熱疲労において DGFRP60 を巻き棒としたマグネットだけが、臨界電流が低下している。これら 3 種類の巻き棒の中で、DGFRP60 が最も大きな膨張率を持っている。従って過度な引っ張り歪が線材に印加されてしまい、線材の臨界電流が低下したと考えられる。過大な引っ張り歪により超伝導線の性能が劣化する現象はしばしば報告されている。また(b)より、DGFRP60 のマグネットだけが、交流損失が増大している。これは、繰り返しサイクル数の増加とともに臨界電流が低下したため通電電流の負荷率が増大し、超伝導線に出入りする磁束格子が増えたことが原因と考えられる。その他の 2 種類のマグネットである DFRP30 と DFRP45 は、100 回の繰り返しにおいて臨界電流も交流損失も変化しなかった。すなわち過度の歪が加わらなければ、磁束格子の出入りなどに起因する損失は変化しないことがわかった。

3. まとめ

磁束格子の振る舞いについて、応用サイドからアプローチした。具体的には重要な課題の一つである、磁束格子の出入りなどに起因する交流損失である。膨張率の異なる 3 種類の巻き枠材料を用いてマグネットを作り励磁したところ、引っ張り歪が巻線に最も強く加わるマグネットにおいて、臨界電流が低下し磁束格子の出入りなどに起因する交流損失は増大した。また歪が大きくないマグネットでは、劣化が見られなかった。これらのことから、超伝導線に加わる機械的歪が過度に大きくなければ、磁束格子の侵入などに起因する損失は増大しないことが実験的に確認された。

4. 本研究に関連する成果発表（2008 年，2009 年）

1. Influence of thermal cycles on critical current and mechanical loss in superconducting coil having negative thermal expansion bobbin, T. Takao, Y. Nakajima, Y. Yamada, Y. Yamamoto, H. Kobayashi, T. Goto, S. Fukui and A. Yamanaka, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, pp. 2999-3002, June (2009).
2. NMR study on the local structure in La-based high- T_c cuprates, T. Goto, J. Tonishi, T. Suzuki, A. Oosawa, M. Fujita, K. Yamada, T. Adachi and Y. Koike, J. Phys., Conference Series **108** (2008).
3. Muon spin relaxation detection of the soft mode toward the exotic magnetic ground state in the bond-disordered quantum spin system $\text{IPA-Cu}(\text{Cl}_{0.35}\text{Br}_{0.65})_3$, T. Goto, T. Suzuki, K. Kanada, T. Saito, A. Oosawa, I. Watanabe and H. Manaka, Phys. Rev. **B78**, 054422 (2008).
4. Cooling performance of conduction cooled superconducting magnet using high thermal conduction plastic, T. Takao, R. Sakuma, T. Takiyama and A. Yamanaka, 2008 Applied Superconductivity Conference, No. 2LPQ04 (2008).