

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12671

研究課題名（和文）磁気共鳴画像装置用磁場発生コイルへの遮蔽電流磁場消磁法の適用に関する基礎的検討

研究課題名（英文）Fundamental Investigation for Application of Original Methods Eliminating Screening-Current-Induced Fields to Superconducting Coils for Magnetic Resonance Imaging System

研究代表者

柁川 一弘 (KAJIKAWA, Kazuhiro)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：10294894

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：磁気共鳴画像（MRI）装置用の高温超伝導コイルを構築する上で、空間的に不均一で時間的に減衰する「遮蔽電流磁場」が解決すべき課題の一つとなっている。これまでに、遮蔽電流磁場を消磁する手法を独自に提案し、小型コイル単体に対して原理実証している。そこで、複数個のコイル群で構成されるMRI装置用高温超伝導コイルについても、提案する遮蔽電流磁場消磁法が適用可能なことを実証するために、消磁コイルの代表的な2つの配置法に関する実験と遮蔽電流磁場の消磁効果に与えるコイル間相互作用の数値解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験と数値解析の結果、消磁コイルが作る外部磁場により高温超伝導コイルに誘起される遮蔽電流磁場の大きさは非常に小さく、提案する遮蔽電流磁場消磁法が複数個のコイル群で構成されるMRI装置用高温超伝導コイルに対しても適用可能なことを明らかとした。現在国内外の病院に幅広く導入されているMRI装置では低温超伝導コイルを液体ヘリウムで冷却しているが、高温超伝導化により希少で高価なヘリウムを使用しないIMRI装置の実現に一歩近づいた。

研究成果の概要（英文）：When high temperature superconducting coils for magnetic resonance imaging (MRI) system are constructed, the screening-current-induced field that produces special inhomogeneity and temporal decay is one of problems to be solved. Original methods to eliminate the screening-current-induced fields have been proposed and validated using fabricated small single coils. In this study, in order to validate the proposed methods to eliminate the screening-current-induced fields in the high temperature superconducting coils for MRI system, which usually consist of several sets of element coils, we carried out experiments for two arrangements of shaking coils and numerical analyses on the magnetic interaction between the coils affecting the elimination of screening-current-induced field.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導線 テープ形状 遮蔽電流 磁化 消磁 同軸配置 トロイド配置 MRI装置

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 高温超伝導線は幅が数 mm 程度、厚さがサブミリオーダーのテープ形状をしており、これをコイルに巻線して励磁すると、テープ幅広面に垂直な磁場印加により面内に遮蔽電流が誘起されて垂直方向に磁化し、輸送電流が作るコイル中心部の主磁場に加えて、テープ線の垂直磁化が主磁場と反対向きの磁場（遮蔽電流磁場）を作る。特に、国内外の病院に数多く設置されている非破壊で人体を断層撮影する磁気共鳴画像（MRI）装置に用いる磁場発生コイルでは、ppm オーダの高い空間均一度を必要とするが、高均一な主磁場を作るコイルを設計しても、遮蔽電流磁場の重ね合わせにより空間均一度が著しく低下してしまう。また、MRI 装置では 0.1 ppm/hour 未満の高い時間安定度も要求されるが、遮蔽電流磁場は長時間にわたり減衰し続ける特徴も併せもつため、時間安定度も確保できない。そこで、これまでに、高温超伝導コイルの励磁時に発生する遮蔽電流磁場を消磁する独自の手法を提案し、小型の試作コイルを用いてその原理実証に成功した。本手法は遮蔽電流磁場を消磁可能な有望技術として、世界的に注目されている。

(2) MRI 装置用の磁場発生コイルは、なるべく少ない線材量で大口径空間に均一磁場を生成するために、形状や配置が最適設計された複数個の要素コイルで構成されるのが一般的である。高温超伝導線を用いてこのようなコイル群を構成して遮蔽電流磁場を除去するための消磁コイルを配置する場合、コイル群全体を 1 つの消磁コイルで囲むのは占積率が極端に低く非効率のため、要素コイル単位で個別に消磁コイルを配置する方が効果的である。そこで、高温超伝導コイル単体に対してこれまでに実証済みである遮蔽電流磁場消磁法を、複数個のコイル群にも適用可能かどうか検証する必要がある。

## 2. 研究の目的

独自に提案する遮蔽電流磁場消磁法が、複数個の高温超伝導コイル群に対しても有効かどうかはこれまでに全く検討されていない。そこで、本研究では、実験や数値解析を通して、高温超伝導コイルにおける遮蔽電流磁場消磁法に関する新しい知見を得る。

## 3. 研究の方法

(1) 同軸配置した消磁コイルを有する高温超伝導コイルを製作する。また、高温超伝導コイルを内在しない同軸型とトロイド型の消磁コイルも別途製作する。液体窒素を用いて浸漬冷却した高温超伝導コイルを励磁した際に発生する遮蔽電流磁場を、コイル中心部に配置した極低温用ホール素子により観測する。3 つの消磁コイルを様々に組み合わせて微小交流磁場を印加した際の遮蔽電流磁場の変化を観測し、相対位置関係や印加磁場の大きさ等が与える影響を実験的に評価する。

(2) トロイド配置した消磁コイルを有する高温超伝導コイルを製作する。液体窒素を用いて浸漬冷却した高温超伝導コイルを励磁した際に発生する遮蔽電流磁場を、コイル中心部に配置した極低温用ホール素子により観測する。既に製作済みの高温超伝導コイルを内在しない 2 つの消磁コイルも組み合わせることにより、微小交流磁場を印加した際の遮蔽電流磁場の変化を観測し、相対位置関係や印加磁場の大きさ等が与える影響を実験的に評価する。

(3) 実験結果を計算機上で再現する数値計算プログラムコードを作成する。作成したコードを用いて、実験では制約により遂行できない幅広い条件や範囲に対する数値解析を実施し、高温超伝導コイルの寸法や消磁コイルの相対位置関係、印加磁場の大きさ等が遮蔽電流磁場の消磁効果に与える影響を数値的に評価することにより、消磁コイルが相互に影響しない条件・範囲を同定する。

## 4. 研究成果

(1) 市販の高温超伝導テープ線材を用いて、図 1 に示すようなジョイントレスダブルパンケーキ積層コイルを製作した。また、消磁コイル（同軸型もしくはトロイド型）が作る外部磁場が一定の距離だけ離れた位置にある高温超伝導コイルを磁化させるかどうかを実験的に評価するために、両コイルの間隔を調整することができる図 2 に示すような治具も製作した。

(2) 直径 1 mm の銅線を用いて、図 2 に示すような同軸型消磁コイルを製作した。コイル間隔調整治具に製作した高温超伝導コイルと同軸型消磁コイルを固定し、全体を液体窒素で浸漬冷却した。同軸型消磁コイルを交流電流で短時間励磁し、高温超伝導コイルの中心磁場を極低温用ホール素子で繰り返し測定した。結果の一例を図 3 に示す。図 3 より、測定した中心磁場は非常に小さく、コイル間隔や磁場印加回数に関係なく高温超伝導コイルがほとんど磁化しないことがわかった。

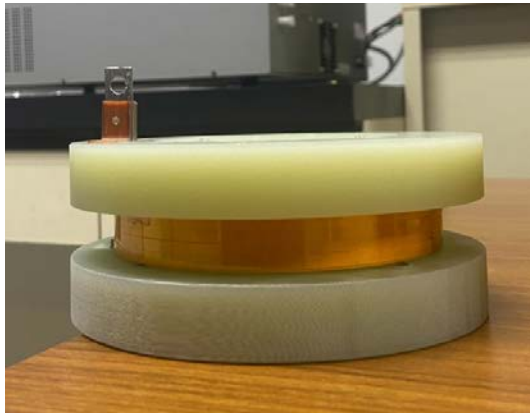


図1 製作した高温超伝導コイル

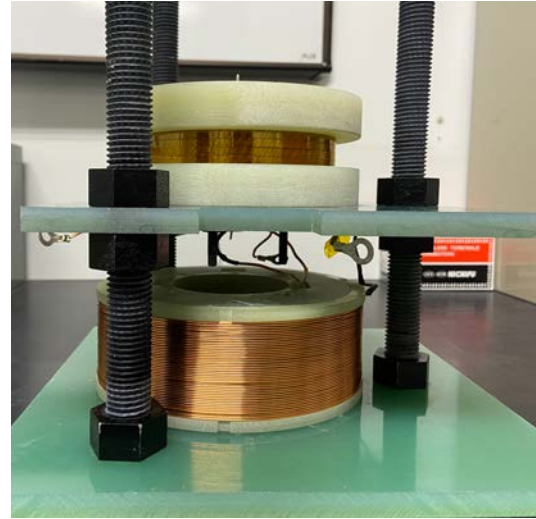


図2 製作したコイル間隔調整治具

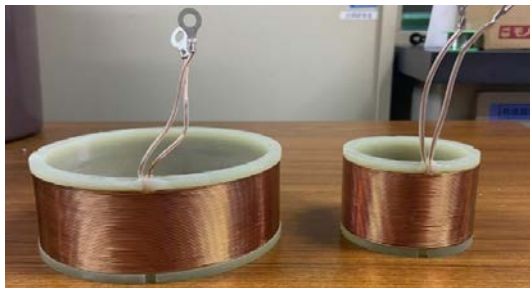


図3 製作した同軸型消磁コイル

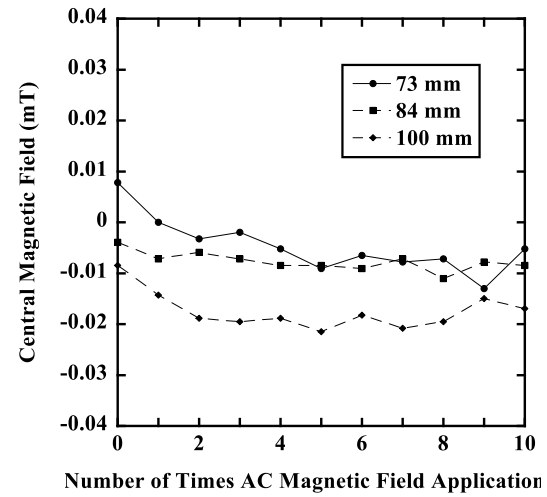


図4 同軸コイルを用いた実験結果

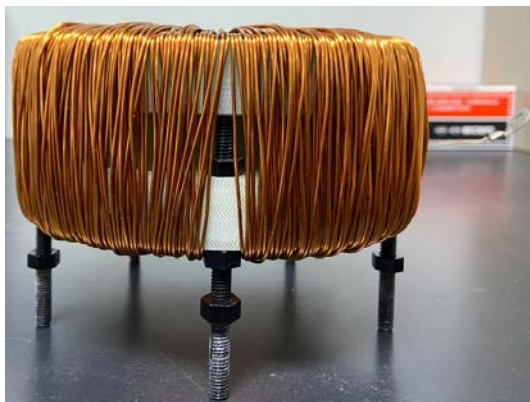


図5 製作したトロイド型消磁コイル

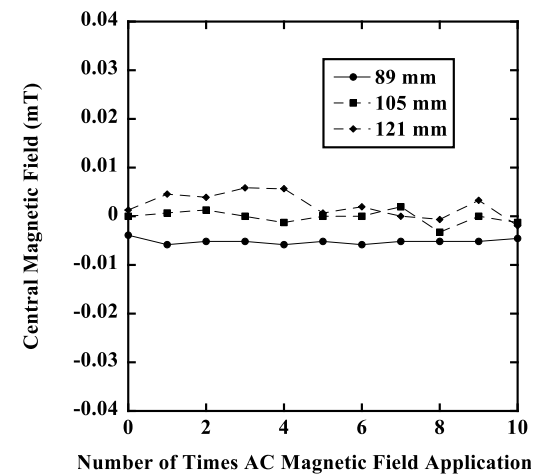


図6 トロイドコイルを用いた実験結果

(3) 直径 1 mm の銅線を用いて、図 5 に示すようなトロイド型消磁コイルを製作した。コイル間隔調整治具に製作した高温超伝導コイルとトロイド型消磁コイルを固定し、全体を液体窒素で浸漬冷却した。トロイド型消磁コイルを交流電流で短時間励磁し、高温超伝導コイルの中心磁場を極低温用ホール素子で繰り返し測定した。結果の一例を図 6 に示す。図 6 より、測定した中

心磁場は非常に小さく、コイル間隔や磁場印加回数に関係なく高温超伝導コイルがほとんど磁化しないことがわかった。

(4) 得られた実験結果を数値的に再現するために、拡張エネルギー最小化法に基づく従来の数値計算プログラムコードをパンケーキコイル用に改変した。改変したプログラムコードの妥当性を評価するために、円形断面線材に斜め方向の外部横磁場を印加したときの電流分布の時間変化を数値解析し、磁化の理論表式と比較した。その結果、パンケーキコイルとして適切な電流分布が求まるとともに、磁化の理論曲線と良く一致した。

(5) 改変したプログラムコードを用いて数値解析した高温超伝導コイルが作る遮蔽電流磁場の外部印加磁場依存性を図7に示す。図7より、消磁コイルが作る数 mT の外部磁場による遮蔽電流磁場の大きさは数十  $\mu$ T 程度であり、実験結果と同様に非常に小さいことがわかった。

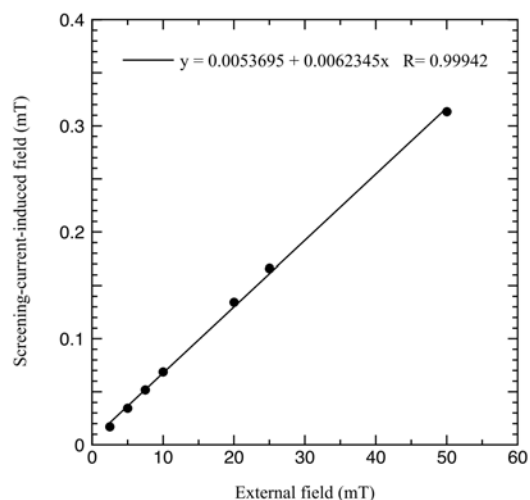


図7 遮蔽電流磁場の数値解析結果

図7より、消磁コイルが作る数 mT の外部磁場による遮蔽電流磁場の大きさは数十  $\mu$ T 程度であり、実験結果と同様に非常に小さいことがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 白石和輝, 柁川一弘
2. 発表標題 消磁コイルの配置が遮蔽電流磁界消磁法に与える影響の実験的評価
3. 学会等名 第104回2022年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------