

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15204

研究課題名（和文）宇宙機搭載に向けた磁気クロークの多層化および磁気遮蔽能力の向上

研究課題名（英文）Increase of the shielding performance of magnetic cloak for spacecraft

研究代表者

長崎 陽（Nagasaki, Yoh）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60823747

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁気遮蔽にとって理想的な超電導バルク体による遮蔽電流分布から着想を得た無絶縁型多層超電導シールド・磁気クロークを提案し、磁気遮蔽率向上を達成した。従来の絶縁型超電導シールドに対して層間絶縁を採用しないことで層間にも電流パスが生じ、遮蔽電流が分布する。実際に絶縁型と無絶縁型の超電導シールドの遮蔽特性を実験的に比較し、無絶縁型は絶縁型と比較して遮蔽率が非常に高くなることを実証した。また、多層化した無絶縁型超電導シールドを制作し、シールド中心部において99.9%以上の遮蔽率が達成可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高い遮蔽率を達成した本研究の磁気遮蔽システムを大型し、放射線・磁気クロークシステムが実現すれば、同システムは今後の人類の宇宙空間における活動のインフラとなることが期待される。更に、宇宙機のみならず、磁気遮蔽を必要とするMRIや量子コンピュータ、磁気環境の影響が大きい生物実験等、様々な磁気関連分野に応用可能であり、非常に社会的意義が高い。また、超電導線材を用いた磁気シールドの遮蔽特性および多層構造化の可能性を明らかにしたことは、電磁気学を含む学術分野においても非常に有意義と考える。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a non-insulation magnetic shield or cloak to make a screening current distribution as like the superconducting bulk and realized the increase of the shielding performance of superconducting shields using CC tapes. The screening current can be produced though the current paths between each layer of the tapes by removing the electrical insulation between the tapes. We experimentally compared the shielding performance of insulation shields and non-insulation shields and verified that the shielding factor of the non-insulation shields were much higher than that of the insulation shields. We also made a multi-layer non-insulation shield and realized more than 99.9% shielding factor at the center of the shield.

研究分野：電気工学

キーワード：磁気クローク 超電導磁気シールド 高温超電導 放射線シールド 宇宙応用

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間には宇宙放射線が飛び交っており、宇宙飛行士の被曝、搭載機器の劣化を防ぐために、放射線シールドの研究開発は宇宙探査における最重要課題の一つである。NASA や EU の SR2S (Space Radiation Superconducting Shield) プロジェクト等で、将来の有人火星探査に向けて、超伝導コイルを利用した放射線シールドの研究開発が行われている。同システムは、超伝導コイルを用いて宇宙機周りに強力な磁場を発生させ、高エネルギー荷電粒子である宇宙放射線から宇宙機を防護する。しかし、この際、宇宙機自体に数百 mT 程度の強力な磁場が常時印加されてしまい、人体および搭載機器に悪影響を及ぼす恐れがある。本研究では、同磁場の遮蔽を目的として、超伝導体と強磁性体シリンダーから構成される磁気クロークの研究開発および磁気遮蔽能力向上に取り組む。超伝導体には外部磁場を遮蔽する性質があり、超伝導シリンダー内部が遮蔽され極低磁場環境となる。しかし、その遮蔽効果がシリンダー外部の磁場にまで影響を与えてしまうため、放射線シールド自身の磁場や宇宙機に搭載された計測機器に悪影響を及ぼすことが懸念されている。磁気クロークは、超伝導シリンダーと強磁性体シリンダーを組み合わせることで、外部磁場に影響を与えることなくシリンダー内部の遮蔽が可能である[1]。しかし、磁気クロークは近年実現されたばかりであり、遮蔽率が向上可能な構成が明らかにされていない。本研究では磁気クロークを磁気遮蔽システムとして実用化するために、磁気クロークの多層構造化に取り組む、磁気クロークによる高磁場における遮蔽率向上を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙機用磁気シールドシステム構築を目的として、超伝導体と強磁性体シリンダーから構成される磁気クロークを多層化することで磁気遮蔽能力の向上を図り、磁気クロークによる磁気シールド技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

多層磁気クロークの磁気遮蔽能力を明らかにするため、電磁界解析モデルを構築するとともに、1 T 程度の磁場を 10^{-3} 程度減衰させることを想定した、小型の磁気クローク (長さ 13 cm) のスケールダウンモデル構築を行った。磁気クロークは、磁性体の透磁率および超伝導シリンダーの構成によりその性能が決定する。様々な構成の多層化されたシリンダー内への磁場侵入量を数値的に明らかにし、上記遮蔽能力を有する多層磁気クロークを設計した。また、多層高温超伝導テープ線材で構成した多層磁気クロークスケールダウンモデルの遮蔽能力を測定し、解析との整合性を確認した。また、放射線シールド実機を想定した大型の磁気クロークシステムにおける構造設計を行った。

4. 研究成果

本研究では、強磁場遮蔽可能な超伝導シールドを実現するために、高温超伝導テープ線材を用いて超伝導磁気シールドを構成した。また、遮蔽率向上のために、磁気遮蔽にとって理想的な超伝導バルク体による遮蔽電流分布から着想を得た無絶縁型多層超伝導シールド・磁気クロークを提案した。無絶縁型の超伝導磁気シールドを用いた際の磁気遮蔽特性を解析および実験的に明らかにした。以下にその成果を示す。

図 1 に構築した電磁界解析モデルを用いた磁気クロークによる磁気遮蔽のシミュレーション結果を示す。1 T の磁場を印加した際における磁束密度のコイル及び磁気クローク周辺の分布を示している。図 1 からわかるように、1 T のように強磁場を印加した際にも磁気クローク内部が遮蔽されており、磁気クローク内部の磁束密度が大きく減衰していることがわかる。同様の解析を磁気クロークの構成を変化させながら行い、内部の遮蔽率が大きくなり、かつ外部磁場への影響が小さくなる構成を明らかにした。また、無絶縁型超伝導磁気シールドを適用することで、超伝導バルク体と同等の遮蔽率が達成可能であることを解析的に明らかにした。

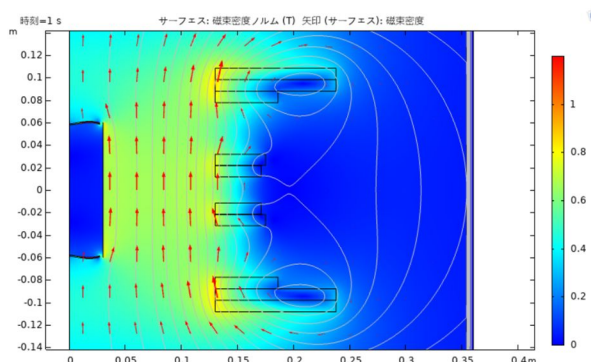


図 1: 磁気遮蔽シミュレーションによる磁場分布解析結果

提案した無絶縁型超伝導シールドは先行研究例がなく、層間絶縁の有無で超伝導シールドの

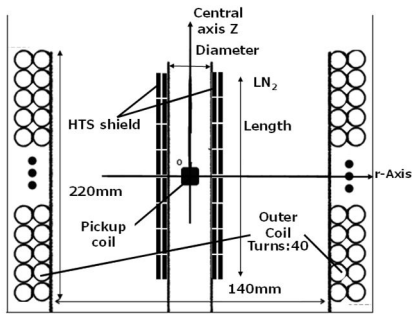


図 2：磁気遮蔽測定実験システム構成図

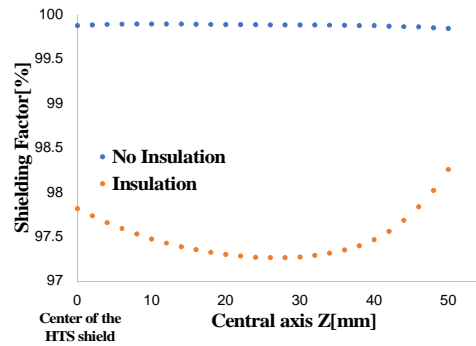


図 3：無絶縁型および絶縁型磁気シールドにおける磁気遮蔽特性の測定結果

遮蔽特性に差が生じるのか確認されていない。そこで、同構造の絶縁型、無絶縁型超電導シールドの中心軸上の遮蔽特性を比較することで無絶縁型超電導シールドの有効性の検討を行った。図 2 に超電導磁気シールドの遮蔽率測定実験システムの構成図を示す。遮蔽特性の測定は外層コイルの中心に同軸に超電導シールドを配置し、外層コイルへ 45 A peak、500Hz の交流通電を行ったときの超電導シールドの有無における磁場の变化を測定することで、遮蔽率を求めた。なお、通電電流は外層コイルへ通電可能な最大の電流であり、その際の中心磁場は 10 mT となる。磁場はピックアップコイルで検出し、ピックアップコイルの信号はロックインアンプを用いて測定した。

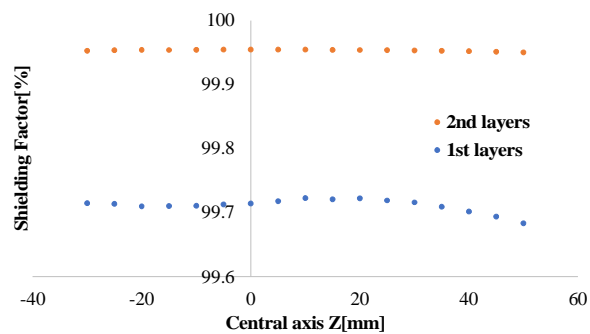


図 4：単層無絶縁型シールドおよび多積層無絶縁型シールドの遮蔽特性測定結果

測定した絶縁型及び無絶縁型の遮蔽率分布を図 3 に示す。横軸は磁気シールド中心軸 z 方向の位置を示している。無絶縁型において遮蔽特性が大きく向上していることがわかる。これは層間絶縁の有無で超電導シールドに流れる誘導電流の電流パスに差が生じていることを意味し、無絶縁型には層間に電流パスが生じていると考えられる。また、その中心遮蔽率はおよそ 99.7 % となった。絶縁型の遮蔽特性において、中心より端部の方の遮蔽率が高い原因としては、絶縁型の電流パスが一つであるためその構造上中心に外部磁場を上回る遮蔽磁場を発生させてしまっているためである。無絶縁型にすることで複数の電流パスが発生し、絶縁型のように中心部付近で遮蔽率が低下しないシールドが実現されていることがわかる。

次に無絶縁型の超電導シールドの遮蔽特性を更に向上させるために、テープ線材の超電導層同士を対向させた 2 層の無絶縁型超電導シールド(ソレノイド構造)を一つの組として、ソレノイド構造を多積層化させた無絶縁型超電導シールドを提案し、遮蔽特性の検討を行った。多積層化させた無絶縁型超電導シールドの遮蔽特性を図 4 に示す。図 3 と同様に磁気シールド中心軸の遮蔽率分布を示している。この結果から、多積層化させることで遮蔽特性が大きく向上していることが確認でき、無絶縁型超電導シールドを積層化させることは遮蔽特性の向上に有効であると実証した。また、図 4 からシールド内部の幅広い位置において遮蔽率 99.9%以上 10^{-3} 程度の磁場減衰を達成していることが確認できる。超電導テープ線材を用いてこのように高い遮蔽率を測定した前例はなく、本研究の無絶縁型超電導シールドを用いた磁気クロークを発展させることで、宇宙応用のみならず磁気遮蔽を必要とする多くの分野に応用可能であり、本成果は重要な成果であると考えられる。

< 引用文献 >

- [1] F. Gomory, M. Solovyov, J. Souc, C. Navau, J. Prat-Camps, and A. Sanchez, "Experimental realization of a magnetic cloak," Science, vol. 335, no. 6075, pp. 1466-8, Mar 23 2012, doi: 10.1126/science.1218316.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Nagasaki, M. Maruyama, M. Tsuda, I. Funaki
2. 発表標題 Reinforcement Structure of HTS Magnet to Increase the Magnetic Moment for Space Application
3. 学会等名 Magnet Technology 27 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nagasaki, M. Maruyama, M. Tsuda, I. Funaki
2. 発表標題 Reinforcement Method of High Temperature Superconducting Coil for Magneto Plasma Sail
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花木悠哉, 江宇揚, 長崎陽, 津田理
2. 発表標題 強磁場遮蔽が可能な電磁誘導型超電導磁気シールドの遮蔽特性
3. 学会等名 2021年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江宇揚, 津田理, 長崎陽
2. 発表標題 強磁場遮蔽が可能な電磁誘導型超電導磁気シールドの遮蔽能力
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoh Nagasaki , Yuyang Jiang , Makoto Tsuda , Mykola Solovyov , Fedor Gomory
2. 発表標題 Magnetic shielding performance of superconducting shields using coated conductor tapes with soldering joints
3. 学会等名 10th Asian Cryogenics and Applied Superconductivity Conference (ACASC), 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia (Asian-ICMC), and the CSSJ meeting (国際学会)
4. 発表年 2020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		
スロバキア	Slovak Academy of Sciences		