

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06211

研究課題名（和文）希土類系分割超伝導バルクの効果的磁気配置を考慮した非接触磁気軸受の基礎研究

研究課題名（英文）Basic study of non-contact magnetic bearing considering effective magnetic arrangement of rare earth based superconducting bulk

研究代表者

山岸 一人（YAMAGISHI, KAZUHITO）

横浜国立大学・大学院工学研究院・特別研究教員

研究者番号：10293177

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、超伝導バルクを使った集積型非接触磁気軸受の実用化のための基礎研究であり、加工技術を含めた分割バルクの効果的最適配置の問題を解決するためのものである。本研究の成果としては、この研究で提案している効果的磁気配置を考慮した設計手法を実際を使って集積型の超伝導磁気軸受（SMB）を構成し、最適配置の効果の検証を行うことができた。この検証過程で、バルクの加工技術の検討や分割バルクの性能評価とその設計手法の構築などいくつかの検討事項をクリアすることができた。そして最終的な成果として、最適配置がもたらす効果を確認することができ、本研究の有効性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である、超伝導バルクの加工技術の検討によって、超伝導バルクを応用した回転機や軸受等の設計自由度を飛躍的に向上させることが可能と考えられる。また、これまでバルクの形状による制約で設計することが困難であった分野へも、その応用範囲が広がることとなり、電力機器応用の分野のみならず様々な分野への応用が期待できる。そして、それらの実用化によって社会全般に貢献すること考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research is a basic research for the practical application of the integrated non-contact magnetic bearing using the superconducting bulk, and is for solving the problem of the effective optimal placement of the divided bulk including the processing technology. As a result of this research, the integrated superconducting magnetic bearing (SMB) is constructed by actually using the design method considering the effective magnetic placement proposed in this research, and the effect of the optimal placement is verified. In this verification process, we were able to clear a number of considerations such as examination of bulk processing technology, performance evaluation of divided bulk, and construction of its design method. As a final result, we were able to confirm the effect brought about by the optimal placement, and were able to show the effectiveness of this research.

研究分野：電気電子工学

キーワード：超伝導バルク 高精度表面磁束分布測定 分割加工技術 磁気的最適配置 表面画像分析 磁気軸受 回転試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまで我々は、超伝導バルクの磁気軸受や回転機への応用実現を目指して、機器特有の変動磁界による超伝導バルクへの悪影響を最小にすることを目標とした最適設計法について研究を行ってきた。この研究の中で、大きな問題となったのが、バルクの形状による設計の自由度が非常に少ないことであった。これは、その超伝導特異な性質である高電流密度性能や捕捉磁束性能を著しく損なうことなく加工を行い、機器等へ組み込む技術が開発されていないためであった。研究用の試験装置などへの組み込む際は、超伝導バルクの性能を第1に優先させており、極力加工はせずに使用され、実際の機器へ組み込む際の大きな制約となっていた。このように、超伝導バルクの性能を落とすことのない加工技術が開発できれば、様々な機器への組み込みが容易になり、バルクの形状による設計上の制約がなくなることから、その応用範囲も大きく広がることとなる。以上のように本研究目的の着想は、これまで行ってきた我々の研究過程から得られた問題の1つであった。

2. 研究の目的

本研究は、RE系超伝導バルクを使った集積型非接触磁気軸受の実用化のための基礎研究であり、加工技術を含めた分割バルクの効果的最適配置の問題を解決するためのものである。これは、超伝導バルクが持つ高電流密度性や捕捉磁束性能などの特異な性能を損なうことなく、分割などの加工作業を行う方法について研究を行うものである。この技術を明らかにすることで、これまで非常に制約を受けてきた超伝導バルク磁気軸受の設計上の自由度を大幅に改善させることができ、さらにその分割バルクの効果的な磁気配置を考慮した設計も可能となる。これは、超伝導バルク応用にとってその性能およびコストの面においても大きなアドバンテージとなる。

3. 研究の方法

以下に、本研究で実施した研究項目ごとの方法を簡潔に示す。

(1) 基本単位立方体バルクの作成

初めに、本研究の目標とした集積型非接触磁気軸受を超伝導バルクで構成するための最小単位のバルク形状を選択する必要がある。バルク形状に関しては、様々なものが考えられるが、配置形状の自由度や加工の容易さ、扱いやすさなどを考慮して、基本単位バルクの形状に立方体を選択した。試料として用いるRE系超伝導バルク体の性能を損なうことなく分割加工を行うためには、その超伝導性能を損なうことのない、分割可能ライン(Cutting Line)を割り出す必要がある。その場合、一般にはX線CTなどを使用して内部構造を観察することが考えられるが、観察試料の大きさや分解能などの制約により本研究で使用する超伝導バルクの分析には適していないと考えられる。よって、ここでは光学的表面構造分析と高精細磁束密度分布測定の結果をもとにした電磁界解析を組み合わせた方法を使用して検討を行った。それらのデータは蓄積を行い、その分析結果をもとにしてバルクの分割可能ラインを決定した。次に、超伝導バルクの分割加工を実際のバルクを使って行った。また、その加工したバルクの評価試験を行い、分割可能ラインの妥当性を検証した。

(2) 立方体バルク的最適配置の検討

分割された立方体バルクを軸受側として最適な性能になるような配置の検討を行った。軸受として磁気的性能が最大となるように立方体バルクによる配置構成を最適計算によって求めることとした。ここで配置の基本形としたのは、もっとも単純と考えられる3×3の正方形配置として最適計算により求める。そして、磁気的最適配置構成となる集積型磁気軸受を仮構成し、その最適配置による評価を最適なものと最適でないものについて比較を行った。

(3) 評価用集積型磁気軸受モデルの検討

(2)の最適配置をもとにして、回転試験装置に組み込みを考えた評価用の集積型磁気受けの設計を行った。これは、軸受面のばらつきが均一になるような軸受面の最適配置を計算で行い、磁気軸受全体の設計を行った。これまでは3行3列で9個の立方体バルクを正方形配置にして最適化設計を行ったが、実際の軸受に近づけるため、3×3の中心バルク1個を取り除き回転軸を通す箇所とし、8個の分割バルクを使って最適計算を行った。この最適化を行う軸受の浮上体回転軸の傾きをレーザーセンサーにより計測し、磁界計算による傾きの計算値と比較検討を行った。また、参考データとして、軸受面と浮上回転体との距離と浮上体上面から加える力の関係をフォースゲージにより測定も行った。

(4) 集積型磁気軸受の回転試験

(3)で構築した集積型軸受面を既存の回転試験装置に組み込む作業を行った。実際の試験装置に組み込むためには、より回転軸を安定させる構造にする必要があり、いくつかの構造パターンについて検討を行った。その結果、浮上回転体を上下に挟み込む構造が最も適していることが確認できたため、上部・下部それぞれの軸受面を最適配置により求めて構成した。その決定された配置で試験装置への組み込み作業を行った。回転試験装置に組み込まれた分割バルク磁気軸受けの各種データ収集を行い、静止時の浮上量と軸変位の測定を行った。また、回転損失の評価を行うために定常回転から停止までの運転試験など性能評価試験を行った。

4. 研究成果

(1) 基本単位立方体バルクの作成

本研究では、複数個ある手持ちの円柱型バルクを利用して、1つの円柱型から4つの立方体バルクを切り出し、1辺10mm角の立方体形状に成形することとした。円柱型バルクの分割可能ラインの選定については、円柱バルクの捕捉磁束密度の様子(磁界解析の結果も含む)とバルク表面の光学的観測により状態確認を行い、サンプルに適さない部分については選別を行った。1例として、図1に元となる円柱状バルクとそこから切り出された立方体バルクを示す。また、図2に円柱状バルクの中で磁束分布測定をしたところ歪が見つかったものを示す。この試料については磁束分布が歪んでいる箇所を切断してみたところ、小さな隙間(約0.5×6.5mm)が見つかった。このように、問題箇所を考慮して分割可能ラインの選定を行い、立方体形状に切り出されたバルクは、それぞれ0.5Tの磁場中冷却(FCM)で着磁した後に、捕捉磁束測定などの評価を個々に行った。以上、3個の円柱バルクから合計12個を切り出して、立方体形状に加工を行った。これら削り出された立方体バルクの捕捉磁束値を各バルクの基本性能値として、後述する最適計算に用いることとした。なお、基本単位バルクそれぞれの捕捉磁束性能は、元の円柱型バルクの性能に起因する傾向がみられるが、切り出し後個々の捕捉磁束性能に大きなばらつきは見られなかった。

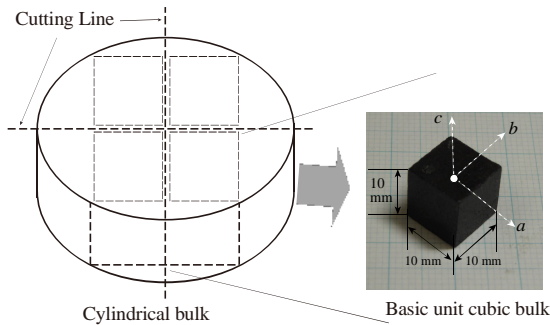


図1 円柱型バルクと基本単位立方体バルク

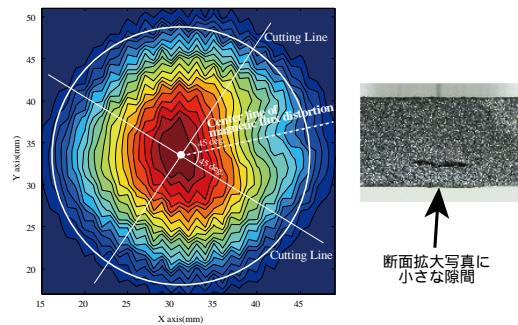


図2 磁束分布に歪がある円柱型バルク

(2) 立方体バルクの最適配置の検討

立方体バルクを集積する軸受側の配置パターンとしては、基本単位バルクの個数に制約があることから、最もオーソドックスで実験及び計算が容易な図3で示すような3×3の正方形配置パターンで行うこととした。この時、隣り合うバルクは、お互いの磁束に影響し合うことが考えられることから、辺が接する数によるGroup(図4参照)毎に最適なバルクの配置を考えることとした。Groupはa, b, cの3つを基本とし、配置全体の中心となり4辺を他のバルクと接するGroup-a, 3辺を他のバルクと接しているGroup-b, そして2辺のみ他のバルクと接しているGroup-cとした。そして、磁気軸受の最適な磁気特性を得るために、その配置パターンを次の条件で最適計算を行い、配置を決定することとした。1) Group-b, cの捕捉磁束の総和が最大となる。2) Group-b, cのピーク値のばらつきが最小, 3) Group-aの捕捉磁束のピーク値が最大となることとした。この計算により、配置パターンを決定した。以上の計算結果で求めた最適パターンで永久磁石(PM)を浮上体として浮上実験を行い、その際の捕捉磁束密度の測定結果を図5に示す。同時に、比較のために捕捉磁束のばらつきを考慮しない最適でないパターンについても同様に測定を行った。その結果を比較したところ、最適配置による磁束分布のばらつき抑制に、効果的であることを確認できた。

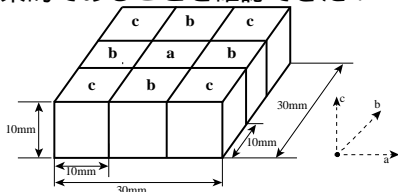


図3 3×3正方形配置.

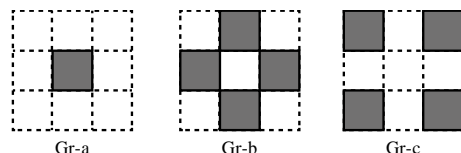


図4 バルクの配置 Group.

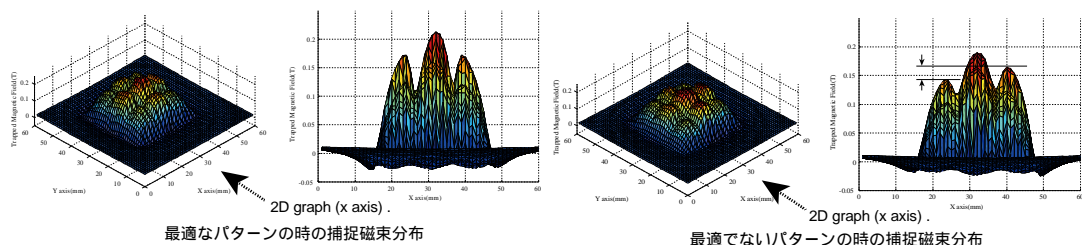


図5 最適な配置パターンと最適でないパターンの捕捉磁束分布の比較.

(3) 評価用集積型磁気軸受モデルの検討

(2) で使用した配置モデルを発展させ、実際に回転試験に組み込むことができる評価用磁気受けモデルを検討した。配置された立方体バルクは、浮上体として使用する永久磁石 (PM) によって FCM された後で、各立方体バルク表面の中心捕捉磁束密度の測定を行った。この中心捕捉磁束密度を各立方体バルクの基本性能値として、最適計算に用いた。この配置モデルは、図 6 で示される通り回転軸を通すために中心ブロックを除いて 8 個の立方体バルクで構成したものとした。この 8 個の立方体バルクの配置を最適計算で求めてパターンを構成し、浮上体の中心軸に対する傾きをコントロールした。図 7 左に示すように、浮上体の距離を上面のレーザーセンサーで測定しその傾きを計算する。その結果を図 7 右に示す。この結果より、傾き角が小さな範囲であれば最適計算によりコントロールできることが確認できた。さらに、最適と最適でないパターンについて図 6 で示すように軸受面と浮上回転体との距離 (Gap) と浮上体上面から加える力の関係をフォースゲージにより測定を行った結果を図 8 に示す。この二つの比較も確認できた。

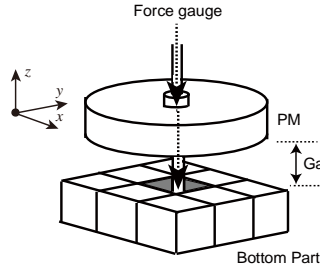


図 6 評価用集積型磁気軸受

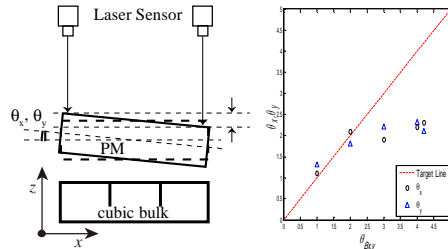


図 7 回転軸の傾き測定と結果

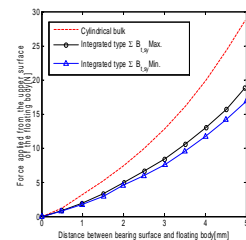


図 8 浮上距離と押さえ力

(4) 集積型磁気軸受の回転試験

(3) で構成した評価用モデルを図 9 のように 3x3 の正方形配置パターンで回転体を挟んで上下 2 面に用いて拡張するものを回転試験用モデルとした。図 9(a) で示される通り駆動軸を通すために中心ブロックを除いて 8 個の立方体バルクで構成するものである。図 9(b) で示すように上部・下部のパーツは、それぞれ 16 個の立方体バルクで構成し、この配置パターンによって浮上体の中心軸に対する傾きをコントロールする。(b) で示される破線は、PM による着磁が行われる部分である。この集積型軸受を図 10 のように既存の回転試験装置に組み込んで回転試験を行った。回転試験は、図 11 で示すようなシーケンスで運転し、定常回転 (100, 200, 300rpm) から停止までの回転速度を測定し比較したものである。その結果を図 12~14 に示す。図 13 と 14 の回転が停止するまでの時間を比較すると、若干ではあるが差が見られることが確かめられた。

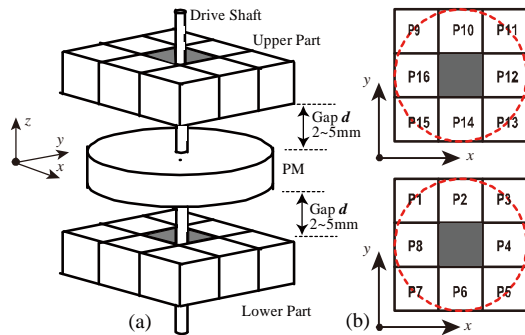


図 9 回転試験用磁気軸受モデル

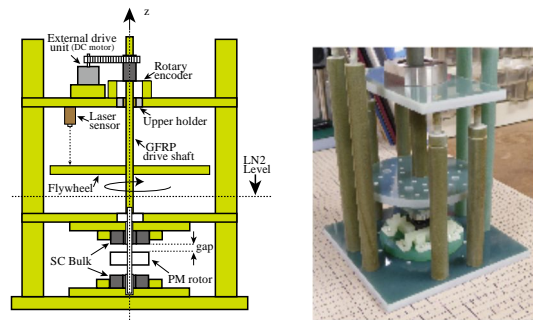


図 10 回転試験装置の構成図と写真

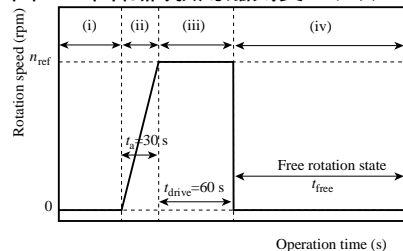


図 11 回転試験運転シーケンス

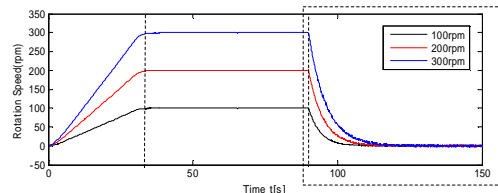


図 12 回転試験全体 (起動 停止)

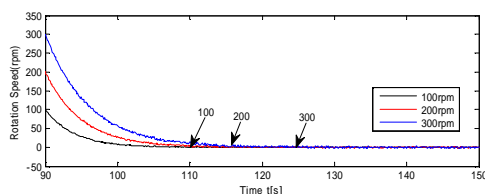


図 13 回転試験減速部分 (最適配置)

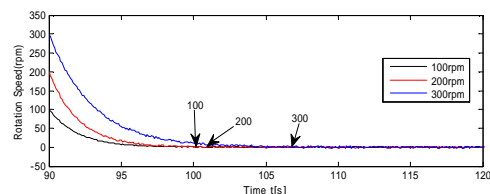


図 14 回転試験減速部分 (最適配置でない)

以上のように、本研究による実機に近い回転試験装置による試験データは、今後の関連研究にとって非常に有用なものとなると考えられる。そして、分割バルクによる磁氣的最適配置が集積型磁気軸受に与える効果を確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Yamagishi Kazuhito, Ogawa Jun | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Rotational Test of an Integrated Magnetic Bearing Using Multiple HTS Cubic Bulk Units | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2963307 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Yamagishi Kazuhito | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Optimum Design of Integrated Magnetic Bearing Using Multiple HTS Bulk Units | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2898325 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 山岸一人 | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 立方体バルクで構成した集積型磁気軸受の検討 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 秋季低温工学・超電導学会講演概要集 | 6. 最初と最後の頁 149 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 山岸一人 | 4. 巻 95 |
| 2. 論文標題 立方体バルクを使った目的に応じた最適配置についての研究 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 秋季低温工学・超電導学会講演概要集 | 6. 最初と最後の頁 132 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔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 Yamagishi Kazuhito |
| 2. 発表標題 Rotational Test of an Integrated Magnetic Bearing Using Multiple HTS Cubic Bulk Units |
| 3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yamagishi Kazuhito |
| 2. 発表標題 Optimum design of basic unit cubic superconducting bulks integrated magnetic bearing. |
| 3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 山岸一人 |
| 2. 発表標題 立方体バルクで構成した集積型磁気軸受の検討 |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Yamagishi |
| 2. 発表標題 Study on the Optimal Arrangement According to the Purpose of Superconducting Bulk |
| 3. 学会等名 European Conference on Applied Superconductivity 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山岸一人 |
| 2. 発表標題 立方体バルクを使った目的に応じた最適配置についての研究 |
| 3. 学会等名 低温工学・超電導学会 |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|