

令和 5 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：2020～2022

課題番号：20K04413

研究課題名（和文）最適磁気配置を目的とした集積型超伝導バルクの電磁氣的接合技術の研究

研究課題名（英文）Study on electromagnetic bonding technology of integrated superconducting bulk for optimal magnetic configuration

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：私たちは、液体窒素温度領域で使用できる超伝導バルクを集積して構成する非接触磁気軸受の実用化のための基礎研究を行っています。今回その目標の中で最も困難な技術的課題の一つである、集積時の機械的接合と磁氣的接合を同時に考慮する接合方法についての研究を行ったものです。本研究の成果としては、磁気軸受組み込みに至るまでの単体バルク形状の検討について、その最適化プロセスが明確となり、その検討法を明らかにすることができた。また、収集してきたバルク単体データと、固定治具を使った集積型バルク接合のデータの結果を踏まえたモデルへ至るまでのプロセスも明確とすることができたことである。

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、集積型超伝導バルクの電磁氣的接合方法の検討によって、バルクを応用した回転機や軸受等への組み込み自由度が飛躍的に向上させることができたと考えられる。これらにより、設計的に制約の多い超伝導機器応用のみならず、それ以外の分野でもその応用範囲が広がることとなり、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と考えられる。

研究成果の概要（英文）：We are conducting basic research for the practical application of non-contact magnetic bearings that integrate superconducting bulk materials that can be used in the liquid nitrogen temperature range. This time, we conducted research on a bonding method that simultaneously considers mechanical and magnetic bonding at the time of integration, which is one of the most difficult technical problems among the goals. As a result of our research, we clarified the optimization process and the investigation method for the investigation of the single bulk shape up to the incorporation of the magnetic bearing. Based on the collected bulk data and the results of integrated bulk data constructed using fixing jigs, the process of reaching the ideal model was clarified.

研究分野：電気電子工学

キーワード：集積型超伝導バルク 光学的表面観測 高精度表面磁束密度分布測定 新しい分割加工技術 最適な接合技術 超伝導磁気軸受

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、研究者個人に帰属します。

## 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、超伝導バルクの回転機応用の実現を目指して、機器特有の変動磁界による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、最も大きな課題となったのが、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る。研究用の試験装置などへの組み込みは、超伝導バルクの性能を第1に優先させるため、極力バルク自身の加工はせず使用され、実際の機器へ組み込む際の大きな制約となっている。これは、その高電流密度性能や捕捉磁束性能を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る。特に、超伝導バルク同士の接合については、電気および磁気特性を考慮する必要があるため、その形状や配置、接合面の加工や処理などが最も困難な課題となっている。

以前の研究では、各バルク間の接合条件についても検討を行ってきたが、接合面の形状や固定時の接合面に対する押さえ力などの関係によりこの接合面のコンディションが一定にならずコントロールができなかったため、接合加工は行わずに最適配置のみで実験を行っていた。この接合加工をしない時の結果として、最適計算通りの磁束分布となることがわかったが、接合加工についての検討については未達成となってしまった。この時の接合加工は、接触面の形状やバルク間の押さえ力をコントロールできなかったため次回への検討項目として持ち越しとなった。つまり、本研究は、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つであり、非常に困難な課題ともいえる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電力機器応用として超伝導バルクを様々な機器へ組み込む際の設計上の自由度の妨げとなってきた超伝導バルクの加工、特に接合加工の問題について解決するための基礎的な研究である。この最適磁気配置を考慮した集積型超伝導バルク同士の接合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、設計上の制約も少なくなることから、その応用範囲も加速的に大きく広がっていくと考えられる。さらには、低コストで製造できる小さなバルクを複数組み合わせることで集積型の超大型バルクを製作することも可能と考えられ、非常に将来有望である。

### 3. 研究の方法

以下に、本研究が目指す新しい集積型超伝導バルクの構築プロセスのイメージ(図1)を示し、実施した研究項目ごとの方法を簡潔に説明する。

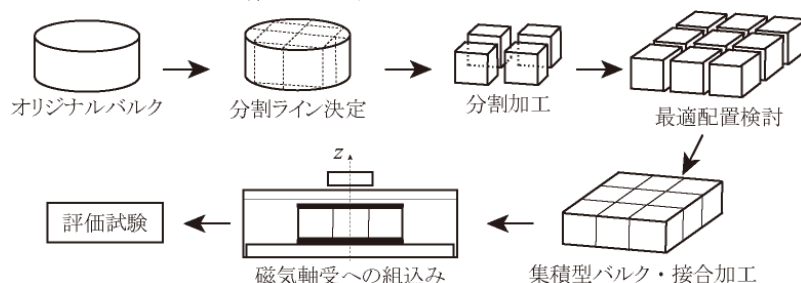


図1 本研究が目指す集積型超伝導バルクの構築プロセス・イメージ

#### (1) 超伝導バルク接合部の形状検討

まず初めに、超伝導バルク接合部の形状を決定するため、①バルク接合面等の詳細な光学的表面観測を行った。前研究でも行ったが、基本単位バルクに分割切断する前の円筒型オリジナルバルクに対して、外周部も含めたバルク全体の表面の光学的観測を行うとともに、②加工前のバルク全体の磁束密度部分分布の測定を行った。光学的観測は、表面の微細な凹凸やひび(隙間)などを観測できる装置を用いて行い、磁束密度分布の測定は、大型超伝導マグネットにより液体窒素中でバルクに磁束を捕捉させた後に、極低温用ホールセンサーを用いた磁束分布測定装置により測定を行った。これらの測定結果を用いて③解析ソフトを使って磁界解析を行いバルクの電流密度( $J_c$ )の計算を行った。そしてその結果をもとに、④接合部の基本モデルを提案し検討を行った。この検討時のバルクデータは、なるべく多く蓄積する必要があり、再検討を行う際の参考データとした。また、改善が必要な場合は、蓄積データをもとにして再検討を行い、⑤のバルク接合部を押さえるための治具の設計と製作を行った。

#### (2) 接合プロセスの検討

次に⑤で製作したバルク接合用押さえ治具を使用し、接合部の固定を検討しながら行い、⑥接合のプロセス条件を検討した後に接合作業を行うとともに、固定治具を設置した。その後、⑦バルク接合部の詳細な磁束分布測定を行うために、既存の測定装置を改良し、測定精度を上げるとともに、測定スピードも高速化させた計測システムを使って精密測定を行った。その結果を使っ

て、⑧電流密度分布の計算を行った。検討項目について改善が必要な場合は、⑥に戻って再検討を行った。⑨検討が必要ない場合は、この接合のプロセスを基本接合プロセスとした。

### (3) 接合バルクを磁気軸受に組込む

⑨の結果により決定された接合プロセスを使って、⑩集積型の超伝導バルク磁気軸受を構成した。この超伝導バルク磁気軸受を⑪既存の回転試験装置に組み込み、回転試験を行い、軸受の挙動等について各種データの収集を行う。⑫ここまでの評価試験の結果を検討して、問題点の抽出を行い再検討が必要であれば、必要な項目まで戻って改善を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 超伝導バルク接合部の形状検討

超伝導バルク全体の光学的観測及の結果、オリジナルバルク表面や外周部については、問題となるクラック（ひび）などは見られなかった。また、オリジナルバルク内部の状態を探ることができる磁氣的観測の結果（磁束密度分布測定）についても磁束密度に大きな影響を及ぼすような問題は見られなかった。これらのデータをもとにして、接合部のモデルを基本モデルと図2に示す他2つのモデル（b）Model A、（c）Model Bを含めて比較検討することとした。なお、これらのモデル検討を選択した際に、円筒型オリジナルバルク（直径30.0mm、厚さ10.0mm）から、モデルによって異なるサイズの基本ユニットバルクを切り出す関係で、モデルのサイズが大きな制約になったこともあり、今回この2モデルを選択することとした。

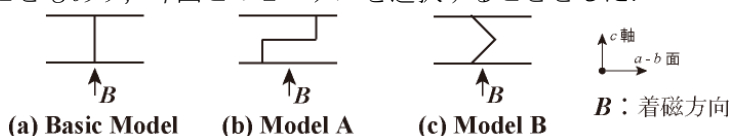


図2 集積型バルクの接合部検討モデル

次に分割したバルク単体の測定データとして、バルクサンプルに直流磁界1.0Tを印加して磁場中冷却により着磁した場合の磁束密度分布の測定結果の例を図3に示す。また、図4に基本モデル用の固定用治具を例として示す。なお、基本モデル以外は接合部の寸法等を変えて測定データの集積を行う必要があり、 $J_c$ の計算も同時に行い基礎データとした。これらのデータをもとにして、接合用治具をモデルごとに製作することとした。なお、基本モデル以外の接合用治具については、予定していた製作が諸般の事情等により非常に遅くなり、年度をまたいでの作業となったため、2年目以降のスケジュールに影響が出ることになった。

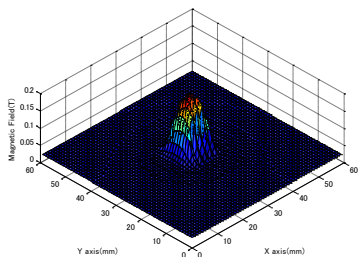


図3 ユニットバルク単体の磁束密度測定例

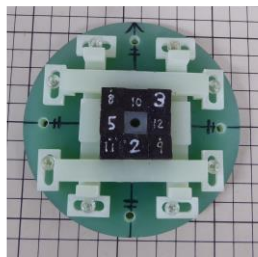
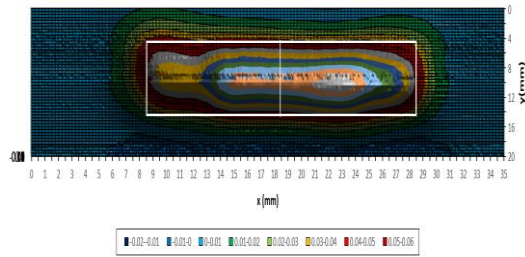


図4 基本モデル用固定治具

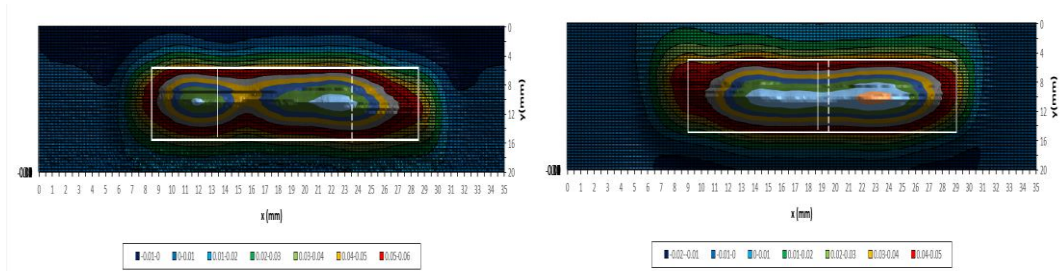
### (2) 接合プロセスの検討

遅れていた固定用治具の製作を早期にすすめ、形状検討モデルの基本モデル（立方体モデル）を比較対象として、これまで収集してきたバルク単体のデータと、固定用治具を使った新たな提案モデルの接合部について接合面の様子を光学的観測と磁束密度分布測定によって観察し、接合モデルとして最適なモデルの検討を進めた。接合部の光学的観測結果については、確認できる隙間などはなかった。また、磁束密度分布測定の結果については、測定例の結果を図5に示す。予想通り固定用治具の設定によって、状態が変化するため、治具の設定条件を厳密に操作し、調整を行いながら接合プロセスを決定していった。検討した結果、接合面の磁束分布が最も凹凸が少なく、全体の磁束密度の大きさも減少していないのは、Model Bであった。Model Aについては、磁束分布の凹凸に変化があり、磁束密度の大きさの減少が大きかった。これは、接合面積の大きさの関係と考えられ、大きいほど損失が大きくなったためと考えられる。

なお、これらのデータ収集については、磁束密度分布測定用の直流マグネットがデータ収集中に不調となり、途中で着磁スピードを変更することになったため、最終年度の初めの段階で、データの再収集をする必要があると判断し、すべての必要データの再測定を行い再収集した。そのため、研究計画全体のスケジュールにさらなる支障をきたすこととなった。この再収集した実験データを使って最終年度の実施計画を進めた。ここで予想外の成果として、今回磁束密度分布測定に用いた改良型測定装置について、一連の研究実施の間に磁束密度分布測定の測定精度とスピードの両方を向上させることができ、効率良く測定を行うことができた。



(a) Base model



(b) Model A

(c) Model B

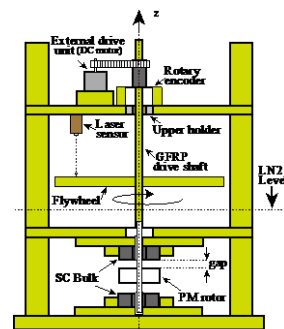
図5 接合バルクの精密磁束密度分布測定結果例

(3) 接合バルクを磁気軸受に組込む

次に、磁気軸受への組込みについては、専用固定治具を用いて組込み作業を行い、既存の回転試験装置(図6)へ磁気軸受を組込むところまでは問題なく実施することができた。しかしその後、この試験装置により回転試験を実施しようとしたところ、バルク冷却時に発生した固定用治具の影響と思われる歪みの影響により、回転子を正常に回転させることができず、回転試験を行うことができないまま、研究期間を終えることとなった。



(a) 写真



(b) 図面

図6 既存の回転試験装置

今回、新たに問題となったバルク冷却時の固定用治具の歪みと思われる影響についての対処法として、これまでは様々な場合に対応可能な固定治具を使った方法を選んできたが、確実に固定できる方法を目指す必要があると考える。そこで、新たに複合材等を使った固定法についても検討する必要があると思った。

研究期間全体を通じての研究成果としては、磁気軸受組込みに至るまでの単体バルク形状の検討について、そのプロセスが明確となり、検討法を明らかにすることができた。さらに、収集してきたバルク単体のデータと、固定用治具を使った集積型バルク接合のデータの結果を踏まえたモデルへ至るまでのプロセスも明確とすることができた。さらに一連の研究実施の間に磁束密度分布測定の測定精度とスピード両方を向上させることができた。

なお、新たに問題となったバルク冷却時のひずみによる影響についての対処法としては、様々な場合に対応可能な固定治具を使った方法を選んできたが、複合材を使った固定法についても検討する必要があると思った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------