

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)	
研究期間：2006～2008	
課題番号：18560272	
研究課題名 (和文)	高温超伝導バルクの変動磁界下におけるふるまいの解明と機器応用の基礎技術の研究
研究課題名 (英文)	The study of making behavior clear under the perturbation magnetic field of the high temperature superconductivity bulk and the basic technology of the applications of electrical machine
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

研究成果の概要：

超伝導バルクの交流機器への応用上での問題点の一つとして挙げられている変動磁界による捕捉磁界減衰・消滅に対して抑制効果のある超伝導磁気シールドリングを付加した超伝導バルクのデザインについて解析モデルを構築し、いくつかのデザインにおいて抑制効果についての検討を行った結果、バルク応用機器設計における手法の一つとして十分効果があることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	900,000	0	900,000
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	750,000	4,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：高温超伝導，超伝導バルク，交流損失，捕捉磁界，磁気シールド，電気機器

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導バルクの製造技術の進歩により、直径が 10cm を超える大型の超伝導バルクの製造が実現され、超伝導バルクの捕捉磁界密度が液体窒素温度 (77K) で 1.5T を超えるものも実現できるようになってきた。このため、超伝導バルクの応用に向けた様々な取り組みが活発になってきており、回転機、リニアアクチュエータ、磁気浮上列車等への機器応用開発が進められている。しかし、超伝導バルクをこれらの機器に応用する場合、過負荷時や空間的な磁界の乱れにより不可避

的に変動磁界にさらされることが予想され、この場合、超伝導バルクに交流損失が発生するとともに、バルクの捕捉磁界の減少・消滅の原因となっている。

2. 研究の目的

本研究は、上記で述べた背景に基づき超伝導バルクの超伝導電磁現象、熱的ふるまいの研究に基づいた交流磁場によって発生する交流損失の抑制法と捕捉磁界の減少・消滅を解決するための手法およびバルク構造の設計ルールを明らかにするとともに、バルクの

交流損失測定法を確立し、超伝導バルクの機器応用基礎技術の体系化を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 解析モデルの構成

これまでの研究では、ビーンモデルに基づく磁化損失計算式を連成させた簡易解析モデルを使って定性的な説明を行ってきたが、定量的に現象を評価するには到っていない。この課題を解決するために、バルク超伝導体の電流密度・電界特性を考慮し、バルク内の磁束侵入の様子や交流損失発生分布を取り扱える解析モデルを構築し、様々なバルク構造の定量的な評価を行った。

(2) バルクの交流損失測定法の確立

我々がこれまでに開発している電氣的交流損失測定法の精度は簡易解析値との比較から約 20%程度の誤差があることがわかっており、測定精度の向上が求められていた。よって、ここではバルク試料の形状に応じたピックアップコイルの寸法・形状、測定回路、補正係数の決定法についてマニュアル化を行うことにより精度の良い交流損失の電氣的測定法の確立を行った。また、これと同時に種々のバルクの交流損失のデータの蓄積も行った。

(3) バルクの交流損失低減手法と捕捉磁界減少・消滅防止対策

バルクの交流損失の低減は捕捉磁界減少・消滅抑制の防止方策としても有効であることから我々は、バルクを円環状に分割する方法もしくはバルクの外側に高温超伝導テープ線材を使って超伝導のリングを付加することを提案し、その効果を数値解析と検証実験により確認を行った。

(4) 交流応用機器へのバルク構造の設計法の明確化について調査を進めた。

4. 研究成果

(1) 交流損失解析基本モデルの構築

ここでは、超伝導バルク体の電流密度・電界特性を考慮し、バルク内の磁束侵入の様子や交流損失発生分布を取り扱える解析モデルを構築した。解析モデルは図 1 で示すもので、円柱状の超伝導バルクの z 軸方向から交流磁界 B を均一に印加した時の超伝導バルクに生じる交流損失の導出を行った。数値解析モデルは、表 1 に示すような標準的な超伝導バルクの形状を基にモデルの決定を行った。数値解析の方法は、超伝導バルクが円柱形状をしていることから z 軸・xy 面对称モデルとして環状電流が作る磁界と遮蔽電流の関係から電流分布を導出し、n 値モデルの超伝導特性を用いて交流損失の導出を行った。臨界電流密度は試料である超伝導バルクを着磁させたときの捕捉磁場分布 (図 2) を測定し、その傾きにより導出された値を用いた。また、

n 値は直接導出することができないため一般的に報告されている値を用いて解析を行った。

解析結果の一例として、図 3 に外部交流磁界 B を 0.1T 印加したとき、磁界が最大に侵入したときの超伝導バルク内の磁界分布の様子を示す。超伝導バルクの端部から表面全体に磁束の侵入がみられ、交流損失が発生していることがわかる。

(2) 超伝導リングを付加した解析モデル

次に基本モデルを拡張し、交流損失の低減や捕捉磁界減少・消滅に抑制効果があると考えられる超伝導リングを付加した場合のモ

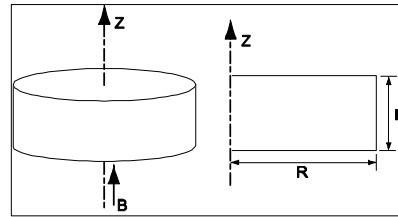


図 1 超伝導バルクの解析モデル

表 1 解析用標準超伝導バルクの緒元

HTS Type	YBCO
Height: H	20.0 mm
Radius: R	22.5 mm
Critical current density	1.61×10^7 A/m ²
n value	10

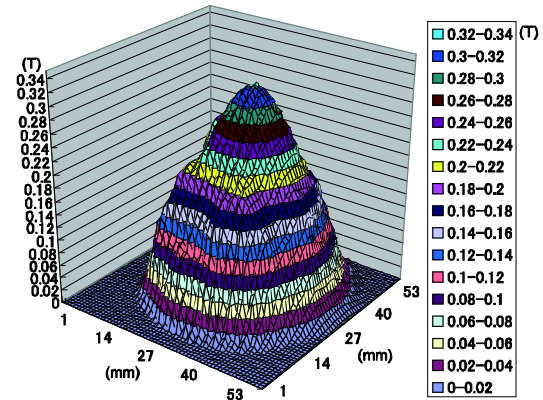


図 2 超伝導バルクの捕捉磁場分布

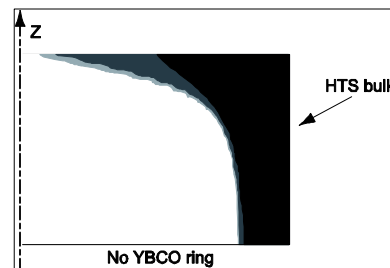


図 3 超伝導バルク内の磁束侵入の様子 (交流磁界 0.1T, z 軸・xy 面对称モデル)

デルを構築した。これは、超伝導バルクの周りに円環状の超伝導リングを配置することにより、超伝導バルクへの磁束侵入を抑制し、交流損失を低減することにより超伝導バルクの温度上昇を防ぎ捕捉磁界減少・消滅を防止できるものと考えた。図4に示すように超伝導バルクの周方向に、超伝導リングを(a)バルク全体(:All), (b)中央部のみ(:Center), (c)端部(:Edge)に配置したときに超伝導バルク部分に生じる交流損失を数値解析により導出を行なった。超伝導リングについては、当初バルクを円環状に分割加工したリングを提案していたが、精密加工が困難なことから既存の超伝導線材(テープ状線材)をリングに加工することとし、モデルも超伝導線材に合わせて構成を行った。現在、入手可能な超伝導線材は大きく分けて第1世代線材のBi(ビスマス)系線材と第2世代線材のRE(レアアース)系線材であり、Bi系線材の線材幅が約4mmであるのに対してRE系線材の線材幅は3~10mmである。本解析ではリングの幅を4mm幅とし線材の臨界電流密度を種類によって変えて解析を行っている。ここでバルク全体を超伝導リングを配置する(a)については4mm幅の線材を5段重ねて20mmにすることとして考えた。1例としてRE系線材の一つであるY(イットリウム)系線材を超伝導リングとして用いることを想定した場合の解析結果を示す。また、解析に用いたY系線材の諸元を表2に示す。

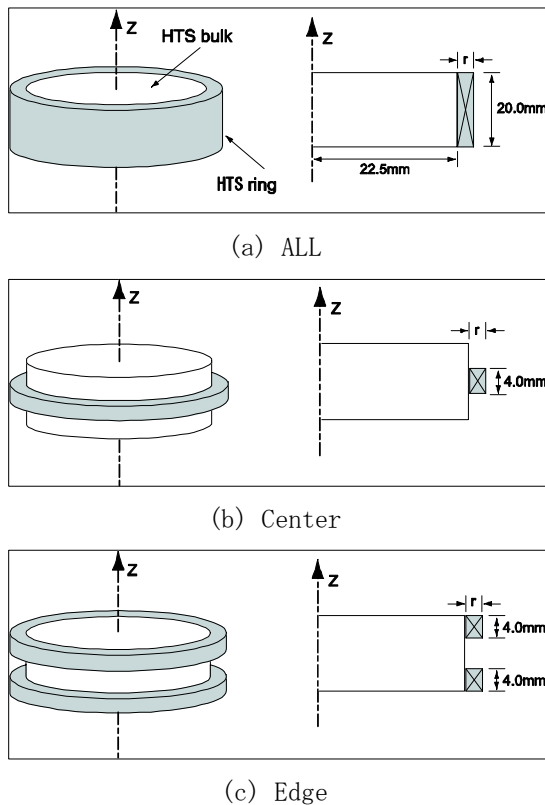


図4 超伝導バルクに超伝導リングを付加した場合の数値解析モデル

表2 Y系超伝導線材の緒元

HTS Type	YBCO
Thickness	0.1mm
Tape Wire Width	4.0mm
Critical current density	2.00×10^8 A/m ²
n value	30

図5に図4(a)~(c)のそれぞれの配置条件において厚さ $r=10$ mmの超伝導リングをバルク表面に配置し、外部交流磁界を0.1T印加し、磁界が最大に侵入したときの超伝導バルク内の磁界分布の様子を示す。超伝導リングを表面全体(a)のように配置した場合には、円筒表面からの磁界の侵入はなく、上表面からの磁界の侵入のみとなっている。このことから、十分な厚さであれば超伝導のリングにより超伝導バルク内に侵入する磁界を遮蔽することが可能である。より効率的に磁束を遮蔽するために超伝導バルクの中央(b)と端部(c)に超伝導リングを配置したモデルを比較した場合には、磁束がバルクの端部より侵入することから中央部に巻くよりも端部に巻いた方が遮蔽効果があり、超伝導バルク内に侵入する磁束の量が減少していることがわかる。

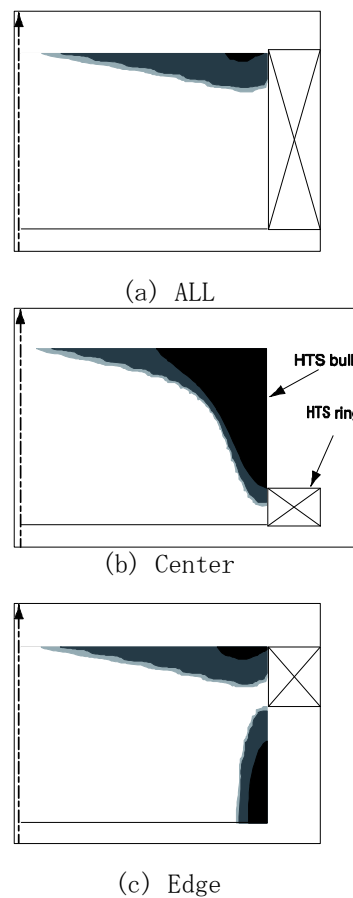


図5 超伝導リングを付加した時の超伝導バルク内の磁束侵入の様子(交流磁界0.1T印加, z軸・xy面対称モデル)

図 6 に外部磁界を 0.1T 印加した条件における, 図 4(a)~(c)それぞれの超伝導リングの厚さによる交流損失特性を示す. 基準のため超伝導リングがないときの交流損失を実線で示す. この結果より, 交流損失の低減効果は超伝導リングを全体に配置した場合, 端部に配置した場合, 中央部に配置した場合の順番となっており, 図 5 の磁束侵入過程と一致している. 特に全体と端部に配置した場合には顕著に抑制効果があることがわかる.

(3) 超伝導リング付バルクの検証実験

解析によって示された結果に基づいて, 実際の超伝導バルクに超伝導リングを付加した場合の捕捉磁界への影響を調べるための検証実験を行った.

超伝導リングは, 表 3 の諸元で示す Bi 系の線材を用いて図 7 のように製作した. Bi 線材を超伝導バルクの周方向に 1 層ずつ巻きつけ, その端部は銀半田により接続しリングになるようになっている. 線材幅が 4.1mm であるため, 5 段積上げて 1 層分が高さ 20.5mm のリングとなった. 各段間についても銀半田で接続を行い, 2 層目のリングも同様の方法で 1 層目の上に製作する. Bi 線材の厚さは約 0.22mm であるので, 層数を変えることにより 0.44, 0.66mm と超伝導層の厚さの調節が可能となっている. この超伝導リングの性能を計るために磁気遮蔽特性の測定を行った. 図 8 に示すように, ダミーバルクの中心に交流磁界測定用のピックアップコイルとホールセンサーを同時に設置し, 中心磁界を精度良く測定できるように構成を行った. このサンプルを液体窒素で浸漬冷却された交流マグネットの中心に設置し, z 軸方向に交流磁界を 0.003~0.1T まで印加を行い中心磁界の測定を行った. 超伝導リングを付加していない状態の中心磁界の大きさを B_{exp} , 超伝導リングを付加した時の中心磁界の大きさを B_{sp} として, リングの層数は 1~3 層まで変化させた

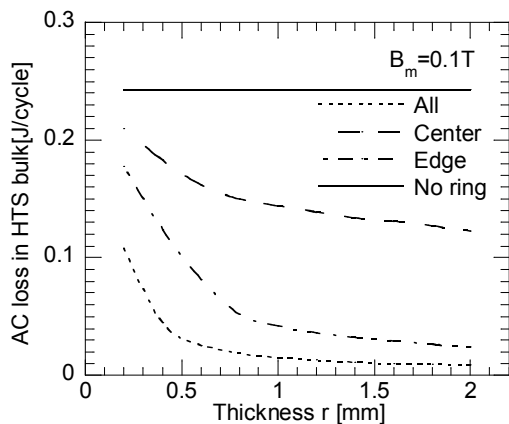


図 6 超伝導バルクに生じる交流損失の超伝導リングの厚さの依存性

表 3 Bi 系超伝導線材の諸元

HTS Type	Bi2223/Ag-sheathed
Thickness	0.22mm
Tape Wire Width	4.1mm
Critical current density	$8.87 \times 10^6 \text{ A/m}^2$
n value	20

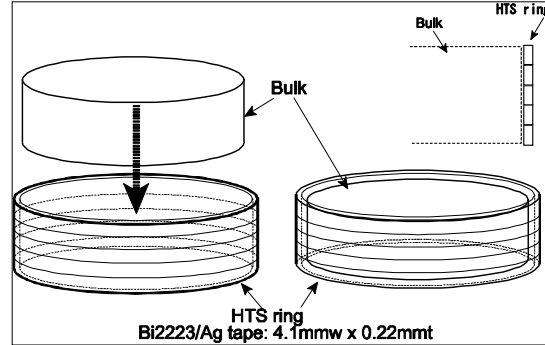


図 7 Bi 系線材超伝導リングとバルク

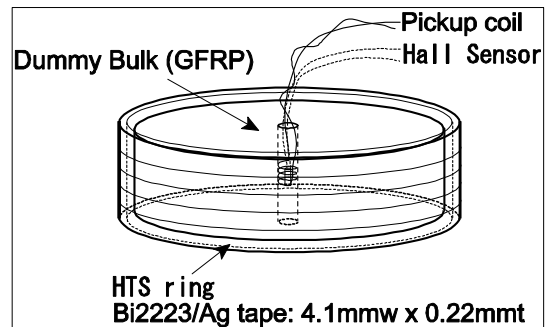


図 8 磁気遮蔽特性測定サンプル

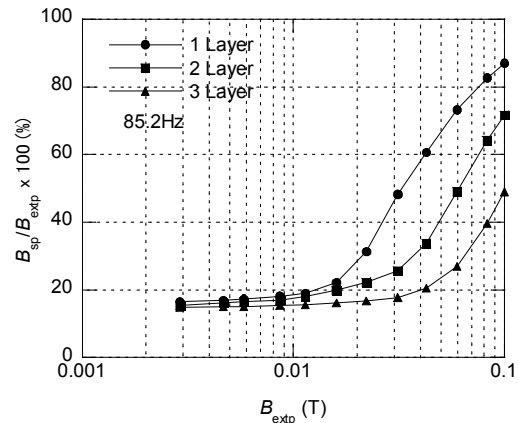


図 9 Bi 超伝導リングの磁気遮蔽特性

結果を図 9 に示す. 横軸は外部交流磁界の大きさ, 縦軸は B_{exp} と B_{sp} の比である. この結果から超伝導リングによって, 0.02T 以下についてはおよそ 80%程度交流磁界を遮蔽することができ, 3 層のリングを用いた場合は, 0.1T で 50%の遮蔽が見込めることがわかる.

次に, 実際に捕捉磁界への影響を調べるため超伝導リングを超伝導バルクに付加した

場合の検証実験を行った。図 10 に捕捉磁界測定用サンプルを示す。サンプルは超伝導リングを付加したバルクを上下から GFRP 材のホルダーで固定され、バルク上面の中心に捕捉磁界測定用のホールセンサーが設置されている。このサンプルを着磁用直流マグネットにより発生した 1T の磁場中で冷却を行い、着磁された後に別の交流マグネットにより交流磁界を 0.1T 印加し捕捉磁界を測定する。図 11 に交流磁界の印加時間に対する捕捉磁界の減少率を示す。 B_{trap0} は着磁後 30 分の捕捉磁界であり、 B_{trap} が交流磁界印加後の捕捉磁界の値である。超伝導リングがない場合は 230 秒までゆっくり捕捉磁界が減少していき、その後 300 秒には捕捉磁界が消滅している。しかし、3 層超伝導リングを付加した場合の捕捉磁界は、やや減少するものの 300 秒後も 10% 程度の減少に留まっており超伝導リングの効果が十分であることがわかった。

検証実験ではこの他に、超伝導リングの配置を変えて同様の捕捉磁界減少抑制に関する測定を行ったが、解析モデルの図 4(c) のように端部に配置した場合の効果は実験結果では見られなかった。これは、Bi 線材の臨界電流密度が解析で用いた Y 系線材よりも低いと考えられ、Y 系線材での検証を考えていたが、線材の入手が困難であったため実現できなかった。

以上のことから、超伝導リングを付加した超伝導バルクの最適な設計が可能であることを示した。

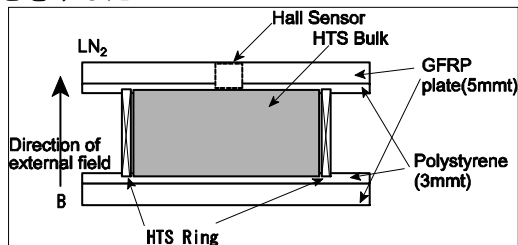


図 10 超伝導リングを付加した超伝導バルク捕捉磁界測定サンプル

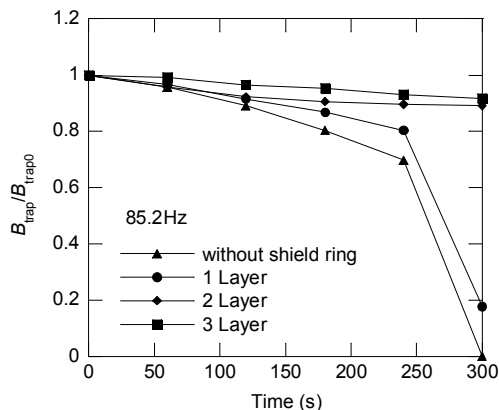


図 11 超伝導リングの付加による超伝導バルクの捕捉磁界保持特性

(4) 交流損失測定法確立のための損失データの蓄積

バルクの交流損失測定の精度向上のため測定法のマニュアル化を行うと共にバルクの形状に応じたピックアップコイルとその補正係数を決定するツールを作成することにより、効率的に測定できるようにした。この方法で種々のバルクの交流損失データの蓄積も行った。

以上、本研究の成果により交流応用機器への超伝導バルク構造について、捕捉磁界減衰抑制と交流損失低減のための最適な設計データを得ることができ、交流機器実現のための手法を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1) K. Yamagishi, O. Tsukamoto and J. Ogawa, “Suppression of influence of AC external magnetic field on trapped magnetic flux in the HTS bulk by use of HTS shielding rings”, To be published IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009 掲載予定, 査読有

2) K. Yamagishi, O. Tsukamoto and J. Ogawa, “Study on methods to suppress decay of trapped magnetic field in HTS bulk subjected to AC magnetic field”, Journal of Optoelectronics and advanced Materials, Vol.10, No.5, pp.1021-1025, 2008, 査読有

3) 山岸一人, 塚本修巳, 「変動磁界下における高温超伝導バルクの熱的電磁的挙動」, 電気学会研究会資料, ASC-07-5, pp.15-19, 2007, 査読なし

[学会発表] (計 3 件)

1) K. Yamagishi, “Suppression of influence of AC external magnetic field on trapped magnetic fluxes in the HTS bulk by use of shielding rings wound of HTS wire”, The 2008 Applied Superconductivity Conference, Aug. 18, 2008, Chicago

2) K. Yamagishi, “Study on methods to suppress decay of trapped magnetic field in HTS bulk subjected to AC magnetic field”, Fifth Japanese - Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, Sep. 17, 2007, Cyprus.

3) 山岸一人, 「変動磁界下における高温超伝導バルクの熱的電磁的挙動」, 電気学会超伝導応用電力機器研究会, 2007 年 1 月 25~26 日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山岸 一人 (YAMAGISHI KAZUHITO)
国立大学法人横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員
研究者番号：10293177

(2) 研究分担者

小川 純 (OGAWA JUN)
国立大学法人新潟大学・大学院自然科学研究科・助教
研究者番号：60377182
塚本 修巳 (TSUKAMOTO OSAMI)
国立大学法人横浜国立大学・工学研究院・教授 (平成 19 年 3 月定年により退職)
研究者番号：42240458

(3) 連携研究者

なし