

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560292

研究課題名（和文）バルクの電磁氣的熱的挙動解明に基づくバルク応用回転機の課題解決法の研究

研究課題名（英文）Study of the problem-solving method of a bulk motor based on electromagnetic and thermal behavior explanation of bulk

研究代表者

山岸 一人 (YAMAGISHI KAZUHITO)

横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員

研究者番号：10293177

研究成果の概要（和文）：超伝導バルクの回転機応用の実用化で問題となる、回転機特有の変動磁界によるバルクの捕捉磁束への影響について解析と実験より検討を行った。実験においては、製作した試験装置を用いて変動磁界を発生させ交流損失の観点から検討を行い、これらの変動磁界がバルクの捕捉磁束に一定の影響がある見通しを得た。また、バルク捕捉磁束減衰抑制のためのシールドコイルの効果的な配置により十分な抑制効果が得られることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The analysis and the experiment considered the influence of trapped magnetic flux on the bulk by the fluctuation magnetic field of a rotating machine which poses a problem by development of a superconductivity bulk motor. It was shown that these fluctuation magnetic field affects influences of a few on trapped magnetic flux of bulk. And, it was able to be shown that there is sufficient effect by arrangement of the shielding coil for the trapped magnetic flux suppression of bulk.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学，電力変換，電気機器

キーワード：超伝導バルク，バルク応用回転機，捕捉磁束，変動磁界，シールドコイル

1. 研究開始当初の背景

近年の高温超伝導 (HTS) バルク技術の進歩により、永久磁石を遥かに上回る捕捉磁束性能を持つバルクが得られるようになった。バルク応用の中でも、産業、運輸、電力分野と応用範囲が広い回転機への応用が最も有望と考えられており、世界で精力的な開発・研究が行われている。バルク応用の回転機においては、一般にその構造にかかわらず空隙部の磁界の空間高調波、電気的な負荷の不平

衡・変動などによりバルクは変動磁界にさらされる。バルクは変動磁界にさらされると、バルク内への侵入磁界の変化により損失が生じる。このような変動磁界損失は場合によっては非常に大きくなり機器効率を低下させるのみならず、我々の従来の研究によれば、捕捉磁束の減少・消滅の原因となる可能性があることが明らかとなっている。回転機において回転によりバルクに加わる変動磁界は単純な交流磁界とは異なり、回転磁界も加わ

るため損失の様相は異なってくる。しかし、損失の値は非常に大きな値になる可能性があり、適正な抑制対策を講じないと機器の効率が大きく損なわれ、バルクの捕捉磁束が減少・消滅する可能性がある。

2. 研究の目的

我々の今までの研究により、交流印加磁界下における静止バルクの捕捉磁束の減少・消滅の機構が明らかにされており、この現象は捕捉磁束の値に対してかなり低い値の交流磁界でも起き得ることが定量的に示されている。また、我々の最近の研究により、バルクの回りに HTS 線材で作ったシールドコイルを巻くことにより、交流磁界印加によるバルクの捕捉磁束の減少・消滅を抑制し、バルク損失の抑制もできることが示された。これにより、上記問題解決に対する見通しが出てきた。この方法はシールドコイルの時定数を適正に選べばバルクの着磁には影響を与えず、変動磁界をシールドができる。しかし、この方法のバルク応用回転機に対する適応性、有効性の検証、また、シールドコイルの変動磁界損失とバルク損失を合わせた全体損失の低減方法の解明も必要である。さらに、バルクそのものの構造の最適化による損失抑制、捕捉磁束減少抑制の方法についても明らかにする必要がある。

以上より、本研究はバルク応用回転機におけるバルクの変動磁界下での電磁的・熱的挙動を解明し、損失抑制、捕捉磁束減少抑制の具体的な方法についての研究を行い、バルク応用回転機の実用化のための基礎的課題の解決を目的とした。

3. 研究の方法

(1) シールドコイルによるバルクの捕捉磁束減少・消滅防止対策

変動磁界によるバルク損失抑制の解決方法の一つとして我々が提案している HTS 線材を用いたシールドコイルを付加したバルクの損失について解析モデルを構築すると共に、シールドコイル用 HTS 線材として Bi (ビスマス) 系銀シース線材および RE (レアアース) である Gd 系薄膜線材を使用したシールドコイルを製作し、交流磁場下での電磁気的熱的挙動の測定を行った。それらの測定データを収集することによりシールドコイルの構成法及び、設計法について検討を行った。

(2) 回転機変動磁界によるバルクへの影響評価

高温超伝導バルクの応用回転機実用化への基礎的課題である変動磁界下におけるバルク回転機の磁界解析を行うために、試験装置をモデルとした解析ツールを作成し、磁界解析を行った。また、回転機特有の変動磁界を模擬できる試験装置を作成し、模擬した変

動磁界がバルクに与える影響について熱量法を用いて交流損失の観点より検討を行った。今回ここで述べる変動磁界の種類としては、励磁用電源から供給される高調波成分を含んだ交流電流が回転機ステータに励磁され発生する変動磁界と回転機特有の移動磁界(回転磁界)によるバルクへの影響について検討を行った。

(3) バルク応用回転機の最適設計

上記の(1),(2)よりバルク応用回転機の変動磁界による影響などを考慮した最適設計について検討を行った。

4. 研究成果

(1) シールドコイルによるバルクの捕捉磁束減少・消滅防止対策

ここでは、交流磁界による超伝導バルクの捕捉磁束減少の抑制に効果的であることが確認できている HTS シールドコイルの付加について、バルクの電流密度および電界特性を考慮した磁束侵入や交流損失発生分布を取扱える解析モデルを使った解析および捕捉磁束減少の原因と思われる交流損失の解析によりシールドコイル付加についての検討を行った。シールドコイルの効果についてはこれまで、Bi 系線材での検証を行ってきたが、新たに臨界電流密度が高い Gd 系薄膜線材を使用したシールドコイルの効果についても検証を行った。また、シールドコイルの層数についてもこれまでの 3 層から 10 層まで増やした効果について検証を行った。

表 1 に解析および検証実験で使用した HTS バルクと表 2 にはシールドコイルに使用した二つの HTS 線材の諸元を示す。まずここでは、付加した HTS シールドコイルの層数を増やしていくに従って捕捉磁束の減衰が抑制されていくことから、シールドコイルの付加によりバルクの交流損失がどのように変化するかの検討を数値解析により行った。

図 1 に解析を行ったモデルを示す。HTS 線材の形状を考慮した、いくつかのコイルの配置を考え、No ring: 付加しないものを基準とし、Ar. 1: バルク側面全体に付加、Ar. 2: バルク側面の中心部のみ付加、そして、Ar. 3: 磁束侵入が集中すると考えられるバルクのエッジ部分に付加、の 3 つの配置について線材種類ごとのサイズも考慮して交流損失の計算を行った。図 2, 3 に結果の一例としてここでは Gd 線材のシールドコイル付加層数による、交流損失の解析結果を示す。図 2 はバルクのみ損失であり、図 3 はバルクとシールドコイルを含めた損失の結果である。

解析結果よりシールドコイルの付加は、バルクの交流損失を減少させるために効果的であることがわかるが、シールドコイル自身の損失もバルクの損失の量とほぼ同じとなり、全体としての損失はあまり変わらない。

また、シールドコイル配置はシールド性能と全体の交流損失減少の両方の観点から全面に付加する Ar.1 の配置が効果的であることを明らかにした。

次に解析で示されたシールドコイルの効果を確認するため、図4で示すようなHTSバルク側面にHTS線材で作成したシールドコイルを付加することにより着磁されたバルクが変動磁界にさらされた時の捕捉磁束への影響を実験により検証した。

表1 HTSバルクの諸元

Bulk material	GdBaCuO
Size	Dia.30mmΦ×10mmt
Trapped Field	1.22T (at 77K) Field Cool
J_c	7.37×10^7 A/m ² (Estimated from experiment of trapped magnetic field of bulk.)
n value	20

表2 HTS線材の諸元

Wire	Bi2223/Ag-sheathed	
Thickness	220μm	
Tape Wire Width	4.1mm	
I_c	80A	
J_c	1.27×10^8 A/m ²	
J_e	8.87×10^7 A/m ²	
Wire	GdBa ₂ Cu ₃ O _x /substrates	Hastelloy
Thickness	220μm (with 100μm thick Cu layer)	
Tape Wire Width	5.0mm	
I_c	155A	
J_c	1.35×10^{10} A/m ²	
J_e	1.41×10^8 A/m ²	

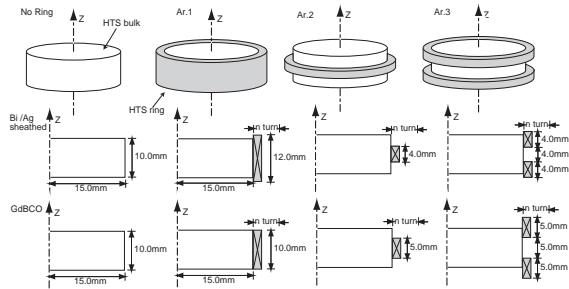


図1 HTSバルクにHTSシールドコイルを付加した場合の数値解析モデル

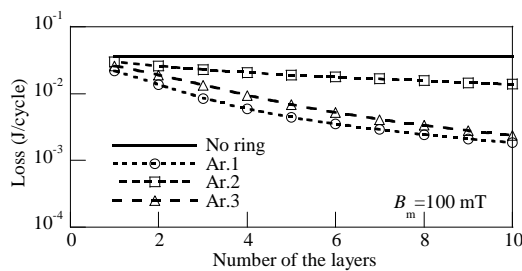


図2 GdBCO coilを付加した層数に対するバルクの損失

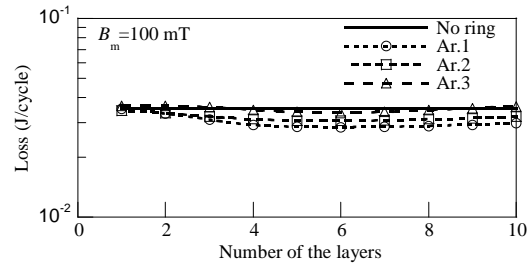


図3 GdBCO coilを付加した層数に対するバルクとシールドコイル全体の損失

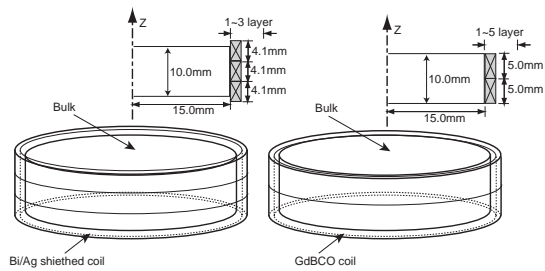


図4 捕捉磁束減衰実験のためのBi系およびGd系線材によるシールドコイル配置

図5の結果が(a)Bi系、(b)Gd系のシールドコイルを付加した時の捕捉磁束への影響を示したものである。横軸が変動磁界印加時間であり、縦軸が捕捉磁束の初期状態を1とした減衰率を示す。捕捉磁束は、バルク表面の中心部分に設置されたホールセンサによって測定される。シールドコイルを付加したバルクは、5Tの直流磁界を発生させることができる直流マグネットにより磁場中冷却により着磁された後、交流マグネットに移されて磁界を印加する。印加する変動磁界としてここでは、84.8Hz、100mTの交流磁界を最大で600秒連続で印加している。これらの結果より、Gd系のシールドコイルであれば、3~5層程度のシールドコイルの付加により、ほぼ捕捉磁束減衰を抑制できることがわかる。

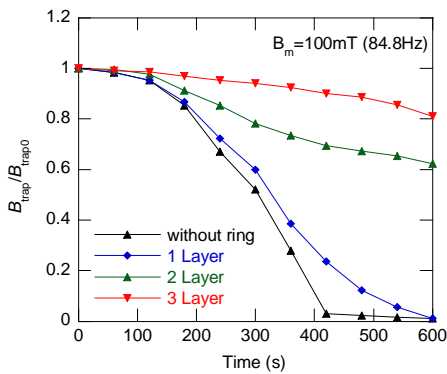
(2) 回転機変動磁界によるバルクへの影響評価

① バルク応用回転機の磁界解析

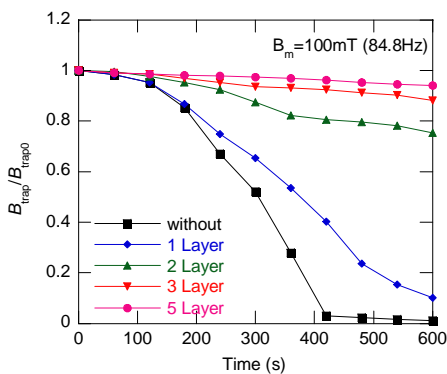
バルクの応用回転機実用化への基礎的課題である変動磁界下における解析モデルを構築するために、まず一般的な回転機モデルの磁界解析を行えるような解析ツールを作成し、その解析結果を参考にして一般的な永久磁石を用いた回転子だけでなく、バルクを回転子としたバルク応用回転機モデルの磁界解析を行った。ここでは、変動磁界発生装置の解析結果を一例として示す。

図6が本研究で製作を行った回転機変動磁界発生装置であり、回転機特有の移動磁界や電源による高調波成分を含んだ変動磁界な

どを発生させ、回転子部に設置した HTS バルクへの影響を調べるものである。装置は 48 スロット、4 極の PM モータのステータをモデルとし、装置ごと液体窒素に浸漬冷却を行い、回転子部にバルクを設置して測定を行う。図 7 は、その装置を外部の制御された電源により励磁した際の磁界解析を行った一例で、磁束の様子を示した結果である。この解析により、模擬された変動磁界が回転子部のバルクにどのような影響を及ぼすのか、磁束の様子を表すベクトル図およびコンター図によりどの部分に磁束の集中が起こるのかを見てとることができるようになった。



(a) Bi/Ag sheathed coil



(b) GdBCO coil

図 5 着磁されたバルクに外部磁界を印加した時の捕捉磁束減衰特性

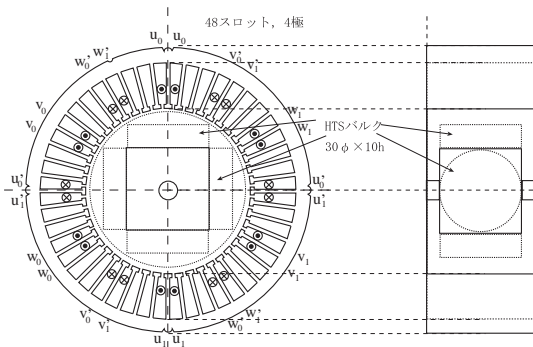
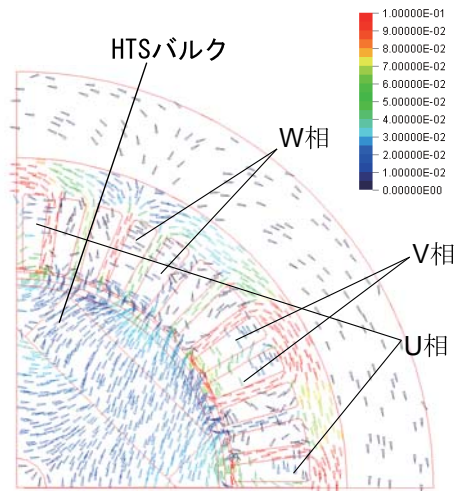
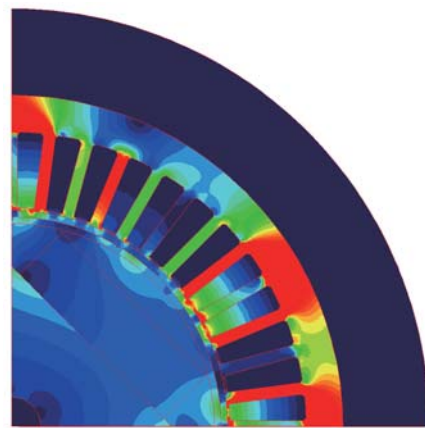


図 6 回転機変動磁界発生装置



(a) 磁束ベクトル図



(b) 磁束密度コンター図

図 7 モデルの磁界解析例

② 変動磁界によるバルクの交流損失

①の磁界解析ツールの結果を参考にして、ここでは回転機等で問題となる変動磁界の一つである高調波成分を含んだ交流磁界に着目し、バルクの交流損失に与える影響について実験による検討を行った。今回の交流損失の測定は、印加磁界の波形に高調波成分を含ませるため、精度の高い電氣的測定法を用いることができない。よって、熱電対を用いて熱量から損失を測定する熱量法により測定を行うこととした。

HTS バルクを図 8 に示すような FRP 製のサンプルホルダーで挟み込み、バルク円筒側面には昇温およびキャリブレーション用のヒータが設置されている。バルク下面中心には温度上昇を計測するための熱電対を設置し、上面には捕捉磁束を測定するためのホールセンサが設置されている。また、バルクの冷却特性を調整するためにバルク周囲を断熱材で覆い、サンプルホルダーを上下に圧縮することで、断熱状態の微調整を行うことを可能とした。このサンプルホルダーに設置された HTS バルクは着磁するために最大 5T まで

発生させることが可能な直流マグネットに挿入され着磁が行われる。その後このサンプルホルダーを液体窒素で冷却された変動磁界発生用マグネットの中心にセットする。このマグネットの励磁電源は、外部コントロールにより、様々な波形を励磁することが可能となっており、今回の測定では高調波を含んだ波形により励磁を行った。

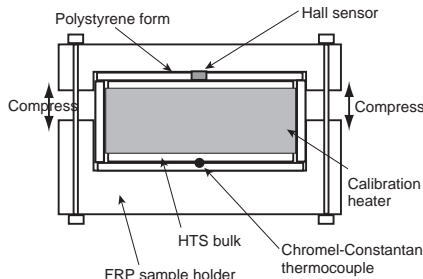


図 8 熱量法のためのサンプルホルダー

図 9(a) にバルクが着磁されていない状態の交流損失の測定結果を示す。 Q_1 が、基本波である 60Hz の交流磁界を印加した際の損失の値であり、実線で示された値は Bean モデルによる損失の計算値である。この二つの値は、良く一致していることがわかる。 Q_{+3} は、基本波に 3 次の高調波 (180Hz) を含めた際の損失の測定値であり、基本波のみの場合に比べて若干ではあるが大きな値となっている。また同様に Q_{+5} は 5 次の高調波 (300Hz) を含めた際の測定値で、3 次の値よりも若干大きな値になっていることが見てとれ、次数による損失の変化がうかがえる。さらに図 9(b) はバルクを着磁した状態での交流損失の結果である。着磁なしの状態と比べると、 Q_1 、 Q_{+3} 、 Q_{+5} の測定値は、ほぼ同じ値となっており、高調波の次数による変化はみられないが、熱量法の測定感度の問題もあると考えられ、感度の向上やデータの蓄積が必要と思われる。

次に、変動磁界発生装置を用いて、移動磁界によるバルクの捕捉磁束への影響について実験を行った。この実験でもバルクの発熱を測定することによる損失測定を行うことで変動磁界による影響を調べた。しかし、この損失データの値が予想よりも小さかったことと、先に述べたように使用していた測定法の精度が十分上がらなかったこともあり、測定したデータにも一部信頼性が低く、この変動磁界による影響については、結果を得ることができなかつた。この問題点については、今後十分な検討を行う必要がある。

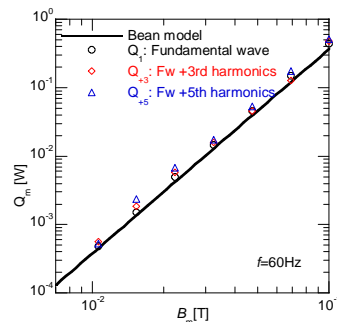
(3) バルク応用回転機の最適設計

以上、本研究の成果によりバルク応用回転機の実用化に問題となる変動磁界によるバルクへの影響について一定の見通しを得ることができたが、一部使用した測定法の問題点も見つかり、十分な検証結果を得るまでに

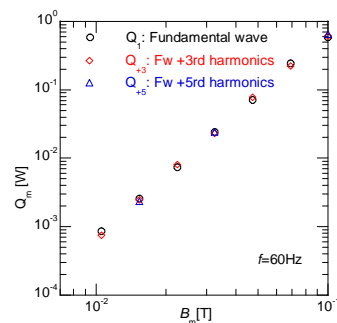
は至っておらず、最適な設計法も含めて新たな課題として検討する必要がある。また、バルク捕捉磁束減衰抑制のためのシールドコイルの付加については、シールド性能と交流損失低減の見地から、シールドコイルの配置を検討することができ、交流磁界下においての最適な配置を明らかにすることができた。

(4) 国内外へのインパクト

国内外での関連学会での成果発表において、様々な分野の研究者から多くの質問や意見を受け、大きなヒントや解決に至るための新たな考え方を得たことで、本研究の問題の解決法や次の目標への方向性を示すことができたと考えられる。



(a) 磁束が捕捉されていない場合



(b) 磁束が捕捉されている場合

図 9 高調波成分を含む変動磁界による交流損失

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 4 件)

- ① K. Yamagishi, O. Tsukamoto and D. Miyagi, "Influence of high harmonics of magnetic fields on trapped magnetic fluxes in HTS bulk.", Physics Procedia (To be published.), 2012, 査読有
- ② 山岸一人, 塚本修巳, 宮城大輔, 「HTS バルクの高調波磁界による交流損失の測定」, 低温工学・超電導学会講演概要

- 集, p.139, 2011, 査読なし
- ③ K. Yamagishi, O. Tsukamoto, J. Ogawa and D. Miyagi, "Study on method to suppress decay of trapped magnetic fluxes in the HTS bulk subjected to perturbation of external magnetic field by use of shielding coil wound of HTS wire", IEEE Trans. on Applied Supercon., Vol.21, No. 3, pp.3320-3324, 2011, DOI: 10. 1109 /TASC. 2010. 2093111, 査読有
- ④ 山岸一人, 塚本修巳, 小川純, 宮城大輔, 「HTS バルクの捕捉磁界減衰抑制のためのシールドコイルについての検討」, 低温工学・超電導学会講演概要集, p.127, 2010, 査読なし

[学会発表] (計4件)

- ① 山岸一人, 「HTS バルクの高調波磁界による交流損失の測定」, 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 2011 年 11 月 10 日, 金沢.
- ② K. Yamagishi, "Influence of high harmonics of magnetic fields on trapped magnetic fluxes in HTS bulk", EUCAS2011, Sep. 19, 2011, Den Haag.
- ③ 山岸一人, 「HTS バルクの捕捉磁界減衰抑制のためのシールドコイルについての検討」, 2010 年度秋季低温工学・超電導学会, 2010 年 12 月 1 日, 鹿児島
- ④ K. Yamagishi, " Study on Method to Suppress Decay of Trapped Magnetic Fluxes in the HTS Bulk Subjected to Perturbation of External Magnetic Field by Use of Shielding Coil Wound of HTS Wire", The Applied Superconductivity Conference, Aug. 5, 2010, Washington, D.C.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山岸 一人 (YAMAGISHI KAZUHITO)
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

塚本 修巳 (TSUKAMOTO OSAMI)
横浜国立大学・産学連携推進本部・特任教授
研究者番号：30017975
宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10346413

(3) 連携研究者

富田 優 (TOMITA MASARU)
(財) 鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・超電導応用研究室室長