

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289072

研究課題名(和文)高温超伝導回転機用電機子巻線の交流損失低減手法の系統的研究

研究課題名(英文) Study on AC Loss Reduction in HTS Coils for Armature Winding of AC Rotational Machines

研究代表者

福井 聡 (Fukui, Satoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70293199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、交流回転機で一般的に用いられる分布巻電機子巻線に高温超伝導線材を適用するための基盤研究として、小型コイルとスロットのある積層電磁鋼板と組み合わせて交流損失を評価するための模擬試験装置を開発し、交流損失低減法を研究した。FEM解析により、コアのスロット内で試験コイルに加わる垂直磁界分布を解析し、スロット内のコイル近傍に磁性体を配置することにより、垂直磁界を低減できることを見出した。単相及び三相の模擬試験装置に用いて、スロット内の試験コイル巻線近傍に磁性体を配置することによる交流損失低減効果を実証した。特に、Y系コイルによる試験では、最大で50%程度損失を低減できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, to investigate applicability of high temperature superconducting (HTS) coils to armature winding of AC rotational machines, test devices to evaluate AC loss characteristics in HTS coils combined with iron core were developed and AC loss reduction in HTS coils was studied. Based on the electromagnetic field analysis using FEM, it was found that the perpendicular magnetic field can be reduced by properly arranging the magnetic material around the HTS coil winding. By using test devices for the 1-phase and 3-phase AC loss measurements, the AC loss reduction by arranging magnetic materials around the HTS coil winding was demonstrated.

研究分野：応用超伝導工学

キーワード：高温超伝導コイル 高温超伝導回転機 交流損失

1. 研究開始当初の背景

近年、高温超伝導線材技術の進展は著しく、Bi系線材、Y系線材ともに、実用レベルの臨界電流と長さを持つものが供給されている。このような線材化技術の進展に伴い、日米欧をはじめ中国、韓国などで、船舶用モータや風力発電機などの大型の回転機へ高温超伝導を適用する研究開発が活発に展開されている。現在研究がすすめられている高温超伝導回転機のほとんどは、界磁巻線のみを超伝導化した界磁超伝導型の同期回転機がほとんどである。これは、同期機の界磁巻線は基本的に直流運転されるので、高温超伝導線材の交流損失の問題を回避できることが主要な理由の一つである。回転機の電機子巻線は三相交流（或いはそれ以上）で駆動されるため、これに高温超伝導線材を適用すると大きな交流損失が発生するので、超伝導化のメリットが見いだせなくなると考えられてきた。しかしながら、界磁巻線のみを超伝導化した巻線型同期機への応用では、大型風力発電機や船舶用モータなどの極く限られた大型機への応用のみに留まってしまふ。高温超伝導技術により回転機にイノベーションを実現するには、中容量以下の回転機に高温超伝導を適用することが必要である。そのためには、電機子巻線の高温超伝導化が必須の研究開発項目である。高温超伝導線材はテープ形状をしており、印加される変動磁界がテープ面に平行の場合では、現状でも変動磁界の振幅が比較的小さければ交流損失は許容できるレベルに収まる。しかしながら、テープ面に垂直方向の交流磁界が加わると大幅に交流損失が増大する特性があるので、回転機用電機子巻線としての要求性能を満たし超伝導化の利点が発揮でき、且つ低交流損失の巻線構成技術の確立が必須である。

2. 研究の目的

前述のように現在各所で取り組まれている高温超伝導回転機の研究開発の多くは、大型の同期機の直流界磁巻線を超伝導化するものである。交流損失の問題が根本的に解決できていない現状では、最も超伝導化のメリットを出しやすい界磁超伝導機に開発が集中している。しかしながら、高温超伝導応用の裾野を広げるためには、中容量機を対象を拡大することが望ましい。そのためには、低交流損失の電機子巻線技術の開発が必要である。本研究では、回転機の電機子巻線に高温超伝導巻線を適用するための交流損失低減方法に関する基礎的な研究を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

交流回転機の分布巻電機子に高温超伝導 (HTS) コイルを適用する場合、HTS コイルは固定子鉄心のスロット内に配置される。このとき、HTS コイルの線材は周囲の鉄心の影響により、コイルのスロット内の配置によって線材の曝される磁界が変化し、交流損失も変化する。従って、HTS コイルのスロット内での配置やスロット開口部の形状を工夫して線材に加わる磁界分布を制御することによって、交流損失を低減できる可能性がある。本研究ではまず、鉄心内に配置された HTS コイルの交

流損失を低減する手法を検討した。コイル周囲の磁界分布を制御する方法として、コイル巻線部分の周囲に適切な形状の磁性材料を配置する方法を用いる。磁性材料を配置することにより、コイル巻線への垂直磁界を低減し、交流損失の低減を狙った。基礎的な検証として、コイル単体での損失低減効果を検証し、鉄心と組合わせた単相部分モデル及び3相部分モデルを設計・製作し、同様に損失低減効果を検証した。これらの結果に基づき、3相モデル巻線を開発し、交流損失評価を行った。

4. 研究成果

4.1 コイル単体での損失低減効果の検証

コイル巻線部周囲に磁性材料を配置して、コイル巻線に加わる磁界分布を成形し、垂直磁界成分を抑制することによる交流低減効果を、コイル単体で検証した。Y系線材を用いて、小型のレーストラック形状の試験コイルを製作した。製作したコイルの概略構造及び諸元を図1.1及び表1.1に示す。

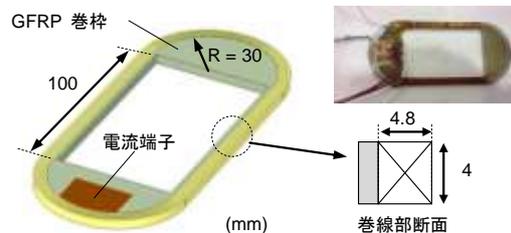


図 1.1 HTS コイルの概略図

表 1.1 HTS コイルの諸元

線材	YBCO
線材幅	4 mm
線材厚み	0.1mm
ターン数	26
臨界電流	64 A

まず、本コイルの巻線部周辺に磁性体を配置した場合の磁界分布を FEM 解析し、垂直磁界が低減できることを確認した。解析はコイル直線部分の中央断面の2次元解析とした。解析モデルを図1.2に示す。配置A及びBは、それぞれ磁性材料を巻線部の上下に配置する場合と配置しない場合に対応する。磁性材料は日本セラミックの5Mであり、後述の測定に用いたものと同じである。図1.3に解析結果を示す。図1.3の結果は、図1.2のX-X'線上における、コイル巻線の線材に加わる垂直磁界 $B_p$ とコイル最内からの距離 $D$ の関係を示したものである。コイル巻線断面に、起磁力280 AT対応する均一な電流密度を与えて解析を行っている。図1.3に示すように、配置Aは配置Cに比べてコ

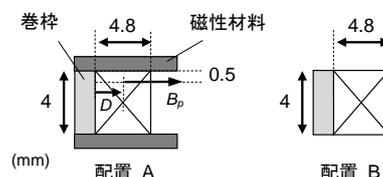


図 1.2 磁界解析モデル (コイル単体)

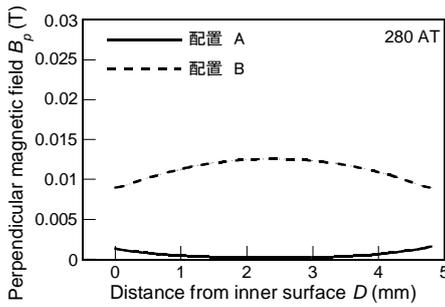


図 1.3 コイル巻線内の垂直磁界分布 (コイル単体)

コイル巻線内の HTS 線材に加わる垂直磁界が低減していることがわかる。

解析結果から得られた知見に基づき、スロット内の磁性体配置による HTS コイルの交流損失の変化を実験により検証する。交流損失はパワーメータ法<sup>(17)</sup>により測定した。図 1.4 に測定回路を示す。電流の計測には、パワーメータ専用設計された無誘導シャントを用いた。また、交流測定に先立ち、直流臨界電流を測定した。図 1.5 に配置 A 及び B に対応する HTS コイルの交流損失の測定結果を示す。図の横軸は、コイルの起磁力であり、ピーク電流値とターン数の積である。配置 A では、配置 B に比べて交流損失が約 30% 減少しており、理論解析で予想した特性と一致することが確認できた。

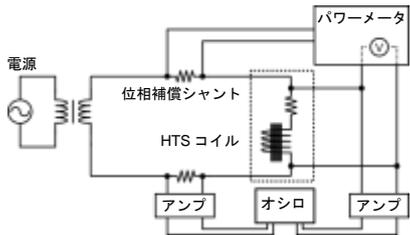


図 1.4 測定回路

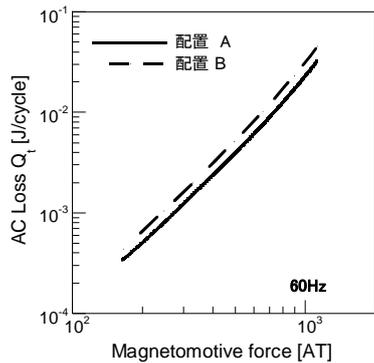


図 1.5 交流測定結果 (コイル単体)

#### 4.2 単相部分モデルによる損失低減効果の検証

図 2.1 に示すような最も基本的な鉄心と HTS コイルの組み合わせにおいて、HTS コイルの交流損失を低減する手法を検討する。図 2.2 に示すように、電磁鋼板を積層した 1 次側鉄心に長方形のスロットを切り、そこにレーストラック型 HTS コイルを配置し、空隙を隔てて 2 次側鉄心と対向させて磁気回路を形成したモデルを考える。長方形のオープンスロット開口部に磁性体を導入して、

磁界分布を成形することにより、コイルへの垂直磁界を低減し、交流損失の低減を図ることを考える。図 2.2 に示す 3 種類の配置 (配置 A, B 及び C) について FEM 解析により磁界分布を評価する。配置 C は磁性材料をスロット内に挿入しないケースである。HTS コイルは、後述の測定サンプルと同じ寸法とし、Coil 1 は Bi-2223 コイルに、Coil 2 は YBCO コイルにそれぞれ対応する。また、解析は断面内の 2 次元解析で行った。電磁鋼板は新日鉄製 35H360、スロット内に挿入する磁性材料は日本セラミックの 5M であり、同様に後述の測定に用いたものと同じである。

図 2.3 に解析結果を示す。図 2.3 の結果は、図 2.2 の X-X' 線上における、コイル巻線の線材に加わる垂直磁界  $B_p$  とコイル最内からの距離  $D$  の関係を示したものである。コイル巻線断面に、Coil 1 及び Coil 2 について、それぞれ起磁力 495 AT (27.5 A×18 ターン) 及び 280 AT (10 A×28 ターン) に対応する均一な電流密度を与えて解析を行っている。図 2.3 に示すように両コイルにおいて、配置 A と B は配置 C に比べてコイル巻線内の HTS 線材に加わる垂直磁界が低減している。図 2.4 に、Coil 1 におけるスロット内の巻線周辺の磁束線分布を示す。

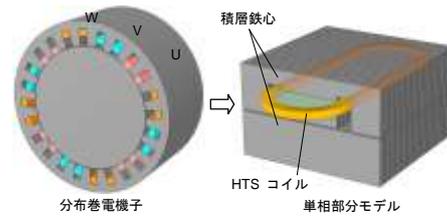


図 2.1 単相部分モデル

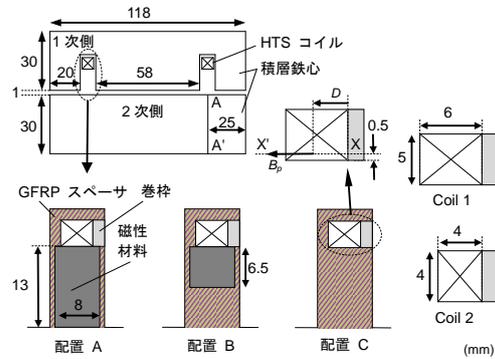


図 2.2 磁界解析モデル (単相部分モデル)

配置 A 及び B では、磁束が巻線周囲に配置した磁性材料を通して迂回することにより、線材への垂直磁界が低減して様子がわかる。しかしながら、磁性材料を通過して主磁界がショートすることにより、2 次側に鎖交する磁束が減少してしまうと考えられる。2 次側鉄心へ鎖交する磁束  $\phi_{core}$  を図 2.2 の A-A' 線上で計算した結果を表 2.1 に纏める。配置 A では、HTS 線材に加わる垂直磁界は最も低減するが、スロットに配置した磁性体を介して磁束がまわり込んでしまい、主磁束が減少してしまう。これに対し、配置 B では配置 C に比べて、主磁束の減少は 3% 程度に留まっている。従って、コイルに加わる垂直磁界を低減しつつ、主磁束が減

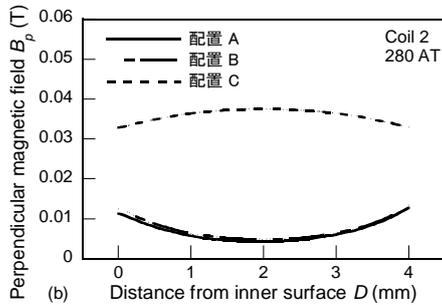
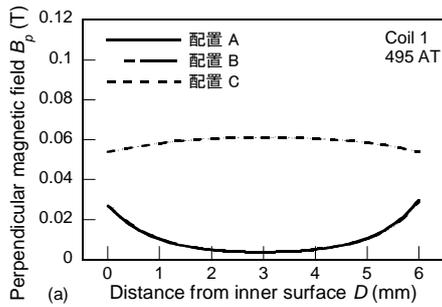


図 2.3 垂直磁界分布の解析結果

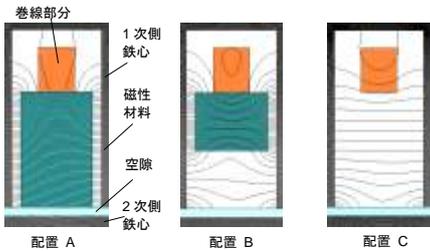


図 2.4 スロット内のコイル巻線周囲の磁束線の様子 (単相部分モデル)

表 2.1 2次側鉄心の磁束 (A-A'上)

コイル配置	A-A'上の磁束
配置 A	$7.81 \times 10^{-3}$ Wb/m
配置 B	$8.05 \times 10^{-3}$ Wb/m
配置 C	$8.07 \times 10^{-3}$ Wb/m

少しないような配置 C が適切と考えられる。

解析結果から得られた知見に基づき、スロット内の磁性体配置による HTS コイルの交流損失の変化を実験により検証した。図 2.5 に測定のために作製した小型レーストラックコイルと鉄心の図を示し、表 2.2 のそれらの諸元を纏める。測定には 2 種類のコイルを用意した。Coil 1 は、Bi-2223 線材を用いて作製したシングルパンケーキ巻コイルで、Coil 2 は YBCO 線材を用いたものである。1 次及び 2 次側鉄心は、電磁鋼板 (新日鉄製 35H360) を積層し、ワニスで含浸して作製した。1 次側及び 2 次側鉄心間の空隙は 1mm である。鉄心開口部に挿入する磁性体は入手の容易さから、ソフトフェライト (日本セラミック製 5M) を用いた。交流測定に先立ち、直流臨界電流を測定した。直流臨界電流値は、コイル巻線内の平均電界が  $10^{-4}$  V/m になったときの電流値で定義した。交流損失はパワーメータ法により測定した。図 2.6 に測定回路を示す。電流の計測には、パワーメータ専用設計された無誘導シャントを用いた。

図 2.7 に配置 A, B, C に対応する HTS コイルの

交流損失の測定結果を示す。図の横軸は、コイルの起磁力であり、ピーク電流値とターン数の積である。配置 A 及び B では、配置 C に比べて交流損失が減少しており、理論解析で予想した特性と一致することが確認できた。特に Coil 2 においては、配置 A 及び B の交流損失は配置 C に比べて 50% 程度低減されている。これは、YBCO 線材の方が Bi 線材に比べて、垂直磁界の低減がより交流損失低減に寄与することから理解できる。また両コイルにおいて、配置 A と配置 B では、交流損失は同程度である。図 3 に示す磁界分布解析の結果から

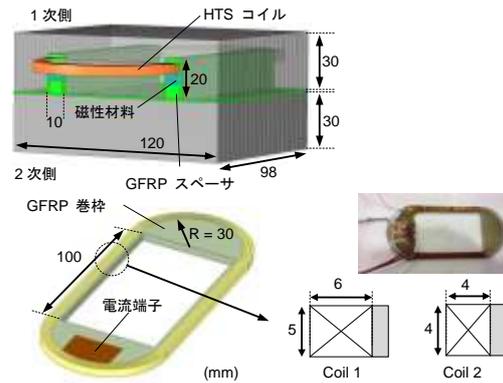


図 2.5 交流損失測定用サンプル (単相部分モデル)

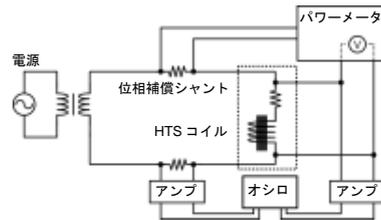


図 2.6 交流損失測定回路

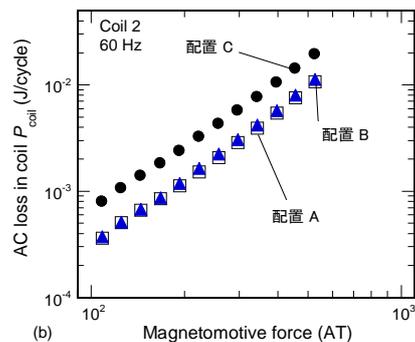
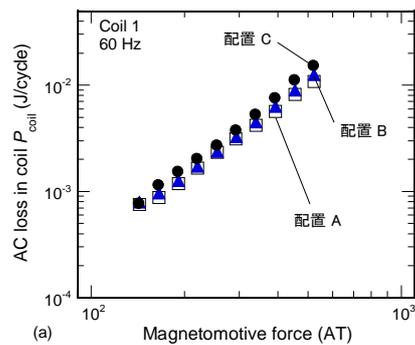


図 2.7 交流損失測定結果 (単相部分モデル)  
わかるように、配置 A と配置 B では、コイル巻線

の線材に加わる垂直磁界がほとんど同じレベルであることから予想通りの結果と言える。

### 4.3 3相部分モデルによる損失低減効果の検証

3相交流条件での損失低減効果を検証する目的で、図3.1に示すようにHTSコイル3個を鉄心と組み合わせた場合のHTSコイルの交流損失を測定し、評価を行った。図3.2に示すように、スロットを切った積層電磁鋼板に、3個のコイルをオーバーラップして配置し、3相分布巻の一部を模擬したモデルを考える。前述の単相部分モデルと同様に、長方形のオープンスロット開口部に磁性体を導入して、磁界分布を成形することにより、コイルへの垂直磁界を低減し、交流損失の低減を図ることを考える。まず、図3.2に示す2種類の配置(配置A, B)についてFEM解析により磁界分布を評価する。HTSコイルは、前述の測定サンプルと同じ寸法のYBCOコイルとする。また、解析は断面内の2次元解析で行った。鉄心の電磁鋼板及びスロット内に挿入する磁性材料も同じものである。図3.3に解析結果を示す。起磁力は280 AT (10 A×28 ターン)である。図3.3に示すように各相のコイルにおいて、配置Aは配置Cに比べてコイル巻線内のHTS線材に加わる垂直磁界が低減していることがわかる。図3.4に、スロット内の巻線周辺の磁束線分布を示す。単相モデルと同様に、配置Aでは、磁束が巻線周囲に配置した磁性材料を通して迂回することにより、線材への垂直磁界が低減している様子が見られる。

3相部分モデルにおける、スロット内の磁性体配置によるHTSコイルの交流損失の変化を実験により検証した。図3.5に、作製した3相部分モデルの図を示す。使用したコイルの諸元は、表2.2に示すものと同じである。図3.6に示す通り、交流損失は3相パワーメータを用いて行った。図3.6の測定回路に示すように、コイルはスター結線である。3相部分モデルの交流損失測定結果を図3.7に示す。交流損失は3相分合計である。3相部分モデルにおいても、損失低減効果が検証できた。

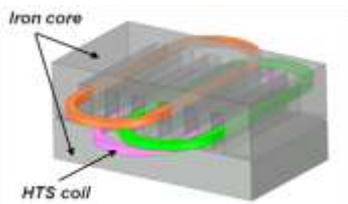


図 3.1 3相部分モデル

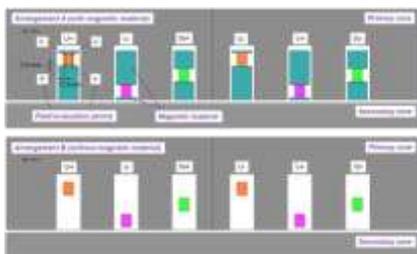


図 3.2 磁界解析モデル (3相部分モデル)

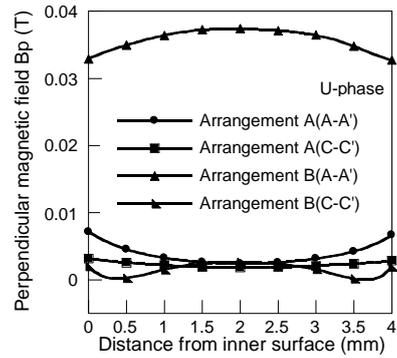


図 3.3 垂直磁界分布の解析結果(3相部分モデル)

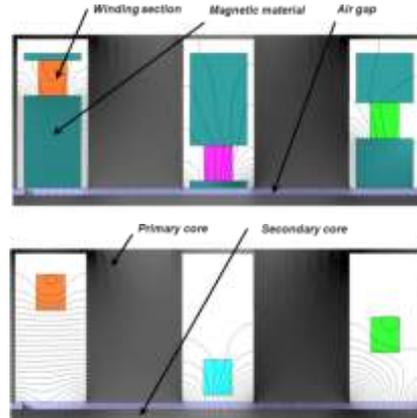


図 3.4 スロット内のコイル巻線周囲の磁束線の様子 (3相部分モデル)

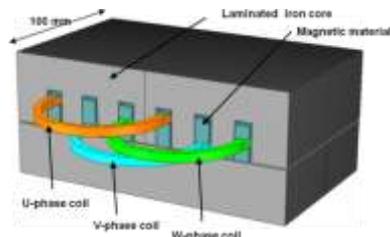


図 3.5 交流損失測定用サンプル(3相部分モデル)

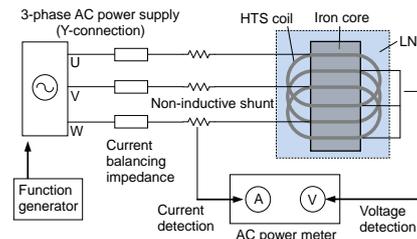


図 3.6 交流損失測定回路 (3相条件)

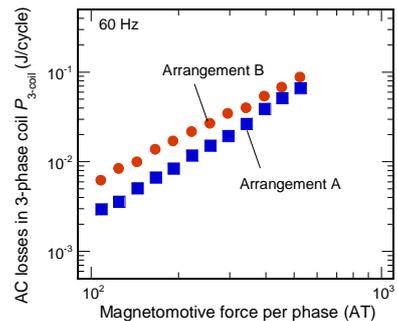


図 3.7 交流損失測定結果 (3相部分モデル)  
起磁力が大きな領域で損失の低減効果が小さくなる

っているのは、巻線部に配置した磁性体の磁気飽和により、垂直磁界が低減されなくなったためと考えられる。

#### 4.4 3相モデル巻線の交流損失評価

コイル単体及び部分モデルでの結果を踏まえ、3相モデル巻線を作製し、交流損失の評価を行った。予算と納期の関係から、市販用の誘導機に使用する固定子のみを巻線が施されていない状態で購入して使用することにした。各相当たり2個のHTSコイルを用いた2極の3相巻線構造になっている。使用線材はY系である。製作した3相モデル巻線の構造を図4.1に示す。また、諸元を表4.1に纏めた。スロット内にコイル巻線が斜めになるように配置する必要があるため、ターン数は10ターンである。まず、図4.2に示す2種類の配置(配置A, B)についてFEM解析により磁界分布を評価する。解析は断面内の2次元解析で行った。起磁力は400 AT (40 A×10 ターン) である。基本的に磁界分布は、交流1周期において位相が異なるだけで対称になるので、図4.3にはU相コイルの垂直磁界分布のみにを示す。図はU相電流がピークになる位相の場合に対応する。図4.3に示すように、3相モデルコイルにおいても、配置Aは配置Bに比べて垂直磁界が低減していることがわかる。作製した3相モデル巻線の交流損失の測定を行った。交流損失の測定方法は、3相部分モデルと同じ方法である。図4.4に測定結果を示す。本測定での3相モデル巻線において、一定の損失低減効果は確認できたものの、部分モデルにおけるそれよりも顕著なものではなかった。これは、市販機用の固定

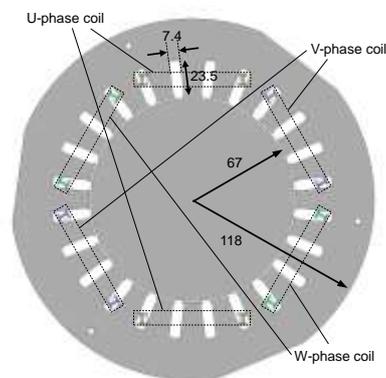


図4.1 3相モデル巻線の概略図

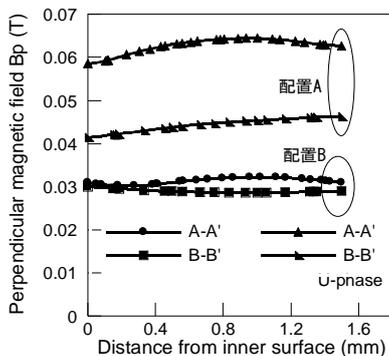


図4.2 垂直磁界分布の解析結果(3相モデル巻線) 子鉄心を用いたため、スロット形状の制約から磁

性体の大きさに制約があり、垂直磁界の抑制が部分モデル場合よりも小さくなったためと考えられる。

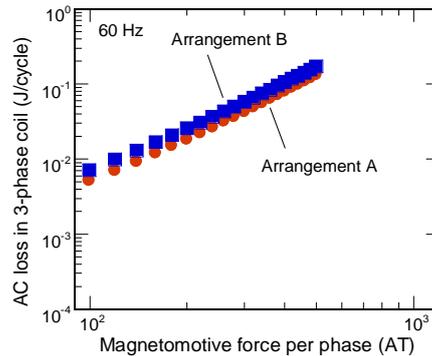


図4.4 交流損失測定結果(3相モデル巻線)

#### 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. J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, Y. Sano, M. Ogawa, S. T. Ranecky, "Experimental Investigation of AC Loss Characteristics in HTS Tape With Rotating Magnetic Field", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, 5900504, 2017 [査読あり].
2. J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sakurai, Y. Sano, H. Tada, Y. Yoshii, "Experimental Investigation of AC Loss Characteristics of Stacked HTS Tapes in an Iron Core", IEEE Trans. Sppl. Supercond., Vol. 26, 5900204, 2016 [査読あり].
3. S. Fukui, S. Tsukamoto, N. Nohara, J. Ogawa, T. Sato and T. Nakamura, "Study on AC Loss reduction on HTS Coil for Armature Winding of AC Rotational Machines", IEEE Trans. Apple. Supercond., Vol.26, 5203705, 2016 [査読あり].

[学会発表] (計 2件)

1. S. Fukui, J. Ogawa, K. Nohara, Y. Kobu, J. Takahashi, T. Sato, T. Nakamura, "Study on AC Loss Reduction in HTS Coils With Iron Core by Flux Modification Using Magnetic Material in 3-phase AC Condition", Asian International Cryogenic Material Conference, The Kanazawa Kageki-za, Kanazawa, Nov.10 2016.
2. 福井聡, 小川純, 野原和貴, 古布祐太, 佐藤孝雄, 中村武恒, 「磁性体による磁束変調を利用した鉄心付き HTS コイルの交流損失低減」, 電気学会 超電導機器/金属・セラミックス合同研究会, 大阪大学, 大阪, 2016年6月28日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

福井 聡 (FUKUI SATOSHI)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 70293199