

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760203  
 研究課題名（和文） 同期機の塊状磁極表面損失の現象解明と計算精度向上に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Calculation Accuracy Improvement and Principle Investigation of Surface Losses in Solid Pole Synchronous Machines  
 研究代表者  
 島 和男（SHIMA KAZUO）  
 金沢工業大学・工学部・講師  
 研究者番号：20410285

研究成果の概要：発電所・工場・家庭などで広く用いられている同期機（発電機とモータ）を対象に、発熱や効率低下を引き起こす塊状磁極表面損失の高精度計算法開発を目的にして、表面損失の測定および解析を実施した。その結果、開発のための指針を得ることができた。高精度計算のためには、直流磁界に応じて透磁率を大きく変える必要があることや、ヒステリシス損を考慮する必要があることを明らかにした。本成果に基づき、今後も高精度計算法開発を進めていく。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	0	2,800,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	180,000	3,580,000

研究分野：電気機器工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気機器工学

キーワード：マイナーループ・表面損失・同期機・塊状磁極・偏磁・表皮効果・環状試料・増分透磁率

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 同期機（発電機とモータ）は、発電所におけるほぼ唯一の電力発生源であるとともに、工場・社会インフラ・家庭などにおいてあらゆる用途に使われる電動動力源であり、きわめて重要な機器である。同期機の効率向上による省エネルギー効果・温室効果ガス削減効果は大きい。

同期機の磁極には積層鉄心と塊状鉄心がある。塊状鉄心は、積層鉄心に対して、低コストである、構造の自由度が大きい、機械的

強度が高い、始動トルクを発生できる、などの利点があるため、産業用の突極形機・発電所の発電機・自動車用発電機などに広く用いられている。

(2) ただし、塊状磁極の同期機では、磁極に表面損失が生じることによって効率が低下したり磁極が過熱したりする問題がある。

表面損失の発生原理は次のように説明できる。図1に突極形同期機の断面図と、磁束線分布を示す。磁極表面には、主磁束に起因

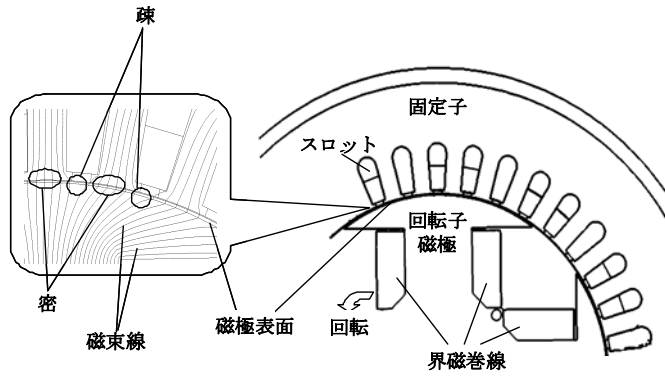


図1 突極形同期機断面および磁束線分布概念図

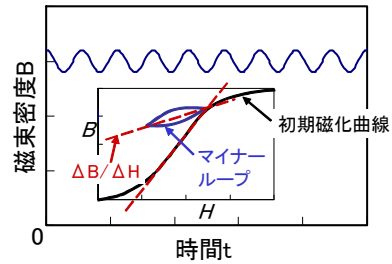


図2 磁極表面磁束の概念図

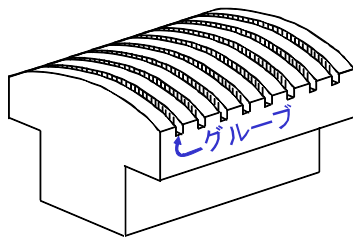


図3 磁極表面グルーブの概念図

する直流磁束と、スロットによる固定子鉄心の凹凸に起因する交流磁束が重畳して生じる。鉄心内には図2に示すようにヒステリシスによるマイナーループが発生する。これによって、磁極表面に渦電流損失やヒステリシス損失が発生する。これを表面損失と呼ぶ。

(3) 塊状磁極同期機を設計するためには、表面損失による磁極過熱の有無と、表面損失による効率低下量を予測することが重要である。そのためには、表面損失を精度良く評価することが重要となる。なお、表面損失を軽減する設計方法の一例として、図3に示すように磁極表面にグルーブ（溝）を形成する構造の採用がある。

(4) しかし、現状の表面損失の計算方法は計算精度が不十分で、実用レベルに達していないように見受けられる。また、表面損失計算の難しさは、材料がヒステリシスを有する強磁性体である点と、直流磁束に交流磁束が重畳する点と、表皮効果により表層にのみ渦電流が生じる点にあるが、これらが複合した物理現象が把握されていない。加えて、グルーブによって表面損失を低減できる物理的原理が十分に把握されていない。

(5) 表面損失の計算精度が十分でないと、試作が困難な大型機の場合には、従来実績機を踏襲して設計せざるを得ず、構造改善の妨げになる。試作が容易な小型機の場合では、表面損失による磁極過熱や効率悪化の評価のために、時間のかかる試作・測定を繰り返す必要があり、最適設計の妨げになる。グルー

ブの最適寸法を見出すことも困難になる。このため、表面損失の物理現象を十分に把握すると共に、表面損失の計算精度を向上することが望まれる。これが実現すれば、同期機の磁極過熱防止・電力効率向上・設計期間短縮・構造改善に寄与できる。

## 2. 研究の目的

(1) 同期機の塊状鉄心磁極の表面損失とグルーブに関する測定および解析により、その物理現象を解明するとともに、表面損失の高精度計算法を開発することを目的とする。

(2) 第1に、塊状鉄心磁極の等価モデルである環状試料を製作し、測定・解析する。同期機自体ではなく環状試料を対象にすることにより、表面損失のみの分析を実現する。同期機実機の場合、さまざまな損失が発生するため、表面損失のみの分析が困難である。

(3) 第2に、塊状磁極突極形同期機を製作し、測定・解析する。これによって同期機実機に生じる物理現象についても把握する。

## 3. 研究の方法

(1) 塊状鉄心磁極の等価モデルとして塊状鉄心環状試料を設計・製作した<sup>〔学会発表〕②</sup>、<sup>〔その他〕③</sup>。また、これと同一ロットの材料で、角棒試料を製作した。製作を株式会社大洋電機エンジニアリングに依頼した。材料は塊状磁極として一般に使用されているSS400材とした。図4に環状試料の外観図を示す。外径65.0mm、内径55.0mm、高さ8.0mm、一次巻数252、二次巻数120とした。角棒試料は長さ30cm、断面を一辺2.0mmの正方形とした。

(2) 実機の塊状磁極表面では直流磁束に交流磁束が重畳する。そこで、直流磁束に交流磁束が重畳した条件で環状試料の表面損失および磁気特性を測定する実験環境を構築した<sup>〔学会発表〕②</sup>、<sup>〔その他〕③</sup>。図5に測定回路を示



図4 環状試料の外観図

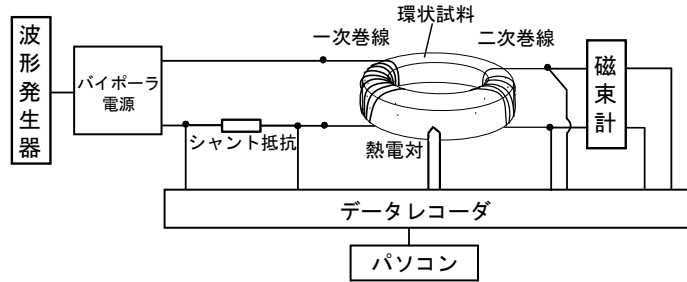


図5 環状試料の測定回路

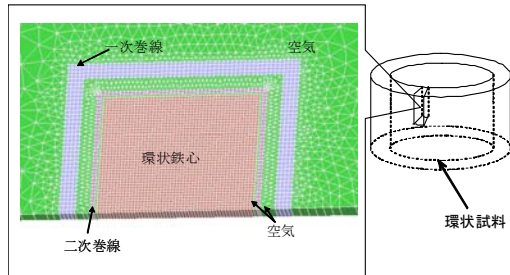
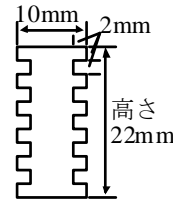


図6 FEA用の解析モデル

す。表面損失の測定手順を以下に示す。①環状試料を消磁する。②一次巻線に直流電流を印加し、その後徐々に正弦波交流電流を重畳させる。③一次電流・二次電圧・磁束計出力の波形を測定する。この波形から、交流印加磁界実効値  $H_{ac}$ 、直流磁界  $H_{dc}$ 、直流磁束密度  $B_{dc}$ 、損失  $P$  などを算出する。

(3) 表面損失の高精度計算のためには、鉄心の透磁率を正確に把握する必要がある。そのための基礎検討として、表面損失の測定値と有限要素解析 (FEA) を用いて透磁率を近似的に推定した<sup>〔その他〕③</sup>。簡単のために、鉄心内部の透磁率が時間的に不変かつ空間的に一様と近似し、線形 FEA を用いた。また、本解析では表面損失のヒステリシス損成分を無視した。導電率は、製作した角棒試料をナノボルトメータで測定した値を入力した。透磁率の値を変えて FEA を繰り返し、解析結果の渦電流損が本章(2)項の表面損失測定値と一致するときの透磁率を推定値とした。

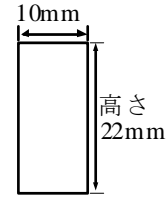
(4) 表面損失の現象を分析する際の基礎データを得るために、製作した環状試料を用いて、鉄心材料の直流磁化特性・ヒステリシス損特性・増分透磁率特性を測定した<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。測定回路は図5と同一である。測定手順を以下に示す。①環状試料を消磁する。②一次巻線に、周期 30 秒程度でゆっくりと変動電流を印加する。この電流波形を様々に変えて直流初期磁化特性・メジャー・マイナーループを測定する。③メジャー・マイナーループの面積からヒステリシス損を算出する。これらループの傾きから増分透磁率を算出する。



周囲長 104 mm

図7 グループ付

環状試料の断面



周囲長 64 mm

図8 グループなし

環状試料の断面

(5) 高精度計算のためには渦電流損に加えてヒステリシス損の影響も把握する必要がある。そのための基礎検討として、本章(4)項で測定したヒステリシス損特性に基づき、環状試料の表面損失に含まれるヒステリシス損の割合を概算する方法を構築した<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。概算手順を以下に示す。①FEA

によって、一次巻線に正弦波交流電流を印加した条件で環状試料を解析する。これによって渦電流損が得られる。図6に解析モデルを示す。偏磁のない場合は、本章(4)項で述べた直流初期磁化曲線を使用した非線形 FEA 解析とする。偏磁のある場合は、本章(3)項の FEA 解析とする。②FEA によって得られる解析モデル内の各要素における磁束密度振幅と、本章(4)項で測定したヒステリシス損特性によって、各要素で発生するヒステリシス損を求める。③各要素を合計し、試料全体のヒステリシス損を求める。④こうして求めた渦電流損とヒステリシス損の和を表面損失として、ヒステリシス損の割合を求める。

(6) 本章(3)項に引き続き、鉄心内の透磁率を分析するために、本章(4)項の増分透磁率特性に基づいて環状試料内の透磁率分布を推定した<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。本章(5)項の FEA によって得られる解析モデル内の各要素における変動磁束密度の波高値と、前記増分透磁率特性によって、各要素の透磁率を求めた。

(7) グループによる表面損失低減効果の分析を目的に、グループを施した塊状鉄心環状試料を設計・製作した。SS400 材とした。外径 110.0mm、内径 90.0mm、高さ 22.0mm とし

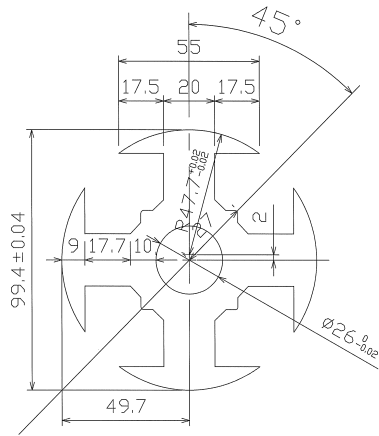


図9 試作機の磁極鉄心の断面図



図10 試作機の測定装置

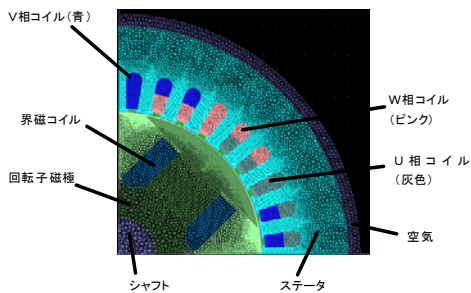


図11 塊状磁極同期機の解析モデル

た。比較のため同一ロット材でグループなし環状試料も作成した。図7, 図8に各試料の断面図を示す。

本試料の表面損失を測定した。測定方法は、一次電流の代わりに一次電圧を正弦波にした点以外、本章(2)項と同一である。

(8) 同期機実機に生じる現象を分析するために、塊状磁極同期機および、同一寸法の積層磁極同期機を試作した<sup>〔その他〕</sup>①。図9に両機の磁極鉄心の断面図を示す。両機の仕様は、1.5kVA, 120V, 1800min<sup>-1</sup>, 4極である。塊状磁極材料は本章(1)項に述べた環状試料・角棒試料と同一ロットのSS400材である。

塊状磁極同期機と積層磁極同期機の損失の差分が表面損失に相当すると仮定することにより、無負荷時の表面損失を測定した。図10に測定装置を示す。測定手順を以下に示す。①塊状磁極機と積層磁極機の端子電圧

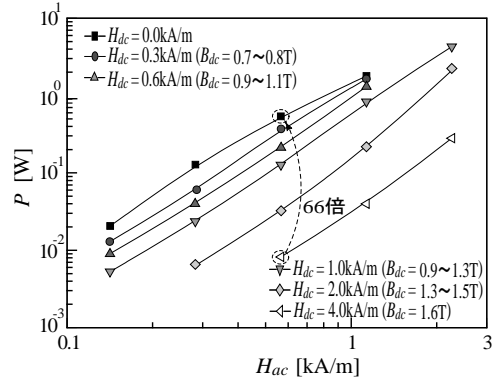


図12 環状試料の表面損失測定結果

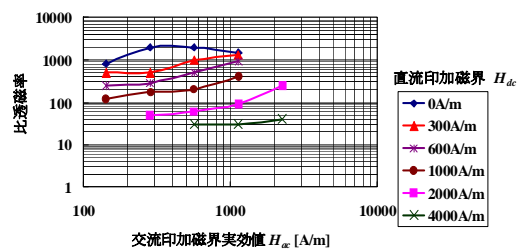


図13 FEAによる比透磁率推定結果

が同一となるように界磁電流を調節し、両機をそれぞれ 1800min<sup>-1</sup> で回転させる。②両機のトルクを測定する。これを損失に換算する。③両機の損失からそれぞれの機械損を差し引いたのち、塊状磁極機の損失から積層磁極機の損失を引く。これが表面損失の近似値となる。

また、試作機の表面損失を FEA によって計算した。図11に解析モデルを示す。鉄心の磁気特性には、環状試料の直流初期磁化曲線の測定値を入力した。すなわち、ヒステリシスループを無視した。鉄心の導電率には、室温における角棒試料の測定値を入力した。表面損失中の渦電流損成分のみを計算した。

#### 4. 研究成果

(1) 表面損失測定のための環状試料を製作できた<sup>〔学会発表〕</sup>②, <sup>〔その他〕</sup>③。本試料によって、表面損失や直流磁化特性を測定できるようになった。また、塊状鉄心環状試料と同一ロットの材料で角棒試料を製作することができた。本試料によって、FEAに入力する材料の導電率を測定できるようになった。

(2) 直流磁束に交流磁束が重畳した条件で前記環状試料の表面損失を測定した<sup>〔学会発表〕</sup>②, <sup>〔その他〕</sup>③。図12に周波数 100Hz の測定結果を示す。表面損失が直流磁界によって大きく変わることがわかった。これは、試料内の交流磁束密度と表皮深さが変化したためと考え

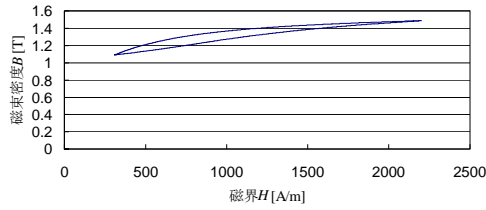


図 14 マイナーループの測定例

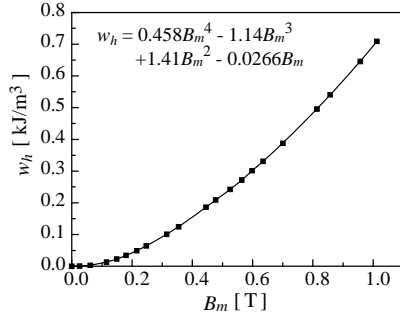


図 15 ヒステリシス損特性の測定例

る。すなわち、交流磁束によって生じるマイナーヒステリシスループの増分透磁率が、直流磁界により大きく変化したためと考えられる。

(3) 表面損失の測定値と FEA を用いて透磁率を近似的に推定した<sup>〔その他〕③</sup>。図 13 に推定結果を示す。透磁率が交流磁界だけでなく、直流磁界によって大きく変わることがわかった。直流印加磁界が 0A/m のときの比透磁率は約 80 から 2000 であるが、4000A/m のときは約 30 から 40 であり、大きく異なる。高精度計算のためには、直流磁界に応じて透磁率を大きく変える必要があることが明らかになった。今後、増分透磁率を考慮に入れた表面損失計算法の開発を目指す。

(4) 鉄心材料の直流磁化特性・ヒステリシス損特性・増分透磁率特性を測定した<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。図 14 に鉄心材料のマイナーループの測定例を示す。図 15 に磁束密度振幅に対するヒステリシス損特性の測定例を示す。偏磁のない条件の結果である。図 16 に偏磁 1.29T の場合の増分透磁率特性の測定例を示す。これらによって、表面損失の現象を分析する際の基礎データを得ることができた。

(5) 表 1 に環状試料の表面損失に含まれるヒステリシス損の概算例を示す<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。偏磁のない場合である。ヒステリシス損の割合が約 3 割と無視できないことを明らかにした。計算精度向上のためにはヒステリシスを考慮する必要があるといえる。今後、ヒステリシスを考慮した高精度計算法を考案していく。なお、図 17 は FEA による環状試

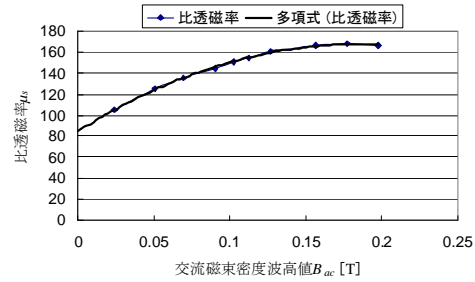


図 16 増分透磁率特性の測定例

料内の渦電流損失の解析結果である。表皮効果によって試料表面に損失が集中している。

(6) 図 18 に環状試料内の透磁率分布の概算例を示す<sup>〔学会発表〕①</sup>、<sup>〔その他〕②</sup>。偏磁 1.29T の場合である。この結果から、本章(3)項で推定した透磁率が増分透磁率の値に近いことがわかった。今後、試料の増分透磁率と概算透磁率の関係をより詳細に分析する。



図 17 環状試料の渦電流損失の解析例  
(100Hz)

表 1 環状試料の表面損失に含まれるヒステリシス損の概算例

	周波数 [Hz]	
	100	1000
ヒステリシス損 計算値 [W]	0.0517	0.161
渦電流損 計算値 [W]	0.0925	0.320
表面損失 計算値 [W]	0.144	0.481
表面損失 測定値 [W]	0.128	-

(7) 図 19 にグループ付き環状試料の表面損失測定結果を示す。直流磁界 0A/m、交流磁界 283A/m (実効値) の場合である。交流印加磁界同一の条件においては、グループによって表面損失が増加することが判明した。また、その増加倍率が試料断面周囲長 (図 8, 9) の倍率 1.63 倍に近いことがわかった。この特性は、実機グループによる表面損失低減効果と逆の特性であるため、今後実機に即した測定条件やモデルを考案していく。

(8) 塊状磁極同期機を試作し、表面損失を測

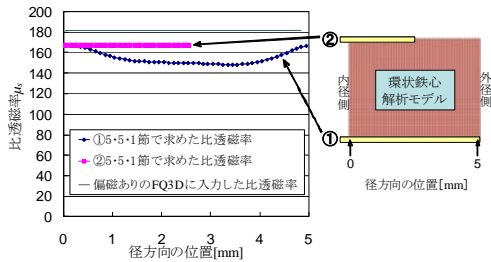


図 18 環状試料透磁率の概算例〔その他〕②

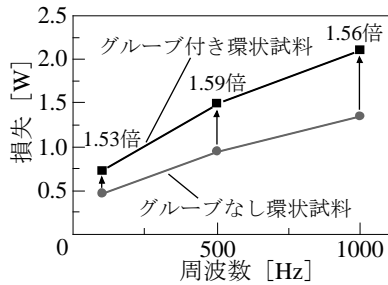


図 19 グループ付き環状試料の表面損失測定結果

定した〔その他〕①。図 20 に測定結果を示す。また、FEA によって試作機の表面損失の渦電流損成分を解析した。図 21 に FEA による磁極表面部の渦電流密度計算結果を示す。実機の塊状磁極に生じる現象を可視化して把握した。線間電圧が 120V のときの表面損失測定値が 28.7W、渦電流損失 FEA 値が 23.1W となった。FEA 値が測定値よりも 2 割程度小さい。これはヒステリシスを無視して解析したためと考えられる。

(9) 今後、本研究で得られた成果に基づき、表面損失の物理現象解明と高精度計算法開発を進める。本研究および今後の成果を実設計に適用できれば、極めて広く使用されている同期機の効率向上・設計期間短縮・磁極過熱事故防止・構造改善に寄与できる。効率向上による省エネルギー効果・温室効果ガス削減効果が得られる。

## 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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 滝川誠彦, 大西隆文, 林慎太郎, 島 和男, 深見 正, 花岡良一, 高田新三, 「塊状鉄心環状試料の表面損失に含まれるヒステリシス損の評価」, 平成 20 年度北陸地区学生による研究発表会, A-2, 2009 年 3 月 1 日, 富山
- ② 滝川誠彦, 島 和男, 深見 正, 花岡良一,

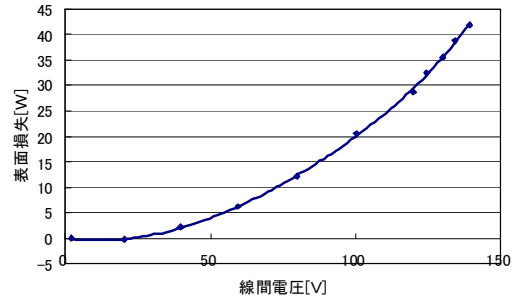


図 20 塊状磁極同期機の表面損失測定値

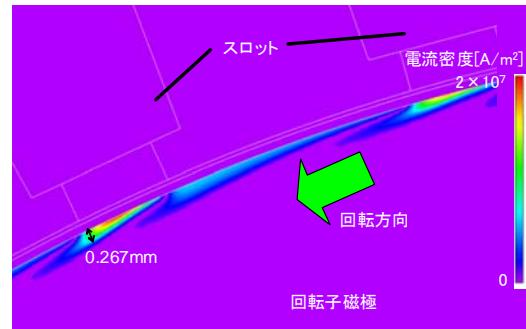


図 21 塊状磁極表面の渦電流密度分布

高田新三, 「偏磁状態における塊状鉄心環状試料の表面損失測定」, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション, Y-110, 2008 年 8 月 27 日, 高知

[その他] (計 3 件)

- ① 中井啓介, 福富雄太郎, 「塊状磁極同期機の表面損失評価に関する研究」, 平成 20 年度金沢工業大学工学設計Ⅲプロジェクトレポート, 2009
- ② 大西隆文, 林慎太郎, 「塊状鉄心環状試料を用いた表面損失評価に関する研究」, 平成 20 年度金沢工業大学工学設計Ⅲプロジェクトレポート, 2009
- ③ 日野健太郎, 赤須史也, 「同期機の塊状磁極表面損失の計算精度向上に関する研究」, 平成 19 年度金沢工業大学工学設計Ⅲプロジェクトレポート, 2008

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
島 和男 (SHIMA KAZUO)  
金沢工業大学・工学部・講師  
研究者番号: 20410285
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし