

(論文)

圧粉コアを用いたアキシシャルギャップモータの性能に及ぼす加工方法の影響

加藤弘樹^{*1}(博士(理学))・三谷宏幸^{*2}・漆畑里美^{*3}・笠井信吾^{*4}・吉田大祐^{*1}(博士(理学))・北条啓文^{*5}

Effect of Processing Method on the Performance of Axial Gap Motor with Soft Magnetic Powder Composites

Dr.Hiroki KATO・Hiroyuki MITANI・Satomi URUSHIBATA・Shingo KASAI・Dr. Daisuke YOSHIDA・Hirofumi HOJO

要旨

アキシシャルギャップモータを大量生産する量産段階において、圧粉コアは金型成形により作製されるが、試作段階では単純形状の塊を切削加工して作製・評価されることが多い。このような加工方法の違いから、切削加工した圧粉コア(試作方式)と金型成形した圧粉コア(量産方式)では磁気特性が異なり、モータ特性が変わることが懸念される。本稿では、各コアを使用したアキシシャルギャップモータをそれぞれ試作し、モータ性能に及ぼす圧粉コアの加工方法の影響を定量化した。それぞれのモータのトルクが増すにつれ、試作方式のモータ効率量は量産方式よりも低下することが明らかになり、その差異要因を特定することにより、圧粉コア加工において配慮すべき点を明確にした。

Abstract

In the stage of mass producing axial gap motors, their soft magnetic powder composites (SMCs) are produced by die compaction. In the prototype stage, on the other hand, a simple-shaped powder compact is often cut to be evaluated. Having such a difference in processing methods causes concern that the magnetic characteristics of the cut SMCs (prototype method) and the mold-compacted SMCs (mass production method) differ and that may affect the motor characteristics. Therefore, axial gap motors using these cores have been prototyped, and the effects that the methods of processing SMCs have on motor performance have been quantified. As a result, it has become clear that, as the torque of each motor increases, the efficiency of a motor produced by the prototype method decreases in comparison with that of a motor produced by the mass production method. The difference factor has been identified, thereby clarifying the points to be considered in SMC processing.

検索用キーワード

磁性鉄粉, 圧粉コア, アキシシャルギャップモータ

まえがき=近年、気候変動や海面上昇をもたらすとされる地球温暖化に注目が集まっている。地球温暖化の緩和策として、CO₂などの温室効果ガス排出量を実質的にゼロにする脱炭素社会への取り組みが始まっている。化石燃料から再生可能エネルギーへの切り替えや脱ガソリン車の動きが推進され、世界的に自動車の電動化が加速していくことが予測されている。

圧粉コアは磁性鉄粉と樹脂などの絶縁物を混合・被覆して成形した軟磁性材料を指すが、1章で後述するように、圧粉コアの特徴を活かすことにより車載モータ(駆動用主機モータ・補機モータ)が小型化、軽量化、高効率化し、自動車の燃費向上や電気自動車の普及に貢献すると期待されている。

圧粉コアは量産の際には磁性鉄粉を金型成形して最終部品形状に加工されるが、金型は作製に時間がかかり高額なため、性能を検証するための試作段階では圧粉コアのブランク品を切削してコアに加工することが多い。これらの加工方法の違いは、コア内部の残留応力変化としてコアの物理特性に影響を与え¹⁾、最終的にモータ特性に影響を及ぼすと考えられる。このため、設計段階にお

いて量産に用いる金型成形および試作に用いる切削加工の間で生じる圧粉コアモータの特性差異の把握が求められている。

本稿では、磁性鉄粉を用いた圧粉コアモータの特徴を1章で述べる。2章では、金型成形および切削加工されたそれぞれの圧粉成形体を用いたモータ特性の計測評価法を述べる。3章・4章では、実験による圧粉コアモータ特性への影響および実験結果に対する考察・解釈を述べる。

1. 圧粉コアおよびそれを用いたアキシシャルギャップモータの特徴

磁性鉄粉より作製される圧粉コアは、電磁鋼板と比較して数百Hz~数十kHzの周波数域での鉄損が小さく、また、粉末圧縮成形品であるため鉄心としての磁気異方向性が小さく形状自由度が大きいという特長がある²⁾。とくに、後者の性質からモータの小型化に貢献できる可能性を秘めている。

まず、磁性鉄粉²⁾の特長について述べる。通常、磁性材に求められる特性には、高磁束密度、高透磁率、低

^{*1}技術開発本部 応用物理研究所 ^{*2}素形材事業部門 鉄粉ユニット 鉄粉工場 ^{*3}素形材事業部門 鉄粉ユニット 鉄粉工場(現 高砂製作所 総務室付)
^{*4}鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット ^{*5}素形材事業部門 鉄粉ユニット

鉄損がある。高磁束密度と高透磁率を達成するためには、圧縮成形して作製する圧粉コアの成形体密度を上げることが重要である。また、低鉄損化への対応として、鉄損を構成する主要因であるヒステリシス損と渦電流損を低減する必要がある。ヒステリシス損はB-H曲線内の面積に相当し、保磁力との相関が強い。保磁力を低減するためには、外部磁界によって生じる結晶内の磁壁移動を妨げる因子である結晶粒界や介在物の低減、およびコア内部の圧縮応力の低減などが効果的である。ヒステリシス損は低周波数帯の交番磁界下における主要な損失であり、周波数に比例する。いっぽう、渦電流損は交番する外部磁界により素材内部に発生する渦電流で生じるジュール損に相当する。一般に渦電流損は周波数の2乗に比例するため、高周波数帯の交番磁界下における主要な損失になる。渦電流には粒子内渦電流と粒子間渦電流があるが、磁性鉄粉および圧粉コアでは、各粒子表面に絶縁被膜を形成することにより粒子間渦電流を抑制して渦電流損を低減している。この結果、渦電流損失の割合が大きい周波数領域において、圧粉コアの鉄損は電磁鋼板よりも小さくなる。

つぎに、形状自由度について述べる。圧粉コアは磁性鉄粉を圧縮成形したコア（鉄心）であり、金型を用いて所望の部品形状に成形できるほか、一回り大きな圧粉コアのブランク品を作製して任意形状に削り出すこともできる。このようにして作られた圧粉コアは3次的に磁気等方性を有する特徴があり、適用先の磁気回路を3次元化しやすいメリットがある。

現在、電磁鋼板は主要な軟磁性素材として広く普及しており、後述するラジアルギャップモータなどの電磁駆動部品に使用されている。電磁鋼板は厚さ0.1 mm～0.5 mm程度の板状の軟磁性素材である。電磁鋼板コアは、打ち抜いた鋼板が積層されており積層方向に空隙が生じるため、電磁鋼板の面内方向に比べて積層方向の透磁率が低い2次的磁気特性を持つ。このような制限から、電磁鋼板を使用したモータは、図1に示すように、電磁鋼板コアおよびトルクを生じるエアギャップ部の形状が円筒型となるラジアルギャップモータと相性がよく、現行モータの大部分を占めている。このタイプのモ

ータではトルクが回転部の円筒外周面に発生し、トルクは径×軸長に比例する。したがって、扁平なモータにおいてはトルク特性が不利になる³⁾。

いっぽう、圧粉コアは磁気特性が3次的に等方であり、アキシアルギャップモータと呼ばれる円周方向と軸方向の二方向に磁束が流れる磁気回路のモータに適している⁴⁾。アキシアルギャップモータはトルクを発生するエアギャップ部分が円盤形状であり、トルクが円盤径の二乗に比例するため、円盤径の大きな扁平形状において高トルク化が望めるモータである。車載用の小型モータ用途を想定したアキシアルギャップモータとラジアルギャップモータを比較すると、質量あたりのトルクが同等となる扁平率（＝軸長/径）は0.4から0.6であり³⁾、その境界を下回るほどアキシアルギャップモータでは高トルク化のメリットが大きくなることが報告されている³⁾。

2. 金型成形コアおよび切削加工コアのモータ特性の測定試験方法

圧粉コアの加工方法の違いから生じるモータ特性を比較するため、金型成形方式と切削加工方式の圧粉コアを用いてアキシアルギャップモータを試作し、モータ特性を比較した。車載補機用アキシアルギャップモータ（モータ直径φ104 mm）の構成図を図2、実際に作製したモータおよびロータ・ステータコアを図3に示す。定格回転数および定格トルクは、それぞれ1,080 rpm, 1.3 N・mであり、定格出力は約150 Wである。定格モータ効率は81.5%以上である。アルミニウム製モータケース内にあるロータは、ステンレス鋼（SUS304）製フレームにネオジウム磁石が設置された構成になっている。ステータコアは圧粉コアの突極、バックヨーク、コイルから成る。極数およびスロット数は10極12スロットの3相構造であり、突極に巻かれたコイルのターン数は19ターンである。銅線径は1.2 mmである。

図2に示す圧粉コア部品は、金型成形と切削加工の2種類の方法で作製した。圧粉コアの原料粉末には、水アトマイズ鉄粉に絶縁被膜を形成した当社製マグメル^{TM,注1)} ML28Dを使用した。室温型潤滑で鉄粉をφ55 mm×15 mmのブランク品に圧縮成形した後、600℃の窒素ガ

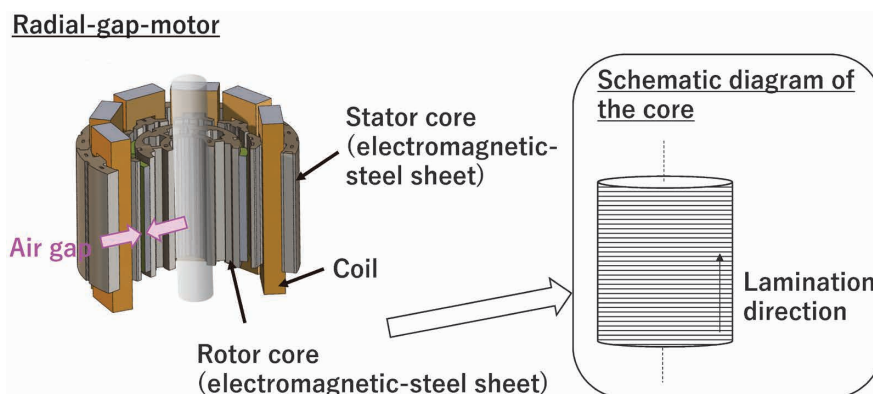


図1 ラジアルギャップモータの基本構造
Fig.1 Basic structure of radial-gap motor

脚注1) マグメルは当社の登録商標（第4669506号）である。

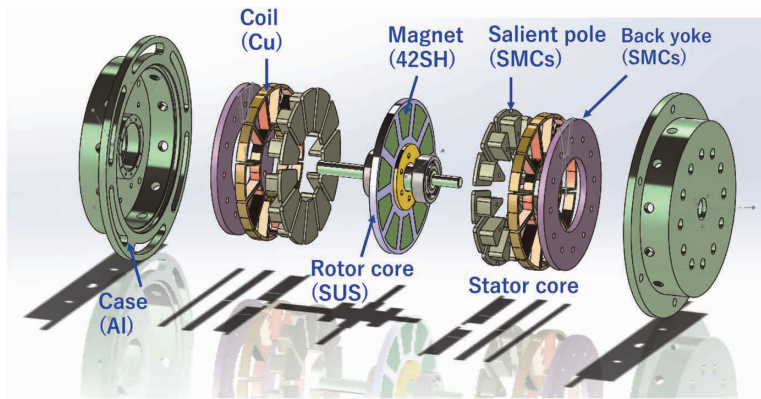


図2 アキシタルギャップモータの構成 (SMCsは圧粉コアの略)

Fig.2 Axial-gap-motor configuration (SMCs is an abbreviation for soft magnetic powder composites)

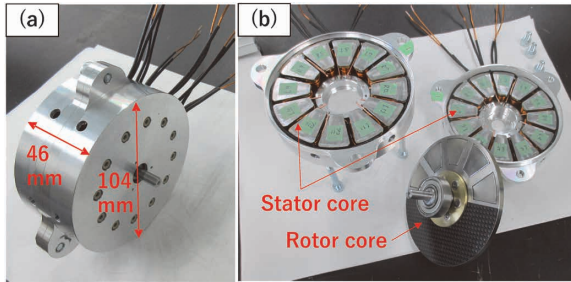


図3 試作用アキシタルギャップモータ (a) およびロータ・ステータ (b) の外観

Fig.3 Exterior of prototype axial-gap motor (a) and stator core & rotor core (b)

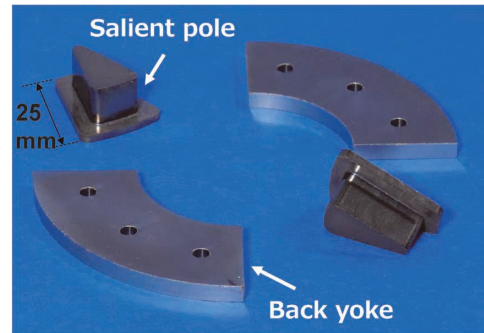


図4 モータ部品用の圧粉コア加工形状

Fig.4 Processed shape of SMCs for motor parts

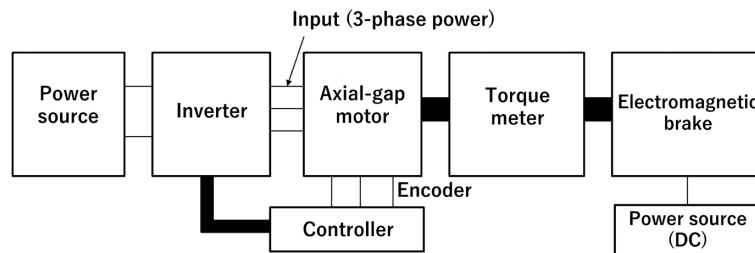


図5 実験装置の配置図

Fig.5 Experimental setup

ス雰囲気中で歪み（ひずみ）とり焼鈍を30分間行い、図4に示すバックヨークおよび突極形状に切削加工した。切削加工コアでは、加工面の絶縁被膜の剥がれが鉄粉粒子間を導通させ、渦電流損を増大させることが懸念される。渦電流を抑制するために、酸洗いにより加工層を除去する表面処理を実施した。酸洗い方法はJIS G 0553：2012に基づいた塩酸法である。金型成形コアも図4に示す形状に成形し、歪みとり焼鈍を実施した。いずれも密度は 7.60 g/cm^3 である。

モータ特性計測の実験系を図5に示す。実験系はDC電源（電圧48V）、出力5kWのインバータでモータを駆動させ、電磁ブレーキで負荷をかける系になっている。実験では、トルク $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、回転数600rpmの条件からモータ駆動試験を開始し、各実験条件におけるモータ効率（出力/モータ入力）を計測した。車載補機用アキシタルギャップモータの定格点（1,080rpm、 $1.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ）付近を狙い、実験条件範囲はトルク $0.3\sim 1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、回転数600~1,800rpmとし、インバータのキャリア周波数は10kHzとした。

3. 圧粉コアの加工方法がアキシタルギャップモータの特性に与える影響

計測された金型成形コアおよび切削加工コアのモータ効率（出力/モータ入力）測定結果を図6および図7に示す。実験の結果、両コアのアキシタルギャップモータは80~90%のモータ効率を有することが確認された。また、図8に示すように、トルクが増大すると金型成形コアによるモータの効率が切削加工コアを上回り、加工方法の違いによりモータ効率に差異が見られた。金型成形コアと切削加工コアを使用したアキシタルギャップモータでは、低速・大トルク領域における効率に最大3~4%の差が生じる結果となった。

上述したように、低速・大トルク領域において金型成形コアの全損失が切削加工コアよりも明らかに低くなることを実験結果は示している。金型成形コアおよび切削加工コアの銅損割合（コイル銅損/モータ入力）の差異を図9に示す。コイル銅損は実測されたコイル電流およびコイル抵抗値から算出した。高トルクになるにつれ

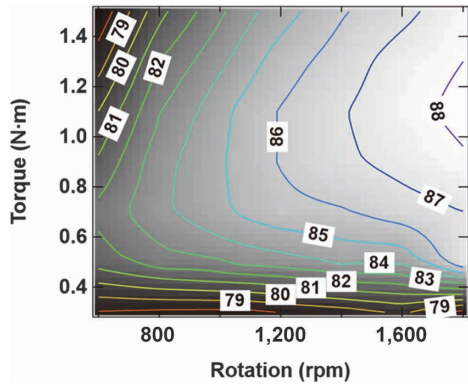


図6 金型成形コアのモータ効率 (%) マップ
Fig.6 Motor efficiency (%) map of SMCs made by compacting process

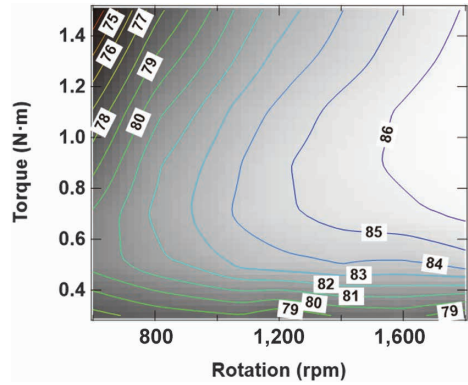


図7 切削加工コアのモータ効率 (%) マップ
Fig.7 Motor efficiency (%) map of SMCs made by cutting process

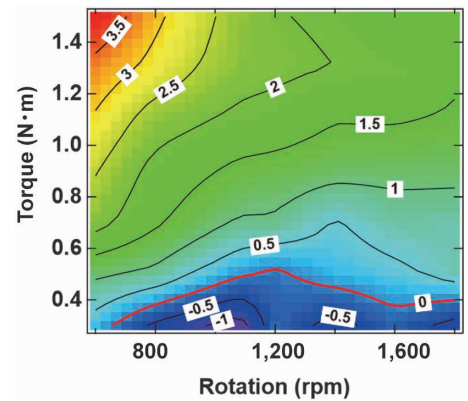


図8 金型成形コアと切削加工コアのモータ効率の差異 (金型成形-切削 [%])
Fig.8 Difference in motor efficiency (%) between compacting and cutting cores (compacting - cutting [%])

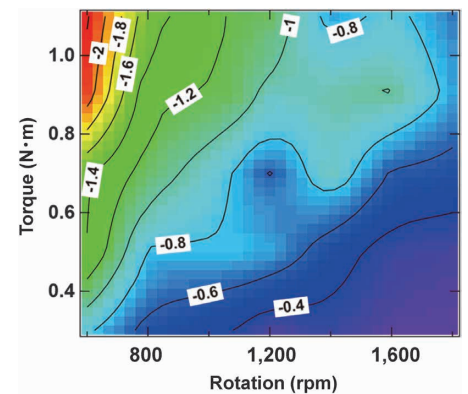


図9 金型成形コアと切削加工コアの銅損割合 (コイル銅損/モータ入力) の差異 (金型成形-切削 [%])
Fig.9 Difference in copper loss ratio (coil copper-loss / motor input) between compacting and cutting cores (compacting - cutting [%])

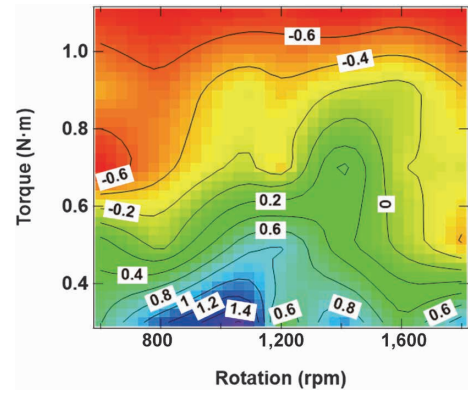


図10 金型成形コアと切削加工コアの鉄損割合 (鉄損/入力) の差異 (金型成形-切削 [%])
Fig.10 Difference in iron loss ratio (iron loss / motor input) between compacting and cutting cores (compacting - cutting [%])

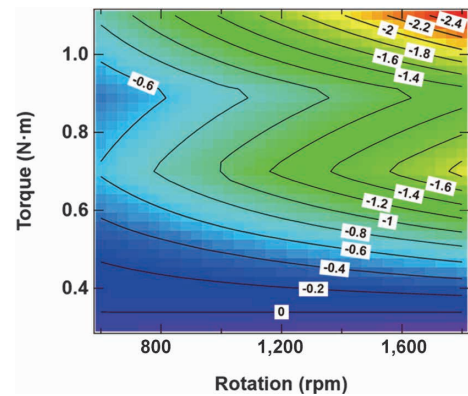


図11 金型成形コアと切削加工コアのヒステリシス損の差異 (金型成形-切削 [W])
Fig.11 Difference in hysteresis loss between compacting and cutting cores (compacting - cutting [W])

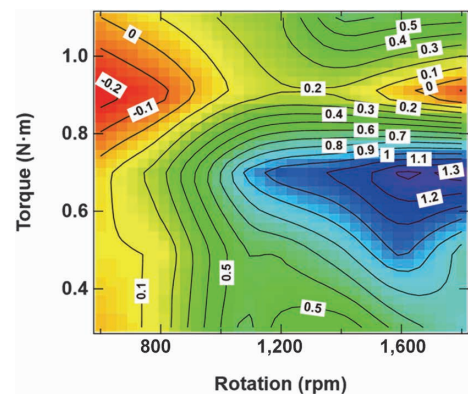


図12 金型成形コアと切削加工コアの渦電流損の差異 (金型成形-切削 [W])
Fig.12 Difference in eddy current loss between compacting and cutting cores (compacting - cutting [W])

て金型成形コアの銅損が切削よりも低くなる結果が得られ、これが効率に差異が生じる主要因になっている。切削加工コアおよび金型成形コアの鉄損割合 (鉄損/モータ入力) の差異を図10に示す。鉄損はモータ効率の計測結果およびコイル銅損から算出した。金型成形コアの鉄損が切削加工コアよりも高トルク領域で低減されることも、金型成形コアの効率が切削加工コアを上回る要因になっている。金型成形コアと切削加工コアのヒステリシス損 (W) の差異、渦電流損 (W) の差異をそれぞれ図11および図12に示す。ヒステリシス損および渦電流

損の鉄損分離はスタインメッツの式により算出した。実験結果は、大トルク領域における鉄損の差異が主にヒステリシス損に起因することを示唆している。

いっぽう、図8に示すように、低トルク領域では金型成形コアによるモータの効率が切削加工コアを下回る。図10に示すように、低トルク領域において金型成形コアの鉄損が切削加工コアより上回ることが金型成形コアの効率低減要因になっている。図11および図12に示すように、ヒステリシス損は金型成形コアと切削加工コアとも低トルク領域では同等レベルになる。いっぽう、渦電流損は切削加工コアが金型成形コアを広範囲の領域で下回る。

4. モータ駆動試験結果に対する考察・解釈

3章で述べたように、金型成形コアと切削加工コアではアキシアルギャップモータの効率に最大3~4%の差異が低速・大トルク領域で生じることが実験的に明らかになった。大トルク領域の効率差異は主に銅損とヒステリシス損に起因する(図9および図11)。いっぽう、低トルク領域では、渦電流損により金型成形コアによるモータの効率が切削加工コアを下回る(図12)。

このモータ効率の差異要因として加工方法の違いによる圧粉コアの磁気特性の差異が密接に関係していると考え、各加工法における圧粉成形体の磁気特性を評価した。圧粉成形体の磁気特性評価の際、鉄粉を室温型潤滑により $\phi 45\text{ mm} - \phi 33\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ のリング形状および $\phi 55\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ の円柱形状に圧縮成形した。成形後の密度は 7.60 g/cm^3 である。いずれも 600°C の窒素ガス雰囲気中で歪みとり焼鈍を30分間行い、ブランク品($\phi 55\text{ mm}$ の円柱コア)から $\phi 45\text{ mm} - \phi 33\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ のリング状試験片に切削加工した。切削加工した試験片は、酸洗いによって加工層を除去した。このように、2章と同手順によりブランク材からの切削加工と金型成形の2種類の方法で $\phi 45\text{ mm} - \phi 33\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ のリング状試験片を作製し、各加工法で作製したコアの磁気特性を評価した。

金型成形および切削加工により作製したリング試験片の磁気特性を図13に示す。切削加工試験片の透磁率は金型成形試験片よりも低い。金型成形試験片および切削加工試験片で実測した最大比透磁率は、それぞれ466, 319であった。金型成形試験片の最大比透磁率は切削加工試験片よりも1.46倍大きい。また、各試験片の保磁力も実測し、金型成形試験片および切削加工試験片の保磁力は、それぞれ139 A/m, 145 A/mであった。金型成形および切削加工で作製したリング状試験片の損失を図14に示す。リング状試験片においても、モータ駆動試験から得られる結果と同様に、金型成形コアの渦電流損は切削加工コアを上回り、ヒステリシス損においては切削加工コアを下回る結果が得られた。1章でも述べたように、通常は保磁力が小さい(あるいは透磁率が大きい)材料ほど、B-Hループ内の面積に相当するヒステリシス損は減少する^{5), 6)}。また、比透磁率が増大すると同一磁束密度を得るためのコイル電流が少なくて済み、銅損が

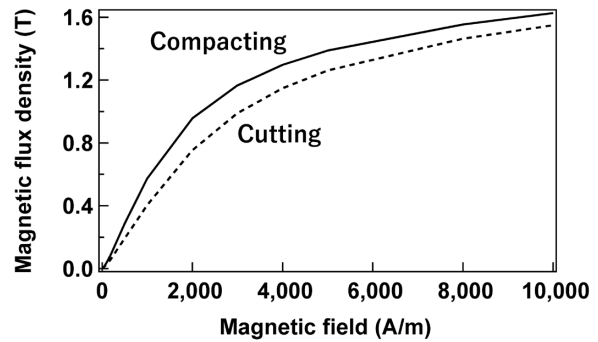


図13 金型成形および切削加工により作製したリング試験片の磁気特性
Fig.13 Magnetic properties of ring test pieces made by compacting and cutting processes

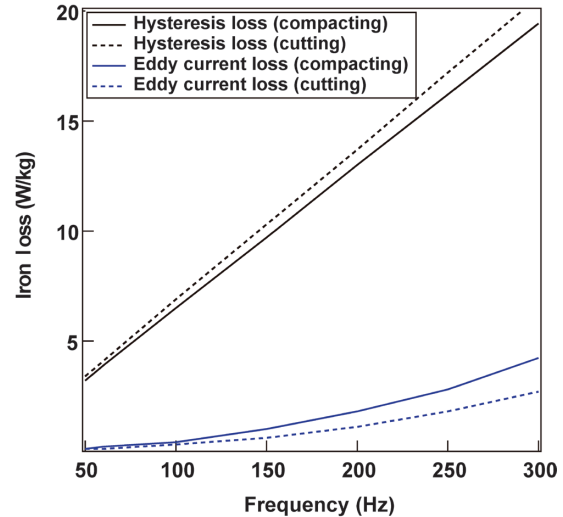


図14 金型成形および切削加工により作製したリング試験片の鉄損特性(磁束密度1.0 T)
Fig.14 Iron loss properties of ring test pieces made by compacting and cutting processes (at magnetic-flux density 1.0 T)

減る。このように、圧粉コア材料の比透磁率や保磁力の違いがモータ特性において銅損・ヒステリシス損の違いを生み、結果として低速・大トルク領域においてモータ効率に差異をもたらす。また、圧粉コア材料の渦電流損の違いが高速・低トルク領域において効率に差異を生む。このように、加工方法による圧粉成形体の磁気特性の違いはモータ計測から得られる結果とよく一致し、モータ効率の違いは圧粉コアの加工方法の差異と密接に関係することが明らかになった。

さらに、圧粉コアの磁気特性・損失特性データを考慮した電磁界シミュレーションを行い、加工方法の違いによるモータ性能の差異について解析した。金型成形コアおよび切削加工コアの磁気特性・損失特性データを含む電磁界シミュレーション結果を図15に示す。コイル温度は室温(20°C)一定とし、コイル電流は振幅2.0~8.0 Aの正弦波とした。解析から得られたモータ特性の差異は実験結果と同様の傾向を示し、低速・高トルク領域における効率の差異が最も大きく、金型成形コアの効率が切削加工コアを上回る結果となった。解析と実測との差異は、コイル・コア温度や電流波形の高調波成分など解析において考慮できていない要因によると考えられる。

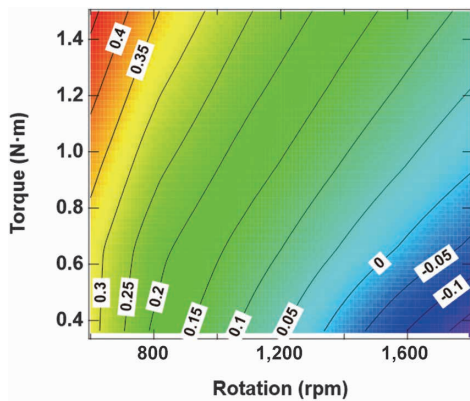


図15 電磁界シミュレーションによる金型成形コアと切削加工コアのモータ効率の差異 (金型成形-切削 [%])

Fig.15 Difference in motor efficiency between compacting and cutting cores by electromagnetic field simulation (compacting - cutting [%])

また、圧粉成形体の加工方法の違いによる磁気特性の差異については、成形体表面の導通層がないと想定された金型成形コアでは、成形時の摺動により被膜不良が発生して表面に渦電流による損失が実測で発生したと推測され、結果として切削加工コアでは表面処理により渦電流損が低減したと推察される。金型成形コア表面の渦電流低減については、例えばレーザ加工で表面の導通を遮断させる手法が報告されており⁷⁾、とくに低トルク・高回転領域で被膜不良の対処が重要となる。いっぽう、切削コアは歪みとり焼鈍後に加工され、加工歪みの蓄積が透磁率および保磁力の差異を引き起こす要因の一つになっていると考えられる。圧縮応力による歪みは透磁率および保磁力に影響を与え、ヒステリシス損が劣化することが電磁鋼板や圧粉磁心の場合で報告されており^{1), 8)}、本試験においてもこれらの報告と合致する結果が得られている。金型成形コアの特性を反映させたモータ特性を精度よく予測するためには、切削加工における切削面の酸洗、切削後の歪みとり焼鈍などによりコアの透磁率低下を防ぐことが重要となる。

むすび = 金型成形 (量産方式) と切削加工 (試作方式) で作製した圧粉コアを用いたアキシシャルギャップモータを試作してモータ特性を比較した結果、加工方法の違いによりモータ効率に差異が見られた。低速・大トルク領域では、とくに金型成形コアと切削加工コアとの透磁率・保磁力の差異に起因して、金型成形コアのモータは切削加工コアのモータよりも効率が上回ることが実験的に明らかになった。低トルク領域では、渦電流損に起因して金型成形コアによるモータの効率が切削加工コアによるモータを下回ることも確認された。圧粉成形体の磁気特性を評価した結果、加工方法の違いによる磁気特性・損失特性の差異はモータ性能計測結果の傾向とよく一致し、モータ効率の差異はコア加工方法の違いに密接に関係することを明らかにした。さらに、コア磁気特性・損失特性を考慮した電磁界シミュレーションにおいても実験結果と同様の傾向を示すことが確認でき、コア加工方法が磁気特性の差異およびモータ特性に及ぼす影響を明らかにした。金型成形コアによるモータ特性を精度よく予測するためには、切削加工における切削面の酸洗、切削後の歪みとり焼鈍などによりコアの透磁率低下を防ぐ必要性が示され、コア加工において配慮すべき点が明確になった。

参考文献

- 1) 吉川浩平ほか. SEIテクニカルレビュー. 2008, No.173, p.53-58.
- 2) 三谷宏幸. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.12-15.
- 3) A. Hattori et al. 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2021, p.404-409.
- 4) M. Aydin et al. IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2006, Vol.53, No.3, p.822-830.
- 5) 宮城大輔. 電気学会論文誌B. 2017, Vol.137, No.3, p.26.
- 6) 西川幸男ほか. Panasonic Technical Journal. 2016, Vol.62, No.2, p.43-48.
- 7) 上野友之ほか. SEIテクニカルレビュー. 2016, No.188, p.4-9.
- 8) 山本健一ほか. 電気学会論文誌A. 1997, Vol.117, No.3, p.311-316.