

特集 磁気回路製品開発のための磁場シミュレーション*

Magnetic Field Simulation for Development of Products Using Magnetic Circuits

青木 哲也

Tetsuya AOKI

大西 宏充

Hiromitsu OHNISHI

Automobiles use various electromagnetic components that include magnetic circuits. The performance of these components depends on the design of the magnetic circuits and the magnetic properties of the material, such as iron loss.

We will introduce two analysis cases where we used a new modified simulation method. First we developed new technical methods for estimating the iron loss on core materials and designing efficient magnetic circuits of fuel pump motors. Second, when we analyze the ignition coil, we adapted a new modeling method that reduces the simulation time.

Key words: Magnetic circuit, Magnetic field analysis, Calculation of iron loss, Product performance presumption

1. はじめに

自動車用電装製品には多くの磁気回路製品が使われている。例えば、スタータやオルタネータなどのエンジン補機用回転機製品や、ガソリンやディーゼルの燃料噴射バルブであるソレノイド製品などが代表的な製品である。これら磁気回路製品には、硬質磁性材料および軟質磁性材料が使用されている。具体例を挙げると、ガソリンやディーゼルの燃料噴射バルブには電磁ステンレスやSMC (Soft Magnetic Composites)、エンジンの回転角センサにはプラスチック磁石などがある。また、近年ではハイブリッド自動車用の製品が数多く開発、流動され、昇圧コンバータのリアクトルに使用されている6.5%Si電磁鋼板や、電動コンプレッサ用モータには希土類焼結磁石ならびに高効率電磁鋼板などの高機能磁性材料が適用されている。これら磁性材料は、製品の効率や出力、体格に大きく寄与することから、我々は磁性材料開発と並行して、磁性材料の評価、適用技術の開発を行っている。

我々は磁気回路製品開発を行うにあたり、磁場シミュレーション技術を活用している。本技術のデンスーでの歴史は古く、1980年代より動磁場シミュレーションと運動を連成させた技術を確認し、ガソリン噴射バルブの製品化を達成した¹⁾。一方で、近年の磁場シミュレーション技術は、有限要素法 (FEM) による3次元動磁場シミュレーション技術や境界要素法 (BEM) を組み合わせた2次元シミュレーション手法などが汎用化、市販化され、パソコンを用いて製品設計者らが手軽に利用できるインフラが整っている。ところが、実際の製品製造工程においては、プレス加工などによる材料の歪み導入によって磁気損失 (以下、鉄損) が増大するため、加工歪みの影響を加味した材料モデリ

ング技術が必要となるが、現在では未確立であることから計算精度の悪化を招いている。また3次元動磁場シミュレーションにおいては、計算時間の観点より大規模問題の取り扱いに苦慮しており、すべての磁気回路製品には適用できていないのが実情である。

そこで本報告では、従来困難とされてきた加工歪みによる鉄損特性変化の考慮手法を考案し、磁場シミュレーション技術へ適用することによりフェューエルポンプモータ用コア開発を行った事例と、一般に3次元動磁場シミュレーションが必要な構造であるイグニッションコイルに対し、新しいモデリング方法の考案によって2次元シミュレーションによる製品性能推定を可能とした事例について紹介する。

2. フェューエルポンプモータ用コア開発

2.1 製品概要

Fig. 1に、開発した新型のGHフェューエルポンプモータ (以下GH) ならびに、従来製品であるH38フェューエルポンプモータ (以下H38) を示す。GHはH38に対し全長が約1/2、モータ効率は10%向上を目標として開発された。この開発目標に対応するため、回転子であるアーマチャ巻き線の集中巻き化ならびに、高性能フェライト磁石を採用した。ところが、これら技術の採用によっても製品効率の目標を満足しないため、アーマチャコア材料ならびに構造に対して、モータ効率2%向上の目標が要求された。

一般にモータ効率を向上させるには、アーマチャコア材料に鉄損が低い材料を適用することが考えられるが、それはコア材料の高コスト化につながることから、安易に採用できない。そこで、加工方法を含めたアーマチャコアの低鉄損化について検討することとした。

*2007年9月5日 原稿受理

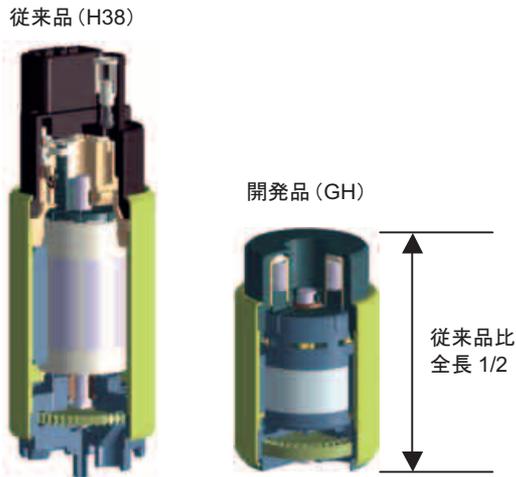


Fig. 1 Current and new fuel pump

2.2 アーマチャコア低鉄損化検討手法

アーマチャコアの鉄損検討には鉄損を考慮可能な磁場シミュレーションを用いる。これは、通常の磁場シミュレーションによりアーマチャコアの磁束密度分布を求め、次に、得られた磁束密度分布に対し、実験で求めた鉄損値を代入することにより鉄損分布を求める手法である。近年では、磁場シミュレーションソフトにおいて素材の鉄損データがデータベース化されて使用可能となっており、手軽に鉄損シミュレーションが行える環境が整っている。ところが本事例のアーマチャコアでは、その製造方法においてプレス加工ならびにカシメによるアーマチャコアの固定がされるため、その加工歪みによる鉄損の劣化、すなわち、加工により変化するヒステリシス損失の加工劣化を考慮した鉄損シミュレーション技術の開発が必要である。

以下、今回開発した加工歪みを考慮可能な鉄損シミュレーション手法について述べる。

2.3 加工歪みを考慮した鉄損シミュレーション

アーマチャコアの加工歪みは、主にプレスによる切断加工ならびにカシメ加工によるプレス加工歪みである。Fig. 2にはアーマチャコア材料のプレス切断端面の組織写真を示すが、一般にプレス端面より板厚長さ分は加工歪みが残留すると考えられている。従って、この加工歪み量と鉄損特性の関係を実験データと補完計算で求め、それを鉄損シミュレーションに入力することにより、加工歪みを考慮することが可能となる。ところが、加工歪み量はプレス端面から徐々に低くなることから、材料内にて分布を持っており一定ではない。すなわち、加工歪みと鉄損特性の関係を把握するには、局所的な鉄損計測技術が必要であり、現在の磁

気評価技術にてこれを評価するのは困難である。

そこで我々は、プレス加工歪みを各種テストピースにて測定、算出し、得られたヒステリシス損失データをシミュレーションへ入力する手法を考案した。具体的には、Fig. 3に示すように、シャー切断機を用いて切断した短冊状テストピースを用い、シャー切断歪みによりアーマチャコアのプレス打ち抜き及びカシメ歪みをシミュレートすることを検討した。シャー切断歪みとアーマチャコアのプレス及びカシメ歪みは、Fig. 4に示す切断端面からの硬さ分布がほぼ同等であるこ

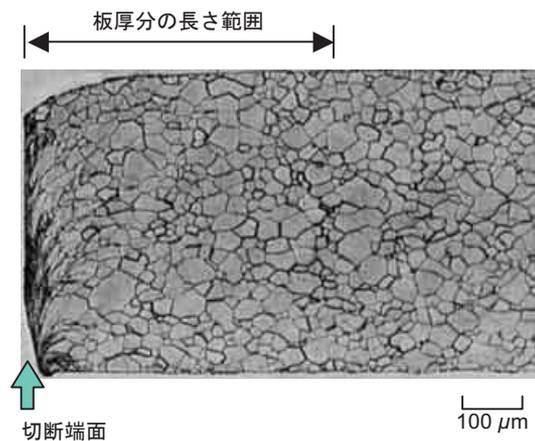


Fig. 2 Microstructure on press cutting edge side of the armature core

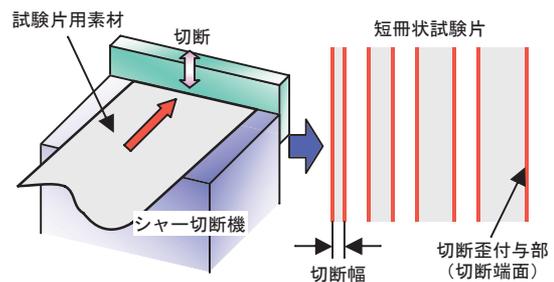


Fig. 3 Test pieces

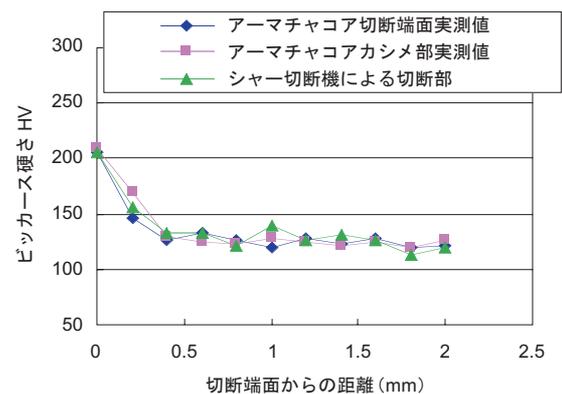


Fig. 4 Hardness in various processing methods

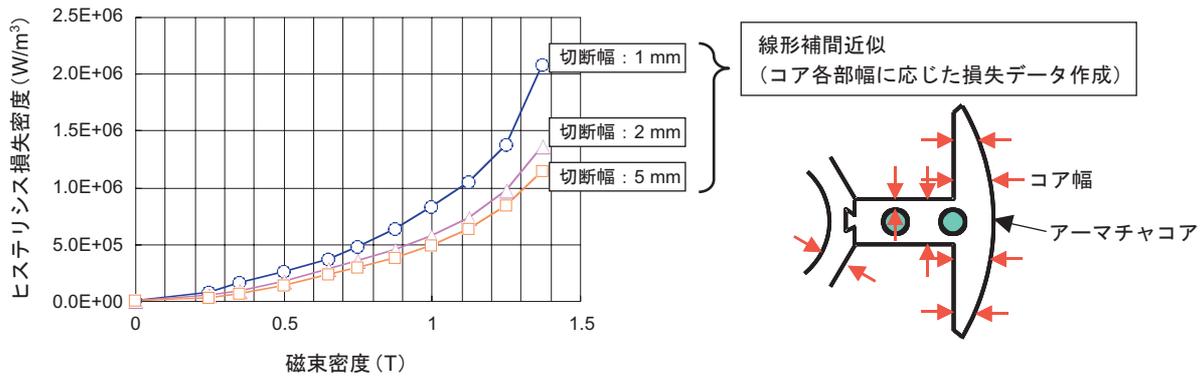


Fig. 5 Relation between magnetic flux density and hysteresis loss density

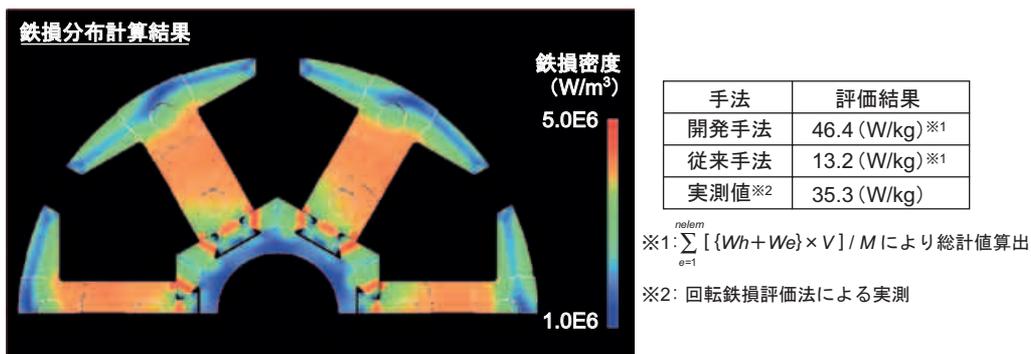


Fig. 6 Calculation result of iron loss distribution and measurement value of iron loss

とから、磁気的な歪みも同等であると判断した。また、シャープ切断時においてテスト材料の剪断幅を種々変化させることにより、アーマチャ各部の幅に応じたプレス加工歪みを考慮した。

短冊状テストピースのヒステリシス損密度評価法には、短冊形状のまま計測が可能なSST (Single Strip Tester) 試験法を用いた。ヒステリシス損密度測定結果をFig. 5に示すが、各種磁束密度下における歪み付与時の損失変化がよく現れており、シャープ切断幅による歪み付与テストピースの損失データを用いることで、歪みを考慮した鉄損分布計算が可能と判断した。

2.4 鉄損シミュレーション結果

鉄損シミュレーションへの入力データを得るため、Fig. 5にて得られたヒステリシス損密度値の各切断幅の間を補間近似した。これにより、実機回転子コア幅に応じたヒステリシス損データを作成した後、磁場シミュレーションソフトの鉄損シミュレーションへ入力し、鉄損計算を行った。Fig. 6に計算により得られた鉄損分布を示すが、鉄損計算値の総和と回転鉄損評価法²⁾により得られた実測値とを比較した結果、加工歪

みを考慮しない場合に比べ実測値に近い結果が得られた。

2.5 GHアーマチャコア低鉄損化検討

本手法を用いて、GHアーマチャコアの鉄損低減方法の検討を行った (Fig. 7)。まず鉄損密度の高い部分のコア幅を増やし、動作点磁束密度を抑制して鉄損を低減する手法 (方法①) では、図中矢印の部分のコア幅を1.5倍にした場合、コア鉄損は8%低減可能であり、また、カシメレスによる歪みの低減 (方法②) により鉄損は13%低減するとの知見が得られ、これは実機製品効率で2%向上に相当することが判明した。

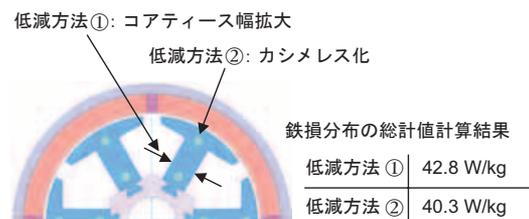


Fig. 7 Methods for decreasing iron loss

2.6 鉄損計算精度の考察

Fig. 6において鉄損計算結果と実測値では若干の誤差が生じているが、これはアーマチャコア内の回転磁界鉄損の影響ならびにSST評価の補完誤差であると推定する。回転磁界については、Fig. 8に示すようにコアティースの根元にて発生することがシミュレーションにより確認されており、今後これらの考慮をも含めた手法開発により、更なる高精度化が可能であると考える。

3. イグニションコイルの性能予測技術

3.1 製品概要

Fig. 9にスティック型イグニションコイル（以下スティックコイル）の製品図および磁気回路構造断面の略図を示す。本製品についても他の電装製品と同様に、小型、高出力化を達成させるため磁気回路材料および磁気回路構造の検討を実施しており、その製品性能の予測手法には前述のGHと同様に磁場シミュレーションを用いているが、適用上の問題点を以下に説明する。

スティックコイルの中心コアは電磁鋼板の積層構造であり、外周コアはC型筒構造となっている。これを

3次元動磁場計算によりシミュレーションを行えば、製品性能（2次出力電圧）がシミュレート可能であるが、膨大な計算時間が必要である。実際に、CPU=Pentium4 3.2 GHz、メモリ=2 GBのパソコンを用いてFig. 10に示すスティックコイルの3次元動磁場モデルにおける試計算を行ったところ、ステップ数50にて約20時間必要であった。本来のスティックコイルの性能シミュレーションには、1次入力電圧遮断時の急峻な事象をシミュレートするために約800ステップの計算数が必要であることから、その計算時間は20 h×(800/50)倍=320 h（13日間）必要になる。この計算時間では、製品の磁気回路材料、構造を検討するには効率が悪く、計算速度の速い2次元場にてシミュレーション出来ることが望まれるが、それには電磁鋼板の積層構造ならびに外周コアのC型筒構造を考慮した新しいモデリング手法を開発する必要がある。また製品性能のシミュレーションにおいて、2次出力電圧については $e = -N d\phi / dt$ (V)にて計算が可能であるが、2次出力エネルギーの計算は、電気回路の考慮などによる算出手法の開発が必要である。

以下、中心ならびに外周コアの新しいモデリング手法について説明する。

コアティース根元部（矢印は磁界ベクトルの方向を示す）

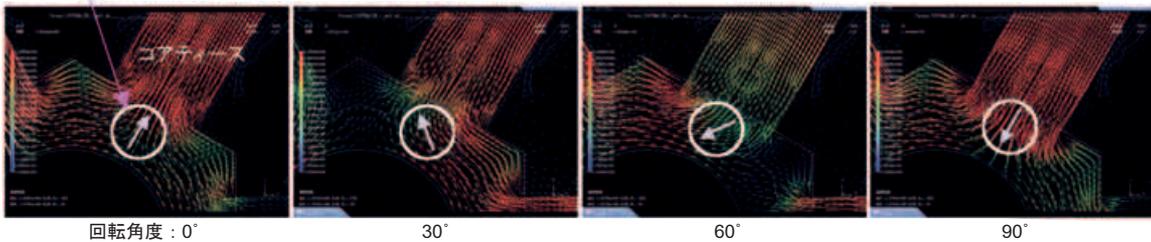


Fig. 8 Direction of the magnetic flux vector of the core teeth

スティック型イグニションコイル

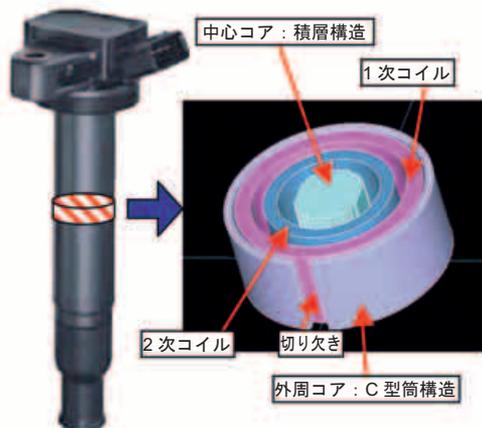
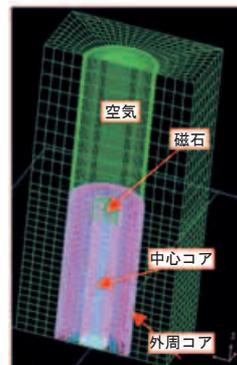


Fig. 9 Schematic diagram of the ignition coil and the magnetic circuit



シミュレーション条件

- (1)シミュレーションソフト：JMAG-Studio Ver8
- (2)要素数：84940
- (3)節点数：89440
- (4)計算手法：3次元過渡応答解析

Fig. 10 3D simulation model for transition analysis

3.2 2次元場モデリング技術開発

3.2.1 中心コアモデリング方法

Fig. 11にスティックコイルを2次元場にてモデリングした図を示す。一般に2次元場では積層鋼板一枚ごとのモデリングが不可能であることから、中心コア全体を一つの塊（以下バルク）とし、その比抵抗値(ρ)を合わせ込んで計算を行う方法が用いられる。従来は、中心コア素材の ρ を積層枚数分積算した値を設定する方法が用いられてきたが、渦電流の流れる面の面積減少などを考慮していないために、計算結果に15~20%の誤差を生じていた。そこで今回は、渦電流の流れる面の面積減少も考慮した手法を開発した。

具体的には、先ず従来法と同様の考え方により、積層枚数ならびに渦電流が流れる経路の長さ（以下渦電流経路長）を考え、積層コアの渦電流経路長の総計についてバルクコアに対する渦電流経路長の倍率を求める。次に、積層コアの渦電流路面積についてもバルクコアに対する倍率を求める。これら各々の倍率を積算し、比抵抗値に乗算することにより、バルク構造による積層鋼板の次元縮退化が可能になると考えた。この考え方について、簡易モデルを用いた3次元動磁場計算により検証した結果をFig. 12に示す。検証は、中心コアの積層を鋼板一枚毎にモデリングした積層構造モデルを3次元動磁場により計算した結果を是とし、計算にて得られる総磁束量の比較により実施することとした。Fig. 12より、今回検討方法の場合には、積層コアを一枚ごとにモデリングした磁束量とほぼ一致しており、本手法によりバルクコアにて中心コア積層をシミュレートできると判断した。

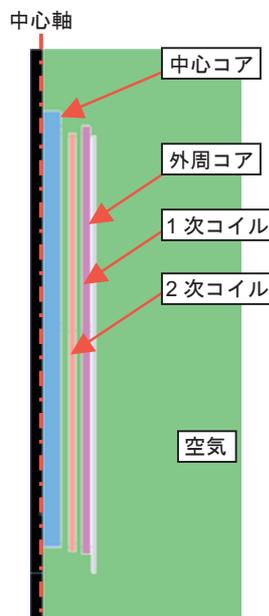


Fig. 11 2D simulation model for transition analysis

3.2.2 外周コアモデリング方法

外周コアは切り欠き部を有するC型筒構造となっているため、これをそのまま2次元場にてモデリングを行うと、Fig. 13に示すように切り欠き無しのO型筒構造となる。この外周コアを上述の中心コアと同様の考え方にて比抵抗倍率を計算すると約4倍となるが、渦電流の流れ方がC型筒構造と比べ異なり、その渦電流は主磁束を妨げる方向へ強力に作用すると予想される。このように、モデリング方法の要因によって渦電流の流れ方が実際の製品と大きく異なり、その渦電流が磁気回路磁束計算へ影響を与えることから、外周コアの2次元場におけるモデリング方法は、以下の2点を考慮する必要がある。

- (1) 外周コア内渦電流の中心コア主磁束への影響
- (2) 外周コア内渦電流の外周コア主磁束に対する反作用磁界の影響

以下、これらの考慮方法を述べる。

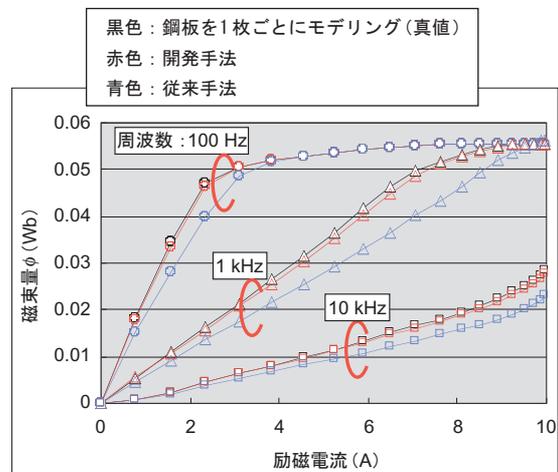


Fig. 12 Relation between exciting current and total magnetic flux

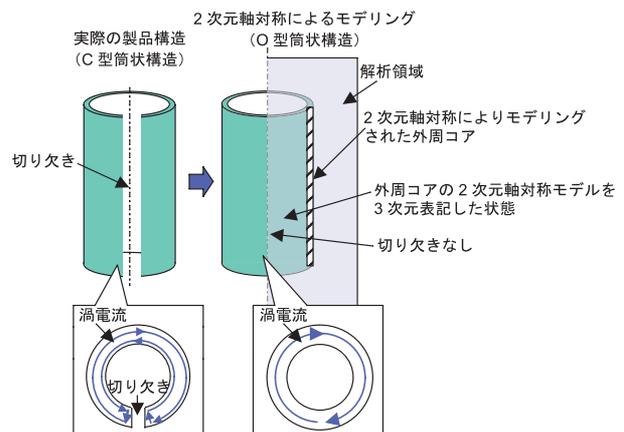


Fig. 13 2D axisymmetric modeling for the auxiliary core

3.2.3 外周コア内渦電流の主磁束への影響

実際の製品構造であるC型筒構造では、外周コア鋼板内を流れる渦電流は循環している。すなわち、外周コア内の製品中心側を流れている電流と製品外側を流れている電流は、エネルギー保存則により電流量は同じとなるが、その製品中心からの距離に差があるため、中心コアを流れる主磁束に対し影響が生じることになる。

一方、O型筒構造の場合は、上述のとおり渦電流の流れ方がC型筒構造に比し全く異なり、その渦電流は中心コア主磁束を妨げる方向へ強力に作用する。

これら構造の差による中心コア主磁束への影響度を、スティックコイルの構造条件（寸法）によりビオースバルの法則を用いて算出した（Fig. 14）。これにより、2次元モデルによって外周コアをモデリングする場合の外周コア内渦電流の中心コア主磁束への影響分の比抵抗倍率を求めた。

3.2.4 外周コア内渦電流の外周コア主磁束への影響

実際の製品構造であるC型筒構造の場合、外周コア主磁束に対する反作用磁束が外周コア内循環渦電流によって形成される（Fig. 15）。2次元モデル化したO型筒構造の場合には、この反作用磁束は発生しないが、モデリングの際にはその差について考慮する必要がある。この外周コア内循環渦電流による反作用磁束についても、上述と同様にビオースバルの法則を用いて影響度を計算した。

以上より得られた比抵抗倍率を総合することにより、シミュレーションへ入力する比抵抗倍率値が求められる。すなわちスティックコイル外周コアの場合は、外周コア内渦電流の中心コア主磁束への影響分と外周コア内循環渦電流の外周コア主磁束への影響分を積算す

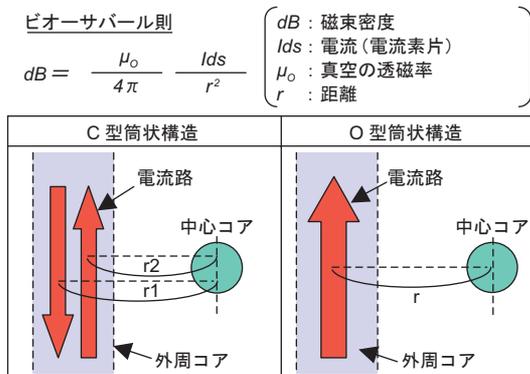


Fig. 14 Effect of the auxiliary core eddy current on the center core

ればよいと考えた。この比抵抗倍率値を検証するため、簡易モデルによる3次元動磁場計算により検証を実施した。検証の方法は、C型筒構造（切り欠き有り：外周コア比抵抗値は素材値）とO型筒構造（切り欠き無し：外周コア比抵抗値は今回検討値ならびに未考慮の2条件）の磁気回路総磁束量比較にて実施した。その結果、O型筒構造の今回開発手法では、C型筒構造にて製品をモデリングした場合とほぼ同等の磁束量計算値が得られることが判明した（Fig. 16）。これにより2次元場にて外周コアをシミュレートできると判断した。

3.3 シミュレーション精度検証

実測値との比較にて今回開発した手法の精度検証をした。磁場シミュレーションは、電気回路を連成して

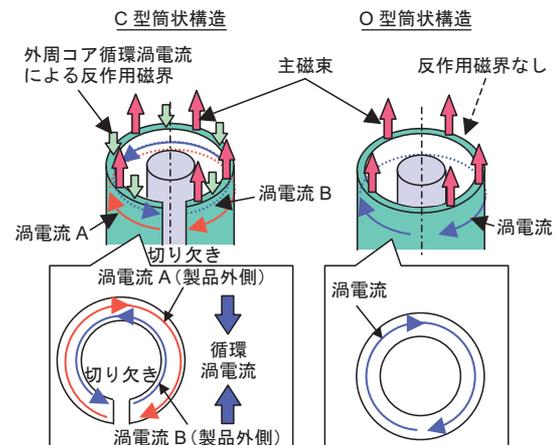


Fig. 15 Effect of the auxiliary core eddy current on the magnetic flux

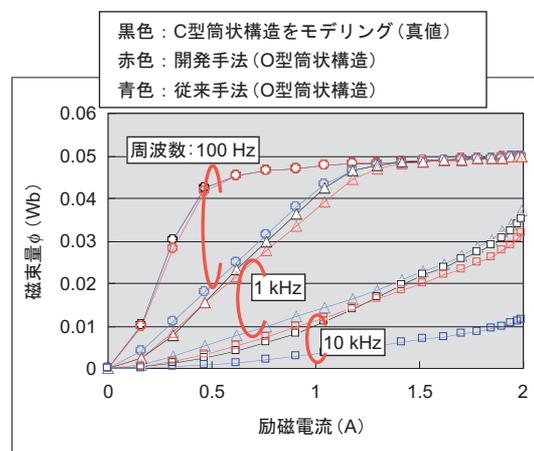


Fig. 16 Relation between exciting current and total magnetic flux

2次出力エネルギー計算を実施している。Table 1に2次出力エネルギー計算結果（2次コイル電流計算結果）ならびに2次電気回路オープン時の2次電圧計算結果を示すが、双方ともに実測値とほぼ一致していることが確認できる。従って、今回実施したモデリング方法により、スティックコイルの性能予測が可能であり、磁気回路材料および構造検討に適用が可能と判断した。また計算所要時間は、1モデル、800ステップにて約20 min（CPU=Pentium4 3.2 GHz, メモリ=2 GBのパソコンによる）であり、3次元動磁場解析を用いた場合の計算時間に比し大幅な時間短縮が可能となった。

Table 1 Calculation result of output voltage and energy

	出力電圧 (kV)	出力エネルギー (mJ)
開発手法	37.3	33.1
実測値	38.0	32.7

4. おわりに

本稿では、従来困難とされた加工歪みによる鉄損特性変化の考慮方法ならびに、3次元磁場シミュレーションが必要な構造に対しての新しいモデリング手法による2次元性能シミュレーションについて報告した。加工歪みの考慮は、実物の歪み増加現象をテストピースを用いた実測定により実現し、新しいモデリング手法は磁性材料中に流れる渦電流の流れ方の考察により比抵抗倍率として適用することを考案した。これら技術は磁気回路製品開発のツールとして有用であると考ええる。将来的には、加工歪みによる磁気特性劣化の定式化ならびに、ヒステリシスの直接計算にて実施すべきところであり、これらが可能となれば、更に効率の良い磁気回路製品開発や磁性材料開発が行えるものと考えられる。今後これらの技術開発ならびに、コンピュータ計算能力の更なる進歩により、磁気回路製品の高精度性能予測技術の更なる進歩が期待される。

<参考文献>

- 1) 清水真樹, 岡崎恵一, 青木哲也: “自動車用モータ・アクチュエータの損失解析” 第12回電磁界数値解析に関するセミナー講演論文集 (2002), p. 34.
- 2) 開道力: “トルク検出による電磁鋼板回転機鉄損評価法の理論検討” 電気学会研究会資料, RM-92-79 (1992).



<著 者>



青木 哲也
(あおき てつや)
材料技術部
磁性材料開発研究に従事



大西 宏充
(おおにし ひろみつ)
材料技術部
金属材料および鉄鋼, 磁性材料
開発の研究に従事