

ハイブリッド型ステッピングモーターへの電磁界解析適用例

大坪 浩二 小堀 勝

Utilizing Magnetic Field Analysis for a Hybrid Stepping Motor

Hiroshi OHTSUBO, Masaru KOBORI

A hybrid stepping motor is a motor that has axial flux and generates a field using small teeth facing the gap. One advantage of these types of motors is the ability to achieve high-synchronous stability without any feedback devices because of multiple poles (normally 100 poles). However, the iron losses get larger as the frequency increases. Previous works of magnetic field analyses for hybrid stepping motors are extremely rare because the three-dimensional (3D) magnetic pathways and narrow gap widths (less than 0.1 mm) are difficult to analyze. Estimating the motor constants from the geometry is also difficult.

This paper will outline the characteristics of stepping motors, compare the results from examples of a 3D magnetic field analysis with the results from actual stepping motors, define the difficulties when performing analyses, and describe the requirements to perform highly accurate analyses.

1. はじめに

ハイブリッド型ステッピングモーター(以下、HB型STM)は、高精度な位置決めが簡単に行えるため、さまざまな用途で使われており、性能改善のため解析的設計手法が望まれています。

電磁界解析の手法として、有限要素法(Finite Element Method)(以下、FEM)は、航空・宇宙や自動車業界で活用されて数多くの実績を残しています。あらゆる物理現象を視覚的にも定量的にも把握できることから、製造業や研究機関で欠かせないツールとなっています。一般の同期機の設計においても、設計変数の最適化やアイデア創出に活用されています。

しかし、HB型STMは、複雑な三次元磁気回路、狭小ギャップ、微小ステップ、局所的な強い磁気飽和、加工歪など、解析を困難としている要因が数多くあるために解析事例⁽¹⁾が少ないのが現状です。

ここでは、汎用電磁界解析ツールJMAG^(注1)を用いた三次元電磁界解析例と実機との比較結果を紹介し、解析が困難な理由と、より精度の高い解析のために必要な要件について述べます。

2. FEM解析が困難な理由

図1に2相HB型STMの構造を示します。ロータは、

外周が「小歯」と呼ばれる50枚の極歯で形成されており、軸方向に着磁した磁石をはさむようにして、半ピッチずらしたN極とS極のロータ鉄心で構成されています。ステータの各主極の内径側にも同ピッチで小歯が対向して形成されており、励磁相を切り替えることにより100極という多極モーターを実現しています。

この多極化により、HB型STMは、高トルクで保持力が大きく、微小ステップでの位置決めを可能としています。その反面、鉄損が大きいというデメリットがあります。

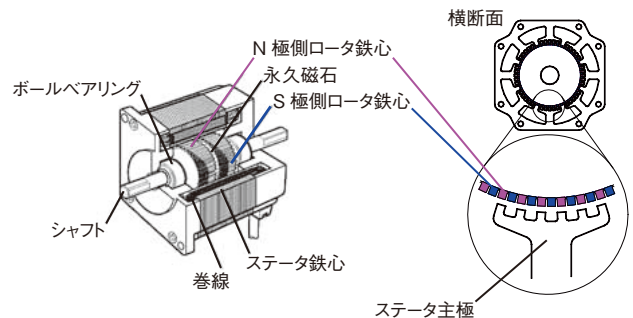


図1 HB型STMの構造

2.1. 三次元磁気回路

図2に、HB型STMの磁束線を示します。軸断面側からみると積層方向の磁路のループが確認できます。また、バックヨーク側からみると、主にバックヨークを斜めに横切る磁路が確認できます。このように、HB型

(注1) JMAGは、(株)JSOLの登録商標

STMは複雑な三次元磁気回路を構成しており、これが周期的に変化するために、本質的に三次元解析が必要となります。

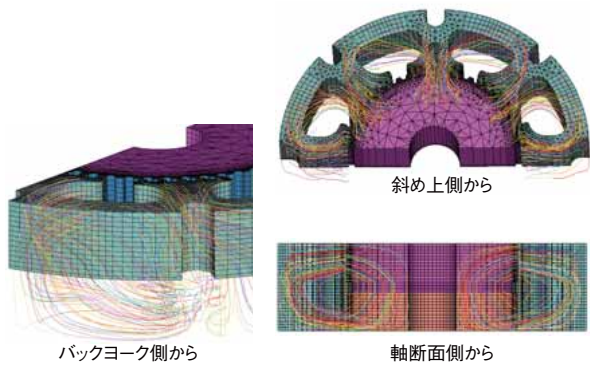


図2 2相HB型STMの磁束線 (FEM解析)

2.2. 狭小ギャップ

小歯部と狭小ギャップ(58 μm)部のメッシュ分割を図3に示します。小歯部の磁束密度は回転子の位置関係で過渡的に変化し、局所的に2T以上の高磁束密度になる部分があります。そのため、空気である狭小ギャップ部には急激な磁束密度の変化が現れることから、未知数の連続性を保つためにも非常に細かいメッシュ分割が必要となります。今回は、精度を優先して、この径方向を7分割し、約8 μm という微小な要素サイズとしています。

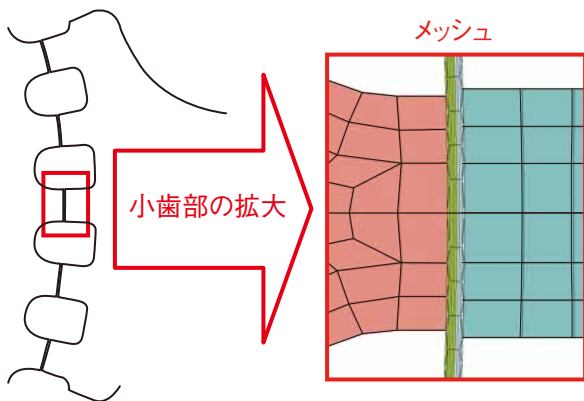


図3 小歯部とギャップ部のメッシュ分割

2.3. 微小ステップ

図3は、誘起電圧解析用のメッシュ分割であり、機械角周期7.2度の波形を32ステップ解析するために、周方向を800分割しています。また、ディテントトルクの解析の場合は、1.8度周期となるため、さらに4倍して3200分割しています。

以上のように、ギャップ部は、径方向にも周方向にもメッシュを細かくする必要があり、積層方向のメッシュ分割も考えるとHB型STMは膨大な解析時間を必要とします。

2.4. 積層方向の磁気特性

積層方向の磁束変化は面内方向の渦電流による鉄損を発生させます。しかし、電磁鋼板は積層方向に磁束を通すことを考えていないため、製造メーカーからは、面内方向の磁気特性データしか提供されていません。一般的な測定方法として、リングコア方式(図13参照)やエプスタイン試験がありますが、前者では積層が構成できませんし、後者では占積率や積層間のギャップの影響も含んでしまいます。そのため、積層方向の磁気特性はわかっておりません。

2.5. 鉄損推定の困難さ

界磁周波数が数kHzレベル(3000r/minで2.5kHz)となるため、表皮効果を考慮した渦電流解析が必要となり、厳密には上下層部の積層鋼板を等比的に数層のメッシュ分割を行う必要があります。

さらに、電磁鋼板表面のコーティングや空気層など実物に近いモデル化をすることは膨大な要素数となり、最新の高スペックなパソコンでも非現実的な計算時間となってしまいます。

2.6. 加工歪の影響の取り扱い

試作品と量産品では加工方法が異なるため、量産品になると磁気特性が落ちることはよく知られています。しかし、その加工の影響範囲や劣化度合いなどを正確に把握できないこともあり、定量的な評価や推定は困難となっています。

1つは、プレスによる打抜き歪による影響があり、その歪幅は鉄板の板厚と同程度あると言われています。HB型STMでは磁束密度の集中する小歯部分で大きな影響を受けています。FEMでこの影響を考慮しようとしても歪部分の物性データは公知ではありません。

もう1つは、カシメ工法による渦電流の増大の影響があります。電磁鋼板は積層方向の渦電流の増大を防ぐため、積層間を絶縁コーティングしてありますが、カシメをすると、その絶縁膜が破れて積層間を導通させてしまいます。その結果、渦電流を発生させて出力の低下を引き起こします。FEMでこの影響を考慮しようとする、積層やカシメのモデル化をすることになり、膨大な解析時間を必要としてしまいます。

以上のように、HB型STMの場合は、モデル化と解析時間の両面で、FEM解析を困難とする要因が数多くあります。

3. 解析内容

3.1. 解析事例

図4に示す2相HB型STMをベースに3種類のサンプルを製作しました(表1参照)。試作①は、量産前の評価・検討時に用いる製作方法で、電磁鋼板の積層間を接着剤により固定してワイヤカットで加工を行ったものです(以下、ワイヤカット品)。試作②は、量産品と同様にプレス加工を行い、カシメにより積層間を固定したものです(以下、プレス品)。この試作品①と②の比較により、プレス加工やカシメによる加工歪の影響を確認しました。また、試作③は、積層鋼板ではなく、構造用炭素鋼(S45C)の塊をワイヤカットで製作したものです(以下、S45C品)。この「S45C品」との比較により電磁鋼板を積層する効果を確認しました。

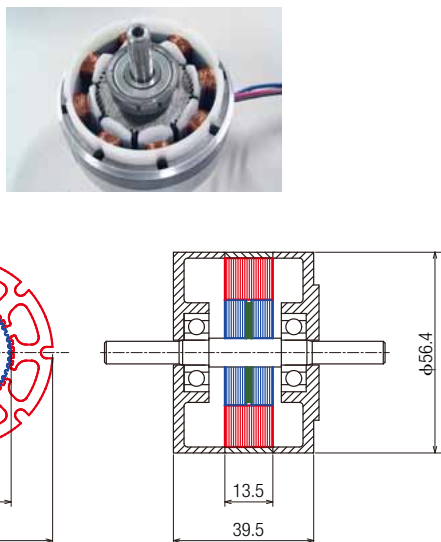


図4 試作機のベースとなる2相HB型STM

表1 HB型STMの試作機(各2個)

試作機	材料	加工	固定
試作①	積層電磁鋼板(50H600)	ワイヤカット	接着
試作②	積層電磁鋼板(50H600)	プレス打抜き	カシメ
試作③	構造用炭素鋼(S45C)	ワイヤカット	なし

3.2. 設定

表2にFEM設定データを示します。量産品(試作②)をモデル化するために、ステータ・ロータとは別にカシメ部と打抜き部を別途設定し、磁気特性を劣化させたデータを入力しています(詳細は4章参照)。また、カシメ部には、積層方向にも電気特性を入力して渦電流が発生するようにしています。

表2 FEM設定データ

	磁化特性(BHカーブ)	電気特性(渦電流)	占積率[%]
ステータ ロータ	データベース 50H600(新日鐵)	面内方向:考慮 積層方向:考慮せず	98.5(積層方向)
カシメ部	ユーザ点列 50H600(劣化)	面内方向:考慮 積層方向:考慮	98.5(積層方向)
打抜き部	ユーザ点列 50H600(劣化)	面内方向:考慮 積層方向:考慮せず	98.5(積層方向)
マグネット	ユーザ点列 (着磁特性制御)	面内方向:考慮 積層方向:考慮	-

3.3. メッシュ

図5にメッシュ(節点数32万、要素数38万)を示します。対称性から、1/2、180度モデルとして、量産品と同様にカシメ部や打抜き部をモデル化しています。特に磁束密度の集中するギャップ部を細分化して、メッシュの粗密をつけ、精度向上と計算速度向上の両面を考慮しています。

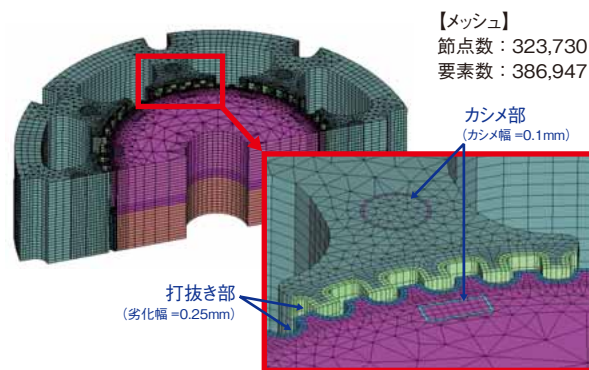


図5 メッシュ分割

4. 材料の取り扱い

4.1. 電磁鋼板の加工部の歪

新日本製鐵株式会社様(以下、新日鐵)の参考資料から、電磁鋼板の加工部断面を顕微鏡で拡大したものを図6に示します。左側がプレス打抜き断面、右側がカシメ断面です。結晶粒が潰れているのが確認できます。

ここでは、この加工による影響をFEMで表現するために、以下に説明する手順で加工による劣化範囲の特定と、加工による歪率の推定を行い、その歪率をもとに磁気特性の劣化を計算し、それを入力しています。

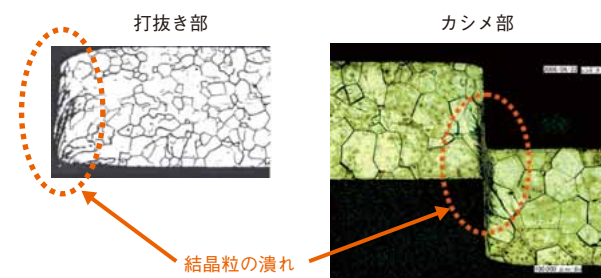


図6 電磁鋼板加工部断面の顕微鏡写真

4.2. 劣化範囲の特定と加工による歪率

図6の左側に示す電磁鋼板の打抜き断面部では、剪断による結晶粒の潰れによって硬度が上昇し、鉄の特性が落ちます。新日鐵の参考資料から、硬度データを読み取って、プレス加工によって生じる硬度の増加の比率を表したグラフを図7に示します。●が読取り値で、実線が近似曲線で、式(1)に示す指数関数で表すことができました。加工歪がある範囲を0～400μmと見積もると、この領域での硬度の増加分の平均値は、約0.23倍となりました。

$$h(x)=1.05e^{-0.01152x} \dots\dots\dots (1)$$

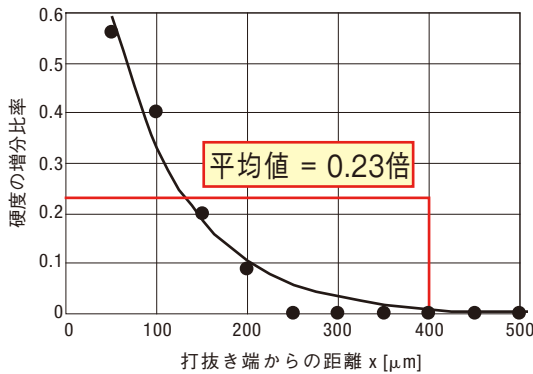


図7 コア打抜き端からの硬度増分比率

次に、文献(2)の圧延材の磁気特性データから、圧延による歪に対する硬度の増分比率のデータを読み取ったグラフを図8に示します。●が読取り値で、実線が近似曲線で、歪をε%として、硬度の増分比率 $h_c(\epsilon)$ は、式(2)のようになりました。歪範囲での平均の硬度の増分比率=0.23を当てはめると、歪は6.8%となりました。

$$h_c(\epsilon)=8.56 \times 10^{-3} \epsilon + 0.201(1 - e^{-0.34\epsilon}) \dots\dots\dots (2)$$

以下、加工部には、この6.8%の歪を用いて、磁気特性の劣化を計算していきます。

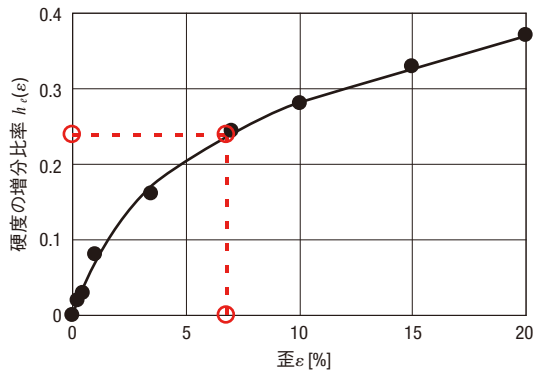


図8 歪と硬度増分比率の関係

4.3. 直流磁化特性の劣化

文献(2)には、歪が大きくなるに従って比透磁率が低下することが記載されています(図9参照)。歪が6.8%の場合の起磁力と磁束密度の関係をも50H600に当てはめたのが、図10となります。

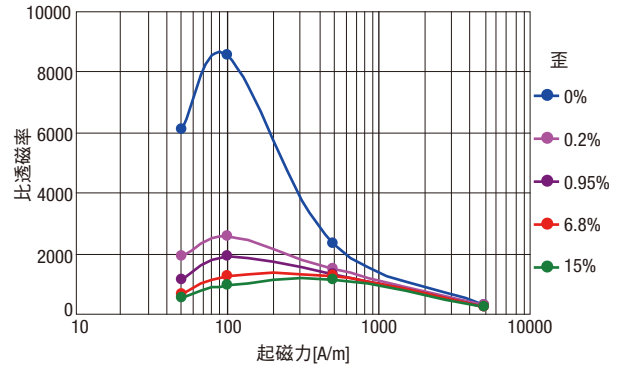


図9 歪による透磁率変化

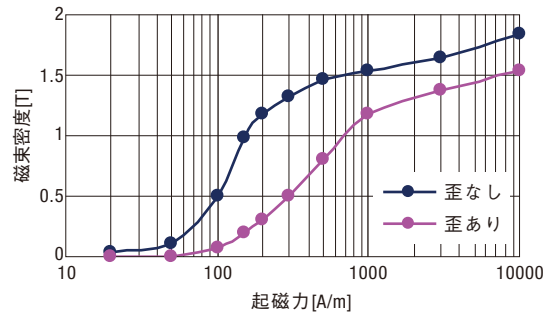


図10 磁気特性劣化時の直流磁化曲線(50H600)

4.4. 鉄損特性の劣化

文献(2)には、歪が大きくなるに従い、ヒステリシス損が大きくなることも記載されています(図11参照)。このグラフから、歪0%と6.8%のデータの比 k を表す近似関数は、低磁束密度で一定値、高磁束密度で1に収束するという条件で式(3)のように表すことができました(図12参照)。

$$k=1+3.95\exp(-0.08B^4) \dots\dots\dots (3)$$

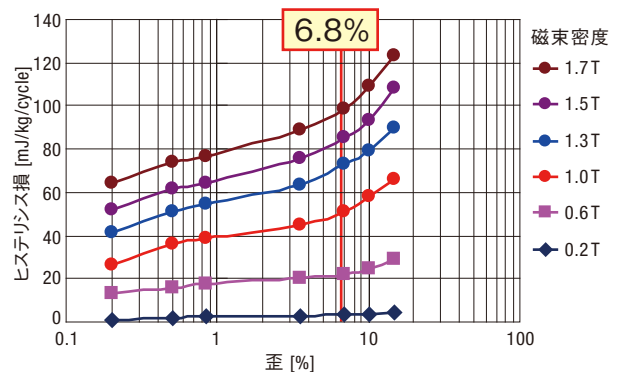


図11 歪によるヒステリシス損変化

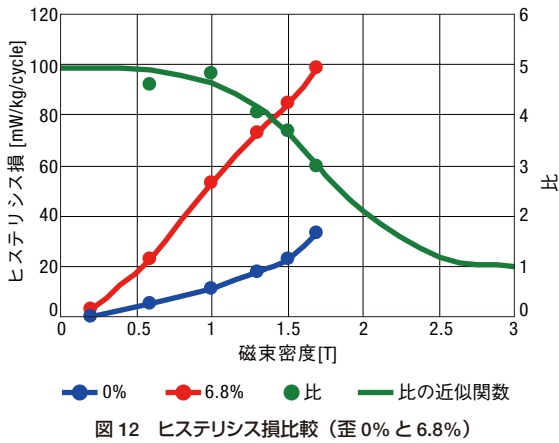


図12 ヒステリシス損比較 (歪0%と6.8%)

資料(3)データブックの高周波鉄損データから鉄損の近似式を求めると、歪なしの場合は、式(4)になりました。

$$P(f,B)=0.0627fB^2+8.94\times 10^{-5}f^2B^2 \dots\dots\dots (4)$$

表面磁石型ブラシレス DC モーターの打抜き加工がモーター鉄損に及ぼす影響を評価した文献(2)では、硬度変化からの鉄損上昇の計算値が6%であるのに対して、実機での鉄損上昇が16%あると述べています。試験片をスリットした場合の鉄損上昇が計算値の3倍程度であることから、硬度変化では説明できない鉄損上昇要因があると推定しています。ここではこの推論を受け入れて、式(4)のヒステリシス損項に式(3)を乗じ、さらに

$$16\% \div 6\% \div 2.67$$

を乗じて、次式(5)を歪部の鉄損推定式としました。

$$P(f,B)=0.167 [1+3.95\exp(-0.08B^4)] \cdot fB^2 + 8.94 \times 10^{-5} f^2 B^2 \dots\dots\dots (5)$$

- P: 総鉄損 W/kg
- f: 周波数 Hz
- B: 磁束密度 T

4.5. 磁気特性の測定

電磁鋼板の面内方向の鉄損は、図13に示すリングコアにより測定しています。新日鐵のカタログ値と良い精度で一致しました(図14参照)。積層方向の鉄損は、前述のように通常のリングコア方式では測定できないため、測定方法が課題となっています。今回は面内方向の鉄損を代用しています。図15は参考データのなかったS45Cを測定したもので、50H600に比べて桁違いに鉄損が大きくなっています。



図13 リングコア

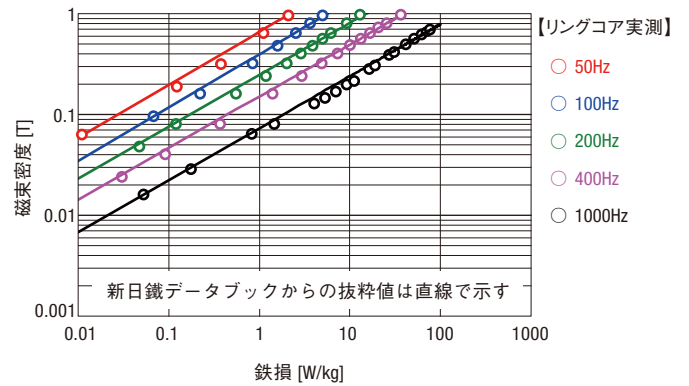


図14 電磁鋼板(50H600)の鉄損測定結果

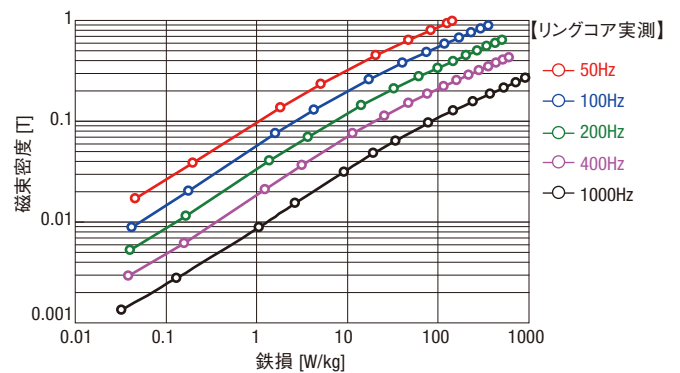


図15 炭素鋼(S45C)の鉄損測定結果

5. 解析結果

5.1. 誘起電圧

回転速度に対する誘起電圧定数 K_e の測定結果を図16に示します。回転速度の上昇と共に誘起電圧定数 K_e が低下しており、試作機によってその傾きに違いが出ています。

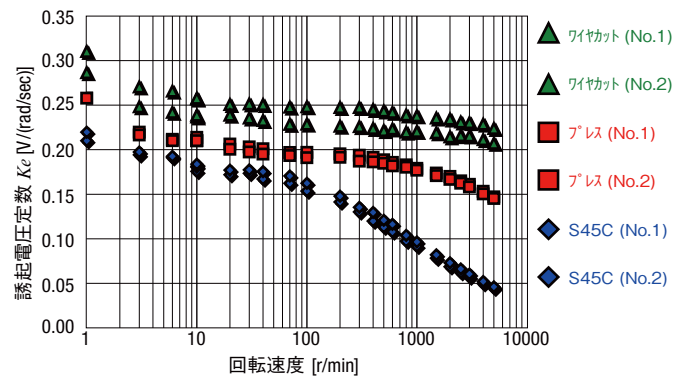


図16 誘起電圧定数測定結果

図 17 の等価回路で示すように、回転速度の上昇と共に鉄損抵抗 R_c に流れる電流 i_c が増加するため、誘起電圧定数が低下しています。

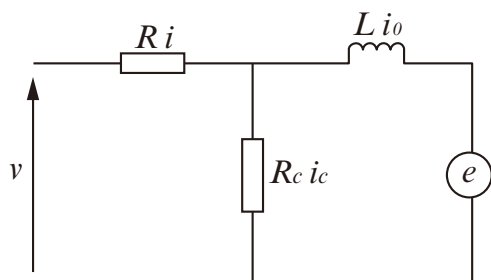


図 17 鉄損を含むモーター等価回路

次に、図 16 から 600r/min を抽出して、FEM 解析結果と比較したグラフを図 18 に示します。プロットが測定結果で棒グラフが FEM 解析結果です。

加工歪を考慮することにより、FEM 解析は鉄損値が異なるプレス品や S45C 品に対して、定性的な評価ができることがわかりました。

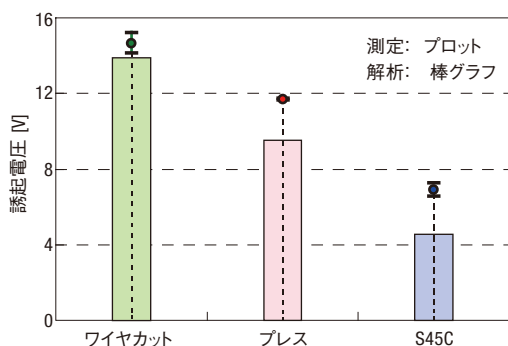


図 18 測定と解析の誘起電圧の比較 (600r/min)

5.2. 鉄損

回転速度に対する端子間開放時の界磁鉄損 (以下、界磁鉄損) の測定結果を図 19 に示します。600r/min のみを抽出して、FEM 解析結果と比較したグラフを図 20 に示します。FEM 解析結果は、プレス品に対して実測結果と定性的に合いました。S45C 品に対しては、5.3 節の (2) で考察します。

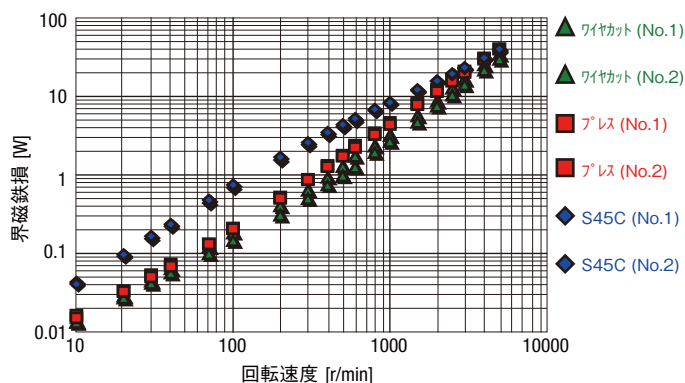


図 19 界磁鉄損測定結果

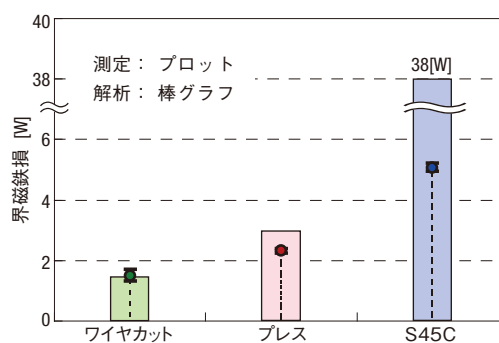


図 20 測定と解析の界磁鉄損の比較 (600r/min)

5.3. 鉄損分析

(1) ヒステリシス損と渦電流損の分離

界磁鉄損を電気角周波数で割ることで、ヒステリシス損と渦電流損に分離したものを図 21 に示します。左側に実測結果、右側に FEM 解析結果を示します。

FEM の場合、ワイヤカット品に対してプレス品の鉄損は、ヒステリシス損のみが顕著に増加しています。これは、シュタインメッツ式のヒステリシス損の項に劣化を考慮している影響が出ています。また、実測との鉄損分離をみると、加工劣化の影響を強く見積もりすぎた感があります。

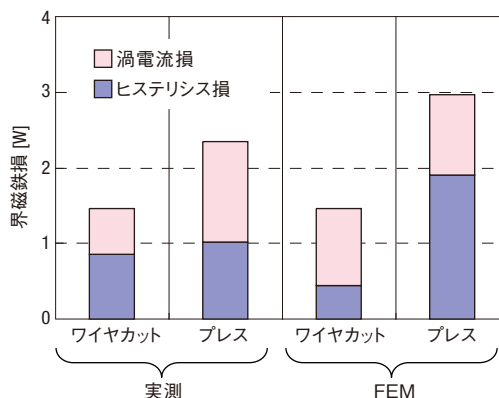


図 21 実測と FEM 比較 (鉄損分離)

(2) S45C 品の渦電流損失

今回の鉄損計算は、シュタインメッツ式を用いたが、渦電流損は電流密度分布から求めて、ヒステリシス損はシュタインメッツ式から計算して合算すると、鉄損は 10.8W となり、精度が良い結果となることがわかりました。

S45C ソリッド品の電流密度ベクトルを図 22 に示します。電流が表面に集中しており、表皮効果が確認できます。HB 型 STM のように界磁周波数が高いモーターは、表皮効果が現れやすいため、渦電流を正確に計算する必要があります。

さらに精度の良い渦電流解析を行うには、表皮効果が表現できるように、表面に行くほど分割が細くなる等比的なメッシュ分割が必要となります。

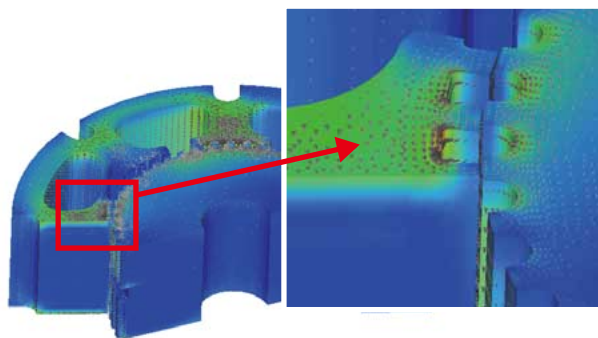


図 22 電流密度ベクトル (S45C)

5.4. スティフネス

図 23 の上側にスティフネストルク波形 (7.2 度) を示し、下側に周波数分析した結果を示します。上側のスティフネストルク波形は、FEM 結果をプロットで表し、測定結果を 2 本の実線で表しています。また、下側の棒グラフは、FEM 結果を無色の棒グラフで表し、測定結果を色塗りの棒グラフで表しています。

3 種類の試作品すべて、1 次成分の大きさ、3 次成分の位相反転の度合いなど比較的良好でした。

5.5. ディテントトルク

(1) ディテントトルク波形 (注2)

ディテントトルク (7.2 度) の測定結果を図 24 に示します。上側に波形を示し、下側に直流成分と交流成分に分離した値を示します。プレス品が最も小さくなりましたが、プレス剪断面による磁気的な劣化が影響していると考えられます。磁気劣化は鉄損の増加やトルク低下など悪い方向だけではないところに設計の難しさがあると考えます。

(2) 測定と解析の比較

ワイヤカット品において、図 25 の上側に実測結果、下側にメッシュ分割数を変えた FEM 解析結果を示します。メッシュを細分化していくと実測に近づいていくことがわかります。ホールディングトルクなどを解析した 32 万要素 (周方向 800 分割) のメッシュ分割では合わず、その 3 倍近い 92 万要素 (周方向 3200 分割) で実測と合いました。

5.6. 試作品の測定結果比較

ワイヤカット品を基準にして、プレス品と S45C 品の特性を 600r/min で比較したものを表 3 に示します。

(1) プレス、カシメの影響

ワイヤカット品に比べ、プレス品は誘起電圧が 21%、

スティフネストルクが 9% 低下し、鉄損は 1.5 倍に増加しました。誘起電圧の低下と鉄損の増加は、プレスとカシメによるヒステリシス損の増加、カシメによる渦電流の増加が原因であり、スティフネストルクの低下は直流磁化特性の劣化が原因となっています。

(2) 積層鋼板コアとソリッドコアの比較

ワイヤカット品に比べ、S45C 品は誘起電圧が 52%、スティフネストルクが 9% 低下し、鉄損は 3.4 倍に増加しました。誘起電圧の低下と鉄損の増加は、積層していないために大きな渦電流が流れている影響が出ています。

表 3 特性測定結果 (ワイヤカット品基準、600r/min)

	プレス品	S45C
誘起電圧	-21.0%	-52.0%
スティフネス	-9.1%	-9.0%
界磁鉄損	1.5 倍	3.4 倍

5.7. 解析精度

ワイヤカット品において、実測値に対する FEM 解析値の差を誤差として表 4 に示します。この結果から、ワイヤカット品の場合は、±6% レベルの精度で定量的に近い評価ができました。

ただし、ディテントトルクは、誘起電圧やスティフネストルクの 1/4 角度の周期となるので、少なくとも周方向に 4 倍以上のメッシュを必要とすることに注意が必要です。また、鉄損は、定性的な評価はできますが、ヒステリシス損と渦電流損の分離で課題を残しました。

表 4 解析精度 (ワイヤカット品)

	解析項目	誤差 [%]
1	誘起電圧	-5.2
2	鉄損	-1.8
3	スティフネストルク	-3.1
4	ディテントトルク	+6.3

5.8. 解析時間

表 5 に界磁鉄損の解析時間を示します。プレスやカシメを考慮するか否かで異なりますが、1 つの事例で 3 ~ 5 日くらいかかることがわかりました。

ただし、ディテントトルクの場合は、メッシュ分割数を増加させる必要があるために、さらに時間を要します。

表 5 解析時間 (界磁鉄損時)

	試作品	解析時間 [Hr]
1	ワイヤカット	83.4
2	プレス	113.2
3	S45C	118.6

要素数: 386,947、33step

計算マシン: Intel® Xeon® 5160@3GHz

(注 2) ディテントトルク波形: 波形の直流成分はヒステリシス損、交流成分は変化分を表す。

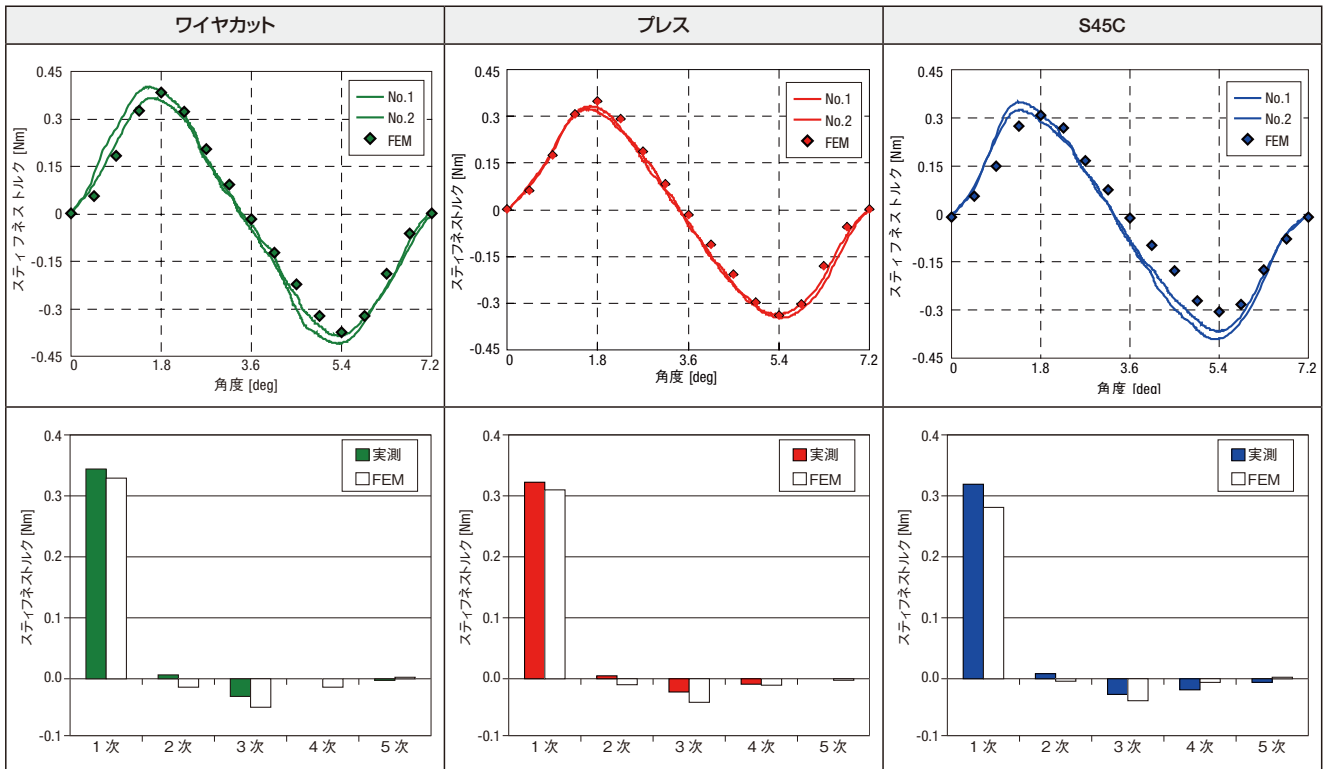


図 23 測定結果と解析結果の比較 (スティフネストルク)

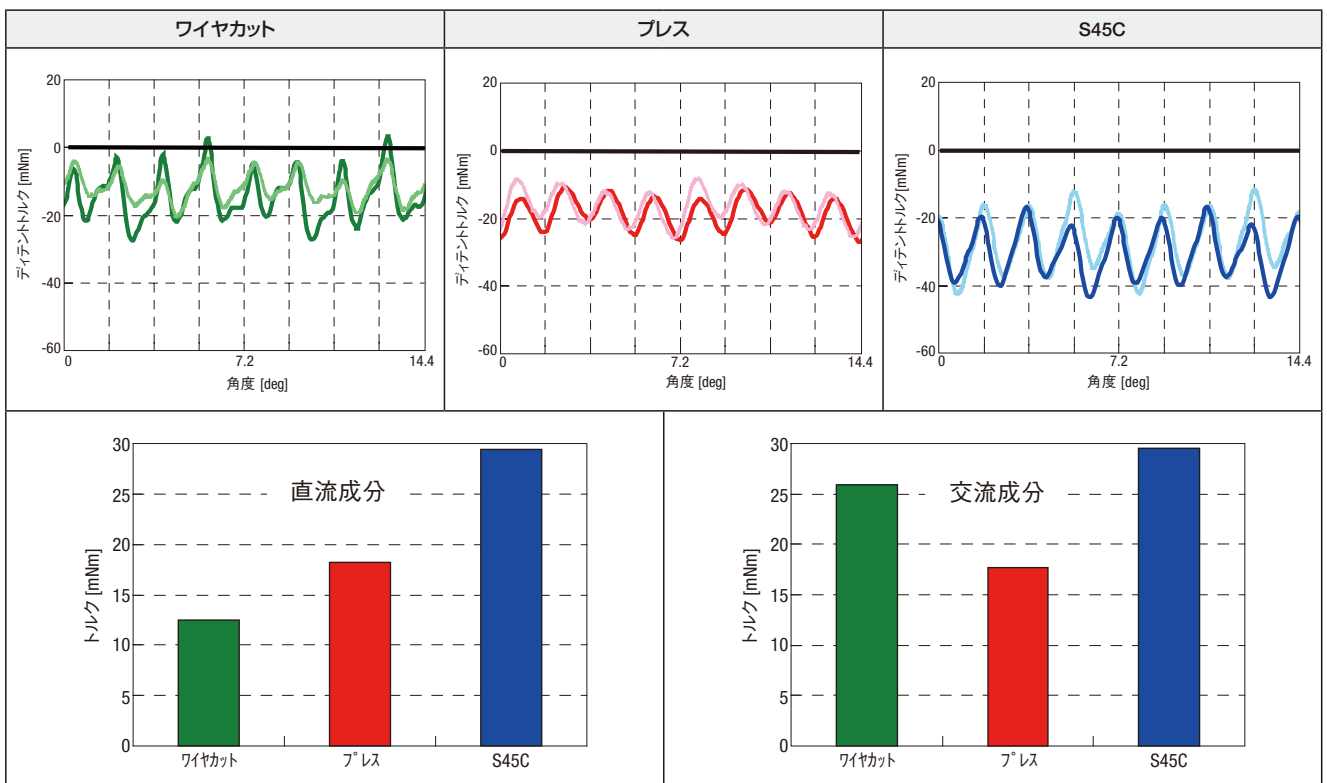


図 24 測定結果 (ディテントトルク)

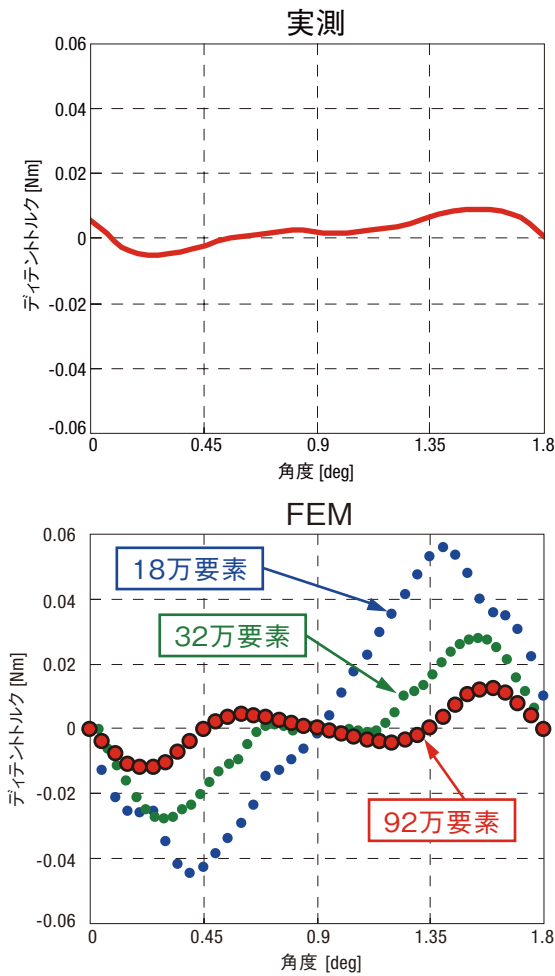


図 25 測定結果と解析結果の比較 (ディテントトルク)

6. まとめ

以上、HB 型 STM の FEM 解析は、メッシュ分割を含めた特有のテクニックもありますが、正確な磁気特性データを用いること、磁気特性劣化の影響を考慮することなどの工夫によって、実機の誘起電圧やトルクなどの定性的な評価が可能であることを示しました。

ディテントトルクは、ステイフネストルクとは別に、周方向にさらに 4 倍、メッシュを細かくすることで、精度が向上することがわかりました。

鉄損の分離に課題を残しましたが、ヒステリシス損はシュタインメッツ式に磁気劣化の影響を考慮し、渦電流損は表皮効果を考慮したメッシュ分割を行い、電流密度分布から求めるという方法で分離していくことが良いということがわかりました。今後は、さらなる精度向上を行います。

まだ、HB 型 STM の設計に活用するには、モデル化を含めた解析時間など課題が山積です。今後は、まだわかっていない磁気回路や設計変数の影響を明確にしていき、高トルク・低損失化など差別化できる商品を提供していけるように研究・開発を進めていきます。

参考文献

- (1) 榎本裕治, 宮田健治, 坂本正文, 牧晃司, 大西和夫, 蛇川俊美「三次元磁場解析による各種 HB 型ステッピングモータ特性解析」, 電学論, 123 巻 8 号, (2003 年), p964-969
- (2) 千田, 石田, 志賀, 本田, 「ブラシレス DC モータの鉄損に及ぼす打抜き加工の影響」, 電気学会回転機研究会資料, RM-03-144
- (3) 新日本製鐵無方向性電磁鋼板データブック

筆者



大坪 浩二

技術本部
要素開発部



小堀 勝

技術本部
要素開発部