

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820102

研究課題名(和文) 高効率電気機器開発のためのヒステリシス磁界解析技術の実用化に関する研究

研究課題名(英文) Enhancement of Magnetic Field Computation Technique Taking Account of Hysteresis for High-Efficiency Electric Machines

研究代表者

高橋 康人 (Takahashi, Yasuhito)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：90434290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：電気機器内損失の発生場所と原因を精度よく算定可能なヒステリシス磁界解析技術の確立を目的として、鉄損算定時にのみ磁気ヒステリシスを考慮する簡便な後処理鉄損評価法および磁気ヒステリシスを考慮した時間分割型並列有限要素法を開発した。開発手法をインバータ駆動IPMモータの損失評価等に適用し、実用的な計算コストで従来法と比べて高精度な鉄損算定が可能であることを明らかにした。また、種々提案されているヒステリシスモデル化手法の得失比較の基準となるような磁気回路の設計・作製および磁気特性測定を実施し、スカラーおよびベクトルヒステリシスモデル検証用ベンチマークモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to develop a practical magnetic field analysis method taking account of hysteresis to estimate iron loss and its cause accurately for development of high-efficiency electric machines. First, an iron loss estimation method considering both hysteretic property and skin effect by utilizing 1-D finite element methods as a post-processing of usual 2-D analyses based on ordinary magnetization curves was examined. Next, a novel parallel finite-element method for obtaining steady-state solutions in time-periodic magnetic field analyses considering hysteresis were investigated based on the parallel TP-EEC method. The effectiveness of these methods was clarified in the analysis of an IPM motor fed by PWM inverter. Finally, verification models for examining the accuracy of scalar and vector hysteresis modeling methods were newly designed. The accuracy of the play model was discussed by comparing the analysis and the measurement results of the proposed benchmark model.

研究分野：電気機器工学

キーワード：鉄損 ヒステリシス 並列計算 電気機器 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

社会基盤を支える電気機器の開発において、効率クラスの国際標準が制定されるなど高効率化への要求は国際的にますます厳しくなっており、国内においても2015年よりトランジスタ方式による効率規制が開始された。このような状況の中、電気機器のさらなる小型化・高性能化を達成するためには、磁気回路を構成する電磁鋼板の磁気特性を精確に測定し、機器内における複雑な物理現象を再現することで、損失の発生場所と原因を精度よく算定する必要がある。そのための手段として、数値シミュレーションが広く活用されている。

電磁鋼板は、磁気ヒステリシス特性や磁気異方性などの複雑な材料特性を有している。これらの物理現象を計算機上で精度良く再現することは容易ではないため、現状の磁界解析では初磁化曲線のみを考慮し、鉄損は後処理で推定する手法が一般的に用いられている。しかし、電気機器の損失を精確に把握するためには、磁気ヒステリシス特性を考慮した磁界解析を行い、直接的に鉄損を評価することが必要であり、電気機器設計分野ではヒステリシス磁界解析技術の実用化が切望されている。

そこで、ヒステリシスモデリングに関する研究が盛んに行われているが、実規模レベルの複雑な解析対象への適用に際しては計算精度やコスト、モデルの簡便な同定法など、解決すべき課題も多く残されている。したがって、既存のヒステリシス磁界解析技術を実用化の段階にまで引き上げるためには、さらなる技術の深化が必要であった。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では、電気機器の高速高精度な鉄損算定を可能とする実用的なヒステリシス磁界解析技術の確立を目指す。

まず、今後ますます普及していくことが予想される高並列計算環境を活用し、磁気ヒステリシスを考慮した時間分割型並列有限要素法を開発する。ヒステリシス磁界解析は初磁化曲線に基づく通常の磁界解析と比べて計算量が大幅に増加するため、その実用化のためには計算時間削減は重要な課題である。また、過渡解析は並列処理に不向きな逐次的な計算であり時間軸方向の並列有限要素解析は検討例がほとんどないため、時間分割型並列有限要素法によるヒステリシス磁界解析の高速化は電気工学・計算科学の両観点から有意義である。

一方、新しい技術の普及を促進するためには、効果的であることに加えて実装が容易であることが望ましい。このような観点から、初磁化曲線に基づく通常の磁界解析により得られた磁束密度の時系列波形に対し、後処理のみヒステリシス特性を考慮して鉄損を算出する鉄損計算法を開発する。

さらに、各種ヒステリシスモデル化手法の課題を整理するために、得失比較の基準となるような適切なベンチマークモデルの策定を行う。スカラーヒステリシスモデルおよびベクトルヒステリシスモデルのベンチマークモデルを設計・測定し、ヒステリシス磁界解析結果と比較することで、各種手法の得失や実用性を明らかにする。

本研究の成果により、ヒステリシス磁界解析技術の信頼性が向上し、実用化がさらに一步前進すると思われる。開発手法を用いた電気機器内損失の詳細な要因分析に基づき、電気機器のさらなる高効率化が達成されうると考えられる。

3. 研究の方法

(1) ヒステリシスを考慮した簡便な後処理鉄損算出法の開発

計算精度の観点からはヒステリシス特性の直接的な考慮が望ましいが、計算時間は大幅に増大する。そこで、初磁化曲線に基づく従来の磁界解析により得られた磁束密度の時系列波形にヒステリシスモデルを適用してヒステリシス損を算出する、簡便な後処理鉄損算出法を開発する。図1に、従来法、ヒステリシスを直接考慮した磁界解析法、およびヒステリシス特性を考慮した簡便な鉄損推定法の手順を示す。

スロット高調波・インバータのキャリア高調波に起因する渦電流損の高精度評価のためには、電磁鋼板の厚み方向の渦電流密度分布(表皮効果)の考慮が不可欠である。そこで、後処理として行う電磁鋼板厚み方向の次元有限要素解析時にヒステリシス特性を考慮し、表皮効果および磁気ヒステリシスの影響を直接的に評価する。したがって、従来の磁界解析と比較して主解析は同一であるため計算コストはほぼ等しいが、より高精度な鉄損評価が期待できる。本提案手法の有用性を非正弦波励磁下のリング試料の測定結果との比較により検証する。最終的に、インバータ駆動IPMモータの損失解析に適用し、その実用性を明らかにする。

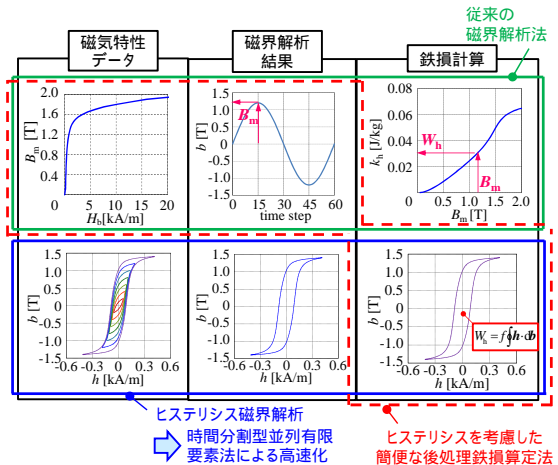


図1 従来の磁界解析法と本研究課題が対象とするヒステリシス磁界解析法の関係

(2) 磁気ヒステリシスを考慮した時間分割型並列有限要素法の開発

磁気ヒステリシスを考慮した磁界解析は、初磁化曲線を用いた通常の磁界解析と比較して一般的に多くの計算時間を要し、また現在の磁化状態が過去の遷移状態に依存するため本質的に過渡解析が必要となる。定常解を算出する際には、未知変数のみならず各要素の磁化履歴も補正する必要があり、これまで提案されてきた定常解高速求解法をそのまま適用することはできない。先行研究として、ヒステリシスを考慮した時間周期有限要素法 (TPFEM) が提案されている。しかし、ヒステリシスを考慮した TPFEM ではすべての極値を考慮して係数行列を作成するため、多くのマイナーループを含む解析対象の場合に定式化が煩雑になり、また係数行列の非零要素が増大する。一方、現象論的ヒステリシスモデルであるプレイモデルを用いた磁界解析を対象として、未知変数に加えてプレイヒステロンも補正する簡易 TP-EEC 法が提案されているが、簡易 TP-EEC 法の適用範囲は限られており、補正量を算出するまでに相応の計算量を要するとともに定常解算出までに多くの補正回数が必要であるなどの課題も残されていた。

そこで本研究では、時間分割型の並列計算法である並列化 TP-EEC 法に着目し、ヒステリシス磁界解析のための汎用的定常解高速求解法の開発を目指す。具体的には、並列化 TP-EEC 法より算出される 1 (半) 周期の磁束密度の時系列波形を用いて未知変数に加えて磁化履歴の補正も行うことで、励磁条件に依らずに適切なヒステリシスループが定常状態として得られる。まず、リング試料の実測結果との比較により、開発手法の妥当性を明らかにする。最終的に、PWM インバータ駆動 IPM モータへ適用し、実機解析における有用性を検証する。

(3) ヒステリシスモデル化手法のベンチマークモデルの構築

リング試料は、磁気特性測定では試料の全方向の平均的特性が得られ、また磁界解析結果に磁気特性の影響が顕著に表れるため、スカラヒステリシス検証用ベンチマークモデルとして最適な形状だと考えられる。材料は無方向性電磁鋼板とする。モデル同定用データとしては直流ヒステリシスが望ましいが、極低周波での高精度測定は困難なため、複数の周波数での磁気測定結果から推定することとした。さらに、PWM 励磁時における磁気特性データの整備も行う。

続いて、ベクトルヒステリシスベンチマークモデルとして具備すべき条件を整理し、精度が良好かつ安定的な磁気測定が可能であることを考慮した上で、実器取扱い時に問題となる可搬性や、渦電流および磁気飽和に対する各種対策を講じた磁気回路の設計、実器の作製およびヒステリシス磁界解析に必要な種々の磁気特性測定を行った。

4. 研究成果

(1) ヒステリシスを考慮した簡便な後処理鉄損算出法の開発

磁界解析の後処理として行う電磁鋼板厚み方向の一次元有限要素解析時にのみヒステリシス特性を考慮する簡便な鉄損算出手法の有効性を検討するために、後述するスカラヒステリシス検証用ベンチマークモデル (50A470 の環状試料) の鉄損解析を行う。図 6 に、モデル寸法および 3 次元解析時に使用した要素分割を示す。

表 1 に 検討手法を示す。主解析において、method I および method II ではヒステリシス特性を考慮しているのに対し、method III ~ V では通常の磁化曲線に基づく磁界解析を行う。鉄損計算時のヒステリシス損 W_h の算出法として、「 k_h - B_m curve」はヒステリシス損係数 $k_h(B_m)$ を用いて評価する手法を指し、「Hysteresis loops」は磁界解析で得られた各要素でのヒステリシスループの面積より直接ヒステリシス損を算定した。また、渦電流損 W_e の算出法として、「 K_e 」は磁束密度の時系列波形から渦電流損を求める手法、「post 1D FEM」は表皮効果を考慮可能な後処理一次元有限要素解析「post 1D FEM + hysteresis」はヒステリシス特性を考慮した後処理一次元有限要素解析を表す。後処理一次元有限要素解析の解析領域は板厚方向の半分とし、等間隔に 10 分割した。なお、後処理鉄損計算は OpenMP で並列化しており、使用計算機は Intel Xeon X5675 である。

図 2 に、スカラヒステリシス検証用ベンチマークモデルにおける損失の測定値と計算値の比較を示す。図中の M は測定値、 W_e は渦電流損、 W_h はヒステリシス損、 W_{iron} は鉄損、 W_{cu} は銅損を示す。また、表 2 に各手法における主解析および鉄損計算時の計算時間を示す。三次元モデルを用いた method I が最も測定値に近いが、計算コストは他と比べて非常に大きい。一方、二次元モデルを用いた従来法 (method IV や method V) では、計算コストは小さいが損失を過大評価している。主解析・後処理鉄損算定時ともにヒステリシス特性を考慮した method II と後処理時のみヒステリシス特性を考慮している method III の精度はほぼ同程度であるが、表 2 に示す通り計算時間は method III の方が半分以下である。したがって、計算コストと計算精度の観点から、method III (後処理時のみヒステリシスを考慮する鉄損算定法) の実用性が確認できる。

表 1 解析手法

Method	Main analysis		Loss calculation	
			W_e	W_h
I	Hysteresis loops	3D	Direct	Hysteresis loops
II		2D	Post 1D FEM + Hysteresis	
III	Post 1D FEM		k_h - B_m curve	
IV	K_e			
V				

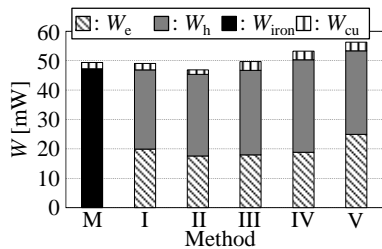


図2 損失の比較

表2 各手法における計算時間

Method	Main analysis [h]	Loss calculation [s]
I	5.90	
II	0.51	101.9
III	0.25	95.6
IV		10.7
V		4.1

(2) 磁気ヒステリシスを考慮した時間分割型並列有限要素法の開発

あらゆる時間周期波形は、時間ステップの並べ替え操作により任意の多相交流時間周期性を有する問題に変換できる(上記操作を相変換と呼ぶ)。並列化 TP-EEC 法では、各プロセス(またはスレッド)にそれぞれ初期値を与え、過渡解析を独立に実行する。相変換により多相交流時間周期問題と解釈することで、各プロセスで独立に得られた過渡解に多相交流 TP-EEC 法を適用し、収束の遅い誤差成分やプロセス間に生じる誤差を抽出・補正する。この補正を繰り返すことで、最終的に定常解を算出することができる。

並列化 TP-EEC 法により未知変数の定常状態への収束は加速されるが、ヒステリシス磁界解析においてはさらに磁化履歴に対する補正も必要となる。そこでまず、各要素の磁化履歴を消磁した後、並列化 TP-EEC 法による補正後の過渡解から暫定的な磁束密度の 1 周期波形を再現し、この再現波形に基づいて磁化履歴を更新する。この手順を繰り返すことで、未知変数の定常状態が求めれば対応する磁化履歴も適切に求められる。ただし、磁化履歴の補正は(磁気ヒステリシスを考慮する要素数)×(積分点数)回実施する必要があるため、ヒステリシスを考慮する要素数が多い場合には相応の演算量となる。暫定的な 1 周期波形による磁化履歴の更新は逐次的な処理となるが、要素毎に独立に実行できるため、効率的な並列計算が可能である。

図3に示す IPM モータモデルを対象として、開発手法の妥当性および並列台数効果の検証を行った。インバータ電圧波形は正弦波三角波比較方式により作成し、1 周期を 2,048 ステップに分割して 5 周期分の過渡解析を行った。このとき、並列化 TP-EEC 法による補正回数は 5 回としている。要素数は 10,684、未知変数の数は回路方程式との連成も含めて 5,339 である。使用計算機は、京都大学の Appro GreenBlade 8000 である。最大 16 ノード(256 コア)を用いて台数効果を検証した。

図4にトルク波形の時間変化、図5に固定

子ティース先端における定常状態でのヒステリシスループ(径方向成分)を示す。並列化 TP-EEC 法ではプロセスごとに独立に設定した初期値に基づいて過渡解析を行うため、過渡解析初期段階では大きな誤差が確認できる。しかし、提案手法により補正を行うことで、ヒステリシス磁界解析においても徐々に定常状態に近づいている。また、図5に示すように、プロセス数によらず最終的にはほぼ一致したヒステリシスループが得られており、ヒステリシスを考慮した並列化 TP-EEC 法の妥当性が確認できる。表3に、5 周期の過渡解析に要した計算時間および逐次計算に対する速度向上率を示す。規模の小さい問題であるがヒステリシスを考慮する要素数は大きいので、256 プロセス使用時では、通常の TP-EEC 法を用いた過渡解析(sequential)と比較して約 70 倍の高速化を達成しており、提案手法の有効性が確認できる。

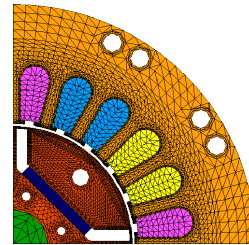


図3 IPM モータモデル(要素数:10,684)

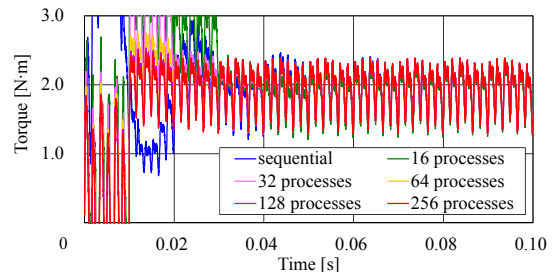


図4 トルクの時間変化

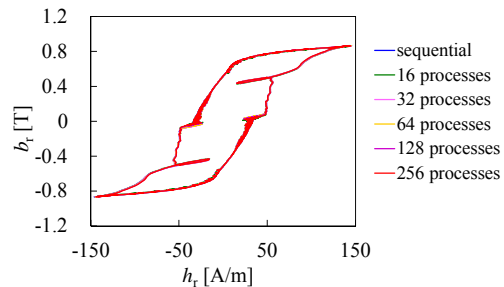


図5 ティース先端部でのヒステリシスループ

表3 磁気ヒステリシスを考慮した並列化 TP-EEC 法の並列性能

Number of processes	Calculation time [s]	Parallel speedup
sequential	70026.0	1.0
16	6986.4	10.0
32	4153.7	16.7
64	2292.9	30.5
128	1288.1	54.4
256	1013.6	69.1

(3) ヒステリシスモデル化手法のベンチマークモデルの構築

スカラーヒステリシス検証用ベンチマークモデルとして、図6に示すように無方向性電磁鋼板 JIS 50A470 をワイヤーカットにて切り出した 12.5 mm 幅(内径 102 mm, 外径 127 mm) のリング試料を採用した。測定周波数は 20, 50, 100, 200 Hz である。ベンチマークモデルの測定データとして、ヒステリシスモデル同定用の対称ループ(20, 50, 100, 200 Hz での測定結果から FFT により偶数調波成分を取り除いた磁束密度・磁界強度・励磁電流波形, $B_m=0.05\text{ T}$ から 0.05 T 刻みで 2.0 T まで, 1 周期あたり 1024 点), 磁束密度正弦波条件下における電圧波形(測定周波数 50 Hz, $B_m=1.2, 1.5, 1.8\text{ T}$), PWM 励磁時における測定結果を, 電気学会内に設置された調査専門委員会内にて公開している。

図7に, PWM 励磁時の測定結果と解析結果の比較を示す。3 次元解析では, ヒステリシスおよび渦電流の効果を適切に反映できしており, 実測結果に近いヒステリシスループがヒステリシス磁界解析によって得られていることがわかる。

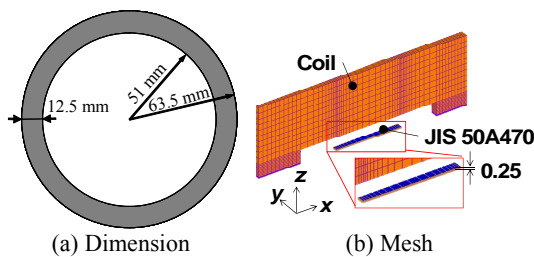


図6 スカラーヒステリシスベンチマークモデル

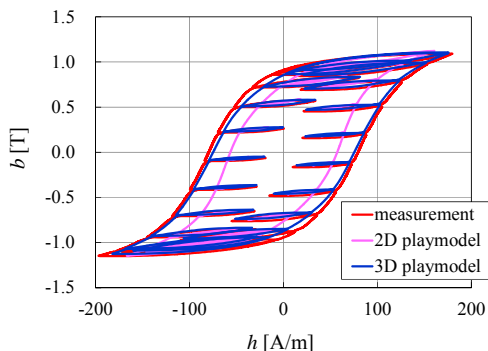


図7 スカラーヒステリシスベンチマークモデルにおけるヒステリシスループの比較

ベクトルヒステリシスモデル化手法のベンチマークモデルとしては, 磁気特性の影響が強く現れる閉磁路であり, 回転磁界の形成が容易かつ形状が単純な磁気回路が望ましい。そこで本研究では, 有限要素法を用いて磁気回路設計を行い, 図8に示すような田形コアモデルの作製および磁気特性測定を実施した。以下に, その概要を述べる。

田形コアモデルの中央脚部(十字部)には, コイルが合計で 4 組巻かれている。コイル A1, A2 に同位相の電流を流し, コイル B1,

B2 にそれらの電流とは 90 度位相をずらした電流を流すことで, 田形コア中央部に回転磁界を発生させる仕組みとなっている。使用する磁性材料には, 等方性に近い磁気特性を有する冷間圧延鋼板 (SPCC) を採用し, さらにそれを一定の間隔で 3 枚重ね, 3 層構造としている。3 層のうち, 上下層の SPCC は磁気シールドの役割を担っており, これにより層間における板厚方向の磁場の均一性を向上させている。磁界強度の均一性向上により, 実器測定時における再現性の改善が期待できる。また, 田形コア中央部では, 磁気飽和により磁束が広がってしまうことに起因して高磁束密度を達成することが困難となる。そこで, 磁束を田形コア中央部に集中させるための対策として, 図8に示すようなスリットを 4 箇所挿入した。スリットを挿入することで, 磁束が十字部に広がることを抑制できると考えられる。

田形コアモデルのヒステリシス磁界解析を行うためには, SPCC の磁気特性データが必要となる。そこで, SPCC の磁気特性データを入手するとともに, その等方性の程度を確認するため, 田形コアと同一母材から切り出した試料を用いて, 焼鈍前後の SPCC の磁気特性測定を行った。測定用試料として, 圧延方向 (RD), 圧延直角方向 (TD) 各方向に切り出した長方形試料および円形試料の 3 種類それぞれについて, 焼鈍前の試料を 1 枚ずつ, 焼鈍後の試料を 3 枚ずつ用意した。長方形試料は単板磁気特性試験器 (SST) を用いて, 円形試料は 2 次元単板磁気特性試験器 (RRSST) を用いて測定を行った。これらの測定結果は, 電気学会内に設置された調査専門委員会内にて今後公開し, 各種ベクトルヒステリシスモデル化手法の得失比較を行う予定である。

図8に示す田形コアモデルを対象として, 等方性ベクトルプレイモデルを適用したヒステリシス磁界解析を行った。プレイモデルの同定で必要となる直流磁気特性は, 励磁周波数が 20 Hz, 50 Hz および 100 Hz 時の測定データを用いて最小二乗法により推定を行った。励磁周波数およびコイルの巻き数は, 実器に合わせてそれぞれ 50 Hz, 43 ターンとした。SPCC の導電率は別途測定し, $8.30 \times 10^6\text{ S/m}$ とした。過渡解析における 1 周期当たりの時間分割数を 160, 解析周期数を 3, プレイモデルのヒステロン数を 80 とした。

図9に, 入力電圧 V_m が 2.5 V または 3.0 V としたときのヒステリシス磁界解析結果と測定結果の比較(定常状態における磁束密度および磁界の強さの軌跡)を示す。参考までに, ヒステリシスを考慮しない場合の解析結果も示している。等方性ベクトルプレイモデルを適用することによって, 解析精度が向上していることが確認できる。しかしながら, 測定結果との間には差異が見受けられるため, 今後はこの差異の原因について検討を行い, さらに解析精度向上を図る予定である。

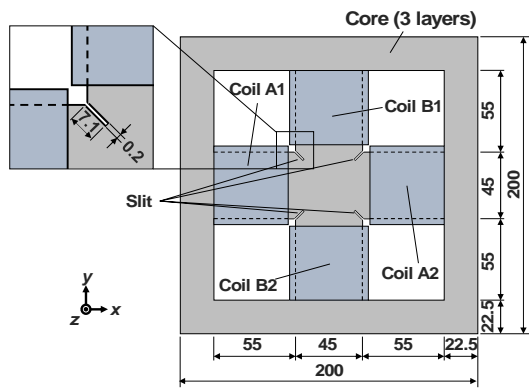


図8 田形コアモデル

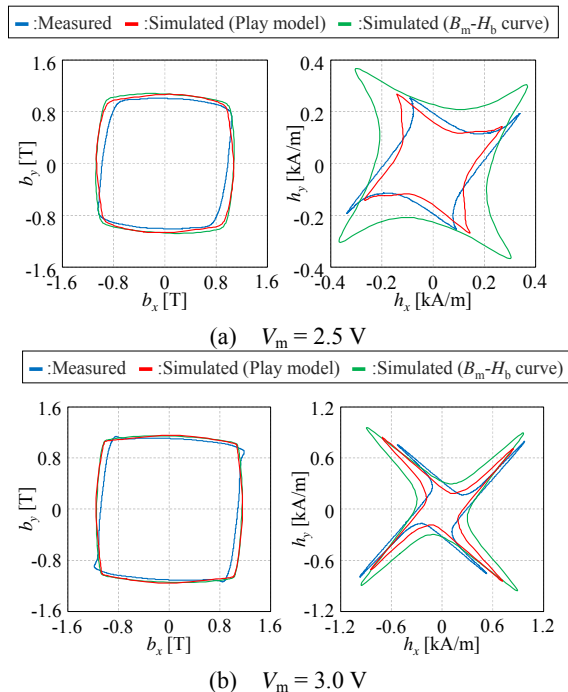


図9 田形コアモデルにおける解析結果と測定結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

Y. Takahashi, J. Kitao, K. Fujiwara, A. Ahagon, T. Matsuo, T. Iwashita and H. Nakashima, "Steady-State Analysis of Hysteretic Magnetic Field Problems Using a Parallel Time-Periodic Explicit-Error Correction Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 6, 7203304, DOI: 10.1109/TMAG.2017.2658600 (2017). (査読有)

Y. Takahashi, K. Fujiwara, T. Iwashita, and H. Nakashima, "Parallel Finite-Element Analysis of Rotating Machines Based on Domain Decomposition Considering Nonconforming Mesh Connection," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 3, 7401604, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2477308 (2016). (査読有)

T. Taitoda, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, "Iron Loss Estimation Method for a General Hysteresis Loop With Minor Loops," *IEEE*

Trans. Magn., vol. 51, no. 11, 8112304, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2445930 (2015).

(査読有)

Y. Takahashi, T. Tokumasu, K. Fujiwara, T. Iwashita, and H. Nakashima, "Parallel TP-EEC Method Based on Phase Conversion for Time-Periodic Nonlinear Magnetic Field Problems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, 7001305, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2356193 (2015).

(査読有)

Y. Takeda, Y. Takahashi, K. Fujiwara, A. Ahagon, and T. Matsuo, "Iron Loss Estimation Method for Rotating Machines Taking Account of Hysteretic Property," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, 7300504 DOI: 10.1109/TMAG.2014.2357412 (2015).

(査読有)

〔学会発表〕(計50件)

袁輪直紀, 高橋康人, 藤原耕二: 「等方性ベクトルヒステリシスベンチマーク用田形コアモデルの磁気特性評価」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-17-008/RM-17-008, 法政大学小金井キャンパス(東京都小金井市)(2017.1.18)

袁輪直紀, 高橋康人, 藤原耕二: 「等方性ベクトルヒステリシスベンチマーク用田形コアモデルの試作に向けた検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-16-065/RM-16-111, 石垣島商工会館(沖縄県石垣市)(2016.9.7)

高橋康人, 北尾純士, 藤原耕二, 阿波根明, 松尾哲司: 「並列化 TP-EEC 法を用いたヒステリシス磁界解析の高速化」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-16/RM-16-16, 富士通株式会社 本社事務所(東京都港区)(2016.1.20)

竹田よし美, 帯刀田考弘, 高橋康人, 藤原耕二: 「マイナーループを含むヒステリシスループの鉄損推定法に関する基礎的検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-15-029/RM-15-021, 宮古島マリナターミナル(沖縄県宮古島市)(2015.3.5)

高橋康人, 徳増 正, 藤原耕二, 岩下武史, 中島 浩: 「相変換と多相交流時間周期境界条件に基づく TP-EEC 法の並列化」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-14-82/RM-14-98, 宇都宮大学陽東キャンパス(栃木県宇都宮市)(2014.9.26)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 康人 (TAKAHASHI, Yasuhito)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号: 9 0 4 3 4 2 9 0