

平成23年5月20日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560280

研究課題名(和文) 電気機器省エネルギー設計への応用へ向けた高速高精度電磁界数値解析技術の実用化研究

研究課題名(英文) Research on electromagnetic field computation for energy-saving design of electric machinery

研究代表者

若尾 真治 (WAKAO SHINJI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70257210

研究成果の概要(和文)：近年、環境エネルギー問題への配慮から、電気機器においては損失低減による高効率化が強く要望されており、数値解析を活用しての設計技術の高度化が期待されている。このような背景のもと、本研究では、均質化法を用いた積層鉄心の磁界解析、応答曲面法による機器の最適化設計、無限辺要素を用いた開領域問題の解析などについて検討を行い、複雑形状を有する電気機器の省エネルギー設計のための実用的な数値解析手法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the loss reduction of electric machinery is strongly demanded because of environmental energy issues. Therefore, the effective design technique based on numerical analysis is anticipated. With this background, this research deals with the development of practical numerical analysis methods for the energy-saving design of complicated-shaped electric machinery, such as the magnetic field analysis of laminated iron core by using the homogenization method, the design optimization of electric machinery by using the response surface methodology, and the analysis of open-boundary problems by using the infinite edge elements, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電磁界解析、電気機器設計、有限要素法、均質化法、応答曲面法、無限辺要素

1. 研究開始当初の背景

電子計算機の目覚ましい発達と様々な電磁界数値計算技術の研究開発は、電気機器の設計や物理現象の解明に画期的な進歩をもたらした。しかし、設計対象や解析対象がますます複雑化、大規模化し、数値解析に基づく設計技術のさらなる高精度化と計算時間短

縮が要求されている状況にある。例えば、電気機器設計分野における高精度化の要望が最も高い項目の一つとして、積層鉄心のモデリング手法があげられる。電気機器では、その鉄心中に生じる渦電流損を減らすため、一般に積層鉄心が用いられる。電気エネルギーの大部分が機械エネルギーに変換されてい

る産業界においては、近年の地球温暖化問題に代表される環境エネルギー問題への配慮から省エネルギー化がますます重要視されており、電気機器の損失低減による高効率化が強く要望されている。その実現のためには、積層鉄心の高精度な電磁界解析などが必須となってくる。

しかし、積層鉄心における損失を精度良く算出するためには、その積層構造を詳細にモデル化する必要があるが、有限要素法に代表される従来の解析手法では膨大な計算コストを要するため、実際の機器に対してこのようなモデル化を行うことは非常に困難である。特に、電磁現象は本質的な特性としてその影響が広範な領域に及ぶため、機器本体以外にその周辺の空気領域も含めて解析する必要がある。機器内に積層鉄心のような高アスペクト比を有する部材が用いられている場合には、部材における扁平メッシュ形状の影響が空気領域のメッシュ分割にも及び、総メッシュ数が増大し、未知変数の求解、すなわち連立一次方程式を解く際の計算時間の大幅な増加につながる恐れがある。これは、多くの反復計算を要する機器の最適化設計においては、さらに深刻な問題となる。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では、形状や包含される物理現象が複雑でありかつ要求される計算の精度・時間の制約が厳しい実機問題にも十分適用可能な解析手法の開発を目指し、種々の検討を行う。

3. 研究の方法

まず、モデリングの容易さ等、実機解析への適用性について、積層鉄心モデル化手法の調査を行った。さらに、電磁鋼板と絶縁層を直接メッシュ分割することが不可能である数メートルの規模の長尺積層鉄心を例題に取り上げ、鉄損の計算値と実モデルでの実測値を比較することで、均質化法の有効性を検証した。

また、数値解析に基づく機器の最適化設計のプロセスには多くの反復計算が含まれるため、特に機器内に積層鉄心のような高アスペクト比を有する部材が用いられている場合には、計算コストの増大は深刻な問題となる。この計算コストを削減するための一方策として、回帰モデルに対して打ち切りべき乗スプライン関数を導入した高精度な応答曲面作成手法を検討した。

さらに、積層鉄心のような高アスペクト比を有する部材における扁平メッシュ形状の影響は、広範な空気領域のメッシュ分割にも及び、総メッシュ数が増大する恐れがある。この計算コストを削減するための方策の一つとして、有限要素解析をベースに無限辺要

素を併用する開領域問題解析手法の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 均質化法を用いた長尺積層鉄心の損失評価

ここでは、図1に示す全長3mの長尺積層鉄心を例題に取り上げる。対称性より1/4領域を解析した。解析にはA- ϕ 法を用いた有限要素法を使用し、非線形過渡解析を行った。また、積層鉄心の解析には均質化法を用い、計算精度を維持したまま計算コストの削減を図る。今回用いた均質化法では積層方向の導電率を無視するが、電磁鋼板の面内方向に流れる磁束によって生じる積層方向の渦電流損とヒステリシス損については、鋼板に鎖交する磁束密度の時間変化から後処理によって算出する。解析する積層鉄心はz方向に積層されており、鉄心の中央にはx方向にスリットが入っている。今回の均質化法を用いた解析では、積層方向の分割数を変えたモデルとして、①積層鉄心の底面（電磁石に最も近い面）の一層は方向性電磁鋼板の厚さ0.35mmで分割を行い、表面から徐々に粗く分割（Case 1）、②積層鉄心を積層方向に等分割（Case 2）、の2パターンの解析を行う。

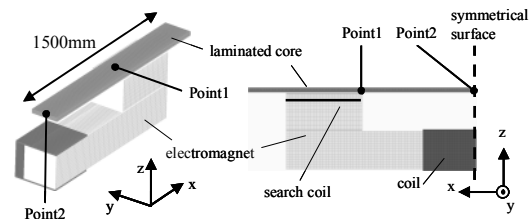


図1 解析モデル (1/4モデル)

図2に励磁電流1400ATの時の鉄損の解析結果を示す。図2を見るとCase2では面内方向に垂直な磁束によって生じる面内方向渦電流損が若干大きめに評価されている。これは積層鉄心を粗くメッシュ分割すると、z軸方向に入射した磁束の積層鉄心中での急激な屈曲が適切に表現できなくなり、渦電流の評価に誤差が生じたためと考えられる。

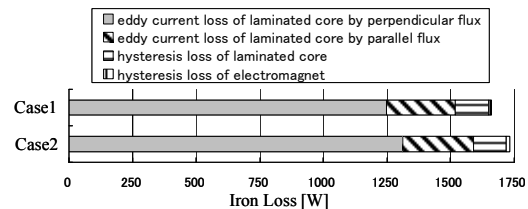


図2 鉄損分析

最後に図3に鉄損の実測値と計算値の比較を示す。磁束密度が高い領域では若干誤差が出ているもののCase1の解析結果と実測値はよく一致しており、数メートル規模の長尺積層鉄心でも、均質化法を用いれば鋼板一枚一

枚を直接分割しなくても精度良く鉄損を計算できることが確認できる。

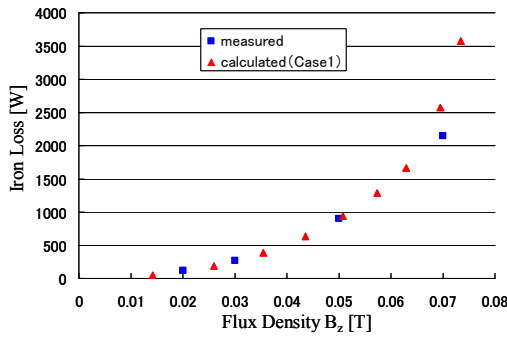


図3 鉄損の実測値と計算値との比較

これまで数メートル規模の長尺積層鉄心を用いて均質化法の適用性能を検証した例はなかったが、本検討の結果、要素分割に留意することで長尺積層鉄心に対しても計算コストを大幅に削減しつつ高精度な損失評価を行えることが明らかになった。

(2) 多変量回帰のスプライン(MARS)を用いた応答曲面近似法(RMS)の機器設計への適用

実モデルへの応用として、図4に示す磁場プレス最適化問題にMARSを適用した例を示す。MARSでは、回帰モデル決定の際にパラメータの個数を対象となるモデルに対して適応的に設定するノンパラメトリック回帰モデルを採用する。本例題では、キャビティ内のe-f上の磁束密度に関して、式(1)および式(2)を最小化させるように、装置の最適な形状を決定することが目標である。今回は本例題を、磁束密度の角度に関する式(1)、およびその大きさに関する式(2)の2つの目的関数を最小化する多目的最適化問題として扱う。

$$W_1 = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{B_{iyp}}{B_{ixp}} - \frac{B_{iy}}{B_{ix}} \right)^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$W_2 = \sum_{i=1}^{10} \left(|B_{ip}| - 0.35 \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

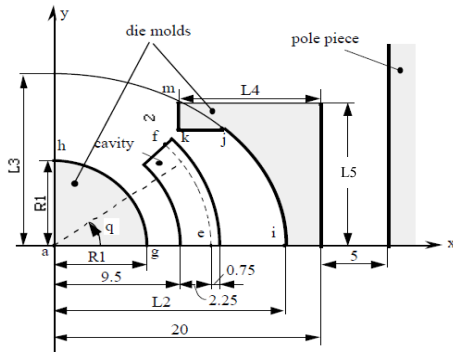


図4 磁場プレスモデル

ここでは最適化手法に遺伝的アルゴリズム(GA)を採用した。式(1)と式(2)の2つの目的関数に対してMARSを用いて近似関数(応答曲面)を作成し、GAにおける個体の適応度評価に活用する。応答曲面を用いて最適化計算を実行し、得られたパレート解が有する設計変数の値に基づき探索空間を適切に絞り込みながら、同様のプロセスを繰り返す方法を採用した。応答曲面を用いた最適化計算で得られたパレート解に対し、FEM解析との比較による精度検証を行い、両者が十分に良い一致をみた時点で最適化計算を打ち切る。パレート解が存在する近傍に適切に設計空間を絞り込むことにより、応答曲面による近似誤差の影響を低減させながら、解探索の高速化が期待できる。また、MARSを用いた提案手法の有効性を確認するため、RSMを用いずにFEMとGAのみを併用した最適化(以下、従来法と呼ぶ)による結果との比較を行う。

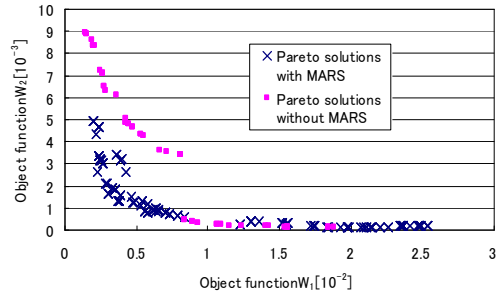


図5 パレート解分布(絞り込み探索空間)

1回の絞り込みを行った後に得られた結果を図5に示す。比較のため、従来法により得られた100世代目の最終のパレート解を合わせて図中に示す。提案手法により、1回の絞り込みで、ランクの異なる個体がまだ若干混在しているものの、従来法よりも十分良好なパレート解が得られていることが分かる。この段階で、FEM計算による目的関数値と応答曲面による算定値との差(絶対値)の平均は、 W_1 に関しては 5.801×10^{-4} 、 W_2 に関しては 2.790×10^{-4} であり、応答曲面の精度が十分向上していることが確認できる。計算時間に関しては、従来法(100世代)の場合で約6時間22分、MARSを適用した提案手法では、1度の探索空間絞り込みを含む総計算時間(100世代×2回)として約2時間48分であった。以上の結果より、設計空間の絞り込みを適切に行いながらMARSを用いて応答曲面を作成する提案手法により、計算コストを抑えたまま効率的なパレート最適解の探索が実現できることが明らかになった。

(3) 辺要素無限要素法を用いた三次元磁界解析

本研究で提案する辺要素無限要素法は、無限要素の放射方向の補間を遠方界のポテンシャルの多重極展開の考えに基づいて定義し、それ以外の離散化手順は通常の変数有限要素法と同様に解く手法である。ベクトル変数の接合境界面上の成分が従来のFEMの辺要素形状関数と同様に連続性を有すると同時に、辺要素無限要素法におけるガラキンの弱形式ではシステムマトリクスは従来のFEMと同様に対称性を持つスパースなものとなり、通常のICCG法で解くことが可能となるなどの長が挙げられる。解析対象とその周辺を含む解析領域を有限要素領域として有限要素で離散化し、その外側の広範な空気領域を無限要素領域として無限要素で離散化する。本無限要素は、ある一つの任意の基準点と接合境界における二次元メッシュから形状が幾何的に一意に決まっており、モデル作成の際に無限要素のメッシュは容易に作成することができる。

提案手法の有効性を検証する目的で、複雑なモデルとして、40枚の鋼板（JIS grade: 50A1300）により構成される図6の積層鉄心モデルを、無限要素（展開次数 $N=2$ ）を用いて解析を行った。解析結果の磁束密度分布を通常のFEM解析の結果と併せて図7に、コイルの自己インダクタンスと計算時間を表1に示す。また、各手法での有限要素領域の範囲も表1に示す。表1におけるカッコ内の値は、固定境界条件を用いた従来のFEMで解析を行った結果を基準とした比率である。図7と表1より、磁束密度分布およびコイルの自己インダクタンス値に関して、無限要素を用いた解析結果と従来のFEMの解析結果とが良く一致していることが分かる。一方、無限要素を用いた解析では、計算時間を大幅に削減できることが分かる。積層鉄心では積層方向に細かく要素分割をする必要があるため、通常のFEMを用いて解析する場合、積層部分の細かいメッシュに影響されて空気領域の要素数も膨大になってしまう。無限要素を用いた場合、この細かく分割された広範な空気領域の要素数を大幅に削減することが可能となる。この結果、計算時間は従来のFEMでの解析と比較して17%に抑えられている。以上の結果より、従来の有限要素法のみによる解析時と比較し、十分な解析精度を保ったまま大幅な計算時間の短縮を可能とする提案手法の有効性が実証された。

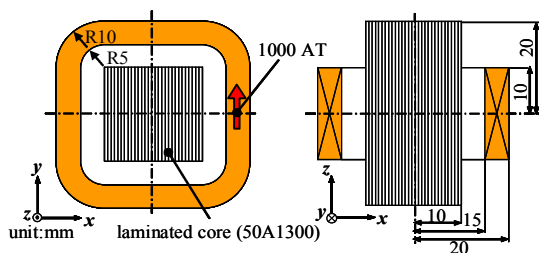


図6 積層鉄心モデル

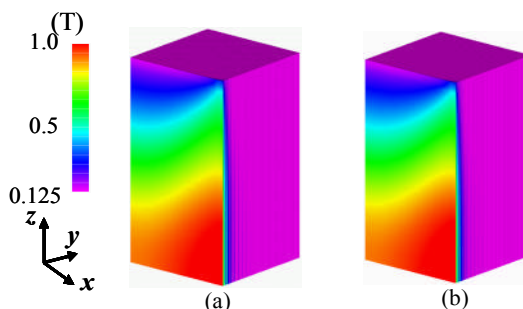


図7 1/8モデルの磁束密度分布
(a) 無限要素解析 (b) 通常のFEM解析

表1 無限要素と従来のFEMとの比較

Method and FE Region	Number of Elements	Self-Inductance of Coil (mH)	Total CPU-Time (s)
FEM with Infinite Element ($N=2$) $0 \leq x, y \leq 25, 0 \leq z \leq 30$	208,000	0.6949324485 (1.000144)	586.05 (0.17)
Conventional FEM (BC of $H_t=0$) $0 \leq x, y, z \leq 500$	1,184,000	0.6949575029 (1.000180)	2377.57 (0.69)
Conventional FEM (BC of $B_n=0$) $0 \leq x, y, z \leq 500$		0.6948325255 (1.000000)	3455.76 (1.00)

本研究では、その他、代数マルチグリッド法を前処理とした共役勾配法の適用による計算速度の改善や、時間周期有限要素法とEEC法に基づく誤差補正法による非線形過渡電磁界解析時の逐次積分の収束性改善などについても検討を行った。

以上、本研究における成果は、積層鉄心等を含む複雑な電気機器の損失低減・高効率化設計技術のレベル向上に寄与するものと考えられる。

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)

[雑誌論文] (計12件)

- ① T. Tatsuishi, Y. Takahashi, M. Miwa, S. Wakao, K. Fujiwara, Y. Ishihara, "Large-Scale Analysis of Magnetic Particle Dynamics Taking into account Contact Force and Magnetic Interaction with the Fast Multipole Method," Journal of Applied Physics, Vol. 109, 2011, 07D331, 査読あり
- ② Y. Takahashi, H. Kaimori, A. Kameari, T. Tokumasu, M. Fujita, S. Wakao, T. Iwashita, K. Fujiwara, Y. Ishihara, "Convergence Acceleration in Steady State Analysis of Synchronous Machines Using Time-Periodic Explicit Error Correction Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 5, 2011, pp. 1422-1425, 査読あり
- ③ S. Tamitani, T. Takamatsu, A. Otake, S.

- Wakao, A. Kameari, Y. Takahashi, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Problem with Open Boundary Using Infinite Edge Element," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 5, 2011, pp. 1194-1197, 査読あり
- ④ Y. Takahashi, T. Iwashita, H. Nakashima, S. Wakao, K. Fujiwara, Y. Ishihara, "Performance Evaluation of Parallel Fast Multipole Accelerated Boundary Integral Equation Method in Electrostatic Field Analysis," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 5, 2011, pp. 1174 - 1177, 査読あり
- ⑤ Y. Takahashi, T. Tokumasu, A. Kameari, H. Kaimori, M. Fujita, T. Iwashita, and S. Wakao, "Convergence Acceleration of Time-Periodic Electromagnetic Field Analysis by Singularity Decomposition-Explicit Error Correction Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 8, 2010, pp. 2947-2950, 査読あり
- ⑥ A. Otake, K. Takayasu, S. Wakao, T. Okutani, Y. Takahashi, M. Saito, and A. Toyoda, "Design of Railway Wheel Detector Insusceptible to Electromagnetic Noise," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 8, 2010, pp. 2731-2734, 査読あり
- ⑦ 高橋康人, 岩下武史, 中島浩, 若尾真治, 「直方体要素用高速多重極法を用いた大規模マイクロマグネティクス計算の並列化」, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 101-111, 査読あり
- ⑧ 高橋康人, 徳増 正, 藤田真史, 若尾真治, 岩下武史, 金澤正憲, 「時間周期有限要素法と EEC 法に基づく非線形過渡電磁場解析における時間積分の収束性改善」, 電気学会論文誌 B, Vol. 129-B, No. 6, 2009, pp. 791-798, 査読あり
- ⑨ Y. Takahashi, S. Wakao, T. Iwashita, and M. Kanazawa, "Micromagnetic simulation by using the fast multipole method specialized for uniform brick elements," Journal of Applied Physics, Vol. 105, 2009, 07D514, 査読あり
- ⑩ M. Miwa, T. Yamada and S. Wakao, "Investigation of Algebraic Multigrid Method for Magnetic Field Analysis of an Electric Machine with a Laminated Core," IEEE Transactions on Magnetics Vol. 45, No. 3, 2009, pp. 992-995, 査読あり
- ⑪ T. Tatsuishi, Y. Takahashi, S. Wakao, M. Tobita, I. Tominaga, and H. Kikuchi, "Large-Scale Eddy-Current Analysis of Conductive Frame of Large-Capacity Inverter by Hybrid Finite Element-Boundary Element Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 3, 2009, pp. 972-975, 査読あり
- ⑫ N. Nishida, Y. Takahashi, S. Wakao, "Robust Design Optimization Approach by Combination of Sensitivity Analysis and Sigma Level Estimation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, 2008, pp. 998-1001, 査読あり
- [学会発表] (計 20 件)
- ① 民谷智史, 津崎賢大, 若尾真治, 徳増 正, 高橋康人, 亀有昭久, 五十嵐 一, 藤原耕二, 石原好之, 「ヒルベルト行列の直交化による無限辺要素法の収束性改善」, 平成 23 年電気学会全国大会, 2011. 3. 18, 大阪
- ② 鶴見祐輔, 若尾真治, 「電気機器の多目的最適化におけるパレート解の多様性向上に関する検討」, MAGDA コンファレンス in 札幌, 2010. 11. 23, 札幌
- ③ 民谷智史, 高松智明, 若尾真治, 亀有昭久, 高橋康人, 藤原耕二, 石原好之, 「辺要素無限要素法を用いた三次元磁界解析」, 電気学会静止器・回転器合同研究会, 2010. 9. 28, 鹿児島
- ④ 高橋康人, 徳増 正, 藤田真史, 若尾真治, 藤原耕二, 石原好之, 「電気機器の過渡磁界解析における TDC 法および TP-EEC 法の検討」, 電気学会静止器・回転器合同研究会, 2010. 9. 28, 鹿児島
- ⑤ Y. Tsurumi and S. Wakao, "Multiobjective Design Optimization of Electric Machine by Using Genetic Algorithm with Aggressive Species Diversity," 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, May 1, 2010, Chicago, USA
- ⑥ 高橋康人, 徳増 正, 藤田真史, 若尾真治, 岩下武史, 「簡易多相交流 TP-EEC 法による回転機の過渡解析における収束性改善」, 平成 22 年電気学会全国大会, 2010. 3. 17, 東京
- ⑦ 大竹飛鳥, 若尾真治, 奥谷民雄, 斉藤匡彦, 豊田明久, 森田政次, 矢島敦, 田代維史, 工藤希, 中畑芳樹, 城水常宏, 「新幹線用主変換装置におけるノイズ磁界の測定」, 平成 22 年電気学会全国大会, 2010. 3. 17, 東京
- ⑧ 三輪将彦, たに浩司, 山田隆, 若尾真治, 「大規模メッシュモデルのためのメッシュモーフイング手法の提案」, 電気学会マグネティクス・静止器・回転機合同研究会, 2010. 1. 28, 愛知
- ⑨ 大竹飛鳥, 高安健太, 若尾真治, 奥谷民雄, 斉藤匡彦, 豊田明久, 高橋康人, 「ロバス

- ト性を考慮した車軸検知装置の最適化設計」, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会, 2010. 1. 28, 愛知
- ⑩ K. Takayasu, A. Otake, M. Miwa, S. Wakao, T. Okutani, Y. Takahashi, M. Tanai, K. Onda, “Application of Response Surface Methodology to Electric Machine Design with Multivariate Adaptive Regression Splines,” the 17th Biennial IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2009), November 24, 2009, Florianopolis, Brazil
- ⑪ T. Tatsuiishi, Y. Takahashi, M. Miwa and S. Wakao, “Large-Scale Analysis of Magnetic Beads Behavior in Magnetic Field with Fast Multipole Method,” the 17th Biennial IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2009), November 23, 2009, Florianopolis, Brazil
- ⑫ 高橋康人, 岩下武史, 徳増 正, 藤田真史, 若尾真治, 「回転機の電磁界解析における並列化時間周期有限要素法の有効性に関する検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2009. 9. 17, 北見
- ⑬ 大竹飛鳥, 若尾真治, 高橋康人, 徳増 正, 藤田真史, 「均質化法を用いた長尺積層鉄心の損失評価」, 平成 21 年電気学会全国大会, 2009. 3. 19, 札幌
- ⑭ 立石拓也, 三輪将彦, 若尾真治, 高橋康人, 「高速多重極法を導入した磁性粒子の磁気力-接触力連成挙動解析」, 平成 21 年電気学会全国大会, 2009. 3. 18, 札幌
- ⑮ 高橋康人, 岩下武史, 金澤正憲, 若尾真治, 「直方体要素用高速多重極法によるマイクロマグネティックス計算の高速化」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2009. 1. 29, 東京
- ⑯ 高安健太, 大竹飛鳥, 三輪将彦, 若尾真治, 高橋康人, 「多変量適応的回帰スプライン (MARS) を用いた応答曲面近似法の電気機器設計への適用に関する基礎的検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2009. 1. 29, 東京
- ⑰ 藤野清次, 尾上勇介, 若尾真治, 「IDR 定理に基づく IDR(s) 反復解法族の電磁界問題への適用と評価」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2009. 1. 29, 東京
- ⑱ 三輪将彦, 仙波和樹, 山田 隆, 若尾真治, 「積層構造を有する電気機器の大規模電磁界解析における代数マルチグリッド法の評価」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2009. 1. 29, 東京
- ⑲ 高橋康人, 徳増 正, 若尾真治, 岩下武史, 金澤正憲, 「時間周期有限要素法と EEC 法に基づく非線形過渡電磁場解析の収束特

性改善に関する基礎的検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2008. 9. 18, 大分

- ⑳ 藤野清次, 尾上勇介, 若尾真治, 「有限境界要素法の解析に適した IDR(s) 法の並列収束性評価」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, 2008. 9. 18, 大分

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若尾 真治 (WAKAO SHINJI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：70257210

(2) 連携研究者

高橋 康人 (TAKAHASHI YASUHIITO)
同志社大学・理工学部・助教
研究者番号：90434290