

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820099

研究課題名(和文) 圧粉磁芯モータの低損失・高出力磁気回路実現のための創発的位相最適化手法の開発

研究課題名(英文) Development of Emergent Topology Optimization Method to Realize the Motor Structured by Soft-Magnetic Core with High Efficiency

研究代表者

岡本 吉史 (OKAMOTO, Yoshifumi)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：40415112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 高効率モータ設計を行うため、トポロジー最適化による実用的な解を導出する方法として、レベルセット関数の移流を使用したトポロジー最適化手法の開発と、三次元問題でも実用的な計算時間内に最適化可能な有限要素法の高速化手法の開発に注力する。

レベルセット関数の移流を考慮したトポロジー最適化では、磁気非線形性を考慮できる三次元静磁界最適化問題へ適用し、その優位性を明らかにした。

有限要素法の高速化手法の開発では、連立一次方程式解法であるICCG法の高速化を主眼として研究を進めた。具体的には、電磁界解析で現れる係数行列の非ゼロ要素分布を並列化に適した分布へオーダリングする手法を開発する。

研究成果の概要(英文)： To design the motor with high efficiency, 3-D topology optimization tool is investigated. Especially, two topics; enhancement of practicability of the converged solution derived from topology optimization and speedup of optimization were strongly focused.

Regarding the enhancement of practicability of the converged solution, the level-set-function-based method was successfully developed in the nonlinear magnetostatic field. As a result, the outline of converged topology was drastically modified in comparison to the topology derived from the evolutionary algorithm or material-density-based method.

To realize further speedup, the linear solver for the linear algebra obtained from the finite element method was improved by the introduction of the multicolor ordering. Resultant elapsed time was reduced to less than one third of the performance of the conventional ICCG method.

研究分野：計算電磁気学

キーワード：トポロジー最適化 高速大規模電磁界解析 感度解析 随伴変数法 レベルセット関数 並列計算 電気機器工学

1. 研究開始当初の背景

近年、低炭素型社会を実現するため、地球環境に配慮した高効率電気機器の開発が盛んに行われている。国内の消費電力の内、モータの消費電力が半分以上を占めており、モータの高効率化は急務となっている。我々は、モータの小型化、三次元磁気回路の実現可能性(磁束有効利用)の観点より、電磁界シミュレーションを援用した高効率な三次元磁気回路を導出できる形状推定算法の開発を行う。使用する磁性材料(磁芯素材、永久磁石)を設定しさえすれば、過去の英知に勝る磁気回路を導出できる算法の開発を行い、限界性能を出力可能な圧粉磁芯型モータの新構造設計に挑戦する。

2. 研究の目的

本申請では、圧粉磁芯を使用した新しいモータ構造導出のため、複数の磁性材料(永久磁石同期モータであれば、空気・磁石・鉄芯)を考慮した最適化機能を新たに付加することで、真の白紙状態から、合理的な三次元磁気回路を生成できる最適化アルゴリズムの開発を実施する。本手法を使用することで、珪素鋼板を積層したモータよりも低鉄損で、なおかつ、高トルクを出力できる圧粉磁芯モータの新三次元構造の導出に挑戦する。

当初、報告者らが有する多段式遺伝的アルゴリズムの拡張を予定していたが、設計領域内部の有限要素数が増加するにつれて、最適化手法の収束特性、収束解の質が劣悪になることが明らかになった。従って、大規模な設計変数で構成される圧粉磁芯モータのような三次元構造問題求解のために、実用的な形状が得られるアルゴリズム開発に視点を置き、研究を遂行した。

3. 研究の方法

三次元トポロジー最適化問題においても、実用的な解を導出する方法として、レベルセット関数の移流を使用したトポロジー最適化手法の開発と、三次元問題でも実用的な計算時間内に最適化可能な有限要素法的高速化手法の開発に注力する。

レベルセット関数の移流を考慮したトポロジー最適化では、磁気非線形性を考慮できる三次元静磁界最適化問題へ適用し、その優位性を明らかにした。また、レベルセット法では、反復毎にレベルセット関数の符合付き距離関数の性質が損なわれてしまう。そこで、移流項の大きさを常に単位化するレベルセット関数の初期化が、電磁界システム最適化問題に対して有効であることを明らかにした。

有限要素法的高速化手法の開発では、連立一次方程式解法である ICCG 法的高速化を主眼として研究を進めた。具体的には、電磁界解析で現れる係数行列の非ゼロ要素分布を並列化に適した分布へオーダリング

する手法を開発する。

4. 研究成果

4.1 レベルセット関数の移流に基づく三次元トポロジー最適化手法の開発

レベルセット法では、次式に示すレベルセット関数の零等位面を設計領域内部の物体と空気領域の界面として定義する。

$$\phi(x) = \begin{cases} d(x, \partial\Omega) & x \in \Omega \\ 0 & x \in \partial\Omega \\ -d(x, \partial\Omega) & x \notin \Omega \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 Ω は物体領域、 $\partial\Omega$ は物体領域の輪郭とする。また、 $d(x, \partial\Omega)$ は $\partial\Omega$ と x の最短距離を示す。レベルセット関数はあくまでも物体の輪郭を形作る役割を果たしているのみで、その大きさに制約条件は存在しないため、このままでは材料定数を表現できない。そこで、(2)式に示す5次のヘビサイド関数にレベルセット関数を代入することで、設計領域において0以上1以下の関数を形成できる。

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & (\phi < -h) \\ \frac{1}{2} + \frac{15}{16} \left(\frac{\phi}{h}\right) - \frac{5}{8} \left(\frac{\phi}{h}\right)^3 + \frac{3}{16} \left(\frac{\phi}{h}\right)^5 & (-h \leq \phi \leq h) \\ 1 & (h < \phi) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 h は空間領域と物体領域において、材料定数を連続に取り扱うための遷移幅を示す。空間方向のパラメータを一軸のみにしたレベルセット関数 $\phi(x)$ と $H(\phi)$ の関係を図1に示す。

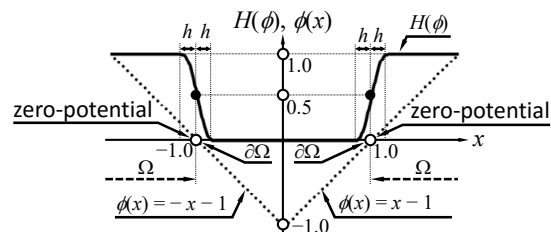


図1 レベルセット関数とヘビサイド関数の関連

この場合、 $\phi(x)$ の零等位点が $x = 1.0$ 、 $x = -1.0$ に設定されている。それゆえ、 $x < -1.0$ 、 $x > 1.0$ の領域を物体として、 $\phi(x)$ を計算すると $x = 0$ を境にして $\phi(x)$ の傾きの符号が逆転する。また、 $\phi(x)$ は等距離関数の性質上、(3)式を満足することがわかる。

$$|\nabla\phi| = 1 \quad (3)$$

一方、材料定数を評価するための $H(\phi)$ の分布も $x = 1$ 、 $x = -1$ を境にして変化している。なお、本論文で取り扱う磁気回路の最適化問題では、レベルセット関数 $\phi(x)$ について求解するため、設計領域における全ての要素積分点の磁気抵抗率 $\nu(\phi, \mathbf{B})$ は(4)式の

ように表現できる.

$$v(\phi, \mathbf{B}^2) = v_0 + (v_e(\mathbf{B}^2) - v_0) H(\phi) \quad (4)$$

ここで, v_0 は真空の磁気抵抗率, $v_e(\mathbf{B}^2)$ は磁性体の初期磁化曲線から推定される磁気抵抗率を示す. 磁気特性が線形の場合, $v_e(\mathbf{B}^2)$ は定数となる. ここで, (1) 式で定義したレベルセット関数の時刻 t における零等位面は, 次式のようになる.

$$\phi(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (5)$$

次に, この方程式を時間微分すると, (6) 式が得られる.

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + |\nabla \phi| v_n = 0 \quad \left(\because v_n = \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \right) \quad (6)$$

本式において, \mathbf{n} は零等位面の法線方向ベクトル, v_n はレベルセット関数の速度の法線方向成分を示し, 位置ベクトル \mathbf{x} を時間関数 $\mathbf{x}(t)$ として取り扱っている. $\phi(\mathbf{x}, t)$ が (3) 式を満たしていれば, (6) 式は次式のように簡略化できる.

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + v_n = 0 \quad (7)$$

通常, v_n には目的関数の設計感度が代入されるが, それを使用して更新された $\phi(\mathbf{x}, t)$ は, (3) 式を満たさない. それゆえ, (3) 式を満足するように時間領域の反復過程で, 毎回初期化する手段が考えられる.

時間積分に前進 Euler 法を使用し, 節点形状関数 N_i で (7) 式の弱形式 G_{ai} を導出すると, (8) 式のようになる.

$$G_{ai} = \int_{\Omega_d} N_i \left(\frac{\phi^{(k+1)} - \phi^{(k)}}{\Delta t} + v_n^{(k)} \right) dV = 0 \quad (8)$$

ここで, Ω_d は設計領域を示し, Δt は時間刻み幅, 上付き添え字 k は時間ステップ番号を示す. その結果, $\phi(\mathbf{x}, t)$ の更新公式は, (9) 式のようになる.

$$\{\phi^{(k+1)}\} = \{\phi^{(k)}\} - \Delta t \mathbf{K}_a^{-1} \mathbf{F}_a^{(k)} \quad (9)$$

なお, 係数行列 \mathbf{K}_a , ベクトル $\mathbf{F}_a^{(k)}$ の各成分 $K_{a|ij}$, $F_{a|k}$ を (10), (11) 式に示す.

$$K_{a|ij} = \int_{\Omega_d} N_i N_j dV \quad (10)$$

$$F_{a|k} = \int_{\Omega_d} N_i v_n^{(k)} dV \quad (11)$$

なお, Δt には次の CFL 条件を課す. ここで, Δx_{\min} は設計領域の全要素の内, 最短の辺長を示す. 本論文では, (12) 式の等号関係が成立する Δt を採用する. また, レベルセット関数の更新の度に, (3) 式を満足するように, レベルセット関数分布を初期化している.

本手法を図 2 に示す三次元アクチュエータモデルに適用する. 本問題の最適化目標は, 設計領域 Ω_d に生成される鉄心体積を指定値以下に維持しながら Ω_t に蓄積される磁気エネルギーを最大化することである.

したがって, 目的関数, 制約条件は (12) 式のようになる.

$$\begin{aligned} \min. f(\phi) &= \chi(\phi)^{-1} & \left(\because \chi(\phi) &= \frac{1}{2} \int_{\Omega_t} \mathbf{B}^T \mathbf{v} \mathbf{B} dV \right) \\ \text{s.t. } g(\phi) &= V_{\text{iron}}(\phi) - V_0 \leq 0 & \left(\because V_{\text{iron}}(\phi) &= \int_{\Omega_d} H(\phi) dV \right) \end{aligned} \quad (12)$$

材料定数は, armature の比透磁率を 1000 (線形), Ω_d 内で使用する鉄芯材料には圧粉磁芯 EU67 を定義する. なお, 磁気特性を線形とする場合, 圧粉磁芯 EU67 の比透磁率を 1000 とした. 設計領域の要素は, 全て立方体で分割した. また, 設計領域の要素数に依存して空気領域の要素数も増加するため, 線形結合に基づく非適合接続を導入して, 計算規模を縮減する. 表 1 に最適化パラメータを示す. ヘビサイド関数の遷移幅 h を一要素幅とし, V_0 は Ω_d の体積 V_{all} の 6.4% とする. また, 探索空間が二次元問題よりも広くなるため, 最適化最大反復回数 k_{opt} を 500 とした.

まず, 磁気特性を線形とし, 初期形状を球体と設定した場合の形状変化を図 3 に示す. なお, 図 3 のヘビサイド関数分布は, x - y 平面に対して鏡面对称として表示している. (b) から, armature 近傍の球体が磁石付近に近づくような形状変化が確認できる. 最終的に (c) が収束解として得られた. レベルセット関数の零ポテンシャル境界近傍では, ヘビサイド関数の性質上, グレイスケールが存在するが, (d) に示すように, その内側にはグレイスケールのない具体的な鉄芯形状が内在する. また, 要素内一定の材料密度ベース最適化法で得られた離れ小島のような鉄芯分布は発生していない.

磁気特性を非線形とした場合の最適化結果を図 4 に示す. 図 3 (a) に示した同様の初期値を使用しても, 磁気飽和の影響によって鉄芯断面積が増加した. 図 3 (d) と図 4 (b) を比較すると, 形状の差異が顕著である. 図 5 より, 磁気非線形性の有無に関わらず, 鉄芯体積の制約条件を維持しながら, 磁気エネルギーの増加が達成されている.

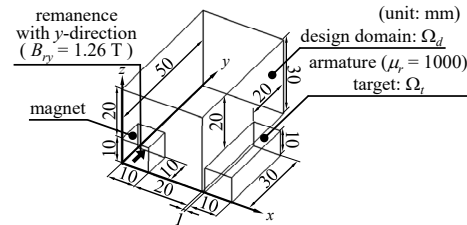


図 2 三次元アクチュエータモデル

表 1 最適化パラメータ

dim.	elem. distribut.	h [m]	n_s	n_d	n_e	k_{opt}	V_0 [m ³]	V_0 / V_{all}
2-D	regular	5.0×10^{-4}	4	11,522	5,600	300	2.8×10^{-4}	0.200
	distorted							
3-D	regular			367,821	352,000	500	2.8×10^{-6}	0.064

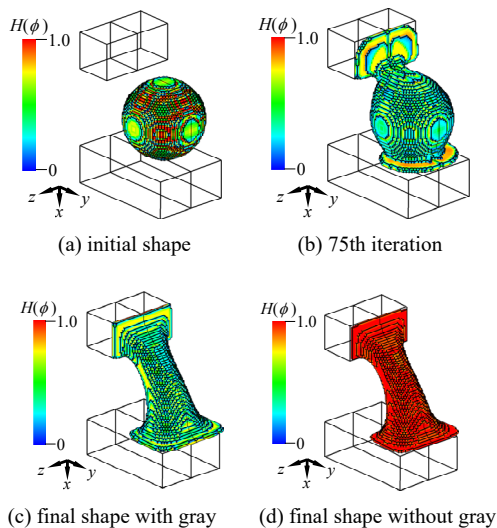
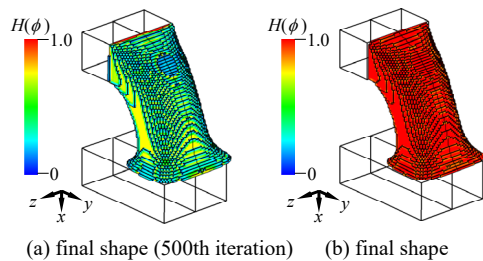


図3 磁気特性が線形の場合の最適化結果



without gray scale

図4 磁気特性の非線形性を考慮した場合の最適化結果

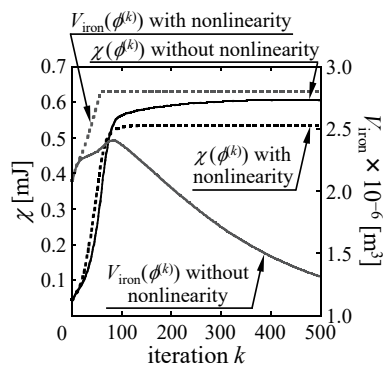


図5 目的関数の収束特性

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 9 件)

- ① Yoshifumi Okamoto, S. Wakao, and S. Sato, “Topology Optimization Based on Regularized Level Set Function for Solving 3-D Nonlinear Magnetic Field System with Spatial Symmetric Condition,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 52, No. 3-7402204 (2016), DOI: 10.1109/TMAG.2015.2492978 (査読有り)

- ② Tomonori Tsuburaya, Yoshifumi Okamoto, and S. Sato, “Parallelized ICCG Method Using Block-multicolor Orderings in Real Symmetric Linear System Derived from Voltage-driven FEM in Time Domain,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, No. 5, pp. 1433-1446, Sep. 2015, DOI: 10.1108/COMPEL-02-2015-0069 (査読有り)
- ③ Yoshifumi Okamoto, A. Kameari, K. Fujiwara, T. Tsuburaya, and S. Sato, “Fast Nonlinear Finite Element Analysis Using Newton-Raphson Method Implemented by Krylov Subspace Method with Relaxed Convergence Criterion,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, No. 5, pp. 1537-1552, Sep. 2015, DOI: 10.1108/COMPEL-02-2015-0075 (査読有り)
- ④ 圓谷友紀, 岡本吉史, 里周二: 「辺有限要素法による周波数領域電磁界解析から得られる複素対称線形方程式におけるマルチカラーオーダーリングを使用した前処理付き COMRTR 法の並列性能」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 12, pp. 765-773 (2015), DOI: 10.1541/ieejpes.135.765 (査読有り)
- ⑤ Tomonori Tsuburaya, Yoshifumi Okamoto, and Shuji Sato, “Parallelization of Preconditioned MRTR Method with Eisenstat’s Technique by Means of Algebraic Multicolor Ordering,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, No. 3-7206505, Mar. 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2360036 (査読有り)
- ⑥ Yoshifumi Okamoto, Yu Matsubayashi, Shinji Wakao, and Shuji Sato, “Material-density-based Topology Optimization with Magnetic Nonlinearity by Means of Stabilized Sequential Linear Programming: SLPSTAB,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, No. 3-7207804, Mar. 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2361360 (査読有り)
- ⑦ Tomonori Tsuburaya, Yoshifumi Okamoto, Koji Fujiwara, and Shuji Sato, “Performance of Preconditioned Linear Solvers Based on Minimum Residual for Complex Symmetric Linear Systems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 2-7013704, Feb. 2014, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2281410 (査読有り)

- ⑧ **Yoshifumi Okamoto**, Yusuke Tominaga, Shinji Wakao, and Shuji Sato, "Improvements in Material-density-based Topology Optimization for 3-D Magnetic Circuit design by FEM and Sequential Linear Programming Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 2-7017004, Feb. 2014, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285261 (査読有り)
- ⑨ **Yoshifumi Okamoto**, Yusuke Tominaga, Shinji Wakao, and Shuji Sato, "Topology Optimization of Rotor Core Combined with Identification of Current Phase Angle in IPM Motor Using Multistep Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 2-7017904, Feb. 2014, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285580 (査読有り)
- [学会発表] (計 17 件)
- ① 圓谷友紀, **岡本吉史**, 里周二: 「各種オーダーリングを適用した並列化ブロック ICCG 法の特質」, 平成 28 年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-015, RM-16-015, pp. 81-86, 2016 年 1 月 20 日 (富士通本社, 東京都港区)
- ② Tomonori Tsuburaya, **Yoshifumi Okamoto**, and Shuji Sato, "Parallelization of Preconditioned MRTR Method Combined with Block-multicolor Ordering Supported by Level Structure Arising in RCM ordering," *Proceedings of the 20th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, COMPUMAG 2015, Montréal, Canada, 2015 年 6 月 28 日~7 月 2 日
- ③ **Yoshifumi Okamoto**, Shinji Wakao, and Shuji Sato, "Extension of Topology Optimization Method Based on Regularized Level Set Function to Solving 3-D Electromagnetic Field System," *Proceedings of the 20th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, COMPUMAG 2015, Montréal, Canada, 2015 年 6 月 28 日~7 月 2 日
- ④ 圓谷友紀, **岡本吉史**, 里周二: 「RCM オーダリングで現れるレベル構造を援用したブロックマルチカラーオーダーリングによる前処理付き MRTR 法の並列化に関する検討」, 平成 27 年電気学会全国大会, 12H-C4: 静止器 解析, 5-057, Vol. 5, p. 99, 2015 年 3 月 24 ~26 日 (東京都市大学, 東京都世田谷区)
- ⑤ **岡本吉史**, 若尾真治, 里周二: 「レベルセット関数の移流に基づく電磁界問題最適化手法の改良に関する研究」, 平成 27 年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-15-043, RM-15-035, pp. 57-62, 2015 年 3 月 5, 6 日 (宮古島マリンターミナル, 沖縄県宮古島市)
- ⑥ 圓谷友紀, **岡本吉史**, 里周二: 「代数マルチカラーオーダーリングによる並列化前処理付き線形解法に基づく回転機の高速度有限要素解析」, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会 (CMD2014) 講演資料, No. 0206, 2014 年 11 月 23 日 (会場: 岩手大学, 岩手県盛岡市)
- ⑦ **岡本吉史**, 若尾真治, 里周二: 「レベルセット関数の移流による電磁界システム最適化問題の求解」, 平成 26 年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-14-73, RM-14-89, pp. 43-48, 2014 年 9 月 25 日 (会場: 宇都宮大学 陽東キャンパス, 栃木県宇都宮市)
- ⑧ 圓谷友紀, **岡本吉史**, 里周二: 「RCM オーダリングから得られるレベル構造を用いたブロック代数マルチカラーオーダーリングによる ICCG 法の並列化」, 平成 26 年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-14-69, RM-14-85, pp. 23-28, 2014 年 9 月 25 日 (会場: 宇都宮大学 陽東キャンパス, 栃木県宇都宮市)
- ⑨ **Yoshifumi Okamoto**, Koji Fujiwara, Akihisa Kameari, Tomonori Tsuburaya, and Shuji Sato, "Fast Nonlinear Finite Element Analysis Using Krylov Subspace Method with Relaxed Convergence Criterion," *the 16th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, p. 38, Graz, Austria, 2014 年 9 月 14~17 日 (招待講演)
- ⑩ Tomonori Tsuburaya, **Yoshifumi Okamoto** and Shuji Sato, "Parallelized Preconditioned MRTR Method with Eisenstat's Technique Supported by Algebraic Multicolor Ordering," *Proceedings of the 16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, PE2: 2, CEFC 2014, Annecy, France, 2014 年 5 月 25~28 日
- ⑪ **Yoshifumi Okamoto**, Yu Matsubayashi, Shinji Wakao, and Shuji Sato, "Material-density-based Topology Optimization for 3-D Magnetic Circuits with Magnetic Nonlinearity," *Proceedings of the 16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, OE3: 5, CEFC 2014, Annecy, France,

2014年5月25～28日

- ⑫ **岡本吉史**, 若尾真治, 里周二: 「材料密度ベースの位相最適化における逐次線形計画法の収束特性改善」, 平成26年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-14-017, RM-14-017, pp. 7-12, 2014年1月24日(会場: 東京工科大学八王子キャンパス, 東京都八王子市)
- ⑬ 圓谷友紀, **岡本吉史**, 里周二: 「ブロック化前処理を用いた並列化実対称線形解法に関する基礎検討」, 平成26年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-14-010, RM-14-010, pp. 43-48, 2014年1月23日(会場: 東京工科大学八王子キャンパス, 東京都八王子市)
- ⑭ 松林祐, 永野拓身, 若尾真治, **岡本吉史**: 「磁気回路設計における解の多様性向上のための二段階位相最適化手法」, 平成25年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-13-063, RM-13-077, pp. 23-28, 2013年9月26日(秋田市にぎわい交流館, 秋田県秋田市)
- ⑮ 圓谷友紀, **岡本吉史**, 藤原耕二, 里周二: 「周波数領域有限要素解析より得られる複素対称線形方程式に対する前処理付 COMRTR 法の有効性」, 平成25年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-13-060, RM-13-074, pp. 7-12, 2013年9月26日(秋田市にぎわい交流館, 秋田県秋田市)
- ⑯ Tomonori Tsuburaya, **Yoshifumi Okamoto**, Koji Fujiwara, and Shuji Sato, “Convergence Characteristics of Preconditioned Linear Solvers Based on Minimum Residual for Complex Symmetric Linear Systems,” *Proceedings of the 19th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, COMPUMAG 2013, Budapest, Hungary, 2013年7月4日
- ⑰ **Yoshifumi Okamoto**, Yusuke Tominaga, Shinji Wakao, and Shuji Sato, “Topology Optimization of an IPM Motor Flux Barrier Based on Current Phase Angle Using a Multistep Evolutionary Algorithm,” *Proceedings of the 19th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, COMPUMAG 2013, Budapest, Hungary, 2013年7月4日

[その他]

ホームページ等

<http://information-electromagnetics.weebly.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 吉史 (OKAMOTO, Yoshifumi)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号: 40415112