

令和元年6月20日現在

機関番号：32675
 研究種目：基盤研究(C)（一般）
 研究期間：2016～2018
 課題番号：16K06240
 研究課題名（和文）電磁界数値解析とトポロジー最適化を併用した電気機器の革新的最適設計システムの構築

研究課題名（英文）Building Innovative Optimal Design System for Electrical Machines Using Combination of Numerical Electromagnetic Field Computation with Topology Optimization

研究代表者
 岡本 吉史（OKAMOTO, Yoshifumi）
 法政大学・理工学部・教授

研究者番号：40415112
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：実際の設計現場において、トポロジー最適化を導入するため、本研究課題では、主として、次の3つの項目：「（1）感度解析ベースのトポロジー最適化手法の高速化」、 「（2）時間領域トポロジー最適化手法の開発」、 「（3）磁気ヒステリシス特性測定装置の開発」に取り組み、それぞれの研究内容について、予定通り完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低炭素化社会を実現すべく、地球環境に配慮した高効率電気機器の開発が行われている。通常、実設計の前段階で、有限要素法等の電磁界数値解析を用いた電気機器特性の把握が行われており、所望の特性を実現するまでカットアンドトライ工程が実施される。本研究では、工程の自動化と高い自由度で磁気回路を模擬できるトポロジー最適化手法に着眼し、本手法の未到達項目（磁気ヒステリシス・時間領域問題への適用）を解決し、電気機器の性能を限界まで高められる革新的最適設計システムの構築を目的とする。結果、短時間で高効率な電気機器を開発することが可能となり、低炭素化社会の実現と国内の電気機器技術開発力に寄与することが予見される。

研究成果の概要（英文）：To apply the topology optimization to the scene for the practical design of electrical machines, the next three topics which are “A: Development of high-speed topology optimization method based on sensitivity analysis”, “B: Development of topology optimization method in time domain electromagnetic field” and “C: Building measurement system for magnetic hysteresis” has been mainly achieved.

研究分野：電気機器工学，設計最適化

キーワード：電気機器工学 電磁界数値解析 トポロジー最適化 磁気非線形性 磁気ヒステリシス 時間領域随伴変数法 大規模高速化

1. 研究開始当初の背景

近年、低炭素化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。通常、実設計の前段階では、有限要素法等の電磁界数値解析を用いた電気機器特性の把握が行われており、所望の特性を実現するまでカットアンドトライ方式の工程が継続的に実施される。本研究では、工程の自動化と高い自由度で磁気回路を模擬できるトポロジー最適化手法に着眼し、電気機器設計のために必要なトポロジー最適化の未到達項目を解決し、モータ等の電気機器の性能を限界まで高めることができる革新的最適設計システムの構築を目的とする。その結果、短時間の工程で高効率な電気機器を開発することが可能となり、低炭素化社会の実現と国内の電気機器技術開発力に大きく寄与することが予見される。

2. 研究の目的

実際の設計現場において、トポロジー最適化を導入するため、本研究課題では、主として、次の3つの項目：「(1) 感度解析ベースのトポロジー最適化手法の高速化」、「(2) 時間領域トポロジー最適化手法の開発」、「(3) 磁気ヒステリシス特性測定装置の開発」に対して、重点的に取り組んだ。

(1) 感度解析ベースのトポロジー最適化手法の高速化

トポロジー最適化問題における設計変数の数は、設計領域に含まれる有限要素節点の数と等価となる。すなわち、使用する分割図によっては、数十万を超える設計変数を包含した大規模最適化問題となる。それゆえ、進化的アルゴリズムのような乱数を使用した方法よりも、目的関数、制約条件の勾配を使用できる感度解析ベースの方法が好ましい。そこで、筆者らは、Krister Svanberg 教授が提案している Method of Moving Asymptotes (MMA) を、筆者らの研究室で実装を試み、その性能について評価を行うことを目的とする。

(2) 時間領域トポロジー最適化手法の開発

通常、トポロジー最適化手法に関する研究報告には、構造分野では線形弾性解析、電磁界分野では静磁界解析が、主体的である。実際の電気機器は、時間変動する電磁界を応用したものが殆どであり、電磁界の時間変動性を考慮した目的関数（例えば、渦電流損や電動機のトルク等）の感度（設計変数に対する勾配）を求める必要があり、それを使用したトポロジー最適化が重要となる。本項目では、「磁気非線形性を考慮した時間領域随伴変数法」による目的関数の感度解析手法の確立、ならびに、それらを MMA 等の非線形最適化手法へ受け渡した際のトポロジー最適化手法の実用性に関する検討を行う。

(3) 磁気ヒステリシス特性測定装置の開発

変圧器、電動機、発電機等の電気機器には、鉄芯が至るところで使用されている。鉄芯内部に時間的に変化する磁界が印可されると、磁束密度と磁界は初期磁化曲線を辿って、磁気ヒステリシスカーブを描く。昨今、低鉄損な電磁鋼板が、多数開発されているが、鉄損の評価は、電気機器の効率に大きく影響を与える指標であるため、正確に評価することが求められている。本研究課題では、最終的に、磁気ヒステリシス現象を適用することで、鉄芯の損失をより明確にトポロジー最適化へ導入することを目的としている。その前段階として、各種電磁鋼板の磁気ヒステリシス特性の測定が重要となる。本項目では、磁気ヒステリシス特性の測定装置を、我々の研究室で構築することを目的としている。

3. 研究の方法

前章で定義した、3つの研究項目を達成するために、次のような方法により、研究の円滑な進捗を図った。

(1) 感度解析ベースのトポロジー最適化手法の高速化

MMA を実際に開発する過程において、その提案者である Krister Svanberg 教授と、直接的にコンタクトをとり、その性能について、Svanberg 教授のオリジナルコードの性能と比較し、概ね、同等の性能を達成していることを確認できた。我々の研究室で実装した MMA のコードが、確実に動作していることを十分に検証して、実際のトポロジー最適化手法に導入した。

(2) 時間領域トポロジー最適化手法の開発

時間領域随伴変数法の定式化の流れ、また、磁気非線形性の考慮法について、定式化ベースで十分検討を行った。次に、我々で定式化した磁気非線形性を考慮した時間領域随伴変数法を実装し、前進差分と評価することで、その妥当性を十分に検証した。その後、感度を MMA 等の非線形最適化手法へ受け渡し、時間領域トポロジー最適化を試みた。以上より、定式化から実装まで、確実に完成していることを精緻に確認しながら、研究を着実に進めた。

(3) 磁気ヒステリシス特性測定装置の開発

ファンクションジェネレータから出力される信号が、正確にアンプを通して増幅されていることを確認し、さらに、複数の計測器で同じ波形を測定することによって、計測値の妥当性を確実に検証しながら実験を進めた。また、同志社大学 石原好之 名誉教授、同学 藤原耕二 教授に、適宜、ご指導頂きながら、リング試料の測定、単板磁気試験器の開発まで進めた。

4. 研究成果

(1) 感度解析ベースのトポロジー最適化手法の高速化

図1に最適化モデルを示す。 Ω_d 内部で生成されるロータ体積を指定値以下に維持しながら、

平均トルクを最大化するロータ構造の導出が最適化目標である．三次元成形が可能な圧粉磁芯の磁気特性を $\nu_e(\mathbf{B}^2)$ に割り当てる．

最適化結果を図 2 に示す．最適化の初期構造を図 2 (b) に示すように，グレイスケールとした．図 2 (c) のように，反復 2 回目で具体的な構造が得られ，反復 58 回目で収束解が得られた．図 2 (d) の構造は，図 2 (a) に示した基準構造と大きくかけ離れた構造となっている．今後，トポロジー最適化を 3D プリンタと併用することで，新たな設計システムを構築できる可能性がある．

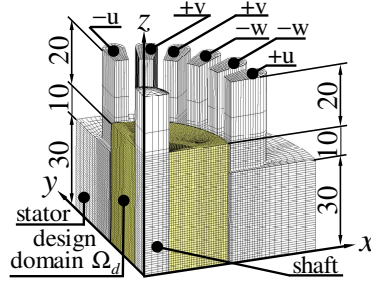


図 1 最適化モデル

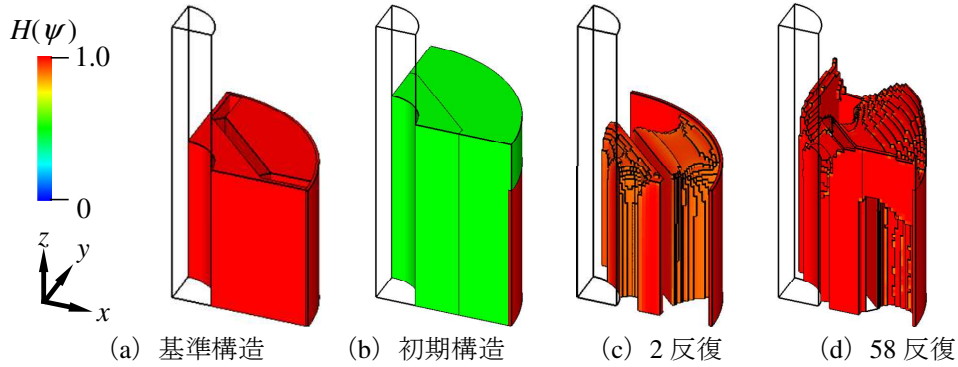


図 2 IPM モータのロータ構造最適化結果 (MMA)

(2) 時間領域トポロジー最適化手法の開発

時間領域有限要素法を用いた非線形渦電流解析では，後退 Euler 法等の陰解法により，時間増分方向に対して電磁界が求まる．一方，時間領域随伴変数法は，最終時刻ステップから初期時刻に向けて，終端値問題を解く必要がある．まず，(1) 式によって，最終時刻ステップの随伴変数 λ_N を定める．次に，(2) 式を，最終時刻ステップから初期時刻方向に時刻を遡る．

$$M^T \lambda(t_N) = - \left. \frac{\partial w}{\partial \mathbf{A}} \right|_{t=t_N} \quad (1)$$

$$\left(K + \frac{\partial K}{\partial \mathbf{A}} \mathbf{A} \right)^T \lambda(t) - C^T \dot{\lambda}(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w}{\partial \mathbf{A}} \right) - \frac{\partial w}{\partial \mathbf{A}} \quad (2)$$

ここで， K, C は有限要素法弱形式における剛性行列，減衰行列を示す．また， \mathbf{A} は磁気ベクトル， $\lambda(t)$ は時刻 t における随伴変数， w は時間積分型の目的関数における被積分関数を示す．本定式化では，左辺第一項目に磁気非線形項が付加されている．以上の定式化を実装し，感度解析の性能を検証した．

渦電流解析における時間領域随伴変数法の精度検証用モデルを図 3 に示す．本モデルは二次元軸対称場を想定しており，巻線領域に交流電流 $I = I_m \sin \omega t$ AT を印加する． Ω_t に内在する材料を導体とし，比透磁率を $\mu_r = 1$ ，導電率を $\sigma = 10^6$ S/m とする．また， Ω_d に内在する材料を非導電性材料として，比透磁率 $\mu_r = 1,000$ ，導電率を $\sigma = 0$ とする．目的関数は，積分区間 $[0, t_{\max}]$ における Ω_t 内の渦電流損の時間積分値とする．従って，目的関数 W_0 は (3) 式のようになる．

$$W_0 = \int_0^{t_{\max}} \left(\int_{\Omega_t} \frac{\mathbf{J}_e^2}{\sigma} dV \right) dt = \int_0^{t_{\max}} w(\psi, \dot{\mathbf{A}}) dt \quad (3)$$

ここで， \mathbf{J}_e は渦電流密度ベクトルで，(4) 式のようになる．

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (4)$$

本モデルの有限要素メッシュの分割図を図 4 に示す．全領域の節点数は 749，要素数は 1,425，設計領域内の節点数は 132，要素数は 208 である．有限要素法の未知変数の総数は 687 である．時間領域随伴変数法の計算精度について，前進差分法 (FDM) と比較する．前進差分法による感度の計算式は，次式のようになる．

$$\frac{\partial W_0}{\partial \psi} \approx \frac{W_0(\psi + \Delta \psi) - W_0(\psi)}{\Delta \psi} \quad (5)$$

図5に、時間分割数を変更した場合の時間領域随伴変数法から得られた感度分布の変化を示す。時間分割数を変化させた場合の感度分布にほぼ差がないことから、トポロジー最適化の結果として得られる構造も、同様なトポロジーが得られると推測できる。

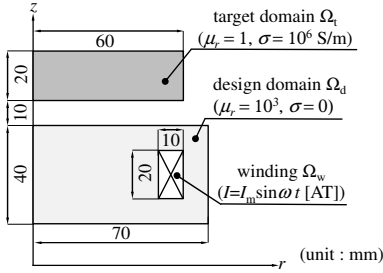


図3 時間領域随伴変数法の精度検証用モデル

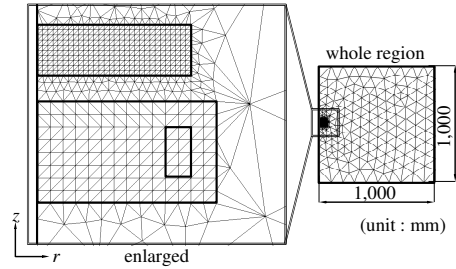


図4 時間領域随伴変数法の精度検証用モデルのメッシュ分割図

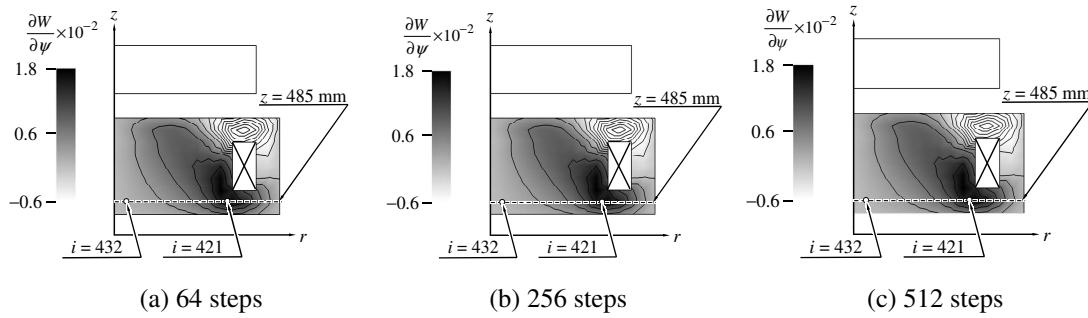


図5 時間領域随伴変数法の感度解析結果

(3) 磁気ヒステリシス特性測定装置の開発

鉄損を評価するためには、高精度に磁気ヒステリシス特性を測定する必要がある。本研究室では、図6に示す単板磁気試験器 (Single Sheet Tester, 以降 SST) を独自に開発した。図7に SST を含めた電気回路を示す。各時刻における磁界 $H(t)$ は、次式に示す励磁電流法を使用して算出する。

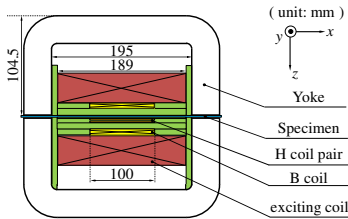
$$H(t) = \frac{n_1}{l} i_1(t) \quad (6)$$

ここで、 n_1 は一次側コイルの巻数、 $i_1(t)$ は一次側コイルの電流、 l は平均磁路長を示す。一方、磁束密度 $B(t)$ については、次式に示すように、ファラデーの電磁誘導の法則を変形した式を用いる。

$$B(t) = -\frac{1}{n_2 S} \int v_2(t) dt \quad (7)$$

ここで、 n_2 は二次側コイルの巻数、 $v_2(t)$ は二次側誘起電圧、 S は試料断面積を示す。

本報告で取り扱う試料は 35A300 である。図8に、測定された磁気ヒステリシス特性を示す。なお、計測されたカーブは、フーリエ級数展開し、29次成分までを合算した波形である。概ね、定性的な特性が得られていることがわかる。本研究課題では、磁気特性測定装置の基本的な部分を構築できたのみで、今後、 $B(t)$ が正弦波となるように、 $H(t)$ の波形自動制御システムを構築し、プレイモデル等のヒステリシスモデリング手法へ適用することで、磁気ヒステリシスを考慮したトポロジー最適化手法を開発する予定である。



(a) SST の寸法図



(b) SST の概観

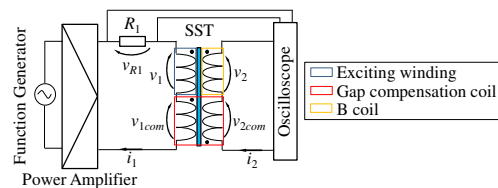
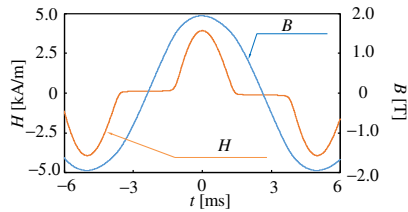
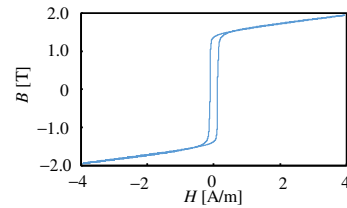


図7 SST を含めた測定系

図6 試作した SST



(a) 磁界・磁束密度の時間変化



(b) 磁気ヒステリシス特性

図 8 測定結果

最後に、本研究プログラム遂行のための研究費を支給頂きました日本学術振興会へ感謝の意を表します。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Reona Hoshino, **Yoshifumi Okamoto**, and Shinji Wakao, “Topology Optimization of Magnetic Shielding Using Level-set Function Combined with Element-based Topological Derivatives,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 718-729 (2018), DOI: 10.1108/COMPEL-12-2016-0524 (査読有り)
- ② **Yoshifumi Okamoto**, Hiroshi Masuda, Yutaro Kanda, Reona Hoshino, and Shinji Wakao, “Improvement of Topology Optimization Method Based on Level Set Function in Magnetic Field Problem,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 630-644 (2018), DOI: 10.1108/COMPEL-12-2016-0528 (査読有り)
- ③ Tomonori Tsuburaya, **Yoshifumi Okamoto**, and Zhiqi Meng, “Improvement of Block IC Preconditioner Using Fill-in Technique for Linear Systems Derived from Finite-Element Method Including Thin Elements,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 3-7202504 (2018), DOI: 10.1109/TMAG.2017.2763958 (査読有り)
- ④ **Yoshifumi Okamoto**, Reona Hoshino, Shinji Wakao, and Tomonori Tsuburaya, “Improvement of Torque Characteristics for a Synchronous Reluctance Motor Using MMA-based Topology Optimization Method,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 3-7203104 (2018), DOI: 10.1109/TMAG.2017.2762000 (査読有り)
- ⑤ Kazuki Hirono, Reona Hoshino, Tsuyoshi Kamiya, Shinji Wakao, **Yoshifumi Okamoto**, and Woojin Jeon, “Design Optimization of Primary Core in Induction Heating Roll by the Combination of 2D Level-set Method and 3D Coupled Magnetic-Thermal FEM,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 7, No. 1, pp. 64-72 (2018), DOI: 10.1541/ieejia.7.64 (査読有り)
- ⑥ Hiroshi Masuda, Yutaro Kanda, **Yoshifumi Okamoto**, Kazuki Hirono, Reona Hoshino, Shinji Wakao, and Tomonori Tsuburaya, “Topology Optimization of Induction Heating Model Using Sequential Linear Programming Based on Move Limit with Adaptive Relaxation”, *Open Physics*, Vol. 15, pp. 845 – 850 (2017), DOI: 10.1515/phys-2017-0100 (査読有り)
- ⑦ **Yoshifumi Okamoto**, Hiroshi Masuda, Yutaro Kanda, Reona Hoshino, and Shinji Wakao, “Convergence Acceleration of Topology Optimization Based on Constrained Level Set Function Using Method of Moving Asymptotes in 3-D Nonlinear Magnetic Field System,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 6-7206204 (2017), DOI: 10.1109/TMAG.2017.2669198 (査読有り)

[学会発表] (計 51 件)

- ① 荒瀬浩平, 増田弘, 早津政人, **岡本吉史**, 若尾真治: 「簡易永久磁石モータモデルにおけるレベルセット法と数値計画法に基づくトポロジー最適化の性能評価」, 平成 31 年電気学会全国大会, G305-A2 セッション: 静止器 解析 (II), 5-137, Vol. 5, p. 241, 2019 年 (北海道, 北海道科学大学)
- ② 鈴木滯也, 山下祐輝, **岡本吉史**, 貝森弘行, 若尾真治: 「トポロジー最適化による複数の駆動条件を考慮した電気学会 G モデルのリラクタンストルク改善に関する検討」, 平成 31 年電気学会全国大会, G304-A4 セッション: 回転機 解析 (II), 5-080, Vol. 5, p. 136, 2019 年 (北海道, 北海道科学大学)
- ③ 澤田浩幸, 鈴木滯也, **岡本吉史**, 若尾真治: 「電磁気・構造連成トポロジー最適化による同期リラクタンスマータのロータ構造最適化」, 平成 31 年電気学会全国大会, G304-C1 セッション: 回転機 リラクタンスマータ, 5-064, Vol. 5, p. 108, 2019 年 (北海道, 北海道科学大学)
- ④ 増田弘, **岡本吉史**, 若尾真治: 「トポロジー最適化によるポット型リアクトルの直流重畳インダクタンスの特性改善—一定常状態における設計感度の導出—」, 平成 31 年電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-19-009, RM-19-009, pp. 43-48, 2019 年 (岡山県, 岡山大学津

- 島キャンパス)
- ⑤ Furuya Ryosuke, Shinji Wakao, and **Yoshifumi Okamoto**, “Design Sensitivity Analysis for Topology Optimization Based on Frequency-domain Adjoint Variable Method with Magnetic Nonlinearity,” *Digests of the 18th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, TAO3-5, ID: 1316, Hangzhou, China, 2018 年
 - ⑥ **Yoshifumi Okamoto**, and Shinji Wakao, “Effect of Approximated Characteristic Function on Rotor Structure Derived from Topology Optimization,” *Digests of the 18th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, WAP1-1, ID: 1340, Hangzhou, China, 2018 年
 - ⑦ Hiroshi Masuda, **Yoshifumi Okamoto**, and Shinji Wakao, “Topology Optimization of Pot-type Reactor in Time Domain Nonlinear Magnetic Field,” *Digests of the 18th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, WBP2-4, ID: 1051, Hangzhou, China, 2018 年
 - ⑧ Hiroyuki Kuwahara, Atsushi Ando, Yuya Maruyama, Shinji Wakao, Masahide Takahashi, Makoto Yagi, Tamio Okutani, and **Yoshifumi Okamoto**, “Design Optimization of Conductor Plate in Magnetic Sensor for Enhancing Performance on Detection of Rail Wheel,” *Abstracts of the 18th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, p. 43, Graz, Austria, 2018 年
 - ⑨ Hiroshi Masuda, **Yoshifumi Okamoto**, and Shinji Wakao, “Topology Optimization of Spherical Shell Shielding in Time Domain Electromagnetic Field,” *Abstracts of the 18th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, p. 20, Graz, Austria, 2018 年
 - ⑩ 鈴木 澯也, **岡本吉史**, 若尾真治: 「トポロジー最適化による永久磁石補助付き同期リラクタンスモータのトルク特性改善」, 第 13 回最適化シンポジウム 2018, No. 116, pp. 31-32, 2018 年 (京都府, 京都リサーチパーク東地区 1 号館)
 - ⑪ 貝森弘行, **岡本吉史**, 若尾真治: 「同期リラクタンスモータモデルを用いたトポロジー最適化によるトルクリプル低減要因に関する検討」, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No. 3-25, pp. 177-182, 2018 年 (神奈川県, 横浜国立大学)
 - ⑫ Reiya Suzuki, **Yoshifumi Okamoto**, and Shinji Wakao, “Average-torque-maximization of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Using Topology Optimization,” *Proceedings of the 15th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*, pp. 144-145, Innsbruck, Austria, 2018 年

学会発表論文他 39 件

[その他]

ホームページ等

法政大学 岡本研究室: <http://okamotoylab.ws.hosei.ac.jp/wp/>

早稲田大学 若尾研究室: <http://www.eb.waseda.ac.jp/wakao/>

福岡大学 圓谷友紀 助教: <http://ce.tec.fukuoka-u.ac.jp/~tsuburaya/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 若尾 真治

ローマ字氏名: WAKAO, Shinji

所属研究機関名: 早稲田大学

部局名: 理工学術院

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 70257210

研究分担者氏名: 圓谷 友紀

ローマ字氏名: TSUBURAYA, Tomonori

所属研究機関名: 福岡大学

部局名: 工学部

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 50782330

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。