

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02132

研究課題名（和文）実規模機器に対するマルチフィジックス高速トポロジー最適化設計システムの創成

研究課題名（英文）Creation of high-speed topology optimization system for practical electric machinery design with consideration of multiphysics

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：環境エネルギー問題の解決に向け、徹底した省エネルギー化、特に、国内の年間総消費電力量の半分以上を占めている電気エネルギーから動力などへの電磁エネルギー変換における大幅な高効率化を実現することが重要となる。このような背景のもと、電磁エネルギー変換機器の全く新しい高度化設計技術の創成を目的として、電磁現象に加え応力特性などの電気機器におけるマルチフィジックスを精確に模擬可能であると同時に、これに革新的なトポロジー最適化技術を開発・併用した電気機器設計のための強力な計算機支援システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果であるトポロジー最適化での「大域的最適解の探索手法の開発」、「時間領域最適化問題の高速求解」などは電気機器設計の飛躍的な高度化に大きく貢献する内容であり、学術的意義は大きい。また、本研究で開発した最適化設計支援システムにより、膨大な計算負荷がネックとなり電気機器設計分野において普及が進まなかったトポロジー最適化を、汎用的なワークステーションの環境下で実用化することが可能となった。開発した高速計算機支援システムの応用可能な分野の裾野は広く、もの作りの現場で高度な最適化設計支援システムが広く活用されることとなり、我が国の産業分野にける競争力強化への寄与が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to solve the environmental energy problem, it is essential to achieve significantly higher efficiency in the conversion of electromagnetic energy from electrical energy, which accounts for more than half of the total annual electric power consumption in Japan, to mechanical energy. Against this background, with the aim of creating new advanced design technologies for electromagnetic energy conversion equipment, we have developed the innovative topology optimization technologies to build a powerful computational support system for electrical equipment design where we have accurately simulated multiphysics such as electromagnetic phenomena and stress characteristics.

研究分野：電気工学

キーワード：トポロジー最適化 電気機器設計 磁界解析 深層学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化を背景に、環境エネルギー問題が一層深刻化している。国内の年間消費電力量は1万億 kWh 超と見積もられており、特に電気機器の代表であるモータの消費電力がその半分以上を占めている。したがって、徹底した省エネルギー化、特に電気機器による電気エネルギーから動力・熱エネルギーへの電磁エネルギー変換における大幅な高効率化の要求は、喫緊の課題として重要度が益々高まっている。このような背景のもと、高効率化をはじめとする電気機器設計技術の一層の高度化が求められている。

電気機器設計においては、電磁界数値解析技術の発展と計算機性能の飛躍的向上に伴い、コンピュータの援用による最適化設計技術が必要不可欠となっている。中でも、設計空間の材料配置をパラメータとするトポロジー最適化は、これまでの寸法最適化や形状最適化と異なり機器のトポロジー自体を自由に变化させて最適解を探索するため、機器効率向上の観点から既成概念の範疇を超えた革新的な構造を導く可能性を含んでいる。一方、トポロジー最適化では、特に、複数の物理現象が複雑に絡み合う電気機器におけるマルチフィジックス条件下において大域的な最適解の探索に膨大な計算負荷を要するなど、実用面での難点が指摘されていた。

2. 研究の目的

以上の背景のもと本研究では、本グループのこれまでの開発手法をさらに展開すべく、電磁現象に加えて応力特性などの電気機器におけるマルチフィジックスを精確に模擬できると同時に、より大域的な解を高速に探索可能とする革新的なトポロジー最適化技術の開発し、産業分野における電気機器設計の飛躍的な高度化に大きく貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、「探索空間が広範となり膨大な計算負荷がかかると同時に、一般に多峰性を有する目的関数に対し局所的な解に捕われ易いという難点の克服」および「複数の物理現象が複雑に絡み合う電気機器におけるマルチフィジックスを包含した実規模問題へのトポロジー最適化の展開」の二つの課題に取り組み、トポロジー最適化技術の実用化を飛躍的に向上させる。課題解決に向けた具体的な方策として、大別して下記2項目に焦点を当てて研究開発を行った。

- (1) 大域的最適解の効率的探索を目指したトポロジー最適化における深層学習の活用
- (2) 時間領域トポロジー最適化問題の求解および磁界・構造連成問題を考慮したトポロジー最適化

4. 研究成果

- (1) 大域的最適解の効率的探索を目指したトポロジー最適化における深層学習の活用

電気機器設計の構造最適化のうち、設計の自由度が高いトポロジー最適化は、設計者の思考を超えた新規の形態を得られる可能性がある反面、実製作に不適切な形状が獲得されてしまうという懸念がある。この対策として、解探索に勾配法を用いるレベルセット法の採用が考えられるが、その初期値依存性より、大域的な解の獲得のためには、多くの初期条件による試行が必要であるという課題が残されていた。一方で、GPUなどのハードウェアの高性能化に伴い、高次元データに対して、ニューラルネットワークが適用可能となり、その応用が活発化している。中でも、Auto-Encoder は低次元の潜在変数と呼ばれる中間層をもつことで、データの特徴を効果的に獲得できるニューラルネットワークの構造であり、データの次元圧縮などに用いられてきた。

本研究では、Auto-Encoder によって次元圧縮された低次元空間での勾配計算と、レベルセット法による実設計空間での勾配計算を組み合わせた最適化手法を開発した。圧縮された低次元探索空間において元の探索空間における目的関数の多峰性を緩和して、低次元探索空間での最適化結果を初期値として元の探索空間での最適化を行うことで解の精度を担保し、局所解から抜け出した大域解を効率よく得ることが可能となった。具体的な検証例題として磁気シールドモデルを取り上げ、磁性材料面積とシールド効果（磁気エネルギーの低減効果）の2目的最適化を行い、開発手法の有効性を検証した。1,770パターンの初期値から従来のレベルセット法を用いて得た解群と、僅か36パターンの初期値から探索を開始した開発手法のパレート解分布の比較を図1に示す。

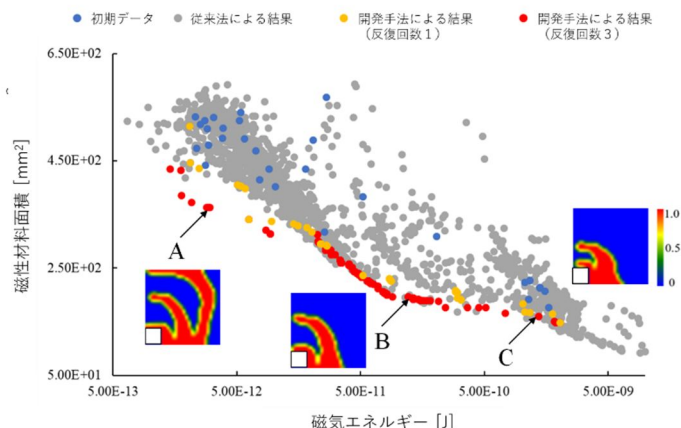


図1 従来手法と開発手法の比較

開発手法により、初期学習データにはない良好なパレート解が獲得できており、さらに最適化計算を繰り返すことで、従来法よりも優れている前進した、すなわち大域的なパレート解が得られた。また、図 1 中に示す獲得されたシールド形状を見ても、両目的関数に従って適切な多層シールド構造が確認でき、開発手法の妥当性が示された。さらに、検証例題において、開発手法は従来手法と比べて約 88% の計算時間削減に成功しており、解探索の大幅な高速化も達成した。

なお本研究では、最終的な開発手法に至る過程で、時系列データを扱える Long Short-Term Memory (LSTM) を用いた Encoder-Decoder とレベルセット法の併用による磁性体の形状最適化問題の解探索プロセスの高速な復元技術の開発や、条件付深層生成モデルである Conditional Variational Auto-Encoder (CVAE) の磁気回路設計への適用も行い、トポロジー最適化における大域的最適解の効率的探索に資する深層学習の活用法についても明らかにした。

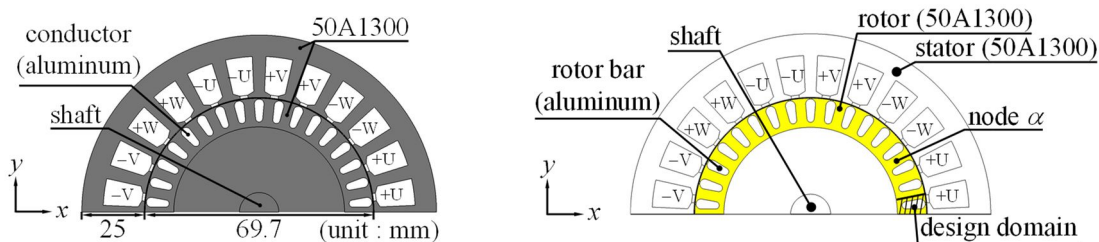
(2) 時間領域トポロジー最適化問題の求解および磁界・構造連成問題を考慮したトポロジー最適化

Maxwell 方程式に基づく電磁界現象は、過渡状態を経て定常状態へ到達する。電気機器の特性解析では、定常状態における機器定数が必要になる場合が多く、さらには、鉄芯による磁気非線形特性の影響を忠実に考慮する必要がある。本研究では、かご型誘導電動機の時間方向の電磁界特性・鉄芯の磁気非線形特性を考慮し、さらには、二次導体の面積を基準モデルの値に維持しながら、平均トルクの最大化を行った。

解析モデルを図 2 (a)、(b) に示す。図 2 (a) は、基準モデル (電気学会 K モデル) である。また、図 2 (b) は、トポロジー最適化を実施する設計領域を示す。二次導体 1 スロット分を設計領域 (斜線部) として、全てのスロット領域へコピーする。設計領域では、空気・鉄芯・二次導体のエリアをマルチマテリアルレベルセット法により同定する。その結果、図 3 のような構造が得られた。ロータの回転方向 (反時計周り) に鉄芯が集中する構造となった。なお、本結果は、二種類のすべりを採用した場合における定常状態の平均トルク向上を目的として得られた結果である。

昨今、内部埋込式永久磁石同期電動機 (IPMSM) の高速回転化が積極的に実施されており、IPMSM のロータ部分に作用する応力が増加の一途を辿っている。それゆえ、電磁気的な物理量に加えて、機械的な応力に対する耐性を確保した設計のニーズが高まっている。本研究では、磁界に加えて、構造解析を連携することで、力学的な頑強性を担保したトポロジー最適化を提案・実施したので報告する。

解析モデルを図 4 に示す。車載用 IPMSM を対象としており、トポロジー最適化の設計領域を図 4 (b) に示す。斜線部で得られる鉄芯・フラックスバリアを一極分のなかでコピーし、一極において鏡面対称な構造が得られるように設定している。図 5 に最適化構造を示す。図 5 (a) は電磁気特性のみを考慮した結果であり、d 軸磁束を向上させるため永久磁石間に空隙が発生している。図 5 (b) は、電磁気・力学特性双方を考慮した設計最適化結果である。応力の集中する磁石間にトラス構造が得られており、効果的に応力低減とトルクを向上できる構造であることが明らかとなった。



(a) 電気学会モデル (b) トポロジー最適化モデル

図 2 誘導電動機の基準モデルとトポロジー最適化モデル

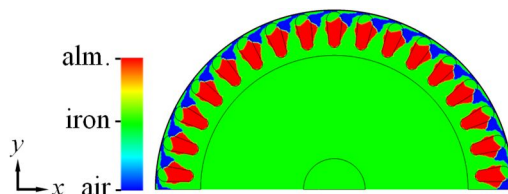
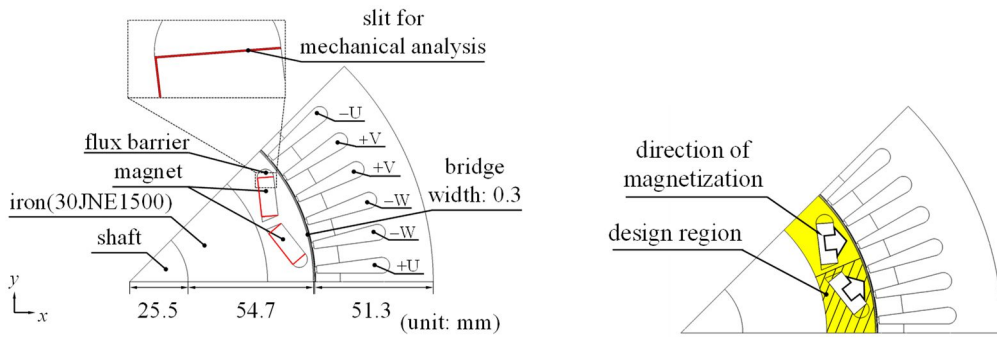


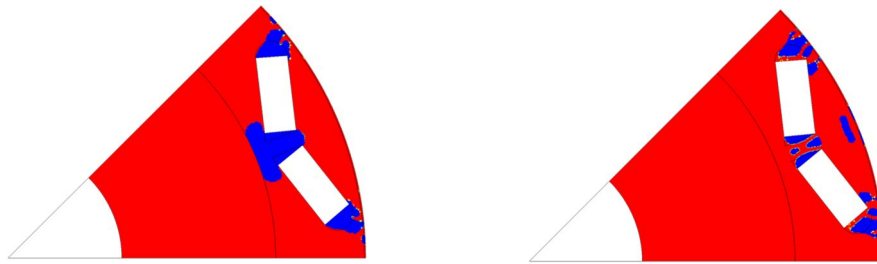
図 3 誘導電動機ロータ領域のマルチマテリアル最適化結果



(a) 車載用モータの基準モデル

(b) トポロジー最適化における設計領域

図4 解析モデル (IPMSM)



(a) 電磁気のみ

(b) 電磁気・力学連携

図5 トポロジー最適化から得られた IPMSM のロータ構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamashita Yuki, Okamoto Yoshifumi	4. 巻 56
2. 論文標題 Design Optimization of Synchronous Reluctance Motor for Reducing Iron Loss and Improving Torque Characteristics Using Topology Optimization Based on the Level-Set Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2019.2954468	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masuda Hiroshi, Okamoto Yoshifumi, Wakao Shinji	4. 巻 38
2. 論文標題 Multistage topology optimization of induction heating apparatus in time domain electromagnetic field with magnetic nonlinearity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 1009~1022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/COMPEL-10-2018-0386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oda Kanae, Kawamata Ryota, Wakao Shinji, Murata Noboru	4. 巻 57
2. 論文標題 Fast Multi-Objective Optimization of Magnetic Shield Shape by Combining Auto-Encoder and Level-Set Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2021.3074123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamashita Yuki, Koda Riku, Katayama Kazuya, Okamoto Yoshifumi	4. 巻 141
2. 論文標題 Multi-material Structural Optimization of IPM Motor Using Phased Application of Density and Level-set Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 729~737
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.141.729	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Kanae Oda, Ryota Kawamata, Shinji Wakao, Noboru Murata
2. 発表標題 Extraction of design information of magnetic circuit shape according to objective function values by Auto-Encoder
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoki Sudo, Takuya Yokoyama, Shinji Wakao, Keiichiro Kondo, Keigo Ukita
2. 発表標題 Fast magnetic field analysis by using nonconforming infinite edge element method with reference line
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重松宏希, 若尾真治, 牧野宏明, 竹内活徳, 松下真琴
2. 発表標題 同期リラクタンスモータのトルク向上を目指した回転子構造の形状最適化に関する一考察
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重松宏希, 若尾真治, 牧野宏明, 竹内活徳, 松下真琴
2. 発表標題 同期リラクタンスモータにおけるフラックスバリアの多目的形状最適化に関する一考察
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 風見浩之, 大倉寛ノ介, 角 和樹, 岡本吉史
2. 発表標題 LabVIEWによる波形自動制御機構を実装した単板磁気特性試験法に基づく磁気測定システムの開発に関する検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 子田 陸, 荒瀬浩平, 岡本吉史
2. 発表標題 実数値遺伝的アルゴリズムによるアウトロータ型同期電動機の鉄芯・永久磁石・磁化角の設計最適化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山一哉, 山下祐輝, 山野眞輝, 岡本吉史
2. 発表標題 時間領域随伴変数法を用いた磁界・電気回路強連成解析における設計感度解析に関する検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山野眞輝, 山下祐輝, 片山一哉, 岡本吉史
2. 発表標題 磁気非線形性を考慮した時間領域随伴変数法による誘導電動機の感度解析に関する検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下祐輝, 子田 陸, 片山一哉, 岡本吉史
2. 発表標題 最急降下法とレベルセット法を併用したトポロジー最適化手法によるIPMモータのマルチマテリアル構造最適化
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒瀬浩平, 子田陸, 岡本吉史
2. 発表標題 PDEフィルタを援用したトポロジー最適化によるアウトローター型SPMモータの構造複雑性低減に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 子田 陸, 山下祐輝, 岡本吉史
2. 発表標題 フーリエ級数展開を援用したマルチマテリアルトポロジー最適化手法の収束特性改善
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kawamata Ryota, Wakao Shinji, Murata Noboru, Okamoto Yoshifumi
2. 発表標題 Development of Encoder-Decoder Predicting Search Process of Level-set Method in Magnetic Circuit Design
3. 学会等名 COMPUMAG 2019 (the 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kawamata Ryota, Wakao Shinji, Murata Noboru
2 . 発表標題 Application of Conditional Variational Auto-Encoder to Magnetic Circuit Design with Magnetic Field Computation
3 . 学会等名 COMPUMAG 2019 (the 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masuda Hiroshi, Arase Kohei, Okamoto Yoshifumi, Wakao Shinji
2 . 発表標題 Multi-objective Topology Optimization of DC-based Reactor in Steady-state Time-domain with Magnetic Nonlinearity
3 . 学会等名 COMPUMAG 2019 (the 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kawamata Ryota, Wakao Shinji, Murata Noboru, Okamoto Yoshifumi
2 . 発表標題 Design Optimization of Magnetic Material Distribution by Using Encoder-Decoder with Additive Mixing for Design Conditions
3 . 学会等名 ISEF 2019 (19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sawada Hiroyuki, Suzuki Reiya, Okamoto Yoshifumi, Wakao Shinji
2 . 発表標題 Optimization of Rotor Structure for Synchronous Reluctance Motor Using Coupled Topology Optimization Based on Electromagnetic Field Analysis and Structural Mechanics
3 . 学会等名 ISEF 2019 (19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 小田奏絵, 川俣良太, 若尾真治, 村田 昇
2. 発表標題 多目的磁気回路設計におけるAuto-Encoderを用いた情報抽出に関する基礎的検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 重松宏希, 若尾真治, 村田昇, 牧野宏明, 竹内活徳, 松下真琴
2. 発表標題 Auto-Encoderによる応答局面近似を活用した同期リラクタンスモータの多目的位相最適化
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角和樹, 岡本吉史, 藤原耕二, 佐々木秀徳
2. 発表標題 Deep Neural Networkを用いた初期波形推定による単板磁気試験器における磁束波形制御の高速化に関する検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 子田陸, 岡本吉史
2. 発表標題 実数値遺伝的アルゴリズムによるリラクタンスモータの磁界・構造連携トポロジー最適化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山野眞輝, 片山一哉, 岡本吉史
2. 発表標題 レベルセット法によるかご型誘導電動機の時間領域マルチマテリアルトポロジー最適化
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山一哉, 山野眞輝, 岡本吉史
2. 発表標題 電磁界・三相交流回路強連成解析と数値計画法の併用による時間領域特性を考慮したIPMSMのトポロジー最適化
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Katayama, Masaki Yamano, Yoshifumi Okamoto
2. 発表標題 Sensitivity Analysis Using Time Domain Adjoint Variable Method for Topology Optimization of IPM Motor Supported by Finite Element Analysis Coupled with Three-phase Voltage Source
3. 学会等名 The 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Yamano, Kazuya Katayama, Yoshifumi Okamoto
2. 発表標題 Sensitivity-based Topology Optimization of Induction Motor in Time Domain with Magnetic Nonlinearity
3. 学会等名 The 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山野真輝, 片山一哉, 岡本吉史
2. 発表標題 時間領域随伴変数法を援用した誘導電動機のトポロジー最適化に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山一哉, 山野真輝, 岡本吉史
2. 発表標題 電磁界・三相交流回路強連成解析に基づく時間領域随伴変数法を用いたIPMモータのトポロジー最適化
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Shigematu, Shinji Wakao
2. 発表標題 Shape Optimization of Synchronous Reluctance Motor Using Sensitivity Information for Multiple Objective Functions
3. 学会等名 16th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡本 吉史 (Okamoto Yoshifumi) (40415112)	法政大学・理工学部・教授 (32675)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------