

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14962

研究課題名(和文) 超低背型インダクタを用いた高電力密度MHz級電力変換回路の開発

研究課題名(英文) Development of high power density MHz power converter using ultra low-profile inductor

研究代表者

今岡 淳 (Imaoka, Jun)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：60772019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：車載用などの電力変換器では高電力密度化が強く求められる。これに対して、近年では高周波駆動可能な化合物パワー半導体が実用段階にあり、産業への応用が期待されている。しかし、パワー半導体デバイスによる高周波駆動によって電力変換回路を高電力密度化すると、磁気部品で過度な自己発熱が発生し、さらに移動体の利用環境温度は厳しい条件下にある。そこで本研究では、MHz駆動時の磁性材料モデリング、磁気部品設計、高放熱化へ向けた磁気部品の実装技術に関する基盤技術の構築を行った。本検討で得られた成果は材料や構造で制限が決まっていた磁気部品の性能向上に寄与し、車載用に限らず小型軽量化が求められる応用に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動体に搭載される電力変換回路は高効率化に加えて、走行性能向上や車内空間拡大の面から体積・重量低減が強く要求される。特に、回路内において主要な重量・体積物である磁気部品を小型軽量化するには、パワー半導体の高周波駆動(MHz)が有効な方策の一つであるが、この場合、磁気部品で過度な発熱や損失増加、信頼性低下が課題となる。そこで、本研究で磁性材料のモデリングや回路との連携シミュレーション(フロントローディング設計へ寄与)、高放熱構造(塗布型インダクタや新構造のスプリットコアを用いたインダクタ)を提案し、回路中で発熱面・サイズの面から性能ボトルネックとなりやすい磁気部品の性能向上を実現した。

研究成果の概要(英文)：High power density power converters are strongly needed in automotive applications. In recent years, compound power semiconductors such as gallium nitride and silicon carbide that can drive at high frequencies are in the practical stage in the industry. However, when applying the high-switching frequency drive of power devices over MHz, high heat is generated in magnetic components such as transformers and inductors. To solve this issue, this research carried out comprehensive research, including magnetic material modeling, design, and magnetic structure with high heat dissipation capability. The knowledge obtained from this research will contribute to constructing high power density converters for several applications such as aircraft, Drone, and automotive applications.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：低背化インダクタ 塗布型磁性体コア MHz級電力変換回路 シミュレーション 温度依存性 放熱性能

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

CO₂排出抑制は国際的にも重要な課題として位置づけられており、COP21により採択されたパリ協定やSDGs (Sustainable Development Goals)をはじめとする国際的な枠組みや目標を背景に環境負荷の少ない社会・カーボンニュートラルを実現することは今後益々重要となる。特に移動体分野(自動車、航空機、船舶など)におけるCO₂排出は特に内燃機関を搭載した移動体から排出されるため、世界的にも移動体の電動化に向けた研究開発が活発化している。電動化された移動体の多くはモータ駆動用電力変換回路が主要な体積を占め、高効率化に加えて変換器全体の重量/体積低減を実現することは燃費改善、搭載機器のデザイン自由度を向上させる意味においても極めて重要である。一方で、電力変換器内のインダクタやトランスに適用される磁気材料は、ベースメタル(Fe, Cuなど)および一部レアメタルを用いて構成されるが、これら金属資源のニーズは2050年までには現有埋蔵量を大きく超えてしまう可能性が指摘されており、体積低減に加えて電力変換器の中で使用される金属資源を省資源化することも将来的に重要な課題となる。

電力変換器を小型軽量化ならびに単位システム当たりでの金属資源を省資源化するための方策の一つとしては、パワー半導体の高周波駆動化が有効な方策である。これに対して、SiCやGaNをはじめとする化合物パワー半導体は、従来のSiパワーデバイスと比較して低オン抵抗に加えて高速でスイッチングできるため、さらなる高周波駆動が実現可能である。さらに、近年では自動車や鉄道応用にも化合物半導体デバイスの導入が実現されている状況にあるが、これらパワー半導体デバイスの優れた特性を電力変換回路で享受するには周辺の受動部品の特性改善を合わせて行う必要がある。特に、インダクタやトランスをMHz級のスイッチング周波数でkWクラスの電力変換を実現する場合では損失、発熱といった観点から回路中において磁気部品が性能ボトルネックとなりやすく、磁気部品の性能によって回路性能が律速する事例もいくつか散見される。従って、次世代化合物パワー半導体応用に向けてMHz以上のスイッチング周波数で動作する磁性部品の基盤技術確立と回路への応用技術について検討を実施する。

2. 研究の目的

上記研究背景のもと、本研究ではMHz以上の高周波駆動時における磁気デバイスの特性改善のため、以下に示す1)-2)の各検討を実施する。

1) 複合物理ドメイン(電気・磁気・熱)で連携動作する磁気部品のモデリング・シミュレーション構築

電動化された移動体を陸(自動車)・海(電気推進船)・空(航空機, eVTOL, 宇宙での応用)での応用に向けては、モータ駆動によって十分な推進力を得る必要があり電力変換回路の高出力化が強く求められる。また、移動体が利用環境(寒冷地・温暖な土地や航空・宇宙などへ)を拡大すると電力変換回路で活用される能/受動素子には過酷な“環境温度”でも安定した動作が求められる。さらに、この電力変換回路の高出力化の際には回路駆動時における能/受動素子の“自己発熱”を十分に抑制する必要がある。MHz以上のスイッチング周波数で回路を駆動させると、磁気部品は大きく小型軽量化できる一方で、放熱面積が少なることや高周波励磁に伴って鉄損が増加することにより、磁気部品の温度上昇が喫緊の課題となる。磁性体コアの鉄損や比透磁率は、回路駆動時の励磁条件(周波数、デューティ比、電圧、電流)や温度によって非線形に変化する。この温度により非線形に変化する鉄損や比透磁率を定量的に評価するには、モデル構築が必要となる。一方で、モデル構築はフロントローディング設計の観点からも重要である。現代の電力変換回路の開発ではモデルベース開発が基本であり、少量多品種生産が主流となっているパワーエレクトロニクス分野において、短期間での回路開発に貢献するモデル構築と回路シミュレーションへの実装は極めて肝要である。従って、励磁条件や温度条件(環境温度・自己発熱)で特性が自動的に変化する汎用性の高い回路シミュレーション用磁気部品のモデルの構築が必要となる。以上のことから、本研究では図1に示すようにMHz級の電力変換回路における磁気部品の過度な発熱を想定して、電気、磁気、熱の複合物理ドメインで動作する磁気部品のシミュレーションモデル構築を一つの目標として設定した。この検討における目的としては①磁性体コアの温度と電流値で変化する比透磁率のモデリング手法構築、②鉄損特性(温度・励磁条件依存)と熱回路網を連携した回路シミュレーション用磁気部品のモデル構築、の2つの点から検討を実施する。

2) 高放熱性を有するMHzのスイッチング周波数で動作可能な低背化コア(塗布型コアとスプリットコア構造)の提案と検証

2つ目の目的としてMHz・kW級での高周波電力変換回路構築にあたっては磁気部品の放熱性能向上が重要となる。図2に示すように、化合物半導体デバイスを用いて高周波駆動を行う場合は、磁気部品の体積・重量低減が魅力であるが、立体形状のまま小型化すると磁気部品の放熱に関わる表面積も併せて小さくなってしまいうため、温度上昇抑制に向けた対策が必要となる。磁気部品の構造面における改善としては低背化を施し、筐体などの冷却面に接する磁性体コアの表面積を向上させ、伝熱させることが有効な方策の一つであると考えられる。この検討における目的としては①塗布型コア、②低背型スプリットコア構造の2つの点から磁気部品の放熱性能向上に向けた方策を検討した。①の塗布型コアは樹脂材料内に粉末の磁性粉末(鉄を主成分としているので飽和磁束密度ならびに高キュリー温度)を混ぜ込み、回路基板に塗布させながら硬化させる手法を提案・検討

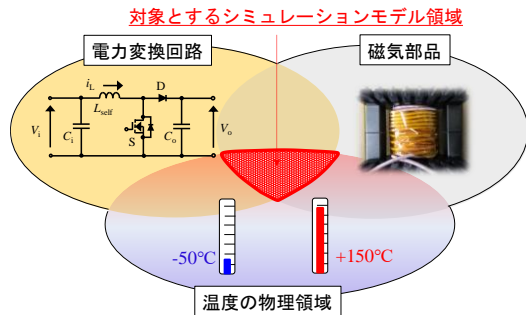


図1 複合物理ドメインのシミュレーションモデル

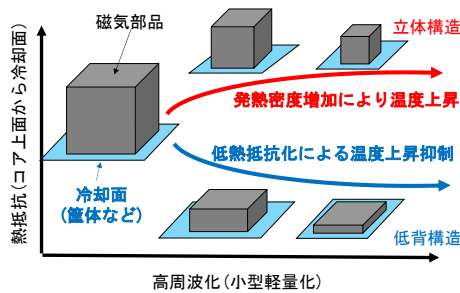


図2 低背化による高放熱化の実現

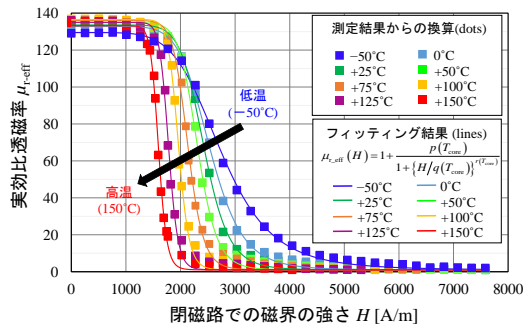


図3 実効比透磁率のモデリング結果

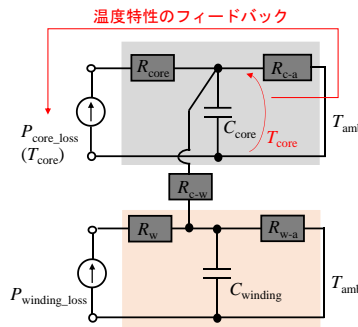


図4 自己発熱と鉄損特性(温度依存)のモデル

するものである。この塗布型コアの利点はその製法から形状自由度が高いのが最大の特徴であり、既存の成型されたコアでは実現できないような構造の磁性体コアを製作できる点にある。②の低背型スプリットコア構造では、ミアンダ配線に低背化したコアを複数用いて低背構造を実現するものである。ここで使用する磁性材料としては高周波励磁条件でも低鉄損な Mn-Zn 系フェライトを用いる。従来の Mn-Zn フェライトの周波数特性としては、1MHz あたりから比透磁率の実部が低下し、鉄損が増加するものが多かったが、近年 MHz 以上の高周波電力変換回路での使用を想定された Mn-Zn フェライトが登場している。しかしながら、Mn-Zn フェライトは低鉄損であることが魅力であるが、キュリー温度は低く、回路駆動時における過度な温度上昇は物性的な観点から許容することができない。そのため、高い放熱性能を有するコア構造が求められる。評価は提案するスプリットコア構造のインダクタと従来の立体形状のコア構造のインダクタと相対比較する形で体積を同じとした状態で温度上昇の観点から優位性を評価する。

3. 研究の方法

第2章で述べた研究目的はそれぞれ以下の方法で検討を進めた。

- 1) 複合物理ドメイン (電気・磁気・熱) で連携動作する磁気部品のモデリング・シミュレーション構築

直流電流が重畳する応用でよく用いられるギャップ付き Mn-Zn フェライトインダクタを対象にインダクタ電流とコア温度がそれぞれ変化した際の比透磁率のモデリングを実施した。まず、比透磁率のモデリングに際しては磁性体コアを恒温槽 (温度範囲: $-50^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$) により温度変化させ、直流電流を重畳させながら非線形な実効比透磁率を実測し、3つの係数で非線形な比透磁率をモデリング可能な数式モデルとルックアップテーブルを活用することで広い温度範囲で非線形な比透磁率を反映する磁気回路シミュレーションモデルを構築した。まず、ベースとなる比透磁率の測定結果を図3に示す。提案する数式モデルは3つの係数 p, q, r (図3中に数式モデルを記載) で実効比透磁率の非線形性を模擬しているが、これら3つの係数を各温度で係数変化させることで広い温度範囲でのシミュレーションを実現している。

次に、回路駆動時における自己発熱と鉄損については、iGSE (improved Generalized Steinmetz Equation) の鉄損算定式を用いている。iGSE 内で使用する鉄損を示す3つの係数を温度と結び付けて変化させることでモデル化を実現している。また、温度については熱回路網と連携することで、図4に示すように熱回路網から得られた情報を用いて鉄損算定にフィードバックすることで電気・磁気・熱を連携させることで、回路シミュレーション上で磁気部品の温度上昇をシミュレーション上で予見可能なモデルとしている。

- 2) 高放熱性を有する MHz のスイッチング周波数で動作可能な低背化コア (塗布型コアとスプリットコア構造) の提案と検証

塗布型コアについては樹脂に磁性粉末を混ぜ込み、これを空芯のインダクタへ実装することで塗布型コアの有効性を検証している。評価の際には、1MHz, 1kW の昇圧コンバータのインダクタにおいて、空芯インダクタ (塗布型コア無し)、従来のギャップ付き Mn-Zn フェライトと塗布型

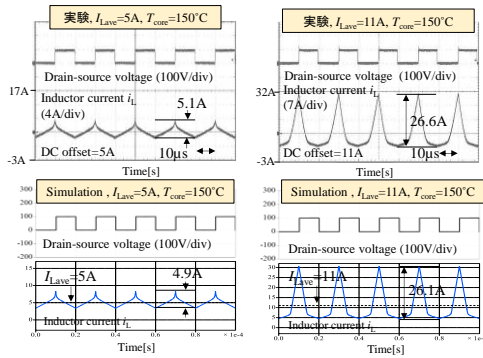


図5 実験とシミュレーション結果(電流波形)

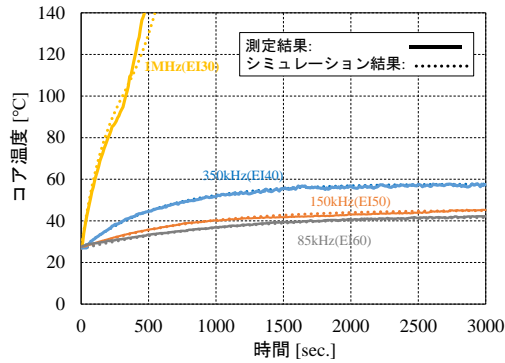
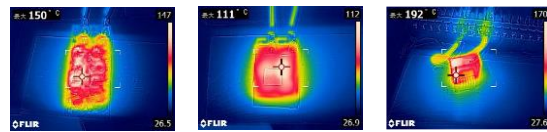


図6 実験とシミュレーション(温度上昇)

空芯インダクタ 塗布型インダクタ



空芯インダクタ 塗布型インダクタ フェライトインダクタ

図7 塗布型インダクタの評価結果

インダクタ(提案方式)の3水準で相対評価を実施する。また、スプリットコア構造についてはPCB基板で構築したミアンダ配線に複数の低背UI形状のMn-Znフェライトを挿入し、インダクタ全体で低背化を実現している。さらに、これらを高熱伝導な絶縁シートを介してヒートシンクに接続することで高放熱性を評価する。評価の際には昇圧コンバータのインダクタとして1MHz, 1kW出力条件下で評価する。

4. 研究成果

第3章で述べた各研究手法における成果を以下の通りに述べる。

1) 複合物理ドメイン(電気・磁気・熱)で連携動作する磁気部品のモデリング・シミュレーション構築

まず、比透磁率の温度依存性モデリングとシミュレーション結果について述べる。図3に示す数式によるフィッティング結果を用いて、回路シミュレーション(PLECS)へ実装し、磁性体コアの温度とインダクタ電流値が変化した条件で、実機と回路シミュレーションのインダクタ電流波形を比較することでモデルの妥当性を実証評価した。図5にインダクタを150°Cの温度環境において昇圧コンバータで動作させた場合の実測波形とシミュレーション結果を示す。図5から見てわかる通り、非線形に比透磁率が変化する場合(インダクタンスが大きく変化)においてもインダクタ電流は実機動作とシミュレーション動作で波形の一致を確認しており、コア温度、電流変化、インダクタンス(比透磁率が関与)の中で、モデリング構築手法の有効性を確認した。

次に、磁性体コアの自己発熱による温度上昇のモデル化・シミュレーションについての検討結果について述べる。評価対象は温度に対する鉄損依存性が強いMn-Znフェライトを用いて、エリアプロダクト法に基づいて85kHz, 150kHz, 350kHz, 1MHzの4水準で磁気部品のサイズ最適化を行い、これらを自己発熱モデル化の対象コアとして評価した。図4に示すモデルを回路シミュレーション上に構築し、各インダクタの温度上昇を予見可能なモデルを構築した。連続駆動した場合の実測した磁性体コアの温度上昇値と図4に示すシミュレーションモデルでの相対比較結果を図6に示す。この結果から、実測ならびにシミュレーションによって得られた温度上昇の傾向は一致する結果が得られた。これによって、鉄損(温度依存)、励磁条件、温度上昇を関連付けたモデル構築に成功した。

2) 高放熱性を有するMHzのスイッチング周波数で動作可能な低背化コア(塗布型コアとスプリットコア構造)の提案と検証

まず、塗布型コアの結果から述べる。評価は、空芯巻線によるインダクタ、空芯巻線に磁性ペーストを塗布したインダクタ(提案方式)、ギャップ付きMn-Znフェライトを用いたインダクタの3種類で行っている。図7に試作したインダクタの外観を示す。ここで、試作した3つのインダクタのインダクタンスの要件を統一するため、 $L=2.57\mu\text{H}$ 程度となるようにしている。ここで、空芯インダクタは257nHの空芯インダクタを10個直列接続することで2.57 μH のインダクタを作成している。一方で、塗布型インダクタは同一の空芯巻線を6個直列化させた空芯インダクタに磁性ペーストを用いることで2.57 μH となっており、巻数とサイズの低減に成功し、直流抵抗値も空芯インダクタと比較して約40%低下している。また、Mn-Znフェライトを用いたインダクタも併せて試作を行い、

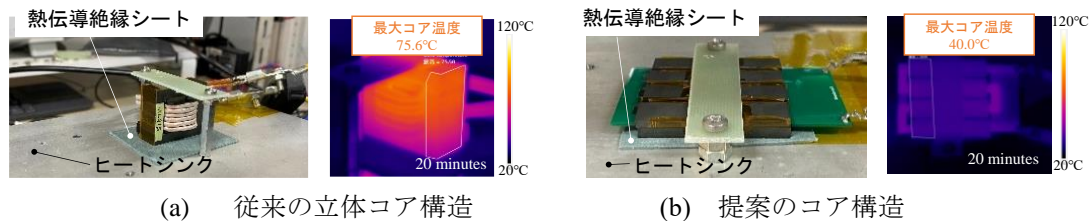


図 8 スプリットコア構造の評価結果

動作時における熱や効率等について評価を行っている。なお、回路評価は昇圧コンバータにおいてスイッチング周波数 1MHz, 1kW 出力時において、電力変換効率、温度上昇の観点から評価を行った。電力変換回路通電開始時(室温から)においては3つのインダクタは安定動作していたものの、回路駆動時 8 分後では Mn-Zn フェライトを用いたインダクタでは約 200°C程度の高温になっており、フェライトのキュリー温度近傍の温度上昇まで到達している。一方で、塗布型インダクタと空芯インダクタは連続動作させてから 10 分後でも安定動作していることを確認している。回路駆動時から 10 分後にコンバータの効率測定も実施したが空芯インダクタと比較すると塗布型インダクタは0.5%効率が向上しており、10 分後の素子の温度も空芯コアと比較して約 40°C程度低減できていることを確認した。

次に、スプリットコア構造の低背インダクタにおいては、PCB によりミアンダ配線を構築し、4 個の UI コアを用いて評価を実施している。図 8(a)には同一の Mn-Zn フェライト材料を用いた従来の立体コア構造(EI コア)、図 8(b)には提案するスプリットコア構造のインダクタの外観を示す。従来と提案方式の磁性体コアの体積はそれぞれ等しく試作しており、提案方式の場合、放熱シートに接する面積は従来コア構造の 4 倍に増加している。図 8(a)、図 8(b)にはそれぞれ、連続通電した際の飽和温度をサーモカメラで撮影した結果を示す。従来コア構造の場合は 20 分後にはコア上面において 75.6°Cの温度上昇が確認されているのに対して、提案方式は 40°Cに抑制できている。提案手法により過度な温度上昇を大幅に改善することができ、MHz 以上でのスイッチング周波数に対するインダクタの実装方法の基盤技術を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yuki Ishikura, Jun Imaoka, Mostafa Noah, Tatsuya Aoki, Koichiro Ito, Masayoshi Yamamoto	4. 巻 56
2. 論文標題 Magnetic Design Method for Multi-Material Inductor to Flatten Efficiency Curve of Power Converters Within Wide Load Ranges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2020.3014592	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12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 今岡 淳, 山本 真義
2. 発表標題 ギャップ付きフェライトコアにおける非線形比透磁率モデリングとパワーエレクトロニクス回路におけるシミュレーション評価
3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Ito Koichiro, Tatsuya Aoki, Koichi Shigematsu, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Modeling of Gapped Ferrite Cores with Non-linear Relative Permeability and Its Simulation Evaluations in Power Electronics Circuits
3. 学会等名 Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Yuki Ishikura, Koichiro Ito, Tatsuya Aoki, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Magnetic Design Method for Multi-Material Powder Core Inductor to Improve Efficiency of Bidirectional DC/DC Converter within Wide Load Range
3. 学会等名 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今岡淳, 服部文哉, 重松浩一, 山本真義
2. 発表標題 高周波/大容量電力変換器と磁気部品応用技術の動向
3. 学会等名 電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Tatsuya Aoki, Koichi Shigematsu, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Temperature Dependency Modeling, Simulation and Experimental Validations of DC Superposition Characteristics for Gapped-Ferrite Inductor Including Saturation Region
3. 学会等名 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今岡淳, 重松浩一, 向山大索, 山本真義
2. 発表標題 次世代パワーエレクトロニクスの基盤技術創生に向けた磁気部品のモデリング, 設計, シミュレーション技術
3. 学会等名 2021 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Wu Yu-Hsin, Koichi Shigematsu, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto, Wilmar Martinez
2. 発表標題 A Magnetic Design Method for Powder Core Inductor with Concentrated Airgap Considering DC Superposition Characteristics Used for High Current Applications
3. 学会等名 The 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Wu Yu-Hsin, Koichi Shigematsu, Tatsuya Aoki, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Effects of High-frequency Operation on Magnetic Components in Power Converters
3. 学会等名 The Energy Conversion Congress and Exposition Asia (ECCE Asia 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井 友崇, 三島 大和, 松田 和也, 今岡 淳, 山本 真義, 吉本 耕助, 飯塚 俊介, 田畑 有基
2. 発表標題 高周波電力変換回路における塗布型インダクタの実用性評価
3. 学会等名 令和3年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Matsuta, Jun Imaoka, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Investigation on improvement of heat dissipation performance for magnetic parts
3. 学会等名 2021 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Ochiai, Koichi Shigematsu, Jun Imaoka, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Finite Element Method based Thermal Magnetic Core Characteristics Modeling and Thermal Simulation
3. 学会等名 2022 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jun Imaoka, Matsuta Kazuya, Hiroki Ochiai, Koichi Shigematsu, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto
2. 発表標題 Feasible Evaluations of Low Profile Magnetic Structure Based on Meander Winding and Split-Magnetic Cores with High-Cooling Capability Used in Power Converters
3. 学会等名 The 14th IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 今岡 淳	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会 車載テクノロジー	5. 総ページ数 5
3. 書名 電動化された移動体に求められる電力変換用受動素子の温度特性とパワーエレクトロニクスとの連携シミュレーション	

1. 著者名 今岡 淳	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会 MATERIAL STAGE	5. 総ページ数 6
3. 書名 車載用パワーエレクトロニクス用磁気部品の応用領域と高周波化/低背化に向けた粉末塗布型インダクタの実用性評価	

1. 著者名 今岡 淳, 他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版 次世代パワー半導体の開発動向と応用展開	5. 総ページ数 10
3. 書名 移動体応用に向けたパワーエレクトロニクス技術動向とその高電力密度化技術	

1. 著者名 今岡 淳, 他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会 次世代EV/HEV用モータの高出力化と関連材料の開発	5. 総ページ数 13
3. 書名 車載用パワーエレクトロニクスにおける磁性材料・磁気デバイスの基本とその応用領域	

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学 教員データベース http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100010131_ja.html 名古屋大学パワーエレクトロニクス研究室 http://pelab.imass.nagoya-u.ac.jp/

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

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		
ベルギー	KU Leuven		