

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14240

研究課題名（和文）電力変換回路用ノイズフィルタ設計に向けた素子材料特性・空間電磁結合のモデル化

研究課題名（英文）Modeling of material characteristics of circuit components and electromagnetic coupling for designing noise filter in power conversion circuits

研究代表者

井瀨 貴章（Ibuchi, Takaaki）

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90755646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電力変換回路における電磁環境両立性（EMC）設計の実現を目的とし、受動素子の材料物性に起因する非線形特性のモデル化、および配線や素子間の空間電磁結合のモデル化に基づいて、ノイズフィルタや付帯回路を含めたシステムレベルでの電磁干渉（EMI）ノイズ抑制設計に関する検討を実施した。広帯域ノイズ解析における受動素子の材料物性を含めた特性の定量評価・モデル化、およびノイズ源となるパワーモジュールにおけるノイズ閉じ込め用DCリンクキャパシタのレイアウト設計検討により、回路から外部に漏出するノイズの低減及びノイズフィルタ容量の低減に関する知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電力変換器における高レベルの省エネ特性と低電磁ノイズ特性を両立させる回路設計の実現を目的とし、ノイズ発生・伝搬メカニズムの解明に基づく広帯域電磁ノイズ抑制・低減設計に関する検討を実施した。本研究の取り組みは、損失やノイズを低減した回路設計・実装手法の基礎構築に有用であるとともに、本研究成果に基づきワイドバンドギャップパワー半導体デバイス的高速・高周波数スイッチング動作を適用した次世代電力変換回路の社会実装をさらに進めることは、CO2排出削減等の低環境負荷社会の実現に貢献可能であるという点で、学術的かつ社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：This research studies the characterization of passive components for electromagnetic interference (EMI) noise analysis and the design of power modules with low-EMI noise source characteristics based on modeling of electromagnetic coupling between interconnects and elements. The results clarify the noise generation and propagation mechanisms that contribute to realize electromagnetic compatibility (EMC) design of power conversion circuit that achieves both low-EMI noise and downsize noise filter.

研究分野：電気電子工学・電力変換・電磁環境

キーワード：パワーエレクトロニクス 電磁環境両立性（EMC） 寄生成分 磁性材料特性 高周波鉄損計測 空間電磁結合

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。

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー・SDGs（持続可能な開発目標）の達成に向け、自動車・航空機・産業機器の電動化や分散型電源有効利用のための系統連系・蓄電技術開発など、パワーエレクトロニクスの適用範囲は拡大の一途をたどっている。近年ではシリコンカーバイド（SiC）に代表されるワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの開発が盛んに進められてきた。回路で扱う高電圧・大電流を従来よりも高速・高周波数でスイッチングさせることで、電力変換機器自体のさらなる低損失化や小型軽量・高密度実装設計の実現が期待されている。ただし、電力変換性能の向上およびパワーエレクトロニクスの社会実装拡大を実現させるためには、機器から発生する電磁干渉（EMI）ノイズのさらなる広帯域化および解析・評価の複雑化が大きな懸念事項となっており、その解決に向けた取り組みが必要不可欠である。

これまでの EMI 対策技術は経験とノウハウに頼る要素が多く、ノイズ抑制を目的にフィルタ・シールド等を単に適用するだけでは、意図しないノイズレベルの悪化等の新たな問題を招いてしまい「もぐら叩き」と称される様相を呈する。ノイズ課題の根本的解決を図るためには、ノイズ発生メカニズムを明らかにしたうえで「回路から生じるノイズレベル自体を下げる・回路内で閉じ込める」「ノイズフィルタの効果的活用によって全体ノイズを抑制する」というアプローチが有効である。すなわち、扱う電圧・電流の大きい電力変換回路に対して広帯域 EMI ノイズ低減を検討するためには、ノイズ閉じ込め・抑制用受動素子の材料特性を把握・モデル化し、これに基づく最適設計を検討すること、およびノイズフィルタや主回路、付帯回路を含むシステム全体でノイズ発生・伝搬メカニズムの解明をあわせて検討することが重要である。特に次世代電力変換回路の低 EMI 設計検討においては、従来の規格要件ありきのノイズモデリング・対策というアプローチだけでなく、EMI ノイズの発生・伝搬メカニズム解明および広帯域 EMI ノイズ抑制・低減設計法に関する検討・考察に基づいて、幅広い動作条件・周波数帯域にわたって電力変換回路の電磁環境両立性（EMC）性能担保を目指す必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、電力変換回路における EMC 設計の実現を目的とし、EMI ノイズ閉じ込め・抑制に用いる受動素子の材料物性に起因する非線形特性のモデル化、および配線や素子間の空間電磁結合のモデル化に基づいて、システムレベルでのノイズ閉じ込め・抑制設計法の確立を目指すものである。電力変換回路における EMI ノイズ発生量予測および抑制・低減検討について、近年では CAE（Computer Aided Engineering）に基づく大規模解析に対する要求が増加している。CAE 解析は電気・機械・電磁気・熱などの連成解析が行えるため、電力変換機器設計における開発期間短縮・試作コスト削減の観点からも有用かつ必要不可欠と考えられる反面、解析の前提となる物理的性質や制約条件を適切に設定しない限り妥当な結果が得られない。

研究代表者がこれまでに取り組んできた SiC パワーデバイスのノイズ源特性検証に係るノイズの時間一周波数解析および可視化技術に関する知見に加え、本研究において受動素子材料の諸特性評価や要素間の空間電磁結合のモデル化について検討することにより、次世代電力変換回路の広帯域 EMI ノイズ低減設計法の基礎構築を目指す。すなわち本研究は、上述の数値電磁界解析技術とあわせ、EMI ノイズのマルチドメイン解析や EMC を考慮に含めたモデルベース開発へと発展させるための重要な取り組みである。

3. 研究の方法

(1) 広帯域ノイズ解析における受動素子の材料物性を含めた特性の定量評価・モデル化に関して、トロイダル型コモンモードチョークインダクタを例に高周波鉄損の実測評価法や直流重畳を考慮したインピーダンス特性のモデル化を中心に検討を実施し、素子が持つ寄生成分とノイズ低減・抑制の基本原則との対応付けを図った。また電圧・電流測定に用いるプローブの広帯域ゲイン・位相特性評価や MHz 以上の高周波数帯を対象とした鉄損測定法の原理検証や課題抽出により、広帯域・高精度鉄損計測およびモデリング技術の確立に向けた重要な知見が得られた。

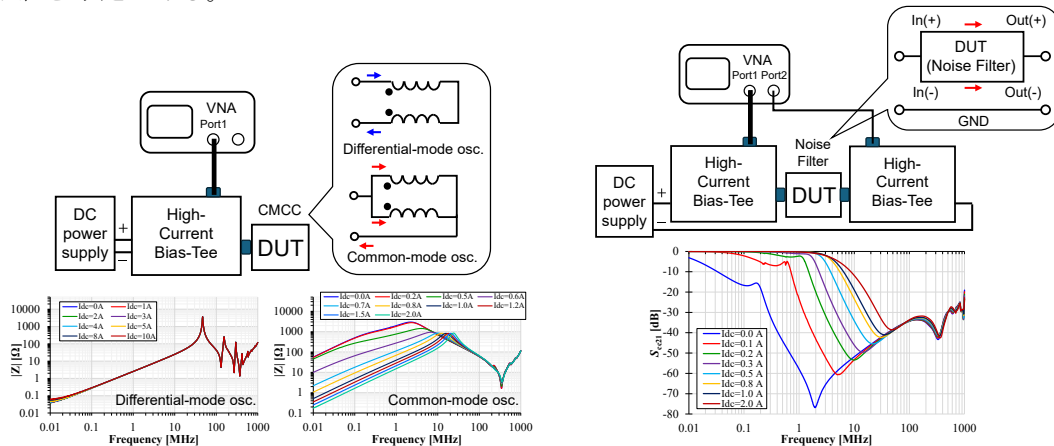
(2) 空間電磁結合の評価に近傍磁界可視化システムを用いることで、ノイズ源となるパワーモジュール内配線およびノイズ閉じ込め用 DC リンクキャパシタの実装レイアウトの最適設計について検討し、電力変換器から外部に漏出するノイズの低減及びノイズフィルタ容量の低減に関する知見が得られた。さらに、50/60Hz の交流入力電圧と数十 kHz のスイッチング動作の両方に同期した近傍磁界測定技術についても検討し、電力変換回路における EMI ノイズ発生・伝搬メカニズム解明およびノイズ抑制・低減設計における開発期間短縮・試作コスト削減の実現に向けた評価技術の確立を図ることができた。

4. 研究成果

(1) コモンモードチョークコイルの直流重畳特性に着目したノイズフィルタ特性評価

コモンモードチョークコイルは、回路動作電流（ノーマルモード電流）によりコア内部に生じる磁束は打ち消されてインピーダンスが低くなるのに対し、コモンモード電流に対してはコア

内の磁束が強め合うためにインピーダンスが高くなる。すなわち、回路動作で生じた共通モードノイズ電流の減衰を目的とした素子であり、ノイズフィルタ回路に広く用いられる。ただし、現実のCMCCでは巻線構造の影響により、ノーマルモード電流起因で生じる磁束が完全にはキャンセルされず漏れ磁束が発生する。特に回路動作電流が大きくなると、コアの磁気飽和によるインダクタンス低下、すなわち共通モードインピーダンスの低下を招き、設計通りのフィルタリング性能が得られなくなることも報告されている。以上を想定したフィルタ設計に向け、本研究ではCMCCの直流重畳特性評価系の構築を行い、CMCCの共通モードインピーダンスおよびノイズフィルタの減衰特性の実測評価を行った(図1)。DCバイアス電流を増加させると、10 MHz以下の共通モードインピーダンスが低下することが実験により確認できる。また、市販ノイズフィルタに対するDCバイアス電流印加時にも、伝導性EMIノイズ測定対象の周波数範囲全体にわたって共通モード減衰特性が変化することを確認できた。これらの結果をもとに、CMCCに適用する磁性材料の種類や巻線条件が及ぼす影響について詳細評価を行い、これらの特性を模擬するノイズフィルタ全体の等価回路モデリングへと発展させる必要があり、継続課題として取り組む予定である。



(a) CMCCの共通モードインピーダンス評価 (b) ノイズフィルタの共通モード減衰特性評価
図1. コモンモードチョークコイルの直流重畳特性に着目したノイズフィルタ特性評価

(2) 高周波鉄損特性のモデリングに向けた部分キャンセル法に基づく鉄損測定

広帯域ノイズ解析における受動素子の材料物性を含めた特性の定量評価・モデル化に関して、インダクタ・トランスを例に高周波鉄損の実測評価法について検討を実施し、素子を持つ寄生成分とノイズ低減・抑制の基本原則との対応付けを図った。電力変換回路に適用するインダクタ・トランスは、スイッチング周波数を高くするほど銅損・鉄損が増大するため、高周波損失の小さい磁性材料開発が望まれている。ただし、低損失材料ほど力率角が90度付近となり、測定系のわずかな計測位相誤差が損失計算結果に及ぼす影響が無視できなくなるため、実測における高精度鉄損評価が課題である。図2に示すように、評価対象とするトランスに対し十分損失の小さい空芯トランスを適用し、励磁インダクタンス分を相殺させる接続構成として鉄損を求める。ただし、1次側励磁電流と鉄損分のみで生じる2次側誘起電圧の位相差がほぼ0度となる完全キャンセル条件とするためには、空芯トランスのインダクタンス精度が必要となる。部分キャンセル法では励磁電流測定において位相摂動を与えて求められる修正係数を導入することで、鉄損算出における追加トランスの特性依存性が緩和できる(図3)。また電圧・電流測定に用いるプローブの広帯域ゲイン・位相特性評価およびそれらの補正法についてあわせて検討することで、広帯域・高精度鉄損計測法を確立し、素子特性のモデリングに必要なデータを取得可能とした。

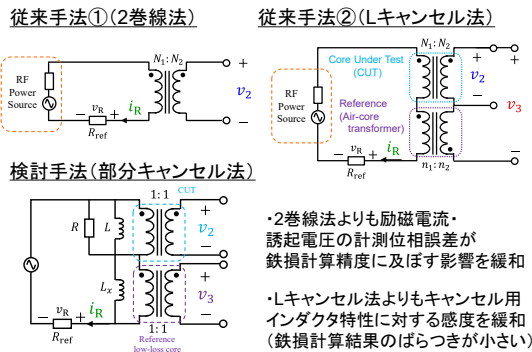


図2. 高周波鉄損測定法の原理・構成検討

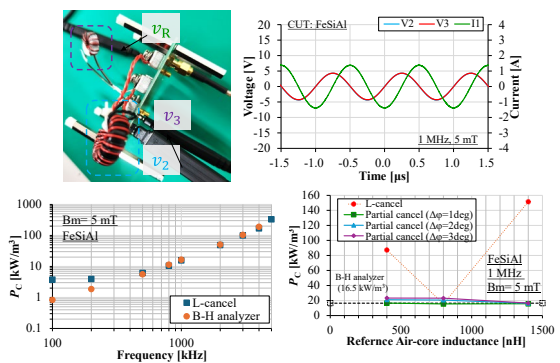


図3. 圧粉材料の鉄損実測評価

(3) 近傍磁界強度分布に基づく大電流 SiC パワーモジュールの EMI 低減設計

電力変換回路におけるノイズ発生メカニズム解明及びこれに基づくノイズ低減設計に関して、ノイズ源となるパワーモジュール内配線およびノイズ閉じ込め用 DC リンクキャパシタの実装レイアウトの最適設計について近傍磁界可視化システムを用いることで空間電磁結合を評価し、回路から外部に漏出するノイズ低減およびノイズフィルタ容量低減に関する知見が得られた。

急峻な電圧電流の時間変化と寄生成分との相互作用によりスイッチング動作時に生じ EMI ノイズの原因ともなるサージやリングング（高周波振動）の抑制には、ハーフブリッジ部の直近に DC リンクキャパシタ C_{sn} を実装し、パワーループの実効的な寄生インダクタンス低減が効果的であることはこれまでの取り組みでも明らかにされている。ただし、高耐圧・大電流 SiC パワーモジュールは絶縁離隔距離や放熱性能の確保およびチップの多並列接続によってモジュールの内部配線が長く全体が大型化するため、モジュールに内蔵する DC リンクキャパシタの実装位置が EMI 低減効果に及ぼす影響を検証する必要がある。図 4 に示す評価用サンプルおよび近傍磁界強度分布測定系を構築し、スイッチングノイズを想定した周波数 20 MHz およびスイッチング周波数の低次高調波を想定した 200 kHz の励振源を用いて C_{sn} の実装位置に対するノイズ電流分布の可視化検討を行った。大電流 SiC パワーモジュール内の両端に C_{sn} 対称に実装することが、MHz 帯の漏出ノイズ低減に最も効果的であることを示した（図 5）。これはモジュール内部で生じる磁界の打ち消し効果によるものと考えられ、パワーループの実効的な寄生インダクタンスの低減にも効果があると見込まれる。ただし、励振電流が C_{sn} とモジュール外部の平滑用コンデンサで形成されるループで循環する影響により、数百 kHz 帯の成分はかえって外部に漏出するノイズレベルが増加する可能性があることも明らかになった。すなわち、平滑用コンデンサとのループインピーダンス特性の考慮に基づく C_{sn} 容量最適化が継続検討課題である。

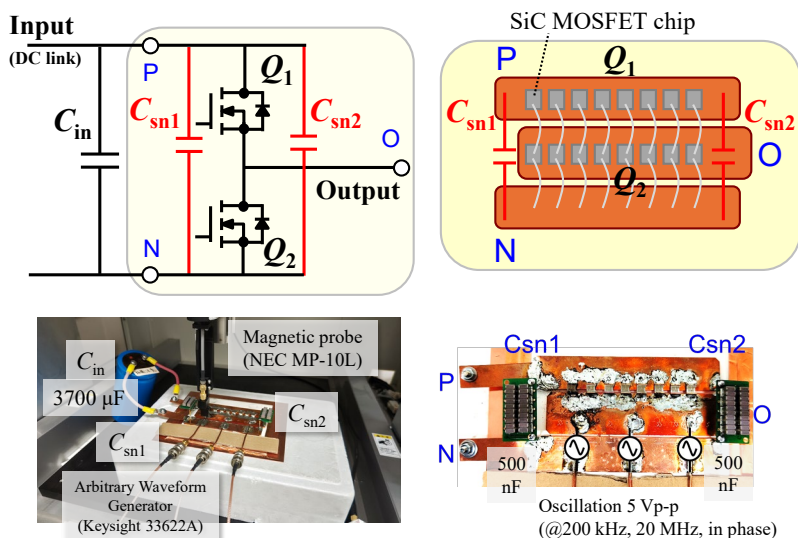


図 4. ノイズ低減検討対象とした大電流 SiC パワーモジュールの配線レイアウトおよび近傍磁界強度分布測定系

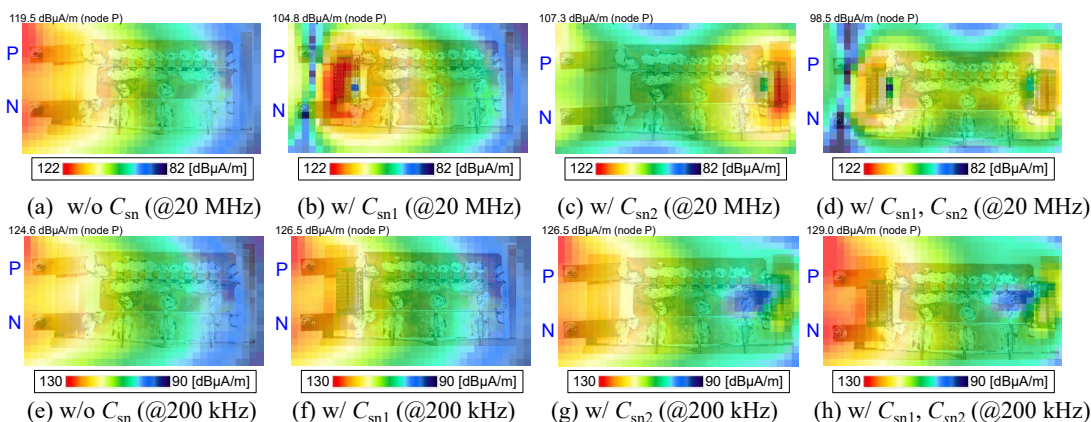


図 5. 近傍磁界強度分布測定結果（内蔵 DC リンクキャパシタの実装レイアウト依存性評価）

(4) AC-DC コンバータの交流入力電圧およびパワーデバイスのスイッチング電圧に同期した近傍磁界強度測定

(3) の検討は、正弦波定常状態での近傍磁界強度分布可視化に基づくものである。これはスペクトラムアナライザの周波数掃引期間における周波数スペクトルの評価となるため、近傍磁界

強度の空間分布を回路動作状態別に切り分けて表示することや、スイッチング動作によって生じる過渡的な雑音電流の伝搬を可視化することは困難である。回路動作に伴って生じる動的なノイズ電流分布の可視化に向け、研究代表者はこれまでにゲート駆動信号と時間同期をとった状態で磁界の時間応答を測定・記録し、各測定点で得られた磁界強度の時間応答データに対し、短時間フーリエ変換等の時間・周波数解析を適用することで、任意の時点における磁界強度スペクトルの時間変化や、任意周波数の動的な磁界強度分布を評価可能とした。本研究ではさらに、AC-DCコンバータのような50/60Hzの交流入力電圧と数十kHzのスイッチング動作の両方に同期した近傍磁界測定技術についても検討した(図6)。2周波数同期トリガー回路を用い、供試コンバータの近傍磁界分布を商用AC周波数とSW周波数の双方に同期して測定・評価することで、交流入力およびスイッチング周波数の位相差異が回路内のノイズ電流分布に及ぼす影響を可視化評価できることを明らかにした(図7)。これにより、電力変換回路におけるEMIノイズ発生・伝搬メカニズム解明およびノイズ抑制・低減設計における開発期間短縮・試作コスト削減の実現に向けた評価技術の確立を図ることができた。

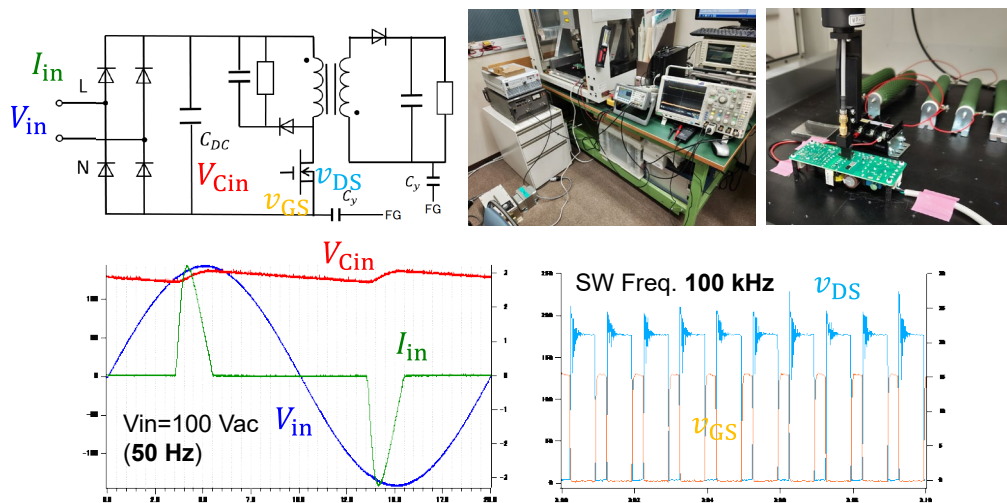


図6. AC-DCコンバータの入力電圧・電流およびMOSFET電圧の時間応答波形

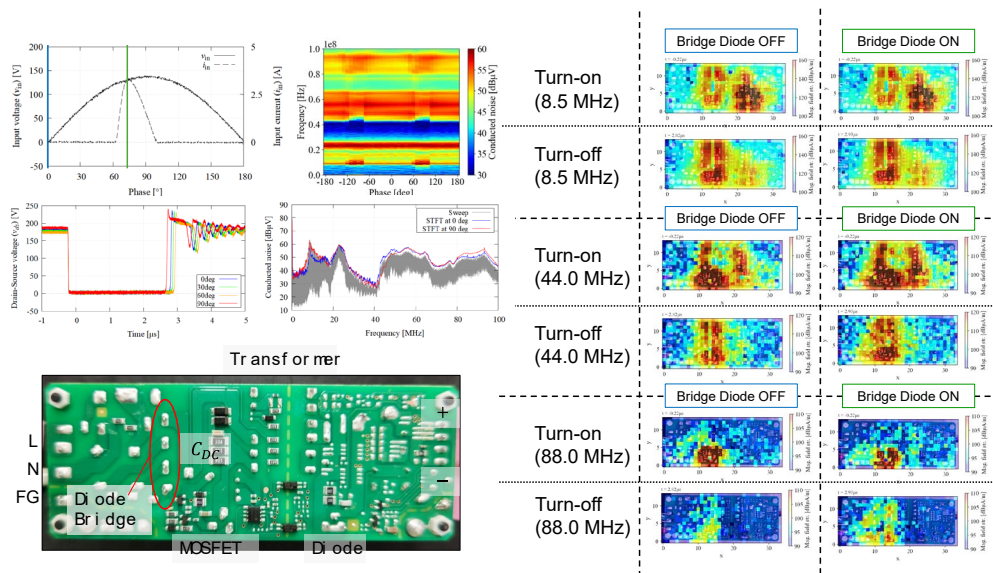


図7. 交流入力電圧およびパワーデバイスのスイッチング電圧に同期した近傍磁界強度評価

以上に挙げた本研究における取り組みにより、受動素子材料の諸特性評価や近傍磁界強度分布可視化に基づく要素間の空間電磁結合やノイズ電流分布評価についてそれぞれ技術を確立し、次世代電力変換回路の広帯域EMIノイズ低減設計法の基礎構築に有用な成果が得られた。EMIノイズのマルチドメイン解析やEMCを考慮に含めたモデルベース回路開発へと発展させるためには、本研究で得られた各特性評価結果のモデル化・一般化についてさらに取り組む必要があり、今後の継続検討課題である。

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 井瀨 貴章, 舟木 剛	4. 巻 144
2. 論文標題 近傍磁界強度分布に基づく大電流SiCパワーモジュールのEMI低減設計評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 511, 512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.144.511	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8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井瀨貴章, 舟木剛
2. 発表標題 ゲイン - 位相特性および過渡応答測定に基づく電圧・電流プローブの性能評価に関する一検討
3. 学会等名 電気学会・電磁環境研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井瀨貴章, 舟木剛
2. 発表標題 電力変換回路に適用する磁性部品の鉄損実測評価における寄生成分の影響に関する一検討
3. 学会等名 電気学会・マグネティックス/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井瀨貴章, 舟木剛
2. 発表標題 電力変換回路に適用する磁気素子の高周波鉄損測定法に関する検討
3. 学会等名 電気学会・マグネティックス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 二社谷 一樹, 井瀨 貴章, 舟木 剛
2. 発表標題 AC電圧位相依存性に着目したAC-DCコンバータの伝導ノイズに関する一検討
3. 学会等名 電気学会・半導体電力変換・モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井瀨 貴章, 舟木 剛
2. 発表標題 交流入力家電機器の直流駆動における伝導ノイズおよび消費電力の評価
3. 学会等名 電気学会・電磁環境研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takaaki Ibuchi, Tsuyoshi Funaki
2. 発表標題 An Experimental Study on Conducted EMI Characteristics of AC Home Appliances in DC Power Feed
3. 学会等名 The 5th IEEE international conference on DC Microgrids (ICDCM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井瀨 貴章, 舟木 剛
2. 発表標題 nチャンネルパワーデバイスのハーフブリッジ構成における共通モードノイズ源モデリングに関する一検討
3. 学会等名 電気学会・電磁環境研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 井瀨 貴章, 舟木 剛
2. 発表標題 部分キャンセル法に基づく圧粉材料の鉄損測定に関する検討
3. 学会等名 日本金属学会・第174回講演大会(招待講演)
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------