

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04443

研究課題名（和文）マルチスケール・マルチフィジクスモデル縮約による高精度モータシミュレーターの開発

研究課題名（英文）Development of accurate motor simulator using multi-scale/ multi-physics model order reduction

研究代表者

松尾 哲司（Matsuo, Tetsuji）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20238976

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：1. マルチスケールモデル縮約 機器スケールモデル縮約手法に材料スケールモデル縮約法を組込んだ。まず、積層鉄芯の均質手法を有限要素磁界解析に組込んだ定式化を行い、次にそれをCLN法により縮約する手法を開発した。
2. マルチフィジクスモデル縮約 CLN法を誘導加熱問題に拡張した。また、ステッピングモータのモデル縮約法を開発し、運動方程式との連成解析に成功した。
3. 誘導モータモデル縮約 CLN法を用いて誘導モータのピヘイピアモデルを導出し、制御系との連成解析より、始動時過渡現象の高速高精度解析を実現した。また、パラメータ依存CLN法により磁気飽和を考慮した誘導モータの非線形モデル縮約法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの電気機器のモデル縮約は静止器が中心であり、可動部を持ち、特に運動誘導起電力の評価が必要なモデル縮約法は存在しなかった。本研究は、精度を損なうことなく電磁界と機械的運動を連成することが可能なモデル縮約法を実現しており、また、材料特性の考慮や様々な物理現象を包括的に扱うことができる、マルチスケール・マルチフィジクスモデル縮約法として他に類を見ない。

研究成果の概要（英文）：1. Multiscale MOR (model order reduction) A material scale MOR method was incorporated into the machine scale MOR method. First, we formulated a method that incorporates the homogenization method for laminated iron cores into finite element magnetic field analysis, and developed a method to reduce it using the CLN method.
2. Multiphysics MOR The CLN method was extended to the induction heating problem. We also developed a MOR method for stepping motors and succeeded in coupled analysis with the equation of motion.
3. Induction motor MOR A behavior model of the induction motor was derived using the CLN method. Through coupled analysis with the control system, we achieved high-speed, high-precision analysis of transient phenomena during startup. We also developed a nonlinear MOR method for induction motors that takes magnetic saturation into account using the parameterized CLN method.

研究分野：計算電磁気学

キーワード：電気機器工学 シミュレーション工学 モデル縮約 モータ解析

1. 研究開始当初の背景

電動化および自動化が進む自動車やロボットの駆動において、その出力・効率の向上のみならず高速制御性能を含めた電磁・電気機器の設計・開発が必要である。電気機器の解析技術および制御理論の進展にもかかわらず、両者を組み合わせた計算機シミュレーションによる上記性能の評価は現在の計算機性能をもってしても容易でない。これは、機器の電磁界解析の計算コストが大きいためであり、効率的・高速に電磁界応答の算出を可能とするモデル縮約手法が求められている。

電磁界のモデル縮約手法の研究は近年進展しており、有力な数学的手法が存在する。研究代表者らは、Cauer ladder network (CLN) 法と呼ばれる、電磁界の応答を精度を損なわずに等価な電気回路に置き換えるモデル縮約の手法を開発している。CLN 法は、物理的な方法論により、様々な物理現象の記述への拡張が容易であるとともに、制御回路との接続も容易であることが特徴である。

上記のようにモデル縮約の要素技術は多くありながら、下記の問題点が存在しており、汎用的な設計開発用ツールとなっていなかった。

- ・方法論的に静止器向きの手法であり、運動の記述が困難である。特に運動誘導起電力の取り扱い方法が確立されていない。
- ・材料スケール、機器スケールのモデル縮約法が別個に存在し、統合的なマルチスケールモデル縮約法が存在しない。

モデル縮約は、個々の物理現象の本質を抽出する技術でもあるので、本来は個々の縮約モデルをシステムティックに接続するだけでマルチスケール・マルチフィジクスモデル縮約が可能ではなくである。したがって、異なるスケールあるいは異なる物理現象との統合的な表現が可能となる縮約モデルの記述法が必要と考えられる。すなわちこれまでは数学的な要素技術に留まっており、物理現象を統合的に表現する手法に達していなかった。その結果、マルチフィジクスのモータのモデル縮約手法の開発が遅れており、従来の簡易的な等価回路が今も使われているのが現状である。

2. 研究の目的

前述のように、これまでの電気機器のモデル縮約は静止器が中心であり、可動部を持ち、特に運動誘導起電力の評価が必要なモデル縮約法は存在しなかった。本研究は、精度を損なうことなく電磁界と機械的運動を連成するモデル縮約法を実現するものであり、また、材料特性の考慮や様々な物理現象を包括的に扱うことができる、マルチスケール・マルチフィジクスモデル縮約法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) マルチスケールモデル縮約法の開発

機器スケールモデル縮約手法 (CLN 法) に材料スケールモデル縮約法 (均質化法) を組み込む (図 1)。両者の親和性が高くなるように物理的な縮約法を組み合わせる必要がある。それにより、材料特性として均質化法を外部参照することなく等価回路の回路パラメータに直接反映させる手法を開発する。

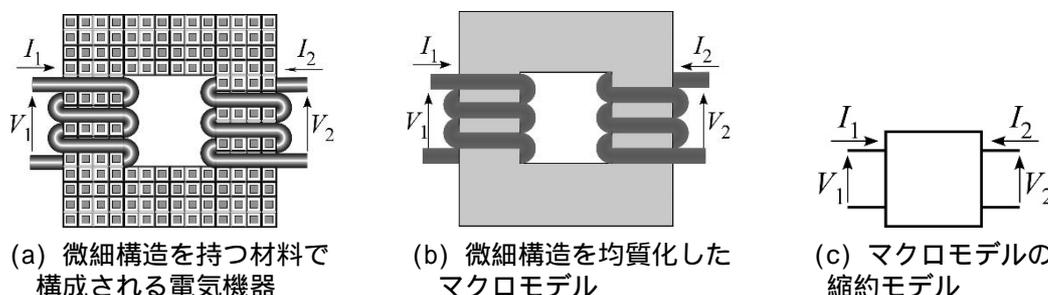


図 1 微細構造を持つ材料の均質化手法を組み込んだ機器スケールのモデル縮約法 (マルチスケールモデル縮約)

(2) パラメータ依存モデル縮約法の開発

磁気飽和は内部諸量に依存して材料特性が変化する現象の一種であり、代表者らは、これを非線形性の表現手法とするモデル縮約法を開発した。すなわち、内部パラメータに依存して縮約モデルを変化させる手法であり (図 2)、これを後述のマルチフィジクスモデル縮約法に应用するため、パラメータ依存モデル縮約法として定式化し、その数理的性質を明らかにする。

(3) マルチフィジクスモデル縮約法の開発

例えばモータシステムは、電磁界、機械的運動・振動・応力、熱伝導など様々な物理現象を

含む。これらの相互作用を考慮したマルチフィジクスモデル縮約手法を開発する。熱伝導方程式は渦電流界方程式と同じく拡散方程式で記述されるので、CLN法の適用が可能と考えられる。また、後述のモータシミュレータにおいて必要な機械的運動との連成解析を実現する。

(4) モータシミュレータの開発

固定部と移動部に対して個々に縮約モデルを構成し、これを図3のように連結することでモータのモデル縮約を実現する。前項のマルチフィジクスモデル縮約法の応用として、様々な運転条件下での運動制御を模擬可能なビヘイビアモデルを開発する。

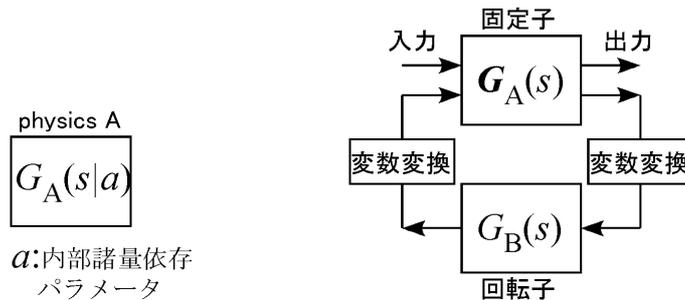


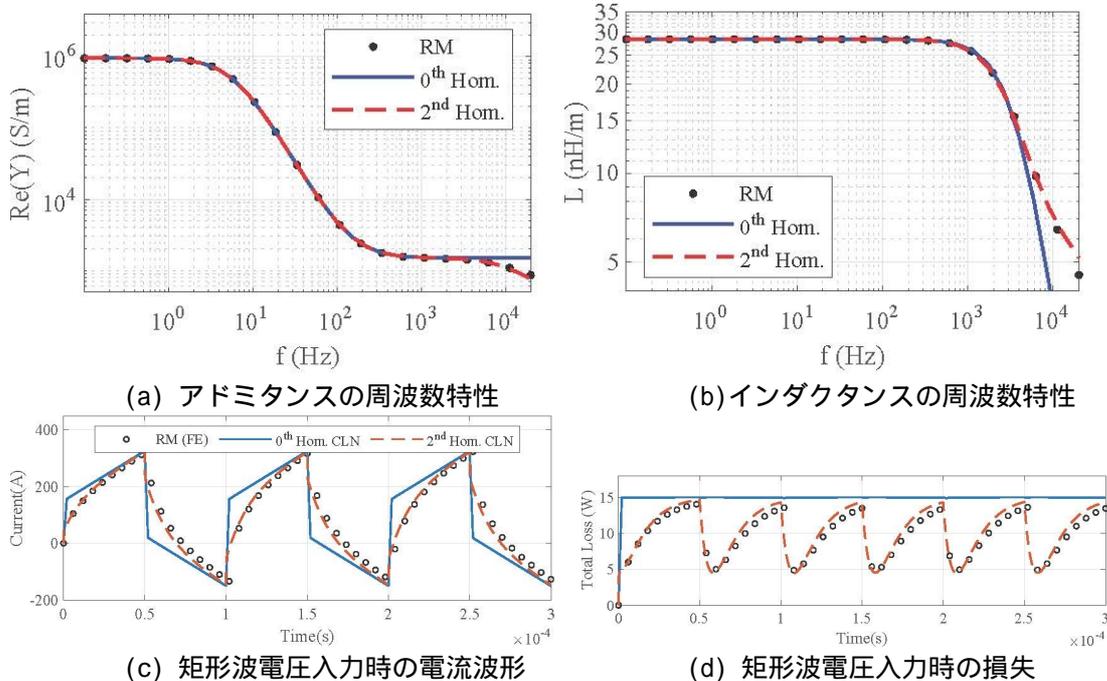
図2 パラメータ依存縮約モデル

図3 モータ縮約モデル

4. 研究成果

(1) マルチスケールモデル縮約法の開発

機器スケールモデル縮約手法（CLN法）に材料スケールモデル縮約法（均質化法）を組み込んだ。まず、積層鉄芯の均質化手法を有限要素磁界解析に組み込んだ定式化を行い、次にそれをCLN法によりモデル縮約する手法を開発した。これにより、材料特性として均質化法を外部参照することなく等価回路の回路パラメータに直接反映させる手法を実現した。電流電圧特性のみならず積層鉄芯内を含む磁界分布を正確に再現することに成功した（図4）。



(a) アドミタンスの周波数特性

(b) インダクタンスの周波数特性

(c) 矩形波電圧入力時の電流波形

(d) 矩形波電圧入力時の損失

図4 マルチスケールモデル縮約法による巻き鉄芯インダクタの縮約表現（图中、RMは有限要素法による詳細解析結果、0th Homおよび2nd Homは0次近似および2次近似均質化法を組み込んだマルチスケール縮約モデルによる結果）

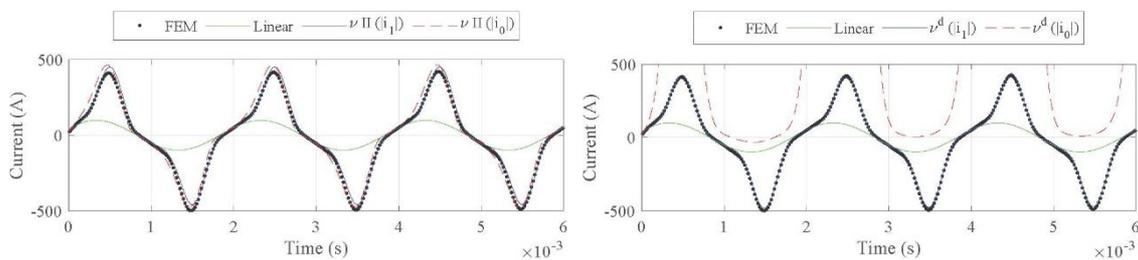
(2) パラメータ依存モデル縮約法の開発

磁気飽和は内部諸量に依存して材料特性が変化する現象の一種であり、これを内部パラメータに依存して縮約モデルを変化させる手法として記述することで、パラメータ依存モデル縮約法の定式化を実現した。パラメータの変化によって基底ベクトルが変化する影響を、パラメータ変動項として厳密に表現することに成功した。磁気抵抗率または微分磁気抵抗率を1次電流依存とすることにより非線形性を表現し、その回路方程式を導出した。本手法により、非線形電磁機器を精度よくモデル縮約することを可能にした（図5）。

次に、本手法を誘導モータ解析の非線形化に適用した。電源磁束、空隙部磁束をパラメータとして飽和度を表現し、小さなパラメータ次元で精度よく飽和度を表現する手法を開発することにより、誘導モータ固定子縮約モデルの非線形化を実現した。トルクなどモータ諸量を時間変化

を含めて精度よく効率的に算出することに成功した(図6)。

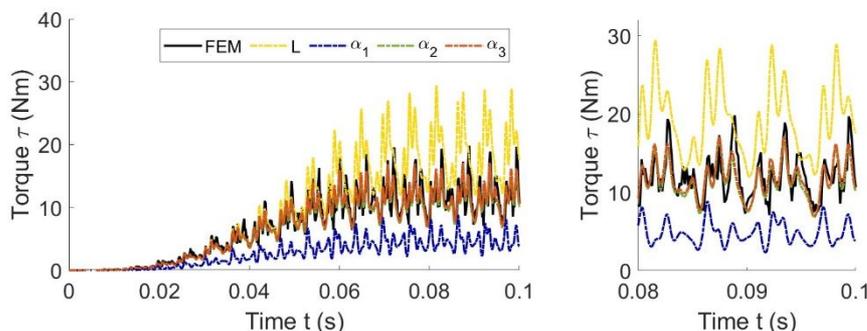
他方で、鉄芯材料の磁気ヒステリシス特性を考慮した非線形モデル縮約手法の開発にも成功している。



(a) 磁気抵抗率を用いた表現

(b) 微分磁気抵抗率を用いた表現

図5 パラメータ化による非線形 MOR を用いたインダクタ解析結果(図中, FEM は有限要素渦電流解析, Linear は線形縮約モデル, $|i_1|$ は初段インダクタ電流によるパラメータ化, $|i_0|$ は全電流によるパラメータによる結果)



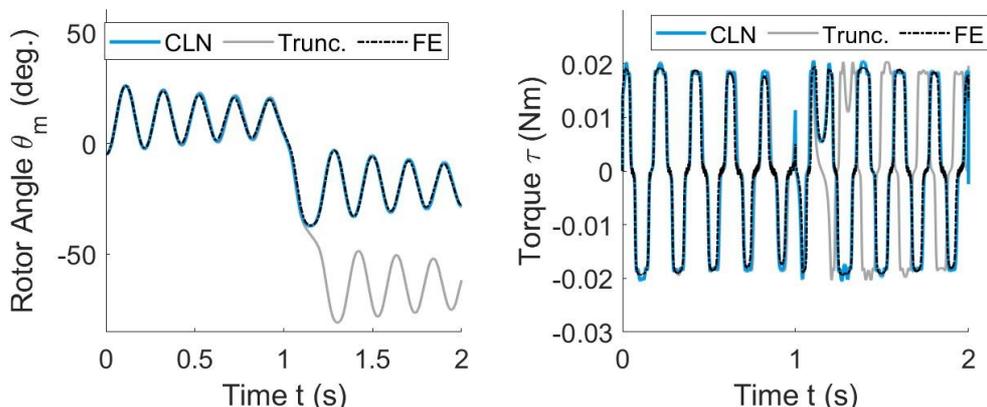
(a) トルクの時間波形

(b) 拡大図

図6 非線形誘導モータ MOR によるトルク波形(図中, FEM は有限要素渦電流解析, L は線形 MOR, α_1 は電源電流によるパラメータ化, α_2 は電源磁束によるパラメータ化, α_3 は空隙部磁束によるパラメータによる結果)

(3) マルチフィジクスモデル縮約法の開発

まず, CLN 法を誘導加熱問題に拡張した。CLN を等価変換することにより, ネットワーク素子の物理的な意味が明確な形で CLN を構成した。次に, ステッピングモータのモデル縮約法を開発し, 運動方程式と連成解析する手法を開発した。ステップ指令に対する過渡応答を同期外れの場合を含めて精度よく模擬できることを示した(図7)。



(a) 回転角の時間変化

(b) トルクの時間波形

図7 縮約モデルによるステッピングモータの同期外れ解析(図中, FE は有限要素渦電流解析, CLN は CLN 法による縮約モデル, Trunc. は表皮効果を考慮しない簡易縮約モデルによる結果)

(4) モータシミュレータの開発 まず, 誘導モータの固定子と回転子に対して個々にマルチポート CLN 法を用いて縮約モデルを構成し, 空隙部の磁界と電界の高調波成分により両縮約モデルを接続することにより, 誘導モータのモデル縮約手法を開発した(図8)。次に, これを用いて, 誘導モータのビヘイビアモデルを開発した。導出したビヘイビアモデルを制御系連成回路シミュレ

ーションに適用し、始動時の過渡現象解析を空間高調波・キャリア高調波による影響含めて高速・高精度に実行可能であることを明らかにした。他方で、かご形誘導モータの3次元構造を考慮するため、スキューを考慮した縮約法を開発した。スキューを近似的に模擬した多段の回転子のモデル縮約と各段間のロータバー電流の接続を考慮することにより、トルク波形を含むモータ諸量を高精度に再現する効率的な縮約モデルを得た。他、空隙部高調波成分の数を削減した縮約モデルの開発、巻線短絡を有する誘導モータのモデル縮約手法の開発を行っている。移動物体を含む解析対象に対する新たなモデル縮約法として、並進運動をする導体を含む系に対して、導体位置にかかわらず固定した基底を用いたモデル縮約手法を開発し、運動する導体中の渦電流界を精度よく表現できることを示した。

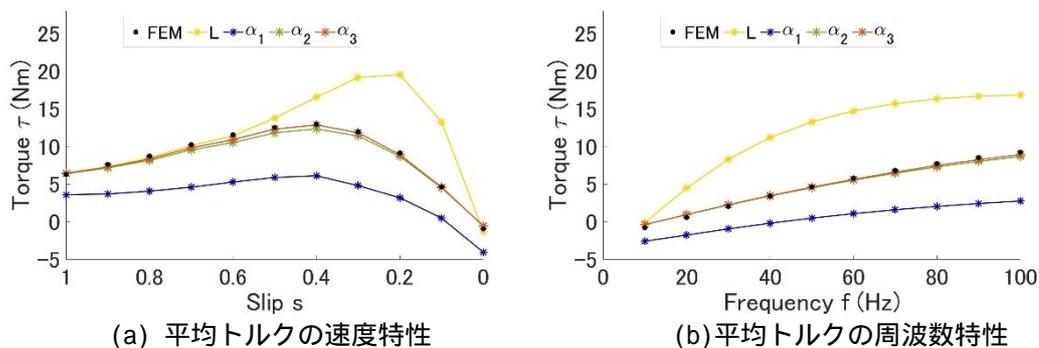


図 8 非線形誘導モータ MOR による動作特性解析 (図中、FEM は有限要素渦電流解析、L は線形 MOR、 α_1 は電源電流によるパラメータ化、 α_2 は電源磁束によるパラメータ化、 α_3 は空隙部磁束によるパラメータによる結果)

(5) CLN 法の精度評価法の開発

固有関数展開と連分数展開との関係を議論することにより、CLN の段数と誤差の関係を理論的に導出した。また、連分数の性質および回路理論に基づいて、CLN 法の誤差解析/精度評価を行う手法を開発し、段数と誤差の関係を幾何学的に評価する手法を開発し、その手法をマルチポート CLN 法に応用することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Takahashi Yasuhito、Fujiwra Koji、Sugahara Kengo、Matsuo Tetsuji	4. 巻 58
2. 論文標題 Reduced Order Modeling Based on Multiport Cauer Ladder Network for Space Harmonics of Air-Gap Flux Density in Cage Induction Motor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8203306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3148418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tobita Miwa、Matsuo Tetsuji	4. 巻 58
2. 論文標題 Nonlinear Model Order Reduction of Induction Motors Using Parameterized Cauer Ladder Network Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8205504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3171743	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shimonishi Toru、Mifune Takeshi、Matsuo Tetsuji	4. 巻 58
2. 論文標題 Frequency-Domain Model Order Reduction of Electromagnetic Field in Induction Motor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8206404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3188062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tobita M.、Matsuo T.	4. 巻 13
2. 論文標題 A model order reduction of hysteretic eddy-current fields in electric machines using Cauer ladder network method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 25208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/9.0000417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Eskandari Hamed, Matsuo Tetsuji	4. 巻 57
2. 論文標題 Comparison Study of First-Order Approximations of Nonlinear Eddy-Current Field Using Cauer Ladder Network Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6300704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3060503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Eskandari Hamed, Gyselinck Johan, Matsuo Tetsuji	4. 巻 57
2. 論文標題 Eddy-Current Field Analysis in Laminated Iron Cores Using Multi-Scale Model Order Reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6301004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3064410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuriyama Kenta, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji	4. 巻 57
2. 論文標題 Multiport Model Order Reduction With Multiple Expansion Points	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6301505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3065024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tobita Miwa, Eskandari Hamed, Matsuo Tetsuji	4. 巻 41
2. 論文標題 Model order reduction of nonlinear eddy-current field using parameterized CLN	5. 発行年 2021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 967 ~ 980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/COMPEL-02-2021-0065	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 Tobita Miwa, Matsuo Tetsuji	4. 巻 59
2. 論文標題 Nonlinear Model Order Reduction of a Variable Reluctance Stepper Motor Using the Parameterized Cauer Ladder Network Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8200604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3232701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji, Sugahara Kengo, Matsuo Tetsuji	4. 巻 59
2. 論文標題 Model Order Reduction of Cage Induction Motor With Skewed Rotor Slots Using Multiport Cauer Ladder Network Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8201004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3240478	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagamine Hideaki, Hiruma Shingo, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji	4. 巻 59
2. 論文標題 Error Estimation of the Cauer Ladder Network Method Based on Eigenfunction Expansion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7001604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3246596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Eskandari Hamed, Kaimori Hiroyuki, Matsuo Tetsuji	4. 巻 60
2. 論文標題 Second-Order Approximation of Nonlinear Eddy-Current Problems by a Cauer Ladder Network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6300604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3310575	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagamine Hideaki、Hiruma Shingo、Mifune Takeshi、Matsuo Tetsuji	4. 巻 60
2. 論文標題 Henrici-Pfluger-Type Error Estimators for the Cauer Ladder Network Representation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7200404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3306785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugahara Kengo、Tanimoto Naoto、Takahashi Yasuhito、Matsuo Tetsuji	4. 巻 60
2. 論文標題 Cauer Ladder Network With Constant Basis Functions for Eddy Current Problems Involving Conductor Movement	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6300404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3304725	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagamine Hideaki、Hiruma Shingo、Mifune Takeshi、Matsuo Tetsuji	4. 巻 60
2. 論文標題 Truncation Error Formula for Multi-Port Cauer Ladder Networks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7201208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2024.3387309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuo Tetsuji、Takahashi Yasuhito、Sugahara Kengo	4. 巻 60
2. 論文標題 Reduced Representation of Spatial Harmonics for Motor Model Order Reduction Using Block Arnoldi Method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8200504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3302859	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuo Tetsuji, Ozeki Toshihiro, Hiruma Shingo, Mifune Takeshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Port Reduction of Multiport Cauer Ladder Network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7200704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3322286	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Eskandari Hamed, Gyselinck Johan, Matsuo Tetsuji	4. 巻 58
2. 論文標題 Nonlinear Multi-Scale Model Order Reduction of Eddy-Current Problems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 6300305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3080301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計40件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 加藤春弥, 菅原賢悟
2. 発表標題 誘導加熱解析における電磁場熱連成解析へのCLN 法の適用
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 長嶺英朗, 比留間真悟, 美船健, 松尾哲司
2. 発表標題 固有関数展開を用いた Cauer Ladder Network 法の誤差解析に関する一検討 (その2)
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 飛田美和, 松尾哲司
2. 発表標題 カウアーラダーネットワーク法による磁気ヒステリシス特性を考慮した電気機器モデル縮約
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 丸山弘貴, 高橋康人, 藤原耕二, 菅原賢悟, 松尾哲司
2. 発表標題 マルチポートCLN法を用いた固定子巻線短絡を有するかご形誘導電動機のモデル縮約に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideaki Nagamine, Shingo Hiruma, Takeshi Mifune, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Convergence Analysis of the Cauer Ladder Network Method using Eigenfunction Expansion
3. 学会等名 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miwa Tobita, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Nonlinear Model Order Reduction of a Variable Reluctance Stepper Motor
3. 学会等名 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunya Kato, Kengo Sugahara, Yasuhito Takahashi, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Induction Heating Analysis with Cauer Ladder Network Method
3. 学会等名 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Kengo Sugahara, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Model Order Reduction of a Cage Induction Motor with Skewed Rotor Slots Using Multiport Cauer Ladder Network Method
3. 学会等名 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Tobita, T. Matsuo
2. 発表標題 A Model Order Reduction of Hysteretic Eddy-current Fields in Electric Machines Using Cauer Ladder Network Method
3. 学会等名 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長嶺英朗, 比留間真悟, 美船健, 松尾哲司
2. 発表標題 Henrici-Pfluger型誤差限界を用いたCLN法の精度評価に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松尾哲司, 高橋康人, 菅原賢悟
2. 発表標題 CLN法を用いたモータモデル縮約におけるギャップ高調波成分の縮約表現に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅原賢悟, 谷本直斗, 高橋康人, 松尾哲司
2. 発表標題 基底関数を一定とした可動子CLNのT.E.A.M. 28への適用
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飛田美和, 松尾哲司
2. 発表標題 半陰解法と予測子修正子法を用いたヒステリシス有限要素解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飛田美和, 松尾哲司
2. 発表標題 非線形CLN法を用いた誘導機のモデル縮約表現
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 下西徹, 美船健, 松尾哲司
2. 発表標題 CLN法を用いた誘導モーターモデル縮約における空間高調波相互作用に関する検討
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 長嶺英朗, 美船健, 松尾哲司, 菅原賢悟
2. 発表標題 FP-CLN法の近似解の誤差評価に関する検討
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 T. Shimonishi, T. Mifune, T. Matsuo
2. 発表標題 Frequency Domain Model Order Reduction of Electromagnetic Field in Induction Motor
3. 学会等名 23th Conference on Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Tobita, T. Matsuo
2. 発表標題 Nonlinear Model Order Reduction of Induction Motors Using Parameterized CLN Method
3. 学会等名 23th Conference on Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Takahashi, K. Fujiwara, K. Sugahara, T. Matsuo
2. 発表標題 Reduced Order Modeling Based on Multiport Cauer Ladder Network for Space Harmonics of Air-gap Flux Density in Cage Induction Motor
3. 学会等名 MMM/Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長嶺英朗, 比留間真悟, 美船健, 松尾哲司
2. 発表標題 固有関数展開を用いたCauer Ladder Network法の誤差解析に関する一検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比留間真悟, 松尾哲司
2. 発表標題 CLN法のための誤差評価手法の数理的背景に関する考察
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安井昌輝, 高橋康人, 藤原耕二, 菅原賢悟, 松尾哲司
2. 発表標題 マルチポートCLN法を用いたスキューを有するかご形誘導電動機のモデル縮約に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飛田美和, エスカンダリハメド, 松尾哲司
2. 発表標題 パラメータ依存CLN法を用いた非線形磁界の縮約表現に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下西徹, 美舩健, 松尾哲司
2. 発表標題 誘導モーター磁界の周波数領域における縮約表現に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇野賢, 高橋康人, 藤原耕二, 菅原賢悟, 松尾哲司
2. 発表標題 マルチポートCLN法のかご形誘導電動機への適用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 2020年

1. 発表者名 M. Tobita, H. Eskandari, T. Matsuo
2. 発表標題 Model Order Reduction of Nonlinear Eddy-current Field Using Parameterized CLN
3. 学会等名 19th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Eskandari, T. Matsuo
2. 発表標題 Comparative Study of First-Order Approximation of Nonlinear Eddy-Current Field Using CLN Method
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Eskandari, J. Gyselinck, T. Matsuo
2. 発表標題 Multi-scale Model Order Reduction of Eddy-Current Field on Laminated-Core Devices
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kuriyama, T. Mifune, T. Matsuo
2. 発表標題 Multi-port Model Order Reduction with Multiple Expansion Points
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾哲司, エスカンダリハメド, 飛田美和
2. 発表標題 非線形CLN法とその回路方程式に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇野賢, 高橋康人, 藤原耕二, 菅原賢悟, 松尾哲司
2. 発表標題 マルチポートCLN法に基づくピヘイピアモデルを用いたかご形誘導電動機の制御系連成シミュレーション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 2020年

1. 発表者名 仲矢郁雄, 菅原賢悟
2. 発表標題 モーメント法に基づくCLN法を用いた多導体伝送線路モデルの等価回路解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・環境電磁工学・エレクトロニクスシミュレーション他合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲矢郁雄, 菅原賢悟
2. 発表標題 積分方程式とCLN法を用いた複合素線の数値計算
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 菅原賢悟, 飛田美和, 松尾哲司, 高橋康人
2. 発表標題 Fixed-Point Harmonic Balance法に基づく非線形カウア回路法
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kengo Sugahara, Naoto Tanimoto, Yasuhito Takahashi, Tesuji Matsuo
2. 発表標題 Cauer Ladder Network Representation with Constant Basis Functions for Eddy Current Problems Involving Conductor Movement
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hamed Eskandari, Hiroyuki Kaimori, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Second Order Approximation of Nonlinear Eddy-Current Problems by a Cauer Ladder Network
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuji Matsuo, Yasuhito Takahashi, Kengo Sugahara
2. 発表標題 Reduced Representation of Spatial Harmonics for Motor Model Order Reduction Using Block Arnoldi Method
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideaki Nagamine, Shingo Hiruma, Takeshi Mifune, Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Henrici-Pfluger type error estimators for the Cauer ladder network method
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuji Matsuo, Toshihiro Ozeki, Shingo Hiruma, Takeshi Mifune
2. 発表標題 Port Reduction of Multiport Cauer Ladder Network
3. 学会等名 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松尾哲司, 尾関俊大, 飛田美和, 比留間真悟, 美船 健
2. 発表標題 非線形モータモデル縮約におけるギャップ高調波成分の縮約表現に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 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
研究 分担者	菅原 賢悟 (Kengo Sugahara) (50718963)	近畿大学・理工学部・准教授 (34419)	
研究 分担者	高橋 康人 (Yasuhito Takahashi) (90434290)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	

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