

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630101

研究課題名(和文) モデル縮約による電磁機器の高速3次元最適化の実現

研究課題名(英文) Realization of fast three-dimensional optimization of electric apparatus using model order reduction

研究代表者

五十嵐 一 (Igarashi, Hajime)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90212737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、3次元最適化の高速化を実現するために、モデル縮約法を用いた有限要素法を開発した。まずモデル縮約法のひとつである固有直交分解法を用いることにより、準定常電磁界の非定常問題を高速に解けることを示した。またアンテナの形状最適化問題への本法の有効性を示した。さらに、磁気飽和が強い部分とそれ以外の部分に自動的に領域を分割し、後者にのみモデル縮約法を適用する方法(部分領域モデル縮約法)と、回転機解析において角度範囲を分割し、範囲ごとに基底を構成することで解析時間を短縮する方法(ブロックモデル縮約法)を提案した。またモデル縮約法により、有限要素モデルから等価回路を合成する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have developed a finite element method (FEM) based on the model order reduction (MOR) to realize fast three-dimensional optimization. I have shown that transient quasi-static electromagnetic fields can be fast analyzed using the proper orthogonal decomposition (POD) which is one of the MOR methods. I have shown that POD-based FE analysis is useful and effective for shape optimization of antennas. Moreover, I have proposed the sub-domain MOR in which the domain is automatically subdivided into strongly saturated and other regions to latte of which MOR is applied, and block MOR in which the angle-domain for rotating machine analysis is subdivided into small ones in each of which the basis vectors for MOR are constructed. I have also shown that using the MOR technique, the equivalent circuits can directly be synthesized from FE models of electric apparatus.

研究分野：電磁界解析

キーワード：モデル縮約法 最適設計 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

(1) **社会的背景**：近年グローバル化した競争環境下において、インダクタやモータ、MRI装置などの電磁機器の開発には、高性能化や低損失化、小型化、様々な環境下での性能維持など多様な要求を同時に満足する設計を短期間に行わなければならない。このような設計を行うためには、電磁界の有限要素解析に基づく設計最適化が有効であり、世界的にその研究が進められている。

(2) **現状の問題点**：最適化計算において最急降下法などの勾配法を用いた場合、局所解に陥る可能性が高いという問題がある。これに対して、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)を始めとする多数点同時探索法を用いると、大域最適解に近い解を求めることができる。しかしGAでは、多数の個体に対して有限要素解析を行う必要があるため、計算時間が長いという難点がある。特に、3次元有限要素モデルの最適化には1週間以上の時間を要するため、3次元最適化は設計に活用されていない。しかし、電磁機器を忠実にモデル化して信頼性の高い最適化結果を得るためには、3次元モデルが必要である。このため、3次元有限要素解析の高速化が強く望まれていた。

2. 研究の目的

(1) **研究目的**：本研究では3次元有限要素方程式を縮約して未知数を数万分の一に減らすことにより、解析の大幅な高速化を実現するモデル縮約法を開発する。実施する具体的な研究内容を以下にまとめる。

- (a) 過渡現象を高速に解析するための時間領域モデル縮約法の開発
- (b) 設計パラメータと電磁機器性能の関係を高速計算するパラメータ領域モデル縮約法の開発
- (c) モデル縮約法を基礎としたGAの開発とそれによる3次元電磁機器の高速設計最

適化の実現

(2) **学術的な特色・独創的な点と波及効果**：本研究の特色は、3次元最適化を可能とするために、モデル縮約法を用いて電磁界解析を高速化する点にある。このような研究は世界的にみても例がほとんどなかった。また、たとえば自動車用モータは軸方向に短い構造を有しているため、端部効果の考慮が可能な3次元モデルを用いた最適化が今後重要になってくる。さらに変圧器やリアクトル、MRI機器等のように3次元モデルを用いた最適化が必要な電磁機器が多数あるため、本研究による3次元最適化の高速化は大きな意義がある。

(3) **本研究の新規性とチャレンジ性**：多数の変数を持つ系を少ない自由度で近似する方法として、固有直交分解法に基づくモデル縮約法(model order reduction)がある。本法は低次元の基底ベクトルを構成し、その基底ベクトル線形結合で系の挙動を記述する。この場合の変数は基底ベクトルの係数となる。固有直交分解法ではデータ列(スナップショット列)を蓄積し、主成分分析により直交基底を求める。本法では各スナップショットをベクトル空間の点と見なし、点集合の分散が大きな方向に基底ベクトルを構成する(図1)。これにより少数の基底ベクトルの線形結合で多次元データを表現できる。申請者は電磁界の有限要素解析の高速化のために、固有直交分解法をベースとしたモデル縮約が有効であると考えた。すなわち有限要素解析を少数回実施して電磁界のスナップショットを蓄積し、固有直交分解法を用いて有限要素方程式を縮約する(図2)。縮約された方程式の未知変数(数10)は、元方程式の未知数(数10万~数100万)に比べて圧倒的に少ない。したがって、いったん縮約方程式を構成すれば、電磁界解析を高速に行うことができる。

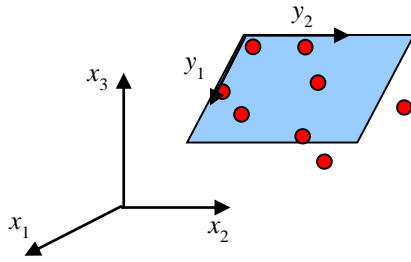


図1 モデル縮約による低次元化の例. 本来は数10~100万次元空間であるが, 簡単のため3次元で表示した. 各点がスナップショットデータを表す. この場合3変数の系を2変数で近似している.

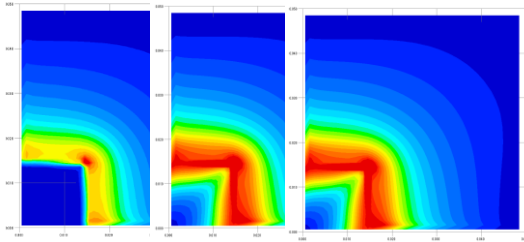


図2 電磁界スナップショットの例. これらの主成分分析より基底ベクトルを求める.

3. 研究の方法

(1) 研究方法の概要: 3次元電磁機器最適化の実利用を可能とするために, モデル縮約法を用いた高速有限要素法を開発する. 本研究で実施する研究の具体的な内容を以下にまとめる.

- ① 電磁界の過渡解析を高速化するために時間領域モデル縮約法を開発する. まず適切なスナップショット数を決定する方法を開発する. また磁気飽和など非線形性がある系への有効性を確認する.
- ② 最適化において, 設計パラメータを様々な変化させて電磁機器の特性を求めるが, この計算を高速化するためのパラメータ領域モデル縮約法を開発する. そしてモデル縮約法をGAによる電磁機器最適化に適用して, 計算時間の短縮化効率と最適化結果の妥当性を検証する.

(2) 固有直交分解法: 有限要素方程式の縮約法を図3に示す. 3次元モデルに対する有限要素方程式の未知数 m は通常, 数10万~数100万であるが, 縮約された方程式の

未知数は, スナップショット数 m (数10)となる. モデル縮約法を用いて渦電流分布を解析した例を図4に示す.

電磁機器の最適化に本法を活用する方法として, 過渡解析を高速化して解析時間を短縮する方法(時間領域モデル縮約法と呼ぶ)と, パラメータを変化させて系の特性を求める計算を高速化する方法(パラメータ領域モデル縮約法と呼ぶ)が考えられる.

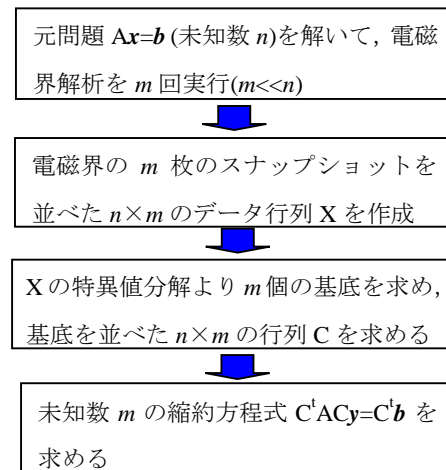


図3 縮約方程式構成の流れ

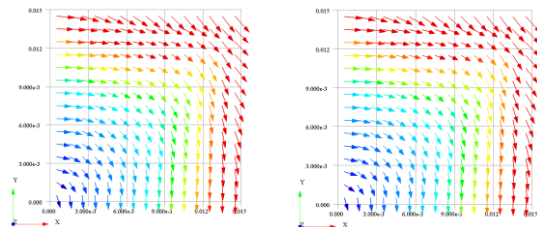


図4 うず電流分布の例. 左が未知数約40万の元問題を解いて得た分布, 右が未知数50の縮約方程式を解いて得た分布. よく一致している.

(3) 時間領域モデル縮約法の研究: 準静電磁界(有限要素法の未知数 n は数10万~数100万程度)の過渡解析にモデル縮約法を適用するために, 初期状態から m 個($m \ll n$)の時間ステップで元問題の解析を実行し, 電磁界分布をスナップショットする(図2参照). そして得られた電磁界 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^n$ (有限要素法の未知数である辺の起磁力からなるベクトル)からデータ行列 $X = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m]$ を構成し, X に特異値分解 $X = W S V^*$ を適用することで m 個の基底ベクトルからなる

行列 W を得る(固有直交分解法). そして有限要素法の未知数を $x = W\tilde{x}$ と変換することにより, 有限要素方程式の未知数を大幅に削減することができる. そしてこれ以降は上で得た縮約方程式を解いて電磁界解析を実行する.

(4) パラメータ領域モデル縮約法の研究:

最適化では, 駆動波形や材料特性, サイズなどの設計パラメータを様々に変化させて電磁機器の特性を求めることが必要である. このような解析にモデル縮約法を適用するために, パラメータ空間の少数のサンプリング点で電磁界解析を行い, 得られたスナップショットから固有直交分解法を用いて直交基底を構成する. そしてパラメータ変化に対する機器の特性変化を縮約モデルにより高速計算する.

(5)磁気飽和の考慮: 電磁界解析においては磁性材料の磁気飽和などの非線形現象を扱わなければならない. このとき, 磁気飽和がない領域のスナップショットから求めた基底では, 磁気飽和した界分布を精度よく表現できない. そこで, 電磁界を磁気非線形性が強い領域とそれ以外に分割し, 後者にのみモデル縮約法を適用する(部分領域モデル縮約法).

4. 研究成果

(1) 時間領域モデル縮約法: 非定常の準定常電磁界問題を考え, 初期のタイムステップにおいて電磁界のスナップショットを取り, 固有直交分解法により基底ベクトルを作成して, 方程式を縮約した. 後のタイムステップでは縮約された方程式を解くことで電磁界の時間発展を解析した. 本法においては, スナップショットをどの時間まで取るかということが問題となる. そこで, あるタイムステップ数 s と, つぎのタイムステップ $s+1$ における誤差(縮約しない場合の磁束密度と縮約して求めた磁束密度の相対誤差)の比 e_{s+1}/e_s が閾値よりも小さくなった時点

で, スナップショットを終了する方法を提案し, その有効性を確かめた. また本法は, 磁束密度の飽和が強い領域では解析誤差が大きくなることがわかった(雑誌論文(7) これまで 18 回引用されている (Google Scholar)).

上記の問題を解決するため, 磁束密度の飽和が強い領域とそれ以外の領域を自動的に同定し, 後者にのみモデル縮約法を適用する方法を提案し, その有効性を実証した(雑誌論文(8), (5)).

(2) パラメータ領域モデル縮約法: 電気電子機器形状の最適設計問題を考える. ここで, 機器形状は寸法, 角度等のパラメータにて表現されているとする. 通常最適設計においては, パラメータを変化させるごとに電磁界解析を実行して目的関数, 拘束条件を評価するため, 長い計算時間が必要である. そこで, パラメータを変化させて電磁界のスナップショットを取り, 固有直交分解法により基底を作成することで電磁界の有限要素法定式を縮約し, 解析時間の短縮を行う方法を提案し, その有効性をテストした. 例題としては, ミアンダアンテナと, スパイラルアンテナの最適設計問題を選んだ. この結果, 計算時間を約20%に削減できることがわかった(雑誌論文(6)).

上記のほかに, モデル縮約法を回転機の解析に適用することを考えた. 回転機においては, 回転子が回転するごとに磁束分布が大きく変化するため, 正確な縮約モデルを作成するためには多数のスナップショットが必要となる. また回転機の磁気コアでは磁気飽和が生じるため, 縮約モデルを構成しても, 行列積を角度ごとに計算する必要があり, 計算時間の短縮効果があまりなかった. この問題を解決するため, 解析する角度範囲を小さな範囲に分割し, その範囲ごとに基底を作成する方法を提案した. この方法では変換行列が小さくなるため, 行

列積の計算時間を短くできる。本法を IPM モータの磁界解析に適用し、本法の有効性を確認した(雑誌論文(4)).

(3) モデル縮約法による等価回路合成の可能性に関する検討：当初の研究計画にはなかったが、モデル縮約法を用いることで、電気電子機器の有限要素モデルから直接、等価回路を合成する方法を着想したため、研究期間において、その基礎検討を行った。その結果、固有直交分解法および Pade via Lanczos 法により、実際に Foster 型および Cauer 型の等価回路を合成でき、電気電子機器の入出力特性を精度よく表現できることがわかった(雑誌論文(1), (2), (3)).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

(1)Yuki Sato, Hajime Igarashi, Equivalent Circuit of Antennas Generated by Model Order Reduction, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 印刷中

(2)Yuki Sato, Hajime Igarashi, Generation of Equivalent Circuit from Finite-Element Model Using Model Order Reduction, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, vol.52, 1100304, 2016

10.1109/TMAG.2015.2476370

(3)Toshihito Shimotani, Yuki Sato, Hajime Igarashi, Equivalent-Circuit Generation from Finite-Element Solution Using Proper Orthogonal Decomposition, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, vol.52, 7206804, 2016

10.1109/TMAG.2015.2482540

(4)Toshihito Shimotani, Yuki Sato, Takahiro Sato, Hajime Igarashi, Fast Finite-Element Analysis of Motors Using Block Model Order Reduction, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, vol.52, 7207004, 2016

10.1109/TMAG.2015.2482542

(5)Yuki Sato, Markus Clemens, Hajime Igarashi, Adaptive Subdomain Model Order Reduction With Discrete Empirical Interpolation Method for Nonlinear Magneto-Quasi-Static Problems, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, vol.52, 15786607, 2016

10.1109/TMAG.2015.2489264

(6)Y Sato, F Campelo, H Igarashi, Fast Shape Optimization of Antennas Using Model Order Reduction, IEEE Transaction on Magnetics, 査

読有, vol.51, no.3, 7204304, 2015

10.1109/TMAG.2014.2358295

(7)Y. Sato, H. Igarashi, Model Reduction of Three-Dimensional Eddy Current Problems Based on the Method of Snapshots, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.49, 1697-1700, 2013

10.1109/TMAG.2013.2241412

(8)佐藤佑樹, 五十嵐一, 部分領域モデル縮約法を用いた電磁界解析について, 計算数理工学論文集, 査読有, vol.13, pp.109-114, 2013

[学会発表] (計 8 件)

(1)佐藤佑樹, 五十嵐一, モデル縮約法を用いた等価回路生成(その2) -Cauer型等価回路の生成-, 電気学会静止器回転機合同研究会, 富士通(東京), 2016年1月21日

(2)下谷俊人, 佐藤佑樹, 五十嵐一, 橋本英二, 今成宏幸, 木原美怜, モデル縮約法を用いた誘導加熱装置の電磁界-熱伝導連成解析, 日本機械学会第28回計算力学講演会, 横浜国立大学(横浜市), 10月10日, 2015

(3)Yuki Sato, Hajime Igarashi, Fast Eddy Current Analysis Using Model Order Reduction and Time-Periodic Explicit Error Correction, 17th International Symposium on Electromagnetic Fields (ISEF2015), Technical University of Valencia (Valencia, Spain), 2015年09月10日~2015年09月12日

(4)Toshihito Shimotani, Yuki Sato, Hajime Igarashi, Direct Generation of Equivalent Circuits from Reduced FE Models Using Proper Orthogonal Decomposition, 17th International Symposium on Electromagnetic Fields (ISEF2015), Technical University of Valencia (Valencia, Spain), 2015年09月10日~2015年09月12日

(5)佐藤佑樹, Markus Clemens, 五十嵐一, 部分領域モデル縮約法を用いた非線形準静磁場解析の高速化, 電気学会静止器回転機合同研究会, 宮古島マリンターミナル(沖縄県宮古市), 3月5日, 2015.

(6)下谷俊人, 佐藤佑樹, 五十嵐一, モデル縮約法を用いた等価回路生成, 電気学会静止器回転機合同研究会, 宇都宮大学 (栃木県宇都宮市), 2014年09月25日~2014年09月26日

(7)下谷俊人, 佐藤佑樹, 五十嵐一, 固有直交分解を用いたモデル縮約法による電磁機器の有限要素解析, 第27回計算力学講演会, 岩手大学 (岩手県盛岡市), 2014年11月22日~2014年11月24日

(8)佐藤佑樹, 五十嵐一, モデル縮約法を用いた電磁機器形状最適化の高速化, 電気学会静止器回転機合同研究会, 秋田市にぎわい交流館AU(秋田市), 2013年09月26日

[その他]

ホームページ等

<http://hbd.ist.hokudai.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

五十嵐一 (IGARASHI, Hajime)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90212737