

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤 (C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560289  
 研究課題名 (和文) マルチフィジックス有限要素解析法と複数コイル系による  
 電磁誘導加熱方式の研究  
 研究課題名 (英文) Research on Multi-Physics Finite Element Method and  
 Design of Induction Heating System with Several Coils  
 研究代表者  
 島崎 眞昭  
 福井工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：60026242

研究成果の概要：現在産業界で盛んに利用されている電磁誘導加熱では、加熱対象の周囲に交流磁界を発生させ電磁誘導によって誘導される渦電流によって加熱を行う。加熱対象とコイルの形状・配置などの設定によって渦電流の分布は複雑に変化するため、目的・状況に応じた適切な加熱装置の設計を行うのは一般に容易でない。本研究では、マルチフィジックス有限要素法に基づく誘導加熱設計ソフトウェアの開発を行い、金属加工を想定した誘導加熱装置の最適設計への応用を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：電気機器工学

科研費の分科・細目：5101

キーワード：マルチフィジックス、連成解析、最適化、電磁誘導

## 1. 研究開始当初の背景

工学設計においてコンピュータ・シミュレーションによる試作前の検討の有効性が認識されるようになり、コンピュータによる解析が一般化してきた。従来の解析に比較して精度の高い解析を実現するには、物理モデルの高度化が本質的に重要で、電磁界、熱、力学、流体などの複数の物理原理に基づいて対象のモデル化と解析を行うマルチフィジックス連成解析の必要性が認識されている。本研究で直接の対象とする電磁誘導加熱においても、少なくとも電磁誘導現象と熱伝導現象の両者を扱うマルチフィジックス連成解

析が必要となる。

電磁誘導加熱は、既に産業界で盛んに利用されている。電磁誘導加熱では、導電性の加熱対象に対して、適切に配置したコイルによって加熱対象の周囲に交流磁界を発生させる。このとき電磁誘導によって加熱対象内に渦電流が誘導されるので、ジュール熱により加熱が行われる。コイルに与える電流の周波数・大きさ、加熱対象とコイルの形状・配置などの設定によって、誘導される渦電流の分布は複雑に変化するため、目的・状況に応じた適切な加熱装置の設計を行うのは一般に容易でない。これに対してコンピュータを用

いたマルチフィジックス連成解析による設計支援が有用と考えられる。

## 2. 研究の目的

### (1) 誘導加熱設計のためのマルチフィジックス有限要素解析ソフトウェアの開発

誘導加熱現象のシミュレーションを実行するために、電磁気学的現象と熱伝導現象を扱うマルチフィジックス有限要素解析コードの開発を行う。

### (2) 遺伝アルゴリズムによる最適化計算

複数コイルの形状・配置などを変数（パラメータ）として誘導加熱系の設計を行う場合を考える。パラメータ最適化を行う上では、与えられた一組のパラメータに対してその良好さを表す評価値を求める必要がある。ここで前項に述べたマルチフィジックス有限要素解析ソフトウェアを用いれば、コンピュータ・シミュレーションによって求めた詳細な温度場分布に基づいて評価値を計算することができる。

一方、評価値計算を繰り返しながらパラメータ空間を効率的に探索するための最適化手法も重要である。パラメータの大域的探索に優れるとされる最適化手法の一つに遺伝アルゴリズム(GA, Genetic Algorithm)があるが、本研究ではGAの一種である $\mu$ GA(micro GA)の応用について検討する。

### (3) マルチフィジックス有限要素解析の高速性・柔軟性の向上

最適化計算において評価値の計算は多数回繰り返されるので、評価値計算に使用するマルチフィジックス有限要素解析を高速化することが計算コストの観点から重要である。また、対象とするモデルの複雑化に対応するために解析ソフトウェアの柔軟性を向上させることも求められる。本研究では解析ソフトウェアの高速性・柔軟性の向上を目指して、以下に述べる研究・開発を行う。

### ①大規模連立方程式に対する高速求解法に関する研究

有限要素法による定式化では、最終的に連立方程式が導かれ、その求解計算が必要となる。この連立方程式の自由度（未知数の数）は、使用するメッシュが細密になるに従って増大するため、解析の高精度化・大規模化を目指す際には、自由度の大きい連立方程式に対する効率的な求解法を使用することが重要となる。

また、有限要素解析においては、対象とする物理現象の性質を考慮して適したメッシュ生成を行うことが重要である。マルチフィジックス解析において複数の物理現象に対して共通のメッシュを使用するときには、各

現象を個別に扱うのと比較して、より詳細なメッシュが必要とされ、また、メッシュに扁平な形状が現れることも多くなる。この場合、大規模連立方程式に対する優れた求解法の重要性はさらに高くなり、使用するメッシュ形状に依存しない頑健性も要求される。

本研究では、有限要素解析で現れる連立方程式に対する高速求解法の開発を目的の一つとする。

### ②並列計算に関する研究

近年、並列計算環境の利用が急速に普及している。有限要素解析の高速化のために並列計算を導入する。

### ③非線形材料を含む解析に関する研究

誘導加熱装置のみならず、電気機器に関するシミュレーションにおいては、磁性体磁気特性の非線形性を考慮することが重要である。磁気非線形性を考慮した有限要素解析への代数マルチグリッド法の応用について研究を行う。

### ④モルタル有限要素法に関する研究

マルチフィジックス解析においては現象毎に使用するメッシュを変える方が効率的である。また力学的変形を伴う場合や領域の一部の移動を伴う場合には、変形領域、可動部分に対し別途メッシュを作成することが考えられるが非整合メッシュを扱う難しい問題となる。本研究では、非整合メッシュを許容することで解析モデルの複雑化への柔軟な対応を可能にするモルタル有限要素法に着目し、モルタル有限要素法で導かれる連立方程式に対する高速求解法について研究を行う。

### (4) 複数コイルを使用する誘導加熱系の最適設計

項目(1)～(3)で開発した要素技術を連携させ、複数コイルを使用する誘導加熱系の最適設計に関する検討を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 誘導加熱設計のためのマルチフィジックス有限要素解析ソフトウェアの開発

開発する解析コードでは、ステップバイステップ法による非定常解析によって温度場の解析を行う。ただし、電磁気学的現象についての時定数は熱伝導に関するそれより十分小さいとみなして、温度場解析の各ステップにおいて時間調和磁界解析を行うことで、そのステップにおける渦電流密度・ジュール熱分布を計算する。磁界解析における未知数は磁気ベクトルポテンシャルである。これによって、導電率などの材料定数の温度依存性も考慮したマルチフィジックス連成解析が

可能となる。

#### (2) 遺伝アルゴリズムによる最適化計算

$\mu$ GA は、5 個体程度の少数の個体を用いることが特徴で、これにより、局所最適解への収束を速める。また、個体群が収束に達すれば、最適個体を残したまま、個体群をランダムに再構成する。このランダムな再構成を頻繁に繰り返すことにより、多様性が確保される。従来 GA では、効率的な探索を行うために、多くのパラメータを調整する必要があり、ノウハウと試行錯誤が必要である。これに対して、 $\mu$ GA で設定すべきパラメータの数は少なく、これも  $\mu$ GA の利点の一つである。

#### (3) マルチフィジックス有限要素解析の高速性・柔軟性の向上

##### ①大規模連立方程式に対する高速求解法に関する研究

代数マルチグリッド法はマルチグリッド法の一つで、有限要素解析で導出される連立一次方程式の反復解法として、高速性・汎用性・簡便性を備えた有力な手法の一つである。まず、誘導加熱系のマルチフィジックス有限要素解析への応用の準備段階として、辺要素を用いた磁界解析のための新規的代数マルチグリッド法の開発を行う。

さらに、代数マルチグリッド法を含むマルチグリッド法に関する研究に関連して、連立方程式の高速求解法の開発に有用な陰的/陽的誤差修正 (IEC/EEC, Implicit/Explicit Error Correction) についても研究・開発を行う。IEC/EEC は反復解法の性能改善を目指すための柔軟なフレームワークであり、マルチフィジックス有限要素解析において反復解法の性能が十分でない場合に、性能改善のための有力なツールとなることが期待できる。

##### ②並列計算に関する研究

近年急速に普及しつつあるマルチコア CPU を有効利用して有限要素解析の高速化を図るため、OpenMP によるスレッド並列計算について検討する。辺要素解析にマルチグリッド法を適用する際に有効とされる手法の一つに、Arnold, Folk, Winther によって提案された特殊なブロックガウスザイデル法がある。本研究では、代数マルチグリッド法の各グリッドレベルにおいて、節点多色順序付けを用いることで、Arnold, Folk, Winther のブロックガウスザイデル法の並列化が可能になることを示す。

##### ③非線形材料を含む解析に関する研究

磁気スカラポテンシャルを未知数とする磁界解析について、線形探索をとりいれたニ

ュートンラフソン法と代数マルチグリッド法を併用することによって、解析に要する計算時間を大幅に削減できることを示す。

##### ④モルタル有限要素法に関する研究

モルタル有限要素法で現れる大規模連立方程式に対して、前述した代数マルチグリッド法を適用することで高速に求解を行う。モルタル有限要素法で現れる非スパース行列に対して直接代数マルチグリッド法を適用するのは非効率的であるが、近似行列を使用することによって効率的な計算を可能にする。

#### (4) 複数コイルを使用する誘導加熱系の最適設計

パラメータ探索には (2) で述べた  $\mu$ GA を使い、評価値計算には (1) および (3) で開発・改良したマルチフィジックス有限要素解析コードを使用することで、誘導加熱系の効率的な最適設計を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 誘導加熱設計のためのマルチフィジックス有限要素解析ソフトウェアの開発

磁界・温度場ともに軸対称分布を仮定したモデルを対象として、Fortran 95/2003 を用いてマルチフィジックス有限要素解析コードを開発した。

##### (2) 遺伝アルゴリズムによる最適化計算

漏洩磁界最小化問題に対して  $\mu$ GA を適用し、その有効性を示した [学会発表③]。同手法は、誘導加熱設計計算に対しても問題なく応用される。

##### (3) マルチフィジックス有限要素解析の高速性・柔軟性の向上

##### ①大規模連立方程式に対する高速求解法に関する研究

辺要素を用いた磁界解析のための双対メッシュを利用する新規的代数マルチグリッド法を開発し、その有効性を示した [雑誌論文①]。

有限要素解析において扁平なメッシュを使用した場合、計算性能が大幅に悪化する可能性があるが、これに対する解決策として冗長な自由度を導入することが考えられる。この解決策について、IEC/EEC フレームワークの観点から理論的な根拠を示した [雑誌論文③, 学会発表⑤~⑧]。IEC/EEC に基づく求解法の開発には、科学研究費補助金・若手研究 (B) 「マルチグリッド高速求解法に基づく高性能電磁界解析ソフトウェア」(代表者: 美船健, 課題番号 20760183) による成果も利用し

ている。

## ②並列計算に関する研究

Arnold, Folk, Winther のブロックガウスザイデル法を使用する代数マルチグリッド法について、節点多色順序付けに基づく並列化手法を開発し、数値解析例においてその有効性を確かめた[学会発表①]。

## ③非線形材料を含む解析に関する研究

磁気スカラーポテンシャルを未知数とする磁界解析において、直線探索を導入したニュートンラフソン法と代数マルチグリッド法との連携の有効性を示した[学会発表②]。

## ④モルタル有限要素法に関する研究

モルタル有限要素法において、近似スパース行列を導入する手法を用いることによって、不完全 LU 分解および代数マルチグリッド法を効率的に導入することを可能にした[雑誌論文②、学会発表④]。モルタル有限要素法と代数マルチグリッド法との連携に関する研究においては、科学研究費補助金・基盤研究(C)「代数マルチグリッド法に基づくモルタル有限要素高精度高速電磁界解析」(代表者:島崎眞昭, 課題番号 17560255)に基づく成果の一部を利用した。

## (4) 複数コイルを使用する誘導加熱系の最適設計

項目(1)～(3)で研究開発を行った計算技術を連携させ、金属加工を想定した誘導加熱の例題について最適設計を行い、良好なパラメータが得られることを示した[学会発表⑨⑩]。パラメータ最適化には $\mu$ GAを使用し、評価値計算に用いるマルチフィジックス有限要素解析の連立方程式の求解部には代数マルチグリッド法を組み込んでいる。時間調和磁界解析で現れる行列は複素行列であるが、代数マルチグリッド法で必要となる補間行列の計算には実部分のみを用いる手法によって、効率的な解法を構築した。扱った例題については、標準的な解法とされる ICCG 法、ICCOG 法を用いる場合と比較して、評価値計算の計算速度を7倍程度に高速化できることを確認した。

今後の課題としては、 $\mu$ GA と他の最適化手法との比較、空気部分の対流の効果の考慮、実機における測定値との比較などが望まれる。

## 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3件)

① T. Mifune, T. Iwashita, M. Shimasaki,

“A Novel Algebraic Multigrid Preconditioning for Large-Scale Edge-Element Analyses,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 4, pp. 1481-1484, 2007, 査読有り.

② T. Matsuo, Y. Ohtsuki, M. Shimasaki, “Efficient Linear Solvers for Mortar Finite-Element Method,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 4, pp. 1469-1472, 2007, 査読有り.

③ T. Mifune, S. Moriguchi, T. Iwashita, M. Shimasaki, “Convergence Acceleration of Iterative Solvers for the Finite Element Analysis Using the Implicit and Explicit Error Correction Methods,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 3, pp. 1104-1107, 2009, 査読有り.

[学会発表] (計10件)

① 美船 健, 小畑信彦, 岩下武史, 島崎眞昭, “A法及びA- $\phi$ 法を用いた準定常磁界解析のための代数マルチグリッドソルバの並列化”, 第12回計算工学講演会, Vol. 12, No. 2, pp. 635-638, 2007年5月.

② T. Mifune, T. Iwashita, M. Shimasaki, “Nonlinear Finite Element Analysis with Magnetic Scalar Potential as an Unknown Using Line-Search and an Algebraic Multigrid Preconditioner,” 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, pp. 67-68, Jun. 2007.

③ T. Matsuo, M. Shimasaki, “Application of Micro Genetic Algorithm to Magnetic Field Optimization,” 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, pp. 411-412, Jun. 2007.

④ 美船 健, 松尾哲司, 岩下武史, 島崎眞昭, “モルタル有限要素法を用いた電動機解析の代数マルチグリッド法による高速化”, 第16回MAGDAコンファレンス, D01, pp. 139-142, 2007年11月.

⑤ 美船 健, 守口聡一, 岩下武史, 島崎眞昭, “高アスペクト比のメッシュを用いた有限要素解析のためのImplicit Error Correction法及びExplicit Error Correction法に関する基礎検討”, 静止器回転機合同研究会, MAG-08-19/SA-08-7/RM-08-7, pp. 35-40, 2008年1月.

⑥ 守口聡一, 美船 健, 岩下武史, 島崎眞昭, “扁平要素を含む有限要素解析における反復法の収束性改善のための新しい誤差修正法”, 平成20年電気学会全

- 国大会, 5-187, p. 278, 2008年3月.
- ⑦ T. Mifune, S. Moriguchi, T. Iwashita, M. Shimasaki, “Convergence Acceleration of Iterative Solvers for the Finite Element Analysis Using the Implicit and Explicit Error Correction Methods,” 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, PD1-11, p. 299, May 2008.
  - ⑧ T. Mifune, T. Iwashita, M. Shimasaki, “Basic Study on Convergence Properties of the Implicit and Explicit Error Correction Methods,” International Kyoto-Forum on Krylov Subspace method, pp. 35-38, Sep. 2008.
  - ⑨ 美船 健, 松尾哲司, 島崎眞昭, “磁場—熱連成有限要素法と遺伝アルゴリズムによる誘導加熱設計に関する基礎検討”, 静止器回転機合同研究会, SA-09-16/RM-09-16, pp. 87-92, 2009年1月.
  - ⑩ 美船 健, 松尾哲司, 島崎眞昭, “誘導加熱最適化計算の代数マルチグリッド法による高速化に関する基礎的検討”, 平成21年電気学会全国大会, 2009年3月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

島崎 眞昭 (SHIMASAKI MASAOKI)  
福井工業大学・工学部・教授  
研究者番号：60026242

### (2) 研究分担者

松尾 哲司 (MATSUO TETSUJI)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20238976  
美船 健 (MIFUNE TAKESHI)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号：20362460