

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月14日現在

機関番号：13701  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21560295  
 研究課題名（和文） 電動機の特性解析のための並列計算機システムの構築  
 研究課題名（英文） Building Parallel Computing System for Characteristics  
 Analysis of Electrical Motors  
 研究代表者  
 河瀬 順洋（KAWASE YOSHIHIRO）  
 岐阜大学・工学部・教授  
 研究者番号：20144735

研究成果の概要（和文）：三次元有限要素法による磁界解析をベースとした電動機の特性解析のための並列計算機システムを構築した。各種電動機の特性解析を通して本システムの有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A parallel computing system for characteristics analysis of electrical motors based of the magnetic field analysis using the three-dimensional finite element method are developed. The utility of the system is clarified through the characteristics analyses for several electrical motors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電動機、並列計算機システム、有限要素法

1. 研究開始当初の背景

(1) 電動機の特性解析のための有限要素法をベースとした磁界解析システムは、周期境界の考慮といった技術的な手法をはじめ、システム全体に様々な工夫が込められている。

(2) 近年のパーソナル・コンピュータの活用法のひとつとして、マルチCPUを利用した並列技術があり、学術的な数値計算においてもマルチCPUを並列利用した計算機システムの構築が要望されつつある。

2. 研究の目的

電動機の特性解析のための磁界解析シス

テムの並列化における問題点を明らかにするとともに、並列計算機システムを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

三次元有限要素法を用いた電動機の磁界解析の要となる技術に、①周期境界、②A-φ法による定式化、③回転子の回転に伴う要素分割の再構成がある。これらはどれも、解析時間の短縮を実現し、電動機の数値解析の根幹となり、従来のシングルCPUを用いて電動機を解析する場合の基本となる技術である。本研究を通して、上記の技術を実装した並列コンピューティングシステムを開

発するため、次のように研究を進めた。

(1) 解析領域の削減のため、周期境界を実装した。従来のシングルCPUを用いた解析のために開発された周期境界考慮ルーチンを有効に利用するため、周期境界を含む領域は同一領域内に含んで解析を行うように並列計算のための領域分割を工夫する。

(2) 渦電流を考慮した解析の計算時間の短縮のために、 $A-\phi$ 法による定式化を考慮した並列コンピューティングを実現する。このとき、未知数が辺と節点という幾何学的に異なる領域に振り分けられるため、領域分割を工夫する。

(3) 周期境界の考慮と $A-\phi$ 法による定式化を実現した並列計算機システムにおいて回転機の回転に伴う領域分割の再構築を実装する。

(4) 構築した並列計算機システムにおいて並列化による並列化率、すなわちCPUの利用効率の検証を行い、システムの有効性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 電動機の特性格解析のための並列計算機システムの構築にあたり、初年度において、基本的な並列計算の手法として領域分割法を用い、かつ、計算機間の通信に対して標準的なMPIを採用した三次元辺要素有限要素法を開発し、研究の基礎となる並列計算システムを構築した。これにより、解析モデルを小領域に分割し、ネットワークに接続された複数のコンピュータに分配して同時に計算することにより、高速計算が可能になった。本手法を用いることにより、16台のPCによって構成した並列計算機システムでは約1.2倍の計算速度の向上を実現した。また、採用した領域分割法によって計算の高速化だけでなく大規模計算も可能になった。

(2) 回転子の回転に伴う要素分割を再構築する方法の開発を目的とし、それを実現した(図1参照)。本手法の開発においては、計算時間の短縮を第一義として考え、回転子の回転に伴い回転子領域を回転させた後にメッシュ分割した電動機モデルを小領域に分割する方法を採用した。これにより、各時間ステップ間ではデータの引継ぎのための処理が必要となるが、各時間ステップにおける並列計算にかかる負荷が最小限になることにより、回転処理の追加による計算時間の増大を抑えたシステムを構築することができた。

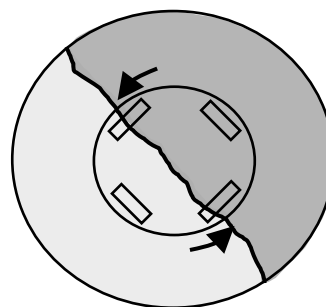


図1 回転子を回転した後に領域を分割

(3) 電圧源を考慮した電動機の磁界解析のための並列計算を可能にした。電圧源を考慮するためには磁界の方程式に電圧方程式を連立する必要がある。領域分割法による並列化を採用した本システムでは、電圧方程式を構築するために、複数の領域に分割されたコイルがもつポテンシャル値を合計する必要があるが、これをそのまま通信で行うと、通信時間が莫大になる。ここで開発した手法は分割された各小領域にそこに含まれるコイルがもつポテンシャルの合計値をもたせることにより、大幅に通信量を減らした並列化が可能となった。

(4) 周期境界を考慮した並列計算ができるように拡張した(図2参照)。PC1台で計算する従来の電動機に対する有限要素解析では、同じ電磁界分布が周期的に現れる電動機の周期性を用いて解析領域を削減して計算時間の短縮が行われており、この手法は並列計算でも有効であると考えられる。しかし、これを並列計算システム上に実現するためには、通信コストを抑えた領域分割が必須となる。本研究を通して、周期境界上の未知数を同一領域に配置するような領域分割法を提案し、並列計算システムに実装し、いくつかの電動機を解析することにより、その有用性を明らかにした。その一例として、埋込磁石構造電動機を解析対象とした場合には、1/2モデルの計算速度は1/1モデルのおよそ1.8倍となった。

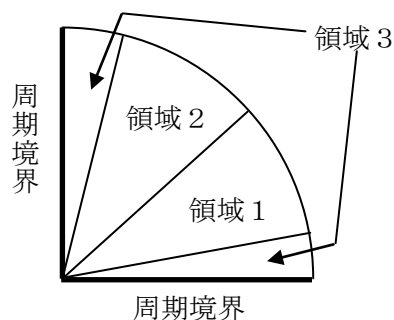


図2 周期境界を含む領域の分割

(5) A- $\phi$ 法による定式化により高速化を実現した。辺要素有限要素法による磁界解析では、渦電流を考慮する場合、辺のみに未知数を定義するA法に比べ、辺と節点に未知数を定義するA- $\phi$ 法の方が計算時間が短くなるという性質がある。A- $\phi$ 法による定式化を並列計算システム上で実現するためには、隣接辺のみでなく隣接節点間あるいは節点と辺のつながりを考慮した領域分割の必要がある。本研究を通して、辺と節点の関連を考慮した領域分割法を提案し、並列計算システムに実装することにより、計算時間の短縮に成功し、その有用性を明らかにした。例えば、電流入力解析では、並列台数を1~8台のどの台数で計算した場合でも、A- $\phi$ 法はA法よりも約2.5倍以上高速に計算できた。

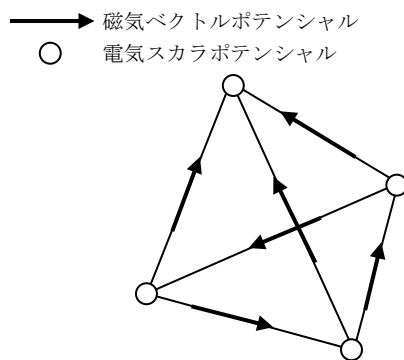


図3 A- $\phi$ 法での未知数の取り扱い

(6) 上記(1)~(5)の機能を有する本研究を通して開発された並列計算機システムを用いて、埋込磁石構造同期電動機(IPMモータ)を解析対象とし、より実機に近い形状や条件で諸特性を解析し、並列計算機システムの有用性を明らかにした。以下にその具体例を示す。

IPMモータの固定子鉄心形状のモデル化が電動機の諸特性に及ぼす影響を求め、電流波形やトルク波形には固定子鉄心形状を簡略化したモデルを用いてもほとんど影響がないが、磁束密度や渦電流損に影響を及ぼすことを明らかにした。これにより、特性解析に対する電動機の数値モデル化において留意しなくてはならない点が明らかになった。

当初の計画通り、電圧方程式を連立した並列計算機システムを構築し、インバータ駆動時のIPMモータの諸特性を求めることができるようにするとともに、層間ギャップを考慮できるようにシステムを拡張し、より実機に近いモデル化を実現した。これにより、積層鋼板内の表皮効果を考慮した鉄損特性を定量的に求めることができるようになった。

さらには、積層鋼板内を流れる渦電流の三次元有限要素解析を実現した。この解析は莫大な計算容量と多大な計算時間を要し、現在の市販のPC単体では不可能な計算であり、

並列計算機システムの構築によってはじめて実現可能になった例の一つである。

また、当初の計画になかったが、本研究を通して培われた並列計算技術を複素数近似法による磁界解析システムに適用し、その有用性についても明らかにした。

これらの研究成果は適宜、国内および国際会議等で発表され、国内外の研究者に伝えられた。

#### 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0件)

〔学会発表〕(計18件)

①河瀬順洋、インバータ駆動時におけるIPMモータの積層鋼板中の三次元渦電流解析、電気学会全国大会、2012年3月22日、広島県・広島工業大学五日市キャンパス

②河瀬順洋、複素数近似法を用いた並列計算による磁界解析、電気学会産業応用部門大会、2011年9月7日、沖縄県・琉球大学千原キャンパス

③河瀬順洋、並列計算を用いたインバータ駆動時のIPMモータの鉄損に関する検討、電気学会静止器・回転機合同研究会、2011年8月26日、新潟県・新潟大学駅南キャンパス「ときめいと」

④河瀬順洋、三次元有限要素法による固定子鉄心形状がIPMモータ諸特性に及ぼす影響の検討、第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2011年5月18日、愛知県・愛知県産業応用労働センター(ウインクあいち)

⑤河瀬順洋、コイル分割がリアクトルの銅損に及ぼす影響、電気学会全国大会、2011年3月18日、大阪・大阪大学

⑥河瀬順洋、複素数近似法を用いた電磁界解析の並列計算、電気学会全国大会、2011年3月18日、大阪・大阪大学

⑦河瀬順洋、埋込磁石構造回転機における固定子形状がトルクおよび損失特性に及ぼす影響、電気学会全国大会、2011年3月17日、大阪・大阪大学

⑧河瀬順洋、有限要素法による段スキューを考慮したIPMモータの三次元磁界解析、電気学会全国大会、2011年3月17日、大阪・大阪大学

⑨河瀬順洋、回転機のためのA- $\phi$ 法を用いた並列電磁界解析、電気学会全国大会、2011年3月17日、大阪・大阪大学

⑩河瀬順洋、A- $\phi$ 法による回転機の三次元渦電流解析の並列化、電気学会静止器・回転機合同研究会、2011年1月21日、京都・同志

社大学

⑪河瀬順洋、周期境界を考慮した並列計算を用いたインバータ駆動時のIPMモータの特性解析、電気学会回転機研究会、2010年10月21日、北海道・北見市民会館

⑫河瀬順洋、三次元有限要素法による磁界解析のGPUによる高速化、電気学会静止器・回転機合同研究会、2010年9月29日、鹿児島県・かごしま県民交流センター

⑬ Yoshihiro Kawase、Characteristics Analysis of IPM Motor Driven by Voltage Source Inverter with Parallel Computing、ICEM2010、2010年9月7日、イタリア・ローマ

⑭ Yoshihiro Kawase、MPI Parallelization of Magnetic Field Analysis for Rotating Machines on PC Cluster、ICEM2010、2010年9月7日、イタリア・ローマ

⑮ Yoshihiro Kawase、Parallel Computing of 2-D Finite Element Method for Rotating Machines、APSAEM2010、2010年7月28日、マレーシア・クアラルンプール

⑯河瀬順洋、並列計算を用いたIPMモータの特性解析、第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2010年5月21日、福岡県・門司港ホテル

⑰河瀬順洋、並列計算を用いた埋込磁石構造回転機の特性解析、電気学会全国大会、2010年3月18日、東京都・明治大学

⑱河瀬順洋、三次元有限要素法による回転機の動作特性解析のための並列計算手法、電気学会静止器・回転機合同研究会、2009年9月17日、北海道・北見工業大学

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河瀬 順洋 (KAWASE YOSHIHIRO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20144735

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし