



# 岐阜大学機関リポジトリ

## Gifu University Institutional Repository

Title	有限要素法を用いた三次元電磁界解析の高速化に関する研究(内容と審査の要旨(Summary))
Author(s)	片桐, 弘雄
Report No.(Doctoral Degree)	博士(工学) 甲第453号
Issue Date	2014-03-25
Type	博士論文
Version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12099/49022">http://hdl.handle.net/20.500.12099/49022</a>

この資料の著作権は、各資料の著者・学協会・出版社等に帰属します。

別紙様式第13号 (論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名 (本籍)	片桐 弘雄 (岐阜県)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第 453 号
学位授与日付	平成 26 年 3 月 25 日
専攻	電子情報システム工学専攻
学位論文題目	有限要素法を用いた三次元電磁界解析の高速化に関する研究 (Acceleration of three-dimensional electromagnetic field analysis using finite element method)
学位論文審査委員	(主査) 准教授 山口 忠 (副査) 教授 河瀬 順洋 准教授 田中 雅宏

論文内容の要旨

近年の計算機の性能向上と数値解析技術の進歩に伴い、有限要素法等を用いた磁界解析技術の電気機器への実用的な利用能力は目覚しく向上し、試作コストの削減や開発期間の短縮のための強力な道具となっており、設計や開発の現場に広く普及している。

一方、磁界解析の普及に伴い、これまで解析が困難であった複雑かつ大規模な問題が解析対象となるようになったため、現在の計算機の性能をもってしても、計算時間が数週間から数ヶ月以上に及ぶ場合も珍しくない。

そのため、高速化計算の要求に一段と拍車がかかり、磁界解析の更なる高速化が望まれている。

磁界解析では、通常、非線形反復計算ループの内側に線形化された連立一次方程式を解くためのICCG法のような反復法のループを含む。したがって、一般的な磁界解析は、時間ステップ-非線形反復-連立一次方程式の3重ループ構造となる。電磁界数値解析の計算時間を削減するためには、3重ループのいずれかを高速化すればよい。例えば、連立一次方程式のループの高速化手法として、マルチグリッド法や領域分割による並列計算などがあげられる。非線形反復の収束特性の高速・安定化手法として、直線探索に関する研究が盛んに行われている。また、時間ステップのループの高速化としては、複素近似法が挙げられる。

時間ステップのループの新たな高速化手法の一つとして、渦電流を考慮した電気機器の定常解析における数値解析的な過渡現象を抑え、時間ステップ数を削減できる簡易time periodic-explicit error correction(TP-EEC)法が提案されている。この手法は機械的な動作を伴わない電気機器の磁界解析に適用されてきた。しかし、本研究の開始時には、回転機のように機械的な周期的な動作を伴う電気機器への簡易TP-EEC法の適用法が報告されていなかった。さらに、産業応用の分野では交流に直流が重畳した強制電流を流す電気機器もあり、これらの電気機器には直流磁界が含まれるため磁界の半周期性を利用する従来の簡易TP-EEC法はそのままでは適用できなかった。そこで、本研究では回転機や直流分が含んだ電磁界解析にも適用出来る過渡収束改善法を提案し、時間ステップのループの高速化を目指している。

また、連立一次方程式のループの高速化においては、有限要素の要素形状を検討することも考えられる。電気機器の三次元磁界解析では、要素分割が容易で複雑な三次元形状に柔軟に対応できる一次四面体辺要素<sup>7)</sup>が多く用いられている。一次四面体辺要素を用いた解析では、薄く扁平な要素がある場合、計算精度が著しく悪化するため、薄膜等の薄い形状の部品をモデル化する際には厚み方向の長さに合わせてメッシュを非常に細かく分割しなければならず要素数が膨大になってしまう問題がある。一方で、一次三角柱辺要素を使えば、厚み方向に薄く扁平な要素でも精度が悪化しないため、薄い形状の部品がある場合でも少ないメッシュで精度よく高速に計算できると考えられる。また、モーターや非接触充電コイルのようにモデル形状が単純で、三次元メッシュを二次元の分割図から積み上げて作成できる場合に限れば、三角柱辺要素でも容易に要素分割ができ、一次三角柱辺要素に優位性があると考えられる。そこで本研究では、モーターや非接触充電コイルの電磁界解析に三角柱辺要素を用いることで未知数の削減やICCG法の収束性向上により、連立一次方程式のループの高速化を目指す。

本研究の目的は、電気機器の磁界解析の高速化を達成するために、以下の3つの検討を行うことである。

- (1) 一次三角柱辺要素による電磁界解析を用い、電気機器の磁界解析の高速化を達成する。
- (2) 回転機解析のための簡易TP-EEC法の適用法を開発し、回転機の磁界解析の高速化を達成する。
- (3) 直流磁界を含む電気機器の磁界解析の数値解析的な過渡を取り除くために、従来の簡易TP-EEC法を拡張した簡易simplified TP-EEC method for DC magnetic field (TP-EEC-DC法)を開発し、直流磁界を含む電気機器の磁界解析の高速化を達成する。

論文審査結果の要旨

本論文では、電気機器の磁界解析を高速化するために、一次三角柱辺要素による電磁界解析を用い、

実用的なモータや非接触充電コイルの解析に対する優位性を検証している。また、回転機や直流分を含んだ電気機器の定常解析にも適用できる数値解析的過渡状態の収束改善法を提案し、実用的な解析対象に対する手法の有用性を検証している。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

(1) 数値解析手法の一つである有限要素法を用いて、マクスウェルの電磁方程式から得られる基礎方程式をもとに、三次元非線形解析を行うための離散化・定式化について示している。定式化にはガラキン法を用い、離散化の過程で、空間的には一次四面体辺要素または一次三角柱辺要素、時間的には後退差分近似法を用いている。また、鉄などの磁性体の磁界に対する非線形性を考慮する方法として、ニュートン・ラフソン法による非線形解析手法を示している。さらに、磁界の基礎方程式と回路方程式とを連立させた解析手法、回転機の要素分割図作成法について示している。

(2) 一次三角柱辺要素と一次四面体辺要素を用いてPulse Width Modulation (PWM) インバータで駆動されるInterior Permanent Magnet (IPM) モータおよび非接触充電コイルの電磁界解析を通して、精度、速度の観点から一次三角柱辺要素の優位性を明らかにしている。PWMインバータで駆動されるIPMモータの解析では、一次三角柱辺要素を用いた解析結果は一次四面体辺要素の解析結果とほぼ同精度で約2倍速く計算できることを確認している。また、非接触充電コイルの解析では、機器を構成する部品として薄い薄膜を含むため、一次四面体辺要素では扁平な要素ができて渦電流が正しく計算できなかったものが、一次三角柱辺要素を用いれば正しく計算でき、かつ、解析で得られたコイルの電流値は実測値とほぼ一致することを確認している。

(3) 同期電動機と誘導電動機への簡易TP-EEC法の適用法を述べ、固定子と回転子で異なる周期で簡易TP-EEC法による補正を行うことで定常解への収束性改善できることが示されている。さらに、簡易TP-EEC-DC法について述べている。本手法は渦電流の周期性を利用することで、直流磁界を含む磁界解析でも定常解への収束を改善できることが示されている。

(4) 回転機解析のための簡易TP-EEC法の適用法を埋込磁石構造形同期電動機と誘導電動機に適用し、提案手法の有用性を明らかにしている。さらに、簡易TP-EEC-DC法を渦電流場数値計算技術調査専門委員会で提案されている三次元渦電流解析検証用標準ベンチマークモデルの線形磁界解析およびシールド版付きC形コアの非線形磁界解析に適用し、その有用性を明らかにしている。埋込磁石構造形同期電動機の解析では、簡易TP-EEC法による補正を行うことで、計算時間を約1/11に短縮できることが示されている。誘導電動機の解析では、すべりによって簡易TP-EEC法による補正の有無を変える必要があることが示されている。三次元渦電流解析検証用IEEJ標準ベンチマークモデルの線形磁界解析では、半周期性の簡易TP-EEC-DC法を使うことで、計算時間が約1/3に短縮できることが示されている。アルミ板付きC形コアの非線形磁界解析では、一周期性の簡易TP-EEC-DC法を使うことで、計算時間が約1/17になることが示されている。

以上、本論文は電気機器の磁界解析の高速化のために、一次三角柱辺要素による電磁界解析を行い、実用的なモータや非接触充電コイルの解析に対する優位性を示し、さらに、回転機や直流分を含んだ電磁界解析にも適用できる過渡収束改善法を提案し、実用的な解析対象に対する手法の有用性を示したものであり、学術上、実際上寄与することが少なくない。また、本論文の主たる部分は査読付き論文として発表されている。以上から、本論文は博士(工学)の学術論文として価値あるものと認める。

### 最終試験結果の要旨

平成26年2月4日の公聴会後に、学位論文に関する口頭質問を実施し、これを最終試験とした。論文提出者は、学位(工学)の取得に必要な学力を有していることが確認できたので、最終試験に合格とした。

---

発表論文(論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ)

- 1.Improvement of Convergence Characteristics for Steady State Analysis of Motors with Simplified Singularity Decomposition-Explicit Error Correction Method\*, Hirokatsu Katagiri, Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Takeshi Tsuji, Yoshiyasu Shibayama, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, No. 6, pp. 1786-1789 (2011)
- 2.Characteristics Analysis of IPM Motor Applied by Voltage Source Using 3-D Finite Element Method with Prismatic Elements , Hirokatsu Katagiri, Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Kazuya Kishida and Keiichi Morinaga COMPEL, vol. 31, No.5 pp. 1379-1385 (2012)
- 3.Novel Simplified Time Periodic-Explicit Error Correction Method for Steady State Analysis of AC Magnetic Field Including DC Component, Hirokatsu Katagiri, Yoshihiro Kawase and Tadashi Yamaguchi, 電気学会論文誌 B, vol. 133, No.3, pp.271-276 (2013)
- 4.Electromagnetic Field Analysis of Separate-type Transformer Connected to Non-Contact Battery Charger Using 3-D Finite Element Method with Prismatic Edge Elements, Hirokatsu Katagiri, Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Katsuhiro Hirata, Tomohiro Ota and Satoshi Suzuk, AEM 学会誌, vol. 21, No.3, pp.340-345 (2013)