

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29日現在

機関番号：15501
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560299
 研究課題名（和文） 高性能電気機器におけるアイソパラメトリック辺要素の電磁解析への応用とその検証
 研究課題名（英文） Finite Element Analysis of Intelligent Electric Machines using Isoparametric Edge Elements
 研究代表者
 羽野 光夫（HANO MITSUO）
 山口大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：70108265

研究成果の概要（和文）：電磁界の有限要素解析において、高次アイソパラメトリック辺要素の開発に成功した。さらに、要素次数が不均一な混合次数アイソパラメトリック辺要素の開発にも成功した。これらによって、複雑な電気機器のモデリングが可能になり、全体的に解析が容易になった。さらに、PCクラスターを利用することによって、高速化が実現できた。

研究成果の概要（英文）：Homogeneous and inhomogeneous high-order isoparametric elements for a finite element electromagnetic field analysis were developed. It is possible that complicated electric machines are divided into these elements, and these electromagnetic field distributions are obtained. PC cluster realizes a high-speed analysis of electromagnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数値電磁界解析

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：有限要素法、アイソパラメトリック要素、電磁界解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 有限要素法による電磁界解析において、当時辺要素が認知され、多くの市販汎用ソフトに採用されるに至っていた。しかし、その要素は基本要素か、または低次の要素に限られていたため、高精度解析には細分割過程が避けられなかった。そのため、要素分割のために費やされる実質的時間がソルバーの時間を上回り、問題となって来た。このような

状況の中、高速な要素分割アルゴリズムが開発される一方、高次要素の利用にも目が向けられた。高次要素を用いると、電磁界分布が高次多項式で近似されるため、要素数を減らしても高精度な解析結果が得られる。要素数が減れば、要素分割が容易になり、解析に掛かる時間の総合的な短縮が期待できる。

(2) 当時、高次辺要素に対する Hano や Ren らの精力的な研究が目立った。すなわち、

有限要素法解析におけるベクトル多項式空間の構造が明らかになりつつあった。ベクトル高次要素は電磁界解析に独特なものであり、Nedelec によって発表されたが、彼の論文は数学的記述が多く、一般的な工学者には非常に難解であり、異なった解釈による高次要素の発表が行われるに至った。日本国内の関連研究者の多くは 1,2 次辺要素の利用に留まっていたが、亀有は独自の高次辺要素を提案していた。そのような中で、ベクトル多項式空間の具体的な構成がシステムティックに可能になり、高次要素の数式表現が容易に実現しかけていた。

(3) また、この分野の最大級の国際会議である COMPUMAG、CEFC においては非適合要素の考えが数多く発表されていた。しかし、電磁界の連続性の取り扱い不明確であったり、また最終的な連立一次方程式の解法において不安定が生じたりして十分な成果が得られておらず、この分野は未開発の分野と言ってよい状況であった。辺要素では基本的に電界や磁界の接線成分の連続のみを課すが、非適合要素ではその条件が崩れしう可能性がある。また、有限要素法において一般的には連立一次方程式、あるいは固有値方程式が得られるが、その解法が種々提案されており、安定解析の方法が模索されていた。現在でも研究が世界的に継続している。

2. 研究の目的

(1) 電磁界解析における総合的な高速化と低コスト化を実現するために、高次要素を意識したアイソパラメトリック辺要素の開発と、その実用化を目的とする。そのためには、独自の要素分割アルゴリズムの開発が必要になる。また、Nedelec が開発した高次要素の数学的構造を明らかにし、簡便な構成法を見つけることが必要である。

(2) 次に、辺要素の辺や面の次数に粗密を付けた混合次数アイソパラメトリック辺要素を開発する。これによって、電磁界の粗密を吸収することができ、高次要素の特性をさらに発揮することが可能になる。また同時に、要素境界面における電磁界の不整合が発生するので、磁束分布などが連続になるように接続方法を開発する。

(3) さらに、本手法を電気機器などの非線形問題に適用し、従来法との比較によってその有効性を実証し、実用化を目指す。

3. 研究の方法

(1) まず、高次ベクトル要素の平易な構成を可能にするために、積み上げ方式による構

成理論を構築する。これを基に、要素の点、辺、面、及び体を別々に考えた混合次数ベクトル要素の構成法を検討する。一方、辺や面を多項式表現したアイソパラメトリック辺要素の構成理論を構築する。最後に、これらを結び付けて混合次数アイソパラメトリック辺要素の構成理論を構築する。これらを基にコーディングを行い、簡単なモデルで固有値解析を行ってコードのデバックを行うと共に、次数パラメータ間の関係を明らかにする。

(2) 次に、有限要素法による電磁界解析において最終的に得られる代数方程式解法のためのソルバーの開発を行う。これには、一般的に反復法が有利だといわれているが、これらにも種々のアルゴリズムが提案されており、比較検証する必要がある。さらに、反復計算のための収束判定基準等は経験的に決定する必要があり、時間を要す。

(3) さらに、PC クラスターに対応するために領域分割法等のコーディングを行う。PC クラスターは小さい計算機を複数台並列に配置して、大きな問題を解くための手法であり、計算機間の通信がネックとなるので、アルゴリズムとコーディングが重要になる。

(4) 最後に、実機モデルの要素分割を行い、そのデータを基に本手法の有用性を確認する。

4. 研究成果

本研究は、電磁界解析における総合的な高速化と低コスト化を実現するために、混合次数アイソパラメトリック辺要素の開発と、その実用化を目的とした。

(1) まず、任意形状のモデルに対応可能な四面体辺要素、及び六面体辺要素の多項式空間の構造を明らかにし、高次辺要素の開発を行った。Nedelec の高次要素の構成法は、大きなベクトル空間から不要なベクトル成分を除くという手法で構成されていることが明らかになった。しかも、この方法はコーディングを難しくし、現実的ではないことも分かった。そこで、最終的なベクトル空間を小さな空間を積み上げる方式で構成する手法を見つけ出した。さらに、任意の次数の要素に対してシステムティックに構成できる手法を見出した結果、いかなる次数の要素も構成が可能になった。このような高次要素をコーディングした後、空洞共振器の固有値問題に適用し、スプリアス解が発生しないことを確認した。これは Nedelec が提案したのと同じ関数空間のベクトル要素が構成されていることを意味する。しかし、この要素はひと

つの次数パラメータによって管理されているため、境界面の電磁界の接続において融通性がなく、電磁界の粗密に対応することができない。そこで、要素の点、辺、面、および体それぞれの次数パラメータを配置し、各々には単一次数要素の形状関数を適用した混合次数アイソパラメトリック辺要素を開発した。要素の点、辺、面、及び体にとどのベクトル空間を対応させるかが鍵で、これを明らかにした。これによって、ひとつの要素が多数の次数パラメータを持つことになり、電磁界解析への適用の自由度が飛躍的に向上することを確認した。さらに、固有値解析によるスプリアス解の発生状況から、たくさんある次数パラメータ間の関係を明らかにした。

(2) 電気機器の磁気特性は非常に複雑で、有限要素法による磁界解析においても定説がないのが実状であり、多くの内外の研究者が手がけている。磁気問題は複雑になる一方であるが、この分野では避けて通れず、磁気特性のモデリングにマクロな物理モデルを導入し、実験結果との整合性を検討した。一方、高次要素の利用には、解析対象のモデリングからアイソパラメトリック化が避けられない。そこで、混合次数アイソパラメトリック辺要素を適用した。アイソパラメトリック要素は、解析対象とのマッチングを取るために辺や面の形状が多項式表現になっているため、要素行列の構成には数値積分を行わなければならない、積分点の数と精度との関係を明らかにしておかなければならない。積分点を多く取れば精度は向上するが、計算時間が増大する。また、辺や面が多項式で表現されていることから可視化が複雑になり、可視化プログラムの開発も必要になった。辺が曲線となることから陰線処理が複雑になり、さらに面が曲面となることからさらに複雑な陰面処理を必要とした。これらを基に、解析領域の多様性に対するロバスト性を実現するために、電気機器などの実機モデルに適用し、その適用性を検討した。

(3) 多種のアイソパラメトリック辺要素を用いた磁場解析コードの開発を行い、回転機などの実機モデルに適用し、そのロバスト性を確認した。さらに、多種の混合次数アイソパラメトリック辺要素を用いた磁場解析コードの開発を行い、回転機などの実機モデルに適用し、そのロバスト性を確認した。さらに、低次要素に対して従来法との計算時間、及び解析結果の安定性の比較検討を行い、本手法の有効性を確認した。ただし、低次辺要素を適用するためには、高密度の要素分割が

必要になり前処理に多くの時間を費やす結果に変わりはなかった。最後に、本研究の有効性を実証するためには、高速で大容量な処理が必要になり、PCクラスタで対応した。

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 2 件)

- ① 羽野光夫, 田中良, 堀田昌志, “有限要素法による無限周期構造導波管の位相定数解析,” 日本 AEM 学会誌, vol.19, no.2, pp.366-371, 2011-06.
- ② M. Hotta, R. Ogawa, and M. Hano, “TE Volume Modes in Anisotropic Single-Negative Slab with Negative Component in Permeability Tensor,” *IEICE Trans. on Electron.*, vol.E93-C, no.1, pp.81-84, 2010-01.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 坂田季之、多良信太郎、堀田昌志、羽野光夫 “導波管充填法による異方性媒質の材料定数測定,” 第 13 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, no.A-3, pp.5-8, 2011-11.12、広島大学 (広島市)
- ② 結城亨、堀田昌志、羽野光夫、栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討” 第 13 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, no.B-3, pp.220-223, 2011-11.12、広島大学 (広島市)
- ③ 堀田昌志、結城亨、羽野光夫、栗井郁雄, “共鳴型無線給電システムにおける伝送効率改善に関する一考察” 電子情報通信学会総合大会予稿集, B-1-8, p.8, 2011-03.17、東京都市大学 (東京都)
- ④ 羽野光夫、田中良、堀田昌志, “有限要素法による無限周期構造導波管の位相定数解析” 第 19 回 MAGDA コンフェレンス in 札幌, PS4-TB12, pp.667-672, 2010-11. 23、北海道大学 (北海道)
- ⑤ 齋藤宏典、堀田昌志、羽野光夫, “異方性 Single-Negative 媒質からなる平行二線スラブの固有モード” 第 12 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, no.C-25, pp.244-247, 2010-11.6、島根大学 (松江市)
- ⑥ 多良信太郎、坂田季之、堀田昌志、羽野光夫, “導波管充填法による電波吸収体の材料定数測定” 第 12 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, no.C-27,

pp.250-253, 2010-11.6、島根大学(松江市)

- ⑦ 河埜慎吾、富田朋幸、堀田昌志、羽野光夫、“異方性 Single-Negative 媒質を含む平行二線分布結合系のモード解析,” 第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム 論文集, no.C-15, pp.220-223、2009-11.6、島根大学(松江市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽野 光夫 (HANO MITSUO)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70108265