

学 位 論 文 題 名

電磁波問題の有限要素法解析における
スプリアス解の除去法に関する研究

学位論文内容の要旨

今日の情報通信需要の爆発的な増大に伴い、新しい通信システム構築のための研究が基礎と応用の両面から広範囲にわたって展開されており、こうした情報通信の分野においても解析・設計支援ツールとしての有限要素法に対する関心と期待が高まってきている。特に、システムを構成する各種マイクロ波デバイスや光デバイスの高性能化、多機能化、微細化ならびに集積化に見られるように、これらのデバイスの、より精密な解析、設計が要求されるようになっており、電磁波動場の高精度な解析がデバイス設計上不可欠になりつつある。

ところで、電磁波工学の分野における有限要素法の応用に関する研究は、1960年代後半から特に70年以降になって本格的に開始され、様々な問題への応用が試みられてきた。なかでも2次元電磁波導波路の伝搬特性を求める問題（導波路問題とよぶ）への応用に関する研究が間断なく続けられており、マイクロ波、ミリ波ならびに光波帯における各種の導波路に適用され、特に、電界あるいは磁界の3成分を用いた有限要素法は、電磁波導波路の有力な数値解析法の一つとして定着しつつある感さえある。しかしながら、このような電磁波導波路の有限要素法解析においては、多くの場合、スプリアス解とよばれる非物理的な解が発生し、これが有限要素法を利用する際の大きな障害になっており、このため、こうしたスプリアス解を抑圧あるいは除去するための方法の開発が急務となっている。また、導波路問題は、いわゆる固有値問題の一つであるが、共振器の固有周波数を求める問題（共振器問題とよぶ）もこの固有値問題に属する。このような共振器問題に代表される3次元電磁波問題の有限要素法解析は、一般に、電界あるいは磁界の3成分による変分表現式を基にして行われるが、この変分表現式を用いて固有値問題を解くと、前述したようにスプリアス解が発生するので、共振器問題においても、このスプリアス解を抑圧、除去するための検討が必要になっている。さらに、いま一つの固有値問題として、伝搬方向に周期的な構造を有する導波路の伝搬特性を求める問題（周期構造導波路問題とよぶ）があるが、この実用的にも重要な3次元周期構造導波路問題への有限要素法の応用は、これまでほとんど試みられておらず、そのうえ、やはりスプリアス解が発生するので、何らかの対策が必要である。

本論文は、こうした状況のもとで、電界あるいは磁界の3成分を用いた電磁波問題の有限要素法解析において問題となるスプリアス解の抑圧・除去法の開発に関する研究成果をまとめたものである。まず、任意形状の3次元共振器問題および3次元周期構造導波路問題に対する有限要素法解析の定式化を行い、スプリアス解対策法として2次元導波路問題において開発されてきたペナルティ法、横磁界法、リダクション法などを拡張して用いるとともに、エッジ要素の導入を試みている。つぎに、軸対称3次元共振器問題および軸対称3次元周期構造導波路問題に対しては、スプリアス解対策法としてペナルティ法を用いた定式化を行い、円筒座標系で表現された変分表現式に由来する特異点を含む要素積分の評価には、Hammerらの数値積分公式に基づく数値積分を用いることを提案している。さらに、2次元導波路問題に対しては、エッジ要素を導入することによってスプリアス解を除去するとともに、周波数を与えて伝搬定数を直接固有値として求めることを可能としている。また、エッジ要素を用いることにより、これまで困難とされていた金属くさびによる電磁界の特異性を考慮することも可能になっている。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、任意形状の3次元共振器問題と3次元周期構造導波路問題に対する有限要素法解析の定式化を行っている。まず、共振器問題が周期構造導波路問題の特別な場合として取扱うことができることを示している。つぎに、四面体要素を用いた有限要素表示式を導出し、スプリアス解の抑圧・除去法として、ペナルティ法、横磁界法、リダクション法を導入している。さらに、直方体エッジ要素を導入した場合の有限要素表示式も導出している。エッジ要素を用いることによって、これまで解析が困難であった金属くさびによる電磁界の特異性があるような問題に対しても、その解析が可能になっている。具体的な数値計算例において、有限要素法によって得られた真の解ならびにスプリアス解のふるまいを詳細に検討し、厳密解あるいは他の解析法による結果との比較を行い、ここで提案した解析法の妥当性、およびそれぞれのスプリアス解対策法ならびにエッジ要素の有効性について検討している。

第3章では、軸対称3次元共振器問題と軸対称3次元周期構造導波路問題に対する有限要素法解析の定式化を行っている。ここでは、スプリアス解の抑圧・除去法として、ペナルティ法を導入しており、軸対称三角形要素を用いた有限要素表示式を導出している。また、円筒座標系で表現された変分表現式に由来する特異点を含む要素積分の評価法として3種類の方法を考案し、TE_{0,lm}モードを対象としたスカラ波解析における数値計算例を通して、各方法の有効性について詳細に検討している。さらに、ハイブリッドモードに対する数値計算例において、真の解ならびにスプリアス解のふるまいを詳細に検討し、他の解析法による結果との比較を行い、ここで提案した解析法の妥当性、およびペナルティ法ならびにHammerらの数値積分公式に基づく数値積分の有効性について検討している。

第4章では、2次元導波路問題に対して、エッジ要素を用いた有限要素表示式を導出し、スプリアス解を除去するとともに、周波数を与えて伝搬定数を直接固有値として求めることを可能としている。ところで、ストリップ線路のような金属くさびが存在する導波路では、金属くさびの頂点で電磁界横成分が特異性を示し、くさびの頂点に計算に必要な節点が配置される通常のラグランジュ三角形要素を用いた有限要素法では、この特異性を考慮することが困難であり、正しい解が得られない。これに対して、エッジ要素ではくさびの頂点に節点が配置されないので、界の特異性をうまく回避することができる。数値計算例として、マイクロストリップ線路ならびに各種の光導波路に対して本手法を適用し、他の解析法による結果との比較を行い、本手法の妥当性、有効性について検討している。

第5章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	小柴正則
副査	教授	伊藤精彦
副査	教授	深井一郎
副査	教授	永井信夫

学位論文題名

電磁波問題の有限要素法解析におけるスプリアス解の除去法に関する研究

今日の情報通信需要の爆発的な増大に伴い、新しい通信システム構築のための研究が基礎と応用の両面から広範囲にわたって展開されており、こうした情報通信の分野においても、システムを構成する各種マイクロ波デバイスや光デバイスの高性能化、多機能化、微細化ならびに集積化の要請から、これらのデバイスの、高精度解析・設計支援ツールとしての有限要素法に対する関心と期待が高まってきている。さて、電磁波工学の分野においては、これまで2次元電磁波導波路の伝搬特性を求める問題（導波路問題とよぶ）への有限要素法の応用に関する研究が間断なく続けられており、特に、電界あるいは磁界の3成分を用いた有限要素法は、マイクロ波、ミリ波ならびに光波帯における各種の導波路の有力な数値解析法の一つとして定着しつつある感さえある。しかしながら、このような電磁波導波路の有限要素法解析においては、スプリアス解とよばれる非物理的な解が発生し、このため、こうしたスプリアス解を抑圧あるいは除去するための方法の開発が急務となっている。また、導波路問題は、いわゆる固有値問題の一つであるが、共振器の固有周波数を求める問題（共振器問題とよぶ）もこの固有値問題に属する。このような共振器問題に代表される3次元電磁波問題の有限要素法解析もやはり、電界あるいは磁界の3成分による変分表現式を基に行われるので、スプリアス解が発生し、共振器問題においても、このスプリアス解を抑圧、除去するための検討が必要になっている。さらに、いま一つの固有値問題として、伝搬方向に周期的な構造を有する導波路の伝搬特性を求める問題（周期構造導波路問題とよぶ）があるが、この実用的にも重要な3次元周期構造導波路問題への有限要素法の応用は、これまでほとんど試みられておらず、そのうえ、やはりスプリアス解の発生が考えられるので、何らかの対策が必要である。

本論文は、こうした状況のもとで、電界あるいは磁界の3成分を用いた電磁波問題の有限要素法解析において問題となるスプリアス解の抑圧・除去法の開発に関する研究成果を

まとめたものであり、5章からなっている。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、任意形状の3次元電磁波固有値問題に対する有限要素法解析の定式化として、四面体要素を用いた有限要素表示式を導出し、スプリアス解の抑圧・除去法として、ペナルティ法、横磁界法、リダクション法を導入している。さらに、直方体エッジ要素を導入した場合の有限要素表示式も導出している。具体的な数値計算例において、真の解ならびにスプリアス解のふるまいを詳細に検討し、厳密解あるいは他の解析法による結果との比較を行い、ここで提案した解析法の妥当性、およびそれぞれのスプリアス解対策法ならびにエッジ要素の有効性について検討している。

第3章では、軸対称3次元電磁波固有値問題に対する有限要素法解析の定式化を行っている。スプリアス解の抑圧・除去法として、ペナルティ法を導入しており、軸対称三角形要素を用いた有限要素表示式を導出している。また、特異点を含む要素積分の評価法として3種類の方法を考案し、TE_{01m}モードを対象としたスカラ波解析における数値計算例を通して、各方法の有効性について詳細に検討している。さらに、ハイブリッドモードに対する数値計算例において、真の解ならびにスプリアス解のふるまいを詳細に検討し、他の解析法による結果との比較を行い、ここで提案した解析法の妥当性、およびペナルティ法ならびにHammerらの数値積分公式に基づく数値積分の有効性について検討している。

第4章では、2次元導波路問題に対して、エッジ要素を用いた有限要素表示式を導出し、スプリアス解を除去するとともに、周波数を与えて伝搬定数を直接固有値として求めることを可能としている。金属くさびが存在する導波路では、金属くさびの頂点で電磁界横成分が特異性を示すが、エッジ要素ではくさびの頂点に節点が配置されないので、界の特異性をうまく回避することができる。数値計算例として、マイクロストリップ線路ならびに各種の光導波路に対して本手法を適用し、他の解析法による結果との比較を行い、本手法の妥当性、有効性について検討している。

第5章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

以上のように本論文は、電磁波問題の有限要素法解析におけるスプリアス解を抑圧、除去するための方法論について多方面から検討し、スプリアス解の問題に一つの解決策を提供したもので、電磁波工学、および通信工学の進歩に寄与するところが大きい。

よって、著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。