

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	田中泰
論文題目	Study on acceleration of the method of moments for electromagnetic wave scattering problems with the characteristic basis function method and Calderón preconditioning (Characteristic Basis Function MethodとCalderónの前処理による電磁波動散乱問題に対するモーメント法の高速化に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本研究は、無線周波数から光学帯域における電磁波動散乱の空間特性を高速かつ高精度に数値解析する方法として、CBFM (Characteristic Basis Function Method) と Calderon の前処理について検討を行い、その効果と有効性を数値計算によって検証し、論じている。本研究で論じる手法は、電磁波動散乱問題の解析によく用いられているモーメント法との比較において、より少ない基底で精度良く電磁流を表現できる点、また連立方程式の反復解法による求解において生じる収束性悪化の問題を Calderón の前処理を用いて回避しつつ高速に求解している点において特色を有するものである。</p> <p>本研究では上記の目的を達成するために2つの方法について検討している。第1の方法は、ある座標面内において複数方向から入射する平面波に対する完全導体の散乱問題を高速・高精度に解析するための方法である。このような解析手法は、工学的応用として重要な量であるモノスタティックレーダー断面積を求める上で重要である。本研究では完全導体による電磁波動散乱問題の積分方程式として標準的に用いられる結合場積分方程式を取り上げ、精度コントロール可能な CBFM について研究を行っている。CBFM では、散乱体をいくつかの部分 (セル) に分割し、それぞれのセルの中で、散乱波の波源となる表面電流を効率よく表すことができる基底を導入するが、これらの基底、すなわち CBF (Characteristic Basis Function) の生成方法が極めて重要である。本研究では、従来散乱体上のセル間の相互作用を考慮して CBF を生成するために用いられてきた方法がブロック反復法に基づいていることに注目し、新たに GMRES 法を用いて品質の高い CBF を効率よく作成する方法(IPCBF法)を提案している。さらに本研究では、最終的にレーダー断面積を得たい座標面から入射波をサンプリングする方法を検討して、比較的少ない CBF で種々の入射波に対する電流を精度良く表現する方法を提案している。一方、CBFM では基底を求めるために用いた入射波と実際の入射波との相違の程度により得られる数値解の精度が変動することはやむを得ない。そこで、CBFM の高速性を生かしつつ、解の精度をコントロールする方法として、CBFM から得られた電流を初期値とし、さらにモーメント法を用いることによって任意の精度の数値解を得る方法を提案している。本研究においては、例として、2種類の完全導体に対する電磁波動散乱問題を提案方法とモーメント法を用いて数値計算し、提案方法はモーメント法と比較して計算速度は速いこと、および解析精度は同程度となることを確認して成果を得ている。</p> <p>第2の方法は、双対基底と Calderón の前処理を用いた CBFM により、誘電体構造物に対する散乱問題を高速に解析するための方法である。誘電体の電磁波動散乱問題に現れる典型的な積分方程式として PMCHWT 定式化が知られているが、同定式化を離散化した場合には未知数の増大に伴って条件数が増大し、反復法を用いた求解において多数の反復を要することがあることが知られている。一般に CBFM は問題規模の縮小を可能にする数値計算法であると考えられるが、大規模問題の解析需要を考慮すれば、PMCHWT 定式化の CBFM においても反復法の収束性の改善が重要な課題となっている。従来の CBFM においては電流・磁流に対する CBF に対して独立に直交化を行っているが、この場合は電磁流が本来有すべき双対性に関する情報が CBF で</p>			

は失われることになる。そこで、本研究ではある Gram 行列に対する特異値分解を行うことにより、電流と磁流の双対性を考慮した CBF を生成する方法を提案に成功している。この方法で得られた CBF は、通常モーメント法におけるいわゆる RWG 基底と BC 基底に相当するものであり、これらを用いると自然に Maxwell 方程式の積分作用素の積を離散化することが可能であり、従って Calderón の式を用いた前処理が可能になる。本研究では提案する双対性を有する CBF を用いて PMCHWT 積分方程式を離散化し、さらに GMRES 法と組み合わせることによって、簡単に Calderón の前処理を実装する方法を提案している。また、この方法を用いることにより、従来のモーメント法との比較において、少ない反復回数で高精度な数値解を得ることに成功している。さらに、得られた数値解法の種々の特性を数値的に検討している。その具体的な成果としては、球形の散乱体を用いて CBF 生成時の特異値の打ち切り方の指針を得たこと、誘電体の誘電率と GMRES 法の反復回数や解析精度、係数行列の固有値分布などとの関連を調べ、提案手法の従来法に対する優位性を示したこと、多数の散乱体に対する解析精度や効率を調べたこと、メッシュの細かさと反復回数の関係について調べ、提案手法の反復回数はメッシュの細かさによらないことを示したこと等が挙げられる。また、角のある散乱体では CBFM が RWG と BC の組み合わせよりも高精度の結果を与えることを示している。また最後に、結論として、全体のまとめと、今後の展望について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本研究は電磁波散乱問題を論じ、無線周波数から光学帯域における電磁波動散乱の空間特性を高速かつ高精度に数値解析する方法として、CBFM (Characteristic Basis Function Method) と Calderón の前処理について検討を行い、その効果と有効性を綿密な数値計算の積み重ねによって論じて成果を上げている。

具体的には CBFM に関わる2つの課題について研究を行って成果を上げている。第1の課題は CBF (Characteristic Basis Function) の生成法に関わるものである。CBFM の解析精度や効率は、使用する CBF の生成法に大きく依存する。従来 of CBF の生成法との比較において、本研究においては GMRES 法を用いて品質の高い CBF を効率よく作成する方法(IPCBF法)を提案し、従来法では課題であった精度悪化の問題を巧みに解決している。さらに当該 CBF を用いた CBFM から得られた電流を初期値とし、モーメント法により任意の精度の数値解を得る方法も提案している。この方法によって CBF の生成に用いた入射波と実際の入射波の差異に関わらず必要な精度の解を得ることに成功したことは高く評価される。また、本研究の方法が、工学上重要なモノスタティックレーダー断面積の計算に有効であることが数値例によって実証されている点も評価される。

第2の課題は、双対基底と Calderón の前処理を用いた CBFM により、誘電体構造物に対する散乱問題を高速に解析するもので、本研究では新たな方法の開発し提案している。Calderón の前処理法は数値電磁気学における近年の重要課題の一つであり、多くの研究がなされているが、これを CBFM と組み合わせた研究はほとんど見当たらず、極めて新規性と独創性の高い成果として高く評価できる。特に、特異値分解を用いた電流と磁流に対する双対性を有した基底の生成法は、理論的に興味深いのみならず、PMCHWT 定式化の反復解法における前処理法として用いた際の収束性の改善効果も極めて良好であり、さらに実装も比較的容易であるため実用性が高い。また、研究全体を通して数値計算例も豊富に示されており、その研究成果の緻密さと完成度は特に高く評価することができる。

本研究は現実の産業の中で生じる具体的な問題に焦点を当て、産業における学術成果の明確な活用を視野に入れた基礎研究としての特徴を有するものであり、この点においても高く評価される。具体的には、工学に現れる電磁波動散乱問題に焦点を絞り、定量性を考慮しつつ問題を数学的に記述して CBFM を理論的に論じ、その成果を再び具体的な数値計算に落とし込むことで、数値計算の信頼性と個々の問題に対する高速・高精度性を両立させて成果を示している。また、令和5年2月13日に論文内容とそれに関連した学術について試問を行った結果、高い学識を確認して合格と認めた。以上により、本研究ならびに主論文は京都大学博士(情報学)の学位基準に合致するものと認める。

なお、主論文の一部成果の国際学術誌での発表による制約から、インターネットでの全文公開は暫時控えたうえで令和6年3月23日までの適当な時期に行うことを認める。

要旨公開可能日： 令和 年 月 日以降