

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13153 号
------	---------------

氏 名 柳原 洸太

### 論 文 題 目

準光学光線追跡コードの開発及びその核融合プラズマへの適用  
(Development of a quasioptical ray tracing code and its  
application to fusion plasmas)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	客員教授	久保 伸
委員	名古屋大学	教授	藤田 隆明
委員	名古屋大学	教授	大野 哲靖
委員	九州大学	教授	出射 浩

## 論文審査の結果の要旨

柳原洸太君提出の論文「準光学光線追跡コードの開発及びその核融合プラズマへの適用」は、準光学光線追跡法を開発し、それが実用的であり、核融合プラズマにおける電子サイクロトロン波加熱において有用であることを明らかにしている。

第1章では、エネルギー・環境問題と絡めて核融合発電の必要性を論じ、核融合を考える上で重要なキーワードであるプラズマの導入とともに、環状に閉じた磁力線で構成されるカゴに高温高密度なプラズマを閉じ込めることで核融合反応を引き起こす磁場閉じ込め方式による核融合発電を紹介し、閉じ込められたプラズマの温度を上昇させたり、制御を行うために必要な様々な加熱手法について、中でも、将来、最も有望と考えられる電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)に絞ってその特徴や利点を述べた。ECRHではビーム状に成形された電磁波をプラズマに入射し、電子サイクロトロン共鳴層においてその電磁波エネルギーを共鳴吸収させるが、その電磁波ビームの伝搬と吸収を数値計算的に評価することの重要性と、その具体的かつ一般的におこなわれている簡便手法としての光線追跡法を紹介した。光線追跡法は波動の伝搬を幾何光学近似することで光線の軌道として計算するが、その近似によって無視される回折や偏波などの波動性がECRHの高精度な評価・予測には重要な役割を果たすこと、そしてこれらを考慮する方法として拡張幾何光学を用いた準光学的な光線追跡法があることを述べた。

第2章では、幾何光学近似に基づいた従来の光線追跡法で用いるハミルトン形式の光線方程式を導いた後、波動伝搬方程式の近似理論として幾何光学における光線の描像が得られることを拡張可能な数学的準備を含めた形で解説した。次に、その発展として拡張幾何光学に基づいて光線方程式と準光学方程式を導いた。具体的にはまず光線なる概念そのものについて解説し、フェルマの原理に基づく考察によって一様媒質中の光線が辿る経路は光線の直進性、反射の法則、屈折の法則を満足することを示した。さらにその一般化として非一様媒質中において光線が辿る経路は、変分法によって導かれるオイラー・ラグランジュ形式の光線方程式、またそのルジャンドル変換より得られるハミルトン形式の光線方程式によって与えられることを示した。次にディラックのブラとケットを用いたヒルベルト空間における波動の表現と、それを物理位相空間における関数に写像するワイル変換を導入した。ワイル変換を用いてヒルベルト空間から物理位相空間に写像された波動関数をアイコナル形式で仮定し、アイコナル波動関数の特徴的長さである波長とそれが伝搬する媒質の非一様性のスケール長さの比として与えられる無次元の幾何光学パラメータを定義した。アイコナル波動関数から幾何光学パラメータについて最低次の項を抜き出すことで、波動の幾何光学近似としてハミルトン形式の光線方程式が導かれることを示した。また拡張幾何光学に基づいて、今度は幾何光学近似で無視した高次の項を考慮することで光線近傍に局在する波束についての方程式を導き、ワイル変換及びその逆変換を駆使することでその波束を支配する演算子の具体的な表式を導いた。そして幾何光学パラメータをそれより具体的な準光学パラメータに置き換え、準光学パラメータに基づく新しいオーダーリングに則って波束を支配する演算子を更に近似することで、光線軌道に沿った波束の発展を求める準光学方程式を導いた。

第3章では、核融合プラズマにおいてECRHで用いる電磁波ビームが伝搬する媒質として、プラズマの温度を無視したコールドプラズマモデルと、温度を考慮したホットプラズマモデルについて概説した。コールドプラズマについては分散関係の導出と、その中で励起され得る様々なモードの中でECRHにとって重要な幾つかのモードについてまとめた。また、ホットプラズマについては分散関係を示し、プラズマ中に励起された波動と荷電粒子が共鳴する時の物理的描像を特に考察した。

第4章では、拡張幾何光学を基に任意の強度・位相分布を持つ波動ビームの伝搬を回折、散逸、モード間結合、回折を全て同時に考慮して記述する準光学光線追跡コード"PARADE"を、従来のどの光線追跡コードより最も一般的なコードとして開発・整備した。この章ではその開発経緯を述べた。まず、光線方程式及び準光学方程式の、数値計算に適した表式への変形について述べた。つまり1本の参照光線を用いてその周りの波束の分布まで評価することを考え、参照光線から外れた近軸領域の分散関係を近似的に満たすように、準光学方程式の更なる拡張を行った。その結果として得られた方程式がPARADEの中で計算されるプロセスについてもまとめた。次に様々なサンプル問題を設定し、その中でPARADEによって計算された波束が期待される波動的描像を正しく捉えられているかどうかの確認を行った。真空中を伝搬するビームのPARADEによる数値計算解とガウスビーム光学による解析解はよく一致しており、回折効果が正しく導入されていることを確認した。コールドプラズマ中で直線的に伝搬する状況では波束の発展は真空の場合と異なり、またモード毎にもその発展は異なることを示した。次に曲線的に伝搬するビームについてもPARADEによる結果ではビームの有限幅が維持されていることを確認し、従来のマルチ光線追跡によるビーム幅模擬計算で問題とされていた焦点近傍での各光線の交差が解消されることを示した。そしてホットプラズマ中で非一様な共鳴磁場を部分的に通過する波動ビームは、ビームエネルギーが部分的に吸収されることでその強度分布が歪み、その結果、回折による影響が強まってビームは従来の予測よりも大幅に拡がり、またその伝搬軌道そのものも従来予測されていた経路とは異なる経路を示すことが明らかになった。これはPARADEが回折と非一様散逸を同時に計算することによって可能となった効果である。任意の偏波状態を持った波動ビームの記述が可能なPARADEは、低密度のプラズマにおいてほとんど縮退した複数のモードが同時に励起し、それらの線型結合比が変化するモード変換まで扱うことができる。磁気シアを伴った低密度コールドプラズマにおいて直線的に伝搬する波動ビームをPARADEで計算し、その偏波状態とモード混合比の伝搬に沿った変化を1次元全波解析コードによる数値計算解と比較したところ、両者はよく一致した。さらに複数モードを同時に計算す

## 論文審査の結果の要旨

るPARADEは、プラズマ密度の上昇にしたがってビームに含まれる各モードの分散関係の縮退が少しずつ解けることによる伝搬軌道の分裂を記述することも可能で、PARADEによって求められた分裂伝搬した各モードの伝搬経路が従来の独立な2つのモードに対してそれぞれ光線追跡を行った結果と一致することも示した。

第5章では、複雑な磁場構造を有する大型ヘリカル装置(LHD)における波動ビームの振る舞いを高機能に記述するため、PARADEコードをLHDにおけるECRH実験データ解析に適用した結果について議論した。LHDのECRHシステムでは、準光学ミラーを用いて有限のビーム幅を伴った波動ビームをプラズマ中の狙った位置へと局所的に入射する。この局所加熱による高機能・高精度なプラズマ加熱・制御を実際に実現するには、有限幅を持つ波動ビームによる共鳴加熱の空間分布を正確に評価することが求められる。そこでLHD実験より得られた実際のプラズマ分布のもとで入射波動ビームがもたらす加熱の空間分布をPARADEでシミュレートし、マルチ光線追跡による同様のシミュレーション結果と比較したところ、PARADEから得られる加熱分布はマルチ光線追跡によるそれよりも幅が広く、またそのピーク位置も異なることが明らかになった。これは光線周りの波束を持つエネルギーのプラズマへの堆積位置の違いによるもので、回折を考慮して波束を記述するPARADEによってより実際的な評価が可能となったことを示した。またLHDプラズマは磁気シアが大きいことを特徴としており、コアプラズマにおけるモード純度が高い電磁波ビームの励起のためには低密度な周辺領域におけるモード混合ビームの励起と磁気シアによるその混合比の変化が問題となる。このことを評価するために、LHD実験より得られた実際の周辺プラズマ分布の元で電磁波ビームの偏波状態・モード混合比をPARADEでシミュレートし、1次元全波解析による同様のシミュレーション結果と比較した。両者による結果はほとんどよく一致するが、ビームが最外殻磁気面に近づくにつれて僅かな違いが見られる。これはPARADEが曲がりゆく光線軌道上の偏波状態を記述することによるもので、直線軌道上の偏波状態を評価する1次元全波解析と比べてより実際的な結果を示していることを明らかにした。

第6章では本論文の結論として、従来、一般的に用いられている幾何光学近似の光線追跡法を拡張した準光学光線追跡理論を整備し、それに基づいて、核融合プラズマなどの非一様、非等方媒質中の屈折、回折、非一様吸収、モード変換を同時に扱える拡張性の高い“PARADE”コードを開発・整備し、その実効性、有効性を示した。さらにこのコードをLHDプラズマに適用して実験解析に有用なより現実に近い電力吸収分布を提供できることも示した。

以上のように本論文では一般的な非一様、非等方媒質の電磁波伝搬を準光学的に取り扱うことによって、実用的に高速にかつ正確に核融合プラズマの電子サイクロトロン加熱を記述できるとこ明らかにしている。これらの解析方法並びに得られた結果は、核融合プラズマの電子サイクロトロン加熱に限らず、不均一性が波長に比べて十分に緩やかな一般的な異方性媒質中を伝搬する電磁波の解析に適用が可能であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である柳原洸太君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。