

報告番号	甲 第 13153 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

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)

氏 名 柳原 洸太

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究の目的は非一様非等方媒質中を伝搬する波動ビームの振る舞いを高機能・高精度に記述する新しい手法の開発と、特にその核融合プラズマにおける電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)実験データ解析への適用である。本論文ではまず波動の伝搬を幾何光学的な枠組みで記述する方法について述べ、その発展として拡張幾何光学による準光学的な記述法の導入を行った。次にそれに基づいた新しい準光学光線追跡コードの開発について詳述し、様々なサンプル問題で動作の確認を行った後、核融合プラズマ中を伝搬する波動ビームのシミュレーションに実際に適用し、得られた知見をまとめた。以下ではその概要を各章に分けて述べる。

### 第1章

エネルギー・環境問題に対する解の一つに核融合発電の実現が挙げられる。磁場閉じ込め方式による核融合発電では、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。閉じ込められたプラズマの温度を上昇させるためには外部からの加熱が必要となるが、様々な加熱手法の中でも、将来、最も有望と考えられているのが電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)である。ECRHは局所加熱位置において磁場に巻きつくように螺旋運動する電子と同じかその整数倍の周波数を持つ電磁波をビーム状に成形して入射することで、電子サイクロトロン共鳴によってその電磁波エネルギーをプラズマ中の電子に吸収させる加熱手法である。正確な実験解析や予測のた

めにはプラズマ中における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が重要で、一般的に用いられている簡便手法としては光線追跡法がある。光線追跡法は波動の伝搬を光線の軌道に幾何光学近似して計算するが、こ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ため、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を提案する。

## 第 2 章

フェルマの原理に基づけば、一様媒質中の光線が辿る経路は光線の直進性、逆進性、独立性、そして反射の法則、屈折の法則を満足する。フェルマの原理とはまさに変分原理の言い換えであり、したがって一様媒質中の議論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、自明でない曲線的な軌道である。

波動の光線への近似はワイル変換の導入と幾何光学近似の適用によって実現する。配位空間で表現された演算子はワイル変換によって位相空間における関数に写像される。配位空間で仮定したアイコナル形式の波動関数を位相空間に写像し、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幾何光学パラメータについて、最低次の項をアイコナル波動関数から抜き出すことで、波動方程式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ける。

また幾何光学近似する際に無視した高次の項を考慮すれば、光線近傍に局在する波束まで考慮した拡張幾何光学理論が導ける。幾何光学パラメータを、より具体的な準光学パラメータに置き換え、それに基づく新しいオーダーリングに則って拡張幾何光学方程式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

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には、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の両方を用いた。

## 第 4 章

第 2 章で導いた準光学方程式を実際の数値計算コードとして具現化するには工夫が必要である。つまり本来光線軌道上の波束の発展のみを記述する元の方程式を、光線から外れた近軸領域の分散関係を近似的に満たし、光線周りの波束の分布の発展まで評価できるように、更なる拡張を行った。その結果として得られた方程式を基に、任意の強度・位相分布を持つ波動ビームの伝搬を屈折、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。

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性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、回折効果が妥当に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、従来の独立な複数本の光線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。

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

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。

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とマルチ光線追跡によるそれとの間には違いが見られることが明らかになった。これは光線周りの波束が持つエネルギーのプラズマへの吸収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、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と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次元全波解析より現実的な結果を示していることを明らかにした。

以上より要点をまとめると、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・整備した。そしてその実効性、有効性を様々なサンプル問題への適用を通じて示すとともに、さらにこのコードを実際の LHD プラズマに適用することで実験解析に有用な、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。

本研究の成果は非一様非等方媒質、特に核融合プラズマにおける波動ビームの振る舞いのより正確な理解に貢献し、今後のプラズマ波動理論の発展、及び核融合プラズマ実験解析の高精度化、そして高効率・高機能・高精度な波動加熱システムの構築に資するものである。