

氏 名 吉玉 仁

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1326 号

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 レーザープラズマ加速による高品質電子ビームの  
発生に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 大見 和史  
教授 鎌田 進  
教授 設楽 哲夫  
准教授 田内 利明  
教授 川田 重夫（宇都宮大学）

## 論文内容の要旨

近年、レーザープラズマ加速器の研究は進み、その高い加速勾配と従来の高周波加速器では不可能な高品質ビームを利用する小型X線自由電子レーザー等への応用が期待されている。プラズマ波を励起してウェーク場を作るには高強度のレーザーパルスが必要だが、レーザーの焦点から遠ざかると回折によりレーザーの強度が低下してしまいウェーク場を作ることができなくなる。このことにより加速距離が制限され、エネルギー利得は高々100MeV程度に留まっていたが、キャピラリーを使った光ガイディングにより焦点付近の高強度状態を保ったまま回折させずにレーザーパルスを伝播させることによってこの制限を克服することができ、3cmのキャピラリーを用いて1GeVの加速が実現している。

しかし、レーザー及びプラズマのパラメーターと生成される電子ビームのエネルギー広がり、エミッタンス、バンチ長、電荷量等のビームパラメーターとの関係はいまだ十分に研究がなされていない。そこで、本論文はレーザーとプラズマの相互作用を扱うためにPICシミュレーションを用い、高品質電子ビームを実現するプラズマ加速器の開発と小型の波長13.5nmの軟X線FELに応用可能な高品質電子ビームパラメーターの生成条件に関する研究について述べる。

まず、ガスフィル型放電キャピラリーを開発し、それを用いた光ガイディング実験を行い、生成されるプラズマチャネルによる光ガイディングを実証した。次に、キャピラリーによる電子加速で、高品質な電子ビームを生成するために、Particle in Cell (PIC) シミュレーションでレーザープラズマ加速による電子ビームの品質とレーザー及びプラズマパラメーターを探索し、キャピラリープラズマチャネルが高品質化に有効であることを見出した。

キャピラリーの作成では生成されるプラズマチャネルを光ガイディング実験により調査した。作成したキャピラリー内で水素ガスの放電を行いガイディングに最適な時刻にレーザーパルスを入射したところ、光ガイディングが観測され、非局所熱平衡モデルをこの結果に当てはめて電子密度プロファイルを計算し、GeV級の電子加速に使用可能であることが判明した。

PICシミュレーションによる電子加速実験のシミュレーション及び高品質電子ビームを生成するための条件を探索した。前者ではベータトロン振動やマルチバンチ入射などの実験で観測された現象が確認され、最大エネルギーと電子の入射位置は実験を証明する結果が得られた。後者では電子ビームのクオリティを向上させるための条件が判明した。プラズマ電子密度はエネルギー利得の制御に、レーザーパルスのスポット半径及びパルス幅はエネルギー広がり、エミッタンス、バンチ長、電荷量などの品質制御に用いられることが判った。本研究で得られた最適なビームパラメーターはキャピラリーを用いて波長13.5nmの軟X線FELに応用可能であることを明らかにした。

## 博士論文の審査結果の要旨

吉玉氏の博士論文はレーザープラズマ加速理論のレビュー、装置の開発、実験、シミュレーションからなり、レーザープラズマ加速による高品質ビーム発生のための条件を探し、実現への方向性を示す研究である。

レーザープラズマ加速とは、プラズマ内にレーザーを照射することで、高エネルギー電子が発生する物理現象である。その現象を加速器として利用することで、非常に高加速勾配 ( $> \text{GeV/m}$ ) の加速器が実用化される可能性がある。近年の高強度レーザー技術のめざましい進歩によりレーザー加速エネルギーがGeV級まで上がっている。加速原理では、レーザーによりプラズマ中に光速で伝搬する、電子の少ない領域(バブル)をつくり、そのバブル内に形成される電場で電子が加速される。レーザー場による電子の加速距離は、レーザー光のスポットサイズすなわち回折により決まる。本研究で、レーザー光のガイディング技術により加速距離が長くできることがわかった。つまりレーザーを通すプラズマに密度分布をつけることで、屈折によりレーザーを長い距離絞ったままガイドすることができるのである。これにより加速距離はプラズマ波動と電子速度の位相のずれる距離まで加速が可能になる。

本研究は、ガイディング用ガスフィル型キャピラリーの開発製作、ガスジェットによるプラズマ加速実験の解析および、高品質電子ビーム発生条件を探索するための計算機シミュレーションである。その結果開発したキャピラリーは期待のガイディング性能を示すことが実験で示された。シミュレーションではプラズマ中にレーザーを通し、バブルができる過程、ビームがバブルに入射、加速される過程を多体マクスウェルローレンツ方程式を粒子(PIC)シミュレーションコードを用いて解析した。

プラズマ加速における興味深い点のひとつは電子がいかに入射されるかである。非相対論的に波動を伝搬させる媒体であったプラズマ中の電子がプラズマ波と同期し、加速される過程がシミュレーションで再現されている。プラズマ中に電子の空洞であるバブルが形成され、その中に電子が入射され、トラップされ、内部の電場で加速されていく。入射があるタイミングで起こり、その後起こらないようになっていなければエネルギーの単色性は保証されない。シミュレーションによると、入射は複数回起きることがあるようである。加速電子のエネルギー領域が複数あり、高品質単色ビームを得るためには分離が必要であることがわかった。実験でも複数回の入射は確認されている。位相速度が線形理論より遅く、それにより加速が制限されていることもシミュレーションで見られた。実験でも線形理論

の 1/5 程度の加速エネルギーであることが知られている。本論文の結論では、キャピラリーを用い、パラメータの最適化により、軟X線FELが発振可能なビームを生成することができる可能性を示した。

以上により吉玉仁氏の研究は博士論文に値すると判断した。