

ELECTRON INJECTION INTO THE LASER WAKEFIELD BY THE WAVEBREAKING

K. Koyama^{A)}, H. Masuda^{A)}, M. Uesaka^{A,B)}, S. Masuda^{C)}

^{A)} Department of Nuclear Engineering and Management, The University of Tokyo

2-22 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

^{B)} Nuclear Professional school, The University of Tokyo

2-22 Shirane-shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188, Japan

^{C)} Photon Pioneers Center, Osaka University

2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

Abstract

Electron injection into the laser wakefield by the wave breaking in a density down ramp was investigated. An oblique shockwave in a supersonic gas flow of $M=5$ was utilized for producing the steep density ramp. In order to find the optimum condition for getting a high-quality electron beam, the numerical simulation was performed by using a 1-D particle-in-cell (PIC) code. A preliminary experiment using the density ramp in the gas target suggested that electrons were injected by the wave breaking. In order to produce high-quality electron beam, we are conducting further investigations with help of 2-D PIC code.

プラズマ波の破壊による航跡場への初期電子入射

1. はじめに

レーザーパルスによってプラズマ中に励起された光速で進むプラズマ波を利用したレーザー航跡場加速器は、単一エネルギーの電子加速が可能になったものの、応用に当たってはエネルギー、エネルギー幅、電荷量、出射方向の安定性に課題が残る。この内、エネルギーおよびエネルギー幅と電荷量に関しては、初期電子の供給が制御されていないためであり、出射方向のバラツキはプラズマ中をレーザーパルスが伝播する時の不安定性によるものと考えられる。これらを解決するためには、前者に対しては初期電子入射の制御技術、後者に対してはレーザーガイド用プラズマチャンネル形成技術の開発が求められる。初期電子入射には強力なレーザーパルスとの相互作用を使った光学的方法とプラズマ中の密度不連続面で発生する波の破壊による方法がある。

応用に当たっては、簡便かつ小型である事が望ましいことから、東京大学ではこれまでに12TW、50fsのチタンサファイア・レーザー（波長800nm）を用いたレーザープラズマ加速実験を行い、加速電子のエネルギー、電荷量、方向のレーザー・プレパルス依存性およびレーザー光軸に平行な外部磁場による電子ビーム集束と方向の安定化効果などを報告した^[1-5]。その後、初期電子入射と安定加速を目指して、磁場を1Tに強くしてプラズマガイドコーンを形成し、更にメインパルスの約十ピコ秒前にプレパルスを導入した事によるプラズマチャンネルを形成して、7TWのレーザー出力で電子加速実験を実施し、

100MeV級の準単色電子加速に成功した。

複数のレーザーパルスを使わない単純な構成で電子入射出来る可能性がある超音速ジェット中の階段状密度分布を利用した初期電子入射の予備的実験を実施し、予備的実験に於いて電子入射にとって密度不連続が有効であるとの示唆を得ているが、安定性に関する議論ができるまでには至っていない。超音速ノズルの改良に先立って、2D PICコードを用いて密度分布の最適条件の探索を進めている。

2. 入射電子と密度の条件

最初に、計算時間を要しない次元粒子コード(1-D Particle in cell; PIC)によって、電子入射に必要な階段状電子密度分布の密度比と密度の不連続の特性長さに関する情報を得た。図1に示すように、入射電荷量は密度比が3ないし4の時に最も大きく、密度変化の特性長が短いほど大きい。エネルギー幅は密度比によって大きな違いは無いが密度の特性長が λ の2~3倍で最小(5~6%)になる。これらは、最初のポテンシャル井戸に入射され加速された電子に関する結果である。階段の上下での密度比が大きくなると、図2(b)(c)のように、2番目、3番目のポテンシャル井戸に入射される電子の量が無視できなくなり、エネルギー幅が広がったり、複数のエネルギーピークが現れる。

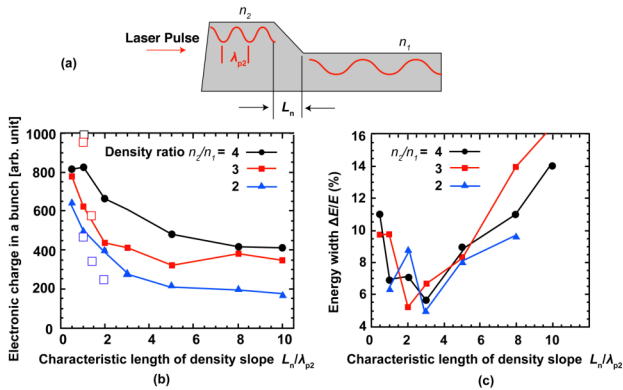


図1 (a)密度分布の模式図。(b)密度変化の特性長に対する入射電荷量。中抜け四角の記号は、レーザーパルス幅が9fsの場合の結果。(c)密度変化の特性長に対する単一エネルギー成分のエネルギー幅。

3. 階段状密度分布ジェットとの生成と電子入射予備実験

複数のレーザーパルスを使わずに、単純な構成で電子入射するために、ガスジェット・ターゲット中の密度に段差を発生する。階段状の密度分布は超音速ノズルの脇においた板で超音速流の向きを変えるときに発生する斜め衝撃波を用いた。斜め衝撃波面を横切る時の密度比は衝撃波面の伝播方向（元の流れの方向に対する角度）の関数であり、衝撃波面の伝播方向は流れの向きの変化の関数である。1次元粒子コードによるシミュレーションから得た必要な密度比（2倍）で、かつ衝撃波面の方向を元の流れの方向に出来るだけ近くするために、マッハ数 $M=5$ で流れの偏向角を 9° とした。超音速ノズルの喉部の面積はノズル先端での分子の数密度を $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上という条件およびガス供給用ソレノイドバルブの C_v 値、ノズルまでのコンダクタンス等を用いて決定した。図3は、分子密度の干渉計計測結果である。ノズル開口は矩形であるので、図中の干渉縞のずれは密度に比例する。

電子入射実験は7TWのレーザーパワーで行った。パルス幅は50fsであり、集光には焦点距離が177mmの軸外し放物面鏡を用いた。集光径($1/e^2$)は $7 \mu\text{m}$ で集光強度は 10^{19} W/cm^2 であった。プレパルスのメインパルスに対する強度比（コントラスト比）は $10^4 \sim 10^6$ であった。低コントラスト比では、プレパルスで発生したプラズマが階段状の密度構造を破壊するために、高エネルギー電子の発生は見られなかった。一方、コントラスト比を極力高くした場合には、高エネルギー電子の発生が認められ、しかも単一エネ

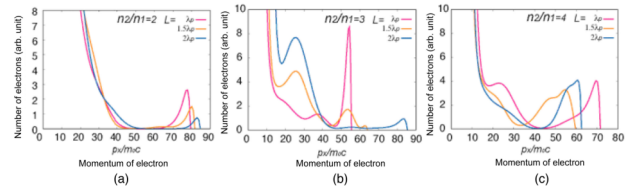


図2 階段状プラズマ密度での波の破壊を利用した時の電子の運動量スペクトル。(a) (b) (c)と段差の密度比を変えている。各々の図の三つの曲線は密度変化の特性長に対応している。

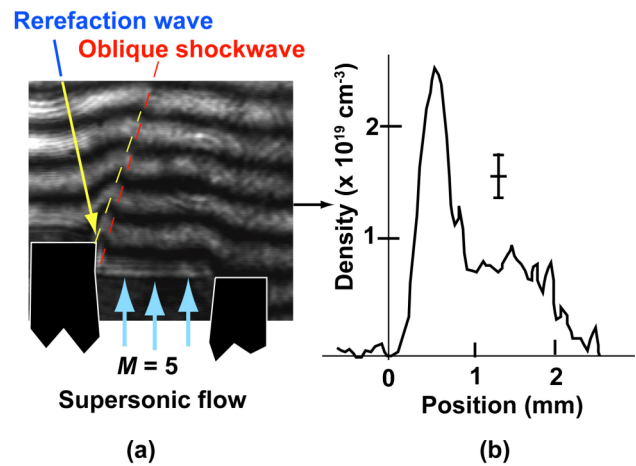


図3 (a)超音速流の干渉縞計測結果。赤点線は斜め衝撃波面で黄色点線は希薄波を表す。(b)干渉縞のずれから読み取った密度分布。

ルギーの成分が認められた。この実験では、電子のエネルギー分析器の前に入射スリットを用いなかったため、電子のエネルギーの正確な評価はできない。単一エネルギー成分の電子群が中心軸上にあれば約70MeVと見積もることができるが、出射方向のずれを考慮すると $\pm 50\%$ の不確かさがある^[6]。電子入射の本方式の評価を行うために、今後は、レーザーのプレパルスを 10^{-6} 以下にし、レーザーの安定化を図り、電子エネルギーの測定と同時にレーザー散乱計測によって相互作用（特に波の破壊）の測定を行う予定である。

4. 2次元シミュレーション

実際のレーザー航跡場加速はレーザービームの径が有限であるために、横方向の密度変調の影響も受ける。一様な密度分布中でのレーザー航跡場による初期電子の自己捕捉機構は、航跡場が作る半径方向の強力な電場によってポテンシャル井戸の終端近く

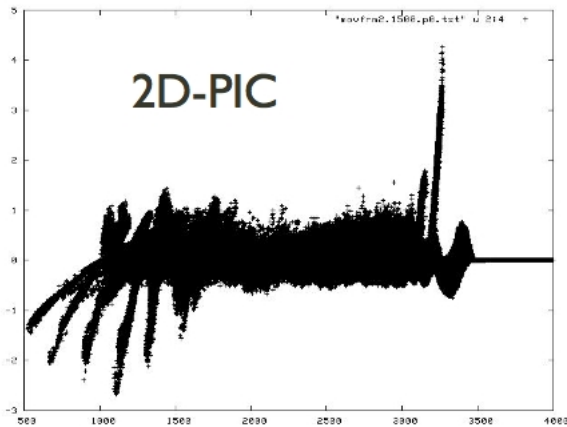


図4 2D-PICコードによる予備的計算で得た位相空間での電子の分布図。

で航跡場の半径方向の構造が壊されて電子が集束し、航跡場のポテンシャル井戸の入射される「横方向の波の破壊」が主な機構であると考えられている。

階段状密度分布の場合も、半径方向の電場の影響を考慮して、電子入射条件を選ぶ必要がある。過去にTomassini等が横方向の分布の影響も考慮したPICコードによるシミュレーションを行い、急峻な勾配の場合には、横方向の運動量が抑制されて高品質な電子ビームが得られる事を示している^[7]。しかし、プラズマ波の波長よりも短い特性長の密度分布を作る事は難しいので、プラズマ波の波長の2~3倍程度の密度変化の特性長でも高品質のビームが得られるような条件を探索する必要がある。そのために、我々は、実験と並行して2-D PICコードによる、シミュレーションを開始した。図4は予備的な計算で得られた位相空間での電子の分布図である。

5. まとめ

超音速ジェット中に斜め衝撃波を応用して階段状密度分布を生成する事に成功した。それを用いて、初期電子入射の予備的実験を実施し、電子入射が可能である事を示したが、まだ初歩的段階であり、密度分布と加速エネルギー、エネルギー幅の再現性の関係に課題は残る。今後は、2次元粒子コードによるシミュレーションおよびレーザー照射実験によって、本方式の可能性を検証すると共に、これまで実施してきた強磁場中でのレーザープレパルス導入法で得た知見も合わせて、小型実用機として最適な方式を見出し、そのための基礎技術を確立する。

参考文献。

- [1] T. Hosokai, *et al.*, Phys. Rev. E **67** (2003) 036407.
- [2] T. Hosokai, *et al.*, Phys. Plasmas. **11** (2004) L57.
- [3] T. Ohkubo, *et al.*, Phys. Plasmas. **13** (2006) 033110.
- [4] K. Kinoshita, *et al.*, Jpn.J.Apl.Phys. **45** (2006) 2757.
- [5] N. Hosokai, *et al.*, Phys.Rev.Lett. **97** (2006) 057004.
- [6] K. Koyama, *et al.*, NIMA, **608** (2009) S51.
- [7] P. Tomassini, *et al.*, Phys. Rev. STAB **6** (2003) 121301.