

研究責任者名 Name	野崎 光昭 NOZAKI Mitsuaki	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 KEK
受理番号 Proposal No.	大型14/15-26	研究課題名 Program title	レーザープラズマを用いた高エネルギー粒子加速に関する研究

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

レーザー航跡場による電子加速において、幾つかの知見を得られた； (i) 3次元相対論的PIC(particle-in-cell)シミュレーションを用いて、軸対称偏光（ラジアル及びアジマス偏光）レーザーパルスの均一プラズマ中でのフィラメンテーション不安定性の存在する可能性を示した。この不安定性は、レーザー軸付近でのレーザーパルスの自己収束による電子の圧縮によって引き起こされる。(ii) 軸対称偏光レーザーパルスの強いデコンポジションを実証した。極めて短い伝搬距離で2次高調波が発生する。直線偏光レーザーパルスではこの高調波は発生しない。(iii) 1T以上の外部磁場を印加することによるレーザー航跡場の加速位相への電子入射の制御について。

(英文)

We have explored several effects in electron acceleration by laser wake fields: (i) Using three dimensional fully relativistic particle-in-cell simulations we have shown appearance of filamentation instability for radially and azimuthally polarized laser pulses in uniform plasma. This instability is provoked by compression of plasma electrons near the laser axis during radially or azimuthally polarized pulse self-focusing (ii) We have demonstrated numerically that the strong decomposition of axisymmetric laser pulses in under-dense plasma. During the decomposition the strong second harmonics (SHG) radiation is emitted in quite short distance. In the case of linearly polarized laser pulses SHG emission does not occur. The generation of SHG confirms the electron compression near the laser axis that result in the pulse instability (iii) We have shown that there is an essential effect of longitudinal magnetic field on the electron self-injection already at $B>1T$ External magnetic field may be a good instrument to control the charge of self-injected electrons in the acceleration phase.

研究成果を公開しているホームページアドレス

事務局にて使用	論文 査読有	論文 査読無	講義・発表	招待講演	その他
	0	0	0	0	0

高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究 実施報告書

研究課題「大型 14/15-26」

大型レーザープラズマを用いた高エネルギー粒子加速に関する研究

scplasma グループ

1. 研究組織

以下の組織でレーザー航跡場加速による電子源開発を行った。そのためのシミュレーション研究として、大型シミュレーション研究課題「大型 14/15-26」を実施した。シミュレーションは大阪大学の Alexei Zhidkov、Naveen Pathak が担当した。

高エネルギー加速器研究機構

野崎光昭 共通基盤研究施設 教授：研究総括

吉田光宏 加速器研究施設 准教授：理論検討、要素技術開発

小山和義 先端加速器推進部 研究員：理論検討、要素技術開発

大阪大学

兒玉了祐 光科学センター 教授（センター長）：研究総括

細貝知直 光科学センター 特任准教授：理論検討、要素技術開発

Alexei Zhidkov (アレクセイ ジドコフ) 光科学センター 特任教授：理論検討

Naveen Pathak (ナビーン パサック) 光科学センター 特任研究員：理論検討

益田伸一 光科学センター 特任講師：理論検討、要素技術開発

2. 研究課題の内容

高密度プラズマへの極短パルスレーザー照射によって極めて高い加速電場を持つ短波長のプラズマ波（レーザー航跡場）を励起し、レーザー航跡場に電子バンチを補足させ、短い加速長で高エネルギー電子を発生することができる。また、レーザー航跡場加速では、高電荷量のフェムト秒電子バンチ発生が可能である。既にいくつかの研究グループは、cm スケールの加速長で 1 GeV 以上の電子バンチ発生に成功している。しかしながら、シ

ショット毎の電子バンチのエネルギー、放射方向等のビームパラメータは大きくばらついており、実用に供するためには安定性を大きく改善する必要がある。

近年のレーザー航跡場加速に基づく新奇小型電子加速器の開発研究では、外部磁場印可によるプリプラズマ制御、複数のレーザーパルスを使ったフルオプティカルな電子入射と加速の制御が重要な研究テーマとなっている。プラズマ中のレーザーパルスの伝搬を詳細に解析するために3次元空間中で計算する必要があり、電子入射の解析にはプラズマの振る舞いを運動論的に計算する必要がある。3次元 PIC (Particle-In-Cell) シミュレーションコードを開発し計算を行った。PIC法は、プラズマを運動論的に取り扱う数値計算方の一つである。プラズマを構成する荷電粒子は、多数の粒子が集まった超粒子として扱う。Maxwell 方程式を FDTD 法により電場と磁場の時間発展を交互に計算し、各超粒子に対して運動方程式を Buneman スキームにより粒子の位置と運動量の時間発展を交互に計算する。Maxwell 方程式の電流項を粒子の位置と運動量から計算、運動方程式のローレンツ力を電磁場から計算することによって、Maxwell 方程式と運動方程式が結びつけられるので、電磁場と荷電粒子の運動の時間発展を自己無撞着に解ける。各時間ステップで、小領域での各プラズマ粒子の平均密度および温度を計算し、各種衝突電離確率を計算する。また、電場強度から各プラズマ粒子の光電離確率を計算する。電離確率の計算に基づいて、各粒子の電離価数を決めて電荷の重み付けを変更する。

3. 研究課題の結果

3.1. 軸対象レーザーパルス伝搬による安定性研究

レーザー航跡場加速において、高強度レーザーパルスのプラズマ中の伝搬を安定に制御することが極めて重要である。特に適切な航跡場の励起、航跡場の適切な位相への電子入射の制御が必要である。レーザー航跡場加速では、普通ガウスモードのレーザーパルスが用いられる。しかし他のモードを使用することにより航跡場励起、電子入射の制御性が改善される可能性がある。ここで、我々は軸対称偏光レーザーパルスのドーナツ状の横方向強度分布と強い縦方向電磁場に注目して、シミュレーションを行った。

軸対称偏光レーザーパルスは、ガウスモードレーザーパルスと異なり、急激な不安定性の成長により複数のフィラメントに分裂しやすいことがわかった。この不安定性はレーザー軸付近でドーナツ状強度分布によって圧縮された高密度プラズマ電子との相互作用が引き金になる。さらに相対論的自己収束効果によるパルスの収縮がさらなるプラズマ電子の圧縮を引き起こす。Figure 1 から 5 にレーザーパルスの強度分布及び電子密度分布の時間発展を示す。

これらの計算では、格子サイズ $dx \times dy \times dz = 1/16 \lambda \times 1/8 \lambda \times 1/8 \lambda$ のセル当たり 8 個の粒子を用い、光速で x 方向（レーザーの伝搬方向）に動く $80\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ のムービー

ングウィンドウ内でのレーザーパルスの時間発展を計算している。プラズマ長は 1mm とし、 $150\ \mu\text{m}$ 長の密度勾配を真空との境界に配置している。計算は均一プラズマと密度チャンネル有りの場合で行った。レーザーの中心波長を 800nm、パルス幅を 30fs とした。レーザーのピーク強度は $I=3\times 10^{19}\ \text{W}/\text{cm}^2$ から $I=3\times 10^{20}\ \text{W}/\text{cm}^2$ まで、均一プラズマの密度は $N_e=3\times 10^{19}$ から $N_e=3\times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ まで変化させた。プラズマチャンネルは $N_e(r) = N_{e\text{min}} + \Delta N_e r^2 / D^2; r \leq D$ の分布を持つとして、直径 $D=60\text{mm}$ 、深さを 0.5 及び 0.25 とした。以下の計算結果は、システム B の 128 ノードを用いて得られた。

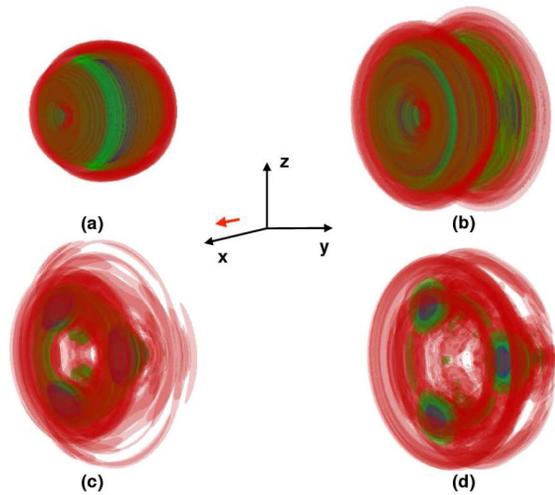


Fig. 1 3-D contours of intensity of radially polarized laser pulse with $I_0=3\times 10^{19}\text{Wcm}^{-2}$ propagating in uniform under-dense plasma. The snap shots show intensity distribution at (a) 240 fs, (b) 750 fs, (c) 1.4 ps, and (d) 1.8 ps. The pulse is propagating from right to left hand side

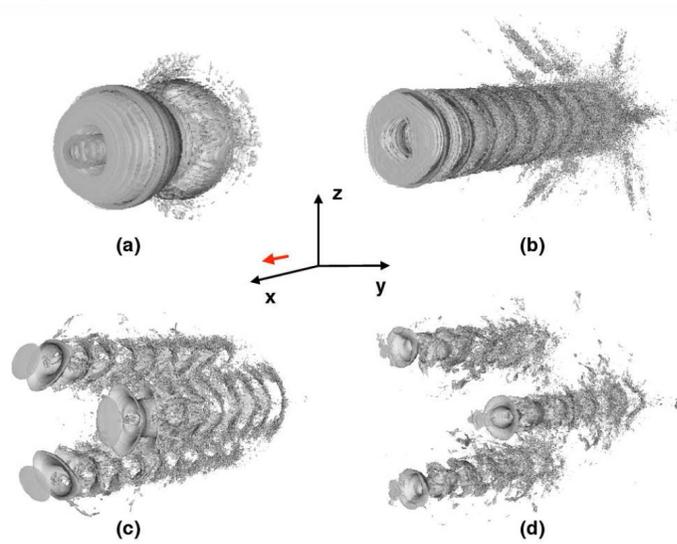


Fig. 2 3-D contours of electron density for radially polarized laser pulse of intensity $3 \times 10^{19} \text{Wcm}^{-2}$ propagating in uniform underdense plasma. These snapshots correspond to the intensity plots in fig. 1.

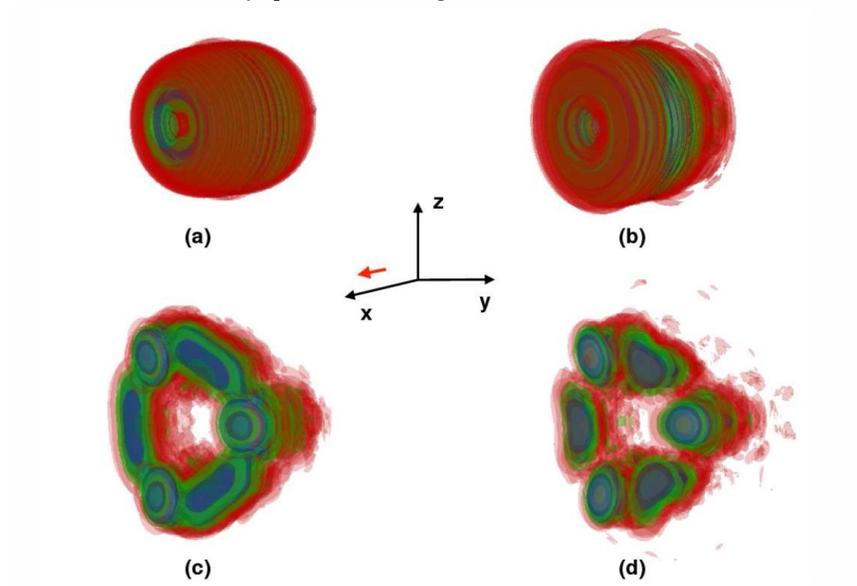


Fig. 3 3-D contours of intensity of radially polarized laser pulse with its maximum $3 \times 10^{20} \text{Wcm}^{-2}$ propagating in uniform underdense plasma. The snapshots show intensity distribution at (a) 224 fs, (b) 687 fs, (c) 1.4 ps, and (d) 1.5 ps. The pulse is propagating from right to left hand side.

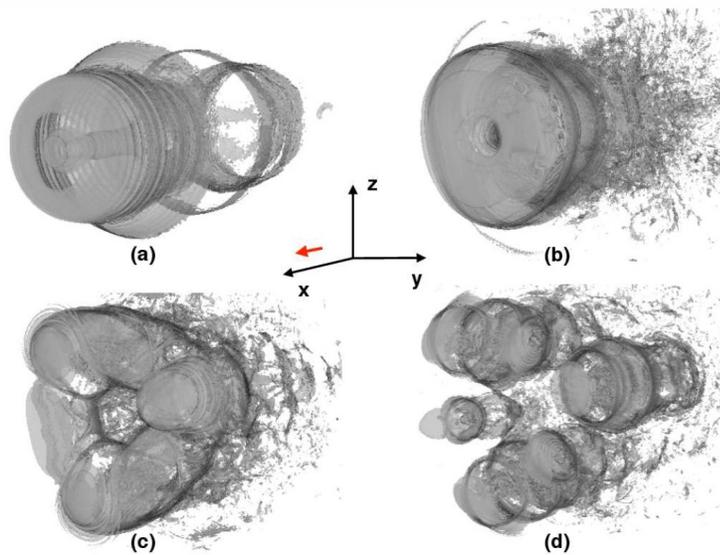


Fig. 4 : 3-D contours of electron density for radially polarized laser pulse with intensity $3 \times 10^{20} \text{Wcm}^{-2}$ propagating in uniform under-dense plasma. These

snap shots are corresponds to the intensity plots in fig. 3.

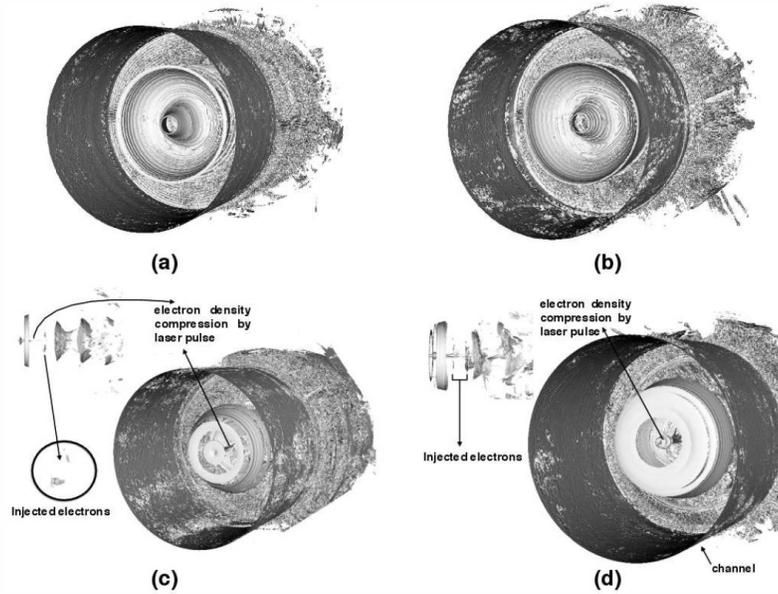


Fig. 5 3-D contours of electron density evolution of a radially polarized pulse with intensity $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ propagating in under-dense plasma with parabolic density profile of depth 0.25 ($N_{\text{emax}} = 3 \times 10^{20}$ and $N_{\text{emin}} = 0.25 N_{\text{emax}}$). The snap shots show density distribution at (a) 492 fs, (b,) 1.2 ps, (c) 1.8 ps and (d) 2.2 ps.

3次元 PIC シミュレーションによって均一プラズマ中を伝搬する軸対称レーザーパルスのフィラメンテーション不安定性の存在が示された。この不安定性はレーザー軸でのプラズマ電子の圧縮によって引き起こされる。フィラメントの形成はレーザー強度に依存しており、 $I=3 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ では3つの分裂し、 $I=3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 以上ではそれ以上に分裂する。シミュレーションの過程で、レーザー軸から発生するプラズマジェットが観測された。さらにシミュレーションでは、プラズマチャンネル中を軸対称レーザーパルス伝搬させることによって不安定性が抑えられることがわかった。

以上の結果は Phys. Rev. X に投稿中である。

3.3. レーザー航跡場中の電子自己入射に対する外部磁場の影響

外部磁場をプラズマに印加することにより、レーザー航跡場への電子の自己入射の制御を行うことができる。磁場の影響により、パラメトリック共鳴とレーザー軸近傍での穏やかなプラズマ波破碎が引き起こされる。シミュレーションによって、縦方向プラズマ波破碎の結果、強い電子入射が得られることがわかった。極めて強

い磁場を印加すると連続的なプラズマ波破碎が生じ、大量の電子が入射される。
Figure 7, 8, 9 にシミュレーション結果を示す。これらの結果は Phys. Rev ST に投稿
中である。

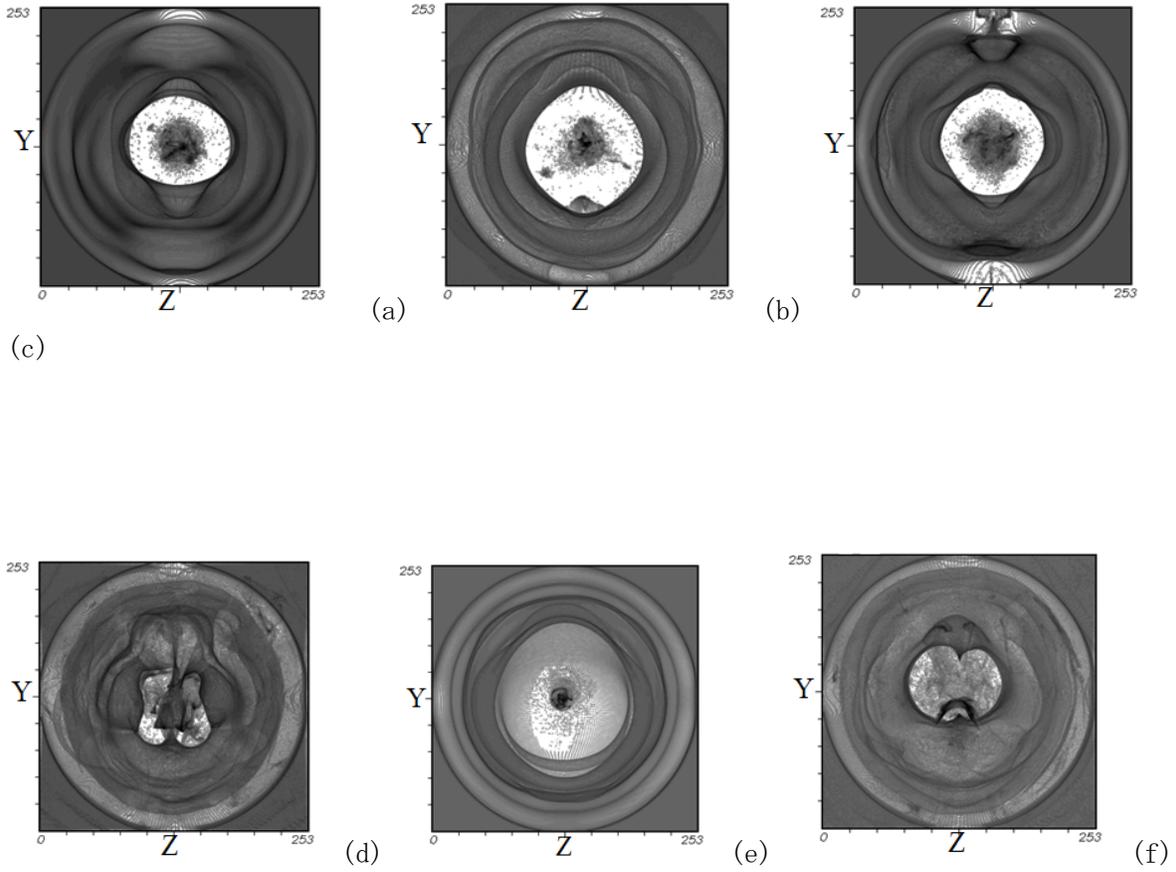


Fig.7 Transverse profile of electron density including the electron beam in the laser wake in an external magnetic field $B=10T$

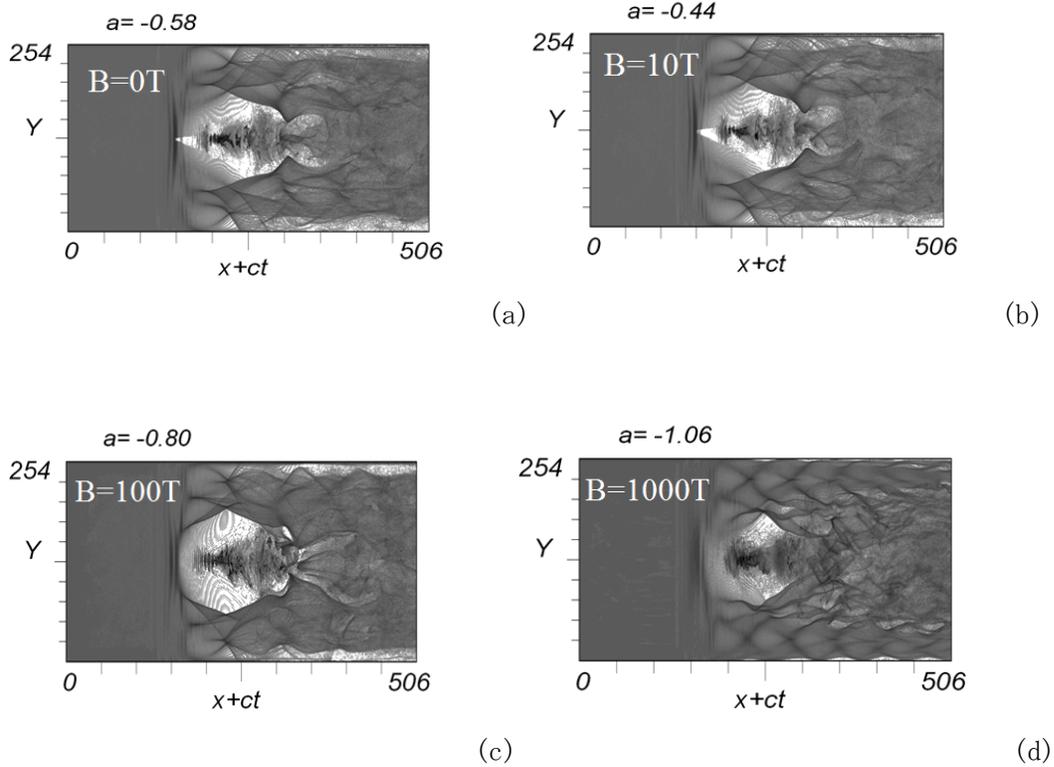


Fig.8 Longitudinal profiles of electron density including the electron beam in the laser wake in an external magnetic field of different strength

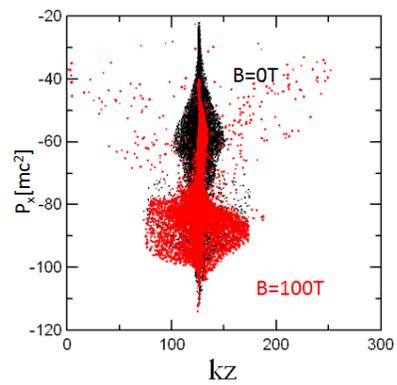


Fig.9 Transverse geometrical emittance of electron beams with and without external magnetic field $I=2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $w_0=20 \text{ mm}$, $t=10 \text{ fs}$, $N_e=10^{19} \text{ cm}^{-3}$