



Title	運動論的レーザープラズマ相互作用による非熱的高速電子発生
Author(s)	高木, 悠司
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 37-39
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106230
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

運動論的レーザープラズマ相互作用による非熱的高速電子発生

高木 悠司

大阪大学 レーザー科学研究所

1. はじめに

1.1 ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度プラズマの生成

出力がペタワット級の高強度ハイパワーレーザーを用いて物質を加熱・圧縮することで、温度が数千万度、圧力が数百億気圧に達する高温高密度状態を実現できる。現在このような高エネルギー密度プラズマを実験室内で作り出せるのは高強度レーザーだけであり、レーザー核融合・実験室宇宙物理実験等様々な応用研究に用いられている。

レーザーからプラズマへのエネルギー変換過程は、レーザーの集光強度によって大きく変化する。強度が 10^{18} W/cm^2 以上の相対論的領域ではレーザー電場によるプラズマ中電子の相対論的速度への直接加速が支配的であり、 10^{13} W/cm^2 以下の比較的低強度領域では逆制動輻射（衝突）による電子加熱が主となる。両者の間に位置する強度が $10^{14-16} \text{ W/cm}^2$ の近相対論的強度領域でのレーザープラズマ相互作用(Laser-plasma interaction: LPI)では、誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman scattering: SRS)・ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin scattering: SBS)・二電子波崩壊不安定 (Two plasmon decay instability: TPD) 等のパラメトリック不安定 (Parametric instability: PI) と総称される LPI がレーザーからプラズマへのエネルギー変換において重要な役割を果たす事が知られている[1]。

PI はレーザー波によるプラズマ波(と散乱波)励起現象であり、不安定によって大振幅の電子プラズマ波 (Langmuir wave: LW) が励起されると、周囲の電子を捕獲し自身の位相速度まで捕獲電子を加速させる。この電子捕獲及び加速機構はレーザー遮断密度以下の低密度プラズマ中において

レーザー周期の 10-100 倍程度で成長し、波のエネルギーを得た電子は数 100 eV～数 keV の熱的平衡にある周囲の流体的プラズマより一桁以上エネルギーの高い非熱的高速電子となる。発生した高速電子は遮断密度以上の高密度プラズマ中にレーザーのエネルギーを輸送し、レーザー駆動衝撃波等のプラズマ流体運動に影響を与える。レーザー核融合では爆縮用レーザーの強度がこの近相対論的領域に達し爆縮性能を左右する為、長年この強度領域での PI の成長及び高速電子発生過程の研究が行われてきた[2]。特に近年、衝撃点火方式と呼ばれる高速電子によるエネルギー輸送を衝撃波増強に積極的に利用するレーザー核融合方式が提唱され[3]、本方式を想定したレーザー・プラズマ条件下での PI の成長及び PI によって発生する高速電子フラックスの精確な見積もり等が重要となっている。

1.2 誘導ラマン散乱 (SRS) による非熱的高速電子発生

PI の中でも SRS は大振幅の LW を励起し、典型的には数 10 keV の高速電子を発生させる。また、SRS 再散乱等の多段階過程を経る事でより位相速度の速い LW の励起を可能とし、100 keV を超える相対論的エネルギーを持った高速電子の発生も報告されている[4-5]。

従来 SRS による高速電子発生の理論は、一様密度プラズマ中での SRS による単一モード(波数・周波数) LW 励起モデルとその励起 LW の簡素化マクスウェル速度分布プラズマ中での碎波モデルとの組み合わせによって理解されてきた[6]。また、密度が非一様なプラズマ中や長時間の非線形成長過程での LW 励起や高速電子発生過程については、ブラソフや Particle-in-cell (PIC)等

の運動論的シミュレーションを用いて調べられてきた。運動論的シミュレーションはレーザー波や励起プラズマ波と電子との波動粒子間相互作用を取り扱える。

著者はこれまで 1 次元 PIC シミュレーションを用いて、レーザー生成プラズマでよく見られる指数関数的密度分布を持つプラズマ中でのレーザー周期の 10^{3-4} 倍程度の長時間に渡る SRS の成長と電子加速過程について研究を行ってきた。前年度までの研究から、 10^3 倍を超える LPI 下では LW による電子捕獲では無く、SRS の成長飽和に伴い生じる揺動電場中での統計的な加速過程によって、数 100 keV の平均エネルギーを持つ相対論的高速電子発生が可能となる事が分かってきた[7-9]。そこで本年度は、2 次元 PIC シミュレーションを実施し、プラズマ分布の多次元性及びレーザーの偏光方向が SRS の成長とこの統計的加速過程にどの様に影響するかを調査した。

2. 2 次元 PIC シミュレーションを用いた SRS 成長・相対論的高速電子発生過程の調査

2.1 シミュレーション設定

PIC 法では格子状に分割したシミュレーション空間内にプラズマを模した荷電粒子を配置する。空間内での荷電粒子の運動に伴い発生する

電磁場及び外部電磁場(レーザー場)の時間発展を各空間格子上でマクスウェル方程式に従って求める。荷電粒子の運動は自分の位置する格子上の電磁場から運動方程式に従って計算される。衝突無しの 2 次元 PIC シミュレーションを行った。使用した PIC コードは PICLS コード[10]で、設定は前年度行った 1 次元計算[7]を y 方向に広げたものである。2 次元に拡張した事で、レーザー伝搬軸(x 軸)上外の波数ベクトルを持つプラズマ波励起が可能となり、また、レーザーの偏光面がパラメーターとして増える。ここでは、p 偏光（電場は y 方向、磁場は z 方向に振動）と s 偏光（電場は z 方向、磁場は y 方向に振動）の二通りに関して、 y 方向をレーザー波長 λ の 20 倍に広げた計算結果を示す。レーザーは平面波（レーザー強度の空間分布は y 方向に一样）で強度は 10^{16} W/cm² で時間的に一定に設定し、初期のプラズマの密度スケール長 L は λ の 50 倍に設定し、レーザー周期 τ_L の 12000 倍まで計算を行った。

2.2 シミュレーション結果

図 1 に p 偏光、図 2 に s 偏光での計算におけるプラズマ電子密度の時間変化を示す。偏光の違いによって密度揺動の成長に違いが見られ

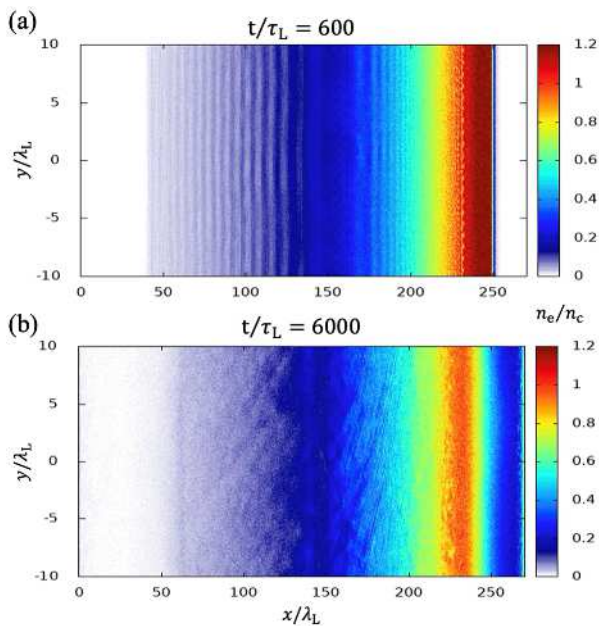


図 1 : p 偏光 2 次元計算での電子密度分布発展。

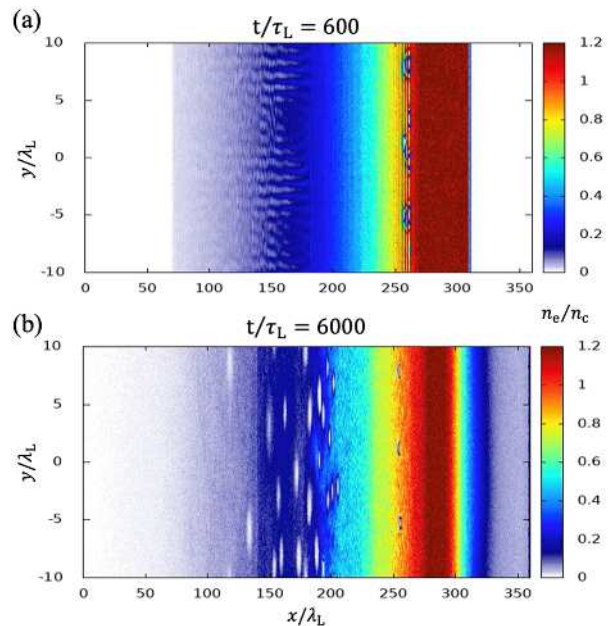


図 2 : s 偏光 2 次元計算での電子密度分布発展。

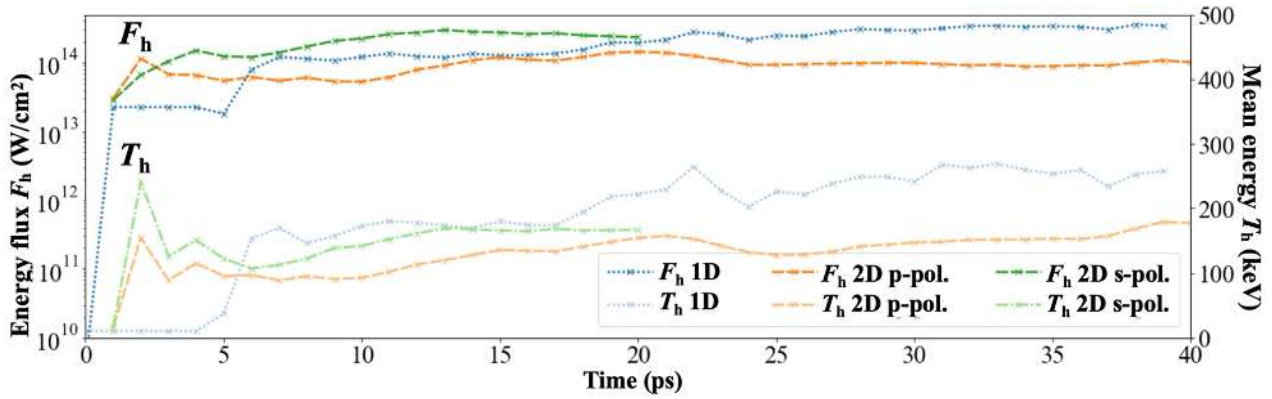


図3：非熱的高速電子フラックスの平均エネルギー T_h とエネルギーフラックス F_h の時間変化。

た。特に長時間の相互作用（図1及び2の(b)）では、 $n_e/n_c < 0.5$ の領域での密度空孔の形成に大きな違いが現れる。これは、主にレーザー電場の振動方向の違いに起因する。密度空孔内では孤立したレーザー電磁場の圧力が周囲のプラズマ圧力と拮抗することで、周囲のプラズマとの間に大きな密度差を形成する。p 偏光の場合には、レーザーがプラズマ密度分布（y）方向に電子を振動させる。ここで電子プラズマ波が共鳴的に励起されることでレーザー場は減衰し、大きな密度差を保持できず、比較的小さな密度揺動の成長に留まる。一方 s 偏光の場合にはレーザー電場は z 方向に振動する為、電子プラズマ波を励起できない。よって比較的大きな密度変化を持った空孔が形成される。

図3に両計算及び1次元計算で発生する高速電子の平均エネルギー T_h とエネルギーフラックス F_h の比較を示す。どの計算も T_h, F_h 共に似た様な時間発展・値を示すことが分かった。すなわち、プラズマ分布と偏光方向の関係により生じる密度空孔の違いは、 T_h, F_h には大きな影響を及ぼさない。これは1次元計算による過去の研究において、密度空孔が高速電子発生過程に大きく影響しないとする結論と一致する[9]。

3. おわりに

本研究では大規模2次元PIC計算を用いて、レーザーの偏光方向を変えた計算での、レーザープラズマ相互作用中での高速電子発生過程の

変化を調査した。結果、 $n_e/n_c < 0.5$ の領域でのプラズマ密度揺動の形成に大きな違いが現れた一方で、発生する高速電子の平均エネルギー T_h 及びエネルギーフラックス F_h には大きな違いは見られなかった。今後、パラメトリック不安定の成長過程の比較及びより詳細な高速電子発生・加速過程の調査を行う予定である。

参考文献

- (1) P. Michel, “Introduction to Laser-Plasma Interactions”, Chap. 8, (2023). Springer
- (2) J. D. Lindl et al., Phys. Plasmas **11**, 339-491 (2004).
- (3) D. Batani et al., Nucl. Fusion **54**, 054009 (2014).
- (4) C. Rousseaux et al., Phys. Fluids B **4**, 2589 (1992).
- (5) D. Kumar, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62**, 125024 (2020).
- (6) B. J. Winjum et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 165001 (2013).
- (7) 高木悠司、サイバーメディア HPC ジャーナル **No. 14** (2024).
- (8) 高木悠司、サイバーメディア HPC ジャーナル **No. 15** (2025).
- (9) Y. Takagi et al., Accepted to Phys. Rev. Research (<https://doi.org/10.1103/7zsq-4n4j>).
- (10) Y. Sentoku and A. J. Kemp, J. Comput. Phys. **227**, 6846-6861 (2008).