

速 報

レーザー・プラズマ加速で単色ビームの発生に成功・世界初

小山 和義*1・三浦 永祐*2・加藤 進*2
齋藤 直昭*2・益田 伸一*3・安達 正浩*4

Monoenergetic Electron Beam Generated from Laser Plasma Accelerator, World First

Kazuyoshi KOYAMA*1, Eisuke MIURA*2, Susumu KATO*2,
Naoaki SAITO*2, Shinichi MASUDA*3 and Masahiro ADACHI*4

Abstract

Through an intimate collaboration, the AIST and the NIRS has succeeded in generating quasi-monoenergetic electron beam of 7 MeV energy from a 0.5 mm-long plasma by irradiating a laser pulse of 2 TW for 50 fs to a plasma of electron density as high as 10^{20} cm^{-3} , which is an order of magnitude higher than that for the previous experiments. An evidence to demonstrate electron being accelerated by plasma wave has been obtained by diagnosing the laser plasma interaction. While the generation of monoenergetic electron beam with a laser plasma accelerator has been regarded unavailable up to now, the success in this study will provide a great step toward the practical use of the laser plasma accelerator.

概 要

レーザー・プラズマ加速器は、加速勾配が 10 GeV/m-100 GeV/m と現在のマイクロ波を用いた加速器の 100-1000 倍の大きさであり、出力ビームは低エミッタンスである。高性能加速器を劇的に小型化できる可能性があるため、新世代の加速器の実現を目指して、国内外の多くの研究機関でレーザー・プラズマ加速の研究が行われている。その結果、数メートル四方に収まるテラワット・レーザーを用いて生成したプラズマ中での加速勾配は 100 GeV/m に達し¹⁾、最高エネルギーは 200 MeV まで得られるようになった²⁾。しかし、出力ビームのエネルギースペクトルは、ボルツマン分布やべき乗分布であり、エネルギー広がり が 100% に近いことが最大の問題であった。

産総研と放医研のグループは、他の研究グループより一桁以上小さなレーザーパワーではあるが、プラズマの条件を広範囲に変えて単色ビーム加速の可能性を

探った。その結果、世界で初めて、約 100 回のレーザーショットを平均しても、ピークとバックグラウンドの比が 10 という、高い再現性で単色電子ビームを加速できた。このことは、レーザー・プラズマ加速が、質的に異なる段階に至った、すなわち「加熱器」から「加速器」の仲間に加わったことを意味する。

2003 年 10 月の米国物理学会主催 The 45th Annual meeting of the Division of Plasma Physics での単色ビーム加速に関する我々の発表は、ポストデッドラインであったが大きな関心呼んだ³⁾。その後、今年 6 月に米国で開催された The 11th Advanced Accelerator Concept Workshop 2004 (AAC04) では、我々のグループの他に、ラザフォード・アップルトン研究所(英)、応用光学研究所(仏)、ローレンスバークレイ国立研究所(米)の三機関から、それぞれ独立に単色電子ビーム加速に関する報告があった⁴⁾。全体の進歩に貢献できたとすれば、嬉しい限りである。以下で、レーザー・プラズマ加速器の簡単な説明と単色ビーム

*1 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
(E-mail: k.koyama@aist.go.jp)

*2 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

*3 放射線医学総合研究所 National Institute of Radiological Sciences

*4 広島大学大学院 Hiroshima University

加速の実験結果等の要点を紹介する。

レーザー・プラズマ加速

レーザー・プラズマ加速器では、レーザーとプラズマの相互作用を通して荷電粒子を加速する。提案されている粒子加速の機構は、大きく二つに分類されることが多い。一つは、レーザー電界が加速の源となっている「直接加速」であり、他の一つは、電子プラズマ波が作る静電界が加速の源の「航跡場加速」や「ビート波加速」である。航跡場加速とビート波加速は、レーザーによる電子プラズマ波励起の方法が違っただけであり、レーザーパルスの群速度に等しい位相速度で伝播するプラズマ波を粒子加速に応用する点では同じと考えてもよい。

レーザーで励起されたプラズマ波による加速の原理は、T. Tajima 等によって 1979 年に発表されたものが有名である⁵⁾。当時はレーザーパワーが弱かったので、レーザー・プラズマ加速の原理実証はできなかった。その後、レーザー技術の発展に伴って、超短パルス・高強度レーザーが発明されると、数 m 四方の大きさをテラワットのレーザー出力が得られるようになり、レーザー・プラズマ加速の実験が始まった。その結果、出力電子ビームの最高エネルギーは最近の 10 年間で 2 桁以上の伸びという目覚ましい成果を上げた。しかし、エネルギー幅がほぼ 100% であった。

レーザー・プラズマ加速で単色エネルギーの電子ビームを得るためには、プラズマ波の波長に比べて短い電子バンチを、プラズマ波の適当な位相に入射するべきであり、背景プラズマの電子を捕捉し加速する（自己捕捉）方法では、エネルギースペクトルが指数関数分布になるのは当たり前であるというのが理論家の見解であった。一部の理論家は単色ビーム加速の新しいスキームの提案をしているが、100 TW 級のレーザーパワーと 10^{19} W/cm² のレーザー集光強度が必要であるといっている⁶⁾。

単色電子ビーム加速実験

レーザー・プラズマ加速の実験は、図 1 に示すように、真空中に吹き出した超音速ガスジェットにレーザーパルスを集光し、プラズマを生成して行なった。これは、この種の実験の一般的な配置に近い。電子プラズマ波の波長とレーザーのパルス幅、電子密度とレーザー集光強度の間で適当な条件を満たすと、長さがミリメートル程度で直径が数十マイクロンのプラズマの中に、光速で伝播する大振幅の電子プラズマ波が励起され電子加速が起こる。プラズマ波と電子加速の関

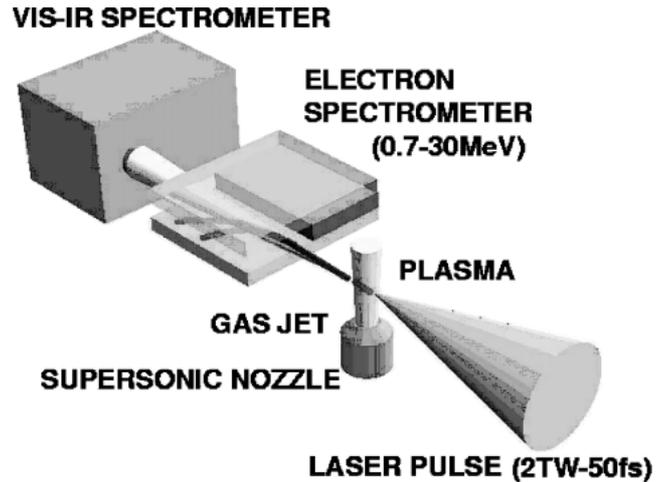


図 1 レーザー・プラズマ加速器実験配置の模式図

係を明確にするために、電子計測と同時にレーザーパルスのプラズマによる前方散乱光のスペクトル測定を行なった。2 TW という比較的小さなレーザー出力で相対論的非線形効果を得るためには、焦点の直径を $5 \mu\text{m}$ 程度に小さくする必要がある。するとレーリー長（焦点付近の高強度領域の長さ）は $70 \mu\text{m}$ にしかならない。レーリー長より十分長い距離にわたって高強度を保つためにはプラズマ中での相対論的自己集束の条件を満たす必要があり、そのためには電子密度を高くしなければならない。産総研と放医研のグループは電子密度を 10^{20} cm^{-3} 以上にし、これまで行われていた実験条件よりも高い領域で、単色電子ビーム加速実験を行なった。

今回得られた電子ビームのエネルギースペクトルは図 2(a) に示すように、明りょうな準単色ビームになっている。このデータは、約 100 回の平均を取ったものであり、半年前の実験に比べて再現性に優れている。AAC04 で発表があった他グループのデータは、シングルショットのデータである。再現性に差はあるものの、複数の機関で独立に実施した実験で、自己捕捉方式レーザー・プラズマ加速でも単色ビーム加速が可能であることが実証されたことの意味は大きい。また、それぞれの機関が所有しているレーザーパワーに一桁以上の開きがあるので、偶然にも広い範囲での実験的スケーリング則を得ることが出来た。このことについては、別の機会に紹介したい。電子ビームのエネルギー測定と同時に実施した前方散乱スペクトルの例を図 2(b) に示す。この図で 1040 nm 付近にあるサテライトピークは、レーザーパルスが電子プラズマ波によって変調を受けたために現れたものである。電子加速が起こっている条件では必ずサテライトピークが現れ

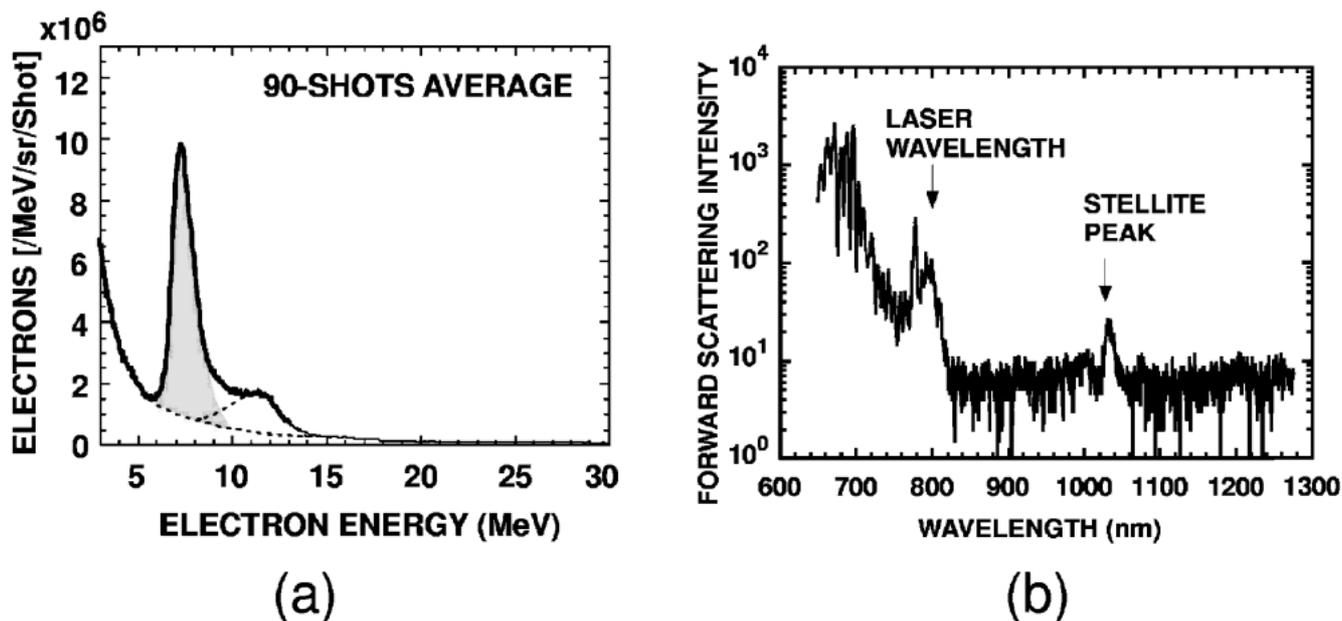


図2 レーザー・プラズマ加速器で得られた準単色電子ビームのエネルギースペクトル(a)と、同時に計測したレーザーパルスの前方散乱スペクトル(b)．レーザー波長付近の強い光とサテライトピークを同時に観測するために、帯域フィルターを用いた．

ることから、電子はレーザーで励起された電子プラズマ波によって加速されていることが分かる．電子加速実験では同時に、横方向へのレーザー散乱光像のモニターおよび光学シャドウグラフによるプラズマ密度分布計測も行った．横方向散乱は電子プラズマ波の励起と密接な関係があるので、散乱光強度分布から電子プラズマ波が励起されている長さを推定する事ができる．今回の実験ではプラズマ波が励起されている長さ、すなわち加速距離は約 $500 \mu\text{m}$ であった．我々の結果のみが、高い再現性を示したのは、加速電子の計測と同時に、レーザーとプラズマの相互作用計測を同時に行いながら照射条件を探っていた事が幸いしたのかもしれない．

今回の実験条件はレーザーの遮断密度の10% 近い高電子密度であるために、電子加速の脱位相距離が短く全加速距離の数分の一しかないことと、焦点の直径が小さいので、電子プラズマ波は一次元的ではなく半径方向にも大きな電界を持つことの二つが特徴となっている．このような条件では、半径方向にも大きな周期的電界を持つ電子プラズマ波によって、電子は脱位相距離の数倍の長さにわたって加速と減速、集束と発散を繰り返す．その内に、前方に向かっては特定のエネルギー帯の電子だけが生き残る可能性がある．しかし、まだ単色ビームの発生が確認されたばかりであり、発生機構に関しては推測の域を出ない．実験、理

論とも今後の課題である．

今後の予定と見通しなど

産総研では加速エネルギーの制御と電荷量の増加のために、レーザーパワーの増強とビームの質の向上を図っている．既に照射容器の更新も済み、最終調整の段階である．改造後の実験では、再現性を向上させ、加速機構を解明する．安定に単色ビームを得た後は、出力ビームともう一つのレーザーパルスによる逆コンプトン散乱を応用したテーブルトップ高輝度超短パルスX線源の開発を行う．これらは平成17年度からの5年間で実行する事が決まっている．

レーザー・プラズマ加速の安定化と普及のためには、民間企業の力が不可欠である．この分野の研究開発に民間企業を呼び込むための準備として、平成16年8月に「レーザープラズマ加速産業化フォーラム」を開催した⁷⁾．今後は、フォーラムを通じた民間との交流も期待したい．

レーザー・プラズマ加速器は、高周波加速器に比べてケタ違いに小さくできる．したがって、特殊な基礎工事や建屋が不要であり、スイッチ一つで高エネルギービームが on-site で使えるようになる．レーザーは4 TW の出力のものが、既にモバイル化されているなど急速に進歩している．小型でコンポーネントが少ない機器は、開発サイクルが格段に短くなり、進歩

が速い事は、電子機器の発展の歴史を見れば明らかである。過去 20 年間の揺らん期を経たレーザー・プラズマ加速器は、今後加速度的に進歩すると予想される。

謝辞

今回の研究成果は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費「超高強度レーザーによる高エネルギー粒子・放射源に関する研究（平成 12～16 年度）」及び、放医研（他の参加機関、東大、京大、阪大、広島大、高エネルギー研究機構、原研関西研）との共同研究で、医療応用のための「先進小型加速器開発事業」により実施され得られたものである。

参考文献

- 1) K. Nakajima, et al., Phys. Rev. Lett. **74**, pp. 4428–4431 (1995).
- 2) V. Malka, et al., Science **298**, p. 1596 (2002).
- 3) K. Koyama, et al., Bulletin of the APS (45th DPP), **48**, p. 350 (2003).
- 4) <http://www.bnl.gov/atf/AAC04.htm>
- 5) T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, pp. 267–270 (1979).
- 6) A. Pukhov and J. Meyer-ter-Vehn, Appl. Phys. B, **74**, p. 355 (20).
- 7) http://unit.aist.go.jp/energyelec/powerlas/LPA_forum/