

衝突入射型レーザー電子加速

小瀧 秀行・大東 出・神門 正城・林 由紀雄・大道 博行・Sergei V. Bulanov

Laser Electron Acceleration by Using Colliding Pulse Optical Injection

Hideyuki KOTAKI, Izuru DAITO, Masaki KANDO, Yukio HAYASHI, Hiroyuki DAIDO and Sergei V. BULANOV

A high stability electron bunch is generated by a laser wakefield acceleration with the help of a counter-crossing laser pulse. In our experiments, the wakefield is generated by a sub-relativistic laser pulse; the second laser pulse collides with the first pulse at 45 degree realizing optical injection of electron bunch into the wakefield. Since the second pulse is counter-crossing, it can not damage the laser system. The observed high quality electron bunch has high stability and high reproducibility compared with a single pulse electron generation.

Key words: laser acceleration, optical injection, laser-plasma interaction, intense laser pulse, high stability electron beam

高強度レーザーとプラズマとの相互作用により生成したプラズマ振動中の電場（ウェーク場）によって荷電粒子を加速する「レーザー加速」¹⁾は、現在の汎用加速器である高周波加速器に比べて、超短パルスで低エミッタンス（指向性が高い）の電子ビームを短い加速距離でつくることが可能となるため、高時間分解能の測定用光源や次世代の加速器のための電子ビーム入射器として期待され、各国で研究が進められている。レーザー加速研究により、ガスジェットを用いた準単色エネルギー電子ビーム生成²⁻⁶⁾、3 cmの加速でのキャピラリーを用いた1 GeV 電子ビーム生成^{7,8)}等の成果が得られている。しかしながら、レーザー加速生成電子ビームの安定性に問題があるため、未だ実用化にはいたっていない。安定化できない理由は、1レーザーパルスで、電子入射と電子加速を行っているためである。安定に電子を加速するにはプラズマ波が壊れない領域での電子加速が必要であるが、電子の入射には波の破砕が必要となる。そのため、1レーザーパルスで生成したレーザー加速電子ビームを安定化させるのは、非常に難しい。それならば、電子入射と加速を分離してやれば、生成電子ビームの安定化および電子ビームのコントロールが可能となる。そのひとつに、複数のレーザーパルスを用いる方法「光電子入射（オプティカルインジェクション）」がある⁹⁻¹³⁾。3レーザーパルスを用いる場合、インジェクショ

ンパルス1と2をプラズマ中で衝突させ、そのときにできるビート波によりプラズマ中の電子をドライバーパルスで生成したウェーク場へ入射する⁹⁻¹¹⁾。プラズマ中の電子は、ほぼ光速で動くウェーク場に乗っていくことができないため、他の2レーザーパルス衝突により生成されるビート波によりウェーク場へ入射してやる必要がある。3パルスを用いる場合、電子入射位置をコントロールできるという利点があるが、セットアップが複雑になるため実験では成功していない。2レーザーパルスを用いる場合、ドライバーパルスで安定なウェーク場を作り、インジェクションパルスとドライバーパルスとの衝突により電子の入射を行う^{12,13)}。この場合、ドライバーパルスがウェーク場生成と電子入射の両方を担うことになる。しかし、電子入射と加速の分離はできているため、電子ビームの安定化、エネルギーコントロールは可能である。2パルスでの光電子入射は、フランスおよび日本において実験でも証明されている^{14,15)}。フランスの実験の場合、完全対向入射での電子ビーム発生を行っており、2パルスのタイミング調整により、生成電子ビームのエネルギーコントロールが可能である。しかしながら、完全対向入射の場合、レーザーのレーザーシステムへの戻り光の問題がある。そこでわれわれは、45°衝突入射での電子発生実験を行った。

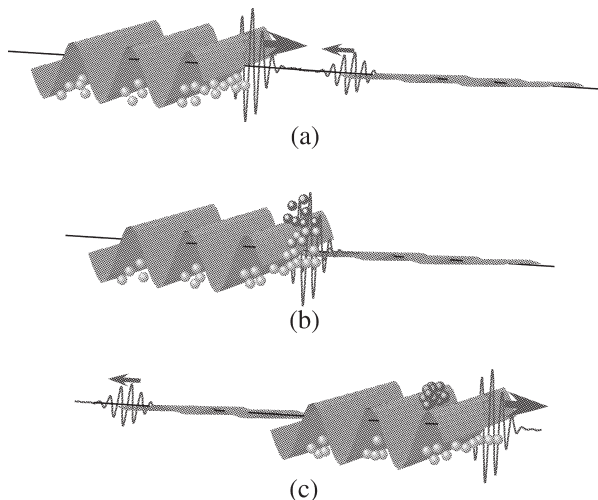


図1 衝突入射型レーザー加速概念図。(a) 衝突前、(b) 衝突の瞬間、(c) 衝突後。

1. 衝突入射型レーザー加速

図1に、2レーザーパルス衝突入射型レーザー加速の概念図を示す。ドライバーパルスおよびインジェクションパルスは、それぞれ安定で自己入射の起こらないウェーク場を励起する(図1(a))。次に、2つのレーザーパルスが衝突することにより定在波が生成され、その定在波によりプラズマ中の電子をウェーク場へ入射する(図1(b))。入射された電子は、ウェーク場により高エネルギーに加速される(図1(c))。このウェーク場は、ドライバーパルスの強度およびプラズマ密度を自己入射が起こらない領域まで下げ、安定に生成したものである。このようにして、安定でコントロール可能な電子ビームを、レーザー加速により、生成できるようになる。

図2に、衝突角 45° での衝突入射型レーザー加速実験セットアップの概要を示す。ターゲットとして、 $1.3 \times 4 \text{ mm}^2$ のヘリウムガスジェットを用いた。ガスの密度分布は、マッハ・ツェンダー干渉計で計測した。ガス密度の一定になる距離は、 $600 \mu\text{m}$ である。70 fs、0.2 Jのドライバーパルスは、焦点距離646 mmの軸外し放物面鏡(OAP)で、ガスジェットに集光した。このときの e^- スポット半径は、 $12.5 \mu\text{m}$ であり、スポット中のエネルギー含有率は55%であった。これらより計算した、集光強度は $I_0 = 6.8 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 、規格化強度 $a_0 = 8.5 \times 10^{-10} \lambda_0 [\mu\text{m}] I_0^{-1/2} [\text{W/cm}^2]$ は0.6である。70 fs、10 mJのインジェクションパルスは、ドライバーパルスとの衝突角を 45° とし、焦点距離200 mmの凸レンズでガスジェット中に集光した。このときの e^- スポット半径は、 $15 \mu\text{m}$ であり、スポット中のエネルギー含有率は50%であった。これらより計算した集光強度は $I_0 = 2.9 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 、規格化強度 a_1 は0.1である。電子

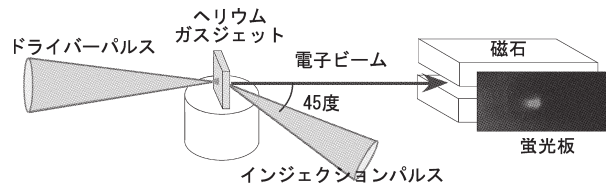


図2 角度 45° での衝突入射型レーザー加速実験セットアップ。

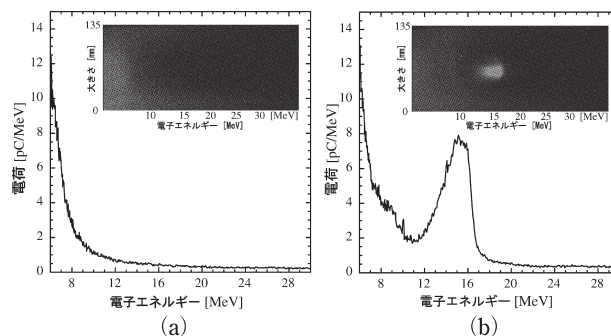


図3 衝突入射型レーザー加速での実験結果。(a) インジェクションパルスなし、(b) インジェクションパルスあり。

ビーム測定は、永久磁石・蛍光版・CCDカメラで構成された電子スペクトロメーターを用いて、電子ビームのエネルギー、エネルギー分散、角度広がり、電荷量を測定した。

2. 衝突入射型レーザー加速による電子ビーム

まず、安定なウェーク場を励起するため、自己入射方式(1パルス)でのレーザー加速実験を行い、自己入射が起こらないプラズマ密度を調べた。実験結果より、このレーザーパルスの場合、プラズマ密度が、 $4.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下では自己入射がほとんど起こらないことが確認できた。そこで、プラズマ密度 $3.95 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で衝突入射型のレーザー加速実験を行った。図3に、インジェクションパルスなしの場合とありの場合の電子ビームを示す。図のように、インジェクションパルスなしの場合は、全く電子はなく、インジェクションパルスがある場合、単色エネルギーの電子ビームが生成される。生成電子ビームのピークエネルギーは15 MeV、エネルギー分散は7.8% (1.2 MeV)、電荷量は30 pC、エミッタンスは $0.7 \pi \text{ mm mrad}$ である。このエネルギーではエネルギー分散は現在使用されている高周波加速器より大きいものの、さらに加速すればエネルギー分散は小さくなる。計算およびシミュレーションより予想されているパルス幅は10数fs以下であり、瞬間の電流量は、高周波加速器よりも高い値を示している。また、エミッタンスも、同等かよりよい値を示している。

次に、生成電子ビームの安定度を調べた。図4に自己入射型と衝突入射型それぞれの電子ビーム安定度を示す。エネルギー・エネルギー分散・電荷量とも衝突入射型のほうが安定である。さらに、単色エネルギー電子ビーム生成率

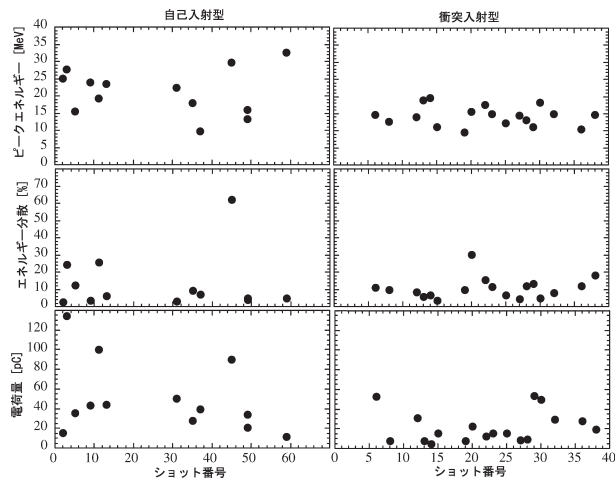


図4 自己入射型レーザー加速と衝突入射型レーザー加速の安定度の比較。ピークエネルギー、エネルギー分散、電荷量、すべてにおいて、衝突入射型レーザー加速のほうが安定であり、さらに電子ビーム発生率も衝突入射型のほうが高い。

も、自己入射型では16%であるのに対し、衝突入射型では50%と、衝突入射型のほうが高い。この50%の生成率も、レーザーのポインティングジッターによるものであり、インジェクションパルスのスポットサイズを大きくし、必ず衝突するようにすれば、生成率は100%となる。事実、フランスのグループの実験¹⁴⁾では、インジェクションパルスのスポットサイズを大きくすることにより、電子ビーム生成率100%を達成している。

レーザー加速は、小型・超短パルス・高品質の電子ビーム源として期待されているが、安定化およびコントロールが難しく、未だ、その利用研究にいたっていない。本報告では、その安定化とコントロールするための方法として筆者らが提案した、「2パルスでの衝突入射型レーザー加速」の最近の成果を紹介した。本手法により、単色エネルギー電子ビームの安定生成に、角度45°での衝突入射型のレーザー加速で成功した。この方法の場合、自己入射型のレーザー加速に比べて、電子ビームの安定性・生成率とも高い。また、同じ衝突入射型でも、完全対向入射ではなく、角度をもたせることにより、レーザーシステムの戻り光によるダメージをなくした。この結果により、レーザー加速生成超短パルス・高品質電子ビームを用いた応用研究が、現実のものとなることを期待したい。

本研究への助言をいただいた、日本原子力研究開発機構の Timur Zh. Esirkepov 氏、甲賀ジェームス氏、高エネルギー加速器研究開発機構の中島一久氏に感謝いたします。本実験への助力をいただいた、日本原子力研究開発機構の福田祐仁氏、本間隆之氏、Alexander Pirozhkov 氏、馬景龍氏、陳黎明氏に感謝いたします。

文 献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: "Laser electron accelerator," *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979) 267-270.
- 2) E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, T. Nakamura and M. Tanimoto: "Demonstration of quasi-monoenergetic electron-beam generation in laser-driven plasma acceleration," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 251501.
- 3) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin *et al.*: "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions," *Nature*, **431** (2004) 535-538.
- 4) C. G. R. Geddes, Cs. Tóth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary and W. P. Leemans: "High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding," *Nature*, **431** (2004) 538-541.
- 5) J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy and V. Malka: "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams," *Nature*, **431** (2004) 541-544.
- 6) A. Yamazaki, H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, S. Kondo, S. Kanazawa, T. Homma, K. Nakajima, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii and K. Nemoto: "Quasi-monoenergetic electron beam generation during laser pulse interaction with very low density plasmas," *Phys. Plasmas*, **12** (2005) 093101.
- 7) W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Tóth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder and S. M. Hooker: "GeV electron beams from a centimeter-scale accelerator," *Nature Phys.*, **2** (2006) 696-699.
- 8) K. Nakamura, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Tóth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder and S. M. Hooker: "GeV electron beams from a centimeter-scale channel guided laser wakefield accelerator," *Phys. Plasmas*, **14** (2007) 056708.
- 9) E. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting and P. Sprangle: "Electron injection into plasma wakefields by colliding laser pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **79** (1997) 2682-2685.
- 10) C. B. Schroeder, P. B. Lee and J. S. Wurtele: "Generation of ultrashort electron bunches by colliding laser pulses," *Phys. Rev. E*, **59** (1999) 6037-6047.
- 11) E. Esarey, C. B. Schroeder, W. P. Leemans and B. Hafizi: "Laser-induced electron trapping in plasma-based accelerators," *Phys. Plasmas*, **6** (1999) 2262-2268.
- 12) H. Kotaki, S. Masuda, M. Kando, J. K. Koga and K. Nakajima: "Head-on injection of a high quality electron beam by the interaction of two laser pulses," *Phys. Plasmas*, **11** (2004) 3296-3302.
- 13) G. Fubiani, E. Esarey, C. B. Schroeder and W. P. Leemans: "Beat wave injection of electrons into plasma waves using two interfering laser pulses," *Phys. Rev. E*, **70** (2004) 016402.
- 14) J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. Lifschitz, Y. Glinec and V. Malka: "Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses," *Nature*, **444** (2006) 737-739.
- 15) H. Kotaki, I. Daito, M. Kando, Y. Hayashi, J. Ma, L.-M. Chen, T. Zh. Esirkepov, Y. Fukuda, T. Homma, A. Pirozhkov, J. K. Koga, K. Nakajima, H. Daido and S. V. Bulanov: "Improvement of the quality and stability of electron bunch using counter crossing laser beam," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **36** (2008) 1760-1764.

(2008年6月11日受理)