

# レーザー電子加速の現状

三浦 永祐・益田 伸一

## Recent Progress of Research on Laser Electron Acceleration

Eisuke MIURA and Shin-ichi MASUDA

In laser acceleration which is charged particle acceleration via the interaction of an intense laser pulse with a plasma, the accelerating electric field is a thousand times higher than that of radio-frequency accelerators. Such high accelerating electric field enables us to realize a compact accelerator and the generation of ultrahigh energy particles which seem to be inaccessible by using present technologies. To realize such an advanced accelerator, the laser acceleration has been intensively studied over the last decade. Recently, the generation of high-quality electron beams with a quasi-monoenergetic peak has been demonstrated. This is a breakthrough toward the realization of laser electron accelerators. Recent progress of the research on laser electron acceleration is reviewed.

**Key words:** laser acceleration, intense laser pulse, plasma, plasma wave, quasi-monoenergetic electron beam

現在、普及している高エネルギー粒子加速器はマイクロ波を用いた高周波加速器であり、金属加速管の絶縁破壊によって、その加速電場には上限が存在する。最初から電離したプラズマを加速媒体として利用できれば、絶縁破壊による制限がなくなり、非常に高い加速電場を保持することができる。プラズマを用いて粒子加速ができれば、加速電場が高いことを生かして、同じエネルギーの粒子を得るための加速距離を短くして卓上の小型加速器の実現や、従来技術では到達困難と考えられてきた未踏領域の超高エネルギー粒子加速が可能になる。

高周波加速器の限界を打ち破る新しい粒子加速として、レーザーとプラズマの相互作用を利用したレーザー加速（あるいは、レーザープラズマ加速）が1979年に提案された<sup>1)</sup>。当時は、この提案を実現するような強力なレーザーが存在せず、現実的な粒子加速法とは考えられていなかった。しかし、チャープパルス増幅<sup>2)</sup>に代表される超短パルス高強度レーザー技術の急速な進展によって実験室規模の強力なレーザーが手に入るようになり、1990年代に入っ

てから急速に研究が進展した。最近では、エネルギーのそろった準単色の高品質電子ビームの発生が報告され<sup>3-20)</sup>、レーザー電子加速器実現も現実味を帯びてきた。本稿では、レーザー電子加速研究の最近の進展について紹介する。

### 1. レーザー電子加速とは

#### 1.1 レーザー電子加速の原理

高周波加速器が金属導波管内に進行波を励起して電子を加速するのと同様に、レーザー加速では光速に近い速度で移動する進行波（プラズマ波）のポテンシャルを利用して電子を加速する。図1にレーザー電子加速の原理を示す。ピークパワーがテラワットを超える超短パルス高強度レーザー光を集光して希薄なガス状のターゲットに照射すると、レーザーパルスの立ち上がりでガスは瞬時に電離しプラズマが生成される。プラズマ中をレーザーパルスはポンデロモータイプ力（レーザー強度の空間勾配に起因する力で、輻射圧とみなせる）により電子を排斥しながら伝搬す

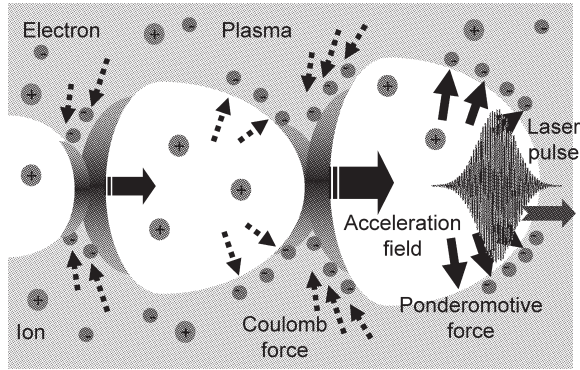


図1 レーザー電子加速の原理の概念図。

る。レーザーのパルス幅が十分に短いと、質量の大きなイオンは静止しているとみなせる。レーザーパルスの通過後いったん排斥された電子は、クーロン力によって引き戻される。引き戻された電子はレーザーの伝搬軸近傍で密になり、反発して周辺領域に再度押し出される。この繰り返しにより、プラズマ振動が生じる。プラズマ振動がレーザーパルスの伝搬に伴って励起されることにより、レーザーパルスと同じ速度で進行する電子の疎密波（プラズマ波）が励起される。プラズマ波の位相速度  $v_p$  はレーザーパルスの群速度に等しく、 $v_p = c \sqrt{1 - \frac{n_e}{n_c}}$  である。  $c$  は光速、  $n_e$  はプラズマの電子密度、  $n_c$  はレーザー光の遮断密度である。レーザーパルスの伝搬方向に沿って電子の疎、密…、の周期が形成され、伝搬方向と平行な電場が生じ、この電場で粒子は加速される。

プラズマ波の作り出す電場  $E$  は線形領域では、式(1)で与えられる。

$$E = \frac{m_e \omega_{pe} c}{e} \delta n \quad (1)$$

$m_e$  は電子の質量、  $\omega_{pe}$  はプラズマ周波数、  $e$  は素電荷、  $\delta n$  は電子密度の変調率である。プラズマ周波数は式(2)で与えられる。

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \quad (2)$$

例えば、電子密度を  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、密度変調率を 30% とすると、電場は  $100 \text{ GV/m}$  となる。現在の高周波加速器の 1000 倍以上にも達する非常に高い加速電場が得られることがわかる。

電子がプラズマ波に乗る（捕捉される）と、サーフィンするように加速される。プラズマ波は光速に近い速度で伝搬するので、この波に電子が捕捉されるには同じく光速に近い速度をもっている必要がある。研究の初期の段階では、加速される電子群（バンチ）を電子銃を用いて外部か

ら供給して電子加速が行われてきた<sup>21,22)</sup>。その後、外部から電子を供給せずとも、プラズマ中の電子を捕捉して（自己入射、自己捕捉とよばれる）加速できることも示された<sup>23)</sup>。近年報告されている電子加速のほとんどは、この自己入射の手法によっている。

レーザー加速の特徴として、極短電子パルス発生が可能なることも挙げられる。レーザー加速で用いられるプラズマの電子密度は  $10^{18} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  程度であり、プラズマ波の波長は  $3 \sim 30 \mu\text{m}$  程度になる。この波の一部に電子を捕捉して加速するので、加速方向の電子バンチの空間広がりにはマイクロメートル程度になる。つまり、フェムト秒領域のパルス幅をもつ極短電子パルス発生が可能である。また、電子バンチの横方向の広がりには、レーザーの集光径程度になる。電子バンチのサイズを小さくして、エミッタンスの小さな高品質ビームを得ることも可能である。また、レーザー装置は放射線を発生しないので、プラズマの部分だけを遮蔽すればよく、放射線防御が必要な領域を極端に小さくできる。このように、レーザー加速はさまざまな利点、特徴を兼ね備えた電子加速器を実現する可能性をもっている。

## 1.2 準単色電子ビームの発生機構

最近、数多くの報告がある準単色電子ビームの発生<sup>3-20)</sup>を説明するために、数多くの理論、シミュレーションが報告されている<sup>24-27)</sup>。ここでは、われわれが行った二次元粒子シミュレーション結果に基づいて説明する。図2に示すシミュレーションの条件は、2章で紹介するわれわれの実験で準単色ビームが得られた条件と同様に設定している。図2の上段は、レーザーパルスがプラズマ中を (a)  $660 \mu\text{m}$ 、(b)  $880 \mu\text{m}$ 、(c)  $1280 \mu\text{m}$  伝搬した場所における電子分布のスナップショットを示す。電子をドットで示している。ドットの濃淡はローレンツ因子  $\gamma$  によって規格化したエネルギーを示している。ドットが密な部分は電子密度が高く、疎な部分は電子密度が低い。レーザーパルスは  $x$  軸方向に左から右に伝搬し、レーザー電場は  $xy$  平面内にあり  $y$  軸方向に偏光している。レーザーパルスの先頭はおおのこの図の右端付近にある。空間スケールはレーザー光の波数で規格化しており、 $38 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  の領域を表示している。図2の下段は、伝搬軸近傍の電子密度分布（実線）、 $x$  軸方向の電場強度分布（破線）を示す。電子密度を初期密度（この場合は、 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）、電場強度をレーザーの規格化ベクトルポテンシャル 1 が与える電場強度（この場合は、 $4.1 \times 10^{10} \text{ V/cm}$ ）で規格化して表示している。

レーザーパルスは相対論的自己集束<sup>28)</sup>（レーザー電場に

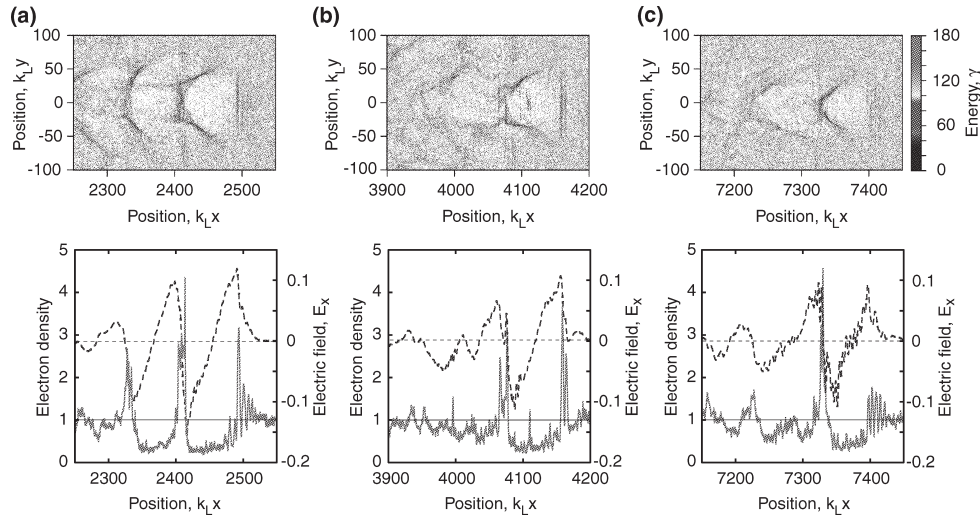


図2 準単色電子ビーム発生時の二次元粒子シミュレーション。プラズマ中をレーザーパルスが (a) 660  $\mu\text{m}$ , (b) 880  $\mu\text{m}$ , (c) 1280  $\mu\text{m}$  伝搬したときの電子分布のスナップショット (上段) とレーザー伝搬方向 ( $x$  軸方向) の電子密度 (実線) と電場強度分布 (破線) (下段)。

よる相対論的運動をもたらす電子の質量増大が断面方向のプラズマの密度分布を実効的に中空にし、レーザーが自己集束する現象)を起こしながら、その強度を保ちつつ伝搬しプラズマ波を励起する。ある程度の距離を伝搬するとプラズマ波の振幅が大きくなり、図2 (a) にみられるように、レーザーパルスの直後に電子密度のきわめて低い領域 (バブルとよばれる) が形成される。レーザーによって排斥された電子が、バブルの根元 ( $k_x=2400$  付近) に集中して波の突っ立ちが起こっている。このような波の突っ立ちが起こると、海面で大波が立ち波頭が砕けて水しぶきが飛ぶがごとく波の破碎 (wavebreaking) が起こり<sup>29)</sup>、電子がプラズマ波に入射される (自己入射が起こる)。このとき、電子が集中して急峻な突っ立ちが起こっているため、大量の電子が入射される。入射された大量の電子がこの波の突っ立ちを打ち消してしまい、電子の入射は瞬時に終了する。電子入射に要する時間が非常に短いため、入射された電子は空間的に局在して波に捕捉される。そのため、電子は等しい電場を受けて加速されるので、図2 (b) の  $k_x=4100$  付近にみられるようにエネルギーのそろった電子バンチが形成されている。しかし、図2 (c) に示したように、さらに伝搬距離が長くなると捕捉された電子はエネルギーを失っている。プラズマ波の位相速度よりも加速された電子の速度のほうがわずかではあるが速く、電子はプラズマ波を追い越してしまい、逆方向の電場 (図2 でいえば、プラスの電場) を受けて減速されるからである。これは位相ずれ (dephasing) とよばれる。エネルギーのそろった電子ビームの発生には、位相ずれを起こす前にプラズマから電子を取り出す必要があり、加速距離の最適化が

重要になる。

エネルギーのそろった電子を得るには同じ電場で加速することが本質であり、加速に寄与するプラズマ波の周期が少ないことが望ましい。図2 にみられるように、電場強度は周期によって異なるからである。文献24のシミュレーションで示されているような単一のバブルの形成が理想的である。このようなバブルの形成には、レーザーのパルス幅、レーザーの集光径、プラズマ波の波長の3つの整合が必要条件のひとつである<sup>26)</sup>。

## 2. 準単色電子ビームの発生

レーザーパワーの増大により、1990年代の後半から100 GV/mを超える加速電場の発生<sup>30)</sup>や数百 MeVに達する電子加速<sup>31)</sup>が実証されてきた。しかし、得られる電子ビームのエネルギースペクトルは、低エネルギーから高エネルギーのものを含んだマクスウェル状分布であり、エネルギー広がり100%であった。高周波加速器がエネルギーのそろった単色ビームを発生するように、レーザー加速器実現に向けては、エネルギーの単色化が大きな課題であった。しかし、2003年から2004年にかけて産業技術総合研究所<sup>3)</sup>をはじめとして、英<sup>4)</sup>米<sup>5)</sup>仏<sup>6)</sup>の4機関から相次いで特定のエネルギーにピークをもつ準単色電子ビーム発生が報告された。これがきっかけとなり、その後、数多くの機関から準単色電子ビームの発生が報告されるようになった<sup>7-20)</sup>。

図3はわれわれが行った準単色電子ビーム発生の実験配置図である。波長800 nm、エネルギー400 mJ、パルス幅50 fsのチタンサファイアレーザーパルスを集光してヘリ

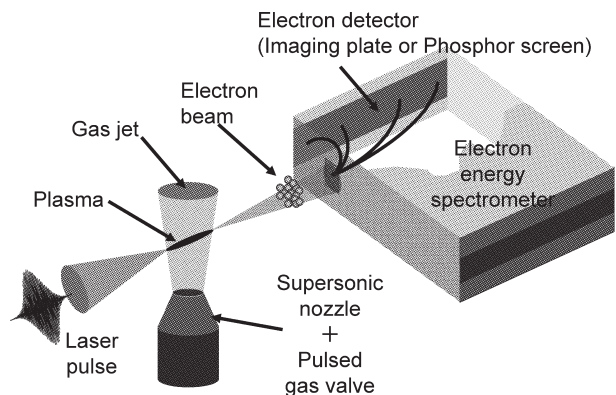


図3 レーザー電子加速の実験配置。

ウムガスジェットに照射する。レーザーの集光強度は、 $5.8 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  である。ガスジェットは直径 0.7 mm の円形開口の超音速ノズルから噴出される。加速された電子を磁場でエネルギー分解して、その像をイメージングプレート<sup>32)</sup>に記録する。プラズマの電子密度が  $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  のときに、図4に示した準単色電子ビームの発生が観測された<sup>20)</sup>。図4(a)に示したエネルギー分解された電子像は1ショットで得られている。40 MeV 付近にみられるスポットが発散角の小さな単色ビームの発生を示している。電子像の縦方向の大きさからビーム発散角は 7 mrad (半値全幅) と見積られ、単色成分は非常に高い指向性をもつことがわかった。エミッタンス  $\epsilon_n$  は、電子エネルギーのローレンツ因子を  $\gamma$ 、電子源の半径を  $\sigma$ 、ビーム発散角 (半値半幅) を  $\theta$  とすると、 $\epsilon_n = \gamma \sigma \theta$  で与えられる。電子源の半径をレーザー集光半径 (4.5  $\mu\text{m}$ ) とすると、エミッタンスは 1.3  $\pi \text{ mm mrad}$  と見積もられ、この値は現在の高周波加速器のビームに匹敵する。図4(b)のエネルギースペクトルから単色ピークに含まれる電子数は  $3.1 \times 10^8$  個 (電荷量 50 pC) と見積もられ、電子数も高周波加速器からのビームに迫る値が得られている。同じ照射条件で、ピークエネルギー 50 MeV、電子数  $4.1 \times 10^8$  個の準単色ビームも得られている。このとき、準単色ビームの全エネルギーは 3.3 mJ であり、レーザーから準単色ビームへのエネルギー変換効率は 0.8% になる。エネルギー変換効率も決して低くないこともわかった<sup>20)</sup>。

実験条件におけるレーザーのパルス幅 50 fs (空間的なパルス長 15  $\mu\text{m}$ )、レーザーの集光径 (9  $\mu\text{m}$ )、プラズマ波の波長 (8.3  $\mu\text{m}$ ) の3つの値は近く、理論モデルで示されている準単色ビーム発生の必要条件<sup>26)</sup>に近い。先にも述べたように、図2に示したシミュレーション結果は、準単色ビーム発生には、電子のプラズマからの取り出し位置が重要であることを示している。シミュレーションによる

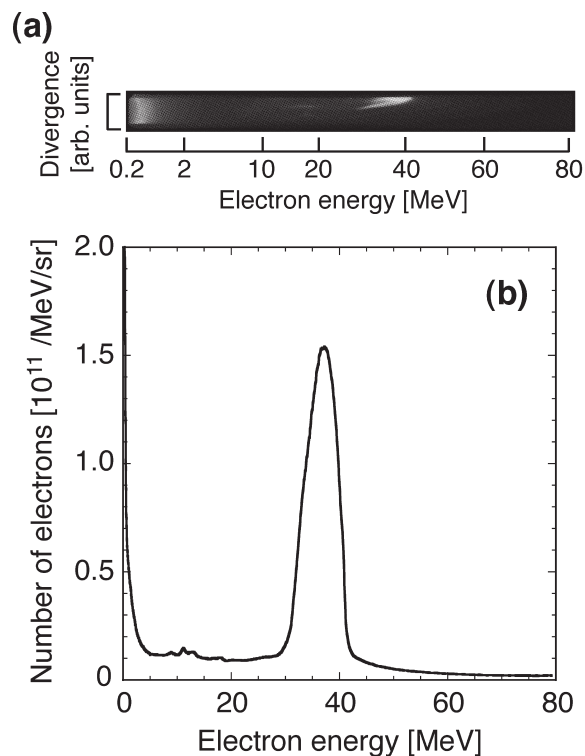


図4 レーザー加速で得られた準単色電子ビームの (a) エネルギー分解電子像, (b) エネルギースペクトルの一例。8 TW (400 mJ/50 fs) のレーザーパルスを用いてエネルギー 38 MeV、単色ピークの電子数  $3.1 \times 10^8$  の準単色ビームが得られている。

と最適なレーザーパルスの伝搬距離は、880  $\mu\text{m}$  程度であり、これはガスジェットの長さ  $\sim 1 \text{ mm}$  にほぼ等しい。われわれの実験では、ガスジェットの長さ とレーザーパルスの伝搬距離が整合し、加速距離の最適化が実現されていたと考えられる。また、シミュレーションで予測される準単色ビームのピークエネルギーは 80 MeV 程度で、実験で観測されたエネルギーに近い。シミュレーション結果は、実験結果を説明している。

### 3. 準単色電子ビーム発生の安定化に向けて

準単色電子ビームの発生に成功しているが、次の課題はその発生の安定化と制御である。準単色ビーム発生の安定性を評価し安定化を図るには、レーザーやプラズマのパラメーターとともに、電子ビームのエネルギースペクトルを同時に測定する必要がある。効率的な測定を行うために、電子の検出器として蛍光板 (化成オプトニクス社 DRZ-HIGH) を用いて、その蛍光像を CCD カメラで観測し、エネルギースペクトルを単発でその場観測する装置を開発した。エネルギースペクトルの絶対値を評価するために、感度が知られているイメージングプレートを参照検出器として感度を校正した<sup>33)</sup>。図4の準単色電子ビームが得られ

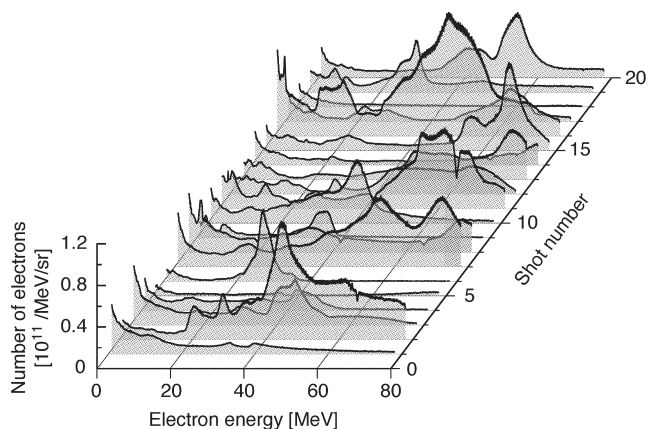


図5 1 Hz の繰り返しで連続 20 ショット取得した電子ビームのエネルギースペクトル。準単色ビームの発生頻度は 80% であった。

表1 連続 20 ショットで得られた準単色電子ビームのビーム特性の統計値。

Beam parameters	Mean $\pm$ S.D.
Peak energy	55 $\pm$ 17 MeV
Energy spread ( $\Delta E_{\text{FWHM}}/E$ )	21 $\pm$ 11%
Number of electrons	(1.6 $\pm$ 0.7) $\times 10^8$
Beam divergence (FWHM)	7.6 $\pm$ 3.5 mrad
Beam pointing	$\pm 7.6$ mrad

たときと同じ照射条件で、1 Hz の繰り返しで 20 ショット連続で得られた電子ビームのエネルギースペクトルを図 5 に示す。20 ショット中、16 ショットで 30~80 MeV にピークをもつ準単色ビームが観測され、発生頻度は 80% と見積もられた。これまでの準単色ビームの発生頻度が数十% 程度であったので<sup>15)</sup>、頻度を 3 倍程度高くし、発生の安定化も同時に達成されている。このとき得られた準単色ビームの特性の統計値を表 1 に示す。図 5 に示したスペクトルでは、同一のショットで異なるエネルギーに複数のピークが観測されている場合がある。これは加速に寄与するプラズマ波が 1 周期でなかった、あるいは電子の入射が複数回起こったためと考えられる<sup>34)</sup>。

また、準単色ビームの発生条件を調べた。図 6 は電子ビームのエネルギースペクトルのプラズマ電子密度依存性を示す。パルスバルブのガス充填圧によってガスジェットの密度を変化させて、プラズマの電子密度を変化させている。電子密度が  $1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  のときには、高エネルギー電子は発生しなかった。密度を高くして、 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  で、準単色ビームが発生した。さらに密度を  $1.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  まで高くすると、エネルギースペクトルはマクスウェル状分布になりピークはみられない。準単色ビームは特定の狭い密度領域でのみ発生し、プラズマの電子密度

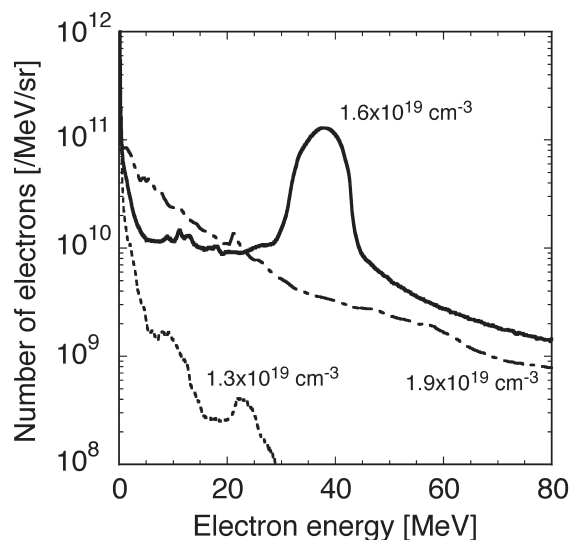


図6 電子ビームのエネルギースペクトルのプラズマ電子密度依存性。準単色ビームの発生には、プラズマの電子密度制御が重要であることを示している。

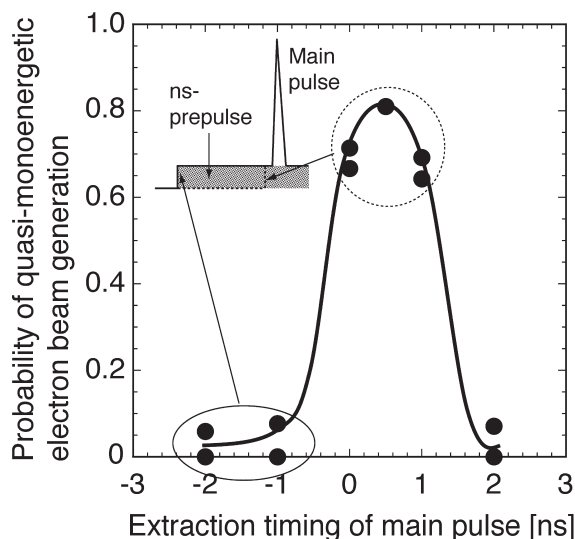


図7 準単色電子ビームの発生頻度のパルスクリーナーにおける主パルスの取り出しタイミング依存性。準単色ビームの安定な発生には、プレパルスの抑制が必要であることを示している。

制御が重要であることがわかった。

準単色ビーム発生の安定化には、プレパルスの抑制が重要であることもわかった。レーザー装置の第 1 段目の増幅器である再生増幅器の直後に、プレパルス抑制のためにポッケルスセルと偏光板を用いたパルスクリーナーを挿入している。図 7 の挿入図に示すように、主パルスの取り出しタイミングによって付随するナノ秒プレパルスの長さを制御することができる。図 7 は、準単色ビーム発生頻度のパルスクリーナーにおける主パルスの取り出しタイミング依存性を示す。図 7 では、取り出しタイミングを遅らせたほ

ど、ナノ秒プレパルスが短くなることを意味する。ナノ秒プレパルスを抑制したほうが発生頻度は高くなり、準単色ビーム発生安定化には、プレパルスの抑制が必要であることがわかった。主パルスの取り出しタイミングを極端に遅くしたときは、発生頻度が低くなっている。これは、主パルスの一部が切り取られエネルギーが低下しているためである。プレパルスが長いときは、非常に強い横方向散乱光像が観測されている。プレパルスで生成されたプレプラズマによって主パルスが散乱されていると考えられ、プレパルスが主パルスの伝搬に影響を及ぼすことを示唆する結果も得られている。

準単色ビームの発生頻度を高くできたとはいえ、表1にみられるように、ビーム特性値のばらつきはまだ大きい。上述のように、条件がそろったときのみ準単色ビームが発生するので、レーザーのエネルギー、パルス幅、空間分布、プレパルスレベル、ガスジェットの密度および分布等のわずかなばらつきが準単色ビームのエネルギー、電荷量等に大きく影響する。これは、波の破碎という基本的には不安定な非線形現象を介して、プラズマ波への電子入射を行っているためである。準単色ビームの安定発生には、レーザー等の安定化も含めて実験条件のさらなる高精度での制御が不可欠になる。

プラズマ波への電子入射を能動的に制御できれば、準単色ビーム発生さらなる安定化が可能になる。複数のレーザーパルスを用いて準単色ビーム発生安定化、制御が試みられている<sup>14)</sup>。1パルスがプラズマ波を励起し、他のパルスで電子入射を制御する手法である。この詳細については、本号に掲載の解説を参照されたい<sup>35)</sup>。

#### 4. 超高エネルギー電子加速を目指して

これまで報告されてきたほとんどの実験では、図3に示したような長さ数mmのガスジェットが用いられている。この手法では、ガスジェットの長さあるいはレイリー長程度の加速距離しか得られない。これでは、高い加速電場が得られる利点を生かしているとはいえない。加速距離を長くして超高エネルギー電子加速を実現するには、プラズマの長尺化とレーザー光の長尺伝搬が必要となる。キャピラリー放電<sup>13,16,18,19)</sup>や中空のキャピラリーターゲット<sup>36)</sup>、あるいは複数のレーザーパルス<sup>5)</sup>を用いることによって、レーザー伝搬の断面方向のプラズマの密度分布を中空状にして中心部分が高い屈折率分布を形成し、光ファイバーのようにプラズマ中でレーザー光をガイドすることが試みられてきた。一昨年、長さ3cmのキャピラリー放電プラズマを用いてピークエネルギー1GeV、単色ピークの電子数

$1.9 \times 10^8$ の準単色ビーム発生が報告された<sup>13)</sup>。これに引き続き、GeVに迫る準単色電子加速が報告されている<sup>16,18,19)</sup>。

#### 5. レーザー加速電子ビームの応用

最近では、電子ビームの高品質化、高エネルギー化、高出力化と並行して、その特性評価、応用の研究も行われるようになっている。

レーザー加速の特徴であるフェムト秒電子パルス発生を実証するために、電子パルス幅測定方法の開発が進められている。プラズマから真空中に電子ビームが飛び出る際の遷移放射（誘電率が異なる媒質間を荷電粒子が運動する際に発生する放射）で発生するテラヘルツ電磁波によって電気光学結晶を駆動して、フェムト秒レーザーパルスの偏光変化をポンプ・プローブ法によって計測し、電子パルス幅が測定されている<sup>37)</sup>。50fs程度の分解能が得られており、フェムト秒電子パルス発生が実証されている。テラヘルツ電磁波のスペクトルからもパルス幅が測定されている<sup>38)</sup>。また、電子ビームと高強度レーザーパルスを相互作用させ、電子ビームの散乱角をポンプ・プローブ法によって計測してパルス幅を測定する手法も提案されている<sup>39)</sup>。極短電子パルスは電子ビームと物質との相互作用の物理、化学過程の詳細を調べるパルスラジオリシスの線源として有用である。レーザー加速電子ビームのパルスラジオリシスへの応用が報告されている<sup>40,41)</sup>。

高エネルギー電子ビームとレーザーの相互作用（レーザーコンプトン散乱）によってX線を発生することができる。レーザーコンプトン散乱で発生するX線のパルス幅は相互作用時間で決まるので、レーザー加速で得られるフェムト秒電子パルスとフェムト秒レーザーパルスを相互作用させて、フェムト秒X線パルス発生が可能である。レーザーコンプトン散乱によるkeV X線の発生が報告されている<sup>42)</sup>。高原子番号物質中で制動放射によって発生する $\gamma$ 線を用いた非破壊観測への応用も報告されている<sup>43)</sup>。電子源が小さくビーム発散角も小さいので、点光源を作り出すことができ、数百 $\mu\text{m}$ の高い分解能が得られている。レーザー加速で得られた準単色電子ビームをアンジュレーターに入射し、赤外から可視域のシンクロトロン放射光発生も報告されている<sup>44)</sup>。

公表されている文献をもとに、照射条件に近い（波長800nm近傍、パルス幅数十fsのレーザーを用いた）結果に限定して<sup>3-20)</sup>、レーザー加速による準単色電子ビーム発生達成値（ピークエネルギー、単色ピークの電子数）をレーザーパワーの依存性としてまとめたものを図8に示

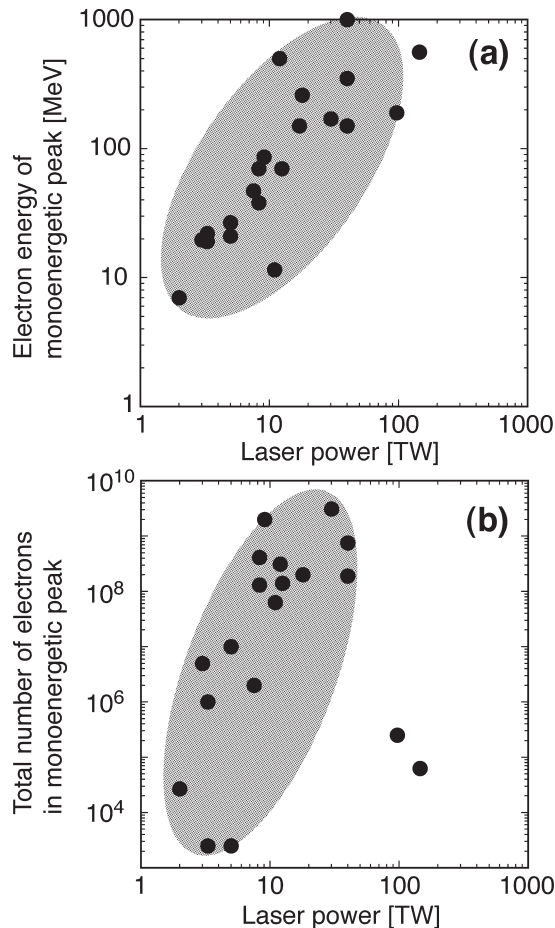


図8 これまでに報告されている準単色電子ビーム発生達成値。ピークエネルギー (a) および単色ピークの電子数 (b) をレーザーパワー依存性として示している。

す。ここに示した以外にも、多くの報告があることを付け加える。実験室規模の10~数十TWのレーザーを用いれば、高周波加速器で得られているエネルギー数十MeV~1GeV、電子数 $10^8 \sim 10^{10}$ の準単色ビームが得られることがわかってきた。図8は経験則ではあるが、レーザー電子加速器のおおよその設計指針を与えていると考えることができる。また、準単色ビームの安定発生技術、制御技術も進展した。最近では、ビーム特性の評価が行われ、応用も示されつつある。この数年で、以前の原理実証研究から一歩踏み出したことはいうまでもない。

高周波加速器における電子銃、加速管にあたる部分が小型化できることは証明された。しかし、エネルギーを供給するレーザー装置は実験室規模になったとはいえ、卓上の超小型加速器を標榜するにはまだまだ大きい。真の意味での小型加速器を実現するには、レーザー装置の小型化は不可欠である。レーザー装置は繰り返し可能とはいえ、現在は10Hz程度であり、平均線量を高くするにはレーザー

の高平均出力化も必須となる。実用機実現に向けての課題が少なくないことも事実である。

レーザー加速は、極短電子パルス発生に代表されるさまざまな特徴を備えている。これらの利点、有用性を示せる応用例を掲げてそれを実証し、レーザー装置も含めた実用機設計を見据えた研究開発が今後重要になってくると考えられる。

本稿で紹介した筆者らの研究は、文部科学省原子力試験研究費および文部科学省先進小型加速器事業によって実施されたものであり、ここに謝意を表します。また、研究実施にあたり小山和義氏、加藤進氏、齋藤直昭氏をはじめとする共同研究者には多大な協力をいただいた。あわせて、謝意を表します。

## 文 献

- 1) T. Tajima and J. M. Dawson: "Laser electron accelerator," *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979) 267-270.
- 2) D. Strickland and G. Mourou: "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219-221.
- 3) E. Miura, K. Koyama, S. Kato, N. Saito, M. Adachi, Y. Kawada, T. Nakamura and M. Tanimoto: "Demonstration of quasi-monoenergetic electron-beam generation in laser-driven plasma acceleration," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 251501.
- 4) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker, D. A. Jaroszynski, A. J. Langley, W. B. Mori, P. A. Norreys, F. S. Tsung, R. Viskup, B. R. Walton and K. Krushelnick: "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions," *Nature*, **431** (2004) 535-538.
- 5) C. G. R. Geddes, Cs. Toth, 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) T. Hosokai, K. Kinoshita, T. Ohkubo, A. Maekawa, M. Uesaka, A. Zhidkov, A. Yamazaki, H. Kotaki, M. Kando, K. Nakajima, S. V. Bulanov, P. Tomassini, A. Giulietti and D. Giulietti: "Observation of strong correlation between quasi-monoenergetic electron beam generation by laser wakefield and laser guiding inside a preplasma cavity," *Phys. Rev. E*, **73** (2006) 036407.
- 9) M. Mori, M. Kando, I. Daito, H. Kotaki, Y. Hayashi, A. Yamazaki, K. Ogura, A. Sagisaka, J. Koga, K. Nakajima, H. Daido, S. V. Bulanov and T. Kimura: "Transverse dynamics and energy tuning of fast electrons generated in

- sub-relativistic intensity laser pulse interaction with plasmas,” *Phys. Lett. A*, **356** (2006) 146-151.
- 10) C.-T. Hsieh, C.-M. Huang, C.-L. Chang, Y.-C. Ho, Y.-S. Chen, J.-Y. Lin, J. Wang and S.-Y. Chen: “Tomography of injection and acceleration of monoenergetic electrons in a laser-wakefield accelerator,” *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 095001.
  - 11) B. Hidding, K.-U. Amthor, B. Liesfeld, H. Schwöerer, S. Karsch, M. Geissler, L. Veisz, K. Schmid, J. G. Gallacher, S. P. Jamison, D. Jaroszynski, G. Pretzler and R. Sauerbrey: “Generation of quasimonoenergetic electron bunches with 80-fs laser pulses,” *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 105004.
  - 12) S. P. D. Mangles, A. G. R. Thomas, M. C. Kaluza, O. Lundh, F. Lindau, A. Persson, F. S. Tsung, Z. Najmudin, W. B. Mori, C.-G. Wahlström and K. Krushelnick: “Laser-wakefield acceleration of monoenergetic electron beams in the first plasma-wave period,” *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 215001.
  - 13) W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Toth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder and S. M. Hooker: “GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator,” *Nature Phys.*, **2** (2006) 696-699.
  - 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) S. Masuda, E. Miura, K. Koyama, S. Kato, M. Adachi, T. Watanabe, K. Torii and M. Tanimoto: “Energy scaling of monoenergetic electron beams generated by the laser-driven plasma based accelerator,” *Phys. Plasmas*, **14** (2007) 023103.
  - 16) S. Karsch, J. Osterhoff, A. Popp, T. P. Rowlands-Rees, Zs. Major, M. Fuchs, B. Marx, R. Hörlein, K. Schmid, L. Veisz, S. Becker, U. Schramm, B. Hidding, G. Pretzler, D. Habs, F. Gruner, F. Krausz and S. M. Hooker: “GeV-scale electron acceleration in a gas-filled capillary discharge waveguide,” *New J. Phys.*, **9** (2007) 415.
  - 17) A. Maksimchuk, S. Reed, N. Naumova, V. Chvykov, B. Hou, G. Kalintchenko, T. Matsuoka, J. Nees, P. Rousseau, G. Mourou and V. Yanovsky: “Energy scaling of quasi-monoenergetic electron beams from laser wakefields driven by 40-TW ultra-short pulses,” *Appl. Phys. B*, **89** (2007) 201-207.
  - 18) T. P. Rowlands-Rees, C. Kamperidis, S. Kneip, A. J. Gonsalves, S. P. D. Mangles, J. G. Gallacher, E. Brunetti, T. Ibbotson, C. D. Murphy, P. S. Foster, M. J. V. Streeter, F. Budde, P. A. Norreys, D. A. Jaroszynski, K. Krushelnick, Z. Najmudin and S. M. Hooker: “Laser-driven acceleration of electrons in a partially ionized plasma channel,” *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 105005.
  - 19) T. Kameshima, W. Hong, K. Sugiyama, X. Wen, Y. Wu, C. Tang, Q. Zhu, Y. Gu, B. Zhang, H. Peng, S. Kurokawa, L. Chen, T. Tajima, T. Kumita and K. Nakajima: “0.56 GeV laser electron acceleration in ablative-capillary-discharge plasma channel,” *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 066001.
  - 20) S. Masuda and E. Miura: “Generation of quasi-monoenergetic electron beams with high charge by laser-driven plasma-based acceleration,” *Appl. Phys. Express*, **1** (2008) 086002.
  - 21) C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson, M. Everett, A. Lal, W. P. Leemans, R. Williams and C. Joshi: “Ultra-high-gradient acceleration of injected electrons by laser-excited relativistic electron plasma waves,” *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 37-40.
  - 22) N. A. Ebrahim: “Optical mixing of laser light in a plasma and electron acceleration by relativistic electron plasma waves,” *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 7645-7647.
  - 23) A. Modena, Z. Najmudin, A. E. Dangor, C. E. Clayton, K. A. Marsh, C. Joshi, V. Malka, C. B. Darrow, C. Danson, D. Neely and F. N. Walsh: “Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves,” *Nature*, **377** (1995) 606-608.
  - 24) A. Pukhov and J. Meyer-ter-vehn: “Laser wake field acceleration: The highly non-linear broken-wave regime,” *Appl. Phys. B*, **74** (2002) 355-361.
  - 25) F. S. Tsung, R. Narang, W. B. Mori, C. Joshi, R. A. Fonseca and L. O. Silva: “Near-GeV-energy laser-wakefield acceleration of self-injected electron in a centimeter-scale plasma channel,” *Phys. Rev. Lett.*, **93** (2004) 185002.
  - 26) S. Gordienko and A. Pukhov: “Scalings for ultrarelativistic laser plasmas and quasimonoenergetic electrons,” *Phys. Plasmas*, **12** (2005) 043109.
  - 27) W. Lu, C. Huang, M. Zhou, W. B. Mori and T. Katsouleas: “Nonlinear theory for relativistic plasma wakefields in the blowout,” *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 165002.
  - 28) P. Sprangle, C. M. Tang and E. Esarey: “Relativistic self-focusing of short-pulse radiation beams in plasmas,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-15** (1987) 145-153.
  - 29) S. V. Bulanov, F. Pegoraro, A. M. Pukhov and A. S. Sakharov: “Transverse-wake wave breaking,” *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 4205-4208.
  - 30) D. Gordon, K. C. Tzeng, C. E. Clayton, A. E. Dangor, V. Malka, K. A. Marsh, A. Modena, W. B. Mori, P. Muggli, Z. Najmudin, D. Neely, C. Danson and C. Joshi: “Observation of electron energies beyond the linear dephasing limit from a laser-excited relativistic plasma wave,” *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 2133-2136.
  - 31) V. Malka, S. Fritzler, E. Lefebvre, M.-M. Leonard, F. Burgy, J.-P. Chambaret, J.-F. Chemin, K. Krushelnick, G. Malka, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin, M. Pittman, J.-P. Rousseau, J.-N. Scheurer, B. Walton and A. E. Dangor: “Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse,” *Science*, **298** (2002) 1596-1600.
  - 32) K. A. Tanaka, T. Yabuuchi, T. Sato, R. Kodama, Y. Kitagawa, T. Takahashi, T. Ikeda, Y. Honda and S. Okuda: “Calibration of imaging plate for high energy electron spectrometer,” *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 013507.
  - 33) S. Masuda, E. Miura, K. Koyama and S. Kato: “Absolute calibration of an electron spectrometer using high energy electrons produced by the laser-plasma interaction,” *Rev. Sci. Instrum.*, **79** (2008) 083301.
  - 34) A. Oguchi, A. Zhidkov, K. Takano, E. Hotta, K. Nemoto and K. Nakajima: “Multiple self-injection in the acceleration of monoenergetic electrons by a laser wake field,” *Phys. Plasmas*, **15** (2008) 043102.
  - 35) 小瀧秀行・大東 出・神門正城・林由紀雄・大道博行・S. V. Bulanov: “衝突入射型レーザー電子加速”, *光学*, **37** (2008) 651-653.
  - 36) Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu, W. Sakamoto, R. Kodama, K. A. Tanaka, K. Azumi, T. Norimatsu, T. Matsuoka, H. Fujita and H. Yoshida: “Electron acceleration in an ultraintense-laser-illuminated capillary,” *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 205002.
  - 37) J. van Tilborg, C. B. Schroeder, C. V. Filip, Cs. Tóth, C. G. R. Geddes, G. Fubiani, R. Huber, R. A. Kaindl, E. Esarey and W. P. Leemans: “Temporal characterization of femtosecond laser-plasma-accelerated electron bunches using terahertz radiation,” *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006)



- 014801.
- 38) T. Ohkubo, A. Maekawa, R. Tsujii, T. Hosokai, K. Kinoshita, K. Kobayashi, M. Uesaka, A. Zhidkov, K. Nemoto, Y. Kondo and Y. Shibata: "Temporal characteristics of monoenergetic electron beams generated by the laser wakefield acceleration," *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **10** (2007) 031301.
- 39) S. Banerjee, S. Sepke, R. Shah, A. Valenzuela, A. Maksimchuk and D. Umstadter: "Optical deflection and temporal characterization of an ultrafast laser-produced electron beam," *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005) 035004.
- 40) B. Brozek-Pluska, D. Gliger, A. Hallou, V. Malka and Y. A. Gauduel: "Direct observation of elementary radical events: Low- and high-energy radiation femtochemistry in solutions," *Radiat. Phys. Chem.*, **72** (2005) 149-157.
- 41) D. A. Oulianov, R. A. Crowell, D. J. Gosztola, I. A. Shkrob, O. J. Korovyanko and R. C. Rey-de-Castro: "Ultrafast pulse radiolysis using a terawatt laser wakefield accelerator," *J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 053102.
- 42) H. Schworer, B. Liesfeld, H.-P. Schlenvoigt, K.-U. Amthor and R. Sauerbrey: "Thomson-backscattered X rays from laser-accelerated electrons," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 014802.
- 43) Y. Glinec, J. Faure, L. Le Dain, S. Darbon, T. Hosokai, J. J. Santos, E. Lefebvre, J. P. Rousseau, F. Burgy, B. Mercier and V. Malka: "High-resolution  $\gamma$ -ray radiography produced by a laser-plasma driven electron source," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 025003.
- 44) H.-P. Schlenvoigt, K. Haupt, A. Debus, F. Budde, O. Jäckel, S. Pfontenhauer, H. Schworer, E. Rohwer, J. G. Gallacher, E. Brunetti, R. P. Shanks, S. M. Wiggins and D. A. Jarosynski: "A compact synchrotron radiation source driven by a laser-plasma wakefield accelerator," *Nature Phys.*, **4** (2008) 130-133.

(2008年6月30日受理)