

レーザープラズマ電子加速の新展開 —指先サイズの電子加速器の実現に向けて—



森 道昭

Mori Michiaki

1 はじめに

放射線によるがん治療は、外科手術に比べて身体への負担が大幅に少なく患者の生活の質（QOL）を高める治療法である。先進国では、がん患者の半数以上が放射線治療を受ける等広く認知をされ、近年ではより効果が高くかつより身近な治療法としての高度化への期待も高まっている。この治療法には、身体の外部から放射線を照射する方法や、カテーテルを用いて放射線源を患部近くに届ける方法等があるものの、いずれの方法も健全な部位の被ばくを避けることができない課題がある。また、加速器の運転による放射線の管理や放射線源の取扱いには注意が必要であり、更に装置価格の抑制や運用コストの低減等も重要な課題となっている。

一方、レーザープラズマ電子加速は原理的に加速器を非常にコンパクトに構成できるメリットがあり、小型なシステムで超大型加速器を超越する高エネルギーを目指した研究開発が進んでいる。最近、レーザープラズマ電子加速の新たな展開として、これまでとは異なる電子線発生的手法と応用が提案されている。これは前記の課題に対して有効な手法として期待をされており、筆者らはその原理実証を行ったので一部を抜粋する形で紹介する。

2 レーザープラズマ電子加速

粒子加速器は電子やイオン等の電荷を持つ粒子を

加速する装置であり、医療だけでなく、産業や科学研究の分野でも多様に利用されている。しかし、特に高エネルギー加速器においては装置規模が大きな課題となっており、加速器の大幅な小型化が希求されている。また、医療や産業での用途では、装置の小型化だけでなく、必要な粒子を手軽に使える技術も求められ、今後の医療や産業の発展にとって重要な課題となっている。

一方、レーザープラズマ電子加速は、45年前の田島・ドーソンによる理論的な提唱¹⁾から、チャープパルス増幅法²⁾による高ピーク出力の超短パルスレーザー装置の革新的な小型化により大きく進んできた。ピーク出力の高い超短パルスレーザー光を凹面鏡等の集光光学素子で集光し物質に照射すると、物質の原子から電子を剥ぎ取り、プラズマ状態が生成される。更に強度が高まると、プラズマ内に電子密度の異なる領域が交互に現れる「粗密波」がレーザー光の進行方向にレーザーパルスに追従する形で発生する。この粗密波は、電子密度の高い領域から低い領域に向かって電子を加速させる電場（加速場）を持つことから、この加速機構を「レーザープラズマ加速」と呼ぶ。また、このようなプラズマによって生み出される電界強度は一般的な粒子加速器の数百～数千倍に相当するため、粒子加速器の格段の小型化が期待されている。このような背景から、世界的なトレンドとして、レーザー装置のピーク出力の増強による高エネルギー化をメインとした研究が展開され、最近では10 cmの加速長で10 GeV級

の電子線の発生に成功する等進展している³⁾。

近年、新たな展開として小型で比較的ピーク出力の低いレーザーと従来に比べ2~3桁程度高い密度のプラズマを使い、産業や医療分野に応じた比較的低いエネルギーの電子を必要な数だけ生成できることが提案されている。その鍵は高密度のプラズマである。レーザー光によって生成されるプラズマを媒体とする加速場は前述のようにレーザー光に追従する形で形成される。したがってその伝搬速度は光の伝播速度に等しい。他方でプラズマは電子とイオンが混在した荷電粒子で構成されているため、電磁波の一種である光（レーザー光）はプラズマの応答を伴いながら伝搬し分散が発生する。この分散によってレーザー光の伝搬速度（群速度）はプラズマ密度の増加で低下し、最終的に0に収束する（この0となるプラズマ密度を臨界密度と呼ぶ）。したがって臨界密度に近いプラズマ密度では電子の加速を担う粗密波の速度が非常に遅く、見込める加速電子のエネルギーが低いいため、最近までほとんど研究が進んでいなかった。しかし、加速距離が数 μm 程度と非常に短く、またメカニズム上、比較的弱いレーザー強度でも加速できるという特長があることから、超小型の加速器としての提案がなされた⁴⁾。更にその特徴を活かした応用として、ファイバーレーザーベースによる加速器型小線源治療が提案され、既存のRIベースの小線源治療法を比較対象とするコストを含めた優位性と実現に向けた研究開発の指針が示された⁵⁾。しかし、提案では、高密度プラズマの生成にカーボンナノチューブの非束縛電子の利用を想定する等、現状のレーザープラズマ電子加速の手法から大きく離れているため実証が難しい。そこで筆者らはよりシンプルで汎用性の高いマイクロチャンネルプレートという材料に着目し、広く行われているレーザープラズマ電子加速実験に近い形での原理実証を進めることとした。

3 マイクロチャンネルプレート (MCP) を用いた原理実証

高強度レーザー光を駆動源とした高エネルギーの電子線は、通常、レーザー光を放物面鏡等で集光させ、 1cm^2 あたりエクサ(100京、 10^{18})Wを超える非常に高いレーザー強度（ピーク出力を集光面積で割ったもの）でガスや固体等の材料に照射して発

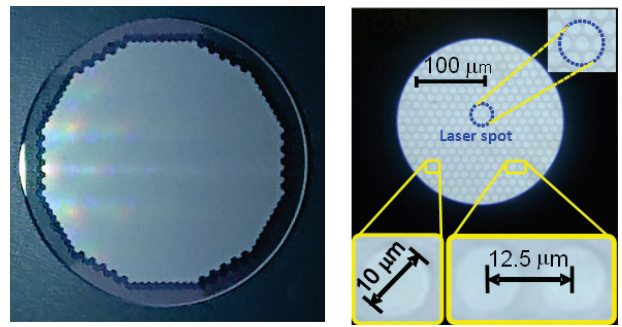


図1 マイクロチャンネルプレート 左:実物写真 右:顕微鏡拡大写真

実験ではホール径 $10\mu\text{m}$ ・ピッチ $12.5\mu\text{m}$ のものを用いた(右図下拡大写真)

生させる。固体材料を使った手法では、レーザーパルスの上がりエッジでのレーザーアブレーションによるプラズマ化を含んだ気化拡散とメインパルスによる粗密波形成の二段階で加速場を生成する。しかし、高密度プラズマはスケール長が非常に短くまた安定的な保持も難しい。他方でシート状の固体材料を用いる場合、レーザーの進行方向に電子線が発生するためこの材料が電子線の伝送を妨げる本質的な問題もあり、これらの課題に対する工夫が必要である。そこで筆者らはマイクロチャンネルプレートに着目した(図1)。マイクロチャンネルプレートとは孔径が数 μm ~数百 μm のガラス毛细管(キャピラリー)を規則正しく二次元的に配列したガラスプレートであり、光電子増倍管等で利用されている。この狭小のチャンネルを使うことで、キャピラリー内部でレーザーアブレーションによって生成されるプラズマは効率的に閉じ込められるため良好な高密度状態の維持が期待できる。更にキャピラリーは中空構造のため、発生した電子線は固体材料の障害を受けることなく効果的に伝送することもできる。このようにキャピラリー構造は高密度プラズマ生成と電子線の伝送の双方においてメリットが期待できることから、実際にこれを用いて原理実証実験を行った。

実証実験は量子科学技術研究開発機構関西光量子科学研究所にある小型チタンサファイアテラワットレーザー装置 JLITE-X を用いて行った。この装置から発生するパルスレーザー光を図2のイメージで、真空容器内に焦点距離 646 mm の軸外し放物面鏡で内径 $10\mu\text{m}$ ・厚み $400\mu\text{m}$ のマイクロチャンネルプレート(ターゲット)上にスポット径 $30\mu\text{m}$ (e^2 径)

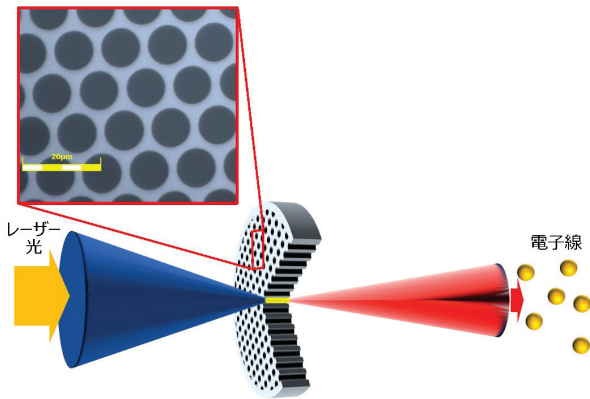


図2 電子線発生のイメージ

ガラスプレートに細い穴が等間隔に並んだマイクロチャンネルプレート(中央)にレーザー光(左)を照射し、指向性の高い電子線(右)を発生させる

で集光し、レーザーエネルギー及びレーザー強度を変化させた際の電子線のエネルギースペクトルと空間分布の変遷を調べた。

図3に実験で得られた有効励起レーザーエネルギー27 mJ及び6 mJそれぞれにおけるレーザー強度の変化に対する電子線のエネルギースペクトルの変遷を示す。双方ともレーザーエネルギー一定のもとパルス幅を変化(40 fs~1 ps)させることでレーザー強度を変化させた。27 mJ及び6 mJいずれにおいても電子の低いエネルギー領域でレーザープラズマ加速では典型的なMaxwell-Boltzmann様のエネルギー分布を観測した。この構造はレーザー強度の増加で変化し、特に高い励起強度、具体的には $4 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 及び $1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ において300 keV付近の高エネルギー領域でこぶ構造が出現した。このこぶ構造はコンピューターシミュレーションから、高いレーザー強度ではキャピラリー内部での比較的プラズマ密度の低い領域から発生していることが分かった。またこれまで行ってきた低密度プラズマでのレーザープラズマ電子加速実験の視点から、低密度での加速電子の発生には十分に高い励起強度が必要なことは自明のため、その点でもリーズナブルである。

図4にこの結果を元にした100 keV付近での電子線の有効温度のレーザー強度依存性を示す。スケールとしては27 mJ励起で0.4乗則、6 mJ励起で0.13乗則であり、通常のレーザー加熱としてよく知られているレーザー光の振動運動(Quiver運動)の1乗則に比べて明らかに鈍感である。このように低

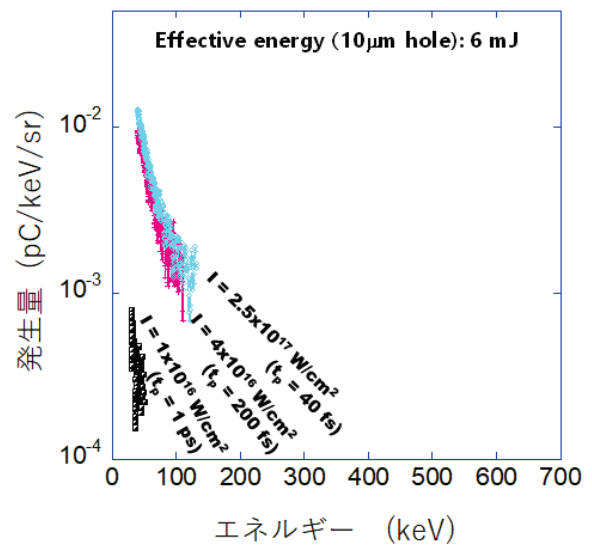
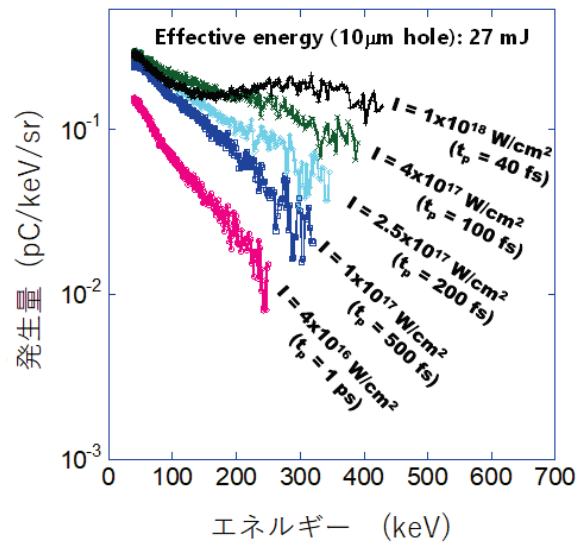


図3 得られた電子線のエネルギースペクトル
上: 27 mJ励起時, 下: 6 mJ励起時⁶⁾

いピーク出力の励起でも臨界密度近辺の高密度プラズマを使うことによって高エネルギーの電子線が発生できることが明らかとなった。

一方、電子線の角度分布については、電子線の拡がり角は電子線のエネルギー分布が変化しているにもかかわらず概ね30 mrad(半値半角)であった(図5)。マイクロチャンネルプレートは微小な筒で構成されるためX線管等指向性を持たない線源から発する放射線をコリメートさせるのに有効であることは古くから知られている⁷⁾。これに基づく理論上の誘導角が約25 mradであることからこれが有効に機能したものと考えられる。またこの理論に従うと発散角はマイクロチャンネルプレートの厚みで制御

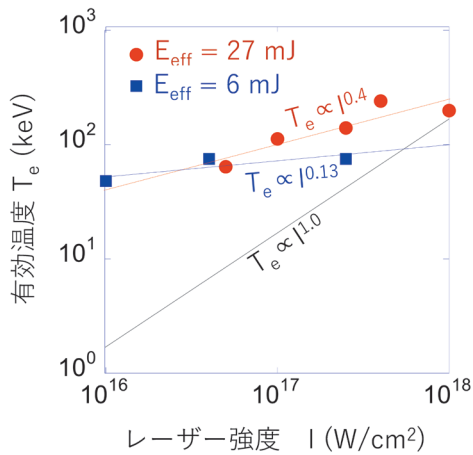


図4 発生した電子線の有効温度のレーザー強度依存性

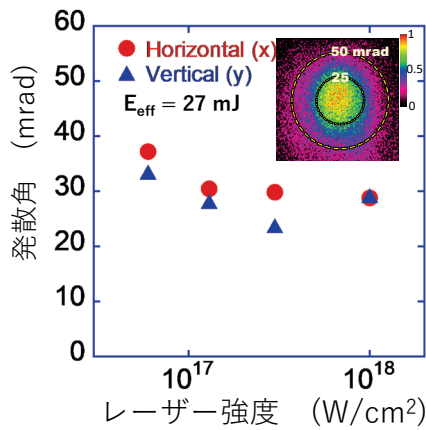


図5 電子線の発散角（半値半角）の有効励起エネルギー27 mJにおける励起レーザー強度依存性と典型的なイメージ⁶⁾

することができる。特に今回の実証で使ったマイクロチャンネルプレートの厚みは400 μmと薄く、これを厚くすることは容易であり、より高いコリメーション性が期待できる。このように狭小キャピラリー構造は当初の目的の高密度プラズマ生成や電子の効率的な伝搬以外に発散角の抑制においても優位性があることが実証実験から明らかになった。

4 まとめ

レーザープラズマ電子加速の新たな展開について紹介を行った。近年のレーザー技術の進歩によって、ファイバーレーザーに代表される可搬性に優れた高ピーク出力レーザー装置の開発が急ピッチで進み装置コストも大幅に低減している。本高密度プラズマ加速に関する実証は、レーザープラズマ電子加速の敷居を下げ、より身近な応用に結びつくものと考えられる。

謝辞

本解説の内容は、量子科学技術研究開発機構 小瀧秀行氏、林由紀雄氏、神門正城氏、近藤公伯氏、河内哲哉氏、米カリフォルニア大学アーバイン校 Ernesto Barraza-Valdez 氏、田島俊樹教授、及び加ウオーターレー大学 Donna Strickland 教授との共同メンバーを中心とする成果である。また、レーザー駆動電子加速研究については、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 及び日本学術振興会科学研究費補助金 20K12505 及び 23K11716 を受け実施している。

参考文献

- 1) T. Tajima, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **43**, 267 (1979)
- 2) D. Strickland, *et al.*, *Opt. Comm.*, **56**, 219 (1985)
- 3) C. Aniculaesei, *et al.*, *Matter Radiat. Extremes*, **9**, 014001 (2024)
- 4) B. S. Nicks, *et al.*, *Photonics*, **8**, 216 (2021)
- 5) D. Roa, *et al.*, *Photonics*, **9**, 403 (2022)
- 6) M. Mori, *et al.*, *AIP Advances*, **14**, 035153 (2024)
- 7) N. Yamaguchi, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **58**, 43 (1987)

((国研)量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所)