

レーザーイオン加速の現状と応用展開

根本 孝 七

Present Status and Application of Laser Ion Acceleration

Koshichi NEMOTO

Laser ion acceleration using ultrashort pulse laser is an attractive candidate for next generation ion accelerator because of its compactness. The scaling for maximum acceleration energy can be described on the basis of the modified iso-thermal plasma expansion model. The maximum ion energy depends on not only laser intensity and wavelength but also pulse duration in the low intensity region less than $\sim 10^{19}$ W/cm². In this region, ion acceleration time is close to the laser pulse duration. Ion beam characteristics such as beam divergence and energy can be controlled by target fabrication and plasma lens, respectively. Ultra thin target and damage reduction of the target by using high contrast laser pulse can increase ion energy, significantly.

Key words: laser, accelerator, ion, plasma, iso-thermal plasma expansion

高速イオンは衝突や核反応など、種々の断面積が大きい
ため、さまざまな産業への応用が期待される。この高速イ
オンの加速方法として、近年では、レーザーを用いたコン
パクトなイオン源の研究開発が進められている^{1,2)}。これ
は Gerard Mourou 教授らが発明したチャープパルス増幅
法により³⁾、非常に強力で、また、パルス幅が数フェムト
秒から数ピコ秒程度と非常に短いレーザーパルスの発生が
容易になったことによるところが大きい。このようなレー
ザー装置は超短パルスレーザー、あるいは超高強度・超短
パルスレーザーとよばれ、高強度場科学 (high field sci-
ence)、もしくは高強度場工学 (high field engineering) と
よばれる新しい科学と工学分野の創出が期待されてい
る⁴⁾。超短パルスレーザーを用いて陽子線や重イオン線を
発生させるレーザーイオン加速は、その中でも特に期待さ
れているものである。

レーザーイオン加速とは、図 1 に示すように、超短パ
ルスレーザーを薄膜ターゲットに照射するとターゲット裏面
よりプロトン (水素イオン) ビームなどの高速イオンが加
速されるもので、非常にコンパクトなレーザーイオン源を

実現できる可能性がある⁴⁻⁷⁾。また、図 2 に、ミシガン大
学で行われたレーザーイオン加速実験の初期のころの装置
構成例を示す。この写真からわかるように、レーザーイオ
ン加速装置の基本的な構成素子は、レーザービーム、レー
ザーを集光する光学素子、薄膜テープターゲット、および
真空チャンバー程度であり、非常に簡単な構成になってい
る。レーザーイオン加速による最大加速エネルギーとして
は、レーザーのエネルギーが数百ジュールという大型のレー
ザーを用いて最大 50 MeV 以上のエネルギーのプロト
ンビームが得られている^{8,9)}。1 MeV (メガ電子ボルト) と
は、電荷数 1 のプロトンや電子が 100 万ボルトの電圧で加
速されたときの運動エネルギーである。後述するように、
レーザーイオン加速において加速されるイオンのエネルギ
ーは、レーザー照射により発生する高速電子の運動エネル
ギーに依存する。また、高速電子のエネルギーはレーザー
の集光強度に依存する。このため、レーザー光を小さく集
光し、レーザー強度 (W/cm²) を高めることで、同じレー
ザーエネルギーでもより高い運動エネルギーを得ることが
可能となる。実際に電中研では、理論限界近くまでレーザ

(財)電力中央研究所電力技術研究所 (〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1) E-mail: nemoto@cripi.denken.or.jp

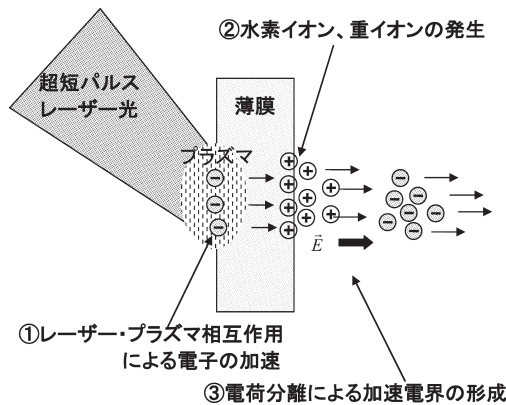


図1 レーザーイオン加速の原理。厚さ数ミクロン程度の薄膜に超短パルスレーザーを照射すると、①照射面からレーザーとプラズマの相互作用により高速電子が加速され、これが薄膜の裏面に突き抜ける。このとき、②薄膜の裏面表面に存在する水素原子などがイオン化される。さらに、③裏面に突き抜けた高速電子と薄膜ターゲットのつく電界により、プロトン（水素イオン）などのイオンが加速される。

ーを集光し、エネルギー 30 mJ、パルス幅 80 fs のレーザーを厚さ $7.5\ \mu\text{m}$ のポリイミドテープに照射したとき、最大プロトンエネルギーとして $1.1 \pm 0.3\ \text{MeV}$ を得た¹⁰⁾。このときはデフォーマブルミラー（表面形状可変鏡）という特殊な鏡を用いて収差を補正することで、理論限界近くまでの集光を行っている。

以下、本稿では、電力中央研究所での研究結果も織り交ぜながら、超短パルスレーザーを用いたレーザーイオン加速について紹介したい。

1. レーザーイオン加速のメカニズム

レーザー照射によるイオン加速は、図1に示される以下の3つのプロセスによると考えられている¹¹⁻¹⁶⁾。

- ① 高速電子の加速： 薄膜ターゲットにレーザーを照射すると、レーザーとプラズマの相互作用により、レーザーを照射した側のターゲット表面から高速の電子がターゲットの裏面へと加速される。この加速をもたらす力は、ポンデロモータティブ力とよばれ、レーザー光強度の勾配に依存する。レーザーパルスが照射されたときにターゲットのプラズマ化が進んでいると、さまざまなレーザー・プラズマ相互作用により、さらに高いエネルギーまで電子が加速されることがある。この加速はターゲット裏面の極近傍の微小な空間で行われる。
- ② イオンの発生： ターゲットの裏面まで突き抜けた高速電子は、ターゲット裏面の表面にある原子を電離し、イオンを作り出す。発生したさまざまなイオンのうちで、加速されるイオン種としては軽量である水素

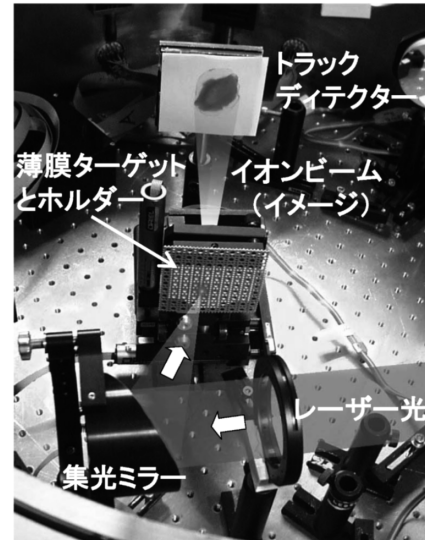


図2 レーザーイオン加速の初期の実験配置例（ミシガン大学）。主要な構成要素は、レーザービーム、レーザーを集光する光学素子、薄膜テープターゲットである。トラックディテクター（CR39）はイオンの照射痕をエッチング処理により可視化する高速粒子ディテクター。レーザービーム口径は5 cm 程度であり、非常にシンプル、コンパクトな装置構成である。

イオン（プロトン）が主であり、ターゲットの材質にはあまり依存しない。この水素原子は、ターゲット表面に自然に付着した水分や油分に含まれるものである。炭素などのより質量の大きいイオンを加速するためには、加熱して水分などをターゲット裏面から除去することが有効である。

- ③ 電荷分離による加速電界の形成： ターゲット裏面まで突き抜けた高速電子はターゲットから離れる一方で、慣性が高いターゲットを構成していたイオン類はそのままの位置にとどまるため、電荷の分離が起こり、またターゲットは正に帯電し、それにより静電界が生じる。この電界によりプロトンが加速される。

より詳しい解釈としては、プラズマ膨張モデルによる説明がなされている。プラズマ膨張モデルでは、レーザーの照射時間などにより、次に述べる等温的プラズマ膨張モデル (isothermal plasma expansion model)¹¹⁻¹⁴⁾ と断熱的プラズマ膨張モデル (adiabatic plasma expansion model)¹⁷⁾ が提案されている。

2. レーザーイオン源により加速されるイオンのエネルギー

レーザーイオン加速を応用するには、まずは十分な加速エネルギーを達成する必要がある。このための研究開発には、レーザー照射強度に対するイオンの加速エネルギーな

ど、まずはスケーリングを求めることが重要となる。これまでの実験結果により得られたプロトンの最大エネルギーのスケーリングや、加速モデルは、レーザー照射強度により以下の通りである。

2.1 低～中照射強度領域 ($<10^{19} \text{ W/cm}^2$)

筆者らは、レーザーパルス幅 55～400 フェムト秒、レーザー強度 $8.5 \times 10^{17} \sim 1.1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ の領域での実験に基づき、イオンエネルギーをポンデロモータティブ・ポテンシャルにより無次元化することで、レーザーパルス幅に対する最大イオンエネルギーの加速スケーリングを見いだしている¹⁴⁾。この中で、等温的プラズマ膨張モデルが比較的近い近似を与えることを報告している。等温的プラズマ膨張モデルでは、プラズマが膨張する際、電子のほうが速く膨張し、その電子に引き出されるような形でイオンが加速される。この際、レーザー照射の間は高速電子の温度が一定に保たれ、また、加速時間はレーザー照射時間と同じとする。このとき、プロトンの最大エネルギーは以下の式で表せる。

$$E_{\text{pmax}} = kT_h \ln^2(t/t_0 + \sqrt{t^2/t_0^2 + 1}) \quad (1)$$

ここで、 T_h は高速電子の等価温度、 k はボルツマン定数、 t はイオンの加速時間であり、筆者らの研究ではレーザーのパルス幅 (FWHM) と同じものとしたときに、実験に近い最大加速エネルギーの予測値が得られている。 t_0 は、加速領域をイオンがその音速で通過する時間である。一方、高速電子の等価温度は

$$T_h = mc^2(\sqrt{1 + I\lambda^2/1.37 \times 10^{18}} - 1) \quad (2)$$

で与えられることが知られている¹⁸⁾。したがって、最大のプロトンエネルギーはレーザー照射強度とレーザーパルス幅でスケーリングできることがわかる。ここで m は電子の静止質量、 c は光速、 I はレーザー照射強度 W/cm^2 、 λ はレーザー光の波長である。また、このスケーリングからレーザーパルス幅がある程度長いほうがよいことがわかった。これは、プロトンや他のイオンは電子に比べると質量が大きいので、すぐには加速されず、ある程度の加速時間が必要となるためである。このことから、レーザーイオン源用のレーザーとしては、数十フェムト秒程度までの短パルス発生が可能なチタンサファイアレーザーのみではなく、半導体レーザー励起が可能なため高効率、小型化が期待できる Yb 系レーザーなども有望であることがわかった。

さらに、Fuchs らは、パルス幅 0.15～10 ピコ秒、レーザー照射強度 $10^{18} \sim 6 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ の領域でのスケーリングを求めた¹⁵⁾。この領域でも、等温的プラズマ膨張モデル

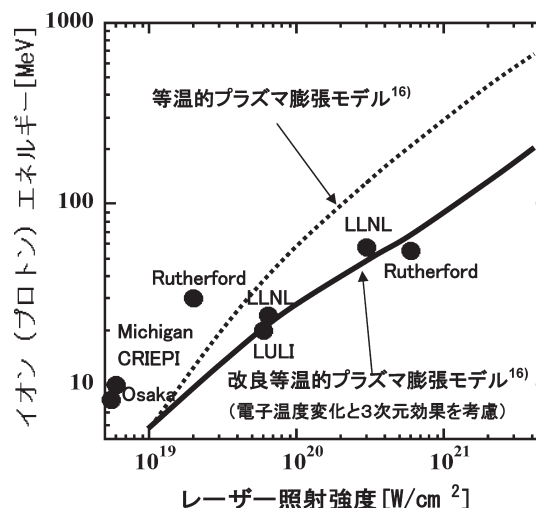


図3 レーザーイオン加速のスケーリング (等温的プラズマ膨張スキーム領域)。レーザー照射強度に対する最大イオン (プロトン) エネルギーの等温的プラズマ膨張スキームにおける加速のスケーリング。レーザー照射強度の大きい領域では、電子温度の変化と三次元的効果を考慮して修正された等温的プラズマ膨張モデルがよく実験結果と一致する¹⁶⁾。なお、本来のスケーリングにはレーザー波長の影響を考慮せねばならない。

は有効であり、加速時間 t をレーザーパルス幅の 1.3 倍とすると最大のプロトンエネルギーのよい近似を与えることを見いだしている。また、PIC (particle in cell) シミュレーションなどとの比較により、1.3 倍という数値の妥当性を示している。さらに、このスケーリングをもとにがん治療に必要な 200 MeV の陽子を発生させる条件として、パルス幅 0.5 ピコ秒、レーザー照射強度 $8 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ と推定している。これは、次に紹介する Robson らの高照射強度領域の実験に基づく推定値の数分の 1 である。

2.2 高照射強度領域 ($>10^{19} \text{ W/cm}^2$)

さらに最近、Robson らが、パルス幅 1～8 ピコ秒、レーザー照射強度 $4 \times 10^{19} \sim 6 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ の領域でスケーリングを求めている。プロトンの最大エネルギーとしては $4 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ では 10 MeV、 $6 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ では 55 MeV を達成している¹⁶⁾。この領域になると、実際に得られるプロトンエネルギーは等温的プラズマ膨張モデルで期待されるよりも低くなり、また、パルス幅への依存度がなくなるという結果を得ている。この結果をもとに、Robson らは改良した等温的プラズマ膨張モデルを提案し、図 3 に示すように高いレーザー照射強度領域において実験とのよい一致を得ている。ここでの加速モデルの改良点は次の 2 つである。① 加速は 2 つの段階からなり、最初の第 1 フェーズでは、電子温度がレーザーパルス幅程度の間は線形に上昇し、その後は断熱的に減少する。最初の段階ではターゲット

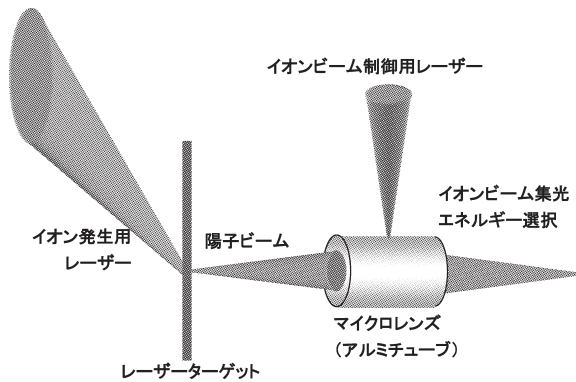


図4 円筒にレーザーを照射すると円筒の内側にプラズマが生成され、その電荷分布が陽子ビームに対してイオンレンズとして作用し、イオンを焦点の位置に集めることができる。円筒を照射するタイミングを調整することで、集める陽子のエネルギーを調整できる²²⁾。

ット裏面にプラズマの密度勾配が生じ、それにより加速効率が低下する。②等温的プラズマ膨張モデルは一次元のモデルであるが、実際にはターゲット裏面のプラズマは三次元的に膨張し、レーザー照射時間が長くなるとその影響は無視できなくなる。このため、第2フェーズにおける加速エネルギーの見積もりでは、プラズマのターゲット鉛直方向の膨張が、イオンの加速を行うプラズマシースの横方向の幅の計算値の2倍になったら終了するものとしている。

3. イオンビームの制御性

応用の際には、イオンエネルギーやイオン照射密度などを制御することが必要となる。また、プロトン以外の炭素イオンなどの加速も必要となる。ここでは、レーザーイオン加速におけるイオンビームの制御に関する研究状況を紹介する。

3.1 加速イオン種の制御—重イオンビームの発生と加速

粒子線によるがん治療などでは、炭素イオンなど、プロトン以外のイオンも用いられる。プロトン以外のイオンは、レーザーを照射する前にターゲットを加熱し、表面から水分を除去することで加速することが可能である⁹⁾。また、筆者らの経験では、ターゲットを加熱しなくともターゲット表面の油分付着が著しい場合には、陽子のみならず炭素イオンの加速も起こることを確認している¹⁹⁾。多価イオンでは、最大のエネルギーとしてパラジウムイオンでは225 MeVが報告されている²⁰⁾。

3.2 加速エネルギーの制御

ここまで紹介した例においては、ほとんどがエネルギースペクトル的にはボルツマン分布に近いものであった。実

際の応用では、エネルギーのそろった単色ビームが望まれる。イオンビームのエネルギーを制御する方法としては、以下の3つの方法が実験的に試みられている。

3.2.1 レーザー照射ターゲット構造による制御

レーザーを照射するターゲットを工夫することで、イオンのエネルギー分布に変化を与えることができる。Schwoererらは、5 μm 厚のチタン薄膜の裏面に20 μm 角のPMMA（メタクリル酸メチル樹脂）を0.5 μm 堆積させたものをレーザー照射ターゲットとして用い、 $3 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ の照射強度で1.2 MeVにピークを有するエネルギースペクトルを得ている²¹⁾。これは、加速領域をレーザー照射領域に対して制限することで、イオンのエネルギーの制御性を高めることができることを示している。また、Hegelichらは、ターゲットを加熱することで、エネルギー広がり17%で3 MeVの C^{5+} を得ている⁹⁾。

3.2.2 ゲート型プラズマレンズによる制御

Tonicanらは、図4に示すような小さな円筒を用いて、イオンエネルギーの選別と集光を行っている。円筒にレーザーを照射すると、円筒の内側にプラズマが生成され、その電荷分布が陽子に対してイオンレンズとして作用し、イオンを焦点の位置に集めることができる²²⁾。円筒を照射するタイミングを調整することで、集める陽子のエネルギーを調整できるというものである。この円筒は1ショットしか用いることができないが、イオンエネルギーの選別とイオン密度を上げることができる点が魅力である。

3.2.3 高周波電界を用いる方法

京都大学と原子力研究開発機構では、超短パルスレーザー照射により発生させたブロードなエネルギースペクトルの陽子ビームに高周波を印加することにより、エネルギー広がり減じた準単色陽子ビームの繰り返し発生に成功した²³⁾。これは、ブロードなエネルギースペクトルの陽子線に高周波電場をかけることにより、ある速度より速い陽子については減速させ、またそれより遅い速度の陽子は加速することで、速度、すなわち運動エネルギーをそろえる。これは、従来型の加速器との連結が可能であることを実証したものであり、実用上重要である。

3.3 イオンビーム発散角の制御

プロトンビームは、ターゲットの形状を工夫することで、ビームの発散角などを制御することができる。図5(a)に示すように、レーザーイオン加速では、イオンビームはターゲット裏面に対してほぼ垂直に加速されるため、裏面を凹面にすることでイオンビームを収束させることができる。また、図5(b)に示すように、レーザー照射ターゲットとなる薄膜を円筒の端面に取り付けると、レーザー

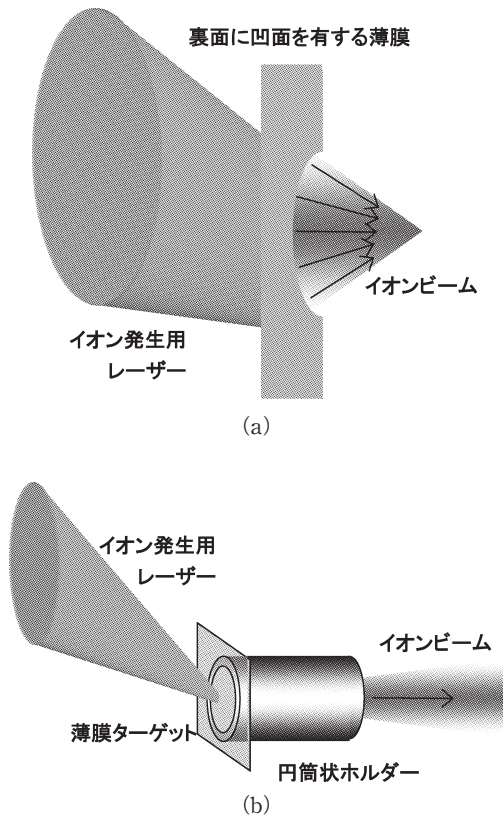


図5 ターゲット裏面の表面形状によるイオンビームの収束 (a) と、ターゲットと一体化したターゲットホルダー形状によるイオンビームの発散角の制御 (b)。

照射により薄膜および円筒から電子が追い出されることにより薄膜と円筒が高い電位になるため、円筒体が静電レンズとして作用する。この静電レンズにより、イオンビームの発散角を小さくすることができる。Kar らは、300 J、500～600 フェムト秒のレーザーを用い、 10^9 V/m の電界を発生させ、17 MeV 程度のエネルギーのプロトンビームの発散角を低減させている²⁴⁾。これは、先に述べた Tonican らと同じプラズマレンズによるものである。イオン加速とプラズマレンズの形成は同じレーザーパルスで行うために、エネルギー選別はできないが、レーザーシステムは簡単になる。

4. より長い時間のイオン加速によるイオン加速性能の向上

これまでのレーザーイオン加速に関する実験および理論的研究のほとんどは、プラズマシース内の電界による加速 (target normal sheath acceleration: TNSA)、すなわち等電子温度プラズマ膨張による加速によるものであった。前に述べたように、この場合には、イオンの最大エネルギーはレーザー照射強度とレーザーパルス幅により決定され

る。一方、河西らは、「断熱的加速」を提案している²⁵⁾。これは単に、等電子温度プラズマ膨張に対する断熱的プラズマ膨張過程を利用するものとは異なるようである。質量が大きいイオンの加速は、電子の加速に比べると時間がかかるため、電子の運動エネルギーからイオンへの運動エネルギーの変換効率が低いという問題がある。これに対して断熱的加速方式では、緩やかに加速することにより、このエネルギー変換効率を格段に向上させるという考え方である。

Yin らの提案する方法も、この「断熱的加速」の一種といえるかもしれない。Yin らは従来の TNSA に加えて、その後 enhanced TNSA と “laser breakout afterburner: BOA” と呼ぶところの、追加の加速を実現することでイオン加速エネルギーを1桁向上できるとするシミュレーション結果を報告している²⁶⁾。TNSA フェーズに続く enhanced TNSA フェーズでは、電子がレーザーにより十分加熱されて、ターゲットの厚さが表皮深さとはほぼ同じになる。結果として、減衰するレーザー光の電界によりターゲット内の電子をいっぺんに加熱し、それにより軸方向の電界強度がきわめて増加する。この enhanced TNSA フェーズはすぐに BOA に移行する。この段階では、レーザー光がターゲット裏面まで貫通し、また軸方向の電界ピークはイオンとともに移動する。電子は、レーザー光のポンドロモティブ力により相対論的電子ビームが斜め方向に生成される。この相対論的電子ビームは、相対論的 Buneman 不安定性とよばれる不安定性を引き起こしやすいとしている。相対論的 Buneman 不安定性は、イオンと共鳴する波を誘起するため、電子の運動エネルギーはイオンへと急激に移乗する。これにより、イオンの最大加速エネルギーが増すとともに加速効率も向上される。ただし、このスキームを実現するには、プレパルスの抑制と数十 nm 程度の超薄膜ターゲットが必要となるため、イオン数を稼ぐために高繰り返し運転が必要とされる応用には課題がある。なお、TNSA においては、ターゲット裏面に発生した磁界の電荷分離への寄与についても検討がなされている²⁷⁾。

5. 応用分野

陽子線や重イオン線に限らず、レーザーを用いた高エネルギー粒子生成は、他の発生方法に比べコンパクトで、時間的制御性にすぐれており、医療などさまざまな応用が期待されている^{1,2,5-7)} もの、まだ具体的な応用研究の例は少ない。レーザー陽子源に関しては、陽子の運動エネルギーとして 50 MeV 以上が達成されており^{8,9)}、エネルギー

だけをみれば眼科など一部の医療応用に可能なレベルに近づきつつある。レーザーイオン源の適用が期待される分野としては、粒子線がん治療など医療用のほかに、同位体生成、慣性核融合における高速点火用などのイオン源やイオンビームである。

本稿では、超短パルスレーザーを用いた陽子ビーム、および重イオンビームの発生の実状について、主として陽子とイオン加速のエネルギーについて紹介した。これは、最も期待される医療応用では、さらなるイオンエネルギーの向上が必要とされるためである。また、レーザーイオン加速技術の応用においては、イオンエネルギーへの変換効率としては3%程度の値も得られているが²⁸⁾、高速イオンのフラックスの向上も重要となる。イオンエネルギーとしては、プロトンに関しては医療応用への適用の目安となる200 MeVに近い58 MeVまでは、大型レーザーによってではあるがすでに達成されており、また、これまでの実験結果によるスケールリングにより、必要なレーザー条件もかなり明らかになってきた。ただし、ターゲットのプラズマ化の状態を変えることで、加速スキームも変わる可能性がある。ターゲットの薄膜化や新加速スキームなど、今後、さらなる粒子エネルギーの向上に関する発見があるであろうと期待される。

本稿で紹介した電中研の実験データについては、(財)電力中央研究所 大石祐嗣氏、名雪琢弥氏、藤井隆氏、A. Zhidkov 氏、東京工業大学大学院総合理工学研究科堀岡一彦教授、東京工業大学応用セラミックス研近藤建一教授、中村一隆準教授、ロシア科学アカデミー V. Yu. Bychenkov 教授、A. A. Andreev 教授らにご指導、ご協力をいただきましたことを感謝いたします。

文 献

- 1) N. Patel: "Accelerator physics: The plasma revolution," *Nature*, **449** (2007) 133-135.
- 2) K. Ledingham: "Desktop accelerators: Going up?" *Nat. Phys.*, **2** (2006) 11-12.
- 3) D. Strickland and G. Mourou: "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219-221.
- 4) D. Umstadter: "Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers," *Phys. Plasmas*, **8** (2001) 1774-1785.
- 5) J. A. Cobble, R. P. Johnson, T. E. Cowan and N. Renard-Le Galloudec: "High resolution laser-driven proton radiography," *J. Appl. Phys.*, **92** (2002) 1775-1779.
- 6) M. Roth, T. E. Cowan, M. H. Key, S. P. Hatchett, C. Brown, W. Fountain, J. Johnson, D. M. Pennington, R. A. Snavely, S. C. Wilks, K. Yasuike, H. Ruhl, F. Pegoraro, S. V. Bulanov, E. M. Campbell, M. D. Perry and H. Powell: "Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams," *Phys.*

- Rev. Lett.*, **86** (2001) 436-439.
- 7) K. Nemoto, A. Maksimchuk, S. Banerjee, K. Flippo, G. Mourou, D. Umstadter and V. Yu. Bychenkov: "Laser-triggered ion acceleration and table top isotope production," *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 595-597.
- 8) R. V. Snavely, M. H. Key, S. P. Hatchett, T. E. Cowan, M. Roth, T. W. Phillips, M. A. Stoyer, E. A. Henry, T. C. Sangster, M. S. Singh, S. C. Wilks, A. MacKinnon, A. Offenberger, D. M. Pennington, K. Yasuike, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, J. Johnson, M. D. Perry and E. M. Campbell: "Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids," *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000) 2945-2948.
- 9) B. M. Hegelich, B. J. Albright, J. Cobble, K. Flippo, S. Letzring, M. Paffett, H. Ruhl, J. Schreiber, R. K. Schulze and J. C. Fernández: "Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams," *Nature*, **439** (2006) 441-444.
- 10) T. Nayuki, T. Fujii, Y. Oishi, K. Takano, X. Wang, A. A. Andreev, K. Nemoto and K. Ueda: "Production of a MeV proton with 30 mJ laser energy by optimizing the focusing spot using a deformable mirror," *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 073305.
- 11) A. V. Gurevich, L. V. Pariiskaya and L. P. Pitaevskii: *Sov. Phys. JETP*, **22** (1966) 449-454.
- 12) Y. Kishimoto, K. Mima, T. Watanabe and K. Nishikawa: "Analysis of fast-ion velocity distributions in laser plasmas with a truncated Maxwellian velocity distribution of hot electrons," *Phys. Fluids*, **26** (1983) 2308-2315.
- 13) P. Mora: "Plasma expansion into a vacuum," *Phys. Rev. Lett.*, **90** (2003) 185002.
- 14) Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, Y. Takizawa, X. Wang, T. Yamazaki, K. Nemoto, T. Kayoi, T. Sekiya, K. Horioka, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura and K. Kondo: "Dependence on laser intensity and pulse duration in proton acceleration by irradiation of ultrashort laser pulses on a Cu foil target," *Phys. Plasmas*, **12** (2005) 073102.
- 15) J. Fuchs, P. Antici, E. d'Humières, E. Lefebvre, M. Borghesi, E. Brambrink, C. A. Cecchetti, M. Kaluza, V. Malka, M. Manclossi, S. Meyroneinc, P. Mora, J. Schreiber, T. Toncian, H. Pépin and P. Audebert: "Laser-driven proton scaling laws and new paths towards energy increase," *Nat. Phys.*, **2** (2006) 48-54.
- 16) L. Robson, P. T. Simpson, R. J. Clarke, K. W. D. Ledingham, F. Lindau, O. Lundh, T. McCanny, P. Mora, D. Neely, C.-G. Wahlström, M. Zepf and P. McKenna: "Scaling of proton acceleration driven by petawatt-laser—Plasma interactions," *Nat. Phys.*, **3** (2007) 58-62.
- 17) V. Yu. Bychenkov, V. N. Novikov, D. Batani and V. T. Tikhonchuk: "Ion acceleration in expanding multispecies plasmas," *Phys. Plasmas*, **11** (2004) 3242-3250.
- 18) S. C. Wilks, W. L. Kruer, M. Tabak and A. B. Langdon: "Absorption of ultra-intense laser pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 1383-1386.
- 19) T. Fujii, Y. Oishi, T. Nayuki, Y. Takizawa, K. Nemoto, T. Kayoi, K. Horioka, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura and K. Kondo: "MeV-order proton and carbon ion acceleration by irradiation of 60 fs TW laser pulses on thin copper tape," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 1524-1526.
- 20) B. M. Hegelich, B. Albright, P. Audebert, A. Blazevic, E. Brambrink, J. Cobble, T. Cowan, J. Fuchs, J. C. Gauthier, C. Gautier, M. Geissel, D. Habs, R. Johnson, S. Karsch, A. Kemp, S. Letzring, M. Roth, U. Schramm, J. Schreiber, K. J. Witte and J. C. Fernández: "Spectral properties of laser-accelerated mid-Z MeV/u ion beams," *Phys. Plasmas*, **12**

- (2005) 056314.
- 21) H. Schwoerer, S. Pfotenhauer, O. Jäckel, K.-U. Amthor, B. Liesfeld, W. Ziegler, R. Sauerbrey, K. W. D. Ledingham and T. Esirkepov: "Laser-plasma acceleration of quasi-mono-energetic protons from microstructured targets," *Nature*, **439** (2006) 445-448.
 - 22) T. Tönican, M. Borghesi, J. Fuchs, E. d'Humières, P. Antici, P. Audebert, E. Brambrink, C. A. Cecchetti, A. Pipahl, L. Romagnani and O. Willi: "Ultrafast laser-driven microlens to focus and energy-select mega-electron volt protons," *Science*, **312** (2006) 410-413.
 - 23) S. Nakamura, M. Ikegami, Y. Iwashita, T. Shirai, H. Tongu, H. Souda, H. Daido, M. Mori, M. Kado, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Nishiuchi, S. Orimo, Y. Hayashi, A. Yogo, A. S. Pirozhkov, S. V. Bulanov, T. Esirkepov, A. Nagashima, T. Kimura, T. Tajima, T. Takeuchi, A. Fukumi, Z. Li and A. Noda: "High-quality laser-produced proton beam realized by the application of a synchronous RF electric field," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) L717-L720.
 - 24) S. Kar, K. Markey, P. T. Simpson, C. Bellei, J. S. Green, S. R. Nagel, S. Kneip, D. C. Carroll, B. Dromey, L. Willingale, E. L. Clark, P. McKenna, Z. Najmudin, K. Krushelnick, P. Norreys, R. J. Clarke, D. Neely, M. Borghesi and M. Zepf: "Dynamic control of laser-produced proton beams," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 105004.
 - 25) 河西俊一, 大道博行, 田島俊樹: "光医療産業バレー拠点創出: 光医療研究連携センター", *レーザー研究*, **36** (2008) 440-446.
 - 26) L. Yin, B. J. Albright, B. M. Hegelich, K. J. Bowers, K. A. Flippo, T. J. T. Kwan and J. C. Fernández: "Monoenergetic and GeV ion acceleration from the laser breakout afterburner using ultrathin targets," *Phys. Plasmas*, **14** (2007) 056706.
 - 27) A. Yogo, H. Daido, S. V. Bulanov, K. Nemoto, Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, K. Ogura, S. Orimo, A. Sagisaka, J.-L. Ma, T. Zh. Esirkepov, M. Mori, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, S. Nakamura, A. Noda, H. Nagatomo, T. Kimura and T. Tajima: "Laser ion acceleration via control of the near-critical density target," *Phys. Rev. E*, **77** (2008) 016401.
 - 28) M. Nishiuchi, H. Daido, A. Yogo, S. Orimo, K. Ogura, J. Ma, A. Sagisaka, M. Mori, A. S. Pirozhkov, H. Kiriya, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, I. W. Choi, C. M. Kim, T. M. Jeong, T. J. Yu, J. H. Sung, S. K. Lee, N. Hafz, K. H. Pae, Y.-C. Noh, D.-K. Ko, J. Lee, Y. Oishi, K. Nemoto, H. Nagatomo, K. Nagai and H. Azuma: "Efficient production of a collimated MeV proton beam from a polyimide target driven by an intense femtosecond laser pulse," *Phys. Plasmas*, **15** (2008) 053104.

(2008 年 8 月 5 日受理)