

レーザー生成イオンビームの位相回転

野 田 章

Phase Rotation of Laser Produced Ion Beam

Akira NODA

In order to improve the energy characteristics of the laser produced ion beam, “Phase Rotation” scheme utilizing an RF electric field synchronized to the pulse laser has been applied. By application of acceleration and deceleration to the laser produced ions according to their phases arriving at the gap of the RF cavity located downstream of the laser-ion production target, energy peak with $\sim 7\%$ spread can be clearly created with good reproducibility and repetition rate up to 10 Hz. The peak energy is well controlled with the change of the RF phase relative to the pulse laser.

Key words: laser ion production, short pulse laser, mono-energetic peak, RF electric field, phase synchronization

レーザーにより生成されたプラズマ中の高強度場を用いて高効率の加速を実現する可能性に関しては、1979年のTajimaとDawson¹⁾による最初の提案以来、高エネルギーの実現に向けて世界各地で追求されてきたが、近年のchirped-pulse amplification (CPA)²⁾の発明によるパルスレーザー技術の目覚ましい発展を待ってはじめて現実味を帯びてきた。通常の高周波電場を用いる加速器で実現可能な加速勾配は数十 MeV/m のオーダーであり、現在世界中の協力で建設の検討が進められている international linear collider (ILC) は超伝導技術を駆使して、35 MeV/m の安定な実現を当面の技術課題としている。これに比して、レーザー・プラズマ加速では 100 GeV/m を超える加速勾配を実現しており、高エネルギー加速器の小型化に向けて大きな期待が寄せられるゆえんである。

ただここで見落とししてならないのは、加速器を実用に供する際には、ビームのエネルギーの増大と並んで、ビーム強度の確保および安定なビームの供給という要素が必要不可欠とされる点である。レーザー生成のビームは、レーザーとターゲット物質との相互作用という熱的過程で生成されるため、生成ビームのエネルギースペクトルはマクスウェル分布に従う熱的分布に従っており、100% のエネルギー広がりをも有していた。この特性がレーザー加速の実用化

のうえで大きな制約となっていたが、電子ビーム生成に関しては準単色ピークの形成が報告され³⁻⁶⁾、イオンビームに関しても同様の報告がなされるに至っている⁷⁻⁹⁾。しかしながら、これらはいずれも 100% の再現性を実現するには至っておらず、またイオンに関するこれらの手法では 10 Hz 程度の繰り返しも不可能と考えられる。こうした状況を克服し、十分な再現性と実用化に向けて許容可能な程度の繰り返し (~ 10 Hz) でレーザー生成イオンビームにエネルギーピークを形成する手法として「位相回転」法を提案し¹⁰⁾、最近、日本原子力研究機構・関西光科学研究所(原研・関西研)との共同研究によりその実証に成功しているのものでその概要を紹介したい。

1. 位相回転の原理

ここで紹介する「位相回転」の手法は、パルスレーザー(パルス幅 ~ 100 フェムト秒以下)の標的への照射で生成されたイオンビームが標的から放出されるまでの緩和過程を考慮しても、1ピコ秒以下の短時間で放出されることに注目し、図1に示したように、標的の下流に設置した高周波空洞のギャップにイオンが到達する時間がイオンのエネルギーによって異なることを利用して、中心エネルギーより高いエネルギーのイオンは減速し、低いエネルギーのイオンは加速して、中心エネルギーにピークの形成を図るも

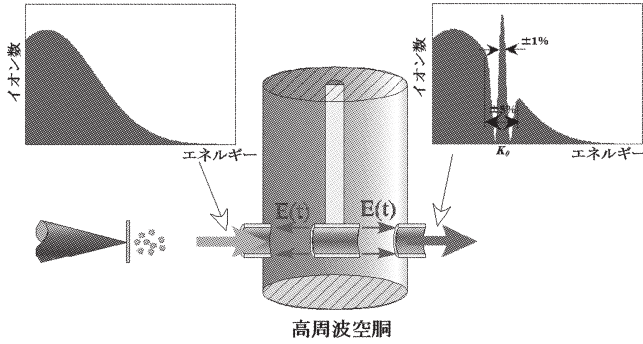


図1 位相回転の原理。

のである。その際、高周波電場の周波数として、パルスレーザーの発振のマスターオシレーターの周波数を採用した。この周波数としては80 MHz 近辺の周波数を使用するレーザーが多いので、上記の1ピコ秒以下のビーム発生時間幅は高周波電場の1周期に比して十分短い。「位相回転」とは縦方向位相空間内でのビーム構成粒子の回転を行うため、こうよばれており、既存の加速器中でビームのエネルギー広がり抑制や、逆にエネルギー広がり増大は許容したビームの時間幅の縮減（ビームバンチング）のためによく使用されている。この手法をレーザー生成イオンビームに適用した点がユニークな点である。パルスレーザーのマスターオシレーターからトリガー信号をとり、高周波空胴の電力増幅器との間に設置した移相器により、パルスレーザーと高周波電場との相対位相を自由に設定した一定値に保つ回路系の構築を行った。

2. 位相回転の実証実験

前述のような位相回転の手法を実際のレーザー生成イオンに適用し、エネルギーピークの形成を実証する実験を原研・関西研のCPAに基づくパルスレーザー J-LITEX および J-KAREN を用いて実施した。図2に J-LITEX での実験のセットアップを示した¹¹⁾。パルス幅150フェムト秒、パルスあたりエネルギー350 mJ、ピークパワー2.3 TW のチタンサファイアレーザーを焦点距離645.99 mm の軸外し放物面鏡で厚さ3~5 μm のチタン標的に11×15 μm² のサイズに集光し、標的の法線に対して45度の方向から照射し、3×10¹⁷ W/cm² のレーザー密度を実現している（レーザーパワーの23.5%がこのサイズ中に集中している）。この実験では図2のように、ターゲット下流1080 mm の位置に位相回転用高周波空胴の最初の加速ギャップが位置するセットアップとなっている。製作した位相回転用高周波空胴は、図3に示したような2ギャップを有する1/4波長共振型空胴であり、ある瞬間での2つのギャップの電場は180度位相がずれているモードが立っている。

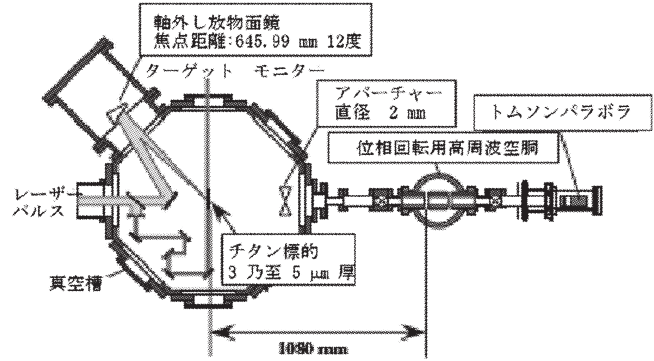


図2 原研・関西研のパルスレーザー J-LITEX を用いた位相回転によるエネルギーピーク形成の実証実験のセットアップ。

これら2つのギャップの中心間の距離 d は、中心エネルギー (2 MeV/u を想定) のイオンが高周波電場の半周期で進む距離に等しく設定されている ($d = \frac{v_0}{2f}$: v_0 および f はそれぞれ中心エネルギーをもつイオンの速度および高周波位相回転空胴の周波数)。位相回転空胴の2つのギャップ間 ($[x_1, x_2]$ および $[x_3, x_4]$) の電場によるイオンのエネルギーゲイン ΔW は、

$$\Delta W = eE_0 \left\{ \int_{x_1}^{x_2} \cos(\omega t + \phi_0) dx + \int_{x_3}^{x_4} \cos[\omega(t + \Delta t) + \phi_0 + \pi] dx \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここに e , E_0 , ω , ϕ_0 および Δt は電気素量、高周波電場の振幅、高周波電場の角周波数、初期位相および中心エネルギーのイオンが2つのギャップの中心間を飛行する時間、をそれぞれ表している。第2項の位相に π が付け加わっているのは、前述のように2つのギャップ間の電場の位相が180度ずれたモードが立っている状況に対応している。図1の原理図に示したような位相回転によるエネルギーピークの形成のためには、中心エネルギーのイオンは高周波電場での加・減速を受けず、遅く到達する低エネルギーのイオンは加速、早く到達する高エネルギーのイオンは減速される必要があるため、高周波電場は、イオンが位相回転空胴のギャップの間を通過する時点でその位相が負から0を通過して正に変化することが必要となる。この条件はパルスレーザーと位相回転空胴に印加される高周波電場の位相に差がない場合には、標的から位相回転空胴の最初のギャップの間までの距離を L とした場合、

$$v_0 = \frac{L f}{m} \quad (m \text{ は任意の整数}) \quad (2)$$

なる関係で記述できる。図2のセットアップにおいて、標的として3 μm 厚のチタンホイルを用いた場合の J-LITEX を用いて行った、レーザー生成陽子ビームの「位

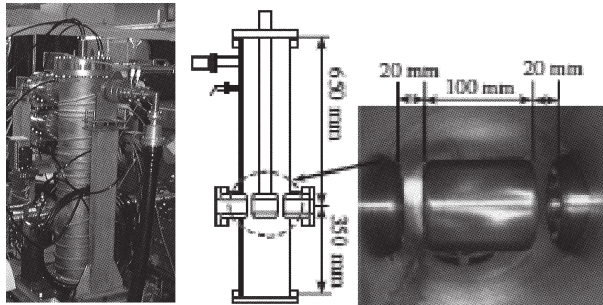


図3 1/4波長共振タイプの位相回転用高周波加速空洞。2つのギャップを有し、中心エネルギーのイオンがこれらのギャップ間を通過する時間に高周波の位相が180度変化する設計となっている。

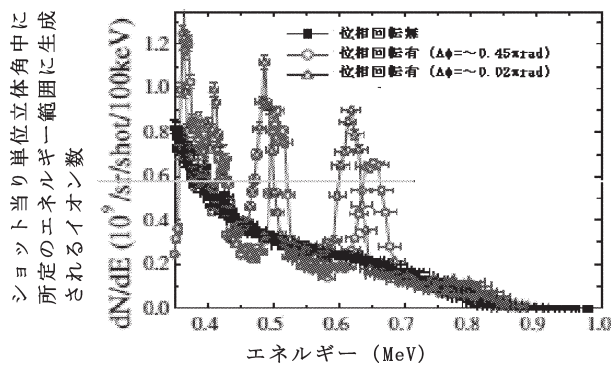


図4 位相回転の有無によるレーザー生成イオンのエネルギースペクトルの差異 $\Delta\phi$ はパルスレーザーと位相回転空洞の高周波電場の位相差。

「位相回転」実験の結果を図4に示した。図から、パルスレーザーと位相回転空洞の電場の位相がほぼ等しい ($\Delta\phi = 0.02\pi\text{rad}$) 場合には396 keV, 489 keV および619 keVの位置にエネルギーピークが形成されていることがわかるが、これらは式(2)において整数値 m が10, 9, 8の場合に対応している¹¹⁾。図4から、パルスレーザーと位相回転用電場の相対位相を変化させるとピークの位置が変化することがわかるが、図5にこの相対位相を変化させた場合のピークエネルギーの位置をチタン標的の厚さが3 μm および5 μm の場合について示した¹¹⁾。図から、相対位相を制御することにより、エネルギーピークの位置が自由に変化できることがみとれる。

以上述べたJ-LITEXでの実験結果は数百 keVでのエネルギーピーク形成にとどまっているが、その後よりレーザーパワーの大きいJ-KARENを用いた位相回転実験を平成18, 19両年度に実施し、ピークのエネルギーの1.4 MeV近辺までの増大とよりシャープなピークの形成を達成している。また、こうした「位相回転」の手法を2ギャップからマルチギャップに発展させ、直接がん治療が可能なエネルギー領域でピーク形成を達成して準単色化を実現

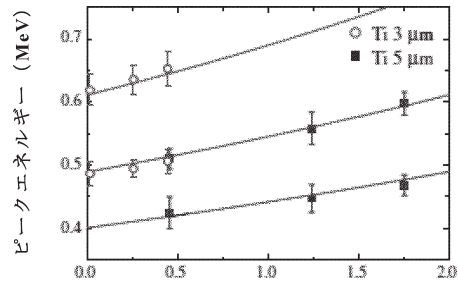


図5 位相回転用高周波電場のパルスレーザーに対する相対位相に依存するレーザー生成陽子のエネルギーピークの位置。

するアイデアを提案し、特許出願を行っている¹²⁾。

ここで述べた研究は文部科学省の「先進小型加速器開発のための要素技術開発」プロジェクトにより、京都大学化学研究所と原研・関西研および放射線医学総合研究所との共同研究で遂行した。大道博行氏をはじめとする共同研究者の方々に深甚なる謝意を表したい。また、この研究の遂行に際して京都大学21世紀COE「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」からの支援もいただいた。ここに記して謝意を表したい。

文 献

- 1) T. Tajima *et al.*: "Laser electron accelerator," *Phys. Rev. Lett.*, **43** (1979) 267-270.
- 2) D. Strickland *et al.*: "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219-221.
- 3) S. P. D. Mangles *et al.*: "Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions," *Nature*, **431** (2004) 535-538.
- 4) C. G. R. Geddes *et al.*: "High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding," *Nature*, **431** (2004) 538-541.
- 5) J. Faure *et al.*: "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams," *Nature*, **431** (2004) 541-544.
- 6) E. Miura *et al.*: "Demonstration of quasi-monoenergetic electron-beam generation in laser-driven plasma acceleration," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 251501.
- 7) H. Schwoerer *et al.*: "Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets," *Nature*, **439** (2006) 445-448.
- 8) M. Dunne: "Laser-driven particle accelerators," *Science*, **312** (2006) 374-376.
- 9) T. Toncian *et al.*: "Ultrafast laser-driven microlens to focus and energy-select mega-electron volt protons," *Science*, **312** (2006) 410-413.
- 10) A. Noda *et al.*: "Phase rotation scheme of laser-produced ions for reduction of the energy spread," *Laser Phys.*, **16** (2006) 647-653.
- 11) S. Nakamura *et al.*: "High-quality laser-produced proton beam realized by the application of a synchronous RF electric field," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, No. 29 (2007) L717-L720.
- 12) 野田 章ほか：特願2007-134132.

(2008年5月22日受理)