

# Energetic ion acceleration using ultra short high intensity laser

電子物性工学専攻 植田研究室 名雪琢弥  
2005年3月

陽電子放出断層撮影 (Positron Emission Tomography, PET) に応用できる 1~10MeV クラスのレーザーイオン源[1]を開発することを目的とし、テーブルトップサイズの高繰り返し低エネルギーパルスレーザー装置[2,3]の使用を前提とした装置開発を行った。最重要研究課題は繰り返し運転可能な膜厚 10 $\mu$ m 以下[4]のテーブターゲット供給装置の開発と前置増幅器レベルで達成可能な 30mJ のレーザーエネルギーでも 10<sup>18</sup>W/cm<sup>2</sup> 以上の強度[5,6]を実現する集光光学系の開発の二つであるが、最終的な研究課題はこの二つを組み合わせることで実際に MeV クラスのプロトン生成を実現することにある。

最重要課題であるテーブターゲット駆動装置に関しては、厚さ 5 $\mu$ m の薄膜を扱える実用的なテーブターゲット駆動装置を初めて開発した[7,8]。本ターゲット駆動装置を用いて高エネルギーイオンを発生させた結果、相対論的電子ビームによってターゲット裏面側に形成される強い静電シースに基づくレーザープラズマ加速機構[9,10]と合致する知見を得た。プロトンを効率よく加速させる場合、化学組成に水素を含み、質量密度が小さくても引張り強度の大きいポリイミドが、今回用いた材料の中ではテーブターゲットに適していることを明らかにした (図 1)。

もう一つの最重要課題である集光光学系に関しては、9本の電歪素子を 3 $\times$ 3 に配置したデフォーダブルミラー、および大域的な評価関数を用いて最適解を探索する遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を適用したミラー制御システムを開発した。評価関数はレーザー集光強度計測に依るものと、ターゲットから発生する X 線計測に依るものの二種類を提案した。

$$fitness_{CCD} \equiv \frac{I_{spot} / I_{total}}{S_{spot}} \quad (1)$$

$$fitness_{XPD} \equiv V_{XPD} / V_{PD} \quad (2)$$

式(1)において  $S_{spot}$ ,  $I_{spot}$  はメインスポット領域の面積とその領域におけるレーザー強度の面積分を表す。また  $I_{total}$  は CCD 全領域におけるレーザー強度の面積分で、ターゲットに照射した全レーザーエネルギーに相当する。従って集光スポットが明るく、かつ小さくなるほ

ど  $fitness_{CCD}$  は増加する。一方、式(2)では XPD 電圧波形の最大振幅 ( peak-to-valley ) を  $V_{XPD}$  として、レーザー散乱光  $V_{PD}$  で規格化した値を適応度とした。前者による制御の結果、回折限界である半値全巾  $2\mu\text{m}$  のスポットサイズを得る手法を確立し、レーザーエネルギーが  $30\text{mJ}$  でも相対論的電子領域に到達する集光強度  $9 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$  を実現した ( 図 2 )。

最後に、開発したデフォーダブルミラー制御システムとテーブルターゲット駆動装置を用いたプロトン加速を行い、レーザーエネルギーが  $30\text{mJ}$  でも最大エネルギー  $1\text{MeV}$  クラスのプロトンを  $10^6/\text{MeV}/\text{shot}$  のフラックスで生成できることを初めて明らかにした。同時に、評価関数としては *in situ* 計測の可能な X 線ピーク信号を用いる制御方法が、熱レンズ効果など運転条件に応じて複雑に変化する波面歪の補正に有効であることを示した ( 図 3 )。本成果の位置付けを示すため、観測されたプロトン最大エネルギーとレーザーエネルギーの関係を、最近の研究成果と比較し、図 4 にまとめる。このうち  $1\text{J}$  を越えるレーザーシステムは極めて巨大であり、コンパクトなテーブルトップサイズのレーザー装置を用いた実用化とは研究の方向性が異なる。 $1\text{J}$  以下の範囲で比較すると、本研究で得た  $30\text{mJ}$  の成果は、前置増幅器レベルのレーザーエネルギーでも  $1\text{MeV}$  クラスの高エネルギープロトンが得られることを実証したものであり、むしろ世界最小のレーザーエネルギーで高エネルギープロトンを発生させたことよりも、技術的にレーザーシステムを小型化できる可能性を示唆したことのほうが工学的価値は遥かに大きい。同時に、本レーザーシステムの繰り返し周波数が  $10\text{Hz}$  であることを踏まえれば、 $10^6/\text{MeV}/\text{shot}$  のプロトンフラックスは陽電子放出核種の一つである  $^{11}\text{C}$  の製造に必要な粒子数に到達していることが示される。

今後の実用化としては、ターゲットを重水素に置換することで  $1\text{MeV}$  クラスの重水素加速が可能性として考えられる。また本実験では、ターゲットの位置決め誤差と Rayleigh 長が同程度となる条件でも  $10^6/\text{MeV}/\text{shot}$  のプロトンフラックスが得られており、位置決め精度の向上によって更なる高効率化が期待できる。図 4 の点線で示したエネルギーレベルは前置増幅器のみで得られる上限値であるが、再生増幅器の繰り返し周波数を増やすことでフラックスを補う手段も考えられる。以上、本成果によって今後の実用化の可能性が様々に考えられ、当初の目的である PET に応用できる  $\text{MeV}$  クラスのレーザーイオン源開発に成功したものと結論する。

## 参考文献

- [1] S. Fritzler, V. Malka, G. Grillon, J. P. Rousseau, and F. Burgy, Appl. Phys. Lett. **83**, 3039-3041 (2003).
- [2] P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, and G. Mourou, IEEE J. Quantum Electron. **24**, 398-403 (1988).
- [3] G. Mourou, Appl. Phys. B **65**, 205-211 (1997).

- [4] A. J. Mackinnon, Y. Sentoku, P. K. Patel, D. W. Price, S. Hatchett, M. H. Key, C. Andersen, R. Snavely, and R. R. Freeman, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 215006-215009 (2002).
- [5] D. Umstadter, *Phys. Plasmas* **8**, 1774-1785 (2001).
- [6] D. Umstadter, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, R151-R165 (2003).
- [7] T. Nayuki, Y. Oishi, T. Fujii, K. Nemoto, T. Kayoiji, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, K. Kondo, and K. Ueda, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 3293-3296 (2003).
- [8] T. Fujii, Y. Oishi, T. Nayuki, Y. Takizawa, K. Nemoto, T. Kayoiji, K. Horioka, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, and K. Kondo, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1524-1526 (2003).
- [9] S. P. Hatchett, C. G. Brown, T. E. Cowan, E. A. Henry, J. S. Johnson, M. H. Key, J. A. Koch, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, R. W. Lee, A. J. Mackinnon, D. M. Pennington, M. D. Perry, T. W. Phillips, M. Roth, T. C. Sangster, M. S. Singh, R. A. Snavely, M. A. Stoyer, S. C. Wilks, and K. Yasuike, *Phys. Plasmas* **7**, 2076-2082 (2000).
- [10] R. A. 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, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2945-2948 (2000).
- [11] A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo, D. Umstadter, and V. Y. Bychenkov, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4108-4111 (2000).
- [12] K. Nemoto, A. Maksimchuk, S. Banerjee, K. Flippo, G. Mourou, and D. Umstadter, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 595-597 (2001).
- [13] I. Spencer, K. W. D. Ledingham, P. McKenna, T. McCanny, R. P. Singhal, P. S. Foster, D. Neely, A. J. Langley, E. J. Divall, C. J. Hooker, R. J. Clarke, P. A. Norreys, E. L. Clark, K. Krushelnick, and J. R. Davies, *Phys. Rev. E* **67**, 46402-46406 (2003).

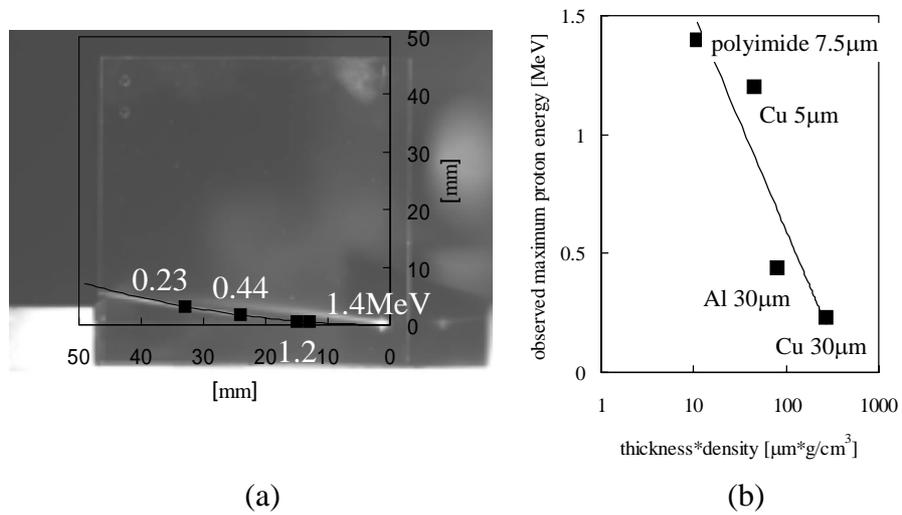


Figure 1 (a) Thomson mass spectrogram of energetic protons fitted with calculation. Positions of the etched tracks, which correspond to the observed maximum proton energies using four kinds of materials, are plotted as squares. (b) Diagram between mass density and observed maximum proton energy.

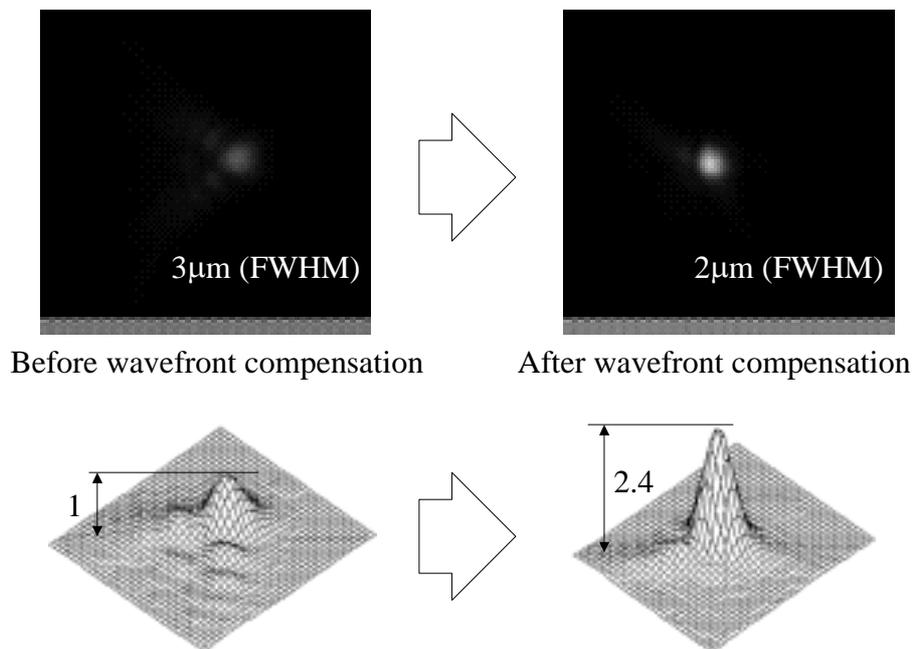
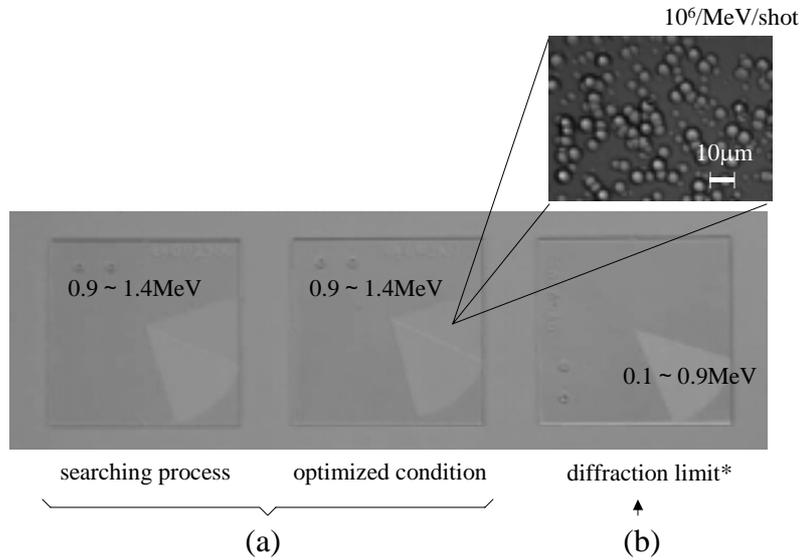


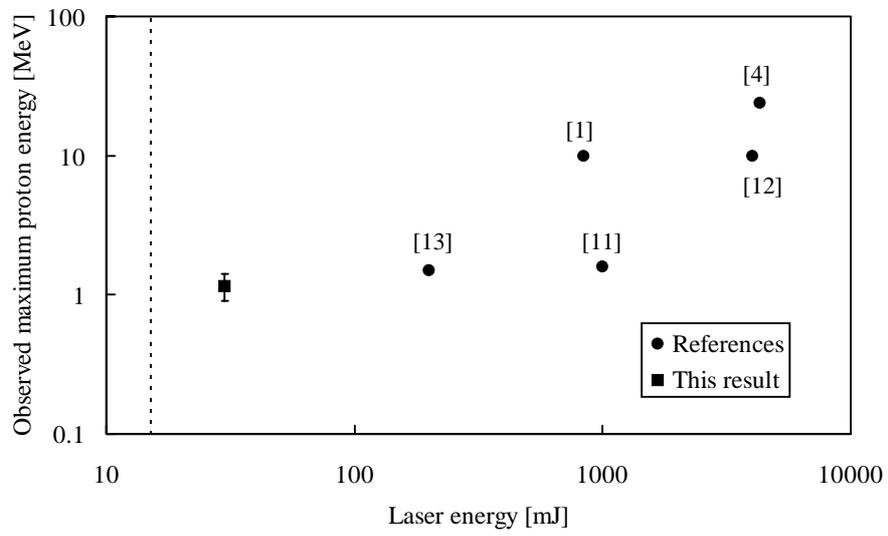
Figure 2 Measured focusing profiles before / after wavefront compensation using a deformable mirror

controlled by Genetic Algorithm (GA). GA sized the focusing spot down to a diffraction limit with a low gain condition of the power amplifier.



\* with a low gain condition of the power amplifier

☒ 3 Etched tracks on three CR39's, which were equipped with filter sets consisting of seven copper films with different thickness. (a) Etched tracks accumulated for all trials in a searching process showed 1MeV energetic protons with a flux of  $10^6/\text{MeV}/\text{shot}$  were observed using laser pulses of only 30mJ energy. (b) Protons of less than 0.9MeV were observed using the same laser pulses after sizing the focusing spot down to a diffraction limit with a low gain condition of the power amplifier.



⊠ 4 Diagram between laser energy and observed maximum proton energy. This result is plotted as a square, whereas references are plotted as circles. The dashed line shows an upper limit of output energy of a preamplifier.