

レーザー駆動イオン加速機構における高品質イオンビーム生成

HIGH QUALITY ION BEAM GENERATION IN LASER-DRIVEN ION ACCELERATION MECHANISM

宮武 立彦^{#,A,B)}, 小島 完興^{B)}, 榊 泰直^{A,B)}, チン タンフン^{B)}, 畑 昌育^{B)}, 錦野 将元^{B)}, 西内 満美子^{B)}, 渡辺 幸信^{A)}, 岩田 佳之^{C)}, 白井 敏之^{C)}, 神門 正城^{B)}, 近藤 公伯^{B)}

Tatsuhiko Miyatake^{#,A,B)}, Sadaoki Kojima^{B)}, Hironao Sakaki^{A,B)}, Thanh-Hung Dinh^{B)}, Masayasu Hata^{B)}, Masaharu Nishikino^{B)}, Mamiko Nishiuchi^{B)}, Yukinobu Watanabe^{A)}, Yoshiyuki Iwata^{C)}, Toshiyuki Shirai^{C)}, Masaki Kando^{B)},
Kiminori Kondo^{B)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} Kansai Institute for Photon Science (KPSI), National Institutes for Quantum Science and Technology

^{C)} National Institute of Radiological Sciences (NIRS), National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

The ion beam generated in a laser-driven ion acceleration mechanism has ultra-low emittance and short pulse characteristics. This high beam quality is due to the characteristics of the acceleration mechanism. However, the correlation between the laser irradiation conditions and the beam quality of laser-accelerated ion beams is not well understood. A highly accurate emittance measurement method is required to control the beam quality for the characterization experiment. In this study, we optimize the emittance measurement method using the slit method to diagnose the ultra-low emittance characteristics of laser-accelerated ion beams with high accuracy. The measurement system was optimized using the Monte Carlo code PHITS, and these conditions were analyzed to obtain measurement accuracy for extremely low emittance of laser-accelerated ion beams.

1. はじめに

レーザープラズマによるイオン加速機構として最もよく知られている TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構[1,2]では、超高強度レーザーを薄膜ターゲットに集光し、電子を相対論レベルまで加速させることで、ターゲット裏面に \sim TV/m の電荷分離場勾配を発生させる。この電界によって、ターゲット裏面のイオンは、数 μm という非常に短い距離で数 MeV の運動エネルギーにまで加速される。TNSA 機構で生成されるイオンビームは、既存の加速器によって生成されるイオンビームと比較して、エミッタンス、バンチ幅などの特性が極めて優れていると言われている。10 MeV の陽子ビーム加速において、横方向のエミッタンスが 0.004 mm-mrad という計測結果も得られており、これは既存の RF 加速器よりも 2 桁ほど優れた値である[3]。これらの特徴から、本加速機構は粒子加速器の小型化だけでなく、これまでの加速器では達成できないような超高品質なビーム供給を行うことで、FLASH 治療、PIXE を含む物性実験などへの応用も期待される[4,5]。上記のようなレーザー加速器の開発では、高品質なビーム生成が重要な研究要素の一つであるが、高品質なイオンビームを生成するためのレーザー照射条件の最適化は、十分に行われていない。

そこで、本研究では、一般的な横方向エミッタンス診断のために、スリットで取り出したビームレットの空間プロファイルから横方向の運動量広がりを求める、スリット法によってレーザー加速イオンビームのビーム特性診断を行った。レーザーで加速されたイオンは、イオンビームが

マイクロメートルスケールの小さな線源で生成されるため、空間的なビームレットプロファイルが小さい。これまでの研究では、この空間プロファイルのわずかな変化を診断するために、マイクロメートルの空間分解能を持つ、ラジオクロミックフィルム(RCF)を用いた二次元線量計の計測システムを開発した[6]。この計測システムと最適化されたスリット計測法によって、レーザー加速イオンの高精度な計測手法の開発を行う。

2. スリット法によるエミッタンス計測体系

レーザー加速イオンビームは、数 μm から数 10 μm の小さな発生源からイオンビームが発生し、かつ発散角を持って発生するために、位相空間分布は Fig. 1(a)のような発散型の分布を示す。このような位相空間分布を持つビームを計測する際、Fig. 1(a)の x'_{int} 及び x_{max} の RMS 値を計測することにより、Eq. 1 で rms エミッタンスを見積もることが可能である。そのため、位相空間の x'_{int} の RMS 値をいかに精度よく計測することができるかが、エミッタンス値の計測精度を決定する。本研究では、加速器ビームのエミッタンス診断に一般的に用いられる、スリット法を採用し、計測体系の最適化を行うことで、エミッタンス計測精度を得られる方法に関して検討した。

Figure 1(b, c)に、レーザー加速イオンのエミッタンス・粒子数特性計測体系の概要を示す。Figure 1(b)のスリット計測では、位相空間の x'_{int} を計測する。Figure 1(c)のプロファイル計測では、位相空間の x_{max} の RMS 値、及びプロファイルから得られるエネルギー毎の粒子数を計測する。

[#] miyatake.tatsuhiko@qst.go.jp

$$\varepsilon_{rms} \cong x'_{int} x_{max} \quad (1)$$

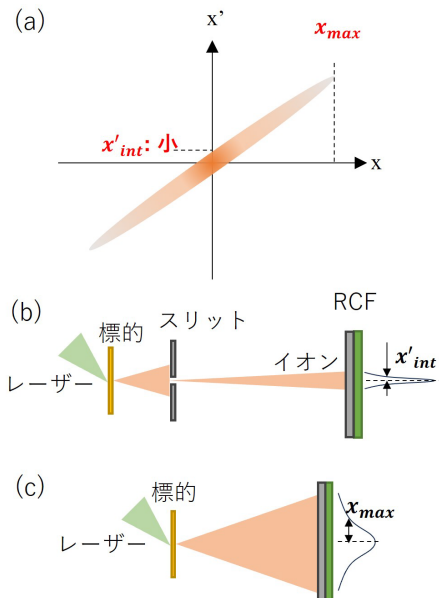


Figure 1: (a) Overview of the phase-space distribution characteristics of laser-accelerated ion beams. (b) Slit measurement system. (c) Profile measurement system.

また、レーザー加速イオンは、連続的なエネルギー分布を有するため、検出器はエネルギー分解が可能な2次元線量計を用いる必要がある。そこで、RCFを線量計に選定した。これは、照射された線量に応じて、有感層が着色されるフィルム型の線量計である。1~2 MeV程度のプロトンビームの診断を想定するため、厚い保護層がなく、直接有感層に照射可能なGafchromic HD-V2を選定した。HD-V2は12 μm 厚の薄い有感層を有しており、HD-V2手前のエネルギー選択フィルタの厚みを調整することによって、ブラッグピーク特性から、観測するエネルギーを制限することが可能である。フィルタごとに計測されるエネルギーは、モンテカルロコードPHITSによって計算し、エネルギー毎のビーム特性計測を可能にする。

3. 計測体系の最適化

計測体系の最適化には、任意の位相空間分布を入力し、輸送計算が可能なモンテカルロコードPHITSを用いた。最適化の条件は、1 MeVのプロトンビームにおいて、規格化RMSエミッタンスが0.01 π -mm-mrad程度の時の幾何学的な計測誤差を5%以下に抑えることとし、解析を行った。スリット計測において、計測体系で最も精度に影響を与える条件は、スリット幅であることが分かった。このスリット幅を最適化することによって、位相空間分布における x'_{int} の値を正しく評価することが可能になる。シミュレーションでは、ビームの発生点からスリットまでの位置を10 mmとし、スリット幅は5~300 μm の幅をそれぞれ与え、体系を構築した。イオンビームは、1 MeVのプロトンビームを、規格化rmsエミッタンス0.0115 π -mm-mrad(rms発散角 $=\pm 25$ mrad)で入力した。このシミュレーション結果から x'_{int} を計算し、それぞれのスリット幅で得られるエミッタンスの値を評価した。

その結果、Fig. 2に示されるように、スリット幅の縮小に

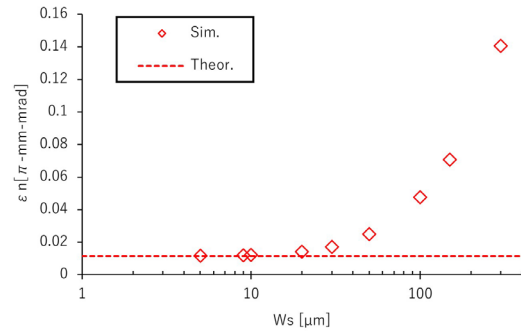


Figure 2: Relationship between the slit width and the emittance value obtained when diagnosing a beam with $\epsilon_{n,rms} \sim 0.01 \pi$ -mm-mrad by the slit method.

伴い、計測精度の向上がみられる。0.01 π -mm-mrad程度の極めて小さなエミッタンスの運動量広がり計測の際、10 μm 未満のスリット幅を選択することで誤差5%以内の精度を得られることが観測された。先行研究でレーザー加速プロトンの計測にペーパーポットを使用した実験[7]では、 $\phi = 150 \mu\text{m}$ が使用されていたが、本シミュレーションで150 μm 幅のスリットを使用したところ、513%もエミッタンスを過大評価しており、低エミッタンスビームの診断にスリット幅の最適化が重要であることがわかる。

4. まとめ

レーザー駆動イオン加速における、極めて小さなエミッタンス特性を高精度に診断するための手法として、スリット法を検討し、その計測体系の最適化を行った。スリット幅の最適化によって、0.01 π -mm-mrad程度の規格化rmsエミッタンスを有するプロトンビームの計測精度は、誤差5%以下に抑えることが可能になる。

謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1の支援を受けて実施された。本研究は、JSPS 科研費JP21J22132の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] E. L. Clark *et al.*, “Measurements of energetic proton transport through magnetized plasma from intense laser interactions with solids”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 1654, (2000).
- [2] R. A. Snavely *et al.*, “Intense high-energy proton beams from Petawatt-Laser irradiation of solids”, *Phys. Rev. Lett.* 85, 2945 (2000).
- [3] T. E. Cowan *et al.*, “Ultralow emittance, multi-MeV proton beams from a laser virtual-cathode plasma accelerator”, *Phys. Rev. Lett.* 92, 204801, (2004).
- [4] F. Kroll *et al.*, “Tumour irradiation in mice with a laser-accelerated proton beam”, *Nat. Phys.* 18(3), 316–322 (2022).
- [5] M. Barberio and P. Antici, “Laser-PIXE using laser-accelerated proton beams”, *Sci. Rep.* 9(1), 6855 (2019).
- [6] T. Miyatake *et al.*, “Evaluation of the spatial resolution of Gafchromic™ HD-V2 radiochromic film characterized by the modulation transfer function”, *AIP Advances* 13, 085303 (2023).
- [7] M. J. Wu *et al.*, “Emittance measurement along transport beam line for laser driven protons”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, 031302 (2020)