

## レーザー駆動イオン加速機構におけるビームエミッタンス評価

### PARAMETER EVALUATION OF AN ION BEAM EMITTANCE IN LASER-DRIVEN ION ACCELERATION MECHANISM

宮武 立彦<sup>A,B)</sup>, 小島 完興<sup>B)</sup>, 榎 泰直<sup>A,B)</sup>, 竹本 伊吹<sup>A,B)</sup>, 近藤 康太郎<sup>B)</sup>, 西内 満美子<sup>B)</sup>, ゼン タンフン<sup>B)</sup>, 畑 昌育<sup>B)</sup>, 錦野 将元<sup>B)</sup>, 渡辺 幸信<sup>A)</sup>, 岩田 佳之<sup>C)</sup>, 白井 敏之<sup>C)</sup>, 神門 正城<sup>B)</sup>, 近藤 公伯<sup>B)</sup>, Tatsuhiko Miyatake<sup>#A,B)</sup>, Sadaoki Kojima<sup>B)</sup>, Hironao Sakaki<sup>A,B)</sup>, Ibuki Takemoto<sup>A,B)</sup>, Kotaro Kondo<sup>B)</sup>, Mamiko Nishiuchi<sup>B)</sup>, Thanh-Hung Dinh<sup>B)</sup>, Masayasu Hata<sup>B)</sup>, Masaharu Nishikino<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>C)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>C)</sup>, Masaki Kando<sup>B)</sup>, Kiminori Kondo<sup>B)</sup>, Yukinobu Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Kyushu University

<sup>B)</sup> Kansai Photon Science Institute (KPSI), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences (NIRS), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

#### Abstract

The TNSA mechanism can produce ion beams with low emittance and high peak current due to the characteristics of its acceleration mechanism. Therefore, this ion beam is being studied as a novel accelerator for applications such as PIXE analysis and FLASH therapy. We study how to control the beam quality with the laser-plasma interaction. Here, we performed laser-plasma simulations using a 2D Particle-in-Cell code to analyze transverse emittance, current and brightness. In this simulation, we studied the effects of laser spot size and target thickness variation on its beam quality. The results confirmed that the target thickness of the interaction contributes to the beam brightness under various laser spot conditions.

#### 1. はじめに

レーザー駆動イオン加速機構 [1-3]は、その発生機構が持つ加速勾配の高さ(~TV/m)やビーム品質の高さ、短パルス性など、既存の加速器と異なる特徴を持つため、加速器の小型化をはじめとする、応用に向けた研究が進められている。中でも、低エミッタンス性や短パルス性といったビーム品質に関する特徴は、粒子線治療の照射方法の一つである FLASH [4]や、PIXE 分析などの物性実験 [5, 6]において求められる、局所的な線量集中性を高めることに適しており、近年研究が進められている。このレーザーイオン加速手法の一つである Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) 機構は、 $\geq 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> で高強度レーザーを固体薄膜に照射することで、ターゲット表面の電子を相対論速度まで加速し、薄膜裏面において電荷分離電場(~TV/m)を生成させる。そして、この電場によって、イオン化した水素、炭素、酸素などが MeV 級のエネルギーに加速される。レーザープラズマ加速器を実現するためには、この TNSA によって発生するビーム特性を把握することが不可欠であるため、加速されたイオンのビーム品質はこれまでにいくつかの手法で評価され、横方向エミッタンスは 10 MeV のプロトンにおいて、既存の RF 加速器の値を 2 桁程度下回る 0.004 mm-mrad (normalized RMS value) [7]というように非常に層流性が高いことが理解されている [8, 9]。また、レーザー加速におけるビームエミッタンス成長の物理的起源に関して言及された論文 [10]などもある。

ところで、レーザー加速器という応用を考える場合には加速されたイオンビームの制御が必要となるが、レーザーの集光条件や固体薄膜ターゲットなどの照射条件

の変化に応じて、イオンビームの品質がどのような相関をもつかについて、理解されていない。つまり、応用目的に応じたビームを生成するためのレーザー照射条件や、ビーム品質を制御するための手法に関しては、ほとんど議論が進んでいない。

そこで我々は、2D Particle-in-Cell(PIC)コードを用いて TNSA によるイオン加速過程をシミュレーションすることにより、様々なレーザー照射パラメータが持つビーム品質との相関を体系的に把握し、それらの結果を実験的に示していくことを目的とし、研究を開始した。本発表では、2D PICシミュレーションによって得られた結果に関して議論を行う。

#### 2. Particle-in-Cell シミュレーション

イオンビームを発生させるうえで、理想的なビームはエミッタンスがゼロとなることであるが、実際のビームはレーザーとプラズマの相互作用の過程で発生するノンゼロのエミッタンスを持っている。そのため、エミッタンスやビーム電流といったビーム品質を制御するためには、レーザープラズマ相互作用の過程を PIC シミュレーションにて計算し、ビーム品質に影響を与える要因を解明する必要がある。ここでは、Fig. 1 に示すように、相互作用ターゲットの厚さとレーザーのスポットサイズという 2 つの要因に着目しビーム品質との相関を評価する。シミュレーションには、2 次元 PIC コード EPOCH version 4.17.10 [11]を用いた。解析の簡略化のため、シミュレーションボックスの寸法は 80  $\mu\text{m}$  × 80  $\mu\text{m}$  (x 方向 × y 方向)、セルサイズは 0.042  $\lambda_L$  × 0.042  $\lambda_L$  ( $\lambda_L$  はレーザー波長)である。x-y 平面の直線偏光レーザーは、シミュレーションボックスの左境

界から入射し、x 軸に沿った正方向に伝搬する。レーザーの空間強度分布は単一のガウス分布とし、レーザー中心を  $y=0 \mu\text{m}$  とした。パルスの時間プロファイルは、FWHM で  $80 \text{ fs}$  のガウス分布で与えられた。ターゲットはポリイミドと裏面側に付着した不純物層(厚さ  $20 \text{ nm}$ )の 2 層という条件にて、数  $\mu\text{m}$  級のポリイミド層は炭素とプロトンの数比が  $2:1$ 、不純物層は純粋なプロトン層と仮定した。仮定した。両ターゲット層の電子密度は  $n_e = 40 n_c$  としており、ここで、電子臨界密度  $n_c = \epsilon_0 m_e \omega^2 / e^2$  とし、 $\epsilon_0$  は真空誘電率、 $\omega$  はレーザー周波数、 $m_e$  と  $e$  はそれぞれ電子質量と電荷である。レーザープリパルスの影響を考慮し、レーザーの入射面には指数関数的な密度分布とスケール長  $L = 4 \lambda_L$  のプリフォームドプラズマを設定した。

本シミュレーション条件において、レーザースポット径を  $5 \mu\text{m}$ 、レーザー集光強度を  $6.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 、ターゲット厚を  $5 \mu\text{m}$  としたときのレーザー照射後  $1000 \text{ fs}$  経過時点でのプロトンビームのエネルギースペクトルを Fig. 2 に示す。プロトンビームの最大エネルギーは  $5 \text{ MeV}$  程度となっているが、診断にはビーム品質を観測するうえで十分な粒子数が得られるプラトリーなエネルギー領域 ( $2 \text{ MeV} \pm 5\%$ ) を用いた。解析するイオンビームの発散角は  $\pm 50 \text{ mrad}$  以内とする。この制限を設ける理由は、実験的にこれらのビームを輸送する場合において、quadrupole magnet で輸送可能な発散角が  $20\text{-}50 \text{ mrad}$  程度であることが予測されるためである[9]。

我々のアプローチは、シミュレーション上でのレーザー照射条件ごとの横方向エミッタンス、電流、輝度を定義し、そのビーム品質が示す傾向を観測することである。ビーム品質の解析は、レーザー照射後  $1000 \text{ fs}$  経過時点での結果を基に行われる。規格化 RMS エミッタンス  $\epsilon_{Sim, Norm, RMS}$  は、横方向空間  $y$  と角度  $y'$  によって求まる式 (1) を用いて計算される。

$$\epsilon_{SimNR} = \gamma\beta \sqrt{\langle y^2 \rangle \langle y'^2 \rangle - \langle yy' \rangle^2} \quad (1)$$

ここで、 $\langle \rangle$  は平均値を表す。ビーム電流は  $I_{Sim}$  とし、シミュレーション上で発生するチャージ量をビームパルス幅で割った値を示す。ターゲット厚が  $3 \mu\text{m}$  と  $12 \mu\text{m}$  厚におけるビームパルス幅を比較したところ、どちらも  $100 \text{ fs}$  程度であり、その差は数%以内であった。この差は電流値に与える影響が小さいので、パルス幅は均一であると仮定した。ビーム輝度は、ビーム電流をエミッタンスの二乗で割った値を指し、本論文では、シミュレーション電流をエ

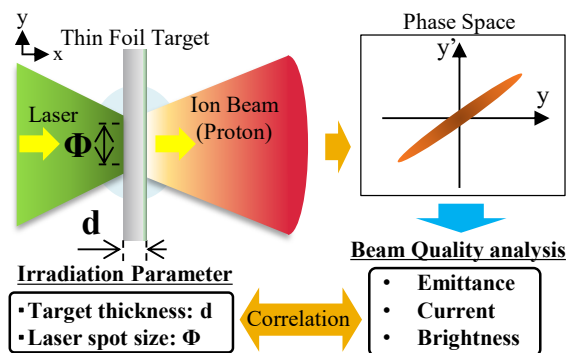


Figure 1: Overview of the calculation scheme.

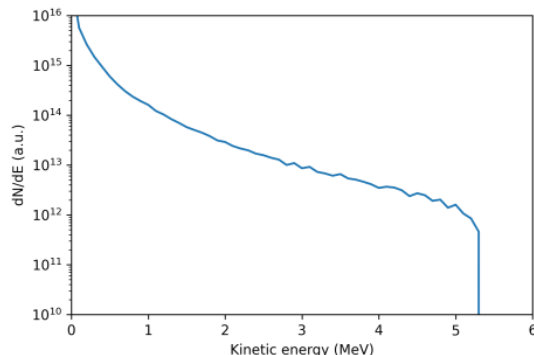


Figure 2: Energy spectrum of proton beam when laser spot size:  $5 \mu\text{m}$  (FWHM), laser energy:  $130 \text{ mJ}$  and target thickness:  $5 \mu\text{m}$ .

ミッタンスの二乗で割ったものを式(2)の輝度  $B_{Sim}$  として任意に定義する。

$$B_{Sim} = I_{Sim} / \epsilon_{SimNR}^2 \quad (2)$$

ただし、これらのパラメータはシミュレーション上で定義された物理量であり、実験的に測定される値と定量的に比較可能な値ではないことに注意する。以下では、ターゲットの厚みとレーザーの照射スポット径をスキャンした場合の、ビーム品質の比較に関する解析結果について議論する。

### 3. シミュレーション結果及びディスカッション

#### 3.1 位相空間分布によるビーム品質の評価

PIC シミュレーション結果から求まる位相空間分布を用いて、ターゲットの厚み、レーザースポット径の変化による楕円分布の変化について議論する。

まず、ターゲット厚み依存性に関して評価した結果を Fig. 3(a-b) に示す。この時のレーザースポット径は  $5 \mu\text{m}$  (FWHM)、レーザーエネルギーは  $130 \text{ mJ}$ 、その集光強度は  $6.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  であり、ターゲット厚を  $3, 12 \mu\text{m}$  とした時の位相空間分布の結果を示している。Figure 3(a-b) の分布を比較すると、 $12 \mu\text{m}$  厚のターゲットの場合に位相空間の持つ角度広がりが大きく、空間方向の幅も大きくなっていることが確認できる。横方向エミッタンスとは、この位相空間面積であるため、この時の集光条件においては、厚みが小さい照射条件においてエミッタンスの小さなビームが生成されることが分かる。

次に、レーザー照射スポット径の大きさを比較した時の位相空間分布を Fig. 3(c-d) に示す。この時のターゲット厚は  $5 \mu\text{m}$  で一定であり、スポット径は  $3.5, 10 \mu\text{m}$  の結果を比較している。また、集光強度を  $6.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  で一定に保つためにレーザーエネルギーはスポット径に応じて調節されている。Figure 3(c-d) の位相空間分布の結果から、等しい集光強度でレーザースポット径を変化させた場合、大きなスポット径の照射では、 $y'$  方向への角度分布広がりと  $y$  方向への空間広がりが見られ、エミッタンスに変化が表れていることが分かり、大きなスポット径の場合にエミッタンスが大きくなるような傾向がみられた。

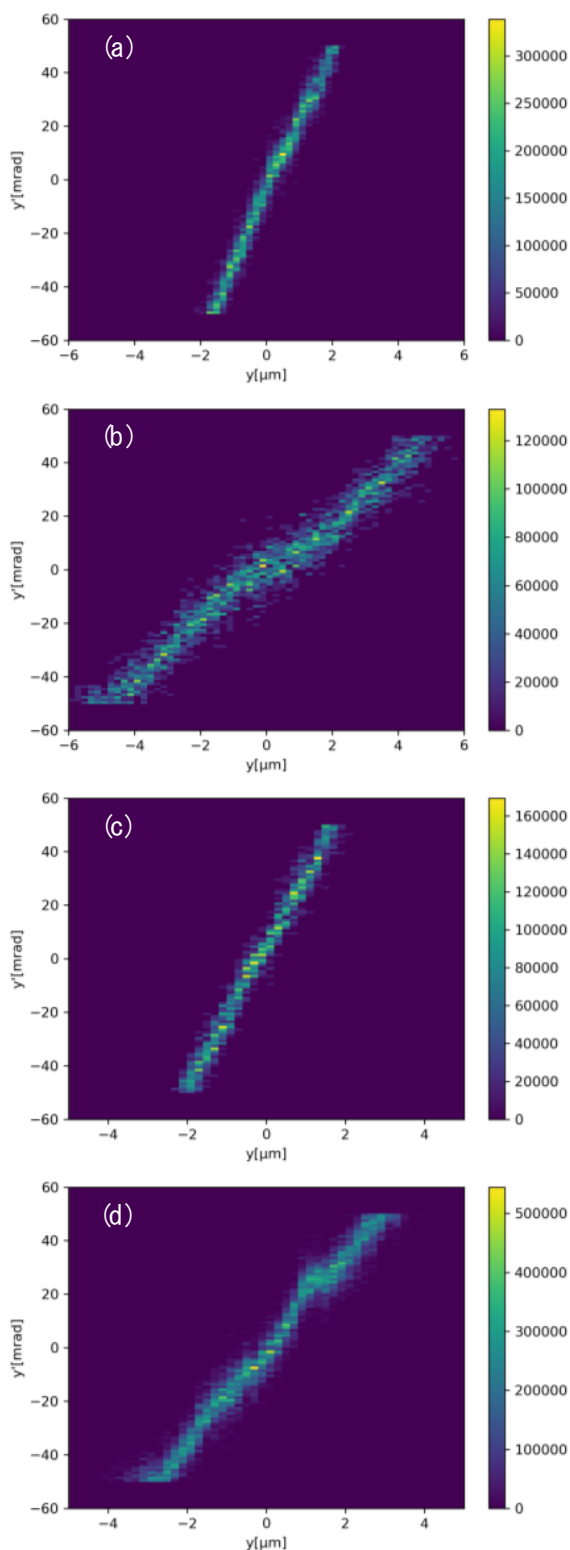


Figure 3: Transverse phase space profile of  $y-y'$ . The energy of protons to be observed is 2 MeV with  $\pm 5\%$  dispersion. (a-b) show results for target thickness of 3 and 12  $\mu\text{m}$ , respectively, (c-d) show results for laser spot sizes of 3.5 and 10.0  $\mu\text{m}$ . A color bar shows a simulation particle number, and the color intensity is normalized from purple to yellow for each map.

### 3.2 輝度マップによるビーム品質の評価

等しい集光強度で照射される場合の、ターゲット厚とレーザースポット径の持つビーム品質に対する影響を比較するため、2つの条件をスキャンした時の輝度分布を観測した。Figure 4は、ビーム輝度の大きさを赤から青のカラーマップで示しており、横軸を横方向エミッタンス、縦軸をビーム電流とする。ターゲットの厚みは、3, 5, 6, 7.5, 12  $\mu\text{m}$  の時の結果をそれぞれ比較しており、レーザースポット径はそれぞれ 3.5, 5.0, 7.5, 10.0  $\mu\text{m}$  の結果を示す。ターゲット厚の変化に着目し等しいレーザースポット径の結果を線で結んだ Fig. 4の結果によると、レーザースポット径が比較的小さな照射条件下において、3.1節で得られた結果と同様にエミッタンスは厚みの上昇に従って大きく増加することが観測され、より薄いターゲットにおいて低エミッタンスなビームが得やすい傾向が観測された。一方で、ビーム電流の変化は、ターゲット厚の変化に対して比較的緩やかな変化を示した。例えば、レーザースポット径 5  $\mu\text{m}$  の時のターゲット厚 3  $\mu\text{m}$  と 12  $\mu\text{m}$  の結果を比較すると、12  $\mu\text{m}$  のエミッタンス値は 3  $\mu\text{m}$  と比較して 202.0%増加している一方で、電流値は 15.6%しか減少しない。これらの結果から輝度の変化を観測すると、ターゲット厚 3  $\mu\text{m}$  の時のビーム輝度は、12  $\mu\text{m}$  の結果と比較して 1桁以上増加した。また、スポット径の大きな照射では、ターゲットが薄くなるに従い、ビーム電流が増加していく傾向が観測された。これらの結果から、全体的に薄いターゲットの照射において高輝度なビームを発生させる傾向が観測された。

次に、Fig. 4のスポット径の変化に着目すると、スポット径の増加に伴いエミッタンス、電流値がともに上昇傾向を示すために、スポット径は輝度の変化への寄与が比較的小さいという結果が得られた。例としてターゲット厚が 5.0  $\mu\text{m}$  の時のスポットサイズ 3.5  $\mu\text{m}$  と 10.0  $\mu\text{m}$  の結果を比較すると、10.0  $\mu\text{m}$  では、3.5  $\mu\text{m}$  に比べてエミッタンスが 80.7%、電流値が 363.4%増加するが、ビーム輝度は 42.1%しか増加していない。様々なターゲット厚において同様の傾向が得られていることから、等しい集光強度での照射において、レーザースポット径の変化がビーム輝度に与える変化は、比較的小さいことがわかる。

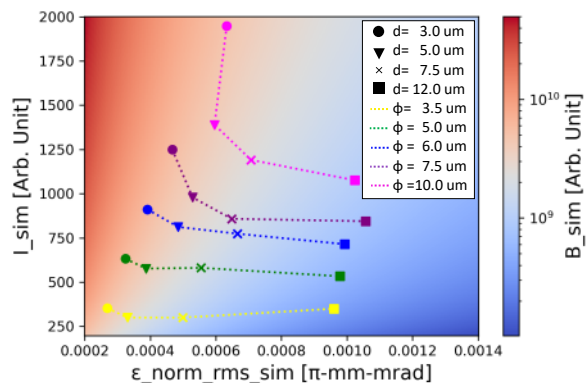


Figure 4: The distribution of brightness with red to blue color map. The horizontal axis is the normalized rms emittance and the vertical axis is the beam current in the simulation.

お、これらのような違いが生まれる物理的メカニズムは、電場分布や電子フィラメンテーション、方位磁場など様々な影響から発生することが考えられるため、詳細な物理解析を行う必要がある。

また、本シミュレーション体系は衝突効果を考慮しておらず、二次元であり、ターゲット及び不純物層の粒子密度も固体密度に対して小さい。また、解析対象のプロトンのエネルギーは、加速のピークエネルギーよりも比較的低いエネルギーのプラトーなエネルギースペクトルの領域を選択しており、ピークエネルギー付近では異なる傾向を示す可能性も考えられる。

#### 4. 終わりに

我々は、レーザー加速イオンのビーム品質を制御可能にすることを目的として、2D Particle-in-Cell シミュレーションを用いてレーザー照射パラメータとビーム品質の持つ相関について研究した。我々は連続的にビーム輸送が可能な発散角内のビームのみに焦点を当て、シミュレーション上で定義された横方向エミッタンス、電流及び輝度を用いてビーム品質を評価した。その結果、ターゲットの厚みがビーム輝度を制御するのに有効なパラメータであることを示した。また、レーザースポットサイズが電流値の増大に有効なパラメータであることを示した。今後は、より詳細なシミュレーション解析を行うとともに、実験的にこれらの傾向が得られるかどうかを調査し、レーザー照射条件の最適化、レーザー駆動イオン加速器の実現に向けた研究を進めていく。

#### 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, K. Krushelnick, M. Zepf, F. N. Beg, M. Tatarakis, A. Machacek, M. I. K. Santala, I. Watts, P. A. Norreys, and A. E. Dangor, *Phys. Rev. Lett.* 85, 1654, (2000).
- [2] A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo, D. Umstadter, and V. Y. Bychenkov, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4108 (2000).
- [3] 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 (2000).
- [4] F. Kroll *et al.*, *Nature Physics*, 18, 316-322, (2022).
- [5] M. Barberio and P. Antici, *Scientific Reports*, 9, 6855, (2019).
- [6] M. Passoni, L. Fedeli and F. Mirani, *Scientific Reports* 9, 9202, (2019).
- [7] Cowan, T. E., J. Fuchs, H. Ruhl, A. Kemp, P. Audebert, M. Roth, R. Stephens, I. Barton, A. Blažević, E. Brambrink, J. Cobble, J. Fernández, J.-C. Gauthier, M. Geissel, M. Hegelich, J. Kaae, S. Karsch, G. P. Le Sage, S. Letzring, M. Manclossi, S. Meyroneinc, A. Newkirk, H. Pépin, and N. Renard-LeGalloudec, *Phys. Rev. Lett.* 92, 204801, (2004).
- [8] F. Nürnberg, M. Schollmeier, E. Brambrink, A. Blažević, D. C. Carroll, K. Flippo, D. C. Gautier, M. Geißel, K. Harres, B. M. Hegelich, O. Lundh, K. Markey, P. McKenna, D. Neely, J. Schreiber, and M. Roth, *Rev. Sci. Instrum.* 80, 033301, (2009).
- [9] M. J. Wu, D. Y. Li, J. G. Zhu, T. Yang, X. Y. Hu, Y. X. Geng, K. Zhu, M. J. Easton, Y. Y. Zhao, A. L. Zhang, H. Y. Lu, W. J. Ma, C. Lin, and X. Q. Yan, *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, 031302, (2020).
- [10] A. J. Kemp, J. Fuchs, Y. Sentoku, V. Sotnikov, M. Bakeman, P. Antici, and T. E. Cowan, *Phys. Rev. E* 75, 056401, (2007).
- [11] T. D. Arber, K. Bennett, C. S. Brady, A. Lawrence-Douglas, M. G. Ramsay, N. J. Sircombe, P. Gillies, R. G. Evans, H. Schmitz, A. R. Bell, and C. P. Ridgers, *Plasma Physics Controlled Fusion* 57, 113001, (2015).