

転送行列を用いたレーザー駆動イオン加速のビーム輸送シミュレーションの開発

DEVELOPMENT OF BEAM TRANSPORT SIMULATION OF LASER-DRIVEN ION ACCELERATION USING TRANSFER MATRICES

村川真宙^{#, A, B)}, 小島完興^{B)}, 大石沙也加^{C, B)}, 松本悠椰^{A, B)}, チン・タンフン^{B)}, 畑昌育^{B)}, 榊泰直^{A, B)}
Mahiro Murakawa^{#, A, B)}, Sadaoki Kojima^{B)}, Sayaka Oishi^{C, B)}, Haruya Matsumoto^{A, B)}, Thanh-Hung Dinh^{B)},
Masayasu Hata^{B)}, Hironao Sakaki^{A, B)}

^{A)} Kyushu University

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

^{C)} Nara Woman's University

Abstract

The beam by the TNSA mechanism, which is a general acceleration mechanism in laser-driven ion acceleration, is characterized by a beam distribution that follows the Maxwell distribution over a wide range of energies in a very short time bunch and a divergence angle for each energy. QST completed a prototype of a laser-driven ion acceleration injector using the TNSA mechanism in 2023, but in order to adjust the magnetic field setting parameters during commissioning of the prototype, a highly responsive simulator that can immediately check the beam trajectory generated by the TNSA mechanism on site and immediately adjust the beam trajectory is required. Common beam simulators such as TraceWin can only input a single energy and have poor commissioning efficiency. Therefore, we decided to develop a simulator that is highly responsive to beam calculations using transfer matrices. In this article, I would like to report on the development and progress that we are considering.

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知られる TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) 機構は、高強度レーザーを固体の薄膜標的に照射することで、高速電子を加速し、それに伴う電荷分離によりイオンを加速する方法である。この TNSA 機構で生成されるレーザー駆動イオンビームは、従来の加速器によって生成されるイオンビームと比べて、エミッタンスやバンチ幅といった特性が優れていると報告されている。しかし、TNSA 機構によるイオンビームのエネルギー分布は、高エネルギーに向けて指数関数的に減少し、エネルギー広がりがあるため、特定のエネルギーのイオンを利用する応用研究においては非効率的である。そこで、我々はレーザー駆動イオンビームに特定のエネルギーピークを形成する手法として、三連四重極磁石と高周波空洞による「位相回転」を組み合わせたシステムを導入するとともに、オペレーション時に輸送効率が最大となる軌道計算が随時可能にしたいと考えている。QST では 2023 年に TNSA 機構を用いた原型機を完成させたが、位相回転を入れたビームオペレーションを行う上で、ビーム特性を迅速に確認し、直ちにビーム軌道を調整できる即応性の高いシミュレーターが必要である。

現在の一般的なビームシミュレーターである TraceWin などは単一エネルギーの入力しかできず、コミッショニング効率が悪いという課題がある。この課題を解決するために、位相回転を考慮した転送行列を用いてビーム計算を行う、即応性の高いシミュレーターを開発することにした。本報告では、「位相回転」を行うために行った高周波空洞の立ち上げ、およびシミュレーターの開発とその

進捗状況について報告する。

2. 位相回転

位相回転法では標的からわずかピコ秒程度で放出されるレーザー駆動イオンが数 m 下流では速度差によってビームがエネルギーごとに並ぶことに着目している。Figure 1 に、位相回転の概略図を示す。2 ギャップの 1/4 波長共振型空洞を用いて、中心の導体チューブ内に特定エネルギーのイオンが入った瞬間に、左右 2 つのギャップに 180 度位相がずれている電場を印加すると、電場の作用によって特定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される。それにより、特定エネルギーに集群されて、ビーム強度を増加できる[1]。

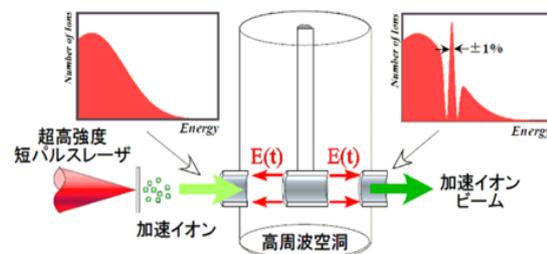


Figure 1: Energy peak generation by phase rotation.

なお、位相回転空洞の2つのギャップ間に印加する電場によってイオンが受け取るエネルギーゲイン ΔW (減速または、加速) は、

[#] murakawa.mahiro@qst.go.jp

$$\Delta W = eE_0 \left\{ \int_{x_1}^{x_2} \cos(\omega t + \varphi_0) dx + \int_{x_3}^{x_4} \cos[\omega(t + \Delta t) + \varphi_0 + \pi] dx \right\} \quad (1)$$

の COS 関数の和で与えられる。ここで e は電気素量(物理定数)、制御できる変数は、 E_0 , ω , φ_0 および Δt : 電気素量、高周波電場の振幅、高周波電場の角周波数、位相、特定エネルギーイオンが 2 つのギャップの中間に達する時間となる。

3. 位相回転空洞の共振周波数

特定のエネルギー帯のイオンを安定的に位相回転するには、高周波電場が印加されるタイミングと、イオンビームが空洞の 2 つのギャップの中間に入ってくるタイミングが常に同じに保たれる必要がある。つまり、レーザーの発振器のタイミングと位相回転空洞の共振周波数が一致しなければならない。そのため、レーザー発振器のレーザー光をフォトダイオードでピックアップして波形整形し、空洞の共振周波数と一致させて空洞に入力し、ギャップに電場を印加する方法を検討した。この方法によって、例えば長時間運転の温度変化の中でレーザー発振のタイミングがずれた際でも、このずれに合わせて自動的に位相回転タイミングが調整されることになる。レーザー発振器から位相回転空洞に入れるまでの信号生成システムを Fig. 2 に示す

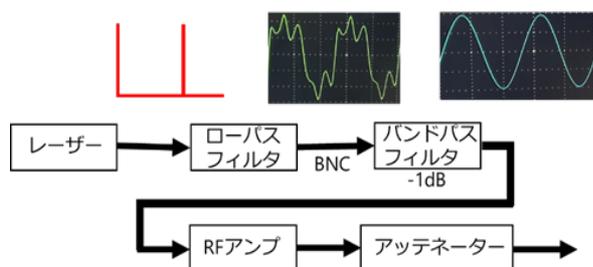


Figure 2: Signal system diagram.

モードロック発振器と呼ばれる今回のレーザー発振器からはパルス幅 40 fs、パルス間隔が約 12.5 ns (80.01 MHz 程度)の光パルス列が出射される。この周波数は発振器を構成する 2 枚のミラー間隔によって決まっているが、温度変化によるわずかな伸縮によって一日の間に 80.014 MHz~80.019 MHz の範囲で緩やかに変動していることがわかっている。光パルス列はフォトダイオードによってデルタ関数で近似できる電気信号 (Fig. 2 の赤色の波形) に変換される。この電気信号にはフーリエ変換に従うと、80.016 MHz 以外の多くの周波数成分が含まれており、この信号を増幅し、空洞に入力すると、空洞が共振しない周波数成分が反射され、RF アンプに逆流し壊れる恐れがある。そこで、初めに、ローパスフィルタを備えた任意遅延器で高周波成分をカットし、矩形波状の波形 (Fig. 2 の緑色) を生成した。その後、2 倍波や 3

倍波成分を取り除くために 76 MHz-100 MHz の通過帯域を持つバンドパスフィルタを入れて 80.016 MHz の成分が支配的な強度 2 dBm の信号 (Fig. 2 の青色) を得た。得られた種信号を高周波アンプによって増幅し、空洞に入力する。

一方で、高周波を受け取る空洞についても調整が必要である。高周波空洞の共振周波数は空洞の長さ、形状、体積などで決まる。今回用いる空洞は、京都大学にて利用していた空洞を移管してきたものであり、この共振周波数をネットワークアナライザーで測定したところ、79.3 MHz であった。レーザー発振器の周波数 (80.016 MHz) とは 0.7 MHz 程度の差があるために、空洞の共振周波数を調整しなければならない。

空洞の共振周波数を高くする調整は、空洞の上面にチューナーブロック (銅製) を追加し空洞の長さを短くする方法を検討した。追加するブロックの厚みに対する共振周波数の変化は、電磁界解析コード SUPERFISH を用いて計算した。

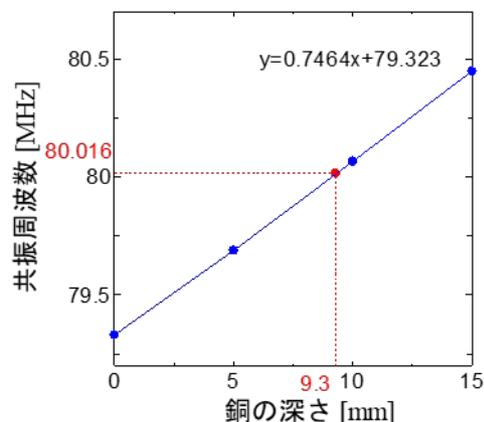


Figure 3: Determining block thickness.

共振周波数は、厚みの変化とともに線形に変化し、9.3 mm の時に、レーザー発振器と周波数が一致することがわかった (Fig. 3)。計算を確かめるために、過去に作成された厚み 15 mm のブロックを追加し、実験的に共振周波数を測定したところ、79.3 MHz から 80.4 MHz へ上昇し、上昇幅がシミュレーションと一致し、ビームオペレーションが可能となった。

4. ビームシミュレーターの開発

位相回転を用いた実験を進めることと並行して、そのオペレーション効率を向上させるため、オペレーションしながら利用可能な即応性の高いシミュレーターの開発を進める。精度より即応性を重視することにし、計算粒子群の時間発展を追う PIC (Particle In cell) 手法を用いるのではなく、ドリフト空間や四重極磁石、高周波空洞などの伝送行列を定義して、それらを組み合わせ、実際のビーム

ラインと同じようにビームラインを構築する。使用言語及び、ツールとして、Python をベースに Numpy, Matplotlib, Seaborn, SciPy などのライブラリを使用した[2]。以下に、詳細なシミュレーターの計算について示す。

4.1 ビームラインの要素

ドリフト空間の長さ L に対する伝送行列は以下のように定義する。

$$D(L) = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

四重極磁石の集束領域と発散領域の伝送行列は以下のように定義する。

$$Q_F(k, \Delta s) = \begin{bmatrix} \cos(k\Delta s) & \frac{\sin(k\Delta s)}{k} \\ -k \sin(k\Delta s) & \cos(k\Delta s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q_D(k, \Delta s) = \begin{bmatrix} \cosh(k\Delta s) & \frac{\sinh(k\Delta s)}{k} \\ k \sinh(k\Delta s) & \cosh(k\Delta s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 k は磁石の強さを表し、 Δs は磁石の長さを表す。ビームラインの構築は、これらのドリフト空間と四重極磁石の伝送行列を組み合わせるの必要があり、ビームラインの総合伝送行列は各要素の伝送行列を乗算することで求められる。我々の原型機に用いるビームラインのうち、三連四重極磁石を用いた部分をこの行列を使い表現すると、ビームラインの伝送行列 M_{total} は以下のように表される。

$$M_{total} = M_{D(L_3)} \cdot M_{Q_F(k_3, \Delta s_F)} \cdot M_{D(L_2)} \cdot M_{Q_D(k_2, \Delta s_D)} \cdot M_{D(L_2)} \cdot M_{Q_F(k_1, \Delta s_F)} \cdot M_{D(L_1)} \quad (5)$$

4.2 粒子の輸送

ビーム横方向の粒子分布は正規乱数を振って生成した。具体的には、粒子の初期位置と初期角度の平均値と標準偏差を設定し、 x 方向および y 方向における分布の調整を行った。これには、共分散行列を用いることで位置と角度の間に相関を持たせる方法を採用した。この手法により、粒子分布の発散角を再現させることが容易になる。

$$\sum_x = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho\sigma_x\sigma_{x'} \\ \rho\sigma_x\sigma_{x'} & \sigma_{x'}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

一方、ビームのエネルギー分布は高エネルギーになるにつれて粒子の個数が指数関数的に減少するように設定した。この設定は、レーザー加速器における実際のエネルギー分布を反映しており、エネルギースペクトルの評価に重要な役割を果たす。エネルギー分布は、次の式に従う。

$$f(E) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{E}{\lambda}\right) \quad (7)$$

初期の位置と角度、エネルギーを持つ粒子がビームラインを通過する際には、4.1 で構築した伝送行列を用いて粒子の位置と角度の変化を追跡する。

初期粒子の位置と角度 x_0, x'_0 に対する、ビームライン最下流での粒子の位置と角度 x_f, x'_f を以下のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} x_f \\ x'_f \end{bmatrix} = M_{total} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

この計算により、ビームラインを通過した後の各粒子の位置と角度を正確に計算することが可能となる。また、各位置に到達する時間も粒子の速度を用いて計算し、到達時間の分布を求めることができる。

5. シミュレーション結果と考察

固定エネルギー1.5 MeV で粒子分布において最も外側を通る軌道がどのような軌道を描くのか Trace3d[3]のシミュレーターと比較検討した。その比較図を以下に示す。

Figure 4, Fig. 5 より、あまり違いがないことがわかった。次にビームライン最下流で縦方向にどのような分布となっているか、原型機で取った実測データ(四重極磁石の磁場勾配 B_1, B_2, B_3 は $B_1, B_2, B_3 = -3.167 \text{ T/m}, 3.921 \text{ T/m}, -3.922 \text{ T/m}$, ドリフト空間 L_1, L_2, L_3 は $L_1, L_2, L_3 = 0.4 \text{ m}, 0.085 \text{ m}, 3.17 \text{ m}$)と比較検討した。

Figure 6 より実測の時間の原点がシミュレーターと合っていないのか、ピークの位置が少し後ろにあるもののおむね形は一致していた。

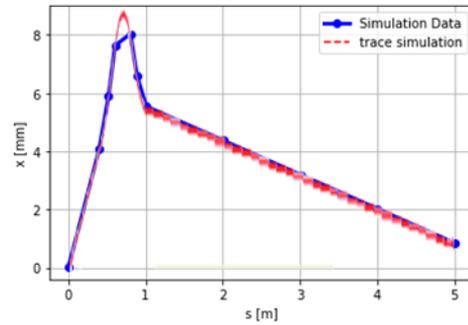


Figure 4: Comparison of outermost particle tracking with trace simulation.

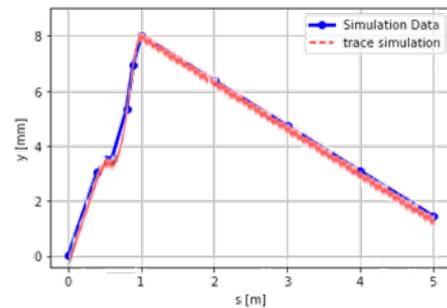


Figure 5: Comparison of outermost particle tracking with trace simulation.

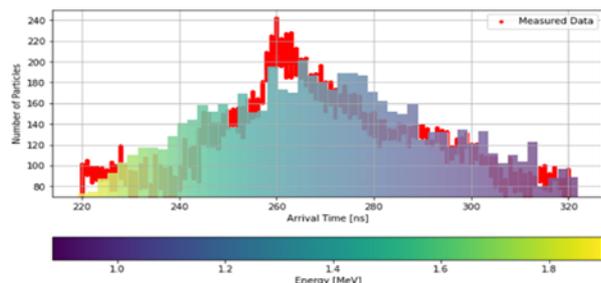


Figure 6: Comparison of beam longitudinal distribution with actual measured data.

6. まとめと考察

これまでに、レーザー発信器と位相回転空洞の共振周波数を合わせるために、空洞の周波数調整とレーザー発振器に由来した高周波信号の生成と空洞の共振周波数にチューニングするチューナーブロックの設計計算、

ビームシミュレーターの開発を行った。今後は、位相回転を取り入れたシミュレーターの開発を行う。また、空間電荷などの非線形要素を考慮に入れたシミュレーションの導入が必要であると考えます。

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。

参考文献

- [1] Akira Noda, Phase Rotation of Produced Ion Beam, kogaku 37-11, 654-656, 2008.
- [2] https://indico.cern.ch/event/1022988/contributions/4499874/attachments/2311905/3944312/CAS_Optics_Primer-3.pdf
- [3] K. R. Crandall and D. P. Rusthoi, TRACE3-D Documentation, Los Alamos National Laboratory, 1997.