

レーザーイオン源を用いたシンクロトロンへのシングルターン入射の検討 RESEARCH ON SINGLE TURN INJECTION INTO SYNCHROTRON BY LASER ION SOURCE

野田悦夫^{#,A)}, 中尾政夫^{A)}, 野田章^{A)}, 野田耕司^{A)}, 後藤彰^{B)}, 岩井岳夫^{B)}, 山口晶子^{C)},
Etsuo Noda^{#,A)}, Masao Nakao^{A)}, Akira Noda^{A)}, Koji Noda^{A)}, Akira Goto^{B)}, Takeo Iwai^{B)}, Akiko Yamaguchi^{C)},

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Yamagata University

^{C)} Toshiba Corporation

Abstract

The development of a laser ion source, which can produce highly-ionized ions by focusing and irradiating a pulse laser onto a solid target, is being advanced. Single turn injection into a synchrotron is required because its operation is intermittent and the pulse width of the ion beam extracted from laser-produced plasma is usually in the range of several hundreds nanoseconds to a few microseconds. The carbon beam with the emittance of about 1/10 of the synchrotron acceptance was injected off the center in the phase space in the horizontal direction of the synchrotron. The behavior of the injected beam was studied by a particle trajectory simulation with consideration for space charge effect. The tune shift caused by space charge was also estimated theoretically and by using the particle simulation.

1. はじめに

パルスレーザーを固体ターゲットに集光照射して高温高密度プラズマを発生させ、多価イオンを生成するレーザーイオン源の開発を行っている。レーザーイオン源はパルス動作をし、プラズマから引き出されたイオンビームのパルス幅は通常数百 ns~数 μ s であるためシングルターン入射を行う必要がある。レーザー生成プラズマから引き出され加速されたイオンをシンクロトロンに入射したときの空間電荷を考慮したビーム軌道解析を行った。

2. レーザーイオン源の概要

レーザー照射によって生成されたプラズマはターゲット面にほぼ垂直に、ある角度広がりを持って膨張する。この時のイオンの膨張速度はイオン音速程度に達する。ターゲット面にほぼ垂直方向に飛び出したプラズマをドリフトチューブと呼ばれる長さ 1 m 程のパイプ中を飛行させた後、半径 数 mm のノズルを通して、RFQ 等の線形加速器中に入射する。ターゲットとドリフトチューブの電位を同電位とし、それを負電位に設定しておく、ノズル部分で電子が剥ぎとられ、イオンが加速される。ドリフトチューブを飛行してくるプラズマは空間電荷が見かけ上 0 のため、ターゲットからノズルまで直進する。その結果、ノズルには広がり角数 mrad 以下のほぼ平行なビームが入射する。ノズル部分の彎曲電場の影響で、電子を剥ぎとられたイオンは収束・加速され、ノズルから飛び出す。その後、イオンは自分自身の空間電荷により収束から発散に転じる。この収束点

で RFQ 等に入射し、次段の加速を行う。レーザーイオン源からシンクロトロン入射までの概略図を Figure 1 に示す。本研究では、固体ターゲットとして炭素（グラファイト）を用い、 C^{6+} イオンをシンクロトロンに入射することを想定した検討を行った。

エネルギー 1J、パルス幅 10ns のレーザーをグラファイト上に $\Phi 100 \mu$ m 程度に集光して照射 ($\sim 10^{12} \text{W/cm}^2$) すると、電子温度 100eV 以上のプラズマが生成される^[1]。この時、プラズマ中に含まれる 6 価のイオンの割合は Saha の式^[2]から 30%程度と予想される。Figure 1 に示すように、シンクロトロン中に入射する C^{6+} の個数を 5×10^9 個とし、ノズルを出てから入射するまでの途中損失を 50%程度とすると、ノズルを通過する全イオン数は 3×10^{10} 個以上必要となる。また、イオンビームのパルス幅を 1μ s とすると、ノズル通過時のイオン電流は 30mA 以上、シンクロトロン入射時のイオン電流は約 5mA となる。ノズルを通過するイオン電流を 35mA、ノズル電圧を -40kV、ノズル径を $\Phi 7$ mm とした時のノズル近傍の等電位面とビームの軌道を計算した結果を Figure 2 の(a), (b) に示す。この時の C^{6+} のエネルギーはおよそ 20keV/u となる。

この後、線形加速器にビームを入射して 4MeV/u まで加速する。今回は、線形加速器の検討は行っていない。

3. シンクロトロンへの入射

加速後のビームのパルス幅はノズル通過時と同じ 1μ s であり、シンクロトロンへはシングルターン入射を行う。シンクロトロンの水平方向の位相空間に、

[#] e-noda@nirs.go.jp

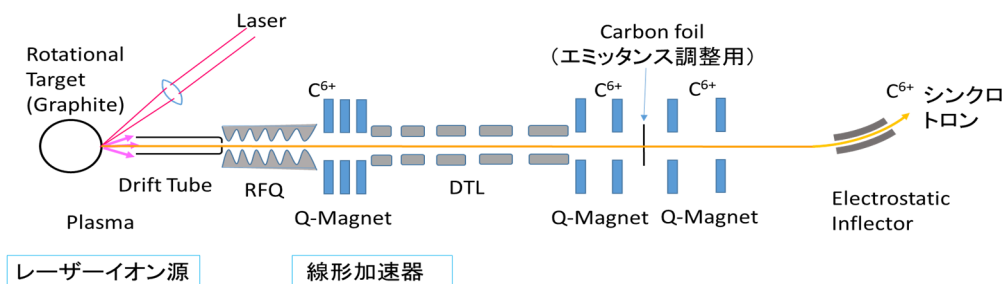


Figure 1: Schematic diagram of the laser ion source and linac system.

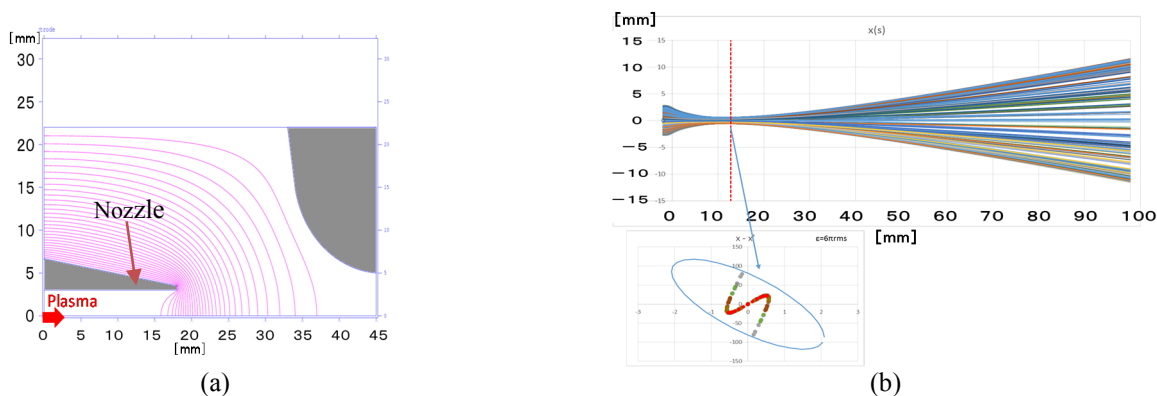


Figure 2: Particle trajectory simulations of carbon ions accelerated and squirted out of the nozzle. (a) Equipotential plane. (b) Calculated ion trajectories.

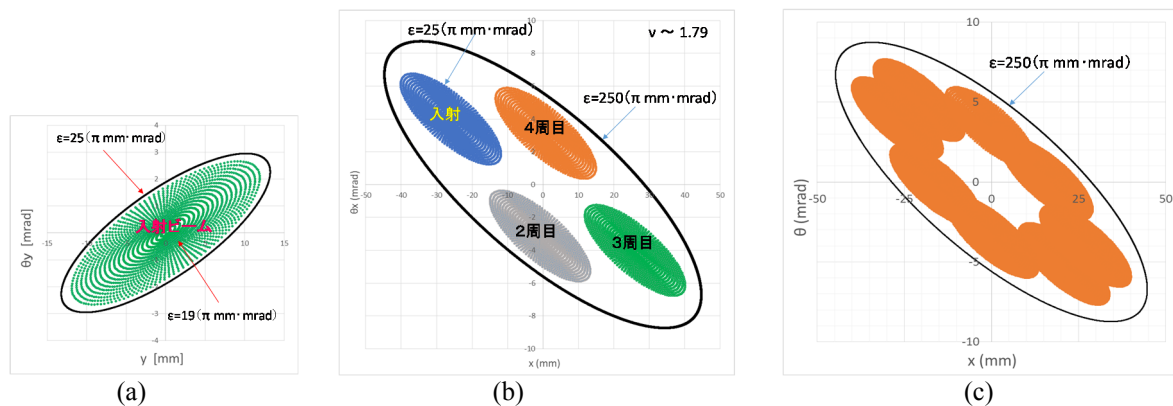


Figure 3: Injected beam shapes and synchrotron acceptance in the phase space. (a) Vertical (y-) direction. (b) Horizontal (x-) direction and four turns of beam are described at a time. (c) Horizontal (x-) direction after 14ms of beam injection.

アクセプタンス ($\epsilon = 250 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) の 1/10 程度の
エミッタンス ($\epsilon = 25 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) を持つ炭素ビー
ム (6 価) をシンクロトロンの中心からずらして入
射する。垂直方向については、アクセプタンス (ϵ

$= 25 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) とほぼ同じエミッタンス ($\epsilon = 19 \pi$
 $\text{ mm} \cdot \text{mrad}$) を持つビー
ムをシンクロトロンの中心
に入射する。線形加速器通過直後のビー
ムのエミッタ
ンスは数 $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度と考えられ、シンクロ
トロンに入射するにはエミッタ
ンスが小さすぎるため、

ビームを適切なサイズに拡大した後で炭素の薄膜等を通過させることで、必要なエミッタンスを得る。シンクロトロンへの入射は ESI (Electrostatic injector) と BMP 磁石を用いて行う。BMP 磁石を用いた入射の検討結果については、今回は報告を省く。Figure 3(a) に垂直方向 (y 方向) の、Figure 3(b) に水平方向の入射時のビームのイメージをそれぞれ示す。ビームが 1 周回る時間は $2.3 \mu\text{s}$ で、ビームのパルス幅は $1 \mu\text{s}$ であるため、入射時のビームは周長の半分程度しか占めていない。x 方向のチューン ν を 1.79 としているため、ビームは 4 周で位相空間上のほぼ最初の位置にもどる。Figure 3(b) は、4 周分のビームを重ねて描いている。入射したビームは、速度広がりを持っているため、時間とともに周方向に伸びていく。周方向の速度広がりを $\pm 0.2\%$ 、Momentum Compaction Factor を $0.3 (\sim 1/\nu^2)$ とすると、ビームが 4 周分にまで広がる時間は約 6.5ms 、8 周分にまで広がる時間は約 13.7ms である。すなわち入射後十数 ms 経過後には、ビームはアクセプタンス内の中心部を除いてほぼ一杯に広がると思われる。その時のイメージを示したのが Figure 3(c) である。また、線形加速器による Beam Bunching (200MHz) の debunching 時間は、約 $0.6 \mu\text{s}$ となり、シンクロトロン入射時あるいは入射直後には平坦化されていると考えられる。Table 1 に数値としてまとめておく。

Table 1: Beam Spread Time in Travelling Direction

ビームのパルス幅	1 (μs)
速度 v_z (4MeV)	$2.78 \cdot E+07$ (m/s)
速度広がり $\Delta v/v$	± 0.2 (%)
周長	63.3 (m)
チューン ν_x	1.79
Momentum Compaction Factor	$0.3 (\sim 1/\nu^2)$
debunching 時間 (200MHz)	0.6 (μs)
1 周回る時間	2.3 (μs)
1 周分に広がるまでの周回数	448 (回)
1 周分に広がるまでの時間	1.0 (ms)
4 周分に広がるまでの周回数	2851 (回)
4 周分に広がるまでの時間	6.5 (ms)
8 周分に広がるまでの周回数	6055 (回)
8 周分に広がるまでの時間	13.7 (ms)

4. シンクロトロン入射後の粒子軌道シミュレーション

4.1 磁場配位の概要

ビームをシンクロトロンの中心から外してシングルターン入射した後のビームの x 方向の挙動を粒子軌道シミュレーションにより調べた。シミュレーションは BMP 磁石と四重極磁場 (QD、QF 各 6 個) のみを考慮した直線近似で行い、S=0 から 1 周に相当する S=63.3 (m) までを 1 周期として計算を繰り返

した。以下の計算では BMP 磁石の磁場は最初から 0 としている。入射点は S=10.65 (m) の位置に相当している。計算に使用した四重極磁場の位置を Table 2 に示す。また、チューン ν は 1.79 である。

Table 2: Q-magnet Layout

Magnet	S(m)	Magnet	S(m)
Start	0	QD	24.03
BMPF1	2.59	QF	29.1
QD	2.93	QD	34.58
QF	8	QF	39.65
ESI	10.155	QD	45.13
INJ	10.65	QF	50.2
QD	13.48	QD	55.68
QF	18.55	QF	60.75
BMPF2	21.49	End	63.3

4.2 空間電荷効果とチューンシフト

正電荷が一様に分布している楕円柱が作る電界 $E_{sc}(x,y)$ は以下の式であらわされる^[3]。

$$\vec{E}_{sc}(x, y) = \frac{I}{\pi \epsilon_0 (a + b) \beta c} \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b} \right) \quad (1)$$

ここで、 I はビーム電流、 ϵ_0 は真空の誘電率、 a 、 b は x、y 方向のそれぞれのビーム半径である (Figure 4 参照)。(1)式を用いてシミュレーションを行った。

また、シンクロトロンの中心にビームを入射した場合の空間電荷によるチューンシフト $\Delta \nu$ は次の式で表わされる^[4]。

$$\Delta \nu = \frac{N R r_0 Z^2}{\pi B \nu b (a + b) A \beta^2 \gamma^3} \quad (2)$$

ここで、 N はシンクロトロン中の粒子数、 R はシンクロトロン半径、 r_0 はプロトンの古典半径、 Z はイオン価数、 B は Bunching Factor、 ν はチューン、 A はイオンの質量数である。Table 3 に示すような実際の重粒子線がん治療装置で想定されるパラメータを(2)式に入れて $\Delta \nu$ を計算すると

$$\Delta \nu = 0.042$$

となる。

Table 3: Beam Parameters

a (m)	0.013
b (m)	0.011
r_0 (m)	$1.54E-18$
R (m)	10
ν	1.79
β^2	0.0085
γ	1.0
B	0.435
z	6
A	12

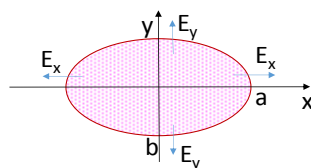


Figure 4: Cross section of the elliptical beam with uniform charge density.

4.3 空間電荷効果を考慮したビームの運動

前節で述べたように、ビームの電荷密度を一様としたモデルを考えると、空間電荷による電場は(1)式のように表わせる。よって、ビームの中心とシンクロトロン中心が一致している場合、Hill の方程式は以下ようになる。

$$x'' + (K(s) - K_{SC}(s))x = 0 \quad (3)$$

ここで、 s は軌道に沿った長さで、周回ごとに大きくなっていくように定義する。 $K_{SC}(s)$ の前の符号-は発散力であることを示している。また、 $K_{SC}(s)$ は、初期値として、ビームサイズ (ϵ)、Twiss parameter、電荷密度を与え、(3)式を逐次解いてゆくことで、 s の関数として一意的に決めることができる。もしビームのマッチングが取れていなければ、 $K_{SC}(s)$ は周期的にならないため、 s は周回ごとに大きくなるように定義する必要がある。もし、ビームの中心がシンクロトロン中心とずれていた場合、ビームの中心の座標を X_0 とすると(3)式は以下になる。

$$x'' + K(s)x - K_{SC}(s)(x - X_0) = 0 \quad (4)$$

ここで、 x を、ビームの中心座標 X_0 とその周りの座標 X で表す。すなわち

$$x = X_0 + X \quad (5)$$

とすると、(4)式は次のようになる。

$$X_0'' + X'' + K(s)X_0 + (K(s) - K_{SC}(s))X = 0 \quad (6)$$

(6)式を X_0 と X に関する2つの式に分離する。 $K(s)$ 、 $K_{SC}(s)$ はともに s のみの関数であることから

$$\begin{aligned} X_0'' + K(s)X_0 &= 0 \\ X'' + (K(s) - K_{SC}(s))X &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

と表わすことができると考えられる。(7)式は、ビームをシンクロトロン中心から外して入射した場合の空間電荷を考慮した粒子の運動は、空間電荷を考慮しないビーム中心の運動と、シンクロトロン中心にビームを入射し空間電荷を考慮した粒子の運動の合成で表わされることを示している。

4.4 シミュレーション結果

最初に、ビームをシンクロトロン中心に入射した時のシミュレーション結果を Figure 5 に示す。入射ビーム ($\epsilon = 25\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) の Twiss parameter β 、 α の値はシンクロトロンアクセプタンスの β 、 α と一致させて、マッチングをとっている ($\beta = 6.7$ 、 $\alpha = 1.08$)。C⁺ をパルス幅 $1\mu\text{s}$ で 5×10^9 個入射したときのイオン電流は約 5mA となる。ここでは、 $I = 0, 5, 50$ (mA) の場合について計算した。ビーム入射点である $S = 10.65$ (m) における入射時の楕円 ($\epsilon = 25\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) とその中の2つの粒子を赤色で、一周後の楕円と粒子を橙色で、98周後を緑色で示し

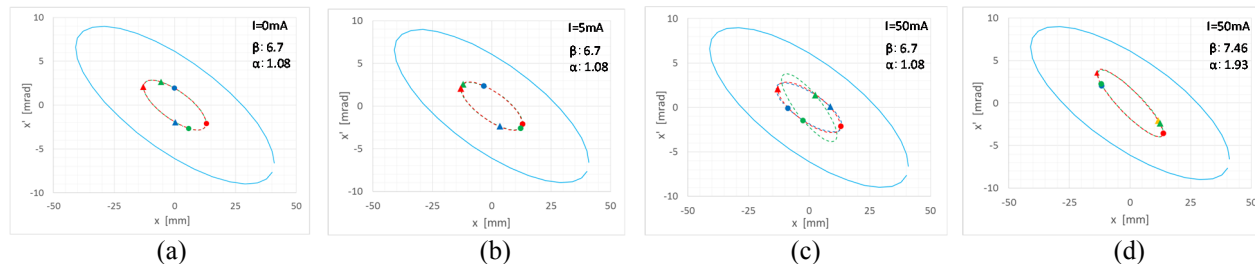


Figure 5: Synchrotron acceptance and beam shapes are described in the phase space at injection (red line), after one turn (blue line) and after 98 turns (green line), in the case of (a) $I = 0$, $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (b) $I = 5$ (mA), $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (c) $I = 50$ (mA), $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (d) $I = 50$ (mA), $\beta = 7.46$, $\alpha = 1.93$. Two particles are plotted at injection (red points), after one turn (blue points) and after 98 turns (green points) in each case. Beams were injected through the center of the synchrotron in the phase space.

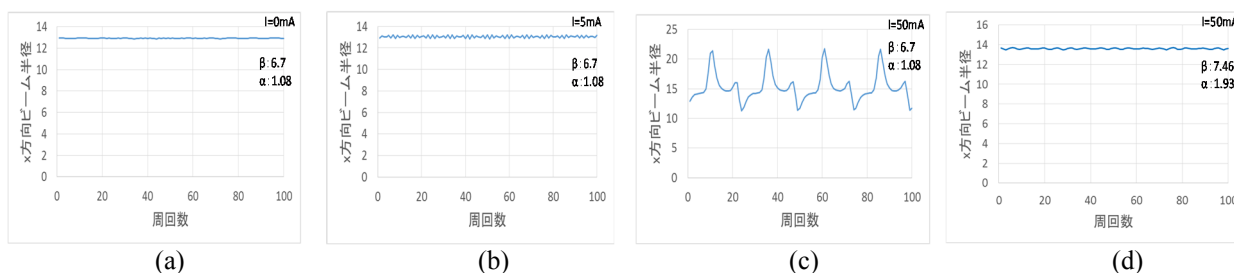


Figure 6: Histories of x-directional beam radius, in the case of (a) $I = 0$, $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (b) $I = 5$ (mA), $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (c) $I = 50$ (mA), $\beta = 6.7$, $\alpha = 1.08$, (d) $I = 50$ (mA), $\beta = 7.46$, $\alpha = 1.93$. Beams were injected through the center of the synchrotron in the phase space

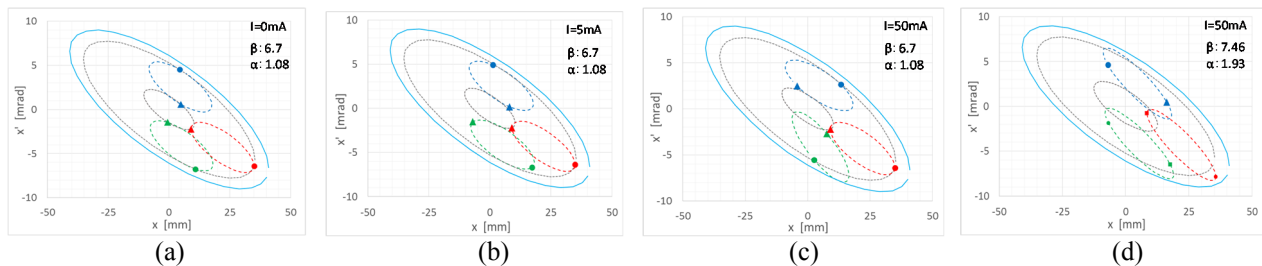


Figure 7: Synchrotron acceptance and beam shapes are described in the phase space at injection (red line), after one turn (blue line) and after 98 turns (green line), in the case of (a) $I=0$, $\beta=6.7$, $\alpha=1.08$, (b) $I=5$ (mA), $\beta=6.7$, $\alpha=1.08$, (c) $I=50$ (mA), $\beta=6.7$, $\alpha=1.08$, (d) $I=50$ (mA), $\beta=7.46$, $\alpha=1.93$. Two particles are plotted at injection (red points), after one turn (blue points) and after 98 turns (green points) in each case. Beams were injected off the center of the synchrotron in the phase space.

ている。粒子は楕円上を反時計回りに回転する。 $I=0$ と 5 (mA)では、入射時、一周後、98 周後も楕円形状にほとんど変化は見られないが、 $I=50$ (mA)では 98 周目の楕円形状が変化しており、空間電荷により Twiss parameter が変化したことを示している。Figure 6 は、 x 方向のビーム半径の周回ごとの変化の様子を示したものである。これを見ても $I=0$ と 5 (mA)ではほとんど半径が変化していないのに対し、 $I=50$ (mA)ではマッチングがとれていないことが分かる。ここで $\alpha=7.46$ 、 $\beta=1.93$ とすると、 $I=50$ (mA)においてもビーム半径の変化は見られず、マッチングがとれたビーム形状となっていることが分かる。また、個々の粒子の位置については、1 周後の粒子の位置を比べると、 $I=0$ 、5、50 (mA)で異なっており、粒子が反時計回りに回転していることより、電流が増えるとチューンが小さくなることが分かる。 $I=5$ (mA)のとき、回転角の差から求めたチューンシフト ($\Delta\nu$)の大きさは約 -0.042 であった。この値は 4.2 節の (2)式から求めた値とほぼ一致した。また、このチューンシフトの大きさならば 4 次以下の共鳴を避けることが可能である。

次に、ビームをシンクロトロンを中心から外して ($\Delta x=22$ (mm)、 $\Delta x'=-4.3$ (mrad)) 入射した時のシミュレーション結果を Figure 7 に示す。入射ビームの ε や Twiss parameter β 、 α の値は上述したビームと同じにした。 $I=0$ 、5、50 (mA)、および、 $I=50$ (mA)で $\alpha=7.46$ 、 $\beta=1.93$ とした場合のすべての場合において、1 周後および 98 周後の楕円形状と楕円上の粒子の位置が、中心に入射した場合とそれぞれの条件ですべて一致していることが分かる。さらに、 x 方向のビーム半径の周回ごとの変化の様子をそれぞれ 4 つの条件で調べたが、すべての条件で Figure 6 と全く同じ結果が得られた (図省略)。以上の結果からビーム中心を原点としたときの各粒子の運動は、ビーム電流やビームの Twiss parameter を同じにしてシンクロトロンを中心に入射したときの各粒子の運動と一致することが確認できた。

次にビームの中心の運動についても調べた結果、上記 4 つの条件で入射した各ビームの中心座標を周回ごとにプロットした点、および、ビーム中心と同

じ位置に単一粒子を入射したときの周回ごとの位置をプロットした点を 100 周分すべて重ね合わせた結果、すべてのデータ点が一致した (図省略)。これより、ビームの中心座標の動きは、空間電荷の有無、あるいは、その大きさや Twiss parameter を変化させてもそこに入射した単一粒子の運動と完全に一致することが確認できた。

5. 結論

レーザー生成プラズマから引き出され加速されたイオンをシンクロトロンにシングルターン入射したときの空間電荷を考慮したビーム軌道解析を行った。具体的には、シンクロトロンの水平方向の位相空間に、アクセプタンスの 1/10 程度のエミッタンスを持つ炭素ビーム (6 価) をシンクロトロンの中心からずらして入射する。

その結果、以下のことが分かった。

- ・周 (進行) 方向の速度広がりのため、ビームは入射から十数 ms 後には、アクセプタンス内の中心部を除いた領域にほぼ一杯に広がる。
- ・シミュレーションから求めたチューンシフトの大きさは約 -0.042 であり、理論式から求めた値とほぼ一致した。また、このチューンシフトの大きさならば 4 次以下の共鳴を避けることが可能である。
- ・ビームをシンクロトロンを中心から外して入射した場合の空間電荷を考慮した粒子の運動は、空間電荷を考慮しないビーム中心の運動と、シンクロトロンを中心に入射し空間電荷を考慮した粒子の運動の合成で表わされることを、粒子軌道シミュレーションで確認した。

参考文献

- [1] [2] T. P. Hughes, "Plasmas and Laser Light", Published by Adam Hilger, 1975, P.386, P.37.
- [3] K. Schindl, "SPACE CHARGE", CERN, CH-1211 Geneva 23.
- [4] L. J. Laslett, "Accelerators and Experimentation at Super-High Energies", Proc. 1963 Summer Study on Storage Rings, Brookhaven (BNL7534), p.324.