

第13回 加速器学会年会

TUOM03

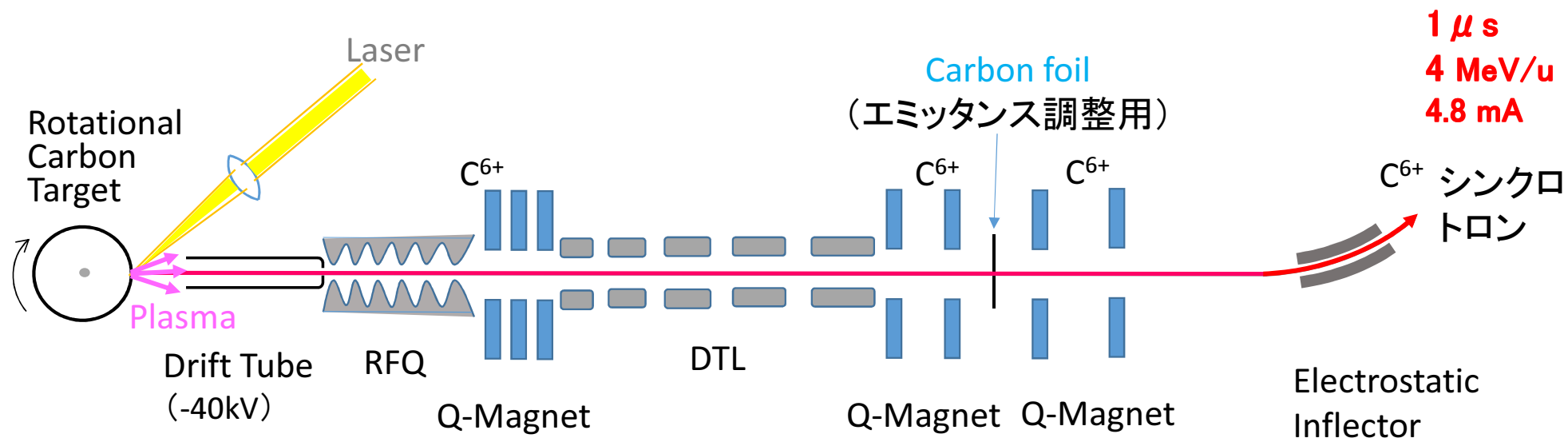
レーザーイオン源からシンクロトロンにシングルターン入射を行ったときのビーム不安定性の検討

野田悦夫, 中尾政夫, 野田章, 野田耕司
後藤彰², 岩井岳夫², 山口晶子³, 佐古貴行³
放医研, 山形大², 東芝³

発表の概要

- レーザーイオン源の概要
- シンクロトロンへのシングルターン入射の検討
- Space Charge の効果
- 整数および半整数共鳴による不安定性の検討

レーザーイオン源の概要



レーザーイオン源

線形加速器

	ドリフトチューブ出口	RFQ出口	DTL出口
イオンエネルギー	20keV/u	600keV/u	4.0MeV/u
パルス幅	1~1.5μs	1~1.5μs	1~1.5μs

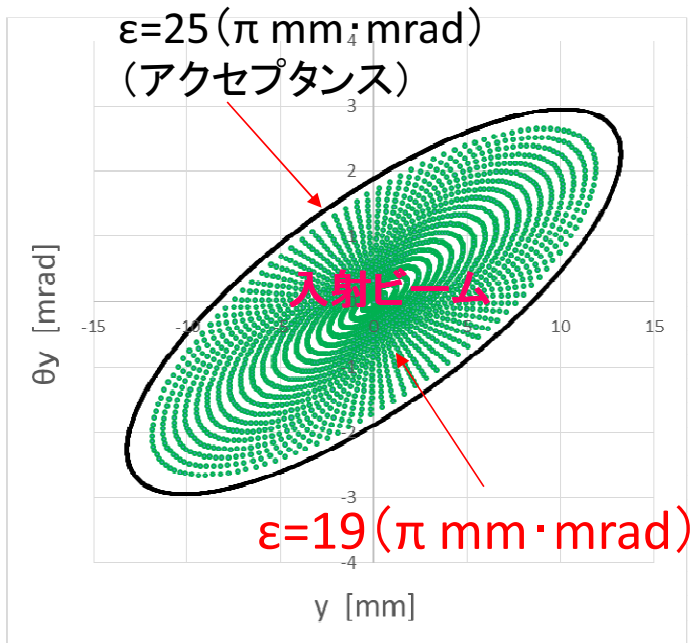
C⁶⁺イオン粒子数
5 × 10⁹ ppp
普及型重粒子線がん
治療装置とほぼ同じ

パルス幅 < シンクロトロンでの周回時間 (~2.3μs) → 1ターン入射

↓
1μs 4.8mA

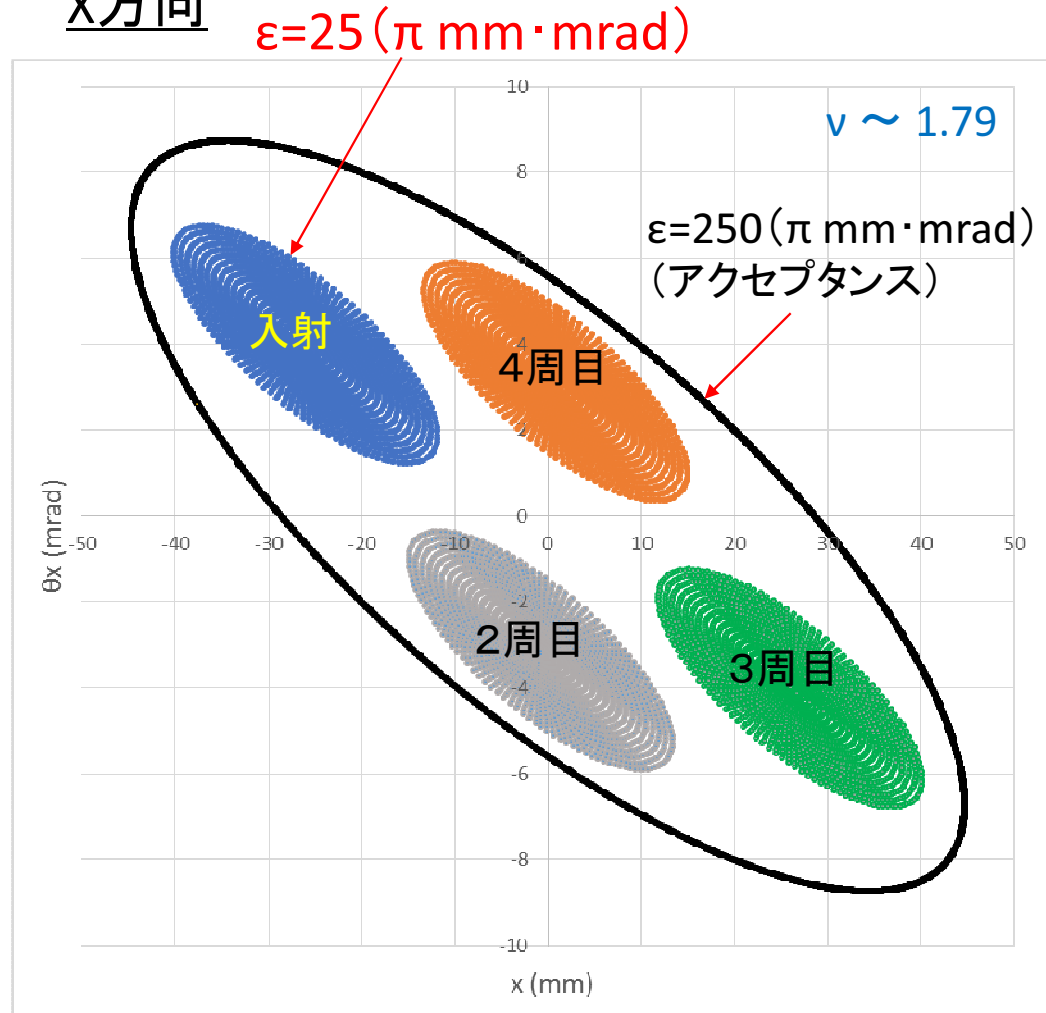
シンクロトロンへの入射

y方向



入射ビームのy方向のエミッタンスとシンクロトロンのアクセプタンス

x方向



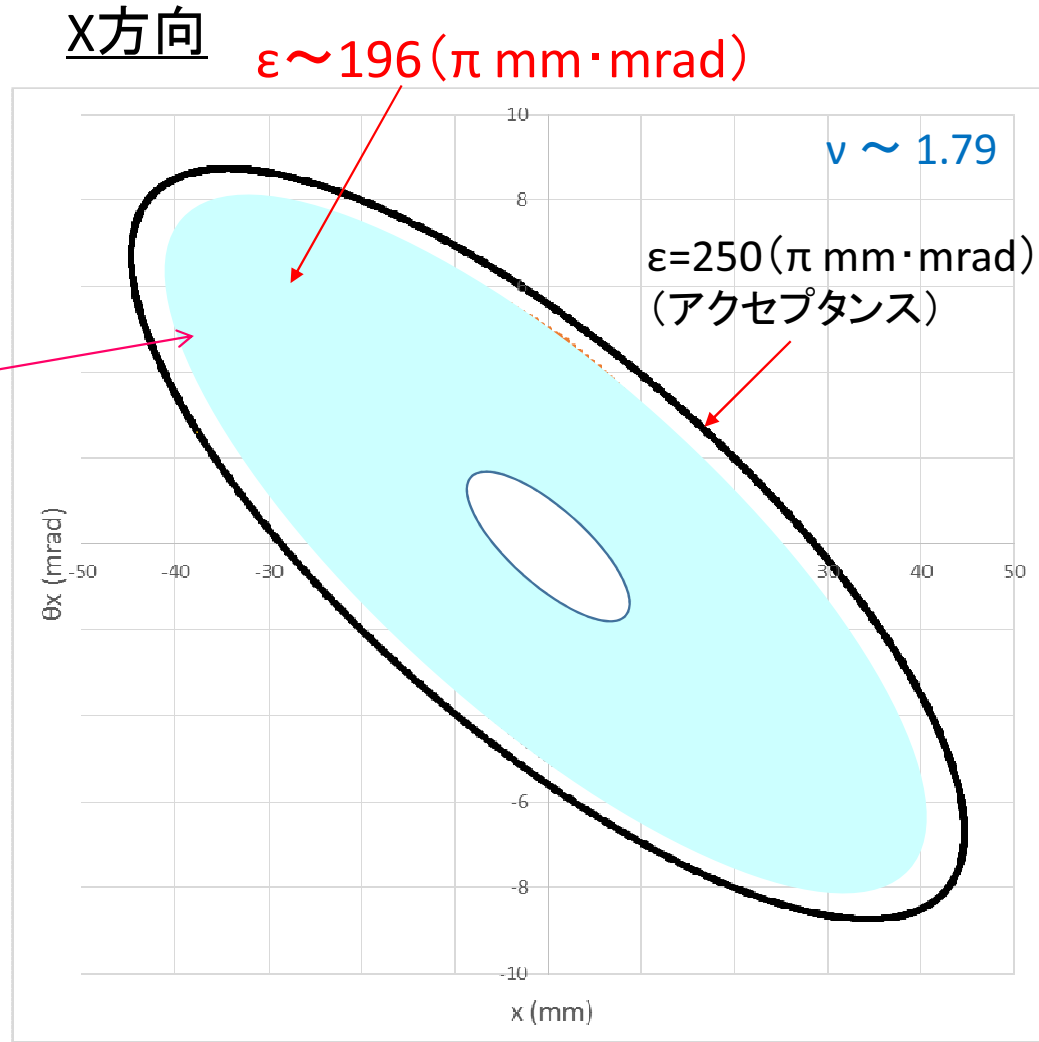
入射ビームのx方向のエミッタンスとシンクロトロンのアクセプタンス
(4周分を同時に表示)

シンクロトロンへの入射

パル幅 $\sim 1 \mu s$ のビームを入射
(アクセプタンスの1/10程度のエミッタンスのビーム)



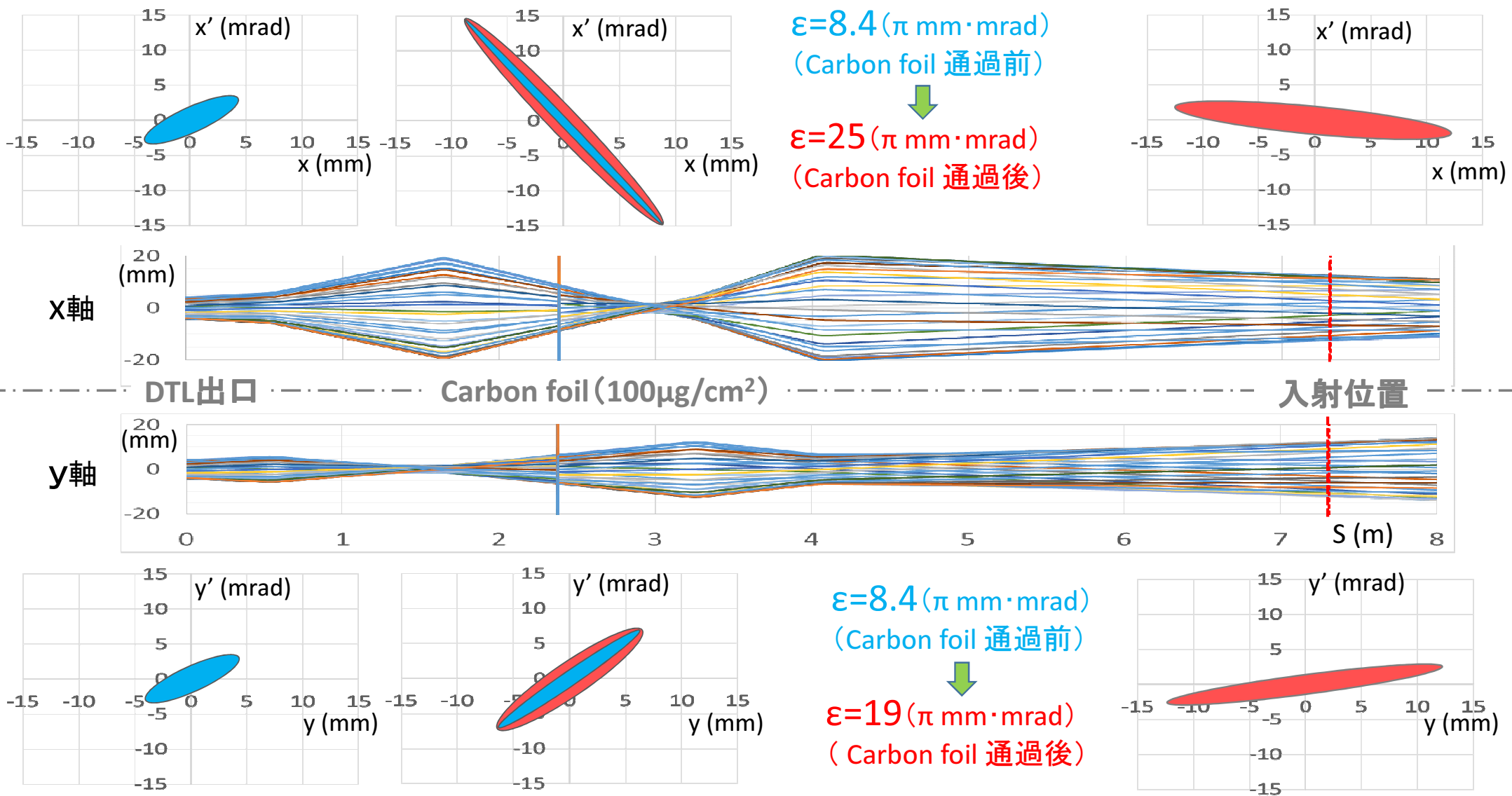
最終的に、位相空間内を
うめつくす



Bump磁石と
静電インフレクタ

B.Mの変化
速度、ESIの
印可電圧が
ともに比較
的小さくて
すむ

入射ビームのx方向のエミッタンスとシンクロトロンのアクセプタンス
(4周分を同時に表示)



シンクロトロン入射時のビームエミッタンス調整 (DTL出射以降)

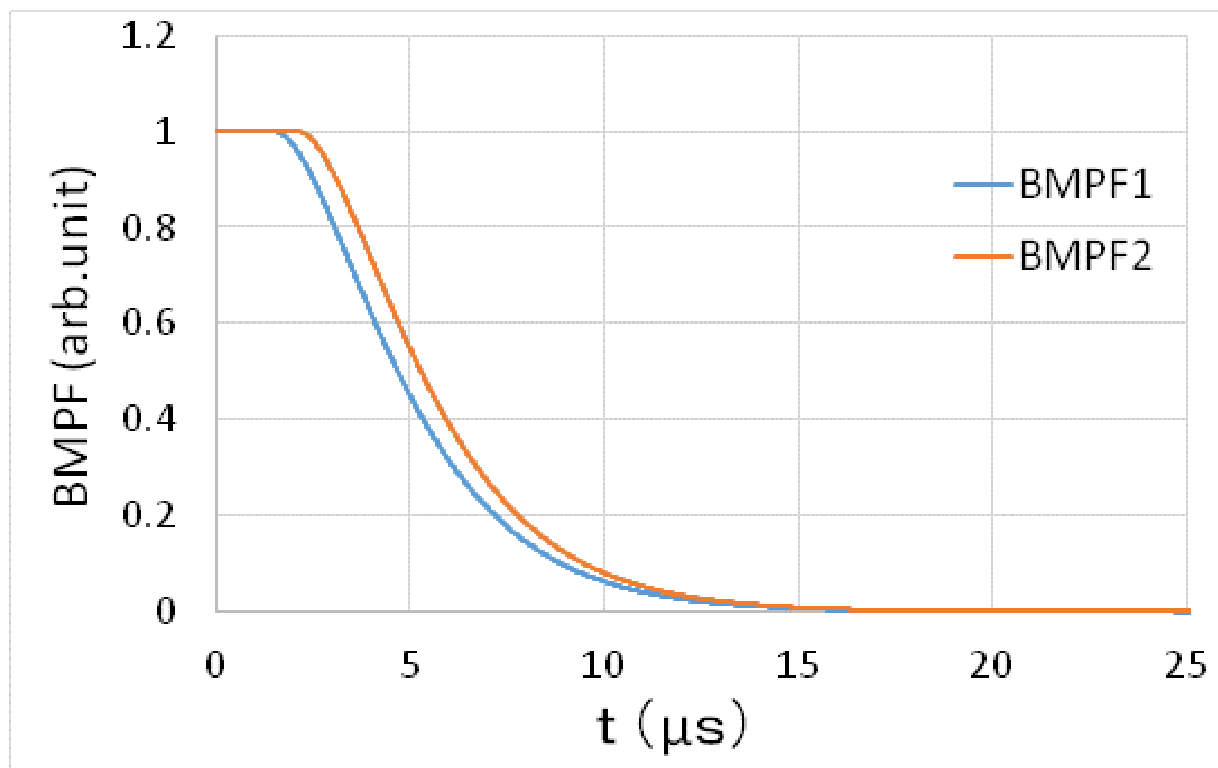
シンクロトロン入射時のビームパラメータ等

入射ビームのパルス幅	1 (μ s)
速度 v_z (4MeV)	2.78.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 (μ s) 16.5(m)
シンクロトロンを1周回る時間	2.3 (μ s)
さらに、ビームが	
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)

シンクロトロンのMagnet配置

Magnet	S(m)
Start	0
BMPF1	2.59
QD	2.93
QF	8
ESI	10.155
INJ	10.65
QD	13.48
QF	18.55
BMPF2	21.49
QD	24.03
QF	29.1
QD	34.58
QF	39.65
QD	45.13
QF	50.2
QD	55.68
QF	60.75
End	63.3
$\nu_x \sim 1.79$	

BUMP磁石を用いたシンクロトロンへの入射

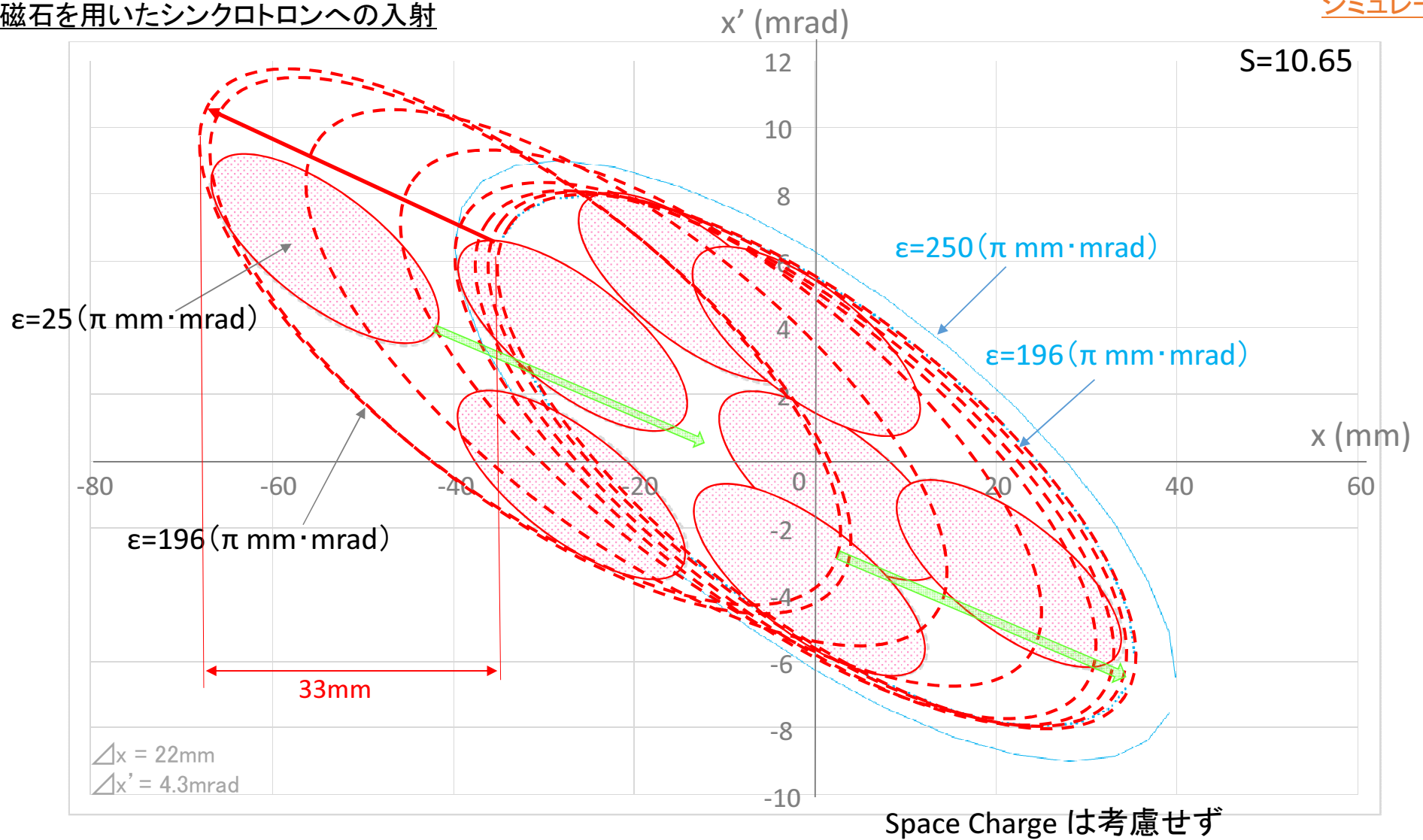


BUMP磁石の時間変化 (Dump波形)

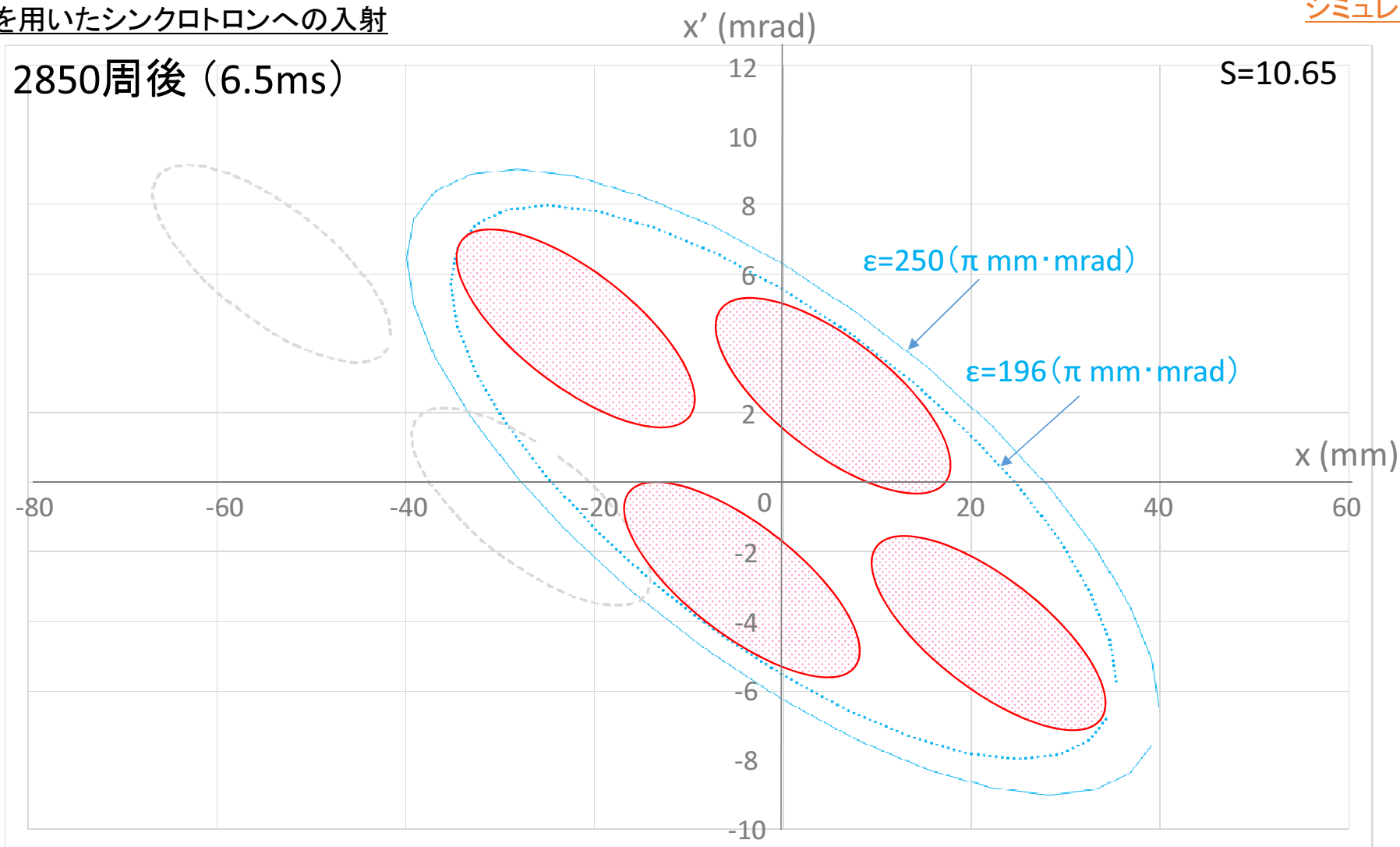
シンクロトロンのMagnet配置

Magnet	S(m)
Start	0
BMPF1	2.59
QD	2.93
QF	8
ESI	10.155
INJ	10.65
QD	13.48
QF	18.55
BMPF2	21.49
QD	24.03
QF	29.1
QD	34.58
QF	39.65
QD	45.13
QF	50.2
QD	55.68
QF	60.75
End	63.3
$\nu_x \sim 1.79$	

BUMP磁石を用いたシンクロトロンへの入射

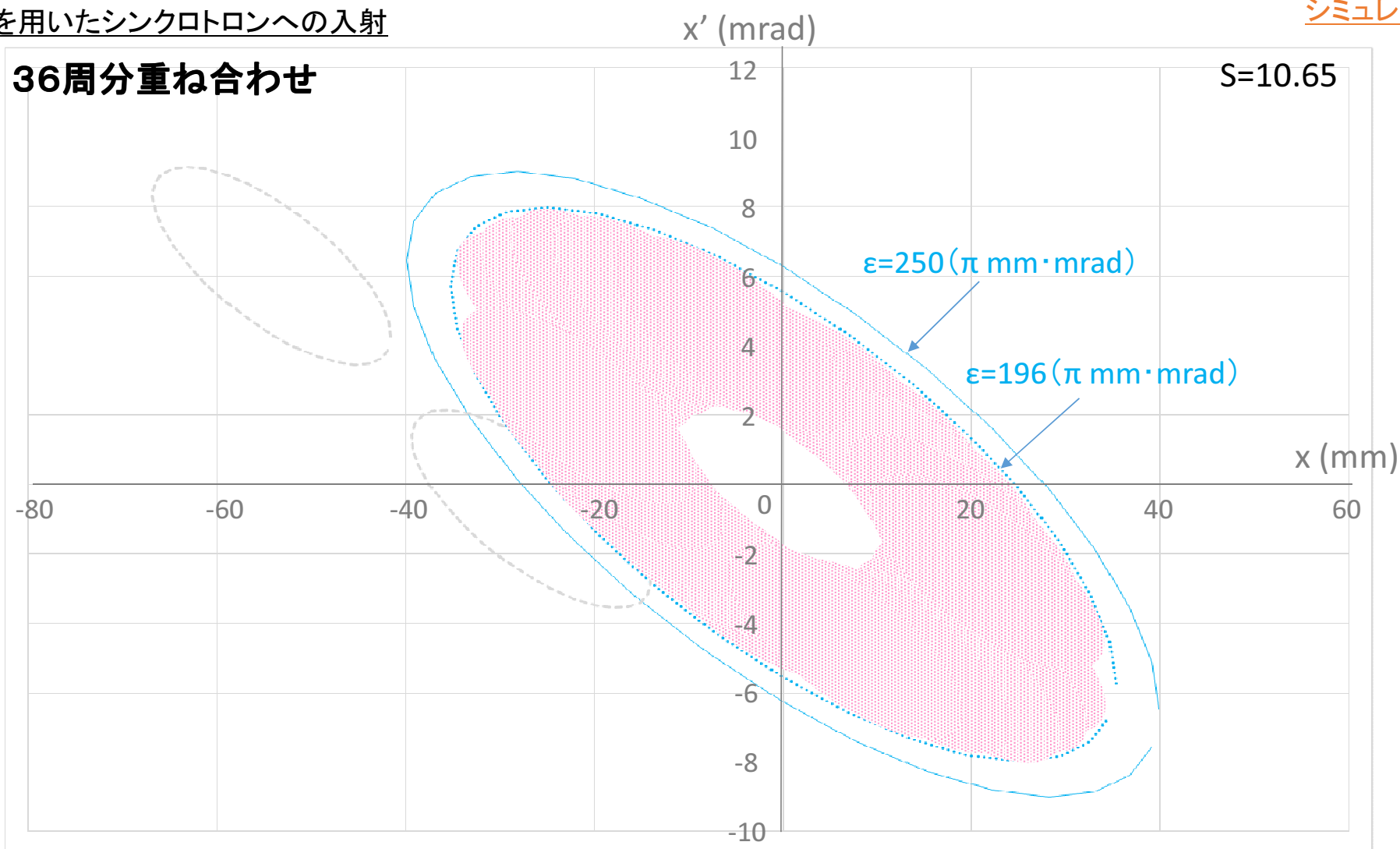


入射後のビーム軌道



入射後のビーム軌道

36周分重ね合わせ



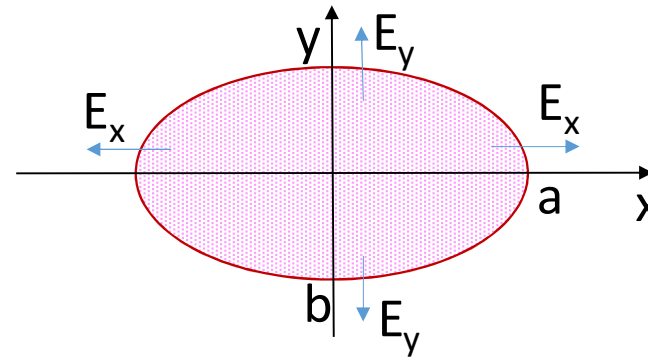
入射後のビーム軌道

Space Charge とチューンシフト

(入射時はビームが細い)

正電荷が一様に分布している楕円柱が作る電界 E_{sc} は以下の式であらわされる (Shindle)

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



また、チューンシフト $\Delta\nu$ は

$$\Delta\nu_x = \frac{NRr_0Z^2}{v_x B \pi b (a+b) \beta^2 \gamma^3} \quad (\text{Laslett})$$

(r_0 : 陽子の古典半径, B : Bunching Factor)

右のパラメータを用いて計算すると

$$\Delta\nu_x = 0.039 \quad (\rightarrow \text{シミュレーションとほぼ一致した})$$

$\Delta\nu$ を計算する際に用いたパラメータ	
a (m)	0.0129
b (m)	0.0115
R (m)	10
ν	1.75
β^2	0.0084
γ	1.004
B	0.44
N	5×10^9
z	6

$\rightarrow I=4.8\text{mA}$

Space Charge を考慮した時の Hill's equation

$$x'' + K(s)x - K_{SC}(s)(x - X_0) = 0 \quad (X_0 \text{ はビームの中心座標})$$

(X_0 はシンクロトロンとは一致していない)

ここで $x = X_0 + X$ とおくと (X はビーム中心のまわりの座標)

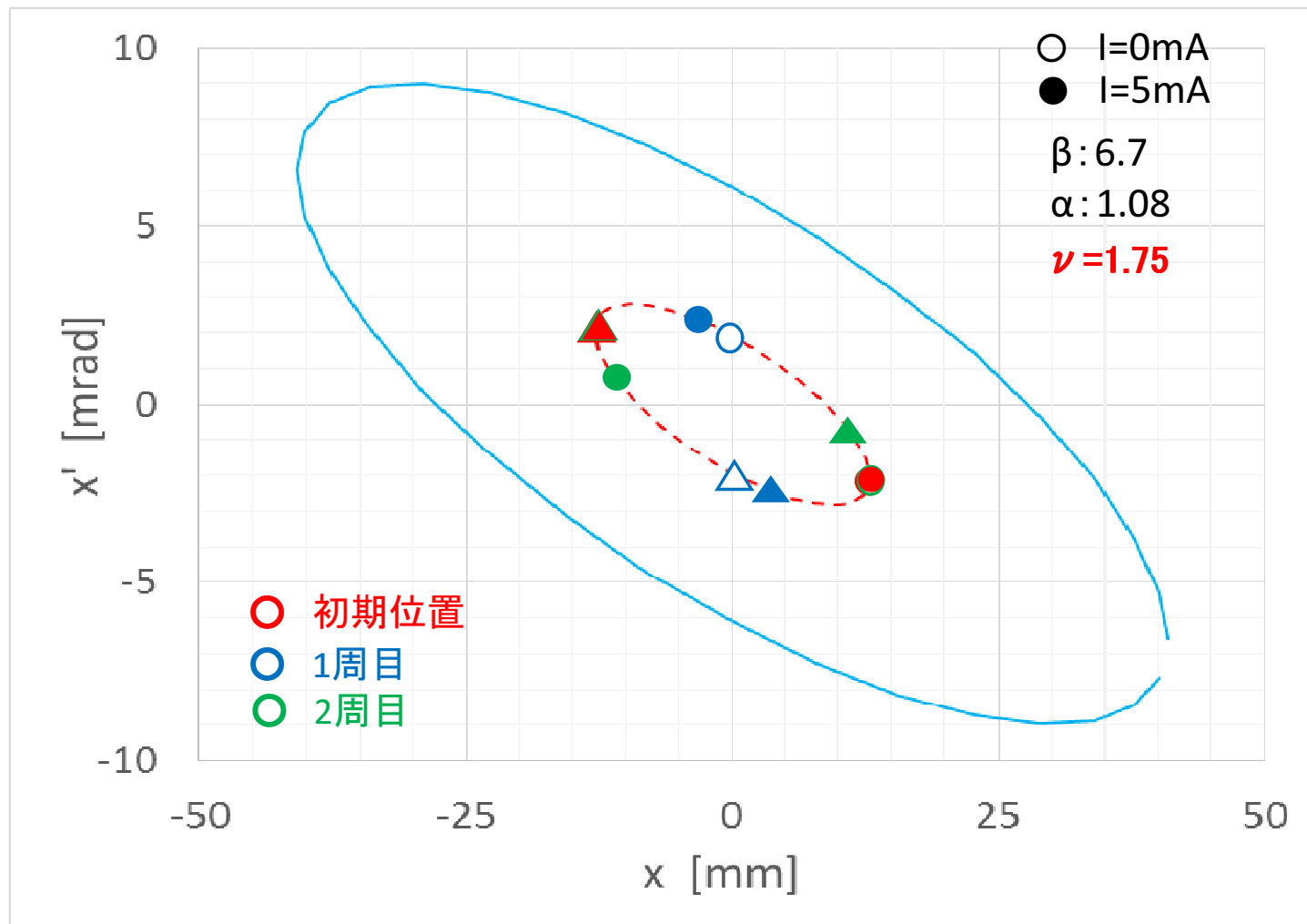
$$X_0'' + X'' + K(s)X_0 + (K(s) - K_{SC}(s))X = 0$$

すべての粒子の平均をとると、Space Chargeによる力は0となるので

$$X_0'' + K(s)X_0 = 0$$

$$X'' + (K(s) - K_{SC}(s))X = 0$$

- ・ビーム中心軌道は、Space Chargeの影響を受けない
- ・ビーム中心のまわりの軌道は、Space Chargeの影響を受け、ビームをシンクロトロンの中心に入射した時の軌道と同じとなる

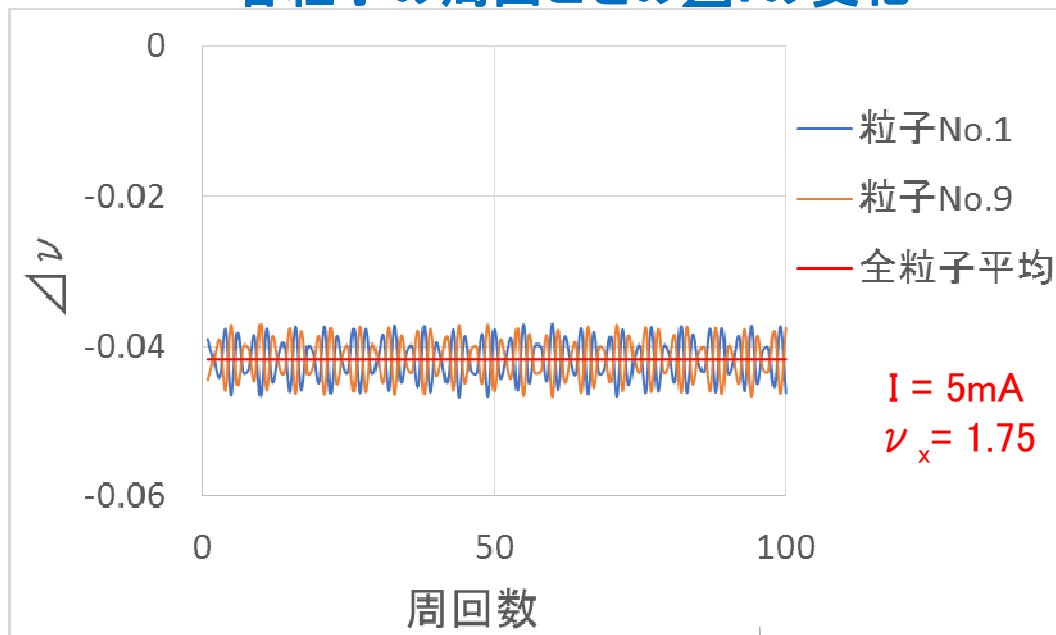


シンクロトロンを中心にビームを入射した場合の粒子軌道

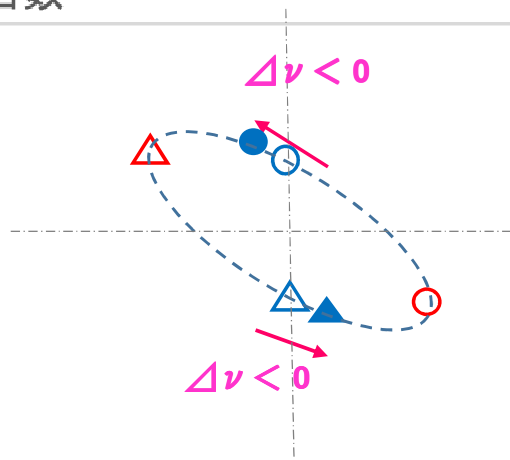
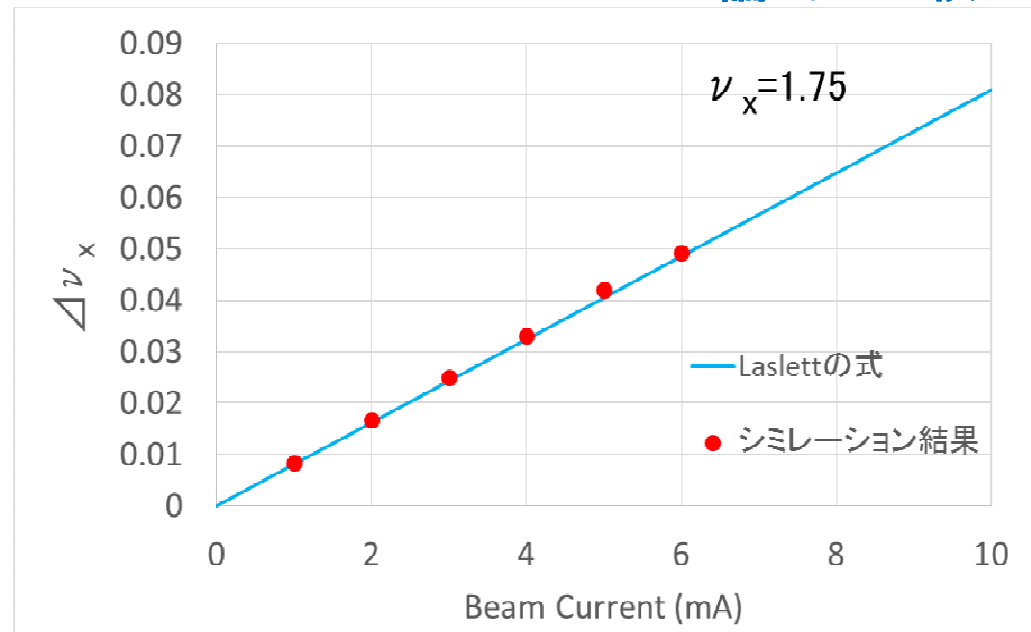
シミュレーションからチューシフトの大きさを計算する

シミュレーション結果

各粒子の周回ごとの $\Delta\nu$ の変化



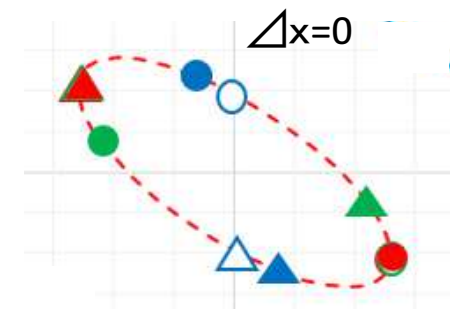
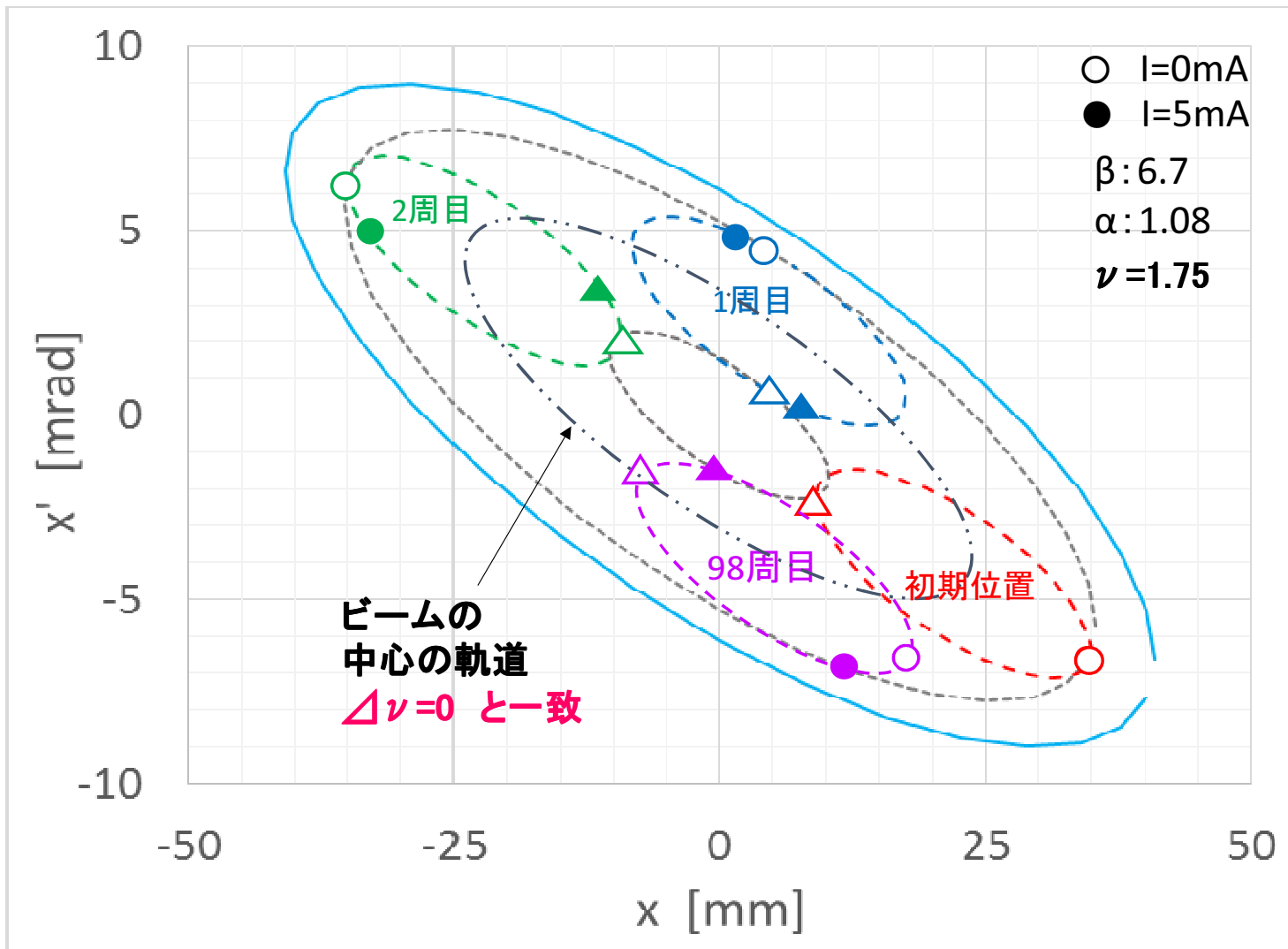
シミュレーションと理論式の比較



Laslettの式

$$\Delta\nu_x = \frac{NRr_0Z^2}{\nu_x B\pi b(a+b)\beta^2\gamma^3}$$

→ チューンシフトの大きさはシミュレーションと一致した



中心に入射した場合の粒子軌道

ビーム中心のまわりの粒子軌道は、S.C.の影響を受け、ビームを中心に入射した時の軌道と同じとなる

ビームの中心軌道は、S.C.の影響を受けない

シンクロトロンを中心から外してビームを入射した場合の粒子軌道

誤差磁場を考慮した時の Hill's equation

2極誤差磁場のとき

$$x'' + K(s)x - K_{SC}(s)(x - X_0) = \underline{F_{\Delta B}(s)} \quad (X_0 \text{ はビームの中心座標})$$

$$(F_{\Delta B}(s) = F_{\Delta B}(s + nL))$$

ここで $x = X_0 + X$ とおくと

(X はビーム中心のまわりの座標)

$$X_0'' + X'' + K(s)X_0 + (K(s) - K_{SC}(s))X = F_{\Delta B}(s)$$

$F_{\Delta B}(s)$ は、すべての粒子に同じように働くので、平均をとった X_0 に対しても同じように働くので

$$X_0'' + K(s)X_0 = F_{\Delta B}(s)$$

よって $X'' + (K(s) - K_{SC}(s))X = 0$

- ・ X_0 は、2極誤差磁場の影響を受けるが、s.c.の影響を受けない
- ・ X は、s.c.の影響を受けるが、2極誤差磁場の影響を受けない

誤差磁場を考慮した時の Hill's equation

$$x'' + K(s)x - K_{SC}(s)(x - X_0) = \underline{K_{\Delta B}(s)}x$$

ここで $x = X_0 + X$ とおくと

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

$$X_0'' + K(s)X_0 = \underline{K_{\Delta B}(s)}X_0$$

$$X'' + (K(s) - K_{SC}(s))X = \underline{K_{\Delta B}(s)}X$$

4極誤差磁場のとき

(X_0 はビームの中心座標)

($K_{\Delta B}(s) = K_{\Delta B}(s + nL)$)

(X はビーム中心のまわりの座標)

- X_0 は Space Charge の影響を受けない。もし、 X_0 が最初からシンクロトロン中心にあれば、 X_0 は 0 のままとなり、4極誤差磁場の影響を受けない。
- 今回は、シンクロトン中心を外したビーム入射を考えているので、 X_0 も X も 4極誤差磁場の影響を受ける。

エンベロップ方程式を用いると、チューンシフトの大きさと共鳴の関係が導かれ、それによると、 x 方向と y 方向のチューンが異なる場合には

$$(\nu - \Delta\nu / 1.6) = m / 2$$

不安定性の発生条件（場合分け）

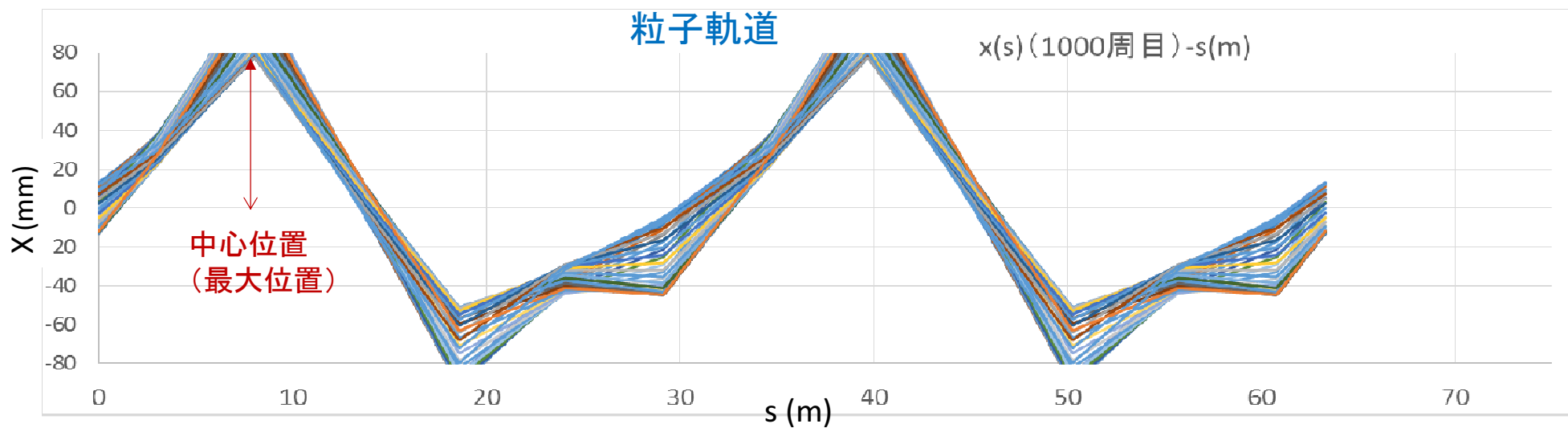
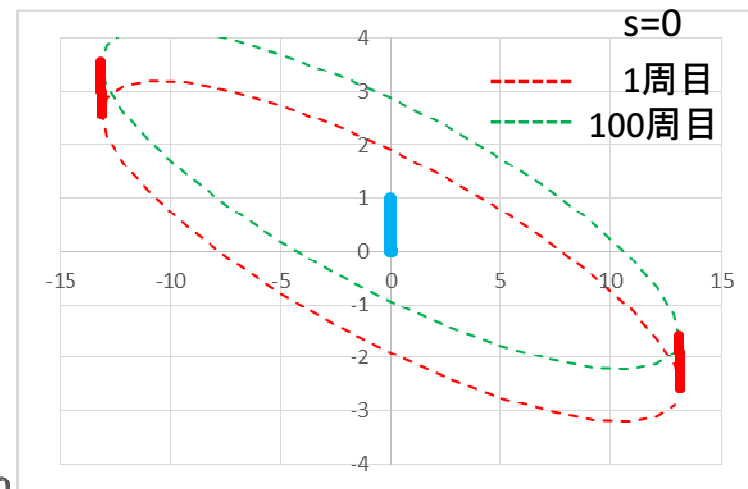
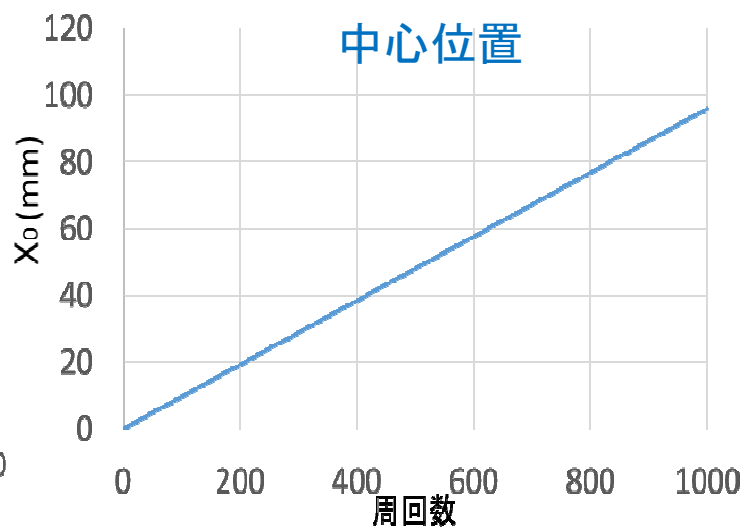
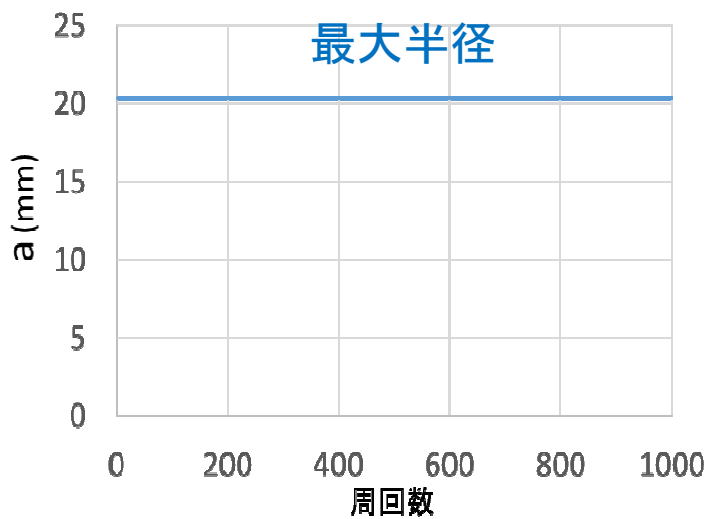
○: 不安定性発生
 ×: 発生せず

中心へ入射 ($X_0=0$)			
2極誤差磁場			
ν	$\Delta\nu$	X_0	$r \times (=a)$
m	0	○	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu \neq m$)	○	×
$\neq m$	0	×	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu = m$)	×	×
4極誤差磁場			
m/2	0	×	○
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu \neq m/2$)	×	×
$\neq m/2$	0	×	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu / \alpha = m/2$)	×	○

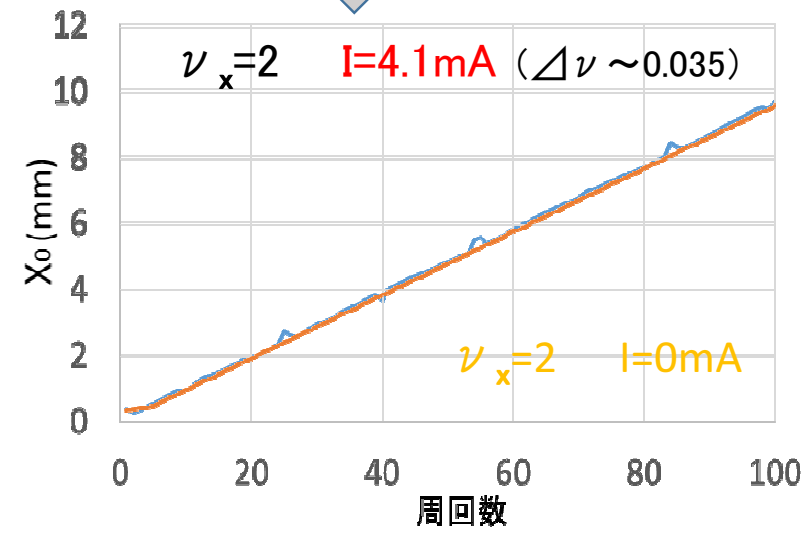
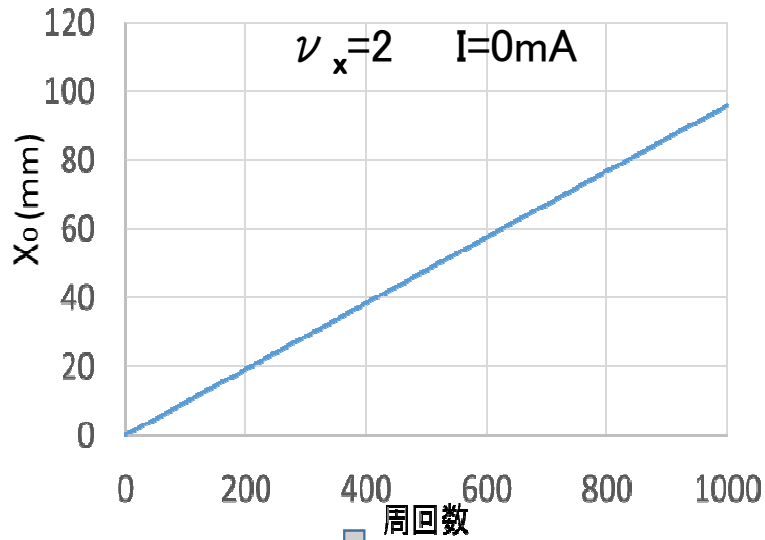
中心を外して入射 ($X_0 \neq 0$)			
2極誤差磁場			
ν	$\Delta\nu$	X_0	$r \times (=a)$
m	0	○	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu \neq m$)	○	×
$\neq m$	0	×	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu = m$)	×	×
4極誤差磁場			
m/2	0	○	○
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu \neq m/2$)	○	×
$\neq m/2$	0	×	×
	$\neq 0$ ($\nu - \Delta\nu / \alpha = m/2$)	×	○

2極誤差磁場 $\nu_x=2$ $I=0\text{mA}$

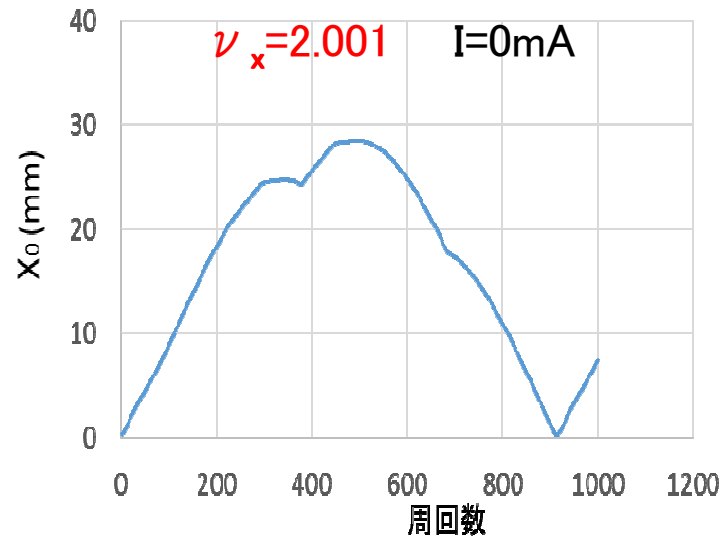
中心へ入射 シミュレーション結果



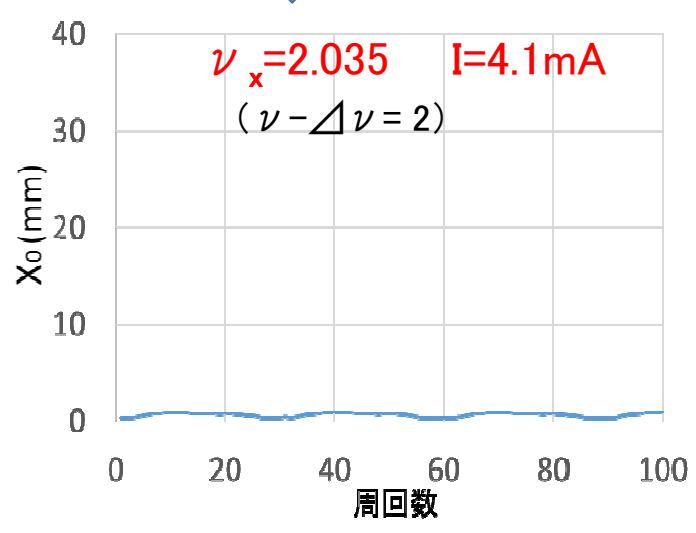
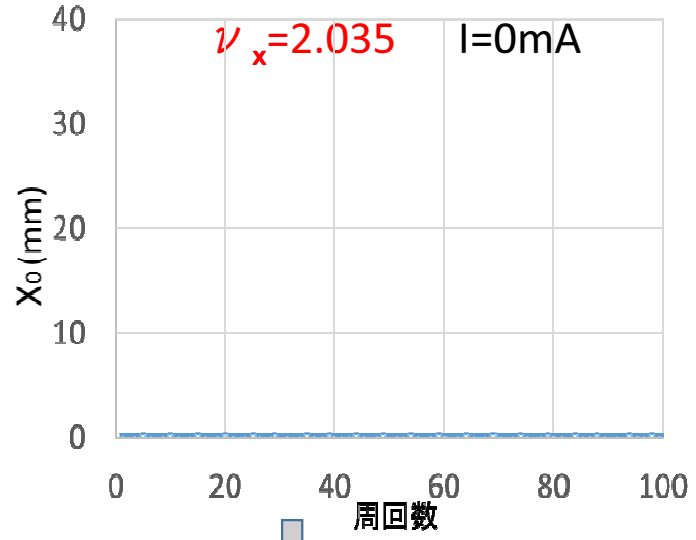
2極誤差磁場 (ν と電流を振る)



中心位置

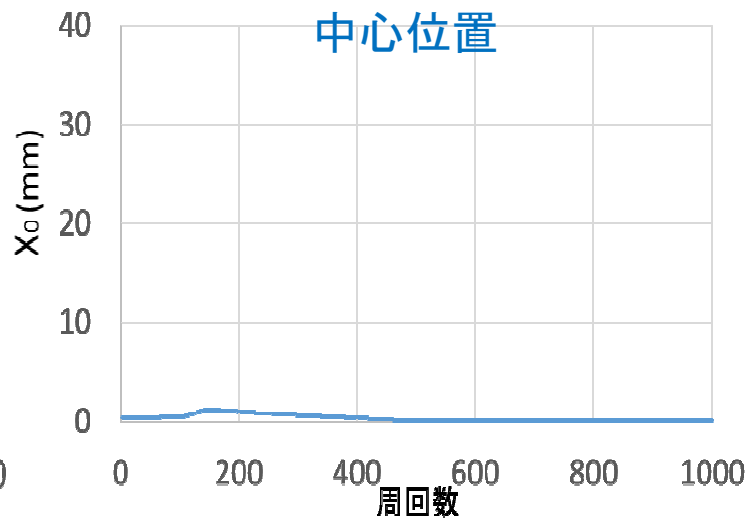
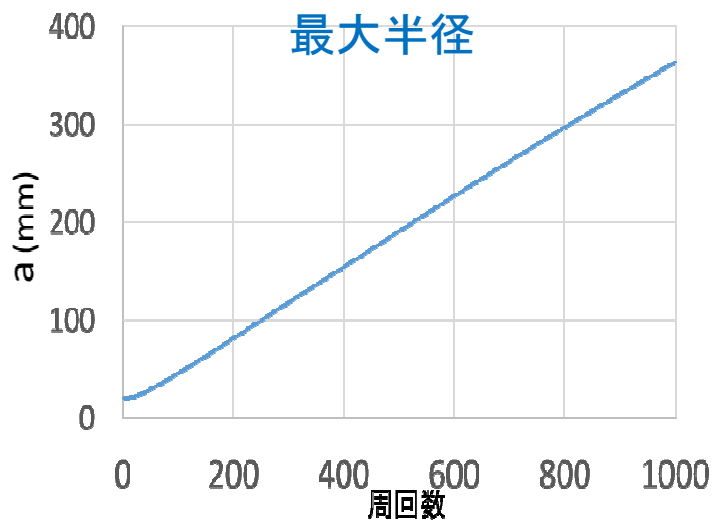


中心へ入射 シミュレーション結果

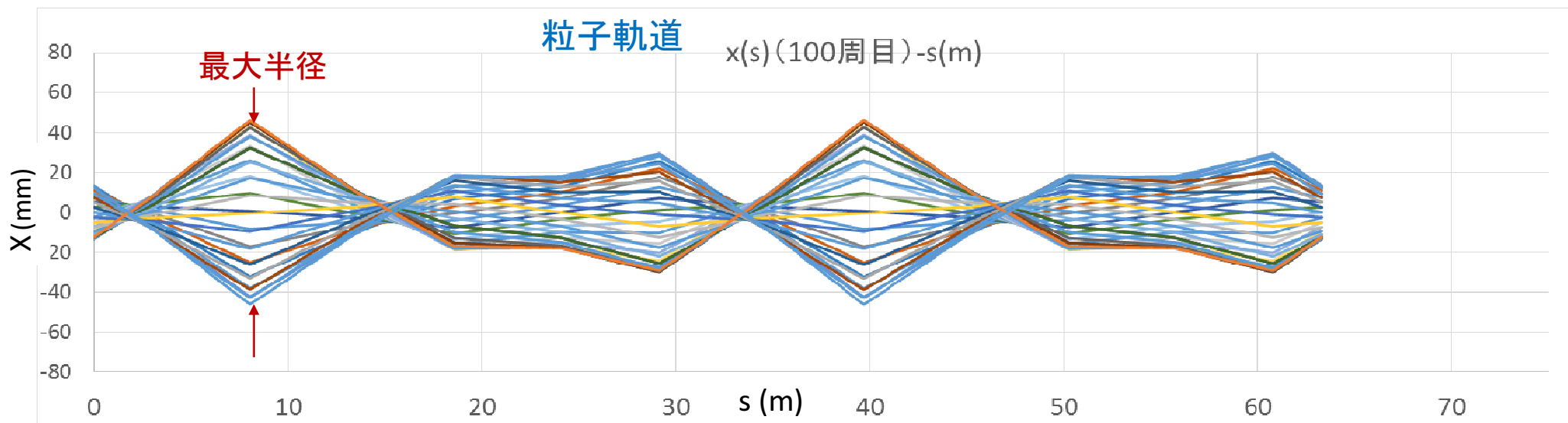
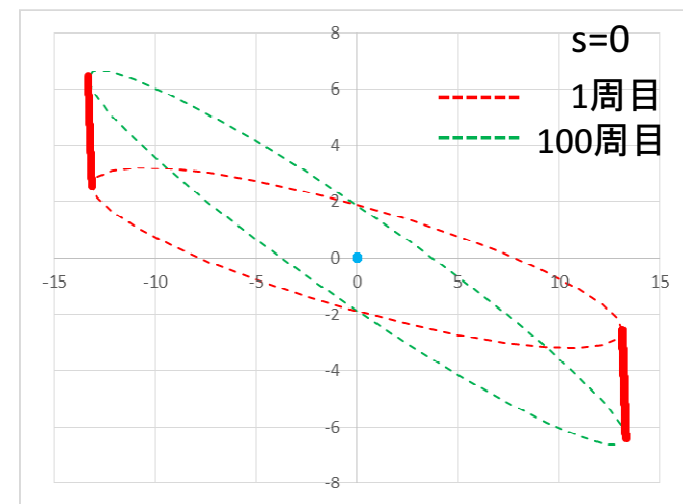


電流($\Delta\nu$)には依存しない

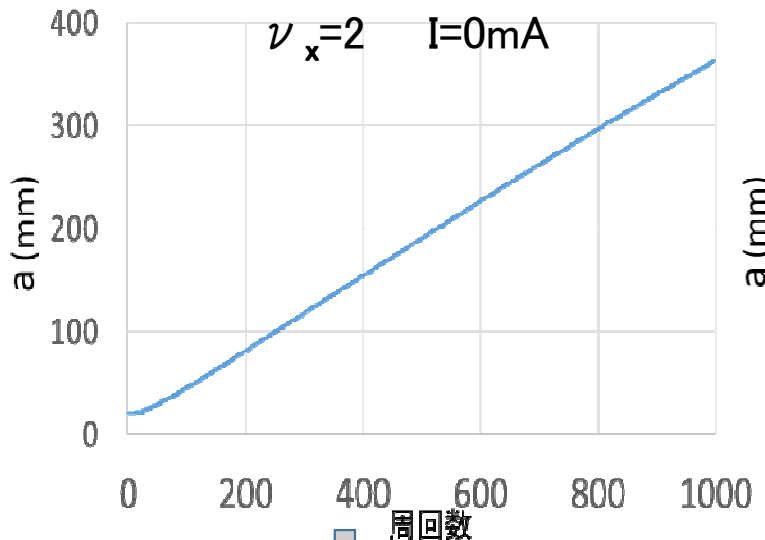
4極誤差磁場 $\nu_x=2$ $I=0\text{mA}$



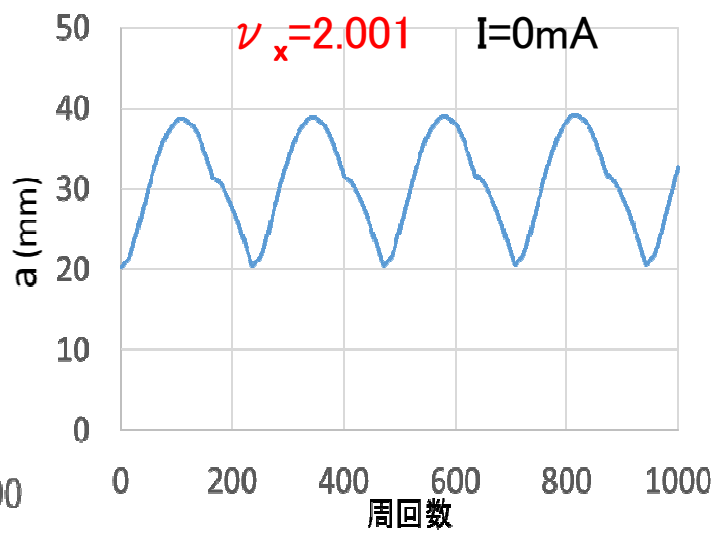
中心へ入射 シミュレーション結果



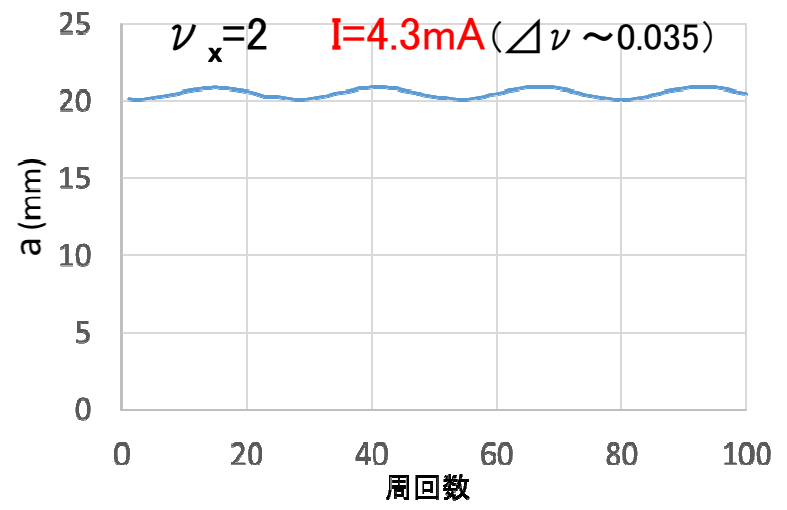
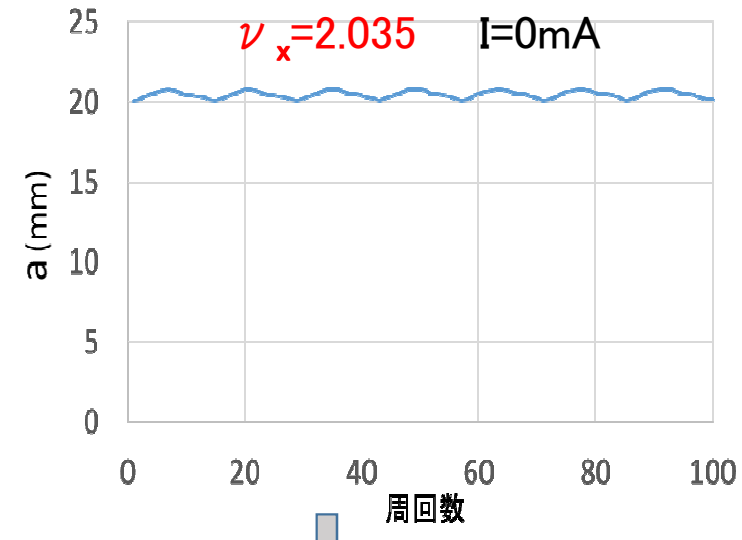
4極誤差磁場 (ν と電流を振る)



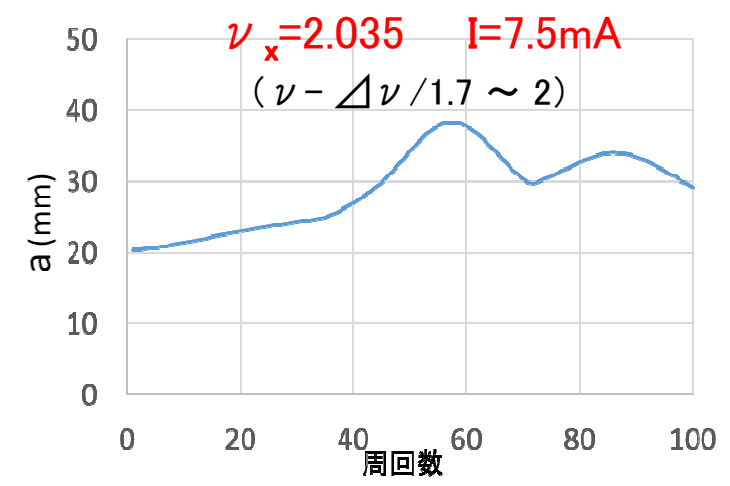
最大半径



中心へ入射 シミュレーション結果



電流($\Delta\nu$)
に依存する

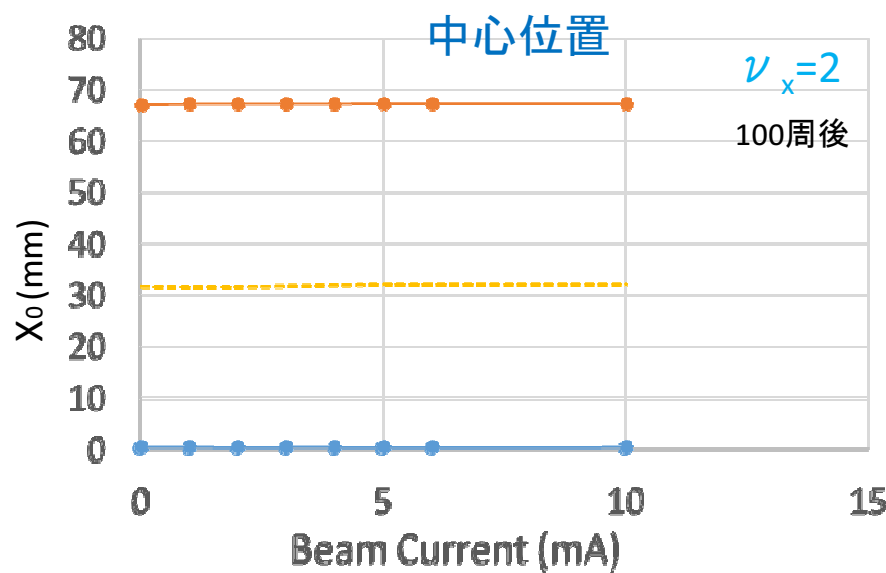
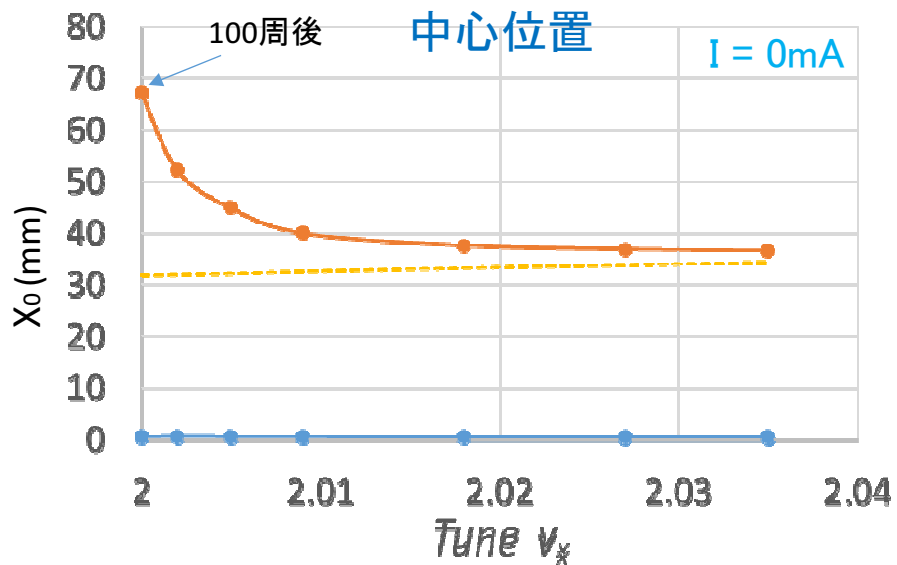


中心に入射した時と中心を外して入射した時の比較

4極誤差磁場

中心位置

シミュレーション結果



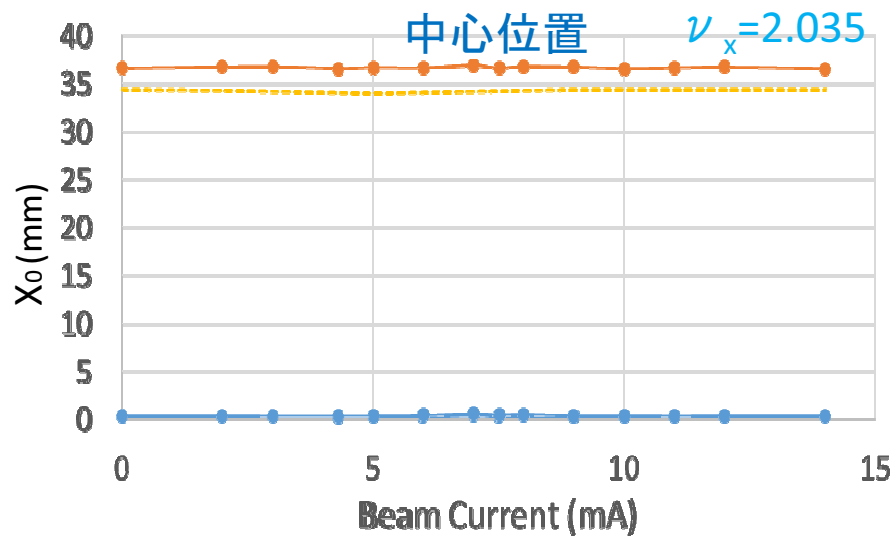
— 中心に入射
— 中心を外して入射

中心に入射した場合

ν_x および電流 ($\Delta\nu_x$) にはよらず中心位置は変動しない。

中心を外して入射した場合

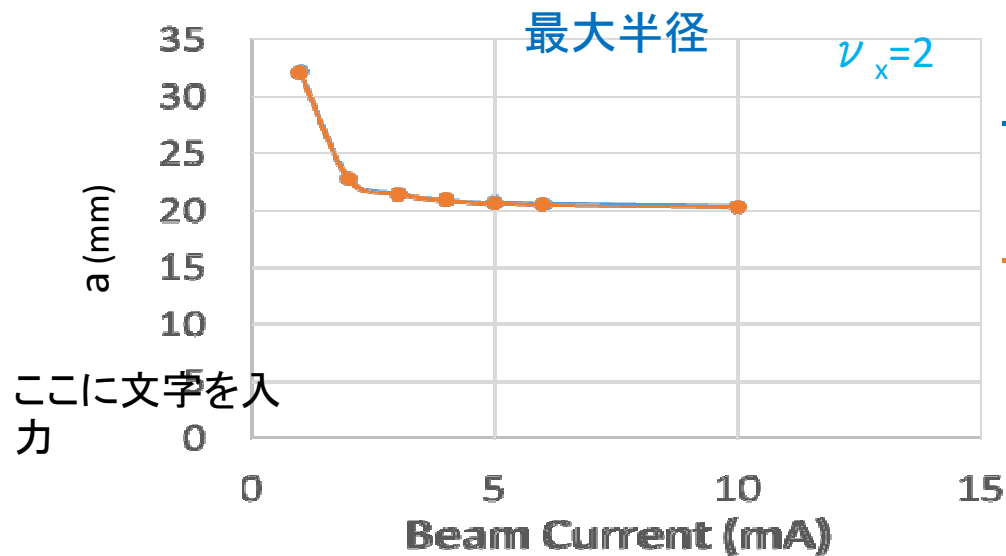
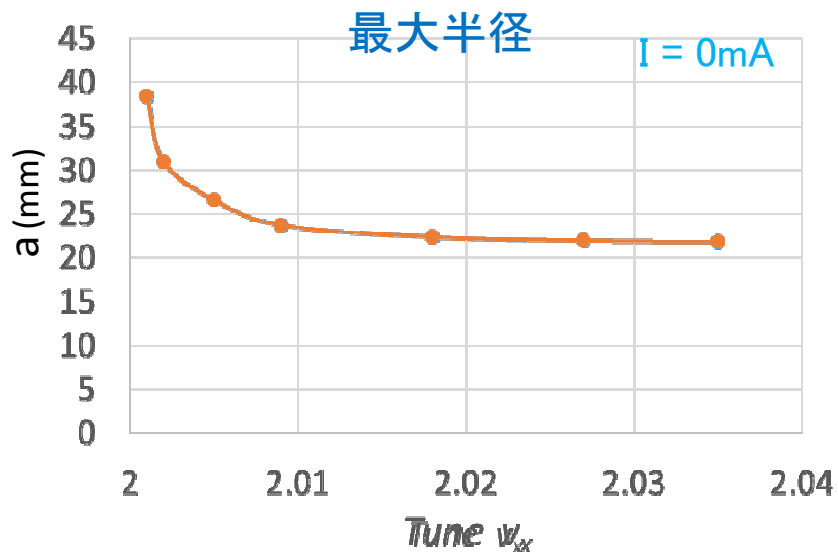
ν_x が2の付近で中心位置は大きく変動する。電流依存 ($\Delta\nu_x$) は無い。



中心に入射した時と中心を外して入射した時の比較

4極誤差磁場 半径

シミュレーション結果

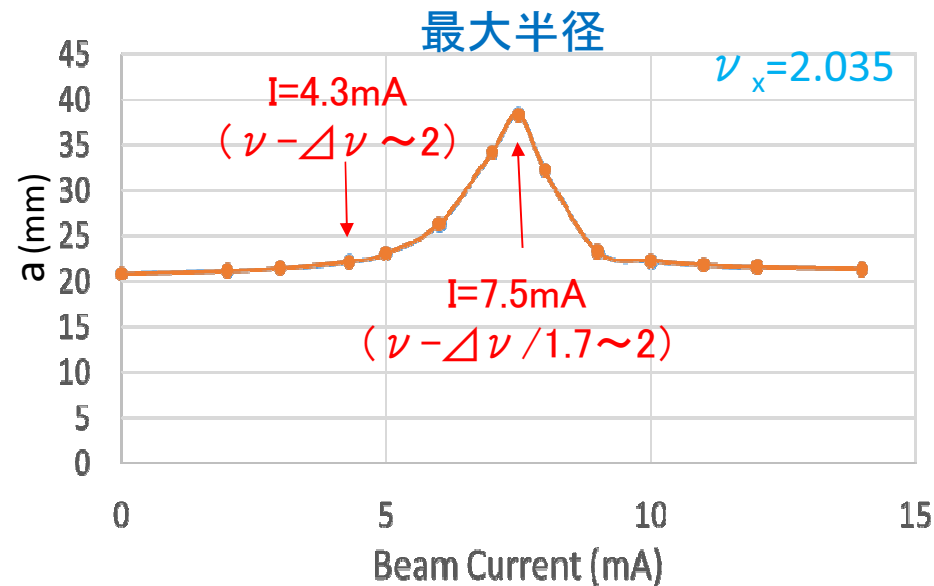


— 中心に入射
— 中心を外して入射

ここに文字を入力

中心に入射した場合
 ν_x および電流 ($\Delta\nu_x$) に依存して半径は変動する。
 $2(\nu - \Delta\nu / \alpha) = n$ ($\alpha \sim 1.7$)
 のとき最大半径が最大になる。

中心を外して入射した場合
 中心に入射した場合と一致した。



あらかじめチューンを0.04程度はずしておくことで5mAでも大丈夫

まとめ

- ・レーザーイオン源からシンクロトロンへの入射
BUMP磁石を用いたシングルターン入射の検討を行った
- ・入射ビームへのSpace Charge の効果の検討
- ・入射ビームの整数(半整数)共鳴による不安定性の検討
ビーム中心軌道とそのまわりの粒子軌道について調べた
(理論とシミュレーション)
- ・今回提案した入射方式は可能性があると考えられる