

KEK-PFにおける 入射効率改善のための研究

平野広太

放射光物理研究室

2019年2月13日(木)

1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射シミュレーション
4. 入射最適化
5. まとめ

1. はじめに

- ・入射とは
- ・研究背景・目的

2. 入射パラメータの測定

3. 入射シミュレーション

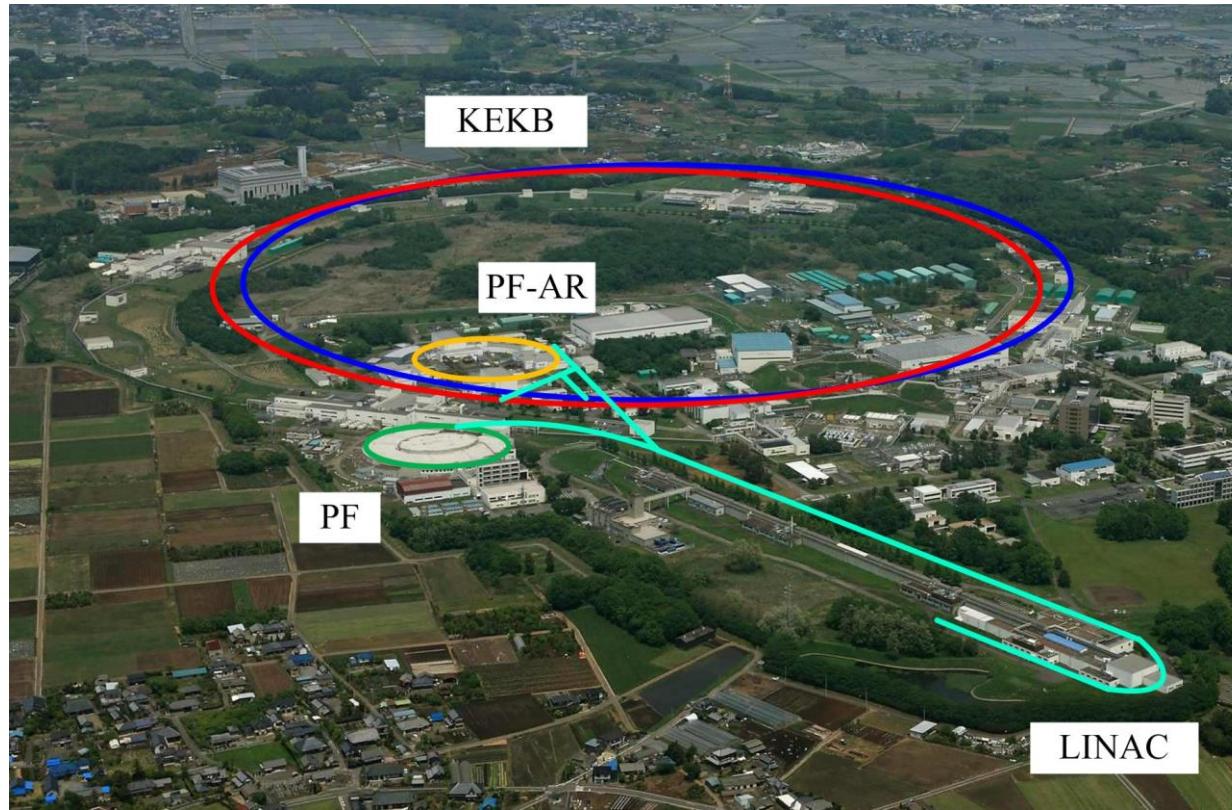
4. 入射最適化

5. まとめ

The Photon Factory (PF)

放射光利用専用の2.5 GeVの電子蓄積リング

線形加速器 (LINAC)とビーム輸送路 (BT), 電子蓄積リング (PF)で構成される



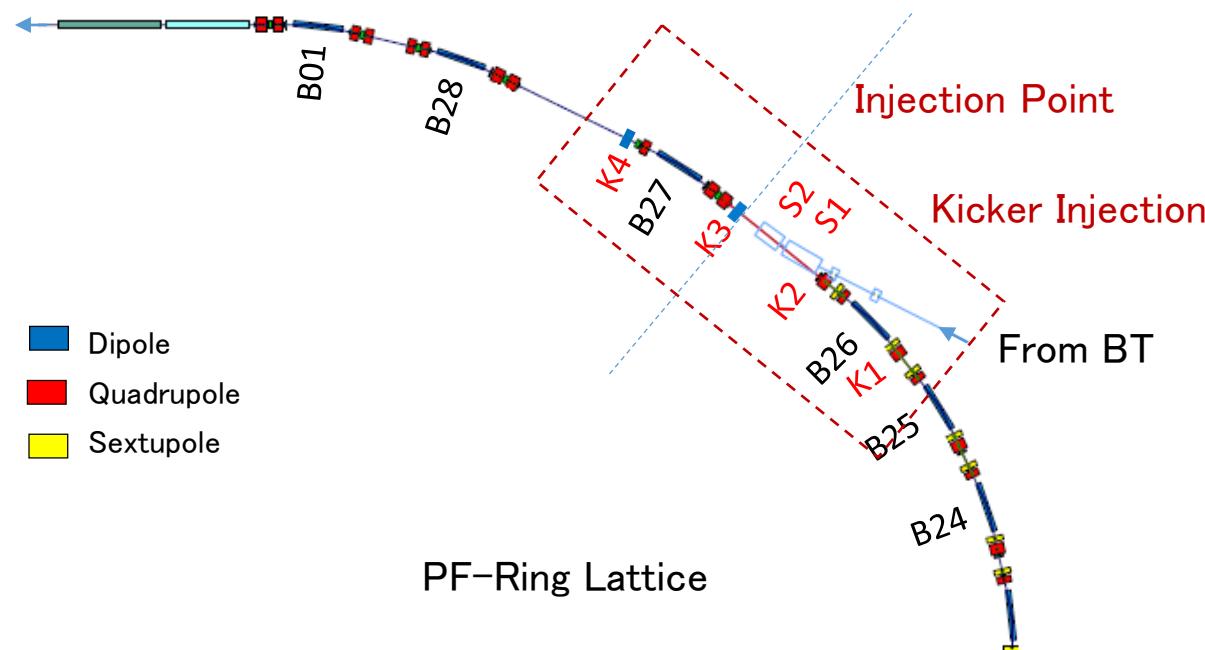
<https://www2.kek.jp/accl/topics/topics100830.html>

入射

ビーム輸送路からリングへ受け渡し

入射の要件

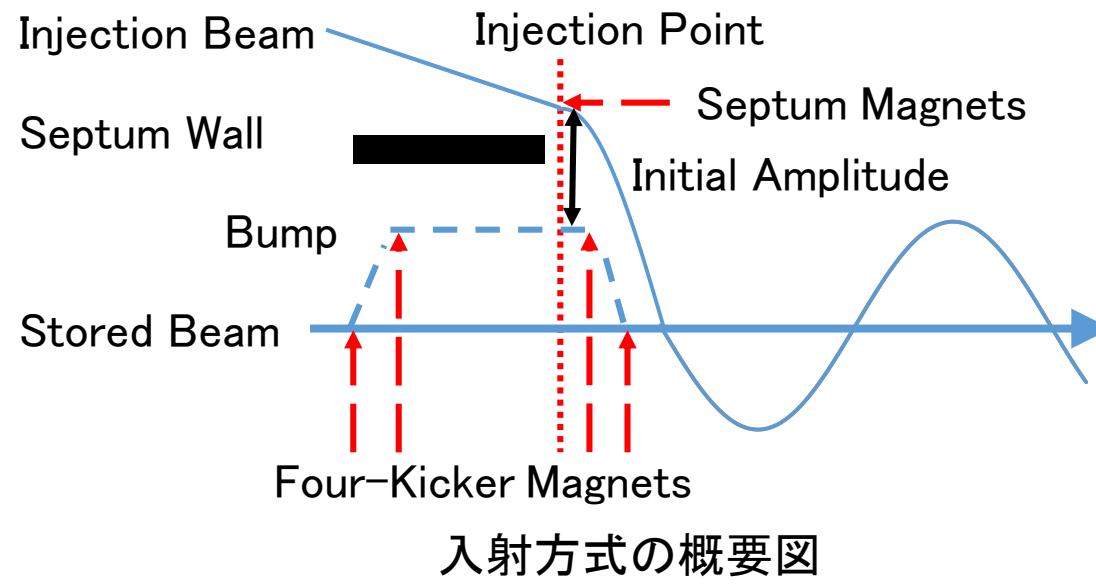
- 目的の位相空間に輸送すること
- ビームロスの最小化(=入射効率の最大化)



入射方式

セプタムとキッカーを組み合わせた方式

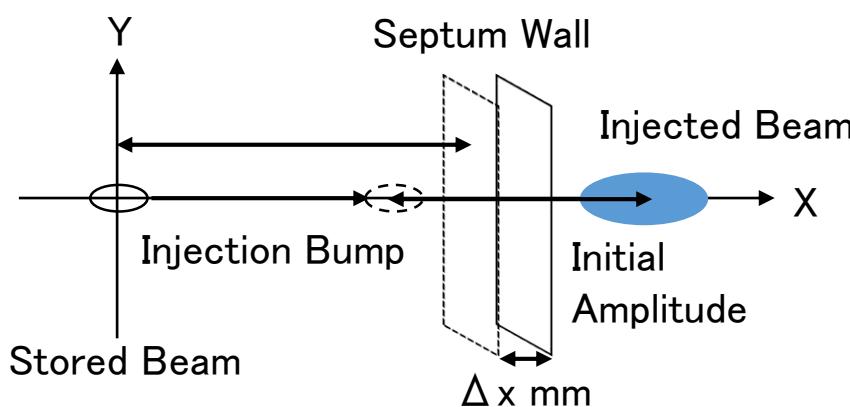
- 閉じた入射バンプの生成
- 入射ビームの向きをリングの軌道に揃える(目的の位相空間に輸送)



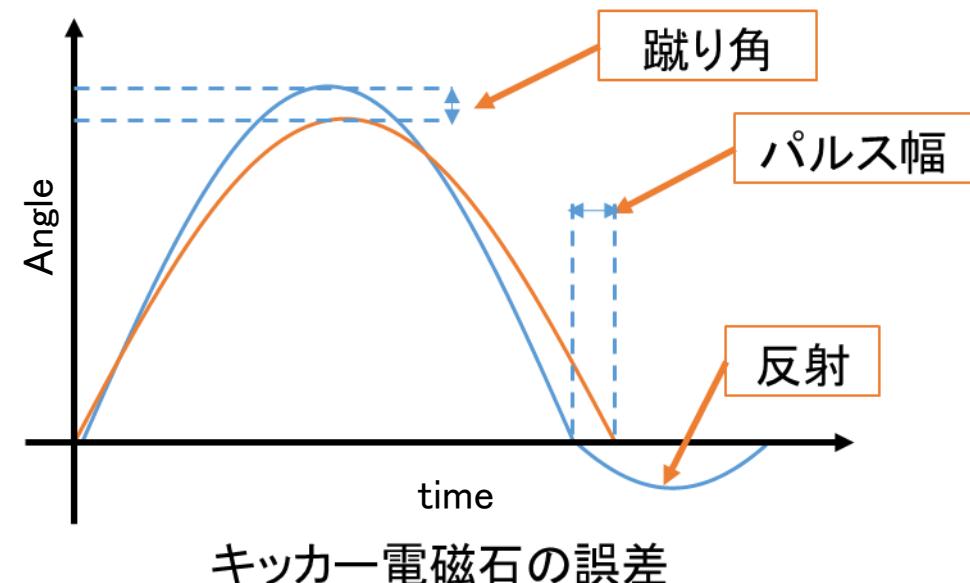
問題

PFでは東日本大震災以降、入射効率低下の問題となっている

- セプタム電磁石の設置誤差
 - キッカ一電磁石の誤差
- が主な原因と考えられる



セプタム電磁石のずれ



キッカ一電磁石の誤差

背景

セプタム電磁石の設置誤差、キッカー電磁石の誤差
などが主な原因となって入射効率の低下の問題となっている

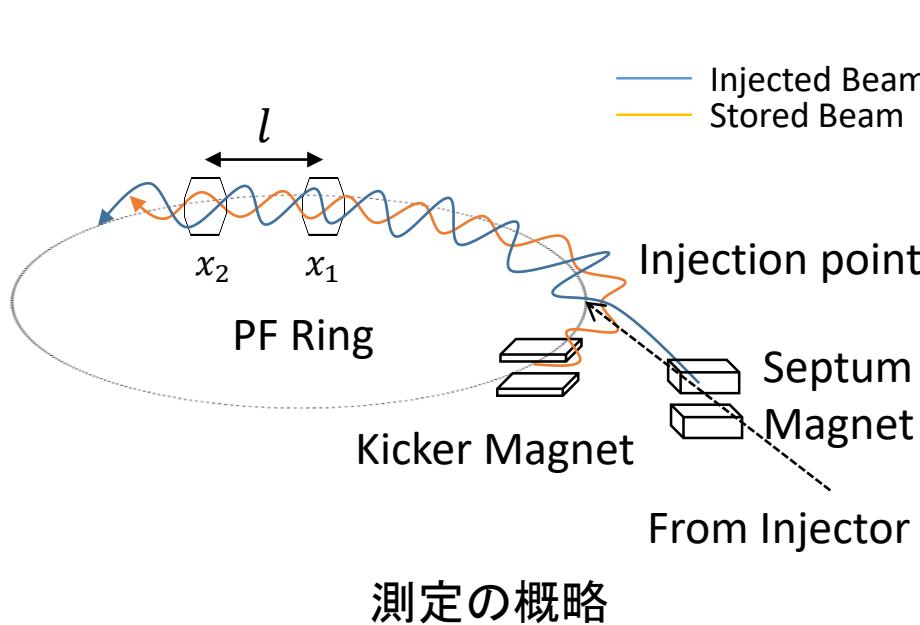
目的

電子ビームを直接測定する手法で現在の入射状況を把握して問題解決を目指す

1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
 - ・測定方法
 - ・測定結果
3. 入射シミュレーション
4. 入射最適化
5. まとめ

ビームベース測定

ドリフト空間を挟んだ直線部両端にある検出回路を使用
中心部の位相空間情報を求め、上流に転送



x_2, x_1 の位置データ



直線部中心の位相空間情報に計算

$$x_{ID02} = \frac{x_1 + x_2}{2}, x'_{ID} = \frac{x_2 - x_1}{l}$$

$l: 8.83 [m]$

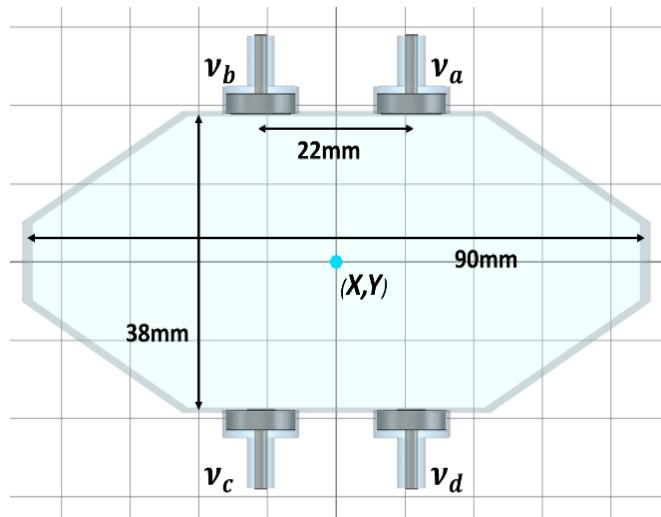


入射点へ転送

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{Inj} = M \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{ID}$$

$M: Transfer Matrix$

検出回路



ダクトの断面図

電極間距離

22 mm(H) × 38 mm(V)

三次多項式によるビーム位置の計算

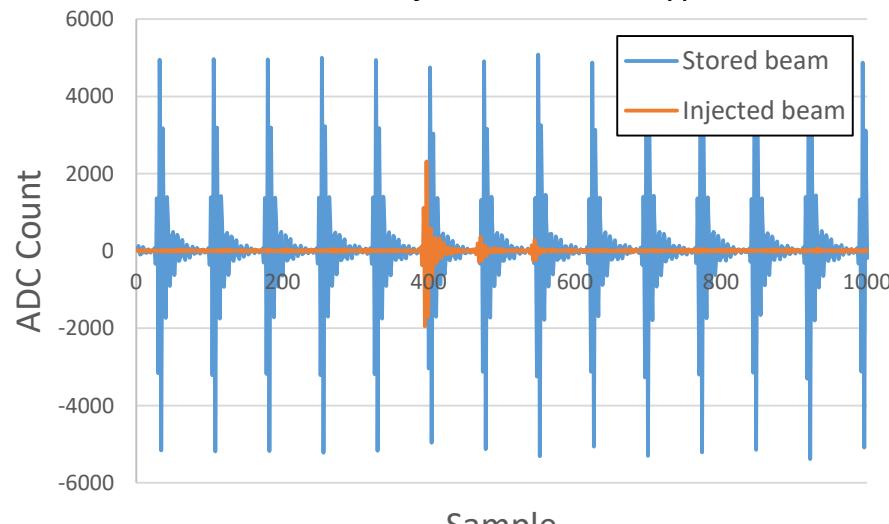
$$x = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_x(i, j) U^i V^j$$

k_x : 非線形応答係数
U, V: 電極間の信号比

ADC Raw Date

ビーム位置の情報に加えて電荷量、タイミングの情報を得る

1 Turn = 74 sample
Sampling clock = 112 MHz
Stored Beam current = 3 mA
Injected bunch = Typical. 0.25 nC



ADC Raw Date

入射ビーム
電荷量の少ないデータを除去

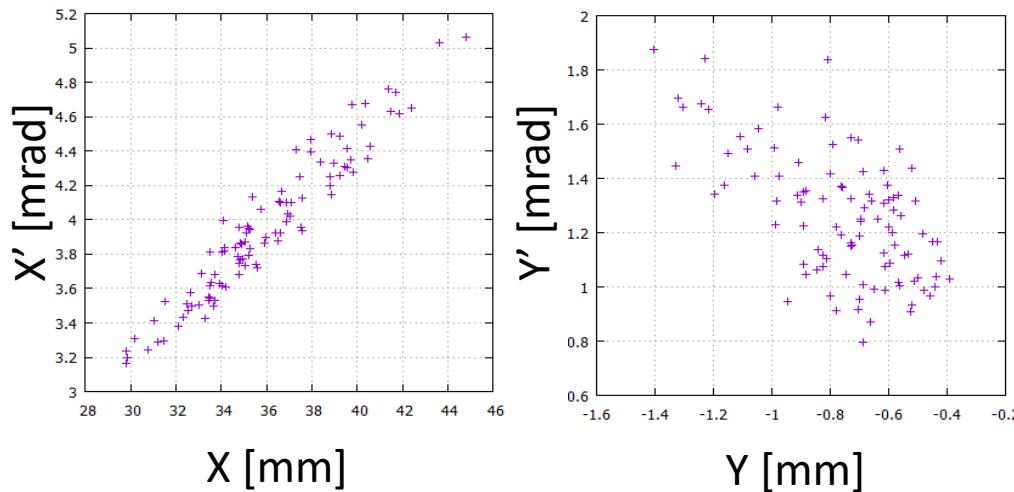
キッカーのパルス波形
パルスタイミングを遅延時間方向に
掃引してパルス波形に再構築

入射点のビーム位置関係

測定した入射バンチをビーム輸送路終端部まで転送

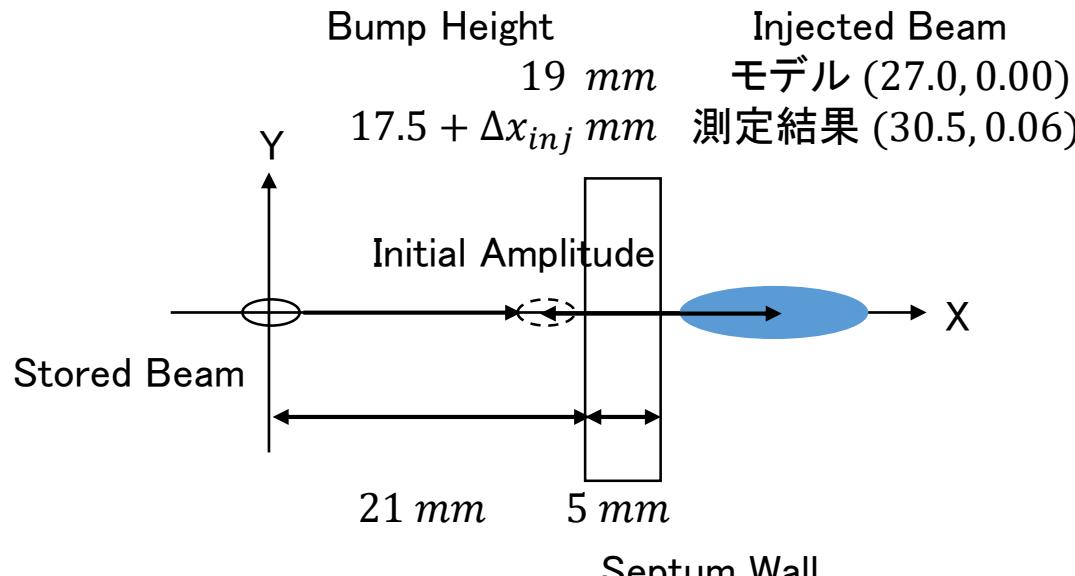
Phase Space 100 plots

Injected bunch = 0.28 nC, 1 Hz Rep.



中心軌道との相対座標

	position[mm]	angle[mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23



測量による推定

- 入射振幅の増大を確認
- 測量結果とビームベース測定の結果は一致

中心軌道との相対座標

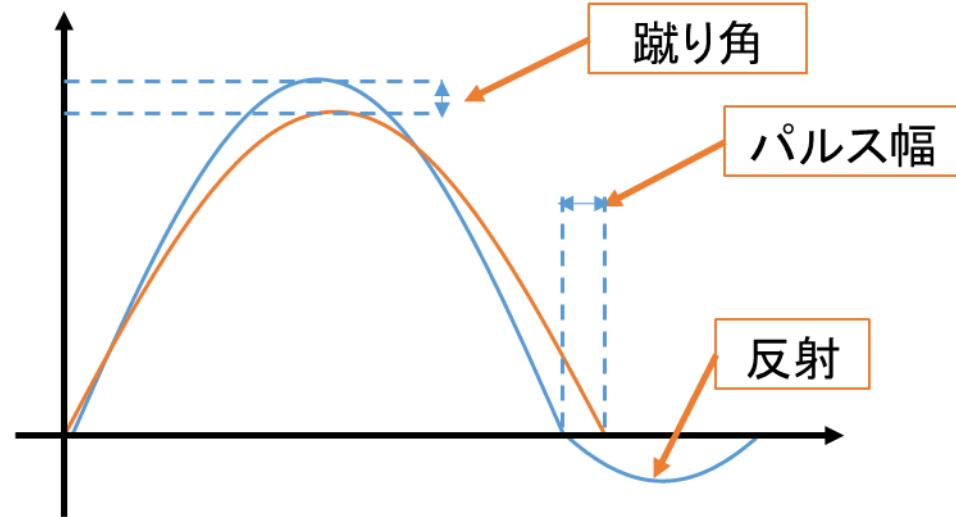
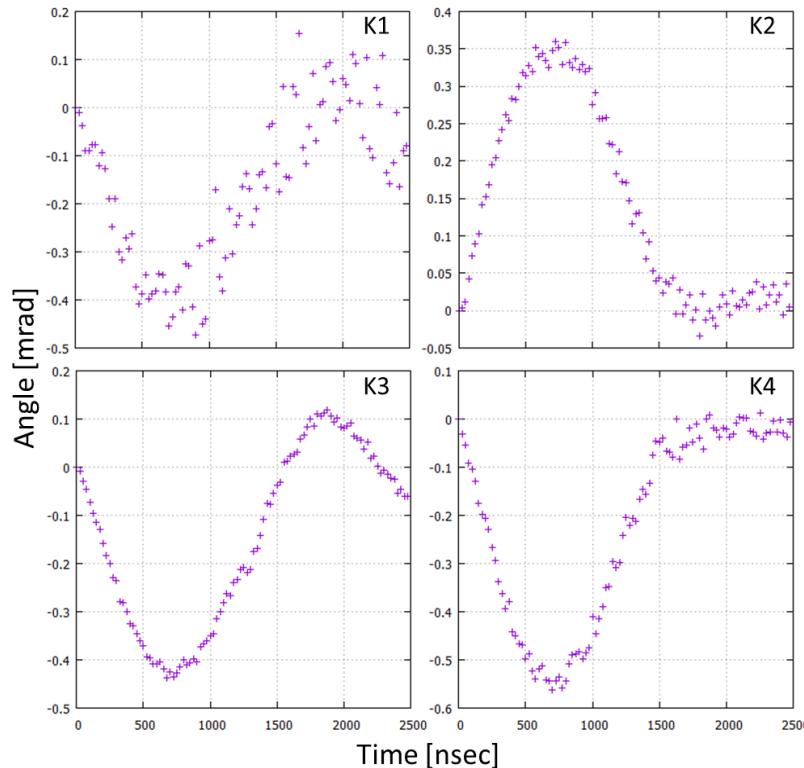
	position[mm]	angle[mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23

キッカー電磁石のパルス波形

パルスタイミングを0~2500 nsecまで25 nsecずつ掃引
キッカー電磁石を励磁して蓄積ビームの振動を測定

Stored beam, single bunch 2.8 mA

Kick angle 0.4 rad mrad



キッカー電磁石の誤差

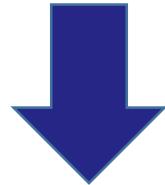
- ・ パルスの波形から電流値-蹴り角の校正を実施

1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射シミュレーション
 - ・キッカーバンプ
 - ・入射効率の見積もり
4. 入射最適化
5. まとめ

キッカー入射の要件

閉じたバンプを形成する

入射ビームの向きをリングの軌道に揃える



入射シミュレーション

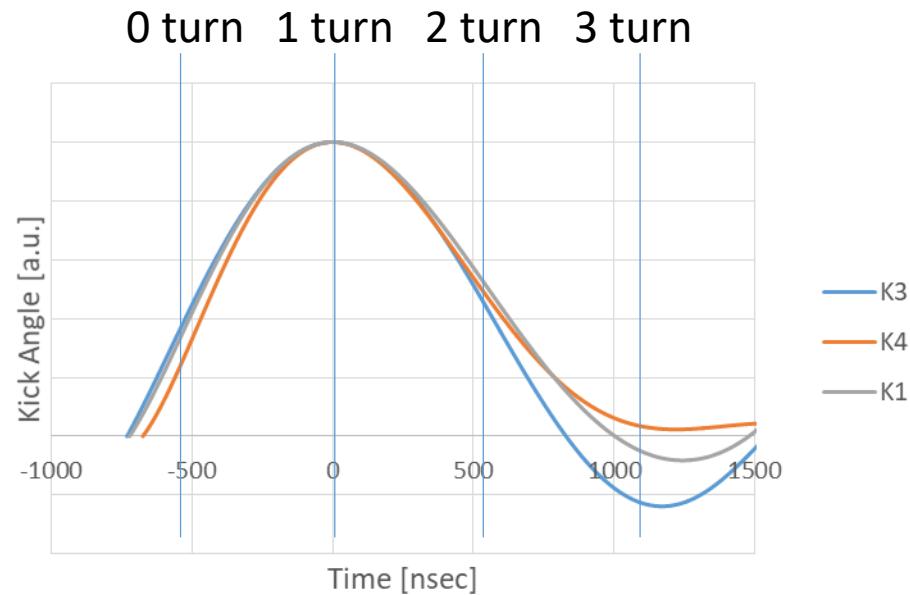
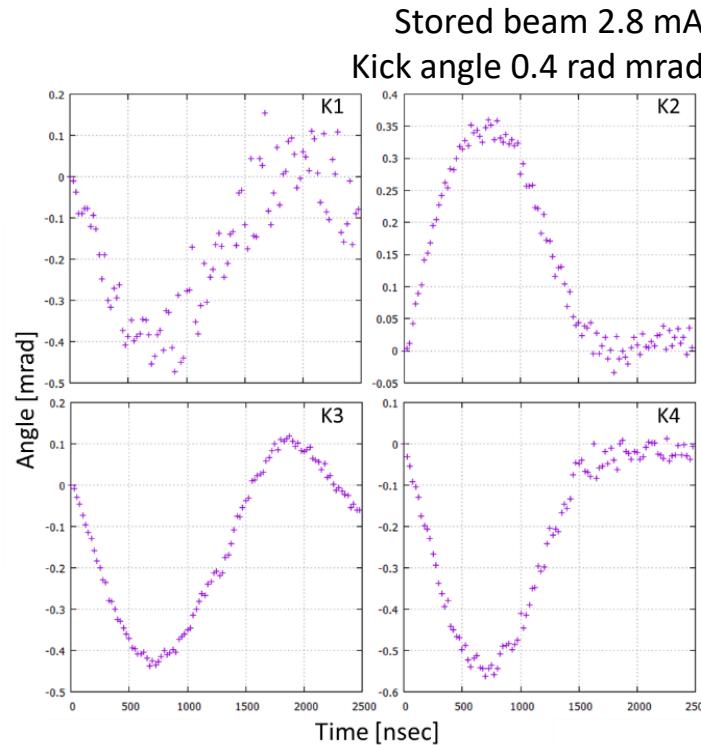
入射パラメータの測定結果を加速器シミュレーションコードSADに導入

- キッカーバンプマッチング
- 入射効率

を調べる

キッカーのパルス波形

パルス波形は、ビームベース測定結果を多項式フィットして導入
マルチターンキックを0~3ターン目まで、それ以降は無視

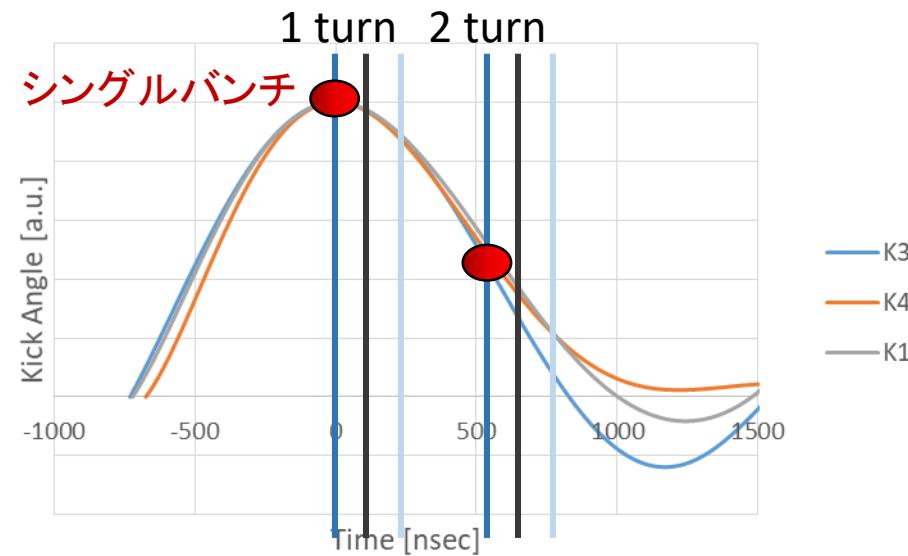
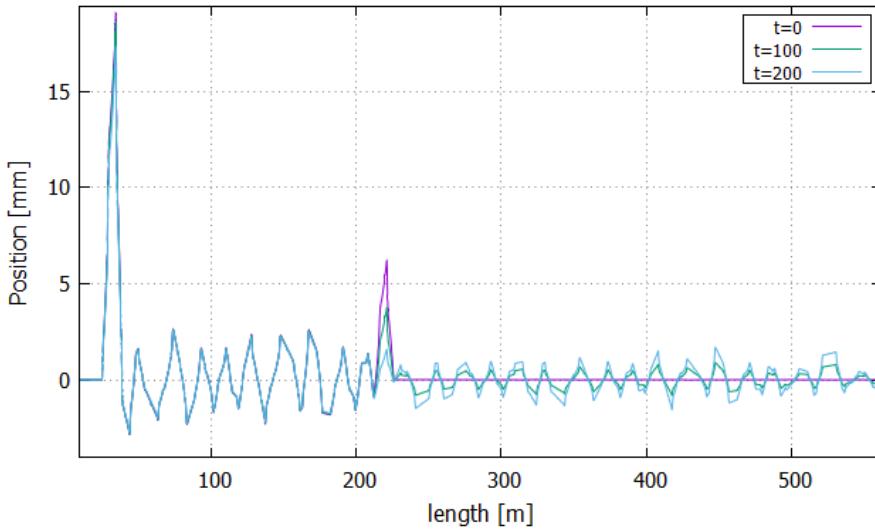


キックカーバンプマッチング(シングルバンチ)

誤差キックによる軌道のずれのRMS

$$\chi_{calc} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j^{\text{turn BPM}} \sum_i (x_i * x_i)}$$

x_i : 中心軌道からのずれ, turn: マルチターンが終わって2周期分



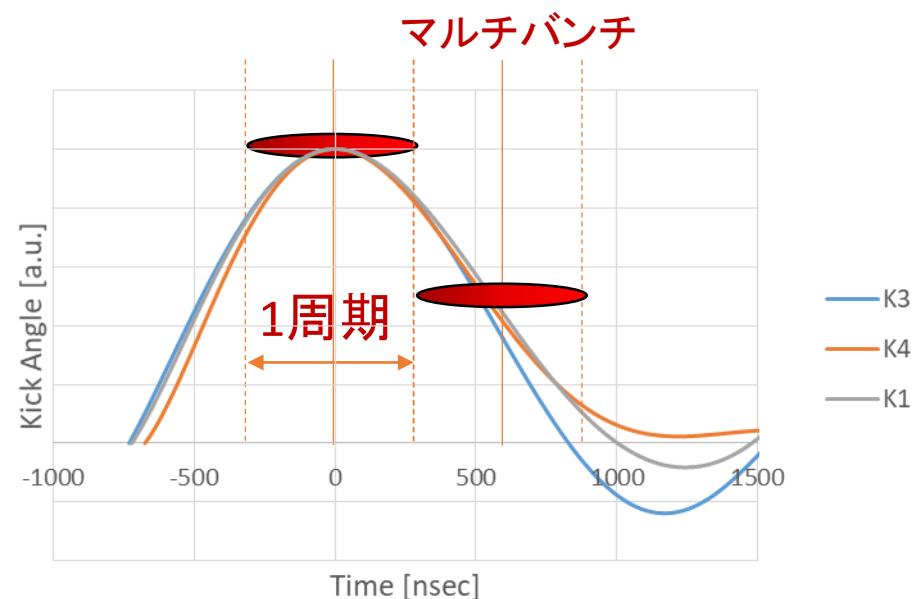
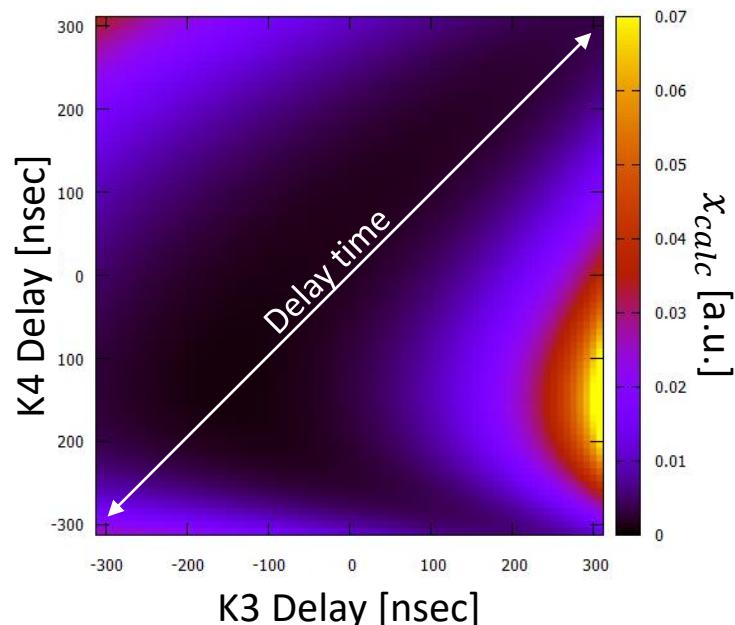
リング2周分のビーム軌道(タイミングを変えた時)

キックバーンプマッチング(マルチバンチ)

マルチバンチでのマッチングを評価

目標関数にdelayを導入

$$\chi_{calc} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_t \sum_j \sum_i^{delay turn BPM} (x_i * x_i)}$$

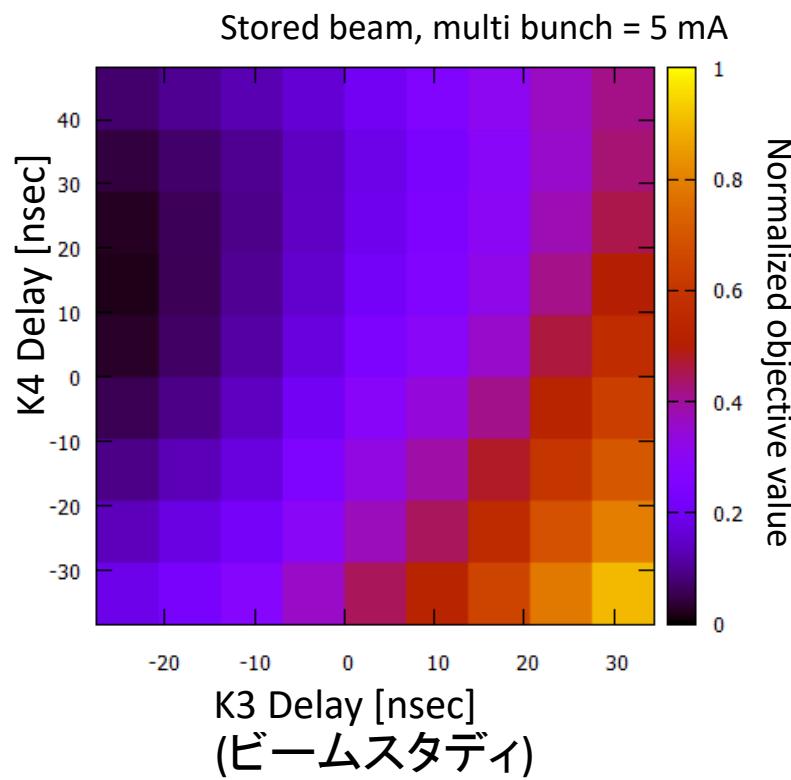
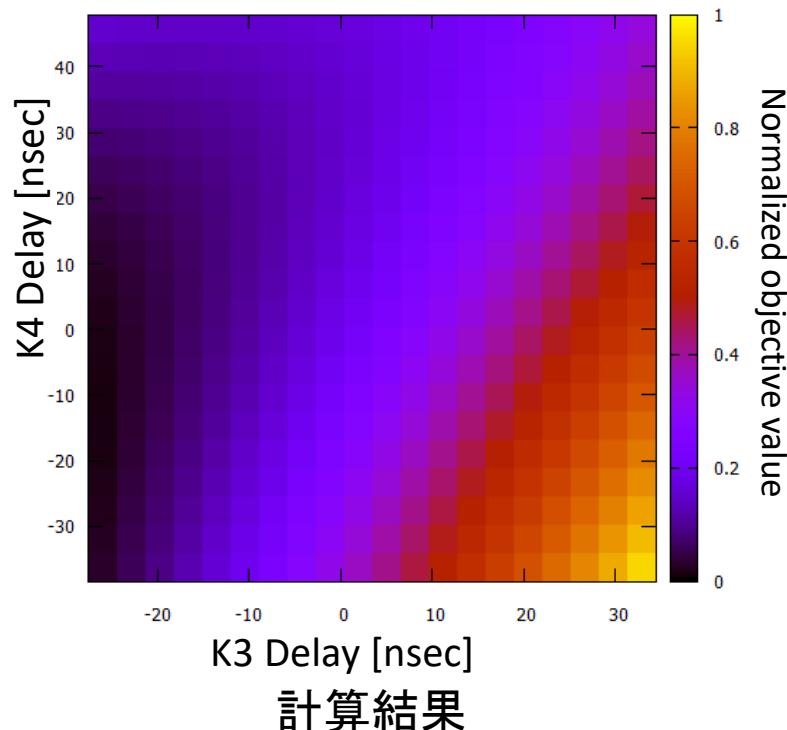


キックバーンプマッチング(マルチバンチ)

ビームスタディと比較

K3とK4のタイミングを変えた時の目標値の振る舞い

初期パラメータは運転時のテーブル



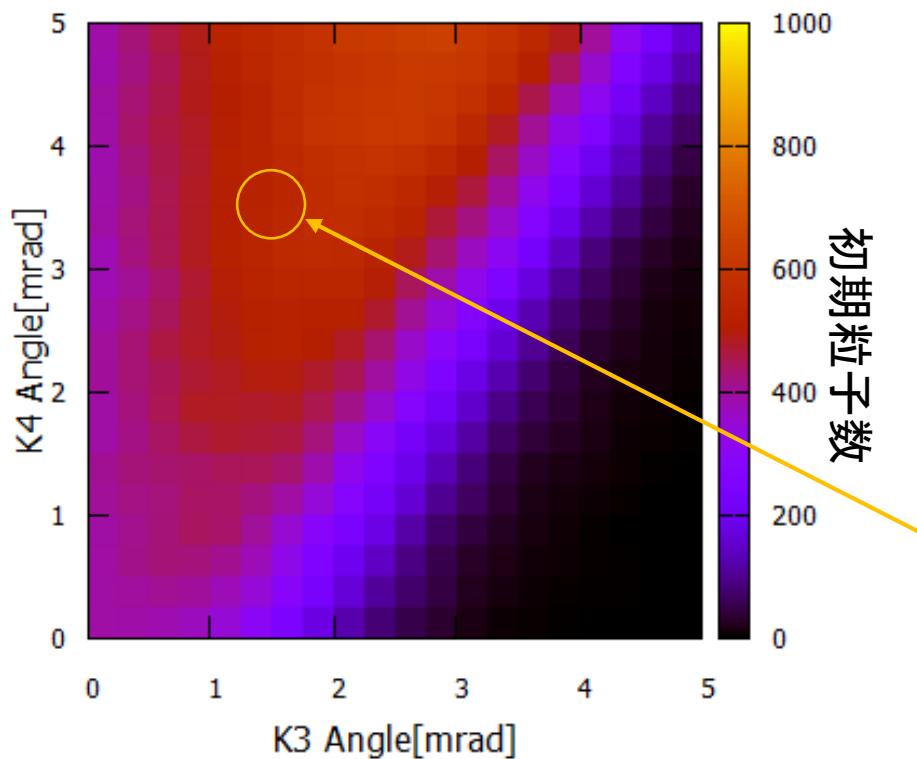
入射効率

入射効率の計算は多粒子追跡

マルチターンキック入射

オプティックスは測定して求めたモデル (LOCO)

初期粒子分布は測定結果の位相空間情報でガウス分布



中心軌道との相対座標

	position [mm]	angle [mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23

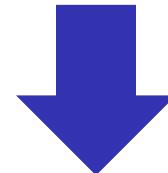
The initial kicker's setting is in operation value

Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.22	0
K2	0	0
K3	1.51	0
K4	3.47	0

入射効率低下の原因是

- セプタム電磁石のずれによる初期振幅の増大
セプタム交換によって改善が見込まれる

マルチターンキックによる、蓄積ビームの振動が残る



キッカー入射の要件

蓄積ビームの振動抑制

入射効率の最大化

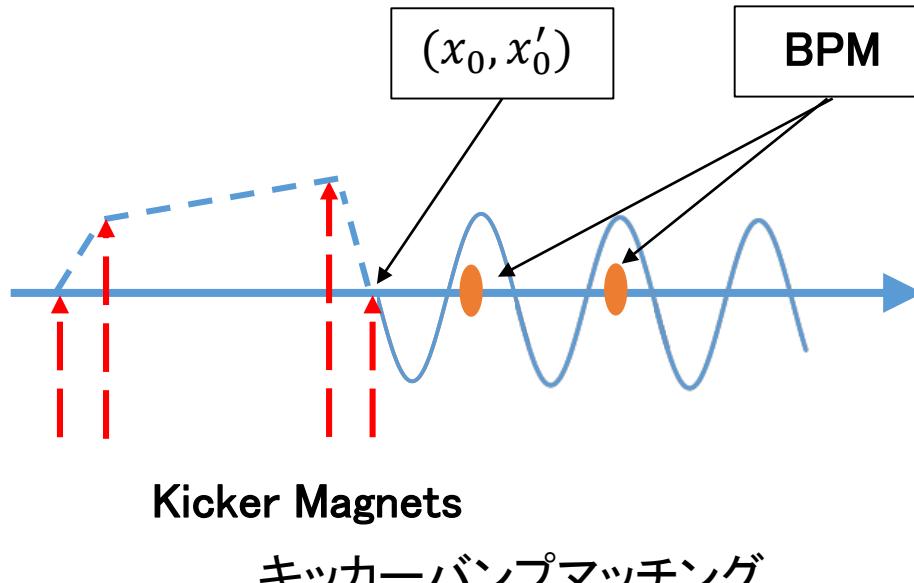
1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射シミュレーション
4. 入射最適化
 - ・キッカーバンプ
5. まとめ

キッカーバンプマッチング

誤差キックによる軌道のずれ

$$\chi_{meas} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{turn} \sum_{bpm} (x_i * x_i)}$$

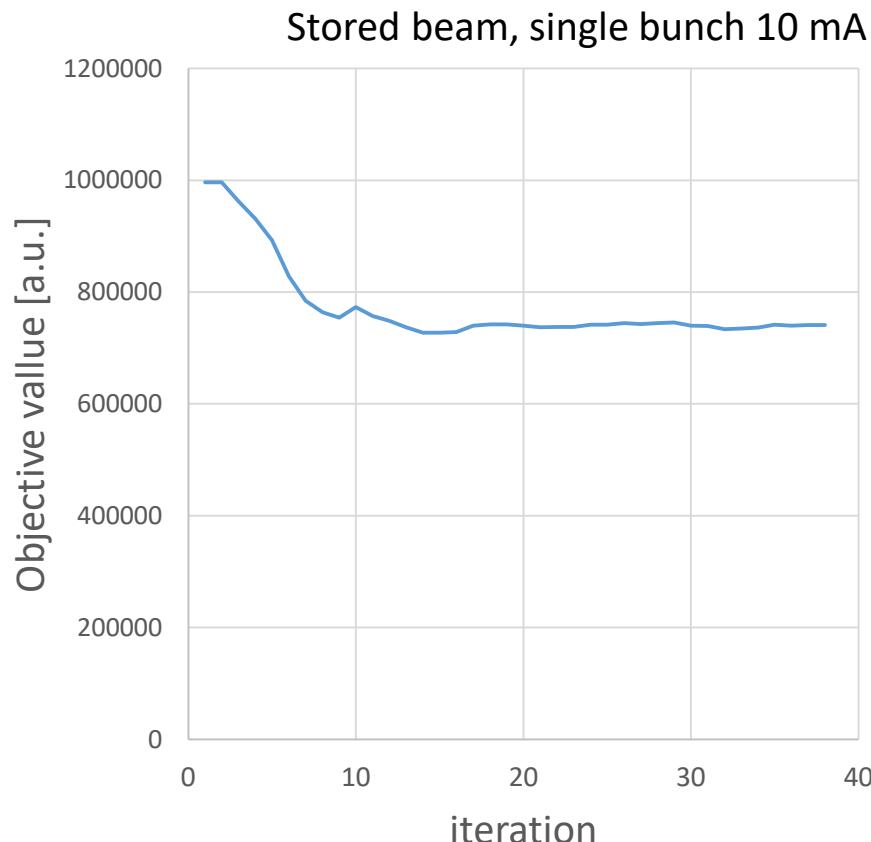
BPMは6台, 測定範囲は800 Turns



オンライン調整

最急勾配法による最適化

縦軸は5回の測定値、横軸は反復回数



Original set

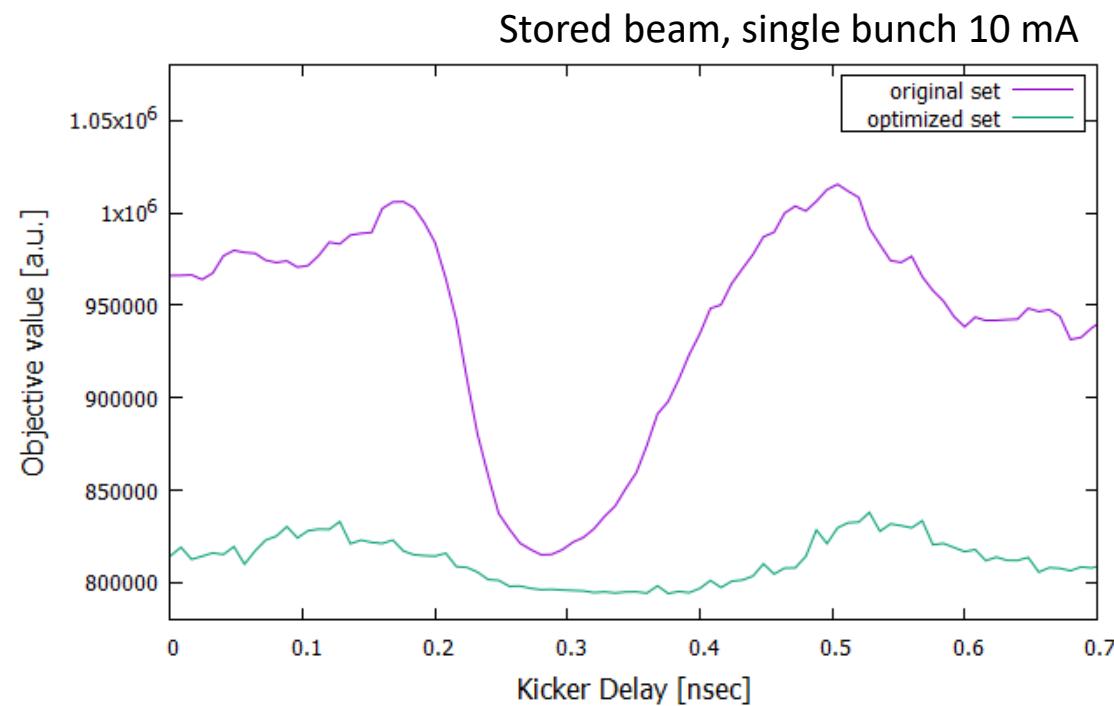
Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.02	0
K2	0	0
K3	1.51	0
K4	3.43	0

Optimized set

Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.02	0
K2	0	0
K3	1.495	+45
K4	3.429	-8

最適化前後の比較(シングルバンチ)

パルスタイミングを変えた誤差キックによる軌道のずれ

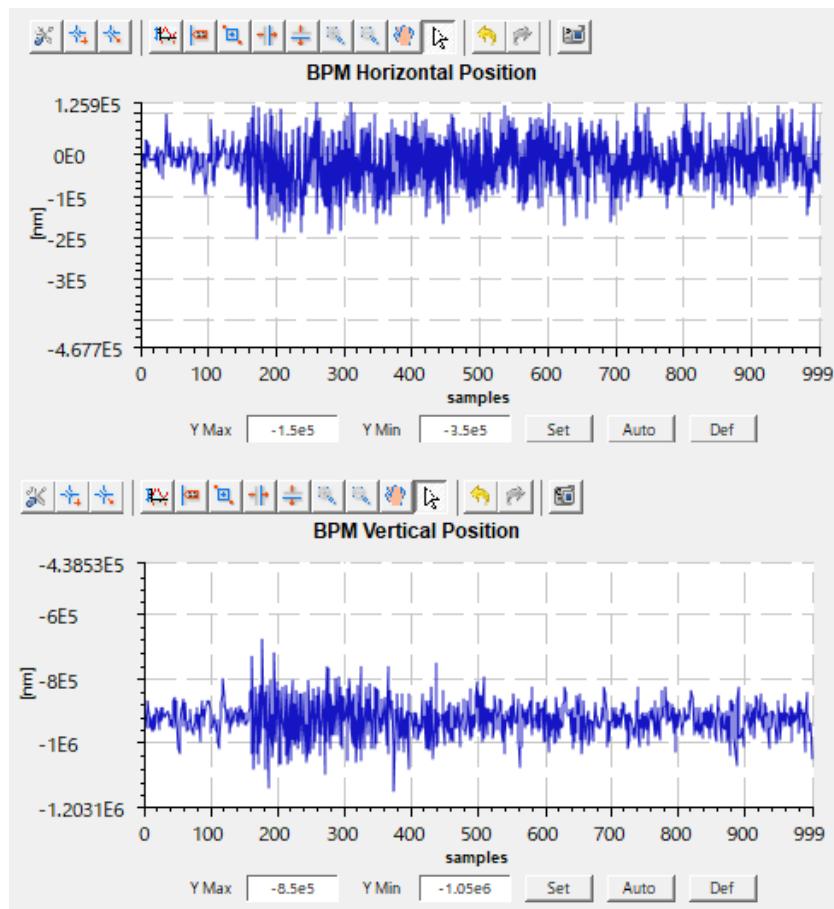


- 蓄積ビーム振動の抑制を確認

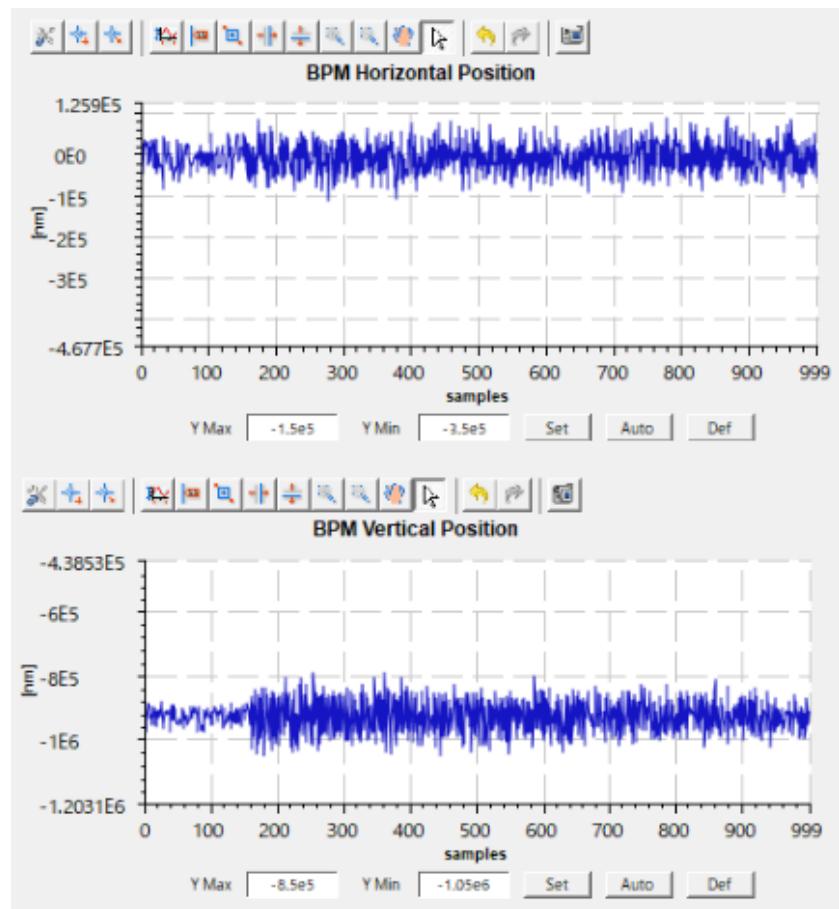
最適化結果

入射最適化

Original set



Optimized set



1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射最適化
4. まとめ
 - ・まとめ
 - ・今後の展望

まとめ

- 入射パラメータの測定

ADC生データから信号量、電荷量、タイミングの情報を処理

- 入射シミュレーション

実際の加速器の誤差を含んだ測定結果を導入

- 入射最適化

キッカーバンプマッチング調整する

今後の展望

- セプタム電磁石後の入射調整

・ リングより上流を扱う(輸送路のオプティックスマッチング)

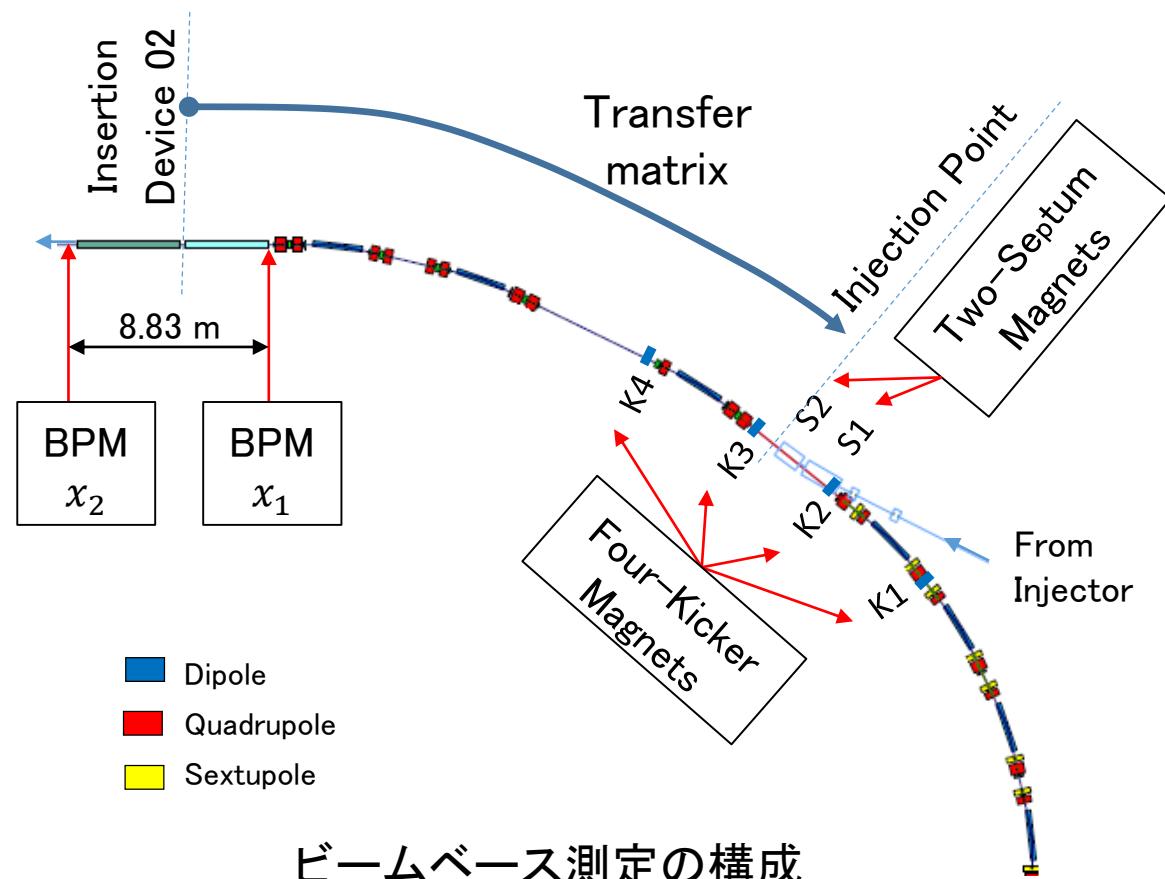
ご清聴ありがとうございました

PF ring main parameters

General parameters		
Energy	GeV	2.5
Circumference	m	187.4074
Natural emittance	nm rad	35.4
Current	mA	450
Revolution time	ns	624
Energy spread		7.29E-4
Momentum Compaction		6.56E-3
Horizontal tune		9.6
Vertical tune		5.3
Horizontal chromaticity		-13.4
Vertical chromaticity		-15.8
Coupling factor		0.01
Horizontal damping time	msec	7.8
Vertical damping time	msec	7.8
Longitudinal damping time	msec	1.6

ビームベース測定

直線部両端の位置情報から中心部の位相空間情報を求め、上流に転送する。
入射点でのビーム位置関係、キッカー電磁石のパルス波形を調べた。



ビームベース測定の構成

セプタム電磁石の蹴り角

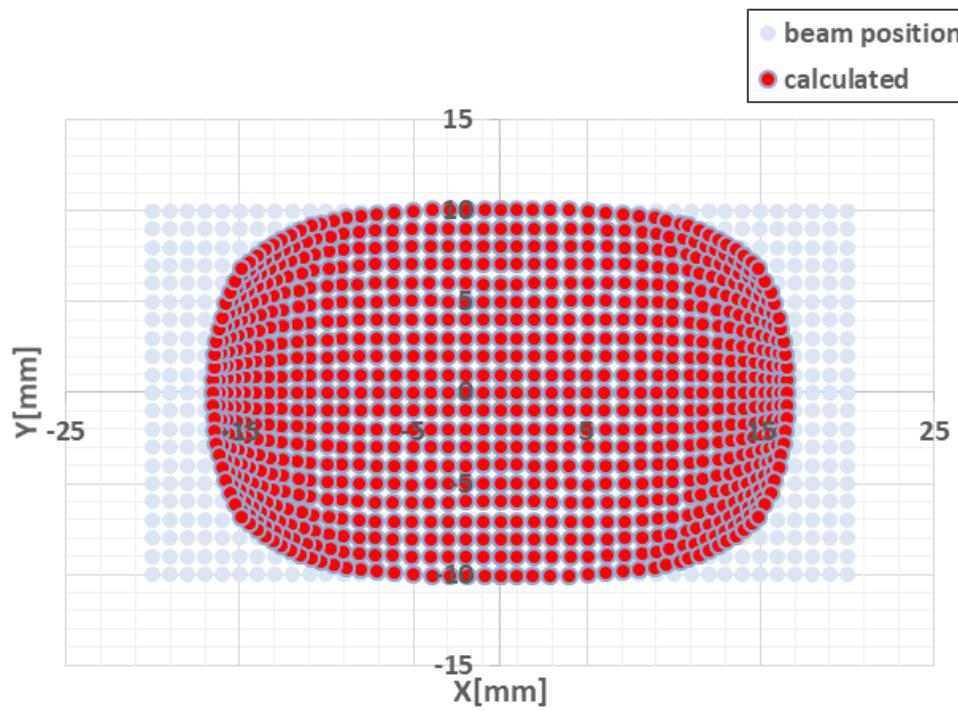
position	設定値		蹴り角-角度 [deg]
	[mrad]	[A]	
S1	118.61	5344	6.796
S2	93.69	6281	5.368

Twiss parameters and Phase advanced

	K1	K2	K3	K4	ID02	Inj
α_x	-1.79	-0.62	-1.47	-0.66	0.01	-1.08
β_x	3.25	6.02	13.8	3.15	12.0	9.45
$\Delta\phi_x$	8.01	8.29	1.24	0.86	0.00	1.26

*K1はID01から再構築

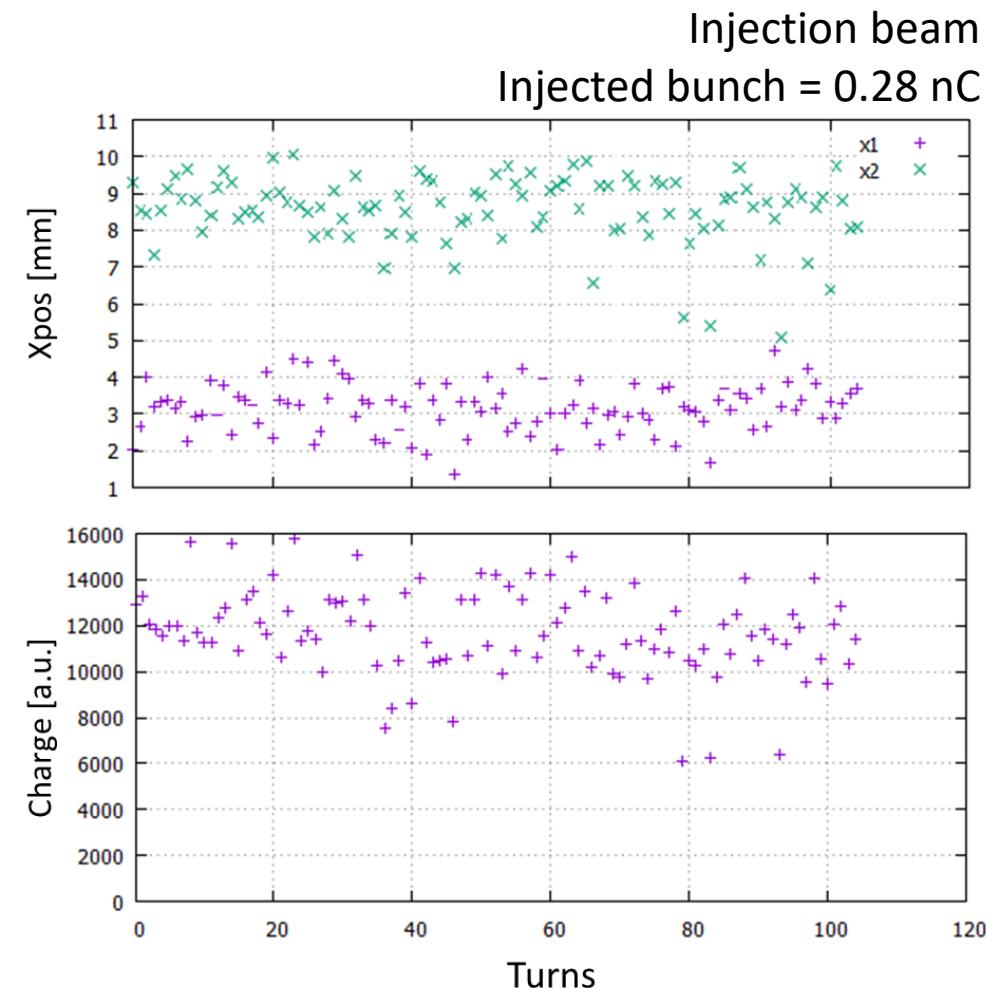
ビーム位置モニターのワイヤー校正



BPM の非線形応答係数

Coefficients	Horizontal	Vertical
$k(0,0)$	0.000	0.000
$k(1,1)$	17.12	0.000
$k(1,2)$	0.000	16.432
$k(2,1)$	0.000	0.000
$k(2,2)$	0.000	0.000
$k(2,3)$	0.000	0.000
$k(3,1)$	18.829	0.000
$k(3,2)$	0.000	-11.477
$k(3,3)$	-27.138	0.000
$k(3,4)$	0.000	7.431

電荷量の抽出



X、Yの位置データ



直線部中心の位相空間情報に計算

$$x_{ID02} = \frac{x_2 + x_1}{2} \quad , \quad x'_{ID02} = \frac{x_2 - x_1}{l}$$



入射点へ転送

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{Inj} = M \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_{ID02}$$

データの条件

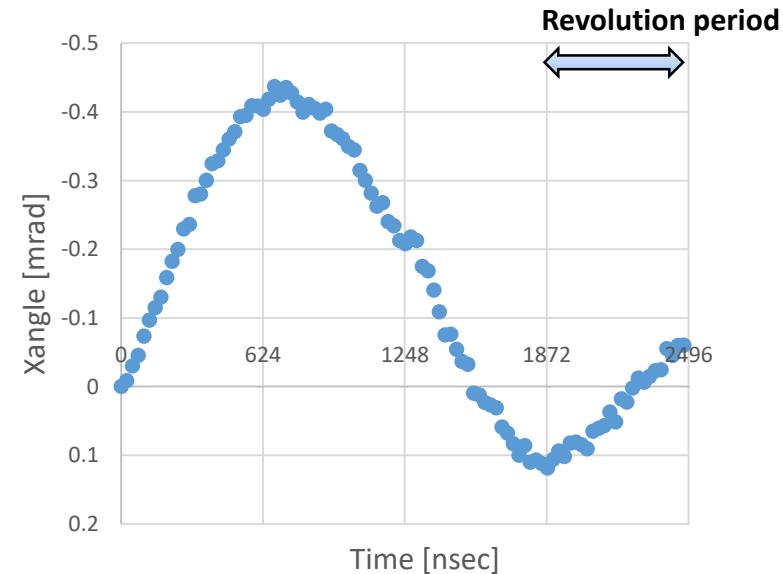
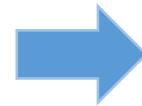
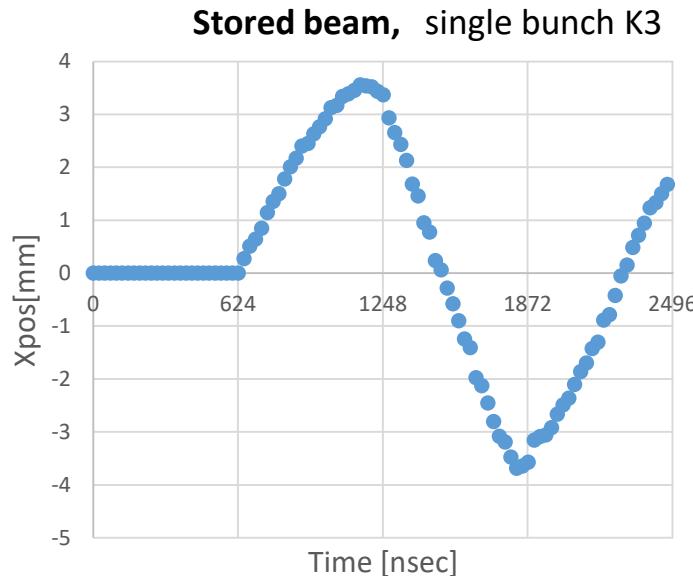
- ・電荷量の少ないデータを除去

キッカーパルス波形の再構築

キッカーディスクを励磁して蓄積ビームの運動を測定。直線部の情報をもとに蹴り角を導出、パルスのタイミングを遅延時間方向に掃引した結果からパルス波形に再構築する。

- ・パルス波形の計算

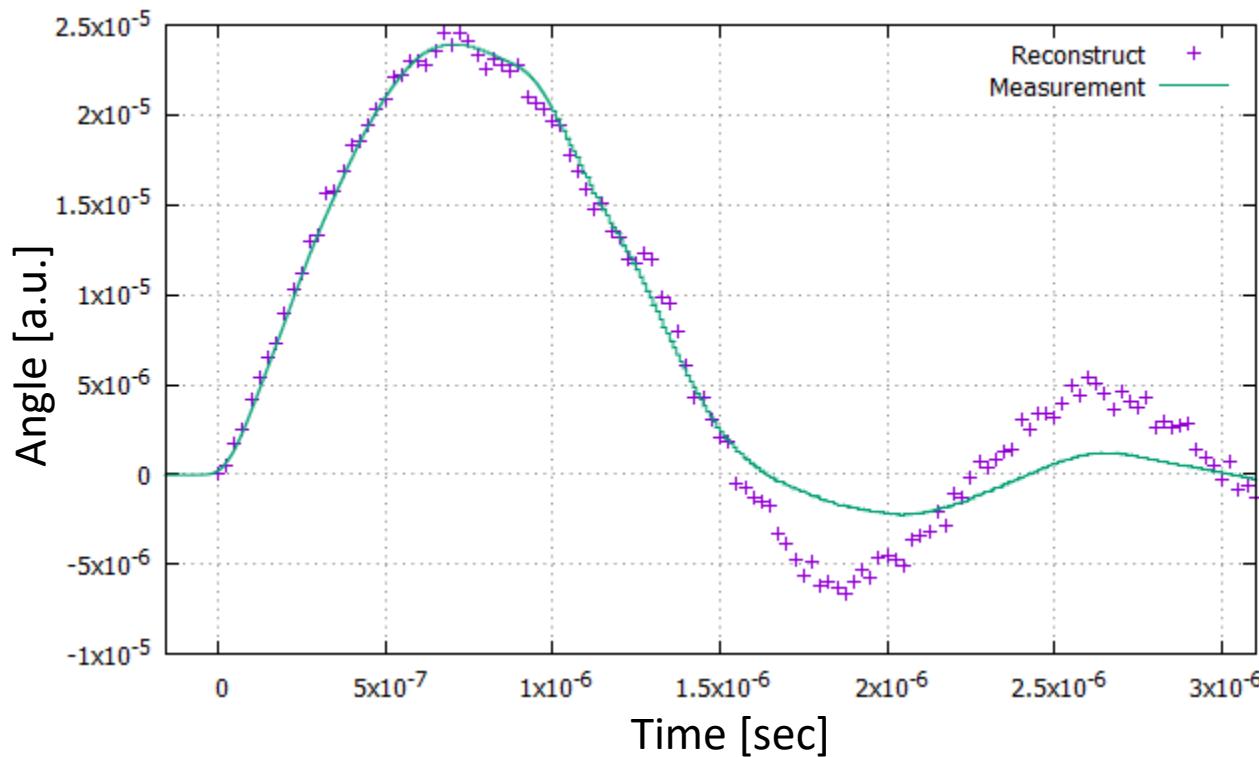
$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ x'_{n+1} \end{pmatrix}_{BPM} = \begin{cases} M_{BK} \left\{ M_{KB} \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_{BPM} + \begin{pmatrix} 0 \\ \theta(t) \end{pmatrix}_{Kicker} \right\} & : \theta(t) \neq 0 \\ M_c^n \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix}_{BPM} & : \theta(t) = 0 \end{cases}$$



磁場測定との比較

リングからキッカー電磁石K3を取り出して磁場測定を行った結果とビームの応答からパルス波形を再構築した結果を比較。

- 磁場測定とビームベース測定は1500 nsecまで一致
- パルス幅とアンダーシュートの部分が異なる



Betatron function (LOCO)

J. Safranek, "Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements", Nuclear Inst. and Methods in Phys. Res. A, 388, pp. 28 (1997).

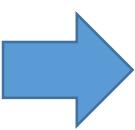
蓄積リングの補正電磁石を微小な角度で蹴り、BPMで観測される振動の応答行列から加速器パラメータを推定する手法。推定は軌道レスポンスと実測のレスポンスの残差が最小となるように加速器パラメータをフィッティングして行う。

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(R_{mod, ij} - R_{meas, ij})^2}{\sigma_i^2}$$

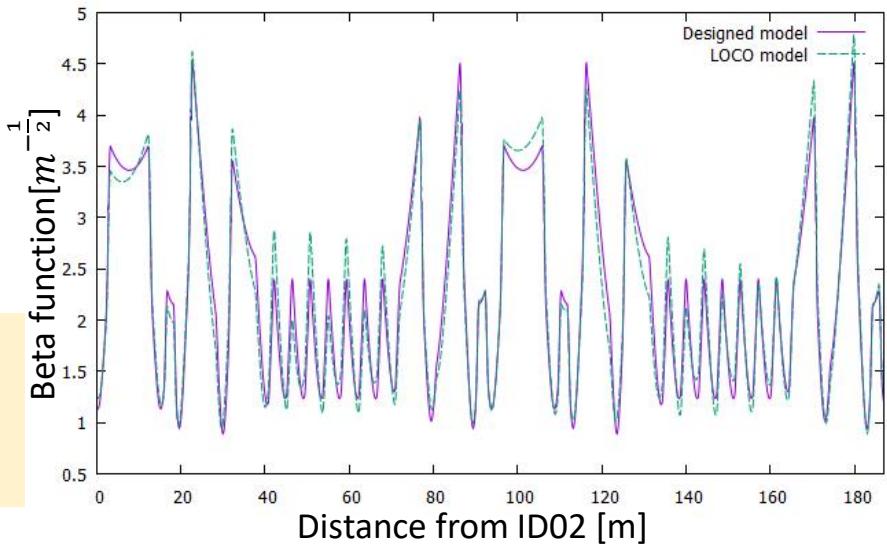
i : BPM
 j : Steering magnet
 σ : BPM noise level

LOCOパラメータ		
	name	Number
Horizontal	mrad/A	28
Vertical	mrad/A	42
K-quadrupole.	m^{-2}	72
Momentum compaction	-	
Skew-quad.	mrad	14

Fitting



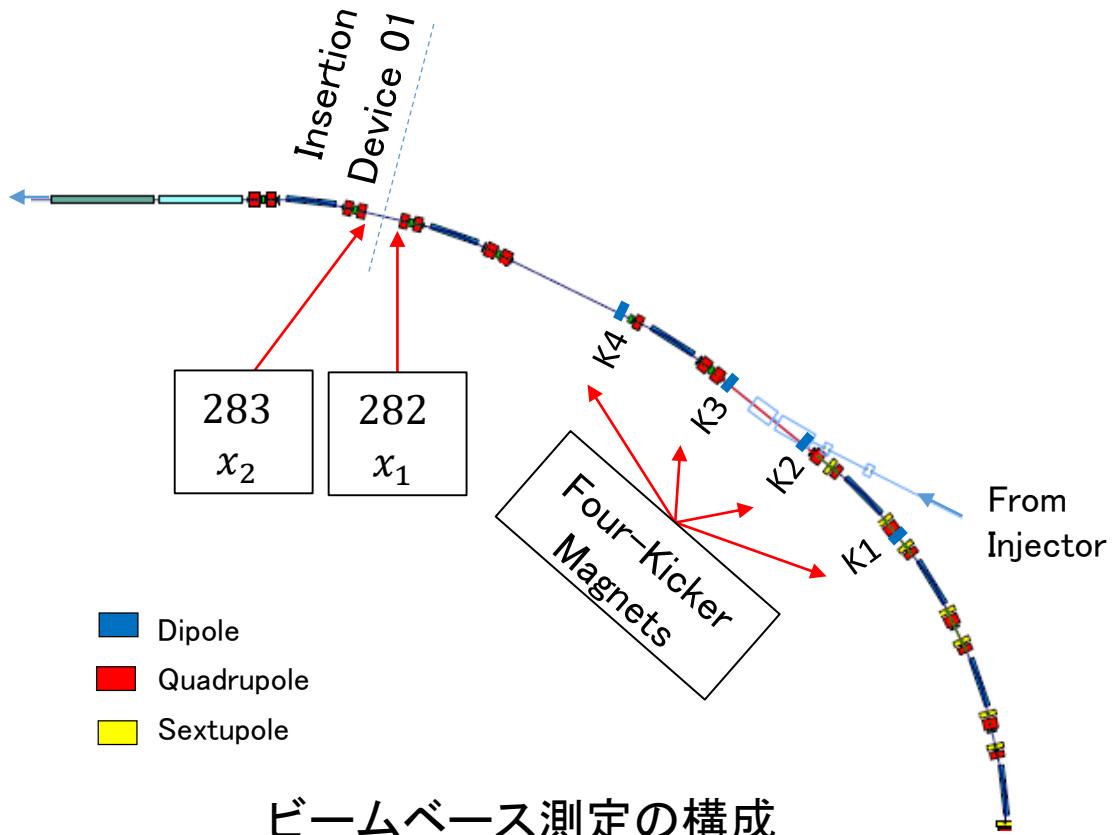
収束
 $5.10 \mu\text{m(H)}$
 $2.87 \mu\text{m(V)}$



測定方法

測定は(282), (283)にLiberaを接続してTbTのデータを使用した。

条件 : 5mA、シングルバンチとマルチバンチ



Original set

Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.22	0
K2	0	0
K3	1.51	0
K4	3.57	0

Twiss parameters and Phase advanced

	K4	282	283
α_x	1.13	1.87	1.56
β_x	3.81	8.90	6.82
$\Delta\varphi_x$	0.00	0.496	0.497

最急降下法

- 初期点 x_0 を与える。 $k = 0$
- 探索方向の生成

$$d_k = -g_k$$

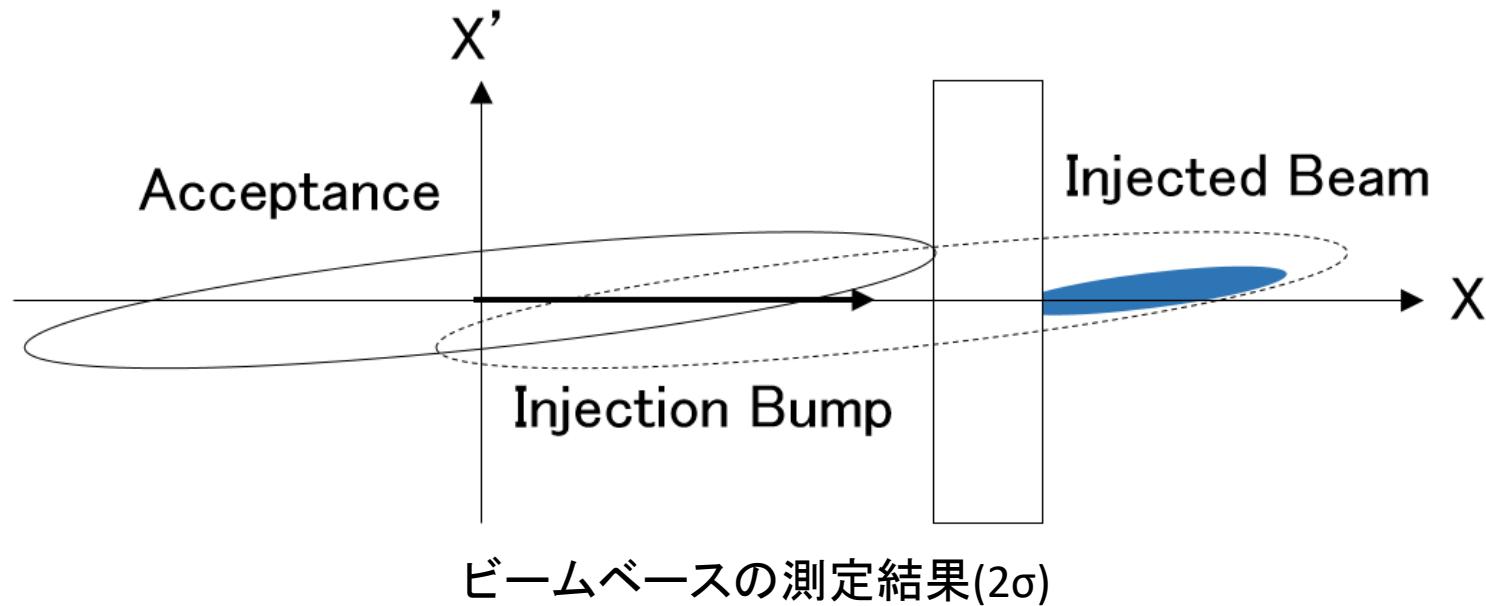
- 直線探索で α_k を計算する
- $k += 1$
- 終了判定条件を満たしたら停止

直線探索

- 学習率 α_k を与える $\alpha_k=10e-7$
- 目標値を5回測定
- $\alpha_k += \alpha_k$
- 終了判定条件を満たしたら停止

現段階の最適化で入射調整を取り扱わない理由

- 入射ビームがライナックから直接入射される場合、入射ビームのばらつきを考慮してトレランスを余分に取る必要がある(他施設では $3\sigma + \Delta x$ が多い)
- セプタム交換が予定されているので、交換後に最適化を実施する
- キッカーバンプマッチングは入射調整を拡張性を持って開発した



修士論文の発表なので、コントリビュートはもれなく発表する。
修論発表のため論理構造はなるべくつなげたけど、時間軸で見ると…

- **何をしたか(Motivation)**

入射効率改善を目的に一連の入射スタディを実施した

- **何をしたかったのか**

問題の原因はセプタムだと考えていた、交換されて問題解決されるか調べたかった

交換される前の準備：モデルをつくる、問題原因の調査

交換された後の準備：自動調整のプログラム

- **先行研究と比べてどこがすごい？**

ビームベーススタディと最適化を実施、そこ自体に新規性はない

加速器分野として、他施設でされたからいい方法とは限らない。

自施設に適した形に落とし込むことが意味をもつ。

- **技術や手法のキモはどこ？**

ビームベースでやるために必要な解析処理を開発したこと

ビームベースでやって加速器の誤差を含むモデルを調べたこと

シミュレーションに落とし込んだこと

そのシミュレーション結果はビームを使った実験でも正しいことを確認したこと

-正しくないんじゃないの

自動調整のプログラムを開発したこと(なぜ自動化?を議論していないので主張しにくい)

- **どうやって有効だと検証した？**

ビームを使った実験とSADによるシミュレーションを比較して

- **議論はある？**

議論は残さないためにオンライン調整を導入