

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14日(木)

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

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

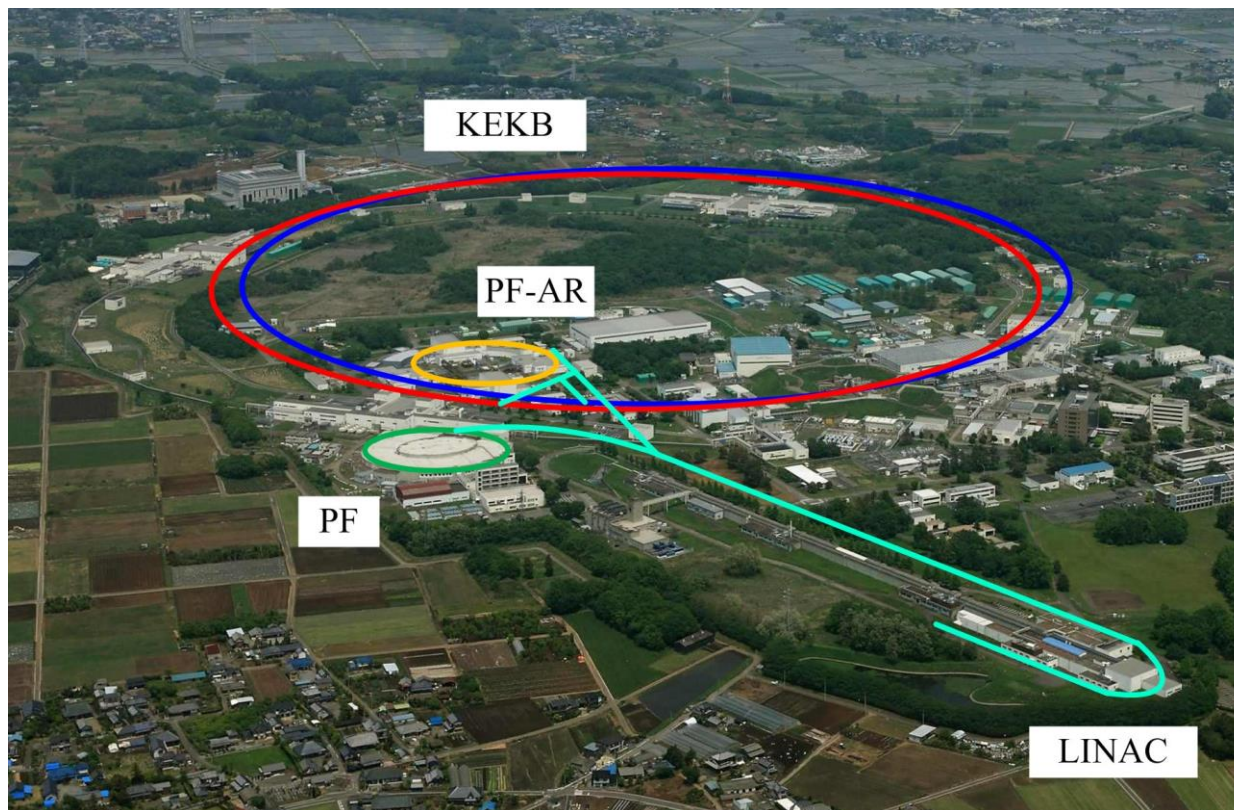
3. 入射シミュレーション

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



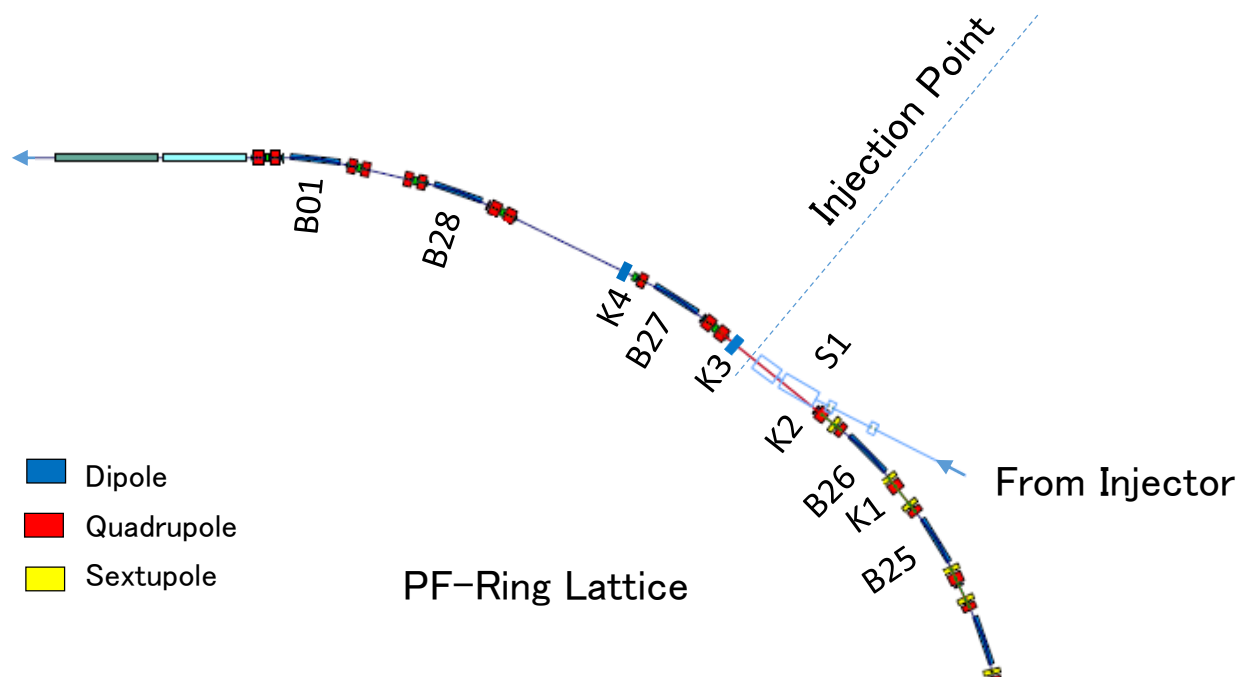
<https://www2.kek.jp/accl/topics/topics100830.html>

入射

ビーム輸送路からリングへとビームを輸送すること

入射の要件

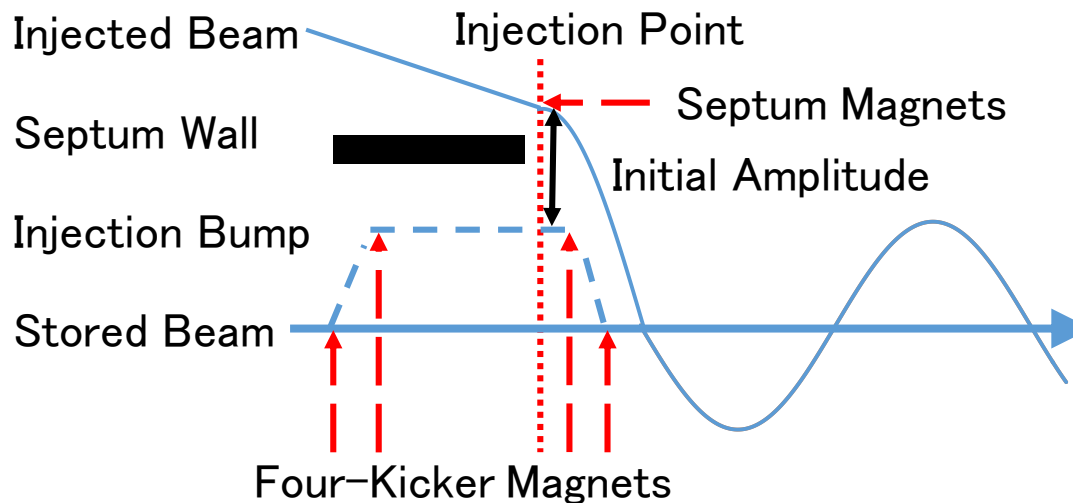
- 目的の位相空間に輸送すること
- 輸送によるビームロスの最小化



入射方式

セプトムとキッカーを組み合わせた方式

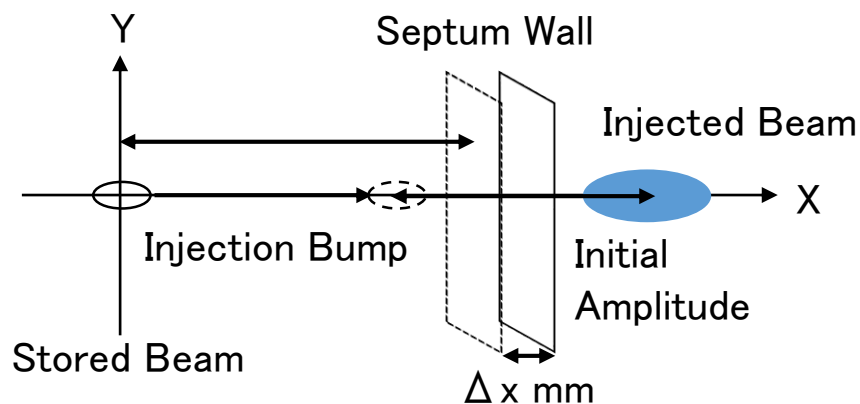
- 閉じた入射バンプの生成
- 入射ビームの向きをリングの軌道に揃える(目的の位相空間に輸送)



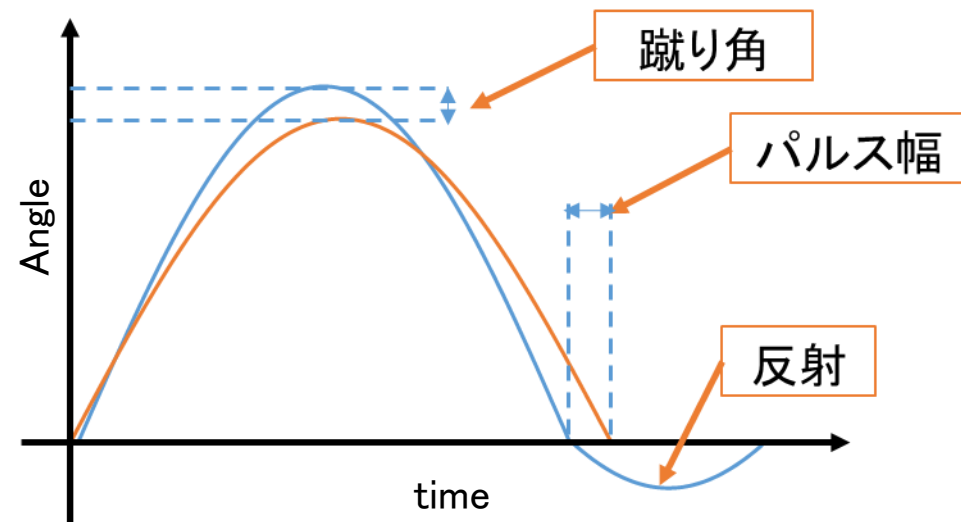
入射方式

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。
地震の影響による、セプタム電磁石の設置誤差
従来から存在する、キッカー電磁石の誤差
などが主な原因と考えられる。



セプタム電磁石のずれ



キッカー電磁石の誤差

背景

セプト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

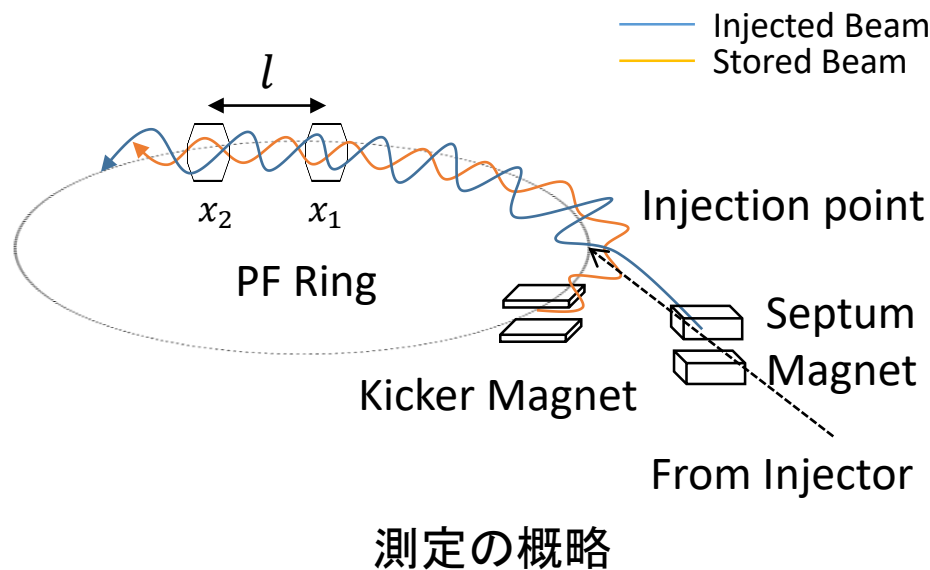
目的

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、上流に転送する



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

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

$l: 8.83 \text{ [m]}$

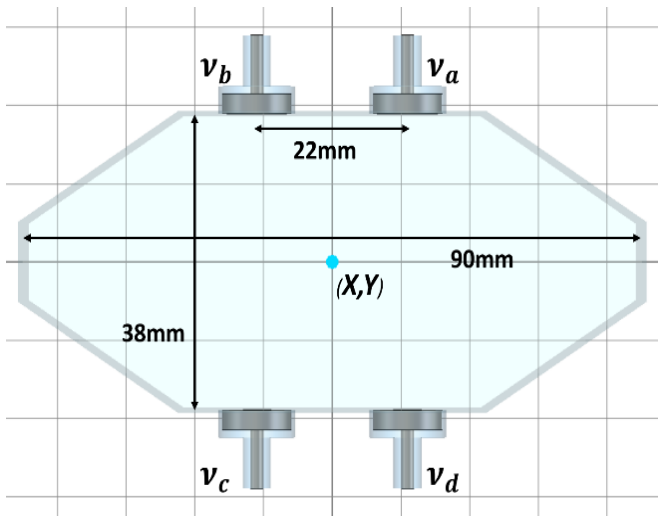


入射点へ転送

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

$M: \text{Transfer Matirix}$

検出回路



ダクトの断面図

電極間距離

22 mm(H) × 38mm(V)

三次多項式によるビーム位置の計算

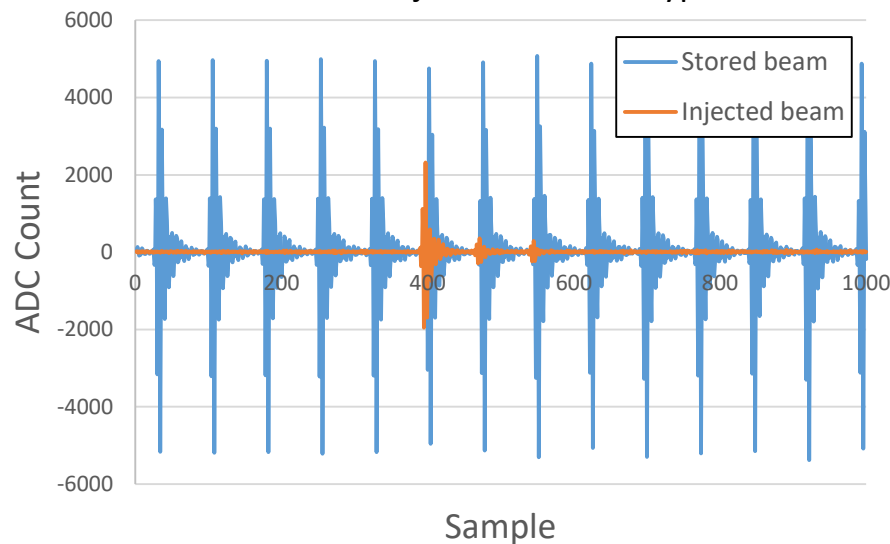
$$x = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_x(i,j) U^i V^j$$

k_x : 非線形応答係数
 U, V: 電極間の信号比

ADC Raw Data

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 Data

蓄積ビーム

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

入射ビーム

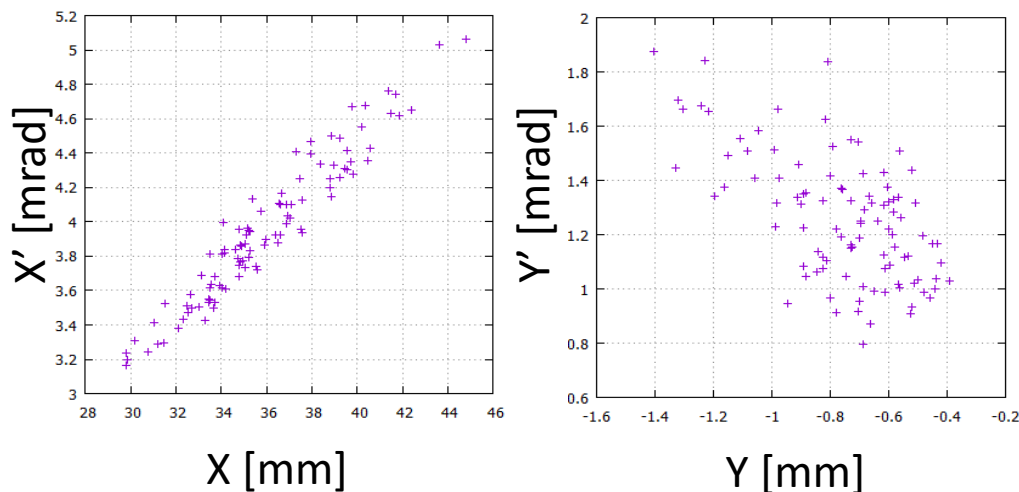
電荷量の少ないデータを除去

K. Hirano, et. al., J Phys Conf. , 1067(2018)032024

入射点のビーム位置関係

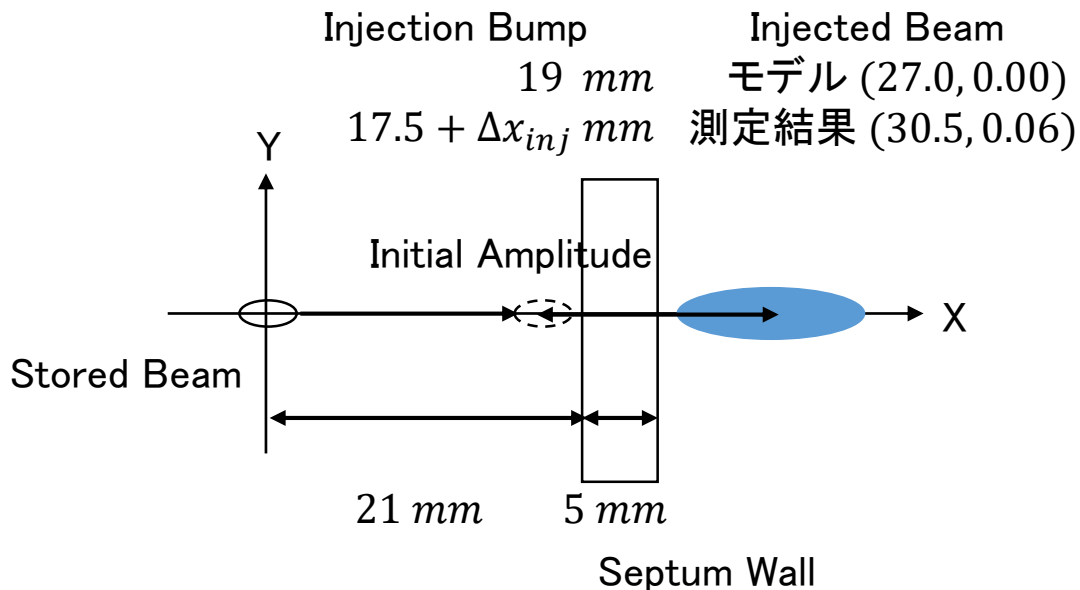
入射バンチを測定してセプタム電磁石出口まで転送して位相空間にプロット。

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



中心軌道との相対座標

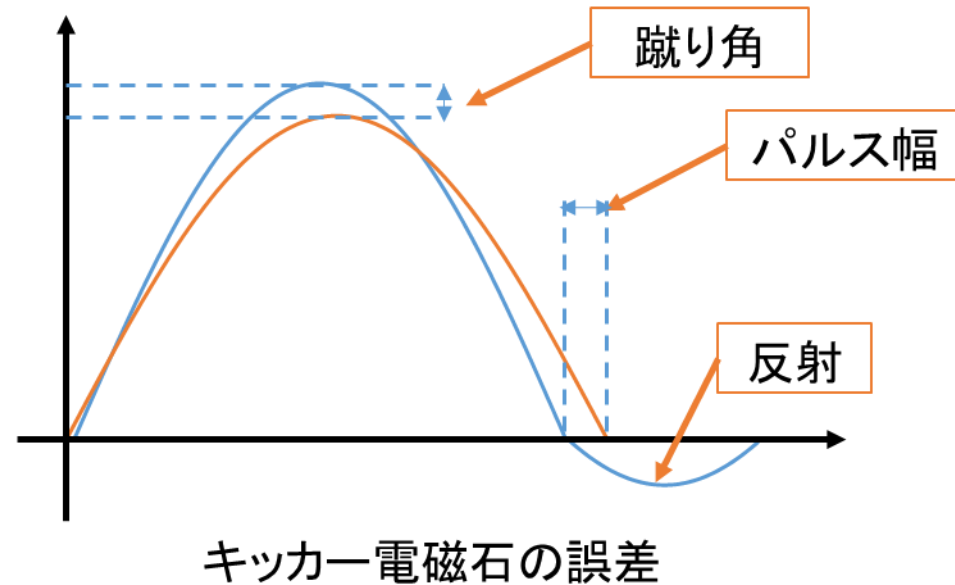
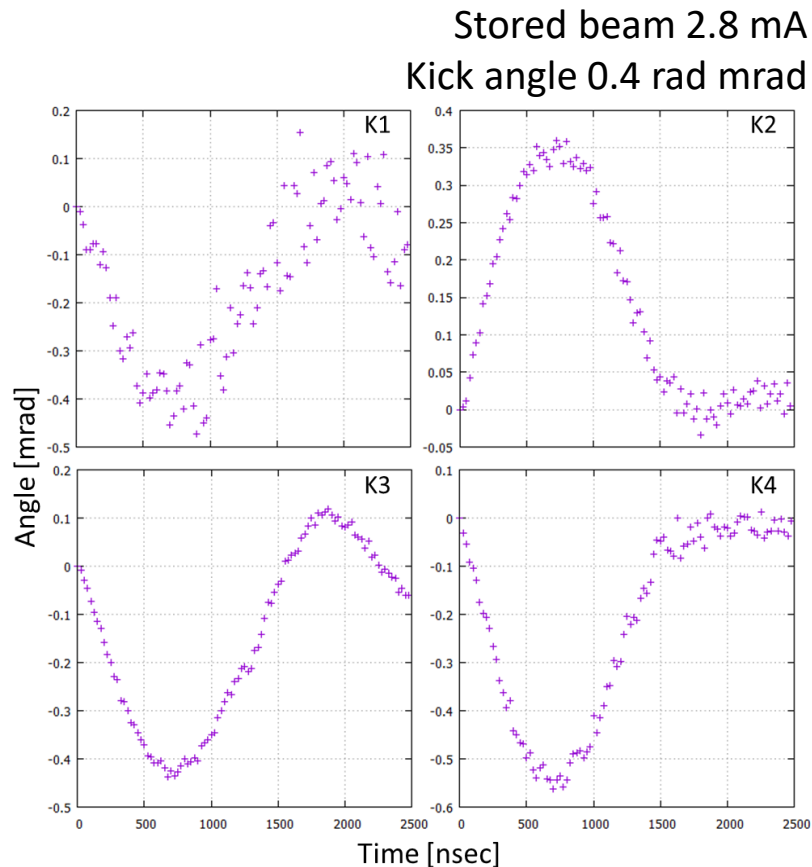
	position[mm]	angle[mrad]
Horizontal	30.5 ± 3.2	3.11 ± 0.42
Vertical	0.06 ± 0.23	1.02 ± 0.23

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

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



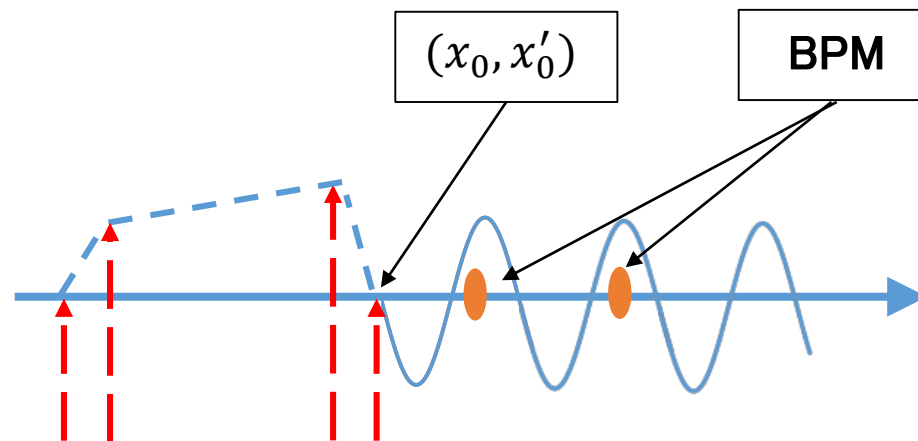
- パルスの波形から電流値-蹴り角の校正を実施

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こと

入射ビームの向きをリングの軌道に揃える



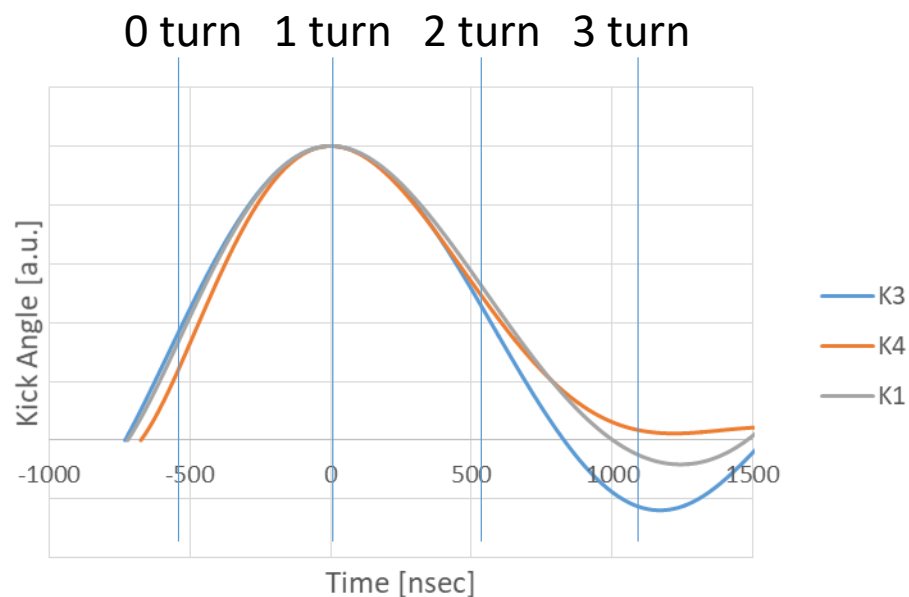
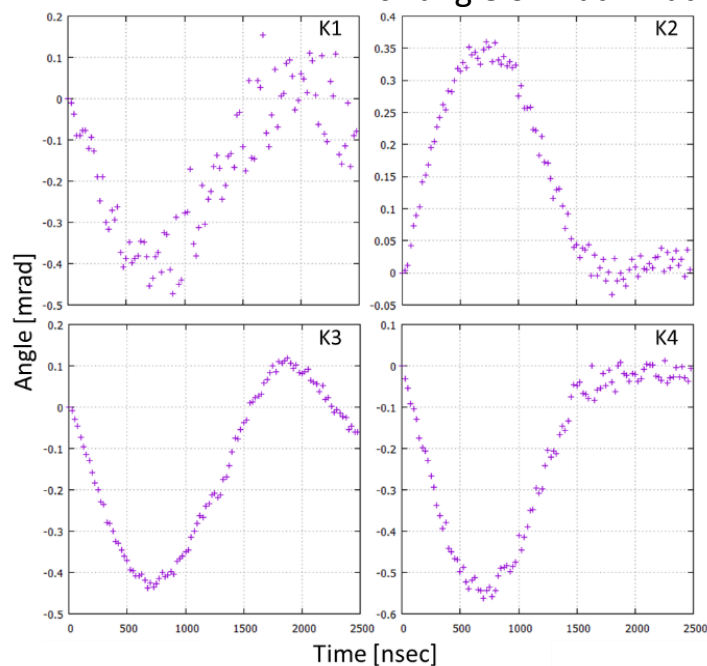
Kicker Magnets(K1,K3, K4)

キッカーバンプマッチング

キッカーバンプマッチング

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

Stored beam 2.8 mA
Kick angle 0.4 rad mrad

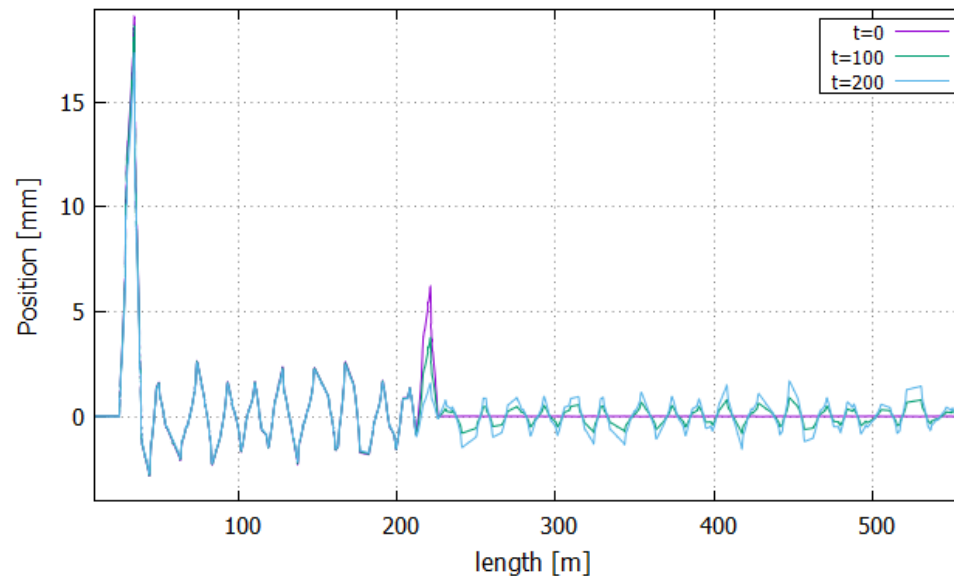


キッカーバンプマッチング(シングルバンチ)

誤差キックによる軌道のずれのRMS

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

ここで, 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



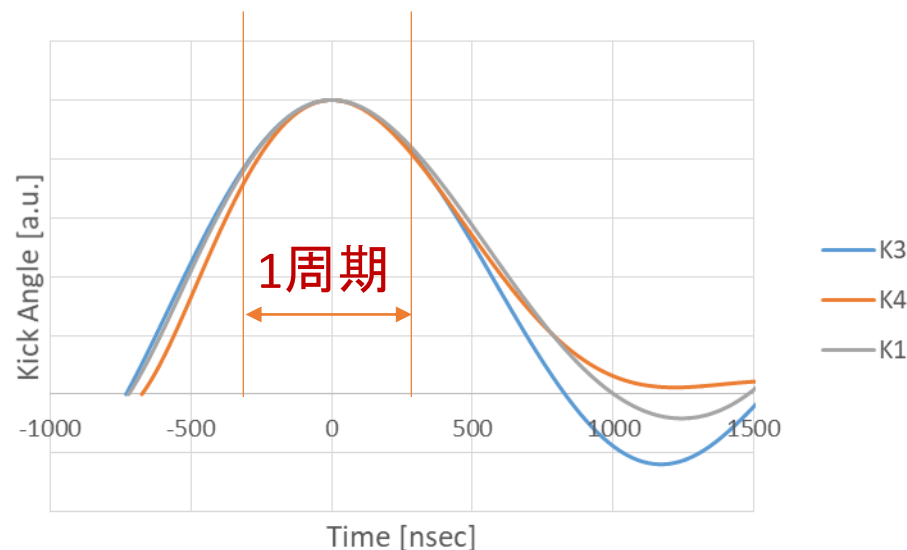
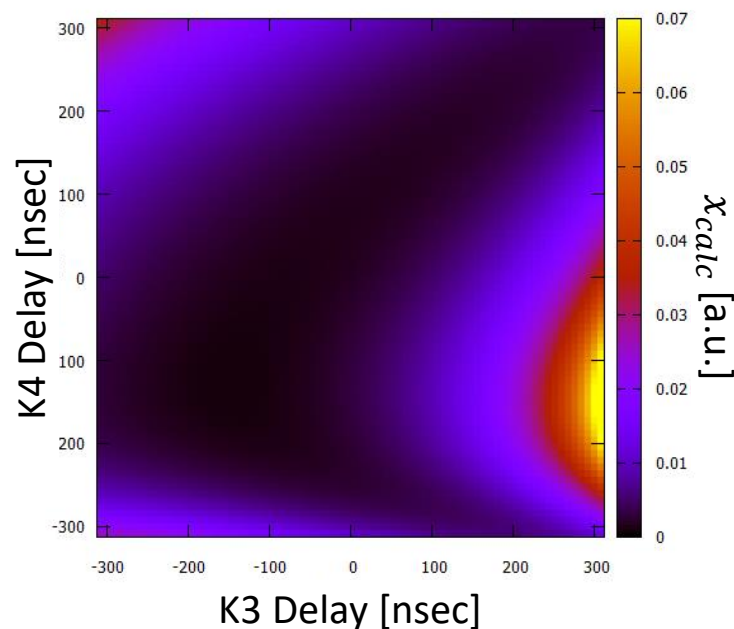
リング2周分のビーム軌道(ディレイを変えた時)

キッカーバンプマッチング(シングルバンチ)

計算する量は誤差キックによる軌道のずれのRMS

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

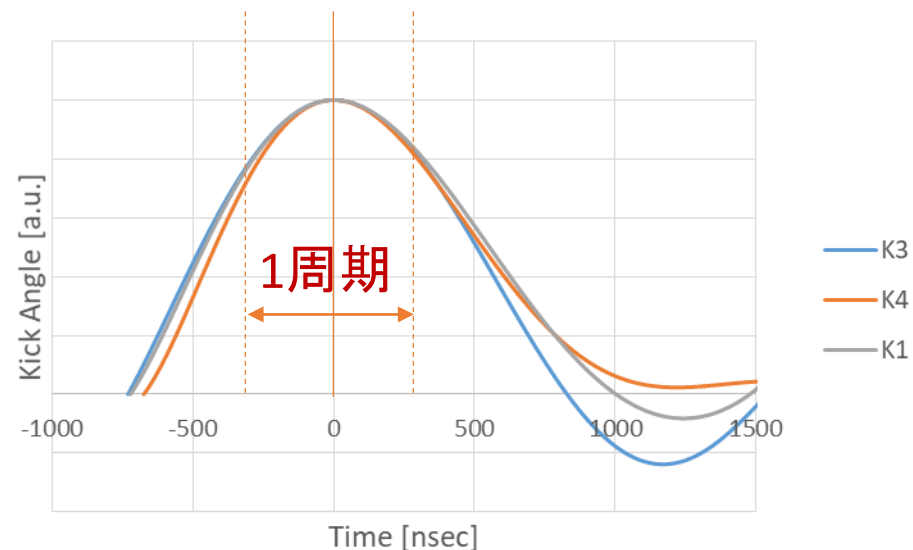
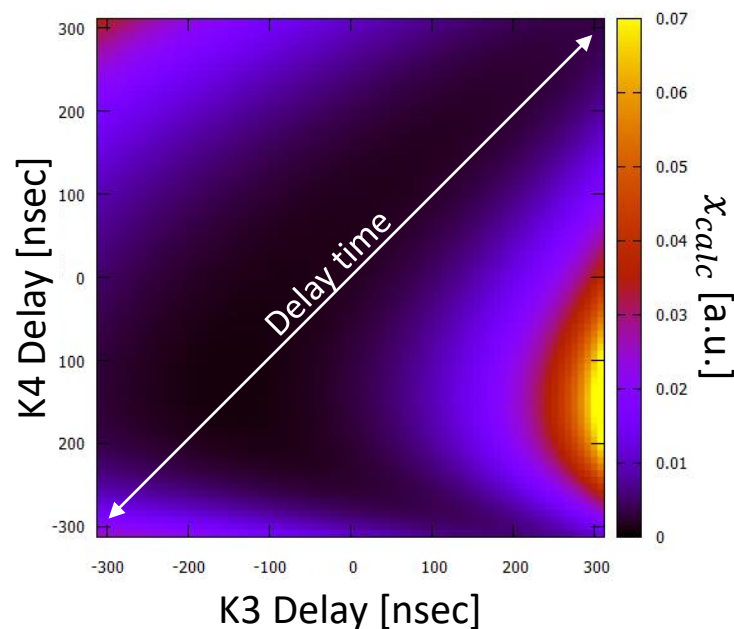
ここで, x_i : 中心軌道からのずれ, turn: マルチターンが終わって2周期分



キッカーバンプマッチング(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。

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

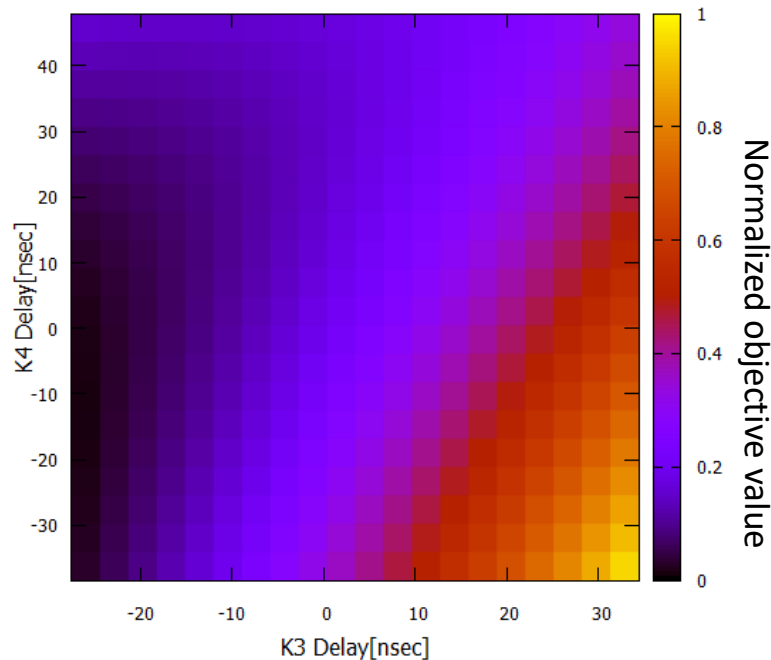


キッカーバンプマッチング(マルチバンチ)

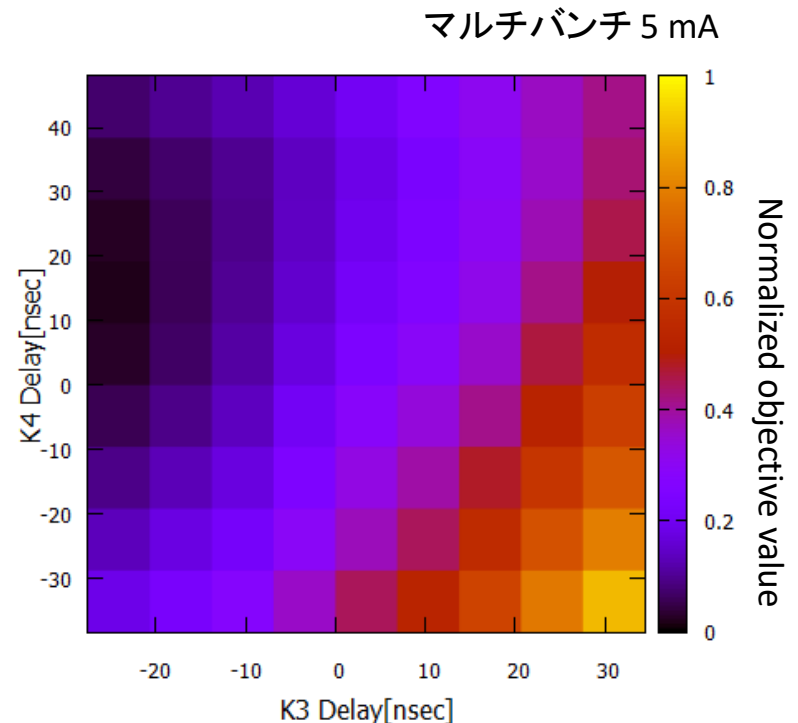
ビームスタディと比較

K3とK4のタイミングと蹴り角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を用いた



計算結果



(ビームスタディ)

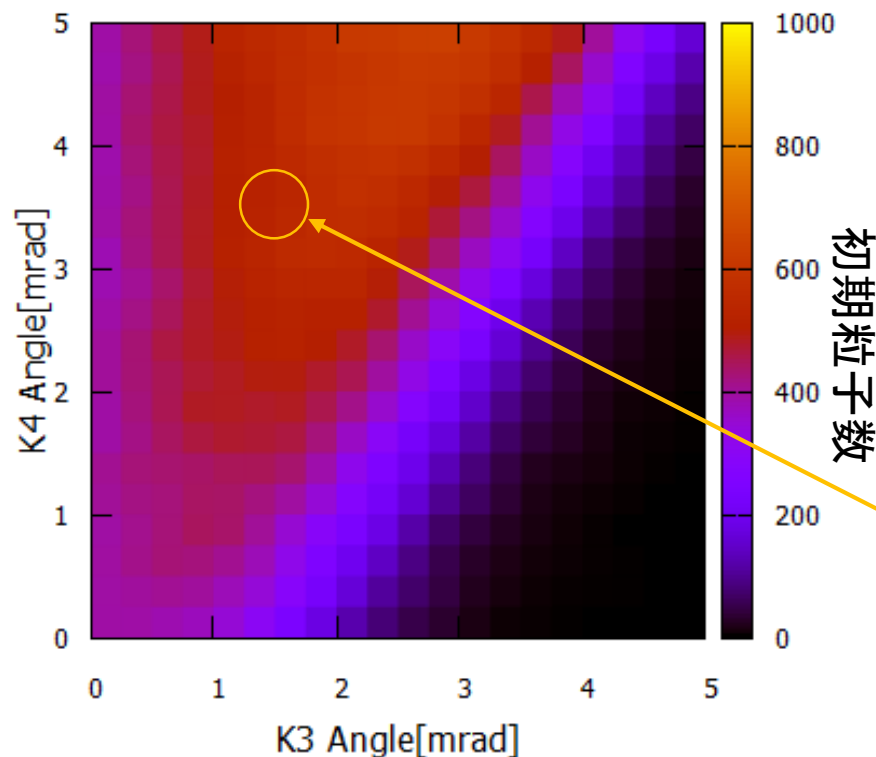
入射効率

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)

初期粒子分布はビームベースの位相空間情報でガウス分布

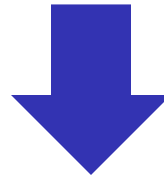


The initial kicker's setting is in operation value

Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.22	0 (1890)
K2	0	0 (1800)
K3	1.51	0 (1720)
K4	3.47	0 (2400)

まとめ

入射背景で考えた問題は、実際に入射効率低下の一員となっていた。
この測定の場合、ビームベース測定は正しい結果を返している。
入射調整による、効率の改善25.0~52.7 % (20180706)は見込めない



キッカー入射の要件

閉じたバンプを形成すること ←
目的の位相空間にビームを入射すること

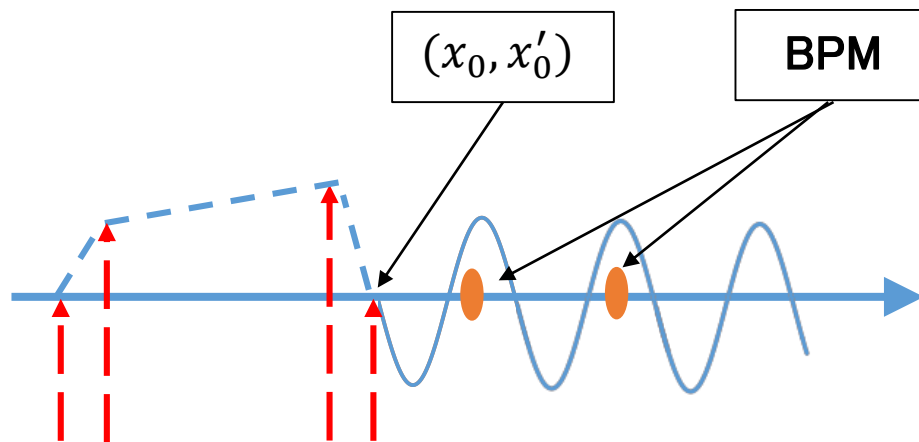
1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射シミュレーション
4. 入射最適化
 - ・キッカーバンクマッチング
5. まとめ

キッカーバンプマッチングの調整

誤差キックによる軌道のずれ

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

目標値は蓄積ビームの振動(TBT)のRMSを6台のBPMで測定したものの
測定範囲は200~1000 Turns(キッカー励磁から十分に時間がたったもの)



Kicker Magnets(K1,K3, K4)

キッカーバンプマッチング

The initial kicker's setting is in operation value

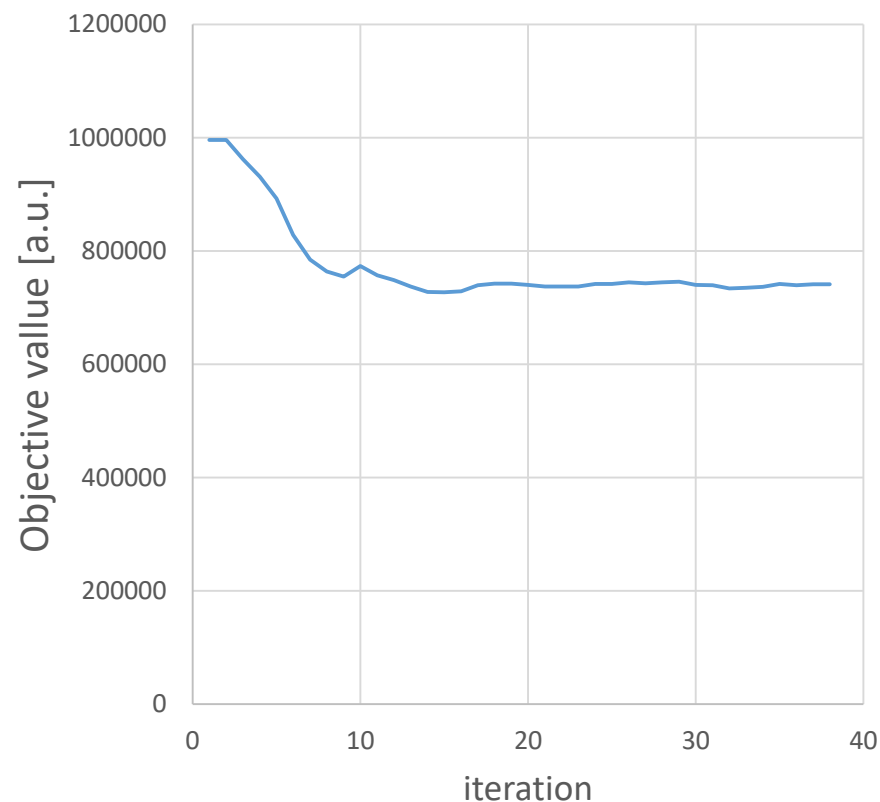
Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.22	0 (1890)
K2	0	0 (1800)
K3	1.51	0 (1720)
K4	3.47	0 (2400)

調整

目標値の測定は、10 mAのシングルバンチを使う

反復はディレイと蹴り角を交互に変える

縦軸は5回の積算値、横軸は直線探索を含めた反復数



Original set

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

Optimized set

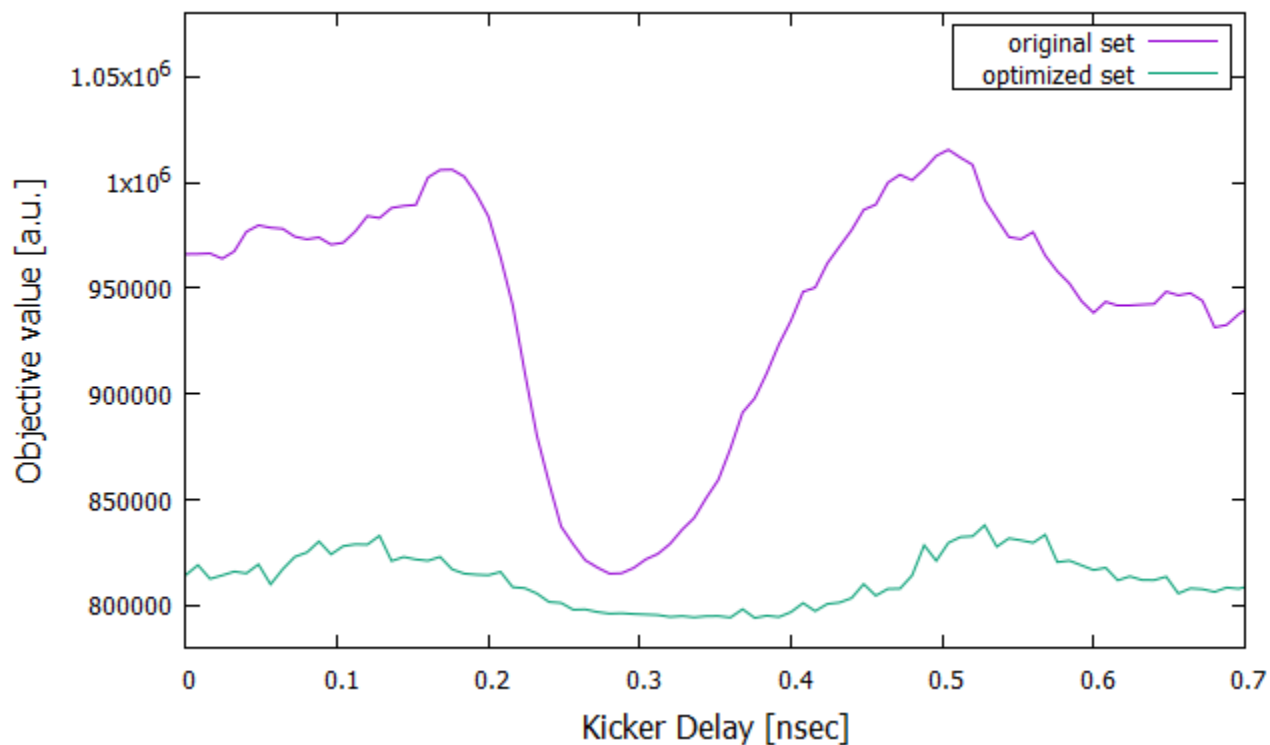
Name	Angle [mrad]	Delay [nsec]
K1	2.02	0
K2	0	0
K3	1.495	+45
K4	3.429	-8

周期構造の比較(シングルバンチ)

誤差キックによる軌道のずれの周期構造の測定

10 mAのシングルバンチ

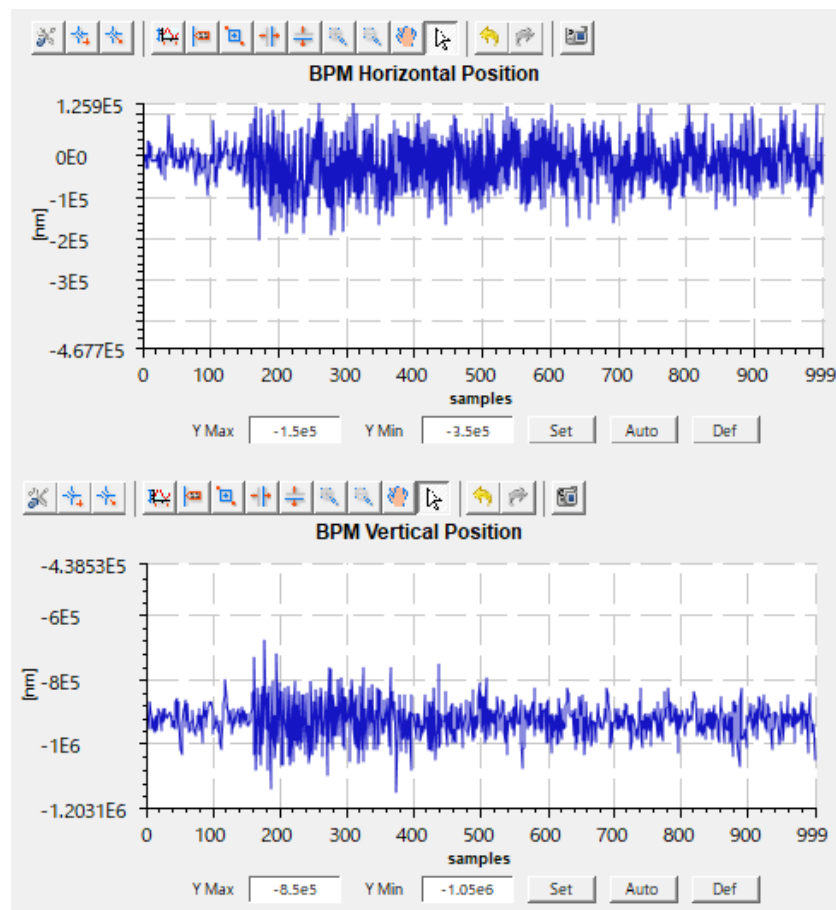
評価はディレイタイムを8 nsecの間隔で掃引しながら5回の積算値



振動の比較

Original set

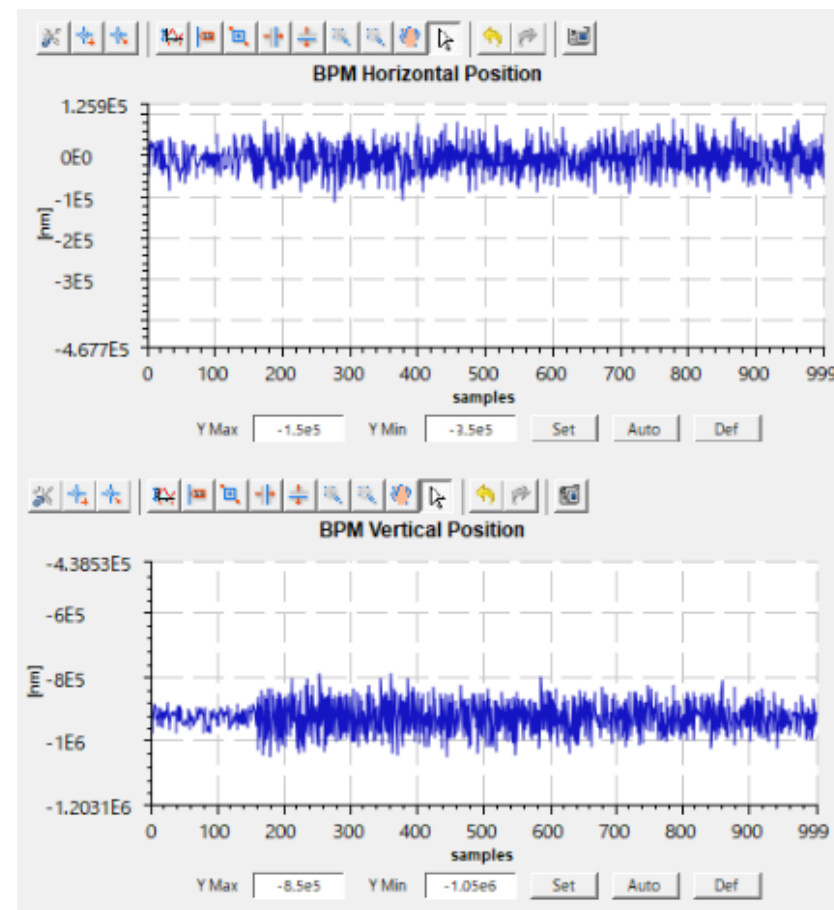
ピーク位置で揃える設定



Optimized set

K3 Delay: +45 nsec

K4 Delay: -8 nsec



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

入射ビームの位相空間情報、キッカー電磁石のパルスを得て、校正を実施

- 入射シミュレーション

キッカーバンプの計算にマルチターン入射とビームベース測定結果を導入

ビームスタディと比較、ビームベース測定の評価

多粒子追跡による入射効率の見積もり

入射効率低下の原因は初期振幅の増大

- 入射最適化

キッカーバンプマッチング調整の自動化

自由パラメータを増やした

今後の展望

- リングより上流を扱う(輸送路のオプティクスマッチング)
- セプタム電磁石後のキッカー調整

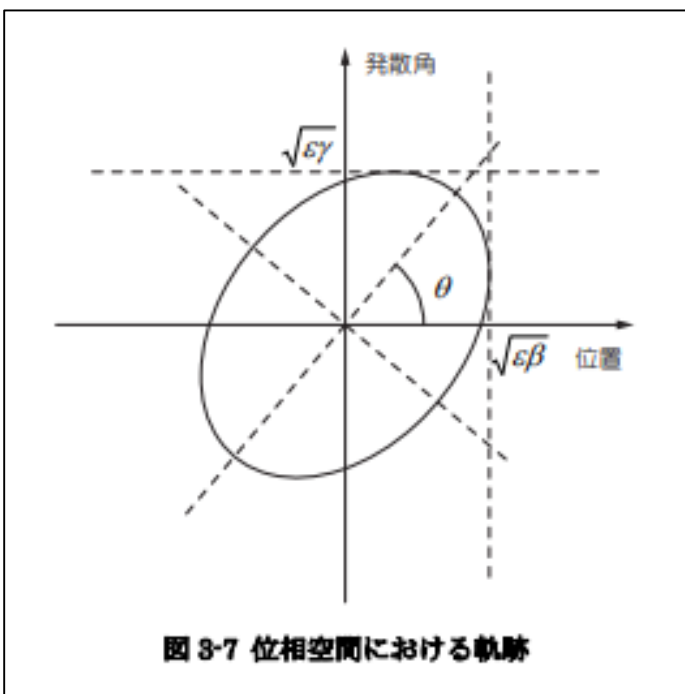
ご清聴ありがとうございました

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

目的の位相空間に輸送

下記の図を使って、振幅を小さくする方法の説明



位相空間の楕円は、

$$\frac{1}{\beta} (x^2 + (\beta x' + \alpha x)^2) = \varepsilon \quad (1-173)$$

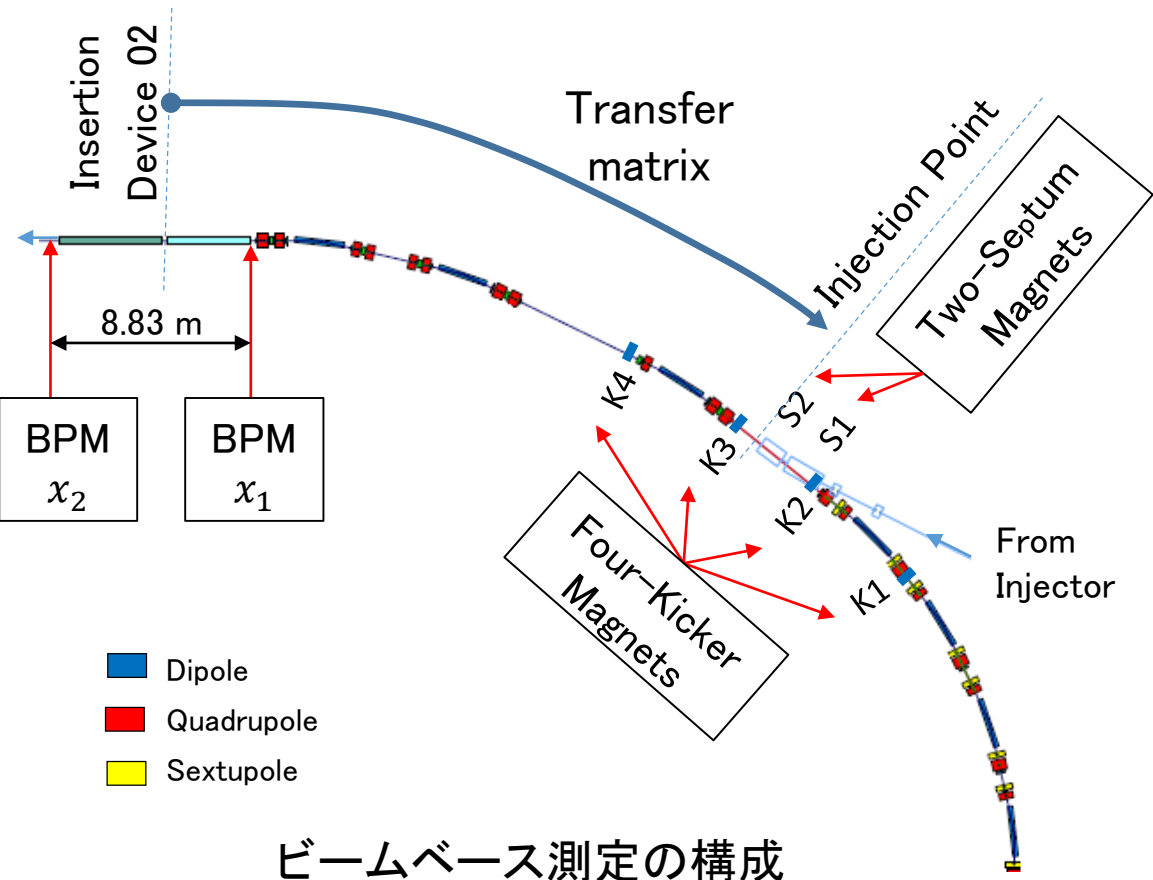
なので、

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, \quad (1-174)$$

$$P = \frac{\beta x' + \alpha x}{\sqrt{\beta}}$$

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。



セプタム電磁石の蹴り角

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

Twiss parameters and Phase advanced

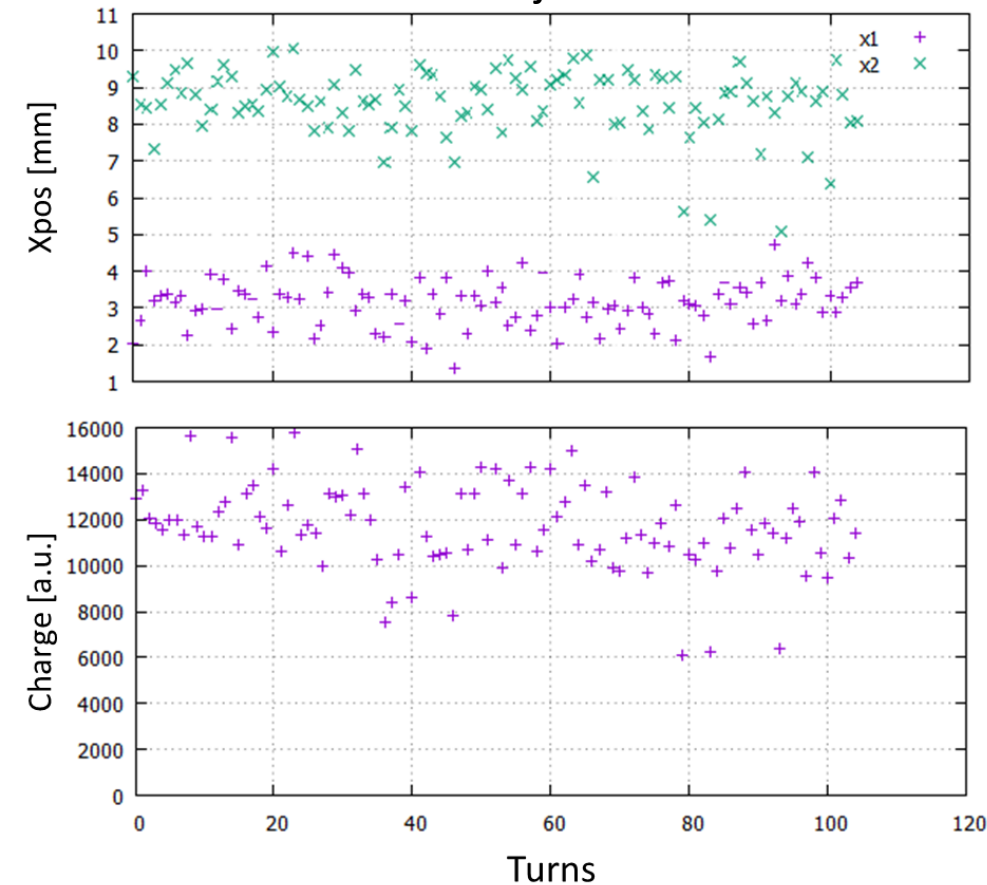
	K1	K2	K3	K4	ID02	Inj
α_x	-1.79	-0.62	-1.47	-0.66	0.01	-1.08
β_x	3.25	6.02	13.8	3.15	12.0	9.45
$\Delta\phi_x$	8.01	8.29	1.24	0.86	0.00	1.26

*K1はID01から再構築

ビームベース測定の構成

位置情報の導出

Injection beam
Injected bunch = 0.28 nC



X、Yの位置データ



直線部中心の位相空間情報に計算

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



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

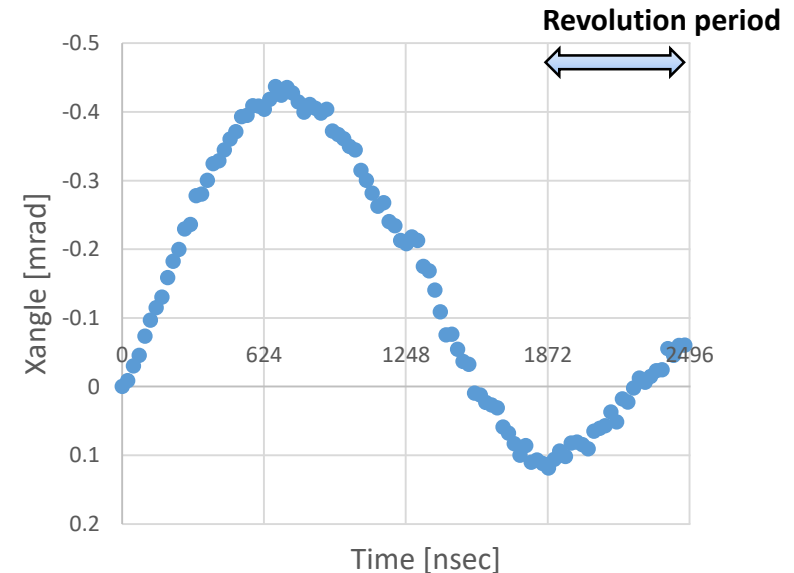
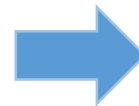
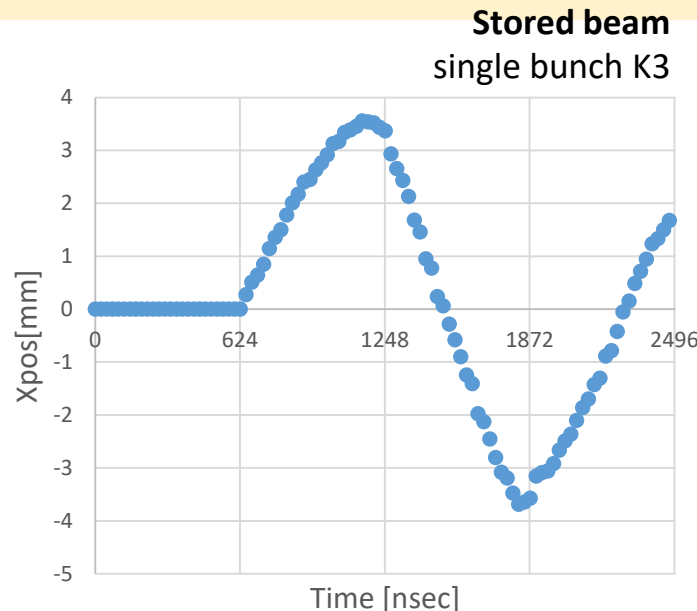
- ・電荷量の少ないデータを除去

キッカーパルス波形の再構築

キッカー電磁石を励磁して蓄積ビームの振動を測定。直線部の情報から蹴り角を導出、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

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



ビーム位置モニターのワイヤー校正

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。

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

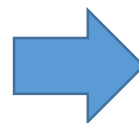
j : Steering magnet

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

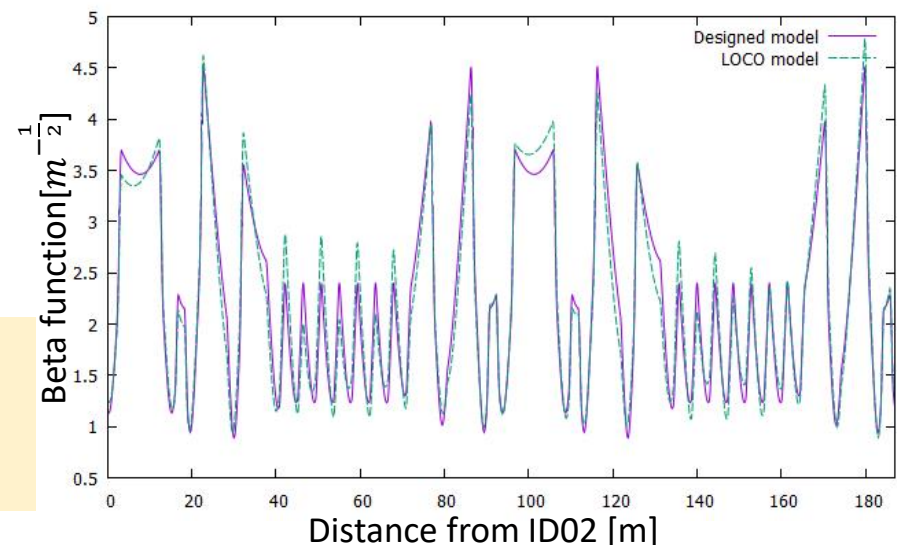
Fitting



収束

5.10 $\mu m(H)$

2.87 $\mu m(V)$



最適化のアルゴリズム

次の問題を解く

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$$

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

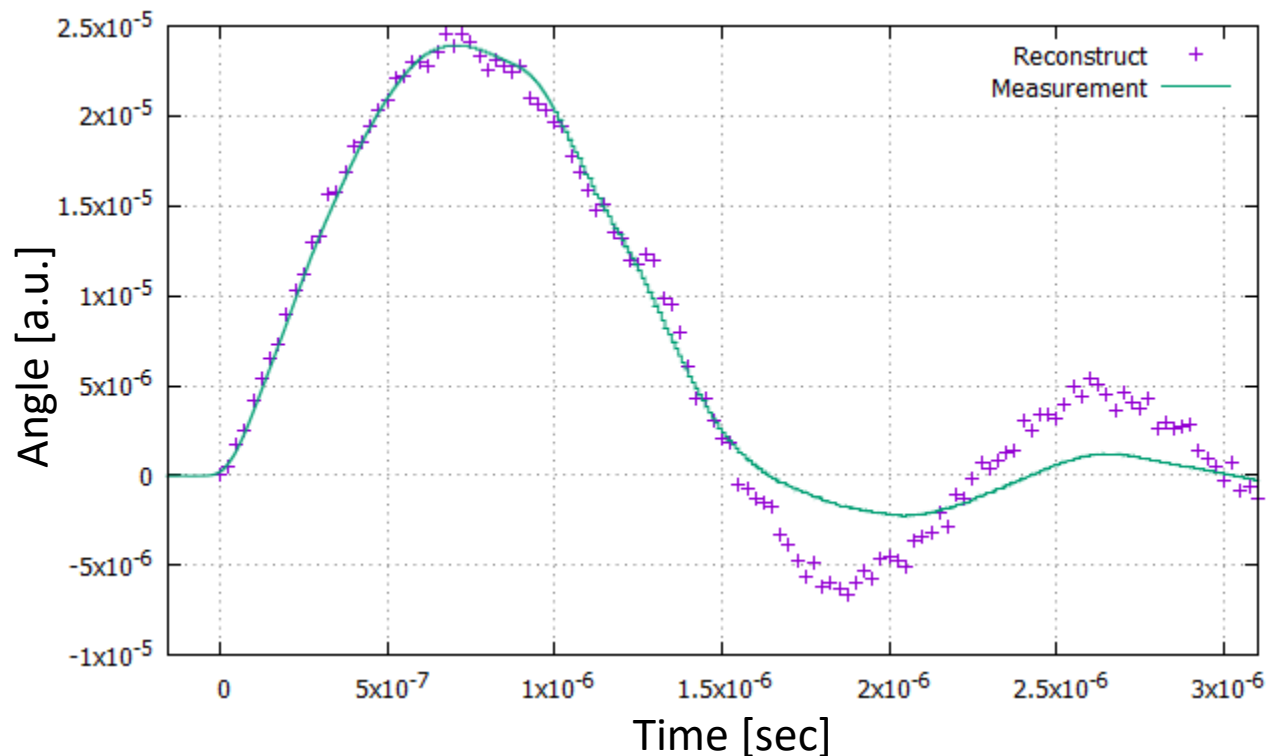
直線探索

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

Betatron function (LOCO)

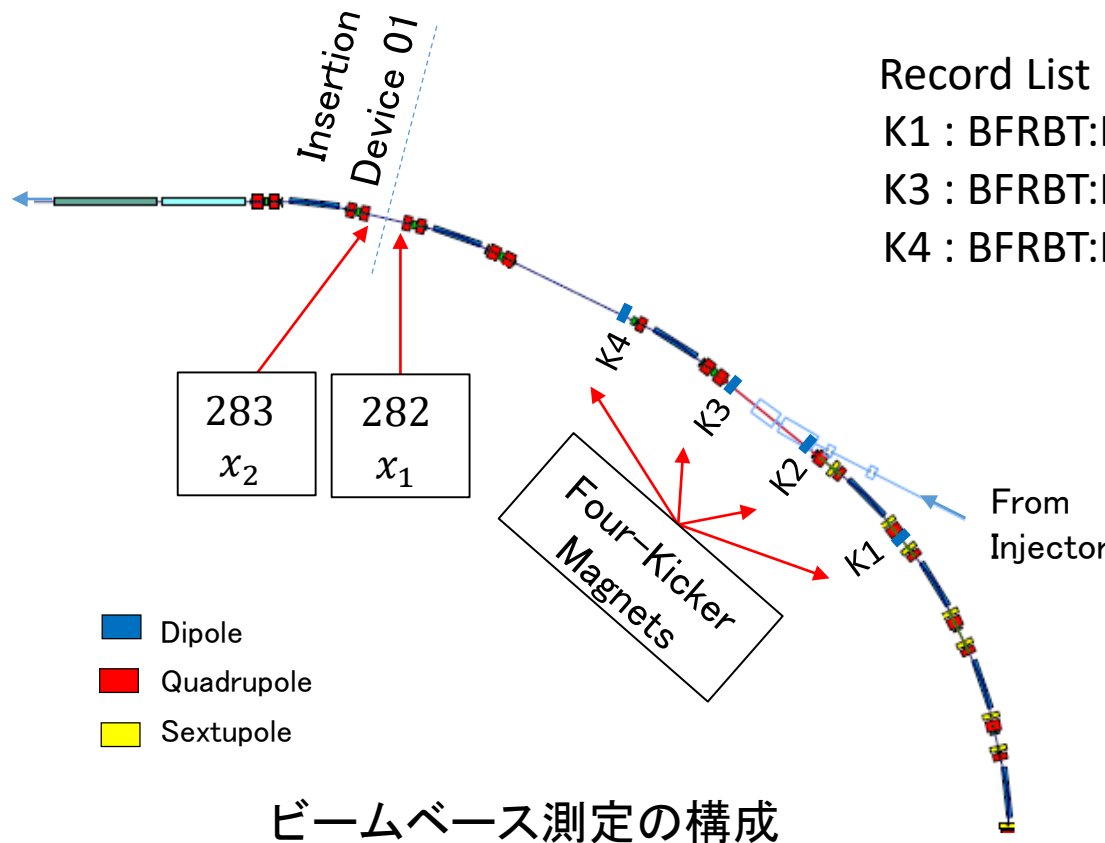
リングからキッカー電磁石K3を取り出して磁場測定を行った結果とビームの応答からパルス波形を再構築した結果を比較。

- 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



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
初期値: Angle = [2.22, 0.00, 1.51, 3.57], Delay time = [1.90, 1.80, 1.72, 2.40]



Record List

K1 : BFRBT:K1:ANGLE_SET, BFRBT:K1:DELAY_SET
K3 : BFRBT:K3:ANGLE_SET, BFRBT:K3:DELAY_SET
K4 : BFRBT:K4:ANGLE_SET, BFRBT:K4:DELAY_SET

TdpBpm03 = 'pflibera03:TT:WFX'
TdpBpm09 = 'pflibera09:TT:WFX'
ArmBpm03 = 'pflibera03:TT:ARM'
ArmBpm09 = 'pflibera09:TT:ARM'

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

ビームベース測定の構成