

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）

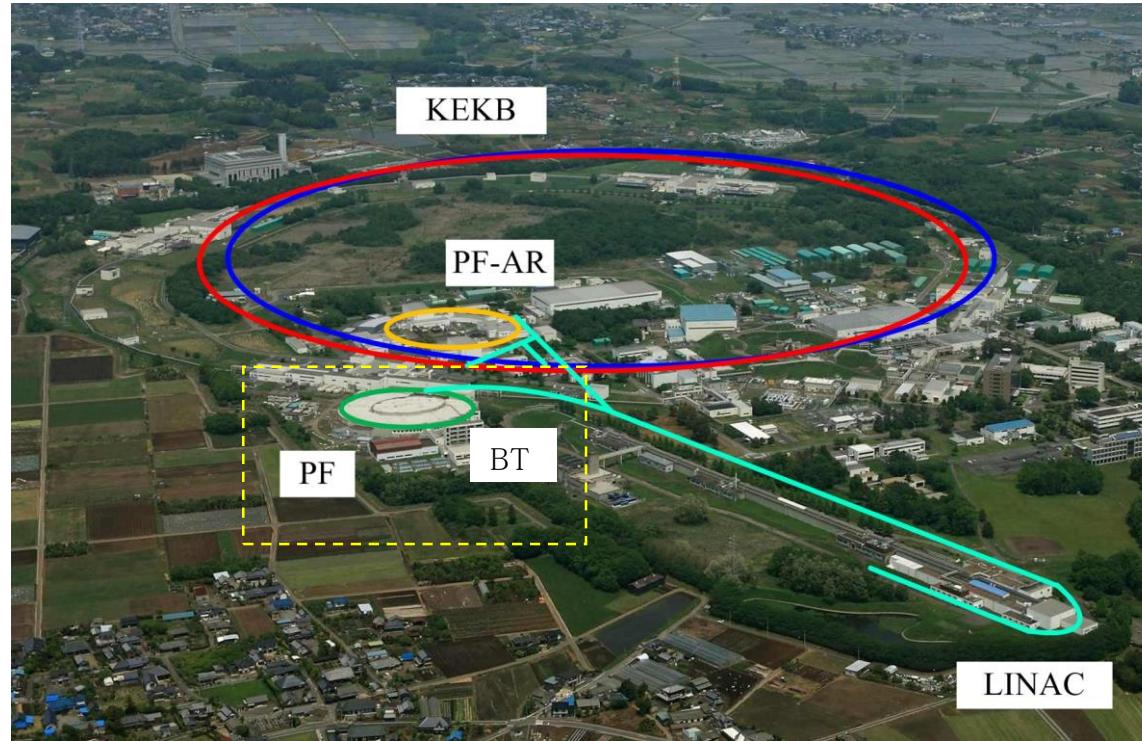
Outline

1. はじめに
2. 入射パラメータの測定
3. 入射効率の計算
4. キッカーバンプの計算と最適化
5. まとめ

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), ビーム輸送路(BT), 電子蓄積リング(PF)で構成
リングから出てくる光を使って物質科学, 生命科学の実験を行う



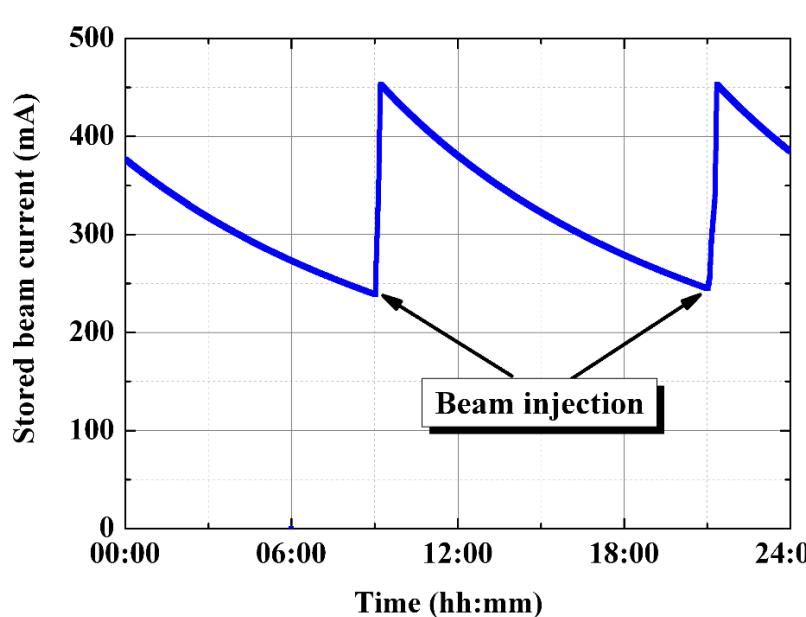
<https://www2.kek.jp/accl/topics/topics100830.html>

KEKの鳥瞰図

入射

光の強度は蓄積した電流量に比例

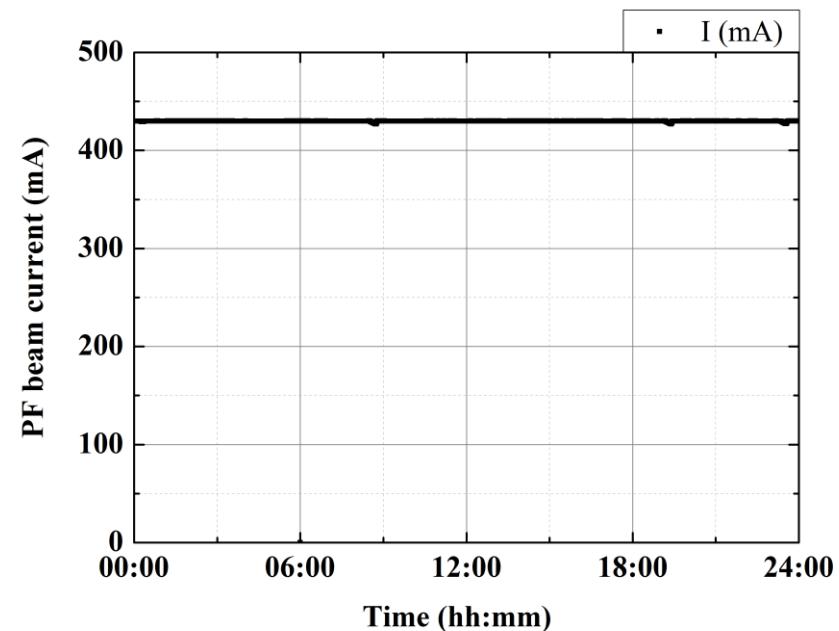
蓄積した電子ビームはガス散乱や量子寿命, ビーム内散乱によって失う電子ビームを継ぎ足す操作(=入射)が必要



定期入射

PFリングの蓄積電流値

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



随時継ぎ足し入射

入射とは

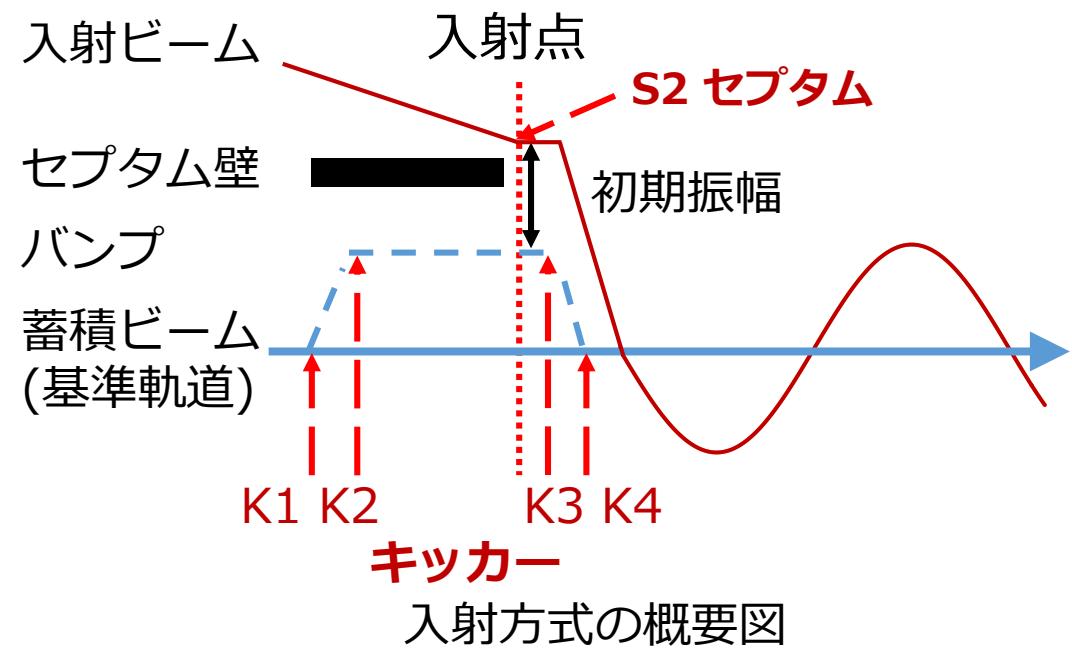
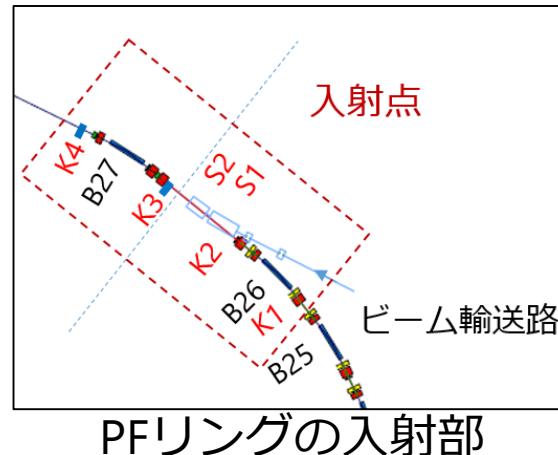
入射方式

セプタムとキッカーを組み合わせた方式

- ・ バンプ軌道を作る
- ・ 入射ビームの向きをリングに揃える

入射方式の要求

- ・ キッカーの蹴り角を揃えてタイミングを同期
- ・ 入射ビームの振幅をリングの口径内に抑える



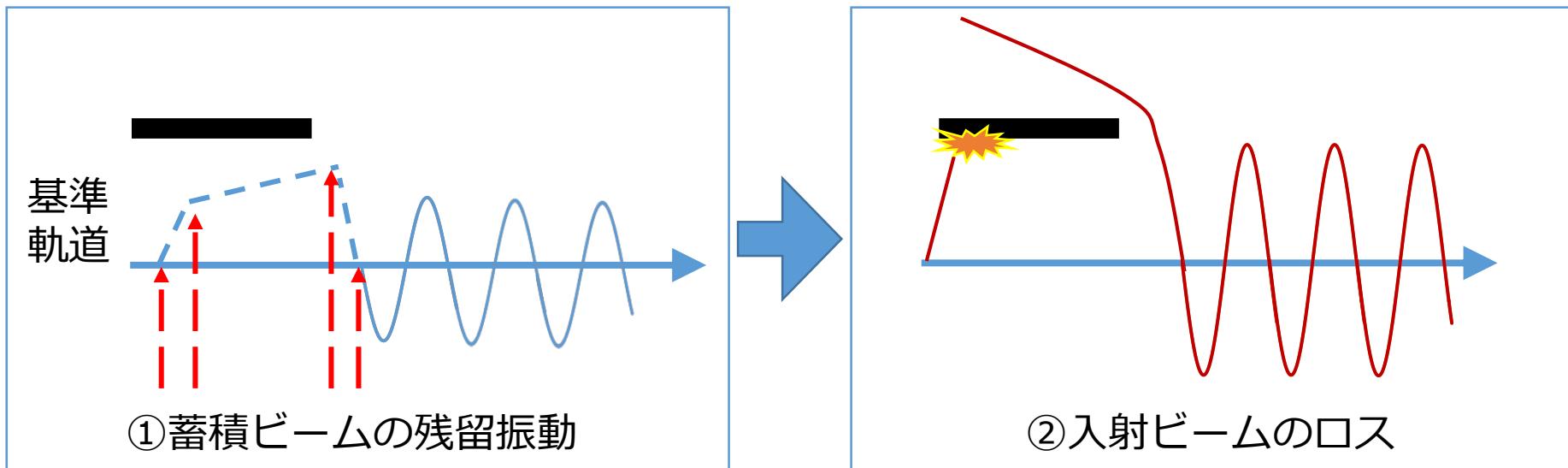
入射方式

セプタムとキッカーを組み合わせた方式

- ・ バンブ軌道を作る
- ・ 入射ビームの向きをリングに揃える

入射方式の要求

- ・ キッカーの蹴り角を揃えてタイミングを同期
- ・ 入射ビームの振幅をリングの口径内に収める



入射効率改善のための研究

研究背景

長年の運転で積み重なった誤差の影響と東日本大震災の影響によって
蓄積ビームの残留振動と入射率の低下が問題

主題

1. 蓄積ビームの残留振動をなくして
2. 入射率の最大化

入射パラメータの測定

1. 入射率
入射ビームの位置と傾き
2. 残留振動
キッカーのパルス波形

入射シミュレーション

1. 入射率
マルチターンキック
オプティックス
2. 残留振動
マルチターンキック

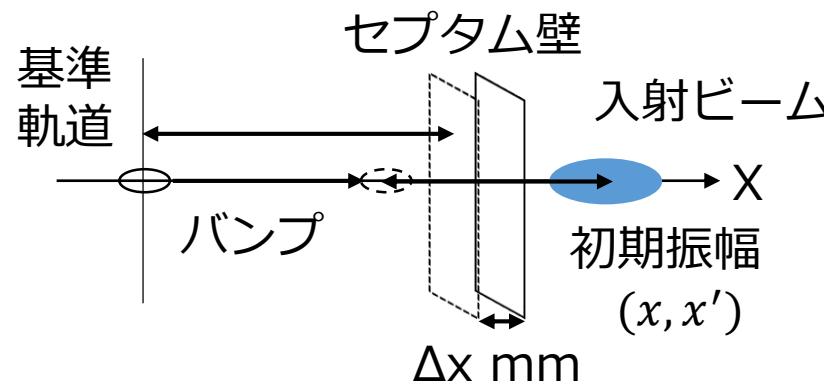
入射最適化

1. 入射率
2. 残留振動
自動調整

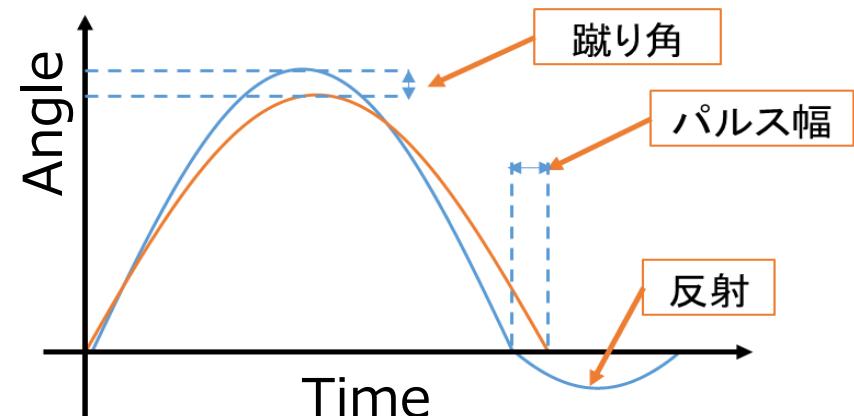
- ① 入射点でのビームの位置と傾き(x, x')
 - 設置されたモニターの座標を失ったこと
- ② キッカーのパルス波形
 - 加速器設置前後の環境変化

ビームベース測定

ビームの応答から加速器パラメータを調べる手法
全ての誤差の影響を含んだ正しい値が得られる



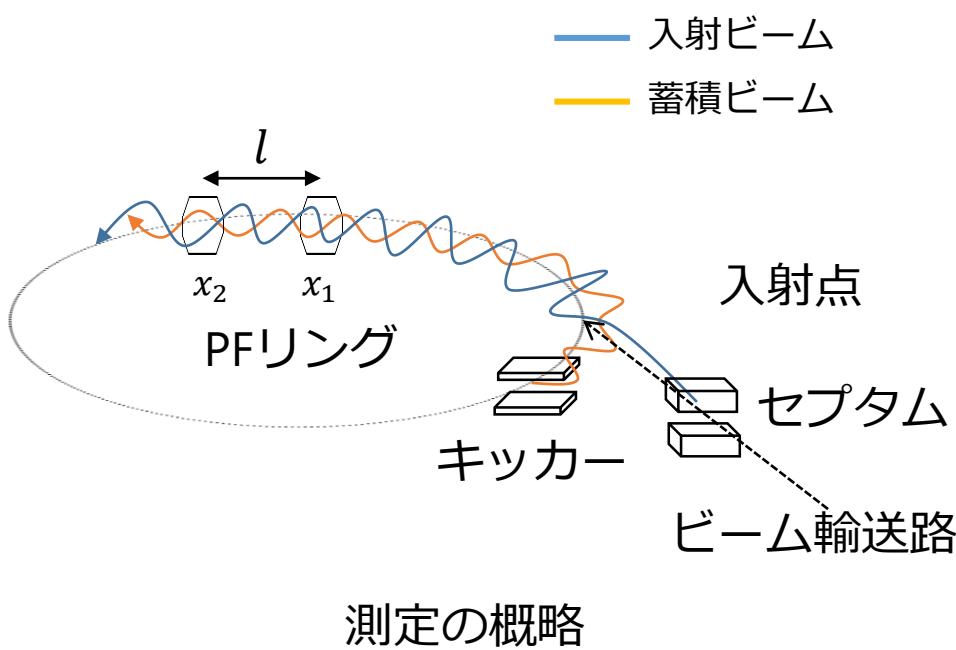
セプタム電磁石のずれ



キッカー電磁石の誤差

ビームベース測定

何もない空間を挟んだ直線部両端にあるビーム位置モニターを使用
中心部の位相空間情報を求め、上流に転送



直線部両端の位置データ x_2, x_1

直線部中心の位置と傾きに計算

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

l : 直線部の長さ

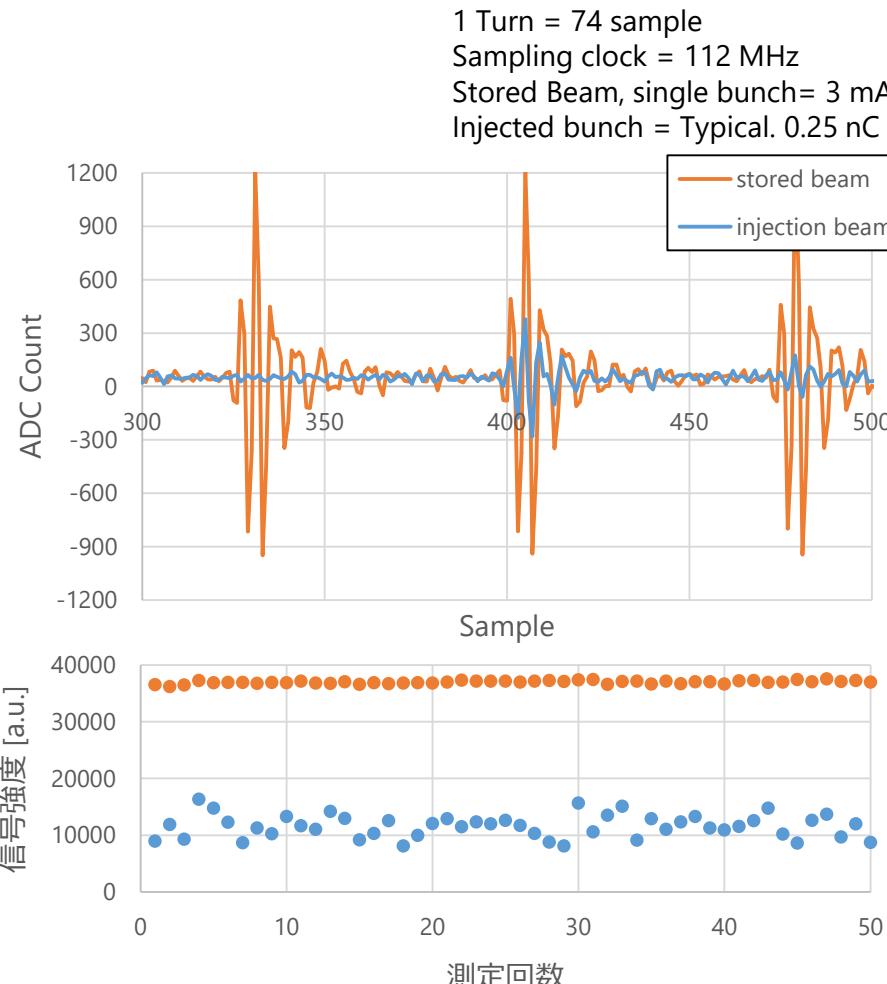
上流に転送

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

M : 転送行列

位置データの解析

BPMの電極に誘起される生の電圧の時間波形からデータ解析を行う



周期成分で取り出す

直流成分を取り除く

信号強度の総和を調べる

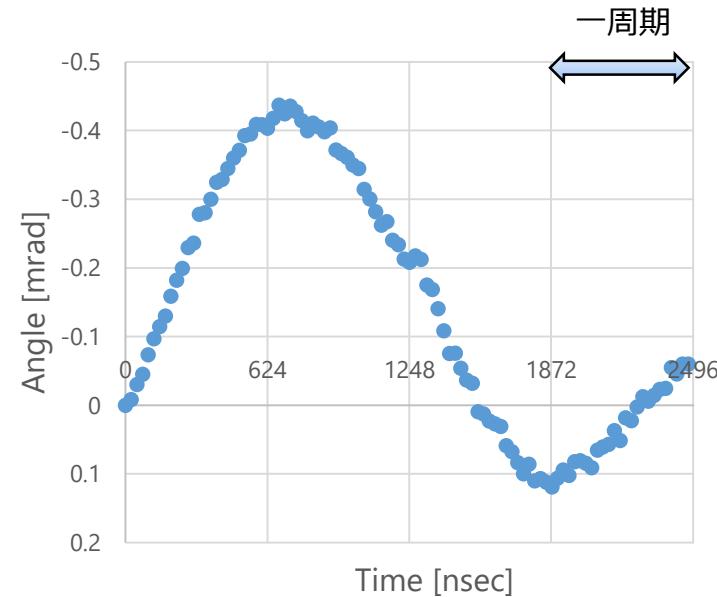
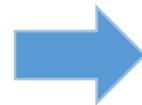
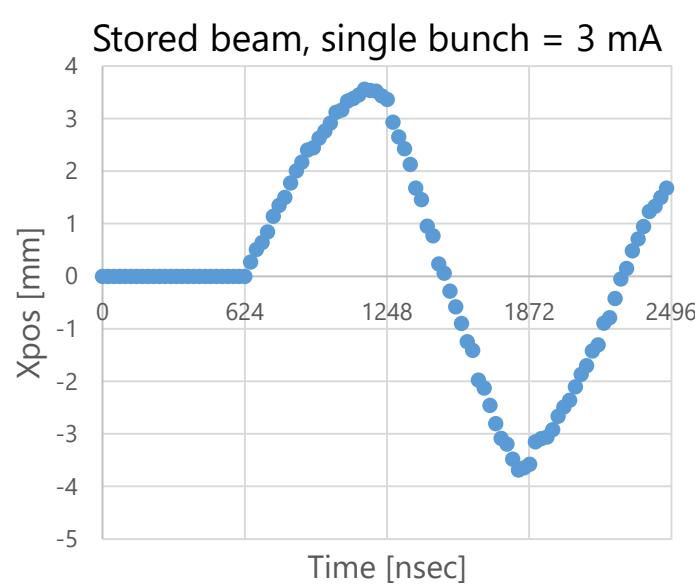
信号強度の少ないデータを取り除く

非線形応答のフィッティング

位置データ

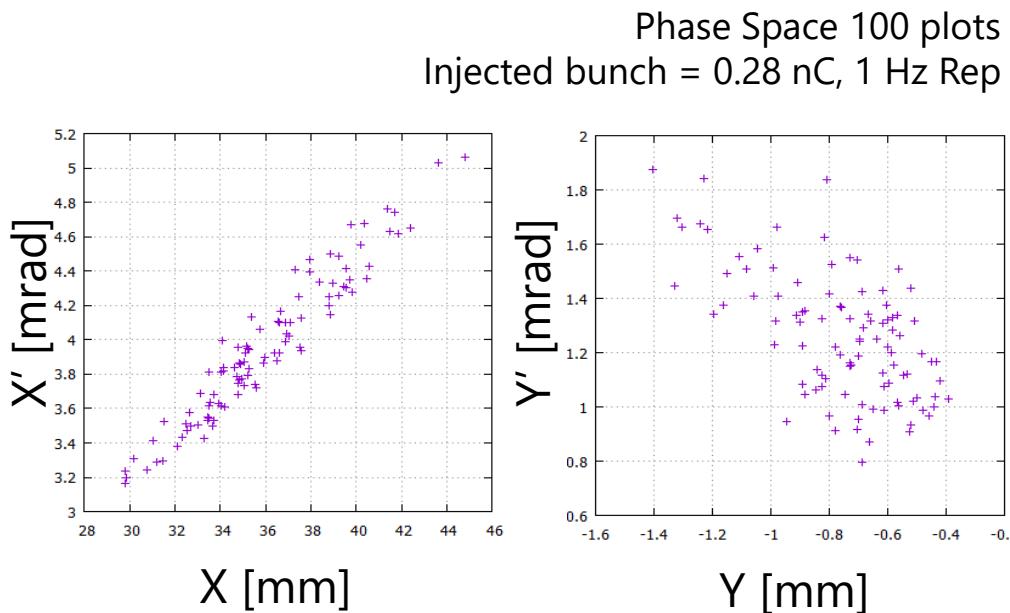
パルス波形への再構築

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



入射ビームの位置と傾き

直線部で測定した入射バンチの位置と傾きを入射点まで転送



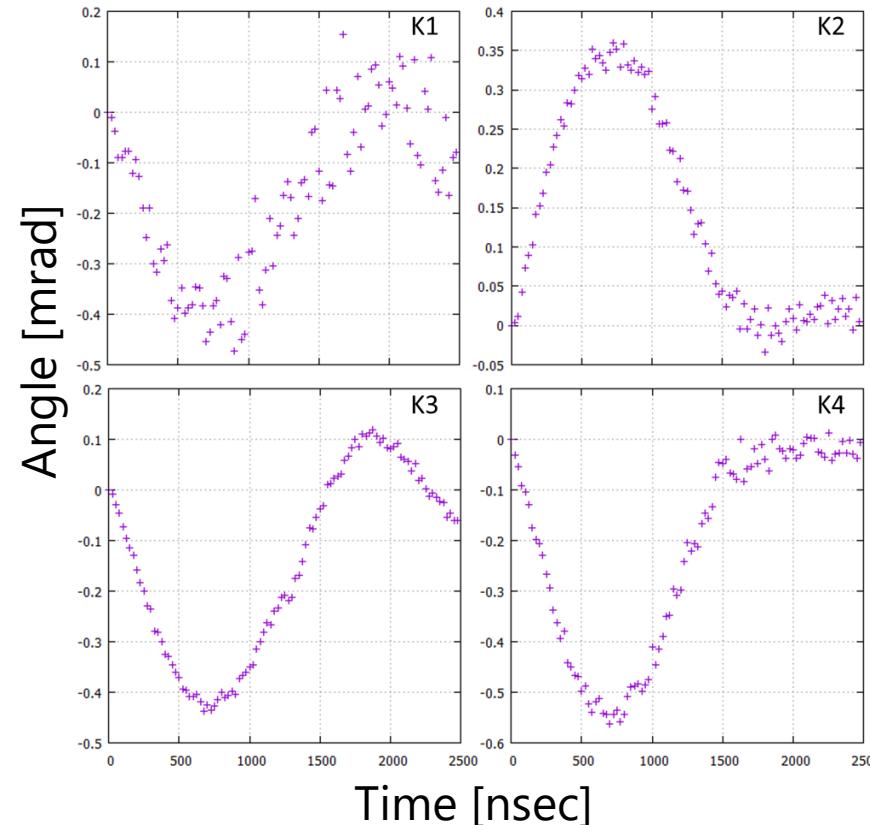
中心軌道との相対座標

| | Position [mm] | Angle [mrad] |
|------------|-----------------|-----------------|
| Horizontal | 30.5 ± 3.2 | 3.11 ± 0.42 |
| Vertical | 0.06 ± 0.23 | 1.02 ± 0.23 |

キッカーのパルス波形

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

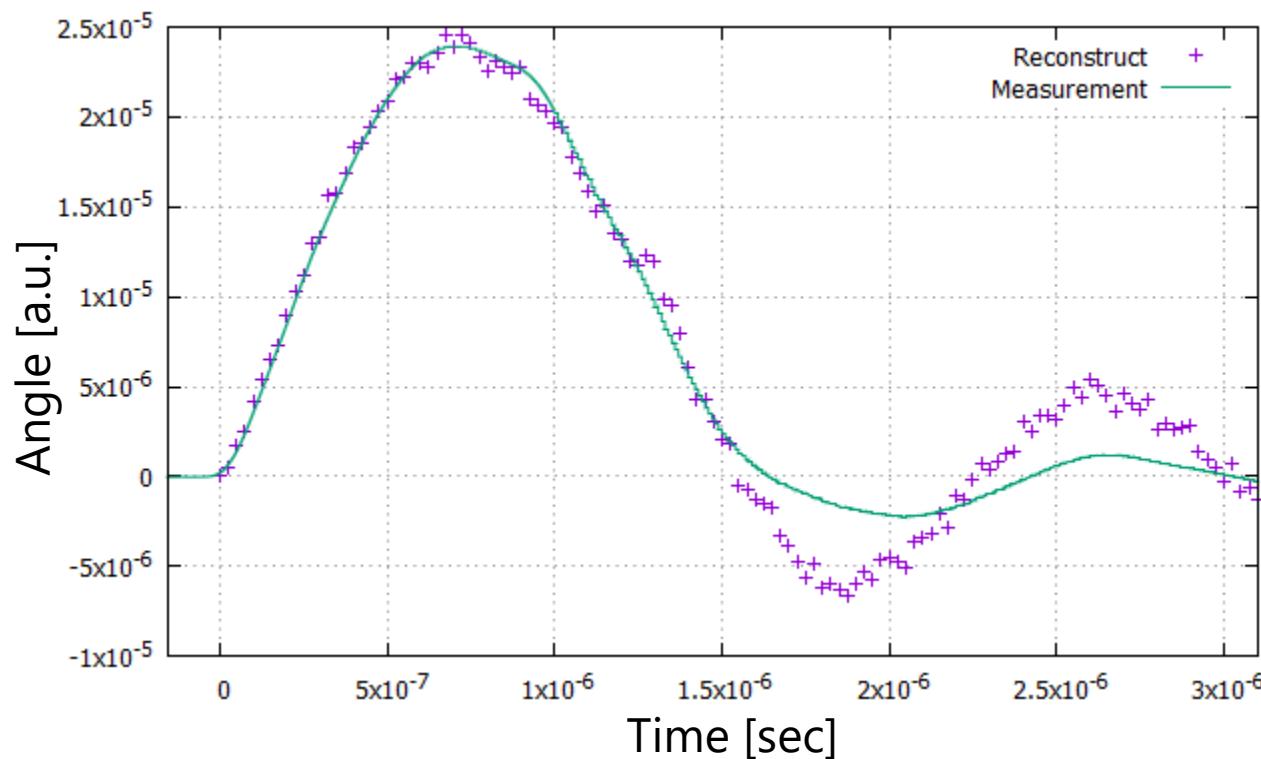
Stored beam, single bunch 2.8 mA
Kick angle 0.4 mrad



磁場測定との比較

磁場測定とビームベース測定の結果を比較

- パルス波形の前半部分は一致
- パルス幅と反射の部分が異なる



まとめ

入射点での入射ビーム位置関係とキッカーのパルス波形を明らかにした

磁場測定だけではみられない加速器内の環境の影響

入射効率改善のための研究

主題

- 蓄積ビームの残留振動をなくして
- 入射率の最大化

研究背景

長年の運転で積み重なった誤差の影響と東日本大震災の影響によって
蓄積ビームの残留振動と**入射率の低下**が問題

入射パラメータの測定

- 入射率
入射ビームの位置と傾き
- 残留振動
キッカーのパルス波形

入射シミュレーション

- 入射率
**マルチターンキック
オプティックス**
- 残留振動
マルチターンキック

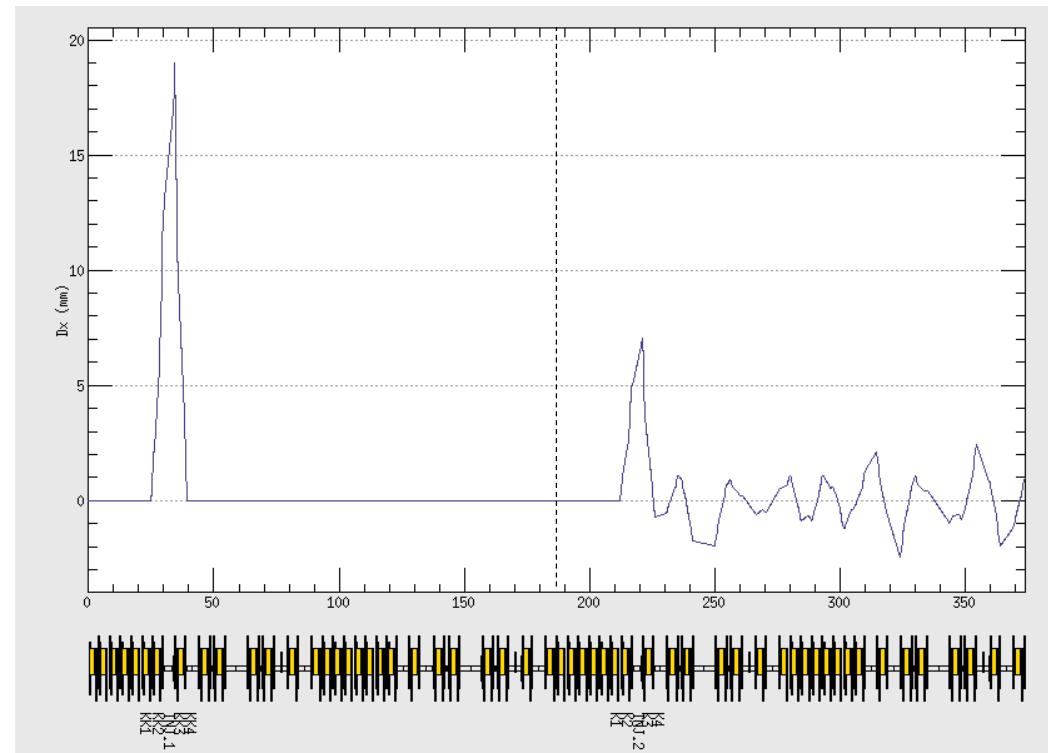
入射最適化

- 入射率
- 残留振動
自動調整

マルチターンキック

パルス幅がリングの周期時間より長いため、ビームを複数回蹴ること

Circumference = 187 [m]



リング2周分のビーム軌道

マルチターンキック

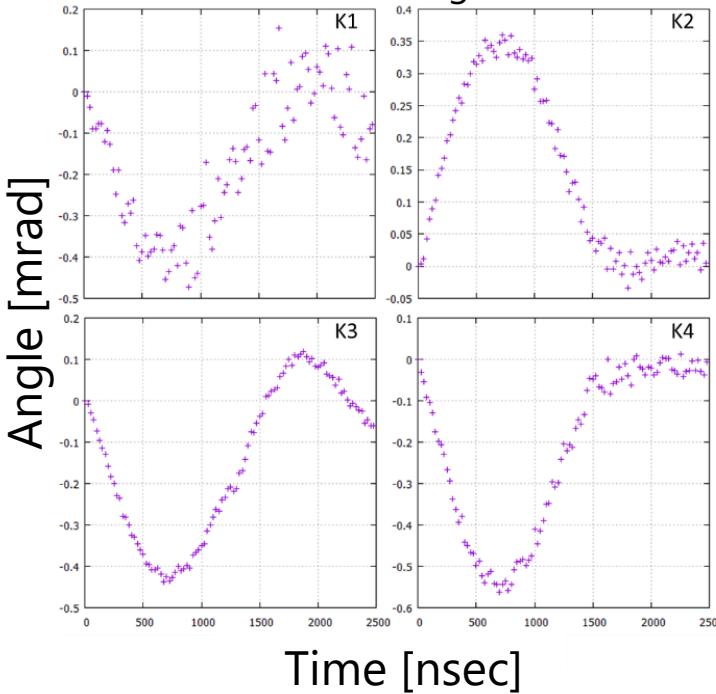
入射率

キッカー電磁石のパルス波形

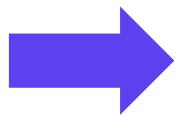
測定結果を多項式フィットして導入

マルチターンキックは0から3ターンまでの4回を調べる

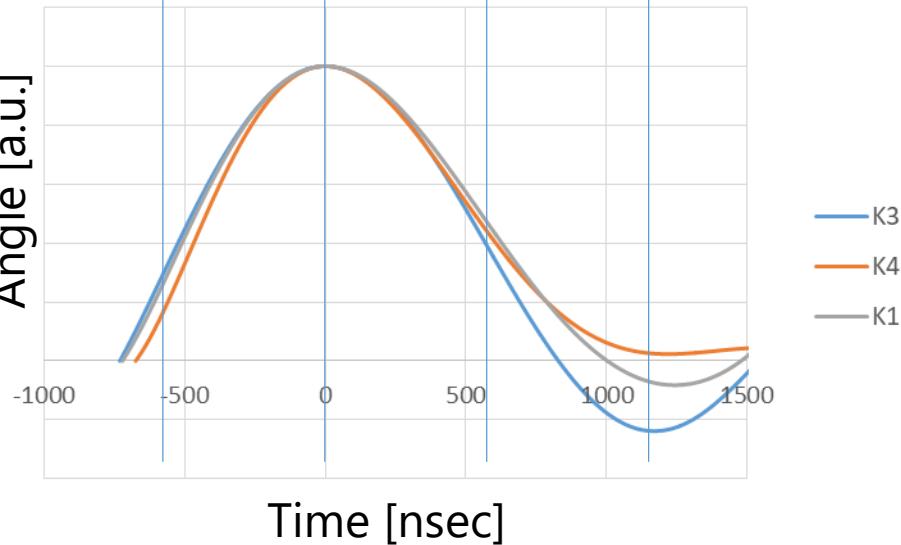
Stored beam, single bunch 2.8 mA
Kick angle 0.4 rad mrad



測定結果



0 turn **1 turn** 2 turn 3 turn



シミュレーションに使う波形

Betatron function (LOCO)

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¹
フィッティングして行う,

J, Safranek, Nucl, Inst, and Phys, 388, 28 (1997)

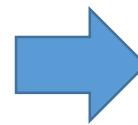
$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(R_{mod,ij} - R_{meas,ij})^2}{\sigma_i^2}$$

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

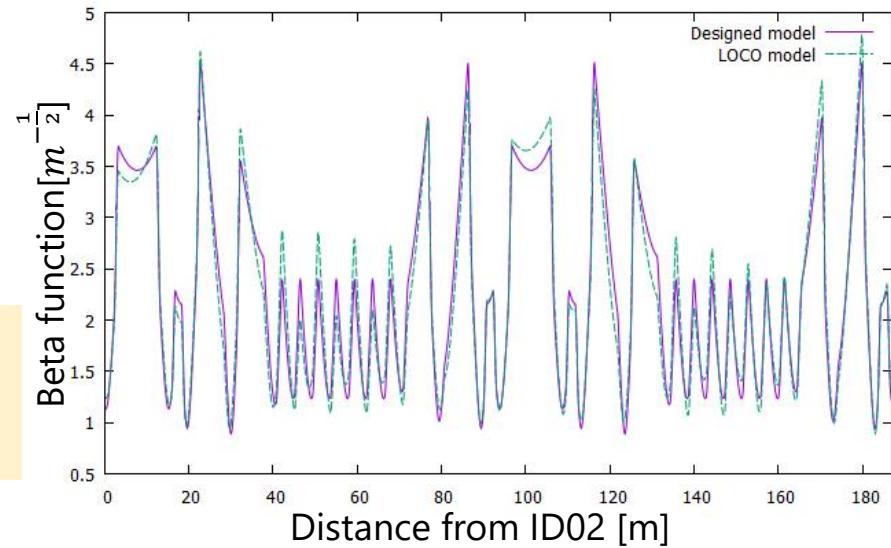
LOCOパラメータ

| | name | Number |
|---------------------|----------|--------|
| Horizontal | mrad/A | 28 |
| Vertical | mrad/A | 42 |
| K-quadrupole, | m^{-2} | 72 |
| Momentum compaction | - | |
| Skew-quad, | mrad | 14 |

Fitting



収束
 $5.10 \mu m(H)$
 $2.87 \mu m(V)$

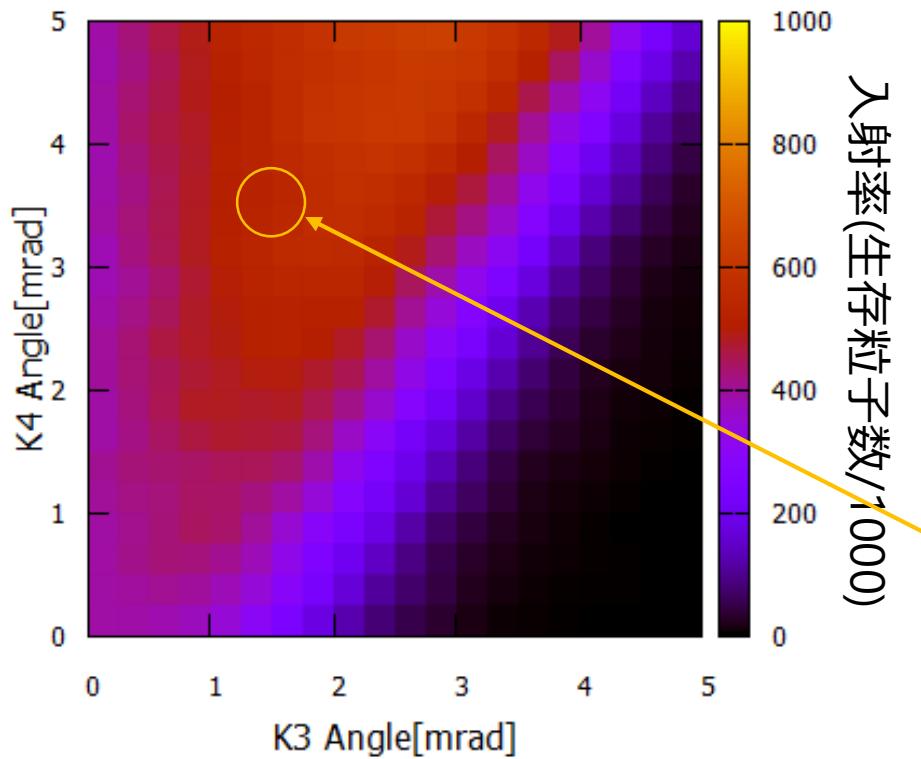


入射効率

入射効率はマルチターンキック入射の多粒子追跡で計算

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置と傾きでガウス分布



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 |

キックカーパラメータ(運転時)

| Name | Angle [mrad] | Time [nsec] |
|------|--------------|-------------|
| K1 | 2.22 | 0 |
| K2 | 0 | 0 |
| K3 | 1.51 | 0 |
| K4 | 3.47 | 0 |

入射効率改善のための研究

主題

- 蓄積ビームの残留振動をなくして
- 入射率の最大化

研究背景

長年の運転で積み重なった誤差の影響と東日本大震災の影響によって

蓄積ビームの残留振動と入射率の低下が問題

入射パラメータの測定

- 入射率
入射ビームの位置と傾き
- 残留振動
キッカーのパルス波形

入射シミュレーション

- 入射率
マルチターンキック
オプティックス
- 残留振動
マルチターンキック

入射最適化

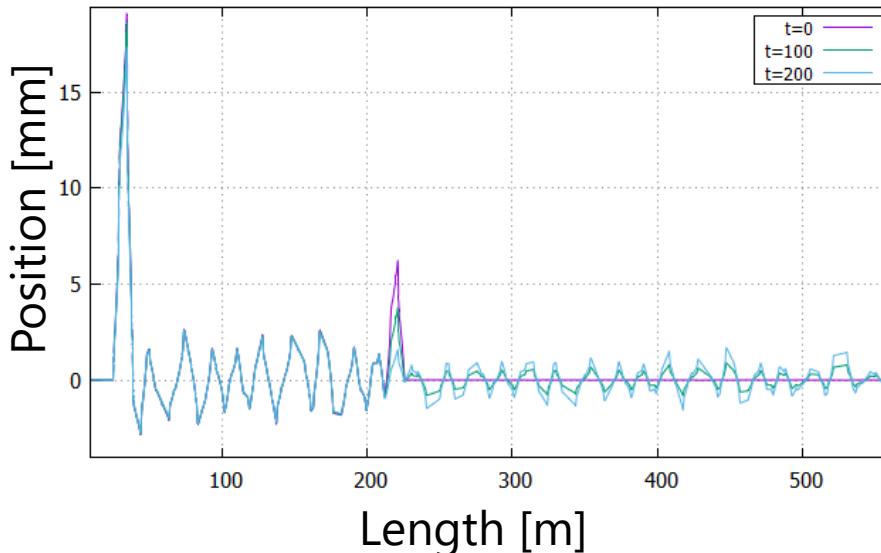
- 入射率
- 残留振動
自動調整**

キッカーバンプの計算

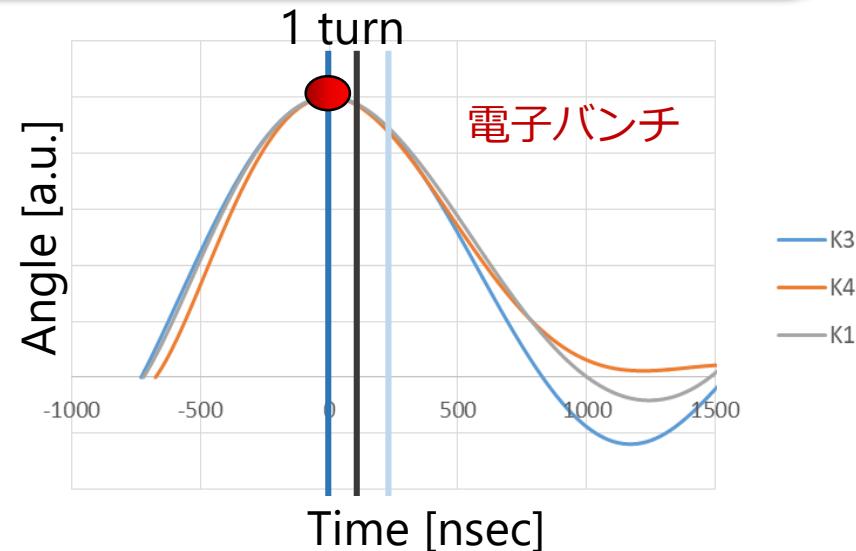
誤差キックによる蓄積ビームの残留振動を最小化

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

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3周分のビーム軌道

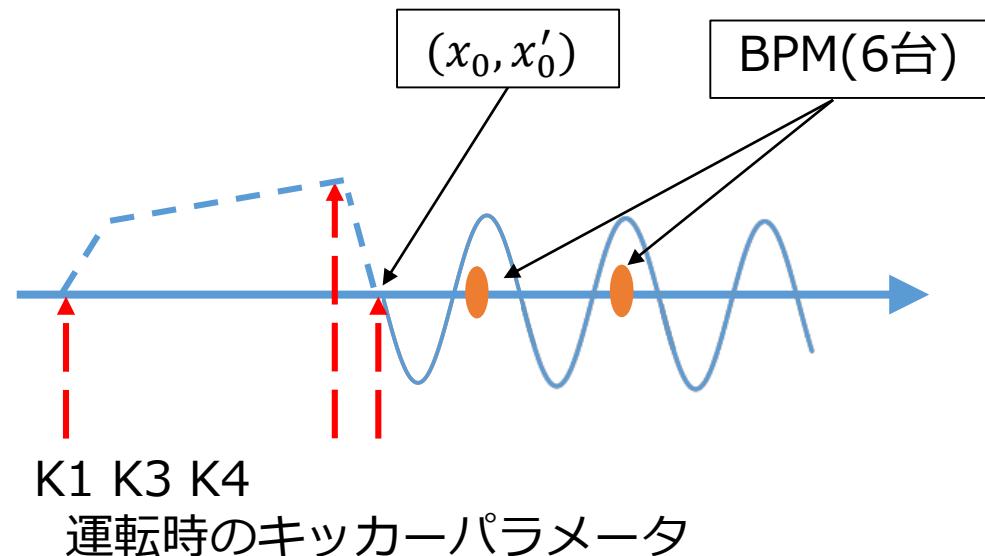
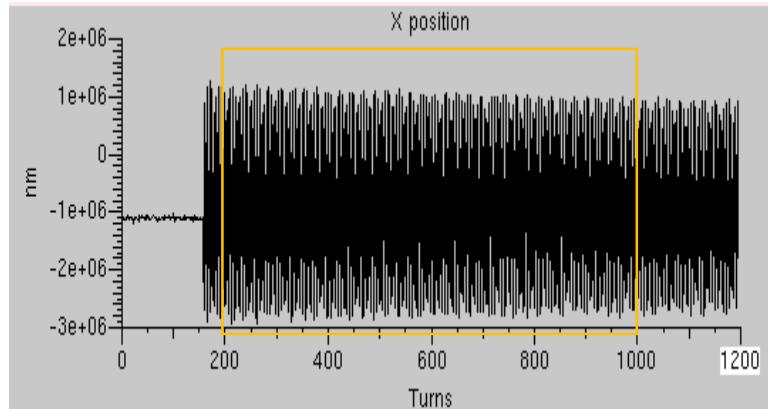


キッカーバンプの測定

誤差キックによる蓄積ビームの残留振動を最小化

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

x_i : 中心軌道からのずれ, turn: マルチターンが終わって800周期分



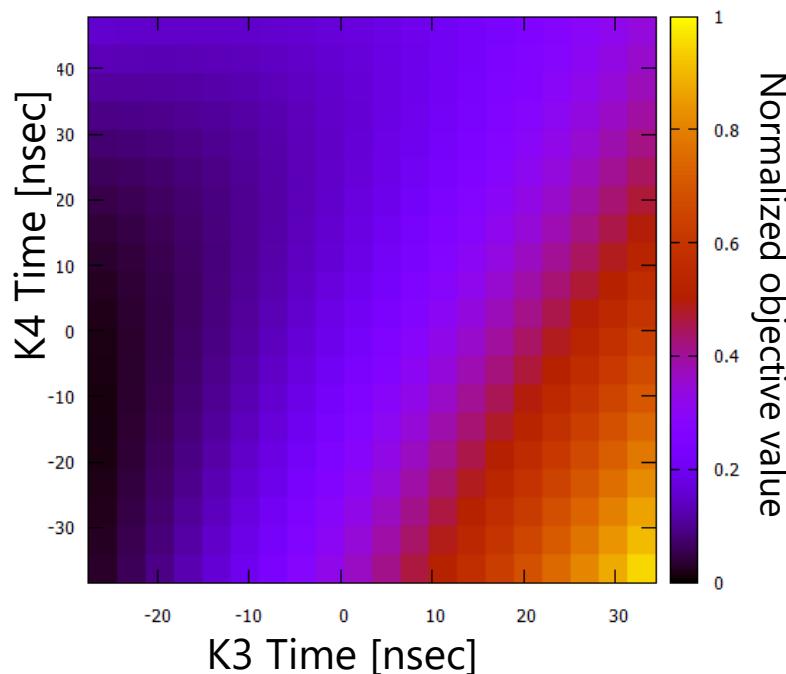
最適化の概要図

キックマッチング

計算結果とビームスタディの比較

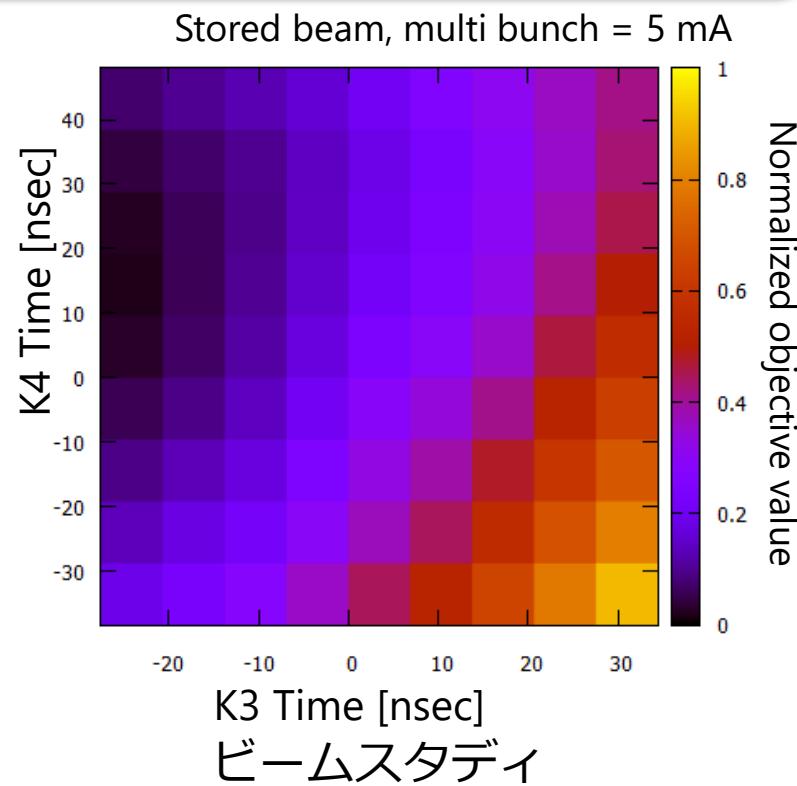
K3とK4のタイミングを変えた時の目標値の振る舞い

初期パラメータは運転時のテーブル



シミュレーション結果

- マルチターンキックの影響を再現

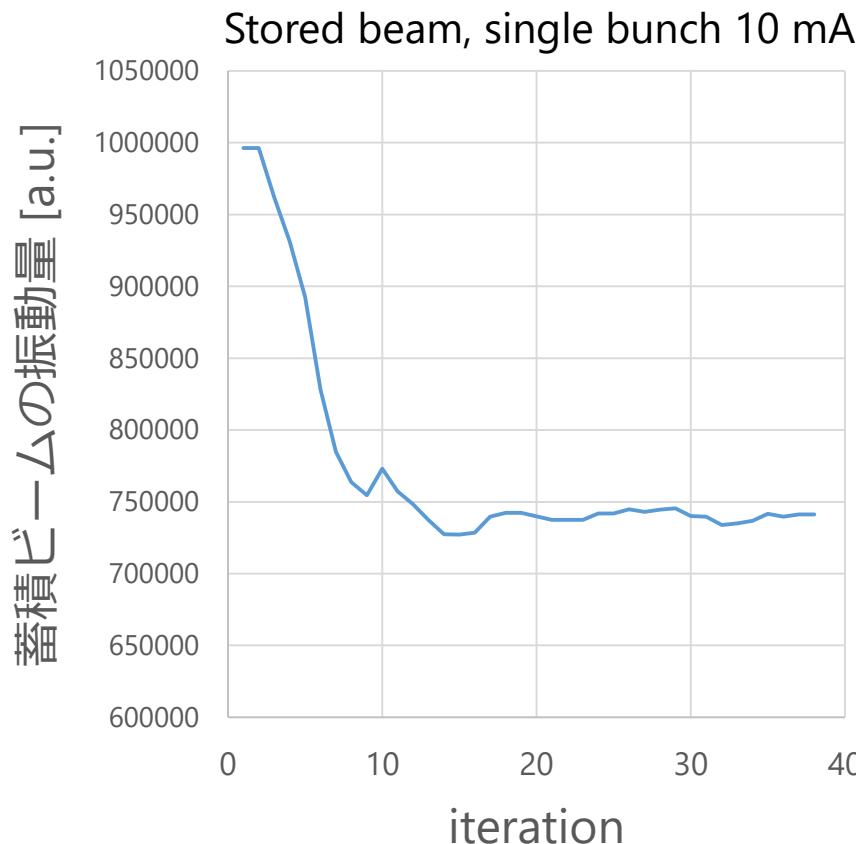


ビームスタディ

ビームベース調整

最急降下法による最適化

縦軸は5回の測定値、横軸は反復回数



運転時のキッカーパラメータ

| Name | Angle [mrad] | Time [nsec] |
|------|--------------|-------------|
| K1 | 2.02 | 0 |
| K2 | 0 | 0 |
| K3 | 1.51 | 0 |
| K4 | 3.43 | 0 |

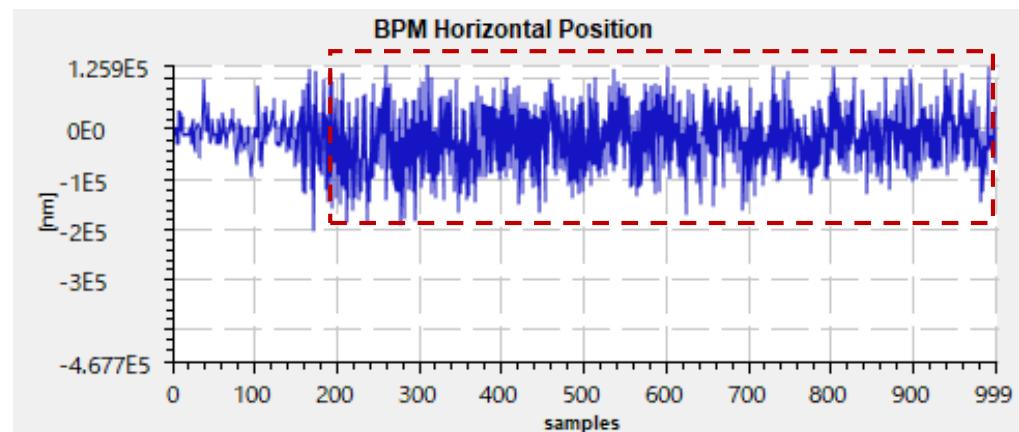
最適化結果

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

ビーム位置モニターで振動量の比較

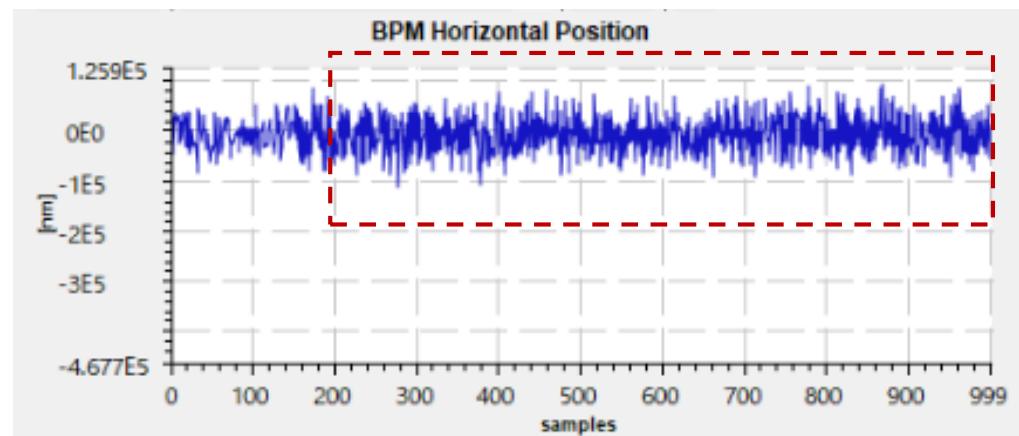
元の設定値

| Name | Angle [mrad] | Time [nsec] |
|------|--------------|-------------|
| K1 | 2.02 | 0 |
| K2 | 0 | 0 |
| K3 | 1.51 | 0 |
| K4 | 3.43 | 0 |



最適化結果

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



まとめ

入射パラメータの測定

入射点のビーム位置関係とキッカーのパルス波形を明らかにした
磁場測定だけではみられない加速器内の結果を得た

入射率

加速器内の環境の誤差を含んだビームオプティスクを測定した
実測したマルチターンキックで入射率の計算を行った
実際の入射率を再現した

キッカーバンプ

マルチターンキックでキッカーバンプを計算した
キッカーに対する応答を再現できた
蓄積ビームの残留振動を抑える調整を行い、達成した

今後の展望

入射ビームの調整

リングより上流の問題を扱う

ご清聴ありがとうございました

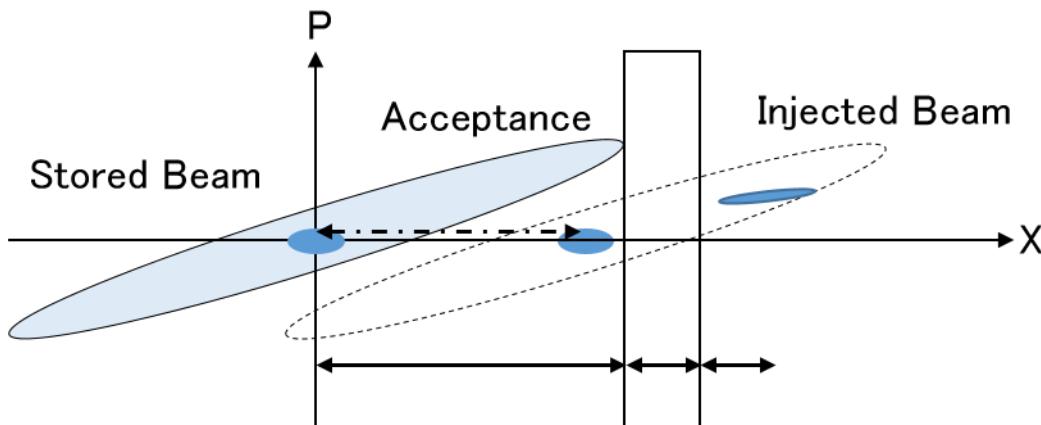
31. PFのMain parameters
32. 入射調整(入射ビームの位相空間情報)
33. 入射パラメータの測定のセットアップ
34. ビーム位置モニターの断面図
35. 蓄積ビームの振動測定
36. 入射ビームの振動測定
37. 入射点断面図
38. 再構築の詳細
39. 多粒子トラッキングの様子, 分布の端が削
れる効果が大きいことを説明(~10 turns)
40. 入射効率の計算、理想
41. フィルパターンの一例
42. 最急降下法と直線探索
43. 最適化で入射率を取り扱わない理由
44. ビームベース最適化の関連研究
45. ビームベースの意義

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 |

入射調整

ビーム位置：セプタム壁との位置関係とビームのばらつきを考慮した距離
 ビーム角度：セプタム電磁石によって初期振幅を最小にするように調整



$$x_{pos} = W_{acc} + W_{blade} + W_{inj} + \Delta x$$

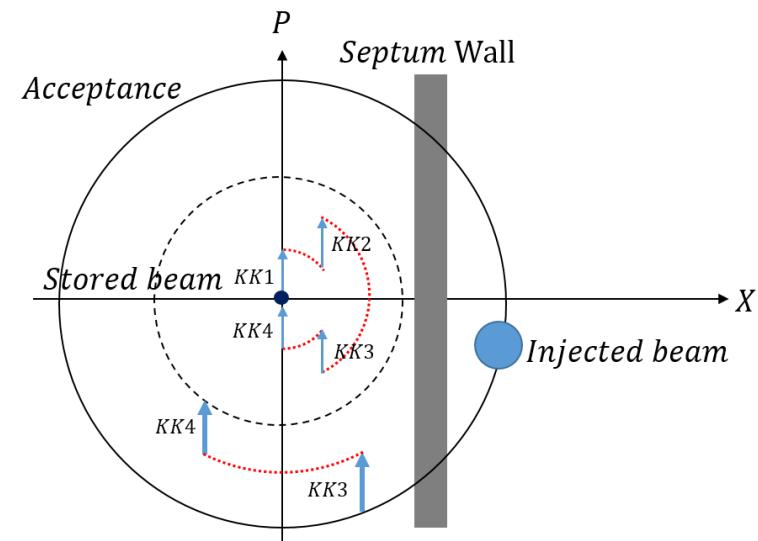
W_{acc} : 設計軌道からセプタム壁までの距離

W_{blade} : セプタム壁の厚み

W_{inj} : セプタム壁から入射ビームまでの距離

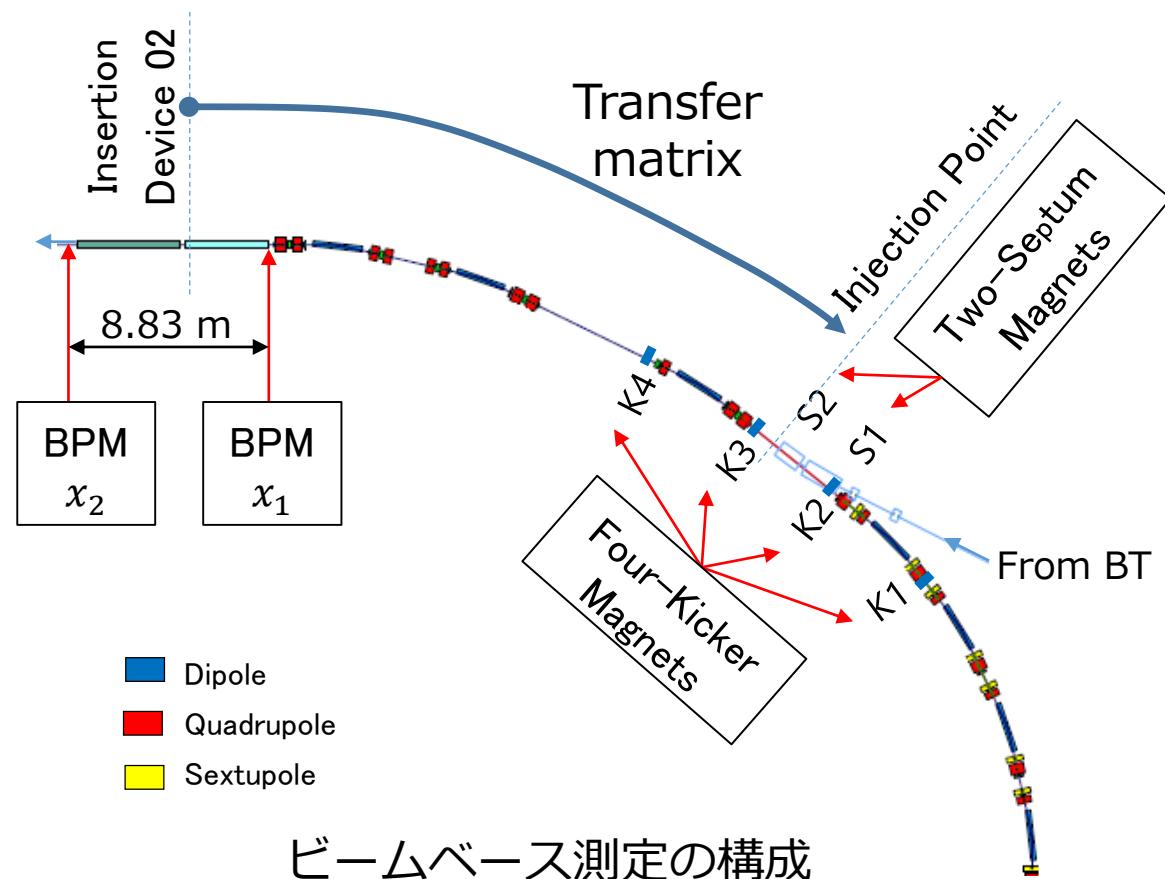
Δx : 入射ビームのばらつき

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



入射パラメータの測定

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

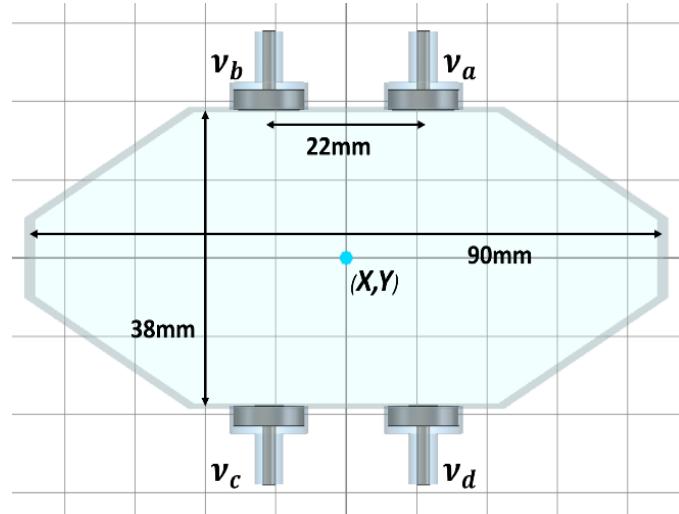
| position | 設定値 | | 蹴り角-角度 [deg] |
|----------|--------|------|--------------|
| | [mrad] | [A] | |
| S1 | 118.61 | 5344 | 6.796 |
| S2 | 93.69 | 6281 | 5.368 |

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



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

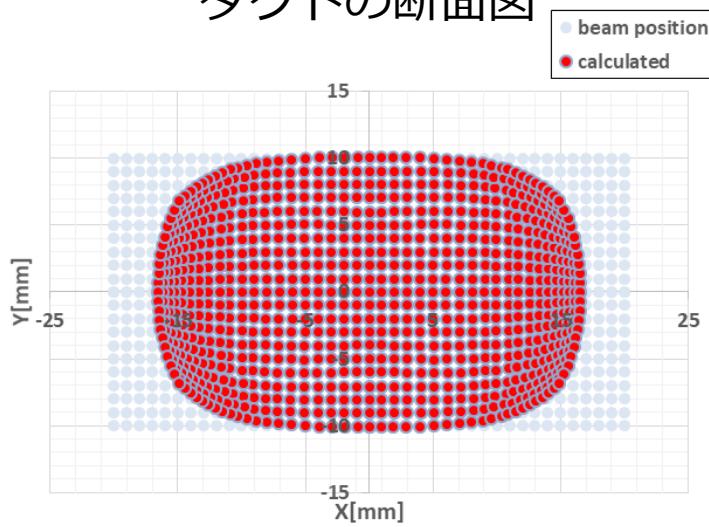
$$x = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 k_x(i,j) U^i V^j$$

k_x : 非線形応答係数
U, V: 電極間の信号比

BPM の非線形応答係数

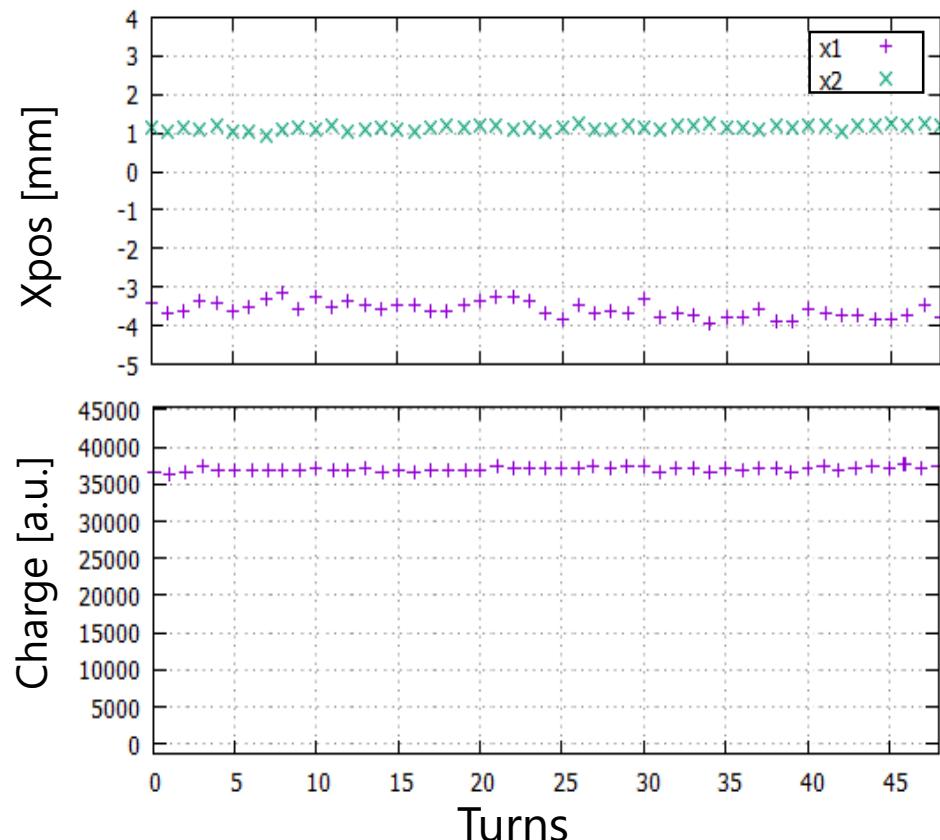
| Coefficients | Horizontal | Vertical |
|--------------|------------|----------|
| $k(0.0)$ | 0.000 | 0.000 |
| $k(1.1)$ | 17.12 | 0.000 |
| $k(1.2)$ | 0.000 | 16.432 |
| $k(2.1)$ | 0.000 | 0.000 |
| $k(2.2)$ | 0.000 | 0.000 |
| $k(2.3)$ | 0.000 | 0.000 |
| $k(3.1)$ | 18.829 | 0.000 |
| $k(3.2)$ | 0.000 | -11.477 |
| $k(3.3)$ | -27.138 | 0.000 |
| $k(3.4)$ | 0.000 | 7.431 |

ダクトの断面図



蓄積ビームの振動測定

Stored beam
single bunch = 2.8 mA



X, Yの位置データ

↓
直線部中心の位相空間情報に計算

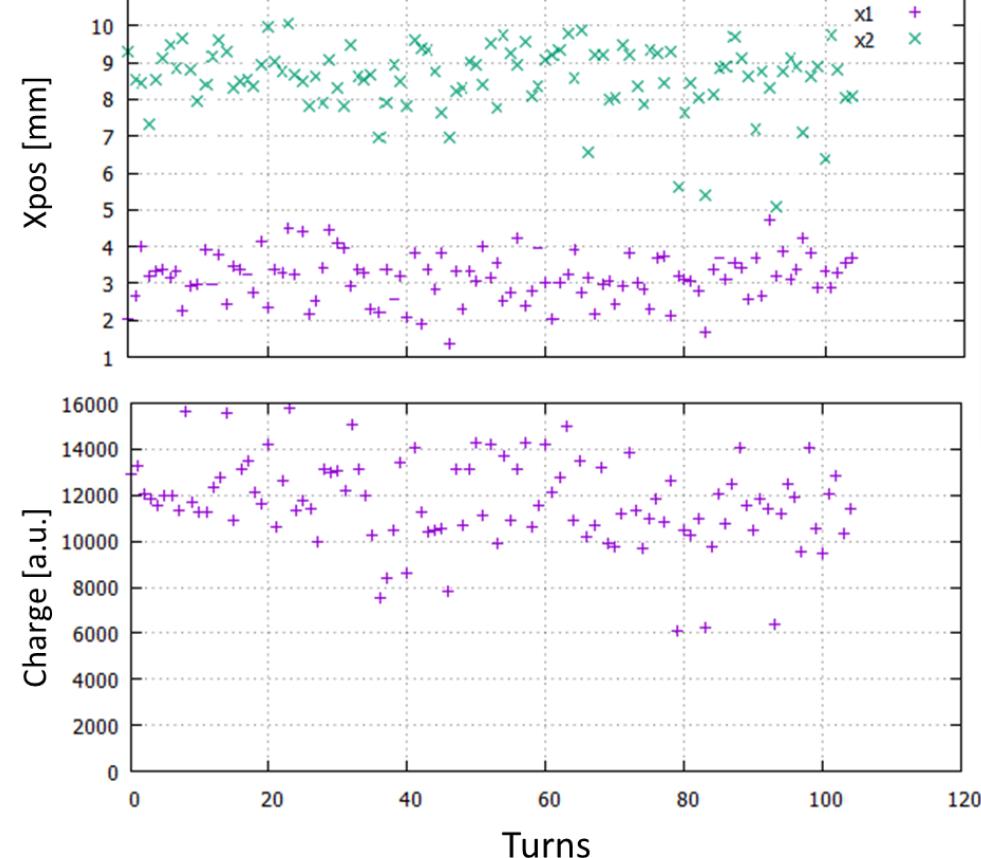
$$x_{ID02} = \frac{x_2 + x_1}{2}, x'_{ID02} = \frac{x_2 - x_1}{l}$$

The parameters of the phase space

| | Position [mm] | Angle [mrad] |
|------------|------------------|------------------|
| Horizontal | -1.22 ± 0.09 | 0.53 ± 0.03 |
| Vertical | 1.65 ± 0.07 | -0.12 ± 0.02 |

入射ビームの振動測定

Injected bunch = 0.28 nC



X, Yの位置データ



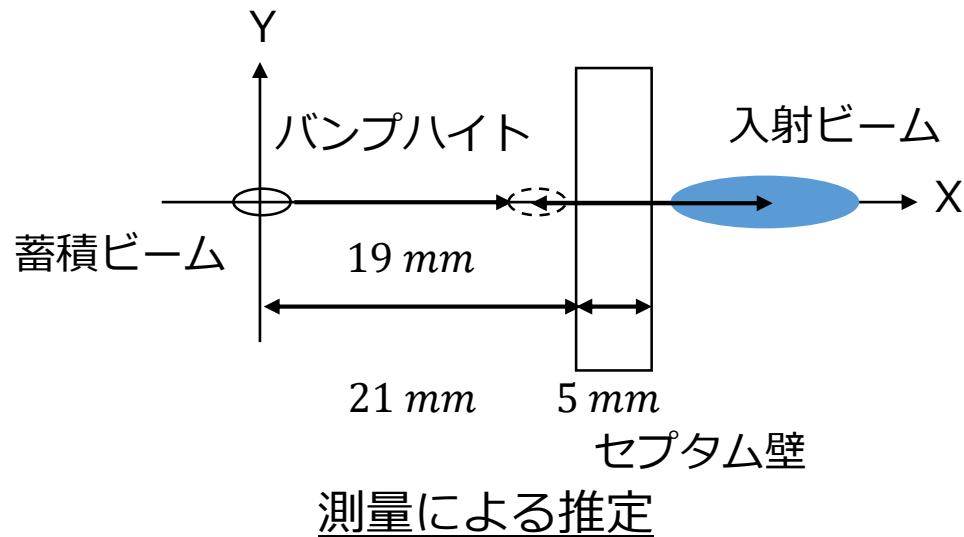
直線部中心の位相空間情報に計算

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

データの条件

- 電荷量の少ないデータを除去

入射点でのビーム位置関係



入射点断面図の情報

| | バンプハイト [mm] | 入射ビーム [mm] |
|--------|-------------------------|---------------|
| モデル | 19 | (27.0, 0.00) |
| ビームベース | $17.5 + \Delta x_{inj}$ | (30.5, 0.06) |

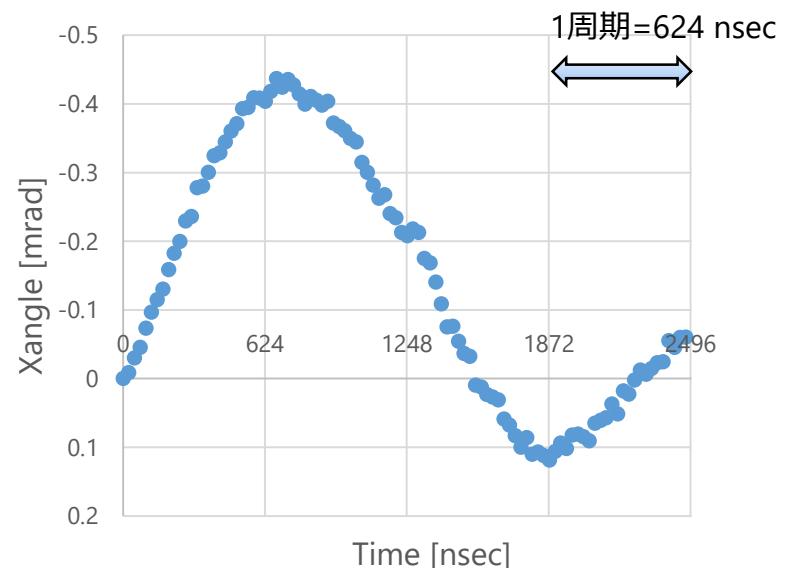
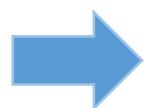
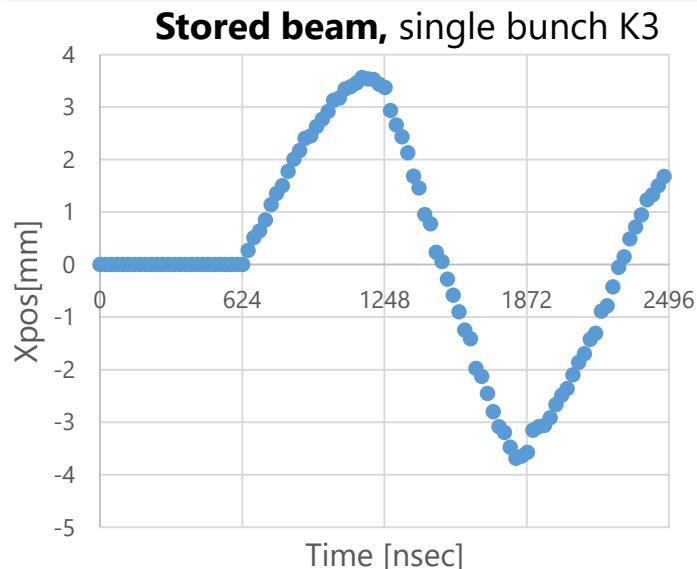
- 入射振幅の増大を確認
- 測量結果とビームベース測定の結果は一致

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

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



多粒子トラッキング（設計モデル）

入射効率の計算は、粒子を生成して放射減衰のスケールまで追跡
アパーチャーを超えた場合、粒子は失われる

条件

- ・アパーチャー

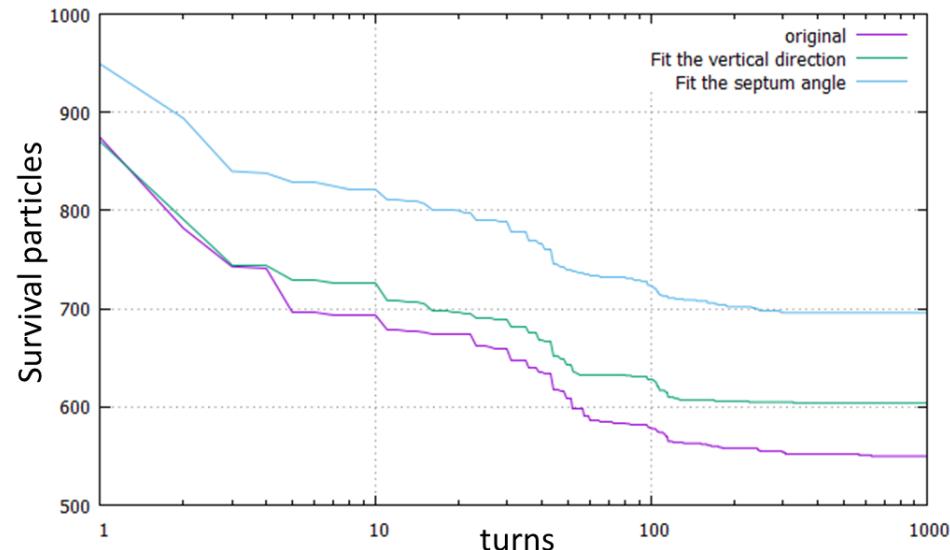
| Position | Aperture | | Betatron |
|----------|----------|-----|--------------|
| | [mm] | | function [m] |
| | x | y | Design |
| ID16 | - | 7.5 | 5.00 |
| ID14 | 16 | - | 7.96 |
| SEPTUM | 21 | - | 9.44 |

- ・生成粒子

入射パラメータの測定結果

- ・シングルキック

計算結果

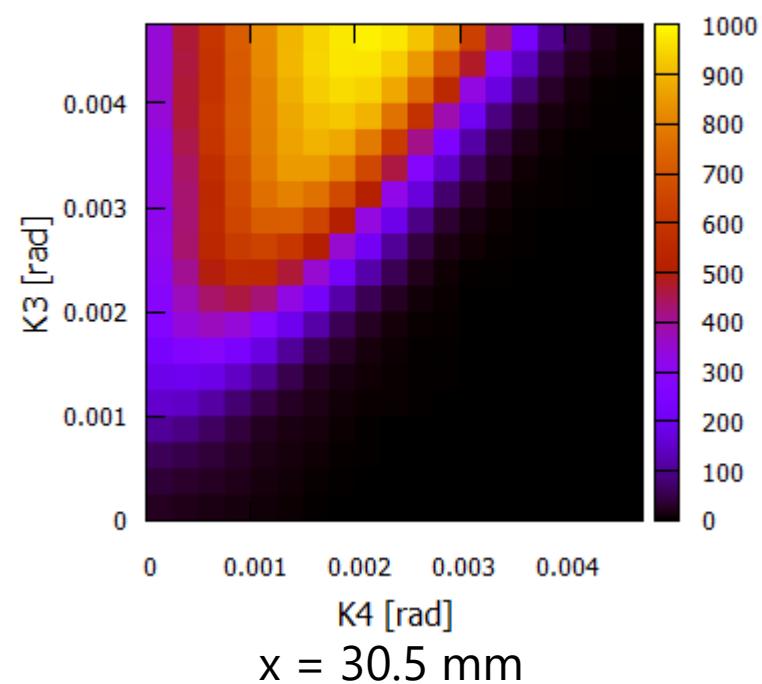
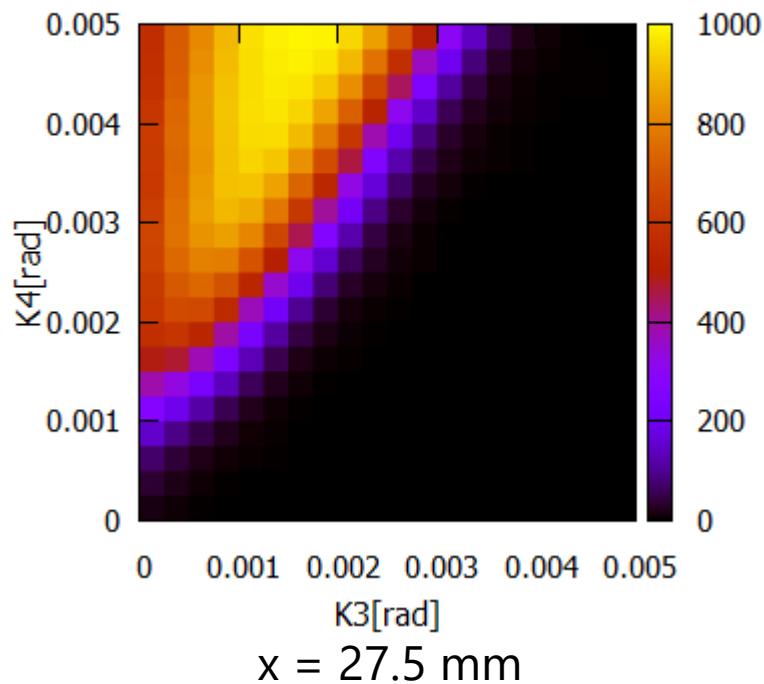


入射効率

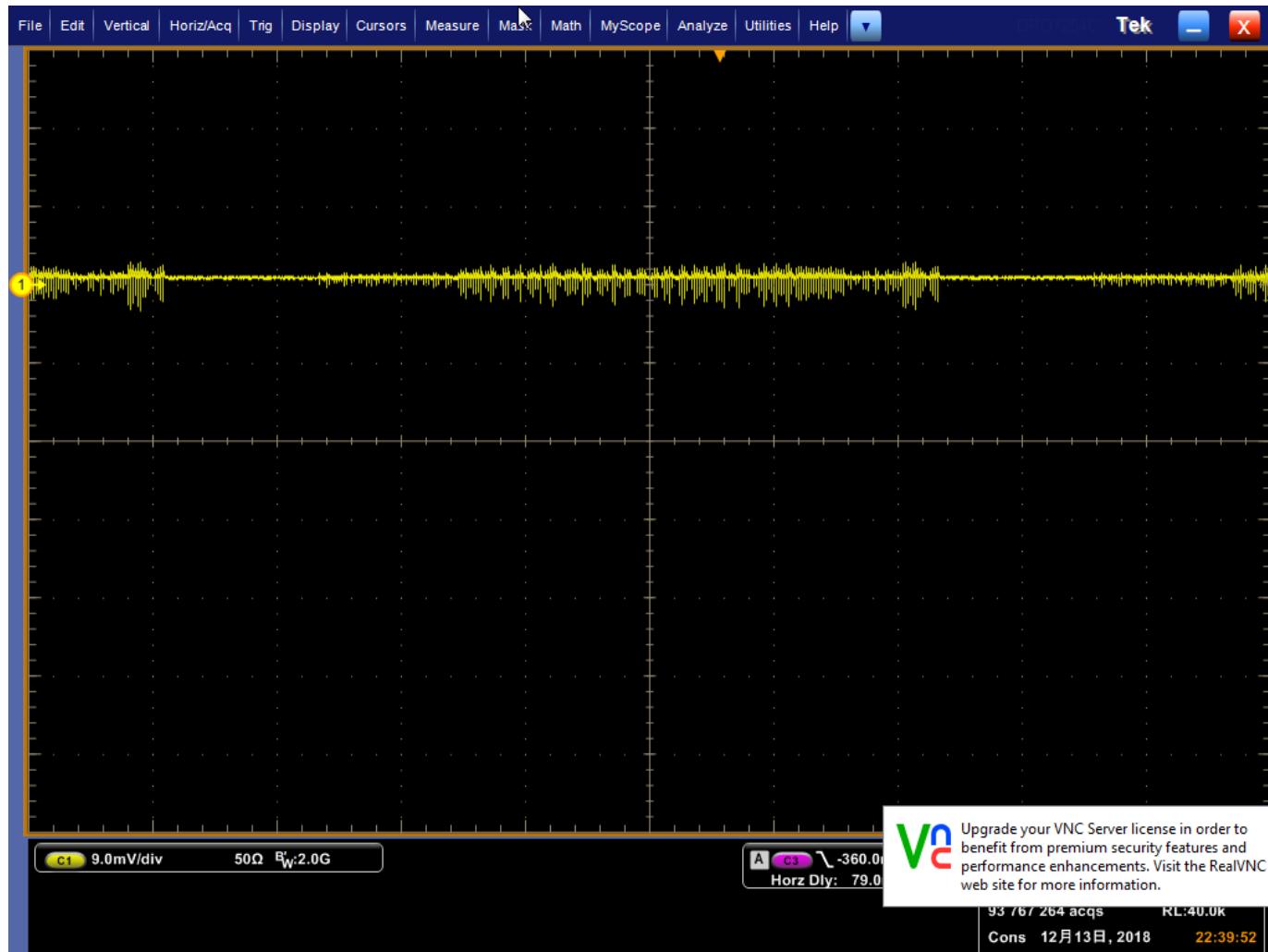
シングルターンキック入射で多粒子追跡の計算

オプティックスは理想的なモデル

初期粒子分布は測定結果の位相空間情報でガウス分布



フィルパターン



次の問題を解く、

$$\underset{x}{\operatorname{minimize}} \ f(x)$$

ここで、 $f(x)$ は目標関数であり $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ は滑らかとする、反復法を初期点 $x_0 \in \mathbf{R}^n$ から出発する、反復は以下の式で更新される

ここで、 $\alpha_k > 0$ をステップ幅、 $d_k \in \mathbf{R}^n$ を探索方向と呼ぶ

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

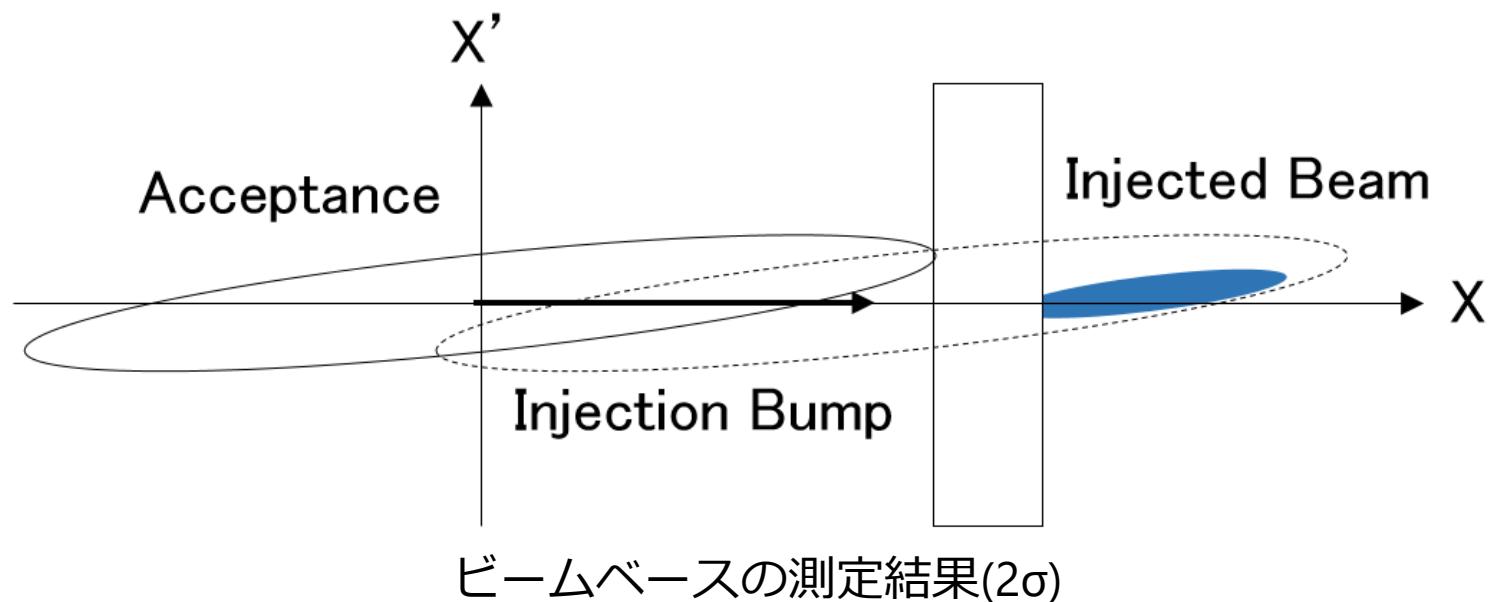
最適化で入射率を取り扱わない理由

入射ビームをセプタム外壁に近づける

- のばらつきを考慮して許容量が必要

蓄積ビームをセプタム内壁に近づける

- セプタムに挿入されているアブソーバーで制限される



ビームベース最適化の関連研究

目的：

最適な評価関数を設定するとパラメータ間の相互作用を越えて調整可能
(アライメントエラー, 涡電流効果, 挿入光源, フリンジフィールド)

手動調整

勾配ベクトル：なし

直線探索：一次元スキャン



一般的なオンライン調整

勾配ベクトル：一次までの勾配情報

直線探索：施設に沿ったもの



RCDS法

勾配ベクトル：共役勾配法

直線探索：黄金探索, 探索間の補間

加速器は多くの部品で構成される複雑なシステム

多くの誤差が含まれる(アライメントエラー, 磁場誤差, 非線形磁場成分, 涡電流効果, 挿入光源, フリンジフィールド, etc.)



ビームベース測定

実験室モデルと異なる, 加速器モデルを得る

加速器モデル : 設置後の加速器内の結果

実験室モデル : 設置前の準備測定の結果



ビームベースシミュレーション

加速器モデルの数値計算で最適解の傾向を知る



ビームベース最適化

最適な評価関数を設定するとパラメータ間の相互作用を越えて調整可能
(アライメントエラー, 涡電流効果, 挿入光源, フリンジフィールド)