

## 4-1 加速器のビーム調整(下崎)

(前半)ビーム調整のための、ビーム物理の基礎



(後半)電子蓄積リングにおけるビーム調整例

(注意)

- 1 モニターの詳細は他の講師にお任せし、「モニターを使って何が出来るか」を話します。
- 2 今回紹介するビーム調整は、あくまで一例であり、他施設ではこれと異なる加速器調整の御作法があると思います。

## 後半の概要:

- 1 ビーム調整前のビーム蓄積について
- 2 ビーム調整シナリオ
- 3 ビーム調整
  - COD補正
  - チューン補正
  - クロマティシティ補正
  - ベータ関数と分散関数の補正
  - 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
  - 光軸補正
  - 入射軌道補正
  - 入射タイミング補正
- 4 加速器の高度化に向けての加速器調整例
  - 振幅依存チューンの測定

## 後半の概要:

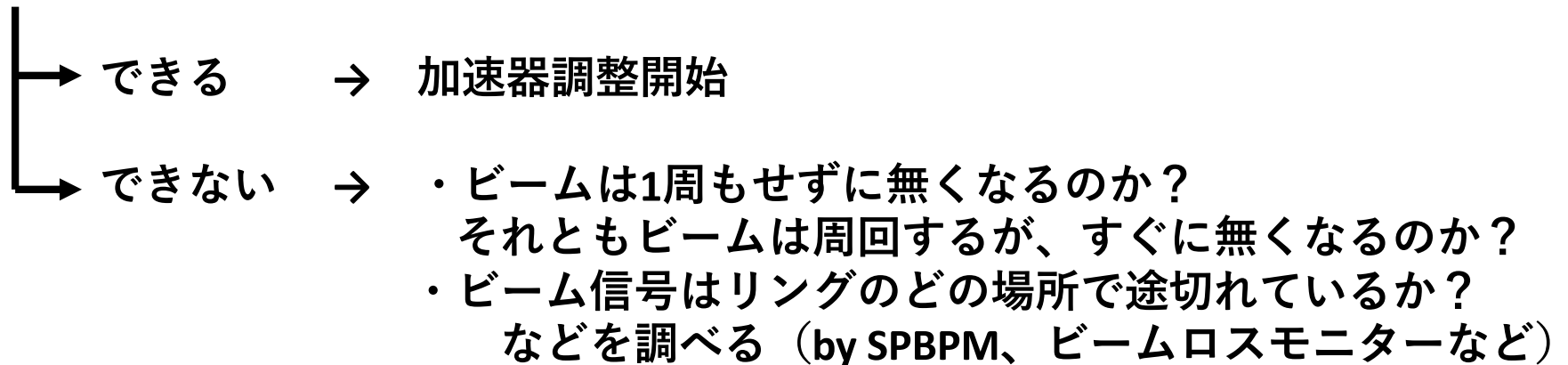
- 1 **ビーム調整前のビーム蓄積について**
- 2 ビーム調整シナリオ
- 3 ビーム調整
  - ・ COD補正
  - ・ チューン補正
  - ・ クロマティシティ補正
  - ・ ベータ関数と分散関数の補正
  - ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
  - ・ 光軸補正
  - ・ 入射軌道補正
  - ・ 入射タイミング補正
- 4 加速器の高度化に向けての加速器調整例
  - ・ 振幅依存チューンの測定

## 加速器調整前のビーム蓄積について

夏期・冬期などの長期停止期間が明けた直後は、ビームが入りにくかったり、ビームが入らなかったりする。

例) 長期停止期間中には機器の修理やメンテナンスを行う。  
→ 電源ケーブルをつなぎ間違えて電流の流れる向きが反転していた、  
というのは、過去、何回か遭遇したことがある。  
磁場の向きが反転するので、ビームが入りにくかったり、  
ビームが入らなかったりする。

まずビームを蓄積できるかを調べる (= ビーム電流を測定する by CT: Current Transformer)



**BPM: Beam Position Monitor**

(ビーム重心を調べるモニター。時間平均してS/N比を上げる)

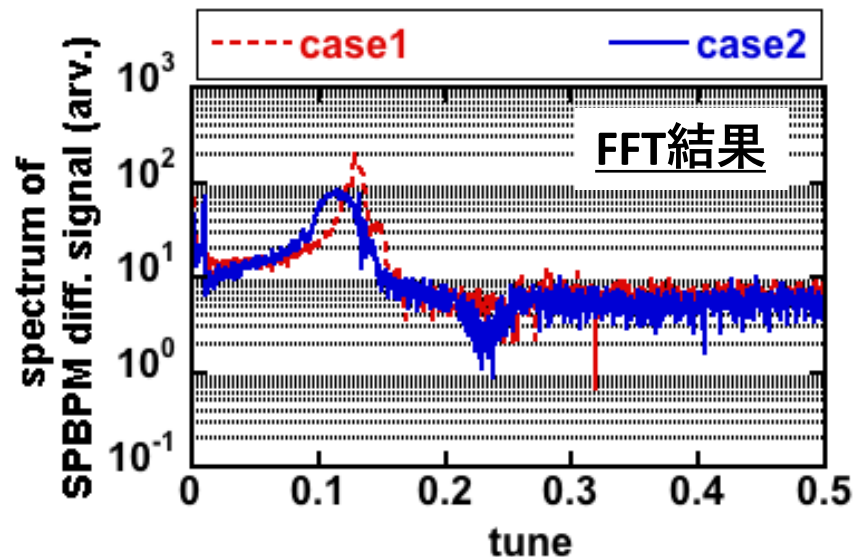
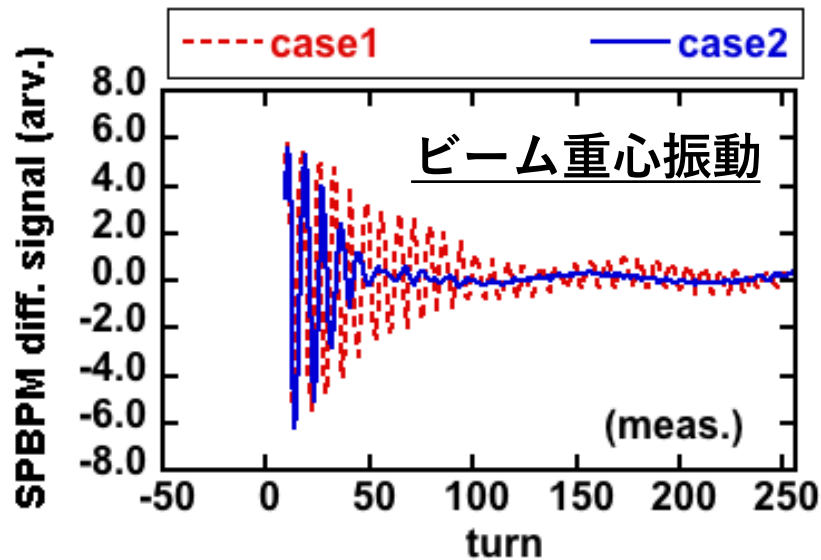
**SPBPM: Single Pass BPM**

(時間平均しないでターンごとのビーム重心を調べるためのBPM)

# SPBPM (Single Pass BPM)

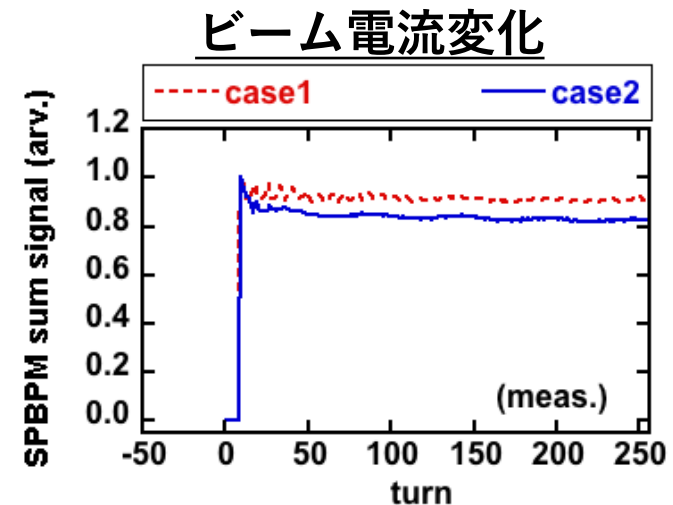
## 差信号：

各ターンでのビーム重心振動がわかる。  
→ 周波数分布から運動の質を調べる。

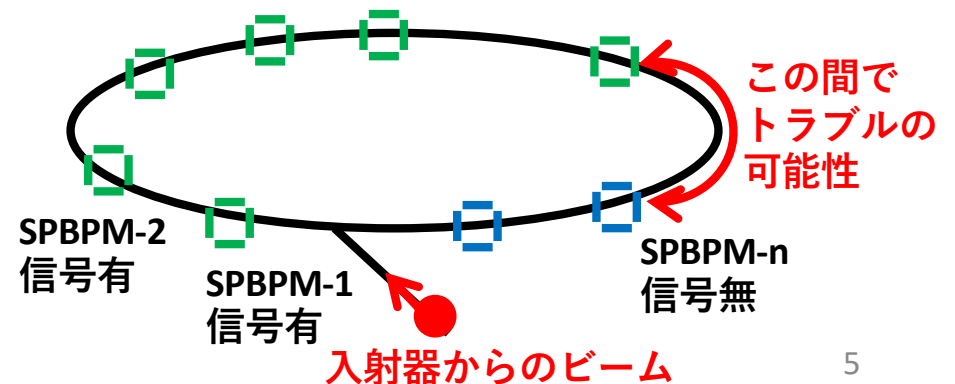


## 和信号：

各ターンでのビーム電流変化がわかる。  
→ 時間変化を見て、運動の質を調べる。

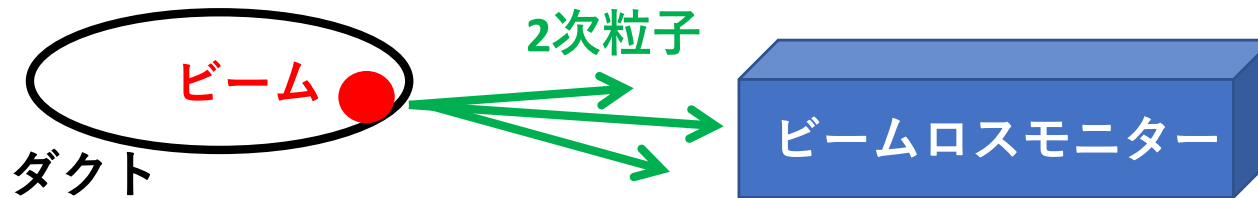


- ・ (ビームが1周もしない場合) リングに複数個のSPBPMが入っていれば、「信号の有無」でトラブル箇所の推定ができる。

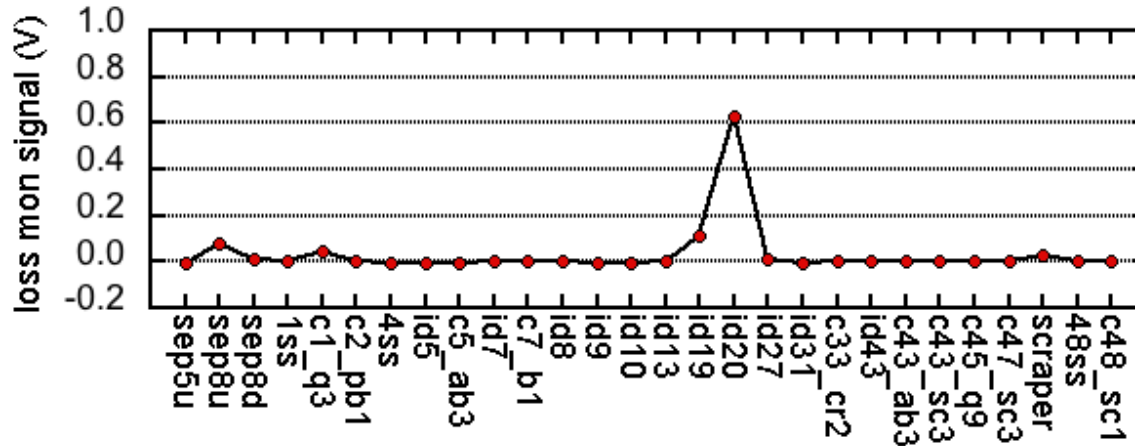


# ビームロスモニター

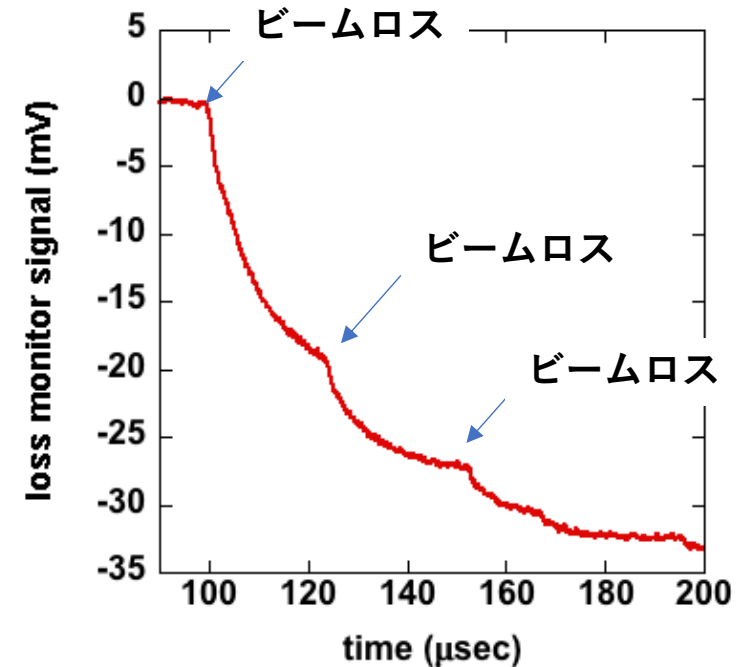
ビームロスモニター：ビームロスに伴う2次粒子を観測する。  
いつ、どこで、どのくらいビームロスしたかを調べる。



(例) ビーム入射時の、リング全周における  
ビームロスモニター信号の分布



(例) リング1箇所で見つ  
ビームロスモニター信号の時間変化



## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム蓄積について

2 **ビーム調整シナリオ**

3 ビーム調整

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ 光軸補正
- ・ 入射軌道補正
- ・ 入射タイミング補正

4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

## ビームを蓄積できるようになったら

影響の大きいものから調整する：

- 1 四極磁石の磁極中心をビームが通らないとCODを作る。  
六極磁石の磁極中心をビームが通らないとチューンシフトやCODを作る。  
  
→ **まずCODを補正**して、磁石のほぼ磁極中心をビームが通るようにする。
- 2 CODを補正したらチューンを補正する。  
チューンを変えたらCODも動く→**COD補正とチューン補正を何回か繰り返す**。
- 3 **CODとチューンを固定したら、ビームが比較的安定になる**。  
→高周波加速空洞の周波数を変えて（=ビームの運動量を変えて）  
クロマティシティ補正を行う。
- 4 （時間に余裕があったら）ベータ関数とx方向分散関数を補正する。
- 5 （必要があれば）線型結合共鳴補正とy方向分散関数補正。
- 6 （必要があれば）ローカルバンプによる光軸補正。
- 7 入射軌道、入射タイミングの調整。  
（COD、チューン、線型結合共鳴等の補正が終わり、**リングのパラメータを固定した後**に行う）

$$\frac{\Delta f}{f} = -\left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p}$$



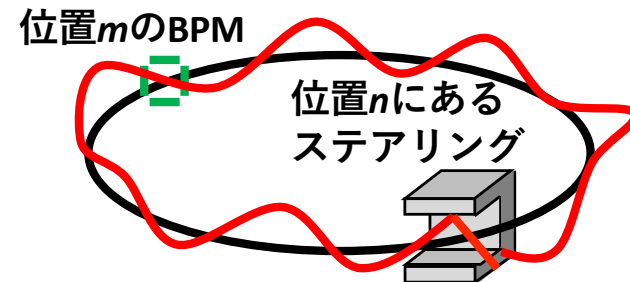
# 加速器調整で使うモニターとコレクター

ビーム調整項目	モニター	コレクター
<b>すぐに補正できるもの</b>		
・ COD補正	BPM	ステアリング電磁石
・ 周長補正	BPM	高周波加速空洞
・ チューン補正	SPBPM	四極電磁石
・ クロマティシティ補正	SPBPM	六極電磁石
・ 結合共鳴補正	2次元放射光干渉計	スキュー四極電磁石
・ y方向分散関数補正	BPM	スキュー四極電磁石
・ 放射光の光軸補正	X-ray BPM, BPM	ステアリング電磁石
・ ビーム入射用パルス電磁石の調整 (タイミング、波高、チルト)	SPBPM 2次元放射光干渉計	入射用パルス電磁石
・ ビーム入射のタイミング調整	SPBPM	高周波加速空洞
<b>補正に解析を要するもの</b>		
・ ベータ関数補正、分散関数補正	BPM	四極電磁石
<b>その他 (定期観測であったり、加速器 高度化のための調査であったり)</b>		
・ 振幅依存チューンシフト測定	SPBPM	これらが悪化している場合、 原因を調査し、 対応するコレクターを調整する
・ ダイナミックアパーチャー測定	SPBPM	
・ ビーム寿命測定	DC-CT (DC Current Transformer)	
・ ビーム入射効率測定	AC-CT (AC Current Transformer)	
・ ビームプロファイル測定	ビームプロファイルモニター	

## 後半の概要:

- 1 ビーム調整前のビーム蓄積について
- 2 ビーム調整シナリオ
- 3 **ビーム調整**
  - **COD補正**
  - チューン補正
  - クロマティシティ補正
  - ベータ関数と分散関数の補正
  - 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
  - 光軸補正
  - 入射軌道補正
  - 入射タイミング補正
- 4 加速器の高度化に向けての加速器調整例
  - 振幅依存チューンの測定

# キックが作るCODの式



・位置 $m$ のBPMで、位置 $n$ にあるステアリングのキック $\theta_n$ が作るCODを観測する場合の式：

$$x_{cod,m} = R_{mn}\theta_n$$

$$R_{mn} = \frac{\sqrt{\beta_m\beta_n} \cos(|\phi_m - \phi_n| - Q\pi)}{2 \sin(\pi Q)}$$

$\beta_m, \phi_m$  : 観測点でのベータ関数とベートロン位相  
 $\beta_n, \phi_n$  : キック位置でのベータ関数とベートロン位相  
 $Q$  : チューン

→位置 $m$ のBPMで、複数個のキック $\theta_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) が作るCODを観測する場合の式：

$$x_{cod,m} = \sum_{n=1}^N R_{mn}\theta_n = (R_{m1} \quad R_{m2} \quad \dots \quad R_{mN}) \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix}$$

線形の式なので  
足し算できる

→複数個のBPM ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) で、複数個のキック $\theta_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) が作るCODを観測する場合の式：

$$\begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{kick} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \dots & R_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix}$$

## ステアリングキックが作る周長変化の式

Momentum compaction factorの定義式

$$\alpha = \frac{1}{C} \oint D d\theta$$

: 周長

: Momentum compaction factor

: 分散関数

分散関数のあるところでキックするとmomentum compaction factorが変わりそう

→ 分散関数Dが存在する場所 $n$ でキック $\theta_n$ した場合の

momentum compaction factorの変化の式 :

$$\Delta\alpha = \frac{1}{C} \sum_{n=1}^N D_n \theta_n = \frac{1}{C} (D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_N) \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix}$$

このときの周長変化の式 :

$$\frac{\Delta C}{C} = (\alpha + \Delta\alpha) \frac{\Delta p}{p}$$

## COD補正

- 1 「エラーが作るCOD（観測値）」と「キックで作るCOD」の和を「CODの目標値」に持って行く：

$$\begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{meas} + \begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{kick} = \begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{ref}$$

- 2 ただしキックで周長変化を起こしたくない：  
(周長が変わると、COD補正の度にビームのエネルギーが変わる)

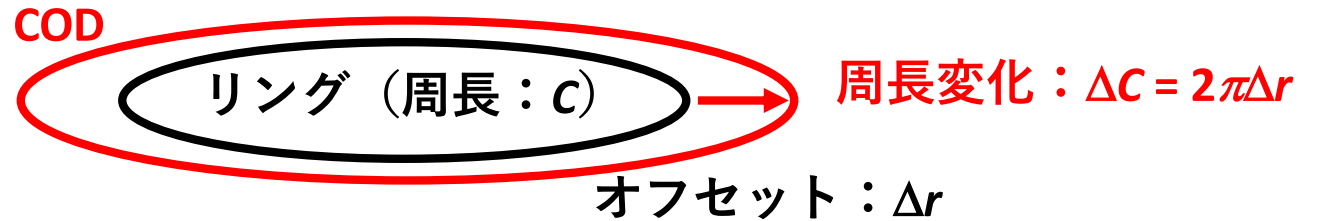
$$\Delta\alpha = \frac{1}{C} (D_1 \quad D_2 \quad \cdots \quad D_N) \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix} = 0$$

以上を満たすキックを求めれば良い。解くべき連立方程式：

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{kick} \\ \Delta\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{ref} \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{cod,1} \\ x_{cod,2} \\ \vdots \\ x_{cod,M} \end{pmatrix}_{meas} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \cdots & R_{MN} \\ D_1/C & D_2/C & \cdots & D_N/C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_N \end{pmatrix}$$

## 周長補正

CODの平均値（=CODをFFTにかけたときの $n=0$ の成分、 $\Delta r$ ）を求める。



周長はキックではなく、高周波加速空洞のRF周波数を変えることで補正する。

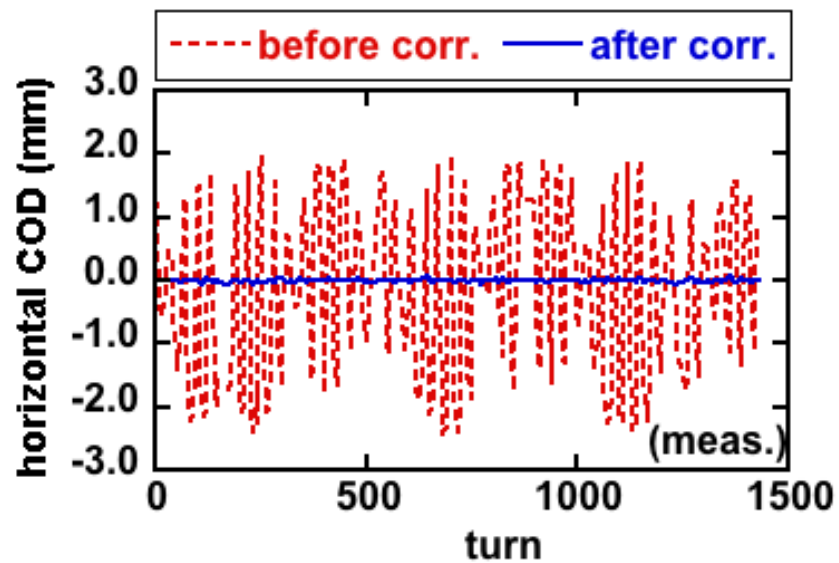
(キックで補正しようとする、キックが強くなりすぎる。高周波加速空洞で補正して、キックの余力を残す)

CODの平均値 ( $\Delta r$ ) がゼロになるように高周波加速空洞の周波数 $f$ に $\Delta f$ を加える。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &= \alpha \frac{\Delta p}{p} \\ \frac{\Delta f}{f} &= -\left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p} \end{aligned} \right\} \frac{\Delta f}{f} = -\left(1 - \frac{1}{\alpha\gamma^2}\right) \frac{\Delta C}{C}$$

# COD補正＋周長補正 終了後のCOD測定値

x方向COD

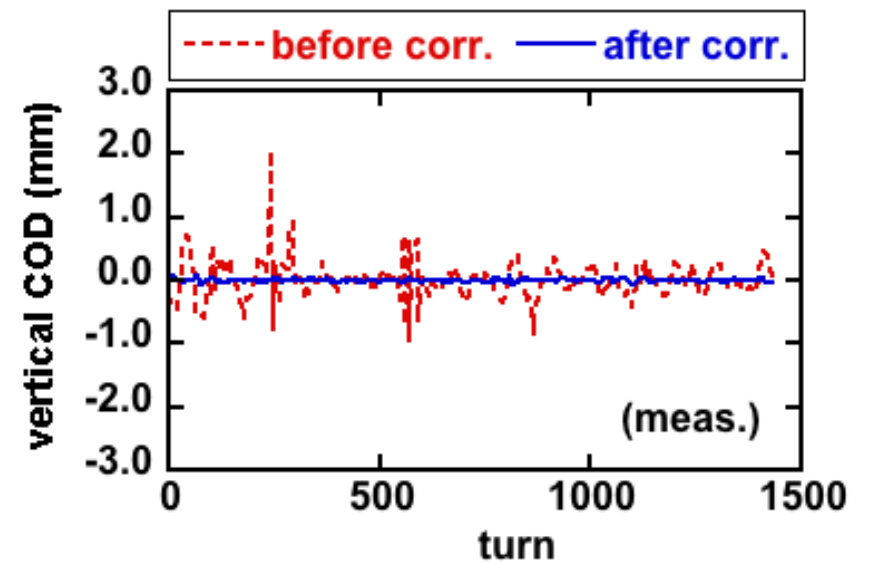


COD@BPMのRMS値

補正前：1.42 mm

補正後：0.02 mm

y方向COD



COD@BPMのRMS値

補正前：0.31 mm

補正後：0.02 mm

## 後半の概要:

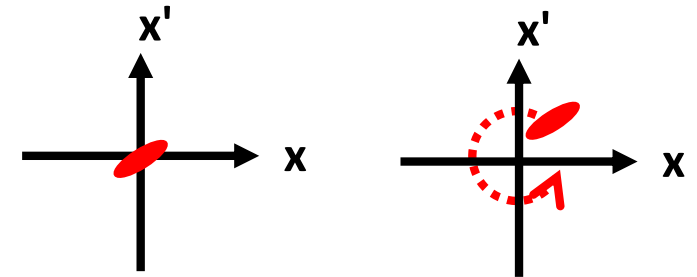
- 1 ビーム調整前のビーム蓄積について
- 2 ビーム調整シナリオ
- 3 **ビーム調整**
  - ・ COD補正
  - ・ **チューン補正**
  - ・ クロマティシティ補正
  - ・ ベータ関数と分散関数の補正
  - ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
  - ・ 光軸補正
  - ・ 入射軌道補正
  - ・ 入射タイミング補正
- 4 加速器の高度化に向けての加速器調整例
  - ・ 振幅依存チューンの測定



# チューン計測

- 小振幅のダイポール振動の場合、チューンと同じ周波数でビーム重心が動く。

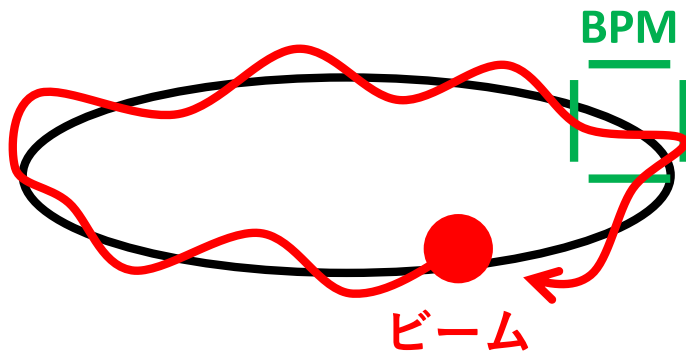
ダイポール振動無し    ダイポール振動有り



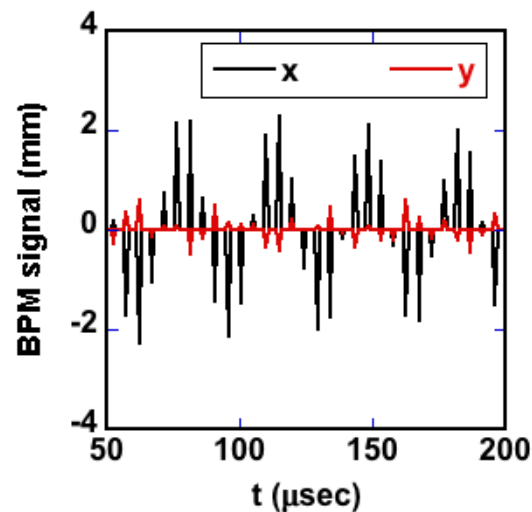
→ ビームのダイポール振動をSPBPMで検出すればチューンを計測できる。

(言い換えると、チューンを検出するためには、パルス電場またはパルス磁場でビームをキックする必要がある。)

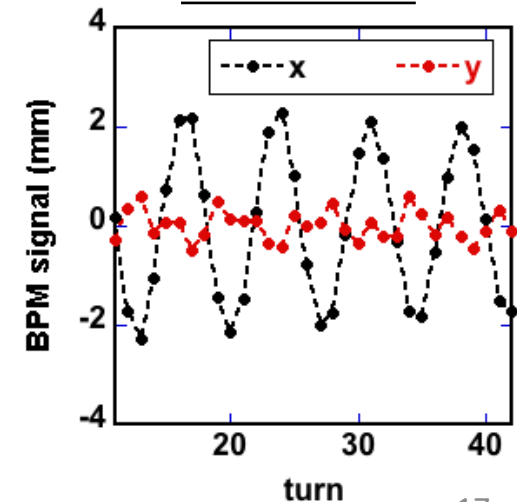
- BPMでは、ビームがあるタイミングだけダイポール振動が検出される。  
= BPMのアナログ信号は「デルタ関数 x ダイポール振動」のような形になる。



SPBPMでの  
アナログ信号例



ビームがあるタイミングの  
信号だけをピックアップした  
離散データ例



# チューン計測

チューンの求め方 (1) : SPBPMのアナログ信号 $x(t)$ をフーリエ展開にかける場合

$$x(t) = \left\{ \underbrace{\cos\left(\frac{2\pi Q_x}{T}t\right)}_{\text{ダイポール振動分}} + \underbrace{x_0}_{\text{オフセット (ノイズ相当)}} \right\} \underbrace{\delta(t - nT)}_{\text{「ビームが有る時だけ信号が出る」分}}$$

$$= \left\{ \cos\left(\frac{2\pi Q_x}{T}t\right) + x_0 \right\} \cdot \frac{2}{T} \sum_{m=0}^{\infty} \cos\left(\frac{2m\pi}{T}t\right)$$

デルタ関数のフーリエ級数展開

$$\propto \frac{2}{T} \sum_{m=0}^{\infty} \left[ x_0 \cos\left(2\pi \frac{m}{T}t\right) + \cos\left\{2\pi \frac{(m + Q_x)}{T}t\right\} + \cos\left\{2\pi \frac{(m - Q_x)}{T}t\right\} \right]$$

$f_m = mf$

$f_{m+} = f_m + Q_x f$

$f_{m-} = f_m - Q_x f$

$f$  : ビームの周回周波数  
 $f_m$  : 周回周波数の整数倍

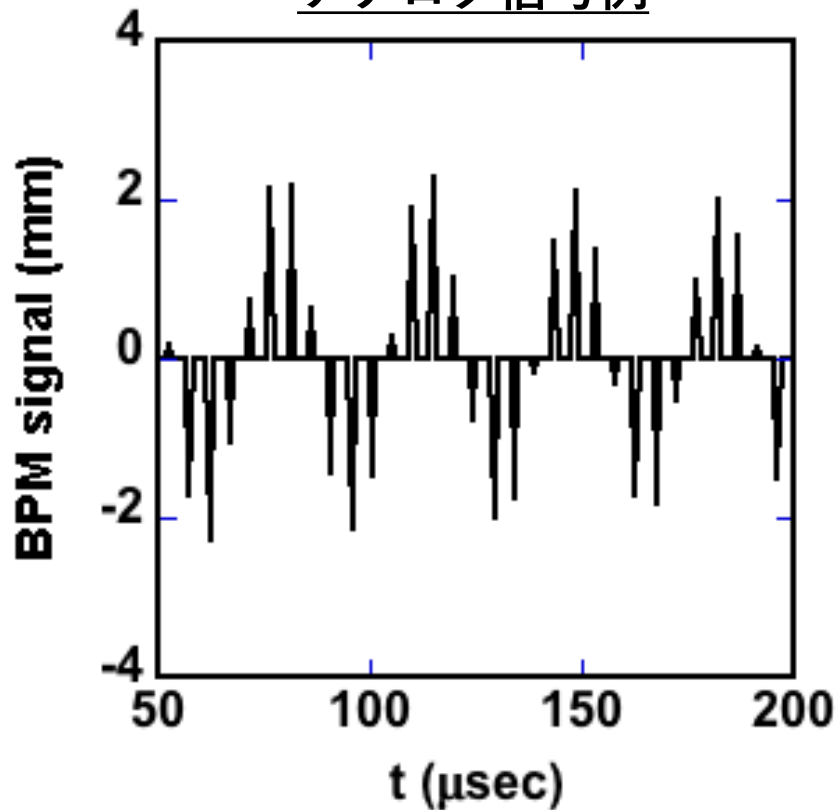
フーリエ展開すると $f_m$ の周りに  
 サイドバンド ( $f_{m-}, f_{m+}$ ) がたつ

# チューン計測

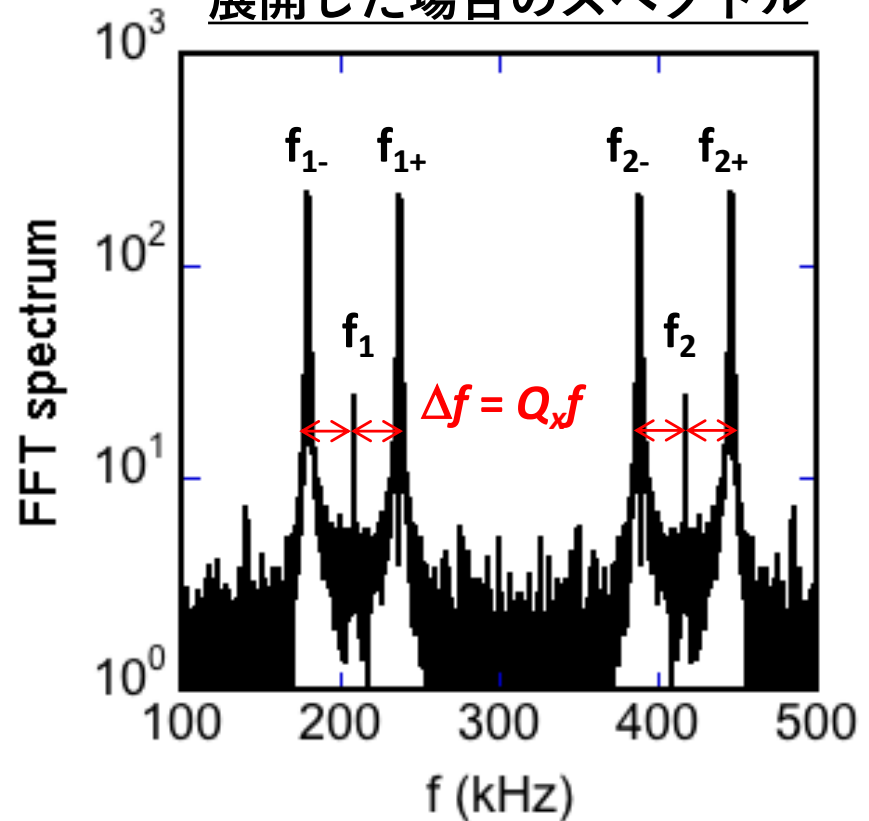
チューンの求め方 (1) : SPBPMのアナログ信号 $x(t)$ をフーリエ展開にかける場合、

サイドバンドからチューンがわかる：
$$Q_x = \frac{|f_{m\pm} - f_m|}{f}$$

SPBPMでの  
アナログ信号例



アナログ信号例をフーリエ級数  
展開した場合のスペクトル

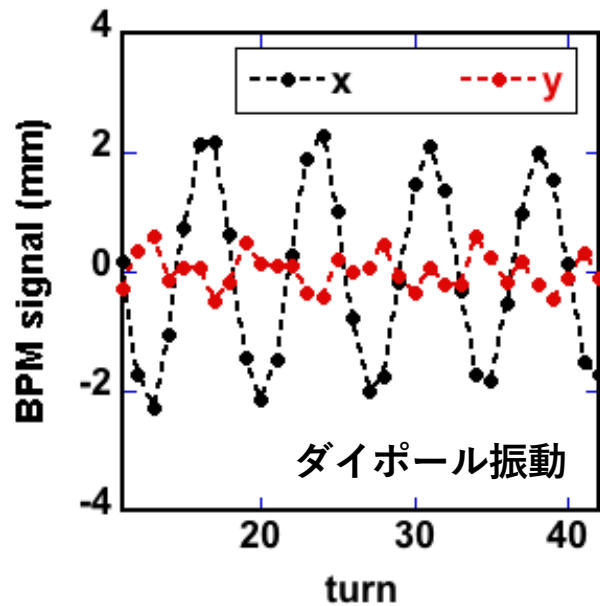


# チューン計測

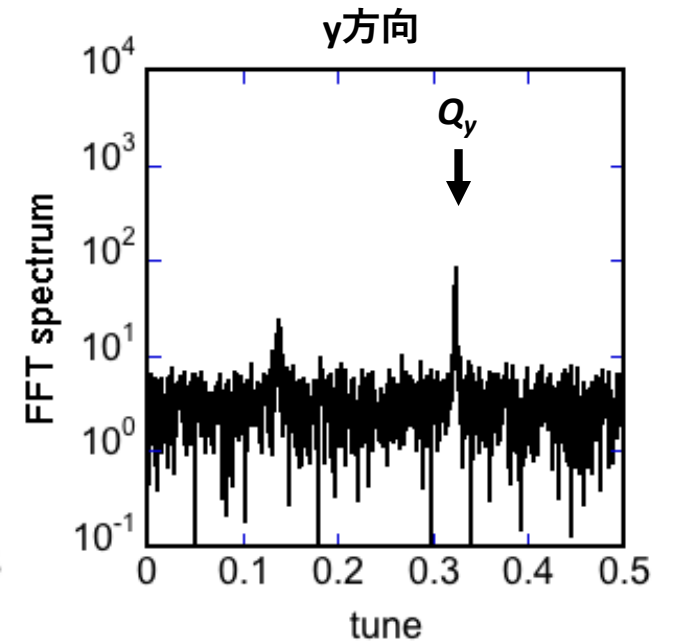
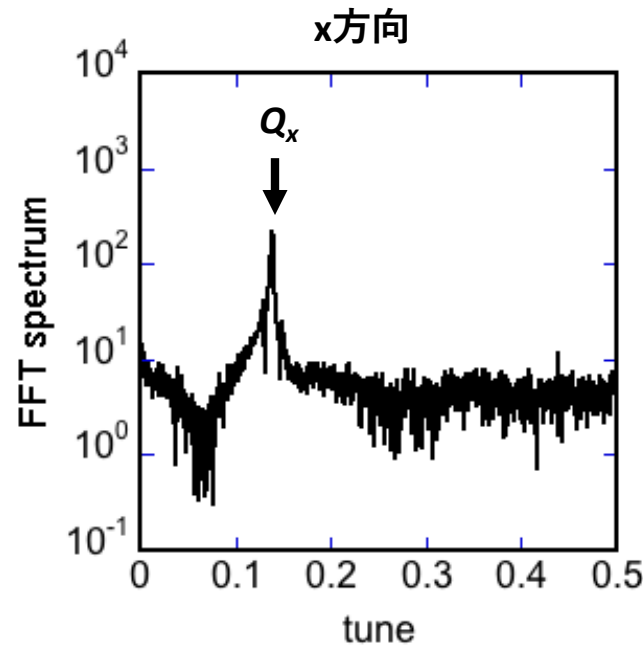
## チューンの求め方 (2)

「SPBPMのアナログ信号 $x(t)$ 」から「ビームが有るタイミングの信号を抜きだして離散データ $x(n)$  ( $n$ はターン数)にしたもの」に変換してフーリエ展開をかければ、そのままチューンが出る。

ビームがあるタイミングの  
SPBPM信号をピックアップした  
離散データ例



離散データをフーリエ展開にかけた結果



## チューン補正

四極磁場を変えてチューンを補正する。

1種類の四極磁場を変えた時のチューンシフトの式：

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_y \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi B\rho} \begin{pmatrix} \beta_x \\ -\beta_y \end{pmatrix} B'L$$

$\beta_x, \beta_y$ : 四極磁石がある位置のベータ関数  
 $B'$ : 四極磁場係数  
 $L$ : 四極電磁石の有効長

= 四極磁場を変えるとx方向にもy方向にもチューンが変わる。

→ x方向とy方向、両方のチューンを補正するためには、少なくとも2種類の四極磁場を変える必要がある。

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_y \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi B\rho} \begin{pmatrix} \beta_{x1} & \beta_{x2} \\ -\beta_{y1} & -\beta_{y2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B'_1 L_1 \\ B'_2 L_2 \end{pmatrix}$$

**(注意) 四極磁場を変えると、チューン以外に、ベータ関数や分散関数も変わる。**

→事前に計算機で「ベータ関数や分散関数への影響が小さくて、チューンを補正できる四極磁石」を探しておく必要がある。

## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム蓄積について

2 ビーム調整シナリオ

3 **ビーム調整**

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ **クロマティシティ補正**
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ 光軸補正
- ・ 入射軌道補正
- ・ 入射タイミング補正

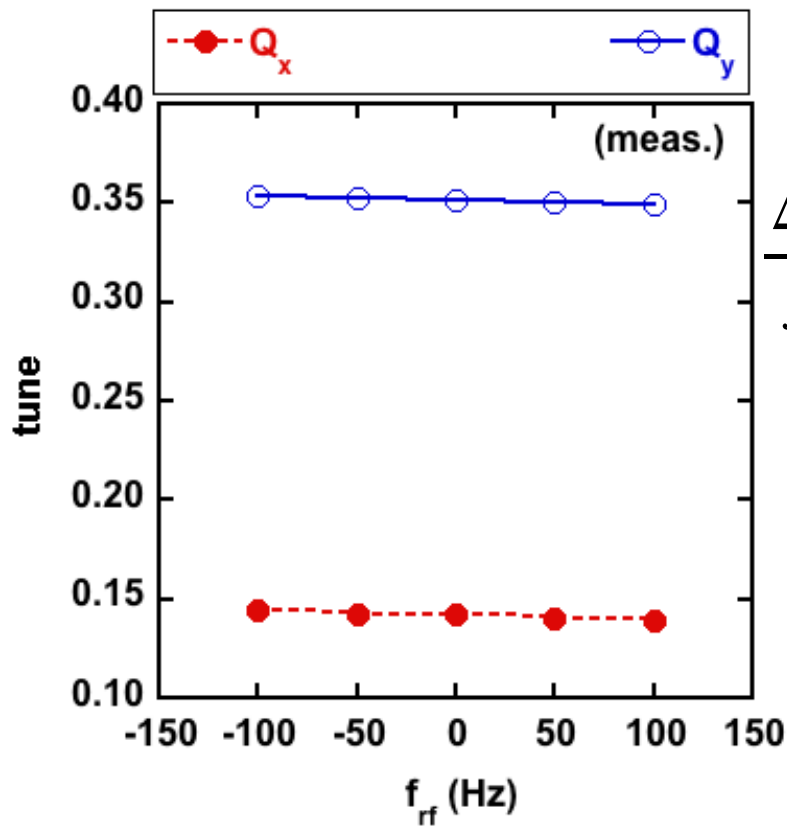
4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

## クロマティシティ計測

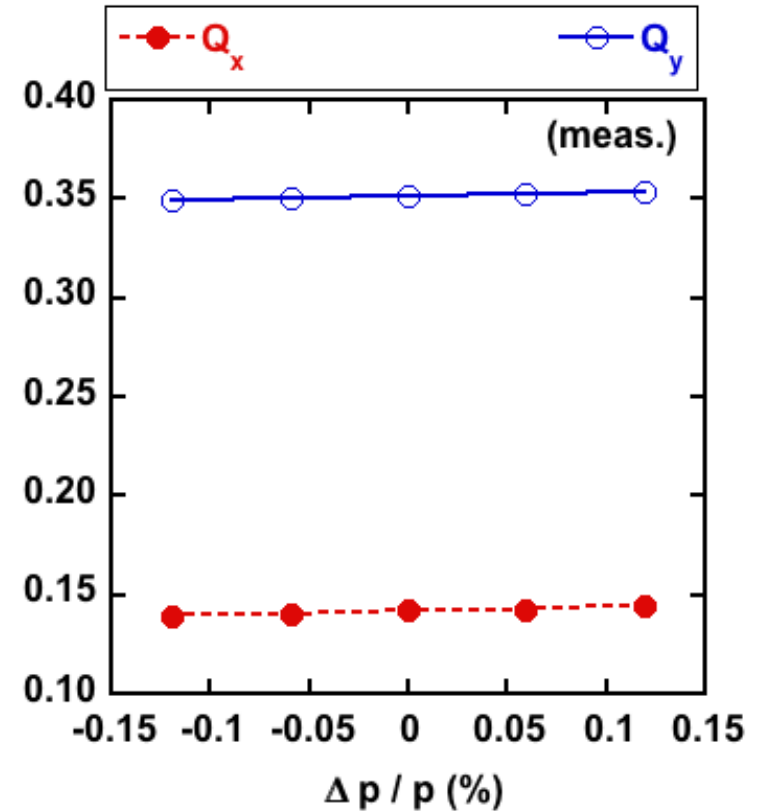
クロマティシティによるチューンシフトの式：
$$\begin{pmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{pmatrix} \frac{\Delta p}{p}$$

高周波加速空洞の周波数を変えてチューンを測れば良い。
$$\frac{\Delta f}{f} = -\left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p}$$



$$\frac{\Delta f}{f} = -\left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2}\right) \frac{\Delta p}{p}$$

→



フィッティングから  
 $(\xi_x, \xi_y) = (1.85, 1.75)$ と求まる。

## クロマティシティ補正

計測したクロマティシティが設計値からずれている場合、  
「六極磁場@分散関数がある場所」を変えてクロマティシティを補正する。

1種類の六極磁場を変えた時のクロマティシティ変化の式：

$$\begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi B\rho} \begin{pmatrix} D\beta_x \\ -D\beta_y \end{pmatrix} B''L$$

$\beta_x, \beta_y$ : 六極磁石がある位置のベータ関数  
D: 六極磁石がある位置の分散関数  
 $B'$ : 六極磁場係数  
L: 六極電磁石の有効長

= 六極磁場を変えるとx方向にもy方向にもクロマティシティが変わる。  
→ x方向とy方向、両方のクロマティシティを補正するためには、  
少なくとも2種類の六極磁場を変える必要がある。

$$\begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi B\rho} \begin{pmatrix} D_1\beta_{x1} & D_2\beta_{x2} \\ -D_1\beta_{y1} & -D_2\beta_{y2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B''_1L_1 \\ B''_2L_2 \end{pmatrix}$$

(注意) 六極磁場を変えると、クロマティシティ以外に、「ビームの存在しうる安定領域 (ダイナミックアパーチャ、モーメンタムアパーチャ)」なども変わる。

→事前に計算機で「ビームの安定領域への影響が小さくて、クロマティシティを補正できる六極磁石」を探しておく必要がある。



## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム入射について

2 ビーム調整シナリオ

### 3 ビーム調整

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ **ベータ関数と分散関数の補正**
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ 光軸補正
- ・ 入射軌道補正
- ・ 入射タイミング補正

4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

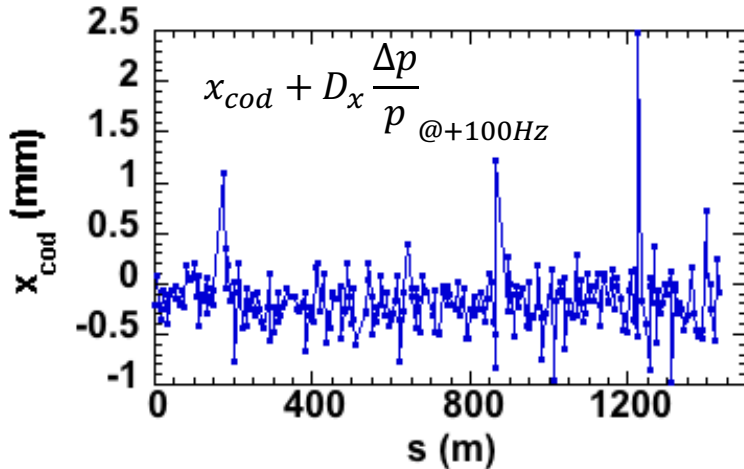
$x_p$ は閉軌道で $D_x$ が分散関数

$$x_p = D_x \frac{\Delta p}{p}$$

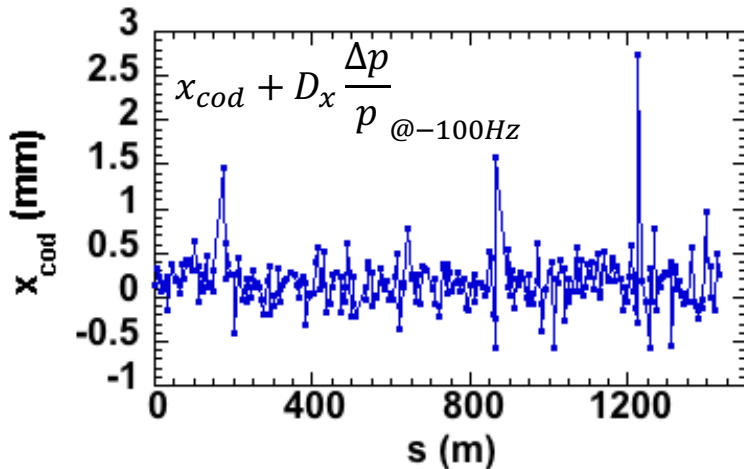
## 分散関数測定

高周波加速空洞の周波数を変えてCODを測れば良い。

$f_{rf}$ を中心周波数から+100 Hz  
動かした時のCOD (meas.)

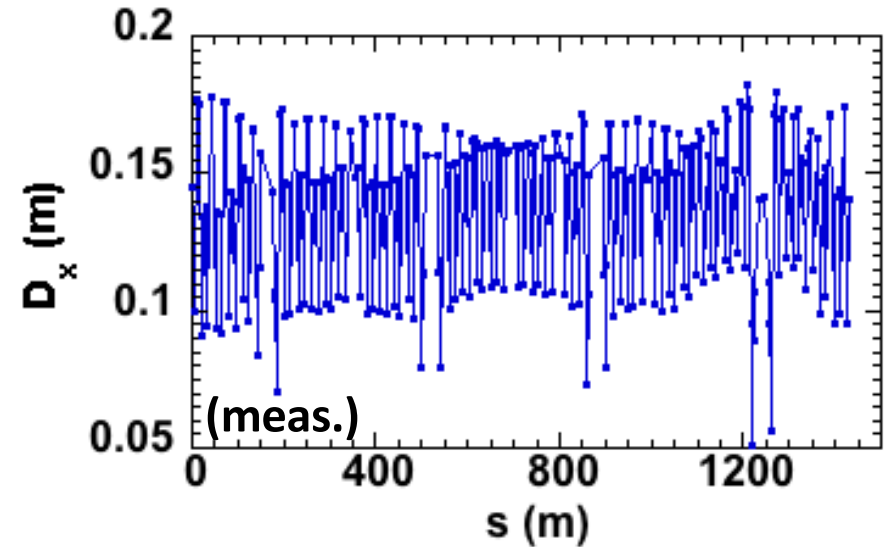


$f_{rf}$ を中心周波数から-100 Hz  
動かした時のCOD (meas.)



$$\left\{ x_{cod} + D_x \frac{\Delta p}{p} @ +100\text{Hz} \right\} - \left\{ x_{cod} + D_x \frac{\Delta p}{p} @ -100\text{Hz} \right\} = D_x \left( \frac{\Delta p}{p} @ +100\text{Hz} - \frac{\Delta p}{p} @ -100\text{Hz} \right)$$

分散関数測定値



± 100 Hz

→  $\frac{\Delta f}{f} = - \left( \alpha - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p}$

508 MHz →  $1.6e-4$

## ベータ関数の推定

どうやってベータ関数を調べるか：

- 1 実際の加速器でCODをわざと作る。BPMは全周にばらまかれているので観測点を多くできる。

$$\langle x \rangle_m = R_{mn} \theta_n$$

$$R_{mn} = \frac{\sqrt{\beta_m \beta_n} \cos(|\phi_m - \phi_n| - Q\pi)}{2 \sin(\pi Q)}$$

$\beta_m, \phi_m$  : 観測点でのベータ関数とベートロン位相  
 $\beta_n, \phi_n$  : キック位置でのベータ関数とベートロン位相  
 $Q$  : チューン

の関係から $R_{mn}$ の測定値がわかる。

- 2 **計算機内の加速器モデル**に四極磁場誤差をばらまく。  
わざとCODを作り、 $R_{mn}$ 計算値を求める。
- 3  $R_{mn}$ 測定値と $R_{mn}$ 計算値が一致するように、四極磁場誤差を決定すれば良い。

$$R_{model} + \frac{dR_{model}}{dB'_{error}} \Delta B'_{error} \sim R_{meas}$$

ただし四極磁場誤差を与えると分散関数も変わるので、分散関数についても測定値と計算値が一致するように、連立的に四極磁場誤差を求める必要がある。

$$D_{model} + \frac{dD_{model}}{dB'_{error}} \Delta B'_{error} \sim D_{meas}$$

# ベータ関数の推定

連立方程式：

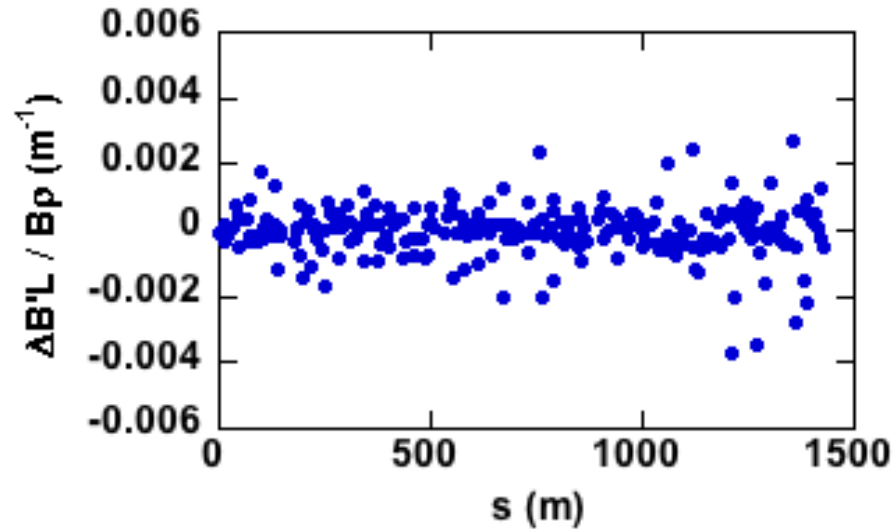
$$\begin{pmatrix} R_{11,model} \\ \vdots \\ R_{MN,model} \\ D_{1,model} \\ \vdots \\ D_{M,model} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{dR_{11,model}}{dB'_1} & \frac{dR_{11,model}}{dB'_2} & \dots & \frac{dR_{11,model}}{dB'_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dR_{MN,model}}{dB'_1} & \frac{dR_{MN,model}}{dB'_2} & \dots & \frac{dR_{MN,model}}{dB'_K} \\ \frac{dD_{1,model}}{dB'_1} & \frac{dD_{1,model}}{dB'_2} & \dots & \frac{dD_{1,model}}{dB'_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dD_{M,model}}{dB'_1} & \frac{dD_{M,model}}{dB'_2} & \dots & \frac{dD_{M,model}}{dB'_K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta B'_1 \\ \Delta B'_2 \\ \vdots \\ \Delta B'_K \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} R_{11,meas} \\ \vdots \\ R_{MN,meas} \\ D_{1,meas} \\ \vdots \\ D_{M,meas} \end{pmatrix}$$

M：BPMの数  
N：ステアリングの数  
K：四極磁場誤差の数

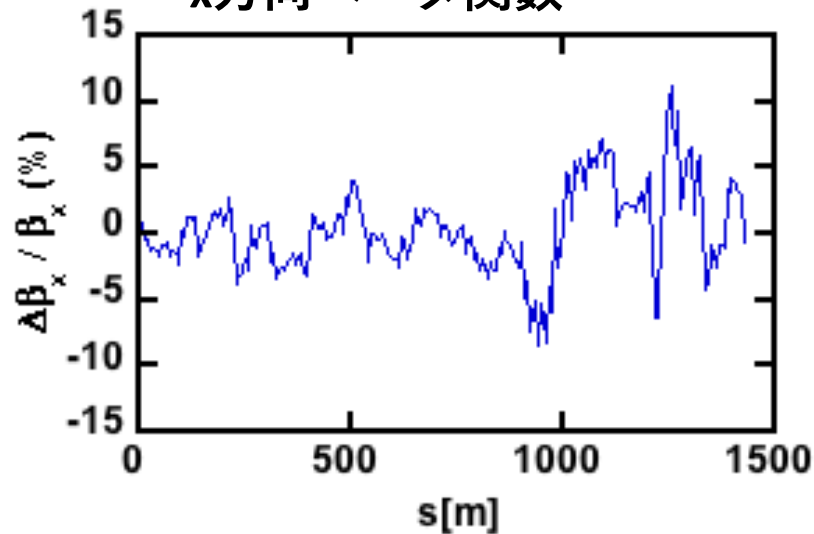
- 4 計算機内の加速器モデルで四極磁場誤差が求まったら、それを**計算機内の加速器モデル**に代入してベータ関数を計算する。

# ベータ関数の推定(計算結果)

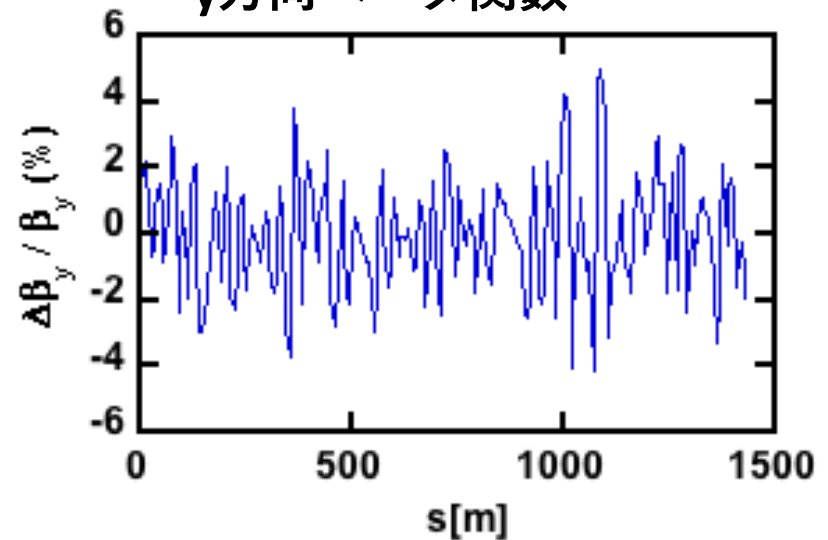
計算機内加速器モデルに与えた四極磁場誤差



加速器モデルで計算した  
x方向ベータ関数



加速器モデルで計算した  
y方向ベータ関数



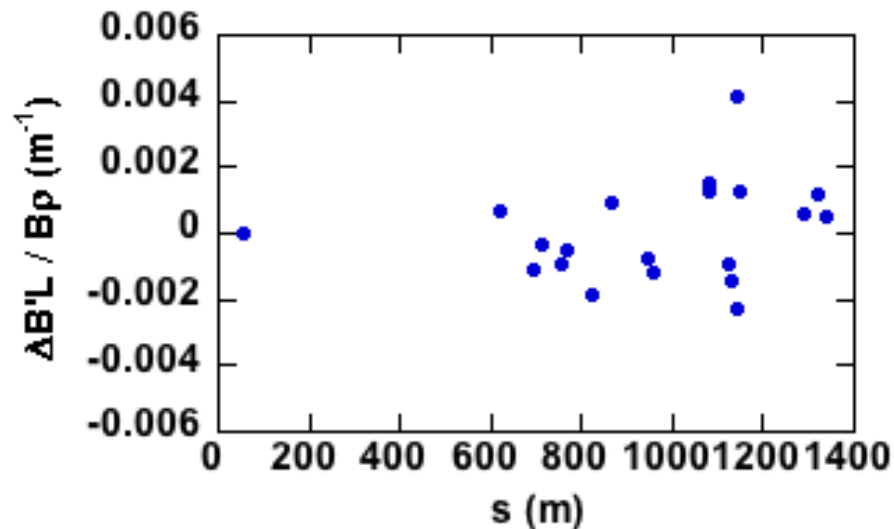
## ベータ関数・分散関数の補正

「四極磁場誤差を加速器モデルに与えて計算したベータ関数」と  
「分散関数測定値」が設計値に近づくように、補正四極磁場係数を求める。

$$\beta_{model} + \frac{d\beta_{model}}{dB'_{corr}} \Delta B'_{corr} \sim \beta_{theory}$$

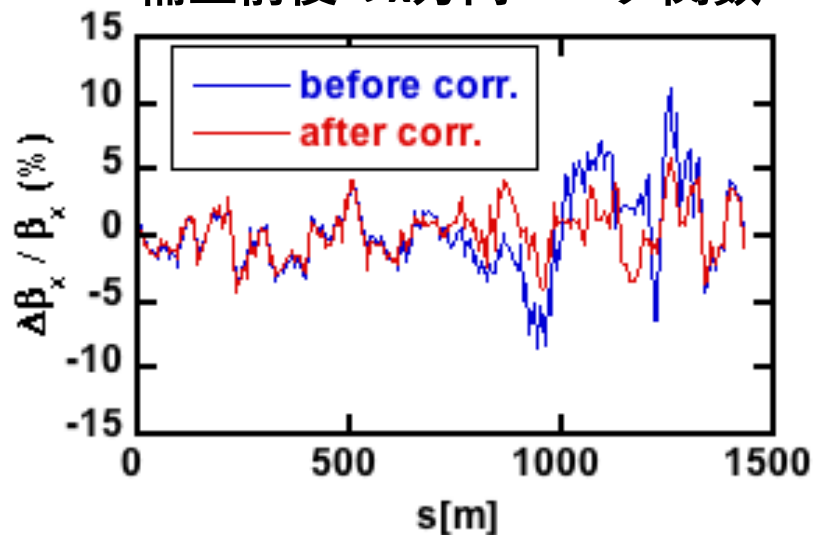
$$D_{model} + \frac{dD_{model}}{dB'_{corr}} \Delta B'_{corr} \sim D_{meas}$$

計算で求めた  
補正四極磁場係数

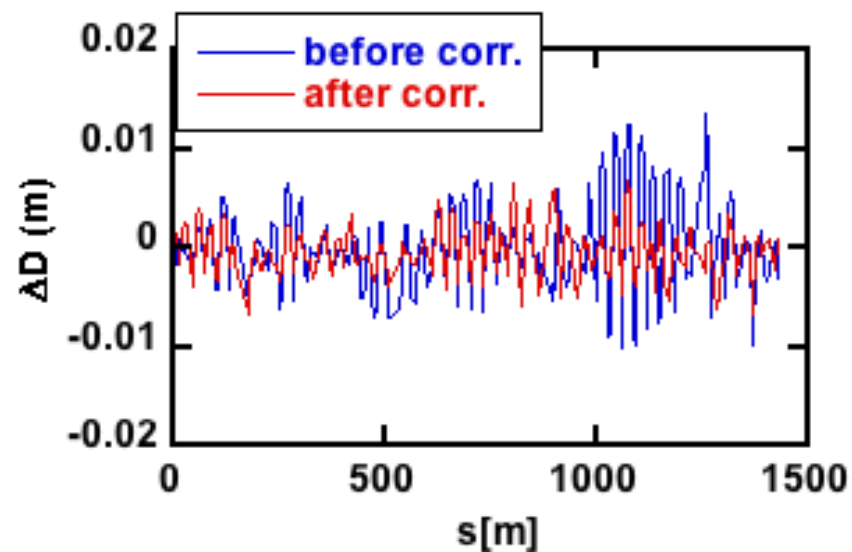


## ベータ関数・分散関数の補正(予想)

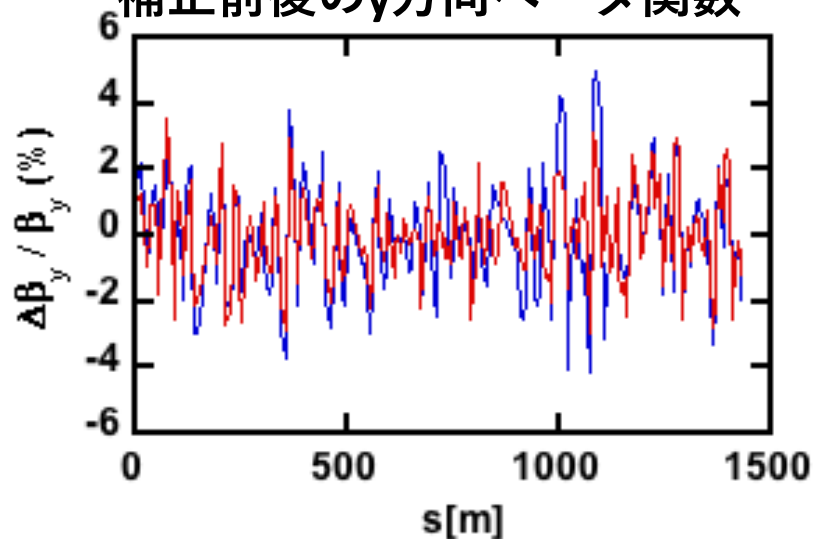
加速器モデルで計算した  
補正前後のx方向ベータ関数



加速器モデルで計算した  
補正前後のx方向分散関数



加速器モデルで計算した  
補正前後のy方向ベータ関数

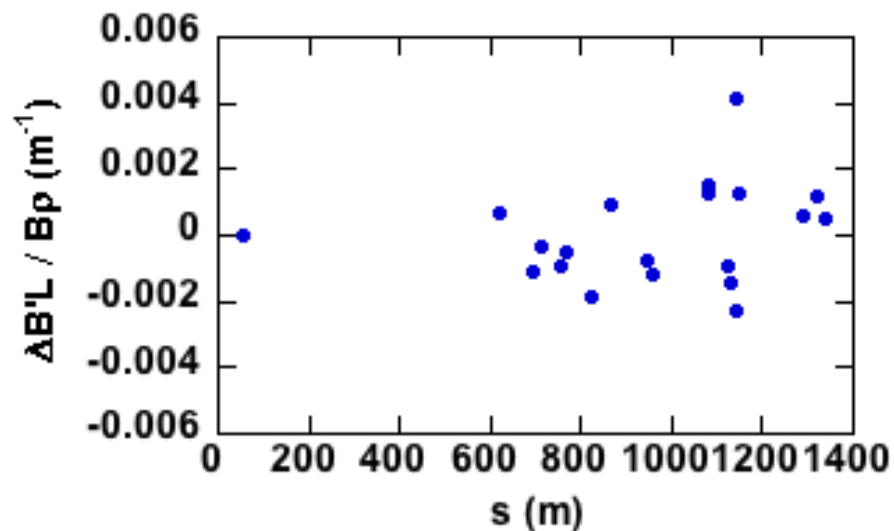


	補正前	補正後 (予想)
$\Delta\beta_x / \beta_x$	3.3 % (RMS)	2.0 % (RMS)
$\Delta\beta_y / \beta_y$	1.7 % (RMS)	1.4 % (RMS)
$\Delta D_x$	4.5 mm (RMS)	2.6 mm (RMS)

## ベータ関数・分散関数の補正(実機投入後)

- 計算で求めた補正四極磁場係数を実機投入
- 分散関数測定
- ベータ関数推定のために再度、わざとCODを作って $R_{mn}$ を取得
- 計算機内加速器モデルで再度ベータ関数の推定を行う

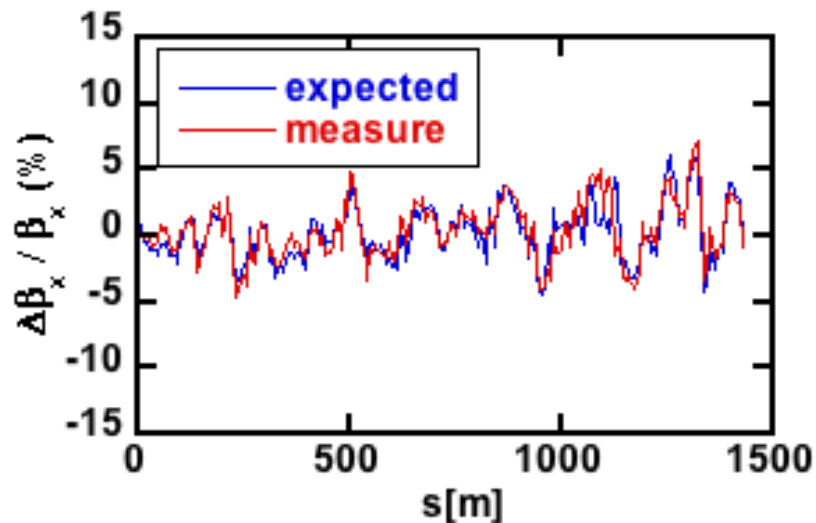
計算で求めた  
補正四極磁場係数



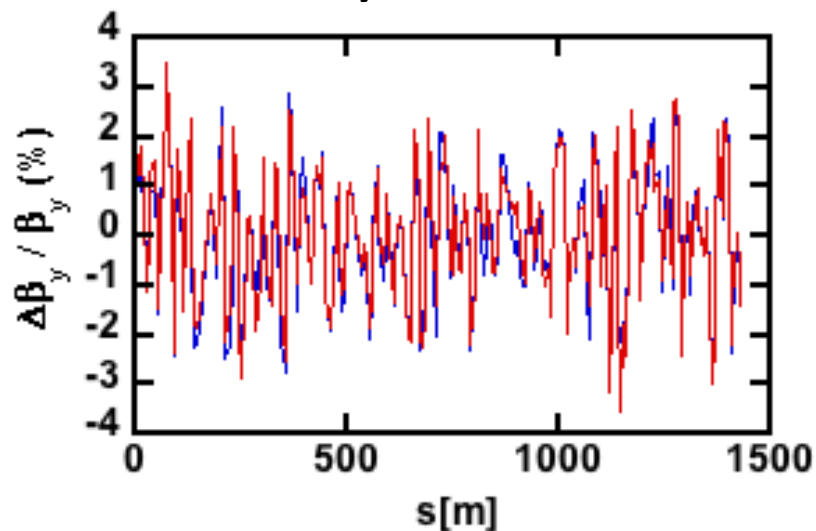


## ベータ関数・分散関数の補正(実機投入後)

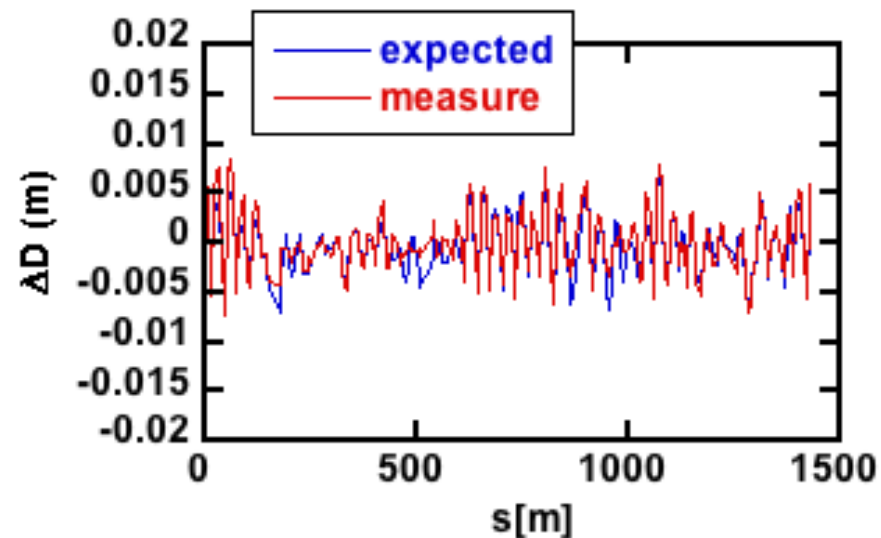
加速器モデルで再計算した  
補正前後のx方向ベータ関数



加速器モデルで再計算した  
補正前後のy方向ベータ関数



補正前後のx方向分散関数 (測定結果)



	補正後 (予想)	補正後 (結果)
$\Delta\beta_x / \beta_x$	2.0 % (RMS)	2.3 % (RMS)
$\Delta\beta_y / \beta_y$	1.4 % (RMS)	1.3 % (RMS)
$\Delta D_x$	2.6 mm	3.2 mm

$\beta$ 関数自体は直接測定できないが (計算からの推定のみ)、  
 $\beta$ 関数補正後は

- ・ローカルバンプ (後述) 作成時の軌道の漏れ  
(=理論値からのずれ) が小さくなる
- ・ビームサイズが理論値に近づく

などビーム挙動が理論に近づくので、補正の効果を  
実感できる。

## 後半の概要:

1 ビーム調整の前ビーム蓄積について

2 ビーム調整シナリオ

### 3 ビーム調整

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ **線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正**
- ・ 光軸補正
- ・ 入射軌道補正
- ・ 入射タイミング補正

4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

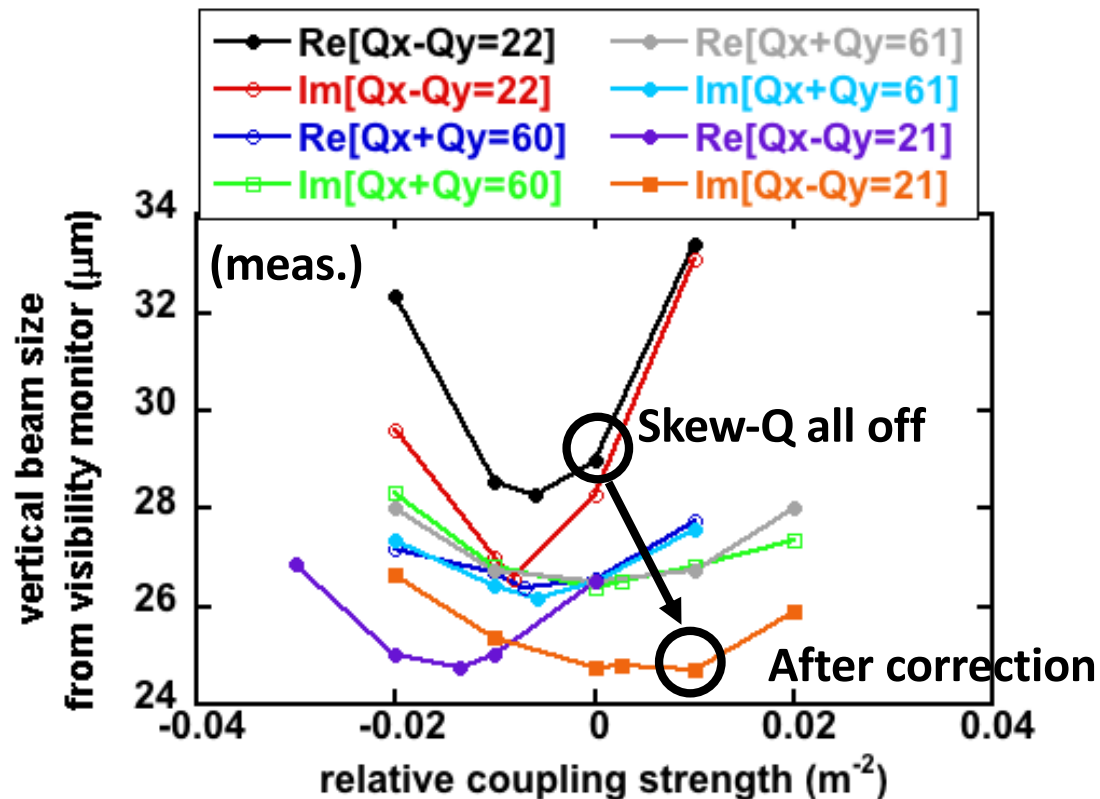
## (お話だけ)線型結合共鳴補正

線型結合共鳴：  $Q_x \pm Q_y = \text{整数}$

x方向の運動がy方向に回り込む（もしくはその逆）

放射光源の場合、線型結合共鳴によりx方向のエミッタンスがy方向に回り込むので2次元放射光干渉計でy方向ビームサイズを確認、スキュー四極磁石で線型結合共鳴の強さを、y方向ビームサイズが小さくなる方向に変える。

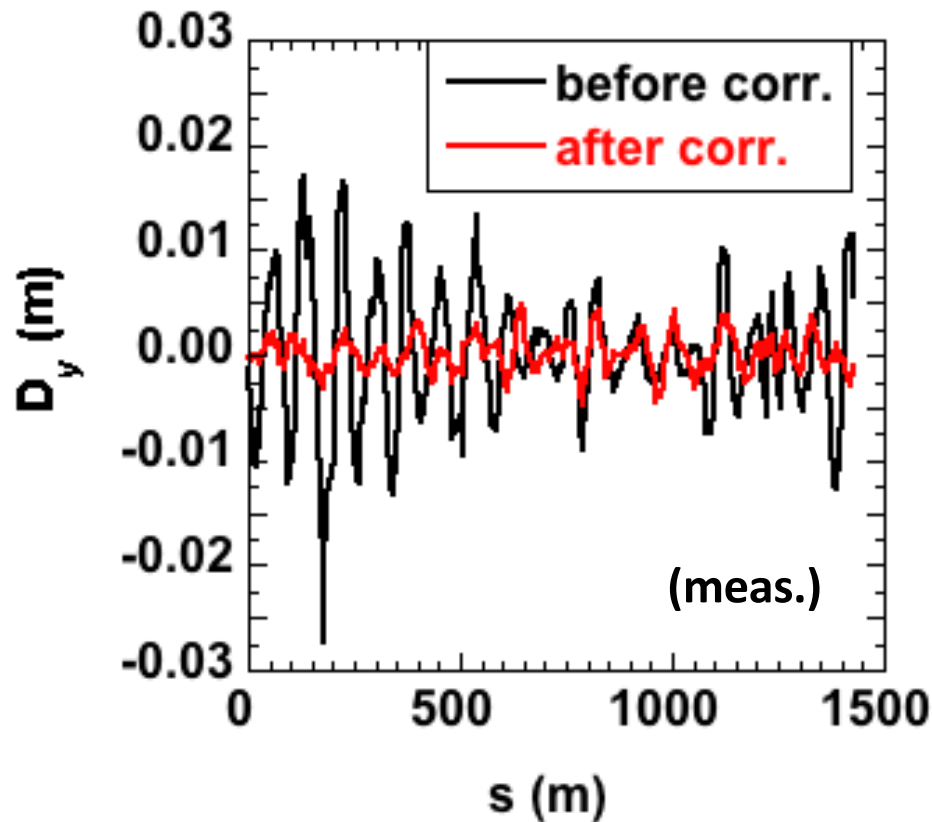
y方向ビームサイズ vs. 線型結合共鳴の振幅



## (お話だけ) Y方向分散関数補正

Y方向分散関数：x方向分散関数がスキュー四極磁場でy方向に回り込む。

線形結合共鳴補正後に、「線形結合共鳴補正の条件を変えない」という条件を加えて、y方向分散関数をスキュー四極電磁石で補正する。



補正前：6.3 mm (RMS)

補正後：1.6 mm (RMS)

## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム蓄積について

2 ビーム調整シナリオ

3 **ビーム調整**

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ **光軸補正**
- ・ 入射軌道補正
- ・ 入射タイミング補正

4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

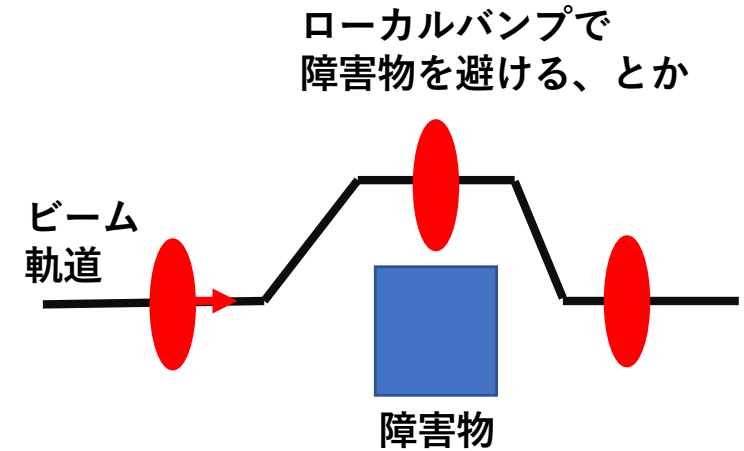
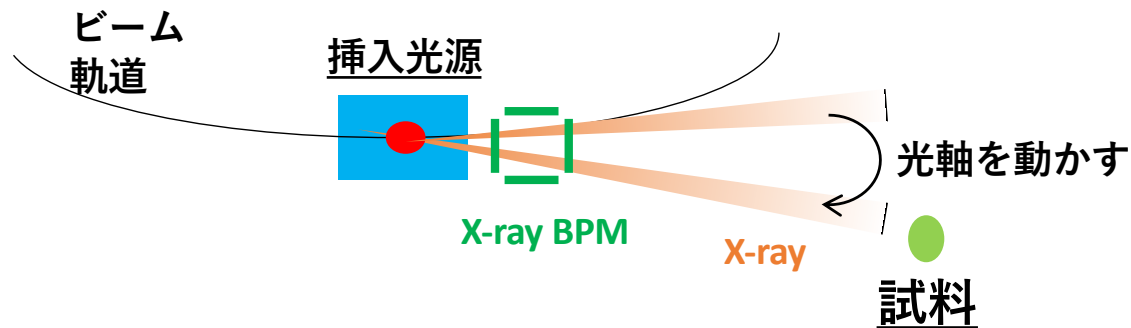
# ローカルバンパ作成による光軸補正

特定の場所にわざとCOD（ローカルバンパ）を作る場合がある。

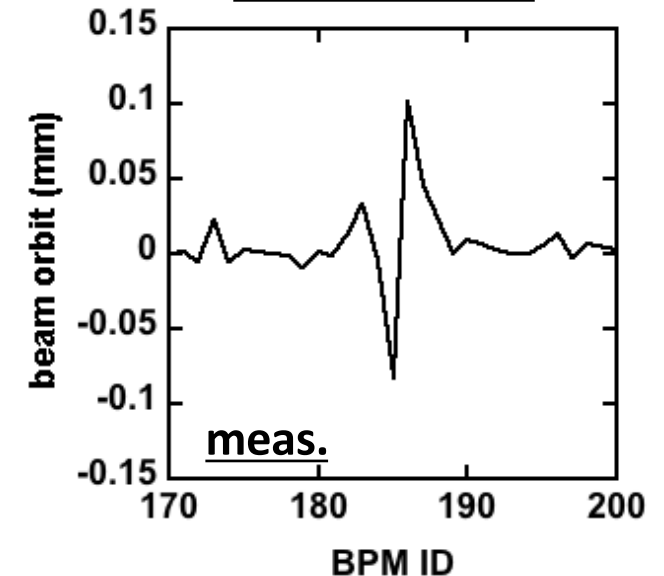
- ビーム軌道上の障害物を避けるため
- 光軸を補正するため

例えば**光軸補正**の場合

- X-ray BPMでエックス線の光軸を検出する。
- **発光点前後にあるBPMとキックで**  
ローカルバンパを作って電子ビームの軌道を動かす  
それによって電子から出る放射光の光軸を調整する。

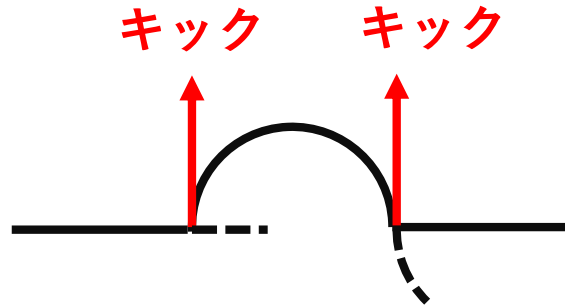


光軸補正後の  
ビーム軌道例



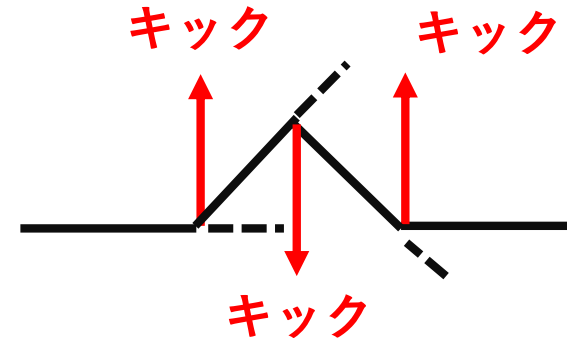
# ローカルバンプ作成

キック間の位相が $\pi$ 離れていれば  
2回のキックで軌道が元に戻る。

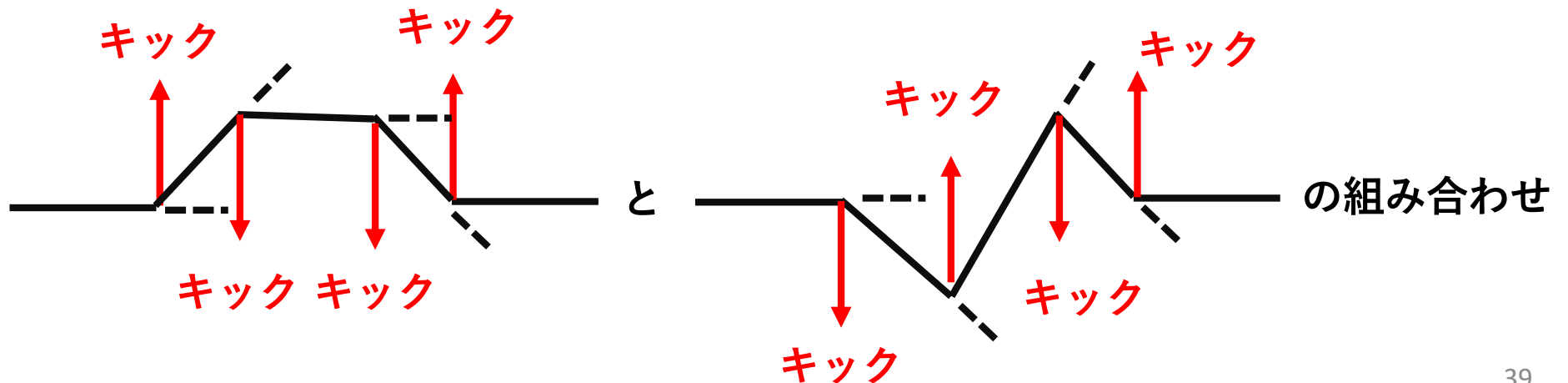


破線の方へ行こうとするビーム軌道を  
キックで修正すれば良い

3回のキックでも軌道は閉じる。



キックが4個あれば、ローカルバンプの高さ、角度を任意に変えられる。



## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム蓄積について

2 ビーム調整シナリオ

### 3 ビーム調整

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ 光軸補正
- ・ **入射軌道補正**
- ・ 入射タイミング補正

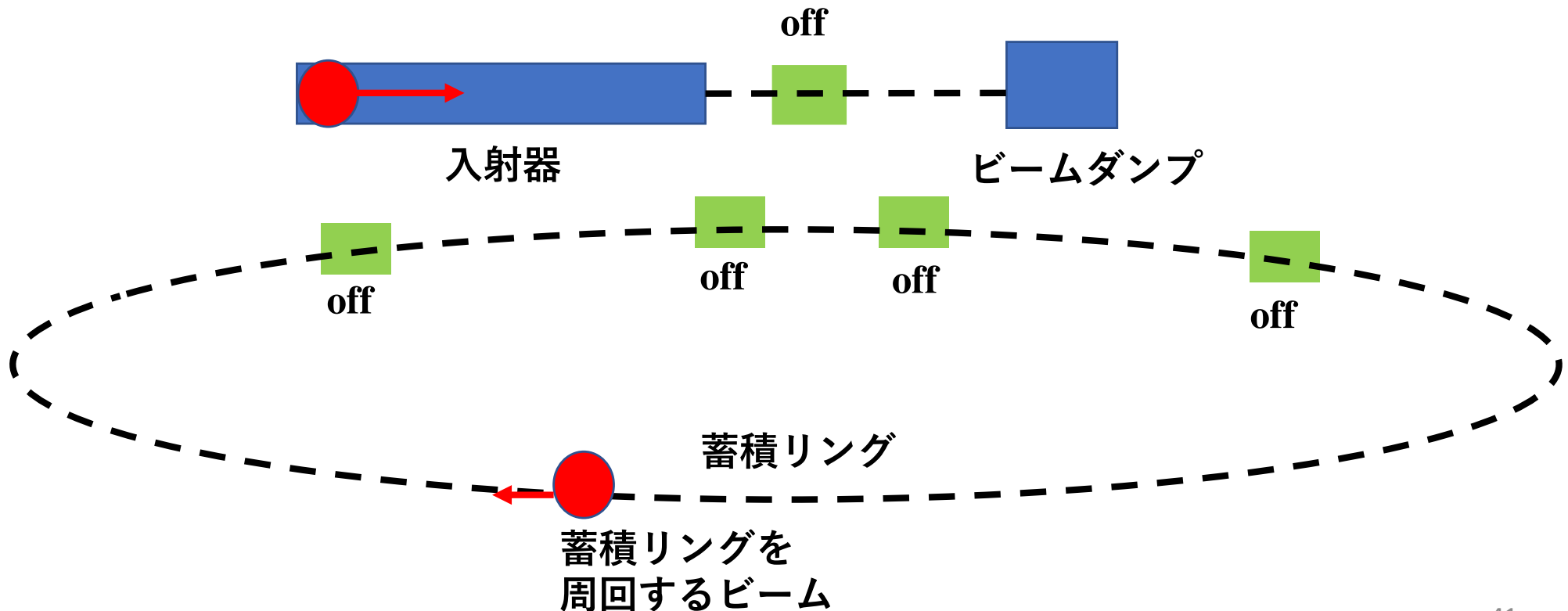
4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定



# ビーム入出射について(1/3)

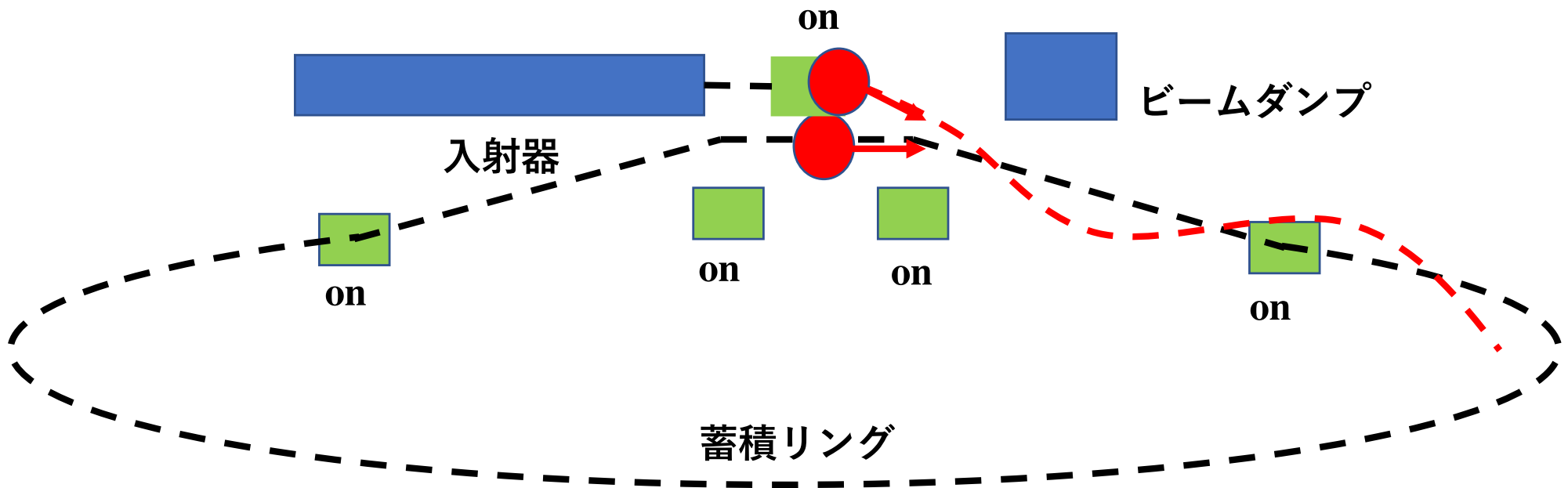
- ビーム入出射用のパルス電磁石（緑）がオフの間は、
- ・ 入射器からのビームはビームダンプへ向かう。
  - ・ 蓄積リングのビームは蓄積リングを周回するだけ。



## ビーム入出射について(2/3)

パルス電磁石をオンにすると、

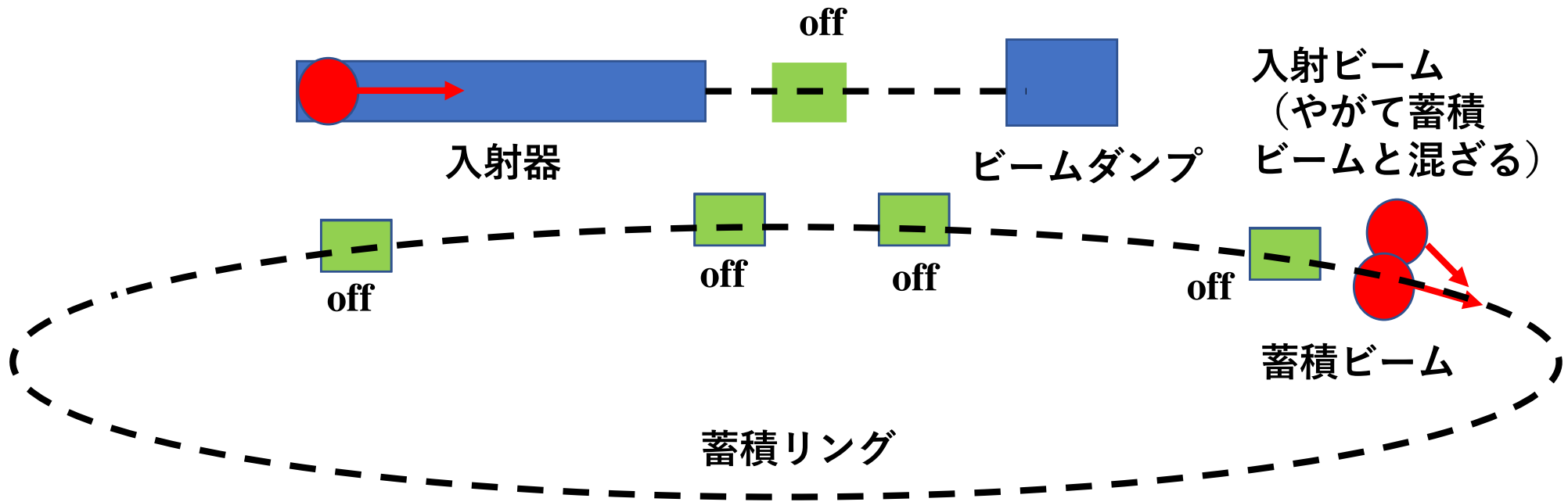
- ・ 入射器から蓄積リングへ軌道が繋がり、入射器からのビームが蓄積リングへ入射可能となる。
- ・ 蓄積ビームの軌道を入射ビーム側に寄せて、入射ビームの蓄積リング内での振動（入射振動）が小さくなるようにする。  
（＝蓄積ビームが入射ビームを迎えに行く）



# ビーム入出射について(3/3)

入射が終わったらパルス電磁石をオフにする。

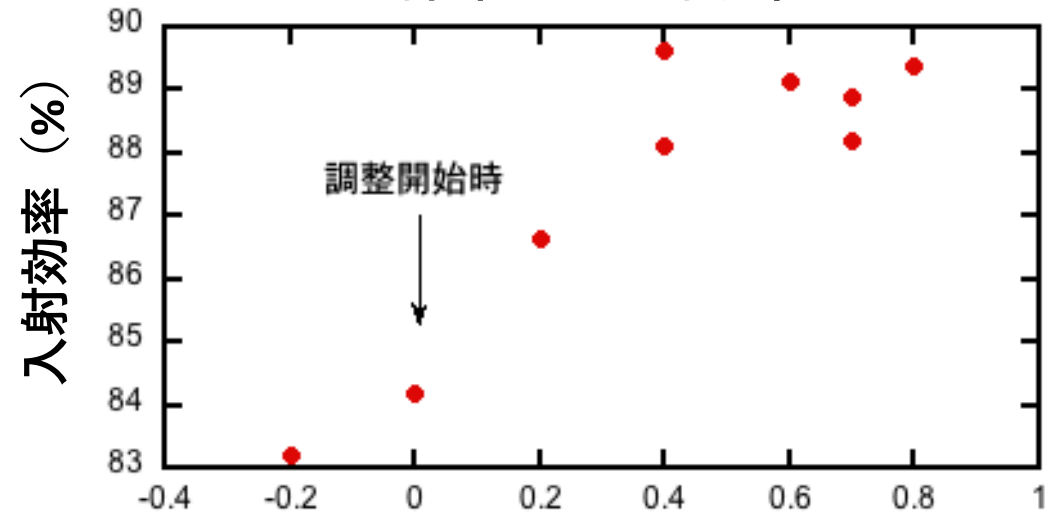
- ・ 入射器は再度、ビーム入射の準備。
- ・ 蓄積リングに入射されたビームは、放射光を出しながら蓄積ビームに近づき、やがて合体して1つのビームになる。



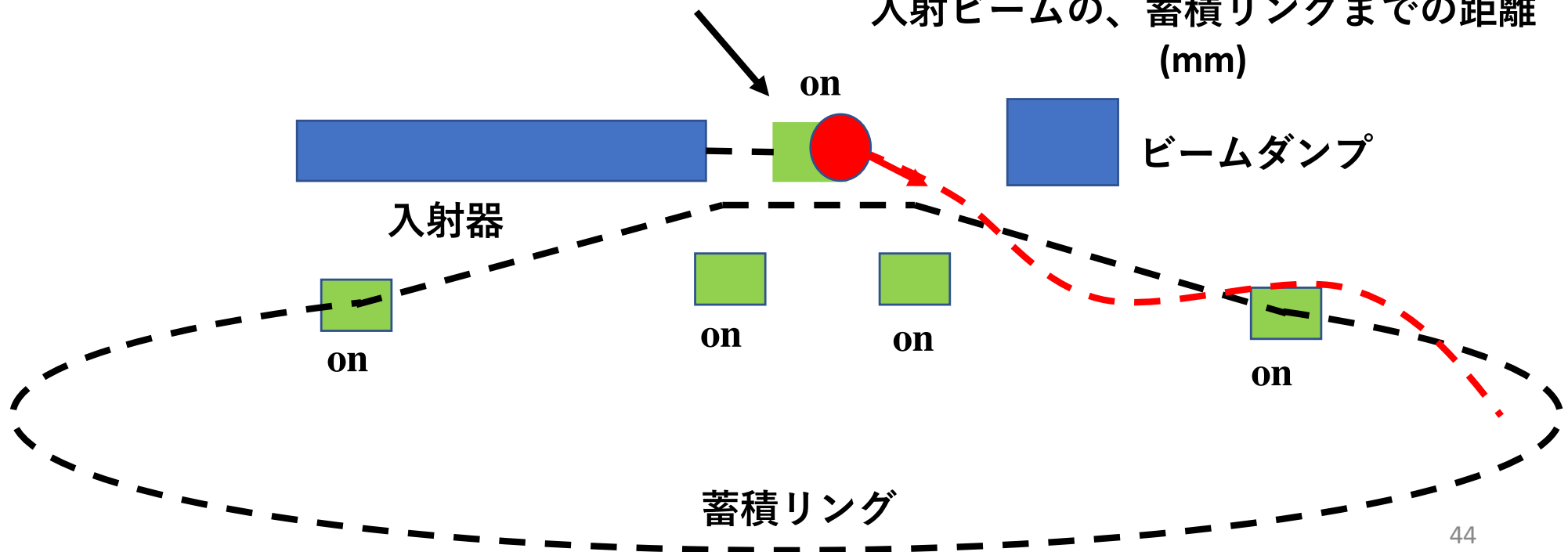
# 入射ビーム軌道調整例

入射ビームをどれだけ蓄積リングに寄せるか、の調整。

入射位置 vs. 入射効率



入射ビームの、蓄積リングまでの距離 (mm)



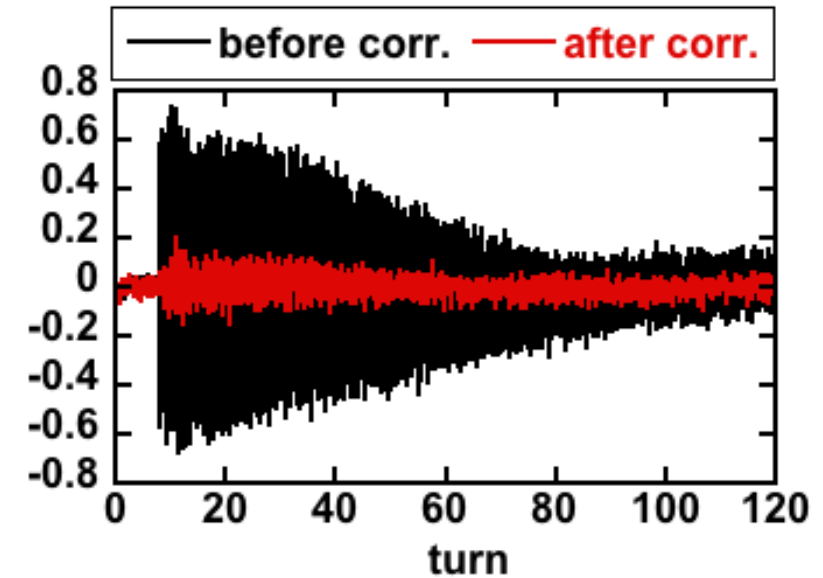
# 入射バンプ軌道調整例

複数台のパルス電磁石でバンプ軌道を作るので、

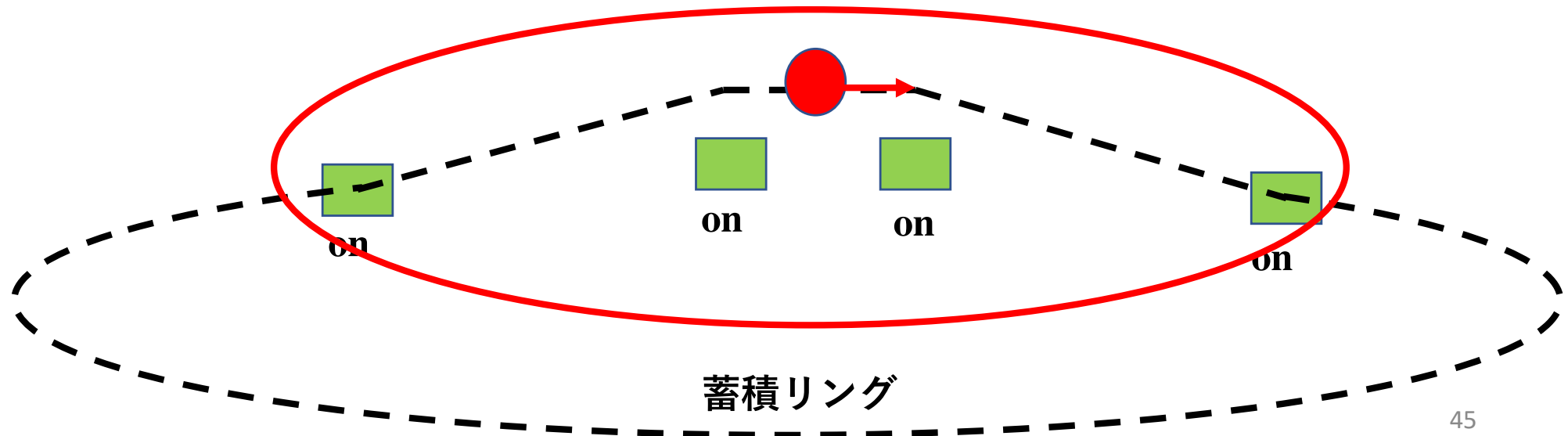
- ・パルス電磁石の磁場、
  - ・パルス電磁石をオン、オフにするタイミング
- がそれぞれ合わないと軌道が閉じない。  
=蓄積ビームが大振幅で振動する。

軌道が閉じるように=蓄積ビームが振動しないように  
パルス磁場の波高とタイミングを調整する。

入射パルス電磁石オン後の  
蓄積ビーム軌道 (SPBPM)



この部分の調整



## 後半の概要:

1 ビーム調整前のビーム蓄積について

2 ビーム調整シナリオ

### 3 ビーム調整

- ・ COD補正
- ・ チューン補正
- ・ クロマティシティ補正
- ・ ベータ関数と分散関数の補正
- ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
- ・ 光軸補正
- ・ 入射軌道補正
- ・ **入射タイミング補正**

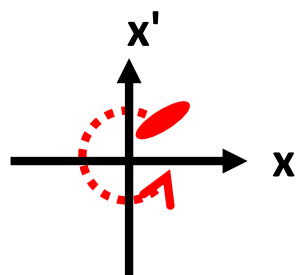
4 加速器の高度化に向けての加速器調整例

- ・ 振幅依存チューンの測定

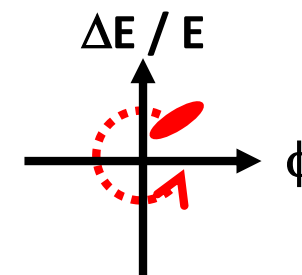
# 入射ビームのタイミング調整

分散関数のある場所のSPBPMで入射ビームの振動を観測すると、**シンクロトロン振動のダイポール振動**が見える場合がある。

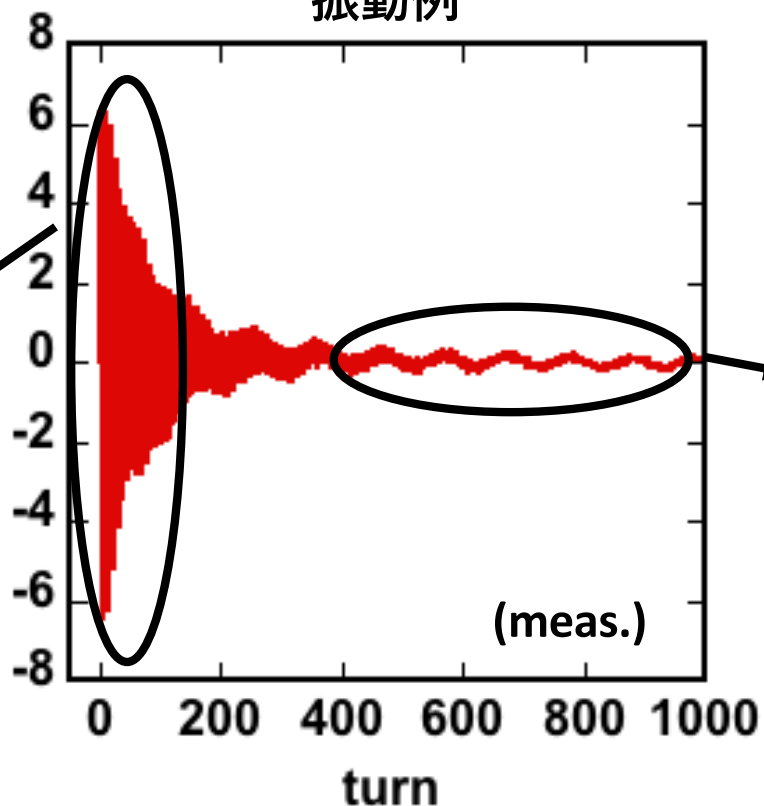
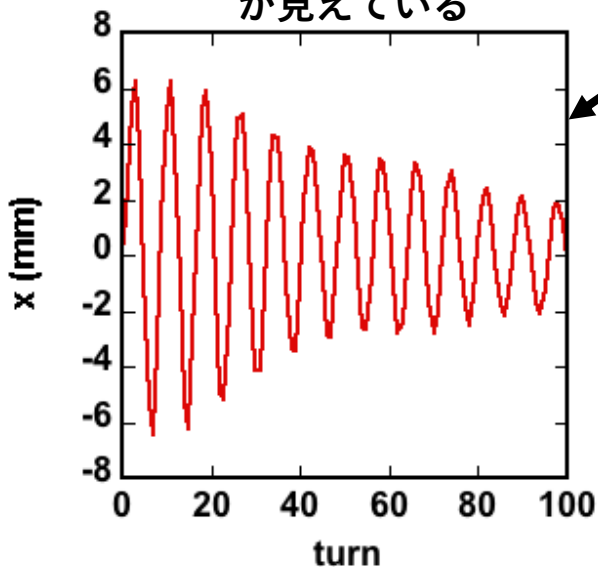
必要があれば、分散関数のある場所のSPBPMで見てダイポール振動が小さくなるようにビーム入射のタイミングを調整する。



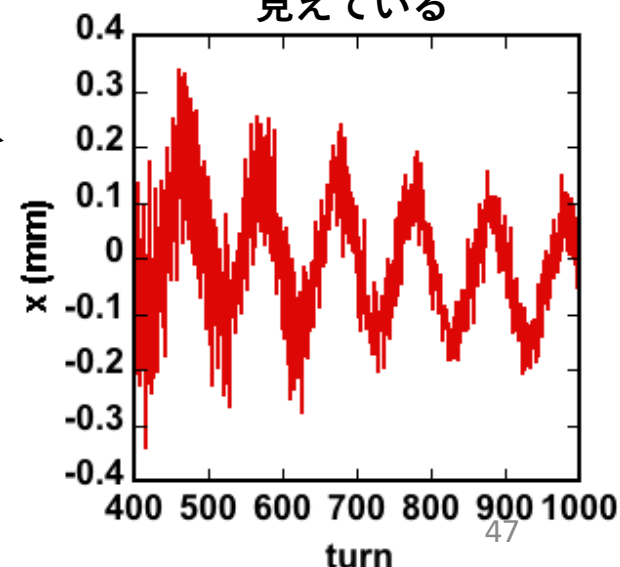
ビーム入射時のビームの振動例



速い振動：ベータトロン振動のダイポール振動が見えている



遅い振動成分：シンクロトロン振動のダイポール振動が見えている



## 後半の概要:

- 1 ビーム調整前のビーム蓄積について
- 2 ビーム調整シナリオ
- 3 ビーム調整
  - ・ COD補正
  - ・ チューン補正
  - ・ クロマティシティ補正
  - ・ ベータ関数と分散関数の補正
  - ・ 線形結合共鳴補正とy方向分散関数補正
  - ・ 光軸補正
  - ・ 入射軌道補正
  - ・ 入射タイミング補正
- 4 加速器の高度化に向けての加速器調整例
  - ・ 振幅依存チューンの測定

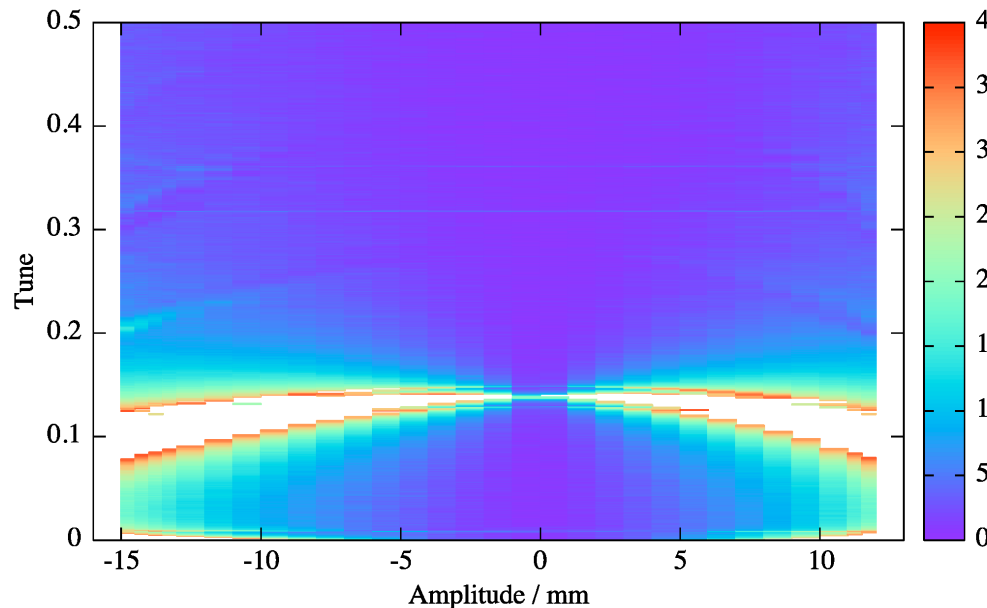


# 振幅依存チューンシフト測定

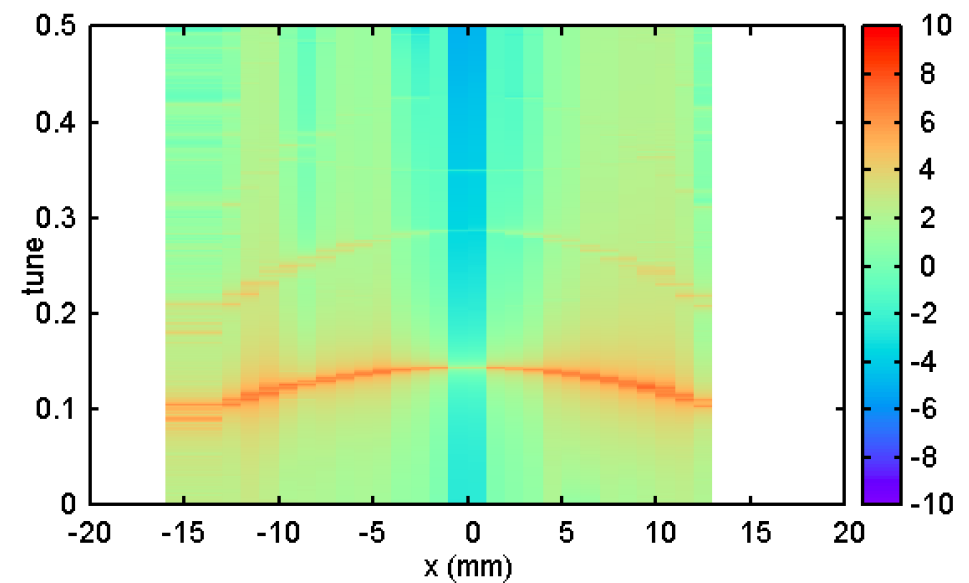
入射用のバンプ電磁石の蹴り角を変えながら、蓄積ビームのダイポール振動をSPBPMで観測する

## 振幅依存チューン ( $Q_x$ vs $x$ )

測定結果 (M. Takao)



計算結果



横軸：初期振幅  
縦軸：FFTスペクトル

-4.03600, 0.268152

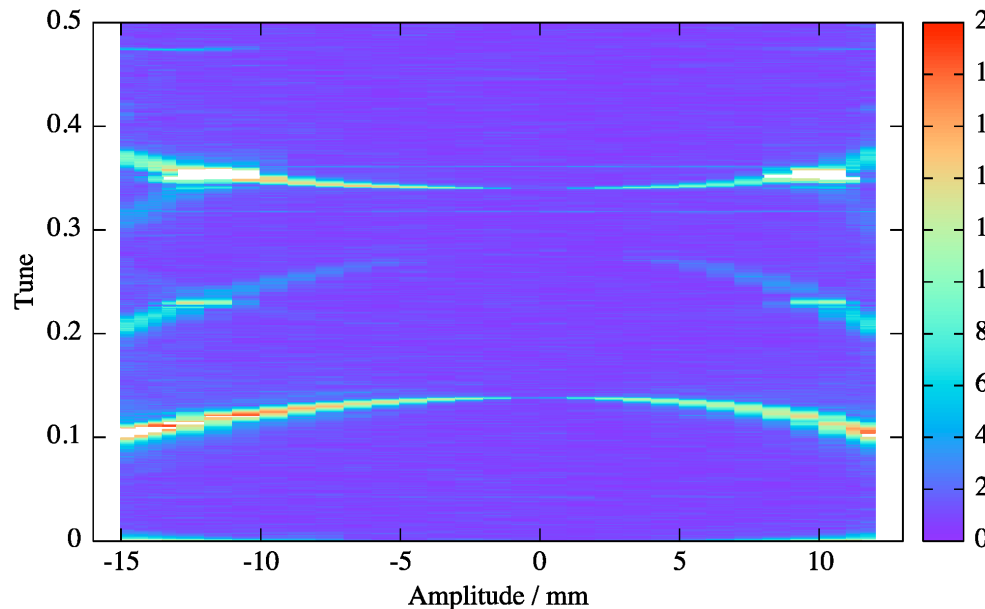
非線形共鳴のスペクトルなどを見ることができる

# 振幅依存チューンシフト測定

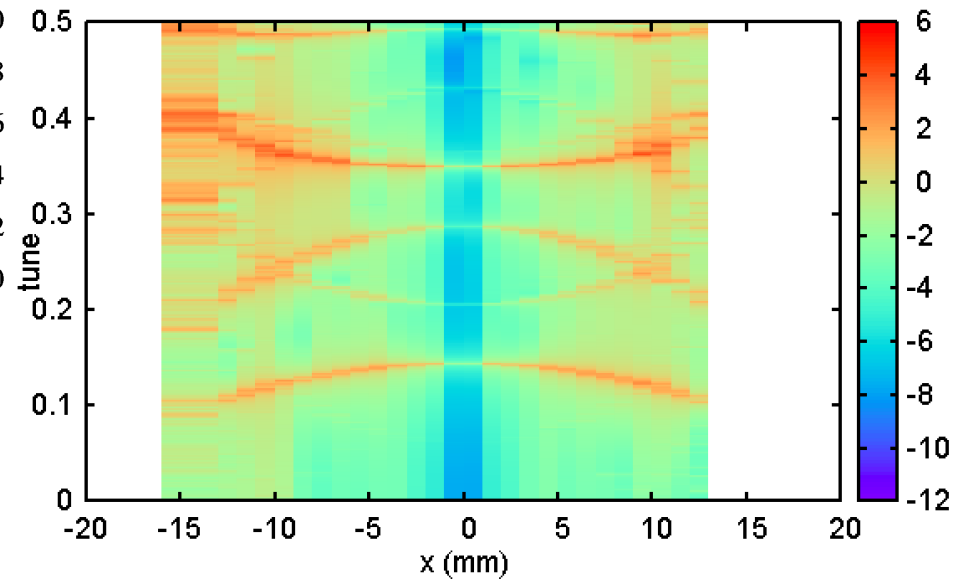
入射用のバンプ電磁石の蹴り角を変えながら、蓄積ビームのダイポール振動をSPBPMで観測する

## 振幅依存チューン ( $Q_y$ vs $x$ )

測定結果 (M. Takao)



計算結果



横軸：初期振幅  
縦軸：FFTスペクトル

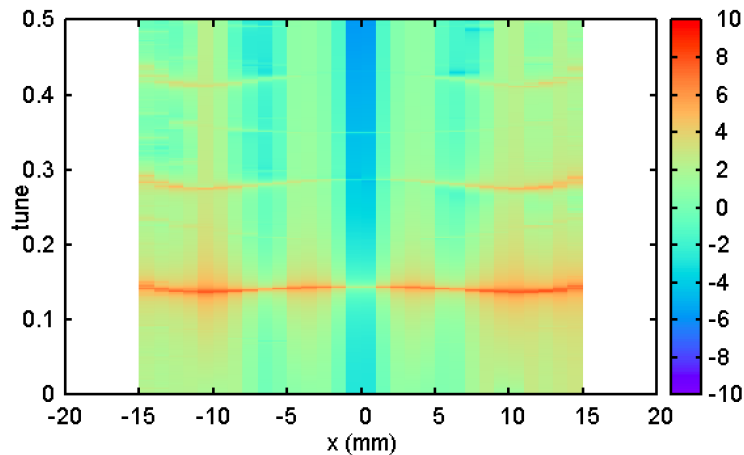
5.36518, 0.220899

非線形共鳴のスペクトルなどを見ることができる

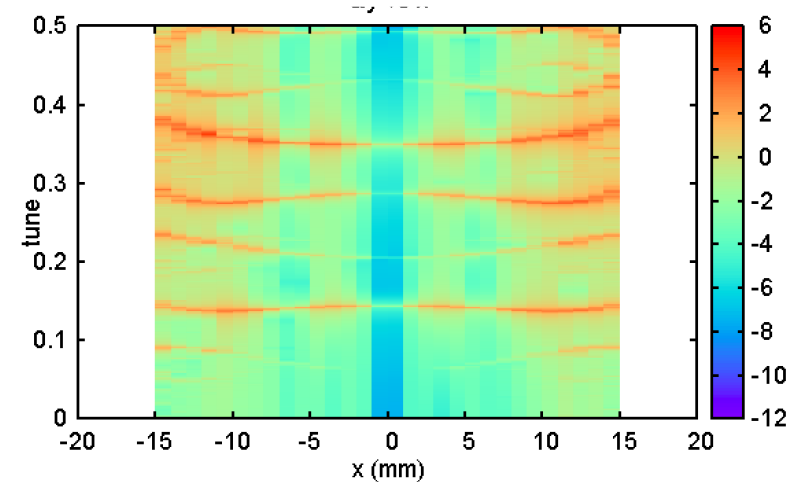
# 振幅依存チューンシフト測定

計算機内の加速器モデルで測定結果を再現できたら、加速器性能が改善するように機器パラメータを調整する（今回は六極磁場を調整）

横軸：初期振幅 振幅依存チューン（改善例：計算予想）  
縦軸：FFTスペクトル  $Q_x$  vs.  $x$   $Q_y$  vs.  $x$

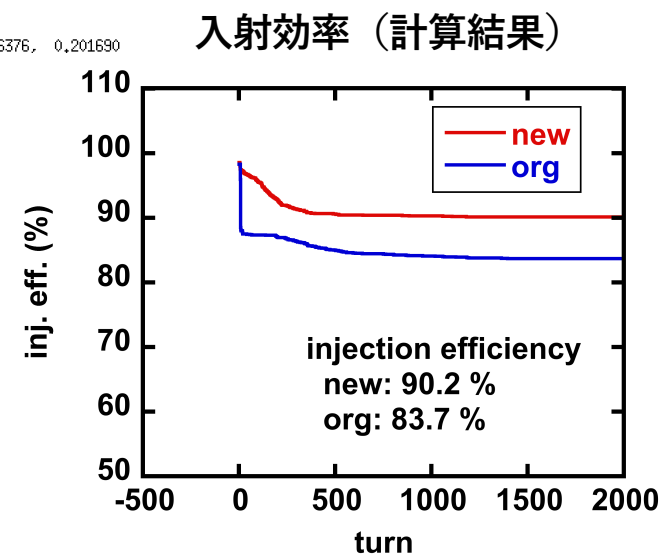


1.72378, 0.173838



2.26376, 0.201690

振幅依存チューンシフトの改善により、  
入射効率の改善が期待できそう



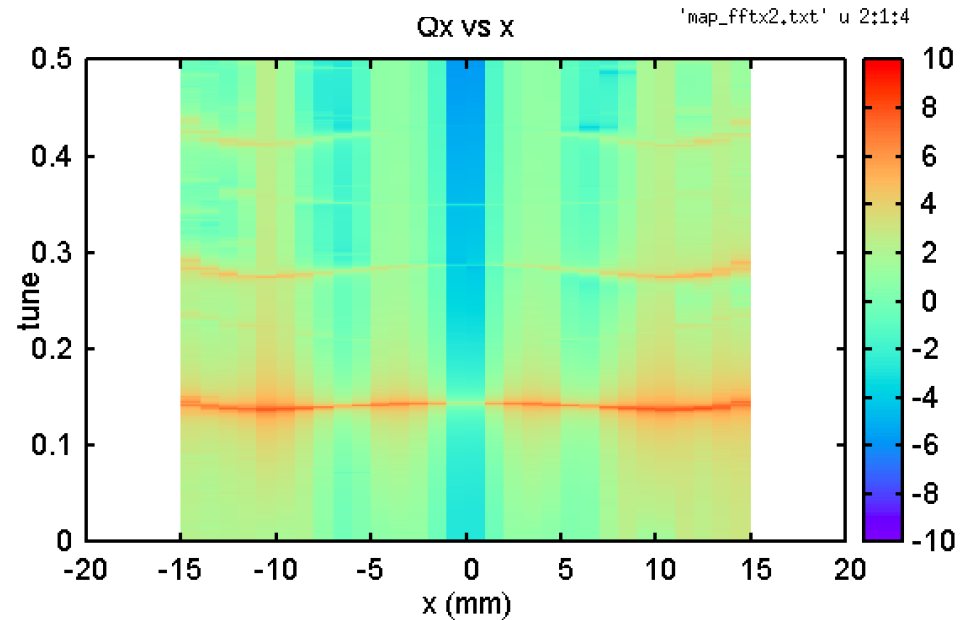
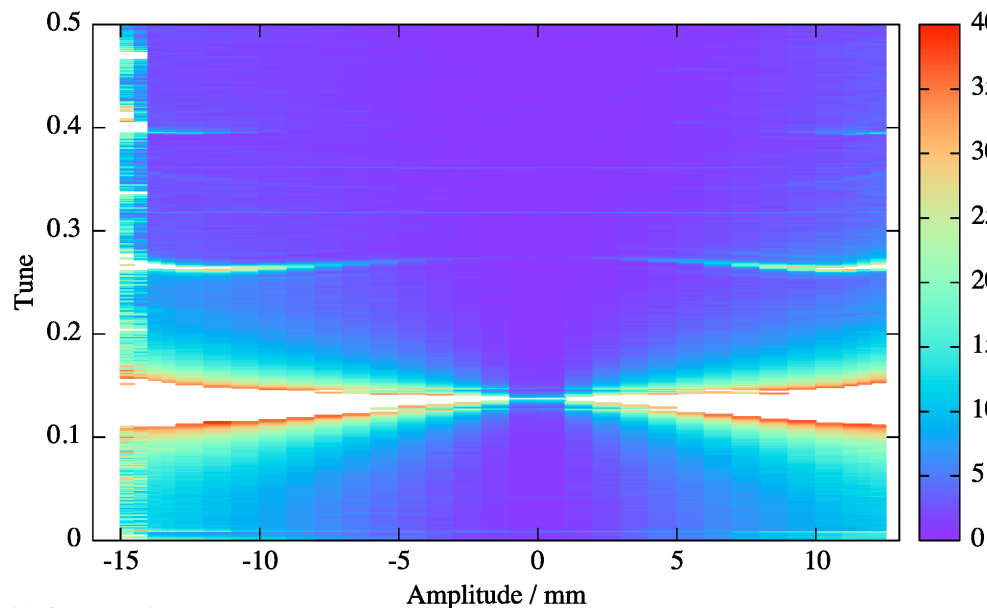
# 振幅依存チューンシフト測定

計算で求めた六極磁場を実際の加速器に適用した。

## 振幅依存チューン ( $Q_x$ vs $x$ )

測定結果 (M. Takao)

計算結果



横軸：初期振幅  
縦軸：FFTスペクトル

1.72378, 0.173838

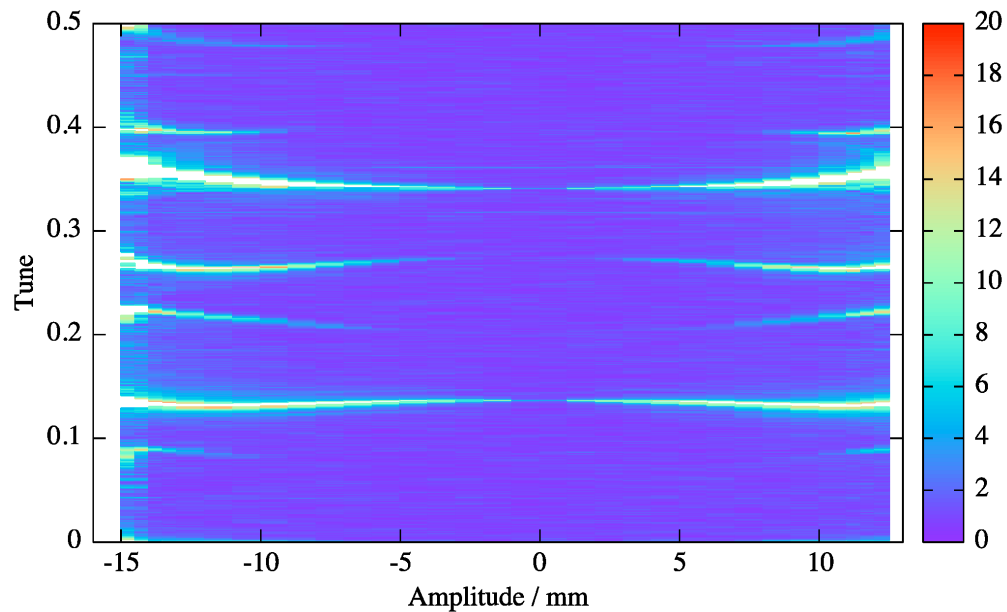
計算結果をほぼ再現

# 振幅依存チューンシフト測定

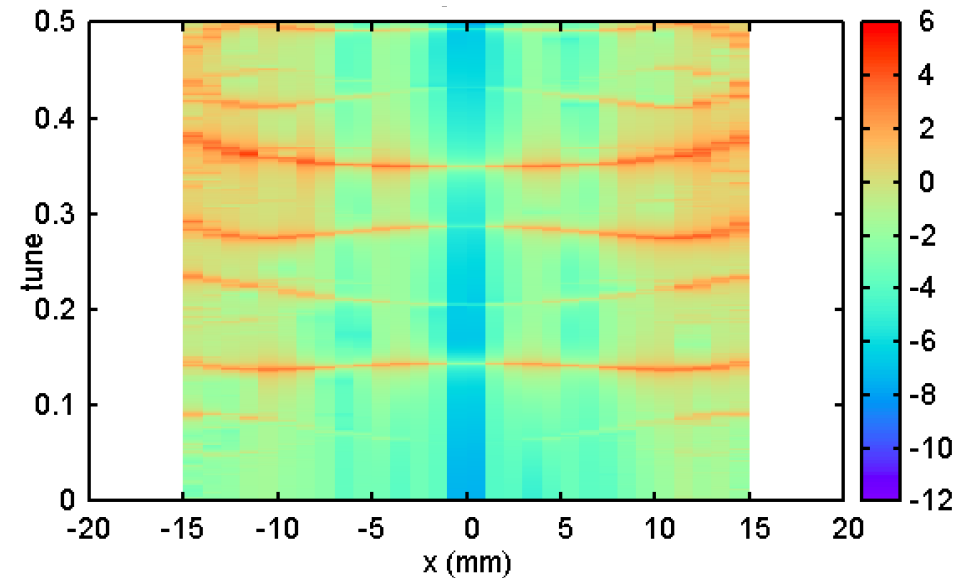
計算で求めた六極磁場を実際の加速器に適用した。

## 振幅依存チューン ( $Q_y$ vs $x$ )

測定結果 (M. Takao)



計算結果



横軸：初期振幅  
縦軸：FFTスペクトル

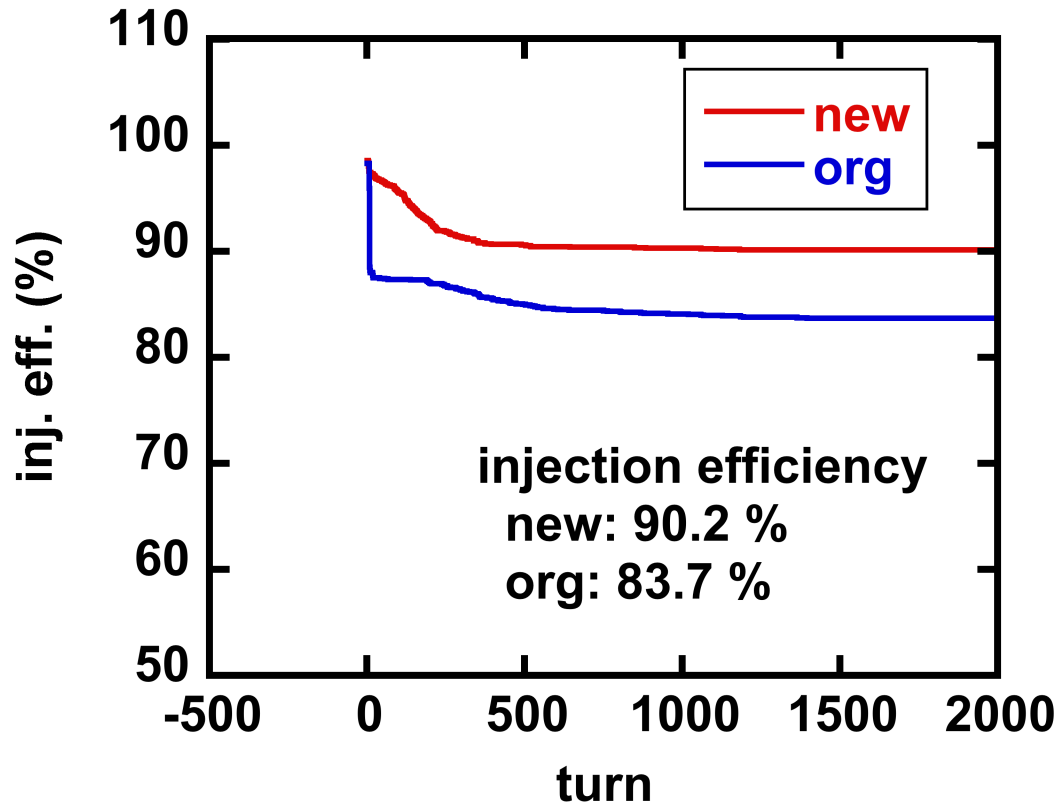
2,26376, 0,201690

計算結果をほぼ再現

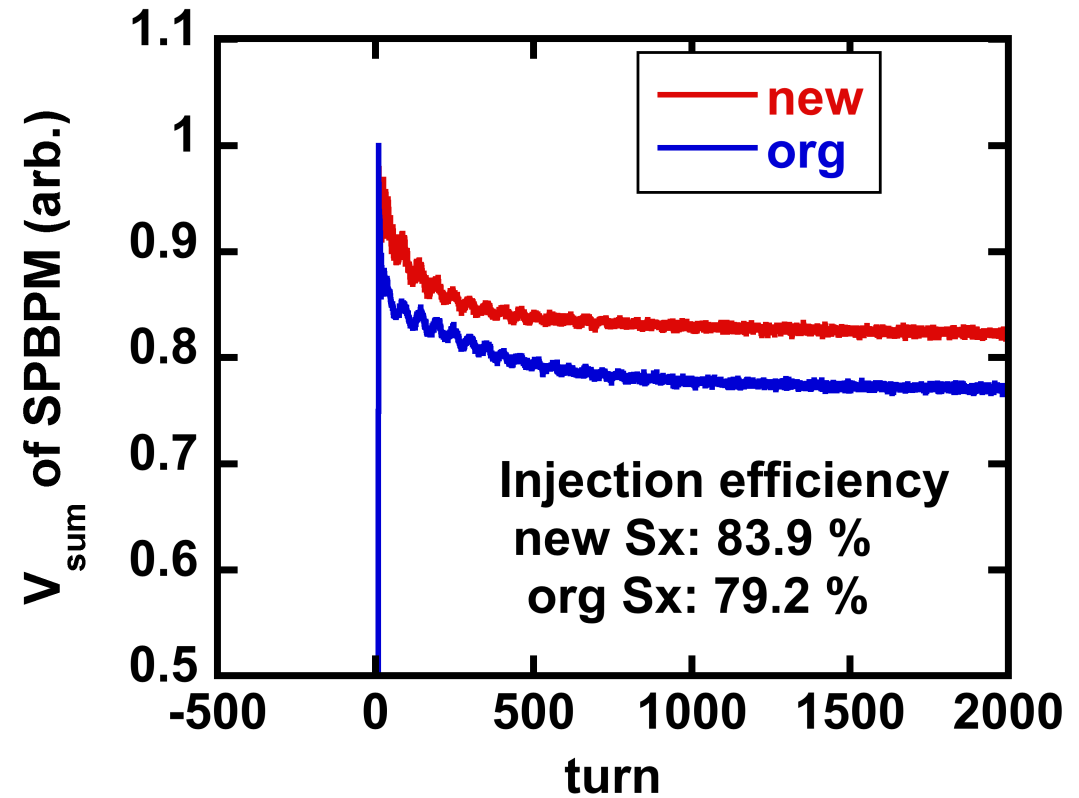
# 入射効率測定

SPBPMの和信号で、ビームの入射効率を測定した。

計算結果



測定結果



- ・ 入射効率測定に関して、測定結果は計算結果を定性的に再現。
- ・ 六極磁場変更後、入射直後20ターン以内に生じる急峻なビームロスが無くなった

# まとめ

ビーム調整の目的：

- 1 ユーザー実験のために、ビーム条件の再現性を確保する。
- 2 機器の故障・放射化を避けるために、ビームロスを抑制する。
- 3 加速器の高度化に向けた試験。

これらの目的のためには

- ・ 加速器内での現象を確認するためのモニター
- ・ 現象を制御するためのコレクター
- ・ 「モニターの信号」を「現象の制御」につなげるための知識が必要になる。

今回、電子蓄積リングにおけるビーム調整の一例を紹介した。  
他の講義ではモニターの詳細についての講義がなされるものと思う。