

SADとEPICSを使った 仮想加速器

広島大学院・理 物理学専攻

博士課程後期 1年 クォーク物理学研究室
(原子力機構 加速器開発グループ 軌道計算グループ)

原田 寛之

2006年9月6日(水) Workshop SAD 2006 at KEK

mail : harada@hepl.hiroshima-u.ac.jp



はじめに

J-PARC 3 GeV RCSではビーム出力1MWを目指している。この大強度出力ゆえに、機器の保守が可能となるリング内のビーム損失割合は、 10^{-3} 程度(1kW)と従来の加速器と比較して極めて厳しく、ビーム損失抑制が大きな課題となる。そこで、計算機上に構築した仮想加速器を制御サーバの下に実加速器と並列に配した制御モデルに基づく運転・調整を推進する。

目的

J-PARC 3 GeV RCSにおいて、実加速器と同等に見える仮想加速器の構築を目指す。

RCSの初期コミッショニング時(day-1)に向け、仮想運転(dry run)や仮想調整(dry commissioning)を可能とする仮想加速器の構築を目指す。

この仮想加速器を用いて、実加速器におけるビームコミッショニング用加速器制御端末(Operation Interface, OPI)の作成、上位系制御システムの検証を目指す。

実加速器と同等に見える 仮想加速器の構築

2006/09/06

SADとEPICSを使った仮想加速器
原田寛之@SAD2006

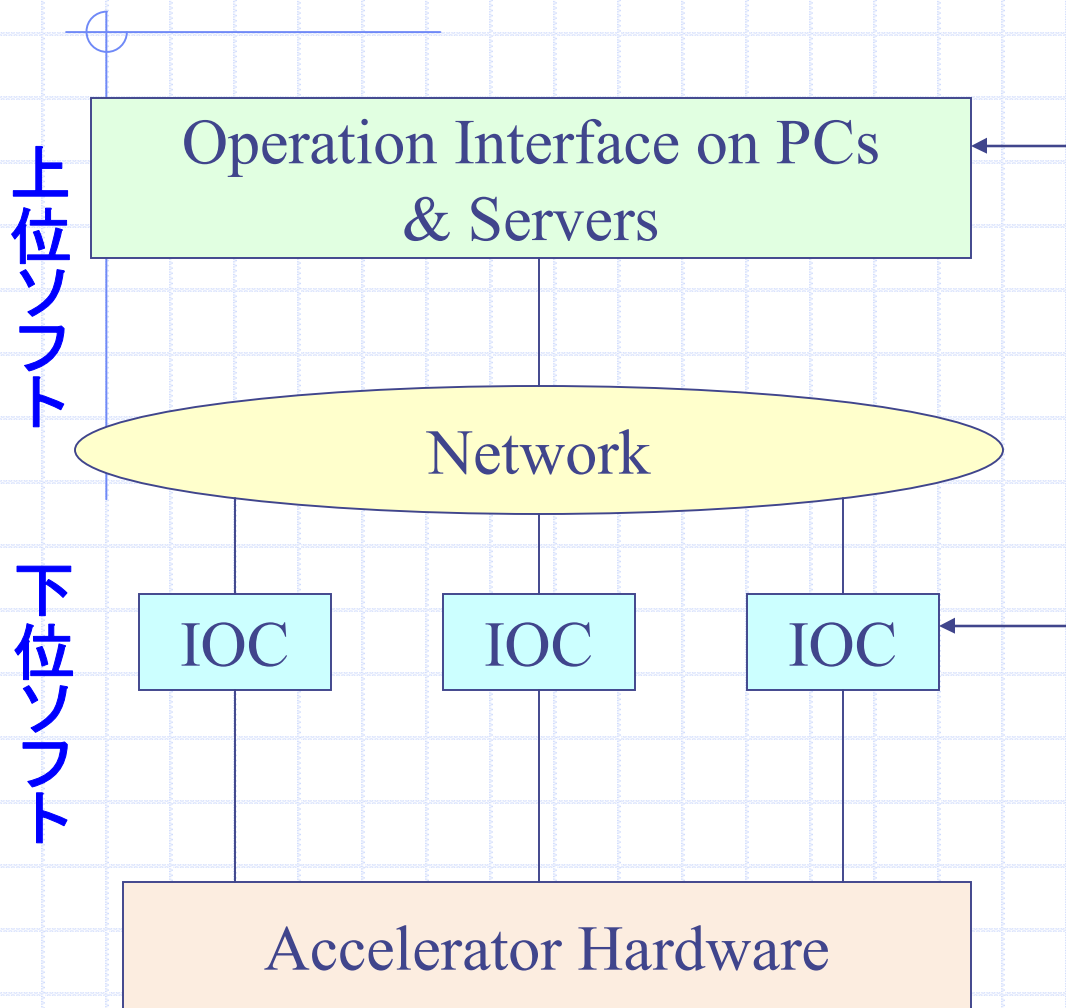
4

EPICS

(Experimental Physics and Industrial Control System)

- ◆ 分散型ネットワークベース制御システム
- ◆ 通信プロトコル
 - Channel Access (TCP/IP, UDP/IPベース)
 - 機器へのデータの読み出し、書き込みは機器種類によらず、EPICSチャンネル名を用いて全く同等に行う
 - ◆ 上位系制御コード製作が容易
 - イベント通知機能 (モニタ)
 - ◆ 読み出し値が変化したことを自動的に通知
 - IOC上にEPICSランタイムデータベース (メモリ上) が存在 (分散型データベース)

EPICSに基づく加速器制御



加速器制御端末(OPI)

機器へのデータの読み出し、書き込みは機器種類によらず、EPICSチャンネル名を用いて全く同等に行う

→ 上位からは各機器に対応したEPICSチャンネルしか見えない

Input/Output Controllers(IOC)

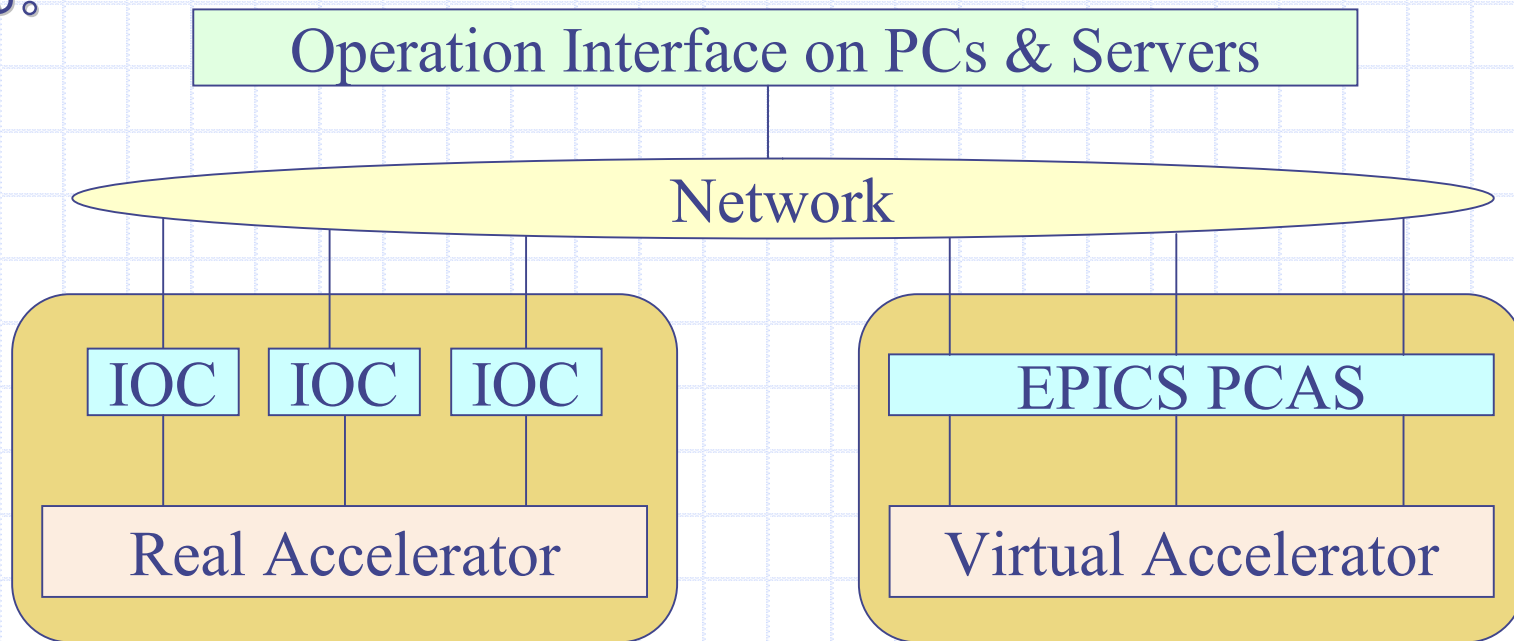
EPICS databaseを持つ

- 各機器の信号に対応したチャンネルの定義

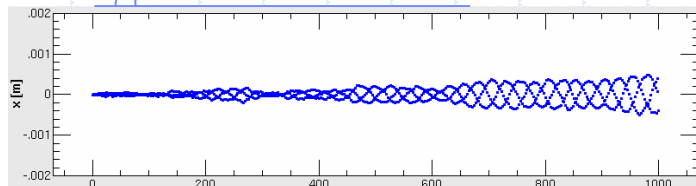
- 簡単な演算が可能

仮想加速器を組み込んだ 制御モデル

運転者ならびに上位系制御から見て、実加速器と仮想加速器は同等に見える。これによって、仮想加速器を用いて実加速器におけるOPI作成や上位系制御システムの検証が可能となり、仮想加速器において仮想運転ならびに仮想調整が可能となる。また、実加速器と直接の比較が可能となる。



仮想加速器の制御モデルの枠組み(基本モデル)の構築



周回ごとのビーム重心[m]

加速器制御端末
(with CA Client)

モニタ値

磁場設定

ネットワーク

制御サーバ
(EPICS PCAS)

ネットワーク

モニタ値

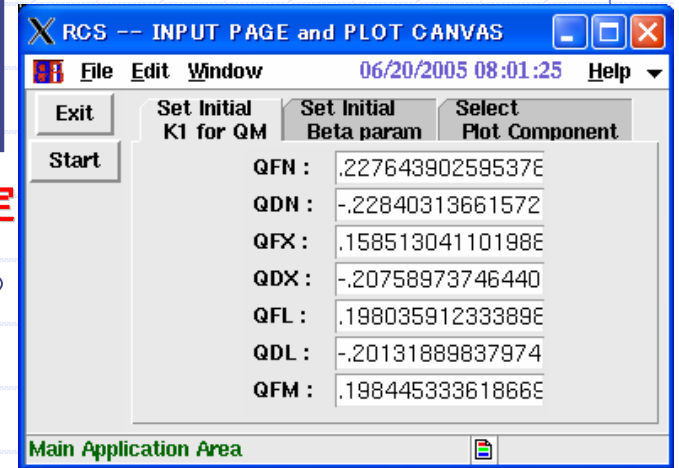
磁場設定

仮想加速器

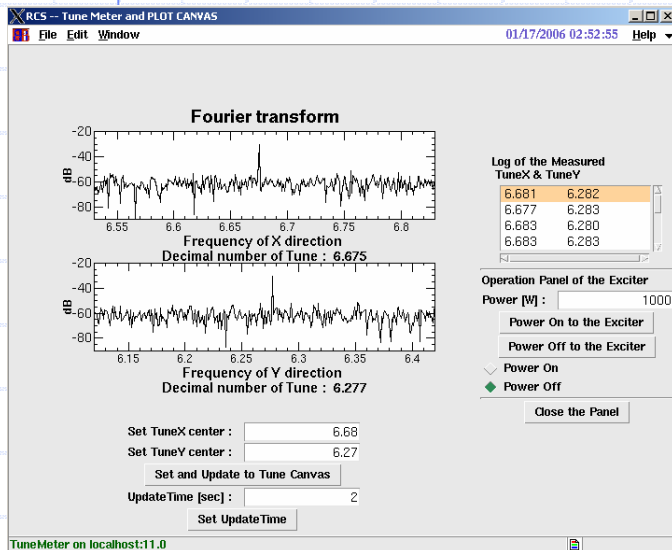
(with CA Client)
加速器モデル(SAD)

周回計算

(TrackParticles)

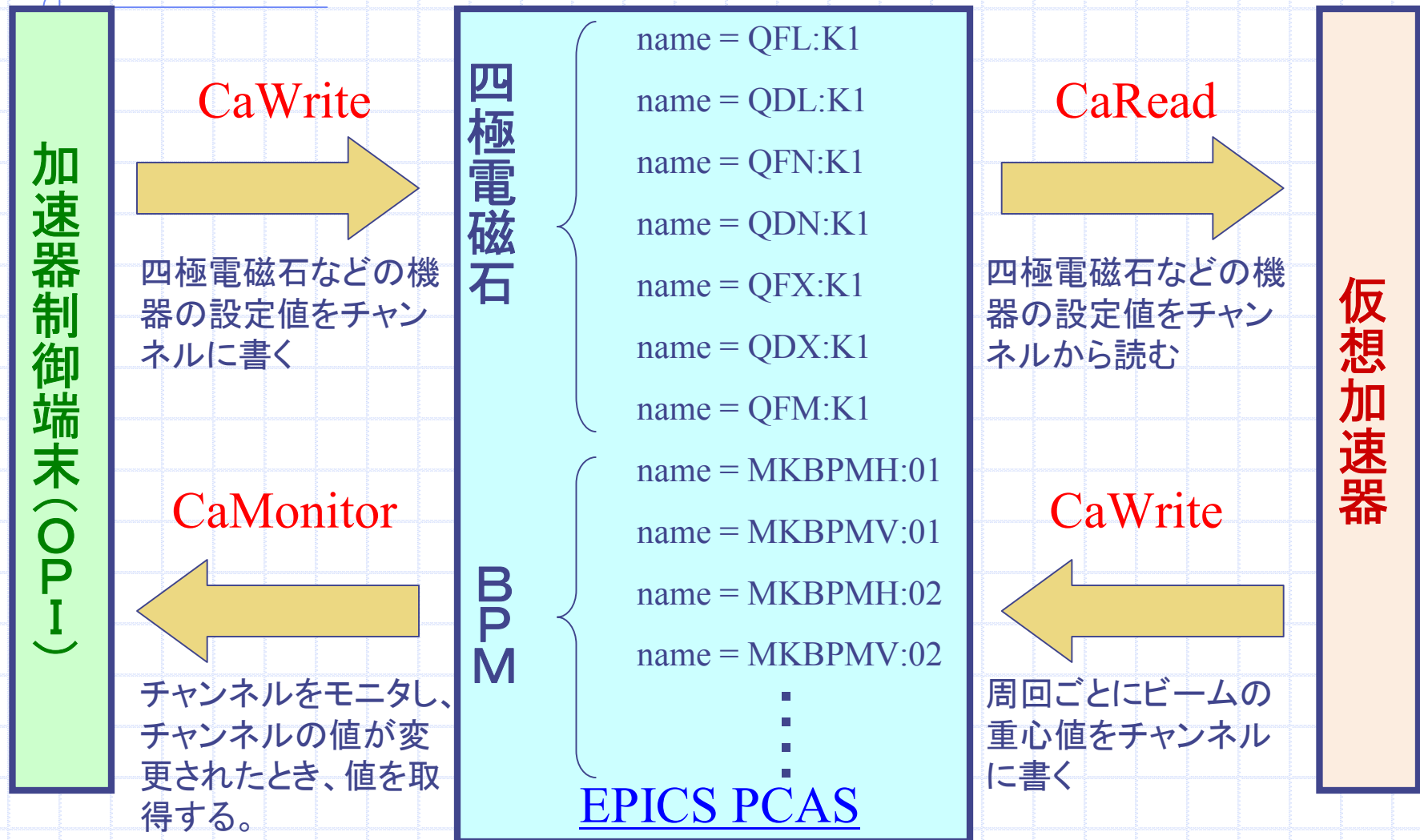


四極電磁石用OPI



チューン測定用OPI

仮想加速器の制御モデルにおけるCA Client機能を用いた出入力



仮想運転 (*dry run*) や 仮想調整 (*dry commissioning*) を 可能とする仮想加速器の構築

仮想加速器の機器および実装

本研究では、仮想調整(dry commissioning)を行うために必要な機器をSAD scriptを用いて仮想加速器に実装した。

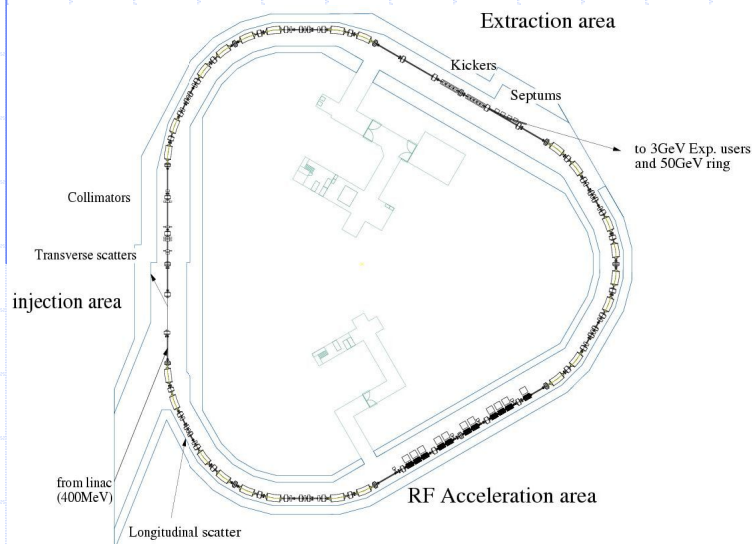
ビーム位置検出器 BPM (制御出力:ビーム重心値 [m]) → ビーム位置検出

横振動励起装置 Exciter (制御入力:電力値 [W]) → ベータロン振動数測定

高周波加速空洞 RF (制御入力:周波数、電圧 [V]) → off-momentumスタディ

ビーム位置検出器 (BPM)

ビーム位置検出器は、ビームが通過した際に電極に誘起される電圧の非対称性より、ビーム重心を測定する装置である。



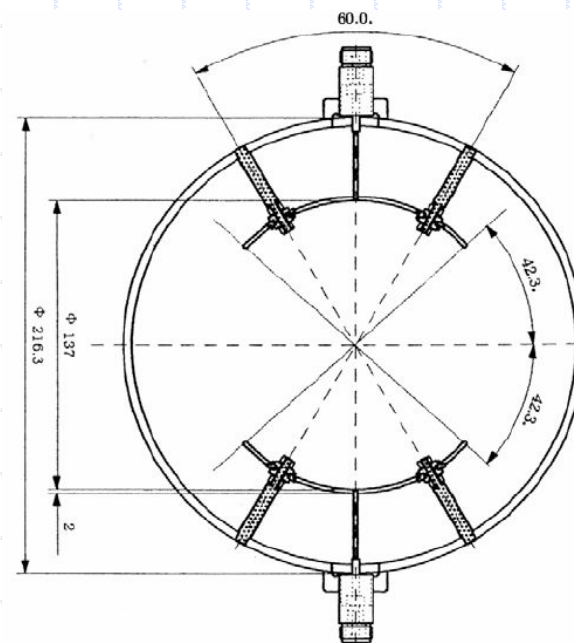
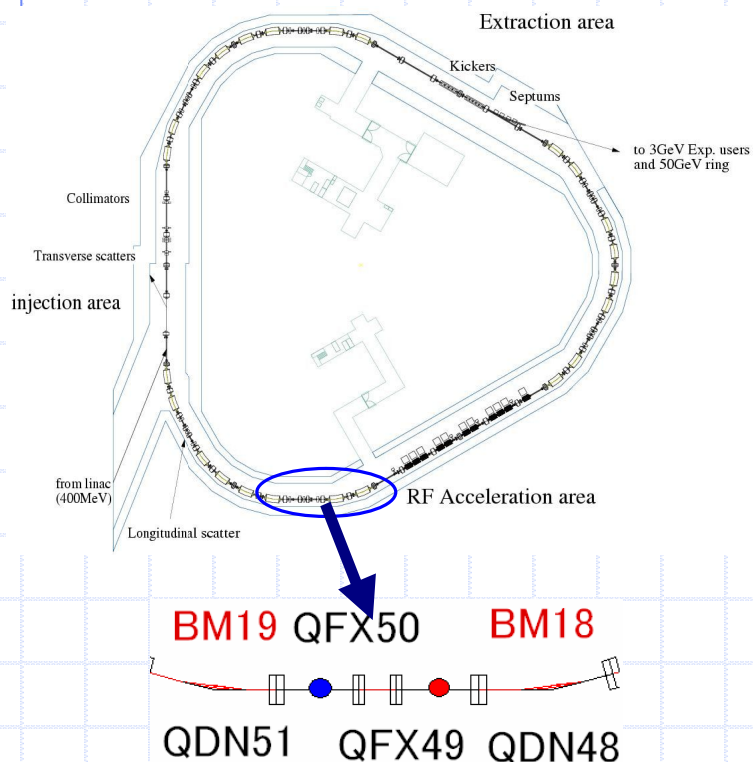
ビームが通過した際に、ビームの重心値(現状:多粒子の平均値)を出力する機能を仮想加速器に実装した。

測定精度に制限を与える要因を一括し、分解能 σ としてBPMに実装した。

RCSではリングに54台設置する

横振動励起装置 (Exciter)

エキサイタとは、ストリップ型電極に任意波形発生器より帯域制限白色ノイズを入力し、ベータトロン振動との共鳴を利用して強制的に横方向振動を与える装置である。



エキサイタ電極の断面

赤丸: 水平方向エキサイタ、青丸: 垂直方向エキサイタ

RCSにおけるエキサイタ

$$\theta_{rms} \approx \frac{eL}{pc} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) Ex$$

$$Ex = \frac{\sqrt{ZP}}{d}$$

θ_{rms} はエキサイタによるキック角、 p はビームの運動量、 β はローレンツベータ、 c は光速、 P はアンプから供給されるパワー、 L はエキサイタの長さ、 d は電極の距離、 Z はアンプから見た負荷側のインピーダンス、 Ex は電場である。

	RCS
L (m)	0.81
p (GeV/c)	0.61 → 3.82
Z (Ω)	100
P (W)	1000
d (m)	0.509

表. RCS-Exciterのパラメータ

例、400 MeVの場合

$$\theta_{rms} \approx \frac{0.81}{0.954 \times 10^9} \left(1 + \frac{1}{0.713}\right) \frac{\sqrt{100 \times 1000}}{0.509}$$

$$= 1.267 \times 10^{-6} = 1.267 \mu rad$$

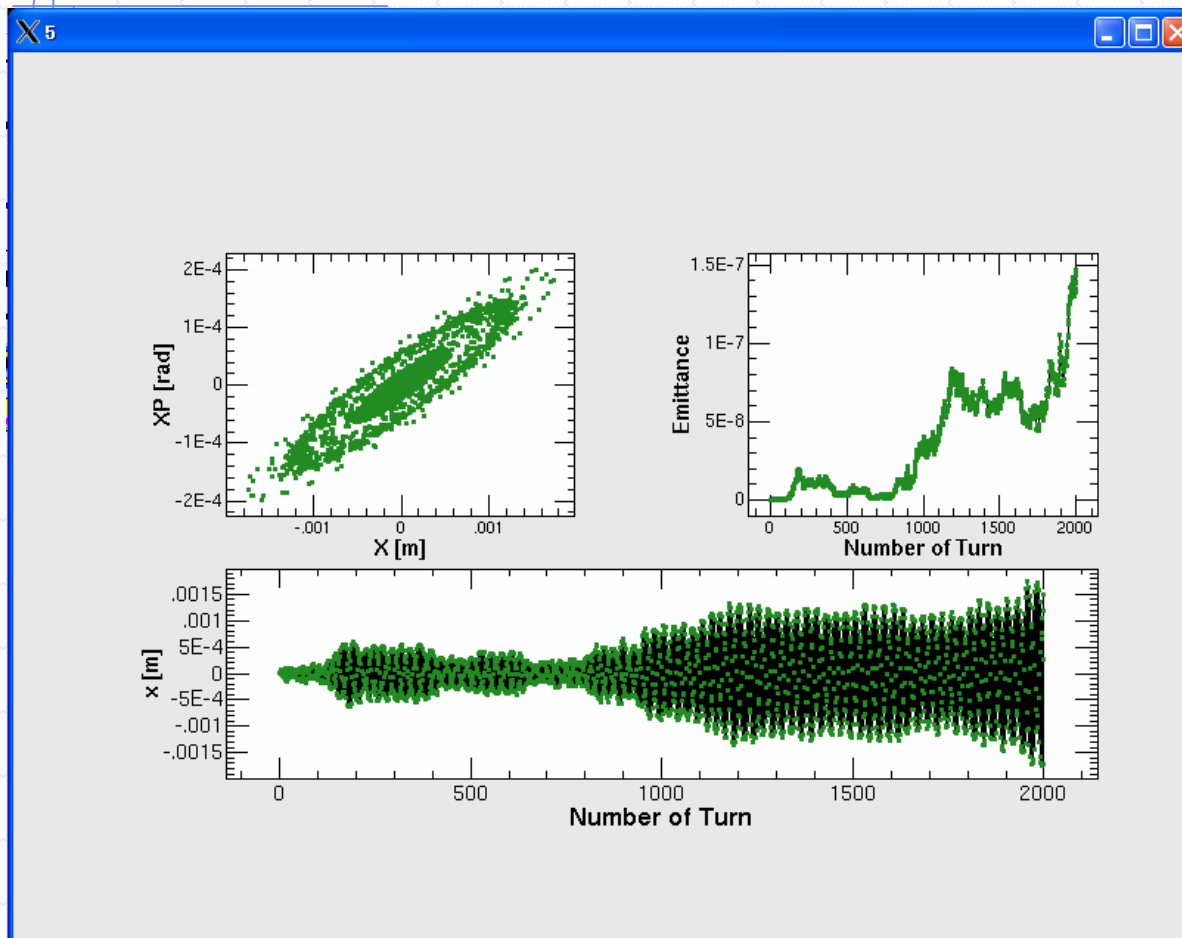
リングの一ヶ所で周回毎に、エキサイタによりビームに横方向キック $\Delta x'$ を与える。

$$\Delta x'_n = \theta_{rms} \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{j=0}^{N-1} \cos\left[2\pi \frac{\Omega_j}{\omega_0} n + \phi_j\right]$$

$$\Omega_j = \Omega_0 + j \frac{\Delta\Omega}{N-1}$$

このエキサイタのキックの周波数スペクトルは、周波数 $\Delta\Omega$ の帯域制限白色ノイズで、周波数 Ω_j 、ランダムな初期位相 ϕ_j 、振幅一定の線スペクトル N 本から成っているとす。式中の n は周回数である。

エキサイタの帯域制限白色ノイズによる1 粒子の振る舞い



1粒子を $(x, x')=(0, 0)$ に配置し、
周回計算を行った。

水平方向ベータatron振動数
→ $\nu_x = 6.68$

周回数→2000

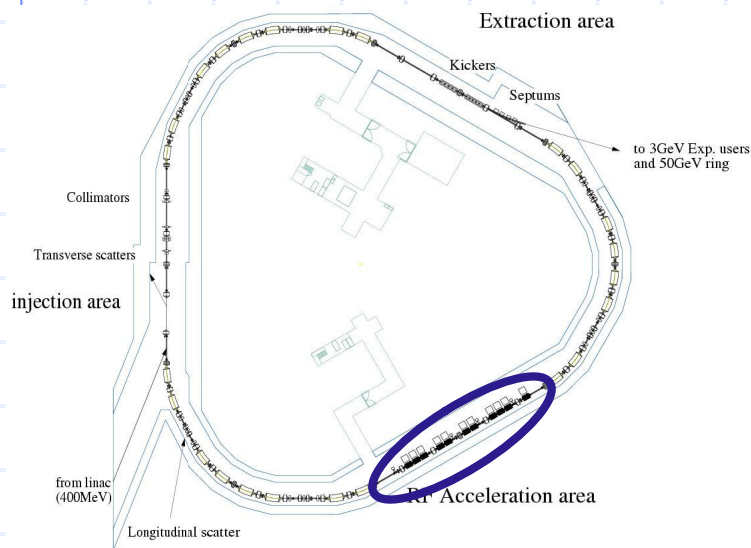
帯域制限→ $0.5 \cdot \text{frev}$ から $1.0 \cdot \text{frev}$

スペクトル数→500

スペクトル間隔→ $0.001 \cdot \text{frev}$

高周波加速空洞(RF)

ビームの減速・加速を行う装置であり、off-momentumのビームスタディを行うために、仮想加速器に実装した。



$$\left\langle \frac{\Delta p}{p} \right\rangle = - \frac{\Delta f / f}{\alpha - 1/\gamma^2}$$

$\Delta f/f$: RF frequencyの変動比率

α : momentum compaction factor

γ : Lorentz gamma

11台分の高周波加速空洞を1台として、仮想加速器に実装した。電圧と周波数で制御を行い、エネルギーおよび運動量の変化を可能した。現在、加速は行っていない。

RCSでは、直線部の11台の高周波加速空洞で加速・減速を行う

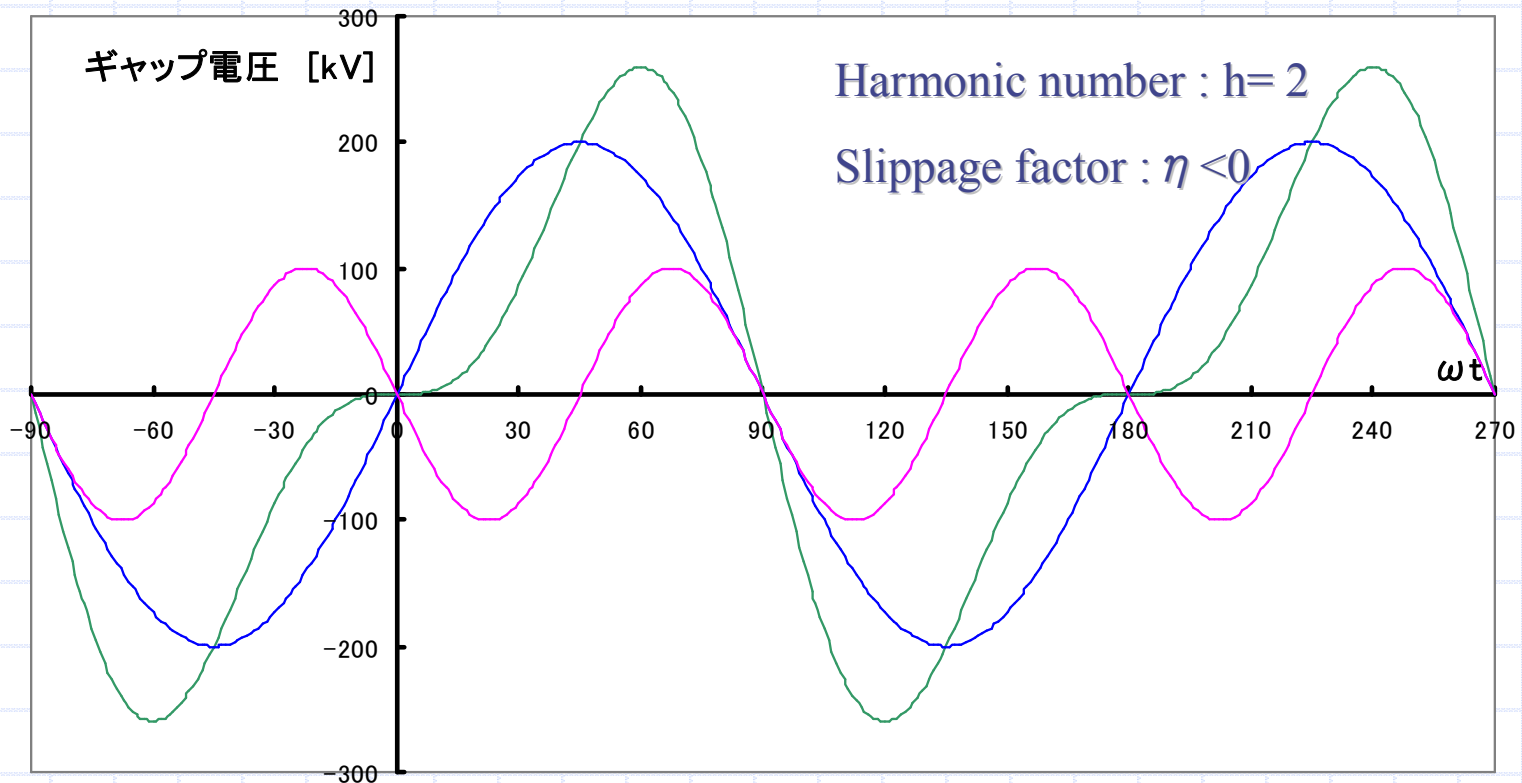
SADとEPICSを使った仮想加速器
原田寛之@SAD2006

2006/09/06

16

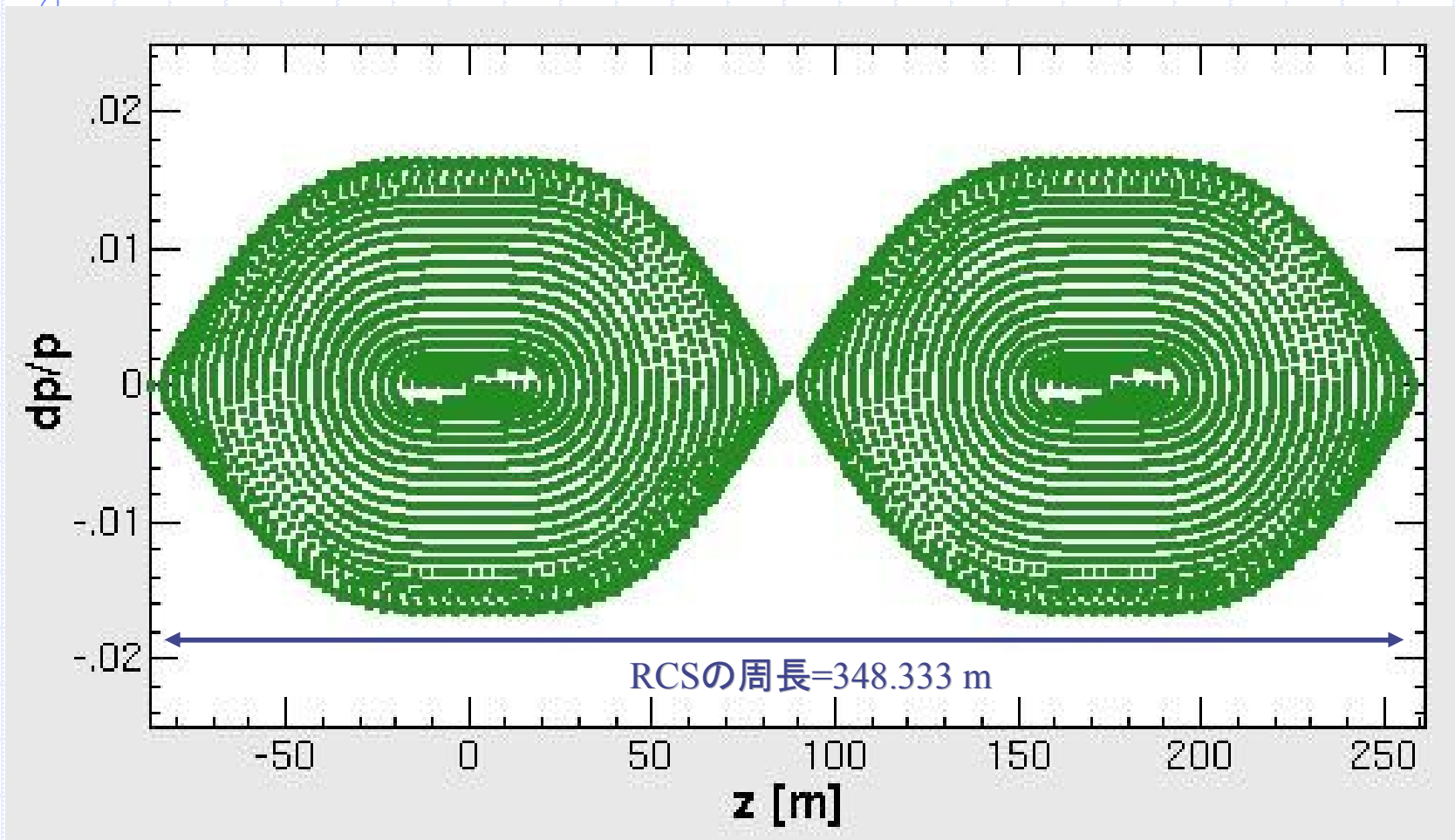
RF波形(単調波+2倍高調波)

RF波形



— 単調波+2倍高調波 — 単調波 — 2倍高調波

RF Bucket



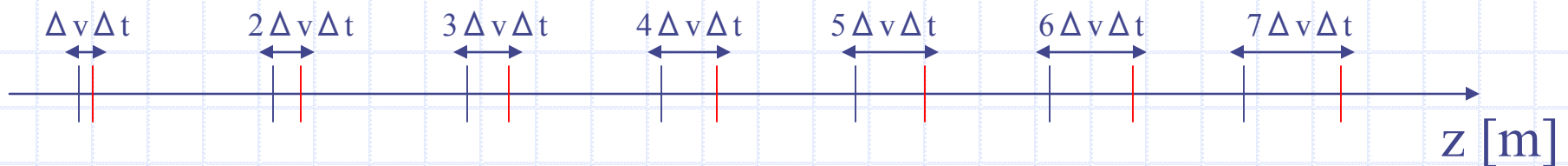
RFによるビームの運動量変化

縦方向の運動において、 $\Delta p/p=0$ 、縦方向 $z=0$ の粒子を同期粒子と定義している。そのため、運動量を変化させるためにRFの振動数を変化させた場合、新たな同期粒子($\Delta p/p \neq 0$)は、以下の図のように次第に z の値が大きくなっていく。そこで、周回毎に $\Delta v \Delta t$ を z から引くことで、同期粒子($\Delta p/p \neq 0$)の縦方向の位置が常に $z=0$ になるようにした。

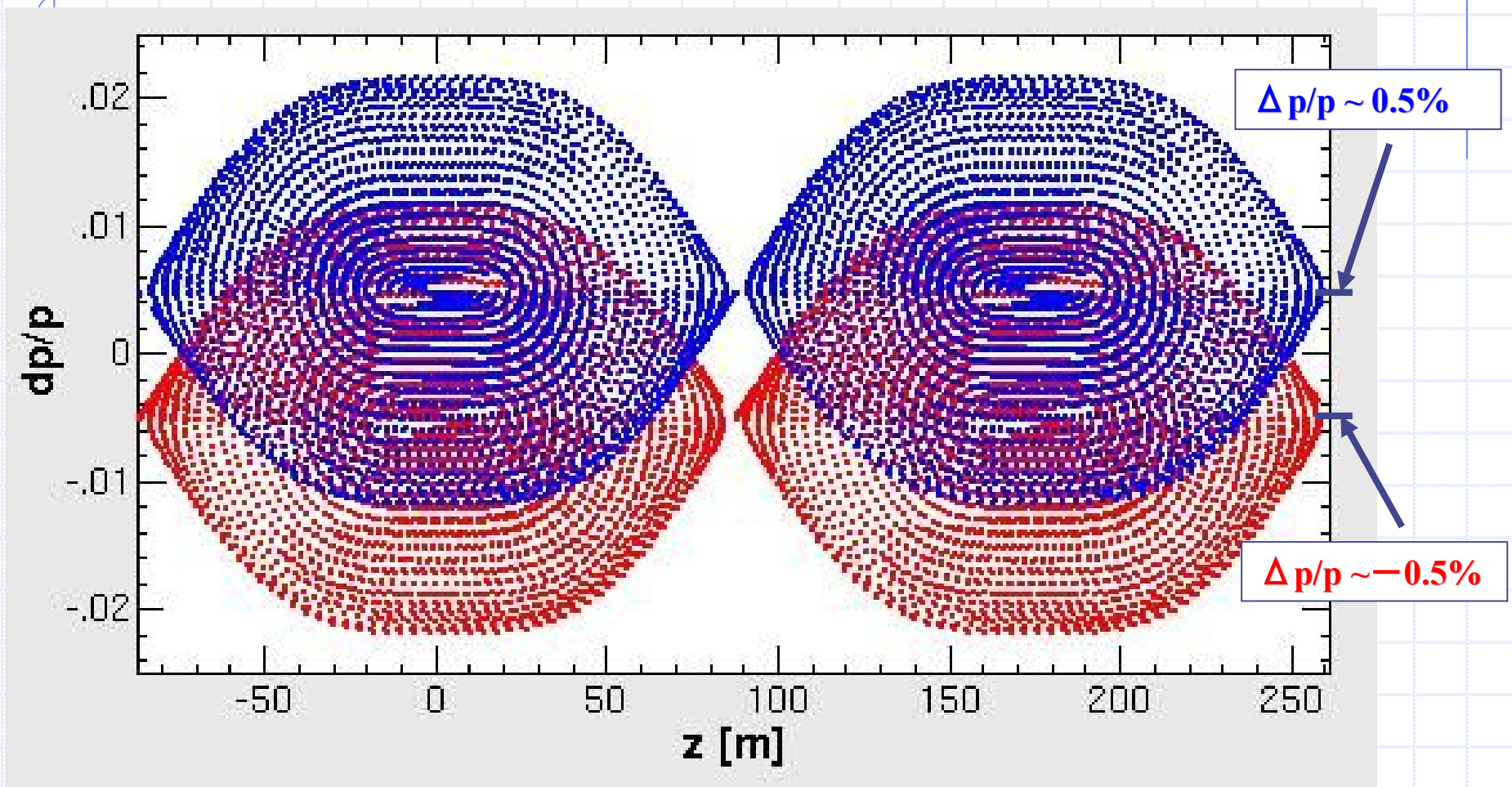
$dp/p = 0\%$ のとき, 運動量 p_0 , 速度 v_0 , 周期 t_0

$dp/p = 0.1\%$ のとき, 運動量 p_1 , 速度 v_1 , 周期 t_1

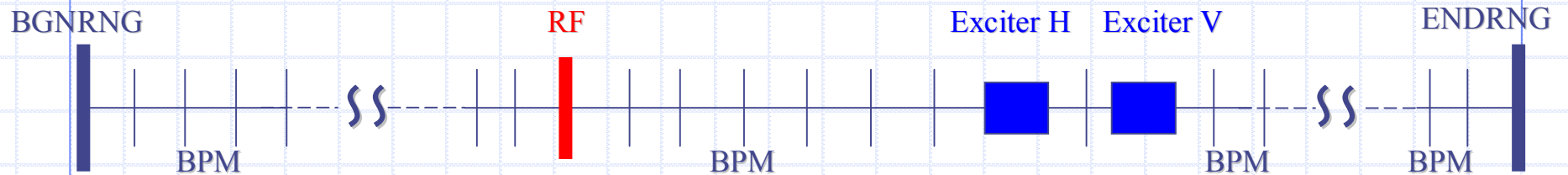
$$\Delta v = v_1 - v_0, \Delta t = t_0 - t_1$$



RF Bucket ($\Delta f/f \neq 0$)



仮想加速器における TrackParticlesを用いた周回計算



<周回コマンド>

```
TrackParticles[ {element1, {x, x', y, y', z, dp/p} }, element2];
```

この機能を用いて、RingのはじめからBPM、また各BPM間で周回計算を行い、各BPMにおけるビーム重心を求め、出力する。

RFでは、外部(SAD script)で各粒子に対して加速・減速を行い、再度周回計算に戻し、Exciterでは、外部で各粒子に対してキックを与え、再度周回計算に戻す。

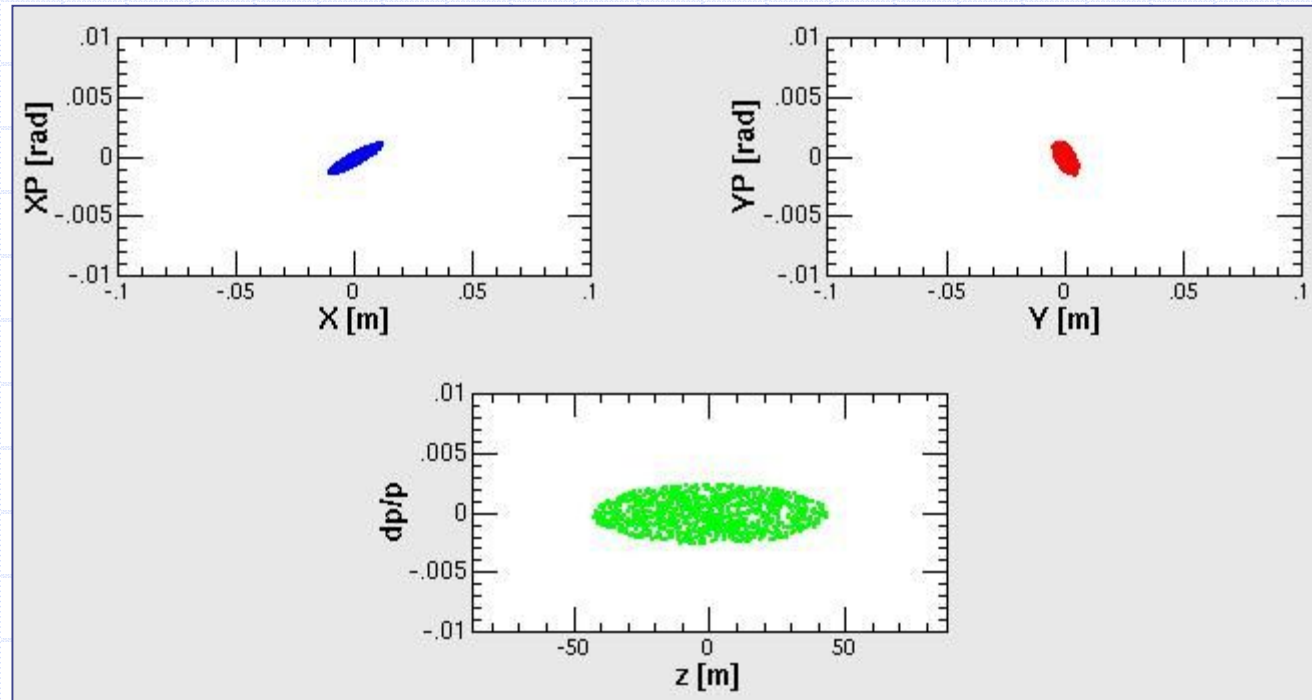
仮想加速器を用いた仮想運転と 仮想調整

2006/09/06

SADとEPICSを使った仮想加速器
原田寛之@SAD2006

22

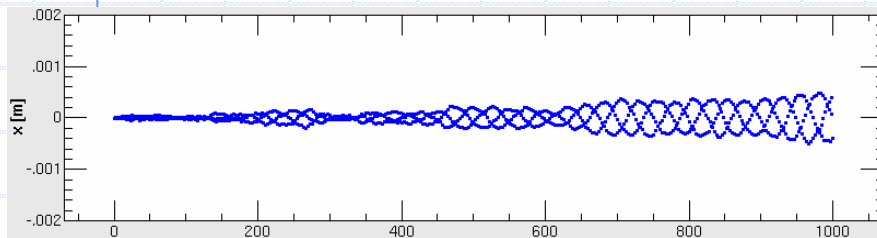
Initial Beam



水平方向、垂直方向 エミッタンス: 4π mm-mrad

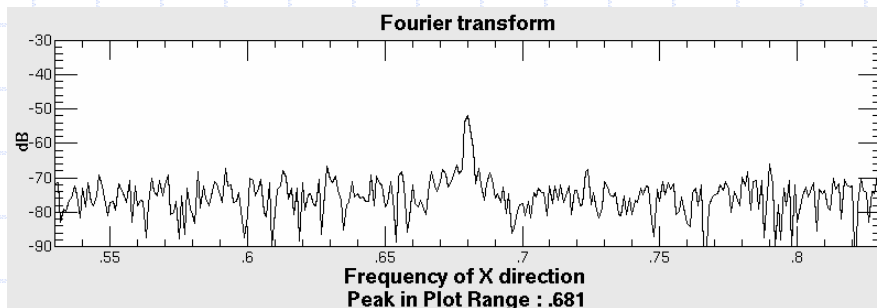
仮想加速器における 各種パラメータの測定例

ベータatron振動数測定



エキサイターによる振幅の増大

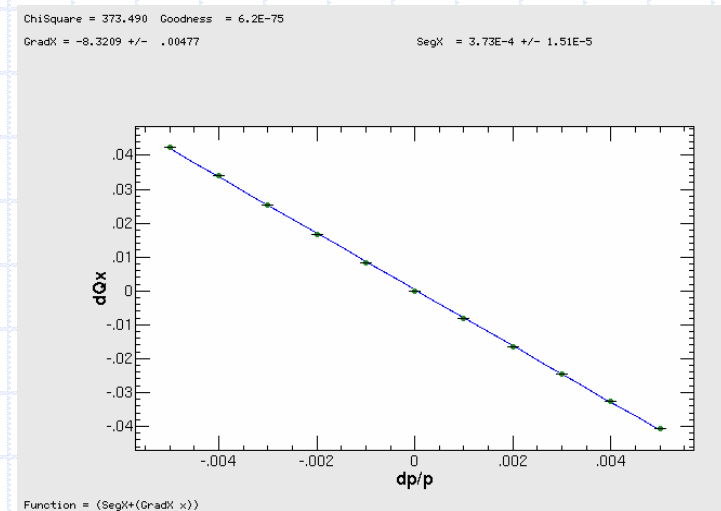
横軸: 周回数 [周]、縦軸: ビーム重心値 [m]



周波数解析スペクトル

横軸: 振動数の端数、縦軸: 出力密度[dB]

クロマティシティ測定



運動量のずれに対する水平(x)方向
ベータatron振動数のずれ

$$\xi_x = -8.321 \pm 0.005$$

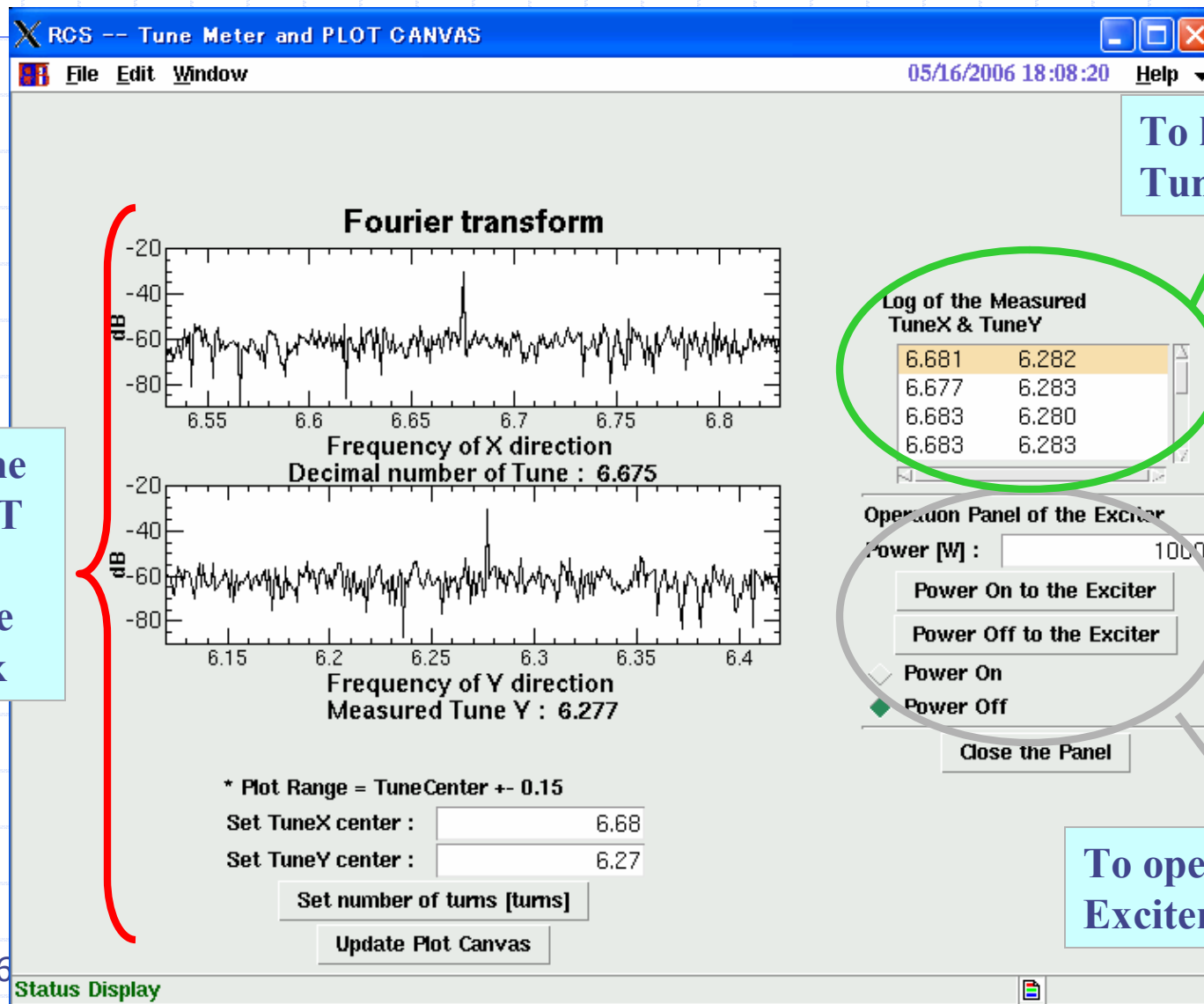
加速器制御端末OPIの作成、 上位系制御システムの検証

2006/09/06

SADとEPICSを使った仮想加速器
原田寛之@SAD2006

25

チューン測定用OPIの素案



To plot the result FFT and to search the tune peak

To log the Tune X & Y

To operate the Exciter

本研究のまとめ

- ◆ 実加速器と同様に見える仮想加速器の枠組みを、SADとEPICSを用いて構築した。
- ◆ SAD TrackParticlesの周回計算機能を用いて仮想ビームを模擬した。
- ◆ SAD scriptでBPM、Exciter、RFを仮想加速器に実装した。
- ◆ 実加速器と同様の手法でベータatron振動数、クロマティシティなどの測定を可能とした。

課題1: 初期運転 (Day-1) に向け

仮想加速器

- ◆ 各種電磁石の個体差
- ◆ 各種モニタ(MWPM, IPMなど)
- ◆ 機器の設置誤差
- ◆ 各運転モードに対応したライン
- ◆ 入射過程
- ◆ 加速過程

上位系制御システム

- ◆ 加速器制御端末OPI作成
- ◆ 仮想加速器を用いた上位系制御システムの検証

課題2:ビーム出力増強に向け

RCSではビーム損失の観点から、Haloの振る舞いを気にしないといけないため、空間電荷効果などの粒子間相互作用を加えた多粒子周回計算の機能が必要である。

- SADの機能を拡張(?), その他のコードの実装(?)

→SIMPSONS (developed by Machida-san)にCA Clientを実装中

- 膨大な計算時間のため、モデル化や並列化計算による計算時間の短縮が不可欠

付録

EPICS PCAS

~ Portable Channel Access Server

米国ロスアラモス国立研究所で開発されたシンプルなクラスインターフェースであり、EPICS databaseのCA serverツールを作成することができる。

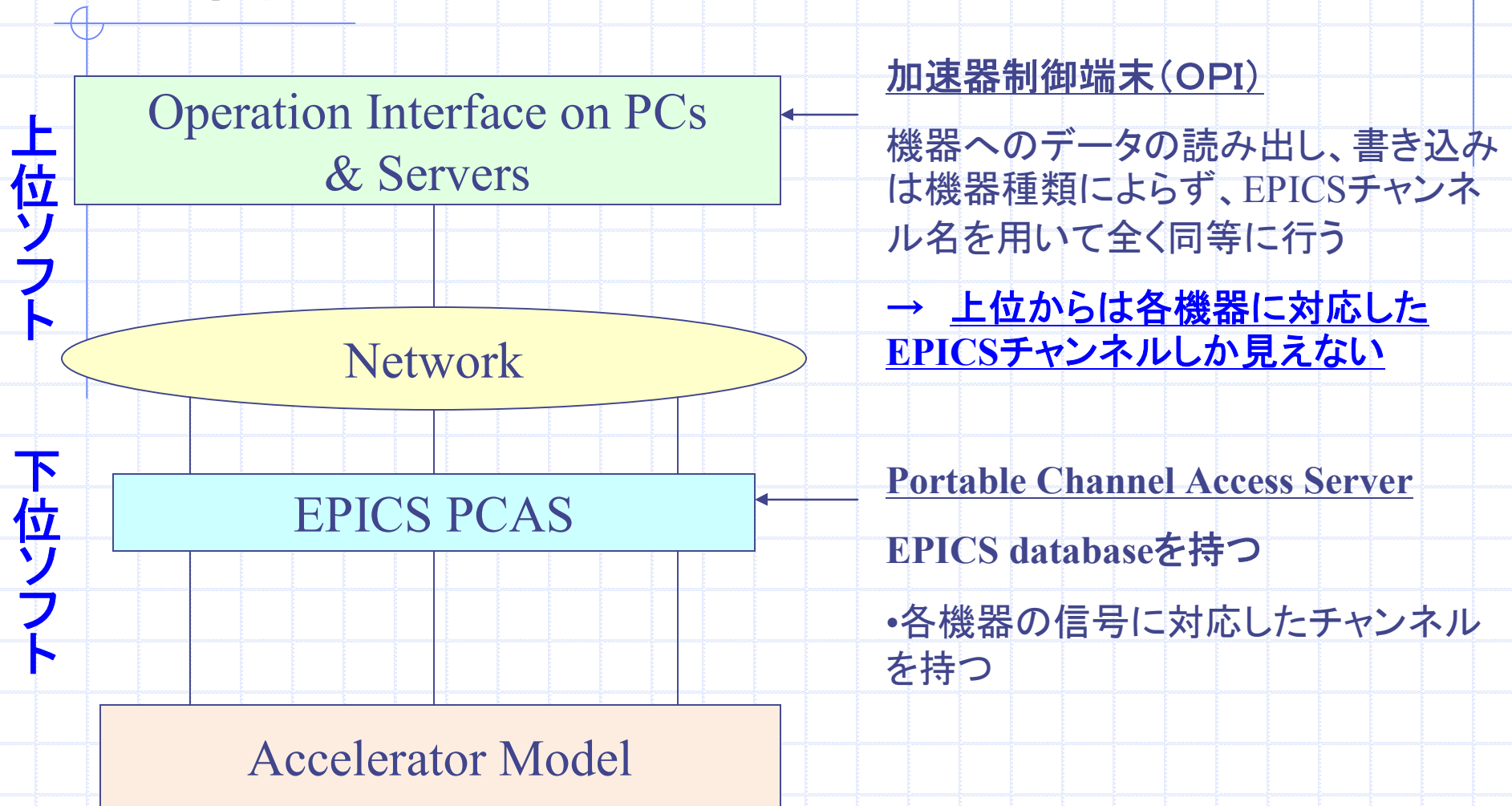
利用例: KEKB gateway to Linac Control System

Reference:

[1] N. Yamamoto et al., “Implementing Portable Channel Access Server Software In The KEKB Accelerator Control System”, APAC’98

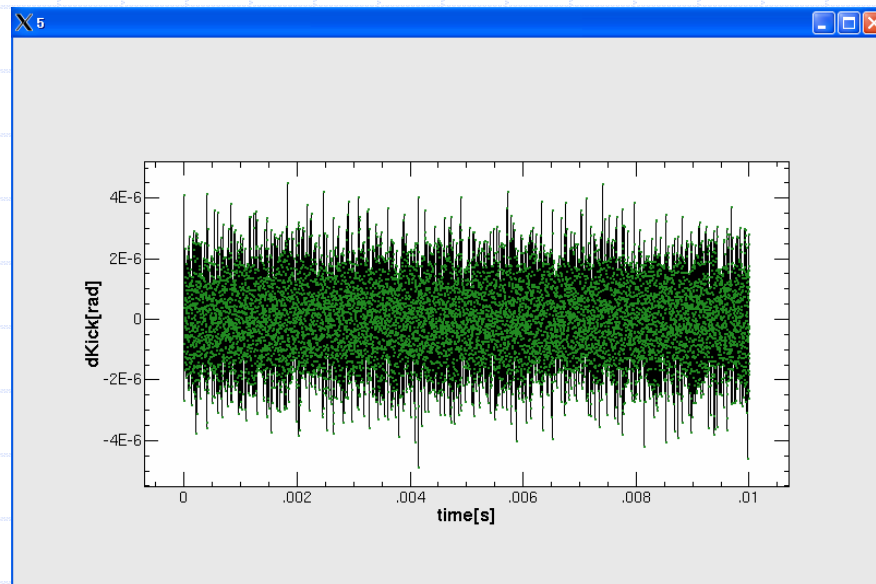
[2] S. Schaller and M. Oothoudt, “Generalized Control And Data Access At The LANSCE Accelerator Complex – Gateway, Migators And Other Server”, Proc. ICALEPCS’95, Chicago, USA, 1995, pp. 943-948

EPICSに基づく仮想加速器の 制御モデル



エキサイタの模擬

エキサイタとは、ビームに横方向のキックを与えて振動を励起するエレメントであり、これは連続的にコヒーレントなベータatron振動を励起できるように、電極に帯域制限白色ノイズをかけ、ベータatron振動との共鳴を利用してビームに強制的に振動を与える。白色ノイズを使用することで周波数を変えてスキャンする必要が無く、一度だけで測定が可能となる。

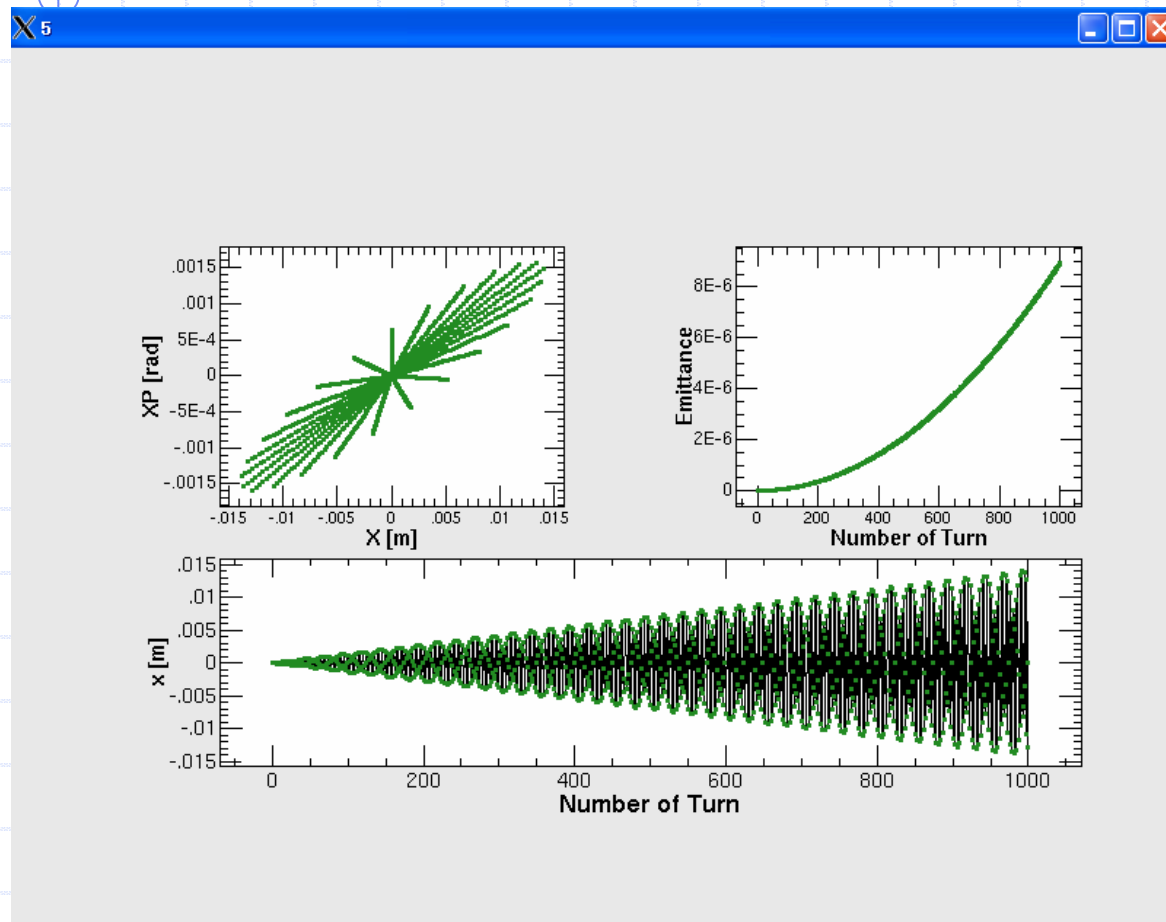


模擬したエキサイタの白色ノイズ

横軸: 時間[s]

縦軸: ビームに与えるキック量[rad]

ベータatron振動と同じ振動数の単色波を持つエキサイタによる1粒子の振る舞い



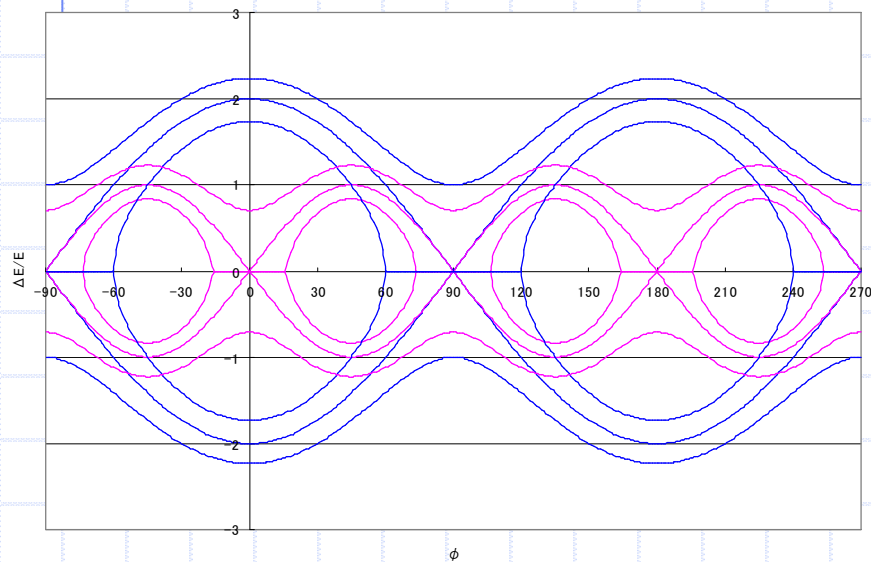
1粒子を $(x, x')=(0, 0)$ に配置し、
周回計算を行った。

水平方向ベータatron振動数
→ $\nu_x = 6.68$

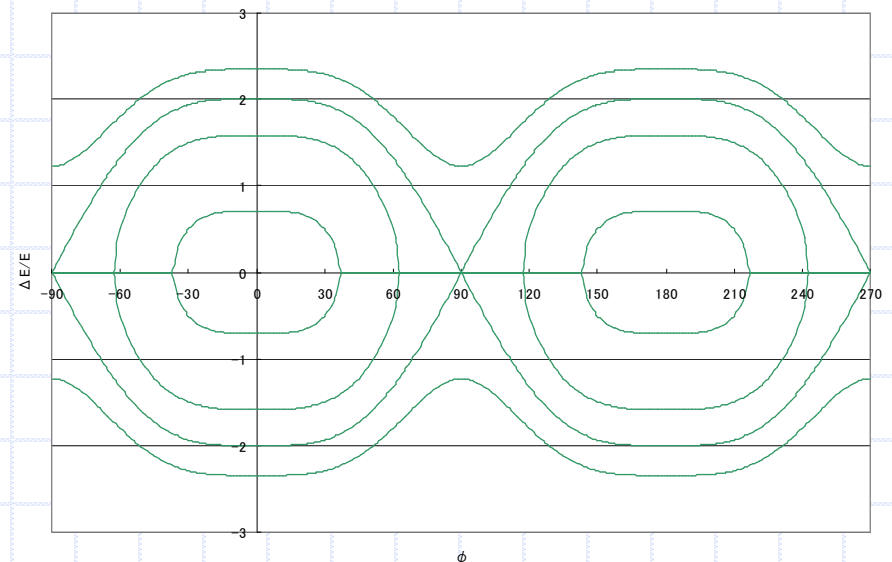
周回数→1000

RF bucket

単調波、2倍高調波



単調波 + 2倍高調波



スリッページ・ファクター測定

$$\nu_s = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \sqrt{\frac{heV \cos \phi_s}{2\pi E}} \cdot \eta$$

$$\eta = \frac{2\pi E \nu_s^2 (\gamma^2 - 1)}{heV \cos \phi_s \gamma^2}$$

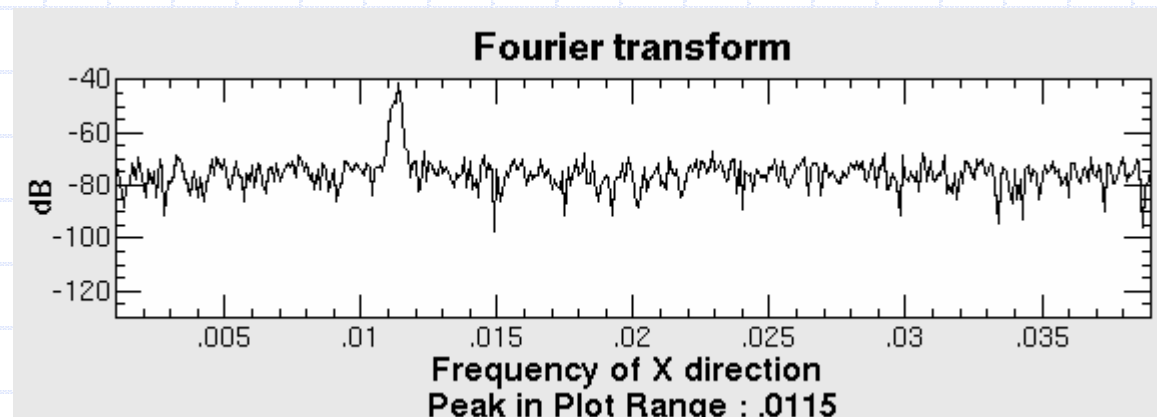
ν_s : シンクロトンチューン

E: 同期粒子のエネルギー

V: RF電圧

ϕ_s : 同期位相

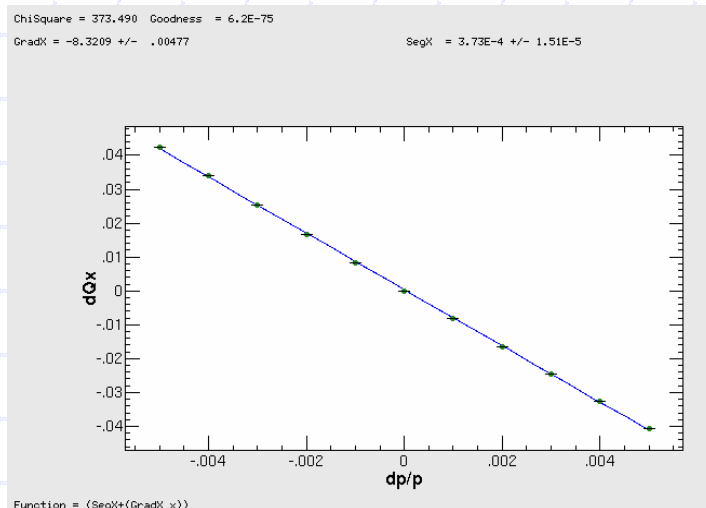
γ : ローレンツガンマ



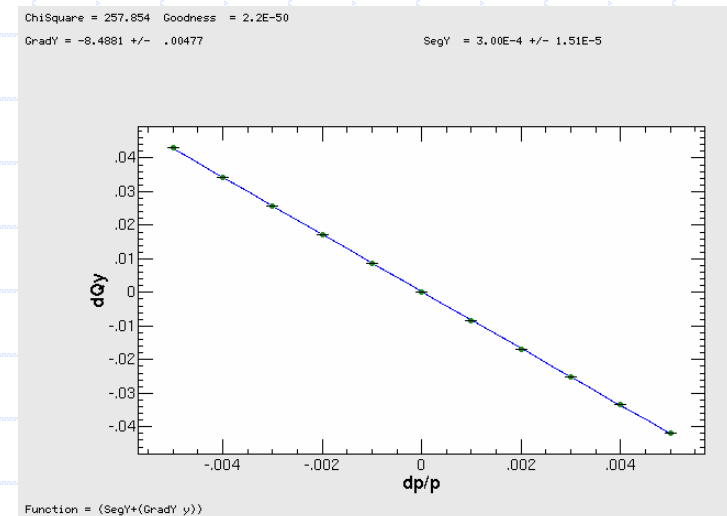
RF frequencyのサイドバンドからシンクロトンチューンを測定し、スリッページ・ファクター η を見積もる。

クロマティシティの測定

高周波加速空洞RFで運動量を変化しつつ、ベータトロン振動数を測定



運動量のずれに対する水平(x)方向
ベータトロン振動数のずれ

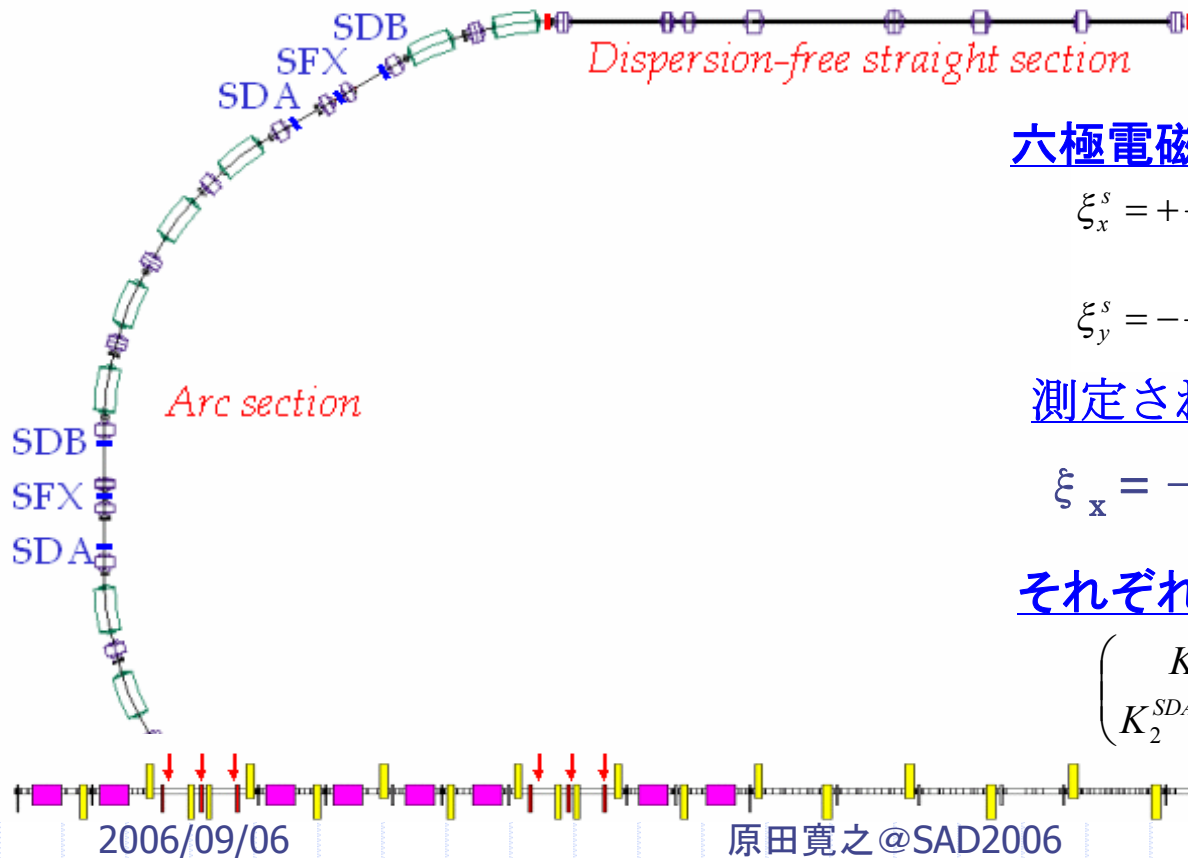


運動量のずれに対する垂直(y)方向
ベータトロン振動数のずれ

$$\xi_x = -8.321 \pm 0.005, \quad \xi_y = -8.488 \pm 0.005$$

クロマティシティ補正

それぞれ6台ずつの収束型六極電磁石SFX、発散型六極電磁石SDA, SDBでこのクロマティシティを補正する



六極電磁石が作るクロマティシティ

$$\xi_x^s = +\frac{1}{4\pi} \int_0^C K_s(s) \beta_x(s) \eta_x(s) ds$$

$$\xi_y^s = -\frac{1}{4\pi} \int_0^C K_s(s) \beta_y(s) \eta_x(s) ds$$

測定されたクロマティシティ

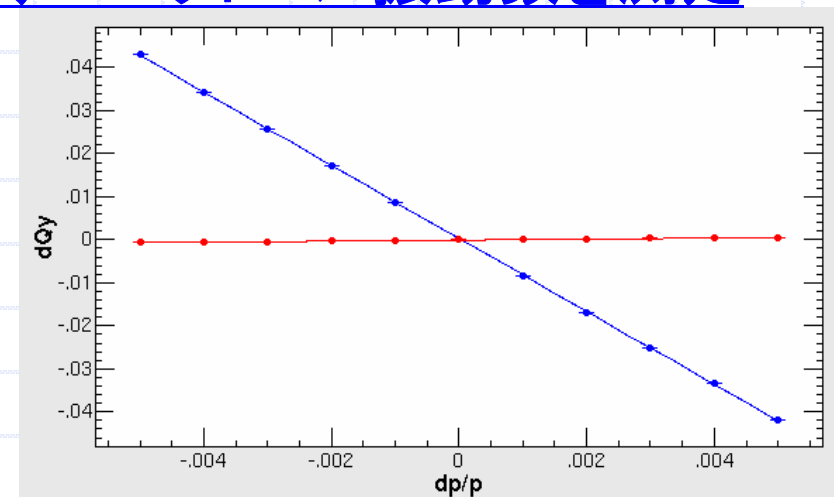
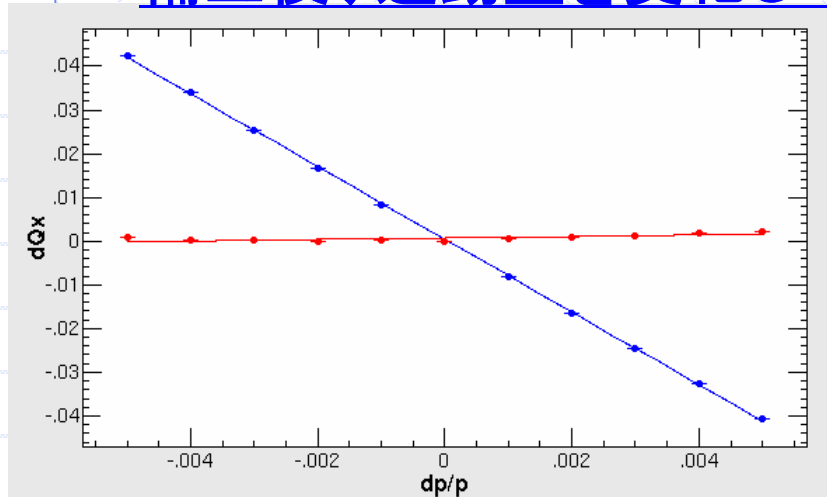
$$\xi_x = -8.321, \quad \xi_y = -8.488$$

それぞれの六極電磁石の励磁量

$$\begin{pmatrix} K_2^{SFA} \\ K_2^{SDA}, K_2^{SDB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3847 & [m^{-2}] \\ -0.3154 & [m^{-2}] \end{pmatrix}$$

クロマティシティ補正結果

補正後、運動量を変化しつつ、ベータatron振動数を測定



運動量の違いによるベータatron振動数 ν_x のずれ

青線:補正前、赤線:補正後

運動量の違いによるベータatron振動数 ν_y のずれ

青線:補正前、赤線:補正後