

< 加速器物理セミナー >  
SuperKEKBにおけるTurn by Turn モニター  
を用いたHead Tail Dampingの解析と横方  
向インピーダンスの評価

2016/2/17

筑波大学 数理物質科学研究科

黒尾奈未

# SuperKEKB project

KEKB 加速器の性能の 40 倍であるルミノシティ  $8 \times 10^{-35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  をめざして改造

<SuperKEKB operation >

Phase1 :2016/2-2016/6

- Belle-IIのインストールのための準備
- optics study

→Turn by Turnモニターを用いてベータトロン振動の減衰率を測定し、リングのWakeを求めた

Wake :ビームが環境と相互作用して生じる電磁場のこと

→ビーム不安定性の原因となる。

- ビームがダクト壁にぶつかるなどのビームロス
- ビームサイズ増大

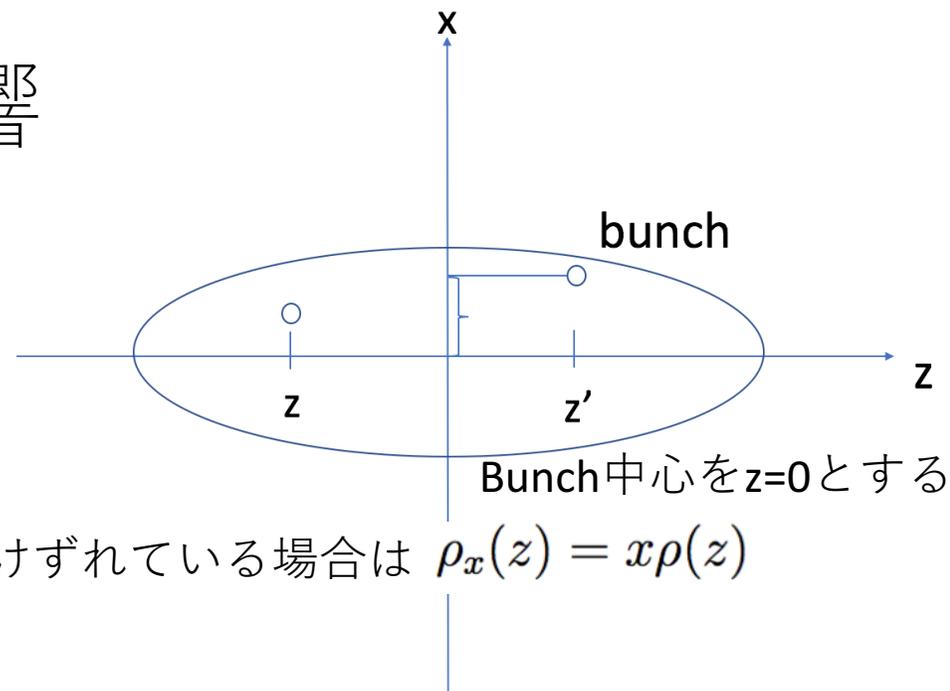
Wakeを求めることで不安定になるビーム電流のthresholdを知ることができる

# Wakeによるベータトロン振動の影響

バンチ内粒子の運動方程式 (Wakeによる影響を考慮)

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \left(\frac{2\pi\nu_x}{L}\right)x = -\frac{Nr_e}{\gamma L}F_x(z)$$

$$F_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho_x(z')dz$$



$\rho_x(z')$ は  $\rho_x(z') = x(z')\rho(z')$  で定義されており、ビームが一様にxだけずれている場合は  $\rho_x(z) = x\rho(z)$

自分より前の粒子のx方向の変位に応じたWake力F(z)の影響を受ける

リング一周分のWakeによるベータトロン振動への力積は

$$\Delta p_x = -\frac{Nr_e}{\gamma}F_x(z) \quad p_x = \frac{dx}{ds} \quad \begin{array}{l} N: \text{バンチ内粒子数、} \\ \text{ビーム強度が大きくなるほど強くなる} \end{array}$$

バンチ全体が受ける力:  $\langle F_x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(z)\rho(z)dz = x \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho(z)\rho(z')dz'dz$

$$\Delta \langle p_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma} \langle F_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho(z)\rho(z')dz'dz \times \langle x \rangle$$

Kick Factor

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho(z)\rho(z')dz'dz$$

$$\Delta \langle p_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma}K \langle x \rangle \quad \Delta \nu_x = \frac{Nr_e K \beta_x}{\gamma 4\pi}$$

ビーム電流に比例したチューンシフトが起こる

# Wakeによるベータトロン振動の影響

<周波数領域での表現>

フーリエ変換

$$Z_x(\omega) = i \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z) e^{-i\omega z/c} \frac{dz}{c} \quad W_x(z) = -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_x(\omega) e^{i\omega z/c} d\omega$$

→

$$\begin{cases} \bar{F}(\omega) = \int F(z) e^{-i\frac{\omega z}{c}} \frac{dz}{c} = -icxZ(\omega)\bar{\rho}(\omega) \\ K = -\frac{ic^2}{2\pi} \int d\omega Z(\omega)\bar{\rho}(\omega)^2 = -\frac{i}{2\pi} \int d\omega Z(\omega) e^{\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{c^2}} d\omega \\ \Delta\nu_x = \frac{Nr_e}{\gamma} \frac{K\beta_x}{4\pi} = -i \frac{Nr_e cL}{8\pi^{\frac{3}{2}} \gamma \mu \sigma_z} Z_{eff} \end{cases}$$

実効インピーダンス

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{\pi}c} \int d\omega Z(\omega) e^{\frac{\omega^2 \sigma_z^2}{c^2}} d\omega$$

クロマティシテイξがあるとき  
 $\omega - \omega\xi$

クロマティシテイ考慮

$$\Delta\langle p_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma} K(\xi)\langle x \rangle \quad \Delta\nu_x = \frac{Nr_e}{\gamma} \frac{K(\xi)\beta_x}{4\pi}$$

周波数表現

$$2\pi\Delta\nu_x = -i \frac{Nr_e}{4\sqrt{\pi}\gamma} \frac{cL}{\mu_x \sigma_z} Z_{eff} \quad Z_{eff} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{\pi}c} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) e^{-\frac{(\omega-\omega\xi)^2 \sigma_z^2}{c^2}} d\omega$$

<クロマティシテイ>

ξ=Δv/Δp/p で定義される量

(Δp/p:運動量のズレの割合)

クロマティシテイは、運動量をずらして  
チューンがどれくらいズレるかを示す量

クロマティシテイによりチューンシフトに虚数がでる。ベータトロン振動に減衰、増幅がおこる。

# Turn by Turn モニターを用いたHead Tail Dampingの解析

- SuperKEKBの陽電子リング（LER）、電子リング（HER）それぞれにおいてバンチ電流、クロマティシティ $\xi$ を変え、キッカーで蹴られたバンチの振動を測定し、減衰率を求める
- 減衰率を用いてWakeを求める
- Simulationの計算結果とも合わせる

<クロマティシティ>

$\xi = \Delta v / \Delta p / p$  で定義される量

（ $\Delta p / p$  : 運動量のズレの割合）

クロマティシティは、運動量をずらしてチューンがどれくらいズレるかを示す量

チューン $\nu$  : ベータatron振動数

粒子が一周回るとき、何回振動するかという量

# SuperKEKB Machine Parameters

## Machine Parameters

2013/July/29	LER	HER	unit	
E	4.000	7.007	GeV	
I	3.6	2.6	A	
Number of bunches	2,500			
Bunch Current	1.44	1.04	mA	
Circumference	3,016.315		m	
$\epsilon_x/\epsilon_y$	3.2(1.9)/8.64(2.8)	4.6(4.4)/12.9(1.5)	nm/pm	() : zero current
Coupling	0.27	0.28	%	includes beam-beam
$\beta_x^*/\beta_y^*$	32/0.27	25/0.30	mm	
Crossing angle	83		mrad	
$\alpha_p$	$3.18 \times 10^{-4}$	$4.53 \times 10^{-4}$		
$\sigma_\delta$	$8.10(7.73) \times 10^{-4}$	$6.37(6.30) \times 10^{-4}$		() : zero current
$V_c$	9.4	15.0	MV	
$\sigma_z$	6.0(5.0)	5(4.9)	mm	() : zero current
$v_s$	-0.0244	-0.0280		
$v_x/v_y$	44.53/46.57	45.53/43.57		
$U_0$	1.86	2.43	MeV	
$\tau_{x,y}/\tau_s$	43.2/21.6	58.0/29.0	msec	
$\xi_x/\xi_y$	0.0028/0.0881	0.0012/0.0807		
Luminosity	$8 \times 10^{35}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	

$T_0$  : revolution time [s]

$\xi$  : クロマティシテイ

$\tau$  : decay time [s]

$\sigma_z$  : バンチ長 [m]

$N_e$  : バンチ内粒子数

$\alpha$  : モーメントムコンパクション

$r_e$  : 古典電子半径 [m]

$\nu\beta$  : tune

( $T/\tau$   
=0.00022,0.00017)

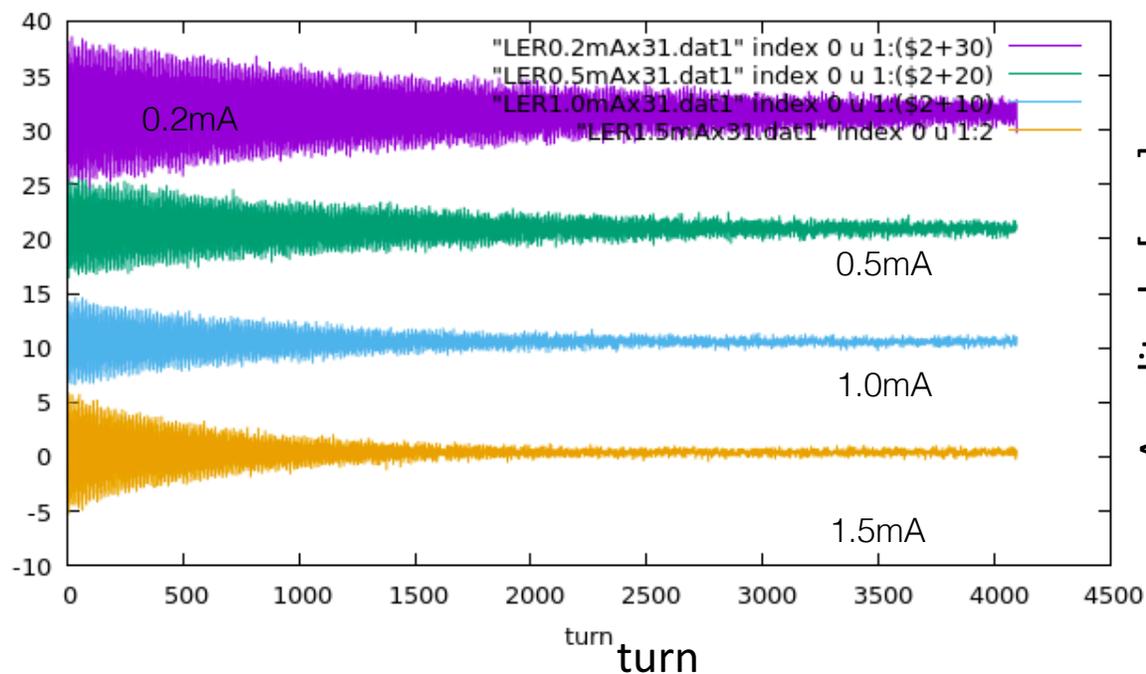
# Turn - Amplitude

<TbTモニターによる実際のデータ>

クロマティシティに対する電流依存性

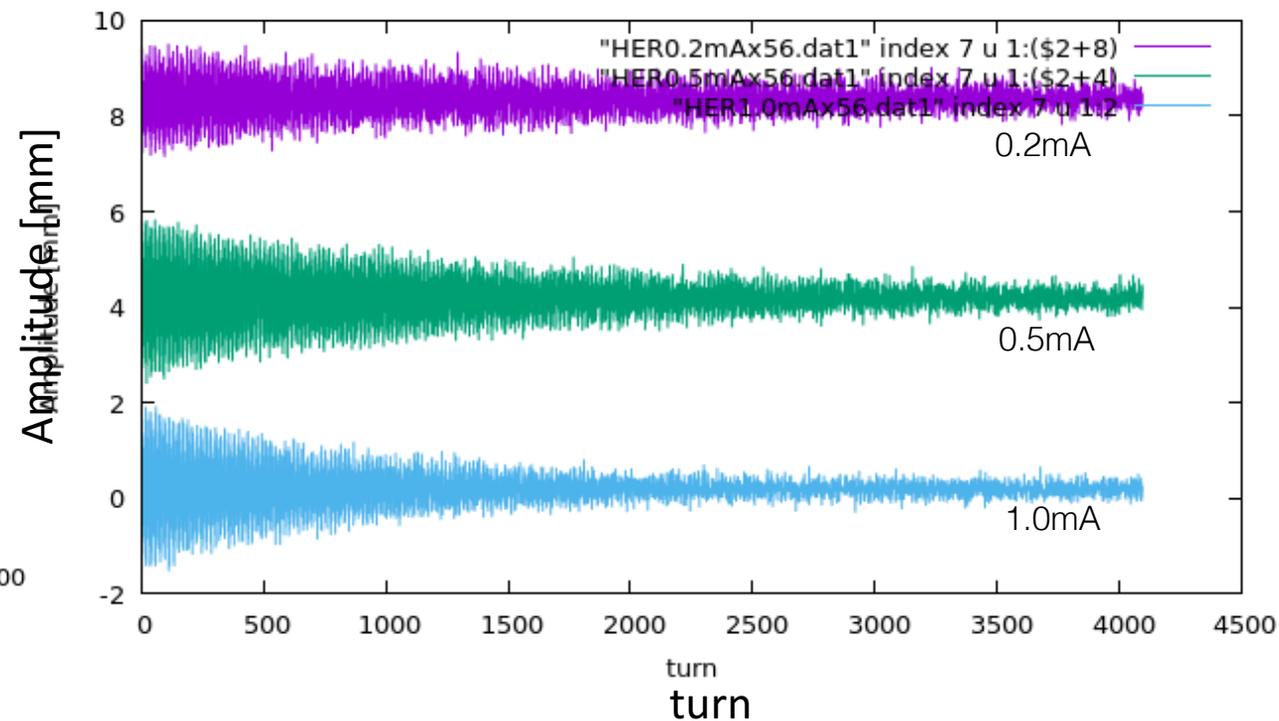
## LER Horizontal

turn - Amplitude (LER Horizontal Chromaticity=3.1)



## HER Horizontal

turn - Amplitude (HER Horizontal Chromaticity=5.6)



\* 中心はずらして表示

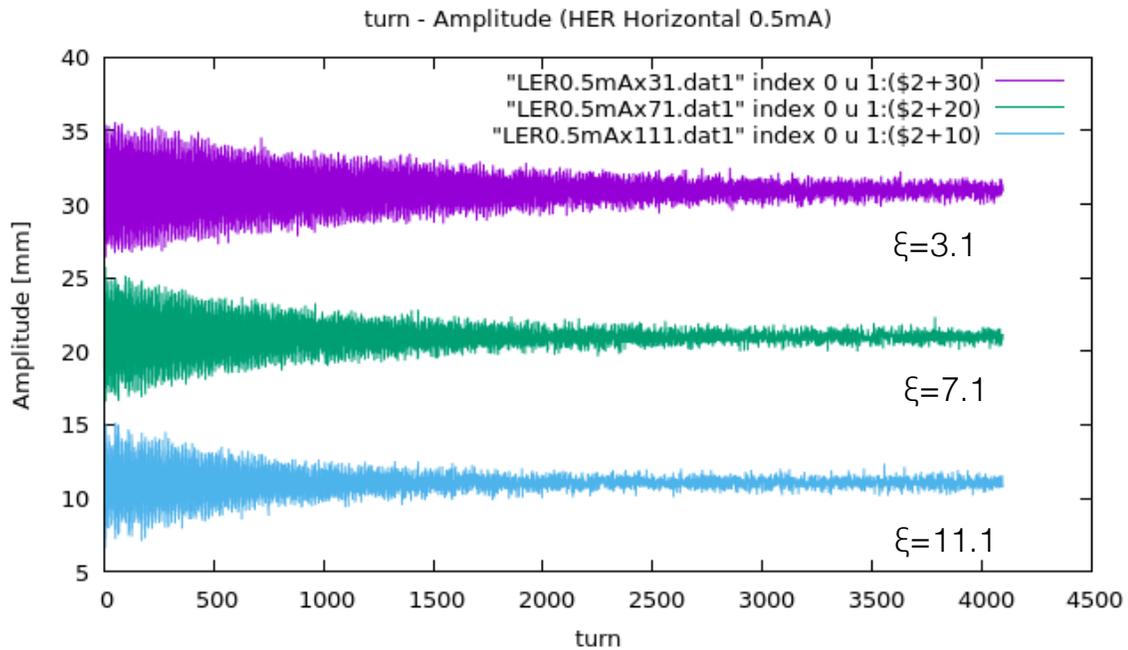
電流が大きくなるほど減衰が早い

# Turn - Amplitude

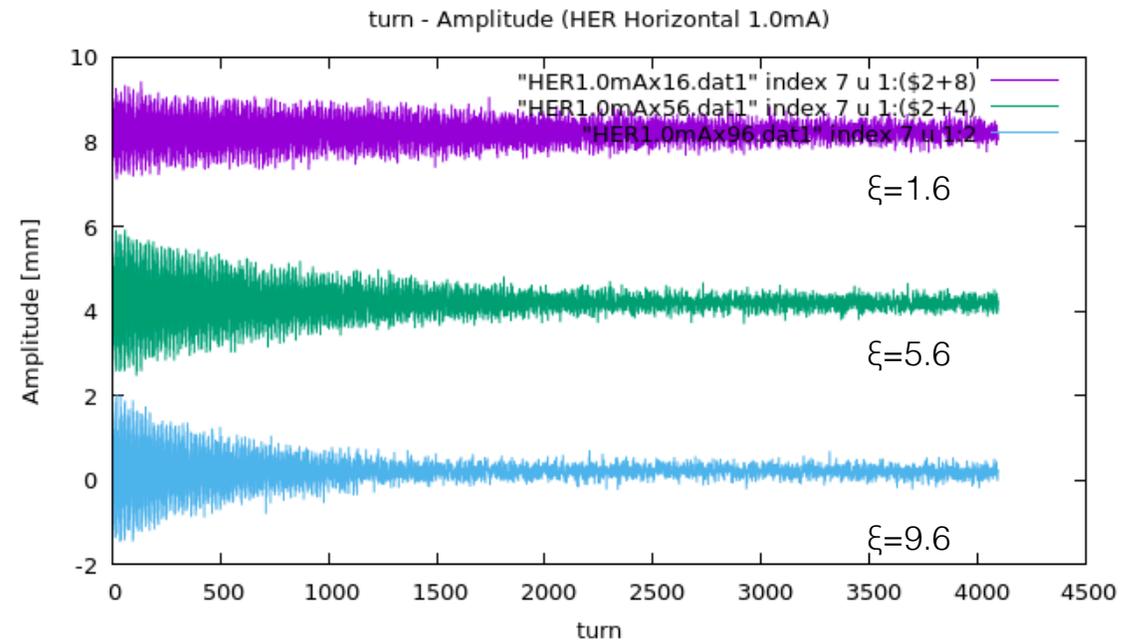
<TbTモニターによる実際のデータ>

電流に対するクロマティシティ依存性

LER Horizontal 0.5mA



HER Horizontal 1.0mA

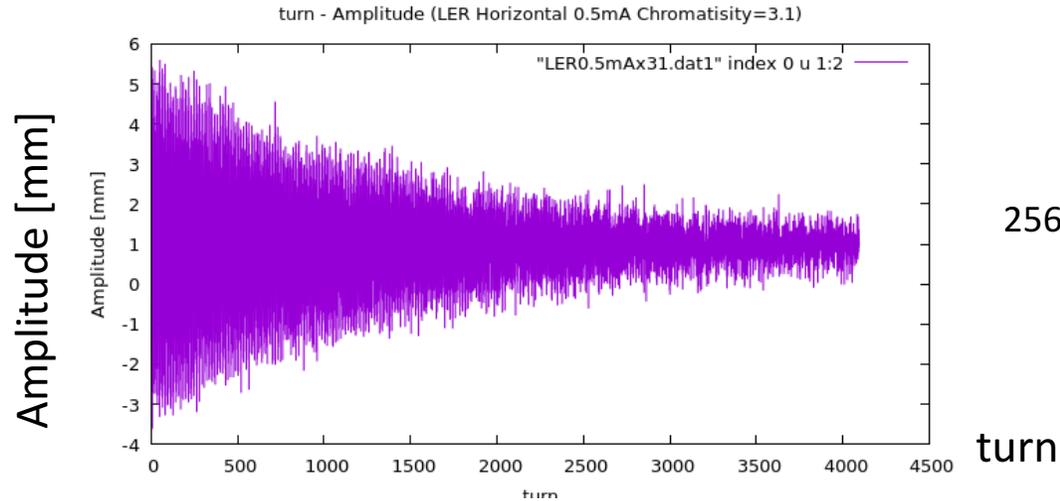


\* 中心はずらして表示

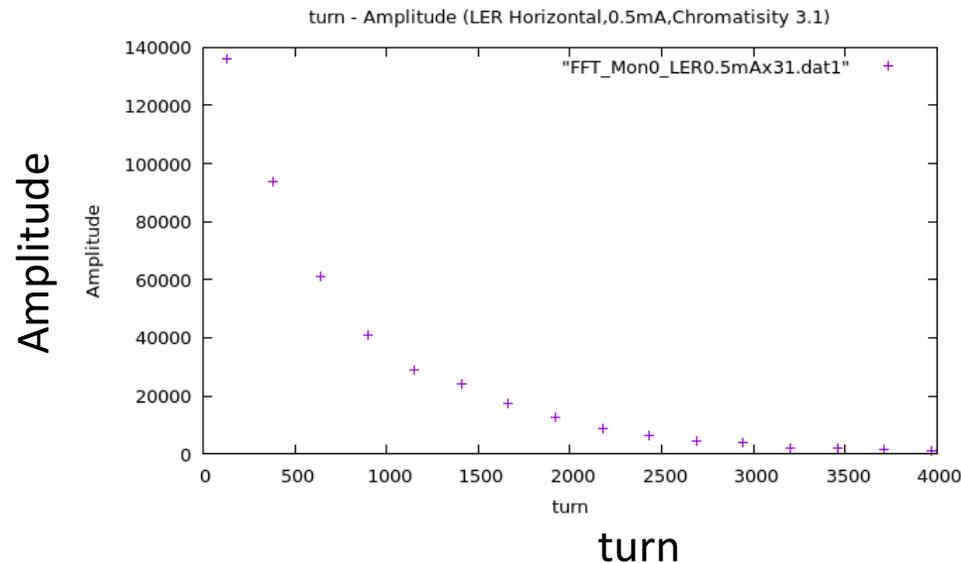
クロマティシティが大きくなるほど減衰が早い

# FFT 解析（高速フーリエ変換） 減衰率の算出

キッカーでけられたバンチの振動振幅をFFTで求め、減衰率を出す



256ターンずつFFTかけ、それぞれの最大振幅を取得し、プロットしていく



今回は4096ターンなので $4096/256 = 16$   
1つのデータに対して16個のプロットができる

Expでfitし、減衰率を求める

$$f(x) = Ae^{-(T_0/\tau)x}$$

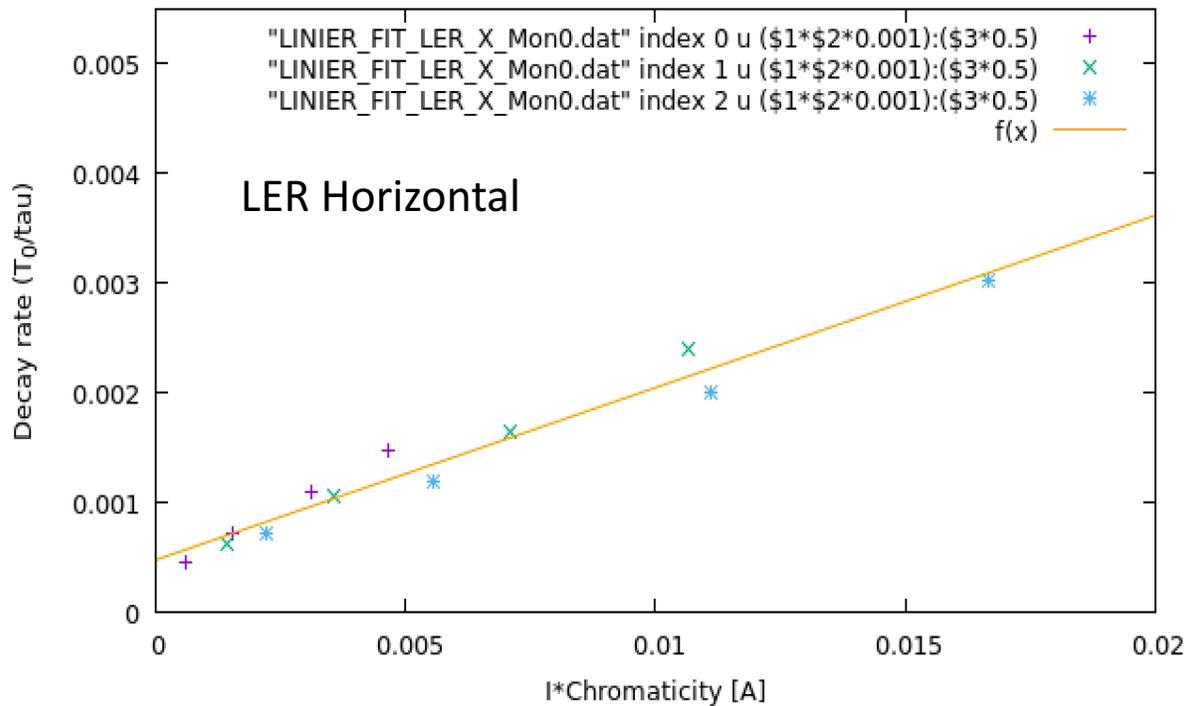
# LER (陽電子ビーム 4.0GeV)

電流 × クロマティシティにたいするベータatron振動の減衰率

簡単な2粒子模型での評価

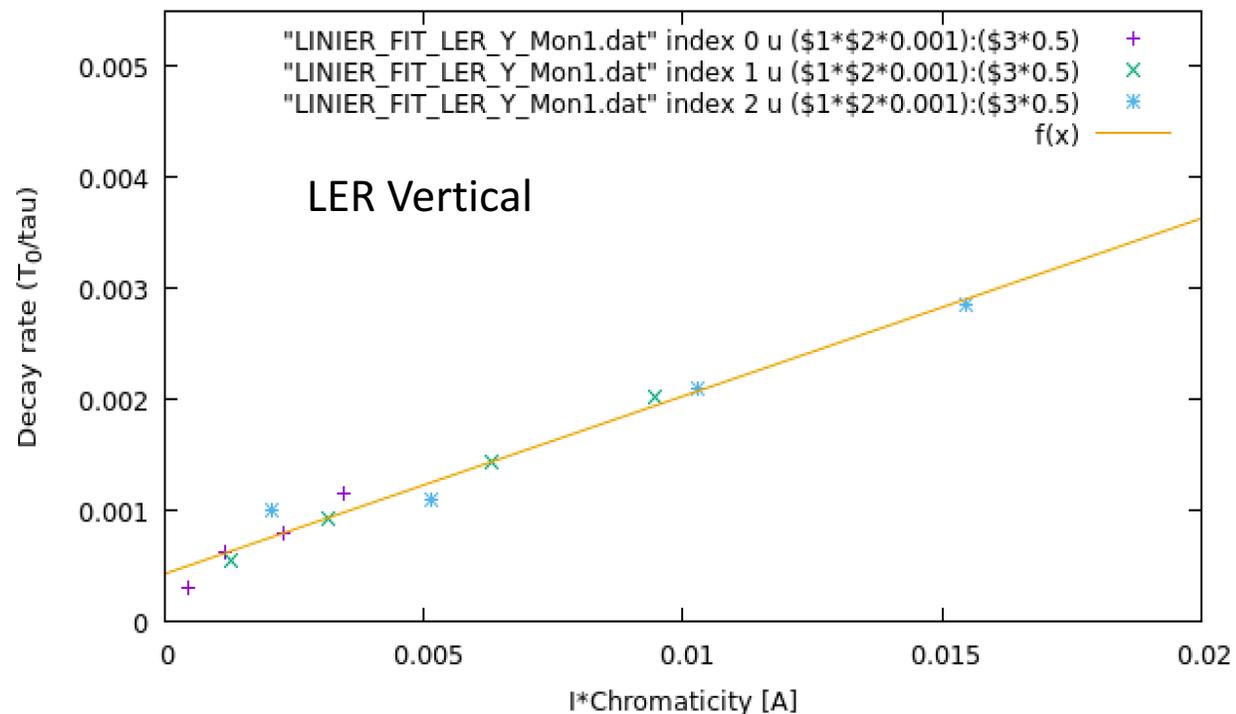
$$\frac{T_0}{\tau} = \frac{r_e \sigma_z}{2\pi \gamma \alpha \nu \beta c e} \frac{L}{W} I \xi + \frac{T_0}{\tau_{rad}} + \frac{T_0}{\tau_{nl}}$$

\*Chromaticity - Decay rate (LER Horizontal)



$$y = 0.157x + 4.79 \times 10^{-4}$$

\*Chromaticity - Decay rate (LER Vertical)

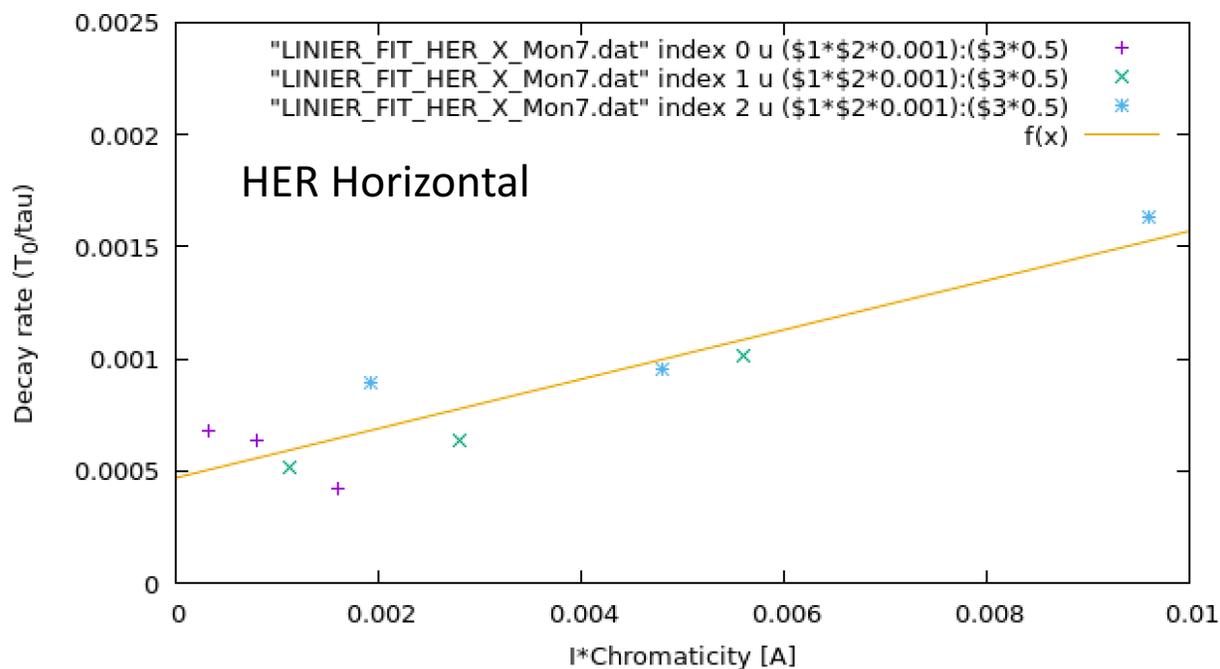


$$y = 0.160x + 4.32 \times 10^{-4}$$

# HER(電子ビーム 7.0GeV)

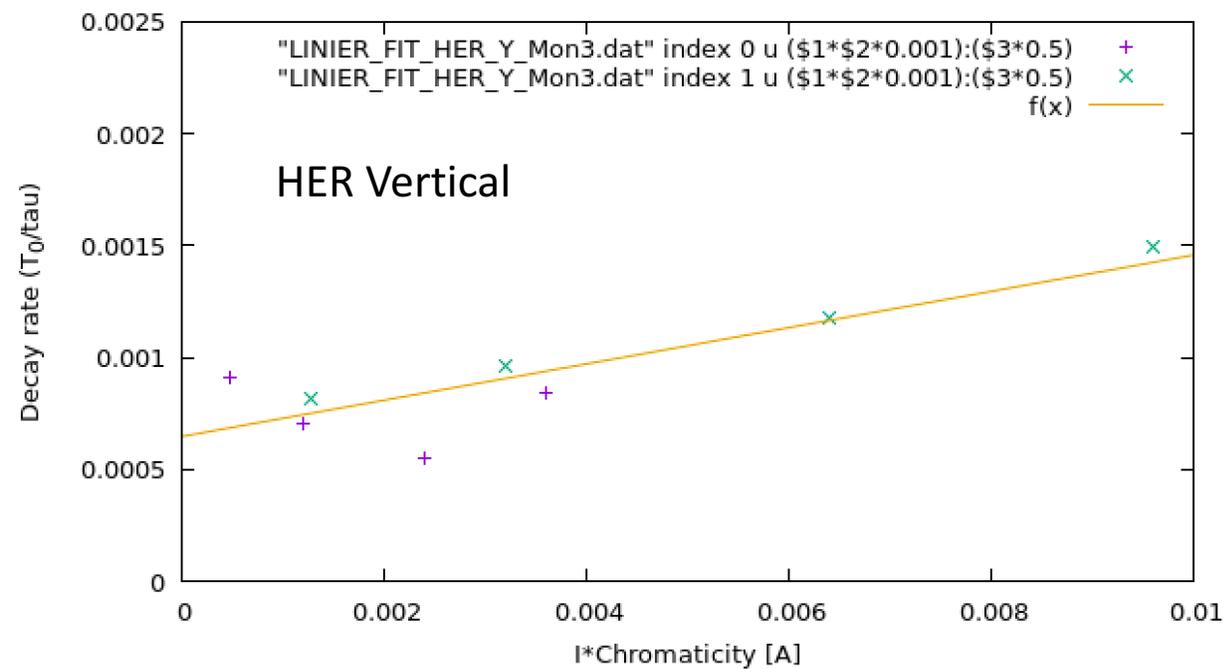
電流 × クロマティシティにたいするベータトロン振動の減衰率

I\*Chromaticity - Decay rate (HER Horizontal)



$$y = 0.110x + 4.70 \times 10^{-4}$$

I\*Chromaticity - Decay rate (HER Vertical)



$$y = 0.081x + 6.48 \times 10^{-4}$$

# Wake Model

Wakeの算出

<Wake model>

$$W_m(z) = -W_0 \theta(-z) : \text{Constant Wake}$$

$$W_m(z) = \frac{cR_s \omega_R}{Q\bar{\omega}} e^{\frac{\alpha z}{c}} \sin \frac{\bar{\omega} z}{c} : \text{Resonator Model}$$

$$\alpha = \frac{\omega_R}{2Q}$$

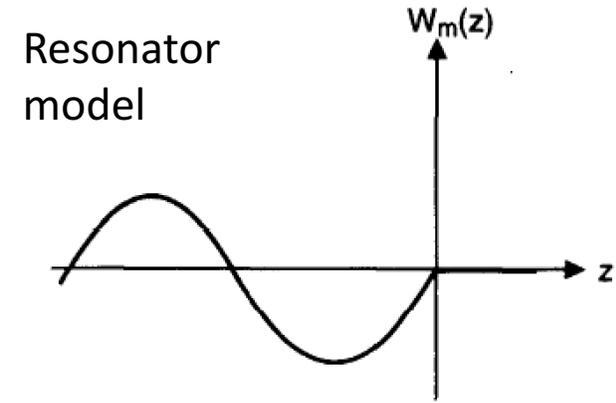
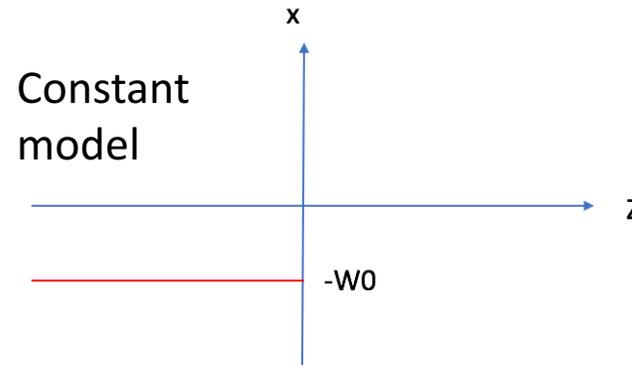
$$\bar{\omega} = \sqrt{\omega_R^2 - \alpha^2}$$

$$cR_s = QW$$

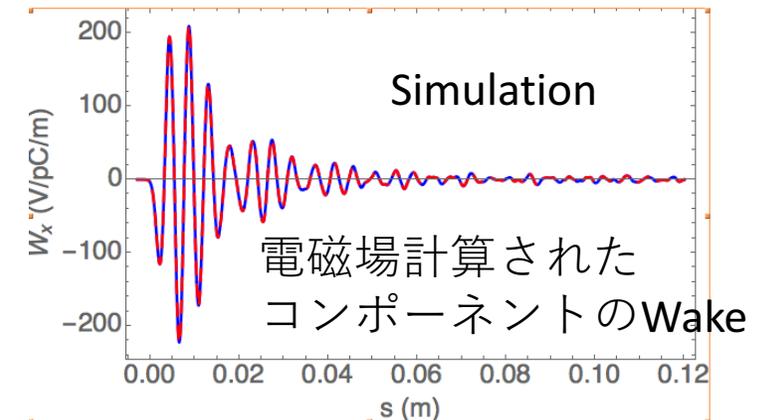
$\omega_R$  : 共鳴周波数

$W$  : Wake

$Q$  : Q 値 (Wake の伸びを表す)



- Constant Wakeはstep functionである
- Resonator ModelのWakeは周波数を考慮、且つ振幅の増減をも表せる。

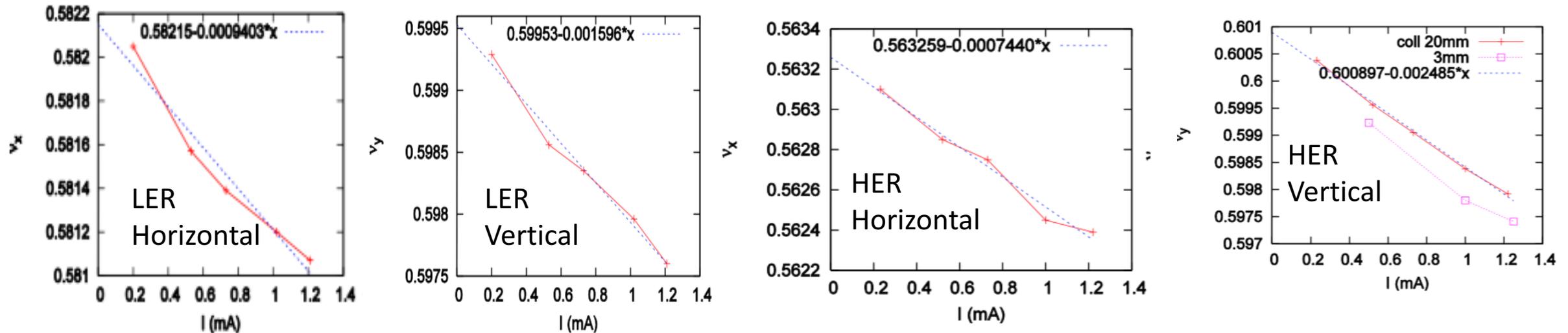


1. Wakeは電磁波なので、実際はある周波数成分を持っている。
2. バンチの周波数は約60GHzであり、これくらいの長さの共鳴的構造物はリング内にほとんど存在しない。  
( $Q=1$ としてすぐに減衰するようなWakeが適切)

Resonator Modelを用いた算出方法がより適切であると考えている

# 電流に依るチューンシフトの測定

SuperKEKB summary 22 July, 2016



簡単な2粒子モデルでの評価

$$\frac{T_0}{\tau} = \frac{r_e \sigma_z L}{2\pi \gamma \alpha \nu_\beta c e} W I \xi + \frac{T_0}{\tau_{rad}} + \frac{T_0}{\tau_{nl}}$$

a



$$W = a \frac{2\pi \gamma \alpha \nu_\beta c e}{r_e \sigma_z L}$$

$$W_0 = \frac{\Delta \nu_\beta}{I} \frac{16\pi e c \gamma}{L r_e \beta}$$

beam line	Head tail damping [ $/m^{-2}$ ]	Tune shift [ $/m^{-2}$ ]
$LER_H$	$1.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$
$LER_V$	$1.1 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$
$HER_H$	$2.2 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$
$HER_V$	$1.6 \times 10^5$	$8.8 \times 10^5$

より精密な評価の必要性

# Resonator Model

Resonator ModelのWake, Impedance

$$W_m(z) = \frac{cR_s\omega_R}{Q\bar{\omega}} e^{\frac{\alpha z}{c}} \sin \frac{\bar{\omega}z}{c}$$

↑ フーリエ変換 ↓

$$Z_m^\perp(\omega) = i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz}{c} e^{-\frac{i\omega z}{c}} W_m(z)$$

$$= \frac{c}{\omega} \frac{R_s}{1 + iQ\left(\frac{\omega_R}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_R}\right)}$$

$\chi_R = \frac{\omega_R \sigma}{c}$

ベータトロンチューン(周波数)シフト

$$2\pi\Delta\nu_x = -i \frac{Nr_e}{4\sqrt{\pi}\gamma} \frac{cL}{\mu_x\sigma_z} Z_{eff}$$

$$= \frac{Nr_e}{4\sqrt{\pi}\gamma} \frac{cL}{\mu_x\sigma_z} (-i\text{Re}(Z_{eff}) + \text{Im}(Z_{eff}))$$

$$Z_{eff} = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}c} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) e^{-\frac{(\omega-\omega_\xi)^2\sigma^2}{c^2}} d\omega$$

$\Delta\nu_x$ 実部：ベータトロン振動のチューンシフト

$$\Delta\nu_x = \frac{Nr_e}{8\pi^{\frac{3}{2}}} \frac{cL}{\gamma\mu_x\sigma_z} \text{Im}(Z_{eff})$$

$$= \frac{Nr_e}{8\pi^{\frac{3}{2}}} \frac{cL}{\gamma\mu_x\sigma_z} \frac{\sigma_z W_0}{\sqrt{\pi}\sigma_z} IZ(\chi_R)$$

ここで、 $\text{Im}(Z_{eff}) = \frac{\sigma_z W_0}{\sqrt{\pi}c} IZ(\chi_R)$

$\Delta\nu_x$ 虚部：減衰、あるいは増幅

$$\frac{T_0}{\tau} = \frac{L}{ec} \frac{r_e}{4\sqrt{\pi}} \frac{cL}{\gamma\mu_x\sigma_z} \frac{\sigma_z W_0}{\sqrt{\pi}c} I\xi RZ'_N(\chi_R)$$

$$\text{Re}(Z_{eff}) = \frac{\sigma_z W_0}{\sqrt{\pi}c} RZ(\chi_R)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\nu_x = \frac{Lr_e\beta_x}{8\pi^2 e\gamma c} W_0 I \times IZ_N(\chi_R) \\ \frac{T_0}{\tau} = \frac{Lr_e\beta_x}{4\pi e\gamma c} W_0 I \xi \times RZ'_N(\chi_R) \end{array} \right.$$

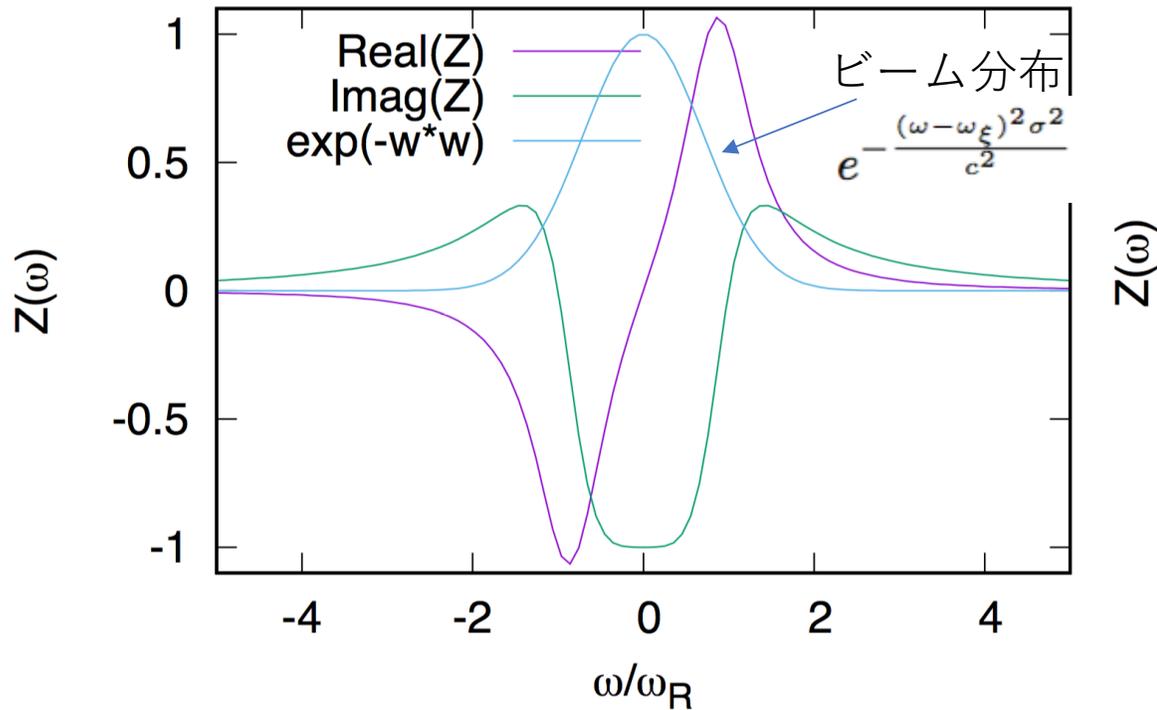
$RZ_N(\chi_R) = \xi \times RZ'_N(\chi_R)$

# 実効Impedance $Z_{\text{eff}}$

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}c} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) e^{-\frac{(\omega-\omega_{\xi})^2 \sigma^2}{c^2}} d\omega$$

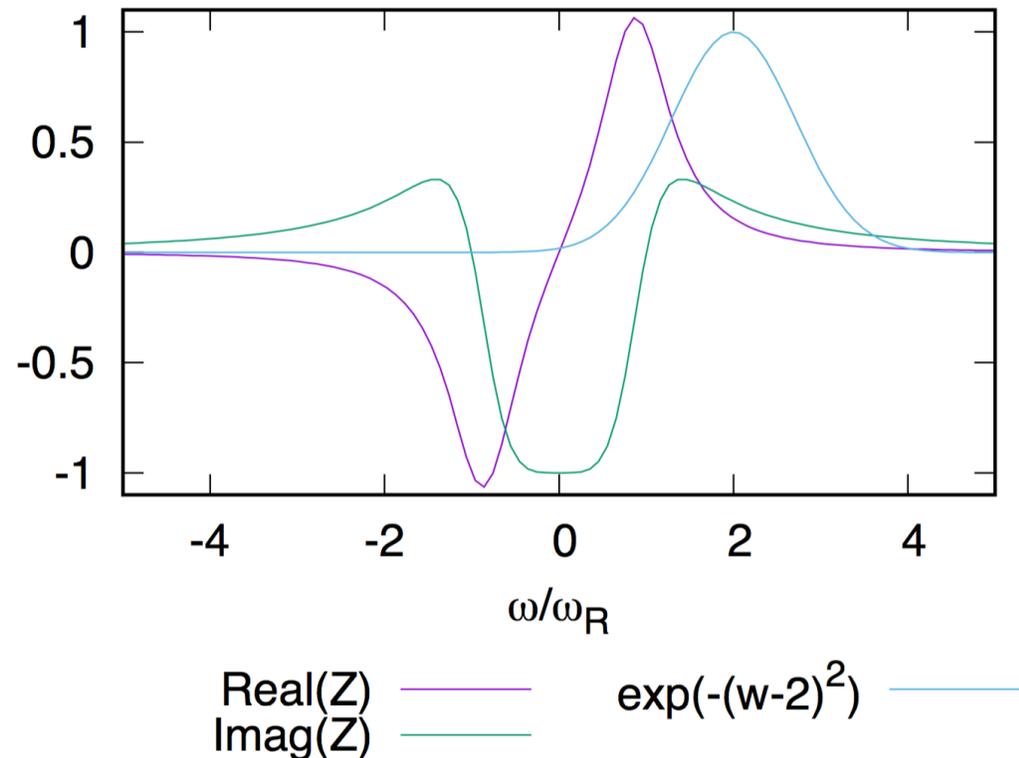
$$Z(\omega) = \frac{c}{\omega} \frac{R_s}{1 + iQ\left(\frac{\omega_R}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_R}\right)}$$

$\xi=0$ , ビームの周波数分布が対称、積分の実部は0  
虚部は有限(負)チューンシフトは起こるが、減衰は起きない



$\xi < > 0$ , ビームの周波数分布が非対称、積分の実部が値を持つ。右にずれると ( $\xi > 0$ ) 減衰、左 ( $\xi < 0$ ) は増幅(不安定)

チューンシフトはずれが小さければ  $\xi=0$  と同様



# Resonator Model (Mathematica)

チューンシフトとHead-tail減衰の両方を矛盾なく説明できる

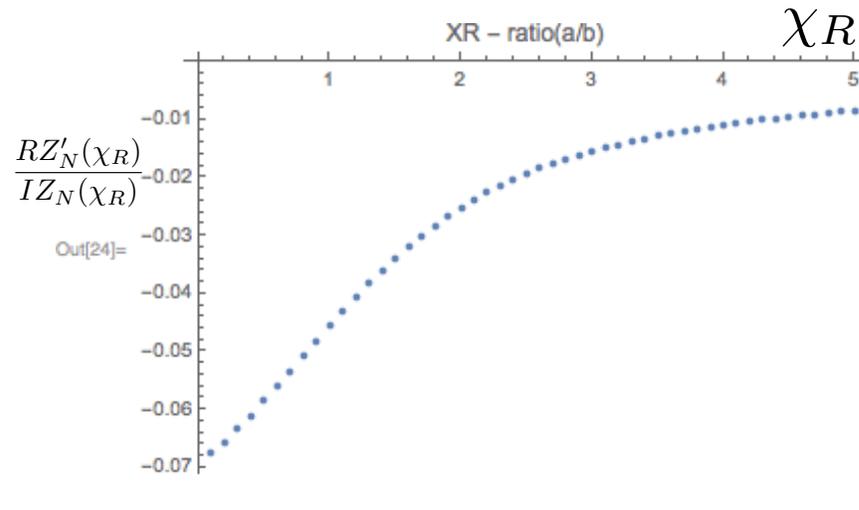
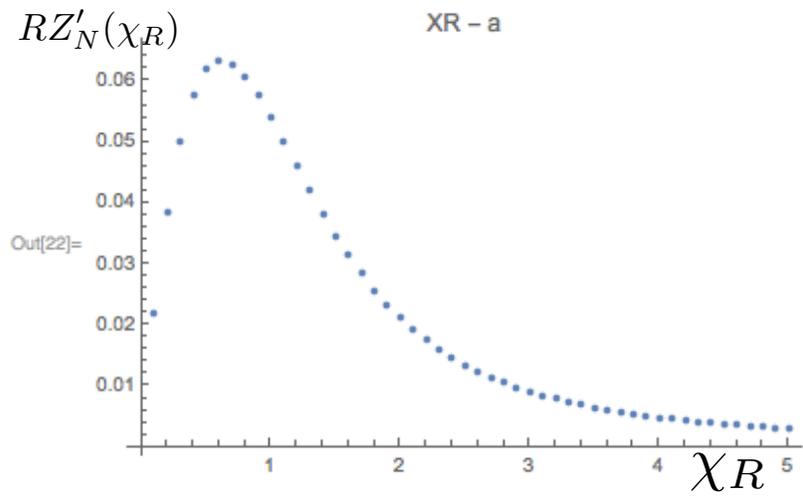
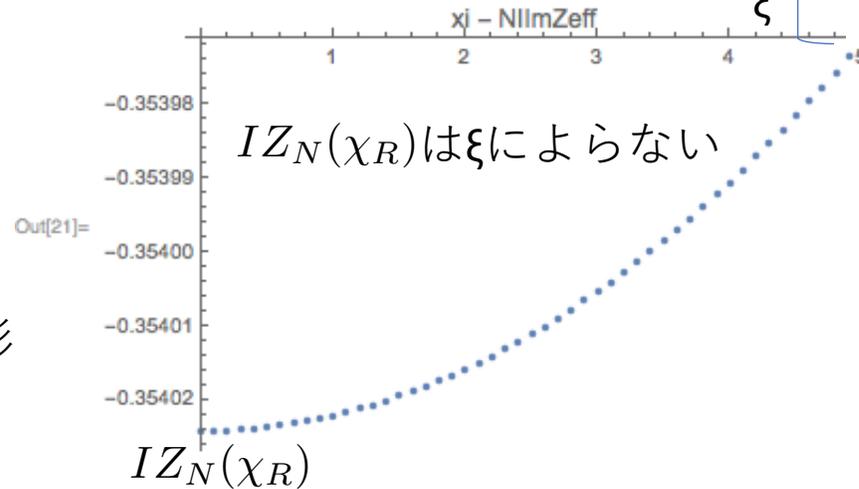
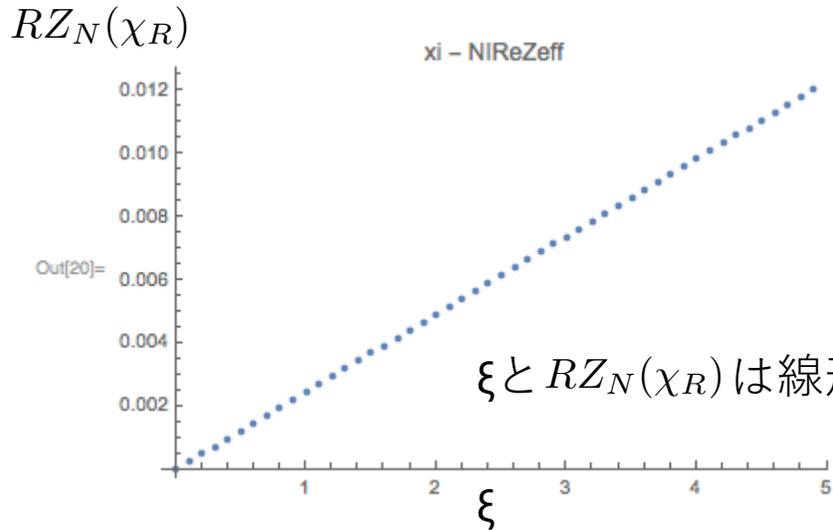
$$\Delta\nu_x$$

$$= \frac{Lr_e\beta_x}{8\pi^2e\gamma c} W_0 I \times IZ_N(\chi_R)$$

$$\frac{T_0}{\tau}$$

$$= \frac{Lr_e\beta_x}{4\pi e\gamma c} W_0 I \xi \times RZ'_N(\chi_R)$$

$$RZ_N(\chi_R) = \xi \times Z'_N(\chi_R)$$



解析により求まっている

$$\frac{T_0}{\tau} = aW_0RZ'_N(\chi_R)I\xi$$

$$\Delta\nu_x = a'W_0IZ_N(\chi_R)I$$

$$0.157 = aW_0RZ'_N(\chi_R)$$

$$0.94 = a'W_0IZ_N(\chi_R)$$

# 結果

beam line	Resonator Wake [ $/m^{-2}$ ]	$\chi_R$	error %
$LER_H$	$2.5 \times 10^5$	1.5	6.32
$LER_V$	$8.7 \times 10^5$	2.8	5.38
$HER_H$	$4.7 \times 10^5$	1.8	16.9
$HER_V$	$2.1 \times 10^6$	5.0	25.0

$$W_m(z) = \frac{cR_s\omega_R}{Q\bar{\omega}} e^{\frac{\alpha z}{c}} \sin \frac{\bar{\omega}z}{c} : Resonator Model$$

$$\chi_R = \frac{\omega_R\sigma}{c} \quad W = \frac{cR_s}{Q}$$

$\omega_R$  : 共鳴周波数

$$\omega_\xi = 2.0 \times 10^9$$

- LERは数パーセント以内であり良い
- HERのエラーが大きいののは低電流領域のplotのばらつきが原因と考えられる。
- plotのばらつきは、非線形効果とwakeの干渉効果が原因ではないか？

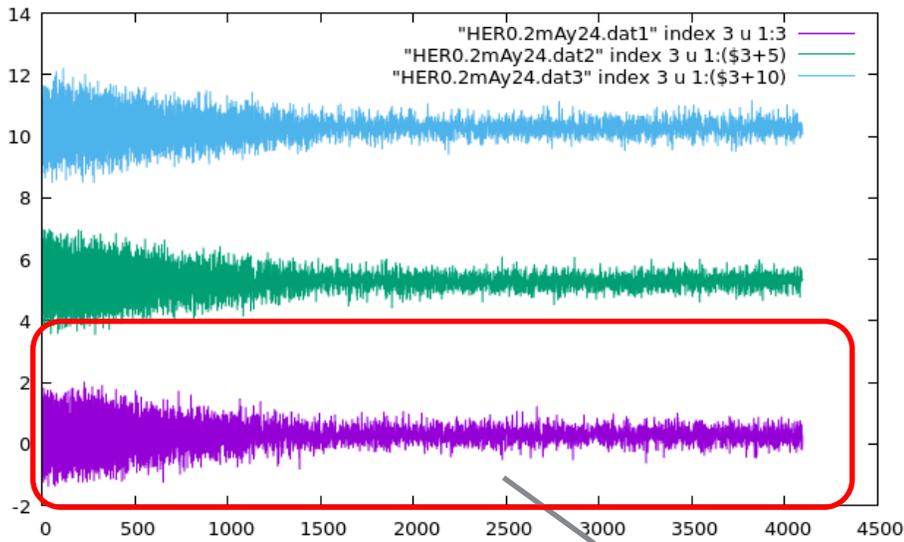
# ベータatron振動の非線形効果

6極磁石による非線形力でチューン広がりが生じることによる減衰

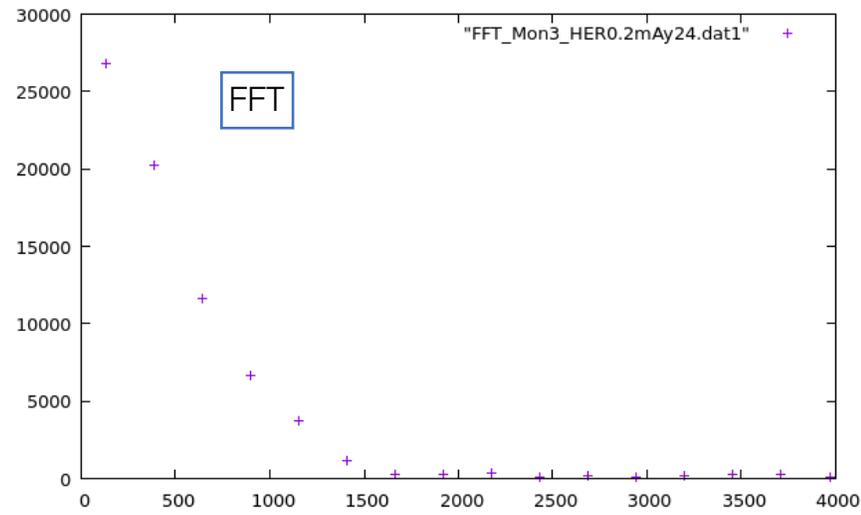
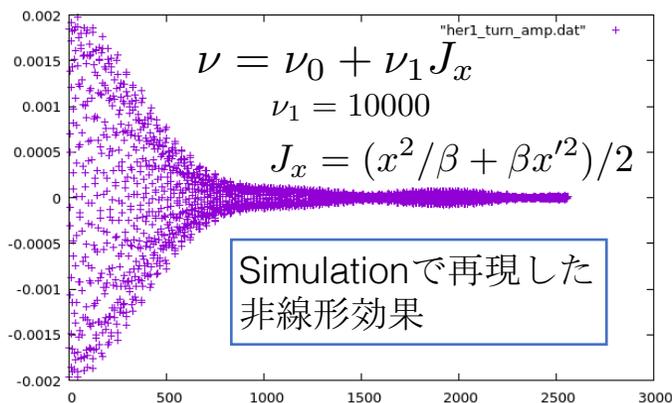
- 同じ条件で3回データを取得
- 3つとも非線形性を含むような形

HER Vertical 0.2mA Chromaticity:2.4

$$\frac{T_0}{\tau} = \frac{r_e \sigma_z}{2\pi \gamma \alpha \nu_\beta c e} \frac{L}{W I \xi} + \frac{T_0}{\tau_{rad}} + \frac{T_0}{\tau_{nl}}$$



非線形効果？

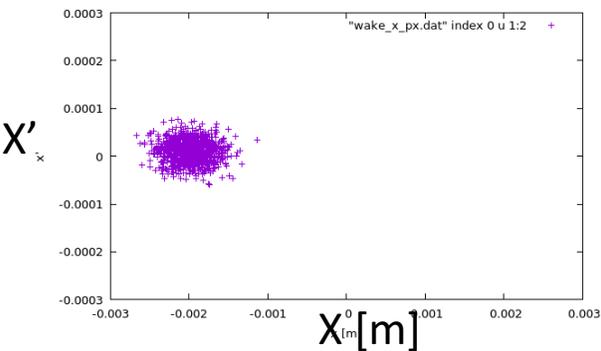


非線形効果とWの干渉効果を見してみる

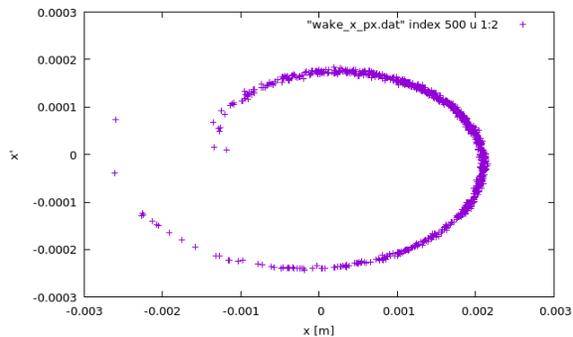
# 非線形効果と、Wakeを計算するためのシミュレーションコード

非線形効果、ベータトロンチューンが振幅に依存する効果を考慮  
チューン広がりによる減衰を再現

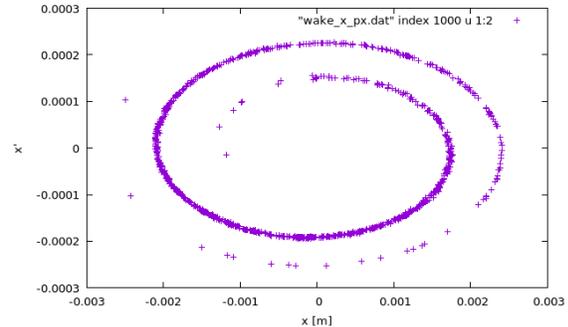
0 turn



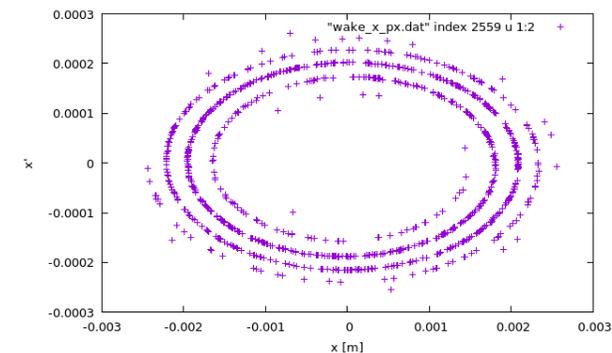
500 turn



1000 turn



2550 turn



何周もするとbunchの重心が0になり減衰となる

# シミュレーションコードへのWakeの組み込み

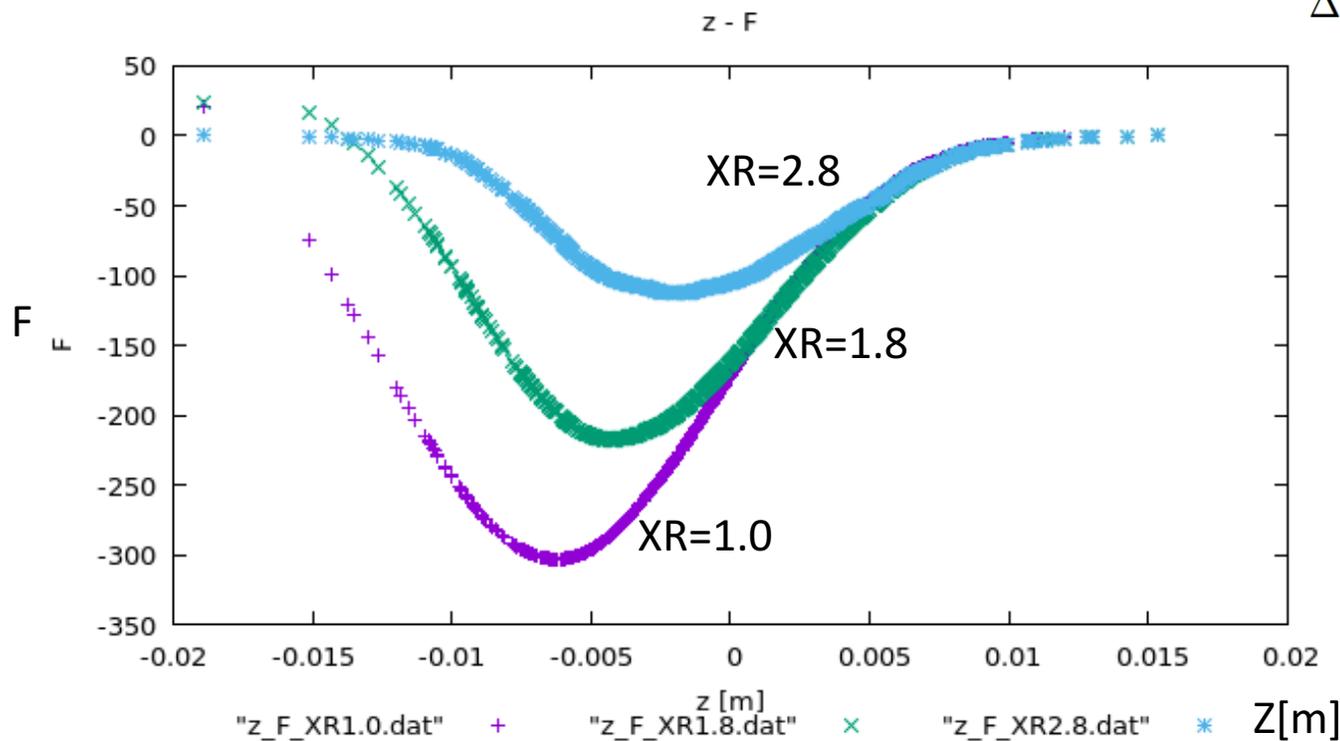
バンチ内粒子の運動方程式 (Wakeによる影響を考慮)

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \left(\frac{2\pi\nu_x}{L}\right)x = -\frac{Nr_e}{\gamma L}F_x(z)$$

$$F_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho_x(z')dz$$

1000個のマクロ粒子をガウス乱数で発生させ、ベータトロン振動させる。  
周回ごとにF(z)を粒子分布に応じて計算。  
F(z)によりマクロ粒子にキック(力積)を与える

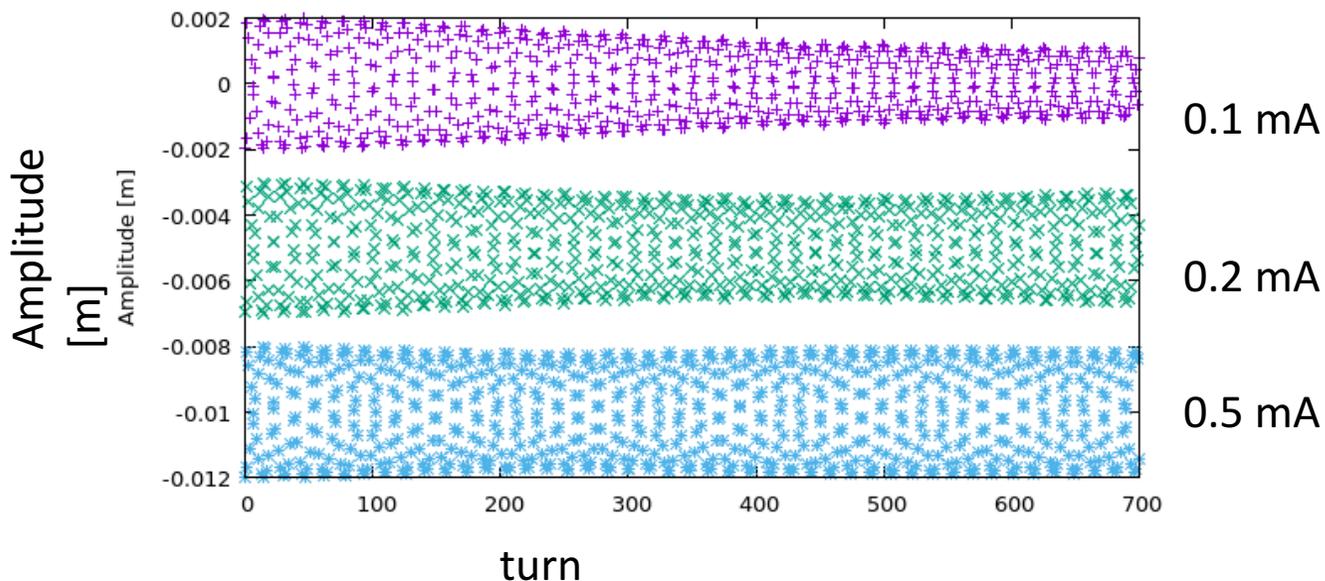
$$\Delta\langle p_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma}\langle F_x \rangle = -\frac{Nr_e}{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(z-z')\rho(z)\rho(z')dz'dz \times \langle x \rangle$$



← Bunchが受ける力

$$\chi_R = \frac{\omega_R \sigma}{c}$$

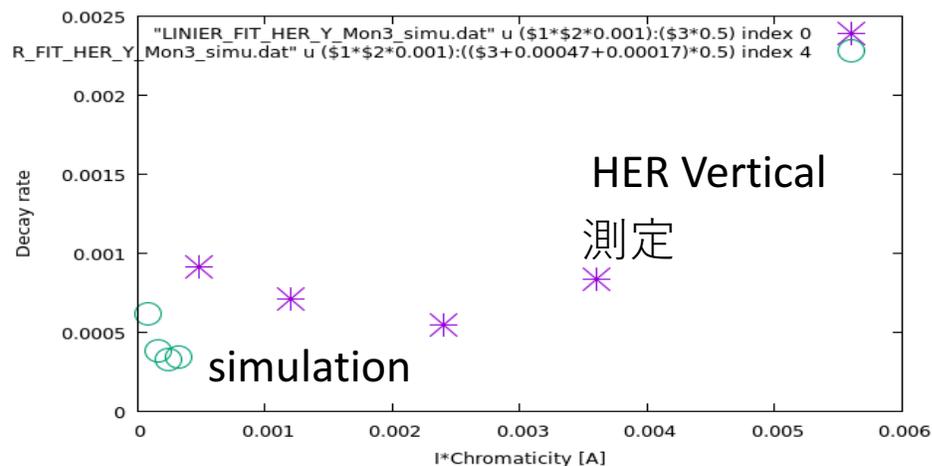
# 非線形効果とWの干渉効果



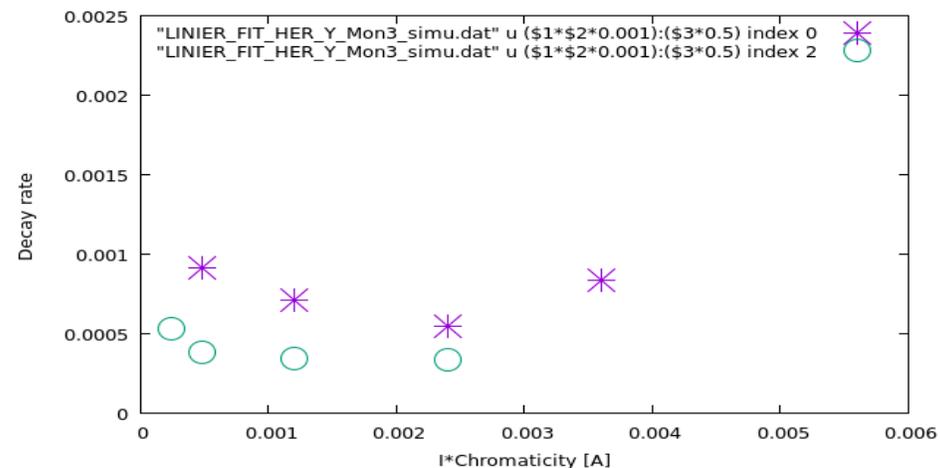
\*電流が増加することにより減衰が遅くなっている

- 非線形効果により粒子集団がばらけて減衰する一方で、Wの効果も合わさることにより、ばらけを抑制している
- 電流を増やすにつれてWが強くなるので減衰が弱まっていると考えられる。

W=const

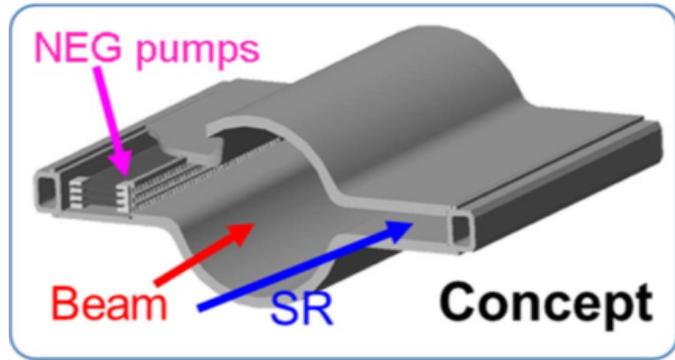


Resonator Wake



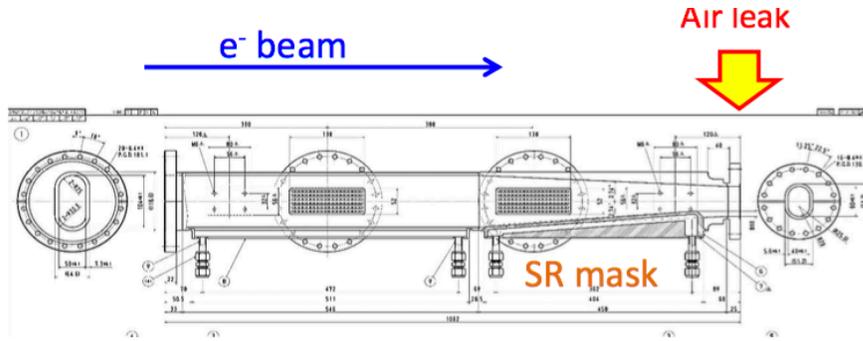
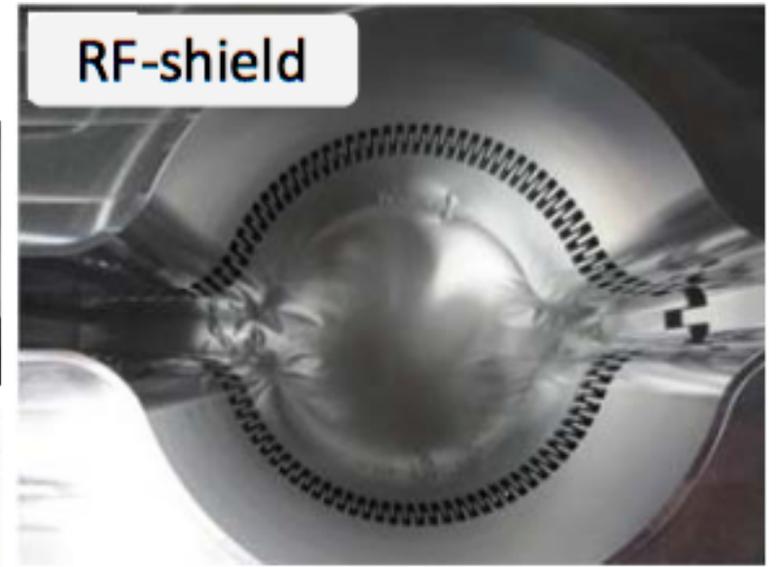
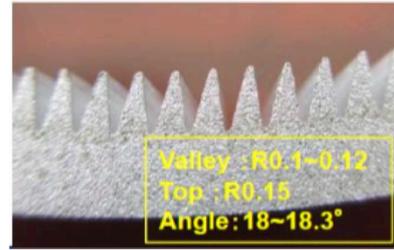
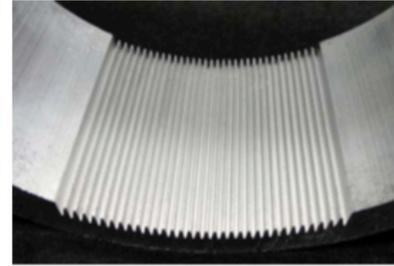
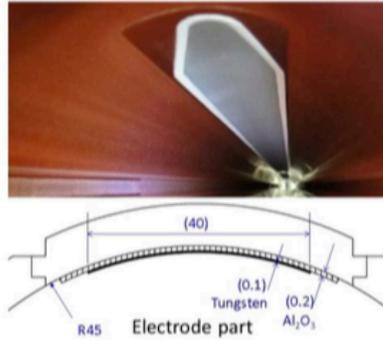
- constant Wakeでは減衰を示している電流領域が異なっているが、Resonator Modelでは再現されている
- HERの低電流領域での減衰率の低下の原因は、非線形効果とWakeの干渉効果であることが考えられる。

Typical size:  $\phi 90 \times w 220$



● Clearing electrode (w)

● Grooved surface (B)



104x50  
race track

60x40  
race track

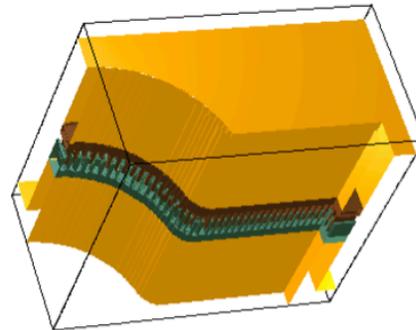
\*xct: ( 0.000E+00, 1.300E-01)  
\*yxt: ( 0.000E+00, 7.000E-02)  
\*zxt: ( -5.000E-02, 7.500E-02)

GdfidL

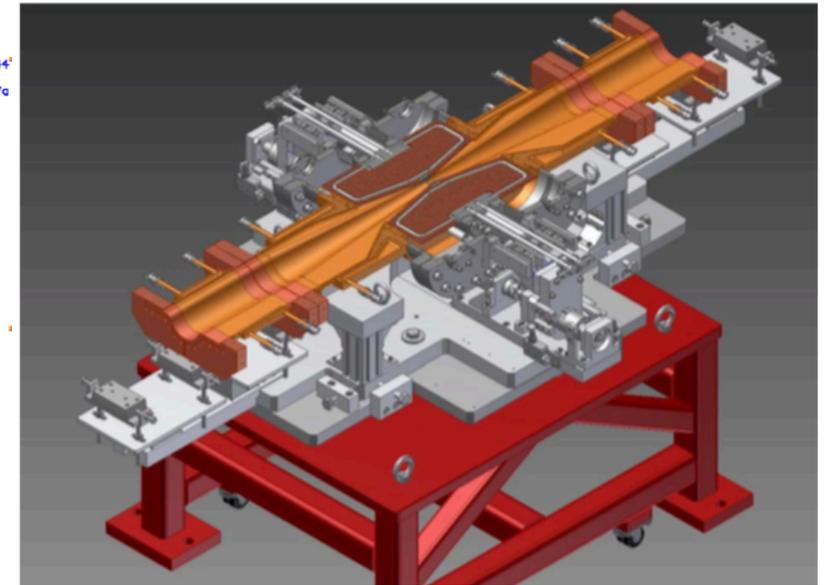
Material Boundaries

23/12/2016, 08:32:44'

v3.3 Tue Oct 15 2013 wb027c



Schematic of a horizontal-type collimator



加速器内の様々なパーツに対して、電荷通過後の電磁場をマクスウェル方程式を解くことで計算(商用コード)



# LER Horizontal 電磁場計算より

ARES: Kick factor=-20.6187 V/pC/m  
Bellows: Kick factor=37.265 V/pC/m  
MO flange: Kick factor=-21.7773 V/pC/m  
Pumping port: Kick factor=-0.0058289 V/pC/m  
SR mask: Kick factor=-1.15638 × 10<sup>-9</sup> V/pC/m  
IR duct: Kick factor=-69.7232 V/pC/m  
BPM: Kick factor=-4.03616 V/pC/m  
Feedback kicker: Kick factor=-5.08536 V/pC/m  
Feedback BPM: Kick factor=-4.93105 V/pC/m  
Longitudinal kicker: Kick factor=-7.65254 V/pC/m  
Grooved beam pipe: Kick factor=-45.6397 V/pC/m  
Tapers: Kick factor=-2.58005 V/pC/m  
Clearing electrode: Kick factor=-4.23382 V/pC/m  
Collimator: Kick factor=-15.7179 V/pC/m  
Resistive wall: Kick factor=-58.3156 V/pC/m

(★ Total ★)

[合計]

$$\begin{aligned} \text{kk} = & 22.6187 + 0.0 + 21.7773 + 0.11184 + \\ & 1.15 \times 10^{-9} + 69.7232 + 4.03616 + 5.08536 + 4.93105 + \\ & 7.65254 + 45.6397 + 2.58 + 4.23382 + 15.7179 + 57.3229 \end{aligned}$$

261.43

Kick Factor  $1.92 \times 10^4 / m^2$

ARES cavity: tune shift=-0.0000649158 /mA  
Bellows: tune shift=0.000119174 /mA  
MO flange: tune shift=-0.000069644 /mA  
Pumping port: tune shift=-1.86409 × 10<sup>-8</sup> /mA  
SR mask: tune shift=-3.69813 × 10<sup>-15</sup> /mA  
IR duct: tune shift=-0.000348902 /mA  
BPM: tune shift=-0.0000146251 /mA  
Feedback kicker: tune shift=-0.0000212714 /mA  
Feedback BPM: tune shift=-0.0000157696 /mA  
Longitudinal kicker: tune shift=-0.000029431 /mA  
Grooved surface: tune shift=-0.000100682 /mA  
Taper: tune shift=-8.25103 × 10<sup>-6</sup> /mA  
Clearing electrode: tune shift=-0.000013169 /mA  
Collimator: tune shift=-0.0000762935 /mA  
Resistive wall: tune shift=-0.000186494 /mA  
Total tune shift with simple estimate: 0.000639603  
Total tune shift w/o IR, collimators and bellows:  $-0.000524272$   
Total tune shift w/o collimators and bellows: -0.000873174  
Total tune shift w/o bellows: -0.000949467

Measurement Tune shift kick Factor

$$3.01 \times 10^4 / m^2$$

# 電磁場計算結果との比較と評価

- 構造が複雑なため、正確に電磁場がもとめられていない可能性
- Q値が混合している
- リング内にその他のwakeの要因がある。
- まだ判明していない不安定性の原因が含まれている

上記のことが考えられるため、値に1.5倍の差が出てしまうのはは十分あり得ると考える。

# まとめ

Phase 1でのSuperKEKB加速器リングのWakeを評価した。

beam line	Resonator Wake [ $/m^{-2}$ ]	$\chi_R$	error %
$LER_H$	$2.5 \times 10^5$	1.5	6.32
$LER_V$	$8.7 \times 10^5$	2.8	5.38
$HER_H$	$4.7 \times 10^5$	1.8	16.9
$HER_V$	$2.1 \times 10^6$	5.0	25.0

- LERは数パーセント以内であり良い
- HERの低電流領域の値のばらつきは非線形効果とWakeの干渉効果が考えられる。
- LER(Horizontal)の電磁場計算のSimulation結果と1.5倍の差で一致している

今後

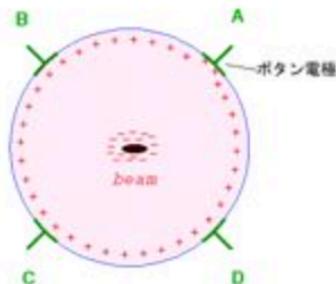
Phase2ではコリメータの増加などがあるため、Wakeが大きくなることが考えられる。Simulationにコリメータの効果を入れ、電流のスレッシュホールドを求める

BackUP

世界最強の加速器、すなわちKEKBのような精密な加速器では、ビーム位置モニタが重要な役割を果たしています。

## ビームの軌道を計る

加速器のビームは真空容器の中を光とほぼ同じ速度で移動しています。ビームを安定に周回させるために、ビームの軌道を数十秒毎に調整しており、多数のビーム位置モニタを用いてビーム軌道を測定しています。その測定原理は、電荷を持つビームからの電磁場によって、真空容器壁に誘導された電荷をボタン電極を用いて、電圧信号として検出します。



上の図のように真空容器に付けられた4個の電極の信号の強さの差をとってビーム位置を測定します。

$$x = k_x \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D}$$
$$y = k_y \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D}$$

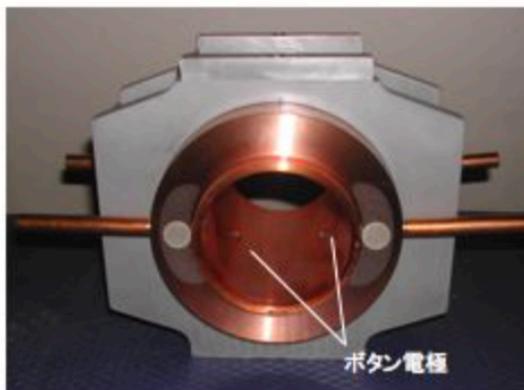
尚、 $k_x$ 、 $k_y$ はビーム位置モニタの形状で決められる係数です。

## モニタの台数は

KEKBのビーム位置モニタは全ての四極電磁石に設置されており、HER(電子リング)の447台、LER(陽電子リング)の454台で合計901台です。

## 測定性能は

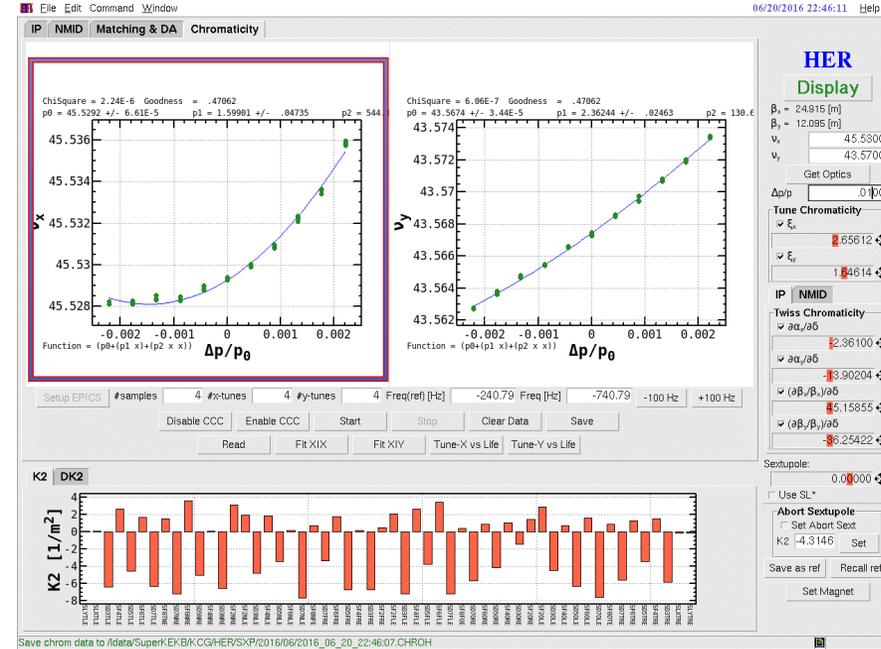
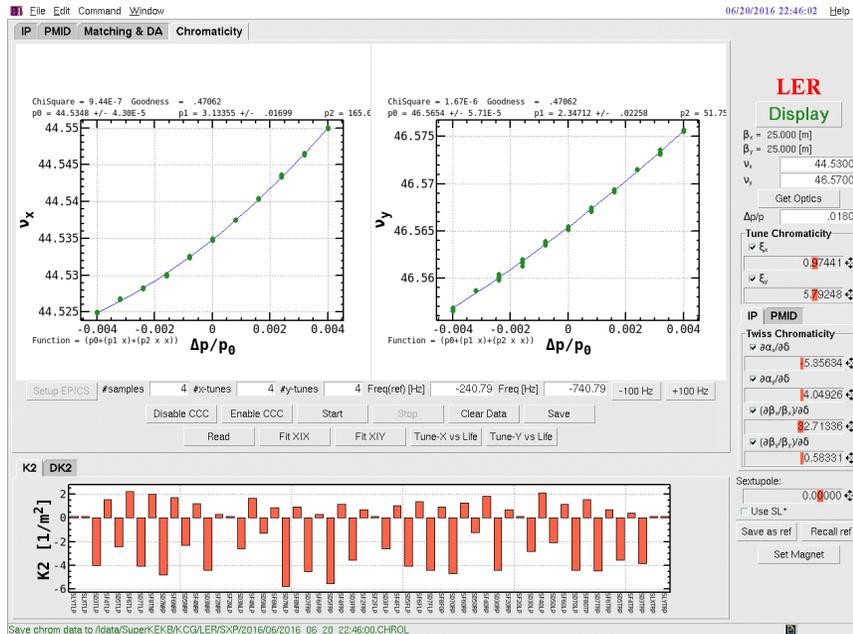
リング全周のビーム位置を約1~3 $\mu$ mの高精度で、3秒以内に測定できます。ビームが最適な軌道からわずかに外れると、高性能コンピューターが瞬時に計算し、補正電磁石を用いて軌道の修正を行います。



$\nu - \delta$

• Phase 1で測定された、運動量の広がりに対するチューンの変化  
**SuperKEKB summary 22 July, 2016**

大西さん測定

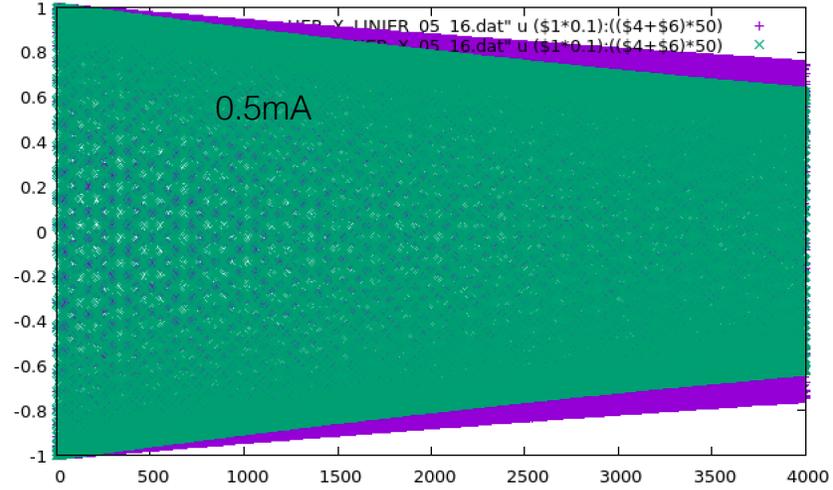
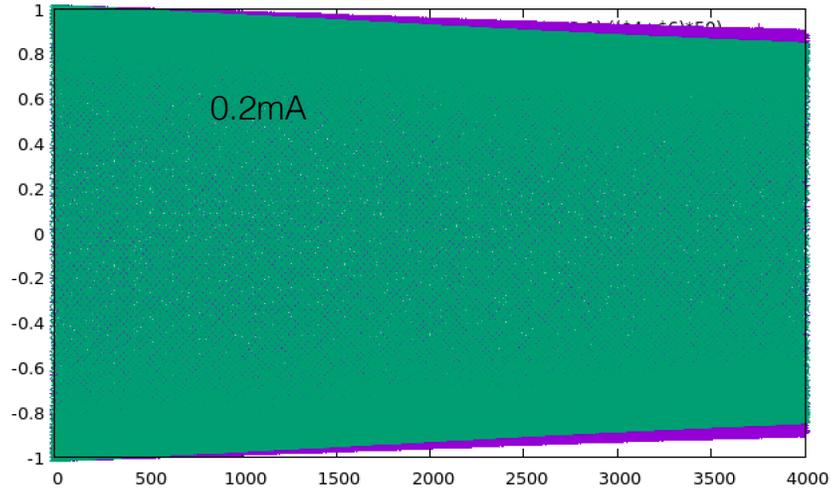


\* HER Horizontal で、運動量偏差に対する線型性が崩れている  
 →  $1.6\delta + 544\delta^2$  の考慮をシミュレーションに組み込み比較

$$\mu_x = 2\pi(\nu_{x0} + \xi\delta) \longrightarrow \mu_x = 2\pi(\nu_{x0} + 1.6\delta + 544\delta^2)$$

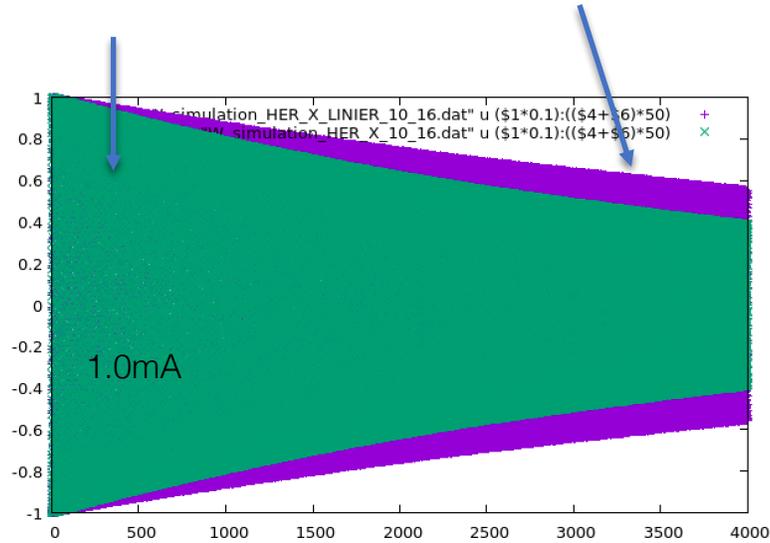
# HER Horizontal

クロマトシティ : 1.6



非線形

線形

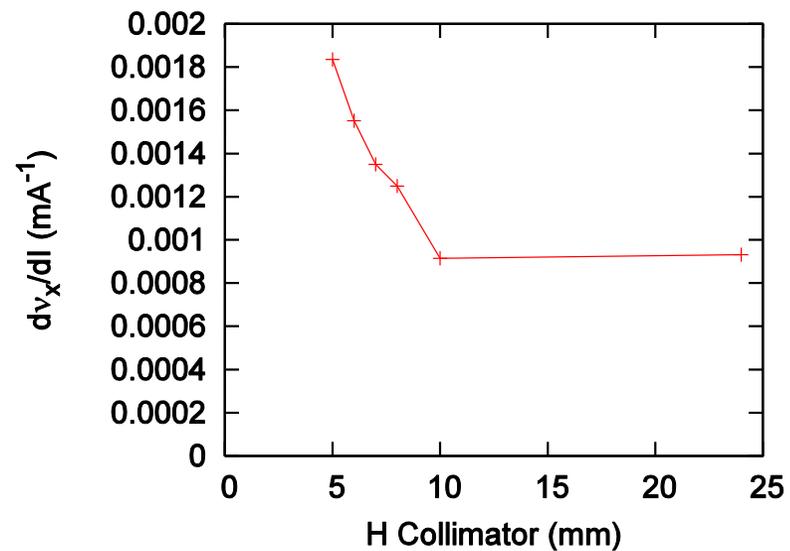


非線形の方が減衰が早い

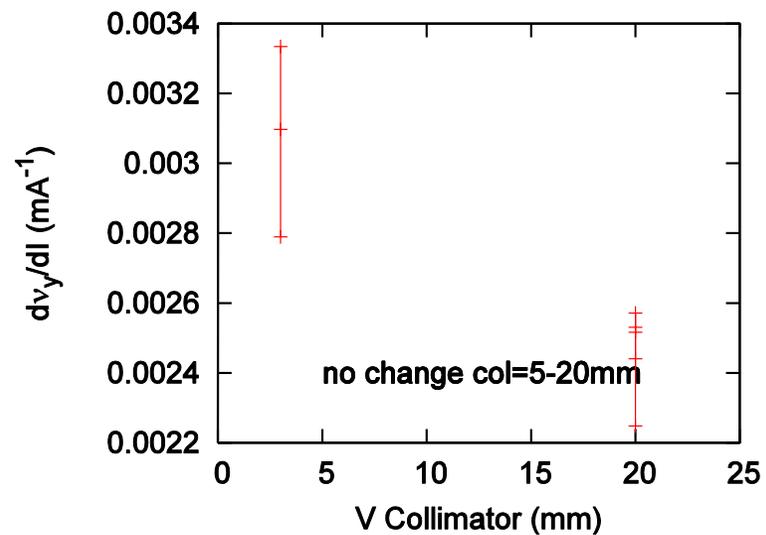
→減衰率の直線からのずれは、運動量偏差に対する線型性が崩れていることによるものではないと考えられる

→HER-HのWは大きく見積もっている（30%位）可能性がある

LER

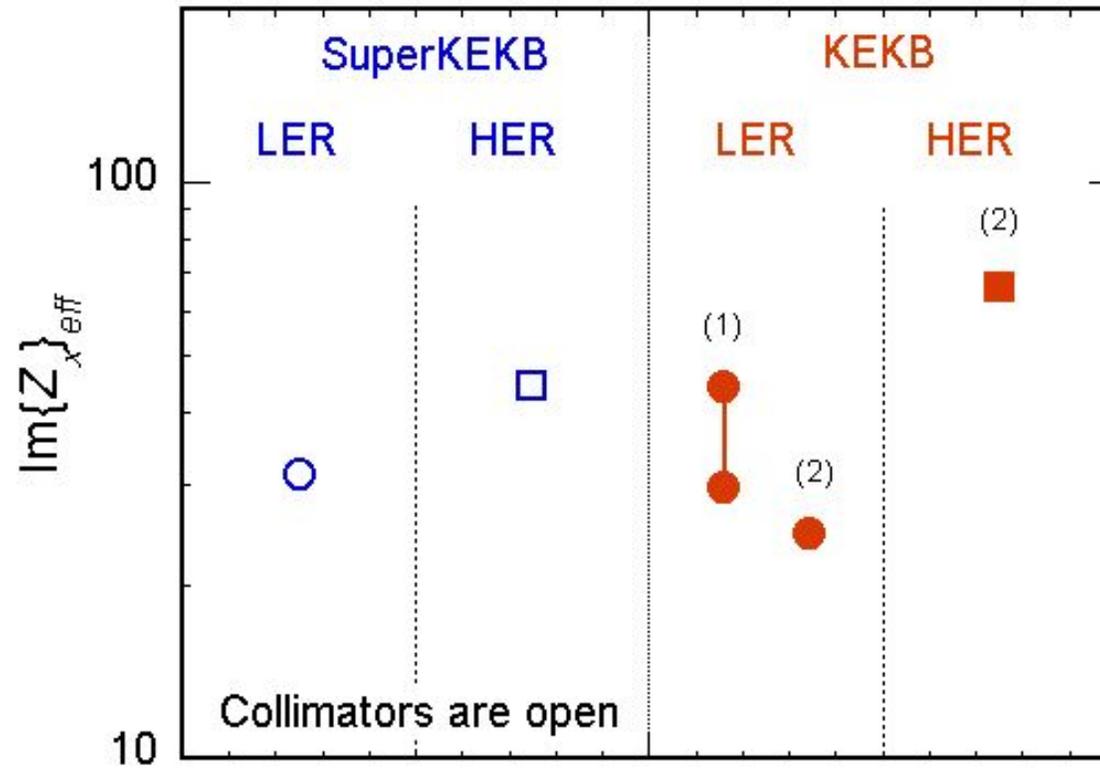


HER



Collimatorが支配的

# Transverse impedance (x)

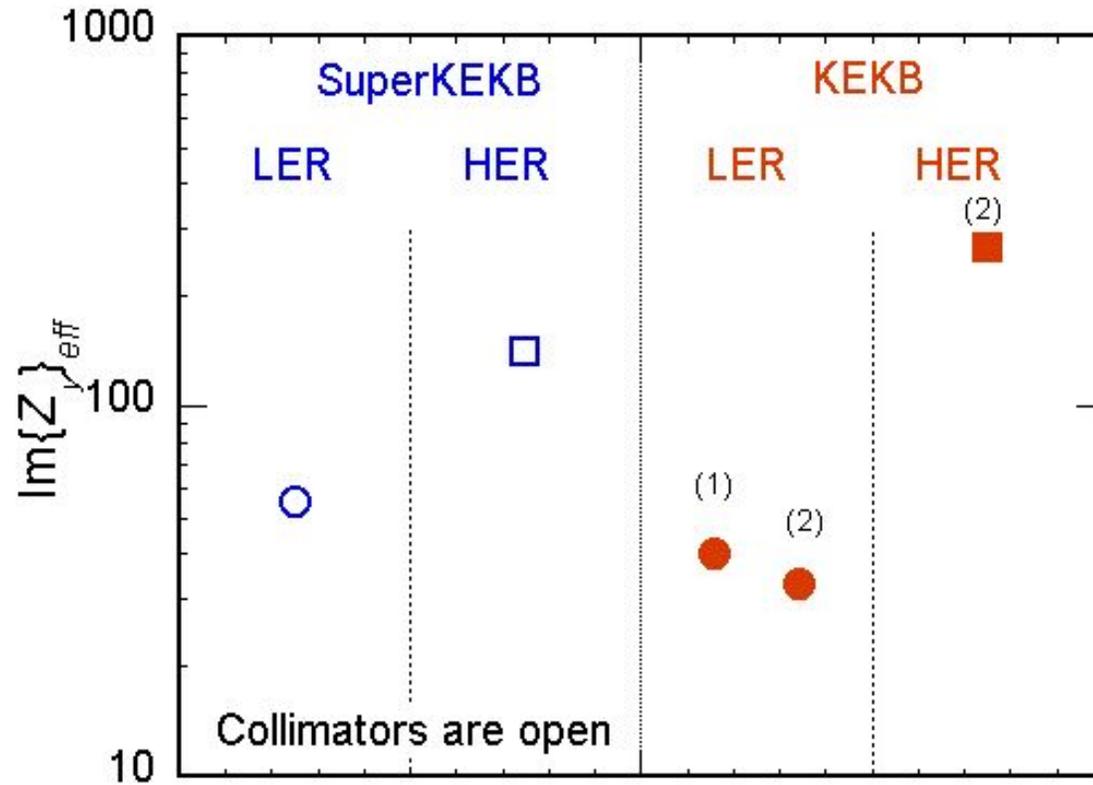


(1) T. Ieiri, Proc. EPAC2000

(2) H. Fukuma, MAC2000

y.Suetsugu さん

# Transverse impedance ( $y$ )



(1) T. Ieiri, Proc. EPAC2000

(2) H. Fukuma, MAC2000

y.Suetsugu さん

## Phase 1

### Impedance model <LER>

- no IR
- two collimators (D06H3,D06H4 gap 22mm)

### Number of components in SuperKEKB <LER>

- ARES 22
- bellows 1000+47
- flange 2000
- pump 2200/0.247
- srmask 1000
- bpm 445
- fbkicker 2
- FBbpm 12
- Lkicker 4
- Groove 520/0.4
- electrode 150/0.88
- taper 50/2