

J-PARC MRの大強度運転へ向けた バンチトレインチューンシフトの研究

Bunch train tune shift study
for higher beam power at J-PARC MR

小林愛音

KEK

第15回加速器学会年会

2018年8月8日 WEOM01

共著者：

外山毅、五十嵐進、佐藤洋一、下川哲司、久保木浩巧

協力：

チューンシフトに関する情報の提供と助言：

大見和史様、菖蒲田義博様

RF電圧の操作：杉山泰之様

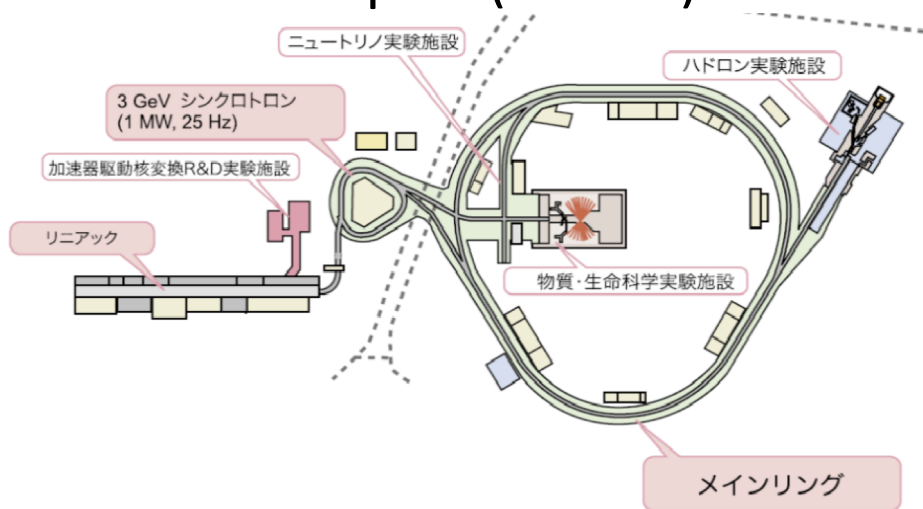
議論および実験の協力：佐藤健一郎様、MR関係者の皆様

研究助成：

JSPS科研費JP16H06288

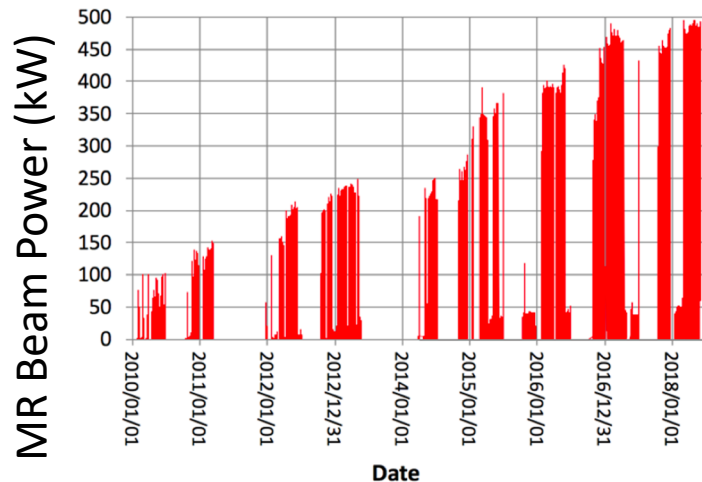
はじめに

大強度陽子加速器施設 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)



現在のMain Ring (MR)の主なパラメーター

injection energy	3.0 GeV
extraction energy	30.0 GeV
circumference	1567.5 m
cycle time	2.48 sec (FX) 5.2 sec (SX)
total intensity	500 kW (FX) 50 kW (SX)
harmonic number	9
RF frequency	1.672 - 1.72 MHz
tune H / V	~ 21.35 / ~ 21.45 (FX) 22.333 / 20.8 (SX)
number of bunches	~ 8



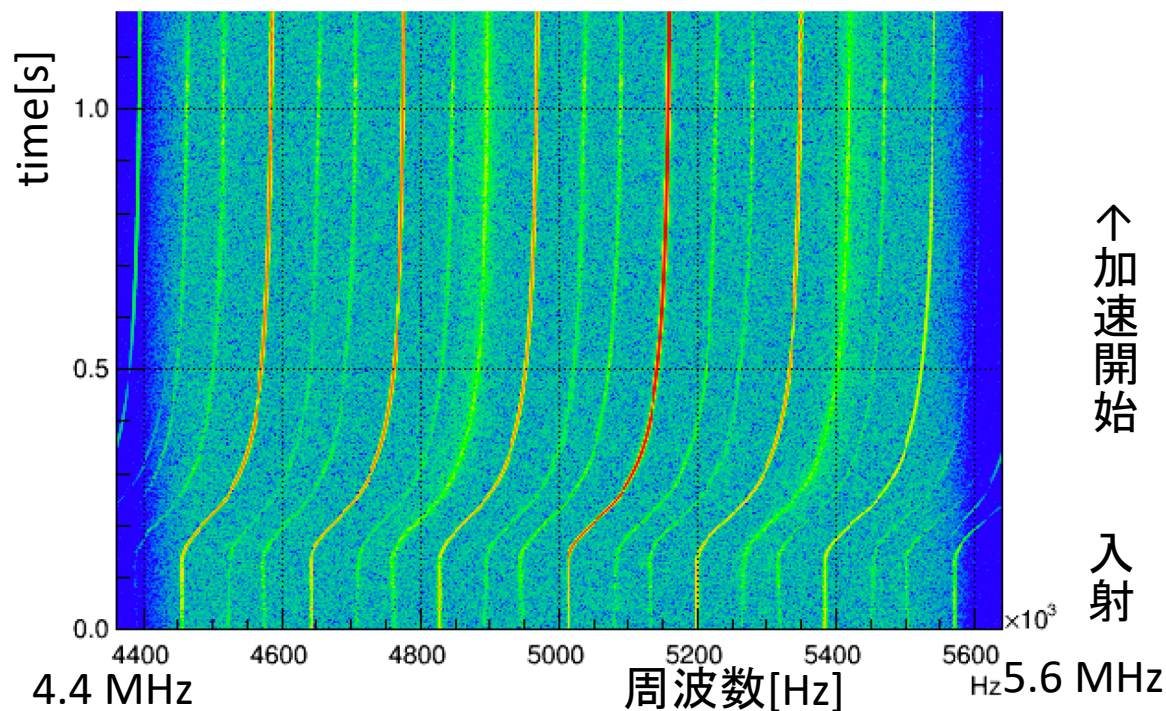
ビームロス低減のため、マルチバンチ
でチューンシフトを測定した
(それまではシングルバンチのみ)

チューンの測定

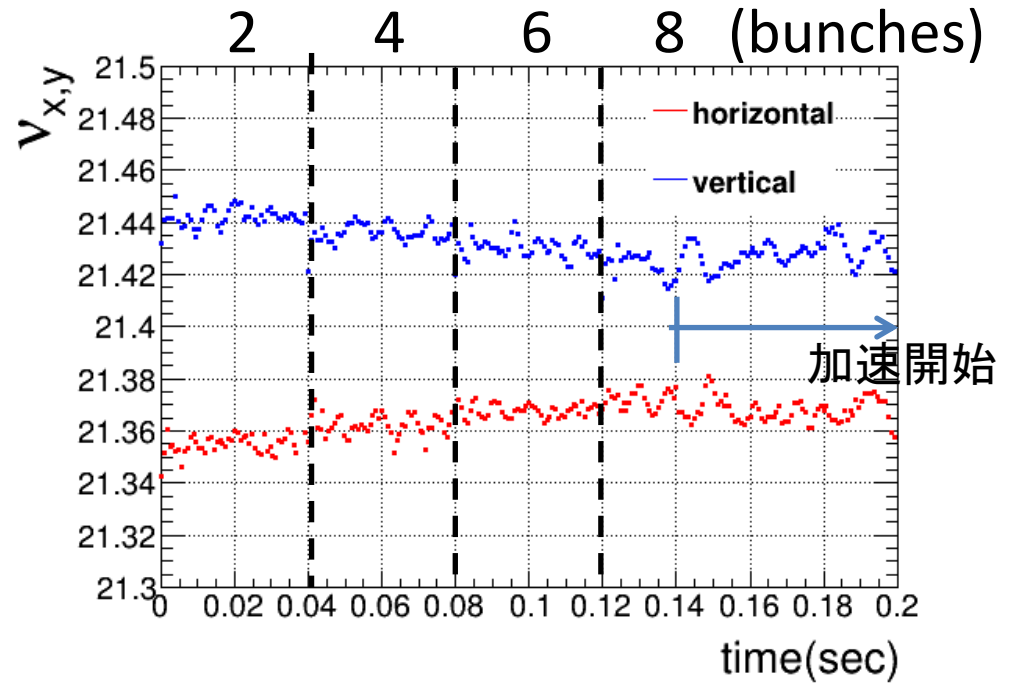
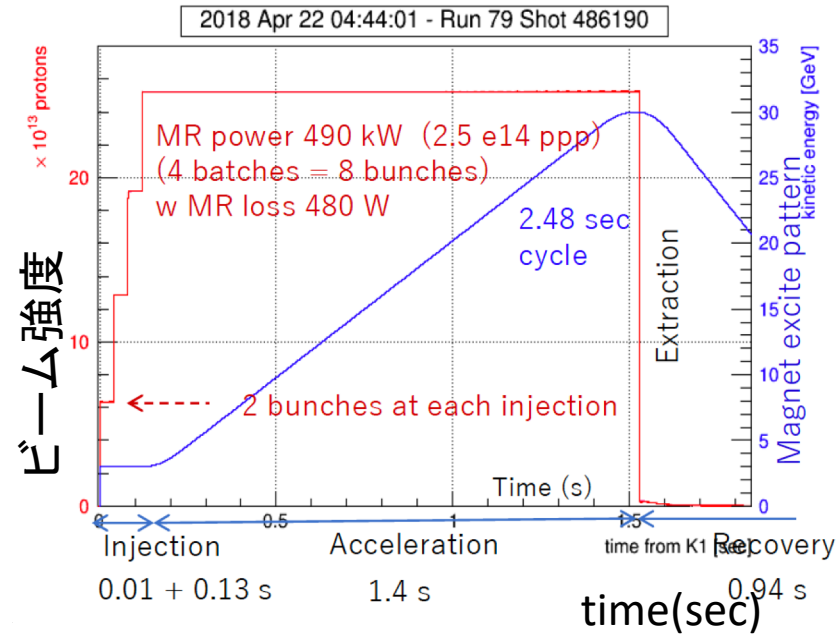
MRに設置されているエキサイター（ストリップラインキッカー）
- ビームを横方向に蹴り、信号を励起

↓
ビーム信号をビーム位置モニターで測定

↓
スペクトルアナライザーでFFT解析、コヒーレントチューンを検出



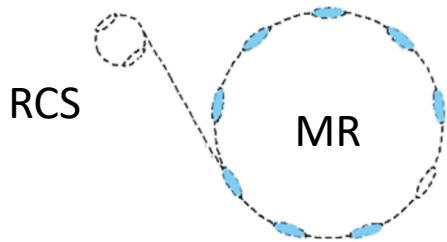
チューンシフト



$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{space charge}} + \Delta\nu_{\text{resistive wall}} + \Delta\nu_{\text{others}}$$

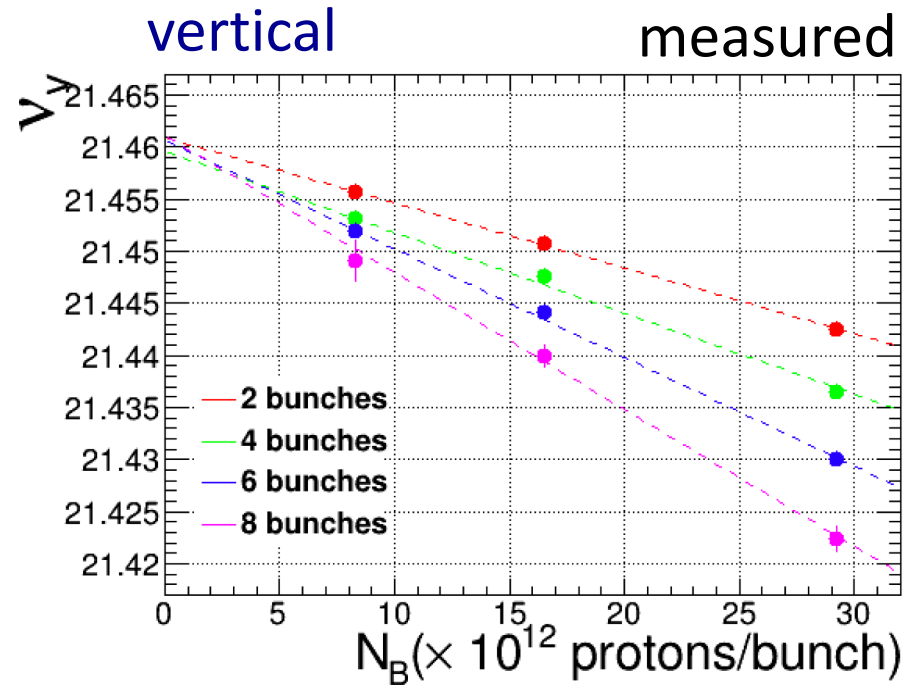
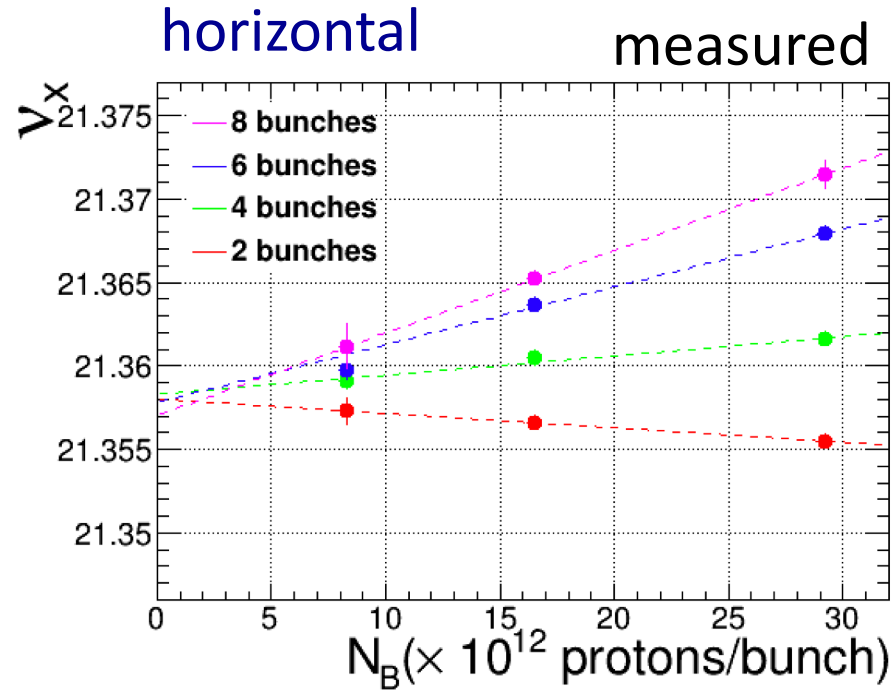
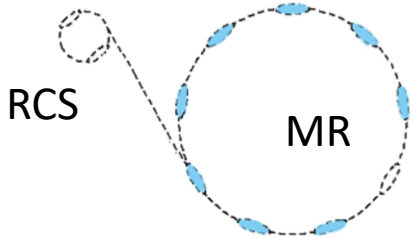
Laslett

Chao *et al.*, Shobuda *et al.*



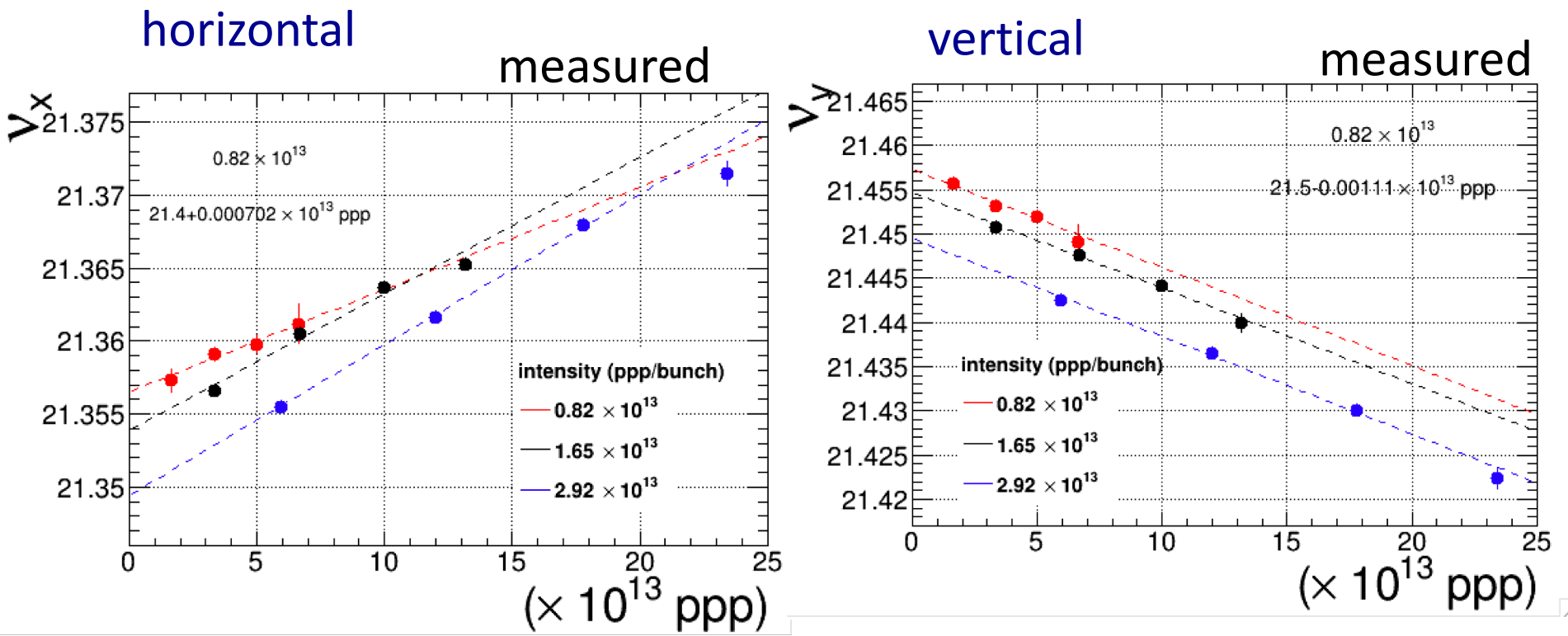
チューンシフト
強度依存性を持つ

チューンシフト v.s. バンチあたりの粒子数



バンチ数依存性のチューンシフト：バンチトレインチューンシフト

チューンシフト V.S.全粒子数



横軸を強度 (ppp) に直したものの

同じ強度でもバンチ数が異なるとチューンが異なる

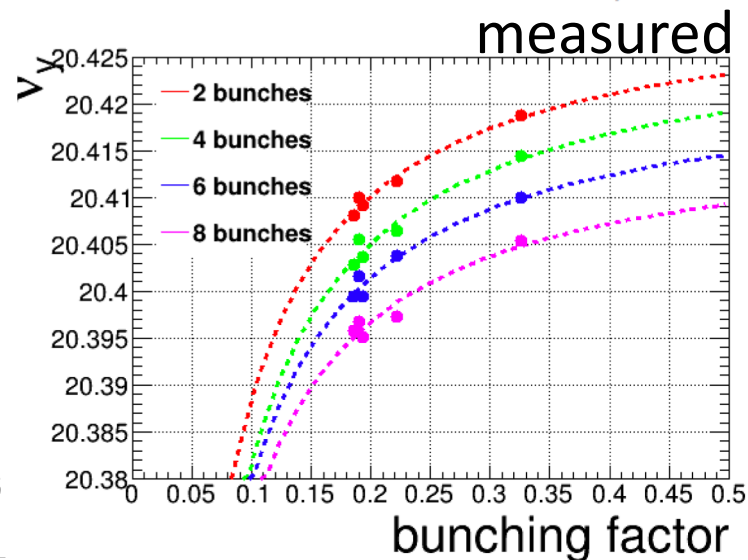
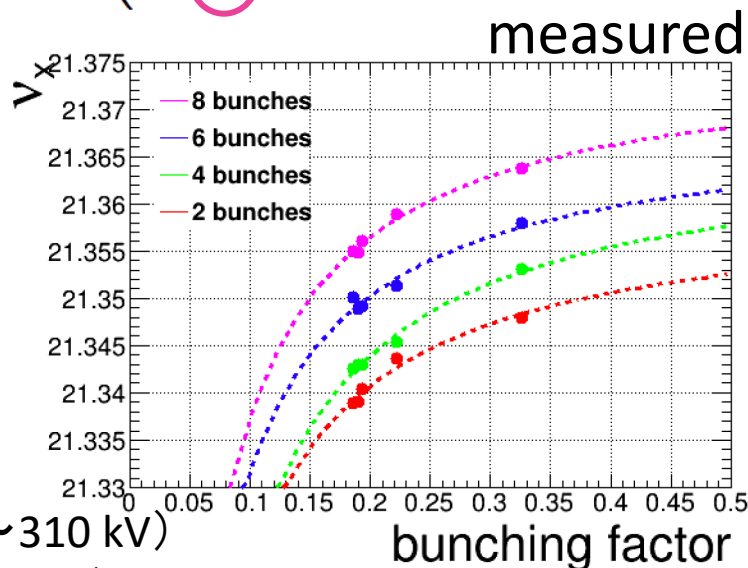
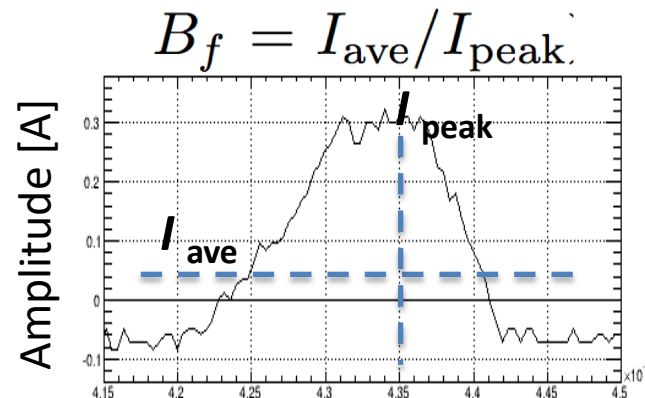
Bunching factor dependence

一定の強度 (1.72×10^{14} ppp) で
RF基本波と二倍高調波の電圧の設定
の操作によりバンチングファクター
を変更した

Laslettの式を参考 (B. Ng)

$$\Delta\nu_{\text{coh}}^{H,V} = -\frac{Nr_oR}{\pi\nu_{H,V}\gamma} \left(\frac{\xi_1^{H,V}}{\beta^2 B_f h^2} + \frac{\epsilon_2^{H,V}}{g^2} F - \frac{\xi_1^{H,V} (1/B_f - 1)}{h^2} - \frac{\xi_1^{H,V} - \epsilon_1^{H,V}}{h^2} \right)$$

$$\Delta\nu \sim 1/B_f$$



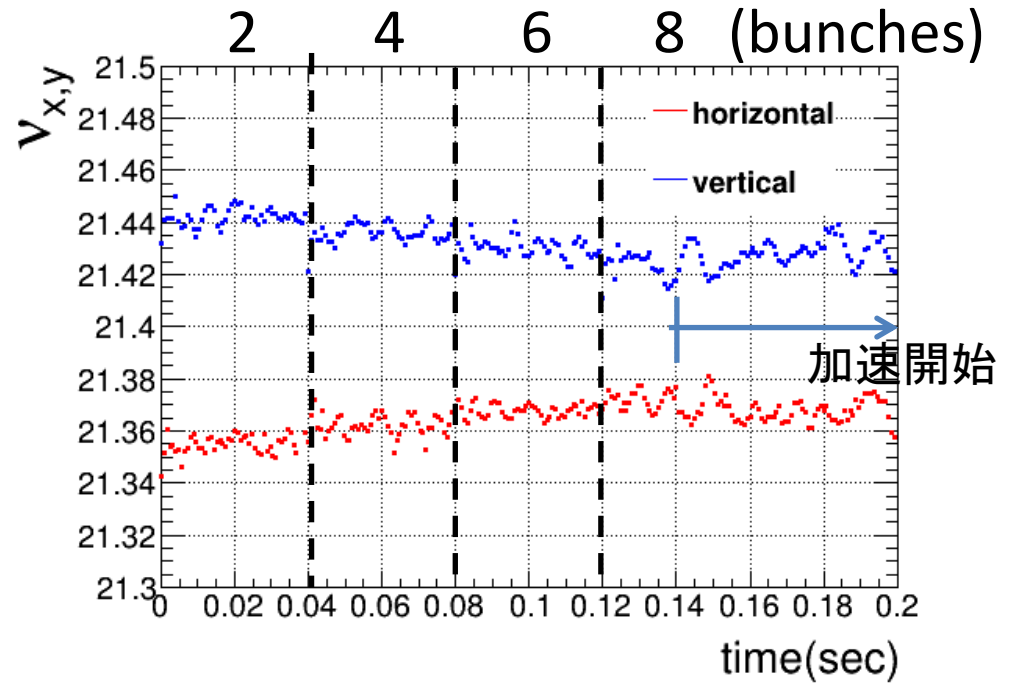
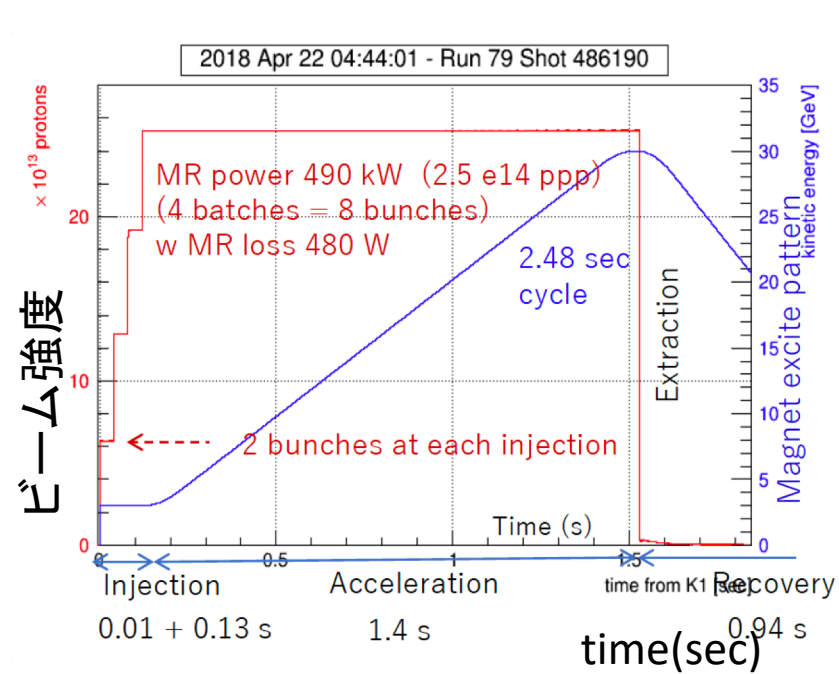
測定条件

1.72×10^{14} ppp

RF基本波 (155 kV ~ 310 kV)

二倍高調波 (0 ~ 110 kV)

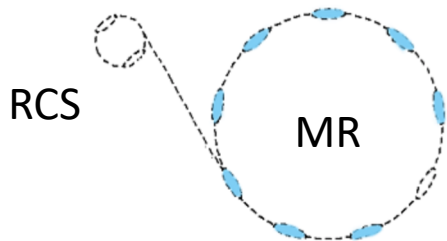
チューンシフト



$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{space charge}} + \Delta\nu_{\text{resistive wall}} + \Delta\nu_{\text{others}}$$

Laslett

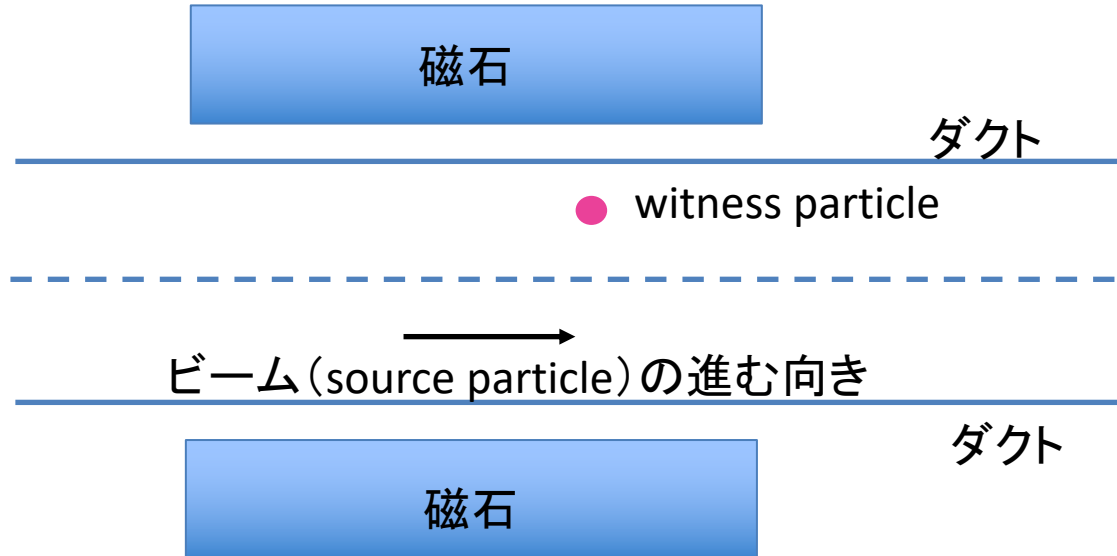
Chao *et al.*, Shobuda *et al.*



チューンシフト
強度依存性を持つ

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{space charge}} + \Delta\nu_{\text{resistive wall}} + \Delta\nu_{\text{others}}$$

空間電荷による効果



個々の粒子 (witness particle) はダクトから鏡像電流と、
磁石から鏡像磁場の力を受ける

↓
チューンに影響し、チューンシフトが起こる

空間電荷効果によるチューンシフト

L. J. Laslett, 1963/ B. Ng Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities
2006/ M. A. Martins et al., FERMILAB-TM-1880, 1994

Laslettの式を参考 (B. Ng)

$$\Delta\nu_{\text{coh}}^{H,V} = -\frac{Nr_oR}{\pi\nu_{H,V}\gamma} \left(\frac{\xi_1^{H,V}}{\beta^2 B_f h^2} + \frac{\epsilon_2^{H,V}}{g^2} F - \frac{\xi_1^{H,V} (1/B_f - 1)}{h^2} - \frac{\xi_1^{H,V} - \epsilon_1^{H,V}}{h^2} \right)$$

$N = N_B \cdot M$

Electric image in vacuum chamber

Magnetic image in magnetic poles

AC magnetic image from axial bunching

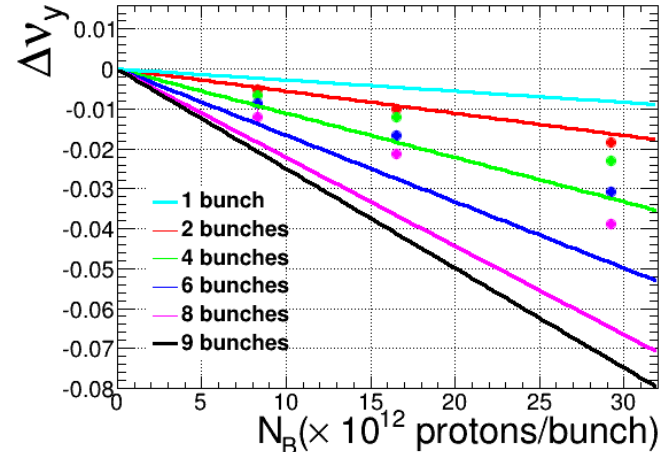
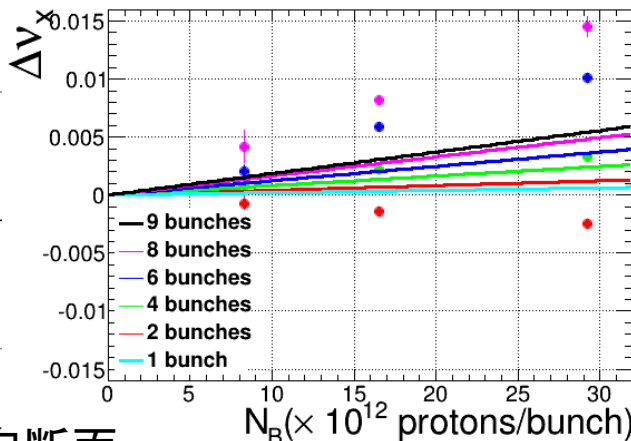
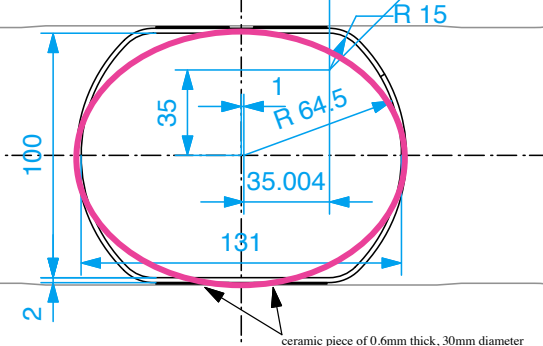
AC magnetic image from transverse motion

tune shift slope ($d\nu_{x,y}/dN_b [\times 10^{12}/M]$)

偏向電磁石総全長/加速器周長: $F = 0.358$
それ以外: $F = 0.642$

Tune shift slope	Horizontal	Vertical
Non-circular	0.0000916958	-0.000206191
Circular	-0.000071106	-0.000071106

$\xi_1^{H,V}, \epsilon_1^{H,V}, \epsilon_2^{H,V} \sim 0.003^\circ$
形状因子



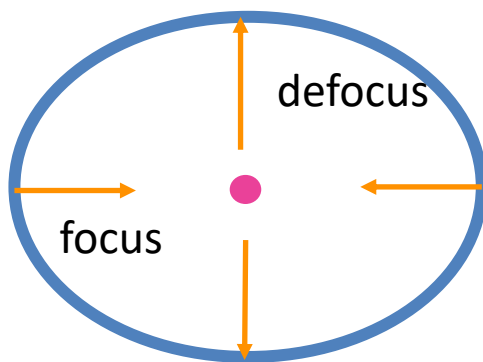
偏向電磁石のダクト横方向断面
(それ以外は円形を仮定)

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{space charge}} + \Delta\nu_{\text{resistive wall}} + \Delta\nu_{\text{others}}$$

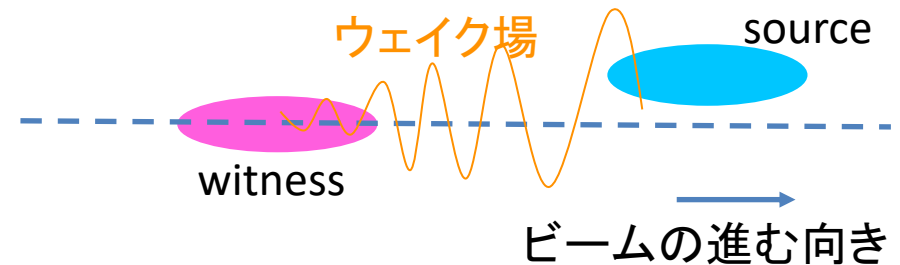
Resistive wallの寄与

非円形のダクトはquadrupolarウェイク場を引き起こし
特に長い距離のウェイク場に影響を及ぼす

ダクトの横方向断面



Chao *et al.*, Phys. Rev. A. B. **5**, 111001, 2002
Shobuda *et al.*, Phys. Rev. E **66**, 056501, 2002



ビームを構成する粒子の受ける力が、水平・垂直方向で異なる
→バンチトレインチューンシフト

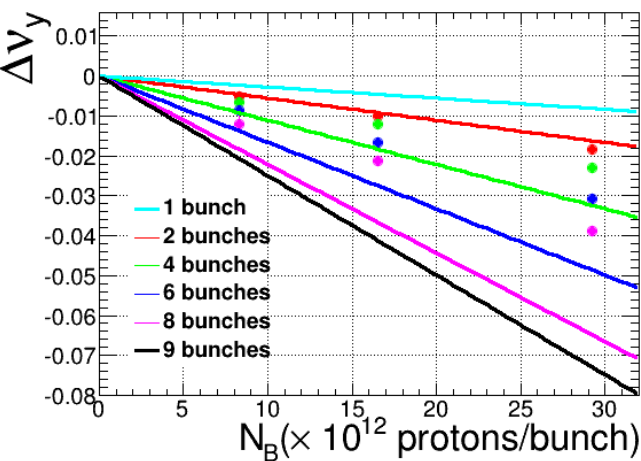
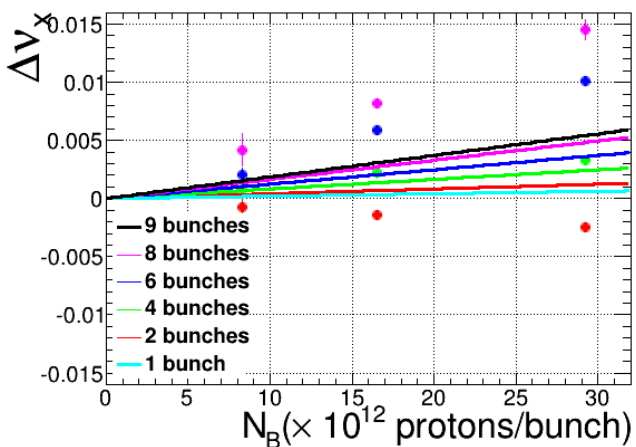
空間電荷

ダクトの形状を円形+非円形と近似

tune shift slope ($d\nu_{x,y}/dN_b[\times 10^{12}/M]$)

Tune shift slope	Horizontal	Vertical
Non-circular	0.0000916958	-0.000206191
Circular	-0.000071106	-0.000071106

2ページ前の絵



空間電荷 + resistive wall

resistive wall

tune shift slope ($d\nu_{x,y}/dN_b[\times 10^{12}/M]$)

ダクトの形状: 円形 + 非円形と近似

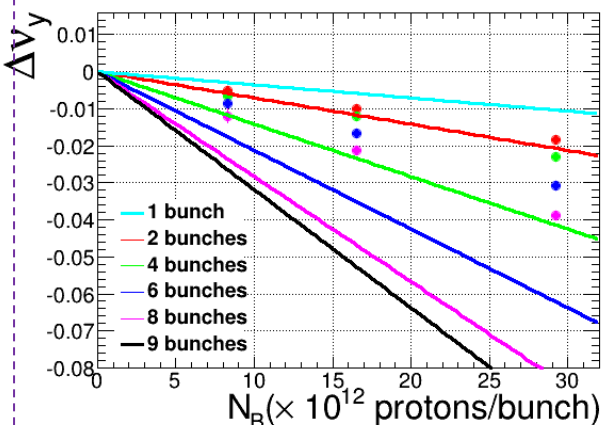
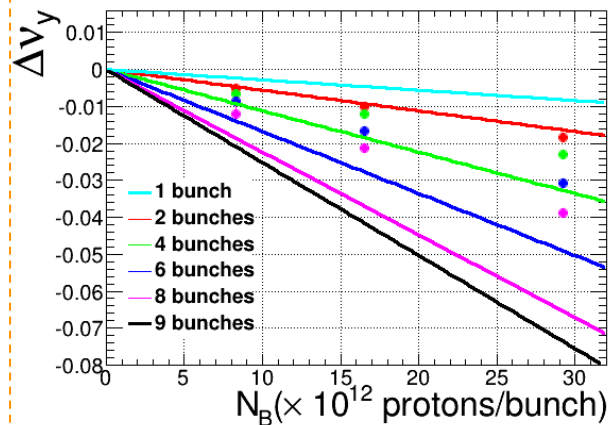
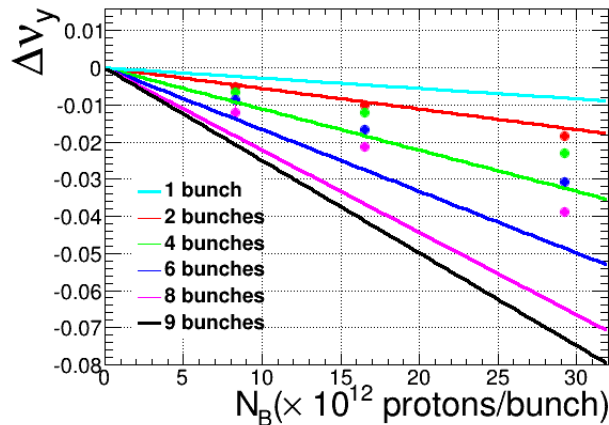
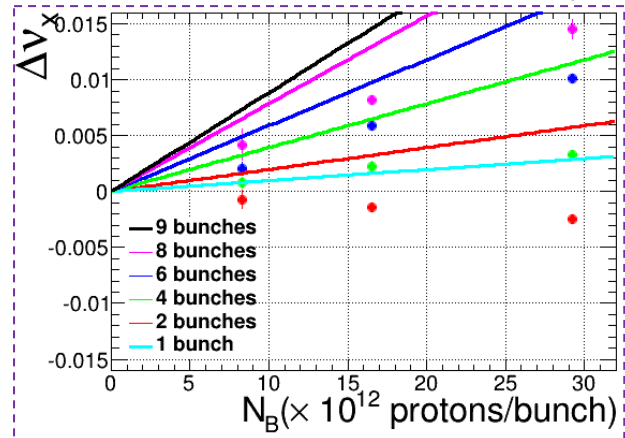
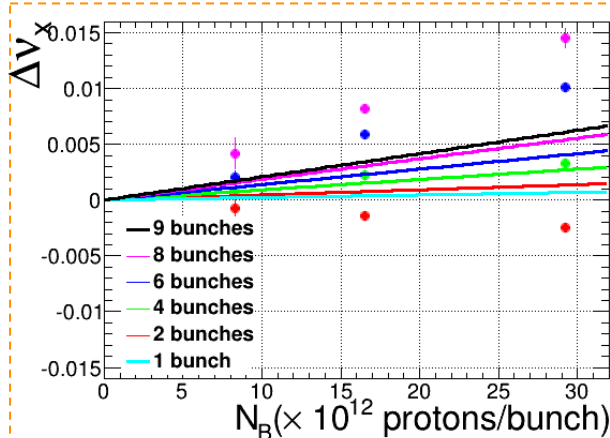
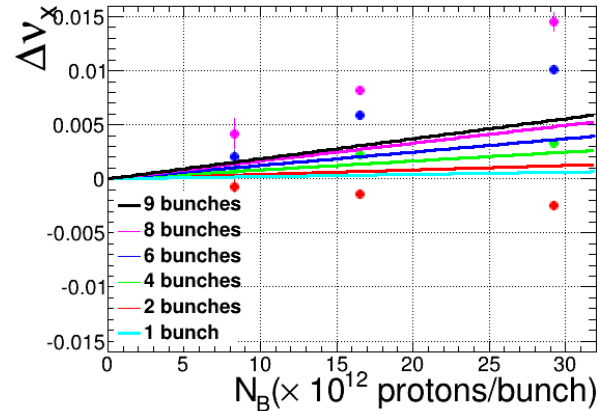
材質: ステンレススチール

Model	Horizontal	Vertical
based on Chao <i>et al.</i>	7.75175×10^{-5}	-7.71202×10^{-5}
based on Shobuda <i>et al.</i>	2.51124×10^{-6}	-2.51124×10^{-6}

Laslett

Laslett + Simplified model
based on Shobuda *et al.* (Phys.
Rev. E **66**, 056501, 2002)

Laslett + Simplified model
based on Chao *et al.* (Phys.
Rev. A. B. **5**, 111001, 2002)



空間電荷 + resistive wall

resistive wall

tune shift slope ($d\nu_{x,y}/dN_b [\times 10^{12}/M]$)

ダクトの形状: 円形 + 非円形と近似

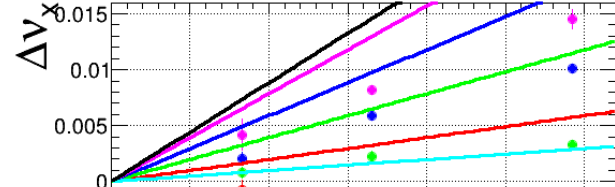
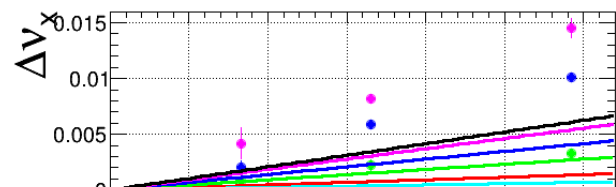
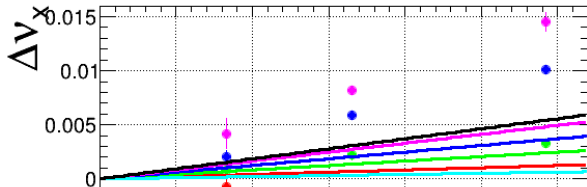
材質: ステンレススチール

Model	Horizontal	Vertical
based on Chao <i>et al.</i>	7.75175×10^{-5}	-7.71202×10^{-5}
based on Shobuda <i>et al.</i>	2.51124×10^{-6}	-2.51124×10^{-6}

Laslett

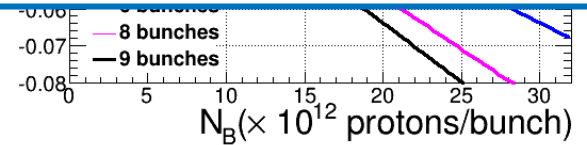
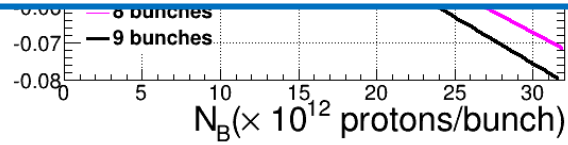
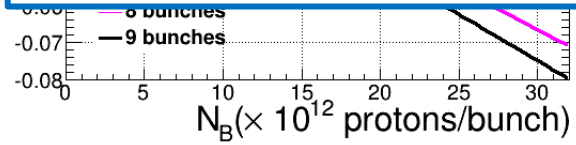
Laslett + Simplified model
based on Shobuda *et al.* (Phys.
Rev. E **66**, 056501, 2002)

Laslett + Simplified model
based on Chao *et al.* (Phys.
Rev. A. B. **5**, 111001, 2002)



実際には加速器リングの中には複雑な形状・構造があり、様々な材質もあり、他にもインピーダンス源は考えられる
 大強度マルチバンチのチューンシフトはMRで初めて観測した
 バンチングファクター依存性、強度依存性：理論と傾向は合う
 バンチ数依存性：もう少し理論式を拡張する必要があると考える

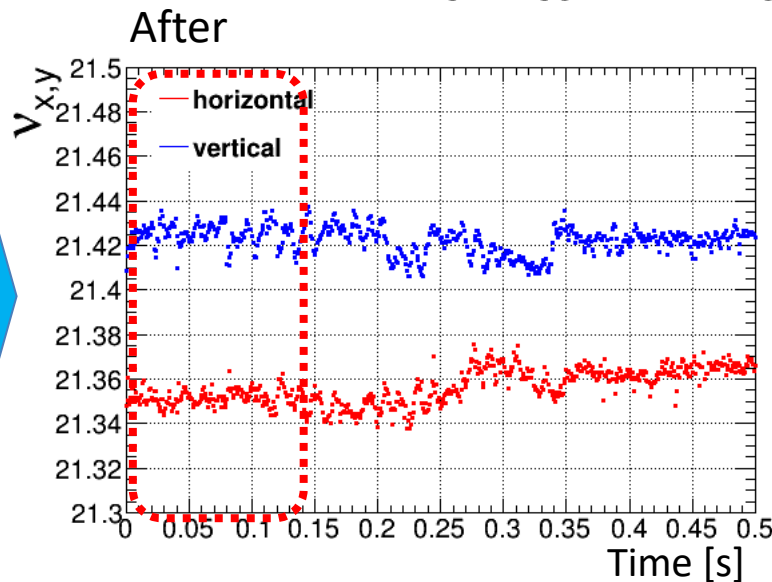
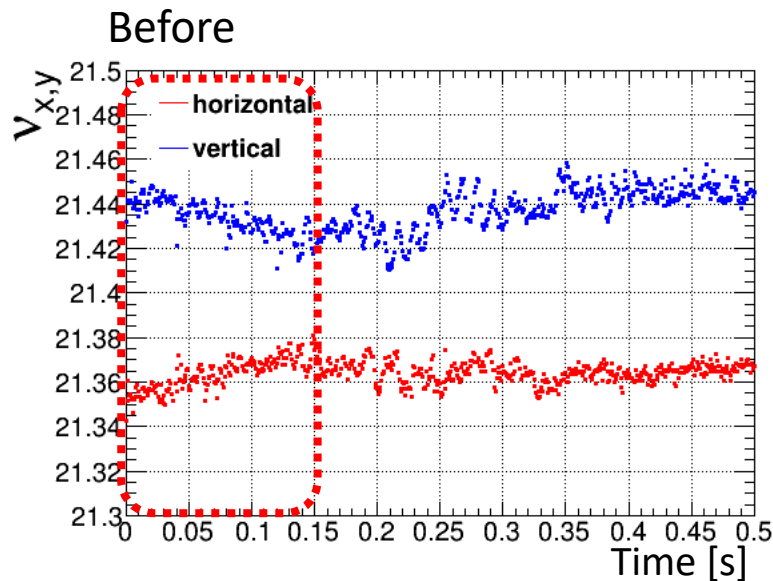
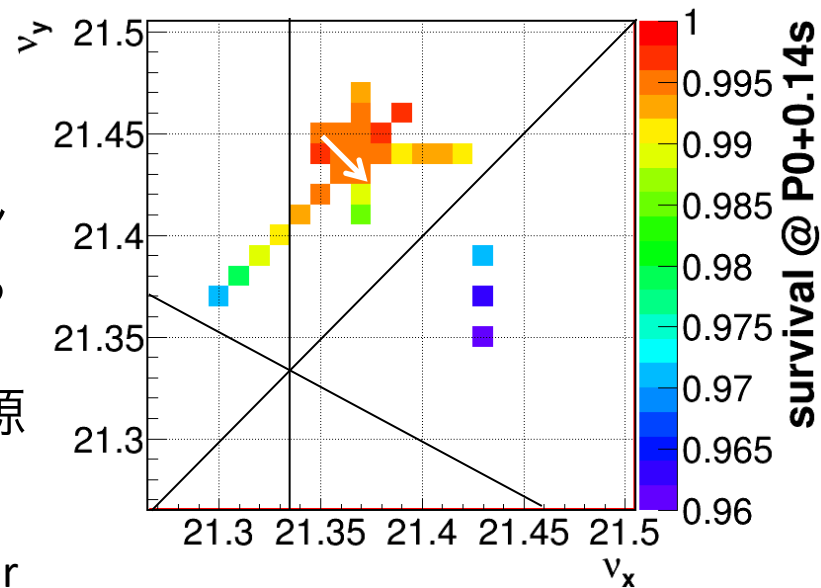
必要に応じて、計算の考慮に含めるものの精度を上げ、定量的な評価を行う



チューンシフト由来の ビームロス

入射時にバンチ数が増えるにつれチューンシフトが
起こり、非線形共鳴へのかかり方が変わる

チューンシフトの補正が四極電磁石の新電源
により可能になった



ビームロスが約30%減った

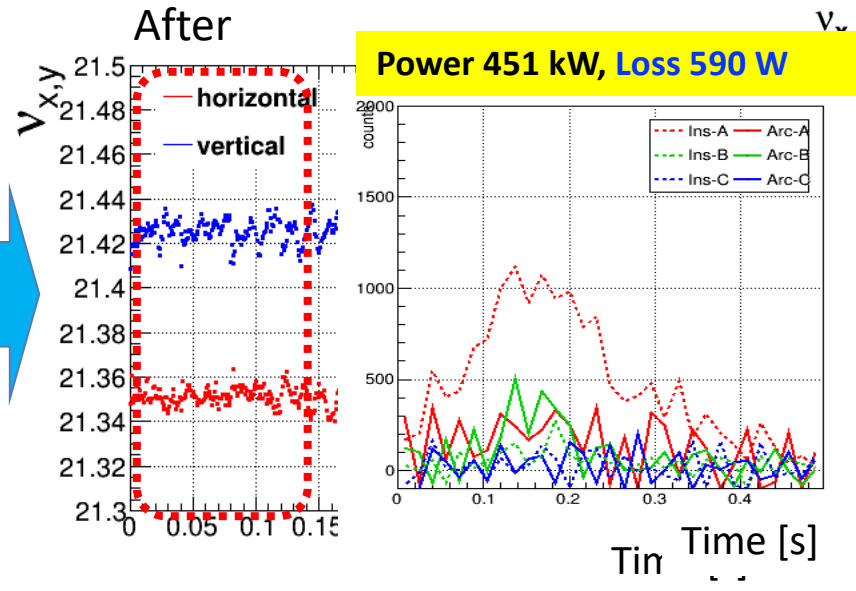
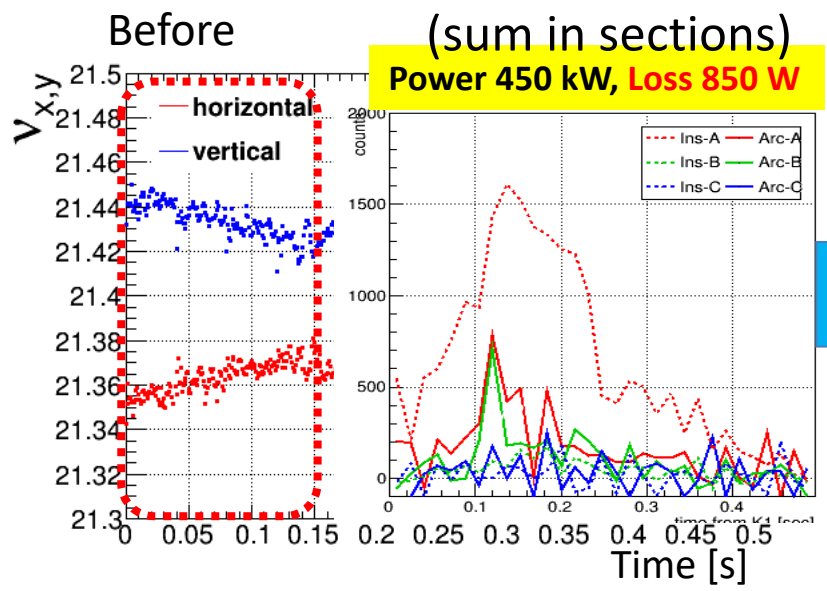
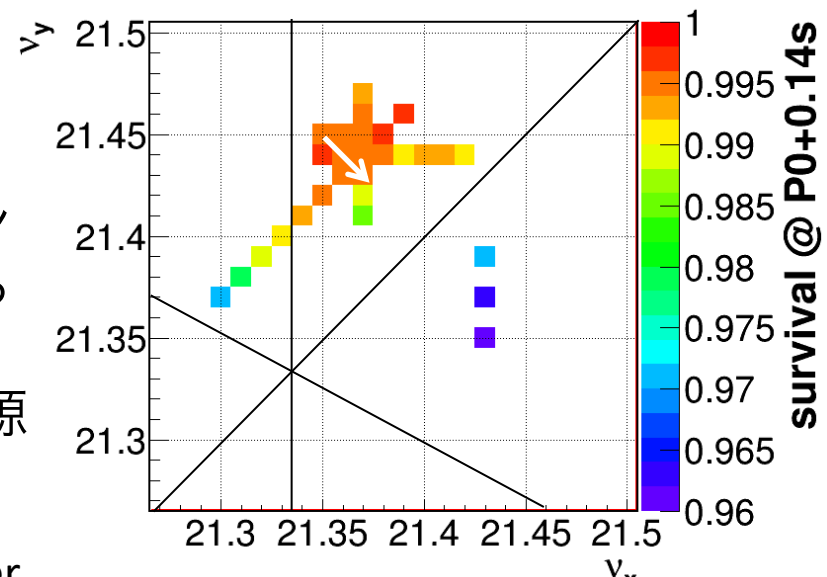
この補正の適用+さらなる調整によりビーム強度490 kWへ

チューンシフト由来の ビームロス

入射時にバンチ数が増えるにつれチューンシフトが起こり、非線形共鳴へのかかり方が変わる

チューンシフトの補正が四極電磁石の新電源により可能になった

Time Variation of Beam Losses



ビームロスが約30%減った

この補正の適用+さらなる調整によりビーム強度490 kWへ

まとめと今後

- J-PARC MRで大強度 (2.4×10^{14} ppp) 、かつ最大の8バンチでバンチトレインチューンシフトを測定した
 - 強度・バンチ数・バンチングファクター依存性
- チューンシフトの傾きの符号が水平・垂直で異なるため、非円形断面のダクトの形状によって発生するquadrupolar wake fieldが影響を及ぼしている可能性がある
- バンチ数依存性については理論式を拡張する必要の可能性があると考える
- チューンシフトを補正することで非線形共鳴へのかかり方が変わってビームロスが減り、ビーム調整の結果、強度を上げることができた
- さらなる大強度化に向けてシミュレーション等により、チューンシフトの評価とインピーダンスの他への影響を調査する