

J-PARC Main Ring大強度運転のための ビーム位置モニター（BPM）の高度化

小林愛音、外山毅、佐藤健一郎、久保木浩功
KEK

2017年8月3日
第14回加速器学会年会
北海道大学クラーク会館・学術交流会館（札幌市）
講演番号：THOM05

Acknowledgements

協力

- 実験：MR関係者の皆様
- SADの使い方・助言：五十嵐進氏、佐藤洋一氏、山本昇氏
- バンプの操作：高野淳平氏

研究助成

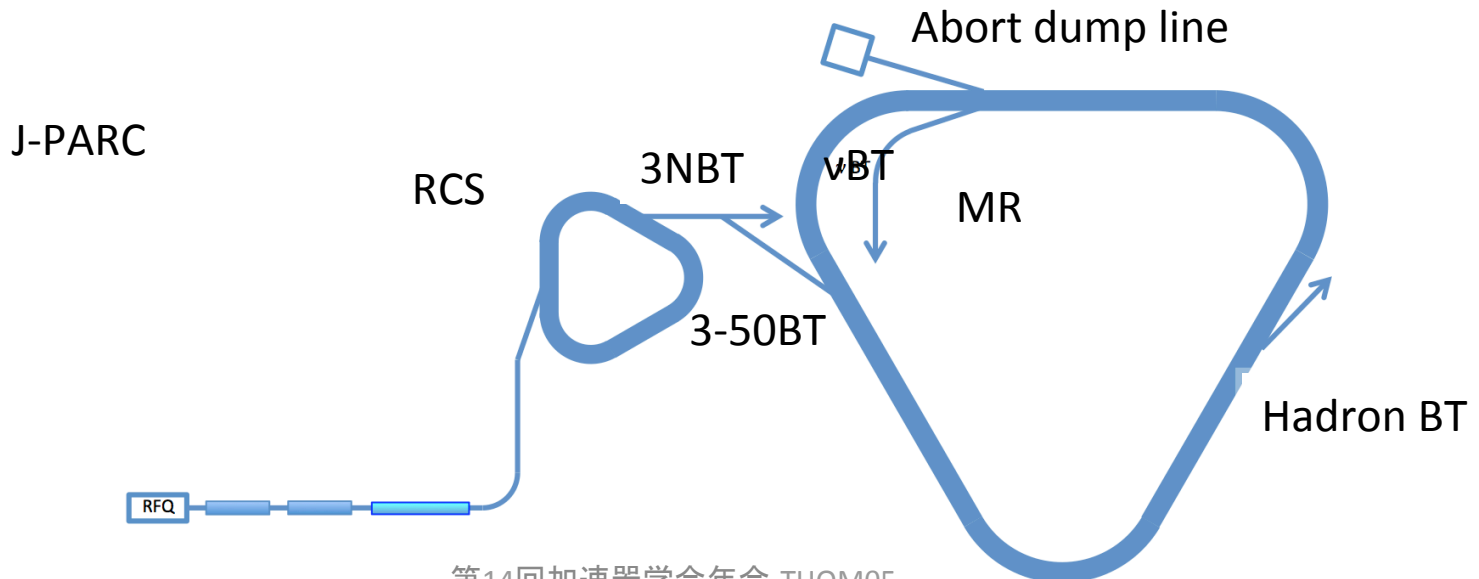
- JSPS科研費JP16H06288

はじめに

J-PARC Main Ring (MR)

ビーム強度増強に向けてアップグレード計画を進行中

- ニュートリノ振動を用いてCP対称性の測定を行うこと等を目指すT2K実験では大強度ビームが必要
- 目標：1.3 MW（現在可能な運転 約470kW の約3倍）

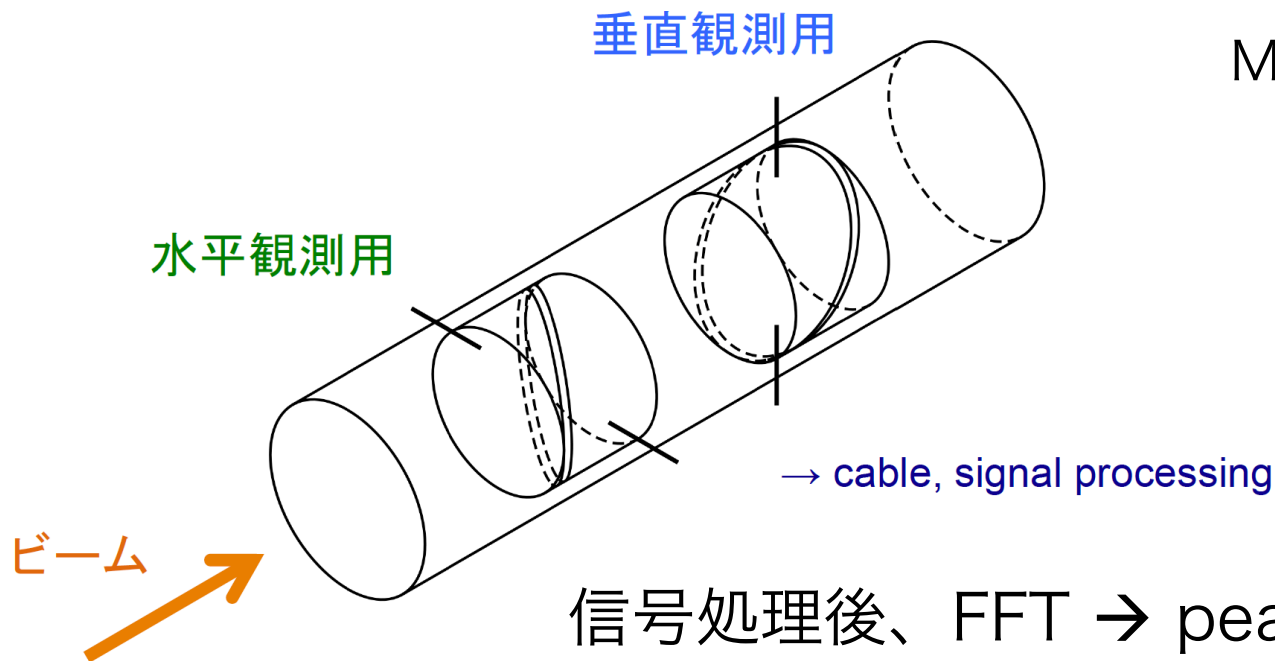


加速器のバンチに詰め込める陽子数：ビームロスにより制限

ビーム位置モニター（BPM）でビーム位置を精度良く測定・軌道補正、安定した長時間制御・運転をする必要がある

現状の位置分解能は閉軌道歪み（Closed orbit distortion, COD）モードで数 $10\mu\text{m}$ 、ターン毎モードで数 $100\mu\text{m}$
→10分の1程度にすることを目指す

MRのBPM



MRの全周に186台

信号処理後、FFT → peak検出 (RF周波数成分の2次高調波) 、位置への換算

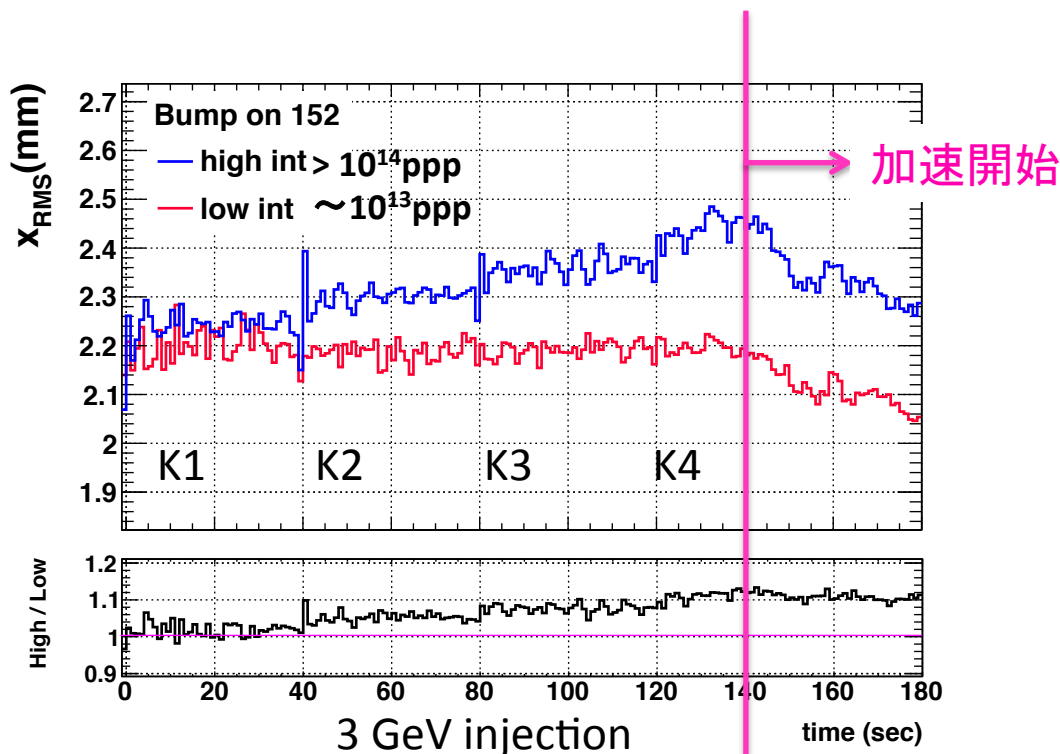
S. Hatakeyama *et al.*, PASJ17, 2007.など

校正 (BBA・BBGC) : 誤差の決定

T. Toyama *et al.*, PASJ10, 2010.など

大強度でのCODの変動

MRでは9個のRFバケットに最大8バンチを詰めることができる入射キッカーで2バンチずつK1, K2, K3, K4と呼ばれるタイミングで入射



ビーム強度が約 10^{14} pppを超えるとCOD RMSが変動するようになる (2017年3月中旬以降に見られるようになった)

測定

- ロシアのVEPP-4M加速器でローカルバンパによるトランスバースインピーダンスが作るCODについて調査されている (V. Kiselev and V. Smaluk, NIM A 525 (2004) 433-438.)
- 今回MRで、ビーム強度、バンパの有無、バンパの位置による違いを見る測定を行なった

Machine condition

MR Power	470 kW
energy	3 GeV
number of bunches	8
beam intensity	high : $> 2.4 \times 10^{14}$ ppp low : $\sim 6.0 \times 10^{13}$ ppp
thin ratio	high : 26/32 low : 16/32
macro pulse	high : 500 μ s low : 100 μ s
tune	ν_x/ν_y : 21.35/21.45

バンパの条件

high intensity ($> 10^{14}$ ppp)

- なし
- kickerに立てるためにQFR152 +10 mm
- septumに立てるためにQFR82 +4 mm
- QFR152(+10mm) & QFR 82 +4mm

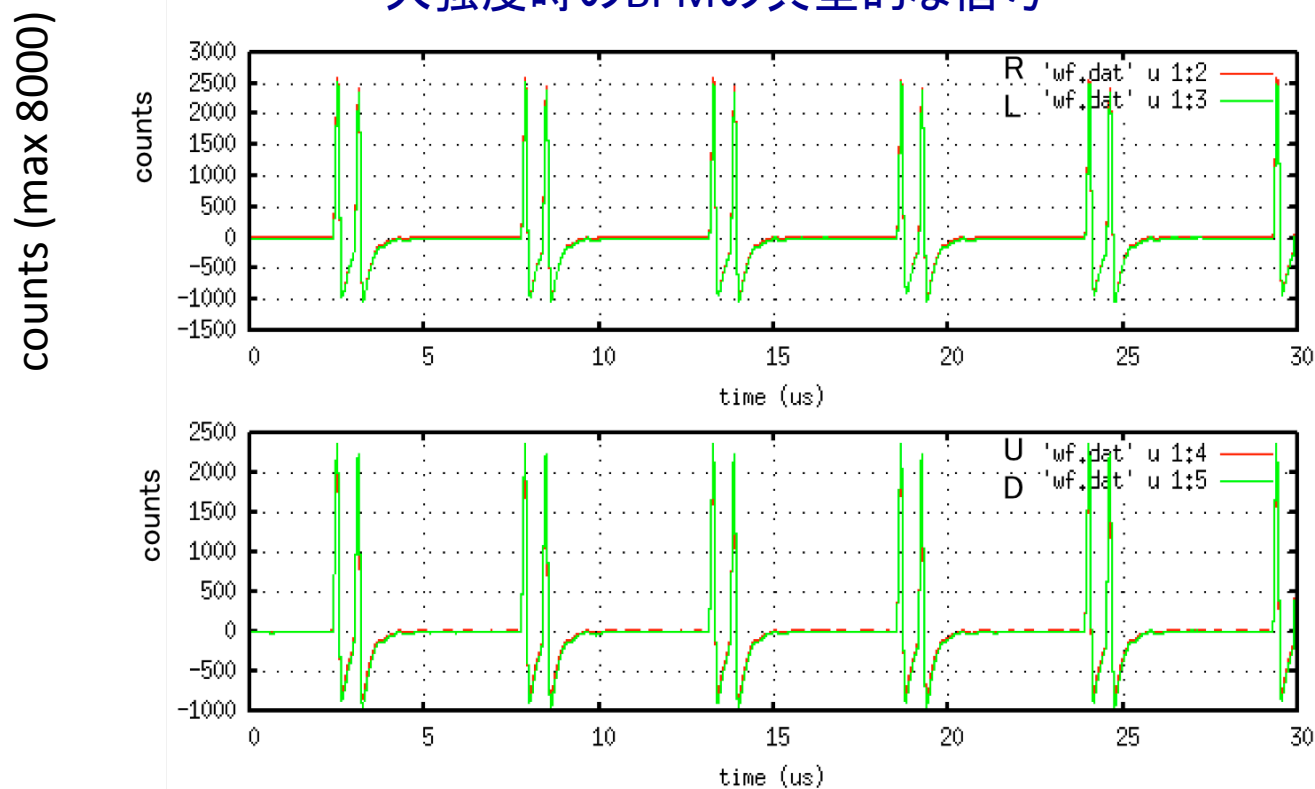
low intensity ($\sim 10^{13}$ ppp)

- QFR 152 +10 mm

解析 (1) BPMの調査

大強度時のBPMの信号を調査

大強度時のBPMの典型的な信号



どのBPMもカウント数はリニアリティーが保証される範囲内である

解析 (2) CODデータの補正

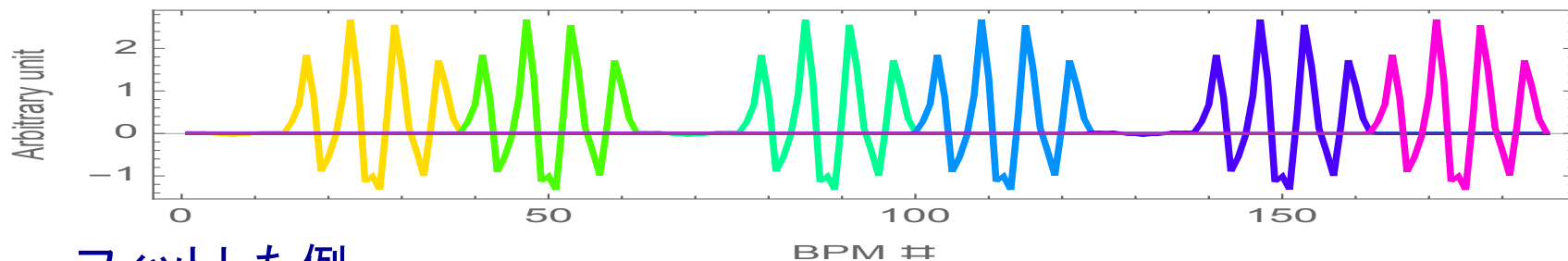
測定したCOD ($x(s)$) には、運動量による効果とリップルによる効果が含まれる

MRは6分割して電源につないでいる

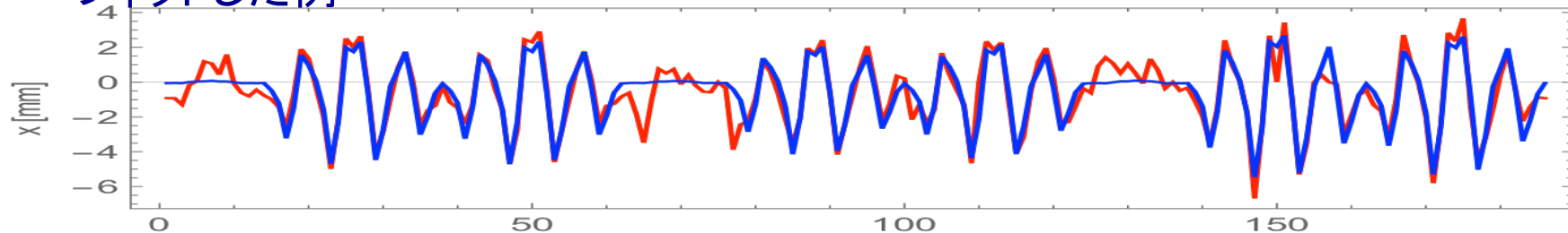
$$x_{\text{measured}}(s) = x_{\text{COD}}(s) + \sum_{k=1}^6 \lambda_k \eta_k$$

η_k : k番目の偏向電磁石 familyの momentum dispersion function
 λ_k : 未知数(データにフィットして求める)

光学計算から得られる momentum dispersion function

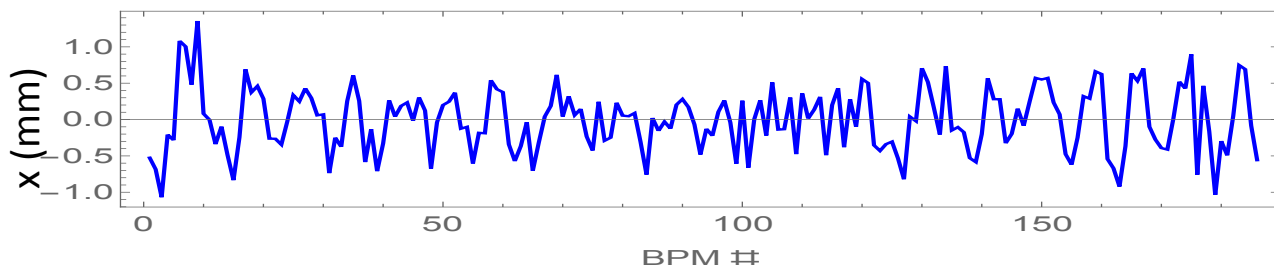


フィットした例

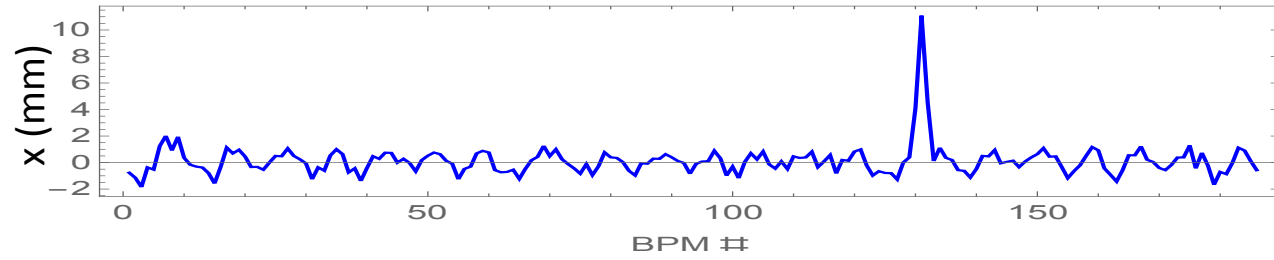


差し引いた結果 (それぞれ10~20shotを平均)

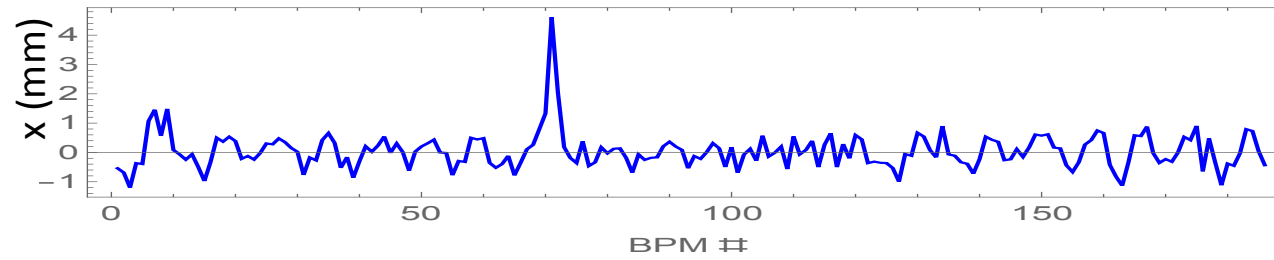
QFR 152 = BPM # 131
QFR 82 = BPM # 71



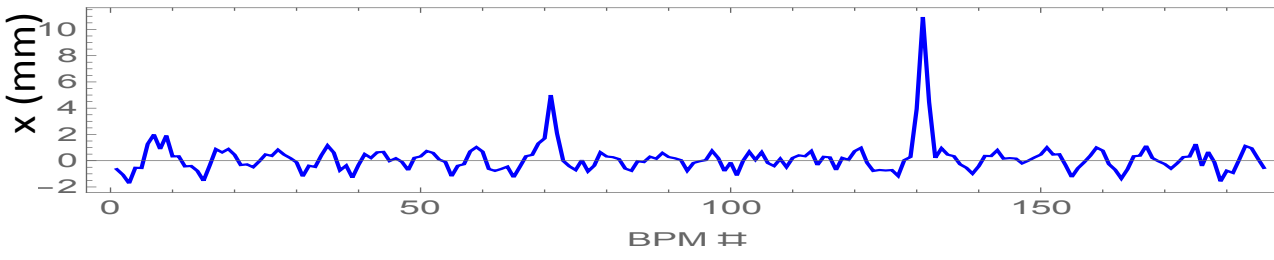
w/o bump



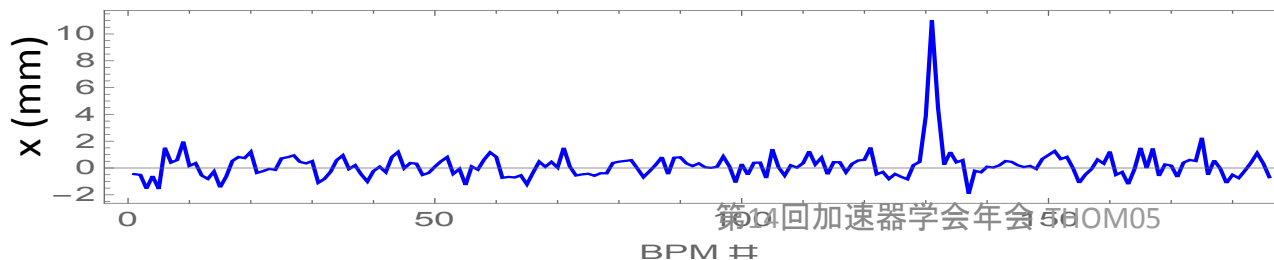
bump @ QFR152 +10 mm



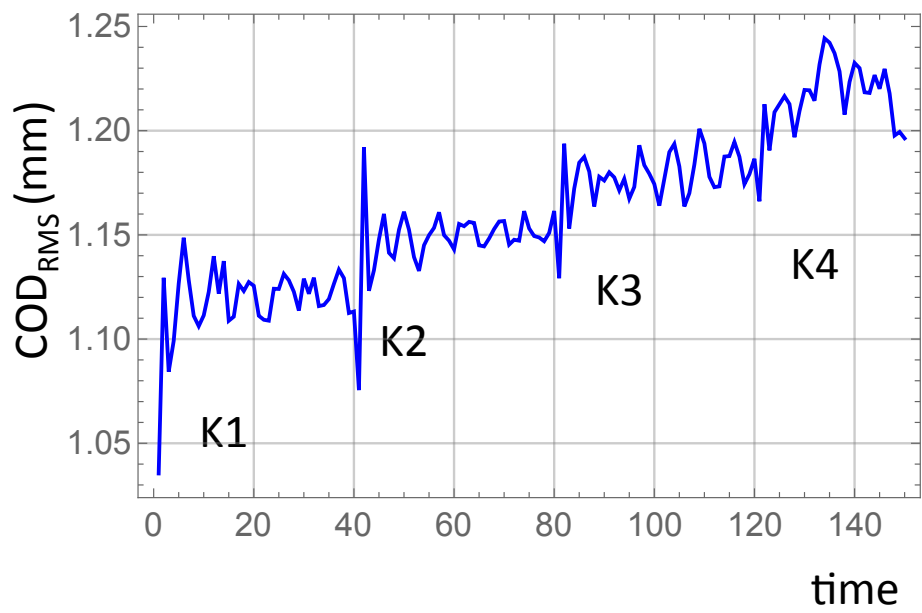
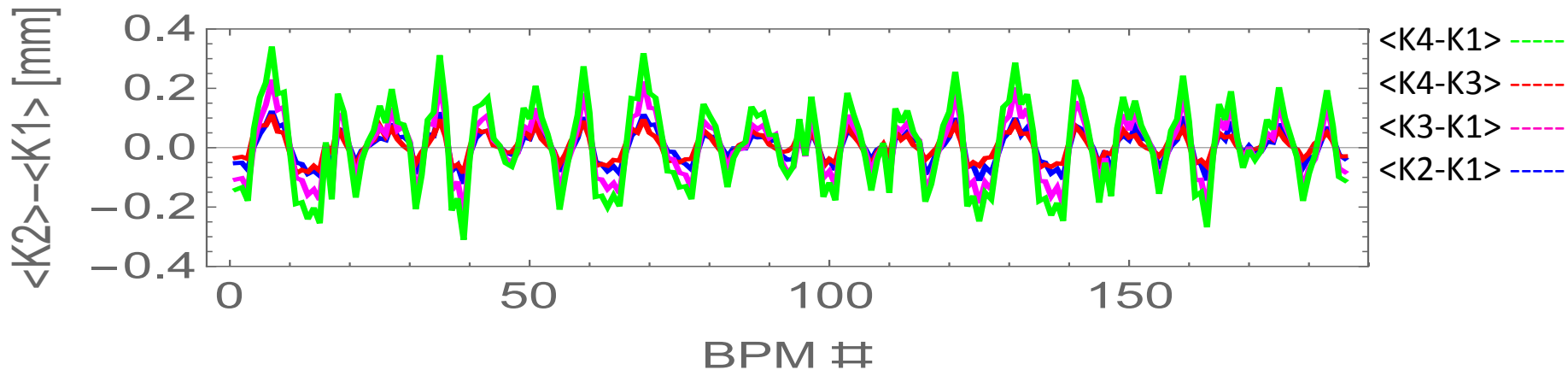
bump @ QFR 82 +4 mm



bumps @ QFR 82 +4 mm
& QFR 152 +10 mm



bump @ QFR 152 +10 mm
low intensity



$\langle K4-K1 \rangle$:
 K4入射後 (加速前の10ms
 の平均) でのCODから
 K1入射後 (K2が始まる前
 の40msの平均) でのCOD
 を差し引いたもの
 →相似形をしている

解析 (3) エラーソース探し

CODを動かす原因となってるソース (エラーソース) を光学計算をもとにシミュレーションツールSADに実装されているアルゴリズムMicadoを用いて計算した

$$x(s_j) = \sum_{i=1} \left(\frac{\sqrt{\beta(s_j)\beta(s_i)}}{2 \sin(\pi\nu)} \right) \cos(\pi\nu - |\psi(s_i) - \psi(s_j)|) \theta(s_i)$$

↑
observable

matrix M_{ij}

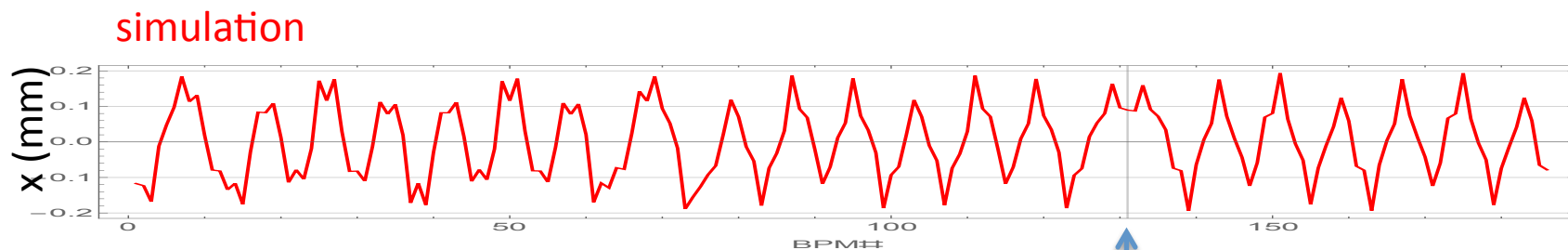
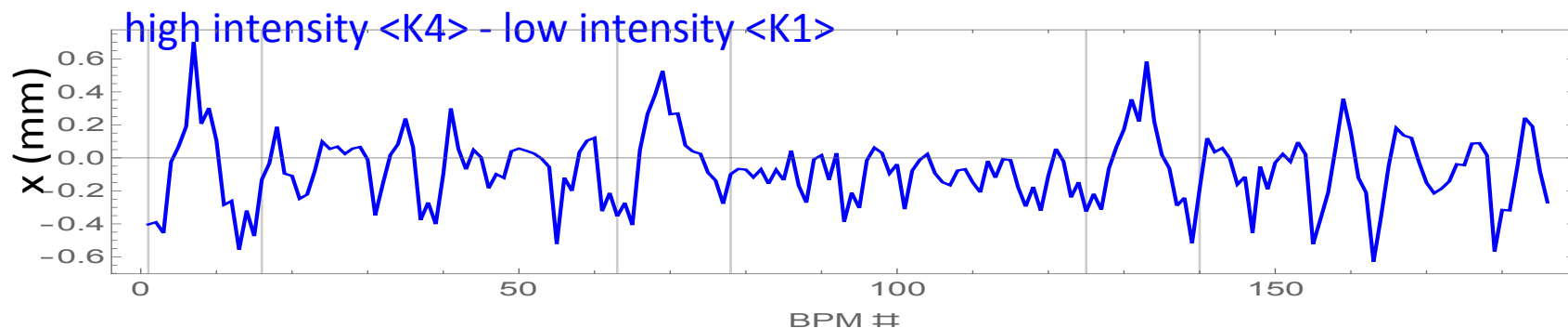
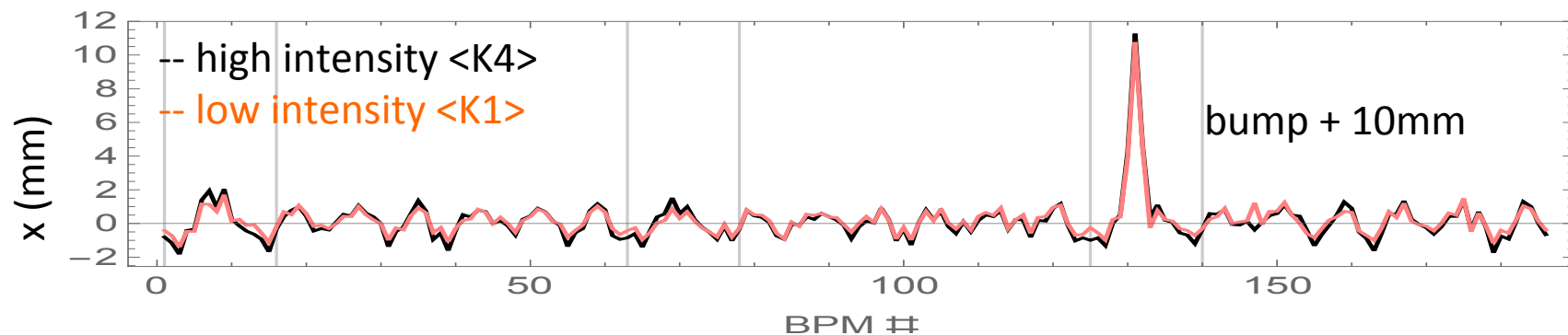
↑
kick angle

$$\theta(s_i) = M_{ij}^{-1} x(s_j)$$

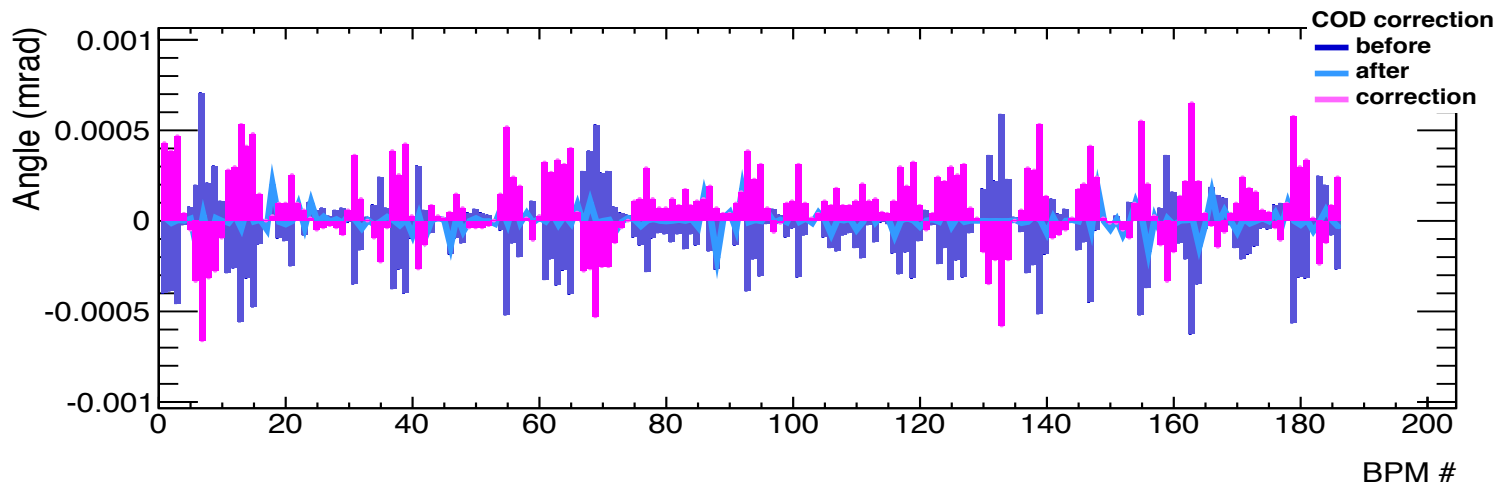
SAD: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/index.html>

Micado : B.Autin, et al. CERN ISR-MA/73-17

大強度でのK4のCODと低強度でのK1のCODの差 (バンプの条件は同じ)

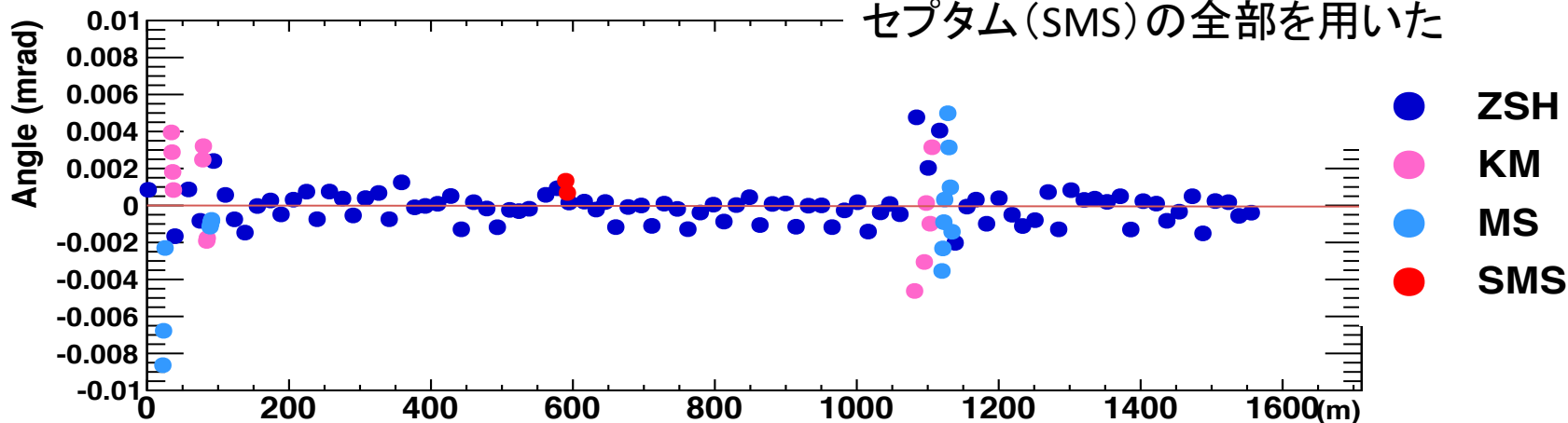


補正前後のCOD

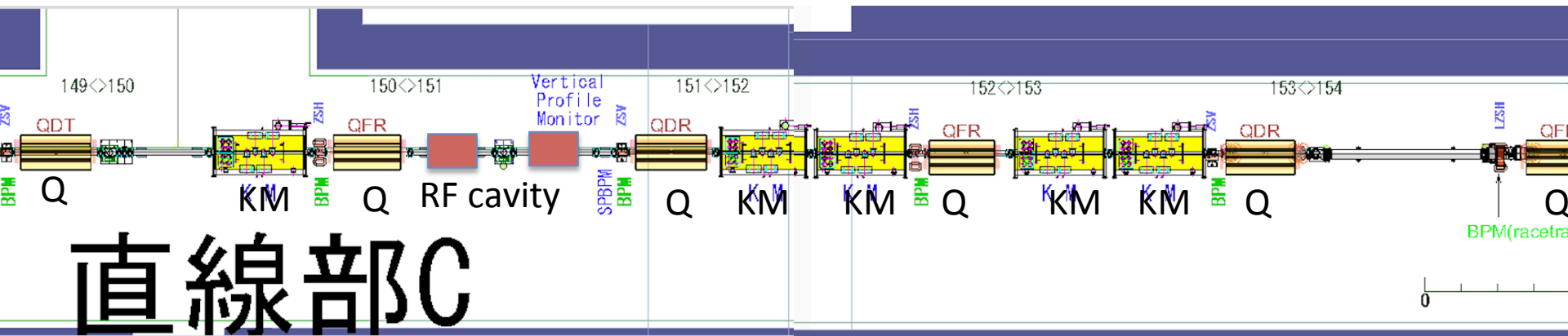


今回は、ステアリングマグネット (ZSH)、キッカーマグネット (KM)、マグネットセプトラム、スローマグネットセプトラム (SMS) の全部を用いた

補正の内訳 (エラーソース)

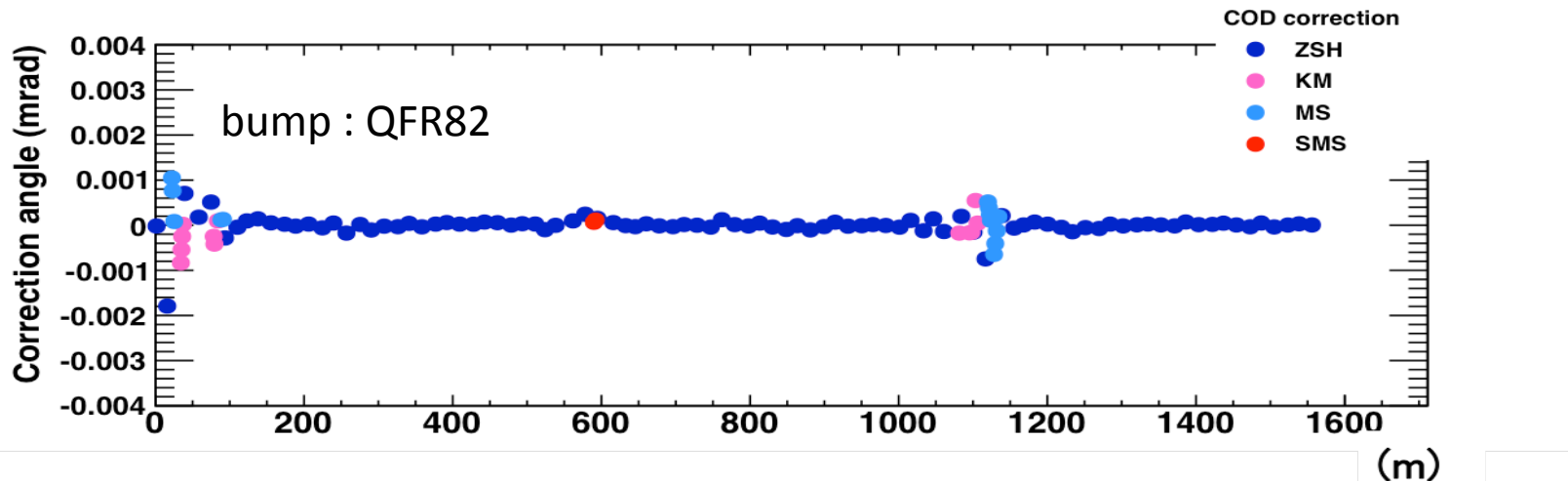
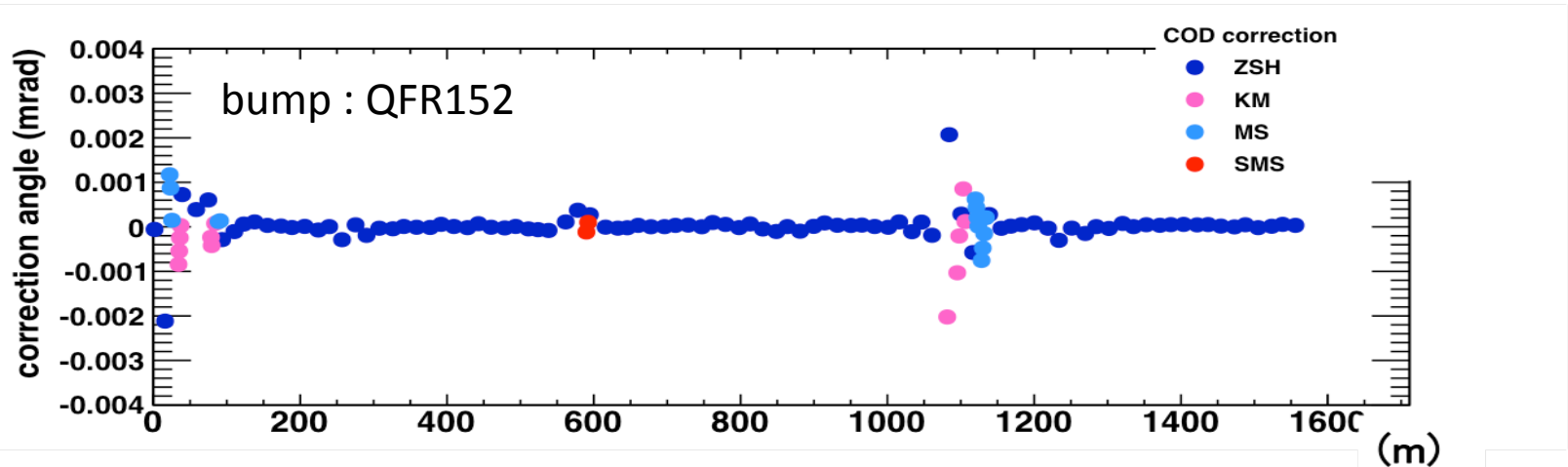


Q アドレス 152付近



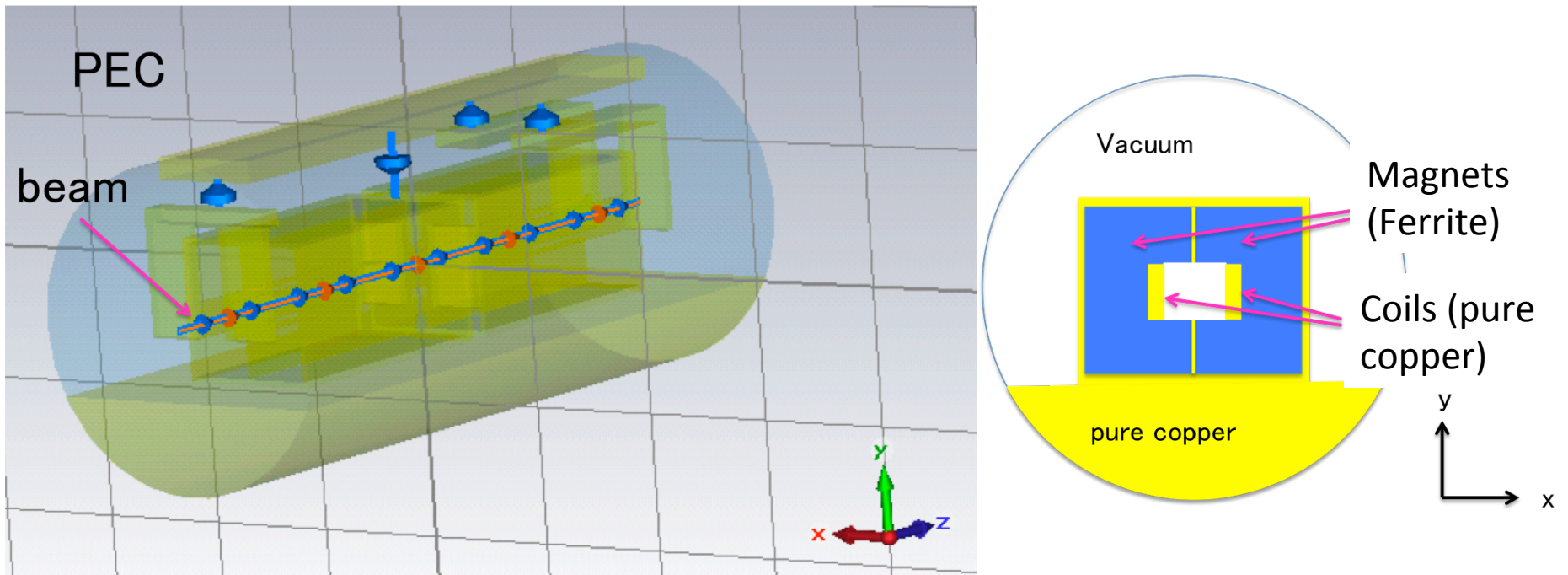
直線部C

同様に、バンプありの<K4-K1>からバンプなしの<K4-K1>との差の軌道でエラーソースを探した結果



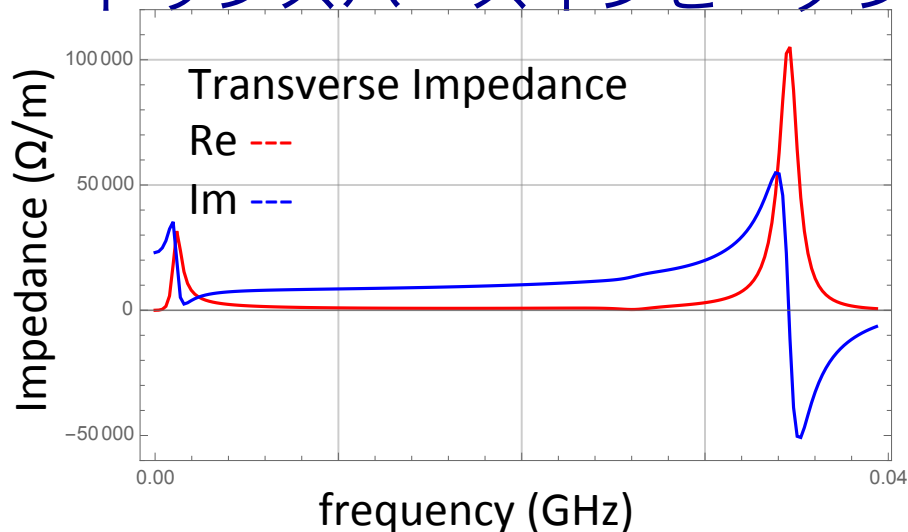
ウェイク場の見積もり

FXキッカー（QFR152付近）にビームが通って発生するウェイク場をCST STUDIOを用いて計算した
キッカーは以下の図のようにモデル化した



計算結果

トランスバースインピーダンス

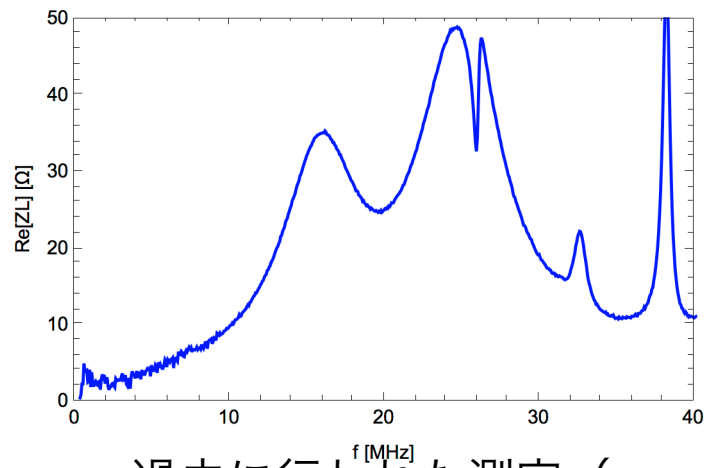
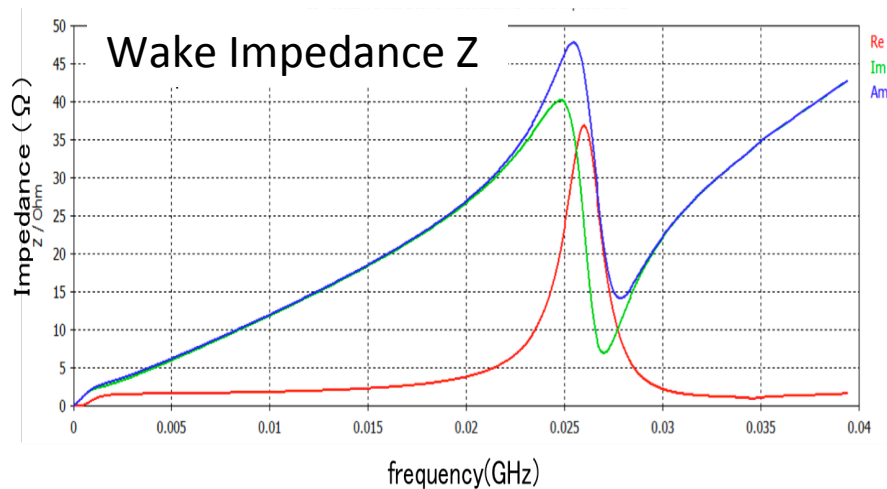


Kick factor:

$$\kappa_{\perp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Im}(Z_{\perp}(\omega_j)) |\lambda(\omega_j)|^2 d\omega$$

$$\text{Kick angle} : \Delta\theta = \frac{q}{(B\rho)c} \kappa_{\perp} \Delta x$$

1 bunch分のkick angle
~ 0.001 (mrad)



過去に行われた測定 (T. Toyama, ATAC2011, 2011.)

まとめ

- J-PARC MRではビーム強度増強が計画されている
- CODが大強度で変動するように見える現象があり、BPMの問題なのかを調べる必要があった
- 光学計算を利用したエラーソース探しを行った
- ローカルバンブがあるときのキッカーによるウェイク場を見積もった

今後

- チューンシフトの影響を見る
- J-PARCにおけるチューンシフトの測定は強度が 10^{13} pppの範囲でシングルバンチで2015年に行われている (T. Toyama, "Tune shift of the J-PARC MR beam", 2015)
- 今回のようなCODが変動する大強度の8バンチでも測定を行い相関を調べたい
- BPMの高度化に向け、大強度で性能と操作性の向上も含めた開発を行う