

J-PARC Main Ringのビーム位置モニタのゲイン較正

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
加速器第一研究系
モニターGr.
久保木浩功

- 導入: Main Ringのビーム位置モニタとゲイン較正
- シミュレーション: Total Least Squareフィッティングの有用性
- ビーム・マッピングデータ解析と結果
- まとめ、展望

外山毅、畠山衆一郎^A、高野淳平、手島昌己

高エネルギー加速器研究機構

^A三菱電機システムサービス(株)

J-PARC Accelerators

Main Ring シンクロトロン (MR)
E = 30 GeV

Rapid Cycling Synchrotron (RCS)
3 GeVシンクロトロン
E = 3 GeV

利用運転: 360 kW
目標: 750 kW

ハドロン実験施設

利用運転: 560 kW
試験運転: 1 MW

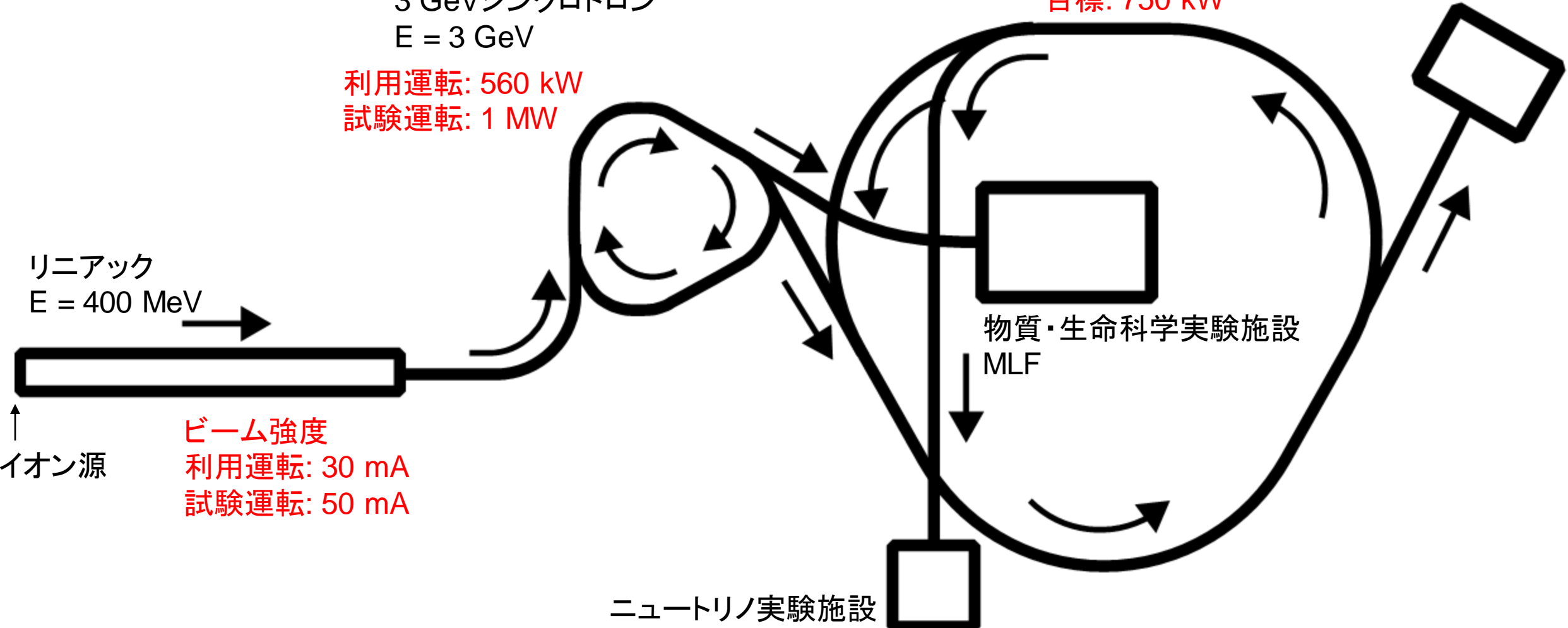
リニアック
E = 400 MeV

物質・生命科学実験施設
MLF

↑
イオン源

ビーム強度
利用運転: 30 mA
試験運転: 50 mA

ニュートリノ実験施設



長谷川和男 (WEOLP02)

“J-PARC 加速器のビーム強度の増強”

Main Ring シンクロトロン (MR)
E = 30 GeV

Rapid Cycling Synchrotron (RCS)
3 GeVシンクロトロン
E = 3 GeV

利用運転: 360 kW
目標: 750 kW

利用運転: 560 kW
試験運転: 1 MW

佐藤洋一 他 (WEP031)
“J-PARC Main Ring大強度運転の進捗と展望”

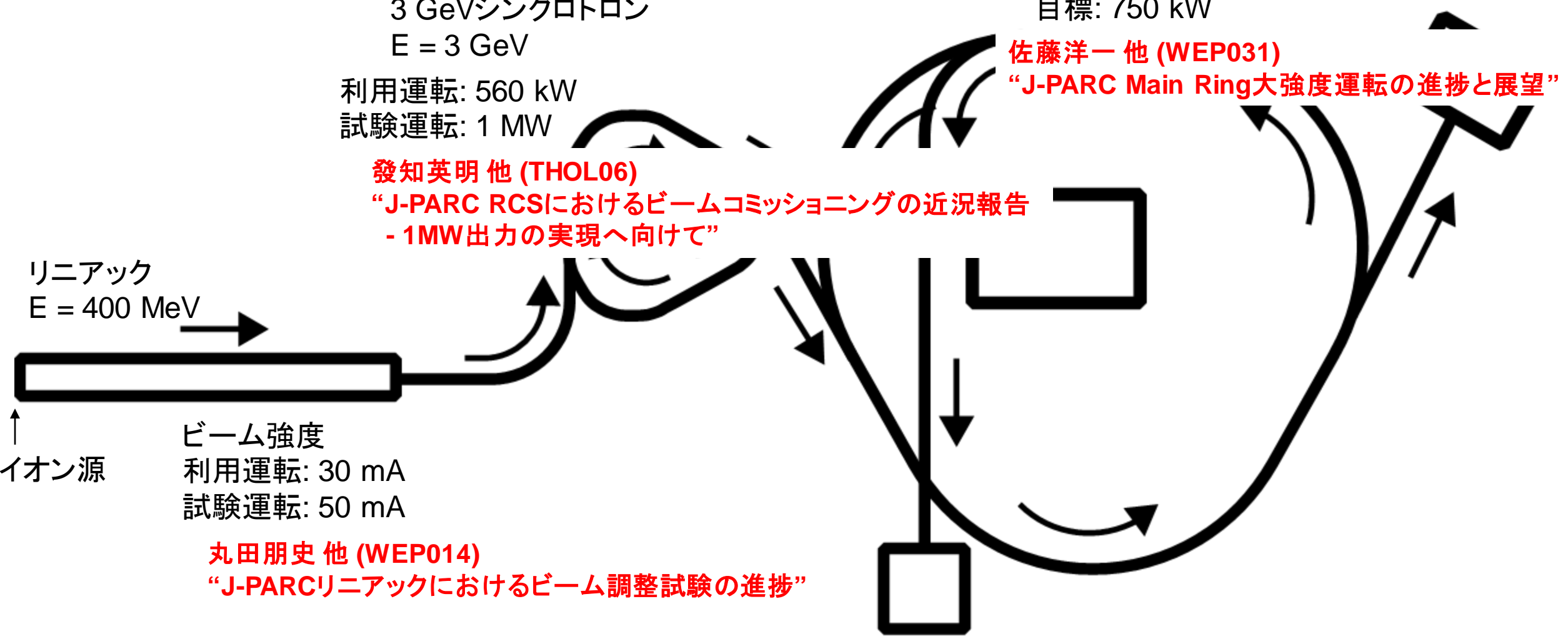
發知英明 他 (THOL06)
“J-PARC RCSにおけるビームコミッショニングの近況報告
- 1MW出力の実現へ向けて”

リニアック
E = 400 MeV

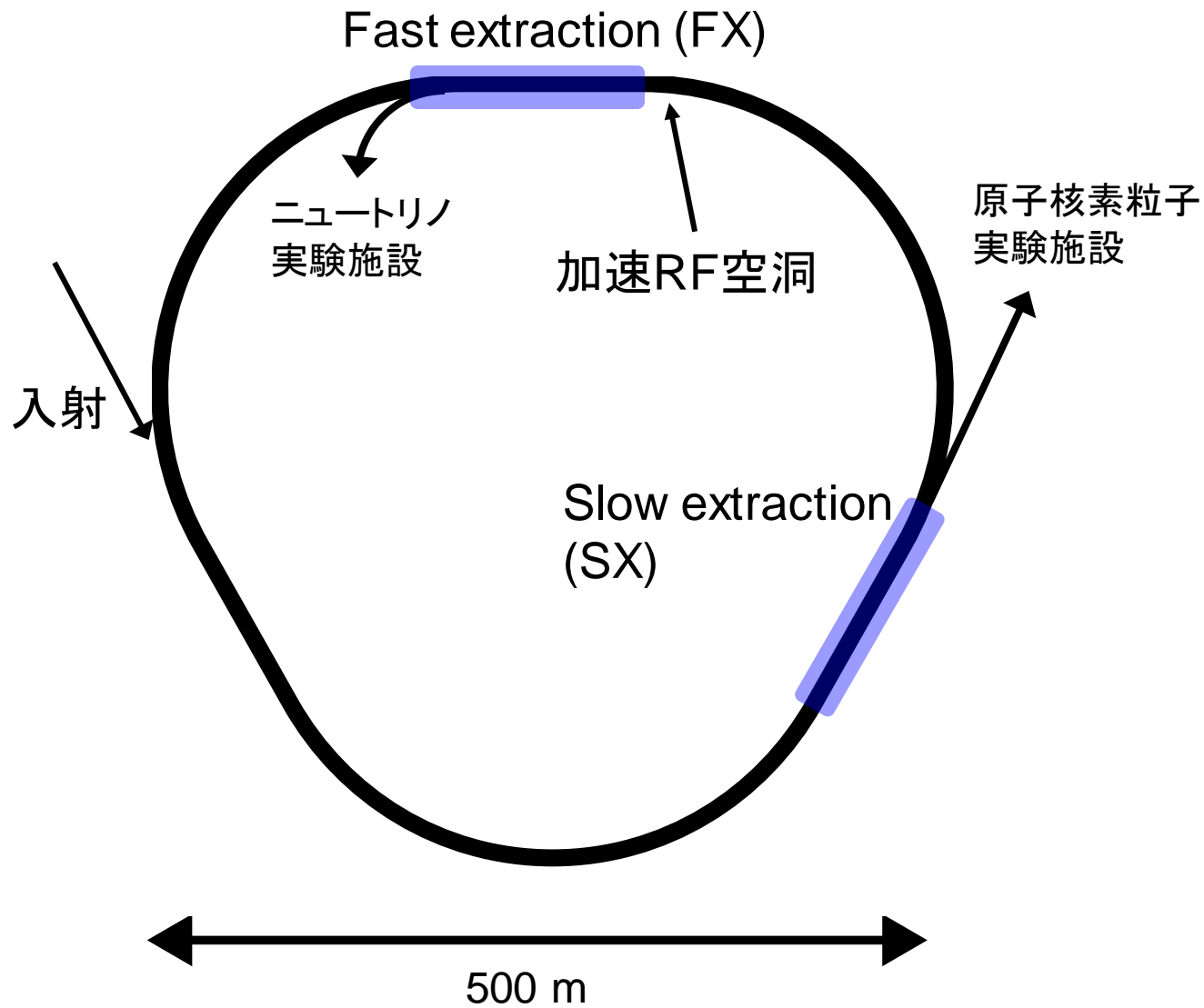
↑
イオン源

ビーム強度
利用運転: 30 mA
試験運転: 50 mA

丸田朋史 他 (WEP014)
“J-PARCリニアックにおけるビーム調整試験の進捗”

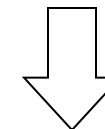


MR



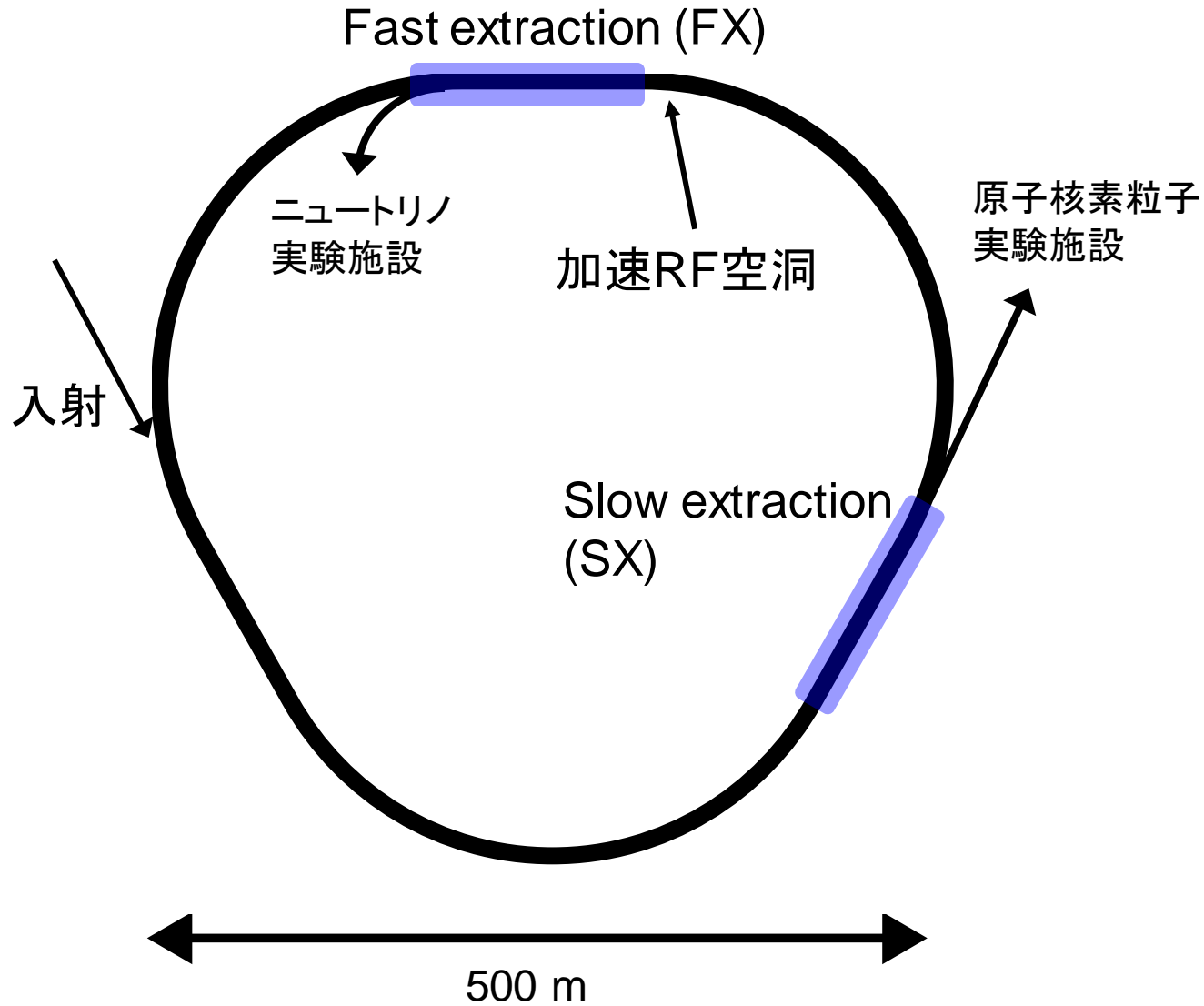
周長 (m)	1567.5	
エネルギー (GeV)	3	30
β	0.9712	0.9995
Lorentz γ	4.20	32.97
ハーモニック数	9	
バンチ数	8	
周回周期 (μ sec)	5.38	5.23
RF周波数 (MHz)	1.67	1.72
バンチ長(時間) (nsec)	200	70
バンチ長(空間長) (m)	60	20
チューン	FX: $v_x=22.40, v_y=20.75$ SX: $v_x=22.30, v_y=20.78$	
ビーム位置モニタ数	186台 (1台/7-10 m)	

大強度化⇒ビームロスの軽減

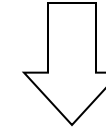


安定したビーム中心軌道が必要

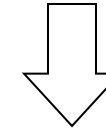
MR



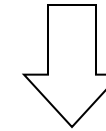
大強度化⇒ビームロスの軽減



安定した中心軌道が必要



磁石据付誤差・磁場誤差による
Closed Orbit Distortion (COD)を補正



ビーム位置モニタ
(Beam Position Monitor, BPM)
● 0.2 mm以下の位置精度の必要性

Y. Sato, Personal communication.

J-PARC MR のBPM

対角線カット型電極
Electrode shape:
"diagonal cut"

Horizontal
Electrode L

Beam

Vertical

U

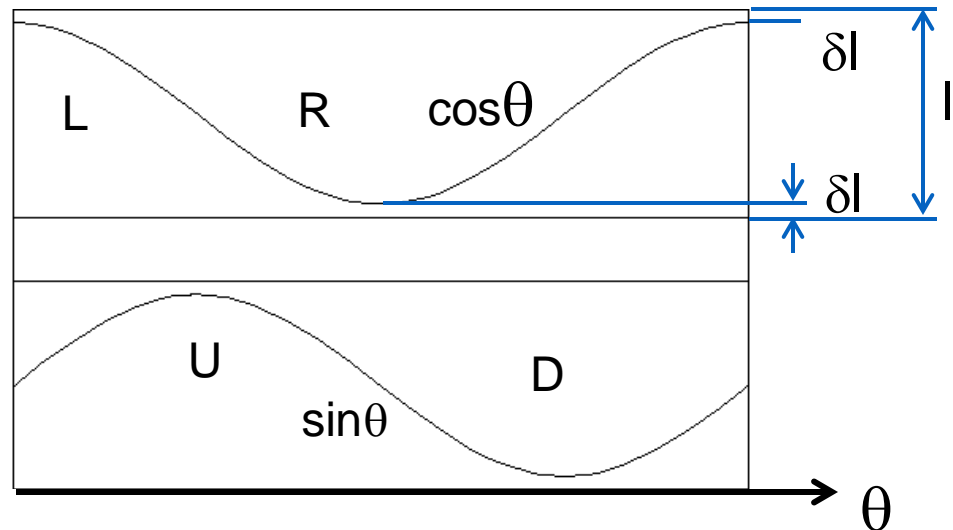
D

R

v_R

v_L

電極の展開図



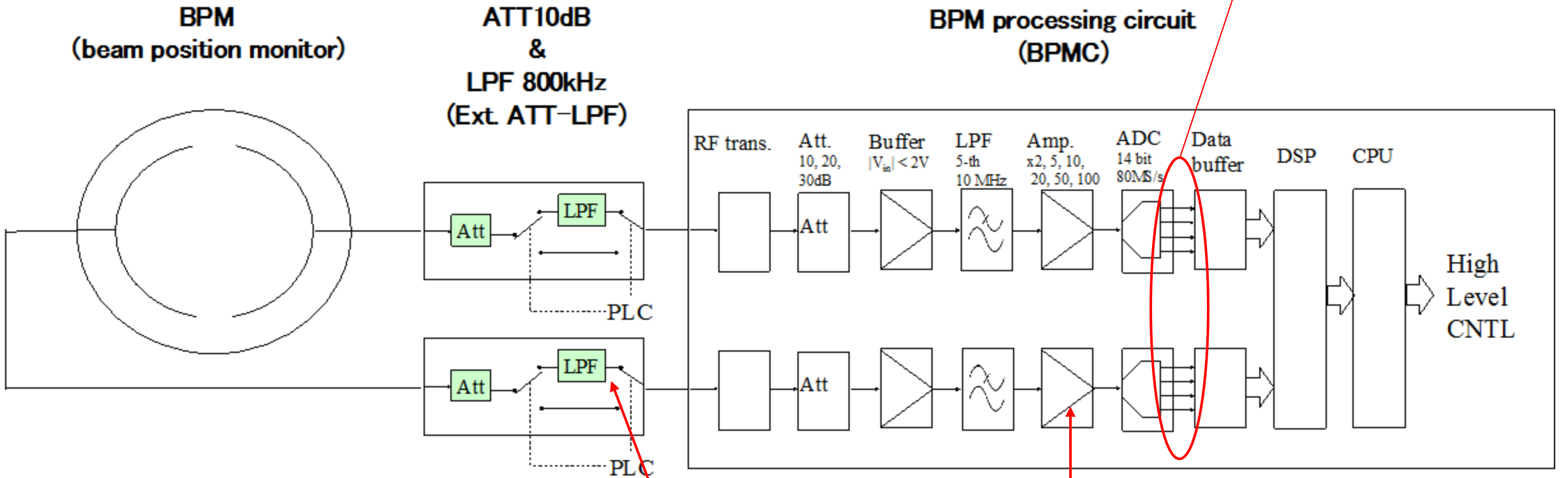
Courtesy of T. Toyama

v_U } cable
 v_D }

BPM processing circuit (BPMC)

V_L, V_R, V_U, V_D

BPM データ取得システム



V_L, V_R, V_U, V_D: デジタル化信号
(ADC out)

Low Pass Filter
(ON/OFF)

Amp. Gainの設定
× 1, × 2, × 5, × 10

Courtesy of
T. Toyama

ビーム強度によって異なる処理回路設定

ビーム位置と出力電圧の関係

電極からの出力電圧のバランスの変化

- コネクタ接続部の接触抵抗の変化
- 周辺环境温度によるケーブルの伝送特性の変化
- 信号処理回路の経年変化、等

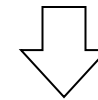
$$V_i = q g_i f_i(x) \quad (i = L, R, U, D)$$

g_L, g_R, g_U, g_D	各電極からの応答ゲイン
V_L, V_R, V_U, V_D	各電極L,R,U,Dからの出力電圧
q	BPM内部に存在するビームの電荷
$f_i(x)$	出力電圧の応答関数
x, y	水平、垂直方向のビーム位置
a	BPM中心から電極内面の実効半径

対角線カット型電極のため、
広い範囲で線形応答が確保

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = q g_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a} \right) \\ V_R = q g_R \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{a} \right) \\ V_U = q g_U \frac{1}{2} \left(1 + \frac{y}{a} \right) \\ V_D = q g_D \frac{1}{2} \left(1 - \frac{y}{a} \right) \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x = \frac{V_L/g_L - V_R/g_R}{V_L/g_L + V_R/g_R} a \\ y = \frac{V_U/g_U - V_D/g_D}{V_U/g_U + V_D/g_D} a \end{array}$$

出力電圧のバランスの変化 ⇒ 算出位置の誤差
→ ゲインの誤差



ゲイン較正の必要性

ビームを用いたゲイン較正 (Beam Based Gain Calibration)

BPMの位置情報の誤差

- 据付誤差
- 回転
- 磁石との相対位置
等

ゲインによる誤差
(信号伝送系、処理回路の個体差)

Beam Based Alignment (BBA)*

- (1) ビームを用いてBPM中心と四極電磁石中心との相対位置を
包括的に補正
→有用だが現システムでは測定が非常に大変
(データ取得時間のみで約100時間)

*T. Toyama et al., Proc. of PASJ meeting (2014).

ビームを用いたゲイン較正 (Beam Based Gain Calibration)

BPMの位置情報の誤差

- 据付誤差
- 回転
- 磁石との相対位置等

Beam Based Gain Calibration (BBGC)**

→比較的容易にデータ取得可能 (数時間)

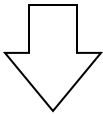
ゲインによる誤差
(信号伝送系、処理回路の個体差)

**K. Satoh and M. Tejima,
Proc. of PAC95, p. 2479 (1995).

Beam Based Alignment (BBA)

- (1) ビームを用いてBPM中心と四極電磁石中心との相対位置を包括的に補正
→有用だが現システムでは測定が非常に大変
(データ取得時間のみで約100時間)

BBAデータは取得済



ゲインを較正することでBBAデータを更新/補正し、
BBGCデータのみを取得することで位置誤差を補正可能

BBGC手順

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = qg_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right) \\ V_R = qg_R \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \\ V_U = qg_U \frac{1}{2} \left(1 + \frac{y}{a}\right) \\ V_D = qg_D \frac{1}{2} \left(1 - \frac{y}{a}\right) \end{array} \right. \xrightarrow{x,y,a \text{ 消去}} \left\{ \begin{array}{l} q = \frac{V_L}{g_L} + \frac{V_R}{g_R} \\ q = \frac{V_U}{g_U} + \frac{V_D}{g_D} \end{array} \right.$$

位置の導出式

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{V_L/g_L - V_R/g_R}{V_L/g_L + V_R/g_R} a \\ y = \frac{V_U/g_U - V_D/g_D}{V_U/g_U + V_D/g_D} a \end{array} \right.$$

q消去

$$\Rightarrow V_L = -\frac{V_R}{\tilde{g}_R} + \frac{V_U}{\tilde{g}_U} + \frac{V_D}{\tilde{g}_D}, \quad \left(\tilde{g}_{R,U,D} = \frac{g_{R,U,D}}{g_L} \right)$$

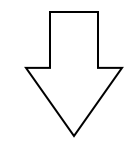
$$G_{R,U,D} = \frac{1}{\tilde{g}_{R,U,D}}$$

● データ点n個の連立方程式ができる

$$\underbrace{\begin{pmatrix} -R_1 & U_1 & D_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_n & U_n & D_n \end{pmatrix}}_{\mathbf{X}} \underbrace{\begin{pmatrix} G_R \\ G_U \\ G_D \end{pmatrix}}_{\mathbf{G}} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix}}_{\mathbf{L}}$$

$$-G_R R + G_U U + G_D D = L \quad \text{表記を簡単化}$$

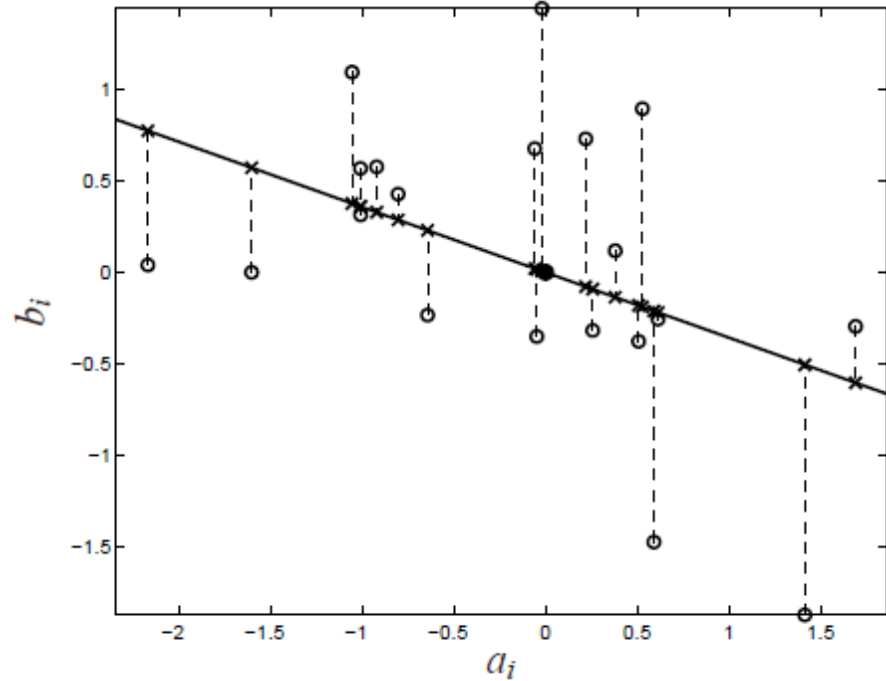
ゲイン較正



連立方程式 $\mathbf{X} \cdot \mathbf{G} = \mathbf{L}$ を解くことに帰着

解法

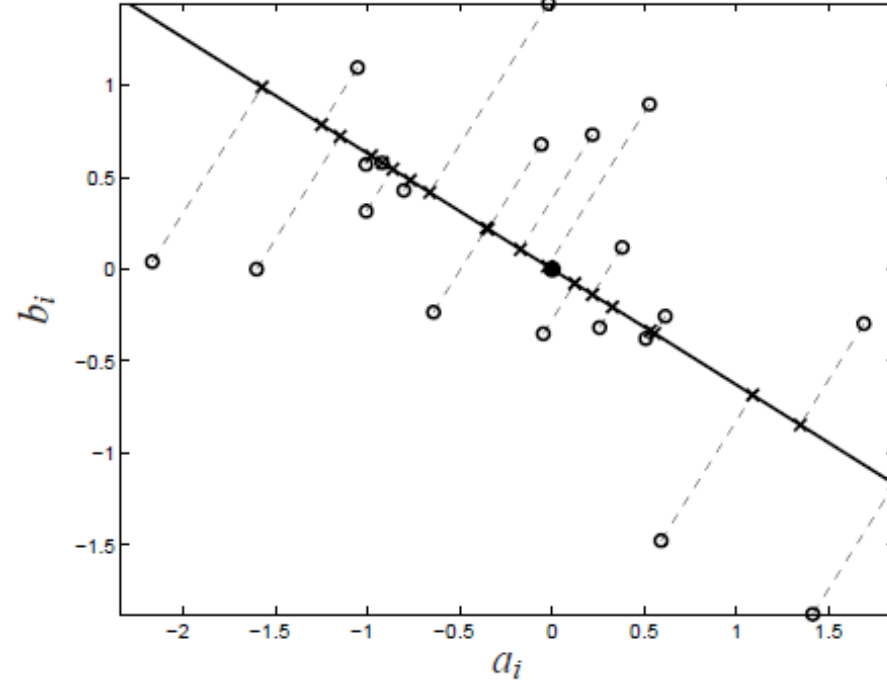
(1) 最小二乗法 (Least Square Fitting, LS)



最小にするもの: 残差 Δr

$$\Delta r = \sum_{i=1}^n (-G_R R_i + G_U U_i + G_D D_i - L_i)^2$$

(2) 全最小二乗法 (Total Least Square Fitting, TLS)



最小にするもの: データとモデルとの距離の二乗和 Δd

$$\Delta d = \frac{1}{\|\mathbf{G}_\perp\|^2} \sum_{i=1}^n (-G_R R_i + G_U U_i + G_D D_i - L_i)^2$$

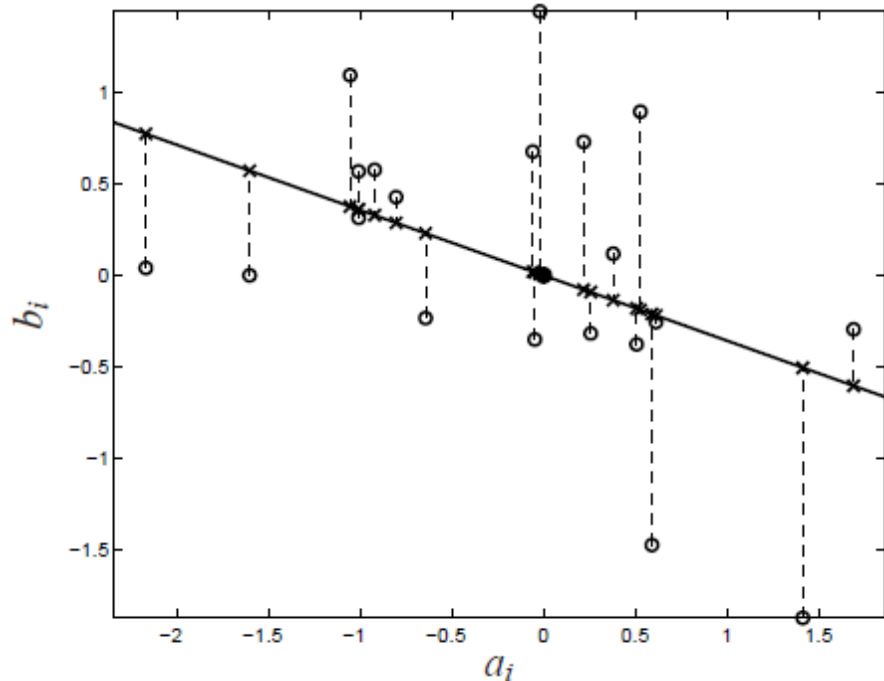
$$\mathbf{G}_\perp = (-1, -G_R, G_U, G_D) \quad \mathbf{G}_\perp: \text{L,R,U,D空間上での平面の式}$$

$$-G_R R + G_U U + G_D D - L = 0$$

に対する法線ベクトル

解法

(1) 最小二乗法 (Least Square Fitting, LS)



(具体的な計算)

LS: 誤差はLにのみ付随

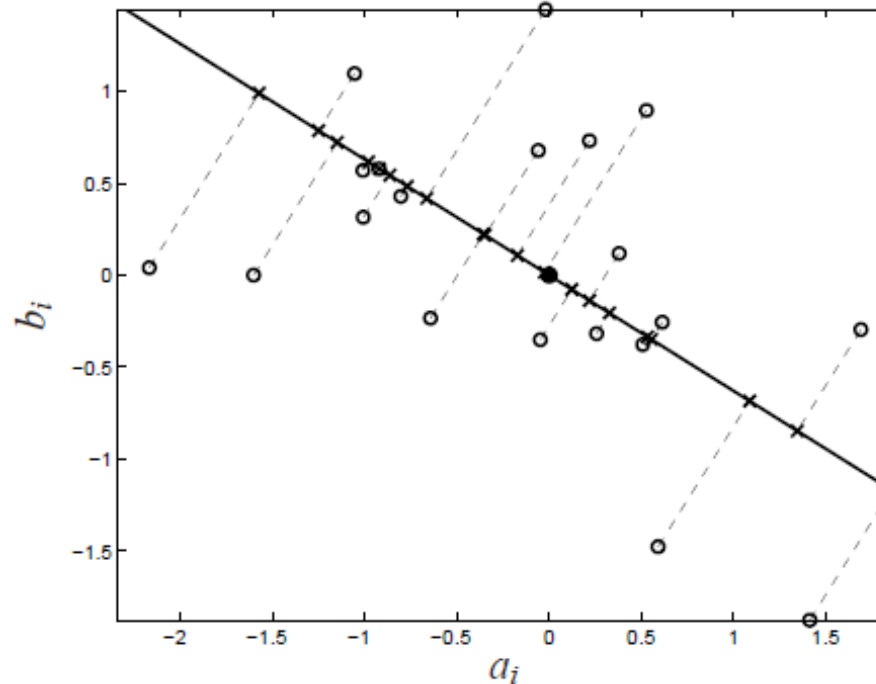
$$[X]G = L$$

$$[X^T][X]G = [X^T]L$$

$$[X^T X]^{-1}[X^T][X]G = [X^T X]^{-1}[X^T]L$$

$$\therefore G = [X^T X]^{-1}[X^T]L$$

(2) 全最小二乗法 (Total Least Square Fitting, TLS)



TLS: 未知数を1つ加えることで全データ (L,R,U,D)の誤差を考慮

$$[X]G = L$$

$$[X^T][X] - \lambda I \Big] G = [X^T]L$$

λ : 未定乗数

I : 単位行列

$$[X^T][X] - \lambda I \Big]^{-1} [X^T][X] - \lambda I \Big] G = [X^T][X] - \lambda I \Big]^{-1} [X^T]L$$

$$\therefore G = [X^T][X] - \lambda I \Big]^{-1} [X^T]L$$

シミュレーション例

①: ゲインの値を設定 $V_L = q g_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$ $(g_L, g_R, g_U, g_D) = (1.00, 1.01, 1.005, 0.975)$

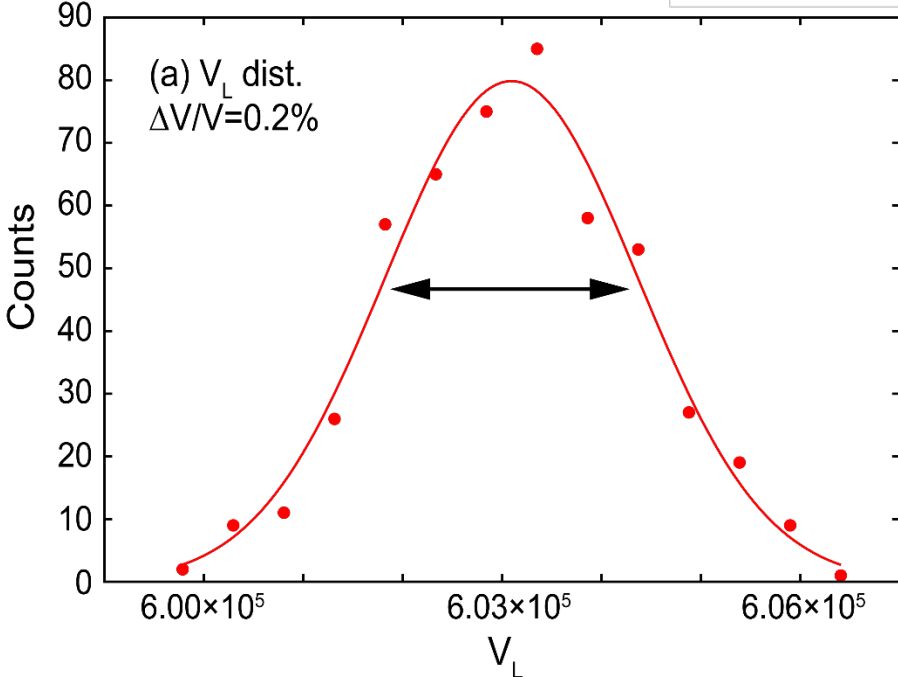
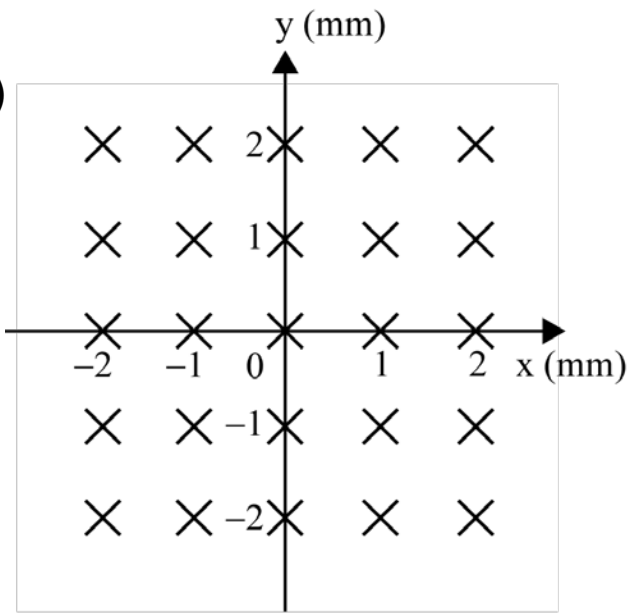
②: 位置の設定 $V_L = q g_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$ $-2 \leq x \leq 2, -2 \leq y \leq 2$, 計25点 (右図)

③: 各位置での出力電圧を計算 $V_L = q g_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$

④: ガウス分布に従う $\Delta V/V = 0.2\%$ のランダムノイズを生成

⑤: 1つの位置で500点のデータを生成

q: BPM内のビーム電荷 (実データに即して決定)
 a: オフラインでの較正結果



シミュレーション例

①: ゲインの値を設定 $V_L = qg_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$ $(g_L, g_R, g_U, g_D) = (1.00, 1.01, 1.005, 0.975)$

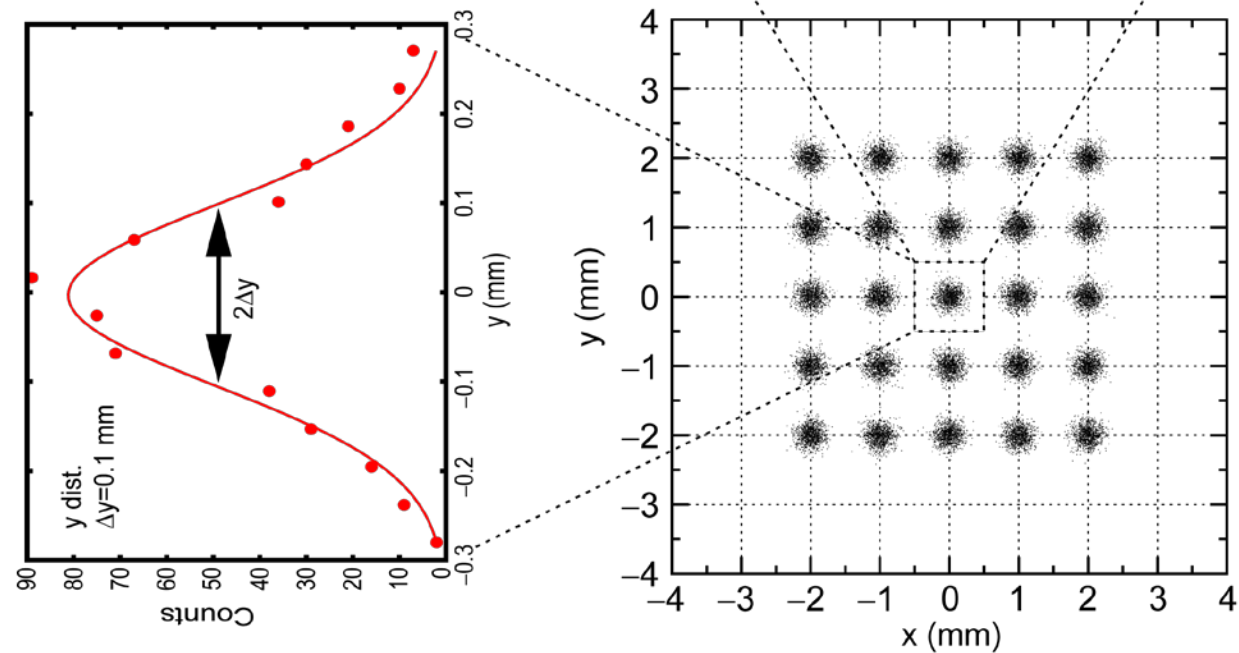
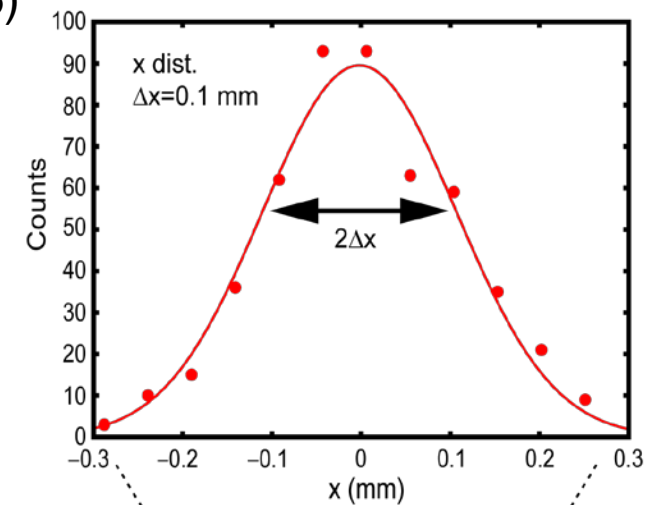
②: 位置の設定 $V_L = qg_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$ $-2 \leq x \leq 2, -2 \leq y \leq 2$, 計25点 (右図)

③: 各位置での出力電圧を計算 $V_L = qg_L \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{a}\right)$

④: ガウス分布に従う $\Delta V/V = 0.2\%$ のランダムノイズを生成

⑤: 1つの位置で500点のデータを生成

⑥: 出力電圧データからゲインを導出、位置を再計算



フィッティング解析結果

	g_R	g_U	g_D
True	1.010	1.005	0.975
LS	1.034	1.015	0.988
TLS	1.012	1.005	0.977

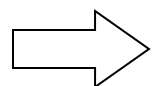
LS: Least Square Fitting

TLS: Total Least Square Fitting

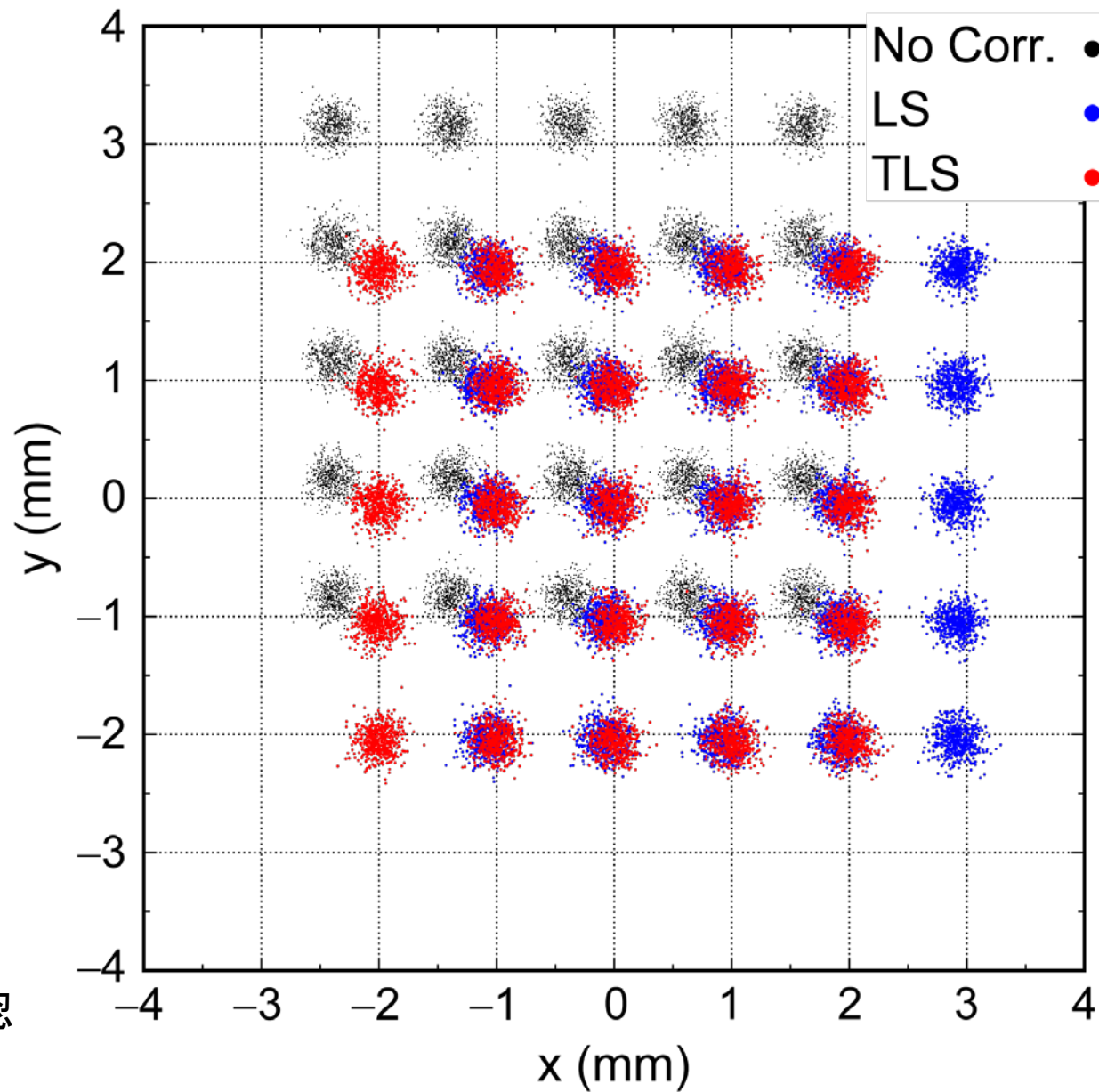
データ点 $n=25 \times 500=12500$

$$\begin{pmatrix} -R_1 & U_1 & D_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_n & U_n & D_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_R (= 1/g_R) \\ G_U (= 1/g_U) \\ G_D (= 1/g_D) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix}$$

g_R, g_U, g_D で割った場合も同様の結果であることを確認



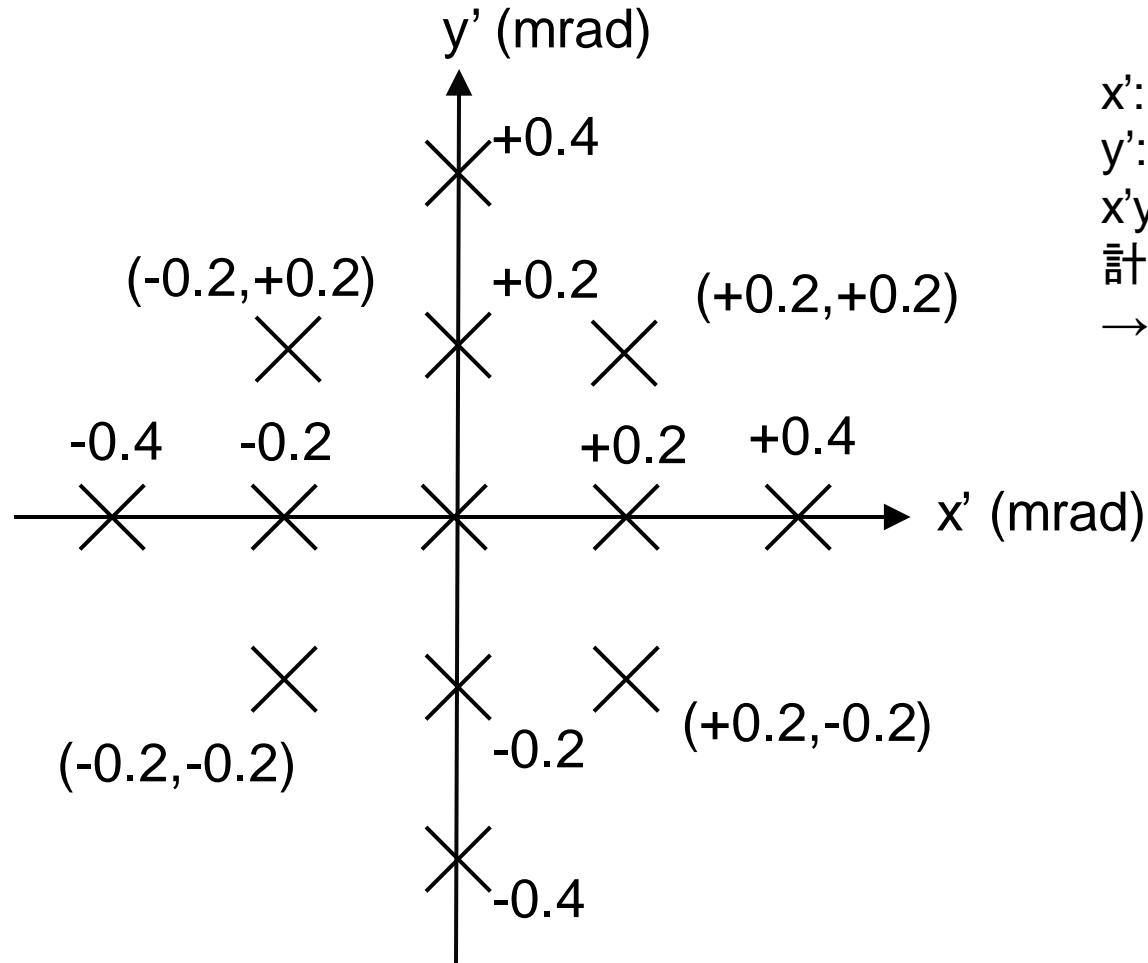
TLSの適用は有効



ビーム・マッピングデータ取得

複数の出力電圧のデータ → 複数の位置データ $-G_R R_i + G_U U_i + G_D D_i = L_i$

- 1) ステアリング磁石で閉軌道にキックを加え、振動振幅が大きい軌道を生成。
- 2) 複数の振幅のデータ、位相をずらしたデータも取得。
- 3) 出力電圧データセットを最もよく再現するようにゲイン(g_R, g_U, g_D)を決める。



x' : 5点 (-0.4, -0.2, 0, +0.2, +0.4 mrad)

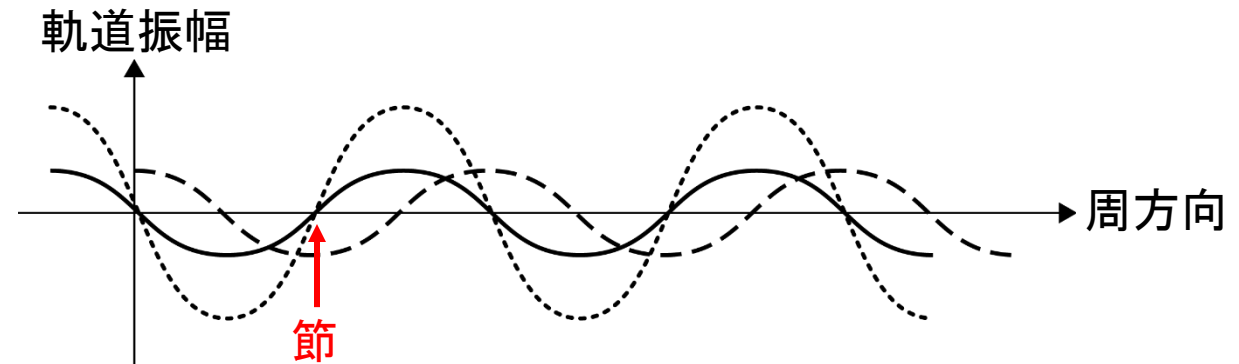
y' : 5点 (-0.4, -0.2, 0, +0.2, +0.4 mrad)

$x'y'$: 4点

計14点の設定。各点9個のデータ。

→ **14点 × 9データ × 2セット = 252個**のデータセットを取得

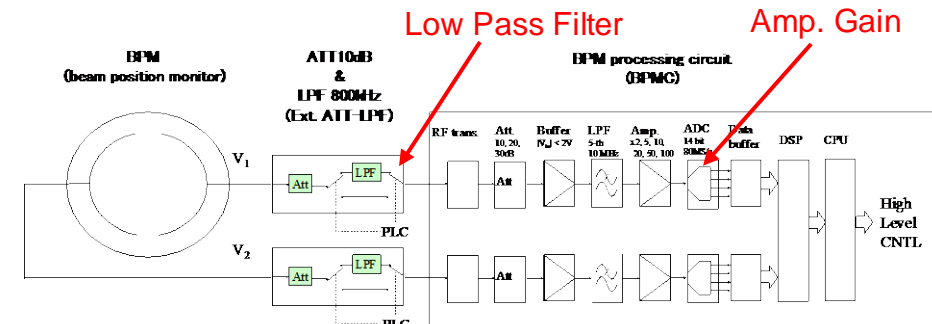
※1か所のステアリングによるキックでは位置が変化しない場所(振動の節)があるため、位相がずれたデータも取得



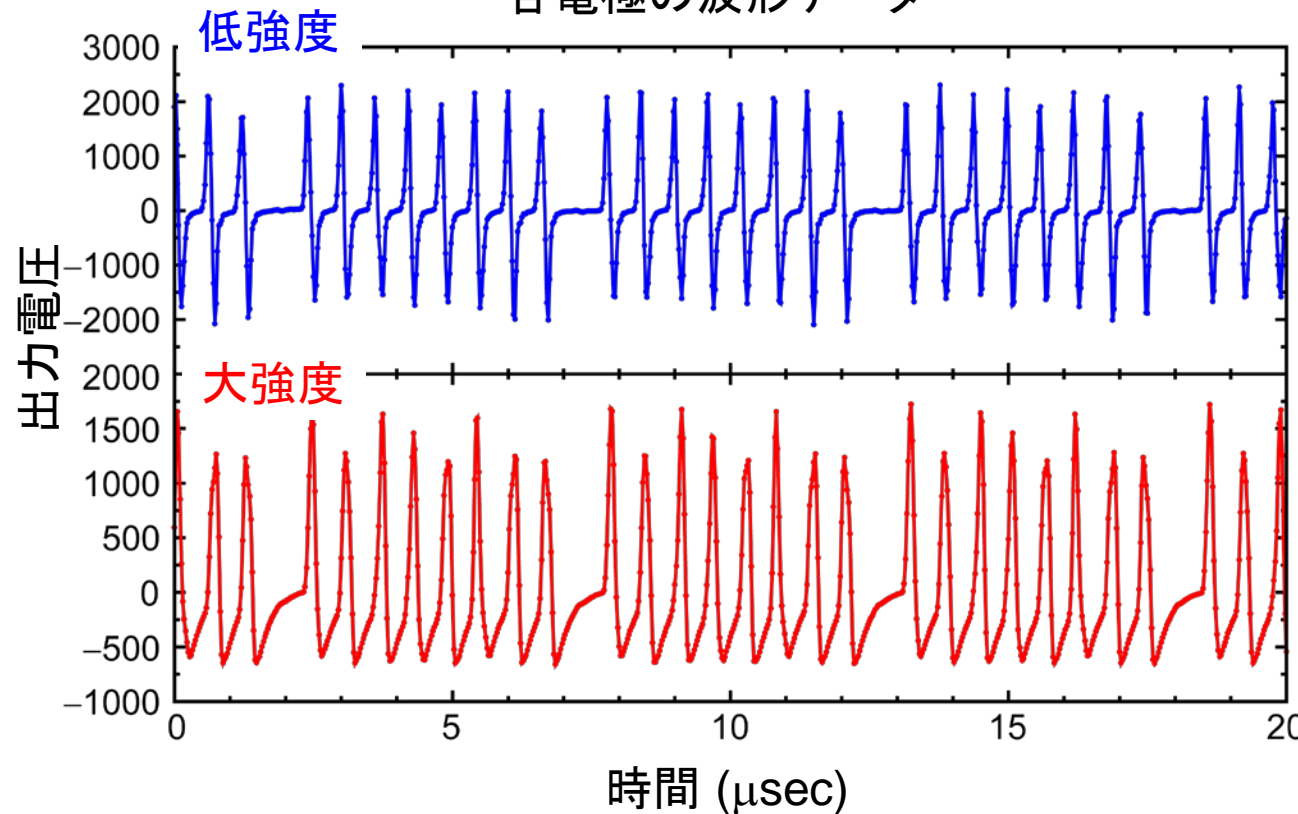
ビーム・マッピングデータ解析

- ゲインは処理回路の設定によって変動

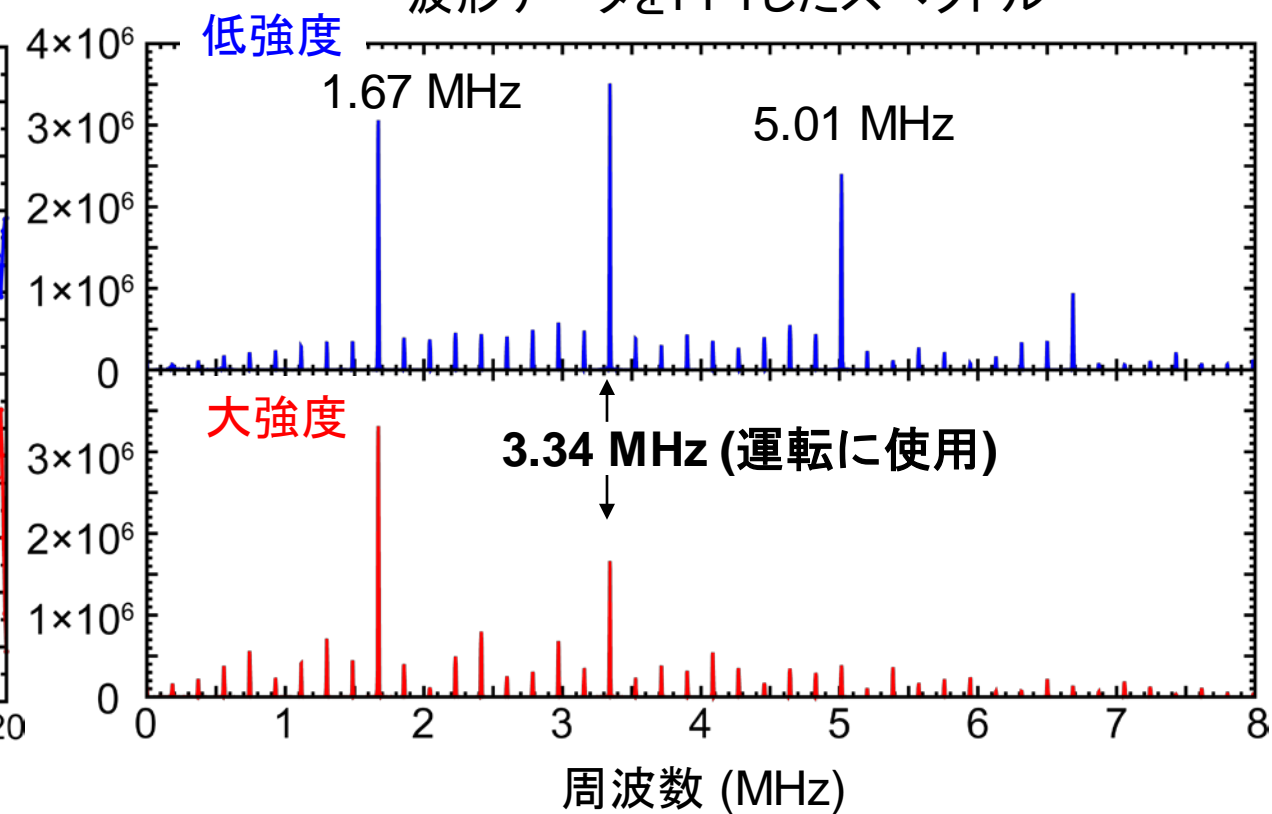
	粒子数 Protons/pulse	Amp. gain	Low Pass Filter
低強度	2×10^{13}	$\times 5$	OFF
大強度	1×10^{14}	$\times 2$	ON



各電極の波形データ

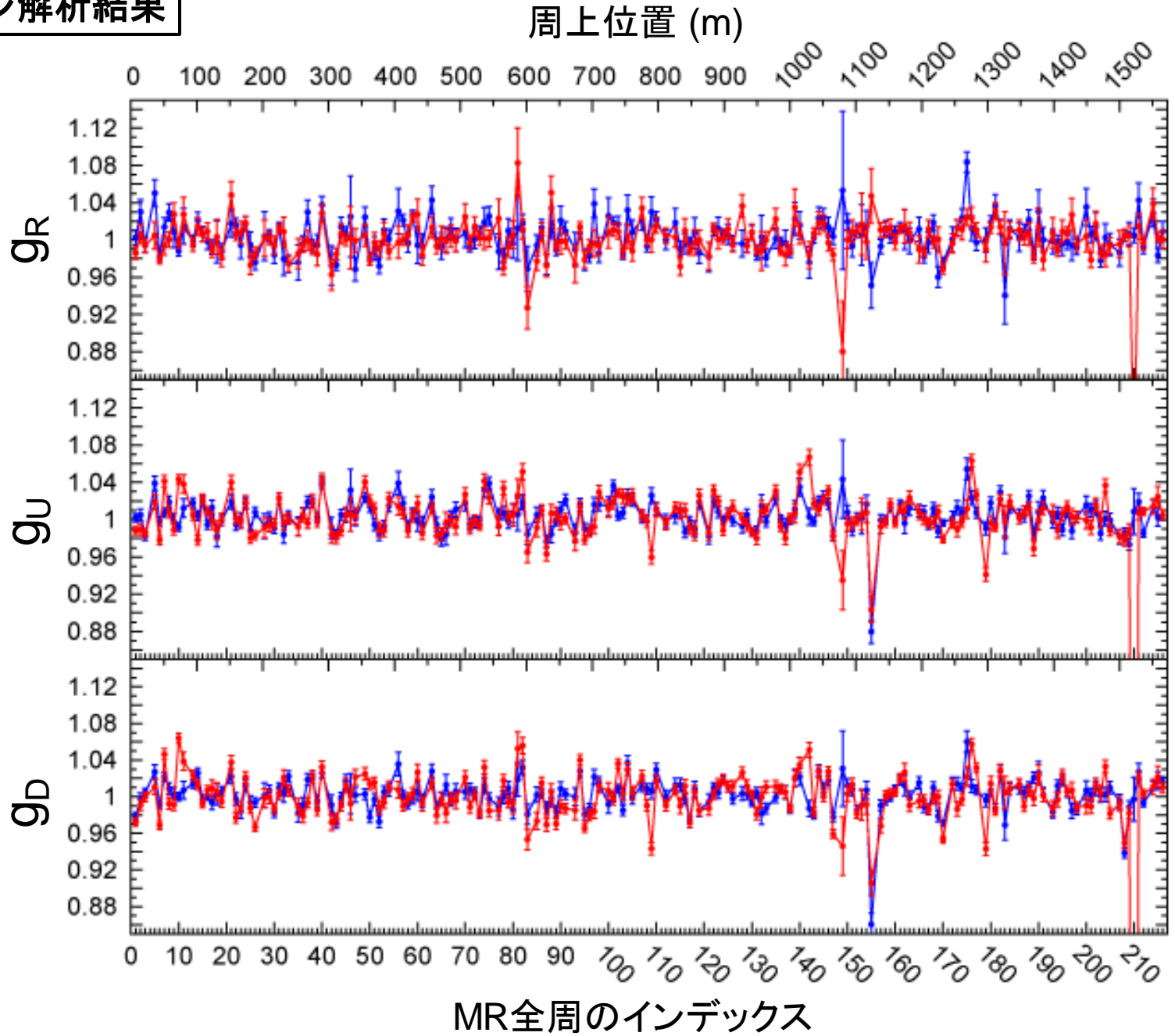


波形データをFFTしたスペクトル



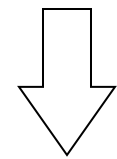
FFT後のスペクトル3.34 MHzのピークを出力電圧L,R,U,Dとしてゲインを算出

ゲイン解析結果



● 低強度
● 大強度

Amp. Gain、LPF ON/OFF
の違いで最大2~3%の差異



処理回路の設定によって
ゲイン較正の必要性

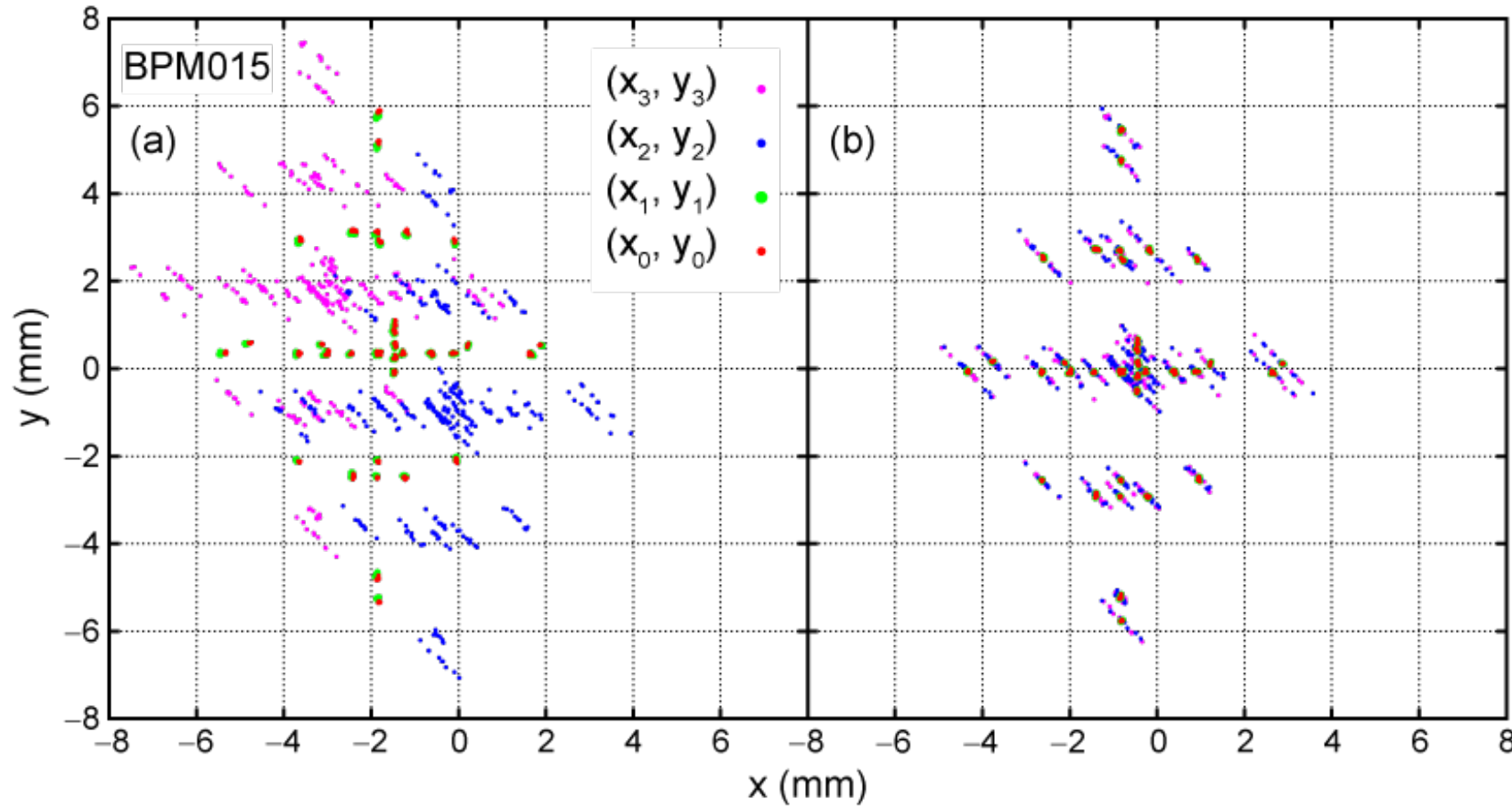
	g_R	g_U	g_D
誤差	0.8%	0.6%	0.6%

g_L 誤差=0としているため、 g_R の誤差が
 g_L の誤差分も含んでいる
→ $\sim \sqrt{2}$ 倍

解析ゲインの妥当性: 異なる導出法での位置のコンシステンシー

現状のゲイン

解析したゲイン



3電極から導出している
 (x_2, y_2) , (x_3, y_3) の
 斜めの相関は
 規格化に使用している
 $L/g_L + R/g_R$
 $U/g_U + D/g_D$
 の比のばらつきによる。

$$x_0 = \frac{L/g_L - R/g_R}{L/g_L + R/g_R} a$$

$$x_1 = \frac{L/g_L - R/g_R}{U/g_U + D/g_D} a$$

$$x_2 = \left(\frac{2L/g_L}{U/g_U + D/g_D} - 1 \right) a$$

$$x_3 = \left(1 - \frac{2R/g_R}{U/g_U + D/g_D} \right) a$$

$$y_0 = \frac{U/g_U - D/g_D}{U/g_U + D/g_D} a$$

$$y_1 = \frac{U/g_U - D/g_D}{L/g_L + R/g_R} a$$

$$y_2 = \left(\frac{2U/g_U}{L/g_L + R/g_R} - 1 \right) a$$

$$y_3 = \left(1 - \frac{2D/g_D}{L/g_L + R/g_R} \right) a$$

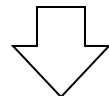
低強度でのBPM測定値と真のビーム位置との関係

$$\begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix}_{Low} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{MON} \\ \tilde{y}_{MON} \end{pmatrix}_{Low} - \underbrace{\left[\begin{pmatrix} \Delta x_{Q-BPM} \\ \Delta y_{Q-BPM} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{Low} \right]}_{\begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{Low} \leftarrow \text{低強度でのBBAデータ (取得済)}} \quad \begin{matrix} \text{※厳密には補正用回転行列} \\ \text{等を考慮して補正} \end{matrix}$$

大強度時

$$\begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix}_{High} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{MON} \\ \tilde{y}_{MON} \end{pmatrix}_{High} - \underbrace{\left[\begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{Low} - \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{Low} + \begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{High}}_{\text{大強度用ゲインへ入替}} \right]}_{\begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{High}}$$

- 解析したゲインと取得済のBBAデータを用いて、大強度用BBAオフセットを算出



較正したゲインを用いることで大強度時のCOD補正の改善が期待

まとめ

- BPM位置精度向上のため、ビームを用いたゲイン較正 (BBGC)を行った
- パルスあたり 10^{13} 、 10^{14} のビーム強度用回路設定において、1電極あたりの誤差
～0.6%でゲインを決定
- 解析したゲインを用いたBBAオフセットを解析中

展望

- ◆ 大強度時のCOD補正改善を確認
- ◆ BPM位置誤差の切り分け (据付誤差+ゲイン誤差)
- ◆ 大強度利用運転への実用化に向け、補正・運用手法を確立