

Belle 実験に於ける放射光バックグラウンド に対するアラーム・システムの開発

阿部 哲郎

東北大学ニュートリノ科学研究センター

— 概要 —

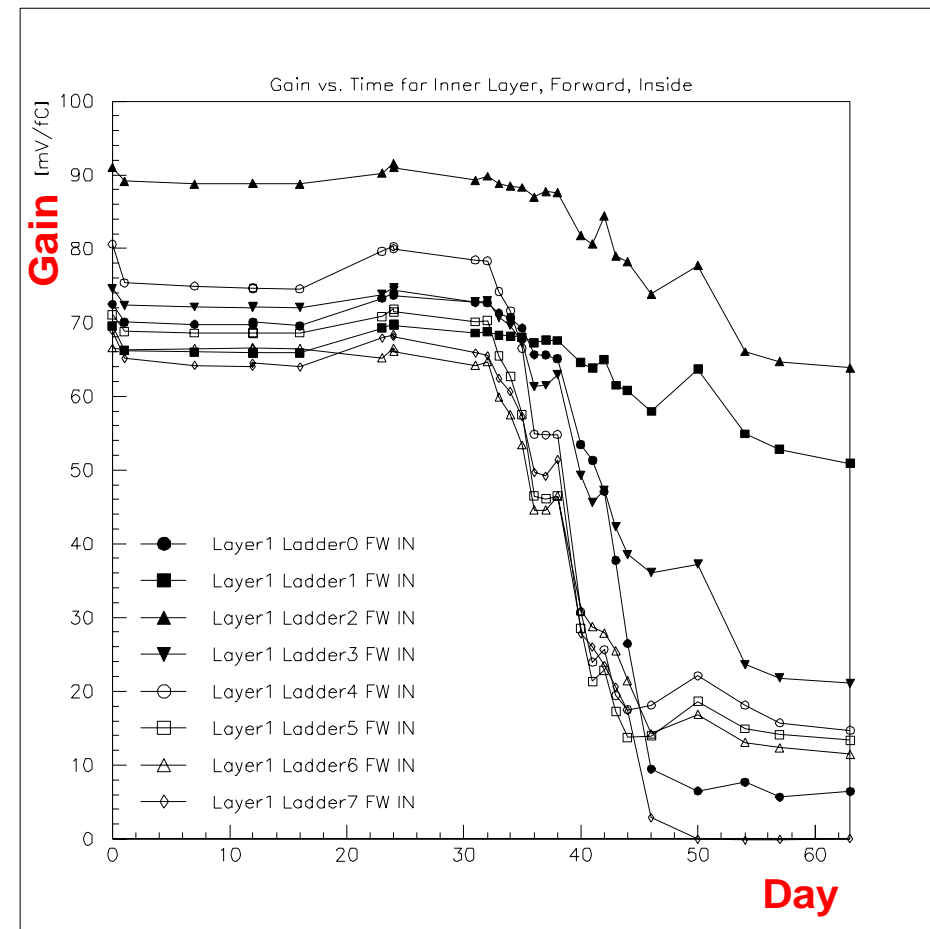
- 1) 研究の背景・動機
- 2) 実軌道と放射光の計算法
- 3) ベンチマーク・テスト
- 4) まとめ

研究の背景

⇒ 初代シリコン・バーテックス検出器 (SVD1.0)
のゲイン降下事件 (1999 年夏)

- ⇒ いきなり 10 日間程でゲインが無くなってしまった
- ⇒ 原因は High Energy Ring (HER) からのシンクロトロン放射光

第 1 層目の前方読み出しチップのゲイン



研究の動機

⇒ **SVD1.0 のゲイン降下事件**

⇒ HER からの放射光が原因

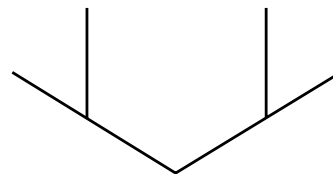
⇒ **より細かい衝突点ビームパイプ**

(← 検出器をなるべく衝突点近くに置きたい)

⇒ $r = 2.0 \text{ cm} \rightarrow 1.5 \text{ cm} \rightarrow 1.0 \text{ cm} (?)$

⇒ **より大きなビーム電流**

⇒ より多くの放射光



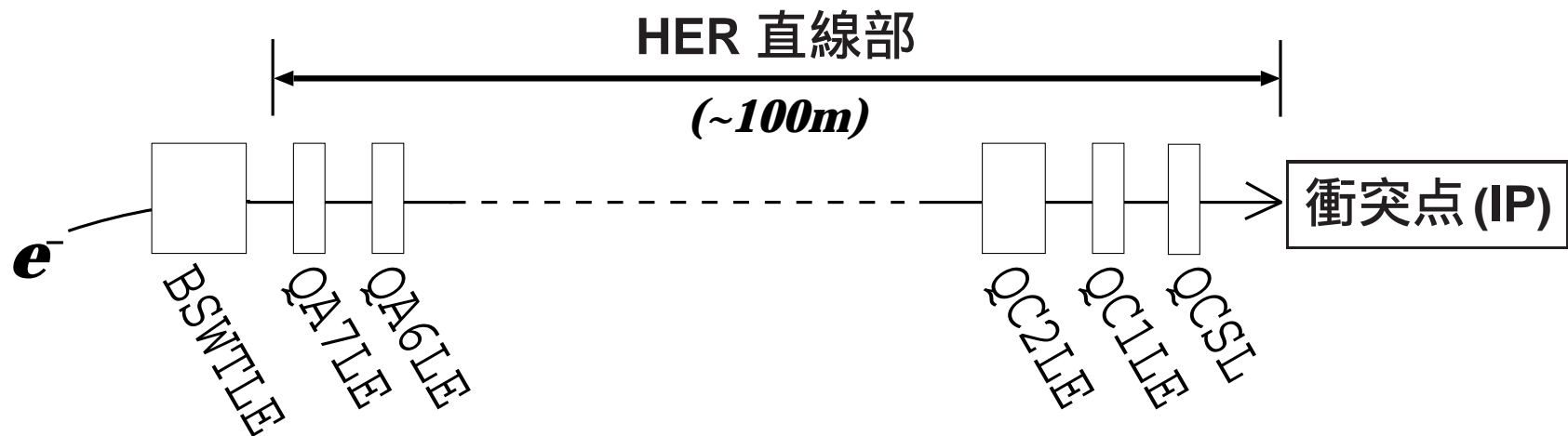
新しいアイデアに基づくアラーム・システム

ビーム位置モニター (BPM) の測定値を フィット

- ビームの**実**軌道
- シンクロトロン放射光
- 衝突点領域に於ける**ワット** 数分布
- アラーム!

実軌道の計算

- HER 直線部の全磁石を対象 (see ↓)
- 線形近似 → **transfer matrices**
- 専用のプログラムを開発



SADシステムによる行列要素との比較

例、 QC3LE

```
In[61] := TransferMatrix["QC3LE", "LX086E.1"]
```

```
Out[61] :=
```

```
{1.0415110062367, 1.094542869142296, 0, 4.440892098501E-16}
```

```
{.077425177671287, 1.0415110062367, 3.469446951954E-18, 0}
```

```
{3.382710778155E-17, -3.53883589099E-16, .959055549847622, 1.065412001995326}
```

```
{-2.60208521397E-18, 2.775557561563E-17, -.075287731090181, .959055549847622}
```

$$\frac{R_{ij}^{(T.Abe)} - R_{ij}^{(SAD)}}{|R_{ij}^{(SAD)}|} = \begin{pmatrix} 0 & +4 \times 10^{-15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \times 10^{-15} & -3 \times 10^{-14} \\ 0 & 0 & 0 & -2 \times 10^{-15} \end{pmatrix}$$

倍精度の範囲で一致

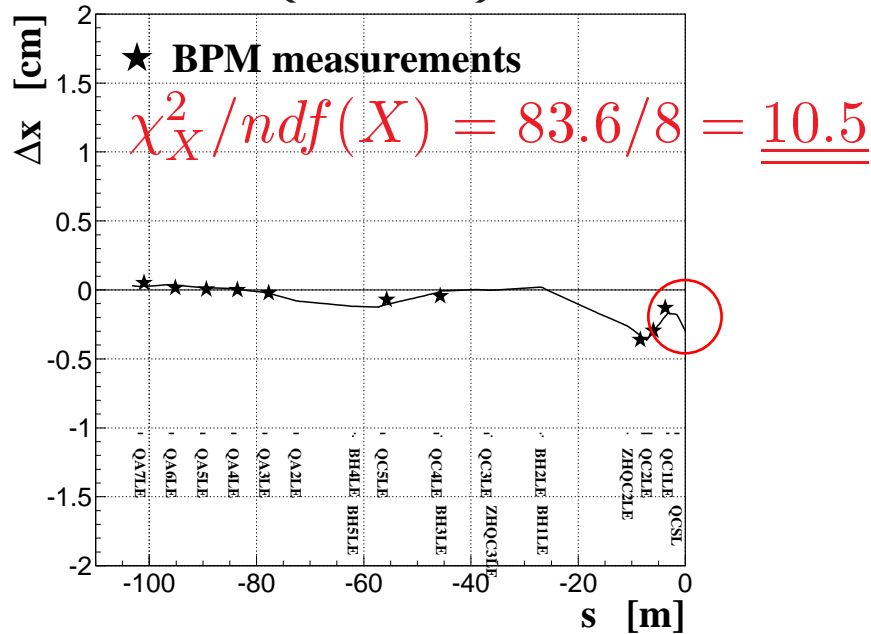
BPM 測定値のフィット

- インプット : $\begin{cases} (1) 12 \text{ 個の BPM の測定値} \\ (2) \text{ 磁石の磁場の強さ } (k_0, k_1) \end{cases}$
- フローティング・パラメータ : $\begin{pmatrix} x_{\text{ini}} \\ y_{\text{ini}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{\text{IP}} \\ y_{\text{IP}} \end{pmatrix}$
- $\chi^2 \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{j:\text{BPM}} \left\{ \left(X_j^{(\text{BPM})} - X_j^{(\text{orbit})} \right)^2 + \left(Y_j^{(\text{BPM})} - Y_j^{(\text{orbit})} \right)^2 \right\} / \sigma^2$
- 最小化 by MINUIT
- $\frac{\chi^2}{\text{ndf}} = \frac{\chi_X^2 + \chi_Y^2}{\text{ndf}(X) + \text{ndf}(Y)} = \frac{\frac{\chi_X^2}{\text{ndf}(X)} \frac{1}{\text{ndf}(Y)} + \frac{\chi_Y^2}{\text{ndf}(Y)} \frac{1}{\text{ndf}(X)}}{\frac{1}{\text{ndf}(X)} + \frac{1}{\text{ndf}(Y)}} \quad (\text{ndf} : \text{自由度})$

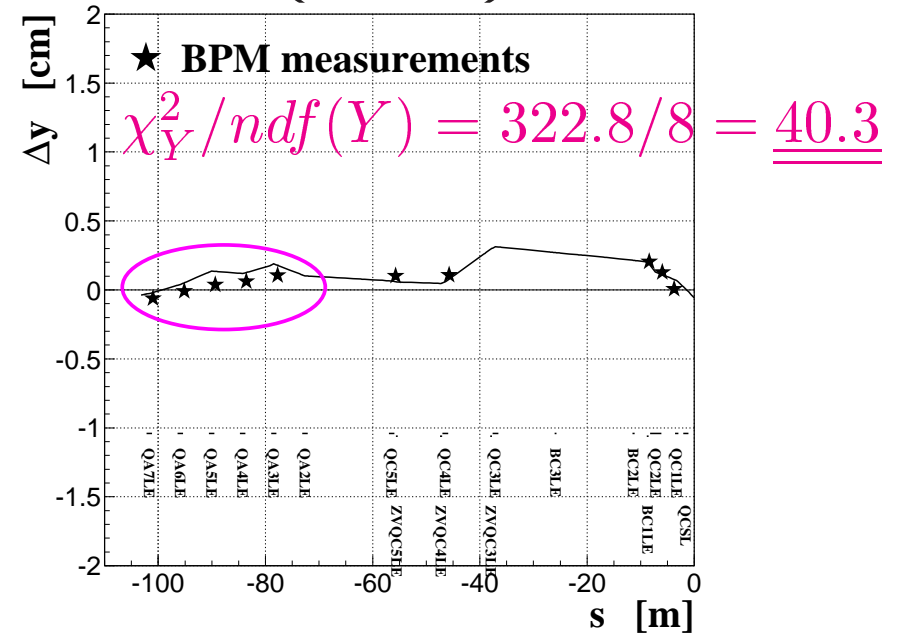
フィットの例

- BPM 測定分解能: $100\ \mu\text{m}$ (含、オフセットの不定性)
- 2001 年 11 月 7 日のデータ

(横方向)



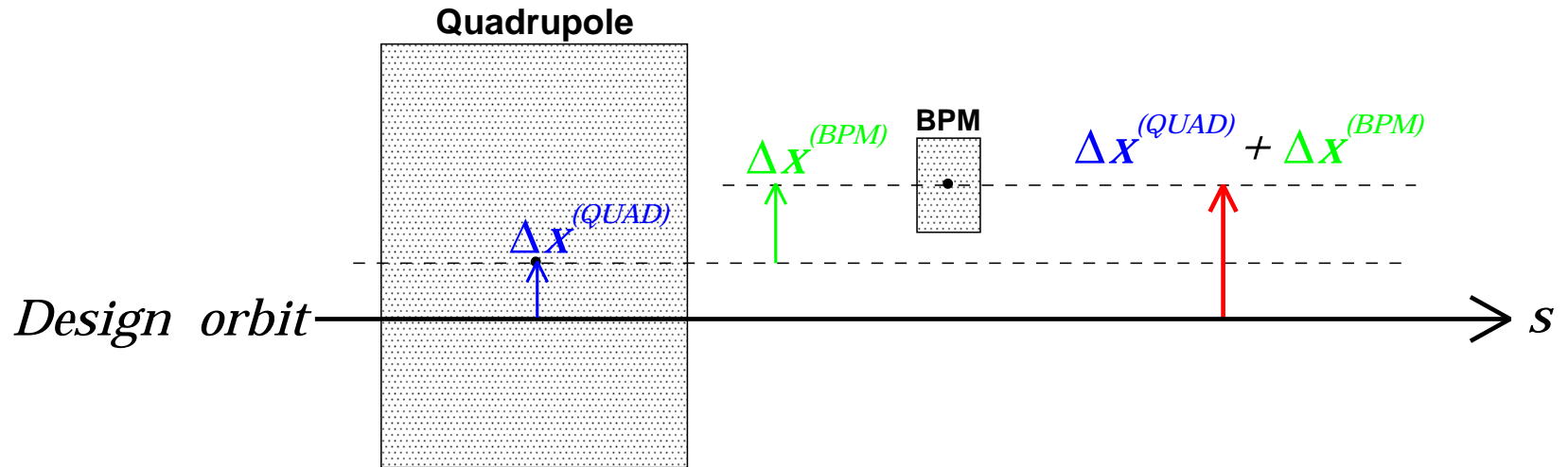
(縦方向)



Failure with $X_{IP} \sim -3\ \text{mm}$ & $\chi^2 / \text{ndf} \gg 1$

何かしらのオフセット補正が必要！

オフセットの定義



$$\chi^2 = \sum_{i:orbits} \sum_{j:BPMs} \left[\begin{aligned} & \left\{ \left(X_{j,i}^{(BPM)} + \frac{\Delta X_j^{(QUAD)} + \Delta X_j^{(BPM)}}{100\mu m} \right) - X_{j,i}^{(orbit)} \right\}^2 \\ & + \left\{ \left(Y_{j,i}^{(BPM)} + \frac{\Delta Y_j^{(QUAD)} + \Delta Y_j^{(BPM)}}{100\mu m} \right) - Y_{j,i}^{(orbit)} \right\}^2 \end{aligned} \right] / (100\mu m)^2$$

オフセットの決定

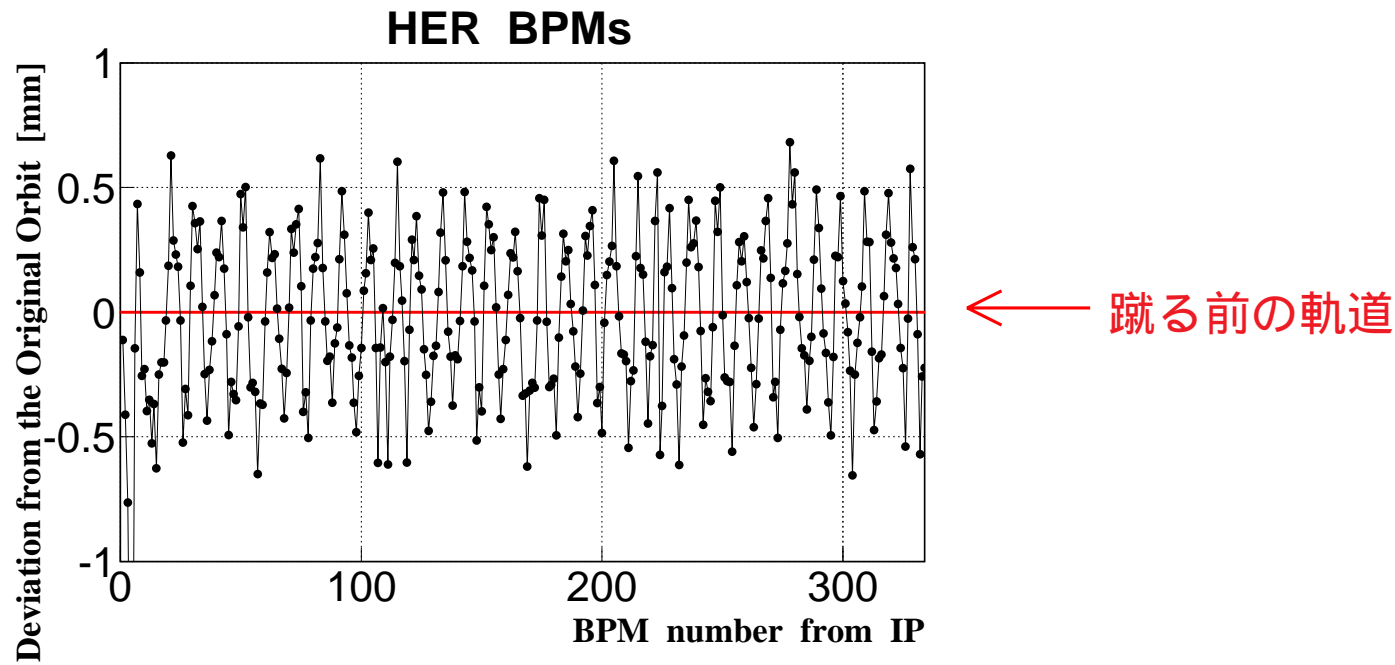
BETARAW サンプル：以下の6セットのステアリング磁石の内の1つがオン

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQFRNE1} \\ \text{ZVQDRNE1} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQFRNE2} \\ \text{ZVQDRNE2} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQFROE1} \\ \text{ZVQDROE1} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQFROE2} \\ \text{ZVQDROE2} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQX6E1} \\ \text{ZVQX5E1} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{ZHQX6E2} \\ \text{ZVQX5E2} \end{array} \right\}$$

$$s = \sim 710\text{m}, \quad \sim 730\text{m}, \quad \sim 2220\text{m}, \quad \sim 2240\text{m}, \quad \sim 1460\text{m}, \quad \sim 1540\text{m}$$

→ ベータatron振動

→ 6本の異なる軌道が得られる



《 フローティング・パラメータ 》

- 始点と終点(衝突点)に於ける軌道:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} X_{ini}^i \\ Y_{ini}^i \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} X_{IP}^i \\ Y_{IP}^i \end{array} \right) \end{array} \right\}$$

($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$: orbits)

- BPM と 4 極磁石のオフセット
- 偏向磁石のスケール

$$\theta_{kick}^{(NEW)} = (1 + \mathbf{a}) \times \theta_{kick}^{(ORG)}$$

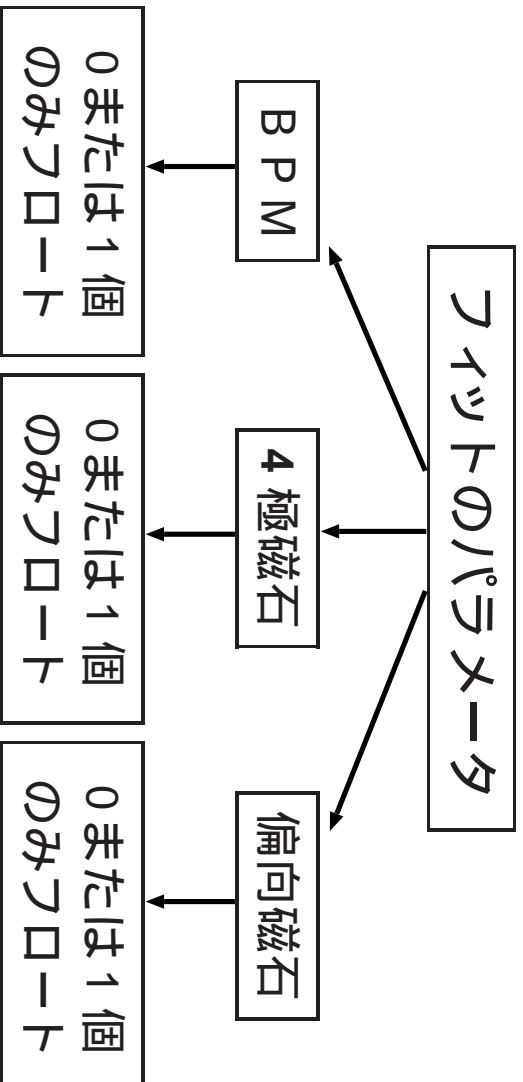
↑ 6本の軌道で 共通

↓
グローバル・フィット

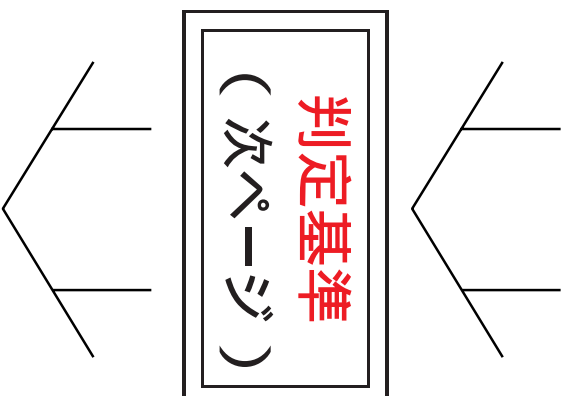
すべてをフロートさせると、

- 100 個以上のパラメータ
 - 大きなオフセット (> 1 cm)
 - 多重解
 - ヘッセ行列が正定値にならない
- という問題が起る。

オファセット補正法



すべての組合せに対してグローバル・フイット



最も χ^2 の小さい組合せを採用

《 判定基準 》

- フィットが正定値のヘッセ行列をもって収束
- |BPM オフセット| < 1 cm
- |4 極磁石 オフセット| < 1 cm
- |偏向磁石のリスケール| < 20%
- $|X_{IP}| < 1 \text{ mm}$ & $|Y_{IP}| < 1 \text{ mm}$

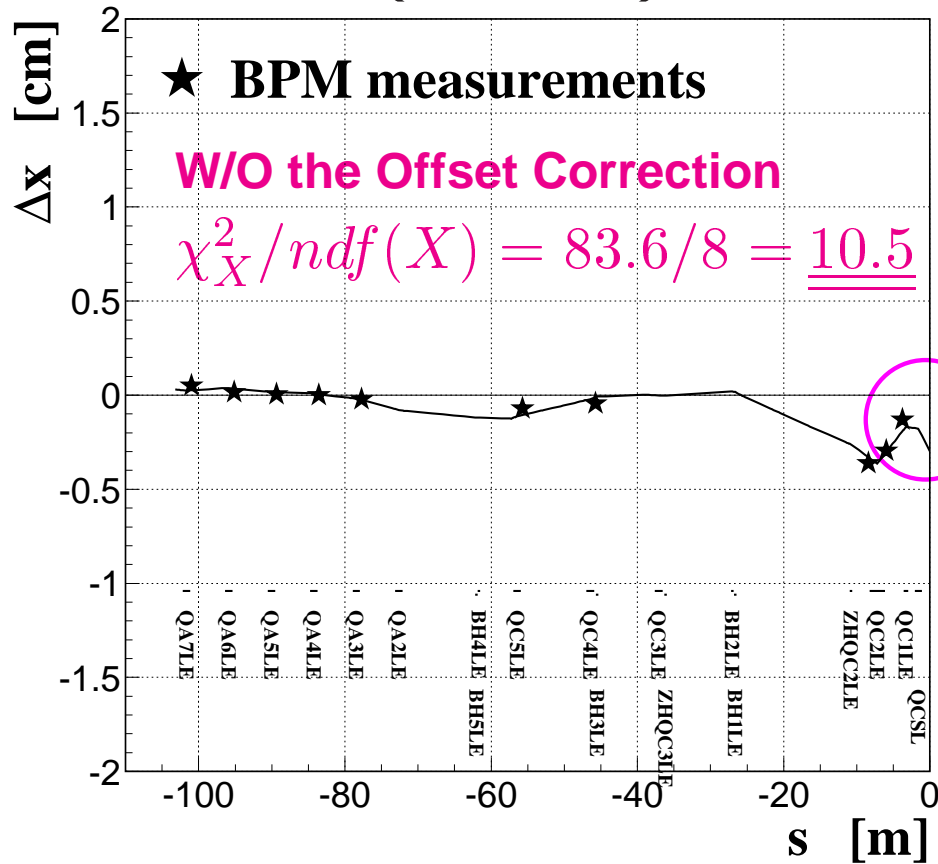
- 最小限の補正
- 数値的手法の可能な範囲内

で解を見つける

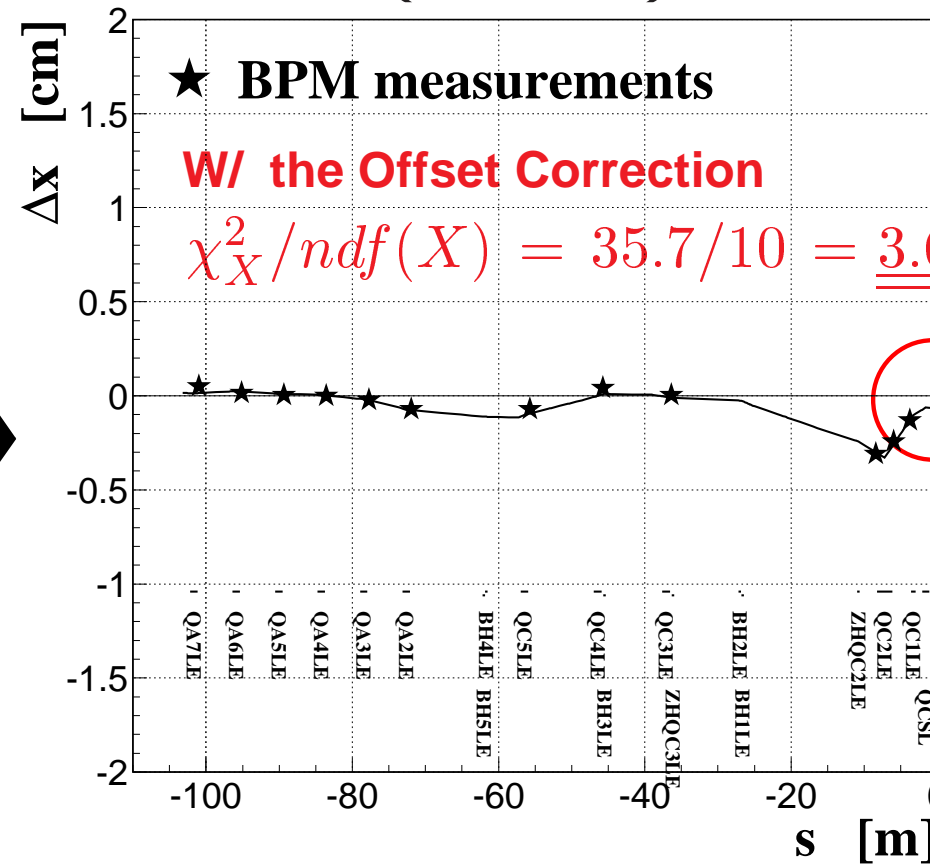
オフセット補正の効果

(横方向の場合)

(補正前)



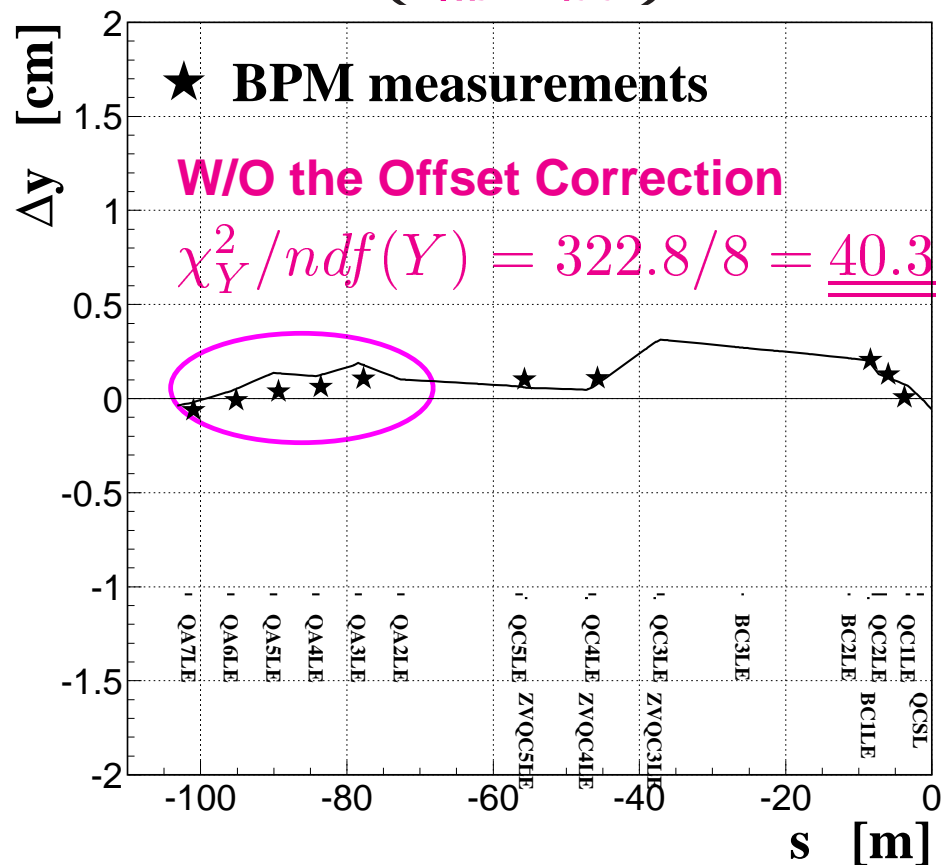
(補正後)



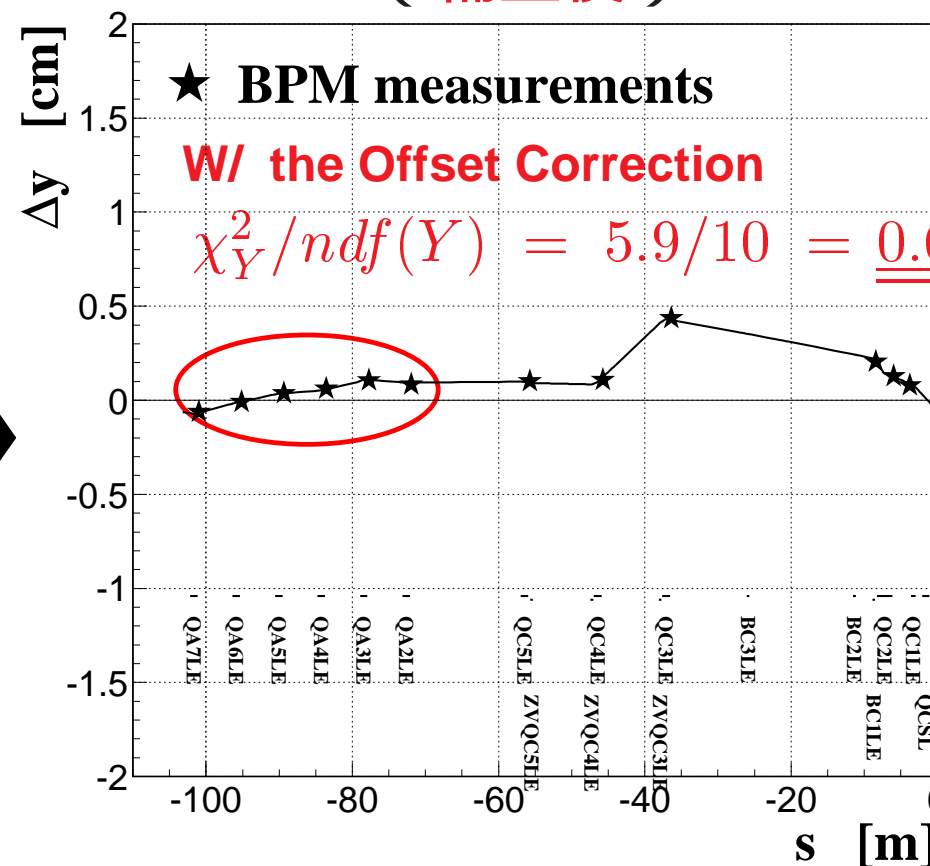
オフセット補正の効果

(縦方向の場合)

(補正前)



(補正後)

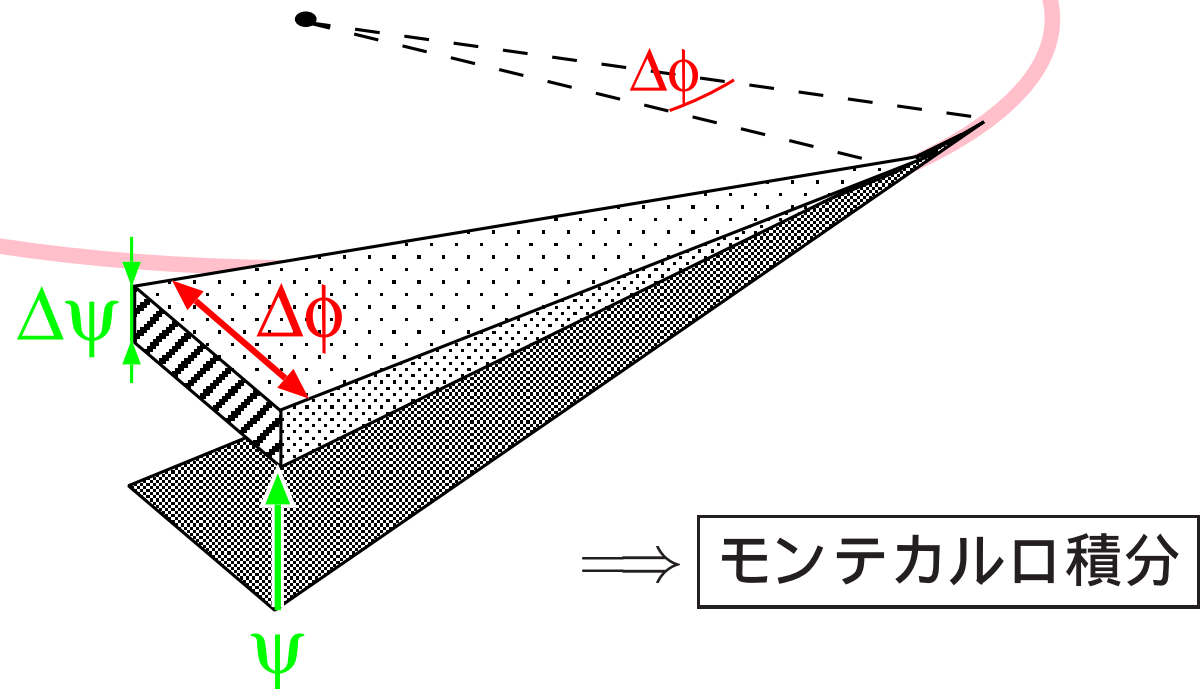


放射光の計算

以下の解析式を使用 (J. S. Schwinger, Phys. Rev. **75**, 1912 (1949))

$$\Delta W = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \frac{I}{e} \gamma^2 \times \Delta\omega \Delta\phi \Delta\psi \frac{1}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 (1 + X^2)^2 \left\{ K_{\frac{2}{3}}^2(\eta) + \frac{X^2}{1 + X^2} K_{\frac{1}{3}}^2(\eta) \right\} \hbar\omega$$

$\left(\gamma : \text{Lorentz factor, } \omega : \text{frequency, } X \equiv \gamma\psi, \eta \equiv \frac{1}{2} \frac{\omega}{\omega_c} (1 + X^2)^{3/2} \right)$



放射光計算のチェック

(SAD の電磁場計算と比較)

同一のモデル・ファイルから出発

計算対象となる磁石 (例、QC3LE)

自分の計算

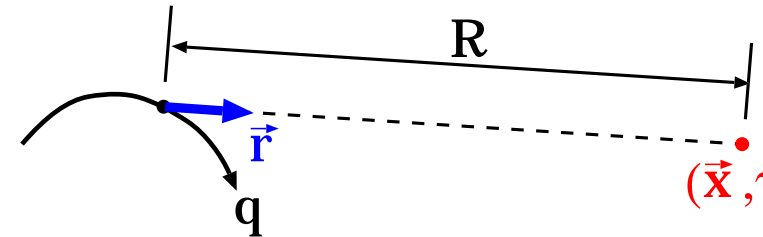
SAD による計算

衝突点領域に於けるワット数分布

SAD による厳密計算

Feynman-Heaviside の式を使用

$$\vec{E}(\vec{x}, \tau) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\vec{r}}{R^2} + \frac{R}{c} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\vec{r}}{R^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{d\tau^2} \vec{r} \right]$$



$$\vec{E}'(\vec{x}, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \hat{\vec{E}}(\vec{x}, \omega) e^{-i\omega\tau} d\omega, \quad \vec{H}' = \vec{r} \times \vec{E}'$$

ポインティング・ベクトル: $\vec{S} = \vec{E}' \times \vec{H}'$

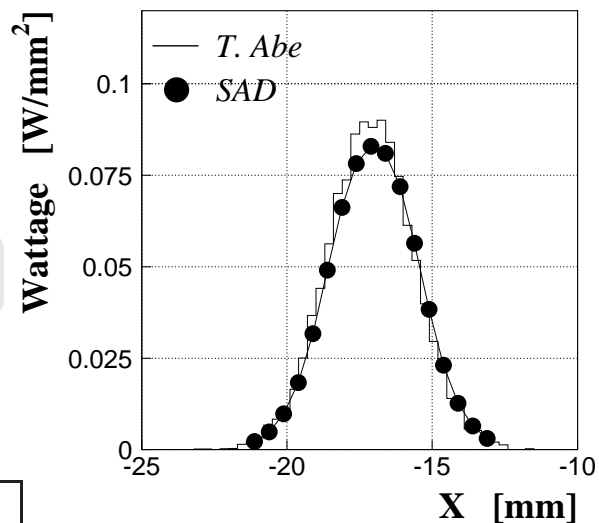
$$W = \int \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{S}(\vec{x}, \tau) d\tau \right\} \cdot \vec{n} d\Omega \times \frac{I_{beam}}{e}$$

(X, Y, Z) :
Belle 座標系

4.7 W (T.Abe)
4.0 W (SAD)

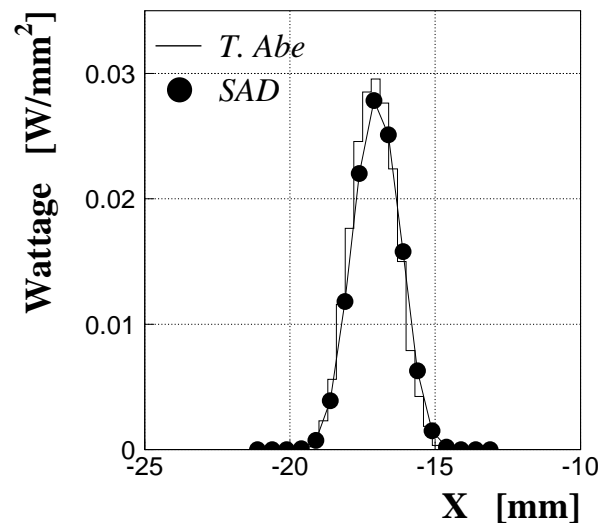
$0.1 < E_\gamma < 1 \text{ keV}$

Y = 12 mm AND Z = -80 mm



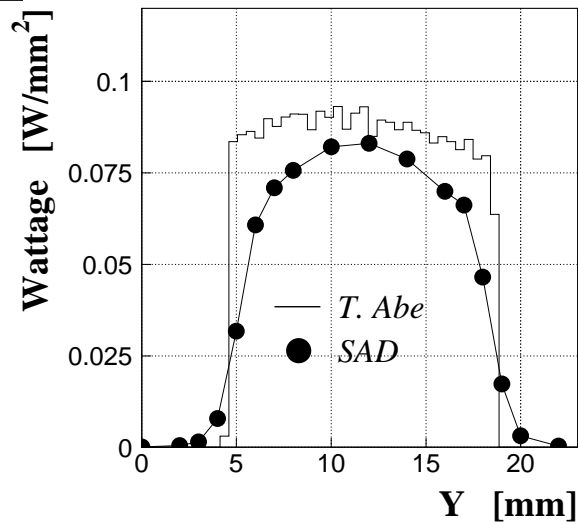
$1 < E_\gamma < 2 \text{ keV}$

Y = 12 mm AND Z = -80 mm

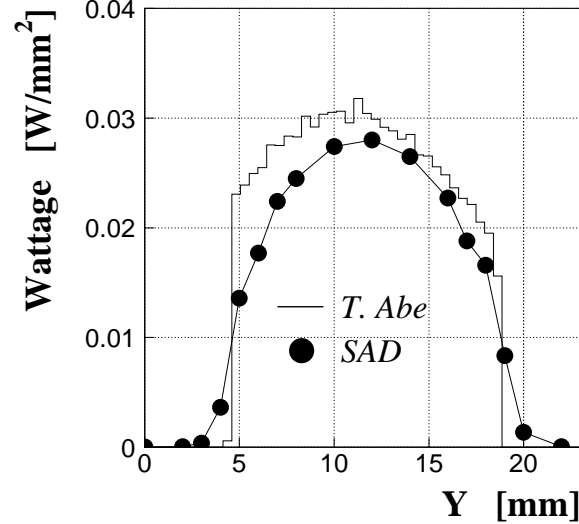


0.85 W (T.Abe)
0.75 W (SAD)

X = -17 mm AND Z = -80 mm



X = -17 mm AND Z = -80 mm



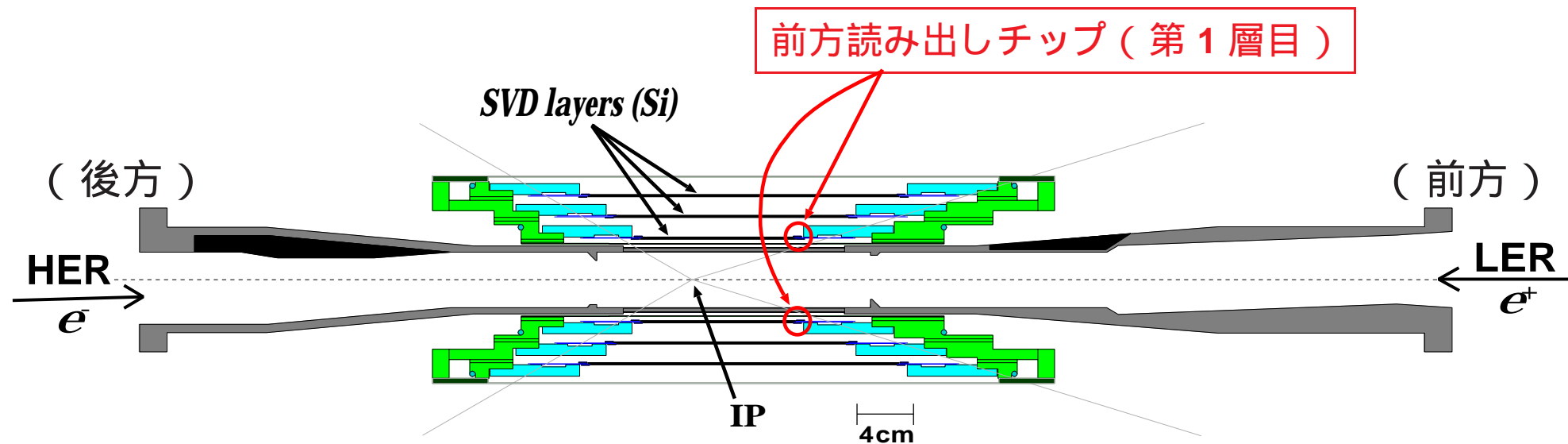
- 分布の絶対値と形の一致 \implies 放射光に関する計算のチェック
- 分布の位置の一致 \implies 座標変換に関する計算のチェック

ベンチマーク・テスト

SVD1.0 ゲイン降下事件を再現できるか？

≪ 測定器シミュレーション ≫

- KEK-improved **EGS4** を使用 (1 keV までシミュレーション)
- SVD1.0 geometry in EGS4 : 図面通り厳密に記述
(↑ 幾何学計算のモジュール化 : 平面、円筒、円錐)

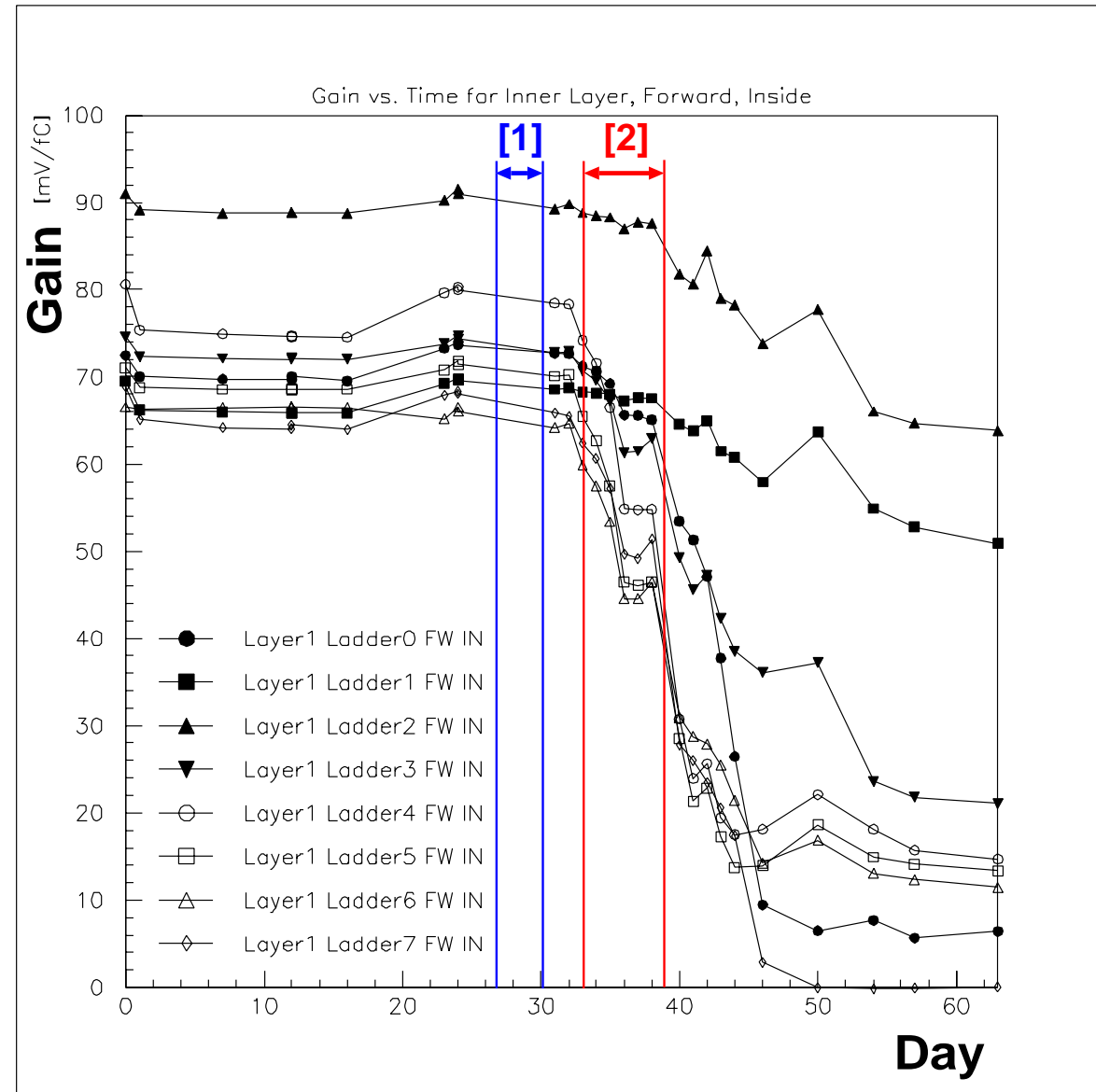


2つの期間

[1] ゲイン降下の開始前

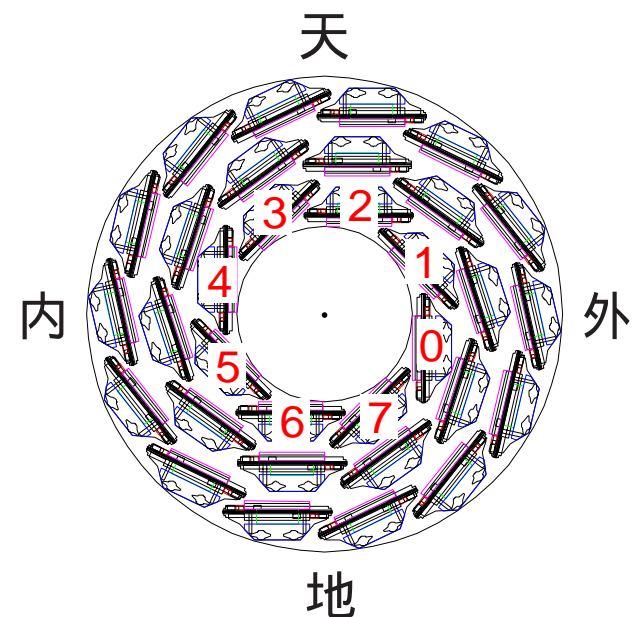
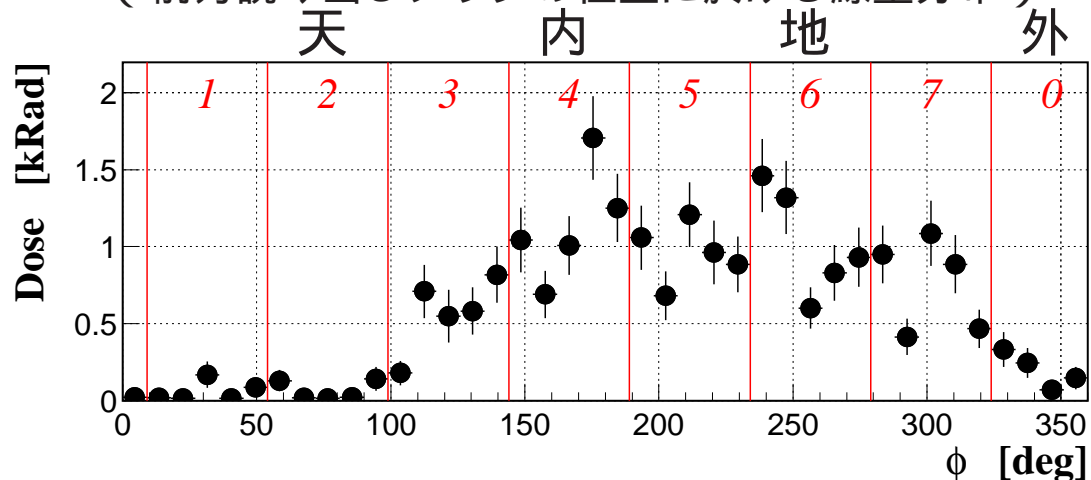
[2] ゲイン降下の開始後

(十分長い時間ビーム軌道がほぼ一定)



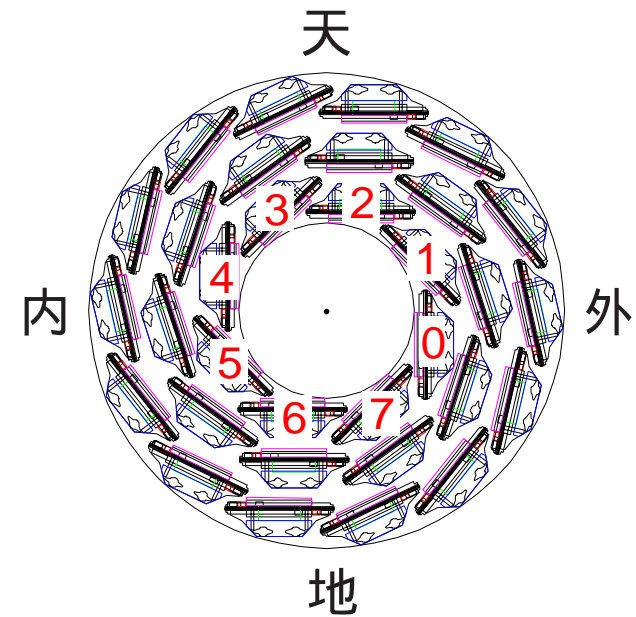
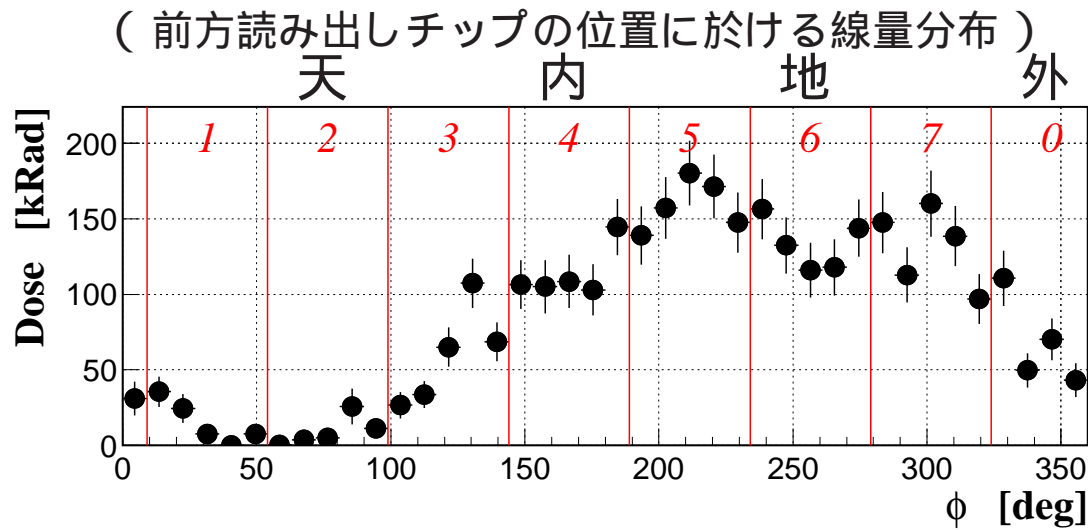
[1] ゲイン降下の開始前

(前方読み出しチップの位置に於ける線量分布)

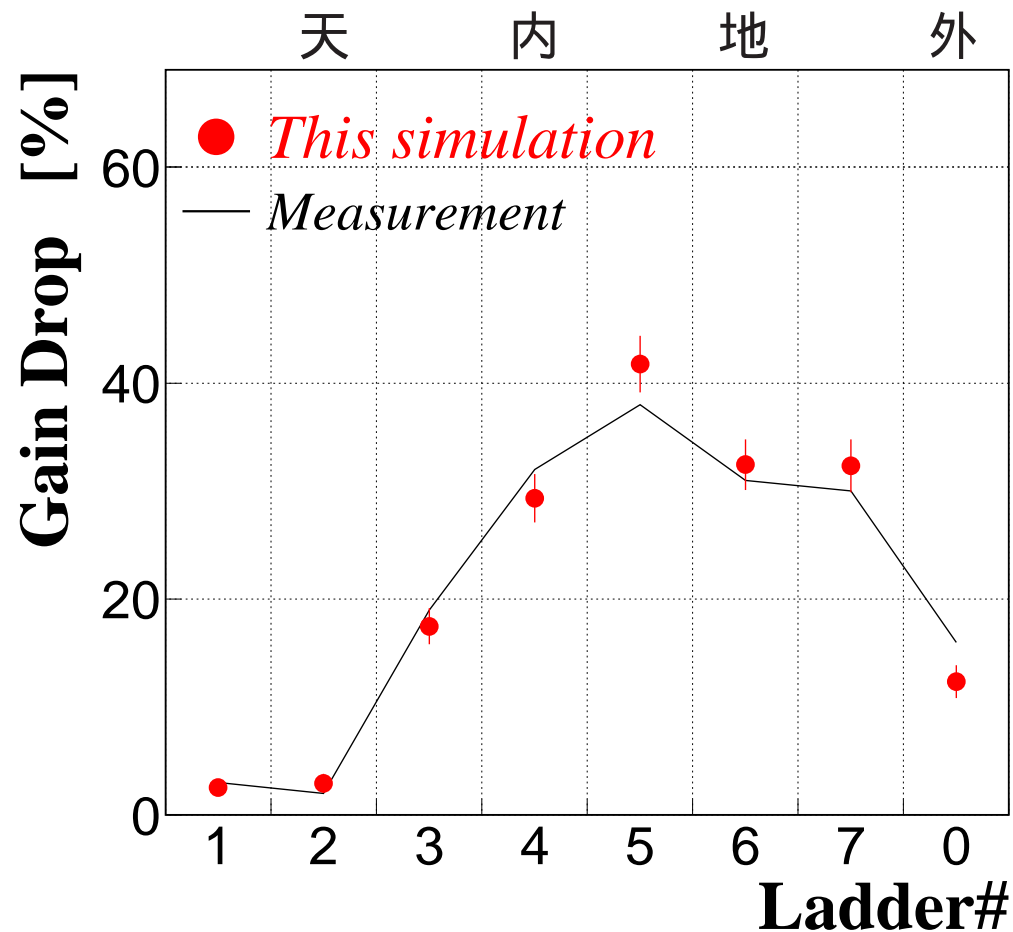


Ladder#	1	2	3	4	5	6	7	0
線量 [Rad/min/A]	2.1 ± 0.9	1.2 ± 0.7	23 ± 3	41 ± 4	33 ± 4	33 ± 4	25 ± 3	$3.5 \pm 1.$
時間	4641 分 (3.2 日)							
平均ビーム電流	4.6 mA							
線量 [kRad]	0.06	0.04	0.53	0.93	0.75	0.74	0.57	0.10
ゲイン降下 (計算) [%]	0.02	0.01	0.17	0.30	0.24	0.23	0.18	0.03
ゲイン降下 (測定) [%]	≤ 1							

[2] ゲイン降下の開始後



Ladder#	1	2	3	4	5	6	7	0
線量 [hRad/min/A]	1.5 ± 0.4	1.7 ± 0.5	10 ± 1	17 ± 1	24 ± 2	19 ± 1	19 ± 1	7.2 ± 0.9
時間	8071分 (5.6日)							
平均ビーム電流	6.7 mA							
線量 [kRad]	8.0	9.2	55	92	131	102	102	39



- 絶対値の一致
- 方位角分布の一致

SVD1.0 ゲイン降下の再現に成功

まとめ

放射光バックグラウンドに対するアラーム・システム

- ⇒ 実軌道の計算
 - ⇒ BPM 測定値をフィット
 - ⇒ オフセット補正法
- ⇒ 放射光の計算
 - ⇒ 解析的式をモンテカルロ積分
- ⇒ **SAD** による計算と比較
 - ⇒ 計算システムのチェック
- ⇒ **SVD1.0** ゲイン降下の定量的再現
 - ⇒ このシステムの正当性を実験的に確認