

# S-2S D1 電磁石の磁場測定

京大理 七村拓野

日本物理学会 第72回年次大会

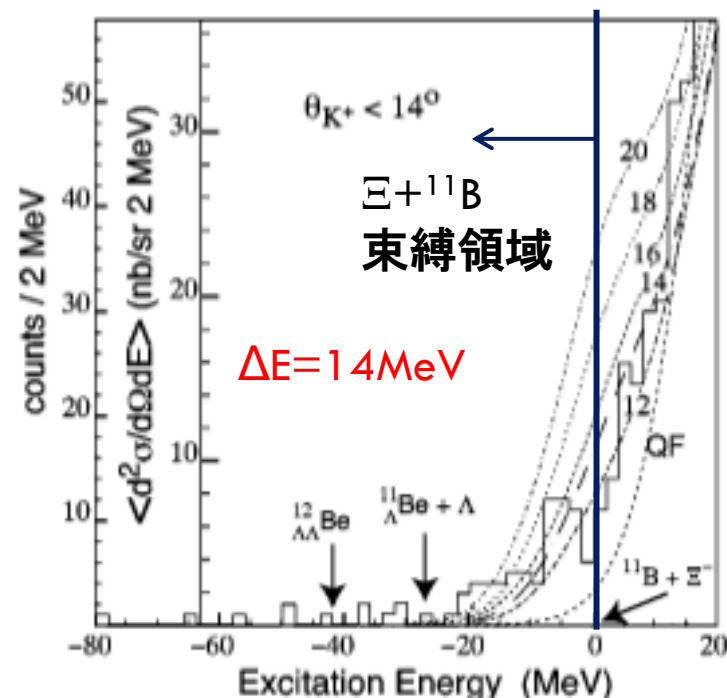
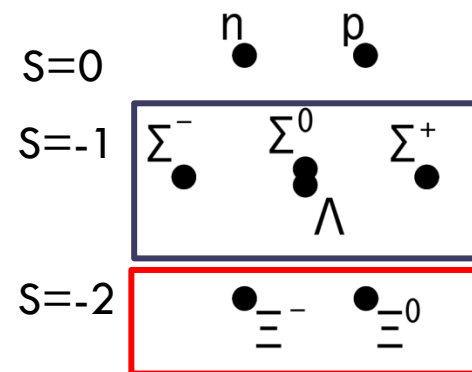
2017/3/19

# 発表内容

- **研究の背景**
  - **ミハイパー核分光実験**
  - **磁気スペクトロメータS-2Sの新規開発**
- **S-2S D1磁場測定**
  - **磁場分布測定と誤差**
  - **計算磁場との比較**
- **S-2Sの運動量分解能の評価**

# Ξハイパー核分光実験

- u,d,sからなるバリオン8重項の間に働く力
  - ◻ 核力:核子-核子散乱→現実的な核力模型
  - ハイパー核の構造からYN,YY相互作用
    - S=-1:  $\Lambda$ ,  $\Sigma$  ハイパー核  
→  $V_{\Lambda} \sim -30$  MeV,  $V_{\Sigma} = 30$  MeV など
    - S=-2:  $\Xi$ ,  $\Lambda\Lambda$  ハイパー核  
→ 実験データは未だ少ない
- ツイン $\Lambda$ ハイパー核事象  
 $\Xi^{-} + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{10}_{\Lambda}\text{Be} + {}^5_{\Lambda}\text{He}$  (木曾イベント[1])
  - ◻  $\Xi^{-} + {}^{14}\text{N}$ 系の束縛状態を示唆
- $\Xi$ ハイパー核
  - ◻  $\Xi\text{N}$ 相互作用のポテンシャルの深さ
  - ◻  $\Xi\text{N} \rightarrow \Lambda\Lambda$  遷移強度
- BNL-E885 実験[2]:  ${}^{12}\text{C}(K^{-}, K^{+})$  反応  
素過程:  $p(K^{-}, K^{+})\Xi^{-}$   
 $\Xi\text{-N}$ 相互作用の  $V_{\Xi} = -14$  MeV,  
 ${}^{12}_{\Xi}\text{Be}$ の生成断面積  $\sim 60$  nb/sr

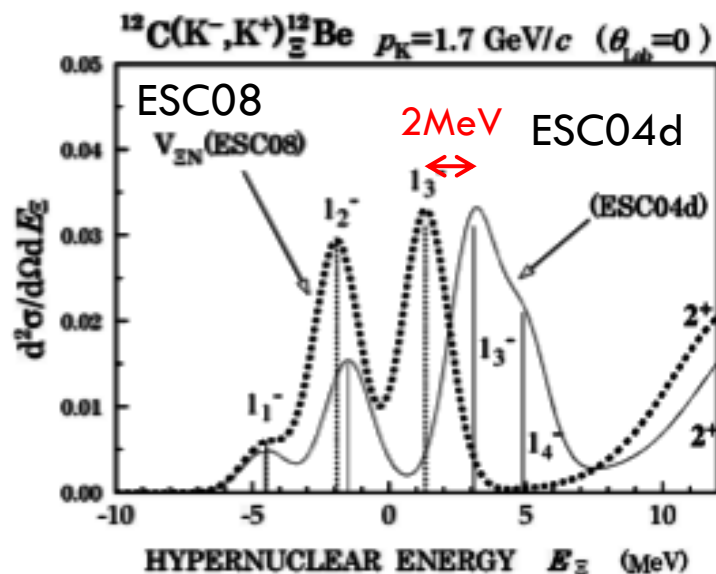


[1] K.Nakazawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 033D02

[2] P. Khaustov et al., PRC 61 (2000) 054603

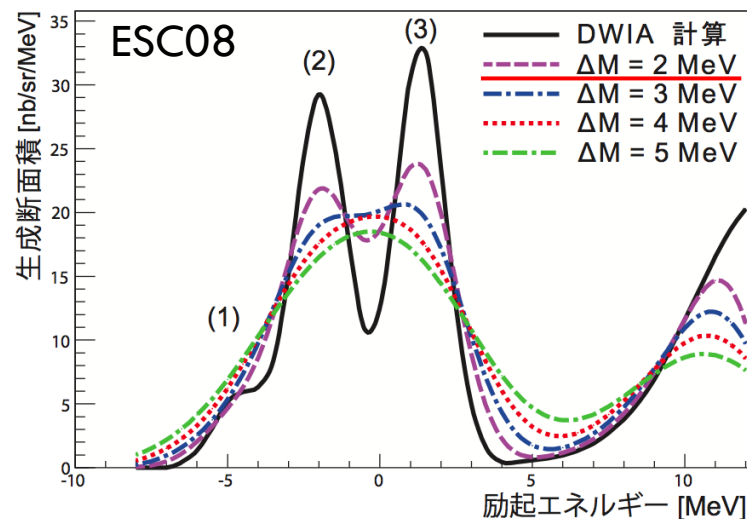
# 高エネルギー分解能での分光実験の必要性

- $\Xi$ ハイパー核状態のピーク位置と幅を明確に観測
  - $\Xi N$ 相互作用ポテンシャルの実部と虚部に対応する
- コア原子核励起状態を分けるには $\Delta E < 2$  MeVが必要
  - バリオン間相互作用モデルの選別



コア原子核の励起も考慮した  
理論計算による $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ 励起スペクトル

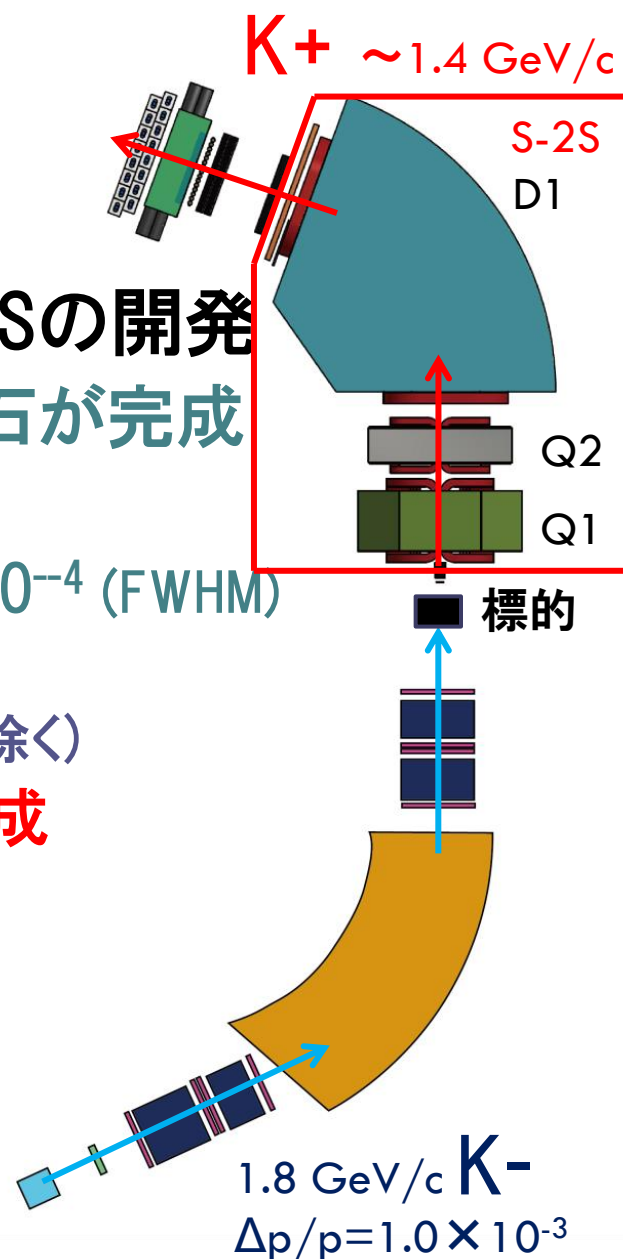
T.Motoba and S.Sugimoto NPA 835(2010) 223



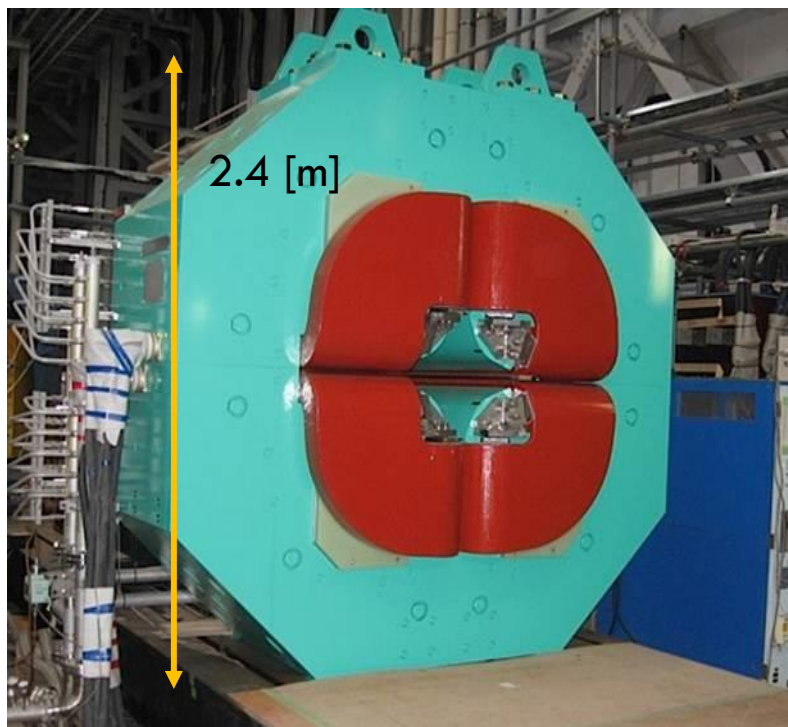
実験分解能の違いによる  
励起スペクトルの見え方の違い

# J-PARC E05実験

- $^{12}\text{C}(K^-, K^+)^{12}_{\text{E}}\text{Be}$ 反応を用いた  
ミッシングマス分光実験
- 散乱 $K^+$ 磁気スペクトロメータS-2Sの開発
  - 2015年に3台(Q1, Q2, D1)の電磁石が完成
  - 立体角  $\sim 55 \text{ msr}$
  - 運動量分解能目標値  $\Delta p/p = 6 \times 10^{-4}$  (FWHM)
    - ・ エネルギー分解能  $\Delta E$  1.89 MeV  
(標的中のエネルギー損失のふらつきを除く)
- 高エネルギー分解能と高統計を達成
- 2018年頃データ取得予定



# S-2S Q1, Q2 電磁石



Q1 (縦収束)

最大磁場勾配: 8.7 [T/m]

磁極間隙 : 31 [cm]

鉄重量 : 37 [Ton]

幅×高さ×長さ: 2.4 × 2.4 × 0.88 [m<sup>3</sup>]



Q2 (横収束)

最大磁場勾配: 5.0 [T/m]

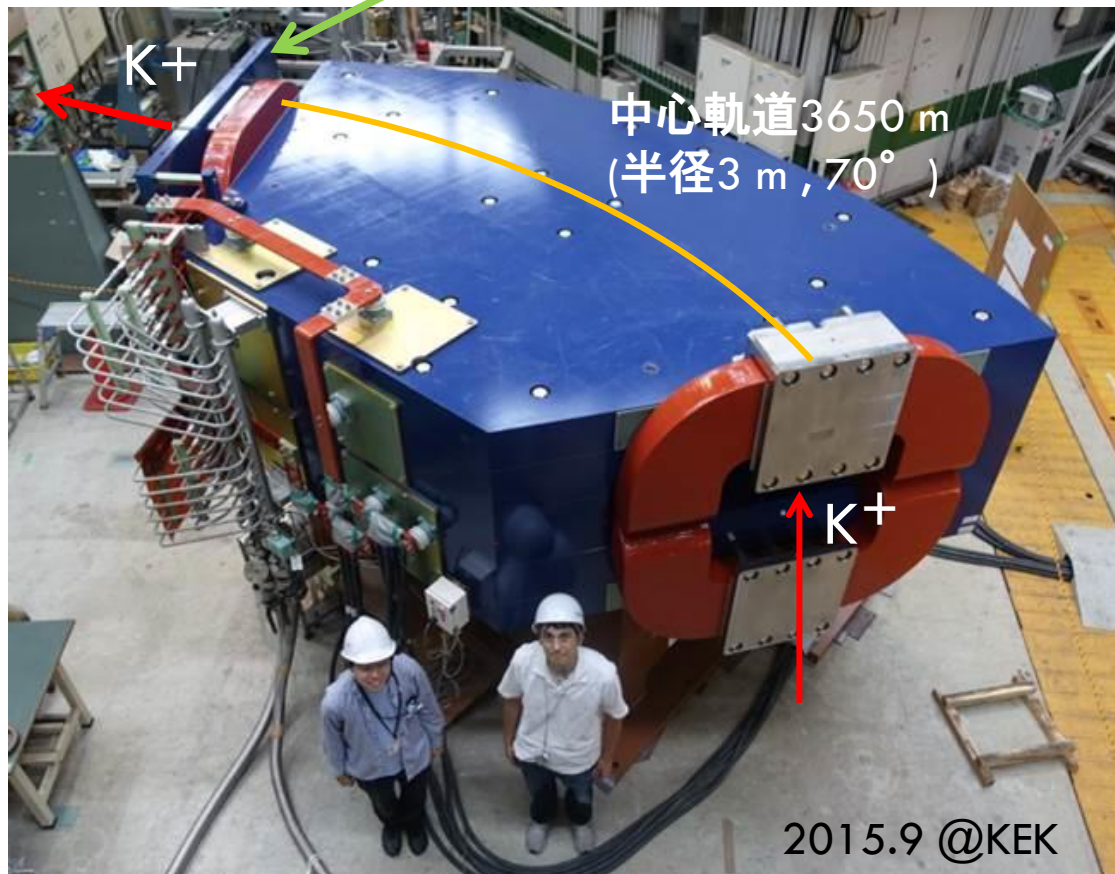
磁極間隙 : 36 [cm]

鉄重量 : 12 [Ton]

幅×高さ×長さ: 2.1 × 1.54 × 0.5 [m<sup>3</sup>]

# S-2S D1 電磁石

エンドガード:漏れ磁場を抑え、検出器への磁場の影響を減らす



定格電流:2500 [A]  
最大中心磁場:1.475 [T]  
中心運動量: 1.38 [GeV/c]  
磁極間隙体積:  
800 × 320 × 3650 [m<sup>3</sup>]  
鉄重量 :86 [Ton]

# 今回の研究の位置づけ

- S-2S実験では、計算磁場マップを使い運動量解析を行う
  - 3台の電磁石を並べた状態での磁場測定は困難
- 計算磁場の精度が運動量分解能に影響する

D1電磁石の測定磁場  比較  計算磁場(OPERA3D/TOSCA)



計算磁場の精度を評価

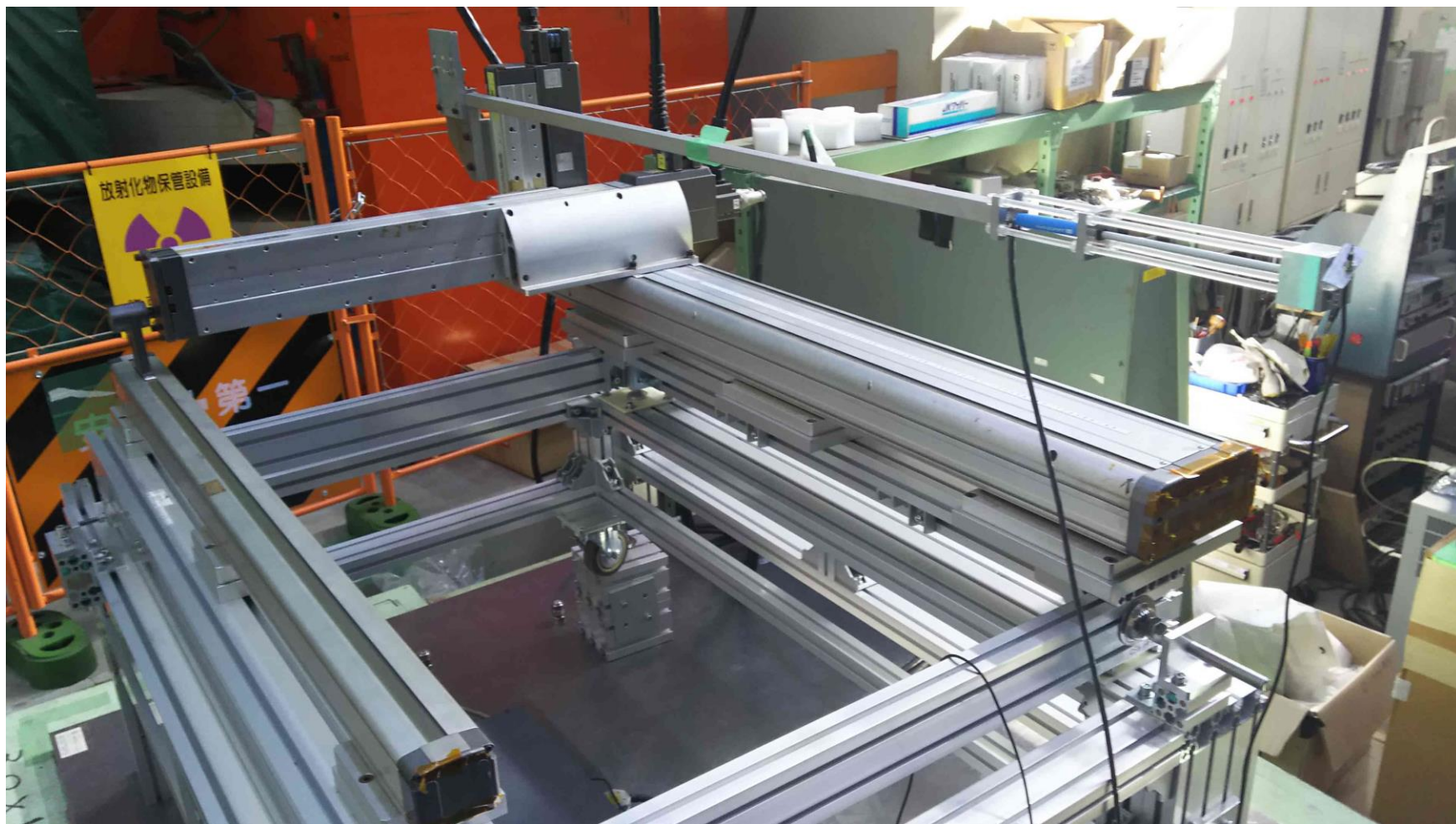


運動量分解能への影響を評価する。



# 磁場分布測定

# 磁場測定器



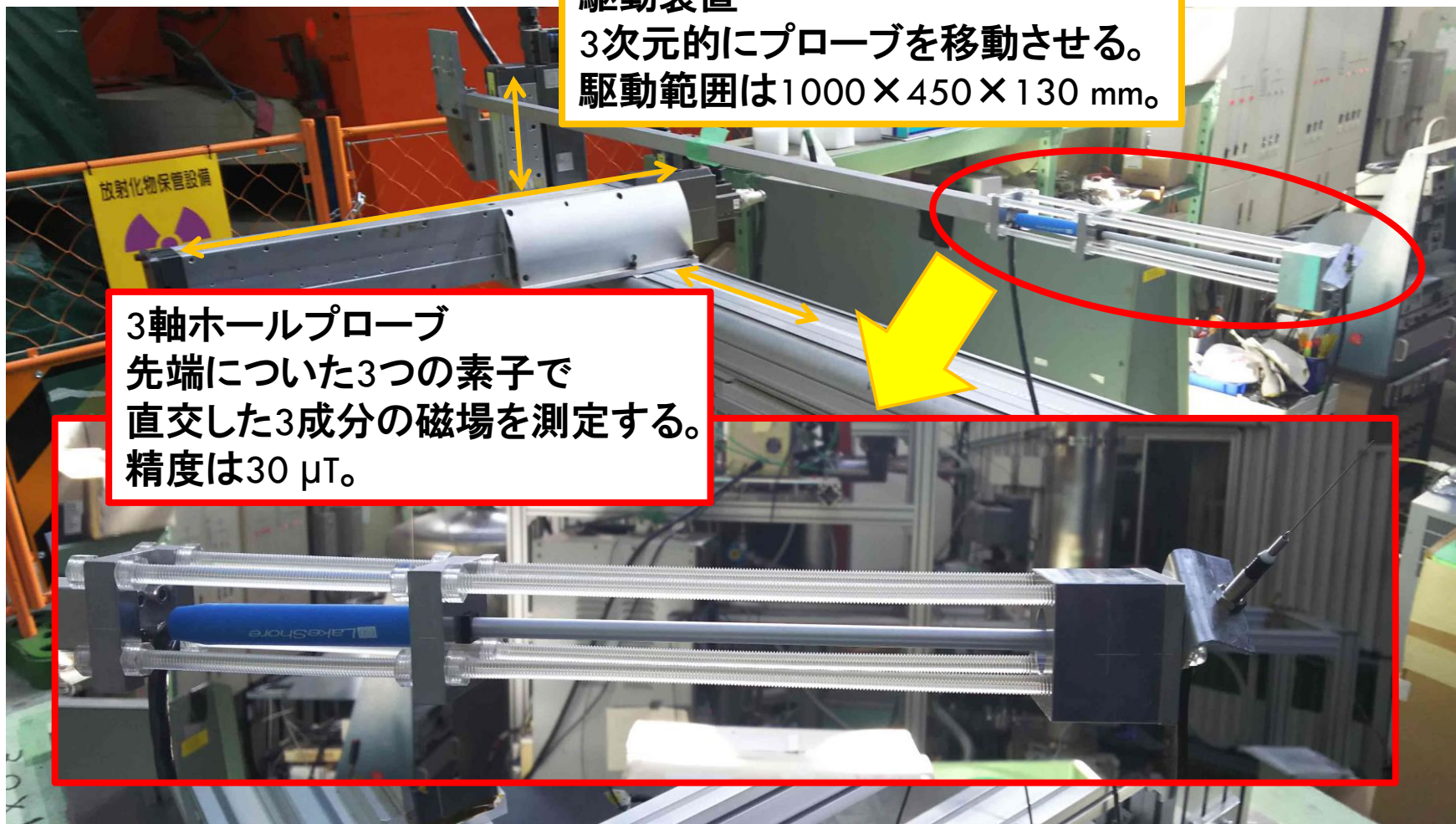
# 磁場測定器

## 駆動装置

3次元的にプローブを移動させる。  
駆動範囲は1000×450×130 mm。

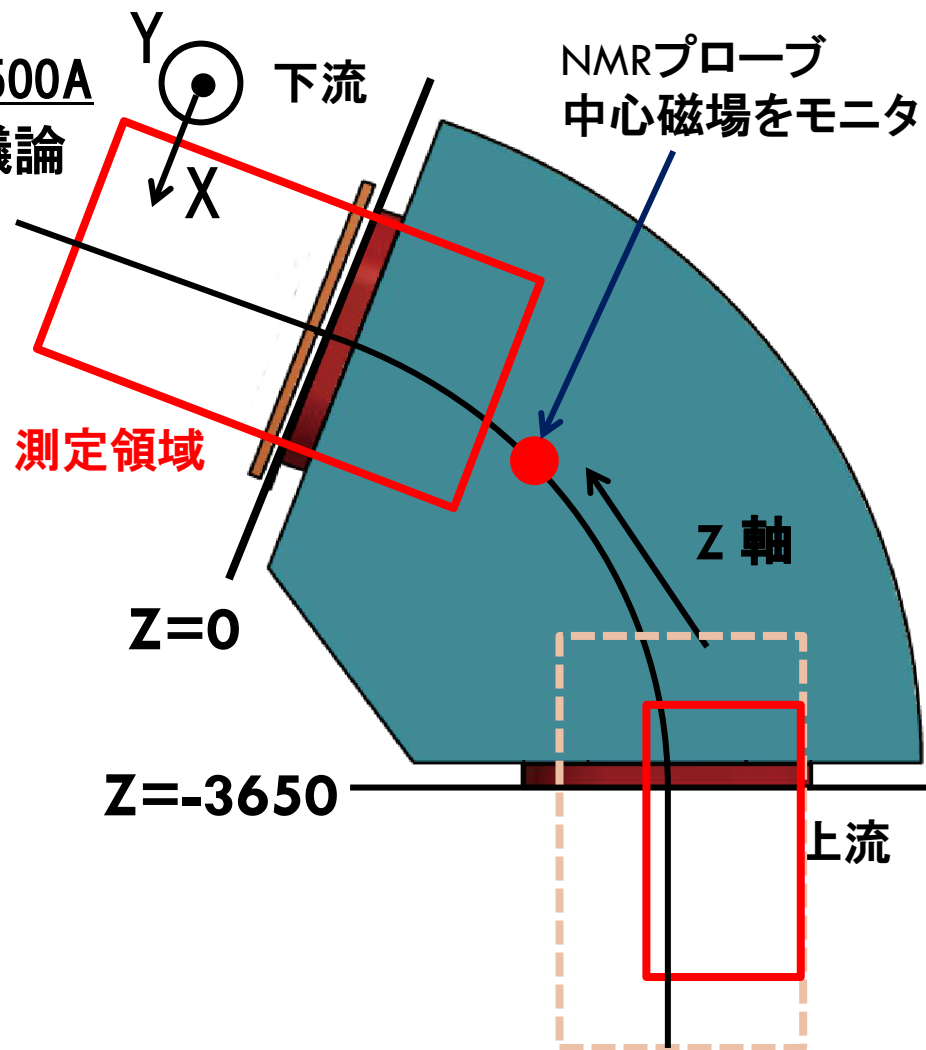
## 3軸ホールプローブ

先端についた3つの素子で  
直交した3成分の磁場を測定する。  
精度は30  $\mu$ T。

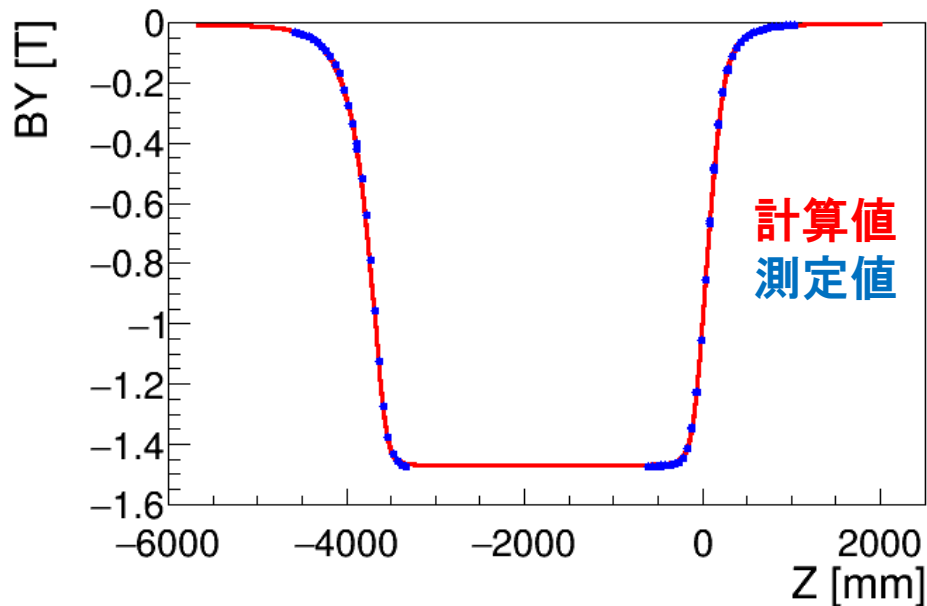


# 測定の概要

- 領域：800×320×1700 mm<sup>3</sup>(下流側), 400×320×1100 mm<sup>3</sup>(上流側)
  - メッシュ間隔：50×20×50 mm<sup>3</sup>
  - 電流設定：1000A, 1500A, 2000A, 2500A
- 本発表では下流側、2500Aについて議論



中心軌道上の磁場のY成分

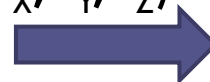


# 測定データの較正

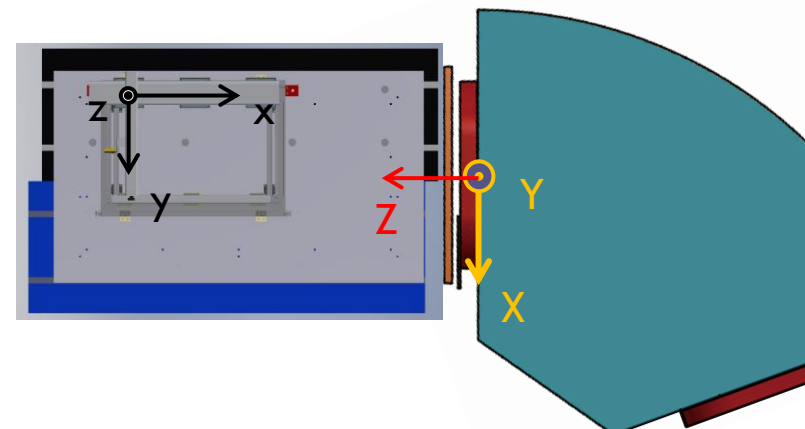
- 測定データ
  - $(x, y, z), (b_x, b_y, b_z)$
- 計算磁場分布
  - $(X, Y, Z), (B_x, B_y, B_z)$
- 計算磁場と統一的に扱うため、測定データ $(x, y, z, b_x, b_y, b_z)$ を変換
- 位置の変換 $(x, y, z) \rightarrow (X, Y, Z)$ 
  - 座標原点を合わせる
  - 駆動装置の傾きを補正
- 磁場の較正 $(b_x, b_y, b_z) \rightarrow (B_x, B_y, B_z)$ 
  - プローブの傾きを補正
  - 電流の時間変動の補正



位置のずれ  $\delta X < 0.1$  [mm]



角度の較正誤差  $\Delta\theta = 0.002$  [rad]



$Z=0$ が磁極端、  
 $Z>0$ が外側、 $Z<0$ が内側

# 測定結果の一例

- 中心軌道に沿った $B_Y$ 分布をEnge関数

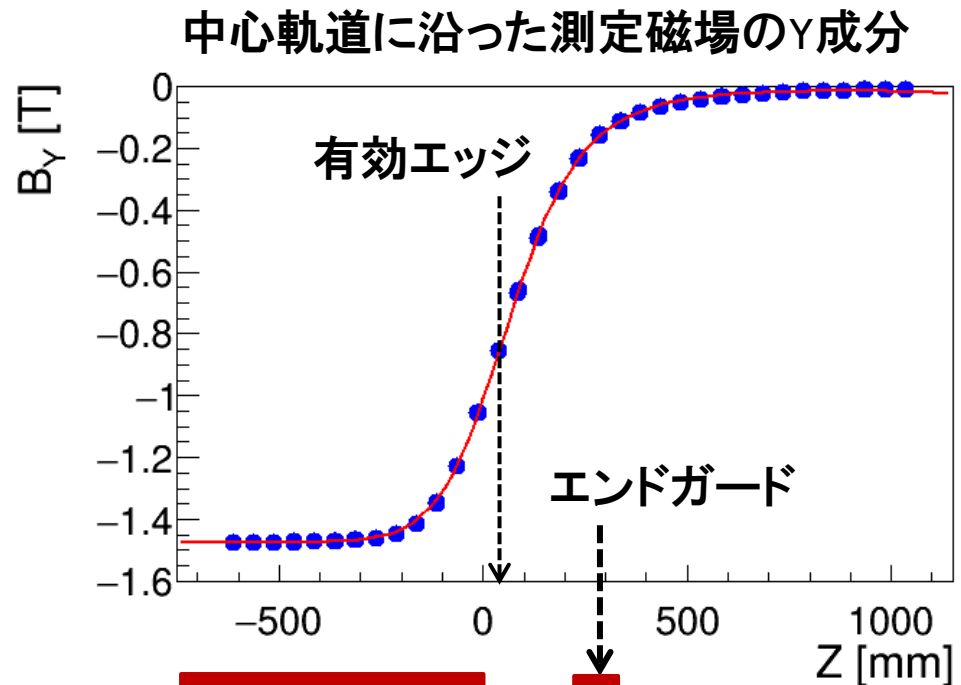
$$f(Z) = \frac{1}{1 + e^{p(Z-s)}} \quad : \quad p(x) \text{は多項式}$$

でフィッティングして有効エッジ $s$ を求める

- 2500Aのデータに対し

有効エッジの位置は  
 $s = 67.3 \pm 0.4$  [mm]

計算磁場は $s = 67.4$  [mm]  
双極電磁石を特徴づける  
量が一致した



# 測定誤差 $\Delta B$ の評価

- **ホールプローブ自体の測定誤差  $\sigma_{\text{Hall}}$** 
  - 同じ位置の磁場を連続で測ったデータから評価
- **測定点の位置精度からくる誤差  $\sigma_{\text{mover}}$** 
  - 同じ位置に繰り返し設定しなおして測ったデータから評価
- **ホール素子の大きさからくる誤差  $\sigma_{\text{size}}$** 
  - ホール素子は半径 $750\mu\text{m}$ の円盤型
  - 測定データから測定点の $\frac{\partial B}{\partial x}$ を求め、誤差の伝搬則から評価
- **誤差 $\Delta B^2 = \sigma_{\text{Hall}}^2 + \sigma_{\text{mover}}^2 + \sigma_{\text{size}}^2$   $\Delta B$ に対しては $\sigma_{\text{size}}$ が支配的**

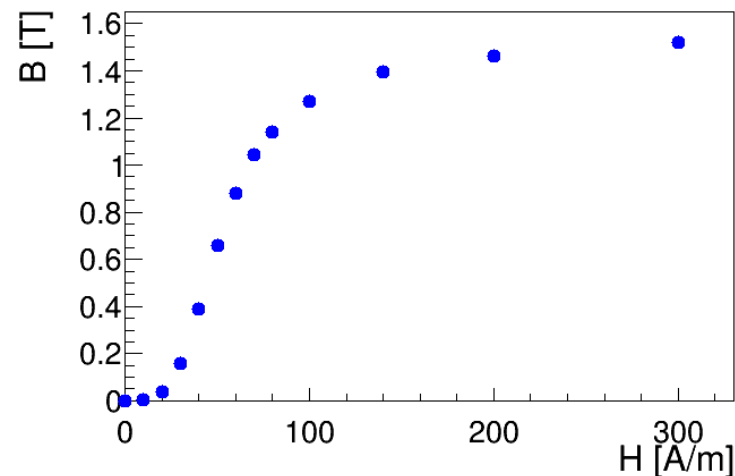
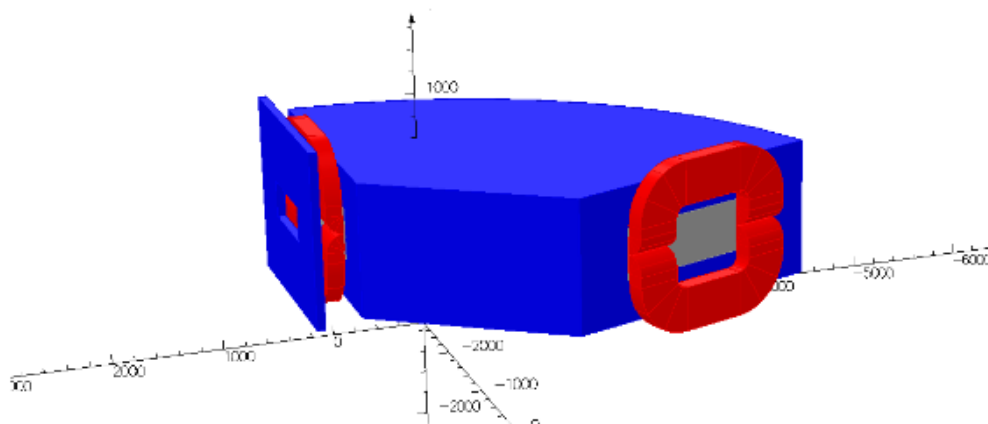
成分	$\sigma_{\text{Hall}}$ [mT]	$\sigma_{\text{mover}}$ [mT]	$\sigma_{\text{size}}$ [mT]	$\Delta B$ [mT]
$B_x$	0.03	0.01	0.06	0.06
$B_y$	0.03	0.02	<1.6	1.6 (磁極端付近), 0.20 (それ以外)
$B_z$	0.03	0.1	<1.4	1.4 (磁極端付近), 0.22 (それ以外)

# 測定磁場と計算磁場の比較



# 計算磁場

- OPERA-3D/TOSCAで計算
- モデリング：設計図をもとに作成、上下対称
  - 周辺の磁性体や電磁石の架台などは考慮していない
- BH曲線：Q1電磁石の計算磁場の精度を上げるために調整したもの

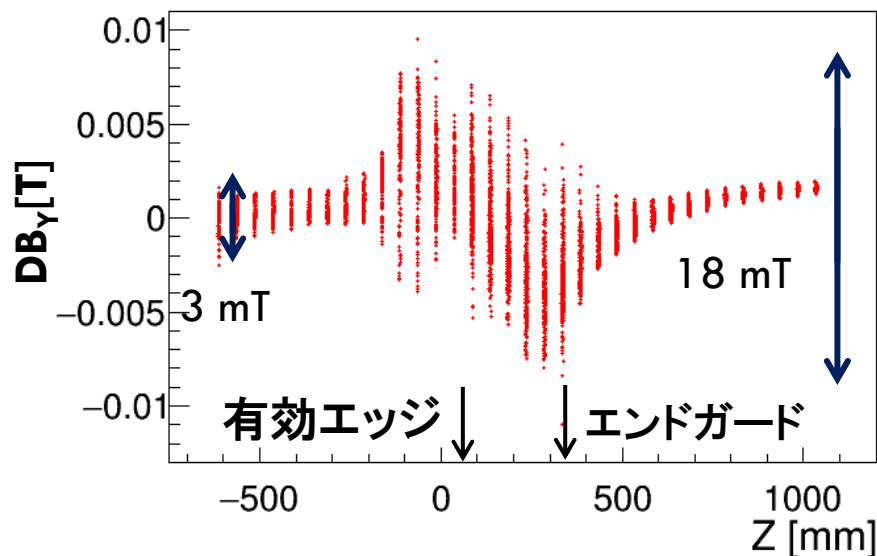


- メッシュサイズ
  - ヨーク部分:30 mm, 粒子が通る領域:20mm
  - それ以外:100mm
    - ・ メッシュサイズによる計算精度は60 $\mu$ T未満

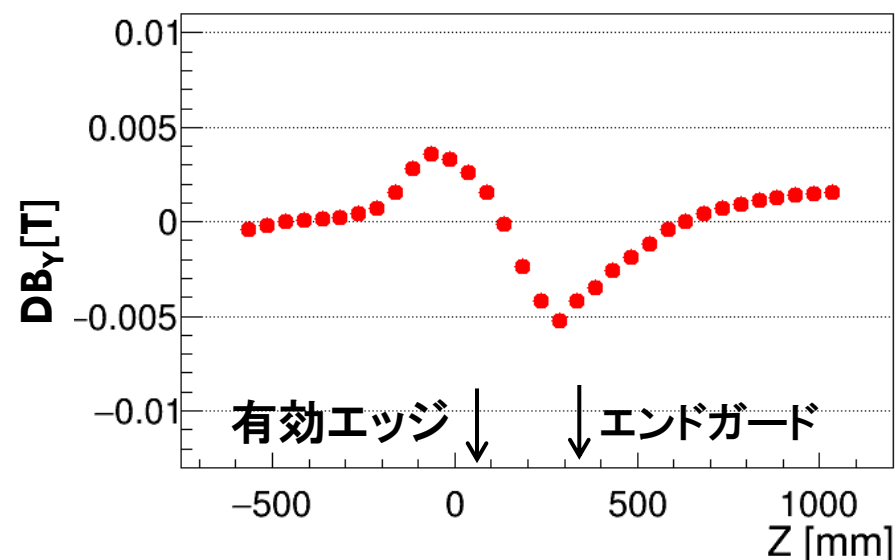
# 計算磁場との比較

- $DB_Y = (\text{測定磁場のY成分}) - (\text{計算磁場のY成分})$ 
  - 傾向1 a: 一様領域では3mTの範囲に収まる( $\sigma = 0.7\text{mT}$ )
  - 傾向1 b: 磁極端付近では18mTの範囲でばらつく( $\sigma = 2.8\text{mT}$ )
  - 傾向2: 有効エッジの前後で正負が入れ替わる

全測定データの差



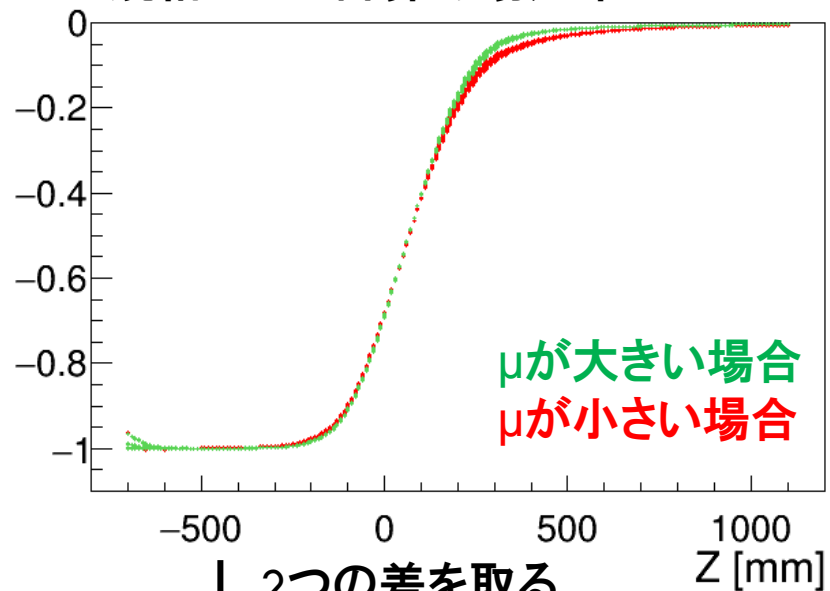
中心軌道での差



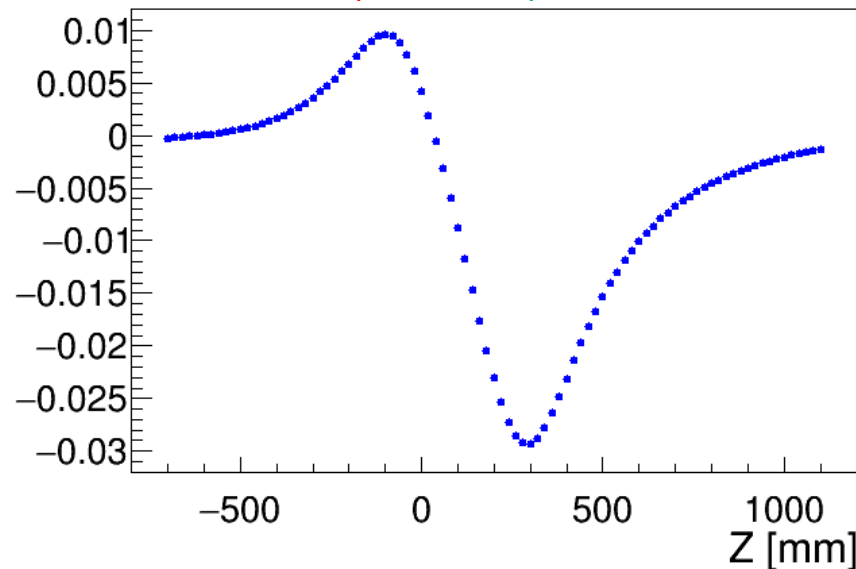
# DB<sub>Y</sub>の傾向から考察

- 傾向2は磁極の透磁率 $\mu$ の値の違いからくるものと考えられる

規格化した計算磁場分布



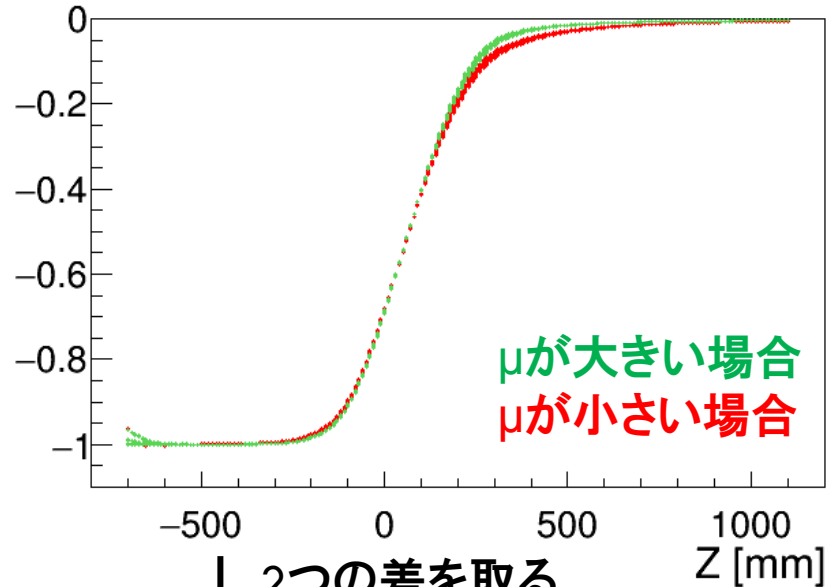
2つの差を取る  
 $B_Y(\mu_{\text{小}}) - B_Y(\mu_{\text{大}})$



# DB<sub>Y</sub>の傾向から考察

- 傾向2は磁極の透磁率 $\mu$ の値の違いからくるものと考えられる
- 計算で使う鉄の透磁率が大きいと推測される

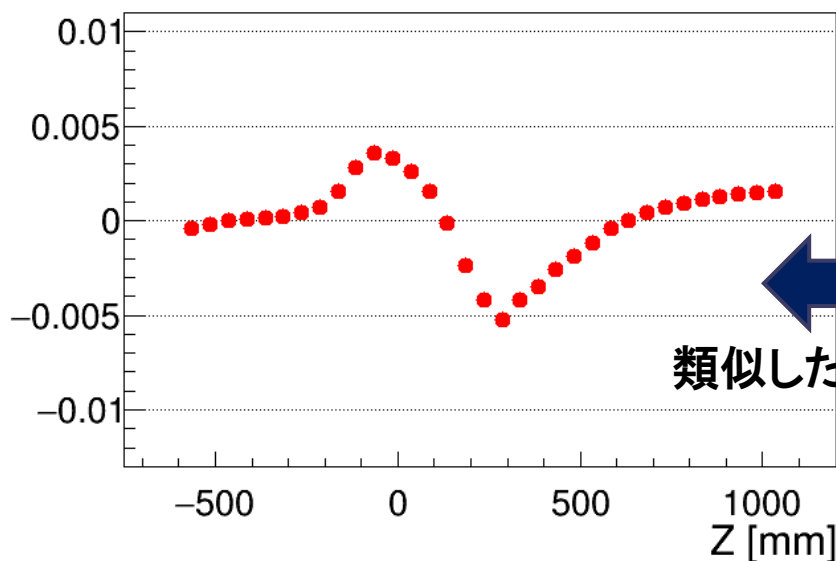
規格化した計算磁場分布



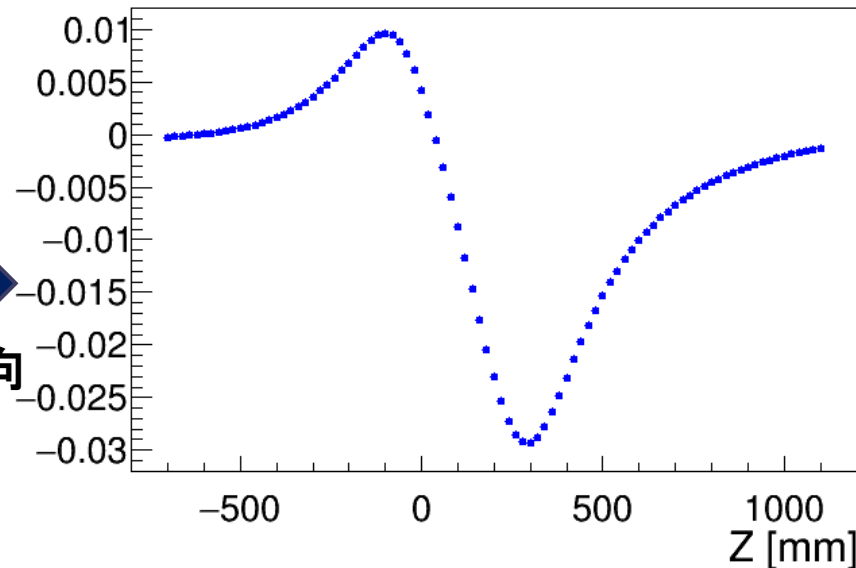
2つの差を取る

$$B_Y(\mu小) - B_Y(\mu大)$$

中心軌道付近での差



類似した傾向



# 計算磁場との比較

- 計算磁場の精度

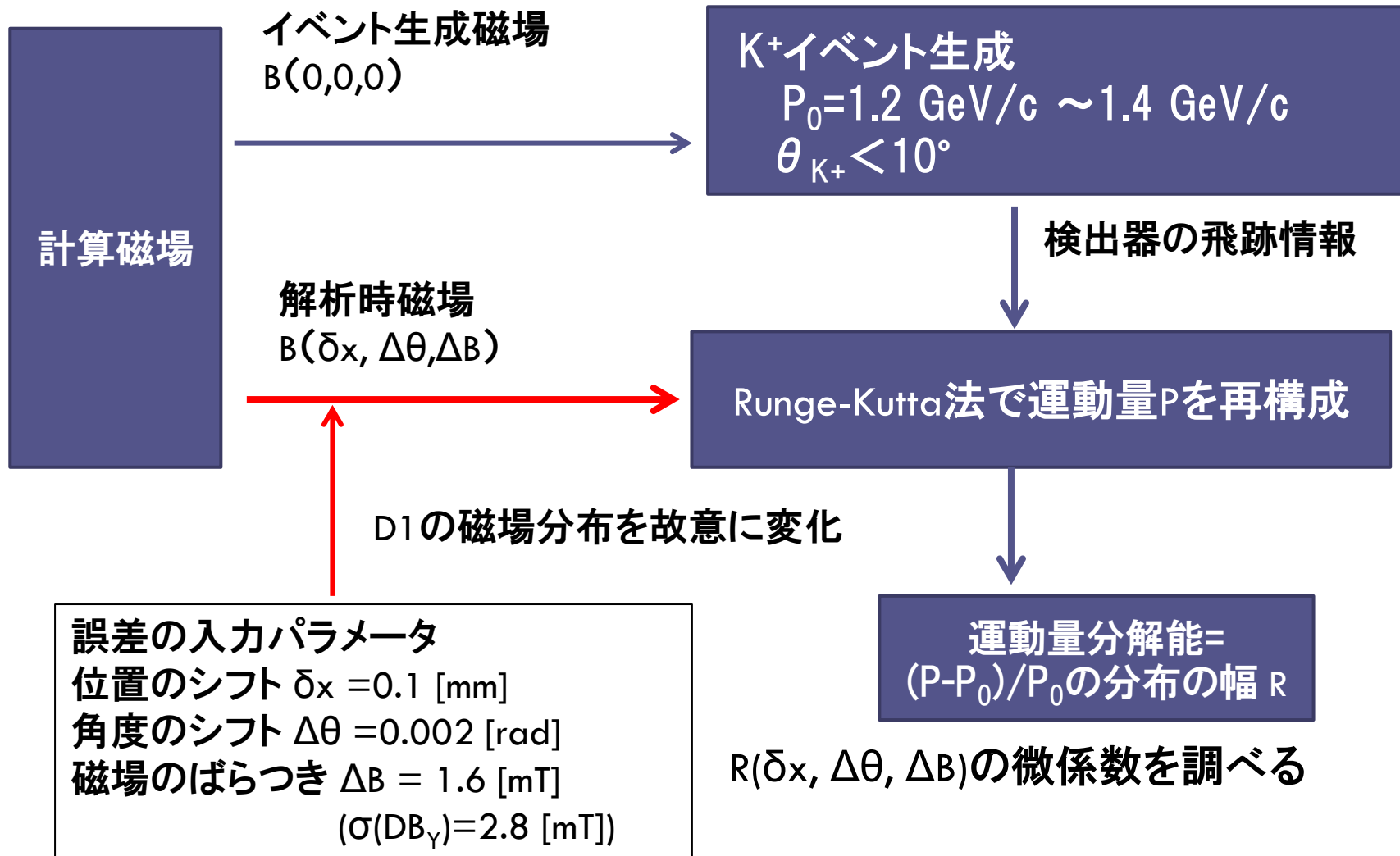
成分	$\sigma$ (DB) (磁極端付近) [mT]	$\sigma$ (DB) (それ以外) [mT]
$B_x$	1.9	0.82
$B_y$	2.8	0.7
$B_z$	3.2	0.98

- 計算磁場と測定磁場の違いの原因

- 有効エッジの前後で大小が入れ替わるという傾向がある
- 計算で用いた鉄の透磁率が大きいためと推測される  
→計算で用いる鉄の透磁率を小さく調整する

# 磁場分布の誤差を考慮した 運動量分解能の見積もり

# 評価の手順



# 磁場の誤差と運動量分解能

$\Delta R = R - \underline{R(0.0.0)}$  ← 多重散乱位置分解能  $5.8 \times 10^{-4}$

$$= \sqrt{\underbrace{\sum \left( \frac{\partial R}{\partial(\delta x)} \right)^2 (\delta x)^2}_{\text{位置のシフト}} + \underbrace{\sum \left( \frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 (\Delta \theta)^2}_{\text{角度のシフト}} + \underbrace{\sum \left( \frac{\partial R}{\partial(\Delta B)} \right)^2 (\Delta B)^2}_{\text{磁場のばらつき}} + \underbrace{\sum \left( \frac{\partial R}{\partial(\Delta B)} \right)^2 (\sigma(DB))^2}_{\text{計算磁場の精度}}}$$

	1項目	2項目	3項目	4項目
値	$1.3 \times 10^{-11}$	$1.9 \times 10^{-12}$	$6.6 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-8}$
	測定誤差のみを考慮(4項目=0)			計算磁場の精度
$\Delta R$	$8.3 \times 10^{-5}$			$1.5 \times 10^{-4}$

- $\Delta R$ は過大評価になっている
  - $\Delta B$ は位置依存性がある (磁極端付近で大きい)
  - 今後は位置依存性を考慮したシミュレーションを導入
- 運動量分解能  $6.0 \times 10^{-4}$  の達成には計算磁場の再現度向上が必要



# まとめ

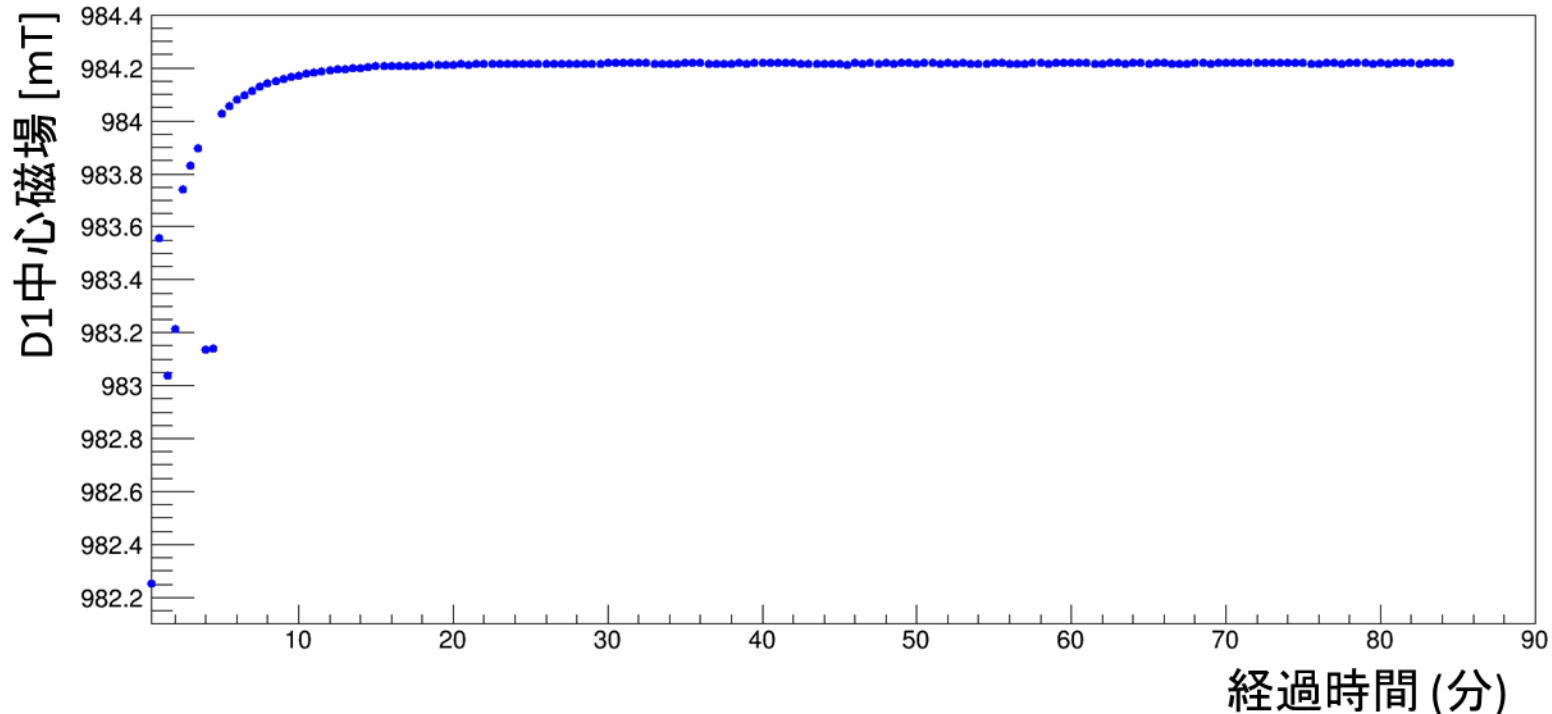
- S-2Sを用いた $\Xi$ ハイパー核精密分光実験を準備中
  - $\Delta E < 2 \text{ MeV}$ の高エネルギー分解能、200イベントの統計
  - 世界で初めて束縛状態をピークとして観測
- D1磁場分布の測定
  - 4通りの電流設定、のべ58000点の測定
  - 測定誤差は1.6mT未満。
    - ・ 今後は測定磁場を補完しホール素子の大きさからくる誤差を正確に評価する
- 計算磁場分布の検証
  - 測定磁場との差は最大で0.018 T程度
  - 計算に使う鉄の透磁率を小さくすることで精度が上がると考察
- 磁場分布の誤差が運動量分解能に与える影響
  - 測定磁場の誤差では $8.3 \times 10^{-5}$ , 計算磁場の精度では $1.5 \times 10^{-4}$ だけ悪化
    - ・ 過大評価になっている→シミュレーションの改良が必要
    - ・ Heとの多重散乱、位置分解能の寄与が $5.8 \times 10^{-4}$
    - ・  $6.0 \times 10^{-4}$  ( $\Delta E = 1.89 \text{ MeV}$ )には計算磁場の再現度を高めることが必要

Back up

# 時間経過に対する磁場の安定性

- 1500Aを通電
- 86分間、30秒ごとに中心磁場の大きさを取得

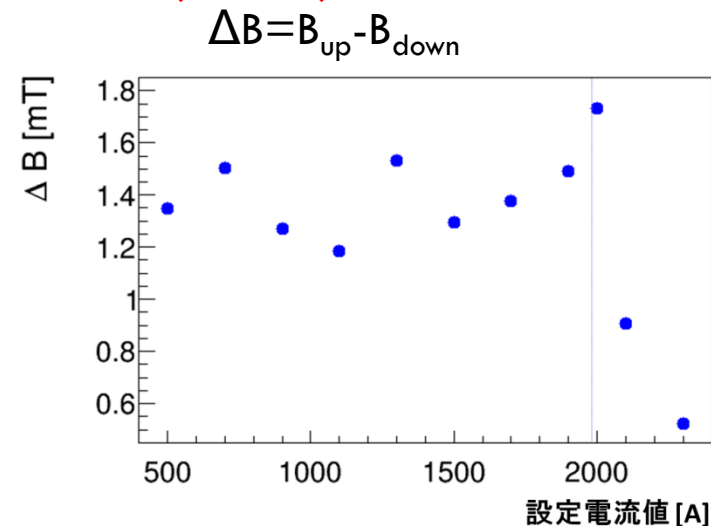
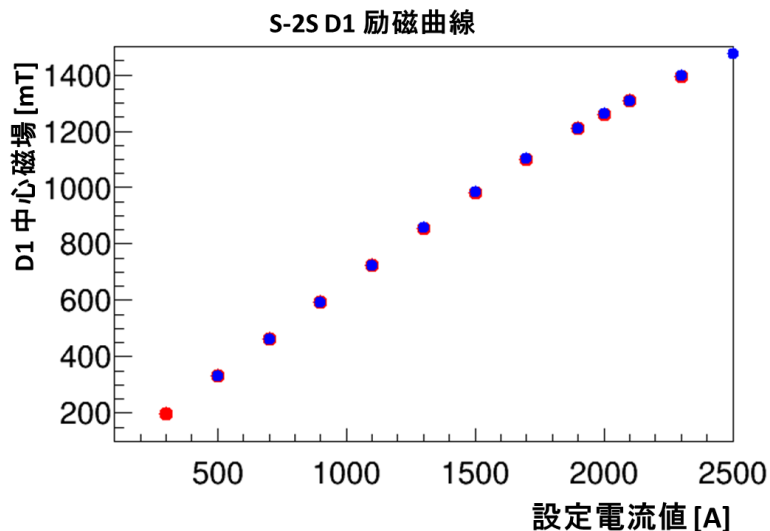
Time dependance of NMR value @1500A



- 励磁から10分後には、中心磁場はほぼ測定精度 ( $1 \mu\text{T}$ )の範囲で一定になる

# 励磁曲線

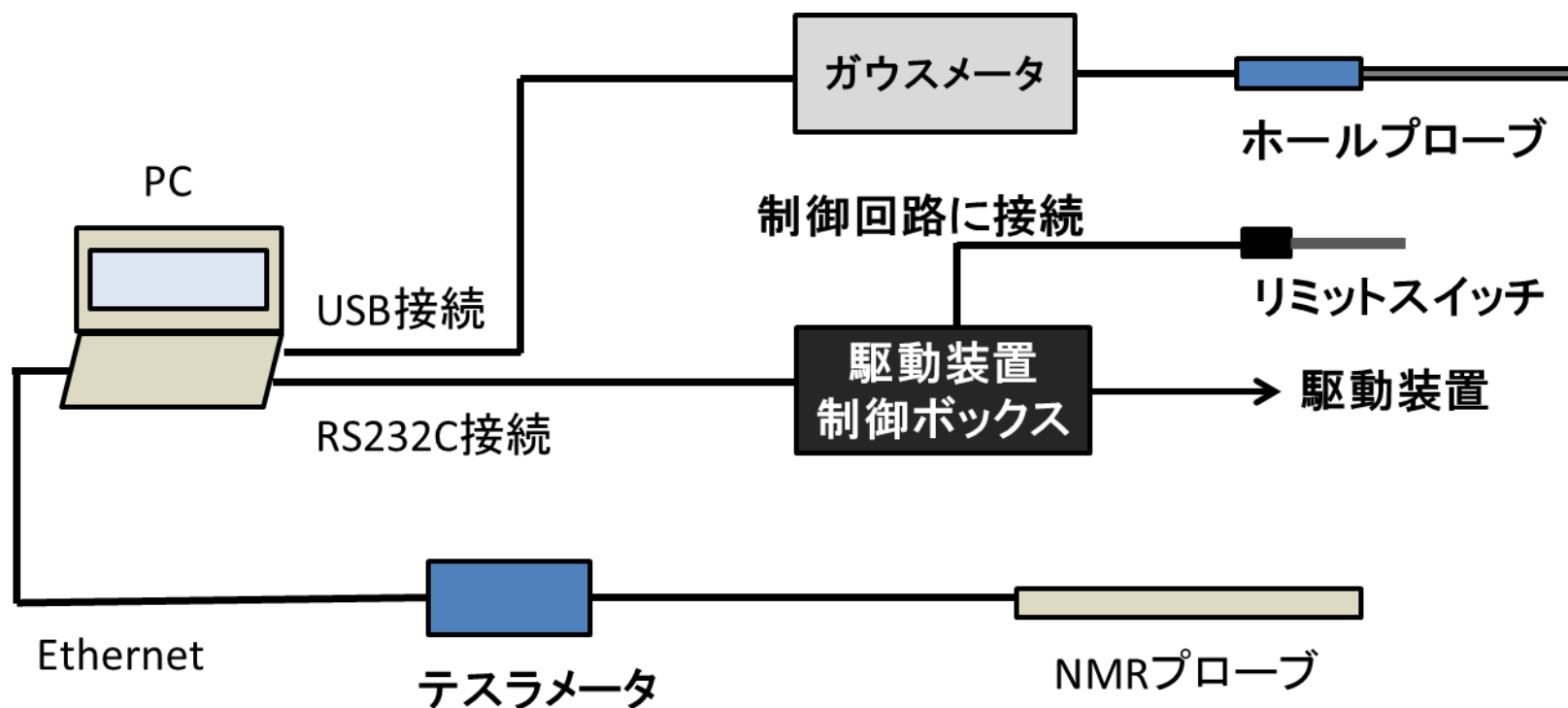
- 電流値を変えながら中心磁場の大きさを取得
- 0A → 300A → 500A → ... → 2500A (UP1)
- 2500A → 2300A → ... → 500A → 0A (DOWN)
- 0A → 1100A → 1500A → 2000A (UP2)



- UP2の値はUPと0.04%の範囲で一致
  - ヒステリシスの影響は小さい

# 測定器系の制御

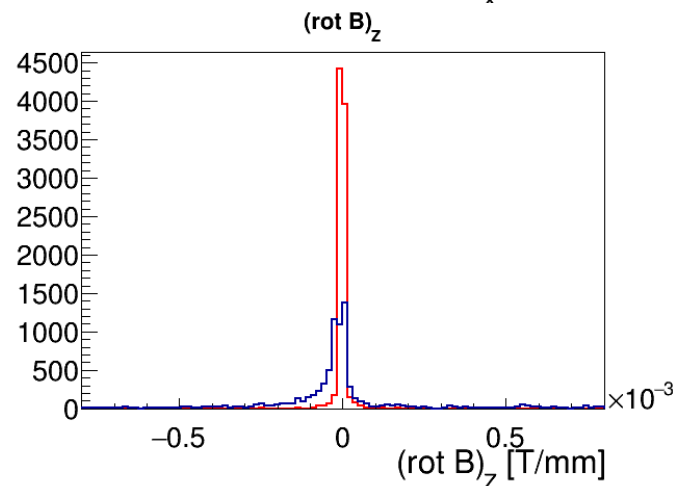
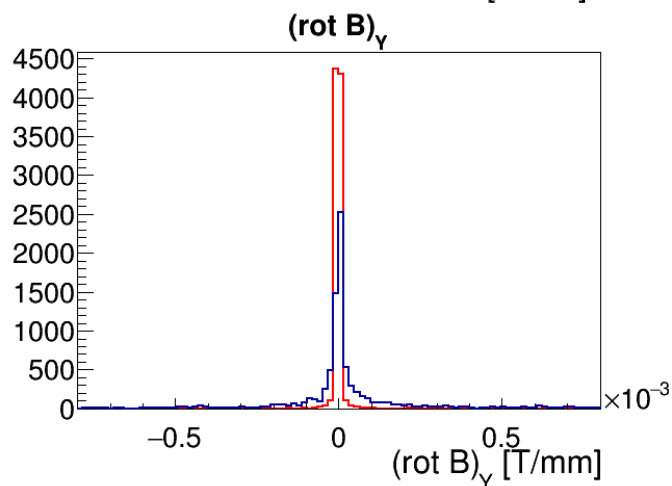
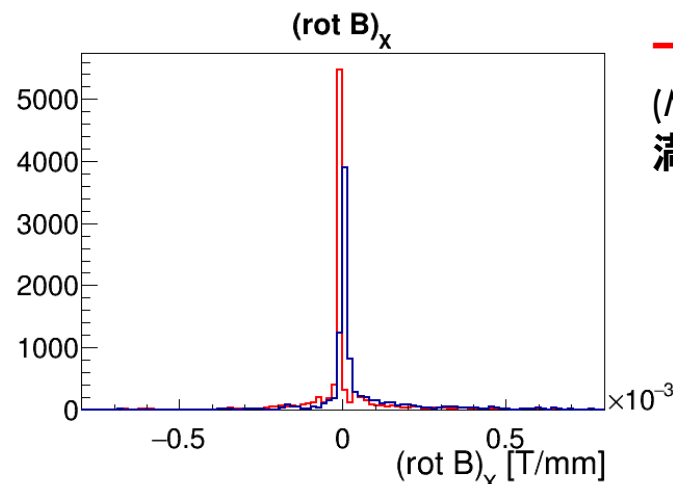
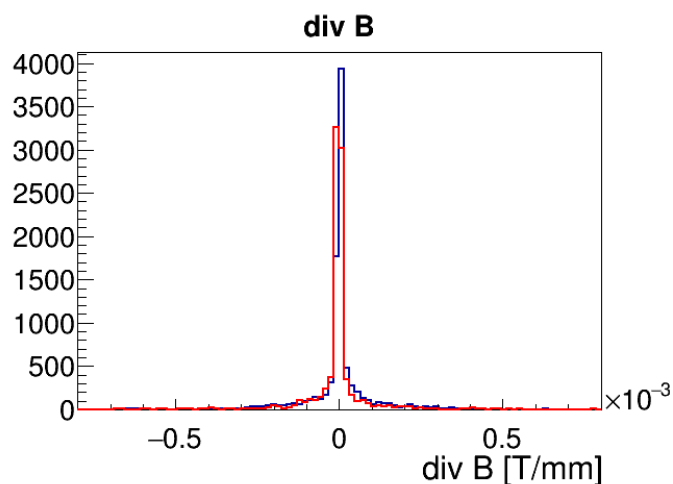
- 1台のPCにNMRプローブ、駆動装置、ホールプローブを接続、Excel-VBAマクロで制御を行った



# 磁場の満たすべき条件の確認

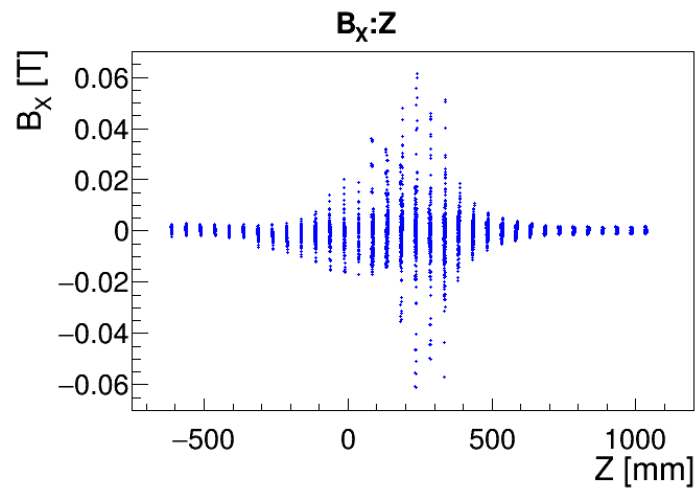
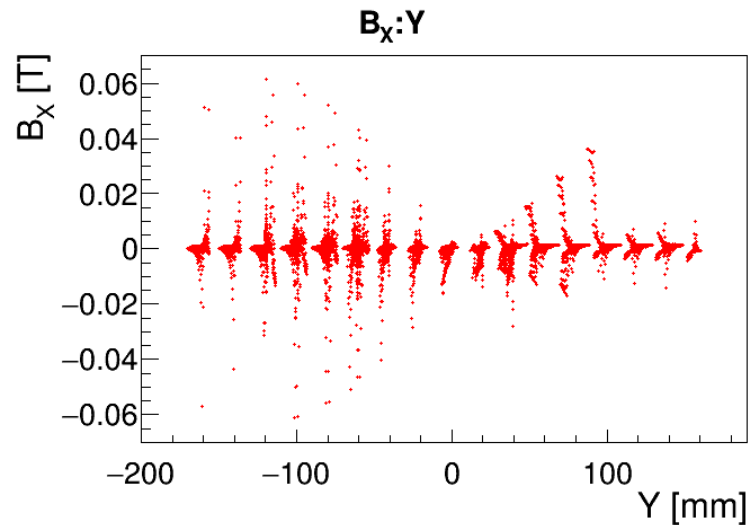
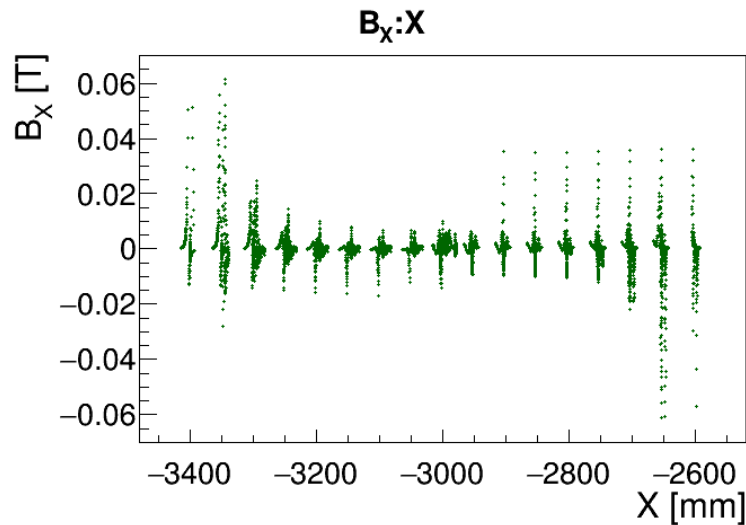
- $\text{div B}$ ,  $\text{rot B}$ の各成分は0を中心に分布
  - Maxwell 方程式を満たしている

— 測定磁場  
— 計算磁場  
(Maxwell方程式を  
満たす磁場の例)



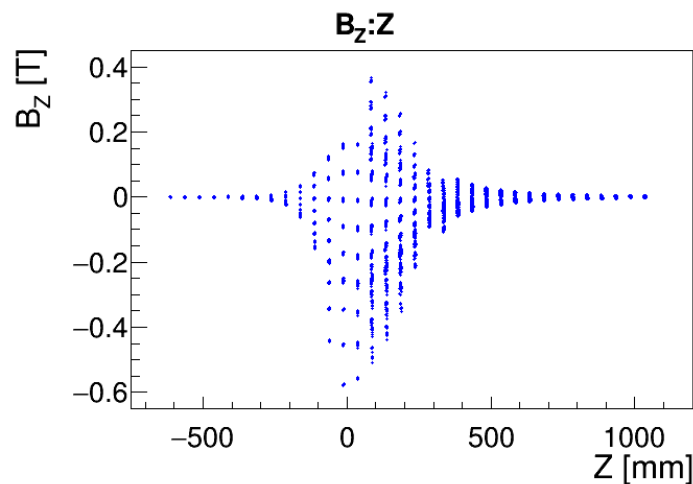
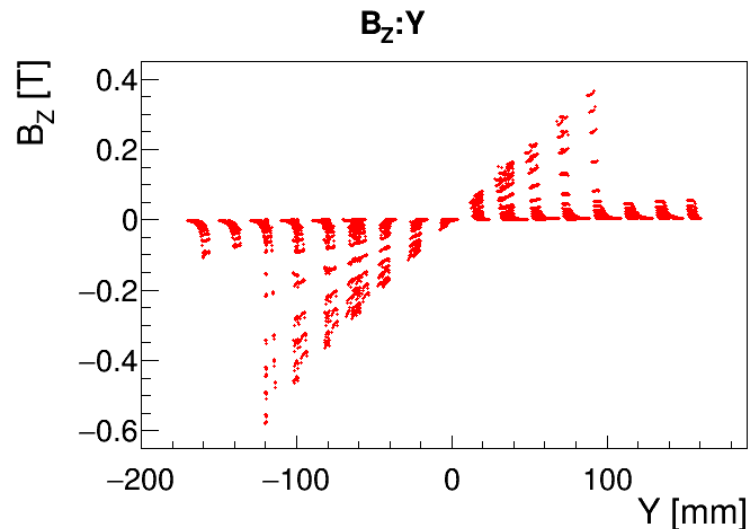
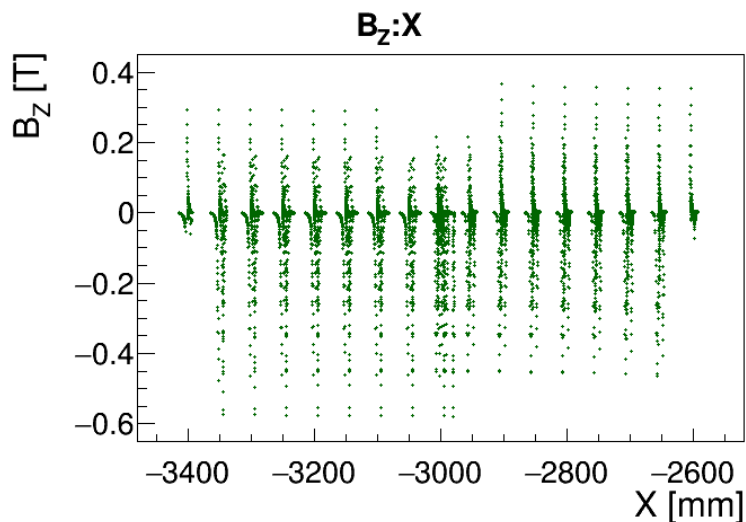
# 測定結果

- $B_x$ の各座標に対する依存性@2500A



# 測定結果

- $B_z$ の各座標に対する依存性

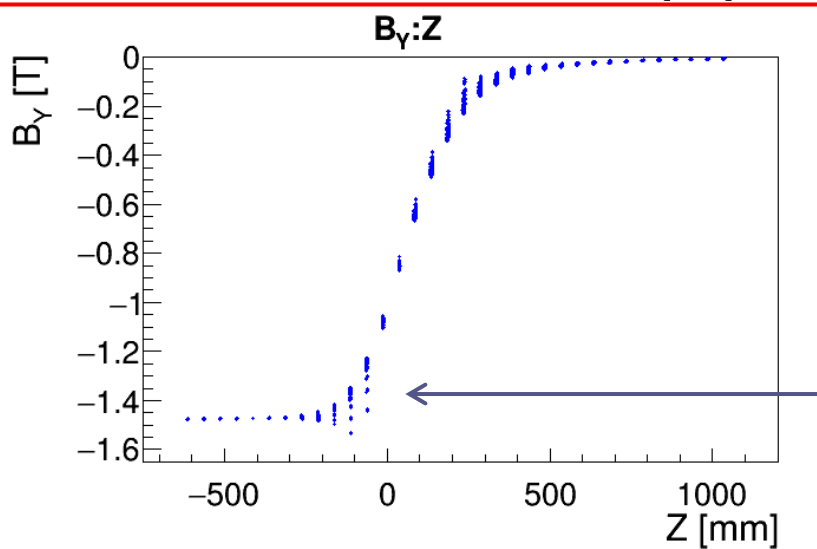
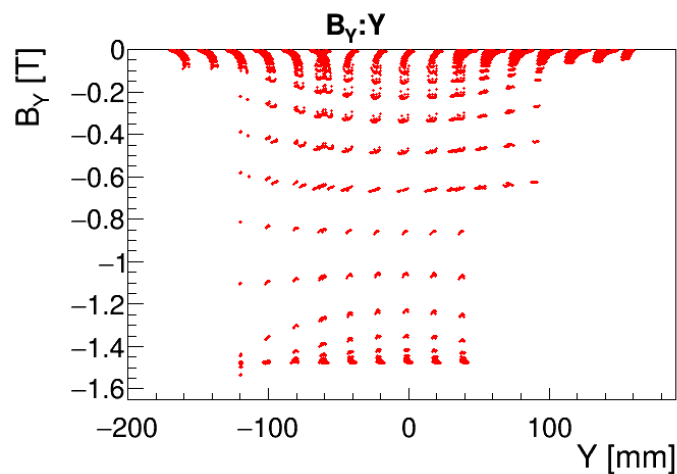
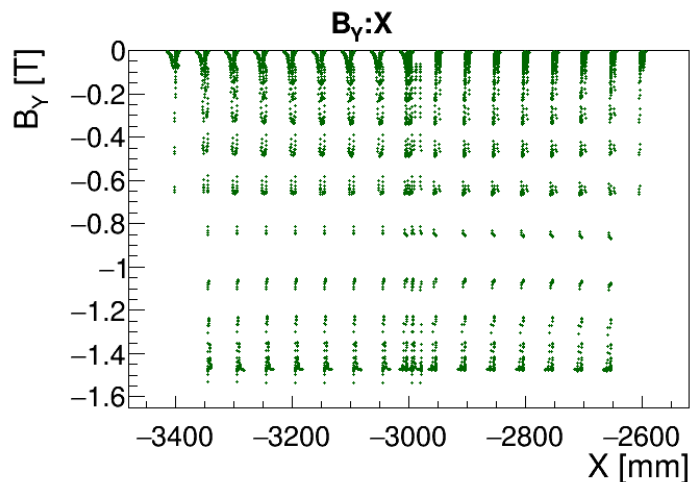


Yの値の大小に応じて  
 $B_z$ 成分の大きさが  
分かれている



# 測定結果

- $B_Y$ の各座標に対する依存性@2500A

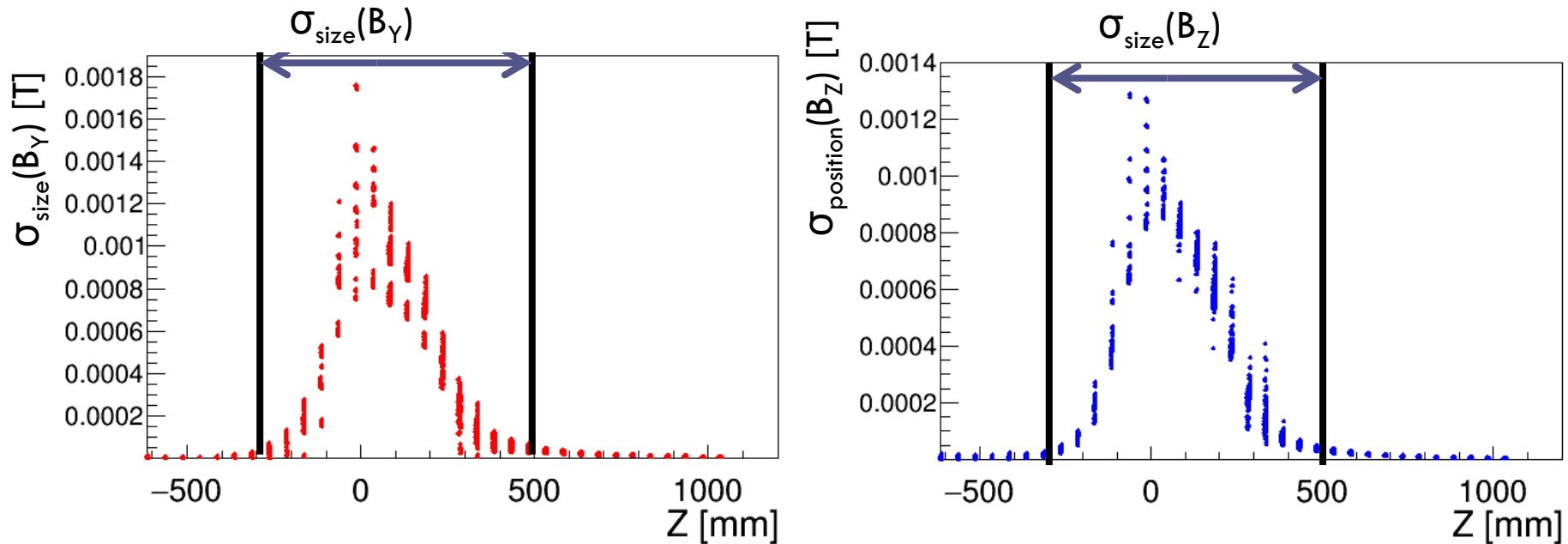


中心軌道に沿った  
D磁石の主成分の分布

$Y, X$ の値に応じて同じ $Z$ でも  
点がばらついている

# 測定誤差の評価

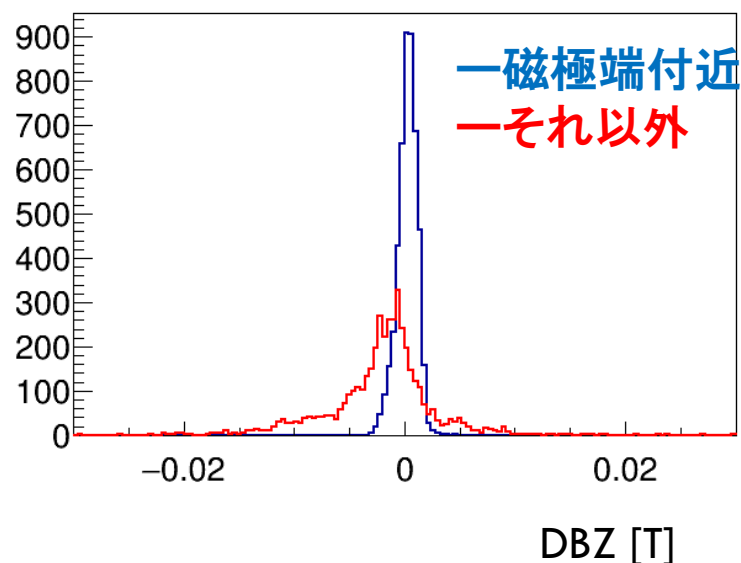
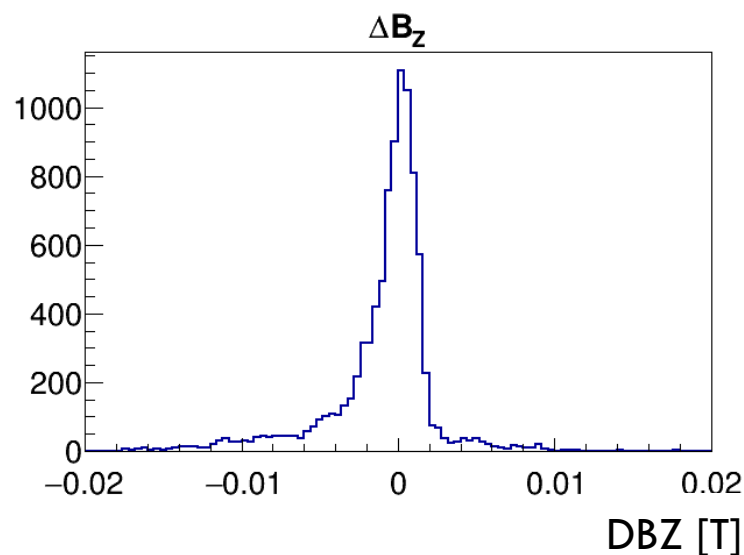
- ホール素子の大きさからくる誤差は、磁極端付近の領域で大きくなる



- この領域( $-300 < Z < 500$ )をRegion 2と定義し、その他の領域 Region 1と区別する。

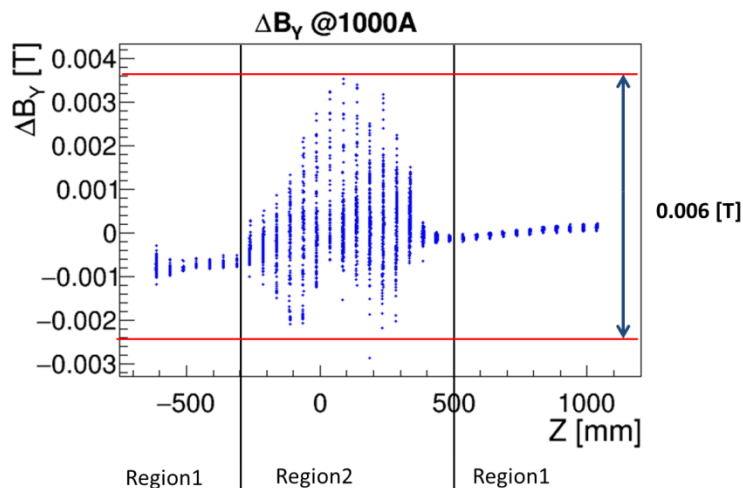
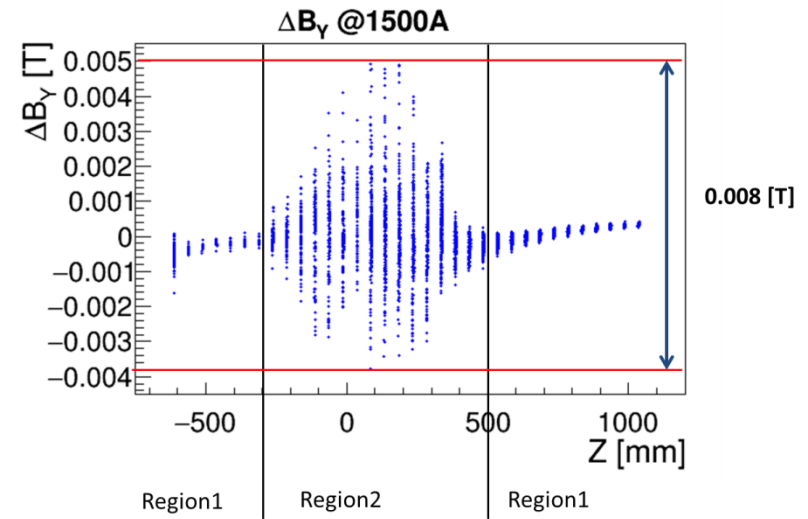
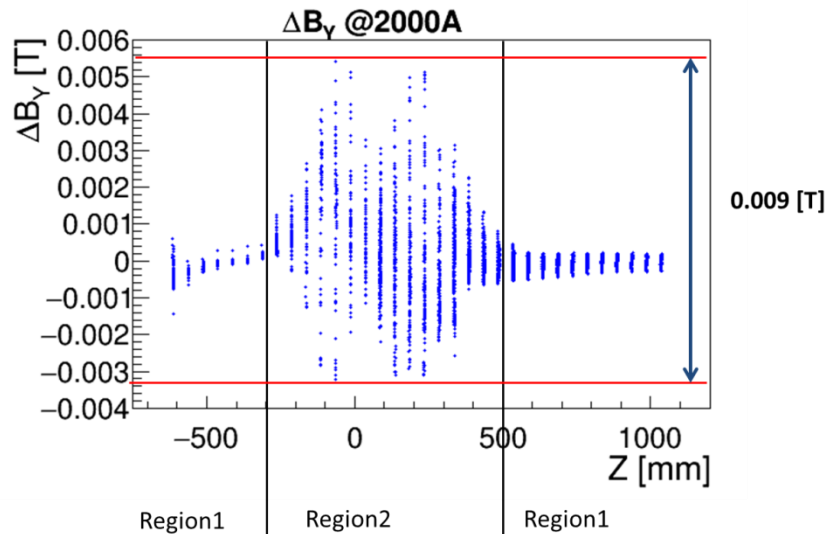
# 計算磁場の精度

- $DBZ = (\text{測定磁場のZ成分}) - (\text{計算磁場のZ成分})$
- 磁極端付近 ( $-300 < Z < 500$ ) とそれ以外で
- それぞれガウシアンでフィット、 $\sigma$ を計算磁場の精度



# 測定磁場と計算磁場の比較

- 他の電流値のデータについても確認する



2500Aの時ほど明らかな傾向は見られない  
 →透磁率 $\mu$ のずれは2500Aの時に比べて小さい

分布の幅は電流値が小さくなるほど小さくなる

# 各パラメータごとの運動量分解能Rの変化

