

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

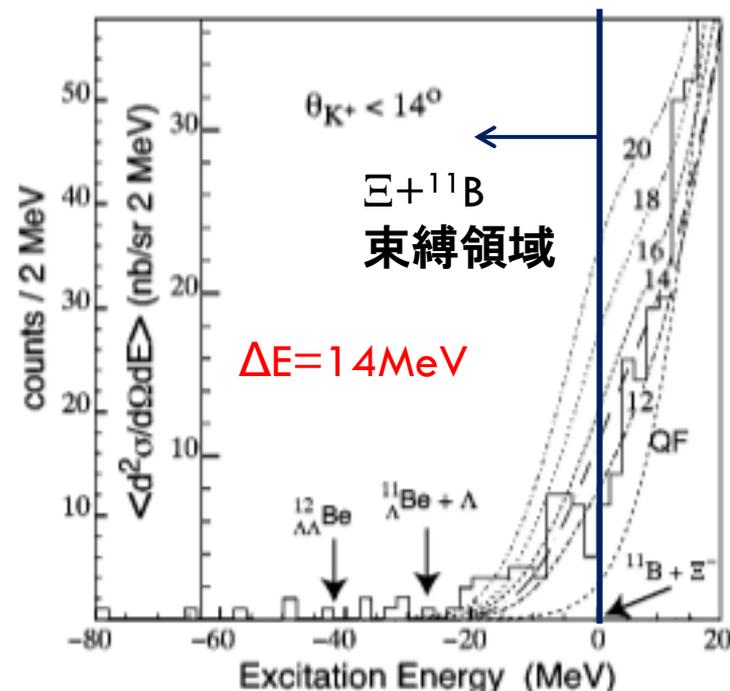
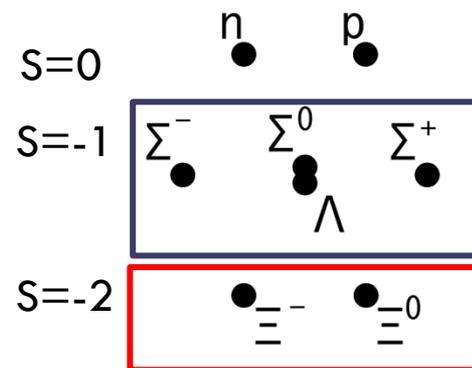
2017/3/19

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: Λ , Σ ハイパー核
→ $V_{\Lambda} \sim -30$ MeV, $V_{\Sigma} = 30$ MeV など
 - S=-2: Ξ , $\Lambda\Lambda$ ハイパー核
→ 実験データは未だ少ない
- ツイン Λ 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
- Ξ ハイパー核
 - ◻ ΞN 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]: ${}^{12}\text{C}(\text{K}^{-}, \text{K}^{+})$ 反応
素過程: $p(\text{K}^{-}, \text{K}^{+})\Xi^{-}$
 $\Xi\text{-N}$ 相互作用の $V_{\Xi} = -14$ MeV,
 ${}^{12}_{\Xi}\text{Be}$ の生成断面積 ~ 60 nb/sr

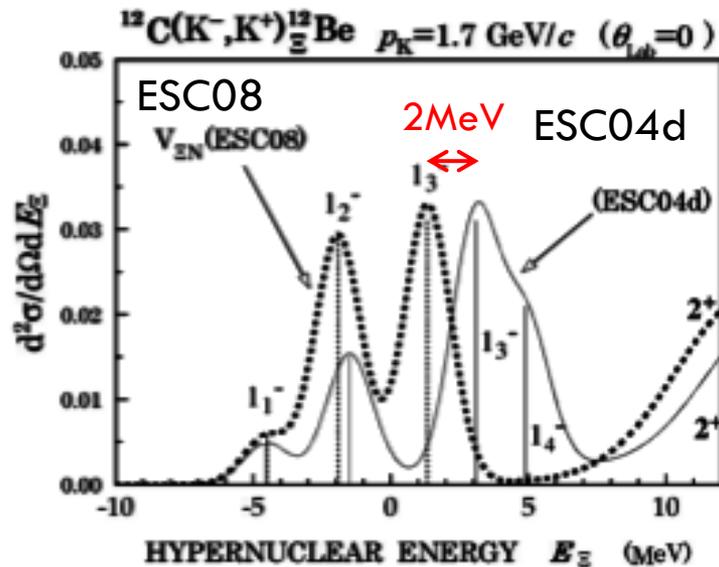


[1] K.Nakazawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 033D02

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

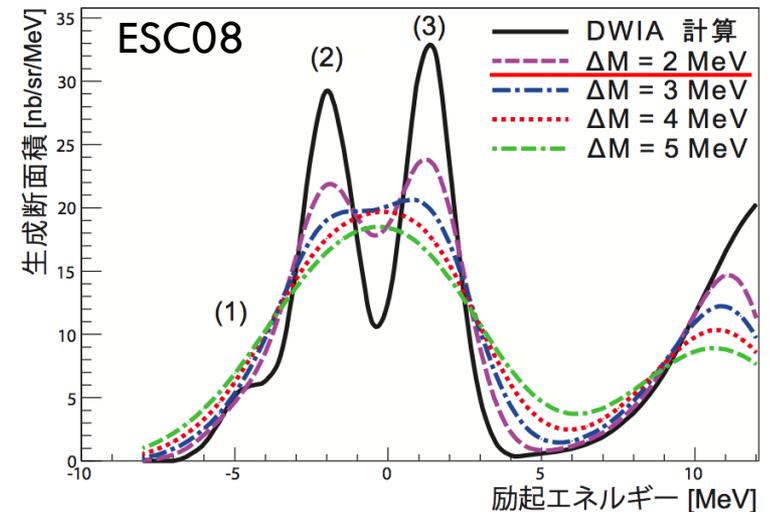
高エネルギー分解能での分光実験の必要性

- Ξ ハイパー核状態のピーク位置と幅を明確に観測
 - ΞN 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

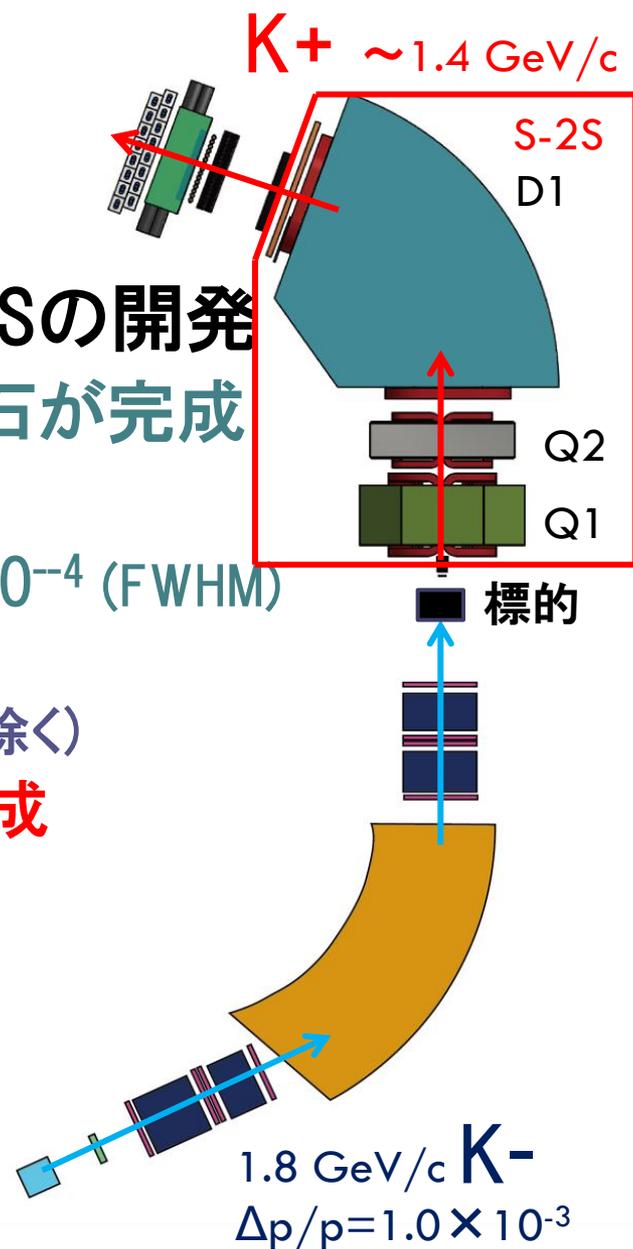
T.Motoba and S.Sugimoto NPA 835(2010) 223



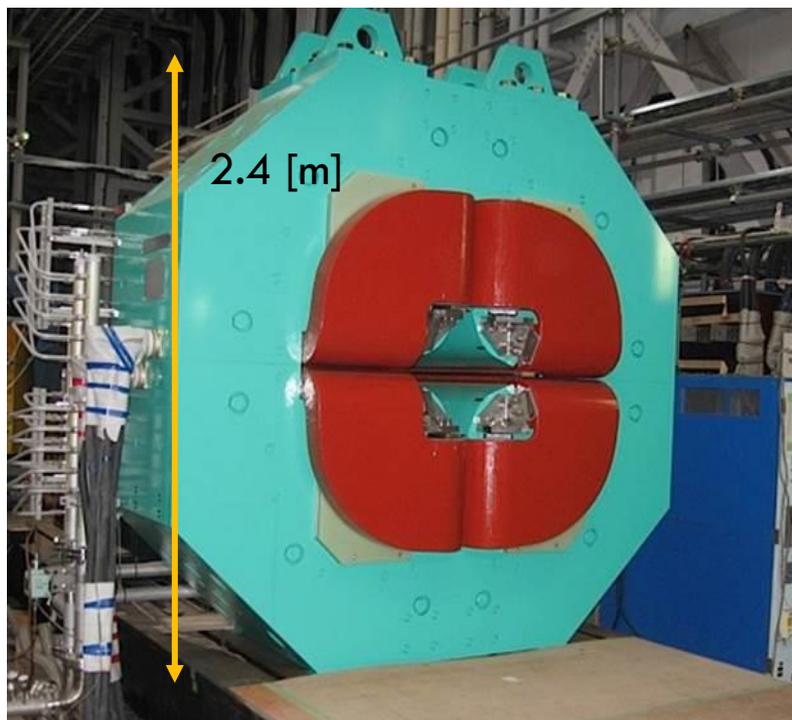
実験分解能の違いによる
励起スペクトルの見え方の違い

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 ΔE 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 [m³]



Q2 (横収束)

最大磁場勾配: 5.0 [T/m]

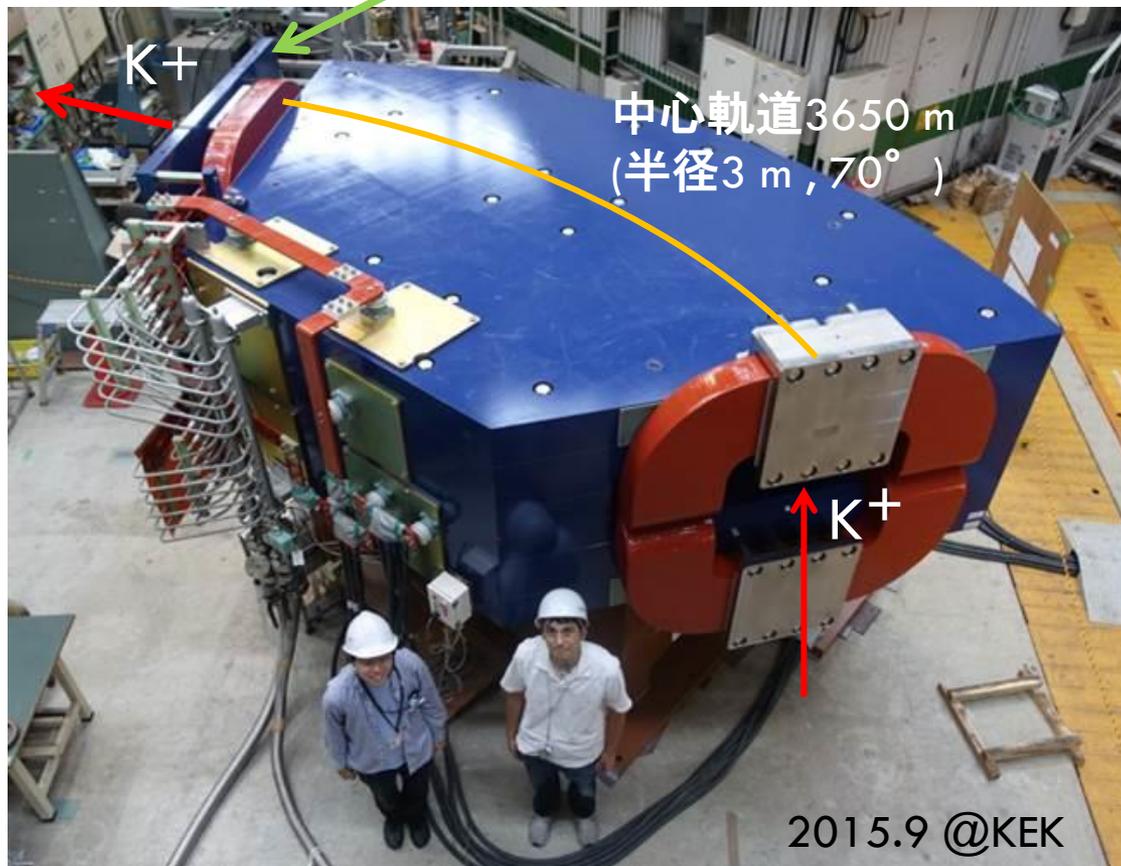
磁極間隙 : 36 [cm]

鉄重量 : 12 [Ton]

幅×高さ×長さ: 2.1 × 1.54 × 0.5 [m³]

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 [m³]
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)



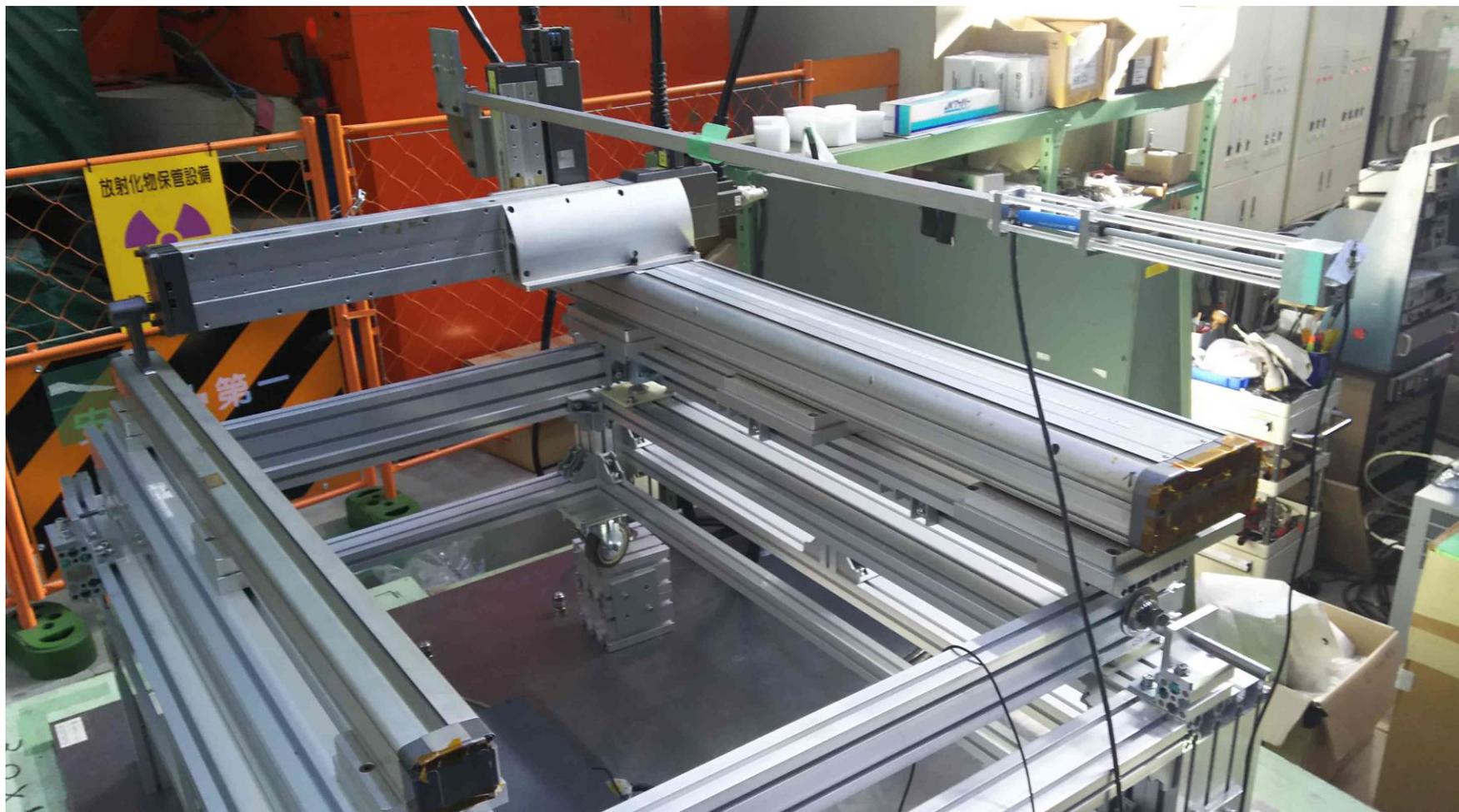
計算磁場の精度を評価



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



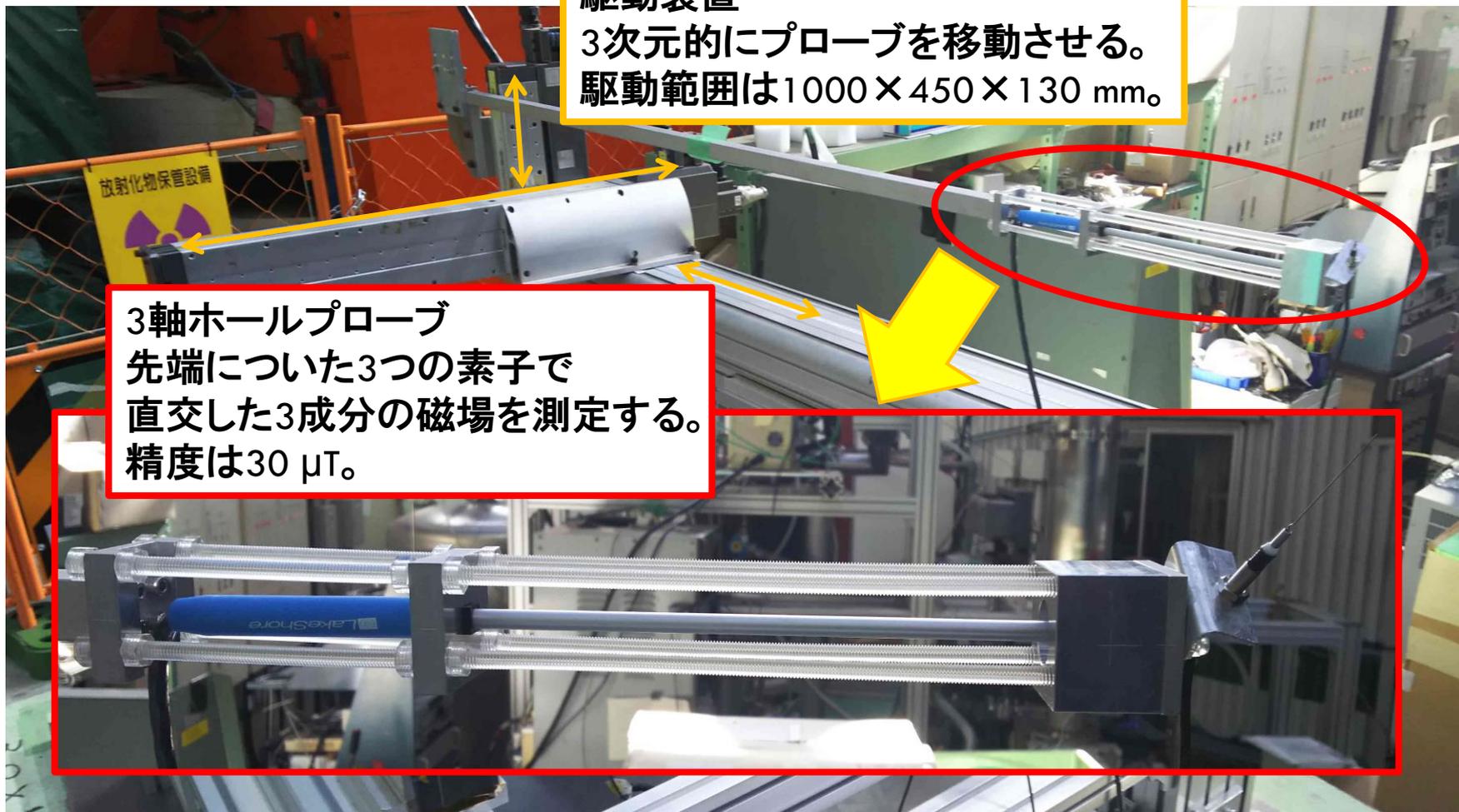
磁場測定器

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。

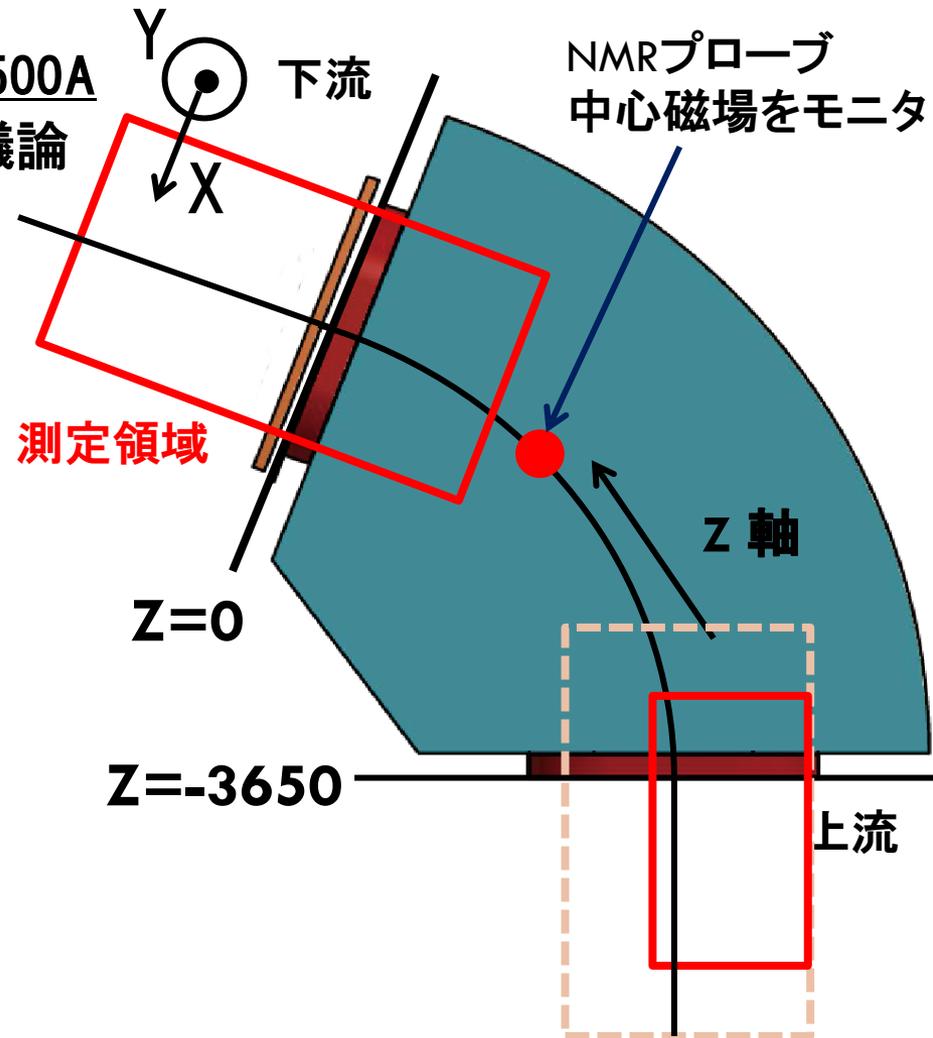
3軸ホールプローブ

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 μ T。

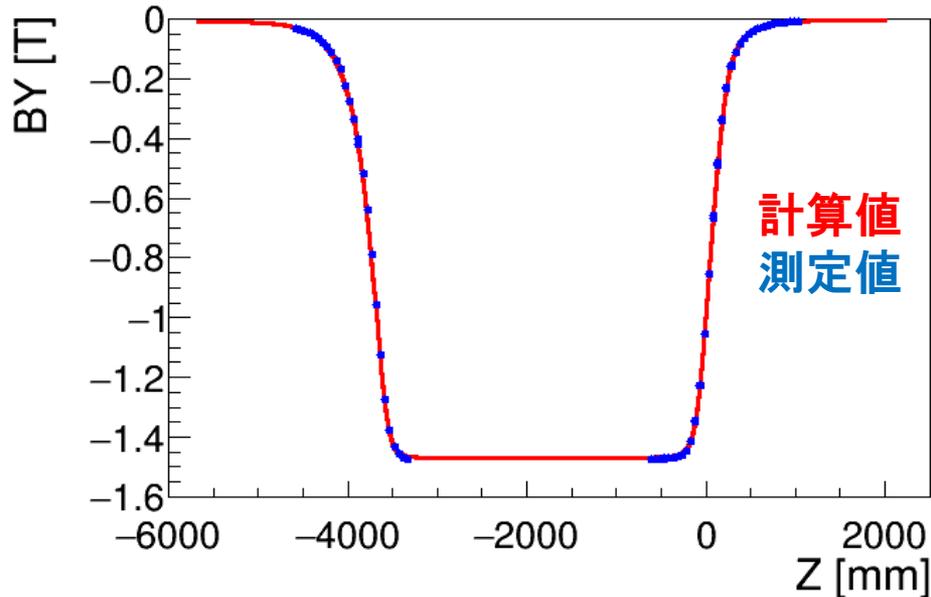


測定の概要

- 領域：800×320×1700 mm³(下流側), 400×320×1100 mm³(上流側)
 - メッシュ間隔：50×20×50 mm³
 - 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

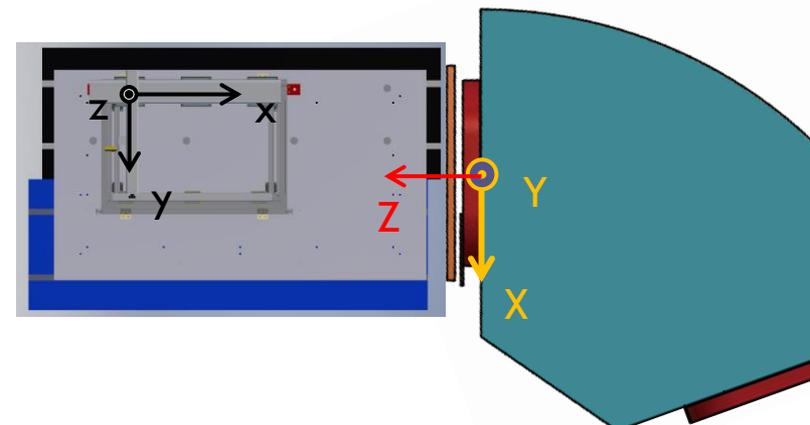
- 測定データ
 - $(x, y, z), (b_x, b_y, b_z)$
- 計算磁場分布
 - $(X, Y, Z), (B_x, B_y, B_z)$
- 計算磁場と統一的に扱うため、測定データ (x, y, z, b_x, b_y, b_z) を変換
- 位置の変換 $(x, y, z) \rightarrow (X, Y, Z)$
 - 座標原点を合わせる
 - 駆動装置の傾きを補正
- 磁場の較正 $(b_x, b_y, b_z) \rightarrow (B_x, B_y, B_z)$
 - プローブの傾きを補正
 - 電流の時間変動の補正



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

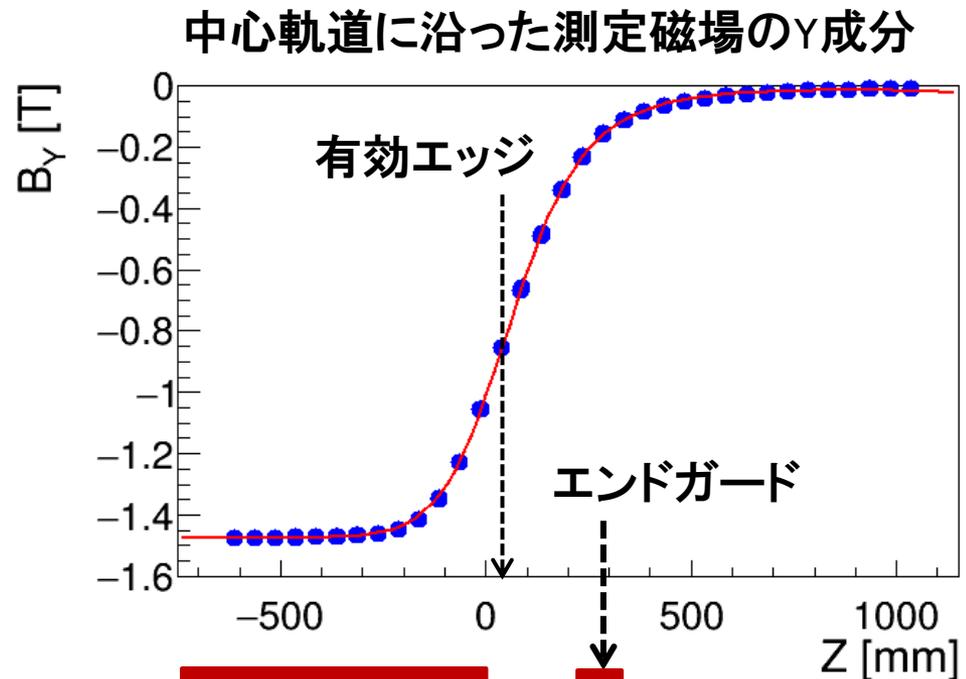
$$f(Z) = \frac{1}{1 + e^{p(Z-s)}} \quad : \quad p(x) \text{は多項式}$$

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 ΔB の評価

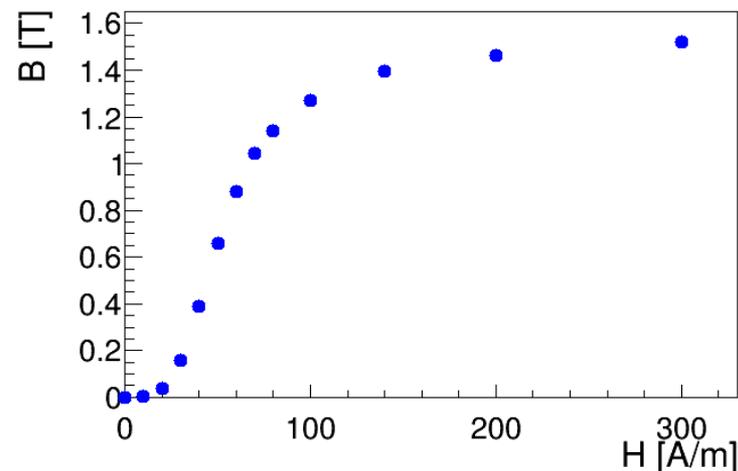
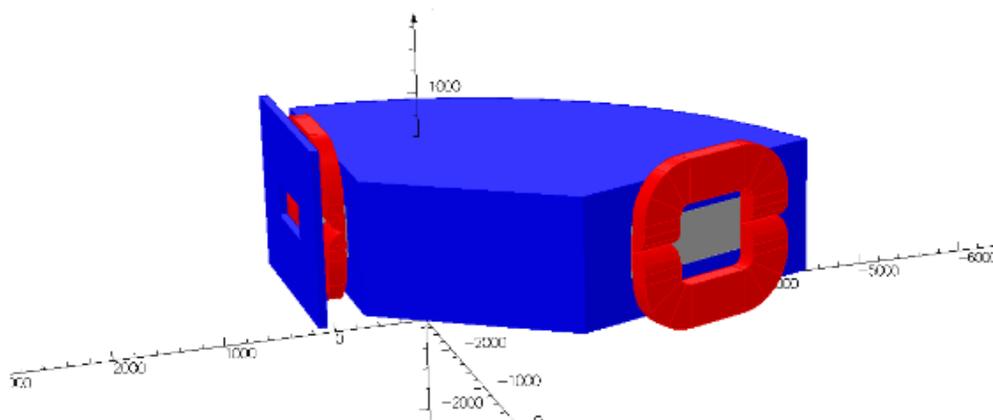
- **ホールプローブ自体の測定誤差 σ_{Hall}**
 - 同じ位置の磁場を連続で測ったデータから評価
- **測定点の位置精度からくる誤差 σ_{mover}**
 - 同じ位置に繰り返し設定しなおして測ったデータから評価
- **ホール素子の大きさからくる誤差 σ_{size}**
 - ホール素子は半径 $750\mu\text{m}$ の円盤型
 - 測定データから測定点の $\frac{\partial B}{\partial x}$ を求め、誤差の伝搬則から評価
- **誤差 $\Delta B^2 = \sigma_{\text{Hall}}^2 + \sigma_{\text{mover}}^2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

成分	σ_{Hall} [mT]	σ_{mover} [mT]	σ_{size} [mT]	ΔB [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

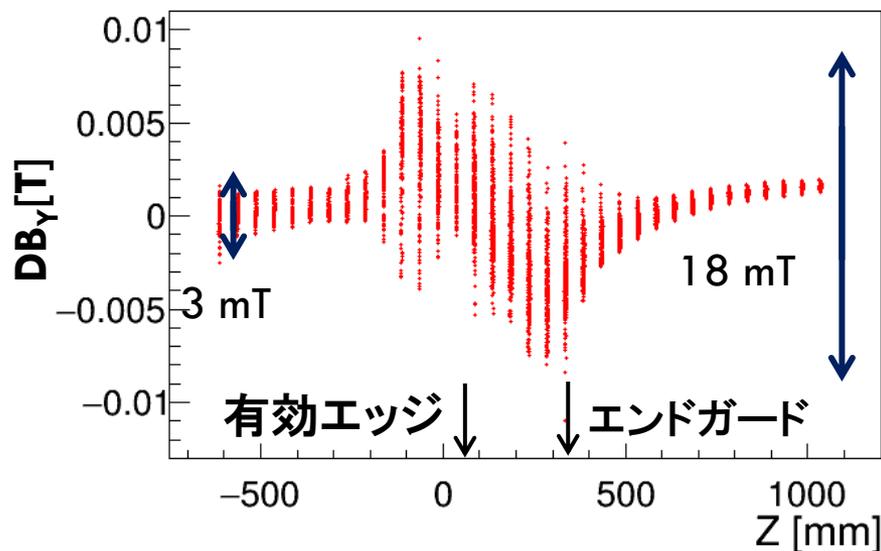


- メッシュサイズ
 - ヨーク部分:30 mm, 粒子が通る領域:20mm
 - それ以外:100mm
 - ・ メッシュサイズによる計算精度は60 μ T未満

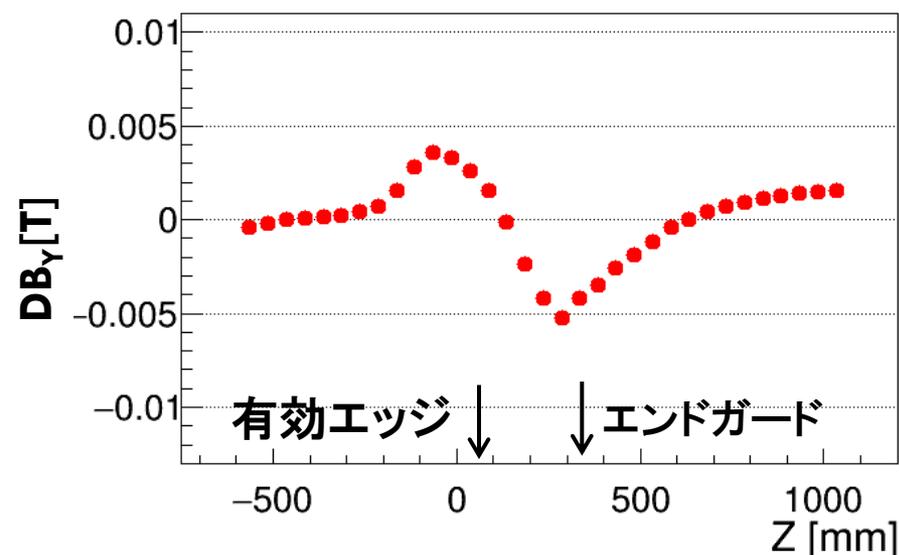
計算磁場との比較

- $DB_Y = (\text{測定磁場のY成分}) - (\text{計算磁場のY成分})$
 - 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



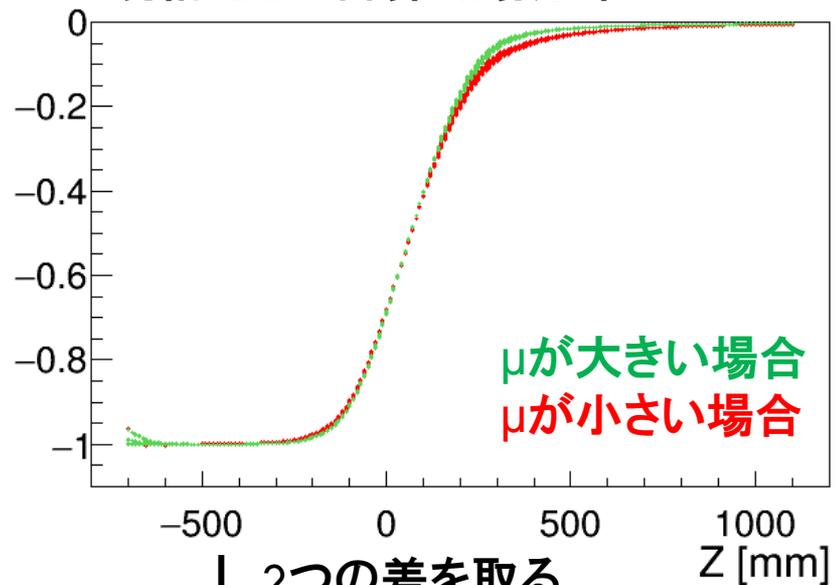
中心軌道での差



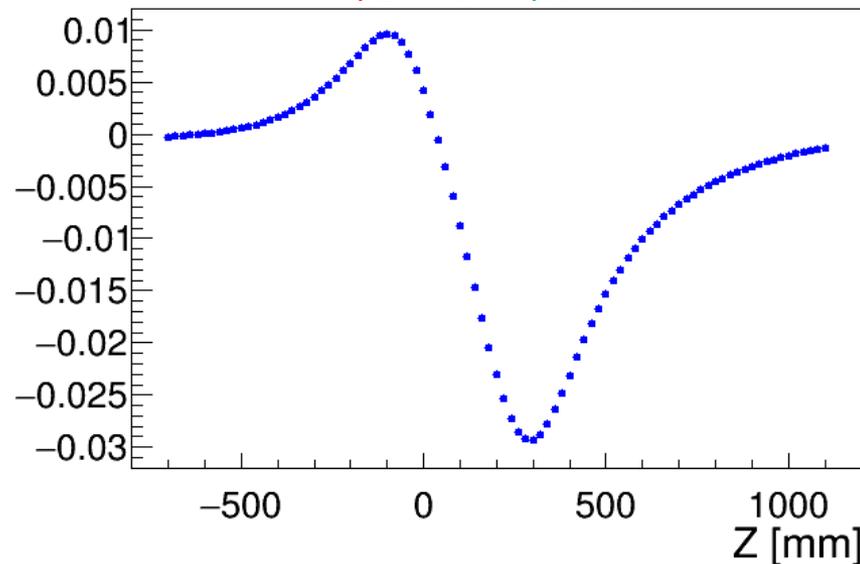
DB_Yの傾向から考察

- 傾向2は磁極の透磁率 μ 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



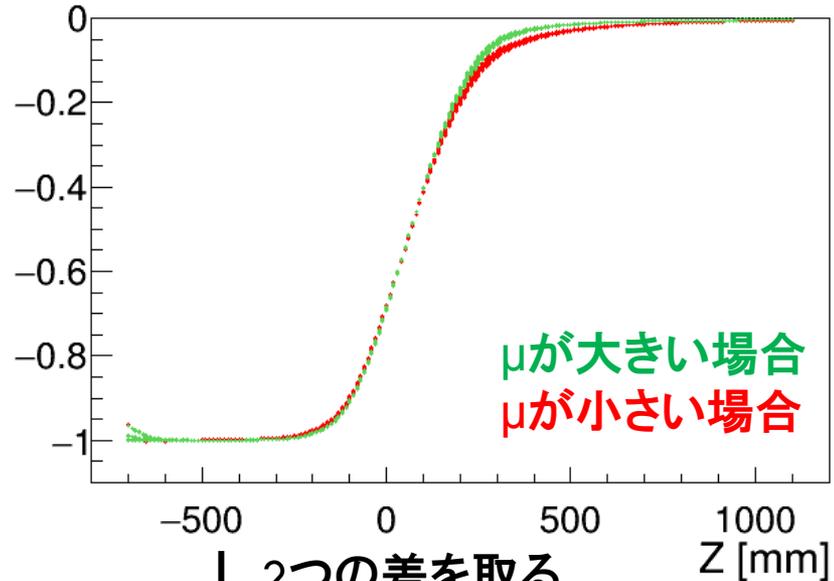
2つの差を取る
 $B_Y(\mu_{\text{小}}) - B_Y(\mu_{\text{大}})$



DB_Yの傾向から考察

- 傾向2は磁極の透磁率 μ 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

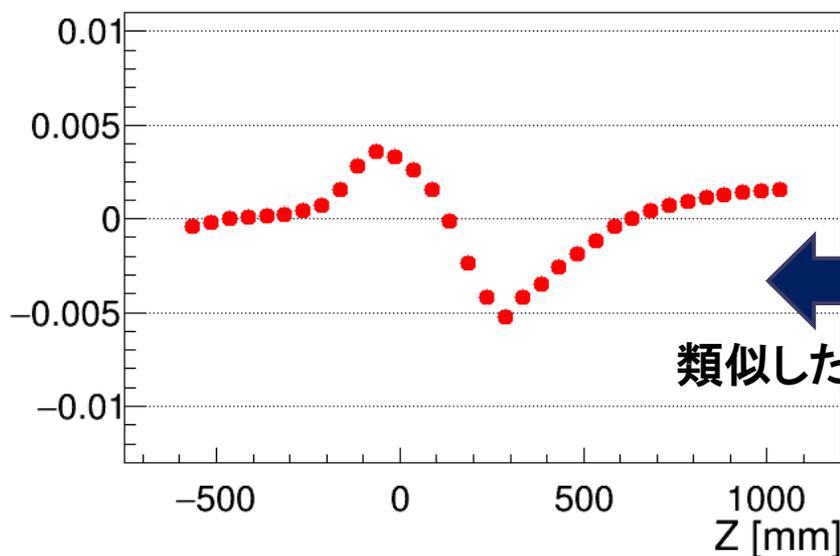
規格化した計算磁場分布



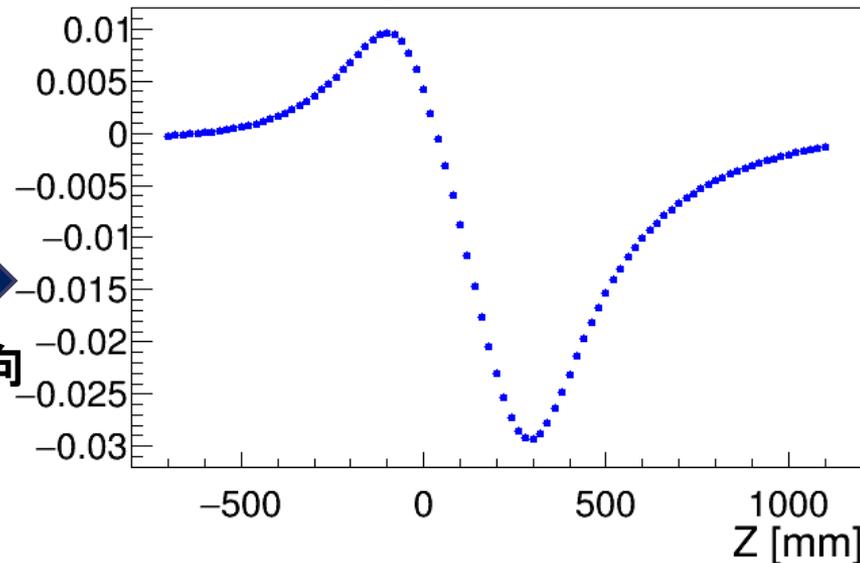
2つの差を取る

$$B_Y(\mu小) - B_Y(\mu大)$$

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

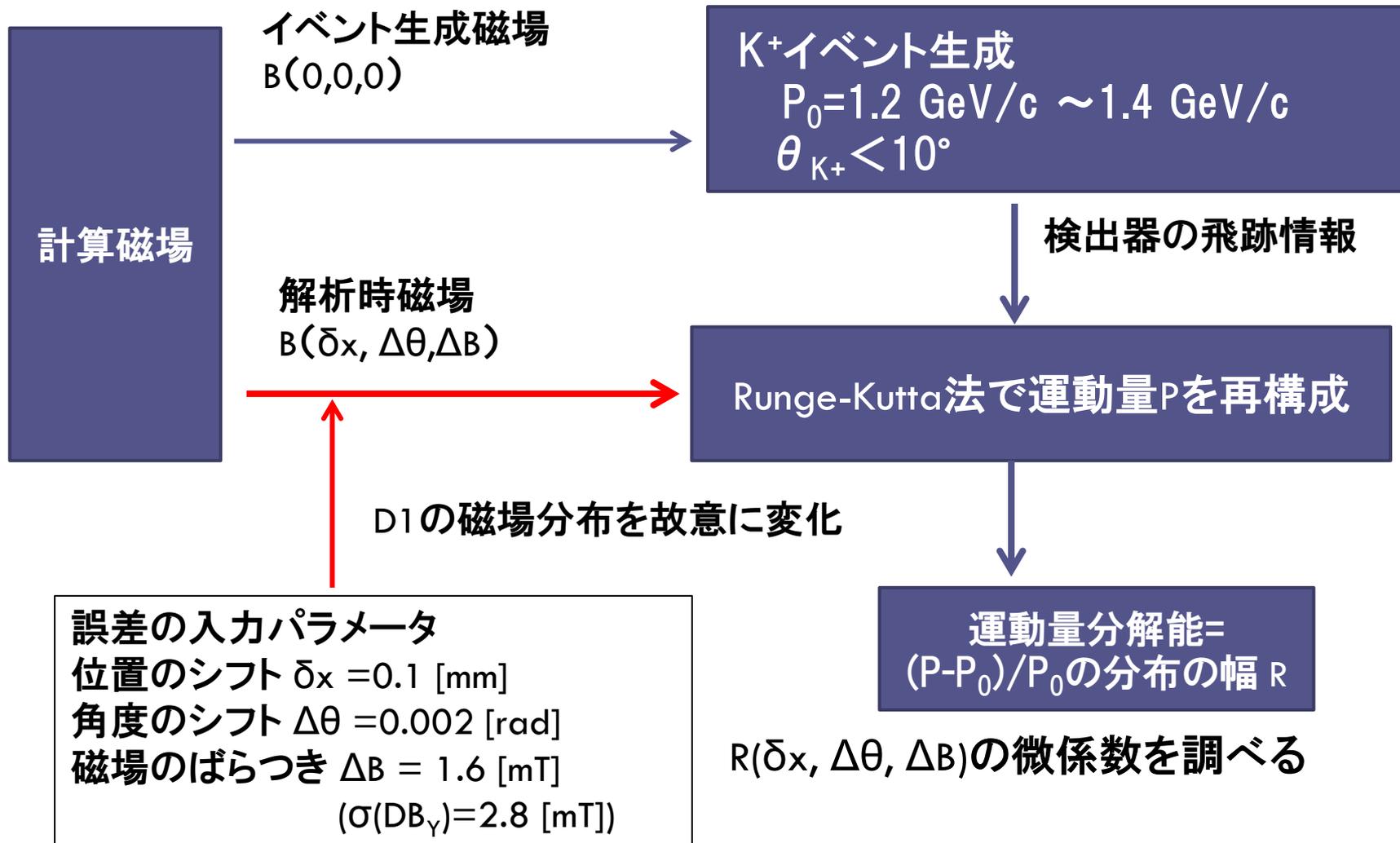
成分	σ (DB) (磁極端付近) [mT]	σ (DB) (それ以外) [mT]
B_x	1.9	0.82
B_y	2.8	0.7
B_z	3.2	0.98

- 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 5.8×10^{-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	1.3×10^{-11}	1.9×10^{-12}	6.6×10^{-9}	1.4×10^{-8}
	測定誤差のみを考慮(4項目=0)			計算磁場の精度
ΔR	8.3×10^{-5}			1.5×10^{-4}

- ΔR は過大評価になっている
 - ΔB 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 6.0×10^{-4} の達成には計算磁場の再現度向上が必要

まとめ

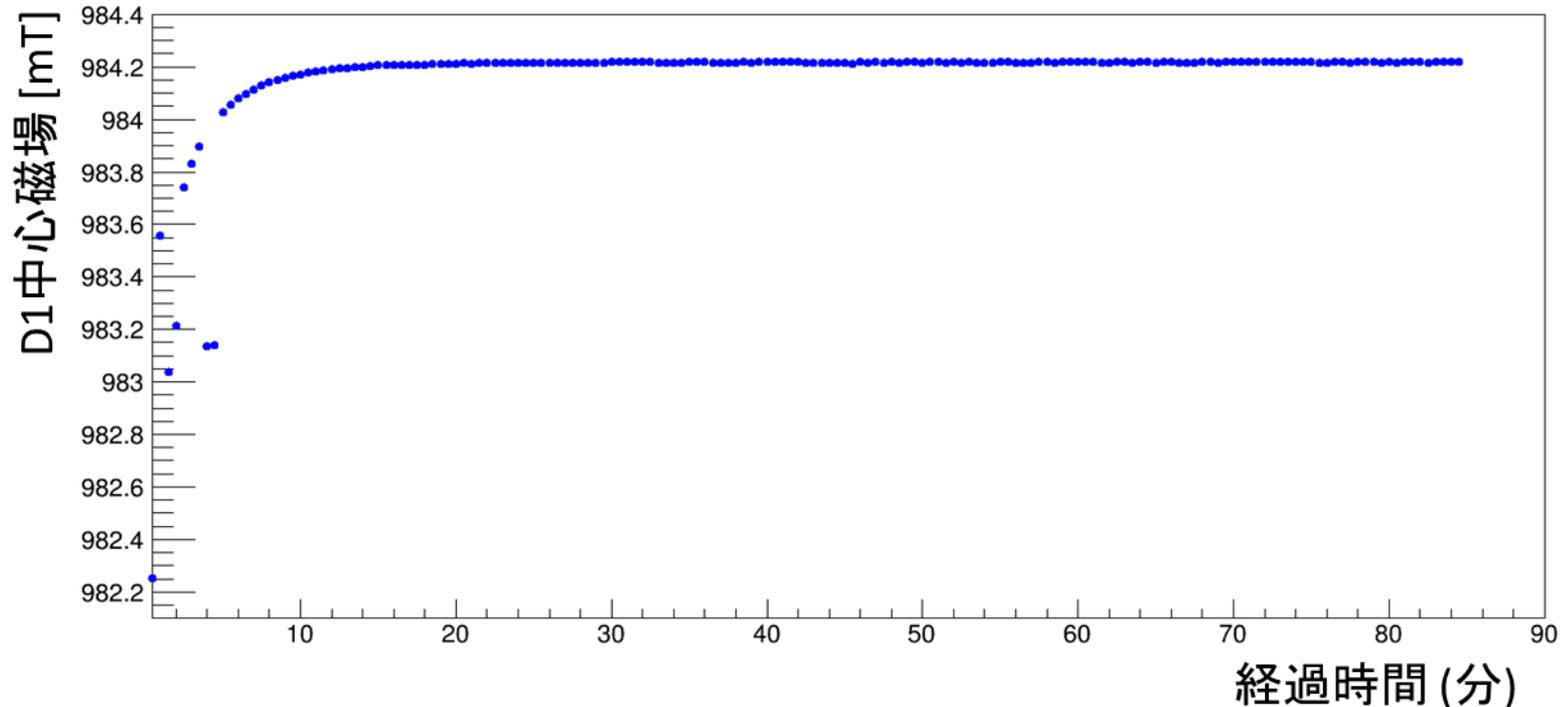
- S-2Sを用いた Ξ ハイパー核精密分光実験を準備中
 - $\Delta E < 2 \text{ MeV}$ の高エネルギー分解能、200イベントの統計
 - 世界で初めて束縛状態をピークとして観測
- D1磁場分布の測定
 - 4通りの電流設定、のべ58000点の測定
 - 測定誤差は1.6mT未満。
 - ・ 今後は測定磁場を補完しホール素子の大きさからくる誤差を正確に評価する
- 計算磁場分布の検証
 - 測定磁場との差は最大で0.018 T程度
 - 計算に使う鉄の透磁率を小さくすることで精度が上がると考察
- 磁場分布の誤差が運動量分解能に与える影響
 - 測定磁場の誤差では 8.3×10^{-5} , 計算磁場の精度では 1.5×10^{-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 5.8×10^{-4}
 - ・ 6.0×10^{-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

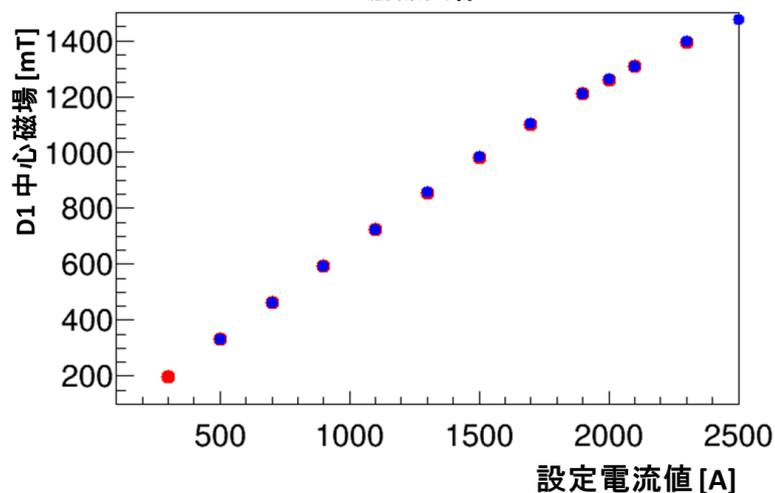


- 励磁から10分後には、中心磁場はほぼ測定精度 ($1 \mu\text{T}$)の範囲で一定になる

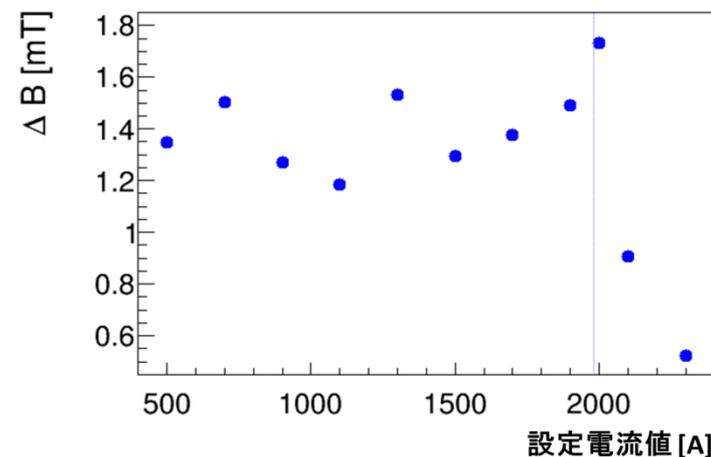
励磁曲線

- 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)

S-2S D1 励磁曲線



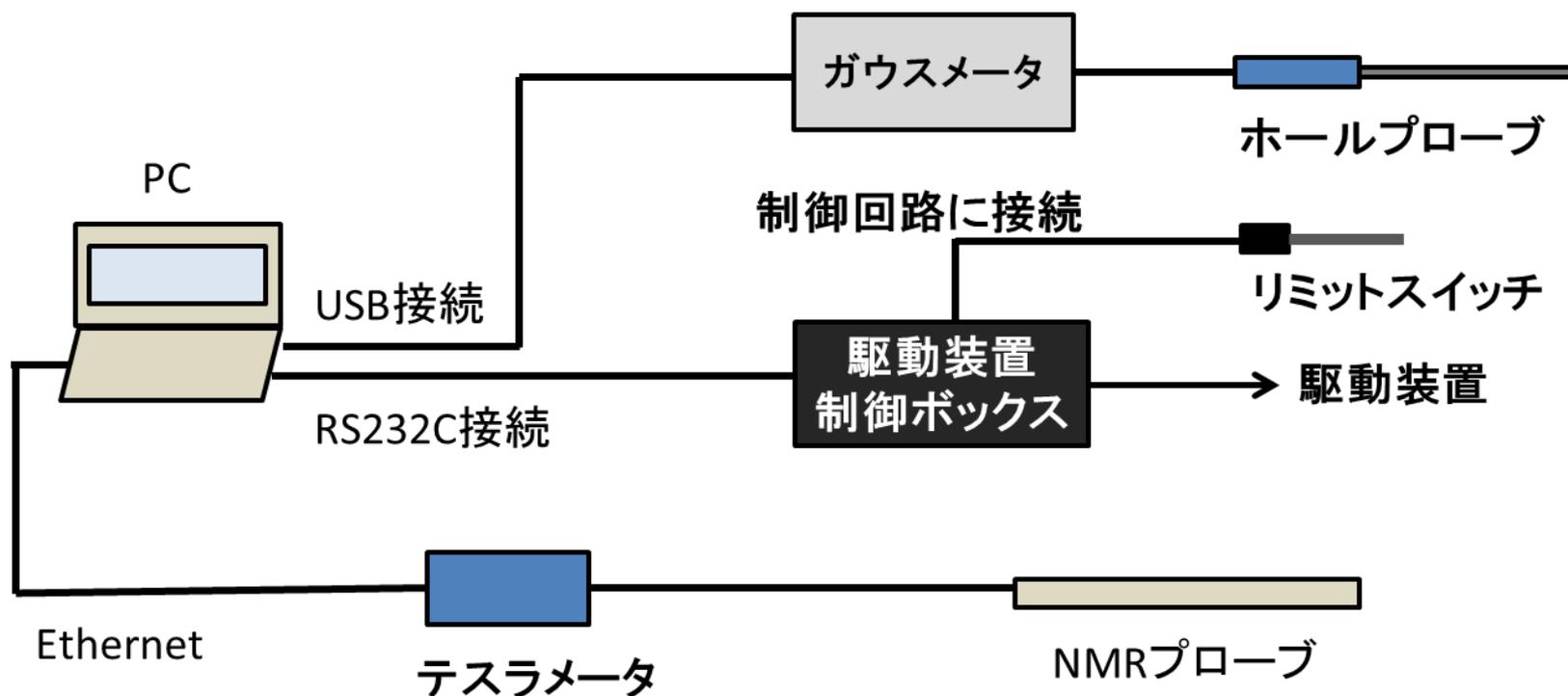
$\Delta B = B_{up} - B_{down}$



- 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

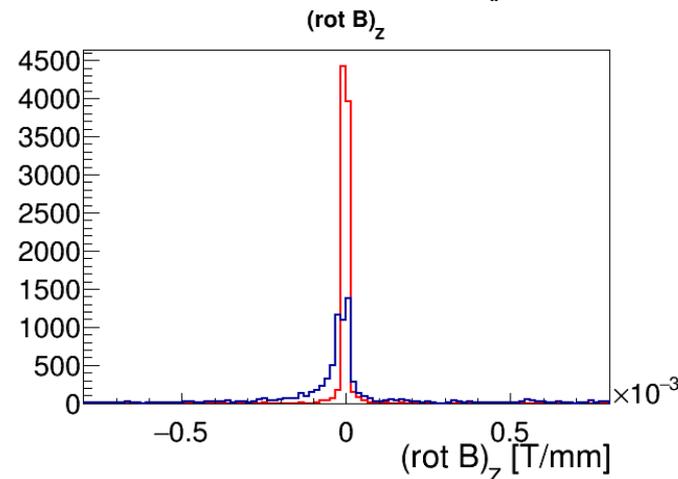
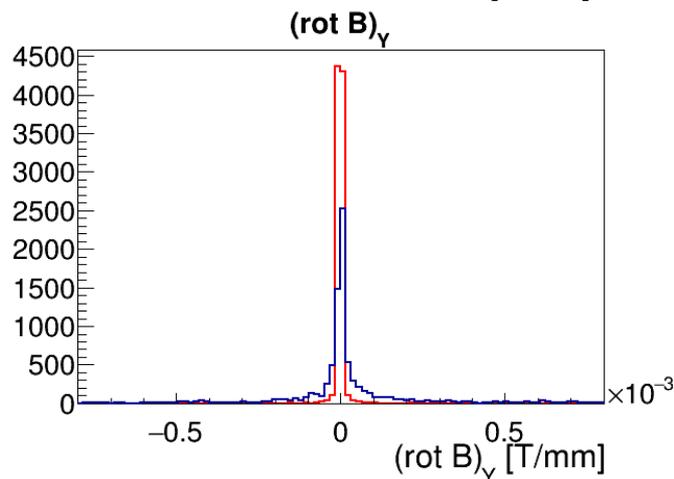
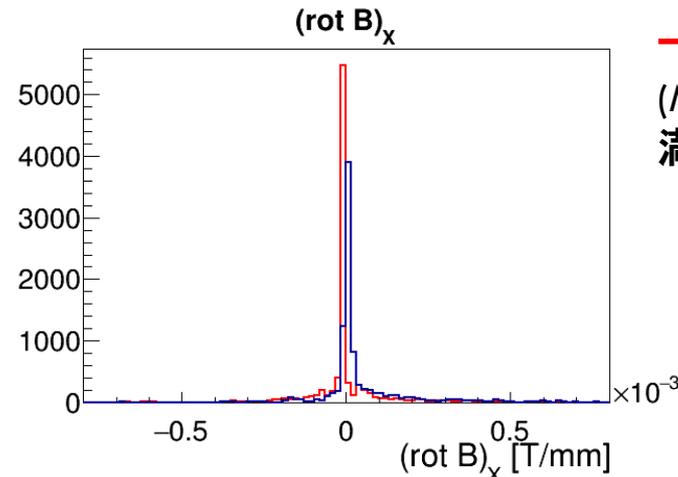
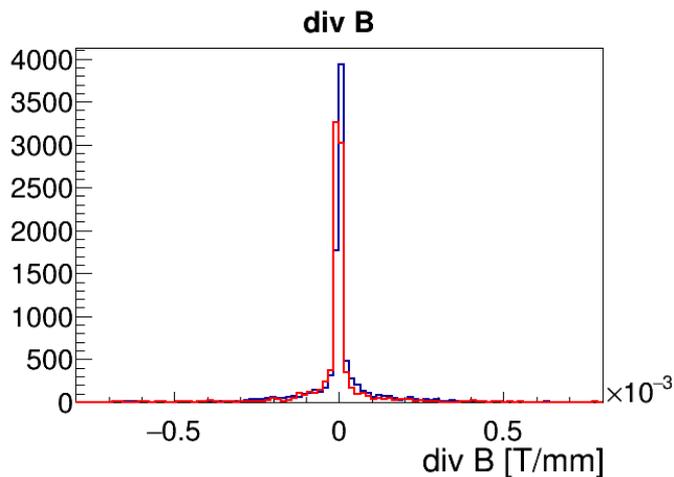
- 1台のPCにNMRプローブ、駆動装置、ホールプローブを接続、Excel-VBAマクロで制御を行った



磁場の満たすべき条件の確認

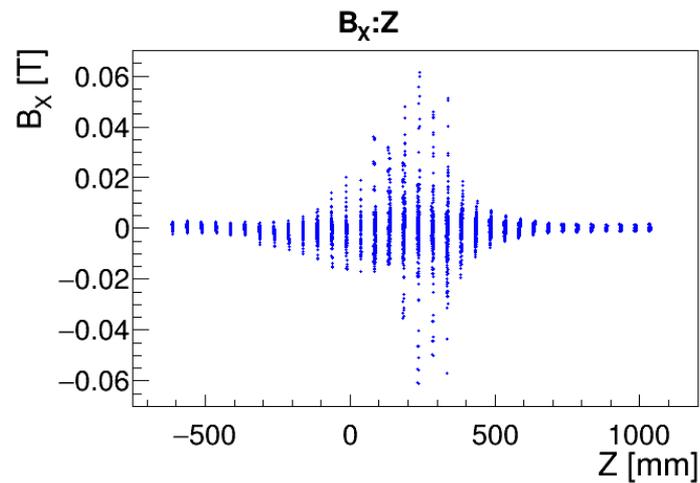
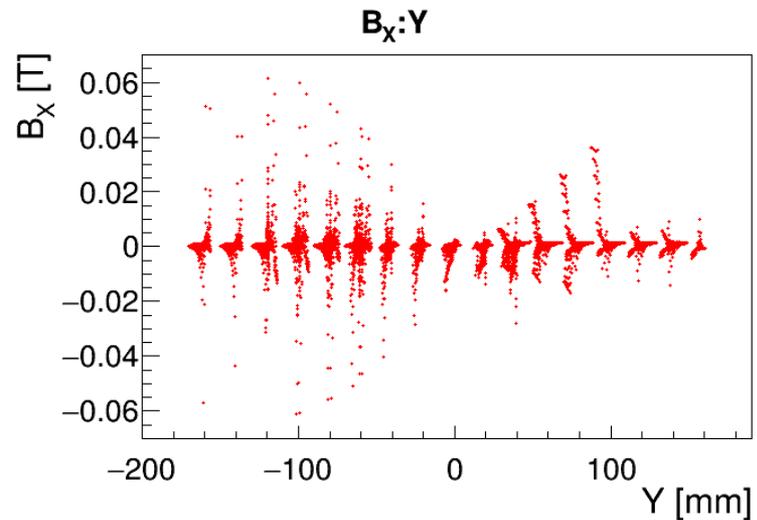
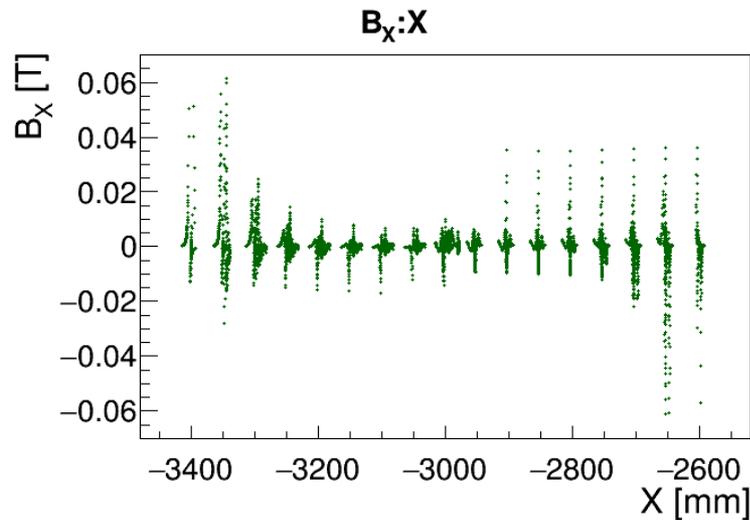
- $\text{div } B$, $\text{rot } B$ の各成分は0を中心に分布
 - Maxwell 方程式を満たしている

— 測定磁場
— 計算磁場
(Maxwell方程式を
満たす磁場の例)



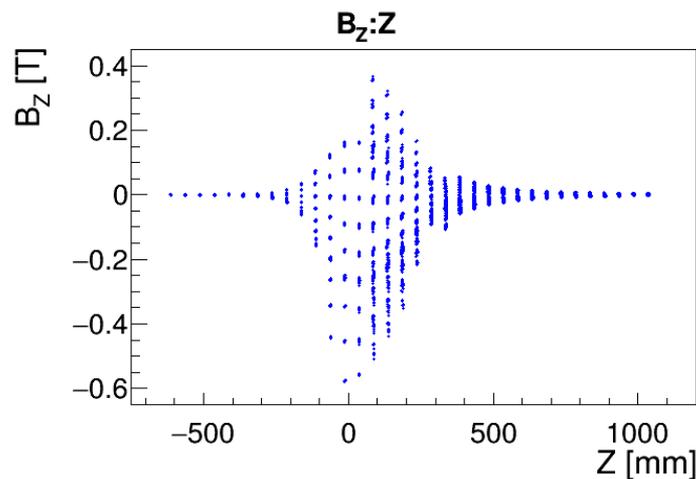
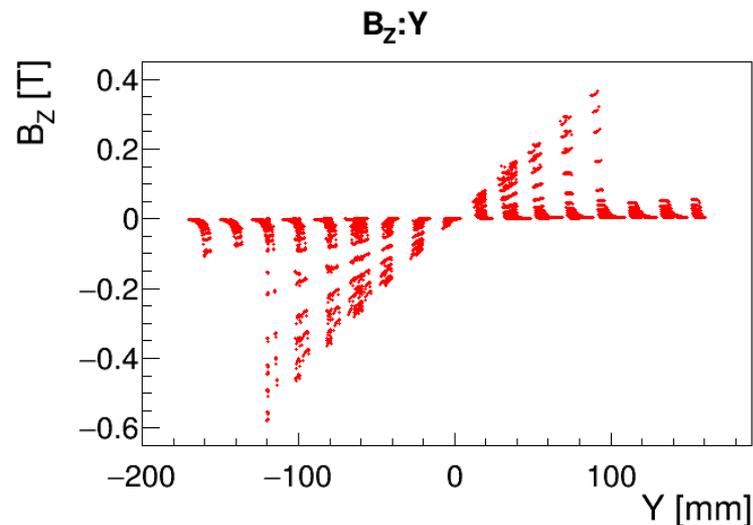
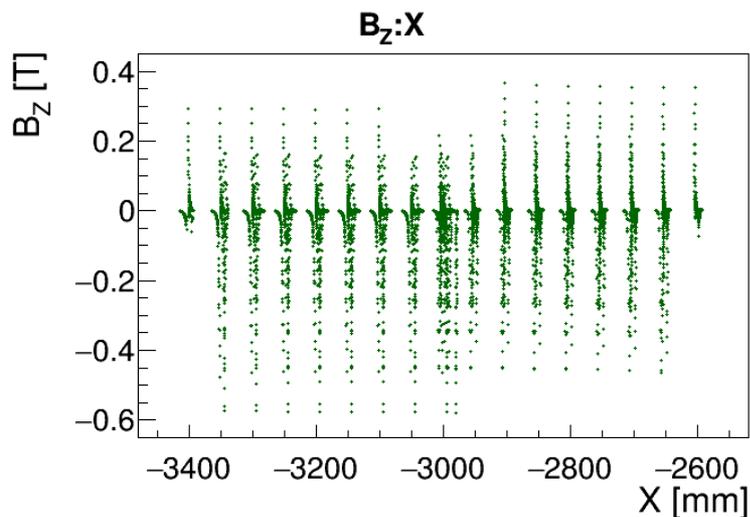
測定結果

- B_x の各座標に対する依存性@2500A



測定結果

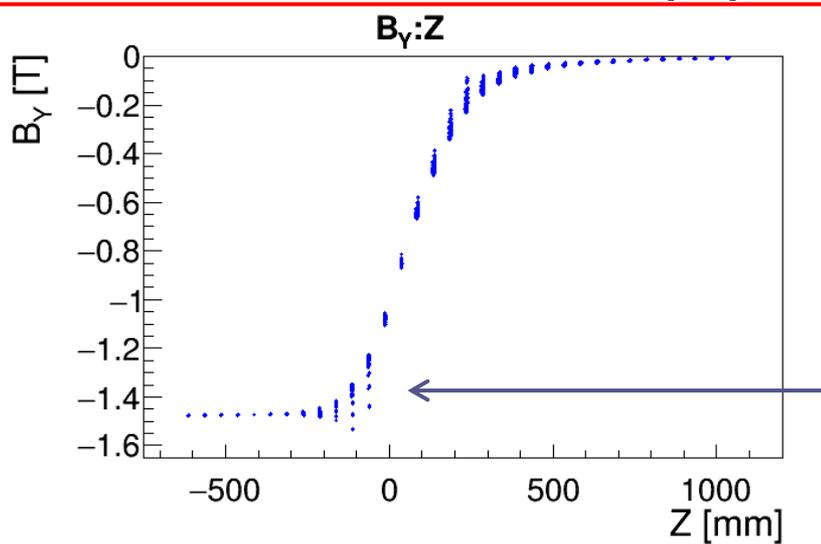
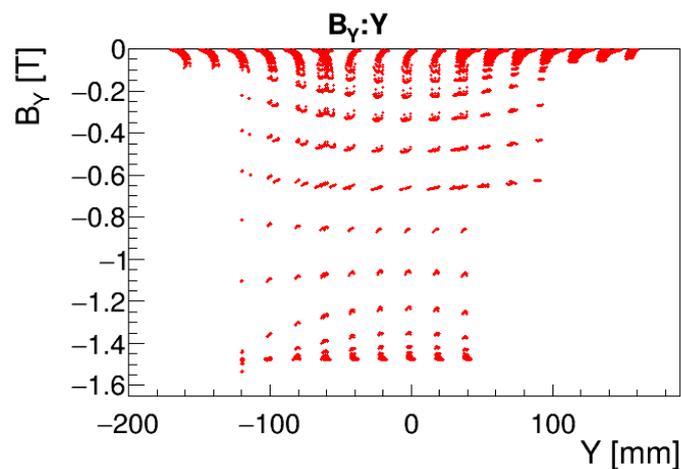
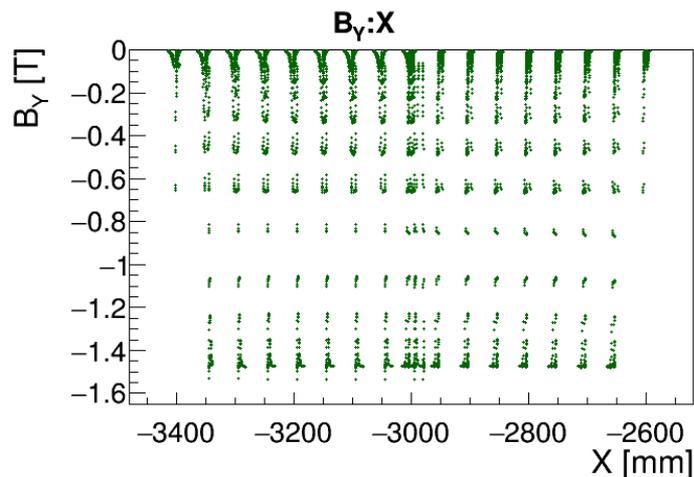
- B_z の各座標に対する依存性



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

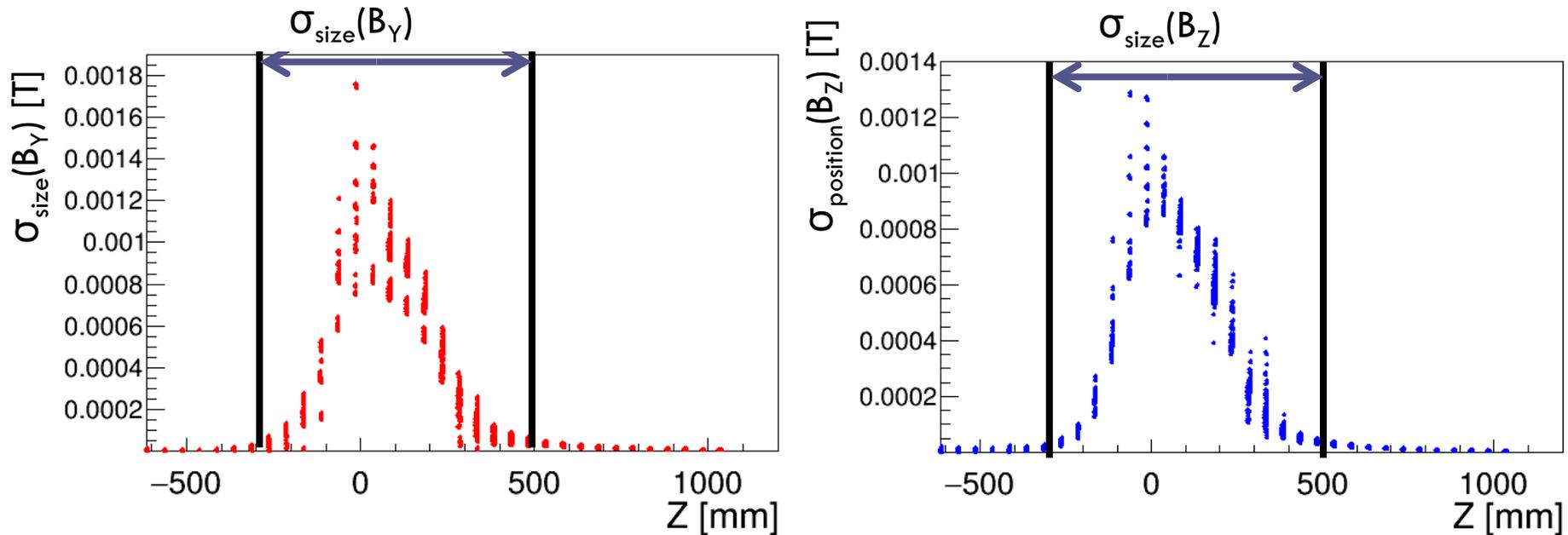


中心軌道に沿った
D磁石の主成分の分布

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

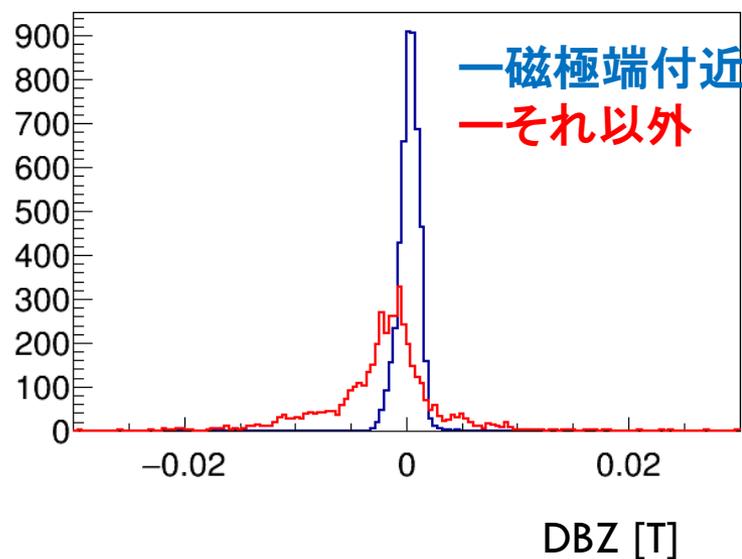
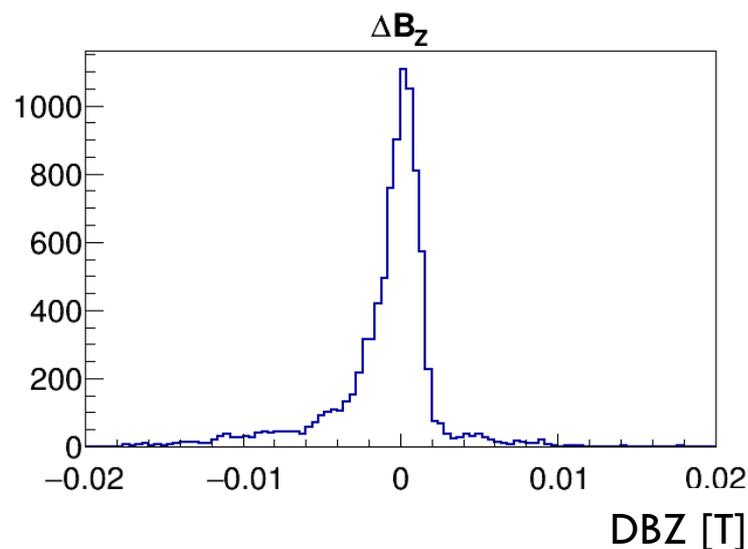
- ホール素子の大きさからくる誤差は、磁極端付近の領域で大きくなる



- 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。

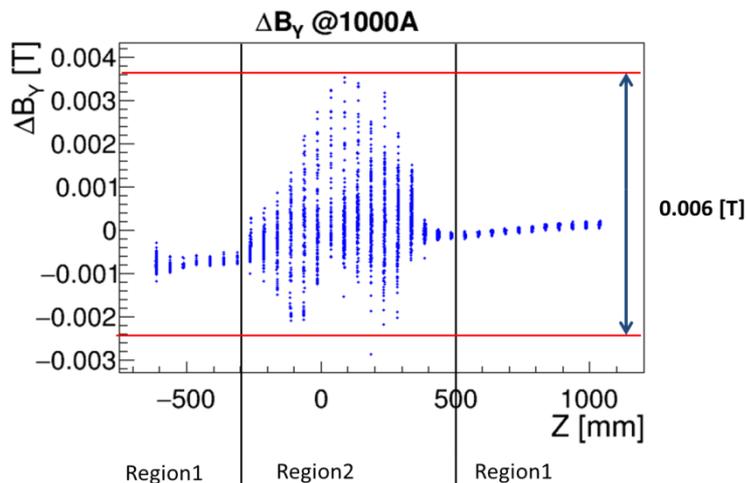
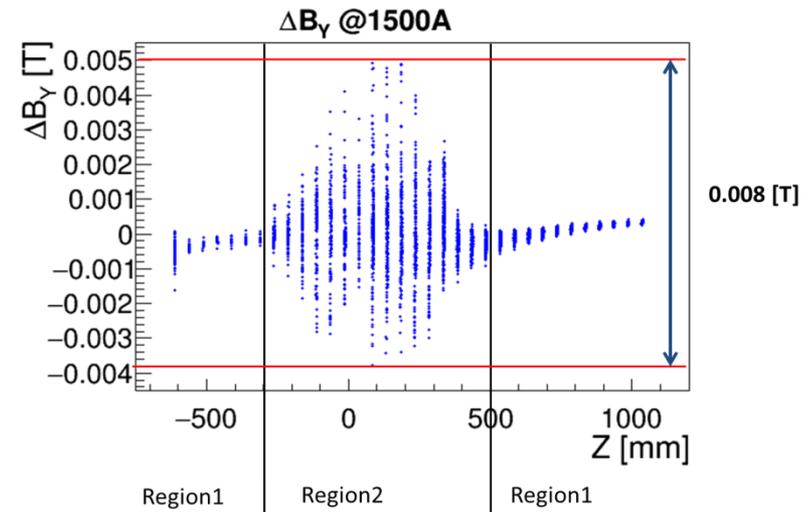
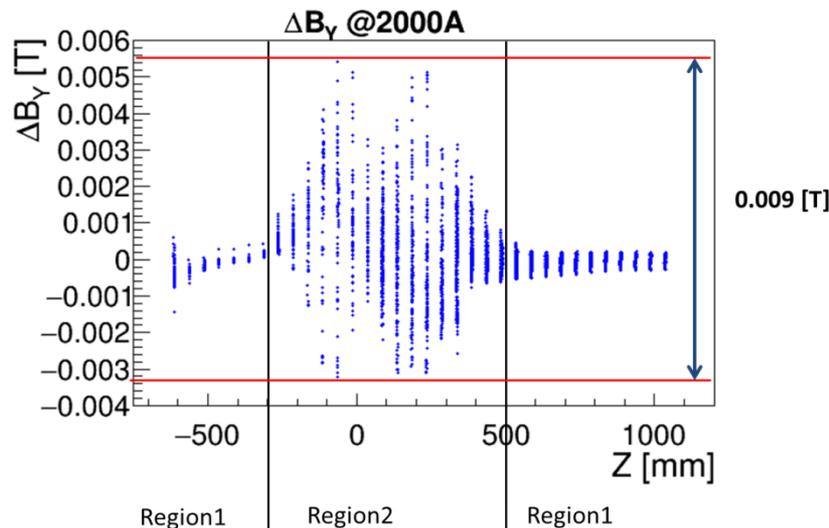
計算磁場の精度

- $DBZ = (\text{測定磁場のZ成分}) - (\text{計算磁場のZ成分})$
- 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、 σ 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 μ 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

