修士論文

K中間子スペクトロメータ（HKS）の精密磁場測定

$(e, e'K^+)$反応によるΛハイパー核分光実験に向けて

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

小山田正学

平成15年

概 要

我々のグループは来年度よりアメリカのジェファーソン研究所にて $(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光実験 (E01-011) を行う. 既に, 同研究所において世界で初めて $(e, e'K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験 (E89-009) を行っており, ${}^{12}_{\Lambda}$B のエネルギー準位を 900 keV 以下 (FWHM) の分解能で測定することに成功し, $(e, e'K^+)$ ハイパー核分光が可能であることがわかった. 本実験では, 次のステップとしてハイパー核のエネルギー準位を 400 keV 以下 (FWHM) の分解能で測定することを目標としている. この目標を達する為に, K^+ 中間子をとらえるスペクトロメータは中心運動量 1.2 GeV/c に対し, 2×10^{-4}(FWHM) の運動量分解能を達成する必要がある. この分解能を達成するため, $(e, e'K^+)$ 反応に特化した, 大立体角高分解能 K 中間子スペクトロメータ (HKS) を建設した.

目標とする分解能を達成するためには,HKS の精密な磁場マップが必要となる. 磁場マップに要求される磁場測定の精度をシミュレーションによって求め, その精度を満たすよう精密磁場測定を行った. 測定データを解析し, データ補正を行った.

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　ハイパー核の研究意義 1
1.2　Λ ハイパー核実験の歴史的背景 1
1.3　$(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光の特徴 2
1.4　本研究の目的 2

第 2 章　$(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光実験 **3**
2.1　運動学的条件 3
2.2　Jefferson Lab での実験 (E01-011) 5
2.3　高分解能 K 中間子スペクトロメータ HKS 8
2.3.1　四重極磁石 Q1,Q2 10
2.3.2　双極磁石 D 12

第 3 章　磁場測定への要求精度 **14**
3.1　方法 14
3.2　メッシュサイズと位置分解能 15
3.3　Dipole に対する見積もり 16
3.4　Q1 および Q2 に対する見積もり 17
3.5　要求精度のまとめ 20

第 4 章　磁場測定 **21**
4.1　Q1, Q2 磁石の単体磁場測定 21
4.1.1　測定環境 21
4.1.2　アラインメント 22
4.1.3　G-I 測定 23
4.1.4　磁場分布測定 24
4.2　D 磁石の単体磁場測定 26
4.2.1　B-I 測定 26
4.2.2　磁場分布測定 26
4.3　組合せ測定 29
4.3.1　励磁パターンの検証 29
4.3.2　Q1 磁石と Q2 磁石 (磁場分布測定) 29

4.3.3 Q2 磁石と D 磁石 (磁場分布測定) 29

第 5 章 磁場解析 **30**

5.1 Q1, Q2 磁石 30

5.1.1 測定軸とプローブの傾き 31

第 6 章 まとめ **39**

図 目 次

2.1 $(e, e'K^+)$ 反応の運動学 3
2.2 仮想光子フラックス Γ の角度依存性 5
2.3 E01-011 実験のセットアップ 5
2.4 E89-009 実験で得られた $^{12}_{\Lambda}$B のスペクトル 6
2.5 HKS のセットアップ 8
2.6 四重極磁石 Q1 11
2.7 四重極磁石 Q2 11
2.8 D 磁石 13

3.1 Mesh size dependence 15
3.2 Position accuracy dependence 16
3.3 Field accuracy dependence 17
3.4 Probe rotation angle dependence 18
3.5 Q x-probe position dependence 18
3.6 Q probe angle dependence 19

4.1 トランスハーフ型ホールプローブ 21
4.2 Q 磁石測定用 3 次元駆動装置 22
4.3 Q1, Q2 磁場測定図 23
4.4 Q1, Q2 磁場測定時の座標 23
4.5 Q1 G-I 測定 24
4.6 Q2 G-I 測定 24
4.7 Q1 測定ライン 25
4.8 Q2 測定ライン 25
4.9 Q1 測定範囲 25
4.10 Q2 測定範囲 25
4.11 D 磁石の B-I カーブ 27
4.12 D 磁石磁場測定の各スパンの配置図 28

5.1 NMR によるホールプローブ校正 30
5.2 NMR vs ホールプローブ 31
5.3 Q1 磁石の (x,y,z)=(0,0,0) における磁場と温度の相関 32

5.4 Q1 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と y 軸方向のずれ 33
5.5 Q1 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と x 軸方向のずれ 33
5.6 Q2 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と y 軸方向のずれ 34
5.7 Q2 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と x 軸方向のずれ 34
5.8 Q 磁石測定時の軸と角度 36
5.9 回転補正前後の比較 37
5.10 Q1 磁石の補正前後の divergence B 38

表 目 次

2.1 E01-011 実験の目標とするエネルギー分解能 (C ターゲット) 7
2.2 HKS に必要とされる性能 9
2.3 Q1 磁石 10
2.4 Q2 磁石 10
2.5 D 磁石 12

3.1 磁場測定の要求精度 20

4.1 三次元駆動装置のスペック 22

5.1 式 5.5 および式 5.7 に対する各磁石の fitting 結果 35

第1章　はじめに

はじめに, ハイパー核の研究意義, またハイパー核実験の歴史,$(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核生成の特徴, 本論文の目的を述べる.

1.1　ハイパー核の研究意義

ハイパー核とは, 通常の原子核を構成している核子以外にストレンジネスを持つバリオン "ハイペロン（Λ, Σ, Ξ など）" が入った原子核をいう. ハイペロンは原子核中でパウリ効果を受けず, 原子核の奥深くまで束縛されるので, プローブとしての役割を果たし, 原子核構造を調べるのに適している. さらにハイパー核の構造から, ハイペロン・核子 (YN), ハイペロン・ハイペロン (YY) 間の相互作用に関する知見が得られる. これにより, 核子間 (NN) の相互作用をもとに築きあげられてきた核力の理解をさらに深めることができる. 核力は現象論的に理解さている部分が多く, バリオン間の相互作用としてより広く理解することにより, 核力の起源を探ることは非常に意義深い.

1.2　Λ ハイパー核実験の歴史的背景

ハイパー核の中で, 特に Λ 粒子を含む原子核のことを Λ ハイパー核と呼ぶ. Λ 粒子はハイペロンの中で最も軽いため生成され易く, また弱い相互作用でのみ崩壊するため寿命も比較的長い. そのためハイパー核の中でも最も多くの実験で研究されてきた. 1952 年に宇宙線の emulsion 実験で初めて Λ ハイパー核が観測され [1], 基底状態の束縛エネルギーが測定された. 1970 年代中頃から (K^-, π^-) 反応のカウンター実験が CERN や BNL において精力的に行われ [2][3][4][5], Λ ハイパー核の励起状態が観測された. 1980 年代後半から (π^+, K^+) 反応を用いた実験が行われるようになり [6][7][8], (K^-, π^-) 反応を用いた場合に比べ, 励起モードのより複雑な構造を観測できるようになった. 1990 年代後半には米国ジェファーソン研究所 (JLAB) において, $(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光実験が初めて行われた [9] . この実験により, $(e, e'K^+)$ 反応実験の可能性が見出され, 新たな Λ ハイパー核研究手法への道をひらいた.

1.3 $(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光の特徴

$(e, e'K^+)$ 反応により生成される Λ ハイパー核では, (π^+, K^+) 反応と同様に, 運動量移行が大きいため, 様々な深い束縛状態の stretched states が励起できる. また $(e, e'K^+)$ 反応では仮想光子による反応のため, スピン反転, 非反転状態の両方を励起する電磁相互作用による反応である. また, 中性子を Λ に変える (K^-, π^-) 反応や (π^+, K^+) とは異り, 陽子を Λ に変換するため, 中性子過剰ハイパー核を生成することができる. また, 生成断面積は極めて小さいが, 電子ビームを用いる為, π や K ビームに比べ分解能を格段に良くすることができる.

1.4 本研究の目的

来年度より, JLAB において, $(e.e'K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験（E01-011）を行う. 世界で初めて $(e, e'K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験（E89-009）では, ハイパー核のエネルギー分解能にして, 900 keV (FWHM) を達成することができた. この実験では, $(e, e'K+)$ 反応実験の可能性が見出されたが, 問題点がいくつかみられた. その問題点のひとつは, 実験全体の分解能が K^+ 中間子測定側の SOS スペクトロメータによって, 制限されていたことだった. この問題を改善すべく, E01-011 実験に向けて, 高分解能 K 中間子スペクトロメータ (HKS[1]) を建設した. E01-011 実験では, 全体として ∼400 KeV のエネルギー分解能を目標としている. この分解能を達成するためには, HKS には精密な磁場マップが要求される. 本研究では, この要求に沿った磁場測定の精度を求め, 精密磁場測定を行い, 要求精度を満たす磁場マップを実現させる事を目的とする.

[1] High resolution Kaon Spectrometer

第2章　$(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光実験

2.1　運動学的条件

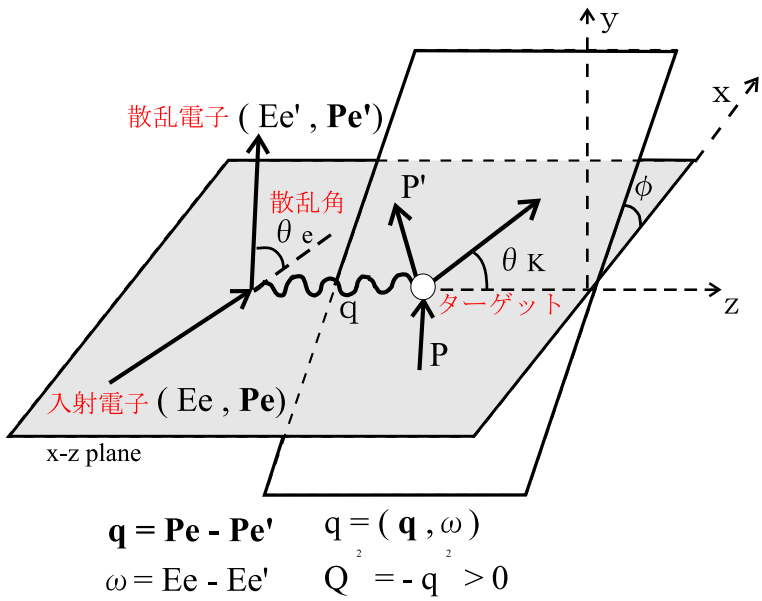

図 2.1: $(e, e'K^+)$ 反応の運動学

(e, e', K^+) 反応の運動学を図 2.1 に示す．入射電子はターゲットと電磁相互作用をおす．この際原子核内の陽子が Λ 粒子に変換され，同時に生成した K^+ が，核外へ放出される．ビーム電子の運動量とエネルギーを $\vec{P_e}$, E_e, 散乱電子，K 中間子も同様に $\vec{P_{e'}}$, $E_{e'}$, $\vec{P_K}$, E_K とすると，生成される Λ ハイパー核の運動量，エネルギー，質量はそれぞれ

$$\vec{P_\Lambda} = \vec{P_e} - \vec{P_{e'}} - \vec{P_K} \tag{2.1}$$

$$E_\Lambda = E_e - E_{e'} - E_K \tag{2.2}$$

$$M_\Lambda = \sqrt{E_\Lambda^2 - P_\Lambda^2} \tag{2.3}$$

と求めることができる．生成された Λ ハイパー核の性質を調べるためには，入射電子，散乱電子，K 中間子のそれぞれの運動量を測定すれよい．

$(e, e'K^+)$ 反応によるハイパー核生成の 3 重微分断面積は, 2.4 式のように書ける [10].

$$\frac{d^3\sigma}{dE_{e'}d\Omega_{e'}d\Omega_K} = \Gamma\left[\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \epsilon_L\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \epsilon\frac{d_p}{d\Omega_K}\cos 2\phi_K + \sqrt{2\epsilon_L(1+\epsilon)}\frac{d\omega_I}{d\Omega_K}\cos\phi_K\right] \tag{2.4}$$

ただし

$$\begin{aligned}
\Gamma &= \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2}\frac{E_\gamma}{1-\epsilon}\frac{E_{e'}}{E_e} \\
E_\gamma &= \omega + \frac{q^2}{2m_p} \\
\epsilon &= \left[1 + \frac{2\,|\vec{q}|^2}{Q^2}\tan^2\left(\frac{\theta_e}{2}\right)\right]^{-1} \\
\epsilon_L &= \frac{Q^2}{\omega^2}\epsilon \\
Q^2 &= \omega^2 - \vec{q}^2
\end{aligned}$$

ここで, $\Omega_{e'}$, Ω_K はそれぞれ散乱電子側, K 中間子側の立体角であり, Γ は仮想光子フラックス, σ_T, σ_L, σ_p, σ_I はそれぞれ横波, 縦波, 偏極および干渉成分の断面積である. ϵ, ϵ_L は仮想光子の横および縦偏極であり, m_p は陽子の静止質量, E_γ は実効光子のエネルギーであり, α は微細構造定数である.

このように, 3 重微分断面積は仮想光子フラックスに, K^+ の光生成断面積との積で表される. Γ の電子散乱角の角度依存性を表したのが図 2.2 である. 図のように Γ は $\theta_e \sim 0°$ で最大となる. また, K^+ 生成角度依存性も $\phi_K = 0°$ で最大となるため, できるだけビーム前方で散乱電子と K 中間子を測定することで最も良い統計を得ることができる.

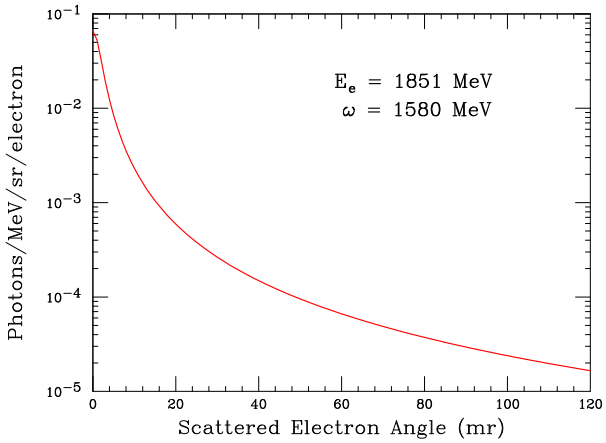

図 2.2: 仮想光子フラックス Γ の角度依存性

2.2 Jefferson Lab での実験 (E01-011)

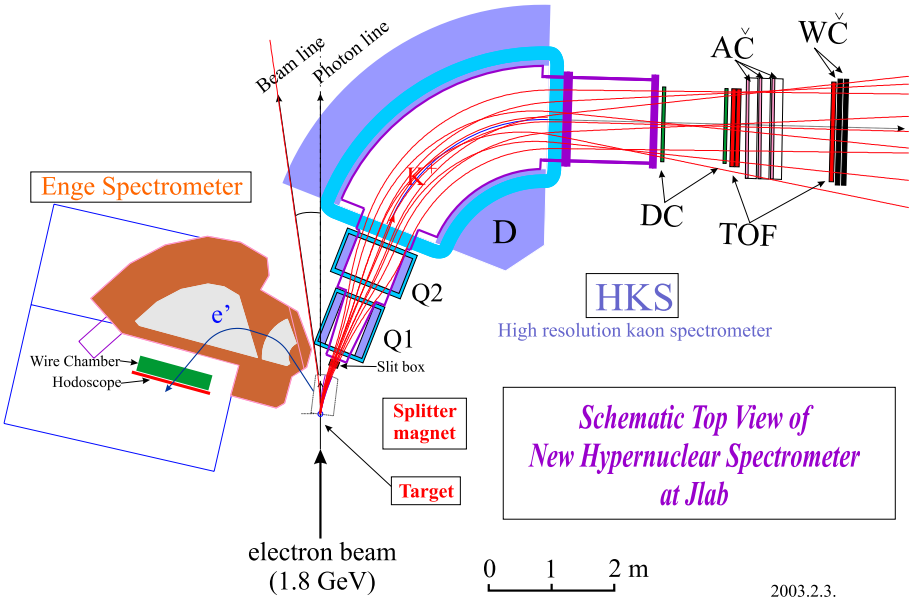

図 2.3: E01-011 実験のセットアップ

$(e, e'K^+)$ 反応を用いて世界で初めて行ったハイパー核分光実験 E89-009 は成功し, Λ ハイパー核のスペクトルを得る事ができた (図 2.4). この実験で得られた, ハイパー核のエネルギー分解能は 900 keV(FWHM) であり, ハイパー核分光実験において, 世界最高の分解能を達成する事ができた. この実験は, $(e, e'K^+)$ 反応実験の可能性を示したが, 問題点がいくつかみられた. その問題点のひとつは, 実験全体の分解能が K^+ 中間子測定側の SOS スペクトロメータによって, 制限されてい

たことであり, もう一方は制動放射起因の散乱電子が散乱電子側スペクトロメータのシングルレートを支配したため, S/N 比が劣化し, またターゲット厚やビーム強度が制限されたことである.

そこで, E89-009 実験で得られたこれらの反省点から, 新たな Λ ハイパー核分光実験 (E01-011) が提案された. この実験では, 以下の二つの大きな改善点がある.

- K^+ 中間子測定用スペクトロメータとして, $(e, e'K^+)$ 反応に特化した, 新しいスペクトロメータ (HKS) を導入する
- 散乱電子測定用スペクトロメータを垂直方向に傾けることにより, 制動放射, Moeller 散乱起因電子の, スペクトロメータへの入射を防ぐ

以上の改善により, エネルギー分解能は 400 keV (FWHM) と格段に良くなり, 10 倍の S/N 比, 50 倍の収量を見込むことができる.

この論文では特に, 400 keV (FWHM) という高いエネルギー分解能を得るための鍵となる, K^+ 中間子測定用スペクトロメータに焦点をしぼり詳しく述べる.

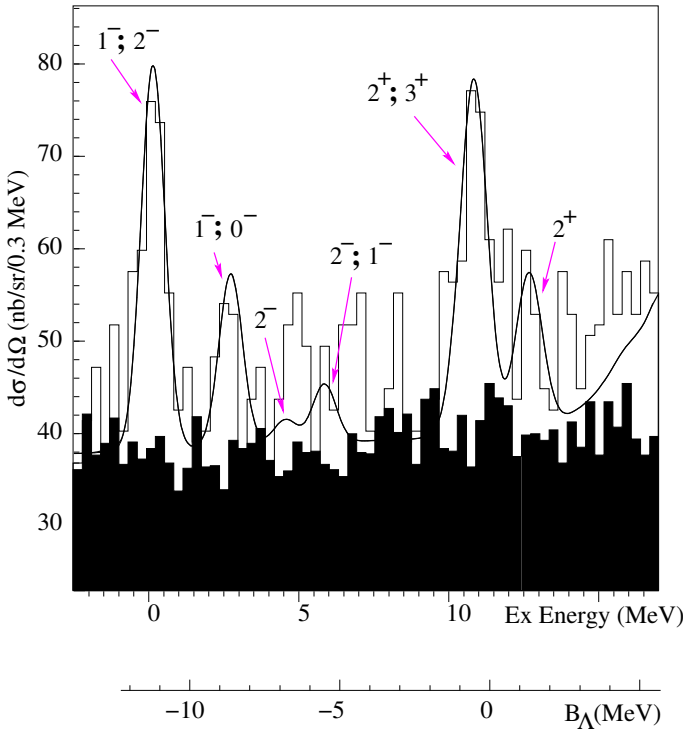

図 2.4: E89-009 実験で得られた ${}^{12}_{\Lambda}$B のスペクトル

表 2.1: E01-011 実験の目標とするエネルギー分解能 (C ターゲット)

要素	分解能への寄与（keV, FWHM）
HKS 運動量（Δp/p = 2×10^{-4}）	230
Beam 運動量（Δp/p= 1×10^{-4} at 1.8 GeV/c）	$\geq$ 180
Enge 運動量	120
K^+ 角度 ($\Delta\theta < 3.3$mrad)	134
ターゲット (100 mg/cm^2)	$\geq$ 180
全体	$\geq$ 390

2.3 高分解能 K 中間子スペクトロメータ HKS

E01-011 実験に用いる HKS の特徴を述べる. 図 2.5 は HKS のセットアップである.HKS の性能は表 2.2 に示す通りである. HKS は 2 つの四重極磁石（Q1, Q2）と双極磁石（D）の 3 つの常伝導磁石で構成されている. HKS は $(e, e'K^+)$ 反応に特化したスペクトロメータとして, K 中間子の運動量を正確に測定するために使用される. $(e, e'K^+)$ 反応では Λ ハイパー核の生成確率が非常に小さいため, HKS は大立体角, 高分解能の両方を同時に満たすことが要求される. そのため立体角を大きくとれるように設計し, 精密磁場測定を行うことにより高分解能を実現させる. また, K^+ 中間子の寿命が約 12 ns と短いため, 焦点面までの距離ができるだけ短くなるように設計した.

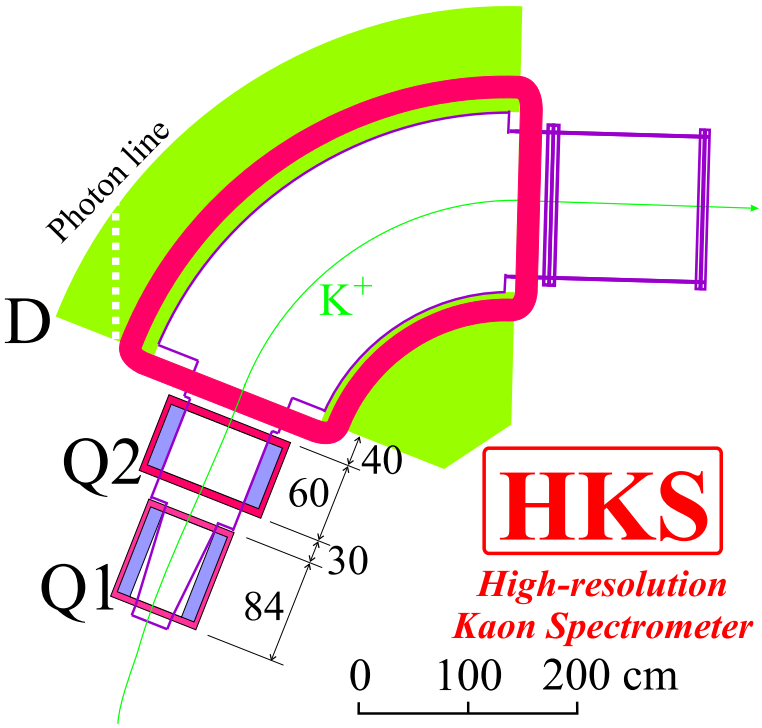

図 2.5: HKS のセットアップ

HKS を, Q-D ではなく, Q-Q-D スペクトロメータとした理由はビームラインにおけるクアドルポールダブレットと同じ原理を利用したからである. 最初の Q1 磁石では, 荷電粒子を鉛直方向に収束, 水平方向に発散させ, 次の Q2 磁石ではこれと反対に, 水平方向に発散, 垂直方向に収束するように磁場を設定する. 自由度が 2 つあるので, これらの磁場の強度を調節することにより, 鉛直方向にも水平方向にも自由に荷電粒子を収束させることができる. また, HKS には大立体角を要求されるので, 最初の Q 磁石には鉛直方向の強い収束力が求められる. 鉛直方向に強く収束するほど, 水平方向には発散してしまうので, Q-D スペクトロメータであれば,

表 2.2: HKS に必要とされる性能

基本構成	四重極 + 四重極 + 水平偏向双極磁石 (Q1,Q2,D)
中心運動量	1.2 GeV/c
運動量アクセプタンス	±12.5 %
運動量分解能 (Δp/p)	2×10^{-4} (FWHM)
立体角	16 msr with スプリッター磁石
	(30 msr without スプリッター磁石)
焦点面までの飛行距離	8.2 m
K 中間子検出角	水平方向 7 度

D 磁石に対して水平方向に広がる角度ををもって粒子が入謝してしまうが, Q-Q-D スペクトロメータであれば, 次の Q 磁石で水平方向の広がりを抑え, D 磁石に対し垂直に粒子を入射させることができる.

2.3.1 四重極磁石 Q1,Q2

表 2.3: Q1 磁石

基本構成	四重極磁石
磁極長	84 cm
ボア直径	24 cm
水平広がり	50 cm
垂直広がり	24 cm
使用磁場勾配	5.78 T/m
最大電流	875 A
重量	8.2 ton

表 2.4: Q2 磁石

基本構成	四重極磁石
磁極長	60 cm
ボア直径	29 cm
水平広がり	80 cm
垂直広がり	32 cm
使用磁場勾配	3.40 T/m
最大電流	450 A
重量	10.5 ton

Q1 磁石は, 正に荷電した粒子を鉛直方向では収束させ, 水平方向では発散させるよう磁場をセットし, Q2 磁石は Q1 磁石と反対の磁場構成となっている. Q1 磁石と Q2 磁石の形状を図 2.6,2.7 に示す. Q1, Q2 磁石は, 大立体角を得るため, 長さを短くし且つ大口径の四重極磁石となるよう設計した. また、Q1 磁石は, 大立体角を実現するために可能な限り Q1 上流に位置するスプリッター磁石に近づけて設置することが要求されるが, 散乱電子用検出器 Enge スペクトロメータとぶつからないように配慮して設計した. 通常の四重極磁石では円筒状の真空チェンバーを設置するが, 立体角を少しでも大きくするために, Q1, Q2 ともに図のように磁極に沿った形の真空チェンバーを採用した. Q1 と Q2 の間の距離は 30 cm となるように設置するので, コイル同士が接触しないよう設計した. また, スプリッタ磁石内で偏向された電子及び 0 度方向に放出される光子の逃げ道を作るために, Q1, Q2 磁石は通常の四重極磁石とは異り, 上下の鉄芯が分離した構造となっている. 両磁石の性能は表 2.3,2.4 の通りである.

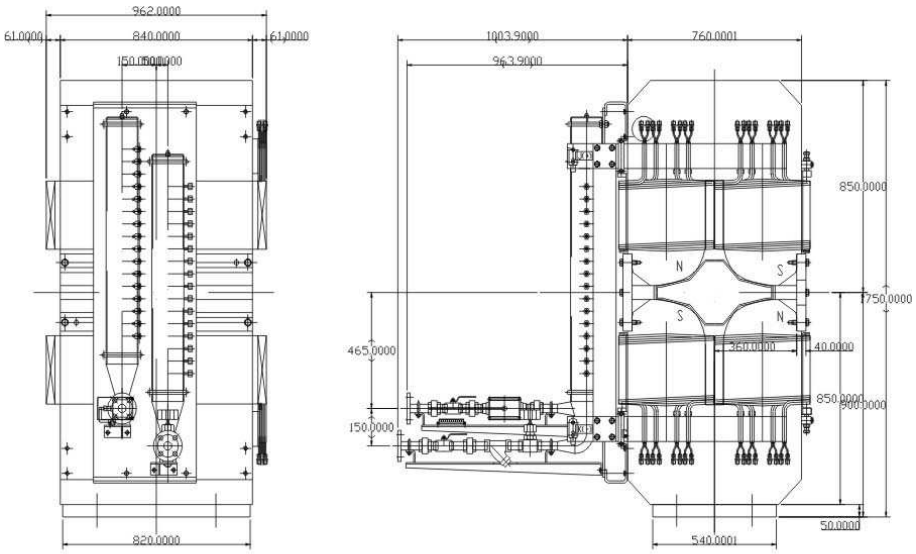

図 2.6: 四重極磁石 Q1

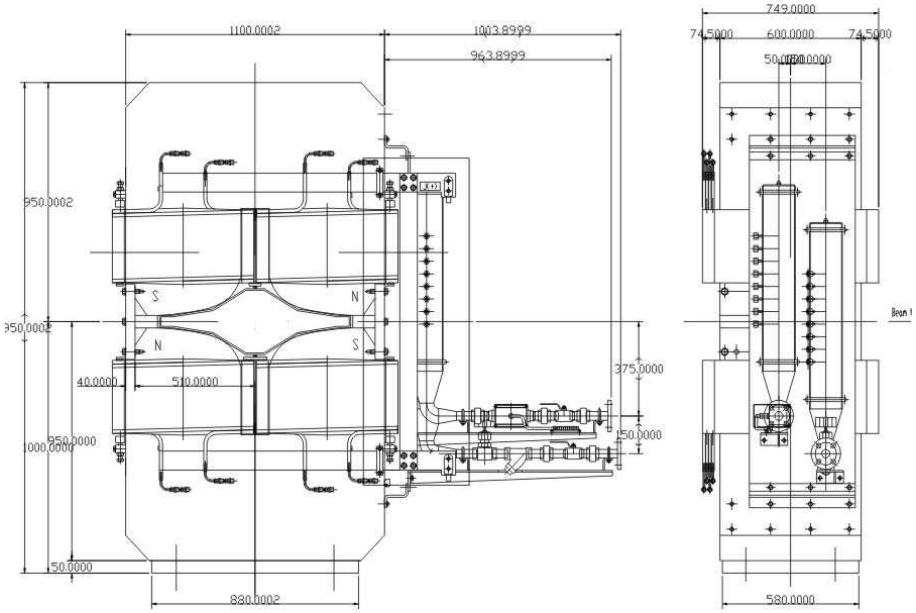

図 2.7: 四重極磁石 Q2

2.3.2 双極磁石 D

表 2.5: D 磁石

基本構成	水平偏向双極磁石
外半径	349.5 cm
内半径	190.5 cm
中心軌道曲率半径	266 cm
中心偏向角	70 度
磁極間距離	20 cm
磁極長	156 cm
最大磁場	1.53 T
最大電流	1140 A
重量	210 ton

D 磁石は運動量 1.2 GeV/c の粒子を中心軌道で 70 度偏向する能力を持つ. D 磁石の形状を図 2.8 に示す. 入射電子および 0 度方向に放出される光子の逃げ道を作るために, 図のようにヨークの一部に穴があいている.D 磁石と Q2 磁石ポール間の距離は 40 cm となるように設置するため, コイル同士が接触しないように設計した. また, 有効領域を最大限利用するため, 磁極そのものを真空チェンバーの一部としている. D 磁石の性能を表 2.5 にまとめた.

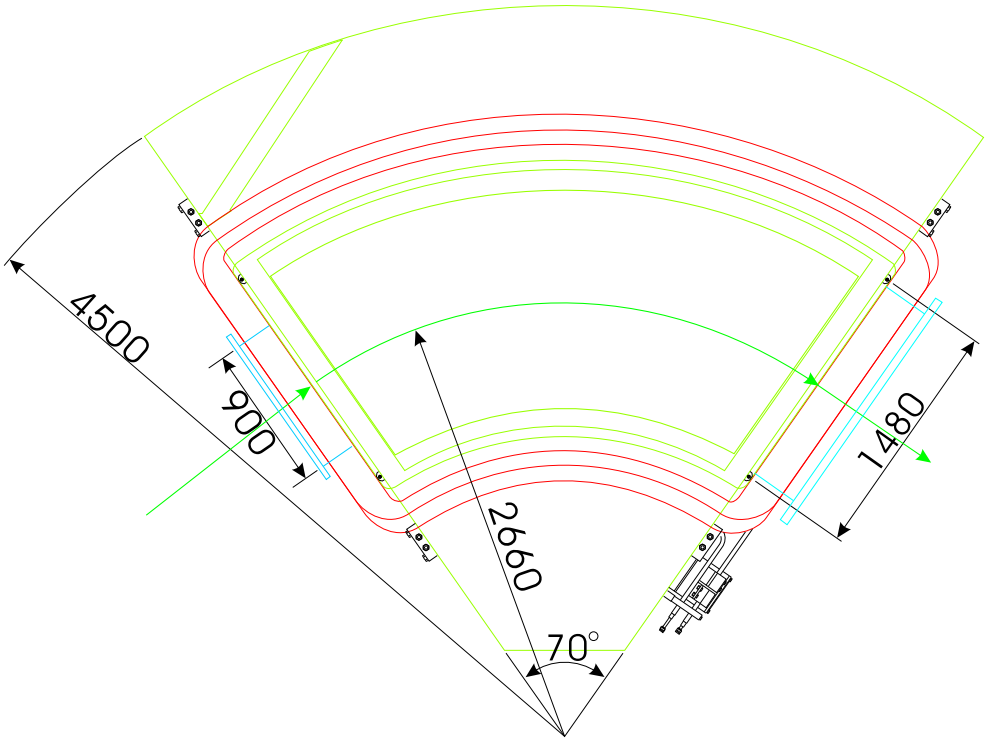

図 2.8: D 磁石

第3章　磁場測定への要求精度

磁場測定を行うにあたり, 目標とする HKS の分解能 (2×10^{-4}) を達成するために, 磁場測定に対してどの程度の精度が要求されるか, Q1, Q2, D 磁石それぞれに対し精度を見積もった.

3.1　方法

見積りは GEANT3[1] を用いたシミュレーションコードで行った。Splitter の磁場は, TOSCA[2] で求めた 1 cm mesh の格子点上ものを用いた. Q1 および Q2 の磁場は, ボア半径を G, 磁場勾配を B, 磁石端からの距離をボア半径単位で表したものを s として, ポアソン方程式を満たす以下のような解析的な式で求めた. パラメータは, 現実の磁石を良く再現するように経験的に得られたものである.

$$B_x = B \cdot \left[yh - \frac{y^3 + 3x^2 y}{12G^2} \frac{d^2 h}{ds^2} \right],$$

$$B_y = B \cdot \left[xh - \frac{x^3 + 3xy^2}{12G^2} \frac{d^2 h}{ds^2} \right],$$

$$B_z = B \cdot \frac{xy}{G} \frac{dh}{ds},$$

$$h(s) = (1 + \exp(C_0 + C_1 s + C_2 s^2 + C_3 s^3))^{-1},$$

$$C_0 = -0.9842, C_1 = 6.3375, C_2 = -3.5134, C_3 = 0.9895.$$

また, Dipole 磁場も同様に, ギャップ面に垂直な方向を y 軸, 磁石端からの距離をギャップ間隔単位で表したものを s として, 以下の式で与えた.

$$B_x = 0,$$

$$B_y = B \cdot h^{-n},$$

$$B_z = -B \cdot \frac{zn}{aG} \cdot \frac{\exp(\frac{s-X}{a})}{h^{n+1}},$$

[1]素粒子, 原子核物理のモンテカルロシミュレーションを行えるソフトウェア.

[2]vector field 社のパッケージソフト OPERA-3d の一ソフトで, 有限要素法を用いた 3 次元磁場計算プログラムである. 定義した 3 次元空間上に, コイルなどの物質を定義し, 電流密度を指定すると, 任意の場所での磁場の値を計算することができる.

$$h = 1 + \exp(\frac{s - X}{a}),$$
$$X = -0.1720, a = 0.1750, n = 0.2690.$$

ドリフトチェンバー上での位置情報から Target 上での運動量を求める関数は, 汎用のフィッティングプログラム ERIKA を用いて, 理想的な磁場を用いて得られた event を fit することで得た. この後に示す運動量分解能は全て rms で示し, 上記 fitting の残差も含んだ値である.

見積もりの手順としては, まず Dipole 磁場を用いてメッシュサイズに対する運動量分解能の依存性を求めた後, Dipole に対しては位置分解能, 角度精度および磁場精度に対する見積もりを行い, Q1, Q2 に対しては位置精度, 角度精度および磁場精度に対する見積もりを行った. なお, 各項目における誤差の許容範囲は運動量分解能が 50 keV/c (fitting 誤差含む) になるところとした.

3.2 メッシュサイズと位置分解能

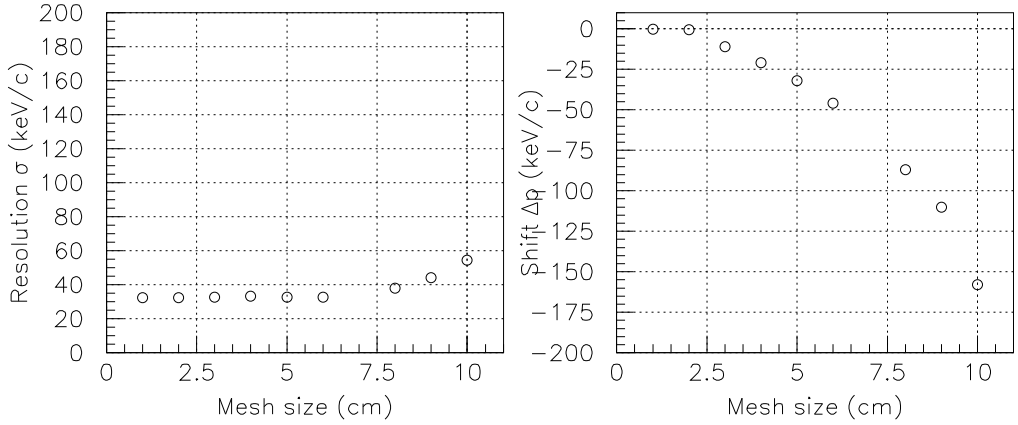

図 3.1: Mesh size dependence

まず, 最も分解能に効くと思われる Dipole 磁場に対して, メッシュサイズおよび位置分解能による分解能の変化を見積もった.

Figure 3.1 に, メッシュサイズによる分解能の変化と運動量の絶対値のずれを示す. 分解能自体は 10 cm mesh でも 55 keV/c とほぼ許容できる値だが, 運動量の絶対値は, メッシュサイズが大きくなるほど大きい方にずれる. これはメッシュが荒いほど上に凸な洩れ磁場部分が過小評価され, 粒子の感じる $\int Bd\ell$ が小さくな

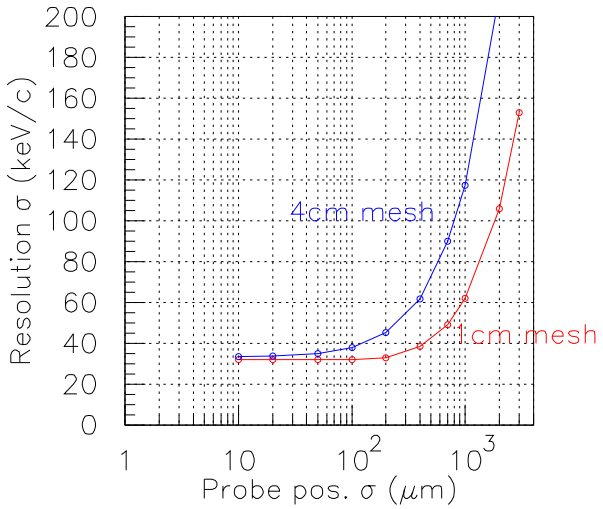

図 3.2: Position accuracy dependence

ると考えると定性的に理解できる. またこの後示すように, メッシュサイズが大きいと, 誤差が分解能に与える影響が大きくなる. これはメッシュサイズが小さいほど誤差が平均化されてしまうためである.

Figure 3.2 に, 運動量分解能の磁場測定点の位置精度依存性を示す. ここで横軸は σ で, 座標の 3 成分に独立に幅 σ のガウス分布の誤差を加えている. 1 cm mesh の場合 700 μm, 4 cm mesh の場合 300 μm の位置精度があれば 50 keV/c を達成できる.

3.3 Dipole に対する見積もり

Figure 3.3 に, 運動量分解能の磁場測定精度依存性を示す. 横軸は σ であり, 磁場の 3 成分に独立に幅 σ のガウス分布の誤差を与えた. この図から, 50 keV/c の分解能を出すためには 1 cm mesh のとき 1×10^{-3} , 4 cm mesh のときで 3×10^{-4} の磁場測定精度が必要であることが分かる.

Figure 3.4 に, プローブの角度を間違えて設置していた場合の運動量分解能の変化を示す. 青線は y 軸周りにプローブを回転させたものである. この場合, 50keV/c を達成するためには, 1 mrad の精度でプローブの角度を決めなければならない. 一方, 赤線は z 軸周りにプローブを回転させたものである. この場合, 大きく角度を間違えても全く分解能には影響しない.

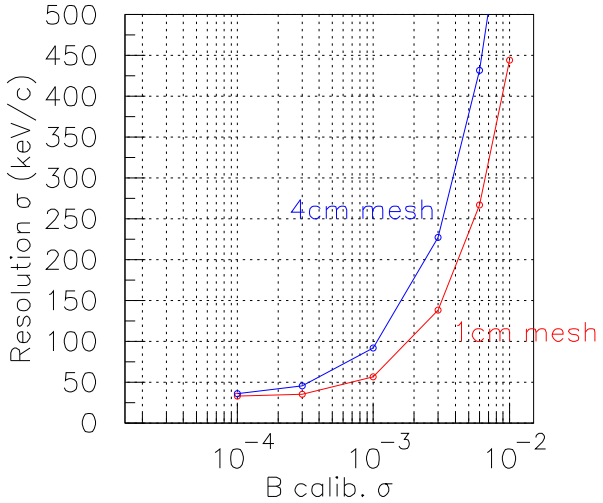

図 3.3: Field accuracy dependence

この違いは, 磁場の主要成分は z 軸方向であることによる. y 軸周りの回転では, 磁場の x 成分そのものは θ^2 のオーダーでしか変化しないのに対し, 主要成分である z 成分が θ のオーダーで混入してくるためである (z 成分の変化は洩れ磁場領域を除き無視できる). ここでは示してないが, 分解能は一様に悪くなる (単一ガウシアンの幅が広くなる) のではなく, 幅自体はそれなりに狭いガウシアン二本に分かれるため rms で見ると図のように悪化する. 一方 z 軸周りの回転では洩れ磁場成分同士である x 成分と y 成分が混ざるだけなので影響は少ない.

3.4 Q1 および Q2 に対する見積もり

図 3.5 に, B_x 用プローブが y 方向にずれていた場合の分解能の変化を示す. 実線が Q1, 破線が Q2 に対するものである. 図より, Q1 に対して 100 μm, Q2 に対して 300 μm の位置精度が必要であることが分かる. 一方, B_y 用プローブの位置が x 方向にずれていた場合, 分解能はほとんど変化しないが, 磁石を通った場所に応じて絶対値が二通りに分かれる. しかしながら, これに関しては実際のデータを見ることで補正が可能であるため, 磁場測定に対しては B_y プローブと同じ精度を要求することとする.

図 3.6 に, B_x プローブもしくは B_y プローブが z 軸回りに回転していた場合の運動量分解能の変化を示す. 右が Q1, 左が Q2 に対するもので, 実線が B_x プローブ,

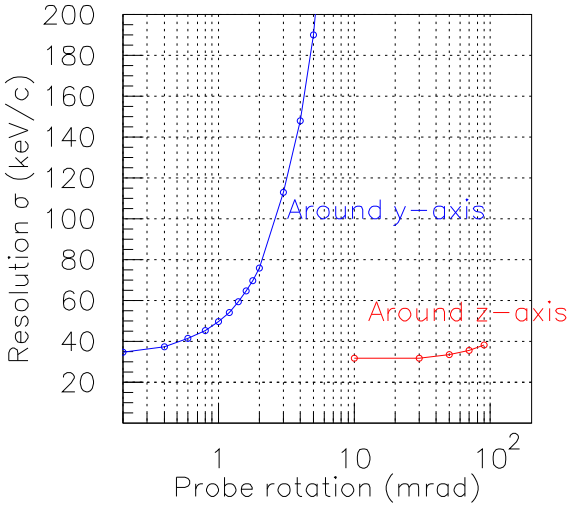

図 3.4: Probe rotation angle dependence

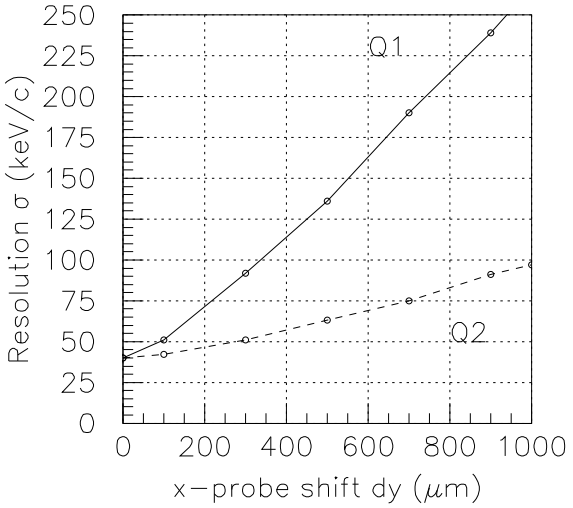

図 3.5: Q x-probe position dependence

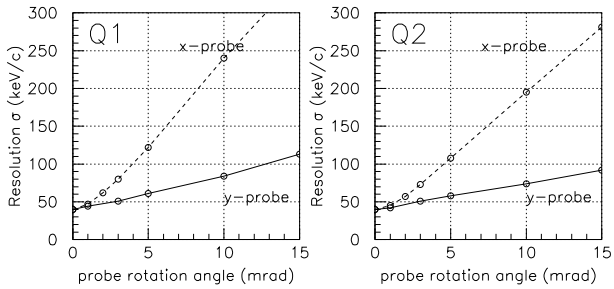

図 3.6: Q probe angle dependence

点線が B_y プローブである. 図より, Q1, Q2 ともに B_x プローブに対しては 3 mrad, B_y プローブに対しては 1 mrad の角度精度が要求されることが分かる. なお, B_z 成分が混ざる方向での回転は, B_z が洩れ磁場成分であることから影響は少なく 20 mrad の精度があれば十分である.

プローブ自身の磁場測定精度は, Dipole の時と同様ランダムなものについては各点の誤差が打ち消しあうため, 1 % の誤差を加えても許容範囲に収まる. 一方, 系統的に磁場の絶対値を間違えていた場合には, 5×10^{-3} の精度が要求される. そのため, ここでは要求精度を 5×10^{-3} とする.

3.5 要求精度のまとめ

各項目からの寄与を 50 keV/c に抑えるために必要な精度は以下の通りである.

表 3.1: 磁場測定の要求精度

メッシュサイズ	4 cm
D 位置精度	250 μm
D 角度精度	1 mrad (B_x, B_y)
D 磁場精度	3×10^{-4}
Q1 位置精度	100 μm
Q2 位置精度	300 μm
Q1, Q2 角度精度	3 mrad (B_x), 1 mrad (B_y)
Q1, Q2 磁場精度	5×10^{-3}

第4章　磁場測定

磁場測定は2002年10月から2003年8月にかけて, 電磁石を製作した三菱電機（株）電力・産業システム事業所で行った. 事前に磁石内外での測定ポイントを決定し, 設定ポイント一点一点の磁場を, ホールプローブを用いて測定した. まず, 各磁石を単体で測定し, その後3つの磁石を実際の実験セットアップ通り (図2.5) に並べて励磁し, 測定を行った. 実験セットアップでは, 各磁石同士の距離が非常に狭いため, 各磁石からの漏れ磁場の影響が, 単体測定時の磁場の分布に効いてくるかを見積もるため組合せ測定を行った.

4.1　Q1, Q2磁石の単体磁場測定

Q1,Q2の磁場測定は三菱電機所有のトランスハーフ型ホールプローブ[1](図4.1)を, 三次元駆動装置に取り付けて測定した（図4.2）. ホールプローブは全長約1.5 mあり, 図 (4.1) の先端にホール素子が埋め込まれている. 三次元駆動装置にホールプローブを取り付けた, 三次元駆動装置の仕様は表4.1にまとめた.

4.1.1　測定環境

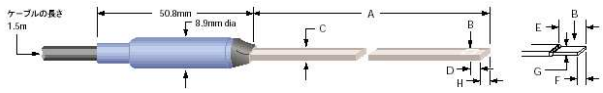

図 4.1: トランスハーフ型ホールプローブ.

測定の際の座標は, 各磁石の中心を原点とし, ビーム進行方向をz軸, z軸に垂直方向で, 鉛直方向をy軸 (上が正), 水平方向をx軸 (ビーム進行方向に対し, 左が正) と定めた (図4.4).

三次元駆動装置には軸数が4あり, x,y,z方向とx軸に対して, 回転自由度があるが, 測定の際は回転軸は固定して測定した. 磁場測定は, 初めにQ1磁石を設置し, Q1磁石の B_y を測定し, その後, プローブを90度時計回りに回転させて, B_x を測

[1]東陽テクニカ製STF99-0402

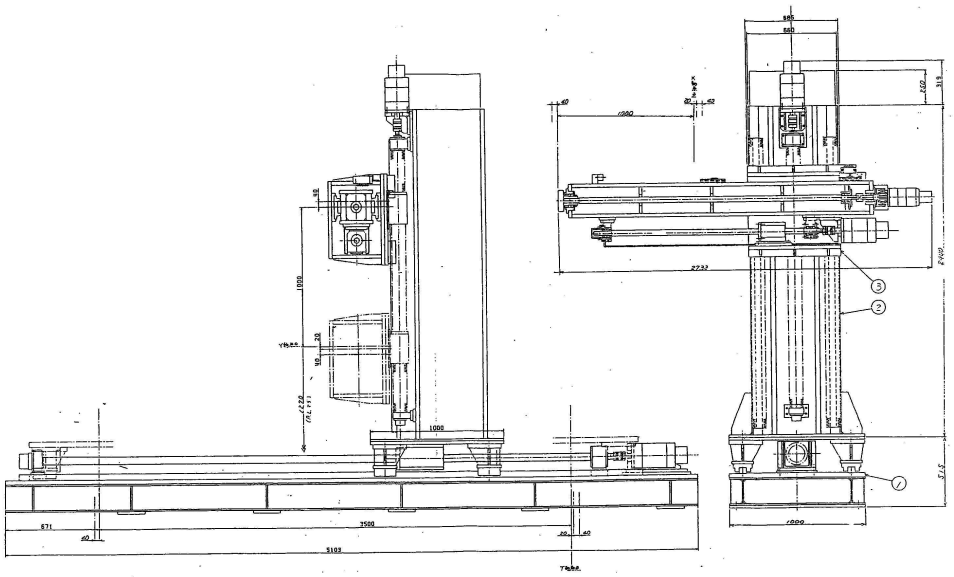

図 4.2: Q 磁石測定用 3 次元駆動装置

表 4.1: 三次元駆動装置のスペック

軸数	4 軸
位置決めスピード	3000 mm/min
位置決め精度	0.03 mm
再現性	0.002 mm
磁場測定精度	0.005 %

定した. その後 Q2 磁石を設置し, プローブを反時計回りに 90 度回転させて, Q1 磁石と同様に先に B_y を測定し, その後 B_x を測定した.

4.1.2 アラインメント

Q1,Q2 それぞれ測定を行う前にアラインメントを行った. アラインメント方法は以下の通り.

1. 電磁石基準面に対して, 水準器を用いてレベル出しをする. この時の精度は 1 mrad 以下になるようにする.
2. 位置決め治具を各 Q 磁石にセットし, その状態でアライメント治具をボアギャップにはめこんで, 上面にてレベル出しをする.
3. 任意の位置座標へホールプローブを移動させ, 再び元の位置へもどし, アラインメントができていることを確認する.

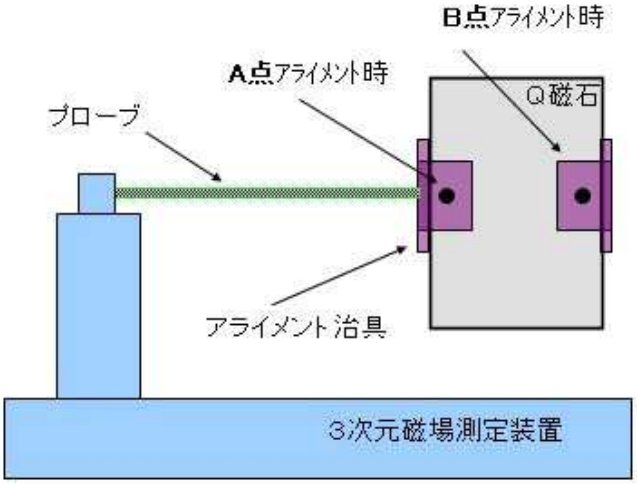

図 4.3: Q1, Q2 磁場測定図

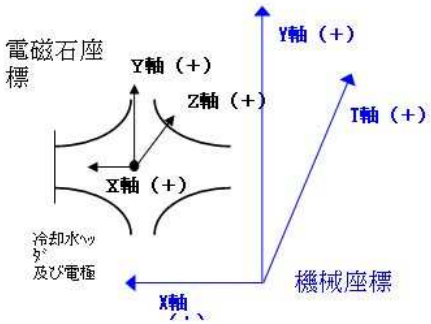

図 4.4: Q1, Q2 磁場測定時の座標

また, アラインメントが終了したら, 初期化を行い, その後測定をする. 初期化の方法を下に示す.

1. 0 A から定格電流値まで上げて 0 A まで下げる.
2. これを 3 回繰り返す.

4.1.3 G-I 測定

アラインメント, 初期化の後にデータを採取した. ホール素子をビーム軸方向に対して垂直に, 各磁石の中心を通る断面で磁場有効端 $(x, y) = (w1, 0), (0, w2)$ に置き, 電流を 0 A→ 定格電流 →0 A と変化させて,G-I 特性を B_x 及び B_y について測定した.

$$\text{Q1:} \quad w1 = \pm 120 \text{ mm} \quad w2 = \pm 60 \text{ mm}$$
$$\text{Q2:} \quad w1 = \pm 150 \text{ mm} \quad w2 = \pm 90 \text{ mm}$$
$$(B_y \text{ を } x = w1 \text{ にて, } B_x \text{ を } y = w2 \text{ の位置とし計 4 箇所})$$

測定電流は以下とし, 電流を 0 A から定格電流 (Q1:875 A Q2:450 A) まで上げて, 下げる一往復を測定した (図 4.5,4.6).

Q1:	87.5	175	262.5	350	437.5	525	612.5	700	766	787.5	875 A
Q2:	45	90	135	180	225	270	315	360	364	405	450 A

G-I 測定は, 磁場分布測定前後で二回測定し測定前後でのデータの再現性を確かめた. また, コアギャップのところに 1 軸ホール素子を固定し, 定点測定を同時に実施した.

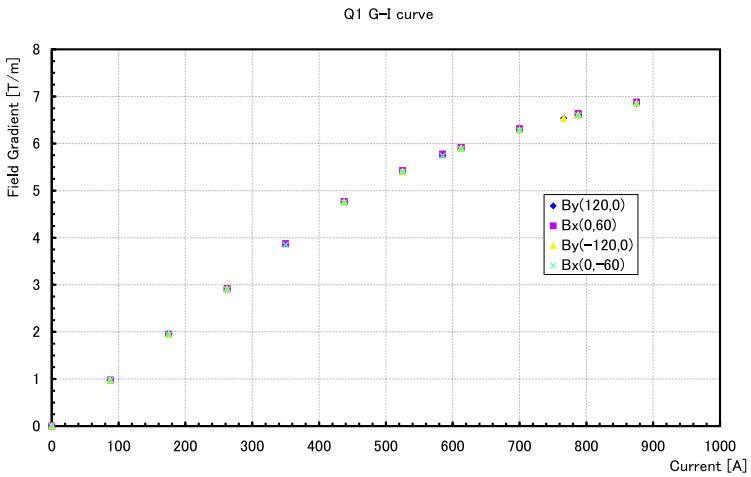

図 4.5: Q1 G-I 測定

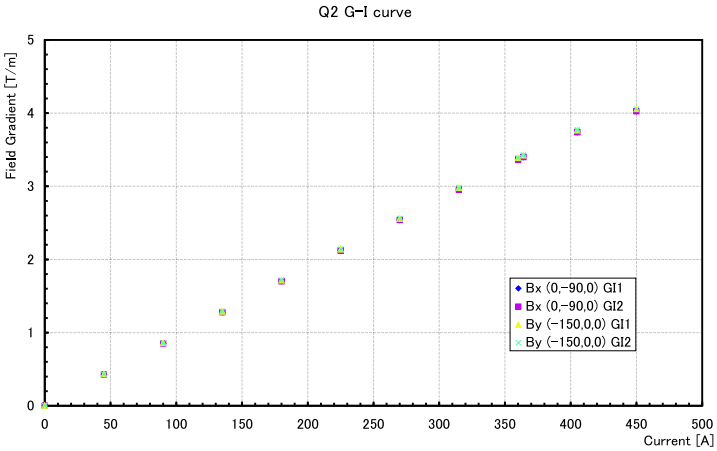

図 4.6: Q2 G-I 測定

4.1.4 磁場分布測定

ホール素子をビーム軸方向に 20 mm ピッチで移動させながら, ビーム軸について図 4.9, 図 4.10 の範囲で磁場分布 B_x 及び B_y について測定した. 測定ラインは図 4.7, 図 4.8 の通りとした. また, 励磁電流は, 以下の 5 ケースとした. この間, 定点測定を NMR, 及びホールプローブで行った.

Q1:	410	497	585	673	766 A
Q2:	254	308	363	417	450 A

を測定した.

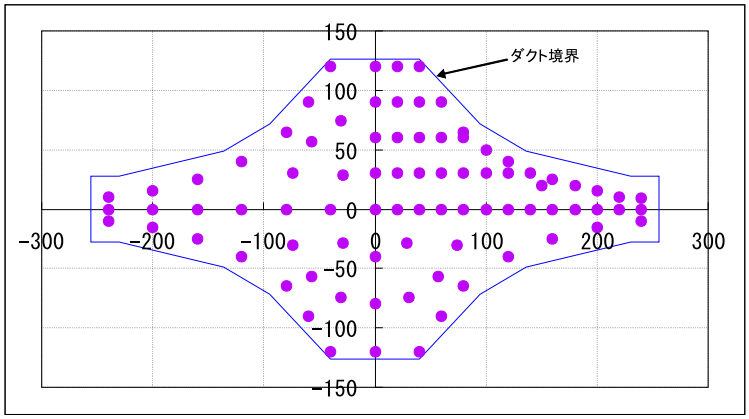

図 4.7: Q1 測定ライン．横軸は x (mm), 縦軸は y (mm)

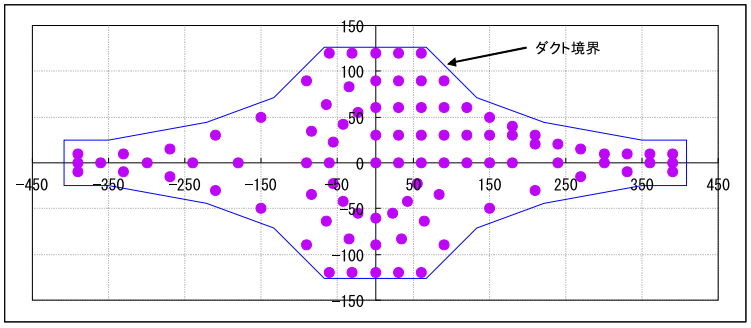

図 4.8: Q2 測定ライン．横軸は x (mm), 縦軸は y (mm)

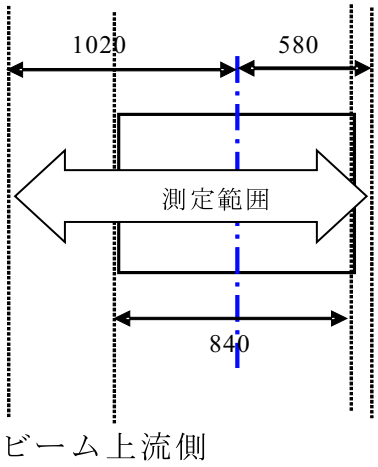

図 4.9: Q1 測定範囲．横軸は z (mm)

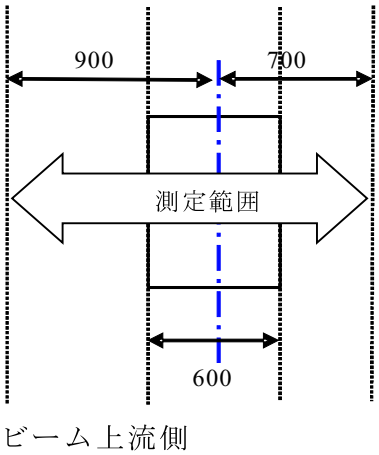

図 4.10: Q2 測定範囲．横軸は z (mm)

4.2 D磁石の単体磁場測定

D磁石の磁場測定は, 非常に高精度の測定が必要となった (磁場測定精度3×10^{-4}). そのため, D磁石の磁場測定用に, 同時に三成分の磁場を測定できる三軸ホールプローブを作製し, D磁石の単体測定, 組合せ測定にはこれを用いた. この三軸ホールプローブをD磁石測定用三次元駆動装置に取り付け, 磁場測定を行った.

4.2.1 B-I測定

三軸ホールプローブをD磁石内部のビーム中心軌道におき, 電流を0 A→定格電流→0 Aと変化させて,B-I特性をB_x, B_y, およびB_zについて測定した. 図4.11
測定電流は以下とし, 電流を上昇下降で一往復, 定格電流1254 Aまで測定した.
125 250 375 500 625 750 875 1000 1050 1100 1140 1200 1250 A
磁場分布測定前後で2回測定した.
磁場のノーマライズに用いるため, NMR2台と3軸ホール素子を用いて, 定点測定を行った.(D磁石内)

	設置場所	
NMR(東北大分)	θ=−10°	R = 2250 mm
NMR(三菱電機分)	θ=10°	R = 2250 mm
三軸ホール素子 (三菱電機分)	コア端より100 mm外のビームライン面	

4.2.2 磁場分布測定

各スパンごと, 初期化を電磁石定格電流まで実施し, 設定は電流上げ方向にて測定した. 測定装置を各スパンごとに移動させて, 各エリアについて測定した.
測定ピッチを測定スパンごとで以下のようにした (図4.12).

領域	スパン	測定座標	ピッチ
領域1	(a,b,c,d,e,f,g,h,j,k)	x,y,z	20 mm
領域2	(m,n,p,q,r,s,t,u,v)	x,y,z	40 mm
領域3	(aa,bb,cc,dd,ee)	x,y,z	40 mm

但し, 高さ方向 (y) はプローブが電磁石鉄心等に当たらない範囲までとした.

励磁電流は1140 Aと −25, −20, −10, 0, 10 %とした. あとで見直し.
ビーム下流側については19スパン, ビーム上流側は5スパンとした.

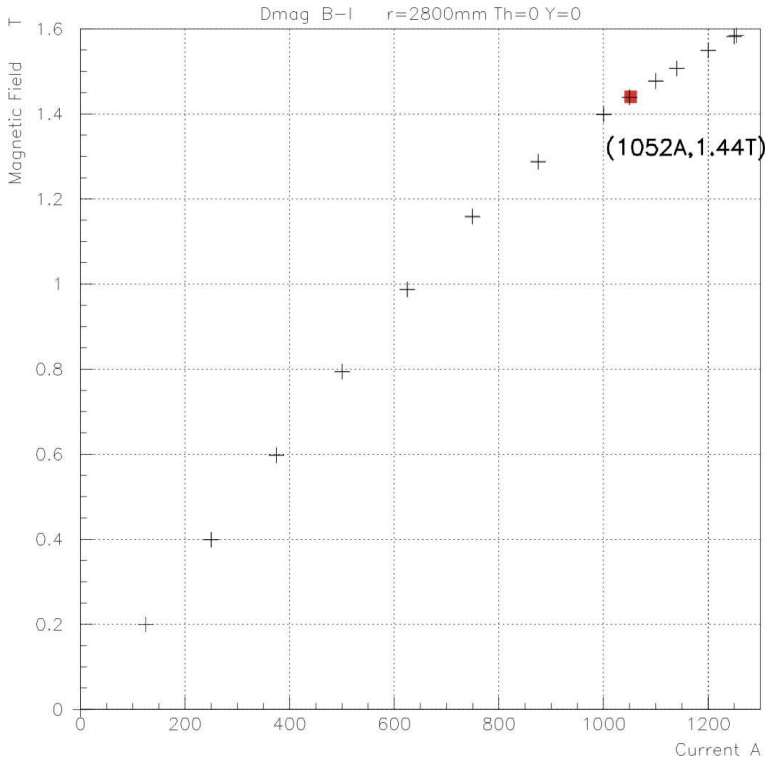

図 4.11: D 磁石の B-I カーブ. 横軸が電磁石の電流で縦軸が B_y

測定順序	
ビーム下流	a → b→ c→ d→ e→ k→ j→ h → g→ f
	→ t→ u→ v→ q→ m→ r→ n→ s→ p
ビーム上流	aa → bb → cc → dd → ee

ホール素子キューブの角度測定は, スパン g 及び j において実施した. また, 各スパン移動ごとに重なり部分での位置決め治具で位置サーチを行った.

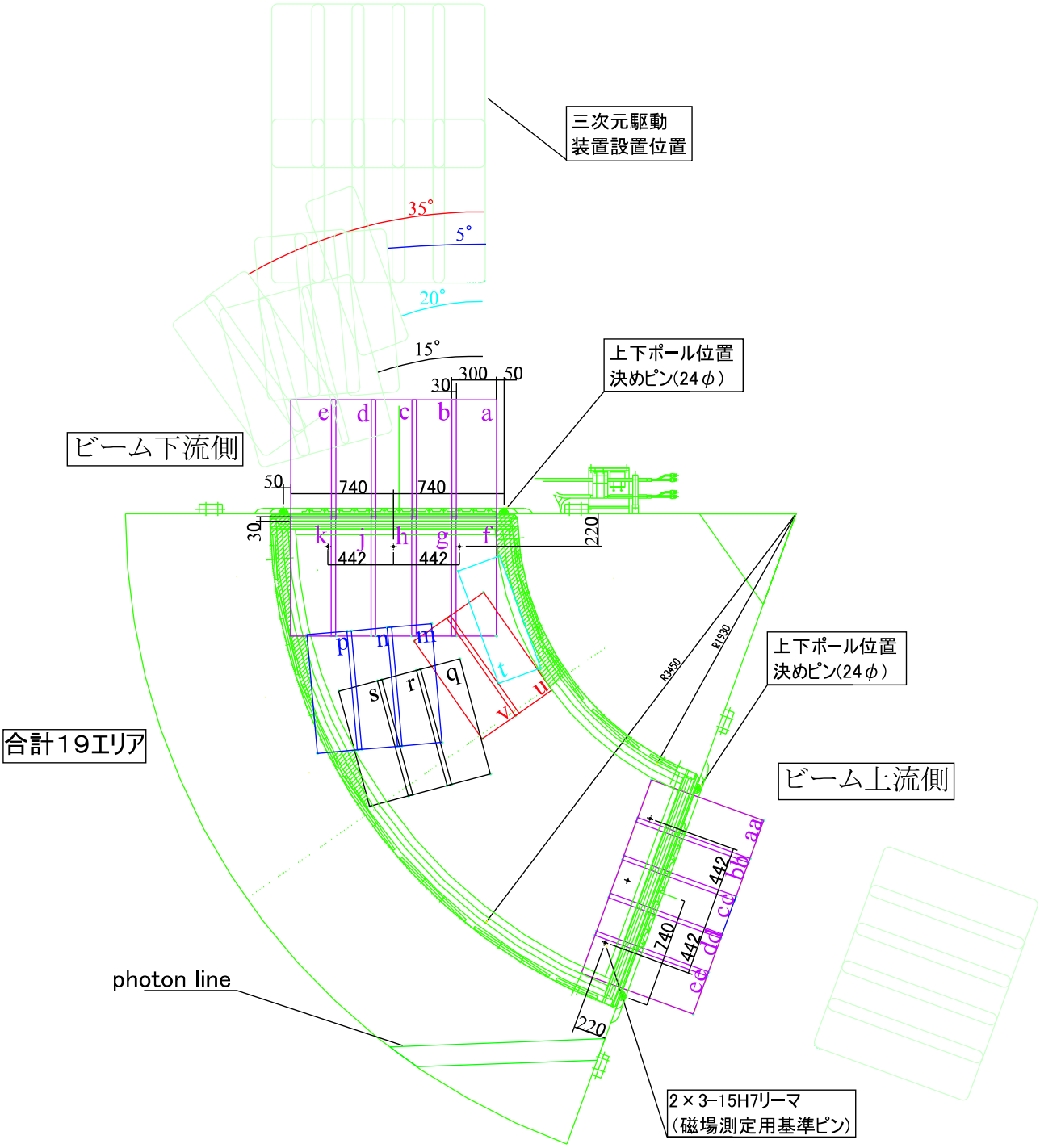

図 4.12: D 磁石測定時の各スパンの配置図

4.3 組合せ測定

HKS は Q1 磁石, Q2 磁石, D 磁石のそれぞれの距離が短く, 漏れ磁場が互いに干渉することが予想された. よって, 各磁石を実際のセットアップに並べて励磁し, 磁場を測定した. また, E01-011 実験で実際に磁石を励磁する場合の励磁パターンについても, 何通りか検討し最適化を試みた. この組合せ測定には, D 磁石単体測定の時に用いた, 三軸ホールプローブ及び, 三次元駆動装置を用いた. 測定装置の制約により磁場測定は Q1-Q2-D を励磁した状態で, Q1, Q2 の磁場を測定し, Q2-D を励磁した状態で Q2, D の磁場を測定した. その間, NMR 2 台と 3 軸ホール素子を用いて, 定点測定を行った.

4.3.1 励磁パターンの検証

実際の実験の際, 磁石をどういう順序で励磁するとより安定した磁場が得られるかは自明ではない. よって 3 つの磁石を同時に励磁するというパターンと D 磁石, Q2 磁石, Q1 磁石の順に励磁するパターンを検証してみた. パターン間の差はみられなかったため, E01-011 実験では, 後者の D, Q2, Q1 の順に励磁することとし, 磁場測定もこの励磁パターンでおこなうこととした.

4.3.2 Q1 磁石と Q2 磁石 (磁場分布測定)

4.3.1 で決定した様に, D 磁石, Q2 磁石, Q1 磁石の順に 3 つの磁石を全て励磁させ, Q1 と Q2 間の磁場分布を測定した.

アラインメント終了後, 磁場分布測定を行った. 3 軸ホールプローブをビーム軸方向に 20 mm ピッチで移動させながら, 範囲で測定した. 測定ラインはの 29 ラインとした. 励磁電流は D 磁石 1140 A, Q2 磁石 363 A, Q1 磁石 585 A を基準とし, 0, −10, −20, −25 %の 4 ケースとした.

4.3.3 Q2 磁石と D 磁石 (磁場分布測定)

Q1 磁石と Q2 磁石の組合せ測定が終わった後, Q1 磁石を撤去し, D 磁石と Q2 磁石を励磁させて, Q2 磁石と D 磁石の間の磁場分布測定を行った. Q1 磁石があると 3 軸ホールプローブが測定場所に届かないため, Q1 磁石は Q2 磁石と D 磁石の間の磁場分布に影響を及ぼさないであろうと考え撤去した.

アラインメント終了後, 磁場分布測定を行った. 3 軸ホールプローブをビーム方向に 20 mm ピッチで移動させながら, 測定した. 測定ラインは 36 ラインとした. 励磁電流は,D 磁石 1140 A, Q2 磁石 363 A を基準とし, +10, 0, −10, −20 %の 4 ケースとした.

第5章　磁場解析

この章ではそれぞれの測定で得られたデータを実際の磁場マップに変換するにあたって, 補正や磁場のチェックを述べる.

5.1　Q1, Q2 磁石

ホールプローブはホール効果によって生じた hall 電圧を測定することで磁場の大きさを間接的に測定することができる. Q 磁石の単体測定にもちいたホールプローブは hall 電圧と磁場の大きさの関係を求めてやる必要があり, そのため素性のよい偏向電磁石のギャップの中心に NMR とホールプローブを並べて設置し (図 5.1), hall 電圧と磁場のデータを採取した. なお電磁石は基準面でレベルを出しておき, ホール素子角度は磁場のデータが最大となるよう調節した.

得られたデータをプロットした結果が図 5.2 であり, このデータに対して直線を fit した. 誤差が最大で 2×10^{-3} であり, 要求精度を満たすのでこの fit した関数を用いて, hall 電圧を磁場の大きさに変換することとする.

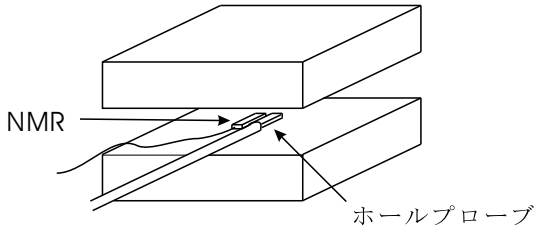

図 5.1: NMR によるホールプローブ校正

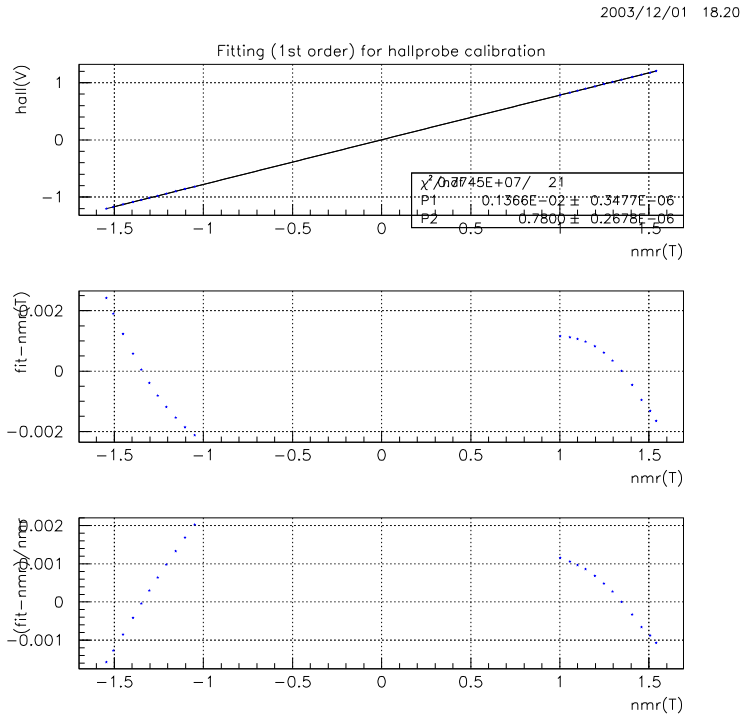

図 5.2: NMR vs ホールプローブ
上図は横軸に NMR で測定した磁場 [T], 縦軸に hall 電圧 [V] をとり測定データをプロットし, 直線で fit した図である. 中図, 下図は横軸に NMR で測定した磁場 [T] をとり, 縦軸に fit により求めた関数と測定データとの残差 [T], 割合をとったものである.

5.1.1 測定軸とプローブの傾き

四重極磁石の磁場は, 磁極中心を通る鉛直断面においては, 理想的には

$$B_x = G \cdot y \tag{5.1}$$

$$B_y = G \cdot x \tag{5.2}$$

$$B_z = 0 \tag{5.3}$$

と表すことができる. ここで,B_x, B_y, B_z はそれぞれ各軸方向の磁場成分 [T] であり, G は磁場勾配 [T/m] を示している. この理想的な磁場と測定した磁場のデータを比べることにより, 磁場測定上でのシステマティックなエラーを見つけることができれば, 事前に補正をすることができる.

図 5.3 は, Q1 磁石の中心 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ における, 時間と B_y, 温度の変化を表している. この図より, 測定した $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ での B_y は時間によって変動している. このことは, プローブの軸が測定の最中に x 方向に対して変移している

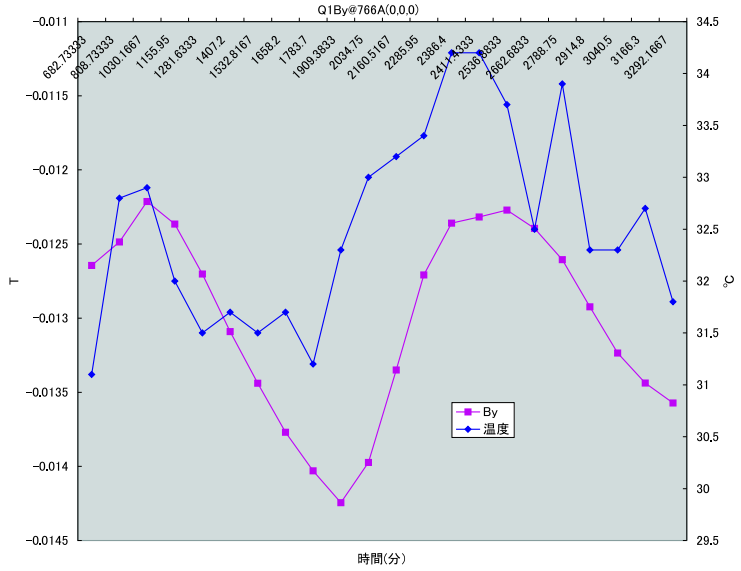

図 5.3: Q1 磁石の (x,y,z)=(0,0,0) における磁場と温度の相関. Q1 磁石, 励時電流 766 A B_y のデータ. 磁場と温度との相関が見える.

と考えることができる. なぜなら温度によって磁場の大きさが変化していると考えるには変化が大きすぎるし, 定点測定の値は変化が見えないからである.

また, 温度との相関が見えるため, 各磁場分布測定での $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ における測定磁場に対して, 温度を横軸, 測定された磁場が測定軸のずれからくるものと仮定した場合の (0,0,0) からのずれを縦軸としてプロットした (図 5.4~5.7). これらの図からは, はっきりとした相関は見て取ることができない. しかし, 中心からのずれが大きいところで 2 mm 程ずれているものもあり, 無視できない. 磁場分布測定の際,Q1 磁石, Q2 磁石とも 4 ラインに一度, $(x, y) = (0, 0)$ のラインを測定していたので, 各 (0,0) のラインの磁場の値が 0[T] となるよう, B_x の場合は y 軸方向へ, B_y の場合は x 軸方向へそれぞれ移動していたこととし, 各データを補正した.

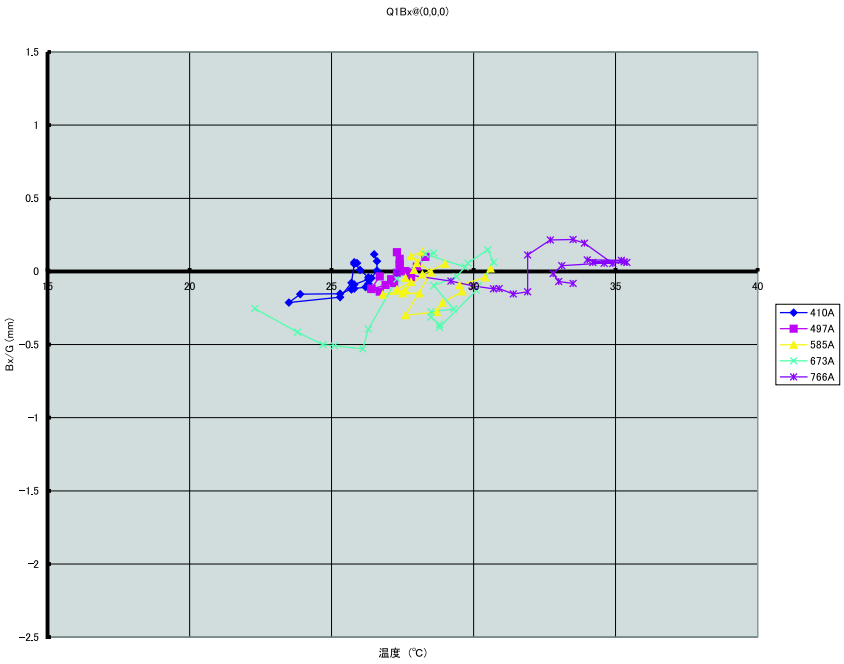

図 5.4: Q1 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と y 軸方向のずれ. 横軸は温度 , 縦軸は B_x を G で割って求めた y 軸方向のずれ (mm) をとった.

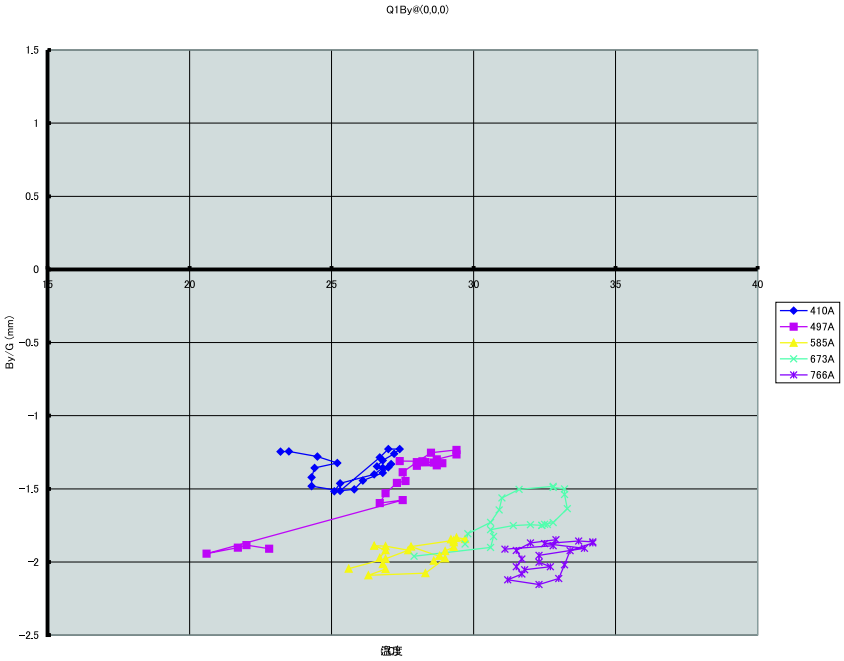

図 5.5: Q1 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と x 軸方向のずれ. 横軸は温度 , 縦軸は B_y を G で割って求めた x 軸方向のずれ (mm) をとった.

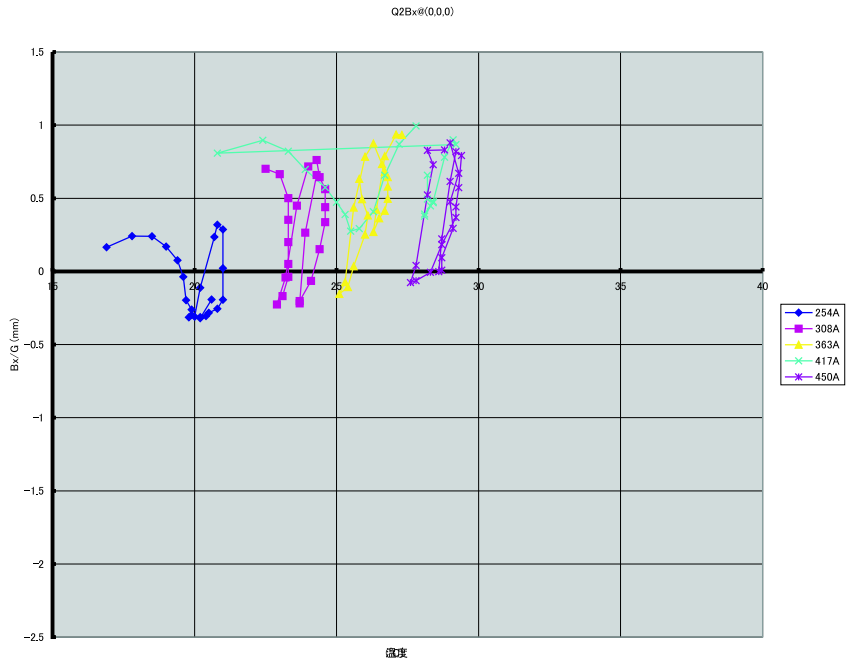

図 5.6: Q2 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と y 軸方向のずれ. 横軸は温度 , 縦軸は B_x を G で割って求めた y 軸方向のずれ (mm) をとった.

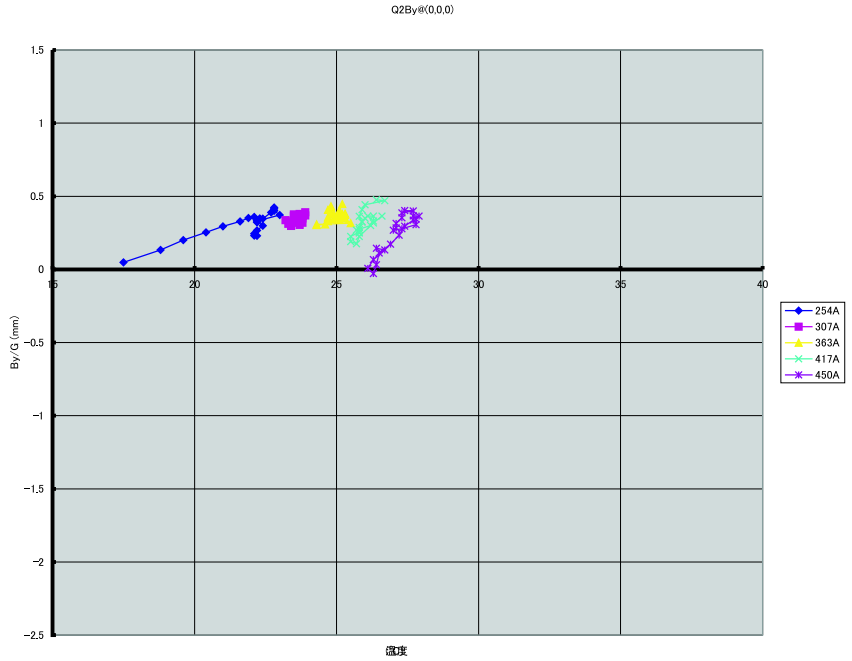

図 5.7: Q2 磁石 (x,y.z)=(0,0,0) における温度と x 軸方向のずれ. 横軸は温度 , 縦軸は B_y を G で割って求めた x 軸方向のずれ (mm) をとった.

次に, 図 5.9 は, Q1 磁石 $(y, z) = (60\ \mathrm{mm}, 0)$ における励磁電流が 585 A の時の, B_x をプロットしてある. 横軸は x, 縦軸は B_x である. x と B_x の間に明らかな一次の相関が見て取れる. 理想的な四重極磁石であれば, B_x は 5.1 式から, y によってのみ変化し, x にはよらないはずである.

このことは B_x を測定しているホールプローブが, y 軸方向の磁場を感じて, x が変化するにつれて測定値が変化したと考えられれる. B_y 測定してから, B_x 測定に移る際に, プローブを 90 度回転させたが, きちんとした精度で回転させる事ができなかったために生じたと思われる. 同様に, 各測定においてもプローブが測定したい磁場に対して, どの程度回転していたかをきちんと見積もるために次式で, それぞれの測定磁場に対し fitting を行った.

$$
\begin{aligned}
\text{測定}\, B_x &= B_x \cdot \cos\theta + B_y \cdot \sin\theta && (5.4)\\
&= G \cdot (y \cdot \cos\theta + x \cdot \sin\theta) && (5.5)\\
\text{測定}\, B_y &= B_y \cdot \cos\phi + B_x \cdot \sin\phi && (5.6)\\
&= G \cdot (x \cdot \cos\phi + y \cdot \sin\phi) && (5.7)
\end{aligned}
$$

ここで測定 B_x, 測定 B_y は実際に測定したデータであり, B_x, B_y は本来の磁石の磁場, x, y は測定座標, G は各磁石の磁場勾配である. fitting には, 式 5.5, 5.7 を用い, G と θ, もしくは G と ϕ をパラメータとした. 測定データはそれぞれ磁石の中心付近 $(-40 \leq z \leq 40)$ の磁場を用いた.

fiting の結果を表 5.1 に示す. fitting の際エラーは, 位置にして 500μm とし, これに磁場勾配を乗じた値を測定磁場のエラーとし fitting を行った.

表 5.1: 式 5.5 および式 5.7 に対する各磁石の fitting 結果

磁石		G (T/m)	θ (mrad)	ϕ (mrad)
Q1 585 A	測定 B_x	5.7581 ± 0.0046	-35.04 ± 0.15	
	測定 B_y	5.7713 ± 0.0020		-0.39 ± 0.46
Q2 363 A	測定 B_x	3.4113 ± 0.0015	83.66 ± 0.13	
	測定 B_y	3.4701 ± 0.0004		-6.50 ± 0.42

目標としている角度精度は 1 mrad 以下であり, 角度の誤差は 1 mrad 以下となっていることから, 求めた角度からデータを補正することで目標としている角度精度を達成できる. よってこの θ, ϕ を用いてデータの補正を行った. データの補正の際は, 式 5.4 と式 5.6 を用いて 2 式より G を消去した以下の 2 式を用いた. fitting は理想的な Q 磁石であると仮定して, G をパラメータの 1 つとしたが, 表 5.1 からも分かるように, fitting によって求めた G は同じ磁石の Bx と B_y でも異った値になっている. よってこの値を用い補正を行わず, 下式のように G を用いないで 測

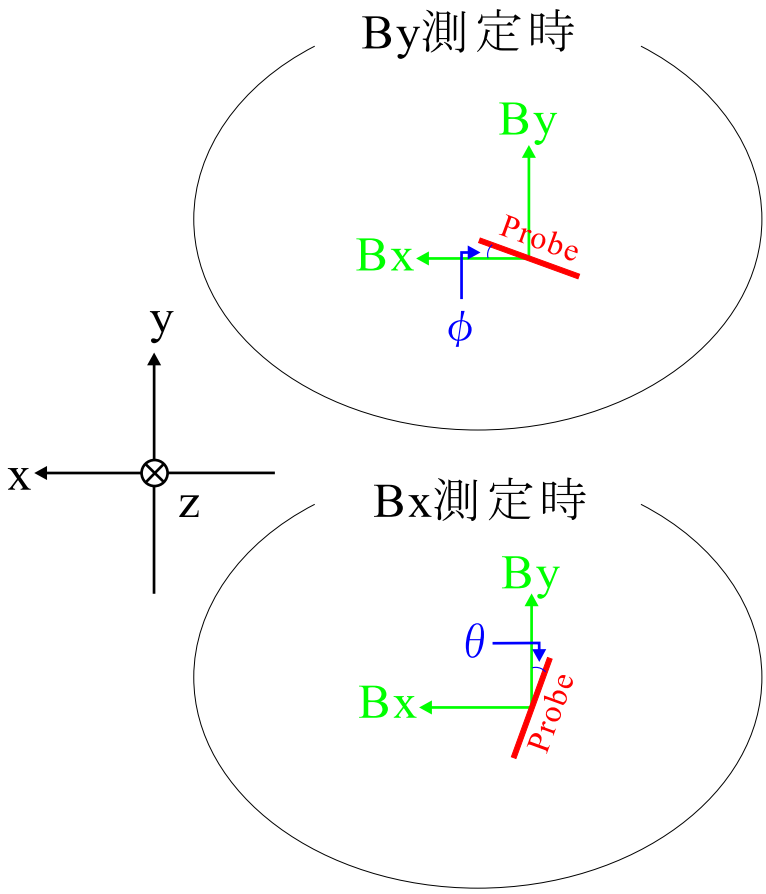

図 5.8: Q 磁石測定時の軸と角度

定 B_x, 測定 B_y それぞれの値を相互に用いることにした.

$$B_x = \frac{\text{測定 } B_x \cdot \cos\phi - \text{測定 } B_y \cdot \sin\theta}{\cos(\theta+\phi)} \tag{5.8}$$

$$B_y = \frac{\text{測定 } B_y \cdot \cos\theta - \text{測定 } B_x \cdot \sin\phi}{\cos(\theta+\phi)} \tag{5.9}$$

補正したデータと TOSCA のデータ, 及び補正前のデータを比較したのが図 5.9 である. 図の様に, TOSCA の値に近付いている. 完全に一致はしていないが, これは磁石固有の磁場形状であると考えられる.

次に補正前, 補正後それぞれの磁場データを 2 次元 3 次自然スプライン関数により補間し, divergence を計算した（図 5.10）. 補正前のデータでは, 0.2 T/m 付近にピークをもっているが, 補正後のデータは 0 T/m 付近にピークを持ち, 補正がうまくいっていることがわかる.

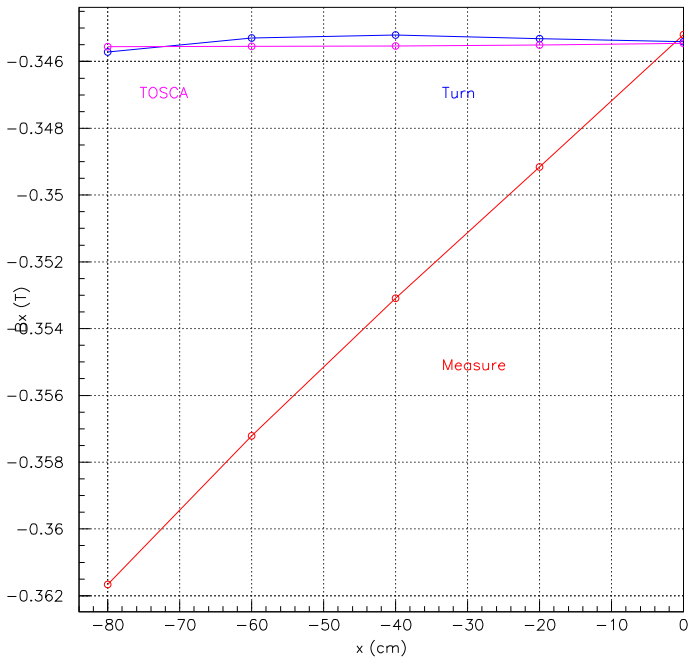

図 5.9: 回転補正前後の比較. Q1 585 A (y,z)=(60,0) の B_x について, 測定データと回転補正後のデータと TOSCA のデータをプロットした. 横軸に x (cm), 縦軸に B_x (T) をとった.

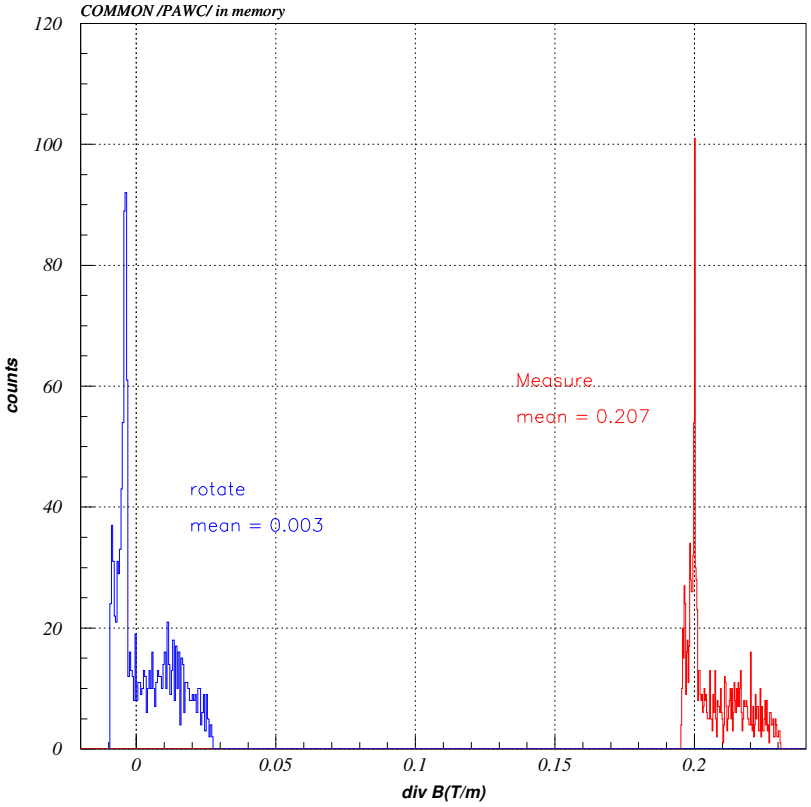

図 5.10: Q1 磁石の補正前後の divergence. 横軸は divergence B (T/m) 縦軸は counts 数

第6章　まとめ

2004年末から米国ジェファーソン研究所（Jlab）において（$e, e'K^+$）反応によるΛハイパー核分光実験（E01−011）を開始すべく準備を進めている．従来精力的に行われてきたK, π中間子ビームを用いた実験に比べ, 散乱電子に起因するバックグラウンドが多い, ハイパー核の生成断面積が小さい等, 実験的には難しいながらも, 良質の一次ビームである電子線を使うことによりこれまでは不可能だったハイパー核の反応分光において, sub MeV のエネルギー分解能を達成することができると期待される．

（$e, e'K^+$）反応によるΛハイパー核分光は既に 2000年に最初の実験E89-009がJlabにおいて成功裏に行われたが, この際, 実験の分解能を制限したのは既存の K 中間子スペクトロメータであった．E01-011実験では（$e, e'K^+$）反応に特化した新しい K 中間子スペクトロメータ（High resolution Kaon Spectrometer, HKS）を導入し, また散乱電子スペクトロメータの配置を最適化することにより, E89-009実験に比べて分解能で2倍（400 keV FWHM）, ハイパー核収量60倍, signal to noise ratio 10倍の向上を目指している．

この新しい実験で最も重要なHKS磁石系は, 2つの四重極磁石（Q1, Q2）と双極磁石（D）の3つの常伝導磁石から構成されている．最初のQ1磁石では, 荷電粒子を鉛直方向に収束させ, 次のQ2磁石で水平方向に収束させる．そしてD磁石で1.2GeV/cの荷電粒子を中心軌道で70度水平偏向させる．HKSは, 1.2 GeV/c ±12.5%の運動量領域において, 運動量分解能（Δp/p）が2×10^{-4}, 立体角は, 前方に設置するスプリッター磁石と併せて ∼16 msr という, 高分解能と大立体角を両立さることを目標とし設計した．

目標とする運動量分解能2×10^{-4}を達成する為に, 各磁石の磁場測定へ要求される精度をモンテカルロシュミレータ GEANT3を用い求めた．

この要求精度を達成するためには精密磁場測定が必要不可欠であり, 2002年10月から200 3年8月にかけて, HKSを作製した三菱電機（株）電力・産業システム事業所において精密磁場測定を行った．Q1, Q2 磁石に関しては, 一軸ホールプローブを用いた測定より, 三次元磁場マッピングを行なった．D磁石の測定の為には, 3つのホールプローブをそれぞれ垂直に配置した三軸ホールプローブを製作した．この3軸プローブを用いて D 磁石磁場測定を行なった．

また, Q1-Q2-D, もしくは, Q2-D を同時に励磁して Q1-Q2 間, Q2-D 間の磁場干渉についても測定を行ない, 励磁パターンについてのデータを得た．

Q磁石に対して, 測定したデータに対して軸のずれ, 角度のずれを補正し, より

実際の磁石の磁場に近づける事ができた.

参考文献

[1] M.Danysz, et al. *Phil.Mag.*, No. 44, p. 348, 1953.

[2] W.Bruckner, et al. *Phys.Lett.*, Vol. 55 B, No.1 p.107, 1975.

[3] G.C.Bonazzola, et al. *Phys.Rev.Lett.*, Vol. 34 ,p.683, 1975.

[4] W.Bruckner, et al. *Phys.Lett.*, Vol. 62 B, No. 4, p.481, 1976.

[5] W.Bruckner, et al. *Phys.Lett.*, Vol. 79 B, No. 1,2, p.157, 1978.

[6] C.Milner, et al. *Phys.Rev.Lett.*, No. 54, p.1237, 1985.

[7] H.H.Pile, et al. *Phys.Rev.Lett.*, No. 66, p.2585, 1991.

[8] W.Bruckner, et al. *Nucl.Phys.A*, Vol. 534 No. 3,4, p.478, 1991.

[9] T.Miyoshi, et al. *Phys.Rev.Lett.*, Vol. 90, 232502, 2003.

[10] M.Sotona and S.Frullai. *Prog.Ther.Phys.Suppl.*, No. 117, p. 151, 1994.

謝辞

本稿をまとめるにあたり, 多くの方々に御助言・御指導・暖かい励ましの言葉をいただきました. 皆様方に心より感謝申し上げます.

非常に興味深い研究のテーマを与えて下さった, 橋本治教授. 研究以外にも日頃から身体の事などを気遣っていただき, 暖かく見守っていただきました. どうもありがとうございました.

指導教官の中村哲助教授には, 研究のみならず私生活の相談にも親身になってのっていただきました. 研究に際しては, いろいろ御心配や御迷惑をおかけしたにもかかわらず, 最後まで見捨てないで御指導していただきました. 就職について迷っている際いただいた “自分で選択した道は, 間違いであるはずがない” という言葉は, これからの私の人生において, 忘れられない言葉になりました. 本当にどうもありがとうございました.

藤井優博士には, 論文執筆の際非常にお世話になりました. 質問にいくと, いつも快く教えて下さりました. 論文発表の際は, 発表数分前までも指導していただき, なんとか発表をすることができましたのも藤井氏のおかげです. どうもありがとうございました. 田村裕和助教授には, わかりやすい言葉で物理を教えていただきました. 普段のセミナーなどの難しい話についていけない私には, 田村助教授に教えていただける機会があるととてもうれしかったです. どうもありがとうございました. 高橋俊行博士には, プログラミングに関していろいろ教えていただきました. 高橋氏の研究に打ち込まれている姿勢には感服しました. これから先, 仕事をしていく上で見習わせていただこうと思います. どうもありがとうございました.

三好敏喜氏には, 実験やプログラミングについていろいろ教えていただきました. 同じ宮城出身ということもあり, いろいろお話させていただきました. どうもありがとうございました. 岡安雄一氏には, 研究や日常生活のいろいろな場面でお世話になりました. いつも暖かい励ましの言葉をいただきました. どうもありがとうございました. 渡辺崇臣氏, 鵜養美冬氏, 亀岡覚氏, 塚田暁氏, 三浦勇介氏には, プログラミングの方法や, 解析手法などを教えていただきました. どうもありがとうございました. 山本洋輔氏からは, ノギスの使い方から, CAD の書き方までものづくりに対するいろいろな事を教わりました. 徹夜で CAD の製図を手伝っていただいたことはいまでも忘れません. どうもありがとうございました.

野村洋氏には, 同学年ながらも物理に関していろいろ教えていただきました. 松村彰彦氏とは同室で, 日頃からお世話になりました. なにかの時にすぐ相談できる頼もしい存在でした. 山内大和氏の何事にも前向で楽観的な姿勢は, 非常に教わるところがありました. 本多大介氏には, 明るい笑顔でいつも励ましていただきました. 私が論文執筆に行き詰まって, 意気消沈している際, 同じ修士 2 年の皆様によって何度も励まされ, 支えていただきました. こうして論文をまとめることができたのも, 皆様のおかげです. 本当にありがとうございました. これからもよろしくお

願いします.

大谷篤氏, 加藤文章氏, 近岳志氏, 江島光彦氏には, 本論文の作図を手伝っていただいたり, 励ましの言葉をいただきました. どうもありがとうございました. 加藤守夫氏, 川村直子氏, 千賀信幸氏には普段の学生生活を支えていただきました. どうもありがとうございました.

皆様方に支えられて, なんとか修士論文をまとめることができました. 橋本研究室の皆様方に心より感謝申し上げます. 本当にどうもありがとうございました.

最後に, いつもやさしい笑顔で私を励ましてくれた両親に深く感謝いたします.