

修士論文
E16 実験におけるスペクトロメーター電磁石の磁場
測定

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室

藤井涼平



2020年1月29日

概要

核子を構成するクォークは数 MeV 程度のヒッグス質量しかもたないのに対し、核子の質量は 1GeV 程度もある。この大きな質量の差を説明する機構の 1 つが、カイラル対称性の破れである。高温、または高密度中では、カイラル対称性が回復すると予想されている。そのため、高密度下では物質は質量が減少されることが予想される。

J-PARC で行われる E16 実験では、炭素などの標的に 30GeV の陽子を当てることで ρ , ω , ϕ 中間子などのベクター中間子を生成する。これらのベクター中間子は、ある分岐比でレプトン対へ崩壊する。レプトンは強い相互作用をしないため、崩壊したときの運動量を保ったまま検出器に到達する。そのため、レプトン対の運動量から不変質量を再構成することで、ベクター中間子が崩壊したときの質量を直接測定することができる。ベクター中間子が標的の原子核中で崩壊したときは、不変質量は真空中に比べて小さくなることが予想されるが、実際の実験では原子核中で崩壊したベクター中間子と、原子核外で崩壊したベクター中間子の質量スペクトルを重ね合わせたものが得られる。質量の減少の影響は、先行研究の結果によれば ϕ 中間子で 3.4% 程度と小さく、有限密度における質量スペクトル測定のためには、高い質量分解能が必要となる。E16 実験で目標とする質量分解能は 6.4MeV 程度である。

レプトンの運動量は、磁場によりその軌道を曲げ、位置分解能のよい検出器で位置を検出することで得られる。高い質量分解能を達成するためには、磁場分布を正確に知る必要がある。E16 実験で要求される質量分解能を達成するためには、粒子の軌道変化に寄与する $\int \mathbf{B} \times d\mathbf{l}$ の誤差が 0.1% 以内でなければならないことが、過去のシミュレーションからわかっている。粒子の飛跡を解析するために、検出器のある領域における磁場を計算する必要があるが、そのときに用いる鉄の BH 曲線は 2T を超える領域では実測することが難しく、実験で使われる電磁石の BH 曲線にもその領域のデータは存在しない。また、スペクトロメーター電磁石付近には鉄遮蔽体や他の実験で用いられる電磁石が配置されている。このような状況をふまえ、実際に用いる電磁石ヨークの内外で磁場を実測し、実測値に合うように BH 曲線等を最適化して計算磁場を作ることとした。本研究では、電磁石のつくる磁場のうち位置分解能の高い検出器が置かれる半径 700mm 以内の領域を 0.1% の精度を目指して測定し、それ以遠の半径 1500mm 以内の領域の一部を 1% の精度を目指して測定した。本論文では、測定手法、空間的な補正パラメータの評価について説明した上で、測定磁場の整合性評価と、補完法など計算磁場実装に向けた戦略を述べる。解析の結果、今回測定した磁場をもとに計算した $\int B dl$ の精度は 0.13% 程度であることがわかつ

た。これは、目標にほぼ到達していると言える。これにより、将来的に BH 曲線を最適化して実用的な計算磁場を作成することができると考えている。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	J-PARC E16 実験の概要	2
1.3	磁場測定	7
第 2 章	測定計画	8
2.1	目標とする運動量分解能と Bdl	8
2.2	Bdl の精度に寄与する要素	8
2.3	磁石座標系	9
2.4	測定領域の決定	9
2.5	測定メッシュサイズの決定	12
2.6	測定時間の決定	13
2.7	FM 電磁石と磁場測定機	14
2.8	磁場が安定するまでの時間	22
2.9	測定メッシュの生成	23
2.10	アクチュエーターの駆動	24
第 3 章	測定器の測定	25
3.1	プローブホルダー位置の測定	25
3.2	プローブホルダー角度の測定	35
第 4 章	プローブの校正	39
4.1	オフセットの補正	39
4.2	プローブ位置の校正	40
4.3	プローブ角度の校正	46

第 5 章	測定結果および考察	54
5.1	電流変動の補正	54
5.2	再現性の確認	55
5.3	同一測定点のデータ取り扱い	56
5.4	ケガキ位置のアクチュエーター座標から磁石座標系への変換	57
5.5	ケガキの座標からプローブの座標への変換	60
5.6	ホールプローブのゼロ点補正	61
5.7	プローブ角度の補正	61
5.8	オーバーラップ領域の比較とパラメーターの最適化	63
5.9	考察	85
5.10	今後の課題	92
第 6 章	結論	100
	参考文献	104

第 1 章

序論

1.1 背景

核子は 3 つの構成子クォークからなる。核子を構成する u,d クォークの質量はそれぞれ 3,5MeV 程度なのに対し、核子は 1GeV 程度の質量をもつ。この大きな質量の差を説明する機構の 1 つが、カイラル対称性の自発的対称性の破れである。高温、または高密度の物質内では、カイラル対称性が回復すると期待されている。クォーク凝縮 $\langle q\bar{q} \rangle$ はカイラル相転移の秩序変数であり、温度については相転移温度を超えると急激に 0 に近づき、密度についてはほぼ密度に比例する形で減少すると予想されている。 $\langle q\bar{q} \rangle$ は直接観測できる物理量ではないが、QCD 和則によってハドロンの質量と結びつけることができる [6]。

レプトン対による有限密度の効果については、先行研究 (KEK - PS E325 実験) において調べられた。この実験では、12GeV 陽子ビームを原子核標的に照射し、生成した ρ 、 ω 、 ϕ 中間子のレプトン対への崩壊を測定した。その結果、速度の小さい中間子に対して、大きな原子核標的の場合にのみ通常の質量スペクトラムでは説明できないエンハンスが見された。これは、原子核内部で崩壊して質量が変化した中間子による寄与であると考えられる [2]。

質量を測定するハドロンとしては、レプトン対に崩壊するベクター中間子が適している。レプトンは電弱相互作用しかしないため、レプトンに崩壊した後は原子核中で強い相互作用をしない。そのため、レプトンはハドロンが崩壊した直後の運動量を保ったまま検出器に到達する。従って、レプトンの運動量を測定することで不変質量法によってハドロンが崩壊したときの質量を求めることができる。

1.2 J-PARC E16 実験の概要

J-PARC E16 実験では、ベクター中間子である ρ , ω , ϕ の原子核中での質量を精密に測定することを目標としている。特に ϕ 中間子は質量スペクトルの幅が狭く、同じ質量領域に質量の粒子がないため有限密度中での質量の変化に対して不定性の小さいプローブとなる。そのため、ベクトル中間子の中でも特に ϕ の質量を精密に求めることが主目的となる。目標とする ϕ 中間子の質量分解能は 6.4MeV である [15]。

2020 年 2 月に、E16 実験を行う高運動量ビームラインが、J-PARC ハドロン実験施設に完成する。実験は 3 段階で行われ、まず 2 月からビームラインと検出器のコミッショニングを行う Run0 と呼ばれるプログラムを実施する予定となっている。その後、2020 年秋に Run1 として飛跡検出器用のパイロットデータを含む物理データの取得、その後検出器を強化して最終的な Run2 を行う予定である。

1.2.1 セットアップ

E16 実験で用いられるビームラインや主な検出器などについて述べる。E16 実験では、磁石の中心から順番に位置検出器の GEM トラッカー、粒子識別検出器の Hadron Blind Detector(HBD)、鉛ガラス (LG) カロリメーターが置かれている。その配置図を図 1.2.1, 1.2.2 に示す。

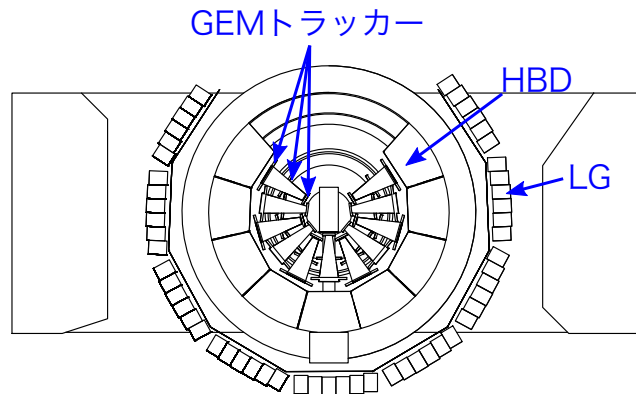


図 1.2.1 電磁石を上から見た図。図の上がビームの上流側。内側から順番に GEM トラッカー、HBD、LG が設置されている。

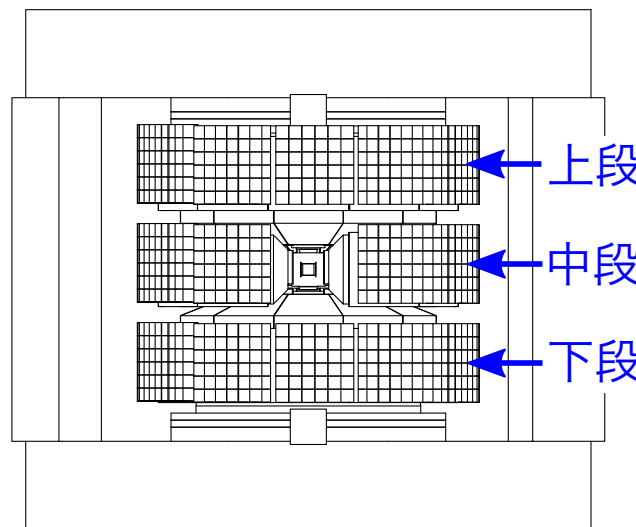


図 1.2.2 電磁石をビーム下流側から見た図。

検出器は、ビーム軸に対して前方 0° から後方 120° までの方位角を覆っている。検出器は上段、中段、下段の3つが設置される。上段の検出器は天頂角 $+45^\circ$ から $+15^\circ$ まで、中段は $+15^\circ$ から -15° まで、下段は -15° から -45° までを覆っている。このうち、まず中段の検出器を製作・インストールして Run0 および Run1 を実施する。その後、上段、下段の検出器を増強して最終的な収量を得る計画である。

次に、これらの検出器の概要と、E16 実験を行うビームライン、電磁石について述べる。

ビームライン

E16 実験では、メインリング (MR) から 30GeV の陽子を直接取り出した High-p ビームラインで実施する。ビームの強度は $10^{10}/\text{spill}$, $1\text{spill}=2$ 秒である [4]。

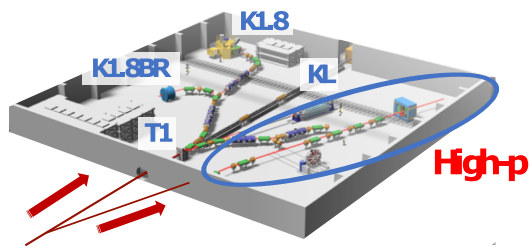


図 1.2.3 High-p ビームラインの俯瞰図 [5][15]

標的

ベクトル中間子の生成は炭化水素や炭素、鉛などの原子核標的に陽子ビームを当てることで行われる。標的の原子核半径によってベクトル中間子の質量スペクトルが変化することを確認するため、ポリエチレン、炭素、鉛の標的を用いる。

FM 電磁石

スペクトロメータ電磁石として、FM 電磁石と呼ばれる双極電磁石を用いる。形状は図 1.2.4, 1.2.4, 1.2.4 に示すとおりである。飛跡検出器が置かれる領域に強い磁場を発生するような構成となっている。GEM トラッカーによる位置測定により粒子の運動量を決定する。コイルは 168 巻で、印可電流は 2450 A である。中心での磁束密度はおよそ 17000 Gauss(以下、G) になる。今回は Run0 において検出器が置かれる領域の磁場測定をおこなった。なお、電磁石の前後には鉄製の遮蔽体と、他の実験で用いられる SKS 電磁石が置かれている。

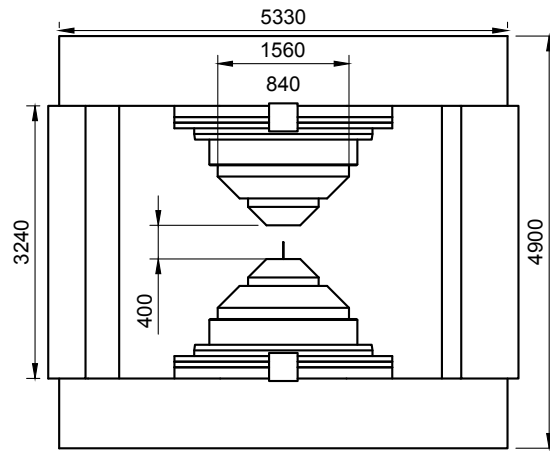


図 1.2.4 FM 電磁石をビーム方向から見た図

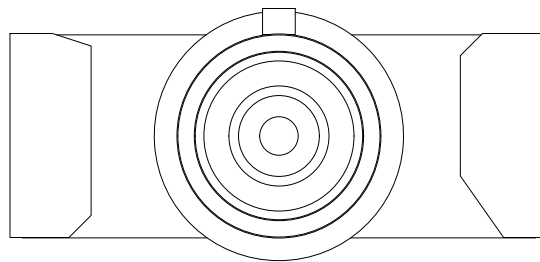


図 1.2.5 上から見た図

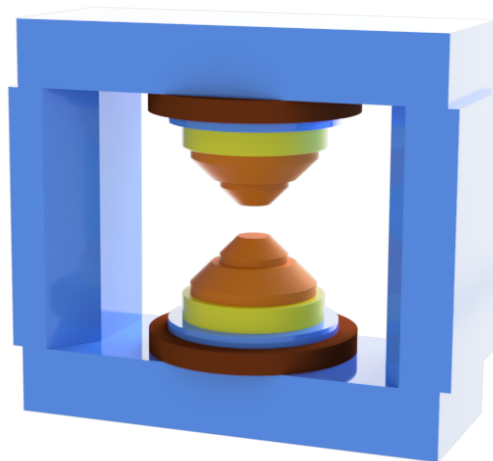


図 1.2.6 斜めから見た図

GEM トラッカー

GEM は飛跡検出器の一種で、微細な穴が規則的に開けられ、 CF_4 ガスが詰められている。穴付近に強い電場が形成されるため、穴の近くを通る粒子が加速され、ガスを電離させて雪崩増幅を起こす。位置分解能は水平方向に $100\mu\text{m}$ 、垂直方向に $700\mu\text{m}$ である [15]。磁石の中心から半径 200mm 、 400mm 、 600mm の位置に 3 枚の GEM が置かれている。GEM トラッカーの高さ方向の広がり、中段が $\pm 15^\circ$ 、上段は 15° から 45° まで、下段は -45° から -15° までとなっている。

磁場分布が既知であれば、初期の運動量を仮定し、ルンゲクッタ法で粒子の軌道を求め、その軌道が GEM を通過した点を再現するよう運動量を修正するイテレーションを行うことで、位置情報から電子の運動量を求めることができる。

HBD

実験中はベクトル中間子以外の π 中間子なども多数生成される。それらのイベントは HBD(Hadron Blind Detector) で $1/100$ まで除去される [3]。HBD は CF_4 ガスが詰められたガスチェレンコフ検出器である。チェレンコフ光は粒子の速さが物質中での光速を超えないと発生しない。E16 実験において取得する電子の運動量領域は 0.4 から $2.5\text{GeV}/c$ であり、この領域では適切にインデックスを設定したガスを用いることで、しきい値型の粒子識別検出器として用いる。特に、HBD はチェレンコフ光を光電効果で電子に変換し、電子増幅機能を備えていることが大きな特徴である。

LG カロリメーター

LG(鉛ガラス)カロリメーターは鉛ガラスのブロックに光電子増倍管をとりつけたもので、大きい原子番号 Z をもつため荷電粒子はクーロン力により強く減速され、制動放射を起こす。そのため、効率的に電磁シャワーを起こすことができる。シャワーによってできた電子がつくるチェレンコフ光を光電子増倍管で検出する。荷電粒子が制動放射を起こす断面積は $\sigma \propto m^{-2}$ なので、電子よりもはるかに質量の大きい π 中間子はシャワーを作りにくく、光量が弱い。このことを利用して π 中間子と電子を識別できる。LG カロリメーター単体で、 π 中間子イベントを $4/100$ まで除去できる。HBD とあわせることで 4×10^{-4} まで除去することができる [3]。

1.3 磁場測定

本論文では、正確な運動量測定のために重要となる磁場測定について述べる。2章では、要求精度に基づいた磁場測定の計画についてまず説明する。3章では、測定磁場を磁石座標系における磁場として与える際に重要となる測量結果について述べる。さらに、4章で磁場測定に用いたホールプローブの校正手法とその結果について述べる。5章では、測定した磁場の評価と考察を行い、6章で結論を述べる。

第2章

測定計画

2.1 目標とする運動量分解能と Bdl

E16 実験では、 ϕ 中間子の質量の分解能として $6.4\text{MeV}/c$ を目指している。過去に行われたシミュレーションによれば、GEM トラッカーの位置分解能なども考慮して、これを達成するために粒子の感じる $\int \mathbf{B} \times d\mathbf{l}$ (以下、単に Bdl と書く) の精度を 0.1% 以下にする必要がある。 \mathbf{B} を 0.1% の精度で測定できれば、Bdl の精度は $\leq 0.1\%$ の精度となる^{†1}。

2.2 Bdl の精度に寄与する要素

Bdl の精度には、以下の要素が寄与する:

要素	影響
ホール素子の位置	0.036% / 0.2mm[9]
ホール素子の角度 ^{†2}	0.087% / 0.05°
メッシュ間隔 (2.5 節参照)	30mm のとき 0.02%
ホール素子の絶対精度 (2.7.5 節参照)	0.06% から 0.1% ^{†3}
電流変動モニター用ホール素子の絶対精度	0.075%
合計	0.14% - 0.16%

^{†1} 粒子の進行方向と同じ方向の磁場成分は粒子の軌道に影響を与えないため、Bdl の誤差に寄与しない。そのため、Bdl の誤差は磁場自体の誤差以下になる。

^{†2} $\sin 0.05^\circ = 0.087/100$

^{†3} 範囲の意味については 2.7.5 節を参照

0.1% をわずかに超えているが、位置 0.02mm、角度 0.05° は通常の測量、およびアクチュエーターの再現性の限界であることから、上記の位置、角度精度を目標に測定することにした。

2.3 磁石座標系

FM 電磁石を基準に、ビーム軸方向を z 軸として、 x, y 軸を図 2.3.1 に示すようにとる。

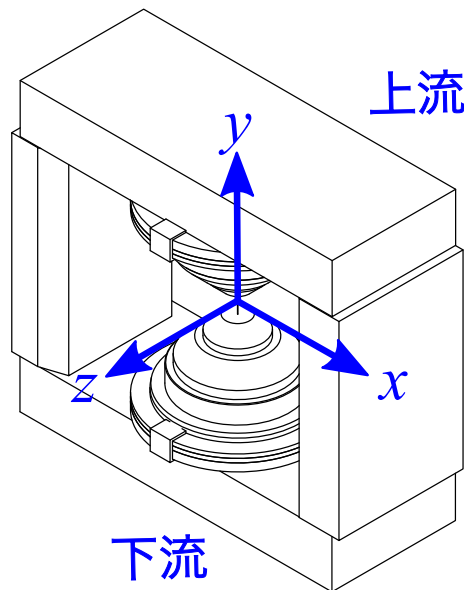


図 2.3.1 磁石座標系

電磁石の磁極にはそれぞれ $y = 0$ 平面、 $x = 0$ 平面、 $z = 0$ 平面を示すケガキがつけられている。水平、垂直方向の角度を測定するためのセオドライトと、鉛直方向の高さを測定するためのレベルを使うことにより、磁石座標の原点および各軸を出すことができる。以降、 $R = \sqrt{x^2 + z^2}$ を用いることがある。

2.4 測定領域の決定

粒子の運動量の決定のために高い精度の磁場マップが必要なのは、GEM トラッカーが置かれている $R \leq 600\text{mm}$ の領域のみである。 $R \geq 600\text{mm}$ には位置に鋭敏でない粒子識別検出器が置かれるが、あまりにも磁場マップの精度が悪いと粒子に対応する検出器の読み出しパッドを間違えるなどの問題が起るため、低精度で測定しておく必要がある。そこで、GEM トラッカーが置かれている高精度の測定が必要な FINE 領域と、それ以遠の

COARSE 領域を、図 2.4.1, 2.4.2 のように定める。

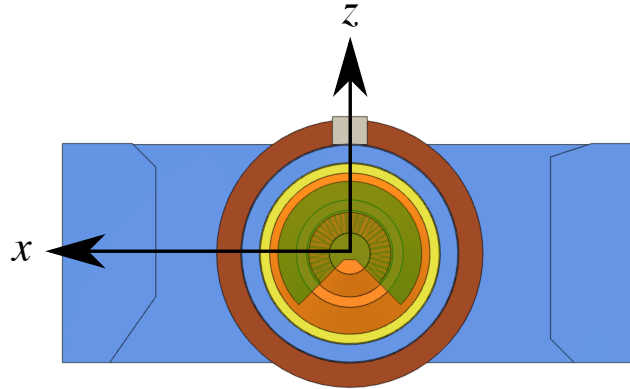


図 2.4.1 測定領域 (FINE), 図の緑色部分

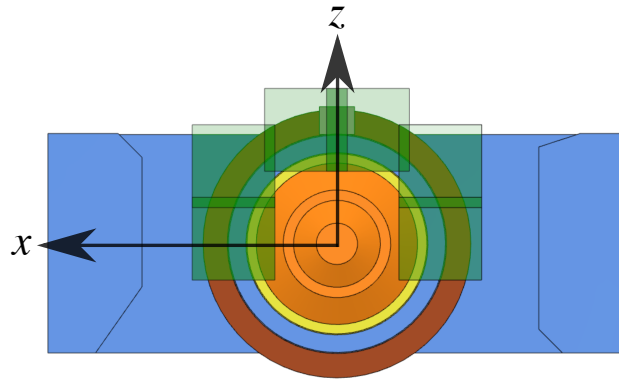


図 2.4.2 測定領域 (COARSE), 図の緑色部分

飛跡検出器は後方 120° までしか置かれなため、FINE 領域もこれに対応して $\pm 120^\circ$ の方位角をカバーしている。COARSE 領域は粒子識別検出器が置かれる領域に対応する。磁場測定はこの両領域で実施した。しかし、本論文では磁場マップが本質的に重要となる FINE 領域についてのみ述べることにする。今回の測定では、実験の初段階である Run0 および Run1 で検出器が置かれる中段の領域のみを測定した。具体的には、 $y = 600 \times \sin(\pm 15^\circ) = \pm 155\text{mm}$ の範囲にあたる。測定時間の制約もあり、序盤に測定した $x > 0$ の領域では広めに $-400 \leq y \leq 400\text{mm}$ 、終盤に測定した $x \leq 0$ の領域では $-260 \leq y \leq 260$ の領域を測定した。

今回の実験では、電動アクチュエーター (2.7.8 節参照) のストロークは 800mm のものを使用した。このストロークでは、FINE 領域すべてを一度に測定することはできない。そのため、FINE 領域をさらに 4 つに分け、測定器を置き直すことで FINE の全領域を測定した。図 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 に、4 つに分けた FINE 領域の形を示す:

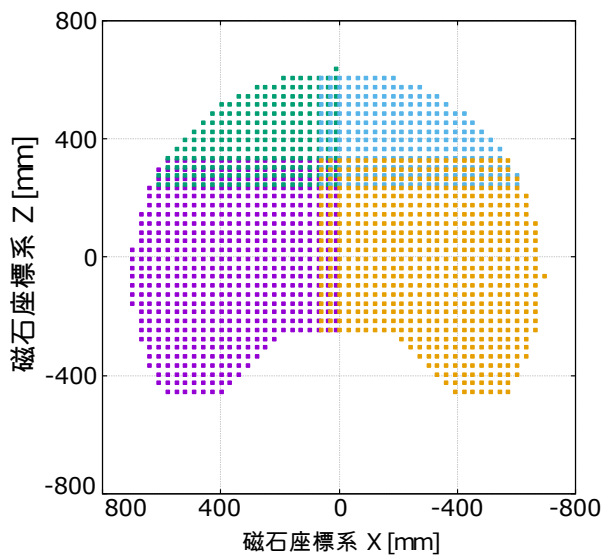


図 2.4.3 FINE 領域をさらに 4 つに分けた測定領域の図 (y 軸正方向から見た図)

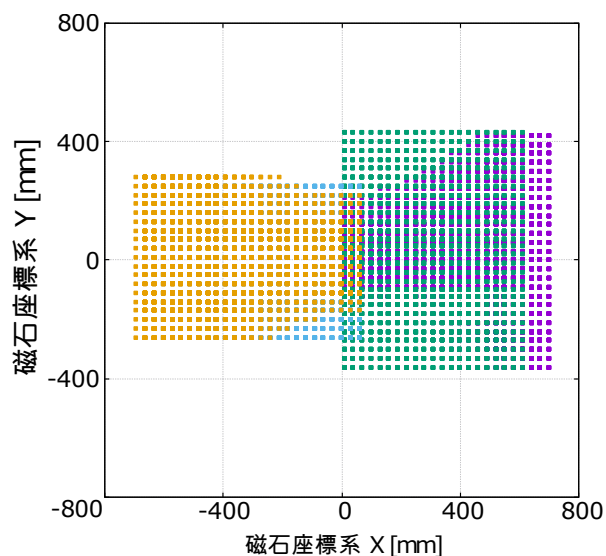


図 2.4.4 z 軸正方向から見た図

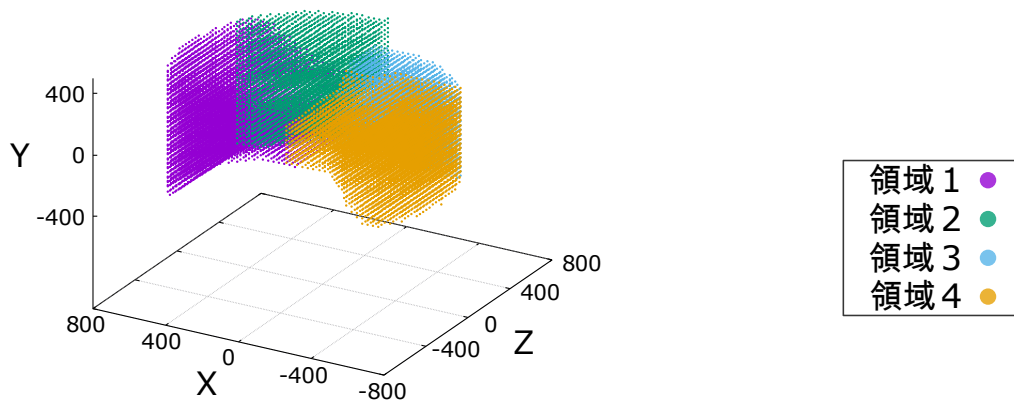


図 2.4.5 斜めから見た図

領域 1 の測定を“セッション 1”のように呼ぶことにする。各領域は 60mm 程度重なって配置されており、同じ部分を再測定することでセッション毎の位置の違いを補正することができる。また、この測定の比較により測定精度の見積もりを行うことができる。この詳細は第 5 章に記載する。

2.5 測定メッシュサイズの決定

測定は数十 mm の立方体の格子メッシュ上で行うこととした。小さいメッシュで測定するほど磁場分布をより正確に測れるが、測定に時間がかかる。そこで、以下のような見積もりを行い、メッシュのサイズを決定した。

1. 粒子が FM 電磁石の原点から直線上を飛ぶという仮定をする^{†4}。
2. 計算磁場を様々なメッシュサイズで離散化して、粒子が原点から $R = 700$ までを通過したときに感じる $\int |\mathbf{B} \times d\mathbf{l}|$ を計算する。
3. 計算磁場を離散化したメッシュを極限まで (0.5mm) 小さくしたときの $\int |\mathbf{B} \times d\mathbf{l}|$ の値を真の値として、そこからの差がメッシュを荒くしたことによる誤差と考える。

なお、この見積もりでは、周囲に遮蔽体や他の電磁石がない場合の計算磁場を用いている。実際にはそれらの磁性体が存在するため、後に測定結果を計算磁場と比べる際には、それらを取り入れたものを別途作成した。計算結果を図 2.5 に示す。

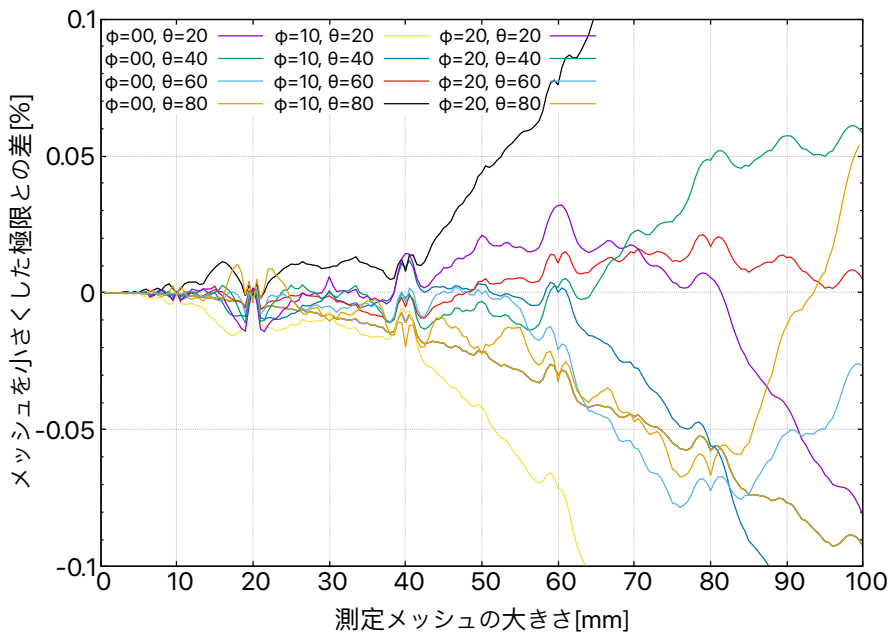


図 2.5.1 メッシュサイズ [mm] と誤差 [%]

ϕ は粒子の軌道の xz 平面からなす角 (ビームに乗って上下方向の角度)、 θ は yz 平面

^{†4} 実際には粒子は曲線軌道を描くため、これは簡易的な見積もりになっている

からのなす角（ビームに乗って左右の角度）を表し、値はその方向の直線上に飛んだ粒子が感じた $\int |\mathbf{B} \times d\mathbf{l}|$ のメッシュサイズが極限まで小さいときの値からの相対値である。この結果から、30mm メッシュで測定したとき、メッシュ間隔による $\int |\mathbf{B} \times d\mathbf{l}|$ の誤差への影響は $\pm 0.02\%$ 未満であることがわかる。以上をもとに、FINE 領域の測定メッシュの間隔を 30mm に決定した。

2.6 測定時間の決定

アクチュエーターを動かした直後は、竿が振動しているため正確な磁場の値を取得できない。そのため、振動がある程度落ち着くまで待つ必要がある。振動の影響の大きさは磁場勾配に依存するため、場所によって異なる。そこで、いくつかの測定点でアクチュエーターを動かした直後から連続的に磁場を測定し、振動がおさまるまでの時間を検討した。測定した箇所でも最も振動がおさまるのに時間がかかったのは $x = 330\text{mm}$, $y = 250\text{mm}$, $z = 150\text{mm}$ の点で、そのときの $|B(t) - B(60\text{s})|/|B(60\text{s})|[\%]$ をプロットしたものが次のグラフである：

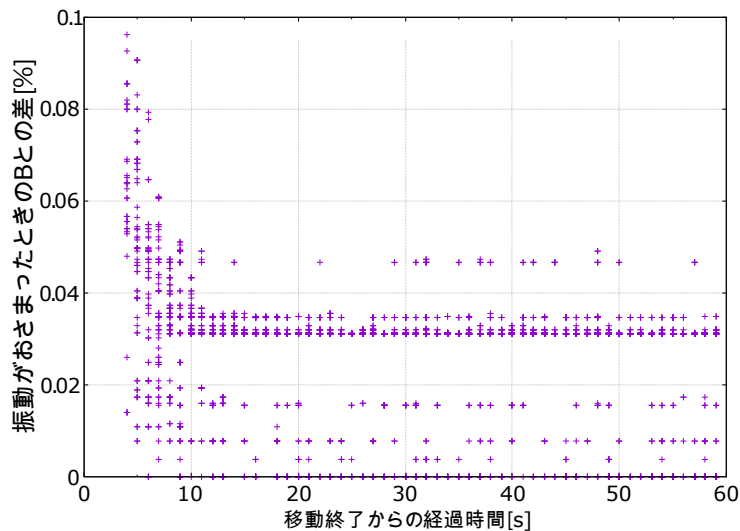
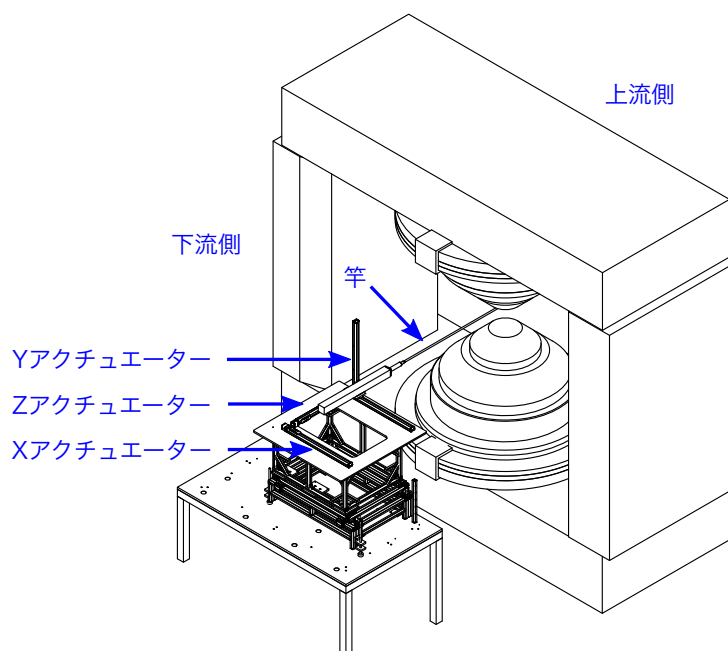


図 2.6.1 $|B(t) - B(60\text{s})|/|B(60\text{s})|[\%]$ と、アクチュエーターが移動を完了してからの時間

上の図から、約 8 秒待てば振動がおさまっていることがわかる。10 秒を超えてから見られる値の変動は、ホール素子の精度によるものと考えられる。1 回の測定に約 0.18 秒かかるため、各測定点ごとに 55 回、合計 10 秒間測定することにした。

2.7 FM 電磁石と磁場測定機

測定に使った装置の概要図を図 2.7 に示す。



2.7.1 FM 電磁石

FM 電磁石は、ヨークの形が非対称で、前後に鉄遮蔽体や他の実験で用いる電磁石が設置してあるため、磁場分布が x, z 方向に対して非対称になっている。また、下に厚みが 100mm の鉄板が敷いてあるため y 方向の対称性も実際に測定して検証する必要がある。電磁石電源の定格は 2500A だが、2500A で長時間運転すると動作が不安定になる恐れがあり、オペレーション電流は 2450A と定められている。また、磁極が円錐台形のため、 1cm^3 で 0.01% の一様性を満たす領域が存在せず、NMR プロブを用いた電流変動のモニターができない。従って、一軸の高精度ホールプロブを常時使用して電流変動のモニターを行う。^{†5}。

^{†5} NMR プロブは絶対磁場を直接測定できる測定器で、 $1\mu\text{T}$ 程度の非常に高い精度で磁場を測定することができる [14]。そのかわり、高い磁場一様性がなければ測定できない。

2.7.2 敷板・架台

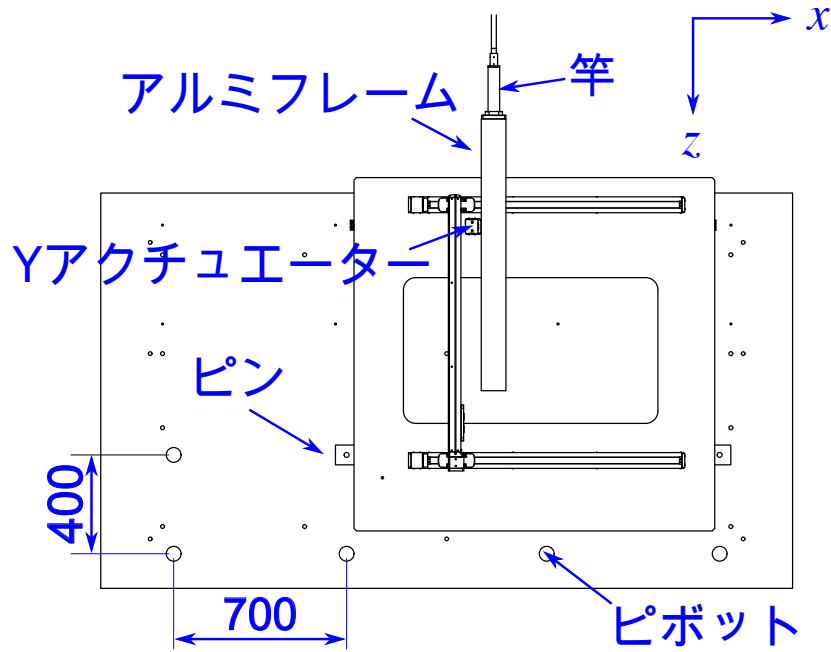


図 2.7.1 敷板、架台、アクチュエーターを設置した図

非磁性のアルミフレーム製テーブルの上にアルミニウム製の敷板が載せられ、その上に架台を設置する。架台の上にアクチュエーターが取り付けられている。架台は敷板上のピボットにピンを差し込むことで位置決めできる。敷板上のピボットは複数設けられており、 x 方向に 700mm、 z 方向に 400mm 動かすことができる。これを使うことで、図 2.7.1 の右上、右下、左下、左上の 4 通りの配置をすることができる。右上がセッション 1、右下がセッション 2、左下がセッション 3、左上がセッション 4 に対応する。図 2.7.1 の配置は架台が右上に置かれている状態で、セッション 1 の測定時の配置である。

2.7.3 竿

竿は CFRP 製で、竿を保持する根本のアルミプレートと合わせて 2389mm の長さがある。根本のアルミプレートはアルミフレームに接合されており、アルミフレームを Z アクチュエーターに取り付けている。

2.7.4 プローブホルダー

プローブホルダーはホールプローブを保持する固定治具で、この測定のために製作した。プローブホルダーは竿の先端に取り付けられている。外観は図 2.7.2 の通りである。

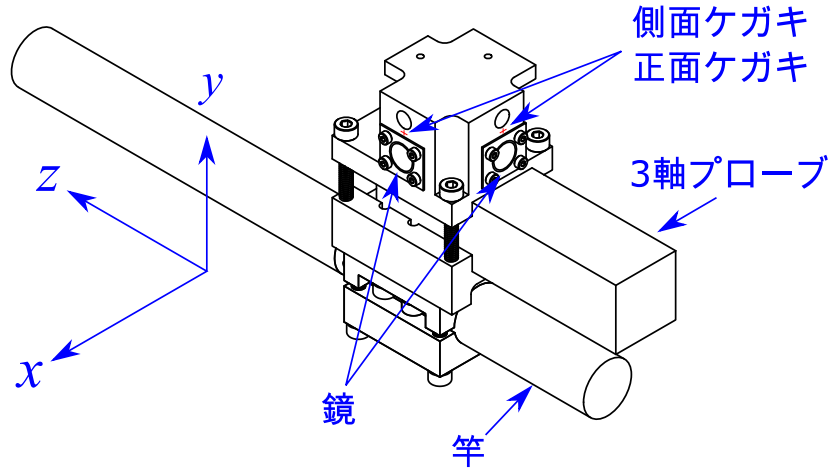


図 2.7.2 プローブホルダーにプローブを取り付け、竿に装着した図。測定の際は、図の座標軸が磁石座標系に合うように設置される。

プローブのケーブルの干渉を避けるために、プローブホルダーには Y プローブが $-x$ 方向、X プローブが y 方向、Z プローブが z 方向を向くように取り付けられている。

プローブホルダーには、位置を測量するために 2 つのケガキがつけられている。図の x^+ 方向 (x 軸正方向) のケガキを側面ケガキ、 z^- 方向のケガキを正面ケガキと呼ぶことにする。正面ケガキをレベラーで覗くことで、プローブホルダーの高さを測定できる。正面ケガキを z^- 方向に置かれたセオドライトで覗くことで、プローブホルダーの x 座標を測定できる。また、側面ケガキをリターンヨークの中に置かれたセオドライトで覗くことで、プローブホルダーの z 座標を測定できる。

z プローブが y 軸に対して θ だけ傾いていると、磁場を $B_z + B_y \sin \theta$ と出力してしまう。FM 電磁石では多くの領域で B_y が支配的なため、これは非常に大きい誤差の原因になる。竿が自重でしなるなどの理由から、プローブの向きを FM 座標系の x, y, z に精度良く揃えることはできない。磁場測定実験では角度は直接測定せずフィッティングすることもあるが、FM 電磁石には磁場が一様な箇所が存在しないため、角度をフィッティングに

よって補正することが難しい^{†6}。そのため、プローブホルダーの角度を直接測定した。プローブホルダーには2枚の直交した鏡がつけられており、レーザーを鏡に当てて反射させ、反射光をスクリーンに当てることでプローブホルダーの角度を測定する(3.2節参照)。プローブホルダーとプローブの相対角度は別途測定した(4.3節参照)。鏡の取付部は精密フライスにより $90 \pm 0.01^\circ$ の精度で直交するよう研磨されており、鏡の基材と鏡面のなす角が $< 2'' = 6 \times 10^{-4}^\circ$ の高平行度ミラーを使用している。ミラーはプローブホルダーの研磨された面に押し付けられ、プレートで抑えられている。ミラーの装着はクリーンルーム内で行い、ゴミが入ることで角度がずれないようにしている。プローブホルダーは、プローブとの相対角度を測定する際に用いる回転ステージに図の上端をネジ止めできる構造になっている。また、竿からの取り外しや回転ステージへの固定はプローブとの相対角度を変えないまま行うことができるように設計されている。プローブホルダーはアルミ製で、使われているボルトはすべてチタンかポリカーボネートのいずれかであり、磁場に引き付けられないように設計されている。

2.7.5 ホールプローブ

ホールプローブは、半導体に電流を流し、磁場を印加したときに磁場と電流に垂直な方向に起電力(ホール電圧)が発生するホール効果を利用したセンサーである。本実験では、3つの素子を組み合わせて3軸の磁場を測定できる3軸ホールプローブを走査して磁場分布を測定した。また、電流変動をモニターするために、1軸ホールプローブを使用した。1軸ホールプローブと3軸ホールプローブに使われているプローブは両方ともGroup3社製MPT-132で、同じ仕様になっている。

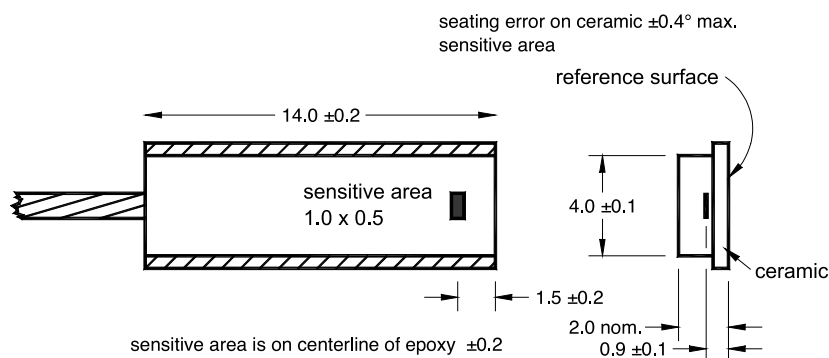


図 2.7.3 1軸プローブの図面 [8]

^{†6} 磁場が一様でないと、計算磁場と合わないときに計算磁場が誤っているのか角度がずれているのかわからない。

ホール電圧と磁場の関係の対応は Group3 社が校正済みであり、テスラメーターに接続することで磁場の値をそのまま読み出すことができる。

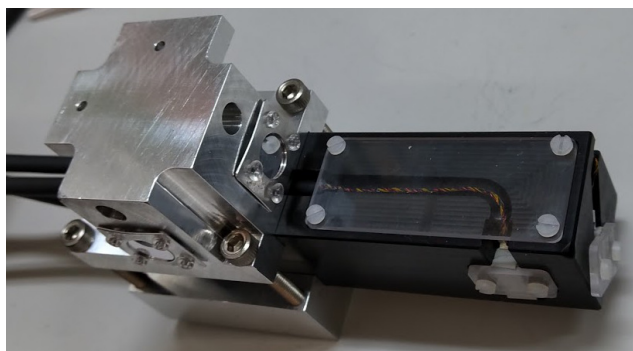


図 2.7.4 プローブホルダーに取り付けた状態の 3 軸ホールプローブ。図の黒い直方体がアルミニウム製の基材で、1 軸プローブが 3 つ基材に固定されている。

主な仕様は以下の通りである。

項目	値
絶対精度	$\pm(0.03\% \text{ of reading} + 0.03\% \text{ of full scale})$
精度	$\pm 0.03\%$
温度安定性	$\pm 0.014\% / ^\circ \text{C}$
1 軸の角度精度	0.4°
有感領域	$1 \times 0.5\text{mm}$

表 2.7.1 ホールプローブの主要な仕様

絶対精度の $\pm(0.03\% \text{ of reading} + 0.03\% \text{ of full scale})$ とは、例えば 1.3T の環境下で 1.2 から 3T のレンジで測定した際の精度が $\pm 1.3\text{T} \times 0.03\% + 3\text{T} \times 0.03\% = \pm(3.9+9.0)\text{G} = 0.1\%$ だということを表している。レンジの下限で測定する際は 0.1%、上限で 0.06% となる。1 軸の角度精度とは、プローブの底面と素子のなす角のことである。3 軸ホールプローブはアルミニウム製の直方体の基材の上に 1 軸プローブを 3 つ組み合わせて作られているが、その直交性は保証されていないため、ホールプローブのプローブホルダーに対する角度は別途校正を行った (4.3 節参照)。有感領域が $1 \times 0.5\text{mm}$ なので、その中で最も感度の高い位置を別途測定し (4.2.2 節参照)、磁場測定の解析の際はその位置を測定しているものとした。厳密には、プローブの有感領域内の磁場に感度で重みをつけたものが出力されるはずだが、その影響はまだ取り込めていない。また、ホールプローブは磁場がない状態

でもオフセットが出力されるため、その影響を別途補正した(5.6節参照)。電流変動モニター用の1軸ホールプローブは、ポールピースの中央付近に貼り付けた。

2.7.6 セオドライト・レベラー

角度および高さの測量機器であるセオドライトとレベラーは、プローブホルダーの磁石座標系での位置を測量するために用いる。セオドライトは水平方向、垂直方向に回転させることができる。セオドライトを複数回立て直して同じケガキを測定した際の位置の再現性は0.2mm程度であった。水平、垂直方向の角度は $20''(0.006^\circ)$ の精度で測定できる。特に、垂直方向の角度は絶対角度を測定できる。FM電磁石の磁極には磁石座標系の $x=0, y=0, z=0$ を示すケガキが施されており、セオドライトやレベラーをそのケガキに合わせて設置することで $x=0$ 平面、 $y=0$ 平面、 $z=0$ 平面を出すことができる。上流セオドライトとレベラーは磁石から3m以上離れて設置されており、励磁したまま使うことができる。ヨーク内セオドライトは安全のため励磁していないときのみ使用できる。

セオドライトは望遠鏡と同じ方向にレーザーを出すことができる。プローブホルダーの角度測定にはこのレーザーを使用した。レーザーはピントを調節することで1mから無限遠に焦点をあわせることができる。

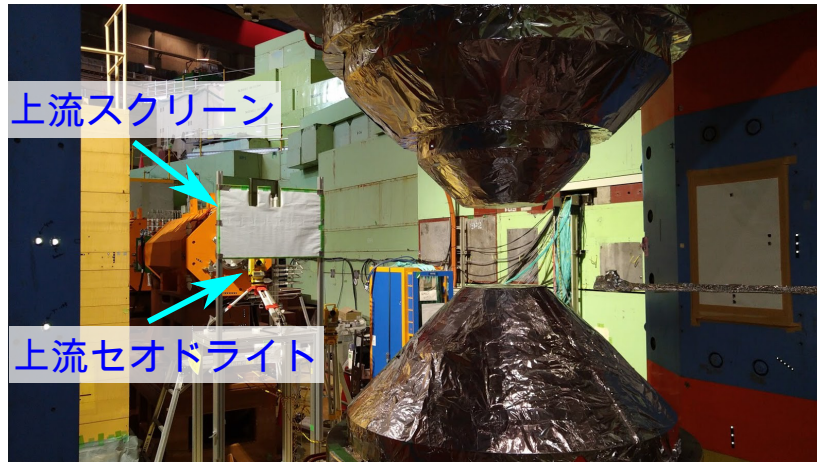


図 2.7.5 上流 (z^- 方向) 側に設置されたセオドライト。

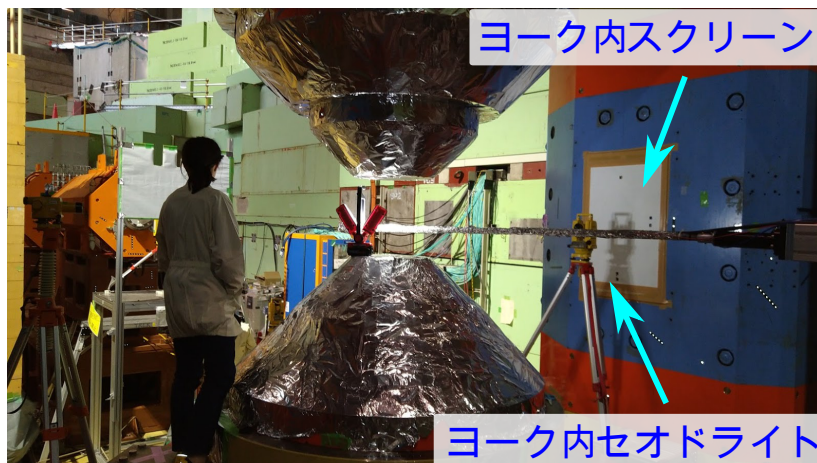


図 2.7.6 ヨーク内 (x^+ 方向) に設置されたセオドライト。

これにより、 x, z 方向に 0.2mm 、 y 方向に 0.5mm の精度で位置を測定することができる。 y 方向の位置の精度が悪いのは、励磁中はレベラーを磁石から遠い場所に設置しなければならないためである。

2.7.7 スクリーン

スクリーンは鏡から反射してきたレーザーを映し、光点の位置を読み取ることでプローブホルダーの角度を求めるために使用する。反りを防ぐために2枚のダンボールを張り合わせたものに市販の 1mm 方眼紙を貼り付けて製作した。セオドライトとレベラーで方眼紙の目盛りが磁石座標系と平行になるように設置されており、スクリーンの座標と磁石座

標の対応がとれるようになっている。

2.7.8 電動アクチュエーター

竿、プローブを自動的に走査して測定するため、THK 社の電動アクチュエーター KSF6 を使用した。アクチュエーターはシリアル通信により既定のコマンドを送ることで、速度、移動量、移動指示などを制御できる。3つのアクチュエーターを組み合わせることで x, y, z 方向に駆動できるようになっている。ただし、アクチュエーター同士の直交性は悪く、わずかに湾曲しているため、アクチュエーターの傾きと湾曲を測定する (3.1 節参照) 必要がある^{†7}。主な仕様は以下の通りである:

項目	値
ストローク	800mm
繰り返し位置決め精度	$\pm 0.01\text{mm}$
ロストモーション (遊び)	0.1mm

表 2.7.2 電動アクチュエーターの主要な仕様

アクチュエーターは、ストローク 800mm のうちどの位置にあるか取得することができる。その値を以降“アクチュエーター座標”と呼ぶことにする。アクチュエーター座標は磁石座標とは異なる。最終的には、アクチュエーター座標を磁石座標に変換して解析を行う (5.4 節参照)。

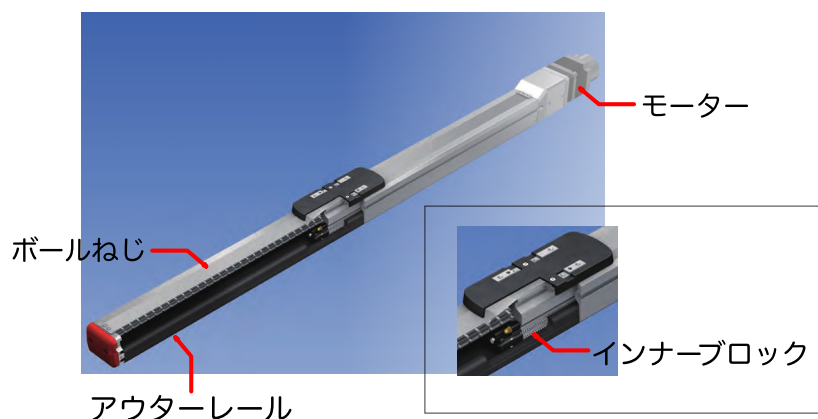


図 2.7.7 電動アクチュエーターの主要部品 [11]

^{†7} アクチュエーター自体の湾曲はわずかでも、2.4m の竿につけるためプローブ位置は数 mm のずれになる。

アクチュエーターの主要部品の材質は、アウターレールは S55C、ボールねじは AISI4150HV、インナーブロックは SCM420H で、いずれも強磁性体である。^{†8}。そのため、アクチュエーターが磁場により引かれて微小な変形が起きるため、その影響を測定する必要がある (3.1 節参照)。磁性体でできていることが磁場そのものに与える影響はまだ評価できていない。

2.7.9 安全装置

電動アクチュエーターの操作を誤ったり、自動測定プログラムに誤りがあるとプローブや竿が FM 電磁石に接触してしまう。そのような事故が起きた際にアクチュエーターが動きつづけると、装置の位置がずれたり、プローブが破損する原因となる。FM 電磁石は円錐形であり、電磁石とプローブ、竿のどの部分が接触するか事前に予測することは難しい。そこで、FM 電磁石、および竿、プローブの双方にアルミホイルを巻き、24V の電圧をかけてアクチュエーターの制御端末に接続することで、接触した際に通電して非常停止信号が入力されるようにした (図 2.7.5 参照)。プローブホルダーのアルミホイルは緩めに巻いてあり、アルミホイルが接触した場合直ちにアクチュエーターが停止するため、位置がずれることはない。また、非常停止ボタンも接続されているため、手動で停止することもできる。

2.7.10 熱電対

ホールプローブの温度依存性の影響を評価するため、プローブホルダーに熱電対を取り付けた。セッション 1 では 30 分から 1 時間おきに手動で記録し、セッション 4 では 15 分おきに自動で測定されるようにした。

2.8 磁場が安定するまでの時間

電流が一定であっても、磁極の鉄が熱的に安定するまでは磁場が変動する。磁場が安定するまでの時間を測定した。この測定には 3 軸プローブを用いた。

^{†8} 市販のアクチュエーターに非磁性体のみで作られたものは存在しないため、非磁性体のもを使うためには特注か製作する必要がある。今回の実験では、納期のためにやむを得ず市販品を使った。

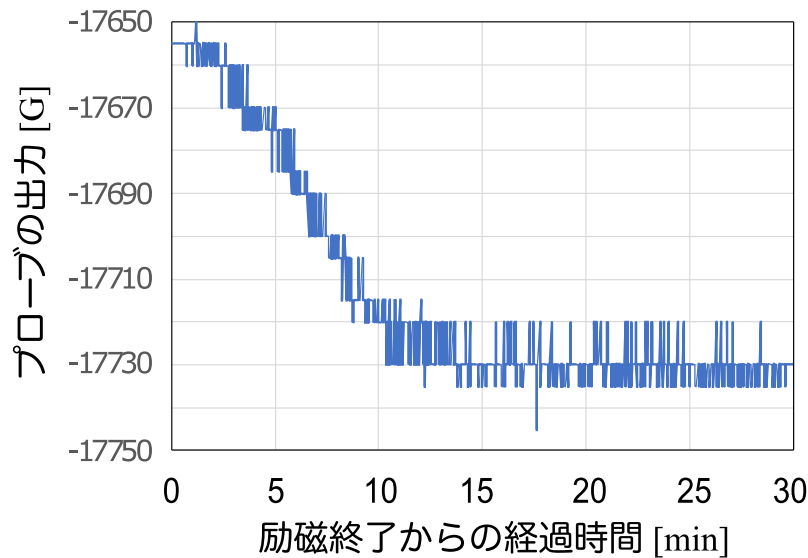


図 2.8.1 励磁直後からの磁場の変動

励磁直後から 15 分待てば磁場が安定していることがわかる。そのため、磁場測定は励磁から 15 分以上経ってから行うことにした。

2.9 測定メッシュの生成

測定点を示す測定メッシュを生成する。メッシュを生成するプログラムには、以下のパラメーターを与える：

1. メッシュ間隔。
2. FM 座標系での測定領域の x, y, z の最小値および最大値
3. 磁石原点におけるアクチュエーター座標 (3.1.1 参照)
4. スキャンする軸の順番

これらを指定すると、測定領域の各軸の最小値から最大値までの範囲内で指定した軸の順番でループが行われ、測定点が出力される。ただし、その測定点を測定する際に FM 電磁石にぶつかる場合は出力せず飛ばす。各軸のループの終わりには、アクチュエーターの原点復帰を示すコマンドが書き込まれる。スキャンする軸の順番は、今回の測定では $Z \rightarrow X \rightarrow Y$ に指定した。この順番では、まず z 方向にスキャンしていき、それが終わると z 方向に原点復帰し、 x 方向に 1 つメッシュをすすめ、再び z 方向のスキャンをしていく。それを繰り返し、 xz 平面が 1 層測定し終わると x, z 方向に原点復帰し、 y 方向に 1 つメッシュを進めて同じことを繰り返す。こうすることで、単純なアルゴリズムにもかかわらず

円錐台形の FM 電磁石に衝突しないように測定できる。

2.10 アクチュエーターの駆動

生成されたメッシュを順番に読み込んでいき、次のメッシュとの差分だけアクチュエーターを動かすことで測定を進めていく。原点復帰コマンドを読み込んだ場合は、対応する軸を原点復帰させる。1 点の測定は 55 回/10 秒連続して行う。1 回測定するごとに以下の内容を記録する:

1. 測定した日付と時刻
2. メッシュ番号 (メッシュを記録したファイルの行番号)
3. 55 回の測定のうち、何回目か
4. 測定した座標 (原点におけるアクチュエーター座標から簡易的に換算したもの)
5. アクチュエーター座標
6. 三軸プローブの X, Y, Z 素子の出力
7. 電流変動モニター用プローブの出力

第 3 章

測定器の測量

本章では、磁場測定の際、置き直しごとに行った測量の方法と結果について述べる。

3.1 プローブホルダー位置の測量

セッションにより、測量した項目が少し異なる。そのため、この節はセッション毎に分けて記述する。本論文では、置き直しによる測定磁場の再現性および接続性を評価することとし、この方針に基づいてセッション 1 および 4 についてのみ述べる。

プローブホルダーが磁石座標系のどこにあるか特定するため、プローブホルダーにつけられた 2 つのケガキをセオドライトとレベラーで覗くことで測量を行った。ケガキの位置とプローブの位置は異なる。ケガキとプローブの位置を別途測定し、補正する必要があるが、それらの補正については 4.2, 5.5 節で述べる。

3.1.1 セッション 1 のプローブホルダー位置の測量

セッション 1 では、次のような位置の測量を行った。

原点

励磁していない状態で、上流セオドライトを FM 電磁石につけられたケガキに合わせ、 $x = 0$ の平面をつくる。同様に、ヨーク内セオドライトを $z = 0$ 平面、レベラーを FM 電磁石の $y = 0$ 平面に合わせる。それらを用い、プローブホルダーの正面ケガキを $x = y = 0$ 、側面ケガキを $z = 0$ に合うようにアクチュエーターを動かす。このときのアクチュエーター座標を記録し、“**磁石原点におけるアクチュエーター座標**” とする。励磁した状態で

も、同じ測量を行った。ただし、励磁した状態では安全上ヨーク内セオドライトを立てられないため、磁石原点におけるアクチュエーターの z 座標は測定できない。そのため、その値のみは励磁していない状態の値を流用した。結果は以下のようになった。

項目	原点におけるアクチュエーター座標 [mm]
励磁していないとき	(29.2, 280, 397.8)
励磁しているとき	(29.0, 280.8, 397.8)

表 3.1.1 磁石原点におけるアクチュエーター座標の測量結果 (セッション 1)

これらの精度は、セオドライトによる位置の測定精度により $\pm 0.2\text{mm}$ である。複数回の測定で、再現性は測定精度の範囲内だった。

アクチュエーター傾き・湾曲

以下のようにアクチュエーターの傾き、湾曲を測定した。測定は励磁していない状態で行った。

1. アクチュエーターを操作し、ケガキを原点 ($x = y = z = 0$) に合わせる。
2. この状態で Z アクチュエーターの座標をいくつかの点に動かす。アクチュエーターが傾いていたり湾曲していると、ケガキの x, y 座標が 0 からずれる。
3. それぞれの点で、ケガキの位置が $x = y = 0$ となるように X, Y アクチュエーターを操作し、X, Y アクチュエーターの座標を記録する。

同じことを他の軸についても行い、X アクチュエーターを動かしたときの y, z 方向の位置ずれ、Y アクチュエーターを動かしたときの x, z 方向の位置ずれ、Z アクチュエーターを動かしたときの x, y 方向の位置ずれの 6 つのパラメーターを測定する。ただし、 y 方向に動かしたときの位置ずれの測定のみ、原点付近ではポールピースに衝突させずに十分なストロークを確保できないため、上流セオドライトに平行に $x = 667.5\text{mm}$ に立てたセオドライトで測定した。結果は以下のようになった。

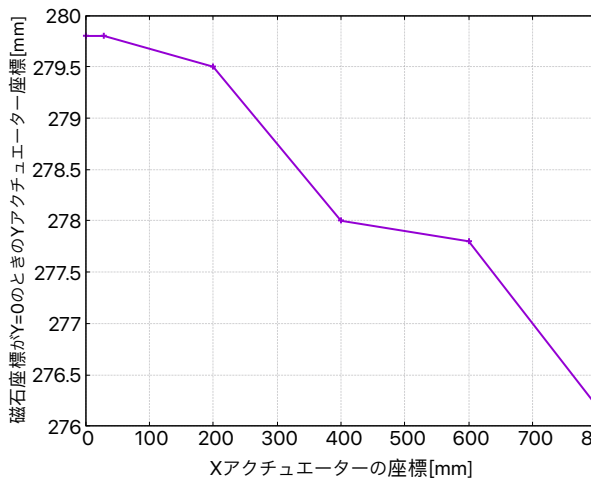


図 3.1.1 X アクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $y = 0$ となる Y アクチュエーターの座標

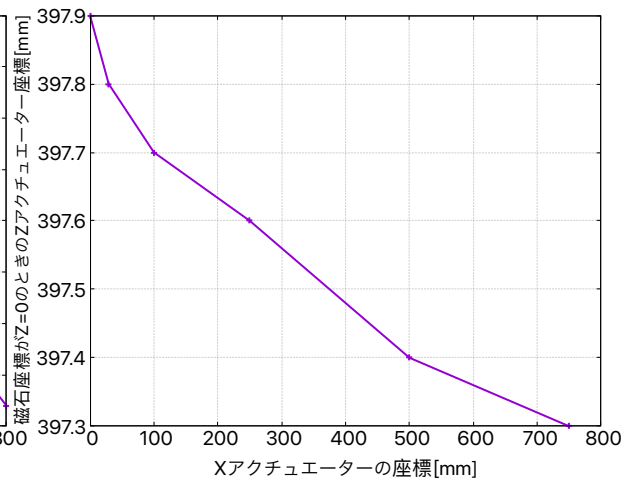


図 3.1.2 X アクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $z = 0$ となる Z アクチュエーターの座標

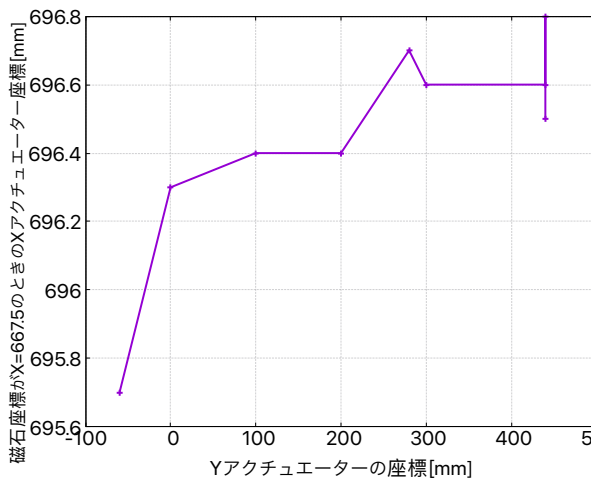


図 3.1.3 Y アクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $x = 667.5\text{mm}$ となる X アクチュエーターの座標

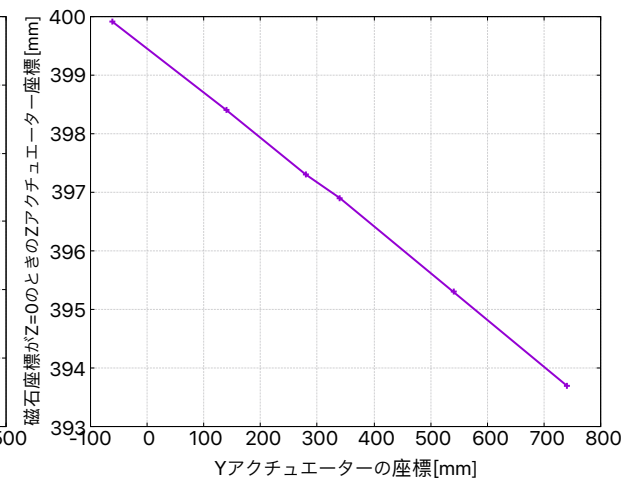


図 3.1.4 Y アクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $z = 0$ となる Z アクチュエーターの座標

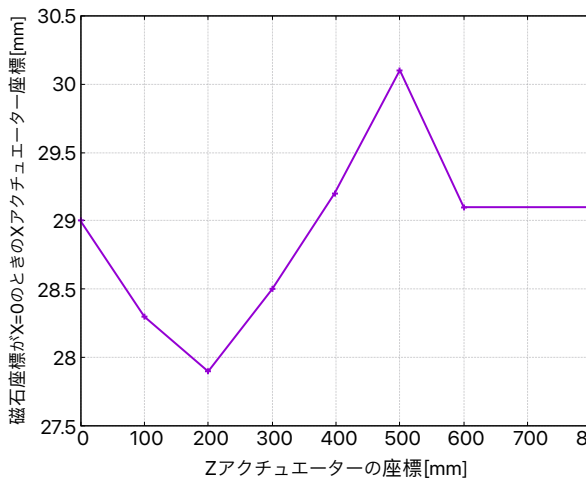


図 3.1.5 Zアクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $x = 0$ となる Zアクチュエーターの座標

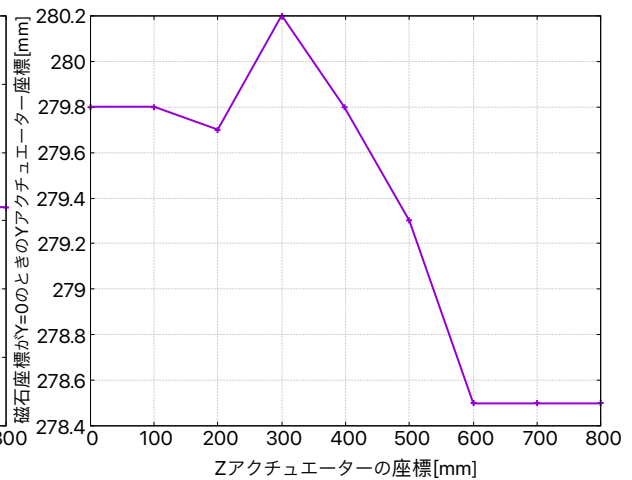


図 3.1.6 Zアクチュエーターを動かしたとき、ケガキの位置が $y = 0$ となる Yアクチュエーターの座標

これらの精度は、セオドライトによる位置の測定精度により $\pm 0.2\text{mm}$ である。湾曲の影響が最大なのは Yアクチュエーターを動かしたときに $z = 0$ となる Zアクチュエーター座標 (図 3.1.4) で、6mm 程度ある。これは、測定精度の範囲内で一致する。解析の際は 3点の中の中央値を使用した。

励磁による位置ずれ

アクチュエーターが磁性体できており、FM電磁石の漏れ磁場が大きいことから、励磁すると励磁していない状態で測量した結果から位置がずれてしまう。特に、Yアクチュエーターは構造上根本のみ固定されているため、磁力による影響を受けやすい。

Yアクチュエーターの位置はZアクチュエーターを動かすことで $z \approx 2500$ から 3400mm 程度の領域を通過することになる。この領域には 80 から 350G 程度の漏れ磁場がある。位置によって漏れ磁場の強さ、向きが異なることから、励磁による位置ずれの影響も場所による依存性がある。そこで、励磁による位置ずれを測定するため、次のような測量を行った:

1. 励磁した状態で、あらかじめ決めておいたアクチュエーター座標に動かす。
2. 上流セオドライトの首を振り、正面ケガキに合わせる。そのときのセオドライトの水平、垂直回転の角度を記録する。1,2をすべての測定点について行う。
3. 励磁していない状態で、アクチュエーターを 1の測定点に動かす。また、セオドラ

イトを記録しておいた角度に合わせる。励磁による位置ずれのため、セオドライトのレティクルとケガキはずれている。

4. X,Y アクチュエーターをケガキがセオドライトのレティクルに合うように動かす。すべての測定点について 3,4 を行う。

測定点は、X,Z アクチュエーターについてはストロークの両端と中央、Y アクチュエーターについてはポールにぶつからない範囲内で 3 点を決めた。次の図に、測定点を示す。座標は磁石座標系におけるプローブの位置に直してある。

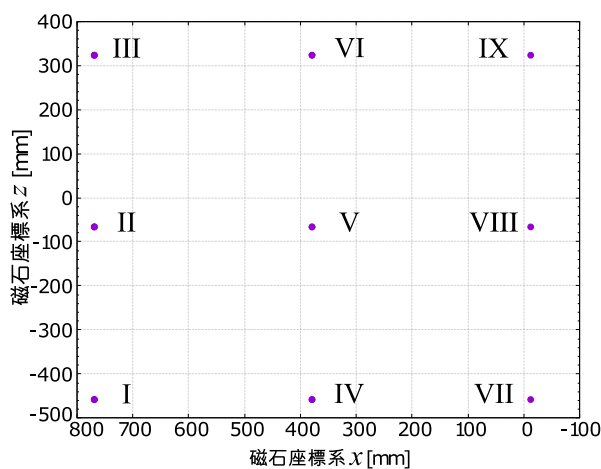


図 3.1.7 励磁による位置ずれを測定した場所 (y^+ 方向から見た図)

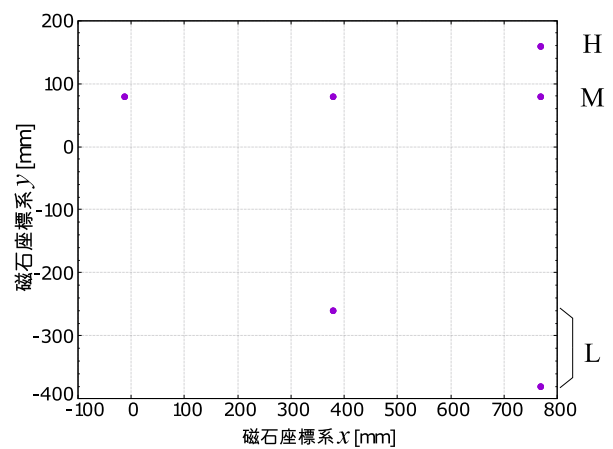


図 3.1.8 z^+ 方向から見た図

測定点には名前がつけられており、“I-L”のように指定する。励磁による Z 方向のずれについては、励磁中にヨーク内セオドライトを設置できないことから測定することができない。そのため、 z 方向のずれは小さいと仮定して無視した^{†1}。同じ磁石座標における、(励磁したときのアクチュエーター座標) - (励磁していないときのアクチュエーター座標) を $(\delta x, \delta y)$ と表すことにする。結果は以下ようになった:

^{†1} 磁場により Z アクチュエーターが微小な角度 $\Delta\theta$ だけ傾いた際、 x, y 座標は竿の長さを L として $L\Delta\theta$ だけ変化し、 z 座標は $Z\Delta\theta$ だけ変化するというモデルでは、 $L \sim 2600, Z \leq 800$ のため、 z 座標の変化は x, y の変化に比べれば比較的小さい。ここで、 Z はアクチュエーター座標である。

測定点	$(\delta x, \delta y)$ [mm]
I-H	(3.5, 1.0)
I-M	(4.0, 1.0)
I-L	(2.0, 1.3)
II-H	(2.5, 0.0)
II-M	(2.7, 0.3)
II-L	(2.0, 0.0)
III-H	(0.5, -0.2)
III-M	(0.9, 0.3)
III-L	(0.5, -0.2)
IV-M	(2.3, 1.8)
IV-L	(1.8, 0.9)
V-M	(2.1, 0.6)
V-L	(2.1, 0.9)
VI-M	(0.2, 0.1)
VI-L	(0.8, -0.1)
VII-M	(0.4, 1.6)
VIII-M	(0.4, 1.1)
IX-M	(0.4, 0.5)

表 3.1.2 各測定点における励磁した／していないときの位置のずれ

この測定では、位置のずれを測定する際にセオドライトの角度を用いている。先述の通り、その精度は $20''$ である。セオドライトとプローブホルダーまでの距離は 2700mm から 3400mm 程度であり、位置の精度に換算すると 0.3mm に相当する。励磁による位置のずれは最大 4mm 程度と大きいですが、ランダムな変動ではなく、 B_x 成分が大きいと考えられる領域で δx が大きく B_z 成分が大きいと考えられる領域で δy が大きくなっている。このふるまいは、磁場にアクチュエーターが引き付けられて位置がずれるというモデルと整合する。測定時間の都合上もあり、励磁による位置のずれはこれらの測定点から補完することにした。

3.1.2 セッション 4 のプローブホルダー位置の測量

原点

セッション 1 と同様に、励磁している状態としていない状態の両方で測定した。先述の理由から、z 座標は励磁していない状態の値を採用した。結果は以下のようになった。

項目	原点におけるアクチュエーター座標
励磁していないとき	(723.0, 286.0, 395.2)
励磁しているとき	(723.5, 286.8, 395.2)

表 3.1.3 磁石原点におけるアクチュエーター座標の測量結果 (セッション 4)

これらの精度は、セオドライトによる位置の測定精度により $\pm 0.2\text{mm}$ である。

アクチュエーター傾き・湾曲

励磁している状態でいくつかの磁石座標 (x, y) において Z アクチュエーターを動かした。Z アクチュエーター傾いたり湾曲していると、ケガキの位置が (x, y) からずれる。各 Z アクチュエーターの座標において、ケガキの位置が (x, y) に戻るように X, Y アクチュエーターを動かし、そのときのアクチュエーター座標を記録した。これはアクチュエーターの傾き・湾曲と磁場による影響をあわせた測定になっている。

ケガキの位置の磁石座標が $(x, y) = A : (-697.6, 0), B : (-697.6, -339.5), C : (-697.6, 104.9), D : (0, 0)$ の点で Z 方向にアクチュエーターを動かし、 x, y 方向の位置のずれを測定した。 y 方向の位置のずれはさらに $E : (-323.5, 0)$ でも測定した。測定した点の位置は次の図の通りである。ただし、プローブの位置をプロットしているため、ケガキの位置とは数十 mm 異なる。

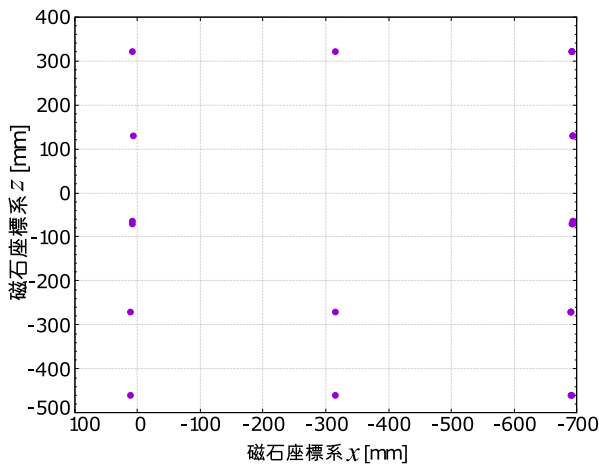


図 3.1.9 アクチュエーター傾き・湾曲を測定した場所 (y^+ 方向から見た図, プローブの位置)

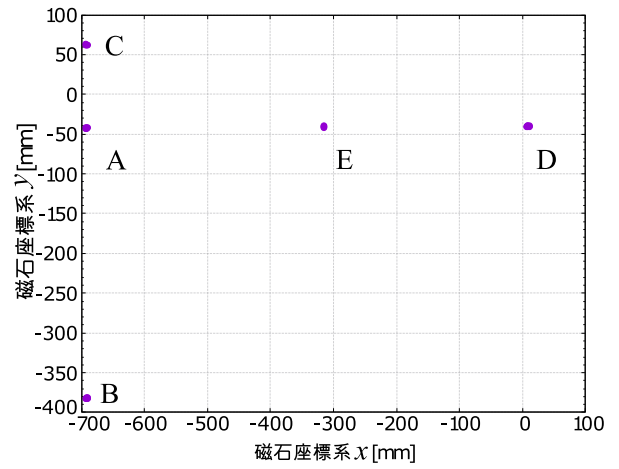


図 3.1.10 アクチュエーター傾き・湾曲を測定した場所 (z^+ 方向から見た図, プローブの位置) 3.1.10

測定結果は次のようになった:

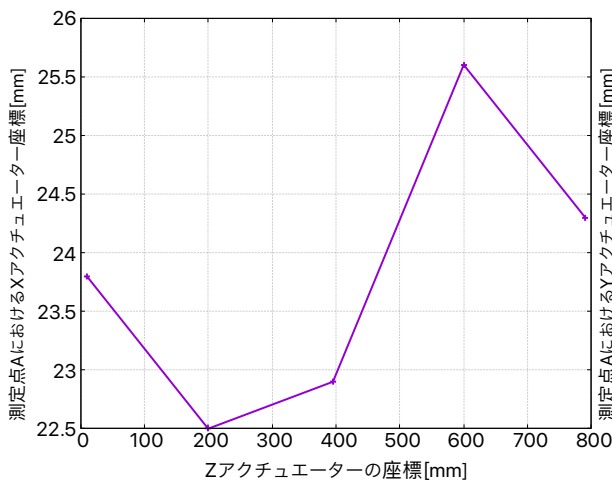


図 3.1.11 測定点 C における、Z アクチュエーターを動かしたときの X アクチュエーターの座標

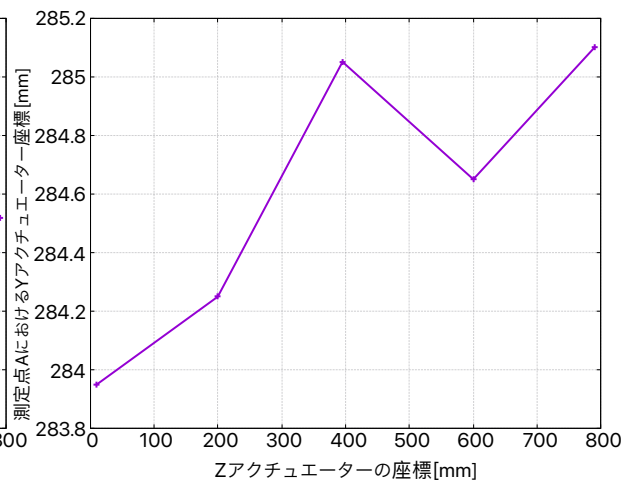


図 3.1.12 測定点 C における、Z アクチュエーターを動かしたときの Y アクチュエーターの座標

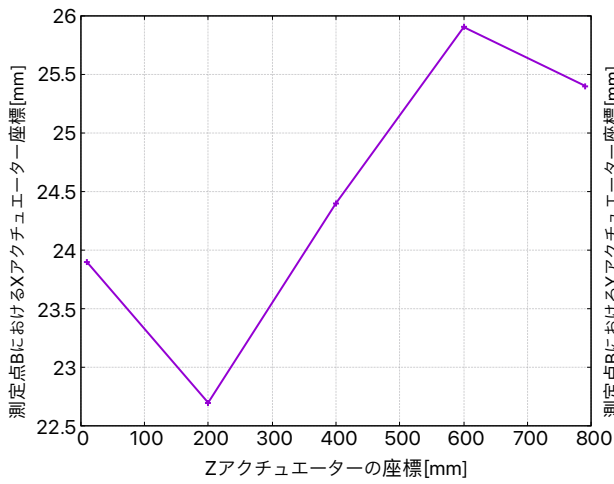


図 3.1.13 測定点 B における、Z アクチュエーターを動かしたときの X アクチュエーターの座標

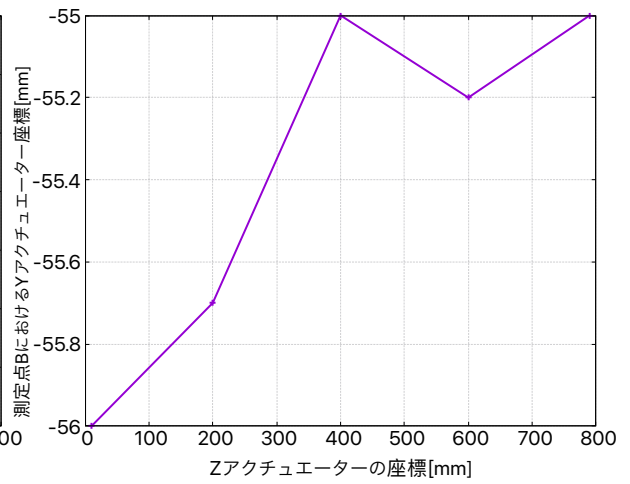


図 3.1.14 測定点 B における、Z アクチュエーターを動かしたときの Y アクチュエーターの座標

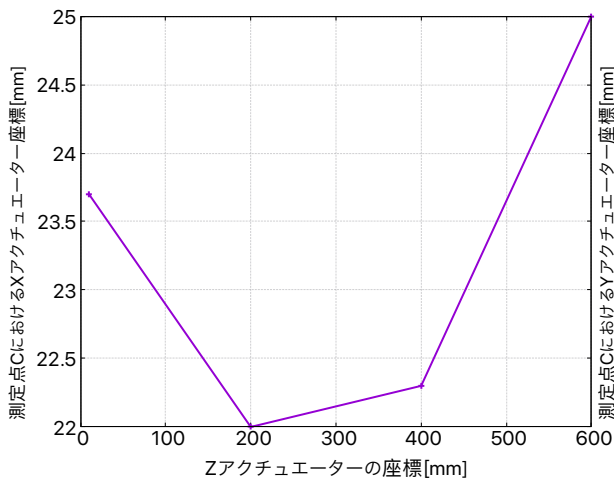


図 3.1.15 測定点 C における、Z アクチュエーターを動かしたときの X アクチュエーターの座標

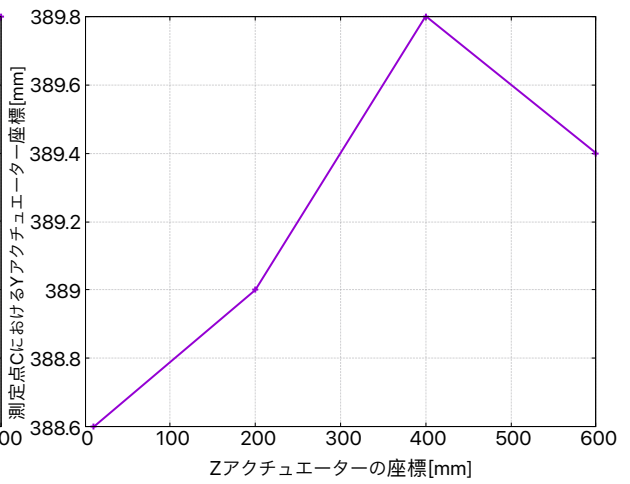


図 3.1.16 測定点 C における、Z アクチュエーターを動かしたときの Y アクチュエーターの座標

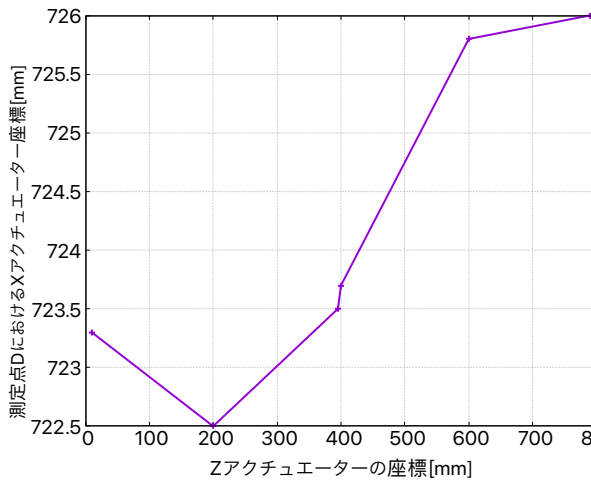


図 3.1.17 測定点 D における、Z アクチュエーターを動かしたときの X アクチュエーターの座標

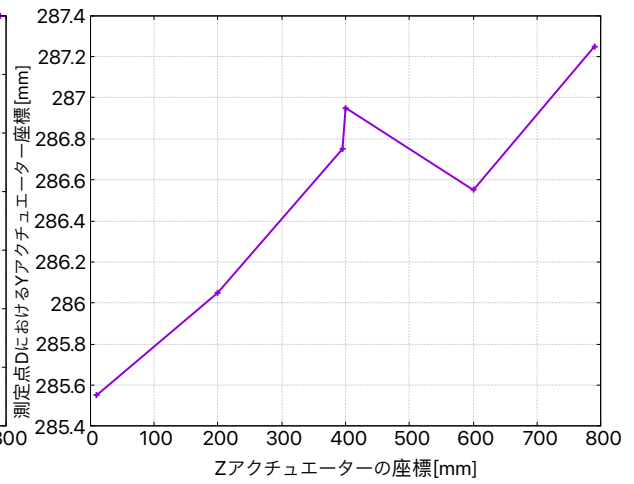


図 3.1.18 測定点 D における、Z アクチュエーターを動かしたときの Y アクチュエーターの座標

X, Y アクチュエーターを動かしたときの z 方向の位置ずれは、先述の理由から励磁していない状態で測定した。X アクチュエーターを動かしたときの位置のずれは磁石原点から X アクチュエーターを動かすことで測定し、Y アクチュエーターを動かしたときの位置のずれはポールピースに衝突することを避けるために $x = -699.1\text{mm}$ で行った。

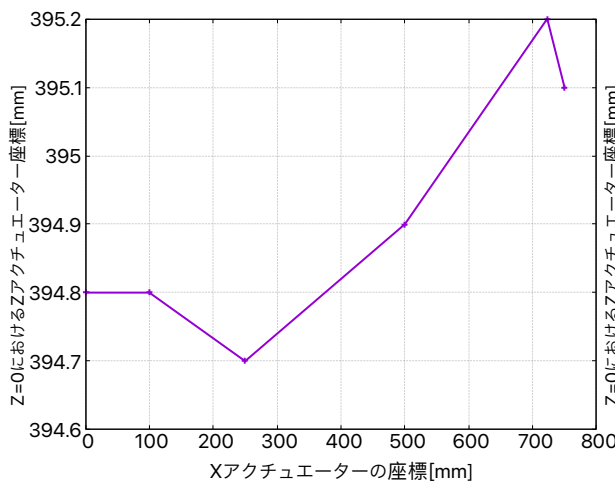


図 3.1.19 X アクチュエーターを動かしたときに $z = 0$ となる Z アクチュエーターの座標

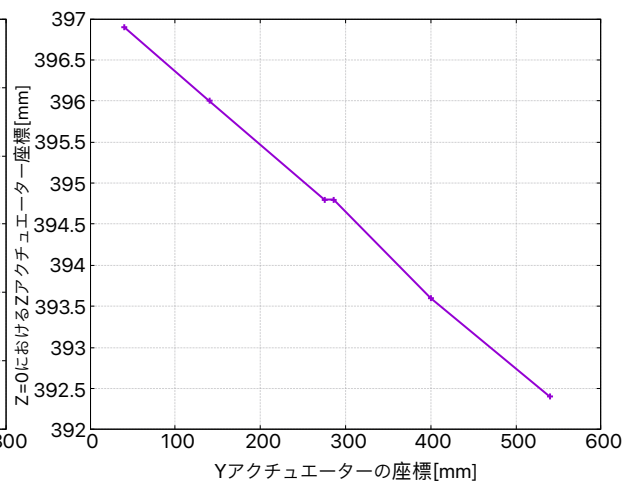


図 3.1.20 Y アクチュエーターを動かしたときに $z = 0$ となる Y アクチュエーターの座標

これらの精度は、セオドライトによる位置の測定精度により $\pm 0.2\text{mm}$ である。

3.2 プローブホルダー角度の測量

プローブホルダーの絶対角度を測定するため、プローブホルダーの鏡、セオドライトのレーザー、スクリーンを使用した。セッション 1 では励磁していない状態で測定した。セッション 4 では、上流セオドライトによる測定は励磁した状態で測定し、ヨーク内セオドライトによる測定は励磁していない状態で行った。また、セッション 4 では複数の場所で測定し、測定位置による角度のばらつきを見た。

3.2.1 測定原理

角度測定のプロット図を図 3.2.1 に示す。

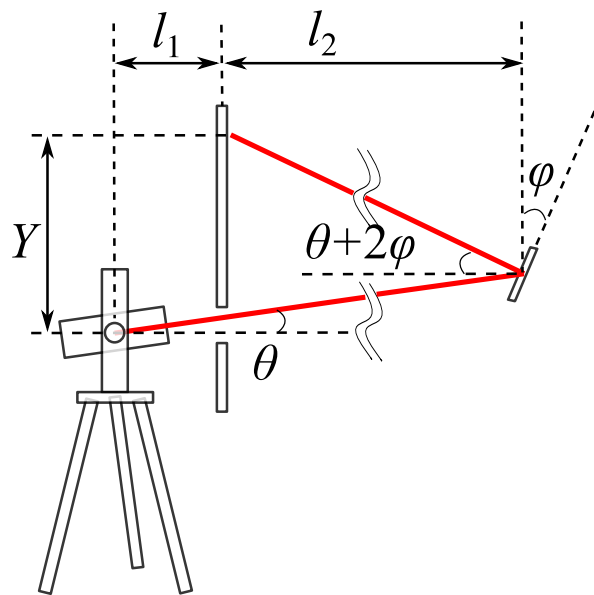


図 3.2.1 角度測定のプロット図 (上流セオドライト、スクリーンを x^- 方向から見た図)

セオドライトが角度 θ 、鏡が角度 ϕ だけ傾いているとき、スクリーンの座標 Y は

$$Y = (l_1 + l_2) \tan \theta + l_2 \tan(\theta + 2\phi) \quad (3.2.1)$$

と表される。ここで、 l_1 はセオドライトの回転軸とスクリーンの距離、 l_2 はスクリーンから鏡までの距離である。これを逆に解くことで ϕ を求めることができる。 l_2 を大きく取るほど ϕ に対する感度が増す。図のような配置では、ヨーク内では l_2 を大きく取れない

ため、ヨーク内スクリーンはセオドライトよりも後ろに設置されている。そのため 3.2.1 式に修正を加える必要がある:

$$Y = l_2 \tan \theta + (l_1 + l_2) \tan(\theta + 2\phi) \quad (3.2.2)$$

l_1 はスクリーンからセオドライトの回転軸までの距離、 l_2 はセオドライトの回転軸から鏡までの距離である。鏡の y 軸回りの回転も同様に測定することができる。その場合、これらの 2 式で Y をスクリーン上の水平方向の位置 X におきかえる必要がある。 X はスクリーンに向かって右向きを正にとることにする。また、 θ をセオドライトの水平方向の角度に置き換える必要があるが、今回の測定ではすべて水平方向の角度を 0° にしている。1 枚の鏡について 2 自由度の角度が測定できる。2 枚の鏡があるため 4 自由度測定できるが、3 次元空間の回転には 3 自由度しかない。そのため、この測定では y 軸周りの回転を重複して測定することになる。

測定は次のように行った。

1. 上流セオドライトは $x = 0$ 平面、ヨーク内セオドライトは $z = 0$ 平面に合わせて立てる。高さ方向の角度を水平にする。
2. 定規を FM 電磁石の $y = 0$ ケガキに合わせて設置し、セオドライトを水平に振って定規の目盛りを読み取ることでセオドライトの磁石座標系での高さを求める。 $y = 0$ におけるスクリーンの目盛りは事前に測定しているので、値を使って Y を求められる。
3. l_1 を定規で測定し、 l_2 をレーザー距離計を使用して測定する。
4. セオドライトの水平方向の角度を 0 にもどす。プローブホルダーを鏡にレーザーが当たる位置に持ってくる。垂直方向の角度を適宜調節し、鏡にレーザーを当てる。
5. セオドライトのピントを調節し、レーザーのスポットが最小になるようにする。方眼紙上のスポットのある場所の目盛りを読み取る。

プローブホルダーの i 軸周り回転を ϕ_i のように表すことにする ($i = x, y, z$)。角度の符号は、図 3.2.2 のようにとる。

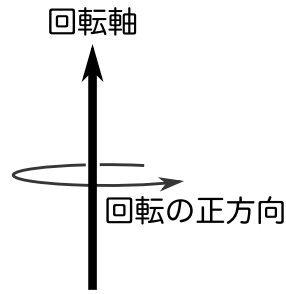


図 3.2.2 角度の符合

X, Y, θ などの意味は図 3.2.1, 式 3.2.1, 3.2.2 を参照。測定結果は以下ようになった。

3.2.2 セッション 1

プローブホルダーケガキが磁石座標系の原点にあるときに測定した。

項目	値
l_1	$570 \pm 1 \text{mm}$
l_2	$3166 \pm 3 \text{mm}$
X	$-45 \pm 1 \text{mm}$
ϕ_y	$0.41^\circ \pm 0.01^\circ$
Y	$77.4 \pm 1 \text{mm}$
θ	$1.54^\circ \pm 0.01^\circ$
ϕ_x	$-0.98^\circ \pm 0.01^\circ$

表 3.2.1 上流セオドライトによる測定結果

項目	値
l_1	$382 \pm 1 \text{mm}$
l_2	$1534 \pm 3 \text{mm}$
X	$-22 \pm 1 \text{mm}$
ϕ_y	$0.33^\circ \pm 0.02^\circ$
Y	$114 \pm 1 \text{mm}$
θ	$1.99^\circ \pm 0.01^\circ$
ϕ_z	$-0.09^\circ \pm 0.01^\circ$

表 3.2.2 ヨーク内セオドライトによる測定結果

2 枚の鏡の組付き角は、別の測定 (4.3.4 節参照) から 90.05° であることがわかっている。この組付き角を補正すると、側面鏡 (ヨーク内セオドライトによる測定を行った鏡) による ϕ_y の測定値は $0.33^\circ + 0.05^\circ = 0.38^\circ$ となる。これは独立な測定値である正面鏡による測定値 0.41° と 1.8σ の範囲内で一致している。今後の解析の際には、正面鏡で測定した ϕ_y を用いる。

3.2.3 セッション 4

プローブホルダーケガキが $(0, 10, 0)$ にあるときに測定した。

項目	値
X	$-44\text{mm}\pm 1\text{mm}$
ϕ_y	$-0.40^\circ\pm 0.01^\circ$
Y	$79\text{mm}\pm 1\text{mm}$
θ	$1.69^\circ\pm 0.01^\circ$
ϕ_x	$-1.13^\circ\pm 0.01^\circ$

表 3.2.3 上流セオドライトによる測定結果

項目	値
l_1	$393\text{mm}\pm 1\text{mm}$
l_2	$1522\text{mm}\pm 1\text{mm}$
X	$-20\text{mm}\pm 1\text{mm}$
ϕ_y	$0.30^\circ\pm 0.02^\circ$
Y	77mm
θ	$0.98^\circ\pm 0.01^\circ$
ϕ_z	$-0.31^\circ\pm 0.02^\circ$

表 3.2.4 ヨーク内セオドライトによる測定結果

2枚の鏡の組付き角を補正すると、側面鏡（ヨーク内セオドライトによる測定を行った鏡）による ϕ_y の測定値は $0.30^\circ+0.05^\circ=0.35^\circ$ となる。これは独立な測定値である正面鏡による測定値 0.40° と 2.2σ の精度で一致している。

セッション 4 では、励磁した状態で正面鏡と上流セオドライトを使って複数の z 座標で角度を測定した。最終的な結果のみまとめる。

ケガキの座標	ϕ_x	ϕ_y
(0, 10, -394.8)	$-1.14^\circ\pm 0.01^\circ$	$-0.42^\circ\pm 0.01^\circ$
(0, 10, -204.8)	$-1.12^\circ\pm 0.01^\circ$	$-0.42^\circ\pm 0.01^\circ$
(0, 10, 195.2)	$-1.12^\circ\pm 0.01^\circ$	$-0.38^\circ\pm 0.01^\circ$
(0, 10, 385.2)	$-1.11^\circ\pm 0.01^\circ$	$-0.39^\circ\pm 0.01^\circ$

表 3.2.5 複数の測定点における上流セオドライトによる角度の測定結果

これらの結果から、複数の測定点において測定した際、角度のばらつきは 2σ 程度であることがわかる。

第 4 章

プローブの校正

この章では、磁場測定に用いたホールプローブの校正について説明する。プローブ読み出し値のゼロ点補正、位置および角度の校正について、手法と結果を述べる。

4.1 オフセットの補正

ホール素子は、ホール電圧に加えてゼロ磁場下でも一定のオフセット電圧がある。ホールプローブを使う際には、オフセットを補正する必要がある。電流変動モニター用の 1 軸プローブを設置する前に、ゼロガウスチェンバーに入れてオフセットを除去した。3 軸プローブは大きすぎてゼロガウスチェンバーに入らない。そのため、1 軸プローブを各軸にあて、1 軸プローブの値と 3 軸プローブの値の両方を記録した。1 軸プローブのオフセットはすでに除去しているから、3 軸プローブのオフセットは 3 軸プローブの出力値から 1 軸プローブの出力値を引くことで得られる。結果は以下のようになった。

プローブ	オフセット [G]
X	14.4±0.7
Y	2.35±0.7
Z	9.70±0.7

これらの精度は、1 軸および 3 軸プローブの分解能によるものである。

4.2 プローブ位置の校正

磁場測定における測定では、プローブホルダー位置の測定ではケガキの位置を測定した。しかし、ケガキの位置とプローブの位置は異なるため、プローブの磁石座標を求めるためにはケガキに対するプローブの相対位置を測定する必要がある。また、プローブの有感領域は $1 \times 0.5\text{mm}$ と広く、その中で最も感度がある場所を測定する必要がある。

4.2.1 ケガキと基準点の相対位置

プローブの有感領域の近くに図 4.2.1 に示す基準点を定め、ケガキと基準点の相対位置を測った。ケガキと基準点の相対位置の測定は、定盤にプローブホルダーを載せ、ノギス

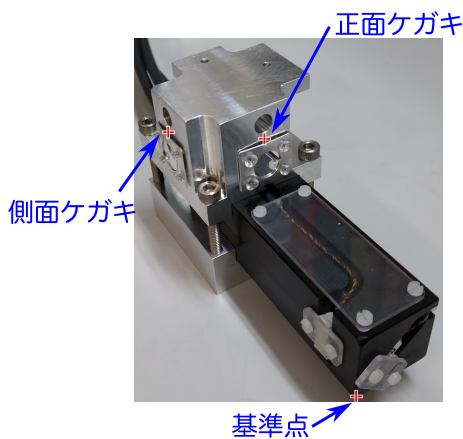


図 4.2.1 プローブの基準点、ケガキの相対位置

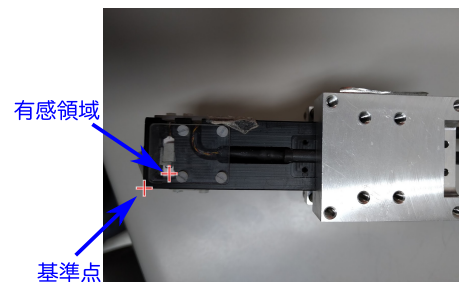


図 4.2.2 X プローブの基準点、有感領域の位置

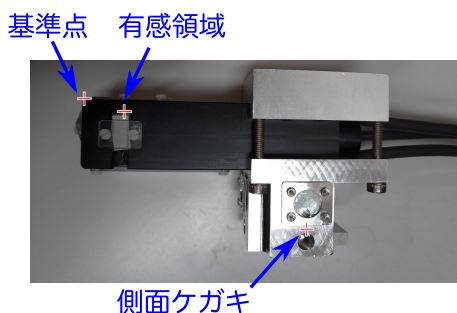


図 4.2.3 Y プローブの基準点、有感領域の位置

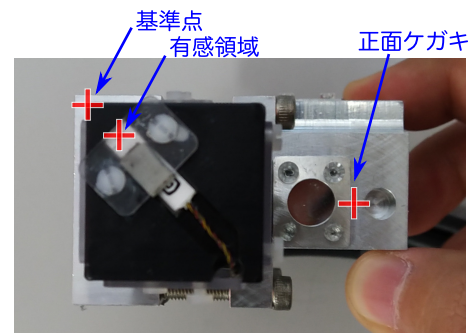


図 4.2.4 Z プローブの基準点、有感領域の位置

とハイトゲージで測定した。磁場測定の際にプローブホルダーを設置した向きで、基準点の x 座標からケガキの x 座標を引いたものを $\delta x, \delta y, \delta z$ と定義する。

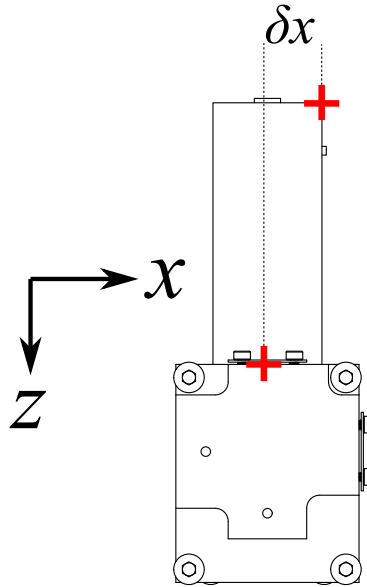


図 4.2.5 ケガキと基準点の相対位置。座標系は、磁場測定の際にプローブを設置したときの磁石座標系である。

プローブホルダーの傾きはこの段階では考えず、後の解析で取り込む (5.5 節参照)。ケガキは 2 つあるが、磁場測定の際に x, y を測定する正面ケガキを使って $\delta x, \delta y$ を計算し、 z を測定する側面ケガキを使って δz を計算した。結果は以下ようになった。

基準点	δx	δy	δz [mm]
X	12.0 ± 0.05	-44.7 ± 0.05	-80.1 ± 0.05
Y	12.5 ± 0.05	-44.2 ± 0.05	-80.3 ± 0.05
Z	12.0 ± 0.05	-44.2 ± 0.05	-80.9 ± 0.05

表 4.2.1 ケガキと基準点の相対位置

精度はノギスとハイトゲージによるものである。プローブはアルミ製の直方体のブロックに切削された溝に押しえつけて固定してある。基準点からの溝の深さはプローブの法線方向の位置に相当する。これらの値をノギスで測定した。その結果は以下ようになった。

基準点	溝の深さ [mm]
X	5.9
Y	5.9
Z	2.9

表 4.2.2 基準点からの溝の深さ

精度はノギスとハイトゲージによるものである。

4.2.2 基準点と有感領域の相対位置

プローブの有感領域を測定するためには、局所的に絞られた磁場をプローブ上でスキャンし、プローブの出力が最大になる位置を求めればよい。この測定は J-PARC E05 実験において S2S 電磁石の磁場測定で行われた実績がある [14]。局所的に絞られた磁場は、円錐形に削られた SS400(鉄)製のピンにネオジウム磁石を貼り付けることで作り出す。

ピンがつくる磁場

ピンからの軸方向の距離を z とする。様々な z についてこの鉄がつくる磁場を計算すると、図 4.2.7 のようになった。

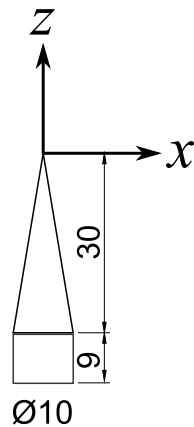


図 4.2.6 ネオジウム磁石、円錐形ピンの外観と座標系

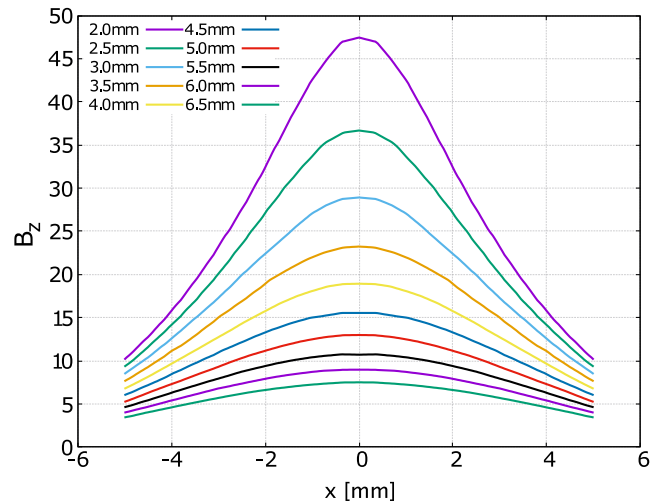


図 4.2.7 円錐形ピンのつくる磁場。各線は円錐頂点からの距離 z に対応している。

セットアップ

この測定の設定の様子を図 4.2.8 に示す。

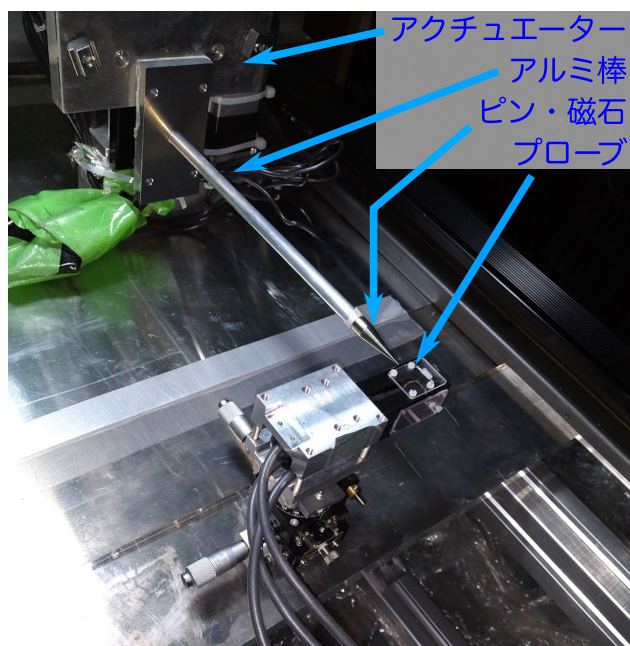


図 4.2.8 位置校正実験のセットアップ

磁場測定で使用した電動アクチュエーターにアルミ製の棒を取り付け、その先にネオジウム磁石と鉄製の円錐形ピンを取り付ける。プローブをアクリル板に取り付け、アクリル板をアクチュエーターの架台の縁に合わせることでアクチュエーターの軸と平行にする。架台はアクチュエーターと精密に平行になるように調整されているわけではないため、このセットアップにおけるピンのプローブに対する角度はそれほど正確ではない。後の解析では、角度の精度を大きめに 2° 程度と見積もった。電動アクチュエーターを 0.2mm ずつ動かすことでプローブの表面をスキャンして、そのときのアクチュエーターの座標とプローブの読み値を記録した。スキャン方向は、図 4.2.9, 4.2.10, 4.2.11 に示すように、プローブ表面の独立な二軸にとった。

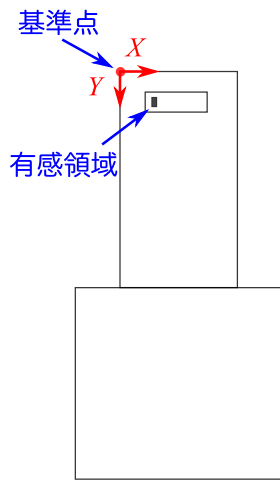


図 4.2.9 X プローブのスキャン方向

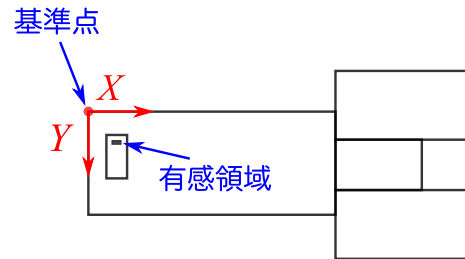


図 4.2.10 Y プローブのスキャン方向

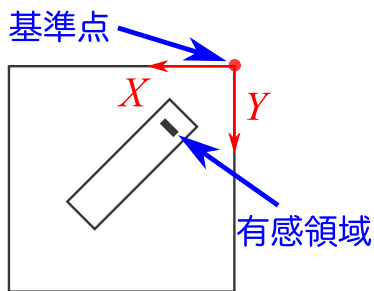


図 4.2.11 Z プローブのスキャン方向

ピンからプローブまでの距離が可能な限り短くなるように、プローブにつけられている保護用のカバー表面にピンを設置した。このときのピン先端からプローブまでの距離は X,Y プローブで 5.5mm、Z プローブで 2.5mm であった。

結果

以上のセットアップにより測定した点の座標 X, Y と、プローブの読み値の関係の測定結果と、フィット結果を図 4.2.12, 4.2.12, 4.2.12 に示す。フィット関数は放物面

$$f(X, Y) = A(X - B)^2 + A(Y - C)^2 + D \quad (4.2.1)$$

を使った。 B, C がピーク位置に対応する。

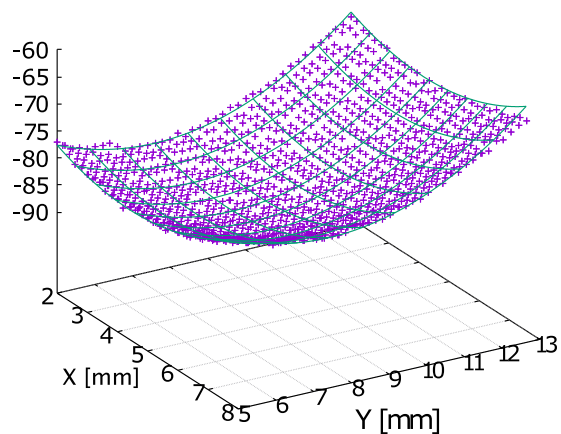


図 4.2.12 Xプローブの基準点からの位置の測定結果

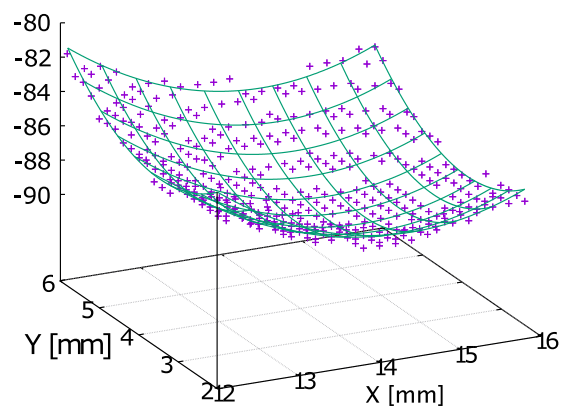


図 4.2.13 Yプローブの基準点からの位置の測定結果

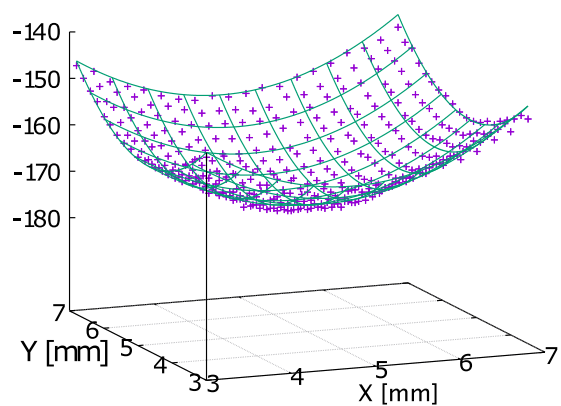


図 4.2.14 Zプローブの基準点からの位置の測定結果

円錐形ピンがプローブに対して傾いていると、ピーク的位置が中央からずれてしまう。今回のセットアップではプローブが取り付けられたアクリル板をアクチュエーターが取り付けられた架台の縁に沿わせることで角度を合わせたが、その精度は 2° 程度だと見積もった。計算磁場によれば、 2° の角度の誤差は位置のずれにして 0.1mm に相当する。フィット結果をまとめる。

プローブ	B [mm]	C [mm]
X プローブ	4.4 ± 0.0	7.6 ± 0.0
Y プローブ	13.5 ± 0.0	4.4 ± 0.0
Z プローブ	3.7 ± 0.0	3.7 ± 0.0

表 4.2.3 基準点からプローブ有感領域の相対位置のまとめ

フィットの際は、磁場の値の誤差としてプローブの分解能 $0.5G$ を取り入れているが、フィッティングエラーは 0.008mm 程度と測定精度よりもはるかに小さかった。

有感領域のプローブ法線方向の位置は測定できない。この値はデータシート (2.7.5 節参照) の $0.9 \pm 0.1\text{mm}$ を用いることにする。

4.2.3 ケガキとプローブ有感領域の相対位置

4.2.1, 4.2.2 節の結果を組み合わせて、ケガキとプローブ有感領域の相対位置を求めた。4.2.1 節と同じく、磁場測定の際にプローブホルダーを設置した向きで、有感領域の x 座標からケガキの x 座標を引いたものを $\delta x, \delta y, \delta z$ と定義する。

プローブ	δx [mm]	δy [mm]	δz [mm]
X	7.6 ± 0.1	-39.7 ± 0.1	-72.5 ± 0.1
Y	7.5 ± 0.1	-39.8 ± 0.1	-66.8 ± 0.1
Z	7.3 ± 0.1	-39.5 ± 0.1	-78.9 ± 0.1

表 4.2.4 ケガキとプローブ有感領域の相対位置

4.3 プローブ角度の校正

磁場測定の際には、プローブホルダーにつけられた鏡でプローブホルダーの角度を測定している。しかし、プローブはプローブホルダーに対してある相対角度で取り付けられている。磁場測定の際のプローブの角度を知るためには、その相対角度を測定する必要がある。その手法と結果を以下に述べる。

4.3.1 角度測定の実理

プローブの角度測定の実理を図 4.3.1, 4.3.2 に示す。

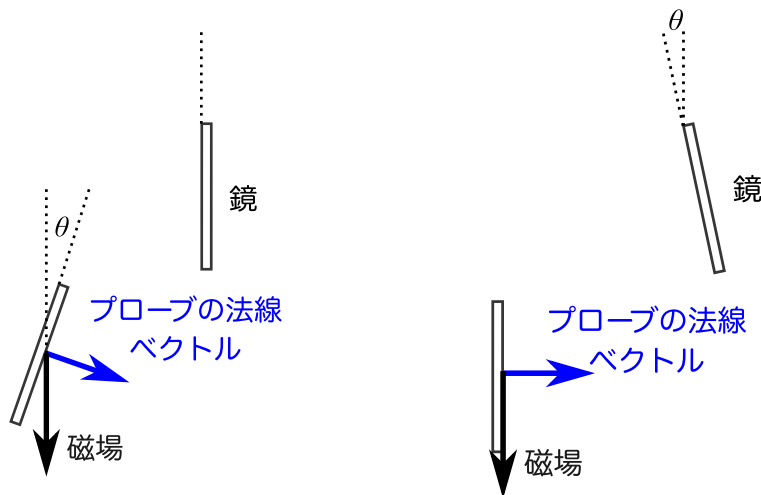


図 4.3.1 プローブの角度測定の実理。鏡が鉛直軸に平行で、プローブが傾いている状態。 θ は鏡とプローブの相対角度にあたる。

図 4.3.2 プローブの角度測定の実理。プローブが鉛直軸に平行で、鏡が傾いている状態。 θ は鏡とプローブの相対角度にあたる。

鏡とプローブの相対角度を θ とする。鏡が鉛直軸に平行な時、プローブは鉛直軸に対して θ だけ傾いている。このとき、プローブから出力される磁場は、磁場が鉛直軸に平行ならば $B \sin \theta$ である。この状態から徐々にプローブホルダーを回転させると、プローブが鉛直軸に並行になり、鏡が鉛直軸から θ だけ傾いている状態になる。このとき、プローブの出力は 0 となる。鏡の角度はレーザーとスクリーンを使って測定できるから、プローブホルダーを少しずつ回転させながら鏡の角度とプローブの出力を記録していくことで、プローブの出力が 0 となる角度を求められる。

4.3.2 プローブホルダーの局所座標系

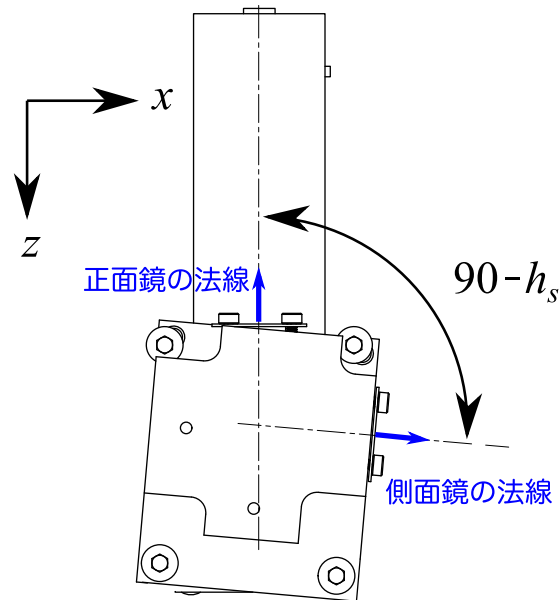


図 4.3.3 プローブホルダーの局所座標系

磁場測定の際、竿にまったく傾きがない理想的な状況下でプローブホルダーが向く方向をプローブホルダーの局所座標系の軸と定義する。軸の方向のみが重要なため、原点をどこにとるかは考えない。この理想的なプローブホルダーの局所座標系に対して、実際に測定に用いるホールプローブが何度傾いているかを測定し、最終的な磁石座標に対する角度を求める際に使用する。具体的に、プローブホルダーの局所座標系は以下のように定義する。プローブホルダーの天面の方向から見たとき、局所座標系の y 軸を天面の法線ベクトルの方向にとる。正面鏡の法線ベクトルと y 軸が張る平面に垂直な方向に x 軸をとる。 z 軸は x, y 軸に垂直にとる。

4.3.3 セットアップ (共通)

校正には、J-PARC E05 実験のために製作された S2S D1 電磁石を用いた。この磁石はすでに磁場が測定されており [14]^{†1}、磁極端から十分内側であれば磁場の一様性が非常に

^{†1} 参考文献は S2S D1 の磁場測定を行った論文である。この章の解析では、同論文の著者からいただいた計算磁場、図面を使用した。計算磁場は同論文の測定に基づいて測定結果に合うように計算されたものである。

高く、ほとんど重力方向の磁場しかなくなることがわかっている。そのため、プローブの角度を校正するのに適している。印可電流は 2500A で測定を行った。S-2S D1 電磁石の形状を図 4.3.4, 4.3.5 に示す。

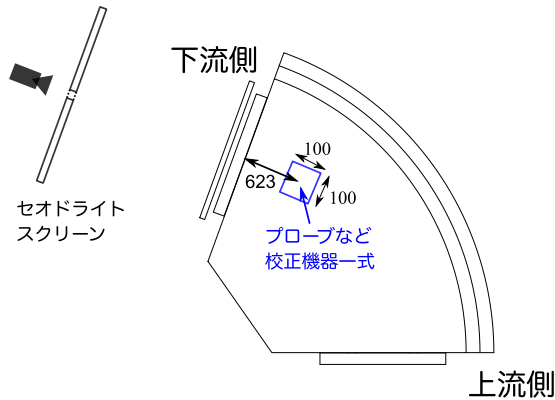


図 4.3.4 S2S 電磁石を上から見た図 [7]

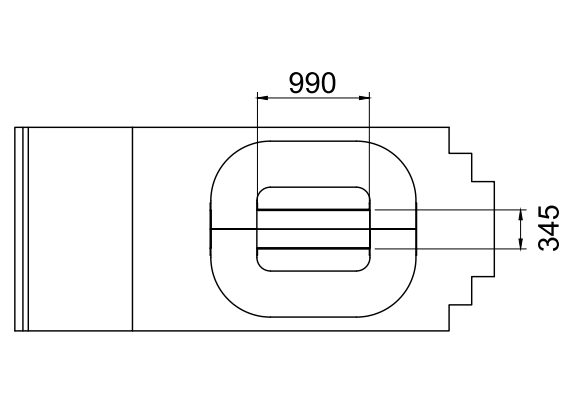


図 4.3.5 S2S 電磁石を横から見た図 [7]

校正機器一式は磁石の中の下流側磁極端から 623mm の位置の下磁極に貼り付けたアクリル板にボルトで固定した。また、磁石の中の 1 点に NMR プローブを固定し、後の磁場測定における 5.1.1 節と同様に電流変動を補正した。プローブのオフセットの補正は、磁場測定と同じ方法 (4.1, 5.6 節) によって行った。下流側にはセオドライトとスクリーンが置かれており、3.2 節と同様に鏡の角度を測定することができる。スクリーンの座標は、鉛直上向きを Y の正方向、構成機器からスクリーンに向かって右手を X の正方向にとる。ただし、S2S D1 電磁石は FM 電磁石と違い磁極の側面が塞がっており、FM 電磁石の磁場測定のとおり側面から鏡にレーザーを当てて角度を測定することはできない。そのため、側面の鏡にレーザーを当てるためには、セオドライトの位置はそのままにプローブホルダーを 90° 回す必要がある。測定するプローブおよび角度によって測定の仕方が大きく分けて 2 つに分かれるため、それぞれについて説明する。

4.3.4 Z プローブの x 軸まわりの角度、Y プローブの z 軸まわりの角度

セットアップ

アクリル板の上に 5 つの回転軸が置かれ、それぞれを用いて角度の校正ができるようになっている。

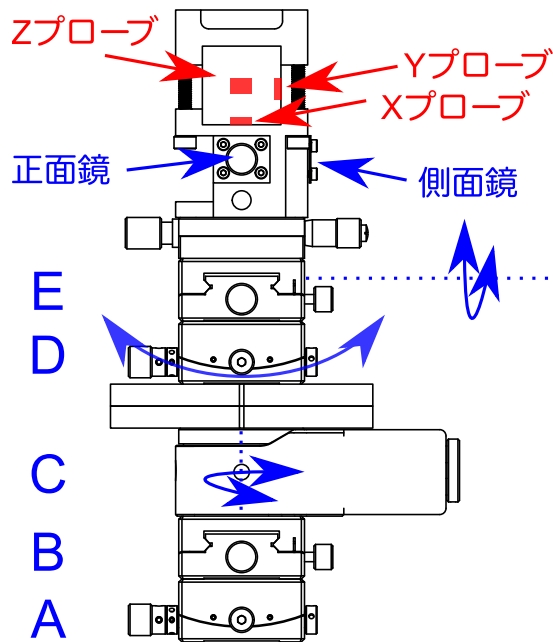


図 4.3.6 校正機器（下流セオドライト側から見た図）

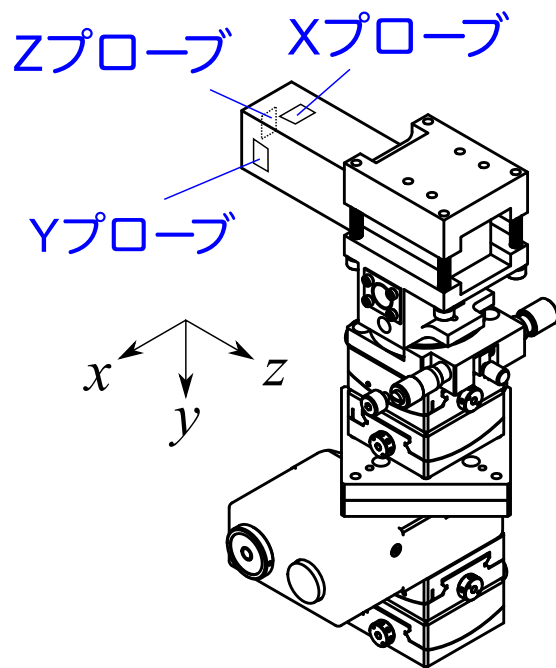


図 4.3.7 校正機器（斜めから見た図）

磁場測定に使う場合とはプローブホルダーは天地が逆に固定されていることに注意が必要である。図 4.3.7 の座標軸はプローブホルダーの局所座標系を表している。2.7.4 節に述べたように、X プローブは y 方向、Y プローブは $-x$ 方向を向いている。回転ステージ A, B, D, E (シグマ光機製 GOHB-40A40) は手動で回転できる。電動ステージ C (シグマ光機製 SGSP-40YAW) はステッピングモーターで駆動でき、36000pulse が 90.00° に対応している。繰り返し位置決め精度 0.02° で回転させることができる。

角度の基準

まず、“角度の基準”を次のように定義する：

1. ステージ D,E を取り外した状態で、ステージ A,B を使い電動ステージ C の上面が水平になるように高精度泡水準器で合わせる。泡水準器は 1 目盛り 0.00115° の精度だが、その精度で合わせるのが難しかったため 10 目盛り $=0.0115^\circ$ の精度で合わせた。
2. ステージ D,E を追加し、ステージ D,E のみを回してステージ E の上面を同様に水平にする。
3. プローブホルダーをステージ E の上面に取り付ける
4. セオドライトのレーザーを正面鏡に当て、スクリーンの X 座標が 0 になるように

電動ステージ C を回す。

この状態では、プローブホルダーの局所座標系の y 軸は鉛直方向下向き、 yz 平面内にセオドライトがある状態になっている。

鏡の組付角

一般には正面鏡はプローブホルダーの天面と直交していない。つまり、正面鏡は y 軸と平行ではない。正面鏡の法線ベクトルの水平面からの仰角を v_f とすると、 v_f はスクリーンの Y 座標を読み取ることで測定できる。その結果、 $v_f = 0.01^\circ \pm 0.02^\circ$ となった。

次に、電動ステージ C を側面鏡にレーザーが当たるように 36000pulse= 90.00° 回転させた。スクリーンの X, Y 座標を読み取ることで、 $h_s = 90.00^\circ -$ (正面鏡と側面鏡の相対角度)、および側面鏡の法線ベクトルの水平面からの仰角 v_s がわかる。 $h_s = -0.05^\circ \pm 0.02^\circ$, $v_s = 0.01^\circ \pm 0.02^\circ$ となった。つまり、2 枚の鏡は測定精度の範囲内で y 軸に平行だが、互いの組付角は $90.00^\circ + 0.05^\circ \pm 0.02^\circ$ になっている。

S2S 電磁石の計算磁場によると、図 4.3.7 のセットアップでは、磁場の主要な成分は y 方向である。このセットアップで校正に用いるプローブがある位置では、 B_y 以外の成分は高々 2G で、これは角度に 0.01° の誤差を及ぼす。“角度の基準” からステージ E を回していくことで、Z プローブが感じる磁場が大きく変動する。ステージ E を少し回し、レーザーのスクリーン上の座標と磁場の値を記録する操作を繰り返していく。ちょうど出力が 0 となるとき、素子は磁場に平行になっている。その結果は図 4.3.8 のようになった。

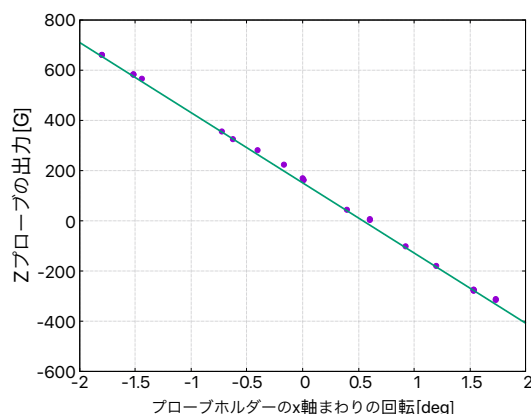


図 4.3.8 プローブホルダーの x 軸まわりの角度 $[\text{deg}]$ と、Z プローブの出力

実線はフィット結果を表している。角度測定誤差、プローブの分解能を取り入れてフィットした結果、Z プローブの出力が 0 となるのはプローブホルダーの x 軸まわりの角

度が $0.54^\circ \pm 0.02^\circ$ のときである。プローブホルダーを x 軸まわりに $+0.54^\circ$ 回したときに Z プローブが磁場の平行になるということは、逆に Z プローブはプローブホルダーに対して x 軸まわりに $-0.54 \pm 0.02^\circ$ 回転しているということになる。

ステージ D を回転させることで、同様に Y プローブの z 軸まわりの角度を求めることができる。結果は $-0.79 \pm 0.02^\circ$ であった。

4.3.5 Z プローブの y 軸まわりの角度、 Y プローブの y 軸まわりの角度、 X プローブの角度

図 4.3.7 のセットアップでは磁場が y 方向なので、プローブの y 軸まわりの角度には感度がなく測定できない。また、 X プローブは回転に対して 2 次のオーダーでしか変化しないため、精度良く角度を測定できない。そこで、それらのプローブの角度を求めるため、プローブホルダーを $90.00 \pm 0.05^\circ$ だけ回した状態で固定できる治具を製作し、高精度水準器を使ってステージ A,B を水平にしたあとに取り付けた。図 4.3.9, 4.3.10 にそのセットアップを示す。

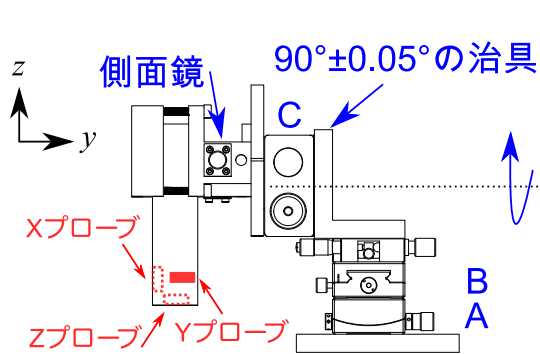


図 4.3.9 校正機器

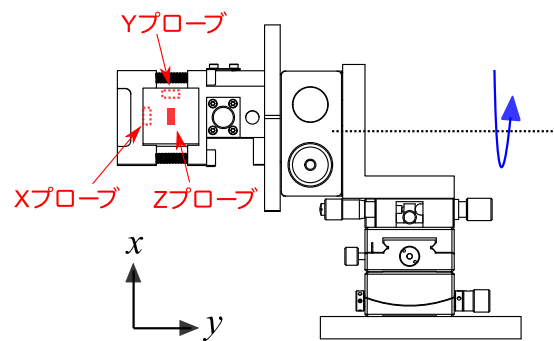


図 4.3.10 校正機器 (電動ステージ C を 90° 回した図)

矢印はプローブホルダーの局所座標系を表している。 Y プローブの y 軸まわりの角度は図 4.3.9 の状態から電動ステージ C を回し、側面鏡を使うことで測定できる。 Z プローブの y 軸まわりの角度は図 4.3.10 の状態から同様に測定できる。図 4.3.9 の場合、 Y プローブが磁極に接近する。計算磁場によると、磁極に近づくほど z 方向以外の磁場成分が強くなり、この位置では $5.1G$ 程度の大きさになる。そのため、 Y プローブの出力に $5.1G$ の誤差があるものとして取り込むことにする。その影響は 0.02° である。

X プローブの x 軸周り、 z 軸周りの角度については、これまでのように回して測ることができない。ステージ A やステージ B を回してしまうと電動ステージ C も傾いてしまう

ため、鏡で角度を正しく測定できなくなってしまうからである。そのため、Xプローブの x 軸周りの角度を θ 、A プローブ (A = X, Y, Z) の出力を B^A として、 $B^Z \sin \theta = B^X$ なる関係式から、また X プローブの z 軸周りの角度 ϕ については $B^Y \sin \theta = B^X$ として求めた。 B^A は A プローブの出力である。この測定には、図 4.3.9 で示したプローブを $90 \pm 0.05^\circ$ 回転させる治具の精度が直接影響を及ぼす。また、左図の測定の際にはプローブが磁極に近づくため、先程の議論と同様にして 0.02° の誤差も考量する必要がある。この方法を簡易方式と呼ぶことにする。

4.3.6 まとめ

すべてのプローブの、プローブホルダーに対する傾きの測定結果をまとめる。測定した磁場を磁石座標系の値に直す際には、これらの値を用いた。

プローブ	回転軸	測定方式	角度
X	x	簡易	$-0.18 \pm 0.05^\circ$
	z	簡易	$-0.17 \pm 0.05^\circ$
Y	y	通常	$0.92 \pm 0.02^\circ$
	z	通常	$-0.79 \pm 0.03^\circ$
Z	x	通常	$-0.57 \pm 0.02^\circ$
	y	通常	$1.15 \pm 0.02^\circ$

表 4.3.1 各素子のプローブホルダーに対する傾きのまとめ

第 5 章

測定結果および考察

測定によって得られたデータは、ホールプローブが傾いているなどの理由から磁石座標系における磁場とは異なる。従って、測定データに校正データを取り込み、磁石座標系の磁場に変換する必要がある。また、測定機器の置き直しによって得た 2 つの独立な測定データである、セッション 1,4 のデータをなめらかにつなげるような並進、回転のパラメーターを求める。以上の解析によって、以上の解析によって、磁石座標系での測定磁場を得ることが出来る。また、独立な測定領域のデータを比較することで、測定精度の評価を行う。

5.1 電流変動の補正

測定中には電流が時間とともに変動する。また、測定が日をまたぐときは一度電源を落として翌日に再投入する。その際には電源の安定性が、絶対磁場の値に影響する。これは常時同じ位置で磁場をモニターした 1 軸ホールプローブのデータを用いて補正する。

5.1.1 電流の変動

セッション 1 の測定期間中の 1 軸プローブの値をプロットする。

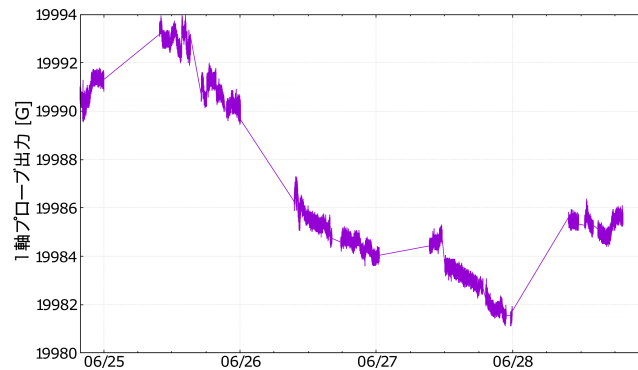


図 5.1.1 セッション 1 を測定中の 1 軸プローブの値

実線でつながれている部分は FM 電磁石の電源が落とされている。電源を落とさない限り、2G 程度の幅で安定していることがわかる。電源を落とすと再励磁する際に 5G 程度変化する。これは 0.025% の変動に相当するが、補正することが可能である。従って、電源の安定性の影響は 0.01% 程度であり、十分小さい。

5.1.2 測定磁場のスケール

セッション 1 の最初の測定点における電流変動モニター用 1 軸プローブの出力を B_{ref}^0 とする。微小な電流変動の範囲内で電流が磁場と線形に対応すると考え、A プローブ (A=X,Y,Z) の出力を

$$B^{A'} = B^A \cdot \frac{B_{\text{ref}}^0}{B_{\text{ref}}} \quad (5.1.1)$$

で補正した。 $B^{A'}$ は補正済み、 B^A は補正前の値である。

5.2 再現性の確認

測定が日をまたぐなどして中断した場合は、再開する際に最後に測定したメッシュ番号から 10 点程度重複して測定した。例えば、メッシュ番号 10000 まで測定して中断した際は、メッシュ番号 9990 から再開するなどした。その際は、一度アクチュエーターの各軸を原点復帰してからメッシュ番号 9990 の位置に動かし、そこから再開している。中断前後の重複した測定データを比べることで、磁場の再現性を確認した。図 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 は、セッション 1 のメッシュ番号 4367 - 4373 における、 $(B_{\text{中断後}}^A - B_{\text{中断前}}^A) / |B_{\text{中断前}}^A| \times 100[\%]$ 中断前後で、各成分が磁場の絶対値に対して変化した割合を示している。 B^A は A プローブ (A=X,Y,Z) の出力である。

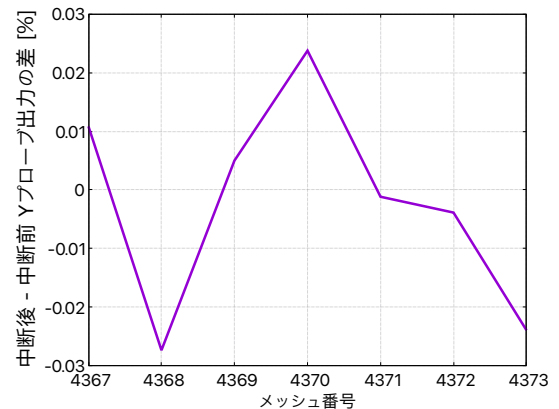
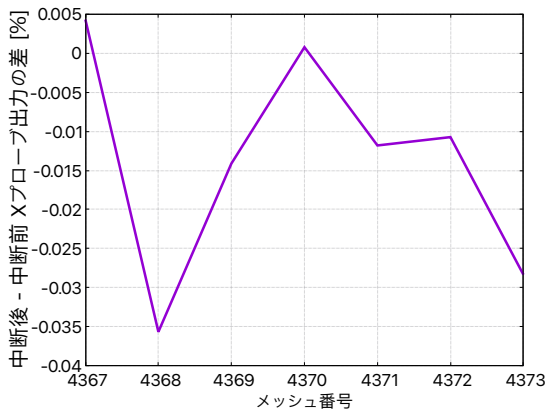


図 5.2.1 測定中断前後の X プローブ出力の差

図 5.2.2 測定中断前後の Y プローブ出力の差

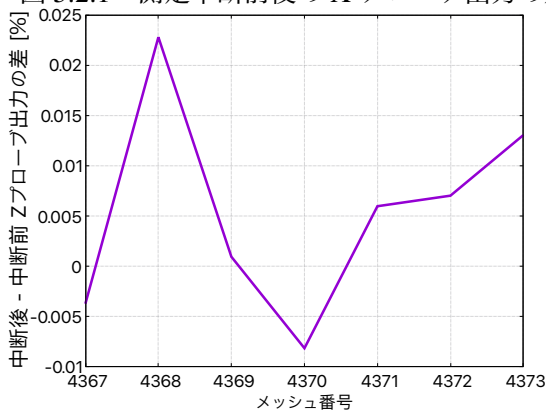


図 5.2.3 測定中断前後の Z プローブ出力の差

各プローブの出力の差は磁場の絶対値に対して最大で 0.035% 程度である。これは、プローブの精度の範囲内で一致している。そのため、同じ測定点を複数回測ったときの磁場の再現性は十分であると判断した。

5.3 同一測定点のデータ取り扱い

各測定点につき、プローブから磁場を 55 回読み取り記録している。また、測定中に中断、再開があった場合、再開時には中断した測定点の数点前から測定し直しているため同じ測定点を重複して測定している。これらの測定データの平均をとる必要がある。図 2.6.1 に示したように、移動から 8 秒程度待てば振動の影響は無視できる。そのため、移動から 8 秒以降の測定データの平均を取れば良い。

まず、メッシュ番号 i の測定データを抽出する。その中には $j = 1 - 55$ 回の測定データが含まれる。55 回の測定で 10 秒なので、 $j \geq 45$ のデータは移動から 8.2 秒以上経過したものである。これらの平均をとったものを測定データとした。

5.4 ケガキ位置のアクチュエーター座標から磁石座標系への変換

測定データにはアクチュエーター座標が記録されている。これをプローブホルダーにつけられたケガキの磁石座標系における位置に変換する必要がある。測量した項目がセッション毎に異なるため、行った変換をセッション毎に説明する。

5.4.1 セッション 1

アクチュエーター原点の補正

アクチュエーター座標を大文字で (X, Y, Z) と表すことにする。励磁していないときの、磁石座標の原点におけるアクチュエーター座標を (X_0, Y_0, Z_0) とする。これらの値は 3.1.1 節で測定している。アクチュエーター原点の補正を行うことで磁石座標系での座標 (x, y, z) は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned}x &= X - X_0 \\y &= Y - Y_0 \\z &= -(Z - Z_0)\end{aligned}\tag{5.4.1}$$

アクチュエーター座標 (X_0, Y_0, Z_0) が磁石座標系の原点に対応することがわかる。(5.4.1) で z 軸のみ符号が逆なのは、 Z アクチュエーターがアクチュエーター座標が増すほど磁石座標系の z が小さくなる方向に設置されているからである。

アクチュエーター傾き、湾曲の補正

3.1 節で測定したアクチュエーター傾き、湾曲の補正を以下のように取り入れる。アクチュエーター Y の座標が Y 、 Z の座標が Z で、ケガキの x 座標が原点にくるときの X アクチュエーターの座標を $X_0(Y, Z)$ のように表すことにする。他のアクチュエーターの組み合わせについても同様の記号で表す。同様に、アクチュエーター Y の座標が Y 、アクチュエーター Z の座標が Z で、ケガキが磁石座標系の z 軸に平行に $x = x_{\parallel} = 667.5\text{mm}$ に立てたセオドライトにあっていいるときのアクチュエーター座標を $X_{\parallel}(Y, Z)$ で表す。複数の X, Y, Z でこれらの値を測定している (3.1.1 節参照) が、それらの間や範囲外については線形補間、補外して用いる。

ここで、以下の量を定義する:

$$\begin{aligned}\Delta x &= X_0(Y_0, Z) - X_0(Y_0, Z_0) + X_{\parallel}(Y, Z_0) - X_{\parallel}(Y_0, Z_0) \\ \Delta y &= Y_0(X, Z_0) - Y_0(X_0, Z_0) + Y_0(X_0, Z) - Y_0(X_0, Z_0) \\ \Delta z &= Z_0(X, Y_0) - Z_0(X_0, Y_0) + Z_0(X_0, Y) - Z_0(X_0, Y_0)\end{aligned}\tag{5.4.2}$$

これらを使い、アクチュエーター傾き、湾曲を補正した磁石座標 (x', y', z') は以下のように表せる:

$$\begin{aligned}x' &= x - \Delta x \\ y' &= y - \Delta y \\ z' &= z + \Delta z\end{aligned}\tag{5.4.3}$$

右辺の (x, y, z) は原点のみを補正した磁石座標の値である。

励磁による位置ずれの補正

励磁しているときとしていないときで位置がずれる効果を次のように取り込む。励磁しているときにアクチュエーター座標が $(X_{\text{off}}, Y_{\text{off}}, Z_{\text{off}})$ の点が磁石座標系では (x, y, z) にあるとする。励磁していないとき、同じ磁石座標に移動させ、そのときのアクチュエーター座標が $(X_{\text{on}}, Y_{\text{on}}, Z_{\text{on}})$ であったとする。ただし、 Z_{on} については測定する術がなく、また Z_{on} と Z_{off} の差は小さいと予想されるため、 $Z_{\text{on}} = Z_{\text{off}}$ を仮定する。

$$\begin{aligned}\delta x &= X_{\text{on}} - X_{\text{off}} \\ \delta y &= Y_{\text{on}} - Y_{\text{off}}\end{aligned}\tag{5.4.4}$$

を定義する。これらを使って、磁場 ON/OFF による位置ずれを補正した磁石座標 (x'', y'', z'') は以下のように表せる:

$$\begin{aligned}x'' &= x' - \delta x \\ y'' &= y' - \delta y \\ z'' &= z'\end{aligned}\tag{5.4.5}$$

$X_0(Y, Z)$ などの値は図 3.1.7, 3.1.8 の場所で測量しているが、測定範囲の一部はこの測量点が囲む領域に含まれない。そのため、アクチュエーターのストロークの両端における値を外挿し、外挿した値と測定した値を使って任意のアクチュエーター座標における値を内挿した。外挿は以下のように行った。

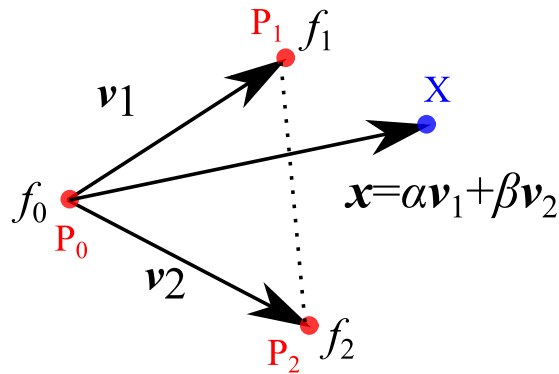


図 5.4.1 外挿のしかた (2次元における概念図)

1. 図 3.1.7, 3.1.8 の点の中から外挿したい点に近く、かつ点を結んでできるベクトルが一次独立となる 4 点を選ぶ。
2. 選んだ 4 点 P_0, P_1, P_2, P_3 を結んでできる 3 本のベクトルを v_1, v_2, v_3 、選んだ 4 点における値を $f(0), f(1), f(2), f(3)$ とする。また、 P_0 と外挿したい点 X を結んだベクトルを x とする。
3. ベクトルの基底を変換することで $x = \alpha v_1 + \beta v_2 + \gamma v_3$ のように表す。
4. $f(0) + \alpha[f(1) - f(0)] + \beta[f(2) - f(0)] + \gamma[f(3) - f(0)]$ で X における値を外挿する。

内挿の方法は後の 5.7.1 節で詳しく説明する。

5.4.2 セッション 4

アクチュエーター原点の補正

アクチュエーター原点の補正はセッション 1 の式 5.4.1 とほぼ同様に行うが、 X_0, Y_0, Z_0 として励磁している状態で測定した原点におけるアクチュエーター座標を用いる。原点を補正したケガキの座標を (x', y', z') とする。

アクチュエーター傾き、湾曲の補正

Z アクチュエーターの傾きについては、セッション 1 と同様に補正する。X, Y アクチュエーターの傾きは次のように補正する。磁石座標系で (x, y) 、Z アクチュエーターの座標が Z のときの X, Y アクチュエーター座標を $X(x, y, Z), Y(x, y, Z)$ とする。原点の補正のみで (x, y) に対応するアクチュエーター座標を $X_{\text{orig}}(x, y, Z), Y_{\text{orig}}(x, y, Z)$ とする。次の値

を定義する:

$$\delta x = X(x, y, Z) - X_{\text{orig}}(x, y, Z) \quad (5.4.6)$$

$$\delta y = Y(x, y, Z) - Y_{\text{orig}}(x, y, Z) \quad (5.4.7)$$

これらを使って、アクチュエーター傾きを補正した磁石座標は

$$\begin{aligned} x'' &= x' - \delta x' \\ y'' &= y' - \delta y' \end{aligned} \quad (5.4.8)$$

と表せる。 $X(x, y, Z), Y(x, y, Z)$ は図 3.1.9, 3.1.10 の場所で測量しているが、測定範囲の一部は測量点に含まれない。その範囲はセッション 1 と同様に外挿した。

5.5 ケガキの座標からプローブの座標への変換

ケガキの位置とホール素子の位置は異なるため、ケガキ位置から各素子の位置へ変換する必要がある。4.2.3 節で求めたプローブホルダーケガキとプローブの相対位置を次のように取り込む。

プローブホルダーケガキの磁石座標系における位置を (x, y, z) とする。

$$\begin{aligned} x^A &= x + \delta x^A - (|\delta z^A| - 20) \sin \theta_y + |\delta y_A| \sin \theta_z \\ y^A &= y + \delta y^A + (|\delta z^A| - 20) \sin \theta_x \\ z^A &= z + \delta z^A - |\delta y^A| \sin \theta_x \end{aligned} \quad (5.5.1)$$

δx^A は A プローブ (A=X,Y,Z) のケガキとプローブ有感領域の相対位置、 θ_a は a 軸 ($a = x, y, z$) 周りの回転、 (x^A, y^A, z^A) はプローブ有感領域の磁石座標である。第二項以降は、ケガキとプローブの相対位置が角度によって変わることが補正している。その概念図を示す:

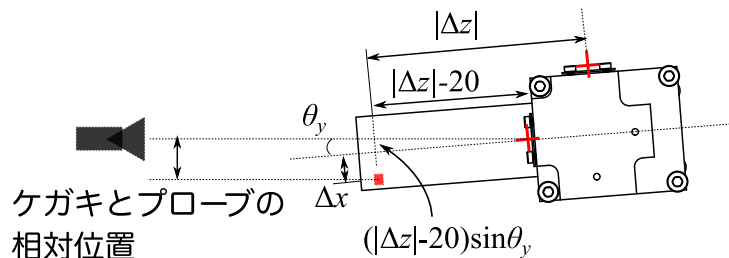


図 5.5.1 ケガキとプローブの位置が角度によって変わるようす

この図はプローブホルダーを上から見た図で、プローブホルダーが y 軸周りに θ_y だけ傾いている。正面ケガキと素子が $|\Delta z| - 20$ だけ離れているため、プローブホルダーの角度によってケガキとプローブの相対位置が機械的な長さ Δx よりも $(|\Delta x| - 20) \sin \theta_y$ だけ広がっていることがわかる。

5.6 ホールプローブのゼロ点補正

4.1 節で測定した、ホールプローブの読み値に対するオフセットを以下のように補正した:

$$\begin{aligned} B^{X'} &= B^X - B_{\text{ofst}}^X \\ B^{Y'} &= B^Y - B_{\text{ofst}}^Y \\ B^{Z'} &= B^Z - B_{\text{ofst}}^Z \end{aligned} \quad (5.6.1)$$

B^A は A プローブ (A=X, Y, Z) の出力、 B_{ofst}^A は A プローブのオフセット、 $B^{A'}$ はオフセットを補正した結果である。

5.7 プローブ角度の補正

プローブホルダーが傾いており、かつプローブホルダーに対してプローブが傾いているため、各素子が出力する磁場の値は磁石座標系での B_x, B_y, B_z とは異なる。その影響を以下のように補正する。

まず、プローブホルダーに対するプローブの傾き、プローブホルダーの傾きを合成して、A プローブ (A=X, Y, Z) の回転を表す回転行列 R^A を求める。次に、プローブが理想的に磁石座標系の各軸と同じ状態に向いているときの法線ベクトルに、上で求めた回転行列をかける。これにより、各プローブの法線ベクトル n^A が求まる。

$$\mathbf{n}^X = R^X \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n}^Y = R^Y \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n}^Z = R^Z \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.7.1)$$

X プローブの傾きがない状態の法線ベクトルが $(1, 0, 0)^T$ でないのは、プローブホルダーにプローブを取り付けるときの向きが X プローブが y 方向を向き、Y プローブが $-x$ 方向を向くように z 軸周りに 90° 回して固定したことによる。Y プローブについても同様である。

これらを使ってプローブの角度を補正することで、プローブの出力を磁石座標座標系での磁場に直して解析することである。プローブの出力から磁石座標系の磁場への変換は次のようにして行う。

5.7.1 同一の点におけるプローブ出力の補完

回転を補正するためには、同一の座標における3素子の出力が必要となる。3軸のプローブは数mm離れているため、同一の座標における出力を求めるためには補完が必要となる。測定メッシュはアクチュエーターの湾曲や磁場による位置ずれのために湾曲しているため、完全な直方体になっていない。そのため、通常の線形補間^{†1}ができず、以下のような補完を行った：

1. 測定点群をドロネー四面体に分割する。
2. 四面体OABC内の点Xでの値を点O, A, B, Cでの値で重みをつけて補完する。

ドロネー四面体分割とは、点群をどの四面体もその外接球に他の点を含まないような四面体に分割することである。2次元での分割の例を図5.7.1に示す。

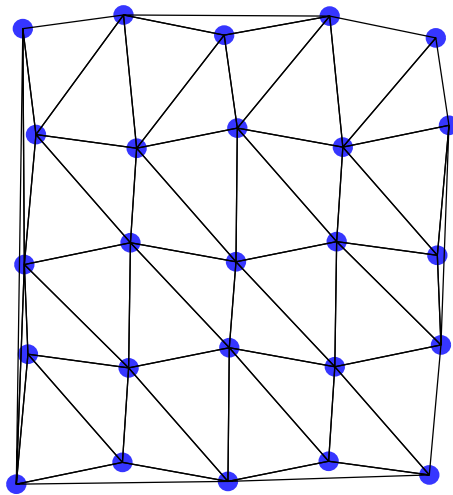


図 5.7.1 2次元でのドロネー三角形分割の例

X, Y, Z プローブの出力をこの方法で補完することで、同一の点における3素子の出力を求めることができる。補完は上記のアルゴリズムが実装されている [1]Python3 の `Scipy.LinearNDInterpolator` で行った。

^{†1} 直方体メッシュの場合、1次元の線形補間を7回繰り返すことで3次元の線形補間ができる。

5.7.2 回転の補正

プローブが出力する値は、プローブの法線ベクトルと磁場の内積が出力されるから、出力される磁場と磁石座標系の磁場には次のような関係がある。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} B^X \\ B^Y \\ B^Z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} n_x^X & n_y^X & n_z^X \\ n_x^Y & n_y^Y & n_z^Y \\ n_x^Z & n_y^Z & n_z^Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \\ &= N \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.7.2)$$

n_a^A は A プローブ (A=X,Y,Z) の法線ベクトルの a 成分 ($a = x, y, z$)、 B^A は A 素子の出力、 B_a は磁石座標系での磁場の a 成分を表す。磁石座標系での磁場を求めるためには N^{-1} を左からかければよい。

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = N^{-1} \begin{pmatrix} B^X \\ B^Y \\ B^Z \end{pmatrix} \quad (5.7.3)$$

5.8 オーバーラップ領域の比較とパラメーターの最適化

セッション 1, 4 は x 方向に 6cm 程度の重なりがある。測定点における X, Y, Z プローブの位置を図 5.8.2 に示す。

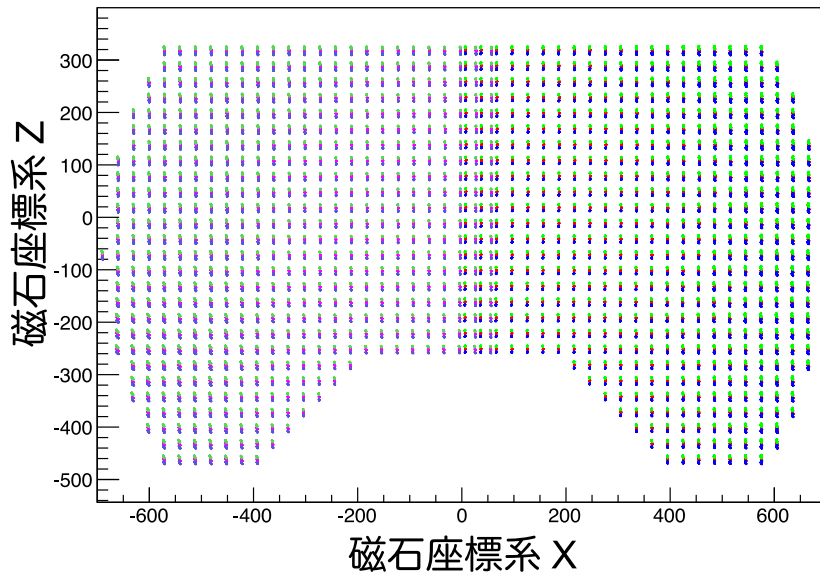


図 5.8.1 セッション 1,4 における X,Y,Z プローブの位置を上から見た図
セッション4の測定列 セッション1の測定列

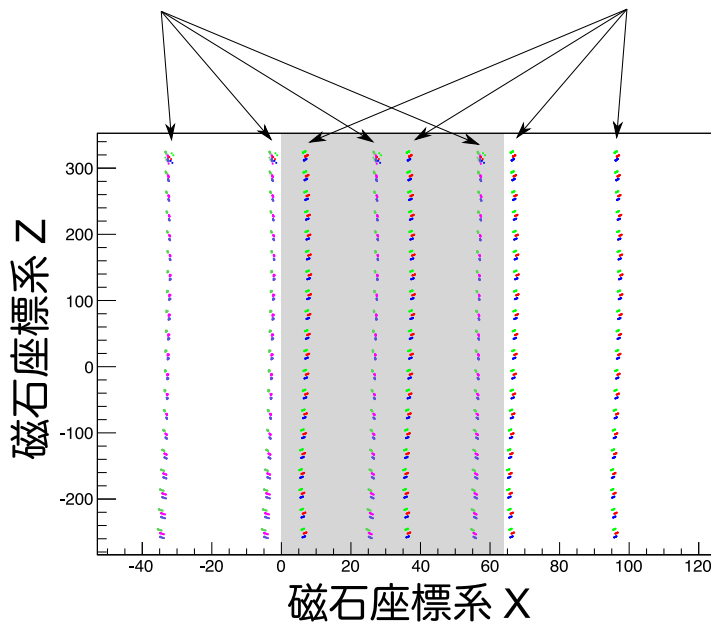


図 5.8.2 拡大した図

赤点は X プローブ、緑点は Y プローブ、青点は Z プローブの位置を表している。この領域の中でセッション 1 と 4 で重複して測定しているのは図 5.8.2 の灰色に塗られた領域である。この領域をオーバーラップ領域と呼ぶことにする。同じ場所を測定しているため、オーバーラップ領域における測定磁場の値はセッション 1,4 で同じにならなければな

らない。しかし、セッション 1,4 の測定点の座標、およびプローブの角度は測量精度の範囲内でずれている。セッション 4 を位置、角度の測定精度の範囲内で並進、回転させるパラメーターを見つけることで、セッション 1,4 のデータをなめらかに接続する。

5.8.1 オーバーラップ領域の残差

まず、この領域のうち、実験の初段階である Run0, 1 で検出器が置かれる $\pm 15^\circ$ の領域の残差を求める。残差は以下の式で定義する。

$$\Delta B_x = \frac{1}{N} \sum \frac{B_x^1 - B_x^4}{|B^4|} \times 100 \quad (5.8.1)$$

$$\Delta B_y = \frac{1}{N} \sum \frac{B_y^1 - B_y^4}{|B^4|} \times 100 \quad (5.8.2)$$

$$\Delta B_z = \frac{1}{N} \sum \frac{B_z^1 - B_z^4}{|B^4|} \times 100 \quad (5.8.3)$$

N は領域内の点数である。これらの値は、1 点あたり磁場の各成分が磁場の絶対値に対して平均何%ずれているかを示している。平均残差を求めたところ、以下のような値になった。

残差の成分	残差の平均	残差の標準偏差
ΔB_x	-0.03	0.15
ΔB_y	-0.01	0.09
ΔB_z	-0.07	0.08

表 5.8.1 Run0,1 で検出器が置かれる領域内の残差

パラメーター最適化の準備として、まず位置、角度のずれが磁場に及ぼす影響を調べた。

5.8.2 位置のずれが測定に及ぼす影響

まず、計算磁場から位置のずれが測定に及ぼす影響を見積もった。ここからの解析では、遮蔽体と SKS 電磁石も含めた計算磁場を使う。計算条件については付録で述べる。計

算した磁場から、次式で表される磁場の勾配を求めた。計算磁場の詳細は付録で述べる。

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{\partial B_x}{\partial x}, & \frac{\partial B_x}{\partial y}, & \frac{\partial B_x}{\partial z}, \\
 \frac{\partial B_y}{\partial x}, & \frac{\partial B_y}{\partial y}, & \frac{\partial B_y}{\partial z}, \\
 \frac{\partial B_z}{\partial x}, & \frac{\partial B_z}{\partial y}, & \frac{\partial B_z}{\partial z},
 \end{array} \quad (5.8.4)$$

$\frac{\partial B_a}{\partial b} \frac{100}{|B|} [\%/mm]$ は、 b 方向に 1mm 測定位置がずれたときに磁場の a 成分が磁場の大きさに対して変化する割合を表す。セッション 1,4 が重複して測定している領域の中の $10 \leq x \leq 60, -100 \leq y \leq 100, -240 \leq z \leq 300$ で、これらの値のプロットを示す。横軸にはこれらの値と相関性の高いものをとっている。これらの値は (5.8 節参照) でセッション同士を接続する際に使用する。

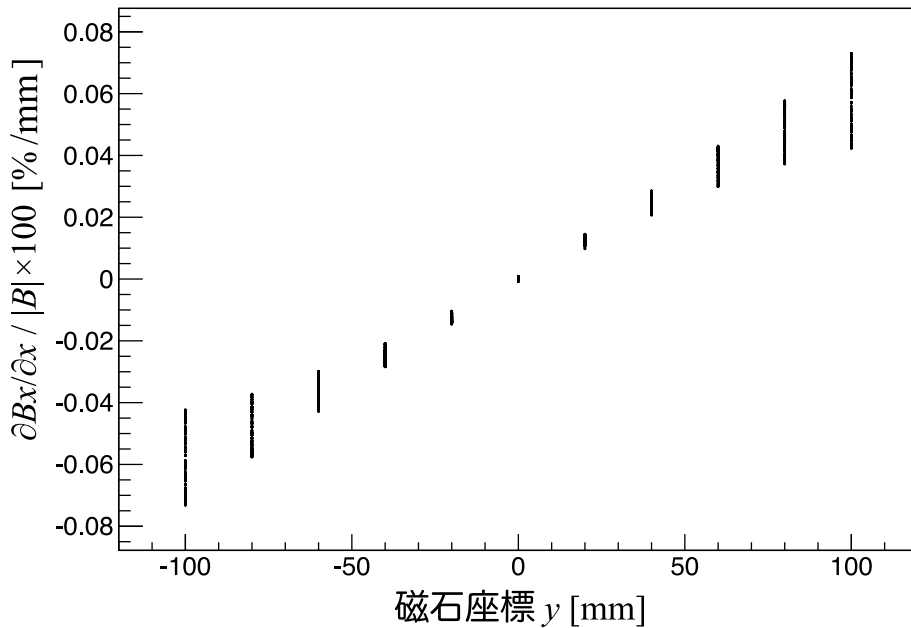


図 5.8.3 x 方向の位置ずれが B_x に与える影響 [%/mm] と y

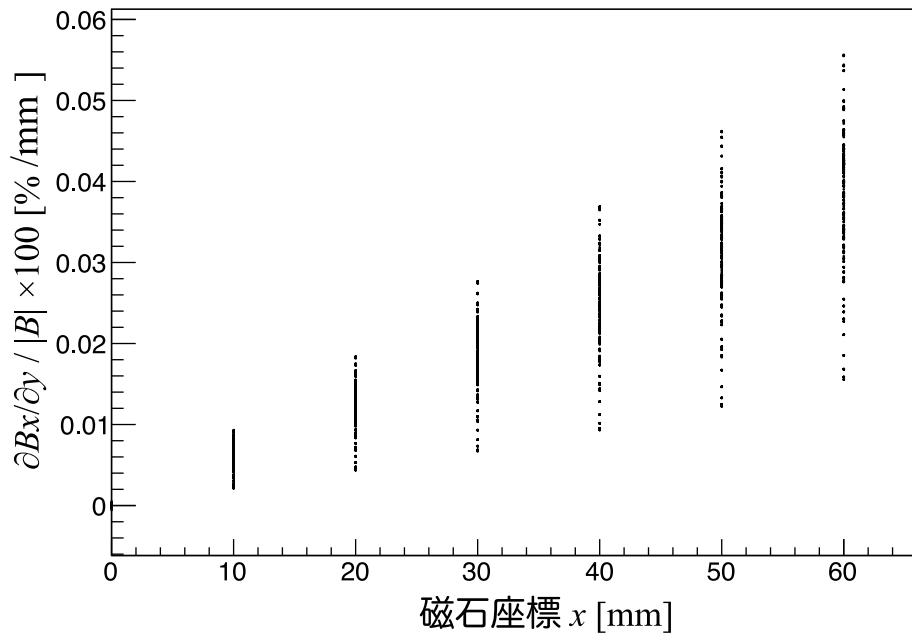


図 5.8.4 y 方向の位置ずれが B_x に与える影響 [%/mm] と x

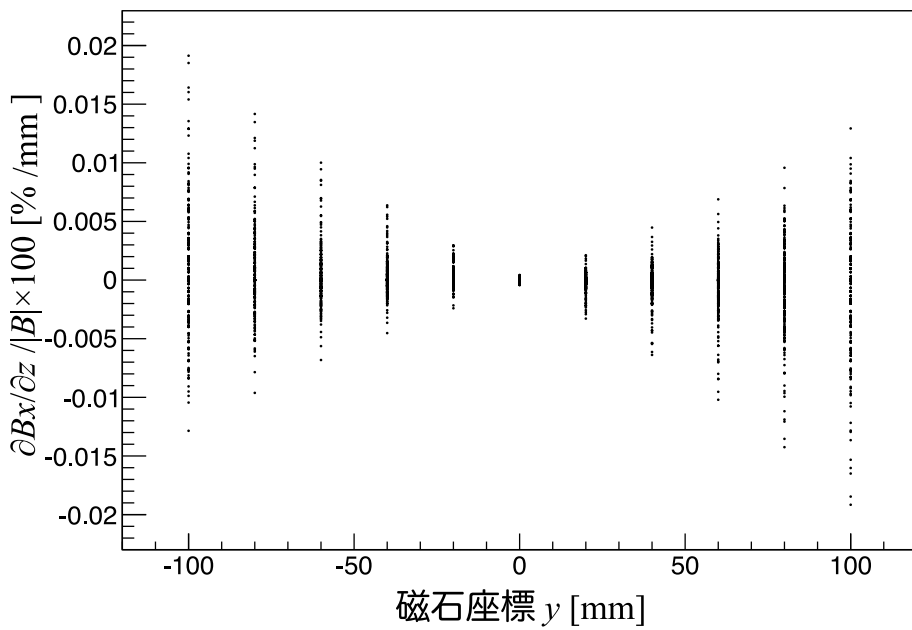


図 5.8.5 z 方向の位置ずれが B_x に与える影響 [%/mm] と z

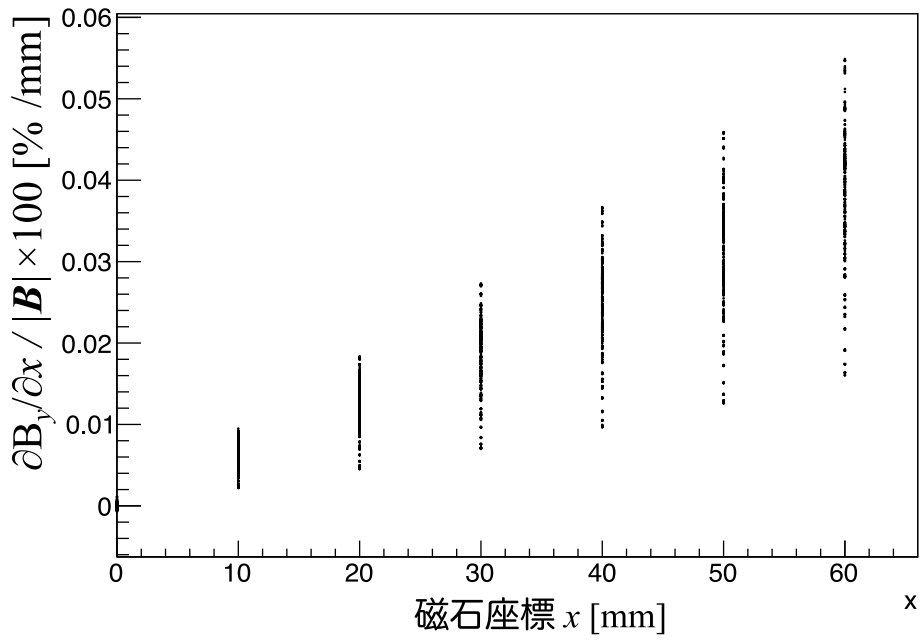


図 5.8.6 x 方向の位置ずれが B_y に与える影響 [%/mm] と x

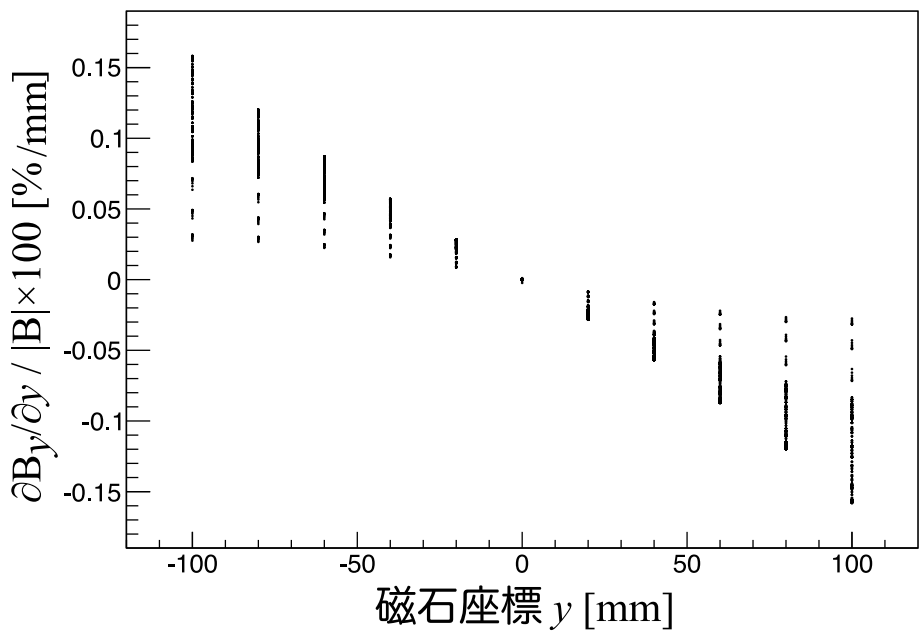


図 5.8.7 y 方向の位置ずれが B_y に与える影響 [%/mm] と y

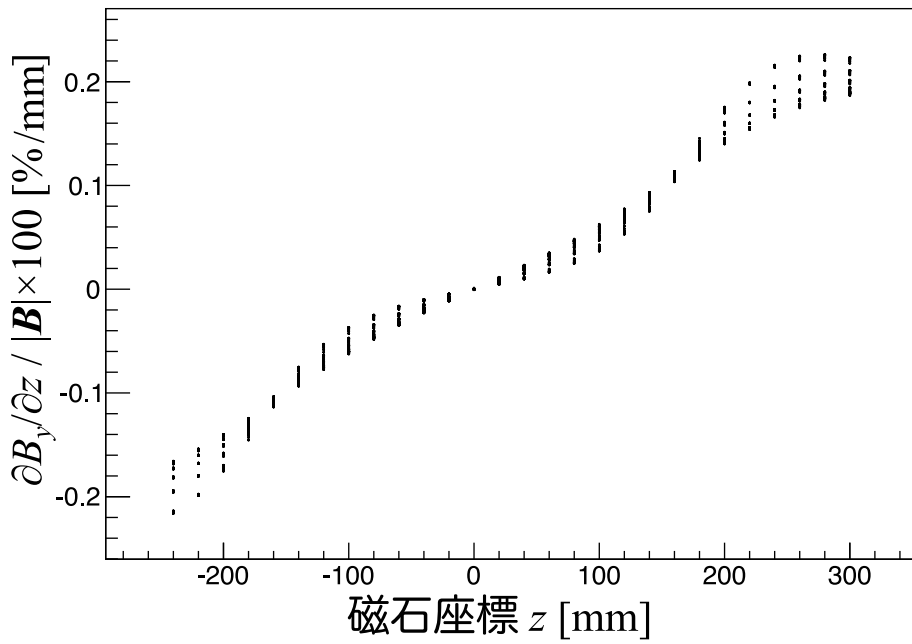


図 5.8.8 z 方向の位置ずれが B_y に与える影響 [%/mm] と z

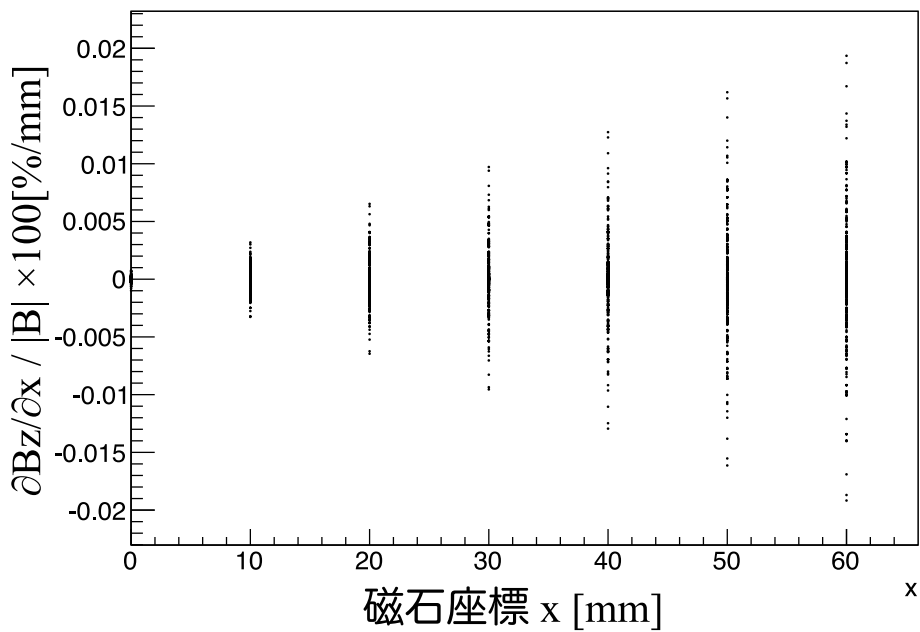


図 5.8.9 x 方向の位置ずれが B_z に与える影響 [%/mm] と x

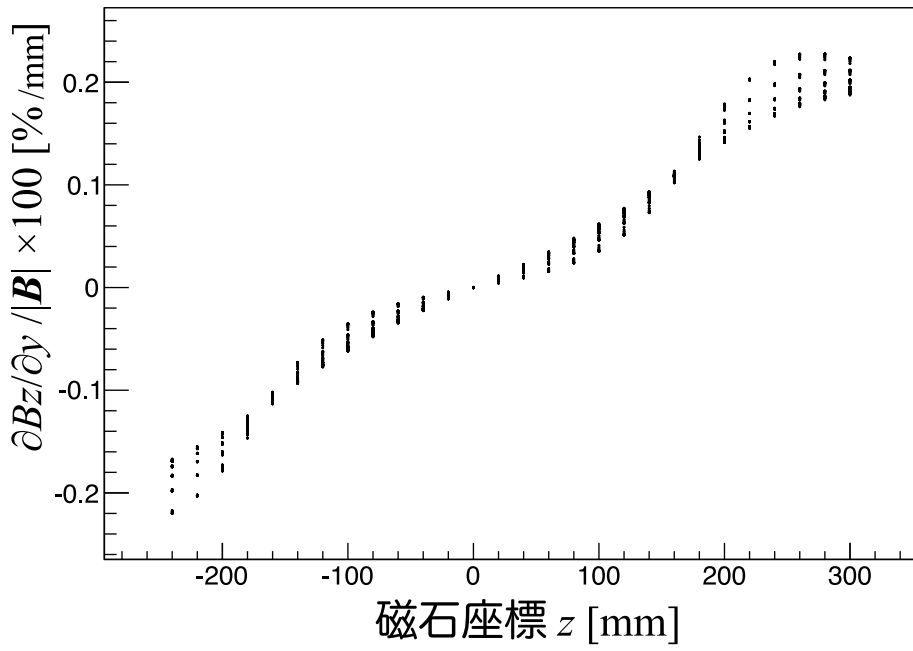


図 5.8.10 y 方向の位置ずれが B_z に与える影響 [%/mm] と z

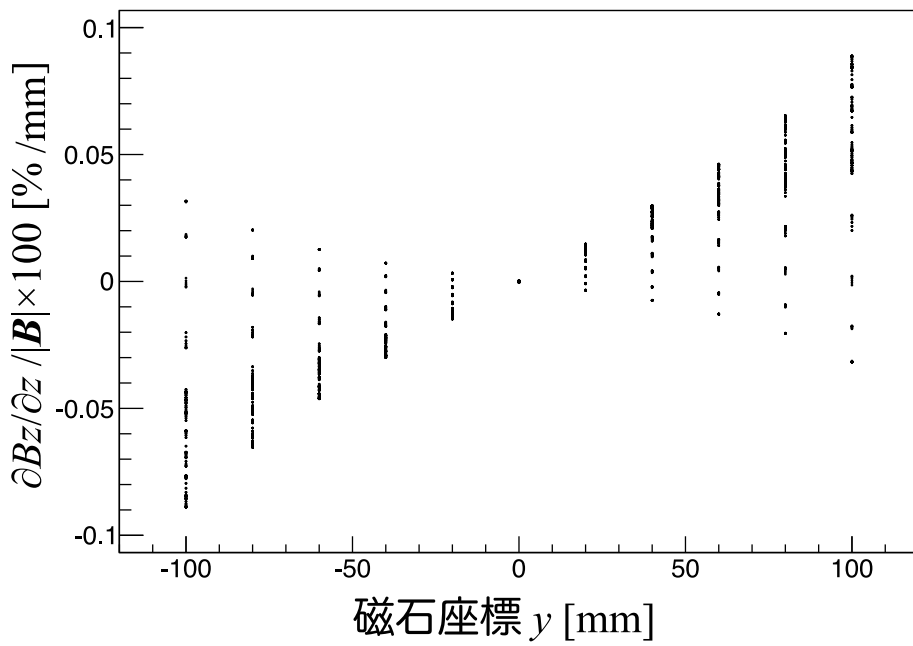


図 5.8.11 z 方向の位置ずれが B_z に与える影響 [%/mm] と y

5.8.3 回転が測定に及ぼす影響

次に、計算磁場からプローブの角度が測定に及ぼす影響を見積もった。計算した磁場から、プローブの角度が測定に及ぼす影響を調べた。A プローブ (A=X,Y,Z) の a 軸まわりの回転を θ_a^A と表すことにする。5.7.3 式を簡略化し、各軸まわりの回転の 1 次のオーダーまで展開すると、次式が得られる:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\theta_z^X & -1 & \theta_y^X \\ 1 & -\theta_z^Y & -\theta_x^Y \\ \theta_x^Z & \theta_y^Z & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^X \\ B^Y \\ B^Z \end{pmatrix} \quad (5.8.5)$$

この式を角度で微分することで次式が得られる:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial \theta_x^X} &= 0, & \frac{\partial B_x}{\partial \theta_y^X} &= B^Z, & \frac{\partial B_x}{\partial \theta_z^X} &= -B^X \\ \frac{\partial B_y}{\partial \theta_x^Y} &= -B^Z, & \frac{\partial B_y}{\partial \theta_y^Y} &= 0, & \frac{\partial B_y}{\partial \theta_z^Y} &= -B^Y \\ \frac{\partial B_z}{\partial \theta_x^Z} &= B^X, & \frac{\partial B_z}{\partial \theta_y^Z} &= B^Y, & \frac{\partial B_z}{\partial \theta_z^Z} &= 0 \end{aligned} \quad (5.8.6)$$

$\frac{\partial B_a}{\partial \theta_b^A} \frac{100}{|B|} [\%/rad]$ は、A プローブの b 軸まわりの角度が 1rad 変化したときに磁場の a 成分が磁場の絶対値に対して変化する割合を表す。1rad はプローブの角度のずれとして大きすぎるため、これらの値を $0.1 \times \pi/180^\circ$ 倍して評価する。これは 0.1° の角度のずれに対する磁場の変化を表している。セッション 1,4 が重複して測定している領域の中の $10 \leq x \leq 60, -100 \leq y \leq 100, -240 \leq z \leq 300$ で、これらの値のプロットを示す。横軸はこれらの値と相関性の高いものをとっている。これらの値は (5.8 節参照) でセッション同士を接続する際に使用する。

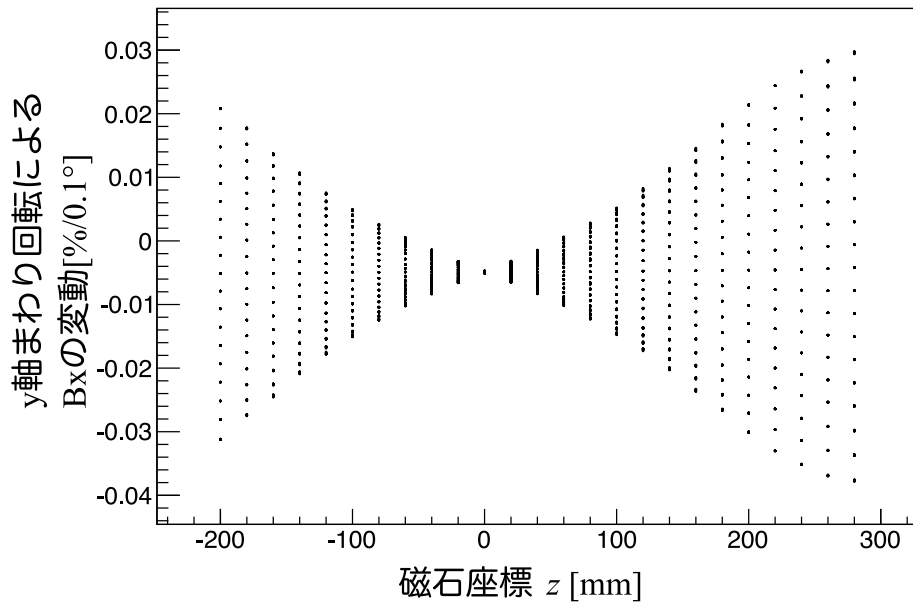


図 5.8.12 y 軸まわりの回転が B_x に与える影響 [%/0.1°] と z

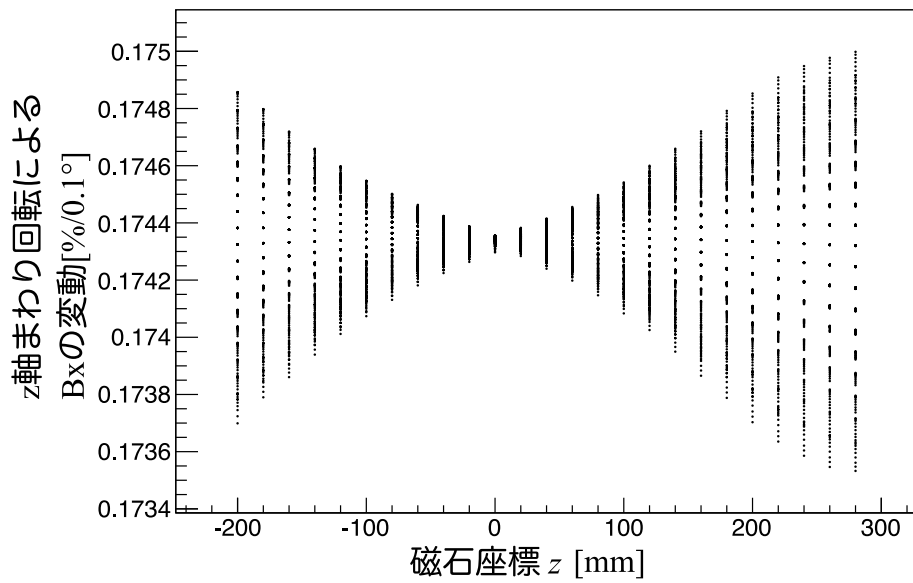


図 5.8.13 z 軸まわりの回転が B_x に与える影響 [%/0.1°] と z

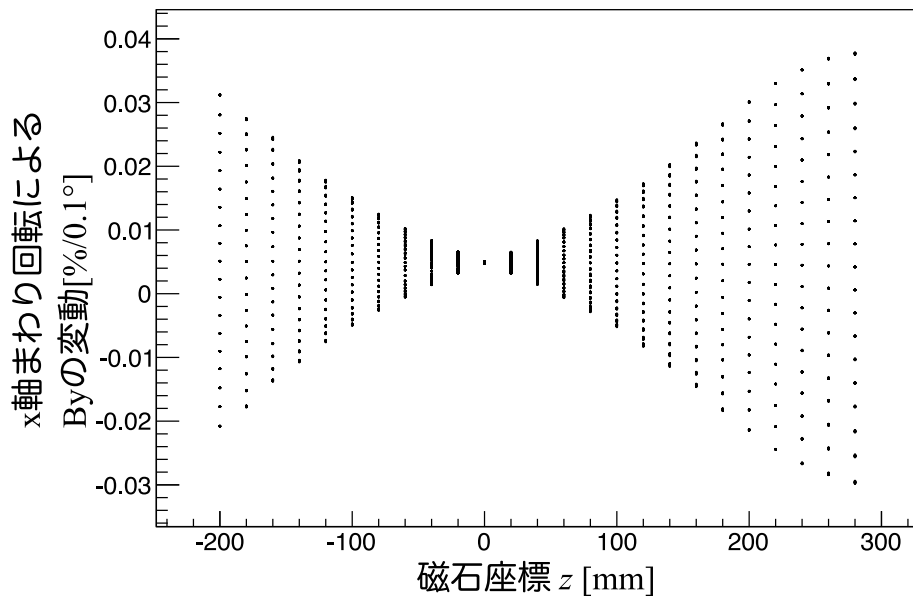


図 5.8.14 x 軸まわりの回転が B_y に与える影響 [%/0.1°] と z

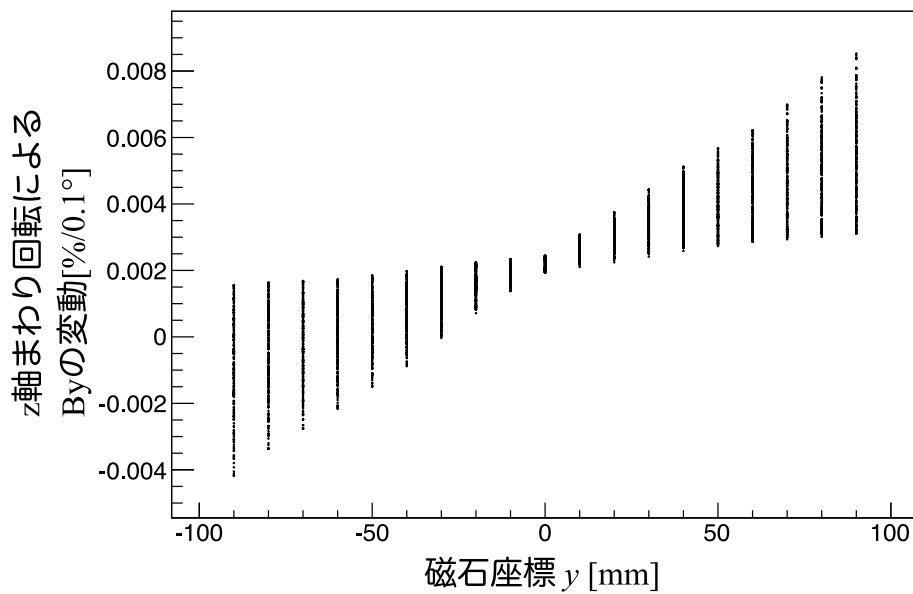


図 5.8.15 z 軸まわりの回転が B_y に与える影響 [%/0.1°] と y

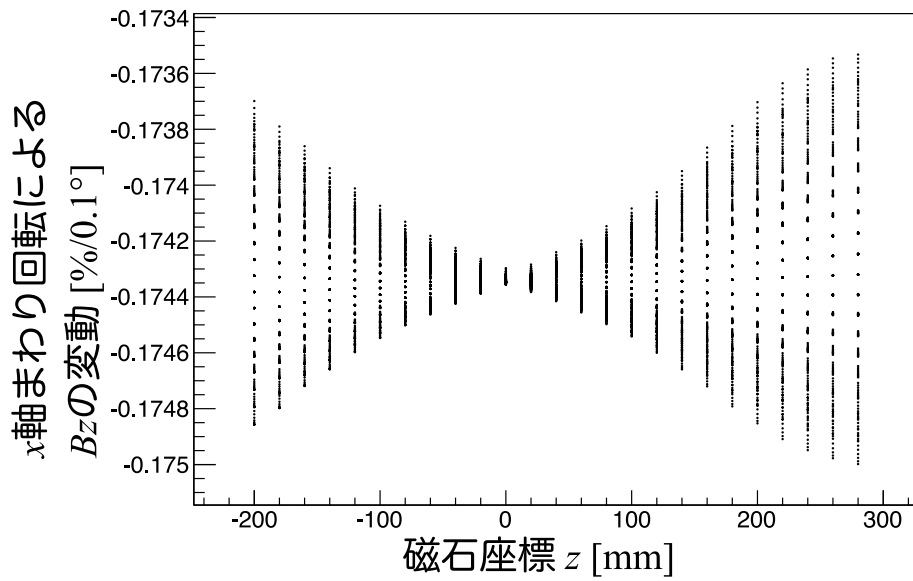


図 5.8.16 x 軸まわりの回転が B_z に与える影響 [%/0.1°] と z

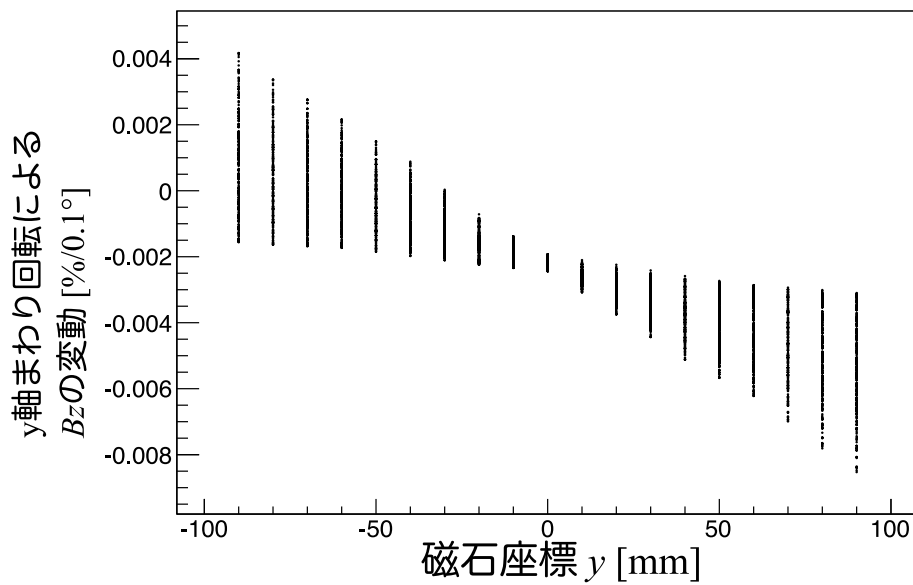


図 5.8.17 y 軸まわりの回転が B_z に与える影響 [%/0.1°] と y

5.8.4 プローブホルダーの位置

前節の結果から、位置のずれ、角度のずれについて、磁場への影響が大きい領域を推測することができる。。1、あるいは2個のパラメーターのみ影響が大きくなる領域を抽出

し、そのパラメーターを調整することでセッション 1 と 4 をなめらかにつなぐように最適化する方針をとった。この節では、セッション 1 における測定磁場を B^1 、セッション 4 における測定磁場を B^4 のように表す。X プローブは、主に B_y 成分を測定している。FM 電磁石では中心付近の磁場はほとんど B_y であることから、中心付近では X プローブの角度のずれはほとんど B_y に影響しない。そこで、全体の並進を表すパラメーターは X プローブを使って合わせることにした。

z 方向の位置のずれ

5.8.2, 5.8.3 節の結果から、 $0 \leq x \leq 10$, $-10 \leq y \leq 10$ の範囲で各パラメーターが B_y に与える影響は以下の通りである。

パラメーター	影響
x 方向位置ずれ	0.01% / mm
y 方向位置ずれ	0.02% / mm
z 方向位置ずれ	0.22% / mm
x 軸まわり角度ずれ	0.04% / 0.1°
z 軸まわり角度ずれ	0.008% / 0.1°

表 5.8.2 $0 \leq x \leq 10$, $-10 \leq y \leq 10$ において位置、角度が与える影響

この領域における $(B_y^1 - B_y^4)/|B^4| \times 100[\%]$ をプロットすると、以下のようになった。

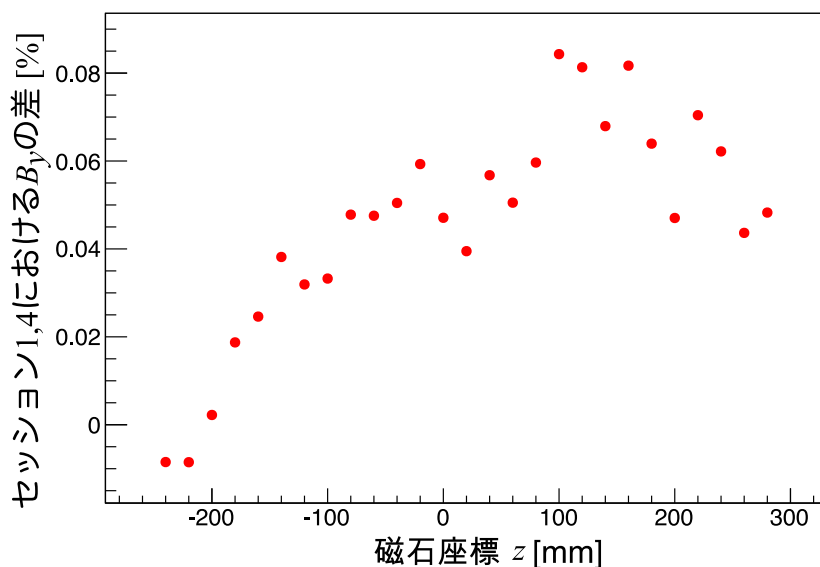


図 5.8.18 $0 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_y の差。横軸は磁石座標系の z にとってある。

ずれが最小になるはずの $z = 0$ において、0.04% のずれがある。これは、プローブの絶対精度が 0.06% から 0.1% であることに起因すると考えられる。また、 z が増すにつれて右上がりになっているのは、図 5.8.8 から z 方向の位置ずれがあるためである。そのため、セッション 4 の原点におけるアクチュエーター座標を z 方向に -0.3mm 並進させた。その結果、セッション 1,4 の B_y の差は図 5.8.19 のようになった。 $z \leq 150$ では z 依存性が小さくなったが、それより先では z に依存している。これは、セッション 1,4 が空間並進だけではつながらず、アクチュエーターの歪みなどの局所的な位置のずれが補正しきれていないことを示唆している。補正しきれていないずれは、位置のずれに換算すると 0.3mm 程度であり、測定の誤差と同程度である。

x 方向の位置のずれ

$-10 \leq y \leq 10, -20 \leq z \leq 20$ の範囲で、各パラメーターが B_y に与える影響は以下の通りである。

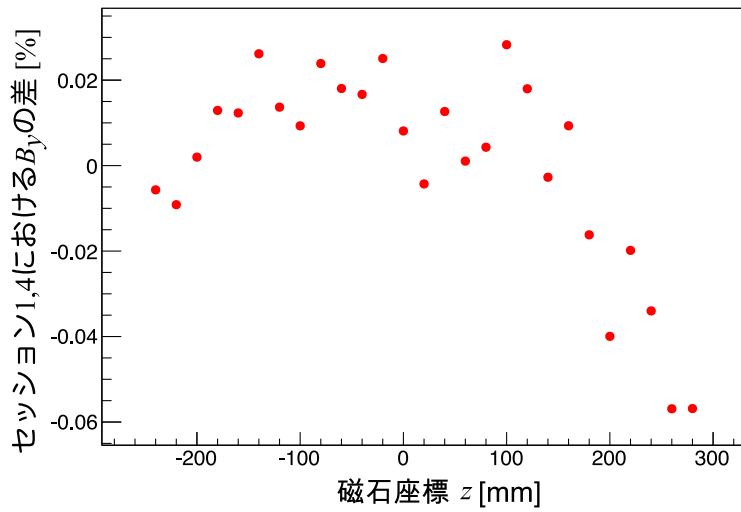


図 5.8.19 $0 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_y の差。横軸は磁石座標系の z にとってある。 z 方向の並進を加えたもの。

パラメーター	影響
x 方向位置ずれ	0.05% / mm
y 方向位置ずれ	0.02% / mm
z 方向位置ずれ	0.02% / mm
x 軸まわり角度ずれ	0.005% / 0.1°
z 軸まわり角度ずれ	0.008% / 0.1°

表 5.8.3 $-10 \leq y \leq 10, -20 \leq z \leq 20$, において位置、角度が与える影響

この領域における $(B_y^1 - B_y^4) / |B^4| \times 100[\%]$ をプロットすると、以下のようになった。

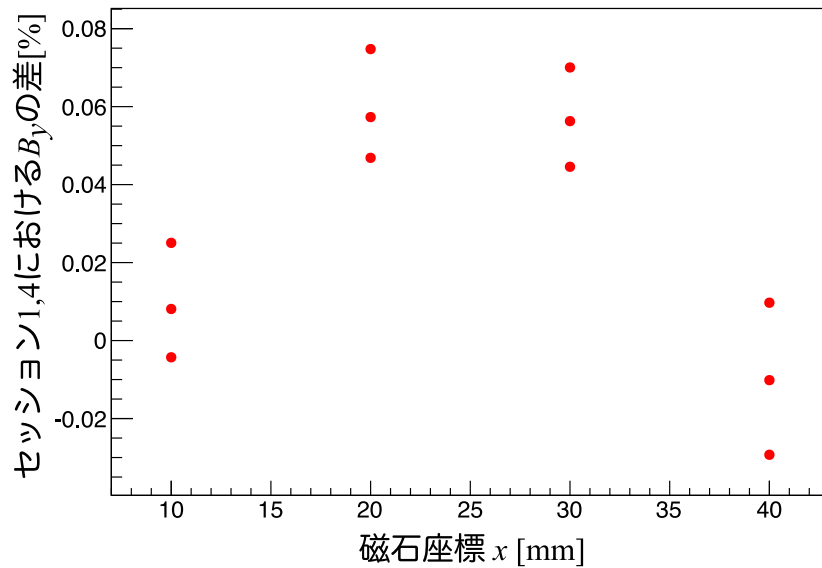


図 5.8.20 $-10 \leq y \leq 10, -20 \leq z \leq 20$ における、セッション 1,4 の B_y の差。横軸は磁石座標系の x にとってある。

このグラフは x に関する単調な変化になっていないため、並進では説明がつかない。また、変動の程度は 0.06% 程度で、プローブの精度で説明できる範囲内であり、最適化の必要はないと判断した。

y 方向の位置のずれ

$0 \leq x \leq 10, -50 \leq y \leq 50, -10 \leq z \leq 10$ のとき、各パラメーターが B_y に与える影響は以下の通りである。

パラメーター	影響
x 方向位置ずれ	0.01% / mm
y 方向位置ずれ	0.1% / mm
z 方向位置ずれ	0.02% / mm
x 軸まわり角度ずれ	0.01% / 0.1°
z 軸まわり角度ずれ	0.006% / 0.1°

表 5.8.4 $0 \leq x \leq 10, -50 \leq y \leq 50, -10 \leq z \leq 10$ において位置、角度が与える影響

この領域における $(B_y^1 - B_y^4) / |B^4| \times 100[\%]$ をプロットすると、以下のようになった。

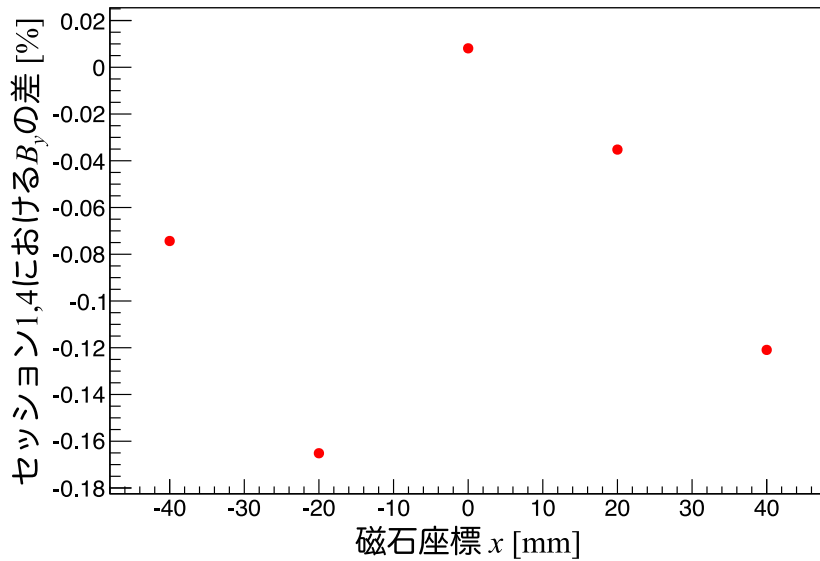


図 5.8.21 $0 \leq x \leq 10, -50 \leq y \leq 50, -10 \leq z \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_y の差。横軸は磁石座標系の y にとってある。

このグラフも y に関する単調な変化になっていないため並進では説明がつかない。また、差が 0.17% 程度と大きいためプローブの精度よりも有意にずれが大きい。プローブの精度を考慮しても、 y 方向に 2mm 程度局所的に位置がずれていることに相当する。

5.8.5 プローブホルダーの角度

x 軸まわりの角度

Z プローブは主に B_z を測定している。Z プローブの角度は x 軸まわりの角度に対し非常に敏感である。そのため、 B_z を使ってセッション 4 の竿の角度を最適化し、セッション 1 と接続する。 $-10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ のとき、各パラメーターが B_z に与える影響は以下の通りである。

パラメーター	影響
x 方向位置ずれ	0.005% / mm ^{†2}
y 方向位置ずれ	0.01% / mm
z 方向位置ずれ	0.01% / mm
x 軸まわり角度ずれ	0.17% / 0.1°
z 軸まわり角度ずれ	0.004% / 0.1°

表 5.8.5 $-10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ において位置、角度が与える影響

この領域における $(B_z^1 - B_z^4)/|B^4| \times 100[\%]$ をプロットすると、以下のようになった。

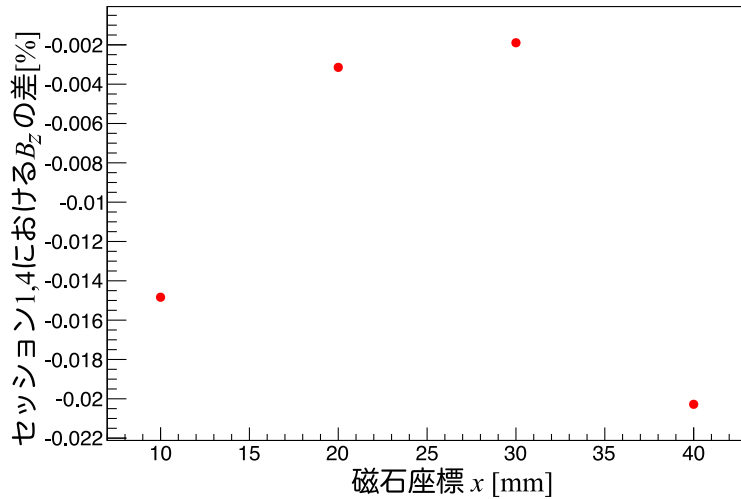


図 5.8.22 $-10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_z の差。横軸は磁石座標系の x にとってある。

0.02% の変動が見られるが、これは 0.01° に相当し、複数位置におけるプローブホルダー角度の測定の結果 (3.2 節参照) から角度の安定性の限界と考えられる。その範囲内で一致していることから、最適化の必要はないと判断した。

z 軸まわりの角度

Y プローブは主に $-B_x$ を測定している。Y プローブの出力は z 軸まわりの角度に対し非常に敏感である。そのため、 B_x を使ってセッション 4 の竿の角度を最適化し、セッション 1 とつなげる。 $0 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ のとき、各パラメーターが B_x に与える影響は以下の通りである。

^{†2} 図 5.8.9 では x を軸にプロットしてあるが、この値は y にも相関がある。 $-20 \leq y \leq 20$ では、 x の値によらず $\partial B_z / \partial x / |B| \times 100$ は 0.005% 未満である。

パラメーター	影響
x 方向位置ずれ	0.01% / mm
y 方向位置ずれ	0.01% / mm
z 方向位置ずれ	0.0025% / mm
y 軸まわり角度ずれ	0.008% / 0.1°
z 軸まわり角度ずれ	0.17% / 0.1°

表 5.8.6 $0 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ において位置、角度が与える影響

この領域における $(B_x^1 - B_x^4) / |B^4| \times 100[\%]$ をプロットすると、以下のようになった。

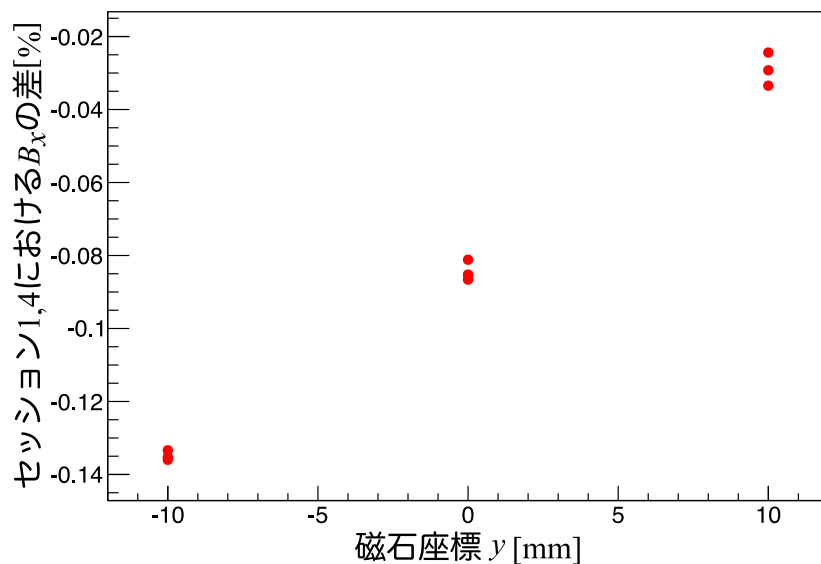


図 5.8.23 $0 \leq x \leq 10, -10 \leq y \leq 10, -10 \leq z \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_x の差。横軸は磁石座標系の y にとってある。

z 軸まわりの角度による影響以外が極小となる $y = 0$ において、 -0.08% の差がある。これは 0.05° に相当し、角度の測定精度の範囲内である。そのため、セッション 4 のプローブホルダーの角度を z 軸まわりに -0.045° 回転させた。その結果、セッション 1,4 の B_x の差は次のようになった。

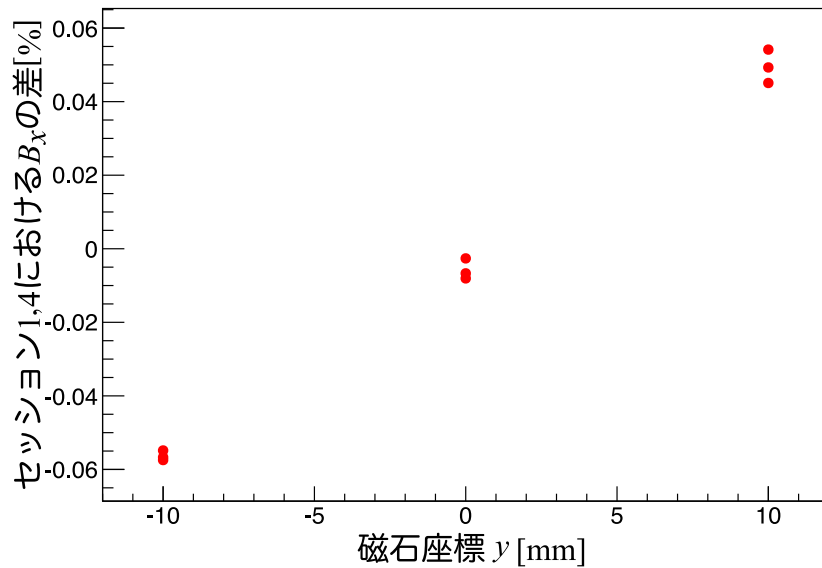


図 5.8.24 $0 \leq x \leq 10$, $-10 \leq y \leq 10$, $-10 \leq z \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_x の差。横軸は磁石座標系の y にとってある。

残った残差はな x 方向の位置のずれ、測定中の角度の変動、プローブの精度によるものと考えられる。しかしながら、このずれは並進のパラメータのみでは取り除けなかった。広い y の領域で B_x の残差を見たものを図 5.8.25 に示す。 y に対して単調な振る舞いを示しておらず、現状の測定精度を反映すると考えられる。

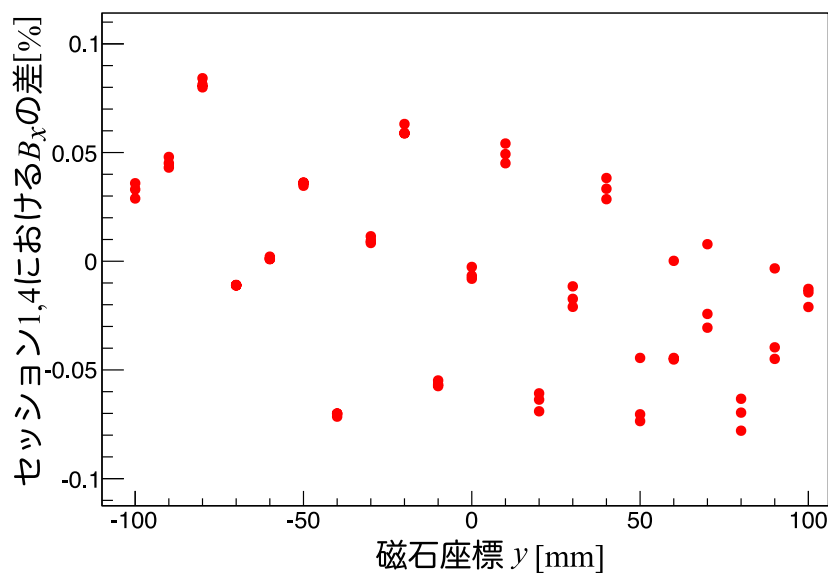


図 5.8.25 $0 \leq x \leq 10$, $-100 \leq y \leq 100$, $-10 \leq z \leq 10$ における、セッション 1,4 の B_x の差。横軸は磁石座標系の y にとってある。

プローブの精度を考慮しても残る残差は、角度だけで説明すると 0.06° 、 x 方向の位置のずれだけで説明すると 2.5mm のずれがあることに相当する。

5.8.6 オーバーラップ領域の残差 (パラメーター調整後)

これらの全体の並進、回転を補正した後、オーバーラップ領域の平均残差は以下のようになった。

残差の成分	残差の平均	残差の標準偏差
ΔB_x	0.05%	0.12%
ΔB_y	-0.02%	0.1%
ΔB_z	-0.07%	0.08%

表 5.8.7 Run0,1 で検出器が置かれる領域内の残差

最適化前の表 5.8.1 と比べると、ごくわずかに残差が悪化している。この理由の 1 つとして、オーバーラップ領域の中で局所的に位置がずれている場所があったとき、セッション 1,4 を並進させて原点付近の位置を合わせても、局所的な位置のずれはより開いてしまうことが考えられる。この最適化の目的はセッション 1,4 の座標、角度を正しく接続することであるので、わずかな残差の悪化は許容し、今後は最適化済みのパラメーターを用いる。

オーバーラップ領域の中で、中段の検出器が置かれる $\pm 15^\circ$ の範囲内のセッション 1,4 の差の分布は以下のようになった。

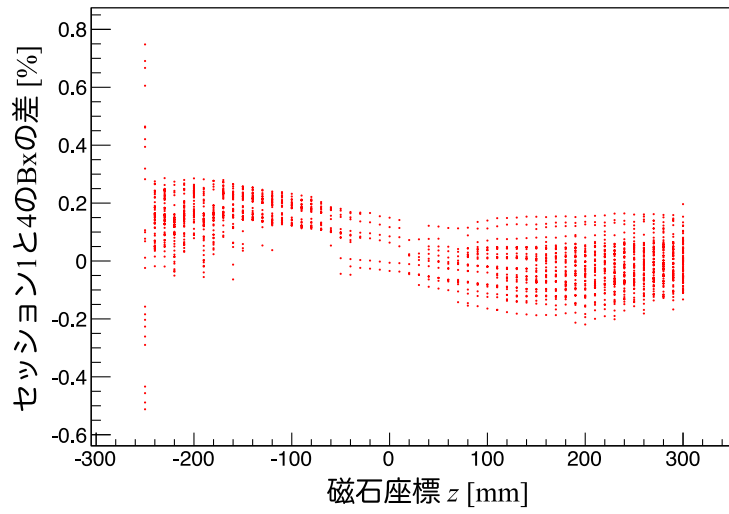


図 5.8.26 オーバーラップかつ中段の $\pm 15^\circ$ における、 $(B_x^1 - B_x^4)/|B| \times 100[\%]$

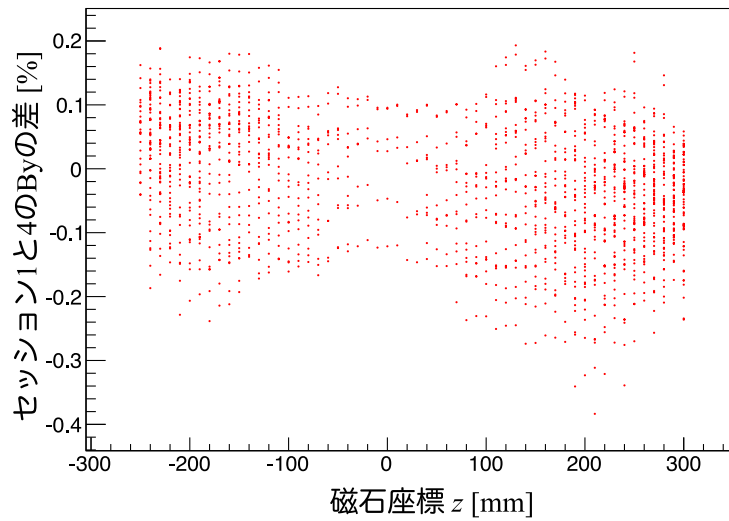


図 5.8.27 オーバーラップかつ中段の $\pm 15^\circ$ における、 $(B_y^1 - B_y^4)/|B| \times 100[\%]$

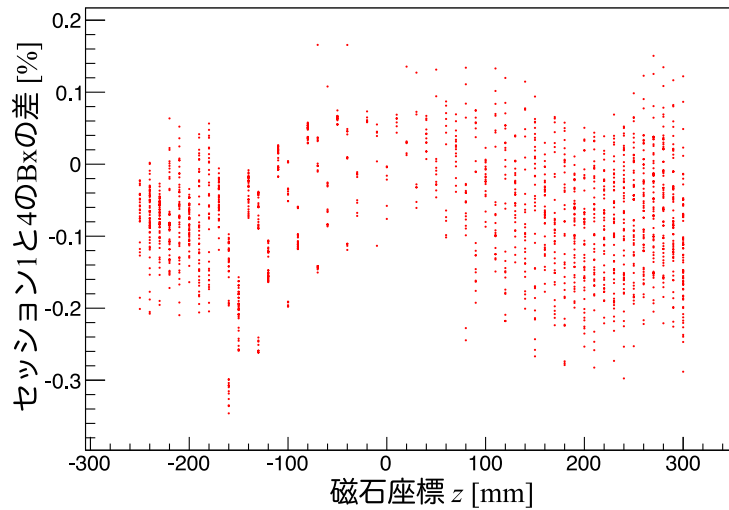


図 5.8.28 オーバーラップかつ中段の $\pm 15^\circ$ における、 $(B_z^1 - B_z^4)/|B| \times 100[\%]$

最大で B_x は 0.8%、 B_y は 0.4%、 B_z は 0.35% の不一致がある。以上により、空間並進、回転によって説明できるセッション 1 と 4 のずれが補正できた。

5.9 考察

5.9.1 磁場の妥当性の確認

磁場が正しく測定できていれば、Maxwell 方程式を満たすはずである。 $\nabla \cdot \mathbf{B}$ 、 $\nabla \times \mathbf{B}$ を計算し、測定した磁場が Maxwell 方程式を満たしているかどうか確認する。 $\nabla \cdot \mathbf{B}$ は全空間で 0 になり、 $\nabla \times \mathbf{B}$ は電流密度のない場所では 0 となるはずである。今回の測定領域に電流密度はない。

Maxwell 方程式には空間についての偏微分が含まれる。測定磁場は 30mm のメッシュなので、偏微分は 30mm メッシュの中心差分によって置き換える。微分を差分で置き換えたことの影響を評価するため、計算磁場も同じ 30mm メッシュで離散化し、比較する。計算磁場は Maxwell 方程式を満たすように解かれているため、計算磁場の $\nabla \times \mathbf{B}$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{B}$ はメッシュを微分を差分で置き換えたことの影響のみで 0 以外の値を返す。計算磁場と測定磁場を比較する際に条件を揃えるため、計算磁場は測定磁場のメッシュと同じ場所で計算し、測定磁場が測定範囲外で NaN を返す場合は計算磁場も NaN となるようにした。

セッション 1,4 のそれぞれについて、測定磁場と計算磁場の両方に対して $\nabla \cdot \mathbf{B}$ 、 $\nabla \times \mathbf{B}$ を計算し、そのヒストグラムをプロットした。計算した領域は測定した空間すべてであり、オーバーラップした領域に限らない。ただし、計算磁場との差が 4% を超える領域は、

5.10.4 節に述べる理由から除いている。結果は以下のようになった。

セッション 1

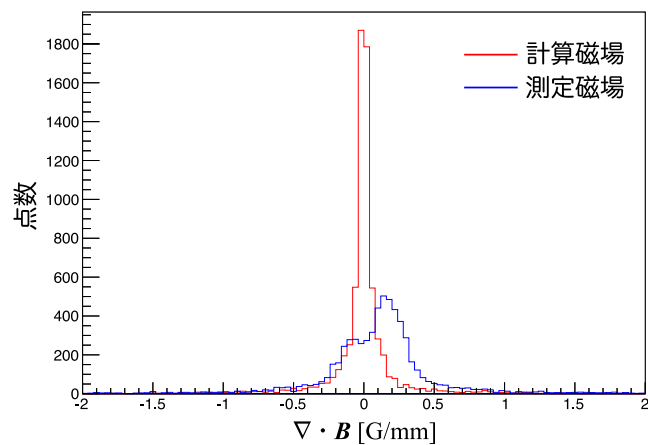


図 5.9.1 セッション 1 における $\nabla \cdot \mathbf{B}$

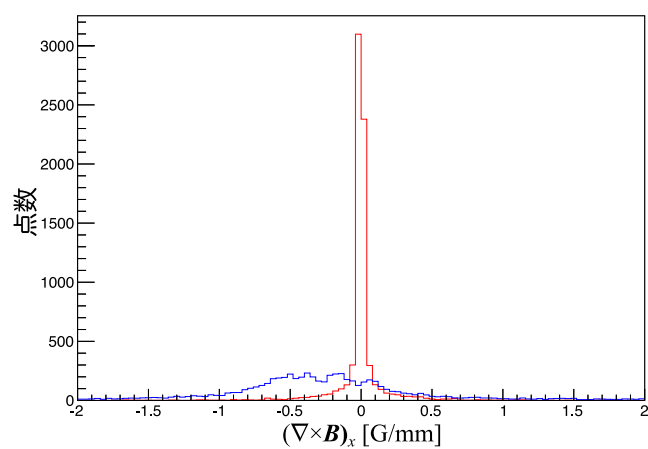


図 5.9.2 セッション 1 における $(\nabla \times \mathbf{B})_x$

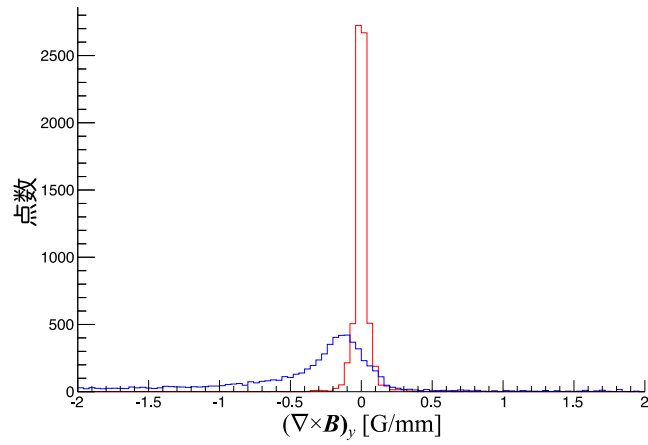


図 5.9.3 セッション 1 における $(\nabla \times \mathbf{B})_y$

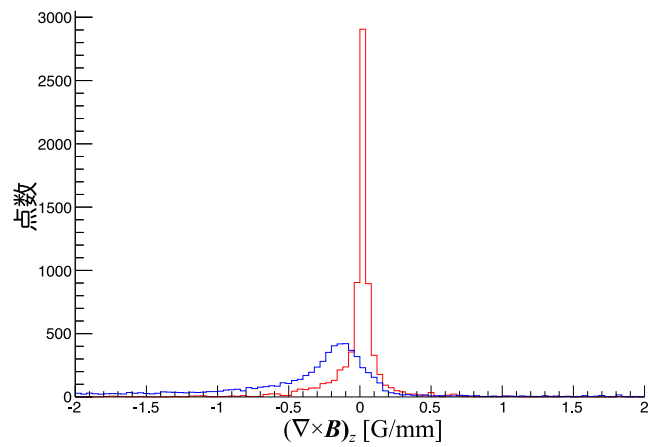


図 5.9.4 セッション 1 における $(\nabla \times \mathbf{B})_z$

これらをガウス分布でフィットした結果は以下のようになった。

項目	計算磁場の平均 μ	計算磁場の分散 σ	測定磁場の平均 μ	測定磁場の分散 σ
$\nabla \cdot \mathbf{B}$	-8.0×10^{-5}	4.7×10^{-2}	9.4×10^{-2}	2.2×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_x$	-2.5×10^{-3}	2.7×10^{-2}	-3.1×10^{-1}	5.0×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_y$	-1.4×10^{-4}	3.2×10^{-2}	-1.9×10^{-1}	2.2×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_z$	2.0×10^{-2}	4.2×10^{-2}	-1.9×10^{-1}	2.2×10^{-1}

表 5.9.1 セッション 1 のそれぞれの項目をガウス分布でフィットした結果。単位はすべて G/mm。

セッション 4

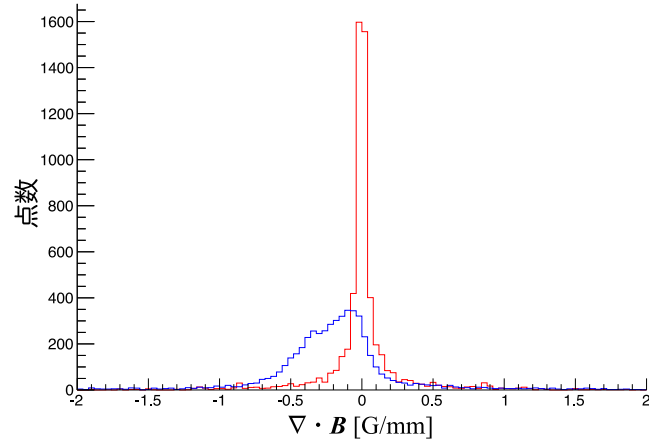


図 5.9.5 セッション 4 における $\nabla \cdot B$

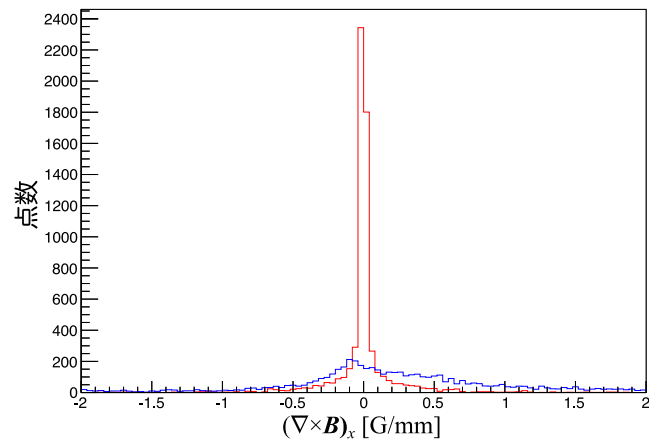


図 5.9.6 セッション 4 における $(\nabla \times B)_x$

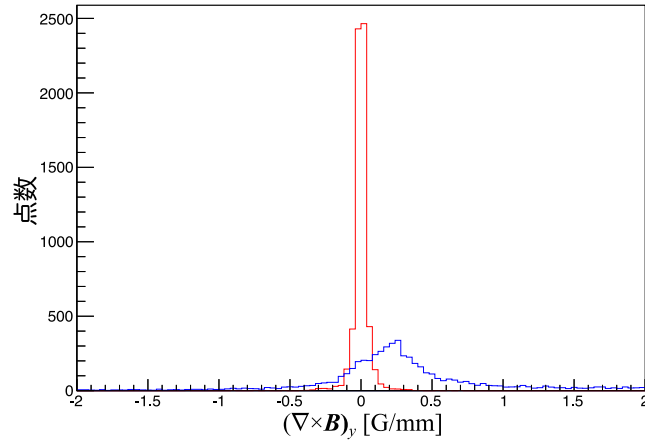


図 5.9.7 セッション 4 における $(\nabla \times \mathbf{B})_y$

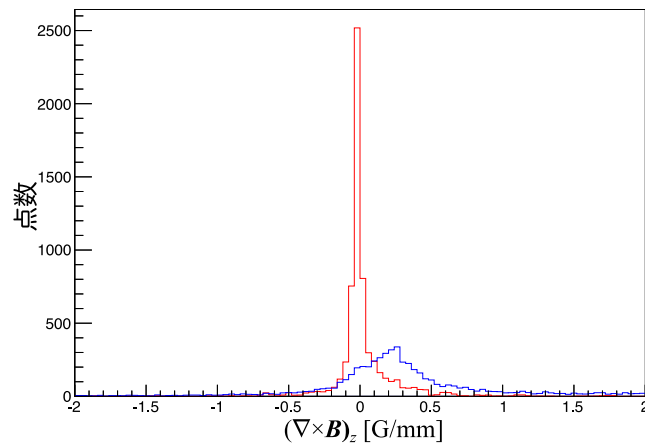


図 5.9.8 セッション 4 における $(\nabla \times \mathbf{B})_z$

これらをガウス分布でフィットした結果は以下ようになった。

項目	計算磁場の平均 μ	計算磁場の分散 σ	測定磁場の平均 μ	測定磁場の分散 σ
$\nabla \cdot \mathbf{B}$	-5.4×10^{-4}	3.9×10^{-2}	-2.1×10^{-1}	2.4×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_x$	-2.6×10^{-3}	2.8×10^{-2}	2.1×10^{-1}	6.1×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_y$	3.2×10^{-4}	3.1×10^{-2}	2.2×10^{-1}	3.1×10^{-1}
$(\nabla \times \mathbf{B})_z$	-1.9×10^{-2}	3.7×10^{-2}	2.2×10^{-1}	3.1×10^{-1}

表 5.9.2 セッション 4 のそれぞれの項目をガウス分布でフィットした結果。単位はすべて G/mm。

フィット結果から、これらのピークの値は 0 に近く、電磁気学的に妥当な磁場だといえる。ただし、ピークの幅は計算よりも 10 倍程度広い。磁場全体の並進、回転をしても $\nabla \cdot \mathbf{B}$, $\nabla \times \mathbf{B}$ は 0 だから、これは全体の並進、回転以外の誤差の要因があることを示している。たとえば、3 軸プローブの組付角の補正が十分でない、測定の途中でプローブの角度が変わっている、アクチュエーターの傾きといった部分的な位置のずれが補正しきれていないなどの原因が考えられる。

5.9.2 磁場の測定精度

本実験の最終的な精度を評価する。

角度の測量精度

まず、角度の測量精度について述べる。本実験では、プローブホルダーの角度、プローブホルダーに対するプローブの角度を測定し、それらを組み合わせることでプローブの角度を求めた。最終的なプローブの精度を表 5.9.3 に示す。

プローブ	回転軸	精度 °
X	x	0.05°
	z	0.05°
Y	y	0.02°
	z	0.04°
Z	x	0.02°
	y	0.02°

表 5.9.3 各素子の磁石座標系における角度の精度

また、複数の座標で角度の測定を行った結果 (3.2.3 参照)、アクチュエーターを動かしても 0.02° の精度で角度が一致している。そのため、角度の測定精度も、測定中の角度の安定性も高いと言える。角度の測定精度は、当初の計画 (2.2 節) である 0.05° よりも大幅に良いことがわかる。

位置の測量精度

次に、位置の測量について述べる。位置の測量の精度は、磁石原点におけるアクチュエーター座標の精度が 0.2mm、アクチュエーターの傾きの測定精度が 0.2mm である。

セッション 1 のみで行った励磁による位置のずれの測定精度は 0.3mm であった。これらを考慮し、位置の測定の精度はセッション 1 で 0.4mm、セッション 4 で 0.3mm だと言える。これは当初の計画である 0.2mm よりも悪い。

プローブの精度

まず、3 軸プローブの精度について評価する。磁極の熱的安定性を評価した図 2.8.1 によれば、電磁石が安定していてもプローブの出力が $\pm 7.5G$ 変動している。これは 0.04% に相当し、メーカーのカタログスペック (2.7.5 節) である 0.03° よりも悪い。一方、1 軸プローブは、電流の安定性を評価した図 5.1.1 によると、電磁石電源を切らない限り 0.01% の精度があることがわかる。これはカタログスペックよりも良い。

オーバーラップ領域の一致度

オーバーラップ領域ではセッション 1, 4 が同じ領域を測定しているにもかかわらず、図 5.8.28 によると B_z は最大 0.3% 程度一致していない。これは角度だけが原因だとすると 0.17° に相当する。さらに、5.8.4 節で角度に対して感度が小さい X プローブで並進パラメーターを最適化した際、0.16% の残差が残った。これはプローブの精度と位置のずれだけで説明すると 2mm に相当する。これは、測定の精度を大幅に上回るずれである。こうした残差が生まれる理由として、現在のところもっとも可能性が高いと考えているものは、励磁による位置のずれの補完精度の悪さである。この測定では、場所に依存する 4mm 程度の大きいたわみがあるにもかかわらず、ごく限られた測定点のみからその依存性を補完しているからである。今後の解析の際には、どのような領域で精度が悪くなっているか調べ、誤差の原因を特定する必要がある。また、もし位置のずれの補完を線形で行っていることが原因ならば、よりよい補完方法を検討する必要がある。

5.9.3 Bdl の評価

ここまでの解析で、セッション 1, 4 がオーバーラップしている領域では B_x の残差の平均が 0.05%, B_y の残差の平均が -0.02%, B_z の残差の平均が -0.07%, B_x の残差の標準偏差が 0.12%, B_y の残差の標準偏差が 0.10%, B_z の残差の標準偏差が 0.08% の精度で測定結果が一致していること、場所、成分によっては最大 0.8% 程度の差があることがわかった。場所によって誤差が異なることから、Bdl の誤差は粒子の軌道に依存する。そこで、オーバーラップ領域の中でいくつかの方向に粒子を直線上に飛ばし、Bdl を比較した。オーバーラップ領域に原点が含まれていないため、 $(10, 0, 0)$ から $(10, \sin \phi, Z)$ まで粒子を飛

ばした。オーバーラップ領域でセッション*i*の磁場を使って計算した Bdl を Bdl^i と表すと、 $|Bdl^1 - Bdl^4|/|Bdl^4| \times 100[\%]$ は次のようになった。

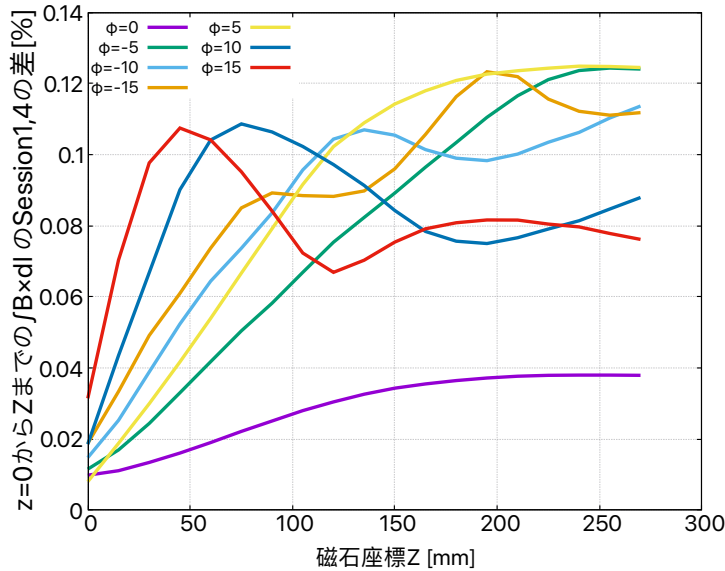


図 5.9.9 セッション 1,4 のオーバーラップ領域における Bdl の差

オーバーラップ領域は $z = 300$ までしかなく、台形積分する際に 1 つ先のメッシュが必要となるから、 $Z = 270$ までしか計算できない。この範囲内では、セッション 1, 4 の Bdl は 0.12% 程度の範囲内で一致している。位置の測定精度が計画よりも悪いにもかかわらず目標に近い値となっているのは、角度の測定精度が良かったためだと考えられる。このことから、オーバーラップ領域の測定誤差が Bdl に与える影響は 0.12% 程度だと結論できる。トラック領域の $0 \leq z \leq 600$ までの Bdl 精度は今後セッション 2,3 を解析することで求められる。现阶段でできる簡易的な見積もりとして、 $270 \geq z$ でも同程度の独立な Bdl 誤差があると仮定する。計算磁場によれば、 $300 \leq z \leq 600$ における Bdl は $0 \leq z \leq 300$ における Bdl の 0.4 倍である。そのため、 $0 \leq z \leq 600$ による Bdl の誤差は 0.13% 程度になると予想される。

5.10 今後の課題

5.10.1 セッション 2,3 の解析

現在解析が進んでいるセッション 1, 4 だけでは、トラックが置かれる全領域をカバーできない。そのため、これまで行ってきた解析をセッション 2, 3 についても行い、接続す

る必要がある。

5.10.2 励磁による位置のずれの補完の改善

励磁による位置のずれのは、図 3.1.7 の限られた点でしか測定されていない。磁場がアクチュエーターを引きつける力を計算して取り込むことで、より位置の精度を高められる可能性がある。

5.10.3 計算磁場の作成

測定磁場のマップには、プローブが磁極に衝突しないようにマージンがとってあるなどの理由から欠損している領域がある。また、後述のように測定領域の端付近で補完が不安定になるなど扱いづらい面がある。そのため、測定磁場によく合う計算磁場がある方が望ましい。現時点では遮蔽体、および SKS 電磁石の影響を取り入れた計算磁場ができているが、測定磁場とは 3.5% 程度の差がある。

実際に比較した結果を示す。計算磁場と同じ分布を（傾いた）プローブが測定した際の出力と、実測の出力値を比較すると、以下のようなになる。A プローブ (A=X,Y,Z) の出力を B^A 、計算磁場を測定した場合に A プローブが出力するはずの値を B_{calc}^A とする。A プローブの比較には $(B^A - B_{\text{calc}}^A)/|B_{\text{calc}}| \times 100[\%]$ 、全プローブの比較には $\sqrt{(B^A - B_{\text{calc}}^A)/|B_{\text{calc}}| \times 100[\%]}$ を使う。横軸はポールピースからの距離にしている。

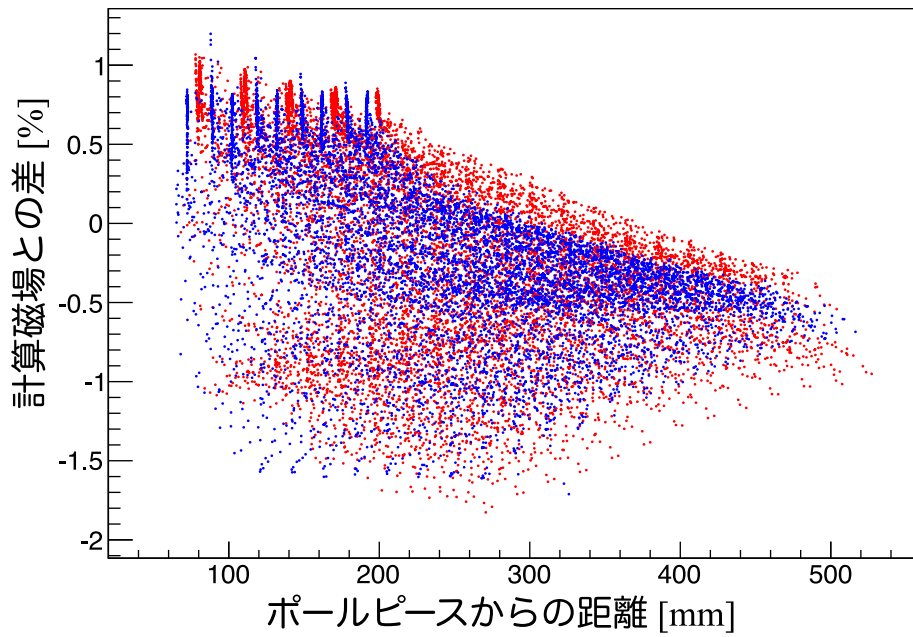


図 5.10.1 X プロブの出力の測定値、計算の比較

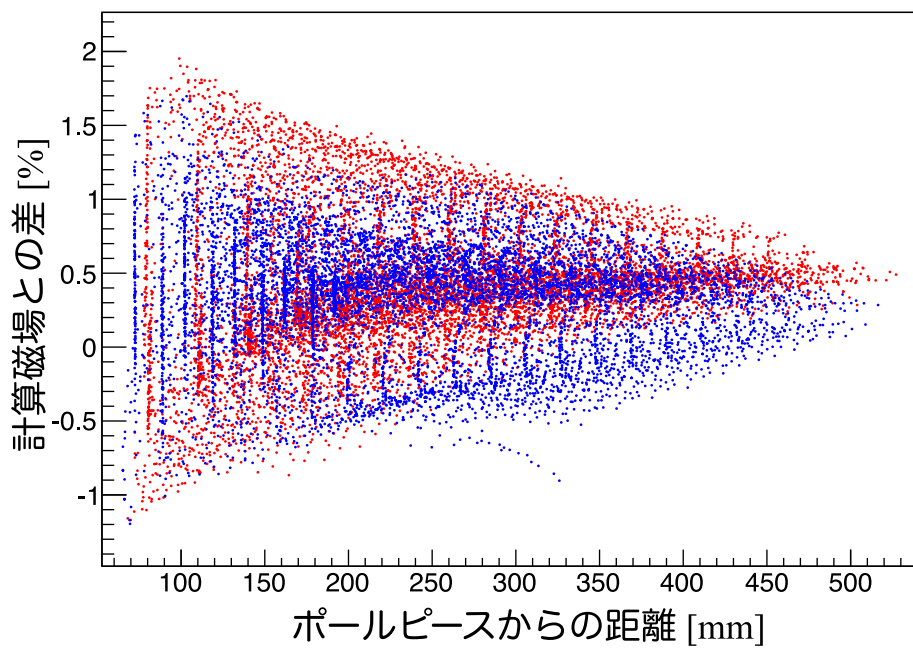


図 5.10.2 Y プロブの出力の測定値、計算の比較

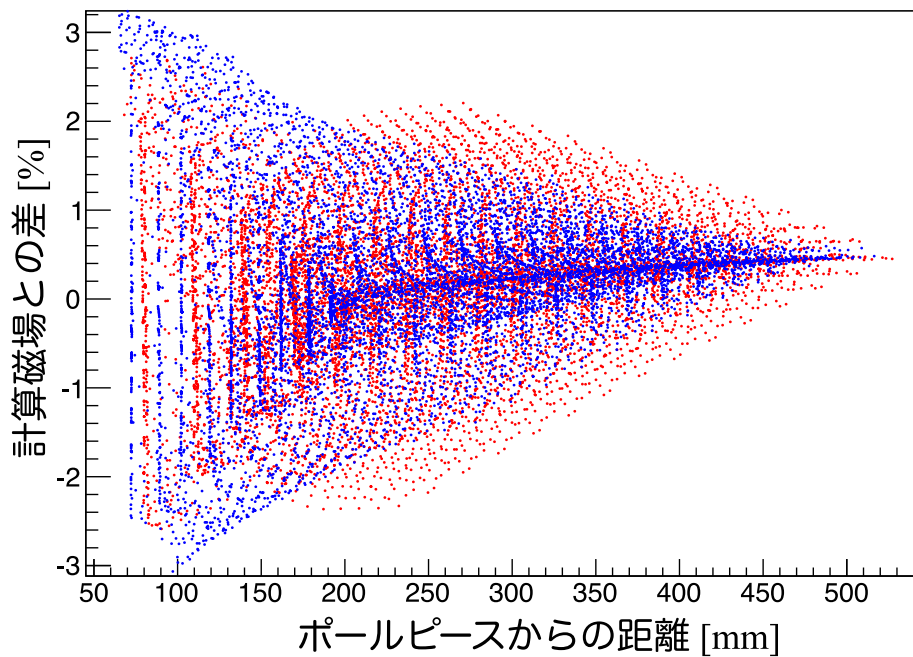


図 5.10.3 Z プロブの出力の測定値、計算の比較

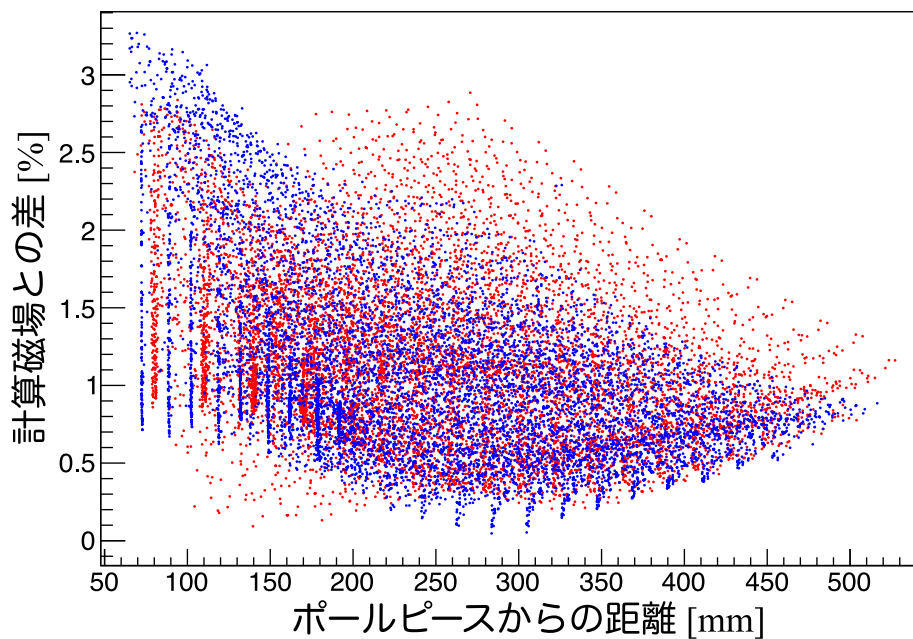


図 5.10.4 全プロブの出力の測定値、計算の比較

B_y を測定している X プロブを除き、ポールピースから離れるほど差が小さくなっていることがわかる。これはポールピース付近が計算磁場の BH カーブが実際と異なること

を示唆している。今後は計算磁場の BH カーブを修正することで、計算磁場を改善できると考えている。

5.10.4 補完方法の改善

計算磁場が完成するまでは、測定磁場のマップを使用する。プローブの出力を磁石座標における磁場に直して B_y を計算磁場と比較すると次のようになる。5.10.3 節と同じく、ポールピースからの距離を横軸にとっている。

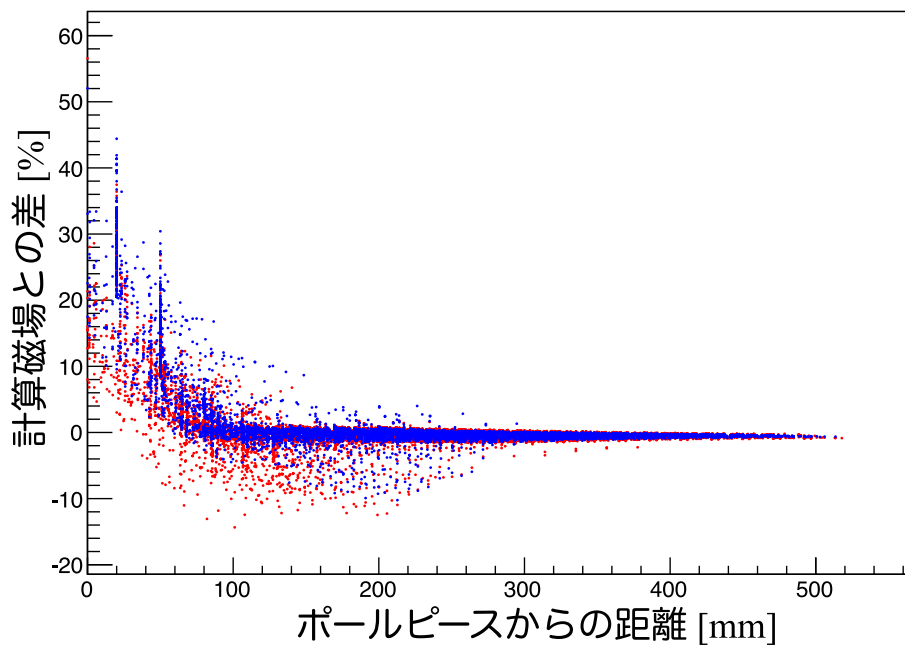


図 5.10.5 B_y の測定値、計算の比較

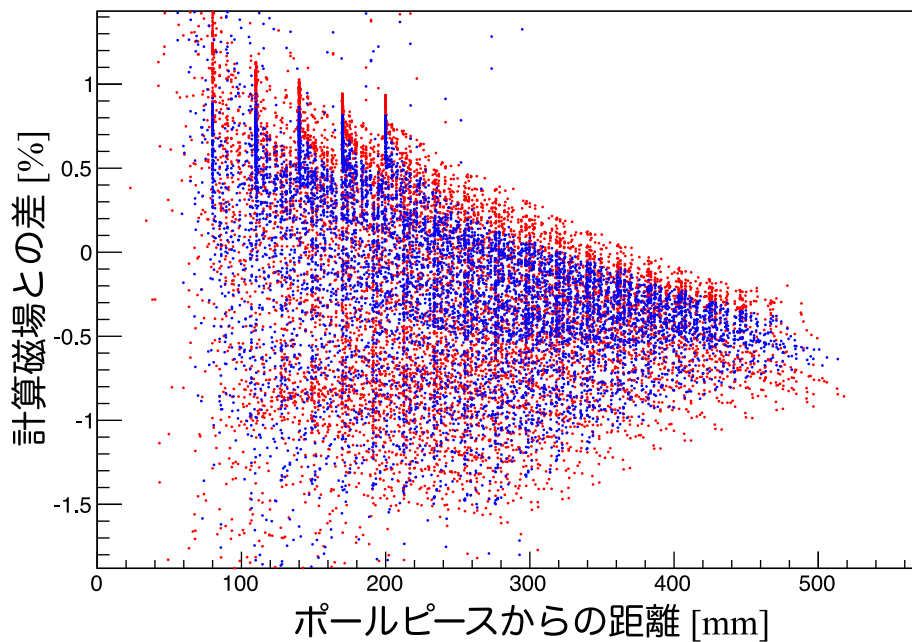


図 5.10.6 B_y の測定値、計算の比較 (拡大)

図 5.10.5 から、計算磁場から 40% 以上離れている点が紛れていることがわかる。計算磁場との差が小さい領域を拡大したものが図 5.10.6 で、 B_y を測定している X プローブの出力の図とよく似ていることがわかる。この結果から、磁石座標系の磁場への変換は多くの領域で正しくできているが、一部の領域で変換がうまくできていないことがわかる。その理由は、現段階では次のように理解している。

磁石座標における比較で計算磁場との差が 4% を超える領域の点のみを抽出してプロットする。

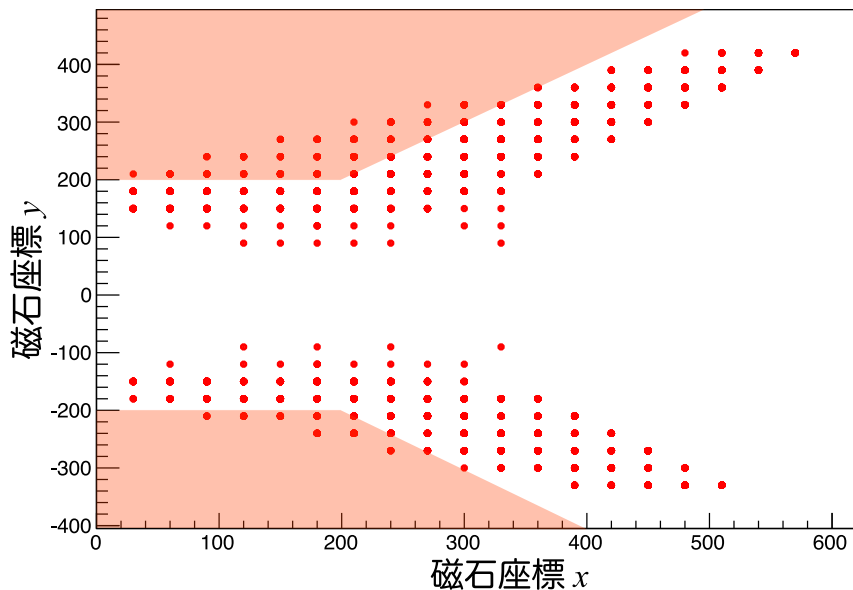


図 5.10.7 計算磁場との差が4%を超える点。オレンジ色はポールピースの断面を表している。

この図から、計算磁場と異常に異なる結果になっている点はポールピースの周辺に集中していることがわかる。異常な補完がおきる理由の1つとして、指定した座標におけるプローブ出力を補完する(5.7.1節参照)際に、測定領域の凹な形状の付近では遠い点から補完されてしまうことが考えられる。2次元におけるその概念図を示す。

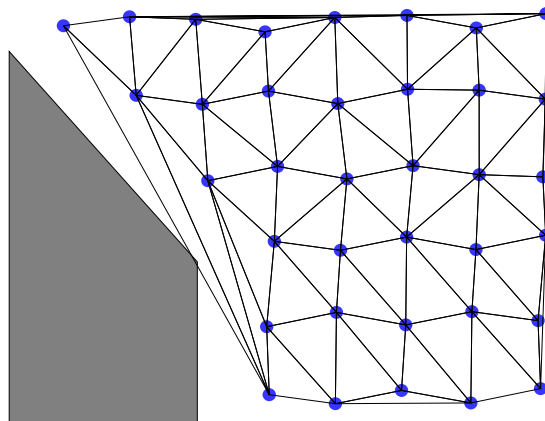


図 5.10.8 凹な形状付近で遠い点から補完されてしまう様子。青丸は測定点、灰色はポールピースを示す。青丸の点群はドロネー三角形に分割されている。

ただし、図 5.10.7 には必ずしもポールピース表面付近ではない点も含まれているため、これだけで異常な補完のすべてが説明できるわけではない。測定磁場を実験に用いる際は、このような異常な補完が起きないように補完方法を改善する必要がある。幸い、

run0,1 で検出器が置かれる $\pm 15^\circ$ の範囲内では、異常な補完がされる場所はセッション 1 で全 3832 点のうち 11 点、セッション 4 では全 3801 点のうち 20 点と非常に少ない。

5.10.5 温度の補正

熱電対による温度の測定結果を使ってプローブの温度依存性を補正することができる可能性がある。

5.10.6 ホール・プラナー効果

ホール・プラナー効果は、ホール素子の法線ベクトルに垂直な方向の磁場がホール電圧に影響を与える効果である。プローブ角度の校正の際にこの効果を測定するためのデータを取得しているが、まだ解析には取り込んでいない。この効果を取り入れることで、より精度を高められる可能性がある。

第 6 章

結論

J-PARC E16 実験で用いるスペクトロメータ電磁石の磁場測定を行った。飛跡検出器が置かれる全領域を含む、検出器の範囲での磁場データを得ることが出来た。最終的な磁石座標系での磁場マップを得るために、種々の補正および校正を行った。また、測定磁場の整合性および精度を評価するために、測量結果と、プローブの位置、角度の校正データを取り込み、セッション 1 と 4 において重複して測定されたオーバーラップ領域の測定結果を比較した。セッション 4 を z 方向に -0.3mm 並進させ、セッション 4 のプローブホルダーの角度を z 軸まわりに -0.045° 回転させることで、セッション 1 と 4 がつながった。この最適化の結果、オーバーラップ領域のうち検出器が置かれる範囲の残差の平均と標準偏差は B_x が $\mu = -0.03\%$, $\sigma = 0.15\%$, B_y が $\mu = -0.01\%$, $\sigma = 0.09\%$, B_z は $\mu = -0.07\%$, $\sigma = 0.08\%$ となった。

また、オーバーラップ領域で粒子を直線上に飛ばし、セッション 1、セッション 4 の磁場を使って Bdl を計算し、その差を比較した。オーバーラップ領域で計算できる $z = 270$ までの範囲内では、差は Bdl は 0.12% であった。同程度の精度で $z \leq 600$ まで測定できているとすると、 $0 \leq z \leq 600$ の Bdl は 0.13% となる。目標としていた Bdl の精度は 0.1% なので、目標に近い精度に達していると言える。引き続きセッション 3,4 の解析も行い、すべてを接続することで、検出器が置かれる範囲内の磁場マップが製作できると考えられる。

付録

計算磁場の作成

計算磁場と比較し、またセッション 1,4 を接続する際の最適化を行う際に参考にするため、計算磁場を Opera 社製の磁場シミュレーター“TOSCA”で作成した。計算の際は、FM 電磁石の前後に置かれた SKS 電磁石、鉄遮蔽体を取りいれている。

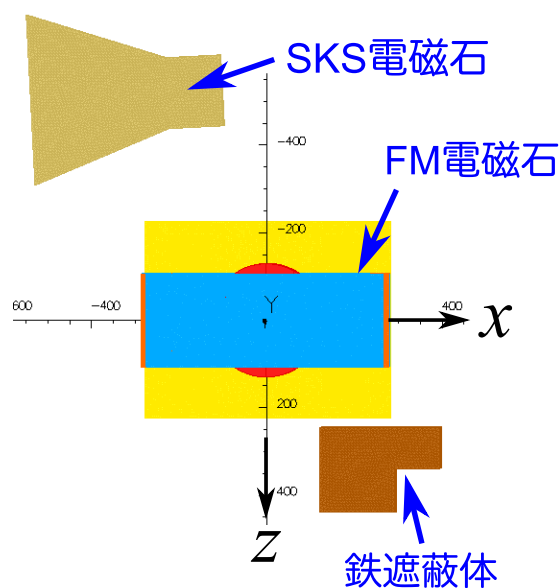


図 6.0.1 TOSCA での計算に使用したモデル

FM 電磁石の BH カーブは先行実験の KEK-PS E325 で使われたもの [12] を使用し、電流は 2450A に設定した。SKS 電磁石の BH カーブは SKS を使用する実験で用いられたもの [10] を使用した。鉄遮蔽体は普通铸铁 FC200 製で、磁石用でないことから BH カーブは正確に測定されておらず、おそらく製品によって異なる。そのため、FC200 の BH カーブは文献値 [13] を使用した。

計算メッシュの大きさは、 $R \leq 800\text{mm}$, $|y| \leq 900\text{mm}$ では 20mm メッシュ、 $R \leq 1600\text{mm}$, $|y| \leq 1440$ では 50mm メッシュ、 $(-300, -300, -230)$ から $(300, 260, 230)$ までの直方体では 100mm メッシュ、それ以遠では 300mm メッシュで計算した。

謝辞

この研究の間、多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

指導教官の成木恵准教授は、測定計画を立てる際や解析をする際に壁にぶつかったとき、親身になって一緒に考えてくださいました。後神利志助教は過去に磁場測定をされたご経験があるため、測定計画を立てる際に非常に参考になるアドバイスをたくさんしてくださいました。特に、レーザーと鏡で角度を測るアイデアは後神助教からいただいたものです。永江知文教授は解析で行き詰まっているときに数々のアドバイスをくださいました。同じ研究室の七村拓野先輩は S2S D1 磁石の磁場測定をされたご経験があるため、S2S D1 電磁石を使ったプローブ角度校正の際に磁石についての情報を詳しく教えていただきました。高エネルギー加速器研究機構の森野雄平助教には、プローブを保護するための安全装置の回路を製作していただきました。この回路のおかげで何度もプローブが救われました。同じグループの小沢恭一郎准教授には、プローブの角度校正の際に長期間手伝っていただきました。足利沙希子先輩、市川真也先輩には、連日のように深夜まで測量を手伝っていただきました。また、市川先輩には角度測定に使うスクリーンを製作していただきました。

磁場測定は1ヶ月にわたって行われ、後半はほぼ24時間にわたって行われました。シフトに入ったり、測量を手伝ってくださった四日市悟さん、高橋智則さん、小松雄哉さん、赤石貴也さん、佐藤進さん、佐甲博之さん、本多良太郎さん、菅野光樹さん、青木和也さん、ありがとうございました。

参考文献

- [1] scipy. <https://github.com/scipy/scipy/blob/master/scipy/interpolate/interpn.py>.
- [2] R.Muto et al. Evidence for in-medium modification of the ϕ meson at normal nuclear density. *Phys. Rev. Lett.* 98, 042501, 2007.
- [3] S. Yokkaichi et al. Electron pair spectrometer at the J-PARC 50-GeV PS to explore the chiral symmetry in QCD (J-PARC E16 Proposal), 2006.
- [4] S. Yokkaichi et al. J-PARC E16 Run0 proposal, 2006.
- [5] ハドロン実験施設. <https://j-parc.jp/Hadron/ja/index.html>.
- [6] Tetsuo Hatsuda and S-H. Lee. Qcd sum rules for vector mesons in the nuclear medium. *Phys Rev C Nucl Phys.* 1992 Jul;46(1):R34-R38., 1992.
- [7] Shunsuke Kanatsuki. private communication.
- [8] Group3 technology limited, mpt-132. <https://www.group3technology.com/product-page/mpt-132-2s>.
- [9] Ryotaro Muto. private communication.
- [10] Toshiyuki Takahashi. private communication.
- [11] Thk 電動アクチュエータ コンパクトシリーズ 取扱説明書. https://tech.thk.com/upload/tec_data/ksf_manual_no2050-4.pdf.
- [12] Satoru Yokkaichi. private communication.
- [13] 山田一ほか. 高速応答 Idm に用いる磁性材料についての一考察. 電気学会論文誌 D, 1995.
- [14] 七村拓野. S-2s 電磁石の磁場測定と運動量分解能. Master's thesis, 京都大学 理学研究科, 2017.
- [15] 鈴木一輝. 電子対測定に用いるハドロンブラインド検出器のためのトリガー用信号読み出しシステムの開発. Master's thesis, 京都大学 理学研究科, 2019.