

第 1 章

MAMI における測定手法

この章の目的は、実験に用いた装置の性能や仕様、およびセットアップの手法を説明することである。まず加速器と MAMI の概要を示し、高品質のアンジュレータ放射光を得るための制御方法を説明する。次に、電子ビームエネルギー測定に不可欠な分光光学系の構成とアラインメント方法を示す。最後に、ビームタイム中のデータ取得の手順を示す。

1.1 装置とセットアップ

1.1.1 マインツマイクロトロン (MAMI)

MAInz MIcrotron (MAMI) はドイツ、マインツ大学が所有する連続電子線加速器施設である。最大エネルギー 1508 MeV の電子ビームを供給する 3 台の RTM(Race Track Microtron) および 1 台の HDSM(Harmonic Double Sided Micrtron) から構成される。MAMI のフロアマップを図 1.1 に、主なパラメータを表 1.1 に示した。ハイパー核生成実験では HDSM を用いて最大エネルギーの 1508 MeV の電子ビームを供給する。

スペクトロメータ校正実験では、RTM3 までで加速された 180 MeV から 210 MeV までの電子ビームを用いる。ここでは本研究で用いる 200 MeV 領域の電子ビームに注目

表 1.1: MAMI の主要パラメータ

	RTM3	HDSM
最大エネルギー	855.1 MeV	1508 MeV
最大強度	100 μA	100 μA
周回数	90	43
偏光磁石の磁場	1.28 T	0.95 - 1.53 T
周波数	2.45 GHz	2.45 / 4.9 GHz
エネルギー幅	13 keV	110 keV
水平方向エミッタンス	13 $\pi \mu\text{m mrad}$	27 $\pi \mu\text{m mrad}$
垂直方向エミッタンス	0.84 $\pi \mu\text{m mrad}$	1.2 $\pi \mu\text{m mrad}$

図 1.1: MAMI のフロアマップ。RTM1,RTM2,RTM3 で加速された電子ビームは X1 ホール (赤) または A1 ホール (青) に供給される。X1 ホールではアンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー測定を行う。また A1 ホールでは電子弾性散乱実験を行う。

し、RTM3 における加速機構を説明する。図 1.2 に RTM3 の模式図を示した。2 つの 180° 偏向電磁石の間には線形加速器 (LINAC) が設置されている。前段の加速器で 180 MeV まで加速され入射された電子は LINAC で加速されるごとにおよそ 15 MeV エネルギーを得る。加速されると偏向電磁石での軌道半径が大きくなり、一つ外側の周回軌道を通り再び LINAC で加速を受ける。このようにして電子は周回軌道を繰り返し、最終的に最大で 855 MeV まで加速されて実験ホールに供給される。周回軌道の途中にはビーム取り出しのためのキッカーマグネットが設置されており、このキッカーマグネットをどの軌道に設置するかによって周回回数を調節し、供給するエネルギーを決定する。

RTM3 には計 90 週の周回軌道があり、 1 周毎に 15 MeV ずつ加速されるが、このうち 73 週目の軌道にビームポジションモニタが設置されている。RTM3 の 180° 偏向電磁石中での軌道半径 R_{73} を測定し、得られたビームエネルギー E_{73} から MAMI で確立された粒子トラッキングシステム PTRACE[?] を用いて n 週目のビームエネルギー E_n を外挿して求める。 180° 偏向電磁石の磁場は NMR を用いて 10^{-4} の精度で測定されている。また PTRACE の計算で生じる誤差が 0.1 mm、ビームパイプの位置決定精度が 0.43 mm と見積もられており、これらの誤差を考慮して $E_{73} \sim 727$ MeV におけるエネルギーの誤差は $\delta E_{73} = 120 \text{ keV}$ と見積もられている [?]. E_{73} から他の周回軌道のビームエネルギー

図 1.2: RTM3 の模式図。前段の RTM2 で 180 MeV まで加速された電子ビームは 180° 偏向電磁石でもっとも軌道半径の小さい周回軌道に入る。1 周して LINAC で加速されるごとに 15 MeV ずつエネルギーが増加し、これに伴い軌道半径が大きくなり、一つ外側の周回軌道を通り再び LINAC で加速を受ける。軌道中に設置したキッカーマグネットによって周回軌道からずれビーム取り出しビームラインに供給される。

ギー E_n を PTRACE で外挿した結果、 E_n の誤差は一律で $\delta E_n = 160$ keV と見積もられている [?]

RTM3 の直後には供給するビームラインを選ぶための偏向電磁石が設置されており極性をレバーで変えることで、アンジュレータ放射光干渉法による電子ビームエネルギー測定を行う X1 ホールと、電子弾性散乱によるスペクトロメータ較正を行う A1 ホールにビームを供給するモードを切り替えることができる。

X1 ホール

電子ビームエネルギー測定を行うホール B と X1 ホールの構成を図 1.3, 1.4 に示す。電子ビームの軌道を調整するための電磁石が RTM3 に設置されており、水平方向、垂直方向のビーム位置を調整する。RTM の直後にはビームライン選択用の偏向電磁石が設置されている。更に下流には四重極電磁石が 2 つ (Q1, Q2) 設置されており、その間にミラーボックスが設置されている。Q2 の下流にアンジュレータを 2 台設置する。その下流に更に 2 台の四重極電磁石 (Q3, Q4) が設置されている。4 台の四重極電磁石はアラインメントの基準となるほか、ビーム調整時にも利用するが、測定を行う際には原則利用しない。その下流には偏向電磁石が設置されており、電子ビームをビームダンプに導くことができる。これにより放射光のみをコンクリート壁に通したビームパイプを通じて X1 ホールに導くことができる。X1 ホールには光学系が設置されており、放射光を観測する。アンジュレータから光学系まではおよそ 10 m の距離がある。更にその下流側にはアラインメント用のセオドライトが設置されている。

またホール B のビームライン上には光学系の較正用の水銀灯や青色レーザー、ビーム

図 1.3: ホール B と X1 ホールの模式図。電子ビームは図の左の RTM3 側から供給される。RTM3 偏向電磁石の直後にある一つ目の偏向電磁石では電子ビームを供給するビームラインを選択する。電子ビームエネルギー測定をおこなうときには電子ビームは図の下側のビームラインへ供給される。四重極電磁石 (Q1,Q2) の間にはミラーボックスを設置し光学系の較正用のレーザー光をビームラインに導く。Q2 の下流にアンジュレータを設置し、ここで放射光を発生させる。アンジュレータの下流には更に 2 つの四重極電磁石 Q3,Q4、および偏向電磁石が設置されている。偏向電磁石によって電子ビームはビームダンプへ導かれ、放射光のみを観測する光学系に導くことができる。コンクリート壁を隔てて X1 ホールに光学系を設置し放射光のデータ取得を行うほか、更に下流にはアラインメント用のセオドライトを設置する

ライン内の可動式ミラーが設置されている。水銀灯や青色レーザーによる較正を行う際にはミラーボックス内のミラーをビームライン中心に移動させることで水銀灯や青色レーザーを光学系に供給することができる。

ビーム調整

まずルミノシティモニタを用いてフェイントビームの位置を目測で調整する。この時の精度は 1 mm 間隔のグリッドの 1/10 として 100 μm と見積もられる。

続いて、ビーム強度を 5 μA に上げつつホール B 内の放射線モニターで測定される放射線レベルが MAMI の安全基準よりも低くなるように微調整を行う。この時放射線レベルが安全基準よりも高くなることは、ビームがビームダンプまで輸送されるまでにビームパイプ中心から外れ、ビームラインの内壁にビームが当たってしまっていることを示す。最後にカメラを用いて放射光を見ながらビームの位置を調整する。スリットに対してビーム中心がずれている場合には回折パターンが上下非対称になる。

図 1.4: ホール B のビームラインを上から撮影した画像。図 1.3 の模式図の Q1 からビームダンプへの偏向電磁石までが見えている。

図 1.5: ホール B 内に設置されたミラーボックスを真上から撮影した画像。ビームタイム中は蓋がされており、遠隔でモーターを駆動することでミラーを移動させる。写真では電子ビームを供給するモードの状態になっており、電子軌道からミラーが外れている。水銀灯による較正を行う際にはミラーが電子軌道に挿入され、図の左から入射する水銀灯の光をビームラインに平行に X1 ホールに供給できる

1.1.2 アンジュレータ

アンジュレータは自作のコイルを用いて製作した。各コイル対が独立に制御可能な電磁石となっている。1 台のアンジュレータに計 13 個のコイルが等間隔かつ極性が交互に配置されている。上下のギャップは 18mm である。ギャップサイズは固定し、電磁石の電流を調整することで磁場調整を行う。全長が 520 mm である。

図 1.6: ルミノシティモニタでのフェイントビームの照射領域。このモニタでビーム位置を目測しながらビーム調整用の電磁石の電流値を調整する。グリッドの間隔は 1 mm である。

図 1.7: 測定に用いた 2 台のアンジュレータ。上流側の赤色アンジュレータは固定されているのに対し、下流側の青色アンジュレータはステージに取り付けられており、825 mm の可動範囲で z 軸方向に移動できる。2 台のアンジュレータの設計は同一で、13 個のコイルが等間隔かつ極性が交互に配置されている。磁場 1 周期すなわちコイル 2 個分の長さは 80 mm で、全長は 520 mm である。図の手前には磁場調整の際に用いるホールプローブ取り付け台が設置されている。

磁場制御

各コイルには電源ボックスから電流を供給する。電流値を調整することで正弦波状の磁場を発生させることができる。磁場の調整の際には、マトリックス型のホールプローブによる磁場測定を行う。ホールプローブは $40 \times 40 \text{ mm}^2$ の領域に 16×16 個、合計 256 個のホール素子を持ち、磁場の 3 次元成分を測定する (図 1.8)。ホールプローブはアンジュレータの中心を走査し磁場測定を行う。測定の様子を図 1.9 に示す。アンジュレータ内の磁場は隣り合う複数の電磁石から影響を受けるため、適切な磁場を得るためには全ての電磁石の電流を同時に調整する必要がある。ホールプローブによる測定と最適な電流値の決

図 1.8: マトリックス型のホールプローブ。40×40 mm² の領域に 16×16 個、合計 256 個のホール素子を持ち、磁場の 3 次元成分を測定する。

図 1.9: ホールプローブによるアンジュレータの磁場測定の様子。ホールプローブはアンジュレータの中心を走査し、磁場の 3 次元成分を測定する。

定を数回繰り返すことで、アンジュレータ内の磁場を調整する。調整を止める基準として、アンジュレータを通過した後の電子軌道の変位が 10 μm 以下になることを定めて調整した。調整後の磁場と、磁場の積分から計算される電子軌道の推定値を図に示す。最後に、電子ビームエネルギーに対する目標磁場と偏向定数、および共鳴波長 (放射光の共鳴波長??) を表 1.2 に示す。

位置制御と読み取り

アンジュレータは可動式ステージに取り付けられており、モーターによって移動させる。可動範囲はビームライン上の制約から最大 825 mm に制限されており、間隔は通常の測定では 5 mm で指定する。移動したアンジュレータの絶対値は、リニアエンコーダ (Heidenhain LC415) で 5 μm の精度で読み出す。

(a) 磁場測定の結果

(b) 電子軌道の推定値

図 1.10: $E = 180$ MeV の時の磁場測定 ($B = 95$ mT) の結果を示す。調整の結果、電子軌道の変位は $10\ \mu\text{m}$ 以下に抑えられている。

エネルギー [MeV]	磁場設定値 [mT]	偏向定数 K	共鳴波長 [nm]
180	95	0.710	403.6
195	130	0.971	404.2
210	140	1.046	366.4

表 1.2: アンジュレータの磁場設定値と偏向定数および共鳴波長 (放射光のピーク波長)。180 MeV および 195 MeV では較正波長の 404 nm と共鳴波長がほぼ一致したセットアップを実現できたが、210 MeV ではアンジュレータのコイルの過電流を避けるために共鳴波長を短くする必要があった。

アラインメント

セオドライトを用いてアンジュレータと較正用水銀灯、スリットの位置を調整した。セオドライトの基準は四重極電磁石 (Q2, Q3) の中心で、この 2 点を通る直線をビームラインおよび光軸の基準としている。アンジュレータの設置の際には、基準線をセオドライトを通して見ながら、アンジュレータの上流、下流側の磁石の中心を x, y 方向に調整可能な調整ステージを動かして調整した。

1.1.3 分光光学系

分光光学系全体の構成を図 1.11 に示す。各素子間の長さは、素子の中心同士を結ぶ直線を測定した。放射光の光軸が必ずしも素子の中心を通ることは保証されていないことと、放射光はスリットの大きさに対応して数 mm^2 程度の広がりを持って入射するため、実効的な距離は実測値と比較して最大 10 mm 程度のずれが生じると見積もった。

図 1.11: 分光光学系の全体図。光学素子間の長さの単位は mm である。

スリット

矩形スリットを用いる。スリット幅は $4\text{ mm}(x) \times 6\text{ mm}(y)$ であり、調節ねじにより上下、および左右のブレードが連動して動き、スリット幅を調整可能である。これを x 軸、 y 軸方向の可動ステージに乗せることでスリット全体の位置を 0.1 mm 単位で調整可能にした。

回折格子

回折格子は Thorlab 製の回折格子 [?] を用いた。格子定数は $1200/\text{mm}$ 、大きさは $50 \times 50\text{ mm}^2$ である。ピッチ・ヨー方向に調節可能な光学マウントによって固定され、さらに光学マウントが水平方向の回転ステージに設置されている。これにより分光された放射光がカメラ方向に水平に反射されるよう調整できる。

波長分散レンズ

水平方向にのみ光波を収束するシリンドリカルレンズを用いた (図??)。大きさは $40 \times 50\text{ mm}^2$ 、焦点距離は 1 m である。 $350 - 410\text{ nm}$ の波長領域に対して AR コーティングが施されている。このレンズもピッチ・ヨー方向および y 軸方向の調節が可能な光学マウントによって固定される。水平墨出しレーザーの反射光を用いることでピッチ・ヨー回転の調整ができる。

図 1.12: シリンドリカルレンズ。水平方向のみに光波を収束し、垂直方向には窓として作用する。

CMOS カメラ

光学系は波長が 400 nm の領域において動作するため、可視光領域のカメラを用いることができる。HAMAMATSU C14440-20UP を用いた。仕様を以下に示す。

ピクセル数	2304 × 2304
ピクセルサイズ	6.5 μm × 6.5 μm
チップサイズ	14.976 mm × 14.976 mm
ビット深さ	16 bit

表 1.3: CMOS カメラ HAMAMATSU C14440-20UP の仕様

1.1.4 光学系のアライメント

青色レーザを用いて光学系全体の光軸調整を行った。青色レーザーの光軸はセオドライトを用いてビームライン中心と合わせる。ビーム中心と合わせた青色レーザー光を光学系に通し、各光学素子の中心をとるようにアライメントを行う。またレーザー墨出し器を用いて光学系全体の水平を確認する。回折格子とレンズの水平は青色レーザー光の位置を基準に調整した。青色レーザーはミラーボックスの横 20 cm の位置に設置され、次節で説明する水銀灯の較正にもミラーボックスを利用できるようモーターで横方向に移動可能である。

1.2 データ取得

1.2.1 分光光学系の波長較正

波長較正として水銀灯を用いる。400nm 領域には 2 本の輝線があり、このスペクトルを光学系で観測することで 2 つの輝線スペクトルを観測できる。水銀灯ランプはビームラ

図 1.13: 青色レーザーと水銀灯用スリット。セオドライトを通してミラーボックスを目で見て、ビームライン中心にアラインメントした。

インから垂直に 5 m の位置に設置されており、ミラーボックス内のミラーを用いて電子ビームラインと同じ軌道を通して光学系に導かれる (図 1.5)。ミラーボックスの直前には水銀灯用の円形スリットを設置した (図 1.13)。

輝線スペクトルをガウス関数でフィッティングし、中心位置のピクセルを対応する波長にする。2 本のスペクトル以外のピクセルは 2 本の輝線の波長 - ピクセル関係の線形性を仮定して決定する。

1.2.2 データ取得

以下の手順を繰り返してデータ取得を行う。ステージモータに指定する位置の値は 0 から 825 mm の範囲で、5 mm 間隔、計 166 点である。

- アンジュレータのステージモータに次の指定位置の信号が送られる
- 指定の位置にアンジュレータが移動する
- カメラによる画像撮影の信号が 4 回送られる
- 画像撮影が完了し 4 枚の画像が追加されたことを DAQ が確認する

同時にリニアエンコーダの位置読み出しも行い、データがラズベリーパイに保存される。この流れを図 1.14 に示す。

1.2.3 弾性散乱実験との同時運用における電子ビームエネルギー測定

今回の実験の目的は弾性散乱実験における電子ビームエネルギーの精密測定である。この目的に照らし合わせて、弾性散乱実験でのデータ取得の前後にエネルギー測定を行うランプランを設定した (図 1.15)。

図 1.14: データ取得の流れ。アンジュレータが指定位置に移動するとカメラによる画像撮影が行われる。画像撮影が完了すると DAQ に信号が送られ、次の指定位置にアンジュレータが移動する。ステージの移動が完了したらラズベリーパイからリニアエンコーダーに位置読み出しの信号が送信され、位置データがラズベリーパイへと送信される。これを 166 回繰り返すと 1 つのデータセットが取得できる。

図 1.15: 弾性散乱実験とエネルギー測定の同時運用。弾性散乱実験の前後にエネルギー測定を行う。赤、または青で枠の色がつけられている時間帯がビームが照射されている時間である。黒の枠で囲われた時間帯は、実験ホールでの作業と、一部ビーム調整の時間が含まれており、データ取得はできない。また”エネルギー測定”の内容は前節 1.2.2 で述べたとおりである。

1.2.4 下流側アンジュレータによるデータ測定

パラメータ較正を目的として、下流側アンジュレータのみを用いたデータ取得を行う。
実験条件は $E_{beam} = 210$ MeV で、アンジュレータの磁場は 140 mT とした。

上流のアンジュレータ (赤) はコイルに流す電流を 0 にしたうえで、残留磁場の影響を受けないように x 軸方向に 30 cm ずらした。