

3次元らせん入射手法によるビーム蓄積の実証

DEMONSTRATION OF BEAM ACCUMULATION BY THREE-DIMENSIONAL SPIRAL INJECTION SCHEME

松下 凌大^{*,A)}, 飯沼 裕美^{B)}, 大澤 哲^{C)}, 小川 真治^{C)}, 中山 久義^{C)}, 古川 和朗^{C)}, 齊藤 直人^{A,C)}, 三部 勉^{A,C)}
 Ryota Matsushita^{*,A)}, Hiromi Inuma^{B)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Shinji Ogawa^{C)}, Hisayoshi Nakayama^{C)},
 Kazuro Furukawa^{C)}, Naohito Saito^{A,C)}, Tsutomu Mibe^{A,C)}

^{A)} The Univ. of Tokyo

^{B)} Ibaraki Univ.

^{C)} KEK

Abstract

An experimental program is underway at J-PARC to simultaneously measure the muon anomalous magnetic moment ($g - 2$) and electric dipole moment (EDM) with high precision. For these measurements, muon beams accelerated up to 300 MeV/c need to be injected and accumulated in a solenoidal magnetic field, with a strength of 3 T and a diameter of 66 cm, guaranteed to have a uniformity better than 0.1 ppm. We employ a new technique called *Three-dimensional spiral injection* to achieve this. To demonstrate beam accumulation using this method, validation experiments with low-energy electron beams are ongoing at KEK. In JFY 2022, it was reported that the signals indicating beam accumulation had been measured. To obtain concrete evidence of beam accumulation, we measured the stored beam distribution using detectors with scintillation fiber (SciFi) and report these results.

1. はじめに

1.1 J-PARC Muon $g - 2$ /EDM (E34) 実験

J-PARCにおいて、ミューオンの異常磁気モーメント ($g - 2$) と電気双極子モーメント (EDM) を高精度に同時測定するための実験、J-PARC Muon $g - 2$ /EDM (E34) 実験 [1] の準備が進められている。J-PARC E34 実験では、一度冷却し 300 MeV/c まで再加速した低エミッタンス μ^+ ビームをソレノイド型蓄積磁石中に入射・蓄積し、スピン歳差運動を測定する。ビーム蓄積領域は直径 33 cm であり、このようなコンパクトな領域にビームを入射・蓄積するために、新規手法「3次元らせん入射 [2]」を開発し採用する。

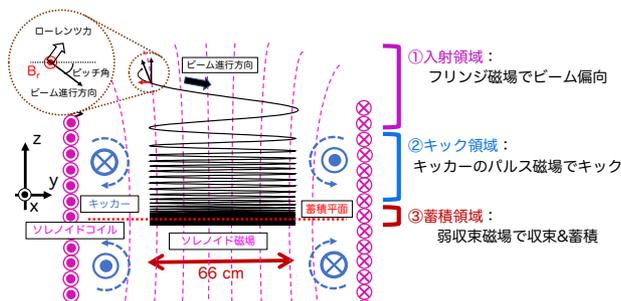


Figure 1: Overview of three-dimensional spiral injection scheme.

1.2 3次元らせん入射

3次元らせん入射ではスピン歳差運動の精密測定のため磁場のみでビーム制御を行う必要があり、3種類の磁場発生装置を駆使してビームの入射・蓄積を行う。

3種類の磁場を使ってビームの入射・蓄積を行う。蓄積磁石中でのビーム軌道を Fig. 1 に示す。ビームが入射された直後の入射領域では、ソレノイド磁石のフリンジ磁場の動径方向成分によるローレンツ力で、ビームのピッチ角 (水平面とビーム方向の成す角) を減少させる。さらにソレノイド磁石の中までビームが入射されるとフリンジ磁場が減少するため、キック領域においては、蓄積磁石中に設置したキッカーコイルによるパルス磁場で動径方向成分の磁場を作り、鉛直方向にキックすることでさらにピッチ角を減少させる。蓄積領域には弱収束磁場があり、これによってビームを収束・蓄積する。

Table 1: Comparison with E34 and This Demonstration Experiment

	E34 実験	実証実験
ビーム粒子	μ^+	e^-
ビーム運動量 [MeV/c]	300	297×10^{-3}
ソレノイド磁場強度 [T]	3	82.5×10^{-4}
弱収束磁場 n 値	1.5×10^{-4}	1.6×10^{-2} ⁱ
蓄積領域における ピッチ角許容残差 ⁱⁱ [mrad]	2	30 ⁱⁱⁱ
サイクロトロン半径 [cm]	33	12
サイクロトロン周期 [ns]	7.4	5.0

ⁱ 蓄積磁石の主コイル、補助コイルに印加する電流値のバランスを変えることにより、蓄積基準平面でのソレノイド磁場強度を $B_z = 82.5 \times 10^{-4}$ T に保ったまま n 値を変えることが可能である。

ⁱⁱ VBO 振幅 < 5 cm を仮定

ⁱⁱⁱ n 値に依存して変動

* matsur@post.kek.jp

1.3 3次元らせん入射実証実験

3次元らせん入射によるビーム蓄積を実証することを目的とし、低エネルギー電子ビームを用いた実証実験用ビームラインを構築した [3]。E34 実験のスケールドアウンであり主なパラメータの比較は Table 1 に示す。ビームラインの概要を Fig. 2 に示す。電子銃によって電子ビームを生成し、チョッパー装置 [4] によって、パルスビームに変換される。さらに下流で回転四極磁石によりビーム位相空間を調整し、偏向磁石によってビームを偏向、入射直前の2つのステアリング磁石によって入射のピッチ角、ヨー角をそれぞれ調整しビーム入射を行う。これまでの研究開発によってビーム蓄積を示唆する信号が測定できており [5,6]、今回ビーム蓄積の確固たる実験的証拠を得るために蓄積ビーム分布の測定を行った。

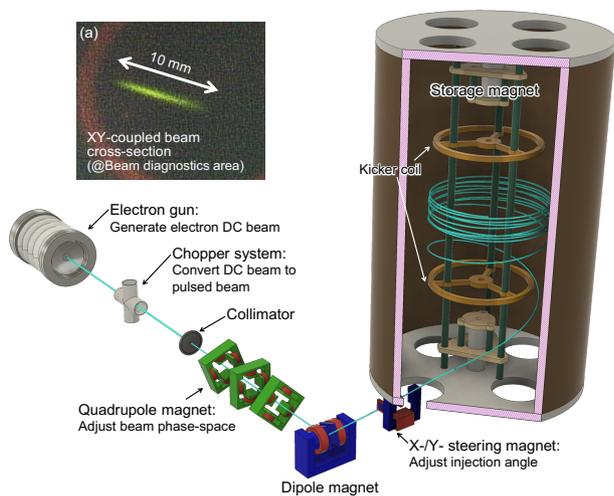


Figure 2: Overview of demonstration experiment beamline. (a) Injected beam cross-section measured at the end of the straight section. The beam phase-space is adjusted by three rotatable quadrupole magnets.

2. 蓄積ビームの測定

2.1 測定装置

蓄積ビームの測定には Fig. 3(a) に示す SciFi プローブと呼ぶ検出器を用いる。この検出器は銅製のサポートロッドの先端に長さ 20 cm、直径 1 mm の SciFi を取り付けただけのものである。蓄積チャンバー内部のキッカーによる電磁ノイズの影響を避けるため、SciFi はサポートロッド中で光ファイバーと接続し、光ファイバーフィードスルーを通して真空外まで転送する。光は PMT モジュール [7] まで転送し、電気信号に変換、オシロスコープ^{iv}で電気信号を測定する。この SciFi プローブは蓄積磁石上部の真空チャンバー内でリニアフィードスルーと接続してあり、リニアフィードスルーに接続したアクチュエータによって、Z 方向の位置を変えることができる (Fig. 3(b))。この SciFi プローブは蓄積チャ

^{iv} 使用したオシロスコープは Tektronix 社製 DPO7104。

ンバー上部のポートに取り付けられ、蓄積ビーム軌道の設計中心である $R = 12\text{ cm}$ において Z 方向にスキャンできるようになっている。

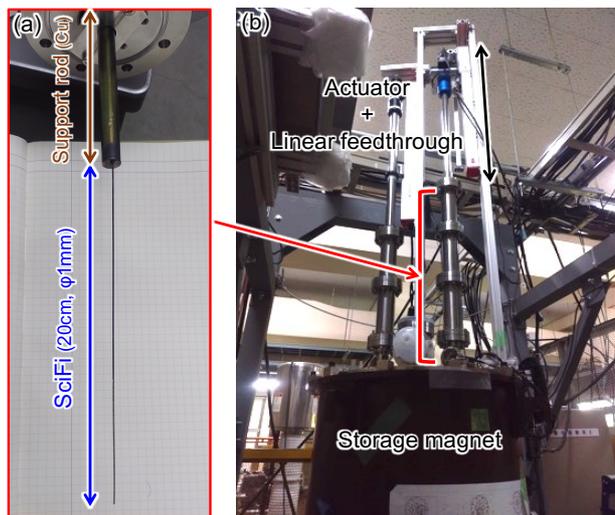


Figure 3: (a): Picture of SciFi probe. (b): SciFi probe is connected with linear feedthrough inside the vacuum chamber and linear feedthrough is moved by the actuator.

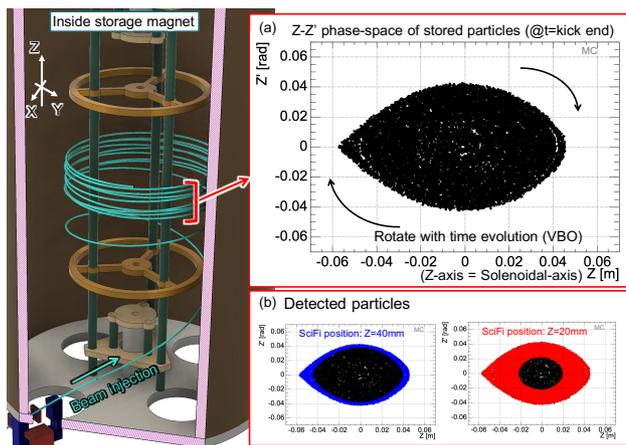


Figure 4: (a): Time slice of $Z - Z'$ phase-space of accumulated particles at the kick end timing. Accumulated particles rotate within this phase space as time evolves. This rotation in $Z - Z'$ phase-space means vertical betatron oscillation (VBO). (b): Accumulated particles are scraped off by the SciFi probe.

2.2 測定原理

ここで、蓄積粒子の Z 方向 (ソレノイド軸方向) の運動について着目すると、蓄積された粒子はそれぞれ弱収束磁場によって、Vertical Betatron Oscillation (VBO) 運動をする。これは Fig. 4(a) に示すように、 $Z - Z'$ 位相空間内で時間発展に伴い弱収束磁場によって決まる等ポテンシャル面上を移動することに相当する。そのため、SciFi プローブを蓄積領域内部にどこまで挿入する

かによって、Fig. 4(b) に示すように、 $Z-Z'$ 位相空間内のどの範囲まで蓄積粒子を検出するかを決めることができる。^v

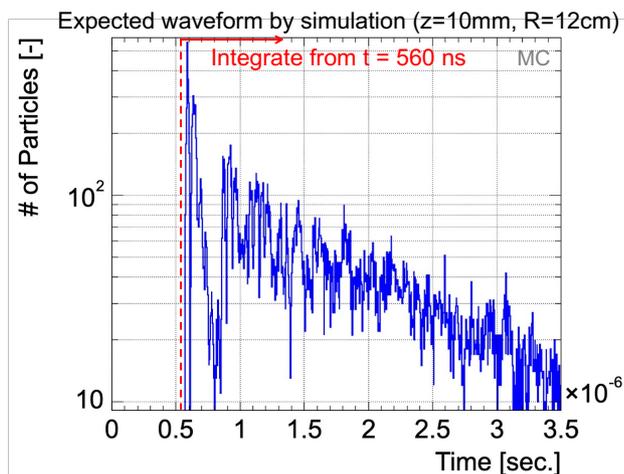


Figure 5: An expected waveform by simulation at $Z = 10$ mm. An integral of the waveform calculates the amount of signal at each measurement point.

各 Z 位置で測定される PMT 信号はその Z 位置までの粒子数を反映している。例として、 $Z = 10$ mm での測定波形のシミュレーションを Fig. 5 に示す。ビーム入射直後に SciFi プローブに当たる粒子は、蓄積されるものと蓄積されないものが混ざっており本来蓄積されない粒子の影響を排除するため、入射から十分時間が経ち、蓄積領域の磁場分布が定常状態となるキッカー電流値が 0 A になったタイミング ($t = 560$ ns) 以降の信号を積分し、測定された信号量とする。ビームが蓄積されていない場合、入射ビームのパルス幅 100 ns、繰り返し周波数 25 Hz であり、サイクロトロン周期 5 ns で数ターンのうちに蓄積磁石の上下面に衝突し失われてしまうので、この時間窓に信号をほとんど残さない。このような測定を SciFi プローブの Z 位置を変えて行ったシミュレーション例を Fig. 6 に示す。ここで、横軸は SciFi プローブの下端の Z 位置、縦軸は上述の時間窓で積分した信号量 (MC シミュレーションなのでここでは粒子数) である。Figure 6 において、蓄積基準平面である $Z = 0$ mm までは蓄積ビームの Z 方向分布を反映したものである。 $Z = 0$ mm で SciFi プローブが $Z-Z'$ 位相空間内の中心まで挿入され、以降検出する蓄積粒子の数が変わらないため $Z = 0$ mm 以降はプラトーになっている。

また上述したように、SciFi プローブの挿入量によって測定する $Z-Z'$ 位相空間内の範囲を変えられるため、 $Z \geq 0$ mm の範囲で Fig. 6 の Z 分布について 1 次微分を計算すると、Fig. 7 に示すように蓄積粒子の VBO 振幅分布を再構成することが可能である。ここで、横軸は蓄積粒子の VBO 振幅の大きさを表し、縦軸は粒子数である。青線のヒストグラムは MC シミュレーション

^v ビームの運動量は約 300 keV/c であり、シンチレータ中での放射長が 100 μ m 程度のため SciFi プローブに当たるとほぼ 100% の確率で止まる。

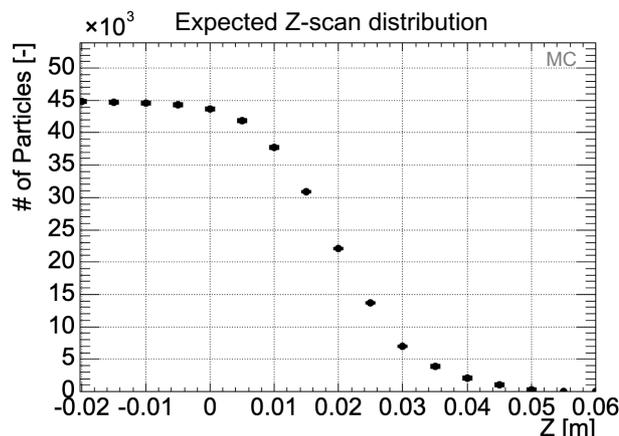


Figure 6: Expected distribution of Z -scan measurement with $n = 1.6 \times 10^{-2}$.

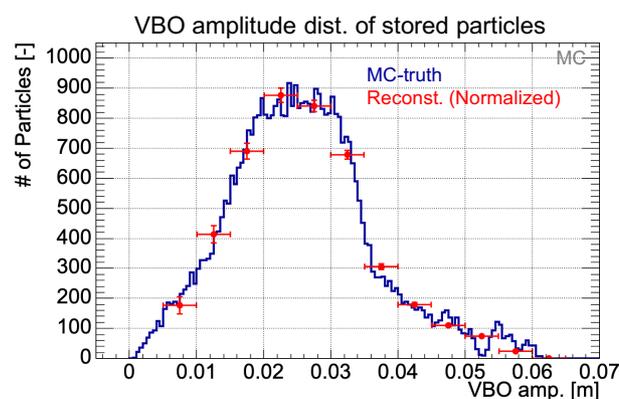


Figure 7: Simulation of VBO amplitude reconstruction by Z -scan data. Blue-histogram: VBO amplitude distribution from MC simulation. Red-point: 1st derivative of expected distribution of Z -scan measurement with $n = 1.6 \times 10^{-2}$ (Fig. 6).

ンより得られた蓄積粒子の VBO 振幅分布であり、赤点は Fig. 6 の Z スキャン分布の 1 次微分である。

ここで示したように、SciFi プローブを使った Z スキャン測定によって、蓄積ビームの (i) Z 方向分布と (ii)VBO 振幅分布を得ることができる。

2.3 蓄積ビーム分布の測定例

実際の Z スキャン分布の測定と、その測定データを使った VBO 分布の再構成について一例を示す。ここで示す測定は、入射パルスビーム幅 100 ns、弱収束磁場は $n = 1.6 \times 10^{-2}$ で行ったものである。測定波形の例を Fig. 8 に示す。Figure. 8 と比べると、同じく 100 ns 幅の入射ビームに比べて十分長い時間幅の信号が得られ、かつおおむね同じ時間構造の信号波形が測定できている。2.2 節で述べたように、このように得られた波形をキックが終わったタイミング ($t = 560$ ns) 以降で積分した値を信号量とする。

このように各位置で測定した波形より信号量を計算して得られた Z スキャンの結果を Fig. 9 に、 Z スキャン結果より再構成した VBO 分布を Fig. 10 に示す。

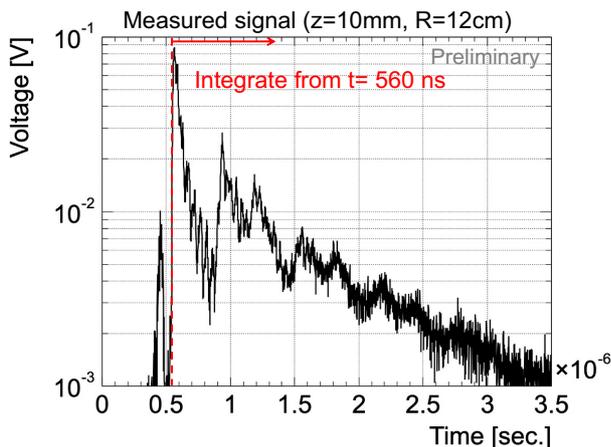


Figure 8: Measured waveform at $Z = 10$ mm. This is 1000 shots averaged waveform. BG waveform is subtracted.

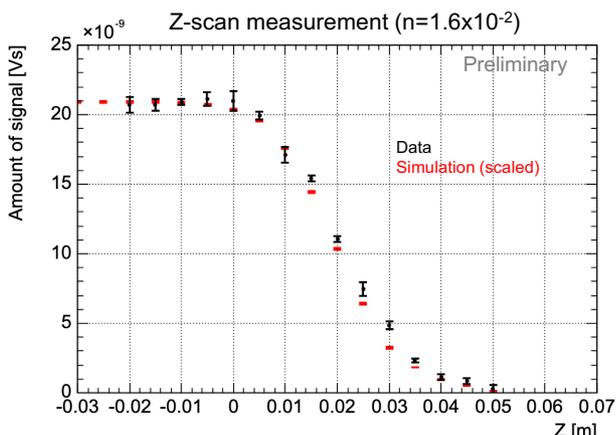


Figure 9: Result of Z -scan measurement with $n = 1.6 \times 10^{-2}$. Black-point: Measured data calculated by an integral of the measured signal in each position. Error bars are statistical errors only. Red-point: Expected distribution (Fig. 6) scaled by the value of $Z = 0$ mm in Measured data.

Figure 10 からわかるように、測定とシミュレーションはおおむね一致しており、SciFi プロブを用いた Z スキャン測定によって、蓄積ビーム分布の測定が可能である。

2.4 蓄積ビーム分布の弱収束磁場依存性

本実証実験では、主ソレノイドコイル磁場と、蓄積基準平面付近に設置されている補正コイル磁場(印加電流は主ソレノイドコイルと逆向き)を重ね合わせることで、弱収束磁場を成形している。それにより、蓄積平面におけるソレノイド軸方向の磁場を $B_z = 82.5$ gauss に固定したまま、弱収束磁場の n 値を変化させることができる。また、 n 値の変化に伴って、主コイルと補正コイルの磁場のバランスが変化するため、Fig. 11 に示すように弱収束磁場によって蓄積できる領域が変化する。Figure 11 において、色付きの矢印はそれぞれの n 値におけるビーム蓄積が可能な範囲を示す。今回、ビーム蓄積が真に弱収束磁場によるものなのか確かめるた

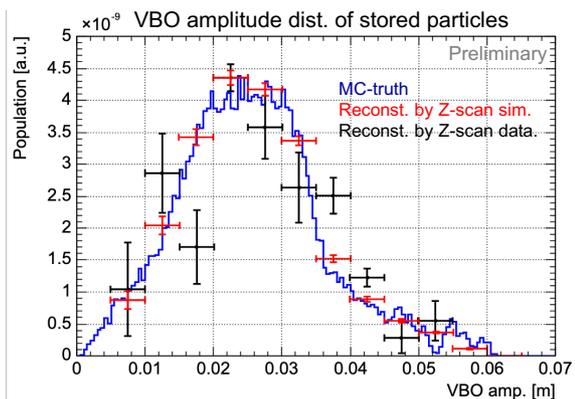


Figure 10: Reconstruction of VBO amplitude distribution. Blue-histogram: Scaled VBO amplitude distribution by MC simulation (scaled Fig. 7). Red-point: Reconstructed by using expected Z -scan distribution (scaled Fig. 7). Black-point: Reconstructed by using measured Z -scan distribution.

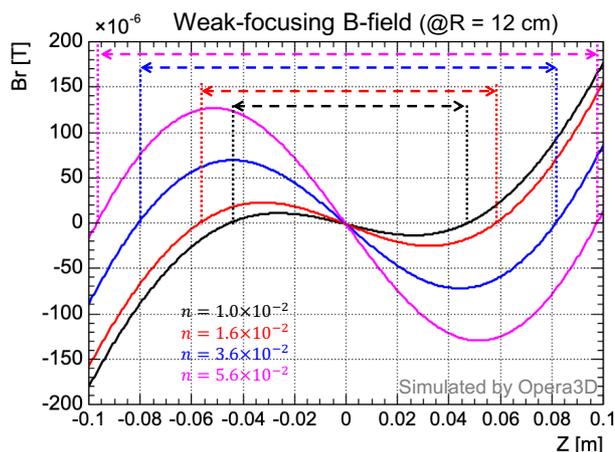


Figure 11: B_r distribution as a function of Z in design orbit ($R = 12$ cm) simulated by Opera-3D. Each colour represents the respective n -index.

め、弱収束磁場の n 値を変化させ、それに伴って蓄積ビーム分布が変化するか確かめた。弱収束磁場によってビームが蓄積されているのであれば、Fig. 11 に示す通り、 n 値が大きくなるにつれて蓄積ビーム分布が広がることが期待される。 n 値を変えて行った Z スキャン測定の結果を Fig. 12 に示す。Figure 12 において、色付きの矢印はそれぞれの n 値で大まかにビームが蓄積されている範囲を示す。この結果から分かる通り、弱収束磁場の変化に追従して蓄積ビーム分布の範囲も変化しており、弱収束磁場によってビーム蓄積されていることが確認できた。

2.5 XY 結合ビームの有効性

3次元らせん入射手法において、重要な要素が入射ビームの XY 結合である。入射領域においては、ソレノイド磁石のフリッジ磁場によってビーム方向を制御する。ただし、フリッジ磁場の dB_r/dZ は空間分布をもっており、有限な大きさの位相空間をもつビーム粒

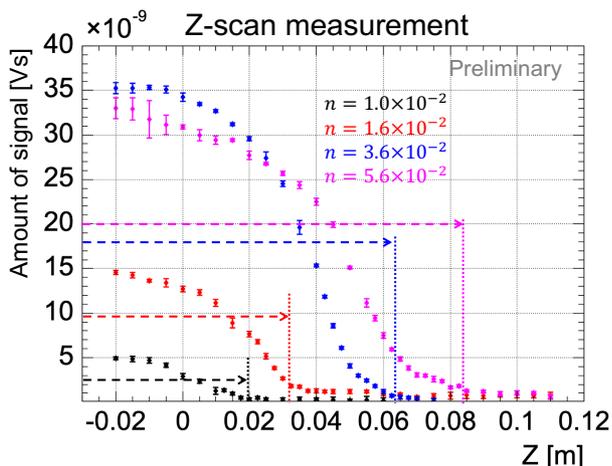


Figure 12: Result of Z-scan measurement with different conditions of n-index of weak focusing field. Each colour represents the respective n-index condition. Error bars are statistical errors only.

子が感じる磁場 ($B_r L$ 積) に位置依存性が生じるために Z 方向の発散という形になってビームに影響が出てしまい、結果として蓄積効率が低下する。このようなソレノイド磁場による影響を打ち消すためには、入射前のビームに適切な XY 結合を与えることが必要であるということがこれまでの研究でわかっている [8]。

今回、XY 結合の有効性を確認するため、入射に適した XY 結合をビームに与えた場合と、その他数パターンの XY 結合を与えた場合で Z スキャン測定を行った。入射ビームの XY 結合は、3つの回転四極磁石に印加する電流値をそれぞれ変えることで変化させた。測定結果を Fig. 13 に示す。黒色のデータが設計値の XY 結合での測定結果であり、それ以外の色のデータは設計と異なる XY 結合での測定結果である。Z = 0 mm まで SciFi プローブを挿入すると全ての蓄積粒子を測定したことになるため、Z = 0 mm での信号量を用いて蓄積効率の相対的な比較を行うことができる。この結果は、設計通りの XY 結合で入射した場合に蓄積効率が相対的に向上することを示唆しており、3次元らせん入射手法における XY 結合の有効性を示すものになると考えている。ただ Fig. 13 の結果は、四極磁石のミスアライメントによる軌道のずれも含まれている。今後定量的な議論をするためには、ミスアライメントに起因する入射軌道のずれがどれほど蓄積効率へ影響するのか評価する必要があり、シミュレーションベースで進めていく予定である。

3. まとめと展望

3次元らせん入射手法によるビーム蓄積を実証するため、SciFi を用いた検出器により蓄積ビーム分布を測定した。弱収束磁場の条件を変えて測定したところ、磁場の変化に伴って蓄積ビーム分布の範囲が変化していることが確かめられ、弱収束磁場によってビーム蓄積がなされていることを確認し、3次元らせん入射手法によるビーム蓄積を実証した。また、この手法における

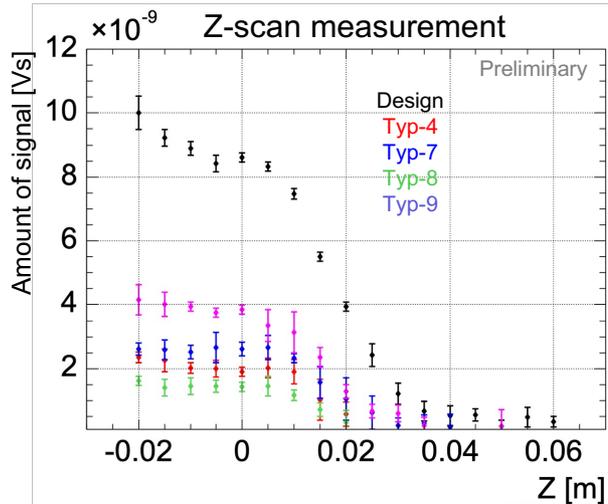


Figure 13: Result of Z-scan measurement with different conditions of XY-coupling of injected beam. Black-dot shows the result of measurement with designed XY-coupling. Another color shows the result with different from designed XY-coupling. Each error bars are statistical errors only.

重要な要素である XY 結合ビームの有効性についても、入射ビームの XY 結合を変えて分布測定を行い、有効性を示唆するデータが測定できた。今後は以下に列挙する事柄について、シミュレーションとデータ解析の双方から解析し、測定データの定量的な考察を行う。

- キッカーによる電磁ノイズに起因する BG ノイズの変動
- 入射軌道の不定性に起因する蓄積ビーム分布への影響
- 偏向磁石のフリンジ磁場によるビーム移送空間への影響

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26287055, 19H00673, 22K14061, 23KJ0590 の助成を受けたものです。検出器や治具の製作において、KEK 機械工学センターによる製造支援を受けています。ネクストクリエイトサービスの牛久俊郎氏には電磁石装置製作でご協力いただきました。パルスパワー研究所の徳地明氏にはキッカー電源の開発でご協力いただきました。KEK 加速器の久松広美氏には真空系全般の機器をお貸しいただき、また真空系の運用についてご助言いただきました。PMT モジュールをお貸しいただいた KEK 加速器の矢野喜治氏、オシロスコープをお貸しいただいた KEK 加速器の諏訪田剛氏はじめ、ご協力いただいた KEK 入射器の方々に感謝します。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment”, PTEP, 2019, Vol. 2019, Issue 5. doi : 10. 1093/ptep/ptz030

- [2] H. Inuma *et al.*, “Three-dimensional spiral injection scheme for the $g-2$ /EDM experiment at J-PARC”, Nucl. Instrum. Meth. A, 2016, Volume 832, pp.51-62. doi:10.1016/j.nima.2016.05.126
- [3] M. A. Rehman, “A Validation Study on the Novel Three-Dimensional Spiral Injection Scheme with the Electron Beam for Muon $g-2$ /EDM Experiment”, 総研大博士論文, 2020. <https://ir.soken.ac.jp/records/6324>
- [4] R. Matsushita *et al.*, “Development of Pulsed Beam System for the Three Dimensional Spiral Injection Scheme in the J-PARC muon $g-2$ /EDM Experiment”, Proc. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil(Online), 2021, pp.809-812. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB256
- [5] H. Inuma *et al.*, “J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験に向けた 3次元らせん入射実証実験”, Proc. PASJ2022, Online 2022, FROB05, pp.218-223. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/FROB/FROB05.pdf
- [6] R. Matsushita *et al.*, “Demonstration of three-dimensional spiral injection for the J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment”, J. Phys.: Conf. Ser., Volume 2687, 2024, 022035. doi:10.1088/1742-6596/2687/2/022035
- [7] 矢野喜治, “大口経光ファイバの加速器への応用”, 総研大博士論文, 2014, pp.77-81. <https://ir.soken.ac.jp/records/4916>
- [8] H. Inuma *et al.*, “Precise control of a strong X-Y coupling beam transportation for J-PARC muon $g-2$ /EDM experiment”, J. Phys.: Conf. Ser., 2024, Vol. 2687, 022034. doi:10.1088/1742-6596/2687/2/022034