

J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験のための 3次元らせんビーム入射の実証実験の現状報告

THE STATUS REPORT OF DEMONSTRATIVE EXPERIMENT OF 3D SPIRAL BEAM INJECTION FOR J-PARC MUON $G-2$ /EDM EXPERIMENT

平山穂香^{#, A)}, 飯沼裕美^{A)}, Muhammad Abdul Rehman^{B)}, 大澤哲^{C)}, 中山久義^{C)}, 古川和朗^{C)}, 三部勉^{C)}
Honoka Hirayama^{#, A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Muhammad Abdul Rehman^{B)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Hisayoshi Nakayama^{C)},
Kazuro Furukawa^{C)}, Tsutomu Mibe^{C)}
^{A)} Ibaraki University, ^{B)} SOKENDAI, ^{C)} KEK

Abstract

We are developing a new beam injection technique, the three-dimensional spiral injection technique, which is designed for the ultra-precise experiment to measure the anomalous magnetic moment ($g-2$) and the electric dipole moment (EDM) of muons at the J-PARC muon beamline. To demonstrate this, we are working on a test experiment in which an 80 keV electron beam from an electron gun is injected into an 82.5 Gauss solenoid magnetic field instead of a muon beam and accumulated in a circular orbit with a diameter of 24 cm. The key issue in this test experiment is to establish a technique to properly couple the vertical and horizontal components of the beam motion (X-Y coupling) for the injection into an axisymmetric solenoid magnetic field.

1. はじめに

J-PARC ミューオンビームラインで、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)を測定する超精密実験の計画が進んでいる。ミューオンの $g-2$ は標準模型で計算された理論値と実験値との間に 3.8σ のずれがある、数少ない物理量である[1]。本実験でミューオンの $g-2$ を精密に測定し、標準模型を超えた物理に迫る。また、ミューオンの EDM は、発見されれば実験では初の時間反転対称性の破れの発見であり、現在の宇宙が反物質に対して圧倒的な物質優勢となった理由の解明に繋がるのが期待される。

本実験ではまず、運動量 $300 \text{ MeV}/c$ のミューオンビームを、鉛直方向にソレノイド軸をもつ MRI 型ソレノイド磁石を応用した直径 0.66 m の蓄積軌道に向けて斜め上から入射(3次元らせん入射)させる。次に、キッカーコイルで垂直方向にキックを与え、ビームの運動をほぼ2次元平面内に収め、ビームを保持する。最後に、ミューオンの崩壊陽電子の時間スペクトルを検出することでミューオンの $g-2$ と EDM を測定する。このような小さな蓄積リングへのビームの入射は過去に例がなく、技術開発や実証実験が進められている。

本稿では、KEK つくばキャンパスでおこなわれている3次元らせん入射実証実験の概要や目標、結果を報告する。

2. 3次元らせん入射実証実験の目的と概要

J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験では、直径 0.66 m という小さな蓄積軌道にビームを入射させるために、3次元らせん入射を採用する[2]。この手法は前例がないので、実証実験を KEK つくばキャンパスでおこなっている。

実証実験の目的は次の3つである。1つ目は、蓄積領

域内でのビームの3次元らせん軌道をカメラで可視化し、ワイヤスキャナで定量的なビームサイズを測定することである。2つ目は、蓄積領域内でのビームサイズを制御するために必要な X-Y 結合をビームに与えることである[3]。3つ目は、蓄積コイルに3次元らせん入射させたビームの運動を、キック磁場を用いて2次元平面内に収めることである。それぞれの詳細は後述する。

Table 1 に本番実験と実証実験の特徴の違いを示す。実証実験では、ミューオンビームではなく、電子銃からの電子ビームを用いる。電子は崩壊しないので、ビームを安定して蓄積させることができ、蓄積ビームを測定しやすくする。

Figure 1 に電子銃テストビームラインの概略図を示す。電子銃から出た 80 keV 電子ビームはまずコリメータと3つの四極電磁石を通る。この3つの四極電磁石はすべて回転させることができ、任意の回転角と任意の電流をもって、ビームの進行方向(z 方向)に対して垂直面上の x 方向と y 方向の運動に相関をもたせる(X-Y結合)ことができる。その後、ビームは偏向電磁石で角度 44 度上に向きを変え、ソレノイド磁石の蓄積コイルに入射する。蓄積領域内でのビームの運動は CCD カメラによって可視化され、ワイヤスキャナによって定量的なビームサイズが測定される。

Table 1: Differences Between Production and Demonstration Experiments

	Production experiment	Demonstration experiment
Beam	muon	electron
Momentum	$300 \text{ MeV}/c$	$297 \text{ keV}/c$
Storage coil diameter	0.66 m	0.24 m
Storage coil magnetic field	3 T	82.5 Gauss
Cyclotronic period	7.4 ns	5.0 ns

[#] 20nm031t@vc.ibaraki.ac.jp

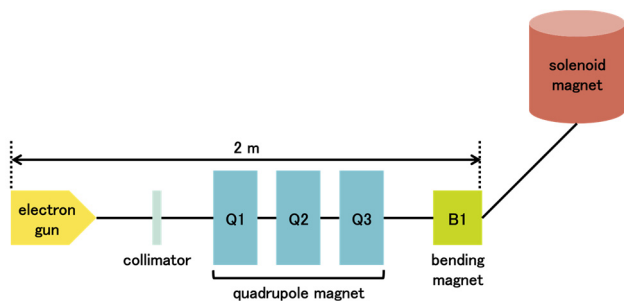


Figure 1: Schematic diagram of the electron gun test beamline.

3. Q-scan 法

コリメータ直後の、初期値としてのビームのエミッタンスやパラメータを調べるために、Q1~3のそれぞれについてQ-scan 法でビームを解析した。Q-scan 法をおこなう際はビームを蓄積領域に入射させるのではなく、Fig. 2 に示すように、ビームの進行方向に設置してあるスクリーン(銅板)にビームを当てる。銅板に映ったビームは CCD カメラによって撮影される。Figure 3 は CCD カメラによる実際のビームの画像である。

ビーム画像を解析するにあたって、四極電磁石の残留磁化がビームに大きく影響していることがわかった。Figure 4 に示す 2 つのビームはどちらも自由空間を飛ばしたもので、左が四極電磁石に残留磁化がある場合、右が残留磁化を消磁した場合のビームである。残留磁化がビームに意図しない変形を与えていることがわかる。よって、実験を開始する前に四極電磁石の残留磁化を調べ、地磁気(約 0.6 Gauss)に比べて大きい場合は消磁することにした。

Figure 5 は Q1 を用いてビームに垂直方向収束を与えたときの、 k 値に対するビーム幅 (RMS を採用) の変化である。このようなグラフが Q1~3 の垂直および水平方向収束いずれからも得られた。データ点を 2 次関数でフィットし、その係数から四極電磁石の入口でのビームパラメータが求められ、さらに自由空間を逆算することでコリメータ直後でのビームパラメータを求めることができる。Table 2 にコリメータでのエミッタンス ε とツイスパラメータ α, β, γ を示す。

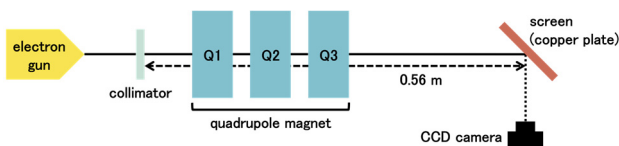


Figure 2: Beamline for projecting beams on a screen.



Figure 3: Images of the beam taken by a CCD camera.

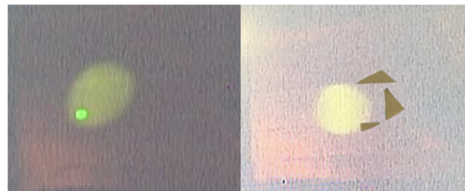


Figure 4: Effect of remanent magnetization of quadrupole magnets on the beam.

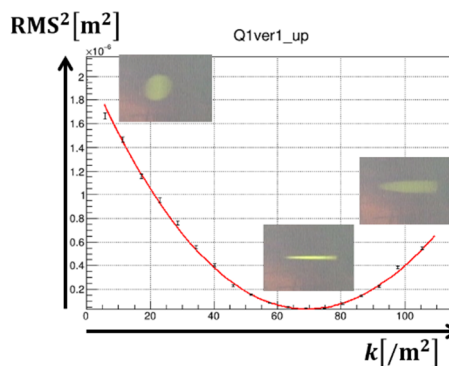


Figure 5: Change in beam width for vertical focus on the beam by Q1 as a function of k -value.

Table 2: Values of the Emittance and Twiss Parameters of the Beam at the Collimator

ε_x [mm · mrad]	0.252 ± 0.079
α_x	-3.717 ± 0.007
β_x [m]	1.760 ± 0.004
γ_x [mrad]	8.89 ± 0.01
ε_y [mm · mrad]	0.299 ± 0.080
α_y	-2.355 ± 0.009
β_y [m]	1.172 ± 0.005
γ_y [mrad]	5.76 ± 0.02

4. X-Y 結合

4.1 X-Y 結合

ビーム蓄積に用いられるソレノイド磁石はソレノイド軸(鉛直方向)に回転対称な磁場を作る。径方向磁場の空間分布 ($z-r$ 分布) があるところに有限の大きさをもつビームを入射させると、入射角のばらつきを生み、結果

的にビームが鉛直方向に引き伸ばされ、キック磁場でビームの運動を 2 次元平面内に収めることができない。これを防ぐために、あらかじめビームの x 方向と y 方向の運動に相関をもたせる。これを X-Y 結合と呼ぶ。Figure 6 の左の図がビームに X-Y 結合をかけていない状態で入射したとき、右の図が適切な X-Y 結合をかけたときのものである。ビームに適切な X-Y 結合をかけることで、蓄積領域内でのビームサイズを制御できることがわかる。

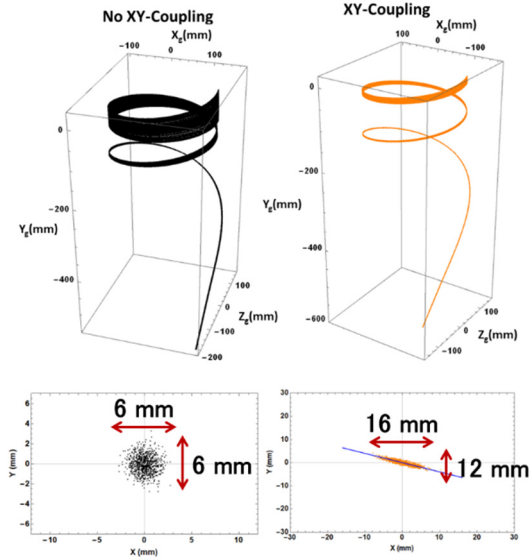


Figure 6: Effect of X-Y coupling on the beam size in the storage coil.

4.2 初期ビームの X-Y 結合度の判定

ビームに適切な X-Y 結合をかける前に、まず初期値としてのコリメータ直後のビームにどの程度 X-Y 結合がかかっているかを調べた。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \langle xx \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle \\ \langle xy \rangle & \langle x'y \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle \\ \langle xy' \rangle & \langle x'y' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$t = \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{\sqrt{|\sigma|}} - 1 \quad (2)$$

Equation (1)はビームの位相空間上の形状を表す σ 行列である。 σ 行列の左上と右下の x または y のみで表された成分は Q-scan 法から求めることができる。残りの右上と左下の x と y の相関をもった成分を計算で求める。 σ 行列の全成分を求めることで、Eq. (2)に示した X-Y 結合度を判定する結合定数 t を算出することができる。

コリメータでの σ 行列を求めるために、Q1~3 それぞれに電流を流し、20 通りのビーム画像を撮った。

$$\begin{pmatrix} x_f \\ x_f' \\ y_f \\ y_f' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ x_i' \\ y_i \\ y_i' \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$x_f = m_{11}x_i + m_{12}x_i' \quad (4)$$

$$y_f = m_{33}y_i + m_{34}y_i' \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \langle xy \rangle_f &= m_{11}m_{33}\langle xy \rangle_i + m_{11}m_{34}\langle xy' \rangle_i \\ &+ m_{12}m_{33}\langle x'y \rangle_i + m_{12}m_{34}\langle x'y' \rangle_i \end{aligned} \quad (6)$$

Equation (3)はビームをコリメータから銅板まで飛ばしたときのビームの位置や運動量の変化を見る式であり、左辺の添え字 f がついていないベクトルが銅板でのビームの値、右辺の添え字 i がついていないベクトルがコリメータでのビームの値、 4×4 の行列がコリメータから銅板までの転送行列である。これを Eq. (4)や Eq. (5)のように x_f や y_f について解くと、Eq. (6)の式をたてることができる。いま、20 通りの銅板でのビームの値がわかっているので、Eq. (6)を 20 本たてることができる。

$$X = \begin{pmatrix} \langle xy \rangle_f^1 \\ \langle xy \rangle_f^2 \\ \vdots \\ \langle xy \rangle_f^{20} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$X_0 = \begin{pmatrix} \langle xy \rangle_i \\ \langle xy' \rangle_i \\ \langle x'y \rangle_i \\ \langle x'y' \rangle_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$T = \begin{pmatrix} m_{11}^1 m_{33}^1 & m_{11}^1 m_{34}^1 & m_{12}^1 m_{33}^1 & m_{12}^1 m_{34}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{11}^{20} m_{33}^{20} & m_{11}^{20} m_{34}^{20} & m_{12}^{20} m_{33}^{20} & m_{12}^{20} m_{34}^{20} \end{pmatrix} \quad (9)$$

とおくと、20 本の方程式は、

$$X = TX_0 \quad (10)$$

とまとめることができる。Equation (10)の左から T の一般逆行列を作用させることで、求めたいコリメータのビームの値である X_0 を算出することができる。

以上の計算でコリメータでのビームの σ 行列の全成分を求めることができた。これをもとに Eq. (2)の結合定数 t を求めると、 $t = 0.05 \pm 0.6$ であった。結合定数 t は $t > 1$ で X-Y 結合が強く、 $t \sim 0.1$ で X-Y 結合が弱いと判定されるので、コリメータでのビームの X-Y 結合は無視できる程度に小さいとわかった。

4.3 ビームへの適切な X-Y 結合の付与

初期ビームに X-Y 結合はほぼないとわかったので、適切な X-Y 結合をビームに与えて蓄積領域に入射させることを試みた。SAD でビームに適切な X-Y 結合を与える回転四極電磁石の回転角と電流値を計算し、これに基づいて回転四極電磁石を調整した。Figure 7 は蓄積領域内でのビームの 3 次元らせん軌道を CCD カメラによ

てとらえたものである。左の画像が適切な X-Y 結合をビームにかけたとき、右の画像が不適切な X-Y 結合をビームにかけたときのものである。X-Y 結合が不適切だと、ビームが垂直方向に広がるのがわかる。

CCD カメラによるビームの 3 次元らせん軌道観測と合わせて、ワイヤスキャナによるビームサイズの定量的測定もおこなった。Figure 8 の赤線のグラフはビームに適切な X-Y 結合をかけたときのビームサイズを表している。1 周目のビームサイズが半値幅で約 10 mm であり、このサイズならば、キック磁場でビームの運動を 2 次元平面内に収めることができる。また、軌道中心が安定しており、軌道半径が設計値通りであると確認できたので、キッカーコイルを蓄積領域内に設置できることがわかった。

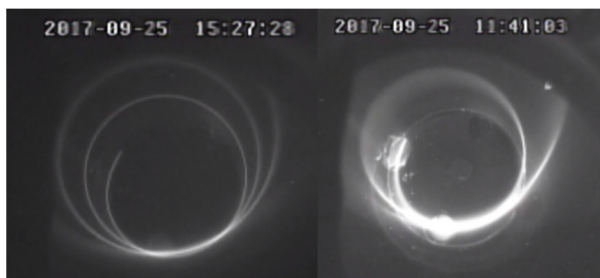


Figure 7: 3-D spiral orbits in a storage coil for a X-Y coupled beam.

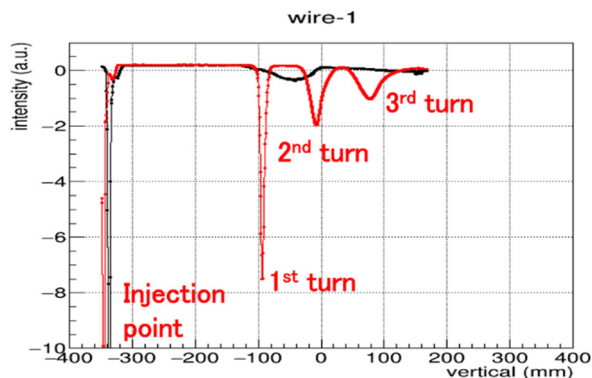


Figure 8: Beam size measurement with a wire scanner.

5. まとめと今後

J-PARC では、新しい実験手法でミューオンの $g-2$ と EDM を精密測定する計画が進んでいる。この実験の鍵となるビームの 3 次元らせん入射は過去に例がなく、KEK つくばキャンパスで実証実験がおこなわれている。実証実験では、これまでのところ、電子銃テストビームラインで回転四極電磁石を用いて Q-scan 法および 4 次元 σ 行列の測定・計算をおこなった。また、3 次元らせん入射に必要な X-Y 結合をビームに与える回転四極電磁石の設定を SAD で計算し、テストビームラインで試した。これにより、適切な X-Y 結合をビームに与えることで蓄積領域内でのビームサイズを制御できることがわかった。さ

らに、蓄積領域内でのビームサイズを十分小さくすることができたので、キッカーコイルの導入に進む。

今後、まず SAD 計算の精度を上げることに着手する。現在、SAD による回転四極電磁石の設定値とテストビームラインでの設定に差異があることがわかっている。本番実験では 3 次元らせん軌道を直接見ることができないので、SAD の計算精度は重要課題である。また、キッカーコイルを導入し、ビームをできるだけ長時間蓄積することを試みる。その後、検出器の導入、蓄積ビームの定量的評価手法の確立、入射効率の評価方法の検討などが、やるべきこととして挙げられる。

謝辞

本研究は、科学研究助成事業(科研費) JP19H00673 のサポートを受けています。

参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003, 2006.
- [2] M. Abe *et al.*, PTEP, Volume 2019, Issue 5, May 2019, 053C02; <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz030>
- [3] H. Iinuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A832, 2016, pp. 51-62.