

J-PARC muon g-2/EDM 実験における 精密な三次元ビーム入射のための蓄積ビームモニター

STORAGE BEAM MONITOR FOR PRECISE THREE-DIMENSIONAL BEAM INJECTION AT J-PARC MUON g-2/EDM EXPERIMENT

小川 真治^{#,A)}, 阿部 充志^{B)}, 飯沼 裕美^{C)}, 大谷 将士^{B)}, 佐々木 憲一^{B)}, 佐藤 優太郎^{D)}, 中山 久義^{B)}
松下 凌大^{E)}, 三部 勉^{B),E)}, 山中 隆志^{A)}
Shinji Ogawa^{#,A)}, Mitsushi Abe^{B)}, Hiromi Iinuma^{C)}, Masashi Otani^{B)}, Ken'ichi Sasaki^{B)}, Yutarō Sato^{D)},
Hisayoshi Nakayama^{B)}, Ryota Matsushita^{E)}, Tsutomu Mibe^{B),E)}, Takashi Yamanaka^{A)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} Ibaraki University

^{D)} Niigata University

^{E)} University of Tokyo

Abstract

In the J-PARC muon g-2/EDM experiment, small emittance muon beam is injected to the target storage orbit by the three-dimensional spiral injection scheme. Reduction of the vertical betatron oscillation amplitude is a key to improve experimental sensitivity. To measure the vertical betatron amplitude, a new storage beam monitor is proposed. This monitor utilizes thin scintillating fibers to suppress the multiple scattering of the muon beam. A design of this monitor and a prototype for a proof-of-principle test are described in this paper.

1. 3次元らせんビーム入射

1.1 J-PARC muon g-2/EDM 実験(E34 実験)

μ 粒子の異常磁気能率(g-2)は標準模型による理論値計算と実験による測定がどちらも 1 ppm 未満と精密にできるため、標準模型を超える新物理の探索において重要な物理量となっている。米国での 20 年前の実験、および現在行われている追実験において、実測値が理論予測値より 2.1 ppm (5.0 標準偏差)も逸脱している[1]。

これらの実験は魔法運動量(3 GeV/c)の μ 粒子を使うという同じ測定手法に基づいた極めて高精度での測定であり、双方の実験において同種の系統誤差が見落とされている可能性は排除しきれない。そのため、全く新しい手法により異常磁気能率を測定し、標準模型からの逸脱を独立に検証できる J-PARC muon g-2/EDM 実験(E34 実験)を日本で準備している[2]。誤差 0.45 ppm を目指しており、先行実験の結果を検証できる唯一の実験計画である。

μ 粒子異常磁気能率は μ 粒子を一様磁場中に蓄積し、スピン歳差運動の周期を正確に測定することで知ることができる。先行実験は π 粒子崩壊由来のエミッタンスの大きい μ 粒子ビームを直接用いたため、ビームを蓄積する際に収束電場を印可していた。一方、E34 実験では表面 μ 粒子ビームを一度冷却することで得られる低エミッタンスビームを活用し、電場なしでの蓄積を実現する。これにより低運動量(0.30 GeV/c)の μ 粒子ビームを用いたコンパクトなセットアップでの測定が可能となり、磁場の一

様性やビームの広がり起因する系統誤差を先行実験から大幅に削減できると期待される。

1.2 3次元らせんビーム入射の原理

E34 実験では低いエミッタンス(約 1 mm*mrad)の μ 粒子ビームを、半径 33 cm(運動量 0.30 GeV/c、磁場 3.0 T)とコンパクトな蓄積軌道にビームを入射し、魔法運動量を用いない為電場をかけずに蓄積を実現する必要がある。このため、「3次元らせんビーム入射」と呼ばれる手法が考案された[3]。Figure 1 にその概要を示す。 μ 粒子ビームは蓄積磁石上方から斜め下の方向に入射される。鉛直方向の運動量は蓄積磁石の動径方向プリング磁場により減少する。加えてキッカーコイルによる動径方向パルス磁場も印可し目標とする蓄積平面上に導く。蓄積平面付近には弱収束磁場 $B_z = -nB_{z0}z/R$ ($0 < n < 1$) をかけることで、入射したビームを蓄積する。ここで z は鉛直方向座標、 $R = 33$ cm はビームの蓄積軌道半径、 $B_{z0} =$

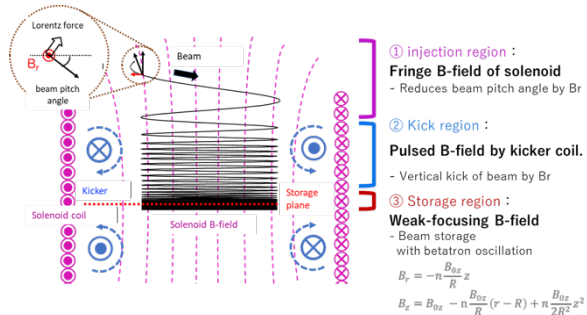


Figure 1: Principle of 3D spiral injection.

[#] ogawa.shinji@phys.kyushu-u.ac.jp

3 Tは蓄積磁場である。

入射後の μ 粒子は一樣磁場に從うサイクロトロン振動に加えて、弱収束磁場のポテンシャルに從って鉛直方向に単振動を行う。これを鉛直方向ベータトロン振動と呼ぶ。Figure 2 にシミュレーションにより予測するビーム軌道の一例を示す。蓄積されたビームが集団として上下に振動しているのがわかる。振動周期は弱収束磁場ポテンシャルの傾き $n = 1.5 \times 10^{-4}$ によって決まっており、E34 実験ではスピン歳差運動(2.2 μ s)と十分離れた600 ns 程度の周期となるように設計される。振動振幅・振動位相はパルス磁場の印可が終了した時点での鉛直方向位置・速度により決まる。

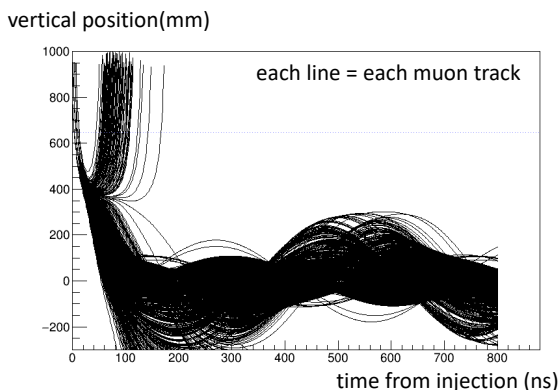


Figure 2: Injected muon tracks (simulation). Stored muons follow vertical betatron oscillations after the pulsed magnetic field finishes at 120ns.

精度よく μ 粒子異常磁気能率を測定するためには振動振幅が十分小さい必要がある。E34 実験では蓄積平面 ± 5 cm において蓄積磁場の一樣性と弱収束磁場の線形性が担保されるような設計になっており[2]、実験中の磁場測定もこの領域で行われる。そのためできるだけ多くの μ 粒子を振幅 5 cm 未満に蓄積する必要がある。また、さらに振幅 3 cm 程度とさらに狭い領域への入射ができると、実験探索感度の大幅な向上につながる可能性を提案している[4]。すなわち μ 粒子ビームの存在領域が狭くなることで崩壊陽電子の飛跡との交点から陽電子放出角が一意に再構成できるようになり、放出角を物理解析に取り込むことで異常磁気能率の統計誤差を最大 1.7 倍改善することが期待できる。

1.3 想定されるビーム調整・診断システム

このようなベータトロン振幅の小さい“精度の良い入射”を実現するためには、ビーム制御にフィードバックをかけるためにベータトロン振幅を実測できるシステムが必要となる。そのため本研究では蓄積軌道に設置できる蓄積ビームモニターを考案した。本モニターについては次章以降で詳しく議論する。

このモニターは本実験で計画しているビーム調整・ビーム診断装置の一部となる(Fig. 3)。鉛直方向ベータトロン振動を測定し、物理測定が実施できるかを判断するのが本モニターの役目である。位相空間上でのビームの調整は輸送ビームライン上の回転四重極電磁石や漏れ磁場が発生しないようにして蓄積磁石内部に設置する2極あるいは4極の Active Shield Steering Magnet

(ASSM)[5]により行う。印加するパルス磁場の強度・時刻もビーム軌道を調整できるパラメータである。互いに相関を持ったビーム位相空間での調整となるため、理想的な設定を見つけるために追加のビーム診断が必要となることが想定される。このため、ASSM 前後でのビームプロファイル測定や、高速シンチレータータイトルでのサイクロトロン周期測定による運動量測定の可能性も検討している。

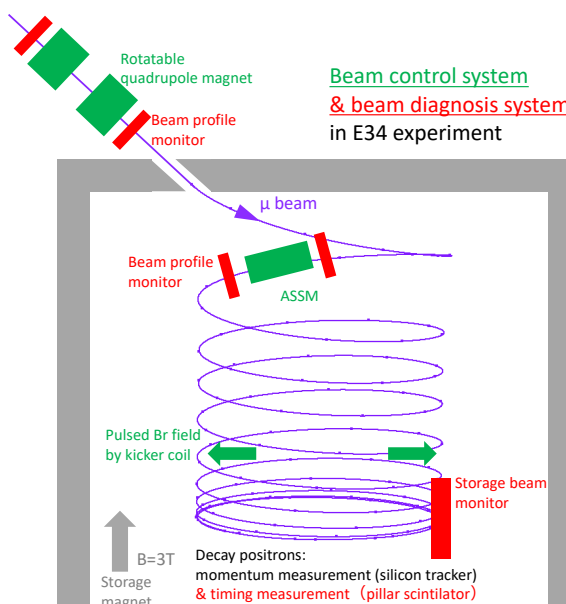


Figure 3: Sketch of beam control and diagnosis system for the E34 experiment.

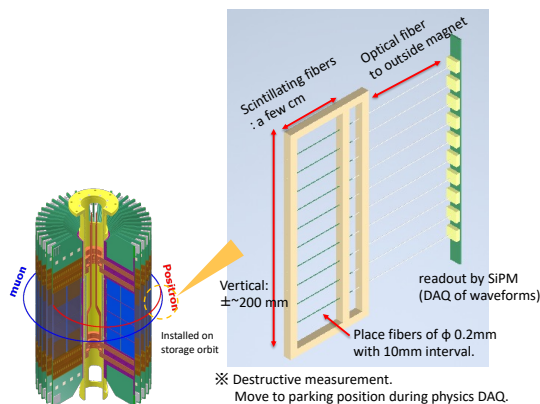


Figure 4: Design of storage beam monitor.

2. 蓄積ビームモニター

2.1 蓄積ビームモニターの概要

蓄積された μ 粒子ビームの鉛直方向ベータトロン振動を測定することを目的として、シンチレーションファイバー技術に基づいた Fig. 4 のような蓄積ビームモニターを考案した。直径 0.2 mm のシンチレーションファイバーを 10 mm 間隔で水平方向に張った構造となっている。蓄積

されたビームは周期 600 ns 程度で鉛直方向にベータロン振動をしながら、サイクロトロン周期 7 ns おきにモニターのある領域を通過する。シンチレーションファイバーを通過した μ 粒子により発生するシンチレーション光を半導体光センサー SiPM (波形の時定数: 30 ns 程度) で読み出すことで鉛直方向のビーム位置分布の時間変動が測定できる。

このような細線シンチレーションファイバーと SiPM を組み合わせた検出機技術は単粒子も観測可能な技術であり、毎秒 10^5 粒子と低強度な E34 実験のビームでも測定が可能である。

本モニター的设计にあたっては商用として入手できる最も細いシンチレーションファイバーを幾何学的占有率 2% とまばらにおくことで実効的な物質量の低減を図った。これは蓄積軌道にあるモニターを μ 粒子ビームが何度も通過するため、ベータロン振動を測定する前にビームが散乱してしまわないようにするためである。Figure 5 にモニターの有無による鉛直方向ビーム位置分布の変化を示す。散乱により分布が多少なまるものの大きく変化しないことがわかる。

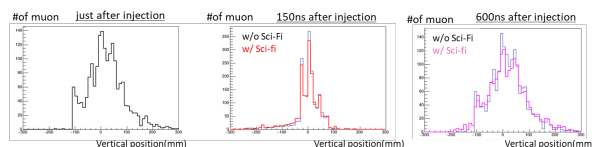


Figure 5: Simulated vertical distribution of muon beam in one vertical betatron oscillation period. A smear of the beam by the multiple scattering with the scintillating fibers is designed to be limited.

2.2 ビーム診断の動作原理

測定される鉛直方向ビーム位置分布の時間変動は多数の μ 粒子の運動、すなわち様々な振幅と位相を持った単振動の重ね合わせになる(周期の一様性は鉛直方向の n -index の一様性により担保されている)。ビーム診断として知りたいのはベータロン振幅分布であり、それをビーム位置分布から再構成するアルゴリズムを検討した。

測定されたビーム位置分布のベータロン振動1周期分の積分を考える。もし蓄積平面から一番外側のファイバー(例えば $z=200$ mm)に信号があるならば、それはそれだけ大きな振幅(この場合 $z=200$ mm)を持った μ 粒子が存在することを意味する。ベータロン振動はただの単振動であるため、そのような粒子がより蓄積平面に近いファイバーに引き起こす信号の大きさの平均値は逆三角関数で計算することができ、これを差し引く。次に一本内側のファイバー($z=190$ mm)に着目すると、差し引き後の信号の大きさから 190-200 mm の振幅を持った μ 粒子数がわかる。このような「ある振幅を持った粒子数の推定とその影響の差し引き」という操作を蓄積平面から遠い側のファイバーから近い側に向かって繰り返すことでベータロン振幅の分布を再構成できる。

このアルゴリズムをシミュレーションにより検証した。Figure 6 はベータロン振幅の真の値と再構成された分布を示す。比較のため振幅の小さい「精度の良い入射」

が実現できた場合と、ビームの入射角を間違えたため振幅が大きくなってしまった場合をのせている。振幅分布の形状を概ね再構成できており、本モニターの情報に基づき、精度の良い入射ができていないかを判断しながらのビーム調整が可能となる。

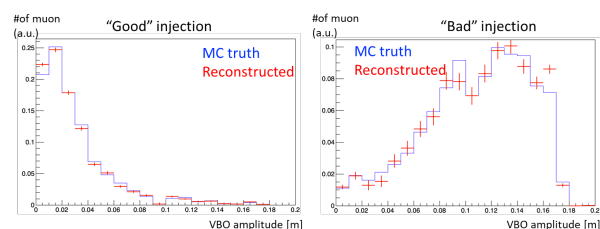


Figure 6: Reconstructed vertical betatron amplitude distribution from the storage beam monitor compared with the simulation truth. A good injection case with correct beam injection parameters (left), and a bad injection case whose beam pitch angle is shifted by 3mrad from the good case (right) are compared.

今回の検討ではベータロン振動1周期分の積分を考えることで、ベータロン振動の初期位相の情報除去して振幅分布を再構成した。次のステップとして時間変動の情報も活用することで振幅・位相の二次元分布が再構成できると期待される。これにより入射直後のビームの y - y' 空間分布が測定でき、ビーム調整に活用できる更なる情報源となりうる。

3. 原理実証を目指した試作機の製作

3.1 入射試験装置による原理実証

電子銃を用いた入射試験装置に導入する目的で蓄積ビームモニターの試作機を作成した。この試験装置は電子銃から来る 80 keV の電子ビームを蓄積磁場 82×10^4 T に入射することで3次元らせん入射の実証を目的としている[6]。実験本番と同様に、プリング磁場およびパルス磁場をかけることでビームの鉛直方向の運動量を削減し、弱収束磁場のかかった蓄積平面に導くことでビーム蓄積を行う。そのためこの試験装置においてもビームは鉛直方向にベータロン振動をしながら蓄積される。

入射試験装置にモニター試作機を導入する1つ目の目的は蓄積後のビーム運動の理解である。報告[6]の通り、電子ビームの蓄積自体は観測されたものの、蓄積後のビームの運動については理解が進んでいなかった。観測されたデータの挙動から、ビームが周期 1 μ s 程度で水平方向に偏心運動していると推測される。またシミュレーションにおいて、試験装置では E34 実験本番と比べて磁場の一様性が悪いため、このような偏心運動が起きることも示された[7]。以上の推測に基づき水平方向の運動を実測するため、鉛直方向にシンチレーションファイバーを張った試作機を導入する。

モニター試作機を導入する2つ目の目的は本モニターの原理実証である。水平方向の偏心運動は鉛直方向の運動と比べて、入射ビームのヨー角を調整することで制御がしやすい点や、入射後の振幅・位相分布が狭いという利点があり、動作試験に適している。ただし一方で、入射試験装置では本番実験とは異なり磁場の非一

様性により周期が一様でなく、再構成手法で対応が必要となる。

3.2 蓄積ビームモニター試作機の製作

蓄積ビームモニターの試作機を製作した。Figure 7 にその概略を示す。鉛直方向は弱収束磁場領域よりも長い 15 cm の測定領域を確保することで蓄積後のビームを確実に捉え、水平面内のビーム運動に注力するような設計となっている。水平方向には 6 本のファイバーを並べており、この領域内での偏心運動を捉えられる。例として振幅 2 cm 程度の場合に予測される信号の例を Fig. 8 に示す。偏心運動により時間が経つに従い本モニターを通過する際の半径が振動する様子が見えている。

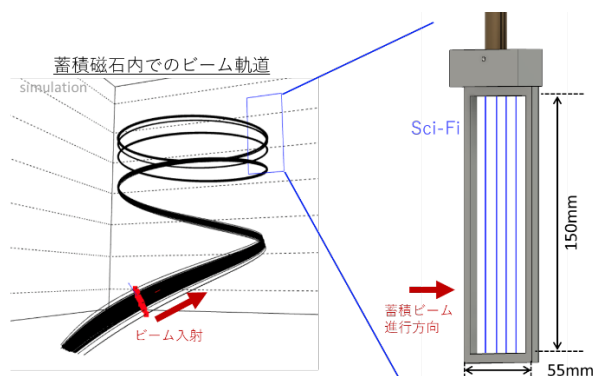


Figure 7: Design of prototype beam monitor.

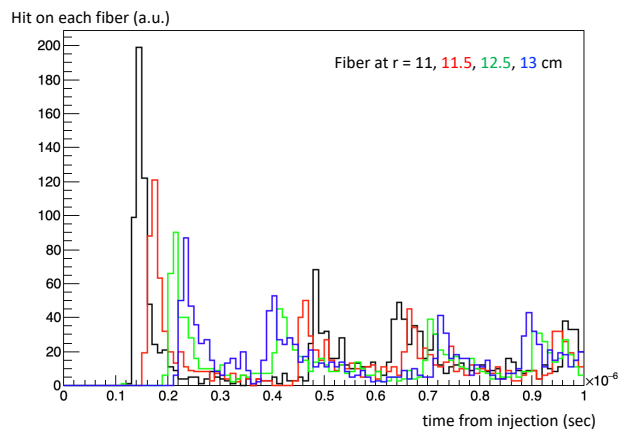


Figure 8: Example of expected signal (simulation). Oscillation of radial beam position can be seen.

Figure 9 は製作したビームモニターの写真である。アルミ製のフレーム上に細線シンチレーションファイバーが紫外硬化接着剤により固定され張られている。シンチレーション光は、シンチレーションファイバー端面に固定された光ファイバーを通じて、真空容器の外にある光センサーまで伝搬される。

今回の試作を通じて、シンチレーションファイバーと光ファイバーの接合部については改善が必要であることが判明した。コネクタを使うのが最も簡便ではあるが、スペースの制約上不可能である。試作機ではこれらのファ

イバーはガイドにより軸合わせされ光学グリスを挟んで接合した状態で固定されている。実際には固定が強くないせいでシンチレーション光の一部が漏れる現象が確認された。今回の測定ではビーム信号を用いた信号量較正により対処する。実験本番のモニター製作に向けてはファイバー融着器の活用などより良い接続方法を検討している。

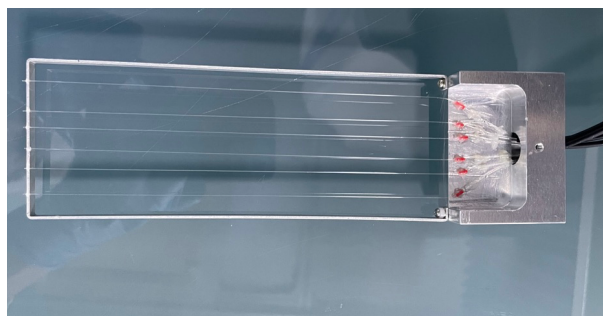


Figure 9: Prototype of beam storage monitor.

作成したモニター試作機を入射試験装置に導入し、蓄積ビーム信号測定に向けた準備を進めている。Figure 10 はパルス磁場を印加せずにビームがモニターを通り過ぎるように設定した際の SiPM 信号の例である。全てのファイバーから正常な信号が確認された。今後は蓄積されたビームの運動を測定し、その理解を通じて本モニターの原理実証を行う。

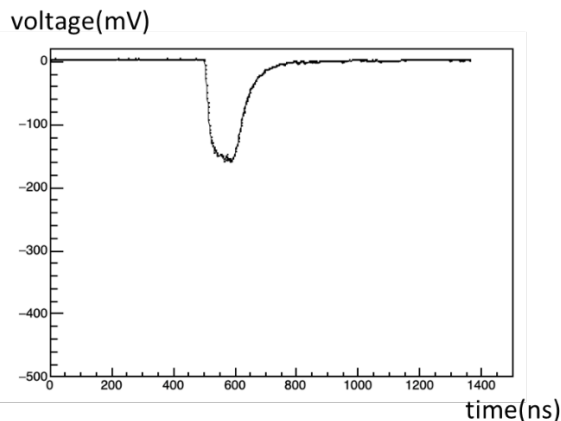


Figure 10: Example of fiber signal from passed through electrons. Waveform caused by 100ns beam width and about 30ns trailing edge of SiPM is observed.

4. 結論

J-PARC muon g-2/EDM 実験では3次元らせん入射法により目標とする蓄積軌道へのビーム入射を行う。ビーム蓄積後の鉛直方向ベータatron振動の振幅を小さく抑えることが実験感度の改善に直結する。鉛直方向ベータatron振動を測定するため、細線シンチレーションファイバー技術を活用し、ビームとの散乱を抑えた蓄積ビームモニターを考案した。測定量であるビーム位置分布から

PASJ2023 THOA2

振幅分布を再構成する手法を考案し、シミュレーションにおいて適切に動いていることを確認した。試作機を製作し、入射試験装置に導入した。今後は蓄積されたビームの測定を行いその原理実証を行う。

謝辞

本研究は科研費 22KJ2373・22K14061 により実施しました。また、試作機の製作にあたっては、高エネ研機械工作センターにご協力いただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm”, D.P. Aguillard *et al.*, arXiv:2308.06230
- [2] “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment”, M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02 (2019).
- [3] “Three-dimensional spiral injection scheme for g-2/EDM experiment at J-PARC”, H. Inuma *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A, 832, 2016, pp51-62.
- [4] “J-PARC muon g-2/EDM 実験における精密な三次元ビーム入射のための蓄積ビームモニター”, 小川真治 *et al.*, 日本物理学会 2023 年春季大会.
- [5] “g-2/EDM 精密計測用超電導磁石内設置能動磁気遮蔽型ステアリング磁石の試設計”, 阿部充志 *et al.*, 第 17 回日本加速器学会年会.
- [6] “J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けた 3 次元らせん入射実証実験”, 飯沼 裕美 *et al.*, 第 19 回日本加速器学会年会.
- [7] “J-PARC Muon g-2/EDM 実験に向けた 3 次元らせん入射実証実験:蓄積ビームの運動状態とビーム調整”, 松下凌大 *et al.*, 日本物理学会 2023 年春季大会.