

低エミッタンスミュオンビーム測定のための チェレンコフ放射型プロファイルモニターの開発

DEVELOPMENT OF A CHERENKOV RADIATION-BASED PROFILE MONITOR FOR LOW-EMITTANCE MUON BEAM MEASUREMENTS

中川鈴彩^{#, A)}, 宮原房史^{A, B)}, 大谷将士^{A, B)}, 橋本義徳^{B)}

Risa Nakagawa^{#, A)}, Fusashi Miyahara^{A, B)}, Masashi Otani^{A, B)}, Yoshinori Hashimoto^{B)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We are developing a new beam profile monitor for the muon g-2/EDM experiment at J-PARC, which aims to test the Standard Model via precision measurements of the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment. The experiment uses a 212 MeV muon linear accelerator and requires accurate beam position and profile measurements. At the early stage, fewer than 40 muons per pulse and background electrons from dark current make conventional monitors unsuitable. To address this, we propose a Cherenkov-radiation-based monitor with an Offner relay optical system using spherical mirrors, free of chromatic aberration and correcting all but astigmatic aberration. The difference in Cherenkov angles between electrons and muons enables selective muon detection and precise profiling of ultra-low-charge bunches. We optimized the optical design for a 40 MeV muon beam and will conduct electron-beam tests and radiation-durability studies of silica aerogels for the 212 MeV monitor.

1. はじめに

ミュオンの異常磁気能率および電気双極子能率の精密測定を通じた標準模型の検証を目的として、J-PARC muon g-2/EDM 実験ではエネルギー212 MeVのミュオン線形加速器の開発および建設が進んでいる[1]。現在、エネルギー25 meV まで冷却したミュオンを 90 keV まで加速することに成功している[2]。

実験には、低エミッタンスのビームが要求され、ビームの位置や形状を高精度で測定することが求められる。開発初期段階ではビームパルスあたりのミュオン数がパルスあたり 40 個以下となることが予想され、さらに暗電流由来の電子がバックグラウンドとして混入するため、既存のモニターでの測定は困難である。そこで本研究では、チェレンコフ放射に着目し、新型ビームプロファイルモニターを開発した。

本論文では、40 MeV 部と 212 MeV 部のビームプロファイルモニターについて報告する。

2. ビームプロファイルモニター

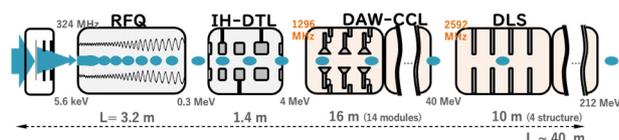


Figure 1: Layout of muon LINAC.

ミュオン線形加速器の概略図を Fig. 1 に示す。我々は DLS の入口と出口のビームプロファイルモニターを開発している。DLS (Disk-Loaded Structure) は、進行波型の加速空洞構造であり、運動エネルギー 40 MeV から

212 MeV の領域を担当し、光速の約 70 % から 94 % に対応するミュオンを効率的に加速する[3]。DLS の各セクションは約 2 m の長さを持ち、高加速勾配 (20 MV/m) で運転される。

ミュオンビームの電荷量は、電子や陽子加速器と比較して極めて小さい。コミッショニング初期段階では、1 パルスあたりの総電荷量が 6.4 fC 程度であり、これは一般的な電子線形加速器の数 pC - 数 nC と比べて数桁小さい。このような低電荷量のビームに対しても高精度で動作するビーム診断系の開発が不可欠である。

また、加速管内面で電界放出により発生する暗電流がミュオンビームに混入する。暗電流のエネルギーは最大約 14 MeV 程度と見積もられている。ミュオンと電子では電荷の大きさが同じため、電気的な測定では信号を分離できない。

ミュオンと暗電流由来の電子を選別するためには、チェレンコフ放射を用いる。屈折率 1.08 の媒質でのチェレンコフ光の放出角は、212 MeV ミュオンで 10.9 度、1.2 MeV - 14 MeV 電子で 14.0 度 - 22.1 度となる。ミュオンと同程度の放出角の低エネルギーの電子は加速管下流の四極電磁石でオーバーフォーカス/デフォーカスされるため、プロファイルモニターまで到達しない。電子由来のチェレンコフ光は放出角がミュオンよりも大きいため、光学系を工夫することでミュオン由来のみのチェレンコフ光を集光することが可能になる。

チェレンコフ光を用いたビームプロファイルモニターの概略図を Fig. 2 に示す。ミュオンビーム (青破線) は、ラジエータを通過することでチェレンコフ光を発生させ、ビームホールを通してモニター外へ抜けていく。本モニターはビームがラジエータを通過するため、破壊的な測定であるが、ラジエータの出し入れを外部から機械的に行うことで、真空環境を維持したまま必要ときだけ測定を行うことが可能である。発生したチェレンコフ光 (青実線) は

[#] nrisa@post.kek.jp

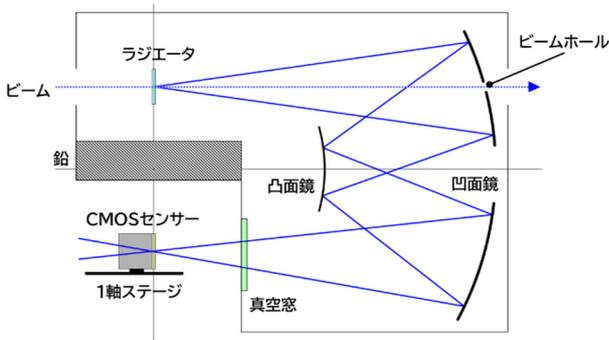


Figure 2: Layout of the beam profile monitor.

真空中を伝播し、凹面鏡および凸面鏡を用いたオフナーリレー光学系により像が形成される[4-6]。オフナーリレー光学系は3枚の球面鏡を居合わせた1対1の光学系である。この光学系は非点収差を持つが鏡を用いた光学系のため、検出器の感度領域全体のチェレンコフ光を色収差無く集光できる。

このモニターは、真空窓を通して外部のCMOSセンサーに光を導く構造となっており、CMOSセンサーの放射線損傷を防ぐために上部に鉛シールドを設置している。CMOSセンサーは1軸ステージ上に設置することで、焦点調整が可能になる。

3. 光学系の分解能評価

オフナーリレー光学系に起因する収差がビームプロファイルの空間分解能に与える影響を評価した。使用している光学系は凹面鏡および凸面鏡のみで構成されているため、色収差の影響は原理的に存在しない。一方で、非点収差については、光軸外の点光源から発せられる光線が、球面レンズや鏡の同心円方向と直径方向で異なる焦点面上に結像することで、像の広がりを引き起こす。このため、非点収差によって生じる像の広がりが最小となる検出器面の位置をシミュレーションで調査した。この評価により、実際のビームプロファイル測定における最適なセンサー配置条件と像の広がりを定量的に導出することが可能となる。

本研究では、オフナーリレー光学系における非点収差の影響を評価するため、Zemax OpticStudio[7]を用いてレイトレーシングシミュレーションを行った。対象とする設計は、40 MeV ミュオンビームに対応するプロファイルモニターであり、Table 1 の条件に基づいてモデル化を行った。

Table 1: Design of the Monitor for the 40 MeV Beam Section

| | |
|--|---|
| Radiator thickness | 5 mm |
| Radiator reflective index | 1.46 |
| Radius of curvature of spherical mirrors | Concave mirror: 560 mm Convex mirror: 280 mm |

チェレンコフ光源のモデル化においては、ラジエータ内部において0.5 mm 間隔で発光点を配置し、それぞれ

の点から円錐状に360本の光線を等角度で放射することで、チェレンコフ光の広がりを再現した。また、ミュオンビームは粒子数1000個、横方向の広がりをガウス分布と仮定した。

ビームサイズを $\sigma_x = \sigma_y = 1 \text{ mm}$ としたときに得られた光線追跡結果に基づき、検出面上での分布から収差による広がりを評価した。検出器面における応答を評価するため、CMOSセンサーの位置を変化させつつ、スポットサイズを調査した。Figure 3 にセンサー位置に対するスポットサイズを示す。x, y 方向の焦点位置はデータに二次関数をフィットして評価した。

得られたx, y方向の焦点位置の平均値をセンサーの最適配置位置として採用し、最終的にセンサーは設計基準面から-3.2 mmの位置に設置した。求めた最適配置位とx, y方向の焦点位置での検出器面における像をFig. 4に示す。x方向の焦点位置では、スポットがy方向、y方向の焦点位置では、x方向に広がる傾向が見られた。これらの結果は、光軸外の光線が同心円方向と直径方向で異なる焦点位置に結像する非点収差の影響を明確に示している。

次に、ビームサイズと検出器面($z = -3.2 \text{ mm}$)での測定スポットサイズとの関係性を評価するため、複数のビームサイズ条件に対してシミュレーションを行った(Fig. 5)。測定されたスポットサイズ σ_{meas} は、入力ビームサイズ σ_{beam} および光学系の分解能 $\sigma_{resolution}$ との間に以下の関係を仮定して評価した。

$$\sigma_{meas} = \sqrt{\sigma_{beam}^2 + \sigma_{resolution}^2}$$

本評価により、光学系の分解能はx方向で $\sigma_{x,res} = 0.28 \text{ mm}$ 、y方向で $\sigma_{y,res} = 0.29 \text{ mm}$ と見積もられた。この広がりは、想定されるビームサイズ $\sigma = 1 \text{ mm}$ より小さく、この広がりを差し引くことでビームサイズを十分な精度で測定可能であることが分かった。実際の広がりはミラーの製作精度やアライメント誤差などに依るため、実機を用いて評価する。

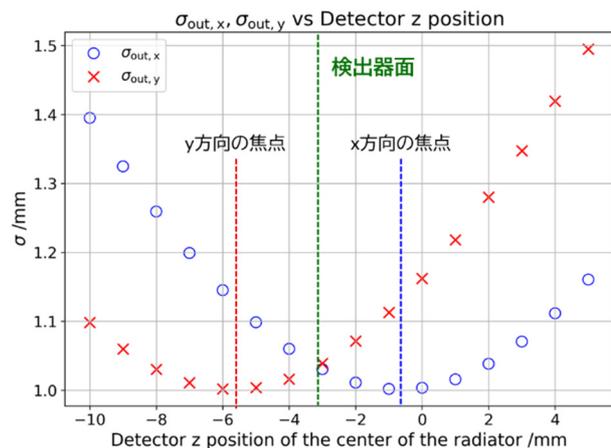


Figure 3: Spot size in the x and y directions as a function of detector position.

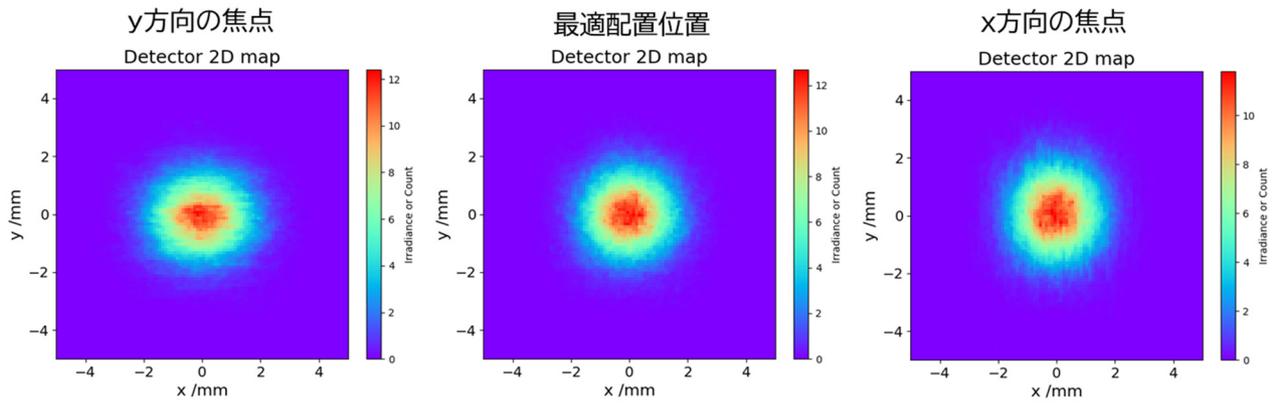


Figure 4: Imaging at optimal detector and x/y focal positions.

4. エアロゲルの放射線耐性試験

212 MeV 部のラジエータにはシリカエアロゲルを用いる予定である。放射線により特定の位置で透過率が低下した場合、その位置の光の強度が弱くなり、ビームの分布を正しく再現することができなくなる。また、屈折率が変わると光学系の焦点が変化し、分布が広がる。したがって、シリカエアロゲルの放射線耐性を調査する必要がある。

シリカエアロゲルに対する放射線耐性評価として、これまでに ^{60}Co を用いた γ 線照射試験が報告されており、光学特性に有意な影響を与えないことが報告されている[8]。一方で、電子ビームを直接照射した評価はこれまで報告がなく、光学特性変化は未解明である。

そこで、212 MeV ミュオン用モニターに使用するエアロゲルの長期信頼性を確認するため、電子ビームを用いた放射線耐性試験を計画している。本試験では、照射前後での屈折率および透過率の変化を測定し、光学特性への影響を定量的に評価する予定である。透過率は、照射時間を変えた複数の試料に関してスペクトメータを

用いて照射前後の波長ごとの透過率を測定して確認する[9]。また、屈折率は最小偏角法を用い、回転テーブル上に置いたエアロゲルに対しレーザーを照射し、偏角が最小になる点を求めて測定する[10]。

実際に予定しているセットアップを Fig. 6 に示す。電子ビームは図の上部から入射し、回転テーブル上に設置したエアロゲルに照射する予定である。屈折率測定用のエアロゲルは回転テーブル上に配置し、透過率測定用のエアロゲルはビーム下流部に別途設置する。放射線損傷による屈折率変化が生じた場合には、屈折光のシフトを視覚的に確認できるように、エアロゲルから十分な距離を離して拡散反射板を配置する。透過率の評価は、ビーム下流部のエアロゲルを一定時間ごとに交換および回収し、照射時間の異なる 3 種類の試料について測定を行う計画である。電子ビームのサイズは、ビーム取り出し窓後方およびビームダンプ直前に配置した蛍光板により確認、調整する。本試験は、2025 年度後期に東北大学電子光理学研究センターにて実施する予定である(課題採択済)。

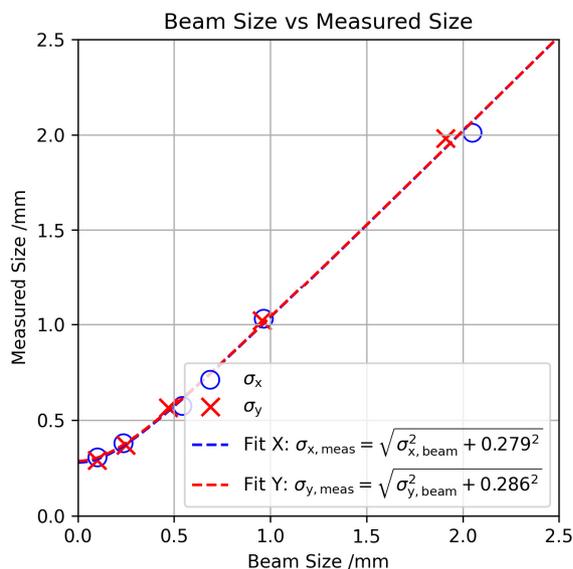


Figure 5: Measured spot size on the optimal detector position as a function of beam size and its fitting.

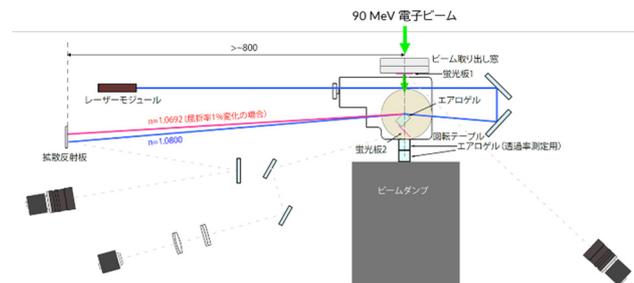


Figure 6: Planned setup for the radiation hardness test.

5. まとめと今後の課題

本研究では、J-PARC における muon g-2/EDM 実験で必要となる低エミッタンス・超低電荷ミュオンビームのプロファイル測定を目的として、新型ビームプロファイルモニターの開発を行った。

本モニターは、ミュオンと暗電流の電子を分離するためにチェレンコフ放射を利用し、ミュオン由来の光のみを選択的に集光する光学系を設計した。光学系には球面鏡を用いたオフナーリレー構成を採用し、レイトレーシ

グ解析により分解能を評価した結果、x, y 方向の非点収差が一致する位置において像の広がり約 0.29 mm となり、ミュオンビームのサイズ測定が十分可能であることが分かった。

さらに、モニターに用いるシリカエアロゲルの放射線耐性を確認するため、電子ビームを用いた照射試験を計画しており、屈折率および透過率変化を測定する予定である。

今後の課題として、球面鏡の設置角度・位置誤差の影響評価と要求精度の決定、ビーム入射角度の影響評価、試作機の製作と光学系試験を進める予定である。

謝辞

光学系のアイデア、設計に関して KEK 三橋氏に多くの情報、助言をいただきました。深く感謝します。

本研究は東レ科学技術研究助成、住友電工グループ社会貢献基金 2024 年度学術・研究助成、カシオ科学振興財団 2024 年度研究助成、JSPS 科研費 JP25H00401 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Mibe *et al.*, “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* Vol. 2019, no. 5, 2019, 053C022. doi:10.1093/ptep/ptz03
- [2] S. Aritome *et al.*, “Acceleration of Positive Muons by a Radio-Frequency Cavity”, *Phys. Rev. Lett.* vol. 134, 2025, 245001. doi:10.1103/PhysRevLett.134.245001
- [3] K. Sumi *et al.*, “Design and beam dynamics study of disk-loaded structure for muon LINAC”, *Journal of Physics: Conference Series* 2420(2023) 012038, 13th International Particle Accelerator Conference (PAIC'22). doi:10.1088/1742-6596/2420/1/012038
- [4] A. Offner, “New concepts in projection mask alignment”, *Optical Engineering*, vol. 14, no. 2, 1975, pp.130-132.
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, “大強度陽子ビームのためのマルチスクリューモニター”, *Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, 2014, pp.282-286.
- [6] F. Miyahara, M. Otani, T. Mibe, “ミュオン選別可能な高感度ビーム位置モニター開発”, *Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024)*, Yamagata, Japan, Aug. 2024, pp.110-113.
- [7] <https://www.ansys.com/ja-jp/products/optics/ansys-zemax-opticstudio>
- [8] S.K. Sahu *et al.*, “Measurement of radiation damage on a silica aerogel Cherenkov radiator”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, vol. 382, no. 3, 1996, pp. 441-446. doi:10.1016/S0168-9002(96)00768-1
- [9] M. Tabata *et al.*, “Fabrication of silica aerogel with n=1.08 for e+/μ+ separation in a threshold Cherenkov counter of the J-PARC TREK/E36 experiment”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, vol. 795, 2015, pp. 206-212. doi:10.1016/j.nima.2015.06.002
- [10] M. Tabata *et al.*, “Hydrophobic silica aerogel production at KEK”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, vol. 668, 2012, pp. 64-70. doi:10.1016/j.nima.2011.12.017