

J-PARC/MUSE 透過型ミュオン顕微鏡における 超低速ミュオンのビームプロファイル測定

BEAM PROFILE MEASUREMENT OF THE ULTRA-SLOW MUON FOR THE TRANSMISSION MUON MICROSCOPE AT J-PARC/MUSE

中沢雄河^{*,A)}, 足立泰平^{A)}, 大西純一^{A)}, 安達利一^{B)}, 池戸豊^{B)}, 大石裕^{B)},
下村浩一郎^{B)}, Strasser Patrick^{B)}, 神田聡太郎^{B)}, 後藤彰^{B)}, 手島菜月^{B)}, 永谷幸則^{B)},
三宅康博^{B)}, 山崎高幸^{B)}, 湯浅貴裕^{B)}, 梅澤卓矢^{C)}, 梅田幸佑^{C)}, 中村真毅^{C)},
Yuga Nakazawa^{*,A)}, Taihei Adachi^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Toshikazu Adachi^{B)}, Yutaka Ikedo^{B)}, Yu Oishi^{B)},
Koichiro Shimomura^{B)}, Patrick Strasser^{B)}, Sohtaro Kanda^{B)}, Akira Goto^{B)}, Natsuki Teshima^{B)},
Yukinori Nagatani^{B)}, Yasuhiro Miyake^{B)}, Takayuki Yamazaki^{B)}, Takahiro Yuasa^{B)}, Takuya Umezawa^{C)},
Kosuke Umeda^{C)}, Shinki Nakamura^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center, ^{B)} KEK, ^{C)} Ibaraki University

Abstract

We conducted a profile measurement of the ultra-slow muon beam for transmission muon microscopy at the J-PARC MUSE (Muon Science Establishment). The ultra-slow muons are generated by a laser ionization of thermal muonium emitted from a high-temperature tungsten target and are then electrostatically accelerated to an energy of 30 keV and transported to the muon cyclotron. The transverse beam profiles were measured at a transport beamline, confirming that the measurements were consistent with the result of the Monte-Carlo simulations. In this paper, the simulation and profile measurement results of the ultra-low muon beamline are reported.

1. はじめに

ミュオンは電子の約 200 倍の大きい質量を持ち、高エネルギーでの物質中での相互作用が陽子や電子に比べて小さいため、物質に対して優れた透過能を持つ。J-PARC 物質生命科学実験施設 MUSE (Muon Science Establishment) では、ミュオンの透過能を活かした新しい量子イメージングとしての透過型ミュオン顕微鏡の開発 [1] を推進している。透過能の高いミュオンで、空間的・エネルギー的に非常に先鋭化された高輝度ビームを実現することで、高分解能かつ高透過能な革新的なイメージングが可能になる。これにより従来のイメージングでは到達できなかった、観測可能厚みが数 100 μm オーダーでの透過観測、例えばシナプスから神経細胞までの統合的な細胞活動の 3 次元投影などが可能になる。

観測厚みは、ミュオンビームのエネルギーに依存し、イメージングの分解能はミュオンビームのエミッタンス及びエネルギー幅に依存する。例えば、観測可能厚みが数 100 μm オーダーでの透過観測には、エネルギー 40MeV、エミッタンス $1\pi\text{ mm mrad}$ 程度のミュオンビームが要求される [2]。そこで、J-PARC MUSE では、レーザーイオン化によるミュオンの冷却技術と再加速で生成される低エミッタンスなミュオンビームを用いることで、透過型ミュオン顕微鏡の実現を目指している。

現在、透過型ミュオン顕微鏡の原理実証としての試作機開発が J-PARC MUSE U-line で進められている。本実験では、U-line で生成される室温程度まで減速された超低速ミュオン (Ultra slow muon: USM) を、フラットトップ RF 空洞を備えた小型 AVF サイクロトロンに

Table 1: Main Parameters of the Muon Cyclotron

Beam species	μ^+
Repetition rate	25 Hz
Operating frequency	108 MHz
Acceleration harmonics	2
Average magnetic field	0.4 T
Extraction radius	0.26 m
Injection: energy	30 keV
Injection: transverse emittance (rms)	$1\pi\text{ mm mrad}$
Extraction: energy	5.2 MeV

よって、5 MeV まで加速する。これにより、観測可能厚みが $\sim 4\mu\text{m}$ での物質の透過観測 [2] が可能になる。Table 1 に AVF サイクロトロンの仕様と要求条件を示す。このサイクロトロンは、住友重機械工業 (株) 製の HM10 型サイクロトロンをミュオン用に改造したものであり、設計及び製作、低電力、大電力試験が既に完了している [3-7]。一方で、サイクロトロン出射後のエミッタンス及びエネルギー分散は、入射ビームのエミッタンスや位相空間分布に敏感に依存する [4] ため、ビームコミッションングとしての、精度良いビーム診断と調整が要求される。

そこで本研究では、サイクロトロンへ入射する USM ビームの位相空間分布測定の事前試験として、USM ビームプロファイル (x - y 断面) 測定を実施した。Sec.2 では、実験のセットアップとして、USM ビームラインとプロファイルモニターを紹介する。次に、測定結果との比較検証のためのモンテカルロシミュレーションを Sec.3 で示す。Sec.4 では、プロファイルの測定結果を

* yuga.nakazawa@riken.jp

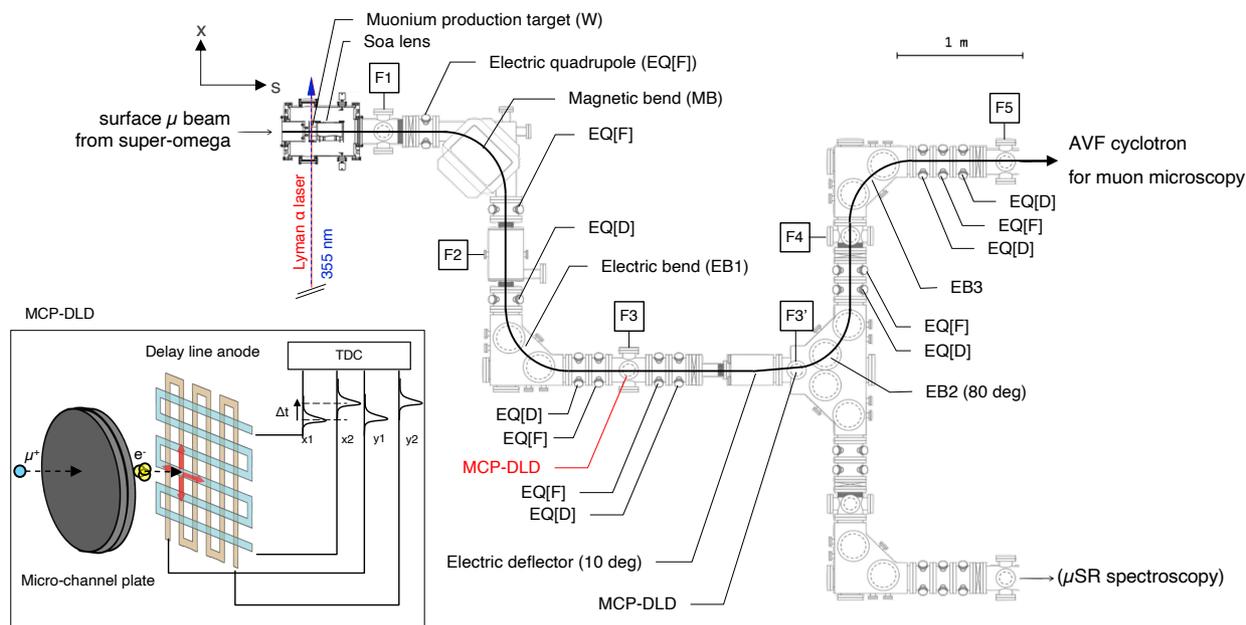


Figure 1: Experimental setup at the J-PARC MUSE U-line. The USM beam profile is measured using an MCP-DLD installed at F3; the diameter of the MCP is 40 mm and position detection is performed by the DLD.

示し、Sec.5 で今後の展望について述べる。

2. 実験セットアップ

実験セットアップを Fig. 1 に示す。表面ミュオンは、3GeV 陽子ビームを炭素標的に入射することにより生成され、バンチ幅 100 ns、間隔 600 ns、繰り返し周波数 25 Hz のダブルパルス構造を持つ。生成された表面ミュオンは、大口徑の超伝導ソレノイドを有するビームライン (Super-omega) [8] によって捕獲・輸送することで、大きな立体角で高強度のミュオンを引き出すことを可能にしている。

まず、表面ミュオンビームはパルス DC 電流で 2000 K まで加熱されたタングステン (W) 標的に熱エネルギー程度まで減速され、電子を捕獲しミュオニウムとなり真空中へ放出される。次に、放出されたミュオニウムから電子を解離するために、基底状態 $1S$ 状態のミュオニウムを $1S-2P$ のエネルギー差に相当する 122.09 nm の Lyman- α 光で $2P$ 状態に励起し、 $2P$ 状態から、355 nm のイオン化レーザー光でイオン化する。レーザービームの全幅は垂直方向に約 9 mm、水平方向に約 2 mm であり [9]、Lyman- α 光と 355 nm 光は、ほぼ平行かつ同期してミュオニウムに照射される。

イオン化された超低速ミュオンは、円筒形電極で構成される Soa lens [10] によって 30 keV まで静電加速及び収束される。30 keV で取り出されたビームはその後、一連の電気四重極、静電偏向、偏向電磁石から構成される輸送ビームラインによって、2つの実験エリア U1A (超低速ミュオン μ SR [11]) と U1B (透過型ミュオン顕微鏡用サイクロトロン) にそれぞれ輸送される。

輸送ビームラインにはマイクロチャンネルプレート (MCP) をベースとした粒子検出器を 6 箇所 (F1-F5, F3')

に設けている。ただし、F1 及び F2 地点では崩壊陽電子などの背景事象が多いため、ビーム診断は主に F3 及び F3' で行う。位置検出器としてのプロファイルモニターには、ディレイラインアノード付き Micro-channel plate (MCP-DLD) (Roentdek 社製 DLD40 [12]) を用いる。DLD は 2 層のコイル状のアノード電線が、互いに直交に積層された構造であり、それぞれの電線が x 及び y 座標の検出を行う。MCP で増幅された 2 次電子が電線に衝突すると、その地点を起点にして、両端に 2 つのパルス信号が伝播し、それらの時間差を測定することで、衝突位置を同定する。データ取得にはタイムスタンプが 1 ns の Time-to-Digital Converter (TDC) [13] を用いた。

サイクロトロン入射のビームコミッショニングには、F5 地点でのプロファイル測定が必要となるが、本研究ではビーム測定システムの検証とシミュレーションの健全性の確認のため、F3 地点での測定を実施した。

3. シミュレーション

輸送ビームラインの光学パラメータ及びビームプロファイルを推定するために、Geant4 ベースのコードである musrSim [14] によるモンテカルロシミュレーションを行った。OPERA-3D (TOSCA) の有限要素法を用いて、Soa lens の静電場及び輸送ビームライン上のすべての電場及び磁場マップを計算し [15]、これらの電磁場マップを musrSim コードに実装した。

シミュレーションにおける USM 初期ビームは、真空中に放出されたミュオニウムと Lyman- α 光と 355 nm 光のオーバーラップ体積と同様であると仮定し、ビーム幅 (1σ) は、 x 、 y 、 z 方向にそれぞれ 14 mm、2.1 mm、1.0 mm と定義した。USM 初期エネルギーは、2000 K での Maxwell-Boltzmann 分布を想定し、0.2 eV と定義し

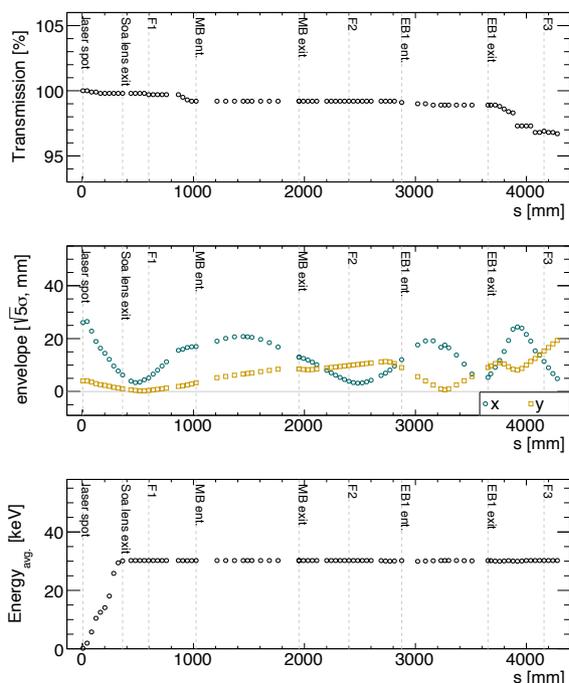


Figure 2: Simulation results of beam tracking from USM generation position to F3. (a) transmission efficiency without muon decay loss. (b) beam envelope of $\sqrt{5}\sigma$ in the x - and y -direction. (c) average energy.

た。また、初期 USM ビームの角度分布は均一で、W 標的の表面に対し垂直であると仮定した。

Figure 2 に USM 生成 (レーザー照射) 地点から F3 地点までの USM の輸送効率、ビームエンベロープ、平均エネルギーのシミュレーション結果を示す。USM は静電加速により 30.2 keV で引き出される。輸送ビームラインの光学系は F3 地点の MCP-DLD の有感領域内 ($\phi 40$ mm) に輸送される USM の個数が最大になるように最適化しており、F3 地点までの輸送効率は 97% となる。ただし、USM 生成地点から F3 地点までの飛行時間の計算値は 640 ns であり、ミュオン崩壊損失を含めた輸送効率は 73% となる。

4. プロファイル測定結果

2023 年 6 月に J-PARC MUSE U-line にて、F3 地点におけるビームプロファイルの測定を実施した。まず、生成された USM を同定するために、MCP-DLD で time of flight (TOF) 分布を測定した。Figure 3 に、F3 地点の TOF 分布を示す。最初の 2 つのピークは即発陽電子¹であり、これは J-PARC MUSE に陽子ビームを供給する RCS 加速器が 2 バンチ運転をしていたことに由来する。次の 6950 ns 付近のピークが USM 由来の信号であり、これは F3 と F3' の TOF 測定値の差分から USM であることを同定した。USM ビーム強度は、ミュオン生成効率や共鳴レーザーなどの条件に依存する。これ

¹ 陽子がミュオン生成標的に衝突した瞬間に発生し、光速に近い速度で U ラインを抜けてきた高エネルギーの陽電子

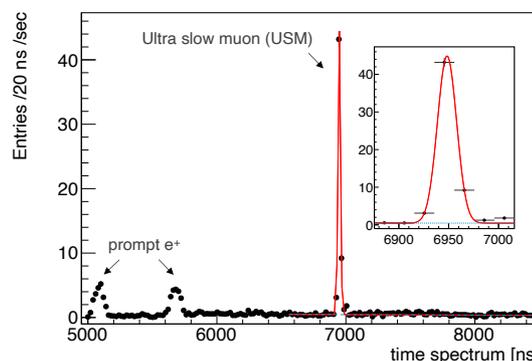


Figure 3: A time-of-flight distribution measured with the MCP-DLD at F3. The first two peaks correspond to prompt positrons from the muon production target.

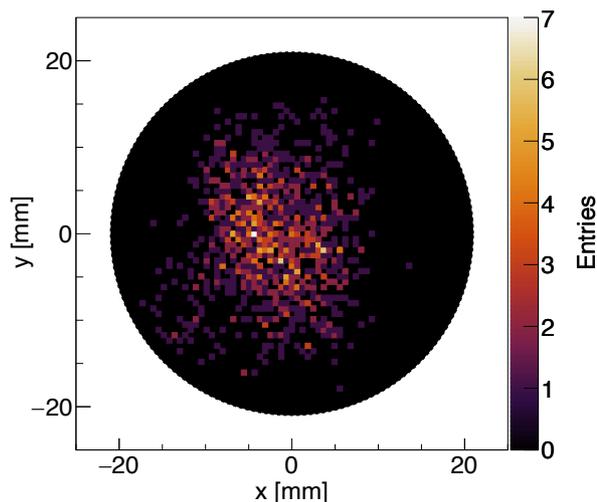


Figure 4: Measured USM profile at F3. The aperture of MCP-DLD is 40 mm in diameter.

らの影響を考慮した解析は鋭意推進中である。

次に、MCP-DLD から取得した TDC 情報を元に、二次元 (x - y) 分布を再構成した。USM のプロファイルの事象選別として、MCP-DLD の x 及び y 座標用のアノード電線の全ての信号のコインシデンスを取ることで、起点の異なる複数のパルスのペアが同時に伝播することで生じる事象 (マルチヒット) を除外した。Figure 4 に再構成した USM の二次元分布を示す。ここで、円は MCP の有感領域 ($\phi 40$ mm) を示している。このプロットは約 60 秒の測定で取得した約 1100 イベントの結果である。

Figure 5 には、Fig. 4 の射影としての x 及び y 方向の 1 次元分布の測定結果を示す。ガウシアンフィットの結果として測定されたビーム幅はそれぞれ $\sigma_x = 4.8$ mm、 $\sigma_y = 6.3$ mm であった。また、ハッチング線はモンテカルロシミュレーションにて見積もった値を示す。測定結果はシミュレーション結果とよく一致しており、シミュレーションと定量的に比較可能な測定データを得

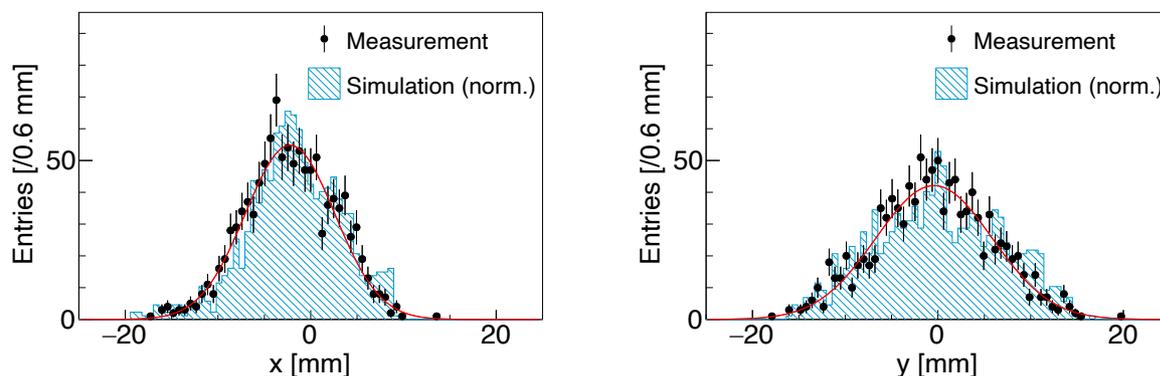


Figure 5: Measured and simulated USM beam profile in the x - and y -direction at F3. The black data indicate the measured data, and the red solid line is a result of Gaussian fitting. The hatched line indicates the simulation result, and the event number in the simulation was normalized.

られることが確認できた。

5. まとめと展望

J-PARC MUSE では、透過型ミュオン顕微鏡の開発に向けて、超低速ミュオンビームのコミッショニングを進めている。サイクロトロンへのビーム入射のための事前測定として、MCP-DLD を用いた超低速ミュオンビームのプロファイル測定を実施した。測定されたビームプロファイルは、モンテカルロシミュレーションによる結果とよく一致し、シミュレーションの健全性を検証することができた。

今後は、得られたビームプロファイルを用いて、位相空間分布の測定を進める。F3 及びサイクロトロン入射直前の F5 地点でのビームパラメータを取得することで、サイクロトロンへのビーム整合を行う。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP17H06126、JP23KJ2176 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Miyake *et al.*, “Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE”, JPS Conf. Proc. 2, 010101 (2014). doi:10.7566/JPSCP.2.010101
- [2] 永谷 幸則, 下村 浩一郎, “透過型ミュオン顕微鏡”, 日本結晶学会誌, 2023, 65 巻, 1 号, p. 33–41, doi.org/10.5940/jcrsj.65.33
- [3] J. Ohnishi *et al.*, “ミュオン加速用サイクロトロンの軌道計算”, in *Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019)*, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 121–125.
- [4] J. Ohnishi *et al.*, “ミュオンサイクロトロンの設計と製作”, in *Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020)*, Online, Sep. 2020, pp. 669–673.
- [5] T. Yamazaki *et al.*, “ミュオンマイクロビーム生成のためのフラットトップ RF 空洞の開発”, in *Proc. 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2020)*, Online, Sep. 2020, pp. 885–887.
- [6] J. Ohnishi *et al.*, “ミュオンサイクロトロンの磁場測定結果の分析”, in *Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021)*, Online, Aug. 2021, pp. 845–849.
- [7] J. Ohnishi *et al.*, “ミュオンサイクロトロンの開発状況”, in *Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022)*, Online, Oct. 2022, pp. 906–910.
- [8] P. Strasser *et al.*, “Superconducting curved transport solenoid with dipole coils for charge selection of the muon beam”, *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 317, pp. 361–364, 2013. doi.org/10.1016/j.nimb.2013.07.046
- [9] Y. Oishi *et al.*, “Intense Lyman-alpha light source for ultra-slow muon generation”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2462, 012026, 2023. doi:10.1088/1742-6596/2462/1/012026
- [10] P. Strasser *et al.*, “Design and construction of the ultra-slow muon beamline at J-PARC/MUSE”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 551, 012065, 2014.
- [11] S. Kanda *et al.*, “The Ultra-Slow Muon beamline at J-PARC: present status and future prospects”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2462, 012030, 2023. doi:10.1088/1742-6596/2462/1/012030
- [12] O. Jagutzki *et al.*, “A broad-application microchannel-plate detector system for advanced particle or photon detection tasks: large area imaging, precise multi-hit timing information and high detection rate”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 477 (2002) 244 – 249.
- [13] K. M. Kojima *et al.*, “New μ SR spectrometer at J-PARC MUSE based on Kalliope detectors”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 551, 012063, 2014. doi:10.1088/1742-6596/551/1/012063
- [14] K. Sedlak *et al.*, “Manual of musrsim.”, <http://lmu.web.psi.ch/simulation/index.html>.
- [15] A. D. Pant *et al.*, “Characterization and optimization of ultra slow muon beam at J-PARC/MUSE: A simulation study”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 929, pp. 129–133, 2019. doi.org/10.1016/j.nima.2019.02.065