

# J-PARC E34 muon $g-2$ /EDM 実験：低エミッタンスミューオンビーム実現に向けた高時間分解能縦方向ビームプロファイルモニターの開発

## DEVELOPMENT OF THE LONGITUDINAL BEAM PROFILE MONITOR WITH HIGH TIME RESOLUTION FOR REALIZATION OF LOW-EMITTANCE MUON BEAM IN THE J-PARC E34 MUON $G - 2$ /EDM EXPERIMENT

四塚麻衣<sup>\*A)</sup>, 飯嶋徹<sup>A,B)</sup>, 飯沼裕美<sup>C)</sup>, 居波賢二<sup>A)</sup>, 大谷将士<sup>D)</sup>, 河村成肇<sup>D)</sup>, 北村遼<sup>E)</sup>, 近藤恭弘<sup>E)</sup>, 齊藤直人<sup>F)</sup>, 下村浩一郎<sup>D)</sup>, 須江祐貴<sup>A)</sup>, 中沢雄河<sup>C)</sup>, 長谷川和男<sup>E)</sup>, ニツ川健太<sup>D)</sup>, 三部勉<sup>D)</sup>, 三宅康博<sup>D)</sup>, 森下卓俊<sup>E)</sup>, 安田浩昌<sup>G)</sup>, 山崎高幸<sup>D)</sup>

Mai Yotsuzuka<sup>\*A)</sup>, Toru Iijima<sup>A,B)</sup>, Hiromi Iinuma<sup>C)</sup>, Kenji Inami<sup>A)</sup>, Masashi Otani<sup>D)</sup>, Naritoshi Kawamura<sup>D)</sup>, Ryo Kitamura<sup>E)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>E)</sup>, Naohito Saito<sup>F)</sup>, Koichiro Shimomura<sup>D)</sup>, Yuki Sue<sup>A)</sup>, Yuga Nakazawa<sup>C)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>E)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>D)</sup>, Tsutomu Mibe<sup>D)</sup>, Yasuhiro Miyake<sup>D)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>E)</sup>, Hiromasa Yasuda<sup>G)</sup>, Takayuki Yamazaki<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>Nagoya University, <sup>B)</sup>Nagoya University KMI, <sup>C)</sup>Ibaraki University, <sup>D)</sup>KEK, <sup>E)</sup>JAEA, <sup>F)</sup>J-PARC Center, <sup>G)</sup>University of Tokyo

### Abstract

The muon anomalous magnetic moment ( $g-2$ ) and electric dipole moment (EDM) are one of the physical quantities for which new physics is expected. The J-PARC muon  $g-2$ /EDM experiment aims to measure the muon  $g-2$  and EDM precisely by the novel method. It plans to use a low emittance muon beam, which is achieved by re-acceleration of ultra-slow muons generated from thermal muonium production and laser dissociation. In order to accelerate the ultra-slow muons, a muon linac has been developed. The muon linac in the low beta part consists of a 340-keV RFQ and a 4-MeV IH-DTL which operate with 324 MHz. In order to avoid substantial emittance growth, beam matching based on real measurement between the different accelerator is important. Because the IH-DTL adopts an alternative phase focusing (APF) scheme, the longitudinal beam matching is especially important in the low beta part. Therefore, we are developing a longitudinal beam profile monitor with high time resolution and a transport beam line. First, we developed a beam monitor and evaluated time resolution by test bench with photoelectron. The result is 65 ps in RMS. Next, we studied the emittance growth in the IH-DTL with several beam parameters. In this paper, the results of the beam monitor test and adjustment the twiss parameter are reported.

## 1. 研究背景

新物理の寄与が期待されている物理量のひとつに、ミューオンの異常磁気能率 ( $g-2$ ) と電気双極子能率 (EDM) がある。ミューオン  $g-2$  は米ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で行われた BNL E821 実験により、0.54 ppm [1] の精度で測定されている。その結果、標準理論の予測に対して  $3\sigma$  以上の乖離が確認されている [1, 2]。J-PARC E34 実験では先行研究とは異なる手法を用い、ミューオン  $g-2$  を 0.1 ppm の精度、EDM を  $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$  の感度で精密測定を行うことを目指している [3]。

先行研究での主要な系統誤差を削減するため、J-PARC E34 実験では低エミッタンスミューオンビームを用いる [3]。物質・生命科学実験施設 (MLF) から供給される 100% 偏極した表面ミューオンをターゲットで静止させ、熱エネルギー (25 meV) 程度まで冷却する [4]。その後、Fig. 1 に示す複数段階の線形加速器を用いた再加速を行うことで、低エミッタンスミューオンビームを生成する。加速周波数は、低速部の RFQ [5] と IH-DTL [6] では 324 MHz、高速部

の DAW-CCL [7] と DLS [8] では 1296 MHz である。これにより、ミューオンビームは 212 MeV まで加速される。

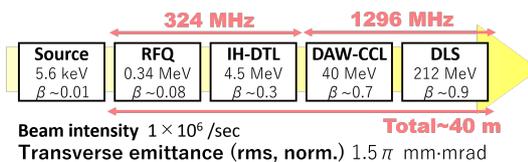


Figure 1: Schematic of the muon linac [3].

ミューオン線形加速器における主要なパラメータを Table 1 に示す。ビーム強度はビームコミッション時には、1 パルス当たり 1 ミューオン程から徐々に大強度化していく予定である。

目標精度での精密測定を実現させるには、再加速の際にエミッタンス増加を抑制しなければならない。そのため、実際の測定に基づいた、異なる加速器間でのビームマッチングが重要である。ここで、IH-DTL では Alternating Phase Focusing (APF) 方式を採用するため、縦方向のビームマッチングが特に重要となる。横方向のビームプロファイルモニターは

\* yotsuzuka@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

Table 1: Main Parameters of the Muon Linac [9]

Particle	$\mu^+$
Energy	212 MeV
Beam intensity	$1 \times 10^6$ /sec
Repetition rate	25 Hz
Beam pulse width	10 ns
Normalized transverse emittance	$1.5 \pi$ mm mrad
Momentum spread	0.1%

すでに開発されている [10]。しかし、縦方向については要求精度の高さと開発段階のビーム強度の低さによって従来の方法を用いることが難しい。そのため、高時間分解能を持ち、ミュオン1つに対する検出が可能であるマイクロチャンネルプレート (MCP) を用いた縦方向ビームプロファイルモニターの開発を行った。また、このモニターを用いた RFQ と IH-DTL 間のビーム調整についても研究を行っている。

本稿では、2章でビームモニターの構成と性能評価のために構築したテストベンチについて説明し、これらによる時間分解能の評価結果を示す。3章ではシミュレーションによる IH-DTL のビームマッチング結果について議論を行い、4章にてまとめと今後の展望を述べる。

## 2. 縦方向ビームプロファイルモニターの開発

### 2.1 モニターの構成

Figure 2 に縦方向ビームプロファイルモニターの概略を示す。ビームモニターは粒子検出部と読み出し系の2つから構成される。

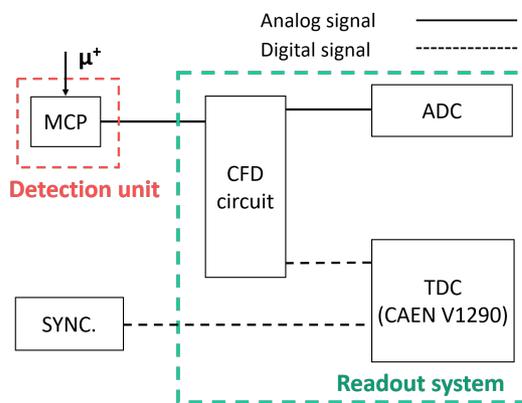


Figure 2: The beam monitor system diagram [11].

粒子検出部にはアノードを短冊状に4分割したマルチアノード MCP (MA-MCP) を使用した (浜松ホトニクス F1217)。これは、実際のビームラインで使用する際に運動量分散によって偏向磁石での選別時に生じるビームの広がり影響を削減するためである [12]。また、本研究では十分な二次電子増幅を得る

ために MCP は二段の仕様であり、直径  $\phi 42$  mm、一枚あたりの厚さ  $480 \mu\text{m}$ 、増幅率は  $10^6$ – $10^7$  である。

読み出し系には Constant Fraction Discriminator (CFD) 回路を使用する。MCP から得られる信号を CFD 回路に通すことにより、Time walk の影響を削減したデジタル信号と、増幅されたアナログ信号の取得が可能となる。その後、ADC (0.1 pC/count) を用いて電荷情報を、時間分解能が 35 ps である TDC CAEN V1290A [13] を用いて時間情報を取得する。Figure 2 の基準信号 (SYNC.) には加速器から得られる RF 信号を用いる。

### 2.2 テストベンチの構成

ビームモニターの性能評価を行うため、高速レーザーを用いたテストベンチの開発を行った。

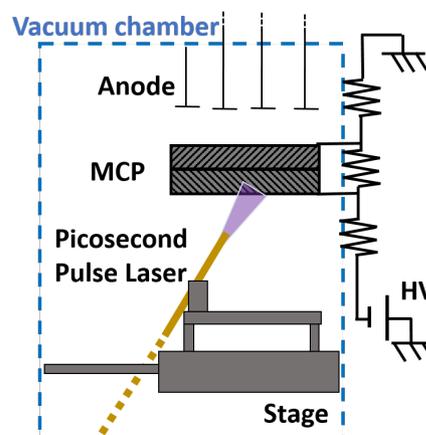


Figure 3: Configurations of the test bench [11].

Figure 3 に示すように、ピコセカンドパルスレーザー (浜松ホトニクス PLP10-040) を MCP 表面に照射し光電効果を起こすことで、光電子の生成を行う。レーザーの波長は 404 nm であり、半値全幅は 74 ps である。ここで、404 nm の光子に対する MCP の量子効率極めて低く、レーザーの照射レート 20 MHz に対してダークノイズを含む信号レートは数 Hz ほどである。そのため、Fig. 3 に示すテストベンチでは、1 電子に対する MCP の応答の測定となっている。

SYNC. としてレーザーの基準信号を用いた。また、レーザーの光は光ファイバーによって真空チャンバー内部に導入されており、MCP に平行な平面内で入射位置の変更を可能とするステージ上に設置している。本測定では、4 分割されたアノードのうち中央に位置するアノードのひとつの真下にレーザーを設置して測定を行った。

### 2.3 時間分解能の評価結果

Figure 4 にビームモニターの時間分解能の評価結果を示す。横軸はレーザー基準信号に対する MCP 信号の時間差を表す。ここで、複数のチャンネルにヒットがあった場合はクロストーク信号の可能性が有るため除外した。従って、Fig. 4 は特定のチャンネルに対する単一ヒットのみの分布である。Figure 4 の信号

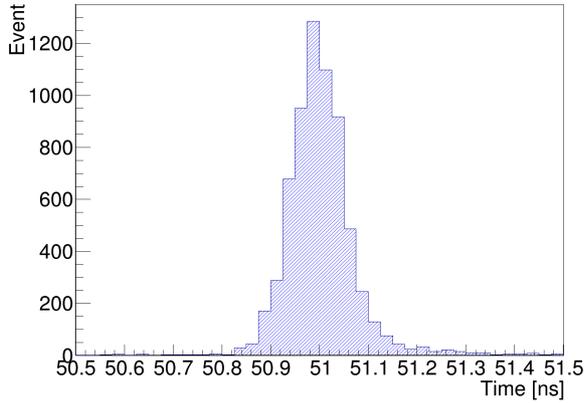


Figure 4: Time distribution of the beam monitor for pulse laser.

領域における RMS は 65 ps である [11]。但し、レーザーのパルス幅や読み出し系のジッターによる影響も含まれているため、ビームモニターの時間分解能は 65 ps 以下であると考えられる。今後は、レーザーに関してパルス幅の実測とレンズによる収束を行うことで、テストベンチによる測定精度の向上を計画している。

### 3. ビームマッチング

エミッタンス増加を抑制するためには、RFQ と IH-DTL 間のビームマッチングをとることが重要である。そのため、RFQ から出射されるビームを IH-DTL のアクセプタンスに合わせて整形するビームラインを設計する必要がある。

まず、シミュレーションによって IH-DTL のビームマッチング条件を求めた。IH-DTL では APF を採用しており周期構造になっていないため、入射ビームの Twiss parameter をスキャンし、出射エミッタンスが最小になるものを求めている [14]。本研究では Twiss parameter に従ってガウス分布で粒子を生成し、General Particle Trace (GPT) [15] でビーム輸送を行った。Figure 5 および Figure 6 に、Twiss parameter  $\alpha_z$  および  $\beta_z$  に対するエミッタンス  $\varepsilon_z$  の依存性に関する初期評価結果を示す。まず、 $\alpha_z$  のみをスキャンしてエミッタンスが最小値となるような値を求めたのちに、 $\beta_z$  のスキャンをおこなった。Figure 5 では、求めた  $\beta_z$  の周辺で再度  $\alpha_z$  のスキャンを行った結果を示す。

これらの結果から、z 方向に関する IH-DTL のビームマッチング条件は

$$\alpha_z = -0.19, \beta_z = 2449 \text{ [deg/MeV]} \quad (1)$$

であると結論付けた。また、x、y 方向に対しても同様のスキャンを行った結果は

$$\alpha_x = 0.75, \beta_x = 0.23 \text{ [mm/mrad]} \quad (2)$$

$$\alpha_y = 0.95, \beta_y = 0.28 \text{ [mm/mrad]} \quad (3)$$

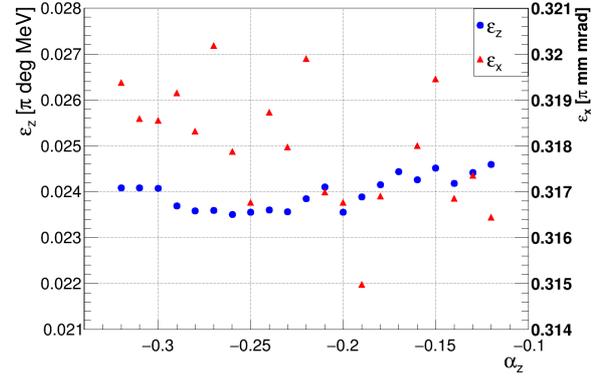


Figure 5: Result of emittance with  $\alpha_z$  scan when  $\beta_z$  is 2449 deg/MeV.

である。以上の Eq. (1)、Eq. (2)、Eq. (3) のマッチング条件における IH-DTL 出射のエミッタンスは

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= 0.315 \text{ [}\pi \text{ mm mrad]} \\ \varepsilon_y &= 0.187 \text{ [}\pi \text{ mm mrad]} \\ \varepsilon_z &= 0.0239 \text{ [}\pi \text{ deg MeV]} \end{aligned} \quad (4)$$

である。これは、現在設計されているのエミッタンス増加の要求値  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.5 \pi \text{ mm mrad}$  以下を満たす [16]。

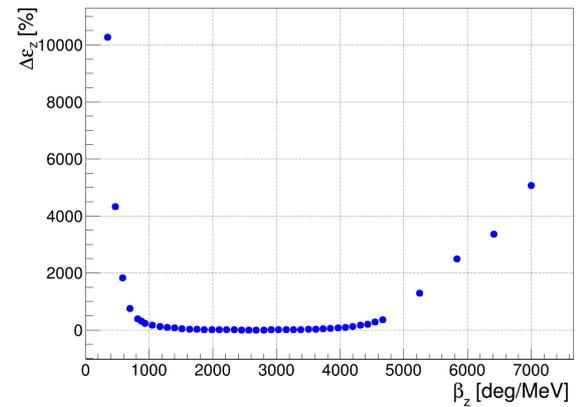


Figure 6: Emittance growth with  $\beta_z$  scan.

ビームモニターの精度に対するエミッタンスの増加率を Fig. 6 で評価する。ビームモニターの分解能を  $\delta \text{ deg}$  とすると、識別不可能な  $\beta_z$  の範囲は

$$\begin{aligned} \sqrt{\varepsilon_{\text{entrance}_z} \beta_{z0}} &= b_0 \\ b_0 - \delta < \sqrt{\varepsilon_{\text{entrance}_z} \beta_z} < b_0 + \delta \end{aligned} \quad (5)$$

と表せる。ここで、 $\beta_{z0}$  は IH 出射時のエミッタンスが最小となる場合の  $\beta_z$  である。また、2 章で開発を行ったモニターの分解能は  $\delta = 7.6 \text{ deg}$  である。パラ

メータ  $\beta_z$  の変化によるエミッタンス増加率が  $10^4\%$  以内となるのは  $\delta < 4 \text{ deg}$  の場合であり、 $10^2\%$  以内となるのは  $\delta < 2 \text{ deg}$  である。 $\beta_z$  の変化に対するエミッタンス増加が大きく、原因については今後他のパラメータも含めて調べる必要がある。また Fig. 6 より、 $\beta_z > 5000 \text{ deg/MeV}$  のエミッタンス増加は、 $\beta_z < 600 \text{ deg/MeV}$  と比べて緩やかな傾向がある。これらをもとに、ビーム輸送ラインの設計を検討している。

#### 4. まとめと展望

J-PARC muon  $g-2$ /EDM 実験が目標とする精密測定において必要不可欠である低エミッタンスミューオンビーム生成のために、低速部の加速を行う RFQ と IH-DTL 間のビーム診断に関して研究を行っている。とくに縦方向のビーム診断を行うため、MCP を用いた高時間分解能ビームプロファイルモニターの開発を行った。あわせて開発を行った高速レーザーを用いたテストベンチでの評価により、時間分解能  $65 \text{ ps}$  という結果を得た。また、IH-DTL のビームマッチング条件を求めるために、Twiss parameter に従ってガウス分布で粒子を生成し、 $\alpha_z$  および  $\beta_z$  に対するエミッタンスの依存性について GPT を用いて調べた。結果、 $z$  方向のビームマッチング条件は  $\alpha_z = -0.19$ 、 $\beta_z = 2449 \text{ deg/MeV}$  であり、このときの IH-DTL の出射エミッタンスは  $\varepsilon_x = 0.315 \pi \text{ mm mrad}$ 、 $\varepsilon_y = 0.183 \pi \text{ mm mrad}$ 、 $\varepsilon_z = 0.0239 \pi \text{ deg MeV}$  である。これは実験の要求値を満たす。また、 $\beta_z > 5000 \text{ deg/MeV}$  の範囲ではエミッタンス増加は緩やかな傾向にあることがわかった。今後は他のパラメータについても  $\beta_z$  と同様のスタディを行い、エミッタンス増加傾向について理解を深めた上で最適な Twiss parameter の決定を行う。その後、求めた Twiss parameter に合わせて RFQ、IH-DTL 間のビーム輸送ラインを設計する。最後に、設計したビーム輸送ラインと実粒子分布を用いたシミュレーションにより、エミッタンス増加へのビーム mismatches の影響を調べる予定である。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費、JP15H03666, JP15H05742, JP16H03987, JP16J07784, JP18H03707, JP18H05226 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003, (2006).
- [2] A. Keshavarzi *et al.*, Phys. Rev. D 97, 114025, (2018).
- [3] M. Abe *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 053C02 (2019).
- [4] P. Bakule *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B266, 335, (2008).
- [5] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 16, 040102, (2013).
- [6] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 040101, (2016).
- [7] M. Otani *et al.*, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 1543-1546, (2016).

- [8] Y. Kondo *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 874012054, (2017).
- [9] Y. Kondo *et al.*, Proc. IPAC' 18, Vancouver, BC, Canada, pp. 5041 - 5046, (2018).
- [10] B. Kim *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. A 899, 11, 22-27, (2018).
- [11] M. Yotsuzuka *et al.*, Proc. IPAC' 19, Melbourne, Australia, p. 2571, (2019).
- [12] Y. Sue *et al.*, Proc. IPAC' 19, Melbourne, Australia, p37, (2019).
- [13] [http://www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen\\_v1290.pdf](http://www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen_v1290.pdf)
- [14] M. Otani *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 040101 (2016).
- [15] <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [16] H. Inuma *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A832, 51, (2016).