

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2015～2016  
課題番号：15K17666  
研究課題名(和文)極めて物質量の小さいビームモニター検出器の開発

研究課題名(英文)Development of Ultra-Thin Beam Monitor

## 研究代表者

深尾 祥紀 (Fukao, Yoshinori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：80443018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パルスミュオンビームを用いた基礎物理の精密測定実験における、ビームモニター検出器の開発を行った。検出器は太さ100 $\mu$ mのシンチレーションファイバーを精密に配列し、極めて少ない物質量を達成している。これにより、検出器によるビームのエネルギー損失や散乱を抑えることが可能となっている。開発したビームモニター検出器はJ-PARC MUSE Dラインのミュオンビームを利用して性能評価を行い、十分な信号量が得られることを確認し、ビームプロファイルの測定に成功した。また、J-PARC MUSEで進めているMuSEUM実験に組み込み、ミュオニウム超微細構造の測定にも貢献した。

研究成果の概要(英文)：We developed a beam monitor for the various precision measurement in fundamental physics using pulsed muon beam. The detector consists of 0.1mm-diameter scintillating fibers to make the thickness of the detector as small as possible. The ultra-thin detector makes it possible to minimize the energy loss and scattering of the beam. The performance of the beam monitor was evaluated using muon beam at J-PARC MUSE D-line. We confirmed the detector gains sufficient signal and succeeded the measurement of the beam profile. We also installed the beam monitor to the J-PARC MuSEUM experiment and contributed to the measurement of muonium hyperfine structure.

研究分野：素粒子実験物理学

キーワード：beam monitor muon scintillating fiber

## 1. 研究開始当初の背景

J-PARC ではパルスミュオンビームを用いた基礎物理の精密測定実験が複数計画されており、代表的なものとしてはミュオンウムのマイクロ波分光による超微細構造測定実験 MuSEUM、ミュオン双極子モーメントの精密測定実験 g-2/EDM、ミュオン電子転換事象探索実験 COMET などがある。これらの実験に共通する特徴は、大強度ビームによる高い統計精度の実現と、それに伴う長期運転時におけるビーム安定性の評価および検出器の性能向上の必要性である。また、ビームのエネルギーが比較的低いことも共通しており、それに対応して動作する検出器が必要である。例えば、MuSEUM 実験において測定対象となるミュオンビームは最大強度  $10^8$  個/秒 ( $4 \times 10^6$  個/パルス)、運動エネルギー 3.65MeV 程度である。このような低エネルギーミュオンビームを用いた物理測定はビームのモニタリングを同時に行うことが難しく高く均一な検出効率を実現した実用性の高いモニター検出器は存在しなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、茨城県東海村の実験施設 J-PARC におけるパルスミュオンビームを用いた基礎物理の精密測定実験をはじめとするビーム実験において利用可能な、汎用性の高いビームモニター検出器を開発することである。これによりビームに由来する測定誤差を低減して実験の測定精度を向上させるとともに、適切かつ迅速なビーム診断によって実験の早期実現を可能にすることが期待できる。本研究では上述の実験のうち最初に行われる MuSEUM 実験に合わせて検出器を開発し、将来的に他の実験においても仕様を最適化の上で使用する。

## 3. 研究の方法

ビーム診断のための検出器としては Micro Channel Plate (MCP) や直径 1mm 程度のシンチレーションファイバー等がよく用いられるが、ミュオンは電子と比較して質量が大きく、物質との電磁相互作用による影響を大きく受けるため、上記の方法ではビームは検出器で完全に止まってしまうか、大きく散乱されてしまう。また、薄いプラスチックシンチレーターを使用した場合、シンチレーター内で発生した光信号の大半は多数の反射によって失われてしまい、検出効率の低下に加えて、信号の発生位置に対する依存性の問題が発生する。これらの問題を完結するために、申請者らは直径  $100 \mu\text{m}$  のシンチレーションファイバーを高精度で配列することでビームモニター検出器とする方法を考

案した。別の選択肢であるガス検出器と比較した場合、真空中での使用といった面で有利であり、また、シリコン半導体検出器と比較して物質量、製作コストの面で有利である。

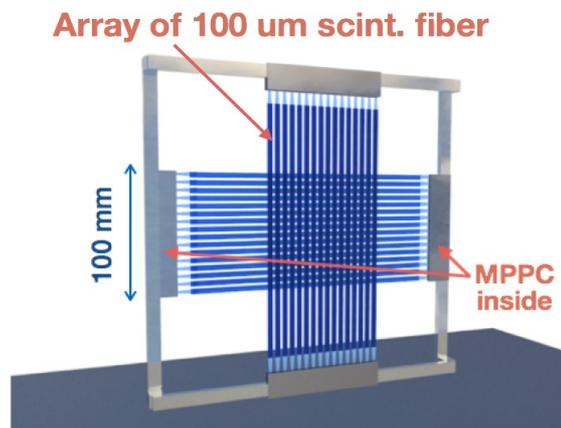


図1 検出器概念図

図1は検出器の概念図である。一次元配列したファイバーによる検出層を、向きを変えて二層重ねることで、二次元のビームプロファイル情報が得られる。直径  $100 \mu\text{m}$  のファイバーを40本並べて、エポキシ樹脂で固めて1チャンネルとする。このようにすることで、ビームに対する検出器の厚みを一定に保つことができる。40本のファイバーは束ねて両端をMPPC (Multi-Pixel Photon Counter、浜松ホトニクス社) に接続し、光信号を電気信号へと変換する。ファイバーを束ねることで、チャンネル当たりの信号量を増加させるとともに、読み出しのチャンネル数を必要十分な数に調整している。MPPCの利用により光電子増倍管と比較して検出器を小型に設計でき、高磁場環境での使用が可能となる。MPPCは1光子からの信号の検出が可能であり、ファイバーを細くすることによる信号光子の減少に対応している。MPPCからの信号は増幅回路を経て波形デジタイザを用いて記録する。

開発した検出器の性能を実験室における放射線源を用いた測定によって評価する。検出器の粒子検出効率、粒子通過位置の決定精度、チャンネルによる性能個体差の評価を行う。粒子貫通による検出器の発光量やビーム形状の再構成精度に関してはシミュレーションを行って評価する。

## 4. 研究成果

図2は制作したビームモニター検出器の写真である。J-PARC MUSE Dラインのミュオンビームを使用して検出器の性能評価を行った。検出器としては十分な信号量が得られることを示し、実際にビームのプロファイル

強度を測定できることを示した。図3は測定したビームのプロファイルである。

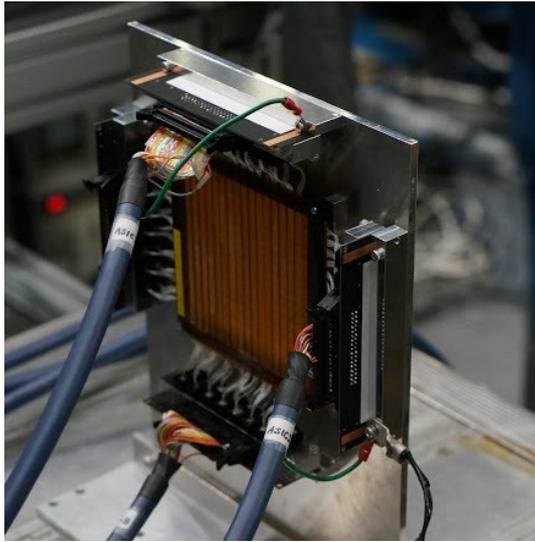


図2 ビームモニター検出器

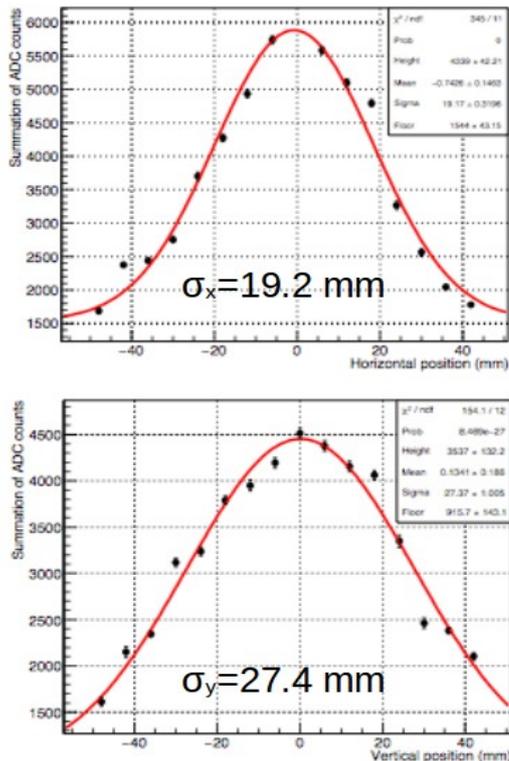


図3 ビームプロファイル

制作したビームモニター検出器は MuSEUM 実験にインストールする計画である。MuSEUM 実験は J-PARC MLF に新しく建設される H ラインにおいて行う計画であるが、平成 28 年度には、その予備段階として既存の D ラインを使用して、測定が行われた。本研究のビームモニター検出器も同時にインストールし、

ミュオニウムの超微細構造の測定に使用した。現段階の統計量ではビームモニター検出器によるビームの情報が物理測定の誤差に大きく貢献することはないものの、今後も継続していく実験において、貢献できるであろうことを確認できた。この実験結果は共同研究者の博士論文としてまとめられている。

ビームモニター検出器に使用している MPPC は周囲の温度に性能が依存するため、当初計画では周囲の温度管理を行うこととしていたが、予算の制限により実現には至らなかった。しかしながら、現段階では物理測定の誤差に及ぼす影響は小さいため、本研究の目標は十分に達成されたと考えている。

平成 28 年度にはビームモニター検出器の性能評価に特化したビーム実験も行う計画であったが、ビームタイムが限られており物理測定実験に優先的に割り当てられていることもあり、ビームタイムを確保することができなかった。平成 29 年度秋にこのためのビームタイムを確保できる見通しであり、そこでさらに検出器の性能を詳細に評価する計画である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 9 件)

① 神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、J-PARC における大強度パルスミュオンビームを用いたミュオニウム基底状態超微細構造の直接測定実験、日本物理学会 2017 年年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市)

② 上野恭裕、深尾祥紀、下村浩一郎、神田聡太郎、J-PARC MUSE におけるミュオニウム超微細構造の精密測定の現状と展望、日本物理学会 2017 年年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府・豊中市)

③ 上野恭裕、深尾祥紀、下村浩一郎、神田聡太郎、Precise Measurement of Muonium HFS at J-PARC MUSE、22nd International Spin Symposium、2016 年 9 月 27 日、Champaign (USA)

④ 神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、J-PARC におけるミュオニウム超微細構造の精密マイクロ波分光、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 24 日、宮崎大学木花キャンパス (宮崎県・宮崎市)

⑤ 下村浩一郎、深尾祥紀、神田聡太郎、上野恭裕、J-PARC MUSE におけるミュオニウム超微細構造精密測定実験の開発状況、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 16 日、金沢大学角間キャンパス (石川県・金沢市)

⑥神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、 Muonium Hyperfine Splitting Measurement in J-PARC、 International Nuclear Physics Conference 2016、2016年9月12日、Adelaide (Australia)

⑦神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、J-PARCにおけるミュオニウム超微細構造の直接測定実験のための検出器開発、日本物理学会 2016 年年次大会、2016年3月19日、東北学院大学 (宮城県・仙台市)

⑧神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、 Development of a fiber beam profile monitor for the experiments with low energy charged particle beam、12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics、2016年3月7日、金沢東急ホテル (石川県・金沢市)

⑨神田聡太郎、深尾祥紀、下村浩一郎、上野恭裕、J-PARCにおけるミュオニウム超微細構造の直接測定実験、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学 (大阪府・大阪市)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

深尾 祥紀 (FUKAO, Yoshinori)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：80443018

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

神田聡太郎 (KANDA, Sohtaro)  
下村浩一郎 (SHIMOMURA, Koichiro)  
上野恭裕 (UENO, Yasuhiro)