

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710101

研究課題名(和文)フライパス法の高度化による微量試料の Pulsed muSR 測定の開発

研究課題名(英文)Improvement of the flypast method for pulsed muSR measurements on a small amount of sample

研究代表者

伊藤 孝 (Ito, Takashi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：10455280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：J-PARCの大強度ミュオンビームを用いた物性測定(Pulsed muSR)における信号対雑音比の飛躍的向上を目指し、D1実験エリアにフライパス法を導入した。フライパス法において鍵となる真空容器の形状とミュオンビームの軌道を最適化するために、3次元的にミュオンビームを可視化する装置を製作し、ビーム軌道の観測に基づいてこれらに関するパラメータを決定した。最適化された条件下における信号対雑音比を計算機シミュレーションにより評価したところ、断面積 4mm<sup>2</sup>の試料に対しておよそ3という数値を得た。本手法によりこれと同程度の断面積をもつ微量試料の Pulsed muSR 測定が可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：The flypast method was implemented in the D1 experimental area of J-PARC to improve the signal-to-noise ratio in pulsed muSR measurements. A muon beam trajectory was optimized for the flypast mode using a 3D muon beam profile monitor, which was developed for interactive tuning of a muon beam line. A long vacuum chamber, which plays a key role in the flypast mode, was optimally designed based on the observed beam trajectory. The signal-to-noise ratio in the optimal condition was estimated to be about 3 for a small sample with the cross-sectional area of 4mm<sup>2</sup> using a computer simulation code.

研究分野：固体物理、ミュオン科学

キーワード：ミュオンビーム フライパス法 ビームプロファイルモニタ

### 1. 研究開始当初の背景

ミュオンスピン回転・緩和 ( $\mu$ SR) 法は正ミュオン( $\mu^+$ )のスピンを用いた微視的磁気測定手法であり、物性物理や化学分野の研究において広く用いられている。 $\mu$ SR 法は一つのスペクトルを得るのに通常  $10^6$  個以上の正ミュオンを必要とする。ゆえに、これを大量に生成する高エネルギー加速器が不可欠であり、従って  $\mu$ SR 実験を行うことのできる施設は世界で数か所に限られる。日本の J-PARC もその内の一つに数えられ、世界最高強度のパルスミュオンビームを供給する施設として独自の地位を築いている。J-PARC ミュオン実験施設では、この高強度ビームにより統計精度の高い実験データを他施設に比べ短時間で得ることができる。一方でパルスビームであるが故に、試料周辺の物体(試料ホルダー、真空容器内壁など)に止まったミュオンからの信号を信号処理回路系によって識別・除去できないため、サンプルの断面積がビームスポットサイズより小さくなると急激に信号対雑音比が悪化するという欠点を併せ持つ。このため、ミュオンビームに対する試料の幾何学的な断面積が  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  以下になると、測定は極めて難しくなる。その一方で、微量試料の  $\mu$ SR の実現を望む声は強く、信号対雑音比の改善が急務であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、J-PARC ミュオン実験施設 D1 エリアにフライパスシステムを導入し、 $\mu$ SR 実験における信号対雑音比を大幅に改善することにある。通常の  $\mu$ SR 実験ではミュオンビームを試料および試料ホルダーで全て受け止めて、試料を取り囲むように配置されたカウンターテレスコープにより正ミュオンの崩壊に伴い放出される陽電子を検出する。一方、フライパス法を用いる場合は、試料周辺の物体を極限まで減らし、素通りしたミュオンを下流に向かって捨て去る。このために長さ数メートルの内径の大きな真空容器(フライパス真空容器)が用いられる。下流に飛び去ったミュオンはいずれ崩壊して陽電子を放出するが、そこから見込んだ検出器の有効立体角は試料位置から見た場合に比べ著しく小さい。これにより試料以外に由来する信号の割合が減少し、信号対雑音比が向上する。フライパス法は英国ラザフォードアップルトン研究所のパルスミュオンビームラインにおいて長年運用され、優れた実績を残している手法である[Physica B 326, 270-274 (2003)]。これを J-PARC にも導入し、諸条件を D1 分光器に最適化することで、信号対雑音比を飛躍的に改善し、微量試料の  $\mu$ SR を実現する。

### 3. 研究の方法

フライパス法の実践においては、不要なミュオンビームを如何にして試料以外の物体

に当てずに十分下流まで輸送するかが重要になる。ゆえに、ビームは試料位置に適切に集光され、尚且つ発散が弱い方がよい。このようなビームを引き出す条件を探るにあたり、D1 分光器周辺の 3 次元的なミュオンビームプロファイルが得られるビームモニタがあると大変便利である。まずはこの 3 次元ミュオンビームプロファイルモニタを製作し、それを用いてフライパス法に適したビームラインパラメータの探索を行う。

つづいて、D1 分光器周辺のビームプロファイルに基づき、フライパス真空容器の設計・製作を行う。この際、モンテカルロシミュレーションによって評価した信号対雑音比を設計の指針とする。

最後に、フライパス真空容器を J-PARC 物質・生命科学実験施設 D1 エリアに設置し、性能確認のためのビーム照射試験を行う。

### 4. 研究成果

(1) シンチレーションスクリーン、ゲートイメージンテンシファイア、冷却 CCD カメラ等を組み合わせて 3 次元ミュオンビームプロファイルモニタを構成し、D1 エリアに設置して性能試験を行った。図 1 に示すように、2 次元像のビーム軸に沿った位置依存性という形で 3 次元ミュオンビームプロファイルが得られた。2 次元面内の空間分解能は 1.4 mm であった。この分解能は主に光学系の構成により決まっているため、レンズの選択・調整により変化し得る。本装置はミュオンビームをシンチレーションスクリーンで完全に受け止めて検出する方式をとっているため、プロファイルには崩壊陽電子に起因するバックグラウンドが含まれる。イメージンテンシファイアにミュオンパルスに同期したゲートをかけることにより、このバックグラウンドを全信号強度の 5% 以下まで低減することができた。これらの結果を論文[Nucl. Instr. Meth. A 754, 1-9 (2014)]として公表した。さら

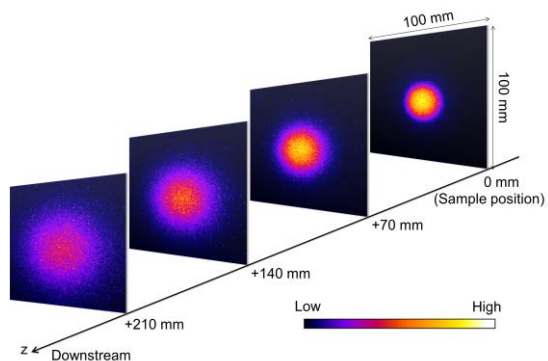


図 1: 3 次元ミュオンビームプロファイルモニタによって得られた D1 分光器周辺の 4MeV 正ミュオンビームのプロファイル。

に、本装置により負ミュオンビームのイメージングも可能であることを確認し、詳細を論文[JPS Conf. Proc. (印刷中)]に報告した。

- (2) 3次元ミュオンビームプロファイルをモニタしつつ、フライパス法に適したビームラインパラメータの探索を行った。これにより実用的なビーム強度を保ったままビームの発散を当初のおよそ7割に抑える条件を見出した。この時、試料位置におけるビームスポットの半値全幅は14mmであった。
- (3) 実測したミュオンビームプロファイルと計算機シミュレーションに基づき、フライパス真空容器の設計を行った。フライパス真空容器、ビームコリメータ、試料、冷凍機、および陽電子カウンターテレスコープを図2のように計算機上でモデリングし、GEANT4を用いてミュオンの入射、崩壊、陽電子検出の全過程をシミュレートした。最適化したデザインに対し、断面積 $\phi$ 4mmの試料を置いた際の信号対雑音比はおよそ3と見積もられた。
- (4) フライパス真空容器を製作し、D1エリア

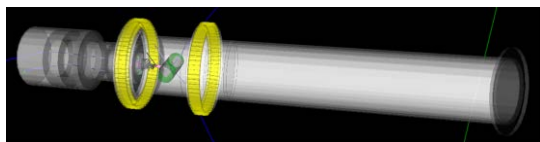


図2: GEANT4によるモンテカルロシミュレーションに用いたモデル。ミュオンビームは左側から入射し、ビームコリメータを通過してフライパス真空容器に入る。2組のリングは分割された陽電子カウンターテレスコープから成り、試料はこれらの中心に位置する。緑色の筒は冷凍機の熱シールドをモデル化したものである。

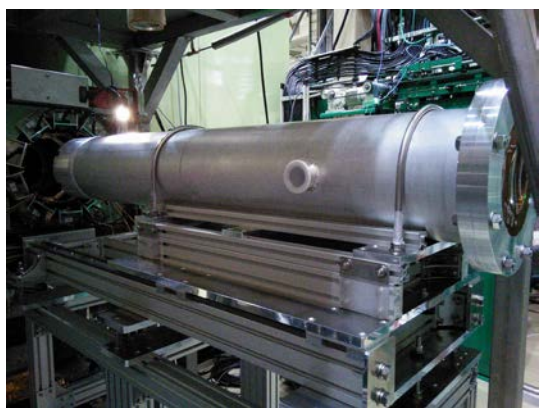


図3: D1エリアに設置したフライパス真空容器。

に設置した(図3)。冷凍機等のアクセサリを装着して真空試験を行い、冷凍機の断熱真空容器およびミュオンを飛行させるための空洞として必要十分な真空度が得られることを確認した。

- (5) この真空試験の直後に実験施設内で火災が発生し、長期間にわたりビーム供給が停止する事態となった。このため予定していたミュオンビーム照射試験を研究期間内に完遂することはできなかった。ビーム運転が再開され次第、ミュオンビームを使った性能試験を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ninomiya, M. K. Kubo, N. Kawamura, and K. Shimomura, “Online Monitoring of Negative Muon Beam Profiles at J-PARC MUSE using a Gated Image Intensifier”, JPS Conf. Proc. (印刷中), 査読有
- ② T. U. Ito, A. Toyoda, W. Higemoto, M. Tajima, Y. Matsuda, and K. Shimomura, “Online full two-dimensional imaging of pulsed muon beams at J-PARC MUSE using a gated image intensifier”, Nucl. Instr. Meth. A **754**, 1-9 (2014), DOI: 10.1016/j.nima.2014.04.014, 査読有
- ③ T. U. Ito, W. Higemoto, T. D. Matsuda, A. Koda, and K. Shimomura, “Shallow donor level associated with hydrogen impurities in undoped BaTiO<sub>3</sub>”, Appl. Phys. Lett. **103**, 42905 (2013), DOI: 10.1063/1.4812348, 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① T. U. Ito, A. Toyoda, W. Higemoto, M. Tajima, Y. Matsuda, and K. Shimomura, “Muon Beam Imaging at J-PARC MUSE using a Gated Image Intensifier”, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, 2014年7月14日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)
- ② 伊藤孝、豊田晃久、髭本亘、田島実典、松田恭幸、下村浩一郎、“イメージングテンシファイアを用いたミュオンビームプロファイルモニタの開発”、日本物理学会2013年秋季大会、2013年9月27日、徳島大学(徳島県徳島市)
- ③ T. U. Ito, A. Toyoda, W. Higemoto, M. Tajima, Y. Matsuda, and K. Shimomura, “Development of a High-resolution Beam Imaging System for Pulsed Muon Beams”, International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), 2013年8月11日、Kunibiki

Messe (Matsue, Japan)

- ④ 伊藤孝、ミュオンスピン回転法による物性研究の最前線、第2回西川シンポジウム、2013年3月13日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 孝 (ITO TAKASHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：10455280