

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05466

研究課題名(和文)エアロゲルを用いた高収率ミュオニウム生成・放出標的の開発

研究課題名(英文)Development of aerogels as high-yield muonium production/emission targets

研究代表者

鈴木 一仁 (Suzuki, Kazuhito)

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・研究員

研究者番号：30547534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子の一つであるミュオンは、素粒子物理と物性物理の研究にわたって、未知の現象を捉える重要な探針として用いられている。高品質のミュオン粒子ビームを生成するにはミュオン粒子の革新的な冷却技術が必要である。本研究で開発を進めたミュオニウム(正ミュオン粒子と電子から成る原子状態)の高効率生成・放出標的は、その革新的な冷却技術の重要な要素である。本研究で得られた成果は、素粒子物理学における「新物理」の発見が最も期待される実験の一つであるミュオン異常磁気モーメントの精密測定を始め、ミュオンとミュオニウムを用いる様々な国際的先端研究を促進する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュオン粒子はパイ中間子の崩壊で生成され、パイ中間子は陽子と原子核の相互作用で生成されるため、とり得る位置と運動量の領域(「エミッタンス」)が広がっており、電子や陽子などの安定粒子と比べて短い寿命と相まって、ビームとしての取り扱いが困難である。本研究成果を用いてミュオン粒子を室温程度の熱エネルギーまで冷却することで、エミッタンスの小さい高品質のミュオン粒子ビームが生成でき、素粒子特性の超精密測定における探針として、また物性における細密構造解析における探針として、様々な最先端研究での利用が期待される。冷却されたミュオニウム(正ミュオン粒子と電子から成る原子状態)自身も、理論の精密検証に利用できる。

研究成果の概要(英文)：Muon is one of the elementary particles and is an important probe for new phenomena in the researches of elementary particle physics as well as condensed matter physics. To generate a high-quality muon beam, an innovative muon cooling technique is necessary. The high-formation/emission targets of muonium, an atom that consists of a positive-charge muon and electron, developed in this research is an important component of such an innovative cooling technique. The obtained results would promote various international state-of-arts researches that use muons and muonium atoms, such as the precision measurement of the muon anomalous magnetic moment which is one of the experiments we expect to observe new physics phenomena beyond the standard model of elementary particle physics.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ミュオニウム エアロゲル

## 1. 研究開始当初の背景

ミューオンの異常磁気モーメント ( $a_\mu$ ) には、高精度で得られている理論値と実験値の間に  $3.4\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差) の乖離が見られている[1,2]。この乖離は、素粒子物理学の「標準理論」を超える「新物理」の存在を示唆するものとして最も期待されているものの1つであり、更なる精度の向上による乖離の有意性の検証が待たれている。これまでの $a_\mu$ 測定では、飛行中の $\pi$ 中間子の崩壊から生じる「崩壊ミューオン」(運動量3.1 GeV/c程度)を用いており、系統誤差もこれに起因するものが主要因であった。一方、大強度陽子加速器施設(J-PARC, 茨城県東海村)で準備が進められているJ-PARC E34実験[3]では、革新的なミューオン冷却技術を用いた「超低速ミューオン」の開発により、崩壊ミューオン起因の系統誤差を大幅に抑制した新手法で、世界最高精度の $a_\mu$ 測定を目指している。この冷却技術では、適切な標的物質への正ミューオン照射により生じた「ミューオニウム(正ミューオンと電子の束縛状態)」が、標的温度に熱化して拡散することを用いる。標的外真空中に放出されたミューオニウムをレーザー共鳴法でイオン化することにより、超低速ミューオン(室温熱化で運動量3 keV/c程度)を得る。常温源が便利なことや、加速器への設置や真空中での取り扱いの容易さなどから、これまで疎水性シリカエアロゲル[4]を用いて開発を進めてきた。標的内でのミューオンの飛程(2-3 mm程度)とミューオニウムの拡散距離(50  $\mu$ m程度)の理解が進み、レーザー表面加工(穴径:約300  $\mu$ m, 穴深さ:約5 mm, 繰り返し間隔(ピッチ):300-500  $\mu$ m)で標的表面積を増大することで、標的外真空中でのミューオニウム収率が飛躍的に向上した[5,6]。今後は、表面加工の最適化が課題となっている。他方、レーザー表面加工は標的の表面破壊や形状変形を引き起こしており、表面加工の最適化や長期安定性に懸念がある。近年、エアロゲル開発の分野では、有機-無機ハイブリッド構造により高い機械的強度が得られており[7]、レーザー表面加工への耐性など、ミューオニウム生成・放出標的への適用に興味深い。

## 2. 研究の目的

ミューオン異常磁気モーメントの精密測定は、素粒子物理学における「新物理」の発見が最も期待される実験の1つであり、革新的手法による世界最高感度での測定計画が国内で進められている。この手法で重要となる熱化ミューオニウムの生成・放出標的には、レーザー表面加工で表面積を増大したシリカエアロゲルが有望であり、表面加工の最適化が課題となっている。他方、表面加工はエアロゲルの表面破壊や形状変形を引き起こし、表面加工の最適化や長期安定性に懸念がある。近年、エアロゲル開発の分野では、機械的強度の制御技術に目覚ましい発展が見られている。本研究では、表面加工の最適化とこれらの技術の適用により、高収率ミューオニウム生成・放出標的の開発を行う。

## 3. 研究の方法

穴加工を中心に、異なるパラメータ(形状, ピッチ, サイズ, 深さ)で表面加工を施したシリカエアロゲル標的を作製し(図1)、ミューオンビームの照射により真空中に放出されたミューオニウムの収率を評価する。得られた結果から加工パラメータと収率の相関を見出し、表面加工の最適化を図る。また、機械強度の高いエアロゲルとして有機-無機ハイブリッド構造を有するPMSQゲル[7]を用いた標的も作製し、レーザー表面加工における表面破壊の様子とミューオニウム収率を評価する。

## 4. 研究成果

シリカエアロゲル標的について加工パラメータと真空中でのミューオニウム収率( $R_{vac, \mu}$ )との相関を調べた結果、表面加工の開口率( $F_{open}$ )に最も明瞭な正の線形相関が見られた(図2, 図3右)。一方、穴加工における穴深さ( $d_{hole}$ )とは負の相関が見られている(図3左)。素朴にはレーザー穴加工の(深さ方向も含めた)表面積と相関があると考えていたが、開口率と穴深

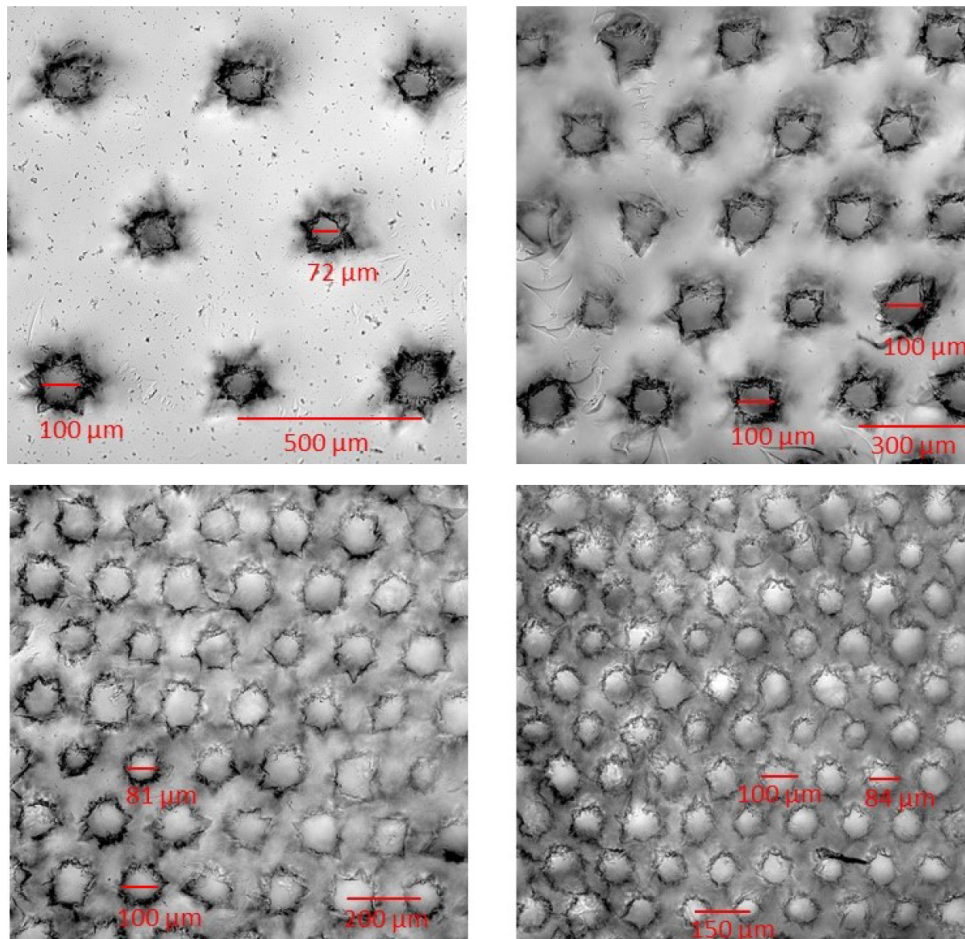


図1. シリカエアロゲル標的の表面に施したレーザー穴加工の例. 同じ穴径 (約 0.1 mm) に対して、繰り返し間隔 (ピッチ) を0.5 mm (左上), 0.3 mm (右上), 0.2 mm (左下), 0.15 mm (右下) と変えている. (文献8より引用.)

さで逆の相関が見られたことは興味深い。レーザー加工では衝撃波によりエアロゲルを弾き飛ばして除去するが、その後の研究において深い加工箇所では弾き飛ばされたエアロゲルが堆積する可能性が示唆されている。堆積による高密度化はミュオニウム拡散を阻害し得るため、今後の課題である。穴加工においては、開口率0.4-0.7の領域で高い収率が得られている。溝加工においても高い収率が得られているが、穴加工に見られる線形相関からは少し低く、連続面加工においてはさらに低くなっている。開口率0.8以上の穴加工では加工穴同士の近接により加工構造が保たれず、連続面的な加工への推移領域になるため、この高開口率領域における収率の理解は更なる収率向上に向けた課題である。

PMSQゲルについては、レーザー表面加工による表面破壊がシリカエアロゲルより顕著に観測された。これはPMSQゲル特有の機械的強度が、レーザー加工時の衝撃波に対する柔軟性を乏しくした可能性を示唆する。一方で、標的形状の顕著な変形 (片面加工による収縮湾曲) は認められず、特有の機械的強度が有利に働いたと考えている。ミュオニウム収率 (図2, 上三角印) においては低収率のシリカエアロゲル標的と同程度であり、開口率との相関もそれらと矛盾しない。多様な標的物質の探索として有用な知見が得られている。

これらの成果は、室温熱化ミュオニウムと超低速ミュオンの生成技術に重要な知見を与えており、ミュオン異常磁気モーメントの測定を始め、ミュオンとミュオニウムを用いる様々な国際的先端研究を促進する。

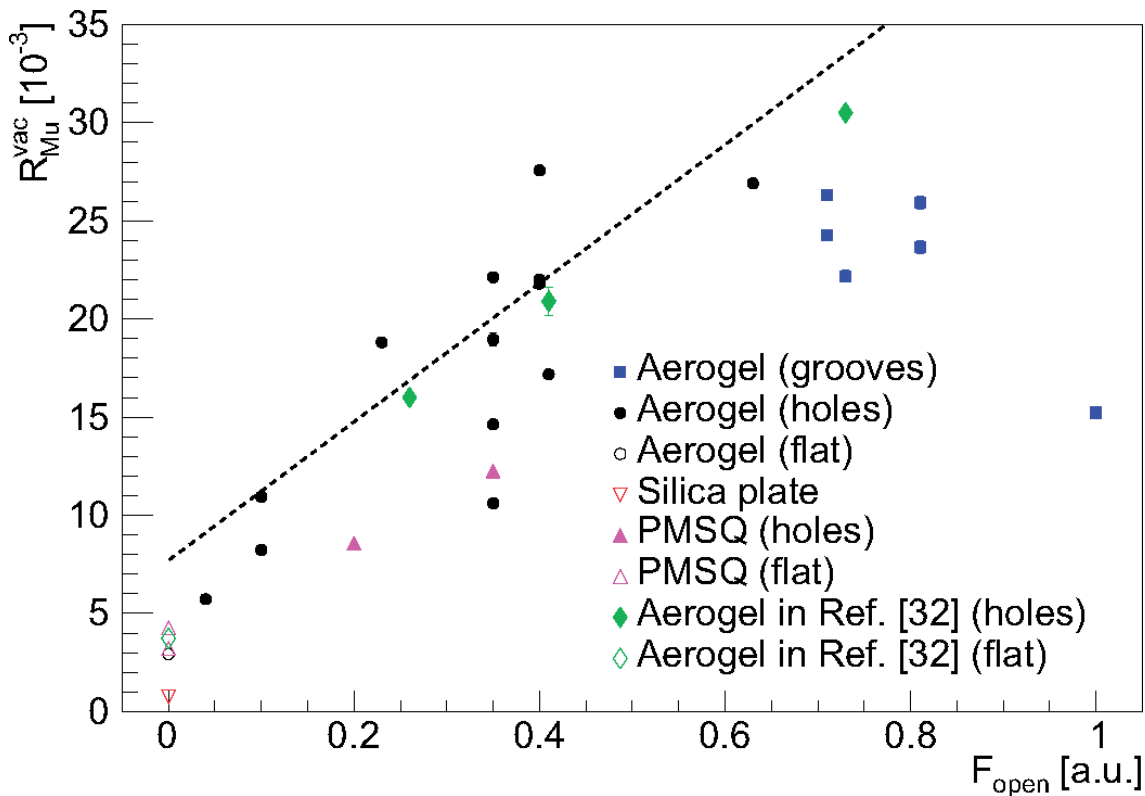


図2. 標的の表面加工の開口率 ( $F_{\text{open}}$ ) に対する真空中でのミュオン収率 ( $R_{\text{Mu}}^{\text{vac}}$ ) . 図注の点線は穴加工標的の相関傾向を示す目安として掲載している. (文献8より引用.)

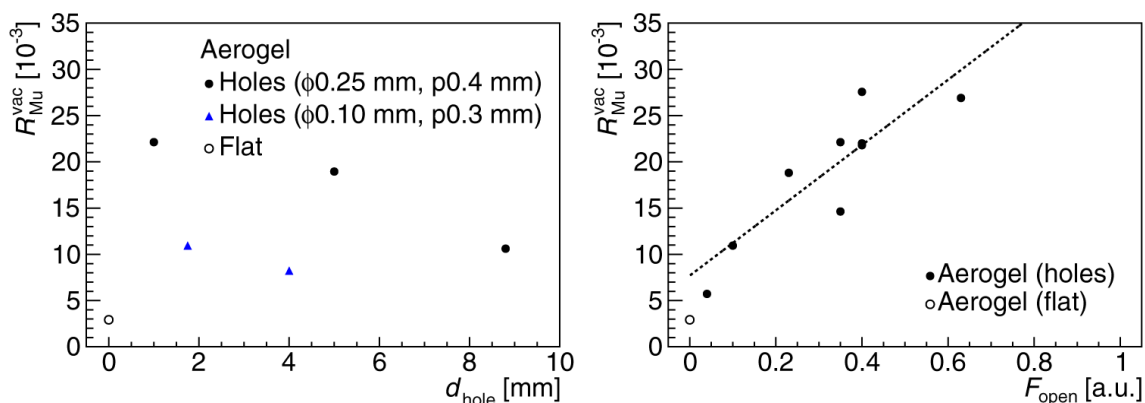


図3. (左) 標的の表面穴加工の穴深さ ( $d_{\text{hole}}$ ) に対する真空中でのミュオン収率 ( $R_{\text{Mu}}^{\text{vac}}$ ) . (右) 図1の穴加工した (黒丸) のエアロゲル標的について、左図における穴深さ 2 mm以上の標的を取り除いたもの. 開口率 ( $F_{\text{open}}$ ) と収率の線形相関が明瞭に見られる. 加工なし (白丸) のエアロゲル標的は参照として掲載. (文献8より引用.)

<引用文献>

[1] Y. K. Semertzidis, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 091001 (2016); C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016).  
 [2] 2021年4月時点でこの乖離の有意さは $4.2\sigma$ となっている。B. Abi et al., Phys. Rev. Lett. 126, 141801 (2021); T. Aoyama et al., Rphys. Rep. 887, 1 (2020).  
 [3] M. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2019) 053C02.  
 [4] M. Tabata et al., Nucl. Instrum. Methods A 668, 64 (2012).  
 [5] P. Bakule, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 103C01.  
 [6] G. Beer et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 091C01.  
 [7] K. Kanamori et al., Adv. Mater., 19, 1589, 2007.  
 [8] J. Beare et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2020) 123C01.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Beare J, Beer G, Brewer J H, Iijima T, Ishida K, Iwasaki M, Kamal S, Kanamori K, Kawamura N, Kitamura R, Li S, Luke G M, Marshall G M, Mibe T, Miyake Y, Oishi Y, Olchanski K, Olin A, Otani M, Rehman M A, Saito N, Sato Y, Shimomura K, Suzuki K, Tabata M, Yasuda H	4. 巻 2020
2. 論文標題 Study of muonium emission from laser-ablated silica aerogel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123C01 (1,24)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kazuhiro Suzuki
2. 発表標題 The status and prospect of the muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 Anomalies 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suzuki
2. 発表標題 Development of the muonium production target for the muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suzuki
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM experiment
3. 学会等名 New Developments of Muon Precession Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木一仁
2. 発表標題 J-PARCミュオンg-2/EDM実験のためのレーザー加工したシリカエアロゲル標的からのミュオンニウム放出の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhi to Suzuki
2. 発表標題 Development of the Muonium Production Target for the J-PARC muon g-2/EDM experiment
3. 学会等名 Physics of muonium and related topics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木一仁
2. 発表標題 J-PARC Muon g-2/EDM Experiment
3. 学会等名 第9回 Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhi to Suzuki
2. 発表標題 Development of the Muonium Production Target for the Ultra-cold Muon Beam
3. 学会等名 Mini-workshop on monium and muonic hydrogen laser spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sirui Li
2. 発表標題 Optimization of thermal muonium yield from silica aerogel with laser-ablated holes for muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuhiro Suzuki
2. 発表標題 Studies on muonium emission from laser-ablated silica aerogel targets for the polarized, ultra-cold muon source of the muon g-2/EDM experiment at J-PARC
3. 学会等名 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuhiro Suzuki
2. 発表標題 Development of the Target for Muonium Production at Room Temperature
3. 学会等名 第8回 Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sirui Li
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM experiment: 2017 experiment result of muonium emission from laser-ablated silica aerogel
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東大齋藤研究室/総研大ミュオン精密測定研究室: TRIUMFにおけるミュオン生成実験  
<http://g-2.kek.jp/gakusai/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	三部 勉  (Mibe Tsutomu)  (80536938)	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授   (82118)	
連携研究者	金森 主祥  (Kanamori Kazuyoshi)  (60452265)	京都大学・理学研究科・助教   (14301)	
連携研究者	飯嶋 徹  (Iijima Toru)  (80270396)	名古屋大学・現象解析センター・教授   (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	TRIUMF	The University of British Columbia	University of Victoria