

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01930

研究課題名(和文) ミューオンg-2/EDM精密測定のための検出器アライメントモニターの開発

研究課題名(英文) Development of the alignment monitor for muon g-2/EDM experiment

研究代表者

久米 達哉 (KUME, Tatsuya)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・講師

研究者番号：40353362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、J-PARCにおけるg-2/EDM精密測定実験にて用いられる陽電子飛跡検出器を構成するベーン間の姿勢変化を監視する高精度アライメントモニターの実現を目指して、絶対測長干渉計、ポールレンズ光学系、測長網の3つの要素技術開発に取り組んだ。その結果、偏波保持した光学系を用いることでppmレベルの測長が実現可能であること、ポールレンズの径は大きな程有利、屈折率はコリメータとしては低いほど、リフレクタとしては2近傍が望ましいこと、測長網については、ベーン上のセンサ近傍に設置したリフレクタ位置をベーン上方から監視する構成が最適との見通しが得られ、アライメントモニター実現への指針が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、光周波数コムをエタロンに通すことで、エタロンの自由スペクトル領域、FSRで決定する広い調整範囲を持つ光パルスが発生し、そのパルス間隔は、高精度高安定な光周波数コムを基準に、サブppmの不確かさで評価可能であるとの知見が得られた。

これらの知見は、既存技術では実現困難なサブppmレベルの不確かさでの高精度高安定なアライメント評価を、より広範な対象に適用可能とするための技術基盤となり、本研究計画が目標とするJ-PARCにおけるg-2/EDM精密測定実験のような先端科学分野はもとより、より一般的な産業分野を含めた広範な科学、技術分野に貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Here, we develop three basic technologies for the alignment monitor, those are an absolute distance interferometer, an optical system configured by glass ball lens, and a length measurement grid, intending to monitor relative directional changes between vanes, which configure our positron tracking detector for g-2/EDM precise measurement at J-PARC. As the results, we had obtained perspectives for the development of our alignment monitor. Length measurement with ppm uncertainty can be realized by adopting polarization maintain optics. Larger diameter ball lens is better for both collimators and reflectors, while smaller refractive index is better for collimators; however, refractive index around 2 is better for reflectors. As for length measurement grid, a configuration which monitor positions of reflectors located near sensors on each vane from above the vane is optimum. They become guidelines for developing our alignment monitor.

研究分野：精密測定

キーワード：alignment monitor interferometer optical frequency comb ball lens muon g-2 EDM

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

標準理論の対称性・ゲージ構造および力の統一を自然に説明する物理法則の解明のために、TeV を超えるエネルギースケールに新しい物理法則・対称性が存在することが期待されている。そのフレーバー構造・CP 非対称性などの情報を得るためには、LHC での直接探索に加え、レプトンセクターにおける精密測定やレプトンフレーバーを破る稀崩壊による相補の実験が不可欠である。

ミュオン  $g-2$  は量子ループ効果として、超対称性粒子などの効果が顕著に現れ得ることが指摘されており、標準理論を越える物理現象を包含し得る物理量である。これまでに、BNL、および、FNAL において、同様の手法を用いて得られた値の平均としてのミュオン  $g-2$  の値は、標準理論の予想から  $4.2\sigma$  大きいと報告されている。このことは、標準理論のほころびを示唆し得るものであるにもかかわらず、これらと独立した手法による検証は行われておらず、その実現が強く望まれている。

研究代表者らは、J-PARC においてレーザ解離法により生成した超冷ミュオンビームを用いて、高強度、高均一度のコンパクト蓄積リング磁場中にて周期運動するミュオンの崩壊陽電子の飛跡を検出することで、ミュオン  $g-2$  を、 $0.1 \text{ ppm}$  の精度で測定し、EDM を、 $d_e=10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$  の感度で確定する実験を計画している。当該実験は、BNL/FNAL によるものとは全く異なる手法によるものであり、当該実験を遂行することで、BNL/FNAL とは独立したミュオン  $g-2$  の検証が可能となり、相互の実験の意義が高められる。

### 2. 研究の目的

実験計画の核心となる崩壊陽電子の飛跡検出には、図 1 に示されるペーンと呼ばれる 40 枚の板状粒子位置センサが放射状に配置された、陽電子飛跡検出器（以下、検出器と記す）が用いられる。

実験の目標精度を達成するには、崩壊陽電子の飛跡測定に要する数ヶ月以上の間にわたり、ペーン間の相対姿勢変化が  $10 \mu\text{rad}$  以下になるように保持されなければならないものと見積もられている。即ち、検出器の動作する高磁場真空の過酷環境下にて、 $250 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$  程度の大きさのペーン間の姿勢変化や相対位置変化を、数ヶ月以上の間にわたり、ppm レベルに抑える必要がある。

このことを検出器の高精度組み立てや、安定化のみで保証することは困難であることから、本研究では、高精度なアライメントモニターを開発し、それを検出器内に組み込み、検出器の変動を検出し、補正することで、実験の目標精度を実現可能とする。

### 3. 研究の方法

本研究で開発するアライメントモニターでは、光周波数コムの高精度高安定なパルス間隔に基づく絶対測長干渉計を用いることで、長期間にわたり高安定、高精度なアライメント監視を可能とする。また、アライメントモニターを構成する干渉光学系のビームコリメータとターゲットリフレクタに、図 2 のようなボールレンズに基づく光学測定ヘッドを用いることで、光学系を小型、高精度、高安定、かつ、低コストに実現する。さらに、光ファイバ導入型の光学系を適用して、アライメントモニターの干渉光学系に用いられるレーザやディテクタなどの脆弱な機器を検出器が設置される過酷環境外に配置することで、過酷環境下に設置された検出器のアライメント監視を長期間にわたり安定的に行う。

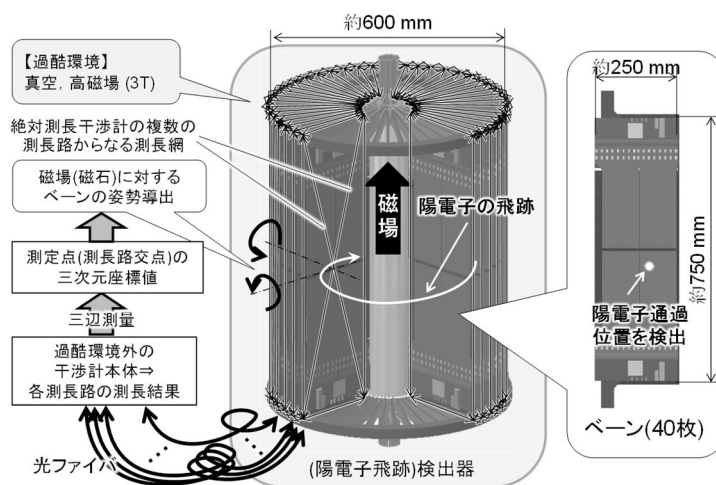


図 1. 検出器（陽電子飛跡検出器）とアライメントモニター

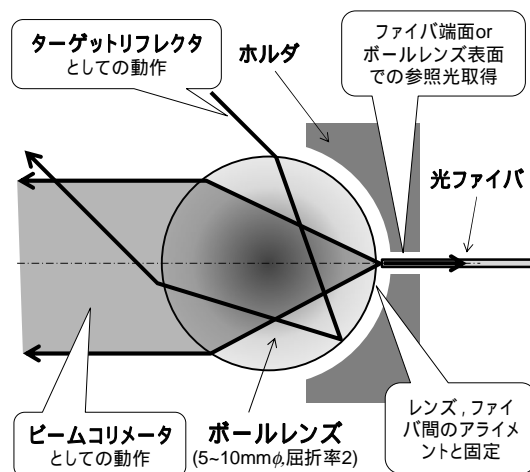


図 2. ボールレンズに基づく光学測定ヘッド。

#### 4. 研究成果

本研究では、目標とする検出器の ppm レベルの変動を監視、補正するために必要と見込まれる、不確かさ ppm レベルの評価が可能なアライメントモニターを実現するため、それを構成する絶対測長干渉計、ボールレンズ光学系、三次元座標導出の3つの基盤技術の開発に取り組んだ。

研究初年度は、アライメントモニターを構成する絶対測長干渉計に対する理解を深めるため、測長基準となるエタロンの自由スペクトル領域、FSR の評価を中心とした検討を行った。ここでは、アライメントモニターに求められる 100~1,000 mm 程度の測長に適合させるために、パルス繰返し周波数 60 MHz 程度の光周波数コムによる 5 m 程度の間隔の光パルスを、FSR が 1 GHz 程度のエタロンに通すことで得られた、数 100 mm 間隔の光パルスを基準とするが、その光パルス間隔は、光源となる光周波数コムのパルス繰返し周波数によらず、エタロンの FSR のみで決まることが、ゲージブロック(GB)や基準干渉計(RefIF)による複数の校正測定(図4)、および、シミュレーションにより示された。このとき、異なる校正法による校正値のずれは数 10 ppm 程度となり、エタロンの FSR に 10~20 ppm/°C 程度の温度特性があることが示された。これらから、本研究が目指す ppm レベルのアライメント評価を実現するあたり、FSR 評価におけるさらなる不確かさの低減と、エタロンの FSR 自体の安定化が必要であることが示された。

研究次年度は、サブ ppm レベルの不確かさでのエタロン FSR 評価の実現を目指して、相対不確かさの小さな周波数基準に基づく校正法を適用した。エタロンを通過した光周波数コムのパルス繰返し周波数を、周波数カウンタにて直接測定する方法では、ノイズの影響を受けられるような結果が得られなかったが、新たに考案したエタロンに入力する光周波数コムのパルス繰返し周波数を走査しながら、得られる畳み込み信号ピークを読み取る方法(frepScan)により、ppm レベルの不確かさでの校正を行った(図4)。

ボールレンズ光学系の開発では、コリメータ、および、リフレクタを、直径 10 mm、屈折率約 2 の高屈折率ガラスボールレンズとした絶対測長干渉計による測長可能であることを実証した。さらに、検出器が動作する強磁場環境下への適用が可能な非磁性材料であるアルミ合金、および、エンジニアリングセラミクスを用いた図3に示されるような直径 10 mm、長さ 20 mm の小型光学モジュールを試作して、これらをコリメータとリフレクタとした干渉光学系による測長が可能であることが示された。



図3. 試作ボールレンズ光学測定ヘッド。

研究最終年度は、光周波数コムとエタロンとの相互作用により発生する干渉信号のサイドピーク間隔に基づく FSR 校正法(SidePeak)を用いることで、不確かさサブ ppm レベルの校正値が得られた(図4)。一方、偏波保持した光学系を用いることで、絶対測長干渉計の光学系を構成する光ファイバを伝播する二偏波成分の相互作用による干渉信号変動の影響を除去して、干渉計の長さ基準として用いるエタロン FSR の不確かさが抑えられることで干渉計性能が向上した。その結果、FSR 評価の不確かさがサブ ppm レベル、異なる評価法による評価値の最大差が 1.3 ppm となり、最終的な目標とする不確かさ ppm レベルのアライメント評価が視野に入ってきた。

ボールレンズ光学系の開発では、試作した偏波保持対応した光学モジュールの評価を通して偏波保持の効果を確認した。さらに、シミュレーションと実験により光学モジュールの最適化を行い、ボールレンズの特性を決定するレンズ径は、コリメータ、リフレクタともに大きな程有利、屈折率については、コリメータとしては低いこと、リフレクタとしては 2 近傍であることがそれぞれ望ましいとの見通しが得られた。この場合、設置スペースが限定される検出器内への実装を考慮すると、10 mm 程度のレンズ径が適当であると考えられる。

三次元座標導出の検討においては、3D-CAD を用いた検討を通して、検出器を構成するベーン上のセンサ近傍の3点に設置したリフレクタの位置を、ベーン上方に設置したコリメータから監視する形式が最適であるとの見通しが得られた。また、システムが多チャンネル、自動化に際して、LabVIEW ベースのシステムとその動作プログラムを作成し、その動作を確認した。

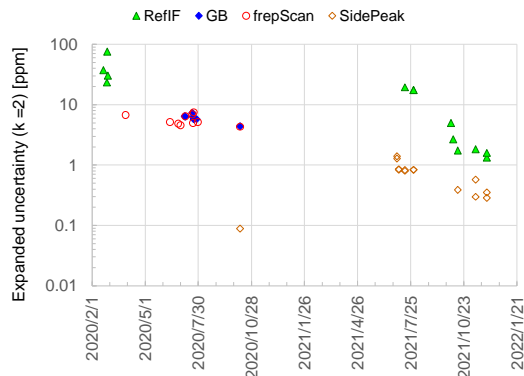


図4. FSR 評価値の拡張不確かさの変化。RefIF は基準干渉計による、GB はゲージブロック基準による、frepScan はコムのパルス繰返し周波数の走査による、SidePeak はサイドピーク間隔による校正法による評価値の拡張不確かさ(k=2)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aoyagi T., Honda Y., Ikeda H., Ikeno M., Kawagoe K., Kohriki T., Kume T., Mibe T., Namba K., Nishimura S., Saito N., Sasaki O., Sato N., Sato Y., Sendai H., Shimomura K., Shirabe S., Shoji M., Suda T., Suehara T., Takatomi T., Tanaka M., Tojo J., Tsukada K., Uchida T., Ushizawa T., Wauke H., Yamanaka T., Yoshioka T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed muon beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04027 ~ P04027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/04/P04027	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 -

1. 著者名 T. Yamanaka, T. Kume, N. Sato, T. Takatomi, et. al	4. 巻 A958
2. 論文標題 Positron tracking detector for J-PARC muon g-2/EDM experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162786	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Abe, T. Kume, N. Sato, T. Takatomi, et. al	4. 巻 2019
2. 論文標題 A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz030	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 T. Kume, T. Mibe, M. Michihata and S. Takahashi
2. 発表標題 Evaluation of a free spectral range of an etalon for a reference of an alignment monitor
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米, 三部, 道畑, 高橋
2. 発表標題 過酷環境下にて動作する高安定アライメントモニターの開発(第2報) - 偏波保持光学系による干渉計性能の改善
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久米, 三部, 道畑, 高橋
2. 発表標題 過酷環境下にて動作する高安定アライメントモニターの開発-基準エタロンの自由スペクトル領域の評価と安定化
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kume, H. Yasuda, T. Mibe, M. Michihata, S. Takahashi
2. 発表標題 Evaluation of the Free Spectral Range of an Etalon by Referring an Optical Frequency Comb
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kume, H. Yasuda, T. Mibe, M. Michihata, S. Takahashi
2. 発表標題 Interferometer Adopting a Ball Lens Both As a Beam Collimator and a Reflector
3. 学会等名 XXIII IMEKO World Congress Measurement: sparking tomorrow's smart revolution (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久米, 三部, 道畑, 高橋
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第8報) - 試作光学モジュールの評価
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久米, 三部, 道畑, 高橋
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第7報)-光周波数コムを基準としたエタロンFSRの評価
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kume, H. Yasuda, T. Mibe, M. Michihata and S. Takahashi
2. 発表標題 Comparison for Pulse Interval Calibration of an Optical Frequency Comb Compressed by an Etalon
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高橋
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第6報) - ボールレンズを用いた干渉計
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高橋
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第5報)- エタロンで圧縮された光周波数コムのパルス繰返し周波数の校正
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高増
2. 発表標題 Pulse Interval Calibration of an Optical Frequency Comb Compressed by an Etalon
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高増
2. 発表標題 Pulse Interval of an Optical Frequency Comb Compressed by an Etalon
3. 学会等名 The 14th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高増
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第3報) - リンギングを用いない光周波数コムパルス間隔の校正
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米, 三部, 安田, 道畑, 高増
2. 発表標題 光周波数コムを用いた高精度アライメントモニター(第4報) - 圧縮されたパルス間隔の基準干渉計を用いた校正
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

J-PARC muon g-2/EDM experiment <a href="https://g-2.kek.jp/">https://g-2.kek.jp/</a>
---

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
研究分担者	道畑 正岐  (Michihata Masaki)  (70588855)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	
研究分担者	三部 勉  (Mibe Tsutomu)  (80536938)	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・教授   (82118)	削除：2020年9月10日
研究分担者	高増 潔  (Takamasu Kiyoshi)  (70154896)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授   (12601)	削除：2020年8月7日

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
---------	---------