

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00673

研究課題名(和文) ミューオン g-2・EDMの同時測定に向けた、3次元螺旋ビーム入射の精密制御の確立

研究課題名(英文) Establishment of precise control of 3-D spiral beam injection scheme for the muon g-2/EDM experiment at J-PARC

研究代表者

飯沼 裕美 (Inuma, Hiromi)

茨城大学・理工学研究科(理学野)・准教授

研究者番号：60446515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,270,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理学の根幹をなす標準模型の綻びがミュオンの異常磁気双極子の超精密測定により明らかになるかもしれない。素粒子物理学20年来の謎に挑むべく、J-PARC(大強度陽子加速器施設)で新しい実験準備を進めている。医療用MRIの技術を応用した直径70cm弱の小型・超精密磁場中に、J-PARCの高品質ミュオンビームを蓄積するために、世界に事例のないビーム入射手法を確立し、その予備実験を完遂した。荷電粒子の制御は、電磁気学に基づく運動方程式を、精度よく現実の装置に反映することが肝要であると同時に、実際の装置を含む様々な誤差要因を制御するロバストなシステムを作り上げ、運用手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は医療用MRI磁場発生装置の技術を応用した電磁石内部での荷電粒子運動の精密制御であり、医療用粒子線加速器のビーム制御にも応用可能な技術である。荷電粒子ビームにとっては有効磁場であっても、そのほかにとって”磁場的に透明”な電磁石の開発は、強磁場中でのビーム制御装置にかかる電磁力をほぼゼロにすることができるため、装置の軽量化にも役立つ。また、待機電力がピーク電力の0.1%以下を実現する大電力かつ低ノイズ磁場パルス発生装置の運用にも本研究では取り組んでおり、大電力・省エネ装置に共通する電力源としても、広い技術分野へ還元できる。

研究成果の概要(英文)：Ultraprecise measurements of the muon's anomalous magnetic dipole may reveal the flaws in the standard model, which forms the basis of particle physics. New experiments at J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) is now in under preparation to tackle the new physics beyond the standard model which has been discussed for more than 20 years. In order to accumulate high-quality muon beams in a small, ultra-precise magnetic field with a diameter of 70 cm, which applies medical MRI technology, we have established a beam injection method that is unprecedented in the world, and are conducting preliminary experiments. This is a big mile stone to control of charged particles, which requires accurately consistent with the equation of motion based on electromagnetism in the actual device.

研究分野：素粒子実験、量子線加速器

キーワード：ミュオンスピン 異常磁気双極子 電気双極子 3次元螺旋入射 荷電粒子ビーム可視化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2000 年代初頭に米国 BNL 研究所が、ミュオン異常磁気双極子の精密実験結果を出してから、約 20 年後の 2020 年 4 月、米国 FNAL 研究所が再測定の結果を報告したが、やはり、素粒子標準模型の予言値とのズレは残り、実験値、理論値双方の精度が高くなった分、両者の相違は 4.2 標準偏差まで広がることとなった。これは科学雑誌 Nature に掲載されるなど、素粒子物理学の先端の興味として再び脚光を浴びることとなった。しかし、FNAL 研究所の実験装置は、BNL 研究所の装置を移築したもので、基本的には同じ実験を繰り返した結果、同じ結果を得たものであり、我々 J-PARC で取り組む、既存実験とは全く独立の新しい実験 (J-PARC E34 実験と呼ぶ) での、新しい知見への期待が一層高まることとなった。

その中で、新しい実験の要素技術である「3 次元螺旋ビーム入射」の実証実験が進行中であり、その知見を基に、J-PARC に建設する本番実験用のビームラインの詳細設計を完成させる作業を進めていた。

2. 研究の目的

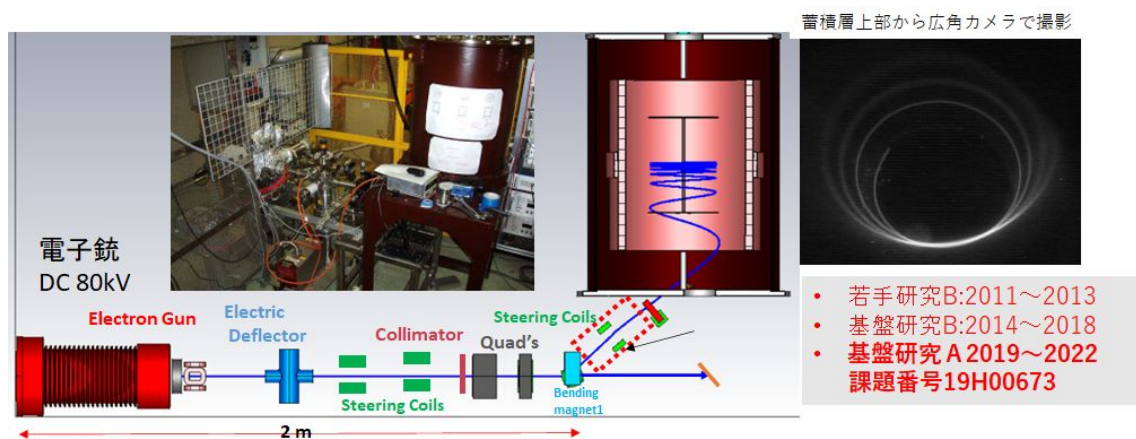
本研究により、大きく 3 つの項目の達成を目指した。

- (1) 新規開発の 3 次元螺旋入射実証実験において、ソレノイド電磁石内部に荷電粒子を数マイクロ秒以上、蓄積をし、そのビーム品質を定量評価すること。
- (2) 実証実験には、大電力パルス磁場発生装置の開発と運用が必要で、その装置を導入すること。
- (3) J-PARC で行う本番実験に向けてビームラインに設置する電磁石の詳細設計を行い、実機の製作・性能評価を行う。

3. 研究の方法

上記 (1) は本研究課題の前 (基盤研究 B 26287055) から取り組んでいる実証実験装置に改良を加えつつ取り組んできた。

下図に、実証実験の概要を示す。



高エネルギー加速器研究機構 (高エネ研) つくばキャンパス内にある電子銃を用いた実証実験装置で、すでに直流 80keV の電子ビームを用いた 3 次元入射の技術開発は完了していたので、

- ・直流ビームを静電チョッパーでパルス化する、
- ・大電流パルス磁場キッカーの設計と製作に取り組んだ。

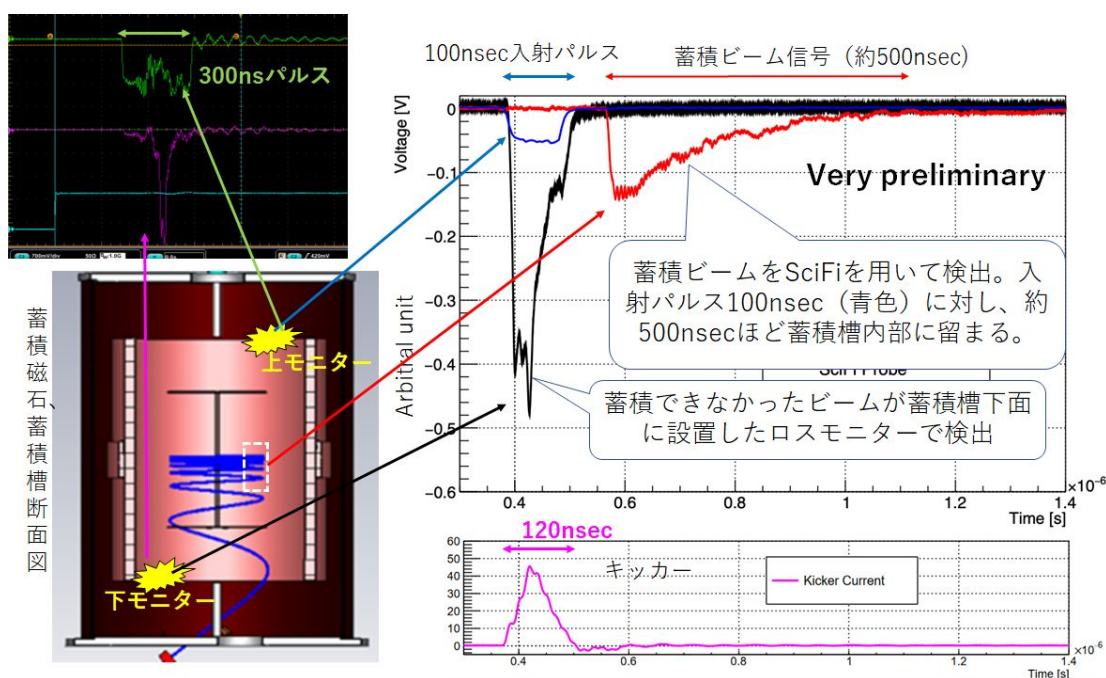
右図は、ビームを蓄積する真空槽内部に本研究により制作したキッカーコイル導体を設置した際の写真である。電子ビームがコイル導体に衝突することを想定し、帯電しないように導電性塗料を表面に塗装している。この導体には最大 40A の電流を流す。



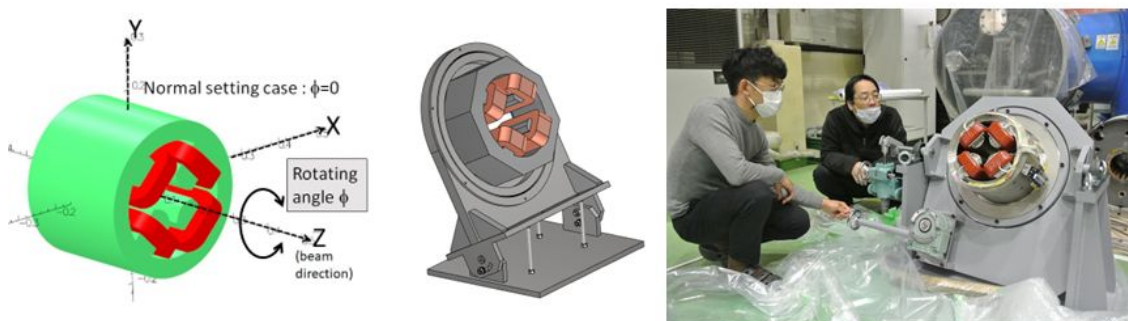
さらに、下図に、本研究で開発した大電流発生装置を実証実験装置に組み込んだ際の写真、試運転時の電流波形を示す。



以上により、本研究の目的(1), (2)を達成することができた。成果となる実験データを下図に示す。



また、目的(3)にかかる実機ビームラインに設置する電磁石の設計・製作を行った。



下図は、レーザートラッカーを用いて4極電磁石の設置ジグのアライメントを行っているところである。実機ビームラインでは、27度傾いた場所に3軸姿勢制御を行う必要があり、このための姿勢制御装置の試験機を製作し、性能評価も行った。



4. 研究成果

目的(1), (2)の成果は別紙に示すように国内外の学会で多数の報告を行った。更に、学術誌投稿論文2本執筆中である。国内学会での成果報告も3件予定している：2023年度の日本加速器科学会(2023年8月29日~9月1日・日本大学)、日本物理学会秋季大会(2023年9月16日~19日・東北大学)。国際学会での口頭発表を2件予定している：13th Workshop on Accelerator Operations、WA02023(2023年9月10日~15日・つくば)、25th International Spin Symposium(SPIN2023)(2023年9月24日~29日・米国)。

本研究で得た知見をもとに、本番ビームラインの設計を順調に進めており、2028年のビーム運転開始、即時に物理データ取得に移行、物理成果の発表を目指している。

本研究に関連する博士取得学生は1名、修士取得学生は3名である。博士論文、修士論文を以下のリンクに示す：<https://wiki.kek.jp/display/gminus2/Thesis>

本研究による成果が評価され、2022年度に2件の受賞があった。

- ・研究代表者である飯沼が、2023年2月14日第12回湯浅年子賞を受賞している。

https://www.ocha.ac.jp/danjo/op/ytp/20230221_yuasa.html

- ・博士課程2年・東京大学学際理学・松下凌大が2022年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞(Student Presentation Award of the Physical Society of Japan)受賞

https://www.jps.or.jp/activities/awards/gakusei/2022_student_presentation_award.php

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Iinuma, et al.,	4. 巻 -
2. 論文標題 Precise control of a strong X-Y coupling beam transportation for J-PARC muon g-2/EDM experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 14th International Particle Accelerator Conference, (2023)	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） 10.18429/JACoWIPAC-23-MOPA110	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 R. Matsushita, H. Iinuma et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Demonstration of Three-dimensional Spiral Injection for the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 14th International Particle Accelerator Conference, (2023).	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） 10.18429/JACoW-IPAC-23-MOPA118	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 H. Iinuma, H. Nakayama, M. Abe, Ken-ichi Sasaki, T. Mibe	4. 巻 32
2. 論文標題 Design of a Strong X-Y Coupling Beam Transport Line for J-PARC Muon g-2/EDM Experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4004705
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3161889	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 H. Hirayama, H. Iinuma, M. A. Rehman, S. Ohsawa, H. Someya, H. Nakayama, K. Furukawa, T. Mibe	4. 巻 32
2. 論文標題 Control of the Rotatable-Quadrupole Magnet Angle for a 3-D Spiral Injection Test Experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4005705
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3162810	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 K. Oda, H. Iinuma, H. Hirayama, M. Abe, K. Sasaki, S. Ohsawa, H. Nakayama, N. Saito, K. Furukawa, T. Mibe	4. 巻 32
2. 論文標題 Developments of a Pulse Kicker System for the Three-Dimensional Spiral Beam Injection of the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4101504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3164996	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 H. Iinuma
2. 発表標題 Status of J-PARC Muon g-2/EDM experiment
3. 学会等名 International Conference on the Physics of Two Infinities (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM 実験に向けた3次元らせん入射実証実験
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Iinuma
2. 発表標題 Design of a strong X-Y coupling beam transport line for J-PARC muon g-2/EDM experiment
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hirayama
2. 発表標題 Control of the Rotatable-Quadrupole Magnet Angle for a 3-D Spiral Injection Test Experiment
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Oda
2. 発表標題 Developments of a Pulse Kicker System for the Three-Dimensional Spiral Beam Injection of the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Abe
2. 発表標題 Development of precise shimming technique with materials having low saturation magnetization
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Sugita
2. 発表標題 Effect on temperature dependence for long-term stable control of the magnetic field at sub-ppm using superconducting magnet for MRI
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 Muon g-2/EDM 精密計測用蓄積磁石へのビーム入射輸送ライン設計の最新化
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下凌大
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験における3次元らせん入射手法実証実験：蓄積磁石内でのパルスビーム検出方法の研究開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 Measurement of muon g-2/EDM at J-PARC
3. 学会等名 ICHEP2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 高度なX-Y結合を用いた3次元螺旋ビーム入射のための輸送区間のビーム制御およびモニター手法の仕様
3. 学会等名 第17回日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉田萌
2. 発表標題 全身MRI用磁石技術を応用したビーム捕捉用超伝導磁石の精密磁場調整
3. 学会等名 第17回日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 3次元螺旋ビーム入射実証実験のための垂直ビームキッカー装置の単体性能評価
3. 学会等名 第17回日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平山穂香
2. 発表標題 J-PARCミュオンg-2/EDM実験のための3次元らせんビーム入射の実証実験の現状報告
3. 学会等名 第17回日本加速器学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験のための3次元螺旋ビーム入射の技術開発概要と実証実験
3. 学会等名 第76回年次大会（日本物理学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田航大
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験における三次元らせん入射のためのキッカー装置の研究開発
3. 学会等名 第76回年次大会（日本物理学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下凌大
2. 発表標題 J-PARC $g\mu - 2/\mu$ EDM実験のためのビーム入射手法実証実験：パルスビームの生成・検出方法の研究開発
3. 学会等名 第76回年次大会（日本物理学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部充志
2. 発表標題 J-PARC muon g-2/EDM実験の3次元螺旋入射軌道微調整用の能動磁気遮蔽型ステアリング磁石設計
3. 学会等名 第76回年次大会（日本物理学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯沼裕美
2. 発表標題 Precise Control of Three-Dimensional Beam Trajectory by an Active Shield Steering Magnet in the Solenoid Fringe Field
3. 学会等名 IPAC21（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田航大
2. 発表標題 Developments of a Pulse Kicker System for the Three-Dimensional Spiral Beam Injection of the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment
3. 学会等名 IPAC21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松下凌大
2. 発表標題 Development of Pulsed Beam System for the Three Dimensional Spiral Injection Scheme in the J-PARC muon g-2/EDM Experiment
3. 学会等名 IPAC21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

茨城大学素粒子実験室webページ http://muonspin.sci.ibaraki.ac.jp/publications/ J-PARC Muon g-2/EDM experiment home page https://g-2.kek.jp/ 科研費 研究成果トピックス「 μ 粒子スピン歳差運動の超精密測定のためのビーム入射技術開発」 https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/37_topics/data/00236-12101-60446515.pdf 企画記事「研究に恋して」茨城大学研究・産学官連携機構 (iRIC) & 広報室 https://www.ibaraki.ac.jp/news/2022/03/31011584.html 茨城大学素粒子実験室webページ http://muonspin.sci.ibaraki.ac.jp/publications/ J-PARC Muon g-2/EDM experiment home page https://g-2.kek.jp/ 科研費 研究成果トピックス「 μ 粒子スピン歳差運動の超精密測定のためのビーム入射技術開発」 https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/37_topics/data/00236-12101-60446515.pdf 企画記事「研究に恋して」茨城大学研究・産学官連携機構 (iRIC) & 広報室 https://www.ibaraki.ac.jp/news/2022/03/31011584.html
--

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	古川 和朗 (furukawa kazurou) (00190132)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器 研究施設・教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	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	大澤 哲 (ohsawa satoshi) (00150011)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員 (82118)	
研究分担者	染谷 宏彦 (someya hirohiko) (10518830)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・シニアフェロー (82118)	
研究分担者	近藤 恭弘 (kondo yasuhiko) (40354740)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J - P A R C センター・主任研究員 (82110)	
研究分担者	佐々木 憲一 (sasaki ken'ichi) (70322831)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授 (82118)	
研究分担者	大谷 将士 (otahi masashi) (90636416)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教 (82118)	
研究分担者	山口 博史 (yamaguchi hiroschi) (40717914)	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 (82118)	削除：2019年10月11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