

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740216

研究課題名(和文) 3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置の開発

研究課題名(英文) Development of a pulsed kicker system for the 3-D spiral injection scheme

研究代表者

飯沼 裕美 (IINUMA, HIROMI)

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

研究者番号：60446515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：標準理論を越えた新物理の存否の議論の決定打となる物理量のひとつであるミュオンg-2を超精密測定するために、大強度陽子加速器(J-PARC)の大強度ミュオンビームを用いたg-2/EDMの超精密測定実験計画を推進している。実験成功の要は磁場を0.1ppm以下で制御する貯蔵リングへ、磁場を乱さずにビームを入射する方式の開発である。本申請研究では入射ビームを貯蔵する際に必要なパルス状磁場発生装置の試作及び動作試験を行った。目標とする磁場の空間・時間分布を測定し、加速器学会で成果報告をした。

研究成果の概要(英文)：Muon g-2 is the one of solid signals of new physics of beyond the standard model. New experiment of ultra precise measurement of the Muon g-2 is now in preparation at the J-PARC. One of the keys of this new experiment is to inject beam without changing magnetic field, which is controlled within 1ppm, of the storage magnet. We developed a prototype pulsed magnetic field generator (Kicker) and checked its performance. We presented this topic at Particle Accelerator Society of Japan in 2013 Aug.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ビーム入射用パルス磁場発生装置

1. 研究開始当初の背景

本研究はミュオン異常磁気モーメント ( $g-2$ ) と電気双極子モーメント (EDM) を超精密測定実験を行い、素粒子の標準理論を精査、および標準理論を越えた未知の粒子・相互作用の兆候を捉えることを目指すものである。ミュオン  $g-2$  は、堅牢な標準理論の予言値と、実験結果にズレの兆候がある数少ない物理量の一つである。1970年代から欧州や米国で実験を繰り返し、測定精度を向上させてきた。最新の結果は1997年に米国ブルックヘブン研究所の E821 実験で精度 0.54ppm を達成している。理論予言値と比較すると中心値のズレは 2.2ppm、理論の精度 0.42ppm を考慮すると 3.1 シグマである。新物理の有無を結論づけるにはもう一歩実験精度を向上させねばならない。ミュオン EDM は CP 対称性の破れを必要とし、小林・益川理論を越えた現象である。つまり、もしも有限の EDM 値 ( $\eta_{EDM}$ ) を観測すれば直ちに未知の新物理の証拠発見になる。E821 実験により上限値  $\eta_{EDM} < 1.8 \times 10^{-19} \text{e.cm}$  (95% C.L.)、実験精度内でゼロと報告している。しかし、この精度では完全にゼロなのか結論づけるには不十分で、更に感度を向上しなければならぬ。

2. 研究の目的

我々は過去 30 年近く踏襲された実験の系統誤差要因を根本から解決する新しい手法を考案し、大強度陽子加速器 (J-PARC) の大強度ミュオンビームを用いた  $g-2$ /EDM の超精密測定実験計画を推進している。申請者は、新実験方式実現の要の一つである、0.1ppm 以下の磁場の一様性が要求される貯蔵リング磁場とビーム入射方式の概念設計に取り組んできた。

以下にビーム入射方法の概要を紹介し、研究期間内の目標を述べる。新実験では、歳差運動周期測定と磁場制御・測定の精度が最適になるように、運動量  $300 \text{MeV}/c$  のミュオンビームを磁場 3 テスラのリングに貯蔵する設計で進めている。貯蔵リングの直径は 0.66m である。

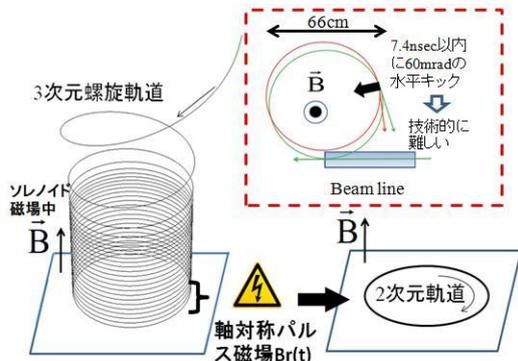


図 1. 3次元らせん軌道の概念

ビーム入射の概念的に最も単純な手法は、図1の赤い点線の枠内に示す様に、貯蔵磁場の端部のフリンジ磁場を完全に遮蔽するパイプを通して、均一磁場中へビームを入射し、(均一磁場中のビームは完全な円軌道を取り、遮蔽装置の出口に必ず戻るので)、ビームが1周して遮蔽装置にぶつかる前に適切な水平方向の“力”を与えてビーム軌道中心を平行移動させ (水平キック)、定常周回軌道の乗せるという2次元的な入射方式である。しかし、3テスラのフリンジ磁場を完全に遮蔽する点、1周7.4ナノ秒以内に与える水平キックの強度・時間応答の点で技術的困難があり、この方法では現実的なビーム入射が不可能と判断した。そこで、次の2点を念頭に置き、図1のような、貯蔵リング平面に対し斜め上からビームを入射して3次元螺旋軌道を取る新しいビーム入射方式を考案した：

- イ) フリンジ磁場形状も含めて貯蔵リング磁石を設計し、積極的にビーム軌道制御に利用する、
- ロ) ビーム軌道に沿って軸対称なパルス状動径方向磁場による垂直キックを与え、貯蔵リング平面上の定常周回軌道へビームを制御する。パルス状磁場の時間応答要求を1周以内から複数周回程度まで緩め、必要磁場強度も小さくし、技術的困難を軽減する。

この入射方式は、磁場軸方向に長いビーム軌道を取るため、貯蔵リング磁石は図2に示すソレノイド型磁石を基本にした。(図示していないが) 鉄ポールチップとリターンヨーク形状を調整してフリンジ磁場の動径方向成分  $B_R$  を成形する。3次元螺旋軌道計算を行い、安定したビーム軌道を得るまで調整を繰り返す。磁石の概念設計は医療用 MRI 等の精密磁場設計技術も利用している。

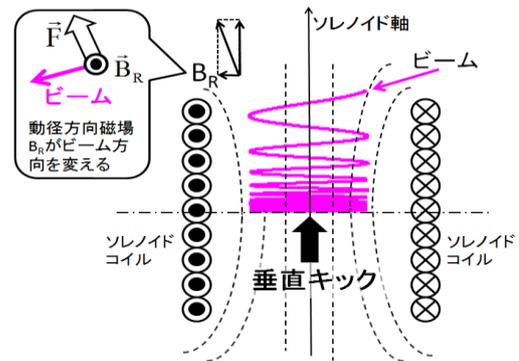


図 2. 3次元らせん軌道とソレノイド磁場

本申請研究期間では、項目(ロ)、及び図2に示す垂直キック装置への要求条件(パルス状磁場の時間・空間構造)、詳細設計と試作及び動作試験を行う。ビーム軌道に沿って軸対称なパルス状動径方向磁場による垂直キックは図3に示す様な、2組の環状コイルを貯蔵リング平面の上下に配置することで発生させる。ビームは、外側のコイルと内側のコイルの間を通過する。

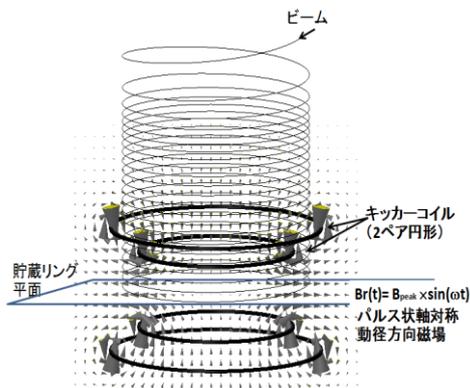


図3. キッカーコイルのイメージ

本申請研究は、3次元螺旋軌道入射方式を確立するための実証研究の第一歩である。

### 3. 研究の方法

以下に、方法を4段階にまとめる：

- (1) 磁場を発生させるためのコイルの形状設計と製作: 入射ビームの運動量分布・ビームサイズ広がりから理想的な磁場を算出し、コイル形状とコイル電流の時間構造を決定する。
- (2) 電流源回路の設計と試作: 蓄電電圧 10kV, 電流 100A, 半周期 150 ナノ秒程度の半サイン波形を出力する回路を SPICE シミュレータ等で設計し、試作機を製作する。
- (3) 試作機の動作確認と発生磁場計測: 高電圧プローブや電流モニターで電流源出力を確認し、ピックアップコイル方式で磁場の時間・空間な分布のマッピング測定を行う。
- (4) 設計磁場と測定磁場の差異から (1) や (2) の改良を加えて完成させる。

次に、実際に行った研究の様子を説明する。図4に示すように、原寸サイズのパルス状磁場発生装置を試作した。パルス磁場は直径 0.66m の円形コイル(キッカーコイル)に 100A 程度のパルス電流を流して発生させる。図4に大電流をキッカーコイルに流す為の回路を示す。大電流のスイッチはサイラトロンを使用している。キッカーコイルに流れる電

流の時間分布と電流値を調べる為に、CT(Current Transformer)を使用した。

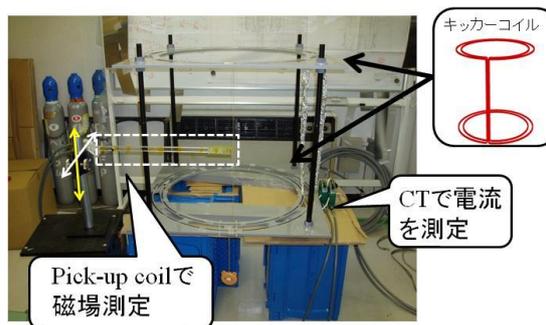


図4. 原寸サイズのキッカーコイル

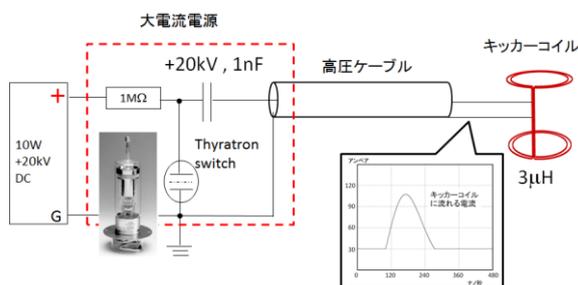


図5. 大電流電源

### 4. 研究成果

コイルを流れる電流をCTで測定した信号と、励起されるパルス状の磁場をピックアップコイルで測定した磁場の信号を図6に示す。

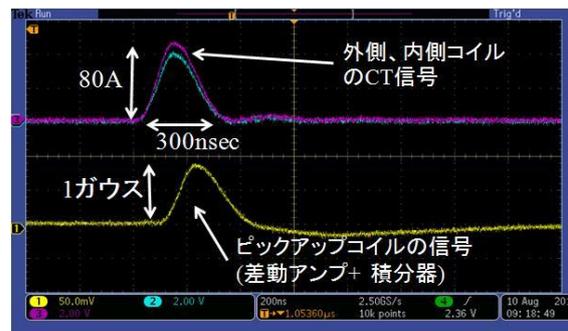


図6. CTとピックアップコイルの信号

また、図7に磁場の空間分布の測定結果を示す(図の丸点)。磁場の空間時間分布は設計値(四角点)と良くあっていることを確認した。ピックアップコイルを用いて、パルス磁場の空間・時間分布を測定し、設計値の通りの性能であることを確認した。そして、2013年8月の加速器学会で成果報告をした。キッカー装置の単独動作確認は完了したので、次のステップとして、2014年4月より新たに「ソレノイド型蓄積磁石への3次元らせん軌道によるビーム入射の

実証試験」を開始している。この中で、3次元らせん軌道入射の実証試験の装置に組み込み、システムとしての動作確認を行う予定である。

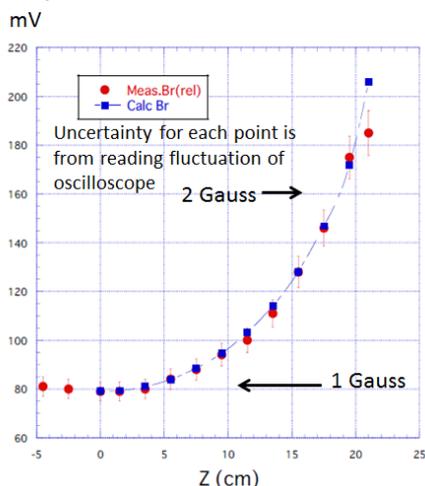


図 7. 磁場の空間分布

(測定結果とシミュレーション結果の比較)

取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

<http://research.kek.jp/people/hiromi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
飯沼 裕美 (IINUMA, Hiromi )  
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  
研究者番号：60446515

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：

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 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

題名 「3次元らせん軌道ビーム入射のためのパルス状磁場発生装置の開発」  
第10回日本加速器学会年会 2014年8月3日～5日名古屋大学  
発表者 飯沼裕美

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：