

# J-PARC のミュオン $g-2$ /EDM 実験のための 3次元らせん軌道ビーム入射手法の開発と テスト実験の現状報告

SATテクノロジー・ショーケース2015

## ■ はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) の、世界トップクラスのパルスミュオンビームを用いて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) の超精密測定を行う実験準備を進めている。この実験は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し、その成果はノーベル賞級のインパクトを与える。

実験では  $g-2$  と EDM は磁場中のミュオンの歳差運動の周期と角運動量ベクトルの方向をそれぞれ 0.1ppm、0.01mrad の精度で測定する。このために、(1) 医療用 MRI 電磁石の磁場調整技術を応用した超高精度な蓄積磁場の実現と、(2) 新規開発したビーム入射・蓄積軌道の 3次元制御の実現、を目指している。

## ■ 活動内容

### 1. 超伝導ソレノイド型蓄積磁石の設計・製作

中心磁場は 3 テスラ、磁石サイズは医療用 MRI 磁石と同程度のものを用いる。本研究に向けて取り組んでいる技術開発項目を以下に示す。

- ミュオンビームを蓄積する領域を含む磁石中心部 (長手方向に  $\pm 10$ cm、半径 35cm 以内の領域) の磁場調整精度を従来よりも 10 倍向上させてローカルに 1ppm 以内の調整をする、
- ミュオンビームが通過するため、フリッジ部の磁場の 3次元分布も 100ppm で調整する、
- 上記に示すように、ビーム軌道に適した広い範囲の磁場空間分布の高精度調整を実現するために、要求磁場からコイル配置、鉄の配置を算出するアルゴリズムを開発 [論文1]、
- 受動的、能動的シミング手法の開発 [特許1、学会発表1]。

### 2. 3次元らせん軌道ビーム入射と蓄積手法の開発

ミュオンビーム (300MeV/c) は蓄積ソレノイド磁石中心部の高精度磁場調整領域のさらに内側の、長手方向  $\pm 10$ mm 以内に軌道半径 33cm で蓄積する。加速器から得る高エネルギービームをこのような小型リングに蓄積するのは前例のない試みである。また、ローカルに 1ppm の精度で磁場調整している領域への入射は磁場を乱さずに行わねばならない。本研究に向けて新規開発項目を以下に示す。

- 3次元らせん軌道入射手法の開発

一般的なビーム入射は図 1 の右上の赤線で囲った部分

で示すように、蓄積リングと入射ビームラインが同一平面上にある 2次元入射である。本実験の場合、1周 7.4 ナノ秒以内に 60mrad の水平キックを与えて周回軌道に移動せねばならず、このようなキッカー製作は技術的に難しい。そこで、3次元的な入射手法を新たに考案した。図 1 に示すように斜め上から入射したビームはソレノイド磁石のフリッジ部の径方向の磁場により徐々に垂直方向の運動を弱め、蓄積領域付近では、10mrad 程度の垂直運動になる。これを 500 ナノ秒程度の (70 周回程度) パルス磁場を与えて垂直方向の運動を止める。この手法はキッカーの時間・強度のスケールを現実的なものにすると同時に、蓄積磁石のフリッジ部を入射に利用するため、入射機能・蓄積機能を一体化させ、蓄積部の磁場を乱さずにビーム入射することを可能にする。[学会発表 3]

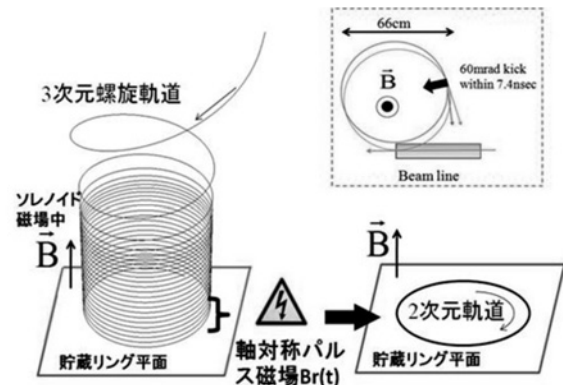


図1 3次元らせん軌道入射の概念説明

- パルス磁場キッカー装置の開発

ビームの垂直方向の運動を制御するために、数 100 ナノ秒程度のソレノイド軸に対称な径方向パルス磁場をビームに与える。ピーク磁場は 2 ガウス程度、径方向の空間均一度は、ビームに沿って 1% 程度あれば良い。3 テスラのメイン磁場に比べてキッカー磁場の大きさは 1 万分の 1 程度なので磁場自体は問題にならない。しかし、キッカー装置は 100A オーダーのパルス電流で駆動するため、渦電流の発生を抑制すること、およびフープ力を考慮した構造設計を行っている。[学会発表 2]

代表発表者 **飯沼 裕美 (いひぬま ひろみ)**  
 所属 **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 第 4 系**  
 問合せ先 **〒305-0081 つくば市大穂 1-1  
 TEL: 029-864-5200-4096 (PHS)  
 Hiromi.iinuma@kek.jp**

■キーワード: (1) 3次元らせん軌道入射  
 (2) 超精密磁場  
 (3) ミュオンスピン歳差運動

### 3. 原理実証実験

3次元らせん軌道入射手法の実証実験準備を進めている。ミュオンビームの代わりに電子銃からの電子ビームを用い、本番の3分の1スケールのミニソレノイド磁石へ3次元らせん軌道入射を行う。図2に実証実験のイメージを示す。実証実験で特筆すべきは、電子ビームを使うので、ビーム軌道を可視化しやすいことである。ミニソレノイド磁石の中の蓄積槽にアルゴンガスを封入し、その電離の様子をカメラで撮影し、電子ビームの軌道を直接観測することができる。このようにして、3次元らせん軌道入射の原理を実証し、入射効率の向上、貯蔵領域内でのビーム軌道を高精度に制御する手法の開発を行う予定である。現在、ビームラインを建設中であり、図3にテストビームラインの11月初旬時の様子を示す。本発表では、テストビームラインの詳細と、試運転の状況も合わせて報告する。

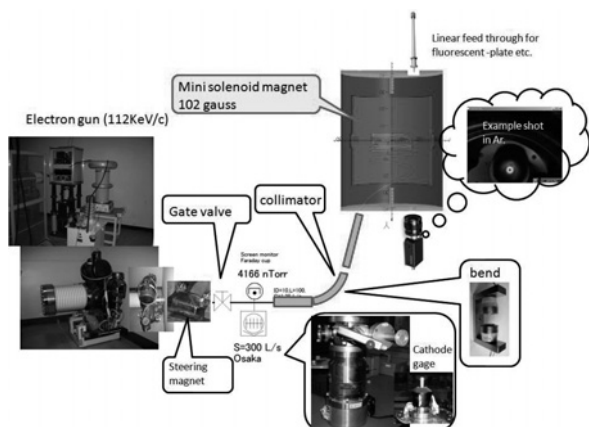


図2 テストビームラインの概要

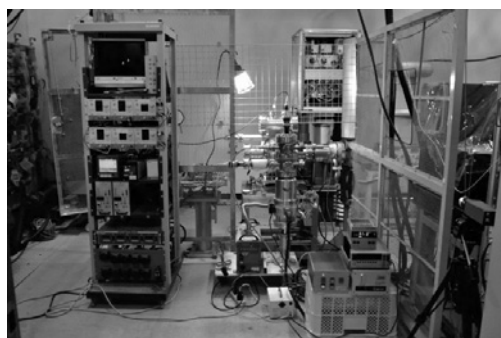


図3 テストビームラインの様子(2014年11月初旬)

### ■施設

本実験は大強度陽子加速器施設J-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)の世界トップクラスの強度のパルスミュオンビームを用いて行う。国際的な協力体制になっており、現在世界9か国、21施設、100人規模の共同研究者が参加している。本実験開始は2017年ごろの予定である。

テスト実験は、高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス内の実験室で行う。加速器研究施設から実験にかかわる設備、専門家のサポートを得ている。

### ■特許、参照論文、研究助成の情報

[特許1]阿部充志 他、特許第4902787号、「MRI装置用磁場調整」、平成24年1月13日登録、日本国特許庁

[論文1] M. Abe, K. Shibata, “Consideration on Current and Coil Block Placements with Good Homogeneity for MRI Magnets using Truncated SVD”, IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 6, pp. 2873-2880, June. 2013.

[学会発表1]阿部充志、「打ち切り特異値分解法による正則化計算を用いた磁場分布調整手法」、第42回日本磁気共鳴医学会大会、発表No.P-2-120、京都2014年9月18-20日。

[学会発表2] 飯沼裕美、阿部充志、他「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 2013年8月3-5日 名古屋大学 ([http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/MOOS/MOOS14.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/MOOS/MOOS14.pdf))

[学会発表3] 飯沼裕美、阿部充志、他「3次元らせん軌道ビーム入射のためのX-Yカップリングの大きいビームの調整・輸送ラインの設計」第11回日本加速器学会年会 2014年8月9-11日 リンクステーションホール青森

([http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP061.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUP0/SUP061.pdf))

本発表に関わる研究は科学研究費助成を受けている。

- 若手研究(B) (2011~2013年度) 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
- 基盤研究(B) (2014~2017年度) 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