

**高輝度ミュオンマイクロビームによる透過型ミュオン顕微鏡イメージング**  
Transmission Muon Microscope by muon microbeam,  
realizing 3-D Imaging

課題番号：17H06126

**三宅 康博 (MIYAKE, YASUHIRO)**

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授



研究の概要（4行以内）

超低速ミュオンを再加速することで、時間・空間コヒーレンスに優れた高輝度ミュオンマイクロビームを創生し、ミュオンの波動性を実証するとともに、透過型ミュオン顕微鏡を開発し、「生きた細胞まるごと1個の機能を観る」という新たな顕微法イメージングを確立する。

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：ミュオン、超低速ミュオン、レーザー、顕微鏡、量子可干渉性、波動性

1. 研究開始当初の背景

新学術領域研究「超低速ミュオン顕微鏡」（鳥養映子代表、平成23-27年度）において、J-PARC ミュオン施設で得られる世界最高強度のパルス表面ミュオン（4MeV）を0.2eVまで7桁冷却した超低速ミュオンの生成に成功した。超低速ミュオンは、表面ミュオンをタングステン箔に入射することで真空中に放出されるミュオニウム（正ミュオンと電子が結合した軽い水素様原子、Mu）から、レーザー共鳴イオン化法（1s-2p-unbound）により電子を剥ぎ取ることで生成される。この超低速ミュオンは静電場を用いて最大30keVで取り出すことが可能であり、物質界面を有する多層膜、ナノ構造を含む新機能的物質等の薄膜界面の局所磁場、電子状態、スピン伝導の超高感度観測等に用いられる。

2. 研究の目的

本計画では、超低速ミュオンを再加速することで、時間・空間コヒーレンスに優れた高輝度ミュオンマイクロビームを創生し、ミュオンの波動性を実証するとともに、透過型ミュオン顕微鏡を開発し、「生きた細胞まるごと1個の機能を観る」という新たな顕微法イメージングを確立する。

ミュオンは電子より200倍重いため、同じ速度で約200倍の試料透過能力を有し、荷電粒子であることから電磁場の可視化能力を有する。超低速ミュオンを再加速しエネルギーを上げることにより、超高压電子顕微鏡をもってしても到達不可能な10μm厚のトモグラフィ

3次元測定、生きた細胞の透過観察を実現することが可能となる（図1）。これは電子顕微鏡と光学顕微鏡の分解能ギャップを埋める全く新しい顕微鏡である。

まずは超低速ミュオンを誘導加速器で300keVまで再加速し、回折実験を行うことでミュオンの量子可干渉性を直接証明する。これは標準模型の第2世代以降の粒子の量子可干渉性の初の直接証明である。次に、更に10MeVまで再加速することで、深さ10μm以上の対象物を分解能1μm以下で観察可能な透過型ミュオン顕微鏡を開発する。最終的には、ミュオン冷却の多段化と収差補正により、

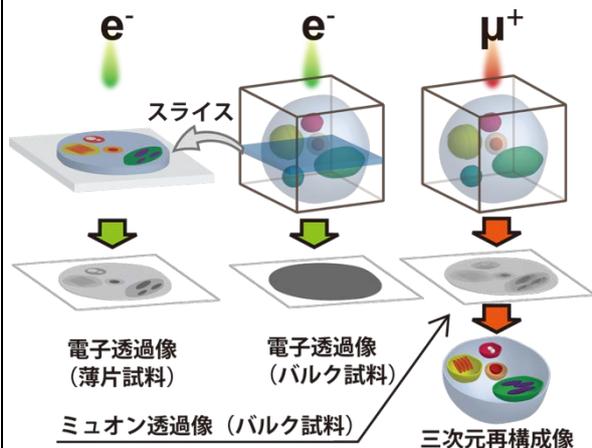


図1. 透過型ミュオン顕微鏡が目指す、10μm厚試料の3Dイメージングと電子顕微鏡の比較。透過型ミュオン顕微鏡は、生きた細胞の透過観察を可能にする。

分解能 0.1nm への性能向上を目指す。以下の4つの研究開発項目を達成し、透過型ミュオン顕微鏡を実現する。

- (A) 超低速ミュオン再加速技術の開発
- (B) 超伝導対物レンズの開発
- (C) 透過ミュオンイメージング手法の確立
- (D) 実用材料のイメージング

### 3. 研究の方法

上記(A)~(D)の技術を個別に開発、J-PARCにおいて統合し透過ミュオン顕微鏡を組み上げる。(C)のイメージング手法は先行して開発、超低速ビームラインに接続し、ミュオン回折実験を行いミュオンの波動性を証明する。透過ミュオン顕微鏡の調整はイメージング実験と併せて実施し、分解能を向上させてゆき、最終的には各時点での分解能に適合した(D)実用材料のイメージング実験を行う。

### 4. これまでの成果

#### (A) 超低速ミュオン再加速技術の開発

透過型ミュオン顕微鏡に必要なより高エネルギーへの加速手法として、申請時には誘導加速マイクロトロンを計画したが、物理設計の結果、フラットトップ RF サイクロトロンはミュオン寿命よりも早く加速でき効率的と判明し、これを詳細設計した。予算的制約から加速能力を 10MeV から 5MeV へと変更したが、当初目標通りの  $10^{-5}$  安定度の詳細設計に成功し、2020 年秋のビームタイムに合わせて稼働予定であり、予定通り進んでいる。詳細なビームシミュレーションに基づいてサイクロトロンの設計を行った(図2)。サイクロトロンを構成する電磁石等の機器の製作は完了した(図3)。誘導加速器も開発に成功しており、電子加速で性能等を確認した。回折実験のエネルギー可変の手段として用いる予定である。

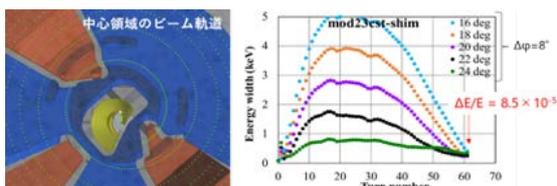


図2. (左)サイクロトロン中心領域におけるビーム軌道。(右)シミュレーション結果。パルス幅 200ps (RF 位相幅  $8^\circ$ ) の超低速ミュオンが約 60 ターンで 5MeV まで加速、エネルギー分散  $\Delta E/E$  を  $10^{-5}$  台に抑制可能な設計。



図3. 完成したサイクロトロンのマグネットと RF 空洞の一部。2020 年 J-PARC に設置予定。

#### (B) 超伝導対物レンズの開発

日本電子より超伝導対物レンズを供与され、極低温化での再起動試験を実施している。1980 年代の技術の復活のため技術情報の一部に散逸があり、クエンチ等の装置の故障を避けるため慎重な再起動実験を実施している。このため、当初予定よりも半年ほどの遅れがあるが、期間内の開発には問題とならない見込みである。

#### (C) 透過ミュオンイメージング手法の確立

透過ミュオン顕微鏡の試料ステージ、ミュオン用イメージセンサ等の動作を確認した。これらを用い、ミュオンの量子干渉性の証明になるミュオン回折実験が現在進行中であり、統計が少ないため確定ではないが、既にミュオン回折現象の兆候を捉えている。

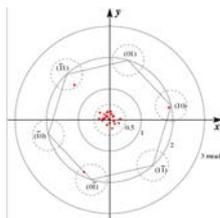


図4. ミュオン回折実験の途中経過の像。統計が少なく確定ではないが、回折スポット位置に複数のミュオンを捉え、兆候を示している。

### 5. 今後の計画

継続中のミュオン回折実験を 2020 年度のできるだけ早い時期に完了し、ミュオンの波動性を直接証明する。2020 年度にサイクロトロンの磁場測定や高周波系の試験を行い、J-PARC 超低速ミュオンビームラインに接続、ビームコミッションが終わり次第、透過型ミュオン顕微イメージングを開始する。最終的には、厚いや凍結生物試料の透過ミュオン顕微鏡イメージング実験を実施する。

### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

○発表論文 (下記含む計 13 件)  
A.D. Pant, T. Adachi, P. Strasser, Y. Ikeda, Y. Oishi, J. Nakamura, W. Higemoto, K. Shimomura, R. Kadono, Y. Miyake, E. Torikai, "Characterization and optimization of ultra slow muon beam at J-PARC/MUSE: A simulation study", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 929 (2019) 129-133, (2019)

○発表(下記含む計 28 件)  
 (招待講演) 三宅康博, "Ultra Slow Muon Generation and Its Application for Transmission Muon Microscopy at J-PARC Muon Facility, MUSE", The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), 2019  
 (招待講演) 三宅康博, "高輝度ミュオンマイクロビームによる透過型ミュオン顕微鏡イメージングにむけて", 日本顕微鏡学会 第61回シンポジウム, 2018

### 7. ホームページ等

<http://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy.html>