


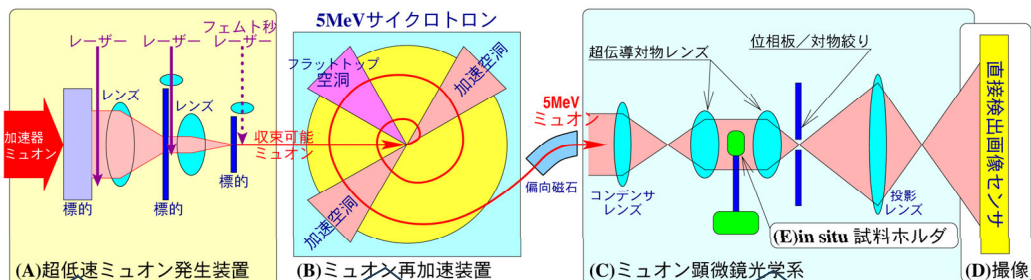
パワー素子と生体内部の電磁場を可視化する透過型ミュオン顕微鏡

	研究代表者	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別准教授 永谷 幸則 (ながたに ゆきり)	研究者番号: 00393421
	研究課題情報	課題番号: 24H00028 キーワード: 顕微鏡、ミュオン、電磁場イメージング、パワー素子、細胞	研究期間: 2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

現代文明はエレクトロニクスを通じて電磁気学に依存しており、半導体などのパワー素子内部の電磁場分布の可視化の実現は、素子の高性能化を通して社会のSDGs到達に貢献できる。また、生体組織においては、ミトコンドリアの膜電位が細胞のエネルギー生産の基盤となっている他、脳や神経組織の活動電位の伝播が思考や感情などの情報処理を司っており、その可視化は細胞生物学や脳神経科学にブレークスルーをもたらす。素粒子のミュオンは加速により高い物質透過能力を備えるが、ミュオンは電荷をもっているため、ミュオンの軌道や波動関数の位相の変化を像として捉える事で、物質内部の電磁場のイメージングに用いる事ができる。透過型ミュオン顕微鏡は、加速器で大量生産したミュオンビームを多段ビーム冷却装置で超高輝度化し、サイクロトロン加速で物質透過能力を付与し、超伝導を用いた顕微鏡光学系にローレンツ法や位相差法を導入することで、パワー半導体や細胞などの厚い物体内部の電磁場イメージングを実現する。



極小の点 (~30nm) まで絞り込める超高輝度の超低速ミュオンビームを生成



世界初ミュオン・サイクロトロン内部構造と外観



レンズ本体 超伝導レンズ マイナースチールド

●背景となる透過型電子顕微鏡の技術

透過型電子顕微鏡は、ローレンツ法や位相差法あるいはホログラフ法により薄い物質内部の電磁場を最高分解能で透過観察できる。しかし、電子ビームの透過能力は弱く、通常は数100nm程度の試料厚さの透過観察が可能で、世界最高加速の3MV顕微鏡をもってしても数μm厚さの透過観察が限界である。

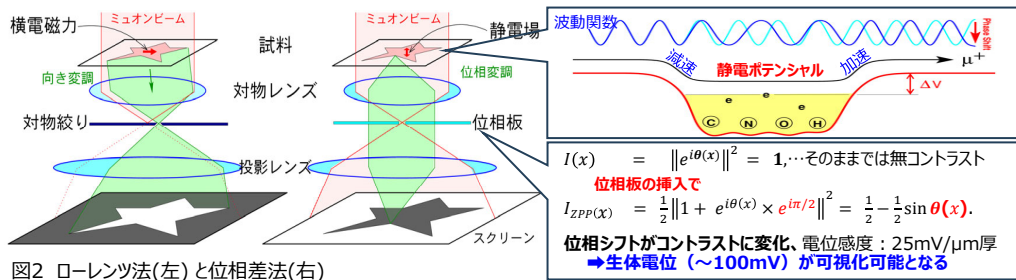


図2 ローレンツ法(左)と位相差法(右)

●加速ミュオンの透過能力

透過電子顕微鏡の試料厚さの制限を突破するため、電子顕微鏡の電子を加速ミュオンに置き換える。電子とミュオンはよく似た素粒子であり、電磁場の可視化能力をそのまま生かせる。一方、ミュオンは加速により極めて高い物質透過能力をもつ。これが透過型ミュオン顕微鏡の基本原則である。本研究では、ミュオンを加速するため、科研費基盤研究(S)三宅代表で開発された世界初のミュオンサイクロトロンを進展させ、10μm厚さの試料の透過観察を実現させる。

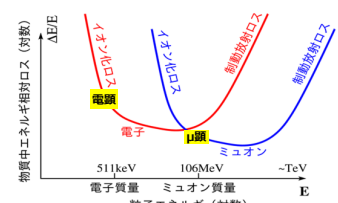


図3 電子とミュオンの透過能力の比較

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●超低速ミュオンの生成装置の高輝度化と極短パルス化

超低速ミュオンをさらに多段ビーム冷却することで、30nm程度まで絞り込むことが可能な超高品質なミュオンビームを発生させる。これにより後段の顕微鏡光学系の性能を極限まで引出し、高い空間分解能と電磁場分解能を実現させる。また、ビーム冷却装置の最終段にフェムト秒レーザーを用いる事で、時間幅がピコ秒の極短ミュオンビームを実現し、高速動作する半導体内部の電磁場をストロボ的に可視化する。

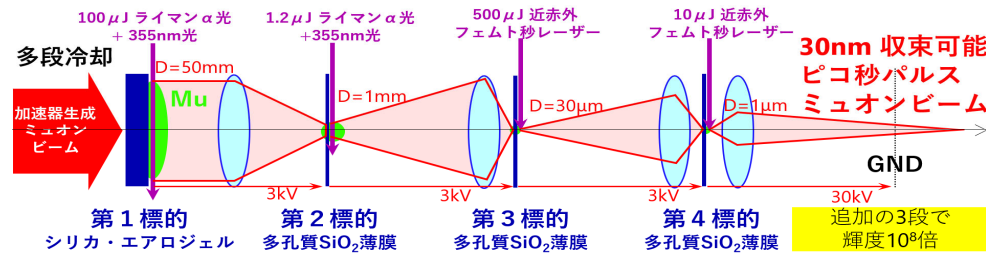


図4 超高輝度のミュオンビーム発生装置の構成

●電磁場を可視化するミュオンの顕微鏡光学系の開発と実証

超伝導対物レンズを用いた顕微鏡光学系を開発し、電子顕微鏡の分野で開発されてきた電磁場を可視化するローレンツ法や位相差法を導入することで、実際にミュオン顕微鏡が厚い試料内部の電磁場分布を可視化できることを証明する。

●パワー素子の観察と高性能化

産総研が開発してきた超高耐圧のSiC MOSFET素子の内部の電場分布をイメージングし、実際の電界集中箇所の特定、加速器に同期したパルス電圧の印可による脆弱箇所の特定などを行い、設計にフィードバックすることで素子の高耐圧化、高効率化などの高性能化を行う。他にもセラミックコンデンサの測定なども行う。パワー素子の効率化や高速化を通じた社会貢献を目指す。

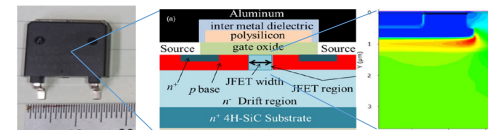


図5 産総研が開発した超高耐圧MOSFETの外観(左)、内部構造(中)、内部電場のシミュレーション(右)。

●ミトコンドリアと神経細胞の内部の電位分布の3次元測定

生体組織を急速凍結し観察するクライオ電子顕微鏡の技術を導入する。電子顕微鏡や蛍光顕微鏡でも観察可能な単離したミトコンドリアの膜電位を、ミュオン顕微鏡と平行して測定し、従来手法の測定との連続性を証明する。細胞内のミトコンドリアを細胞まるごと測定し、ミトコンドリアの形状と機能の関連のマッピングというこれまでにない計測手法を確立する。刺激を与えた神経細胞や神経ネットワークを急速凍結し、凍結試料を回転させながら透過撮影するトモグラフィーの手法で、神経細胞内部やネットワークを伝播する活動電位の分布のスナップショットを3次的に可視化する。

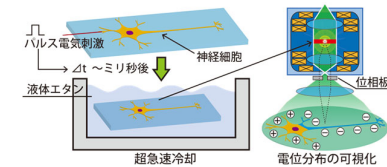


図6 神経細胞の活動電位の可視化