

【領域番号】 2 3 0 7	【領域略称名】 超低速ミュオン
【領域代表者（所属）】 鳥養映子（山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授）	
目指す新たな研究領域： 本計画の目的は、「超低速ミュオン顕微鏡」によるイメージング法(超低速ミュオン顕微法)を確立し、多様な物理・化学・生命現象の発現機構を、スピン時空相関という概念を導入して理解する新しい学術領域を開拓することにある。 スピン偏極した正ミュオンは、物質に止まり崩壊する際にスピン方向に対し、空間異方的陽電子を放出する。これにより、多くの臨界現象が起こるピコ秒からマイクロ秒までの広い時間域において、その微視的状態を高感度に検出するプローブとなる。核磁気共鳴(NMR)や中性子回折法では見えない時間域において、磁気秩序や電子状態を、温度・圧力・磁場などの外部条件に制約されずに測定できる。この大きな特徴により、世界各地の加速器施設において、物質科学研究に用いられている。超低速ミュオンは、熱エネルギー状態にある真空中のミュオニウム(正ミュオンと電子からなる水素状原子；Mu)からレーザー解離法で得られるものである。さらにこれを加速、収束させて3次元的な顕微プローブを創る。このようにして深さ方向にナノオーダーの局所性と走査性を創りだし、界面のスピン伝導や触媒反応、表面-バルク境界のヘテロ電子相関などの機構を微視的に解明する、新たな超低速ミュオン科学領域を拓く。 「超低速ミュオン顕微法」は、物質の表面近傍から内部にわたる現象の走査的な観測により、表面とバルクの関係性を明らかにし、また界面という境界条件自体が作り出す諸現象の微視的機構を解明するものである。一方、生命科学においても生体の空間イメージングなどの新たな可能性を拓く。加えて、さらなるビームの低温化・尖鋭化により、「標準理論」を越える素粒子/基礎物理のフロンティアを推進する。 図1-1に、超低速ミュオン顕微鏡の特徴的な観測の空間スケールを示す。 図1-1 超低速ミュオン顕微鏡で見える空間スケール	

物質・生命の研究のプロブとして最も必要なのは、①物質表面から深さ方向にナノメートル (nm) の分解能での連続走査性能、②サブミクロン(μm)分解能での物質内部3次元走査性能、および、③マイクログラム(μg)以下の試料に対する測定感度である。第一段階ではミュオンの超低速化により、表面近傍の打ち込み深さ(図1-1 横軸)を連続的に変化させ、nm分解能での走査性能を実現する(超低速ミュオン分岐)。第二段階では超低速化技術に加えて加速によりビームを尖鋭化した超高密度マイクロビームを完成させて、 μg オーダーの微量試料の観測や、物質深部をサブ μm オーダーのビームサイズ(図1-1 縦軸)で2次元マッピングする機能の完成を目指す(ミュオンマイクロビーム分岐)。世界の研究者が、これらの局所性を目標としながら、他の方法では原理的な壁を越えることができなかった。この2つの新しい量子ビームを用いた顕微法により、大強度陽子加速器施設(J-PARC)に物質・生命・素粒子基礎物理研究の世界的研究拠点を構築する。

新しい測定方法の導入による現象の多角的な理解は、それぞれの分野に飛躍的な発展をもたらす。超低速ミュオン顕微法の持つ潜在能力を十分活用し、異分野への展開を積極的に図ること、ミュオンが活躍する領域を拡げることが、我が国の学術の進展のために重要である。最高性能のミュオン顕微鏡を完成させるためには、物性、化学、生命科学はもとより、加速器科学、レーザー科学、素粒子原子核物理にわたる広範な分野からの最先端の知識と技術を結集する必要がある。

学術的背景：ミュオンスピン回転法(μSR)による物質科学研究は、弱い相互作用の空間反転対称性の破れが発見された1957年に原理が提案され、その後、着実に物性研究の新技术として発展してきた。零磁場ミュオンスピン緩和法(山崎他；PRL、1978年)、高エネルギー物理学研究所(KEK：現在は機構)における世界初のパルス状ミュオンビーム発生(永嶺他；Hyperfine Interactions、1981年)、パルス状ビームの特徴を活かした新しい研究方法(鳥養、門野、下村、西山他；PRL、1994年他)等を、本領域の研究者が主導する形で創出してきた。現在では、磁性、半導体、超伝導、化学反応、蛋白質の研究等の多彩な分野に拡がりを見せている。しかしながら従来得られてきたミュオンは、ビームサイズが数10mm ϕ 、打ち込み深さがmmオーダーで、 μSR 法はバルクの性質を見るものであった。超低速ミュオンは、KEKで20年余りに原理実証された(三宅、岩崎、下村、永嶺他；PRL、1995年)。その後、KEKと理化学研究所(理研)の共同開発研究によって、強度は毎秒20個ながらも深さ分解能(nm)と時間分解能(ns)の画期的な性能が確認された。この優れたビームの実用化が世界の研究者から待望されている。

一方、物質の表面・界面では並進対称性の破れにより、バルクと異なる特有の性質を持つ低次元の新物質相が出現することが知られている。これらの発現機構の解明のためには構造のみならず、その性質の根源にあるスピン時空相関の理解が重要である。例えば、触媒反応や水素貯蔵物質における、表面及びその近傍(サブサーフェス)における水素電子状態とそのダイナミクスの解明は、クリーンエネルギーの実用化につながることからグリーンイノベーションのための緊急の課題である。超低速ミュオンは、これらに対する他の追従を許さない決定的なプロブとなるであろう。また走査型プロブ顕微鏡(SPM)技術の飛躍的な発展によって、物質の表面からバルクに至る性質の統一的な理解が重要であることが一層明らかとなってきた。表面、サブサーフェス、バルクと電子状態を連続的に走査検出できる超低速ミュオン顕微法は、まさにこの目的に相応しい微視的研究手段である。

本領域の発展による学術水準の強化：表面・界面・薄膜に関わる諸現象の微視的機構解明は、基礎研究においても、グリーンイノベーションにつながる応用研究においても、緊急の課題である。超低速ミュオン顕微法で得られる、電子状態とスピン状態の時空相関に関する局所的かつ俯瞰的な理解は、これらの解明に不可欠である。この新しい量子測定手法は、これまで本領域の研究者らによって開発された画期的な超低速ミュオン発生技術に加えて、KEKの旧ミュオン施設を3桁上回るJ-PARCの超強パルスミュオンビームをもって初めて実現できるものである。J-PARCが完成した今こそ、超低速ミュオン顕微鏡の夢を実現できる時である。この新しい測定法により、世界の物質・生命科学の進展に貢献したい。