

領域略称名：超低速ミュオン
領域番号：2307

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学
のフロンティア」

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成28年6月

領域代表者 (山梨大学・大学院総合研究部・教授・鳥養映子)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	12
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	17
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	22
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	24
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	28
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	29
11. 総括班評価者による評価	30

研究組織 (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	23108001 超低速ミュオン顕微鏡 が拓く物質・生命・素粒 子科学のフロンティア 総括	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	鳥養 映子	山梨大学・総合研究部・教授	14
A01 計画	23108002 超低速ミュオン顕微鏡	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	三宅 康博	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・教授	20
A02 計画	23108003 界面のスピン伝導と反 応	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	鳥養 映子	山梨大学・総合研究部・教授	22
A03 計画	23108004 表面バルク境界領域 のヘテロ電子相関	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	門野 良典	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・教授	19
A04 計画	23108005 物質創成の原理を極め る超冷却と尖鋭化	平成 23 年度 ～ 平成 27 年度	岩崎 雅彦	国立研究開発法人理化学研究所・仁 科加速器科学研究センター・主任研 究員	11
計画研究 計 5 件					
A01 公募	24108504 超低速ミュオン線形加 速器の開発	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	林崎 規託	東京工業大学・原子炉工学研究所・ 准教授	1
A01 公募	24108510 物質表面から真空中へ の熱ミュオニウムの蒸 発過程の系統的な研究	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	長友 傑	独立行政法人理化学研究所・仁科加 速器研究センター・技師	1
A01 公募	24108511 分子性導体における低 次元揺らぎの織り成す 多様なスピン状態の理 論的研究	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	妹尾 仁嗣	独立行政法人理化学研究所・古崎物 性理論研究室・専任研究員	1
A01 公募	26108703 ガラスキャピラリーに よる超低エミッタンス 超低速ミュオンの生成	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	関場 大一郎	筑波大学・数理解物質科学研究科・講 師	2

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成 員数
A01 公募	26108707 超低速ミュオン電子顕 微鏡用線形加速器の開 発	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	林崎 規託	東京工業大学・原子炉工学研究所 ・准教授	1
A01 公募	26108712 超低速ミュオンビームに おける高精度ビームプロ ファイルモニターの開発	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	佐藤 朗	大阪大学・理学研究科・助教	2
A01 公募	26108716 微視的不均一状態から 生まれる巨視的量子状 態の解明	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	森 道康	国立研究開発法人日本原子力研究開 発機構・先端基礎研究センター・研 究主幹	1
A01 公募	26108718 超低速ミュオンの再加 速に最適な超高速光伝 導スイッチによる電界 集中型加速器の開発	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	吉田 光宏	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・ 准教授	1
A01 公募	26108720 分子性固体における磁 性・電子状態とミュオン ー第一原理計算による 研究一	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	圓谷 貴夫	国立研究開発法人物質・材料研究機 構・若手国際研究センター・ICYS 研究員	2
A02 公募	24108501 金属ナノ粒子の水素化 触媒反応特性の原子レ ベル解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	有賀 寛子	北海道大学・触媒化学研究センター・ 助教	1
A02 公募	24108503 表面水素の分極・荷電状 態	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	福谷 克之	東京大学・生産技術研究所・教授	1
A02 公募	24108507 結晶と磁性のカイラリ ティ結合の実空間マッ ピング	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	高阪 勇輔	青山学院大学・理工学部・研究員	4
A02 公募	24108509 絶縁体スピンゼーベッ ク素子におけるスピン 流生成の微視的検証と 界面スピン状態の解明	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	伊藤 孝	独立行政法人日本原子力研究開発機 構・先端基礎研究センター・研究員	1

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	
A02 公募	26108701 μSR 法を用いた金属酸化物の光触媒特性の解明	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	有賀 寛子	北海道大学・触媒科学研究所・助教	1
A02 公募	26108705 表面水素の分極・荷電状態	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	福谷 克之	東京大学・生産技術研究所・教授	1
A02 公募	26108708 ミュオン顕微鏡を水素プローブとして用いるためのシミュレーション研究	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	斎藤 峯雄	金沢大学・数物科学系・教授	3
A02 公募	26108709 負熱膨張性マンガン窒化物の局所磁性と機能	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	竹中 康司	名古屋大学・工学研究科・教授	1
A02 公募	26108714 酵素反応に伴う電子伝達・プロトン移動由来内部磁場のミュオン測定	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	清谷 多美子	昭和薬科大学・薬学部・助教	3
A02 公募	26108717 非磁性金属薄膜における電流誘起スピン蓄積の深さ分解測定	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	伊藤 孝	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員	1
A02 公募	26108719 カイラル磁性体におけるらせん磁気秩序の実空間 3 次元イメージング	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	大石 一城	一般財団法人総合科学研究機構・東海事業センター・副主任研究員	3
A02 公募	26108722 水素貯蔵材料の水素脱離反応機構解明と新規低脱離温度材料の創生	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	梅垣 いづみ	株式会社豊田中央研究所・分析部・副研究員	8
A03 公募	24108505 ミュオンと核プローブの相補利用による磁性積層膜の深さプロファイル探査	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	壬生 攻	名古屋工業大学・工学研究科・教授	3

研究 項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成 員数
A03 公募	24108506 超低速ミュオンをプロ ーブとするカイラル磁 性結晶のダイナミクス 探索	平成 24 年度 ～ 平成 25 年度	岸根 順一郎	放送大学・教養学部・教授	1
A03 公募	26108702 酸化物ヘテロ界面物性 の超低速ミュオン顕微 鏡測定	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	一杉 太郎	東京工業大学・理工学研究科・教授	2
A03 公募	26108706 超低速ミュオンをプロ ーブとするカイラル磁 性体の電子状態の理論	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	松浦 弘泰	東京大学・理学研究科・助教	2
A03 公募	26108713 トポロジカル絶縁体に おけるスピンロックの 超低速ミュオンによる 検出	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	後藤 貴行	上智大学・理工学部・教授	8
A03 公募	26108715 磁気超格子中における トポロジカル表面スピ ン波の理論的研究	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	大江 純一郎	東邦大学・理学部・准教授	1
公募研究 計 27 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

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、その微視的状态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。

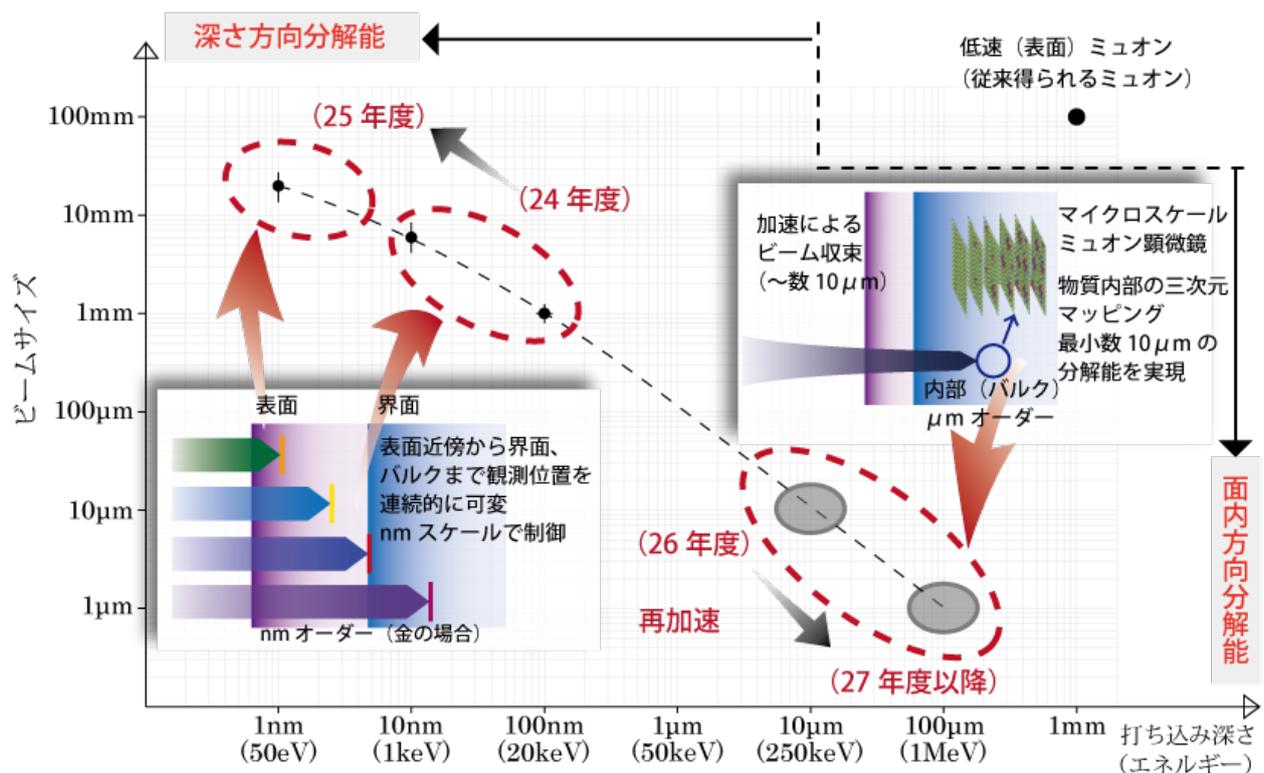


図1-1 超低速ミュオン顕微鏡で見る空間スケール

物質・生命の研究のプロー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 (μ SR)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、 μ SR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年余り前に原理実証された(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ーブとなるであろう。また走査型プローブ顕微鏡(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。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

超低速ミュオン顕微鏡は、表面・界面が関与する物理、化学、生命の諸現象の解明から、ミュオン異常磁気能率の精密測定まで、さまざまな分野において、従来の研究を飛躍的に発展させる突破口となる。本領域では、研究期間の前半で、対象となる広い分野の研究者との協力体制のもとに、物質内部の新しい機能イメージング法を確立し、後半でこれを用いた新たな学術領域の開拓をめざした。

最大のハイライトは、平成28年2月21日に初の超低速ミュオン発生に成功したことである。以後、今日までの3か月間安定に超低速ミュオンの発生を続け、目標とする毎秒1万～10万個の実用強度に向けて増強途上である。エネルギー分解能（エミッタンス）は、PSI（スイス）の低エネルギーミュオンの公称値400eVより1桁以上優れた30eVが確認され、物質・生命科学研究のプロープとして最も必要とされる、表面から深さ方向にnmの分解能での連続走査性能実現に大きく前進した。

本領域は、A01：超低速ミュオン顕微鏡と極微 μ SR 法創成、A02：界面のスピン伝導と反応、A03：表面・バルク境界領域のヘテロ電子相関、A04：物質の究極を極める超冷却と尖鋭化の4つの計画研究班と公募研究者から構成されている。超低速ミュオン生成は、A01班の世界最強パルスミュオン生成技術と、A04班の世界最強全固体ライマン（レーザー）システム技術の2つの基盤技術によって支えられており、これらの技術開発の大部分は、前半に当初目的を達成した。後半（実験装置本体完成後の3年間）は、加速器施設の事故や不具合による再三の長期運転停止が続き、装置へのビーム供給は90日間（予定では約600日）にとどまった。この間、実験研究者は海外ミュオン実験施設・相補的な研究手段による予備実験や試料準備等を進め、磁性、超伝導、半導体、電池材料に加えて、触媒化学や生命科学などこれまで未開拓の分野においても、超低速ミュオンによる実験に向けた基礎データを蓄積することができた。これらの実績を踏まえて、国際的にもさまざまな分野において、この夢の量子ビームへの期待が高まっている。

A01 班：超低速ミュオン顕微鏡は、図2-1に示すように、(1)熱ミュオニウム発生装置、(2)レーザー輸送系、(3)偏向電磁石、(4)レーザーシステム（A04班担当）、(5)、(6)超低速ミュオンビーム輸送系、(7)超低速 μ SR分光器から構成されている（番号は図に対応）。A01班では、これらを設計・製作し、J-PARCに設置した。A04班と協力し、超低速ミュオンビームの生成実験を行った。

平成28年2月に、超低速ミュオン生成試験を本格的に開始し、直後に生成を確認した。当初、0.01個/sだった超低速ミュオンの個数は、最適化により35個/sまで上昇した（図2-2.）。これは英国のRIKEN-RAL施設で観測された瞬間最高強度15個/sを既に上回る結果である。また、生成効率の減衰が大きかったRIKEN-RALと比べ、A04班の全固体レーザーは、安定にビームを供給できる。陽子ビーム、レーザー強度の増強等により、さらに大強度化が見込まれる。

超低速 μ SR分光器は、常伝導電磁石、クライオスタット、運動エネルギーを50 eV-30 keVまで変化させるための高電圧ステージ等が既に設置され、直ぐに μ SR実験を開始できる準備が整っている。

超低速ミュオンを再加速することで、よりエミッタンスの良いビームが得られる。この可干渉性により、波動性を使用した回折実験が可能となる。ミュオンの波動性を直接観測した例はなく、世界的に見ても大いに注目される実験である。

低エネルギーミュオン加速器の先行研究は世界的にも皆無である。粒子速度によらずに、加速電圧を可変にできるインダクション加速を採用し、SOSダイオードによりインダクションのファインメットコアのフライバック電圧を使用することで、ファインメットの特性を最大限発揮する電圧となるような回路を製作した。インダクション加速装置は完成し、今後J-PARCにインダクション加速装置を設置し、再加速試験を行う。

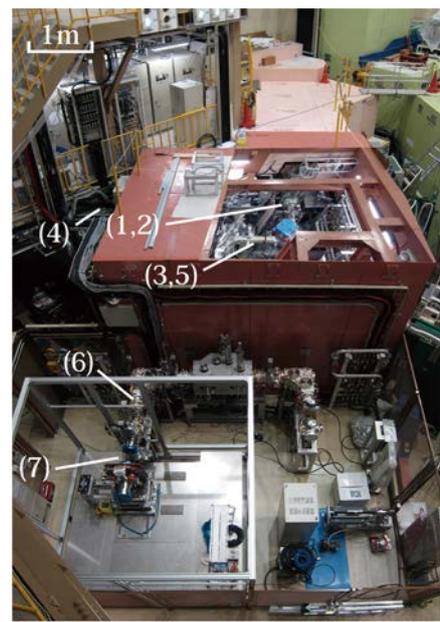


図2-1 超低速ミュオンビームライン

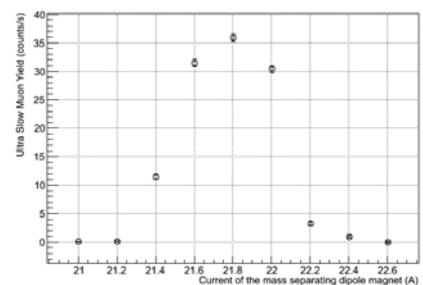


図2-2 偏向電磁石の電流値に対する超低速ミュオン生成数

A02 班：界面における物質・情報・エネルギーの移動を伴う動的現象を、相互作用のスピンの選択性という概念で統一的に理解することを目的に、以下の4現象を中心に実験と理論の準備研究を展開してきた。

界面近傍におけるスピン伝導の研究では、GaAs 中の負ミュオニウムスピン緩和の伝導電子スピン偏極依存性に関し、負ミュオニウムの荷電揺動に基づく理論的解釈を提案した。このミュオン実験手法を Si など他の半導体へ展開する可能性を示した。スピントロニクスでは、磁性体/絶縁体・半導体界面のスピン状態の理解と制御が必須である。膜厚が 10 nm 以下の(Ga,Mn)As 薄膜において磁性、及び磁気輸送特性が強い膜厚依存性を示すことを見出し、その機構を理解することにより電子構造の理解の深化をとともに、スピン注入用電極としての高性能化を進めた。一方、界面のスピン構造の解明に資するため STM 観測技術を発展させ、スピン偏極伝導電子放出顕微鏡(SP-BEEM)の開発を進めた。

触媒化学反応の研究では、酸化物の電子物性や触媒物性を決定している表面近傍の酸素欠陥の構造と分布、光触媒活性への寄与の解明を目的として、予備実験ではミュオンによる酸素欠陥の直接観測法の確立を目指した。これまでに単結晶のミュオンスペクトルの温度依存性が、酸素欠陥が多く存在する場合、特異な挙動を示すことを見出した。また酸素欠陥近傍で水素不純物とミュオニウム（水素同位体）の結合状態が示唆されている。予備実験の結果は、ミュオンが酸素欠陥の直接観測に有効であることを実証した。第1原理計算によっても、ミュオンはミュオニウムとして酸素欠陥に存在することが予測されている。

電気化学を担うイオン伝導の研究では、積層固体電池の超低速ミュオン顕微鏡による観察で、界面層でのイオン拡散やイオン濃度変化を明らかにし、固体電池の性能を支配すると言われる「界面層」に関する新知見を得ることを目的とし、積層固体電池におけるイオン拡散を調べた。正極材料の μ SR 測定結果と電気化学測定結果を比較することにより、電解液中での反応面積と充電深度との関係を世界で初めて明らかにした。また図 2-3 に示すように μ SR 法と β -NMR 法により固体電解質材料の Li 拡散係数を求め、イオン伝導度と比較してキャリア濃度を見積もり、イオン伝導を支配する要因を明らかにした。Li 以外にも Na の固体内拡散を検出できることを明らかにした。

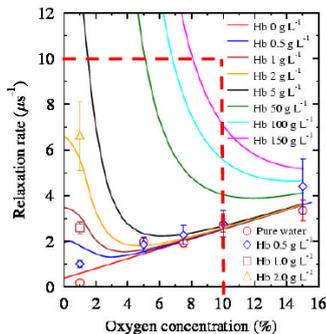


図 2-4 ヘモグロビン水溶液中のミュオニウム緩和の酸素濃度依存性

生命系の電子伝達において、理論計算により水と水が電子伝達を媒介するという提案がなされている。生命反応を司る電子伝達の研究では、シトクロム c について含水量を制御した μ SR スペクトル測定を行い、含水量の増加が電子の 3 次元拡散を促進すること、ガラス転移温度の上下で電子伝達の振る舞いに差異があることを明らかにした。これにより、生命系における光合成や呼吸鎖反応のコアとなっている電子伝達の解析に μ SR 実験の有効性が明らかになった。また、図 2-4 に示すように水溶液中の溶存酸素の検出に、ミュオニウムスピン緩和の測定が極めて有効なことを実験的に明らかにした。この結果は、ミュオンマイクロビームによる低酸素症の非侵襲診断の可能性を強く示唆するものである。

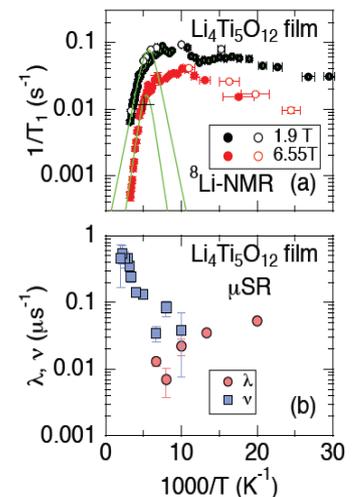


図 2-3 (a) β -NMR と (b) 低速 μ SR で求めた $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 薄膜のスピン格子緩和率と温度の逆数の関係

A03 班：まず銅酸化物研究で、電子ドーピング系銅酸化物 T'相 La214 系の母物質の薄膜で、頂点酸素の原子レベルでの制御によりキャリアドーピングなしで現れるとされる超伝導について、USM- μ SR によりその実相を微視的に明らかにすることを大きな目標の一つとしていたが、USM ビーム利用への準備としてポール・シェラー研究所 (PSI) の低エネルギーミュオンビームを用いた μ SR (深さ分解能 \sim 20nm) 測定を当該物質 (厚さ \sim 300 nm) について行い、非ドーピングの母物質薄膜で現れる超伝導が本質的でバルクな性質であることを示す結果を得るとともに、薄膜表面付近に超伝導とは異なる電子状態が現れる証拠をも得られており、USM- μ SR のより高い深さ分解能によりさらなる解明が期待される。また、これに触発されてバルク試料合成も見直された結果、プロテクトアニール法による T'相 La214 系単結晶においても非ドーピング超伝導を示唆する研究結果が得られ、光電子分光による電子状態研究も進展するなど、T'相の研究に大きなインパクトを与えている。一方、第 2 種超伝導体の表面近傍における磁束格子のダイナミクスの研究では、USM と相補的な時空スケールを持つ走査トンネル分光 (STS) により磁束格子の測定を高速で行えるような新手法を開発することが目標の一つであったが、本研究により今までの 1000 倍の速さの渦糸運動の STS 測定が可能となり、これによって磁束格子における刃状転位の振る舞いを明らかにした。今後 STS と USM の相補利用による広い時空でのダイナミクス解明が期待される。表面・界面に現れる磁性の研究では、USM- μ SR を用いた深さ方向空間分解によるスピン相関の研究を目標としていたが、

LaAlO₃/SrTiO₃ 等の界面を含む遷移金属酸化物複合構造の製膜手法の開発、および走査トンネル顕微鏡 (STM) 測定などによる表面の評価が行われ、これまで知られていなかった表面の原子構造や電子状態を明らかにし (図 2-5)、USM- μ SR による表面-バルク境界領域の研究に向けて試料サイズ、製膜条件等の最適化が進化した。さらに、キラル (カイラル) 磁性体研究では、カイラルスピソリトン格子の実現と USM- μ SR によるそのダイナミクス解明を目標としていたが、本研究で育成に成功したカイラル磁性体 CrNb₃S₆(Cr_{1/3}NbS₂)の単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡を用いた実空間および電子線回折実験を行うことにより、らせん軸に垂直方向への磁場印加によるカイラルスピソリトン格子発生の観測に成功するとともに、ソリトン格子の間隔の磁場依存性が理論計算と完全に一致することを明らかにした。さらに、CsCuCl₃の新規不斉合成手法の開発により cm オーダーの単結晶試料を得ることを可能にし、得られた単結晶試料についてのミュオン測定、偏極中性子回折測定から、右手系 (空間群 P6122)の結晶は右巻のらせん磁気構造、左手系 (空間群 P6522)の結晶は左巻のらせん磁気構造であることを実証した。今後 USM- μ SR 測定を行うことで、当該物質中でのソリトンダイナミクス解明が期待される。

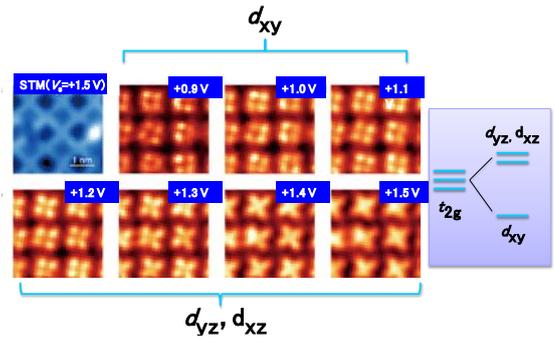


図 2-5 SrTiO₃ (001) ($\sqrt{13} \times \sqrt{13}$)表面の STM 像 (試料バイアス+1.5 V)、および、微分コンダクタンスマッピング (dI/dV, 試料バイアス+0.9~+1.5 V)。

A04 班: ミュオン (g-2) 測定のための超冷ミュオンビーム開発の一つの柱とした常温標的開発では、シリカエアロゲルにレーザー多光子吸収アブレーションによる高精細表面穴加工を行うことにより、真空中のミュオニウム収量を 10 倍に増やす手法を開発し、高温タングステンに匹敵する収量を得ることに成功した (図 2-6)。この研究により、石田勝彦氏、岡田信二氏 (理研)、三部勉氏、大石裕氏 (KEK) は、平成 27 年度高エネルギー加速器科学研究奨励賞を受賞した。

常温標的を利用することにより、取り出したビームの低エミッタンス化、ドップラー幅減少によるレーザーイオン化効率増加、ミュオニウムの空間的広がり減少、熱対策の自由度などの利点も期待できる。表面穴構造の最適化によりさらなる収量増加を目指している。

ミュオニウムイオン化のためのライマン α レーザーシステムに関しては、理研で製作したシステムを J-PARC に移設し、ライマン α レーザー光を U-line の高温タングステン標的から発生するミュオニウムに照射することにより、当初の目標通り超低速ミュオンビーム生成に供用している (図 2-7)。全固体レーザーの採用による高い運転安定性、Kr/Ar への入力波長の 5 倍波の増幅に最適な新規セラミック結晶 Nd:YAG の開発、Kr/Ar ガスでの波長変換相互作用領域を十分長くとることによるライマン α 変換効率の 2 桁向上、など

により世界最高強度のライマン α 光生成に成功した。一方、課題としては、当初目標値の 100 μ J を達成するには最終段の大口径 Nd:YAG 結晶の透明度が、中間アンプと比較すると劣ることから、メーカーと連携を取り結晶作成条件の改良を進めているところである。

常温標的開発の進展を受けて、これを源にした超低速ミュオン発生および超冷ビーム実証のための試験用機器の製作設置を完了し、理研 RAL のミュオンビームを用いた試験を開始し、新機能の一つである 3 軸磁場システムを用いたスピン制御などの作動を確認した。引き続き常温標的からの超低速ミュオン発生の実証試験を既存レーザーを大幅に改良して利用する予定で進めている。

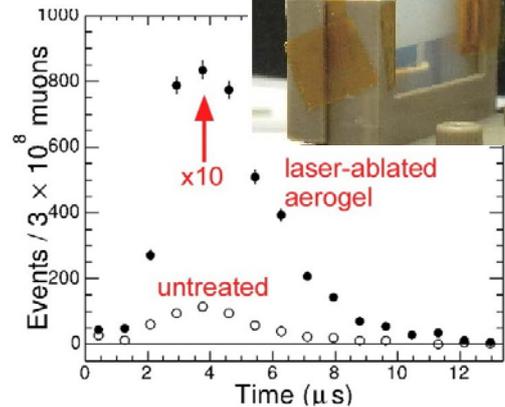
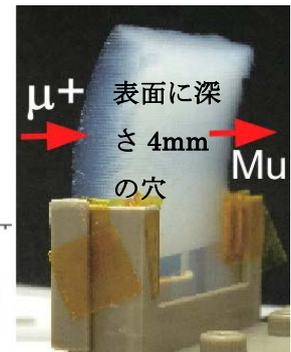


図 2-6 表面穴加工エアロゲル標的の写真と真空中ミュオニウム収量測定

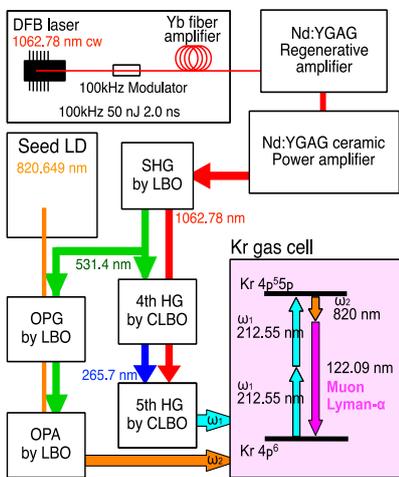


図 2-7 ライマン α レーザー

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

本領域研究に不可欠な実用強度の超低速ミュオン発生は、我が国が世界をリードする2つのパルス技術—大強度パルスミュオンと大強度パルスVUVレーザー技術—に依っている。本研究期間にこれらに関して以下の問題が生じ、開発スケジュールの遅延が生じた。

1. 加速器施設事故による長期ビーム停止への対応策（図3-1参照）

超低速ミュオン顕微鏡(USMM)開発拠点のJ-PARC物質生命科学実験施設(MLF)では、東日本大震災からの復帰が順調に進み、湾曲ソレノイドによる高強度ミュオン発生を目指したUラインでは、平成24年11月に従来の80倍を超える世界最強ミュオンビーム発生に成功した(加速器200kW運転時)。1MW運転に向けた加速器のパワー増強計画が進めば、入射ミュオン強度は平成27年までに目標値の4倍(従来の400倍)となると期待された。しかし、USMM装置が完成して法定施設検査を受ける4日前に、ハドロン施設において放射能漏れの事故が発生し、J-PARCではMLFも含め全施設を停止して徹底的な放射線安全体制の見直しを行うところとなった。この緊急かつ長期停止期間中に湾曲ソレノイドのビーム窓が破損するトラブルが発生し、Uラインへのビーム供給は1年半停止された。長期ビーム停止への対応策として、Liビームによる輸送特性の確認に加えて、追加予算で水素ライマンα光発生用の種光源を導入し、標的周りの水素の共鳴イオン化実験とビーム光学系のテスト実験を着々と進めた。平成26年11月下旬にUラインにビームが復帰したが、翌年頭にDラインにおける電磁石電源火災、4月に下流にある中性子源のトラブルが続き、ビーム再開は平成28年2月20日まで再び持ち越された。この間、水素の共鳴イオン化によるレーザー光の調整やビーム光学系の調整を続け、ビーム再開の翌21日には、待望の超低速ミュオン発生に成功した。目標ビーム強度達成に向けてレーザー強度増強、ビーム光学系とレーザー光路の最適化、4波混合ガス交換システムの改良などを重ね、世界記録更新を続けている。研究期間終了の1か月前までビーム停止という試練を乗り越えて超低速ミュオン発生を確認できたのは、博士研究員を中心とする若手研究者達の地道な準備の積み重ねに負うところが大きい。

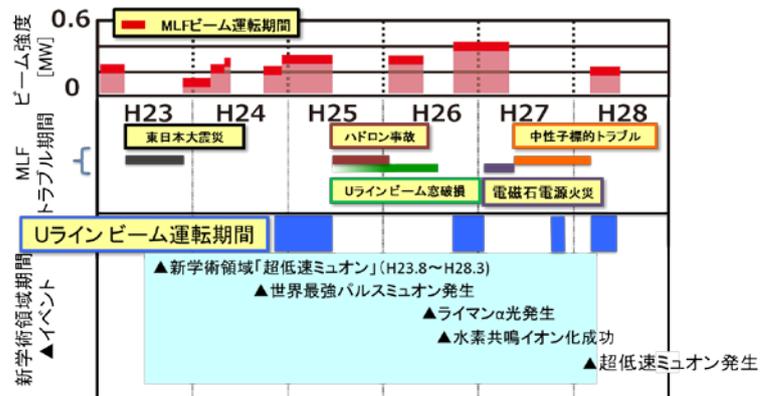


図3-1 ビーム供給状況と超低速ミュオン顕微鏡開発状況

2. レーザー増幅器用高品質Nd:YAG単結晶製造中止に対する対応

1062.55nmにおける直接増幅のための固体レーザー結晶候補として、Nd:YAG、Nd:YSAG、Yb:YAGの3つの単結晶、Nd:YAG、Nd:YSAGのセラミクスを候補に、それぞれのメーカーと増幅器の開発を進めていたところ、中間アンプ用の利得媒質として当初予定していたNd:YAG単結晶は製造会社(米)が技術継承に失敗し、良好な結晶が得られる見込みがないことが判明した。このため、神島化学工業株式会社と共同で単結晶を超える大型セラミクスの開発に挑戦し、平成24年8月に世界初の高品質Nd:YAGセラミクスレーザー媒質(直径4mm)の開発に成功した。このセラミクスは中間アンプに組み込まれ、長期間安定にライマンα光を発生する基幹部品として機能している。さらにメインアンプ用に直径12mmのNd:YAGセラミクスの開発を行い、一定の基準を超えるレーザー媒質がすでに得られているが、直径4mmのセラミクスと比較すると透明度もしくは透過波面精度が劣るため、万全を期してさらなる焼結条件の最適化を進めている。このため、平成28年2月の超低速ミュオン発生は中間アンプからの出力のみで臨んだ。当面の光源の強度不足を補うため、国際レーザー諮問委員会の助言を受け、共鳴励起後のイオン化光源(355nm)としてフラッシュランプNd:YAGパルスレーザーを導入した。将来は当初計画通り全固体レーザー装置からライマンα共鳴励起光とイオン化光の両方を出力して精度の高い時空間オーバーラップを達成する。メインアンプ搭載により、ライマンα光強度は理想的には3桁増が予測される。

3. 超低速ミュオン実験開始の遅延に対する対応策

上記1の理由により研究期間中に超低速ミュオン実験を開始できなかったため、既存のミュオン施設による準備研究を中心に、新しい学術領域への展開を図った。特にこれまでミュオン実験の適用が困難であった触媒化学、生命科学の分野でのテスト実験の成功により、超低速ミュオンへの期待を高めることができた。開発した超低速ミュオン顕微鏡は、課題採択委員会により、本プロジェクトによる占有が平成28年度まで認められているが、領域として、さらに1年間の延長(平成29年度まで)を交渉中である。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

「深さ方向分解能 1nm を実現する我が国オリジナルの測定手法は、物性物理・化学といった物質科学から、電子工学、生命科学、素粒子物理まで、広い学術分野に波及効果をもたらし、国際的にも大きなインパクトを与えると期待される。」

加速器施設の長期ビーム停止の影響を受け、研究期間に超低速ミュオン顕微鏡を用いた実用実験開始には至らなかったが、海外の既存のミュオン源や β -NMRを用いて準備研究を重ね、ミュオンが得意とする磁性、超伝導、電池材料のみならず、光触媒、蛋白質、酵素反応、高分子材料、水素吸着材料等の研究においてもミュオンが高感度に反応することを実証してきた。理論と実験研究の協同により、新しい測定原理の解明にも一定の成果をあげることができた。これらの取組みと成果を、領域会議や、これまでミュオンの応用が知られていなかった触媒化学、生命科学分野の国際会議等において広報した結果、平成26-27年度の公募研究では新分野からの応募が増加した。研究期間の前半はミュオン科学者らの支援を必要としていた研究者らが、新たに参入した公募研究者を支援し、既存のミュオン施設の課題申請に応募し採択されるまでになった。また、A01班、A04班の項で詳述するように、ビーム再加速によるマイクロビーム並びに診断系、室温ミュオニウム標的の開発において著しい進展があり、異常磁気能率の精密測定や、将来の干渉ミュオン顕微鏡開発に向けて国際的な注目を集めている。

「このような革新的な測定計開発は息の長い取り組みが必要であり、この5年間での研究が測定系の基幹技術開発中心になることはやむを得ない感もあるが、開発された測定系を使ってどのような新しい学術を展開してゆくのか、当該領域からの力強い情報発信が求められる。」

領域としての情報発信は、ホームページ、毎年発行のニュースレター、領域会議公開シンポジウム（平成23、25、26年度）、領域主催国際会議（平成24、27年度）を中心に展開した。平成24年度領域主催国際会議（超低速ミュオンの拓く科学国際会議）においては、物質科学、生命科学、電池材料、素粒子科学、ビーム工学、デバイス工学、レーザー科学等、これまで交流のなかった異分野の研究者が一堂に会して分野の壁を超え「超低速ミュオンで何ができるか」白熱した議論が行われた。異分野交流の新しい会議形式は、海外の研究者にも高い関心を持たれた。平成27年度には、スーパーコンピュータ京及び次世代スーパーコンピュータ・プロジェクトとの共催により、薄膜と界面の実験・理論研究の最前線に関する国際会議を開催した。異なる研究手段を専門とする研究者間の活発な議論と交流が行われ、新たな共同研究の芽が生まれた。朝倉清高氏（北大）は、環太平洋国際化学会議 PACIFICHEM2015 において量子ビームが拓く新しい化学研究のシンポジウムを主催し、触媒研究分野に情報発信した。領域代表者、研究分担者らは、PACIFICHEM2015、バイオフォトニクスに関する国際トピカルミーティング（TPB2015）、日本顕微鏡学会その他国内外の会議において招待講演し、超低速ミュオンが拓く科学の新展開と開発の状況を発信した。平成28年7月には国際超微細相互作用会議（HYPERFINE2016）の特別講演や、成果とりまとめのシンポジウムにおいて、超低速ミュオン発生の朗報と今後の展望を世界に発信する予定である。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

総合所見

1. レーザーの高強度安定運転の達成に向けた一層の努力

全固体ライマン α レーザーシステムの性能に関しては、中間アンプとして世界初の高品質Nd:YAGセラミクスレーザー媒質（直径4mm）の開発に成功し、理想に近いガウス型プロファイルを持つ高品質レーザービームが得られ、Kr/Arガスでの十分長い波長変換相互作用領域と合わせて、ライマン α 変換効率を2桁向上し、世界最高強度のライマン α 光生成に成功した。夜間や週末はレーザー監視要員の常駐なしでも連続安定運転が実現している。一方強度に関しては、メインアンプ用レーザー媒質の透明度と均一度を中間アンプのレベルまで改良する焼結条件の最適化が進行中である。

2. モチベーションを高く持ち続け、J-PARCの状況に応じた柔軟な対応を図る努力

施設のトラブルにより最終年度の2月までほとんどミュオンビーム供給が停止する状況は想定外であったが、超低速ミュオンを利用した研究を行うA02、A03班では、海外実験施設での予備実験や、理論と実験研究者の小規模な研究会活動により、モチベーションをさらに高めるよう努めた。例えば、超低速ミュオンの開発を志したアンバダットパント氏（山梨大）は、ビームの長期停止中に海外実験施設で行った生命と水に関するミュオン実験の成果により博士学位を取得し、平成27年度日本中間子科学会学生奨励賞を受賞、現在KEKの博士研究員として超低速ミュオン開発に活躍している。

各計画研究に対する個別の所見

総括班：「残り数年で着実な成果を得るためには、今後、開発の進展に応じて計画を適宜修正しながら最

適な計画を練る柔軟さが要求される。特に超低速ミュオン顕微鏡が本格運用された後は、ビームタイムの割り振りなどに総括班の調整能力が求められる。」

設置施設の課題審査を経て、平成28年度までは本領域によるUラインの占有が認められており、さらに1年間の延長を交渉中である。全ての計画研究、公募研究の研究者がこの2年間で超低速ミュオンの威力と魅力を体験できるよう、総括班のリーダーシップで実験グループの再編成を図っている。そのために、領域会議においては、計画研究者と公募研究者のディスカッションの時間を十分設けた。また、研究期間に超低速ミュオン実験が実現できなかった平成24-25年度公募研究者には、連携研究者として領域内にとどまっていた。中間評価におけるこの指摘は、今後2年間のビームタイムの割り振りに反映させる所存である。平成28年度採択を受けた「成果とりまとめ」で領域シンポジウムや研究会を開催し、ピークとなる研究課題と新分野への展開を図る研究課題のバランスをとり、90名に膨らんだ研究グループ全体としての最大限の成果創出に全力をあげる。

「レーザー開発の結果、当初予定していた強度や性能に満たない場合は、研究領域全体の推進計画を変更し、どの時点でどういう判断をすべきかを考慮した多面的な計画を準備すべきである。」

この指摘を受け、国際レーザー諮問委員会を開催（平成27年3月）した。諮問委員会の助言に従い、メインアンプ完成までのレーザー強度不足を補うとともに、超低速ミュオン生成効率のイオン化レーザー強度依存性を明らかにするために、総括班の主導でA01、A02班の協力により、フラッシュランプ励起の高強度Nd:YAGレーザーを最終年度に購入した。これらの周到な準備により、平成28年2月のミュオン供給再開翌日に超低速ミュオン発生を確認することができた。

「異分野の研究者だけでなく一般国民へのわかりやすいアウトリーチ活動も心掛けてほしい。」

高校生への出前授業、大学生向けキャリア講演での研究紹介、サイエンスカフェにおける市民向け講演、企業向け講演会などの活動を展開した。これらの実績を踏まえ、成果のとりまとめ（平成28年度）において、アウトリーチ活動用の説明資料や演示資料を整備して領域内で共有し、個々の活動を支援する。

A01班：「平成26年度以降のビーム再加速によるマイクロビームかやその診断系位置調整機構の構築などを想定すると、人的資源の最適配分など全体計画の見直しに備える必要があると思われる。」

研究会や領域シンポジウム等を通してビーム加速の専門家への働きかけを積極的に行った結果、ビーム再加速によるマイクロビーム並びに診断系に関して公募研究への応募が集まった。採択された吉田光宏氏（KEK）、林崎規託氏（東工大）、佐藤朗氏（阪大）、関場大一郎氏（筑波大）らと計画班の共同研究でビーム加速の設計開発を著しく進展させ、次期大型計画を見据えたミュオン施設整備計画の柱に成長させた。

A02班：「今後、偏極加速電子銃開発の研究開発などが予定されており、研究項目A01やA04の展開に対応しながら、超低速ミュオンが必須となる研究と不要な研究を切り分け、優先度等を検討する必要がある。」

本班の4つのモデルシステムは、いずれも界面における物質と情報の移動による機能発現の機構解明を目指したものであり、超低速ミュオンが必須となる。超低速ミュオン発生が何よりも最優先されるため、偏極電子発生ならびに実験試料励起用レーザーの予算を国際レーザー諮問委員会が勧めるフラッシュランプ励起の高強度Nd:YAGレーザー購入に充てた。メインアンプ完成によりイオン化レーザーに分配する十分な強度が確保された後は、チタンサファイアレーザーと組み合わせて、300-1000nmの広帯域波長可変レーザーとして、実験試料の励起に活用する。優先順位については、新しい量子ビームによる成果創出のために、それぞれの課題についての予備研究の進展を踏まえて柔軟に決める。

A03班：「 μ SR用超電導磁石や高時間分解能陽電子検出器の制作は、全体計画において妥当かつ必須であるため、ビーム状態にかかわらず進めるべきである。」という指摘を頂いたが、高磁場中のビーム軌道の

制御には超低速ミュオンのビームとしての性質（輝度、分散など）に合わせた設計が必要であることを考慮し、超低速ミュオンビームが利用可能になるまでこれらの制作を延期することとした。研究期間内には超低速ミュオン実験用の薄膜試料作成環境の整備に集中し、レーザー加熱蒸着薄膜製造装置をMLF実験棟から至近にあるKEK東海キャンパス内に整備した。これにより薄膜、超格子試料の研究環境が整った。

A04班：「今後セラミックス材料を導入して、高出力化・高安定化に向けた調整開発の段階に入ると予想されるが、ここが本研究領域の成否を決める正念場と言える。この調整開発では、レーザー診断装置や広域帯お城の整備、チャープパルス形成に必要な短パンチ化、常温ミュオニウム源開発など、多彩でかつ周回な計画が記載されている。各部分の必要性及び妥当性は十分認められるが、いずれもライマン α レーザーの大強度安定運転の成功を前提にしており、場合によっては研究計画を見直すなどの注意が必要であ

る。」という指摘を受けて、全固体ライマン α レーザーシステムと、常温ミュオニウム源開発に人的・物的資源を集中した。Kr/Arガス中4波混合の相互作用長を長くとする集光光学系を採用することにより、ライマン α 光への変換効率が従来（理研RAL）のレーザーシステムの最大値と比べて2桁向上し、絶対強度でも役10倍のパルスエネルギーが長時間にわたって安定に得られることを確認した。超冷ミュオンビーム実証に向けて、シリカエアロゲル表面に微細孔をレーザー加工したミュオニウム生成標的を開発し、真空中に放出されるミュオニウム生成効率を飛躍的に向上させた。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

計画研究A01：

超低速ミュオン発生源、輸送ビームライン、分光器等、超低速ミュオン顕微鏡基幹部の製作・設置を行った。平成 28 年 2 月に超低速ミュオンの発生を確認し、レーザー光の位置・時間調整、ビーム輸送・収束等の最適化を行い、35 個/s の生成を確認した。これは従来の約 2 倍の収量である。時間変化については、全固体レーザーの採用により、長時間にわたり安定した結果が得られている。

超低速ミュオンの再加速をするため、粒子速度によらずに、加速電圧を可変にできるインダクション加速器（図 5-1）の開発を行った。このような低エネルギーミュオン加速の先行研究は世界的にみても皆無である。

A01 公募研究

【佐藤朗】超低速ミュオンのビームプロファイルモニターとして、高発光の無機シンチレータ GAGG(Ce) の開発を行った。J-PARC-MLF において、GAGG(Ce) にミュオンを照射し、発光をカメラで撮影し、画像の性能を評価した。今後は、超低速ビームラインに組み込み、測定をする計画である。

【関場大一郎】ビーム収束性能の向上のため、細く絞ったガラス管内壁の帯電による静電的な散乱を応用し、最終焦点位置でのビーム径を数 mm 以下にする「キャピラリー法」の試験を陽子ビームで行い、運動量の関数として見た場合に経験則としてイオン種に依らないスケールリング則がみられることが示された。

【吉田光宏】超低速ミュオンの再加速に最適な超高速光伝導スイッチによる電界集中型加速器の開発を行った。本研究では GaAs ウェハを使用し、光伝導スイッチの評価を進めた。光伝導スイッチの特性試験としては、1 枚の GaAs ウェハ当たり、4kV の印加に成功した。ミュオン加速の事前試験として、電子加速の試験を行った。

【森道康】銅酸化物高温超伝導体は、元素置換や酸素量の増減によりキャリア密度が制御され超伝導状態になるため、結晶中に空間的な不均一性が存在する。t-J 模型に Gutzwiller 近似を用いて Bogoliubov-de Gennes 方程式を解き、過剰酸素のクラスターによって誘起される電荷密度分布が、結晶の対称性と異なる場合があると分かった。

【圓谷貴夫】カチオンが異なる一連の β' -X[Pd(dmit)₂]₂ に対して第一原理計算を実行し、二量体 [Pd(dmit)₂]₂ が形成する 2 次元三角格子の異方性を反映した電子状態を見出した。1 次元スピン鎖が 2 つのフラストレートした鎖間相互作用で結合されている系として見なせる可能性を提案した。また Pd を挟んだ dmit リガンドで電子密度に偏りがみられることを明らかにした。これは HOMO だけでなく対となる分子の LUMO や他の軌道の混成があることを示している。この混成の度合いと三角格子構造に起因した幾何学的なフラストレーションによって、それぞれ多様な秩序状態の系統性を調べることができた。

計画研究A02：

界面における物質・情報・エネルギーの移動を伴う動的現象を、相互作用のスピン選択性という概念で統一的に理解することを目指している。既存のミュオン施設における予備実験等で以下の成果が得られた。

1. 界面近傍におけるスピン伝導：GaAs 中の負ミュオニウムスピン緩和の伝導電子スピン偏極依存性に関し、負ミュオニウムの荷電揺動に基づく理論的解釈を提案した。このミュオン実験手法を Si など他の半導体へ展開する可能性を示した。

2. 触媒化学反応：酸化物には欠陥構造が多数存在し、その電子物性や触媒物性を決定している。ミュオンにより酸素欠陥を直接観測できる方法を確立し、酸素欠陥の光触媒活性への寄与を解明することを目的として、現在までに単結晶のミュオンスペクトルの温度依存性が、酸素欠陥が多く存在する場合、特異な挙動を示すことを見出した。

3. 電気化学を担うイオン伝導：積層固体電池の超低速ミュオン顕微鏡による観察で、界面層でのイオン拡散やイオン濃度変化を明らかにし、固体電池の性能を支配すると言われる「界面層」に関する新知見を得ることを目的とし、積層固体電池におけるイオン拡散を調べた。正極材料の μ SR 測定結果と電気化学測定結果を比較することにより、電解液中での反応面積と充電深度との関係を世界で初めて明らかにした。 μ SR 法によりイオン伝導度と比較してキャリア濃度を見積もり、イオン伝導を支配する要因を明らかにした。さらに Li 以外にも Na の固体内拡散を検出できることを示した。また全固体 Li 電池の負極材料として有望な

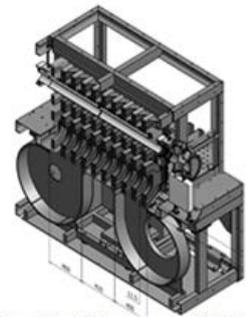


図 5-1 インダクション加速器

Li₄Ti₅O₁₂スピネル薄膜中のLiイオン拡散を、低エネルギーミュオン(PSI)、β-NMR法(TRIUMF)で調べ、バルク試料のμSR測定結果と比較し、全ての結果が良く一致することを確認し、薄膜中のLi拡散を超低速ミュオン顕微鏡で検出できることを証明した。

4. 生命反応を司る電子伝達：生命系の電子伝達において、理論計算により水和水が電子伝達を媒介するという提案がなされている。そこで、シトクロムcについて含水量を制御したμSRスペクトル測定を行い、含水量の増加が電子の3次元拡散を促進すること、ガラス転移温度の上下で電子伝達の振る舞いに差異があることを明らかにした。またヘモグロビン水溶液中のミュオニウムスピン緩和の測定と酸素濃度依存性の測定に成功し、癌細胞中に酸素濃度が減少している低酸素症(Hypoxia)とよばれる現象に対して、ミュオンマイクロビームを用いたμSR実験で非破壊的に微小領域を短時間に酸素濃度を測定する事ができることを見出した。

A02 公募研究

【福谷克之】表面・界面に吸着した水素の反応性の起源解明のために電子状態を解析することを目的として研究を行った。アモルファス氷表面に吸着した水素分子の核スピン転換速度を測定し、転換時間が約300sであることを明らかにするとともに、表面電場誘起核スピン転換モデルを提案した。このモデルを検証すべくμSR実験を行い、水素の電子状態について考察を行った。

【有賀寛子】SnO₂はガスセンサーとして、広く利用されている。Ptの添加効果をミュオンで解明することを目的として、メタンの酸化反応とPtの担持量の関係および構造との関係を調べ、Pt存在形態を明らかにした。

【伊藤孝】代表的な薄膜成長用酸化物基板のμSR測定を行い、薄膜試料の超低速ミュオン測定時にバックグラウンドとなり得る基板からのμSR信号をデータベース化した。この過程で、代表的な強誘電体であるBaTiO₃においてミュオニウム(疑似水素同位体)が浅いドナーとして振る舞うことを明らかにした(2013/07/22 プレスリリース)。さらに、BaをSrやCaで置換した一連のペロブスカイト型チタン酸化物においても浅いミュオニウムを見出し、それらの不対電子が主にチタン由来の軌道に分布していることを明らかにした。

【清谷多美子】酵素反応に伴う電子およびプロトン移動の可視化に関して、酵素反応を伴わない、一般のタンパク質とは異なるμSRスペクトルの観測に成功した。これらの成果は、μSR in Biologyという新分野を切り開く端緒となった。

【竹中康司】逆ペロブスカイトMn₃GaNは、Mn₆N八面体由来の幾何学的フラストレーションを特徴とする反強磁性体である。その磁気構造は、フラストレーションを反映して、Γ^{5g}と呼ばれる120°配置の特徴的なものである。この磁気構造出現に伴い出現する大きな磁気熱量効果を、圧力により取り出すことに成功し、これまで見出されている物質中で最大の磁気熱量効果を実現した。

【斎藤峯雄】これまで、μSRにおける超微細構造における異方性に関しては、あまり理論的な研究がなされていない。GaN中ミュオニウムにおいては、顕著な異方性が検出されていたが、今回初めてその原因を明らかにした(図5-2)。

【梅垣いずみ】超低速ミュオンにより、水素放出中の局所的な水素ダイナミクスを捉え反応の関係性を明らかにするため、高周波マグネトロンスパッタ装置を用いて、水素貯蔵材料の単一薄膜試料を生成した。

【大石一城】超低速ミュオン顕微鏡実験の予備実験として、カイラル磁性体CsCuCl₃の右手系及び左手系単結晶を用いてバルクμSR測定を行った。バルク実験では、左右の単結晶でミュオンスピン回転周波数の温度依存性は完全に一致し、結晶構造同様、磁気構造もカイラルであることを示した。中性子実験より決定された磁気構造との比較から、磁気モーメントはCuサイトに加え、Clサイトにも存在する可能性を示した。

計画研究 A03 :

(1) 電子ドープ系高温超伝導母物質の非ドープ超伝導：キャリアドーピングなしで超伝導を示すT'相La_{1.9}Y_{0.1}CuO₄薄膜試料について、ポール・シェラー研究所の低エネルギーミュオンビームを用いたμSR(深さ分解能~20nm)により、試料の膜内部深さ方向磁場分布を測定した。その結果、膜の深さ方向にマイスナー効果が起きていることを確認し、バルクに超伝導が発現していることを初めて微視的に実証した。さらに、T'-Pr_{1-x}LaCe_xCuO_{4+δ}のバルク単結晶試料についてもx=0.05という低いCe濃度(~キャリア濃度)まで超伝導を発現させることに成功し、その電子状態をバルク物性測定、μSR、光電子分光を用いて調べた結果、x=0.05付近においても金属的なフェルミ面が回復していること、一方でわずかに残存していると思われる不純物(頂点酸素)に由来すると思われる銅スピンの比較的遅い揺らぎが観測されたことなどから、当該物質がモット絶縁体に近い金属として振舞っていることを明らかにした。

(2) 磁場中第2種超伝導体の渦糸の運動の研究：渦糸の運動は、走査トンネル分光顕微鏡法(STM/STS)を用いて10T以上の高磁場において実空間で直接測定することができるが、従来のSTM探針を高速で動かして渦糸運動を観測する手法には限界があり、より速い渦糸運動を測定するための新しい手法を開発した。

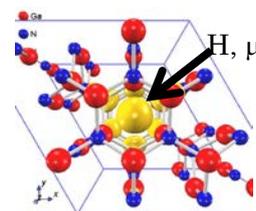


図5-2 GaN(H)のスピ密度の異方性

具体的には、面内方向ドリフトを 0.1nm/日程度に安定化させることで、以前の手法より 3 桁ほど速い渦糸速度でも測定可能とした。

(3) 酸化物表面・界面近傍における電子状態の研究：金属酸化物界面領域で形成される 2 次元電子系によるヘテロ電子相関を明らかにするために、SrTiO₃ 基板表面における原子構造と電子状態を走査トンネル顕微鏡 (STM) で詳細に調べ、SrTiO₃ (001) ($\sqrt{13} \times \sqrt{13}$) 表面の STM 像から表面では酸化チタンの過剰吸着層が存在すること、これと SrTiO₃ 表面での酸化チタン過剰吸着層を用いた第一原理計算により、結晶対称性の破れによりチタン由来の d 軌道の縮退が解け表面電子状態を形成していることを明らかにした。

(4) キラル磁性体における磁気ソリトン格子の研究：キラルらせん磁性体 Cr_{1/3}NbS₂ 単結晶を用いて、ローレンツ顕微鏡法による実空間観察および電子線小角回折法による逆空間解析により、ゼロ磁場下でのキラルらせん磁気構造および磁場下でのキラル磁気ソリトン格子の存在の実証に成功した。この磁気構造は 20 μm に及ぶ範囲において欠陥構造を含まない完全な直線状コントラストとして観察され、きわめて安定な磁気構造であることが示された。これはマクロな磁気位相格子と呼べる磁気秩序状態であり、"new state of matter" といえることができる。特に、らせん軸に垂直に印加した磁場をゼロ磁場から臨界磁場である約 2000Oe まで変化させることで、キラル磁気ソリトン格子の格子間隔をゼロ磁場でのらせん周期 48 nm から強制強磁性状態での試料全長におよぶ長さに至るまで、連続的に制御できることを明らかにした。この成果は、スピントロニクス分野にキラル磁性結晶という新しい舞台を提供し、次世代情報ストレージ技術への応用も期待されるもので、米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で重要なトピックスとして紹介された (図 5-3)。

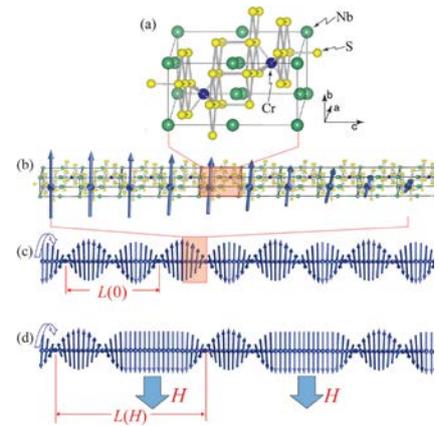


図 5-3 (a)CrNb₃S₆ の構造、(b)および(c)ゼロ磁場での磁気構造の概念図、(d)横磁場印可下でのキラルスピソリトン格子磁気構造の概念図。

A03 公募研究

【岸根順一郎】超低速ミュオンをプローブとするカイラル磁性結晶のダイナミクス探索

カイラルらせん磁気秩序構造に磁場を印加すると、磁場によってらせんの捻じれが周期的にほどけたカイラルソリトン格子 (CSL) 構造が安定化する。該当年度の主要な成果として、CSL のコヒーレント集団運動の機構を明らかにし、スピン起電力の巨大化現象を提案した。

【壬生攻】ミュオンと核プローブの相補利用による磁性積層膜の深さプロファイル探査

メスbauer分光法と超低速ミュオンの相補利用研究に向けて、ホイスラー合金系積層膜および酸化鉄系積層膜に重点を置き、高品質化および最適化、界面磁性や磁氣的性質の深さプロファイルの測定を推進した。また放射光メスbauer分光法を用いた非平衡電子スピン分極を検出する試験を行った。

【高阪勇輔】結晶と磁性のカイラリティ結合の実空間マッピング

(1) カイラル磁性体 Cr_{1/3}NbS₂ の単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡により磁場下で CSL の観測に成功した。(2) その他、カイラル磁性体の新規不斉合成手法の開発を行い、CSL の研究を行った。

【松浦弘泰】反転中心をもたない結晶構造の物質で、反対称スピン軌道相互作用への磁気臨界ゆらぎの影響を、ファイマンダイアグラムを用いた方法により調べた結果、反強磁性量子磁気臨界点近傍では、フェルミ面が顕著に変形を受けるとともに、ラシュバ効果により分裂した二つのバンドの質量のくりこみ効果が逆になることを示した。この結果は、ドハース・ファンアルフェン効果により観測可能であることを提唱した。

【一杉太郎】極低温走査トンネル顕微鏡を用いて La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃(LCMO) 薄膜表面の観測を行い、MnO₂ 終端面が $p4gm$ の対称性をもつ ($\sqrt{2} \times \sqrt{2}$) 構造を有し、擬一次元的なジグザグドメイン構造を有することを明らかにした。また、この表面上で得られたトンネルスペクトルは Fermi 準位付近でエネルギーギャップ (~0.4 eV) を示し、最表面はバルクの強磁性金属相とは異なって絶縁化していることも判明した。

計画研究 A04 :

A04 班では大強度超冷ビーム実現を目指して、ミュオニウム発生のための常温標的、ミュオニウムイオン化のための大強度ライマン α レーザーの開発を行った。ライマン α レーザーのためには、Kr ガス中での 2 光子共鳴 4 波混合法に必要な 212.556 nm 光を 5 倍波で生成する 1062.78 nm 波長の出力に適した結晶として Nd:YAG を開発した。ここで得られた 212.556 nm 光を、別途用意した 820 nm 光と Kr ガス中で混合することにより、高い効率でライマン α 光を発生させ、ミュオニウムのイオン化に供し、超低速ミュオンビームを得た (A01 班報告参照)。

シリカエアロゲルから真空中に放出されるミュオニウムを増やすため、表面に穴加工を行って表面積を増やし、平成 25 年に TRIUMF 研究所で再測定を行なったところ、加工を行わない場合と比べて 10 倍のミュオニウム収量の増加が観測され、低速ミュオンビーム用の常温ミュオニウム源として非常に有望であることがわかった。また J-PARC のビームを用いた平成 26 年の測定でも同様の効果を確認した。

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

（論文、書籍の場合）

● A01 班：[計画研究]（計 33 件）

- [1] ▲"Tuning of Ultra-Slow Muon Transport System", *T. Adachi, Y. Ikedo, K. Nishiyama, A. Yabuuchi, T. Nagatomo, P. Strasser, T. U. Ito, W. Higemoto, K. M. Kojima, S. Makimura, J. Nakamura, K. Shimomura, N. Kawamura, Y. Kobayashi, R. Kadono, Y. Miyake, and E. Torikai, JPS Conference Proceedings 査読有 8 (2015) 036017(1-4).
- [2] ▲"Online Monitoring of Negative Muon Beam Profiles at J-PARC MUSE using a Gated Image Intensifier", *T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ninomiya, M. K. Kubo, N. Kawamura, and K. Shimomura, JPS Conference Proceedings 査読有 8, 036014-1~036014-5 (2015).
- [3] ▲"Optimal crossed overlap of coherent vacuum ultraviolet radiation and thermal muonium emission for μ SR with the Ultra Slow Muon",* J. Nakamura, Y. Oishi, N. Saito, K. Miyazaki, K. Okamura, W. Higemoto, Y. Ikedo, K. M. Kojima, P. Strasser, T. Nagatomo, S. Makimura, Y. Miyake, N. Kawamura, K. Yokoyama, D. Tomono, K. Shimomura, S. Wada, A. Koda, Y. Kobayashi, H. Fujimori, R. Kadono, and K. Nishiyama, Journal of Physics: Conference Series 査読有 551, 012066 (2014).
- [4] "Current status of the J-PARC muon facility, MUSE", *Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, Y. Ikedo, S. Makimura, Y. Kobayashi, J. Nakamura, K. Kojima, T. Adachi, R. Kadono, S. Takeshita, K. Nishiyama, W. Higemoto, T. Ito, K. Nagamine, H. Ohata, Y. Makida, M. Yoshida, T. Okamura, R. Okada and T. Ogitsu, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有 551 012061(1-7), (2014)
- [5] ▲"Design and construction of the ultra-slow muon beamline at J-PARC/MUSE", *P. Strasser, Y. Ikedo, S. Makimura, J. Nakamura, K. Nishiyama, K. Shimomura, H. Fujimori, T. Adachi, A. Koda, N. Kawamura, Y. Kobayashi, W. Higemoto, T. U. Ito, T. Nagatomo, E. Torikai, R. Kadono and Y. Miyake, J. Phys.: Conf. Ser. 査読有 551 012065(1-7), (2014)
- [6] ▲"Construction of Ultra Slow Muon Beam Line at J-PARC", *T. Nagatomo, Y. Ikedo, P. Strasser, S. Makimura, J. Nakamura, K. Nishiyama, K. Shimomura, N. Kawamura, A. Koda, H. Fujimori, Y. Kobayashi, T. U. Ito, W. Higemoto, A. D. Pant, R. Kadono, E. Torikai and Y. Miyake, JPS Conference Proceedings 査読有 2 010102 (2014).
- [7] "U-line at MLF/J-PARC for Ultra Slow Muon Microscopy", *Y. Ikedo, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, N. Kawamura, K. Nishiyama, S. Makimura, H. Fujimori, A. Koda, J. Nakamura, T. Nagatomo, Y. Kobayashi, T. Adachi, A. D. Pant, T. Ogitsu, T. Nakamoto, K. I. Sasaki, H. Ohhata, R. Okada, A. Yamamoto, Y. Makida, M. Yoshida, T. Okamura, R. Ohkubo, W. Higemoto, T. U. Ito, K. Nakahara, K. Ishida, JPS Conference Proceedings 査読有 2 010103 (2014).
- [8] ▲"Multipole and superconducting state in $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ probed by muon spin relaxation", *W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, and T. Takabatake, Physical Review 査読有 B 85, 235152 (2012).

[公募研究]（計 30 件）

- [1] ▲"What determines the sign of the spin Hall effects in Cu alloys doped with 5d elements? ", *Z. Xu, B. Gu, M. Mori, T. Ziman, and S. Maekawa, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 査読有 400 184–187 (2016).
- [2] ▲"First-Principles Study of Hydrogen-Bonded Molecular Conductor κ -H₃(Cat-EDT-TTF/ST)₂", *T. Tsumuraya, H. Seo, R. Kato, and T. Miyazaki, Physical Review B 92, 035102/1-9 (2015).
- [3] ▲"Enhanced Charge Excitations in Electron-Doped Cuprates by Resonant Inelastic X-Ray Scattering", *T. Tohyama, K. Tsutsui, M. Mori, S. Sota, and S. Yunoki, Physical Review 査読有 B 92, 014515/1-8 (2015).
- [4] ▲"Spin-Spin Correlation Enhanced by Impurities in a Frustrated Two-leg Spin Ladder", *T. Sugimoto, M. Mori, T. Tohyama, and S. Maekawa, JPS Conference Proceedings 査読有 3, 014016/1-5 (2014).
- [5] ▲"Electronic States of Single-Component Molecular Conductors [M(tmdt)₂]", *H. Seo, S. Ishibashi, Y. Otsuka, H. Fukuyama and K. Terakura: Journal of the Physical Society of Japan 査読有 82(5) (2013) 054711 (11 pages).

● A02 班 : [計画研究] (計 84 件)

- [1] Protonation State and Hydration of Bisphosphonate Bound to Farnesyl Pyrophosphate Synthase", *T. Yokoyama, M. Mizuguchi, A. Ostermann, K. Kusaka, N. Niimura, T. E. Schrader, I. Tanaka, J. Med. Chem., 査読有 58, 7549-7556 (2015).
- [2] " Electronic structure of Mu-complex donor state in rutile TiO₂ ", K. Shimomura, R. Kadono, A. Koda, K. Nishiyama, and M. Mihara, Phys. Rev. B 査読有 92, 075203(1-6) (2015).
- [3] ◎▲"Hydration effect on electron transfer in cytochrome c monitored by μ SR", A. D. Pant, *Y. Sugawara, I. Yanagihara, G. P. Khanal, I. Shiraki, W. Higemoto, K. Shimomura, K. Ishida, F. L. Pratt, E. Torikai, and K. Nagamine, JPS Conference Proceedings 査読有 8, 033007-1-5 (2015).
- [4] ▲"Variation of magnetic ground state of Sr_{1-x}Ca_xCo₂P₂ determined with μ +SR", *J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, M. Harada, Y. Higuchi, K. Miwa, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, M. Imai, C. Michioka, K. Yoshimura, and M. Månsson, Physical Review B 査読有 91, 144423-1-5 (2015).
- [5] ▲"Past, Present and Future of Ultra-Slow Muons", *K. Nagamine, JPS Conference Proceedings 査読有 2, 010001-1-8 (2014).
- [6] "Origin of symmetric STM images for the asymmetric atomic configuration on GaAs(001)-c(4x4)α surfaces", *S. Kaku, J. Nakamura, K. Yagyu, and J. Yoshino, Surface Science 査読有 625, 84-89 (2014).
- [7] ◎▲"Hydration Effects on Electron Transfer in Biological Systems Studied by μ SR", *Y. Sugawara, A. D. Pant, W. Higemoto, K. Shimomura, E. Torikai and K. Nagamine, JPS Conference Proceedings 査読有 2, 010310-1-5 (2014).
- [8] ◎▲"Variation of local magnetic environments in olivine-type compounds: Na_{0.7}FePO₄ and FePO₄", *J. Sugiyama, H. Nozaki, M. Harada, Y. Higuchi, J. H. Brewer, E. J. Ansaldo, G. Kobayashi, and R. Kanno, Physical Review B 査読有 90, 014426-1-10 (2014).
- [9] ▲"Internal magnetic field in the zigzag-chain family (Na,Ca)Cr₂O₄", *H. Nozaki, I. Umegaki, M. Harada, Y. Higuchi, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, M. Månsson, H. Sakurai, and J. Sugiyama, Journal of Physics: Conference Series 査読有 551, 012013-1-6 (2014).
- [10] ◎▲" Muonium response to oxygen content in biological aqueous solutions for cancer research " A. D. Pant, K. Nagamine, I. Shiraki, E. Torikai, K. Shimomura, F. L. Pratt, H. Ariga, K. Ishida, and J. S. Schultz, J. Phys.: Conf. Ser. 551 (2014) 012043(1-6).
- [11] ◎▲"Diffusive behavior of Li ions in garnet Li_{5+x}La₃Zr_xNb_{2-x}O₁₂ studied by muon-spin relaxation and QENS", *H. Nozaki, M. Harada, S. Ohta, T. Asaoka, I. Watanabe, V. Pomjakshin, Y. Ikedo, Y. Miyake, N. H. Jaralvo, E. Mamonov, and J. Sugiyama, Solid State Ionics 査読有 262, 585-588 (2014).
- [12] "Detection of Conduction Electron Spin Polarization in n-GaAs by Negative Muonium", K. Yokoyama, K. Nagamine, K. Shimomura, H.W.K. Tom, R. Kawakami, P. Bakule, Y. Matsuda, K. Ishida, K. Ohishi, F.L. Pratt, I. Shiraki, *E. Torikai, Physics Procedia 査読有 30, 231-234 (2012).
- [13] "Interfacial properties of polystyrene thin films as revealed by neutron reflectivity", R. Inoue, K. Kawashima, K. Matsui, M. Nakamura, K. Nishida, *T. Kanaya, and N. L. Yamada, Physical Review E 査読有 84, 031802-1-7 (2011).

[公募研究] (計 55 件)

- [1] ▲"Spin-split bands of metallic hydrogenated ZnO (10-10) surface: First-principles study", M. A. Absor, F. Ishii, H. Kotaka, *M. Saito, AIP Advances 査読有 6, 025309-1-8 (2016).
- [2] ▲"Relation between crystallographic and magnetic chiralities in chiral helimagnet CsCuCl₃", *K. Ohishi, Y. Kousaka, E. Proskurina, T. Ogura, J. Akimitsu, and K. Inoue, JPS Conference Proceedings 査読有 8, 034006-1-5 (2015).
- [3] ▲"Towards direct observation of electron and proton transfers due to enzymatic reaction in trypsin by μ SR", M. Kobayashi, *I. Tanaka, T. Kiyotani, and N. Niimura, JPS Conference Proceedings 査読有 8, 033006-1-4 (2015).
- [4] ▲"Matrix-filler interfaces and physical properties of metal matrix composites with negative thermal expansion manganese nitride", *K. Takenaka, K. Kuzuoka, and N. Sugimoto, Journal of Applied Physics 査読有 118, 084902-1-7 (2015).
- [5] ▲"Desorption temperature control of palladium-dissolved hydrogen through surface structural manipulation", *S. Ohno, M. Wilde, and K. Fukutani, Journal of Physical Chemistry C 査読有 119, 11732-11738 (2015).
- [6] "Detection of oxygen vacancy in rutile TiO₂ single crystal by μ SR measurement", H. Ariga, K. Shimomura, K. Ishida, F. Pratt, K. Yoshizawa, W. Higemoto, E. Torikai, and *K. Asakura, JPS Conference Proceedings 査読有 2, 010307-1-4 (2014).
- [7] ▲"Two charged states of hydrogen on the SrTiO₃(001) surface", *K. Takeyasu, K. Fukada, S. Ogura, M. Matsumoto, and K. Fukutani, Journal of Chemical Physics 査読有 140, 084703 (2014).
- [8] ▲"Crystal Growth of Chiral Magnetic Material in CsCuCl₃", *Y. Kousaka, T. Koyama, M. Miyagawa, K. Tanaka, J. Akimitsu, and K. Inoue, J. Phys.: Conference Series 査読有 502, 012019-1(2014).
- [9] ©"In-situ μ SR experiment during hydrogen desorption reaction in MgH₂", I. Umegaki, H. Nozaki, M. Harada, Y. Higuchi, T. Noritake, M. Matsumoto, S. Towata, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, A. Koda, Y. Miyake, and *J. Sugiyama, Journal of Physics: Conference Series 査読有 551, 012036-1-6 (2014).
- [10] ▲"Shallow donor level associated with hydrogen impurities in undoped BaTiO₃", *T. U. Ito, W. Higemoto, T. D. Matsuda, A. Koda and K. Shimomura, Appl. Phys. Lett. 査読有 103 (2013) 042905-1-4.

● A03 班 : [計画研究] (計 38 件)

- [1] "Suppression of the antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped high-temperature superconductor by protect annealing", *M. Horio, T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, K. Okazaki, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzaki, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. Ootsuki, K. Sawada, M. Takahashi, T. Mizokawa, Y. Koike and A. Fujimori, Nature Communications 査読有 7, 10567/1-8 (2016).
- [2] ©"Synthesis, Crystal Structure, and Magnetic Properties of a Chiral Cyanide-Bridged Bimetallic Framework K₃[Mn^{II}(L-asp)]₆[Cr^{III}(CN)₆]·2H₂O", Li Li, Sadafumi Nishihara, *Katsuya Inoue, *Mohamedally Kurmoo, Inorganic Chemistry, Inorganic Chemistry 査読有 55, 300-306 (2016).
- [3] ▲"Bulk superconductivity in undoped T^c-La_{1.9}Y_{0.1}CuO₄ probed by muon spin rotation", K. M. Kojima, Y. Krockenberger, I. Yamauchi, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, *R. Kadono, R. Kumai, H. Yamamoto, Physical Review B 査読有 89, 180508/1-5 (2014).
- [4] ▲"High-Resolution Scanning Tunneling Spectroscopy of Vortex Cores in Inhomogeneous Electronic States of Bi₂Sr₂CaCu₂O_x", S. Yoshizawa, T. Koseki, K. Matsuba, T. Mochiku, K. Hirata and *N. Nishida, Journal of the Physical Society of Japan 査読有 82, 083706/1-5 (2013).
- [5] ©"Multiple spectra of electron spin resonance in chiral molecule-based magnets networked by a single chiral ligand", *M. Mito, T. Nagano, K. Tsuruta, H. Deguchi, S. Takagi, J. Kishine, Y. Yoshida and K. Inoue, Journal of Applied Physics 査読有 114, 133901/1-5 (2013).
- [6] ©"The effect of doping a molecular spin ladder with non-magnetic impurities", *S. Nishihara, X. Zhang, K. Kunishio, K. Inoue, X.M. Ren, T. Akutagawa, J. Kishine, M. Fujisawa, A. Asakura, S. Okubo, H. Ohta, *T. Nakamura, Dalton Transactions 査読有 42, 15263-15266 (2013).
- [7] "Effect of oxygen deficiency on SrTiO₃(001) surface reconstructions", R. Shimizu, K. Iwaya, T. Ohsawa, S. Shiraki, T. Hasegawa, T. Hashizume, and *T. Hitosugi, Applied Physics Letters 査読有 100, 263106/1-4 (2012).

- [8] “Distinct Fe-induced magnetic states in the underdoped and overdoped regimes of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_4$ revealed by muon spin relaxation”, K. M. Suzuki, *T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Y. Koike, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki, and I. Watanabe, Physical Review B 査読有 86, 014522-1-9 (2012).
- [9] “Velocity-induced reorientation of fast driven Abrikosov lattice”, *S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Physical Review B 査読有 85, 064508/1-5 (2012).
- [10] “Unconventional Magnetic Domain Structure in the Ferromagnetic Phase of MnP Single Crystals”, T. Koyama, S. Yano, *Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Mori, K. Inoue, J. Kishine, and J. Akimitsu, Journal of the Physical Society of Japan 査読有 81, 043701/1-4 (2012).

[公募研究] (計 35 件)

- [1] ▲”Cu-NMR study on the quasi one dimensional antiferromagnet $\text{Cu}_3\text{Mo}_2\text{O}_9$ ”, *T. Kawase, T. Goto, H. Kuroe, T. Sekine, T. Sasaki, M. Hase, K. Oka, T. Ito, H. Eisaki, Physics Procedia 査読有 75, 641-646 (2015).
- [2] ▲” ^{19}F -NMR study on the Equilateral Triangular Spin Tube CsCrF_4 ”, *Kazuki Matsui, Takayuki Goto, Hirotaka Manaka, and Yoko Miura, Physics Procedia 査読有 75, 726-730 (2015).
- [3] ▲”NMR study on the Ru-dimer system with valence fluctuation”, *Yosuke Hosoya, Takayuki Goto, Akira Endo, Takeshi Hashimoto, Takashi Hayashita, Satoshi Iguchi, Takahiko Sasaki, Physics Procedia 査読有 75, 613-617 (2015).
- [4] ▲”Low-energy μSR study on the tetradymite topological insulator $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{TeSe}_2$ ”, *Takayuki Goto, Kazuki Matsui, Tadashi Adachi, Tomi Ohtsuki, Ngoc Han Tu, Yoichi Tanabe, Katsumi Tanigaki, Isao Watanabe, Zaher Salman, Andreas Suter and Thomas Prokscha, Physics Procedia 査読有 75, 100-105 (2015).
- [5] ▲”Li-ion diffusion in $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and LiTi_2O_4 battery materials detected by muon-spin spectroscopy”, *Jun Sugiyama, Hiroshi Nozaki, Izumi Umegaki, Kazuhiko Mukai, Kazutoshi Miwa, Susumu Shiraki, Taro Hitosugi, Andreas Suter, Thomas Prokscha, Zaher Salman, James S. Lord, and Martin Mansson, Physical Review B 査読有 92, 014417/1-9 (2015).
- [6] ▲”Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction”, Y. Fujimoto, K. Miyake and H. Matsuura, Journal of the Physical Society of Japan 査読有 84, 043702/1-5 (2015), Editor's choice.
- [7] ▲” μSR study on quantum spin system NH_4CuCl_3 ”, *K Matsui, T Suzuki, A Oosawa, M Fujisawa, K Yoshizawa, H Tanaka, T Goto, P K Biswas, A Amato, I Watanabe, Journal of Physics: Conference Series 査読有 551, 012007/1-5 (2014).
- [8] ▲”Topological magnetization jumps in a confined chiral soliton lattice”, *J. Kishine, I. G. Bostrem, A. S. Ovchinnikov, and V. E. Sinitsyn, Physical Review B 査読有 89, 014419/1-6 (2014)..

● A04 班 : [計画研究] (計 32 件)

- [1] ◎▲High-Efficiency Generation of Pulsed Lyman- α Radiation by Resonant Laser Wave Mixing in Low Pressure Kr-Ar Mixture”, *N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, J. Nakamura, O. A. Louchev, M. Iwasaki, S. Wada, Optics Express 査読有 24, 7566-7573 (2016).
- [2] ◎”Ionization efficiencies of Doppler-broadened atoms by transform-limited and broadband nanosecond pulses: one-photon resonant two-photon ionization of muoniums”, *Rakesh Mohan Das, Souvik Chatterjee, Masahiko Iwasaki, and Takashi Nakajima, J. Opt. Soc. Am. B 査読有 32, 1237-1244 (2015).
- [3] ”Development of Muon LINAC for the Muon $g-2$ /EDM Experiment at J-PARC”, *Masashi Otani, Yoshinori Fukao, Yoshihisa Iwashita, Ryo Kitamura, Yasuhiro Kondo, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Mitsuhiro Yoshida, Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC2015) 査読有 JACoW WEPWA023/1-4 (2015-06).
- [4] “Detuning-induced stimulated Raman adiabatic passage in atoms with hyperfine structure”, *Li Deng and Takashi Nakajima, Physical Review A 査読有 89, 023406/1-8 (2014).
- [5] “H Line: A Beamline for Fundamental Physics in J-PARC”, *Naritoshi Kawamura, Akihisa Toyoda, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Masaharu Aoki, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, JPS Conference Proceedings 査読無 2, 10112-1-6 (2014).
- [6] ◎▲”Tunable 820.65nm Light Source by Injection-Seeded Optical Parametric Oscillator and Amplifier for Muonium Lyman-Alpha Generation”, *Koji Miyazaki, Norihito Saito, Kotaro

Okamura, Yu. Oishi, Oleg A. Louchev, Masahiko Iwasaki, Satoshi Wada, JPS Conference Proceedings 査読有 2, 10107-1-4 (2014).

- [7] ◎“All-Solid-State Laser Amplifiers for Intense Lyman- α Generation”, *Yu. Oishi, Kotaro Okamura, Koji Miyazaki, Norihito Saito, Masahiko Iwasaki, Satoshi Wada, JPS Conference Proceedings 査読無 2, 10105-1-5(2014).
- [8] “Development of High-Rate Positron Tracker for the Muonium Production Experiment at J-PARC”, *S. Kanda, H. Fujimori, Y. Fukao, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, N. Kawamura, K. M. Kojima, M. Lee, S. Makimura, T. Mibe, Y. Miyake, J. Nakamura, Y. Nagashima, T. Nagatomo, K. Nagumo, S. Nishimura, S. Okada, N. Saito, K. Shimomura, T. Suzuki, P. Strasser, K. Ueno, E. Won, JPS Conference Proceedings 査読無 2, 10404-1-7(2014)
- [9] ◎▲”Enhancement of muonium emission rate from silica aerogel with a laser-ablated surface”, G. A. Beer, Y. Fujiwara, S. Hirota, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, R. Kitamura, S. Lee, W. Lee, G. M. Marshall, *T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Ohnishi, Y. Oishi, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won, and K. Yokoyama, Progress of Theoretical and Experimental Physics 査読有 (2014) 091C01/1-7.
- [10] ▲“Measurement of muonium emission from silica aerogel”, P. Bakule, G.A. Beer, D. Contreras, M. Esashi, Y. Fujiwara, Y. Fukao, S. Hirota, H. Inuma, K. Ishida, M. Iwasaki, T. Kakurai, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, G.M. Marshall, H. Masuda, Y. Matsuda, *T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Onishi, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, K. Yokoyama, S. Yoshida, Prog. Theor. Exp. Phys. 査読有 2013 103C01/1-10 (2013).

(ホームページ)

超低速ミュオン顕微鏡 <https://slowmuon.jp/>

A01 班 超低速ミュオン Ultra Slow Muon 領域番号 2307 <http://slowmuon.kek.jp/index.html>

計画研究 A03 班 表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関 <http://msl.kek.jp/a03/>

岩崎先端中間子科学研究室 超低速ミュオンビーム <http://meson.riken.jp/ral/slow-mu.html>

MSL ミュオン科学研究系 http://www2.kek.jp/imss/msl/MSL_index.html

(主催シンポジウム)

- [1] International USMM&CMSI Workshop, 場所 東京大学 本郷キャンパス, 参加人数 163 名(2016 年 1 月 5 日~9 日)
その他各班会議 14 回
- [2] 第 3 回領域会議, 場所 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 WPI-AIMR 本館会議室階, 参加人数 90 名(2014 年 9 月 23 日~25 日)
- [3] 国際シンポジウム International symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013)
場所 松江コンベンションビューロー 参加人数 130 名(2013 年 8 月 9 日~12 日)
- [4] 第 2 回領域会議, 場所 北海道大学理学部 5 号館 5-203 号室, 参加人数 116 名(2012 年 8 月 30 日~9 月 1 日)
- [5] 第 1 回領域会議, 場所 ホテル春日井(山梨県笛吹市), 参加人数 55 名(2012 年 1 月 7 日~ 9 日)

(アウトリーチ活動)

- [1] 石田勝彦, 三部勉, 西川賞受賞「極冷ミュオンビーム実現のためのミュオニウム標的開発」科学新聞 (2016 年 2 月 26 日)
- [2] 科学新聞 4 面 (2013 年 8 月 26 日付)
- [3] 原子力産業新聞朝刊 4 面 (2013 年 8 月 1 日付)
- [4] 日刊電気通信 注目記事 (2013 年 7 月 24 日号)
- [5] 鳥養映子, 出前授業「超低速ミュオンが拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」場所: 山梨県立甲府昭和高校 参加人数 45 名 (2012 年 8 月 1 日)
- [6] 永嶺謙忠 超低速ミュオン顕微鏡サイエンスカフェ “素粒子ミュオンは観る、そして創る”, 場所: 神戸メリケンパークオリエンタルホテル 参加人 50 名 (2012 年 3 月 23 日),
- [7] 三宅康博, 第 20 回技術部会「先端加速器とミュオン科学-素粒子ミュオンが拓く多彩な応用-」場所 アルカディア市ヶ谷 (2011 年 7 月 19 日) 等計 41 件

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域は、計画研究間の有機的な連携を図り研究を推進するとともに、領域全体を代表して窓口の役割を果たす総括班(X00)、および、以下の4班から構成される。

- A01 超低速ミュオン顕微鏡と極微 μ SR法創成
- A02 界面のスピン伝導と反応
- A03 表面-バルク境界領域のヘテロ電子相関
- A04 物質の究極を極める超冷却と尖鋭化

また、本学術領域を充実させるとともに、より広い分野への積極的な展開を図ることを目的として、この新しい量子計測法を利用して、それぞれの分野を飛躍的に発展させる創造的な実験課題と、新しい計測方法や実験結果を解釈するための理論課題を公募研究として募集し、平成24-25年度公募研究者としてA01、A02、A03班において3名ずつ、平成26-27年度公募研究者としてA01班6名、A02班8名、A03班4名の公募研究者が加わった。平成24-25年度公募研究者は、研究期間終了後は連携研究者として活動している。研究組織を図7-1に示す。総計94名（A01:28名、A02:30名、A03:24名、A04:12名）、評価委員5名である。



図7-1 研究組織全体図

領域全体の共通装置となるミュオン顕微鏡を完成させるために、領域全体が一丸となって、超低速化装置、従来の100倍の強度を持つライマン α レーザー装置開発を最優先に進めた。最終年度は設備備品購入を予定していなかったが、国際レーザー諮問委員会の助言を受けて、総括班の主導により共同でフラッシュランプ励起の高強度Nd:YAGレーザーを導入し、超低速ミュオンの早期発生成功をもたらした。これにより、強度と性能の極限を迫る全固体ライマン α レーザーシステムを徐々に増強するゆとりが生まれた。

研究組織間の具体的な連携状況を以下に記載する。

超低速ミュオンビーム生成(A01、A04)

A04班によって開発されたレーザー装置をA01班が構築したビームラインに設置し、超低速ミュオンを生成するため、J-PARCにおいて、毎週（ビームタイム中は隔週）の定期的な担当者会議を開催し、班を越えたチームとして共同実験に取り組んだ。A04班によって準備されたクリプトンガスセル中では、二光子共鳴四波混合法によってライマン α 光が生成され、A01班のレーザー輸送系によってミュオニウム生成チェンバにまで輸送される。高温のタングステン標的から放出される熱ミュオニウムをこのライマン α 光で励起し、

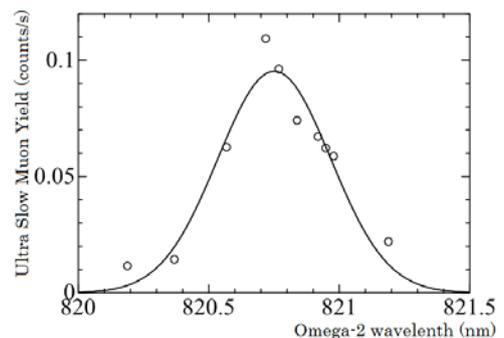


図7-2 超低速ミュオン生成率のライマン α 光波長依存性

355 nm 光によりイオン化することで、超低速ミュオンが生成する。効率よく超低速ミュオンを生成するためには、レーザー光とミュオンビームパルスの時間的同期、及び空間的なオーバーラップが重要である。加速器のタイミング信号に対するレーザー光のトリガー信号の調整方法やレーザー光の最適なビームプロファイル等を共同で検討し、実験を行った。ライマン α レーザー光の波長・強度、強度依存性等のレーザーの諸パラメータを変化させて超低速ミュオンを生成する実験では、A04 班がレーザーパラメータを変化させ、A01 班がそのときの超低速ミュオン数を測定する、というように一緒に実験を行った。これらの相互交流を経て、平成 27 年度には A04 班の博士研究員大石裕氏が KEK の特別准教授に着任し、両グループの連携がさらに緊密になった。両班の協力により、図 7-2 に示すように、超低速ミュオンの発生が確認され、強度の世界記録を更新した。

分光器の構築(A01、A02、A03)

A01 班による分光器開発は、超低速 μ SR 測定を実際に実施する A02、A03 班の意見を取り入れて製作された。超低速 μ SR 分光器、常伝導電磁石電源、試料を冷却するクライオスタット、A03 班が製作した試料の分析・準備等を行い、測定位置にセットするロードロックチャンバやデータ取得システム用の 19 インチラックは、A01 班が設計・製作を行った高電圧ステージ上に効率よくかつ使いやすく設置するためのレイアウトを共同で考え、設置を行った。

計画研究と公募研究の調和

領域会議及び各班の班会議や研究会において、計画研究と公募研究のグルーピングのための意見交換の場を設けた。さらに A01 班では、ミュオンマイクロビーム開発のための再加速技術開発を、計画班と 4 人の公募研究者の密接な共同研究によって進めてきた。そのために毎週定例 TV 会議を開催している。A02 班では、ミュオン実験を行う公募研究者に対して計画研究者らが必ず支援を行うとともに、触媒化学、生命科学、スピントロニクスなどの小グループの研究会を頻繁に行い、実験研究と理論研究、計画研究と公募研究の緊密な関係を築いた。A03 班では毎年の班会議において計画研究と公募研究の連携を深め、共同実験を開始している。

班を越えたミュオン実験体験の指導体制

研究グループは、研究開始時の 58 名から、100 名近い大所帯となった。増員の内訳は、博士研究員 8 名、公募研究者 15 名、計画班研究分担者 2 名、連携研究者 10 名、事務局 3 名等である。ミュオン利用経験のない研究者、若手研究者、博士学生等に対しては、班を越えた支援・指導体制を組んだ。このうち 4 名はトライアルユース等を経て、自ら実験課題申請書を作成し、新たに参入した公募研究者の指導・助言を行うまでに至っている。また博士学生の一人は、A01、A02 班の研究者の集団指導体制のもとで実験及び計算機シミュレーションに取組み、博士学位取得後、施設の博士研究員として超低速ミュオン開発に活躍している。班を超えた協力体制による実験体験は、超低速ミュオン実験開始を待つ間のモチベーションの向上に役立っている。

異分野の有機的連携を推進するための異分野理解の取組み

領域会議、国際会議は異分野理解の重要な場として、全分野合同のシングルセッションで運営した。特に、平成 24-26 年度の領域会議及び国際会議においては、若手研究者主催によるプレスクールを開催し、各研究課題の背景と導入部のみを 1 時間かけてじっくり紹介しあった。プレスクールには、毎回、若手研究者、大学院生に加えてシニアの研究者も含む平均 50 名が参加し、本領域のカバーする広い分野の基礎を互いに理解することに努めた。これらの異分野交流は班を超えた有機的連携に非常に有効であった。

他の新学術領域・大型研究計画との連携

領域を超えた研究連携も活発に行った。一例としては、新学術領域「コンピューティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」の研究者等との連携により、ミュオンの静止位置・荷電状態・電子状態についての理論的理解を著しく進展させた。また新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」、「分子自由度が拓く新物質科学」、「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、「コンピューティクスによる物質デザイン」、「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」、「分子アーキテクトニクス：単一分子の組織化と新機能創成」、「ナノスピン変換工学」、「3D 活性サイト科学」、「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」、「J-Physics：多極子伝導系の物理」領域と連携して毎年秋に物性科学領域横断研究会を共催し、領域研究者が発表して超低速ミュオンの可能性を伝えるとともに、他領域の研究者との共同研究の芽を育んだ。さらに「トポロジカル量子現象」領域とは、相互に研究会や領域会議に参加するなど、領域の枠を越えた交流も深化している。さらに、スーパーコンピュータ京及び次世代スーパーコンピュータプロジェクトの強相関物性理論研究グループ（代表：今田正俊氏）と国際会議を共催し、異なる実験手法を専門とする研究者間、あるいは理論と実験の交流を深め、新しい共同研究を生み出す場を提供した。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

総括班は、計画研究代表者と有識者から構成され、(1)各計画班および公募研究の有機的な連携促進と研究支援、(2)領域の運営と研究遂行に関する一元的な窓口、(3)共同研究、研究人材育成の組織的推進、(4)評価と助言・指導、(5)成果の情報発信の機能を果たすことにより、本領域の円滑な推進を図り、確実な成果に結びつけることを目的としている。主要支出としては、博士研究員（8名）の人件費（88,000千円）がある。総括班として8名を採用し、A01班、A04班の研究活動に4名ずつが参加した。その他、国際シンポジウム・領域会議・公開シンポジウムと関連した旅費（5年間合計 9,500千円）、「領域ニュースレター」の編集・発行（年1回）を行い、領域メンバー全体で研究の進展状況を共有するとともに、関係各方面に配布することで研究成果の周知に努めた。

A01班では、主要備品として、以下の機器備品の購入を行った。いずれも本領域の共通基盤装置である超低速ミュオン顕微鏡の開発に関わるものである。ミュオニウム発生チェンバ（25,700千円）では、大強度表面ミュオンを受け入れ、熱ミュオニウムを有効に発生、加速するためのチェンバであり、開発・設計・製作を行った。また、超低速ミュオン輸送チャンバ（39,600千円）は、超低速ミュオンビームを μ SR実験エリアまで輸送するためのチャンバ部分に対応する。この中には放射線管理区域に入域に関わるインターロックや遮蔽体、タングステンを加熱するヒータ電源や超低速ミュオンの加速・輸送に関わる装置が含まれている。また、超低速ミュオンの加速距離のばらつきを抑えるため、最大2kVの電圧をナノ秒以下で立ち下げられるパルス高圧電源の開発・製造を行った。その他に、超低速ミュオンを用いた μ SR実験を行うための陽電子計測系、電磁石、冷凍機等を備えた分光器（30,000千円）、レーザー光をミュオニウム生成チェンバに導入する「レーザー輸送系」の超高真空チェンバ類（16,000千円）を作製した。これらの機器はすべて超低速ミュオン発生に必須なものである。

A02班では、備品としては、SPMコントロールシステム（10,600千円）、四重極質量分析計（2,000千円）、湿度供給装置（2,000千円）等を購入し、ミュオン測定に先立つ構造研究、試料準備等に活用している。また、効果的に実験を遂行するためには、J-PARCにおける既存のミュオンビームと共に、J-PARC以外の海外施設の利用が必須であったため、海外施設における実験のための旅費、試料代、消耗品などに使用した。

A03班では、表面分析用チェンバ（10,000千円）およびこれと一体として用いる表面分析システム（10,000千円）を製作し、試料表面状態を分析した上で隣接する超低速ミュオン用分光器への試料移送を中継することが可能とした。またレーザー-MBEシステム（16,000千円）の構築を行い、薄膜実験試料の作成を行った。さらにスピンドローター（8,500千円）の製作を行い、A01班作製の超低速ミュオン輸送系と組み合わせることで入射ミュオンスピンの方向を任意に変えることを可能とした。

A04班では、超低速ミュオン顕微鏡に必須となるミュオニウム共鳴イオン化用大強度ライマン α レーザーシステムを製作した。全固体パワーアンプ（63,000千円）、820/845 nm コヒーレント光源（42,000千円）は、ライマン α レーザーの主要構成要素である。その他のレーザー構成装置類として、セラミックレーザー媒質（Nd:YAG（計15本、11,200千円）、高調波結晶オープン（3,000千円）、1062.78nm シードレーザー（3,800千円）、CLBO結晶（5,901千円）、レーザーステアリングチェンバ（2,500千円）、およびレーザーの性能診断・保守装置（レーザー遠隔監視制御システム（6,496千円）等）を購入した。一方、新たに開発したエアロゲル標的からの超低速ミュオン生成試験のために RIKEN-RAL 超低速ミュオンビームライン（6,861千円）の製作を行った。いずれも、領域研究における活用頻度は非常に高い。また水素イオン化のための水素ライマン α 共鳴用シーダー（8,994千円）を購入し、A01班の超低速ミュオンビームライン調整に協力した。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
23	ライマン α 共鳴 コヒーレント光 発生用全固体パ ワーアンプ	メガオプト	1	63,000,000	63,000,000	独立行政法人理化学研究所
	ライマン α 共鳴 コヒーレント光 発生用 820/845 nm コヒーレント 光源	メガオプト	1	42,000,000	42,000,000	独立行政法人理化学研究所
	超低速ミュオン 輸送チェンバ	入江工研 (株) 製	1	39,585,000	39,585,000	高エネルギー加速器研究機 構
	ミュオニウム発 生チェンバ	日立造船 (株) 製	1	25,714,500	25,714,500	高エネルギー加速器研究機 構
24	超低速ミュオン 生成用レーザー 輸送系	(株)エイブイシー製	1	13,650,000	13,650,000	高エネルギー加速器研究機 構
	超低速ミュオン 用スピンローテ ーター一式	入江工研 (株) 製	1	8,505,000	8,505,000	高エネルギー加速器研究機 構
25	レーザー-MBE シ ステム	(株)パスカル製	1	15,984,000	15,984,000	高エネルギー加速器研究機 構
	SPM コントロー ルシステム	Nanonis 社・BP4.5 ベー スパッケージ	1	10,600,212	10,600,212	東京工業大学
	RHEED 解析シス テム及び通電・ 傍熱加熱移動機 構一式	アールデック社 RDA-003G 1台他	1	9,922,500	9,922,500	高エネルギー加速器研究機 構
26	RIKEN-RAL 超 低速ミュオンビ ームラインの製 作	入江工研(株) 独自仕様	1	6,861,240	6,861,240	独立行政法人理化学研究所
	レーザー遠隔監 視制御システム	メガオプト	1	6,496,350	6,496,350	独立行政法人理化学研究所
27	マルチサンプル ロードロック機 構	(株)パスカル LL-BJ0222	1	1,490,400	1,490,400	高エネルギー加速器研究機 構

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成23年度】

・旅費

海外旅費…4,977千円

実験 (ISIS/RIKEN-RAL) 2,362千円 11(人×回)A02班 スピントロニクス・触媒材料のμSR 実験等

実験 (PSI) 1,327千円 4(人×回)A03班 電子ドープ系超伝導物質のμSR 実験等

実験 (TRIUMF) 183千円 1(人×回)A02班 触媒材料のμSR 実験等

その他国際会議 1,105千円 (7回)

国内旅費…1,424千円

「超低速ミュオン顕微鏡」第1回領域会議 (山梨) 1,424千円 (39回)

・人件費・謝金

博士研究員 7,046千円 14(延べ人数×月)

事務補佐員 1,091千円 6(延べ人数×月)

その他謝金 32千円 4(延べ人数×日)

【平成24年度】

・旅費

海外旅費…5,545千円

実験 (ISIS/RIKEN-RAL) 1,854千円 12(人×回)A02班 スピントロニクス・触媒材料のμSR 実験等

実験 (TRIUMF) 634千円 2(人×回)A02班 触媒材料のμSR 実験等

実験 (PSI) 373千円 1(人×回)A03班 電子ドープ系超伝導物質のμSR 実験等

その他国際会議 2,684千円 (16回)

国内旅費…4,170千円

「超低速ミュオン顕微鏡」第2回領域会議 (札幌) 4,170千円 (54回)

: プロジェクトの進捗状況、最新の研究成果の発表および本領域研究の理解共有

長期招聘者旅費…3,840千円 (2回) A04班 偏極度計測用狭帯域レーザー開発

・人件費・謝金

博士研究員 20,094千円 48(延べ人数×回)

事務補佐員 3,923千円 18(延べ人数×回)

その他謝金 138千円 10(延べ人数×日)

【平成25年度】

・旅費

海外旅費…14,245千円

実験 (ISIS/RIKEN-RAL) 5,862千円 20(人×回) A02班 スピントロニクス・触媒材料のμSR 実験等

実験 (TRIUMF) 3,661千円 11(人×回) A02班 触媒材料のμSR 実験等

実験 (PSI) 599千円 2(人×回) A03班 電子ドープ系超伝導物質のμSR 実験等

その他国際会議 4,123千円 (22回)

国内旅費…8,250千円

USMM2013 (松江) 8,250千円 (76回) プロジェクトの進捗状況および研究成果の発表

長期招聘者旅費…5,152千円 (3回) A04班 A04班 選択励起用狭帯域レーザー開発

・人件費・謝金

博士研究員 20,644千円 48(延べ人数×回)

事務補佐員 4,575千円 23(延べ人数×回)

その他謝金 255千円 11(延べ人数×日)

【平成26年度】

・旅費

海外旅費…15,276千円

muSR2014(スイス)3,175千円 (9回)

実験 (ISIS/RIKEN-RAL) 2,710千円 10(人×回) A02班 スピントロニクス・触媒材料のμSR 実験等

実験 (TRIUMF) 2,081千円 6(人×回) A02班 触媒材料のμSR 実験等

実験 (PSI) 715千円 3(人×回) A03班 電子ドープ系超伝導物質のμSR 実験等

その他国際会議 6,595千円 (32回)

国内旅費…2,931千円

「超低速ミュオン顕微鏡」第3回領域会議 (仙台) 2,931千円 (45回)

: プロジェクトの成果発表、新しい可能性の議論

長期招聘者旅費…2,480千円 (1回) A04班 ミュオニウムの光イオン化効率評価

・人件費・謝金

博士研究員 23,947千円 61(延べ人数×回)

事務補佐員 3,523千円 15(延べ人数×回)

その他謝金 89千円 2(延べ人数×日)

【平成27年度】

- ・旅費
 - 海外旅費…12,300千円
 - 実験 (ISIS/RIKEN-RAL) 5,168千円 21(人×回) A02班 スピントロニクス・触媒材料のμSR 実験等
 - 実験 (PSI) 2,491千円 6(人×回) A03班 電子ドープ系超伝導物質のμSR 実験等
 - 実験 (TRIUMF) 735千円 3(人×回) A02班 触媒材料のμSR 実験等
 - その他国際会議 3,926千円 (21回)
 - 国内旅費…3,257千円
 - USMM&CMSI(東京)3,257千円 (46回)
 - 長期招聘者旅費…658千円 (2回) A04班 レーザー誘起スピン偏極の検討
- ・人件費・謝金
 - 博士研究員 16,316千円 47(延べ人数×回)
 - 事務補佐員 5,645千円 24(延べ人数×回)
 - その他謝金 157千円 10(延べ人数×日)

(3) 最終年度(平成27年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

平成27年5月のJ-PARC物質生命科学実験施設の中性子源トラブルにより、陽子ビームが長期にわたり停止した。A01班では平成27年11月の陽子ビーム再開時より、超低速ミュオンビーム生成実験を本格的に開始する予定であった。しかし再び中性子源に不具合が発生し、当時ビーム再開の目途がたっていなかったため、レーザー関連の消耗品等に使用予定であった予算を平成28年度に繰越し、平成29年2月まで延長することにした。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

1. 次世代量子ビーム科学への貢献：10 MeV まで再加速した超低速ミュオンの透過能力と、極小エミッタンス性を活かせば、10 μm 超の領域のトモグラフィ 3 次元解析が可能となる。これにより、従来の手法では困難な細胞全体の微細構造の全貌、神経細胞のネットワーク微細構造までも明らかにできる。また高い透過能力は、厚い環境セルを使用することができ、生きた細胞の透過観察を実施することができる。さらに、超低速ミュオン源のコヒーレント長は数 μm にまで達し、この可干渉性により、電子顕微鏡の位相差法やホログラム法の高度化が可能となる。超低速ミュオン顕微鏡は、AB 効果により大きな組織内部の電位分布等の可視化を実現する。ミュオンは電子線よりも波長が短いため、試料を厚くでき、従来よりも低ドープ領域まで内部電位分布が観測できる。

2. 超強パルス VUV レーザー科学への貢献：

ライマン α レーザーについては実用に供するレーザーシステムがほぼ出来上がり、大型結晶の均質性改良を待って当初目標を達成する。超低速ミュオンを利用した物性研究、(g-2)測定を支える基盤技術が確立したことの意味は大きい。

3. 素粒子基礎物理の新実験方法への貢献：より低エミッタンスの超低速ミュオンビームを得るための候補としていた常温標的としてシリカエアロゲルの利用に目途がたち、素粒子標準理論を検証するミュオン (g-2)測定に向けて大きく前進することとなった。エアロゲル標的の性質を生かしたスピン制御などの様々な新機能も期待でき、実証試験が急がれるところである。

4. 薄膜超伝導研究への貢献：電子ドープ系銅酸化物 T'相 La214 系の母物質薄膜でキャリアドーピングなしに現れる超伝導が本質的でバルクな性質であることを示す結果を報告した論文 (Phys. Rev.B, 2014) は、掲載誌の Editors' Suggestion に選ばれるとともに、同内容が第 13 回ミュオンスピン回転分光国際会議 (2014 年) で口頭発表に選ばれた。この結果に触発されてバルク試料合成も見直された結果、プロテクトアニール法による同物質の単結晶においても非ドープ超伝導を示唆する結果が得られ、光電子分光による電子状態研究も進展している。さらに、このような研究の進展をうけて、日本物理学会第 70 回年次大会 (2015 年 3 月) では「銅酸化物におけるノン・ドープ超伝導の可能性に迫る」と題されたシンポジウムが開催されるなど、銅酸化物高温超伝導の研究に大きなインパクトを与えている。

5. 新しい物質相発見とデバイス応用への貢献：カイラル (キラル) 磁性体研究では、本研究で育成に成功したカイラルらせん磁性体 $\text{CrNb}_3\text{S}_6(\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2)$ の単結晶について、らせん軸に垂直方向への磁場印加によるカイラルスピンソリトン格子発生の観測に成功するとともに、ソリトン格子の間隔の磁場依存性が理論計算と完全に一致することを明らかにしたが、これはマクロな磁気位相格子とも呼ぶべき「新しい物質相の発見」と言い換えることができる。特に格子間隔をゼロ磁場で約 48 nm から強制強磁性状態での試料全長におよぶ長さに至るまで磁場で連続的に制御できることを明らかにした成果は、スピントロニクス分野にカイラル磁性結晶という新しい舞台を提供し、次世代情報ストレージ技術への応用も期待され、米国物理学会のオンライン雑誌 Physics でも重要なトピックスとして紹介され、その後のカイラル磁性体研究の活況へとつながった。

6. 全固体 Li イオン電池開発への貢献：電池の電極と電解質材料について、粉末・ペースト・シート電極・薄膜形状試料中の Li イオン拡散を、表面ミュオン (J-PARC や英国 ISIS) ・低速ミュオン (スイス PSI) ・ ^6Li による β -NMR 法 (カナダ TRIUMF) を駆使して調べ、全ての結果が良く一致することから、 μSR による Li 拡散や Na 拡散の測定範囲を決定した。Li イオン拡散速度の研究に新しい方法を確立することにより、全固体 Li イオン電池開発に貢献するとともに、ミュオンの産業利用に大きく貢献した。

7. スピントロニクス分野への貢献：*n* 型 GaAs 内にレーザーで伝導電子スピン偏極 (CESP) を発生し、その挙動を、同時に打ち込んだ偏極正ミュオンによって、詳細に (時間分解能 ns 以上、空間分解能 μm 以上) 非破壊的に観測出来る事を実証し、スピン蓄積なしでも半導体中の CESP の時間空間的構造・運動を測定する方法を確立した。更に Si においても、同様の観測が試みられた。当研究で確立されたミュオン実験手法は、光誘起 CESP 測定の一般的な方法と考えられ、全ての半導体に展開されよう。

8. 未開拓分野へのミュオン科学の展開：触媒化学・生命科学の分野では、従来のミュオン源では必要な局所性が得られないため、ミュオンによる研究がほとんど行われていなかった。超低速ミュオンによる局所性、顕微鏡の実現を前提とした準備研究により、ミュオンが光触媒酸化物の酸素欠陥濃度や、蛋白質中の電子伝達の含有水濃度に敏感であることが証明され、これら新規分野への応用が広がった。

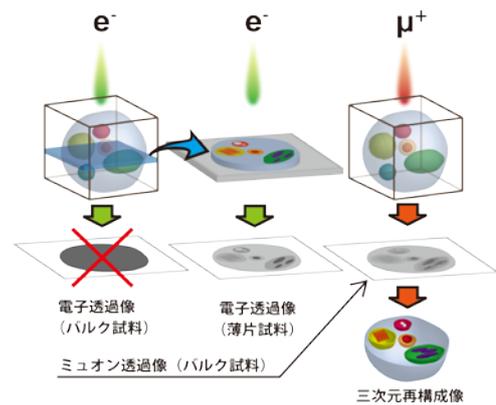


図 9-1 透過型ミュオン顕微鏡が目指す厚い試料のイメージング (電子顕微鏡 vs. ミュオン顕微鏡)

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

若手研究者育成の取組

将来の本分野の発展を見据え、以下に記載する積極的な取り組みを行ってきた。

1. 若手研究者開催のプレスクール：領域会議、国際会議と連動して、若手研究者企画によるプレスクールを開催し、若手研究者や学生への幅広い分野の紹介、異分野理解、会議運営経験を通じた自主性の育成と意欲喚起を行った。

2. 超低速ミュオン顕微法の研究手法に習熟するための教育と支援：本領域では、「超低速ミュオン顕微法」によりこれまで研究対象にすることが出来なかった広い分野の研究者が加わっているため、物質研究を担当している若手研究者には、ミュオン実験の経験が無いものも参加している。そこで、これらの若手研究者に対しては、主に A02、A03 班のサポートのもとで、従来型のビームを用いた試料測定を体験してもらい、測定技術の浸透を図った。平成 24 年 12 月中旬に新規ユーザー開拓を目指した J-PARC MLF スクールが開催され、演習課題「ミュオンスピン回転/緩和/共鳴」を実施した。本領域研究に参加している研究グループの若手研究者の多くがこれに参加し、ミュオン実験の講義と演習を受講した。

3. 将来の大型プロジェクトリーダーの育成：シミュレーション、計算物理やシステム工学等の多彩な総合技術科学である加速器プロジェクトに初めて接する A01 班の若手に対しては、毎週行われるミーティングでの発表・意見交換を通じて、総合的な視野を養う機会を設けた。若手の育成に留まらず、プロジェクト全体の情報共有と連携の強化につながっている。A04 班では、2 名の博士研究員が各々 212.556 nm 光源、820.65 nm 光源の開発の担当として活躍し、全固体レーザーを中心とした最先端のレーザー光源の設計、調整、および出力特性の評価を通じて、新規レーザー開発の基礎技術を習得した。ライマン α 共鳴線の発生にも成功するとともに、A01 班の協力を得て、レーザーの J-PARC への移動・設置・調整は博士研究員主体で行い、加速器科学への応用についても習熟する為の検討会議を隔週で行った。

4. 自立した研究活動を促すエフォート 15%分の裁量研究の保証：将来本領域をさらに発展させる若手研究者の自由な発想による自立した研究活動を促すため、所属機関の協力を得てエフォート 15%分の裁量研究を奨励した。裁量研究時間を活用して科研費に採択されたり、研究機関内競争的資金に採択されたり、着任以前の業績をまとめて国際会議発表や論文にまとめたりすることにより、独立した研究者への道を歩み始めた。

参画した若手研究者の進路

参画した博士研究員 8 名中 6 名は研究機関の任期なし、またはそれに準ずる常勤の研究職・技術職として活躍し、次世代の量子ビーム科学を担う人材として期待されている。

領域博士研究員

- ・ Oleg A. Louchev 氏：理化学研究所 光量子工学研究領域・研究員
- ・ 池戸豊氏：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・技師（連携研究者）
- ・ 長友傑氏：理化学研究所 仁科加速器研究センター・技師
- ・ 大石裕氏：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（連携研究者）
- ・ 宮崎洸治氏：三菱重工業(株) 総合研究所 研究・開発職
- ・ 藪内敦氏：京都大学原子炉実験所・助教（連携研究者）
- ・ 山内一宏氏：佐賀大学大学院工学系研究科・助教（連携研究者）
- ・ 足立泰平氏：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・博士研究員（連携研究者）

博士課程学生

- ・ Amba Datt Pant 氏：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・博士研究員

公募研究で採択された若手研究者は現在も現職で活躍し、本プロジェクトの将来を担うものと期待されている。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本領域では、J-PARC MLF 施設における超低速ミュオンビームラインの整備・高度化を進め、ミュオンの素粒子物理学的研究、ならびに、エネルギー分解能を高めたミュオンビームプローブによる物質生命科学の新展開を目指すものである。山崎敏光、村田好正、川合眞紀、家泰弘、寺倉清之の5名が評価担当者として総括班に加わった。評価担当者は研究期間を通じて、本領域のホームページやニュースレター等を通じて研究の進展に関する情報を得るとともに、領域研究会や成果報告会さらには本領域メンバーが中心となって開催した国際会議に極力出席して、研究進捗状況の把握と助言に努めた。研究期間の最終にあたる平成28年3月末にはJ-PARCの超低速ミュオンビームラインの整備状況の視察を行い、その直前に達成された超低速ミュオン発生データの説明を受けた。

本領域が目指した超低速ミュオン開発は、J-PARCにおける数々の不具合や事故の影響を強く受けることとなった。不幸にして研究期間中J-PARCが正常に運転されている期間が極めて短く、本格的な実験を行うには至らなかった。それでも、そのような困難な状況下でミュオンターゲットやライマン α レーザーなどの要素技術の開発は着実に進められた。逆説的であるが、要素技術の高度化に向けて十分な時間をかけたということも出来る。その甲斐あって、研究期間の最終段階において、超低速ミュオン発生の確認という成果が得られたことは高く評価できる。J-PARCそのものがフルパワー運転でないこともあり、現段階で得られているミュオンビーム強度は毎秒数10個と、目標としている毎秒 $10^4\sim 10^5$ 個にまでまだ数桁の開きがある。今後、「使える超低速ミュオンビーム」とすべく諸パラメーターの最適化等、強度増強に向けたさらなる努力が求められる。一方、超低速ミュオンのエネルギー分解能(エミッタンス)として30eVという優れた値が得られており、これを保ったまま再加速したミュオンビームが実現できれば、物質表面から深さ方向にナノメートルの分解能を実現して「ミュオン顕微鏡」の名に相応しいプローブが得られることになる。本計画の超低速ミュオン生成においてミュオニウムのイオン化のためのライマン α レーザーの開発はキーテクノロジーの一つであったが、高い出力と安定性とを兼ね備えたレーザーが完成したことは今後の発展につながる特筆すべき成果である。

本領域の研究期間を通じてJ-PARCが低い稼働率に終始したため、J-PARCのミュオンビームラインを用いた実験研究に限られたものになった感は否めない。それを補うため、本領域の研究者たちは海外のミュオン施設に積極的に出かけ行って実験を行った。一例として、ポールシェラー研究所(スイス)の低エネルギーミュオンビームを用いた電子ドープ系銅酸化物超伝導体の研究では(深さ分解能 $\sim 20\text{nm}$ ながら)表面とバルクとを分離した情報を得ることに成功している。このような結果は超低速ミュオンビームラインの有用性を実証するものであり、本計画で整備した実用に供されれば遥かに高分解能のデータが得られることを期待させるものである。これら準備段階での研究成果を精査し、今後の超低速ミュオンビームの利用に繋げることは極めて重要である。特殊加工を施したシリカゲルを用いることにより真空中のミュオニウム収量を10倍に増強する手法を開発したことは、素粒子物理学の重要テーマであるミュオンの異常磁気能率の精密測定の実験に関する特筆すべき成果である。

J-PARC関連のアクシデントのためにミュオンビームが出ていない期間が長かった中で、工夫と努力により最初の超低速ミュオンビームが得られたことは素晴らしいことである。今後このビームを利用した研究が始まるが、新しい科学の知見が得られていくことが期待できる。特に表面とバルクの間の領域を埋める「ミッシングリンク」に関しての研究に期待している。固体の最表面については、半世紀にわたる研究の結果、表面数原子層の幾何的情報および電子状態の情報が実験的に取得可能になったが、表面からバルク欠陥への物質移動などの情報を得る手段は限られており、特に水素原子が関わる化学反応(還元反応、水素化反応)に対する新たな知見が期待される。

本領域は、海外との協力関係も良好である。領域活動期間の大半が東海でのビームが停止されている期間にあたったことは不幸だったが、海外の既存の施設、PSI(スイス)、RAL(英国)、TRIUMPH(カナダ)などを利用することで実質的に成果をあげられたことは、今後の活動にも好影響を及ぼすであろう。

総評として、本領域の研究計画の実施にはJ-PARCの安定した運転が必須条件であったが、不幸にしてそれが十全でなかったため計画の実施は大幅に遅れることとなり、当初の目標を達成したとは言い難い。しかしながら、そのような困難な状況の中で本領域のメンバーが最善の努力と工夫により一定の成果を挙げ、近い将来J-PARCがその本来の性能を発揮する状況に復帰した時に、世界最先端の超低速ミュオンビームが実用レベルに達するであろうことを確信させるだけの成果を挙げたものと評価できる。本領域で培われた技術や知見が、基礎物理学ならびに物質生命科学の幅広い分野でのミュオンプローブの適用範囲を拡大し、量子ビーム科学の発展に活かされることを期待する。