

## 二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月13日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

量子科学技術研究開発機構・量子基盤技術研究部  
門関西光量子科学研究所放射光科学研究センター

[職・氏名]

上席研究員・岩澤英明

[課題番号]

JPJSBP 120209941

1. 事業名 相手国: 米国 (振興会対応機関: OP) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 角度分解光電子分光による銅酸化物高温超伝導体における電子・格子相互作用の解明

(英文) Electron-phonon interaction in high-Tc cuprates unraveled by angle-resolved photoemission spectroscopy

3. 共同研究実施期間 2020年4月1日 ～ 2023年3月31日 (3年0ヶ月)【延長前】 2020年4月1日 ～ 2022年3月31日 (2年0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

SLAC National Accelerator Laboratory, Lead Scientist, Makoto Hashimoto

5. 委託費総額(返還額を除く)

| 本事業により執行した委託費総額 |          | 3,800,000 円 |
|-----------------|----------|-------------|
| 内訳              | 1年度目執行経費 | 1,900,000 円 |
|                 | 2年度目執行経費 | 1,900,000 円 |
|                 | 3年度目執行経費 | - 円         |

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

|          |      |
|----------|------|
| 日本側参加者等  | 11 名 |
| 相手国側参加者等 | 6 名  |

\* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

|      | 派遣  |     | 受入    |
|------|-----|-----|-------|
|      | 相手国 | 第三国 |       |
| 1年度目 | 0   | 0   | 0 (0) |
| 2年度目 | 0   | 0   | 0 (0) |
| 3年度目 | 0   | 0   | 0 (0) |

\* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣:委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入:相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

## 8. 研究交流の概要・成果等

### (1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

銅酸化物高温超伝導体は、超伝導の発現する  $\text{CuO}_2$  面内のホールドープ量(酸素量)により、超伝導転移温度( $T_c$ )及び  $T_c$ に対する酸素同位体効果も非線形的に変化する。ARPESを用いた銅酸化物高温超伝導体の酸素同位体効果に関する我々の先行研究では、超伝導ギャップが閉じるノード方向において、キंक構造(70 meV 付近)が電子・格子相互作用に由来することを示した(H. Iwasawa et al., Phys. Rev. Lett. 101, 157005, 2008)。しかし、本質的な酸素同位体効果を検出するためには、非常に精密なARPES測定が要求されるため(J. F. Douglas, H. Iwasawa et al., Nature 446, E5, 2007)、超伝導ギャップが最大となるアンチノード方向や超伝導転移温度が異なる試料など、酸素同位体効果に関する系統的な検証は、これまで展開出来ていなかった。

本研究では、銅酸化物高温超伝導体における酸素同位体効果の働きを、日本・米国の放射光施設を利用した精密な角度分解光電子分光(ARPES)測定により、明らかにすることを目的とする。本研究交流では、試料作製(日本国側参加者)、試料評価(ラマン測定・日本国側参加者)、ARPES 測定(日本側参加者・相手国側参加者)と異なる専門分野を持つ若手研究者が交流できる機会を提供すること、日本・米国の放射光 ARPES 実験では、両国大学院生が参加するようにすることで、コミュニケーションを取りながら放射光実験を行う機会を与えることを、研究計画段階では予定した。しかしながら、コロナ禍の影響により、直接的な研究交流の実施には至らなかった。ただし、Web での研究会の開催(2回)、米国・放射光施設を利用したリモート ARPES 実験(2回:大学院生延べ4人参加)を相手国側と協力して実施するなどの研究交流を展開出来た。また、国内での研究活動として、顕微 X 線光電子分光を国内研究施設(兵庫県立大学・高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory)にて研究機関を通して8回実施(大学院生延べ9人参加)するなど、若手研究者養成に貢献した。

### (2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本事業により、高品質の銅酸化物高温超伝導体の酸素同位体置換試料を作成(産総研)、作成した試料をラマン分光(近畿大学)にて評価し、放射光 ARPES 実験(広島大学放射光科学研究センター・スタンフォード放射光施設)にて、電子状態における酸素同位体効果を検証する体制を新たに整えることが出来た。実際に、放射光 ARPES 実験により、超伝導ギャップが最大となるアンチノード方向の電子状態において、極微小な酸素同位体効果の観測に成功した。今後、再現性を含めて、ドープ量依存性などを検証することで、高温超伝導における電子・格子相互作用の役割を明らかにすることが期待出来る。一方、コロナ禍の影響により、海外・国内のどちらも放射光 ARPES 実験を円滑に展開することが困難であったため、機械学習を用いた ARPES データ解析手法の開発を進めた。その結果、銅酸化物高温超伝導体の電子状態の不均一性を自動分類・可視化する解析手法を確立し、学会・論文等で発表した(Hideaki Iwasawa et al., npj Quantum Materials 7, 24 (2022), Tetsuro Ueno, Hideaki Iwasawa, Synchrotron Radiation News 35, 3-8 (2022), 日刊工業新聞「量子科学技術でつくる未来:未来のクルマ 光電子分光を顕微化」(2022/7/21)など)。

### (3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

本事業により構築した研究体制が有機的に活動したことにより、前項で述べた「アンチノード方向の電子状態における酸素同位体効果の観測」に成功している。これは、日本国側にて準備された高品質の酸素同位体置換試料と米国スタンフォード放射光施設(Stanford Synchrotron Radiation Lightsource:SSRL)の先端 ARPES 装置が組み合わさって得られた成果である。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

SDGs にも掲げられるエネルギー・環境問題は、人類が長らく抱える解決すべき課題である。高温超伝導のメカニズムを理解することは、より高温で超伝導なる新物質の設計指針を与え、次世代の省エネルギー社会を支える基盤となることが期待される。本研究成果は、銅酸化物高温超伝導体の電子状態に対する電子・格子相互作用の影響の一端を明らかにしたものである。今後、本研究をさらに系統的に展開することで、銅酸化物高温超伝導体における「電子・格子相互作用と高温超伝導の関係性」が明らかとなり、高温超伝導の機構解明の糸口となる可能性がある。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

本事業を通して、日本国側大学院生を、Web での研究会(2回)、米国・放射光施設を利用したリモート ARPES 実験(2回)、国内研究施設(兵庫県立大学・高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory)を利用した顕微 X 線光電子分光実験(8回)に参加させることが出来た。これらの活動は、若手研究者の交流・経験の面だけでなく、研究指導の面でもおおきに役立った。本事業に関わった学生の成果として、学会発表 10 件ならびに学位取得 1 件(修士)が挙げられる。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本事業で形成した日本・米国からなる研究体制ならびに本事業により得られた銅酸化物高温超伝導体における酸素同位体効果の成果を基盤とした研究課題を令和 5 年度の二国間交流事業・共同研究に申請し、採択されている。銅酸化物高温超伝導体の研究をさらに発展するだけでなく、リアルでの人的交流をはじめとして、国際研究ネットワークの拡大や若手研究者の育成・交流など、研究交流の面も充実・発展させていきたい。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

特記事項なし。