

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月28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]

群馬大学・大学院理工学府

[職・氏名]

准教授・鈴木 宏輔

[課題番号]

JPJSBP 120205701

1. 事業名 相手国: 英国 (振興会対応機関: The Royal Society) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) マルチモード X 線コンプトン散乱イメージングによるオペランド分析法の開発

(英文) In-Operando multi-mode X-ray imaging of batteries

3. 共同研究実施期間 令和2年4月1日 ~ 令和5年3月31日 (3 年 0 ヶ月)【延長前】 令和2年4月1日 ~ 令和4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】)

Diamond Light Source・Beamline Scientist・Connolley Thomas

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		3,796,200 円
内訳	1年度目執行経費	1,897,150 円
	2年度目執行経費	1,899,050 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	10名
相手国側参加者等	2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)
2年度目	0	0	(0)
3年度目	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)

本研究は、イギリスのグループと共同で高エネルギー・低エミッタンス X 線を用い、動作下のリチウムイオン電池をマルチスケールで非破壊分析する装置の開発を目的とし、本研究の実現のため、日本側のグループで開発した量子力学に基づく軽元素イメージング分析法と、イギリス側のグループが持つ多素子検出器を使ったマルチスケール計測技術を融合させることを目指した。研究交流の実施状況として、2020 年 2 月にイギリス Diamond Light Source における放射光実験に日本側の研究代表者が参加した。その後、COVID-19 による世界的なパンデミックのため、研究開始当初予定していたイギリスへの渡航、ならびに、相手国側研究者の招聘はできなかったが、オンライン会議により定期的に研究打合せ(2020 年度は 20 回程度、2021 年度は 35 回程度、2022 年度は 18 回程度)を行った。その他にも、イギリス側の研究代表者と日本側の学生を含めた研究グループとで研究交流セミナーを行った。セミナーでは、お互いの研究進捗を報告するとともに学生自身が行っている研究内容を英語で発表し、質疑応答を行った。

(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)

本研究で利用するコンプトン散乱法は X 線光子と物質内電子との非弾性散乱現象を利用する実験手法であり、高エネルギー X 線を利用することで非弾性散乱効果を増大することができ、X 線にて軽元素を定量的に分析することが可能となる。また、コンプトン散乱法にピンホールと二次元検出器を組み合わせることで、非破壊で物質の断層画像の取得が可能となる。本研究課題にて、現在、世界中で建設や利用が進んでいる第 4 世代の低エミッタンス放射光施設にて同一実験システム上で Computed tomography (CT)測定とコンプトン散乱イメージングが可能になったことになった。

(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)

研究実施期間に COVID-19 によるパンデミックであったため、相手国側の研究者との対面での交流は叶わなかったが、オンライン会議システムを用いて定期的に研究打合せを行った。その成果として、査読付き論文 3 報 (Applied Science 誌、Advanced Science 誌、Material Today Energy 誌)、国際会議での口頭発表 2 件 (PRiME2020、IUCr2021)を発表することができた。また、本研究課題で得られた成果に基づき、相手国側研究者と共同で国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))に応募し、その研究助成により国際共同研究を継続している。その他にも、研究実施期間内に相手国側研究代表者とオンラインにてセミナーを開催した。セミナーには学生も参加し、英語で自身の研究内容を説明するとともに質疑応答を行った。オンラインでの実施ではあったものの、海外の研究者と直接に交流ができたことは学生らの英語でのコミュニケーション能力の養成や国際的な感覚を養う一助となったと考えている。

(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)

本実験手法の特徴の一つは、高エネルギー X 線を利用することである。高エネルギー X 線は高い物質透過能を有するため実用デバイスを非破壊で測定することができる。本研究では微細構造を持つ、従来に比べ厚い電極から構成されるリチウムイオン実電池を測定対象とした。厚い電極を作ることで電池の高容量化が得られるが、電極内におけるリチウムイオンの伝導を妨げる要因にもなり得る。現在、脱炭素化社会の実現のためモビリティの電動化が世界中で推進されている。モビリティの電動化には、その動力源であるリチウムイオン電池の高性能化、とりわけ高容量化、高寿命、高安全性が求められる。本研究により電極の厚さ方向におけるリチウム分布が

非破壊で得られたことは高性能な電池の設計指針につながるものと考えている。また、これは電池の劣化メカニズムも明らかにすることができ、電池の高寿命化や高安全性につながるものと考えている。

その他にも、本研究課題ではリチウムイオン電池を測定対象としたが、実験手法の適用範囲はリチウムイオン電池に限らず、実用蓄電デバイス内のイオン分布のオペランド測定や大型構造物などのインフラ材料内の空隙の可視化や構造物を構成する元素内でも特に軽元素の分布測定に利用できると考えており、これらは社会生活の質の改善につながるものである。

(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)

相手国側研究代表者とオンラインにて研究セミナーを開催し、学生に英語にて自身の研究発表をしてもらうと共に、質疑応答を行った。

(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)

本研究課題にて同一の実験システム上で、オペランドでリチウムイオン電池の Computed tomography (CT)測定とコンプトン散乱イメージングが可能になったことになった。CT 測定から充放電における電池内部の構造的な変化が可視化され、コンプトン散乱イメージングから電極内の局所領域におけるリチウムの分布が得られる。申請者の知る限り、電池内部の構造的な変化とコンプトン散乱によるリチウム分布の情報を同一実験システム上で得る実験は、これまで行われておらず、これらの情報によりリチウムイオン電池の劣化メカニズムや最適な電池状態の詳細を非破壊で明らかにすることができると考えている。さらに、本研究の発展としては、CT 測定とコンプトン散乱イメージングの同時測定がある。現状のシステムでは、コンプトン散乱イメージングにピンホールを使用しているため散乱 X 線の検出効率が低く同時測定が難しいが、ある数学的な規則に従い複数の開口を持つ符号化開口を使ったコンプトン散乱イメージング法が開発されれば CT 測定とコンプトン散乱イメージングの同時測定が可能になると考えている。符号化開口を使ったコンプトン散乱イメージング法の開発は、国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))の研究助成を受け、現在実施されている。

また、従来、コンプトン散乱イメージングは、日本の SPring-8 でしか行われていなかった。しかし、本研究課題にて第 4 世代の低エミッタンス放射光施設である Diamond Light Source で実験が行われたところは大きな意義があると考えている。現在、低エミッタンス放射光施設は世界中で建設・利用されているため、コンプトン散乱イメージングが汎用的な非破壊測定法として利用されることが期待される。

(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

現在、本事業の研究成果に基づき、相手国側参加者である Enzo Liotti 博士と国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))の資金提供を受け国際共同研究を実施している。