二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月17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]

東京工業大学・工学院

[職・氏名]

教授・波多野睦子

[課題番号]

JPJSBP 120213503

1. 事業名 相手国: ドイツ (振興会対応機関: DAAD) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 地球の進化の解明を目指したダイヤモンド量子顕微鏡の研究

(英文) Development of microwave-free zero-field quantum diamond microscope for studying magnetic phase transitions toward geological applications

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

Helmholtz-Institute Mainz · Professor · Dmitry Budker

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	5名
相手国側参加者等	5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	()
2年度目	3	0	4 (0)
3年度目			()

* 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)

本研究交流では、全期間を通じて「ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥(NVセンター)の利点を利用して、高温高压条件下で動作可能なダイヤモンド量子センシング・イメージング技術を開発すること」を目的とした。また、「その技術を地球科学分野の諸問題に応用し、有用性を示すこと」を目標とした。これまでに、3回の相互訪問やオンライン会議、各々の事前準備を通して、共同実験・データ解析のみならず小規模なセミナー・研究発表会まで実施した。

全期間を通じた研究交流の目的

本研究交流の目標は、ダイヤモンド中のNVセンターの利点を利用して、高温高压条件下で動作可能なダイヤモンド量子センシング・イメージングを開発し、主に地球科学分野の研究に有力なツールを提供することとした。また、上記の研究活動を通じて、若手研究者の国際共同研究の推進力の養成も目指した。

- 目的 1: マイクロ波と静磁場を使用しない磁気イメージングの実証
- 目的 2: 地磁気極性反転などを研究するための高温高压下での磁性の可視化
- 目的 3: 地殻の状態を再現した磁気異常の研究への応用展開

全期間を通じた研究交流の実施状況

本研究交流にあたっては、初年度から第二年度前半はコロナの影響で渡航が叶わなかったが、オンラインでのミーティング等を通して共同研究計画を再度練り上げ、それぞれのチームで研究準備にあたった。第二年度後半はようやく互い国を訪問することができ、関連実験やデータ解析、理論検討、小規模な研究発表会・セミナーを協働して実施した。

当初の日本側からドイツへの渡航計画としては、

- 3名 15日間 Mainz 大学、研究打ち合わせ
- 2名 45日間 Mainz 大学、ダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡の開発と高温高压イメージングの応用実験

を予定していたが、下記に変更して実施した。

- 1名 5日間 Mainz 大学、ダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡の開発とマイクロ波・ゼロ磁場技術の実験
- 2名 6日間 Mainz 大学、ダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡での試料計測結果および高温高压イメージング結果の議論

計画を大幅に変更せざるを得なかった要因としては、主にコロナ禍での渡航制限や渡航・滞在費の高騰、研究参加者の家族の病気等の影響があった。まず長期に渡るコロナ禍での渡航制限によって、日本側からドイツへの最初の訪問が2022年8月にまで大きく後ろ倒しとなった。また、滞在中の協働作業も必要最低限に絞ったことや、燃料費の高騰によって航空運賃が以前よりも高騰したことで、滞在日数も大幅に短縮している。さらには、渡航を予定していたもののうち一名は、家族が緊急入院し

たため、渡航を急遽取りやめることとなった。

当初のドイツ側から日本への来日計画としては、

- 1名 10日間 東京工業大学、研究打ち合わせ
- 2名 45日間 東京工業大学、研究打ち合わせおよびダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡の開発と高温高圧イメージングの応用実験

を予定していたが、日本側と同様の理由で下記に変更して実施した。

- 1名 7日間 東京工業大学、研究打ち合わせ
- 1名 21日間 東京工業大学、研究打ち合わせおよびダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡の開発、応用実験の実施
- 1名 14日間 東京工業大学、研究打ち合わせおよびダイヤモンド磁気イメージング顕微鏡の開発、応用実験の実施
- 1名 1日間 東京工業大学、研究打ち合わせ

このように滞在日数を当初の計画から大幅に減らした実施であったが、先方での滞在目的を、研究計画の練り直しや実験装置の確認、および要素技術の習得のみに限ったことが功を奏し、より効率的に互いの知見共有が進んだといえる。その結果、次節以降に述べるように、初期的とはいえ協働項目を概ね達成できたことにつながった。

2021年度研究内容の2022年度への延長について

共同実験を実施するため、プログラム開始早々にドイツマインツ大学へ渡航しようとしたところ、当初の想定に反し、新型コロナウイルス感染症の拡大が収まらず、渡航できないことが判明した。研究遂行上、共同実験は不可欠であり、オンラインでは代替できないため、相手国研究代表者と調整の結果、令和4年8月まで幾たびも延期することとなった。それにより、その後の実験等の実施も後ろ倒しになることから、2021年度の研究内容を2022年度へ延長し、2022年度の研究内容と併せて実施することとした。

(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)

本研究交流により得られた新たな知見

本研究交流では高温および高圧下でのNVセンターの振る舞いを明らかにし、それを地球科学の応用につなげるところまでを目標としていた。共同実験や対面での議論を通して、下記の技術的課題(9.最終年度実施状況に詳述)が浮き彫りとなり、今後の地球科学応用に向けた新たな知見を得ることができた。

- 蛍光信号のコントラストが高温高圧領域では低下すること
- 高温においてヒーターからの発光がNV計測のノイズとして混入すること
- 高温において加圧装置全体が熱せられ、周りの光学部品に影響を与えること

本研究交流により得られた概念の展開

本研究交流では、これらの基礎となる技術を相互に組み合わせ、外部磁場なしで、磁場感度 $\sim 1\mu\text{T/Hz}^{1/2}$ 、空間分解能 $\sim 1\mu\text{m}$ 、視野 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ で動作する量子ダイヤモンド顕微鏡を構築

することも目標としていた。そこで、ドイツ側がゼロ磁場付近での蛍光強度の変化を事前に計測し、日本側と結果を議論した。その際に、下記の知見および新たな論点生まれ、NV センターの物性科学に新たな展開が生まれた（様式 R3_03 5. 当該年度実施状況に詳述）。

- なぜゼロ磁場・ゼロ MW 下で蛍光ピークが生じるのか？
- その蛍光ピークの信号コントラストや線幅は何で決まるのか？
- この蛍光ピークを使ってどのように効率的に磁場をセンシングするのか？

本研究交流による学術的成果

本研究交流によって、高温高圧下でもダイヤモンド量子センシングが機能すること、マイクロ波やバイアス磁場が無い状況でも量子センシングが可能なこと、さらには、高圧下での磁性の消失（磁気相転移）を高い空間分解能で再現することを学術的成果として得た（9. 最終年度実施状況に詳述）。得られた結果は学術的な価値が高いため、共著の論文投稿を執筆中である。本成果によって、ダイヤモンド量子センシングを、特に高温高圧環境を必要とする地球科学分野に向けた強力なキャラクターゼーションツールへ昇華させるための端緒が得られたと言える。

(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)

両国の研究者の協力内容

本研究交流では、日本側からドイツへ2回（2022年9月、2023年3月）、ドイツ側から日本へ1回（2022年11月）の訪問を実施した。また、それ以外にも定期的なオンラインミーティングを行い、学術交流を継続した。日本側からドイツへの最初の訪問では、コロナ禍での計画の大幅修正を余儀なくされた背景から、実際の共同実験の内容および各共同項目での優先事項を密に議論し、研究戦略を立案した。平行して、ドイツ側の大学で将来的に共同研究先となりそうなグループとの交流を行った。そののちのドイツから日本への訪問では、互いのチームのそれまでの成果を共有・議論し、さらに共同で実験を実施した。具体的には①ドイツ側のゼロ磁場・ゼロマイクロ波下での蛍光強度の計測に用いるダイヤモンド試料の基礎評価、②ゼロ磁場・ゼロマイクロ波下での蛍光強度計測の日本側装置への実装、③日本側装置を用いた高温高圧イメージング測定を実施した。その後、日本側からドイツへの訪問では、それまでに得られた共同データや論文化の議論、今後の共同研究の継続方針についてを話し合った。

学術交流によって得られた成果

今回の学術交流によって、今後の地球科学応用につながる基礎データのみならず、ゼロ磁場・ゼロマイクロ波計測の新たな知見、今後の若手研究者の育成、今後の共同研究の展開などの成果が得られた。まず、共同実験を通して、高温・高圧下でも NV ダイヤモンドが高性能な量子センサとして機能することの示唆が得られ、今後の技術的な課題も浮き彫りとなった。次に、ゼロ磁場・ゼロマイクロ波計測の結果の議論を通して、論文化に至るまでに注力すべき論点が明らかとなった。さらには、各訪問を若手研究者が率先して計画・実行をリードすることにより、若手研究者間のつながりが深まり国際共同研究の推進力が養われた。さらには、今後の共同研究の方針として、さらなる共同研究費に応募することや、両国の大学の近隣の関連研究室とも国際共同研究を拡げていくことの方針で合意した。

- (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)

社会の基盤となる文化の継承と発展

本研究交流はコロナ禍の最中にあり、国際間の交流が分断された状態であった。渡航自体が困難な中、市況を読みつつ滞在日数を極力減らして実施した。そんな状況であったため、当初の計画を遂行するためには、膨大な量の作業を短時間に詰め込まなければならなかったが、我々はあえて優先順位を整理することで、この問題を協力して回避した。それも、両国の研究交流の維持および若手研究者の育成の観点から、ただ漫然と研究をこなすだけでなく、あえて余裕を持って会食や休日の交流などにも十分な時間を割くことで、両国の研究者間の相互理解や文化交流のレベルで深い国際共同研究に発展させることを狙った。その結果、両国間での文化の継承と発展にもつながったと感じている。

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社会的貢献

本研究交流は、ポストコロナのデジタル化増進、働き方改革の2点から社会的貢献があったと捉えている。まずコロナ禍で対面交流が制限される中、オンラインで可能な限り研究を進め、対面では必要最小限で成果を出す方向で各参加者がアイデアを出す場面が多くみられた。また、上記に伴って、貴重な対面時になるべく研究を進める必要があるが、昨今の働き方改革を鑑みて、対面時にタスクを詰め込むのではなく、本質的に重要なこと（論点を絞る、対面コミュニケーションでなければできないことに限る、食事やイベントを通して親交を深めるなど）を最優先することでワークライフバランスを保ち、社会生活の質の改善や現代的問題の解決に資する貢献ができたと感じている。

コロナ禍という特殊な状況での相互滞在や積極的交流を通じて、改めてドイツは科学リテラシーも高く、博士は社会的に尊敬されおり産業界での活用が進んでいるなど、日本との違いを認識した。特に両国とも学生の相互滞在や積極的交流を行ったため、将来のグローバルなキャリアパスをイメージする良い機会となった。

- (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)

若手研究者養成への取り組み

本研究交流では、訪問以前から頻繁にオンライン会議の機会を持っており、その段階から若手研究者の積極的な発言や貢献を促してきた。また、日本側からドイツへ訪問する際には、若手研究者のみで交流するなど、若手研究者の自律性・リーダーシップ養成に注力している。さらには、ドイツ側が日本へ訪問した際には、小規模セミナーの進行や発表を全て学生に任せるなど、意図的に若手研究者を抱き込む仕掛けを入れている。一方で、PI 同士の会合は別途設けるなど、研究方針の制御は行っている。

若手研究者養成の成果

本研究交流によって、日本側は荒井慧悟（日本側参加者）が准教授に昇格、学生の博士後期課程コースへの進学、などの効果が得られた。また、日本側の若手研究者は、海外の研究者（同年代の学生だけでなくPI達も含めて）とのコミュニケーションに自信を持つ結果となった。さらには、英語での発表やチェアとしての進行役を通じて、国際学会での発表ができるレベルでの育成につながっ

た。さらに、ドイツ側にポスドク研究者がいたことから、彼らのチームの日常の実験の進め方が非常に効率的であることに驚嘆を受け、自らも真似して効率的なプロジェクト運営を行えるようになった。具体的には、その日の最初にゴール（論点・到達点）を設定して、それに必要なタスクを分割して合意すること、実験を複数人で行うときは、常に自分が何をやろうとしているかを言語化して発信すること、装置の微調整など細かい点にとらわれることなく、その日のゴールに向かって最短距離で作業を進めること、などである。その他、先方の若手研究者との交流を通じて、複数の日本人学生が博士後期課程を志すなど、今回のプログラム参加者以外の学生への高い波及効果も得られた。

(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)

学術的発展：高圧超伝導への応用

本研究の当初は地球科学への応用を想定して高温高圧のイメージング技術はの確立を目指していた。この方向性に変更はないが、新たな発展の可能性として、高圧超伝導への応用も見えてきた。本事業の途中でドイツ側の同大学にある M. Eremets グループを訪問する機会があり、本技術の応用可能性が見いだされた経緯がある。M. Eremets グループは超高圧下での超伝導体の研究を世界的にリードしており、将来的には室温超伝導体の開発を目指している。本技術はナノスケールで温度・圧力・磁場をリアルタイムにイメージングできることから、従来のセンサにない付加価値を本分野に提供できる。

教育的発展：若手研究者が中心となった共同研究の継続

本研究交流によって、若手研究者が自信を持つこととなり、若手同士の小規模研究プロジェクトの立ち上げにつながっている。具体的な研究費の応募計画も話し合っており、両国間の様残なキャリア段階にある研究者の発展可能性につながったと認められる。同時に国際頭脳循環につながる複数チーム、さらには複数国の大規模な共同研究を計画中である。

(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)

受賞

- 令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
荒井慧悟（日本側参加者）
- 令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（研究部門）
波多野睦子（日本側代表者）・岩崎孝之