

## 二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月10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]  
京都大学・理学研究科  
[職・氏名]  
教授・中 暢子  
[課題番号]  
JPJSBP 120209919

1. 事業名 相手国:スウェーデン(振興会対応機関:OP)との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 先端光・バレートロンクス計測の融合による革新的極限物性の創出

(英文) Extreme transport properties of carrier-exciton system in a novel material

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)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Uppsala University, Professor, Jan Isberg

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	7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	0(0)
2年度目	0	0	0(0)
3年度目	1	2	3(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)

本共同研究は、先端光技術を用いて物性研究を行ってきた申請者のチームが、エレクトロニクス計測およびダイヤモンドバレットロニクスの第一人者であるイスベリ(Isberg)教授(スウェーデン・ウプサラ大学)のチームとの国際連携を本格化し、従来の技術的制約を打破する新たな実験手法の構築と学理の創成を狙うとともに、持続的なネットワークを形成し国際的に活躍する若手研究者を養成することを目的とした。

両チームのメンバーを相互派遣することで研究交流を深める予定であったが、2020年度および2021年度は新型コロナウイルス感染拡大に伴う渡航規制のために実地の相互交流はできず、主にメール交換による共同解析によって研究を進めた。スウェーデンチームとの対面での研究打ち合わせとウプサラ大学への大学院生の派遣は、研究期間延長中の2022年度に実現した。オンライン、対面双方において研究交流は活発に進められ、高インパクト学術誌での共著論文3編、招待記事3編、シンポジウムでの共著の招待講演など、計30件に及ぶ成果発表に結びついた。本共同研究では、これまで応用物理学と基礎物理学の分野で別箇に扱われてきたキャリア(すなわち電子と正孔)と励起子とを分野横断的に融合させて取り扱い、革新材料としてのダイヤモンド本来の究極的な物性機能を実証することができた。

### (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)

半導体の輸送特性の研究において、キャリアは電荷を持つ一方、電子と正孔のクーロン束縛対である励起子は電荷中性であるため、電荷状態の違いによりキャリアと励起子を同じ手法では検出することができないという技術的困難がある。本共同研究では光技術とエレクトロニクス計測を融合し、従来は室温付近でしか測定できなかったダイヤモンド中の光励起キャリアの移動度寿命積を、室温から2Kまで初めて決定した(Konishi et al., Appl. Phys. Lett. **117** (2020) 212102 <https://doi.org/10.1063/5.0031600>)。また、不純物トラップのない世界最高純度のダイヤモンド結晶において、励起子発光量子効率と拡散長および線欠陥の相関を明らかにした(Konishi et al., Phys. Rev. B **102** (2020) 195204 <https://doi.org/10.1103/physrevb.102.195204>)。さらに、光励起密度を下げることでキャリア衝突を回避し、GaAs 二次元電子系の移動度に迫る、バルク半導体で最高の移動度 ( $3.6 \times 10^7$  cm<sup>2</sup>/V/s) を実測した (Konishi et al., Phys. Rev. Appl. **17** (2022) L031001 (**Letter**) <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.17.L031001>)。これらはダイヤモンドが持つ究極的な物性を実際に示す成果として広く注目を集めた(K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, V. Djurberg, S. Majdi, J. Isberg, and N. Naka: Diffusion-related lifetime of photoexcited carriers in ultrapure diamond, MRS Spring Meeting, May 2022 超ワイドギャップ材料・デバイスのシンポジウムにおける招待講演)。

### (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)

日本チーム独自の技術であるナノ秒時間分解サイクロtron共鳴法と、スウェーデンチームが行ってきたタイムオブフライト法を、同一かつ超高純度のダイヤモンド試料に初めて適用した。異なる手法で測定されるダイヤモンドのキャリア移動度を系統的に比較した例はこれまでになく、同一試料での比較を行うことで測定法による違いが初めて明確になった。この結果を受けて、モンテカルロシミュレーションによる新たな解析アイデアが生まれ、キャリア散乱に関する物理機構の理解が進んでいる。一方、京都大学で測定した励起子の発光量子効率の解釈についても、従来の現象論的な理解にとどまらず、数値シミュレーションを通して定量的に説明することが初めて可能になった。これらの取り組みは単独のチームでは成し得ず、相補的な技術を融合したことによる研究の格段の進展といえる。これまでの日本チームにはなかった、数値計算、計測ノウハウなどの専門技術が移転されたことは、今後の研究発展にも大きく寄与するものと期待される。

(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)

本研究で対象としたダイヤモンドは、深紫外発光ダイオード(LED)、放射線検出器、バレートロンクスやパワーエレクトロニクスのための革新材料として期待が高まっている。超高純度ダイヤモンド中のキャリア拡散と線欠陥の相互作用を明らかにしたことは、結晶成長分野に有用なフィードバックを与えるだけでなく、バレートロンクス研究に新機軸を付加する。また、広い温度範囲で決定された拡散長と移動度寿命積は、ダイヤモンドLEDおよび放射線検出器の高効率化やパワーデバイス設計に必須の物性値を提供する。特に、ダイヤモンドLEDは、水の浄化(殺菌)、医療、大面積リソグラフィ、光化学重合、バイオセンシング、蛍光検査など多岐にわたる用途がある深紫外光を発生し、その性能向上は水銀ランプに代わる低環境負荷の新光源として社会的インパクトを有する。さらに、バルク半導体中で最高の移動度となるダイヤモンドの究極物性を引き出したことは、パワーエレクトロニクス分野において他材料を超える電力変換デバイスとしての新たな価値を創出し、次世代の省エネルギー社会実現に向けて大きな発展性を与えるものである。

(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)

双方の研究チームの若手研究者が、国際交流経験を通じて科学コミュニケーション、発表、論文執筆などのスキルを身につけ、自立性や挑戦性、問題解決能力を大きく向上させた。特に、日本チームの大学院生(小西)は、本共同研究での実験、解析結果を含めた学位論文を執筆し、2021年3月に博士(理学)の学位を取得した。スウェーデンチームの博士課程大学院生(Djurberg)は、日本チームが取得したサイクロトロン共鳴データを説明するためのモンテカルロシミュレーションを行い、その成果を国際学会で発表した。日本チームの大学院生4名(小西、高橋、戸田、戸塚)は国際会議での発表を経験し、そのうち2名の貢献は受賞2件につながる高い評価を得た。また、大学院生1名(戸塚)は、ウプサラ大学での長期滞在を通して、異分野の研究者とともに共同解析や意見交換を行う貴重な経験を積んだ。

(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)

本共同研究の取り組みが双方のチームにとって大変有意義であったことから、連携を継続することで合意し、今後の予算申請について協議中である。また、討論を通して、従来の発想を超える研究提案が生まれ、新規実験計画にも着手しつつある。さらに、国際会議での共同成果発表を受けて第三国の研究チームからも参入の打診があり、メンバーを拡大して新たな共同研究を展開する見込みである。このように、本研究交流を通じて持続的な国際ネットワークが形成され、分野横断的融合アプローチが今後さらに必要になると予想される本分野において重要な連携基盤を構築することができた。

(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

日本チームの大学院生による成果発表2件に対して以下の賞が与えられた。

- R. Toda, K. Konishi, D. E. P. Vanpoucke, N. Naka: Phonon Broadening Effect on the Excitonic Luminescence in Intrinsic Diamond, The 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2020/2021), Young Scholar Award 金賞 (2021年6月)
- 戸田倫太郎, 小西一貴, D. E. P. Vanpoucke, 中暢子「ダイヤモンドにおける間接励起子の重心質量の決定」第32回光物性研究会 奨励賞 (2021年12月)