

## 二国間交流事業 共同研究報告書

令和4年4月14日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[代表者所属機関・部局]  
東京大学 生産技術研究所  
[職・氏名]  
准教授・吉川 健  
[課題番号]  
JPJSBP1 20192905

1. 事業名 相手国: フランス (振興会対応機関: CNRS) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) シリコンカーバイド／金属融体界面のファセット制御と結晶多形決定機構

(英文) Exploring polytypism through the interface reconstructions

in the silicon carbide / liquid metal systems

3. 共同研究全実施期間 2019年4月1日～2022年3月31日 (3年\_\_ヶ月)

4. 相手国代表者(所属機関・職・氏名【全て英文】)

CNRS・Senior scientist ・ Didier Chaussende

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 |          | 4,712,500 円 |
| 内訳              | 1年度目執行経費 | 2,337,500 円 |
|                 | 2年度目執行経費 | 2,375,000 円 |
|                 | 3年度目執行経費 | 0 円         |

6. 共同研究全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  | 9 名 |
| 相手国側参加者等 | 3 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 | 3   | 0   | 2(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: 本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)。カッコ内は本委託費で滞在費等を負担した内数。

## 8. 研究交流実績の概要・成果等

### (1)研究交流実績概要(全期間を通じた研究交流の目的・研究交流計画の実施状況等)

#### [研究交流の目的]

本研究交流では、省エネパワーデバイスへの応用が進む SiC 単結晶の高品質・廉価育成技術として開発が進む溶液成長法における成長界面制御法を背景として実施したものである。結晶成長界面においてステップが束なりマクロステップを形成して「荒れ」を生じることが溶液成長法における最大の課題であり、Dr.Chassende と代表者の吉川で考案した界面再構成法により、界面制御につながるステップの動態を調査することを目的とした。

両機関において界面再構成技術を構築するとともに、日本側では高温結晶成長その場解析技術を用い、特に 4H-Si 結晶の結晶面上でステップのバンチングとファセットの形成に至る過程の調査を実施した。

#### [研究交流の実施状況]

Dr.Chassende の研究室が位置するグルノーブルは、ヨーロッパにおける一大材料研究拠点であり、材料系では電磁気冶金法や太陽電池用シリコンの冶金精錬法に特徴があり歴史的に日本との連携も深い。そこで本交流では将来的な広範な連携を視野に交流を行うことを目標とした。2019 年度途中には日本側参画研究者にシリコンならびに化合物結晶の融液成長のその場観察を専門とする若手教員・研究者計 3 名を新規に加えて連携の幅を広げた。日本側参加者(教職員)はいずれも 30 代前半から 40 代前半の若手研究者であり、SiC を議論の核としながら、日仏結晶育成ネットワークの形成の場を築くことを視野に交流を進めた。

#### ① ワークショップ開催

・2019 年 9 月 Workshop on Innovative Metallurgical Processes for Advanced Materials 2

Dr.Chassende、Mr.Xinming が来日し、関連分野の外国人研究者2名を招待して、東京大学生産技術研究所にてワークショップを開催した。Dr.Chassende と、日本側参加者 3 名は、屋久島電工社を訪問し、日本唯一の SiC 原料の製造現場を見学し、SiC 結晶の成長過程の基礎知見を得るとともに、分析試料を得た。

・2020 年 2 月 Workshop on Innovative Metallurgical Processes for Advanced Materials 3

日本側参加者 3 名が訪仏し、SIMAP の関連研究者とともにワークショップを開催した。また Dr.Chassende とともに InP 結晶製造大手の InPact 社を訪問し、単結晶引き上げ法ならびに評価装置等を見学して工業的な結晶育成技術を学んだ。他にもグルノーブル地区の関連研究施設を訪問した。

#### ② 研究滞在受け入れ

Mr.Xinming が東京大学生産技術研究所に 2019 年 10 月より 40 日滞在して SiC 結晶成長その場観察実験を実施するとともに、研究ディスカッションを行った。

以上はいずれも研究交流初年度に実施した内容であるが、COVID-19 により渡航ができなくなり、以降の渡航を前提に計画した交流は実施できなかった。

#### ③ 常時の交流

研究期間を通じて 1 月ないし 2 月に一回のオンライン会議を行い、情報・理解を密に共有するとともに、参加者の連携を行った。また 2 年目、3 年目の最後には、互いの研究活動について、オンライン報告会を実施し、研究方針ならびに展望について議論した。

### (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)

本研究交流では、界面再構成法を軸とした SiC 結晶の成長界面におけるステップ挙動の検討を行った。安定面から傾斜したオフセット基板上に生じるナノステップが、ステップの過剰エネルギーを駆動力として飽和溶液中で誘引されマクロステップ化する挙動と、その過程でのモフォロジーについて、Dr.Didier が得意とするナノ構造観察手法を共有しながら、系統的な調査を実施した。

その結果、

- ① 飽和溶液下でステップは時間の  $1/4 \sim 1/2$  乗で進行すること、
- ② ある溶媒、温度条件において、ステップ間距離の最大値があること、
- ③ 溶媒中炭素溶解度が大きいほどステップ間距離の増加速度が大きい傾向にあり、また添加成分組成により大きくその速度が異なること、

を見出した。したがってステップがマクロステップ化する速度機構と、その溶媒依存性が大きいことを示し、半経験的なステップの束化挙動すなわち界面荒れの時間発展の評価方法として用いることが可能であることを明らかにした。

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

特に Dr.Chaussende は 20 年に及ぶ SiC の結晶成長研究において、結晶の光学的・電気的評価と表面観察手法に高い理解と技術を有しており、一方日本側は研究代表者の吉川を中心に SiC 結晶成長界面のその場観察を先駆的に行い、界面の動態に対して高い理解を有しており、その両者の理解と技術を組み合わせることで、SiC 溶液成長法における難課題である溶媒組成と界面荒れを改善するための、新たな界面評価手法を確立し、課題解決へ向けた大きな前進が得られた。

(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)

本交流事業が目的とすることは、電力変換分野における省エネ革新をもたらす SiC パワーデバイスのより高効率・廉価製造技術に資する SiC 結晶成長技術開発の基盤構築であり、全世界規模でのエネルギー問題につながる部分である。もちろん本研究は基礎研究であり、技術開発を至近に導くものではないが、溶液成長法の革新部分につながる新たな溶媒探索のための評価手法を確立したことから、一定の貢献をなしたと考える。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取り組み、成果)

日本側参加者はいずれも結晶育成という分野を共有する若手研究者であり、ワークショップに参加、あるいはその事前事後の対応を通して、参加者同士の個別の議論、共同研究を開始するなど、新たな海外連携の機会となった。

また本プロジェクトには日本側から 2 名、フランス側から 1 名が大学院生として参加し、常時のオンライン会議に参加し、国際研究交流経験を得た。また双方の大学院生が、国際交流事業を通じて得た成果を基にした参加者の共著での学会発表も複数行った。さらにはフランスの大学院生の学位審査には研究代表者も審査委員として参加しており、本研究交流を通じて特に 3 名の参加学生に対し高い教育効果が得られた。

(6)将来発展可能性(本研究交流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)

本研究交流で新たに確立した界面評価手法におけるカイネティック係数の理論づけと、他材料への展開、その類似性を調査することで、界面ステップ物性の理解へとつなげることができる。よって、今後も引き続き本事業の研究チームにて継続的に検討を行い、高温結晶成長分野の未踏部分を拓く研究を行う計画である。

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

本交流事業で見出した界面再構成法による界面ステップ構造評価手法を一つの軸として、研究参画者の産業総合研究所三谷博士を PL とし、Dr.Chaussende を国際共同研究者とした NEDO 国際交流事業を 2021 年度より実施し、工業的な技術開発へとつなげる検討を行っている。