

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年6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]

東北大学・金属材料研究所

[職・氏名]

教授・藤原航三

[課題番号]

JPJSBP 120217701

1. 事業名 相手国: インド (振興会対応機関: DST) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 高温熱電素子用半導体材料の結晶成長プロセスの解明および欠陥制御

(英文) Investigation on the growth process and defect studies of semiconductor materials for high temperature thermoelectric applications

3. 共同研究実施期間 令和3年6月1日 ~ 令和5年5月31日 (2年0ヶ月)【延長前】 年 月 日 ~ 年 月 日 (年 ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Anna University, Professor, Mukannan Arivanandhan

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		1,950,000 円
内訳	1年度目執行経費	950,000 円
	2年度目執行経費	900,000 円
	3年度目執行経費	100,000 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	6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	3	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)

本研究交流は、東北大学金属材料研究所(日本、仙台)と Anna 大学(インド、チェンナイ)の研究者が協力して、熱電バルク材料の高性能化を目指して実施された。目的達成のために、結晶成長メカニズムおよび材料の微細組織と熱電特性の相関についての基礎研究を実施する計画を立てた。特に、本共同研究では、高い熱電性能を有することが知られている、混晶半導体や化合物半導体を対象として研究を行った。また、研究交流を通して、インドと日本の文化を相互に理解すること、および若手研究者に国際交流の場を提供することも大きな目的の一つであった。本研究交流により、今後の継続的な研究協力体制を構築することができた。以下に、具体的な実施状況について説明する。

令和 3 年度(初年度)は、世界的な新型コロナウイルス蔓延のため、相互の国への渡航は出来なかった。したがって、それぞれの研究機関において実験を実施し、Web 会議を通して情報共有を行った。当初は、混晶半導体の $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ と化合物半導体の SnSe を研究対象として想定していたが、高い熱電特性を有する化合物半導体 CdTe の融液成長実験にも着手することが出来た。また、東北大学金属材料研究所では、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ の融液成長過程のその場観察実験を行い、各組成におけるデンドライト結晶の形状、および一方向凝固過程においてデンドライト成長が発現する様子を直接観察した。得られた結果について、インド側の代表者である Mukannan Arivanandhan 教授(当時准教授)とオンラインでの議論を行い、最終的に共著論文として発表された。

令和 4 年度-5 年度は、東北大学で所有する結晶成長装置を用いて、 CdTe バルク結晶の成長実験を行い、原料の融解条件と結晶成長条件を検討し、最終的に直径 40mm ϕ 高さ 35mm の CdTe バルク結晶の作製に成功した。SEM—EDX 法により組織観察および組成分析を行ったところ、本バルク結晶は、平均結晶粒径が 5mm、組成は化学両論組成と一致する多結晶であることが分かった。令和 5 年 3 月 1 日～13 日に、Anna 大学を訪問し特性評価を行った。Anna 大学へは、東北大学金属材料研究所から若手研究者 2 名を含む 3 名が訪問し、Anna 大学の多くの研究者および学生と交流することができた。また、訪問期間中に Anna 大学で開催された、5th International Workshop on Advanced Functional Nanomaterials (IWAN-5)に 3 名とも参加し、半導体材料の融液成長メカニズムに関する Keynote lecture、コロイド結晶成長に関する招待講演、および半導体融液成長のその場観察に関する口頭講演をそれぞれが行った。いずれも、講演中だけでなく講演後に参加者と活発な議論を行うことができた。

また、本研究交流をきっかけとして、金属材料研究所が実施している国際共同利用共同研究プロジェクト(GI MRT)において、インド側の参加者である Mukannan Arivanandhan 教授のテーマが採択され今後も継続的に共同研究を実施していくこととなった。

(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)

本研究交流により、これまで不明であった混晶半導体 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ のデンドライト成長メカニズムが明らかとなった。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ を熱電材料として利用する場合、結晶粒は微細なほど良いが、デンドライト成長を制御することにより融液からの結晶成長においても結晶粒微細化が可能であることが分かった。また、化合物半導体は大型結晶の作製が困難である場合が多く、工業的な利用において大きな課題となっている。本研究交流により、II-VI 族化合物半導体である CdTe の大型結晶の成長技術開発に着手できたことは今後の研究において極めて重要である。最初に我々が作製した CdTe 多結晶の結晶粒界は 5mm 程度であったが、成長条件を制御することで、粒径が数 cm の多結晶が得られるようになった。今後、単結晶化へ向けて研究を発展させていく予定である。化合物半導体は、熱電材料だけでなく放射線検出器や医療機器や太陽電池などでの応用も期待されており、今後、高品質で大型な CdTe 単結晶が得られれば、様々な分野への応用展開に繋がる。

(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)

東北大学金属材料研究所の参加研究者は、結晶成長を専門としており、インド側の参加研究者は熱電材料

の特性評価を専門としていた。今回の交流により、相互が得意とする研究分野を共有することができ、お互いに研究の幅を広げることができた。東北大学金属材料研究所の研究者は、実際にAnna大学において熱電材料のホール測定や熱伝導率測定を行い、その評価手法を習得することができた。また、Anna大学の研究者は、東北大学金属材料研究所が保有する特殊な装置により、半導体材料がどのように融液から結晶化するのかを直接観察した結果を共有することができた。このように、お互いが新しい実験手法を習得することができたことは交流によって得られた大きな成果である。

(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)

今回の交流で、初めてインドを訪問した。インドにおいては依然、水道水を飲料水として利用することができず、ペットボトルの水を大量に消費していた。世界には水問題を抱えた国がまだ多く存在していることを実感できたことは有意義であった。また、最近、インドの人口が世界一位になり、エネルギーの需要はますます増加することが見込まれる。日本に比べて太陽電池材料や熱電材料の研究も活発に行われており、今回の交流研究で実施した研究が、将来エネルギー問題解決の一助になることを期待している。現地において、日本への渡航経験がある研究者とも交流し、日本滞在中に困ったことなどを聞くことが出来た。日本には、まだベジタリアンに対応した飲食店の数が少なくて困ったという話を多く聞いた。食の多様性への対応は国際交流においては欠かせないものであるが、日本で開催された、ある交流会の懇親会においてベジタリアンフードの提供がなく、食べられるものがほとんどなかったという話も聞いた。今後の国際交流の拡大において、各国の文化的な理解を深めることの重要性をあらためて認識することができた。

(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)

今回の研究交流において、東北大学金属材料研究者の若手研究者1名および博士学生1名が、Anna大学へ渡航し、現地の研究者および学生と交流した。研究内容の議論だけでなく日常的な会話を通して信頼関係を構築することができ、今後の若手研究者や学生の交流の足掛かりとなった。実際に、日本へ帰国した後に当該若手研究者はAnna大学の学生から研究内容に関する質問のEmailをいくつか受け取り、現在も交流は続いている。また、当該若手研究者は国際会議で招待講演をする機会も与えられ、今後の研究活動において大きな経験となった。また、研究結果に対して、日本とインドの若手研究者や学生と一緒に議論する場を設けることができた。

(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)

今回の研究交流によって、金属材料研究所で実施している国際共同利用共同研究プログラムへインドからの応募が増加した。今後も継続した共同研究が実施される予定である。また、今後は、今回の交流先以外の研究機関ともネットワークを繋げることが可能であり、国際共同研究の枠組みを拡げることができる。

(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)

Anna大学の執行部からは、今後、大学間協定を締結したいという連絡があった。今回の研究交流に参加した博士学生は国際会議で講演賞を受賞した。