

**先端研究拠点事業  
事業実績報告書  
(事後評価資料)**

採用年度	平成 23 年度
種別	拠点形成型

平成25年 4月 9日

領域	複合
分科	ナノ・マイクロ科学
細目	ナノ構造科学
分科細目コード	2101
研究交流課題名 (和文)	ナノカーボンテラヘルツ科学
研究交流課題名 (英文)	Nano Carbon Terahertz Science
採用期間	平成23年 4月 1日 ~ 平成25年 3月31日 (24ヶ月)

## 《実施組織体制》

## 日本側

拠点機関名	大阪大学
実施組織代表者 (所属・職・氏名)	大阪大学・学長・平野俊夫
コーディネーター (所属・職・氏名)	レーザーエネルギー学研究センター・教授・斗内政吉
協力機関数	4 機関
参加者数	64 名

## 相手国 1

国名	米国
拠点機関名	ライス大学
コーディネーター (所属・職・氏名)	電気コンピュータ工学科・教授・河野淳一郎
協力機関数	4 機関
参加者数	10 名

国名	ドイツ
拠点機関名	ドレスデンーロッセンドルフ研究所
コーディネーター (所属・職・氏名)	イオンビーム物理および材料研究所・教授・Manfred Helm
協力機関数	2 機関
参加者数	28 名

## 交流目標の達成状況

目標の達成状況を、A～Eのそれぞれの観点から、ポイントを絞って記載すること。

A 学術的な成果 B 持続的な協力関係の基盤構築 C 若手研究者育成における成果  
D 国際的学術情報の収集整備 E 事業の波及効果

### ① 全交流期間を通じての達成目標（申請書で示された内容と同一のもの）

本研究は、ナノ科学とテラヘルツ科学を融合した新しい研究分野の開拓を、ナノカーボン为例として初めて取り組むものである。ナノ科学は先端研究分野を切り開くもので、最重要項目の一つである。その中で、カーボンナノチューブやグラフェンは、次世代の電子デバイスに不可欠な電子材料である。一方、周波数 0.1-10THz の電磁波“テラヘルツ波”は、新しいセンシング分野と次世代の通信分野をカバーするものとして、極めて重要な研究分野と認識されており、2000 年以降に急速な展開を始めている。本研究交流では、このような新しい分野形成のため、世界的教育研究ネットワークを形成し、次世代の研究者を共育するシステムの構築を目指すものである。

具体的に取り組むテーマとして、ナノカーボンにおける一次元伝導・テラヘルツ帯伝導・コヒーレントフォノンダイナミクスの解明ならびに新規機能の探索と創製などから次世代電子デバイス応用の萌芽を目指すものである。

この課題に対して、国内では、大阪大学・東京大学・東北大学・千葉大学・会津大学・理化学研究所・情報通信研究機構の研究開発ネットワークをまず構築し、米国、独国内の連携チームの形成に協力し、3ヶ国のネットワークを完成させるとともに、同分野における若手育成を相互に担当する協力システムを構築する。

共同セミナーを各国で開催し、若手研究者が世界トップレベルの研究者ならびに同世代の海外の研究者と対等に議論できる場を設けるなど、グローバルな人材育成を目指す。また、公開シンポジウムでは、得られる研究成果とともに共同“共育”システムも広く紹介し、独創性と人間力を有したグローバル研究者の育成に貢献する。

### ② 交流目標の達成状況

A. 学術的な成果 特筆すべき成果として、米ニューヨーク州立大学・バッファロー校と東北大学および会津大学の3機関によりグラフェン材料のテラヘルツレーザー応用に関する研究を推進し、デバイスモデリングに関して研究成果を上げ、すでに10本を超える学術論文を共著で発表している。また米ニューヨーク州立大学・バッファロー校と千葉大学との間で行われた共同研究では、グラフェン試料の低温磁気伝導特性において観測される伝導度ゆらぎ、グラフェン試料におけるマイクロ波およびテラヘルツ領域における電気伝導度の応答特性、および単層カーボンナノチューブのネットワーク FET における FET 応答の起源の探索に関する共同研究を行っており、学術論文として成果が公表されている (Rev. B vol. 86, p. 161405(R) (2012), Nanoscale Research Letters, vol. 8, p. 22 (2013))。大阪大学とライス大学はカーボンナノチューブおよびグラフェンのテラヘルツ物性に関して、緊密な協力関係を構築している。電界効果によりグラフェンのフェルミ準位をシフトすることにより、キャリアのバンド内散乱によるテラヘルツ波の吸収が増加することを見いだした (Nano Letters, 12, 3711(2012))。このような手法により、テラヘルツ波の透過率を制御可能であることを示した。また、大面積グラフェンを積層した半導体界面からのテラヘルツ放射を観測し、グラフェン積層により界面バンド構造が変化しテラヘルツ波振幅が大きく変調されることを見いだされた。

この様に、「材料開発・テラヘルツ学・デバイス応用・理論などの役割分担連携をチーム内で構成し、各国のそれぞれ優れた点を組み合わせた研究連携を実施する。」と言う当初の計画を十分に達成した。

B. 持続的な協力関係の基盤構築 国内拠点機関である大阪大学では、米国拠点機関であるライス大学と、本プログラムによる大学間協定を2011年10月に締結した。また、ドイツの拠点機関であるドレスデンローゼンドルフ研究所とは、部局間協定の締結で合意し、現在協定案の最終段階となっている。また、本予算における研究交流により、東北大および千葉大とニューヨーク州立大における強固な研究協力関係が築かれた。また、東北大グループとライス大において共同研究が開始されるなど言語のさらなる成果についても期待できる。

## ② 交流目標の達成状況 (つづき)

C.若手研究者育成 2011年11月(大阪)、2012年7月(沖縄)、2012年12月(ハワイ)においてテラヘルツナノ科学国際シンポジウム(TeraNano)を開催し、また、本プログラムにおける研究交流や成果発表のために、2011年10月(ヒューストン)、2012年3月(ドレスデン)、2012年5月(バッファロー)、2013年3月(ヴェルツブルグ)にて拠点セミナーを開催した。この様に、日本、米国、ドイツにおいて、当初の計画通り、国際シンポジウムを3回、拠点セミナーを4回開催した。日本および米国で開催したセミナーおよびテラヘルツナノ科学国際シンポジウムでは、本プログラム参加者以外に、米国側NSF-PIRE(Teranano)プログラムに参加している米国学生も多数参加し、日米の若手のグローバル教育に大きな成果をあげた。

また本事業により得られた成果発表のため、主に米国およびドイツで開催されたセミナーや国際会議に本事業により21名(H23年度12名、H24年度9名)の学生および若手研究者を派遣した。さらに、計画研究に基づいた共同研究や打ち合わせのため、海外拠点機関および協力機関に11名(H23年度7名、H24年度4名)の学生および若手研究者を派遣し、実際に共同研究に着手させた。以上を通して効率的にグローバルな若手人材育成を行った。

この様に、研究者交流、若手育成を目的とした国際会議、拠点セミナー、海外派遣などを実行した。

D.国際的学術情報の収集整備 すでに記載したように、各国において3回の国際シンポジウム、および3回の拠点セミナーを開催し、その際には本事業の参加メンバーである学生および若手研究者を派遣し成果の研究発表および情報収取を行わせた。また、本事業のコーディネーターをはじめとする主力スタッフが企画した国際会議“テラヘルツナノ科学国際シンポジウム”では、テラヘルツ科学およびナノカーボン科学分野において優れた業績を有する世界的に第一線級の研究者が多数招待講演者として講演し、これら分野での最先端の研究成果についての情報収取を行った。

E.本事業の波及効果 本事業で得られた研究成果の多くについては国内・国外の会議で発表されるとともに45本を超える論文発表が行われ、テラヘルツナノカーボン分野にインパクトを与え続けている。また、計三回行われたオープンなテラヘルツナノカーボン国際会議では、本プログラム参加者だけでなく、学部からも著名な研究者が多数参加し、分野形成に大きく貢献した。第一回の国際シンポジウムであるTeraNano 2011の様子はNature Photonics誌上(Vol. 6, pp.82-83(2012))においても採りあげられ、世界的にも新しい方向性を示すものとして注目を集めた。本プログラム終了直後に行われた、歴史あるテラヘルツ分野の国際会議であるInternational Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013、共同議長：斗内政吉)においては、過去最大の350件を超える投稿があり、その2/3以上が海外からの投稿であった。これも本事業の波及効果の大きさを示すものと言える。

また、拠点セミナーではチュートリアル講演および若手研究者の口頭発表を充実させ、分野の次世代を担う博士課程後期課程学生を中心とする若手育成を重点的に行った。このような若手研究者育成の試みが、本研究分野の将来的な広がりも大きく貢献するものと期待している。

これら本事業において得られた成果等については今後ホームページにおいても広く公開し、これにより、本事業の意義について広く紹介する予定である。

## 実施状況

### 研究交流計画実施にあたる実施体制

#### 国内外の拠点機関及び協力機関の間の、協力連携の状況

※研究参加者リストを、別表2にて作成のこと。

阪大・斗内研究室とライス大・河野グループおよびライス大・Ajayan グループではナノカーボン材料の作製と計測において研究協力を実施しており、すでに NanoLetter 誌など著名な論文誌での成果発表が行われている。また、東北大・尾辻研究室および東北大・末光研究室とニューヨーク州立大・Mitin グループにおいても強固な研究協力関係を築き、また東北大グループとライス大グループの共同研究も新たに開始された。さらに、千葉大・落合研究室(現青木グループ)とニューヨーク州立大・Bird グループにおいてもすでに共著による論文発表が行われている。また、大阪大・千葉大のナノチューブに関する共同研究を開始するなど、国内の研究機関の共同研究も活発化した。

#### 日本側拠点機関における研究交流課題への取り組み(事務支援体制等の観点より)

日本側研究拠点である大阪大学は「大阪大学活動方針」として「国際化の加速的推進によって教育と研究の水準の高さにおいて国際的に評価・認知される卓越した大学であることをめざす。」とし、「国際感覚」の育成、国際協力の推進、キャンパスの国際化、外国人研究者・留学生支援体制の強化を図ることを表明している。本事業においても、海外からの招待講演者および若手研究者・学生の招聘や、日本側研究者の渡航および共同研究のための長期滞在における事務手続き等を、工学研究科や国際連携課の協力により円滑に進められた。それらの結果が、大阪大学とライス大学との大学間協定、大阪大学とドレスデン・ロッセンドルフ研究所との部局間協定(締結作業中)という成果につながった。

## 共同研究

### 交流計画をふまえ、共同研究を実施するにあたっての枠組み、活動内容、得られた成果等

(国内外の拠点機関・協力機関との連携状況も、考慮すること)

【1】ナノカーボン物性評価のための高輝度テラヘルツ分析機器開発：大阪大学ードイツ研究機関との共同研究により、ナノカーボン物性評価に必要な高輝度テラヘルツ光源分光システムの構築を行った。

【2】グラフェンの作製と光物性評価：千葉大学ーライス大学との共同研究により、単層カーボンナノチューブ/電極界面における光応答に関する共同研究を開始し、走査ゲート顕微鏡を用いた観察を行った。また、大阪大学ーライス大学との共同研究により、グラフェンのテラヘルツ分光実験を行い、得られたデータに対して薄膜解析法を使って光学パラメータの導出を行った。これらの成果はすでに学術論文誌に掲載されている。

【3】ナノカーボンデバイスのテラヘルツ伝導：千葉大学ーニューヨーク州立大学間のナノカーボン材料に関する共同研究において、光渦照射によるフラーレン薄膜の重合化やグラフェンの低温磁気伝導に関する研究成果が得られている。24年度には博士前期課程学生1名が同校に約1ヶ月間滞在し、試料作製および実験結果の解析を行っている。また、東北大学、会津大学ーニューヨーク州立大学・バッファロー校3機関によりグラフェン材料のテラヘルツレーザー応用に関する研究を推進し、デバイスモデリングに関して研究成果を上げた。

【4】カーボンナノチューブ結晶成長(東京大学ーヴュルツブルク大学)：東京大学-ヴュルツブルク大学との共同研究により、架橋・孤立単層カーボンナノチューブのCVD合成技術開発、密度勾配超遠心分離(DGU)によるカイラリティ分離と分光評価などを行い、PL分光、ラマン散乱分光などを実現した。

【その他】東北大学ーErlangen 大学、フリッツハーバー研究所(ドイツ)との共同研究により、SiC基板表面に三次元微細加工を施すことにより、エピタキシャルグラフェンの高品質化が図られることを明らかにした。また、大阪大学ードレスデン工科大学(ドイツ)間で共同研究を進め、グラフェンを用いた新奇スピンドバイス・センシングデバイスの立案を行った。

## セミナー

- ・研究交流計画におけるセミナーの位置づけを、他の交流形態と関連させつつ述べること
  - ・交流目標達成に向け、セミナーが果たした貢献を、具体的に述べること
- ※具体的な実施状況及び成果については、別表3にて作成のこと

本事業による拠点セミナーを参加各国で計4回(2011年10月に米国・ライス大学、2012年3月にドイツ・ドレスデン工科大学、2012年5月にバッファロー、2013年3月にドイツ・物理および理論化学研究所)開催した。それぞれのセミナーには拠点代表および各国グループの主要メンバーの他、博士課程学生を含む若手研究者が多数参加した。各セミナーでは、各国拠点コーディネーターをはじめとする一流研究者によるチュートリアル的な講演、若手研究者および中堅研究者ら主要メンバーによる最新の研究成果発表、および若手研究者が中心のポスター発表が行われた。

特に若手研究者にとっては単なる研究発表の場ではなく、世界的に第一線級の研究者らによる最新の研究成果を非常に濃密に吸収できる場となった。大規模な国際会議では、このようなシニアと若手研究者の交流は必ずしも円滑に進まないが、数十名程度の参加者でかつ半分以上を30代以下の若手研究者がしめた拠点セミナーでは、両者が垣根なく交流することができ、若手研究者にとっては特に刺激的なセミナーになったと考えられる。またこの拠点セミナーを通して、ナノカーボンの合成および計測を中心としたグループ、テラヘルツ分光およびイメージングのグループの間で新たな共同研究の芽が生まれ、研究交流の輪をさらに広げる重要な機会となった。

また、セミナー終了後には、互いの人的交流を深めるための機会が与えられ、また各拠点機関における見学会が行われた。この見学会においては、ライス大ではナノカーボンに関する合成から計測まで行うことが可能な設備、大阪大学では各種テラヘルツイメージングおよび分光装置、ドレスデン・ロッセンドルフ研究所では自由電子レーザーによる高強度テラヘルツ波光源設備、ヴェルツブルグ大学ではナノカーボンデバイス作製装置、ドイツの物理および理論化学研究所ではテラヘルツ関連設備など、それぞれの拠点機関が有する最先端の実験設備が紹介された。

## 研究者交流

- ・研究交流計画における研究者交流の位置づけを、他の交流形態と関連させつつ述べること
  - ・交流目標達成に向け、研究者交流が果たした貢献を、具体的に述べること
- ※具体的な交流状況については、別表4-1、4-2にて作成のこと

国内拠点機関である大阪大学では、米国拠点機関であるライス大学およびドイツの拠点機関であるドレスデン・ロッセンドルフ研究所との間で研究者交流を進め、ライス大学との間で本プログラムによる大学間協定を2011年10月に締結した。また、ドレスデン・ロッセンドルフ研究所とは、部局間協定の締結で合意し、現在協定締結の最終段階である。

計画していた共同研究以外に、日本側拠点機関(大阪大学教授)がドイツ・ドレスデン工科大学との間でグラフェンを用いたスピンドバイス・センシングデバイスの共同研究を進め、新奇デバイスの立案を行った。この共同研究の成果の一端として、Advanced Materials(IF=10.857)誌にて Review Article を出版した。

また日本側協力機関(東北大学教授)はドイツ・エアランゲン大学との共同研究を進め、SiC 基板表面に三次元微細加工を施すことにより、エピタキシャルグラフェンの高品質化が図られることを明らかにした。