

平成30年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)
中間評価資料(進捗状況報告書)

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	ナノ空間で光と物質が紡ぎ出すフォトンクス of 学理探求とグローバルネットワークの構築		
日本側拠点機関名	国立大学法人 大阪大学		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	大阪大学・大学院工学研究科・教授・バルマ プラブハット		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	中国	北京大学	Dept. of Physics, Professor, Qihuang GONG
	台湾	中央研究院	Research Center for Applied Sciences, Professor, Din Ping TSAI
	シンガポール	南洋理工大学	Center for Disruptive Photonic Technologies, Professor, Nikolay ZHELUDEV
	フィリピン	フィリピン大学	Dept. of Science and Technology, Professor, Wilson GARCIA
	韓国	ソウル大学校	Electrical Engineering, Professor, Byounggho LEE
	インド	タタ基礎研究所	Condensed Matter Physics and Material Science, Associate Professor, Achanta Venu GOPAL
	オーストラリア	オーストラリア国立大学	ANU College of Medicine, Biology and Environment, Research fellow, Vincent DARIA
	英国	オックスフォード大学	Engineering Science, Professor, Martin BOOTH
	米国	ライス大学	Physics and Astronomy, Professor, Junichiro KONO,
	香港	香港理工大学	Dept. of Applied Physics, Assistant Professor, Dangyuan LEI

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

光と物質の相互作用の研究は、ナノスケールで制御された構造を新たな舞台とすることで、新しい展開を見せている。例えば、金属ナノ構造体では、フォトンとプラズモンとの共鳴的な結合によりナノスケールに局在した非常に強い電磁場の励起が可能となり、ナノ空間への光の閉じ込めの実現、微小構造の周期的配列による負の屈折率の誘起など、自然界では存在し得ない特異な光学的性質を持ったメタマテリアルが創製されようとしている。一方、超短パルスレーザーによる高強度光電場を形成することによってナノ空間で非線形な光学現象を誘起することが可能となり、超解像イメージングやナノレベルの分光学的解析法、3次元光ナノ加工を確立することが試みられている。今まさに、これらナノスケールのフォトニクスを利用した新しいイメージング法、分光法、非線形光学、プラズモニクス・メタマテリアル及びデバイスの研究分野が胎動しようとしている。それらは、非侵襲な治療、高感性的な照明や省エネルギーなどの実現に波及し、21世紀の快適な生活をもたらすと考えられる。

それぞれの分野の発展と融合研究の深まりにより、さらなる研究の高まりが予測され、本交流計画ではこれらの研究を総合した先進ナノフォトニクスの新研究領域：ナノ空間で光と物質が紡ぎ出すフォトニクスの学理探求とグローバルネットワークの構築を推進する。

この目的を実現するために、これらの研究分野で世界をリードする研究者の研究交流の基盤となるネットワークを構築し、共同研究の推進とともに、次代を担う若手研究者の交流を支援し人材の育成を図る。

○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

十分に達成された

概ね達成された

ある程度達成された

ほとんど達成されなかった

【理由】

上に述べたように本プロジェクトの目的は「ナノフォトニクスの学理探求」と「グローバルネットワークの構築」である。本事業では前の学振アジア先進ナノフォトニクス研究教育拠点(AsiaCORE)で形成されたアジア4か国(日本、中国、台湾、シンガポール)間のネットワークを基盤として、それを環太平洋諸国およびインド・欧州にまで広く拡張することにより、地理的にコンパクトでありながらもグローバルな研究ネットワークの構築とナノフォトニクス研究の有機的な推進、それを通じた若手研究者の育成を目指している。ナノフォトニクスは極めて広い学問分野を形成しているので、特定テーマに絞って二か国間の連携で行うのではなく、多国間の相互交流を通じた異分野融合を行う共同研究の推進を行ってきた。

平成28年度はキックオフのため国際会議(GNP2016)を日本側拠点機関のある大阪において開催し、各国拠点機関のコーディネーターが一同に集まり、ネットワークの構築を行った。AsiaCOREのベースがあったとはいえ、初顔合わせの新メンバーが多数あったが、バルマコーディネーターの強力なリーダーシップのもとで基盤となるグローバルネットワーク構築に成功した。また、2年間に日本側ではセミナーを国内外合わせて4回開催し、交流を促すことでネットワークの実質化を進めた。このネットワー

クをもとに平成 29 年度までには共同研究として当初計画したイメージング、分光、非線形光学、プラズモニクス・メタマテリアル及びデバイスの 5 分野において 18 テーマを立ち上げて共同研究を推進した。平成 29 年度までに発表された学術論文は 18 件（このうち国際共著論文 4 件）、国際会議発表は 59 件である。研究成果の詳細は以下に述べるが、若手同士の交流の活発化にともない当初は想定していなかった新しい共同研究もはじまっており、興味深い成果が出始めている。共同研究が軌道に乗りはじめているので、平成 30 年度にはさらに国際共同論文が出る見込みであり、順調に進展している。

研究者交流の実績は 2 年間で 246 人、1384 人日にもおよんでいる。特筆すべきは平成 29 年度に学生・若手研究者が自主的に学生・若手研究者カンファレンス Global Student Conference2016 を開催したことである。これは研究交流と国際的な学生・若手ネットワークの形成を目的としており、学生が企画から参加者集め、運営を行うことで、責任感と主体性が養成されるとともに、同年代の若者同士の議論で刺激を受け研究のモチベーションが向上した。さらに、国際的な学生の交流ネットワークを構築でき、若手研究者の育成にも大きく貢献している。

したがって、2 年間の計画についてスタートアップとしてのネットワーク形成と共同研究の立ち上げの目標は十分に達成されたといえる。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成30年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

共同研究として計画した、イメージング、分光、非線形光学、プラズモニクス・メタマテリアルおよびデバイスの 5 分野において 2 年間で 18 のテーマ（以下では提案順に番号 R-1～R-18 をつけて示す）、相手国 10 か国、23 の研究教育機関、243 名の参画メンバーによって共同研究を進めてきた。5 分野を担当する相手国は以下のとおりである。18 のテーマごとにそれぞれが 1-2 名の研究者、学生を数日間～1 ヶ月程度両国同士で受け入れた。

- ・イメージング：台湾 (R-1, R-8)、オーストラリア (R-3)、英国 (R-3)
- ・分光：中国 (R-2)、台湾 (R-4, R-18)、フィリピン (R-5)、インド (R-5)、オーストラリア (R-15)
- ・非線形光学：米国 (R-6, R-17)
- ・プラズモニクス・メタマテリアル：台湾 (R-9)、シンガポール (R-7)、韓国 (R-12)、英国 (R-10)、香港 (R-13)
- ・デバイス：中国 (R-11, R-14)、台湾 (R-11)、韓国 (R-16)

○セミナー

	平成28年度	平成29年度
国内開催	2 回	1 回
海外開催	0 回	1 回
合計	2 回	2 回

【概要】

平成 28 年度はキックオフのための国際会議 Global Nanophotonics2016 (GNP2016) を大阪国際会議場グランキューブ大阪（大阪市北区中之島）にて開催した。上記の 5 分野を主題に 2 日間で参加者 115

名、22件の口頭発表、学生・若手研究者の58件のポスタープレゼンテーションが行われた。アジア・環太平洋諸国の多くの研究者・学生が直接話し合うことにより、今後の共同研究、融合研究の推進を図ることができ、アジアを中心とするグローバルネットワークの構築に大きく貢献できた。異なる分野間においても積極的に交流が促進され、分野間の融合テーマの探索を行うことができ、新しい融合分野の芽を見出す契機となった。バルマコーディネーターはGNP2016 会議期間中に相手国の代表であるコーディネーター（またはその代理）を集めてコーディネーター会議を開催した。各国のメンバー自己紹介を行うとともに、今後の国際交流の方針を議論した。コーディネーター会議において、平成29年度から各国持ち回りで国際会議を開催して研究の最新の成果と進捗状況の情報交換を行うことが決定された。また、GNP2016に先立って学生自らが主催する国際会議Global Student Conference2016を大阪大学フォトニクスセンター（大阪府吹田市）にて開催した。国内外から55名の学生参加者があり、各国の学生同士で研究成果のポスター発表や自由討論を行うなど大きな成功を収めた。

平成29年度は、International Nanophotonics Symposium 2017を8月25日～27日に静岡県川奈ホテル国際会議場で開催した。大阪大学より10名、国内の研究・教育機関より21名、中国3名、台湾2名、豪州2名、英国2名、独国1名、モロッコ1名の総勢44名が参加し、口頭発表20件およびポスター発表20件の合計40件の講演があった。また、Global Nanophotonics 2017 (GNP2017)を12月6日～12月8日にフィリピンのPalawanで開催した。参加者は大阪大学より18名、総勢75名が参加し、口頭発表18件およびポスター発表25件の合計43件の講演があった。両国際会議ではナノフォトニクス分野で世界を牽引する国際的に著名な研究者を招待し、ナノイメージング、プラズモニクス/メタマテリアル、光操作/加工などにわたるテーマで、最新研究の報告と研究討論を行うことができ、今後の拠点事業推進とネットワーク構築に繋がる成果を得ることができた。

すべての会議期間中には相手国の代表であるコーディネーター（またはその代理）を集めて運営会議を開催し、課題を共有するとともに今後の共同研究の進め方を具体的に決めた。これにより今後の研究拠点形成事業の基盤となる研究協力体制を構築することができた。また、新たな参加者の獲得と共同研究ネットワークの拡大をめざして、会議には本事業参加研究者以外の発表も招待講演に取り入れた。これにより本事業参加者は当初139名であったのが現在は246名に増加している。

○研究者交流

【概要】

ナノフォトニクスの分野では、イメージング法・分光法・非線形光学・ナノ加工などの手法の開発だけでなく、ナノ材料の創製、評価など多角的な視点が必要なため、本学術研究を国際共同で推進する意義は大きかった。共同研究の促進や研究打ち合わせのため、日本から主要研究者・若手研究者を、相手拠点機関および協力研究機関に派遣し、また、国際会議で発表および情報収集、意見交換をすることで研究者交流を図った。

特に、平成28年度には台湾中央研究院のTsai教授が2016 Nanophotonics Core to Core Workshopを開催（2016年12月26日）し、日本から大阪大学、理化学研究所、岡山大学が参加して日台交流を深めた。また、韓国浦項工科大学校（POSTECH）のRho助教が延世大学校においてThe 2nd International Symposium on Optically-assisted Mechanical Systems & the 2nd Riken-nCOMS joint Symposiumを開催し、日本から理化学研究所、岡山大学の研究者が参加して日韓交流を深めた。また、研究者交流の成功例としては、フィリピンで開催したGNP2017において大阪大学と国立台湾大学の異分野の研究者間で誘電体メタ表面に関する共通の課題がみつき、新しい共同研究に発展しており、平成29年度後半から30年度にかけて学生を相互に派遣するなど研究が進展した。現在、国際共著論文を執筆中である。

このように、多くのアジア・環太平洋諸国の参画により、地域的にコンパクトなネットワークを構築すると共に、欧米の2カ国の参画により、グローバルなネットワークの基盤を構築することができた。

また、バルマコーディネーターは今後、欧州拠点の追加も想定してドイツブラウンホーファー研究所 IOF (Institute of Optics and Precision Engineering) を訪問し、所長 A. Tunnermann 教授を始めとした研究者と意見交換を行った。これにより IOF のミッションである産業の支援という視点でナノフォトンクス研究の先進的成果の出口を見出す体制に関する知見を得た。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究交流拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

イメージング、分光、非線形光学、プラズモニクス・メタマテリアル及びデバイスの5分野において下記の研究テーマに関してのべ18件の共同研究(R-1~R-18)を推進した。これらの研究内容に共通する点は光とナノ材料の相互作用であり、国際共同研究なしには、目的を達成することは不可能であった。特に日本の有する世界最先端のフォトンクス技術(ナノイメージングおよびナノ分光)と欧州・米国・オーストラリア・アジアの各国が持つ先駆的ナノ材料、ナノ加工技術の研究を組み合わせることで、ナノフォトンクスの研究を大きく進展させることができた。個々の研究課題の達成状況の概要を5つの分野ごとに分類して以下に示す。

(1) イメージング

光を使ったイメージングは古典的な光学顕微鏡の回折限界を超えて現在も発展を続けている。最先端の超解像顕微鏡の解像度はすでに波長の限界を超えているが、これをナノ粒子のもつ非線形性や金属ナノクラスター蛍光体、あるいは電子線により性能をさらに向上させる研究を行った。本成果は3次元の分子イメージングや生体イメージングに応用できる。

R-1「分子イメージングを目的とした超解像顕微鏡の開発」(相手国:台湾)

超解像顕微鏡では試料に導入するナノ粒子プローブの光学特性の把握と、それによりもたらされる結像特性の理解が重要となる。国立台湾大学 Chu 教授との共同研究により、平成29年度までに従来の手法に用いられていた金属ナノ粒子とは異なる光学応答を示すナノ粒子を見出すことができ、新しい顕微観察法開発への糸口を掴むことができた。それにより、ナノ粒子における特殊な光学特性について新たな知見を得ることができ、超解像イメージング法の開発における新しい研究展開に繋がった。成果は3件の国際共著論文として出版された(H. Y. Wu *et al.*, Scientific Reports 6, 24293 (2016), G. Deka *et al.*, Nonophotonics 6(1), 22 (2017), G. Deka *et al.*, APL Photonics 3, 031301 (2018))。

R-3「蛍光性金属ナノクラスターを用いた生体試料の3次元深部イメージング」(相手国:オーストラリア、英国)

オーストラリア国立大学(ANU)のDaria教授の研究室に日本の若手研究者が滞在し、ラットから取り出した脳細胞の3Dスライスを作製する方法とパッチクランプ法を学んだ。また、日本側で合成した蛍光性白金ナノクラスターを細胞内にドープする方法を模索した。合成したナノクラスター溶液を神経細胞の培地環境と同程度のpHに調整し、神経細胞の生育を妨げずに染色する方法を開発した。さらに、紫外域で発光する白金ナノクラスターに対する2光子励起顕微鏡を用いた場合の発光強度を調べ、抗体を結合させた白金ナノクラスターを2D培養した神経細胞の培地に添加することによって、神経細胞の表層に存在する受容体を染色できることがわかった。また、パラジウム原子で構成させる蛍光性ナノク

ラスタの合成を試み、青色および緑色の蛍光を有するナノクラスターの合成に成功した。さらに、鏝型分子内での還元過程を詳細に調べた。

R-8「電子線励起による局在プラズモンモード可視化のため超解像顕微鏡の開発」(相手国：台湾)

集束電子線を用いて金属微細構造での局在プラズモンを励起し、その発光分布を検出することにより、局在プラズモンの励起特性を解明することを目指した。平成 29 年度までに集束電子線で金属ナノ粒子に励起した局在プラズモンを利用して、蛍光の発光増強を行うことを試みた。集束電子線により微小な領域にのみ局在プラズモンを励起し、蛍光分子を発光させることを試みた。金ナノ粒子、銀ナノ粒子状での局在プラズモンの励起特性を明らかにするとともに、蛍光薄膜上に配置した金属ナノ粒子に電子線を照射すると、蛍光強度が増強されることを確認した。中央研究院 Tsai 教授との共同研究により、数値解析法を用いて、高い電場強度を有する局在プラズモンを励起するための金属ナノ周期構造について設計し、実際にナノ構造の作製を行った。ナノホールアレイとナノディスクアレイを組み合わせた構造を設計し、波長 266nm の紫外光に対して高い増強効果が得られることを確認した。増強度の評価方法として、局在プラズモンによって放出される光電子放出を計測し、その増強度を評価した。

(2) 分光

先端増強ラマン分光は大阪大学で発明されたナノ空間での物質分析を行うための強力な武器である。各国の共同研究者から提供されたナノ材料の分析を先端増強ラマン分光により行い、本顕微鏡の威力が存分に発揮された共同研究となった。

R-2「2次元遷移金属ジカルコゲン化合物材料の先端増強ラマン研究」(相手国：中国)

北京大学 Fang 教授は層数の異なる二硫化モリブデン (MoS_2) 2次元結晶の成長に成功している。この試料を用いて大阪大学でラマン散乱分析を行った。まず一般的な高周波領域でのラマン分析を行い、基礎特性や層数を分析した。さらに、ブラッグ回折格子フィルターを用いて平成 28 年に構築した低周波ラマン装置の光学特性をさらに向上させ、強い背景光となるレイリー散乱光を効果的に除去することに成功し、低周波モードの高効率測定を実現した。この低周波ラマン装置を用いて MoS_2 の低周波ラマンモード分析を行い、層間相互作用や積層方位を解析するとともに、これをイメージングに発展させることによって、層間相互作用の空間分布を可視化することに成功した。

R-4「先端増強ラマン顕微鏡を用いた2次元材料のナノラマン分析」(相手国：台湾)

国立師範大学 Liu 教授から提供された単層 MoS_2 膜試料および単層 WSe_2 膜試料の局所領域からの増強ラマンスペクトルの測定に成功し、先端増強ラマン顕微鏡が2次元材料の分析に有効であることを示した。増強度をさらに高めるために探針先端の金属構造をグレイン化したところ、銀表面のカーボンコンタミネーションのラマン散乱が問題となった。コンタミネーションの混入経路の特定とその低減が課題であることがわかり、次年度に繋がる成果が得られた。

R-5「ナノスケールでの近接場増強ラマン分光」(相手国：インド、フィリピン)

タタ基礎研究所 Gopal 准教授との共同研究により、低温ラマン測定装置を自作し、安定的に測定が行える状態になった。また任意の温度に制御できる機構も構築した。現状、カーボンナノチューブ (CNT) を用いて様々な温度での温度依存性をラマン分析から計測することに成功しており、今後はこれを低温 SERS 測定に発展させる予定である。

R-15「生体分子相互作用のラベルフリーの研究」(相手国：オーストラリア)

ANU Daria 教授との共同研究により、少量ラマン分析チャンバーを開発し、分光法とイメージングに関する予備的な成果が得られている。成果はシンガポールで開催された国際会議にて発表した (N.

Smith *et al.*, Focus on Microscopy, Singapore, 2018 年 3 月 27 日)。

R-18「メタサーフェスを用いた先端増強ラマン分光法」(相手国：台湾)

中央研究院 Tsai 教授との共同研究において、先端増強ラマン分光の効率をさらに向上させるため、プラズモン結合及びプラズモン集束を高効率に誘起可能なメタサーフェス構造を理論的に探索した。数値計算によって実際にいくつか所望の特性を示すメタサーフェス構造を見出している。今後は実験的な検証を行い、高効率の先端増強ラマン分光の実現をめざす。

(3) 非線形光学

CNT やグラフェンなどのナノカーボン材料は光との非線形相互作用を示すので、これを利用した新しいレーザーナノ加工やテラヘルツフォトニクスへの応用を目指した共同研究を行った。

R-6「ナノカーボン材料を応用した新しいレーザーナノ加工技術の開発」(相手国：米国)

ライス大学 Kono 教授と共同でレーザー加工と自己組織化現象を融合した CNT の操作技術と配向制御に関する研究を行った。実験にも着手し、1) 暗視野顕微鏡を用いて、多層 CNT (直径約 15nm、長さ 5 μ m 程度) の一本ずつが水中に分散している様子とその配向をリアルタイムにイメージングした、2) 多層 CNT を分散した界面活性剤でシャボン膜を作製し、その中での CNT の動態を暗視野顕微鏡で観察した、3) 金属ワイヤーで作製した枠を用いてシャボン膜を作製し、枠の形状と、シャボン膜中での CNT の動態や配向の様子を実験的に解明した。

R-17「ナノ材料によるテラヘルツフォトニクスの開拓」(相手国：米国)

ライス大学 Kono 教授との共同研究により、グラフェン等の原子層材料局所的な気体分子の吸着・脱離をセンシングする技術開発を行った。本技術は原子層材料やそれらを用いたデバイスの評価に非常に有用である。我々は原子層材料/半導体接合から発生するテラヘルツ放射波形の変化を計測することにより、原子層材料表面に吸着している酸素分子濃度分布を可視化し、さらにその吸着エネルギーの計測することに成功した。本成果は国際共著論文として発表した(F.R. Bagsican *et al.*, Scientific Reports 7, 1774 (2017))。また CNT を用いた光スイッチの開発を行い、テラヘルツ放射を観測することにも成功した。

(4) プラズモニクス・メタマテリアル

プラズモニクスで用いられる光波長はこれまで可視～近赤外光であったが、ここでは紫外線を用いることにより新しい研究の展開が得られた。紫外線フォトニクスは GaN 系半導体光源の実用化により今後の大きな応用が期待されている。また、メタ表面の熱を利用したヒステリシスをもつ動的な制御や 3 次元メタマテリアルの自己組織化法による新しい作製技術などで成果が得られた。

R-7「紫外近接場プラズモニクス」(相手国：シンガポール)

紫外域測定を見据えた準備実験として、南洋理工大 Dubrovkin 教授と共同で銀を用いた表面粗さの異なるプラズモニック基板及びプラズモニック探針を作製し、可視光(波長 532 nm)によるプラズモン増強を確認するとともに、高い増強度と空間分解能の見込める結果を得た。今後は同様の実験系を紫外域へと発展させる。

R-9「金属メタマテリアル構造の光学特性の数値解析」(相手国：台湾)

3次元メタマテリアルの実現には、金属のナノ構造を3次元的に作製する必要があるが、リソグラフィ技術で作製できるのは2次元構造のみであり、ナノレベルの精度で3次元構造を自在に作製する技術は確立していない。3次元から2次元に構造を簡略化し、メタサーフェスとして機能実現を目指すのが

メタマテリアル研究の世界的動向となっている。GNP2016 では基調講演においてメタマテリアル研究で世界的に著名な台湾 Tsai 教授とともに 3 次元と 2 次元という構図でメタマテリアル技術の現状と可能性を議論し、3 次元メタマテリアルを作製するプロセス技術の重要性が再認識された。

R-10「可逆的アクティブ・メタ表面デバイス」(相手国：英国)

英国サウザンプトン大学 Zheludev 教授の研究室に大阪大学より大学院生を派遣して、形状記憶合金を用いたアクティブ・メタ表面デバイスに関する共同研究を行った。これにより温度にヒステリシスをもつメタ表面の光学特性を制御することに成功した。本成果は国際共著論文として発表した(Y. Nagasaki *et al.*, Appl. Phys. Lett 113, 021105 (2018))。また、誘電体メタ表面によるカラー生成の研究を行い、効率 100%で回折限界に相当する高い解像度の無損失カラーフィルターを色素なしで実現できるようになった。

R-12「三次元メタマテリアルの自己組織化形成法の開発」(相手国：韓国)

理化学研究所、岡山大学と韓国 POSTECH の Rho 博士と 3 国間でメタマテリアルを用いたバイオセンシング技術や高解像度顕微鏡、流体デバイスに関する共同研究を行った。金ナノ微粒子の自己組織化配列による二量体構造の形成に成功し、論文発表を予定している。

R-13「ナノスケールにおける材料評価のための走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM)」(相手国：香港)

香港 Lei 教授との共同研究を行い、電磁場計算によって三角形構造のサイズとプラズモン共鳴との相関を調べた。これにより任意の三角形サイズを選択することにより、レーザー波長と共鳴波長を整合できることが明らかとなった。実際に、サイズの異なる三角形構造を探針先端部に作製し、散乱測定を行うことで、プラズモン共鳴波長の高い制御性を実証した。また、作製した探針を用いてプラズモン共鳴制御下での近接場測定に成功した。

(5) デバイス

プラズモニクス具体的な出口を見据えたデバイス研究を推進した。ここでは高感度赤外センサーや焦点可変のメタレンズの研究を行った。また、フォトニックデバイス応用をめざしたナノカーボン材料の研究を行った。

R-11「光メタマテリアルと超高感度分子検出・同定デバイスへの応用」(相手国：中国、台湾)

理化学研究所、岡山大学と中国 Gong 教授、台湾 Tsai 教授との 3 国間の交流を行い、日本主導の下で中国において構造設計した光メタマテリアルを、台湾において作製し、その光学特性を日本で評価するという体制で 3 国間の国際共同研究を行った。光メタマテリアルと呼ばれる人工光吸収材料の開発と、その高感度赤外分光センサーへの応用に取り組んだ。光メタマテリアルのファノ共鳴を用いて極めて感度の高い分子検出に成功した。論文発表を予定している。

R-14「ナノ光エレクトロニクス材料・デバイス」(相手国：中国)

天津大学 Feng 教授が開発した機能性置換基を有するカーボン量子ドット材料と、 π 共役系分子・高分子との複合構造及び積層構造におけるモルフォロジー、結晶構造、配向状態を X 線回折像及び偏光顕微鏡観察により明らかにした。光励起状態からの失活過程についてカーボン量子ドット材料の分散状態、分子界面を考慮して検討を行い、光誘起電荷移動およびエネルギー移動過程によって議論した。また、光励起により生成したキャリアの取り出しにより、固体薄膜中の電気伝導の評価を行った。特に、分子界面でのエネルギーオフセット及び光生成キャリアの拡散過程を考慮することにより、薄膜中を輸送されるキャリアの極性と移動度を決定する手法を開発した。

R-16「メタレンズによる集光点の 3 次元制御」(相手国：韓国)

韓国 Lee 教授との共同で焦点面をナノメートルの精度で可変できるメタレンズの設計を行った。電磁場計算を用いて金属リングアレイから成るメタレンズを解析し、集光点を制御できることを見出した。様々な設計パラメータを調整することにより、3 次元的に自在に集光点を制御することに成功した。

○若手研究者の育成

以下の 3 つの方法で次代を担う学生および若手研究者の交流を支援し、人材育成を積極的に行った。

(1) 共同研究による交流

ライス大学の Kono 教授は米国 NFS が支援するナノジャパンプログラムのリーダーであり、大阪大学とライス大学の間で多くの学生が数か月単位で受け入れ・派遣を行ってきた実績がある。この実績を踏まえて多国間に拡張し、日本と相手国で相互に学生を受け入れることを積極的に行った。学生・若手研究者の交流は 2 年間で 1384 人日におよび活発に機能している。

以下に代表的な交流の実績を挙げる。R-1 では、平成 28 年度に日本側からは 1 名の学生が台湾大学に滞在し、ナノ粒子プローブの光学特性測定のための実験を進めた。また台湾側からは、1 名の学生が大阪大学に滞在し、蛍光プローブの非線形蛍光応答のモデル構築、シミュレーションを行った。また台湾側から 1 名のポスドクが大阪大学に滞在し新規の超解像顕微鏡のプロトタイプの設定アップを行った。平成 29 年度は、日本側、および台湾側からそれぞれ 1 ヶ月間の学生の派遣ならびに受け入れを相互に行った。台湾に派遣された学生は生体深部の超解像観察に用いられる金属ナノ粒子プローブの光学特性の測定とその結果の分析に従事し、日本で受け入れた学生はシリコンプローブの光学特性の測定を試みた。R-3 では、日本側の若手研究者をオーストラリア側の DARIA コーディネーターの研究室に派遣し、日本側で開発した蛍光性白金ナノクラスターを用いて、オーストラリア側で神経細胞の染色方法の模索および顕微鏡による蛍光発光観察を試みた。また、オーストラリア側での細胞の培養方法および神経回路解析技術を学んだ。R-4 では、平成 28 年度と 29 年度に台湾師範大学の博士課程学生が日本側研究室に約 1 か月間滞在し研究交流活動を行った。具体的には、台湾側が単層 MoS₂ 膜試料を作製し、日本側は先端増強ラマン顕微鏡技術を提供し、2 国間のチームが協力して、単層 MoS₂ 膜の高解像度ラマンイメージングを行った。また、滞在期間中、日本側研究室が開催するサマースクールにも参加し、一泊二日の研究発表セミナーを通じて研究交流を行った。R-10 では、平成 28 年度、日本側博士後期課程大学院生をサウザンプトン大学 Zheludev 研究室に 10 か月間派遣し、形状記憶合金を用いた可逆的アクティブ・メタ表面デバイスの基礎研究を行った。成果は国際共著論文として出版された。R-11 では平成 29 年度に理化学研究所に台湾中央研究院から博士課程学生を受け入れ、共同研究を行った。学生・若手研究者を他国の研究環境で研究を行わせることで、幅広い視野をもつ人材を育成できた。

(2) 国際セミナーでの研究発表

国際セミナーや国際ワークショップに大学院生を参画させ口頭発表・ポスター発表を行った。研究議論を通して、相互交流を推進し若手研究者の育成を行った。

(3) 学生が主催する国際会議

平成 28 年度は、GNP2016 のサテライト会議として、学生自らが主催して Global Student Conference2016 を大阪大学フォトニクスセンターにて開催した。国内外から 55 名の学生参加者があり、各国の学生同士で研究成果のポスター発表や自由討論を行うなど大きな成功を収めた。学生が企画から参加者集め、運営を行うことで、責任感と主体性を養成する大きな効果があった。また、同年代の若者同士の議論で刺激を受けることにより研究のモチベーションが大いに向上している。さらに、国際的な学生同士の独自の交流ネットワークを構築することができた。このような学生独自の活動は応用物理学

会や OSA/SPIE の student chapter 活動などとも連携させながら平成 29 年度以降も継続している。

○研究交流拠点の構築

日本側の拠点機関である大阪大学では文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」(平成 19-28 年度)の終了にともない、平成 29 年度よりフォトニクス先端融合研究拠点 (PARC) を工学研究科附属フォトニクスセンターとして恒久化し、フォトニクスのオープンイノベーションを担う全学的なハブとした。研究交流拠点としてリアルな建物があることは大きな強みであり、大阪大学ではフォトニクスセンターを最大限に活用して本事業の国際交流活動と研究活動を支援している。

具体的には相手国側から研究者が来たときにはフォトニクスセンターに設置されている滞在ブースを貸し出して滞在中のスペースを確保している。また、フォトニクスセンターでは異分野交流のために毎週 1 回火曜日に TMT (Tuesday Morning Tea) と名付けた茶話会を行っている。来日した学生や研究者をこれに招待し、センター参画する研究室 (27 研究室が全学から参画、平成 30 年 7 月現在) や入居企業メンバーとの交流を促している。フォトニクスセンターはメンバー共用の微細加工装置と汎用光学測定装置を完備しており、技術職員も配置している。これを来訪した研究者に利用してもらうことで滞在中の研究者の共同研究を支援している。

このようにフォトニクスセンターによって単独の研究室では難しいハードとソフトの両面から支援を行う恒久的な体制を構築しており、ナノフォトニクスの国際的な研究交流拠点として機能している。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制 (拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等)

日本側拠点機関を大阪大学とし、協力機関は、関東地区は理化学研究所 田中拓男、中部地区は静岡大学 川田善正、中国地区は岡山大学 石川 篤で構成する。大阪大学に事業推進委員会をおき、バルマコーディネーターが委員長をつとめる (図 1)。事業推進委員会の委員は拠点機関の参画研究者 (高原淳一、井上康志、尾崎雅則、民谷栄一) 及び協力機関の代表者で構成される。事業推進委員会は国際セミナー等に合わせて年 2 回程度開催し、本事業の運営方針と年度ごとの予算を議論し決定する。後述するように事務的な支援は大阪大学国際部と工学研究科より受ける。

日本側拠点機関では参画研究者がイメージング、分光、非線形光学、プラズモニクス・メタマテリアル、デバイスの 5 テーマを分担して担当する。協力機関は 5 テーマにまたがる融合研究を積極的に推進するが、主となるテーマとしてイメージング: 川田善正、プラズモニクス・メタマテリアル: 田中拓男、デバイス: 石川篤が担当する。これにより 5 テーマを総合する先進ナノフォトニクスの新研究領域を切り開き発展させ、これを通じて国内に於ける学生・若手研究者の交流と人材育成を行う実施体制としている。

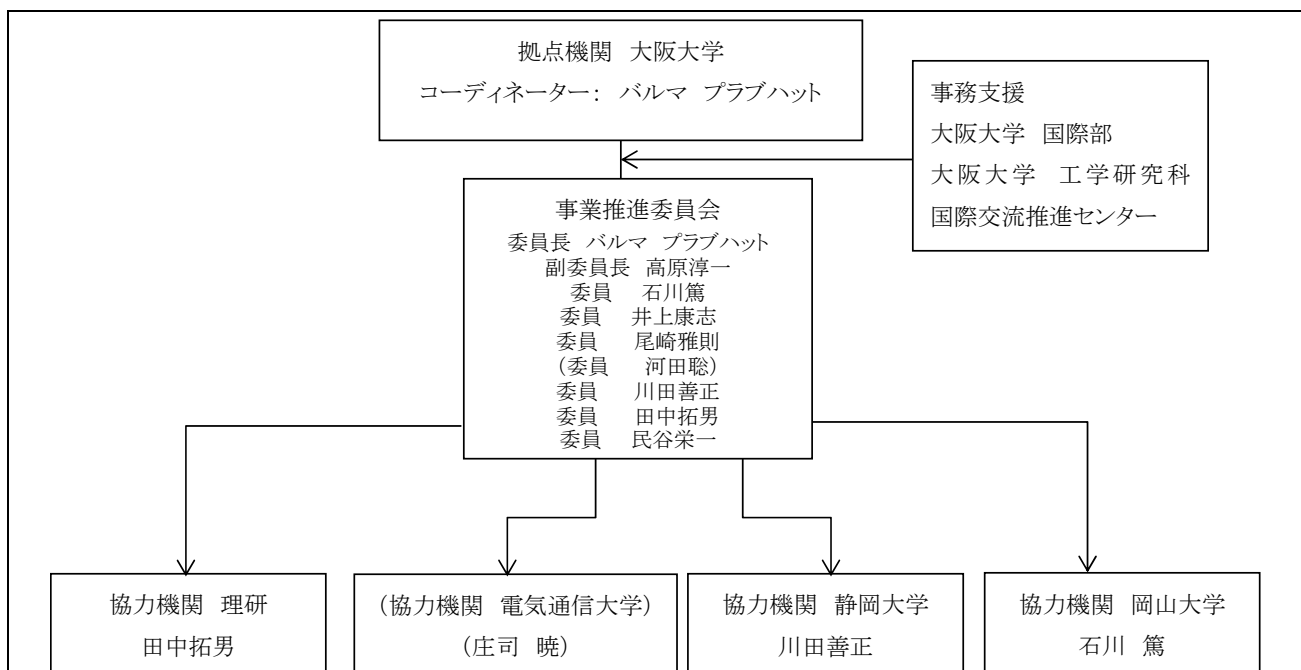


図1 国内実施体制 ()は平成28年度のみ参照

○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

アジア先進ナノフォトニクス研究教育拠点（AsianCORE）を通して大阪大学を中心に中国、台湾、シンガポールの拠点機関との間で交流を行い世界一流の研究成果を挙げてきた。本事業ではAsianCOREのネットワークを発展させ、フィリピン、韓国、インド、香港と欧米から英国、米国、オーストラリアを研究教育拠点に追加した。各国から5つの研究分野における世界的リーダーをコーディネーターとして選出し、アジアに軸足を置きつつもグローバルなネットワークを構築した。コーディネーターは各国内の協力機関を統御する。各国のコーディネーターと役割分担の詳細は後述の通りである。

研究交流の推進のため年1回の国際セミナーを各国持ち回りで開催する。国際セミナーには全グループから学生と若手研究者が集まると同時に、相手国拠点機関のコーディネーターを招集してコーディネーター会議を行う（図2）。コーディネーター会議ではバルマ議長のもとで新たな共同研究の立ち上げや、若手人材育成等の重要事項を審議する。また、各国は独自に国際ワークショップを企画し、主催する。大阪大学工学研究科附属フォトニクスセンターは交流と研究を支援する。

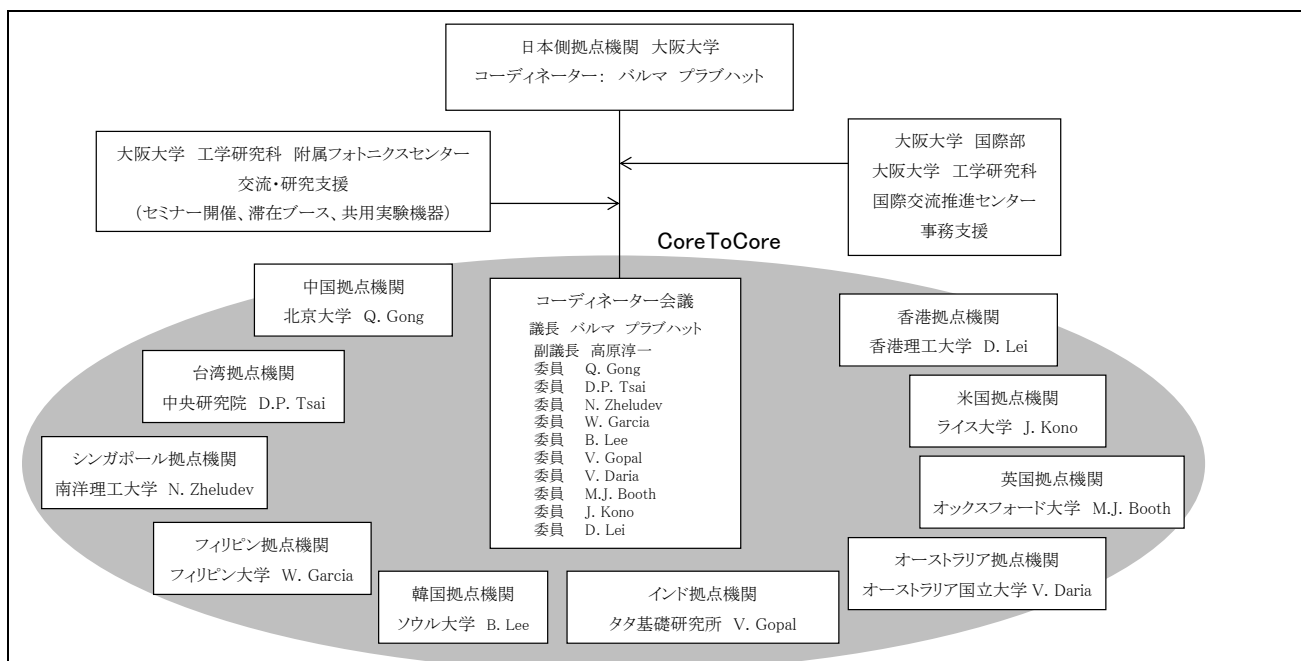


図2 相手国拠点機関との協力体制

各国の拠点機関、協力機関および役割分担を以下に示す。

■中国（北京大学、天津大学） 役割分担：分光、デバイスのためのナノ材料の提供

中国は拠点を北京大学におく。コーディネーターの北京大学Gong 教授は超高速分光とフォトニックデバイスを専門とし、特にフェムト秒のレーザー分光とその応用、有機非線形光学マテリアルズ、強場光物理学が研究テーマである。中国の光研究において主要な研究者であり、日本とのつながりも深い。中国はこの他にも天津大学Wei Feng教授が参画した。中国がナノ材料を作製し、日本でラマン分光を行うという役割分担がうまく機能している。また、日本、台湾との三極間で共同研究を開始した。

■台湾（中央研究院、国立台湾大学、台湾師範大学） 役割分担：イメージング、分光、プラズモニクス・メタマテリアル、デバイス

台湾は拠点を中央研究院におく。コーディネーターの中央研究院Tsai教授は同応用物理学センターの所長と国立台湾大学の特別教授を兼務し、国際光学会（SPIE）や米国光学会（OSA）のフェローでもある台湾のフォトニクスを代表する研究者であり、ナノフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、バイオフォトニクスを専門とする。台湾はこの他にも国立台湾大学Shi-Wei Chu教授とChi-Kuang Sun教授、台湾師範大学Hsiang-Lin Liu教授が参画した。台湾はAsiaCORE以来、日本側との交流実績が長く、共同研究もすすんでいるので、非線形光学以外の全分野において共同研究を実施した。

■シンガポール（南洋理工大学） 役割分担：プラズモニクス・メタマテリアル

コーディネーターのZheludev 教授はシンガポール・南洋理工大学の教授で革新的フォトン工学センターの所長である。メタマテリアルの世界的権威として知られ、この分野をリードしている。プラズモニクス・メタマテリアルを担当する。

■フィリピン（フィリピン大学） 役割分担：イメージング

コーディネーターのGarcia 教授はプラズマ生成のレーザーを主に専門とし、プラズマ分光やパルスレーザー堆積についての研究を行っている。イメージングを担当する。日本、インドとの3か国間で共同研究をすすめている。フィリピンのフォトニクス研究は近年著しく成長しており、本プロジェクトへの参画による発展の加速が期待できる。

■韓国（ソウル大学、浦項工科大学校） 役割分担：プラズモニクス・メタマテリアル、デバイス

韓国は拠点をソウル大学におき、この他に浦項工科大学校（POSTECH）が参画している。コーディネーターのソウル大学Lee 教授はデジタルホログラフィー、3次元画像化、プラズモニクスを主な専門とし、この分野における韓国を代表する研究者である。プラズモニクス・メタマテリアルとデバイスを担当する。理化学研究所、POSTECH、延世大学校との三極間共同研究もはじまっており、ネットワークのさらなる拡大が期待される。

■インド（タタ基礎研究所） 役割分担：分光

コーディネーターのGopal教授は光学、プラズモニクス研究における金属誘電のナノ構造マテリアルズを専門とし、近年顕著な成果を挙げている。分光を担当する。日本、フィリピンとの3か国で共同研究をすすめている。

■英国（オックスフォード大学、サウザンプトン大学） 役割分担：イメージング、プラズモニクス・メタマテリアル

英国は拠点をオックスフォード大学におき、この他にサウザンプトン大学が参画している。コーディネーターのオックスフォード大学Booth 教授は、超解像顕微鏡を専門とし、大阪大学と3次元微細光造形や、Adaptive Optics 等についての共同研究を行い、セミナーを開催した実績もある。イメージング、プラズモニクス・メタマテリアルを担当する。イメージングの共同研究は日本、オーストラリアの3か国間ですすめている。

■オーストラリア（オーストラリア国立大学、メルボルン工科大学） 役割分担：イメージング、分光

オーストラリアは拠点をオーストラリア国立大学（ANU）におき、この他にメルボルン工科大学が参画している。コーディネーターのANU Daria教授は生体イメージングが専門で、特に最近ではニューロフォトニクスの研究に力を入れている新進気鋭の研究者である。大阪大学で学位を取得しており、大阪大学とのつながりが深い。Daria教授のもつバイオ実験技術に関する強みを生かしてイメージング、分光分野を担当する。

■米国（ライス大学） 役割分担：非線形光学

コーディネーターのライス大学Kono教授は、凝縮された物質物理学、光学とフォトニクス、ナノサイエンスと微小工学を専門とし、科学とエンジニアリング学部生のための日米の学生の相互交換プログラムNano Japan（米国全米科学財団）の創始者でもある。Kono教授のもつナノカーボン材料の強みを生かして特にテラヘルツの非線形光学分野を担当する。

■香港（香港理工大学） 役割分担：プラズモニクス・メタマテリアル

コーディネーターのLei 博士はプラズモニックバイオセンシングを主な専門とし、ナノプラズモニクス、ナノフォトニクス分野の研究を多岐に渡り進めている。プラズモニクス・メタマテリアルを担当する。香港のフォトニクス研究は近年著しく成長しており、本プロジェクトへの参画による発展の加速が期待できる。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

本申請課題のように、多くの国の拠点から構成される研究拠点形成事業を5年間にわたって運営するためには、拠点機関における事務の支援が必須である。大阪大学では国際部国際企画課および工学研究科国際交流推進センター、工学研究科総務課評価・広報係が事務支援を行い事業を実施している。