

領域略称名：光圧ナノ物質操作  
領域番号：2806

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」

(領域設定期間)

平成28年度～平成32年度

平成30年6月

領域代表者 (大阪府立大学・工学研究科・教授・石原 一)

# 目 次

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

**研究組織** (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総	16H06503 光圧によるナノ物質操作 と秩序の創生	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	石原 一	大阪府立大学 工学研究科 教授	4
Y00 支	16K21732 光圧によるナノ物質操作 と秩序の創生	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	石原 一	大阪府立大学 工学研究科 教授	4
A01 計	16H06504 光圧を識る：光圧の理論 と計測・観測技術開発に よる基礎の確立	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	石原 一	大阪府立大学 工学研究科 教授	5
A02 計	16H06505 光圧を創る：物質自由度 を活用した操作の高度化	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	岡本 裕巳	分子科学研究所 メゾスコピック計測研究センター 教授	5
A03 計	16H06506 光圧を極める：分子操作 の極限化と光制御による マクロ化	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	笹木 敬司	北海道大学 電子科学研究所 教授	4
A04 計	16H06507 光圧で拓く：多粒子相互 作用の選択的制御による 構造と現象の創造	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	尾松 孝茂	千葉大学 工学研究院 教授	5
総括・支援・計画研究 計 6 件					
A01 公	17H05463 光圧下のナノ粒子群が示 す揺らぎと秩序の熱力学 を定量化する計測データ 解析	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	花崎 逸雄	東京農工大学 工学研究院 准教授	1
A01 公	17H05470 共鳴吸収と熱ゆらぎの協 奏による固体基板上に吸 着した分子の光マニピュ レーション	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	今田 裕	理化学研究所 研究員	1
A01 公	17H05462 マイクロ粒子の光捕捉ポ テンシャル解析を活用し たナノ物質への光圧測定 法の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	田中 嘉人	東京大学 生産技術研究所 助教	1

A02 公	17H05469 アクティブ・フィードバック光ピンセットによるブラウン運動制御とマイクロ冷却	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	杉浦 忠男	崇城大学 情報学部 教授	1
A02 公	17H05460 Optical pulling force using a nanowaveguide	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	SADGROVE Mark	東北大学 電気通信研究所 准教授	1
A02 公	17H05472 サーマル分子ピンセット～溶液中の溶質分子を局所温度分布で摘み動かす技術	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	山本 泰之	産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 研究員	1
A03 公	17H05458 プラズモン導波路を用いたリモート励起多機能光トラッピング	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	雲林院 宏	北海道大学 電子科学研究所 教授	1
A03 公	17H05459 制御されたナノ空間を利用した光圧による物質捕捉と光化学反応場の構築	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	上野 貢生	北海道大学 電子科学研究所 准教授	1
A03 公	17H05468 光圧と Nano-in-Nano 流体力場の融合による液相ナノ粒子の大規模配列	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	許 岩	大阪府立大学 工学研究科 准教授	1
A03 公	17H05471 エバネッセント場による光分子ブレーキと光吸収メタマテリアルを用いた高感度振動分光	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	田中 拓男	理化学研究所 主任研究員	1
A04 公	17H05466 光渦を用いたナノシートコロイド中のキラルな環境場の創出	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	鈴木 康孝	山口大学 自然科学研究科 准教授	1
A04 公	17H05461 電子物性的アプローチによる光圧誘起相転移の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	坂本 一之	千葉大学 工学研究院 教授	1
A04 公	17H05465 光圧によるエクソソームの高効率捕集法の開発と早期がん診断への応用	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	金田 隆	岡山大学 自然科学研究科 教授	1
公募研究 計 13 件					

# 研究領域全体に係る事項

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 領域研究の目標

もし分子や超分子、半導体微粒子、金属微粒子などのナノ物質を、その一つ一つの性質ごとに「個別・選択的」に、また「直接」に運動操作（捕捉・輸送・配置・配向）できれば、極微質量の運動に秩序が表出し、高度な構造や機能が発現するのではないか。このような「極微質量の人為的力学操作を通じた秩序の創生」はあらゆる物質科学者が夢見てきた目標である。本領域は、光が物質に及ぼす力、すなわち光圧（輻射力）を駆使してこれをめざし、「一つひとつのナノ物質を自在に選別し、非破壊・非接触に操る」ことによって高度な構造や機能を組み上げる「次世代物質制御のための学術」を創出することを目的とする。

### 研究の学術的背景

光圧の工学的利用は、1980年代 Ashkin らがレーザーの集光点に  $\mu\text{m}$  サイズの微小誘電体を捕捉する「光ピンセット」技術を提案（Opt. Lett. 11, 288 (1986)）して以来、微小物体の運動制御技術として急速に発展し、現在では、細胞等マイクロ物質を操作するバイオ分野（例えば、Nature 424, 810 (2003)）や原子冷却（Nobel Lecture by William D. Phillips, Dec 8, 1997）の分野での成功がよく知られている。しかし一方で、これらマイクロスケールと原子スケールの間に位置するナノ物質群に対する光圧の研究は、光圧が極小化することに加え、多自由度な環境との相互作用が運動制御を困難とすること、量子力学的多様性から来る物質科学的アプローチが必要であること、などのため、極めて挑戦性の高い課題であった。

### 本領域の先進性

この様な中、我が国では1990年代より世界に先駆けてナノ領域への挑戦が始まった。その研究は、半導体ナノ粒子や分子の物理・化学的な特性を反映した特異な光圧に基づく物質制御の学理追究とその応用を開拓するものであり、世界的にも極めてユニークな研究群を形成してきた。例えば、本領域代表者は、個々のナノ物質のサイズ・形状等の個性が光学応答に強く反映することを利用すれば、光圧でこれらの力学的運動を個別に誘発する選択的な光圧操作が可能であること、またナノ物質の量子力学的特性を反映した線形・非線形光学応答を、光が持つ様々な自由度（周波数、偏光、時空間局在、近年実現し始めた角運動量（光渦））を組み合わせると誘起すれば、ナノ物質を特性に応じて個別に輸送・回転・配向制御、あるいは位置制御や多粒子配置が実現できることなどを理論提案してきた（図1）。実際、光圧でのみ実現可能なこのような「個別」、「選択的」操作の

可能性を示唆する手がかりが、物性物理、光化学、レーザー工学、分子流体力学、さらにナノ計測などの多様な学問領域で得られてきた。このような状況を我が国独自の新学術創成の絶好の機会と捉え、分野を超えた研究者が、それぞれの知見と方法論を融合させ、学問領域の垣根を越えた組織的・戦略的なシナジー効果を得ることによって、上記目標へ挑むことにした。

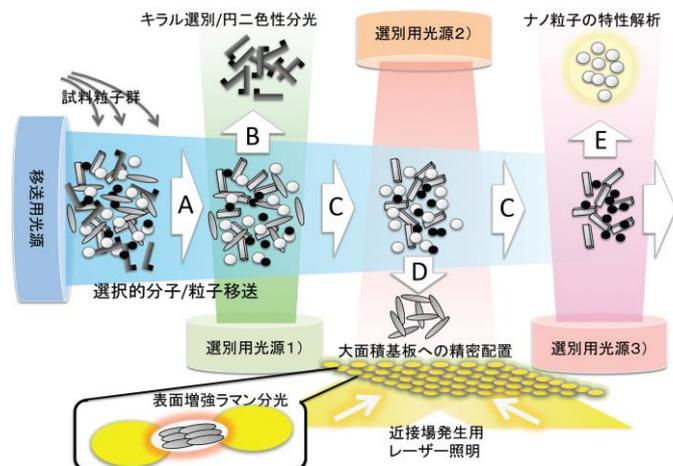


図1 ナノ物質の量子力学的性質を光圧で選択・選別し（ふるいわけ）、さらに精密配置・配列を行うシステムのイメージ図。（図の全体が必ずしも一つのシステムを表現しているわけではない。）**矢印 A**: ナノ物質の特定の場所への輸送。**矢印 B**: 偏光などによる特定のキラリティの選別。**矢印 C**: 特定の性質を持つ粒子の選択的輸送。**矢印 D**: 近接場や光アンテナを利用した光制御により基板へ精密配置・配向、及び単分子計測へ。レーザー干渉や走査を用いた大面積化へも展開。**矢印 E**: 微粒子の微視的特性の分布をマクロな空間分布に変換して計測。（動かすことによって始めて分かる物性特性や、環境との相互作用の情報を取得。）

## 本領域の狙いと学術水準の向上・強化に繋がる点

本領域の狙いは、領域代表者の提案、及びその可能性を示唆してきた領域メンバーの手がかりに基づき、「ナノ物質を『個別・選択的』に『直接』操るための学理と方法論」を確立することを通して、

- ナノ物質の量子力学的性質を光圧でふるいわけることにより可能となる新たな計測・観測・検出手法
- ナノ物質間やナノ物質と環境との相互作用の制御による、結晶多形、階層構造、多重周期構造の創出
- 選択的な拡散制御や分子濃縮などの物理的操作を通じた化学過程の制御

等を実現させることにある。これらが、物質科学、光学、機械工学などの知見を結集して、様々な実用的環境で成功すれば、我が国独自の物質制御技術に基づいて世界を牽引する融合的学術分野が創出される。

## 本領域が明らかにする事項と研究戦略

本領域では【ナノ物質の「個別・選択的」かつ「直接的」操作の実現】なる目標の達成を可視化するため、【1】まず以下に示す**3つの共同研究[A][B][C]**を**領域全員で取り組む核心的な研究項目**として設定した。またこの実現のため、【2】融合されるべき科学的知見と鍵となる技術要素を徹底的に深化させることを目的とした**4つの計画研究**を設定し、それぞれが明らかにすべき課題を割り当てた。【1】の具体的共同研究は以下である。

**共同研究[A]**：分離・精密配置・大面積化 - 特定ナノ物質の分離と光制御による精密配置、マクロ化 -

**共同研究[B]**：高度秩序創製 - 粒子間相互作用の制御と結晶等の階層秩序構造創製 -

**共同研究[C]**：光圧を利用した分子プロセスの制御 - 分子の選択的力学操作を通じた化学過程の制御 -

[A]では、「個別」「選別」「配置」等の集積（**図1に概念図**）から人為的に「運動や空間構造を通してはじめて得られる物質機能やミクロな情報」を獲得し、光圧を駆使する新たな物性研究、化学研究の地平を拓く。

[B]ではナノ物質の粒子間相互作用や環境との相互作用を偏光や光の角運動量などを駆使して選択的に制御し、さらに熱対流や熱泳動などの効果を相乗させてマクロスケールで高度秩序、階層秩序を作り出す。

[C]では特定の分子種を光圧により空間的に濃縮、或いは隔離することで、熱平衡下では得られない化学過程を実現させ、新奇な化学機能や空間選択性のあるセンサー機能の実現などを目指す。

また、上記共同研究を支える【2】の計画研究は以下の様な課題に取り組む。

**計画研究1 (A01)：光圧を識る**：光圧の理論と計測・観測技術開発による基礎の確立

様々な媒質における平衡、非平衡環境下でナノ物質が受ける光圧と、誘起される運動の計測・観測、及びそれを理論的に評価して、互いがどのように整合するかを追求し、光圧を識るための基盤技術を確立する。

**計画研究2 (A02)：光圧を創る**：物質自由度を活用した操作の高度化

線形、非線形光学効果と量子力学的共鳴効果を複合的に使い、ナノ物質の運動操作の自由度を格段に拡大する。上記効果と複数ビームの組み合わせで、押す・引く・回転・スイッチ等の多様な操作を確立する。

**計画研究3 (A03)：光圧を極める**：分子操作の極限化と光制御によるマクロ化

微細金属構造等による局在電場を駆使し、分子サイズスケールの空間分解能でナノ物質の配置・配向を制御する機構を明らかにする。さらに光制御による操作のマクロ化を目指す。

**計画研究4 (A04)：光圧で拓く**：多粒子相互作用の選択的制御による構造と現象の創造

多粒子系の相互作用を制御し、光圧に、対流・熱泳動を相乗的に利用した分子濃縮による反応・センシングの超高効率化、高分子の階層構造実現を追求する。共同研究[A][B][C]の方法論を探るパイロット研究である。

## 共同研究の活性化と研究人材育成の戦略

共同研究[A-C]を本領域の核心的活動として実質化すべく、各共同研究推進に責任を持つ**コーディネーター**を置き、さらに具体的計画を策定して研究を実行する若手研究者を**キーパーソン**として配置している。またこれらキーパーソン、及び院生までを含む若手研究者が異分野の手法を習得して共同研究を具体化・実質化できるよう、多様な**異分野若手トレーニング道場**、**若手総括班活動**等を推進し、それぞれの分野内に閉じた活動だけでは実現できない新たなアイデア、手法融合、共同作業を誘発する仕掛けとしている。

## 2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

本領域では期間内に3つの共同研究を通して次のことに資する学理と技術を明らかにしようとしている。すなわち、●光圧によるナノ物質の量子力学的選別と精密配置を通した新たな計測手法・構造・機能の創出、●ナノ物質間、ナノ物質-環境間相互作用の制御による階層秩序構造創出、●分子の選択的光圧操作を通した化学過程の物理的操作、である。本欄ではまず、4つの計画研究が上記目的へ寄与するため、明らかにしようとしたことと、その進展を記した後、それらがどのように融合し、上記共同研究がどこまで進捗したかを記載する。

### 【計画研究1(A01)】光圧を識る：光圧の理論と計測・観測技術開発による基礎の確立

本課題では理論による光圧予想、実際の光圧精密測定、流体下の運動観測の技術確立し、その結果の整合性を期間内に明らかにしようとしている。前半期では、これらそれぞれの技術の確立に注力した。理論では対向ビームを用いる新奇手法の提案が、共鳴による高感度選別の方法論構築とその実験実証に繋がった (*Proc. SPIE* 2018)。またマイクロ流路中での光圧下ナノ微粒子集団の会合化等の複雑な挙動を運動シミュレーションで正確に再現できるようになった (論文投稿中)。精密測定ではAFMカンチレバー、カーボンナノチューブ振動子で単一量子ドット程度の光圧測定が可能な精度を達成した (*Sci.Rep.*2017, *PRAppl.*2018)。さらに蛍光観測ではプラズモニック基板により光圧下で有意に捕捉される量子ドットを観測する (*Opt. Exp.* 2017) など、それぞれの技術が順調に構築され、共同研究への重要な知見が蓄積されている。

### 【計画研究2(A02)】光圧を創る：物質自由度を活用した操作の高度化

本課題では線形・非線形共鳴光学応答を駆使した光圧操作自由度拡張のための、多様な方法論を期間内に明らかにしようとしている。前半期ではナノ粒子に化学反応を誘起して過渡的に吸収スペクトルを操作して捕捉位置をスイッチする手法を開発し (*JPCL*2018)、また A01 の理論グループと共同で非線形効果による、回折限界を超える超解像捕捉を理論実証 (*ACS Photo.*2018) するなど、新しい操作の方法論が蓄積されてきた。さらに超流動ヘリウム中での共鳴効果の尖鋭化により、プラズモニック基板に量子ドットを輸送する実験に成功し、多様な操作環境での操作の方法論が明らかになっている。また、近接場光学顕微鏡に偏光解析光学系を組み合わせた独自の装置を構築して、金属ナノ構造周辺のキラル場の解析に初めて成功 (*ACS Photo.*2018)、共同研究[B]におけるキラル増強場の構築に寄与する、当初の予定を超えた成果も得られている。

### 【計画研究3(A03)】光圧を極める：分子操作の極限化と光制御によるマクロ化

単一分子レベルの操作、ナノスケールの精密配置、さらにそのマクロ化への方法論を明らかにすべく、前半期では前2者に取り組んだ。単分子を分散させた金属表面上の電場増強部の分子数が、光照射時間と共に増加する現象が明瞭に確認できた (論文投稿中)。また独自に開発した、キラル特性を有する蛍光性ナノ粒子や外部刺激により配向を制御可能な機能性分子を金属ナノ構造体で光捕捉し、光が増強するギャップ部に配置・固定する実験に成功した (図 2-1、*ACS Omega*2018)。さらに光の軌道角運動量による軌道半径を金属ナノ構造で縮小し (*Sci.Rep.*2018)、ナノ粒子をナノ半径で回転させた。またナノファイバーによる光圧輸送を A01 で提案された対向ビーム法と組み合わせて共鳴による選別輸送に成功し、共同研究[A]にブレークスルーをもたらした。

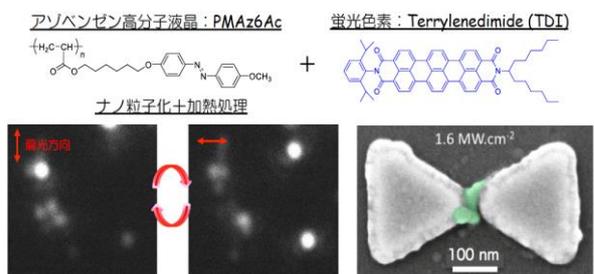


図 2-1 外部刺激により配向を制御可能な蛍光性ナノ粒子と金ナノ二量体による蛍光性ナノ粒子の捕捉&固定

### 【計画研究4(A04)】光圧で拓く：多粒子相互作用の選択的制御による構造と現象の創造

光圧により高濃度粒子系の粒子間相互作用を制御して新奇現象、新奇構造創生の可能性を明らかにしようとする本計画研究では、特に光の軌道角運動量を物質に転写することにより様々なキラル構造が創生可能である

ことを示した(*Opt. Exp.*2017)。また、高濃度の溶液からの光圧誘起結晶化において、光圧ではじめて確認された新たな多形を見いだしている (*Crys. Growth & Design* 2018)。さらにこれまで高温・高圧下でのみ見いだされていた  $C_{60}$  の金属電子相が、光渦を照射した際の相転移で出現することが明らかになっている。またキラル選別結晶化や液-液界面でのナノ粒子捕捉の先導的研究が特に共同研究[B][C]に直結している。現象のさらに詳しい機構やナノ構造創生に果たす光圧の役割は後半期の理論との共同作業の活性化を通し解明していく予定である。

以上の計画研究で蓄積した知見と技術を融合することにより、共同研究[A][B][C]に臨んだ。特に前半期は、申請時の理論的予測とこれまでの手がかりを基礎に、挑戦的課題として設定した、ナノ粒子の量子的特性に基づいた「選別」が室温等実用的条件で可能か、環境の擾乱や熱の影響に打ち勝ってナノ空間で「配置」が出来るか、光圧によって有意かつ新奇な「秩序」が生まれるか、化学反応制御に向けてナノ物質の複合的捕捉・操作が実現するか、を明らかにすることに注力した。以下、共同研究ごとにそのブレークスルーについて述べる。

#### 共同研究[A]

本研究ではナノ微粒子の量子力学的性質による選別・単離を行い、それをナノ空間内で精密に配置、さらにマクロ化する一連の過程を統合する事を目標としており、領域の目標到達の最も直接的な可視化である。本研究において特に重要な成果は、理論と分子流体力学(A01)、分子合成・ナノ金属基板・光圧(A03,A04)の専門家の知見と技術の融合により量子力学的特性による明瞭な選別とその制御、及び精密配置への方法論が実験実証されたことである。共同研究会議で、擾乱に打ち勝つ方法として運動次元の制限を領域共通の戦略として採用することにし、共鳴による「選別」を行った。具体的には、A01で提案した、共鳴以外の力の寄与を相殺してナノ粒子を高精度に共鳴選別する「対向ビームを用いた手法」(*Proc. SPIE* 2018)とA03のナノファイバーによる運動次元制御を組み合わせ、量子情報や先端センシングで応用上も注目されるNV中心を含むナノダイヤモンドの、NV中心有無による選別に、室温・溶液中で成功した[*図 2-2 Proc. SPIE* 2018]。量子的特性に基づいた「選別」の実用的条件下での実証である。現時点では微粒子の粒径が50nm、NV中心数が300程度であるが、理論上、単一NV中心レベルへ展開可能であり、今後の挑戦課題である。

ナノ微粒子の精密配置についても、A03の成果(*図 2-1*)の他にも、ナノ流路専門家の独自デバイスによる運動次元制御によるブラウン運動の抑制と光圧の専門家の技術を融合し、単一ナノ粒子を安定的に光圧捕捉して、選択的な精密複合操作(捕捉・輸送・配置・配列)に成功した。ナノ微粒子を配置する3Dナノケージはマクロ配列されており(*Adv. Mat.* 2018)、期間後半の検討課題である配列マクロ化への手がかりも与える想定を超えた成果と言える。

今後、選別と配置制御の上記方法論を統合したシステム(*図 1*にイメージ)の実現をめざす。

#### 共同研究[B]

本研究においては、期間前半、光圧による新たな秩序創生の際だった例である分子結晶化の機構解明に力を注いだ。本研究において特に重要な成果は、ナノ金属基板(A03)、ナノキラル場解析(A02)、レーザーとキラル結晶(A04)に関する知見と技術の融合により、光圧によるキラル選択性の大幅な向上と機構解明への手がかりを獲得したこと、及び光圧でのみ実現できる結晶多形発現が実証されたことである。

これまで、 $NaClO_3$ 水溶液中での銀ナノ微粒子の光圧捕捉による $NaClO_3$ 結晶化において、光の偏光によるキラル選択性を見いだしていたが、本領域ではその機構の解明をめざしてきた。今回、金属ナノ構造基板の精密製

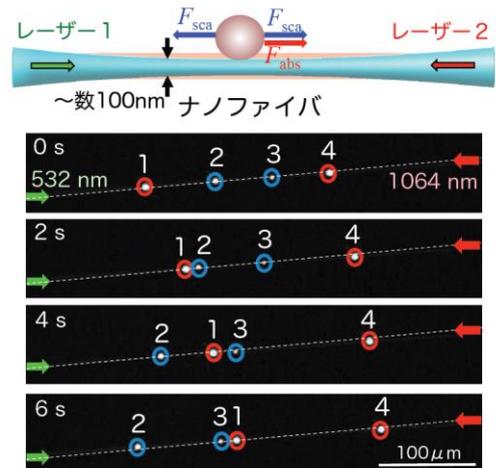


図 2-2 高精細光ファイバによるナノダイヤモンド粒子の NV 中心の有(赤丸)・無(青丸)による選別輸送の観測写真。

造技術と光圧結晶化技術を融合し、プラズモン共鳴波長をデザインして円偏光場を制御することにより狙いの鏡像体の出現率が倍増した[図 2-3]。光周波数、光強度等のパラメーターやキラル場の空間制御性が高い実験系での結果であり、選択的キラル結晶化の機構解明へ極めて大きな手がかりとなる。

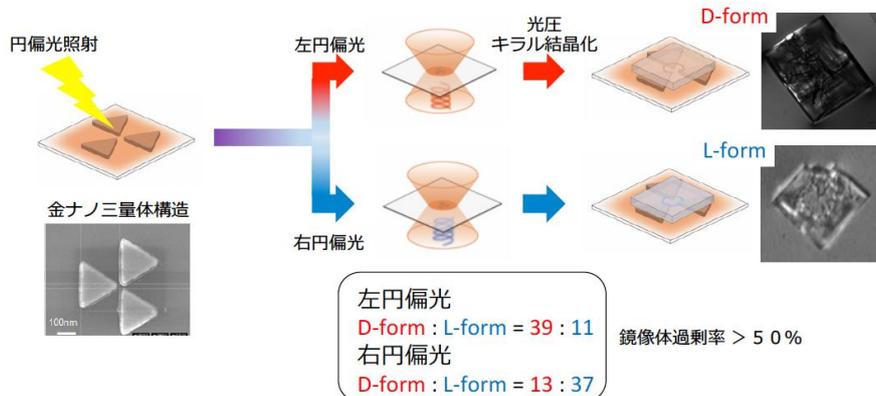


図 2-3 円偏光プラズモン場を用いた光圧キラル結晶化における選択的キラル制御

一方、近赤外連続発振レーザーをシクロデキストリン水溶液の気液-界面に集光することにより、レーザー強度、偏光、溶液濃度によって二つの異なる結晶多形を制御できることが明らかになった。特に多形の一つは光圧によりはじめて析出した新奇な結晶多形であり (*Crys. Growth & Design* 2018)、光圧による新奇秩序創生の重要な事例を示したことになる。

今後、金属ナノ構造による強キラル場と共鳴応答、及び局所空間での結晶化を組み合わせた実験系を構築して、結晶多形及び特異的キラル制御の機構解明と形成された秩序の制御性の一層の向上を目指す。

#### 共同研究 [C]

本研究では、分子プロセスを、光圧を用いて物理的に制御する機構を開拓している。特定の分子種を選択的に分離あるいは濃縮することができれば、熱平衡下とは異なる化学過程が進行する。本研究における最大の挑戦は、化学反応促進のための量子ドット (QD) とナノ金属構造等の液-液界面での異種粒子複合同時濃縮である。今回、化学合成・光圧 (A04)、流体・理論 (A01) の専門家の共同作業により、この点で重要な進展があった。

QD の触媒反応により、油相の QD と水相の金属ナノ構造を架橋させることが出来れば界面での化学プロセスを自在に制御できる。本共同研究で液-液界面を利用した狙いは二つあり、一つは運動次元制限による光圧操作の高精度化、もう一つはこの系の幾何学的特性を活かした光圧による複合粒子系の実現である。今回、独自に作製した 16nm 程度の ZnS-AgInS<sub>2</sub> (ZAIS) QD を油相に、60nm 程度の金属八面体構造を水相に分散させた。これらの粒子は bulk 環境中では容易に捕捉できないが、油液界面では集光ビームでそれぞれが強固に捕捉できることが明らかになった(論文準備中)。理論解析の結果、界面への吸着エネルギーと運動自由度の二次元への制限が光捕捉に重要な役割を果たしていることが分かった。さらに重要な成果として、油相、水相にそれぞれ QD、金属ナノ構造を分散させた場合の同時捕捉にも成功した[図 2-4]。現在、捕捉複合粒子の発光増強現象から配向の解析を行っており、次のステップで配向制御、及び複合微粒子の配列を試み、光誘起触媒反応の確認へ進む予定である。

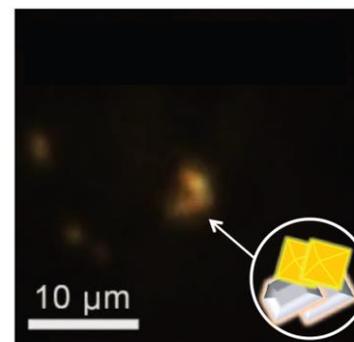


図 2-4 油水界面における ZAIS 量子ドット (油層) と金正八面体ナノ結晶 (水層) の同時捕捉。上図: 捕捉された量子ドット・金正八面体ナノ結晶の集合体の顕微散乱画像。下図: これらの概念図。

以上の共同研究により、ナノ粒子の量子力学的特性と光圧操作の多様な相関が明らかになり、今後の学理の体系化への貴重な蓄積となってきた。またナノ粒子の運動次元制御は技術的ブレークスルーになるのみならず、特殊環境下のナノ微粒子の挙動から、今後、より一般的なナノ微粒子と環境の相互作用に関する知見獲得と、その運動制御についての学理構築への重要なステップになると期待される。

### 3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

審査結果に対する所見は、以下の通りであった。

“本研究領域は、ナノ物質を性質ごとに選別・捕捉・輸送・配置・配向する技術を実用環境下で実現し、極微質量の人為的操作を通じた秩序の創造を目指す独創性・新規性のある提案である。光圧・光渦のデザインによるナノ物質の選択的操作やカイラル制御など世界をリードする研究が計画されており、日本発の独自研究として高い水準を有する。また、本研究領域は光圧によるナノ物質操作に関して我が国の指導的地位を強固にするために必要であるだけでなく、従来の光マニピュレーションとは一線を画した新たな学理を構築する大変意欲的な提案であり、今後、より発展的な研究成果を挙げていくことが期待される。研究組織は、4つの階層からなる計画研究及び3つの共同研究課題を掲げ、新しい学理構築へ向けた明確な目標に基づく体制が設計されている。また、理論系及び実験系での相互理解を促進するための異分野トレーニング道場、若手研究者・学生の研究グループ間交流、設備の共有化などによる有機的連携も計画されており、多くの共同研究が芽生える環境整備が組み込まれている。

一方、日本発の学問として国際的な展開を実現するために、海外との共同研究や国際会議開催など、総括班及び国際活動支援班の役割をより明確にすることが望まれる。また、成果が期待される多くの共同研究を領域が目指す学理構築へ向けて適切に総括するためのマネジメント上の工夫が求められる。”

また留意事項として以下の指摘があった。

“計画されている3つの「班間共同研究」について、より焦点を絞り、具体化した上で遂行すること。”

上記指摘から、必要な対応は次の三点にまとめられる。

- (1) 国際的な展開を実現するための総括班及び国際活動支援班の役割の明確化
- (2) 領域が目指す学理構築へ向けての共同研究の適切な総括のためのマネジメントの工夫
- (3) 「班間共同研究」の焦点付けと具体化

これらについての対応を以下に記載する。

(1) 参考意見にも頂いたように本領域では共同研究、異分野手法若手トレーニング道場、国際共同研究など、領域全体として異分野を融合する様々な仕組みを働かせる計画となっている。このため、特に総括班や国際活動支援において、班員の具体的役割の明確化と、各担当者間の円滑な情報交換と連携、及びそれらを統括する総括班の役割が重要となる。特に若手支援については、海外派遣などを通じて国際活動支援と強くリンクするためそれらの活動の連携が重要である。本領域の国際活動については総括班の尾松が中心になって、国際活動支援班に設けた「国際広報部門担当」の川野・坪井、「国際企画推進部門担当」の笹木・村越、「異分野若手育成部門担当」の秋田・鳥本等の協力の下、その活動計画策定・実施を担当した。その際、総括班の各担当、特に岡本が統括する若手支援活動と密に連携を進めた。(若手支援活動は「7. 若手研究者の育成に係る取組状況」に詳述したので参照されたい。)

本研究領域は我が国独自の新興の研究領域であるため、前半期は、国内、国際を問わず、この領域の認知度を高めていくことを戦略的に行う必要があった。そのため、多くの異分野コミュニティーのそれぞれで実績と知名度のあるメンバーが集まっていることを利用し、各人のホームベースたる学会等でまずは多くのシンポジウム等企画を催して波及効果を高め、後半期で本領域主催の行事を集中的に行って求心力を高める戦略をとった。国際活動についても同様の戦略として、領域メンバーが重要な役割を持つ国際光工学会の Optical Manipulation and Structured Materials Conference をメンバーで主導するなどし、また The 12th

International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON2018、7月9日より予定)を共催して光圧特別セッションを開催し、我が国独自の光圧研究のポテンシャルを広く海外の参加者にもアピールしている。このような中、班員の尾松が米国光学会の新規ジャーナル(OSA Continuum)の Editor-in-Chief に就任するなどの効果も現れている。また、計画代表、分担者レベルで予め協力関係の構築されている海外グループへの、本領域の共同研究拡充と若手育成のための共同研究派遣を組織的に行い、主に博士課程学生、博士研究員、助教クラスの若手をデンマーク、台湾、シンガポール、豪州などへ派遣した。その結果、多くの研究成果や、研究テーマの創出に結びついている。また、台湾でのワークショップと領域アドバイザーによる学生に対する塾開講によって、両国の多数の学生が光圧研究を通じた交流を経験することができた。

(2) 本領域が活動の中心に据える共同研究[A][B][C]はその目標の達成が、学理構築に直結するように策定されている。例えば、共同研究[A]においては、選別的操作と精密配置へのアプローチを通して、ナノ物質の微視的特質が光圧による運動とどのように相関するか、また、環境との相互作用の詳細がどのように運動に反映するかが明らかになり、またその様な運動の結果として現れる機能との相関が明らかになる。また共同研究[B]においては、ナノ物質に対する光圧が粒子間の多体相互作用に与える影響を通して、微視的秩序構築の機構が明らかになると期待される。さらに共同研究[C]においては化学反応の光圧による制御を通して、光圧により、分子プロセスのような微視的過程を熱平衡下の場合からどの程度離れて自由に制御できるのかが明らかになる。

本領域ではこれらの共同研究が実質化し、上記のような学理構築へと集約されるため、次の体制を敷いている。[1]共同研究のそれぞれにおいて統括責任者(コーディネーター)を置き、共同研究会議の開催、各共同研究における方法論や実行計画策定についての議論、等をリードすることで各共同研究を実質化させている。[2]共同研究のそれぞれにおいて主たる実施者(キーパーソン)数名をコーディネーターが指名し、共同研究の具体的進展を促している。キーパーソンは主に若手研究者で、特に期間後半の実行計画を共同で策定している。[3]異分野手法若手トレーニング道場を活性化し、また共同研究会議以外にも、班会議においても積極的に他班からの参加者を招聘することによって共同研究に対する班員の意識を明確化している。前半期では総括班による上記[1][2][3]を通じたマネジメントが有効に働き、多くの共同研究が、共同研究[A][B][C]へと集約され、後半期での学理構築への系統的知見が蓄積されつつある。

(3)「班間共同研究」のそれぞれの具体的プロジェクトである共同研究[A][B][C]における前半期の挑戦的課題を、ナノ粒子の微視的特性に基づいた「選別」が室温等実用的条件で可能か、環境の擾乱や熱の影響に打ち勝ってナノ空間で「配置」が出来るか、光圧によって有意かつ新奇な「秩序」が生まれるか、化学反応制御に向けてナノ物質の複合的捕捉・操作が実現するか、として具体的に焦点付け、班員が明確な課題意識を持つようにした。これらはいずれも本領域発足時には極めて挑戦性の高い課題と認識されていた目標であるが、「2. 研究の進展状況」で詳しく説明したように、● NV 中心を含むナノダイヤモンドの、NV 中心有無による選別に、室温・溶液中で成功したこと、● 単一ナノ粒子を安定的に光圧捕捉して選択的な精密複合操作(捕捉・輸送・配置・配列)に成功したこと、● 光圧による新奇秩序創生の例を実証したこと、● 液-液界面の幾何学的特性を活かして複合粒子系の光圧捕捉を実現したことなど、前半期では上記課題に答えるインパクトのある成果が得られている。また、方法論においても、各計画研究で蓄積した経験に基づいた共同研究会議での議論により、例えば、運動次元の制限に基づいた手法を共通に適用していくことや、金属基板技術、ナノ流体技術など異分野技術を適切に光圧技術と結びつけていくことで、「焦点を絞り、具体化した上で遂行」することが着実に為されてきたと評価している。その結果、上記挑戦的課題に対するそれぞれのブレークスルーが得られ、後半での領域の学理構築への重要なステップになっている。

## 4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

下記において論文番号は項目5のリストに対応している。

### A01 計画研究

共鳴光圧捕捉技術の理論的指導原理を追求する石原 G は台湾交通大との共同研究により、光圧捕捉に対する光学非線形性の影響についての理論予測を裏付ける実験結果を得て[論文 9]、新奇な選択的光捕捉の可能性を実証した。また共鳴光学応答以外の光圧成分を相殺する対向ビーム法を提案し[論文 2]、A03 笹木 G と共同で選択的光圧輸送の実験実証に成功した (*Proc. SPIE* 2018)。さらにナノ微粒子捕捉で避けられない強励起に曝された分散微粒子集団の発光特性を評価する初めての理論的手法の開発に成功している[論文 11]。

ナノ物質の光圧精密計測技術は本領域必須の開発課題であるが、特にナノ物質の光圧計測での熱効果の克服は極めて難度の高い課題であった。菅原 G では世界最高感度の AFM 探針をバネとし、ヘテロダイン技術（周波数変換技術）と周波数変調 (FM) 法に基づく方法（ヘテロダイン FM 法）により光熱効果による見かけの力と光誘起力を分離測定することに成功し[論文 18]、金薄膜表面の量子ドットの光誘起力を 10nm の空間分解能で明瞭に観察した[図 4-1、論文 7]。

また秋田 G ではカーボンナノチューブ (CNT) をバネとして力勾配の分解能  $\pm 0.015$  pN/ $\mu$ m という、ほぼ理論的熱雑音限界の極めて高感度な計測が実現した[図 4-2、論文 16]。さらにグラフェン等の単原子層膜

に、線形振動を保ったまま（非線形にならず）大振幅を示す波長領域があることを見だし、力計測限界の下限を大きく拡張できる可能性を明らかにした[論文 17]。

ナノ粒子の運動観測においては、川野 G がマイクロ流路を用いた熱泳動評価デバイスを作製し、粒子の温度勾配に対する運動方向が粒子種に依存することを明らかにし[論文 5]、流れと熱泳動の均衡を利用して熱泳動の強さを定量的に調べる方法を提案した。光圧捕捉に与える影響の定量評価に必須の成果である。

### A01 公募研究

田中（嘉） G は対称性の低い面状ナノ粒子の面内光散乱方向が偏光により分類できることを明らかにし、光圧方向の偏光制御の可能性を示した[論文 20]。光圧と粒子形状の新たな相関に対する重要な知見である。また STM チップ先端と金属基板の間に生じる増強場で単一分子操作を試みる今田 G は、想定される配置での単一分子発光を超精密分光し、光圧が最大に生じる波長を突き止めることに成功した[論文準備中]。

### A02 計画研究

ナノ微粒子の微視的特性を利用した新奇な操作方法の開発は、光圧操作の自由度を拡大する、本新学術領域

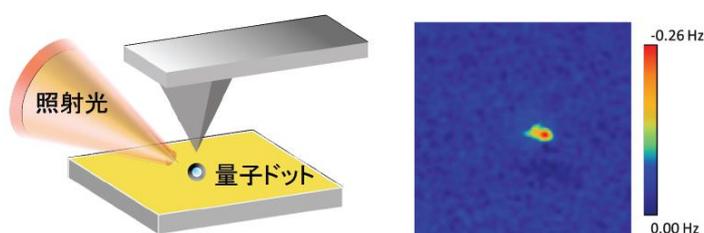


図 4-1 (左)光誘起力測定概念図。原子間力顕微鏡のカンチレバーとナノ物質に光を照射し、探針先端の双極子とナノ物質の双極子との間の相互作用力を測定。(右)金薄膜上の量子ドットに働く光誘起力の像。光誘起力の分布を 10nm の空間分解能で明瞭に観察する事に成功。走査範囲 100nm×100nm。

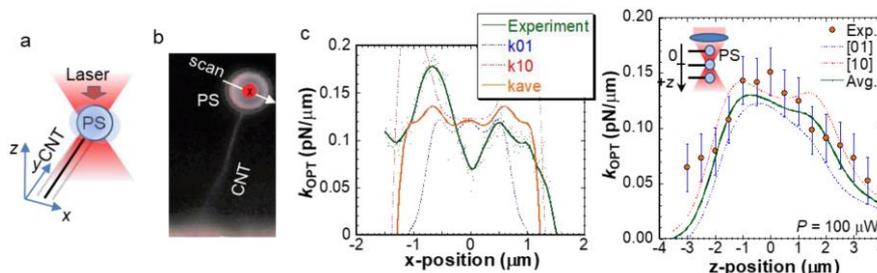


図 4-2 カーボンナノチューブをバネにしてポリマー微粒子への光圧を精密測定。感度は量子ドット一つにかかる光圧が測定可能なレベルに達する。

における重要な課題であり、共同研究[A][B][C]に寄与するためのA02班のミッションである。伊都Gはこのことを化学反応（フォトクロミック反応）によりナノ物質の共鳴条件を変化させることで実現した。用いたフォトクロミック分子は、紫外光照射によって可視域に吸収を持つ分子構造となり、可視光の照射で、可視域で透明な分子に戻る。これを含んだ微粒子を可視光で捕捉し、紫外光を照射して捕捉される位置を変化させ、これを制御することに成功した[図 4-3、論文 26]。これは光圧の挙動を光化学反応によって制御する手法を実現しただけでなく、他の手法では困難な微量化学反応の評価を光圧誘起の運動を通して行う全く新奇なセンシング技術の可能性も示唆している。

ナノ空間において如何に円偏光成分を空間制御するかは重要な課題であり、特に A03 班のナノ空間での光圧操作実現に対する基礎的知見として必須となる。岡本 G は近接場光学顕微鏡に偏光解析光学系を組み合わせた独自の装置を構築して、貴金属ナノ構造（プラズモン物質）周辺のキラルな光の場（楕円偏光電場）を解析することに初めて成功し、キラルでないロッド状金属ナノ構造に直線偏光を照射した場合でも、通常の円偏光よりも強くねじれたキラルな光が局所的に生じることを実験的に示した[図 4-4、論文 22]。この成果は、ナノ領域でキラルな物質を光圧で操作・制御するために必須の知見を提供し、また円偏光場でのキラル結晶化機構解明にも重要な寄与をなす。

さらに岡本 G では、共鳴応答と非線形効果を組み合わせた全く新しい超解像光圧捕捉を A01 石原Gと共同で理論提案した[論文 1]。通常のガウスビームに非線形効果により力の向きを反転させるドーナツビームを相乗させ、位相特異点の部分のみで粒子を捕捉するアイデアであり、ナノスケールの構造作製を可能にする。

#### A02 公募研究

本領域では運動自由度制限の手法としてナノファイバーの利用を推進しているが、サッドグローブGは光照射されたファイバー近接ナノ粒子からのファイバー伝搬散乱光の円偏光特性を観測することで輸送されるナノ粒子の数が明らかにできることを示した[論文 37]。共同研究[A]に寄与する重要な成果である。

#### A03 計画研究

どこまで小さなナノ微粒子を光圧で操作可能か、どれくらい精密な空間精度で操作可能かは、本新学術領域で明らかにすべき重要なポイントであり、A03 班はこの課題解決をミッションとしている。

分子・分子集合体に作用する光圧をナノ空間でデザインし、室温・媒質中における分子・分子集合体を自在に操作する技術として、笹木Gは、スピン・軌道角運動量を有する光を、回折限界を超えてシングルナノメートルサイズの空間に局在させて[論文 42]光圧トルクによりナノ粒子の回転運動を駆動する研究を進めた。強い局在場で、光の軌道角運動量がナノ粒子に転写して発生する光圧トルクにより、ナノ粒子をナノ空間で回転運動させる実験に初めて成功した[図 4-5]。この成果は、共同研究[B]の「金属ナノ構造による選択キラル結晶化」の機構解明に大きく寄与すると期待される。

村越 G では金属表面に分散した分子へ光照射したとき、時間の経過にしたがって光増強場での分子数が増強するという特徴的な現象を観測しており、運動次元の制限によって一分子レベルでの運動制御の可能性を示し

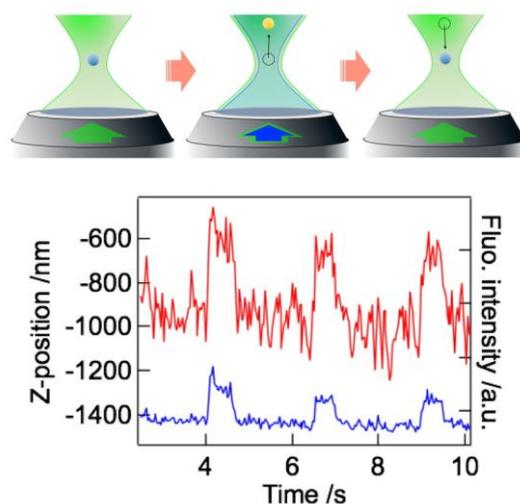


図 4-3 (上) 光圧スイッチングの概念、(下) 微粒子からの蛍光強度 (赤) と位置 (青) の変化。紫外光照射中、蛍光強度が増加し、位置が変化。

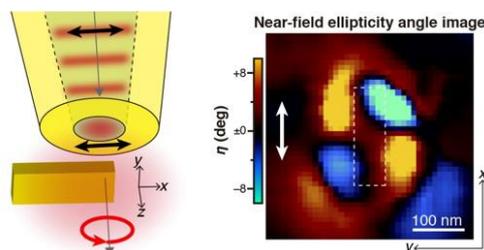


図 4-4 (左) 近接場計測の概念。近接場で直線偏光を照射し、ナノ構造からの散乱光の円偏光度を計測。(右) 金ナノ長方形で得られた近接場円偏光度イメージ

た。さらには電気化学電位の掃引によって[論文 45]分子表面吸着種を選択的に変化させることによる選択的分子光捕捉技術の実現の可能性が示唆されている。

### A03 公募研究

公募研究では許 G がナノ流路中 3D ケージ効果[論文 51]と光圧操作を融合した斬新な手法で一つ一つのナノ粒子配置に成功したことに加え、田中(拓) G が、メタマテリアルを装荷したナノ流路に光導波路をハイブリッド化させたデバイスを作り、流路内のナノ微粒子や分子の運動を光圧で制御しながら超高感度に赤外分光計測を行うシステムを開発している。すでに、赤外スペクトル測定において  $4.4 \times 10^{-4}$  molecules/ $\text{\AA}^2$  の検出感度を実現することに成功した[論文準備中]。

### A04 計画研究

A04 班は共同研究[A-C]に方法論を提供するパイロット研究、中でも多粒子相互作用の選択的制御による構造と現象の創造がミッションであり、光圧誘起結晶成長、階層構造創生、光圧による触媒反応システム創生などを研究している。尾松 G は「階層構造創成」として、角運動量を持つ光波(光渦)が誘導する物質のキラルな質量移動を発見した。特に、光異性化反応を示すアゾポリマーを取り上げ、スピン角運動量と軌道角運動量の相互作用(スピン-軌道相互作用)がキラルな質量移動に大きく寄与していることを実験的に明らかにした[論文 68]。さらに、螺旋ファイバーなどの秩序性を有する構造体を光波の角運動量によって形成することに成功している[図 4-6、論文準備中]。

また、プラズモン捕捉法にも新しい展開があった。色素 J 会合体と色素 H 会合体は分子配向が異なる。一般にプラズモンと分子の相互作用は分子配向に鋭敏である。坪井 G はその性質を利用することで J 会合体と H 会合体を選択的に捕捉できることを実証した[論文 71]。またプラズモン捕捉法で必ず問題となるプラズモン加熱を排除するためブラックシリコンによる局在光閉じ込め増強効果を活用した新しい光捕捉法を開発した[論文 72]。この光捕捉法は非プラズモニック非サーマルであるため、安定に大量の微粒子を局所的に高濃度に捕捉できる。成果は Scientific Reports の年間アクセスランキング Top100 となった。これらは多粒子相互作用の選択的制御の自由度を格段に高める可能性があり、採択時には想定していなかった重要な成果である。

### A04 公募研究

光圧により新しい物性を創出することは A04 班のみならず、本領域全体の重要な課題であるが、公募研究の鈴木 G は Niobate ナノシートのコロイド中で、光渦などによる光圧でシートの配向やシート間相互作用を制御できることを見だし、集光スポットの数 100 倍という広域にわたって秩序構造を生成できることを明らかにした[論文 66]。また坂本 G は、半導体的な電気伝導を示す  $C_{60}$  薄膜に真空中・室温下で光渦を照射すると、光渦を照射した領域でのみ薄膜が金属的な伝導を示していることを光電子分光による解析により明らかにした[論文準備中]。これまで高圧下でのみ出現した電子状態が、光渦を照射したときのみ出現しており、光圧による新しい相転移の機構の存在を示唆する重要な成果である。

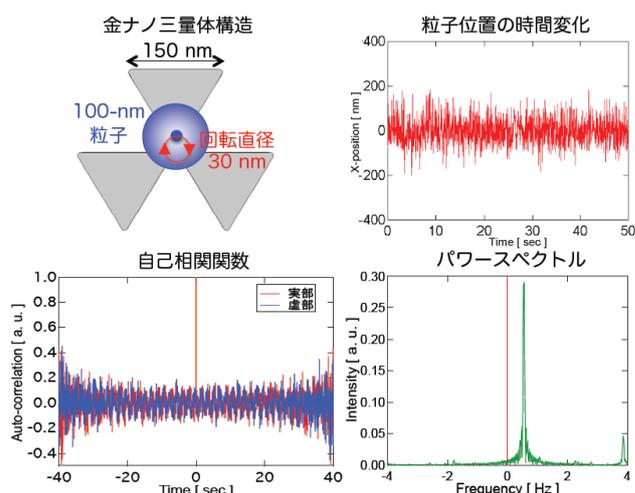


図 4-5 円偏光を照射した金属ナノ三量体構造によるナノ粒子の回転操作。シングルナノ空間での回転駆動。ナノポジション計測装置と新規解析法で直径 30 nm で回転と同定。

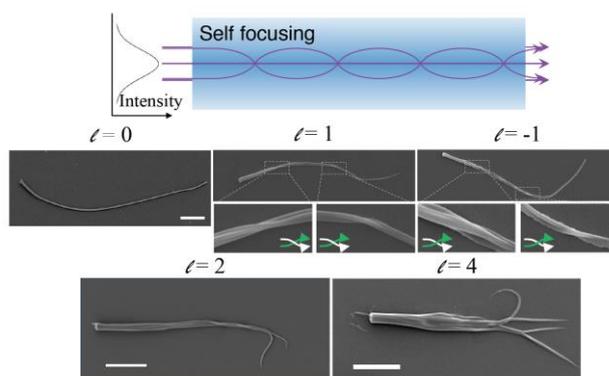


図 4-6 光渦の軌道角運動量がトリガーとなり樹脂がわずかに振じれ(この部分で光圧が作用する)、屈折率の分布の対称性が破れ、レーリー長に相当する周期で振じれたファイバーを形成。

## 5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 原著論文

#### 研究項目 A01（全 62 報）

- ◎▲\*M. Hoshina, N. Yokoshi, H. Okamoto, H. Ishihara, "Super-Resolution Trapping: A Nanoparticle Manipulation Using Nonlinear Optical Response", *ACS Photonics*, **5**, 318-323 (2018) (査読有)
- ▲\*T. Wada, H. Ishihara, "Proposed selective optical transport of nanoparticles using counter-propagating beams", *Proceedings of SPIE*, **10712**, 107121P (2018) (査読有)
- ▲\*T. Kinoshita, T. Matsuda, H. Ishihara, "Spontaneous resonance between bound and delocalized excitons caused by enhanced radiative corrections", *Physical Review B*, **97**, 195451 (2018) (査読有)
- ▲T. Tsuji, S. Saita, \*S. Kawano, "Thermophoresis of a Brownian particle driven by inhomogeneous thermal fluctuation", *Physica A*, **493**, 467-482 (2018) (査読有)
- ▲T. Tsuji, S. Saita, \*S. Kawano, "Dynamic pattern formation of microparticles in a uniform flow by on-chip thermophoretic separation device", *Physical Review Applied*, **9**, 024035/1-11 (2018) (査読有)
- ▲K. Doi, F. Nito, \*S. Kawano, "Cation-induced electrohydrodynamic flow in aqueous solutions", *The Journal of Chemical Physics*, in press (2018) (査読有)
- ▲J. Yamanishi, Y. Naitoh, J. Li, \*Y. Sugawara, "Heterodyne Frequency Modulation Technique in Photoinduced Force Microscopy", *Physical Review Applied*, **9**, 024031/1-5 (2018) (査読有)
- ▲S. Vantasin, \*Y. Y. Tanaka, T. Shimura, "Launching and Control of Graphene Plasmons by Nanoridge Structures", *ACS Photonics*, **5**, 1050-1057 (2018) (査読有)
- ◎▲\*T. Kudo, H. Ishihara, H. Masuhara, "Resonance optical trapping of individual dye-doped polystyrene particles with blue- and red-detuned lasers", *Optics Express*, **25**, 4655-4664 (2017) (査読有)
- ▲\*T. Kinoshita, H. Ishihara, "Design of nonlinear optical response of multipole-type excitons by film thickness and incident pulse width", *Physical Review B*, **95**, 155418 (2017) (査読有)
- ◎▲\*N. Yokoshi, K. Odagiri, A. Ishikawa, H. Ishihara, "Synchronization Dynamics in a Designed Open System", *Physical Review Letters*, **118**, 203601/1-5 (2017) (査読有)
- ▲\*N. Yokoshi, H. Ishihara, "Weak-Light Nonlinearity Using a Dark State in Coupled Quantum Dots", *Journal of the Physical Society of Japan*, **86**, 083401/1-4 (2017) (査読有)
- ▲\*T. Matsuda, H. Ishihara, "Proposal of highly efficient photoemitter with strong photon-harvesting capability and exciton superradiance", *Applied Physics Letters*, **111**, 63108 (2017) (査読有)
- ▲T. Tsuji, K. Kozai, H. Ishino, \*S. Kawano, "Direct Observations of Thermophoresis in Microfluidic Systems", *Micro & Nano Letter*, **12**, 520-525 (2017) (査読有)
- ◎▲T. Tsuji, H. Iseki, I. Hanasaki, \*S. Kawano, "Negative Thermophoresis of Nanoparticles Interacting with Fluids through a Purely-Repulsive Potential", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **29**, 475101/1-10 (2017) (査読有)
- ▲M. Ysuda, K. Takei, T. Arie, \*S. Akita, "Direct measurement of optical trapping force gradient on polystyrene microspheres using a carbon nanotube mechanical resonator", *Scientific Reports*, **7**, 2825/1-7 (2017) (査読有)
- ▲T. Inoue, Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, T. Arie, \*S. Akita, "Resonance control of graphene drum resonator in nonlinear regime by standing wave of light", *ACS Omega*, **2**, 5792-5797 (2017) (査読有)
- ▲J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. Li, \*Y. Sugawara, "Heterodyne Technique in Photoinduced Force Microscopy with Photothermal Effect", *Applied Physics Letters*, **110**, 123102/1-4 (2017) (査読有)
- ◎▲T. Kishimoto, Y. Maezawa, S. N. Kudoh, T. Taguchi, \*C. Hosokawa, "Molecular dynamics in an optical trap of glutamate receptors labeled with quantum-dots on living neurons", *Proceedings of SPIE*, **10252**, 1025208/1-2 (2017) (査読有)

20. ▲\*Y. Y. Tanaka, T. Shimura, "Tridirectional polarization routing of light by a single triangular plasmonic nanoparticle", *Nano Letters*, **17**, 3165-3170 (2017) (査読有)
21. ◎▲Y. Kinoshita, R. Turansk\_, J. Brndiar, Y. Naitoh, Y. Li, L. Kantorovich, \*Y. Sugawara, I. Štich, "Promoting atoms into delocalised long-living magnetically modified state using Atomic Force Microscopy", *Nano Letters*, **16**, 7490-7494 (2016) (査読有)

研究項目 A02 (全 40 報)

22. ▲S. Hashiyada, T. Narushima, \*H. Okamoto, "Imaging Chirality of Optical Fields Near Achiral Metal Nanostructures Excited with Linearly Polarized Light", *ACS Photonics*, **5**, 1486-1492 (2018) (査読有)
23. ▲\*M. Kumakura, K. Mitsutaka, K. Asuka, M. Takeshi, "Dispersion of quantum dots into gases toward their optical manipulation", *Proceedings of SPIE*, **10712**, 107121I (2018) (査読有)
24. ◎▲T. Nakahama, D. Kitagawa, H. Sotome, T. Fukaminato, S. Ito, H. Miyasaka, \*S. Kobatake, "Fluorescence On/Off Switching in Nanoparticles Consisting of Two Types of Diarylethenes", *ACS Omega*, **3**, 2374-2382 (2018) (査読有)
25. ◎▲\*M. Morimoto, Y. Takagi, K. Hioki, T. Nagasaka, H. Sotome, S. Ito, H. Miyasaka, \*M. Irie, "A turn-on mode fluorescent diarylethene: Solvatochromism of fluorescence", *Dyes and Pigments*, **153**, 144-149 (2018) (査読有)
26. ◎▲\*S. Ito, M. Mitsuishi, K. Setoura, M. Tamura, I. Takuya, M. Morimoto, M. Irie, H. Miyasaka, "Mesoscopic Motion of Optically Trapped Particle Synchronized with Photochromic Reactions of Diarylethene Derivatives", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **9**, 2659-2664 (2018) (査読有)
27. ▲\*Y. Minowa, Y. Oguni, M. Ashida, "Inner structure of ZnO microspheres fabricated via laser ablation in superfluid helium", *Optics Express*, **25**, 10449-10445 (2017) (査読有)
28. ▲Y. Minowa, Y. Toyota, M. Ashida, "In situ tuning of whispering gallery modes of levitated silica microspheres", *Journal of the Optical Society of America B*, **34**, C20-C24 (2017) (査読有)
29. ◎▲Y. Takahashi, J. Suzuki, N. Yoneyama, Y. Tokawa, N. Suzuki, F. Matsushima, M. Kumakura, M. Ashida, \*Y. Moriwaki, "Magnetic trapping of superconducting submicron particles produced by laser ablation in superfluid helium", *Applied Physics Express*, **10**, 022701/1-4 (2017) (査読有)
30. ◎▲K. Masuda, S. Nakano, D. Barada, M. Kumakura, K. Miyamoto, \*T. Omatsu, "Azo-polymer film twisted to form a helical surface relief by illumination with a circularly polarized Gaussian beam", *Optics Express*, **25**, 12499-12507 (2017) (査読有)
31. ▲\*M. Kumakura, K. Mitsutaka, K. Asuka, M. Takeshi, "Influence of dilution with organic solvents on emission spectra of CdSe/ZnS quantum dots", *Proceedings of SPIE*, **10252**, 1025219 (2017) (査読有)
32. ◎▲K. Setoura, \*S. Ito, \*H. Miyasaka, "Stationary Bubble Formation and Marangoni Convection Induced by CW Laser Heating of a Single Gold Nanoparticle", *Nanoscale*, **9**, 719-730 (2017) (査読有)
33. ◎▲Y. Arai, \*S. Ito, H. Fujita, Y. Yoneda, T. Kaji, S. Takei, R. Kashihara, M. Morimoto, \*M. Irie, \*H. Miyasaka, "One-colour control of activation, excitation and deactivation of a fluorescent diarylethene derivative in super-resolution microscopy", *Chemical Communications*, **53**, 4066-4069 (2017) (査読有)
34. ◎▲T. Nakahama, D. Kitagawa, H. Sotome, S. Ito, \*H. Miyasaka, \*S. Kobatake, "Fluorescence on/off switching in polymers bearing diarylethene and fluorene in their side chains", *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 6272-6281 (2017) (査読有)
35. ◎▲K. Setoura, M. Yamada, \*S. Ito, H. Yamauchi, \*H. Miyasaka, "Fabrication of Silver Nanoparticles from Silver Salt Aqueous Solution at Water-Glass Interface by Visible CW Laser Irradiation without Reducing Reagents", *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, **344**, 168-177 (2017) (査読有)
36. ◎▲R. Kashihara, M. Morimoto, S. Ito, H. Miyasaka, \*M. Irie, "Fluorescence Photoswitching of a Diarylethene by Irradiation with Single-Wavelength Visible Light", *Journal of the American Chemical Society*, **139**, 16498-16501 (2017) (査読有)
37. ◎▲M. Sadgrove, M. Sugawara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, "Polarization response and scaling law of chirality for a nanofibre optical interface", *Scientific Reports*, **7**, 17085/1-9 (2017) (査読有)
38. ▲T. Narushima, \*H. Okamoto, "Circular Dichroism Microscopy Free from Commingling Linear Dichroism via Discretely Modulated Circular Polarization", *Scientific Reports*, **6**, 35731/1-10 (2016) (査読有)
39. ◎▲\*Y. Nishiyama, \*H. Okamoto, "Near-Field Nonlinear CD Imaging of Single Gold Nanostructures", *The Journal of Physical Chemistry C*, **120**, 28157-28162 (2016) (査読有)
40. ◎▲\*T. Iida, Y. Nishimura, M. Tamura, K. Nishida, S. Ito, \*S. Tokonami, "Submillimetre Network Formation by Light-induced Hybridization of Zeptomole-level DNA", *Scientific Reports*, **6**, 37768/1-9 (2016) (査読有)

研究項目 A03 (全 55 報)

41. ◎▲C. Pin, S. Ishida, G. Takahashi, S. Kota, T. Fukaminato, \*K. Sasaki, "Trapping and Deposition of Dye-Molecule Nanoparticles in the Nanogap of a Plasmonic Antenna", *ACS Omega*, **3**, 4878-4883 (2018) (査読有)
42. ▲K. Sakai, T. Yamamoto, \*K. Sasaki, "Nanofocusing of structured light for quadrupolar light-matter interactions", *Scientific Reports*, **8**, 7746 (2018) (査読有)
43. ▲\*H. Fujiwara, R. Niyuki, K. Sasaki, "White light induced photo-thermal switching in a graphene-flake-mixed ZnO nanoparticle random laser", *Journal of Physics Communications*, **2**, 35022 (2018) (査読有)
44. ▲S. Oikawa, H. Minamimoto, X. Li, \*K. Murakoshi, "Nanoscale Control of Plasmon-active Metal Nanodimer Structures via Electrochemical Metal Dissolution Reaction", *Nanotechnology*, **29**, 45702 (2018) (査読有)
45. ◎▲F. Kato, H. Minamimoto, N. Fumika, Y. S. Yamamoto, T. Itoh, \*K. Murakoshi, "Active Tuning of Strong Coupling States between Dye Excitons and Localized Surface Plasmons via Electrochemical Potential Control", *ACS Photonics*, **5**, 788-796 (2018) (査読有)
46. ◎▲X. Li, P. D. McNaughten, P. O'Brien, H. Minamimoto, \*K. Murakoshi, "Plasmonically Enhanced Electromotive Force of Narrow Band Gap Quantized PbS Dots Based Photovoltaics", *Physical Chemistry Chemical Physics*, in press (2018) (査読有)
47. ▲H. Minamimoto, S. Oikawa, T. Hayashi, A. Shibazaki, X. Li, \*K. Murakoshi, "Electrochemical Fine Tuning of the Plasmonic Properties of Au Lattice Structures", *The Journal of Physical Chemistry C*, in press (2018) (査読有)
48. ◎▲M. Suzuki, K. Yamane, M. Sakamoto, K. Oka, Y. Toda, \*R. Morita, "Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses by using the combination of 4-f spatial light modulator and common-path optical system", *Optics Express*, **26**, 2584-2598 (2018) (査読有)
49. ◎▲T. Nakahama, D. Kitagawa, H. Sotome, T. Fukaminato, S. Ito, H. Miyasaka, \*S. Kobatake, "Fluorescence on/off switching in nanoparticles consisting of two types of diarylethenes", *ACS Omega*, **3**, 2374-2382 (2018) (査読有)
50. ▲K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, X. Shi, \*H. Misawa, "Solid-state plasmonic solar cells", *Chemical Reviews*, **118**, 2955-2993 (2018) (査読有)
51. ◎▲\*Y. Xu, "Nanofluidics: a New Arena for Materials Science", *Advanced Materials*, **30**, 1702419/1-17 (2018) (査読有)
52. ◎▲R. Niyuki, \*H. Fujiwara, \*T. Nakamura, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, T. Tsuji, K. Sasaki, "Double threshold behavior in a resonance-controlled ZnO random laser", *APL Photonics*, **2**, 036101/1-7 (2017) (査読有)
53. ▲H. Minamimoto, F. Kato, F. Nagasawa, M. Takase, \*K. Murakoshi, "Electrochemical Control of Strong Coupling States Between Localized Surface Plasmons and Molecule Excitons for Raman Enhancement", *Faraday Discussions*, **205**, 261-269 (2017) (査読有)
54. ◎▲S. Ishida, \*T. Fukaminato, S. Kim, T. Ogata, \*S. Kurihara, "Sequential Red-Green-Blue (RGB) Fluorescence Color Photoswitching in Multicomponent Photochromic Fluorescent Nanoparticles", *Chemistry Letters*, **46**, 1182-1185 (2017) (査読有)
55. ◎▲S. Ishida, \*T. Fukaminato, D. Kitagawa, S. Kobatake, S. Kim, T. Ogata, \*S. Kurihara, "Wavelength-selective and high-contrast multicolour fluorescence photoswitching in a mixture of photochromic nanoparticles", *Chemical Communications*, **53**, 8268-8271 (2017) (査読有)
56. ◎▲Y. Fujita, R. Aubert, P. Walke, H. Yuan, B. Kenens, T. Inose, C. Steuwe, S. Toyouchi, B. Fortuni, M. Chamtour, K. P.T. Janssen, S. De Feyter, M. B. J. Roeloffs, \*H. Uji-i, "Highly controllable direct femtosecond laser writing of gold nanostructures on titanium dioxide surfaces", *Nanoscale*, **9**, 13025-13033 (2017) (査読有)
57. ◎▲R. Aubert, B. Kennes, M. Chamtour, Y. Fujita, B. Fortuni, G. Lu, J. A. Hutchison, T. Inose, \*H. Uji-i, "Surface Density-of-States Engineering of Anatase TiO<sub>2</sub> by Small Polyols for Enhanced Visible-Light Photocurrent Generation", *ACS Omega*, **2**, 6309-6313 (2017) (査読有)
58. ◎▲J. Guo, K. Ueno, J. Yang, X. Shi, J. Li, Q. Sun, T. Oshikiri, \*H. Misawa, "Exploring the near-field of strongly coupled waveguide-plasmon modes by plasmon-induced photocurrent generation using a gold nanograting-loaded titanium dioxide photoelectrode", *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 21627-21633 (2017) (査読有)
59. ▲\*K. Sakai, K. Nomura, T. Yamamoto, T. Omura, \*K. Sasaki, "Quadrupole lattice resonances in plasmonic crystal excited by cylindrical vector beams", *Scientific Reports*, **6**, 34967/1-7 (2016) (査読有)
60. ◎▲K. Yamane, M. Sakamoto, N. Murakami, R. Morita, \*K. Oka, "Picosecond rotation of a ring-shaped optical lattice by using a chirped vortex-pulse pair", *Optics Letters*, **41**, 4597-4600 (2016) (査読有)

研究項目 A04 (全 61 報)

61. ◎▲W. Chang, A. Usman, \*T. Sugiyama, J. Hofkens, H. Masuhara, "Femtosecond Laser Trapping Dynamics of

- Nanoparticles: A Single Transient Assembly Formation Leading to Their Directional Ejection”, *The Journal of Physical Chemistry C*, in press (2018) (査読有)
62. ◎▲\*H. Niinomi, T. Sugiyama, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Freezing” of NaClO<sub>3</sub> Metastable Crystalline State by Optical Trapping in Unsaturated Microdroplet”, *Crystal Growth and Design*, **18**, 734-741 (2018) (査読有)
  63. ◎▲K. Yuyama, K. Chang, J. Tu, H. Masuhara, \*T. Sugiyama, "Rapid Localized Crystallization of Lysozyme by Laser Trapping”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **20**, 6034-6039 (2018) (査読有)
  64. ◎▲R. Izumi, Y. Yao, T. Tsuda, T. Torimoto, \*S. Kuwabata, "Pt-Nanoparticle-Supported Carbon Electrocatalysts Functionalized with a Protic Ionic Liquid and Organic Salt”, *Advanced Materials Interfaces*, **5**, 1701123 (2018) (査読有)
  65. ◎▲T. Kameyama, K. Sugiura, Y. Ishigami, T. Yamamoto, S. Kuwabata, T. Okuhata, N. Tamai, \*T. Torimoto, "Rod-Shaped Zn<sub>2</sub>Ag<sub>2</sub>In<sub>2</sub>Te Nanocrystals with Wavelength-Tunable Band-Edge Photoluminescence in the Near-IR Region”, *Journal of Materials Chemistry C*, **6**, 2034-2042 (2018) (査読有)
  66. ◎▲ M. Tominaga, T. Nagashita, T. Kumamoto, Y. Higashi, T. Iwai, \*T. Nakato, Y. Suzuki, \*J. Kawamata, "Radiation Pressure Induced Hierarchical Structure of Liquid Crystalline Inorganic Nanosheets”, *ACS Photonics*, **5**, 1288-1293 (2018) (査読有)
  67. ▲M. Kuboi, N. Takeyasu, \*T. Kaneta, "Enhanced Optical Collection of Micro- and Nanovesicles in the Presence of Gold Nanoparticles”, *ACS Omega*, **3**, 2527-2531 (2018) (査読有)
  68. ◎▲K. Masuda, S. Nakano, B. Daisuke, M. Kumakura, K. Miyamoto, \*T. Omatsu, "Azo-polymer film twisted to form a helical surface relief by illumination with a circularly polarized Gaussian beam”, *Optics Express*, **25**, 12499-12507 (2017) (査読有)
  69. ◎▲\*H. Niinomi, T. Sugiyama, M. Tagawa, M. Maruyama, T. Ujihara, T. Omatsu, Y. Mori, "Plasmonic Heating-Assisted Laser-Induced Crystallization from a NaClO<sub>3</sub> Unsaturated Mother Solution”, *Crystal Growth and Design*, **17**, 809-818 (2017) (査読有)
  70. ◎▲\*K. Yamada, C. Narita, R. Kumaresan, T. Shinohara, M. Terakawa, Y. Tsuboi, "Nanofabrication of High Throughput 30 nm hole 2D arrays by a Simple Visible Laser Ablation Technique”, *Applied Surface Science*, **420**, 868-872 (2017) (査読有)
  71. ◎▲A. Mototsuji, T. Shoji, Y. Wakisaka, K. Murakoshi, H. Yao, \*Y. Tsuboi, "Plasmonic optical trapping of nanometer-sized J- /H- dye aggregates as explored by fluorescence microspectroscopy”, *Optics Express*, **25**, 13617-13625 (2017) (査読有)
  72. ◎▲\*T. Shoji, A. Mototsuji, A. Balčytis, D. Linklater, S. Juodkazis, Y. Tsuboi, "Optical tweezing and binding at high irradiation powers on black-Si”, *Scientific Reports*, **7**, 12298 (2017) (査読有)
  73. ◎▲K. Yuyama, M. Ueda, S. Nagao, S. Hirota, T. Sugiyama, H. Masuhara, "A Single Spherical Assembly of Protein Amyloid Fibrils Formed by Laser Trapping”, *Angewandte Chemie International Edition*, **56**, 6739-6743 (2017) (査読有)
  74. ◎▲T. Liu, K. Yuyama, T. Hiramatsu, N. Yamamoto, E. Chatani, H. Miyasaka, \*T. Sugiyama, H. Masuhara, "Femtosecond Laser-Enhanced Amyloid Fibril Formation of Insulin”, *Langmuir*, **33**, 8311-8318 (2017) (査読有)
  75. ◎▲S. Suzuki, Y. Hattori, S. Kuwabata, \*T. Torimoto, "Improvement of Photoluminescence Stability of ZnS-AgInS<sub>2</sub> Nanoparticles through Interactions with Ionic Liquids”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, **332**, 371-375 (2017) (査読有)
  76. ◎▲T. Yoshikawa, \*M. Tamura, S. Tokonami, \*T. Iida, "Optical Trap-Mediated High-Sensitivity Nanohole Array Biosensors with Random Nanospikes”, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **8**, 370-374 (2017) (査読有)
  77. ◎▲\*S. Tokonami, E. Shimizu, M. Tamura, \*T. Iida, "Mechanism in External Field-mediated Trapping of Bacteria Sensitive to Nanoscale Surface Chemical Structure”, *Scientific Reports*, **7**, 16651 (2017) (査読有)

#### 国際会議招待講演 (全 165 件)

##### 研究項目 A01

1. H. Ishihara, "Trapping photons by nanostructures, trapping nanostructures by photons”, *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics* (Hangzhou, China, May 25-27, 2018)
2. Y. Sugawara, "Kelvin probe force microscopy with atomic resolution”, *22nd International Conference and Expo on Nanoscience and Molecular Nanotechnology* (Frankfurt, Germany, Nov. 6-8, 2017) [Keynote]
3. K. Doi, F. Nito, R. Nagura, T. Tsuji, S. Kawano, "Theoretical Prediction of Optical Trapping and Manipulation of Microparticles in Liquid”, *Fourteenth International Conference on Flow Dynamics* (Sendai, Japan, Nov. 1-3, 2017)

#### 研究項目 A02

4. S. Ito, "On-Off Switching of Fluorescence of Diarylethene Derivatives by One-color Photo-Irradiation", *14th DAE-BRNS Biennial Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry 2018 (TSRP-2018)* (Mumbai, India, Jan. 3-7, 2018)
5. S. Shoji, "Laser manipulation of single wall carbon nanotubes", *International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'17)* (Busan, Korea, Sep. 15-17, 2017)
6. H. Okamoto, Y. Jiang, T. Narushima, "Effects of nonlinear polarization in optical trapping", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2016* (Shanghai, China, Aug. 8-11, 2016)

#### 研究項目 A03

7. K. Sasaki, "Optical Manipulation with Linear and Angular Momenta in Nano-Space", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2018)* (Hangzhou, China, May 24-27, 2018) [Keynote]
8. R. Morita, M. Suzuki, K. Yamane, Y. Toda, K. Oka, "Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses with a broadband spectrum", *SPIE Photonics West 2018* (San Francisco, USA, Jan. 27-Feb. 1, 2018)
9. K. Murakoshi, "Plasmonic Field for Molecule Manipulation", *AsiaNANO 2016* (Sapporo, Japan, Oct. 11-13, 2016)

#### 研究項目 A04

10. T. Omatsu, "Creation of Structured Materials with Optical Vortices", *CLEO 2018* (San Jose, USA, May 13-18, 2018) [Tutorial]
11. Y. Tsuboi, "Non-plasmonic nanostructured semiconductor assisted (NASSCA) optical tweezers", *98th CSJ Annual Meeting* (Funabashi, Japan, Mar. 20-23, 2018)
12. T. Sugiyama, "Crystallization and enantiomorphism controlled by optical trapping", *Toyota Riken International Workshop on Chirality in Soft Matter* (Nagoya, Japan, Nov. 24-26, 2017)

#### アウトリーチ活動・広報

光圧トラッピング現象を小中高生や一般市民に実体験してもらうために、領域の共有機器として購入した持ち運び可能なトラッピング実験システムを活用して、領域メンバーがそれぞれの地域でアウトリーチ活動を実施している。装置を購入して10ヶ月間に、

- 1) 大阪の高校の先生を対象としたトラッピング実験自習 (2017/8/10、先生8名)
- 2) 領域の公開シンポジウムでの展示・デモ実験 (2018/1/22-23、参加者120名)
- 3) 日本・アジア青少年サイエンス交流として内モンゴル工業大学の学生の体験実験 (2018/3/6、院生9名)
- 4) 福井県の高校での出前授業・実験実習 (2018/3/15、高校生16名)
- 5) 学園祭に合わせたトラッピング実験公開 (2018/4/30、一般市民80名)

などに活用しており、その他にも、種々のアウトリーチ活動28件を実施した。

また、領域発足時にキックオフシンポジウム (大阪、2016/9/21、参加者150名)、成果報告会として年度末に公開シンポジウム [第1回 (千葉、2017/1/17-18、参加者120名)、第2回 (大阪、2018/1/22-23、参加者120名)] を開催して研究成果の情報発信を行うとともに、応用物理学会、レーザー学会、日本物理学会、日本化学会の年会等で領域関連シンポジウムを企画し開催した。また、国際会議として Optical Manipulation and Structured Materials Conference (3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup>, and 5<sup>th</sup>), International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON2018、2018/7/8-13 予定) を領域メンバーが組織して開催するとともに、OSA や SPIE 等とのジョイントでこれまでに9件の国際シンポジウムを企画し、国際的に情報発信している。領域の活動を紹介するニュースレターは第1～5号と特別号2冊を発刊するとともに、ホームページ (<http://optical-manipulation.jp>) では領域イベントのお知らせに加えて領域の最新の研究トピックスを紹介する欄を設け、研究成果の広報活動に積極的に取り組んでいる。さらに、国際ナノテクノロジー総合展 (nanotech2017、東京ビックサイト、2017/2/14-17) にブース展示を行った他、「産業界へ向けた講演会 (テクノラボツアー)」を開催し、企業関係者への情報発信にも努めている。

## 6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域では、多様な研究分野の方法論と発想を融合することによって新しい学術分野を創出することをめざしている。研究組織体制構築においては、共同研究を実質化し、上記目標へのアプローチを具現化させるため、次の戦略を取っている。

[1] 領域構成員全員が参画する共同研究[A][B][C]を領域活動の中心に据え、3つのテーマそれぞれの推進に責任を持つコーディネーターと実質的推進を担うキーパーソンを配置する体制を取っている。

[2] 若手研究者が異分野の手法を身につけ、それを通して共同研究を活性化させるための異分野手法若手トレーニング道場を開設し（「7. 若手研究者の育成に係る取組状況」参照）、若手育成活動責任担当者の下、これを運営している。

[3] 多数の領域会議や活発な交流企画の他、上記コーディネーターを中心に大小の共同研究会議を頻繁に開催し、具体的に共同研究を進めている。

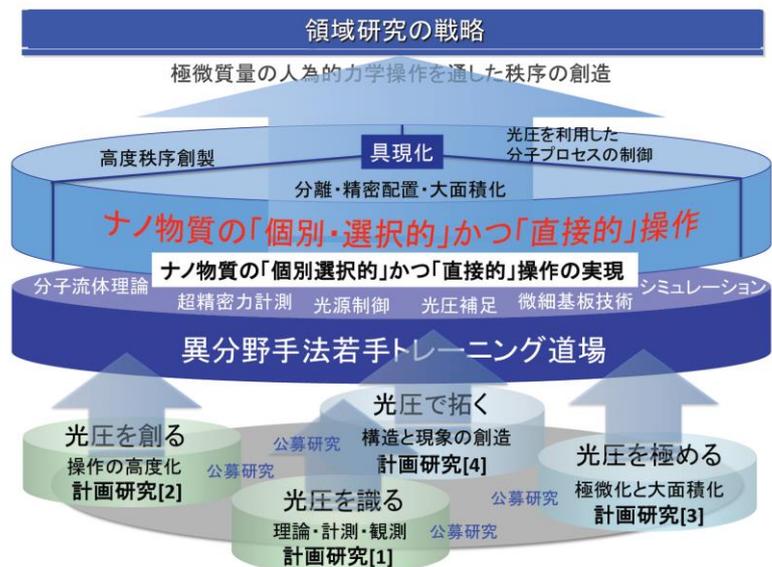
[4] 採択された公募研究は全てA01からA04に再分類できることが分かったため、上記共同研究に既存メンバーと同様の立場で参画できるよう、A01からA04に再配置して共同研究に組み込んだ（次ページ領域組織図参照）。

以下では、上記戦略の下、構成された研究組織と具体的連携状況、推進中の共同研究について説明する。

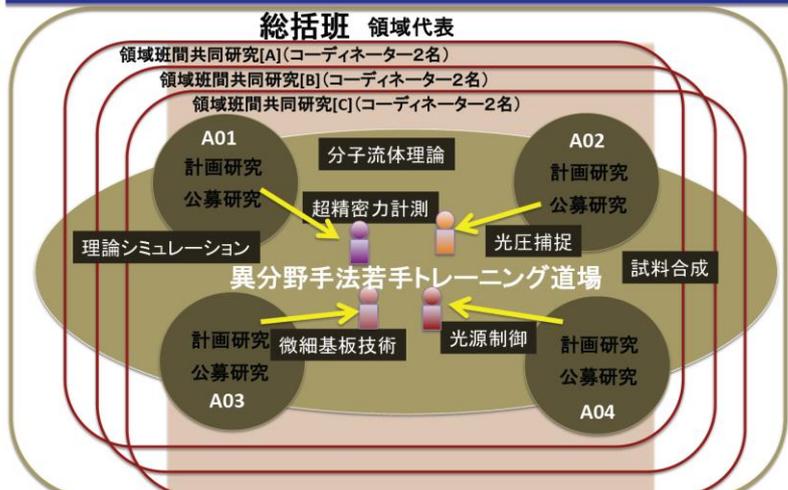
本領域では右、「領域研究の戦略」図、及び「トレーニング道場を通じた共同研究の体制」図に表したように、3つの共同研究を領域活動の中心に据え、それぞれのコーディネーターが共同研究を組織していく体制を取っている。各計画研究は共同研究[A]から[C]の遂行のための基礎となる研究を行い、その成果を随時共同研究に反映させている。また共同研究の結果は各計画研究にフィードバックされている。

具体的な共同研究要素の構築にあたっては、異分野手法若手トレーニング道場をいわば研究の化学反応場として新しい共同研究を創り出している。すなわち、若手准教授、助教、ポスドク、博士課程学生らが分野の異なる研究室で開催される道場に参加して具体的な実験方法等（例えば量子ドットや金属基板の作製、光圧実験、シミュレーション等）を学ぶことを通してグループ間を結びつける。異分野手法若手トレーニング道場の具体的活動については「7. 若手研究者の育成に係る取組状況」に詳しく記載した。

さらにこれら制度設定以外にも、共同研究会議、若手総括班による若手研究会、計

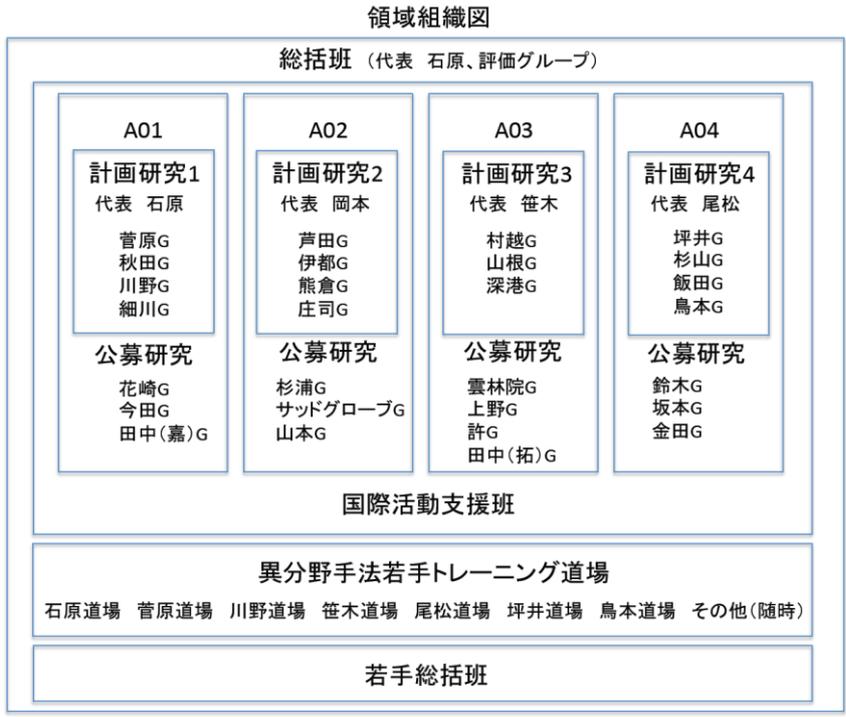


## トレーニング道場を通じた共同研究の体制



画・公募研究会議などを多数開催し、互いの研究成果を披露するだけでなく、共同研究へのアイデア創出や討論に多くの時間を割くことによって共同研究[A][B][C]を具体的に推進してきた。特に強調したいことは、共同研究会議等では、単に共著論文となる協力関係が発生するだけでなく、多くのアイデア、ブレークスルーへの共通のコンセプト等がそれぞれの専門家の立場から交換され、領域内で極めてオープンマインドな議論が行われている点である。このような雰囲気から、計画研究の成果を共同研究に活かす道筋が多く見いだされてきている。

どのような組み合わせで共同研究が行われたかを表1に記した。表では2グループ間の組み合わせしか表せていないが、実際には3グループ以上の共同研究や、多くのメンバーのアイデアや専門家のアドバイスが重要な役割を果たした研究が多くある。共同研究[A][B][C]における成果の掲載や論文文化はこれからのものが多いが、キーパーソンを中心とする若手が筆頭著者や責任著者となるものが多く発表される予定である。



	石原	川野	菅原	秋田	細川	花崎	今田	田中	岡本	芦田	伊都	熊倉	庄司	杉浦	サッドグローブ	山本	笹木	村越	山根	深港	雲林院	上野	許	田中	尾松	坪井	杉山	飯田	鳥本	鈴木	坂本	金田				
1 石原道場	A01計画 石原 一	A	D	D	A	A	D	A	A				A		D		A	A								C							A	共同研究A		
2 菅原道場	A01計画 川野 聡恭	3		C	A											D		A								C								B	共同研究B	
3 川野道場	A01計画 菅原 康弘	2		A					D	A		A					A	A																C	共同研究C	
4 菅原道場	A01計画 秋田 成司	1		2						A																A								D	その他	
5 尾松道場	A01計画 細川 千絵	1	3			B				A	A												A													
6 坪井道場	A01公募 花崎 逸雄		3			8		D																			B	B		D						
7 鳥本道場	A01公募 今田 裕		1							A																									B	
8 その他	A01公募 田中 真人		1				8		D															A												
	A02計画 岡本 裕巳	1		2				8		A	A	A	A	D			B		D	A						A	C	B		A						
	A02計画 芦田 昌明	1	3	2	2	8		8			A	A	A	A	A		A	A								B			A	A						
	A02計画 伊都 利司				6				6	8								A		B	C							B	C							
	A02計画 熊倉 光孝			2					8	8																				A						
	A02計画 庄司 晴								8	8																										
	A02公募 杉浦 忠男					3		8	8	8																										
	A02公募 サッドグローブ		1							8							A																			
	A02公募 山本 泰之			3																																
	A03計画 笹木 敬司	1	3	2				8	4	4					4		C	A	A	A	B				B		B		A							
	A03計画 村越 敬	1		2						8	6						4					D	A				C								D	
	A03計画 山根 啓作								5								4									B										
	A03計画 深港 泰						8		7		6						4		8							B	A									
	A03公募 雲林院 宏		1							7		7					4			8																
	A03公募 上野 貴生																4	8						A												
	A03公募 許 岩				6													8																		
	A03公募 田中 拓男																					4														
	A04計画 尾松 孝茂					5		5	5		5					4		5	5							B	B	B	C	B	B					
	A04計画 坪井 泰之	6	3		6		6		6								6		6							5										
	A04計画 杉山 輝樹					8		8								4										5			B	C						
	A04計画 飯田 琢也				8	8				1	6		1									8	8			5	6	8		C		B				
	A04計画 鳥本 司			2	2	6			7	7	6	7					7	7		7	7	7			5	6	6	6		C	C	C				
	A04公募 鈴木 康孝																								5											
	A04公募 坂本 一之			2			5																		5											
	A04公募 金田 輝															8									5											

表1: 領域内における共同研究の組み合わせを表した。上三角部分では各共同研究の組み合わせが共同研究[A][B][C]のどれに該当するかを表した。下三角部分では各共同研究がどのトレーニング道場と関係したかを表している。この表では2グループの関係しか表せないが、実際には3グループ以上が関わる共同研究が多くある。

## 7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

本領域では、各研究グループの若手研究者が参画する以下のような取り組みを実施している。

### （1）異分野手法若手トレーニング道場

領域研究者が互いの知見と技術を共有し、それらを融合して一貫した過程で実験・解析を行うことを可能とするため、学生・若手研究者を対象とした「異分野手法若手トレーニング道場」を設定し、総括班メンバーが中心となって、領域全体の基礎となるべき技術の経験とノウハウを交換・習得する2～5日間のコースを企画した。この道場を通して、各グループで推進する研究の技術的基礎の視野を広げて研究の格段の推進を目指すとともに、この活動を通じた新たな共同研究の広がりを企図した。平成28年度は、まず3コース[1. 微細基板技術道場（笹木）、2. 光圧捕捉実践道場（坪井・伊都）、3. 微視的非局所光学応答理論道場（石原）]を実施し、学生から助教クラスまで延べ13名が受講した。また平成29年度は、年度はじめに道場に関するアンケート調査を行い、それに基づいて上記3コースに加えて4コース[4. 光源制御道場（尾松）、5. 超精密力計測道場（菅原）、6. 分子流体理論道場（川野）、7. 微粒子合成道場（鳥本）]を開設し、延べ30名が参加した。このトレーニング道場を通じて各グループの若手はそれぞれの技術を持ち帰り各自の研究に取り込んで展開を試みており、すでに共同研究も多数行われつつある。

### （2）若手総括班の設置とそれが中心となった議論の場の設定

若手の活動を自主的に推進する「若手総括班」を設置し、4名がその任に当たっている。活動としては、1) 公開シンポジウムにおける若手総括班企画研究発表会（H29年1月18日、千葉大学）、2) 若手研究会（第1回 H29年3月9日 大阪市立大学 参加34名、第2回 H29年8月18-19日 岡崎コンファレンスセンター 参加47名、第3回 H30年1月23日 大阪大学 参加27名）を開催した。若手研究会では、自己紹介、研究紹介からはじまり、若手らしい活発な研究討論を行うとともに、多様性を重視したチームを作って共同研究のブレインストーミングを行い、独創的な共同研究計画を創出する試みも実施している。

### （3）海外サマーコースへの派遣と国際学生交流

台湾国立交通大学と本新学術領域の共催で台湾新竹において開催したサマーコース（H29年7月3-5日）に学生24名を派遣し、世界的に著名な研究者の英語講義を受講するとともに、ポスターセッションやナイトセッションでは講師や台湾の学生と交流を深めることができた。英語でのディスカッションが初めての学生も多かったが、期待以上に活発な議論が行われ、本領域の研究成果を海外の若手にも情報発信して「光圧ナノ物質操作」の研究を海外に広めるといった観点から極めて有効な機会となった。

### （4）若手研究者塾

本領域の若手研究者・学生が、その分野の第一人者から「研究とはなにか」「研究者とはなにか」を学ぶ機会を設けるための「塾」を企画している。第1回は、上記サマーコースに併せて、領域アドバイザーの増原宏氏が講師を務め、「台湾の大学を知ることから日本の大学・自分の研究を考える」というテーマで「増原塾」が開催された。増原氏の講話とともに実験実習やサイエンスパークの見学等が企画され、海外の研究現場を知ることによって客観的に日本の自分の研究を見直す良い機会となった。第2回は、H30年3月1-2日に北海道ニドムで、領域アドバイザーの河田聡氏による「科学とは？研究とは？」というテーマの「河田塾」が企画された。参加者は助教・博士研究員クラス10名で、外は猛吹雪の中、テーブルを囲んで夜中まで白熱した議論が繰り広げられた。河田氏から投げられる問い「科学と研究の違いは？」「日本はなぜ行き詰まったか？」「起業するには？」「印象に残るプレゼンとは？」等に塾生が自分の意見を率直にぶつけ合い、今後の研究人生を深く考える素晴らしい機会となった。若手が信頼のおける研究仲間を領域内で見つけることができた点でも有意義であった。塾生の貴重な体験記はニューズレター特集号として情報発信している (<http://optical-manipulation.jp/news/>)。

## 8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

**総括班：**光で微小物体が非接触に捕まるといふ不思議な現象を小中高校生や一般市民に実体験してもらうアウトリーチ活動のために、領域全体の共有機器としてトラッピング実験システムを購入した。この装置は本領域からの要望に応じて光学機器メーカーA社が開発したシステムであり、簡単に分解・組立が可能で持ち運びできるため、領域メンバーがそれぞれの地域でアウトリーチ活動に利用している。領域企画の「企業道場」として、若手研究者6名がA社で本装置のトレーニングを受け、A社の技術者とともに出アツリーチ活動のためのブレインストーミングを行った。納品されて半年間に、大阪の高校の先生を対象としたトラッピング実験自習、領域の公開シンポジウムでの展示・デモ実験、福井県の高校での出前授業・実験、学園祭に合わせたトラッピング実験公開などに活用しており、今後も小中学校での体験実験など、様々な企画を立案している。総括班経費はその他、公開シンポジウム、領域会議、総括班会議、計画班・公募班会議等の開催経費や情報発信のためのニュースレター出版費、展示会出展費等に支出した。また、若手トレーニング道場、若手研究会、若手研究者塾、海外サマーコース参加支援等の若手人材育成および領域内共同研究の活性化のための活動に使用した。

**計画研究1：**石原（理論）グループに大型計算機を設置したが、当初の予定通り計画研究だけでなく、微視的非局所光学応答理論トレーニング道場で多くの受講者に活用され、これを契機に複数の共同研究が進んでいる。現在これらの共同研究のため、北大、阪大等の複数のグループから接続して共同利用されている。菅原グループのデータ収集解析装置と高周波ロックインアンプは計画研究だけでなく、超精密力計測若手トレーニング道場でも活用された。さらに、フェムト秒レーザーを用いた光圧測定装置も同道場で活用予定である。またLD励起CW固体IRレーザーを組み込んだ顕微鏡システムは、計画研究1だけでなく、新たに参画した公募研究のグループとの共同研究にも既に活用され複数の共同研究が進展している。

**計画研究2：**分担者の芦田がフェムト秒ピコ秒チタンサファイアレーザーを購入して大阪大学に設置した。これは低温気相、超流動流体中での光圧実験に供することが第一の目的であるが、汎用性の高い光源として、カーボンナノチューブ（CNT）の光圧による分離の実験にも用いている。実際に、分担者の庄司はCNTの分離の実験装置を大阪大学で構築し、共同研究を実施している。このほかにも、この光源は分光実験、非線形光圧操作等においても共同研究に用いる予定である。また同様に大阪大学に設置された電子増倍型CCDカメラと分光器は、分担者の熊倉が量子ドット内包液滴の運動観察や、A04計画研究分担者の鳥本との共同研究でZAIS量子ドットの単一粒子分光観測に用いている。

**計画研究3：**光計測データ解析装置は、微細加工若手トレーニング道場において金属ナノ構造の設計・解析に活用されており、領域内におけるプラズモニク捕捉実験として多数の共同研究に発展している。また、本道場で学ぶ電子線リソグラフィ技術については、国際的にも有数の技術レベルと実績・ノウハウが蓄積されている北大ナノテク研究センターの全国共用設備および技術職員の支援によるものであり、領域内の多くの研究者が本センターを利用するための機器使用料・講習料・作製料等として研究費を使用している。さらに、空間位相変調器、電気化学質量分析装置は、班内・班間共同研究を目的として購入した機器である。

**計画研究4：**千葉大学に配置した超短パルスファイバーレーザーのキット装置や空間位相変調器は、光源若手トレーニング道場においてレーザー発振・モード同期の原理、波面制御技術の原理を理解するために利用されている。光源トレーニング道場で得た知識とノウハウは必要に応じて所望の光源をタイムリーに導入できる光源開発技術として、多数の共同研究に貢献している。また、計画研究4で所有する原子間力顕微鏡・走査型電子線顕微鏡・透過型電子線顕微鏡・レーザー走査型焦点顕微鏡・第二高調波顕微鏡などは、計画研究4で創る様々な階層的秩序構造の解析などの共同研究に活用されている。

## 9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 1. 総括班評価グループと評価体制

#### 評価委員

伊藤正（大阪大学・特任教授）  
梶村皓二（機械振興協会・副会長）  
栗原和枝（東北大学・特任教授）  
谷田貝豊彦（宇都宮大学・特任教授）

#### アドバイザー

河田聡（セレンディップ研究所・主任研究員）  
張紀久夫（豊田理化学研究所・理事）  
中村新男（名古屋産業科学研究所・上席研究員）  
増原宏（台湾国立交通大学・教授）  
柳田敏雄（大阪大学・特任教授）

#### 海外評価委員

Kishan Dholakia (Professor, University of St. Andrews, UK)  
Johan Hofkens (Professor, KU Leuven, Belgium)  
Juan Jose Saenz (Professor, Universidad Autónoma de Madrid, Spain)  
Pavel Zemánek (Professor, Institute of Scientific Instruments of the CSA, Czech Republic)

国内評価委員は多様な研究分野の広い立場から評価を頂き、またアドバイザーには高い専門的観点から助言を頂けるような体制とした。海外評価委員は光圧分野で世界最高レベルと認められる実績を持つ実験及び理論研究者である。国内評価委員、アドバイザーには、総括班会議、領域会議、公開シンポジウム等にて助言、評価コメントを頂いた。また、領域に対する期待やアドバイスをニュースレターにご執筆頂き、領域運営と研究展開の参考にさせて頂いている。海外評価委員には海外の国際学会やシンポジウムで直接助言を頂く以外に、事務局より送付した情報に対して電子メール等で意見・助言をいただいている。また、英語で行った領域会議（横浜、2018/4/23-24）に出席頂き、領域運営と研究内容についての評価を頂いた。下記評価は、上記全般を踏まえ、評価委員・アドバイザーより頂いた評価書の要約である。

### 2. 評価コメント要約

#### 国内評価委員・アドバイザーより

- ・本領域の光圧を「識る」、「極める」、「創る」、「挑む」という4本立ての研究構想は明確であり、時宜を得ている。光圧の制御によるナノ物質の秩序の創生や機能的現象の創出を目指している目標が達成されて、ナノ光・物質科学の新しい領域開拓と学理の構築が期待できる。
- ・4つの計画研究は、当初の設定目標を着実に実現しつつあると言える。金ナノギャップやナノ粒子の光圧制御グループへの提供や様々な物質に対する光渦照射・制御など、計画班内、班間の共同研究の取り組みが想定以上に進んでおり、当初の予測を超えた成果を生み出している。これは、問題点を共有した理論と実験グループの議論および若手トレーニング道場や若手研究者交流会などを通じた研究者間の交流・議論が活発に行われている結果である。
- ・多彩な分野の研究者で構成されているが、領域代表のリーダーシップと領域研究者のオープンマインドな研究姿勢によって他に例を見ないような活発で良好な領域運営がなされている。
- ・ナノ領域の光トラッピングという挑戦的テーマを掲げて、多方面から研究を進めている点は高く評価される。新学術領域の創生という大目標に忠実に向かっていることが分かる。研究チーム間の共同研究は充分に行われている。後半では、個別の研究を一層深化させる側面にも期待したい。
- ・光圧を主軸に据えた世界でもまれなユニークな研究プロジェクトであり、その目標が達成されれば、多方面より興味を持たれながらも、まだ新興分野と考えられて来た光圧の科学の研究分野が確立すると期待される。すでに光圧により物質操作の成果が出てきており、このプロジェクトの持つ勢いが見えてきた。
- ・物理・化学・工学など幅広い分野の研究者が参画しており、若手研究者がこのような幅広い研究環境で、張り切って研究している点、またシニア研究者により解説される道場に大学院生や若手が参加するなど、研究者育成としても充実した活動がされている。今後、この領域ならではの独自性のある世界的にも高い成果が出ることを期待する。また、様々な新現象も見えているようなので、理論的な基盤の充実も重要と考える。
- ・一般に精緻な物理的な測定や考察にたった物質創成は、高い技術や長い経験の積み重ねが必要で、数年で実現するとは限らない。気にせず一つでも二つでもいいから極めてオリジナルな、物理的「秩序の創成」を図つ

てほしい。

・領域全体の研究連携とあわせて本研究で特徴的な若手を中心とする道場・共同研究を通じて、今までにない組み合わせを積極的に奨励している。いくつかの成果をすでに挙げており、今後意外な展開が楽しみである。また、全体会議、国際シンポジウムから各レベルでの打ち合わせ会議、研究会を含めて、多数回のコミュニケーションが図られている。若手の国際研究への派遣、国内外の学会等でのセッション開催なども着実に進んでおり、本研究の国際的優位付けにも努力が見られる。

・光圧による物性の計測、物質の操作の成功例は増えてきており、論文発表、招待講演とも順調になされている。国内における当プロジェクトの **Visibility** は増し、研究レベルの高さは認識されつつある。

・国際的な情報発信、国際誌の特集号に対する取り組みや台湾、オーストラリアとの緊密な連携は進んでいる。プロジェクトの後半では、国際的なネットワークの構築や海外の研究機関との連携などの国際活動支援班の具体的な活動を拡充し、一層成果をアピールされたい。

・素晴らしい研究成果が出ているので、後半ではニュースレターの発行、英文を含むホームページの発信を成果に見合った量に増やしていくことを期待したい。

・企業の参画も期待できる工学方面の発展にも期待したい。全体的には現在までさまざまな成果が得られており、研究そのものは順調に発展していると感じられる。今後、本研究ならではの特色ある研究成果につながることを示せる融合研究を期待したい。

・研究メンバー以外の研究者や外国の研究者がこの分野への関心をより深める活動をさらに活発化して欲しい。特に、今後は、バイオ系への応用展開も期待したい。

#### 海外評価委員より

・ Overall, the aim of the project is very well grounded and right at the cutting-edge of the field. Whilst optical forces and applications have a long history, relatively little attention has been paid to the aforementioned areas which show new and promising directions at the nanoscale. The exciting and complementary blend of experience in the project consortium can particularly exploit new directions using novel materials, chemistry approaches as well as quantum features in a way hitherto not seen to realize major world recognized results in these areas.

・ I find this aim challenging and in its details novel. Especially combination of optical micromanipulations with chemical processes is very novel and deserves increased attention. The research activities are novel and highly multidisciplinary, reach top world level, interconnect group across Japan with complementary skills and equipment, and offer remarkable potential to be applied. Leader of each project activity provided clear research plan for the next 2 years. I would suggest considering implementation of optical levitation in vacuum, which is one of the new hot topics in this area.

・ The team gives excellent visibility to the work and a major international perspective. I was impressed to see the large number of meetings internally by the consortia and other events organized. Again to further the visibility, it is important for the team to disseminate their work at major international OSA/SPIE/ACS events so they can obtain international perspectives and new connections for their data. I think this would be a very good platform too for enhancing the career prospects for young researchers.

・ The project is having a leading role in the international research scene, and is top-notch at the fore front of modern optics and nanomaterials research that will redefine the international standards in the field. I give the continuation of this project my highest recommendation.

・ Expensive equipment of different groups is shared within the project which leads to efficient funding and strengthening of synergy within the project. The publically invited researchers are very well selected to enhance the complementarity within the project and to address new and attractive research directions. Training “dojos” for dissimilar field methods for young researchers is well organized and led by world-class mentors.

・ One of the most important points in this interdisciplinary Project is the organization of “training dojos” where young researchers coming from very different backgrounds (from Physics, Chemistry to Engineering) can learn very different methods and approaches which contributes to the synergy of the research teams. This is not only a key point in the development of the Project but also an investment for other future emerging technologies which certainly will be strongly based on interdisciplinary research efforts.

## 10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

### 【今後の研究推進方針】

期間後半において、まず、本領域全体を通じた課題の中心は、

- (1) 前半期で実現してきた技術的要素の多様化・一般化・究極化
- (2) 前半期で実現してきた技術的要素の統合によるナノ物質光圧操作技術の実質化
- (3) 得られた成果に基づいた統一的学理の構築
- (4) 他領域や産業界が使える技術、或いは他領域の学理を基礎付けるインターフェースの構築
- (5) 成果が国内外へ波及するための体制の構築

がある。これらのうち(1)から(3)については本領域の中心的課題である共同研究[A][B][C]についての今後の研究方針から構成される。以下にその詳細について記載する。

#### 共同研究[A]

共同研究[A]では前半期、量子力学的特性による選別が可能となる例と、ナノ物質の精密配置の幾つかのパターンのデモンストレーションに成功し、当初理論予想されていた学理的発想と技術の実現性を示すことが出来たが、これをさらに対象とする物質の種類、環境の種類を多様化し、また対象サイズの単一分子へのアプローチ、また位置制御のシングルナノへのアプローチが課題となる。具体的には量子ドットや機能性分子の合成を専門とするグループによる最適ターゲットの創生、及び操作物質の観測技術の高度化に力を入れる。また、選別・輸送技術と精密配置などの技術を統合し、システム化することも後半期の重要な課題となる。現在共同研究[A]のキーパーソンを中心に異分野技術の融合によりこれを実現するスキームを構築中である。

#### 共同研究[B]

共同研究[B]ではプラズモンキラル場によってキラル結晶化の制御の可能性が示されたが、後半期の重要な課題はこの機構の解明と制御性の向上となる。金属ナノ構造を配置した基板の制御により、キラル場の空間構造、電場強度などが制御可能であるが、これらのパラメーターに対する依存性と、さらに軌道角運動量を持つ光渦との組み合わせによる効果をより詳細に調べることにより選択的キラル結晶化の機構に迫る。また  $\text{NaClO}_3$  以外の分子における選択的キラル結晶化の可能性を探ることにより、現象の多様性・一般性を追求する。さらに分子の配向制御、共鳴による選択的捕捉との統合による技術の高度化を追求することも後半期の重要な課題である。また結晶化以外にも階層構造的秩序形成について幾つかの事例を確認しているが、これら現象との共通要素を洗い出し、光圧による秩序創生の学理構築に結びつける。

#### 共同研究[C]

共同研究[C]においては油水界面において領域で独自開発した量子ドット、金属ナノ構造の複合的捕捉に成功し、光圧による化学反応制御の可能性に大きく近づいた。後半期の重要課題の一つは触媒反応による量子ドットと金属ナノ構造の架橋による化学反応制御のデモンストレーションになる。また、架橋された構造の配向制御も重要な課題であるが、特に後半、軌道角運動量を含めた角運動量をもつ光による操作により光圧と、ナノ構造間相互作用のインタープレイによる構造創生をめざす。また複合捕捉する対象を現在の量子ドット、金属ナノ構造に加え、酵素など、より多様な物質に広げることにより制御する化学反応の多様性を追求する。

なお、計画研究においては以下の点が後半課題の中心となる。

#### 計画研究1：光圧を識る

現在の精密光圧計測の対象を単一分子へと近づけ、また前半期で進めた光学応答理論、分子流体理論による

解析、及び蛍光観測との整合性を具体的に追求して、光圧と各種環境での運動との相関を解明する。

#### **計画研究 2：光圧を創る**

後半期では特に非線形光学応答による光圧操作の自由度拡張と、超流動ヘリウム中など極短環境下での結果と常温環境下との比較を進め、光圧現象の操作自由度の拡張の指導原理を明らかにする。

#### **計画研究 3：光圧を極める**

前半期で進めたナノ物質の精密配置について、対象物質サイズと配置精度のシングルナノ化を進め、光圧現象の原理的極限を明らかにして、各共同研究の目標点を明確にしていく。

#### **計画研究 4：光圧で拓く**

光圧による液-液界面による触媒システムの構築や光渦など空間的構造を持つ光による新たな階層秩序構造創生についての基礎技術を高め、共同研究に対する先導的知見・方法論を一層明確に示していく。

#### **【領域研究を推進する上での問題点と今後の対応】**

領域研究を推進する上で、領域全体の課題となり、また前半期で未だ取り組めていない重要な点は、光圧により創り出される構造や機能、あるいは新しい物理・化学現象について、その技術的利用や学理における意味づけ等に、より焦点を当てた研究の推進、またそれを利用した異分野とのインターフェースの構築である。これについては、次項目で記載するような、新たな公募研究の導入と、産業界におけるニーズとの接点を構築する体制を整えていくことにより対応することを計画している。後者においては、具体的には前半期で一部進めている産業技術利用検討会の活動をより活発化させることが考えられている。

#### **【公募研究等での今後の重点的な補充】**

前項目で述べた課題推進をより強化するために後半期では、光圧の新奇な利用法を研究する提案、現在の産業技術が画期的に高度化する研究、他分野（例えば有機化学やバイオ、ナノ機械の分野など）との有効なインターフェースを構築する研究、等の優れた提案を採用することにより、領域研究の波及力を一層強力なものにすることを計画している。

#### **【国内外の研究者との連携による組織の強化】**

異分野の知見や技術を融合して上げられてきた前半期の成果を異分野へフィードバックし、国内外に対して、より波及力のある領域とするための体制の構築を計画している。

国内的には、前半期にも試験的に始めた班友制度をより広げ、特に既存の分野で影響力のある研究者に班友として参画して頂き、単に領域研究に寄与して頂くだけではなく、積極的な議論、助言を得ることを通して、それぞれの分野へのフィードバックが有効に促進され、当該領域の学理、技術が広く我が国の多様な学問領域に侵透していく仕掛けを構築していく。

国外への波及効果を高めるために、前半期までの交際活動支援をさらに拡張することを計画している。前半期においては主に現在のメンバーの人的関係を通して、海外でのワークショップや、研究者交流を進めてきたが、後半期は特にそのような企画を通して新たに得られた人的ネットワークを利用し、さらに異分野も含むコミュニティとの交流を活発化させ、本領域の波及性を高める。具体的には各種国際会議での特別セッションや海外コミュニティとのジョイントセッション等を通して日本発の学問領域を広くアピールし、海外からの分野への新規参入を協力を誘導していく計画である。