

---

# 光圧によるナノ物質操作と秩序の創生

---

領域番号：2806

平成28年度～令和2年度

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）

（新学術領域研究（研究領域提案型））

研究成果報告書

令和5年5月

領域代表者 石原 一

大阪大学・基礎工学研究科・教授

## はしがき

平成28年に発足した本領域は5年間の活動を経て令和2年度に終了しました。(その後2年間の繰越予算を用いて、コロナ禍で開催出来なかった取りまとめのシンポジウムや領域会議などを開催しました。)

本領域は、光が物質に及ぼす力、すなわち光圧を用いて「分子や半導体微粒子などのナノ物質を、その性質ごとに『個別・選択的』に、また『直接』に運動操作(捕捉・輸送・配置・配向)する」技術を実現し、「極微質量の人為的力学操作を通じた秩序の創造」に結びつく学理の体系化を行うことを活動の目的としました。ナノ物質は様々な量子力学的特性を顕します。光もまた、周波数、偏光、波数ベクトル、さらに角運動量、重ね合わせによる時空間構造など、多くの自由度を持ちます。このような物質と光の多様な自由度を線形・非線形に作用させて光圧を自在にデザインすれば、ナノ物質の運動を、その特性ごとに、精緻に操ることができると期待されます。このことにより「量子力学的性質や共鳴条件の異なるナノ物質の、光による分別や空間隔離、配向制御による結晶化の誘起」、「選択的な拡散制御や分子濃縮などによる化学過程制御」など、光圧のみがなし得る秩序の創生や機能的現象の創出を実現させることが私たちの到達点でした。このような目的を持った本領域の重要な特徴の1つは、物理、化学、工学等、多様な分野の研究者が集結し、異分野研究者による手法の交流を通して、次世代の物質操作の実現に挑戦したことです。本領域では上記の目標への到達を目に見えるものにするため、本領域では三つの共同研究を掲げました。

[A] 特定ナノ物質の分離と精密配置、及び大面積化

[B] 粒子間相互作用の制御と結晶等の階層構造創製

[C] 分子の選択的力学操作を通じた化学過程の制御

これらの課題には領域のメンバーが一丸となって取り組みましたが、これらの共同研究を4つの計画研究が支える形としました。その計画研究を融合・相乗させることにより、共同研究[A]～[C]における目標へ到達することができました。またこのような異分野の共同研究を実質化するための仕掛けとして、本領域では若手を中心に人材交流を通して学び合う「異分野手法トレーニング道場」を開設し、異分野の実体験の中から共同研究を作り上げる体制を整えました。これにより、当初想定していたより一層の研究の芽が広がり、多くの成果を得ることが出来ました。また本研究領域の将来の発展を支える多くの次世代の研究者が育ちました。

この5年間の活動の間、多くの皆様に多大なご支援を頂き無事研究を完遂出来ました。ここに深く感謝申し上げますと共に、ここで得られた成果が今後の我が国の科学技術の発展に寄与することを期待致します。

領域代表 石原一  
大阪大学 基礎工学研究科

# 研究組織

## 1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名		研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
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 ～ 令和2年度	石原 一	大阪府立大学・工学(系) 研究科(研究院)・教授	4
Y00 国	16K21732 光圧によるナノ物質 操作と秩序の創生	平成28年度 ～ 令和2年度	石原 一	大阪府立大学・工学(系) 研究科(研究院)・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 ～ 令和2年度	石原 一	大阪府立大学・工学(系) 研究科(研究院)・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 ～ 令和2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 ～ 令和2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 ～ 令和2年度	尾松 孝茂	千葉大学・大学院工学研 究院・教授	5
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 6 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

### 計画班

領域代表者 石原 一 (大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授)

#### (総括班)

研究代表者 石原 一 (大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授)

研究分担者 笹木 敬司 (北海道大学・電子科学研究所・教授)

研究分担者 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)

研究分担者 尾松 孝茂 (千葉大学・大学院工学研究院・教授)

#### (国際活動支援班)

研究代表者 石原 一 (大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授)

研究分担者 笹木 敬司 (北海道大学・電子科学研究所・教授)

研究分担者 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)

研究分担者 尾松 孝茂 (千葉大学・大学院工学研究院・教授)

#### (A01 班)

研究代表者 石原 一 (大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授)  
研究分担者 川野 聡恭 (大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授)  
研究分担者 菅原 康弘 (大阪大学・大学院工学研究科・教授)  
研究分担者 秋田 成司 (大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授)  
研究分担者 細川 千絵 (大阪市立大学・大学院理学研究科・教授)

#### (A02 班)

研究代表者 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)  
研究分担者 芦田 昌明 (大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授)  
研究分担者 伊都 将司 (大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授)  
研究分担者 熊倉 光孝 (福井大学 学術研究院工学系部門・教授)  
研究分担者 庄司 暁 (電気通信大学 情報理工学研究科・准教授)

#### (A03 班)

研究代表者 笹木 敬司 (北海道大学・電子科学研究所・教授)  
研究分担者 村越 敬 (北海道大学・大学院理学研究院・教授)  
研究分担者 森田 隆二 (北海道大学・大学院工学研究院・教授)  
研究分担者 深港 豪 (熊本大学 大学院自然科学研究科)

#### (A04 班)

研究代表者 尾松 孝茂 (千葉大学・大学院工学研究院・教授)  
研究分担者 坪井 泰之 (大阪市立大学・大学院理学研究科・教授)  
研究分担者 杉山 輝樹 (奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・客員教授)  
研究分担者 飯田 琢也 (大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授)  
研究分担者 鳥本 司 (名古屋大学 大学院工学研究科・教授)

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
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(系)研究科(研究院)・特任准教授	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	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・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	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員	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(系)研究科(研究院)・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	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・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・大学院創成科学研究科・准教授	1

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
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・大学院工学研究院・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
A01 公	19H04681 単一分子近接場光ピンセット法の確立と光機能性分子配列の創出	令和元年度 ～ 令和2年度	今田 裕	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・上級研究員	1
A01 公	19H04670 光駆動マイクロマシンによる単一量子ドットに働く光圧計測法の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	田中 嘉人	東京大学・生産技術研究所・助教	1
A01 公	19H04671 光圧計測的ナノメカニカルシステムの創出	令和元年度 ～ 令和2年度	米谷 玲皇	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授	1
A02 公	19H04668 Environmentally induced chiral optical force on nano particles	令和元年度 ～ 令和2年度	Sadgrove Mark	東京理科大学・理学部第一部物理学科・准教授	1
A02 公	19H04680 物理的限界を越える光ピンセットの開発	令和元年度 ～ 令和2年度	杉浦 忠男	崇城大学・情報学部・教授	1
A02 公	19H04679 高圧と光圧の協奏によるナノ構造マニピュレーション	令和元年度 ～ 令和2年度	西山 雅祥	近畿大学・理工学部・准教授	1
A03 公	19H04678 ナノ流体デバイスにおける光圧による1分子DNA操作の極限化と超並列	令和元年度 ～ 令和2年度	許 岩	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授	1
A03 公	19H04667 結合系プラズモニックナノ構造による光圧の時空間制御	令和元年度 ～ 令和2年度	上野 貢生	北海道大学・理学研究院・, 教授	1
A03 公	19H04673(廃止) 単分子計測に基づく光圧下における分子の構造および電子状態の解明	令和元年度	木口 学	東京工業大学・理学院・教授	1

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A04 公	19H04677 ナノシートの異方性を用いた光圧による巨大配向構造の誘起と機能性ナノシートの光操作	令和元年度 ～ 令和2年度	鈴木 康孝	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授	1
A04 公	19H04675 金ナノ粒子を利用するエクソソームの高速光圧捕集と迅速がん診断法への応用	令和元年度 ～ 令和2年度	金田 隆	岡山大学・自然科学研究科・教授	1
A04 公	19H04674 光圧下におけるナノ物質の揺らぎ計測と反応制御	令和元年度 ～ 令和2年度	西山 嘉男	金沢大学・物質化学系・助教	1
A04 公	19H04676 エアロゾル液/液界面反応場の構築とその応用	令和元年度 ～ 令和2年度	石坂 昌司	広島大学・先進理工系科学研究科・教授	1
公					
公					
公					
公					
公					
公					
公					
公					
公募研究 計 26 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

**交付決定額**

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 28 年度	272,350,000 円	209,500,000 円	62,850,000 円
平成 29 年度	288,470,000 円	221,900,000 円	66,570,000 円
平成 30 年度	288,340,000 円	221,800,000 円	66,540,000 円
令和元年度	273,780,000 円	210,600,000 円	63,180,000 円
令和 2 年度	237,250,000 円	182,500,000 円	54,750,000 円
合計	1,360,190,000 円	1,046,300,000 円	313,890,000 円



## 研究領域の目的及び概要

### 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した。

### 研究の学術的背景

光圧の工学的利用は、1980年代 Ashkin (2018年ノーベル物理学賞受賞) 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中に位置するナノ物質群に対する光圧の研究は、光圧が極微化することに加え、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、スピン及び軌道角運動量) 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。

### 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、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

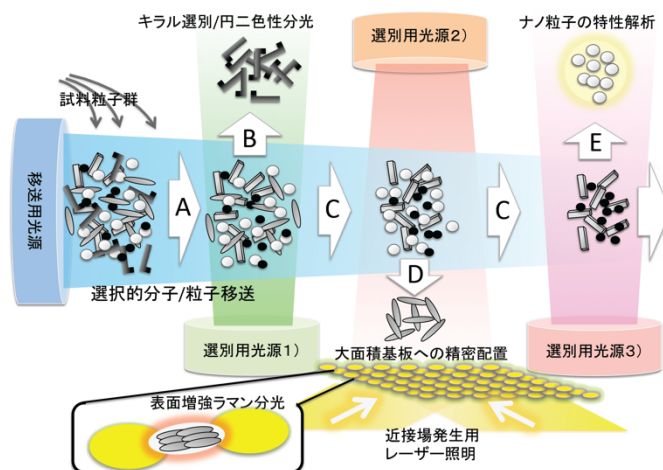


図1 ナノ物質の量子力学的性質を光圧で選択・選別し (ふるいわけ)、さらに精密配置・配列を行うシステムのイメージ図。(図の全体が必ずしも一つのシステムを表現しているわけではない。) **矢印 A:** ナノ物質の特定の場所への輸送。**矢印 B:** 偏光などによる特定のキラリティの選別。**矢印 C:** 特定の性質を持つ粒子の選択的輸送。**矢印 D:** 近接場や光アンテナを利用した光制御により基板へ精密配置・配向、及び単分子計測へ。レーザー干渉や走査を用いた大面積化へも展開。**矢印 E:** 微粒子の微視的特性の分布をマクロな空間分布に変換して計測。(動かすことによって始めて分かる物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

等を実現させることにあった。これらが、物質科学、光学、分子流体力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領域が創出される。

### 本領域が明らかにしようとした事項と研究戦略

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マイクロな情報」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新奇な高度秩序、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実現への足がかりとする。

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んだ。

**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用い、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、押す・引く・回転・スイッチ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・配向を制御する方法論を明らかにする。さらに光制御による操作のマクロ化への足がかりを得る。

**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た。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とした。

## 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 明らかにしようとしたことと達成度 (下記において論文番号は項目7のリストに対応している。)

「4 研究領域の目的及び概要」で説明したように、新しい学術の創成が達成されたことを全領域メンバーで取り組む三つの共同研究[A][B][C]を通して可視化することとし、分野を跨ぐ研究者の議論と情報交換、協同作業を通し、新学術領域でしかなし得ない共同研究によりそれを達成した。本欄では研究項目毎の達成度の説明に先立ち、本領域の核心的な活動であった三つの共同研究の目標達成度について説明する。

**共同研究[A]**では光圧により個々のナノ微粒子がその量子力学特性に応じて分離・選別・配置が可能であることを実証し、さらにそれを大面積化可能であることを示すこととした。

典型的な結果として、ナノファイバーに対して異なる色の波長のレーザーを対向入射させることによりファイバーに引き寄せられたナノダイヤを、量子力学的発光中心である NV センターの有無によって個別に分離・選別することに成功した[図 1a 論文 41]。またナノ粒子の配置制御および固定化については、金ナノギャップによる勾配力の増強により、色素含有高分子のナノ粒子をギャップ位置へ捕捉し固定化することに成功した[図 1b 論文 59]。ナノ粒子の運動自由度の抑制と個別粒子の配置を突き詰めた例は、ナノ流路内の配列ナノボックスへの粒子の誘導配置であり[論文 54]、ナノ粒子、及びそれによる DNA の狙った位置への配置に成功している[図 1c 論文準備中]。ナノボックスはマクロな面積に渡って作成されており、個別ナノ粒子の大面積配置の基盤技術が整ったと言える。このように共同研究[A]の目的は、光物性理論、ナノ金属構造製造技術、分子合成、ナノ流体技術、レーザー工学の様々な専門家の協同作業により完全に達成された。

なお、光 STM による  $\mu\text{eV}$  レベルの超精密ナノ分光に基づいた単一色素分子の共鳴光圧による個別高速輸送[図 2 論文準備中]、また金属構造による光圧捕捉を用いた薄層クロマトグラフィーによる量子ドット選別[図 3 論文準備中]など、本共同研究の計画を越えた極めてインパクトの高い成果も得られている。さらに、本共同研究の成果によりナノダイヤのマクロ選別技術の開発研究が企業との共同研究として開始されている点を強調したい。**共同研究[B]**では光圧による粒子間相互作用の制御を通して結晶化等の自己組織化過程を人為的に操れることを実証することとした。

ここでは分子間相互作用制御によるアキラル分子からのキラル結晶化に焦点を当て、光圧による階層構造制御が可能であることを明瞭に示した。具体的には、キラル結晶化のモデル物質である塩素酸ナトリウム( $\text{NaClO}_3$ )の飽和水溶液からの結晶化をデザインされた金属ナノ構造による局在場で操作した。結晶化の過程ではまず熱力学的に不安定な  $\text{NaClO}_3$  のアキラルな結晶が発生し、その後、安定なキラル結晶へと相転移する。このとき、左周り(あるいは右回り)円偏光を照射した金属 3 量体近傍に現れる増強された右周り(あるいは左回り)の円偏光近接場により、 $d$ -(あるいは  $l$ -)体分子クラスターを選択的に高濃度に捕捉することで狙いのキラル結晶核形成へ誘導した。その結果、実験的に得られた  $d$ -(あるいは  $l$ -)体キラル結晶の鏡像体過剰率は 56%(48%)に達した[図 4]。この値は、従来、円偏光によって実施されたキラル結晶化の鏡

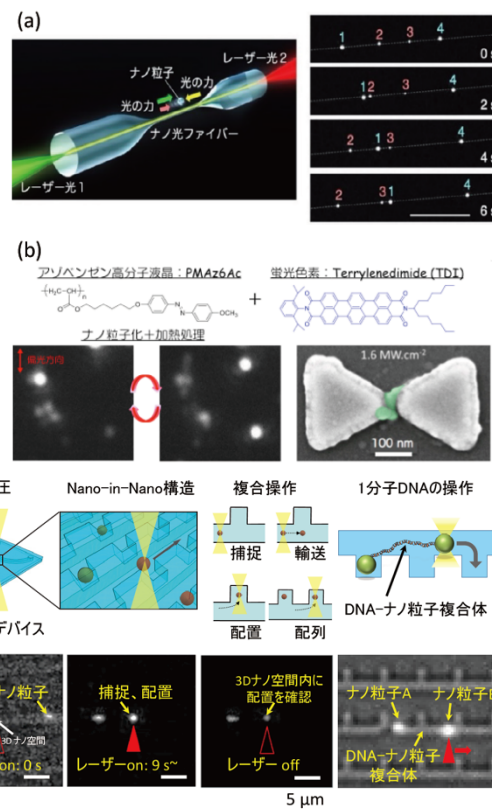


図 1 (a) ナノファイバーと対向波を用いた NV センター含有ナノダイヤの選別。(b) 金属ナノギャップでの局在プラズモン光圧を用いた機能性分子の配置と固定。(c) ナノ流路にマクロに配列したナノボックスと光圧を用いたナノ粒子の配置。

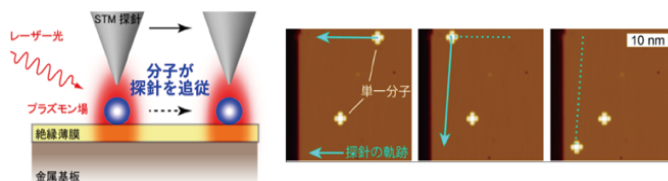


図 2 STM のプローブと基板の間隙で増強した電場の光圧で単一ナフトロシアン分子の高速輸送に成功。

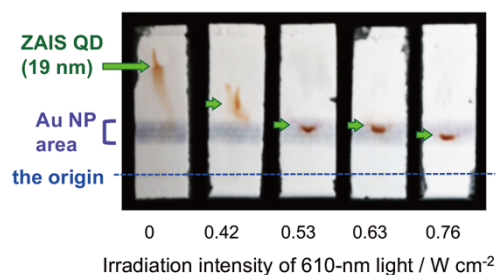


図 3 薄層クロマトグラフィーに金微粒子を担持しプラズモン共鳴で量子ドットを捕捉。光強度で量子ドットのサイズ選別が可能になった。

像体過剰率をはるかに凌駕する。さらに、増強された右周り(あるいは左回り)の円偏光近接場と入射円偏光の角運動量保存則から現れる軌道角運動量によってアキラな結晶に右周り(あるいは左回り)のトルクが加わり、結果として、*d*-(あるいは *l*-)体のキラル結晶が起こる機構も示唆された。**準安定状態な結晶の分子間相互作用に光圧の摂動を与えることにより階層構造を人為操作できる事例が示され、本共同研究の目標は十分に達成された**[論文 62, 70, 71, 74]。

**共同研究[C]では光圧を利用し、分子の選択的力学操作を通じた化学過程の制御が可能であることを示すこととした。**

異種分子が混在する反応系において、特定の分子種を選択的に分離あるいは空間的に濃縮することができれば、熱平衡下とは異なる化学過程を進行させることができる。ここでは液-液界面での粒子捕捉による化学過程制御を実証した。バルクでは光捕捉されない 20 nm 程度の小さなナノ粒子においても、ナノ粒子の熱運動が二次元に閉じ込められるため液-液界面においては効率よく光捕捉できた。特に Au ナノ粒子と半導体量子ドットが複合的に捕捉できることが分かり、新奇な化学反応場を作ることに成功した[図 5a 論文投稿中]。さらに、八面体 TiO<sub>2</sub> 粒子 (サイズ 100 nm) を加えた水溶液相 (上層) と、塩化金酸イオンを添加したイオン液体層 (下層) からなる水-イオン液体界面で TiO<sub>2</sub> 粒子を捕捉し、紫外線照射すると Au ナノ粒子が生成して界面で捕捉された。また、塩化金酸を含む水溶液 (下層) と色素を含むトルエン溶液 (上層) との水/トルエン界面に、レーザー光を集光させてトルエン相中の色素を光励起させると、界面を通して水溶液中に光励起電子が移動し、水溶液中の塩化金酸イオンを還元して Au ナノ粒子が生成した。さらにレーザー光の光圧によってこれをリング状に配列化させることにも成功した[図 5b 論文準備中]。**光圧と光化学反応を利用する液-液界面でのナノ構造体の作製は、これまでに報告例がない。光圧により化学反応を制御した初めての例を示すことができ、目標が十分に達成されたと言える。**

**以上の共同研究[A]-[C]は全て、複数班の多数の異分野グループが参画した共同研究の成果であることを強調したい。**

次に、上記共同研究を支えた各研究項目で明らかにしようとしたことと、その達成度について説明する。本領域では公募研究も全て 4 つの班に組み入れ A01 班から A04 班のそれぞれの目的に沿った活動を共同で行ったため、ここでの説明に加える。また個別の成果の詳細内容は (2) を参照のこと。

**【A01 (計画研究 1 及び公募研究)】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、光圧精密測定、流体中の光圧運動解析の技術確立をめざした。**

理論においては特に本領域で重視した共鳴光圧を引き出す手法として対向波の利用を理論的に予言し、共同研究[A]の実験検証に結びついた。また非線形光学効果に基づく新奇光圧操作の予言も実験的成果に結びついた。光圧の精密測定法については、3 グループが複数の異なる手法、環境でいずれも 1fN 程度、あるいはそれを切る精度で光圧を測定する手法を確立し、ナノ粒子を操作するのに必要な光圧を精密に計測できるようになった。また分子流体力学とバイオの専門家による共同研究により流体中における光圧下の多粒子運動を精密に測定、解析し、散乱力による捕捉粒子の運動に駆動されて周辺粒子の大規模流れが発生するなど、流体中ナノ粒子の光圧運動の機構を明らかにした。このように A01 では目標を十分達成した。加えて光圧を走査型顕微鏡に応用し (光誘起力顕微鏡)、光を用いる走査型顕微鏡としては従来とは桁違いの 1nm を切る分解能を世界で初めて達成した。当初の計画を越えた強いインパクトを持つ成果である。

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

**本課題では物質の線形・非線形光学応答などを駆使した光圧操作自由度の多様な拡張を目的とした。**本研究ではフォトクロミック反応などの化学反応を用い、ナノ粒子の共鳴吸収特性を励起光により変化させて運動制御する手法や逐次的多光子吸収による運動操作、有機分子の誘導放出による負の光圧の実験的検証に成功し、共鳴・非線形光圧操作による操作自由度拡大を達成した。また、キラル構造を持つナノ微粒子の円偏光による光トラップ実験を行い、円偏光の掌性によりキラル粒子の勾配力を制御する

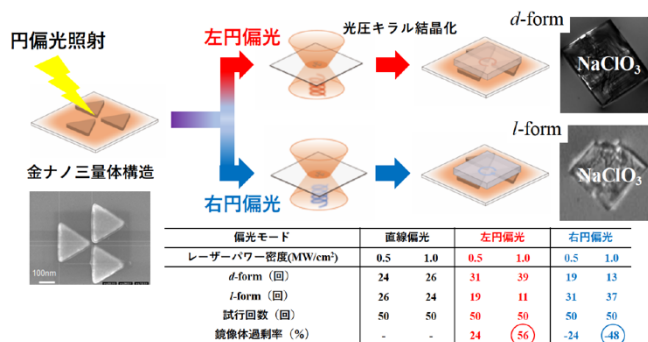


図 4 NaClO<sub>3</sub> のキラル結晶化。プラズモン増強した円偏光で従来を大幅に凌駕する鏡像体過剰率を実現。

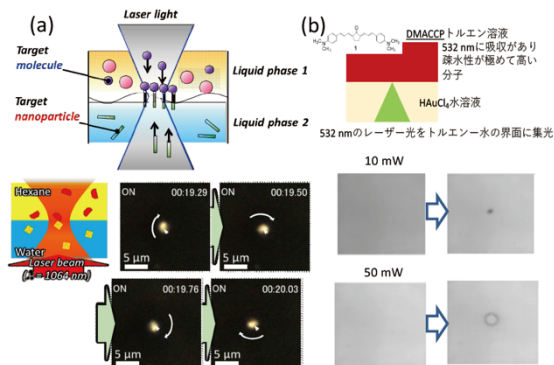


図 5 (a) 液-液界面で金属微粒子-半導体量子ドットの複合捕捉に成功。(b) 液-液界面での化学反応で金微粒子が生成しリングを形成。

ことに成功した。一方、超流動 He 中に NV 中心を有するナノダイヤモンドを導入する事に成功し、NV 中心の吸収に共鳴する連続光レーザーの照射により、光圧で NV 中心含有ナノダイヤモンドの運動制御にも成功した。ここでは水中に比べ圧倒的に速い粒子移動速度を実現している。このように常温溶液中での非線形効果や光の自由度を活用した運動操作の拡大、及び極低温環境中における究極的な運動操作のいずれにおいても計画した目標を達成している。

**【A03 (計画研究 3 及び公募研究)】 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**

本課題では単一分子レベルの操作、ナノスケールの精密配置、そのマクロ化への方法論を追求した。

本研究では金属表面に分散した分子へ光照射したとき、ナノギャップ部における光増強場の光圧で分子数が狙い通り増加現象を示しており、運動次元の制限によって単一分子レベルで光圧操作が可能であることを示した。また金属ナノ構造体の局在プラズモン場を利用して機能性分子を精密配置・固定化できた。さらに光の軌道角運動量を導入する事によって回折限界を超えてナノメートルサイズの空間に局在させ、かつナノ粒子の回転運動を駆動した。一方、ナノ流路中にナノスケールの 3D ケージを多数配置したデバイスによるブラウン運動の抑制手法と光圧操作技術を融合し、単一ナノ粒子の選択的な精密複合操作（捕捉・輸送・配置・配列）に成功した。3D ケージはマクロに配置されており、共同研究 A で操作のマクロ化へ道筋を明らかにすることに大きく貢献している。以上の様に単一分子レベルの操作、ナノスケールの精密配置、そのマクロ化への方法論提示の全てに渡って目標を十分に達成することが出来た。なお、超解像イメージング技術を拡張してナノ粒子の位置追跡手法を開発し、ナノスケールの粒子回転運動の可視化に成功したことは計画を超える成果である。

**【A04 (計画研究 4 及び公募研究)】 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**

本課題では高濃度粒子系の粒子間相互作用を制御して新奇な現象・構造を創生することを目的とした。ここでは特に軌道角運動量を持つ光（光渦）を利用し、通常の運動量にさらに角運動量の作用を加えた粒子間相互作用の制御に焦点を当てた。その結果、光渦のキラリティーを多様な空間スケールの物質に転写することで高度なキラル秩序が形成できることを実証した。具体的には、アゾポリマー高分子がキラル秩序化して螺旋レリーフができること、光硬化樹脂がキラル秩序化して螺旋ファイバーができることなど、単なる光圧では創成できない高度なキラル秩序の創成に成功した。またキラル秩序の創成のメカニズムを理解するために、流体力学と光圧を考慮した連続体の変形シミュレーションを行い、光渦の軌道角運動量を反映した構造体形成のダイナミクスを再現し、新奇現象、新奇構造創製の機構を理論的にも明らかにした。また本項目のミッションであった共同研究[A]-[C]のパイロット研究としても、キラル結晶化などの結果で十分に目標を達成した。なお、薄層クロマトグラフィーによる量子ドットの光圧分離、ブラックシリコン基板によるナノ微粒子大面積捕捉など、計画を越えたインパクトある成果が得られていることも強調したい。

(2) 本研究領域により得られた成果 (主なものを抜粋)

**【A01 (計画研究 1)】**

石原 G の理論研究において、対向波により背景散乱の効果を打ち消して共鳴効果を抽出する新手法が提案され、共同研究 [A] での選別実験に貢献した [論文 7]。また通常の集光ビームでは強い散乱力により共鳴効果は不利になると考えられていたが、非線形光学効果により捕捉、回転運動などが多様に実現できることが示され [論文 3, 9, 31]、A02 班での多様な運動操作の実験実証に結びついた。川野 G では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解明し [論文 20]、また抵抗パルスセンシングと光渦による単一微粒子光圧操作を融合し、単一のターゲット粒子に対する電流信号の取得率や計測精度を大幅に向上させた [論文 4]。細川 G と川野 G は共同で光圧下における多粒子の運動について単一粒子レベルで蛍光解析を行い、捕捉粒子自体の運動に起因する背景流体の大規模流れの影響を初めて明らかにした [論文 8]。秋田 G ではカーボンナノチューブ (CNT) をバネとしてほぼ理論的熱雑音限界の極めて高感度な計測を実現し [図 6 論文 17]、また透明な hBN 膜や正・負の異なる符号の熱膨張率をもつ材料を積層した温度補償型共振器で熱擾乱を抑圧して 1fN 以下の力分解能が実現できることを示した [図 6 論文準備中]。菅原 G は高感度光圧計測を光誘起力顕微鏡に応用し、超高真空、及び独自

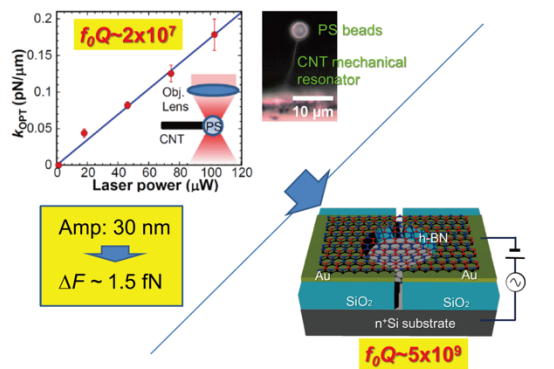


図 6 CNT 機械バネで 1fN レベルの分解能の力計測を実現。さらに hBN 単原子層でそれを凌駕する分解能の可能性が示された。

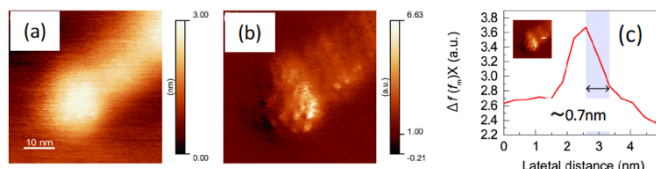


図 7 (a) ダンベル型量子ドットの AFM 像。(b) 同じく光誘起力顕微鏡像。(c) 光誘起力顕微鏡で 0.7nm の分解能を実現。

のFMヘテロダイン法で熱効果を低減して世界で初めて1nmを切る分解能を実現した[図7 論文2]。さらに最近では0.28nmの金属表面原子像を取得するという驚異的な成果を上げ[図8 論文準備中]、計画を大きく越えるインパクトを与えている。

**[A01 (公募研究)]**

田中Gは光駆動マイクロマシンにより~1.5fNと~2.0fNmの感度・分解能でナノ粒子に働く光圧・光トルクの精密計測に成功した[論文準備中]。今田Gは光STMを用いてナフトロシアン単一分子を光圧で高速に輸送することに成功し、計画を大きく越えたインパクトを与えた[図3 論文準備中]。

**[A02 (計画研究2)]**

伊都Gではフォトクロミック反応による基底状態分子の吸収帯変化を用い、共鳴条件の外部変調による光操作を実現した[図9 論文32,33]。また、有機分子の励起状態生成(基底状態吸収の消失と励起状態吸収の発現)により、逐次的多光子吸収による共鳴光操作を達成した[論文準備中]。さらに有機分子の誘導放出による負の光圧の実験的検出にも成功している[論文準備中]。岡本Gでは近接場光学顕微鏡を用いた先端的な計測制御手法により、ナノスケールでキラル光場の構造を決める要因を明らかにし、ナノ空間で局在した円偏光場を発生させてその円偏光度を制御する手法を見出すことができた[論文30,27]。これはナノスケールでキラル構造を光操作するための原理基盤を与えるものと位置づけられる。またキラル構造を持つナノ微粒子の円偏光による光トラップの実験を行い、円偏光の掌性によりキラル粒子の勾配力を制御することに成功した[論文準備中]。芦田Gでは

高強度パルスレーザーの照射によってナノダイヤモンドを液体He中に分散する手法の開発に成功した。超流動相ではブラウン運動の影響は無視できるほど小さく、その運動を鮮明に観測できた。また、NV中心の吸収に共鳴する連続光レーザーの照射により、光圧でNV中心含有ナノダイヤモンドの運動制御にも成功した[論文準備中]。なお、超流動中の光圧捕捉された量子ドット観測から新奇な量子渦研究が立ち上がったこと(芦田グループ蓑輪のさきがけ研究)は領域から生み出された新たな展開である[論文投稿中]。

**[A02 (公募研究)]**

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36]。

**[A03 (計画研究3)]**

笹木Gは金属ナノ構造体の局在プラズモン場の光圧により深港Gの作製した機能性分子捕捉し[図1b 論文59]、またスピン・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、光圧トルクによりナノ粒子の回転運動を駆動し、またそれを可視化した[図10 論文投稿中]。村越G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光圧により増加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単一分子レベルでの運動制御可能であることを示した。さらには電気化学電位の掃引によって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可能性を示した[図11 論文50]。なお、笹木GではナノファイバーでNV中心含有ナノダイヤモンドの選別を行った際に、1個のNV中心含有ナノダイヤモンドの吸収断面積の評価にも成功し[論文41]、中空ナノファイバー(ナノキャピラリー)を用いたアトニュートン光圧測定技術にも結びついた[論文45]。これらは光圧技術と物質科学の強力なリンクを追求し

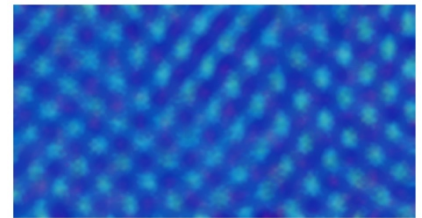


図8 光誘起力顕微鏡で観測した銀表面の原子列(原子間隔は0.28nm)

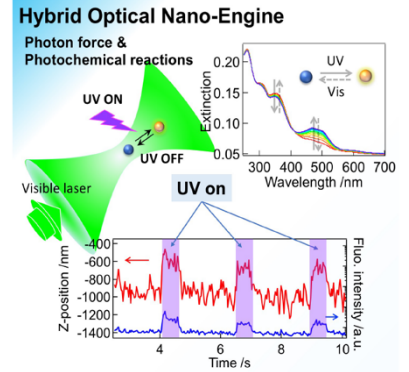


図9 フォトクロミック反応で吸収帯を変化させ、力のバランスをスイッチしてナノ微粒子の反復運動を実現。

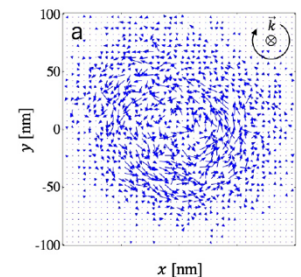
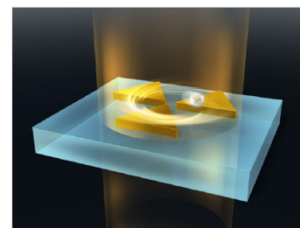


図10 金属三量体に局在するキラル光によりナノ粒子の回転を誘起。超解像イメージングで回転運動を可視化に成功。

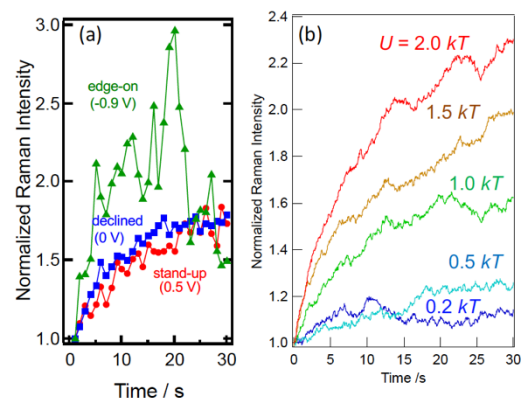


図11 (a) ラマン信号で観測したギャップへの単一分子の集合(実験)。(b) シミュレーション結果。両者の整合性から運動次元を制限した場合の単一分子光圧輸送の有効性が示された。

た本領域の核心的な成果と言える。

#### 【A03（公募研究）】

許 G がナノ流路中のナノボックスを用いた 3D ケージ効果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【[図 1c 論文準備中](#)】。また上野 G は結合系プラズモニックナノ構造を設計・作製し、高精度なナノ粒子捕捉技術を開発した【[論文 47](#)】。

#### 【A04（計画研究 4）】

尾松 G は光渦のキラリティーを多様な物質に転写する高度なキラル秩序が形成できることを示した。具体的には、アソポリマー高分子がキラル秩序化して螺旋レリーフができること【[論文 77, 72](#)】、光硬化樹脂がキラル秩序化して螺旋ファイバーができること【[論文 69](#)】など、単なる光圧では作製できない高度なキラル秩序の創成に成功した【[図 12](#)】。飯田 G は尾松 G と共同でキラル秩序の創成のメカニズムを理解するために、光渦で粒子を回転させる際にスピン角運動量の役割を明らかにし【[論文 64](#)】、また流体力学と光圧を融合した連続体の変形シミュレーションを行い、光渦の軌道角運動量を反映した構造体形成のダイナミクス再現に成功した【[論文準備中](#)】。杉山 G は円偏光とプラズモニックトラッピング法を有機物にも展開し、エチレンジアミン硫酸塩のキラル結晶化に適用することで 40% 以上の鏡像体過剰率を達成した【[論文準備中](#)】。坪井 G はブラックシリコン、ブラックチタンなど非金属基板の表面に作製したナノスケールの突起構造近傍の局所電場で大量のナノ微粒子を光捕捉できることを明らかにした【[図 13 論文 75, 63, 61](#)】。また鳥本 G は Au ナノ粒子を薄層クロマトグラフィープレートに担持し、Au 粒子近傍に生成する増強電場によって量子ドットの光捕捉する光クロマトグラフィーとも呼ぶべき革新的技術を示した【[図 2 論文準備中](#)】。坪井 G、鳥本 G の成果は計画時には想定されていなかったインパクトある成果である。

#### 【A04（公募研究）】

鈴木 G はニオブ酸塩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 68](#)】。また液-液界面で光圧による化学反応の制御を行い共同研究[C]に寄与している【[図 5b 論文準備中](#)】。

なお、以上の成果は個々に記載したが、ほとんどが領域全体の共同研究、あるいは共同の議論から成功へ導かれており、その過程で次のような学術的知見、技術的方法論が共有されていることを強調したい。

#### 【学術的知見】

本領域では（1）光圧現象を通して光と物質のキラル相互作用の理解が格段に進み、光の角運動量と物質キラリティーの相関や、物質との相互作用を通じた光のスピン・軌道角運動量変換の機構に対する理解から新しいプロジェクトが立ち上がっている。（2）また、流体中で物質運動を光圧により人為的に制御する研究過程で、その精密観測・解析から流体中の多粒子相関、或いは環境と微粒子の運動相関についての新しい理解が得られ、新奇な分子流体力学的方法論が構築された。

#### 【技術的方法論】

本領域ではナノ粒子操作において、（1）運動次元を 0, 1, 2 次元に制限する戦略が領域全体で共有され、ナノボックス、ナノファイバー、界面を利用した様々な光圧操作で大きな成功を収めた。（2）また、非線形光学応答や化学反応などの物質特性を積極的に利用した多自由度な光圧操作が成功している。（3）さらに、動きを精密計測することによってこれまで直接測れなかった単一ナノ粒子の吸収や化学反応量の直接計測が実現し、光圧技術と物質科学の間に強力なリンクを構築することに成功した。

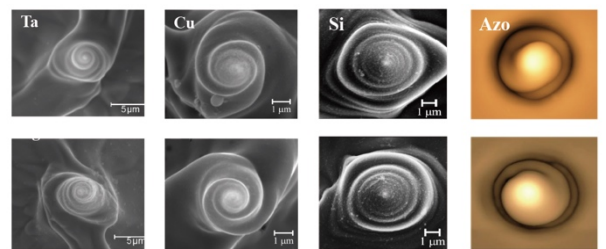


図 12 光渦の軌道角運動量によりそのキラリティーを様々な物質に転写することに成功。上段、下段はそれぞれ左右キラリティー転写に対応。

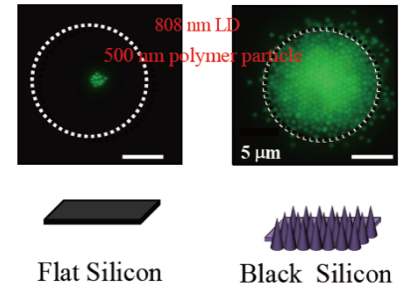


図 13 表面にナノ構造のあるブラックシリコン上で微弱光により大面積でナノ粒子の捕捉に成功。

## 研究発表の状況

### 原著論文

#### 研究項目 A01 (全 141 報)

1. \*H. Imada, M. Imai-Imada, K. Miwa, H. Yamane, T. Iwasa, Y. Tanaka, N. Toriumi, K. Kimura, N. Yokoshi, A. Muranaka, M. Uchiyama, T. Taketsugu, Y. K. Kato, H. Ishihara, \*Y. Kim, “Single-molecule laser nanospectroscopy with micro–electron volt energy resolution” *Science*, 10.1126/science.abg8790 (2021)
2. J. Yamanishi, H. Yamane, Y. Naitoh, Y-J. Li, N. Yokoshi, T. Kameyama, S. Koyama, T. Torimoto, \*H. Ishihara, \*Y. Sugawara, “Optical force mapping at the single-nanoscale scale”, *Nat. Commun.*, 10.1038/s41467-021-24136-2 (2021)
3. H. Ishihara, “Optical manipulation of nanoscale materials by linear and nonlinear resonant optical responses”, *Adv. Phys-X*, **6**, 1885991(1-36) (2021)
4. K. Nakajima, R. Nakatsuka, T. Tsuji, K. Doi, \*S. Kawano, “Synchronized resistive-pulse analysis with flow visualization for single micro- and nanoscale objects driven by optical vortex in double orifice”, *Sci. Rep.*, **11**, 9323 (1-14) (2021)
5. R. B. Jaculbia, \*H. Imada, K. Miwa, T. Iwasa, M. Takenaka, B. Yang, E. Kazuma, \*N. Hayazawa, T. Taketsugu, \*Y. Kim, “Single-molecule resonance Raman effect in a plasmonic nanocavity”, *Nat. Nanotechnol.*, **15**, 105 (2020)
6. \*Y. Y. Tanaka, A. Pabl, R. Mohsen, G. Vincenzo, M. A. Stefan, T. Shimura, “Plasmonic linear nanomotor employing lateral optical forces”, *Sci. Adv.*, **6**, eabc3726 (2020)
7. T. Wada, H. Fujiwara, \*K. Sasaki, \*H. Ishihara, “Proposed method for highly selective resonant optical manipulation using counter-propagating light waves”, *Nanophotonics*, **9**, 3335-3345, (2020)
8. \*C. Hosokawa, T. Tsuji, T. Kishimoto, T. Okubo, S. N. Kudoh, S. Kawano, “Convection dynamics forced by optical trapping with a focused laser beam”, *J. Phys. Chem. C*, **124**, 8323-8333 (2020)
9. M. Hoshina, N. Yokoshi, \*H. Ishihara, “Nanoscale rotational optical manipulation”, *Opt. Express*, **28**, 14980-14994 (2020)
10. \*H. Yamane, J. Yamanishi, N. Yokoshi, Y. Sugawara, H. Ishihara, “Theoretical analysis of optically selective imaging in photoinduced force microscopy”, *Opt. Express*, **28**, 34787-34803 (2020)
11. W. Anan, \*Y. Y. Tanaka, R. Fukuhara, T. Shimura, “Continuity equation for spin angular momentum in relation to optical chirality”, *Phys. Rev. A*, **102**, 23531 (2020)
12. K. Kimura, K. Miwa, \*H. Imada, M. Imai-Imada, S. Kawahara, J. Takeya, M. Kawai, \*M. Galperin, \*Y. Kim, “Selective triplet exciton formation in a single molecule”, *Nature*, **570**, 210 (2019)
13. T. Kinoshita, T. Matsuda, T. Takahashi, M. Ichimiya, M. Ashida, Y. Furukawa, M. Nakayama, \*H. Ishihara, “Synergetic Enhancement of Light-Matter Interaction by Nonlocality and Band Degeneracy in ZnO Thin Films”, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 157401 (2019)
14. D. Yoshikawa, K. Takei, T. Arie, \*S. Akita, “Dielectric actuation of optically transparent electromechanical resonator consisting of cantilevered hexagonal boron nitride sheet”, *Appl. Phys. Express*, **12**, 105001/1-4 (2019)
15. J. Yamanishi, Y. Naitoh, J. Li, \*Y. Sugawara, “Heterodyne Frequency Modulation Technique in Photoinduced Force Microscopy”, *Phys. Rev. Appl.*, **9**, 024031/1-5 (2018)
16. \*N. Yokoshi, K. Odagiri, A. Ishikawa, H. Ishihara, “Synchronization Dynamics in a Designed Open System” *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 203601(1-5) (2017)
17. M. Yasuda, K. Takei, T. Arie, \*S. Akita, “Direct measurement of optical trapping force gradient on polystyrene microspheres using a carbon nanotube mechanical resonator”, *Sci. Rep.*, **7**, 2825/1-7 (2017)
18. \*T. Kudo, H. Ishihara, H. Masuhara, “Resonance optical trapping of individual dye-doped polystyrene particles with blue- and red-detuned lasers”, *Opt. Express*, **25**, 4655-4664 (2017)
19. 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)
20. T. Tsuji, K. Kozai, H. Ishino, \*S. Kawano, “Direct Observations of Thermophoresis in Microfluidic Systems”, *Micro Nano Lett.*, **12**, 520-525 (2017)

#### 研究項目 A02 (全 76 報)

21. S. Matoba, C. Kanzaki, K. Yamashita, T. Kusukawa, G. Fukuhara, T. Okada, T. Narushima, H. Okamoto, \*M. Numata, “Directional Supramolecular Polymerization in a Dynamic Microsolution: A Linearly Moving Polymer’s End Striking Monomers” *J. Am. Chem. Soc.*, **143**, in press (2021)
22. P. Szustakiewicz, N. Kołsut, D. Grzelak, T. Narushima, M. Góra, M. Bagiński, D. Pocięcha, H. Okamoto, L. Liz-Marzán, \*W. Lewandowski, “Supramolecular chirality synchronization in thin films of plasmonic nanocomposites”, *ACS Nano*, **14**, 12918-12928 (2020)
23. \*M. Sugawara, Y. Mitumori, K. Edamatsu, M. Sadgrove, “Optical detection of nano-particle characteristics



- using coupling to a nano-waveguide” *Opt. Express*, **28**, 18938-18945 (2020)
24. T. Yoshino, D. Yamaura, M. Komiya, M. Sugawara, Y. Mitsumori, M. Niwano, A. Hirano-Iwata, K. Edamatsu, \*M. Sadgrove, “Optical transport of sub-micron lipid vesicles along a nanofiber”, *Opt. Express*, **28**, 38527-38538 (2020)
  25. \*Y. Minowa, S. Kuramoto, T. Kameyama, T. Torimoto, M. Ashida, “Synthesis of submicron-sized CdS particles using reverse micelles, *J. Nanophotonics*, **14**, 026013(1-6) (2020)
  26. \*K. Setoura, T. Tsuji, \*S. Ito, S. Kawano, H. Miyasaka, “Opto-Thermophoretic Separation and Trapping of Plasmonic Nanoparticles” *Nanoscale*, **11**, 21093-21102 (2019)
  27. \*S. Hashiyada, T. Narushima, \*H. Okamoto, “Active Control of Chiral Optical Near Fields on a Single Metal Nanorod”, *ACS Photonics*, **6**, 677-683 (2019)
  28. \*T. Yamada, T. Eguchi, T. Wakiyama, \*T. Narushima, H. Okamoto, N. Kimizuka, “Synthesis of Chiral Labtb and Visualization of Its Enantiomer Excess by Induced Circular Dichroism Imaging”, *Chem. Eur. J.*, **25**, 6698-6702 (2019)
  29. S. Nakamura, R. Sunakawa, K. Setoura, \*S. Ito, \*H. Miyasaka, “Detection of optical force due to multiphoton absorption”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1220**, 012042/1-4 (2019)
  30. 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)
  31. M. Hoshina, N. Yokoshi, H. Okamoto, \*H. Ishihara, “Super-Resolution Trapping: A Nanoparticle Manipulation Using Nonlinear Optical Response” *ACS Photonics*, **5**, 318-323 (2018)
  32. \*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”, *J. Phys. Chem. Lett.*, **9**, 2659-2664 (2018)
  33. K. Setoura, A. Memon, \*S. Ito, Y. Inagaki, K. Mutoh, J. Abe, \*H. Miyasaka, “Switching of Radiation Force on Optically Trapped Microparticles through Photochromic Reactions of Pyranoquinazoline Derivatives” *J. Phys. Chem. C*, **122**, 22033-22040 (2018)
  34. \*Y. Minowa, T. Suzuki, K. Setoura, S. Ito, H. Miyasaka, M. Ashida, “Single-particle photoluminescence from cadmium selenide quantum dots fabricated via laser ablation in superfluid helium” *J. Nanophotonics*, **13**, 12506(1-6) (2018)
  35. 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)
  36. \*M. Sadgrove, M. Sugawara, M. Yasuyoshi, K. Edamatsu, “Polarization response and scaling law of chirality for a nanofibre optical interface”, *Sci. Rep.*, **7**, 17085 (2017)
  37. \*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”, *Opt. Express*, **25**, 12499-12507 (2017)
  38. \*Y. Minowa, Y. Oguni, M. Ashida, “Inner structure of ZnO microspheres fabricated via laser ablation in superfluid helium”, *Opt. Express*, **25**, 10449-10445 (2017)
  39. 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” *Appl. Phys. Express*, **10**, 22701 (2017)
  40. \*Y. Minowa, Y. Toyota, M. Ashida, “In situ tuning of whispering gallery modes of levitated silica microspheres”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **34**, C20-C24 (2017)

#### 研究項目 A03 (全 142 報)

41. H. Fujiwara, K. Yamauchi, T. Wada, \*H. Ishihara, \*K. Sasaki, “Optical selection and sorting of nanoparticles according to quantum mechanical properties”, *Sci. Adv.*, **7**, eabd9551 (2021)
42. Y. Kitajima, H. Sakamoto, \*K. Ueno, “Coupled plasmonic systems: controlling the plasmon dynamics and spectral modulations for molecular detections”, *Nanoscale*, **13**, 5187-5201 (2021)
43. \*H. Fujiwara, T. Suzuki, C. Pin, \*K. Sasaki, “Localized ZnO Growth on a Gold Nanoantenna by Plasmon-Assisted Hydrothermal Synthesis”, *Nano Lett.*, **20**, 389-394 (2020)
44. S. Oikawa, H. Minamimoto, A. Ohnuki, \*K. Murakoshi, “Ultra-Fine Electrochemical Tuning of Hybridized Plasmon Modes for Ultimate Light Confinement”, *Nanoscale*, **12**, 11593-11600 (2020)
45. \*C. Pin, R. Otsuka, H. Fujiwara, \*K. Sasaki, “Optical Transport and Sorting of Fluorescent Nanodiamonds inside a Tapered Glass Capillary”, *ACS Appl. Nano Mater.*, **3**, 4127-4134 (2020)
46. T. Fukushima, A. Miyauchi, N. Oyamada, H. Minamimoto, T. Motegi, \*K. Murakoshi, “Visualization of Molecular Trapping at Plasmonic Metal Nanostructure by Surface-Enhanced Raman Scattering Imaging”, *J. Nanophotonics*, **14**, 26001 (2020)
47. K. Shibata, S. Fujii, Q. Sun, A. Miura, \*K. Ueno, “Further enhancement of the near-field on Au nanogap dimers

- using quasi-dark plasmon modes”, *J. Chem. Phys.*, **152**, 104706/1-10 (2020)
48. J. Zhang, R. Zhou, S. Yasuda, H. Minamimoto, \*K. Murakoshi, “Nonzero Wavevector Excitation of Graphene by Localized Surface Plasmon”, *Nano Lett.*, **19**, 7887-7894 (2019)
  49. S. Ishida, D. Kitagawa, S. Kobatake, S. Kim, S. Kurihara, \*T. Fukaminato, “Efficient “turn-off” fluorescence photoswitching in a highly fluorescent diarylethene single crystal”, *Chem. Commun.*, **55**, 5681-5684 (2019)
  50. N. Oyamada, H. Minamimoto, \*K. Murakoshi, “*In-situ* Observation of Unique Bi-analyte Molecular Behaviors at the Gap of A Single Metal Nanodimer Structure via Electrochemical Surface-Enhanced Raman Scattering Measurements”, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 24740-24745 (2019)
  51. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, \*R. Morita, “Comprehensive quantitative analysis of vector beam states based on vector field reconstruction”, *Sci. Rep.*, **9**, 9979/1-14 (2019)
  52. N. Oyamada, H. Minamimoto, Y. Wakisaka, \*K. Murakoshi, “Determination of Molecular Orientation in Bi-analyte Mono-molecule Layer through Electrochemical Surface-Enhanced Raman Scattering Measurements”, *Chem. Lett.*, **48**, 820-823 (2019)
  53. X. Shi, K. Ueno, T. Oshikiri, Q. Sun, K. Sasaki, \*H. Misawa, “Enhanced water splitting under modal strong coupling conditions”, *Nat. Nanotechnol.*, **13**, 953-958 (2018)
  54. \*Y. Xu, “Nanofluidics: a New Arena for Materials Science”, *Adv. Mater.*, **30**, 1702419(1-17) (2018)
  55. \*T. Fukaminato, S. Ishida, \*R. Métivier, “Photochromic fluorophores at the molecular and nanoparticle levels: Fundamentals and applications of diarylethenes”, *NPG Asia Mater.*, **10**, 859-881 (2018)
  56. H. Minamimoto, S. Oikawa, T. Hayashi, A. Shibasaki, X. Li, \*K. Murakoshi, “Electrochemical Fine Tuning of the Plasmonic Properties of Au Lattice Structures”, *J. Phys. Chem. C*, **122**, 14162-14167 (2018)
  57. K. Sakai, T. Yamamoto, \*K. Sasaki, “Nanofocusing of structured light for quadrupolar light-matter interactions”, *Sci. Rep.*, **8**, 7746 (2018)
  58. M. Suzuki, K. Yamane, M. Sakamoto, K. Oka, Y. Toda, \*R. Morita, “Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses by using the combination of 4-f5 spatial light modulator and common-path optical system”, *Opt. Express*, **26**, 2584-2598 (2018)
  59. 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)
  60. \*K. Sakai, K. Nomura, T. Yamamoto, T. Omura, \*K. Sasaki, “Quadrupole lattice resonances in plasmonic crystal excited by cylindrical vector beams”, *Sci. Rep.*, **6**, 34967/1-7 (2016)

#### 研究項目 A04 (全 193 報)

61. S. Hashimoto, Y. Uenobo, R. Takao, K. Yuyama, T. Shoji, D. Linklater, E. Ivanova, S. Juodkazis, T. Kameyama, T. Torimoto, \*Y. Tsuboi, “Incoherent Optical Tweezers on Black Titanium”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 27586-27593 (2021)
62. A-C Cheng, H. Niinomi, T. Omatsu, S. Ishida, \*K. Sasaki, \*T. Sugiyama, “Plasmonic Manipulation-Controlled Chiral Crystallization of Sodium Chlorate”, *J. Phys. Chem. Lett.*, **11**, 4422-4426 (2020)
63. S. Komoto, T. Nagai, R. Takao, K. Ushiro, M. Matsumoto, T. Shoji, D. P. Linklater, S. Juodkazis, \*Y. Tsuboi, “Optical Trapping of Polystyrene Nanoparticles on Black Silicon: Implications for Trapping and Studying Bacteria and Viruses”, *ACS Appl. Nano Mater.*, **3**, 9831-9841 (2020)
64. M. Tamura, T. Omatsu, S. Tokonami, \*T. Iida, “Interparticle-Interaction-Mediated Anomalous Acceleration of Nanoparticles under Light-Field with Coupled Orbital and Spin Angular Momentum”, *Nano Lett.*, **19**, 4873-4878 (2019)
65. M. Ueda, Y. Nishimura, M. Tamura, S. Ito, \*S. Tokonami, \*T. Iida, “Microflow-mediated optical assembly of nanoparticles with femtogram protein via shrinkage of light-induced bubbles”, *APL Photonics*, **4**, 10802 (2019)
66. \*T. Shoji, M. Tamura, T. Kameyama, T. Iida, Y. Tsuboi, T. Torimoto, “Nanotraffic Lights: Rayleigh Scattering Microspectroscopy of Optically Trapped Octahedral Gold Nanoparticles”, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 23096-23102 (2019)
67. R. Nakamura, H. Kawaguchi, M. Iwata, A. Kaneko, R. Nagura, K. Toyoda, K. Miyamoto, S. Kawano, \*T. Omatsu, “Optical vortex-induced forward mass transfer: manifestation of helical trajectory of optical vortex”, *Opt. Express*, **27**, 38019-38027 (2019)
68. 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)
69. J. Lee, Y. Arita, S. Toyoshima, K. Miyamoto, P. Panagiotopoulos, E. Wright, K. Dholakia, \*T. Omatsu, “Photopolymerization with light fields possessing orbital angular momentum: Generation of helical microfibers”, *ACS Photonics*, **5**, 4156-4163 (2018)
70. \*H. Niinomi, T. Sugiyama, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Freezing” of NaClO<sub>3</sub> Metastable Crystalline State by Optical Trapping in Unsaturated Microdroplet”, *Cryst. Growth Des.*, **18**, 734-741 (2018)

71. \*H. Niinomi, T. Sugiyama, M. Tagawa, S. Harada, T. Ujihara, S. Uda, K. Miyamoto, T. Omatsu, "In-situ Observation of Chiral Symmetry Breaking in NaClO<sub>3</sub> Chiral Crystallization Realized by Thermoplasmonic Micro-Stirring", *Cryst. Growth Des.*, **18**, 4230-4239 (2018)
72. K. Masuda, R. Shinozaki, Y. Kinezuka, J. Lee, S. Ohno, S. Hayashida, H. Okamoto, D. Sakai, K. Harada, K. Miyamoto, \*T. Omatsu, "Nanoscale chiral surface relief of azo-polymers with nearfield OAM light", *Opt. Express*, **26**, 22197-22207 (2018)
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", *Angew. Chem. Int. Ed.* **56**, 6739-6743 (2017)
74. \*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", *Cryst. Growth Des.*, **17**, 809-818 (2017)
75. T. Shoj, A. Mototsuji, A. Balčytis, D. Linklater, S. Juodkazis, \*Y. Tsuboi, "Optical tweezing and binding at high irradiation powers on black-Si", *Sci. Rep.*, **7**, 12298 (2017)
76. 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", *Opt. Express*, **25**, 13617-13625 (2017)
77. 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", *Opt. Express*, **25**, 12499-12507 (2017)
78. \*T. Iida, Y. Nishimura, M. Tamura, K. Nishida, S. Ito, \*S. Tokonami, "Submillimetre Network Formation by Light-induced Hybridization of Zeptomole-level DNA", *Sci. Rep.*, **6**, 37768 (1-9) (2016)
79. \*D. V. Nguyen, T. D. Le, T. Iida, "Cancellation of thermally induced frequency shifts in bimaterial cantilevers by nonlinear optomechanical interactions", *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 054102 (1-4) (2016)
80. \*H. Niinomi, T. Sugiyama, M. Tagawa, K. Murayama, S. Harada, T. Ujihara, "Enantioselective Amplification on Circularly Polarized Laser-Induced Chiral Nucleation from a NaClO<sub>3</sub> Solution Containing Ag Nanoparticles", *CrystEngComm*, **18**, 7441-7448 (2016)

#### 国際会議招待講演 (全 359 件)

##### 研究項目 A01

1. H. Ishihara, "Plasmon-boosted cooperative effect in quantum-emitter assembly", *Materials Research Meeting 2019* (Yokohama, Japan, Dec 10-14, 2019)
2. C. Hosokawa, T. Kishimoto, S. Kudoh, T. Taguchi, "Simultaneous measurements of molecular dynamics of optically trapped glutamate receptors and electrical activity in neurons", *The 13th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2019)* (Kobe, Japan, Dec 4-6, 2019)
3. Y. Sugawara, "Kelvin Probe Force Microscopy with Atomic Resolution", *Nanoscience and Graphene Nanotechnology 2019* (Narita, Japan, Nov 25-27, 2019)
4. Y. Sugawara, "Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy", *International Conference and Expo on nanotechnology and Nanomaterial's* (Osaka, Japan, Nov 14-15, 2019)
5. C. Hosokawa, Y. Matsubayashi, S. Kudoh, K. Tawa, "Optical trapping of nanoparticle suspensions on a plasmonic chip and its application to manipulation of cell surface molecules", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019)
6. C. Hosokawa, "Molecular dynamics in an optical trap on living neuronal networks", *The 13th Japanese-Russian Workshop on "Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices" (JRWS2019)* (Awaji, Japan, Nov 10-13, 2019)
7. H. Ishihara, "Nano-Material Manipulation and Structural Order Control with Optical Forces", *Workshop on Optical Force Science: Pre-workshop of the 4th International* (Kobe, Japan, Nov 10-11, 2019)
8. 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, 2019)
9. Y. Sugawara, "Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM) ", *The 12th International Symposium on Test and Measurement* (Taiyuan, China, Oct 23-25, 2019)
10. Y. Sugawara, "Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM) ", *The 8th International Conference on Nanoscience & technology, China 2019* (Beijing, China, Oct 16-19, 2019)
11. H. Ishihara, "Microscopic interaction of light and nanostructures", *The 3rd IMS-INSJ Joint Workshop on Frontier Nanomaterials* (Hanoi, Vietnam, Oct 15-18, 2019)
12. H. Ishihara, "3D near-field circular dichroism measured by optical force The 10th International Conference on

- Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics", *10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2019)* (Lisbon, Portugal, Jul 23-26, 2019)
13. H. Ishihara, "Optical Manipulation of Nanoparticles by Resonant Nonlinear Response", *10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019)* (Singapore, Singapore, Jun 26-27, 2019)
  14. H. Ishihara, "Optical Nano Matter Science in Japan", *The 8th International Summer Course* (Hsinchu, Taiwan, Jun 24-26, 2019)
  15. S. Akita, "Nano-electro-mechanical resonators toward highly sensitive force sensing", *The Seventh International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies* (Nagano, Japan, Jun 19-22, 2019)
  16. C. Hosokawa, "Laser-induced perturbation into cell-surface molecules on neurons", *The 6th Awaji International Workshop on "Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications" (AWEST2019)* (Awaji, Japan, Jun 16-19, 2019)
  17. H. Ishihara, "Enhanced correlation between quantum emitters by plasmonic structures", *The 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (IMCO 2019)* (Hong Kong, China, Jun 14-17, 2019)
  18. Y. Sugawara, "Separation of Atomic-Scale Spin Contrast on NiO(001) by Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM)", *The collaborative conference on Materials Research (CCMR) 2019* (Gyeonggi Goyang, Korea, Jun 3-7, 2019)
  19. C. Hosokawa, Y. Fujioka, S. Kudoh, T. Taguchi, "Femtosecond Laser-induced Stimulation into Neuronal Networks", *The 12th International Symposium on Nanomedicine (ISNM2018)* (Ube, Japan, Dec 6-8, 2018)
  20. S. Akita, "Electronic and mechanical properties of nanomaterials", *6th Hsinchu Summer Course and Workshop* (Hsinchu, Taiwan, Jul 3-5, 2017)

#### 研究項目 A02

21. H. Okamoto, "Chemical and Mechanical Dissymmetries in Chiral Plasmonic Interactions", *IEEE Research and Applications of Photonics in Defense* (USA, Aug 2-4, 2021) online
22. H. Okamoto, "Chiral Near-Field Properties of Plasmonic Nanomaterials: Imaging and Functions", *META 2021 (The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics)* (Warsaw, Poland, Jul 20-23, 2021) [Keynote] online
23. S. Ito "Nano-photomechanical motion of small particles induced by switching photon force through photochemical processes", *SPIE Optics + Photonics 2020* (Sandiego, USA, Aug 24-28, 2020)
24. H. Okamoto, "Local Field Properties of Chiral Plasmons: Imaging and Functions", *Online Summer Conference on Chiral Plasmonics* (Seoul, Korea, Jul 8-9, 2020) online
25. H. Okamoto, "Chiral Near- and Far-Field Optical Properties of Plasmonic Nanomaterials", *Minisymposium on Soft and Plasmonic Nanomaterials, University of Warsaw* (Warsaw, Poland, Mar 9-10, 2020)
26. S. Ito, "Nanoscale Mechanical Motion of Small Particles Achieved by Switching of Photon Force through Photochemical Reactions", *Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry 2020 (TSRP-2020)* (Mumbai, India, Jan 5-9, 2020)
27. H. Okamoto, "Imaging, Control, Impact of Chiral Plasmons", *Materials Research Meeting 2019* (Yokohama, Japan, Dec 10-14, 2019)
28. S. Ito, "Nanoscale mechanical motion of small particles driven by switching of photon force through photo-physicochemical processes", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019)
29. M. Ashida, T. Kinoshita, T. Matsuda, M. Ichimiya, H. Ishihara, "Observation of ultrafast superradiance due to nonlocal light-matter interaction leading to thermal-free photonics", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019)
30. H. Okamoto, "Visualization of chiral plasmons and near-field interactions", *The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019) [Keynote]
31. S. Ito "One-Color Fluorescence Switching of Diarylethene Derivatives and its Application to Ultralong-Time Single-Molecule Tracking", *International Conference on Photochemistry and Sustainable Energy (ICPSE 2019)* (Alappuzha, India, Oct 16-19, 2019) [Plenary]
32. H. Okamoto, "Nanoscale Imaging and Control of Chiral Plasmons", *10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019)* (Lisbon, Portugal, Jul 23-26, 2019)
33. H. Okamoto, S. Hashiyada, T. Narushima, "Nanoscale imaging and control of chiral optical fields", *The 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019)* (Singapore, Singapore, Jun 23-28, 2019)
34. S. Ito, "Mesoscopic Photo-Mechanical Motion of Small Particle Achieved by Switching of Radiation Force Through Photochemical Reaction", *International Conference on Materials for the Millennium (MATCON 2019)*

(Cochin, India, Mar 14-16, 2019)

35. S. Shoji, "Laser manipulation of single wall carbon nanotubes", *International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'17)* (Busan, Korea, Sep 10-15, 2017)
36. M. Ashida, "Optical fabrication and manipulation of semiconductor or superconducting nano- and micro-particles", *Hsinchu Summer Course and Workshop* (Hsinchu, Taiwan, Jul 3-5, 2017)
37. S. Shoji, "Mechanical properties of nanostructured polymer", *International Symposium on Optomechatronics Technology 2016 (ISOT2016)* (Itabashi, Japan, Nov 7-10, 2016)
38. S. Shoji, "Chirality Selective Photo-bleaching of Single-wall Carbon Nanotubes by Femtosecond Laser", *International Conference on The Frontiers of Polymers and Advanced Materials 2016 (ICFPAM 2016)* (Daejeon, Korea, Oct 31-Nov 4, 2016)
39. S. Shoji, "Excitation of polymerization reaction and optical gradient force through local surface plasmon resonance of gold nanorods", *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2016 (PIERS2016)* (Shanghai, China, Aug 8-11, 2016)
40. S. Shoji, "Mechanical properties of polymer micro/nano structures fabricated by two-photon lithography", *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2016 (PIERS2016)* (Shanghai, China, Aug 8-11, 2016)

### 研究項目 A03

41. K. Sasaki, "Nano-Material Optical Manipulation and Structural Order Control", *Optics Seminars OIST* (Japan, Dec 22, 2020) online
42. K. Sasaki, "Optical manipulation toward material sciences", *Optics & Photonics Japan 2020 OSJ-OSA-OSK Joint Symposia on Optics* (Japan, Nov 14, 2020) online
43. K. Murakoshi, "Extended Electrochemical Potential Range Induced By Plasmonic Electronic Excitation", *PRiME 2020 (ECS, ECSJ, & KECS Joint Meeting)* (Hawaii, USA, Oct 4-9, 2020) online
44. K. Murakoshi, "Exotic Plasmonic Excitation of Electrons beyond The Normal Limit of Electrochemical Potential for Novel Photochemical Reactions", *ISE -71st Annual Meeting* (Belgrade, Serbia, Aug 31-Sep 4, 2020) online
45. K. Sasaki, "Linear and Angular Momentum Transfer In Nano- Scale Fields", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 12-14, 2019)
46. K. Murakoshi, "Plasmonically-Powered Electronic Excitation in Nano-Materials", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019)
47. K. Murakoshi, "Control of the Selection Rule at Plasmonic Electronic Excitation", *100th Anniversary of NCHU: the Symposium on Plasmonic Nanotechnology* (Taichung, Taiwan, Oct 30-Nov 1, 2019)
48. K. Sasaki, "Optical manipulation based on linear and angular momenta of nanogap plasmon", *SPIE Photonics Asia: Plasmonics IV* (Hangzhou, China, Oct 22-23, 2019) [Keynote]
49. K. Sasaki, "Nano-Sized Whispering-Gallery-Mode Plasmonic Cavities", *The International Workshop on* (Sapporo, Japan, Aug 19-21, 2019)
50. K. Sasaki, "Rotational Manipulation of Nanoparticles Using Plasmonic Nano-Vortex Fields", *SPIE Optics + Photonics, Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII* (San Diego, USA, Aug 13-15, 2019)
51. K. Sasaki, "Poynting Vector Analysis of Multipolar Plasmonic Fields", *SPIE Optics + Photonics, Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XVII* (San Diego, USA, Aug 13-15, 2019)
52. H. Minamimoto, R. Osaka, K. Murakoshi, "Advanced Materials for the Arbitrary Tuning of the Isotopic Hydrogen Evolution Reactions", *The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019)* (Lisbon, Portugal, Jul 23-29, 2019)
53. K. Sasaki, "Interference of Multipolar Lattice Resonances in Plasmonic Crystal Excited by Structured Light Structured Light", *The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019)* (Lisbon, Portugal, Jul 23-26, 2019)
54. K. Sasaki, "Optical manipulation of nanoparticles using plasmonic antennas and glass capillaries", *Invited seminar* (Guiana, France, Jul 1, 2019)
55. K. Sasaki, "Selective Trapping and Transport of Nanoparticles using Optical Forces", *The 7th International Symposium on Organic and Inorganic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2019)* (Nagano, Japan, Jun 19-22, 2019)
56. T. Fukaminato, S. Ishida, S. Deguchi, S. Kim, S. Kurihara, R. Métivier, "Efficient fluorescence photoswitching in photochromic nanoparticles", *10th Asian Photochemistry Conference (APC 2018)* (Taipei, Taiwan, Dec 16-18, 2018)
57. T. Fukaminato, S. Ishida, R. Métivier "Efficient fluorescence photoswitching in photochromic nanoparticles", *International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC Langkawi 2018)* (Langkawi Island, Malaysia, Oct

- 30-Nov 2, 2018)
58. K. Sasaki, "Conversion and Inversion of Plasmonic Angular Momenta in Nano-Space", *SPIE Optics + Photonics, Plasmonics* (San Diego, USA, Aug 19-23, 2018)
  59. R. Morita, "Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses with a broadband spectrum", *SPIE Photonic West 2018* (San Francisco, USA, Jan 30-Feb 1, 2018)
  60. T. Fukaminato, "Multi-color fluorescence photoswitching in a mixture of fluorescent photoswitchable molecules", *First Workshop on Photo-active Nanomaterials with Cooperative and Synergetic Responses* (Cachan, France, Mar 27-28, 2017)

#### 研究項目 A04

61. T. Omatsu, "Twisted light : Fundamentals and applications", *International conference on optics-photonics design and fabrication* (Taipei, Taiwan, Jun 1-3, 2021) online
62. T. Omatsu, "Optical Vortex Induced Super-Structures", *5th International Conference on Material Engineering and Manufacturing (ICMEM)* (Chiba, Japan, Apr 17-18, 2021) online
63. T. Sugiyama, "Artificial fabrication of protein amyloid fibers by optical tweezers", *2021 International Workshop on Emergence of Life-Nano-Bio Science* (Mar 10-11, 2021) [Plenary] online
64. T. Sugiyama, "Chirality control in chiral crystallization by femtosecond laser irradiation", *The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology* (Mar 1-4, 2021) online
65. T. Torimoto, "Preparation of Near-IR-Responsive Multinary Quantum Dots and Their Photofunctions", *Fuzhou University Remote Lecture* (China, Nov 10, 2020) online
66. T. Torimoto, K. Masuoka, T. Kameyama, S. Kuwabata, "Photocatalytic H<sub>2</sub> Evolution with Anisotropic-Shaped ZnSe-AgInSe<sub>2</sub> Solid Solution Nanorods", *Pacific RIM Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME2020)* (Hawaii, USA, Oct 4-9, 2020) online
67. T. Omatsu, "Chiral photonics: light induced helical materials and beyond", *International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Device Applications (ICMATSE2020)* (Ankara, Turkey, Oct 2-4, 2020) online
68. T. Omatsu, "Ultrafast helical light induced mass transport of azopolymers", *IV International Conference on Ultrafast Optical Science* (Moscow, Russia, Sep 28-Oct 2, 2020) online
69. T. Omatsu, "Structured light offers new laser science and structured materials", *JSAP-OSA joint Symposia* (Kyoto, Japan, Sep 11, 2020) online
70. T. Torimoto, T. Kameyama, S. Kuwabata, "Ionic Liquid/Metal Sputtering Technique for Preparation of Metal and Alloy Nanoparticles", *ISPlasma2020 / IC-PLANTS2020* (Nagoya, Japan, Mar 8-11, 2020)
71. Y. Tsuboi, "Novel optical tweezers using nano-structured surfaces of semiconductors", *The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)* (Kobe, Japan, Nov 11-14, 2019)
72. T. Sugiyama, "Laser-based fabrication of organic crystals", *32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019)* (Hiroshima, Japan, Oct 28-31, 2019)
73. T. Torimoto, T. Kameyama, S. Kuwabata, "Solution-phase Syntheses of Multinary Semiconductor Nanocrystals Composed of Less-toxic Elements and Their Photochemical Properties", *The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13)* (Ginowan, Japan, Oct 27-Nov 1, 2019)
74. H. Niinomi, T. Sugiyama, M. Tagawa, T. Ujihara, K. Miyamoto, T. Omatsu, J. Nozawa, S. Uda, "Manipulation of acetaminophen crystallization and discovery of two-step dissolution process by plasmonic optical tweezers", *19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy* (Keystone, USA, Jul 28-Aug 2, 2019)
75. T. Torimoto, T. Kameyama, M. Kishi, C. Miyamae, S. Kuwabata, "Wavelength Controllability of Band-edge Photoluminescence of Multinary Ag-In-Ga-S Quantum Dots", *The 10th Nagoya Univ.-Tsinghua Univ.-Toyota Motor Corp.-Hokkaido Univ. Joint Symposium(The 10th NTT Joint Symposium)* (Hakodate, Japan, Jul 28-30, 2019)
76. Y. Tsuboi, "Optical manipulation by black silicone surface", *The 8th International Summer Course on "Nano Material Discovery"* (Hsinchu, Taiwan, Jun 24-26, 2019)
77. Y. Tsuboi, "Nano-structured titanium-assisted (NASTiA) optical tweezer", *International Workshop on Integrated Nanooptics & Nanophotonics* (Yokohama, Japan, Mar 14, 2019)
78. Y. Tsuboi, "Optical Manipulation of Molecular Nanomaterials using", *Taiwan Academia Sinica Lecture* (Taipei, Taiwan, Dec 19, 2018)
79. Y. Tsuboi, T. Shoji, "Non-plasmonic nanostructured semiconductor assisted (NASSCA) optical tweezers", *The 10th Asian Photochemistry Conference (APC2018)* (Taipei, Taiwan, Dec 16-20, 2018)
80. T. Sugiyama, "Crystallization controlled by optical trapping", *International Symposium & School on Crystal Growth Fundamentals* (Sendai, Japan, Nov 3-7, 2018)

## 書籍（領域で編集して出版した書籍）

1. CSJ カレントレビュー「プラズモンと光圧が導くナノ物質科学 -ナノ空間に閉じ込めた光で物質を制御する-」日本化学会編（化学同人, 2019）
2. 「光圧 -物質制御のための新しい光利用-」石原一、芦田昌明 編著（朝倉書店, 2021）

## アウトリーチ活動・広報活動・主催シンポジウム

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た。高校での出前授業・実験、学園祭に合わせた実験公開、サイエンスカフェでのデモ実験、領域公開シンポジウムにおける展示・実験など、様々なアウトリーチ活動と光圧研究の啓蒙活動（114 件）を行なった。研究成果の情報発信としては、領域発足時のキックオフシンポジウムに始まり、毎年度末に公開シンポジウム（第 1～5 回）を全国各地で開催して研究成果報告を行うとともに、ニューズレター（第 1～13 号と特別号 2 冊）を発刊して領域の活動を紹介した。ホームページ（<http://optical-manipulation.jp>）では領域イベントのお知らせやトピックス紹介に加えて、最新の研究成果を分かりやすく紹介するために成果毎に動画を配信する研究成果ハイライト欄を設けて広報活動に積極的に取り組んだ。学会関連での情報発信・啓蒙活動としては、応用物理学会、レーザー学会、日本物理学会、日本化学会、光化学協会、日本生物物理学会の年会等で領域関連シンポジウムを企画開催して多くの研究者と情報交換・意見交換を行なった。また、領域終了に伴い、活動を継続し更に発展させるために「光マニピュレーション研究会」を発足し、毎週末に光圧コロキウムを開催するなど新しい活動拠点を構築している。国際会議としては、毎年 4 月に領域と SPIE の共催で **Optical Manipulation and Structured Materials Conference**（OMC、計 5 回）を開催するとともに、領域主催の国際シンポジウムとして **International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics**（iSPN2019, Kobe）およびワークショップ **Workshop on Optical Force Science**（WOFS, Awaji）を開催し、海外の著名な研究者に領域のユニークな活動を紹介することができた。また、**International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials**（EXCON2018, Nara）を領域メンバーが組織して開催するとともに、**Pacificchem2021** においてシンポジウム”**Frontiers of Optical Manipulation for Nano-Material Science**”を企画するなど、OSA, SPIE や ACS, CSJ 等とのジョイントでこれまでに 24 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。さらに、台湾国立陽明交通大学との共催で毎年、**Summer Course** と **Workshop** を台湾新竹で開催し、領域メンバーの学生も含めて多くの研究者で交流活動を行なった。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）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た。

## 研究組織の連携体制

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た。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、次の戦略を取った。

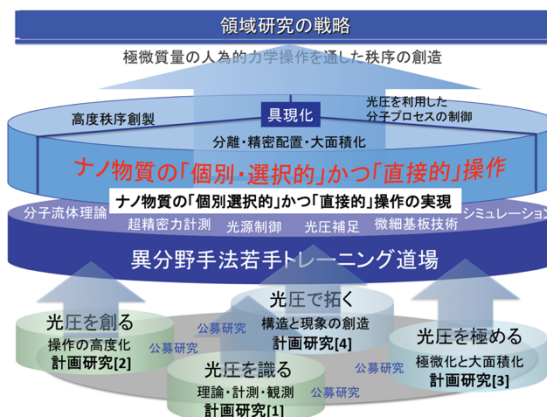
[1] 領域構成員全員が参画する**共同研究[A][B][C]**を領域活動の中心に据え、3つのテーマそれぞれの推進に責任を持つコーディネーターと実質的推進を担うキーパーソンを配置する体制を取った。

[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（「11 若手研究者の育成に関する取組実績」参照）、若手育成活動責任担当の下、これを運営した。

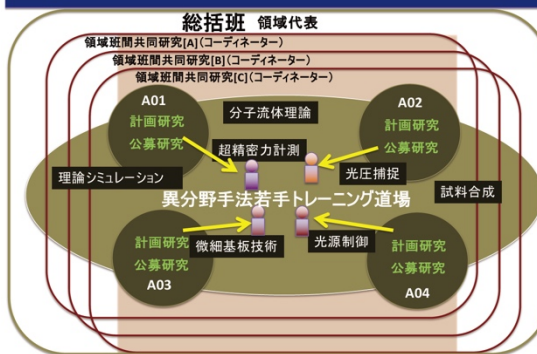
[3] 多数の領域会議や活発な交流企画の他、上記コーディネーターを中心に大小の**共同研究会議**を頻繁に開催し、具体的に共同研究を進めた。

[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（下図 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・共同研究体制について説明する。



## トレーニング道場を通じた共同研究の体制

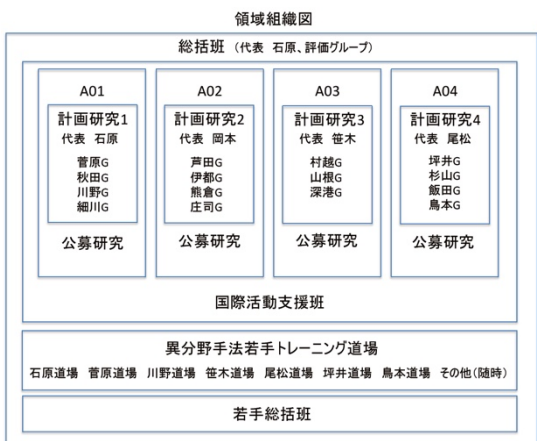


本領域では右、「領域研究の戦略」図、及び「トレーニング道場を通じた共同研究の体制」図に表したように、3つの共同研究を領域活動の中心に据え、それぞれのコーディネーターが共同研究を組織していく体制を取った。各計画研究は共同研究[A]から[C]の遂行のための基礎となる研究を行い、その成果を随時共同研究に反映させた。また共同研究の結果は各計画研究にフィードバックされ活用された。

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た。すなわち、若手准教授、助教、ポストドク、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た。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「11 若手研究者の育成に関する取組実績」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、計画・公募研究会議などを多数開催

し、互いの研究成果の披露だけでなく、共同研究へのアイデア創出や討論に多くの時間を割いて共同研究[A][B][C]を具体的に推進した。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た点である。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数見いだされた。





## 研究費の使用状況

**総括班：**光で微小物体が非接触に捕まるという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た。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アウトリーチ活動のためのブレインストーミングを実施した。納品されて3年間に、大阪の高校教員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、札幌紀伊國屋のサイエンスカフェでのデモ実験、大阪大学や千葉大学での高校生への公開実験など、様々なアウトリーチ活動や研究成果の情報発信に活用した。総括班経費はその他、公開シンポジウム（5回）、領域会議（5回）、総括班会議（10回）、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、大規模展示会における出展費等に支出した。また、領域が主催した国際シンポジウム iSPN2019、国際ワークショップ WOFs、共催した国際会議 EXCON2018、OMC2016～2020 の学会開催経費・招待講演者旅費や、国内の日本物理学会、光化学討論会、日本生物物理学会等における領域主催シンポジウムの開催費・展示会出展費に支出した。さらに、若手トレーニング道場、若手研究会、若手シンポジウム、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するとともに、若手研究者や学生を対象として領域メンバーが執筆・編集した光圧の啓蒙書（化学同人）の出版関連経費に総括班経費を支出した。

**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された。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。期間後半においては大阪大学に原子間力顕微鏡観察室を導入したが、石原グループ、鳥本グループとの共同研究、及び超精密力計測若手トレーニング道場で活用され、光誘起力顕微鏡の貴重な成果に結びついた。またベクトルネットワークアナライザ、フェムト秒レーザーは原子層膜の機械的な共振特性の精密計測に用い、共振の温度特性や光定在波の影響を明らかにすると同時に若手トレーニング道場に活用されている。sCMOSカメラや単一光子計数モジュールは公募グループとの共同研究における蛍光イメージング測定に活用された。なお、後半で補強した大型計算機も引き続き共用に用いられた。

**計画研究2：**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、分担者・芦田が所属する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、分担者・庄司はカーボンナノチューブ（CNT）の分離の実験装置を大阪大学で構築し、共同研究を実施した。この他にも、この光源は計画研究4分担者・鳥本と共同の分光実験においても用いた。また同様に大阪大学に設置された電子増倍型CCDカメラ、分光器等は、分担者・熊倉が量子ドット内包液滴の緩衝気体中への分散と運動観察、蛍光減衰観測に用い、さらに超流動ヘリウム中の光マニピュレーションの共同研究にも駆使した。鳥本との上記の共同研究ではZAIS量子ドットの単一粒子分光観測にも用いた。倒立顕微鏡とCMOSカメラを代表者・岡本が所属する分子科学研究所に設置した。これは、超解像非線形トラッピングに関する計画研究1代表者・石原、分担者・伊都との共同研究、キラルプラズモンによる結晶核生成に関わる計画研究4分担者・杉山との共同研究等で有効に利用された。分担者・伊都は顕微鏡用超安定ステージを購入し大阪大学に設置した。この機器は、光捕捉されたナノ粒子のナノスケールの位置追跡など、高い空間分解能で光捕捉・マニピュレーションの挙動を計測する目的で使用されたが、分担者・芦田との共同研究では、単一量子ドットの発光挙動の計測にも有効利用された。

**計画研究3：**北海道大学に設置した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トラッピング実験として

数多くの共同研究に発展した。また、本若手トレーニング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海道大学グリーン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た。さらに、空間位相変調器、電気化学質量分析装置、高圧電気化学セルは、班内・班間共同研究を目的として北海道大学で購入した機器である。研究期間後半に北海道大学に設置した高出力近赤外レーザーおよび高性能光学顕微鏡システムは、ナノ粒子の光圧回転並進操作とナノスケール運動解析の実験研究に活用し、計画研究1および4との共同研究として、スピン・軌道角運動量の転写による光圧・光トルクの定量解析やエナンチオ制御キラル結晶化などナノ物質の構造形成の光圧制御研究に展開した。また、光学顕微鏡用クライオスタットおよび紫外半導体レーザーは、計画研究1および2との共同研究として、低温系における光からナノ物質への軌道角運動量転写の実験的解析に有効利用されている。

**計画研究4**：研究期間前半に導入し、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。さらに、千葉大学における光渦の二光子吸収過程を介した螺旋レリーフ形成などの計画研究にも活用されている。また、レーザー、光学顕微鏡、光学除震台は光圧による物質操作のための必須実験設備として、千葉大学、大阪市大、奈良先端大学、大阪府立大学などに複数配置されている。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・レーザー走査型共焦点顕微鏡・第二高調波顕微鏡・紫外可視分光光度計・ゼータ電位測定システムなどは、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。研究期間後半で購入したオートコリレーターやポッケルスセルは、超短パルスファイバーレーザーのパルス幅計測、パルス選択に必須の装置であり、多数の共同研究に貢献している。名古屋大学に配置したエネルギー分散型X線分析装置は量子ドットの内部構造解析などに有効活用され、温度可変型動的散乱測定装置はソフトマターナノ粒子のプラズモン光操作の共同研究に利用している。大阪市大に配置されている各種レーザーはノンプラズモントラッピング法などの新技術開発に貢献し、光ピンセット・顕微分光計測システムは、液/液界面光マニピュレーションと化学反応の共同研究に活用されている。

**繰越し**：総括班、国際活動支援班、計画研究、全ての研究費について最終年度の繰越しが承認されている。COVID-19感染症拡大の影響で、スコットランドのStアンドリュース大学において2020年11月に開催予定であった領域主催国際ワークショップが中止せざるを得なくなり、また、この国際会議での議論に基づいて出版する計画であった書籍の編集が大幅に遅延したため、総括班経費・国際活動支援班経費に計上していたワークショップの招待講演者や領域評価委員・アドバイザーの参加旅費、会場費、運営費、および書籍の出版費、計画研究で計上していた領域国際ワークショップの旅費、および成果発表のための国内・国際会議やシンポジウムの参加旅費等を次年度に繰り越すことになった。繰越した研究費は、2022年1月に領域が主催して国際シンポジウムを淡路国際会議場で開催する計画を進めており、ハイブリッド形式で開催するための機器使用料を含む会場費や事務経費、国際アドバイザーや招待講演者の旅費に総括班・国際活動支援班経費を支出する予定である。領域メンバーは、計画研究経費から本シンポジウムの参加旅費を支出するとともに、種々の国内・国際会議において研究成果の情報発信を行うための旅費・参加費を計上している。遅延していた書籍については、2021年5月に執筆・編集を完了し、朝倉書店から出版された。

## 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

本領域では「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」として活動をスタートした。本領域は当初より、光物性物理、有機光化学、レーザー工学、ナノフォトニクス、分子流体力学、分子生物学、ナノメカニクス、表面科学、量子エレクトロニクス、有機合成など、通常の学会活動では出会わない、異分野研究者が集まり、その科学的・技術的融合によって始めて可能になる、従来にはなかった研究領域を興すことを目的にスタートした。従って、当初より強力なマネジメントによって異分野間での共同研究を推進することを活動の柱とした。このため、この領域で立ち上げた学問分野は新しく、得られた成果は必然的にそれぞれ班員のホームグラウンドである関連学問分野に大きく貢献するものとなる。以下に具体的に説明する。

本領域では光圧により個々のナノ粒子の量子力学個性に応じて選別・輸送・配置し、また多様な環境での相互作用を制御して、新しい秩序構造を作り出す方法論を確立してきた。このような技術は将来のナノ機能材料創成の全く新しいアプローチを提供することになり、新奇な機能的ナノ材料を必要とするあらゆる技術分野に波及していくことが期待される。実際、高感度センサー等の応用のため少数個の NV 中心を有するナノダイヤモンドが必要とされているが、製造過程で生じる多数の NV 中心を含まないナノダイヤモンドから含むものを選別する技術が製造業者に渴望されている。今回の成果は製造業者（ダイセル）との共同研究に発展し、選別の大規模化のための特許出願も完了して、これを基に実用化研究が進められている。

また新奇なナノ構造の創成は、物性物理や化学の研究対象を提供すると同時に、本領域で実証された光圧による運動の観測に基づいたナノ構造特性の計測手法は物性物理、化学の新しいアプローチを提供する。実際、対向ビームによるナノファイバー上での単一ナノダイヤモンドの超精密吸収測定や、光圧捕捉されたナノ微粒子のフォトリソニック反応による変位の測定からミクロな化学反応量が計測された。これらの成果は物性物理、化学の新しい方法論を提供したと言える。さらに薄層クロマトグラフィーで実現した光圧による量子ドット選別手法は今後、分析化学分野の画期的手法になる可能性がある。

分子流体力学と光圧のコラボレーションは分子流体力学の新奇なアプローチを提供し、関連グループの新しいプロジェクトとして発展しつつある。例えば、川野は流体中ナノ微粒子の操作に光圧制御を導入し、抵抗パルスセンシングの技術に全く新しい展開を与えて基盤研究 S として発展させている。また許は自身のナノ流路を用いた単一分子計測に光圧という新しいツールを得て、新たな方向性を見出した。また光圧科学と流体力学的手法を融合した新しい理論解析技術が開発されたことも、流体力学分野への大きな寄与になる。このように本領域の成果は分子流体力学の分野に強いインパクトを与えている。

またこの領域から発展した新しい分野にキラル相互作用研究の新展開がある。物質との相互作用を通して光のスピン・軌道角運動量変換の様々なパターンとその効果が見出されてきた。キラル結晶化、ナノ微粒子の組織化、多様な材質でのキラル構造の創成などは、物質と光のキラル相互作用の新しい問題を切り拓く契機となっており、今後、新奇な学問分野として大いに発展することが予想される。

本領域の成果は精密ナノ機械工学にも多大な影響を与えている。ナノ粒子に対する光圧測定の技術開発が、ナノ機械バネやマイクロマシンによる fN 計測の世界を拓いた。これらの成果は今後超精密計測の分野に重要なフィードバックを与えると期待される。

さらに、今田による光 STM を用いた基板上での単一色素分子の高速光圧輸送は、その開発過程で得られた単一色素分子  $\mu\text{eV}$  レベルの超精密分光[論文 1]が基礎になっている。また菅原の光誘起力顕微鏡は期間中に 1nm を切る分解能を達成し[論文 2]、さらに最近では銀基板上の単一原子観測にまで至った。このように本領域は走査型顕微鏡の新平地も開拓した。

以上の様に本領域の成果は、ここに参集した多様な研究分野にフィードバックされ、それぞれの分野の革新的アプローチに発展すると期待される。実際、CREST、未来社会創造事業、科研費基盤研究 S、さがけ研究、創発研究支援、数件の企業共同研究プロジェクトなど様々な大型プロジェクトが単立っている。本領域はこれを基点に始まった新世代光圧研究の最初の 5 年間の役目を十分に果たしたと言える。

## 若手研究者の育成に関する取組実績

本領域では、将来の学術としての裾野が広がるために決定的な役割を果たすのが若い世代の研究者であるという認識の下、若手研究者が自主的に本領域を動かしていく積極的な仕掛けを計画した。

### 異分野手法若手トレーニング道場

本領域の大きな特徴として、異分野手法若手トレーニング道場などを実施した。本領域で進める共同研究を成功させるには、各計画研究の手法を有機的に融合することが不可欠であると考え、若手研究者が各々の専門分野とは異なる異分野の技術を実地で学ぶことを意図した。異分野技術を深く学ぶことで、分業体制的な

表1 異分野手法若手トレーニング道場の参加者数

	A	B	C	D	E	F	G	H	合計
2016年度	3	5	5	-	-	-	-	-	13
2017年度	3	3	9	3	2	5	5	-	30
2018年度	3	5	3	5	2	3	-	1	22
2019年度	2	-	7	2	-	4	4	1	20

A:微細基板技術 B:光圧捕捉実践 C:微視的非局所光学応答理論 D:光源制御  
E:超精密力計測 F:分子流体理論 G:微粒子合成 H:CNT, 2D材料ナノ機械

共同研究とは一線を画し、共同研究の一連の知見・技術が一体となった研究が実現すると考え、若手研究者に俯瞰的な視点を醸成する。道場は必要性、需要を検討し、改廃しながら2019年度まで開催した(表1に開催した道場と参加人数を纏める)。2020年度はCOVID-19感染症拡大のため開催しなかった。このトレーニング道場を通じて、多数の共同研究が開始された。

### 若手総括班の創設と議論の場の設定

上記の道場は総括版が中心に企画し実施したが、若手が中心となる研究会・セミナー、異分野交流会等は、領域内の若手研究者で若手総括班を組織し、これが中心となって企画を進めた。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た。合計6回の研究会を開催し、うち3回は、分子科学研究所、大阪市立大学、自然科学研究機構等の支援を得て、領域外にも公開して開催した。

### 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サマーコースを2017, 2018, 2019年の3回にわたり開催し、それぞれ講師を派遣するとともに、学生を含む若手研究者をそれぞれ24名, 26名, 13名派遣した。世界的に著名な研究者の英語講義を受講するとともに、講師や台湾の学生と交流を深めた。英語でのディスカッションでは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う観点から極めて有効な機会となった。

### 若手研究者塾

本領域の若手研究者・学生が、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、これまでに3回実施した。第1回(2017年7月)と第3回(2018年6月)は、上記サマーコースにあわせて、領域アドバイザーの増原宏氏が講師を務め、新竹(台湾)で(塾生は主に学生、第1回24名、第3回21名)、第2回は領域アドバイザーの河田聡氏を講師として北海道ニドムで開催した(塾生は助教・博士研究員クラス10名)。講師の研究哲学や、グローバルな視点から日本の研究、本領域の研究、自分の研究を俯瞰することなどを学ぶ優れた機会となり、若手研究者に大きな刺激を与えた。

### 人材輩出

本領域の研究活動に参画した研究者(博士課程学生を含む)の多くに、昇任や転出、民間企業への就職等の異動があり、人材輩出に貢献した。表2に昇任や民間企業への転出の状況を纏める。本領域の研究に携わった研究員以上で昇任人事が延べ15件あった。

表2 人材輩出の状況

異動前\異動後	博士課程学生	博士研究員 <sup>a)</sup>	助教等 <sup>b)</sup>	講師	准教授	教授	民間企業
博士課程学生	-	10 (10)	4 (4)	0	0	0	14 (14)
博士研究員 <sup>a)</sup>	-	-	4 (4)	0	1 (0)	0	1 (0)
助教等 <sup>b)</sup>	-	-	-	1 (1)	2 (2)	0	1 (0)
講師	-	-	-	-	2 (2)	0	0
准教授	-	-	-	-	-	5 (0)	0

括弧内は2021年3月末で39歳以下の数(内数)。a) 有期。特任教員を含む。b) 無期研究員を含む。

## 総括班評価者による評価

### 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)

#### アドバイザー

河田聡(セレンディップ研究所・主任研究員)

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）

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)（領域研究期間内に急逝）  
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、海外評価委員・アドバイザー共に領域の様々な活動に密接に関わって頂き、その内容、及び2021年度に取りまとめた評価委員への報告書と4月にオンライン開催した領域最終成果報告会を踏まえ、最終的な評価を頂いた。下記はその抜粋である。

## 2. 評価コメント要約（個々の計画・公募研究への評価は除く）

### 国内評価委員・アドバイザーより

#### 1) 研究目標・構想について

- ・従来のミクロン透明粒子の光マニピュレーションや原子冷却とは一線を画し、ナノ領域の微小物質における光と物質の（共鳴的）相互作用や光の角運動量の物質への転写といった革新的な手法に基づく光操作の新展開を目指す点で極めて興味深いとともに、そこに新しい学理の探求を期待させた。
- ・従来から光圧による物質操作の研究は活発であったが、ナノ領域における研究は未知の領域であった。光化学や光物性の研究において新しい知見をもたらすことが期待された。本領域研究は、この分野に挑戦した画期的なプロジェクトで、我が国の独自性が発揮されることが期待できた。
- ・多彩な量子力学的特性と環境との複雑な相互作用を有するナノ物質を対象にした本プロジェクトは、光圧による物質の操作と物性に関する研究の未開拓領域への挑戦であり、物理、化学、材料科学、光学を基盤とする関連分野において高い学術的価値のある取り組みを、コミュニティとして高く評価する。

#### 2) 研究進展状況

- ・新学術の創成のみでなく、社会的な貢献にもインパクトある研究になった。
- ・光圧のみがなし得る秩序の創生や機能的現象の創出の観点で、理論的探究や技術の開拓により、当初の予測を上回る成果を上げたと評価できる。この研究により学問分野のひとつの領域が確立したといえる。
- ・多くのテーマで初期に想定した以上の成果が挙げられている。理論的な解明の進んだ現象も多く、深みのある展開になった。全体として、非常に高く評価できる成果である。
- ・研究進展は独自性も完成度も非常に高く、学理として注目される組織的進展を示した。学理としての高さに加え、今後多くの物質研究者を巻き込み、機能材料研究へインパクトを与えるものと期待される。異分野へも光圧研究が影響力を及ぼす例として成長することを期待したい。
- ・光圧によるナノ物質操作に対して、光の周波数、偏光、角運動量などの操作を複合的に作用させ、さらには非線形現象をも加味して、分子および分子群の空間的分離や配向制御を実現させることに成功した。この技術を発展させることにより分子濃縮や化学過程の制御にも成功している。これらの成果は、学術的にも高く評価されるべきものである。これらは基礎的萌芽的であるが、今後の一層の研究の進展を待ちたい。

#### 3) 領域運営・活動状況

- ・班間の研究交流と共同研究によって物理、化学、生物の枠を越えて連携研究の進展があったことが大きな成果に結びついた要因。また、理論と実験がうまく刺激し合って、基礎と応用がバランス良く結びついたこともこの領域の特色。
- ・丁寧に計画・企画されたプロジェクト運営と活発な研究活動が行われた。特にチーム間の共同研究を推進することが大きな目的となった。
- ・縦横に共同研究が行われた。通常の公開シンポ、班会議に加え、「塾」、「道場」などの新しい発想で、この本領域の発想を次世代に伝えようとしたのはよい試みであった。
- ・研究体制は、4つの計画研究と3つの全体的共同研究、さらには多数の個別的な共同研究からなっており、非常に活発に研究者間の交流がなされた。新領域の創成にふさわしい研究活動であった。
- ・領域の趣旨、目的をメンバー全員が共有し、連携・協同により研究を進める仕掛け（班間共同研究、若

手トレーニング道場等)をつくることによって、個々の研究の推進、展開、先鋭化を図った結果、当初目標の達成と計画を越えた成果を生み出したことは高く評価できる。領域の準備段階から絶えず、領域代表と総括班メンバーが学問および運営の両者における疑問、課題を深く掘り下げる真摯な議論を重ねていることは特筆すべきである。

#### 4) その他

・5回にわたる公開シンポジウムを初め、クローズドの領域会議、国際ワークショップ、若手研究会の開催、各種の国際学会での発表・討論は、学術誌への研究論文の投稿とともに、成果の公表・普及、研究の深化に十分な役割を果たしている。これらの点でも領域運営は秀逸であった。

・関連する分野において点として活動している研究者、研究課題を計画段階から取り入れて領域研究を構成しているので、年度の進行によりそれぞれの分野において点から面への繋がりが始まり、ナノスケールにおける光圧の概念が関連分野で展開しつつあることを感じる。それは、学会におけるシンポジウム、招待講演の件数、および公募研究の応募件数や新規採択課題の多様性などから知ることができる。また、本領域を経験した若手メンバーがそれぞれの分野で活躍することが大いに期待できる。本研究課題を基盤とした新たなテーマの大型プロジェクトが、メンバーから生まれていることも光圧による物質制御と秩序創生の研究が発展しつつあることを示している。

・まだ、これからの課題や、この新学術研究によって具体化した課題もあると考える。実験ならびに理論の両面からの展開を期待したい。

#### 海外評価委員より

·It is clear from the research output and the attention some of the research got in specialized and popular press that the project had a leading role in the international research scene and that in general the team established itself as a key player in this exciting research field.

·Summarizing, this was a top-notch project, at the fore front of modern optics and nanomaterials research that redefined the international standards in the field. I give this project my highest possible evaluation both scientific and managerial. In all aspects, this project spearheaded the purpose of KAKENHI Grants-in-Aid: creating new knowledge that while shape the field for years to come.

·From the scientific point of view the project fulfilled its aim and successfully enhanced various methods and technologies based on optical forces.

·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.

·The impressive number and high level of novelty of reached research results prove the management and overall organization of the project was properly chosen and working efficiently.

·I am impressed by the project which employs world-class mentors to lead training “dojos” where young researchers are efficiently trained to gain expertise in methods from dissimilar scientific fields, and establishes effective multidisciplinary collaborations between physicists, chemists, and engineers, paving the way to the novel discipline of “optical trapping chemistry”.

·The publication record is of a very high standard and we see excellent papers in Science Advances, AIP journals, APS journals (e.g Physical Review family) and also ACS journals.

·Impressive progress was reported, and this is testified for through the impressive number of joint publications in peer reviewed journals of the highest international standing.

·The consortium has good overlaps and discussions through meetings internally by the consortia and other events organized.

·I would like to conclude by endorsing and giving my strongest endorsement of this important, timely and very well managed project. This is not a straightforward undertaking and the team have shown exceptional publication outputs, collaborative working and very good outputs and training of young researchers. The range of dissemination is of a very high standard, internationally competitive and leading in some respects. The management has been very good, achieving at the highest level. I have benchmarked this against other international work I have seen in this field. The consortium will leave a very strong international legacy in the field of manipulation of nano-objects, particularly to exploit new directions in interdisciplinary science.