領域略称名 ：キラル光物質科学
領 域 番 号：２２Ａ２０４

令和７ 年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（Ａ）」
に係る中間評価報告書

「光の螺旋性が拓くキラル物質科学の変革」

領域設定期間

令和４ 年度 ～ 令和８ 年度

令和７ 年 ６ 月

領域代表者　　尾松　孝茂（千葉大学・大学院工学研究院・教授）

目　　次

研究組織

1　総括班・総括班以外の計画研究
2　総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者
3　公募研究

研究領域全体に係る事項

4　研究領域の目的及び概要
5　研究組織の連携体制
6　研究の進展状況及び主な成果
7　研究発表の状況
8　審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況
9　今後の研究領域の推進方策
10　若手研究者の育成に係る取組状況
11　アウトリーチ活動に係る取組状況
12　研究費の使用状況・計画
13　総括班評価者による評価

研究組織　（　令和７年　３　月現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。）

1　総括班及び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]	課題状況
X00 総	22H05131 光の螺旋性が拓くキラル物質科学の変革	尾松　孝茂	千葉大学・大学院工学研究院・教授	3	
A01 計	22H05132 超螺旋光によるキラル非線形光学応答	余越　伸彦	大阪公立大学・大学院工学研究科　・准教授	2	
A02 計	22H05133 超螺旋光に基づくキラル光物性の量子逆設計理論	江原　正博	大学共同利用機関法人自然科学研究機構（岡崎共通研究施設）・計算科学研究センター・教授	1	
A03 計	22H05134 超螺旋光とキラル秩序の相互作用による励起子コヒーレント制御	中嶋　琢也	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	4	
B01 計	22H05135 超螺旋光とナノレベル物質のキラルな動的相互作用	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	
B02 計	22H05136 螺旋性を持つ近接場光と物質の相互作用の観測	押切　友也	東北大学・多元物質科学研究所・准教授	2	
B03 計	22H05137 光の螺旋性を操るプラズモニクスの開拓とナノキラル物質操作	田口　敦清	北海道大学・電子科学研究所・准教授	1	
総括班及び総括班以外の計画研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[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。）

研究組織　（　令和７年　３　月現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。）

1　総括班及び総括班以外の計画研究（つづき）

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]	課題状況
C01 計	22H05138 超螺旋光によるマルチ空間スケール物質のキラル秩序化	尾松　孝茂	千葉大学・大学院工学研究院・教授	3	
C02 計	22H05139 超螺旋光による量子渦の生成・励起	蓑輪　陽介	京都大学・白眉センター・特定准教授	3	
C03 計	22H05140 超螺旋光による生体組織への刺激と自己組織化反応	細川　千絵	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	2	
C04 計	22H05141 超螺旋光による生体を模倣したらせん構造を有する3次元組織の創製	松崎　典弥	大阪大学・大学院工学研究科・教授	3	
総括班及び総括班以外の計画研究　合計　11　件（廃止を含む）					

[1]　総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[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　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　X00

研究課題名： 光の螺旋性が拓くキラル物質科学の変革

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	尾松　孝茂	千葉大学・大学院工学研究院・教授	領域運営、計画研究・展開研究・公募研究・国際活動の総括、シンポジウム・アウトリーチ・広報の総括、若手研究者支援の総括。
分担	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	計画研究・展開研究・公募研究・国際活動の調整、共有機器管理。
分担	江原　正博	大学共同利用機関法人自然科学研究機構（岡崎共通研究施設）・計算科学研究センター・教授	シンポジウム・アウトリーチ・広報の調整、若手研究者支援の調整。
	合計	3 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　A01

研究課題名： 超螺旋光によるキラル非線形光学応答

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	余越　伸彦	大阪公立大学・大学院工学研究科　・准教授	キラル非線形光学応答理論の開発および研究総括
分担	田中　嘉人	北海道大学・電子科学研究所・教授	多重極子遷移の実験と解析
	合計	2 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　A02

研究課題名： 超螺旋光に基づくキラル光物性の量子逆設計理論

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	江原　正博	大学共同利用機関法人自然科学研究機構（岡崎共通研究施設）・計算科学研究センター・教授	研究代表者
合計	1 名		

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　A03

研究課題名： 超螺旋光とキラル秩序の相互作用による励起子コヒーレント制御

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	中嶋　琢也	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	キラル分子集合体の開発及び研究総括
分担	廣瀬　崇至	京都大学・化学研究所・准教授	円偏光発光分子の開発
分担	森末　光彦	京都工芸繊維大学・分子化学系・助教	円偏光発光分子の開発
分担	山田　美穂子	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教	光応答性分子システムの開発
	合計	4 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B01

研究課題名： 超螺旋光とナノレベル物質のキラルな動的相互作用

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	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	研究統括，実験計画・解析
分担	山西　絢介	分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・特任助教	ナノスケール光誘起力及びCD顕微イメージングの実験・解析
分担	Ｓａｄｇｒｏｖｅ　Ｍａｒｋ	東京理科大学・理学部第一部物理学科・准教授	光マニピュレーション，光学実験・解析
分担	ＡＨＮ　ＨｙｏＹｏｎｇ	大学共同利用機関法人自然科学研究機構（機構直轄研究施設）・新分野創成センター・特任助教	物質合成，光学実験，高速分光実験，及び解析
分担	成島　哲也	分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・特別訪問研究員	光学実験・解析
	合計	5 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B02

研究課題名： 螺旋性を持つ近接場光と物質の相互作用の観測

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	押切　友也	東北大学・多元物質科学研究所・准教授	ナノ構造設計・作製、光学計測、電磁界シミュレーション
分担	和田　健彦	東北大学・多元物質科学研究所・教授	光化学反応分子合成、分析
	合計	2 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B03

研究課題名： 光の螺旋性を操るプラズモニクスの開拓とナノキラル物質操作

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	田口　敦清	北海道大学・電子科学研究所・准教授	研究代表者
合計	1 名		

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C01

研究課題名： 超螺旋光によるマルチ空間スケール物質のキラル秩序化

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	尾松　孝茂	千葉大学・大学院工学研究院・教授	総括・実験企画・理論解析
分担	横田　紘子	東京工業大学・物質理工学院・教授	分極配向計測
分担	杉山　輝樹	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・客員教授	キラル結晶化
	合計	3 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C02

研究課題名： 超螺旋光による量子渦の生成・励起

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	蓑輪　陽介	京都大学・白眉センター・特定准教授	極低温実験
分担	坪田　誠	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	理論計算
分担	西岡　孝	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授	極低温装置開発
	合計	3 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C03

研究課題名： 超螺旋光による生体組織への刺激と自己組織化反応

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	細川　千絵	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	研究総括および現象解析
分担	土井　謙太郎	豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授	キラル秩序形成機構の理論解析
	合計	2 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C04

研究課題名： 超螺旋光による生体を模倣したらせん構造を有する3次元組織の創製

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	松崎　典弥	大阪大学・大学院工学研究科・教授	研究総括、3次元組織の構築
分担	仲本　正彦	大阪大学・大学院工学研究科・助教	超螺旋光応答高分子の合成
分担	本間　健太	大阪大学・大学院工学研究科・助教	らせん組織の作製
	合計	3 名	

3　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]	課題状況
公	25H01604 光駆動分子モーターの協同的回転運動の誘起 令和７年度～令和８年度	豊田　良順	東北大学・理学研究科・助教	1	
公	25H01605 単一素子超螺旋光光源の深化 令和７年度～令和８年度	北村　恭子	東北大学・工学研究科・教授	1	
公	25H01606 スペース・タイム表面プラズモンポラリトン波束によるスピン角運動量制御 令和７年度～令和８年度	久保　敦	筑波大学・数理物質系・講師	1	
公	25H01608 半導体量子ディスクを用いた単一光子スキルミオン発生技術の展開 令和７年度～令和８年度	森田　健	千葉大学・大学院工学研究院・教授	1	
公	25H01609 キラル光と光加熱の相乗効果による磁気渦・超伝導渦・粒子回転の生成についての理論 令和７年度～令和８年度	佐藤　正寛	千葉大学・大学院理学研究院・教授	1	
公	25H01610 半導体キラル電子系における光渦電子励起 令和７年度～令和８年度	音　賢一	千葉大学・大学院理学研究院・教授	1	
公	25H01613 光渦による軌道流の生成と光学検出 令和７年度～令和８年度	川田　拓弥	東京大学・大学院総合文化研究科・助教	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

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]	課題状況
公	25H01614 深紫外領域における超キラル場の創出とキラルセンシングへの応用 令和７年度～令和８年度	小西　邦昭	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授	1	
公	25H01620 超螺旋光によるアクティブ乱流の制御と渦秩序の幾何学的究明 令和７年度～令和８年度	前多　裕介	京都大学・工学研究科・教授	1	
公	25H01623 キラル光誘起力顕微鏡の開発と光の螺旋性と分子の相互作用の解明 令和７年度～令和８年度	菅原　康弘	大阪大学・大学院工学研究科・教授	1	
公	25H01624 光スキルミオンの転写過程をナノレベルで動画撮影する 令和７年度～令和８年度	馬越　貴之	大阪大学・高等共創研究院・講師	1	
公	25H01626 超螺旋光を用いたキラル結晶構造転移の制御 令和７年度～令和８年度	桶谷　龍成	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教	1	
公	25H01627 超螺旋光が誘起する光圧・光熱によるキラル秩序制御の理論 令和７年度～令和８年度	田村　守	関西学院大学・理学部・専任講師	1	
公	25H01630 2台の放射光アンジュレータを用いた紫外渦二色性装置の開発とタンパク質の構造研究 令和７年度～令和８年度	松尾　光一	広島大学・放射光科学研究所・准教授	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

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]	課題状況
公	25H01631 時間分解走査電子顕微鏡によるキラル微細構造体上の光渦近接場の撮影 令和７年度～令和８年度	歸家　令果	東京都立大学・理学研究科・教授	1	
公	25H01632 シリコン結晶で増強した光渦ビーム光圧によるキラル結晶化 令和７年度～令和８年度	坪井　泰之	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	1	
公	25H01633 渦流れのスケールダウンによるキラル物質とのサイズマッチング 令和７年度～令和８年度	瀬戸浦　健仁	兵庫県立大学・工学研究科・准教授	1	
公	25H01637 超螺旋光とナノ物質の相互作用の解明と光キラル場制御 令和７年度～令和８年度	井村　考平	早稲田大学・理工学術院・教授	1	
公	25H01639 Compact plasmonic nanoantenna for the radiation of single photons carrying intrinsic orbital angular momentum 令和７年度～令和８年度	Ｐｉｎ　Ｃｈｒｉｓｔｏｐｈｅ	沖縄科学技術大学院大学・量子技術のための光・物質相互作用ユニット・スタッフサイエンティスト	1	
公	25H01640 超螺旋光と多粒子系の相互作用の局所非対称性と巨視的螺旋性の相関解明 令和７年度～令和８年度	中村　浩章	核融合科学研究所・研究部・教授	1	
公	25H01642 超螺旋光によるプラズモニック粒子の階層的キラル秩序化 令和７年度～令和８年度	齋藤　滉一郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

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]	課題状況
A04 公	23H04571 Study of chirality-dependent optical forces enabled by spin-orbital angular momentum conversion in the nonlinear optical trapping of VO2 particles 令和５年度～令和６年度	Ｐｉｎ　Ｃｈｒｉｓｔｏｐｈｅ	沖縄科学技術大学院大学・量子技術のための光・物質相互作用ユニット・スタッフサイエンティスト	1	
A04 公	23H04576 光渦による超伝導体と磁性体のキラル渦生成ダイナミクスについての基盤理論構築 令和５年度～令和６年度	佐藤　正寛	千葉大学・大学院理学研究院・教授	1	
A04 公	23H04587 キラル秩序化の分子理論 令和５年度～令和６年度	佐藤　啓文	京都大学・工学研究科・教授	1	
A04 公	23H04597 放射光高エネルギー紫外光渦と生体分子との相互作用についての実験・理論研究 令和５年度～令和６年度	松尾　光一	広島大学・放射光科学研究所・准教授	1	
B04 公	23H04575 表面プラズモンポラリトンの横スピン角運動量によるトポロジカル構造 令和５年度～令和６年度	久保　敦	筑波大学・数理物質系・講師	1	
B04 公	23H04590 超螺旋光-高速AFM統合システムで拓くキラル秩序化の高時空間分解能観察 令和５年度～令和６年度	馬越　貴之	大阪大学・高等共創研究院・講師	1	
B04 公	23H04591 光誘起力顕微鏡によるキラリティーの高分解能観察と光の螺旋性と分子の相互作用の解明 令和５年度～令和６年度	菅原　康弘	大阪大学・大学院工学研究科・教授	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

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]	課題状況
B04 公	23H04604 超螺旋光によるナノキラル光場の創成とその可視化 令和５年度～令和６年度	井村　考平	早稲田大学・理工学術院・教授	1	
C05 公	23H04572 電場・磁場が協創する超螺旋光メタ空間でのキラル核形成 令和５年度～令和６年度	新家　寛正	東北大学・多元物質科学研究所・助教	1	
C05 公	23H04573 動的螺旋性を持つナノ材料の開発とその光制御 令和５年度～令和６年度	豊田　良順	東北大学・理学研究科・助教	1	
C05 公	23H04582 超螺旋光による磁気スキルミオン生成 令和５年度～令和６年度	横内　智行	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・ユニットリーダー	1	
C05 公	23H04593 光渦を用いたキラリティ選択的核化と結晶成長によるキラル秩序化 令和５年度～令和６年度	桶谷　龍成	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教	1	
C05 公	23H04594 超螺旋光による流体制御・キラル秩序化の理論 令和５年度～令和６年度	田村　守	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教	1	
C05 公	23H04599 超螺旋光によるアクティブマターのキラル渦制御とその幾何的普遍性の研究 令和５年度～令和６年度	前多　裕介	京都大学・工学研究科・教授	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

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]	課題状況
C05 公	23H04610 超螺旋光の光化学に基づく金属コロイドのキラル成長制御 令和５年度～令和６年度	齋藤　滉一郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員	1	
D01 公	23H04579 量子ホール電子系で探る光渦と電子の相互作用 令和５年度～令和６年度	音　賢一	千葉大学・大学院理学研究院・教授	1	
D01 公	23H04589 単一素子超螺旋光光源の開発 令和５年度～令和６年度	北村　恭子	東北大学・工学研究科・教授	1	
D01 公	23H04600 キラルな光の光圧を利用したフェニルアラニン誘導体の集合体形成 令和５年度～令和６年度	柚山　健一	大阪公立大学・大学院理学研究科・講師	1	
D01 公	23H04601 半導体ナノ構造で増強する光渦ピンセットによるキラル選択的捕捉と渦流発生 令和５年度～令和６年度	坪井　泰之	大阪公立大学・大学院理学研究科・教授	1	
D01 公	23H04608 キラル光熱ナノ反応場の創出 令和５年度～令和６年度	瀬戸浦　健仁	兵庫県立大学・工学研究科・准教授	1	
D01 公	23H04609 超螺旋光とプラズマ反応素過程の局所非対称性と巨視螺旋性相関のシミュレーション研究 令和５年度～令和６年度	中村　浩章	核融合科学研究所・研究部・教授	1	
公募研究　合計　42　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

４　研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」もの（例えば、「新しい原理や学理の発見・追究をするもの」、「学術の概念や体系の見直しを迫るもの」、「大きな発想の転換や斬新な方法論によりブレークスルーをもたらすもの」。）であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【研究領域の目的】

物体や現象がその鏡像と重ね合わせることができない性質（キラリティー）は、自然界において普遍的に顕在化する。らせん*注1（平面に投影すると渦になる）はキラリティーを持つ構造（キラル構造）の一つであり、ナノスケール（nm）の分子集合体などのナノ物質からミリスケール（mm）の生体組織まで、らせん構造を持つ物質は数多く存在する。物質を配列して、らせんなどの構造を創り、構造に起因する機能を顕在化させる科学、すなわち、**物質のキラル秩序化の科学（キラル物質科学）は、フォトニクス、量子工学、化学、生命科学、医工学などの枠を超えた物質科学における普遍的な研究**の一つである。しかしながら、物質を自由にキラル秩序化することは未だ容易ではない。**「あらゆる空間スケールの物質を自在に操りキラル秩序化する。」**それは、まさに物質科学研究者の究極の夢である。分子から生体組織までの多様な空間スケールの物質を非接触で操作できる現実的な手法は光だけである。電磁場構造の螺旋性*注1を持つ光だけが、多様な空間スケールの物質をキラル秩序化できる潜在能力を秘めている。

本研究領域では**「光の螺旋性と物質の相互作用の科学」**を探究し、分子から生体組織まで様々な空間スケールの物質を「光」でキラル秩序化する。さらに構造に起因する機能を顕在化させて**「キラル秩序の化学」「らせんの工学」「渦の物理学」**の新展開を開拓する。

*注１　らせん（螺旋）が物質の構造を示す場合は化学の慣習に従い「らせん」とひらがな表記し、それ以外は漢字で表記する。

【研究領域の概要】

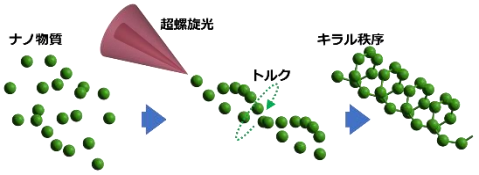
≪学術的背景≫

19 世紀から始まる光の螺旋性の科学(例えば、旋光性の発見（Pasteur）、螺旋電場である円偏光が物質を自転運動させるスピン角運動量を持つこと（Beth））は、物質のキラリティー検出という分光学で重要な役割を果たしてきた。円偏光の螺旋電場の向き、すなわち、左右円偏光に対して物質の光吸収が異なる円偏光二色性(Circular Dichroism, CD)は、物質のキラリティーを検出するために広く用いられている。しかしながら、**一部の例外を除き、左右円偏光に対する光吸収の差(円偏光二色性の大きさ)は分子の全吸収強度のわずか 1/100 以下にすぎない。**これは、光の波長で決まる螺旋電場のピッチの空間スケール（サブμm）に比べて、物質を構成するナノ物質の空間スケール（nm）が 2 桁程度も小さく、**円偏光と物質のキラリティーがほとんど相互作用しない**ことを示唆する。したがって、これまでの常識では、光の螺旋性で物質をキラル秩序化することは極めて困難であると考えられてきた。

≪学術の体系や方向の変革・転換≫

近年のレーザー技術と微細加工技術の革新的進歩が、今、光の螺旋性の科学を分光学の枠を超えた学問分野へと質的に大きく進化させようとしている。

1992 年に Allen が光渦の重要性を示唆した。通常の光の等位相面（波面）が平面なのに対して、光渦の波面は螺旋状になる。その波面の螺旋度（1 波長当たりの波面の回転数）は次数 ℓ（$\pm1, \pm2, \pm3, \ldots$）で定義され、原理的には、次数 ℓ は無限に大きな値にできる。**光渦は物質を公転運動させる軌道角運動量を持ち、その値は次数 ℓ に比例する。**また、近年のナノテクノロジーと微細加工技術の発展により、プラズモニクスをはじめとするナノ光学が発展した。プラズモン物質である金属ナノ構造に光が入射すると、ナノ構造の表面に光が局在する。これを近接場光と呼ぶ。**近接場光の実効的な波長は入射光に比べて極めて小さい。**そのため、円偏光や光渦を入射光とすると、光の電場や波面の螺旋度が、入射した円偏光や光渦に比べて極めて大きな値まで増強される。レーザー技術と微細加工技術の進化と融合が創出した新しい光（光渦・近接場円偏光さらには近接場光渦など）を通常の円偏光を超えた螺旋性を持つ**「超螺旋光」**とわれわれは総称する。**超螺旋光の強い螺旋性と力学的な角運動量を駆使すれば、分子から生体組織までの物質を階層的に配列してキラル秩序化できる可能性がある。**事実、超螺旋光を照射すると分子・高分子・樹脂などスケールの異なる物質が階層的



概念図 1.　超螺旋光がナノ物質にトルクを与えることでキラル秩序を創る。

に配列して極限的に高い鏡像体過剰率*注 2 でキラル秩序化する現象が発見された。例えば、「キラルでない(アキラル)分子の溶液に近接場円偏光を照射すると、分子がキラル秩序化して右手系あるいは左手系の片方の結晶だけが 50%を超える驚異的な(円偏光では不可能な)鏡像過剰率で結晶化(キラル結晶化)すること」「高分子薄膜に光渦を照射すると、高分子がキラル秩序化して薄膜表面に右あるいは左巻きのらせんレリーフだけが選択的にできること」さらには「光硬化樹脂に光渦を照射すると、樹脂がキラル秩序化して右あるいは左巻きのらせんファイバーだけが選択的にできること」などが見いだされた。

≪新しい原理や学理の発見・追究≫

光照射だけで分子(サブ nm)から樹脂(μm)まで階層の異なる物質がキラル秩序化するという現象は、従来の物性論や光圧理論だけでは完全には説明できない。超螺旋光が物質をキラル秩序化する事実を完全に説明するための体系的な研究は未だ途上にある。また、キラル分子が左右の光渦に対して異なる吸収強度を示すこと、近接場円偏光を使うとキラル分子の光学活性信号の検出感度が著しく(場合によっては 2 桁以上)向上すること、など、超螺旋光が物質と電気双極子遷移を超えた強い相互作用を示す事例は理論的あるいは実験的に報告されているが、その機構は未解明である。これまで報告されている限られた事例を超えてキラル秩序化を学理として理解し、最大限に活用するには、**≪なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるのか?≫という学術的問い**の背景にある、光の螺旋性と物質の相互作用の科学を深く探究し、物質科学の新たな地平を開拓することが必要不可欠である。

本研究領域のゴールは物質科学者の究極の夢である「分子から生体組織まで空間スケールの異なる物質のキラル秩序化」を「光」で具現化し、物質科学に革命をもたらし、新たな学術の歴史を刻むことである。

*注 2 物質の右手系あるいは左手系の片方の鏡像異性体だけがどれだけ偏って存在していることを示す指数である。鏡像体過剰率 50%とは物質の 75%がどちらかの鏡像異性体に偏っていることを指す。

【期待される成果】

本研究領域は広範な分野に波及効果をもたらすが、物質の構造を階層的に捉えて**＜キラル秩序の化学＞＜らせんの工学＞＜渦の物理学＞**を応用展開のゴールと定め、波及効果を具体的に示す。

＜キラル秩序の化学＞アミノ酸やタンパク質は、右あるいは左手系の鏡像異性体だけが偏って存在していることが多い。これをホモキラリティーと言う。ホモキラリティーの発現には、古典的な流れの渦や円偏光が重要な役割を果たしている可能性が指摘されてきた。超螺旋光によって 100%に迫る鏡像過剰率のキラル結晶化が達成できれば、**ホモキラリティーにおける光の螺旋性が果たす役割**を深く理解できる。さらに、光の螺旋性と分子の相互作用がナノからマクロに時空間発展してキラル結晶化にいたるダイナミクスを円偏光二色性顕微鏡技術で高精度(高分解能・高感度)に計測できれば、キラル結晶化のメカニズムが解明できる。また、顕微鏡技術は**キラル物質の超微量検出・解析、病理マーカー計測**を可能にし、合成化学・創薬・医工学にも貢献できる。

＜らせんの工学＞分子集合体を超螺旋光で効率よく精緻にキラル秩序化できれば、従来の性能(円偏光純度、輝度など)をはるかに凌駕する円偏光構造色および**円偏光発光新奇物質**・円偏光および光渦発振レーザーなどを実現できる。

コラーゲンや DNA、血管壁や筋肉線維まで生体組織の配向はサブ mm の空間スケールのらせん性を示す。生体組織あるいは生体適合性材料を人工的に秩序化して 3 次元らせん組織を構築することは、人工生体組織の構築、ひいては、再生医療などにつながる。既存の足場法やバイオプリント法を超えた**超螺旋光による 3 次元らせん組織構築法**が実現できる。

＜渦の物理学＞磁性体や液晶に現れる渦状の欠陥構造を準粒子とみなしてスキルミオンと呼ぶ。スキルミオンは、次世代の低消費電力不揮発性磁気メモリ・光アドレスメモリなどの有力候補であるが、所望の場所に生成・制御することは未だ容易ではない。光の螺旋性と集光性を活用して、**所望の場所でスキルミオンを操作する手法**を提供する。

未解決問題の一つである乱流を理解するため、量子乱流(量子渦のもつれあい)が注目を集めている。物理的なプローブを入れることが難しい**超流動体中で発生する量子渦を光で観測・操作**できれば、極低温物性科学の新展開につながる。また、乱流の理解が深化する。

本研究領域で挑戦する**＜キラル秩序の化学＞＜らせんの工学＞**は、分子・分子集合体・生体組織と、よりマクロな物質のキラル秩序、すなわち、**キラル秩序のマクロ化への挑戦**であり、**＜渦の物理学＞**はスキルミオン(サブμm)・量子渦(nm)と光の空間選択性による**キラル秩序の局所化への挑戦**である。これらは究極の高次構造を有するキラル物質創成への挑戦であり、また、単なる個別研究の集合ではなく互いに強くリンクしている。

5　研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に記述すること（1頁以内）。

【研究領域内の研究項目間連携】

本研究領域は、**キラル秩序化とその起源を探究する計画研究**を軸に、**キラル秩序化を応用する展開研究**の輪を回して研究推進した。その狙いは、すべての**計画研究メンバーが学術と応用・展開の両輪を同じ理念・目標を意識しながら連携して研究推進**することにある。

具体的には、キラル秩序化を**＜A.理解＞＜B.観測＞＜C.開拓＞**する 3 班・10 計画研究で研究推進した。

＜A.理解＞光の螺旋性と物質の相互作用の物性理論を担当する A01 班、光物性の量子逆設計理論を担当する A02 班、分子集合体における励起子制御に関わる機能物性化学を担当する A03 班がキラル秩序化の学理を構築するとともに新奇キラル秩序のための未踏物質開拓の指針を示す。

＜B.観測＞キラリティーに関する分光イメージングを担当する B01 班、ナノ微細加工による近接場光制御を担当する B02 班、光化学反応のための近接場光設計を担当する B03 班が、先端計測加工技術でキラル秩序化を超精密計測するとともに、キラル秩序化を誘導する超螺旋光を最適設計する。

＜C.開拓＞超螺旋光の光源開発と物質のキラル秩序化を担当する C01 班、超流動ヘリウム中の量子渦の可視化を担当する C02 班、光圧による生細胞の動態操作を担当とする C03 班、超螺旋光による生体模倣 3 次元組織構築を担当する C04 班が、多様な空間スケールの物質をキラル秩序化する。「なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるか?」という学術的問いを領域全体で共有し、その学理の探究に向けて協力・議論・連携しながら研究推進した。

【計画研究及び公募研究間の連携体制】

領域の波及効果・期待される成果を担う**展開研究を計画研究者と公募研究者が一体となり推進した**。そのシナジー効果で「光の螺旋性が拓くキラル物質科学」の普遍性と革新性を顕在化させた。メンバー間連携による共同研究の多くは、すでに論文発表あるいは論文投稿中である。以下に連携を具体的に示す。

＜展開研究 1：キラル秩序の化学＞キラル結晶化・キラル計測。

メンバー：田中(A01)・岡本(B01)・Pin(公募 B)・尾松(C01)・杉山(C01)・新家(公募 C)・桶谷(公募 C)・齋藤(公募 C)・柚山(公募 C)

＜展開研究 2：らせんの工学＞円偏光発光・生体組織を模倣した螺旋細胞足場。

メンバー：江原(A02)・中嶋(A03)・松尾(公募 A)・押切(B02)・尾松(C01)・細川(C03)・松﨑(C04)・新家(公募 C)・豊田(公募 C)

＜展開研究 3：渦の物理学＞光スキルミオン・光量子制御・量子渦の光制御。

メンバー：余越(A01)・森田(公募 B(2025 内定))・音(公募 A)・佐藤(公募 A)・中村(公募 A)・田口(B03)・井村(公募 B)・馬越(公募 B)・尾松(C01)・蓑輪(C02)・前多(公募 C)

【連携体制のための施策】

「なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるか?」という学術的問いを領域全体で共有するため、領域会議(**5** 回)・班会議(**17** 回)・展開研究会議(**4** 回)を実施した。領域会議では、評価委員(**4 名うち 2 名は海外大学所属**)およびアドバイザー(**4 名**)を招聘し領域活動に対するコメントを頂いた。また、領域主催国際会議 The Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC, パシフィコ横浜)を毎年 4 月に開催した。英語で研究発表を行う OMC では**海外評価委員(4 名)を招聘して国際的研究動向を踏まえた視点から領域に対する意見**を頂いた。そして**先端光源技術・微細加工技術・先端精密計測技術・理論シミュレーション技術などの基盤技術を共有化**する「トレーニング工房」を設置した。

また、国立陽明交通大学(台湾)およびアデレード大学(豪州)との国際合同ワークショップを開催し、「**若手研究者と海外若手研究者の交流**」を積極的に促進した。

さらに、若手研究者が自由な発想で互いに共同研究を立案・実施できるように「**若手共同公募研究**」を領域内で公募して研究旅費・会議費・論文掲載費を総括班経費で支援した。

概念図 2.　研究組織の連携体制。

６　研究の進展状況及び主な成果

本研究領域の研究の進展状況及び主な成果について、以下のとおり記述すること。
１．研究領域全体の進展状況及び成果の概要
以下の点について具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。
(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか
(2) 研究を推進するに当たって特に留意した点や、生じた問題又は課題への対応状況等
※研究推進の過程において当初に想定・予見していなかった新たな展開（計画、研究手法、アプローチ方法の見直し又はセレンディピティ等）によって得られた研究成果がある場合には、その成果の内容とともに、当該成果が得られた経緯を当初計画との関係性を含めて説明すること

２．計画研究及び公募研究の進展状況及び成果
研究項目（計画研究及びそれと連携している公募研究）ごとに、以下の点について具体的かつ簡潔に記述すること（一つの計画研究及び連携する公募研究で２頁以内）。記述に当たっては、「７　研究発表の状況」に記載の研究成果との対応関係がわかるように記載すること。
(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか
(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果（計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。）
※研究推進の過程において当初に想定・予見していなかった新たな展開（計画、研究手法、アプローチ方法の見直し又はセレンディピティ等）によって得られた研究成果がある場合には、その成果の内容とともに、当該成果が得られた経緯を当初計画との関係性を含めて説明すること

【１．研究領域全体の達成度及び成果の概要】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

＜A.理解＞

光の螺旋性とキラル分子との相互作用に関する理論、超螺旋光による物質(特にナノ微粒子や半導体構造体)の非線形光学応答に関する理論、所望のキラル光物性を実現する分子系・光子場の設計が可能な量子逆設計理論などを構築する。
また、光の螺旋性とキラル分子との相互作用に関する基礎実験と超螺旋光と励起子挙動を協奏的に制御する「キラル秩序を有する分子システム」を開拓する。
これらの研究によって、**キラル秩序化の素過程を解明して学理構築**を狙う。

＜B.観測＞

円偏光二色性顕微鏡および多光子光電子顕微鏡、キラリティー誘起を検出する非線形光学計測などの計測技術を駆使して、超螺旋光の螺旋性と物質がナノ空間で織りなす様々な相互作用を観測できる基盤計測技術を開拓する。
また、金属ナノ微細加工とトポロジカル最適化手法を駆使して、ナノ空間において最適化された超螺旋光を提供する手法を開拓する。これらの研究によって、**超螺旋光が誘導するキラル秩序化の時空間発展の解明**を狙う。

＜C.開拓＞

超螺旋光を駆使して多様な空間スケールの物質をキラル秩序化する。例えば、アキラル分子を階層的にキラル秩序化して、究極的な鏡像体過剰率のキラル結晶化に挑戦する。マイクロメートルスケールの螺旋足場材料を創成し、細胞配向を制御する技術を確立する。また、光スキルミオンなどの新しい超螺旋光を駆使した物質のキラル秩序化(構造および物性制御)の可能性を探る。また、量子流体中のナノ微粒子を操作して量子渦を可視化・操作する。これらの成果を共有化することで、**＜展開研究 1~3＞のパイロット研究としての役割**を担う。

＜展開研究 1~3＞

＜A.理解＞＜B.観測＞＜C.開拓＞の研究者が連携して本研究領域を真の学術へと昇華させるための多様な物質のキラル秩序のマクロ化・局所化への挑戦である展開研究を推進する。＜展開研究 1：キラル秩序の化学＞ではキラル結晶化・キラル計測、＜展開研究 2：らせんの工学＞では円偏光発光・生体組織を模倣した螺旋細胞足場、＜展開研究 3：渦の物理学＞では光スキルミオン・光量子制御・量子渦の光制御に挑戦する。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜A.理解＞

超螺旋光と物質が織りなす特異な相互作用の一つに光渦二色性がある。これはキラル分子が示す円偏光

二色性とは異なり、通常の双極子モードでは説明できない。そこで、光渦とねじれナノロッドダイマーとのキラル相互作用を基礎実験と理論研究の側面から探求し、**光渦二色性は四重極子モードの混成モード間遷移で説明できる**ことを解明した(田中・江原)。また、超螺旋光による物質のキラルな非線形光学応答(高次高調波発生)などの理論を構築した(余越)。また、Ag_{29} クラスターをはじめとする**キラルな円発光特性を有する新たな分子システム系を提案した**(中嶋・江原)。
キラル秩序化で最も重要な素過程の一つである光渦二色性のメカニズムの重要な側面が解明されて、**統一的な学理構築の前段階**まで到達した。

＜B.観測＞

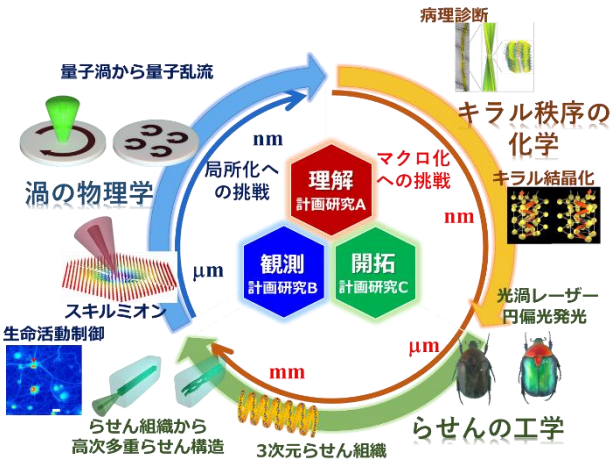
キラルな金ナノ構造体に円偏光を照射し、その近傍に配置したナノスケールの探針に働くキラル光学効果による光圧を検出することで、**ナノスケールでの物質構造のキラリティーを計測**できることを実証した(岡本)。キラルに二次元配列された**等方的な金ナノ粒子が光学的に結合してキラルな光学応答を示す**ことを実証した(押切)。
また、金属ナノ微細加工とトポロジカル最適化手法を駆使して、**ナノ空間において最適化された超螺旋光を提供する手法を開拓**した(田口)。この研究によって、光のキラリティー(光学キラリティー)がナノスケール空間で増強・局在化できることを示した。
超螺旋光の螺旋性と物質がナノ空間で織りなす様々な相互作用を観測できる**基盤計測技術をほぼ確立し、具体的な事例に適用できる段階**まで到達した。

＜C.開拓＞

アキラル分子である塩素酸ナトリウム水溶液に光渦を照射して塩素酸ナトリウムを結晶化させると、**55%を超える鏡像体過剰率でキラル結晶化することを実証**した(尾松・杉山)。その成果を共有し、＜展開研究1：キラル秩序の化学＞として領域全体で発展的に展開した。**生体適合性材料GelMAに光渦を照射して重合させると、マイクロメートルスケールの螺旋足場が創成**できることを実証した。また、螺旋足場で細胞が固着成長することを見出した(尾松・細川・松﨑)。その成果を共有し、＜展開研究2：らせんの工学＞として領域全体で発展的に展開した。
また、**光スキルミオンの特異な偏光構造がアゾポリマーなどの物質に転写**できることを実証した(尾松)。その成果を共有し、＜展開研究3：渦の物理学＞として領域全体で発展的に展開した。さらに、量子流体中のナノ微粒子で**量子渦を可視化してケルビン波の観測**に世界で初めて成功した(蓑輪)。
展開研究のパイロット研究としては十分な成果を得た。その成果を共有し、**展開研究の実現に向けた前段階**まで到達した。

≪研究を推進するに当たって特に留意した点や生じた問題又は課題への対応状況等≫

具体的な研究推進において問題となった例を一つ取りあげる。**超螺旋光による細胞足場の研究**である。主要な役割を担う**松﨑チームは光学実験の経験が乏しく、課題の遂行に困難があった。松﨑チームを支援**するため、**光学系設計から光学部品選定まで細川チーム・尾松チームで全面的に技術サポート**した。その結果、生体適合性材料 GelMA の螺旋ファイバー化、さらには、細胞固着まで成功し、**生体組織を模倣した螺旋足場による細胞成長の一歩手前**まで到達した(**Chem. Asian J. in press**)。
このように研究推進における問題点の共有するため、また、「なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるか?」という学術的問いを領域全体で共有するため、**領域会議(5** 回)に加え、**班会議(17** 回)を頻繁に実施した。特に、A 班と B 班のような班をまたぐ**合同班会議** (**4** 回)、展開研究のための情報を共有し議論する**展開研究会議(4** 回)を定期的に行い、個別研究の羅列とならないように配慮した。さらには**先端光源技術・微細加工技術・先端精密計測技術・理論シミュレーション技術などの基盤技術を共有化**する「トレーニング工房」を設置した。
また、2024 年度より、領域で**新たな共同研究の創出を目標としてブレインストーミングを行う合宿（長野県原村）**を実施した。



概念図 3.　計画研究と展開研究。

（２．計画研究及び公募研究の進展状況及び成果）

【研究項目 A01「超螺旋光によるキラル非線形光学応答」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 A01 では、具体的に 2 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　超螺旋光の非線形光学応答と多体現象への応用(余越)＞

超螺旋光による物質の非線形応答と非線形応答における「物質や光の多体効果」を提案する。具体的には、超螺旋光と物質のキラリティーを微視的な視点で取扱う。そして、光と物質の角運動量の多重交換を取り入れた非線形応答理論を構築する。また、光と物質の角運動量交換によって起こる現象を探求し、光の角運動量合成や分子のキラル秩序形成に関する基礎原理を解明する(中間評価まで)。

さらに、超螺旋光の螺旋性や周辺環境の影響を導入して、発光と吸収を介した分子間相関からキラル秩序形成の起源を探る(最終評価まで)。

＜研究項目②　キラル物質と超螺旋光とのキラル相互作用の学理探求 (余越・田中)＞

マルチ空間スケールなキラル物質と超螺旋光の相互作用の学理を角運動量の視点から探求することを立案した。具体的には、分子と光の空間スケールミスマッチ(可視光の波長に比べて分子は 2 桁以上小さい)を克服するため、励起状態の空間コヒーレンスがサブ波長程度であるプラズモニックナノ構造を利用してキラルな光学応答を理論と実験の両面から解明する(中間評価まで)。

さらに、キラル分子や会合体・結晶を対象としたキラルな光学応答の理解へと発展させる(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　超螺旋光の非線形光学応答と多体現象への応用＞

光と物質のキラル相互作用を微視的に明らかにするため、キラル分子の電子状態を記述するハミルトニアンをキラル部分とアキラル部分に分離する手法を開発した。これにより物質のキラリティーが光と相互作用する物理素過程を詳細に解析することが可能となった。3 回回転対称を持つキラル分子模型に適用することで、ハミルトニアンのキラル部分が物質系の角運動量変化に対応することを明示した。

さらに、互いに整数倍の周波数を持つ二つの円偏光光波の重ね合わせで与えられる双円偏光レーザーによるキラル分子模型の高次高調波発発生を解析した。この双円偏光レーザーは、時間とともに偏光が変化する超螺旋光で空間反転対称性を破る。その結果、高調波次数の広い範囲で空間反転に関する大きなキラル二色性を示すこと、二色性がハミルトニアンのキラル部分に由来していることを示した(**Phys. Rev. B 2025**)。

また、空間的に分散された多数の分子が同期して発光する現象(超蛍光)に注目し、超蛍光が引き起こす力学的な力を計算する手法を開発した。通常、タイミングや方向がランダムである発光による力は、分子集団の総和として大きなものにはなり得ず、秩序形成には寄与しない。そこで、まず、超蛍光が強い指向性と同時性を示すことを明らかにした(**J. Phys. Soc. Jpn. 2023**)。さらに、金属ナノ構造の近傍に配置された数 10 個の分子の超蛍光による力を解析した。このとき分子間で励起占有率に差がある場合、分子間に及ぼしあう相互作用と非相反的な効果が生じることを示した(論文執筆中)。これは金属ナノ構造近傍における局在プラズモン電場の非一様性が励起占有率に反映されると、分子が自発的に互いに及ぼしあい力が発生し、秩序形成の起源になり得ることを示す。

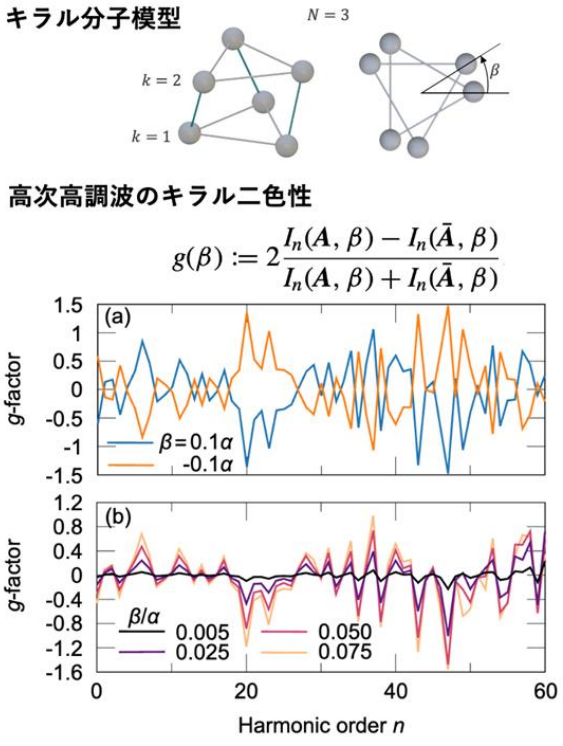


図 A01-1. キラル分子模型の概略図と高次高調波の各高調波次数における非対称因子 g。

このように当初予定していた**中間評価までの目標を高いレベルで達成できた**。今後は、分子集合体の非線形光学応答の解析、固体結晶も含めマルチ空間スケールな物質を対象に超螺旋光による非線形光学応答理論を拡充する(A03 **中嶋**と連携)。また、実験の分子パラメーターにおける実時間分子動力学を併用すること

で、キラル秩序形成の初期過程の起源を明らかにする(C01 **尾松・杉山**と連携)(最終評価まで)。

＜研究項目②　キラル物質と超螺旋光とのキラル相互作用の学理追求＞

各固有プラズモンモードの共鳴波長(有限要素法を用いた 3 次元電磁場解析シミュレーション)がスペクトル的に分離しているサブ波長サイズのプラズモニックねじれナノロッドダイマー(TND)を対象に、スピン角運動量(SAM)と軌道角運動量(OAM)を持つ光を照射した際のキラル相互作用を解析した。SAM を持つ円偏光を照射すると TND は双極子共鳴でキラル相互作用を示す。これに対して、OAM を持つ光渦を照射すると、円偏光では励起できない禁制遷移とされる四重極子共鳴が TND に誘起されキラル相互作用が現れることを見出した(右図, arXiv:2211.03422)。

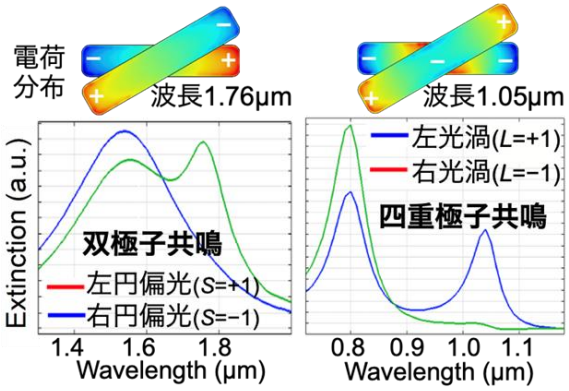


図 A01-2. ねじれナノロッドダイマー(TND)の(a)円二色性と(b)光渦二色性。

また、従来、困難とされてきた左右光渦の高速変調を光弾性変調器と SAM-OAM 変換を組み合わせることで実現し、キラル相互作用(二色性信号)を高精度に測定する方法を提案した(**Rev. Sci. Instrum. 2024**, 特願 2024-199269)。この方法を用いてキラル光二色性分光イメージングシステムを開発し、単一 TND の二色性信号スペクトルを計測可能にした。

そこで、左右光渦の集光スポットを走査し、四重極子共鳴に由来する単一 TND(**図** A01-3a)の二色性信号を空間分解分光計測した。

励起光に円偏光(s = ±1, l = 0)を用いた場合(**図** A01-3b 上)、SAM 由来の光学キラリティー(Spin Optical Chirality, Spin OC)の空間分布を反映した負の二色性信号が観測されたが、信号強度や符号に波長依存性は見られなかった。一方、円偏光光渦(s = ±1, l = ±1)の場合(図 A01-3b 下)、Spin OC の空間分布を反映したドーナツ状の負の二色性信号に加え、Spin OC がゼロになるはずのドーナツ中心で波長依存性のある信号が観測された。具体的には、波長 800 nm では負、825 nm ではゼロ、850 nm では正の二色性信号が観測され、その符号が円偏光光渦の OAM の符号によって反転した。これらの結果から、Spin OC とは異なる応答を生み出す OAM 由来の光学キラリティー(Orbital OC)が存在することを初めて明らかにした(論文投稿中)。

さらに、キラル相互作用における Spin OC と Orbital OC の寄与を分離して解析する理論を構築した。従来の SAM と OAM の保存則はゲージを固定する必要から真空中に限定されてきた。そこで、電場と磁場の微分項を用いた SAM と OAM に着目することにより、光と物質との相互作用における SAM 保存則と OAM 保存則を導出することに成功した(**Phys. Rev. Res. in press**)。これにより、任意の光と任意の物質との相互作用に伴う SAM-OAM 変換を定量的に解析することが可能になる。この理論を用いて実験結果を解析することにより、四重極子共鳴によるキラル相互作用は Orbital OAM が支配的に寄与していることが明らかになった。

このように当初予定していた**中間評価までの目標を高いレベルで達成できた**。今後は、分子系理論、多体結合系、キラル結晶化をキラル分子や会合体・結晶を対象としたマルチ空間スケールのキラル相互作用の理解へと発展させる(A02 **江原**、B02 **押切**、C01 **杉山**と連携)(最終評価まで)。

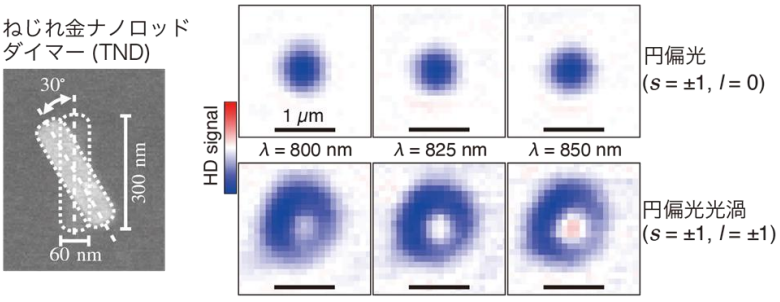


図 A01-3. (a)作製した TND、(b)キラル光二色性の空間分解分光計測。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・空間構造を持つ光の量子力学的な情報を半導体中の電子の空間構造へ転写(**公募 B(2025 内定)・森田**)

・光誘起力顕微鏡による単分子電子状態の実空間計測 (**公募 B・菅原**)

【研究項目 A02「超螺旋光に基づくキラル光物性の量子逆設計理論」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 A02 では、具体的に 3 つの研究課題を設定した。

＜研究項目①局在表面プラズモンのキラル光物性の量子逆設計理論の開発と応用(江原)＞

分子ー金属ナノ微粒子系の局在表面プラズモンのキラル光物性について、**時間依存シュレディンガー方程式に基づく量子逆設計理論を開発し、モデル系・実在系に応用する研究を実施**する。励起状態の占有率を目的関数とし、光子場、吸着分子系、金属ナノ構造体の形状・原子組成、分子–金属ナノ構造体の間の距離・相対配向について理論設計を行う(中間評価まで)。さらに、双極子近似を超えて、超螺旋光との相互作用を記述できる理論開発を行い、超螺旋光と物質の相互作用により発現する現象に関する研究を実施する(最終評価まで)。

＜研究項目②(1)量子逆設計理論に基づく分子集合系・複合系の円偏光発光の理論設計(江原)＞

強い円偏光発光を示す分子集合系・複合系の理論設計を実施する研究を計画した。この方法を量子逆設計理論と結合することによって**分子集合系・複合系の円二色性に関する研究を進展**させる(中間評価まで)。これらの研究を基礎として、金属ナノ微粒子と分子集合系との複合系のキラル光物性が増強できるか、理論シミュレーションによって検討する(最終評価まで)。

＜研究項目②(2)逆設計理論に基づく円偏光発光デバイスや生体系のキラル秩序化の理論設計(江原)＞

逆設計理論にマルチ空間スケールの概念を導入し、高効率な円偏光発光デバイスを設計・開発する研究を設定した。また、**超螺旋光による生体物質や生体組織系の構造化・機能化に関する研究**を計画した(中間評価まで)。さらに、強い円偏光発光を示すデバイスの理論設計を実施し、生体物質や生体組織系のキラル秩序化の動的過程の研究を実施する(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①局在表面プラズモンのキラル光物性の量子逆設計理論の開発と応用＞

量子逆設計理論および量子最適制御理論を開発・実装し、所望の光物性を発現する最適な分子–金属ナノ粒子系と入射光電場の設計を行った。時間依存配置間相互作用法で分子を記述し、誘電体モデルに基づく境界要素法で金属ナノ粒子を記述することで、分子–金属ナノ粒子近傍の有効ハミルトニアンを表現し、各要素の最適化問題に帰着した。また、入射光電場は量子最適制御理論で最適化した(図 A02-1)。

これらの**理論により、分子種・空間配置、金属ナノ粒子の金属種・形状、入射光電場の最適化に成功**した。また、**超螺旋光と分子の相互作用を記述するための、実時間 Kohn-Sham DFT 法と Maxwell 方程式を結合した方法を開発**した(図 A02-2)。

以上から本研究項目に関しては、**中間評価までの目標はほぼ達成した。**

今後は、実験で利用されている超螺旋光を理論シミュレーションに導入し、物質との相互作用について多極子展開の解析により、重要な相互作用を解明する(A01 **田中**と連携)。

また、超螺旋光と分子の相互作用に量子逆設計理論を導入し、相互作用系の理論制御を行う(最終評価まで)。

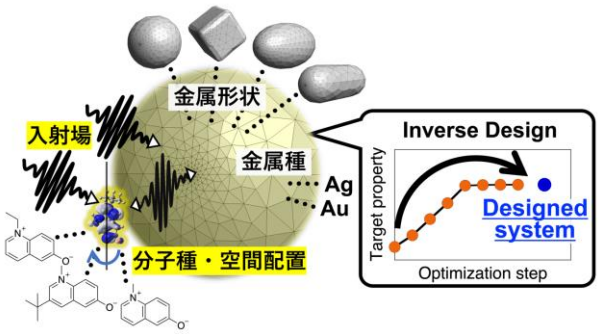


図 A02-1. 量子逆設計理論による分子ー金属ナノ粒子系および入射光電場の最適化。

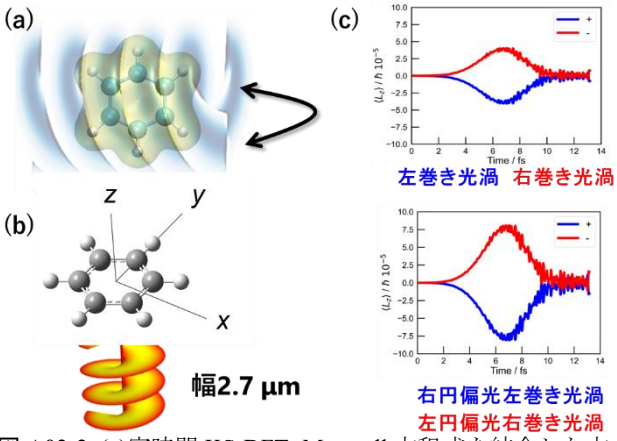


図 A02-2. (a)実時間 KS-DFT+Maxwell 方程式を結合した方法、 (b)ベンゼンと光渦との相互作用, (c)誘起された角運動量二色性。

＜研究項目②(1)量子逆設計理論に基づく分子集合系・複合系の円偏光発光の理論設計＞

基盤的研究として、円偏光発光やキラル物性を示す様々な分子系や複合系の理論解析を行った。キラル分子の左手型と右手型を動的に変換する分子技術が、近年、注目されている。しかしながら、変換速度を制御することは容易ではない。三重らせん構造をもつニッケル三核錯体にアルカリイオンを導入することで、左手型(M 体)から右手型(P 体)への変換速度を 1000 倍速くできることを示した。また、その**非対称性や円偏光二色性等を理論解析**した(図 A02-3)。修飾単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は、近赤外領域の強い発光を示すことが見出されている。SWCNT を環状フルオロアルキル化することで、**通信波長領域の近赤外発光を選択的に発現させることに成功した**(図 A02-4)。また、ヘリカルな表面構造を持つ銀ナノクラスターについて、銀錯体を導入することによって異なる発光波長の発光が得られる。この**発光波長の変化について理論解析**した(A03 **中嶋**と連携、論文投稿中)。基盤研究として、**中間評価までの目標はほぼ達成した。**

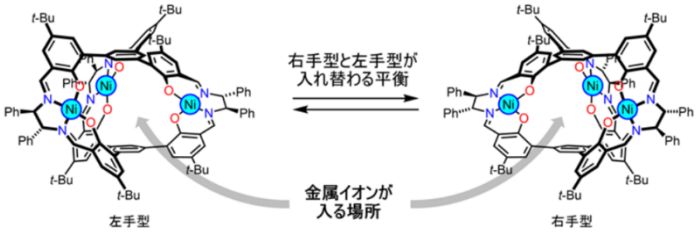


図 A02-3. 三重螺旋構造をもつニッケル三核錯体の左手型(M 体)から右手型(P 体)の変換。

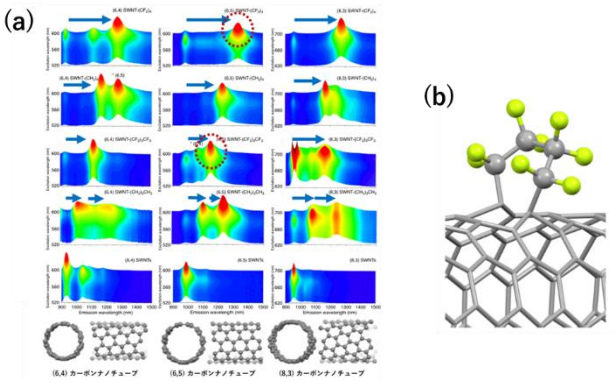


図 A02-4. 修飾単層カーボンナノチューブの近赤外発光制御 : (a) キラル角度および置換基依存性、 (b) 環状付加体の構造。

今後は、金属ナノ微粒子や分子集合系との複合系において、キラル光物性の増強が可能か、理論シミュレーションによって検討する(A03 **中嶋**と連携)(最終評価まで)。

＜研究項目②(2)逆設計理論に基づく円偏光発光デバイスや生体系のキラル秩序化の理論設計＞

生体物質や生体組織系の構造化・機能化に関する理論シミュレーションの方法を検討した。粗視化モデルを用いて、超螺旋光の光電場によって、生体物質・生体組織系がどのような影響を受けるかについて検討した。本研究項目については、シミュレーションの技術開発に試行錯誤があり、**中間評価までの目標は一部を達成した。**

今後、本研究項目については、研究領域内外の研究者との共同研究を実施して、研究を加速する計画である(最終評価まで)。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・生体分子の円二色性に関連する電子励起状態の理論解析(**公募 A・中村・松尾**)

【研究項目 A03「超螺旋光とキラル秩序の相互作用による励起子コヒーレント制御」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 A03 では、以下、2 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　合理的なキラル分子・分子集合体の設計に基づく CPL 特性向上と励起子コヒーレント制御（中嶋・廣瀬・森末）＞

理論的に裏付けされたキラル分子設計、キラル分子のらせん状集合体への秩序制御により円偏光発光（CPL）特性の向上を立案した。具体的には、発光団間のキラル励起子（**μ**）相互作用、遷移電気（**μ'**）および遷移磁気（**m'**）双極子モーメントの強度・配向制御、という二つの異なるメカニズムに基づいた分子設計により CPL 分子を開発する。さらに、キラルダイマー分子、キラル錯体、キラル金属クラスター、ヘリセン分子などを設計・合成し、CPL 特性を測定する。また、CPL 特性向上のための分子設計指針を得る(A02 **江原**と連携)(中間評価まで)。

さらに、キラル配列発色団間の励起子移動におけるスピン偏極挙動について評価する（最終評価まで）。

＜研究項目②　超螺旋光と分子・集合体の相互作用に基づくキラル秩序化と励起子挙動の協奏的制御（中嶋・廣瀬・森末）＞

CPL 特性を示すキラル分子、及び、分子集合体を超螺旋光で励起して、その CPL 測定を実施する。具体的には、金属ナノ粒子やナノ微細構造(プラズモン場もしくは Mie 共鳴場)にキラル分子を配置し、CPL 特性を評価する(B02 **押切**と連携) (中間評価まで)。

さらに、キラル分子集合体（幅 10 nm 以下、長さ数 μm 以上の長尺らせんファイバー）に超螺旋光を照射し、光の螺旋性による階層的ならせん秩序化を行い、階層的らせん秩序構造特有の光学特性を探索する(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　キラル分子・分子集合体に基づく CPL 特性向上＞

熱活性化遅延蛍光(TADF)に加え、CPL 特性を示すキラルダイマー分子(A03-1)を開発した。ビナフチレン骨格を介して、TADF 特性を示す発光団ユニットをらせん状に配置することでキラル励起子（**μ**）相互作用に基づく CPL 特性(異方性因子~6 × 10^{-3})が得られた。さらに、りん光由来の CPL は、より大きな異方性因子(0.05)を与えることを見出した。

両末端にチアジアゾールを導入した新規ヘリセン分子(A03-2)を合成した。この分子は CPL 特性を支配する遷移磁気双極子モーメントが大きくなるように設計されており、キラル有機化合物の中でも優れた CPL 特性を示した(異方性因子~0.04)。また、分子間相互作用により、らせん階段状にパッキングした特異的な結晶構造を示すことを見出した。

特有のキラルスピロ構造を有する化合物 A03-3 を合成し、CPL 特性を評価した。ヘリセンとスピロ構造が融合した骨格を有し、合成化学的にヨウ素(I)の導入位置において、種々の官能基やπ共役ユニットが拡張可能である。

銀原子と有機配位子の集合体である Ag_{29} クラスター(A03-4)が配位子のらせん配置に基づくキラリティーを有することを見出した。また、ラセミ体で得られるクラスターのエナンチオマー分離に成功した。クラスターの CPL 特性は顕著ではないものの、クラスター表面を銀イオン錯体により修飾することで、CPL 特性を大きく増強（異方性因子~0.008）できることを見出した。

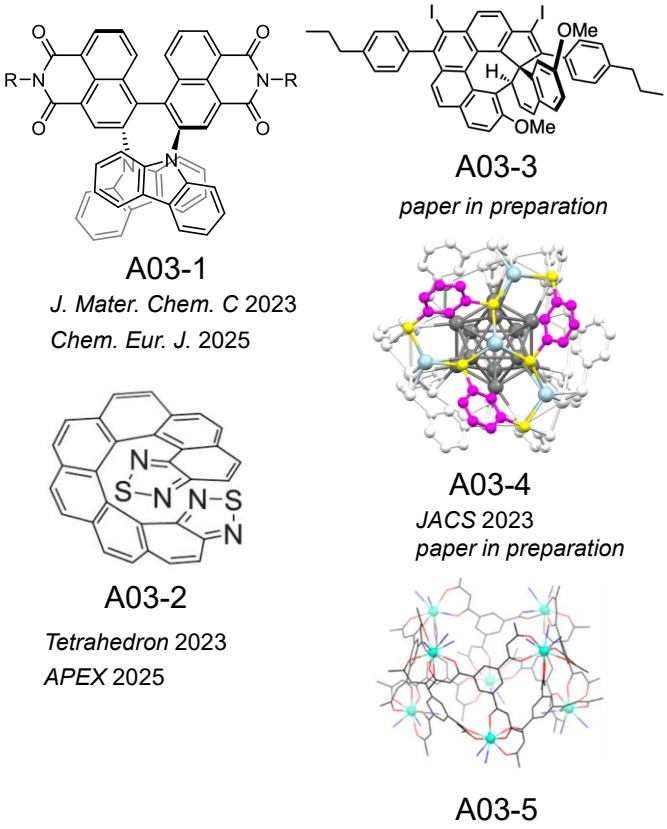


図 A03-1. A03 で開発したキラル物質群の例。

表面修飾前の Ag_{29} クラスターでは、励起子はアキラル構造を有するコア付近に局在する。その結果、CPL 特性が抑制される。表面修飾すると、励起子がキラル表面へと局在することで CPL 特性が増強する。この機構(A02 **江原**と連携)を理論的に明らかにした(図 A03-2)。
さらに、キラル分子集合におけるらせん状分子配列と発光異方性の相関を評価し、励起子移動と増感発光の異方性に関する知見を得た(ENS-Paris Saclay(フランス)との国際共同研究)。以上のように、分子開発、CPL 特性計測、理論研究を通じて、励起子挙動と CPL の相関に関する理解が進展し、**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、CPL 特性の分子科学的理解のため、励起子と発光間における角運動量の転写挙動について理論・実験の両面から研究を進める(A01 **余越**と連携)(最終評価まで)。

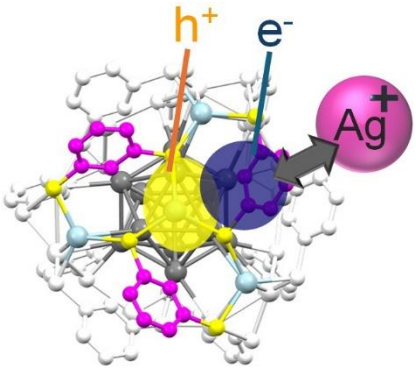


図 A03-2. Ag_{29} クラスターにおける励起子－Ag(I)相互作用。

＜研究項目②　超螺旋光と分子・集合体の相互作用の評価＞
キラル分子と超螺旋光の相互作用の評価のため、複数の検討を進めた。まず、近接場増幅された円偏光電場とキラル分子間の相互作用を CPL 特性で評価することを目的とした。具体的には、らせん形状を有する半導体ナノ粒子表面にアキラル色素を配置した。ナノ粒子表面で色素分子がらせん状に配列することにより、CPL 特性が発現し、そのシグナルはナノ粒子表面の対掌性に依存することを見出した(Rennes 大(フランス)との国際共同研究、図 A03-3)。さらに、銀ナノ粒子表面(直径 8 nm、プラズモン共鳴波長 470 nm)に発光分子をらせん配列させることを狙い、ピレン発光部位を有するキラル配位子の合成を行った。現在、ピレンキラルエキシマー由来の発光が確認されている。今後、近接場増幅された円偏光による CPL 特性を評価する。

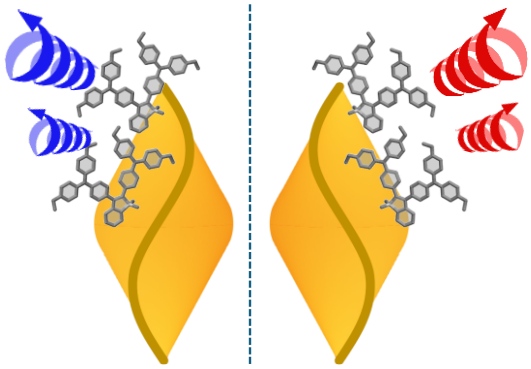


図 A03-3. らせん状ナノ粒子表面における色素分子キラル配列と CPL 発現。

さらに、Mie 共鳴を示すシリコン基板上にキラル Eu 錯体(A03-5)を修飾し、その CPL 特性を評価する研究を進めている(B03 **押切**と連携)。このように、プロジェクト後半に向けた材料、共同研究の準備は整っており、**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、光渦を用いてキラル超分子集合体の階層秩序化し、その光学特性を評価する(C03 **細川**と連携)(最終評価まで)。

≪連携している公募研究で得られた成果≫
・単結晶中のアキラルーキラル結晶相転移における CPL 発現を計測(**公募 C・桶谷**)
・キラル自己組織化ナノチェーンにおける CPL 発現を計測(**公募 C・豊田**)

【研究項目 B01「超螺旋光とナノレベル物質のキラルな動的相互作用」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 B01 では、具体的に 3 つの研究課題を予定した。

＜研究項目① キラル光学イメージングとキラル光-物質相互作用を検出する動的分光手法の開拓・発展(岡本・Ahn・山西・成島)＞

本領域で扱うキラル物質・キラル秩序を評価する基盤技術であるキラル光学イメージング手法を発展させる。近接場キラル光学効果イメージング、高精度 CD 共焦点顕微鏡など、世界的にも他に例を見ない高度な**キラル光学イメージング**装置を高度化、拡張して、本研究と領域内の共同研究に対する親和性をより高める。また、円偏光や光渦を照射することで物質系に生じる、キラルな分極や秩序・構造の動的な変化を解析するための実験手法を開拓する(中間評価まで)。これらの手法を基盤として、物質系に対する超螺旋光の照射がキラル分極・秩序を発生させる動的な挙動に関する情報を取得し、キラルな光-物質相互作用に基づくキラル秩序創出の基本原理の確立を目指す(最終評価まで)。

＜研究項目② キラルな光圧の基盤的学理(Sadgrove・岡本・Ahn)＞

キラル秩序を誘起する基盤的要因として、**螺旋性を持つ光による光圧の特性**、キラル秩序生成の基礎的情報を得る。典型的な系として、キラル金属ナノ粒子の円偏光による光捕捉とともに、ナノ光ファイバー上で円偏光によるキラル粒子の輸送を観測・解析する。これらを通じて、**キラル粒子に対する光圧を支配する法則・原理を解明**し、超螺旋光によるキラル秩序創出の基盤を与える(中間評価まで)。ファイバー上の金属微粒子のキラルな光励起状態とファイバー伝搬光との結合特性を調べ、キラルなファイバーモード-物質間相互作用の特性を解明する(最終評価まで)。

＜研究項目③ 超螺旋光によるキラル秩序創出、キラル発光系(岡本・Ahn・成島)＞

主として金属ナノ構造における**超螺旋光の関与するキラル秩序・構造創出**とその基本原理の解明に向けた実験研究を行う。キラルでない金属ナノ構造に円偏光を照射し、光化学反応によってキラルな光電場を反映したナノ構造を創出する。またその機構を解明する(中間評価まで)。異なる機構のキラル秩序生成原理による掌性の偏りの実験的検討、キラルでない分子からなるキラル結晶等における、超螺旋光の光圧によるキラル誘導の可能性とその機構探索を行う(最終評価まで)。また、超螺旋光の特性を利用した**円偏光発生システム**の構築・高度化、その基本原理の確立を目指した研究を行い、円偏光度を決める要因を明らかにする(中間評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目① キラル光学イメージングとキラル光-物質相互作用を検出する動的分光手法の開拓・発展＞

高精度遠方場 CD 顕微鏡について、イメージセンサーを用いて高速計測が可能な装置開発を進め、数分の 1 秒の測定時間で CD 顕微イメージングが可能となった(特許出願中)。本装置では広い波長範囲での計測も期待できる。今後はこれを領域内の共同研究でキラル光学特性の計測に積極的に用いる予定である(最終評価まで)。近接場 CD イメージングでは、高い空間分解能を可能とする原子間力顕微鏡を基盤として光学イメージングを可能とする、**光誘起力顕微鏡**の手法を用い、左右円偏光で得られるイメージの差から、試料の**キラル光学効果によるナノスケールでのイメージング**を実現した(**図 B01-1**、**Nano Lett. 2023**)。今後はこの手法の像形成機構を深く理解した上で、ナノスケール物質のキラル光学特性の解明にも用いていく(最終評価まで)。これらにより当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した**。キラルな分極や秩序・構造の動的な変化を解析することを目的として、新たな時間分解分光装置を構築している。この手法の基本的な特性を理解する計測を行った上で、今後はキラル秩序創出の初期過程の解析に用いる(最終評価まで)。

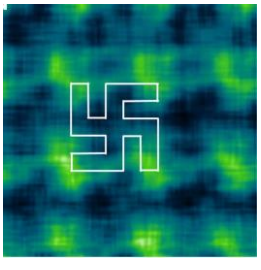


図 B01-1. 逆卍型金ナノ構造配列(格子周期 0.5μm)の光誘起力顕微 CD イメージ。

＜研究項目② キラルな光圧の基盤的学理＞

物質に光を照射すると、光の力(光圧)が加わる。光圧は、光強度の強い方向に力の加わる勾配力、光の進行方向に加わる散乱力・吸収力に大きく分けられる。キラルな物質に対して円偏光で光圧を加える場合、光の掌性(左及び右円偏光)によって加わる力に差が生じることが期待される。

実際、数 10 μm サイズの液晶液滴に対して、円偏光の掌性に散乱力が依存することが報告されている。本研究では**光の波長よりも小さなキラルナノ微粒子に対して、勾配力が円偏光の掌性によって異なる**(勾配力 CD)ことを示すことに成功した(**図 B01-2**)。また、光の波長に対する勾配力 CD の依存性を解析した結果、光圧が外部照射電場とそれによる粒子の誘起分極の相互作用だけでは説明できず、粒子周辺に誘起される近接場が関与していることが明らかとなった(**Sci. Adv. 2022**)。また、**ナノ光ファイバー表面に捕捉されたキラルナノ微粒子に加わる散乱力の円偏光の掌性に対する依存性**(散乱力 CD)についても実験・解析を行い、散乱力が入射光の掌性に依存することを用いてキラルナノ粒子の運動・輸送することに成功した(論文投稿中)。当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した**。今後はこれらを発展させ、微粒子の集団がキラルな光でキラルな秩序を形成する可能性などの検討を進める(最終評価まで)。

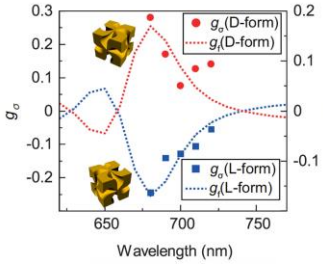


図 B01-2. 単一のキラル金ナノ微粒子の勾配力の非対称性因子 g の波長依存性。点線は電磁気学シミュレーション。

＜研究項目③ 超螺旋光によるキラル秩序創出、キラル発光系＞

キラルでない直方体型金属ナノ微粒子に円偏光を照射して誘起されるキラルなプラズモン増強光電場による光化学反応(光重合)により、nm から μm にわたる空間スケールで渦状のキラル構造体が生成することを見出した(**図 B01-3**)。電磁場解析の結果、プラズモンによる電場そのものは nm スケールの空間に局在するが、その裾の電場成分が入射光と干渉し、μm スケールのキラル構造生成に寄与することが判明した(**J. Phys. Chem. C 2024**)。

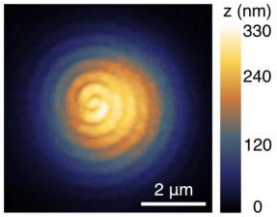


図 B01-3. 直方体金微粒子に円偏光を照射し、光重合により生成した渦構造。

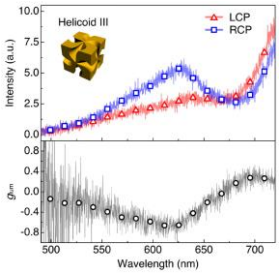


図 B01-4. 単一のキラル金ナノ微粒子からの円偏光発光スペクトル。上：左(赤)及び右(青)円偏光成分。下：非対称性因子 *g* のスペクトル。

また、キラル金ナノ微粒子をフェムト秒近赤外パルス励起することで得られる二光子誘起発光の特性を調べた。直線偏光励起でも円偏光度を表す非対称性因子 *g*(完全な円偏光で±2.0)の値が 0.7 程度にもなる円偏光発光が単一微粒子から得られることを見出し(**図 B01-4**)、その機構を電磁気学計算援用して解明した(**Adv. Opt. Mater. 2024**)。以上、当初、予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した**。今後はこれらの基盤の上で、超螺旋光によるキラルナノマイクロ構造誘起、キラル結晶生成等の可能性を探求し、その機構と原理の解明を目指す(最終評価まで)。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・Si ナノ粒子及び集合体の高次モード光による光励起を観測(**公募 B・井村**)
・渦巻き金属ナノプレートの CD 顕微イメージを観察(**公募 C・齋藤**)

【研究項目 B02「螺旋性を持つ近接場光と物質の相互作用の観測」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 B02 では、具体的に 3 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　超螺旋光を発生するナノ構造の設計・作製(押切)＞

超螺旋光を発生するナノ構造の設計・作製を行う。超螺旋光の発生機構を系統的・定量的に理解するためには、精密なナノ構造設計と作製技術が必要である。**超螺旋光の制御因子である空間対称性を系統的に変化させてナノ構造設計**し、その近接場光特性を評価する(中間評価まで)。

高調波発生などが可能なナノ構造についても検討する。(最終評価まで)

＜研究項目②　近接場における超螺旋光の計測(押切)＞

設計したナノ構造に超螺旋光を照射した時に発生する近接場光の特性を評価する。**円偏光を照射した時の近接場光の電場増強分布を多光子励起型光電子顕微鏡(MP-PEEM)で観測**する。PEEM の入射光を変調することで、種々の超螺旋光照射時に発生する近接場光のイメージングとスペクトルの取得を行う(中間評価まで)。

さらに、超螺旋光の角運動量が光電子のスピン角運動量へと転写される過程やその割合について定量的に計測する。(最終評価まで)。

＜研究項目③　超螺旋光による物質のキラル秩序形成(押切・和田)＞

研究項目①で作製したナノ構造近傍に配置した分子に超螺旋光を照射して、**ラセミ分子の選択的反応**などが誘導できるか検証する。分子の反応ダイナミクスについて理解するため、超高速過渡吸収分光により、ナノ~フェムト秒での電子・振動励起種のスペクトルと緩和速度を計測する(中間評価まで)。

さらに、超螺旋光による分子レベルでの化学反応をトリガーにして、分子会合体や相分離などのより大きな空間スケールのキラル秩序が形成できるか検証する。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　超螺旋光を発現するナノ構造の設計・作製＞

金属ナノ構造が示すプラズモンと光共振器との光学モード同士が強く相互作用すると、モード強結合と呼ばれる混成状態を形成する。複数の金ナノドットを薄膜光共振器上に配置すると、**ナノドット同士が 2 次元の薄膜共振器を介して結合し、集団となってコヒーレントなプラズモンモードを形成**することがわかった(アドバイザー笹木との共同研究)。このコヒーレント相互作用を利用すれば、等方的な**金ナノドットをキラルに配列するだけで、集団モード形成に基づく近接場超螺旋光を自在に生成**できる(図 B02-1)。さらに、**金ナノドットの配列**を高スループットで量産可能な光ナノインプリント構造加工法を開発した。以上、当初、予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成しただけでなく、最終評価までの目標も一部達成した。**

今後、上記の手法を活用し、高調波をはじめとする非線形光学現象を用いた超螺旋光の生成や超螺旋光からホットキャリアへの角運動量転写現象の解明を目指す(A01 **田中**、B03 **田口**と連携)(最終評価まで)。

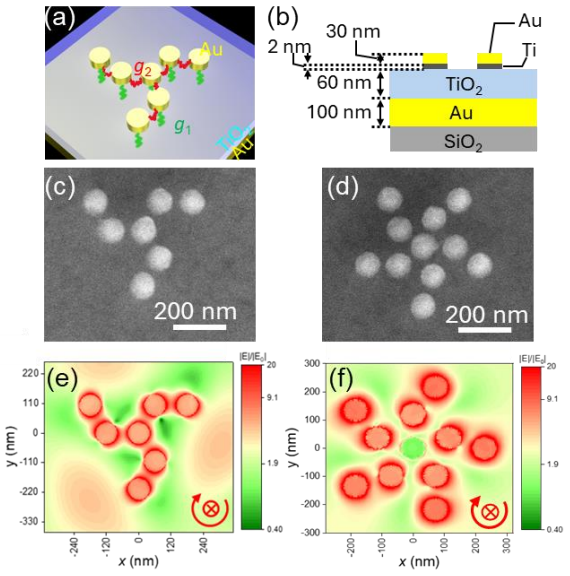


図 B02-1. (a) 集団モード形成を行う金ナノドット配列体の模式図。g_1, g_2 はモード結合の結合定数。(b) ナノドット配列体設計の断面模式図。 (c,d) 金ナノドット配列体の SEM 像。(e,f) 近接場電場増強分布。

＜研究項目②　近接場における超螺旋光の計測＞

ナノ構造の近傍で発生する超螺旋光を評価するため、円偏光照射下での遠方場・近接場の光学特性計測系を構築した。通常の円二色性分光計は透過光学系であるため、研究項目①で述べた構造の光学特性評価には適さない。そこで、**左右円偏光の吸光度差を定量測定できる反射光学系の顕微分光計測系を構築**し、ナノ構造のキラル光学応答を計測した(図 B02-2a)。また、**MP-PEEM を用い、円偏光照射下でモード強結合に基づく集団プラズモンモードを実験的に観測**した(図 B02-2b)。

このように、当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、ナノ構造が示す近接場光の光学キラリティーや光電子スピン偏極を計測できる光学系を構築する(最終評価まで)。また、超螺旋光とナノ構造の相互作用で現れる光渦二色性などを計測する(A01 **田中**と連携)。

＜研究項目③　超螺旋光による物質のキラル秩序形成＞
ナノ構造近傍で発生する超螺旋光を物質に転写し、キラル秩序形成を実証するため、研究項目②で述べた近接場光計測技術に加え、物質の反応過程と反応物質を定量的に計測できる技術開発が不可欠である。数 10 フェムト秒の時間分解能を有する超高速過渡吸収分光法と電気化学計測法を組み合わせることで、**プラズモンのホットキャリア注入・緩和、プラズモン電極表面での酸化還元反応の各素反応の速度定数や活性化エネルギーを計測することに成功**した。また、不斉を有するアントラセン誘導体光二量化物をフェムトモルスケールで検出できる技術を確立した。さらに、Mie 共振器から成る誘電体メタ表面の近傍で発生する近接場超螺旋光による $NaClO_3$ キラル結晶化に挑戦し、鏡像体過剰率 18%を得た(図 B02-3)。このことから、**誘電体メタ表面近傍に発生する近接場超螺旋光で結晶のキラリティーを制御できる**ことを明らかにした。以上から、**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、金属・誘電体ナノ構造の近傍で発生する超螺旋光による光二量化や光分解に基づく分子およびその集合体の不斉反応に挑戦し、超螺旋光のキラリティーを分子スケールで転写する (最終評価まで)。また、キラル近接場光による分子の CPL 変調現象について研究を進める(A03 **中嶋**と連携)。

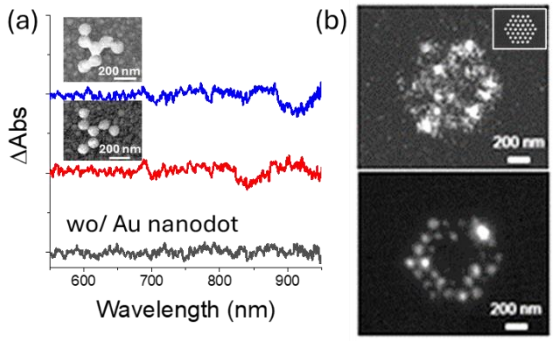


図 B02-2. (a) 反射光学系で計測した金ナノドット構造の左右円偏光差吸収(ΔAbs)スペクトル。 (b) 円偏光照射下で計測した MP-PEEM による金ナノドット配列体の光電子イメージング。 上段：非強結合下、下段：強結合下. 挿入図は SEM 像。

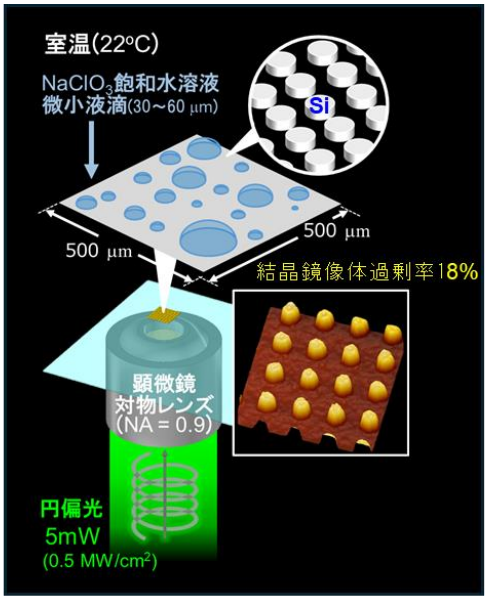


図 B02-3. 円偏光照射下での Si メタ表面でのキラル結晶化実験系の模式図。

≪連携している公募研究で得られた成果≫
・サーモプラズモニクスに基づくサブミクロンスケールの空間構造を有する局所熱分布の解析 **(公募 B・瀬戸浦、公募 C・田村)**

【研究項目 B03「光の螺旋性を操るプラズモニクスの開拓とナノキラル物質操作」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 B03 では、具体的に 3 つの研究課題を予定した。

＜研究項目① プラズモンナノ構造の研究＞

本課題では、光の運動量成分――すなわち運動量(波数)、スピン角運動量(円偏光)、軌道角運動量(螺旋波面)――を、金属ナノ構造表面の局在プラズモン場へと転写し、回折限界を超えるナノスケールで近接場超螺旋光を実現する技術の構築を目的とした。その実現に向けて、所望の振幅・位相・偏光分布を形成する**ナノ構造を逆問題的に設計**する手法を提唱する (中間評価まで)。

さらに、光の螺旋性が異なる複数の入射条件に対して最適構造を導出し、それらに共通する構造の規則性や設計指針の一般原理を抽出する (最終評価まで)。

＜研究項目② 超解像近接場プローブ顕微鏡への応用＞

研究項目①で得られたキラルナノ構造を近接場プローブの先端に応用し、物質のキラル応答をナノスケールで可視化できる**ナノイメージング技術の構築**を提案する(中間評価まで)。

また、超螺旋光照射によって物質に誘起される吸収スペクトル変化から、遷移選択則の変調の原理を明らかにする。六方晶窒化ホウ素をはじめ紫外域にバンドギャップを有する物質についても検討する(最終評価まで)。

＜研究項目③ナノ物質操作とデバイス化＞

ナノ形成電場を用いた物質操作および機能デバイスの実現を提唱する。例えば、ナノスケールで円偏光場を局在化するプラズモニック構造の最適化を行い、超螺旋光によるキラル結晶化における鏡像体過剰率の向上を目指す。核形成から秩序化過程に至る動的過程の可視化手法の検討を進め、キラル結晶化のメカニズムの解明を進める (中間評価まで)。

最終的には、得られた構造・知見を活用し、生体模倣デバイスや生体人工組織の創出、および、領域内連携を通じた応用展開を図る(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目① プラズモンナノ構造の研究＞

トポロジー最適化アルゴリズムを導入し、ナノギャップ領域において所望の振幅・位相・偏光分布を誘導する構造を逆問題的に自動設計する手法を確立した。従来の「順問題」的アプローチでは扱えなかった複雑な 3 次元構造の探索が可能となり、人間の直観のみでは導出困難な革新的なキラルナノ構造の創出に成功した。

具体的には、高屈折率の二酸化チタンを材料とし、円偏光入射時にその場のエネルギーをナノスケールの一点に集中させる構造を導出した。最適化構造は、中心部に直線状ギャップを持ち、そこから光軸方向に沿って上下に円偏光のスピンに応じて捻れたアームを持つ構造が形成された。円偏光の左右の向きに対するカップリング効率を調査した結果、極めて高い異方性を示した。

従来、円偏光と結合するメタサーフェス構造として広く知られる Gammadion 構造は 4 回回転対称性であるのに対し、トポロジー最適化で得られた構造は 2 回対称性を有している。円偏光の向きを識別するには、2 回対称性があれば十分であることが構造最適化から示されたことになり、対称性という抽象概念の合理的実装例として意義深い成果を得た(**Phys. Rev. Appl. 2025**)。

さらに、螺旋性の異なる様々な入射光に対して、最適構造の導出を進めており、構造の規則性から一般原理の抽出へと展開する。また、金属ナノ構造の最適化も実施しており、当初、予定してい

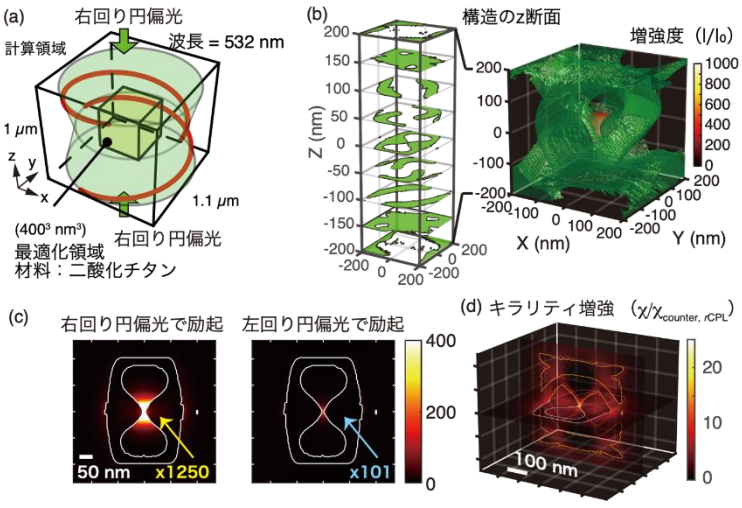


図 B03-1. キラル構造のトポロジー最適化。 (a)計算モデル。(b)最適化構造。(c)左右円偏光で励起した時のギャップ増強度。(d)キラリティー増強度。

た**中間評価までの目標をほぼ達成している。**
今後は、光渦や構造化光波など高次の構造を持つ光に対する最適設計の体系化を目指す。

＜研究項目② 超解像近接場プローブ顕微鏡への応用＞

トポロジー最適化で得られた構造の電磁場特性を解析し、円偏光のスピン角運動量がナノ構造内部に局所し増強されるという現象を確認した。さらに、この現象が光学キラリティーの局所的な増強と直接結びついていることを明らかにした。最適化構造で達成された光学キラリティーは、入射波である円偏光の 50 倍以上に達し、そのモード体積は波長の 1/50 以下である 10 nm 程度に局在化されている。このような微小空間で高い光学キラリティーの増強を確認した報告例はない。近接場プローブの設計に応用することで、ナノスケールでのキラリティー選択的な物質観測が可能となると考えられる。
現在、真空蒸着法や収束イオンビーム加工などを用いたプローブ先端形成プロセスを進めており、今後は、プローブから放射される近接場の光スペクトル特性・局在性評価、照明法の最適化へと展開予定である。さらに、PEEM を用いた偏光評価を実施し(B02 **押切**と連携)、理論的知見と装置設計との整合性を高める。

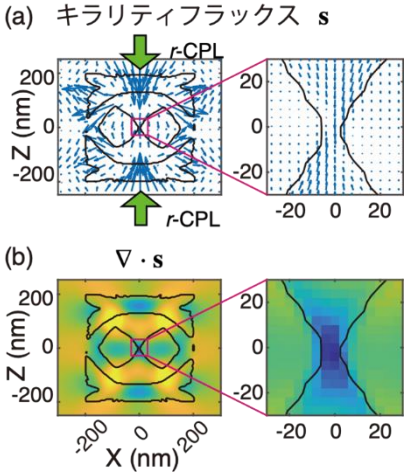


図 B03-2. キラリティーフラックス、(a) キラリティーフラックスのベクトルプロット。(b)フラックスの発散の分布。

＜研究項目③ナノ物質操作とデバイス化＞

レーザー二光子重合法を中心とした先端ナノ加工技術を応用し、自由曲面を含む 3 次元ナノ構造の作製技術を開発している。加工精度・構造再現性・加工自由度の点で有利なこの手法を用い、高分子材料をらせん状に構築するレーザー3D プリンター技術の試作と評価を進めている。
また、超螺旋光照射下におけるキラル結晶化の誘導およびその際の鏡像体過剰率(enantiomeric excess)の向上を目指している(C01 **尾松・杉山**と連携)。現段階では、ナノ構造の加工および評価系の確立を主軸としているが、得られた構造を用いた物質操作の準備も進行中であり、今後、キラル結晶化の核形成および秩序化メカニズムの可視化・解明を目指した展開を計画している。
これらの知見は、生体分子模倣デバイスや機能性材料、さらには生体人工組織構築への応用展開にもつながると期待され、応用研究フェーズへの橋渡しを進めていく(C03 **細川**・C04 **松﨑**と連携)。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・紫外光渦励起による生体分子ヘリカル二色性の検討 (**公募 A・松尾**)

【研究項目 C01「超螺旋光によるマルチ空間スケール物質のキラル秩序化」】
≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫
研究計画 C01 では、具体的に 3 つの研究課題を予定した。
＜研究項目①　超螺旋光によるキラル結晶化（尾松・杉山）＞
超螺旋光によるキラル結晶化を立案した。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（$NaClO_3$）、あるいは、エチレンジアミン硫酸塩（$C_2H_8N_2{\cdot}H_2SO_4$）飽和水溶液を用い、光渦の軌道角運動量と円偏光のスピン角運動量に対する鏡像過剰率を実験的に明らかにする。**軌道角運動量と鏡像過剰率の関係を定量化し、有意な鏡像過剰率を得る**（中間評価まで）。
さらに、キラル結晶化に至るプロセスをモデル化する（最終評価まで）。

＜研究項目②　キラル秩序化によるバイオテクノロジー(尾松)＞
光渦の軌道角運動量によって生体組織を模倣した螺旋足場を創成することを立案した。具体的には、生体適合性材料である PEGDA などを光重合させてファイバー化し、**細胞成長の足場構造として使用できる可能性を探る**(中間評価まで)。
さらに、螺旋足場がもたらす生体機能における意義の理解へと発展させる(最終評価まで)。

＜研究項目③　スキルミオンの光操作(尾松・横田)＞
光渦の位相特異点を転写してスキルミオン構造の光操作に挑戦する。具体的には、光感受性の高いアゾポリマーなどに対して、**超螺旋光を照射して渦状の欠陥構造であるスキルミオンを物質に転写する**。また、軌道運動量の次数 ℓ に対する高次スキルミオン構造の転写にも挑戦する(中間評価まで)。
スキルミオンの光操作技術をより局所化して空間スケールの小さな磁気スキルミオン・電気双極子スキルミオンの光操作へ可能性を探索する(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫
＜研究項目①　超螺旋光によるキラル結晶化＞
キラル結晶化のモデル物質である塩素酸ナトリウム（$NaClO_3$）、あるいは、エチレンジアミン硫酸塩（$C_2H_8N_2{\cdot}H_2SO_4$、EDS）飽和水溶液を用いて、超螺旋光によるキラル結晶化を行った。光源に円偏光ガウスビーム、円偏光光渦、さらに、近接場増強のための 3 量体ナノギャップを組み合わせた。$NaClO_3$ は準安定相であるアキラル結晶を経由して安定なキラル結晶に変化する。これに対して EDS は準安定相を経ずにキラル結晶へ変化する。いずれの場合も、光渦もしくは 3 量体ナノギャップによって誘導される**軌道角運動量がキラル結晶化に大きく寄与**することが分かった(図 C01-1)。また、**鏡像体過剰率が最大で** 55%を超え、当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した(Optica 2023)**。今後は、キラル結晶化に至るプロセスをモデル化する(A01 **田中**、**公募 C 新家**と連携)(最終評価まで)。

Laser	Material	Polarization	CEE (%)	Power
Gaussian	$NaClO_3$	CPL	Rare crystallization	-
Gaussian	$NaClO_3$	CPL with AuNPs	37	1.0 W
Gaussian	$NaClO_3$	CPL with TT	56	18 mW
Gaussian	EDS	CPL	33	0.4-1.0 W
Gaussian	EDS	CPL with AuNPs	40	0.7 W
Gaussian	EDS	CPL with TT	44	1.5 mW
LG	$NaClO_3$	CPL	Rare crystallization	-
LG	$NaClO_3$	CPL with AuNPs	57	1.8 W
LG	$NaClO_3$	CPL with TT	On it	-
LG	EDS	LP	33	0.7-1.4 W
LG	EDS	CPL with AuNPs	On it	-
LG	EDS	CPL with TT	44	3.5 mW

図 C01-1. キラル結晶化の実施例。CPL は円偏光、TT は 3 量体金ナノギャップを使用。

＜研究項目②　キラル秩序化によるバイオテクノロジー＞
光渦の軌道角運動量によって生体組織を模倣した螺旋足場を創成するため、**細川(C03)**、**松﨑(C04)**と連携し、生体適合性材料である PEGDA および GelMA(ローダミン色素を含有)を光重合させてファイバー化した。また、重合開始材には生体侵襲性の少ない LAP を用いた。405nm の高次光渦(ℓ=4)を集光照射することで螺旋ファイバーが形成できることを見出した。**GelMA の螺旋ファイバーには、表面装飾なしで細胞固着できることをすでに確認**した。このほか、バイオテクノロジーへのアプローチとして、シアノバクテリアを含む溶液のマイクロドットをレーザー前方転写法で二次元印刷した。光源に光渦を使用するこ

とで、位置合わせ精度や細胞生存率を飛躍的に向上させることができることを実証した(**Chem. Asian J. in press**)。
このように当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、螺旋足場がもたらす生体機能における意義の理解へと発展させる(最終評価まで)。

＜研究項目③　単一スキルミオンの光操作＞

光スキルミオンはポアンカレ球上のすべての偏光状態を二次元平面に投影した光で面内に偏光(ストークスベクトル)の渦構造を示す新しい超螺旋光である。光感受性を示すアゾポリマーに光スキルミオンを照射して、光スキルミオンの偏光構造の転写を行った。
アゾポリマー表面に記録されたマイクロメートルスケールのレリーフは、**光スキルミオンの偏光構造を反映した Lemon あるいは Star 型で凸凹を示すとともに偏光の垂直方向に沿ったサブ波長スケールの周期的な縞模様**を示すことが分かった。この**縞模様は光スキルミオンの偏光ドメインを反映しており**、光操作によるスキルミオン生成の可能性を示唆する(**図　C01-2**)(**APL Photon. 2024, ACS Photon. 2024**)。
この他、光渦の混成モードよる表面レリーフ形成を研究した(B02 **田口**と連携)。光渦の混成モードが示す局所的な渦場をレリーフ中の凸構造として可視化することができた(**図　C01-3**)。現在、論文投稿中である。
このように当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した。**
今後は、光スキルミオンを駆使して、スキルミオンの光操作技術をより局所化する(A01　**余越**と連携)(最終評価まで)。また、光スキルミオンの応用展開として第二高調波顕微鏡の開発を企画している。光スキルミオンの偏光分布を活用することで、物質の配向やd定数などを即時にかつ超解像に計測できる革新的な第二高調波顕微鏡が開発できる可能性がある。

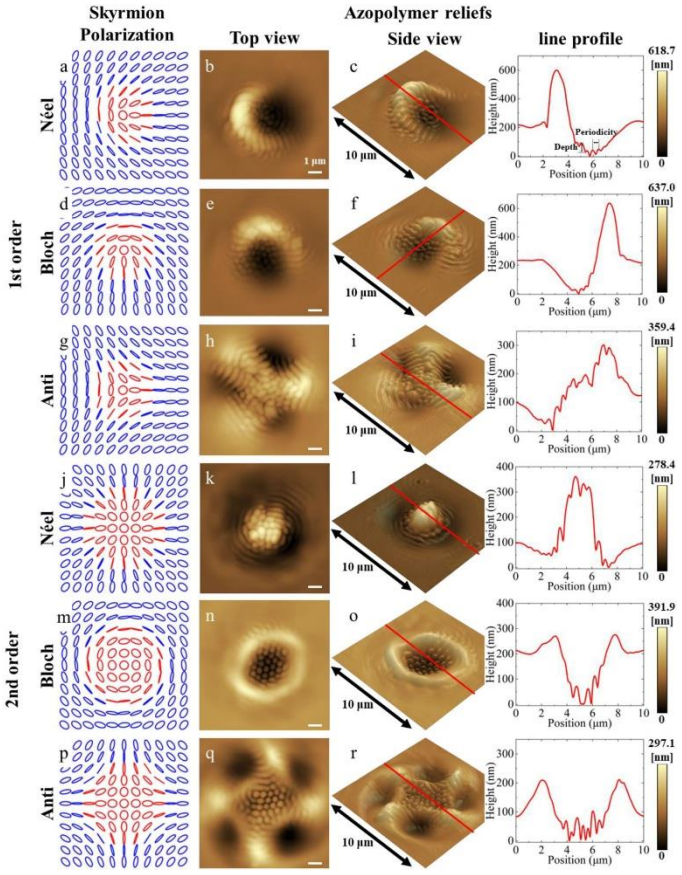


図 C01-2. 光スキルミオンによる物質操作の一例。光スキルミオンの偏光分布を反映したレリーフ構造をアゾポリマーに記録した。

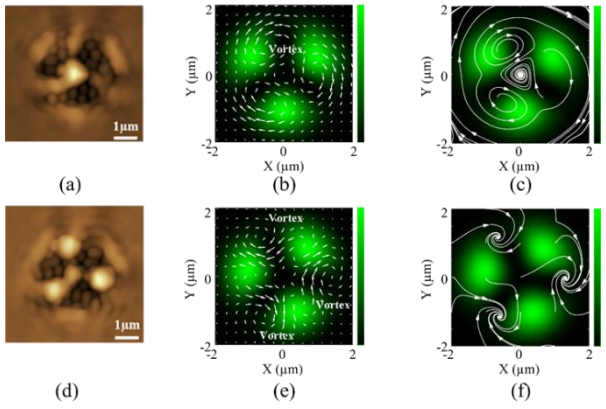


図 C01-3. 光渦の混成モードの局所的な渦場をアゾポリマーのレリーフとして可視化。レリーフの突起部分が渦場に対応している。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・低温・強磁場下の量子ホール電子系の光励起において光渦の軌道角運動量依存性を発見(**公募 A・音**)
・空間構造を持つ光の量子力学的な情報を半導体中の電子の空間構造へ転写(**公募 B(2025 内定)・森田**)
・光渦による表面レリーフ形成ダイナミクスの実時間計測(**公募 B・馬越**)
・光渦レーザー前方転写ダイナミクスの数値シミュレーション(**公募 C・田村**)

【研究項目 C02「超螺旋光による量子渦の生成・励起】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 C02 では、具体的に 2 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　光ピンセットと超螺旋光を組み合わせた量子渦の励起(蓑輪・坪田・西岡)＞

超螺旋光を用いた超流動ヘリウム中での量子渦の励起を立案した。具体的には、超流動ヘリウム中の量子渦を微粒子で修飾する技術、微粒子を捕捉・操作する光ピンセット技術を組み合わせることで、微粒子を媒介として光で量子渦を操作する。まずは、**微粒子を媒介として量子渦を光で捕捉することを狙う(中間評価まで)**。

さらに、超螺旋光による量子渦の操作・励起状態生成を行う(最終評価まで)。

＜研究項目②　プラズモニクスなどを用いた個別的量子渦操作(蓑輪)＞

研究項目①を補完する量子渦を個別に励起・操作する技術の開発に取り組む。具体的には、光によるマクロな制御ではなく、プラズモンによる局所加熱などを利用したミクロな量子渦の個別操作を狙う。プラズモニックな**発熱パターンを設計し、超流動中のミクロな流れを制御する技術を検討する(中間評価まで)**。

さらに、研究項目①で検討する光ピンセット法と組み合わせて、単一の量子渦を選択的に操作する(最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　超螺旋光による量子渦の励起＞

量子渦を修飾する微粒子を導入する技術として、極低温環境である液体ヘリウム中に所望の微粒子を大量に導入できるレーザーアブレーション法を採用した。また、量子渦への修飾効率の観点からシリコンを用いた。レーザーアブレーション光源の波長をシリコンの光吸収の強い紫外 355 nm にすることで微粒子の生成効率を向上させた。光ピンセット光源の波長を液体ヘリウムの光吸収が非常に少ない近赤外 1.5 μm とすることで、意図しない熱流の発生を抑制した。

これらのレーザー光を超流動ヘリウム環境中に導入するとともに、超流動ヘリウム内に設置された小型実験セルを 3 次元的に移動できる技術を確立した結果、**世界で初めて超流動ヘリウム中の量子渦を光捕捉すること成功した**。このように当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した**。

今後は、量子渦の光捕捉を高効率化するために実験条件や材料のさらなる探索を進める。また、量子渦に光の角運動量を転写するため、超流動ヘリウム中の単一微粒子に光の角運動量を転写する(**公募 B・坪井、公募 C 柚山**と連携) (最終評価まで)。

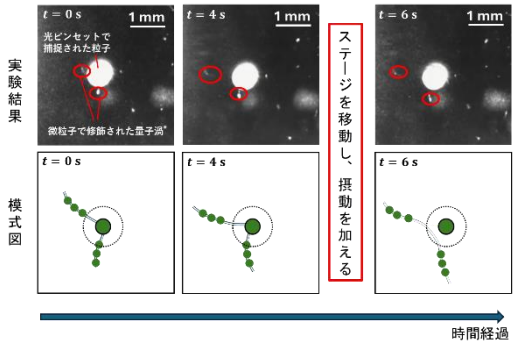


図 C02-1. 量子渦の光捕捉実験の結果。

＜研究項目②　プラズモニクスなどを用いた個別的量子渦操作＞

プラズモンによる局所加熱を量子流体の制御に用いる可能性を理論的に検討したが、熱の効果と流体の効果、さらに超流動の特異性が複雑に関与することがわかった。

レーザーアブレーションによって導入され量子渦を修飾するシリコン微粒子は、その一部が帯電している。そこで、熱の代わりに**外部電場を用いることが有効であることを着想**した。帯電したシリコン微粒子で修飾された量子渦に外部電場を印加することで、量子渦を自由に操作できることを発見した。特に、交流電圧を印加すれば、単一の量子渦を揺動できる。その結果、**世界で初めて量子渦のケルビン波を励振できることを実証した(Nat. Phys. 2025)。ケルビン波は量子渦がらせん状に振動する固有モード**であり、量子流体中の渦のダイナミクスを理解するための重要な素過程である。

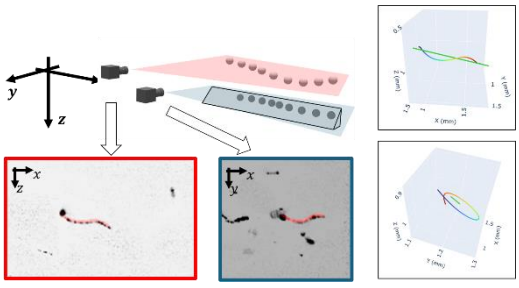


図 C02-2. ケルビン波励起の結果。

以上のように、**当初計画とは異なる手法ではあるものの単一の量子渦操作を実現できた**。さらに、このケルビン波の研究や領域内でのディスカッションを通じて、超螺旋光の一つである光渦と量子渦の間の類

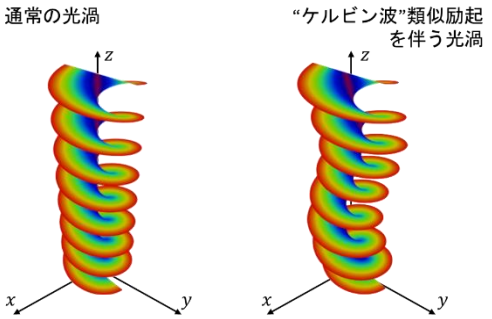


図 C02-3. 光渦と量子渦の対応関係を示す模式図。

似性に気がつくことができた(A01 **余越**と連携)。光渦は波面の螺旋性を有するのに対して、量子流体の回転的な流れである量子渦は螺旋性を持たない。両者は、一見、異なる物理現象に見えるが、光の伝搬とともに動く座標系でみると同一の空間分布を示す。特に、3 **次非線形性をもつカー媒質中での光渦と量子流体中での量子渦を支配する方程式が完全に同じ形になる**(論文投稿中)。この対応関係に基づくと、量子渦で見られる現象がすべて光渦で再現できることが示唆される。研究項目①で実証したケルビン波の励起に対応する現象が光渦でも起こり得ることを明らかにした。

以上のように、当初予定していた**中間評価までの目標はほぼ達成した**。

さらに、領域内ディスカッションとセレンディピティによって、量子渦と光渦の厳密な対応関係が成立することを示すなど**当初計画していなかった成果も得ることができた**。

今後は、量子渦におけるケルビン波励起のらせん選択的励起のモデル化を行う。さらに光渦と量子渦の対応関係に基づき、ケルビン波の励起だけでなく、非線形光学と量子流体力学をつなぐ学理の開拓を行う(最終評価まで)。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

・超流動ヘリウム中の微粒子への光の角運動量転写実験(**公募 B・坪井**)。

【研究項目 C03「超螺旋光による生体組織への刺激と自己組織化反応」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 C03 では、具体的に 3 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　超螺旋光による細胞内分子操作（細川）＞

超螺旋光の角運動量により細胞内分子がキラル秩序化する過程を明らかにする。神経細胞シナプス伝達に関与する分子群の操作に取組み、超螺旋光の力学摂動による細胞内分子動態の過渡応答を顕微蛍光計測により可視化する。超螺旋光の照射とともに細胞内分子動態が過渡的に変化し、それがトリガーとなって進展する細胞内分子秩序化ダイナミクスの分子論的理解を目指す（中間評価まで）。

さらに、超螺旋光による細胞内分子秩序化と神経電気活動変化との相関性を見出し、超螺旋光による細胞機能操作を実証する（最終評価まで）。

＜研究項目②　超螺旋光による生体組織への刺激（細川）＞

超螺旋光が誘起するアブレーションにより神経細胞表面に一過性の微小穿孔を誘発し、超螺旋光により誘発された神経活動の時空間ダイナミクスを明らかにする。超螺旋光が誘起する様々な外力に起因した細胞膜形態変化を計測し、細胞内へのイオン流入過程を考察する。その結果、超螺旋光による刺激メカニズムを解明する（中間評価まで）。

さらに、細胞から生体組織へと空間スケールを拡張し、脳スライス組織に対する超螺旋光刺激の有効性を検証する（最終評価まで）。

＜研究項目③　超螺旋光による生体組織化過程の時空間操作（細川・土井）＞

超螺旋光による生体分子（nm）・細胞（μm）・生体組織（サブ mm）に至るキラル秩序化過程を可視化し、超螺旋光が誘起する外力（光圧、アブレーション、熱泳動）と分子・細胞・生体組織との関係性を光学、流体力学、材料化学の観点から明らかにする。超螺旋光による生体分子・細胞の秩序化・組織化を可視化し、超螺旋光が誘起する外力に起因した生体組織（サブ mm）の秩序構造を実現する（中間評価まで）。

さらに、生体分子から生体組織に至るマルチ空間スケールの操作を実証し、細胞集合体から成る生体組織シミュレーターの構築へ展開する（最終評価まで）。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　超螺旋光による細胞内分子操作＞

超螺旋光の力学摂動による細胞内分子動態の過渡応答計測を目的とした顕微分光システムを構築し、レーザー集光領域における神経細胞内分子動態変化を、顕微ラマン散乱スペクトルのピーク強度により明らかにできることを示した。超螺旋光により捕捉した微粒子を介して局所力学摂動を神経細胞表面に局在する分子群に印加し、単一神経細胞の活動が誘発される可能性を見出した(**図** C03-1)。超螺旋光による細胞表面分子操作を理解するため、人工脂質膜上に付着させたナノ粒子を超螺旋光で操作するモデル実験系を構築した。超螺旋光の光圧が脂質膜上のナノ粒子を公転運動させることを観測した(現在、論文執筆中)。

現在、液中の微粒子が光渦により受ける散乱力と勾配力に加えて脂質膜表面と相互作用しながら軌道運動する力学的メカニズムについて考察を進めている。

電解液中のナノ粒子表面はレーザー照射により分極して、周囲の濃度場や温度場を変調する。そのため、局所的なプロトンや電解質濃度を定量的に評価するためのプローブとなる微小ガラス電極を作製した。また、集光領域内の粒子近傍や微視的秩序構造の形成に伴う局所濃度場の変化を同時に測定するための光学系について検討した。当初予定していた**中間評価までの目標をおおよそ達成**した。

今後、超螺旋光による細胞内分子動態変化のモデル化を行うとともに、超螺旋光による細胞機能操作を実証する（C01 **尾松、公募 C・田村、公募 B・馬越**と連携）（最終評価まで）。

＜研究項目②　超螺旋光による生体組織への刺激＞

超螺旋光による生体組織への刺激を目的として、フェムト秒レーザーを微小電極アレイ上の単一神経細胞に照射した。その結果、レーザー照射した細胞を起点として神経活動が隣接する神経細胞に伝搬し、神経回路網全体において神経活動が誘発されることが明らかになった。また、培養神経細胞にナノ秒光渦パルスを集光照射し、単一細胞精度で刺激できることを蛍光カルシウムイメージングにより見出した

(C01 **尾松・公募 C 柚山**と連携)。さらに、フェムト秒光渦レーザーを単一神経細胞に 8 ms 集光照射すると、高頻度の神経活動が得られることを確認した(フェムト秒光渦による単一神経細胞刺激に成功)。蛍光性膜プローブで神経細胞膜を可視化したところ、光渦照射によって生成した細胞膜上の微小穿孔は 5 秒程度で修復され、ガウシアンビーム照射時に比べて穿孔の修復時間が短い。光渦による神経細胞刺激は、従来のガウシアンビームと比較してより低侵襲な刺激手法として有効であると結論できる。このように当初予定していた**中間評価までの目標は達成**した。
今後、超螺旋光による細胞膜のアブレーション機構を解明し、脳スライスをはじめとした生体組織に対する超螺旋光刺激の有効性を検証する（C01 **尾松**、C04 **松﨑**と連携）（最終評価まで)。

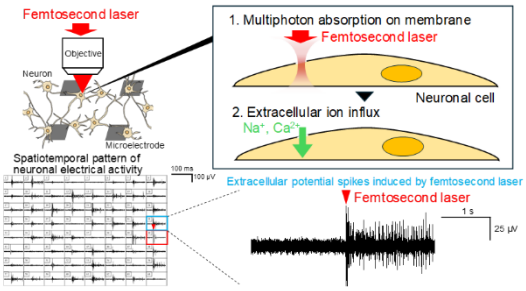


図 C03-1.集光フェムト秒レーザー刺激による神経回路網の活動変化。フェムト秒レーザーを微小電極アレイ上の単一神経細胞に照射した結果、照射した細胞を起点として神経活動が隣接する神経細胞に伝搬し、神経回路網全体において神経活動が誘発されることを示した。従来手法である電気刺激により誘発された神経活動と比較したところ、フェムト秒レーザーにより誘発された神経活動がより高頻度であり、長時間にわたり活動が持続することを明らかにした。

＜研究項目③　超螺旋光による生体組織化過程の時空間操作＞
光渦を用いた二光子重合反応により三次元構造体を作製し、重合過程における軌道角運動量の作用について検証した。メタクリル酸メチルを主成分とする光硬化性樹脂に光渦を集光すると、重合してできた構造体の内壁に微細な螺旋状の周期構造が形成された。螺旋の方向は光渦の軌道角運動量が作用する方向と一致する(**図** C03-2)。本成果は、光渦を用いた二光子重合反応においても軌道角運動量が構造に寄与することを明示しており、光渦による新たな微細加工手法の可能性を拓いた(**J. Phys. Chem. Lett. 2024**)。
さらに、超螺旋光による微細な秩序構造の形成メカニズムを解明するため、光渦照射時にナノ粒子集合体が立体的な螺旋構造を形成する過程を可視化した。電解質濃度と温度を調整することにより、光渦照射を中断してもナノ粒子集合体が螺旋構造を維持することが明らかになった。さらに、電解液中で微視的粒子が立体的な螺旋構造を形成する過程について、光渦による散乱力、勾配力、粒子間相互作用および流体抵抗の関係を定量的に評価するための理論解析を進めている。
今後、生体組織の構築に本手法を展開するとともに、超螺旋光による生体組織化過程の機構を解明する（C01 **尾松**、C04 **松﨑**と連携）（最終評価まで)。

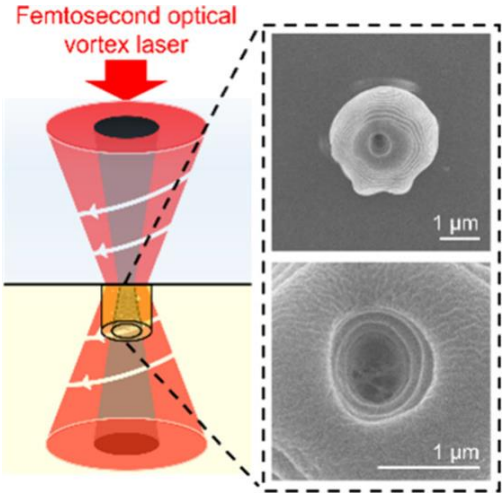


図 C03-2. 光硬化性樹脂へのフェムト秒光渦レーザー照射の模式図 (左)、ℓ =−1 のフェムト秒光渦レーザーで作製した構造体の SEM 像の上面図、および中心部の拡大図 (右)。フェムト秒光渦レーザーを紫外線硬化性樹脂に集光すると、二光子重合反応により三次元構造体が形成された。構造体の中心部および側面には回折限界より小さいピッチの周期構造が観察され、中心部の周期構造は螺旋状となることを見出した。螺旋の巻く方向は光渦の軌道角運動量が作用する方向と一致した。

≪連携している公募研究で得られた成果≫
光圧による人工脂質膜上分子集合過程の実時間計測に関する検討(**公募 B・馬越**)

【研究項目 C04「超螺旋光による生体を模倣したらせん構造を有する 3 次元組織の創製」】

≪領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとしたか?≫

研究計画 C04 では、具体的に 2 つの研究課題を予定した。

＜研究項目①　超螺旋光による細胞-足場材料複合体の螺旋ファイバー化(松﨑・仲本・本間)＞

ポリエチレングリコール(Polyethylene glycol, PEG)誘導体のような生体適合性材料を光渦によって光重合し、らせんファイバー化することを立案した。具体的には、光渦の波長や集光度に加え、軌道角運動量の大きさを変化させることで、らせんファイバーの直径やらせんピッチを制御することを目指す。さらに、光渦の角運動量がラジカル生成や架橋反応といった化学反応に与える影響をライトシート顕微鏡などで計測し、らせんファイバー成長のダイナミクスを明らかにする。また、PEG 誘導体より細胞接着性の高い材料を足場材料として用いたらせんファイバー化も検討する(中間評価まで)。

さらに、ℓ≥4 の光渦を駆使し、自然界には存在しない高次の多重らせん(例：4 重らせん)ファイバーを構築し、生体にも存在しない高機能らせん構造(高い弾性率、伸縮性など)の創製を試みる(最終評価まで)。

＜研究項目②　超螺旋光による細胞-足場材料複合体のラージスケールらせんファイバー化(松﨑)＞

らせん筋線維などを想定し、より口径の大きならせん組織を構築するため、3Dバイオプリントされたファイバー構造 (口径~100 μm) に光渦を導波させることで、その軌道角運動量を転写してらせんファイバー化する。

光渦の波長に加えて、スピン角運動量・軌道角運動量の大きさを変調して、ファイバーのらせんピッチを制御する。さらに、らせんファイバーの弾性率・破断強度などを計測するとともに、らせんファイバー構造が細胞の分化誘導に与える影響を明らかにする (中間評価まで)。

また、作製されたらせんファイバー構造の知見を筋線維のらせん構造に関する知見へと発展させるため、骨格筋芽細胞をターゲット細胞として取り上げ、血管平滑筋層などらせん筋組織への応用を検討する (最終評価まで)。

≪中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか?≫

＜研究項目①　超螺旋光による細胞-足場材料複合体の螺旋ファイバー化＞

ガラスセルに封入された PEG ジアクリレート(PEGDA)、光開始剤 lithium phenyl (2,4,6-trimethylbenzoyl) phosphinate(LAP)、rhodamine B を混合した水溶液中に光渦(波長 405 nm)を集光して、光架橋によりゲルファイバーを作製した。セルの両ガラス面に固定されたゲルファイバーの立体構造を rhodamine B の蛍光観察より計測した結果、ゲルファイバーはらせん構造を示し、らせんの向きは光渦のℓの符号によって反転することが分かった。この研究成果は、光を用いて生体高適合性高分子で構成される「らせんゲルファイバー」を作製した初めての報告である(**Chem. Asian J. in press**)。

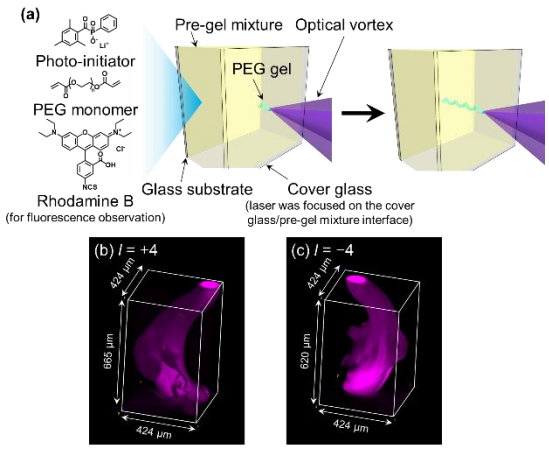


図 C04-1. (a) PEGDA、LAP、rhodamine B の混合水溶液に光渦を照射して、らせんゲルファイバーを作製する実験図。(b, c) Rhodamine B 蛍光観測によるゲルファイバーの立体構造。ℓの正負に対応して、らせんの巻き方向が反転する。

また、細胞接着性の生体高分子であるゼラチンの側鎖に光架橋性メタクリレート基を導入した gelatin methacrylate (GelMA)を用いたゲルファイバーも作製した。PEGDA ゲルファイバーと同様、GelMA ゲルファイバーはらせん構造を示し、らせんの向きは光渦のℓの符号によって制御可能であった。GelMA ゲルファイバーのらせんピッチは数 100 μm であり、接着細胞と同程度の空間スケールである。これまでにペプチドなどを用いた分子レベルのらせん構造を有する足場材料の研究は行われてきたが、細胞と同程度の空間スケールのらせん構造を持つ足場材料の研究は極めて少ない。GelMA ゲルファイバーを細胞(ヒト皮膚線維芽細胞; NHDF)と共存させ、細胞適合性を確認した。ガラス基板から垂直に起立した GelMA ゲルファイバーに接着した NHDF がファイバーを登っていく様子が確認されている。ゲルファイバーを登った細胞は、一部その繊維に沿った伸展形状を保っていることが分かった。このように当初予定していた**中間評価までの目標は達成**した。

今後は、ゲル化過程にどのように光渦の軌道角運動量が作用するのか、探索するとともに、高次の多重ら

せん(4 重らせんなど)ファイバーを構築して、生体にも存在しない高機能らせん構造(高い弾性率、伸縮性など)の創製を試みる。

＜研究項目②　超螺旋光による細胞-足場材料複合体のラージスケールらせんファイバー化＞

サポートバスを利用したバイオプリンティングによる細胞-足場材料複合体のファイバー形成法が確立されている。
本研究では、サポートバスよりも簡便に口径の大きな細胞-足場材料複合体ファイバーを作製できる方法を考案した。
具体的には、ポリアクリル酸水溶液と細胞-コラーゲン混合溶液が互いに相溶しない液液相分離することを利用した。相分離した液液界面をピンセットで引き上げると、コラーゲンが配向してできた直径 100 μm 程度のファイバーが形成できる。この方法を用いると、長さがセンチメートルスケールのファイバーを簡便に作製できる、また、ファイバーに細胞も内包できる。さらに、ファイバーを構成するコラーゲンにラミニンを混合することで内包した筋細胞の分化が促進されることも見いだされた。内包した細胞はファイバー軸方向に伸展する。このように当初予定していた**中間評価までの目標は達成**した。

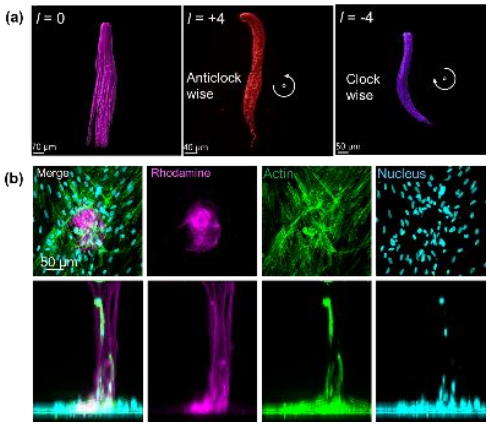


図 C04-2. (a) GelMA にガウス光(ℓ=0)または光渦(ℓ=±4)を照射して作製した GelMA ゲルファイバーの共焦点顕微鏡像。ℓ の正負によって巻き方向が逆転する。(b) GelMA ゲルファイバーと NHDF を共培養した後の蛍光画像。上段は上面図、下段は側面図である。Rhodamine が GelMA ゲルファイバーの立体構造、Actin が NHDF の細胞骨格、Nucleus が NHDF の核を示す。NHDF が GelMA ゲルファイバーを登っている様子が確認された。

今後は、細胞-足場材料複合ファイバーに対して光渦照射することで軌道角運動量によりファイバーをらせん化し、らせん構造が分化挙動に与える影響について解明する。また、らせん筋組織への応用を検討する。

≪連携している公募研究で得られた成果≫

なし。

7　研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和７年５月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、以下の留意点を踏まえ、具体的かつ簡潔に記述すること（５頁以内）。

・雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、計画研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、計画研究分担者には一重下線、公募研究代表者には波線、corresponding author には左に＊印を付すこと。

・領域設定期間より前の研究成果など、本研究に直接関連のない成果発表については、記入しないこと。

国際会議招待講演数 163 件(基調講演 18 件)　受賞 66 件　特許 26 件　プレスリリース 56 件
総論文数 160 編(国際共著 55 編)

計画研究 **A**

1. S. Hashiyada, *Y. Y. Tanaka, “Conservation law for angular momentum based on optical field derivatives: Analysis of optical spin-orbit conversion,” ***Phys. Rev. Res.*** (in press). doi.org/10.1103/d8sm-qjhf
2. K. Terashima, R. Ito, T. Kakue, N. Yokoshi, *K. Morita, “Optical initialization and manipulation of higher-order electron states with spin and orbital angular momentum in a semiconductor quantum disk,” ***Opt. Express*** **33**, 4700-4713 (2025). doi.org/10.1364/OE.550223
3. *Y. Maeda, Y. Iguchi, *P. Zhao, A. Suwa, Y. Taki, K. Kawada, M. Yamada, *M. Ehara, M. Kako, “Switching Photoluminescence Wavelength of Arylated Single-Walled Carbon Nanotubes by Utilizing Steric Hindrance in Reductive Arylation,” ***Chem. Eur. J.*** **31**, e202404529 (2025). doi:10.1002/chem.202404529
4. *S. Hu, J. Wang, P. Zhao, J. Pascual, J. Wang, F. Rombach, A. Dasgupta, W. Liu, M. A. Truong, H. Zhu, M. Kober-Czerny, J. N. Drysdale, J. A. Smith, Z. Yuan, G. J. W. Aalbers, N. R. M. Schipper, J. Yao, K. Nakano, S.-H. Turren-Cruz, A. Dallmann, M. G. Christoforo, J. M. Ball, D. P. McMeekin, K.-A. Zaininger, Z. Liu, N. K. Noel, K. Tajima, W. Chen, M. Ehara, R. A. J. Janssen, *A. Wakamiya, H. J. Snaith, “Steering Perovskite Precursor Solution for Multijunction Photovoltaics,” ***Nature*** **639**, 93-101 (2025). doi:10.1038/s41586-024-08546-y
5. *K. Mutoh, T. Yahagi, S. Takano, S. Kawakita, T. Iwasa, T. Taketsugu, *T. Tsukuda, *T. Nakashima, “A Nearly Perfect Icosahedral Ir@Au_{12} Superatom with Superior Photoluminescence Obtained by Ligand Engineering,” ***Chem. Sci.*** **16**, (online) (2025). doi: 10.1039/D5SC00561B
6. Y. Tsuji, C. Goto, S. Katao, W. Ishii, C. J. Martin, T. Nakashima, G. Clavier, *T. Kawai, *M. Louis, “Room-temperature Inversion of Phosphorescence and Fluorescence Emission Triggered in Twisted Dimeric Structures Displaying Excitonic Coupling,” ***Chem. Eur. J.*** **31**, e202500762 (2025). doi: 10.1002/chem.202500762
7. R. Sethy, A. Brosseau, T. Nakashima, *T. Kawai, *R. Métivier, “Fluorescence Microscopy Imaging of Light-Harvesting in Self-Assembled Nanofibers of Naphthalenediimides toward Perylenediimide Guests,” ***ACS Appl. Mater. Interfaces*** **17**, 10976-10985 (2025). doi: 10.1021/acsami.4c19675
8. T. Matsumoto, S. Sato, S. Akei, Y. Nakano, S. Iba, J. Ishihara, K. Miyamoto, N. Yokoshi, T. Omatsu, *K. Morita, “Coherent transfer of the higher-order polarization state of photons to the spin structure state of electrons in a semiconductor,” ***Optica Quanta*** **2**, 245-253 (2024). doi.org/10.1364/OPTICAQ.527615
9. H. Yamane, M. Hoshina, N. Yokoshi, *H. Ishihara, “Mapping electric field components of superchiral field with photo-induced force,” ***J. Chem. Phys.*** **160**, 44115 (2024). 10.1063/5.0179189
10. A. Kato, *N. Yokoshi, “Description of molecular chirality and its analysis with high harmonic generation,” ***Phys. Rev. B*** **110**, 085308 (2024). doi: 10.1103/PhysRevB.110.085308
11. *H. Miura, K. Imoto, H. Nishio, *A. Junkaew, Y. Tsunesada, Y. Fukuta, *M. Ehara, *T. Shishido, “Optimization of Metal-Support Cooperation for Boosting the Performance of Supported Gold Catalysts for Borylation of C–O and C–N Bonds,” ***J. Am. Chem. Soc.*** **146**, 27528-27541 (2024). doi:10.1021/jacs.4c08340
12. X.-L. Pei, P. Zhao, H. Ube, Z. Lei, *M. Ehara, *M. Shionoya, “Single-gold Etching at the Hypercarbon Atom of C-centred Hexagold(I) Clusters Protected by Chiral N-heterocyclic Carbenes,” ***Nat. Commun.*** **15**, 5024 (2024). doi:10.1038/s41467-024-49295-w
13. Z. Lei, P. Zhao, Z.-J. Guan, Z.-A. Nan, *M. Ehara, *Q.-M. Wang, “‘Passivated Precursor’ Approach to All-Alkynyl-Protected Gold Nanoclusters and Total Structure Determination of Au_{130},” ***Chem. Eur. J.*** **30**, e202401094 (2024). doi:10.1002/chem.202401094
14. *W.-W. Wang, T. Tanaka, *M. Ehara, “Theoretical Study on the Mechanism of Alcohol Photooxidation on Nb_2O_5 surface,” ***J. Comput. Chem.*** **45**, 2128-2135 (2024). doi:10.1002/jcc.27435
15. *S. Muratsugu, K. Sawaguchi, T. Shiraogawa, S. Chiba, Y. Sakata, S. Shirai, H. Baba, *M. Ehara, *S. Akine, M. Tada, “Induced Chirality at Surface: Fixation of a dynamic M/P Invertible Helical Co_3 complex on SiO_2,” ***Chem. Commun.*** **60**, 2094-2097 (2024). doi:10.1039/D3CC05534E
16. K. Mutoh, S. Kawakita, T. Yahagi, *T. Nakashima, “"Sergeants-Soldiers" Principle in the Synthesis of Intrinsically Chiral Au_{13} Clusters,” ***Nanoscale*** **16**, 21776-21782 (2024). doi: 10.1039/D4NR03810J
17. *K. Mutoh, Y. Kobayashi, *T. Nakashima, “A Hexaarylbiimidazole-Terarylene Hybrid: Visible-to-NIR-II Absorption via Sequential Photochromic Reactions,” ***Angew. Chem. Int. Ed.*** **63**, e202410115 (2024). DOI: 10.1002/anie.202410115
18. W. Ishii, R. Tanaka, *T. Nakashima, “Assembly of Anionic Silver Nanoclusters with Controlled Packing Structures through Site-specific Ionic Bridges,” ***Nanoscale*** **16**, 13457-13463 (2024). doi: 10.1039/D4NR01691B
19. H. Shiraki, *N. Yokoshi, H. Ishihara, “Directional Characteristics of Superfluorescence Controlled by Spatial Configurations,” ***J. Phys. Soc. Jpn.*** **92**, 24402 (2023). 10.7566/JPSJ.92.024402
20. S. Hashiyada, *Y. Tanaka, “Rapid modulation of left- and right-handed optical vortices for precise measurements of helical dichroism,” ***Rev. Sci. Instrum.*** **95**, 53101 (2024). doi.org/10.1063/5.0203715

21. *H. Yamane, N. Yokoshi, H. Ishihara, H. Oka, “Enantioselective optical trapping of single chiral molecules in the superchiral field vicinity of metal nanostructures,” ***Opt. Express*** **31**, 13708 – 13723 (2023).10.1364/OE.482207
22. H. Yamane, N. Yokoshi, H. Oka, Y. Sugawara, *H. Ishihara, “Near-field circular dichroism of single molecules,” ***Opt. Express*** **31**, 3415 – 3426 (2023). 10.1364/OE.476011
23. T. Yamamoto, H. Yamane, N. Yokoshi, H. Oka, *H. Ishihara, *Y. Sugawara, “Optical Imaging of a Single Molecule with Subnanometer Resolution by Photoinduced Force Microscopy,” ***ACS Nano*** **18**, 1724–1732 (2023). 10.1021/acsnano.3c10924
24. T. Kimura, *Y. Tanaka, T. Shimura, “Radially Polarized Second-Harmonic Generation from a Single-Element Nanoantenna via Dark Plasmon Coupling of Nonlinear Polarization,” ***ACS Photonics*** **9**, 3649-3655 (2022). doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01136
25. S. A. Ikbal, P. Zhao, M. Ehara, *S. Akine, “Acceleration and Deceleration of Chirality Inversion Speeds in a Dynamic Helical Metallocryptand by Alkali Metal Ion Binding,” ***Sci. Adv.*** **9**, edaj5536 (2023). doi:10.1126/sciadv.adj5536
26. *Y. Maeda, R. Morook, P. Zhao, M. Yamada, *M. Ehara, “Control of Functionalized Single-Walled Carbon Nanotube Photoluminescence via Competition between Thermal Rearrangement and Elimination,” ***Chem. Commun.*** **59**, 11648-11651 (2023). doi:10.1039/d3cc02965
27. *Y. Maeda, R. Morooka, *P. Zhao, D. Uchida, Y. Konno, M. Yamada, *M. Ehara, “Controlling Near-Infrared Photoluminescence Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes by Substituent Effect in the Stepwise Chemical Functionalization,” ***J. Phys. Chem. C*** **127**, 2360–2370 (2023). doi:10.1021/acs.jpcc.2c06153
28. Z. Lei, P. Zhao, X.-L. Pei, H. Ube, *M. Ehara, M. Shionoya, “Photoluminescence Control by Atomically Precise Surface Metallization of C-centered Hexagold(I) Clusters Using N-heterocyclic Carbenes,” ***Chem. Sci.*** **14**, 6207-6215 (2023). doi:10.1039/D3SC01976D
29. Y. Konno, R. Morooka, T. Morishita, P. Zhao, N. Miyasaka, K. Ono, A. Noda, D. Uchida, R. Iwasaki, M. Yamada, *M. Ehara, *Y. Maeda, “Photoluminescence Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes Influenced by the Tether Length of Reagents with Two Reactive Sites,” ***Chem. Eur. J.*** **29**, e202300766 (2023). doi:10.1002/chem.202300766
30. *Y. Maeda, Y. Suzuki, Y. Konno, *P. Zhao, N. Kikuchi, M. Yamada, M. Mitsuishi, A. T. N. Dao, H. Kasai, *M. Ehara, “Selective Emergence of Photoluminescence at Telecommunication Wavelengths from Cyclic Perfluoroalkylated Carbon Nanotubes,” ***Commun. Chem.*** **6**, 159-1-10 (2023). doi:10.1038/s42004-023-00950-1
31. P. Zhao, *M. Ehara, “Theoretical Insights into the Support Effect on the NO Activation over Platinum-Group Metal Catalysts,” ***J. Chem. Phys.*** **158**, 134701 (2023). doi:10.1063/5.0145586
32. Y. Tsuji, N. Kanno, C. Goto, S. Katao, Y. Okajima, P. Reine, P. Imbrasas, S. Reineke, K. Shizu, T. Nakashima, H. Kaji, *T. Kawai, *M. Louis, “A binaphthalimide motif as a chiral scaffold for thermally activated delayed fluorescence with circularly polarized luminescence activity,” ***J. Mater. Chem. C*** **11**, 5968-5978 (2023). doi:10.1039/D3TC00316G
33. W. Ishii, Y. Okayasu, Y. Kobayashi, R. Tanaka, S. Katao, Y. Nishikawa, T. Kawai, *T. Nakashima, “Excited State Engineering in Ag_{29} Nanocluster through Peripheral Modification with Silver(I) Complexes for Bright Near-Infrared Photoluminescence,” ***J. Am. Chem. Soc.*** **145**, 11236-11244 (2023). doi:10.1021/jacs.3c01259
34. J. Kuno, N. Ledos, P.-A. Bouit, *T. Kawai, *M. Hissler, *T. Nakashima, “Chirality Induction at the Helically Twisted Surface of Nanoparticles Generating Circularly Polarized Luminescence,” ***Chem. Mater.*** **34**, 9111-9118 (2022). doi:10.1021/acs.chemmater.2c01994

計画研究 B

1. E. Cao, X. Shi, H. Inoue, T. Oshikiri, Y.-E. Liu, *H. Misawa, “Activation Energy in the Electron Transfer Process and Water Oxidation Intermediate Generation under Plasmon–Nanocavity Strong Coupling,” ***J. Phys. Chem. C*** **129**, 1590-1597 (2025). doi: 10.1021/acs.jpcc.4c07398
2. *T. Oshikiri, Y. Matsuo, H. Niinomi, M. Nakagawa, “Chiroptical response of an array of isotropic plasmonic particles having a chiral arrangement under coherent interaction,” ***Photochem. Photobiol. Sci.*** **24**, 13-21 (2025). doi: 10.1007/s43630-024-00667-7
3. D. P. Gluo, N. T. Hung, W.-L. Chen, S. Wang, M. Liu, E. I. Kauppinen, H. Takehara, A. Taguchi, T. Taniguchi, S. Maruyama, Y.-M. Chang, *R. Saito, *H.-L. Liu, “Quenching of Defect-Induced Photoluminescence in a Boron-Nitride and Carbon Hetero-nanotube,” ***J. Phys. Chem. Lett.*** **16**, 1711-1719 (2025). doi.org/10.1021/acs.jpclett.4c03681
4. *A. Taguchi, Y. Fukui, K. Sasaki, “Nanoscale chirality enhancement using topology-designed three-dimensional dielectric nanogap antennas,” ***Phys. Rev. Appl.*** **23**, L021002 (2025). doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.L021002
5. H.-Y. Ahn, K. Q. Le, T. Narushima, J. Yamanishi, R. M. Kim, K. T. Nam, *H. Okamoto, “Highly Chiral Light Emission Using Plasmonic Helicoid Nanoparticles,” ***Adv. Optical Mater.*** **12**, 2400699/1-9 (2024). 10.1002/adom.202400699
6. *H.-Y. Ahn, T. Narushima, *H. Okamoto, “Creation of a Photopolymerized Double Spiral Structure by Interference of Plasmonic Scattering and Circularly Polarized Light,” ***J. Phys. Chem. C*** **128**, 7159-7168 (2024). 10.1021/acs.jpcc.3c08473
7. *K. Shimizu, K. Inoue, K. Katsumata, A. Naruki, M. Sadgrove, K. Sanaka, “Single-photon generation from a neodymium ion in optical fiber at room temperature,” ***Appl. Phys. Lett.*** **124**, 081106/1-7 (2024). doi.org/10.1063/5.0181691
8. E. Cao, X. Shi, T. Oshikiri, Y.-E. Liu, Q. Sun, K. Sasaki, *H. Misawa, “Improving Charge Transfer under Strong Coupling Conditions via Interfacial Modulation,” ***ACS Photonics*** **11**, 1205-1212 (2024). doi: 10.1021/acsphotonics.3c01733
9. *H. Niinomi, H. Y. Yoshikawa, R. Kawamura, T. Yamazaki, T. Oshikiri, M. Nakagawa, “In-Situ Observation of DL-Alanine Crystallization from a Laser-Trapped Dense Liquid Droplet as a Heterogeneous Nucleation Site,” ***Chem. Lett.*** **53**, upae100 (2024). doi 10.1093/chemle/upae100
10. *H. Niinomi, K. Gotoh, N. Takano. M. Tagawa, I. Morita, A. Onuma, Y. Yoshikawa, R. Kawamura, T. Oshikiri, M. Nakagawa, “Mie-Resonant Nanophotonic-Enhancement of Asymmetry in Sodium Chlorate Chiral Crystallization,” ***J. Phys. Chem. Lett.*** **15,** 1564-1571 (2024). doi: 10.1021/acs.jpclett.3c03303
11. Y. Suganami, T. Oshikiri, H. Mitomo, K. Sasaki, Y.-E. Liu, X. Shi, Y. Matsuo, K. Ijiro, *H. Misawa, “Spatially Uniform and

Quantitative Surface-Enhanced Raman Scattering under Modal Ultrastrong Coupling Beyond Nanostructure Homogeneity Limits," ***ACS Nano*** **18**, 4993-5002 (2024). doi: 10.1021/acsnano.3c10959

12. *T. Oshikiri, T. Hayakawa, H. Niinomi, *M. Nakagawa, "Strong Light Confinement by a Plasmon-Coupled Parabolic Nanoresonator Array," ***J. Phys. Chem. C*** **128**, 5271-5279 (2024). doi: 10.1021/acs.jpcc.3c07224
13. *H. Niinomi, T. Yamazaki, H. Nada, T. Hama, A. Kouchi, T. Oshikiri, M. Nakagawa, Y. Kimura, "Chiral Spinodal-like Ordering of Homoimmiscible Water at Interface between Water and Chiral Ice III," ***J. Phys. Chem. Lett.*** **15**, 659-664 (2024). doi.org/10.1021/acs.jpclett.3c03006
14. K. Endo, S. Hashiyada, T. Narushima, *Y. Togawa, *H. Okamoto, "Circular dichroism of pseudo-two-dimensional metal nanostructures: Rotational symmetry and reciprocity," ***J. Chem. Phys.*** **159**, 234706 (2023). 10.1063/5.0178943
15. R. Nakajima, *D. Hirobe, G. Kawaguchi, Y. Nabei, T. Sato, T. Narushima, H. Okamoto, *H. M. Yamamoto, "Giant spin polarization and a pair of antiparallel spins in a chiral superconductor," ***Nature*** 613, 479-484 (2023). 10.1038/s41586-022-05589-x
16. *J. Yamanishi, H.-Y. Ahn, *H. Okamoto, "Nanoscopic Observation of Chiro-Optical Force," ***Nano Lett.*** **23**, 9347-9352 (2023). 10.1021/acs.nanolett.3c02534
17. M. Takezawa, R. Suzuki, J. Takahashi, K. Shimizu, A. Naruki, K. Katsumata, K. Nemoto, M. Sadgrove, *K. Sanaka, "Room-temperature addressing of single rare-earth atoms in optical fiber," ***Phys. Rev. Appl.*** **20**, 044038 (2023). doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.044038
18. *K. Setoura, M. Tamura, T. Oshikiri, T. Iida, "Switching nanoscale temperature fields with high-order plasmonic modes in transition metal nanorods," ***RSC Adv.*** **13**, 34489-34496 (2023). doi.org/10.1039/D3RA06649E
19. *J. Yamanishi, H.-Y. Ahn, H. Yamane, S. Hashiyada, H. Ishihara, K. T. Nam, *H. Okamoto, "Optical Gradient Force on Chiral Particles," ***Sci. Adv.*** **8**, eabq2604 (2022). 10.1126/sciadv.abq2604
20. R. Watanabe, D. Yamamoto, *M. Sadgrove, "Position-controlled trapping of nanoparticles and quantum dots on a fiber taper," ***Phys. Rev. A*** **108**, 043512 (2023). 10.1103/PhysRevA.108.043512
21. M. Sugawara, Y. Xuan, Y. Mitsumori, *K. Edamatsu, M. Sadgrove, "Plasmon-enhanced single photon source directly coupled to an optical fiber," ***Phys. Rev. Res.*** **4**, 043146 (2022). 10.1103/PhysRevResearch.4.043146
22. Y. Wang, X. Shi, T. Oshikiri, *H. Misawa, "Improved water splitting efficiency of Au-NP-loaded Ga_2O_3 thin films in the visible region under strong coupling conditions," ***Nanoscale Adv.*** **5**, 119-123 (2022). doi: 10.1039/D2NA00768A

計画研究 C

1. K. Homma, Y. Matsumoto, Y. Tanimoto, K. Masui, *C. Hosokawa, *T. Omatsu, *M. Matsusaki, "Fabrication of biocompatible helical fibers using an optical vortex beam," ***Chem. Asian J.*** (in press). 10.1002/asia.202500361
2. *K. Yuyama, S. R. Allam, H. Yamazaki, S. Kawano, *T. Omatsu, "Dynamic release layer mediated optical vortex laser-induced forward transfer," ***AIP Advances*** **15**, 045037 (2025). doi.org/10.1063/5.0252923
3. S. Laxminarayan, S. R. Allam, *T. Omatsu, *P. Kumar, Singularity transformation through single-pass phase modulation of light," Sci. Rep. 15, 8007 (2025). doi.org/10.1038/s41598-025-90451-z
4. Y. Yoneda, S. R. Allam, W. R. Kerridge-Johns, Y. Fujimoto, *T. Omatsu, "Multi-Color Optical Quasiparticle Laser Source Formed of a Pr^{3+} Doped Fiber Laser with a Dual-Output Coupling Geometry," ***Las. Photon. Rev.*** **19**, 2401403 (2025). doi.org/10.1002/lpor.202401403
5. T. Chen, H. Hiramatsu, S. Toyouchi, *T. Sugiyama, "Laser-polarization-induced anisotropy enhances protein crystallization," ***Angew. Chem. Int. Ed.*** **64**, e202501827 (2025). doi:10.1002/anie.202501827
6. *Y. Minowa, Y. Yasui, T. Nakagawa, S. Inui, M. Tsubota, M. Ashida, "Direct excitation of Kelvin waves on quantized vortices," ***Nat. Phys.*** **21**, 233 (2025). 10.1038/s41567-024-02720-9
7. *H.-B. Zeng, C.-Y. Xia, W.-C. Yang, Y. Tian, M. Tsubota, "Dissipation and Decay of Three-Dimensional Holographic Quantum Turbulence," ***Phys. Rev. Lett.*** **134**, 091603 (2025). 10.1103/PhysRevLett.134.091603
8. *W.-C. Yang, M. Tsubota, M. Nitta, H.-B. Zeng, "Macroscopic Borromean and anti-Borromean states of quantized vortices," ***Phys. Rev. A*** **111**, 0233319 (2025). 10.1103/PhysRevA.111.023319
9. Y. Matsumoto, K. Masui, *C. Hosokawa, "Helical Surface Relief Formation by Two-Photon Polymerization Reaction Using a Femtosecond Optical Vortex Beam," ***J. Phys. Chem. Lett.*** **16**, 415-420 (2025). doi: 10.1021/acs.jpclett.4c03055
10. Y. Yoneda, A. S. Rao, Y. Fujimoto, K. Miyamoto, *T. Omatsu, "Direct generation of multicolor Bessel beams from a Pr^{3+}: WPFG fiber laser," ***Opt. Express*** **32**, 9011-9018 (2024). doi.org/10.1364/OE.520672
11. W. R. Kerridge-Johns, A. S. Rao, *T. Omatsu* "Optical skyrmion laser using a wedged output coupler," ***Optica*** **11**, 769-775 (2024). doi.org/10.1364/OPTICA.521901
12. A. Kaneko, M. Iwata, R. Wei, *K.-i. Yuyama, *T. Omatsu, "Using optical vortex laser induced forward transfer to fabricate a twisted ferrite microcrystal array", ***APL Mater.*** **12**, 61116 (2024). doi.org/10.1063/5.0209114
13. R. Tamura, S. R. Allam, N. M. Litchinitser, *T. Omatsu, "Three-dimensional projection of optical hopfion textures in a material," ***ACS Photonics*** **11**, 4958-4965 (2024). doi.org/10.1021/acsphotonics.4c01547
14. R. Tamura, P. Kumar, A. S. Rao, K. Tsuda, F. Getzlaff, K. Miyamoto, N. M. Litchinitser, *T. Omatsu, "Direct imprint of optical skyrmions in azopolymers as photoinduced relief structures," ***APL Photonics*** **9**, 46104 (2024). doi.org/10.1063/5.0192239
15. R. Wei, H. Kawaguchi, K. Sato, S. Kai, K. Yamane, R. Morita, K.-i. Yuyama, S. Kawano, K. Miyamoto, N. Aoki, *T. Omatsu, "High-definition direct-print of metallic microdots with optical vortex induced forward transfer," ***APL Photonics*** **9**, 36108 (2024). doi.org/10.1063/5.0187189
16. H.-T. Su, H. Niinomi, A.-C. Cheng, Y. Y. Tanaka, K. Sasaki, *T. Sugiyama, "Enantioselectivity switch in chiral crystallization using optical trapping with gold nanoparticles," ***Cell Rep. Phys. Sci.*** **5**, 102310 (2024). doi:10.1016/j.xcrp.2024.102310
17. H.-T. Su, S.-Y. Liu, M. Fujii, H. Sugimoto, Y. Y. Tanaka, *T. Sugiyama, "Optical trapping-induced crystallization promoted

by gold and silicon nanoparticles," ***Photochem. Photobiol. Sci.*** **23**, 1697-1707 (2024). doi: 10.1007/s43630-024-00622-6

18. *T. Sugiyama, T.-M. Lin, H.-T. Su, A.-C. Cheng, *K. Sasaki, "Enantioselective Control in Chiral Crystallization of Ethylenediamine Sulfate Using Optical Trapping with Circularly Polarized Laser Beams," ***J. Chem. Phys.*** **160**, 064502 (2024). doi:10.1063/5.0186018
19. A.-C. Cheng, C. Pin, *T. Sugiyama, *K. Sasaki, "Enantioselectivity in Chiral Crystallization Driven by the Canonical and Spin Momentum Forces of Optical Vortex Beams," ***J. Phys. Chem. C*** **128**, 4314-4320 (2024). doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c08424
20. A.-C. Cheng, C. Pin, Y. Sunaba, *T. Sugiyama, *K. Sasaki, "Nanoscale Helical Optical Force for Determining Crystal Chirality," ***Small*** **20**, 2312174 (2024). doi:10.1002/smll.202312174
21. W.-C. Yang, *M. Tsubota, H.-B. Zeng, "Spontaneous symmetry breaking of vortex number in binary alternating current countersuperflow," ***Phys. Rev. B*** **109**, 043303 (2024). 10.1103/PhysRevA.109.043303
22. *K. Asakawa, M. Tsubota, "Corotation of two quantized vortices coupled with collective modes in self-gravitating," ***Phys. Rev. A*** **110**, 053310 (2024). 10.1103/PhysRevA.110.053310
23. *W.-C. Yang, C.-Y. Xia, *Y. Tian, M. Tsubota, H.-B. Zeng, "Mechanism for cluster formation in a strongly interacting superfluid from gauge/gravity duality," ***Phys. Rev. B*** **110**, 134510 (2024). 10.1103/PhysRevB.110.134510
24. *H. Kobayashi, S. Yui, M. Tsubota, "Influence of different mutual friction models on two-way coupled quantized vortices and normal fluid in superfluid 4He," ***Phys. Rev. Fluids*** **9**, 104605 (2024). 10.1103/PhysRevFluids.9.104605
25. Y. Segawa, W. Minoshima, K. Masui, *C. Hosokawa, "Neuronal Electrical Activity in Neuronal Networks Induced by a Focused Femtosecond Laser," ***ACS omega*** **10**, 1354-1363 (2024). doi: 10.1021/acsomega.4c08948
26. Y. Segawa, K. Masui, *C. Hosokawa, "Electrophysiological mechanisms of single-neuron stimulation using a focused femtosecond laser," ***Jpn. J. Appl. Phys.*** **63**, 11SP06 (2024). doi: 10.35848/1347-4065/ad8fb6
27. T. Kishimoto, T. Ando, *K. Doi, "Scanning glass microelectrode technique for investigating temperature-dependent electrical properties," ***Jpn. J. Appl. Phys.*** **63**, 106501 (2024). doi: 10.35848/1347-4065/ad81d8
28. A. Tomita, A. Vallés, K. Miyamoto, *T. Omatsu, "Creation of galaxy-shaped vortex relief structures in azo-polymers with petal-like beams," ***Opt. Express*** **31**, 27868-27879 (2023). doi.org/10.1364/OE.489095
29. T. Morohashi, *A. S. Rao, T. Omatsu, "Direct generation of lower-order cylindrical vector vortex modes from an end-pumped Pr^{3+}:$LiYF_4$ laser," ***Appl. Opt.*** **62**, 9183-9187 (2023). doi.org/10.1364/AO.509263
30. *K.-i. Yuyama, H. Kawaguchi, R. Wei, *T. Omatsu, "Fabrication of an array of hemispherical microlasers using optical vortex laser-induced forward transfer," ***ACS Photonics*** **10**, 4045-4051 (2023). doi.org/10.1021/acsphotonics.3c01005
31. *A. S. Rao, T. Morohashi, W. R. Kerridge-Johns, T. Omatsu, "Generation of higher-order Laguerre–Gaussian modes from a diode-pumped Pr^{3+}:$LiYF_4$ laser with an intra-cavity spherical aberration," ***J. Opt. Soc. Am. B*** **40**, 406-411 (2023). doi.org/10.1364/JOSAB.481727
32. Y. Zhou, T. Yusufu*, Y. Ma, *T. Omatsu, "Generation of tunable, non-integer OAM states from an optical parametric oscillator," ***Appl. Phys. Lett.*** **122**, 121106 (2023). doi.org/10.1063/5.0141377
33. *W. R. Kerridge-Johns, A. S. Rao, Y. Fujimoto, T. Omatsu. "Red, orange, and dual wavelength vortex emission from Pr: WPFGF fiber laser using a microscope slide output coupler," ***Opt. Express*** **31**, 16607-16614 (2023). doi.org/10.1364/OE.491867
34. K. Toyoda, H.-T. Su, K. Miyamoto, *T. Sugiyama, *T. Omatsu, "Chiral crystallization manipulated by orbital angular momentum of light," ***Optica*** **10**, 332-338 (2023). doi.org/10.1364/OPTICA.478042
35. S.-F. Wang, *T. Sugiyama, "Femtosecond Laser-Driven Enantioselectivity on Achiral-Chiral Polymorphic Transition," ***Cell Rep. Phys. Sci.*** **4**, 101323 (2023). doi:10.1016/j.xcrp.2023.101323
36. T.-W. Shih, Y.-R. Chen, X. Wei, M. Rao, C. Yang, *Y. Inoue, *T. Sugiyama, "Optical Trapping-Driven Supramolecular Photochirogenesis via Higher-Order Complexation," ***Cell Rep. Phys. Sci.*** **4**, 101216 (2023). doi:10.1016/j.xcrp.2022.101216
37. T. Chen, S. Toyouchi, *T. Sugiyama, "Spectroscopic Analysis of Concentration Dynamics and Crystallization of Hen Egg-White Lysozyme under Optical Trapping Conditions," ***J. Phys. Chem. C*** **127**, 23340-23348 (2023). doi:10.1021/acs.jpcc.3c06450
38. P.-W. Yi, W.-H. Chiu, S. Toyouchi, *R. Bresolí-Obach, J. Hofkens, E. Chatani, *Y. Hosokawa, *T. Sugiyama, *H. Masuhara, "Two-Stage Optical Trapping and Assembling of Protein at Air/Solution Interface," ***Appl. Phys. Express*** **16**, 025501 (2023). doi:10.35848/1882-0786/acb3ab
39. M. Tamura, T. Omatsu, *T. Iida, "Nanoneedle formation via doughnut beam-induced Marangoni effects," ***Opt. Express*** **30**, 35136-35145 (2022). doi.org/10.1364/OE.460962

公募研究 A

1. *M. Udono, *M. Sato, "Triplons, triplon pairs, and dynamical symmetries in laser-driven Shastry-Sutherland magnets," ***Phys. Rev. B*** **110**, L201112 (2024). doi.org/10.1103/PhysRevB.110.L201112
2. *S. C. Furuya, *M. Sato, "Electric-field control of magnetic anisotropies: Applications to Kitaev spin liquids and topological spin textures," ***Phys. Rev. Res.*** **6**, 013228 (2024). doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.013228
3. *K. Masuda, *M. Sato, "Microscopic Theory of Spin Seebeck Effect in Antiferromagnets," ***J. Phys. Soc. Jpn.*** **93**, 34702/1-20 (2024). doi.org/10.7566/JPSJ.93.034702
4. R. Imaura, Y. Kawata, *K. Matsuo, "Salt-induced membrane-bound conformation of the NAC domain of Salt-induced hydrophobic C-terminal region of alpha-synuclein triggers its fibrillation under the mimic physiologic condition," ***Langmuir*** **40**, 20537-20549 (2024). doi.10.1021/acs.langmuir.4c02178
5. S. Hashimoto, *K. Matsuo, "Dynamic Observation of the Membrane Interaction Processes of β-Lactoglobulin by Time-resolved vacuum-ultraviolet circular dichroism," ***Analy. Chem.*** **96**, 10524–10533 (2024). doi.10.1021/acs.analchem.4c00556

6. *H. Nakamura, K. Ishiguro, A. Nakata, S. Usami, S. Saito, S. Fujiwara, “Reactive molecular dynamics simulation on DNA double-strand breaks induced by hydrogen elimination,” ***Jpn. J. Appl. Phys.* 63**, 12SP09 (2024). doi:10.35848/1347-4065/ad8b54
7. *T. Mizushima, M. Sato, “Imprinting spiral Higgs waves onto superconductors with vortex beams,” Phys. Rev. Res. 5, L042004 (2023). doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.L042004

公募研究 B

1. S. Hasegawa, *K. Imura, “Three Dimensional Visualization of Chiral Nano-Optical Field aroumd Gold Nanoplates via Scanning Near-Field Optical Microscopy,” ***Nano Lett.* 25**, 376-382 (2025). doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c05151
2. *K. Imura, T. Matsuura, “Directional Light Scattering of a Single Si Nanoparticle Revealed by Three-Dimensional Near-Field Optical Microscopy,” ***J. Phys. Chem. Lett.* 16**, 3518-3524 (2025). doi.org/10.1021/acs.jpclett.5c00254
3. N. Ichiji, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, *A. Kubo, “Exciting space-time surface plasmon polaritons by irradiating a nanoslit structure,” ***J. Opt. Soc. Am. A* 41**, 396-405 (2024). doi:10.1364/JOSAA.508044
4. *N. Pavillon, K. Koike, T. Sugiyama, T. Umakoshi, P. Verma, K. Fujita, N. I. Smith*, “In-situ real-time observation of photo-induced nanoscale azo-polymer motions using high-speed atomic force microscopy combined with an inverted optical microscope,” ***Nano Lett.* 96**, 2805−2811 (2024). doi:10.1021/acs.analchem.4c00236
5. M. Fukata, H. Shirayama, *K. Imura, “Development of Absorption and Scattering Microspectroscopy Using Phase-Steppinh Method,” ***J. Phys. Chem. C* 128**, 3370-3376 (2024). doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c07904
6. T. Nagai, L. Jie, S. Teranishi, K.-i. Yuyama, T. Shoji, Y. Matsumura, Y. Tsuboi*, “Förster Resonance Energy Transfer Control by Means of an Optical Force,” ***Adv. Opt. Mater.* 12**, 2400302 (2024). doi.org/10.1002/adom.202400302
7. T. Tokushima, S. Noda, *K. Kitamura, “High-order optical vortex beam generation based on watt-class spatial phase plate-integrated photonic-crystal surface-emitting lasers,” ***Opt. Lett.* 49**, 973-976 (2024). doi:10.1364/OL.510853
8. N. Ichiji, D. Oue, M. Yessenov, K. L. Schepler, A. F. Abouraddy, *A. Kubo, “Transverse spin angular momentum of a space-time surface plasmon polariton wave packet,” ***Rhys. Rev. A* 107**, 063517 (2023). doi:10.1103/PhysRevA.107.063517
9. S. Ogata, *K. Imura, “Optical properties of multilayer MoS2 modified with thermal and shape transformation by laser irradiation,” ***Chem. Phys. Lett.*** 831, 140859 (2023). doi:10.1016/j.cplett.2023.140859

公募研究 C

1. *R. Toyoda, *N. Fukui, H. Taniguchi, H. Uratani, J. Komeda, Y. Chiba, H. Takaya, H. Nishihara, *R. Sakamoto, “Discrete coordination nanochains based on photoluminescent dyes reveal intrachain exciton migration dynamics,” ***Nat. Commun.* 16**, 1367 (2025). doi.org/10.1038/s41467-025-56381-0
2. *K. Nakagawa, M. Kanega, T. Yokouchi, M. Sato, Y. Shiomi, “Spin transport in a Berezinskii-Kosterlitz-Thouless magnet candidate $BaNi_2V_2O_8$,” ***Phys. Rev. Materials* 9**, L011401 (2025). 10.1103/PhysRevMaterials.9.L011401
3. R. Kobayashi, Y. Tsuboi, *K.-i. Yuyama, “Formation of a Hemispherical Droplet in a Temperature Responsive Ionic Liquid by Optical Tweezers,” ***Chem. Photo. Chem.*** e202400394 (2025). doi: 10.1002/cptc.202400394
4. M. Kanoda, K. Hayashi, Y. Takagi, M. Tamura, *S. Tokonami, *T. Iida, “High-throughput Light-induced Immunoassay with Milliwatt-level Laser under One-minute Optical Antibody-coating on Nanoparticle-imprinted Substrate,” ***npj biosensing* 1**, 1 (2024). doi.org/10.1038/s44328-024-00004-z
5. *R. Oketani, K. Shiohara, I. Hisaki, “Crystallization-Induced Diastereomeric Transformation of ChiralOzanimod Key Intermediate Using Homogeneous Ir-BasedRacemization Catalyst,” ***Cryst. Growth Des.* 24**, 5397-5401 (2024). 10.1021/acs.cgd.4c00604
6. M. Tanaka, R. Kobayashi, Y. Tsuboi, *K.-i.Yuyama “Optical trapping of nanoclusters formed in a temperature-responsive ionic liquid aqueous solution under focused near-infrared laser irradiation,” ***Phys. Chem. Chem. Phys.* 26**, 19083-19087 (2024). doi: 10.1039/d4cp02363c
7. *S. Zhang, K. Harii, T. Yokouchi, S. Okayasu, *Y. Shiomi, “Amorphous Ferromagnetic Metal in van der Waals Materials,” ***Adv. Electron. Mater.* 10**, 2300609 (2023). 10.1002/aelm.202300609
8. *J. Matsuki, T. Yokouchi, Y. Shiomi, “Modulation of spin Hall magnetoresistance in α-Fe_2O_3/Pt by uniaxial tensile strain,” ***Appl. Phys. Express* 16**, 123001 (2023). 10.35848/1882-0786/ad0db7
9. T. Kameyama, K. Sato, T. Yamamoto, M. Tamura, T. Iida, T. Shoji, Y. Tsuboi, *T. Torimoto, “Promoting Oxygen Reduction Reaction by Excitation of Localized Surface Plasmon of Shape- and Facet-Controlled Octahedral Au@Pt Core-Shell Nanocrystals,” ***Chem. Electron. Chem.* 10**, e202300182 (2023). doi: 10.1002/celc.202300182
10. K. Fujiwara, Y. Takagi, M. Tamura, M. Omura, K. Morimoto, *I. Nakase, *S. Tokonami, *T. Iida, “Ultrafast sensitivity-controlled and specific detection of extracellular vesicles using optical force with antibody-modified microparticles in a microflow system,” ***Nanoscale Horiz.* 8**, 1034-1042 (2023). 10.1039/D2NH00576J
11. R. Ienaga, K. Beppu, *Y. T. Maeda, “Geometric confinement guides topological defect pairings and emergent flow in nematic cell populations,” ***Soft Matter* 19**, 5016-5028 (2023). DOI: 10.1039/d3sm00071k
12. A. Negi, K. Beppu, *Y. T. Maeda, “Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter,” ***Phys. Rev. Res.* 5**, 23196 (2023). doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.023196
13. *K. Saito, Y. Nemoto, Y. Ishikawa, “Circularly Polarized Light-Induced Chiral Growth of Achiral Plasmonic Nanoparticles Dispersed in a Solution,” ***Nano Lett.* 24**,12840-12848 (2024). doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c03183

Optical Manipulation and Structured Materials Conference(2023, 2024, 2025, Yokohama), Structured Light and Matters (203,2024, Hsinchu, Taiwan), Structured and Chiral light fields for Interdisciplinary Science (2023, 2025, Adelaide, Austlaia)をはじめ国際シンポジウム主催 11 件

８　審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、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、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。

【審査結果の所見】

本領域研究の推進により、キラル秩序化に関する新たな現象が多く見いだされることが期待できるが、個別の研究成果の寄せ集めや単なる現象の羅列ではなく、どのように各計画研究の成果を融合させて**「キラル秩序化を支配する法則の導出」**と**「新たなキラル秩序と機能を開拓する」**という領域全体の目標達成に結び付けるのか、その道筋を明確にして領域を推進していただきたい。

≪対応状況≫

研究推進における問題点の共有するため、また、「なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるか?」という学術的問いを領域全体で共有するため、**領域会議(5** 回)に加え、**班会議(17** 回)を頻繁に実施した。特に、A 班と B 班の**合同班会議**のような班をまたぐ班会議(**4** 回)、展開研究のための情報を共有し議論する**展開研究会議(4** 回)を定期的に行い、個別研究に陥らないように配慮した。

また、2024 年度より、領域で**新たな共同研究の創出を目標としてブレインストーミングを行う合宿(長野県原村)**を実施した。

その結果、個別研究を超えた数多くの研究成果が得られた。光渦二色性は、超螺旋光と物質が織りなす特異な相互作用の一つで、キラル秩序化にとって最も重要な素過程である。その解明は**「キラル秩序化を支配する法則の導出」**につながる。

本領域において最も重要な概念の一つに**光の角運動量（スピン角運動量と軌道角運動量）の保存則**がある。しかしながら、これまで、光の角運動量保存は真空中で議論されており、**物質中での光の角運動量保存を説明できる理論**がなかった。

＜A.理解＞が中心となり、光の電場と磁場の微分項を用いたスピン角運動量と軌道角運動量に着目することにより、**物質中で光の角運動量保存則を記述できる方程式を初めて導出**した**(Phys. Rev. Res. in press)**。

光のスピン角運動量（SAM）保存則

$$\frac{\partial \mathbf{J}'_{spin}}{\partial t} + \nabla \bullet \vec{\vec{\mathbf{M}}}'_{spin} = -\boldsymbol{\tau}'_{spin}$$

SAM密度　$\mathbf{J}'_{spin} = \mathbf{r} \times \left[\frac{\varepsilon_0}{2\omega^2} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \bullet \nabla \right) \mathbf{E} + \frac{1}{2\mu_0 \omega^2} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \bullet \nabla \right) \mathbf{B} \right]$

SAM流速密度　$\left\langle \vec{\vec{\mathbf{M}}}'_{spin} \right\rangle = \frac{\varepsilon_0 c}{4k} \mathrm{Im} \left[-2(\mathbf{E}^* \bullet \mathbf{B}) \vec{\vec{\mathbf{I}}} + \mathbf{E}^* \otimes \mathbf{B} + \mathbf{B} \otimes \mathbf{E}^* \right] + \frac{\varepsilon_0 c}{4k} \mathrm{Im} \left(\mathbf{E}^* \otimes \mathbf{B} + \mathbf{B} \otimes \mathbf{E}^* \right)$

SAM損失　$\left\langle \boldsymbol{\tau}'_{spin} \right\rangle = -\frac{1}{2\omega} \mathrm{Im} (\mathbf{j} \times \mathbf{E}^*) + \frac{c}{2k} \mathrm{Im} (\rho \mathbf{B}^*)$

光の軌道角運動量（OAM）保存則

$$\frac{\partial \mathbf{J}'_{orbit}}{\partial t} + \nabla \bullet \vec{\vec{\mathbf{M}}}'_{orbit} = -\boldsymbol{\tau}'_{orbit}$$

OAM密度　$\mathbf{J}'_{orbit} = \mathbf{r} \times \left[-\frac{\varepsilon_0}{2\omega^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \bullet (\nabla) \mathbf{E} - \frac{1}{2\mu_0 \omega^2} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \bullet (\nabla) \mathbf{B} \right]$

OAM流速密度　$\left\langle \vec{\vec{\mathbf{M}}}'_{orbit} \right\rangle = \frac{\varepsilon_0 c}{4k} \mathrm{Im} \left(\left[\mathbf{B} \times \{ (\mathbf{r} \times \nabla)_i \mathbf{E}^* \} \right]_j + \left[\mathbf{E}^* \times \{ (\mathbf{r} \times \nabla)_i \mathbf{B} \} \right]_j \right) - \frac{\varepsilon_0 c}{4k} \mathrm{Im} \left(\mathbf{E}^* \otimes \mathbf{B} + \mathbf{B} \otimes \mathbf{E}^* \right)$

OAM損失　$\left\langle \boldsymbol{\tau}'_{orbit} \right\rangle = -\frac{1}{4\omega} \mathrm{Im} \{ \mathbf{j} \bullet (\mathbf{r} \times \nabla) \mathbf{E}^* - \mathbf{E}^* \bullet (\mathbf{r} \times \nabla) \mathbf{j} \} - \frac{c}{2k} \mathrm{Im} (\rho \mathbf{B}^*)$

図　物質中で光の角運動量保存則。

この方程式に基づき、光渦二色性に関する基礎実験と理論研究を進めた。その結果、光渦二色性はキラル分子が示す円偏光二色性とは異なり、通常の双極子モードでは説明できないこと、光渦二色性は四重極子モードの混成モード間遷移で説明できることを解明した。これらの成果は、**キラル秩序化の統一的な学理構築の前段階**まで到達したことを意味する。

また**＜B.観測＞**が中心となり、キラリティー計測の高精度化(高速化・高分解能化)を推進し、領域全体の共通基盤計測技術へと成長させた。その結果、従来から円偏光電場の螺旋度を示す量として知られてき

た**光学キラリティー**を再定義しなおし、**超螺旋光に適用できる新たな概念**へと進化させた。
＜C.開拓＞で推進している量子渦の観測・操作において、3 **次非線形性をもつカー媒質中での光渦と量子流体中での量子渦を支配する方程式が完全に同じ形になることが明確になった。**この対応関係に基づくと、量子渦で見られる現象がすべて光渦で再現できることが示唆される。この研究成果は、**領域内ディスカッションとセレンディピティによるもの**で領域発足当初には計画していなかったものである。

これらの成果は、本領域が個別の研究成果の寄せ集めや単なる現象の羅列ではなく、**各計画研究が強く融合しながら、「キラル秩序化を支配する法則の導出」と「新たなキラル秩序と機能を開拓する」という領域全体の目標達成に向かって研究推進している**ことを示すエビデンスである。

【留意事項】
本領域研究の目的達成に向けた各計画研究の関連性や有機的な連携関係に関して、さらなる説明が必要である。また、**研究項目 C「開拓」は、生物分野をはじめとして萌芽的な研究課題が多いため、超螺旋光の技術に精通した共同研究者との戦略的な取り組みが不可欠**と考えられる。そのような観点からの領域運営マネジメントや連携推進体制の強化などが求められる。

≪対応状況≫
超螺旋光による生体組織への刺激と自己組織化反応を担当する**細川**(A03)では、超螺旋光である光渦を発生、あるいは、応用した経験がなかった。そのため、**尾松**(C01)が大阪公大に出張し、徹底的に技術指導した。また、2023 年秋に千葉大で開催した**「先端光源技術トレーニング工房」**には、大阪公大から**増井講師**をはじめ、複数名の教員スタッフと大学院学生が参加し、尾松から超螺旋光の基礎から実習まで徹底的にレクチャーを受けた。その結果、大阪公大における超螺旋光の技術基盤が確立された。
超螺旋光による細胞足場の研究はさらに萌芽的である。担当する**松﨑**(A04)**には、当初、光学実験の経験がまったくなかった。**そこで、**光学部品選定から光学系設計まで光科学研究者である細川**(C03)**・尾松**(C01)**で全面的に技術支援**した。特に、松﨑(大阪大)と地理的に研究場所が近い細川(大阪公大)は共同実験を推進した。また、尾松はオンライン・オンサイトでは超螺旋光に関する技術指導を適宜実施した。螺旋位相板などの光学部品も共同購入することで、技術を共有しやすい環境整備を行った。
その結果、**松﨑は細胞接着性の生体高分子である** GelMA **の螺旋ファイバー化**、さらには、GelMA ファイバーへの細胞固着に成功した。この成果は**生体組織を模倣した螺旋足場による細胞成長の一歩手前**である**(Chem. Asian J. in press)**。
領域発足後、最初の 2 年間に領域全体で研究遂行のための技術の共有化を徹底した結果、**「新たなキラル秩序と機能を開拓する」**という領域全体の目標達成に結び付き、共著論文を発表できるようになった。現在も継続的に毎月オンライン会議を開催し、進捗状況のチェックと技術指導を行っている。

このように**【審査結果の所見】【留意事項】**として指摘された項目に適切に対応し、論文発表できる研究成果を得た。

９　今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

【領域の研究目標】

本研究領域では、「光の螺旋性が拓くキラル物質科学の変革」の**学術としての＜計画研究＞を軸に共同研究としての＜展開研究＞の輪**を回して、全計画研究者が連携して一丸となって研究推進する体制を導入している。

≪計画研究目標≫

光物性理論・分子設計理論の立場から新たな理論を構築して「キラル秩序化」を理解、極限計測技術を駆使して「キラル秩序化」を観測、さらに、分子から生体組織まで多様な空間スケールの物質からなる新奇「キラル秩序化」を開拓する。その結果として、「なぜ超螺旋光は物質をキラル秩序化できるか?」という＜学術的問い＞を体系的な学術に進化させることを達成目標としている。現在、**＜A.理解＞のメンバー**が中心となり、**キラル分子が示す光渦二色性は四重極子モードの混成モード間遷移で説明できる**ことを明らかにした。また、**＜B.観測＞のメンバー**が中心となり、従来から円偏光電場の螺旋度を示す量として知られてきた**光学キラリティーを再定義し、超螺旋光に適用できる新たな概念**へと進化させた。

≪展開研究目標≫

各計画研究で得られた知見と技術を駆使し、＜展開研究 1：キラル秩序の化学＞ではキラル結晶化・キラル計測、＜展開研究 2：らせんの工学＞では円偏光発光・生体組織を模倣した螺旋細胞足場、＜展開研究 3：渦の物理学＞では光スキルミオンによる物質制御・光による光学遷移制御・光による量子渦の制御を目標としている。

現在、**＜C.開拓＞のメンバー**が中心となり、**＜展開研究 1：キラル秩序の化学＞**では、55%を超える高い鏡像体過剰率でアキラル分子である塩素酸ナトリウムのキラル結晶化を実証した。**＜展開研究 2：らせんの工学＞**では、生体適合性材料 GelMA を光重合させて螺旋足場を創成することに成功した。また、**＜展開研究 3：渦の物理学＞**では、光スキルミオンの物質転写、量子流体中のケルビン波の観測など、展開研究のパイロット研究としては十分な成果を得た。その成果を共有し、**展開研究の具現化に向けた前段階**まで到達した。

【領域の推進方策】

上記のように**＜計画研究＞**と**＜展開研究＞**の両輪を推進することで**「キラル秩序化を支配する法則の導出」**と**「新たなキラル秩序と機能を開拓する」**という領域全体の目標達成に向けた前段階の成果がすでに得られている。この研究成果を実りあるものに実質化するため、これまでの研究推進体制を継続する。

本領域では、1 年目、3 年目に公募研究を募集し、各回 **21** 件を採択した。3 年目の採択課題のうち 8 割は継続課題である。そのため、すでに**一部の公募研究代表者は＜展開研究＞に参加し、計画研究メンバーと実質的な共同研究を実施**している。

今回採択された公募研究には、①＜計画研究＞を補完して領域の研究推進を強化できること、②＜展開研究＞を強力に遂行できること、③本領域の理念を飛躍的に拡張して学術領域を広げること、という 3 つの観点に注力して領域内での共同研究を担うことを強く求める。

①＜計画研究＞を補完するもので領域の研究推進を強化できること

＜理論＞光と物質の相互作用をあらわに扱う電磁気学理論、キラル秩序をマクロ化に展開できる分子動力学理論など。

＜機能性分子設計＞超螺旋光と強く相互作用を起こす可能性を有するキラル高分子・分子集合体・キラルナノ微粒子の合成および作製など。

＜計測＞キラル秩序化する過程を可視化できる超高速・時空間イメージング計測など。

②＜展開研究＞を強力に遂行できること

超螺旋光を活用して新奇なキラル物性を発現させる研究、超螺旋光によるキラル結晶化、超螺旋光による人工生体組織創成、超螺旋光による量子渦制御など。

③本領域の理念を飛躍的に拡張して学術領域を広げること

本領域メンバーがカバーしていない多様な物質（例えば、アクティブマター）を光制御することで学術領

域を広げること。
その結果、本領域の普遍性・学際性を高めることを期待している。

【国際ネットワークの取組】

≪国際ワークショップ≫

本領域では、個別の海外共同研究を国際共同研究ネットワーク構築に展開するため、Kishan Dholakia 教授(**University of Adelaide** 光マニピュレーション)、Yung Fu Chen 教授(**国立陽明交通大学** 特異点光学)との定期的な国際ワークショップを実施し、若手研究者交流や共同研究を促進した。
また、Fabian Rotermund 教授(**Ajou University** から KAIST へ転出 テラフォトニクス)との共同研究からスタートした Ajou University との国際ワークショップも、毎年、千葉大学および Ajou University で交互に実施し、今年ですでに 12 回目を迎えた。次回、Ajou University で予定しているワークショップには、千葉大学に所属する領域公募メンバーを参画させて、領域としての国際共同研究ネットワーク構築へと展開する。
これらの国際ワークショップを今後も継続する予定である。

≪国際会議≫

本領域では、これまで国際会議 **Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC)**、Nano and Molecular Machine (SPIE Optics + Photonics)を毎年主催してきた。
特に、**OMC** は、現在、本領域と SPIE の共催として運営しており、本研究領域のアクテビティーを国際的に強力に発信するための重要な機能を担っている。また、同会議には、海外評価員である Kishan Dholakia 教授、Halina Rubinsztein-Dunlop 教授(University of Queensland)、Malcolm Kadodwala 教授(University of Glasgow)、Alexander Govorov 教授(Ohio University)を招聘しており、国際的研究動向の視点から研究拠点形成に向けたアドバイスを頂いている。
さらに、招待講演者の招聘・会議の運営・海外 Student Chapter との連携などを大学院生が主体的に実施する Student Session を OMC(2024, 2025)期間中に設けて、若手研究者・大学院生の国際交流を推進している。半日~1 日のセッションで台湾、中国、韓国などから学生講演を数多く集めた。
OMC をはじめとするこれらの国際会議運営を今後も継続するとともに、研究拠点形成に向けた発展的展開を探る。
さらに、今年度 8 月に International Materials Research Congress 2025 (メキシコ)において、岡本(B01 代表、分子研)が組織委員の一人として **Nanostructured Materials: Synthesis, Chracterization, Nano/Micro-Optical Properties, and Applications** と題するシンポジウムが開催予定であり、この中で chiral plasmonic nanostructures がトピックの一つとなっている。12 月の **Pacifichem 2025**(ハワイ)においては、岡本が中心となり、Alexander Govorov 教授、Ki Tae Nam 教授(Seoul National University)、Nicholas Kotov 教授(Michigan University)、中嶋(A01 代表、大阪公立大)、細川(C03 代表、大阪公立大)と協力し、New Era of Chiral Light-Matter Interaction Effects と題するシンポジウムを開催予定である。

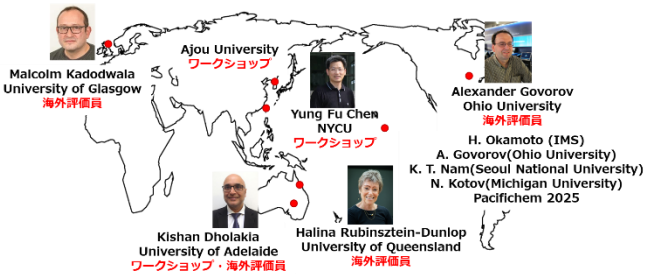


図　国際ネットワークの取り組み。

10　若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に記述すること（１頁以内）。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を冒頭に示すこと。

【「若手研究者」の定義】

本研究領域では、若手研究者として**助教・博士研究員、大学院博士学生および博士課程進学を予定した大学院修士学生**を対象とする。必要に応じて、45 歳未満の准教授も若手育成イベントへの参加を認める。

【若手育成の取組み】

≪海外派遣≫

本領域の海外連携体制を活用して、Yung Fu Chen 教授をホストとする国立陽明交通大学(台湾)とのジョイントワークショップ Structured Light and Materials workshop (2023 年 6 月 17-18(**新竹・台湾**)、2024 年 11 月 25-26 日(**大阪公立大**))、Kishan Dholakia 教授をホストとする University of Adelaide(豪州)とのジョイントワークショップを隔年(2023 年 2 月 23-24 日, 2025 年 2 月 26-27 日(**アデレード・豪州**))で開催した。これらのジョイントワークショップには、本領域から若手研究者 5-10 名を派遣し、海外若手研究者との研究交流を支援した。1 か月以上の若手研究者の**長期海外研究派遣**を **8** 件(KU Luben, RWTH Aachen University, Ghent University, IGPS, Lund University, ETH など)、海外若手研究者の**長期受入**を **5** 件(University of Glasgow, Tianjin University, Ghent University, RWTH Aachen University, Chulalongkorn University)実施した。

≪国際会議≫

本領域では、これまで国際会議 Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC, Pacifico Yokohama)を、毎年、主催してきた。招待講演者の招聘・会議の運営・海外 Student Chapter との連携などを大学院生が主体的に実施する Student Session を OMC(2024, 2025)期間中に設けて、若手研究者・大学院生の国際交流を推進した。半日~1 日のセッションで台湾、中国、韓国などから学生講演を数多く集めた。

≪研究支援≫

若手研究者が自由な発想で互いに共同研究を立案・実施できるように「若手共同公募研究」を領域内で公募して研究支援（研究旅費・会議費・論文掲載費など）した。また、若手研究者を中心に互いの知見・技術を共有化して各計画研究が推進できるように「トレーニング工房」(理論解析・光源・計測・微細加工、各工房の参加者は若手研究者を中心に **10~15** 名)を 2022-2024 年にかけて設置した。

≪キャリアパス支援≫

第 1 回成果を自慢する会「理系世界の歩き方」(2023 年 8 月 1 日オンライン、参加者数 **21** 名)と題して、理系若手研究者のためのキャリアパスに参考になるインタビューを実施した。さらに、合宿形式(2024 年 7 月 5 日琵琶湖白浜荘、参加者数 **16** 名)により、若手研究者の研究紹介やキャリアパス情報の共有を行った。

≪合宿≫

合宿(2024 年 8 月 12-14 日、長野県原村八ヶ岳自然文化園・樅の木荘)を行い、領域から発信する新たな研究の方向性，共同研究の創出を狙い、ブレインストーミングを行った。

【若手育成の成果】

CLEO-PR 2024 Best Student Papers Award (1st prize)、応用物理学会をはじめとする**学会講演奨励賞 20 件**
昇任 7 件(ゴチックは計画班メンバー)
2025 年
田村　守　大阪大学助教→関西学院大学講師、**山西絢介　分子研特任助教→大阪大学助教**
2024
前多裕介　九州大学准教授→京都大学教授、北村恭子　京都工芸繊維大学准教授→東北大学教授
横田紘子　千葉大学准教授→東京科学大学教授、蓑輪陽介　大阪大学助教→京都大学准教授
2023
田中嘉人　東京大学助教→北海道大学教授

11　アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に記述すること（1 頁以内）。

領域では公式ホームページを立ち上げて、研究組織・研究内容の紹介のほかに領域内で得られた研究成果を手短に説明する「トピックス」を随時掲載している。**公式ホームページは日本語と英語で公開している**(https://www.light-chiral-materials-science.jp/)。また、**ニュースレター**を電子版として発行し、領域内の活動状況について定期的に報告している。

これまでに第 3 号まで刊行した(**第 1、2 号は日本語と英語、第 3 号は英語のみ**)。現在、第 4 号の企画を行っている。

領域に属する研究者は、各所属機関等を介して小中高校生を含む一般市民や専門外の**大学生・大学院生を対象とするアウトリーチ活動、民間企業の研究開発や営業の担当者などを対象としたセミナー**等も実施している。

領域発足後、現在までに、領域の研究に関連する内容について行ったアウトリーチ活動を**表 1** にまとめた。

研究内容や関連分野に関する講演はもちろん、**光に関わる実験などの体験型イベント**も実施している。また、研究機関の一般公開等における研究室の公開、研究機関や地域のイベントでのパンフレット等でも研究内容の一端を紹介している。

実施日	グループ	実施者	対象者	実施場所等	実施内容
体験型イベント					
2022/7/16,17	C02	西岡孝	高校生	高知大学	研究の体験実習
2024/4/27	公募	音賢一	高校生	千葉市科学館	光干渉実験の指導
2024/6/1	公募	田村守	小学生	伊丹市立鈴原小学校	光ピンセット，偏光などの体験実習
2025/2/15	C02	蓑輪陽介	小学生	京都大学学童施設	ワークショップ
2024/10/19	B01	岡本裕巳，山西絢介	一般	分子科学研究所	円偏光やキラリティーに関するデモ体験
研究室の一般公開					
2023/8/5-6	C03	細川千絵	高校生	大阪公立大学	研究活動の説明
2023/8/26	C03	土井謙太郎	一般	豊橋技術科学大学	研究活動の説明
2024/8/24	C03	土井謙太郎	一般	豊橋技術科学大学	研究活動の説明
講演					
2022/11/11	B03	田口敦清	民間企業等	東京都立産業貿易センター	紫外域ナノフォトニクス技術の講演
2023/6/2	B03	田口敦清	民間企業等	オンライン	紫外分光技術の講演
2023/7/5	公募	坪井泰之	一般	オンライン	光ピンセットに関する解説
2023/8/10	A03	中嶋琢也	高校生	大阪公立大学	化学分野の授業
2023/10/13	公募	坪井泰之	高校生	奈良県立十津川高校	「研究の世界　化学の世界」に関する講演
2023/10/20	公募	坪井泰之	社会人	大阪大学	社会人教育プログラムにおける講演
2023/11/11	公募	坪井泰之	中学生	大阪医科薬科大学高槻中学校	キャリアデザインに関する講演
2023/12/25	B01	岡本裕巳	一般	名古屋市科学館	「ねじれた光」についての講演
2024/6/5	B02	和田健彦	一般，高校生	仙台国際センター	高分子と螺旋光に関する講演
2024/6/19	公募	北村恭子	高校生	宮城第一高校	超螺旋光光源の紹介
2024/7/29	B03	田口敦清	民間企業等	オンライン	紫外分光技術の講演
2024/8/26	A03	中嶋琢也	高校生	大阪府立富田林高等学校	探求科目の指導
2024/10/18	公募	坪井泰之	社会人	大阪大学	社会人教育プログラムにおける講演
2024/10/24	公募	北村恭子	企業・一般市民	東北大学 電気・情報　技術連携フォーラム	技術連携フォーラムでの超螺旋光光源の紹介
2024/11/5	公募	井村考平	高校生	大阪府立富田林高等学校	大学の模擬講義
2024/11/25	B02	押切友也	大学院生	台湾国立交通陽明大学	プラズモン光化学を中心とした講義
2025/3/21	B01	Sadgrove Mark	高校生	多摩科学技術高等学校	ナノファイバに関する講演
2024/0726	公募	松尾光一	高校生	鹿児島県立加世田高等学校	「光で見る生命の仕組み」に関する授業
2025/3/29	公募	北村恭子	高校生	東北大学工学部in東京	受験生向けの講演会にて超螺旋光光源を紹介
パンフレット等での研究紹介					
2023/7/15	B02	押切友也	一般	学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ2023	学都「仙台・宮城」サイエンスマップに情報掲載
2024/6/14	公募	音賢一	一般	千葉大学	千葉大学理学部広報誌に研究紹介記事掲載
2024/7/14	B02	押切友也	一般	学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ2024	学都「仙台・宮城」サイエンスマップに情報掲載

表 1　領域発足後現在までに行われたアウトリーチ活動の例。

12　研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に記述すること（１頁以内）。

【総括班研究課題の活動状況と予算使用状況、今後の使用計画】

尾松領域代表を代表者、岡本(事務局)、江原(若手活動支援、領域活動内調整)を分担者、他の計画研究代表者 7 名を研究協力者として総括班を構成し、領域全体の連携のための計画研究・公募研究・展開研究のマネジメントなどを強力に支援している。また、尾松・岡本・中嶋をコアメンバー(班長)として、月 2 回程度オンラインで運営会議を行い、イベントの企画や共同研究の調整を密に実施している。

【会議費用】

これまで、総括班会議と領域会議(公開シンポジウム 3 回を含む)を各 5 回(オンライン 1 回を含む)、2023 年 3 月に自然科学研究機構との**ジョイントワークショップ**「キラルな光とキラルな物質」(大阪大学)、2023 年 10 月に学術変革領域(A)「メゾヒエラルキーの物質科学」との**合同シンポジウム**(千葉大学)を開催した。2024 年 4 月には、**海外評価委員**(Profs. K. Dholakia, H. Rubinsztein-Dunlop, M. Kadodwala, A. Govorov)を横浜(ワールドポーターズ会議室)に招き、**領域説明会・進捗状況報告会**を実施した。以上、**会議開催費用、評価委員・アドバイザー招聘費用**を支出した。また、展開研究の加速と新たな共同研究の創出と推進を目的として**合宿**を行った(長野県原村、参加者 33 名)。その際、家正則名誉教授(国立天文台)を外部講師として招き、特別講演を実施した。**合宿開催費用・講師招聘費用**を支出した。

このほか、「光渦発生技術」(千葉大学、15 名)、「高速 AFM」(大阪大学、4 名)、「微細加工技術」(北海道大学、8 名)などの**トレーニング工房**を開催し、**学生を含む若手研究者旅費や領域外講師(1 名)謝金**を支援した。

【国際連携支援】

国際共同研究ネットワーク構築を目的として、**アデレード大学（オーストラリア）とのジョイントワークショップ**(2023 年 2 月「Structured light for life」、2025 年 2 月「Workshop on Structured and Chiral light fields for Interdisciplinary Science」)、**国立陽明交通大学（台湾）とのジョイントワークショップ**(2023 年 6 月「Structured Laser and Matter 2023」(新竹)、2024 年 10 月「Structured Light and Materials workshop 2024」(大阪))をそれぞれ 2 回開催し、本領域から学生を含む若手研究者(延べ **25** 名)の派遣費用を支援した。そのほか、本領域と関連する SPIE Optics + Photonics 等の国際会議への**学生参加費用、論文投稿・オープンアクセス費用**を支援した(**2** 件)。

【若手支援】

蓑輪(C02)を中心として**若手総括班**を組織した。オンラインでのミーティングの他に、キャリアパスに関する情報共有・啓蒙を目的とした**学生合宿**(2024 年 7 月、琵琶湖白浜荘)を企画・開催し、**学生旅費**を支援した。また、2024 年 4 月には、理論化学を専門とする若手研究者が中心となり、「光と物質のキラルな相互作用の理論」をトピックとする**若手研究会**(大阪公立大)を開催し、**開催費用**を支援した。さらに、**「若手共同公募研究」**として、公募研究者(45 歳以下)間**共同研究費**(1 件)支援を行った。

中間評価以降も、定期的な領域会議、海外評価委員を招いた国際シンポジウム、合宿、「トレーニング工房」、若手研究会を継続的に開催する予定である。

【研究費の効果的使用の工夫、設備等】

初年度の総括班経費で共焦点レーザー顕微鏡を千葉大に整備した。光渦照射に伴う物質操作やらせん構造形成がリアルタイムで観測できるため、領域研究内の複数の共同研究(C03：細川、C04：松﨑、B 公募：馬越ほか)に活用されている。トレーニング工房におけるデモンストレーションなどにも利用され、今後、広く領域内および国際共同研究において活用する予定である。

また、**各計画研究で購入した設備についても共有化**を進めている。例えば、田中(A01 分担：北海道)、尾松(C01：千葉)、細川(C03：大阪)ら複数の研究機関で**光渦レーザー照射光源**が整備された。その結果、現在、複数の研究機関が共同研究拠点として機能している。また、余越(A01)、江原(A02)において、**クラスタエレメント**が整備された。現在、それぞれ光量子工学シミュレーション・量子化学計算を通じて、実験科学者との共同研究を進めている。**領域内共用計測装置**として、世界初のシステム化された**光渦二色性計測装置**が田中らにより開発された。また、岡本(B01)により、**高速円二色性イメージングシステム**が完成した。今後、領域内の汎用的な計測装置として活用され、超螺旋光－キラル物質間相互作用の理解が進むことが期待される。

13　総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制(総括班評価者の氏名や所属等)や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に記述すること(２頁以内)。評価コメントは、次の点について記述すること。
(1) 研究領域の設定目的に照らして、着実に研究が進展しているか。
(2) これまでの研究成果に照らして、今後の研究計画は適切なものとなっているか。
(3) その他、特筆すべきポイントや改善すべきポイント

本領域では、**評価委員およびアドバイザー8 名、海外評価委員 4 名**の計 **12 名**の有識者より評価コメントを頂いた。以下、氏名所属を列挙する。

評価委員：谷田貝豊彦 (宇都宮大学)・末元　徹 (電気通信大学)・増原　宏 (国立陽明交通大学)・八島栄次 (国立清華大学)　**アドバイザー**: 笹木敬司 (北海道大学)・井上康志 (大阪大学)・栗原和枝 (東北大学)・原田慶恵 (大阪大学)

海外評価委員: Kishan Dholakia (University of Adelaide)・Halina Rubinsztein-Dunlop (University of Queensland)・Malcolm Kadodwala (University of Glasgow)・Alexander Govorov (Ohio University)

【研究領域の設定目的に照らして着実に研究が進展しているか?】

≪超螺旋光を用いたキラル物質科学における挑戦的な研究が着実に進展して素晴らしい結果が出始めている。光によるキラル物質科学にフォーカスした良く練られているプロジェクトであり世界的に見ても極めてユニークである。≫という高い評価を頂いている。**領域としての共同研究の推進に一層努力する。**

＜個別コメント＞

・光技術を使って物質のキラル構造を創る試みを物理、化学、生物学の広い研究領域にもたらし、新しい科学分野の創造に挑戦している。このグループが**世界的に見ても最先端を走っている**(谷田貝)。

・実験と理論研究者の相補的な共同研究により、キラルな光の本質の理解と高精度円偏光二色性顕微鏡や円偏光発光イメージング技術の開発、光の螺旋性を用いた不斉選択的なキラル結晶化や巨視的な螺旋ポリマーの選択的螺旋形成といった**挑戦的な研究が展開されている**。生体で見られる巨視的な螺旋の形が生命の機能にどのように寄与しているか、についてはこれまで検討されたこともなく、**本領域だからできる挑戦**といえる(八島)。

・複数の研究者がハミルトニアンレベルにまで立ち返って理論を構築し、複雑な 3 次元キラル物質の構造機能を解析しようとしている。領域代表者のリーダーシップの下に、当初予定していた**研究目標の実現一歩手前まで**着実に研究成果をだしている(増原)。

・各研究グループが着実に成果を上げてきた。超流動 He 中ケルビン波、キラルナノ構造デザイン、円偏光によるポリマー成長制御、キラル結晶の選択的成長、などの研究成果が印象に残った。光スキルミオンの物質への転写はこれからの発展が期待される(末元)。

・円偏光、光渦を基盤としたフォトニクスを軸に、ナノスケールからマクロスケールまでを包含したキラル物質の創成と物性解明、さらに工学的展開を目指した**独創的な研究領域の開拓が確実に実施されている**。学問分野を横断した共同研究−キラル秩序の化学、螺旋の工学、渦の物理学−にフォーカスした取り組みは、領域全体に研究目標を明確に共有するものとして高く評価できる(井上)。

・中間評価までの成果は十分に高いものであり、**開始時には個別的にでていた成果が一般化されてキラル光物質科学の形が見えてきた**(栗原)。

・キラルの化学・らせんの工学・渦の物理学など、既存の分野を超えた横断的研究分野の開拓を目指して、**化学、材料科学、物理学など多様な研究者が集結して精力的に研究を進めている**(原田)。

・This particular grant focused on the aspects of exploiting and creating chiral materials by the interaction with structured light, namely helical light fields. An overarching goal creates novel classes of chiral materials with helical light that cannot be attained in nature. **Overall, this is an exciting, contemporary programme of both national and international importance.** Helical light fields (e.g. shaped in polarization, azimuthal phase) have captured the attention of many scientists across the world (Dholakia).

・**I am particularly impressed and interested in studies of chiral optical forces and creation of chiral order.** I believe that for example pinwheel nanostructures represent a very interesting development that might lead to a number of very interesting applications in the future. Overall, **this is a very strong, convincing programme with a highly capable team of both experimental and theory.** I was most impressed with the leadership and the range of presentations and the combination of lab-based results and deep theoretical understanding. **The work is undoubtedly internationally leading** (Rubinsztein-Dunlop).

・The “Revolution of Chiral Materials Science using Helical Light Fields” project continues to demonstrate strong momentum and strategic focus in what is clearly an internationally competitive and timely area. **The large number of collaborative papers with international partners underlines the project’s global reach and its ability to lead complex, multidisciplinary research initiatives** (Kadodwala).

【今後の研究計画は適切なものとなっているか?】

≪領域としての融合を工夫した展開研究の萌芽が見え始めてきた。展開研究を中心に進めるべきである。≫という評価を頂いている。**展開研究を一層加速させる。**

＜個別コメント＞

・領域として重要なのは、研究の大きな流れを作り出し一分野を創生する事である。そこで工夫されたのが展開研究であり、①キラル化学、②らせん工学、③渦物理の 3 件の展開研究の紹介があった。キラル結晶化はこの領域で取り組むべき重要なテーマであり、多くのグループが連携可能なので一つの大きなうねりとなる可能性がある。**展開研究の構成としては、理論やシミュレーションを核にして様々な物質系をつないでいくのが生産的かもしれない**(末元)。

・展開研究における縦串・横串の学際的融合研究から全く新しい研究の芽を生み出すという学術変革ならではの進展を今後期待したい(笹木)。

・螺旋光による生体適合性ポリマーの光重合によるキラル構造体形成が確認されており、今後の 3 **次元生体組織構築を期間内に実現できること**を期待したい。光による量子渦の操作法の進展が見られ、**乱流の理解に資する技術の確立を目指していただきたい**(井上)。

・**Importantly, the area continues to develop talent and capacity.** The number of early-career researchers receiving national awards, along with several academic promotions within the team, reflects strong mentoring and the cultivation of leadership within Japan’s next generation of chiral materials scientists (Kadodwala).

【特筆すべきポイントや改善すべきポイント】

≪領域のビジビリティーを一層向上させるため、積極的に国際会議でシンポジウムなど組むべきである。≫という評価を頂いている。**領域では Pacifichem(ハワイ)でのシンポジウムを予定している。また、国際ワークショップも継続する。**

＜個別コメント＞

・巨視的な螺旋ポリマーの選択的な螺旋構造の構築は、生体で見られる巨視的な一方向巻きの螺旋が生命の機能にどのように関与しているかという素朴な疑問の解決に繋がる可能性がある(八島)。

・研究テーマは、キラルというキーワードの下に基礎的な理論から物理、化学、生物、計測法まで広い範囲に広がっていて、新規でかつユニークなものが多い(末元)。

・若手研究者や学生の学会賞・ポスター賞等の件数が多く、若手研究者の昇任人事も 7 件あることは、人材育成の成果と評価できる。計画研究メンバー・公募研究メンバーともに若手研究者の人数が多く、お互いに切磋琢磨し合って本研究領域の将来を担い発展させていく意識が感じられる。一方、評価委員・アドバイザーも含めた総括班メンバーで、本学術変革領域の運営や今後の方針に関して情報交換・意見交換を行う機会がもう少しある方が良いように思われる(笹木)。

・当領域の進展についての記載（歴史的展開からフロンティアにあるという）があると、わかりやすい。外国ではチーム研究がされていないなどの観点でデータを示していただきたい(栗原)。

・**I think it would be good to further promote this area at national/international meetings.** The eminent researchers have invited talks at major conferences (e.g. Optica, SPIE) and these could be further publicized. If desired the leaders of the project can consider having dedicated sub-conferences at next year’s OPIC meeting or other events in the Pacific Rim. I would appreciate seeing how the careers of younger and emerging researchers have benefitted, or s being nurtured through the programme (Dholakia).

・**The group’s role in organising major international conferences and symposia further highlights its growing leadership role in the global community.** This outward-facing activity is critical in maintaining Japan’s visibility in this highly competitive field (Kadodwala).

・**I would like to see a bit more of outward looking collaborations with international community.** The collaborations within the project are excellent, but the program could be further strengthened with further international collaborations (Rubinsztein-Dunlop).