

令和元年5月30日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02161

研究課題名(和文)キラルなプラズモン励起による不斉光化学場の展開

研究課題名(英文)Development of Chiral Chemical Fields with Chiral Plasmons

研究代表者

岡本 裕巳 (Okamoto, Hiromi)

分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・教授

研究者番号：20185482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：右手と左手のように、物の鏡像体が自身と重ならない構造をもつ時、その物はキラルであるといい、分子やナノ物質でもキラリティは重要な物質の特性である。分子レベル・ナノレベルのキラリティを調べる光学活性分光法を顕微鏡に組み合わせる手法を開発・高度化し、それを用いてナノ物質の局所的なキラリティとその挙動を調べ、応用する研究を行った。局所的なキラリティは従来の光学活性の特性とは異なる挙動を示すことを明らかにした。貴金属ナノ構造と偏光を適切に用いることで、キラリティのない系に分子レベル・ナノレベルのキラリティを誘起する可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キラルな分子やナノ物質には右手系と左手系があり、光も電場の構造がキラルな螺旋状となる右円偏光と左円偏光があるが、そのキラリティの空間スケールが大きく異なる。従って通常は光とナノ物質のキラルな相互作用は弱く、ナノ物質が特定の円偏光を強く放出したり、左右円偏光でナノ物質の応答が大きく異なることは稀である。プラズモン物質を介することで、ナノ物質と円偏光の相互作用が強くなることが考えられ、本研究ではその基礎となる局所的なキラリティの光学特性と、それに基づくいくつかのキラルな光物理化学的効果を示した。将来的に、生命に関連するキラル物質の分析や、新しい光デバイスの基礎となる可能性が期待される。

研究成果の概要(英文)：When a matter is not superposable on its mirror image, as in the case of right and left hands, the geometry of the matter is referred to as "chiral". Chirality is an important characteristic of molecules and nanomaterials. In this research, we developed and/or advanced the methods combining microscopy with optical activity spectroscopy, which characterizes molecular- and nano-level chirality, and we utilized them to investigate fundamental properties of local chirality of nanomaterials, and to apply the knowledge to develop novel chiral photo-chemical functions of materials. We have shown that local chirality properties of nanomaterials show fundamentally different behaviors as compared with those observed with conventional macroscopic optical activity spectroscopy. By the properly designed usage of noble metal nanostructures and polarized optical fields, we found that molecular- and/or nano-scale chirality can be induced on achiral materials systems.

研究分野：ナノ光物理化学

キーワード：プラズモン キラリティ ナノ光学 化学反応 不斉化学分析 走査プローブ顕微鏡

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

対象物の鏡像体が自身と重ならない構造をもつ場合に、そのものはキラルであるという。(2次元的な物質は、3次元空間で任意に動かすことができる場合には、その鏡像体は常に自身と同一となるが、2次元面内に制限されている場合には、鏡像体と同一とはならない場合があり、そのような構造を「2次元キラル」であるとする。)分子やナノ物質でもキラリティは重要な物質の特性である。アミノ酸や糖など、生体を構成する物質の多くがキラルな構造をもち、ナノサイエンスにおいてもキラリティがしばしば問題となる。物質のキラリティは、分光学的には旋光性や円偏光二色性(CD)などの光学活性によって調べられる。これは物質の屈折率や吸収が、左円偏光と右円偏光で異なることに起源を持つ効果である。CDは物質のキラリティを解析する手段として最も普及した方法となっており、広く用いられている。キラルな金属ナノ構造の分光特性を用いて、キラルな生体分子の極微量分析を行う試みもなされている^[1]。

走査型近接場光学顕微鏡(SNOM)は光を用いた顕微観測手法でありながら、光の回折限界を超えるナノメートルの空間分解能を実現する方法で、我々は数年前に、SNOMで局所的なCDを計測してイメージを撮る近接場CDイメージング装置を開発した。この装置を用いて2次元金属ナノ構造の近接場CDイメージングを行い、CD信号は一樣ではなく構造内に正負の信号が混在しており、信号の極値は通常の巨視的な測定によるCDに比べて二桁程度も強く、局所的には大きなCDが観測されることを見出した^[2]。また、従来の巨視的なCDでは、信号は系がキラルな場合に限り現れるという選択律があり、アキラルな(=キラルでない)構造はCDを示さないと考えられているが、我々はアキラルな構造体単独でも、局所的なCD信号を与えることを実験的に示した^[3]。ナノレベルの局所的なCD計測では、従来のCDの選択律が成立しないことを示している。

これらの研究や関連する分野の文献調査を通じて、我々は以下に述べるようなナノ構造体のキラル光学特性に基づく新たな研究展開が可能であると考えた。(1)局所的に極めて大きくねじれた電場が存在する。(ここでねじれた電場とは、電場が空間的に螺旋を巻いていることを指し、円偏光がその典型である。金属ナノ構造の周辺では、自由空間中の円偏光よりも強くねじれた光電場が生成する。)(2)アキラルな構造でも、局所的にはキラルな光学特性を示す。(3)アキラルな構造に直線偏光を照射した場合にも、局所的にねじれた電場が生成する。(4)物質と円偏光との相互作用が、自由空間中でのそれよりも遥かに大きくなる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、まず(A)研究方法論の基盤としてのCD顕微鏡の拡張と高感度化の取り組み、次いで(B)金属ナノ構造周辺のキラル光学場の解析を行い、それを基礎に(C)不斉化学場・不斉化学分析への展開を行うことを目的とした。(A)では、近接場CD顕微鏡の信号検出感度を向上させる方法の開拓、局所的なねじれた光の電場に関する詳細な情報を得るための新たな光学配置、非線形光学過程による近接場光学活性イメージング法の開発、を目的とした。(B)では、開発した手法を利用して、様々な金属ナノ構造のキラル光学場を解析することを目指した。従来ねじれた光電場の有効な発生源、或いは解析法として考えられていなかった、アキラルな金属ナノ構造、直線偏光による励起と、ねじれた光電場の関係についても、理論解析を併用して明らかにすることを目的とした。(C)では、キラル・アキラルな金属ナノ構造、円偏光・直線偏光を組合せた系と、周辺分子の相互作用について、光化学と化学分析の視点から研究展開を目的とした。光化学では、アキラルなナノ構造と偏光状態を制御した光によってキラルな構造を作成する試み、光による分子レベルの不斉誘起の新しいスキームを提案することを目標に、金属ナノ構造によってキラルな系を誘起することがどの程度可能かを明らかにすることを目的とした。不斉化学分析では、キラル或いはアキラルな金属ナノ構造にキラル分子が共存した時の偏光分光特性の変化から、キラル分子の分析を試みた。(B)の成果に基づき様々な金属ナノ構造と様々な偏光条件の組合せによる多様な分析法の可能性を検討し、簡便に感度の高い分析が可能となる方法を探索した。

金属ナノ構造体の光学活性に関する研究は、2000年代の先駆的な研究^[4]に始まり活発になりつつあるが、その殆どが巨視的な分光測定によっており、従って当然、試料の幾何構造自体がキラル(2次元キラルを含む)な構造が研究対象であった。回折限界を大きく超えるナノレベルの空間分解能で光学活性イメージングが行える我々の研究手法によって、アキラルな構造の局所光学活性も実験的に議論でき、そこに本研究計画の大きな特色の一つがある。

3. 研究の方法

まず(A)の項目として、CD計測に必要な円偏光変調方式の改善の検討を行った。研究開始時に使用していた近接場CDイメージング装置では、通常のCD分散計で採用されている、左右円偏光を変調してロックイン検出する方式を用いている。この方式では、試料に直線偏光二色性がある場合には、それが誤差要因としてCD信号に重畳する。本研究では左円偏光と右円偏光のみが試料に照射される新たな方式を開発した。また近接場CD検出モードの拡張の試みを行った。研究開始時の近接場CD検出では、照射光は円偏光としたが、検出光は偏光を特定せずに強度のみを計測していた。これを特定の直線偏光を近接場で試料に照射し、散乱光(透過光)の偏光状態(偏光方位角と楕円率)を検出する手法に拡張した。これによってキラル光学場の解析、特に理論計算との比較において有用な情報が豊富に得られる。更に今一つの装置開発課題として、円

偏光を用いた非線形光学過程（金からの二光子誘起発光）による、近接場 CD イメージングの有効性を検討した。二光子励起を誘起する光（フェムト秒パルス光）に左円偏光と右円偏光を用い、それぞれで得られたイメージの差を取ることで、二光子 CD イメージを得る。

(B)の項目として、金ナノ構造の局所 CD 等に関して、モデル系の計算や有限差分時間領域 (FDTD) 法による電磁気学理論計算を併用したプラズモンモードの解析を通じて、局所 CD 信号の起源の詳細について明らかにした。また(A)で開発した研究手法を用いた実験結果もあわせて理論計算との比較、ねじれた光電場を与えるプラズモンモードの解析に用いた。

(C)の項目として、金属ナノ構造の周辺での不斉誘起、及び金属ナノ構造を利用した不斉分子の高感度検出の試みを行う。これらは、基本的には伝搬光を用いた実験となる。不斉誘起としていくつかの実験を行った。①アキラルな金属ナノ構造体と共存するフォトレジストの2光子励起光重合反応を、フェムト秒 Ti:sapphire レーザーからの近赤外円偏光の照射で誘起し、ナノスケールのキラル構造が形成するかどうかを試みた。この系では金ナノ構造、フォトレジストのいずれにもキラリティはなく、円偏光のみがキラリティの起源となる。②アキラルな分子がキラルな構造を持つ結晶をつくる場合がある。そのような分子の過飽和溶液に光照射して結晶核を生成する際に、金属ナノ構造周辺の局所円偏光場によってキラル結晶が生成する可能性を追求した。この実験研究は国立交通大学（台湾）との共同研究として行った。③キラル金属ナノ構造のプラズモンとアキラルな分子構造を持つ蛍光分子の近接場相互作用により、円偏光発光が発生する可能性について実験・解析を行った。

不斉分子の高感度検出については、電子線描画法で作成した2次元金ナノ構造に不斉超分子（ウイルスを用いた）を共存させた時に、ナノ構造の光学活性信号が変化する状況を検出した。金ナノ構造として、それまでに試みられていた2次元キラルな構造に加え、アキラルな構造を用いた実験を試みた。この実験研究はグラスゴー大学との共同研究として実施した。

4. 研究成果

(1) CD 顕微鏡の拡張・高度化とその利用、ナノ物質のキラル光学特性解析

①円偏光変調の新手法の開拓と CD 顕微イメージング装置の構築、応用：従来の CD 分散計では、光弾性変調器 (PEM) を用いて左右円偏光を変調することで左右円偏光での吸収差、即ち CD を検出しているが、PEM では必ず直線偏光成分が発生するため、異方性のある試料の計測、顕微計測には不向きであった。本研究では原理的には直線偏光成分を完全に排除することのできる新たな変調法を開拓し、それを共焦点配置の遠方場顕微鏡に組み合わせて、高感度 CD 顕微イメージング装置を構築した。2次元キラル金属ナノ構造配列試料を用いてその検出特性を確認した例を図 1 に示す^[5]。

右手系と左手系の試料で符号の逆転する CD 信号を示し、またほぼ回折限界で決まるサブ μm の空間分解能が得られた。検出感度は光学密度 (OD) で 10^{-4} 程度 (楕円率角で mdeg 程度) であった。この CD 顕微イメージング装置は物質科学、生命科学の様々な分野で利用が可能と期待される。その一例として、金属有機構造体 (MOF) 微結晶のキラリティ検出の結果を図 2 に示す (九州大学との共同研究)^[6]。この例では MOF の掌性を合成時の添加物によって制御することができる。CD イメージによって、ほぼすべての微結晶が同じ掌性をもつことが明らかとなった。この CD 顕微イメージング手法は後半な利用が想定され、現在、医学応用を念頭とした共同研究や、後述のような光誘起結晶核生成、種々のキラルナノ構造物質のキャラクタリゼーション等に関する共同研究など、様々な利用を展開、或いは模索している。

②近接場光学活性イメージングの拡張：開口近接場プローブから試料に直線偏光を照射し、散乱光 (透過光) の偏光状態 (楕円率と偏光方位回転角) を検出して、それを信号として近接場イメージを計測する近接場光学活性イメージング装置を構築した。図 3 はアキラルな構造を持つ金ナノロッド

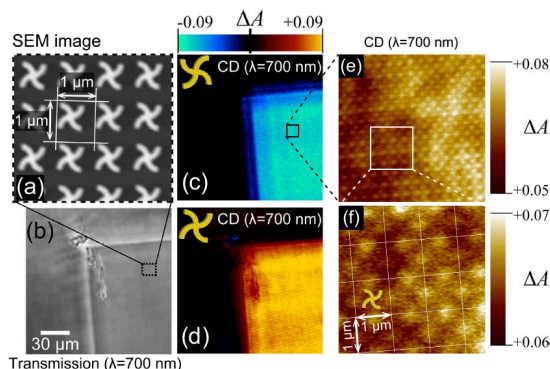


図 1 2次元キラル金ナノ構造試料の CD 顕微鏡観察。a:電子顕微鏡像。b:透過光学顕微鏡像。c,d:右手系,左手系試料の CD 像。e,f:c の拡大像^[5]。

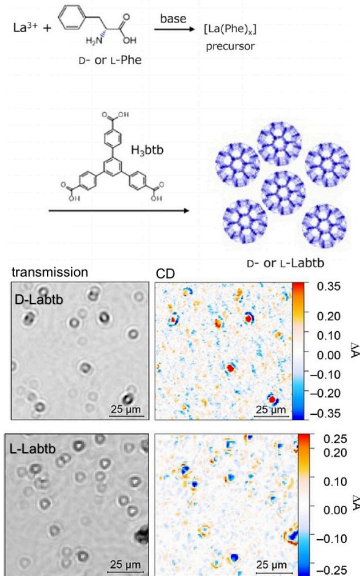


図 2 キラル MOF の生成スキーム (上) と、右手系,左手系の MOF 微結晶に対する透過光学及び CD 像 (下)^[6]。

に対して、この手法を適用して得られた近接場像の例である[7]。この例ではロッドの軸と平行な直線偏光を照射しており、対称軸上では楕円率、偏光回転ともに0であるが、周辺部では強い楕円率、偏光回転角が見られ、強い局所的な光学活性のあることがわかる。楕円率と偏光回転は異なる空間分布を示す。解析の結果、プラズモン共鳴を単純な誘起点双極子とする近似で、これらの空間分布が定性的によく説明されることがわかった。また入射偏光をロッドの軸から傾けて入射した場合には、光の場を含めた系全体がキラルな配置となり、ロッドの中心においても強く円偏光した光（円偏光の純度として50%程度以上）が発生することも明らかとなった[8]。非線形光学過程（2光子励起）によるCDイメージングでは、多重極プラズモンを励起する金ナノロッドでCDイメージを観測し、やはりプラズモンを複数の誘起双極子の集合としたモデルで実測のイメージを定性的に解釈できることが明らかになった[9]。これらの解析結果は、プラズモン励起に伴う局所的なキラル光場を実験的に示した点でユニークな結果であるとともに、キラルプラズモン場の解析・予測の基礎として有用な指針となると考えている。

(2) プラズモンによる不斉化学場・不斉化学分析への展開

①フォトレジストの2光子励起重合反応によるキラルナノ構造生成の試み：電子線描画法でガラス基板の上にアキラルなナノロッドを生成し、紫外硬化フォトレジストを塗布してフェムト秒近赤外円偏光を照射して現像し、重合した残存物を走査電子顕微鏡で調べた。図4の例のように、ナノロッドに対して重合物が非対称に生成している場合が見出され、キラルなプラズモンがナノロッドに誘起され、それにより光で不斉誘起を起こした結果と解釈できるが、十分な再現性を得るに至らなかった。最近東京大学のグループが1光子光化学反応で同様の効果を見出しており[10]、我々の発想は正しかったことになるが、残念ながら先鞭をつけるには至らなかった。

②光誘起キラル結晶核生成：塩素酸ナトリウム NaClO_3 は分子としてアキラルだが、安定相の結晶になるとキラルとなる。その掌性が偏光顕微鏡を用いて容易に帰属できることが知られている。銀微粒子の凝集体存在下、 NaClO_3 溶液に円偏光を照射することで、生成する結晶核の左右掌性のバランスが偏ることが、最近報告されている[11]。本研究では国立交通大学（台湾）との共同研究として、電子線描画法によりガラス基板の上に2次元キラル、アキラルな金ナノ構造体を作成し、その上での NaClO_3 溶液からの光誘起結晶核生成を、直線偏光・円偏光照射下で行った。生成した結晶の掌性を偏光顕微鏡で帰属して、左右掌性のバランスの偏りの有無を調べた。原理的にはアキラル構造である金ナノロッドに直線偏光の偏光角を傾けて入射した場合にもナノ構造近傍に円偏光場が生じるはずだが、現時点では生成した結晶核に左右掌性のアンバランスは見いだせていない。一方、2次元キラルな金ナノ構造に直線偏光を照射した場合には、その入射偏光角の条件に依存して有意な左右掌性の偏りが生じていることが見出され、現在その再現性の確認を行っている。十分な再現性が得られた場合、金ナノ構造のキラリティの空間スケールは分子よりも遥かに大きく、また偏光角に依存して掌性の偏りが変化することから、プラズモンのキラリティによって分子（配列）レベルのキラリティが結晶に誘起されたことを意味する。

③キラル金属ナノ構造と相互作用した蛍光色素からの円偏光発光：2次元キラル金ナノ構造をガラス基板の上に電子線描画法で作成し、そこにアキラルな分子構造を持つ近赤外蛍光色素 IR125 をドーブした高分子を被せた試料を用意した。この系を直線偏光で励起し、色素からの発光の円偏光度のスペクトルを測定した。発光の左右円偏光の偏りを示す非対称性因子 g （純粋な円偏光で ± 2 となる）が 0.1 を超える強く左右に偏った円偏光が得られ、金ナノ構造の掌性を反転させると円偏光発光の掌性も反転した（図5）

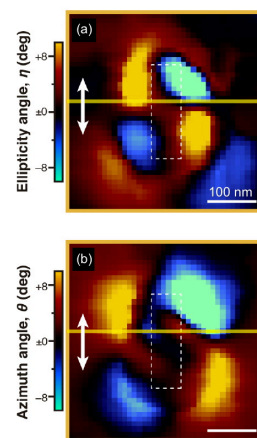


図3 金ナノロッドの近接場直線偏光励起による楕円率像（上）と偏光回転角像（下）[7]。

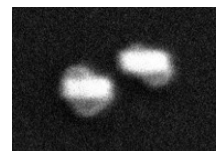


図4 金ナノロッドの円偏光照射に伴うフォトレジスト重合物の電子顕微鏡像。

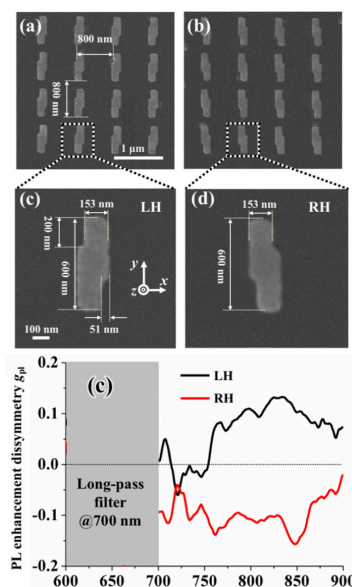


図5 2次元キラル金ナノ構造の電子顕微鏡像（上）及びそれと共存した蛍光色素 IR125 からの発光の非対称性因子 (g 値) のスペクトル（下）[12]。

[12]. キラルな構造を持つ蛍光分子からの発光においても円偏光発光が得られるが、 g 値は通常大きくても 10^{-2} 以下である(希土類元素を含む錯体で大きな g 値を示すものが報告されているが、蛍光強度が弱い)。キラルなプラズモンと色素分子が近接場相互作用することで、高い円偏光度が得られたと考えられる。用いた金ナノ構造の分光特性、プラズモンモードの空間特性と、発光の円偏光度 (g 値) の波長依存性の解析から、発光が強く円偏光を示すのは、キラルな配置の多重極プラズモンが発光分子と近接場相互作用する場合であることが示唆された。双極子的なプラズモンと共鳴する波長では、発光の円偏光度は低い。この成果は、プラズモン共鳴を用いて高い円偏光度の円偏光発光を得る方法・指針を示した点で、意義のあるものと考えている。

④プラズモンの分光特性による不斉分子の高感度検出：2次元キラル金属ナノ構造の光学活性スペクトル(CD および旋光性)は、その表面へのキラル分子(蛋白分子等)の吸着によってピーク位置がシフトし、そのキラル分子検出感度が極めて高い(従来のCD計測に比較して6桁程度)ことがグラスゴー大学のグループにより報告されている[1]。本研究では、当のグラスゴー大学グループとの共同研究として、この手法を拡張する研究を行った。以前の方法では、2次元キラル金属ナノ構造を右手系と左手系の2種類のエナンチオマーを用意して、それらの光学活性スペクトルの分子吸着に伴う変化を計測していた。本研究では上記(1)の結果に基づき、アキラルな金ナノ長方形格子構造と直線偏光入射光を用いた計測を試みた(図6)。入射偏光方向は格子の軸から傾け、反射光の偏光を解析してその偏光回転角を計測した。入射偏光が左に傾いたときの偏光回転角と、右に傾いたときのそれとの差が、試料による光学活性信号に相当する。試料として超分子であるウィルスを用いたところ、金ナノ構造表面のウィルスを高い感度(サブナノグラム以下)で検出できることが明らかとなった。この方法ではプラズモン共鳴物質としてアキラルな金ナノ構造を用い、直線偏光の入射条件の調整のみで光学活性信号を得ている。以前の方法では2種類の金ナノ構造試料を必要としたが、本方法では1種類で済むことから、簡便であるとともに、試料のばらつきの影響を受けにくく、確度の向上が期待される。この成果については、論文の改訂中である。

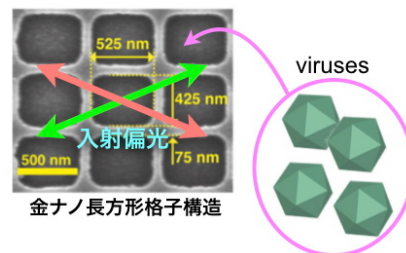


図6 アキラル金ナノ構造による高感度不斉分子検出のスキーム。金ナノ長方形格子に超分子(ウィルス)を吸着させ、傾けた直線偏光を入射して反射光の偏光回転角スペクトルを計測する。

<引用文献>

- [1] Hendry et al., *Nat. Nanotechnol.* **5**, 783 (2010).
- [2] Narushima, Okamoto, *J. Phys. Chem. C* **117**, 23964 (2013).
- [3] Hashiyada et al., *J. Phys. Chem. C* **118**, 22229 (2014).
- [4] Kuwata-Gonokami et al., *Phys. Rev. Lett.* **95**, 227401 (2005).
- [5] Narushima, Okamoto, *Sci. Rep.* **6**, 35731 (2016).
- [6] Yamada et al., *Chem. Eur. J.* **25**, 6698 (2019).
- [7] Hashiyada et al., *ACS Photon.* **5**, 1486 (2018).
- [8] Hashiyada et al., *ACS Photon.* **6**, 677 (2019).
- [9] Nishiyama, Okamoto, *J. Phys. Chem. C* **120**, 28157 (2016).
- [10] Saito, Tatsuma, *Nano Lett.* **18**, 3209 (2018).
- [11] Niinomi et al., *CrystEngComm* **18**, 7441 (2016).
- [12] Le et al., *J. Phys. Chem. C* **122**, 24924 (2018).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Teppei Yamada, Toshiki Eguchi, Taro Wakiyama, Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Nobuo Kimizuka, Synthesis of Chiral Labtb and Visualization of Its Enantiomer Excess by Induced Circular Dichroism Imaging, *Chem. Eur. J.*, vol. 25, No. 27, 6698-6702 (2019). 査読有
doi: 10.1002/chem.201900329
- ② Shun Hashiyada, Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Active Control of Chiral Optical Near Fields on a Single Metal Nanorod, *ACS Photon.*, vol. 6, No. 3, 677-683 (2019). 査読有
doi: 10.1021/acsp Photonics.8b01500
- ③ Khai Q. Le, Shun Hashiyada, Masaharu Kondo, Hiromi Okamoto, Circularly Polarized Photoluminescence from Achiral Dye Molecules Induced by Plasmonic Two-Dimensional Chiral Nanostructures, *J. Phys. Chem. C*, vol. 122, No. 43, 24924-24932 (2018). 査読有
doi: 10.1021/acs.jpcc.8b07297
- ④ Shun Hashiyada, Tetsuya Narushima, Hiromi Okamoto, Imaging Chirality of Optical Fields near Achiral Metal Nanostructures Excited with Linearly Polarized Light, *ACS Photon.*, vol. 5, No. 4, 1486-1492 (2018). 査読有
doi: 10.1021/acsp Photonics.7b01511

- ⑤ Yoshio Nishiyama, Hiroimi Okamoto, Near-field Nonlinear CD Imaging of Single Gold Nanostructures, *J. Phys. Chem. C*, vol. 120, No. 49, 28157-28162 (2016). 査読有
doi: 10.1021/acs.jpcc.6b07315
- ⑥ Tetsuya Narushima, Hiroimi Okamoto, Circular Dichroism Microscopy Free from Commingling Linear Dichroism via Discretely Modulated Circular Polarization, *Sci. Rep.*, vol. 6, 35731 (10 pages) (2016). 査読有
doi: 10.1038/srep35731

〔学会発表〕（計 70 件）

- ① Hiroimi Okamoto, Imaging and Control of Chiral Plasmons, 11th International Conference on Nanophotonics (ICNP 2018) (2018).
- ② Hiroimi Okamoto, Shun Hashiyada, Tetsuya Narushima, Yoshio Nishiyama, Imaging of Local Chirality with Near-Field Microscopy, The 11th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics (APNFO11) (2017).
- ③ Hiroimi Okamoto, Local optical activity of nanomaterials, 日本化学会第 97 春季年会 特別企画「配位アシンメトリー：非対称な構造と空間の科学」(2017).
- ④ Hiroimi Okamoto, Yoshio Nishiyama, Kohei Imura, Observation of plasmon wave packet motions with ultrafast near-field microscopy, 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'16) (2016).
- ⑤ Hiroimi Okamoto, Local Optical Activity in Metal Nanostructures Visualized by Near-Field Circular Dichroism Microscopy, PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2015 Prague (2015).

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：円偏光照射器，分析装置及び顕微鏡
発明者：岡本裕巳，成島哲也
権利者：大学共同利用機関法人自然科学研究機構
種類：特許
番号：特願 2016-236414
出願年：2016 年 12 月 6 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：成島 哲也
ローマ字氏名：(NARUSHIMA, Tetsuya)

研究協力者氏名：西山 嘉男
ローマ字氏名：(NISHIYAMA, Yoshio)

研究協力者氏名：橋谷田 俊
ローマ字氏名：(HASHIYADA, Shun)

研究協力者氏名：レ カイ クワン
ローマ字氏名：(LE, Khai Quang)

研究協力者氏名：カドドワラ マルコム
ローマ字氏名：(KADODWALA, Malcolm)

研究協力者氏名：ジャック カラム
ローマ字氏名：(JACK, Calum)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。