

# メタマテリアル表面上のナノ微粒子からの蛍光偏光解析の研究

表面分光科学チーム（課題番号：137104）

研究期間：平成 25 年 7 月 24 日～平成 28 年 3 月 31 日

研究代表者：中山和之 研究員：田尻恭之、原田拓典（平成 26 年 7 月 31 日まで）

## 1. はじめに

近年、メタマテリアルと呼ばれる自然界には無い電磁応答を示す人工物質が注目を受けている。メタマテリアルを利用することで従来の光学計測では不可能な、光の回折限界を突破したサブ波長イメージング、物体を覆うことで周囲の光を曲げ、その物体を見えなくする光学迷彩などの研究が行われ、新機能素材開発の新たな分野として産業界でも期待されている。最近ではメタマテリアル表面を用いた発光体制御も考案され、発光効率の高い新規な光源の開発、表面プラズモンポラリトンなどの表面に局在化した電磁場を利用した、超高感度計測の研究が行われている。本研究はこのようなメタマテリアルを用いた新機能物質の研究の機運の高まりを受けて、その基本となるメタマテリアルと光の相互作用の研究を行う。

本課題では表面発光レーザーをはじめとした新規な低次元デバイスの開発に向け、“メタマテリアルを用いた光-物質相互作用の研究”、“マルチフェロイック特性を持つナノ粒子の合成方法の確立と物性の解明”、“円偏光発光材料の創製と光学物性評価装置の開発”を主要なテーマに据え研究をすすめる。本研究課題により、新規な光源開発、表面近傍の高感度計測が可能となり、さらに有機電子素子開発、バイオ、ナノケミストリー分野への応用も期待される。次節以降、各課題に関する研究成果報告を行う。

## 2. メタマテリアルを用いた光-物質相互作用の研究（研究代表者：中山和之）

### 研究背景

本研究はハイパボリックメタマテリアル（HMM）と呼ばれる双曲線型の分散構造を持つ特異な物質を対象とする。HMMは構造が比較的シンプルで物理的な話題も

豊富なため、近年活発な研究が行われている。HMMを実現する方法として金属と誘電体の多層膜構造が知られている。これまで多層膜メタマテリアルの積層パターンとしては周期配列が採用されていた。本研究では新たに準周期配列を導入した準周期メタマテリアル近傍の発光体の発光過程に関する解析・研究を行った。一般に準周期配列は自己相似構造を持ち、マルチフラクタル性を示すことが知られている。このような準周期構造を利用した光-物質相互作用の増強と特異な電磁モードの解析を目的として研究をすすめた。

### 研究成果

#### (1) 光-物質相互作用の増強

準周期配列でよく知られたものにフィボナッチ格子がある。これは一次元準周期配列のなかで、二種類の層で構成される最も簡単な準周期配列の一つである。図1に金属（Ag）/誘電体（SiO<sub>2</sub>）層をフィボナッチ格子状に並べた多層膜メタマテリアル（FM）と、周期的に並べた多層膜メタマテリアル（PM）を示す。ここで準周期性に由来する物理的な効果を抽出するため、PMにおける金属と誘電体の体積比率は、FMと揃えてある。

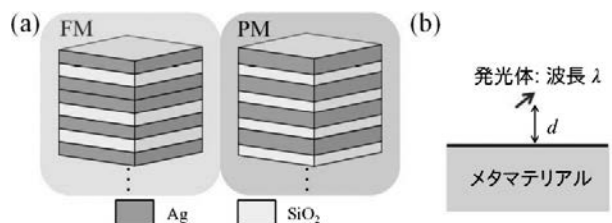


図1 (a) 準周期メタマテリアル (FM) と周期メタマテリアル (PM). メタマテリアルと発光体の配置。

次に現在のナノ構造体の作製技術を考慮し、具体的なメタマテリアルの構造を以下のように考える。FMの金

属層と誘電体層のユニット長は20nmとし、構造長を可視域の波長よりも十分小さくするため、第6世代のフィボナッチ格子 (FM6) を採用する (構造長: 260 nm)。またPMはFMと構造長に近いものと考え、ユニット長は40nmで周期は6周期とする (PM6)。メタマテリアルにおける電磁相互作用の強さの指標である局所状態密度 (LDOS) を評価するため、表面から距離  $d = 20$  nmの位置に波長  $\lambda = 640$  nmを持つ発光体が置かれている状況を考える。図2 (a) は横軸を規格化波数  $u$  とした時のFMとPMのLDOSスペクトル  $LD(u)$  を表す。

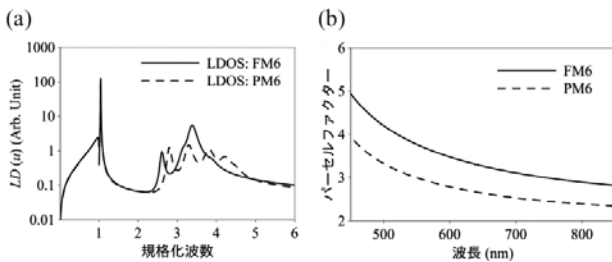


図2 (a) メタマテリアル近傍の LDOS スペクトル. (b) パーセルファクター.

LDOS スペクトル中の  $u = 1$  近傍にある鋭い構造は、真空とAgの界面における表面プラズモンポラリトン (SPP) である。  $u > 2$  の高波数領域において、FMとPM両方の構造で  $LD(u)$  が大きな値を示している。これらの高波数モードは、金属-誘電体の各界面に生じるSPPの結合モードである。さらにLDOSスペクトルの構造に注目すると、FMでは  $u = 3.3$  において特徴的なピークがあることが分かる。興味深いことにLDOSスペクトルは、広い周波数領域にまたがって同様の構造を示す。次にメタマテリアルによる光-物質相互作用を評価するため、発光レートの増強の割合を表すパーセルファクターを考える。図2 (b) にFMとPM のパーセルファクターを発光体の波長の関数としてプロットしたものを示す。全波長域においてFMの方がPMよりも強い増強効果を示すことがわかる。

(2) 電磁モードの解析

さてこのような強い増強効果を引き起こす  $u = 3.3$  のモードの素性を調べるため、FM中の電磁場モードの分布を転送行列法によって計算した (図3 (a))。

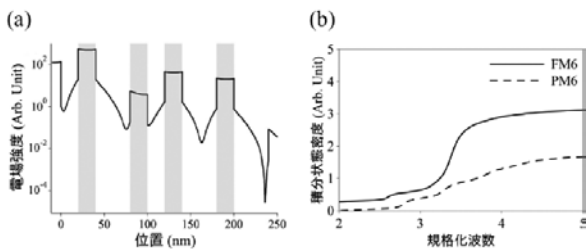


図3 (a) LLS の電場強度分布. (b) 積分状態密度.

横軸はメタマテリアル界面を0としたサンプル内の距離で、縦軸は電場強度で対数スケールである。電場強度の分布はフィボナッチ格子と同じ分布を持つという特徴的なパターンを持っている。これらはlattice-like-state (LLS) と呼ばれ、メタマテリアル界面近傍に局在し、表面から離れるに従い減衰していく。このように局在するモードは FM だけに存在し、PM には存在しない。電磁場の各固有モードが、双極子の緩和レートに与える影響を評価するため積分状態密度  $N(u)$  を計算する。

$$N(u) = \int_0^u LD(u') du'$$

計算結果を図3 (b) に示す。FMにおける  $N(u)$  はLLSが存在する  $u = 3.3$  で大きく上昇していることが分かる。これは「悪魔の階段的」と呼ばれる積分状態密度の振る舞いで、準周期構造のマルチフラクタル性に由来するものである。以上のことをまとめると準周期メタマテリアルにおける光-物質相互作用の増強効果は、準周期構造に固有の LLS によるものだと考えられる。このようなメタマテリアルを用いた光-物質相互作用の研究は、表面や薄膜での発光体の制御への応用が期待される。

業績

(雑誌論文)

Y. Moritake, K. Nakayama, T. Suzuki, H. Kurosawa, T. Kodama, S. Tomita, H. Yanagi, and T. Ishihara, "Lifetime reduction of a quantum emitter with quasiperiodic metamaterials," Phys. Rev. B 90, 075146 (2014).

K. Kusaka, H. Kurosawa, S. Ohno, Y. Sakaki, K. Nakayama, Y. Moritake, T. Ishihara, "Waveguide-mode interference lithography technique for high contrast subwavelength structures in the visible region," Opt. Express 22, 18748-56 (2014).

H. Suo, K. Takano, S. Ohno, H. Kurosawa, K. Nakayama, T. Ishihara, and M. Hangyo, "Polarization Property of Terahertz Wave Emission from Gammadion-Type Photoconductive Antennas," Appl. Phys. Lett. 103, 111106-1-111106-4 (2013).

(学会発表)

中山和之, 富田知志, 國原一眞, 柳久雄, 眞砂卓史, "準周期マグノニッククリスタルにおけるトポロジカルスピンの研究," 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大, 2016年3月.

K. Nakayama, S. Tomita, K. Imakita, and M. Fujii, "Analysis of enhanced light-matter coupling with

quasiperiodic metamaterials,” *Quantum Plasmonics* 2015, Benasque, Spain, 2015年3月.

鈴木敏大, 中山和之, 大野誠吾, 石原照也, “四検光子型偏光解析装置の最適化,” 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 2013年9月.

K. Nakayama, Y. Moritake, T. Suzuki, H. Kurosawa, T. Kodama, S. Tomita, H. Yanagi, and T. Ishihara, “Manipulation of Spontaneous Emission with Quasiperiodic Metamaterials,” *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, Kyoto, 2013年7月.

S. Ohno, M. Shingu, H. Kurosawa, Y. Moritake, K. Nakayama, and T. Ishihara, “Fabrication and Terahertz Response of split-tube Arrays,” *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, Kyoto, 2013年7月.

Y. Moritake, K. Nakayama, T. Suzuki, H. Kurosawa, T. Kodama, S. Tomita, H. Yanagi, and T. Ishihara, “Controlling spontaneous emission using a quasiperiodically stratified metal-dielectric metamaterial,” *3rd Korea-Japan Metamaterials Forum*, Seoul, 2013年6月.

### 3. マルチフェロイック特性を持つナノ粒子の合成方法の確立と物性の解明 (研究員: 田尻恭之)

#### 研究背景

本研究では, (反)強磁性, 強誘電性, 強弾性などの複数のフェロイック特性を複数併せ持つマルチフェロイック物質を研究対象としている. この系の多くの物質は磁場による電気分極の制御が可能であることから, 磁性と誘電性が共存した磁場(電場)–誘電性(磁性)を組み合わせた興味深い振る舞いが期待される. 本研究対象物質は $\text{RMnO}_3$  (R:希土類元素)であり, バルク結晶は反強磁性, 強誘電性を併せ持ち電場–磁場の交差相関を持っている. この物質系では, 薄膜を対象とした研究の報告例は存在するが, ナノ粒子の研究報告例はない. 本研究はマルチフェロイック物質 $\text{RMnO}_3$ のナノ粒子を対象とし, ナノ粒の合成法の確立と結晶構造と物性のナノ粒子特有の振る舞いを明らかにすることを目的として研究を進めた.

#### 研究成果

##### (1) ナノ粒子の合成

本研究では $\text{RMnO}_3$  (R: Eu, Gd, Tb, Dy) のナノ粒子は数ナノメートルの細孔を有するメソ多孔体SBA-15の

細孔中で合成する方法を用いて合成された. ナノ粒子合成に使用したメソ多孔体SBA-15は細孔径分布の小さい一次元細孔が周期配列をしており, その細孔はアモルファスシリカの骨格で隔てられている. この細孔径は合成条件により直径約5~30 nmの範囲で制御することができる. 本研究では約8 nmの細孔径を持つSBA-15を用いてその一元細孔中でナノ粒子を合成した. その概略図を図4に示す. ナノ粒子は一次元細孔中に存在することにより凝集することがないため, 粒子間相互作用等を見捨てることができ独立系として取り扱うことができ各粒子の振る舞いを観測することが可能である. また, ナノ粒子を配列させることが可能である. 合成したナノ粒子の結晶構造解析と物性(磁性, 誘電性, 光学特性)測定を行った. 本研究で合成したナノ粒子の結晶構造解析は高エネルギー, 高強度をもつ放射光を用いる必要があるため, 放射光施設SPring-8および高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーで行った.

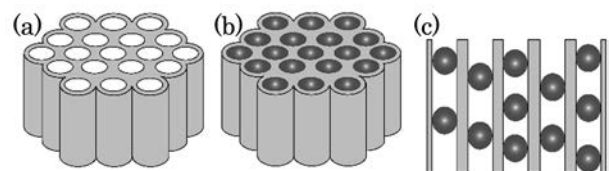


図4 ナノ粒子の合成手法. (a) メソ多孔体SBA-15, (b) ナノ粒子を内包したSBA-15, (c) その断面図.

##### (2) ナノ粒子の物性評価

本研究における結晶構造解析と物性測定の結果はメソ多孔体中に $\text{RMnO}_3$ ナノ粒子を合成することに成功したことを示唆するものであった. これは前述のように今日までに報告例のないナノ粒子合成の成功を意味する. また, そのナノ粒子は興味深い結晶構造と物性のサイズ効果を示すことを明らかにした.

合成したナノ粒子の結晶構造解析の結果について示す. 図5に合成したナノ粒子の粉末X線回折パターンの一例を示す. 得られたX線回折パターンは, 合成した各ナノ粒子がバルク結晶と同様に斜方晶ひずみを持つペロブスカイト型結晶構造であることを示している. 複数の合成条件下で合成した各ナノ粒子の粒子サイズをシェラーの式を用いて算出した結果, 合成されたナノ粒子は約7~30 nmの粒子サイズを持つ $\text{RMnO}_3$ ナノ粒子であることが判明した.  $\text{RMnO}_3$ ナノ粒子の格子定数は希土類元素Rの違いに依らず約15nm以上ではバルク結晶の値とほぼ同様な値であるが, それ以下の粒子サイズではバルク結晶の値から変化し, かつ結晶軸方向によって増減が異なる. すなわち, 15nm以下のナノ粒子の結晶構造は異方的なひずみが誘起されることを明らかにした. ナノ粒子の格子定数は粒子サイズの減少にともない連続的に変化し, 異方的なひずみは連続的に増大する傾向

を示した。また、 $\text{RMnO}_3$  ナノ粒子はバルク結晶同様に  $\text{MnO}_6$  八面体にヤーン・テラーひずみを有し、それは格子定数と同様に約15nm以下でバルク結晶での値から逸脱し、粒子サイズの減少に伴い単調変化した。興味深いことに、物質間（希土類元素Rの違い）で結晶構造のサイズ依存性が異なった。

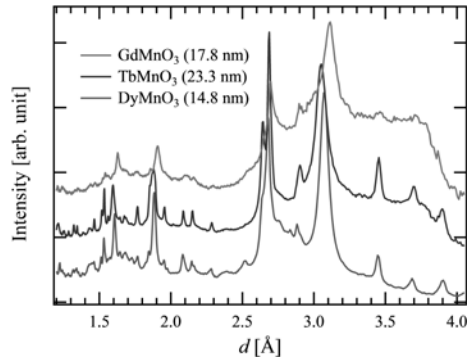


図5 各ナノ粒子のX線回折パターン。

合成したナノ粒子の磁気測定を行い、磁気サイズ効果について調査した。粒子サイズ9.3nmの $\text{DyMnO}_3$  ナノ粒子の外部磁場100 Oeにおける直流磁化率の温度依存性を図6に示す。磁場中冷却 (FC) 磁化率とゼロ磁場中冷却 (ZFC) 磁化率は約40K以下で分岐しヒステリシスを示す。この振る舞いは、磁性体ナノ粒子で出現する超常磁性の特徴的な振る舞いの一つであるブロッキング現象に起因したものである。FC磁化率とZFC磁化率の分岐温度を $T_{\text{irr}}$ とすると、その $T_{\text{irr}}$ は粒子サイズの減少に伴い上昇しているが（図6の挿入図参照）、これは通常の磁気サイズ効果とは逆の振る舞いである。このサイズ依存性は希土類元素Rの違いに依らず合成した全物質のナノ粒子で観測された。また、交流磁化率の温度依存性の測定結果より得られたブロッキング温度も粒子サイズの減少に伴い上昇するといった通常のサイズ効果と逆の振る舞いを示した。合成した全ナノ粒子において、このブロッキング現象に起因した磁化過程のヒステリシス曲線が観測された。ナノ粒子の保磁場は希土類元素Rの違いに依らず、粒子サイズの減少に伴い増加する傾向を示した。磁気測定によって得られたこれらの振る舞いは、通常のサイズ効果（粒子サイズの減少とともにブロッキング温度の低下と保磁場の減少）とは逆の振る舞いであり、これは各ナノ粒子の磁気異方性定数が粒子サイズに依存し、粒子サイズの減少に伴い増加していることを示唆している。

本研究において $\text{RMnO}_3$  ナノ粒子で観測された特異なサイズ効果は、研究対象物質が強相関電子系物質であるため表面効果や有限サイズ効果によりナノ粒子の表面部分の電子状態の変化が顕著に誘起され、結晶構造や物性が特異な変化をしたと考えられる。また、希土類元素R

の違いによりナノ粒子の結晶構造及び物性およびサイズ効果（サイズ依存性の振る舞い）が多少異なるが、これはバルク結晶でみられるR元素の違いによる電子状態や物性の変化に起因していると考えられる。

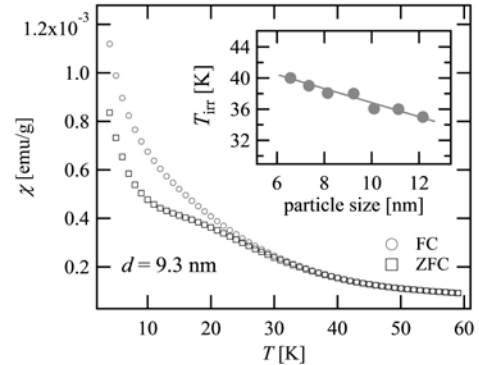


図6  $\text{DyMnO}_3$  ナノ粒子の直流磁化率の温度依存性。挿入図は分岐温度 $T_{\text{irr}}$ のサイズ依存性。

## 業績

### (雑誌論文)

- T. Tajiri, Y. Ando, H. Deguchi, M. Mito, A. Kohno, Magnetic Properties and Crystal Structure of  $\text{DyMn}_2\text{O}_5$  Nanoparticles Embedded in Mesoporous Silica, *Physics Procedia*, Vol. 75, 2015, 1181-1186
- T. Tajiri, S. Saisho, M. Mito, H. Deguchi, K. Konishi, A. Kohno, Size Dependence of Crystal Structure and Magnetic Properties of NiO Nanoparticles in Mesoporous Silica, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol.119, 2015, 1194-1200
- T. Tajiri, N. Terashita, K. Hamamoto, H. Deguchi, M. Mito, Y. Morimoto, K. Konishi, A. Kohno, Size dependences of crystal structure and magnetic properties of  $\text{DyMnO}_3$  nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.345, 2013, 288-293
- T. Tajiri, K. Hamamoto, Y. Ando, H. Deguchi, M. Mito, A. Kohno, Synthesis and Magnetic Property of  $\text{DyMnO}_3$  Nanoparticles in Mesoporous Silica, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.63, 2013, 826-829

### (学会発表)

- H. Deguchi, T. Tajiri, T. Niuro, M. Mito, A. Kohno, Novel Magnetic Size Effects of  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  Nanoparticles in Mesoporous Silica, *The 25th annual meeting of MRS-J*, 2015年12月8-10日, 横浜

田尻恭之, 出口博之, 美藤正樹, 竹田翔一, 中平夕貴,

森吉千佳子, 黒岩芳弘, 香野淳, 希土類マンガ酸化  
物 $\text{RMnO}_3$  (R=Gd, Eu, Tb) ナノ粒子の磁性と結晶構  
造, 日本物理学会, 2015年9月16-19日, 関西大学

T. Tajiri, Y. Ando, H. Deguchi, M. Mito, A. Kohno,  
Magnetic Properties and Crystal Structure of  $\text{DyMn}_2\text{O}_5$   
Nanoparticles Embedded in Mesoporous Silica, 20th  
International Conference on Magnetism, 2015年7月6  
-11日, バルセロナ

田尻恭之, 新納健, 出口博之, 美藤正樹, 香野淳,  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ ナ  
ノ粒子における特異な磁気サイズ効果の出現, 日本物理学  
会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学

田尻恭之, 関将吾, 古賀玲奈, 香野淳, 高圧水蒸気熱処理  
によるメソ多孔体薄膜の膜質改善, 応用物理学会, 2015  
年3月11-14日, 東海大学

T. Tajiri, Size Effects of Crystal Structure and Magnetic  
Properties on Perovskite Manganite  $\text{RMnO}_3$  (R = La,  
Dy) Nanoparticles, The 15th IUMRS International  
Conference in Asia, 2014年8月24-30日, 福岡

田尻恭之, 安藤祐規, 出口博之, 美藤正樹, 香野淳, メソ  
多孔体細孔中に合成した $\text{DyMn}_2\text{O}_5$ ナノ粒子の磁性と結晶  
構造, 日本物理学会, 2013年9月25-28日, 徳島大学

美藤正樹, 田尻恭之, 香野淳, 中村和磨, 出口博之, NiO  
ナノ結晶の高圧力下構造解析, 日本物理学会, 2013年9  
月25-28日, 徳島大学

#### 4. 円偏光発光材料の創製と光学物性評価装置 の開発 (研究員: 原田拓典)

##### 研究背景

本研究では, 有機化合物を用いた円偏光発光材料の創  
製とその光学物性評価に必要な装置開発に取り組  
む。本課題では, 包括的なCPL偏光解析に基づく最適化  
された分光計を新たに構築し, 考案したCPL解析法を用  
いた物性評価による, 発光デバイスを指向した新規円偏  
光発光物質の創製を目的とする。光学的異方性存在下  
において真のCPL測定が可能なCPL装置開発を最重要項  
目とする。これまで測定困難であった真のCPLシグナルが  
測定可能となる本研究成果は, 新規性と独創性を併せ持  
ち, 飛躍的にCPL研究の進展が期待されるものと確信す  
る。

##### 研究成果

###### (1) 装置開発

研究チームスタート時に計画していた, 円二色性兼用  
円偏光蛍光 (CD&CPL) 分光計の構築に成功した。構築  
したCD&CPL分光計のブロックダイアグラムを図7に  
示す。CPLシグナル解析には電子遷移基底状態と励起状  
態の光学異方性測定が不可欠であるため, CD&CPL同  
時測定が可能な光学系にした。CDとCPL測定モードの  
切り替えは, 励起モノクロメータ (ExMo) のゼロ次光  
と1次光の切り替えにより行う光学系とした。図7に示  
すように, 既存CD分光計をベースにし, PEMをサンプ  
ルの後方に置く後変調にすることでCDとCPL測定を同  
時に達成することが可能となった。この光学配置は電子  
遷移吸収測定から求めた光学軸を利用し, CPL測定と解  
析ができる点からも有効な方法である。Stokes-Mueller  
行列解析より, サンプル (S) の後方にマウントされて  
いるレンズ (L2) とPEMの静的残留複屈折と光学軸,  
ディポーライザーの光学軸, およびアナライザーの消  
光比と光学軸の精度がみかけのシグナルに大きく関与す  
ることが, 明らかになった。そこで静的残留複屈折の小  
さなディポーライザー, PEM, アナライザー各々を  
厳選し, 高精度な光学軸調整を行い, 分光計を構築した。  
残留複屈折測定はLB測定により行い,  $10^{-3}\text{OD}$ 以下の光  
学素子を厳選した。

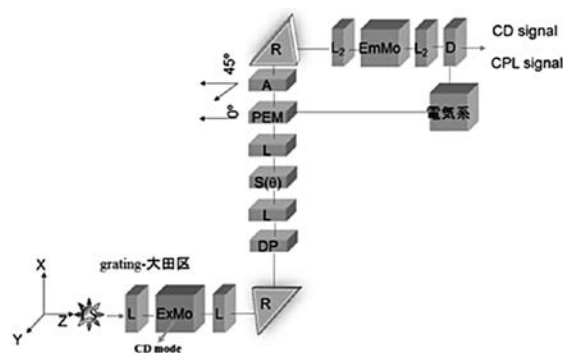


図7 CD&CPL分光計ブロックダイアグラム。

###### (2) 円偏光発光材料開発

円偏光発光材料の問題点として, 高価な光学活性高純  
度原料, 高輝度と高円偏光度の両立が難しいことがあげ  
られる。本課題では光学不活性なフルオロファからなる  
キラリな自己会合凝集体による高特性の円偏光材料の創  
製を行った。分子自体はアキラリであるが, ある条件  
下で自己会合凝集体を形成し, その超分子構造がキラリ  
ティを有するポルフィリン色素をモデル化合物とし, 貴  
金属ナノ粒子との複合体形成を行い, 局在プラズモン  
共鳴 (LSPR) の電場増強効果からtrade-off改善を目指し  
た。開発機を用い, LSPR電場増強効果により発光物質  
の蛍光強度の低下を生じずにキラリ光学特性の増強に成  
功した。(Chem.Comm., 2014) LSPR-CPL挙動の応  
答性に関する報告例は無く, これは複雑な分子設計の必

要が無く NPs と相互作用するための表面修飾剤を導入するのみのシンプルな方法からも独創性と新規性を併せ持つ予想以上の成果が得られた。今後、ナノ粒子の構造の精密なコントロールにより、さらに大きな増強的相互作用を示す系を探索していく。

## 研究業績

### (著書)

- 1) T.Harada,\* H.Moriyama: Encyclopedia of Polymer Science and Technology: SOLID-STATE CIRCULAR DICHROISM SPECTROSCOPY” John Wiley & Sons, Inc., DOI: 10.1002/0471440264.pst587 (2013)

### (論文査読あり)

- 2) T.Harada,\* H.Moriyama, H.Takahashi, K.Umemura, H.Yokota, R.Kawakami and K.Mishima “Spectroscopic Characterization of Supramolecular Chiral Porphyrin Homoassociates at the Air-Water Interface”, 共著, 平成26年12月, Appl.Spectrosc., 68, 1235-1240 (2014)
- 3) T.Harada,\* N.Kajiyama, K.Ishizaka, R.Toyofuku, K.Izumi, K.Umemura, Y.Imai, N.Taniguchi and K.Mishima, “Plasmon Resonance-Enhanced Circularly Polarized Luminescence of Self-Assembled Mesotetrakis (4-sulfonatophenyl) porphyrin-Surfactant Complexes in Interaction with Ag Nanoparticles”, 共著, 平成26年10月, Chem.Commun., 11169-11172 (2014)
- 4) T.Amako, N.Suzuki, T.Harada, K.Mishima, M.Fujiki, Y.Imai, “Solid-State Circularly Polarised Luminescence and Circular Dichroism of Viscous Binaphthyl Compounds”, 共著, 平成25年10月 RSC Adv., 323508-23513 (2013)
- 5) T.Harada,\* T.Nakano, H.Moriyama, N.Tajima, H.Yokota, R.Kawakami, K.Mishima, “A new method for separating configurational and constitutional chiralities using diffuse reflectance circular dichroism”, 共著, 平成25年6月, Appl.Spectrosc., 67, 1210-1213 (2013)

### (学会発表)

- 6) 梶山直樹, 石坂慶, 梅村和夫, 谷口直哉, 今井喜胤, 三島健司, 原田拓典, “表面プラズモン共鳴増強によるキラル光学特性評価”, 共同, 平成26年6月, Symposium on Molecular Chirality 2014 (2014.6.6-7 Sendai)
- 7) 原田拓典, 高本真, 梶山直樹, 早川広志, 渡辺正行, 三島健司, “円偏光吸収および円偏光発光測定システムの開発”, 共同, 平成26年6月, Symposium on Molecular Chirality 2014 (2014.6.6-7 Sendai)

- 8) 高本真, 原田拓典, 田島暢夫, 森山広思, 三島健司, “1,8-Dihydroxyanthraquinone結晶のキラル光学スペクトル: 理論と実験による検討”, 共同, 平成26年3月, 日本化学会第94春季年会2014 (2014.3.27-30 Nagoya)
- 9) 中林和輝, 尼子智之, 原田拓典, 三島健司, 藤木道也, 今井喜胤, “ジエチルエーテル鎖を有する軸不斉ピナフチル化合物の各種マトリックス中におけるキラルな光学特性”, 共同, 平成25年9月, 第24回基礎有機化学討論会 (2013.9.5-7Tokyo)
- 10) 尼子智之, 原田拓典, 鈴木望, 三島健司, 藤木道也, 今井喜胤, “粘稠性軸不斉ピナフチル化合物の固体状態における円偏光発光特性”, 共同, 平成25年9月, 第24回基礎有機化学討論会 (2013.9.5-7 Tokyo)
- 11) 北山陽子, 尼子智之, 原田拓典, 三島健司, 黒田玲子, 藤木道也, 今井喜胤, “光学活性ナフトレン化合物の各種マトリックス中におけるキラルな光学特性”, 共同, 平成25年9月, 第24回基礎有機化学討論会 (2013.9.5-7 Tokyo)
- 12) 原田拓典, 横田春生, 川上亮, 三島健司, 高橋浩三, 黒田玲子, “Stokes-Mueller matrix法に基づく次世代型円二色性 (CD) 分光計の開発”, 共同, 平成25年5月, 光学シンポジウム (2013.6.27 Tokyo)
- 13) 原田拓典, 横田春生, 川上亮, 三島健司, 黒田玲子, 栗原舞, 森山広思, “自己会合シアニン色素のキラル光学特性評価”, 共同, 平成25年5月, Molecular Chirality (2013.5.10-11 Kyoto)
- 14) 尼子智之, 赤木冬駒, 木本貴也, 鈴木望, 原田拓典, 三島健司, 藤木道也, 今井喜胤, “粘稠軸不斉ピナフチル化合物の外部環境による非古典的光学特性制御”, 共同, 平成25年5月, Molecular Chirality (2013.5.10-11 Kyoto)