

## 6-3 光分子科学研究領域

### 光分子科学第一研究部門

岡本裕巳（教授）（2000年11月1日着任）

A-1) 専門領域：ナノ光物理化学

A-2) 研究課題：

- a) 先端的な近接場分光法の開発とその利用研究
- b) 金属ナノ構造におけるプラズモン波，増強電場のイメージングとダイナミクス
- c) ナノ構造物質におけるキラリティと局所的な光学活性
- d) 光によるナノ物質の力学操作手法の開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) ナノ構造物質の観察と，特徴的な光学的性質，励起状態の超高速ダイナミクス等を探るための，近接場分光イメージング装置の開発を行い，並行して試料の測定を行っている。着任後測定装置の構築に取り組み，基本的なシステムの完成後プラズモン物質を中心にナノ光学の研究に用いてきた。光学像の横方向分解能は50 nm程度である。現在これを主に二つの方向に展開している。極めて短寿命のプラズモンの動的過程を直接観測する目的で超高速近接場計測を行うため，超短レーザーパルスと空間位相変調による分散補償を導入した装置を開発し，近接場で最短約14 fsのパルス幅を実現した。これによりプラズモンの時空間ダイナミクスの観測に成功した。また近接場円二色性イメージングの装置を開発し，2次元金属ナノ構造の局所光学活性の研究を行っている。
- b) 各種形状貴金属ナノ構造体の分光及びダイナミクスのイメージング計測を行っている。微粒子及び集合体の近接場分光測定により，プラズモンモードの波動関数の二乗振幅や微粒子周辺の増強電場のイメージが得られることを見だし，その展開を図った。電子線描画装置，フェムト秒広帯域波長可変光源等を導入し，体系的にナノ構造試料作製，光場の空間構造と分光特性の近接場測定を進めた。またプラズモンのダイナミクスを直接観測可能な超高速近接場計測系により，プラズモンの位相緩和のほか，複数のプラズモンモードを同時励起した後のプラズモン波束の運動を可視化した。これはナノ物質励起の時空間コヒーレント制御に向けた重要なステップに位置付けられる。
- c) 2次元のキラルな構造を持つ金ナノ構造体を電子線描画法で作成し，開発を進めている近接場局所偏光解析イメージング装置を用い，局所的な光学活性を測定している。局所的な円二色性信号が巨視的な円二色性信号に比べて極めて大きくなることを見出し，また局所的な強い光学活性がナノ構造内の遠隔的な電磁気学相互作用で現れていることが明らかになる等，幾つかの基礎的に重要な結果が得られている。また高い対称性を持つアキラルな金属ナノ長方形構造において，巨視的な光学活性は当然現れないが，局所的には強い光学活性を示しており，それを平均すると全体の光学活性がほぼ0となっていることを，円二色性イメージングによって明確に示した。これらの発展として，金属ナノ構造と分子とのキラルな光学的相互作用に関する研究を，英国との共同研究として開始した。また金属ナノ構造における局所的に強くねじれた光の特性を更に解明し制御するための実験法の開発も，継続して推進している。

- d) レーザー光を強く集光すると、その焦点に微粒子がトラップされる(光トラッピング)。この時入射光にフェムト秒レーザーパルスを用いることで、非線形誘起分極によって、従来の光トラッピングとは全く異なる挙動を示すことを、数年前に報告した。非線形効果、共鳴効果を有効利用することで、このような光による力学的マニピュレーションの自由度が格段に広がることが予想され、この研究展開を図ることを、今後の研究の今一つの柱とする。

B-1) 学術論文

**T. NARUSHIMA, S. HASHIYADA and H. OKAMOTO**, “Optical Activity Governed by Local Chiral Structures in Two-Dimensional Curved Metallic Nanostructures,” *Chirality* **28**, 540–544 (2016).

**T. NARUSHIMA and H. OKAMOTO**, “Circular Dichroism Microscopy Free from Commingling Linear Dichroism via Discretely Modulated Circular Polarization,” *Sci. Rep.* **6**, 35731 (2016).

**Y. NISHIYAMA and H. OKAMOTO**, “Near-Field Nonlinear CD Imaging of Single Gold Nanostructures,” *J. Phys. Chem. C* **120**, 28157–28162 (2016).

B-4) 招待講演

**Y. NISHIYAMA, K. IMURA and H. OKAMOTO**, “Spatio-Temporal Observation of Plasmon Dynamics by Ultrafast Near-Field Microscopy,” 9<sup>th</sup> Asian Conference on Ultrafast Phenomena, Manila (Philippines), February 2016.

**T. NARUSHIMA, S. HASHIYADA and H. OKAMOTO**, “Near-Field Circular Dichroism Imaging to Design Optically Active Nanomaterials,” 11<sup>th</sup> Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), Matsushima (Japan), April 2016.

**H. OKAMOTO, Y. NISHIYAMA and K. IMURA**, “Observation of Plasmon Wave Packet Motions with Ultrafast Near-Field Microscopy,” 7<sup>th</sup> International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META’16), Malaga (Spain), July 2016.

**H. OKAMOTO, Y. JIANG and T. NARUSHIMA**, “Effects of nonlinear polarization in optical trapping,” PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2016 in Shanghai, Shanghai (China), August 2016.

**H. OKAMOTO, Y. NISHIYAMA, K. IMAEDA and K. IMURA**, “Near-Field Optical Imaging of Ultrafast Dynamics in Gold Nanorods,” PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2016 in Shanghai, Shanghai (China), August 2016.

井村考平, 今枝佳祐, 溝端秀聡, 西山嘉男, 岡本裕巳, 「近接場顕微分光手法の拡張とプラズモン研究への応用」, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟, 2016年9月.

**H. OKAMOTO**, “Near-Field Imaging of Plasmons: Field Structures, Propagation Dynamics, Chirality,” Optics & Photonics Japan 2016, OSJ-OSA Joint Symposia on Plasmonics and Digital Photonics, Tokyo (Japan), October 2016.

成島哲也, 「ナノマテリアルが示す光学活性の起源を探る: 円二色性ナノイメージング」, 第10回日本化学会東海支部若手研究者フォーラム~理論と実験から探る, マクロとミクロをつなぐケミストリー~, 名古屋, 2016年11月.

岡本裕巳, 「キラルプラズモンの局所的な光学活性」, 第4回豊田理研ワークショップ「キラル対称系の電磁応答」, 名古屋, 2016年11月.

B-5) 特許出願

特願 2015-257226, 「円偏光照射器, 分析装置及び顕微鏡」, 岡本裕巳, 成島哲也(自然科学研究機構), 2015年.

#### B-6) 受賞, 表彰

岡本裕巳, 光科学技術研究振興財団研究者表彰 (1994).  
岡本裕巳, 分子科学研究奨励森野基金 (1999).  
井村考平, 応用物理学会講演奨励賞 (2004).  
井村考平, ナノオプティクス賞 (2005).  
井村考平, 分子構造総合討論会奨励賞 (2005).  
井村考平, 光科学技術研究振興財団研究者表彰 (2007).  
井村考平, 日本化学会進歩賞 (2007).  
井村考平, 日本分光学会賞(奨励賞) (2007).  
原田洋介, ナノオプティクス賞 (2010).  
岡本裕巳, 日本化学会学術賞 (2012).  
成島哲也, Yamada Conference LXVI Best poster award (Young Scientist) (2012).  
橋谷田俊, 日本光学会 OPJ ベストプレゼンテーション賞 (2013).  
西山嘉男, 日本分光学会年次講演会一般講演賞 (2014).  
橋谷田俊, 日本化学会第95春季年会学生講演賞 (2015).  
橋谷田俊, 第9回分子科学討論会分子科学会優秀ポスター賞 (2015).  
西山嘉男, The 3<sup>rd</sup> Optical Manipulation Conference Outstanding Award (2016).  
橋谷田俊, The Best Poster Presentation Award, NFO-14 (2016).  
橋谷田俊, OSJ-OSA Joint Symposia Student Award (2016).

#### B-7) 学会および社会的活動

##### 学協会役員等員

日本化学会トピックス小委員会委員 (1993–1996).  
日本分光学会編集委員 (1993–2001).  
日本分光学会東海支部幹事 (2001–2012).  
日本化学会東海支部常任幹事 (2003–2005).  
分子科学研究会事務局 (2004–2006).  
分子科学会運営委員 (2006–2008).

##### 学会の組織委員等

The International Symposium on New Developments in Ultrafast Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (Tokyo), Organizing Committee (1995).  
The Tenth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (Okazaki), Local Executive Committee (2001).  
The Twentieth International Conference on Raman Spectroscopy (Yokohama), Local Organizing Committee (2006).  
International Workshop on Soft X-ray Raman Spectroscopy and Related Phenomena (Okazaki), Local Organizing Committee (2006).  
The 12<sup>th</sup> Korea-Japan Joint Symposium on Frontiers of Molecular Science (Jeju), Co-chair (2007).

Japan-Korea Joint Symposium on Molecular Science 2009 “Chemical Dynamics in Materials and Biological Molecular Sciences” (Awaji), Co-chair, Secretary general (2009).

The 7<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (Jeju), Technical Program Committee (2009).

Yamada Conference LXVI: International Conference on the Nanostructure-Enhanced Photo-Energy Conversion, Programming Committee (2012).

1<sup>st</sup> Optical Manipulation Conference, Optics & Photonics International Congress 2014, Program Committee (2014).

2<sup>nd</sup> Optical Manipulation Conference, Optics & Photonics International Congress 2015, Program Committee (2015).

3<sup>rd</sup> Optical Manipulation Conference, Optics & Photonics International Congress 2016, Program Committee (2016).

The 14<sup>th</sup> International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques, Local Organizing Committee (2016).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

日本学術振興会科学研究費委員会専門委員 (2006–2007).

日本学術振興会特別研究員等審査会専門委員 (2008–2010).

日本学術振興会国際事業委員会書面審査員 (2008–2010).

文部科学省研究振興局科学研究費補助金における評価に関する委員会 (理工系委員会) 委員 (評価者) (2010–2012).

日本学術振興会学術システム研究センター専門研究員 (2013–).

学術誌編集委員

*Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Advisory Board (2012–).

その他

スーパーサイエンスハイスクール (愛知県立岡崎高等学校) 活動支援 (2003, 2004).

総合研究大学院大学物理科学研究科副研究科長 (2010–2012).

総合研究大学院大学物理科学研究科研究科長 (2012–2014).

分子科学研究所運営会議議長 (2014–).

自然科学研究機構教育研究評議員 (2016–).

#### B-8) 大学での講義, 客員

国立交通大学 (台湾), 「Micro- and nano-scope optical activity measurements」, 2016年5月6日.

総合研究大学院大学物理科学研究科, 「構造光科学」, 2016年7月5日–8日.

#### B-10) 競争的資金

科研費萌芽研究, 「近接場分光法による素励起の波動関数イメージング」, 岡本裕巳 (2005年–2007年).

科研費特定領域研究「極微構造反応」(公募研究), 「極微構造における素励起の時空間コヒーレンスの超高時間分解近接場分光」, 岡本裕巳 (2005年–2007年).

科研費基盤研究(A), 「ナノ微粒子系の波動関数と励起状態の動的挙動」, 岡本裕巳 (2006年–2010年).

池谷科学技術振興財団研究助成, 「固体表面・界面歪みの利用を目的とした2次元高精度歪み検出系開発」, 成島哲也 (2007年).

科研費特定領域研究「光-分子強結合場」(計画研究), 「近接場顕微分光に基づく光反応場の動的可視化・制御」, 岡本裕巳 (2007年–2011年).

科研費挑戦的萌芽研究,「ナノ円二色性イメージングの開発と分子集合体キラリティ」,岡本裕巳(2009年-2011年).  
科研費基盤研究(S),「ナノドット配列における結合励起状態の時空間特性と励起場制御」,岡本裕巳(2010年-2015年).  
科研費若手研究(B),「近接場光励起領域近傍の空間分解分光イメージング」,成島哲也(2011年-2014年).  
科研費特別研究員奨励費,「超高速時間分解分光法を用いたイオン液体中における光解離反応過程の解明」,西山嘉男(2011年-2012年).  
二国間交流事業共同研究(英国との共同研究),「ナノフォトニック物質の光電場構造・ダイナミクス解析」,岡本裕巳(2012年-2014年).  
科研費若手研究(B),「近接場超短パルスによるプラズモン波束のコヒーレント制御」,西山嘉男(2013年-2015年).  
光科学技術研究振興財団研究助成,「キラル物質に都合の良い光電場の発生とその相互作用に関する研究」,成島哲也(2013年-2015年).  
科研費基盤研究(C),「局所的に発現するナノ構造の強い光学活性の実態解明と物質系との相互作用への展開」,成島哲也(2014年-).  
科学技術振興機構さきがけ研究,「強い局所光学活性を利用したキラル光デバイス」,成島哲也(2014年-).  
科研費基盤研究(A),「キラルなプラズモン励起による不斉光化学場の展開」,岡本裕巳(2015年-).  
科研費挑戦的萌芽研究,「金属ナノ構造に誘起される局所的円偏光電場による磁性体中の磁化制御」,岡本裕巳(2015年-).  
科研費特別研究員奨励費,「金ナノ構造体の強い局所光学活性によるキラル光化学反応場の開拓」,橋谷田俊(2015年-).  
科研費特定領域研究(計画研究),「光圧を創る:物質自由度を活用した捜査の高度化」,岡本裕巳(2016年-).

### C) 研究活動の課題と展望

近接場分光イメージングによる研究を推進し,金属ナノ構造体に関して波動関数や光電場の空間分布をイメージするという独自の研究領域を拓く事ができた。金属ナノ構造による光の局在化や増強などの性質・機能に関する新たな情報と方法論を提供し,多くの追従研究を生んだと考えている。並行して測定波長域の拡大や,試料設計・作製のための新装置導入,近接場計測装置の高度化等を行い,研究を次のフェーズに進めてきた。時間分解近接場分光では,10 fs レベルの時間分解能で近接場測定を実現し,金属ナノ構造の多モードコヒーレント励起後の時空間ダイナミクスのイメージングが可能となるなど,一つの山を越える段階に到達したと考えている。これを更に今後どのように展開するか,可能性を探ることが一つの課題であるが,非常に高度な技術を要する実験であり,困難も大きい。今一つのベクトルとして進めているナノ物質のキラリティの研究では,金属ナノ構造の光学活性イメージングによって,独自の実験的情報を得ることができた。対称性の高いアキラルな構造でも局所的に強い光学活性を示すという,ユニークな成果も得られた。近接場円二色性イメージングは今後様々なナノ構造光学活性物質の機能解明のための有力な実験手法になることを期待している。この実験手法で得られた成果をもとに,新たなキラル物質機能の研究へ展開することも,高いポテンシャルを持つものとして重点的に考えており,すでに国外との共同研究を開始している。また物質および光のキラリティは磁性との相関においても興味を持たれ,ナノ光学の観点からこの方向への研究展開についても検討を開始し,一部実際の共同研究も始めた。通常の回折光学系による顕微鏡で精度の高い円二色性イメージングを可能とする装置開発も行なっており,これは物質開発,生物科学,結晶学等の様々な分野の研究者から興味を持って頂いている。一方これらとは異なる研究課題として,微粒子の光トラッピングに関わる独自の新たな研究萌芽(非線形共鳴光トラッピング)を見出し数年前に発表した。時を前後して国内で光圧(散乱力,勾配力)に関する新たな展開が勃興し,関連する研究を行っている研究者が集まって,今般新学術領域研究を発足した。光圧によるナノ物質・分子の力学操作に関する新たな展開を図るべく,この研究領域にも注力していく計画である。