

繊維計測研究部門

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プラズモン物質の特性に関する研究への展開
- b) ナノ構造物質におけるキラリティと局所的な光学活性
- c) 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を開発し、試料の測定を行ってきた。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 50nm 程度である。各種形状貴金属ナノ構造体の分光及び超高速ダイナミクスの近接場分光イメージング計測を行い、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ング、プラズモン波束の運動の可視化等が可能であることを示した。また近接場光学活性イメージング法を開発し、金属ナノ構造の局所光学活性、キラルな光場の空間構造とその利用の研究に適用しており、これが次に述べるように現時点でのグループの主要な研究内容に発展している。
- b) キラルな構造を持つ金ナノ構造体（主に 2 次元構造）を電子線描画法で作製し、開発した近接場光学活性イメージング装置を用い、局所的な光学活性を測定した。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、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すこと、局所的な誘起双極子が局所的な円偏光場の起源になること等、幾つかの基礎的に重要な結果が得られている。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開始し、国内外の幾つかの研究グループとの共同研究も実施している。蛍光分子とキラルな金属ナノ構造の組み合わせにより、高い円偏光度を示す蛍光が得られ、その起源をプラズモンモードとの関連において明らかにした。通常の遠方場の顕微鏡においても光学活性によるイメージングは未開拓であるが、我々は高い精度・確度で顕微光学活性イメージングを可能とする装置を開発し、微結晶試料、液晶、生体組織等へのその応用を、共同研究を通じて開始している。キラルな構造を持つ金属有機構造体（MOF）微結晶の掌性同定に成功しており、多数の微結晶の掌性同定に有効であることが確認されている。
- c) 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る。また光と物質のキラリティもその挙動に影響を及ぼすことが予想され、予備的な結果を得ている。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

S. HASHIYADA, T. NARUSHIMA and H. OKAMOTO, “Active Control of Chiral Optical Near Fields on a Single Metal Nanorod,” *ACS Photonics* **6**, 677–683 (2019).

T. YAMADA, T. EGUCHI, T. WAKIYAMA, T. NARUSHIMA, H. OKAMOTO and N. KIMIZUKA, “Synthesis of Chiral Labt and Visualization of Its Enantiomer Excess by Induced Circular Dichroism Imaging,” *Chem. –Eur. J.* **25**, 6698–6702 (2019).

C. GILROY, S. HASHIYADA, K. ENDO, A. S. KARIMULLAH, L. D. BARRON, H. OKAMOTO, Y. TOGAWA and M. KADODWALA, “Roles of Superchirality and Interference in Chiral Plasmonic Biodetection,” *J. Phys. Chem. C* **123**, 15195–15203 (2019).

K. Q. LE and H. OKAMOTO, “Circularly Polarized Two-Photon-Induced Luminescence from Plasmonic Two-Dimensional Chiral Au Nanostructures,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **1220**, 012004 (4 pages) (2019).

S. HASHIYADA, K. ENDO, T. NARUSHIMA, Y. TOGAWA and H. OKAMOTO, “Spectral Properties of Chiral Electromagnetic Near Fields Created by Chiral Plasmonic Nanostructures,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **1220**, 012050 (4 pages) (2019).

B-3) 総説, 著書

成島哲也, 岡本裕巳, 「円二色性によるキラル分光イメージング」, *生物物理* **59**, 035–038 (2019).

岡本裕巳, 「プラズモン共鳴のエキゾチックな時空間構造」, 「プラズモンと光圧が導くナノ物質科学——ナノ空間に閉じ込めた光で物質を制御する——」, 日本化学会編, 化学同人, pp. 48–56 (2019).

H. OKAMOTO, “Local Optical Activity of Nano- to Microscale Materials and Plasmons,” *J. Mater. Chem. C* **7**, 14771–14787 (2019).

B-4) 招待講演 (* 基調講演)

橋谷田俊, 成島哲也, 岡本裕巳, 「金属ナノ構造における局在光電場のキラリティ」, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, 東京, 2019 年 1 月.

T. NARUSHIMA, “Analysis of Local Chirality with Microscopic Circular Dichroism Imaging,” The 23rd Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Materials and Biomolecular Science using VUV-SX Synchrotron Radiation, Hiroshima (Japan), March 2019.

成島哲也, 「ホモキラリティの起源としての星間塵ナノ微粒子の可能性」, 第 1043 回国立天文台談話会, 東京, 2019 年 4 月.

H. OKAMOTO, “Visualization of nanoscale local chirality of plasmons,” 9th International Multidisciplinary Conference on Optofluidics (IMCO2019), Hong-Kong (China), June 2019.

T. NARUSHIMA, “A closer look at an optical near-field on interstellar dust nanoparticles as source of homochirality,” NAOJ workshop on Connecting Fundamental Physics, Chemistry, and the Origins of Biomolecular Homochirality, National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo (Japan), June 2019.

岡本裕巳, 「プラズモン物質における光のキラリティの局所的増強とその利用」, 第 16 回プラズモニク化学シンポジウム「キラルプラズモンの基礎と展開」, 東京, 2019 年 6 月.

H. OKAMOTO, S. HASHIYADA and T. NARUSHIMA, “Nanoscale imaging and control of chiral optical fields,” The 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2019), Singapore, June 2019.

H. OKAMOTO, “Nanoscale Imaging and Control of Chiral Plasmons,” 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2019), Lisbon (Portugal), July 2019.

H. OKAMOTO, “Visualization of chiral plasmons and near-field interactions,” The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019), Ikuta Shrine Hall, Kobe (Japan), November 2019.*

H. OKAMOTO, “Imaging, Control, Impact of Chiral Plasmons,” Materials Research Meeting 2019, Yokohama Symposia, Yokohama (Japan), December 2019.

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 3rd 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 12th 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 7th 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).

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

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

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

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

4th Optical Manipulation Conference, Optics & Photonics International Congress 2017, Program Committee (2017).

The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), Program Committee Subcommittee (2017).

The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Program Advisory Board (2018).

The International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics (iSPN2019), International Organizing Committee (2019).

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 (2013–2017).

日本学術会議連携会員 (2017–).

日本学術振興会特別研究員等審査会専門委員 (2017–2018).

学術誌編集委員

Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, Advisory Board (2012–2018).

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 (2014–2018).

自然科学研究機構教育研究評議員 (2016–).

B-10) 競争的資金

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).

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).

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).

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–2017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–2018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–2019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–2017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–2017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–).

科研費基盤研究(B),「階層を越えた物質のキラリティの3次元分析:汎用偏光二色性分光分析イメージング」,成島哲也(2017年–).

科研費研究活動スタート支援,「対称金属ナノ構造体と直線偏光を用いた不斉分子の高感度検出」,橋谷田俊(2017年–2019年).

科研費研究活動スタート支援,「Amplification of Chiral Light-Matter Interaction Using Bottom-Up 3D Chiral Nanoparticle」,AHN, Hyo-Yong(2019年–).

科研費研究活動スタート支援,「円偏光磁気力顕微鏡による局所磁場観測と局所磁場による磁性ナノ粒子制御」,山西絢介(2019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、分子研着任当初の数年間では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いた。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。その後研究を次のフェーズに進め、時間分解近接場分光では、10fs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。その更なる展開のアイデアもあるが、非常に高度な技術を要する実験であり、人員も限られる状況下では困難が大きい。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、プラズモン由来の強くねじれた局所光場の存在、ま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。これらの研究から得られたプラズモンのキラリティに関する性質を基礎として、キラルプラズモンが分子の特性に及ぼす効果に関する研究にも展開し、成果が得られるようになってきた。例として、高い円偏光度を示す発光物

質系を見出し、その起源を解明した。通常の回折光学系による(遠方場)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い、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。これらの近接場及び遠方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おり、国内外との共同研究も開始している。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が持たれ、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。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。2016年度に関連する新学術領域研究が発足したことを契機に、光圧(勾配力、散乱力)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おり、新たな成果も出つつある段階にある。