

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：光で拓く「キラル物質科学」の最前線**■ 2023年9月19日(火) 14:00 ~ 17:45 | 会場 A201 (熊本城ホール)****[19p-A201-1~8] 光で拓く「キラル物質科学」の最前線**

尾松 孝茂(千葉大)、田口 敦清(北大)

14:00 ~ 14:20

[19p-A201-1] オープニング：光で拓く「キラル物質科学」の最前線

○尾松 孝茂^{1,2} (1.千葉大学大学院工学研究院、2.千葉大分子キラリティー研)

14:20 ~ 14:50

[19p-A201-2] プラズモニクナノ局在渦場の物理特性

○笹木 敬司¹ (1.北大電子研)

14:50 ~ 15:20

[19p-A201-3] 光で開拓する量子渦の物理

○菱輪 陽介¹ (1.大阪大基礎工)

◆ 英語発表

15:20 ~ 15:50

[19p-A201-4] Selective Trapping, Rotation and Propulsion of Isotropic Dielectric and Composite Janus Microparticles in the Evanescent Field of Optical Nanofibres

○Viet Giang Truong¹, Pramitha Praveen Kamath¹, Souvik Sil¹, Georgiy Tkachenko¹, Sile Nic Chormaic¹ (1.OIST Univ)

16:00 ~ 16:30

[19p-A201-5] キラルな光-物質相互作用によるイメージング計測，物理的・化学的效果

○岡本 裕巳¹ (1.分子研)

16:30 ~ 17:00

[19p-A201-6] 光応答性らせん状分子の構造変換とキラル光学特性

○中嶋 琢也¹ (1.阪公大院理)

17:00 ~ 17:15

[19p-A201-7] 単一構造単層カーボンナノチューブからの近赤外円偏光発光

○蓬田 陽平¹、F. L. Sebastian²、細川 裕矢¹、N. F. Zorn²、S. Wieland²、柳 和宏¹、J. Zaumseil² (1.都立大理、2.ハイデルベルク大)

17:15 ~ 17:45

[19p-A201-8] らせんの組織工学

本間 健太¹、○松崎 典弥¹ (1.阪大工)

光で拓く「キラル物質科学」の最前線

Chiral materials science with structured light fields

千葉大工¹, 千葉大分子キラリティー研² °尾松 孝茂^{1,2}

Chiba Univ.¹, Chiba Univ. Molecular Chirality Research Center², °Takashi Omatsu^{1,2}

E-mail: omatsu@faculty.chiba-u.jp

物体がその鏡像と重ね合わせることができない性質であるキラリティーと光の研究の歴史は長い。例えば、キラリティーを示す分子は円偏光の螺旋電場の向きに対して異なる吸光度（円偏光二色性）を示す。円偏光二色性は分子のキラリティーを計測する手段として古くから分光光学で活用されてきた。さらに、キラリティーと光の相互作用は生命科学におけるホモキラリティーの起源の一つとして考えられてきた。

近年、実空間における波面あるいは偏光などが空間的に制御された光「Structured Light」の研究が活性化している。不連続な等位相面を描きながら空間伝播する通常の光とは異なり、「Structured Light」の代表である光渦の波面は連続的な螺旋を描く。光渦は、螺旋波面に由来する軌道角運動量とキラリティーを持つ。古くから知られている螺旋電場に由来する円偏光のスピン角運動量には、左あるいは右周り、すなわち ± 1 の自由度しかない。これに対して、軌道角運動量には、螺旋波面の捩じれ度に対応した無数の自由度が存在する。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てきた。

これらの背景を踏まえ、「Structured Light」やナノ光学を駆使した新しいキラル光物質科学が今まさに胎動しようとしている。

本シンポジウムでは、その最前線を開拓するフロンティア研究者によって最新研究成果を紹介していただくとともにキラル光物質科学の未来を占う。

プラズモニックナノ局在渦場の物理特性

Physical Properties of Plasmonic Nano-Vortex Fields

北大電子研 °笹木 敬司

Hokkaido Univ., °Keiji Sasaki

E-mail: sasaki@es.hokudai.ac.jp

スピン・軌道角運動量を持つ光「螺旋光」とナノ物質の相互作用を増強し制御・操作することを目的として、我々は、局在プラズモンにより回折限界を超えて光をナノサイズまで絞り込むとともに、局在光場の振幅・位相・偏光の分布をナノスケールで自在成形する光ナノシェーピング技術を開発している。例えば、Fig. 1 に示すように、円偏光を金属ナノ三量体構造に照射するとナノギャップにスピン角運動量が局在し、また、光渦を金属五量体構造に照射するとスピン・軌道角運動量の両方をナノ局在化できることを電磁場解析から明らかにしている[1]。このナノ局在光渦場にナノ物質を配置して電子波動関数に光角運動量を転写すれば、多重極子遷移（禁制遷移）の高効率・選択的励起が可能となり、選択則を完全に打ち破って光励起ダイナミクスの自在制御が実現できる[1]。また、ナノ局在光渦場の運動量・角運動量が発生する力（光圧・光トルク）[2]を利用して有機・無機化合物のエナント制御キラル結晶化にも成功している[3]。本報告では、プラズモニックナノ局在光渦場に関する最近の理論解析の進展について紹介し、明らかになってきたユニークな物理特性を解説する。

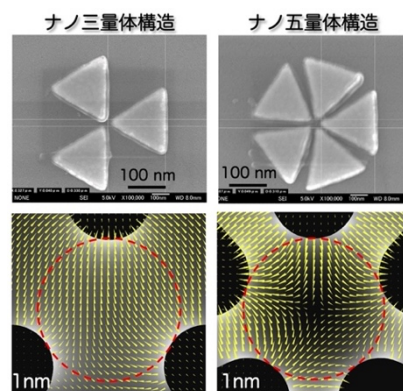


Fig.1 Fabricated metal multimer structures and spatial distributions of localized fields with spin and orbital angular momenta.

Fig. 2 は円偏光照射ナノ三量体構造のギャップ局在光渦場の瞬間電場分布の時間変化を示している。光スポットが1つ生成してギャップの周りを回転することが分かる。 T は光の振動周期であり、半周期で光スポットは1回転する。入射円偏光が右回りであるのに対してスポットの動き（光エネルギーの流れ）は左回り（反転）である。これは、全角運動量 $J=1$ ($l=0, s=1$) の入射光が3回対称性を持つ三量体構造により変調されて $J=1-3=-2$ の散乱場が生成し、この散乱場と入射場の干渉により全角運動量 $J=(1-2)/2=-1/2$ の局在光渦場が形成するためである。この半整数次の全角運動量を持つ局在プラズモン場はモノポール状態で、全角運動量が負値となるため回転方向が逆転する。モノポールは正負の極が変化しながら2回転で元の状態に戻る。これはナノ局在光渦場がメビウスの帯状態であることを表している。

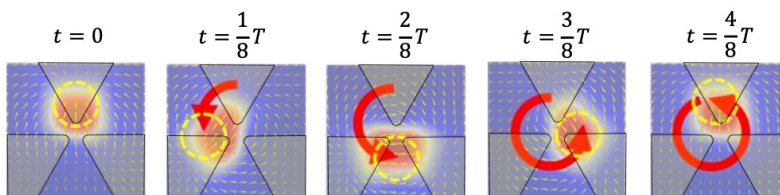


Fig. 2 Spontaneous intensity distributions of localized nano-vortex field. T is the time of optical one cycle.

参考文献：[1] *Nanophotonics*, doi:10.1515/nanoph-2022-0779. [2] *Nano Letters*, 21, 6268-6273 (2021). [3] *J. Phys. Chem. Lett.* 11, 4422-4426 (2020).

光で開拓する量子渦の物理

Exploring the physics of quantized vortices with light

大阪大学基礎工 蓑輪 陽介

Osaka Univ. , Yosuke Minowa

E-mail: minowa.yosuke.es@osaka-u.ac.jp

乱流、あるいは乱流中に見られる渦を理解することは、基礎科学的にも、そして産業応用上も非常に重要である。しかし、乱流や渦は本質的に非平衡な系であり、その性質の詳細な理解にはまだ至っていない。最近、この乱流や渦の科学に、量子的な観点から迫ろうとする研究が注目を浴びている。超流動ヘリウム 4 (以下、超流動 He と表記) に代表される量子流体中では、渦が量子化され、量子渦として存在する。この量子化のために、量子渦は準安定な存在として振る舞う。また、基本的に量子数 1 の同一の量子渦のみが存在する・渦芯は途中で途切れることがない・渦芯が非常に細い (オングストロームオーダー) など、量子渦は古典的な渦に比べて非常にシンプルであり、要素還元的な取り扱いと相性が良い。このような観点から、量子渦・量子乱流の研究を通じて、渦や乱流の普遍的な物理の解明を目指す研究が行われている。超流動 He 中の量子渦は、渦芯が非常に細く、かつ超流動ヘリウムの屈折率がほぼ 1 であることから、そのままでは観察が不可能である。そこで水素微粒子を用いて量子渦を可視化する手法が開発された[1]。しかし、水素微粒子も屈折率は 1 に近く、光との相互作用は弱い。また、水素以外の材料も探索されたが、窒素微粒子など限られた物質でしか量子渦の可視化が行われてこなかった。

我々は、レーザーアブレーションという光技術を超流動 He 中に導入することで、半導体シリコン微粒子を用いた量子渦の可視化 (右図) に成功した[2]。さらに、可視化された量子渦 2 本の再結合現象の観察にも成功し、理論予測とよく一致することを示した。本手法は、多様な材料に拡張が可能であり、蛍光性微粒子を用いた量子渦の可視化など、従来とは質的に異なる研究展開が可能となる。例えば、微粒子を非接触に捕捉・操作可能な光トラッピングとの融合の可能性が期待できる。我々は実際に、超流動 He 中での単一微粒子の光トラッピングに成功している[3]。講演では、最近の研究成果や、その他の研究展開の可能性についても報告する。

[1] G. P. Bewley, D. P. Lathrop K. R. Sreenivasan, Nature **441**, 588 (2006).

[2] Y. Minowa, S. Aoyagi, S. Inui, T. Nakagawa, G. Asaka, M. Tsubota, M. Ashida, Science Advances, **8**, eabn1143 (2022).

[3] Y. Minowa, X. Geng, K. Kokado, K. Sato, T. Kameyama, T. Torimoto, M. Ashida, Optica **9**, 139-144 (2022).

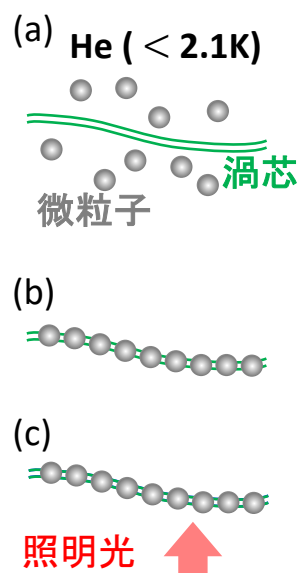


Fig. Schematics of visualization of a quantized vortex.

Selective Trapping, Rotation and Propulsion of Isotropic Dielectric and Composite Janus Microparticles in the Evanescent Field of Optical Nanofibres

Viet Giang Truong, Pramitha Praveen Kamath, Souvik Sil, Georgiy Tkachenko, and Sîle Nic Chormaïc

Light-Matter Interactions for Quantum Technologies Unit

Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Okinawa, 904-0495, Japan

E-mail: v.g.truong@oist.jp

Abstract: The long-range and precise manipulation of spherical isotropic and, composite, anisotropic microparticles is a topic of enduring interest. Here, we present all-optical forces and torques that can be used to control the spin, precession, or long-range propulsion of dielectric and composite Janus microparticles using the linear and angular momenta of light guided in optical nanofibres. We discuss how to transfer these momenta to microparticles trapped near the fibre surface.¹ We find that linearly polarized light, generating linear momentum in the nanofibre, causes Janus particles to exhibit strong transverse localization near the nanofibre's surface and much faster propulsion compared to all-dielectric particles of the same size.² Moreover, angular momentum, generated by circularly polarized light, provides additional azimuthal optical forces and torques to rotate particles around the nanofibre axis.³ These results establish a first step towards the precise long-range trapping and control of microparticles.

Key words: Optical nanofibre, linear and angular momenta, microparticle trapping and manipulation.

References:

1. A. Maimaiti, D. Holzmänn, V.G. Truong, H. Ritsch, and S. Nic Chormaïc, “Nonlinear force dependence on optically bound micro-particle arrays in the evanescent fields of fundamental and higher order microfibre modes”, *Scientific Reports* **6**, 30131, (2016).
2. G. Tkachenko, V. G. Truong, C. Esporlas, I. Sanskriti, and S. Nic Chormaïc “Evanescent field trapping and propulsion of Janus particles along optical optical nanofibers” *Nature Communications* **14**, 1619, (2023).
3. G. Tkachenko, I. Toftul, C. Esporlas, A. Maimaiti, F. Le Kien, V. G. Truong, and S. Nic Chormaïc, “Light-induced rotation of dielectric microparticles around an optical nanofiber” *Optica* **7**, 1, 59-62, (2020).

キラルな光-物質相互作用によるイメージング計測, 物理的・化学的效果

Imaging, Physical and Chemical Effects by Chiral Light-Matter Interaction

分子研 °岡本 裕巳

Inst. Mol. Sci., °Hiromi Okamoto

E-mail: aho@ims.ac.jp

キラルな光-物質相互作用は、円偏光二色性 (CD) や旋光性 (OR) などの分光手法 (キラル光学効果と総称する) を通じてキラル物質の検出や特性解明に用いられる他、キラル物質構造の創出の基本原理ともなり得る。本講演では、キラル光学効果の基礎の再確認と再検討を行い、またキラル光学効果に基づく顕微イメージングについて述べる。それらの基礎の上で、キラルな光-物質相互作用に基づく物理的・化学的な効果に及ぼす影響の研究例について述べる。

1. キラル光学効果の基礎: 再確認と再検討

キラル光学効果は、物質にキラリティがあると活性、キラリティがないと不活性というシンプルで強力な選択則が知られている。これがキラル光学効果を活用する際の基礎となっている。しかし、この選択則が成立しない場合のあることが、低次元系のキラル光学効果の考察から示される。また後述のように、顕微計測で局所的なキラル光学効果を計測する場合にも、この選択則は必ずしも成立しない。

2. キラル光学効果による顕微イメージング

キラル光学効果は一般には信号強度が弱いと考えられている。CD は左右円偏光による吸収強度の僅かな (通常数百分の一以下) 差を検出する。一方、縦横の直線偏光による吸収強度の差 (直線偏光二色性, LD) は CD に比べて遥かに大きく、異方性物質では CD による不均一・異方性試料の顕微イメージングは困難とされてきた。我々はこれを高精度に回避する手法を提案し、近接場キラル光学イメージング手法 (ナノメートルレベル), 高精度遠方場 CD イメージング手法 (サブミクロンレベル) を開発して、いくつかの試料に適用した。

金属ナノ構造によるプラズモン物質に近接場キラル光学イメージングを適用した結果、ナノ構造の局所的なキラル光学効果は極めて大きな信号を与え、またキラルでない構造においても局所的には強い信号を与えることを実験的に示した。高精度遠方場 CD イメージングでは、微結晶試料やドメイン構造を有するキラル構造を持つ試料などに適用し、多数の微結晶の掌性が一気に同定可能であることや、キラルなドメインがイメージングによって可視化できることを示した。

3. キラル光-物質相互作用に起因するキラルな物理的・化学的效果

局所的キラル光学効果の研究結果に基づき、キラルな物理的・化学的效果について研究した。プラズモン物質周辺では光のキラリティの効果が増強する場合がある。キラルなプラズモン共鳴が起源となり、蛍光性分子からの発光 (通常は円偏光度は 1/100 未満) が左右いずれかの円偏光に強く偏ることが見出された。キラルな金属微粒子に対する光圧では、左右円偏光に対する大きな非対称性等が見いだされた。

光応答性らせん状分子の構造変換とキラル光学特性

Modulation of Geometry and Chiroptical Property in Photoresponsive Helical Molecule

中嶋 琢也¹

Takuya Nakashima¹

阪公大院理¹

Osaka Metropolitan Univ.¹

E-mail: takuya.nakashima@omu.ac.jp

Modulation of physicochemical properties in molecules with light is of interest from the viewpoints of technological applications. Some photoresponsive molecules are able to undergo chemical transformation in a stereospecific manner. Especially, chiral molecules with stereoselective photoresponsivity lead to changes in optical rotatory dispersion (ORD), circular dichroism (CD) and circularly polarized luminescence (CPL), working as a chiroptical switch. Molecules having multiple fluorophores (chromophores) arranged in a chiral manner often exhibit CD and CPL activity based on the exciton coupling theory. As an example, two pyrene units were bridged by a photoresponsive tetrathiazole framework with a one-handed helical geometry, capable of photoinduced pericyclic reaction (Figure 1).^[1] The pyrene-bearing photoswitch exhibited CPL activity due to the chiral stacking of pyrene units, which was modulated by the helical-non-helical phototransformation. The CPL switching performance was further enhanced in the chiral aggregates of molecule.^[2] With the same chiral helical and photoresponsive scaffold, two achiral lanthanide complexes were also arranged in a chiral manner to form a dinuclear complex. The dinuclear photoresponsive Eu(III)-complex exhibited strong CPL activity derived from the chiral Eu(III) complexes, which could be also modulated by photoirradiation.^[3]

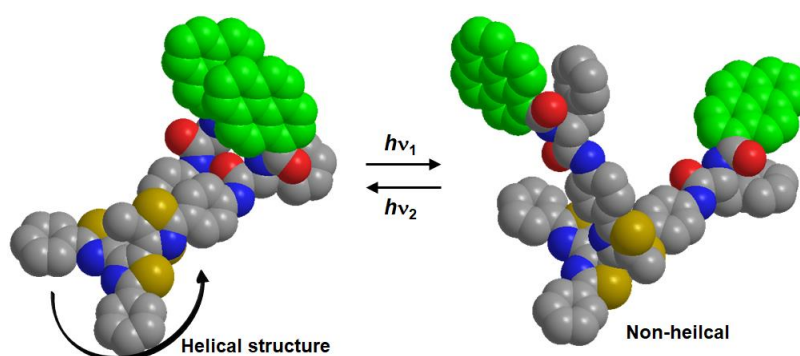


Figure 1. Structural change of photoresponsive helical molecule.

[1] Y. Hashimoto et al. *Chem. Commun.* **2016**, 52, 5171-5174.

[2] Y. Hashimoto et al. *ChemNanoMat* **2018**, 4, 815-820.

[3] Y. Hashimoto et al. *J. Phys. Chem. Lett.* **2018**, 9, 2151-2157.

単一構造単層カーボンナノチューブからの近赤外円偏光発光

Near-infrared circularly polarized luminescence from single-wall carbon nanotubes

都立大理¹, ハイデルベルク大² ○蓬田陽平, F. L. Sebastian, Y. Hosokawa, N. F. Zorn,

S. Wieland, 柳和宏, J. Zaumseil

Tokyo Metro. Univ.¹, Heidelberg Univ.² ○Y. Yomogida, F. L. Sebastian, Y. Hosokawa, N. F. Zorn,

S. Wieland, K. Yanagi, J. Zaumseil

E-mail: yomogida@tmu.ac.jp

円偏光発光 (CPL) は、左円偏光もしくは右円偏光のどちらかに偏った光が生じる現象であり、左円偏光と右円偏光の光吸収に差が生じる円偏光二色性 (CD) と合わせて、キラル物質の基本的な光学応答である。CPL はその波長帯に依存して様々な応用があり、特に 1000 nm 以上の近赤外帯では、光暗号通信やバイオイメージング等への応用が期待される。一方で、近赤外 CPL を示す材料は限られており、新物質の探索が求められてきた。単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、近赤外発光を示す物質であり、カイラル指数(n,m)で表されるグラフェンの巻き方により、エナンチオマーを有するカイラルチューブ構造をとる (図 1(a))。最近では、分離技術の進展により[1-3]、明確な CD を示す SWCNT のエナンチオマーが得られるようになっている。一般的に、CPL と CD は相関することが知られており、CD を示す SWCNT は CPL も示すことが期待されるが、これまでにその報告はない。本研究では、エナンチオマー分離技術[1-3]および発光デバイス作製技術[4]を駆使して、CPL 観察および CPL デバイス実現を目指す。

ゲルクロマトグラフィー法による分離を行い、エナンチオマーの関係にあるカイラル指数(6,5)および(11,-5)の単一構造 SWCNT を得た。得られた SWCNT の薄膜を作製し、その光励起発光の円偏光の偏りを測定した。図 1(b)にその CPL スペクトルを示す。1000 nm 以上の近赤外帯で発光が得られ、(11,-5)は左円偏光、(6,5)は右円偏光を強く示し、SWCNT からの CPL の観察に初めて成功した。さらに、SWCNT 薄膜を用いて発光トランジスタを作製し、電子とホールとの再結合による電流励起発光の観察に成功した (図 1(c))。講演では、CPL 特性の詳細について議論する。

[1] Y. Yomogida et al, Nat. Commun. 7, 12056 (2016).

[2] Y. Yomogida et al, ACS Appl. Nano Mater. 3, 11289, (2020).

[3] X. Wei et al, Carbon 132, 1 (2018).

[4] A. Graf et al, Nat. Mater. 16, 911 (2017).

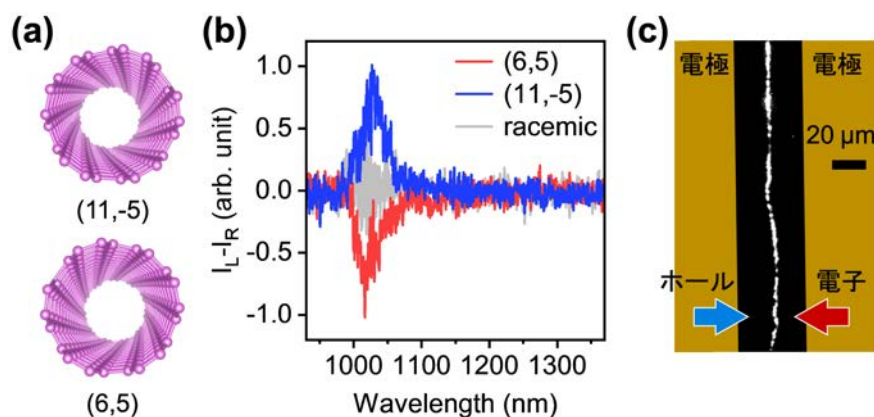


図 1 (a) Structure of chiral nanotubes, (b) CPL properties of enantiopure SWCNT films, and (c) Microscope image of CPL from SWCNT film devices.

らせんの組織工学

Helical Tissue Engineering

阪大工 本間 健太・〇松崎 典弥

Graduate School of Engineering, Osaka University

E-mail: m-matsus@chem.eng.osaka-u.ac.jp

生体組織において完全な直線構造は存在しない。分子レベルではDNAの二重らせんやタンパク質の α -ヘリックス、マイクロメートルレベルではコラーゲンの三重らせんや細胞のらせん配向、ミリメートルレベルでは血管や骨格筋・心筋のらせん構造があり、多くの生体組織はらせん構造を有している(図1)。なぜ生体はらせん構造を好むのか。これまで、生体を模倣したらせん構造を再現した報告例はなく、特に、マイクロ・ミリスケールのらせん組織の理由は明らかにされていない。もし、細胞と足場材料の複合体をらせん構造化し、その機能やメカニズムを明らかにできれば、生体組織の構造と機能を再現した三次元組織の構築が可能となり、組織工学や再生医療への応用が期待される。

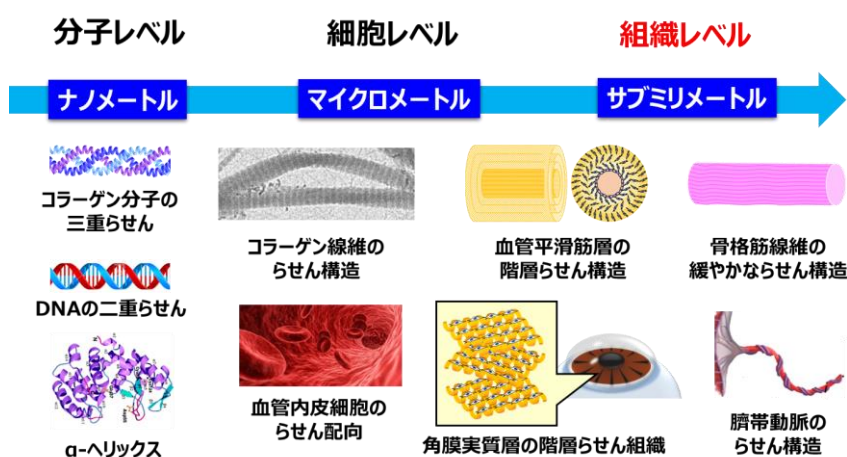


図1. 生体内に存在する様々な空間スケールのらせん構造。

本研究の学術的な問いは、「細胞と足場材料で構成される複合体(細胞-足場材料複合体)の詳細な構造制御と機能発現の理解」である。我々は、光渦に着目し、マイクロメートルピッチでらせん構造を有する細胞-足場材料複合体の構築と細胞機能の解析を目的とした。近年、光硬化樹脂に光渦を照射すると、光重合過程を介して樹脂が軌道角運動量を受取り、らせんファイバー化することが実証された¹。そこで、細胞毒性の低い光重合性モノマーと開始剤を用いて細胞存在下で光重合過程に光渦を照射することで、軌道角運動量に依存したらせん構造を有する細胞-足場材料複合体を構築できると考えられる。作製したらせん組織と非らせん組織の構造や細胞機能を詳細に比較することで、らせん構造の意味や機能を理解し、独創的な「らせん組織工学」技術への展開が期待される。

参考文献：

1. T. Omatsu et al., ACS Photonics 2018, 5, 4156-4163.