微小空間での新たな光応答の探索

ナノ光プロッセシング・ナノ光イメージングへの応用

伊都 将司
ITO Syoji
大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授

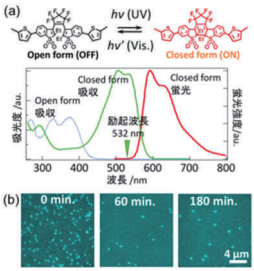


図1 ジアリールエテン誘導体の開環体を含む高分子薄膜を 532-nm光で励起すると少数の開環体が閉環体へ異性化し、蛍光スポットとして検出される（(b)左）。この手法では、光照射開始から3時間後でも蛍光観測可能である（(b)右）

微小空間で起こる新たな光応答を探索し、ナノ操作・ナノ観察へ展開しています。一例を紹介します。超解像蛍光イメージングは光学顕微鏡のもつ非接触、非侵襲という特徴を維持しつつ、より高い空間解像度を実現する技術として注目されています。

超解像蛍光イメージングにおいては、蛍光のON-OFFスイッチングが可能な蛍光分子が重要な役割を担います。

一般に、蛍光スイッチには、OFFとON状態それぞれの吸収帯に対応する2波長の光源が必要でした。しかし私たちは、蛍光スイッチ分子であるジアリールエテン誘導体の開環体（蛍光OFF）の吸収帯の裾にあるホットバンドと閉環体（蛍光ON）の吸収ピークを一つの光源で同時に励起することで、蛍光ON↔OFFが実現できることを実験的に示しました（図1）。これにより、よりシンプルな装置で超解像観察や一分子観察が可能になります。

キーワード
ナノフォトニクス、単分子検出、ハイブリッド光ナノメカノシステム、ナノ光ケモメカニクス

応用分野
ナノ物性評価、高精度リソグラフィー用材料開発、超高感度分析、極微量検体診断

［研究の先に見据えるビジョン］ 新研究分野の開拓を通じた様々な産業への貢献

室温・大気圧下で、分子からナノスケールの微小物体を光で自在に操る新手法を開発し、研究分野「ナノ光ケモメカニクス」を開拓します。その知見を、化学（ボトムアップ）的アプローチと物理（トップダウン）的なアプローチを止揚した「ハイブリッド光ナノメカノシステム」（図2）の構築や、物質（分子）と光の相互作用の自由度を最大限活用した単一ナノ物質に対する新分光法の開発などへ展開します。

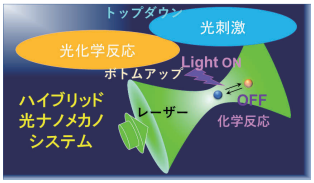


図2 化学反応と光の力をハイブリッドさせた光ナノメカノシステム

分子の機能を引き出す液晶の技術

光でつながる液晶デバイスの開発

内田　幸明
UCHIDA Yoshiaki
大阪大学大学院基礎工学研究科　准教授

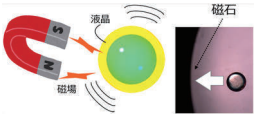


図1 磁石に引き寄せられる液晶マイクロカプセル

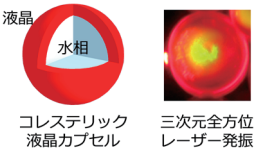


図2 全方位にレーザー発振する液晶マイクロカプセル

磁場と光は接触することなくエネルギーを伝えることのできる刺激として、今後のIoTを活用した社会の中で、バッテリーを持たない超小型デバイスの駆動力として利用されると予想されます。また、液晶の自己組織化をうまく使えば、格段に省エネとなることが期待されます。我々は液晶に特有の磁気的性質と光学的性質についての研究を行っています。液晶マイクロカプセル（図1）においては、京都大学と共同でマイクロ流体デバイスを用いたコレステリック液晶マイクロカプセルの作製に世界で初めて成功し、この液晶マイクロカプセルが三次元全方位レーザー発振器として機能することを報告しました（図2）。さらに、分子の集団的知性を用いて液晶ディスプレイに似たモニタ型コンピュータで計算を行うAIや、光でつながるIoTデバイスとしてのマイクロロボットなど、様々な「ディスプレイの次の液晶デバイス」を目指して研究を進めています。

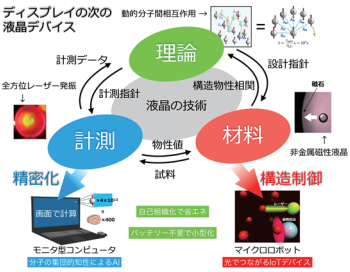
キーワード
液晶マイクロカプセル、分子材料、液晶エマルション、次世代磁性体

応用分野
機械学習、流体材料、薬物送達システム（DDS）、マイクロロボット

［研究の先に見据えるビジョン］

分子の機能を引き出す液晶技術の未来

我々は現在モニタ型コンピュータの実現可能性の実証に取り組んでいます。将来的には、機械学習等に威力を発揮するニューロコンピュータとして、大規模化と大幅な省エネ化、さらにはモバイル化の実現が期待できます。また、光励起による磁気秩序化が可能になれば、金属を含まない高感度の流体材料として、光で繋がるマイクロロボットなどに広く応用されると考えています。



近未来の光・放射線治療に資する 新しい特性をもった光機能ナノ材料の開発

小阪田 泰子
OSAKADA Yasuko
大阪大学高等共創研究院 准教授

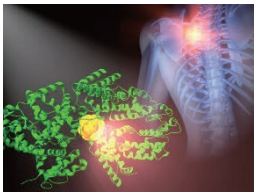


図1 硬X線励起発光の生体イメージングへの応用

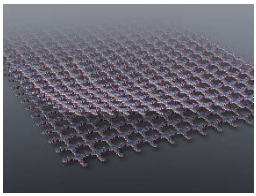


図2 光触媒系の確立に向けた二次元ポルフィリンポリマーの開発

（図の出典：Osakada, Y. et al. Hard X-ray-induced optical luminescence via biomolecule-directed metal clusters. Chem. Commun. 50, 3549-3551 (2014).）

対象物の情報を可視化・画像化したり、機能を制御する基本技術として、光や放射線を用いたイメージングや光操作はバイオサイエンスや医療分野で活用されてきました。その中で、近未来の光・放射線治療に資する破壊的イノベーションの達成を目指し、我々は生体適合性の高いソフトなナノ材料からの硬X線励起発光を世界で初めて明らかにしました（図1）。

また、生体内で光化学反応を引き起こし、生体分子の機能を変化させうる光触媒の開発において、我々は1 nmの厚みの超薄層ポルフィリン二次元ディスクポリマーを有機化学的に設計・合成し、その可視・近赤外光応答性光触媒機能を示しました（図2）。このように、我々は生体機能操作等の画期的技術の開発に挑戦し、生命現象の理解や、がんや神経疾患への革新的な治療技術による新しい創薬・医療技術の開発を目指しています。

キーワード
二次元ポリマー、光触媒、生体イメージング

応用分野
光バイオセラピー、生体機能制御法の開発、ドラッグデリバリーシステム

［研究の先に見据えるビジョン］ ナノ材料によるイメージングの社会応用

現在、バイオサイエンスへの応用を目指し、新しい特性をもった光機能ナノ材料の開発、多色発光が可能になるようにと応用を進めています。さらに光化学的な原理を付加して、光信号のオンオフに応じて、発光したり、消光したりするナノ粒子の設計にも取り組んでいます。今後は、生体機能制御やDDS（ドラッグデリバリーシステム）分野で、発光バイオイメージングの手法を応用した新しい展開をしていきたいと考えています。基礎科学の基盤をしっかり構築していく研究を目指していますが、将来は疾病の治療や創薬に応用できる研究に進めたいと考えています。

［参照情報］ 大阪大学ResOU https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/feature/2018/weetnj

グラフェンバイオセンサー
高感度かつ簡便なバイオセンシング手法の開発

小野 尭生
ONO Takao
大阪大学産業科学研究所 助教

優れた物性を持つ二次元ナノ材料の筆頭であるグラフェンは、半導体デバイスなど様々な応用が期待され、世界が注目しています。我々の研究グループは、グラフェンを用いたバイオセンサーの基盤構築から社会実装までを俯瞰して研究を進めています。グラフェンは、比表面積が大きく、優れた導電性という特性から、電気的に病原体などの標的を検出するバイオセンサーに最適な材料です（図1）。我々は、実用化に向けた課題（検出対象のデバイ遮蔽など）の解決に取り組み、マイクロ流体デバイスで形成した極微小反応場内での酵素反応をグラフェンで高感度かつリアルタイムに計測できるバイオセンサーを開発しました（図2）。本研究は、グラフェンのバイオセンシング応用、医療や公衆衛生の分野での社会実装に大きく貢献するもので、また電気的なバイオセンシング全般に新たな方法論を提案するものです。

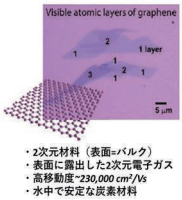


図1 グラフェンの特徴

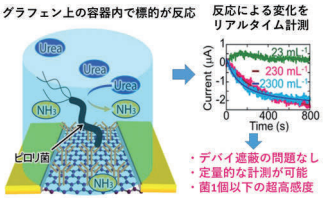


図2 ピロリ菌の超高感度センシング例

キーワード
グラフェン、バイオセンサー、マイクロ流体デバイス

応用分野
病原体の検出システム、生化学研究用分析機器、医療や公衆衛生の分野

［研究の先に見据えるビジョン］ 新奇ナノ材料を活用した新たなバイオ計測と制御

グラフェン等の二次元物質は、既存の三次元物質とは異なる構造・物性を持ちます。これを利用した究極の省エネデバイスや量子デバイスなどを実現して、新たな産業を創出すべく、世界中で研究・開発競争が進められています。私が開発を進めるバイオ計測応用は、その中でもユニークな位置づけながら汎用性があり、魅力的なキラーアプリケーションの一つです。現在、JSTさきがけ「量子生体」領域で研究をさらに発展させ、量子的性質を持つナノ材料を活用して生体ナノ界面を計測・制御する研究も進めています。新奇材料のユニークな物性を活用することで、バイオ計測に新たな機軸を打ち出し、生命科学や医療・産業応用の新たな潮流を生み出すことを目指します。

［参照情報］ 大阪大学ResOU https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190618_2, 大阪大学共創機構『社会実装を目指す研究シーズ集2020』p87

独自評価法とデータ科学を融合したエネルギー変換材料の開発

佐伯 昭紀
SAEKI Akinori
大阪大学大学院工学研究科 教授

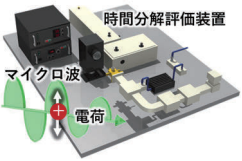


図1 独自開発した光電変換材料評価装置

図2 研究室で作製した有機太陽電池

Society5.0の実現、SDGsやパリ協定の長期目標の達成、資源・環境制約の克服、また、COVID-19の影響を受け、急激に高まる社会のデジタルトランスフォーメーション化のために、早急な革新的マテリアル開発がこれまで以上に求められています。

我々はこれまでに、独自開発の光電変換材料評価装置（図1）と機械学習・人工知能によるデータ科学的統計法を用いて、多くの労力と時間を要してきた材料開発プロセスを一気に短縮する評価手法と、それによる新たな材料・プロセスを次々と生み出してきました。一例として、次世代太陽電池として期待されている有機太陽電池（図2）の開発が挙げられます。

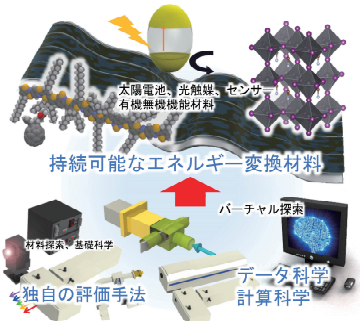
今後は、数々の独自開発評価法とマテリアルズ・インフォマティクスを始め、さらに様々な分野・手法の融合にも挑戦し、日本発の革新的マテリアル開発を先導していきます。

キーワード
過渡分光評価、光エネルギー変換材料、マテリアルズ・インフォマティクス、高分子

応用分野
次世代太陽電池、光触媒、各種センサー、有機無機ハイブリッド機能材料

［研究の先に見据えるビジョン］ 基礎科学に基づく新エネルギー変換材料の開発

私は、光・電気・誘電性といったさまざまな機能の背後にある物理化学を基軸とし、メカニズムの解明、新規機能性材料の開発、新たな評価装置・解析手法の開発を行ってきました。今後も、新たな挑戦は続けつつも、これまでの方向性を追求していきます。革新的な評価手法の開発と、革新的な材料開発を車の両輪として、持続可能な地球環境保全へ、研究を通じて貢献し続けます。



超薄・柔軟な有機エレクトロニクス技術

微小信号計測用シート型センサの開発

関谷 毅
SEKITANI Tsuyoshi
大阪大学産業科学研究所 教授

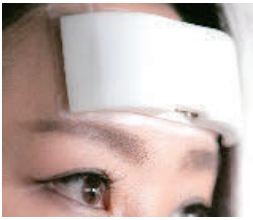


図1 世界最薄・最軽量の医療用シート型脳波計

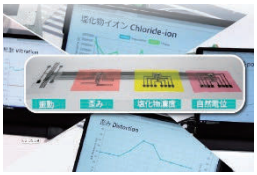


図2 シート型構造物ヘルスケアシステム

世界的に高齢化への対策が課題となる中、人体に優しいフレキシブルなセンサデバイスに注目が集まっています。我々は、「有機材料の柔らかさを活かしたフレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクス」の作製プロセスを確立し、その有用性を世界に先駆けて実証しました。具体的に実用化したのは、シート型のセンサシステムです。例えば、脳活動計測システム・パッチ式脳波計（図1）は、世界最薄・最軽量（厚さ6mm、重さ24g）で、額に貼り付けるだけで簡単に脳波の計測を行うことができます。2020年8月に医療機器の認証を取得し、医療用脳波計として、医療の現場からヘルスケアなどへの展開が進んでいます。さらに、橋梁や橋脚などの効率的な点検・管理手法の研究開発も進めています。壁紙のようなシート型センサを「貼り付けるだけ」で構造物の状態を把握できるセンサシステムの実現が期待されます（図2）。

キーワード

次世代有機デバイス、シート型センサシステム、フレキシブルエレクトロニクス

応用分野

バイタルサインの計測、母子ヘルスケア、大規模構造物のスマート管理システム、農業IoT

［研究の先に見据えるビジョン］

フレキシブルICT・AIシステムの社会実装

微小信号計測用シート型センサをAIと組み合わせ、医療・ヘルスケアや大規模構造物の維持・管理、農業等、多様な社会分野を支えることを目指しています。

高性能熱電変換ナノ材料の開発

安価で環境に調和したユビキタス元素の活用

中村 芳明
NAKAMURA Yoshiaki
大阪大学大学院基礎工学研究科 教授

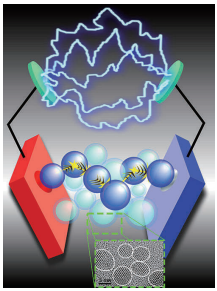


図1 社会実装可能な熱電発電に向けた世界最小熱伝導率を誇る独自シリコンナノ材料波計

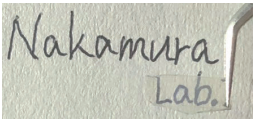


図2 室内外の温度差をもつ窓ガラスからの熱電発電を可能にする透明熱電ナノワイヤ材料

これまで熱電変換材料には、レアメタルや毒性のある材料が使われることが多く、より安価で環境に負荷の少ない材料が求められています。我々は、ありふれた元素であるシリコンの極小なナノドット結晶を結晶方位をそろえて連結した材料を形成する技術を開発しました。この技術により、世界最小熱伝導率の結晶シリコン熱電変換材料の創製に成功し、熱電発電効率向上の指針を見出しました（図1）。また、窓ガラスの室内外温度差を利用した熱電発電のための透明熱電材料の研究にも取り組んでいます。その結果、安価で無毒な酸化亜鉛（ZnO）を使って、ナノワイヤを薄膜中に埋め込んだ構造を世界で初めて作成しました。このナノワイヤZnO材料（図2）では、ナノワイヤ未導入ZnO薄膜と比べ、熱電変換出力因子を約3倍増大することができます。これにより、窓に貼り付けるだけで未利用熱を電気として回収できる熱電変換素子の開発が期待できます。

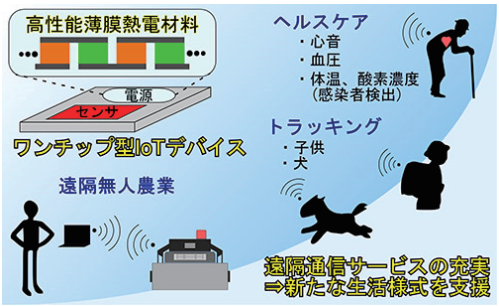
キーワード
熱電変換材料、ナノドット結晶、結晶方位、透明材料、ナノワイヤ、ユビキタス元素

応用分野
次世代IoT、ウェアラブルセンサー用電源、センサ組み込み高性能薄膜熱電電源

［研究の先に見据えるビジョン］

熱電ナノ材料を搭載したIoT社会

ナノ構造高性能薄膜熱電電源をセンサに組み込むことで、IoT社会における新たな生活様式を支えるための遠隔通信サービスを可能にします。これにより、人々の暮らしだけでなく、医療・農業などの幅広い社会分野を支えることを目指します。



［参照情報］ 大阪大学ResOU https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2014/20141210_1, https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20181031_2

ナノスケール立体構造体の造形技術の開発

物質開発・デバイス作製の究極のテクノロジー

服部 梓
HATTORI Azusa
大阪大学産業科学研究所 准教授

ナノ構造作製技術は、物質開発とデバイス作製に関する究極のテクノロジーです。物性を決める電子、スピン、電荷などには、集団系に由来したナノサイズの特性長が存在し、試料サイズを1-10 nmと微小化して特性長と同等程度に迫ると、純粋化した物性の取り出しが可能となります（図1）。それには、精緻なモノづくり力が必要です。我々のグループでは、世界唯一の原子精度のナノ立体構造造形技術を皮切りに、触媒基準エッチング法（CARE）の金属酸化物の適応、ナノ立体構造評価技術の構築など、ナノメートルスケールの立体構造体の造形を可能としてきました。これにより、形状・次元性・サイズを精密に制御したナノ構造体において、マクロサイズ試料中では埋没している機能最少塊の特性を顕在化させ、その特性を様々な分光法、顕微法を用いて多角的に評価し、学理の構築に努めています。

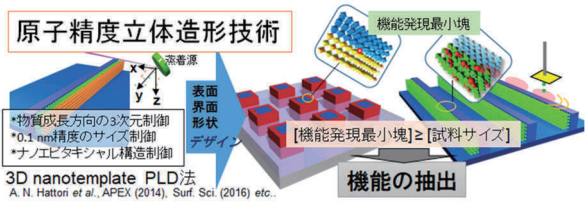


図1 原子精度立体造形技術により、ナノスケールの機能の最小の塊へとアプローチし、物性解明、機能操作エンジニアリングへと展開

キーワード

ナノ構造作製技術、ナノスケール立体構造体、半導体物理、酸化物エレクトロニクス

応用分野

革新的デバイス製作、デバイス低電力化、脳機能再現、人工光合成

［研究の先に見据えるビジョン］ 機能活性化ナノ材料科学によるマテリアル革新

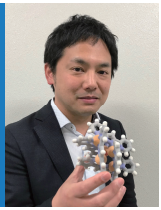
ナノスケール立体構造体を造形することで、その構造と物性の関係を解明し、更にナノの特異性を安定化させる機能性エンジニアリングを確立できれば、極限機能材料の開発や、最大効率ナノデバイスの実現につながります。このような機能活性化ナノ材料科学によるマテリアル革新を通じ、産業界への大きな貢献はもちろん、将来的には、脳機能や人工光合成を再現できるような新しいデバイス作製にも挑戦したいと考えています。

［参照情報］ 大阪大学 阪大StoryZ https://www.osaka-u.ac.jp/ja/news/storyz/forthefuture/2014/201503_hattori

水と光でつくる究極の新エネルギー

金属錯体化学を基盤とした人工光合成

正岡 重行
MASAOKA Shigeyuki
大阪大学大学院工学研究科 教授



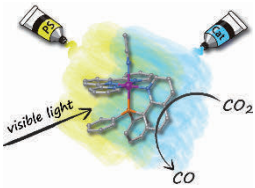


図1 二酸化炭素を光化学的に還元するルテニウム錯体触媒

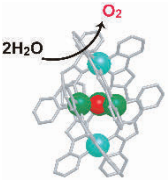


図2 水を酸化して酸素を作り出す鉄五核触媒

無尽蔵に降り注ぐ太陽光エネルギーを用いて化学エネルギーを作り出す「人工光合成」の構築は、実用化に成功すれば世界のエネルギー問題が一挙に解決可能なほど、極めて挑戦的でインパクトの大きな研究課題です。我々は、光・電子・プロトンの媒介役として金属錯体を用い、光によって水や二酸化炭素などの小分子を自在に活性化することで「人工光合成」を達成に導く基盤技術の開発を目指しています。

これまでに、ルテニウム-ポリピリジル錯体（図1）が電気化学的および光化学的な刺激により二酸化炭素の還元反応や水の酸化反応の触媒として機能することを報告してきました。また、鉄五核錯体（図2）が水の酸化反応を非常に効率よく行う触媒となることを見出しました。これらの成果は、今後の人工光合成の触媒開発の重要な指針となることが期待されます。

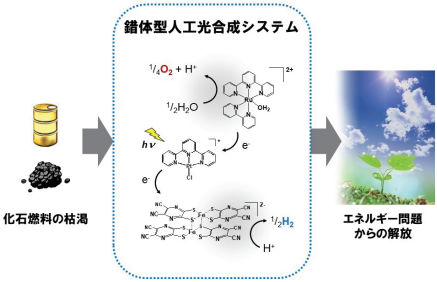
キーワード
人工光合成、金属錯体、二酸化炭素還元、水の酸化、電気化学、光化学、触媒

応用分野
クリーン燃料の生産、二酸化炭素から化学物質の生産

［研究の先に見据えるビジョン］

人工光合成の礎を創りエネルギー問題に挑む

そもそも光合成の仕組みの詳細は未だ明らかになっていません。植物は試行錯誤を繰り返し光合成システムをつくり上げる中で、キーとなる物質に金属錯体を選びました。まずは光合成に倣い、金属錯体に関する基礎的な研究を積み重ね、人工光合成実現を経て、エネルギー問題からの解放を目指します。



［参照情報］ WAOサイエンスパークHPフロントランナーvol.23 http://s-park.wao.ne.jp/archives/1161

次世代液晶性マテリアルの研究

自己組織性に着目することで拓く未来技術

吉田 浩之
YOSHIDA Hiroyuki
大阪大学大学院工学研究科 講師

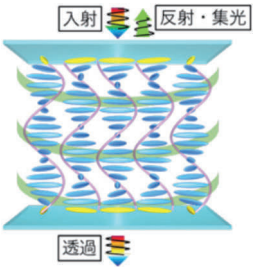


図1 レンズ機能を持たせたコレステリック液晶デバイス

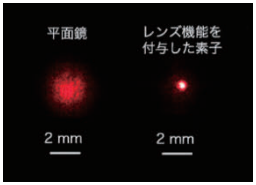


図2 デバイスから反射されたレーザー光の像

液晶はディスプレイの代名詞と言えるほど私たちの社会に浸透していますが、その自己組織性に着目すると、次世代の光学ニーズを満たす高機能・高効率な光学デバイスとしての応用が可能となります。

我々は、棒状分子が自発的にらせん構造を形成するコレステリック液晶を用いることにより、パターニングを施した基材上に液晶を塗布するのみで、反射波面を自由に制御する技術を開発しました。これにより、コレステリック液晶に反射機能に加えて、集光や散乱等のレンズ機能を持たせることが可能となりました（図1、2）。また、液晶と高分子を複合化することで、従来液晶よりも10倍以上の高速応答性を示す液晶も開発しました。これらの技術を使用すれば、様々な光学特性を実現できることから、透明ディスプレイや、照明機器、将来的には3Dディスプレイなどへも応用できると考えられます。

キーワード

コレステリック液晶、レンズ、光学素子、ホログラム、回折、AR、VR、ディスプレイ

応用分野

光アイソレータ、情報ディスプレイ、スマートグラス

［研究の先に見据えるビジョン］

高機能・安価な光学デバイスが普遍化した社会

高速に屈折率を変えたい、薄型の素子で自由に光を曲げたい、高い透明性を維持したい…光学部材に求められる特性はシンプルかつチャレンジングです。液晶のもつ自己組織性に着目することによりこれらの特性を実現し、高機能かつ安価な光学デバイスが普遍的に用いられる社会を実現します。

次世代液晶マテリアルの応用分野