

NATIONAL
INSTITUTE FOR
MATERIALS
SCIENCE

NIMS NOW

No. **4**
2013 May

ひとつぶの
ひかりを、
この手に。

革新的光材料技術の
開発と応用プロジェクト



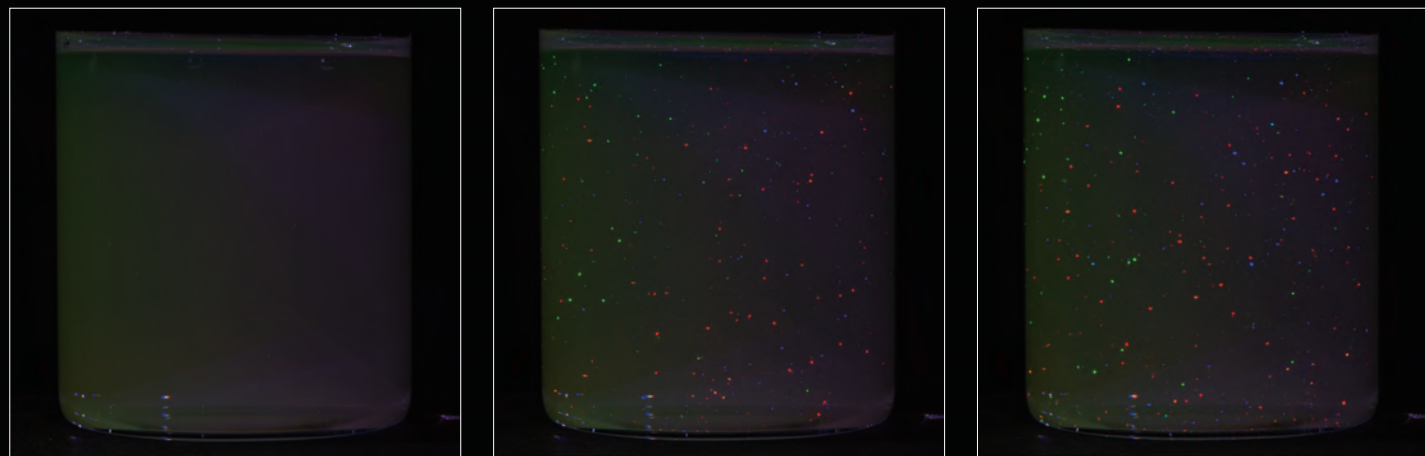
ひとつぶのひかりを、 この手に。

革新的光材料技術の開発と応用プロジェクト

光。この手に取ることもかなわないものを、
光子のレベルでコントロールし、材料に活用しようとしているのが、
革新的光材料技術の開発と応用プロジェクトだ。

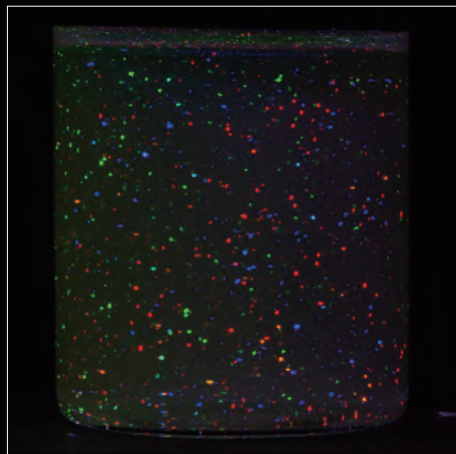
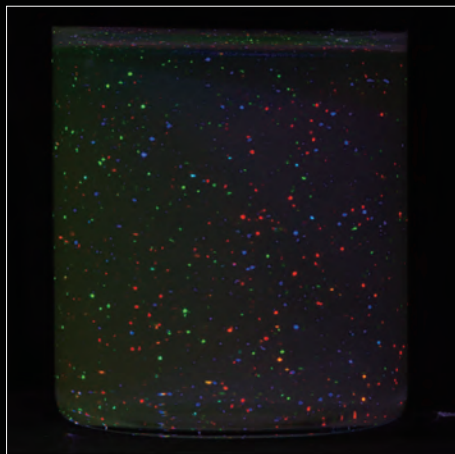
現在のIT技術に使われている各種デバイスは、もちろん、電子を使った電子デバイスだ。
こうした電子デバイスは、電子を使っているからこそその壁もある。
この電子を、光子に置き換えることができれば。
更なる集積化、熱処理問題、暗号技術、容量と速度など、
飛躍的に向上したものになるといわれている。

未来のデバイスを実現するための、レーザーや単一光子、量子ドットと呼ばれる
NIMS独自の最先端フォトニックマテリアル(光材料)を紹介する。



ソフトフォトニック結晶の原料となるコロイド分散液の結晶化挙動。コロイド結晶ドメインが無数に成長してくる。詳細はP.6を参照

Innovative Photonic Materials





洗練されたナノ構造をつくり、量子の世界をあやつる

先端の共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
量子ナノ構造グループ グループリーダー
佐久間芳樹

先端の共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
量子ナノ構造グループ
間野高明

先端の共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
ナノフォトニクスグループ
黒田 隆

先端の共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
量子ナノ構造グループ
大竹晃浩

量子ナノ構造の世界

結晶成長技術を駆使し、洗練された半導体ナノ構造をつくる。そして、電子や光子(光の粒)など量子が繰り広げる不思議な現象を操り、斬新で有用な機能や特性を引き出す。これが私たちの研究目標です。

ナノ構造の代表格は「量子ドット」と呼ばれるもので、幅・高さ・奥行きが10ナノメートル前後の微細な結晶です。ナノメートル(10億分の1メートル)がどのくらい小さいのか考えてみましょう。地球の直径は約12,700km。いま、この地球を直径1mまで縮小したとします。実は、これと同じ比率で1.2cmのピー玉を縮小したときの寸法がおおよそ1ナノメートルです。原子だと数個から10個分程度の大きさです。

量子ドットの中に電子を閉じ込めると波のように振る舞い、量子サイズ効果によってエネルギー準位は離散化します。そのため、量子ドットは電気や光に対して原子のように応答するのです。

たとえば、クーロン閉塞という現象を使って量子ドットに電子を1個ずつ出し入れできます。これは原子のイオン化あるいは帯電現象と同じと見なせます。また、量子ドット内の離散準位間の電子遷移により光が発生します。

準位に幅がないため光子のエネルギーはそろい、色純度の高い発光が得られます。これも水銀灯やナトリウムランプ内のガス原子が発光する原理とほぼ同じと言えます。さらに、ひとつの量子ドットを選び出せば単一光子を発生できます。量子ドットによる単一光子発生は最近10年で急速に発展した分野で、絶対に盗聴されることのない量子暗号技術への応用が検討されています。

このように、半導体ナノ構造は新たな現象や革新的機能を生み出す可能性を持っており、それらを発見あるいは実証し、技術としての応用を探るところにこの研究の醍醐味があるのです。

自然の摂理を利用する

では、量子ナノ構造の研究に大切な要素は何か。もちろん多くの技術と高度な知識が必要ですが、とりわけ作製技術の重要性は群を抜いています。極めて小さな構造をどうやって作るかが研究の成否を決めるのです。また、単に小さいだけでなく、結晶には高い品質と純度も求められます。

量子ナノ構造の概念が提案された当初は、リソグラフィとエッチングを使った伝統的な作製法が試されました。しかし、結晶中に欠

陥が発生し、期待される物性やデバイス特性は得られませんでした。その後、1990年頃に自己形成法と呼ばれる格子歪み系の結晶成長を利用した技術の潮流がおり、研究が加速しました。自己形成法で良質な量子ドットが作製できるようになったためです。

NIMSでも同時期に「液滴エピタキシー」と呼ばれる独自の自己形成法を考案し、さまざまな技術開発をすすめてきました。この方法の原理は、例えばガリウムヒ素(GaAs)の結晶表面に構成元素であるGa原子を蒸着すると、ナノメートルサイズの直径と高さを持つ半球状のGa液滴が自己形成する現象が利用されています。

その後、Ga液滴にAsを供給することで結晶化がすすみ、GaAs量子ドットが形成されます。液滴の自己形成はハスの葉に降った雨水が丸い水滴になるのと似ており、自然の力を利用しています。

最近、液滴エピタキシー法で新たな量子ドットの作製に成功しました。図1は(111)A面という特殊な結晶面に形成したGaAs量子ドットのAFM(原子間力顕微鏡、Atomic Force Microscope)像です。量子ドットが正三角形をしているのは、(111)A面での原子配置の対称性が反映されているためです。Ga

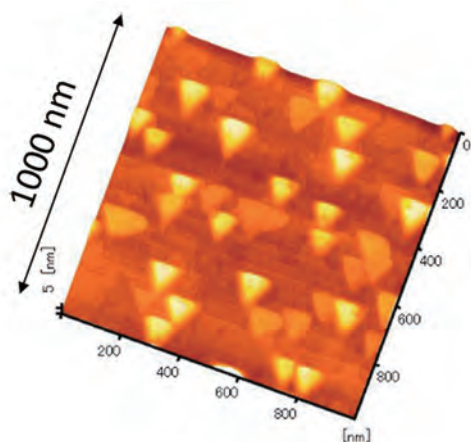


図1 (111)A面上に形成したGaAs量子ドットの原子間力顕微鏡(AFM)像

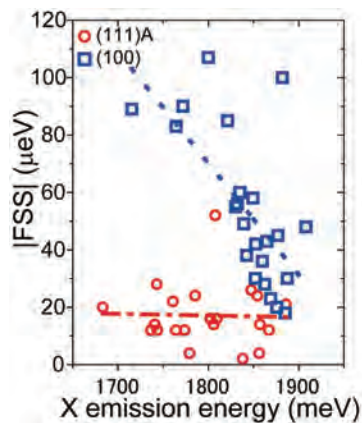


図2 量子ドット中の励起子(X)発光エネルギーと微細分裂幅(FSS)の相関。もつれ合い光子対の生成にはFSSが小さいことが必須。(111)A基板上の量子ドットは、(100)基板のものに比べて小さなFSSを実現できる

液滴にAsを供給して結晶化する過程で正三角形の結晶が自動的に形成されます。つまり、ここでも自然の摂理を利用しているわけです。

近年、優れた形状対称性を持つ量子ドットの重要性が高まっています。量子暗号の長距離伝送の実現には、もつれ合い光子対と呼ばれる量子的な相関を持つ2個の光子を同時発生するデバイスが必要になるからです。この光子対は対称性の高い量子ドットから効率的に放出されることが理論予測されており、NIMSの液滴エピタキシー法に世界中の研究者の注目があつまっています。すでに図2のような基礎データが得られ、もつれ合い光子対の実証も間近です。

原子・分子サイズのナノ構造

もうひとつ私たちが注力しているナノ構造があります。半導体結晶に等電子不純物と呼ばれる大きな電気陰性度を持つ不純物をドーブし、孤立不純物や不純物のペアの周りに電子や正孔を強く束縛させて量子ドットのように振る舞わせる手法です。自己形成法で作製した個々の量子ドットにはサイズや形の揺らぎが避けられません。そのため、全ての量子ドットの特性を均一にそろえることが難しく、深刻な技術課題となっています。

私たちは、結晶中にドーブした孤立不純物、あるいは近接した2つの格子位置にある不純物ペアを使うことで、不均一性の問題が解決できるという着想を得ました。

図3はガリウムリン(GaP)結晶の1つの原子面内に、等電子不純物である窒素(N)をドーブした試料からの顕微PL(フォトルミネッセンス:Photo Luminescence)像です。視野内に発光波長のそろった複数の輝点を確認できます。

いずれも第4近接の格子位置を占めた NN_4 ペアに捕えられた励起子(電子と正孔の結合体)の発光です。私たちはひとつの NN_4 ペアの分光を行い、励起子が再結合して消滅するたびに単一光子が発生することを世界で最初に実証しました。この実験によって、個々の不純物ペアに束縛された励起子が量子ドット内に閉じ込められた励起子と同様な性質を示すことが証明されたのです。

NN_4 ペアの原子間距離は約0.77ナノメートル。自己形成ドットより1桁以上小さなサイズです。 NN_4 は確率的に形成されますが、全て同じ原子配置を持つので発光波長は一致して均一です。現在、この手法を直接遷移型のGaAsなど他の材料系に拡張する研究を進めています。

ナノ構造作製技術を支える表面研究

結晶成長の素過程を深く理解し、知見を体系化することは、学術的な価値だけでなく新たなナノ構造の作製にも役立ちます。私たちはSTM(走査トンネル顕微鏡:Scanning Tunneling Microscope)やRHEED(反射高速電子回折:Reflection High Energy Electron Diffraction)による表面構造解析を行い、表面の再配列や吸着原子のダイナミクスなど、原子レベルでの結晶成長メカニズムの研究にも取り組んでいます。

図4は、0.1~0.2分子層の窒素(N)原子を吸着させたGaAs(001)表面のSTM像です。N原子の吸着によって、 (3×3) という特徴的な周期を持った表面再配列構造の形成が確認されました。また、N不純物の占有位置に関する情報を得るため、RHEEDやXPS(X線光電子分光:X-Ray Photoelectron Spectroscopy)の解析もおこなっています。このような基礎的なデータを利用することで、新たなナノ構造の形成技術の開発を効率的にすすめることができるのです。

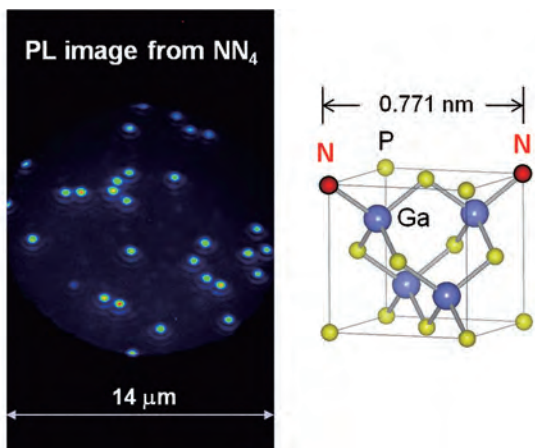


図3 (左) GaP中へのNの δ ドーブ層からのフォトルミネッセンス(PL)像
(右) GaPの単位結晶格子と NN_4 ペアの原子配置

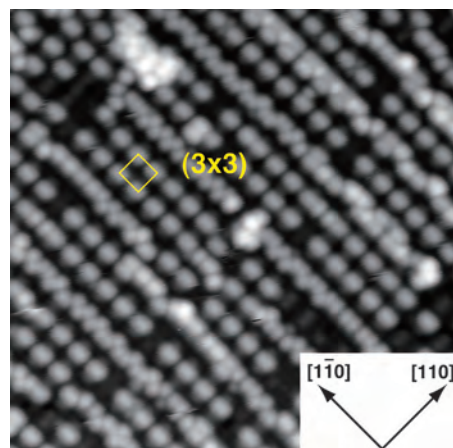


図4 窒素を吸着させたGaAs(001)表面の走査トンネル顕微鏡(STM)像



ソフトフォトンクス材料の創製と応用

先端的共通技術部門 先端フォトンクス材料ユニット
応用フォトンクス材料グループ グループリーダー
澤田 勉

先端的共通技術部門 先端フォトンクス材料ユニット
応用フォトンクス材料グループ
不動寺 浩

先端的共通技術部門 先端フォトンクス材料ユニット
応用フォトンクス材料グループ
古海 誓一

ソフトとは？

私たちの研究は、ナノサイズからミクロンサイズの微細構造によって生み出される新しい光学効果を利用した、ソフトなフォトンクス材料の創製と応用開発を目的としています。ここで、「ソフト」とは、主として材料が「柔軟」であることを意味していますが、同時に、合成プロセスのソフト性（ソフト化学的な省資源・省エネルギー手法を利用していること）、あるいは、応用分野のソフト性（より身近で親しみのある製品分野がありうること）という意味も込めています。

コロイドフォトンクス結晶

フォトンクス材料といっても様々ですが、私たちが対象とする材料は、主として「コロイドフォトンクス結晶」といわれる微粒子の周期構造体です。一般に、屈折率の異なる材質を組み合わせて光の波長程度の小さなスケールの周期で構造を形成させたものは、「フォトンクス結晶」と呼ばれています。コロイドフォトンクス結晶というのは、そのようなフォ

トンクス結晶の一種で、周期構造を形成する単位がコロイド粒子（ナノサイズからミクロンサイズの粒子）であることから、このような名前と呼ばれています。

フォトンクス結晶においては、光の閉じ込め効果、光の増強効果、光の速度の極端な減少、特異な屈折特性といった、様々な特殊な光学効果が発現することが期待され、実用化につながる材料開発が望まれています。一般のフォトンクス結晶においては、微細構造の作製のために、高額な設備を必要とすることが多いのですが、コロイドフォトンクス結晶は、微粒子の自己組織化現象を利用して容易に周期構造が形成されるため、比較的低コストで製造できる可能性があり、工業的な大量生産に向いているという利点があります。

ソフトなフォトンクス結晶

私たちは、コロイドフォトンクス結晶の作製において、微粒子の周期構造を固定化する母相として、高分子ゲルやエラストマーといった柔軟な材質を選ぶことで、材料全体が

容易に変形しうる、ソフトな材料を実現することを目指しています。そのようなソフトな材料をつくる意義は、変形によって、容易に、その特性を変化させるところにあります。図1に、ソフトなフォトンクス結晶の概念図を示します。粒子間を埋めている母相が柔軟な材質であるために、結晶全体が、圧縮や引っ張りという応力により、容易に変形されます。これによって、フォトンクス結晶の光学特性を左右する、粒子間隔や配列の対称性が変化します。従って、ソフトなフォトンクス結晶は、応力を加えることによって容易に光学特性を変化させうる材料であるということになるわけです。

応力の作用により、光学特性が変化することを、最も直感的に感じ取れる現象が、引っ張りによる色変化です。フォトンクス結晶は微細な周期構造を持っているので、その周期によって決まる、特定の波長の光を強く反射します（Bragg反射）。そのため、材質自体は無色であっても、Bragg反射のために着色して見えます。図2は、赤色のコロイドフォ

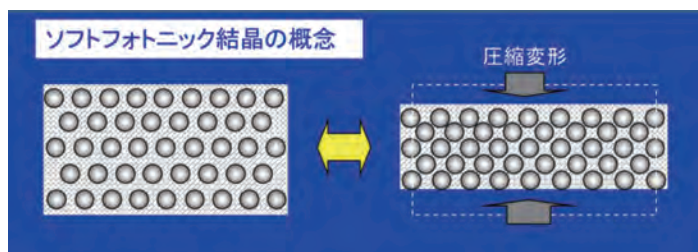


図1 ソフトフォトンクス結晶の概念の説明図。材料に応力（図は圧縮応力の場合）をかけることで、粒子間隔や配列構造の対称性が変わり、光学特性を変化させることができる

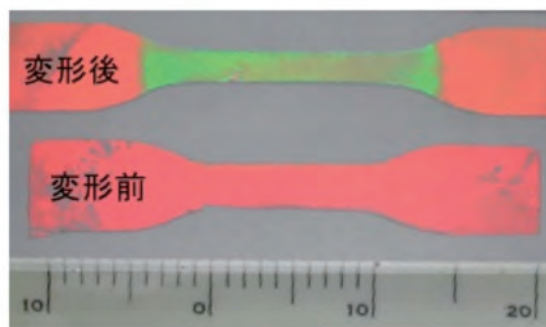


図2 コロイドフォトンクス結晶の引っ張り変形による色変化。変形により、粒子間距離が変化し、Bragg反射による色が変わる

さわだ つとむ 理学博士。主席研究員。専門分野は結晶成長学およびコロイド科学。コロイド単結晶材料の開発に従事。 / ふどうじ ひろし 博士（工学）。主幹研究員。1993年金属材料技術研究所入所。名古屋工業大学大学院准教授を兼任。コロイドフォトンクス結晶の研究に従事。 / ふるみ せいいち 博士（工学）。主幹研究員。東京工業大学博士課程修了。2011年より現職。JSTさきがけ研究者、筑波大学准教授を兼任。高分子フォトンクスの研究に従事。

ニック結晶を引っ張って変形させたときに、緑色に変化する様子を示しています。つまり、引っ張りによって、内包されている微粒子の配列間隔が変化して、それに伴い、光学特性も変化したことを示しています。私たちの目標のひとつが、このようなソフトなフォトニック結晶を、高い品質を保ちながら大面積で作製するプロセスを開発することです。

ソフトフォトニック結晶を用いた 波長可変マイクロレーザー

ソフトフォトニック結晶の大面積材料の開発は、現在進行中ですが、数ミリからセンチメートルサイズの、比較的小さなもの（ただし、これでもこの分野では大きいものに入るので）については、私たちは既につくることができます。そこでこのような材料を用いた先端的な応用として、レーザー素子の開発の成果についてご紹介します。

フォトニック結晶では、一般に、特定の波長（Bragg反射される波長にぎりぎりの波長）の光の速度が極端に遅くなる現象が起こり

ます。これを利用することで、レーザー発振が可能になります。私たちは、蛍光色素を添加したソフトなコロイドフォトニック結晶を作製し、これを短波長の光で照射して励起し、レーザー発振させることに成功しました。さらに、このコロイドフォトニック結晶を圧縮変形していくことで、レーザー発振の波長を、赤色からオレンジ色まで連続的に変化させることも成功しました（つまり波長可変レーザーです）。レーザー発振に必要な材料の厚さは、たったの0.1mmです。つまり、ソフトなフォトニック結晶を用いて、波長可変マイクロレーザーの実現に成功したわけです。図3は、レーザー発振の波長がシフトしていくときの分光スペクトルを、図4は、波長シフトしていくときのレーザースポットの色変化を示しています。

構造色の特性をいかして

ここでは、ソフトフォトニック結晶の応用として、先端的なレーザー素子についてご紹介しましたが、それ以外にも、もっと身近な応

用がいくつか考えられます。最も単純な応用は、フォトニック結晶が発する色の利用です。フォトニック結晶の色は、色素によるものではなく、内包する微細な周期構造に由来するものであり、このような、構造に由来する色は「構造色」と呼ばれています。ソフトフォトニック結晶は、その構造色が、変形で容易に変化する材料であるわけです。その特性を利用して、ユニークな装飾や表示に利用することが検討されています。あるいは、変形によって、光学特性が変わることを、歪のセンシングに利用することも検討されています。もし、ソフトフォトニクス材料が、安価で手に入るようになれば、私たちの身の回りに、様々な応用製品が出現する可能性があるのです。

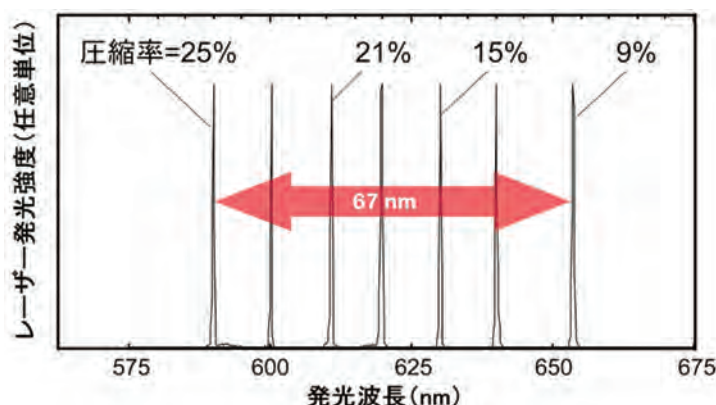


図3 ソフトなコロイドフォトニック結晶を用いたレーザー発振波長の変化。圧縮変形によって、レーザー波長が連続的にシフトし、波長可変レーザーが実現している



図4 圧縮によるレーザー波長がシフトするときの、レーザースポットの色変化



輻射場制御ナノ構造の創製と応用

先端的共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
プラズモニクスグループ
岩長祐伸

MANA ナノシステム分野
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム光学グループ グループリーダー
長尾忠昭

先端的共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
プラズモニクスグループ グループリーダー
宮崎英樹

先端的共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
ナノフォトニクスグループ
杉本喜正

メタマテリアル活用による 極小光波操作素子の実現

光波を自在に操作するためには、目的に応じた媒体をつくりだす必要があります。人工的な電磁波媒体を研究する分野としてメタマテリアルが2000年以降急速な発展を遂げました。この数年の研究を通じて、NIMSでは光波の基本的な成分である偏光ベクトルと位相をサブ波長の光路で操作する極小素子を実証してきました¹⁾。

図1は最も基本的な光学素子である偏光子を極小化した実例を示しています。市販の偏光子は百 μm からcm程度の光路を持ちますが、メタマテリアル偏光子(3層構造)では光路はわずか250nmです。1/1000から1/100000の薄型化にもかかわらず、偏光子としては同等以上の性能を実現しています。このほか、位相を操作する波長板、円二色性素子²⁾などを系統的に極小化できることを示しました。

究極に小さな材料と光との関係

電磁波媒体の構成部品である、原子スケール、或いはナノスケールのような究極に小さな材料における光学現象を解明し、新しい材料機能の創発につなげるべく研究をすすめています。例えば、結晶表面で自己組織化的に形成される、原子レベルの低次元構造や、リソグラフィなどにより製作されたナノアンテナ構造を用い、その中で光の振る舞いを研究しています。

光の赤外域から可視域にわたる広帯域のプラズモン共鳴、そして電場増強を創出し、これらを利用した液中の微量の生体分子の検出、高効率なエネルギー変換素子などへの応用を目指します(図2)。

プラズモニック・メタマテリアルによる 赤外線走査素子

超小型・低コストレーザー・レーダー用の赤外線走査素子を金属/誘電体積層型ナノ

ホール構造で設計したプラズモニック・メタマテリアルをつくりました。

ホール形状を面内で徐々に変化させることで平面プリズムを実現し光の出射方向を制御することでビーム走査をおこないます。

電子線リソグラフィとドライエッチング技術を用いナノスケールでの高精度かつ短時間でのナノ加工技術により赤外線ビーム走査素子を作製しました。ナノホール内への液晶充填により、外部印加電磁場による動的制御をおこない、赤外線走査素子の原理を確認することができました(図3)。

1. M. Iwanaga, Sci. Technol. Adv. Mater. 13.(2012). 053002 [Review]

円二色性：物質中に、円偏光を透過させるとき、物体の立体構造に起因して右円偏光と左円偏光で光吸収に差が生じる現象。

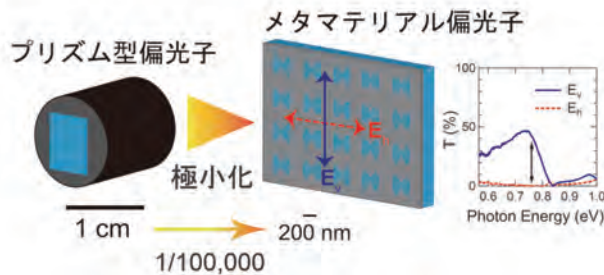


図1 偏光制御素子の極小化：バルク素子(左)からメタマテリアル素子(右)へ。灰色は金属(銀)、水色は透明絶縁体を表している。右端は測定した偏光透過率(T)スペクトル

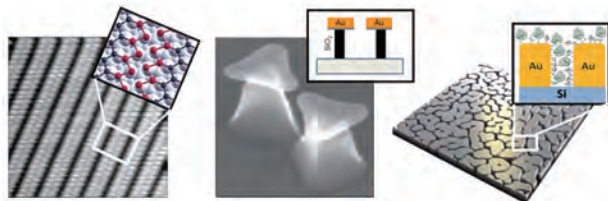


図2 Si単結晶表面の金属原子ワイヤー構造(左) リソグラフィによるアンテナ構造(中) 溶液中で成長したナノギャップ構造(右)

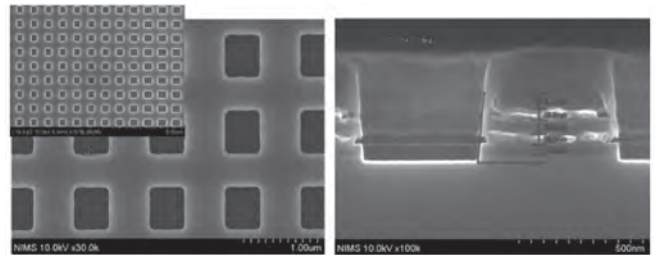
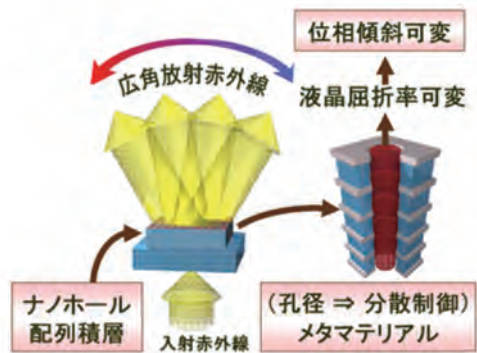


図3 赤外線ビーム走査素子の構造概略図(上)と加工形状のSEM観察像(下)

いわたが まさのぶ 博士(人間・環境学)。2003年京都大学大学院修了、同年東北大学大学院理学研究科(物理学専攻)助手、助教を経て、2009年3月よりNIMS在職。 / なお ただあき 博士(理学)。1994年早稲田大学大学院中退、早稲田大学各務記念材料技術研究所助手、東京大学理学部助手、東北大学金属材料研究所助教授を経て2004年からNIMS。 / みやざき ひでき 博士(工学)。1989年東京大学大学院工学系研究科修了、浜松ホトニクス中央研究所、東京大学先端科学技術研究センター助手等を経て2001年よりNIMS。 / すぎもと よしまさ 博士(工学)。1980年静岡大学大学院工学研究科修了、日本電気中央研究所、産業技術総合研究所を経て2007年よりNIMS。

ナノ極性制御によるコヒーレンス制御光源の研究 ～コヒーレンスデザインされた低ノイズディスプレイ光源へ～

環境・エネルギー材料部門
光・電子材料ユニット
光学単結晶グループ
栗村 直

ナノ極性制御で何ができる？

光の輻射場を制御する技術として、非線形光学効果による波長、位相制御があります。誘電体の分極反転技術が大きく成長したことで、極性制御による非線形光学が進展を見せています¹⁾。

材料における極性を空間反転することにより、エネルギー変換や位相制御が可能になりますが、周波数および位相の精密制御にはナノメートル精度で極性を制御した非線形光学デバイスが必要となります。

極性制御波長変換により、輻射場制御は全く新しい自由度を獲得することになります。この技術では極性構造にさまざまな変調をかけることで、波長変換後の光の振幅・波長・位相をデザインすることができるため(図1)、各応用に適した特性をもつ波長変換可視光レーザーが得られます。

ナノ極性制御は何に使える？

LEDが照明に革命をもたらしたように、ディスプレイにおいてはレーザーが新たな扉を開きつつあります。レーザーディスプレイは、高輝度、高効率、フォーカスフリー(無限遠まで焦点が合っている)、などの優れた

特徴を持ち、大画面のシネマや屋外広告で期待されているものです。

すでに一部のプロジェクターやテレビでは実用例が登場してきました。レーザーディスプレイにおいてはスペckルノイズ^{注)}の低減に苦労していますが、光源の波長帯域を広げて低コヒーレンス設計をおこなえば、スペckルノイズを低減した光源が可能になります(図2)²⁾。

私たちは、レーザーディスプレイ用の光源の研究をおこなってきていますが、このナノ極性制御技術を使った低コヒーレンス設計により、さらに高度なレーザー光源に昇華することができます。

ナノ極性制御で何ができた？

可視光領域への低コヒーレンス波長変換をおこなうため、ナノ精度で極性制御した極性制御波長変換デバイスを研究しています。

この研究では、まず微細露光による電極構造を酸化物強誘電体である定比組成タンタル酸リチウム(Mg:SLT)上に高電気伝導金属で形成します。次にこの電極構造に真空下で高電界を印加し、分極反転をおこないま

るため、印加時の電界コントラストを大きくとることが可能で、微細な分極反転形成には有利になります。

図3はナノ精度の周期電極により分極反転をおこなった結果です。窒化ガリウム系半導体レーザーの波長405nmを緑色530nm帯へ変換する周期4.6 μ mデバイスの微分干渉顕微鏡像が示されています。分極反転比は最大効率を与える0.5で、波長変換に十分な均一性が長さ20mmにわたり実現できています。ここにはナノ精度の構造がマクロなスケールで確保できていて、4000を越える分極反転位置が整然と配列されているのです。

このように、材料科学がもたらす極性反転という自由度が、革新的フォトニクス材料への道を開いています。

参考文献

- 宮澤、栗村編「分極反転デバイスの基礎と応用」(オプトロニクス社、2006)
- 黒田、山本、栗村編「解説 レーザーディスプレイ」(オプトロニクス社、2010)

スペckルノイズ: コヒーレントであるレーザー光を反射させた時、投影面に現れるまだら模様のノイズのこと。反射面上の凹凸で生じるレーザー散乱光が干渉するために生じる。

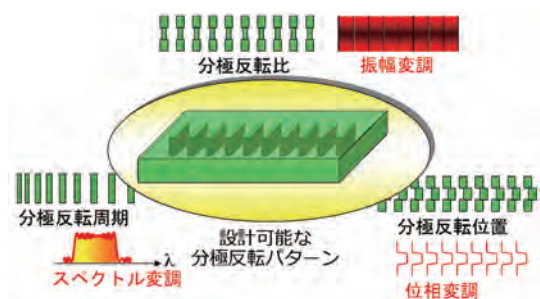


図1 光の振幅・波長・位相をデザインする極性制御非線形光学デバイス

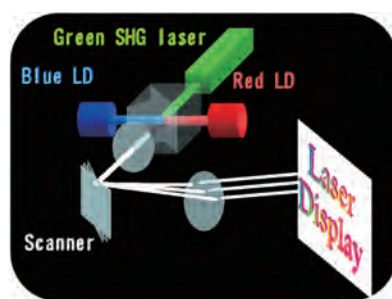


図2 レーザーを用いたディスプレイ:フォーカスフリー(無限遠まで焦点があっている)



図3 波長変換により緑色光を発生する極性制御非線形光学デバイス

くりむら すなお 早稲田大学理工学部物理学科卒。早稲田大学助手、スタンフォード大学訪問研究員、分子科学研究所助手を経て、NIMS主任/主幹研究員。早稲田大学教授を併任。2008年船井情報科学振興賞。2013年レーザー学会論文賞。



革新的導波構造の研究

先端的共通技術部門 先端フォトニクス材料ユニット
ナノフォトニクスグループ
武田寛之・落合哲行・高澤 健

先端的共通技術部門 先端フォトニクス材料ユニット ユニット長
同ユニット ナノフォトニクスグループ グループリーダー
迫田和彰

革新的な光導波を目指して

このサブテーマでは、ナノ構造を利用した新しい光導波機構の開拓と応用を目指して実験研究と理論研究をおこなっています。本稿ではそれらの中から、ポラリトンナノファイバーと光ディラックコーンについて最近の研究成果をご紹介します。

ナノファイバーの低曲げ損失光伝搬

プロジェクト発足前の萌芽研究の過程で、チアシアニン色素の会合体がナノファイバーを形成することを見出しました。図1に示すように、集光したレーザービームでナノファイバーの一点を光励起するとチアシアニン分子が発する蛍光がファイバーを伝搬して両端から放射されます。

顕微鏡写真を見るとナノファイバーには曲率半径が4ミクロン程度の屈曲部が含まれていますが、蛍光はこの屈曲部からほとんど漏れ出すこと無しに両端まで伝搬することがわかりました。

ファイバー表面の電子ビーム加工によるブラッグ反射鏡の形成や、複数のナノファイバーを組合せたマッハ・ツェンダー干渉計の実現¹⁾にも成功しました。これらは微小な

光学回路の実現や半導体チップ間の光インターコネクトなどへの応用が期待されます。

ナノファイバーで観測されたきわめて小さな曲げ損失は、屈折率閉じ込めを利用する現行の光ファイバーでは実現不可能です。理論解析の結果、ナノファイバーの光伝搬はチアシアニン分子の構造の異方性を反映したユニークな励起子ポラリトン(チアシアニンの電子分極と光波が混然一体となった波)が担っていることがわかりました²⁾。

光ディラックコーンとゼロ屈折率

すでに本特集の他の項目でご紹介したように、私たちのプロジェクト研究では光の波長程度の周期で規則配列したフォトニック結晶やメタマテリアルを作製してユニークな光学特性を実現し、種々の応用展開を図っています。これらについて、理論面でも大きな発見がありました。

フォトニック結晶やメタマテリアルの光伝搬の基本的な性質は、振動数(ω)と波数(k)の関係(分散関係)で決まります。応用上、重要ではない $\omega=0$ 近傍を除外して考えると、 $k=0$ 近傍では通常、分散関係は平坦(水平)です。このため光は定在波となって、いずれ

の方向にも伝搬しません。

ところが、フォトニック結晶などの構造をうまく設計して空間対称性の異なる2つの光波の振動数を一致させると、図2に示すように光ディラックコーン(粒子と反粒子のスペクトルが頂点を接した円錐状になることを導いた物理学者ディラックに因んだ名称)と呼ばれる円錐形をした分散関係が実現できることを見出しました³⁾。

2つの円錐が頂点を接する周波数(ディラック点, ω_D)で光波は進行波であり、かつ、実効的に屈折率がゼロであるという著しい性質をもちます。屈折率がゼロであることから伝搬光には位相変化がなく、障害物があっても光散乱が起こりません。これを利用して曲げ損や散乱損のない光導波路の開発などが期待されます。

1. K. Takazawa et al., Phys. Rev. Lett. 105. (2010). 067401; Appl. Phys. Lett. 99. (2011). 253302; Adv. Mater. 23. (2011) 3659; Adv. Func. Mater. 23. (2013). 839.
2. H. Takeda and K. Sakoda, Phys. Rev. B 86. (2012). 205319.
3. K. Sakoda, Opt. Express 20. (2012). 3898; ibid. 20. (2012). 9925; ibid. 22. (2012). 25181

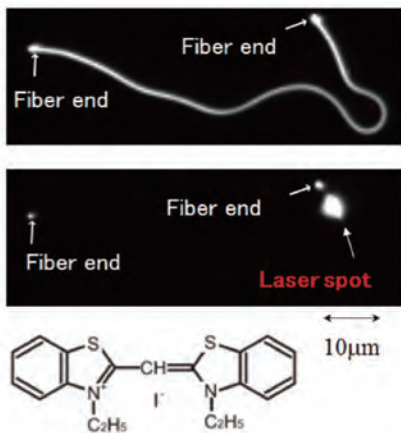


図1 ポラリトンナノファイバーの(左上)顕微鏡写真とレーザー励起による蛍光の伝搬、(左下)化学構造、(右)分散関係

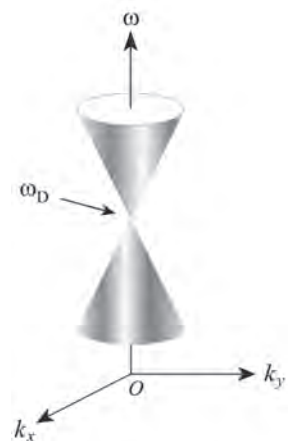
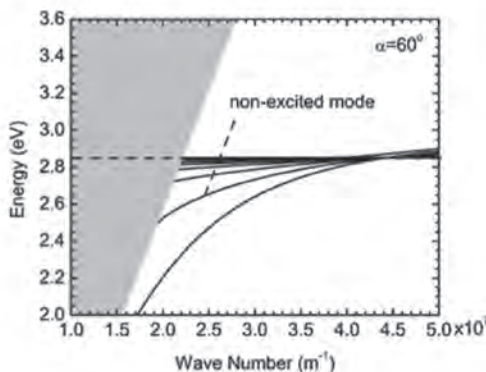


図2 光の分散関係に現れるディラックコーン

たけだ ひろゆき 博士(工学)。2004年大阪大学大学院工学研究科博士課程終了。トロント大学博士研究員を経て、2010年NIMS若手国際研究センター博士研究員。2013年からは先端フォトニクス材料ユニット博士研究員。 / おちあいつゆき 博士(理学)。1997年北海道大学大学院理学研究科博士課程修了。科学技術振興事業団、マドリード自治大学、千葉大学研究員を経て、2006年NIMS入所、量子ドットセンター主任研究員。2011年先端フォトニクス材料ユニット主任研究員。 / たかざわ けん 博士(理学)。1996年早稲田大学理工学研究科博士課程修了。強磁場ステーション研究員併任。 / さこだ かずあき 工学博士。1982年東京大学工学系研究科大学院修士課程修了。東レ(株)電子情報材料研究所研究員、北海道大学電子科学研究所助教授を経て、2002年NIMS主席研究員。2007年量子ドットセンター長、2011年からは先端フォトニクス材料ユニット長。

セシウム137の存在位置をミリメートル以下の精度で可視化

MANA- ナノマテリアル分野 超分子ユニット
超分子グループ
森 泰蔵

MANA- ナノマテリアル分野 超分子ユニット ユニット長
同ユニット超分子グループ グループリーダー
有賀克彦

セシウム137はどこに分布しているのか、すぐにはわからない

東日本大震災にともなう福島第一原子力発電所の事故により、多くの放射性物質が飛散し、福島県をはじめとする広い地域が汚染されました。2年が経過し、現在では特に、半減期が長い放射性セシウム137（半減期約30年）による土壌、水質、海洋汚染が懸念されています。この放射性セシウムは、放射線の測定やさらなる詳しい分析により検知できます。ただ、放射線が検出された場所の、どこにたくさんのセシウムが分布しているかがすぐにはわかりません。この見えない悪魔の存在が人々を不安にさせているのです。

セシウムの存在を目で見えるようにすればいいのではないかと私たちは、放射線を検出する従来の方法論ではなく、セシウムそのものの性質を用いた視覚的な検出方法を開発しました¹⁾。この方法では、セシウムのあり

かをミリメートル以下の精度で特定でき、従来の放射線検出の方法と併用すれば、汚染が疑われる場所のどこにセシウムがあるかを知らず取り除くことができます(図1)。

超分子材料の開発

私たちは、セシウムを蛍光によって可視化するため、図2のような蛍光を発するフェノール誘導体にニトロベンゼンをエチレングリコール鎖で接続した「超分子材料」を、蛍光プローブとして開発しました。この蛍光プローブは、セシウムイオンの存在下では紫外線照射により青緑色の蛍光を発します。この蛍光プローブは、エチレングリコール鎖がセシウムイオンを選択的に内包し、取り込まれたセシウムイオンがフェノール部位と静電的に相互作用することで蛍光が青色から青緑色へと変化します。そして他のイオンはサイズが合わないため、蛍光が変化する現象は起こらず、青色の蛍光をそのまま示します。

この蛍光プローブは、固体や物体表面におけるセシウムイオンの分布を高い空間分解能で可視化できます。土壌や食品、生体中におけるセシウムイオンの挙動を蛍光で確認でき、セシウムイオンの拡散、蓄積過程の研究をすすめるにあたって、安全な安定セシウムを使った蛍光実験でセシウムを追跡することが可能です。さらに、目で見えることにこだわる必要はありません。蛍光発光は分析機器を使えば非常に感度高く検知ができるのです。これは、生物や食品の何処にセシウムがたまりやすいのか?という疑問にも答えを出す有効な手段になると期待されます。

1. T. Mori, M. Akamatsu, K. Okamoto, M. Sumita, Y. Tateyama, H. Sakai, J. P. Hill, M. Abe and K. Ariga, Sci. Technol. Adv. Mater., 14, (2013) 015002.

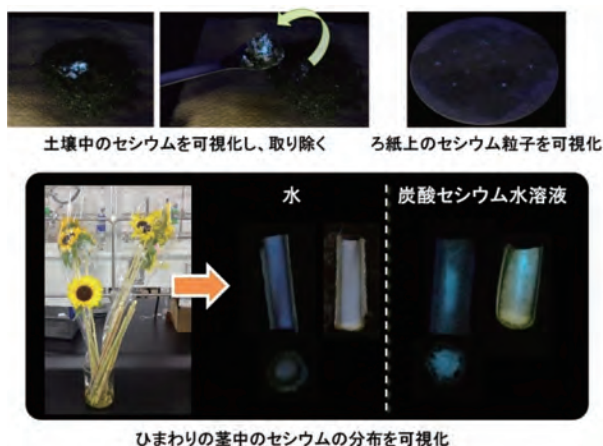


図1 上: 土壌中や紙上のセシウムを可視化
下: ひまわりの茎中のセシウムの分布を可視化

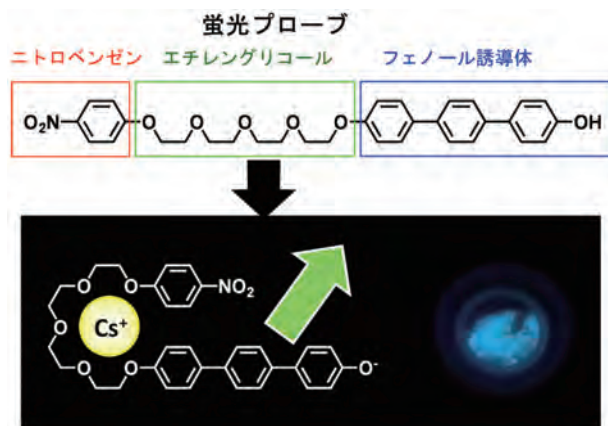


図2 セシウムが蛍光プローブに捕まえられ、紫外線の照射で青緑色の蛍光を発する



もり たいぞう (左) 博士 (工学)。2009年京都大学大学院工学研究科高分子化学専攻博士課程修了。同年からNIMS博士研究員。2013年4月からJSPSフェロー。／ ありが かつひこ (右) 工学博士。東京工業大学、テキサス大学、JST、奈良先端科学技術大学院大学などを経た後、2004年からNIMS。2007年からMANA PI。2010年度科学技術政策研究所「ナイスステップな研究者」に選出。2013年より英国王立化学会フェロー。

1 NIMS Conference 2013 開催

7月1日(月)から3日(水)までの3日間、つくば国際会議場において、NIMSコンファレンスを開催します。この会議は、毎年、世界トップレベルの研究者が集まり、材料科学・ナノテクノロジーの観点から様々な問題を議論し、最新の研究成果を発表する国際会議です。NIMSが主催し、今年は第10回の記念大会となります。

今回のテーマは「機能性原子/分子薄膜の構造制御とその応用」。半導体集積回路に代表される電子デバイス、エレクトロニクスなどユビキタスコンピューティング社会を支える基盤技術について最新成果と今後の展望について活発な議論がおこなわれます。

電子デバイスはこれまで高集積化、微細化をすすめることで高速化と低消費電力化をすすめてき

ましたが、今やその限界に近づいています。そのため、新材料と新構造でその限界を超える必要があります。

注目されているのは多様な機能をもつ新材料です。特に有機分子は層状に成長が可能なおことから2次元デバイスとしても有効で、最近では無機材料との融合で新機能を発現することも可能になっています。また、これらの材料を成長させる原子層堆積法や超薄膜も注目を集めています。ナノ構造の評価では、X線や中性子線をつかった表面分析手法も大きな発展をみせています。今回のNIMSコンファレンスは、新材料や評価技術を紹介し、ナノエレクトロニクス材料に関する幅広い情報の交換の場ともなるでしょう。



■開催概要

日程:7月1日(月)~3日(水)

(ただし、NIMS賞授賞式と受賞記念講演は7月1日)

場所:つくば国際会議場(エポカルつくば)

<http://www.nims.go.jp/nimsconf/2013/>

2 本年度 NIMS 賞に東京工業大学細野秀雄氏

NIMSでは、毎年物質・材料に関わる科学技術において優れた業績を残し、かつNIMSの発展に多大な貢献をされた研究者にNIMS賞を授与しています。今年度のテーマ「機能性原子/分子薄膜の構造制御とその応用」に沿って各国の科学者から候補をノミネートし、中立有識者で構成された委員会により厳正に最終選考をおこなった結果、今年度は東京工業大学フロンティア研究機構の細野秀雄教授に受賞者が決定いたしました。

細野氏はこれまで、アドバイザー・ボードメンバーなどの立場でNIMSの研究の内容やすすめ方

を含め多岐の項目に亘って的確かつ真摯な助言をされてきました。このことは、NIMSが国内外での認知拡大や、高評価を得る上で、多大な貢献を果たしたと言えます。また、これまでに数多くの研究助成プロジェクトに携わってきたことから、物質・材料分野を代表するひとりとして日本の科学技術政策への寄与は大きく、NIMSの今後にとっても様々な形で貢献が大いに期待されます。

7月1日(月)のNIMSコンファレンスにおいて受賞セレモニー、受賞記念講演がおこなわれる予定です。



細野秀雄教授

3 材料研究の魅力を伝える新しいウェブサイト「材料のチカラ」オープン



「材料のチカラ」トップページ

NIMSは新しいウェブサイト「材料のチカラ」をオープンしました。NIMSの材料研究は、ものづくりの原点であり、未来の可能性をつくる重要な活動です。本ウェブサイトでは、物質・材料研究の魅力を、サイエンスの枠を超えた表現方法を用いて、新たな視点から伝えます。

NHK Eテレ「ピタゴラスイッチ」や、「日常にひそむ数理曲線」などの、教育番組・科学映像で知られるクリエイティブグループ「ユーフラテス」、および東京藝術大学大学院映像研究科佐藤雅彦教授に映像製作を依頼し、超伝導のピン止め効果

をテーマにしたショートムービーを制作しました。

ほかにナカサアンドパートナーズ社のフォトグラファー・中道淳氏撮影のフォト・ストーリー(クリープ試験とサイアロン蛍光体)や、元日経サイエンス編集長でNIMS広報アドバイザーも務めた科学ジャーナリスト・餌取章男氏による材料研究の魅力を分かりやすく解説するコラム、研究者インタビューなども掲載しています。これからも順次コンテンツを追加する予定です。今後の展開にご期待ください。

<http://www.nims.go.jp/chikara/>

訂正:NIMS NOW vol.13 No.3 のニュース「平成25年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞」記事中の「4月17日」は「4月16日(火)」の誤りでした。お詫びして訂正いたします。