

NATIONAL
INSTITUTE FOR
MATERIALS
SCIENCE

NIMS NOW

No. 8
2012 OCTOBER

宝石×材料

ワイドバンドギャップ光・電子材料の研究開発プロジェクト



宝石 × 材料



宝石は、鮮やかな色や高い屈折率などから装飾品としての価値を持っています。また簡単に壊れると財産として価値がなくなってしまいます。そして、その形や色も10年で腐食したり、変色したりすると家宝として継承できません。このような色と硬さ、安定性が、宝石が工業的にも大きな意味を持つ理由なのです。

宝石の硬さ

人と石との関わりは古く、人間が手にした最初の道具は石器です。石器時代では、石の「硬さ」と「加工のしやすさ」が石の価値を決めていたと考えられます。刃物として使うには、硬くて、かつ、鋭い刃に加工できなければなりません。

実は、現代の私たちの技術は、この石器と同じ考えなのです。たとえば「歯車」です。機械式の時計で、「石（英語ではjewels）」という言葉が時計の価値を示す単位となっているのをご存知でしょうか。これは、内部の重要な歯車の軸のうちのいくつかがサファイアなどの壊れにくい、硬い宝石でできていることを示しています。また、地下深くから石油やガスなどを採掘するときには、最も硬い物質であるダイヤモンドが掘削用の刃先として利用されている例もあります。

宝石の鮮やかな色

シルクロード原産で美しい青色をもったラピスラズリといわれる石があります。その青は珍重され、ルネッサンス期の貴族は、これを粉にした青色の絵の具（ウルトラマリン）を

ワイドバンドギャップ光・電子材料の研究開発プロジェクト

ダイヤモンド、サファイア、ルビー、水晶…。宝石と呼ばれる鉱物は、その結晶構造や機能から、新しい材料としても利用されています。さらに、天然のものではなく、利用される機能を得るために考え出された新しい人工宝石も研究がすすんでいます。宝石と材料、その光・電子材料への応用を紹介します。



受胎告知聖母
カルロ・ドルチ 1655年

財宝から材料へ 宝石の工業的な利用

環境・エネルギー材料部門 部門長
環境・エネルギー材料部門 光・電子材料ユニット ユニット長
大橋直樹

大胆につかった絵画で、その財力を誇示しました。カルロ・ドルチの受胎告知聖母のマント（左頁）など、機会があれば、是非本物をご鑑賞いただければとおもいます。

このように、宝石といえば「色」。深紅のルビーや紺碧のルビー、無色透明のダイヤモンドや水晶、それぞれ、色が重要です。こうした色は可視光と物質の相互作用で決定されます。

代表的な相互作用は、屈折、反射、吸収の3つ。ダイヤモンドや石英（水晶）が透明なのは、それらが可視光と相互作用しないため、ルビーやサファイアは成分に可視光を吸収する元素（不純物）を含み、それが特徴的な色を出しているのです。

ルビーとサファイアは、実はどちらもコランダム型の酸化アルミニウム（ α -アルミナ）であり、含まれる不純物が異なるだけです。この α -アルミナは、非常に広いバンドギャップを有するため、高純度にすれば可視光に対して全く透明で、窒化物発光ダイオードの基板として用いた際に、ダイオードが発する光を基板が吸収することはありません。チタンを添加した α -アルミナは、チタンの遷移による発光を利用したレーザー材料ですが、もともと α -アルミナがチタンの発光を吸収しない材料だからこそ、その母材結晶として利用できるのです。

また、結晶を通すことで、光の性質を変化させる結晶も存在します。磁性をもった元素を成分として含むガーネットでは、磁気光学効果が得られます。水晶では、電気光学効果を応用して光の波長を変える、すなわち、赤

外線を可視光にしたり、あるいは、可視光を紫外線にしたりする変換が可能です。

宝石か、セラミックスか

セラミックス（磁器）は、微小な粒子の集合体であり、粒子のつなぎ目（粒界）が光を散乱してしまうことが多いため、光の波長変換や、レーザー光発振という用途では宝石（単結晶）が大きな意味を持っています。

しかし、宝石には弱点がひとつあります。宝石とは一粒の結晶ですから、原子が整然と規則的に並んでいます。ひとたび亀裂が入ると原子配列に対応して、亀裂が一気に進展し、破壊されてしまうのです。そのため、最近ではベアリングなどの精密な機械部品には硬さもち、かつ精密な加工ができる材料としてセラミックスが用いられるようになってきています。

ガーネット（YAG）レーザーには、単結晶ガーネットが用いられてきましたが、近年、透明なガーネット磁器（多結晶体）の製造が可能となり、セラミックスをレーザーに応用できるようになりました。また、宝石の中ではオパールは変わり種で、いわゆる単結晶ではありません。粒子の配列による回折という現象が、オパールの独特の色あいをもたらします。

宝石を磨く、つくる

宝石としての価値はカット、すなわち、切削と研削が重要です。珠は磨いてこそ価値が

あるという価値観は、宝石を材料として利用する際にも同じです。

例えば、 α -アルミナを、半導体素子をつくるためのウエファーとして利用する場合、その表面の凹凸は、原子1個のレベルにまで抑えられています。この極端に平坦な表面をつくる技術は、現代の科学技術の発展において、極めて大きな意味を持っています。ものを磨くことの原理は、歯磨き粉と変わらず、微細な粒子をこすりつけて磨くわけですが、例えば、1ミクロンにも満たないアルミナの粉など、極めて精緻にその粒子のサイズを制御した「磨き粉」をpH等を精密に制御した液体に溶くなど、技術の粋を尽くした磨き粉が使われています。このように、人の目でおこなわれる宝飾用の研磨（鏡面研磨）に比べ、工業用の研磨の方が遙かに高度な技術を要することもあるのです。

サファイア、ガーネット、ダイヤモンド、オパール、水晶。それぞれの工業的価値をみてきました。これらは、現在、地下資源としてではなく、工業的な手段でつくることができる結晶です。工業的に不純物や大きさを制御して人工的につくり出した結晶の方が、不純物などを含む天然のものよりも付加価値が高いこともあります。

今、NIMSでおこなわれている研究は、太古には財宝とされていた材料を、効率よく人工的に製造し、その純度や形状を制御し、付加価値を高め、これをより豊かな社会生活に結びつけるための研究開発なのです。



ダイヤモンドでつくる MEMS、NEMS

環境・エネルギー材料部門
光・電子材料ユニット
ワイドギャップ機能材料グループ
廖 梅勇

環境・エネルギー材料部門
光・電子材料ユニット
セラミックス化学グループ グループリーダー
菱田俊一

環境・エネルギー材料部門
光・電子材料ユニット
ワイドギャップ機能材料グループ グループリーダー
小出康夫

ダイヤモンド：MEMS/NEMSに最適

マイクロエレクトロメカニカル・システム (MEMS) は一般に、特性長が $1\mu\text{m} \sim 0.1\text{mm}$ のデバイスで、機械部品、センサー、駆動部、電子装置を、一括処理による微細加工技術で汎用回路基板に組み込んだものを指します。1ミクロン未満のものは、ナノエレクトロメカニカル・システム (NEMS) といいます。これらは、さまざまなセンサー、高周波数スイッチ、光スイッチなど、数多くの製品に使用されています。

現在の MEMS デバイスは微細加工技術が確立しているため、シリコン製が主流です。しかしシリコンは、機械的・摩擦特性的に上限があり、熱安定性が低く、バンドギャップが狭いため、高温などの極端な条件下、高電力、高周波数などの環境下では、信頼性や性能に問題がありました。

ダイヤモンドはバンドギャップが 5.5eV と広く、キャリア移動度や破壊電界が高いなど、電子デバイス向けの究極の半導体です。また、機械的硬度とヤング率が高く、摩擦係数は低く、高耐食性などのメリットがあります。特にその導電率においては、不純物処理技術によって絶縁体から金属導体まで調整が可能です。

ダイヤモンド・オン・ダイヤモンド

私たちは MEMS/NEMS 向けに、様々なサイズ (幅: $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 、奥行き: $1 \sim 100\mu\text{m}$ 、高さ: $0.2 \sim 2\mu\text{m}$) の単結晶ダイヤモンドの懸架構造を生成するプロセスを開発しました。この製法では、“ダイヤモンド・オン・ダイヤモンド”という独自の基本概念を用いています。

まず、単結晶ダイヤモンド基板に高エネルギーイオンを注入することによって局所的に炭素層 (犠牲層という) を形成させます。そして、マイクロ波プラズマ気相成長法によって導電性を持つ P 型ダイヤモンド薄膜を成長させます。炭素層は高温下でグラファイトに変化し、このグラファイト犠牲層を溶液エッチング除去することによって、懸架構造体を作製します。任意の形状を持つ、懸架式または自立式の単結晶ダイヤモンド共振器は、基本的にバッチ生産方式で製造可能です。

私たちは、単結晶ダイヤモンドのカンチレバーとブリッジを、 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ で作製しました (図 1 (a), (b))。基板と懸架構造体のあいだには 200nm のエアギャップが確認できます。共振周波数は約 1.36MHz 、品質係数 (Q) は 4000 、ヤング率の測定値は 1100GPa で、単結晶ダイヤモンドの性質を示しています (図 1 (c))。

単結晶ダイヤモンドの NEMS スイッチ

単結晶ダイヤモンドの NEMS スイッチは、横型デバイスの概念を用いて製造しました。ホウ素をドーパした P 型ダイヤモンド層に、トランジスタのような、伝導源、ドレーン、ゲートとしての機能を付加しました。

ナノマシンスイッチのオン・オフ操作は、ゲート電圧による制御が可能です。オフ状態 (図 2 (a)) では、カンチレバーはドレーンに接触しません。ゲート電圧がプルイン電圧 (V_P) 以上になる場合、ゲートとカンチレバー間の静電気引力により、カンチレバーのドレーン接触時に摩擦が生じ、オン状態 (通電) となります (図 2 (b))。プルイン電圧は、カンチレバーの寸法の設計により、 $10 \sim 100\text{V}$ の間で自由に設計できます。

ダイヤモンドが本来持っている疎水性により、オン・オフ操作時に目立った粘着は見られませんでした。また、高温環境下での動作 (525K) も安定していたことから、顕微鏡走査プローブ、高解像度センサーだけでなく、周辺環境が過酷である航空機、自動車、鉄道施設などへの応用も期待されています。

シリコンベースの MEMS と比較すると、ダイヤモンド製 MEMS は高い品質係数と信頼性、長寿命、高速であることなど、その性能が大幅に向上しています。

※特性長: サイズ効果が現れはじめる長さ

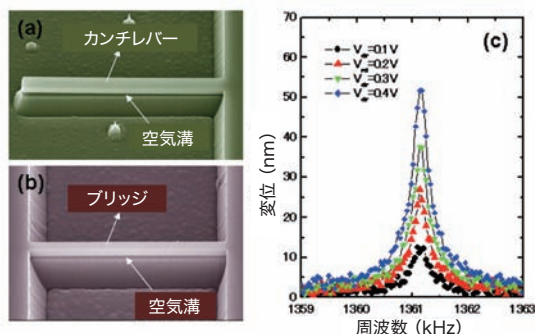


図1 単結晶ダイヤモンドの懸架構造。(a) カンチレバーと (b) ブリッジのスペクトルの走査型電子顕微鏡画像と、(c) 圧電セラミックに印加した様々な強度の電圧において作動させた場合の代表的な周波数応答

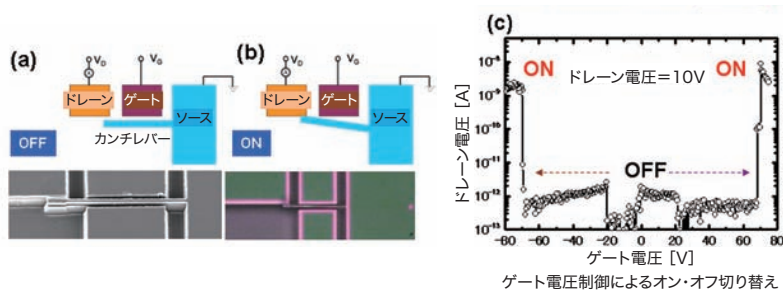


図2 単結晶ダイヤモンド製の3端子ナノマシンスイッチの (a) オフ状態と (b) オン状態の動作原理を示す配線図、(c) ダイヤモンド製 NEMS スイッチとその切り替え動作

りょう めいよん 工学博士。2002年中国科学院半導体研究所にて博士課程修了。同年京都大学に客員准教授として赴任。2004年にポストドク研究員としてNIMSに赴任、ICYS研究員を経て、2008年NIMS主任研究員。 / ひしたしゅんいち 工学博士。1983年東京大学大学院工学系研究科にて博士課程修了。1983年東京大学理学部助手。研究員として無機材質研究所に赴任、2001年NIMS主席研究員、2011年グループリーダー。 / こいで やすお 工学博士。1987年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。1987年名古屋大学理学部助手、1993年京都大学工学部助教授を経て2002年NIMS主幹研究員、2006年グループリーダー、2007年よりNIMSナノテクノロジー融合ステーション統括マネージャー、2010年より低炭素化材料設計・創製ハブ拠点副拠点マネージャー(現職)。

オパールからみた光材料開発

先端の共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット
応用フォトニック材料グループ グループリーダー
澤田 勉

オパールと光

オパールといえば、宝石の中でも独特な輝き方をする、ちょっと異色な存在です。宝石のオパールを観察すると、照明の角度や、見る角度に応じて、色づいて見えたり、見えなかったり、あるいは、その色が、異なって見えるという、不思議な輝き方をします。

天然のオパールの組成は、主としてシリカであり、無色の材質です。その微細構造を電子顕微鏡で観察すると、球状のシリカ粒子が、三次元的に規則正しく配列しているのがわかります。その配列の周期が、ちょうど光の波長と同程度の長さなので、光の回折現象で、干渉効果が起こります。この現象は、通常の結晶材料がX線を回折しておこるBragg反射*と同じ現象で、可視光領域の光のBragg反射です。つまり、オパールは、素材自体は無色ですが、光（可視光）をBragg反射することによって、独特な輝き方をしているわけです。

人工のオパールをつくる

材料の観点から見れば、オパールは光をBragg反射する材料であると捉えられます。

光をBragg反射する材料というのは、一般にフォトニック結晶と呼ばれ、単に、虹色に輝いて美しいだけではなく、光の速度を遅くしたり、光を閉じ込めたりなど、不思議で有用な性質も持っていることが、理論的に明らかにされています。

人工的にオパールをつくるには、どうすればよいでしょうか。シリカや有機高分子を素材として、サイズのよく揃った微粒子を、化学合成でつくることが可能です。それを、三次元的に配列してやれば、人工的なオパールになります。では、その微粒子を、どうすれば規則的に並べることができるのか。驚いたことに、微粒子の分散系、つまりコロイド系では、人がほとんど何もしなくても、微粒子が自分で勝手に配列構造をつくる現象が起こることがあります。コロイド結晶化という現象です。私たちは、そのためのマクロな条件を整えてやり、少し手を貸してやるだけでよいのです。

これまでに、私たちは、コロイド結晶化の現象に独自の手法を付け加えることで、人工的に大面積のオパールを作成する方法を開発してきました。

新しい光材料としてのオパール

三次元的に規則配列した微粒子の間を、樹脂や高分子ゲルのマトリックスで埋め込んで配列構造が壊れないように固定化することで、安定な材料となります。マトリックスが硬い材質なら硬いオパールが、柔らかい材質なら変形容易なソフトなオパールができます。

オパールの中で光の速度が極端に遅くなったり、光が閉じ込められたりする特性を利用して、これまでにレーザー発振素子をつくることに成功しています。オパール中に添加した蛍光色素を外部光で励起すると、Bragg波長に相当する波長のレーザー光がオパールから発振されます。そして、ソフトなオパールを使うと発振レーザー波長を自由に変わることが可能です。その他にもソフトなオパールは、引っ張ったり、圧縮したりすると色が変わる素材なので、変形を色で可視化するセンサー的用途や、装饰材料としての応用も期待されます。

Bragg反射: 3次元の周期構造体に光を照射すると、結晶を持つ特定の格子面の集団が、あたかも鏡のように特定の波長の光だけを反射する現象が起こります。この反射は、格子面一枚による反射ではなく、積層した格子面群による反射の足し合わせによる、総合的な効果で、この効果をBragg反射といいます。

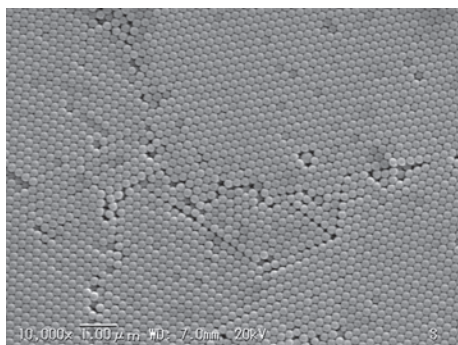


図1 微粒子が自然につくる規則配列構造。ポリスチレン粒子の走査電子顕微鏡写真



図2 高分子ゲル・マトリックスで固定化された人工オパール膜（コロイド結晶ゲル）。虹色の発色は光のBragg反射に起因する

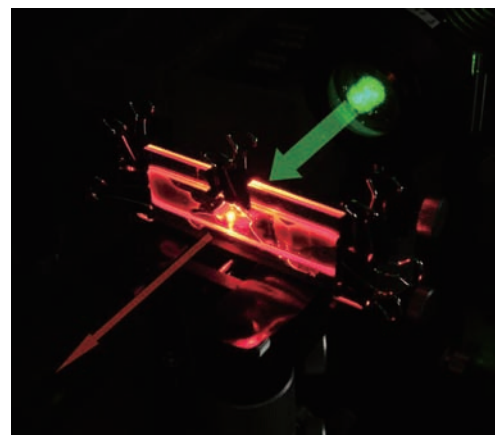


図3 蛍光色素を添加した高分子ゲル固定の人工オパール膜によるレーザー発振。緑色の励起光を照射することにより、Bragg反射に相当する赤色のレーザー発振が起こる（応用フォトニック材料グループ、古海誓一氏提供）



ガーネット：宝石用原石から工業用途まで

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

García Villora

ガーネット(ザクロ石)結晶は、その名前を、ザクロの果実に似た形と色をもつケイ酸塩鉱物にちなんでいます。その組成によって美しい色を見せるため、古来より宝石用原石として利用されてきました。

ガーネット型構造は3つの異なる陽イオンサイトからなる複雑な構造を持っています(図1)。また立方晶に属するため、高い光学的等方性をもちます。そのため、レーザー結晶(Nd:YAG*)や、光通信、高出力レーザー機器のファラデー素子(YIG、TGG)などの工業的用途にも利用されています。陽イオンをさまざまに置換できるガーネット型構造の柔軟性に着目し、新しい単結晶材料の開発をすすめています。

高輝度白色LEDに適した蛍光体：単結晶蛍光体の開発

セリウムをドープしたYAG(Ce:YAG)は、青色光で励起すると、強い可視光(黄色)を生じます。この性質を利用し、青色LEDと黄色蛍光体であるCe:YAG粉末を組み合わせ、白色LEDがつくられています。現在はCe:YAG粉末を樹脂中に封止し、青色発光ダイオード(LED)を被覆した構造が幅広く採用されています(図2)。しかしこの構造は、

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 グループリーダー

島村清史

照明用途に必要な高輝度(HB)白色LEDに使用するには問題がありました。高輝度化すると熱や強い光によって封止用の樹脂が劣化してしまいます。

そこで私たちは、樹脂を使わない白色HB-LEDを可能とする単結晶蛍光体を開発しました(図2)。樹脂を使わないため、熱や強い光による劣化がありません。また単結晶板を蛍光体として使うため、従来の粉末よりも発光効率が高だけでなく、温度上昇による発光強度の低下もありませんでした。実際に白色HB-LEDを試作し、従来のLEDと比較したところ、圧倒的に優れた特性が確認されました。現在は企業と共同で製品化をすすめています。

高出力半導体レーザー加工機に適したファラデー素子Tb₃(Sc,Lu)₂Al₃O₁₂(TSLAG)の開発

高速で信頼性の高い材料加工を可能とするレーザー加工機の光源は、従来のNd:YAGやCO₂レーザーから、光ファイバーで増幅する半導体レーザー(LD)へと進化してきました。それにとまない、レーザーの出力は急速に増加しており、LDを反射戻り光

から保護することが重要な課題となっています。これを可能とするのが光アイソレーターですが、光アイソレーターの性能はファラデー素子で決まります。ファラデー素子は、磁場を印加することで偏光面を回転させる素子です。(図3)。現在はテルビウム・ガリウム・ガーネット(TGG)が使われていますが、結晶の品質が悪くコストが高い、特性がよくないなどの問題がありました。

そこで私たちは、こうした問題を解決する新しい材料、テルビウム・スカンジウム・ルテチウム・アルミニウム・ガーネット(TSLAG)を設計しました。TSLAGは、大型単結晶の育成が容易(図3)、光学的品質が高い、レーザー耐性が高く、ファラデー回転角も大きいなど、あらゆる特性がTGGを凌駕しました。現在、(株)フジクラでは、TSLAG単結晶とそれを用いた光アイソレーターの事業化をすすめており、社内では社長賞が授与されました。TSLAGは可視域でも有用であるため、短波長域でのファラデー素子としても期待されています。

*YAG：イットリウム・アルミニウム・ガーネット(Yttrium Aluminum Garnet)

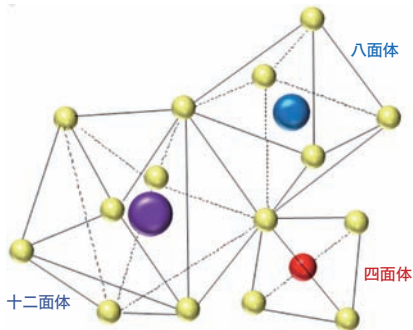


図1 ガーネット型構造の化学式単位C₃A₂D₃O₁₂の模式図。十二面体、八面体、四面体配位をもつ3つの陽イオンサイトを有する。これらのサイトに陽イオン置換をおこなうことで、新結晶材料の設計に高い柔軟性が生まれる

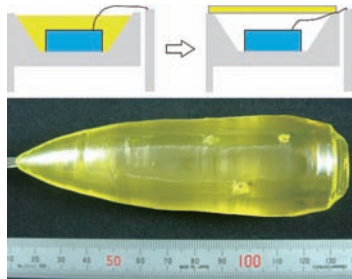


図2 (左上)従来の黄色粉末蛍光体を樹脂に埋め込む白色LED構造 (右上)新たに開発した単結晶蛍光体による樹脂フリーの白色LED構造 (下)育成したCe:YAG単結晶蛍光体

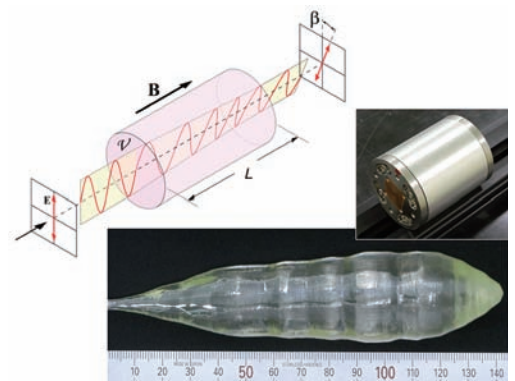


図3 (左上)光アイソレーターの模式図。中心部のファラデー素子で偏光面を回転させる (右上)光アイソレーターの試作品 (下)育成したファラデー素子用TSLAG単結晶

ガルシア ビジョラ 博士(理学)。ベルリン工科大学物理科修士課程修了後、東北大学にて学位取得。早稲田大学博士研究員を経て、現職。/ しまむら きよし 博士(理学)。早稲田大学理工学部卒業、東北大学大学院博士後期課程修了。東北大学助手、早稲田大学助教授を経て、現職。

水晶からみた光デバイス開発

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

占い、時計を経て最先端レーザーへ

癒しを与え女性を輝かせるといわれる愛の石ローズクォーツ(紅水晶)。高貴な色で内面を安定させ人間関係を好転させるとされるアメジスト(紫水晶)。これらは鉄やマンガンなどの不純物で発色した水晶です。透明な水晶も古くから占い、仏像の眼玉、メガネ玉などに用いられ、鉱物学の標本では水晶系の結晶が多く取り上げられています(図1)。愛や人間関係に悩まれている方はパワーストーンとしてお求め頂きますが、ここでは透明単結晶である水晶についてその紫外レーザーへの展開を御紹介します。

人工水晶を光材料として 新しい紫外レーザー光源に

水晶を構成するSiO₂は砂浜に豊富にある砂の主成分で、ほぼ無尽蔵にとれて地球にも優しい材料です。モース硬度7と十分に硬く化学的にも熱的にも丈夫な水晶は、生活の多くのところで使われています。クォーツ時計はもちろん、携帯電話やテレビ内でデータ処理のタイミングを合わせる振動子や、カメラの画像のノイズを除去するローパスフィルターにも使われています。材料自身も、結晶中の水分を減らすことでフィルターの特性を向上させたり、不純物としてAl、Na、Liを減少させて光の吸収を低減したり、発展を続けています。NIMSでは水熱合成法で量産技術

が確立された人工水晶(図2)を、ワイドバンドギャップ光材料として新しい紫外レーザー光源に展開する研究をおこなっています。

微細構造で真空紫外光への レーザー光の波長変換を実現

水晶は非線形光学特性をもつため、レーザーの波長を変換する機能を有します。非線形光学特性自体が1961年にはじめて水晶で報告されたものですが、その後水晶は効率が極めて低いため波長変換に用いられて来ませんでした。1961年の論文では波長変換された光があまりに弱いため、フィルム上の点を出版社がゴミと間違えて消してしまった、という逸話があるほどです。他方非線形光学材料の自発極性を周期的に反転して並べると波長変換の効率が格段にあがることが実証され¹⁾、水晶にも極性反転構造を導入する環境が整ってきました。そこでNIMSでは極性反転構造を導入する方法として、地震予知向けに研究されてきた「応力印加による極性反転」に着目しました。地震の際に地下深くの水晶に応力がかかって、地下で極性が反転することで電波が発生するという現象です。これに最新の半導体加工技術を融合させて細かい段差を作製し、高温で応力を印加しました。その結果、プラスマイナスを交互にもつ周期的な極性反転構造を世界ではじめて実現しました(図3)²⁾。日本人の髪の毛の太

さが70~90μmですから、周期の11.9μmがいかに細かいかわかり頂けるでしょう。現在我々のグループ以外に、地球上にこの技術をもつグループはいません。この微細構造でレーザー光の真空紫外光(波長193nm)への波長変換を実現して、水晶の全く異なる新たな応用を実証しました。このレーザー波長193nmは、半導体の微細加工やレーシックなどの眼科治療に使われているため、半導体産業、医療の分野で小型光源として期待されています³⁾。安定な光源のために紫外光吸収を低減するといった、新分野にあわせた材料開発がもうはじまっています。

参考文献

1. 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)
2. S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada, T. Ueno, Optical Materials Express 1, (2011) pp.1367-1375 (Invited).
3. 日経産業新聞 2011.1.24、11面



図1 水晶系材料 左から紅水晶、紫水晶、水晶



図2 水熱合成法で育成された人工水晶

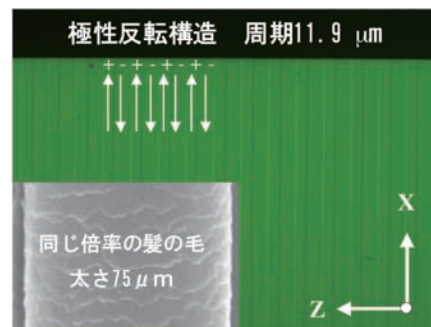


図3 応力印加で周期的に極性反転された水晶

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。



サファイアから見た光材料開発

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 グループリーダー
島村清史

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
García Villora

サファイア単結晶

単結晶は宝石としての利用だけでなく、日常生活の必需品の中の部品として幅広く用いられています。その代表のひとつがサファイア単結晶です。Al₂O₃と表記される酸化アルミニウムの単結晶は、宝石としては青いものがサファイア、赤いものがルビーと呼ばれています。

工業的には無色透明のものがサファイアと呼ばれます。硬度が高く、優れた機械的特性、化学的安定性、耐熱性、透明性を持つことから、時計からプロジェクター、半導体製造装置までの多くの窓材や機械部品として使われています。最近では青色・白色LED (Light Emitting Diode) 用の基板としての用途が急激に拡大しています。

酸化ガリウム (β-Ga₂O₃) 単結晶の開発と高輝度 LED 用基板としての展開

白色LEDの照明用途が本格化するにつれ、HB (High Brightness)-LEDと呼ばれる高輝度・大電流LEDの開発が急務となってきています。しかし、サファイア単結晶基板は絶縁性のため横型構造LEDとならざるを得ません。

そこで私たちは、HB-LEDに有利な縦型構造LEDを可能とする新しい透明導電性基板、酸化ガリウム単結晶を開発しました。酸化ガリウムは大きなバンドギャップ(4.8eV)とともに、優れた化学的安定性と高い導電性(抵抗率は0.005Ωcm程度)を併せ持っています。欠点は、強いへき開性*であり、大型単結晶育成や切断・研磨などはできないと考えられていました。

しかし私たちは酸化ガリウムのポテンシャルを信じ、大型単結晶基板をつくることに成功しました(図1)。Siを添加物とすればキャリア濃度を4桁以上も制御が可能になります。

また、MOCVD (有機金属気相成長) 法によるGaN系多層膜の成膜によりLEDを試作しました(図2)。300μm角のLEDでは200mA投入時に、3.3Vと低い動作電圧が得られました。同サイズの横型市販品では4.7Vと動作電圧は高くなっています。光出力は1200mA投入時で170mWと大きく、同サイズの横型市販品の5倍以上になります。今後の改善で、光出力を更に2倍にできるとみています(図3)。

新しい半導体材料としての可能性も大きく考えられます。Alの固溶化によるバンドギャップ制御(図1)、オゾンガスを適用したMBE

(分子線エピタキシー) 法で高品質単結晶薄膜やキャリア濃度の制御が可能であることを実証しました。Mgを用いた高絶縁化(図1)やp型化も可能であることが分かりましたが、p型化に関してはまだまだ問題が多く残っています。

パワーデバイス素子応用と今後の展開

2002年に早稲田大学一ノ瀬教授(現名誉教授)、(株)光波と共同で開発をはじめ、2007年からは(株)光波・(株)タムラ製作所にて、実用化開発をすすめています。LEDに関しては2012年度中の製品化を目指しています。各種センサーや撮像素子、パワーデバイス素子にも有望で、バリガ性能指数ではSiCの約10倍、GaNの約4倍であり、ショットキーバリアダイオードなども試作をおこないました。

最大の特徴は融液成長により大型のバルク単結晶が容易に得られることでしょう。GaNやSiCは融液成長ができず、基板としての単結晶の大型化、高品質化、特に低コスト化に難しさがあります。開発をはじめてから10余年、今後の急速な展開が期待されます。

*へき開性: 結晶に沿って割れやすい性質のこと

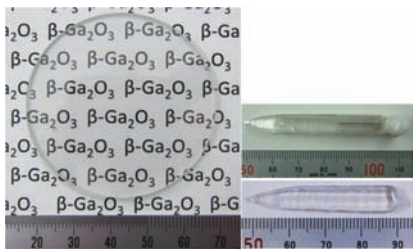


図1 丸形加工した2インチβ-Ga₂O₃単結晶基板(左:(株)光波提供、EFG法育成)、バンドギャップを更に大きくしたβ-Ga_{2-x}Al_xO₃単結晶と高絶縁性Mg:β-Ga₂O₃単結晶(右上と右下、FZ法育成)

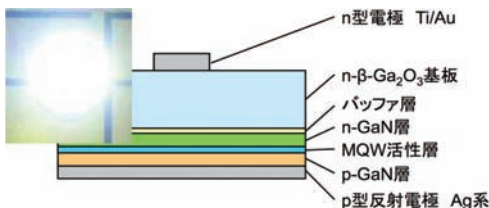


図2 n型β-Ga₂O₃単結晶基板上に作製したGaN系LEDの模式図でp層側を下に実装するタイプ、左上は白色発光の様子((株)光波提供)

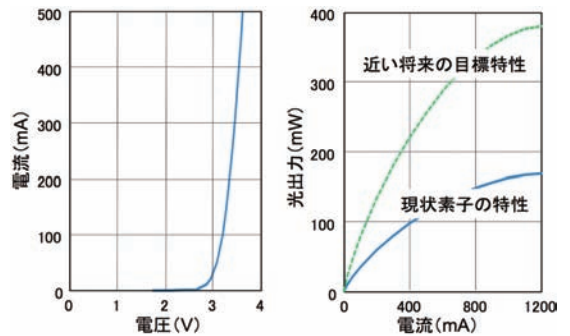


図3 β-Ga₂O₃単結晶基板上に作製したGaN系LED試作品は動作電圧が低く(左)、光出力も大きい(右)((株)光波提供)

しまむら きよし プロフィールはP6を参照。 / ガルシア ビジョラ プロフィールはP6を参照。

見落としていたパラメータを探し、未解明の問題をあきらかに。

環境・エネルギー材料部門 部門長

環境・エネルギー材料部門 光・電子材料ユニット ユニット長

大橋直樹

光・電子材料のユニット長としてだけでなく、環境・エネルギー材料部門長でもある大橋直樹部門長。

光の応用から、材料全体まで「新しく、使える材料はどこにあるのか、

どのようにして見つけることができるのか」を日々考え続けている。

——結晶の研究とは、光・電子材料の研究なのですね。

大橋：この号の特集でも述べたとおり、光を通すことを考えると、確かに、単結晶が大切です。また、特集では触れませんでした。光の応用ではガラスも非常に重要です。実は、ぼくは学生のころは超伝導の研究に関わっていました。その後、セラミックとエレクトロニクスのつなぎ目のあたりで仕事をしてきています。ふとしたことから、材料の評価に光物性を利用する事になり、いつの間にか、NIMSでは、光・電子材料の担当に。その間、ずっと、結晶と関わってきた感じです。

大学で卒論を始める年にベドノルツ・ミュラーの高温超伝導の論文が出て、助手になった年に日本で青色LEDが開発された（1993年）ということが、ぼくのキャリアに大きく影響しています。高温超伝導の発見、青色LEDの実現。そんな社会現象となるような新しいものをみんなが探しているけれども、それはなかなか見つからない。

——環境・エネルギー材料部門の部門長もされています。

大橋：エネルギーや環境の話は、難しいだけではなく非常に複雑です。再生可能エネルギーでクリーンだからと言って、高価で良いことにはならず、原油の値段が10倍になった時に価値のある技術です、と言っても笑われます。本当は、それも大事ですけどね。今、アメリカの大統領選でも、エネルギー関連の研究開発が争点のひとつになるほど、重要、かつ、難しい問題です。とはいえ、安くて、安全・安心な、再生可能エネルギーの取得にむけて、頑張るしかありません。

——新しい光・電子材料を見つけ出すため、重視されていることはありますか。

大橋：今まで置いてきぼりにされてきた、基本的な、解けていない問題を明らかにしたいな、と思いますね。材料の世界、特に、セラミックスの開発は、試行錯誤ですすんできた側面が強いと思う。「こうやって良くなるなら、こうしたらもっと良くなるかな？」の繰り返しです。その努力で技術はすすみましたが、どうして良くなったの？ という問いへの答えが無いものがたくさんあります。今までと、ちょっと違った方向から見つめ直し、そうした、未解明なものを論理的に説明し、そこからさらに何か新しいものが出てくるのが一番いいと思っています。

——材料の特性はどこから来るのか、そこから今までの常識を疑うと。

大橋：今まで皆が見落としていたパラメータはないか、と。たとえば、ある結晶の特性を支配しているのが不純物だとみんなが信じているとしたら、みんなで一生懸命不純物の分析をするわけでしょう。だけど、本当は、不純物は特性に関係がなくて、他のことが特性を決めていた、ということもありえるわけです。今まで見てなかったものを見なくてはいけない。

——別の視点を今までの研究に持とう、ということですね。

大橋：これだけたくさんの科学者がいて、物理学者がいて、周期表にはあれだけしか元素なくて、誰も触ったことがない物質って、もうないかもしれない。しかも、大体の組み合わせはもうかなり研究されています。それでも新しいものが出てくるわけでしょう。そのためには、

物事の本質は何かを見すえつつ、あらゆる角度から現象を見る。この特性は何からできているのか？この特性は別の場面で使えないか？そのように検討する中から、おぼろげながら新しい材料へとつながるヒントが見えてきます。その繰り返しです。そうしてでてきたものが、「使える」新しい材料だったら、それこそ、最高！ **N**

おおはし なおき プロフィールはP.3を参照。



NIMS AWARD 2012

2012年度 NIMS 賞受賞者インタビュー



ケンブリッジ大学教授
ハリー バデーシア

—NIMS賞を受賞された研究について、簡単に教えていただけますか？

私たちは鉄鋼の金属組織を計算で求めることができるような法則を確立しようと長いあいだ努力してきました。そのため、実験からではなく、まず鉄鋼の特性と組織を予測することを目指しました。問題が複雑なため、100%このやり方で答えが得られるわけではありませんが、まず計算で求め、それに基づき実験を計画します。誰もが使えるよう、全データのアーカイブを作り、この分野の進展を図れたらと考えています。すでにかなりのアルゴリズムのライブラリがあり、世界中の人が無料でアクセスできるようになっています。

—はじめてこの研究分野に入ったきっかけは何でしょうか？

16歳の時、British Oxygen社の技術員として金属研究所で働きはじめ、会社が教育費用を出してくれて、ロンドン・ポリテクニクで学位を取り、さらにPh.D.を取るためにケンブリッジ大学へいきました。今でもこの会社は私の研究をサポートしてくれています。若くして仕事を始めると、産業界を恐れなくなり、バランスの取れたものを見方ができるようになります。それに、製品を創ることが論文を書くことに比べていかに難しいかということがわかりますね。

—NIMSとの関わりは長いとお聞きました。

1987年に原田広史先生が当時の金属材料研究所 (NRIM) に紹介していただき、1989年にはじめて訪問しました。1990年から1995年には、NRIMとケンブリッジ大学の間で大きなプロジェクトがあり、日本の研究者たちが膨大な時間をかけてケンブリッジ大学で原子配列とその制御の研究をおこないました。以来、ケンブリッジ、NRIM、日本の博士課程学生やサバティカル中の教授たちのあいだで組織だった交流の場ができあがりました。また、NIMSはケンブリッジ大学内に新しいオフィスも設け、継続的に交流を続けています。

—最初にNIMSを訪問されたころに比べて、今のNIMSの研究環境は変わりましたか。

いろいろな面で大きく変わっていますね。当時、日本の国立研究所は大学との共同研究が禁じられ、学生を受け入れることができませんでした。今では制度も変わり、学生を含む1500人もの方がNIMSで働いていると聞きます。この週末にも、たくさんの若い学生たちが自分の研究について、専門的な、素晴らしい説明をしている場に出会いましたよ。

—NIMSの研究環境は、ケンブリッジ大学とは違いますか？

違って当然です。研究の世界では、いろいろな形の組織が必要です。一つの決まった形の研究所ばかりでは、創造性が生まれません。NIMSには素晴らしい装置もありますし、産業界と強い連携を持っているのも魅力ですね。

Harry K.D.H. Bhadeshia シティ・オブ・ロンドン・ポリテクニク (現ロンドン・メトロポリタン大学に吸収) で学び、76年に理学の学位取得。79年にケンブリッジ大学より博士号取得。プリティッシュ・スチール社で英仏海峡トンネルを結ぶ鉄道線路用の鉄鋼や、イギリス国防省のため装甲用の高性能鋼を開発。2008年にInstitute of Materials, Minerals and Miningより、「鉄鋼業界への多大なる貢献」をしたとしてベッセマー・ゴールドメダル賞を受賞。2008年11月には、初の「タタ・スチール金属工学教授」となる。英国王立協会フェロー (FRS)。



カリフォルニア大学バークレー校
材料科学工学科教授
ジョン モリス

—「材料強度発現機構の理論的解明」について伺いたしたいと思います。

鉄の特性を高めた高強度鋼をマルテンサイト鋼といいます。鋼に焼入れ処理を施すことにより、金属の物理的な組織が変化し、強度が増します。これにより形成される非常に複雑な微細組織を、研究者たちは150年以上にもわたって解明しようとしてきました。そしてようやく私たちは、この微細組織がどのようなものであるかを解明したんです。複雑に見える構造も、何が起きているのかが理解できればそう複雑なことではありません。また、鉄の特性を理解し制御することがもっと簡単になります。複雑で難しいものだという前提にたってしまうと、そこから進展は望めません。ですが、考えているよりもはるかに簡単なことがわかれば、そこから知識を総動員して解決しやすくなります。

—この分野に取り組むことになったはじめてのころのことをおしえてください。

あのころ、研究者たちの関心の的は、極低温用材料の開発にありました。天然ガス貯蔵のためのLNGタンクのニーズが高かったため、1970年代後半から80年代半ばまでこの分野は非常にホットでした。また、世界中がトカマク型核融合炉用の超伝導磁石をつくらうとしていたころで、それにもすぐれた極低温構

2012年6月、茨城県つくば市のつくば国際会議場に於いて「NIMSコンファレンス2012」が開催され、材料科学分野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した研究者にNIMS賞が授与されました。世界各国のトップ科学者から候補者をノミネートし、中立有識者で構成された委員会により厳正な選考をおこなった結果、今年度はProf. H.K.D.H. Bhadeshia (ケンブリッジ大学)、Prof. John W. Morris, Jr. (カリフォルニア大学)、Prof. Subra Suresh (米国国立科学財団)の3名に決定いたしました。コンファレンス開催中、多忙な3名の受賞者がNIMS NOWのインタビューに応じてくださいました。

造用鋼が必要でした。

最近では、LNGに関する問題はさらに重要になってきていまして、私も政府が資金を提供する研究に携わりながら、世界中の鉄鋼会社と共同研究をすすめています。

——NIMSとの交流はもうかなり長い間続いていますね。

はじめてNIMSとかかわりを持った1970年代後半以来、何年にもわたってNIMSとは共同研究を続けており、カリフォルニア大学でも多くのNIMSの研究者がいます。また、アメリカではしばらくの間、鉄鋼に関する研究活動が低迷し、私の研究活動もほとんどがアジア、特に日本と韓国との技術交流がメインでした。

——同じ分野を志す若手研究者にアドバイスをお願いします。

研究を楽しみ、面白いと感じ、新しい発見をする喜びを味わうことができる人は、喜びに満ちた研究人生を送ることができるでしょう。私自身がまさにそうでした。毎日が楽しかったですし、今でも楽しんでます。ですので、私のアドバイスは、自分のやりたいことを見つけ、興味のある分野の研究をおこないなさいということです。面白いことができる機会をいかせば、きっと有益かつ楽しみに満ちた研究者人生を送ることができるでしょう。70歳を超えた私の年代でも、未だに情熱を持って研究を楽しんでいる仲間はたくさんいます。

John William Morris Jr. 金属工学の学位を1964年に、材料科学分野で科学博士(ScD)を1969年に、マサチューセッツ工科大学(MIT)より取得。ニューヨークのパフアローにあるベル・エアロスペース社に1968～1971年まで勤める。1971年より、カリフォルニア大学バークレー校の材料科学工学科の教員および、ローレンス・バークレー国立研究所のスタッフとなる。「材料強度発現機構の理論的解明」に貢献したとして2012年度NIMS賞を受賞。



米国国立科学財団長官
マサチューセッツ工科大学教授
スブラ スレシュ

——研究をはじめられたきっかけは何だったのでしょうか。

1970年代の後半、わたしは機械工学の勉強をしていて、材料の機械的特性、特に破壊特性に興味を持っていました。1980年代には、構造材料や、原子炉の压力容器、航空機、パイプラインなどの大型構造物の機械的特性を中心に研究し、1993年には半導体材料の研究のため、MITに移りましたが、それから生体材料のナノスケール特性に興味を持つようになり、ここ10年間はその研究を続けています。

——どのようにして機械工学を医療に応用するのですか？

例えば赤血球の伸縮性が失われると、血管が詰まったりして病気の原因になります。機械工学者は、機械工学と材料科学の知識——例えば、分光技術や特性評価ツール、ナノテク、原子間力顕微鏡など——を用いてこの血球の変形について調べることができます。

——NIMSについては、どのような印象をお持ちですか。

NIMSとは昔から交流がありましたし、私は3年ほど前に、NIMSのinternational advisory boardのメンバーにもなっています。NIMSの素晴らしい点は、材料科学という

広い研究領域に総合的に取り組んでいるところだと思います。

——研究の対象分野を変えていくことは大切なのでしょうか？

研究分野を変えることのいい点は、違ったものの見方ができるようになることです。よく知らない新しい分野に飛び込むのは、とても大変なことですけどね。文化だけでなく、新たな知識も必要です。赤血球を調べるにあたって、私には、それまで微生物学者たちが取り組むことのできなかったあらゆるツールがありましたが、生物学についての知識がなかった。ですから、数年間は自分で生物学の勉強をし、パリのパスツール研究所で6ヶ月間、生物学のグループの一員として研究に没頭しました。医師や、生物学者、化学者、遺伝学者たちとともに研究するのはとても刺激的でしたが、気後れするような思いもありましたね。

——米国国立科学財団の長官になられてお忙しい毎日と思いますが、今でも研究を続けていらっしゃるのですか？

勿論。でも週末しか時間が無いので、研究グループとはいつも週末にスカイプで会話をしています。私にとってとても大切な時間です。ポスドクたちもみんな良い人で、私が日曜日の朝に連絡しても気にしません(笑)。今は2つのプロジェクトをすすめています。一つはナノ材料に関するもの、もう一つは赤血球の機械的特性に関するもので、こちらはマラリアや癌、その他の血液の病気、最近では糖尿病も対象にしています。

Subra Suresh インド工科大学マドラス校を卒業後、アイオワ州立大学で修士号、MITで博士号を取得。ポスドクとしてカリフォルニア大学バークレー校、ローレンス・バークレー国立研究所で研究をしたのち、ブラウン大学で教鞭をとる。その後MIT教授となり、2010年にオバマ大統領の指名を受け、米国国立科学財団長官に。「構造・生体材料におけるマクロ・ナノスケールの分野横断的マルチスケール材料科学の確立」に貢献したとして、2012年NIMS賞受賞。

1 第22回 ナノ材料科学環境拠点オープンセミナーを開催

9月20日(木)、NIMS並木地区において、第22回 ナノ材料科学環境拠点 (GREEN*) オープンセミナーが開催されました。

GREENは、NIMSが中核となって2009年10月に活動をはじめた文部科学省委託事業です。ナノテクノロジー材料研究を推進することで、環境エネルギー問題を解決し、新しいイノベーションをおこすことを目指しています。

第22回となる本オープンセミナーでは、「ナノ薄膜の熱特性」をテーマに、東京大学先端科学技術研究センターの香川豊教授 (NIMSフェ

ロー)、東京大学只野央将氏、NIMS研究者による5つの講演をもとに活発な議論がおこなわれました。また、サーマルマネージングシステム(熱制御)について計算と計測、さらに材料開発を融合させたアプローチを模索する場として白熱した議論がおこなわれました。

※GREEN: Global Research Center for Environment and Energy based on Nanomaterials Science



会場風景



講演するNIMS研究員 Dr. Rudder Wu

2 情報化月間 2012 における文部科学大臣表彰「情報化促進部門」を受賞

10月1日(月)、NIMSは第41回情報化月間における文部科学大臣表彰の情報化促進部門に選ばれ、記念式典(主催: 経済産業省、総務省、文部科学省、国土交通省)において表彰を受けました。

情報化月間とは、毎年10月に文部科学省、経済産業省など関係6府省が社会のさまざまな情報化に関する普及・啓発をおこなう活動です。また、情報化に関する取り組みや成果などが関係府省の大臣により選ばれ、企業や個人が表彰されます。

今年度、NIMSは「NIMS物質・材料データベ

ス(MatNavi)」の成果が認められ、同賞を受賞しました。

MatNaviはNIMSホームページ上で無料公開している材料の最適な使用・選択を目的とした物質・材料に関わる様々なデータベース群です。以前からあった構築年や目的ごとに分散していた各種データベースを集約・一元管理し、世界最大級の材料データベース群として構築・運営をおこなってきました。現在、高分子・無機・金属・拡散・超伝導など12種類のデータベースと複合材料熱物性予測システムなどの4種類のアプリケーション、NIMS構造材料データシートオンライン版、およ

び横断検索システムがあります。2010年にはリニューアルもおこない、より使いやすいデータベースとして好評を得、登録ユーザーは7万人に達しています。



表彰を受ける潮田理事長

3 MANA 5th Anniversary Memorial Symposium を開催

10月3日(水)、NIMS並木地区においてMANAの発足5周年を記念したシンポジウムが開催されました。

MANAは、2007年に文部科学省の「世界トップレベル研究拠点形成促進プログラム(WPIプログラム)」によって選ばれた5つの研究拠点の1つとして設立以来、大学外に設けられた唯一のWPI拠点という立場をいかしながら、「ナノアーキテクトニクス」の概念の下、「目に見える拠点形成」を目指して積極的に活動を続け、2012年10月で発足5周年を迎えました。

それを記念しておこなわれた本シンポジウムは、潮田資勝NIMS理事長の開会挨拶ではじまり、続いて黒木登志夫WPIプログラム・ディレクター、齋藤軍治WPIプログラム・オフィサー、MANAサテライトディレクターでケンブリッジ大学のマーク・ウェランド教授より祝辞がおくられました。

その後、青野正和MANA拠点長より、MANAの5年間の歩みと今後の第二期の活動方針について「Five-year journey and future challenges of MANA」と題した講演がおこなわれました。引き続き、東京大学大学院工学系研究科の十倉好紀教授より「Emergent electromagnetic phenomena in solids」と題した特別講演がおこなわれました。プログラム後半には、「Our Future Challenges in MANA」と題して、主

任研究者4名を含むMANAの研究者らにより、現在進行中のチャレンジングな研究プロジェクトについて計8件の口頭発表がおこなわれ、延べ257名の出席者はみな興味深く発表を聞いていました。



参加者の全員写真



ケンブリッジ大学
マーク・ウェランド教授