

NIMS

2009年 6月号

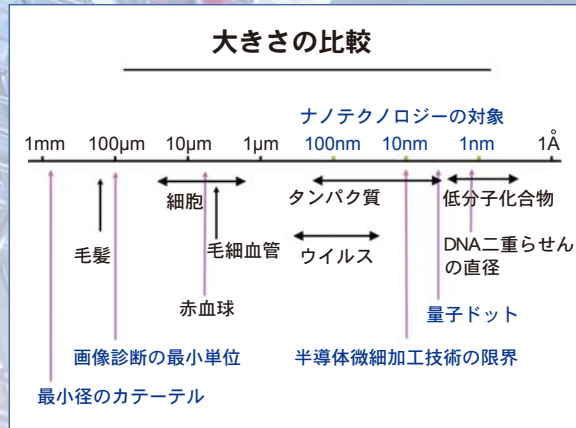
NOW

ナノバイオ材料特集



細胞培養室(クリーンルーム)

ナノバイオ材料特集



ナノバイオ材料とは

「ナノバイオ材料とは何か?」と、この研究領域をあらためて定義しようとすると、当の研究者たちでさえ天を仰いで腕組みするかもしれません。本特集で紹介する研究のひとつひとつを眺めてみても、この領域がいかに広く多様であるかおわかりいただけると思います。研究者の背景も、高分子化学、電気・電子、機械、固体物理、材料科学、生命科学など、理工学の広い分野にわたっています。

医療の飛躍はナノから

ナノバイオ材料研究を、何を目的としているかを軸に切り分けてみましょう。大きな方向のひとつとしてあげられるのが高度先進医療です。

このうち治療を志向する研究には、組織や臓器の再生をめざす再生医療、薬物を必要な時に必要なところに送り届ける薬剤送達システム、人工肝臓や人工腎臓のための材料研究などがあげられます。本特集では、人工骨、人工角膜のほか、組織や臓器を再生する多孔質材料の重要性を紹介します。

一方、診断や測定を目的とする研究も医療に貢献するところが大きく、バイオチップ、バイオセンシング、バイオイメージング、ナノカプセルなど、多くの方法が研究・開発されています。ここでは、在宅医療や遠隔地医療に役立つバイオチップと最新のバイオトランジスタを紹介しています。

このような研究の多くは、医師たちとの連携のもとに進められています。ナノバイオ材料研究は医療を革新する大きな可能性をもっていますが、さらに花開くには社会インフラの支えが強く求められます。

生体は、ナノテクノロジーの対象になる100nmから1nm程度の大きさのさまざまな構造や機能単位をもち、それらが高度に組織化された構造体です。ナノバイオ材料研究では、生体に学び、生体を模倣するという立場にたち、そこから研究の動機やヒントを汲み上げています。研究の対象や手法がナノの領域に特有の現象になるのは自然の成り行きと言えるでしょう。

バイオの原理でコンピュータ

もう一つの軸は、工学的な成果を目的にした研究です。生体に固有の機能である自己組織化、フィードバック処理、学習、複数の信号を同時処理するシステムなどに学んで、これを工学的に再現しようとするものです。人間の脳の機能に学ぶ新たなコンセプトのコンピュータの創成はその代表的なものです。それをめざして、ナノ計測技術を研ぎ澄ます研究者の仕事を紹介します。

また、生体を構成する物質を、その生物学的な意義から離れて、材料として活用しようという立場にも興味深い成果が生まれています。分子モータ、ナノマシン、DNAナノ構造体技術などがあげられます。この特集で紹介する研究では、DNAを材料と割り切る意外性に驚かされるかもしれません。

NIMSでは、「生体材料センター」を核として、材料の視点からナノバイオ研究に力強い布陣を敷いています。分野融合がまさに実現しているこの領域を2009年7月に開催するNIMS WEEKでもたっぷりご披露します。

生きた骨に近づく人工骨

生体材料センター 無機生体材料グループ
菊池 正紀

骨は変化しない無機質なものと思われがちです。病気やケガで欠損した骨を人工骨で置き換えるにあたって、力学的な強度があれば十分ではないかと考える方が多いかもしれません。

ところが、骨は活発に代謝し、生きている存在です。常に吸収と新生を繰り返し、体内では数年で完全に入れ替わります。骨を壊して吸収する破骨細胞と新生させる骨芽細胞とが共役して働き、壊しては造り、造っては壊すサイクルが繰り返されているのです。私たちは、材料工学の立場から生きた骨の再生を念頭に、整形外科など臨床の医師たちと連携して人工骨の開発に取り組んできました。

人間の骨はハイドロキシアパタイト65%、コラーゲン25%、それに水分などを組成としています。しかも、コラーゲン繊維とアパタイトの結晶軸が方向を揃えて並んでいます。きれいに配向するしくみはまだはっきりしていませんが、表面の構造や環境によって自発的に配向し、骨が形成されるのではないかと考えています。コラーゲン分子の長さはおおよそ300nm、骨の中のアパタイト結晶は30~40nm。生体はナノのかたまりと言われますが、骨もまた巧妙なナノ構造をもっています。それを工学的に再現するのが私たちの目標です。

人工骨が必要になるのは、整形外科領域で骨の腫瘍摘出後の骨欠損や骨折、口腔外科領域で歯周病によるあごの骨の欠損などです。現在の治療法は、患者さん自身の腸骨(腰骨)や

腓骨(下腿の骨)の一部を取って粉砕し、欠損部を埋める自家骨移植治療が8割を占めています。自家骨は免疫反応や感染の恐れがなく、細胞を含んでいる利点がありますが、健康な部分を傷つけるのは好ましいことではありません。また、自家骨では量が足りない場合もあるでしょう。



私たちが開発して、もっか実用化をめざしている人工骨は、骨とよく似たナノ構造をもつハイドロキシアパタイト4:コラーゲン1の複合体からできた多孔体です。温度と反応溶液pHを調整することで、アパタイト結晶の生成とコラーゲンの線維化が同時に進行し、骨とよく似た構造をもつ線維状の複合体ができました。この複合体をうまく凍結乾燥することで、スポンジのように変形する多孔体人工骨ができます。これをイヌ腰骨の欠損部に埋めると、破骨細胞や骨芽細胞が活発に働いてだんだんに自分の骨に置き換わり、3カ月後にはイヌは走り回るまでに回復しました。

このナノ構造をもった材料をさらに進化させて優れた高次構造を実現し、細胞反応性のよいものを作りたい——材料屋の夢はさらに広がっています。

組織工学に不可欠な多孔質材料

生体材料センター 高分子生体材料グループ
陳 国平

再生医療は、病気や体の欠損を治療するために細胞から臓器や組織を作り、それを移植する医療です。細胞とともに材料の力も借りて組織を再生しようという動き。組織工学が1980年代後半から盛んになってきました。現在、組織工学によって開発されているのは、細胞培養が容易で構造と機能が比較的単純な、皮膚、軟骨、角膜、骨のような組織で、さらに複雑な機能をもつ腎臓、肝臓、脾臓などはまだ研究段階にあります。

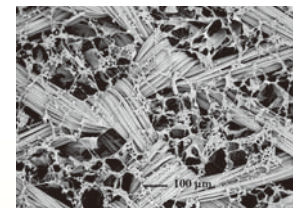
細胞を多孔質材料に播き、栄養物質とともに3次元の環境で培養して増殖させると組織ができます。このとき使う多孔質材料を「足場材料」と呼びます。私たちは効率よく組織を再生できる機能性足場材料の開発に取り組んでいます。

足場材料の満たすべき条件とはどんなものでしょうか。細胞が接着しやすく育ちやすいこと、役目を終えると生体に吸収されることなどがあげられますが、効率よく組織を再生するには、細胞を足場材料の内部にまで入り込ませることが大変重要です。そのためには材料表面に無数の小孔が開き、それらが内部にまで貫通していなければなりません。素材としては、ポリ乳酸(PLA)やポリグリコール酸(PGA)、乳酸-グリコール酸共重合体(PLGA)などの合成高分子、コラーゲンやヒアルロン酸のような天然高分子、そしてこれらの複合材料が使われます。そ

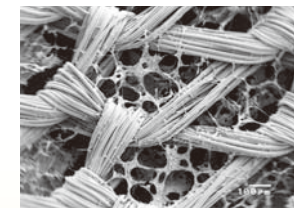
れらの素材から適切な孔の構造をもつ多孔質の足場材料を作るには、精巧な技術が求められます。最近、私たちが開発した材料の作製法を紹介します。

まず、漏斗状の表面構造をもつ多孔質材料を作るために、氷微粒子を鋳型に用いる方法を開発しました。疎水性と親水性を制御した特殊な表面に純水をスプレーし、これを凍結させて直径100~1000µmの氷の微粒子を作ります。この鋳型の上にコラーゲン水溶液を載せ、そのまま凍結乾燥すると、氷が除かれて表面に大きな空孔、内部には貫通した小さな空孔を持つコラーゲンスポンジが得られます。このコラーゲンスポンジは皮膚組織の再生に有用でした。

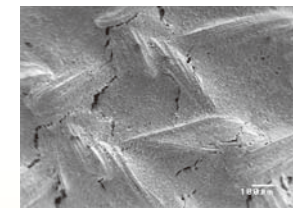
また、生体吸収性合成高分子とコラーゲンを複合化し、強度や生体親和性の高い複合多孔質材料(PLGA-コラーゲン複合メッシュ)も開発しています。これを足場に軟骨組織を作りました。足場材料は次第に分解吸収され、培養細胞の細胞外マトリックスに置き換わります。私たちは、これを用いてヒトの関節軟骨の再生にも成功しました。高齢者には変形性関節症に苦しむ人が多いので、軟骨の再生医療は高齢化が進む今日、特に期待されています。高機能の足場材料は再生医療を実現する有力な鍵のひとつなのです。



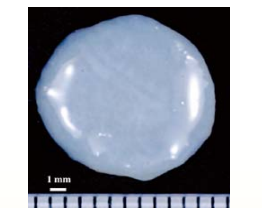
PLGA-コラーゲン複合メッシュ



24時間培養後



4週間培養後



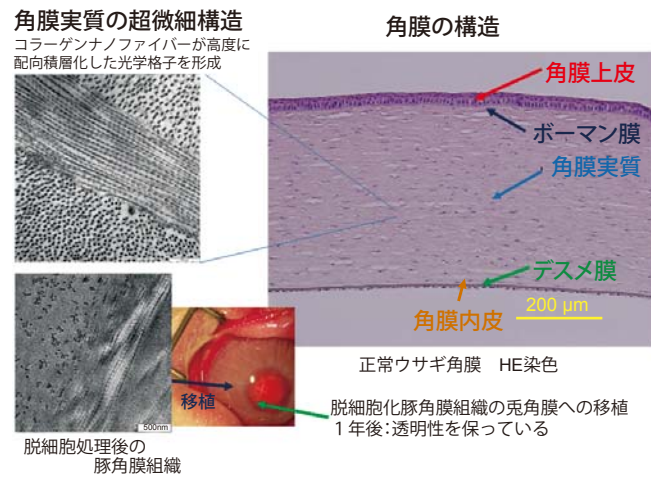
再生軟骨

生体を相手にする材料がなぜナノか、基本的な考え方を説明します。生体は細胞とそれ以外の基質から成り、これらが高度に組織化したものです。細胞は、細胞膜というマイクロサイズの閉鎖空間内に、ナノサイズのベシクル、細胞骨格タンパク、遺伝子などの機能分子を組み込んだ生命ユニットで、細胞膜表面にも各種レセプターやチャネルなど、さまざまなナノサイズの機能グループが存在します。この意味で、細胞はナノファイバーとナノ粒子の構成物と考えることができます。また、細胞外基質もナノレベルの直径の繊維状の糖・タンパク構造体が集合したものです。

私たちは、生体を相手にする高度に機能化した材料を作るには、生体を選んできたのと同じ戦略、すなわちナノファイバーとナノ粒子を基盤として高次構造化・高次機能化を達成することが近道であり、必然でもあろうと考えています。生体に学ぶうちに、材料創生に利用可能な技術が次第にナノレベルに手が届くようになってきた結果、ナノバイオ材料の研究が生まれました。生体材料をボトムアップ型で作るにせよトップダウン型で作るにせよ、ナノ構造制御による高次機能化が当面の目標です。

どの方法をとるにしても、基盤として欠かせないのが高分子を扱う技術です。私たちの研究は、高分子のナノファイバーを活用して高次機能を実現しようというものです。ボトムアップ的な作り方は、高圧の直流電界のなかにステンレス針の先から高分子材料を吹き出し、コレクターで引き集める電界紡糸法によっています。この方法で10 μ m~100nmのファイバーを作ることができ、モノフィラメント、繊維方向の揃った配向ナノファイバー、スポンジ、不織布など高次構造制御が可能です。

ナノファイバーを活用した私のライフワークが人工角膜です。角膜は眼球の一番外側にある厚さ800 μ mほどの透明な



組織で、主にコラーゲン繊維と細胞からなる構造体です。角膜が透明なのは、コラーゲンのナノファイバーが高度に配向し、90度で互い違いに何層にも重なって結晶格子に近い状態になっているためです。角膜に傷ができると混濁して視力が失われるため、角膜移植が必要になります。しかし、ドナーは慢性的に不足しており、移植しても長期生着率は7~8割程度です。角膜を人工的に作れないかと昔から多くの人が考えてきました。

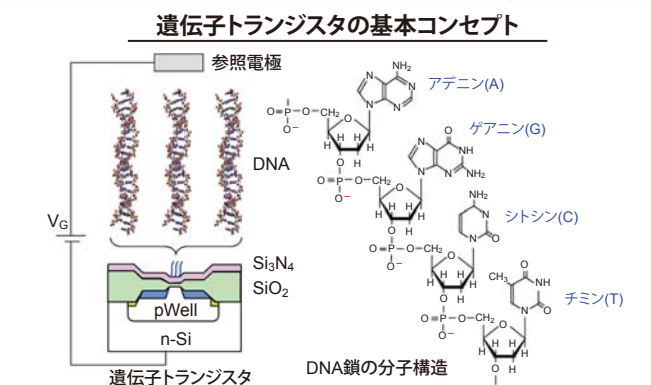
人工物から作り上げる方法としては、ポリビニルアルコールのナノファイバーを試みています。将来は磁場の中で繊維の配向構造を制御して構築することもできるようになるでしょう。また、トップダウン的な手法では、大学や企業と共同で、ブタの角膜から超高压下で細胞を除去してコラーゲン繊維だけ取り出し、これをウサギに移植して細胞を育てて角膜を作る方法を実験中です。移植角膜は1年後も透明で健康な状態を保っています。

高度医療対応の次世代検査法「バイオトランジスタ」

20年前にManz博士がはじめて報告した微量化学分析システム(μ TAS)は、臨床検査用のマイクロチップや実験室で活躍するlab-on-a-chipとして広く受け入れられるようになりました。このシステムは半導体の微細加工技術を生かしたのですが、半導体の電子材料としての特色を活用したものではありませんでした。そこを積極的に利用するのが「バイオトランジスタ」です。

集積回路に使われる電界効果トランジスタのゲート(電極)は、外部の電荷に敏感です。例えばDNAはリン酸基をもつために負に荷電していますが、ゲート表面にDNAの1本鎖を付けておき、これと相補的な鎖とハイブリダイズさせると、負電荷が増加します。これをトランジスタで検出しようと考えたのです。

この方法でDNAの1塩基の違い(SNPs)を検出することができます。2つの短いDNAの断片を用意し、一方は末端を例えばA(アデニン)、もう一方はG(グアニン)として、両方をゲートに固定します。それぞれに同じターゲットDNAを導入すると、ハイブリダイズして2重鎖を形成し、さらにポリメラーゼを



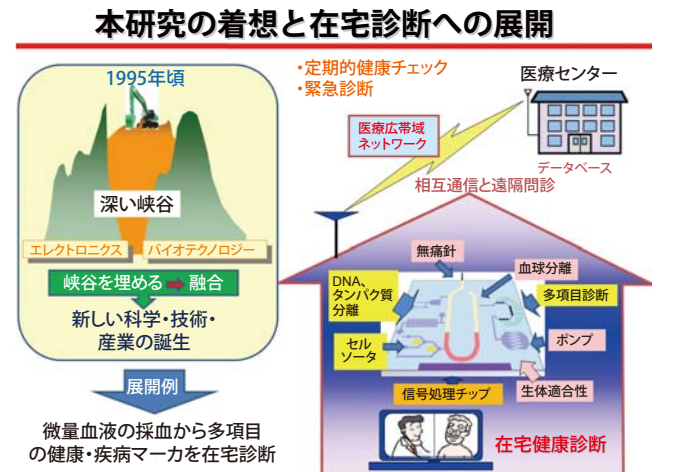
添加すると末端が相補的な場合に限り伸長反応によってポリヌクレオチドが合成される結果、ゲート上の負電荷が増加します。こうして末端にある塩基の違いを識別することができます。SNPsの検査技術は、疾患やその背景にある体質の違いなどを知る方法として、必要性が強く認識されています。

さらに、トランジスタで1塩基伸長反応を検出する方法も考えました。11個の塩基から成るプローブDNAと21塩基が

ら成るターゲットDNAをそれぞれトランジスタ上に固定しておきます。ここにC、A、G、Tをそれぞれ繰り返し反応させると、ターゲットDNAの塩基と相補的な塩基を取り込んで伸長し、2重鎖を形成します。その結果、負電荷が増えていくので、電気信号の変化を検出することができます。この方法で未知の塩基配列の解析が可能です。

より安く簡便に個人の全ゲノムを調べようという「1000ドルゲノムプロジェクト」が米国で進行中です。その実現には、これまでのDNAシーケンサーに代わる次世代の解析法が必

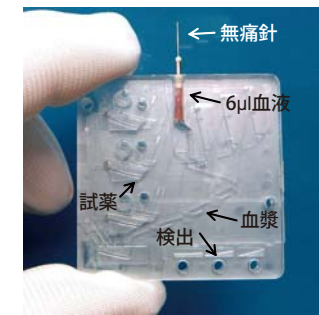
在宅診断を実現するバイオチップ



鎖になって伸展することを見つめました。検出すべきウイルスのDNAを蛍光染色して加えると、試料DNAとハイブリダイズするので、感染を診断できます。

チップの設計は、多項目の反応ごとにシリコンなどでモールドを作製し、樹脂に型圧して試作品を作り、組み合わせで構造を決めていきます。微量の血液ですむことが診断チップの利点であるとよく言われますが、血中濃度が低いウイルスの検出にはむしろ大きな弱点になっています。これを克服するには、感度をさらに高めて試料の濃縮を行う信号増幅技術を確立することが課題です。

さまざまなタイプの診断チップが90年代末から活発に研究されてきました。近い将来、社会インフラが成熟して、実用化と普及が進むことを期待しています。高齢化社会の医療費抑制、離島などの医療過疎地や船舶・航空機内での利用、乳幼児の迅速診断など各方面で診断チップは貢献するはずですが、



細胞を生きのまま計測する技術

私のバイオへの関心は、将来のコンピュータは現在の動作原理から解放され、まったく新しい動作原理に基づいて動作すべきだという思いから来ています。これは、青野正和MANA拠点長との議論から発展してきた考え方でもあります。

脳の持つ柔軟性、曖昧さ的確さは、並列処理や学習効果などの動作原理を細胞という材料のネットワークによって実現した結果だと思えます。驚くべきことですが、1人の人間の脳には、インターネットにつながっている世界中のコンピュータ

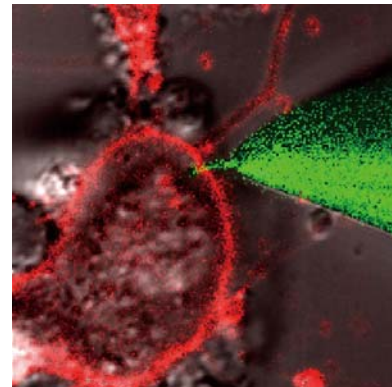
に組み込まれたトランジスタの総数にほぼ匹敵する10¹⁵個ものシナプスがあり、それがわずか10Wの電力で動いています。このような情報処理システムを実現するためには、新しい材料技術の開発が必要不可欠です。神経細胞ネットワークにおけるシナプス(接合部)の動きがその鍵を握っていると思います。しかし、シナプスの機能だけを模倣しても不十分でしょう。神経細胞本体も含めた全体の信号伝達現象を理解しなければなりません。

元来、私の研究の軸足は固体物理や情報技術にあり、無機・有機ナノ構造の研究を、走査プローブ顕微鏡に関連する手法開発とともに進めてきました。複数のプローブ(探針)をもつマルチプローブ顕微鏡を完成させて、それまで不可能だったナノ物性計測を実現させたのもその一環です。これが、今、ナノバイオにつながろうとしています。

生物学の教科書を見ると、細胞の情報伝達機構のモデル図が載っていますが、生きた細胞で実際に起こっている反応を直視した人はいません。ナノテクノロジーを活用した分子レベルでの情報伝達機構の解明が必要です。細胞の情報入出力端子であるイオンチャネルはナノスケール端子です。私たちはこれにアクセスするために、1個の分子を検出できるナノプローブを開発しました。pHを検出するプローブや分子1個が接近すると固有の振動モードを検出するプローブなどを開発し、微小空間でのわずかな環境変化をもとらえることができます。これらを駆使して、生きたままの細胞やそのネットワークとしての

機能を学びたいと考えています。細胞には、多くの分子を活用して複数種の信号を並列処理する機能が備わっています。私たちが得意とするマルチプローブの技術で、多くの情報を同時に計測することも可能になります。

これまでに培ってきたナノ技術を生かして、細胞の理解を深め、脳の動作原理を学び、脳型コンピュータへの道を開く指針を得たいと考えています。



ナノプローブを用いた神経細胞計測の例：神経細胞膜(赤)とナノプローブ(緑)を色分けして観察した蛍光顕微鏡像。

DNAで機能性材料を作る

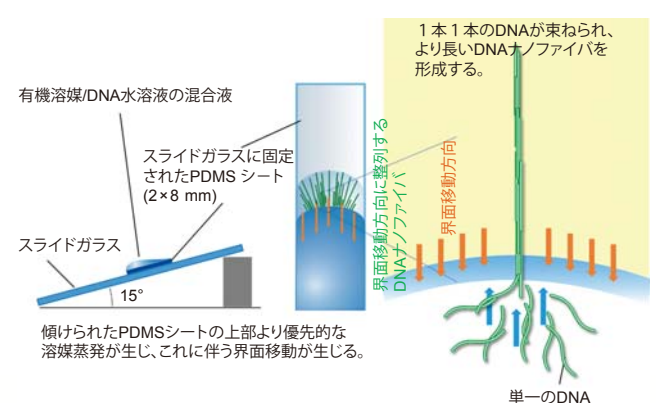
DNAは生物の遺伝情報を担う生体分子ですが、化学物質としてあるいは素材として眺めてみると、まったく別の魅力と幅広い可能性が見えてきます。DNAという豊富で貴重な天然高分子素材をいかに有用な材料に仕立てるかが私のテーマです。

DNAの二重らせんは直径約2nm、長さは数十μm以上に達します。また、規則正しい形態と高い機能が備わっています。鎖にはリン酸基があるので陰イオン性を帯びていますから、さまざまな物質と静電的な相互作用が可能です。

人工的なナノ材料であるカーボンナノチューブにもDNAに匹敵する径や長さをもつものがあります。DNAに比べると機械的な強度には優れていますが、溶媒に溶けにくく表面修飾が困難です。手を加えることが難しいのです。

通常DNAは、水溶液中で糸玉のようになっているため、ナノ材料として活用するにはまず直線状に整える必要があります。そのうえで、金属ナノ粒子や有機高分子などを結合させれば、機能性材料を作ることができるでしょう。AFM(原子間力顕微鏡)下での操作も可能になります。

一次元に伸ばす方法として、これまでは電界紡糸法などが試みられてきました。最近、はるかに手軽で安価なDNAがエタノールに溶けにくい性質をうまく利用する方法を開発したので紹介します。



DNAナノファイバ・アレイ作製のための溶媒蒸発法

ナノ有機センター ナノアーキテクチャグループ 中尾 秀信

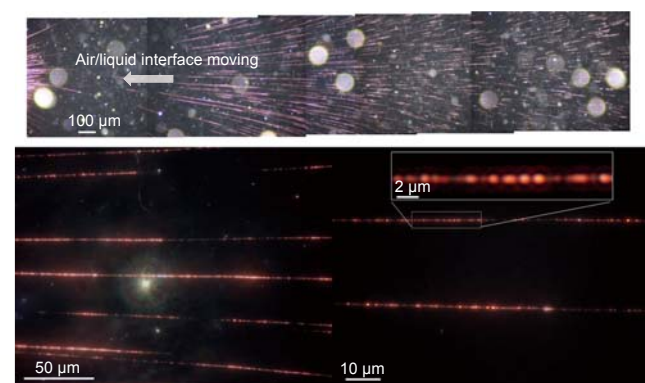
エタノールとDNA水溶液を混合して疎水性のシリコンゴムシート上に滴下し、このシートをわずかに傾けておきます。すると、界面の移動が起こり、溶媒の蒸発が早い液滴の上端からDNAの集合したナノファイバーがシート上に析出し、伸長していきます。こうしてできるファイバーの径は数十nm、長さは1mm以上にもなります。

フレキシブルなシートの上でできあがったDNAナノファイバーのパターンは、ガラス板などにそのまま転写できるほか、転写を繰り返せば複雑な二次元パターンが形成できます。

さまざまな応用が考えられますが、たとえば血糖や各種のアレルゲンに反応する物質をDNAナノファイバーにつけておき、展開したシートを電極パターン上に転写すれば、使い捨てのセンサーとして使えそうです。

DNAの二重らせん内部の空間をうまく利用した機能性材料も作れます。芳香族環を3つ以上持つ陽イオン性の有機色素はDNAのらせん内部になじみがよく、簡単に入り込みます。きれいに配向した色素分子の列はレーザー発振に活用できるかもしれません。

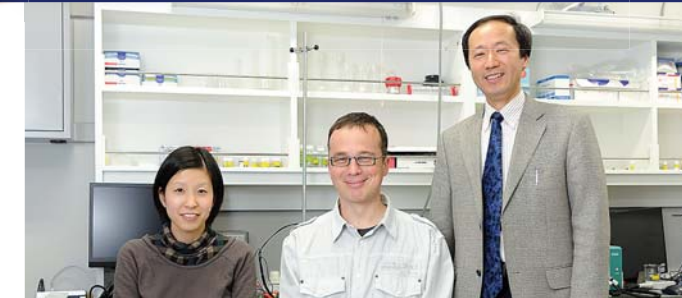
現在のデバイスにただちに取って代わる段階には到達していませんが、基盤技術として確かなものにしておけば、将来、多様な技術との組み合わせで用途が広がるものと期待しています。



DNAナノファイバアレイに沿って結合した金ナノ粒子の暗視野光学顕微鏡写真

固/液界面のナノ構造制御による機能化バイオデバイスの創製

生体材料センター 生体材料システム化グループ



片岡 知歩 Martin Pumera センター長 宮原 裕二

近年、ナノテクノロジーやライフサイエンス分野の研究が大きく進展し、生物学的現象をナノメーター領域の現象と結び付けて理解することが可能になりました。このようなナノバイオ分野の研究は、医療・創薬など幅広い分野へ貢献すると期待されています。私達は、固体/液体界面のナノ構造を化学的、物理的に制御することによって、DNAやたんぱく質の

結合、細胞の性質などを電気化学信号に変換するバイオデバイスの研究を行っています。現在、様々な検出原理を利用したバイオセンサーが開発されていますが、電気化学バイオセンサーの利点の一つは、検出する生体物質を蛍光などで標識する必要がなく、センシングを簡便に行うことができる点です。

現在私達が取り組んでいる主な研究課題は、(1)電界効果トランジスタを用いたDNAシーケンシング法の開発、(2)細胞膜の機能を検出する電界効果デバイスの検出原理の解明、(3)カーボンナノチューブを用いた高感度バイオデバイスの開発です。ここでは、(2)の細胞膜デバイスの研究について紹介します。

電界効果デバイスは、一般的に絶縁膜/半導体基板から作製され、検出される生体物質は絶縁膜表面へ固定化されます。そして、絶縁膜表面の電荷量の変化を、半導体の伝導度や電気容量の変化として検出します。私達はデバイス表面上に生体膜のモデルとして脂質二重膜を形成し(図A)、電気容量の変化について研究を行いました。脂質二重膜は、二つの脂質単分子膜が疎水基を内側に親水基を外側(水溶液側)に向けた構造をもっています。脂質二重膜は構造(数ナノメートルの厚さ)、電荷、組成などを精密に制御することができるので、細胞膜の情報を測定する電界効果デバイスがどのような検出原理に基づいているのかを明らかにすることができます。この一連の研究では、電荷を持つ脂質の含有量に依存してデバイス応答が変化すること(図B)などを明らかにしました。これらの結果は、細胞とデバイスを組み合わせた系の理解に役立つと考えられます。今後は細胞膜とバイオデバイスの複合化についてさらに研究を行い、細胞膜デバイスの動作原理の理解や新しい機能を持つバイオデバイスの開発を試みます。

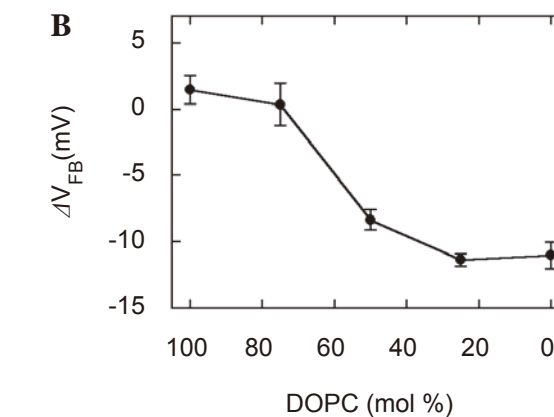
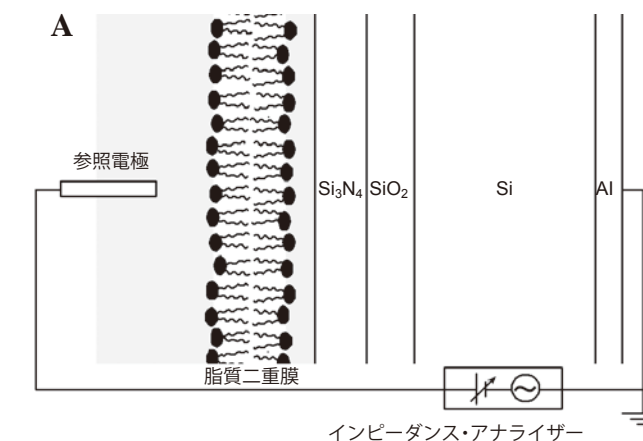
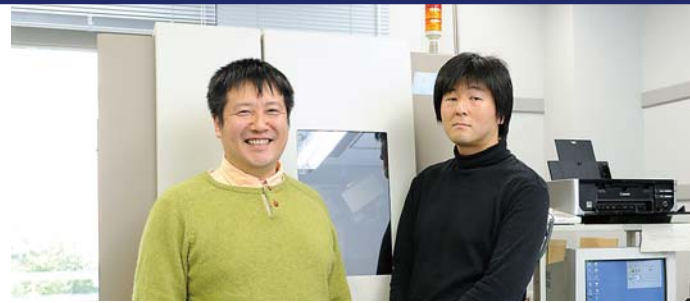


図 (A)電界効果デバイスを用いた脂質膜の検出。半導体(Si)中の電子やホールの分布を電気信号として読み取る。(B)DOPC/DOTAP膜におけるDOPC比とデバイス応答 ΔV_{FB} の関係。DOPC: 1,2-dioleoyl-*sn*-glycero-3-phosphocholine. DOTAP: 1,2-dioleoyl-3-trimethylammonium-propane (chloride salt)

新しい多孔質アパタイト人工骨

生体材料センター 無機生体材料グループ



グループリーダー 菊池 正紀 末次 寧

私たちの骨は、リン酸カルシウム的一种であるアパタイトの微結晶が、タンパク質の一种であるコラーゲン線維に沿うように配列してできています。人工的に合成したアパタイトの多孔質セラミックスは、生体骨中に埋植すると、新生骨が材料と直接結合しながら気孔の中に進入するという特性を持ちます。アパタイトはもともと骨の成分ですから生体に害を及ぼす心配もなく、骨欠損部を補填する人工骨として非常に優れた材料です。

一般的な手法で多孔質セラミックスを製造すると、粒状の形を持つ気孔がランダムに散らばったような構造のものが得られます。しかし、私たちは、新生骨がより進入し易いように、一方向に並んだ管状の気孔を持ったアパタイト多孔体を、氷の結晶成長を利用して作製する技術を開発しました。具体的には、まずアパタイトの微粒子を合成して水中に分散させ、有機高分子を加えてゼリー状に固めます。これを一方から冷やすと、その方向に沿って多数の細い氷柱が成長します。さらに凍結乾燥して氷柱を取り除き、高温で焼結することによって多孔体を作製することができます(図1)。得られた材料内では、一方

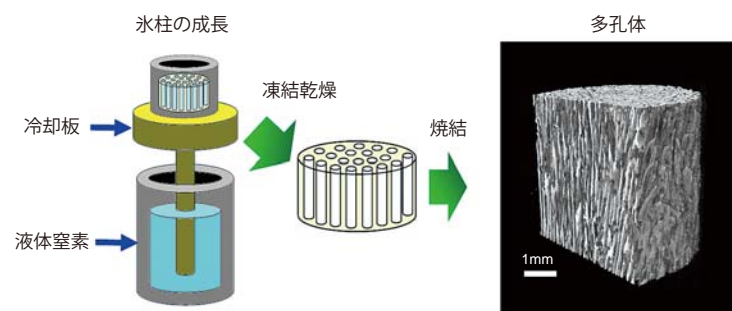


図1 一方向に並んだ気孔を持つアパタイト多孔体の作製

向に並んだ管状の気孔が材料全体をほぼ貫通しています。

この多孔体をウサギの大腿骨の中に埋植し、所定の期間ごとに取出して力学試験を行ったところ、気孔貫通方向の圧縮荷重に対する強度は埋植後の経過時間とともに増加し、12週後には比較用のランダム構造の多孔体よりもあきらかに高い47MPaに達しました(図2)。これは骨の外側の硬い部分の強度の1/2程度に相当します。このような著しい強度の上昇は、気孔内部にできた新生骨のコラーゲン線維とアパタイト結晶が、管状の気孔と平行に配列することにより、その方向の圧縮荷重を効果的に支えることができたためではないかと考えられます。より自然の状態に近い微構造を持った骨の再生を促す人工骨として応用が期待されます。

なおこの材料は、株式会社クラレとの共同研究により開発され、筑波大学整形外科の協力を得て生体内での機能評価を行ったものです。関係各位、特に筑波大学の落合直之教授、坂根正孝講師、岩指仁医師(現:公立昭和病院)、(株)クラレの檜垣達彦氏、堀田裕司氏に心から御礼を申し上げます。

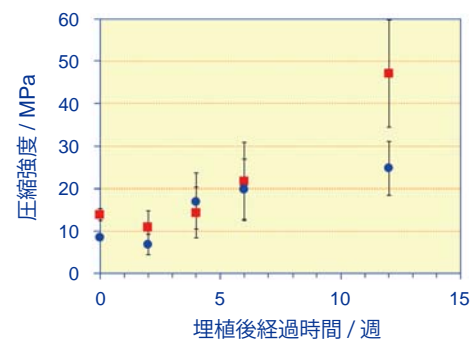
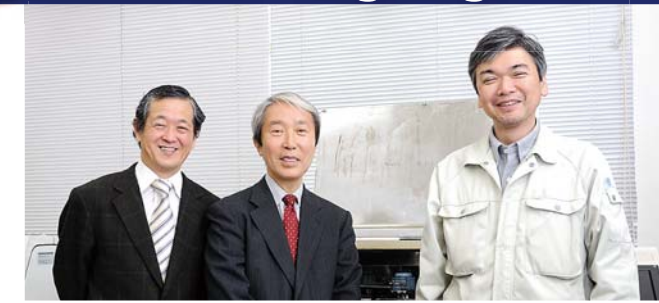


図2 ウサギ大腿骨髄腔に埋植したアパタイト多孔体の圧縮強度変化
 ■: 一方向に並んだ気孔を持つ多孔体 (荷重方向 // 気孔方向)
 ●: ランダム構造の多孔体

ボールミルを利用し手間をかけずに都市鉱石を製造

材料信頼性萌芽ラボ 基盤研究グループ



ラボ長 原田 幸明 片桐 望 井島 清

希少金属(レアメタル)価格の急騰・急落など資源リスクが増大する中で、我が国の「都市鉱山」*を活用すべきだという認識が広まってきています。これに対して、私達は先に、我が国に蓄積されている都市鉱山の量を推定し、金は約6,800トンで世界の現有埋蔵量の約16%、銀は60,000トンで22%に相当するほか、インジウム、タンタルなどの大量の蓄積があることを明らかにし、2008年11月に公表しました。

しかし、これらの値は最大可能リサイクル量を示すものであり、すぐにこの量をリサイクルできるわけではありません。その理由は、使用済み機器の収集ルートがないこともありますが、高効率で安価な処理プロセスがないためです。実際、携帯電話などの機器に含まれるレアメタルは量が少ないため価格は意外に安く、手間をかけて解体や選別などをした場合、その費用(ほとんどが人件費)は賄えません。そこで私達は、回収すべき物質の特性を利用することによってこの問題を解決する方法を提案しました。

* <http://www.nims.go.jp/ecomaterial/hal/MR/UM/index.html>



図1 処理工程の概略
 ボールミルに入る程度に粗破砕した使用済み携帯電話(左)をボールミルで処理(中)。プラスチック、アルミニウム、基板材などは片状物のまま残留(右上)。基板上に実装されているLSIチップや部品などは優先的に剥離・粉碎され「都市鉱石」として濃化される(右下)。

粗く破碎した使用済み携帯電話を適切な条件のボールミルで処理すれば、プラスチック、アルミニウム、基板材など、強度を要求される構造体は破碎されることなく片状物のまま残留します。一方、レアメタルを含むLSIチップや部品などは、もろいため剥離・粉碎され「都市鉱石」として濃化されます。これにより、携帯電話の基板が有している金の含有量を数倍に濃縮することができます。この都市鉱石は天然の鉱石における粉鉱に相当し、風選・磁選・浮遊選鉱などの処理によりさらに濃化できるほか、場合によってはそのまま製錬プロセスに入れることも可能です。また、ボールミルは、中に硬いボールを多数有する円筒状の容器に粗粉砕された携帯電話を入れて回転させるだけの簡単な装置であり、ミルの回転に電力を要する以外は熱や水を必要としません。このため、小型分散型の処理プロセスとして使用済み機器類が多く集まる都市近郊に設置することが容易であり、消費都市から製錬所をつなぐリサイクルのチェーンをつくるすることができます。



図2 実験に使ったボールミル(遊星ボールミル)中に硬質材料製のボール(右)を有する容器に、粗破砕した使用済み携帯電話をいれる。容器は遊星ボールミル装置(左)にセットされ、装置の中心軸の周りで回転(公転)するとともに、容器自体も回転(自転)する。

ナノ材料研究の第一人者になるには 焦点を絞った研究をせよ

影響力の大きい領域に数多くの論文を出し続けているDr. Zhong-Lin Wangは、世界において材料研究分野に多大な影響力をもたらす学者のトップテンに数えられています。国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)のサテライト主任研究者でもある博士は、「第2回MANA国際シンポジウム」に出席するため、2月に来日しました。今回は、NIMSの国際的な研究ネットワークや優れた施設、使いたい時に使用できる豊富な設備、そして異なる研究文化をもつ多様な学問領域の研究者に融合的な研究環境を提供する「スパークリング構想」にとても感心したと話すWang博士へのインタビューです。



Zhong-Lin Wang 教授
ジョージア工科大学 (GIT) 材料科学工学部
Distinguished Professor
GITナノ構造特性技術センター長

博士が得意としているのはどのような研究ですか。

私はGITの材料科学工学部で、あらゆる領域のナノテク研究活動に取り組んでいます。私の研究は、バイオテンプレートによるナノファブリケーションやバイオインスパイアードナノテクノロジーのほか、真鍮ワイヤメッシュ上に成長させた擬似配列のGa₂O₃ナノワイヤペーパー、およびこれらの電気的特性と電界放出特性などによって具現化される生命工学や電子工学の領域に始まり、改良太陽電池形態の光電池システムやin-vivo(生体内)での癌細胞検知など、エネルギーや医学的用途まで多様な領域に及びます。現在GITで指揮しているナノテクノロジー研究は、特にナノ発電機とナノ圧電工学を対象としています。圧電効果について言えば、機能的酸化ナノベルトのように、材料や特性、ナノデバイスなどの観点から、極めて新しいデバイスの製作に取り組んでいます。最近、我々の研究グループがマウス駆動システムをもとに実施した圧電効果実験が、マサチューセッツ工科大学(MIT)の出版している『Technology Review』誌に取り上げられました。この実験では、生体力学的エネルギーを電力に変換しています。(詳細はホームページをご覧ください。)

<http://www.nanoscience.gatech.edu/zwang/index.html>

今回の訪日はいかがでしたか。

MANA国際シンポジウムでは、ナノ材料、ナノシステム、ナノグリーン、ナノバイオの4つの領域について、世界中から招いた講演者のほか、MANAや若手国際研究センターの研究者達が発表をしました。このシンポジウムの目的は、MANAプロジェクトにおける研究の推進だけでなく、これらの領域のエキスパートが一堂に会する機会を設けることでした。今回私がMANAの有賀克彦博士とともに議長を務めた、初日最初のセッションの招聘講演者は、ドイツ、ザールラント大学のGerhard Wenz教授でしたから、このセッションだけでもアジア、アメリカ、ヨーロッパの科学界を代表する出席者が集まっており、まさに先に述べた国際的な研究ネットワークが最大限に発揮されていたと思います。

今日のナノ材料研究についてどのように思われますか。

私が取り組む活動領域で、関与しているナノ材料研究は広範囲な分野に及びます。しかし、特定の分野において世界の主導的立場を得るには、多様な範囲に手を伸ばし過ぎたり、ありきたりの役割に屈してしまう誘惑に勝ち、焦点を絞った研究をしなければなりません。私は、私の根本原理を他の研究者に役立ててもらうだけでなく、私が行った研究がエネルギーを削減し、健康を増進させるようなイノベーションへの道を開いて、すべての人の日々の生活に素晴らしい変化をもたらすよう願っています。

大学での博士の役割はどのようなものですか。

工科大学の教授として今話したようなイノベーションを実現するためには、チームワークと、学生を成長させる使命感が重要であると考えています。そのための最善の方法は、私が研究に感じているような喜びを、学生や同僚が感じられるようにすることだと思います。これは、私が好きな「If you want to do something well, you must love it」—好きこそものの上手なれ—という言葉に一致します。学生には、「私の研究室のドアはいつも開いている。私は君たちの先生として、友人として、いつでも助言するよ」と言っています。「学生の成功が私の成功」であり、「ともに研究に取り組むことで皆が向上できる」というのが、学生に対する私のスタンスなのです。

多忙なスケジュールはどのようにやりくりされていますか。

私にはほかにもいくつか好きな言葉があります。例えば「10分あったら10分でできることをやれ」、「物事は一度で済ませ」(実行に移すのはかなり難しいですが)などで、これらがスケジュールをやりくりする上で大いに役立っています。そして、その中で私が最も好きな言葉は、「persistent, consistent」—^うた^たい^まず、^たゆ^まず—です。これこそ、人生において十分な実りを得たいと考えている人への最高のアドバイスではないでしょうか。

NIMS NEWS

NIMS、材料科学分野の論文被引用数で国内トップに

2009年5月1日付更新のトムソンサイエンティフィック社のEssential Science Indicators(ESI)の材料科学分野における2005年1月から2009年2月までの論文被引用数でNIMSは10,000の大台を超え、東北大学を抜いて世界第3位になりました。

2008年にNIMSの研究者がESIに収録される学術雑誌に発表した論文(SCI論文)の数は1163で前年の1125からの微増にとどまりましたが、「論文誌が与えるインパクト」の目安となるインパクトファクターの平均値は2.35から2.45へと伸びており、量から質への転換を図るNIMSの方針を反映した結果となっています。

材料科学分野における論文被引用数
(2005年1月~2009年2月)

順位	機関名	国名	引用数
1	中国科学院	中国	32,241
2	マックスプランク研究所	ドイツ	14,607
3	NIMS	日本	10,003
4	東北大学	日本	9,845
5	シンガポール大学	シンガポール	9,460
6	清華大学	中国	8,840
7	マサチューセッツ工科大学	アメリカ	8,271
8	産業技術総合研究所	日本	7,465
9	フランス国立科学研究センター	フランス	7,049
10	スペイン科学研究機構	スペイン	6,884

WPIプログラムにおいてMANAが高い評価

NIMSが世界トップレベル研究拠点(WPI)として運営している国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)は、その2008年度の活動に対し、東京大学の拠点とともにプログラム委員会から高い評価を受けました。外国籍研究者が5割を超えていること(表参照)、英語を使用言語とした事務面でのサポートが充実していることなど、WPIにふさわしい運営をしていることが評価されたものです。MANAはこれにより、2009年度の補助金について1億2,500万円が加算され、合計14億7,500万円が交付されることになりました。

このプログラムは、世界から第一線の研究者が集まる、優れた研究環境と高い研究水準を誇る「目に見える拠点」の形成を目指して、文部科学省が10年間にわたって支援をする事業で、NIMSは、東京大学、京都大学、東北大学、大阪大学とともに、2007年に5拠点の一つとして選定されています。

MANAのメンバー構成
(2009年4月現在)

ポジション	人数	外国籍
主任研究者	29	9
一般研究者	57	12
ポスドク	73	59
学生	27	17
研究者合計	186	97

(外国籍研究者比率:52%)

スタッフ	32	4
合計	218	101

国際連携大学院協定—チェコ共和国のパルドゥビツェ大学と調印

平成21年4月20日、NIMSとチェコ共和国のパルドゥビツェ大学は国際連携大学院協定に調印しました。両機関はこれまでもセンサ材料などの共同研究、インターンシッププログラムでの学生の受け入れなどで交流してきました。今後は博士課程大学院生を定期的にNIMSに受け入れ、この秋にも2名の学生がNIMSに送られる予定です。

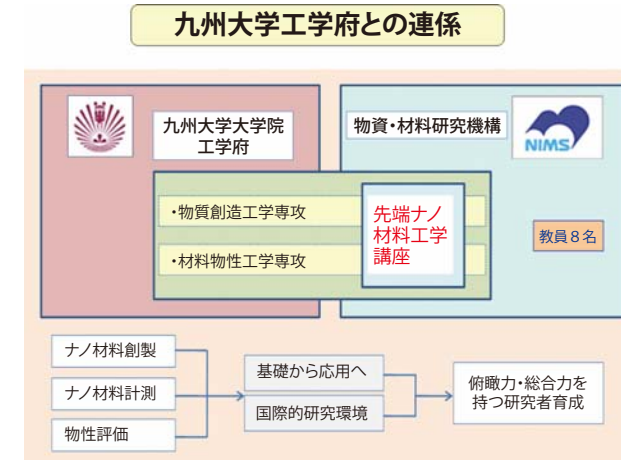
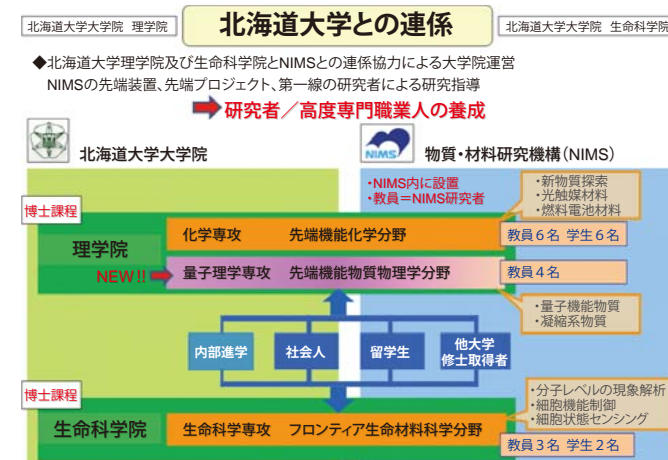


調印式: University of PardubiceのMalek学長(右)とNIMS野田理事

国立大学法人との新たな連携で若手研究者育成を強化

平成21年5月1日、NIMSは北海道大学大学院理学院 量子理学専攻に「先端機能物質物理学分野」を、九州大学大学院工学部 物質創造工学専攻及び材料物性工学専攻に「先端ナノ材料工学講座」を新設する協定書に調印しました。

NIMSの研究者が教員となり、NIMSの優れた研究環境を活用して研究指導を行うことにより、博士後期課程の教育・研究の強化と国際社会で活躍できる若手人材の育成を目的としています。



覚書(MOU)を調印

● 米国GE：将来的な技術連携に向けて

平成21年5月27日、NIMSとGEは将来の技術協業に向けたMOUを調印しました。これはGEが日本の独立行政法人と締結する初めてのMOUです。

これに伴い、両者は、よりクリーンで持続可能なエネルギー・ポートフォリオ、および環境関連技術の向上に貢献する材料科学エンジニアリング分野において、将来的なプロジェクトを見出すことを期待しています。GEの研究開発を担うGEグローバル・リサーチとNIMSにおいて、今後5年間、将来の技術協業に向けた意見交換や人的交流、技術セミナーの共同開催などを積極的に行い、相互補完的なパートナーシップの構築に注力いたします。



GE赤坂オフィスにて：GEグローバル・リサーチのマーク・リトル所長(左)とNIMS岸理事長

● 韓国部品素材振興院：研究協力、人材交流の推進

平成21年4月19日、NIMSと韓国知識経済部の韓国部品素材振興院(KMAC)は研究協力、人材交流に関するプログラム推進のためのMOUを調印しました。このプログラムの目的は、韓国が資金を負担し、韓国から研究者を受け入れて共同研究を行うとともに、人的交流を活性化することです。今後、プログラムをより具体化し、今年度からスタートする予定です。



調印式：KMACのJoon-suk Jung院長(左)とNIMS馬越理事

● NZ ビクトリア大学：機能的なナノ光学材料の研究開発

平成21年4月24日、量子ビームセンターとニュージーランド ビクトリア大学ウェリントン校は「機能的なナノ光学材料の研究開発」に関するMOUを調印しました。NIMSがNZの研究機関とMOUを締結するのはこれが初めてです。

ナノ光学材料の研究に関して、ビクトリア大学は化学的成長法による様々な形状の金属ナノ粒子材料の作製、NIMSは非線形光学特性の実験的評価でリードしており、双方独自の強みを生かした機能的なナノ光学材料の分野融合型研究開発を連携して行います。



ビクトリア大学Richard Tilley准教授(左)と量子ビームセンター武田首席研究員

● 英国リバプール大学：準結晶および複雑構造合金の表面とナノ科学研究

平成21年5月26日、光触媒材料センターと英国のリバプール大学物理学部は「準結晶および複雑構造合金の表面とナノ科学研究」に関するMOUを調印しました。両組織は、それぞれ日本と欧州における複雑構造合金の表面研究の研究拠点として、情報交換や論文執筆を通じて交流を深めてきましたが、このたび、準結晶に関するアジア国際ワークショップの開催を契機にMOU調印に至りました。合金のトライボロジーや触媒特性が注目される中、本共同研究の果たす役割は大きいと期待されます。現在すでにリバプール大よりインターンシップ生が1名NIMSに赴任して研究を進めています。



左から 光触媒材料センター下田首席研究員、リバプール大学Hem Raj Sharma、葉金花センター長、インターンシップ生 Peter Nugent、外来研究員 崔燦



NIMS WEEK 2009 開催のお知らせ

次世代医療を開拓するナノバイオ材料

開催日：平成21年7月21日(火)～24日(金)

開催場所：つくば国際会議場

参加費：無料

参加登録締切：平成21年7月7日(火)

詳細：<http://www.nims.go.jp/nimsweek/09/>