

学術講演

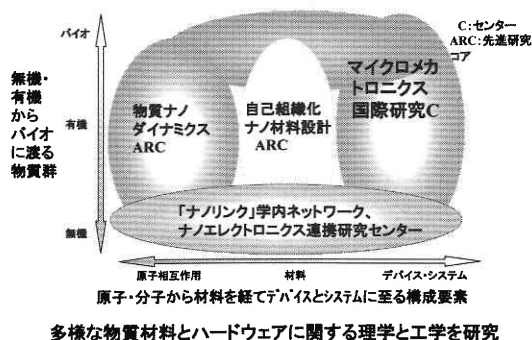
# 「マイクロ・ナノ理工学」

宮山 勝 (東京大学生産技術研究所 教授)

「マイクロ・ナノ理工学リサーチインテグレーション」の構成とコンセプト, 研究概要, それから将来の社会にこのインテグレーションはどのように貢献できていくであろうかということについて話をさせていただきます。

まず構成ですが, 4つの研究グループからできています。物質ナノダイナミクス先進研究コア, 自己組織化ナノ材料設計先進研究コア, マイクロメカトロニクス国際研究センター, 「ナノリンク」学内ネットワーク, ナノエレクトロニクス連携研究センターというグループから成っております。この図は, 縦軸を扱う物質, つまりバイオ, 有機, 無機に渡る物質で分けています。横軸を構成要素, 原子・分子から材料を経てデバイス, システムに至る要素で分けていますが, 横軸は扱うものの大きさと考えていただければいいと思います。このように非常に広い領域を対象としています。

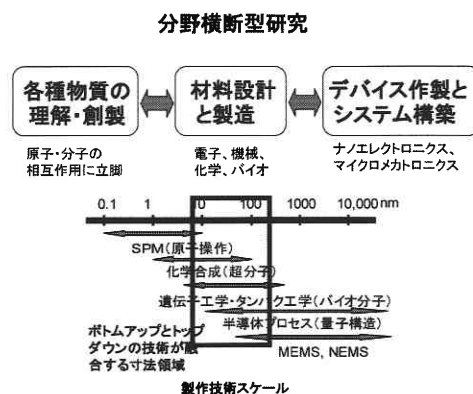
## マイクロ・ナノ理工学リサーチインテグレーション



ここに書いてある「多様な物質材料とハードウェアに関する理学と工学研究」, これだけですと広いということはおわかりでも具体的に何やるかわかりにくいと思いますが, 科学技術基本計画で示されている重点項目の中では, ナノテクノロジー・材料に対応しています。しかしながらこのインテグレーションではもうすこし広い範囲を対象としています。

その特徴ですが, 非常に広い領域をカバーしているということで, まず分野横断型研究であるといえます。各種物質そのものの理解・創製から始まりまして材料設計と創造, そしてそのデバイス化とシステムをつくるというよう

な広い範囲です。この横軸は製作技術スケールを例にもってきていますが, 1ナノメートル以下の領域から数百ミクロンぐらいまで, それぞれのサイズに応じたものづくりのやり方にはだいたい決まったものがあります。

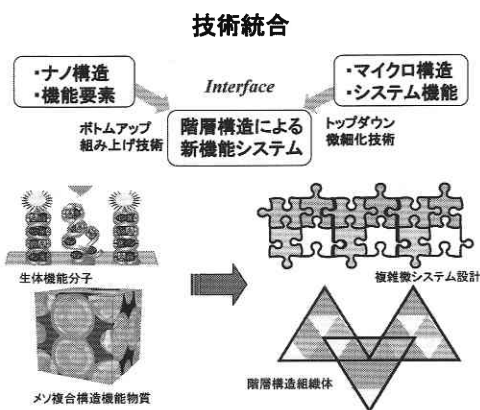


非常に小さい領域でもものをつくるという場合には, 原子を組み上げる, 分子を反応させるといったような組み上げ技術で, これはボトムアップ技術です。それからミリ, ミクロン程度, このへんの領域ですと大きなものからそれを微細加工してつくるといいうわゆるトップダウン方式です。この中間領域というのは意外と難しい領域です。ここでは生産技術のスケールで例を出しましたが, このような広い範囲を融合させる, つまり中間領域の難しい領域での技術を新しく開発するということになります。

技術の統合がもう1つのキーワードになります。つまりナノスケールの構造を持つ機能要素, それと大きな構造をもち, システムとしての機能をもつもの, それらを統合しようというわけです。これだけ違うものを統合しようとするときには, ただ大きいものの上に小さいものを載せるといったような複合化では意味がありません。

どのような考え方かといいますと, 「階層構造による新機能システム」の形成といえます。

つまり, 非常に小さな生体機能分子やナノメートルサイズの複合体を組み合わせてある構造物にする。この構成物をさらに組み合わせてもう一段階大きなサイズの構造物にする, といった階層化を経て最終的に大きな構造のものとなります。それらは見かけは大きなものでも, その構成要素

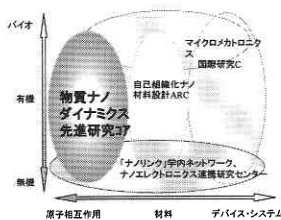


はサイズの小さい別の構成体からなっており、その構成体はよりサイズの小さいものから構成されている。このような構造で大きなシステムとナノの部分の機能を両方出す、あるいは融合化するということを考えています。

4つのグループがあると申しましたが、そのうちのそれぞれをごく簡単に紹介させていただきます。まず、物質ナノダイナミクス先進研究コアですが、これはサイズからいうと一番小さい構成要素に相当します。

ナノテクノロジーを突き詰めていきますと、最後は1つの原子、分子の挙動を扱う、見るといったところに行き着きます。ここではそういった原子・分子レベルの物質の挙動を探り、その次のマクロな機能、材料物性につながるといった研究を行っています。

物質ナノダイナミクス先進研究コア

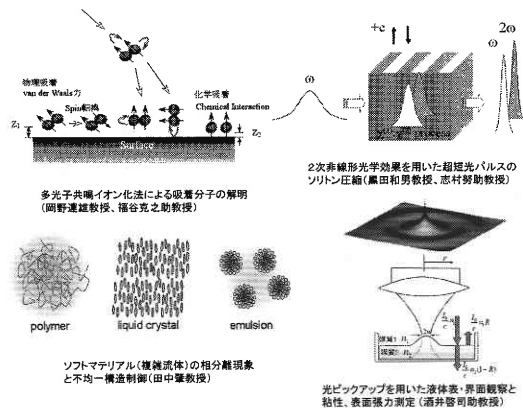


分子、原子、電子レベルの物質の挙動を探り、マクロな機能と材料物性に繋ぐ

- 固体表面・核スピニ
- 共振ナノリアクター
- 有機機能光材料
- 結晶転位挙動
- 石鹸系ソフトマター
- 複雑流体のナノインターフェース
- マルチスケール固体強度モデル
- マスコップ系の電子
- 高分子系の乱流

高木 昭志 岡野 達雄 黒田 和男  
田中 肇 志村 努 吉川 輝宏  
半場 龍弘 酒井 啓明 稲谷 克之  
枝川 圭一 波田 野重道

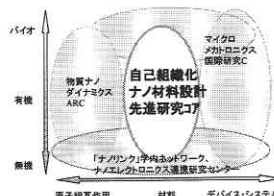
色々な研究がありますが、いくつかの例を示します。例えば表面に吸着する分子が、どのように付いて、それがどのような働きをして表面物性を決めてゆかか、という研究。それから、ソフトマテリアルの研究。ポリマー、液晶、エマルジョンなど不均一な複合構造をもつものが全体として見ると均質になっているという構造を、どのように制御できるかといった研究です。また非線形光学効果をもつ物質に短波光が入ったときに、それがどのように変調されるかという研究、液体の表面や界面に光を当てて、表面が変形することを利用して液体の物性を調べるといったような研



究が行われています。

自己組織化ナノ材料設計先進研究コアでは、物質ナノダイナミクスよりもサイズとしてはやや大きい、いわゆる材料にあたる部分を対象としています。物質としては非常に広い領域をカバーしています。ここでは「自己組織化」をキーワードとして新しいナノ構造・複合構造をつくり、それによって融合機能・インテリジェント機能などを設計、実現させていくという研究を行っています。例えば生体組織、これは細胞から始まって、ある器官となり骨と一緒に個体をつくる、これは階層構造の究極的なものですが、その自己構築がどのようになされるかを調べています。また、有機金属クラスターで構造を設計する、無機材料のメソ構造で多孔体を創る、非晶質材料の機能を設計するという研究を行っています。半導体においても、量子ドットを自己組織化法で形成し、量子効果を用いて新しい電子機能、光機能を生み出そうという研究も進めています。

自己組織化ナノ材料設計先進研究コア



自己組織化を活用した、新規ナノ構造・複合構造の形成と材料創製、融合機能・インテリジェント機能の設計概念構築・実現と応用

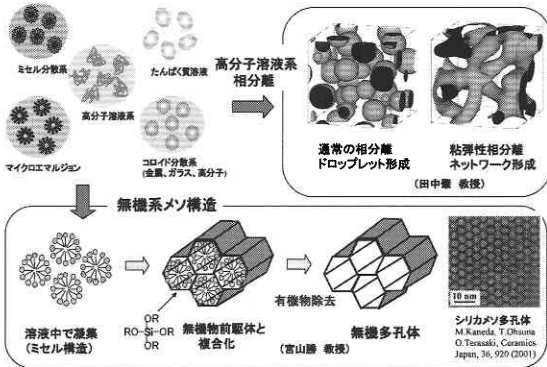


ここで、先ほど出ました「自己組織化」について説明させていただきます。

2種類の違う性質のものを一緒にしたときに、どのような組織になるかということ、わかりやすい例で説明します。水と油を一緒にすると、かき混ぜてもすぐに分離します。しかし、そこに界面活性剤(石鹸)を入れて混ぜると、一見入り混じったような状態になります。このように条件

が違くと自ら異なる組織構造になることを利用するのが自己組織化です。例えば高分子系では、ある高分子が相分離をして2種類の性質の違うものの集合体になるときに通常ですとマトリクスの中に液滴が形成されている構造になるのですが、粘性が大きいものと、それぞれの層が繋がって絡みあったネットワークを形成します。どのような構造になるかというのを理論化し、シミュレーションするという研究が行われています。

自己組織化による複合構造の形成・制御



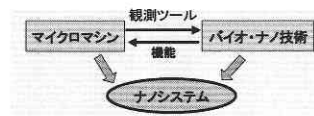
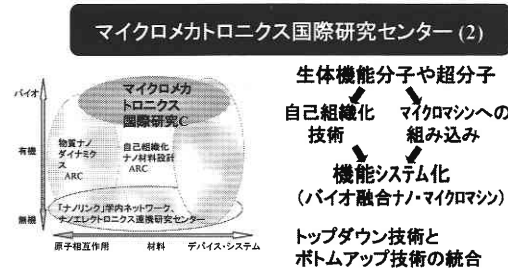
それから、無機材料においても、水の中に界面活性剤を入れるとエマルジョン化します。これは水に親和性のある部分と油に親和性のある部分を持った物質ですので、自らこのような塊をつくります。ここに無機材料の全体体を入れると、ミセルの周りに壁をつくり、このあとで熱処理などにより有機物を取り除くと、このような規則的な孔があいた多孔体になります。この孔はおよそ数ナノメートル程度で、材料としては酸化シリコンが基本です。このような規則的な孔をもつ多孔体には、いろいろな応用があります。例えばこの孔の中に孔と同じ大きさの酵素を入れて特定の反応を起こさせる、また、この孔の中で反応を行わせてポリマーや金属のナノワイヤーを創りだすという研究が世界中で行われています。このような自己組織化をキーワードとして材料を創るというグループです。

マイクロメカトロニクス国際研究センターを紹介し、まず図の右側の領域では、主にママシン技術を用いた

マイクロ電気機械システム、MEMSとの開発を行っています。

半導体のマシーニング、つまり微細加工により圧電体と組み合わせてマイクロアクチュエータをつくるといった研究や、小さなチップが規則的に並んだナノカンチレバーをつくるという研究をしています。またアクチュエータを弁に用いて微小流体システムとするような例もあります。

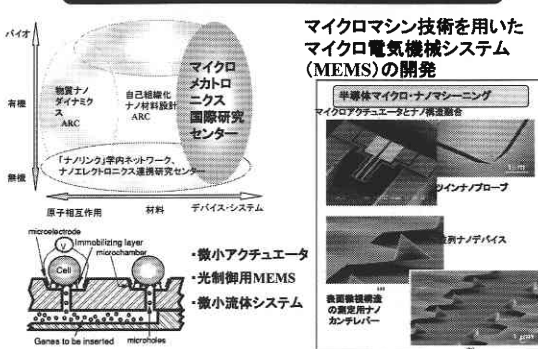
同じマイクロメカトロニクス国際研究センターでも、物質系としてバイオ、生体機能分子を用いた領域を対象とした研究もあります。ここでは、生体機能分子や超分子をマイクロマシンに組み込んでバイオ融合ナノ・マイクロマシンをつくることを主に行っています。ここでは、バイオ、生体分子レベルの非常に小さいもの、ミリ・マイクロメータスケールのデバイスを融合させようとするわけですから、そこにはいままでにない技術が必要となります。



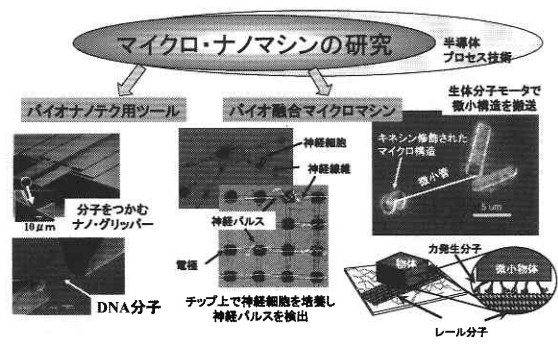
この分野の研究をご紹介します。例えばこの一番左側の図は、先ほどのナノアクチュエータのプローブを使って作られた、DNA分子を1つだけつかむことができるようなグリッパーです。狙っているDNAを1つつまんでもってきて、それを解析するというようなことができます。

中央は、チップ上に神経細胞を培養したものです。それぞれの部分の神経細胞を神経繊維で結び、電極が設けてあります。ある刺激があったときに、どのような応答がどのようなパターンで出されるかを見るわけです。こういうも

マイクロメカトロニクス国際研究センター(1)



マイクロ・ナノマシンとナノバイオ応用

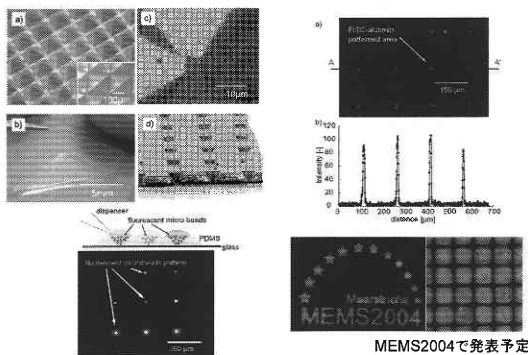


のですと、単に物理的に絶対値だけを測るセンサではなくて、もう少し人の感覚に近いものもできるかもしれません。

それから、生体分子の中には動くもの、つまり回転をしたり様々な運動をするものがあります。それらを使うと、小さなものを運ぶ分子モーターができます。前図はそのような分子をレールに設置して、その動きによって、その上の小さい物体を動かすナノ機械です。物体といたしまして、ある特定の化学分子などを選択的に運べるのが重要な機能だと思います。

この図もその1例です。半導体チップの上にタンパク質をパターンニングして形成し、どういうタンパク質がどのような性質を持っているかを調べたり、望みのタンパク質を形成しようというような研究が行われています。

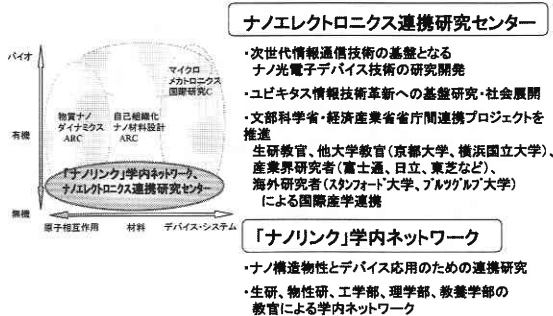
**タンパク質のパターンニング**  
竹内昌治助教授



物質としては半導体を中心として、非常にスケールの小さいところからシステムまで広くカバーしているグループには、「ナノエレクトロニクス連携研究センター」と「ナノリンク」学内ネットワークがあります。ナノエレクトロニクス連携研究センターは、次世代の情報通信技術の基盤となるナノ光電子デバイス技術を研究開発しています。いつでもどこでもアクセスできるというユビキタス情報技術、それに向けての基盤研究、社会展開を行っています。

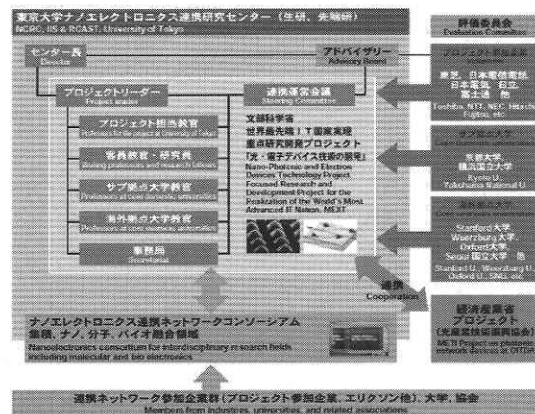
このセンターでは、文部科学省と経済産業省の省庁間プ

**ナノエレクトロニクス連携研究センター  
「ナノリンク」学内ネットワーク**



プロジェクトを推進しています。構成しているメンバーも多種多様で、生研、学内、他大学の教官や、産業界の研究者、海外研究機関の研究者による国際産学連携を進めています。「ナノリンク」学内ネットワークは、学内とありますように、生研、物性研、工学部などの東大内の教官のネットワークです。やはりナノ構造物性、デバイス応用などの研究が行われています。

この図はナノエレクトロニクス連携研究センターの、ホームページに出されているものです。様々な研究が行われていますので、ぜひご覧になっていただきたいと思

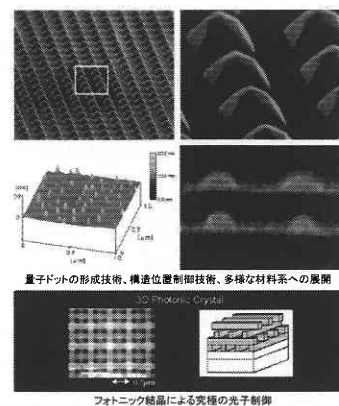


簡単に行われている研究を紹介します。この図は、半導体で量子ドットを形成したもので、これによる量子効果を用いてレーザー発信や、特有の電子機能をもたらすような素子をつくっています。

**ナノエレクトロニクス  
連携研究センター**

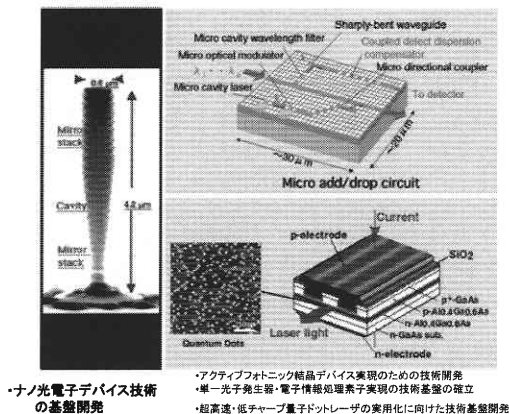
**研究課題**

- 量子ドット形成技術
  - 光子制御ナノ構造形成技術
  - 光・電子制御技術
  - ナノ光電子デバイス技術
- の基盤開発



フォトニック結晶とよばれる、屈折率の違う結晶で構成された構造物をつくりデバイス化する研究も行われています。それによって光制御を行うデバイスや、量子ドットとフォトニクス結晶を組み合わせる光情報処理を行うデバイスの実現を試みています。

これまで4つのグループの概略を紹介致しましたが、それぞれの産学連携・国際連携の状況を述べます。最初の2つの先進研究コアはまだ個別研究からグループ化しようとしているような段階のもので、基本的には民間企業



・ナノ光電子デバイス技術の基盤開発

・アクティブフォトニック結晶デバイス実現のための技術開発  
 ・単一光子発生・電子情報処理素子実現の技術基盤の確立  
 ・超高速・低チャープ量子ドットレーザの実用化に向けた技術基盤開発

との研究もほとんどが個別に行われています。この図では、そのような共同研究の題目の例を挙げています。

これらはほんの一例で、他にも多くの研究が行われています。マイクロメカトロニクス国際研究センターでは、フランスの国立科学研究センターでは、フランスの国立科学研究センター（CNRS）との共同研究ラボ、LIMMSを原点として連携研究を行っています。フランスのセンターとの共同研究を主体としていますが、他の国の研究機関や国内の大学や企業とも連携して、大規模に共同研究を進めています。フランスのブランチに生研の教官が行く、フランスから教官を生研に呼んで実際に共同研究することも実際に行われています。

ナノエレクトロニクス連携研究センターでは、先ほど申しましたように省庁間の連携プロジェクトを実際に推進しておりますので、大学、企業、海外の研究機関の研究者など広い範囲で連携研究をしております。

**産学・国際連携**

- **物質ナノダイナミクス先進研究コア:**  
 共同研究例: ・絶縁膜/Si基板における水素挙動の研究、  
 ・コロイド分散系における数値シミュレーション法の応用、  
 ・動的光散乱法を用いた薄膜厚の計測技術の開発 ……
- **自己組織化ナノ材料設計先進研究コア:**  
 共同研究例: ・プロトン伝導性固体電解質を用いた中温作動燃料電池の開発、  
 ・THz光検出用電気光学結晶の特性評価、  
 ・電気化学スーパーキャパシター、  
 ・フッ化物ガラス中の希土類イオンの光学特性シミュレーション ……
- **マイクロメカトロニクス国際研究センター:**  
 ・フランス国立科学研究センター(CNRS)との共同研究ラボLIMMSを原点  
 (Laboratory for Integrated Micromechanics Systems)  
 ・国内大学、民間企業、欧米アジア研究機関との研究ネットワーク
- **ナノエレクトロニクス連携研究センター:**  
 ・文部科学省・経済産業省省庁間連携プロジェクトを推進  
 ・国内大学、民間企業、欧米アジア研究機関による連携研究

社会貢献については、いろいろなものが将来の社会の発展の基盤となると思いますが、ここではすこし応用に近いものを紹介します。先ほど申しましたバイオテクノロジーを融合したナノ機械では、生体分子モータを利用したナノ駆動システムで超微量の生体物質の操作や化学反応を制御するといったようなことができますと、現在問題になっている有害な化学物質を選択的に分析・評価ができるようになります。極端に言うと、1つの分子での反応をみること

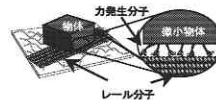
ができるようになるかと思えます。

それから、チップの上にさまざまな生体分子を設けてつくった素子では、診断用・医療用に非常に有効なものができると思えます。DNA診断やタンパク質の合成・検出、酵素活性検出などさまざまな用途が考えられます。

**将来の社会貢献 1**

**融合ナノ・バイオテクノロジーによるナノ機械の創製**  
 ★ **生体機能分子とナノ・マイクロマシンの集積化**

- (1) **生体分子モーターを利用したナノ駆動システム**  
 ・分子を運ぶナノアクチュエーター  
 ・超微量の生体物質の操作や化学反応の制御



- (2) **診断・医療用チップ**

- ・1分子DNA診断
- ・タンパク質合成と活性検出を集積したチップ
- ・1分子酵素活性検出チップ



人脳質膜チップ(竹内助教授)

ナノエレクトロニクス関係では、現在非常に集積化が進んでおり、従来技術では究極に近いところまで到達している状態ですので、新しい動作原理で新しい機能を生じさせ、また従来では無理だった領域で集積化を進めていくことが期待されます。量子計算、量子通信、バイオ・分子エレクトロニクスなどによって新しい展開が開けると思えますし、新しい材料とナノテクノロジーの融合による新規デバイス、例えば窒化物や有機分子を用いた光・電子デバイスによって非常に高周波領域での信号処理、超高密度、それからデバイス自身の透明化が可能になると思われます。また、日常での使用に便利なフレキシブルのデバイスといったものも期待されます。

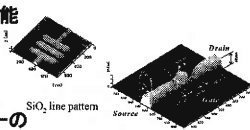
新しい研究のアイデアも提案されています。これまでに、ある目的のための回路システムや、そのための構造についての研究が多くなされていますが、その成果を蓄積しておいて、あるシステム回路をつくりたいときに、それまで蓄積したものから設計やシミュレーションができるようなシステム、つまりシステムづくりのシステム開発ということも考えられています。

**将来の社会貢献 2**

**ユビキタス情報社会に向けた未来ナノエレクトロニクス**  
 ★ **新しい動作原理・量子計算・量子通信**  
 ・バイオ・分子エレクトロニクス

- (1) **ナノ構造を用いた新規機能**

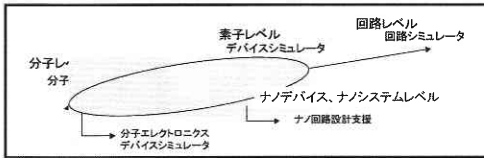
- ・量子ドットやスピン情報を用いた情報処理デバイス



- (2) **新材料とナノテクノロジーの融合による新規デバイス**

- ・窒化物や有機分子を用いた光・電子デバイス (高周波、超高密度、透明、フレキシブル…)

### (3) ナノ・マイクロシステムデザイン デバイス研究成果有効利用のためのシステム構築



### (4) アダプティブ(チューナブル)エレクトロニクス



状況や環境により自分自身で働きを変える適応型機能デバイス

バイオと無機デバイスとの融合  
生物の適応機能の活用

また、アダプティブ(チューナブル)エレクトロニクス、つまり状況や環境により自分自身で働きをかえる適応型機能デバイスも考えられています。

最後にまとめます。このマイクロ・ナノ理工学リサーチインテグレーションでは、対象としている領域が非常に広いので、一番の特徴としては分野横断型構成である点です。それから技術の統合。非常に広い範囲で、極微要素のボトムアップ組み上げ技術と、トップダウン微細化技術を統合するといったような技術統合がキーワードになります。これによってナノ～マクロ構造の階層統合化を行い、バイオ～光エレクトロニクス機能を融合した機能集積化システム

## まとめ

### マイクロ・ナノ理工学リサーチインテグレーション

- **分野横断型構成:**  
各種物質・バイオ分子の機能の理解から、デバイス・システム製作まで、マイクロ・ナノ技術を包括的にカバー
- **技術統合:**  
極微要素のボトムアップ組み上げ技術と、トップダウン微細化技術を統合
- **機能集積化システム:**  
ナノ～マクロ構造の階層統合化によるバイオ～光エレクトロニクス機能の融合したシステムの設計・実現
- **産学・国際連携による未来研究ネットワーク**  
★ 広範囲な苗床を提供し、そこから分野横断型研究が芽生え成長していくことを支援する。

の設計・実現をめざしたインテグレーションといえます。また、さまざまな形での産学・国際連携を進めた未来研究ネットワークを念頭においたインテグレーションともいえます。

これは一番下を書いてあるのですが、このインテグレーションは、広範囲な苗床を提供して、そこから分野横断型研究が芽生えて成長していくことを支援するようなものといえます。このような形で、量子ドットやマイクロメカトロニクスなど、生研の中で見出されて発展していった研究が既にいくつか存在しています。

以上です。