

科学技術未来戦略ワークショップ 「階層的自己組織化のバイオナノテク」 — 出口から見た新機能創製への諸課題 — 報告書

平成19年6月22日(金)－23日(土)開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

●ボトムアップのナノテクノロジー技術、つまり原子・分子から出発して材料やデバイスを逐次積み上げていくことを想定した場合、「自己組織化」はスループット（全プロセス時間）の視点からは欠かすことのできない概念である。一方、生体は分子→蛋白質→細胞→組織→個体へと自律的かつ階層的に構造形成が進む点で、「階層的自己組織化」の典型である。このプロセスの理解と応用がナノテクノロジーにおけるボトムアップアプローチの究極の目的である。

●2000年以降、世界各国でナノテクノロジー国家プロジェクトが立ち上がり、また同時にバイオナノテクノロジーへの投資も急増する中で、必然的にナノとバイオの融合研究がかなり進み、自己組織化についても多様な成果が公表されている。生体内における階層的自己組織化の学術的な理解ばかりでなく、新しい材料として、デンドリマー、有機ナノチューブなど新しいナノ空間をデザインした超分子材料、CNT（カーボンナノチューブ）ゲル、スライドラリングゲル、フォトニックゲルなどの機能性ゲル、またバイオとナノの融合としてもフェリチン（蛋白質）を使った半導体微細加工プロセスへの自己組織化の応用がJSTのCRESTを中心として発表され、海外ではDNA折り紙や次世代半導体集積回路用の低誘電率材料の作製が話題になった。しかしながらナノテクノロジーとしてその成果を総体的に見ると、応用への展開は未熟と言わざるを得ない。個々の要素技術に進展はみられるものの、技術のマスとしては社会への出口までまだ大きな距離が残されている。

●技術の成熟にはまだ時間がかかる。しかしイノベーション創出への期待に応えるためには、今後は、技術課題を根元的な基礎的課題とより出口を意識した研究開発課題とに峻別し、メリハリの効いた研究投資が実施されるべきである。自己集合の階層的発展の理論、非平衡開放系における時間・空間上の散逸構造の解明、平衡論と速度論の使い分け、ゆらぎの効果などサイエンスを巻きこんだ基本課題についても、出口からの位置付けが必須である。

●将来のロボットや分子機械、刺激応答のDDS（薬物送達システム）への利用など広い応用分野が開けているが、牽引力のある出口としては、エネルギー・資源・環境分野への応用が期待される。例えば、「エネルギーや物質の発生・搬送・貯蔵・放出を高度に制御し得るナノ空間技術・プロセスを階層的自己組織化により実現し、具体的応用を志向する概念実証プログラム」である。開発目標を明確にし、克服すべき共通の技術課題と優先度を決めることが重要である。またこのプログラムは、製造技術における人、土地、エネルギーの利用を最小限にする「ミニマルマニファクチャリング」の考え方と軌を一にするものである。

●そのためのプロジェクト実施体制として研究開発リーダーのみならず、出口ニーズに詳しい企業経験者の実質的な参加が肝要である。さらに概念実証に成功した技術をどう社会ニーズに結びつけるか、あるいは社会ニーズを充足する新概念・新材料をどう政策的に誘導するかなど、具体的な仕組み作りが喫緊に必要である。

●自己組織化（自己集合、散逸構造）の究極の姿はプログラム化されたシナリオに沿って、最終構造が自律的に形成されるところにあり、その意味では「材料設計」の典型の1つであり、当研究開発戦略センターのナノテク戦略構成分野における「新材料設計・探索」の考え方に沿って攻略されるべき課題と考えられる。

目 次

Executive Summary

[1] はじめに	1
[2] ワークショップ「階層的自己組織化のバイオナノテク」	2
2.1 挨拶／横山浩（AIST）	2
趣旨説明／田中一宜（JST-CRDS）	3
[3] セッション1 高次自己組織化、そのダイナミクスと制御／	
主査 横山浩（AIST）	5
3.1 時間発展する分子システム：非線形ナノ・ダイナミクス／吉川研一（京大）	5
3.2 タンパク質から学ぶ細胞内構造の構築原理／遠藤斗志也（名大）	6
3.3 機能材料設計、トポロジカルゲルの物理解析と機能設計／伊藤耕三（東大）	8
3.4 生体運動システムにみる階層的自己組織化／石渡信一（早大）	10
3.5 現状までの技術、将来への課題／山口智彦（NEDO）	13
3.6 階層的自己組織化に向けて／横山浩（AIST）	15
3.7 セッション1 討論	16
[4] セッション2 新機能創製／	
主査 相田卓三（東大）	20
4.1 抗体分子の組織化と機能化／原田明（阪大）	20
4.2 分子ナノチューブによる新機能創製と応用へむけた階層的技術融合の課題／	
浅川真澄（AIST）	21
4.3 バイオデバイス応用へむけた機能性材料への要望と課題／馬場嘉信（名大）	23
4.4 メディカル・ナノデバイスからの要望と課題／鄭雄一（東大）	25
4.5 セッション2 討論 出口から見た新機能創製	28
[5] セッション3 新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製／	
主査 居城邦治（北大）	30
5.1 自己組織化プロセスを用いた材料・デバイス創製／竹内昌治（東大）	30
5.2 トップダウン型・ボトムアップ型の融合／山下一郎（奈良先端大）	32
5.3 トップダウン系とボトムアップ系の接続・統合による機能材料設計に向けて／	
藤川茂紀（理研）	34
5.4 新規なデバイス機能設計／渡邊正義（横国大）	35
5.5 セッション3 討論 出口から見た新プロセス創製	38

[6] セッション 4 出口から見た重要課題の抽出	40
6.1 事前アンケートのまとめ：WS の目的と方向付け、目標にむけた重要課題抽出／ 江口健（JST-CRDS）	40
6.2 さきがけ「構造制御と機能」現状の進捗の俯瞰／岡本佳男（名大）	44
6.3 ミクロ・ナノ構造精密制御による機能性材料創製／大林元太郎（東レ）	45
6.4 リソを中心としたトップダウンプロセスから見た、ボトムアップテクノロジーに 求める技術課題／宮内昭浩（日立）	47
6.5 出口から見た重要課題：階層的自己組織化の出口から見た諸課題	
6.5.1 出口から見た重要課題の抽出／曾根純一（NEC）	49
6.5.2 ナノ粒子の構造化／笹倉英史（旭硝子）	51
6.5.3 階層的自己組織化の出口から見た諸課題—電子デバイス／浅川鋼児（東芝）	52
6.5.4 機能性人工分子の複合化で実現するたんぱく質検出技術／藤田省三（富士通）	54
6.5.5 真にイノベーションを実現するための戦略的なマネジメント／ 亀井信一（三菱総研）	56
6.6 分科会：重要課題抽出	
6.6.1 分科会 1	59
6.6.2 分科会 2	66
[7] セッション 5 まとめ	
主査 横山浩（AIST）／田中一宜（JST-CRDS）	72
7.1 階層的自己組織化に基づく、新機能創製と分子設計（分科会 1 まとめ）／ 相田卓三（東大）	72
7.2 階層的自己組織化プロセスの創製へ向けて／ 居城邦治（北大）	76
7.3 外野からみて分かる研究を／宮野健次郎（東大）	80
7.4 セッション 5 総合討論	82
7.5 全体まとめ／横山浩（AIST）	83
[8] まとめ	85
8.1 分科会の議論に基づく技術俯瞰	85
8.2 出口志向から見た自己組織化材料	86
Appendix（ワークショップの開催日時・場所、プログラム、参加者の構成）	91

[1] はじめに

ナノテクノロジーを活かした材料開発に求められているキーワードとして、低コスト、大量生産、省エネルギーが挙げられる。産業界のナノテクノロジーへの期待もこの部分が重要な位置を占める。現在の産業で主流となっているトップダウンによる微細加工も非常に重要な技術として大きな進展を見せている。しかし微細化の限界が近づきつつあり自己構造化のようなあらかじめ設計した構造が自発的に形成され、上記の要求にも耐えうるものが望まれている。これらがトップダウンの技術と融合することにより将来の産業技術にとって極めて有用な技術となり得る。生体分子や生体を手本とする自己組織化や自己集合の利用をさらに加速することで、将来の産業応用を視野に入れたナノテクノロジーを利用した機能材料の構築が可能になると考えられる。過去5年間のボトムアップに係わる日本のナノテク・材料はデンドリマー等に代表される高分子ナノ空間制御材料、自己組織化、ナノチューブ等でかなりの進展が見られた。

科学技術振興機構研究開発戦略センター(JST-CRDS)の田中グループにおいて「ナノテクノロジー・材料分野研究開発俯瞰図」を構築し、この中でナノテク・材料分野全体の今後の研究開発戦略の中で検討を重ね切り出されたナノ構造作製技術として重要な位置を占めるボトムアップ型テクノロジー、言い換えれば自己組織化による階層的構造形成技術の本ワークショップ(WS)のテーマとして取り上げた(図1-1)。

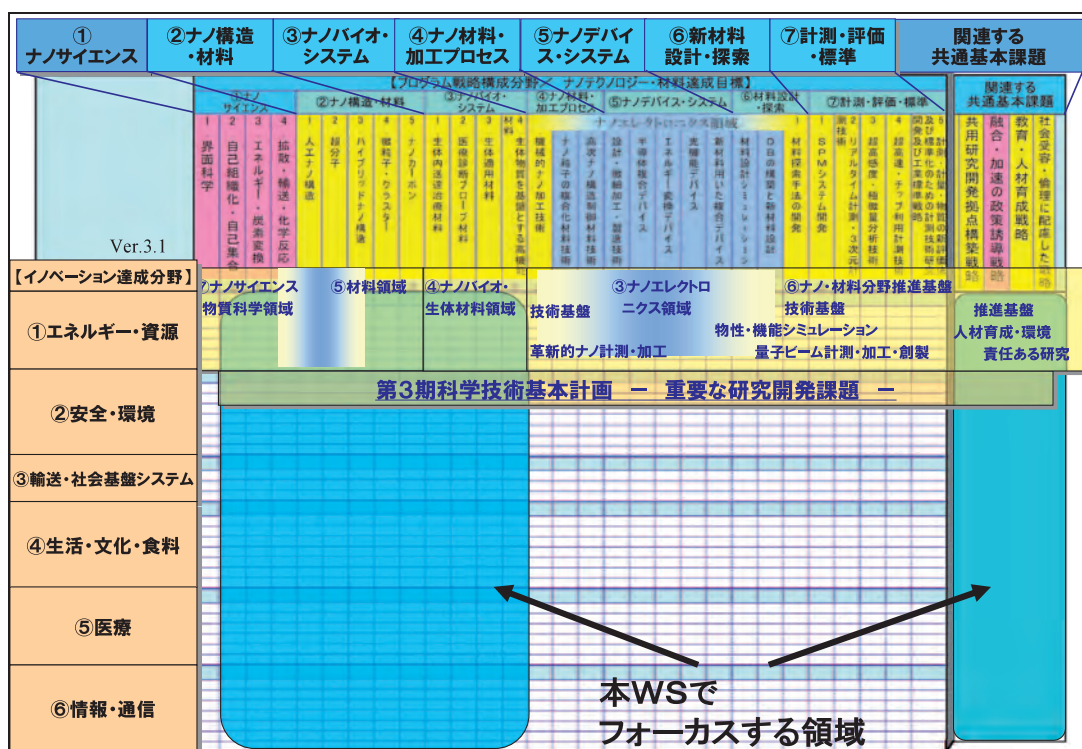


図1-1 ナノテクノロジー・材料分野研究開発俯瞰図

自己組織化と階層性はバイオにおいて象徴的な技術概念であり、バイオと他分野の融合はナノテクにおける異分野融合のシンボルでもある。俯瞰 WS における過去 5 年の技術俯瞰の結果からも自己組織化は重要課題の 1 つとして挙げられている。また材料分野における日本の優位性を生かすことのできる分野と考えられる。さらに 1994-2004 年度の「ナノテク・材料論文」の引用 top-five 論文の 1 つが「自己集合」である。このような状況を鑑み、特にバイオにおける材料やプロセスを直接的・間接的に応用する階層的自己組織化技術に焦点を絞り、これまでに蓄積された要素技術や新規現象を出口側から整理し直すことにより、基礎を含む諸技術課題を抽出することを目的として WS を開催した。

[2] ワークショップ「階層的自己組織化のバイオナノテク」

2.1 挨拶／横山浩（(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 部門長）

雑誌『科学技術動向』2007 年 5 月号に、「日本のナノテク競争力分析—懸念される競争力低下とナノシステム化への挑戦—」という記事が掲載されている。ナノテクノロジーがナノシステムに発展していくという主張が基調になっている。以下に記事の要点を示したい。ナノテクノロジーは最終的に分子の自己組織性を最大限に使ったシステムに移行していくと構想している。日本と欧米の得意とする点の比較ではトップダウン技術は対米・対欧のいずれも日本は強力であるものの、ボトムアップ技術とりわけ分子のシステムに至る方向に日本は弱点があるという状況認識が記述されている（図 2-1）。

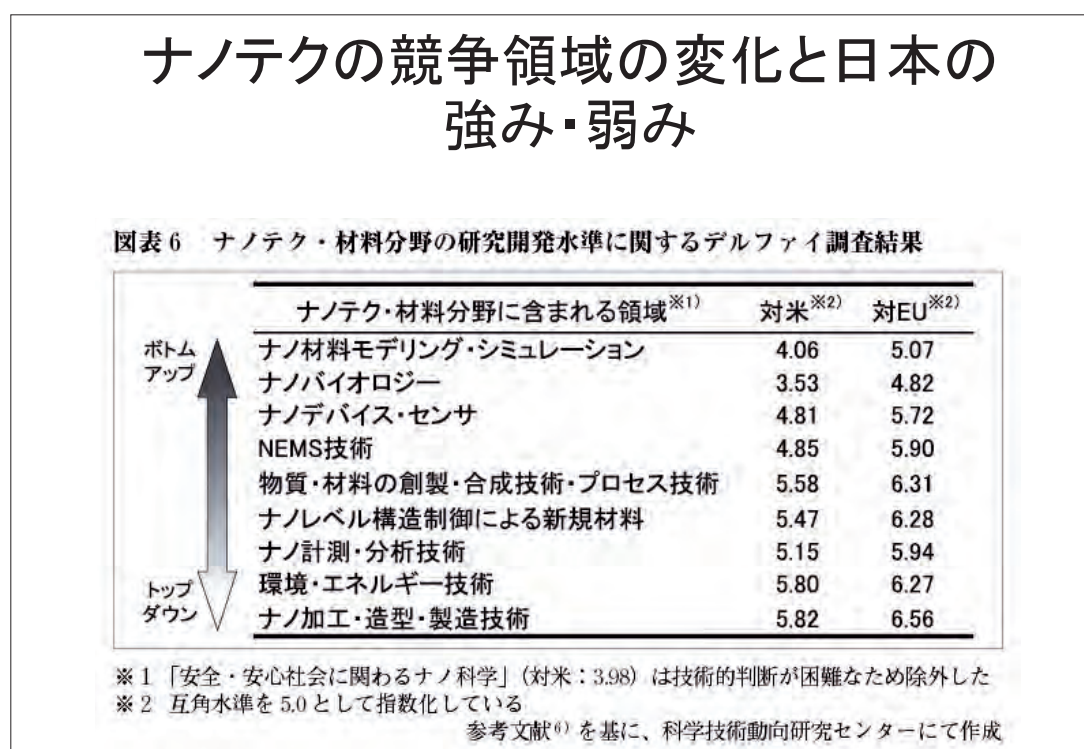


図 2-1 ナノテクの競争領域の変化と日本の強み・弱み

トップダウン型は研究が連続的でありロードマップに沿った研究開発を計画しやすいのに対してボトムアップ型は研究が確率的なものとなり、非ロードマップ型であるという記述がある。日本がボトムアップ型に弱点をもっているという記事の結論に対しては、かならずしも賛成しないがこの点を問題提起したい。記事では新たなマネジメントツール作成の必要性が記述されている。この点は同感である。記事では将来市場の共通認識が成立していない点、技術の取捨選択に膨大なサーチレンジとコストが必要となる点、投資が成果になるまでの道筋が不透明である点などが問題点として指摘されている。記事には金融工学のオプション理論を参考にして研究開発の方法を構築していくとよいのでは、という提案がされており興味深い。

2.2 趣旨説明／

田中一宜 ((独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー)

JST は文部科学省傘下にあり戦略的な資金配分をしている。CRDS は JST の内部に位置づけられている。CRDS のビジョンは「社会ニーズを充足し社会ビジョンを実現する科学技術の有効な発展に貢献する」というものである。ミッションは複数あるがとりわけ注力しているものは、「科学技術政策立案者と研究者とのコミュニティを形成する」というミッションである。また「重点的に推進すべき研究開発領域・課題を戦略プロポーザルとして提案する」というミッションも特徴的である。つまり技術の俯瞰・調査・分析をもとに政策者の意思を反映して具体的戦略を提案することをミッションとしている。戦略プロポーザルを提案するために指定した領域全体の技術マップを作りそれを俯瞰する。俯瞰図に基づき重点研究開発領域・課題を系統的に抽出する。また海外の研究開発状況と比較する。これらの活動を同時進行的に行っている。CRDS 自体が強い意思をもち総合科学技術会議や他省庁と意思疎通を計り、シンクタンクの役割を果たすことも期待されている。昨年12月に「ナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ」を開催した。そこではナノテクノロジー全体として基礎的成果は順調に現れているという結論にいたった。ただし技術移転、つまり研究成果を出口に誘導する部分に不安があるという結論もあった。

自己組織化に関して米国はモレキュラー・アセンブリー・ナノシステムをナノテクノロジーのシンボリック技術目標にしている。自己組織化をナノテクノロジーの一つのシンボルにしている点は重要である。日本においても萌芽的な成果として優れた新材料は現れている。以上のような背景から投資は継続していくべきであろう。ただし社会や政府に対しては出口へ誘導する研究開発を示していかなければならない段階にある。ナノバイオ関連ではフードナノテク、医薬・創薬やケミカルバイオロジー、自己組織化、生命分子機械といった課題が出てきている。フードナノテクは今年後半に議論を開始する予定である。ケミカルバイオロジーは研究開発センターのライフサイエンスグループで今年度研究課題を議論している。ナノテクノロジー・材料グループは自己組織化を取りあげる。

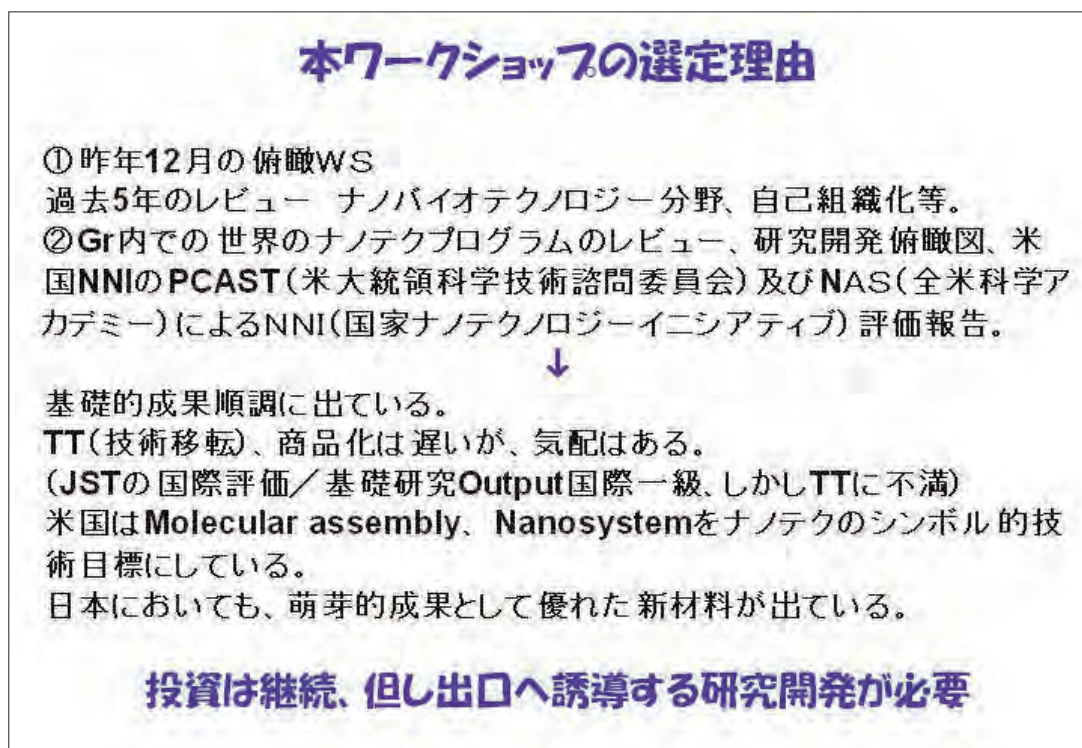


図2-2 本ワークショップの選定理由

ワークショップの課題名を「階層的自己組織化のバイオナノテク」とした。若干自己組織化を広義に定義している。トップダウン型ナノテクノロジーは技術の極限に至ろうとしている。ボトムアップ型では処理量（スループット）が問題となる。集団的同時多発的な生産が求められ広義の自己組織化を階層的に利用することが必要であろう。またバイオナノテクは「バイオにおける材料・プロセスを直接的・間接的に応用するテクノロジー」と定義する。今回のワークショップの目的は以下の3点である。「バイオにおける材料・プロセスを直接的・間接的に応用する階層的自己組織化技術について、その新規可能性と出口から見た諸課題を抽出する」「諸課題解決のための基礎的な問題及びフォーカスすべき技術課題を整理し、今後国が投資すべき研究開発方向の指針を得る」「上記の研究開発を行う上で化学、物理、バイオ、計算機科学等の異分野融合を効率よく推進するための体制、イノベーションに向けた新しい研究開発システム等についても議論する」。

[3] セッション1 高次自己組織化、そのダイナミクスと制御／ 主査：横山浩（(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 部門長）

3.1 時間発展する分子システム：非線形ナノ・ダイナミクス／ 吉川研一（京都大学大学院理学研究科 物理学第一教室 教授）

生物は時間軸上の秩序生成を利用している。人間はいまだ技術としては利用出来ていない。ナノスケールからマイクロスケールの間の細胞スケールにあるリズム現象では、生物・無生物を問わず自己組織化をする能力を本来的に兼ね備えている。例えば異なった周期で拍動している心臓細胞ではお互いがわずかに接触するだけで自律的にリズムが揃う。自律的なリズムをもっている細胞が数千個集合すると時空間の秩序構造が自発的に生じるようになる。

マクロスケールのリズム量子ミクロスケールのリズムではゼロ次近似として時間反転対称性が保たれたリズムを作ることが可能である。実際には散逸の効果のためにマクロスケールではリズムの減衰が、量子スケールでは高波数（高エネルギー）の状態から低波数に移行する。すなわちマクロスケールの世界でも量子の世界でも「オングストロームの谷間」に落ち込もうとする一般的な傾向がある。それに対してエネルギーの流れに逆カスケードをいかに実現するのかが、細胞スケールにおいて時間秩序を生み出す際の勘どころとなる。非線形で散逸系のモデルで実験すると二つのリズムには同調する傾向がある。特に細胞スケールにおいてリズムは基本期に非線形特性を示し、お互いのリズムが揃う方向へ自発的に向かうという性質が本

自己同調現象（引き込み同調）

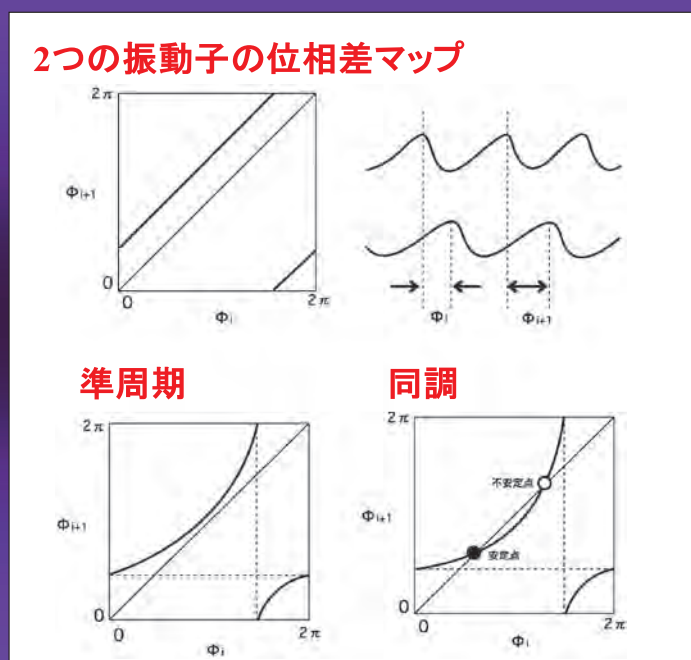


図 3-1 自己同調現象（引き込み同調）

来的に備わっている。二つのリズムの位相差の経時変化をマップで描くと非線形の場合はかならず曲線を描くようになる。ある程度の曲線になると準周期となりさらに曲線の度数が増すと同調し、時間軸上自己組織化した状態が出現する。これは細胞スケールのリズムが本来有している一般的な特性である（図3-1）。

反応拡散の方程式で反応項と拡散項を適当にとり入れるとチューニングパターン、神経興奮伝搬、心臓拍動などをすべて再現することができる。最近では時間発展を利用して生物がパターンの形成をしていることも明らかになりつつある。例えばわれわれの体細胞は数千個単位で時間発展的な空間パターンを作りあげる能力がある。一方簡単なモデル系としてアルコールを水にたらし液滴実験では、化学エネルギーにより自発的な非線形の揺らぎが発生する。非線形揺らぎは空間的な対称性（境界条件）に依存して多彩な時空間秩序を創り出すことができる。生物はこのような時空間の特性を利用しているが、人間はまだこの特性を産業技術としては活用できる段階までには至っていない（図3-2）。

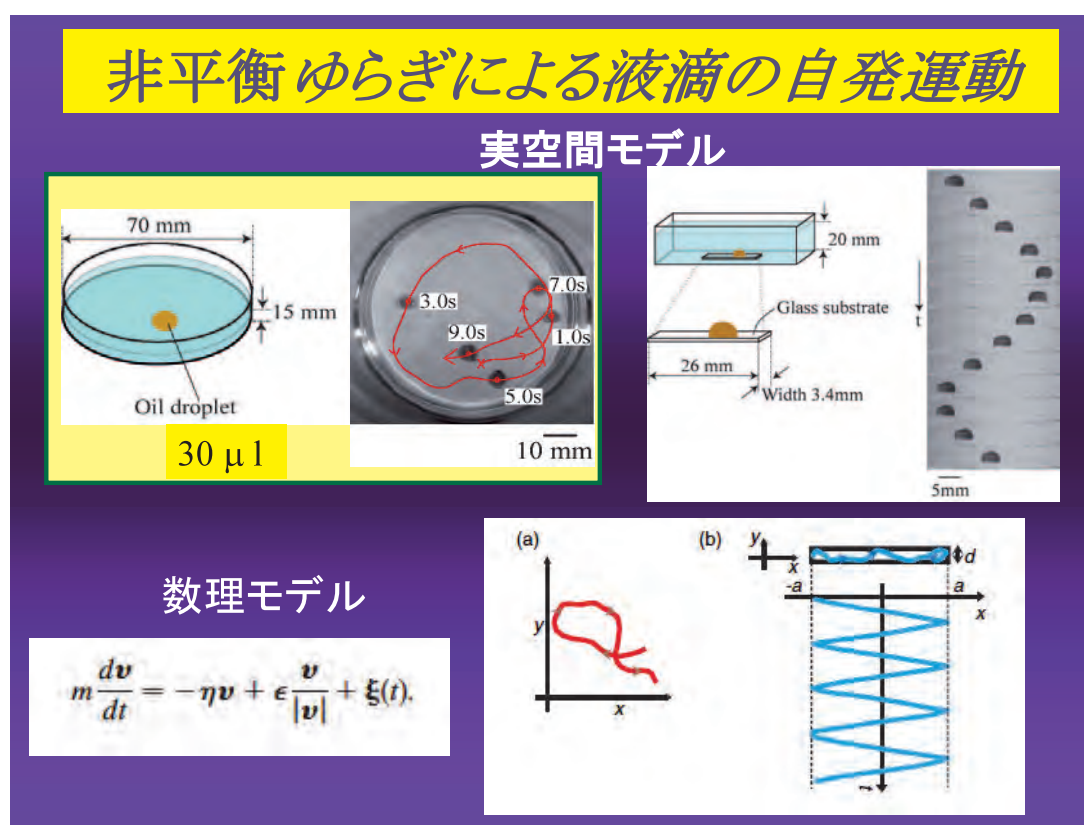


図3-2 非平衡ゆらぎによる液滴の自発運動

3.2 タンパク質から学ぶ細胞内構造の構築原理／

遠藤斗志也（名古屋大学大学院 理学研究科 物質理学専攻 教授）

細胞内のタンパク質や膜などの構造がどのように形成されるかを話したい。オルガネラはミトコンドリアや小胞体などの細胞内器官のことである。オルガネラ自身は細胞ではないが半自律的に増殖するためミニサイズの細胞と捉えることができ

る。生物の最小単位である細胞については設計図も構成因子も分かっているものの、生命というシステムを再構成することはできない。それは生命がもつ空間的秩序をいかに作るかが設計図には書かれていないからである。細胞は複雑すぎるのでより小さいオルガネラのレベルを研究から始めるのが適切と考えられる。オルガネラを作るためにはオルガネラ自身が必要である。たとえばオルガネラを作るタンパク質の作り方はゲノムという設計図に書かれているが、オルガネラ構造を作るためにはゲノムという設計図だけでなく鋳型としてのオルガネラ自身が必要である。その情報がないためにオルガネラを模した構造を作ることではできていない。オルガネラの形成や増殖のしかたなどを観察することにより原理が解明されていくであろう。

オルガネラの生合成プロセスとしてはタンパク質をオルガネラに運び込むトランスロケータと、オルガネラを拡大して分裂・分配するモルフォジェネータの働きがある。膜透過装置トランスロケータという複合体がタンパク質を認識し膜を通す。受容体、孔、モーターといったものから構成される基本的な装置である。ミトコンドリアの系を例にすると、トランスロケータのチャネルを作る因子の輸送などを観察すると自分自身が自分自身を必要とするシステムが成立していることがわかる。ミトコンドリアでも形を制御する因子が異なるため様々な形をしている。動的につながったりちぎれたりしながら形を変化させ、娘細胞に分配されていく。オルガネラの生成にはこのようなしくみも必要である。ミトコンドリアの形を制御する因子を正常に保つ装置も存在する。またオルガネラには異常を監視して修復するというシステムがある。自律的に増殖するためにはこのようなシステムも必要となる。たとえば小胞体では時系列的に段階を追って修復の手段を講じ、最終的には細胞死が誘導されるというような自己管理をしている。

ミトコンドリアにはタンパク質の輸送に関わる因子が数十種、形の制御に関わる因子がその2倍程度あると考えられる。また修復に関わる因子等を加えてもミトコンドリア構造の形成と維持に関わる因子は、全ミトコンドリアタンパク質の1割、100種未満であろう。オルガネラのレベルで自分自身を複製する構造がわかってくるとその構造を制御することにより、オルガネラに入ってくるタンパク質の種類を一挙に変えることも可能になるかもしれない。形の制御もすることで第二のミトコンドリアを作るような技術は「オルガネラ工学」と呼べるかもしれない。こうした技術は第二世代のバイオテクノロジー、細胞を作る手前にある技術といえるのではないだろうか（図3-3）。

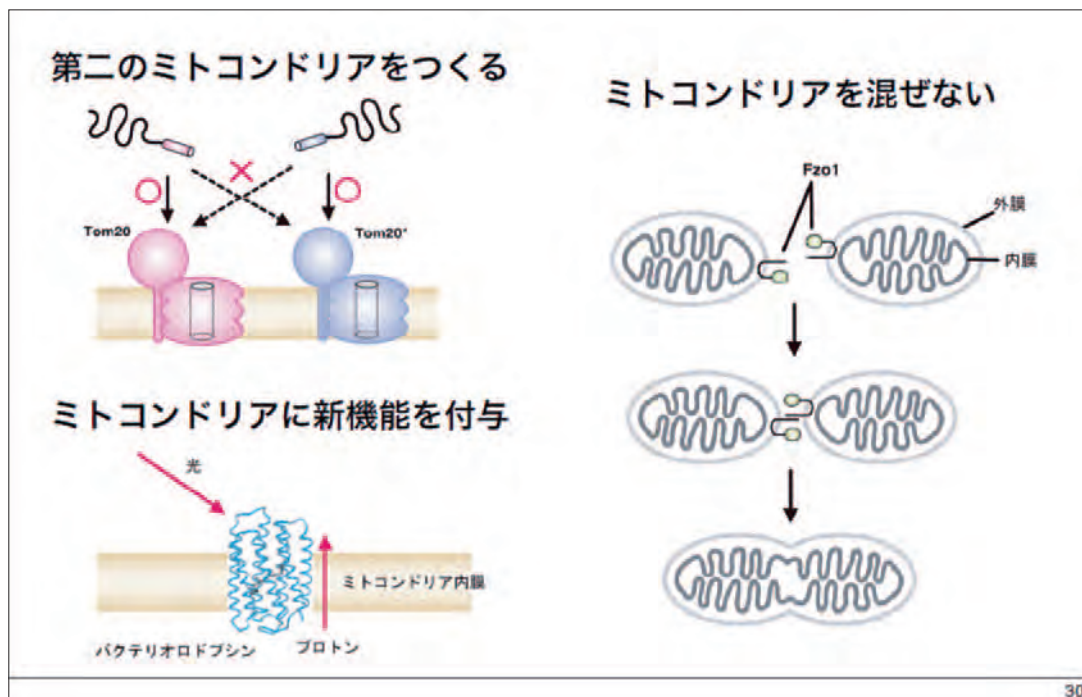


図 3-3 オルガネラ工学

●質疑・討論

●オルガネラ研究の技術への発展

- ・オルガネラ研究はバイオエタノールや医薬品、光合成などへの出口が考えられる
- ・オルガネラに移動するタンパク質の種類を変えて、一つのオルガネラに集めることやある膜で囲まれた場所にタンパク質を移動させて反応させる技術に発展する可能性はある。

●形の形成

- ・オルガネラの形の制御に関して遺伝子レベルのタンパク質が膜を構成するとどのような形になるかを細胞はどの程度分かるのかに関しては、形の制御は解明中の段階である。例えば曲率を変えるタンパク質などが関与している。

●修復システム

- ・修復システムに関してミトコンドリアの場合 1500 ほどのタンパク質がある中で異常の有無をどのように判断しているのかに関しては、粘着したもので自分自身の装置を塞いでしまうかどうか異常に関する重要な指標である。これが毒として感知される。

3.3 機能材料設計、トポロジカルゲルの物理解析と機能設計／

伊藤耕三（東京大学大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授）

ソフトマターの特徴はメソスケール（1nm-1 μ m）の多彩で複雑な高次構造または階層構造を形成するという点にある。分子の個性が違っても同様の高次構造をとる場合がこの系には多い。物性によっては分子の個性よりも高次構造が支配的な

役割を果たす点も、ソフトマターの大きな特徴になっている。ソフトマターが複雑な高次構造を作り構造間の転移や大きな揺らぎを生じる要因としては、エントロピーがシステムを支配しているという点と分子間に比較的弱い相互作用が働いている点が挙げられる。

架橋されネットワークを形成している高分子材料の代表例がゲルである。従来は物理ゲルと化学ゲルの2種類しかなかったが、2000年に架橋点が自由に動くゲル材料を開発することに成功した。本技術については日本、米国、中国であらゆる高分子材料を対象にした基本特許がすでに成立している。このような基本特許は新しい技術が応用され産業界および社会に波及する上で非常に重要であると考えている。ゲルを作成するためにはシクロデキストリンとポリエチレングリコールなどの高分子から、ネックレス状の分子集合体（ポリロタキサン）を形成する。ポリロタキサンという超分子構造体については1992年に初めて報告された。次にポリロタキサンの溶液中で、環状分子であるシクロデキストリンの部分を架橋することによりネットワークを形成する。このとき架橋点は自由に移動することができるので、従来の架橋点が固定されていた高分子材料とは根本的に異なる力学特性を示すことになる。たとえば架橋点が自由に移動することができる材料は、従来の物理ゲルと化学ゲルとは異なり応力伸長特性で履歴のない「J」型の挙動を示す（図3-4）。

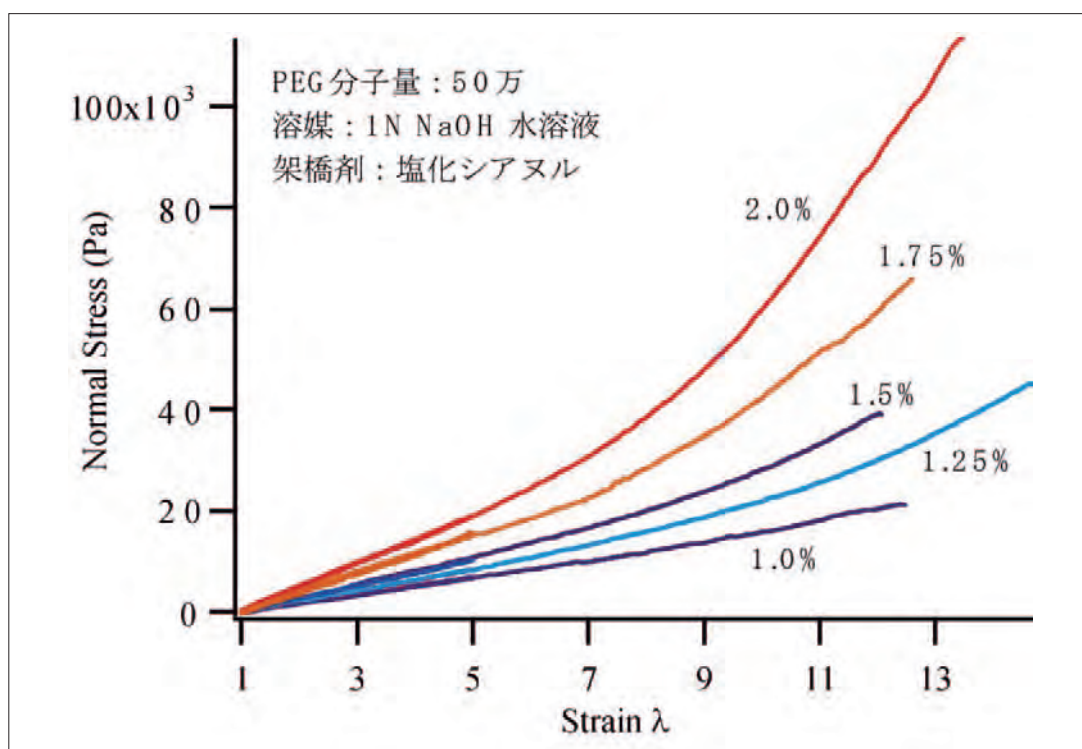


図3-4 環動ゲルの応力伸長特性（図中の数値は架橋剤濃度）

架橋点が自由に移動できる場合には引っ張ったときに高分子の中で原理的には圧縮が生じない。普通の化学ゲルなどの材料では圧縮するとそれに比例してある程度大きな抗力が生じるが、架橋点が移動することができる材料では圧縮しても最初は

ほとんど力が働かず途中から大きな抗力が働くという特徴がある。以上のように架橋点が移動するかしないかの違いで力学特性は大きく変化する。「J」字型の応力伸長特性はその原因はまったく異なるものの、皮膚や血管などの生体でもしばしば見られることが知られている。

架橋点が自由に移動する材料の特徴をまとめると履歴のない「J」字型の応力伸長特性を示す点、弾性不安定性を示さない点、破壊が起こりにくい点、生体にきわめて近い特性を示す点、高分子の運動性が抑制されない点、応力・張力が分散される点などがあげられる。応用としては繊維や化粧品、塗料などの工業用途とコンタクトレンズや眼内レンズなどの生体代替材料などが考えられている。現在ベンチャー企業を立ち上げ様々な大手企業との間での共同研究開発が急速に進んでいる。1992年に報告されたポリロタキサンは環状分子のスライディングが可能であるという著しい特徴がある。この自由度を応用すると新しい高次構造あるいは階層構造の構築とそれに基づいた革新的な機能の発現が期待される。その実現のためには物理学、化学、そして計算科学の分野の融合した研究が求められている。

●質疑・討論

●架橋度の制御

- ・架橋度の制御に関しては、現在のところでは制御できていない。架橋密度の小さいときに「J」字型になるということは解明されている。架橋のしかたにより物質の性質が変化していく点がもっとも興味深いところである。

●生体との構造の違い

- ・生体の組織の「J」字型とは原理が異なるという点については、開発した材料は架橋点が動くのみの単純なしくみである。生体はおそらくより複雑なしくみになっているのであろう。

3.4 生体運動システムにみる階層的自己組織化／

石渡信一（早稲田大学大学院 理工学研究科 生命理工学専攻 教授）

生体運動系は1分子単位での力学研究が可能な時代となった。長年にわたって生物の階層原理（ナノからミクロンスケールへと生体構造が階層的に集積していく過程で、生物特有の構造と機能が発現する仕組み）が各階層でどのように統合されていくか、とくに自己組織系として総合されていくかに関心をもってきた。そのために天然に存在する生体運動系の構造を部分的かつ選択的に解体すること、そして精製タンパク質の自己組織能を活用することによってどのように構造と機能が再構築されるかという、生物学研究としてはオーソドックスな“解体と再構成”手法を方法論の中心に据えて研究を進めてきた。その研究が1分子レベルを出発点として、また遺伝子操作を組み込みつつ行える時代になったわけである。

骨格筋や心筋などの筋肉は横紋構造をもっている。とくに骨格筋は直径1～2ミ

クロンで細長い筋原線維というタンパク質の集合体でできている。横紋構造はアクチンとミオシンからなる2種類の筋フィラメントが周期的に配列している結果である。ミオシンはATP（Adenosine Tri-Phosphate、アデノシン三リン酸）を分解する酵素である。アクチンは球状タンパク質であり太さ7nm程度のフィラメントへの重合過程を蛍光顕微鏡下で直視することができる。フィラメントの両端でアクチン分子が結合・解離する過程が、拡散過程であることを証明した。定常状態では一方の端では重合が他方の端では脱重合が進んでおり、フィラメントの長さはほぼ一定に保たれている（トレッドミル機構とよぶ）ことを示した。アクチン分子の重合・脱重合の1サイクルには1個のATPの加水分解がカップルしている。つまりアクチンフィラメントの長さを維持するためにはエネルギーを消費する必要がある。ミオシン分子をガラス表面に吸着させATP存在下で（蛍光ラベルした）アクチンフィラメントを流し込むと、アクチンフィラメントが滑り運動するのを実時間観察することができる。滑り運動するアクチンフィラメントの中にはリング構造や超らせん構造を形成するものが見られる。そこでアクチンフィラメントの先端を強制的にガラスに固定して滑り運動を観察したところ、フィラメントの中央部分が持ち上がって大きな左巻きらせんが形成された。このことは、ミオシン分子モーターが、アクチンフィラメントに平行な滑り力だけでなく、右回転のトルク成分を発生することを示している。生体中でこのトルク成分がどのように機能し高次構造へと統合されていくかに興味がある。ミオシンフィラメントの束に1本のアクチンフィラメントを滑り込ませることができる新しい実験系を開発した。その結果、ミオシンフィラメントとの接触長さに比例して、つまりミオシン分子モーターの数に比例して力が生じるという、滑り運動メカニズムの本質的特性を1本のフィラメントレベルで証明することができた。心筋収縮系の中でアクチン（細い）フィラメントを再構成する研究について述べる。精製したアクチンフィラメント切断タンパク質（ゲルゾリン）を筋収縮系に加えると細いフィラメントは切断されて取り除かれる。しかし心筋にはZ線にアクチンフィラメントの断片が残るので、これを重合核としてアクチンフィラメントを再構成することに成功した。さらに、アクチンフィラメントを元の筋線維中のものよりも長くすることにも成功し、もとの心筋収縮系が発生する力の2倍もの力を出せるまでになった。この手法を用いてアミノ酸変異したアクチン分子や制御タンパク質を導入することなどが可能となり、制御メカニズムの研究を前進させている。

筋収縮系は生理的には収縮と弛緩の2状態のいずれかをとるとされる。ところが収縮と弛緩の中間の条件を丁寧に調べると、筋収縮系が自発的に振動する条件が存在することを20年ほど前に発見し、SPOCと名づけた。横紋筋におけるSPOCはその構成単位であるサルコメアの長さ（及び発生力）が鋸波状に変動し、隣接するサルコメアへと伝播する（SPOC波）現象である。各ユニットの長さ変化により各分子モーターへの負荷が変動し、それが自律的に自らの酵素機能（力発生）に反

映されて、このようなダイナミクスが生じると考えられる。SPOC 状態にある筋収縮系に外部から力学パルスを与えると、同調して周期が変わる。タンパク質集合体からなる筋収縮系が示す自励振動の周期と、動物固有の心拍とが相関することもわかった。収縮系のリズムには動物固有の周期がある。筋収縮系それ自体が振動系なのである。

つぎに生体運動系の階層構造の最上位に位置するシステムとして細胞分裂装置に着目した。卵から抽出した分裂装置（紡錘体）はレモン状の形を保ちながら、その骨格をなしている微小管が時々刻々重合・脱重合を行っている。素晴らしくダイナミックな自己組織能をもつ超分子集合体である。紡錘体の構造は横紋筋原線維の一つのサルコメアに似ているが、ATP のみならず何十種類ものタンパク質が時空間的にダイナミックに働いているという点で、サルコメアの上位に位置する開放系である。筋原線維の研究で開発してきたガラス微小針による力学計測手法をこのシステム研究に応用し、上位の階層構造における構造形成の仕組みと力の拮抗作用による自発的機能調節の仕組みを明らかにしようとしている（図 3－5）。

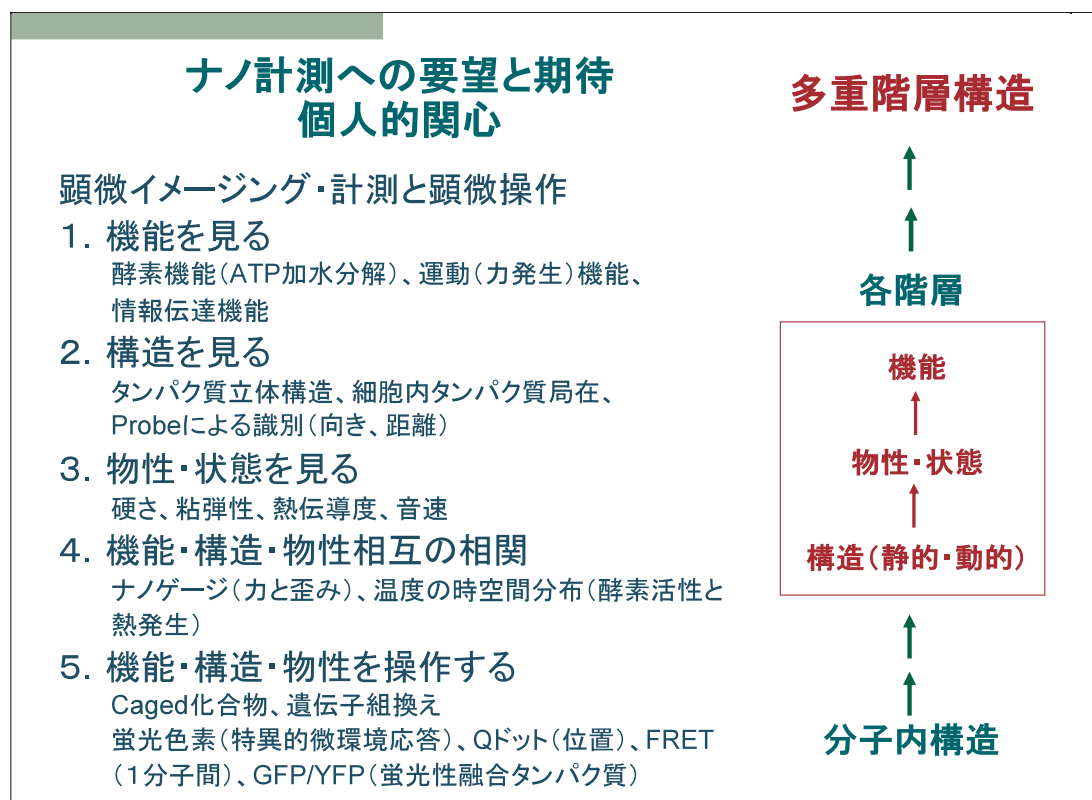


図 3－5 ナノ計測への要望と期待：個人的関心

●質疑・討論

●筋線維間の作用

- ・協調作用を引き出す際の筋肉線維間の媒体は化学的(ケミカル)作用か力学的(メカニカル)作用かに関しては、筋肉の構造に特異的な作用ではないかという結論である。

3.5 現状までの技術、将来への課題／

山口智彦 ((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロジー・材料技術開発部 プログラムマネージャー)

理化学研究所の企画により『自己組織化ナノマテリアル』(フロンティア出版)が2007年2月に出版された。編集を通して研究者の7~8割方は非平衡まで踏み込んだ自己組織化の研究を行いたいという意思があるものの、現時点ではその手段や原則が確立されていない状況であることがわかった。自己組織化は雪の結晶における温度と過飽和度の関係で示した「小林ダイヤグラム」を例に考えると分かりやすい。過飽和度(過冷却度)が大きくなると、平衡形の結晶成長からデンドライト結晶成長に変わりおなじみの雪印の結晶が成長する。しかしミクロな結晶構造は同じである。シュレーディンガーは遺伝と熱力学の二つの問題が複雑に絡み合ったものが生物的な自己組織化であると述べている。自己組織化の考え方を現代の目から振り返ると、システム理論と熱力学とが複雑に錯綜している。システム理論の側では第一世代にサイバネティクス論があり、第二世代に散逸構造論やシナジェティクスなどの非平衡論が登場する(現代は第三世代)。熱力学のほうではシステム理論の第二世代の散逸構造論と対比する形で、熱平衡近傍の自己組織化である自己集合に材料科学の目が向けられてきた。階層的自己組織化に必要な手段としてプログラムという概念がある。ナノテクノロジーの観点では、J.M. Lehnの「プログラムとは分子に組み込まれた構造に存在する」という考え方が一般的である。しかしながらプログラムの本質は「手順」を指定することと、手順が滞りなく起こるために必要な「遅れ時間」を指定することにある。素過程ごとに初期条件や境界条件をきちんと設定して分岐経路を減らすことができれば、分子によるプログラムでもシステムによるプログラムでも手段は問わない。プログラムされた自己組織化の式を示す。

$$P : p(0) \rightarrow p(1) \rightarrow p(2) \rightarrow \dots$$

ここに過程 P は連続する素過程 $p(0)$, $p(1)$, $p(2)$... から成るものとする。 i 番目の素過程 $p(i)$ の初期条件および境界条件が直前の $i-1$ 番目の素過程 $p(i-1)$ によってユニークに規定されるならば、過程 P は最初の素過程 $p(0)$ で完全にプログラムされた自己組織化であるといえる。人工系における実例をあげよう。高分子の溶液にナノ粒子を溶解させ平板上に広げて乾かす。脱濡れ(デウェッティング)で平板全体に形成される微小液滴の大きさに依存して、微小液滴内のナノ粒子の凝集形態はリング状になったりドット状になったりする。デウェッティングの乾燥速度や粘性を制御することにより微小液滴の大きさが制御され、その結果微小液滴中のナノ粒子の凝集形態を制御することができる。このメカニズムとして自己集合と散逸構造を用いている。乾燥していく気液固界面の揺らぎは、雪の結晶のデンドライト構造と関係する。平衡近傍の自己集合と界面の揺らぎ(非平衡)を組み合わせることにより、以上のような階層構造を比較的容易に組み上げることが可能となる。

自己集合をさらに高次の組織体に構造化するためには二つの方法がある。一つは

人工的に環境を整えて構築する方法である。もう一つは生物的な過程を設計して取り組む方法である。今後のナノバイオが目指す方法は後者であろう。ミリスケールやマイクロスケールなどの大きなシステムにも同様の考え方が適用できるが、必要性がさほどないため議論にならないだけである。

自己組織化を定量的に捉えるための指標の一つとしてエントロピー生成が考えられる。現在、CREST（戦略的創造研究推進事業）において、自己組織化系のパターン選択をエントロピー生成の観点から検討するための研究を進めている。ナノテクノロジーでは基板と自己組織化系の座標の一致（「位置決め」）が容易ではないことが重要な問題となっている。そのため自己組織化で階層構造を形成する際には、上手に破壊するような技術も必要になるであろう。この種の自律的なシステムが期待通り機能するためにはシステム自体を維持するためのエネルギーの注入も必要となる（図3－6）。

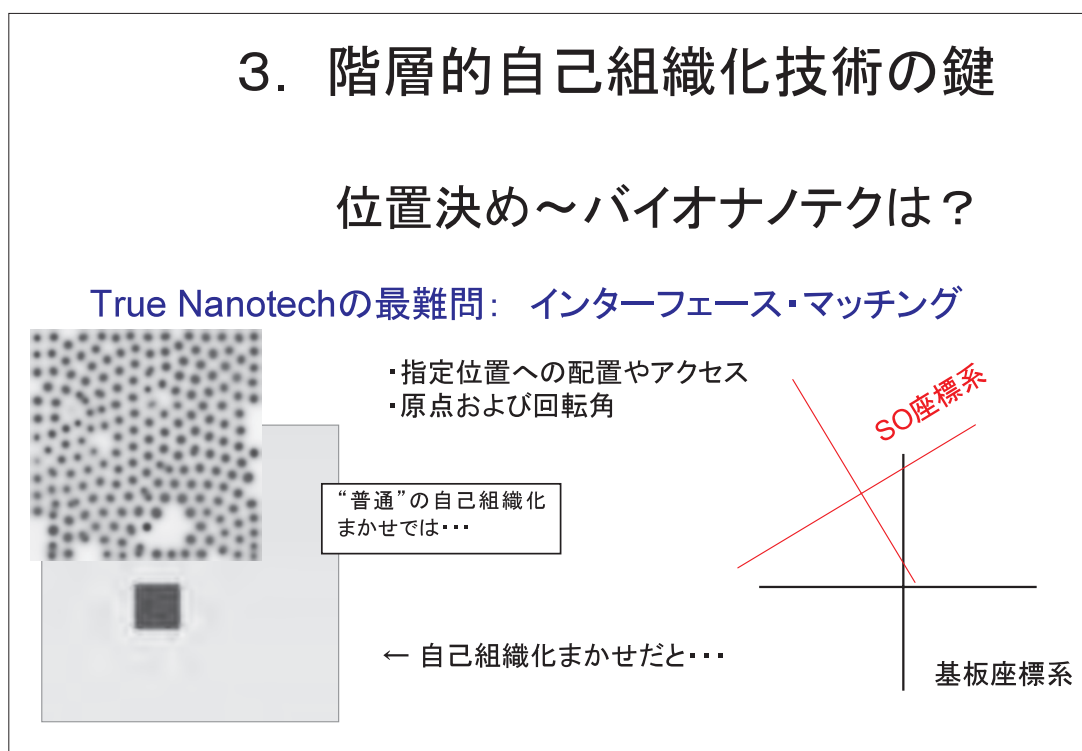


図3－6 階層的自己組織化技術の鍵

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）で実施中の「ナノテク・先端部材実用化研究開発（ナノテクチャレンジ）」では、実用志向のため高度なテーマがあまり見られない。一方 JST のさきがけでは、諸科学との融合を目指した数学領域の研究が今年度から開始される。数学的明晰性を実験科学に取り入れれば未来は意外に明るいかもしい。 「縦割り予算」を払拭するため文部科学省と経済産業省のより密接な連携も求められる。

3.6 階層的自己組織化に向けて／

横山浩（(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 部門長）

液晶を基本とした研究に関して話したい。研究では「ナノの現物合わせ」を目指している。「現物合わせ」で手間を省略して作る過程を自然に行えるソフトマターを実現できないだろうかと考えている。ソフトマターは高分子の集合体、とりわけ液晶となる。本来的に多くの自由度をもっているシステムである。

ボトムアップ型は分子からより複雑で規模の大きくなっていくのに対して、ボトムアップ型は逆の過程を進む。ボトムアップ型では分子一個ずつの構造の中で全体を解明するのは非常に難しい。より単純なソフトマターにおいても、分子固有の性質から直接的に高次構造を支配するのは難しい。しかしながらナノスケールで「現物合わせ」という工夫の可能性はある。液晶においては階層的自己組織化が見られる。複雑なフェーズが階層的に存在している。フォトリソグラフィ的構造も液晶を媒介とした過程の結果である。液晶のブルーフェーズは液晶における自己集合により作られる。液晶の世界における「現物合わせ」とは弾性論である。例えばスメクティック現象では、ある分子レベルの相の状態について弾性論を足がかりとして「現物合わせ」をさせる。レアの構造を不安定化させる発想のもと、基の分子と2倍の長さのダイマー分子を混合させる。体積50%程度ではどの方向から見ても同じ色に見える完全にアモルファス的な反射状態が生じる。弾性定数50%の位置ではスメクティックの相が不安定になっており新しい高次構造を形成している。弾性定数の制御により見る方向により色が変わるなど様々な状態を作ることが可能である（図3-7）。

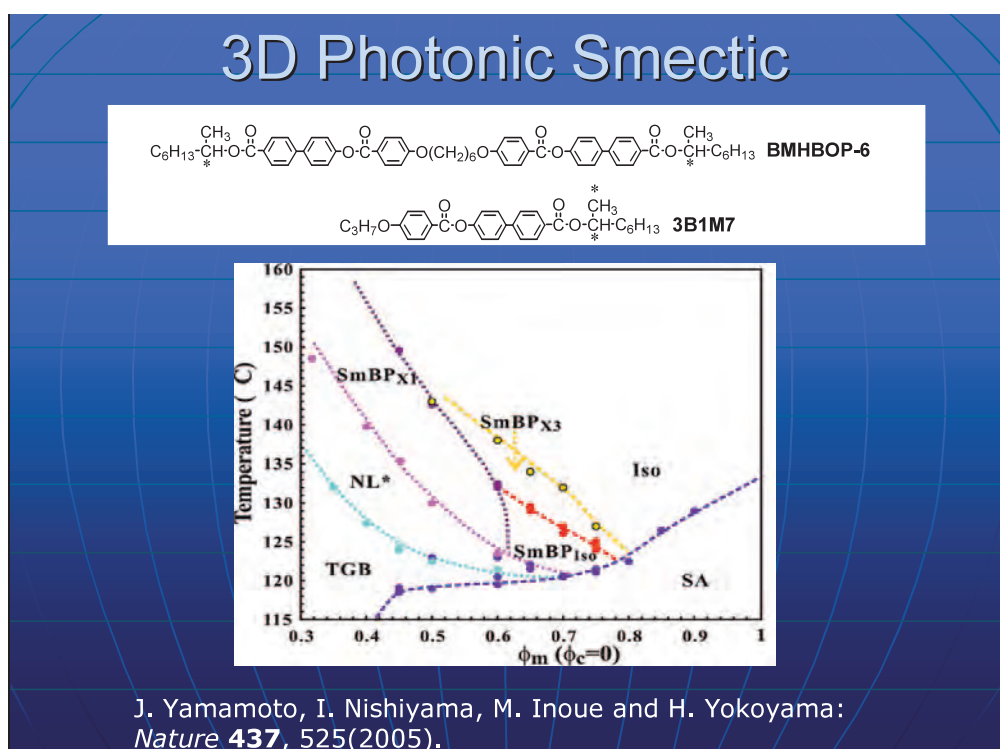


図3-7 3D Photonic Smectic

同じく弾性論を基本にして「現物合わせ」をする対象としてコロイドがある。コロイド結晶の周囲に液晶を満たすと、非稠密な状態であっても結晶的な構造ができる。特定の表面状態をコロイド粒子の周囲に付与すると鎖状の構造ができる。基本的な微細構造は分子が形成する上で弾性論の数式に基づいた構造をデザインすることができる。「現物合わせ」のアプローチとして表面制御もあげられる。時間軸を導入する点がさらなる段階として重要になる。液晶が作る水面上の単分子膜に光を照射し光による分子の変形によりコヒーレントな波の状態を作り出す研究をしている。分子に光を照射すると一部が方向を変える波を作り出す。光の角度を変えると波の方向が 180° 転換する挙動がありスイッチとしての応用が考えられる。弾性論に簡単なダイナミクスを導入するような式も見出している。非線形の一要素の役割を捉えておけば液晶中の光により引き起こされる非線形波動を制御することができる。カイラル分子を用いて液晶の分子を集団として回転させることも可能である。

分子スケールからマクロスケールまでをすべて制御するのは容易ではない。分子スケールの挙動に任せる点と、人間が手を加える点をうまく区分するとよいのであろう。

3.7 セッション1 討論

●講演全体の感想

- ・「自己組織化」という言葉が研究の牽引力になっているかという疑問が若干ある。言葉と牽引力の関係が研究外部からも明らかになっているとよい。
- ・散逸構造の内部での自己組織化については用途を考えさせられた。
- ・トップダウン型とボトムアップ型の融合によるデバイス作製において元々の鋳型となるものをどのように作るべきかを探索している。
- ・商品開発に際して自己組織化で行う場合、アラインメントが重要である。
- ・平衡系では物質のパラメータを変えるというレベルにとどまっている。高次機能をいかに利用するかという点が重要である。
- ・カーボンナノチューブなどの無機材料に弾性論を展開できる可能性については、基本となる対象（講演では液晶）に関する理論（記述）がすでに確立されていることが前提となると考える。多くのナノ材料などは扱う対象自身の理論（k 術）の確率や、変数、自由度の確定などがない点が、もっとも困難な部分ではないだろうか。
- ・出口を見出して実用化に結びつける際に、単純な自己組織化技術によって現実の装置を低コスト化することが可能な方向に注目するとよいのではないだろうか。
- ・ナノ構造を材料に組み込む場合位置制御の問題と熱の耐熱性や安定性の問題がある。鋳型となるものを固定化する方法論を見出さなければならないと考えている。
- ・生体をモデルとした組織化は化学の領域の興味ある分野であろう。とりわけ「認識」を扱う領域などでは組織化は必要な概念ではないだろうか。

- ・将来展望を考える際 LSI（Large Scale Integration、大規模集積回路）などの装置の一部のみに自己組織化を当てはめるのみでは、自己組織化の優れた点を見出しづらい。

●構造の単純化

- ・複雑な構造を単純化する視点は工学に有用な要素技術ではないだろうか。
- ・生物の運動系を物理的に解明する場合、素過程にわけることが可能であれば抽象化は可能であると考えている。また生物が利用している環境のみに焦点を当てるのではなく、人工的な環境中で機能させたらどうなるかといった視点もある。より広がりのある構造の解明や素過程の発見などができることを期待している。
- ・非平衡系に関してはいまだ理論は確立されていないのではないだろうか。

●生物の自己複製

- ・生物の自己複製を参考に自己集合を実現しようとする場合、生物の完全なるコピーがないと不可能というわけではない。1 割程度の参考となる材料があれば複製は可能である。その参考材料をいかに揃えるかが難しい点である。

●生物構造の普遍的原理

- ・タンパク質や酵素などの分子の反応経路の記述をすべて完了すれば研究としては目標達成となるのか。さらにもう一段上に、生物の複製などの理論を支える抽象論を見出すことができるのか。
- ・まずはすべてを記述して現象を解明する点が視野にある。しかしながら各々の記述から普遍的な原理や構造を見出せる点も期待をしている。普遍的な原理を発見することができれば、階層の溝を埋める原理を見出すことが可能となり、自己複製の参考となる生物の構造をいかに最小限に作るかといった局面に展開するであろう。

●自己組織化の利点

- ・自己組織化の利点は、複雑な構造を効率的に作れると点に尽きる。自己組織化に関する普遍的な論を工学側に適用すると、2～3 倍の効率化が達成可能となるような過程の構築が最大の要点であると考えている。現在欠如している点はナノスケールでの物理や化学の基本的枠組みであろう。

●自己組織化研究の約 10 年間の俯瞰

- ・12 年ほど前に主催した JRCAT（Joint Research Center for Atom Technology、アトムテクノロジー研究体）による自己組織化の国際会議においての状況と比較すると、生体の構造に関しての実験は進歩したと考える。ただし応用への距離は依然としてある。一方高次構造をもつ新材料の開発は化学を中心に確実な進歩が見られた。高次構造をもつ新材料の開発や正確な位置制御などに、本質的に階層的自己組織化などが利用可能であるのか、あるいはトップダウン型との組み合わせが必要なのかといった点に関して今回のワークショップで評価をいただきたい。

●研究者のアピールの方法

- ・生命と比較するとはるかに単純ではありながらも、階層構造に関連した興味深い現象などはすでに実用されている点も多いのではないだろうか。研究者たちは自身の研究を役に立っているのかと、卑下しすぎている部分がある。ナノテクノロジーの成果があるからこそ日本の状況は維持されている、という程の姿勢をもつことを期待している。研究の積み重ねを示して種々の成果が実現している点を強調しつつ、まだ目標への道程は遠いということを示していくといった訴え方が考えられる。
- ・現状ではナノスケールでの物理化学や生化学などといったナノサイエンスの部分が欠落している。この真空地帯を埋めなければ、自己組織化を本格的に利用する状況にはならない。結果として既に自己組織化が利用されているという話を主張しすぎると、やらなくてもよいのではないかという逆襲を受ける気がする。
- ・「自己組織化」などといった研究の標語に対して外部の視点からは違和感をもっている。これらの標語がたとえば政策決定者などの外部に届いていないのではないだろうか。例えば長い間にわたり計測分野に携わってきた人物などには、「階層的自己組織化」を耳にしても自分とは無関係の研究であると考えるに違いない。旗の立て方が間違っているのではないか。
- ・現在結果として実用化されている自己組織化現象にも背後には共通する理論体系はあると考える。その共通的な理論が得られることを期待している。また自己組織化構造の利用を目指す技術者の立場としては、生物の精緻な構造には驚異よりも可能性を感じており励みになる。

●合理的デザインのための基礎知識

- ・生物は多様性を維持するために複雑な構造を作っている。この部分を人間が真似する必要はない。合理的なデザインを実現するための基礎知識が不足しすぎている感がある。

●生物の階層構造の組み合わせ

- ・はじめは効率が悪かった生物の階層的構造が組み合わせさっていく過程のような方法論が解明されると、高分子の合成法としても新規の展開が期待できるのではと考えている。
- ・ある程度合理的に部品を用意して、その後の過程ではランダムに選別（スクリーニング）するなどといった組み合わせも一つの手法であろう。

●自己組織化の魅力

- ・化学と異なる部分として自己組織化に興味を抱く点は、高次構造を作ることができる点である。しかしながら自己組織化で作るものはテレビなどの装置ではなく、新規性のある材料であろう。

●グローバル COE

- ・近ごろ発表された今年度のグローバル COE プログラムの採択テーマを概観する

と、新鮮みが欠けている印象であった。人材を育てるための具体的な像が語られていないことを感じた。

- ・斬新的な提案には審査時のリスクがあるためにそれらを犠牲にしている部分がある。提案の方法や選定の方法を改良する必要はあるだろう。
- ・大学の教育をどのようにするかという点も考えなければならない。資金を配分する側と大学側の両方が考えなければならない複雑な原因があると考えている。
- ・グローバル COE プログラムのメンバーとしては全体的に目を引くテーマが少ない印象であった。それらの中で選ばれた最良のものが採択されたプログラムであると受け取っていただきたい。

はじめに

WS「階層的自己組織化のバイオナノテク」

セッション1 高次元組織化、そのダイナミクスと制御

セッション2 新機能創製

セッション3 新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製

セッション4 出口から見た重要課題の抽出

セッション5 まとめ

まとめ

Appendix

[4] セッション2 新機能創製／

主査：相田卓三（東京大学大学院工学系研究科 化学生命工学専攻 教授）

4.1 抗体分子の組織化と新機能／

原田明（大阪大学大学院理学研究科 高分子科学専攻 教授）

合成高分子が専門で抗体分子の研究を行っている。バイオの材料を化学の観点から研究している。抗体は免疫をつかさどるタンパク質であり自己と非自己の識別がある。化学的合成をほどこした分子も識別するものと考えた。抗体は高分子を認識する。

抗体分子の特徴としては5億種類以上あるといわれるほどの多様性と、数ある分子のなかから特定の分子を選別する特異性の2点がある。基本的な抗体のひとつにイミノグロブリンG (IgG) という、分子量5万ほどのY字型をしたタンパク質がある。分子の末端には抗原の結合部位があり、ウイルスや細菌の種類を区別している（図4-1）。

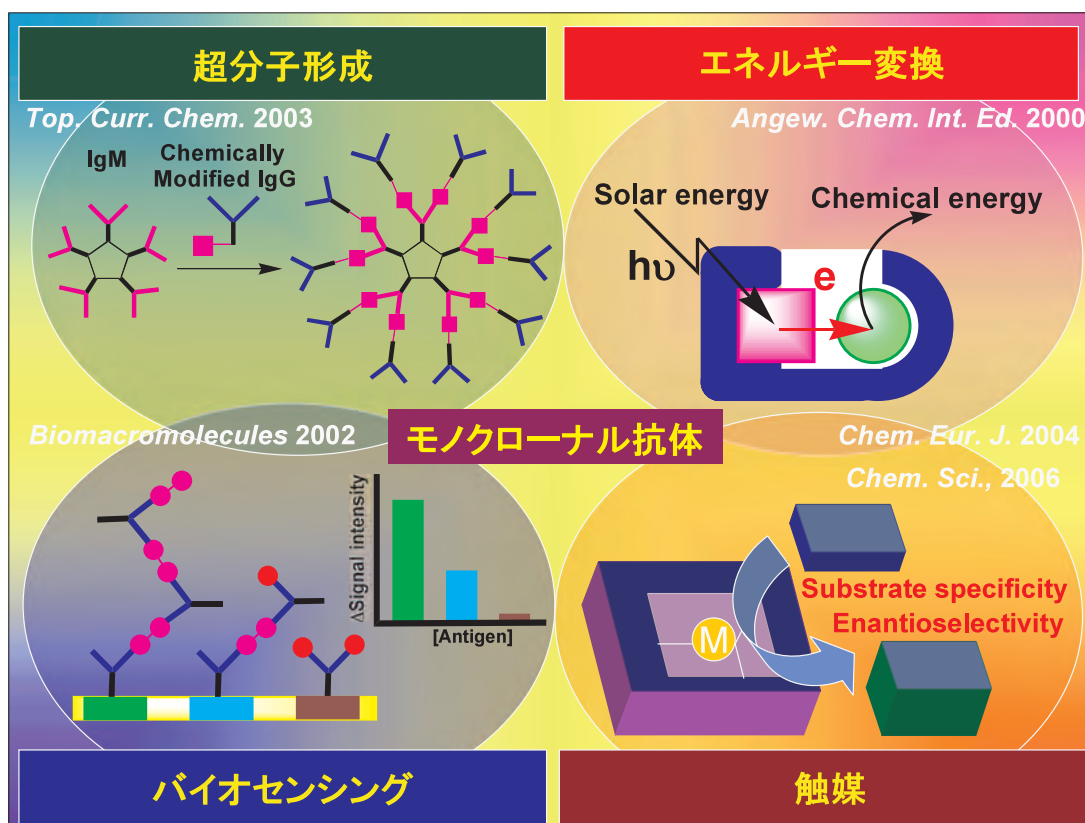


図4-1 モノクローナル抗体

IgGの2つの結合部位を用いて長い線状の高分子を形成することができ、センシングに応用が可能である。またプロテインGやプロテインAなどに埋め込み、さらに別の結合を付与させることで超分子を形成することも可能となる。イミノグロブリンM (IgM) という抗体を中心として周囲にIgGを結合させた。結合力と

特異性の両方を備えている点が特徴である。IgM と IgG の結合にさらに抗原を結合した抗体を結合させると大きなデンドリマーが形成される。IgG はアニオン性ポルフィリンに対する抗体でありカチオン性のポルフィリンには結合しない。この性質によりアニオンに非常に強く結合するデンドリマーの形成を実現した。抗体を集合させていき新機能を実現しようとする研究である。

生体には必須金属は存在するものの後周期遷移金属は存在しない。遷移金属をタンパク質に取り込むことにより、酵素のような選択的な触媒が実現するのではないかと考え研究をしている。ロジウムに配位子が結合した錯体に対する抗体（モノクローナル抗体）を作り、これを触媒としてアミノ酸プリカーサーを水素化させると、特異的に L-アラニンだけが生成される。基質選択性と立体選択性の両方が現れている。微量物質の検出法の一つに蛍光の利用がある。たとえば爆発物のトリニトロトルエン（TNT、Trinitrotoluene）の検出法として導電性高分子ポリアセチレンの誘導体が利用されている。ただし特異性がないため他の物質も検出してしまう。TNT に対する抗体を作ることにより TNT に特異的に反応する検出法が可能となる。

●質疑・討論

●爆発物検出技術への実用化

- ・ TNT を特異的に検出する技術は実用化に向かっていっているかどうかに関しては、様々な企業に関心を持っていただいている。20 年前から研究をしているが時代の流れにより需要が高まってきた。

4.2 分子ナノチューブによる新機能創製と応用へむけた階層的技術融合の課題／浅川真澄（独）産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクニクス研究センター）

両親媒性化合物を溶液中で組織化させ有機ナノチューブを生成する技術を開発している。研究の戦略としては複雑な核酸やタンパク質などの包接、徐放、流動などから、最終的にバイオセンシングなどに応用するテラーメイド型の有機ナノチューブの開発と量産型の有機ナノチューブの開発の 2 つがある。有機ナノチューブはフラレーンやカーボンナノチューブと比較しても研究に歴史があるが、実際の利用価値の面とりわけ量産化の面で課題があった。カルダノール-ブドウ糖系両親媒性化合物から作られる有機ナノチューブなどは熱安定性が 39℃程度と低い。ゲル-液晶相転移温度が 40℃前後であるとバイオ系への利用には適さない。そこで両親媒性化合物に含まれるフェノール環を相互作用が積極的なアミドに代えたところ、熱安定性が 71℃程度まで上昇し生体系に利用する場合の安定性が確保された。しかしながら分子設計の結果利用する脂質分子の値段が 1 グラムあたり 3 万円以上になり値段の問題が生じた。二重結合を cis-11-オクタデセン酸から cis-9-オクタデセン酸に代えてもチューブになることが判明したことからオリーブオイルに多く含まれるオレイン酸を利用したところ、ブドウ糖とオレイン酸から合成される

オレイン酸-ブドウ糖系両親媒性化合物からも有機ナノチューブが合成できることが判明した。値段の面の課題も解決したが量産性の課題が残された。従来の製法では大量の溶媒が必要となり、チューブが析出するまでに時間を要した。そこで溶媒を水からアルコール系の有機溶媒に代えたところ短時間でチューブを作製できるようになった。以上の製法は再生可能な資源から合成される分子を原料としているため、低環境負荷型の技術であると認識している。

開発した有機ナノチューブの包接機能の評価を行った。30～60nm の内径をもつ有機ナノチューブを用いて、1～20nm 程度の大きさをもつ金微粒子や直径 12nm の球状タンパク質フェリチンの包接に成功した。フェリチンはタンパク質の一種である。包接機能により農業、食品、健康などのさまざまな分野への利用が期待される（図 4－2）。

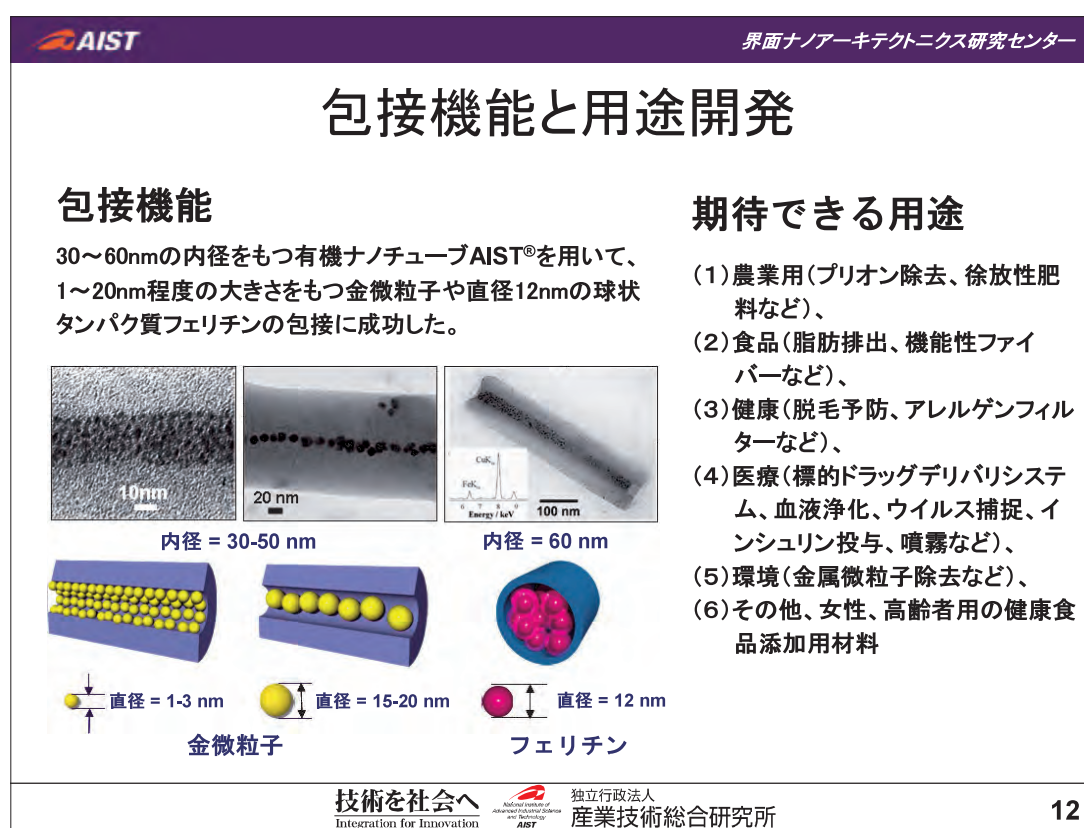


図 4－2 包接機能と用途開発

研究開発のなかでは研究成果を企業に宣伝する技術移転促進面がもっとも苦労した。「オーガニックナノチューブ AIST」という名称で商標登録も行った。サンプル提供の際の研究試料提供契約（MTA、Material Transfer Agreement）や秘密保持契約を経て企業と連携を取りあいながら、製品化研究開発を目指していきたい。知的財産や産学官連携の部署や TLO（Technology Licensing Organization、技術移転機関）から協力を得て、サンプル提供や共同研究の可能性を検討している段階である。安全性の評価に関しては現在分解度の試験を行っており、環境に曝露しても

問題ない物質であることを確認した。今後知的財産権の強化やサンプル提供による企業側のニーズの把握や問題抽出などが課題である。ナノテクノロジーの安全性評価も推進し安全性を社会に示していきたい。

●質疑・討論

●系を決定する条件

- ・系の種類を決定する指標や条件に関して定量的に解明されているのかどうかに関しては、組織化の過程では出発点の条件が系を左右する場合が多い。ただし有機ナノチューブの分子系の場合はその条件はない。溶媒を変えることによりチューブ以外の系になる場合はある。結晶の生成段階で条件に変化を与えれば他の系に進む可能性もある。

●有機ナノチューブ以外の生成

- ・有機ナノチューブ以外の生成に関しては溶媒を変えるとプレート状のマルチラメラができる。

●研究開発の出口、企業との連携・契約

- ・将来がもっとも約束された出口はどのような方向の分野であるか、現時点ではわからない。企業との折衝のなかで課題を抽出していくことになるであろう。十数社と実際の連携の検討を行っている。
- ・秘密保持契約を締結しサンプルの提供受けるという点は企業側にとって困難を伴う。サンプル提供よりも製品購買の形式のほうが比較的容易である。また特許のライセンスという形式で代金を支払う場合にも苦労を伴う。
- ・現状では有償でのサンプル提供の形式となっている。ただし大学などの学術機関には無償で積極的に配布したいと考えている。

4.3 バイオデバイス応用へむけた機能性材料への要望と課題／

馬場嘉信（名古屋大学大学院 工学研究科 化学・生物工学専攻 教授）

トップダウン型の DNA（DeoxyriboNucleic Acid、デオキシリボ核酸）解析法などの研究において理論分野や半導体分野の研究者と共同研究を行ってきた。自己集合的な過程を用いて数十 nm サイズのボールを開発し、DNA タンパク質の解析が可能であることを共同研究で証明した。研究の実用化に向けては医工連携や産学連携を進めながら研究を行っている。

今後の研究の方向性に関して調査する機会を得たのでその成果を紹介したい。量子効果を利用したバイオ装置として DNA を 1 分子レベルで操作する技術の開発が進んでいる。1 分子だけ DNA を固定化することが可能な DNA ナノピンセットは、量子効果装置で開発されている量子ポイントコンタクトと構造が類似している。また DNA 解析装置のナノピラーの構造はフォトニック結晶と類似している。生体分子を操作する装置と量子を操作する装置が類似している点に着目し組み合わせるこ

とができないかと考えてきた。米国の研究者なども数百 nm のチャンネルにイオン溶液を入れた構造のナノフルイディック・ダイオードを開発したと雑誌に報告している。半導体装置においては対象とするサイズが量子力学的領域に突入し、統計的な処理が困難になってきている。トップダウン型と自己組織化などのボトムアップ型の融合を目指すべき領域であろう。バリスティック伝導や量子ホール効果を利用した装置をバイオの分野の装置に組み込むなどの融合が考えられる。実現すれば DNA やタンパク質の相互作用を 1 分子レベルで計測したり、1 光子レベルや 1 電子レベルで酵素反応を正確に計測したりといった技術が期待できる。細胞膜の分子輸送やシグナル伝達などをより詳細に観察することが可能となるのではないだろうか（図 4－3）。

量子バイオデバイス 自己組織化と微細加工の融合

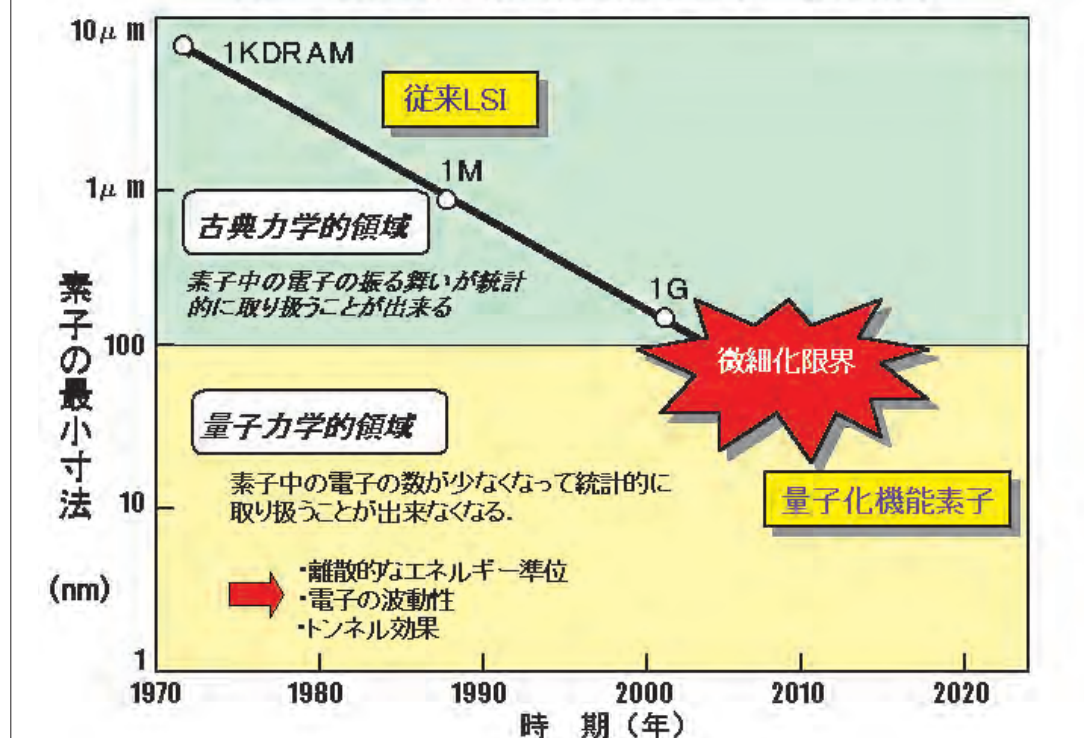


図 4－3 量子バイオデバイス 自己組織化と微細加工の融合

量子ビットや論理ゲートとシリコン装置やカーボンナノチューブの融合も研究が進んでいる。病気の診断などに応用可能な技術が開発されるであろう。自己組織化は量子効果とバイオ・医療の溝を埋める役割を果たすと期待している。「量子バイオデバイス」も実現可能であろう。ナノプレーを用いると DNA の解析が可能となる。配列のしかたにより DNA を大きいものから小さなものに順に分離することができる。また配列のしかたにより DNA が伸長したまま高速で移動することも解明されており、量子輸送のバリスティック伝導を連想させる。また DNA とタンパク質が 1 分子単位で相互作用する様子を観察する装置を開発している。自己組織化の制御

や定位置でのタンパク質の固定化が課題である。DNA の破裂を認識し切断する酵素も開発が行われている。量子的にデータを得るには自己組織化を利用して 1 分子レベルの反応を観察する技術が必要となってくるであろう。これらの分野では自己組織化や化学やケミカルバイオロジーなどの分野の共同研究が重要となる。

●質疑・討論

●DNA 解析

- ・ DNA 解析法における DNA サイズと挙動の関係の理論があるかどうかに関しては、構造を変えるたびにモデルを替えている状況であり、普遍的な説明は現在ではまだ難しい状況である。

●電気浸透流

- ・ 分子の電気浸透流との関連に関してはどうか電気浸透流をゼロにすることは可能かについては、ゼロにすることは不可能である。浸透率が非常に大きいときは DNA の分離はできない。絶縁体が並ぶ中では電場の分布が通常と異なってくる。詳細の解明はこれからとなる。

●ナノフルイディック・ダイオード

- ・ ナノフルイディック・ダイオードに関して内側はイオンとなっている。報告では 100nm 以下になると電流の状態を示すグラフが、ダイオードのものと同様になるというデータが出ている。

●バイオ診断

- ・ バイオ診断の分野では難度の異なる二つの方向性が考えられる。それぞれで超えなければならない基礎科学があるように思える。
- ・ もっとも重要なのはアウトプットとして出されるデータの定量性を担保する点であると考えている。例えばナノピラーで抗原・抗体反応を観察するとすれば、抗体の活性を保持し定位置に固定化できるかなどが重要になってくる。その場合自己組織化の利用が必要になるであろう。低費用化も課題である。

4.4 メディカル・ナノデバイスからの要望と課題／

鄭雄一（東京大学大学院工学系研究科 バイオエンジニアリング専攻 教授）

再生医学や組織工学の分野を専門としている。細胞等から組織や臓器を作り出して治療に役立てる医療戦略を立てている。バイオナノテクノロジーは先端技術の集約に主要な役割を担っている。細胞、足場、シグナルが再生医学を考える際の 3 要素である。

ニースの同定と適切なエンドポイントの設定は要点となる。骨軟骨組織の損傷を例にとると骨粗鬆症は重症例が年 4 万件、変形性関節症は重症例が年 8 万件、歯周病は重症例が年 13 万件ある。症例数が多い、重要性が高い、増加傾向にあるといった観点からニースを同定することが重要であろう。医療用のバイオマテリアルは生

体適合性、生体分解吸収性、生体安定性などの他のマテリアルとは異なる性質を求められる。再生誘導能は生物学的知見なくしては引き出すことはできない。骨の治療法を比較する。自分の骨の使用は機能的には優れているものの手術が危険であり採取量も限られる。他家骨移植は感染症にさらされる側面がある。リン酸カルシウムから作られた人工骨は安全であるものの機能性は劣る。分解吸収、強度、形状・操作性、再生誘導能に優れたバイオマテリアルが求められている。理想的な人工骨は1か月程度で自分の骨と機能的に融合するものである。足場材料としては現在コラーゲンやヒアルロン酸などのポリマーが主に用いられている。人工素材はポリ乳酸やポリグリコール酸などのポリマーが多く用いられている。金属はチタンが有望ではあるものの強度が高すぎたり腐食や毒性や摩耗粉の問題があったりする。セラミックスは生体適合性が高いものの脆いという難点がある。生体適合性や安全性などの問題を解決しながら高機能を発揮する素材を研究開発することが必須である。臓器の構造を例に見る。ほぼ全ての組織や臓器は3次元構造をとっているので外部形状と内部構造を自由に制御できる造形法の研究と開発が必要となる。3次元造形法の中では積層法とりわけ光硬化法やインクジェット式積層造形法が最適であると考え（図4-4）。

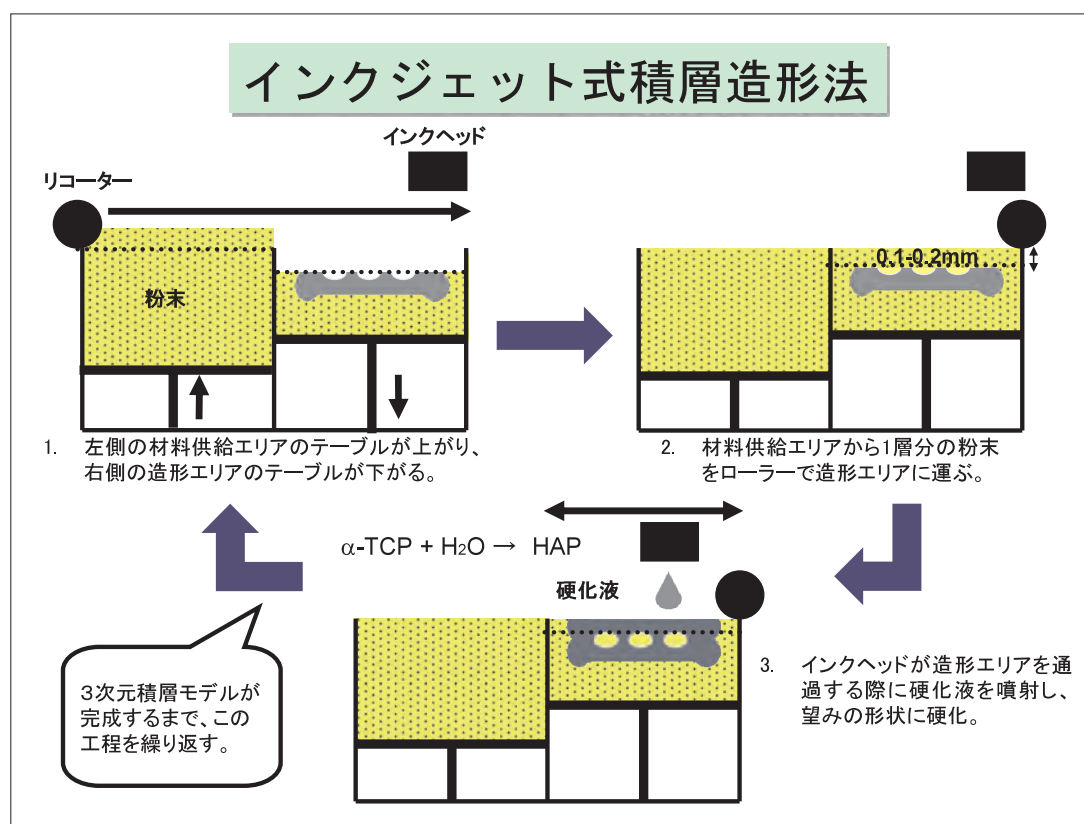


図4-4 インクジェット式積層造形法

光造形法は造形精度が極めて良いがモノマー・重合開始剤の研究開発が必要となる。インクジェット式積層造形法を用いて α -TCP (α -TriCalucium Phosphate、 α -リン酸三カルシウム)に水を混ぜると、ハイドロキシアパタイトになる。操作性、形状、分解吸収性などの課題は解決している。しかしながら α -TCPは再生誘導能が無いため骨癒合に時間を費やす。足場素材を高機能化するため生理活性を付与する技術の研究と開発が必要である。分化刺激因子は多種あるものの単独シグナルでは不十分である。組み合わせも含めて網羅的にスクリーニングを行い最適化することが必要である。分化刺激に反応してGFP (Green Fluorescent Protein、クラゲが発光する緑色蛍光のタンパク質)を発現する遺伝子を取り込んだ細胞を使用することによって、骨・軟骨分化を検出するマーカーシステムを開発している。同様の細胞を低分子化合物のスクリーニングに応用することができる。インクジェット法によりインクヘッドの数を増やすだけで、生理活性物質を含め人工骨を作ることができる。DNA (DeoxyriboNucleic Acid、デオキシリボ核酸)や蛋白や低分子化合物の放出をコントロールして骨を発生させるには、DDS (Drug Delivery System、ドラッグ・デリバリー・システム)と組み合わせる必要があるであろう。3次元の造形技術と生理活性を付与する技術の融合により、生理活性物質を望みの位置で徐放して迅速な再生誘導を行う高機能型インプラントが実現するであろう。

●質疑・討論

●トランスレーショナルリサーチにおける問題点

- ・骨の機能プラントに関するトランスレーショナルリサーチの問題点などについては、医療器具扱いとなるため標準的な安全性試験や毒性試験が求められる。またカスタムメイドであるためどのように強度を担保するかといった点が問題となる。

●組織体制

- ・研究組織や教育の体制に関しては、出口につながる要素技術を列挙して組織のトップに提案した上でチームを組んでいる。研究では患者の治療に役立てたいという出口のイメージが先行している。医学部は臨床医になる進路と基礎研究者になる進路の二つしかない。医療機器開発者や創薬開発者の居場所がないのが問題である。

●インクジェット式積層造形法、GFPを用いたスクリーニング

- ・インクジェット式積層造形法はどの程度の精度があるのか。層状であるため割れやすいといったことはないか。GFP (Green Fluorescent Protein、クラゲが発光する緑色蛍光のタンパク質)を用いた低分子のスクリーニングはすでにシステムが確立されている感がある。
- ・精度に関しては基本的には100 μ m以下のレベルである。割れやすさは臨床的に問題がある程度ではない。大腿骨と同様の強度を実現することは現時点では不

可能である。現在は顔の骨に使っている。低分子のスクリーニングに関しては薬のスクリーニングを実施している。

4.5 セッション2 討論 出口から見た新機能創製

●講演「抗体分子の組織化と新機能」の感想

- ・半導体技術とタンパク質や細胞の相互作用は重要であるという話は興味深かった。費用面の競争は厳しいものがある。潜在力として10年後でもよいから確実に成功する研究であればよいのではないかな。
- ・抗体の右性と左性の分子の分離に関して、所望の分子を確実に分離できる方法が確立できれば革新的な化学になるであろう。

●講演「分子ナノチューブによる新機能創製と応用へむけた階層的技術融合の課題」の感想

- ・らせん構造を活かした付加価値の高い用途は考えられないだろうか。
- ・分子ナノチューブの高次構造化実現をぜひお願いしたい。
- ・費用面を度外視して合成法を開発したところ、別の合成法を開発している化学製造業と接点をもち共同開発を行い最終的に商品化されるに至った経験がある。費用面よりも性能面を主として開発していただきたいという期待がある。
- ・基礎研究レベルではより深い段階の研究を行っている。制限された空間内ではある程度の高次構造化の方向性は見えてきている。用途開発としては分離分析の方面に適用できるのではないかと考えている。

●講演「バイオデバイス応用へむけた機能性材料への要望と課題」の感想

- ・研究開発のうち試作品は複数の企業で作られているが商品化されているものはまだない。
- ・ナノピラーに関してはMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）と組み合わせることにより一定の機能が出るのではないかと考えているが製品段階には至っていない。講演を聴き機能の新規性を追求しつづけると革新的な装置が誕生するだろうという印象を持った。

●バイオチップ・DNAチップ

- ・バイオチップは市場に登場する期待が大きいものの実際にはなかなか商品化されない。一方DNAチップは一時期日本でも開発の努力があったものの、現在は厳しい状況となっている。日本が競争に勝つ算段はあるだろうか。医療分野では認可の問題が厳しい。
- ・日本の技術レベルは欧米とさほど変わらないと考えている。認可の問題が多くある医療分野の中で、キラーアプリケーションの登場につながるような技術的突破が起きるかが重要であろう。各企業の努力に期待している。また医療分野以外のよい市場を見出すことも重要である。

●材料の安定性

- ・新しい機能性のある材料の実用化においては、どの程度安定に材料を使えるかが大きな関心事となる。
- ・抗体はタンパク質としては安定な性質を有している。80℃あたりまでは安定性を保持できるだろう。1回の培養では数キログラムを生成することが可能である。供給としては余剰するぐらいの量である。
- ・分子ナノチューブの安定性に関しては水中で70℃前後までチューブ状態を保持することが可能である。乾燥状態では150～160℃程度で焦げる。サプライチェーンの構想はまだないが興味ある企業と共同で量産化体制を構築できればと期待している。

●「出口」の捉え方

- ・ものづくりをして商売が実現させることのみを「出口」と考えるのではなく、広がりを持つ研究を行うといった点も「出口」の一つとして考えていただきたい。

●理想的なポリマー

- ・化学の研究者は自己組織化の材料を作る際に作り方の美しさなどを追求するあまり、要求される成果とは異なる場合がある。また物理学の研究者と化学の研究者との間での議論がうまく行かない点がある。どの企業も期待しているポリマーは透明性があり屈折率が高く耐熱性の高いものであろう。

[5] セッション3 新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製／ 主査：居城邦治（北海道大学電子科学研究所 分子認識素子研究分野 教授）

5.1 自己組織化プロセスを用いた材料・デバイス創製／

竹内昌治（東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター 准教授）

タンパク質や細胞を焦点としたマイクロマシンの開発を研究している。手法はトップダウン型であるが研究テーマの設定は学生や研究員のボトムアップ的な着想に基づいて行っている。細胞のようなマイクロマシンが実現することをこの分野の研究者はみな夢見ている。その場合のマイクロマシンは細胞の中身のようなナノシステムを持つ。製造過程には自己組織化を用いることが不可欠となるであろう。

カプセルを膜のような構造で囲みカプセルが外界と応答するために膜タンパク質のような機能を組み込みたい。さらに鞭毛や分子モーターを付加することでカプセルに可動性を持たせたい。その場合例えば MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）で用いられている技術を組み合わせると、「出口」に近いアプリケーションが実現するのではないだろうか。またシリコンデバイスと生体との界面にウェットなデバイスをおくことで、より高度なセンシングが可能となると考えている。このような機能的なカプセルを MEMS 技術と融合する開発研究が行われている。無機材質で作った親水基と疎水基のある物質を混合するとカプセルができることが報告されているが、ここでは比較的簡単にできる脂質膜によるカプセルの研究について報告する。パリレン（ポリパラキシリレン）をガラス基板上に蒸着しプラズマ加工により選択的にパリレンを除きガラスを露出させる。そこに溶液を垂らして乾燥させフィルムを剥がしパターンを形成するという MEMS 技術を応用して、リピッドを均一にパターン化する。水を入れて電圧を加えるとエレクトロフォーメーションという現象が発生し、均一な直径のリポソームを作ることができるようになってきた。

フルイディスクを用いてカプセルを作成する方法もある。水と油の非混合性を利用して流路の中に均一な「水玉」を連続して作ることができる。この技術をもとに「シャボン玉法」を考案した。自己組織的に二重膜を作りガラスの流路を用いて微小な流体力を付加すると、微小な膜が変形し球体の膜を作ることができるというものである。「水玉」の周囲では水と油の界面に脂質の単分子膜ができる。マイクロ流体装置の利用により微小な流体の制御が容易になる。十字架型のマイクロチャネルを用いて脂質内で水と水とを接触させると脂質二重膜が形成されることが分かってきた。MEMS 技術の利用により穴の直径・深さ・水圧などを制御できるため、再現性の向上が可能となる。

ガラスのマイクロ流路に材料を含ませ流体力を掛けるとカプセルが作られる。高効率・短時間でカプセルを作ることができる点が利点である。機能デバイス化させて「パチンコ法」を考案した。直線の微小な流路と迂回する微小な流路を組み合わせ

せ、球状小胞体をくぼみに次々とトラップさせアレイを形成するという方法である(図5-1)。

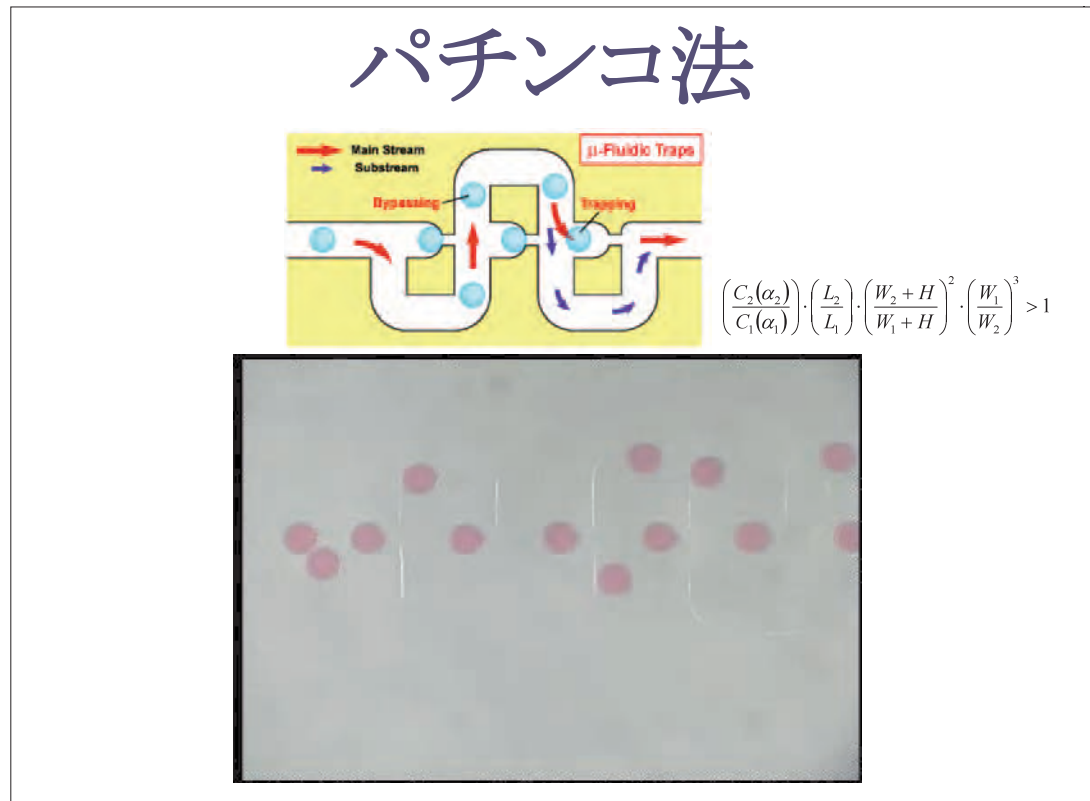


図5-1 パチンコ法

球状小胞体にDNA(デオキシリボ核酸)を入れてタンパク質を発現させその中から例えば発光したタンパク質を取り出し解析する、あるいはそこにあったDNAの配列を読み取るといった方法が確立されれば創薬への応用につながるのではないかと考えている。ボトムアップ的に組み込んだ膜の中に膜タンパク質を挿入することにより膜タンパク質の機能解明に役立つ装置が実現するであろう。それらの要素をカプセル化することにより細胞の様に振る舞う機能的なデバイスを実現することができると思われる。

●質疑・討論

●高インピーダンスによる干渉

・ピコアンペアのチャンネル電流を観察する場合インピーダンス(電圧の電流に対する比)を高くしなければならず干渉が起きやすい。克服に関しては現時点で3チャンネル同時計測に成功している。ただしギガオーム・レベルの検出が可能なアンプを使用しなければならない。

●リポソームの形状

・リポソームのパターン化の際マルチウォールとなるのかシングルウォールとなるのか。制御の可能性についてはユニラメラであるとうと報告されている。紹介し

た研究ではユニラメラーであるかどうかを確認していない。

●パターン形成時の寸法制御

- ・パターンを小さくする場合（球状小胞体の）寸法の制御は可能かどうかについては、紹介した方法でパターン形成が可能であるのは約 $2\mu\text{m}$ までである。さらに微小なパターンを形成する場合フィルターを通して単分散の球状小胞体を作ることになる。10～20 μm の寸法が細胞に合う寸法であると考えている。

●連続的な液滴による作成法

- ・球状小胞体を作ってそれをスポイトで掬っていたが、液滴を連続的に行えば中空チューブ様のものが大量に作成できる可能性があるが二重膜を縦方向に張るチューブからのアプローチを研究している。

5.2 トップダウン型・ボトムアップ型の融合／

山下一郎(奈良先端科学技術大学 物質創成科学研究科 メソスコピック物質科学講座 客員教授)

将来「ムーアの法則」は破綻すると予測されており、バイオ分子の利用が微細加工技術の選択肢の一つとなるであろう。そこでバイオの能力を用いて半導体の主要構成部分を開発してきた。タンパク質の内部空間使って化合物半導体、酸化物半導体のようなナノ粒子を作ったり、チューブ状構造体の中にワイヤを作ったりといったバイオミネラリゼーションを利用したのナノ材料開発により半導体デバイスを作っている。まずナノブロックを自己組織化で作る。アシンメトリ（非対称）な構造をもつタンパク質とバイオミネラリスした無機材料との大型複合体を作製する。これをトップダウンで作製した構造に自己組織化により組み込んでいく。この手法で半導体デバイスの主要構成部品を作る。さらにこの極微小部品によりタンパク質が行う情報処理を、ゆらぎを応用することにより実現することが可能なのではないかと考えている。

アシンメトリ的構造の形成の一例を紹介する。T4-phage の尾部にあるロッド状構造物の構成部品に球殻状（かご状）タンパク質をサブユニット連結させると、自己組織的にボール・アンド・スパイク構造が実現する。さらに金属あるいは半導体を付加し電極認識ペプチドも付加する研究を行っている。自己組織化により部品を作り半導体のトップダウン技術と組み合わせる考え方である。2次元結晶もデバイス開発に重要な要素技術である。タンパク質を利用すると大型の2次元結晶を作ることが可能で2次元結晶をシリコン上に搭載することも可能である。タンパク質の表面に若干の疎水結合性のペプチドを修飾すると、シリコン基板上と弱い相互作用を起こして2次元結晶が自動的に形成される。タンパク質さえ設計・精製することができれば後の工程はピーカーの中で進めることができるため、非常に安価で容易に製造することができる。

自己組織化と半導体技術の融合としてフローティング・ゲートをナノドットに替えた装置を開発した。通常のトランジスタを作る工程にフェリチン・コアを高密度

に配列させる自己集合の技術を融合した。半導体の研究者などからはタンパク質の使用に対して反発があった。しかしながら奈良先端科学技術大学院大学のバイオナノプロセス研究棟では、半導体の研究者とバイオの研究者が日常的に議論をする環境を整えたため分野融合が捗りデバイス作製が実現できた。タンパク質の自己組織化のナノエレクトロニクスへの応用を超えた先の段階があるのではないかと。バイオ系の応用では精度を犠牲にする部分があるためゆらぎを導入した情報処理などの応用を考えていかなければならない。新機能が出現するようなナノ構造の作り方も必要となるであろう。例えば自己組織化により周期的に開閉をする機能をカプセルの中に埋め込んだ電池触媒の開発を構想している。自己組織化によって新機能が生まれるという創発的なナノ構造の作り方を求める必要がある（図5-2）。

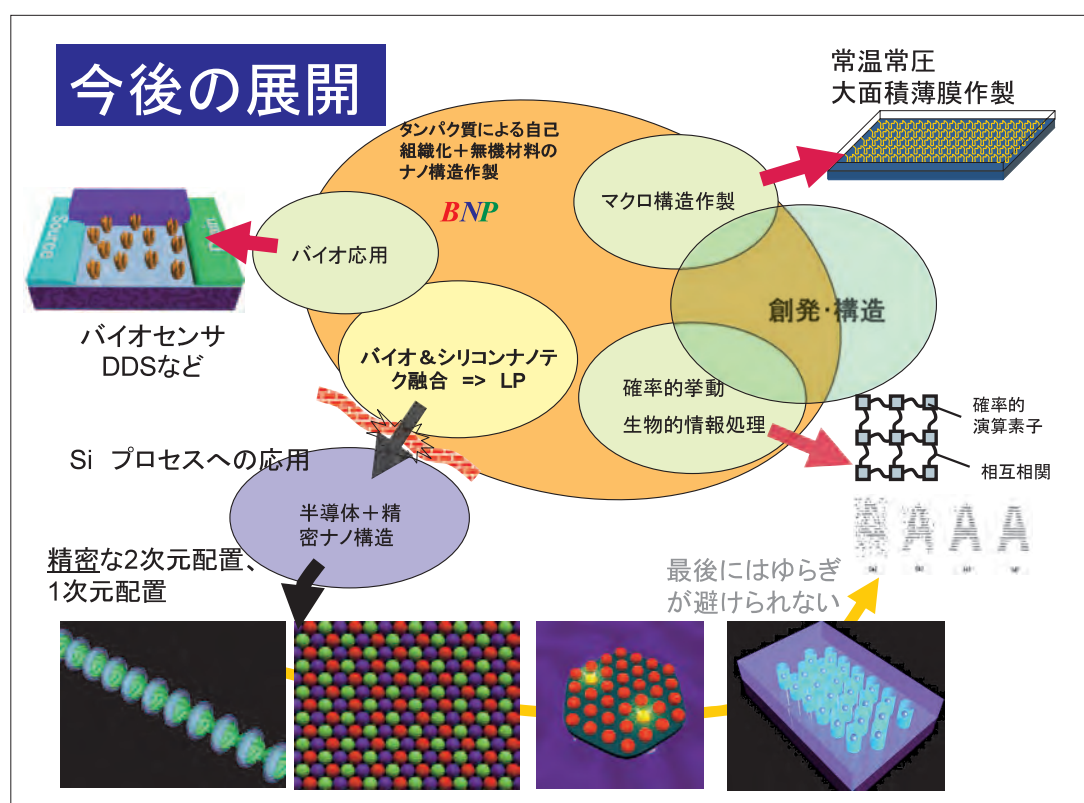


図5-2 今後の展開

●質疑・討論

●形状の選別

- ・T4-phage への球殻状タンパク質の付着に関して、集積する段階でテトラマーのみを選別しているのかどうかについては高い収率には達していない。ただしテトラマーとトライマーやモノマーなどでは大きさが異なるため、遠心分離による選別も可能である。収率向上のためにはリン化の段階をさらに利用していく方向に帰着するのではと考えている。100%の均一性を達成することは厳しいが生物学的な判断が可能となるようなアプリケーションを考えている。

5.3 トップダウン系とボトムアップ系の接続・統合による機能材料設計に向けて／

藤川茂紀((独)理化学研究所 トポケミカルデザイン研究チーム 副チームリーダー)

低分子の自己集積による超分子構造体の形成を研究していた。より高次の組織体形成のためにはナノ領域の分子認識が必要と考え、タンパク質表面の分子認識に基づいた阻害剤の設計を研究した。その後、分子認識の研究だけにとどまらずナノ薄膜を基本とするナノ構造体の形成を研究することとなった。現在は、東京応化工業と共同で、ナノ薄膜（ウェット・ナノコーティング）を用いて種々のナノ加工工程やナノ材料を実現する方法を研究している。EUV（Extreme Ultra-Violet、極端紫外発光）リソグラフィでは、解像度 28nm あるいは 26nm の微細なレジストパターンを実現されている。材料研究の観点からは、レジストパターンを単なる保護膜と捉えるのではなく、寸法や形状がデザインされたナノ物質であると捉えたほうがより多角的な展開が可能と考えられる。バイオのナノ構造は均質なレジストパターンと異なり、内部に微細な階層構造を有している。この特質を用いれば新規のナノ材料が実現するのではないだろうか。

トップダウン型とボトムアップ型のアプローチが相互接合する寸法は、双方の限界である 10～100nm の範囲であろう。この範囲を意識して開発研究を行えば新規の材料が実現しうるのではないか。ナノ材料を作る際、内部構造を単純化し可能な部分から構造を形成してそれを研究するということを行えば、次の段階の科学が生まれるのではないだろうか（図 5－3）。

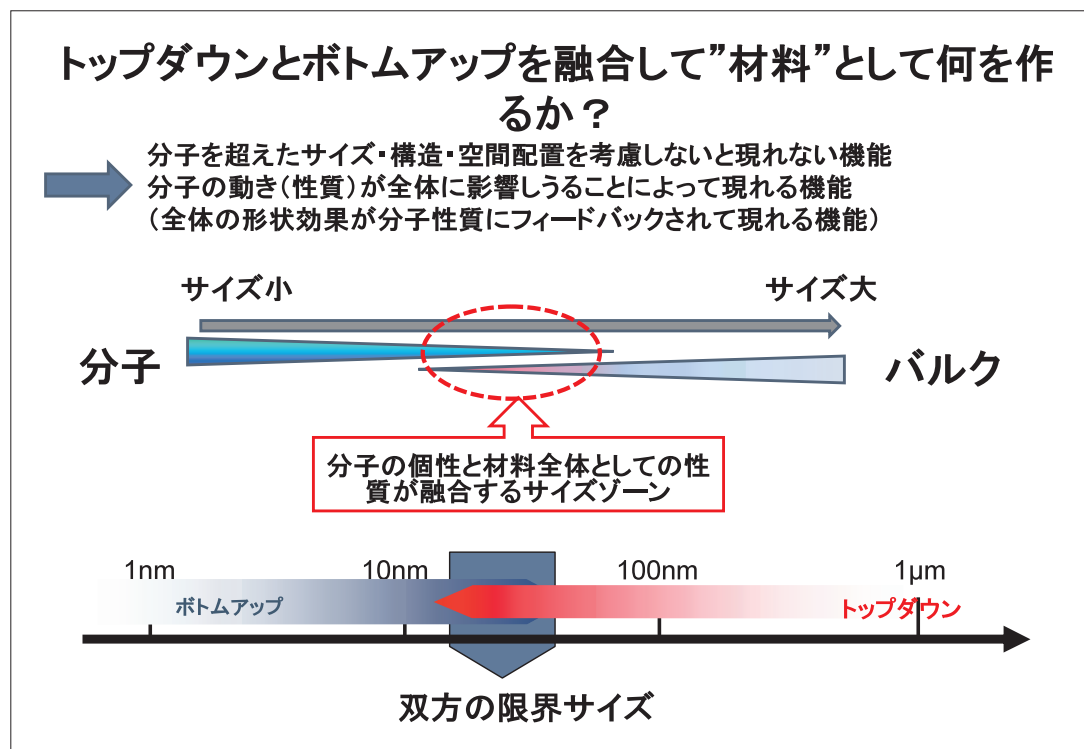


図 5－3 トップダウンとボトムアップを融合して“材料”として何を作るか？

トップダウン型の技術でレジストパターンを基板上に描き、そこに表面ソルゲル法というボトムアップ型の方法で分子を1層ずつ重ねることにより薄膜を作る。その薄膜を選択的にエッチングすると微細な線状パターンを形成することができる。薄膜形成では金属酸化物の他に金・銀・銅・ニッケル、ポリマーといった材料を薄膜化することができる。塗り方の制御により複雑な内部構造を有する線を形成することも可能である。材料、形状、寸法が制御可能となり、材料の物質のデザインや組み上げ方法も制御が可能となった。

トップダウン系とボトムアップ系の接合による機能の材料の設計に向けて、材料の全体の寸法、形状、中身の分子配置の設計などが必要であり、その具体的作製が可能となってきた。ナノ材料を大量かつ系統的に作製しうる理論と実験を進めていく必要がある。ナノ材料の対象機能を具体的に絞り込み協力体系を強化すれば可能となるのではないかと。半導体プロセス技術はIBMやインテルなどの米国企業が強力と言われるが、技術を支えているのは日本企業である。国内の製造業が結集すれば、形状・サイズがデザインされたナノ材料の工業生産は不可能ではない。物質が自然に動く点に興味がある。動くナノ材料を開発できればと考えている。ナノロボットは興味があるテーマである。

●質疑・討論

●トップダウン型とボトムアップ型の融合

- ・紹介された技術はトップダウン型のイメージがある。バイオ分子などを鋳型にすることについては、半導体産業は目的が明確であり開発の進展が速かった。分子合成に関してレイヤーコードなどを上手に利用する技術をボトムアップ型で開発して、単純な構造と寸法・形状を目指していけば系統的かつ基礎的な科学は進歩すると考えている。アモルファスの解析技術はほぼ皆無に等しい。トップダウン型のプロセスも対象の寸法が微小になると、分子を扱うため内部構造が制御された状態のレジストを作る必要が生じる。紹介した研究とニーズの合致点があった。
- ・60～70nmのレベルでのレジストパターン形成では、自己組織化がすでに使われていると考えてよいのではないかと。
- ・広義の意味では自己組織化が使われている。微細なパターンのばらつきなどを解決するために自己組織化により整ったパターンを作るという点では、レジストパターン形成と自己組織化には接点がある。

5.4 新規なデバイス機能設計／

渡邊正義（横浜国立大学 大学院工学研究院 機能の創生部門 教授）

イオンのみからなる融点が室温以下の新規の液体の物性を研究し、材料としての応用を検討している。イオン液体は液体の一般的性質である蒸気圧を有していない。そのため有機物であっても不燃性となる。熱的安定性、高イオン伝導性、高屈折率

などの特徴もある。イオン液体が新規の有用な液体となることを目的としデバイス機能設計を進めている。イオン液体を新規の伝導体や溶媒として使用した。通常の液体では放置すると蒸発してしまうがイオン液体の場合は蒸発しない。液体の範囲が 400℃以上と幅広い。イオン液体の材料化のためイオン液体と高分子を組み合わせる研究をしている。例えばイオン液体と PMMA (Poly methyl methacrylate、メタクリル酸メチル樹脂) の組み合わせでは完全に相溶した新規の材料となる。水中では LCST (Lower Critical Solution Temperature、下限臨界溶液温度) 型の相転移を示す高分子をイオン液体中に入れると、UCST 型 (Upper Critical Solution Temperature、上限臨界溶液温度) の相転移を起こす。また低温で融解し高温で相分離するような系 (LCST 型) をイオン液体／高分子系で発見した。

イオン液体と高分子網目が完全に相溶した「イオンゲル」での研究例を紹介する。開発したプロトン伝導性のイオン液体を用いると水がまったく無い状態でもプロトン伝導が発生し、100℃以上の温度で加湿することなく作動する燃料電池構築が可能となる。イオン液体と高分子を複合させることによりアクチュエータに応用することも可能である。イオンゲルに安価な活性炭電極を取り付け電場印可すると、大気中でイオン液体と高分子からなるイオンゲルが動き出す。またイオン液体を用いてエレクトロウェットングを評価している。イオン液体に疎水性の基板を介して電場を掛けるとイオン液体を動かすことができる。マイクロフルイディスクの材料の一つとしてイオン液体を利用することができるのではないだろうか。

一方ある特定の温度または条件下でイオン液体／高分子が相転移する系の研究も進めている。特に LCST 型の相分離は興味深く構造形成性のエントロピーが減る溶解機構がないと説明が付かない。芳香族系化合物とイオン液体の複合体はリクッドクラスレートを形成することが知られている。高分子化合物でも同様の現象があるのではないだろうか。コロイド液晶鋳型法を用いた材料の開発も行っている。この方法を用いると同一の物質で光の三原色を発色させることができる。逆オパール構造を有するハイドロゲルは電圧を掛けないときは無色透明のゲルであるが、電圧を掛けると様々な色が発生する。逆オパールをエネルギー変換系に利用する研究も行っている。シリカのコロイド結晶を鋳型としこの隙間で高分子を重合し炭化させることにより、炭素系材料の逆オパールを作製している。最密充填型のコロイド結晶であるため空孔も炭素も 3 次元的に連続している。ナノ電極をイオン液体などと組み合わせることにより新規の高性能エネルギー変換系を構築できるのではないかと考えている (図 5-4)。

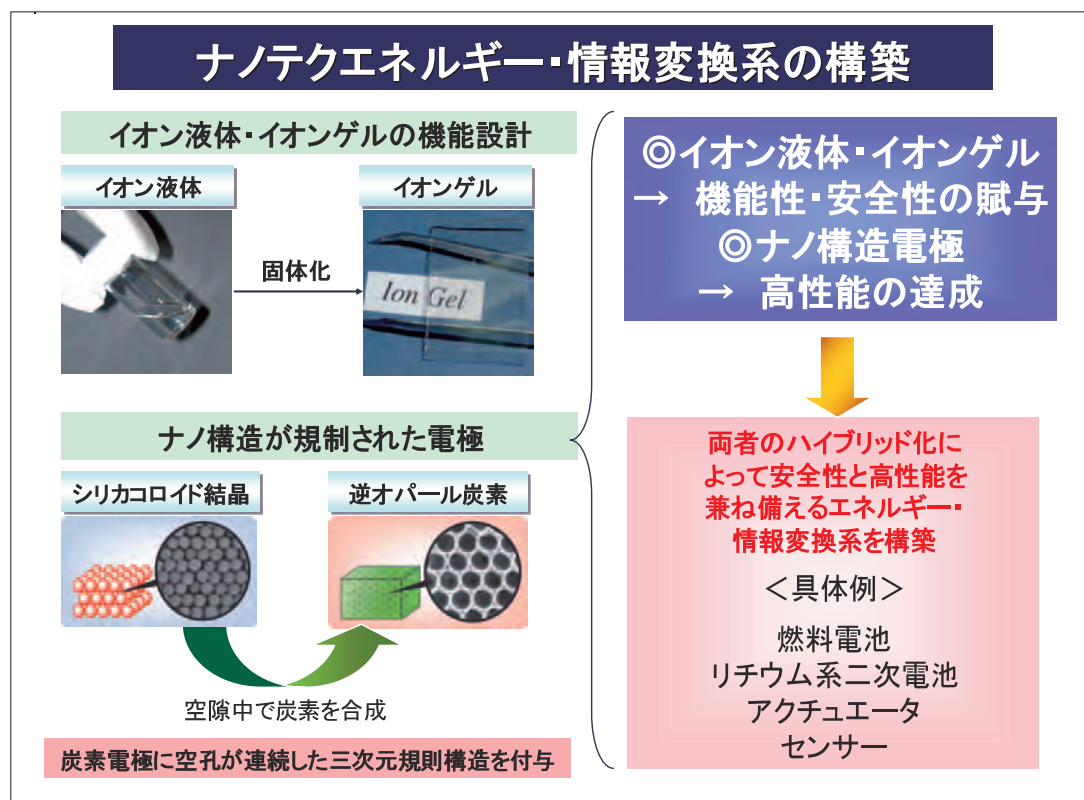


図 5 - 4 ナノテクエネルギー・情報変換系の構築

●質疑・討論

●イオン液体の動作

- ・イオン液体の電気応用に関して 0℃以下での動作については、プロトン伝導性のイオン液体で融点が-10℃程度まで達成されている。一数十℃という温度まで液体状態を保持しようとする点に、科学として研究をする価値があると考えている。

●二次電池への応用

- ・二次電池に应用する場合リチウムイオンの電解液の部分にイオン液体を用いるかどうかに関しては、リチウム系電池の大型化が重要になるであろう。現在のリチウムイオン電池には有機溶媒が使われているため、煙や火が発生した際に問題となる。イオン液体やそれをゲル化した物質を電解質にして、ナノ構造電極を作れば安全性を保つことができると考えている。

●太陽電池への適用

- ・イオン液体を色素系の太陽電池に適用した例については研究段階である。イオン液体を使ってどの程度までナノ構造を制御し高性能を引き出せるかといった点を研究の焦点としている。

5.5 総合討論

●講演全体の感想

- ・興味深いセッションであった。若い研究者たちの将来が楽しみである。
- ・分野が幅広く参考になった。MEMS を活用する技術などの話を聞くと製造技術に使うイメージが湧いてくる。研究開発のアプローチは十分にあり具体化するための方法が検討されている段階であるという印象をもった。トップダウン型とボトムアップ型の融合に重要な点は低コストを維持する点である。その意味では鋳型をもとに大量複製を行う方法が前提になるのではないだろうか。
- ・新規の現象を発見することも「出口」の一つであると考え。ナノ構造をもったバルク材料を開発する際、中を見ることができする方法が欲しい。ナノ粒子とバルク材料の間の相互作用などについても理解が深まれば、よりよい材料が実現するのではないだろうか。

●講演「自己組織化プロセスを用いた材料・デバイス創製」の感想

- ・リポソームを配列したものを高処理量して測定に利用できないだろうか。機能をどのように付加していくか。
- ・血糖値センサなどを付加していく考えはあるものの、現在は膜タンパク質を組み入れて環境に応答する機能カプセルを開発したい。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) には様々な技術が導入されるため、ある技術の目標に向かう中で派生する技術も現れる。

●講演「新規なデバイス機能設計」の感想

- ・イオン液体のゲル化した物質に DNA を散りばめる形で機能を搭載する場として利用することに関しては、可能性としてはあるのではないか。生体高分子をイオン強度の高い箇所に導入しても機能するだろう。
- ・イオン液体中にポリマーが溶解した場合、通常の溶媒に溶解するときとは形状に変化があるのかに関しては解明されていない。ポリマーとイオン液体に関しては、セルロースの溶媒にイオン液体を加える実験が大きな話題となっている。
- ・応用に直結しているわけでないが研究の牽引力が発揮される分野であり、興味をもって取り組んでいる。半導体の分野には研究としての牽引力が非常にある。

●講演「トップダウン型・ボトムアップ型の融合」の感想

- ・機能を実現するための設計としてタンパク質を用いる工程は簡単には実現しないようである。例えば 20 年程度のプロジェクトで成果を生み出すといった可能性を議論したい。
- ・粒子の配列を利用した手法が最初にあったものの困難であることがわかってきた。その後タンパク質の多種多様性を利用する研究の流れになっている。米国では NASA (National Aeronautics and Space Administration、国立航空宇宙局) や軍が、ペプチドの長さを変えることによりテーラーメイドのタンパク質を開発する研究を行っている。10~20 年後には有機化学系の知見も向上し人工タンパ

ク質の開発が行われているのではないだろうか。

- ・セッション全体として興味深いもので元気づけられた。半導体製造業では 300mm サイズの基板に 32nm の極微のチップを作るようになり大量のチップを生産することになる。どの企業が製品を受けとめるのか。半導体の少量多品種化をどのように考えていくか。機能を柔軟に切り替えられるような材料が実現するとありがたい。
- ・場合によると製造業すべてが利益の出ない結果となるのではないかという懸念もある。ベースとなる材料や装置の上に機能を搭載することのできる特徴的な産業が興れば新しい世界が展開すると考えている。ナノ構造をもった大きな電極やディスプレイなどの実現も期待される。
- ・テトラ構造の全長は 30nm 弱である。東京工業大学との研究で全長を伸ばし 50～60nm の距離をもった電極の実現を目指している。タンパク質に伝導性を持たせることについてタンパク質はナノ構造を形成するための鋳型の役割があると捉えており、タンパク質自体に伝導性を期待しているわけではない。
- ・微細化の延長線上（More Moore）ではなく More than Moore の技術であるという印象をもった。自己組織化の技術は More than Moore 的な分野に応用できるのかもしれない。

●半導体と自己組織化の融合

- ・半導体と自己組織化が組み合わされた場合、両方の分野に有益となるような半導体分野の微細加工技術を利用した出口が次々に展開することを予想している。システムをどのように構築するかが重要である。

●ポリマーにおける自己組織化

- ・ポリマーにおける自己組織化の解明が進んでおり、ブロックコポリマーに相分離行動を起こして微細な金属を付加したり酸を用いてパターン形成をしたりすることが可能である。基板の上に機能を搭載する際ブロックコポリマーを基板の上に付与することにより基板を均一的にすることに成功している。また相分離するポリマーの開発には 3 種のポリマーを一つにしたブロックコポリマーが必要であり、ラジカル重合を用いなければならなかったがメタル非利用のラジカル重合技術を開発したことで、3 種のポリマーを所望の長さで連続させる方法が確立している。

[6] セッション4 出口から見た重要課題の抽出

6.1 事前アンケートまとめ：WSの目的と方向付け、目標にむけた重要課題抽出／

江口健（科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー）

本ワークショップ参加者に事前アンケートに回答を得た。「階層的自己組織化」分野の優れた研究事例の図を示す（図6-1）。

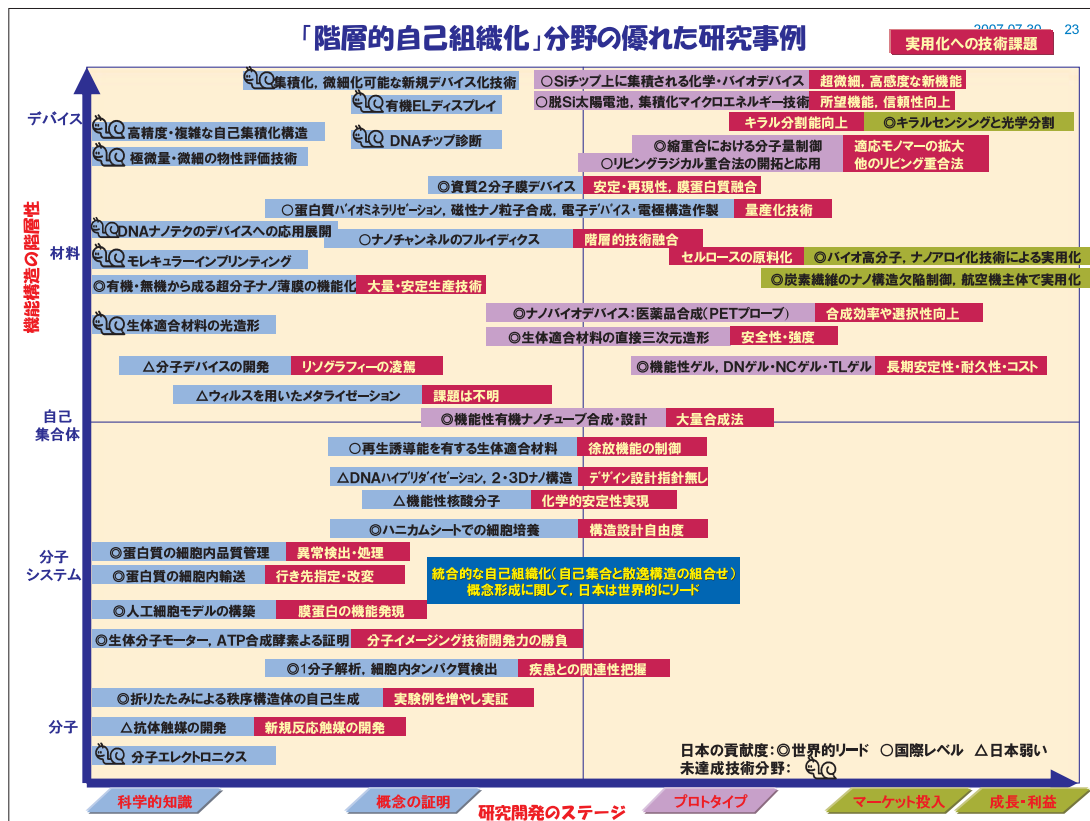


図6-1 「階層的自己組織化」分野の優れた研究事例

俯瞰図を作成することにより以下のことが判明した。

- ・機能構造の階層性が高く、研究開発のステージが進んでいる領域では日本の貢献度の高い優れた研究事例が比較的多い。この領域ではバルク材料のナノ構造を設計・制御することによって、機能性材料としての機能向上を実現している。
- ・上記の対極に位置する分子・分子システムの基礎研究領域においても、日本の貢献度の高いすぐれた研究事例が比較的多く挙げられている。しかし機能構造の階層性が低く研究開発のステージが進んでいる分野では、優れた研究事例が挙げなかった。分子・分子システムの中で実用化になっている部分がないという点が浮き彫りになった。
- ・材料やデバイス開発に関連する科学的知識やデバイス化プロセスの基礎的な研究分野では、期待されたほどの成果が見られず未達成な技術分野が多いという結果

になった。

- ・自己集合体をデバイスに応用していくという一つの研究事例の中で、日本の貢献度が比較的低いという評価があった。

従来から材料技術はナノオーダー（分子レベル）の微細な構造を設計制御することにより、バルク材料としての機能の向上を狙いとして地道な研究開発を続けてきた。長年に亘る努力が今ナノテク・材料として実を結びはじめている。しかしデバイス開発における基礎的研究分野において未達成技術が多いという評価結果は、目標が明確となった「ものづくり」の中で期待通りの機能を発現するための新材料設計探索が難しいことを象徴している。

機能構造の階層性が低く研究開発のステージが進んでいる分野では優れた研究事例が挙げなかった。分子システムの中で実用化になっている部分がないという点が浮き彫りになった。また機能構造の階層性が高く研究開発のステージが進んでいる分野では、日本の貢献度の高いすぐれた研究事例が比較的多いという回答結果であった。この領域はナノ構造を制御することによって高機能を実現している。また日本の貢献度が高く優れた技術研究事例が多かった領域は、分子システムや分子に関する基礎的研究の領域であった。一方で未達成領域が多いという結果になったのは、材料やデバイスに関する科学的知識の領域である。また自己集合体をデバイスに応用していくという一つの研究事例の中で、日本の貢献度が比較的低いという評価が多くあった。

階層的自己組織化分野の俯瞰を試みた。共通の技術課題や、互いに連携できるテーマを見つけていただきたい。異分野融合を効率よく進めるための具体的課題と推進方法に関しては多くの指摘があった。我々自身が把握しながら活動をしていかなければならない（図6-2~5）。



図 6-2 階層的自己組織化分野俯瞰

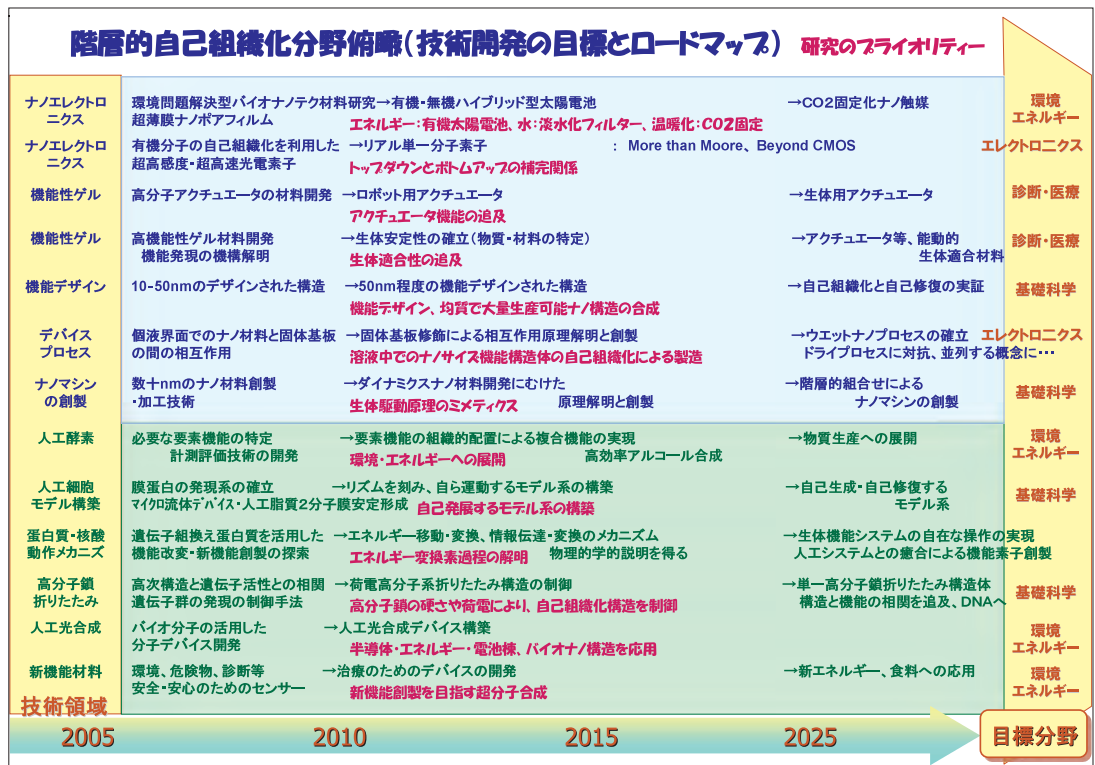


図 6-3 階層的自己組織化分野俯瞰

異分野融合を効率よく進めるための具体的課題と推進方法

- ①徹底的なニーズ調査に基づく、具体的目標の設定、必要な要素技術の研究者の徹底的なリクルート。
トップの研究者を仲間に引き入れること。必要のない人員を仲間に入れないこと(焦点を鮮明に)。
- ②共同研究では異分野融合は困難。リーダーシップをとり、各分野から必要な技術・方法論を導入できる統括責任者が重要。
- ③若手研究者、院生の移動の奨励。学科、大学の枠を超えたカリキュラムの工夫。融合の担い手は若者。
中国、韓国、インドなど先進的グループとの交流。
- ④独創的な研究に対して、長期(10～15年)に亘る助成制度。
- ⑤評価を厳密に行えるシステムの構築。
- ⑥実用化を目指した研究には一貫性を。
- ⑦研究者が直ぐ顔を合わせる環境構築。プロジェクト研究の支援には運営・人事面で柔軟な対応。
- ⑧人が集まってから何をやるのではなく、まず実現したいことを先に設定し、次にどう実現するかを。
- ⑨異分野で育った人材が、思い立った時に議論し協力し合える環境(出会いの場)構築。
多様なキャリアの研究者がバランス良く研究活動する集団構築(長期的資金援助)。
- ⑩異分野融合のテーマを推進する研究拠点設置。一つの空間で研究開発を。異分野交流の場を意識的に設置。
- ⑪イノベティブなマネジメント。「一緒にやる、同じ釜の飯を食う」体制。(過去の成功プロ:集中研方式、積極的人事交流)。
- ⑫技術シーズやトピックスを提供できる分野連携見本市(日本を代表する研究者間)。

技術分野において

- ①生体の階層構造から学ぶ。階層間のギャップは大きく、適当な系、オルガネラレベルを自律型システムモデルに。
- ②タンパク質は巧みな品質管理、秩序維持機構が機能。ナノ構造創製もその仕組みを取り入れる。
- ③量子効果バイオデバイス開発:異分野の研究者が協力・協働できるシステム構築、加工・評価・解析の共通利用環境。
- ④高分子:研究分野の融合、個人的信頼関係の構築。
- ⑤化学、物理、バイオ、計算機科学は実験科学的色彩強し、数学を加えると違う側面の異分野交流が期待(H19 JST数学領域)。
- ⑥ナノバイオ:グローバルなベンチマーク、日本のとるべき戦略の再構築(強い、弱い、他国との協力等)。
環境、エネルギー→大きなイノベーションの可能性。

図 6-4 異分野融合を効率よく進めるための具体的課題と推進方法等

ファンディング

- ①研究者義務負担軽減、間接経費有効利用。
- ②長期間(10年程度)の継続的ファンディング(米国)。若手の過剰な資金獲得競争の緩和。
- ③若手PIの育成・支援のために年間2,000—4,000万円のプロジェクト(さがけとCRESTの中間)
- ④基礎・基礎・応用研究のシームレスファンディング。
- ⑤「基礎研究における」産学連携、産学協力が可能な体制・組織・研究運用のためのファンディング。
- ⑥研究ステージが発展した課題には予算増額。最後まで面倒を見る。
- ⑦チャレンジングな提案にインセンティブ。

評価

- ①評価を厳密におこなうシステムの構築。
- ②自由な発想に基づくアイデアの実証研究。
- ③一貫性を、担当者による目的の変更は避ける。
- ④不採択案件に建設的な助言。
- ⑤申請時の目標ベースの再検討。

人材育成

- ①有能なScience director育成(NSF方式参考)。
- ②独創的な研究にインセンティブ、研究室のスタッフを異分野の集合体。

JSTとNEDOの役割

- ①JST:基礎研究から一歩踏み出す研究部分を担当。
- ②JST:シードの発掘。重複ファンディング回避。
- ③JST:融合研究の拠点を大学内、独法内に数箇所設置、NEDO:融合研究のテーマ選択をJSTと共同。
- ④JST:新物質・新現象・新概念の探索と発見、機構の解明、応用・実用可能性の実証、基本特許の出願。
NEDO:市場提供可能な試作品の製作と評価、コストダウン・量産化のための開発研究、応用特許の出願。
- ⑤JST、NEDO両者のデマケを意識しすぎは問題。JST→NEDOのみでなく、NEDO→JSTのパス構築も。

その他

- ①ナノテクノロジーネットワーク構築。
- ②新たな仕組み構築。
- ③海外の人材を呼び寄せやすくする体制づくり(事務手続きやHPの英語化、連帯保証人問題への対応など)。
- ④ニーズ指向をめざすならマーケット調査必要。

図 6-5 ファンディング、評価、人材育成等

6.2 さきがけ「構造制御と機能」現状の進捗の俯瞰／

岡本佳男(名古屋大学 エコトピア科学研究所 ナノマテリアル科学研究部門 客員教授)

さきがけ「構造制御と機能」領域はボトムアップ型あるいはビルドアップ型の研究開発を目的としている。例えば、原子・分子レベルでの制御によりナノサイズの物質、組織、空間などを創製し、必要な分子構造、空間構造、テンプレート構造、デバイス構造などを、様々なスケールで起こる現象と結びつけて設計し構築するプロセス、およびその応用を目指した機能探索などを研究している。現在、アドバイザー11名、研究者25名の体制である。

バイオ系研究テーマは、「1 メタル化ペプチドを用いる金属の組成・配列・空間配置制御と異種金属集積型分子デバイスの創製」「2 電位依存性チャネルの完全化学合成と新機能創製」「3 インテリジェント生物素子の創製」「4 ポリマー結合ペプチドのビルドアップと機能探索」「5 多孔性蛋白質結晶のナノ空間化学」「6 蛋白質ナノチューブを用いたバイオ超分子の創製」「7 ペプチド分子の自己集合によるナノ空間の創製」の7テーマからなる。扱う材料はペプチドあるいはタンパク質が多い。「1」は、アミノ酸配列を用いて、金属ペプチド構造を規則的に作り、超音波やレーザーを照射して組織化することにより様々な機能創出の研究をしている。

高分子系研究テーマは、「1 高分子メソスコピックダイヤモンド構造の構築」「2 樹木状金属集積体を用いたスピン空間の創出と機能開拓」「3 創造型ナノ空間を用いた精密高分子合成」「4 高分子ナノシリンダーによるナノ回路・配線技術の開発」の4テーマからなる。デンドリマーの中にスピンをもつ金属を組み込む研究や、金属と有機物の作るナノ空間を利用して重合反応を行わせ構造を制御する、といった研究を行っている。

有機系研究テーマは、「1 ヘテロ原子間相互作用に基づく分子集合と機能発現」「2 三次元空間の精密有機建築化学」「3 自己集合性動的分子システムの開発」「4 超分子ナノクラスターのキラル科学」「5 分子手術法による新規内包フラレン類合成と機能開発」「6 機能性芳香族フォルダマーの構築と動的立体制御」「7 三次元錯体空間を活用した π 共役ナノ集積体の構築と機能」「8 光機能性有機分子結晶の固体物性制御」の8テーマからなる。超分子に関係したテーマがほとんどである。

有機無機ハイブリッド研究テーマは、「1 炭素鋳型法による低次元性ナノ金属化合物のビルドアップ型創製」「2 一次元分子細線へのキャリア注入と新機能素子開発」「3 光と機能性流体の融合による先端ナノ材料の創製と評価」「4 分子ワイヤ・シンセサイザー」「5 構造制御と機能評価による酸化物熱電材料の創成」「6 集積型金属錯体ナノ粒子を利用したスピン依存」「7 単電子デバイスの構築」の7テーマからなる。

研究テーマを俯瞰すると、バイオ、高分子、有機、ハイブリッドの各分野で、分子などの（機能構造の階層性が低い）対象を扱う研究が多い。新規の材料の誕生につながる研究が出てくることを期待している（図6-6）。

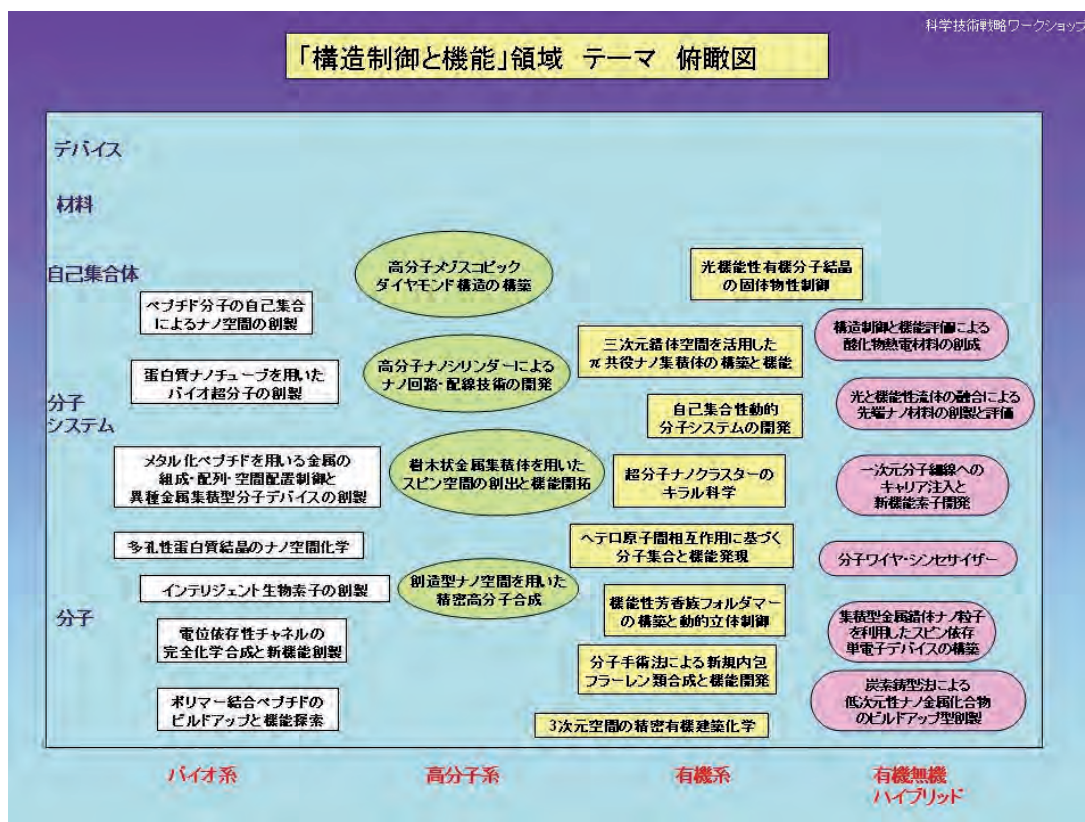


図 6-6 「構造制御と機能」領域 テーマ 俯瞰図

自身のこれまでの研究では安定な一方向巻きのらせん高分子の不斉合成に成功し、らせん高分子が様々なキラル化合物に対して高い不斉認識能があることを解明した。重合度を制御して溶媒に溶ける高分子を選択的に合成しシリカゲル等へ担持すると、実用的なキラル分離材料に変換することができた。キラルカラムとして市販されている。またセルロースなどの多糖を適切に化学修飾すると、安定性ならせん構造を有する実用性の高いキラル分離剤になることを発見した。2005年にJACS (Journal of the American Chemical Society) に発表されたキラル化合物に関する論文 233 報のうち、182 報がこれら多糖誘導体からなるキラルカラムを用いてその光学純度を決めている。これらの研究の特許が期限切れを迎えている。さらに精密にナノ構造を制御して優れた材料を開発していきたい。

6.3 ミクロ・ナノ構造精密制御による機能性材料創製／大林元太郎（東レ㈱理事）

東レではマイクロメートルレベルを超え、ナノレベルでの構造制御により初めて得られるナノ効果を発現・コントロールすることに主眼を置いて先端材料を創出している。炭素繊維複合材料もナノオーダーの構造制御をすることにより高性能化を図ってきた。繊維内部構造におけるナノオーダーの結晶構造の緻密化、ナノレベルへの欠陥コントロール、黒煙結晶構造の配向度の向上などを進めることによって強度や剛性を高めていった結果、現在では飛行機の主要部に使用される素材となり、

重量にして胴体材料の約 50%に炭素繊維複合材料が使われるまでに至っている。1961 年に炭素繊維複合材料の開発を開始した。当初は用途が釣り竿やゴルフシャフトなどに限られていた。基幹素材の本格的な実用化には息の長い研究開発の歴史がある（図 6－7）。

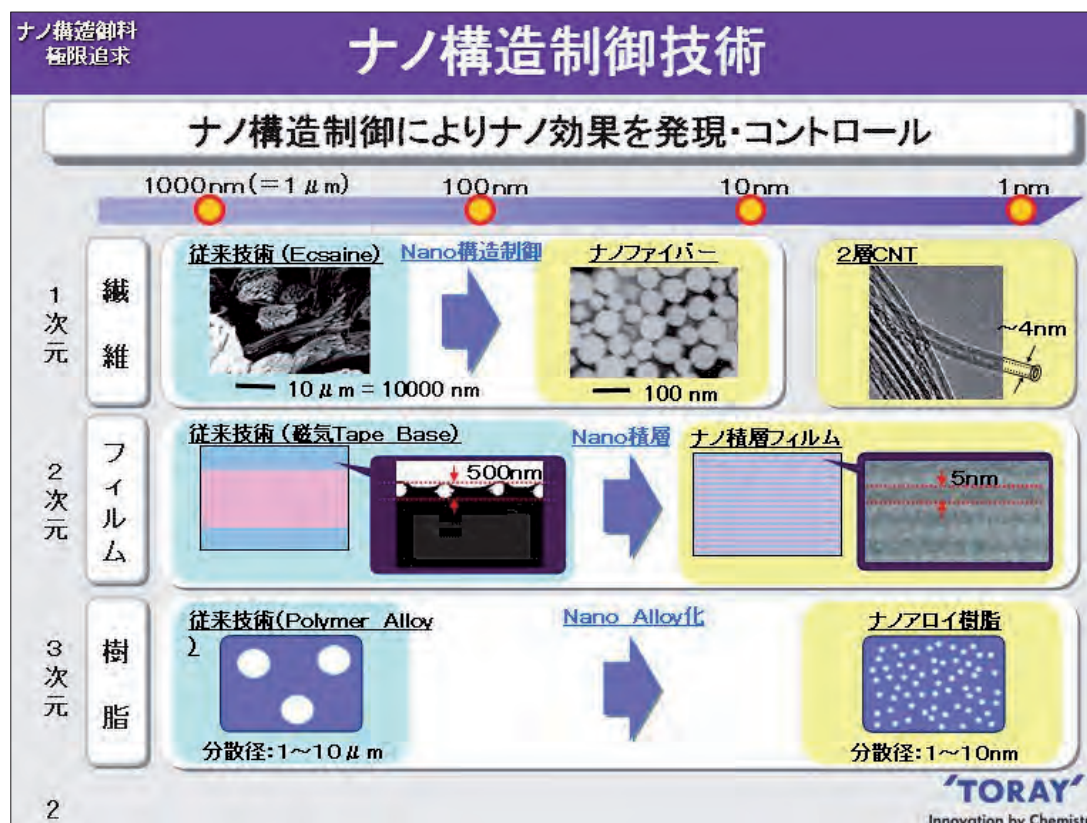


図 6－7 ナノ構造制御技術

PET と他の素材を厚さ 5～10nm で交互に 1000 層ほど積層したフィルムの作製が容易に可能となっている。落球貫通試験で普通のフィルムだと孔が開いてしまうが、ナノ積層にすると孔が開かずに強度が飛躍的に向上する。また膜厚に傾斜をつけるとあらゆる光を反射するようになり、金属的光沢を出すことも可能である。

ポリマアロイやナノアロイの開発も推進している。相溶化剤設計技術やナノ分散化技術を駆使することにより、ナノレベルでの 3 次元的な連続構造を形成することが可能となる。分散過程において強いせん断力をかけると特異な構造を発現し、通常はプラスチック様であるが衝撃を与えるとゴムの様な弾力性を発揮するといった特異な材料を山形大学と共同で研究開発している。また環境対応型ポリマーとしてポリ乳酸をナノアロイ化することにより、情報通信用途ほかへの展開を計っている。ナノ粒子を均一分散することでも新しい機能材料が創出できる。カーボン・ナノチューブ（CNT）を 1 本単位で分散する技術を見いだした。ポリチオフェンに分散すると新しい吸収スペクトルが発現してくる。この材料を用いて有機 TFT を作成すると移動度が 2 桁程度上昇することを見出している。ポリイミドに高屈折率ナノ粒子を均一に分散することで CCD（Charge-Coupled Device、電荷結合素子）

のレンズ材料を開発した。光回路用アサーマル光学材料も分散系を利用して開発している。

表面構造形成による機能材料の開発としては高感度の DNA チップを開発した。ビーズを用いた攪拌によりハイブリダイゼーション反応の促進と均一性向上も実現した。また水処理用の分離膜の開発でもナノ技術が有用な手段を提供してくれている。陽電子消滅法を用いて孔径を解析し、直径 0.4nm のホウ酸分子を除去するための緻密な膜構造制御をして分離膜を作製している。燃料電池用の電解質膜のナノ構造制御も行っている。

ナノテクノロジーは従来のミクロンオーダーの構造制御の限界を突き破る材料創製にパラダイム転換を可能にする基礎的で広範な土台を提供するものと考えている。大学や公的機関におけるナノサイエンスの研究を充実していただきたいというのが一つの要望である。

●質疑・討論 長期間にわたる研究開発の継続

- ・ 30 年以上の炭素繊維複合材料の研究開発において産業に応用したいという考え方は本来あった。性能面と費用面の均衡をとるためにも飛行機への導入は目標であった。会社の一貫した方針がなければ 30 年以上にわたる開発の継続は不可能であったと考える。会社のトップの強力な意志は必要である。

●質疑・討論 カーボンナノチューブのラダー構造

- ・ カーボンナノチューブのラダー構造は P3HT と呼ばれるポリマーである。長辺に“ひげ”（置換基）をはやしたものである。
- ・ カーボンナノチューブは長さなどの選別に関して分子量は選んでいない。置換基を何個付けるかによってナノチューブとの親和性が変わってくる。

6.4 リソを中心としたトップダウンプロセスから見た、ボトムアップテクノロジーに求める技術課題／

宮内昭浩(株)日立製作所 日立研究所 材料研究所 電子材料研究部 ユニットリーダー)

自己組織化技術の利点と欠点を考える。トップダウン型の技術では、精密な構造制御や位置決めが容易である点は利点であるが、分解能が光源の波長で制限され装置コストが高いのは欠点である。一方、自己組織化の技術は、光リソグラフィを超える分解能を有することや低コストになり得ることは利点である。しかしながら形状設計や所定の位置へのパターニングが困難な欠点がある。よってボトムアップテクノロジーの実用化は、いきなり高精度で複雑な形状を形成するのではなく、“適当”な形を適当な位置にパターニングできればデバイス機能を得られるアプリから始めるのが良いかと考えている。以下、形状精度にさほど依存しないデバイスの具体例を示したい。

細胞培養では細胞の培養後、培養皿に接着した細胞を剥離させるために接着タンパク質を分解する。その際に細胞自体にもダメージを与えてしまい、細胞活性が低下してしまう問題がある。そこでナノスケールの柱状構造体（ナノピラー）の上で細胞を培養することで、細胞が下地の足場材料に接触する面積を減少させ、接着タンパクの分解酵素を用いない剥離法を検討した。その結果、微細な構造体の上で培養した HeLa 細胞は増殖後、培養液を滴下するだけで足場材料から剥離できることを確認した。またナノピラー上では、細胞が球状に発育することを見出し、より生態系に近い状態で細胞を培養できるのではないかと推測している。さらには足場材料の幾何学形状が、細胞内部のタンパク質の生成過程にも影響していることを示唆する結果も現れており興味深い。

HeLa 細胞だけでなく、マウスの胎児の脳から取り出した神経細胞の培養も試みた。ナノインプリントで形成した微細柱状構造体の直径を $0.25\mu\text{m}$ ～ $2\mu\text{m}$ まで変えることで足場基材の幾何学形状と神経突起の成長形態との相関を調べた。その結果、柱状構造体の直径に応じて神経突起は直線的に伸展して発育しにくくなる結果を得た。培養基材の下地構造を制御することで神経突起の発育を制御することは、信号処理システムへの応用が考えられる。

細胞培養において足場材料の幾何学形状を制御することで細胞の成長過程を制御できる可能性を見出したが、必要となる幾何学形状は半導体の微細加工のような精度は必要ない。すなわち現在の自己組織化技術のように、ある程度の秩序性を確保できるのであれば、デバイス機能を発現させることは可能と思われる。

一方自己組織化を多層配線の形成工程に適用することで、配線間にエアギャップを作って信号処理を高速化する方法を IBM が発表した。配線間をエアギャップとすることで層間絶縁膜の電気容量を小さくすることができるため、抵抗とコンデンサ成分の積で表される信号遅延を防ぐことができるという利点がある。

また自己組織化で期待されている他の応用分野はパターンドメディアである。トップダウン型のリソグラフィ技術では、集積度の上昇とともに形成する構造体の微細化が困難になる。10nm レベルのパターン形成が必要な段階になると、自己組織化が魅力的となってくる。

自己組織化を利用する際のポイントは加工コストを下げられる点である。複雑なことをせず単純な相分離を他のプロセスで補うことで、長距離秩序性を上げるといふ発想が重要となる。システムの機能を確保するためには、秩序性を向上できる制御技術が求められる。

非平衡系は複雑であるため、理論化や単純化、素過程の解明などが重要となる。技術をある程度、完成させておき、アプリケーション側がデバイスの仕様を自己組織化の技術レベルに合わせることでニーズとシーズを一致させることが好ましい。基礎研究のアプローチとデバイス化技術をマッチングさせることが重要であろう（図 6－8）。

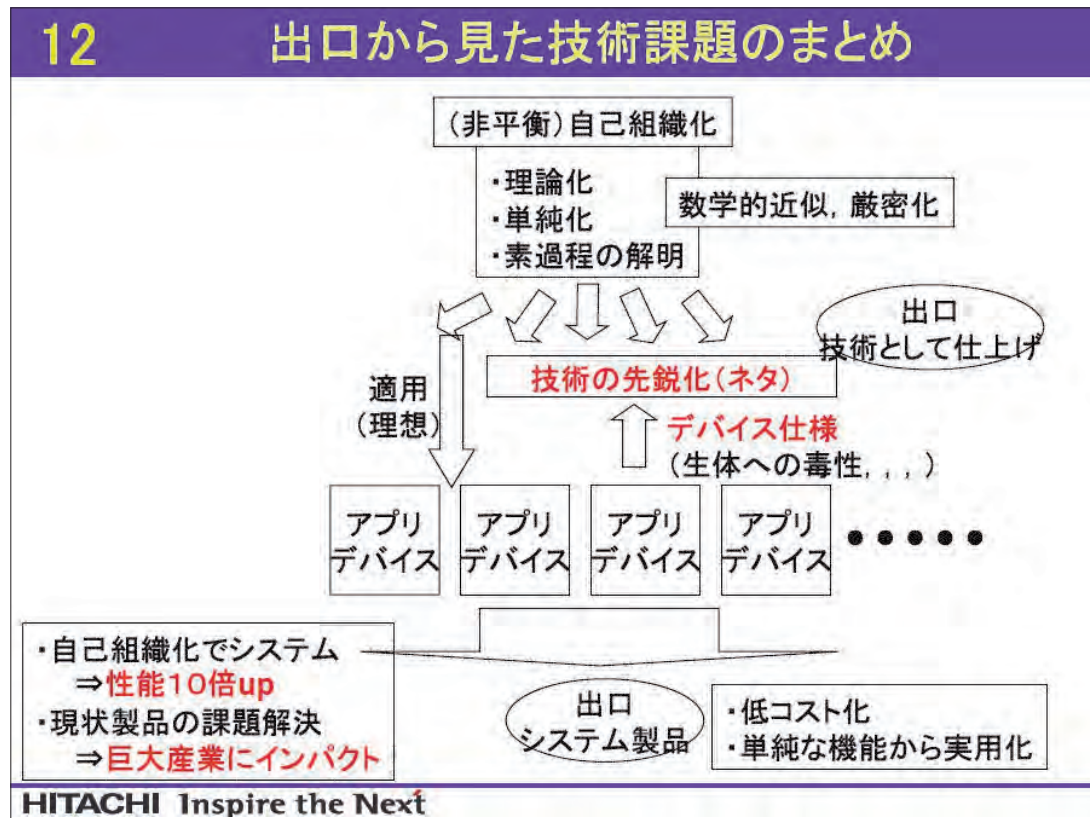


図 6-8 出口から見た技術課題のまとめ

6.5 階層的自己組織化の出口から見た諸課題

6.5.1 出口から見た重要課題の抽出／曾根純一（日本電気㈱中央研究所 支配人）

1997 年～98 年ごろまではトップダウン型の微細加工技術を追求する時代であった。当時電子ビーム露光によるハイスループット加工が課題であった中、EUV（Extreme Ultra-Violet、極端紫外線）などが出現し電子ビーム加工の基礎研究を継続する状況ではなくなった。トップダウン型の微細加工を用いない先端デバイスの研究開発の追求へという技術開発戦略の方針変更を行った。平衡系の自己組織化材料を導入して新規の機能や高性能を実現した事例は高移動度材料、誘電体材料などに見られるように数多く存在する。日本電気ではアモルファスシリコンの異常成長を利用して DRAM のセルキャパシタ構造を自律的に作るといった、HSG（Hemispherical Grain Technology）技術を開発した。64K-DRAM（Dynamic Random Access Memory）に使われている。窒化ガリウムに関しては窒化インジウムとの混合性が低く、両者を結晶制御するとナノメートルスケールの窒化インジウム・ガリウムからなる析出構造が自律的に出来る。これにより量子ドット構造が実現し高効率な青紫色の発光ダイオードが作られるようになった。

ナノブリッジは電気化学反応を用いて自動的にフィラメントを成長させたり消滅させたりして、LSI（Large Scale Integration、大規模集積回路）の配線を電氣的に切り替えることができるロジックアレイ回路を実現する新規のデバイスである。

信頼性も上がっており LSI のロジック系に大きな市場インパクトを生み出せるのではないだろうか（図 6－9）。

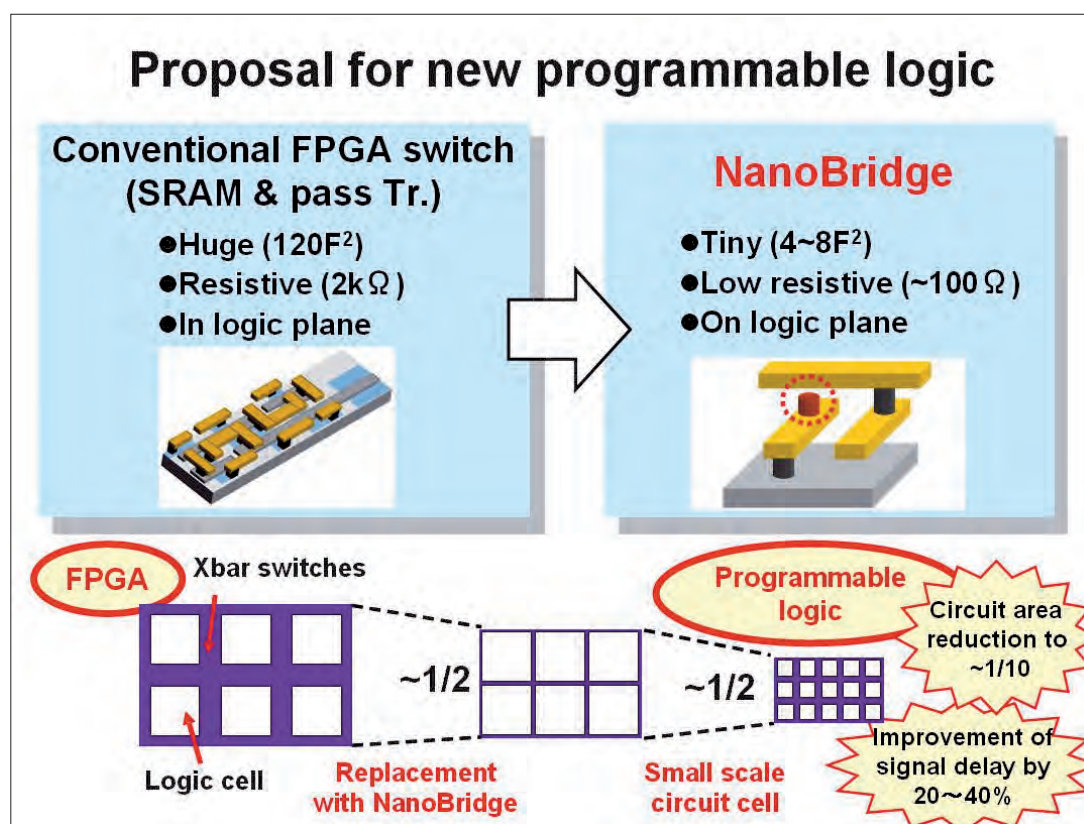


図 6－9 Proposal for new programmable logic

カーボンナノチューブには有機トランジスタを代替するような高性能トランジスタを実現できる可能性を持っている。具体的にはプラスチックシートなど、どんな基板の上にも自己組織的にトランジスタのチャンネル構造を作ることができる。トップダウン型のナノ加工とボトムアップ型の自己組織化技術を用いて、ナノスケールの金属微粒子形成技術が可能となっている。この技術によりナノサイズの金属からなる触媒微粒子を形成し、そこを基点にしたカーボンナノチューブの成長により、カーボンナノチューブの直径や位置を精密に制御することが可能である。

平衡系の自己組織化材料としてとりわけ期待されるものとしては希少元素代替材料、太陽電池、燃料電池などの環境・エネルギー分野の材料や技術であろう。電池の関係ではリチウム電池や燃料電池がかかえる素材の枯渇の問題を解決するような技術が期待されている。高次構造の活用は時間を要す課題となろう。現状を把握するために分野間の交流の必要性がある。生物が高度の自己組織化を実行しているのを見ると研究としては勇気付けられる状況であろう。

6.5.2 ナノ粒子の構造化（階層的自己組織化の出口から見た諸課題／

笹倉英史（旭硝子㈱中央研究所 主幹研究員）

バイオのナノテクノロジーを用いた工業材料についての話をしたい。商品化の要点としては機能、耐久性、価格の三つがまず挙げられる。安全性や環境負荷といった点も重要である。こうした中で発光効率の高いナノ粒子や高密度のナノ粒子などが開発されている。さらにそれらの材料をもとにした構造形成が出口としては重要であると考ええる。ナノ粒子の開発をバイオ分野の技術に期待している面もある。2次元構造としては単層を超密に配列するパターンドメディアやネットワーク構造がある。出口としてはFDP（Flat Display Panel）などが考えられる。3次元構造としては低反射性のフィルム、ポリマーの柔軟性を活かした放熱材料や低熱膨張性のIC（Integrated Circuit、集積回路）パッケージなどが挙げられる。各構造に関して述べたい。

2次元の最密充填構造ではスピンコンピュータなどで高速に粒子を配列させると、欠陥が多発している点が問題となっている。乾燥過程における粒子配列では粒子間や粒子と基板の間の摩擦力、横毛間力、DLVO（Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek）力、ファンデルワールス力などが働いているが、欠陥の原因が摩擦力と最密重点構造を形成する際の粒子の流動性であることを突き止めた。そのために配列させる粒子に対して粒子径が小さいナノ粒子を第2成分として添加することで、摩擦がなくなり粒子の流動性が構造形成まで保たれるため配列は改善された。2次元のネットワーク構造ではブラウン管からの電磁波を抑制する目的で、銀とパラジウムの粒子に天然多糖類を付加したネットワーク構造が開発された経緯がある。米国のベンチャー企業がITO（Indium Tin Oxide）を用いない透明導電膜などを開発する目的で、銀のナノ粒子の自己組織化の技術を研究している。銀のネットワーク構造を形成するが形状制御が困難である。

3次元の最密充填構造ではスライドガラス上の粒子の乾燥速度と配列速度を上げることでより均一な構造が形成される。光の当て方により色の変化が生じるような構造も可能である。ただし構造の形成までに時間がかかる点が課題である。3次元の分散構造では無機のナノ粒子と有機のポリマーに分散させるハイブリッド的方法がある。ナノ粒子の超低（あるいは高）屈折率、耐熱性、低熱膨張、難燃性などとポリマーの溶媒可溶性、成型の容易さ、柔軟性などの特性を組み合わせる。最近ではプリカーサーに表面修飾剤を入れることにより、高結晶性で粒度分布の均一なさらに高密度の表面修飾が行われた新規のナノ粒子が開発されている。

旭硝子ではサイトップという屈折率が低く耐用活性のある溶媒可溶型透明フッ素樹脂を販売しているが、サイトップを用いて種々の酸化物粒子で40W%程度の均一分散が可能になり透明な薄膜もできる。3次元のネットワーク構造では熱伝導性ポリマーや高電気伝導性と、異方性または透明性を融合させたポリマーなどが出口として考えられる。ネットワーク形成がないと制御性が悪くなるためネットワーク

はじめに

WS「階層的自己組織化のバイオナノテク」

セッション1 高次元組織化、そのダイナミクスと制御

セッション2 新機能創製

セッション3 新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製

セッション4 出口から見た重要課題の抽出

セッション5 まとめ

まとめ

Appendix

は必要であろう。ナノ粒子のネットワーク構造の制御や形成速度が産業側から見た重要課題となる。均質で大量生産可能なナノ構造をウェットプロセスで実現するというように、機能からの構造デザインを検討する方法の確立も課題である（図 6－10）。

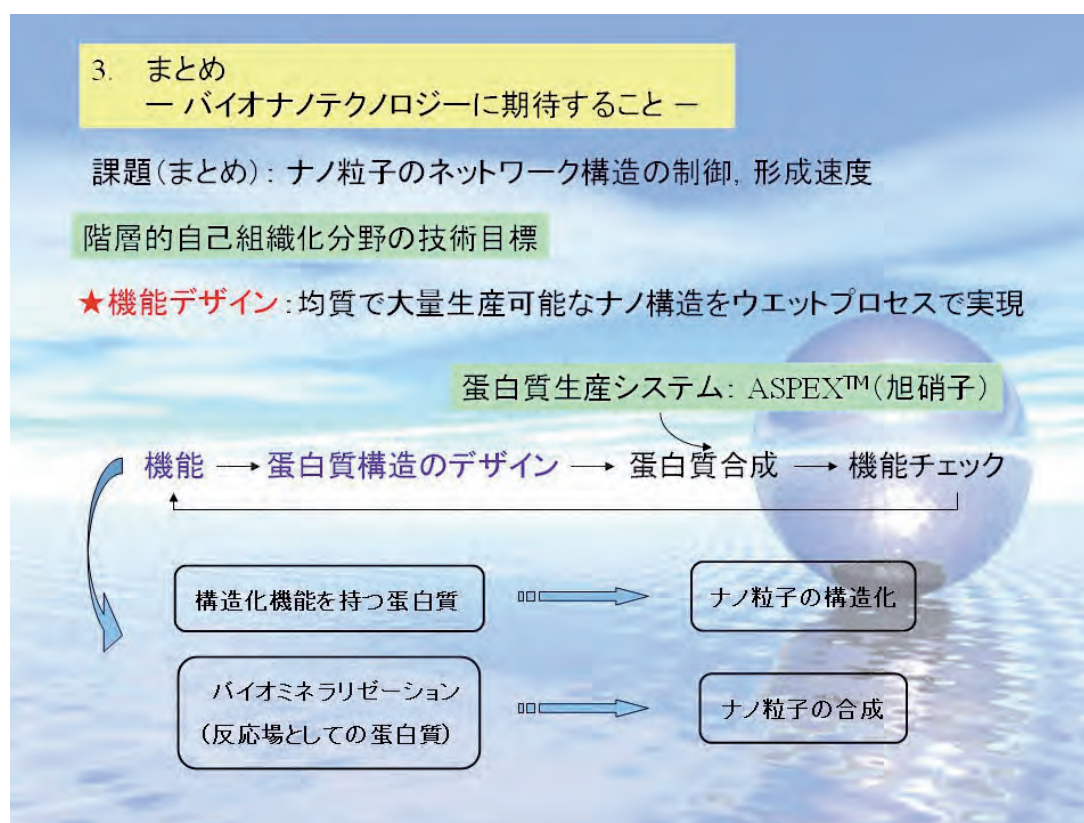


図 6－10 バイオナノテクノロジーに期待すること

●質疑・討論 銀粒子透明電極の ITO との性能比較

- ・銀粒子をもちいた透明電極の導電性と透明性は、ITO（Indium Tin Oxide）を用いた透明電極と比較すると ITO 程度までには達成していない。導電性は面抵抗で 1Ω である。

6.5.3 電子デバイス（階層的自己組織化の出口から見た諸課題／

浅川鋼児(株)東芝 研究開発センター 先端機能材料ラボラトリー 主任研究員)

自己組織化による構造形成の利点は、トップダウン型だと大掛かりな装置が必要なスケールでも簡単な装置・方法でナノメートルの大きさで作製することができる点である。しかし自己組織化による構造形成は、トップダウン型のリソグラフィによる構造形成に比較すると未熟なレベルの実力でしかない。トップダウン型の技術を得意としている企業の中では、ボトムアップ型の技術はビジネスとして小規模なところから開始するのが得策と考えている。例えば、位置制御性が不要な技術や確立されているトップダウン技術の助けを借りる Guided Self-assembly のような形

でのナノレベルの微細パターンを形成技術などである。

LED (Light-Emitting Diode、発光ダイオード) の表面にナノレベルの凹凸をつけると光がより多く取り出せる。LED 基板はシリコンのように平滑な基板ではないため、超微細なパターンの作成が難しくコストの問題もある。このような超微細凹凸パターンの形成は自己組織化が向いている。またディスプレイの回折格子作成用にシリカのナノ粒子を一層だけ形成させる技術を開発した。20 × 30 インチの面積に対応できる技術を想定している。現在、無欠陥で 10 インチ以上の基板を作製することが可能である。自己組織化のブロックポリマーを配向させる技術を用いて、エッチングにより 33nm ピッチ (線幅と空間が 16.5nm ずつ) のアルミニウムワイヤを製作している。ナノレベルの多孔体にナノワイヤを入れ込む技術にも取り組んでいる。自己組織化で作った多孔体の中に金属のナノワイヤを一回の露光過程で入れ込む技術も開発した。ボトムアップ型の技術では位置制御が問題となるためトップダウン型の技術を組み合わせて利用する。例えば、ナノインプリントで μm の溝を形成した上で自己組織化ブロックコポリマーを相分離させた。これを鋳型に世界初で 2.5 インチのパターンドメディアを開発した。

欠陥許容度が高い装置は応用分野として有望な分野となるであろう。1%の欠陥が1%の性能低下にしかならない光学素子などに適しているのではないだろうか。一方応用が厳しい分野としてはメモリーが挙げられる。1 万分の 1 の割合で欠陥があるとその装置自体が使い物にならなくなる。基本的にトップダウン型の技術および欠陥補正アルゴリズムとの組み合わせが必要であろう (図 6-11)。

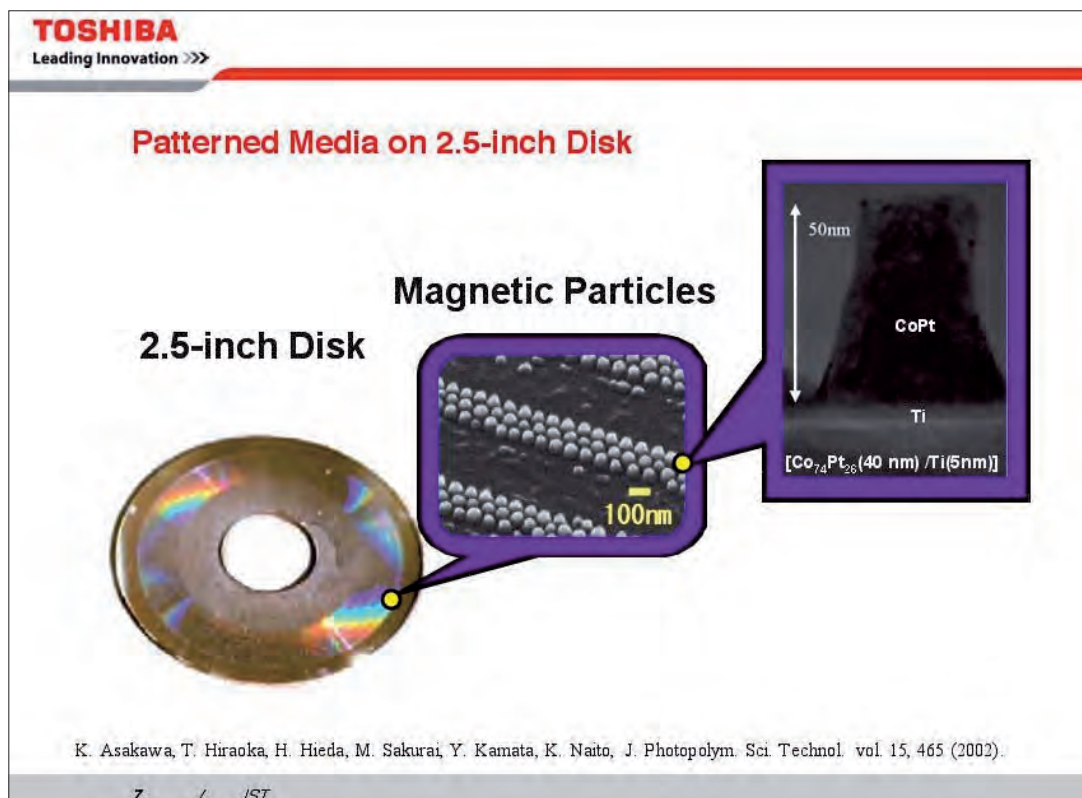


図 6-11 Patterned Media on 2.5-inch Disk

6.5.4 機能性人工分子の複合化で実現するたんぱく質検出技術（階層的自己組織化の出口から見た諸課題／

藤田省三（㈱富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター 主席研究員）

2000 年末に開設した富士通のナノテクノロジー研究センターでは、ナノフォニクス、ナノマテリアル、ナノバイオの 3 分野の研究開発を行っている。ナノバイオ分野ではオーダーメイド医療にプロテオーム解析の成果を生かすと、10 年後にはタンパク質を計測する機器が不可欠になるであろうと想定しタンパク質検出技術の開発を進めた。現在のタンパク質の計測方法としては標識抗体を用いるサンドイッチ法があるものの、時間が掛かる点が難点である。そのためタンパク質を捉えるユニットや信号を外部に取り出すユニットなどを並行して開発し、複合化により計測システムとすることを構想している。どのタンパク質も幅広く計測できることを目指しており、安定性に優れ開発基盤が揃っている DNA（Deoxyribonucleic Acid、デオキシリボ核酸）を材料として利用したシステムの構築を発想した。信号を外部に取り出す DNA ユニット開発では、金の薄膜上に末端に蛍光色素を付けた DNA 二重鎖を化学結合させ金薄膜に電場を印加することにより、DNA の起立状態（蛍光性）と平伏状態（消光性）を蛍光信号で識別できる計測システムを開発した。モデル実験としてピオチンを固定化した DNA 二本鎖を電場駆動しストレプトアビジンを結合させると蛍光信号の微弱化が起ることを確認しており、タンパク質結合に伴う分子量の変化を計測できることがわかった。このシステムでは金の上に DNA を化学結合させた後、メルカプトヘキサノールの SAM 膜（自己組織化単分子膜）を作ることにより安定した特性を実現する。

タンパク質を特異的に捉える DNA ユニットについては天然の DNA アプタマーでは良い特性を得にくいことが知られているので、多数の側鎖を入れることにより相互作用点を増やして良い特性を実現する戦略の元に修飾型 DNA アプタマーを作った。天然のヌクレオチドに人工的な側鎖を入れた材料を作りコンビナトリアルにランダム重合させると、抗体が持つ多様性よりもはるかに多くの組み合わせが実現できる。一旦親和性が最良のものの構造を決定すれば同じ分子を容易に化学合成することが可能となる。ただし PCR（Polymerase Chain Reaction、ポリメラーゼ連鎖反応）を使って配列決定をする際に側鎖が失われるため、2 文字の核酸配列とそこに含まれる側鎖を一対一対応させるブロックコーディング法を考案した。本手法を適用して GFP（Green Fluorescent Protein、緑色蛍光タンパク質）に対する修飾型 DNA アプタマーを得たところ、解離平衡定数 4nmol の高い親和性を実現した。これらの技術基盤を活用して現在、様々な機関と連携研究を行っている。以上の研究にあたっては、修飾型 DNA アプタマー（コンビケム＋セレクション）と信号変換 DNA（分子運動性の可視化）の 2 つの機能を並行開発した。DNA のハイブリダイゼーションを利用すると二つの機能を容易に構造化して複合機能を実現することができる。さらに配列を工夫すると DNA 自体でネットワーク構造を形成

できることが知られているため、DNA ネットワーク構造体にアドレス配列を配しておくことによって前述の複合機能 DNA を特異的に空間配置できるようになると期待される。例えば、ミトコンドリアの呼吸鎖複合体のような形で連続反応場をタンデムに配列した人工場を作ることができるのではないかと考えている（図 6－12）。

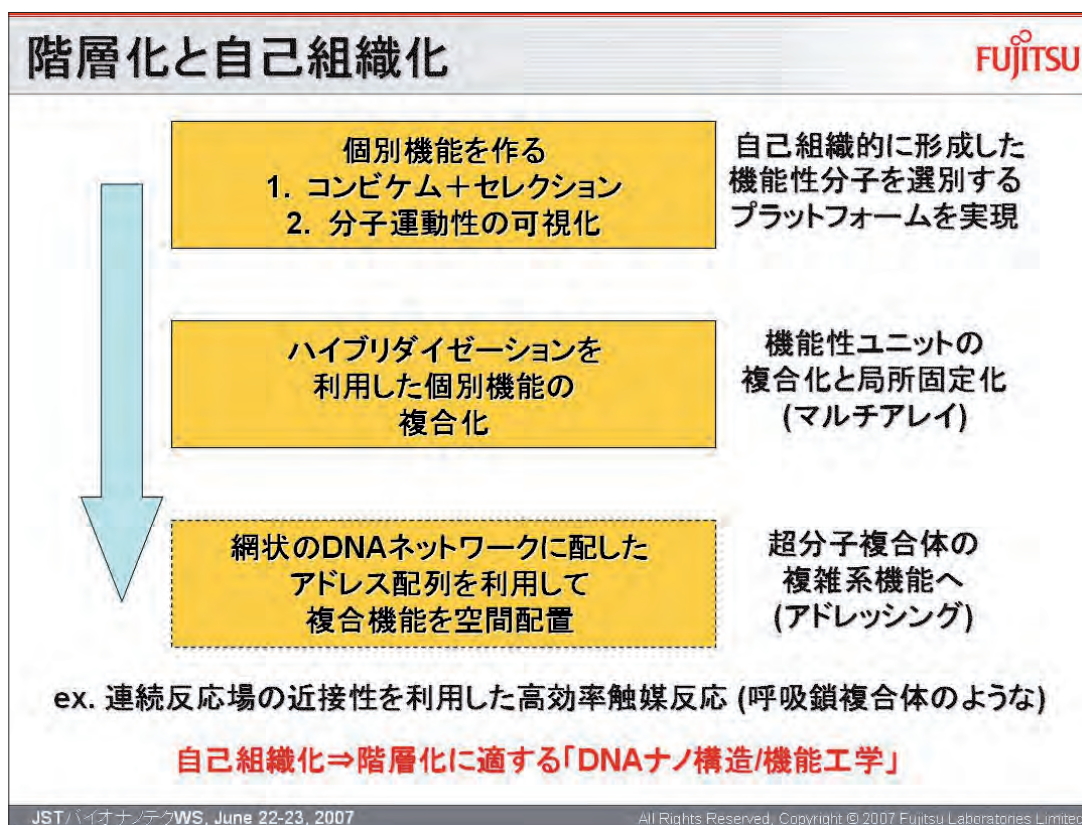


図 6－12 階層化と自己組織化

●質疑・討論 DNA アプタマーの修飾物質

- ・ DNA アプタマーに関して側鎖に修飾させる物質の量産については、側鎖の生えたヌクレオチド・モノマーを直接、DNA 合成機を利用してつなげていく。通常の DNA 合成機は 4 ポート (AGCT 分) であるが、使用している合成機には 20 ポートが備わっている。試薬として利用する場合データだけ保有しておき注文対応で合成して、短時間で発注元に届けるといったビジネスが考えられる。
- ・ DNA 折り紙では修飾はなされていないが DNA アプタマーでは多様性を求めるために修飾が必要かどうかについては、修飾によって起こされる機能を、天然 DNA によるマトリクス上の決定位置に当てはめる。スクリーニングに関する優れた発想があれば興味ある機能を引き出せるであろう。

●質疑・討論 RNA アプタマーの応用化

- ・ RNA (Ribonucleic Acid、リボ核酸) アプタマーの応用化に関しては、薬として利用する分にはよいが光学的分野への応用は困難であると考える。

●質疑・討論 バクテリオファージとの比較

- ・ DNA アプタマーに関してバクテリオファージを用いたディスプレイと比較しての優位性については、バクテリオファージを用いたディスプレイは機能性が低くノイズが拾われる点が問題である。この点が DNA アプタマーの優位な点となる。

●質疑・討論 自由エネルギーの評価法

- ・ 富士通では自由エネルギーの評価法を商業化しているがその信頼性の検証に関しては、水分子をすべて明示的にシステムの中に置き、すべての運動量を変えて 2000 通りほどのシミュレーションを一斉に行う。分子量 30,000 程度の系は数日で評価の結果を出すことが可能である。信頼性に関しては製薬企業の持っている実験データとの一致性を計る盲検法が行われたが、非常によく一致した。

●質疑・討論 研究所内の連携

- ・ 富士通のナノテクノロジー研究センターの技術グループとの連携については、要素的な面では議論をくり返している。応用的な面ではさほど相互作用はないが実用化は近づいていると考えている。

6.5.5 真にイノベーションを実現するための戦略的なマネージメント（階層的自己組織化の出口から見た諸課題／

亀井信一（㈱三菱総合研究所 先端科学研究センター センター長）

科学研究部門の事業部を預かっている立場から「出口」の捉え方を述べたい。企業の事業部は出口や産業化に対して収益性などを強く求められる。アカデミアの方には産業界がこのような立場にあることをご理解していただきたい。三菱総合研究所の先端科学研究センターには生命科学研究グループとナノテクノロジー研究グループの二つの研究部門がある。一般的に生命科学の研究者とナノテクノロジーの研究者を融合させるのは、本来的に発想や基本方針（フィロソフィー）が異なるため極めて困難である。今回のテーマもこの延長線上に位置づけられる。2002 年三菱総合研究所では自己組織化について調査プロジェクトを実施した。トップダウン技術やボトムアップ技術の中で、実際のものづくりに対して事業部がどのような出口の像を描けるかを検討してきた。自然界は真空ポンプやプラズマや電気などの人間が利用している技術を使わずにものを作っている。この点がすごい。ナノテクノロジーの定義や捉え方はいろいろとあるが、ものの本質をそのままの形で取り出す点がナノテクノロジーの本質ではないかと 5 年前に議論をした。ナノテクノロジー

や自己組織化の基本方針はエネルギーが最小の状態で、ものの性質をそのまま取り出す点にあるという考え方である。ものごとを進める際に重要な点は、「どういう目標を立てるか」と「どのようにその目標を達成するか」の2点に尽きると考えている。

まずは目標の立て方である。5年前に作製したボトムアップ生産技術の研究マップの内容を端的に表すと、当時は目に見える成果はまだ将来の夢であるという結論となる。しかしこの段階では大きな目標を描ける環境にはなかったと思われる。かつ指導原理が見出せていなかった。重要なのはボトムアップ生産技術のアーキテクチャと実現するための基指導原理をどのように考えるかであろう。今ならできるはずである(図6-13)。



図6-13 ボトムアップ生産技術の研究マップ

次は方法論である。2003年米国、台湾、中国、インド、英国などから研究者を招きビジネスプランコンテスト・イン・ジャパンを開催した。結果はボトムアップ技術を使った米国のベンチャー企業が優勝した。米国の投資家は、ビジネスはマネジメント、マーケット、マイルー、マイルストーンの「M」を重視すべきであり、とりわけマネジメントは重要であると話していた。適宜変更される当初の研究計画の良し悪しよりも段階ごとに適切なマネジメントを遂行することが重要であると強調していた。創造的な仕事をする場合プロジェクトマネジメントとイノベーションマネジメントは決定的に異なるものであることを認識すべきである。民間企業ではプロジェクトマネジメントは通常業務にあたり、より創造性を発揮できるイノベーションマネジメントは研究開発にあたる。

2007 年 1 月、米国から招待を受け国立研究所のマネジメントの仕方を直に見る機会を得た。明確な目標を立て最適なアプローチで徹底的に議論を重ねて打ち出して掲げている点と、そのための最適な手法を検討している点が非常に印象的だった。例えばオークリッジ国立研究所などの施設は、国が所有し運営は契約先の非営利合資会社のバッテル（Battelle）が行うといった体制をとっている。捗々しい成果が上がらない場合はマネジメントに原因があると見なされ、研究者は解雇されずマネジメントを行っている機関との契約を打ち切り研究所長が解雇されるという現実がある。また DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency、防衛高等研究計画局）はロードマップの作成に関しては積極的ではなかった。目標達成のためのアプローチは様々あり研究開発はジャンプアップ手法をとるべきだという考えであった。新規性や革新性のある研究開発に取り組む場合、紹介したような米国の研究機関やプロジェクト参画機関と競争していかなければならない。どのようなフィロソフィで具体的に何を目標とするか、それを実現するために最適なマネジメントはどのようなものかを決定する議論が非常に重要である。

●質疑・討論 日本と米国の技術開発推進体制

- ・日本では文部科学省が基礎研究を促進し、経済産業省が実用化を促進するといったような段階的構造がある。一方米国では、NSF（National Science Foundation、全米科学財団）等がボトムアップ的なマネジメントを実施しており、産業につながる研究の種を伸ばそうとしている。
- ・米国では多くの省庁ごとに、基礎物理的研究からエネルギーの応用技術開発に至るまで比較的幅広い分野を管轄している。集中すべき分野に集中しているといった印象がある。
- ・日本では「省庁＋内閣府」の体制での府庁連携が始まっており、他省庁がどのような問題に取り組んでいるかの情報交換はなされている。

●質疑・討論 “Why” と “How to” の使い分け

- ・2006 年 12 月に開催された「ナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ」で、米国の研究者は “Why” と “How to” を使い分けているという話が出されていた。“Why” はコミュニケーションパーパス、つまり何のための研究か、“How to” はテクニカルパーパス、つまりどのように研究をするかである。

●質疑・討論 俯瞰的視野からの計画決定

- ・米国は常に世界の先頭に位置することを国是としているため、常に状況を俯瞰的に捉えた上で明確な目標を決定している。一方で CRDS や学術会議は、中長期的な視野の中で国としての総合的な計画を決定しその中で部分的な目標を決定するといった施策を実施していない。ただしそうした施策を狙いとはしている。府

庁間の連携は行われはじめた。総合科学技術会議が経済産業省や文部科学省の課長レベルや産業界の人々を招集し、総合的な議論を展開している。

●質疑・討論 分科会に際して

- ・目標を明確化する際、何をすべきかを考えることは重要であるという話があった。出口を視点にしつつ基礎研究も位置づけるということを考えていた。第二部の分科会では目標をどの点に置くべきかを議論していただきたい。

6.6 分科会：重要課題の抽出

6.6.1 分科会1：階層的自己組織化に基づく、新機能創製と分子設計

●大学と企業の研究の展開

- ・大学は手元にある知識をどのように活かしていくかが重点になるのに対して、企業は出口の設定を重点にして研究を行うという違いがあるように見受けられる。所属する機関の研究開発方法に対する認識はどうか。
- ・富士通研究所の場合は新規のビジネスユニットを作る発想から始まる。5年から10年後には成果を上げるよう要求されるが最初の3年間は模索の段階であり、次の3年間で形が見えてきてその後でどのように社会に出していくかを考えるといった展開で進んでいる。
タンパク質の計測においては、包括的な方法論を構築して顧客が持ってくるタンパク質を計測できる装置と採取できる装置を用意しておけばビジネスになる。
- ・工程は簡単なものにして物質に様々な機能を載せ、望み通りの構造を作って必要な物性を出していくということが大事なのではないか。

●市場化

- ・企業には市場競争を考えると低価格設定を余儀なくされるという現状があるのではないかと。真に優良な商品が出れば、低価格を設定する必要はないのではないかと。
- ・商品を市場に出そうとすると、社内ではそれがどのような市場であるかを必ず問われる。その際比較対象があると理解されやすいが、その商品が市場を開拓すると説明しても信じてもらえない。

●有機太陽電池

- ・経済産業省との間では有機太陽電池は有望という話が上がっている。
- ・塗布するだけでフォト・コンダクションが実現し、自動的に所望の方向に自己組織化する分子的プログラムを開発している。得られた情報を広く適応するための計画アイデアを作っている。

●ボトムアップ型技術の出口

- ・現状で進むと2030年にはどのようなになっているか、ということを考えると「出口」が見えてくるのではないだろうか。最近持続可能性の観点から製造を考える傾向がある。トップダウン型の技術で微小なものを作るほど多くのエネルギーと空間

が必要になってしまう。ボトムアップ型の技術はトップダウン型技術の限界を考えるとことから出てくるのではないかな。

- ・ 社会の要求が明確になっている分野で位置づけされた基礎研究や材料研究は、十分に社会に対する説得力があるであろう。例えば高次構造による新機能を用いれば新しい電池が実現するといった物語が描けていれば、それで位置づけはできているのではないかな。当面は必要に思われないものであっても社会に貢献するという意識をもって研究を行ったり、インセンティブを与えるようなファンディングや運営機能を置いたりして、位置づけを行えば立派なものになるのではないかな。日本が得意としている分野にさらに投資して成績を上げるという点も重要である。また高速かつ低費用で大量生産するためのナノ構造の構築や均整的な配列がなされる装置といったように、いくつかの領域に分けてそれぞれが展開していけばよいだろう。

●長期間にわたる研究

- ・ シーズ先行型の開発では長期にわたり計画的に行わなければならないだろう。初期投資も必要となる。JST 等がシーズ的分野の推進を行い、ある段階から企業がさらに推進していくといった形が考えられる。
- ・ 基礎研究の部分を大学や国立研究機関に行ってほしい。それらの機関の研究者には講演にあった東しの長期にわたる研究開発の過程などが追体験として必要となる。
- ・ 日本独自となっている技術の中には研究の最初の基本となる部分を欧米からの取り入れた場合も多かった。今後も日本の企業などは最初の基本となるコンセプトを出さずに部材の製造業としてあり続けていくべきか、といった議論がある。学生をどのように教育するかという点も関わってくる。
- ・ 大学の工学部志願者がこの 10 年間に 3 割から 4 割も減少している。おそろべき事態である。

●バイオ分野における「出口」

- ・ 基礎科学の研究者にとっての出口は「何を知りたいか」という疑問に対する答となる。バイオ分野でも「何を知りたいか」を明確に打ち出せなければならない。バイオ分野が利用するナノテクノロジーとはどういうものかを知りたい。若い人たちにどのようなメッセージを発信すれば魅力を引き出せるかに関心をもっている。基礎科学と応用科学の中間に立つ JST 等にそのメッセージを見つけ出してもらいたい。

●基礎研究からの発展

- ・ シーズに道筋を付けるだけでは物足りない部分がある。タンパク質も生物から取り出せば物となる。システムとして生物が生きるといった部分には未知の点があり、それに対する魅力がある。役に立たないように見えるものであっても、20～30 年後には次の段階の成果を生み出せる可能性のあるものからは学びたいと

考えている。化学や物理学の原理では説明しきれないさらに高次の原理などがあるのではないか。生物のネットワークや構造の複雑性を考えると応用できる未知の可能性がある。

- ・タンパク質には触発される部分が多いが工学を考えるとタンパク質そのものを使うことはできない。DNA（デオキシリボ核酸）で分子を動かしながらモニターする装置を逆に力を与える装置として分子を揺らがせ、熱エネルギーを吸収するといった技術ができないかと考えている。10年先の研究にはなるが現在のエネルギー問題や食糧問題を解決する糸口になる技術に仕上がっていくのではないかと。
- ・生体分子が1分子で機能を発揮する点には非常に興味がある。そうしたものでまったく新規の製品を開発できないかと考えている。

●分科会議論の中まとめ

- ・日本人の基礎的技術には優れたものが多い。日本人は界面とポリマーの相互作用を完全に抑制する方法、シリンドラーを起立させる方法、見合ったポリマーを作る方法といった幅広い分野で成果をあげている。目標の設定に関してはこれまでも間違えはなかったと考えられる。日本から上がった成果が伝えられていない点が問題ではないか。日本の企業には新規の基礎的研究成果に飛びつかず、4～5年後に着手しはじめようという環境があるのではないか。どういう研究目標が大事か、どういう考えを持って目標を定めたらよいか、どういう人材が必要か、どういう組織であるべきかといった点が問われる。ここからの議論では人材、ファンディング、組織、目標の4点を話しあっていただきたい。

●人材の育成

- ・日本人は自分たちの位置づけを技術系（理系）か事務系（文系）かという部分で決めようとする。「自分は技術系だから経営のことはわからない」や、「文系だから技術のことはわからない」というように逃げ口上として使われている点に危機感を覚える。
- ・米国と日本の大学を比較すると米国の大学は長期休暇に宿題が膨大に課される。また長期休暇には推薦状獲得のインセンティブとなるインターンシップに参加している。一方日本にはそれとは逆の現状がある。根本的に変革する必要があるのではないかと。研究組織として複数的・複合的な分野を経験させる環境を準備しておくことが最も望ましい。
- ・入社してくる学生には不足しているリーダーシップとコミュニケーション能力を育成している。若い人全般に自ら進んで受けようとする意思が足りないように思える。

●目利きの資質

- ・目利きをどのように社会で育てていけばよいかについては、才能つまり個人の資質であると考ええる。

●異分野間の人材結集

- ・自社では商品開発の目標が定まるとポリマーの担当者、ガラスの担当者などの様々な人材が結集する。ただし異分野間での意思疎通の難しさから不満が出たりもする。

●エネルギー問題

- ・産業技術総合研究所の本格研究の中でも最重要の分野はエネルギー問題ではないかと考えている。エネルギー問題をどう解決するかを基本にして、遺伝子工学などの研究を推進していくことが重要と考えている。

●資金投入と人事評価の変革

- ・資金投入と人事評価の部分に変革が起きればより大胆なことが可能となるのにそうっていない。5年後に評価が下るプロジェクトであっても毎年ごとに確実な成果を要求されてしまう。5年間は自由に研究をして次の5年間の最終評価を厳しいものにしたいほうがよいのではないかな。
- ・経験上分野融合的な研究では、5～6年掛けると予想しないような成果が多く生まれてくる。しかしながらプロジェクトはトップダウン主導型でコーディネートをする人材の意思と継続性が必要となる。教育システムを含め中長期にやらなければならないことが数多くあると考えている。法人化された国立大学や国立研究所のトップマネジメントの責任でかなりのことはできるようになっている。

●分野・機関の橋渡し役

- ・大学の基礎科学と、企業研究所の技術と、企業の事業部のビジネスとをいかに橋渡ししていくかが最も重要であるとする。技術的な要素の間でも橋渡しを考えなければならない。人事評価にも問題がある。確実にプロジェクトが継続する評価を得るためには外部評価にすればよい。
- ・広範囲にわたる領域の評価をするには複合的な環境での経験を積んだ人材が必要であろう。異分野間の言葉を翻訳するという点に長ける人材を育成すべきである。

●大きな課題の設定

- ・「アポロ計画」のような誰もが理解しやすくどの分野の人材も貢献できるような分野があれば、若い人材にも興味・関心をもたれるのではないかな。
- ・アポロ計画では技術課題が数多く出され、それが科学のすべての分野を網羅していた。同様の課題を作るのは大変な気がする。

●生命システムの再構築

- ・目標をもって研究ができるような大きな課題ができると、その分野は発展するのではないだろうか。細胞を例にとれば機械分野の研究者が細胞と同様の機械を作りたいという願望を持てると同時に、生物分野の研究者は生命の仕組みを知りたいという願望を持つことができる。生命システムの再構成がバイオナノテクノロジーの大きな目標になれば嬉しい。
- ・「生命システムの再構成」よりも「自己複製できるシステムの構築」のほうがわ

かりやすいのではないか。

- ・「自己複製」というテーマにさらに加えて「自己複製可能な細胞の合成」としたい。
- ・キーワードとして「自己複製」、「自己修復」、「自己進化」が考えられる。
- ・自己増殖をする、ものの開発は危険である。止めたほうがいいのではないか。
- ・水とイオンが積層している箇所のタンパク質の構造などには興味深い部分があり、細胞にはその構造を利用している可能性がある。こうした新しい物理学を若い人たちに伝えようとするが簡単ではない。生命システムの再構築には倫理面などの様々な問題が跳ね返ってくるであろう。

●医療、健康、食料分野

- ・バイオ素材でなければ実現が不可能な分野としては医療や診断がある。しかし日本は制度面の制約から市場の見通しは暗い。一方世界的には医療や健康さらに食料なども含めて、安心・安全の世界はやはり重要だと考える。

●環境・エネルギー問題対策

- ・今後の地球環境問題に対してナノテクノロジーが貢献できる部分がある。バイオテクノロジーでも化石燃料を使わないバイオマス技術の発展に貢献できる部分がある。2050年あたりまでを俯瞰した物語を書いてJSTなどが大きな目標を示し、企業や研究機関が技術を組み合わせることを考えれば的を射た課題になるのではないか。
- ・バイオマスエタノールの需要増による食料価格高騰の中で、非食物由来のバイオマスエネルギーの開発は社会的に意味がある。
- ・ナノテクノロジーによる省エネルギー化により、エネルギー全体の費用を下げていくというアプローチがあると思う。
- ・ナノテクノロジーによる高密度のエネルギー蓄電が可能となれば、社会基盤自体を変える可能性もあるだろう。また自己組織化はミニマルマニュファクチャリング（最小限での生産）やサステイナブルマニュファクチャリング（持続可能性のある生産）に貢献できる可能性がある。エネルギーを消費するトップダウン型の技術とは逆の方向性を目指すことができる。
- ・バイオマスの開発は食料となる物質でなく廃棄された物質を用いれば事足りるのではないか。家庭用のゴミを有効利用できるようなナノテクノロジーがあればよい。

●ナノロボット

- ・新規の有意義な機能をもつナノロボットを開発するということであれば意味がある話になるかもしれない。
- ・ドラッグデリバリーはナノロボットの分野に直結している。新しい研究が始まっており、いくつかの基礎的研究を作っていく点では課題としてよいのではないか。

●倫理的問題

- ・自己増殖のシステムは惹かれるが倫理的問題を伴う。科学の進展において倫理的

問題は必ず表裏一体となる。倫理的問題を明確に処置する制度があれば、研究を推進してもよいのではないか。

- ・増殖を止めるシステムと勝手に壊れるシステムを組み込んでいただきたい。
- ・自己複製、自己修復、自己進化を突き詰めていくと第二の生命を創り出してしまうことになり、人間が駆逐されてしまうという危険性はある。しかしながら遠い先の話であるので現段階では研究を進めつつ、危険が生じたら倫理的な問題や安全性の問題を考えて規制をするといった考え方でよいのではないか。
- ・生命の生死は構成法では成立しない。工学的には、死んでいる物体（人間）であっても構成できればそれも一つの目標達成になる。漠然とした「出来てなんぼ」程度の課題設定があってもよいのではないか。

●「自己組織化」に対する批判

- ・「自己組織化」という言葉が当センターで使われるときには、厳しい目で見られる。「（自己組織化を利用した）具体的な筋道が見えてこない」というのが批判の理由である。その点に対して答を示していかなければならない。また自己組織化は方法論にすぎない、といった批判も聞かれる。目標達成のためには自己組織化を利用しなくてもよいのではないか、といった意見である。
- ・自己組織化でなければ達成不可能な技術を挙げていただきたい。
- ・エネルギーの高効率利用の実現を目標に設定し、具体的な選択肢の一つとして熱揺らぎを利用する。どのような技術を駆使すればそれが可能になるか、筋道を描く中で自己組織化の技術が組み込まれてくるのではないか。
- ・自己組織化を利用すると高次構造が比較的容易に形成される。自然な過程をとるためエネルギー面で有利なデザインをすることができる。ナノの寸法でナノの要素を扱おうとすると単に分子デザインだけで使うのではなく、その要素を拾い出すための道具を考えなければならない。その部分では揺らぎの問題は排除すべきではなく、むしろ積極的に活用していかなければならない。
- ・組織化という現象を利用して様々な材料が作られる。一方で生命現象に至る過程として自己組織化を研究する点はまだ多くあるのではないか。化学からの観点では夢のある研究対象である。
- ・ナノテクノロジー・材料分野において高速処理や省エネルギーを達成させるためには、自己組織化のもつ機能は不可欠であろう。化学的に反応をプログラムして通常達成できない高次構造を形成していくと、新規の用途や技術を生み出すことにつながっていくであろう。ナノエレクトロニクスではリソグラフィの微細化の限界を打ち破るために、ボトムアップ型の技術が必要となる。これらの点に自己組織化の必要性があるだろう。
- ・自己組織化では自己集合でユニットが形成され、さらに自己集合でべつのユニットが形成される。生物の階層的な仕組みを模倣しないと、飛躍的な成果は生まれないのではないか。特異性のある酵素と一般性のある触媒という次元の違うもの

を組み合わせる巧みなことを生物はこなしている。次元の異なるものを組み合わせるといった視点を導入すると、より高次の成果が生まれるのではないか。

●開発の長期継続のための方策

- ・シーズ開発は市場づくりも合わせると非常に長期的になる。成功に至るまでの過程をどのように作るかが問われている。
- ・具体的な課題を決める必要はかならずしもないが、「出口は意識していますよ」と訴えておくことは重要である。

●出口と運営方法

- ・出口の候補を優先順位付きで挙げていただくとともに、プロジェクトの運営方法を対にして提案していただきたい。例えば研究総括への裁量権の度合等に関しての提案をいただきたい。
- ・シーズや出口の有無にかかわらず、いかなる問題に対しても解決能力のある人材の育成に資金を出すなどといった資金提供の形式にすれば柔軟性が増すのではないか。
- ・プロジェクト体制を3人の合議制にするといった方法も考えられる。事務的な支援体制を構築して、総合的に推進すればよい。
- ・大学がマネジメント面をしっかりとすべきという意見を聞くが資金面で厳しい状況である。競争的資金の原理は出口の成果が重視されるため、大学が自由な発想で長期的にビジョンを持ってマネジメントする状況にはなっていない。
- ・多くの研究では実用化までは達成しなくても出口を見据えて行わなければならないだろう。何かをキーワードにしてそれに付随する技術をこの程度の規模で行うだとか、産業の出口との結びつきでこの程度の金額で行うだとか、そうした点を決めていかなければならないのではないか。

●予算を得られる研究と得にくい研究

- ・描きやすい研究の方向性を提示すれば何の役に立つのか、といった疑問への明確な回答になるだろう。しかしながら描きづらい研究に対しては大きな予算を計上しにくいというのは事実である。

●まとめに向けて

- ・自己組織化の必要性は、省エネルギーのための材料技術などの議論で出された。それをどのように絞り込むかに関しては、当センターが今回の議論を基礎にして決めていきたい。
- ・太陽エネルギー利用への応用や、非食物系のバイオマスエネルギー利用への応用の他に、揺らぎの利用が自己組織化の用途として考えられる。基礎科学として非常に興味深い課題であると理解していただきたい。
- ・「自己」を議論しないで自己組織化の話をしているために、「組織化」と「自己組織化」が混同されてしまっている。単に凝集したことを自己組織化と呼んでいる点は根強くあるので、その部分を説明しなければならない。

- ・「プログラムされた組織化」という点がこの議論での目標なのではないか考えていた。
- ・「人材育成」が今後のキーワードとなることは確実であろう。

※その他、「ナノロボット」や「分子機械」などの言葉が、課題設定の言葉として確認された。

6.6.2 分科会2：階層的自己組織化プロセスの創製へ向けて

●分科会の目的

- ・最終的に予算を決定する省庁が納得するための達成目標あるいはキャッチフレーズを決めなければならない。
- ・センター内の会議では一部に「自己組織化」という言葉に対しては悪い印象があり相当な批判が出た。「自己組織化は何に利用できるのか」と疑問に対して答を出さなければならないと思っている。
- ・自己組織化の技術でなければ達成しないという事柄を考えながら、目標は何であるのかを議論していただきたい。
- ・非常に斬新なアイデアの提示が求められる。

●各セッションを聴いて

- ・自己組織化のバイオナノテクには二つの使い道があると考えた。一点目は自己組織化をものづくりに活かすという点、二点目は自己組織化自体を機能として考えるというものである。省エネルギーや低費用性の他に自己組織化の技術でなければ実現しない技術が加われば、アピールは強くなる。ワークショップの題目のさらに上には階層化というテーマがある。階層構造が増大することにより「創発」を得られるかどうかといったテーマである。セッションでは自己組織化技術の使い道として、自己組織化での位置制御の難しさなどから「間違いを許容する」技術への使い道が論ぜられた。それも一つの用途であろう。
- ・揺らぎには二種類あり熱揺らぎと非線形揺らぎは並行的なものではない。非線形揺らぎの場合はある分岐が生じ、その先は頑丈性（ロバスト）は強くなる。非平衡の揺らぎではエネルギー等分配説は成立しない。ブラウン運動や熱揺らぎではない現象自体が非線形なものである。生物が用いる非線形の原理を用いればマイクロメートルレベルで物を動かしたりできる世界も拓けてくる。

●自己組織化に対する認識

- ・自己組織化は生物に関して起きうる自然現象の範囲内での出来事であるという認識を明確にしておかなければならない。自己組織化は過程における順序の不可逆性があるという点も認識すべき重要な点である。

●“Bio-principle”、“Bio-inspired”という言葉

- ・「バイオナノテク」という言葉からは装置や材料を想像しづらい。“Bio-principle

(生物の原理に則った)”という言葉であれば想像しやすくなる。

- ・“Bio-principle”を“Bio-inspired（生物に触発された）”と読み替えるとさらに想像は広がる。その中のナノテクの部分を絞り込んでいけば、議論としてまとめるのではないか。
- ・「自己組織化」と「バイオナノテク」は概念が重複している部分がある。説明の必要なタイトルは相応しくない。
- ・自社内では上層部から「自己組織化で何ができるのか」と問われると「工場が変わります」と言っている。また「バイオがナノテクを塗り替えていく」や「小さく、環境にやさしく」といった言葉でも表現している。

●自己組織化の応用先

- ・この分科会では産業に役立つ具体例を数多く積み上げていきたい。
- ・自己組織化を材料の分野と結びつけば高次構造を含めて数多くの事例はある。自己組織化とは材料を作るためのものであり、装置を作るためのものではないという認識がある。自己組織化で装置を作ることは無理ではないか。トップダウン型の技術と組み合わせて強力な材料や斬新な装置を生み出すことを考えるほうが現実的である。
- ・材料と装置の区別は難しい。自己組織化で作られたその材料が、装置が作動する必須要素であるかどうかといった事例が多くある。
- ・何らかの形で人間が関与しなければ自己組織化のみで装置を完成させるというのは絵空事になってしまうのではないか。

●目標達成までの期間

- ・議論においては「何年の期間で取り組むか」を考えることが重要である。例えば「100年を掛けて」となれば、徹底的に基礎研究をすべきということになる。「5年後を考えて」となれば出口の議論をしないと間に合わない。
- ・向こう5年間の計画を立てるのであれば、どのような機能が必要とされているかを議論することが重要である。誰もが言葉として使っている「自己組織化」をアピールのための言葉として表現しても、説明が曖昧になってしまうおそれがある。
- ・50年後、100年後の未来も見据えて日本が世界を牽引し知を積み上げるという側面を議論すべきである。5年後のみを意識しただけでは「何もできない」という印象が強くなる。

●自己組織化と自己集合

- ・下から組み上げていくものが自己組織化であって自然界の原理すべてを自己組織化とは捉えていない。自然現象で起きていることは「自然組織化」とでも言ったほうがよい。また本来、自己組織化と自己集合は異なる概念である。自己組織化は非平衡で生じる散逸構造でありエネルギーが無くなったら構造は成立しなくなる。一方自己集合は平衡状態で達成する構造である。

●「何をやりたいか」

- ・最も問われることは「何をやりたいのか」という一言になると思う。出席者に聞いていきたい。
- ・従来にはないコンセプトで装置、材料、機能の研究開発に取り組みたい。これまで検討されてこなかった新規の材料で実現していきたい。5年後の目標を問われると現在自らが着手している研究の延長にあるものしか言えない。具体的にはブロックポリマーとイオン液体の組み合わせにより興味深いナノ材料を作ることができる。様々な応用が考えられる。
- ・ナノテクノロジーの状況を三つの側面から説明できる。一点目は、ナノテクノロジーは様々な産業界で実際に利用されているという事実である。しかしながらその技術がナノテクノロジーと呼ばれずに、ナノテクノロジー産業は興っていないと思われているという問題もある。二点目は、ナノテクノロジーは物理学と化学の融合により新規の成果が得られると考えられているが、なかなか成果が得られていないという現状である。三点目は、30年以上の長期を掛けることにより成果が出た事例がある中で、ナノテクノロジー・材料分野は第2期科学技術基本計画で重点分野に採用されてからまだ約10年しか経っていないという点である。これらの三つの側面を考慮して戦略を立てていかなければならない。自分たちが現在行っている産業の中での困難を助けてくれることであれば、どんな点でもナノテクノロジーには期待したい。
- ・半導体のイノベーションを起こしたい。既存の半導体では不可能な機能を実現するためにナノテクノロジーに力を投下すれば、微細な構造で自然界にない物質パラメータをもった材料や機能を生み出すことができるであろう。ナノテクノロジーゆえに出現する新規の機能を創り出したい。自然界の材料が提供できない機能を集積化したい。また日本が得意とする材料分野を含め、この分野で何をしていくべきかの方向付けを強化しなければならない。材料の分野で現在最も求められているのは環境やエネルギー分野における技術であろう。自己組織化などのナノテクノロジーを投入して、環境分野の技術において日本が世界を牽引しつづけるようにしていかなければならない。
- ・「鉄腕アトム」のような望む将来像を凝縮した存在が求められる。漫画ではあるが唆に富む内容を含んでいるといつも思っている。自己組織化で高効率な非線形的な装置を実現させたい。また1分子を感じるセンサや犬よりも能力のよいセンサなども世の中には必要であろう。高次構造を用いることによってそうした応用が実現しやすくなるのではないかと考えている。曖昧さがあっても正確な解答を出せるといった、既存のアルゴリズムとは異なる型のコンピュータも発展させていかなければならない。これらはナノテクノロジーを利用しなければ実現できない。それが理解されずに予算が減っている現状は悲嘆すべきである。
- ・ある目的で開発をしているとまったく違う性質が発見される場合がある。そこか

ら開発する装置の方向性が生まれるという面もある。何をやりたいかというよりは一生懸命に走りつづけるしかないと考えている。簡単にロードマップを出せるようなレベルではない。

- ・人為的行為を介在せずに競争力のある材料や装置を創り出す過程が自身の「自己組織」の定義である。5～10年の範囲で重点的に考えているのは、ミニマルマニファクチャリング（最小限での生産）である。可能なかぎりエネルギーを無駄にせず変量・少量多品種生産に対応するものづくりのあり方を、焦点に据えている。フラットパネル・ディスプレイも大きな目標である。機能性フィルムを張り合わせて作る方法に替わり、塗れば自然に同様の機能が得られるような材料を表面に積み重ねる。実現するために歩止まりや信頼性を確保できる材料と工程を開発していきたい。またインクジェットプロセスやオンデマンドプロセスなどの製造装置と材料、工程を、産業界を念頭において構築していきたい。20年の範囲ではナノロボット的な自律型のナノシステムの実現が大きな使命となるだろう。それよりも長期では人工生命や人工光合成や、食糧生産などがナノテクノロジーの範疇に入ってくるのではないだろうか。現在は実現していないが実現されると大きな社会的意義がある材料に対しては、短い期間で目標設定を立てても行動していきたいのではないだろうか。
- ・既存の材料にどのような機能を付加するかを考えることが重要なのではないだろうか。自己組織化の技術にはどういう役割があり何が可能なのかを集約すれば、一つの結論になるのではないだろうか。またトップダウン型の技術では不可能な点を羅列し、それをボトムアップ型の技術で突破するという戦略を立てればいいのか。
- ・「これまでの5年間でこのような芽が出ていて、これからの5年から10年で、実用化までは行かないとしても技術的にもう一段高い段階に行ける」という感じのことを発言していただきたい。
- ・究極のものづくりを考えた場合、容器の中に材料を入れ2、3日が経過すると、製品になっているといった像がある。ミニマルマニファクチャリングやエネルギー招集などが要点となる。基本的に寸法を小さくすることは、省資源につながるという点を明確に主張すべきではないか。ナノテクノロジーとくに階層的自己組織化の本質は、中国語で言う「創新」である。環境・エネルギー問題に役立つナノテクノロジーは第一に求められる技術であろう。
- ・ナノテクノロジーは材料技術でありすべての分野にわたっている。情報技術やバイオテクノロジーとは視点が異なる。日本は本来的に材料分野を得意にしている。ナノテクノロジーの予算が減っているならば由々しき自体である。出口のほうばかりに目が向くと肝心の材料研究が弱体化してしまう。また生体を人工物で代替するという方向性もある。材料として求められているものは一つの材料に様々な機能を兼ね備えているものである。例えば、五つの機能がすべて含まれている材

料などの開発が目標になるのではないか。エネルギーという観点では光のエネルギーを何かに変換し、それを保存しておけるような材料があれば非常に画期的である。ある時期は環境分野に結びついてよいしある時期はバイオ分野と結びついてよいが、とにかく材料分野が強化されるという点が非常に重要だと考えている。

- ・日本のために日本国民のために何をしたいかといった考えを持っている。日本が得意とする材料分野を伸ばしてその成果や知識で欧米と対等に渡り合っていくことが必要であろう。自身としては環境・エネルギー分野での課題解決を以前から思い描いていた。光合成のような周囲との連携構造がある自己組織化は不可欠であろう。また情報処理分野での課題解決も以前から思い描いていた。生活の中でも絶対的に正確な計算ではなく、曖昧であっても全体を把握できるような計算を必要とする部分は多い。30年後までの範囲で見れば、曖昧でありながらもある程度の明確な結論が出るようなコンピューティングが揺らぎを用いて考えられるのではないか。

●日本のナノテクノロジーの置かれた状況

- ・第4期科学技術基本計画の重点分野からナノテクノロジー・材料が外されるとしたら大変な問題である。時期も採用されるような戦略を優先して検討しなければならない。
- ・ナノテクノロジー・材料の区分けが別のものでなくなっても構わないと考える。
- ・ナノテクノロジーの拠点はものづくり技術に長けたアジア地域に移っている。日本は危機的状況に置かれている。

●ボトムアップ型技術の利点

- ・トップダウン型の技術に関する開発に企業は莫大な投資をしている。ボトムアップ型の技術の利点は安価な値段で行うことができる点ではないだろうか。トップダウン型の加工技術などには処理能力が重要となるが、高い処理能力がなくても安価で加工を行いたいという要求もある。その点にボトムアップ型の技術の用途があるのではないだろうか。

●分野融合的施設

- ・バイオや半導体、材料などの各分野の人材をある研究施設に入所させて各分野の意見を交わさせ、概念を“発酵”させるといった実験的取り組みも必要ではないか。
- ・(上記の研究施設の提案に対して)、ナノ融合センターを次期の計画として総合科学技術会議に提案をしたら、最悪の評価を受けたという経緯がある。理化学研究所や物質材料研究機構などが存在しており、新規に箱物をつくるのは反対だというのが理由であった。

●人材育成

- ・5年間の任期が終了すると“使い捨て”をされた存在となってしまうような日本

の仕組みは問題である。任期終了後も別の機関に移動できる循環的な仕組みを作ることが重要である。

- ・その役職に就いたことが能力や地位の向上につながるような仕組みを作らなければならない。

●地域クラスターの形成

- ・地元で基盤となっている産業の中にネットワークを形成すべきである。企業を出口としたクラスターを作っていくことが日本の地方のあり方として必要ではないか。

●まとめに向けて

- ・材料分野等、日本の得意する点をさらに強化することを示すキーワードは入れたほうがよい。日本が世界で勝負できるものづくりという分野を強調するようなキーワードも必要であろう。
- ・“Bio-inspired” は重要な切り口である。キーワードとして必須であるかはわからない。

[7] セッション 5. まとめ

7.1 階層的自己組織化に基づく、新機能創製と分子設計(分科会 1 まとめ)／ 相田卓三 (東京大学大学院工学系研究科 科学生命工学専攻 教授)

分科会では抗体の組織化と機能、分子ナノチューブによる新機能の創成、バイオデバイスに向けた機能性材料への要望、メディカル・ナノデバイスからの要望・課題といった点が話された。これまでの反省と心構えとして、出口イメージの基本的概念がほとんど欧米からのものであるという点がある。日本はいつも縁の下の手を担っており、日本の基礎科学や要素技術が欧米に利用されている。たとえば中国は材料科学における論文投稿数では日本を上回っている状況などを見ると、日本はいつまでもこのままでいいのかという思いがある。牽引力のある出口が必要であろう。またヘテロな人材が共通の興味をもてるような研究チーム組織も必要である。人材育成・教育の点では出口から基礎までを俯瞰できる人材や目利きを育てるといふ博士課程の問題がある。さらにファンディングのしくみと評価も必要であろう。

研究面に関してはトップレベルの位置づけにあるのはたしかであるが、その研究を可視化した形にする点で劣っているのではないだろうか。「ムーアの法則」には牽引力がある。どのような条件を満たすと何が可能になるか、実現させるためには何が必要になるかといったことを予想することが可能となる。様々な基礎化学を長い時間をかけて成熟させないかぎり、米国のクレイグ・ホーカーが実現したボトムアップによるLSI (Large Scale Integration、大規模集積回路) を実現するための、例えば Low-K (低誘電率) のデンドリグラスのようなものは実現できない。ホーカーはコーネル大学から IBM へと勤務先が移っており、違う研究環境の中に置かれ異なる技術課題に真摯に取り組む、スクリーニングして一番良いものを見つけるといった努力の賜物である。牽引力のある出口としては、エネルギー問題があげられる(図 7-1)。

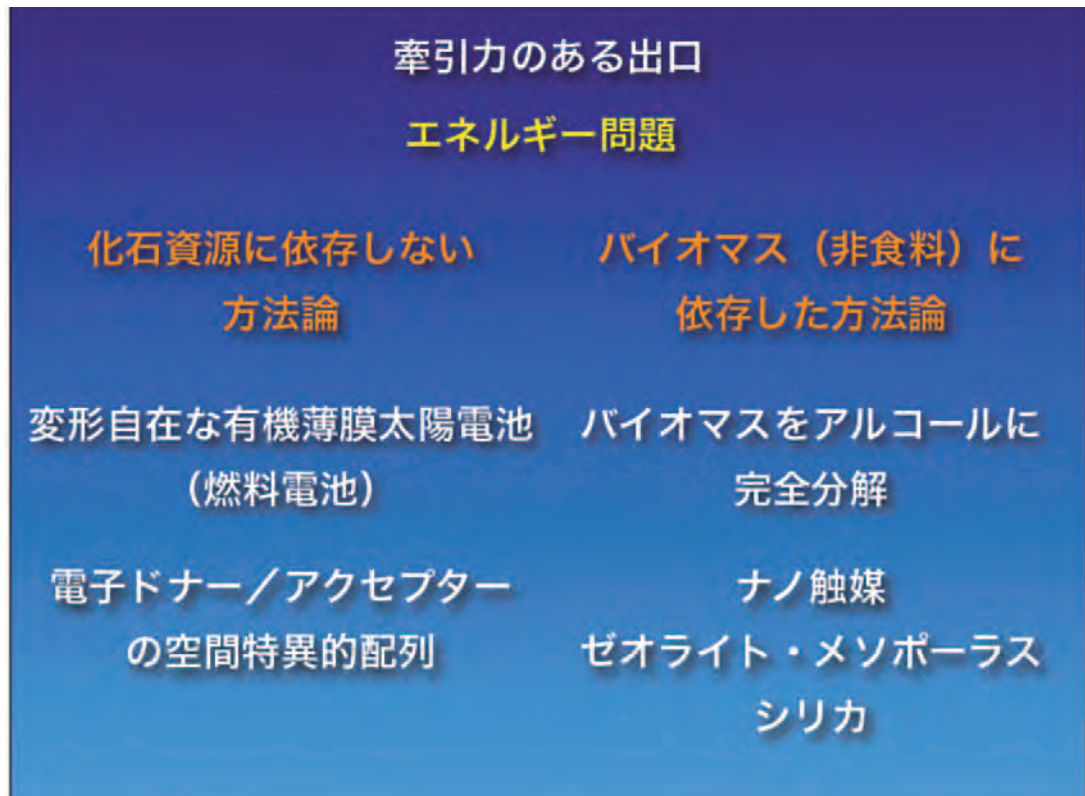


図7-1 牽引力のある出口 エネルギー問題

化石資源に依存しない方法論が必要であり、そのため変形自在な有機薄膜太陽電池や燃料電池の開発が試みられている。また電子ドナーとアクセプターの空間特異的配列も方法論として必要となる。自己組織的プログラムの実現が不可欠であり、多くの基礎科学が開拓されなければならない。バイオマス（非食料）に依存した方法論も必要である。最近バイオマスをアルコールに完全分解する試みでは、ナノ触媒が活用されてきている。まだ高効率ではないものの、ゼオライトやメソポーラスシリカなどの材料が使われようとしている。

夢のある出口としては、生命あるいは生命機能を作るという課題が考えられる。ロボット・分子機械に関する分野の出口として、刺激応答のDDS（Drug Delivery System、ドラッグ・デリバリー・システム）の開発がある。患部認識のための部位、薬放出の部位などを包含的にもつ素材の開発は、挑戦的であるものの実施可能な課題である。おなじく出口として、人工筋肉がある。人工系でATP（Adenosine Tri-Phosphate、アデノ三リン酸）やGTP（Guanosine Tri-Phosphate、グアノシン三リン酸）などを活用して大きな動体を実現することは、材料設計の観点から重要であろう。人工細胞に関する分野の出口として、自己複製、自己修復、自己進化、ヘテロ組織化といったことを実現することがあげられる（図7-2）。

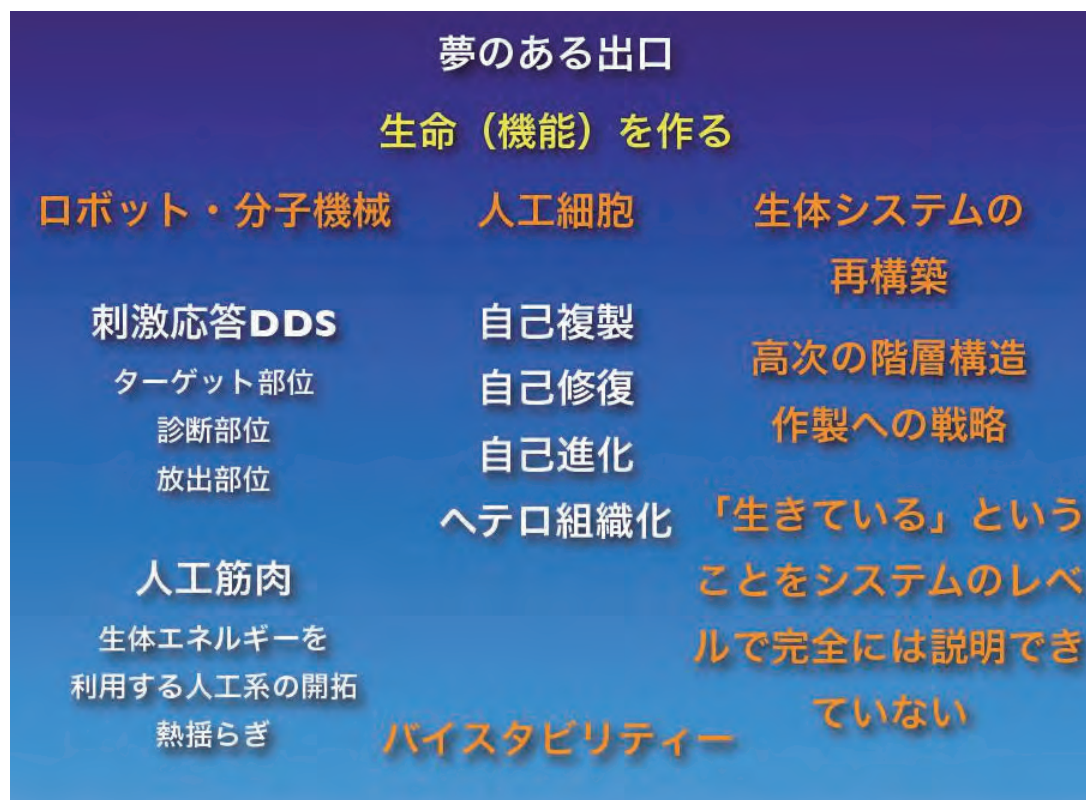


図 7-2 夢のある出口 生命（機能）を作る

夢のある出口として生体システムの再構築もキーワードとして出てくる。すでに完成されている生体システムを再編して新機能を実現するということである。高次の階層構造の構築はまだほとんど実現されていない。また、「生きている」ということをシステムのレベルで完全には説明できていないという指摘も出ている。ナノレベルの自己組織化を活用しながら、システムのレベルでの情報交換や信号の作用などを理解していくしかないだろう。また二つのものがともに安定した状態であるバイスタビリティの実現も出口としてあげられる。

研究チームの組織としては、ヘテロな人材が共通の興味をもつ仕組みが必要ではないだろうか。メンバーがヘテロな集団に馴れていない。分野特有の言葉の違いを吸収するのに時間がかかる。分野の異なる複数のリーダーを置くことも一案である。また、手を出して失敗するより手を出さないことの方よいと考える日本人の精神的傾向がある。「目利き」の存在が必要になってくるものの、先天的なセンスに負う部分が大きい。多くの異なる（分野の）人材をテクノロジー分野に入れていくことが必要となる。

研究資金・評価の面では、明確なミッションを提示できていれば、専門分野が異なるメンバーからできた研究チームを優先的にサポートする米国的なしくみが存在すると、人選の過程・評価法などにおいて顕著な変化をもたらすことになる。CRESTなどの領域総括に人選・方向性などで強いリーダーシップを付与することも大事である。さらに、技術では基礎と応用の二つの独立した軸での評価が必要で

はないだろうか。基礎の観点でのレベルと応用の観点でのレベルを明確に区分して、独創性やインパクトなどでトップクラスの研究に高い評価を与えるべきである。テーマに応じた適切な評価スパンを考慮しないと、小さな研究になる。じっくりと研究をすることができる一定の時間を設ける必要がある。

人材の育成・教育の面では出口から基礎までを俯瞰できる人材・めききが必要となる。しかしながら最近では学生が夢中で研究をやれる余裕がなくなっている。学生は学部から大学院まで同じ研究室に在籍しており、気持ちの余裕を持って複数の分野を経験できないまま修士課程後に就職をしてしまう。また文系・理系を区別する傾向が強く、学生は自身を分類したがるために、コミュニケーションに難が生じるといった弊害がある。米国では良い推薦状を獲得することが重要であるという背景などがあり、人脈を基本とした世界が成立しており多くの人に自分を見せようとする傾向がある。学部時代の夏休みなどにインターンシップを経験する学生も多い。

●質疑・討論 大学の教育

- ・ 所望の人材を大学が育成するには何を变える必要があると考えるか。
- ・ 迫力をもった人間を育てるという点では米国の教育の事例はよいと考えている。自分を見せようとしておりその動機づけもある。またインターンシップも評価を得るための動機付けとなっている。
- ・ 米国の教育が良いのではなく米国外で育った人材が米国内で活用されているのではないか。米国の教育が良いということを言い過ぎるのはよくない。
- ・ 若い人材の学力が落ちているとは考えていない。語学力などは以前よりも格段向上している。博士の段階では日本の学生のほうが米国の学生よりも能力は高いのではないだろうか。学生などの人材の絶対数は日本のほうが少ない。

●質疑・討論 博士課程修了者の処遇

- ・ 日本の企業では博士課程修了者の給料は高くない。改善される見込みもない。
- ・ 最近では中途採用を雇用する率が増えている。5人のうち2人は中途採用といった程度である。博士課程修了者の待遇については旧態依然としていることは事実である。優秀な人材を選び抜くには多数の人材の確保が必要となる。しかしながら研究者に向いていないような人材もその中には出てくる。また優秀な教育を受けた人材であっても能力に見合う職の場所が少なくなっている。
- ・ 将来を見る目のある学生は修士課程修了後に就職をしてしまう。就職などの社会的義務を猶予されたいと考える学生が博士課程に残る傾向がある。
- ・ 政府は博士課程の人間を数多く生み出そうとしている中で、博士課程を修了したら研究者や技術開発者にならなければならないという思い込みが企業にも大学にも強い。欧州では学位を取得した営業職などが活躍している。博士課程の人材を広く捉えていかなければ日本の国力は上がらない。

●質疑・討論 大学院生の進路

- ・優秀な研究者候補がファイナンスなどのまるで関係ない分野に就職してしまう場合がある。
- ・東京大学では経済学部を志望する教養課程の学生は増えているが、工学部や医学部志望の学生が減っている。要因としては就職先の給料の高さがある。悪平等の中でやる気がなくなってしまうような例は多い。科学分野の人材を失っていることは確実だと思う。最近の学生（とくに東大生）は「成果を出す」ということを「結果を出さなければならない」とものと履き違えている。大学の研究はさまざまな経験を積むことが第一の目的である。
- ・科学を理解する人材を科学以外の他分野にも配置したほうがよいのではないか。将来的に我々の力になる土壌に肥料を与えることにつながるだろう。
- ・科学でキャリアを積むことが自身にとっては生産的でないと判断した人たちが他の分野に行く。優秀でない人材が科学の分野に残ると理解されることは問題である。

7.2 階層的自己組織化プログラムの創製に向けて(分科会 2 まとめ)／ 居城邦治（北海道大学電子科学研究所 分子認識素子研究分野 教授）

第4期科学技術基本計画は政府が推進している「イノベーション25」の内容と関連づけられると考えられている。その重点分野に「ナノテク・材料」が含まれるかどうかは微妙な情勢であると聞く。背景には成果が議員たちの目に見えてこないという点がある。自己組織化がほんとうに必要であるかどうかという議論があった。「バイオナノテクノロジー」には、“Bio-inspired nanotechnology”という英語を充てた。分科会では、バイオ分野の原則や材料を基本として、ナノテクノロジーで自己組織化を絡めつつものづくりができないか、という統一見解になった。「自己組織化（Self-organization）」は、非平衡でできる構造（散逸構造）を指すのに対して、「自己集合（Self-Assembly）」は、平衡でできる構造を指す。今回はこの二つの言葉はとくに区分しなかった。自然界の自己組織化を見てみると、生体膜はプラスチックやサランラップなどよりも低分子の分子が自己集合してフィルムを作っている。また、生物以外にもベナールセル型対流などのように大規模から、ナノサイズの小規模まで、エネルギーが発散するときに見える構造がある。自己組織化によるものづくりのイメージとして、パーツを容器の中に放り込み、かき混ぜると宇宙艇が完成しているという鉄腕アトム漫画の例がよく見られる。微粒子の分散液をカバーガラスに滴下して室温で乾燥させるとライン構造が見られる。血管様分岐パターンを形成することができるため、血管の培地として使おうとしている。

自己組織化における現実問題に関する意見を抽出した。どの領域までを自己組織化に含めるかといった言葉の定義の問題がある。また、ものづくりに本当に自己組織化を使う必要があるのかという問題がある。さらに、「バイオ・ナノ」という言

葉と意味合いがかぶっているという問題がある。「自己組織化」という言葉を用いても提言にならないという懸念があった。「バイオ」だけにこだわると範囲が狭くなってしまうため、「バイオインスパイヤ」に言葉を置き換えるほうがよいのではないだろうか。「自己組織化」という言葉を「ビルドアップ・ナノテクノロジー」のように、一言の言葉に置きかえたほうが一般受けをするのではないだろうか。政策提言の土台として、「ものづくり・材料」は国策のまま守るべきであろう。地道なプロセスであり長期的な視点が必要となる。「材料の分野は日本の強みである」という立場を維持すべきであろう。こうした立場の維持には、現状把握をして実現性を短期スパンで考えるべきか長期スパンで考えるべきかを見極めるといった時間軸の設定が必要である。「5年後にはこれだけの成果をもたらす」といった提言にならないと認められにくいだろう。

「自己組織化＝ものづくり」という定義をすると、要求事項（目標）としては、多機能化、少量多品種、創発（階層化による機能の創出）、実装系、低コスト、省エネルギー化、信頼性を獲得できるようなプロセス、無駄の無い作製プロセス、オンデマンドプロセスといったことがあげられる。現状では、液晶はすでに創発の中に組み込まれている。また、ブロックコポリマーによる相分離系を利用することができる。ただし、これらは平衡状態でのものづくりを意味しており、従来の自己組織化が指すところの非平衡状態でのものづくりとは異なる。「自己組織化」という言葉を代えて「工場を変える」などの言葉にすると説得力が増すのではないか。最小限の場所、エネルギー、人で足りることを指す「ミニマルマニュファクチャリング」もキーワードである。ここから「環境・エネルギーに優しい工場」といった言葉が出てくる。

自己組織化により構造化で機能が発現する系を作り出すという点が重要である。トップダウンでできないところを突破する点が自己組織化の使命となるだろう。人工光合成系や、焦電素子、太陽電池、淡水化フィルターなどのように環境・エネルギー向けに役立てたり、再生医療材料、ポリマーベースのアクチュエータ、超高感度の嗅覚・味覚センサ、高屈折材料の加工技術、曖昧さ・溶液系・超並列コンピューティングといった部分に役立てたりすることができる（図7-3）。

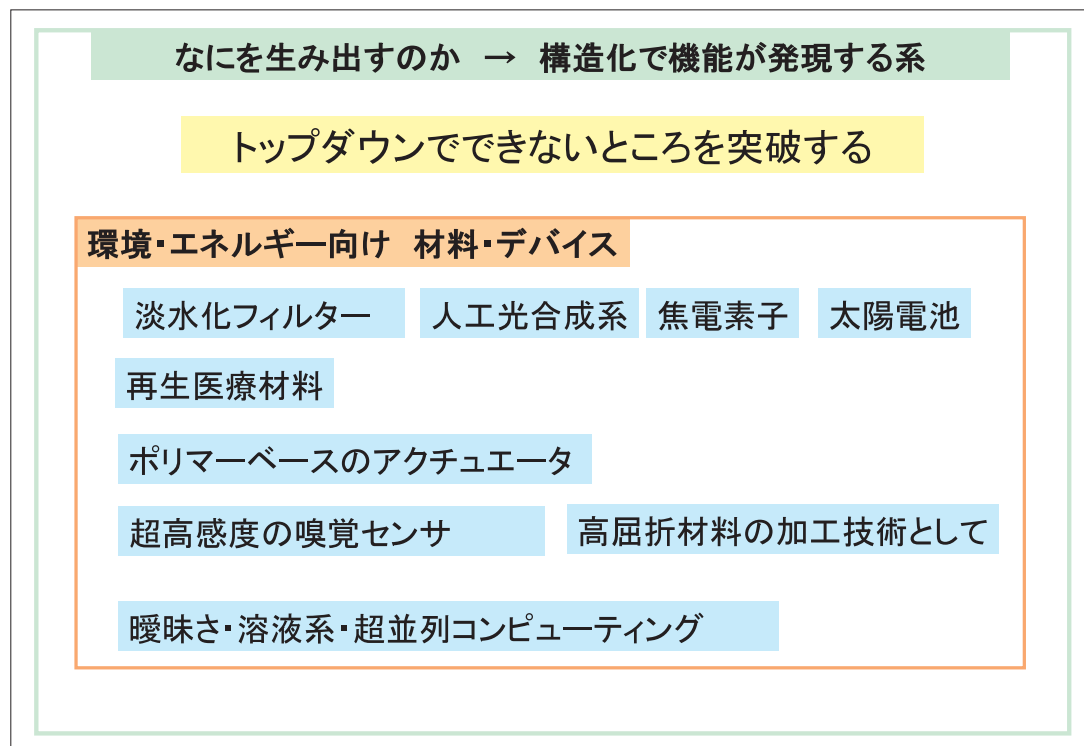


図 7-3 なにを生み出すのか→構造化で機能が発現する系

自己組織化をものづくりではなく機能そのものと捉えた場合に、自発的な動き・変化・ゆらぎなどから既存の固定的な材料とは異なる動きが可能な材料を実現できるのではないだろうか。自己修復（メンテナンス）・自己増幅も自己組織化の最たる部分である。さらに創発や、間違いを許容してそのアルゴリズムにより動く材料を作ることなども考えられる（図 7-4）。

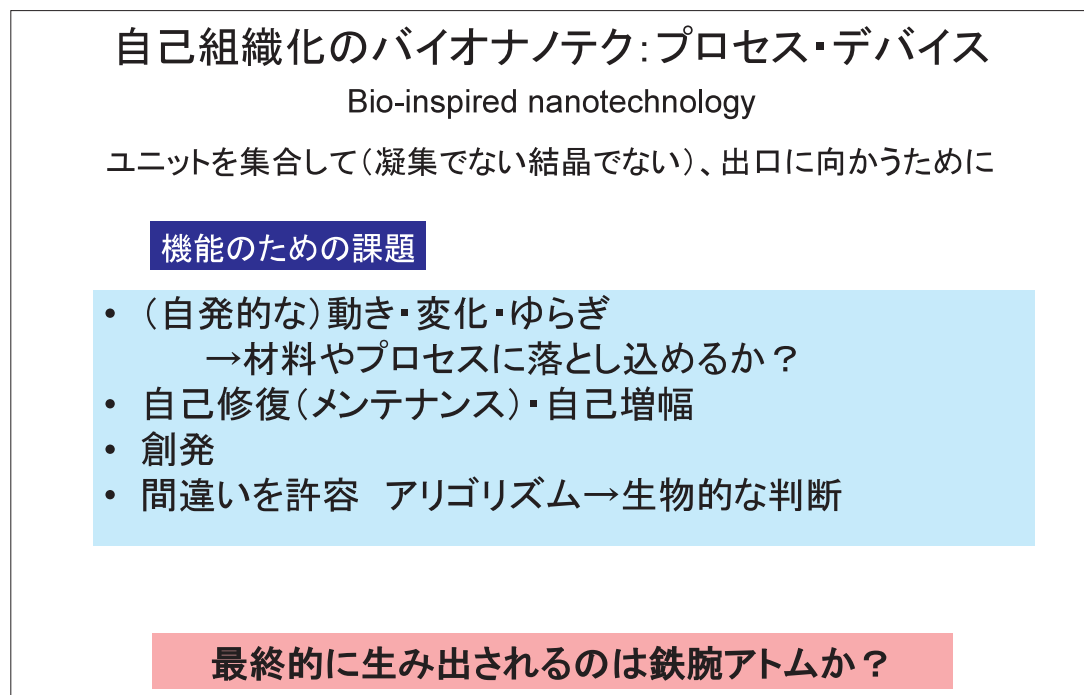


図 7-4 自己組織化のバイオナノテク：プロセス・デバイス

研究支援施設やシステムの点では、自己組織化を進める上で必要であるバイオとナノを扱える人間が常に会合する拠点が重要になる。また、異なる言葉・異なる文化圏を融合しなくてはならない。「箱もの」と見られずに、人材を育成することができるシステムづくりを考えなければならない。大学間・産学間で柔軟に動けるようにするには、マネジメントが必要である。キャリアパスの設定も不可欠であろう。人材と人材を混ぜるだけで融合し、自己組織化的に結果が生まれるような「虎の穴」が必要ではないだろうか。

●質疑・討論 分野融合

- ・分野融合はただ人材の集合のみならず使命・目的を定めた上で適材の人物などを設置するといった仕掛けがあってはじめて進歩するのであろう。
- ・三つ、四つ程度の協調的なテーマを決めてそれに基づき人材を集めてやっていくのがよいだろう。研究者を集めるだけでなく、学生なども入れていくことにより融合がなされていくのではないだろうか。
- ・理化学研究所には「理事長ファンド」（正式名称は創造的特別基礎研究奨励研究）という融合的課題に対してのみファンディングが行われる制度がある。これにより他分野間での融合的課題が出されている。
- ・北海道大学でも 21 世紀 COE プログラムで「バイオとナノを融合する新生命科学拠点」というテーマの研究を実施した。予算の提供が掛かると異分野間でも提案が起きる。
- ・政策誘導の他に場所の共有を組にして考えなければならない。さらに分野融合のための新しい文化をつくりだすためには、新しい規準を決めどの分野の人材にとっても等距離に感じられる場所を確保するようなことが一つに揃っていなければうまくいかない。例として東京大学ナノバイオ・インテグレーション研究拠点が同様のことを始めている。

●質疑・討論 非平衡でできる構造を利用した技術

- ・非平衡でできる構造などを利用した技術はあまり無いという認識か。
- ・非平衡系を材料やものづくりに持ちこむことは難しい。ものづくりはしてはいるが代表例を思い浮かべることが難しい。
- ・ナノレベルではエネルギーを注入しながら効率よく高次構造を作っていくような仕組みをつくるまでには至っていない。
- ・物理学的定義としては自己集合に分類されるものの、エネルギーを機能的に使っているような系は数多く存在する。生物以外の構造もあげられる。勘と経験に頼る技術という視点で見れば産業的にかなり利用されているといってもよい。
- ・バイスタビリティの過程によれば 1 種類の物質から 2 つの異なる機能を作り出すことができる。自己修復というと壊れたものを直す意味合いが強いが、2 つの

異なる状態から異なる機能を出していくことも可能である。

- ・初日の講演で紹介した衝撃を与えると弾力性を増す材料は、特別な三次構造を作り上げている例であると認識している。

●質疑・討論 高次構造を作る過程の議論

- ・高次構造を作り上げるまでの過程が連続的であるのか、どのような仕掛けによるのかまた一次構造と二次構造の間の相関関係はどういったものかといった点の議論が欠けている。また、産業界で求められている開発技術に自己組織化を組み入れることができるのかということも焦点にすべきであろう。例えば、大面積で均一的なディスプレイを実現させるのに必要なマージンに自己組織化を組み込めるのかというような点である。さらに、均質のものを大量に作り出すための方策の有無などについての議論も期待したい。
- ・バイオミネラリゼーションによる構造材が注目されている。
- ・高分子あるいは合金系において冷却速度を変えてパターンを変える方法が用いられており、構造化の方法や理論は考えられている。非平衡解放系の基本理論はここ 20 年で確立しているが産業には応用されていない。
- ・自己組織化は個々の対象ではなく、全体のシステムを考えたときに組み入れることができるかを議論できるものである。自己組織化により材料を作るときの過程制御を確実に行うことにより産業に貢献することが可能となる。

7.3 外野から見て分かる研究を／

宮野健次郎（東京大学 先端科学技術研究センター フォトニクス材料分野 教授）

分野の外側の視点から用語の問題、スローガンと研究当事者の反応、良い研究を実現するための人、研究における細部へのこだわりといった点を話したい。細胞膜内の構造間の相互作用は階層的自己組織化の過程そのものであるといえるが、細胞膜内の相互作用の関連性を図示した俯瞰図を示して「階層的自己組織化」という言葉が思い浮かぶであろうか。もし構造を真似るのであればトップダウン的に設計するであろう。また無機・有機ハイブリッド材料の nm の厚さと cm の面積をもつ薄膜の実験を取りあげた理化学研究所・国武豊喜チームリーダーの論文は、階層的自己組織化の話をしているが「階層的自己組織化」という言葉は登場しない。階層的自己組織化を意識していない研究者は「階層的自己組織化」という言葉を聞いても自分の研究とは関係ないと思うであろう。これらはスローガンとは別のきめ細かい戦略の提示法の検討が必要不可欠であることを示している。

出口が明確であっても思わぬところに落とし穴がある場合がある。例えば、1pg/ml の感度をもつバイオチップの開発では、単分子の計測手法の開発というよりはむしろ解離定数の十分小さい抗体の産生が最大の難関となった。また製品化を請け負う人もあまりいないことが最後の落とし穴となる。その経験で感じたことは、

異なる部分の分担者がいつでも会って議論できる状況を作り出す必要がある。違う分野の人たちの間にたち話を通じさせる仲介が必要である。大学教授でも仲介者になることができる。また機器開発のような場合、プロジェクト・マネージャーやオーガナイザーのような人が必要となる。こうした役割を担う優れた人材は大学の外に沢山居ることを知った。そのような人を発掘、ストックしておくための仕組み、人材バンク等が求められる。

階層的自己組織化でありボトムアップであるからといってそれが良い研究であるとは限らない。計画性がない不意の「できちゃった自己組織化」では、戦略が伴わず成果をあげることはできない。研究がどの程度広がりを見せるのかといった波及効果を評価しなければならない。ナノレベルの目に見えない「現場」を見る努力は必要である。ブラックボックスの状態にしているのは理解不可能な点がある。

研究の良し悪しはしかるべく観察すれば分かる。出口の有無よりもその先の発展性あるかないかが重要である。経営的な判断のできるマネージャー的な人が必要である。支援しない研究を明確に区分する必要がある。ファンディングエージェント間の思想的役割分担は重要である。目利き役を担うこの会議の参加者たちの責任はとても重いといえる。同一人物が複数の研究スローガンに対して名乗りを上げ、ファンドを受ける場合が多い。様々な点で不都合であるし不経済でもある(図7-5)。

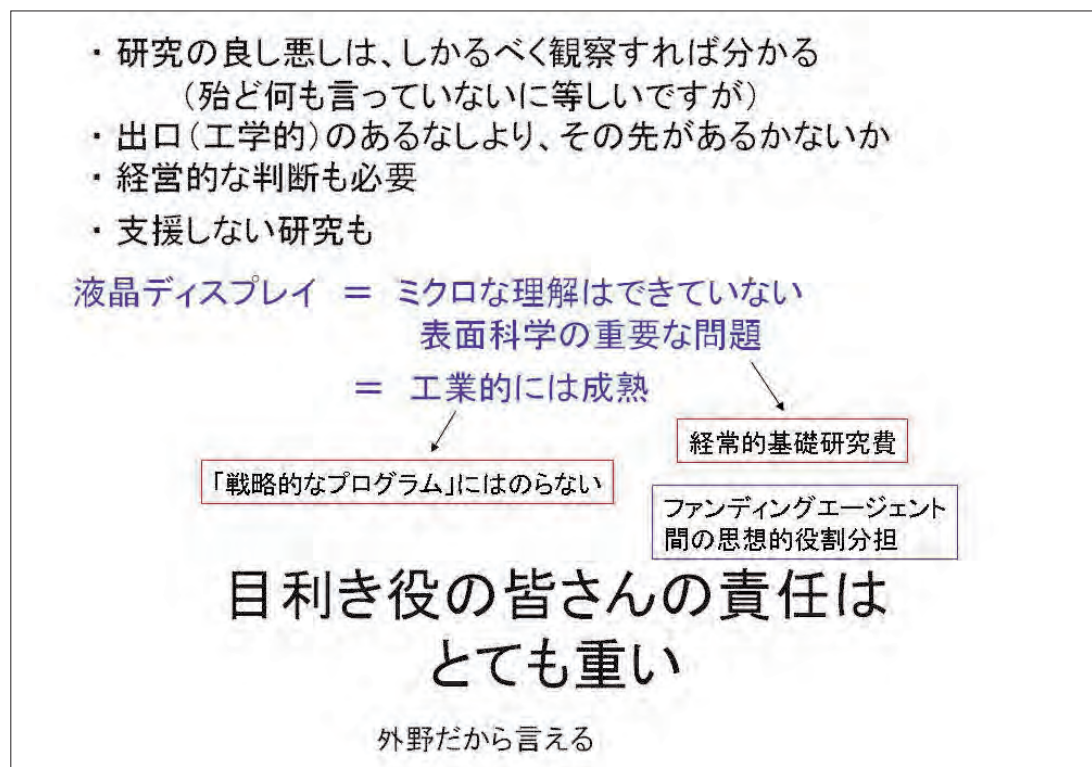


図7-5 目利き役の皆さんの責任はとても重い

●コメント

- ・ ファンディングエージェントの思想的役割分担に関連してここ1年ぐらいで、

JST と NEDO や文部科学省と経済産業省が、戦略段階から相談をするような研究課題の実例が出てきている。たとえばナノエレクトロニクス分野では、平成 19 年度経済産業省ナノテクノロジープログラム「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－うち新材料・新構造ナノ電子デバイス」と、JST の CREST における「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」が研究領域の共同公募をするなどしている。

- ・目利きの役割が重要であるという点に同感である。プロジェクト・マネージャーが信念をもって行動すべきである。

7.4 セッション5 総合討論

- ・今回のワークショップで「出口」を強調したのは社会に貢献する科学技術が求められており、その可視化が求められているという背景がある。ナノテクノロジーは日本の得意とする材料研究に密着しており、継続していかなければならない重要な分野であるとする。第三期科学技術基本計画の範囲内である 2010 年までに、政策決定者に何かしらの成果が現れていることを形として示さなければならない。異分野融合は何より大切である人材育成のために重要である。出口をいくつかに絞り込むことの難しさを今回のワークショップをとおして感じているが、俯瞰的な視野をもって研究と社会のつながりなどを眺められる人材を育てる効果は大きい。出口の方向を決める方法論を手にしていないという問題点があると認識している。今回のワークショップの話し合いや追加インタビューなどをもとに、戦略的な絞り込みを見出す努力をしていきたい。階層的自己組織化をそのままプロジェクトにする考えはなく、今回のワークショップではこの分野で重要な方向性を出して絞り込みをしていくねらいがあった。日本の研究開発政策の制度自体を根本的に変えていくのは困難である。オールジャパンで議論をするための土俵を作ることが現実的な方法であるといえる。2 年ほど前から開始されている省庁間・機関間での連携は重要なことであり、今後も推進されていくだろう。CREST やさきがけの運営に関しては JST 内でも議論がなされている。総括リーダーの判断により研究を採択するなどといった現実的な対応をとり、研究者側の意向や中長期的な研究の視野を包含していく方法も考えられる。研究の全体像を眺めたいのでその段階での政策決定者との合意を形成し、運営でこなしていくといった現実的対応も考えられる。全体的問題への対処と同時並行的に進行していくことが必要であろう。
- ・扱う材料を限定するといった色合いを強めていくと、デバイスとの結びつきが弱くなってしまふということを感じた。自己組織化材料の開発においては、デバイスのスペックとして何が求められているのかをより強く意識すると、成果が出るのではないだろうか。
- ・第 4 期科学技術基本計画でもナノテクノロジー・材料が重点分野として継続さ

れるのかという危機意識がある。物理や化学などの基本的な学問のプラットフォームを築いたうえでアプリケーションを考えていくといった分野はアジア人に適している。一方でグーグルのような発想をアジアから生み出すにはまだ時間が掛かるであろう。技術面での優先順位をつけるなどして第4期科学技術基本計画でも継続されるよう頑張りを期待している。

- ・米国のベンチャーでは「資金提供を受けるためにはナノテクという言葉を用いない」という話までであると聞く。新たな局面に突入したといってもよいかもしれない。新たな形での分野の発展が期待される。またコスト面を心配しすぎることなく研究側と企業が密に協同していければと考えている。
- ・日本のナノテクノロジーは強い分野だと認識している。デバイスメーカーの視点からはその時その場で求めているデバイスを選択することができるような体制に近づいていると考えている。今後もこの状況が日本で続いていくことを期待している。
- ・経験や分野の異なる人材が議論していく中で興味深くて意味のある成果が出てくれば、企業はそれを評価する。ポスドクの余剰が社会的問題となっているが優れた考えや案をもったポスドクの人材が企業に入り、それを公表していくということも重要であるとする。組織間連携に関しては大学間の共同研究は盛んという印象があるものの、産学連携に関しては大学生自身がさほど鋭敏ではないという感がある。
- ・独立行政法人化後の大学はかなり変化しつつある。制度的に不可能である点はさほど多くない状況になってきている。大学は変わりつつあるということを認識していただきたい。

7.5 全体まとめ／

横山浩（（独）産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 部門長） 済

日本には優れた技術的蓄積がありナノテクノロジー分野では世界の一角を占めている。ただし科学面においても技術面においても統合力にかける点は否めない。限定されたテーマに取り組むのではなく、大きな問題を全体的に取り組んでいかなければならない部分は多い。人の気持ちの中にある障壁を崩していくことがいちばん大きな課題ではないかという気がしている。ナノテクノロジーにおいて品揃えの豊富さは重要である。資金を与える側はその品物が役に立つかどうかを簡単に判断せずに、可能性がありそうなものには先見性をもって維持していく気持ちが求められる。旗艦的な役割のある大プロジェクトも必要なのではないだろうか。研究組織や適正な最終目標を設定した上で、NEDO や JST などが誘導的な資金援助を主導していくということが必要であろう。アジアにおけるナノテクノロジーの盛り上がりは大きいものがある。科学全体の論文数が増加している中で、とりわけナノテクノロジー分野の論文数は激増している。とりわけ中国、香港、インドなどでは論文数の伸び

が著しい。日本の成長力の足りなさが心配である。ナノテクノロジーの拠点になろうとしているアジア各国の中で、日本の役割をいかに構築していくかを早急に検討しないと困難な状況になるのではないかと（図 7－6）。

まとめ

- 日本発の多くの要素技術 ⇒ にもかかわらず統合への機動力に欠ける
- 現在の応用は数十年にわたる基礎科学・技術の蓄積の上にある
- ヘテロな人材が共通の興味を持つ仕組み
- 明確なミッションがあれば、専門分野が異なるメンバーからなる研究チームに優先的にサポート
- PL、PMには強いリーダーシップと高い見識
- ナノスケール以上の高次構造で、自己組織化をコントロールする技術は未開拓(特に非平衡)

- 豊富な品揃え ⇒ 戦略的な探索的研究開発
- 一点豪華 ⇒ ミッションオリエント・ビッグプロジェクト
- 創新的研究組織 ⇒ 異分野協奏、国際協力のある組織
- 誘導的ファンディング ⇒ 正しいゴール、見識と信念

図 7－6 まとめ

[8] まとめ

本 WS では、「階層的自己組織化のバイオテクノロジー」分野における「出口から見た新機能創製への諸課題」について 2 日間に亘る長時間の議論を行った。さらに用語の問題、スローガンと研究当事者の反応、良い研究を実現するための人、研究における細部へのこだわりといった点について多くの示唆に富む意見を伺った。議論内容は具体的課題／領域・技術・時間軸／研究の仕組みに及んだ。概要を以下にまとめ今後の展開について述べる。

8.1 分科会の議論に基づく技術俯瞰

バイオ・ナノ構造材料開発を進めるにあたり、何にプライオリティーを置きどのような目標を定めるべきか。その目標を達成するために重要な技術課題となると思われる研究領域分野についてはロードマップ形式の俯瞰図としてまとめた（図 6-1～2）。CRDS ではこの設問に対する回答から重要技術課題を克服するために研究開発すべき共通的な技術領域を抽出できることを期待したが、結果はその期待を全く裏切るものであった。提示された重要技術課題はオリジナリティーが高く、それぞれ個別の技術課題や技術領域に言及しそれぞれの研究内容は独自の技術領域を切り開くことを狙いとしているように思える。近い将来に向けて大きな期待を描くことができるであろう。ナノテクノロジーにおいて技術の品揃えの豊富さは重要である。その技術が役に立つかどうかを簡単に判断せずに、可能性がありそうなものには先見性をもって維持していく気持ちが求められる。また旗艦的な役割のある大プロジェクトも必要なのではないだろうか。

分科会での議論において、牽引力のある出口として環境・エネルギー分野への応用が提案された。エネルギーあるいは物質の変換過程においてはナノ構造の制御されたナノ空間における新規反応場の創製が重要な技術課題となると考えられる。そのような視点から克服すべき共通の技術課題と優先度、それらを効率よく達成するための推進方法等について具体的に議論していくことが今後重要となると思われる。提示された重要研究課題の中で新規反応場に関連すると思われる技術領域についてまとめたが、これらの切り口の中から新たな開発の方向性を見出す検討を続ける（図 8-1）。



図 8-1 ナノ構造による新規反応場の研究開発に関連する技術俯瞰

8.2 出口志向から見た自己組織化材料

「自己組織化」という言葉は厳しい評価をされている。「自己組織化を利用した具体的な筋道が見えてこない」というのが批判の理由である。その点に対して答を示していかなければならない。自己組織化は方法論にすぎないという批判も聞かれる。目標達成のためには自己組織化を利用しなくてもよいではないかという意見もある。しかしナノテクノロジー・材料分野において、高速処理や省エネルギーを達成させるためには、自己組織化のもつ機能は不可欠である。化学的に反応をプログラムして通常達成できない高次構造を形成していくことにより、新規の用途や技術を生み出すことにつながるであろう。ナノエレクトロニクスではリソグラフィの微細化の限界を打ち破るためにボトムアップ型の技術が必要となる。これらの点にナノテクノロジーとしての自己組織化の必要性がある。たとえ実用化まで達成しなくても出口をしっかりと見据え、明確な達成目標にむけて漸進的に研究を進めることで社会に貢献するための科学技術の可視化が求められている。未だ出口への方向を決める方法論を手にしていないという問題点があると認識しているが、俯瞰的な視野をもって研究開発と社会のつながりなどを眺めながら、「階層的自己組織化材料」分野で重要な研究開発の方向性を絞り込むための検討を行なった。

の精度が保証されなくなる。DNA 折り紙が話題になったが日本は遅れている。

分科会での議論で、牽引力のある出口として環境・エネルギー分野への応用が提案された。既にその分野で研究が実施されてはいるが基礎的な研究レベルである。エネルギーあるいは物質の変換過程においてはナノ構造の制御されたナノ空間における新規反応場の創製が重要な技術課題となると考えられる。そのような視点から克服すべき共通の技術課題と優先度、それらを効率よく達成するための推進方法等について議論することが今後重要となると思われる。

「階層的自己組織化の応用創出プロジェクト」として例えば、

- ・エネルギーや物質の発生・搬送・貯蔵・放出を高度に制御し得るナノ空間技術・プロセスを階層的自己組織化により実現し、具体的な応用を志向する概念実証プログラム
- ・プロジェクト実施にあたっては、研究開発リーダーと出口ニーズに詳しい企業経験者の実質的な参加が肝要。個々のプロジェクト運営、プログラム、全体の指導体制とコーディネーションを別途議論。

さらには概念実証に成功した技術をどう社会ニーズに結びつけるか、あるいは社会ニーズを充足する新概念・新技術をどう誘導するかなど仕組みづくりが必須である。

●自己組織化の技術開発達成目標

各研究開発がイノベーションへと進展を遂げてゆくためには、殻として表された高い技術の壁を克服する必要がある。自己組織化分野それぞれの技術開発達成目標として考えられる技術課題を列挙した（図 8－3）。

●新材料統合設計・探索としての提言

炭素繊維複合材料の実用化においては 30 年以上の長期に亘る開発の継続があった。新規材料の産業応用には絶対的な時間が必要である。そうした認識の中で性能面と費用面の均衡をとるための高い目標設定と、それらを支える経営トップの強力な意志が絶対的に必要であった。

本 WS で萌芽的研究として自己組織化、自己集合によるボトムアップ型ナノ構造材料（システム）創製技術が立ち上がりつつあることが明らかとなった。しかし実用化までは尚険しい道程が待ち構えている。今までは「自己組織化」という現象にのみ注目していたが「自己組織化」が目標とはならない。これからの険しい道程を支えるためには、階層的自己組織化により実現される性能面とそれにかかる費用面の均衡を保つための高い目標設定が必要となる。自己組織化（自己集合、散逸構造）は「材料設計」の典型のひとつであり、研究開発俯瞰図中の戦略構成分野である「新材料設計・探索」に含まれる（図 8－4）。具体的な研究課題例として、

- ①牽引力のある出口としてのエネルギー・資源問題があり、高次構造化で機能が発

現する系を作り出すという点が重要である。例えば電子ドナーとアクセプターの空間特異的配列を実現するための方法論など、トップダウンでできないところを突破する点が自己組織化の使命となるだろう。自己組織的プログラムの実現が不可欠であり、多くの基礎科学が開拓されなければならない。

②夢のある出口としてはロボット・分子機械に関する課題がある。刺激応答のDDSの開発等がある。患部認識のための部位、薬放出の部位などを包含的にもつ素材の開発は挑戦的であるものの実施可能な課題である。さらにはポリマーベースのアクチュエータ、超高感度の嗅覚・味覚センサ、高屈折材料の加工技術等が挙げられる。

③最小限の場所、エネルギー、人で足りることを指す「ミニマルマニュファクチャリング」も技術開発にむけての重要概念となる。

等、高い目標としたテーマとして推進すべきである。これらの研究課題を効率的に進めるための研究システムとしては以下のようなものが必要である。

- ・研究ステージに対応した柔軟なファンディングシステム。成果の高いものについては投資の継続性が保証されるプログラム運営。それらを公正に評価し政策として正当化し得る評価システムの構築。
- ・異分野融合を促進するための方策、融合のインセンティブを誘発するファンディングシステムの構築、例えば異分野のチームリーダー複数による共同提案を条件とするプロジェクトへの重点投資など。また異分野の研究者、技術者が物理的空間を共有するオフィスや独立したセンターの設立及び研究者同士の接触機会を増やす時間のマネジメント。
- ・各種物性が迅速に測定できる先端機器の集積センターの設置と支援人材の充当。現在運営されているナノテク総合支援プロジェクトの拡大強化が必要。

以上の工夫は国レベルでトップダウン的に実施すべきものが大半ではあるものの、研究開発を実施する国立大学や国立研究所が法人になることによって獲得したマネジメントの自由度の範囲内でボトムアップ的に実施できるものもある。大学法人、独立行政法人側のマネジメントにも期待したい。さらに俯瞰的視野を有する真のリーダー選出のしくみをつくる必要がある。研究投資側、実施者側、各部署、各レベルでのリーダーが必要である。人材面においては、

- ・新しい学理に基づく革新的な新材料探索には、学術的に世界のトップに立ちかつチーム全体に強いインセンティブを与え得るリーダーが選出されるべき。
- ・社会ニーズに対応する材料探索においては、社会が緊急に必要とする技術分野を俯瞰する能力を有しかつ物質科学、材料技術の問題に翻訳できるスペシャリスト・ゼネラリスト的リーダーが不可欠である。

戦略的な研究開発投資に責任を持つ公的機関には上記のようなリーダーを選ぶ目利きが必要である。あるいは高い確率で適任のリーダー人材が選出されるしくみを作ることが新しい時代における重要な責務となる。

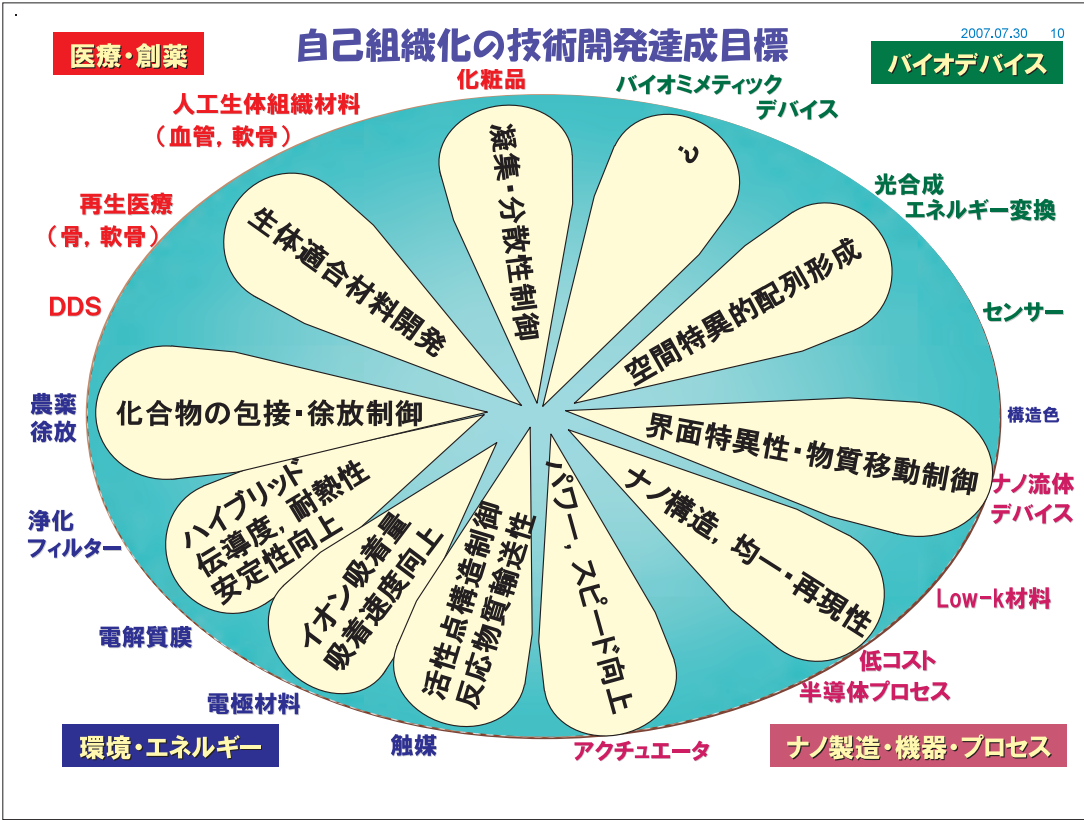


図 8 - 3 自己組織化の技術開発達成目標

2007.07.30 16

ナノテクノロジー・材料研究開発分野俯瞰図								
イノベーション 達成分野	【戦略構成分野／ナノテクノロジー・材料達成目標】							
	①ナノ サイエンス	②ナノ構造 ・材料	③ナノバイオ ・システム	④ナノ材料・ 加工プロセス	⑤ナノデバイ ス・システム	⑥新材料 設計・探索	⑦計測・評価 ・標準	⑧関連共通 基本課題
①エネルギー ・資源	階層的 自己組織化					新材料統合設計探索		社会受容 人材育成 融合加速 共用施設 国際協力 基礎技術から応用を創出 するプロジェクト運営
②安全・環境								
③輸送・社会 基盤システム								
④生活・文化 ・食料	階層的 自己組織化							
⑤医療								
⑥情報・通信								

図 8 - 4 ナノテクノロジー・材料（新材料統合設計・探索及び階層的自己組織化を含む）研究開発分野俯瞰図

Appendix

1. 本ワークショップの開催日時・場所

日時：平成19年6月22日(土) 9時30分～6月23日(日) 12時00分

会場：研究開発戦略センター 2階大会議室

2. 本ワークショップのプログラム、参加者の構成について

表1 本ワークショップのプログラム

1日目

プロローグ	9:30～9:55
開会の挨拶及び趣旨説明	コーディネーター：横山 浩 / 田中 一宜
セッション1. 「高次自己組織化、そのダイナミクスと制御」	10:00～12:00 主査：横山 浩
「時間発展する分子システム：非線形ナノ・ダイナミクス」	吉川 研一
「タンパク質から学ぶ細胞内構造の構築原理」	遠藤斗志也
「機能材料設計、トポロジカルゲルの物理解析と機能設計」	伊藤 耕三
「生体運動システムにみる階層的自己組織化」	石渡 信一
「現状までの技術、将来への課題」	山口 智彦
「階層的自己組織化に向けて」	横山 浩
討論	主査：横山 浩
セッション2. 「新機能創製」	13:00～14:15 主査：相田 卓三
「抗体分子の組織化と機能化」	原田 明
「分子ナノチューブによる新機能創製と応用へむけた階層的技術融合の課題」	浅川 真澄
「バイオデバイス応用へむけた機能性材料への要望と課題」	馬場 嘉信
討論 出口から見た新機能創製	主査：相田 卓三
セッション3. 「新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製」	14:30～16:00 主査：居城 邦治
「自己組織化プロセスを用いた材料・デバイス創製」	竹内 昌治
「トップダウン型・ボトムアップ型の融合」	山下 一郎
「トップダウン系とボトムアップ系の接続・統合による機能材料設計に向けて」	藤川 茂紀
「新規なデバイス機能設計」	渡邊 正義
討論 出口から見た新機能創製	主査：居城 邦治

セッション 4. 「出口から見た重要課題の抽出」第1部		16:15～18:15
「メディカル・ナノデバイスからの要望と課題」	鄭 雄一	
「事前アンケートのまとめ：WSの目的と方向付け 目標にむけた重要課題抽出」	江口 健	
「さきがけ 「構造制御と機能」現状の進捗の俯瞰」	岡本 佳男	
「ミクロ・ナノ構造精密制御による機能性材料創製」	大林元太郎	
「出口から見た重要課題 リソを中心としたトップダウンプロセスから見た、ボトムアップテクノロジーに求める技術課題」	宮内 昭浩	
コメント：階層的自己組織化の出口から見た諸課題	コメンテーター： 曾根 純一、笹倉 英史、 浅川 鋼児、藤田 省三、 亀井 信一	
セッション 4. 「出口から見た重要課題の抽出」第2部 分科会		19:00～21:00

2日目

セッション 5.「まとめ」	9:30～12:00 主査：横山 浩 / 田中 一宜
「階層的自己組織化に基づく、新機能創製と分子設計 および分科会まとめ」	主査：相田 卓三
「階層的自己組織化プロセスの創製へ向けて および分科会まとめ」	主査：居城 邦治
「外野から見て分かる研究を」	宮野健次郎
総合討論	主査：横山 浩
まとめ	コーディネーター：横山 浩
主催者挨拶	田中 一宜

表2 本ワークショップ参加者一覧

(a) 発表者

氏 名	所属・役職（いずれもワークショップ開催当時）
相田 卓三	東京大学大学院工学系研究科 化学生命工学専攻 教授
浅川 鋼児	(株)東芝 研究開発センター 先端機能材料ラボラトリー 主任研究員
浅川 真澄	(独)産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトニクス研究センター 主任研究員
居城 邦治	北海道大学電子科学研究所 分子認識素子研究分野 教授
石渡 信一	早稲田大学大学院 理工学研究科 生命理工学専攻 教授
伊藤 耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科 物資系専攻 教授

遠藤斗志也	名古屋大学大学院 理学研究科 物質理学専攻 教授
大林元太郎	東し(株)理事
岡本 佳男	名古屋大学 エコトピア科学研究所 ナノマテリアル科学研究部門 客員教授
亀井 信一	(株)三菱総合研究所 先端科学研究センター センター長
笹倉 英史	旭硝子(株)中央研究所 主幹研究員
曾根 純一	日本電気(株)中央研究所 支配人
竹内 昌治	東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロミクス国際研究センター 准教授
鄭 雄一	東京大学大学院工学系研究科 バイオエンジニアリング専攻 教授
馬場 嘉信	名古屋大学大学院 工学研究科 化学・生物工学専攻 教授
原田 明	大阪大学大学院理学研究科 高分子科学専攻 教授
藤川 茂紀	(独)理化学研究所 トポケミカルデザイン研究チーム 副チームリーダー
藤田 省三	(株)富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター 主席研究員
宮内 昭浩	(株)日立製作所 日立研究所 材料研究所 電子材料研究部 ユニットリーダー
宮野健次郎	東京大学 先端科学技術研究センター フォトニクス材料分野 教授
山口 智彦	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロジー・材料技術開発部 プログラムマネージャー
山下 一郎	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 メゾスコピック物質科学講座 客員教授
吉川 研一	京都大学大学院理学研究科 物理学第一教室 教授
横山 浩	(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 部門長
渡邊 正義	横浜国立大学 大学院工学研究院 機能の創生部門 教授
水谷 亘	(独)産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 グループ長
松尾 保孝	北海道大学 電子科学研究所 分子認識素子研究部門 助教

(b) その他の参加者

	氏 名	所属・役職（いずれもワークショップ開催当時）
内 閣 府	成瀬雄二郎	内閣府 総合科学技術会議事務局 参事官
文 部 科 学 省	松下 伸広	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 学術調査官
	河本 洋	文部科学省 科学技術政策研究所 特別研究員
経 済 産 業 省	岩野 宏	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課／ファインセラミックス室／ナノテクノロジー・材料戦略室 課長／室長
	渡辺 隆史	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課／ファインセラミックス室／ナノテクノロジー・材料戦略室 課長補佐
	稲垣 勝也	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課／ファインセラミックス室／ナノテクノロジー・材料戦略室 ファインセラミックス専門職／係長

経済産業省	大江 朋久	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課／ナノテクノロジー・材料戦略室 技術係
	山田 豊	経済産業省 製造産業局 ナノテクノロジー・材料戦略室 経済産業技官
新エネルギー・産業技術総合開発機構	仁木 章博	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 主査
	福井 徹	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 主査
	小串 泰之	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 主査
物質・材料研究機構	杉本 喜正	(独)物質・材料研究機構 企画調査室 運営主席
	平原奎治朗	(独)物質・材料研究機構 企画調査室 特別専門職
	門平 卓也	(独)物質・材料研究機構 企画調査室 主任エンジニア
	井下 猛	(独)物質・材料研究機構 国際室 シニアコーディネーター
ナノテクノロジービジネス推進協議会	亘理 誠夫	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長
	大屋 朝夫	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長
科学技術振興機構	北澤 宏一	(独)科学技術振興機構 理事
	落合 幸徳	(独)科学技術振興機構 科学技術振興調整費業務室 プログラム主管
	安藤 利夫	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 調査役
	生嶋 達志	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 主査
	荒岡 礼	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 主査
	高木 和夫	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 主任調査員
	今村 恭子	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 主査
	古川 雅士	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 主査
	森田 裕	(独)科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 係員
	三吉 威彦	(独)科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 技術参事
	白木澤佳子	(独)科学技術振興機構 研究推進部 研究第二課 課長
	横田 修	(独)科学技術振興機構 研究推進部 研究第二課 係長
	金子 博之	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営部 調査役
	吉岡 寛二	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営部 主任調査員
	田中 一宜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー
	鯉沼 秀臣	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	山川 彰夫	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	波多腰玄一	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	江口 健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー

科学技術振興機構	青柳 克信	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		立命館大学 COE 推進機構 特別招聘教授
	木村 茂行	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		(社)未踏科学技術協会 理事長
	小柳 正男	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		(独)産業技術総合研究所 評価部 主席評価役
	田中 秀治	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		東北大学大学院工学研究科 准教授
	福崎英一郎	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		大阪大学大学院工学研究科 教授
	村井 眞二	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
		JST イノベーションプラザプラザ大阪 館長
	雄山 泰直	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	中山 智弘	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	豊蔵 信夫	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	永井 康介	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
		東北大学金属材料研究所 准教授
	伊東 義曜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 主任調査員
	永野 智己	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー
	星野 亜紀	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 事務補助

はじめに

WS「階層的自己組織化のバイオナノテク」

セッション1 高次自己組織化、そのダイナミクスと制御

セッション2 新機能創製

セッション3 新材料・新デバイス作製のためのプロセス創製

セッション4 出口から見た重要課題の抽出

セッション5 まとめ

まとめ

Appendix

科学技術未来戦略ワークショップ

**「階層的自己組織化のバイオナノテク」
—出口から見た新機能創製への諸課題—
報告書**

CRDS-FY2007-WR-08

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

平成19年11月

〒102-0884 東京都千代田区二番町3番地

電話 03 (5214) 7481

ファクス 03 (5214) 7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成19年11月

©2007 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
