

科学技術未来戦略ワークショップ ～ボトムアップ型ナノテクノロジー～ 報告書

平成16年11月13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

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センターは、研究開発戦略の策定のために、科学技術の研究分野を俯瞰的に展望し、今後重要となる研究分野、領域、課題、及びその推進方法等を系統的に抽出している。

その調査・分析・設計活動の一環として、平成16年11月、「物質科学」担当の村井眞二上席フェロー・グループは、魚崎浩平教授（北大院理学研究科）を代表コーディネーターとする「科学技術未来戦略ワークショップ（～ボトムアップ型ナノテクノロジー～）」を企画・開催した。ワークショップには、広範な関係者が集まり、社会ニーズを充足し、社会ビジョンを実現させるための科学技術、そのための研究開発戦略等についての議論を行った。本ワークショップでは、ボトムアップ型ナノテクノロジーに関し、その現状を概観するとともに、トップダウン型ナノテクノロジーとの比較・評価を行い、重要研究開発課題として推進するものがあるかを建設的に議論した。そして、将来の研究目標や明確な道筋を設定するための戦略を立案することを試みた。

本ワークショップは、短期的にはJSTの戦略目標や種々のファンディングへの反映を目的とし、学問的にも新しく基礎的でありながら、将来には産業を興すようなインパクトのある研究テーマの発掘を目指した。また、中長期的には、JSTにおける総合的な検討を通じて、関係機関における科学技術政策への反映を目指すとともに、「第3期科学技術基本計画」に組み込むべき課題の抽出や合意の形成に資することを目的とした。

我が国の貿易黒字約50兆円／年を稼ぎ出し、エネルギー・資源・食糧の輸入を可能にしているのは、信頼性の高い工業製品の輸出である。したがって、そのような工業製品を生み出す製造技術で、我が国は今後も国際競争力を維持していかななくてはならない。その製造技術を革新する使命をナノテクノロジーは負っている。

ナノテクノロジーを利用したナノ製造技術は、トップダウン型とボトムアップ型とにおおまかに分類できる。ナノリソグラフィーやナノエッチングに代表されるトップダウン型ナノ製造技術は、最も大きな付加価値を生み出しているナノ製造技術であり、今後もその重要性は変わらないと思われる。しかし、加工精度を100nmよりもさらに小さくするには限界が生じており、トップダウン法に代わるボトムアップ法のナノ製造技術が今後のキーテクノロジーになっていくと考えられる。

上述のような背景を共通認識とし、科学技術未来戦略ワークショップ（～ボトムアップ型ナノテクノロジー～）では、次の3分科会を設定した。

- ・有機系：居城邦治（北大電子研）

有機系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観

- ・金属・半導体系：村越敬（北大理）、小口信行（物材機構）

金属・半導体系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観

・加工法：下村政嗣（北大電子研）

ビルドアップ（と自己組織化）に基づく新たなナノ加工技術の可能性

ワークショップでの議論の結果、以下のような結論が集約・形成された。

- ①産業技術としては、トップダウン法とボトムアップ法との組み合わせが実用的である。トップダウン法によってプログラム（指令）を持つユニット・鋳型を作製し、続いてボトムアップ法によってそのプログラムに基づく自己集積によりデバイスを製造する。
- ②将来は、プログラム化された自己集積を利用した一貫したボトムアップ法によるデバイスの製造が重要になる。特に、ユニット・鋳型の構築段階で上位の階層へ集積度を上げるために必要なプログラムを組み込むことが重要である。

本ワークショップで提案された研究領域・課題は、いずれも社会の持続的な発展を可能にするとともに、我が国が真の科学技術立国たることを実現するために、長期的な国家戦略の下に取り組むべき重要な基礎的研究領域・課題である。研究開発戦略センターでは、本ワークショップで形成されたオピニオンを戦略プロポーザル策定の際の重要な参考データとする。

目 次

第Ⅰ章 本ワークショップについて	1
1. ワークショップ開催の趣旨	1
2. ボトムアップ型ナノテクノロジーの基本的な考え方	1
3. ワークショップ概要	2
4. ワークショップ開催までの経過	4
第Ⅱ章 各セッションの検討結果	5
セッション1「ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観」	
1. 有機系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観	
	/居城邦治（北大電子研）…5
2. 金属・半導体系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観	
	/村越敬（北大理）…7
3. 「量子ドット」研究の動向 論文データによる研究動向調査	
	/小口信行（物材機構）…9
4. ボトムアップ（と自己組織化）に基づく新たなナノ加工技術の可能性	
	/下村政嗣（北大電子研）…11
セッション2「ボトムアップ型とトップダウン型との比較・評価」	
1. ボトムアップナノテクノロジー ～自己組織化への期待～	
	/横山直樹（富士通研究所）…12
2. ナノプリント技術	
	/宮内昭浩（日立製作所）…14
3. トップダウンとボトムアップのナノリソグラフィー	
	/浅川鋼児（東芝）…16
4. トップダウン技術とボトムアップ技術	
	/大泊巖（早大理工）…17
5. ボトムアップ型ナノテクノロジー	
	/青野正和（物材機構）…17
6. 自己組織化とナノテクノロジー	
	/山口智彦（産総研）…19
セッション3「真に有望で筋の良いボトムアップ型ナノテクノロジーとは」	
1. プログラムに基づくボトムアップ自己組織化	
	/川合知二（阪大産研）…22
2. ナノ及びメゾスケールアーキテクニクス	
	/清水敏美（産総研）…23
3. 自己組織化のシミュレーションにおける課題	
	/寺倉清之（北大創成）…24
4. 自己組織化の「種」	
	/西浦廉政（北大電子研）…25
5. 自己組織化の過去、現在、未来	
	/国武豊喜（北九州市大）…26
6. ボトムアップナノテクの新方向：分子情報生命科学	
	/茅幸二（理研）…27
第Ⅲ章 総合討論および総括	29
1. 総合討論	29
2. 総括	30

第Ⅰ章 本ワークショップについて

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センターは、国内外の研究開発動向の把握、重要研究開発課題の抽出、情報の発信などを進めている。その調査・分析・設計活動の一環として、「物質科学」担当の村井眞二上席フェロー・グループは、魚崎浩平氏（北海道大学大学院理学研究科・教授）を代表コーディネーターとする「科学技術未来戦略ワークショップ～ボトムアップ型ナノテクノロジー～」を企画・開催し、研究者や政策担当者を集めて、重要研究領域・課題、研究推進方法、研究成果の社会へのインパクト、研究開発戦略などを議論した。以下にその概要を報告する。

1. ワークショップ開催の趣旨

本ワークショップでは、ボトムアップ型ナノテクノロジーについてその現状を概観し、トップダウン型ナノテクノロジーとの比較・評価を行った（ボトムアップ型・トップダウン型の定義は後述）。また、ボトムアップ型ナノテクノロジーに関する重要研究領域・課題、およびその研究推進方法について検討し、設定すべき研究目標やそこまでの道筋について建設的に議論した。

本ワークショップの第一の目標は、学問的に新規性があり、かつ将来、新産業につながるようなインパクトの大きい研究テーマを発掘することである。この結果は、JSTはもとより関係諸機関における科学技術政策、「第3期科学技術基本計画」などに反映されることになる。また、本ワークショップを通じて、研究者コミュニティ内で目標に対する共通認識が醸成されることも期待している。

2. ボトムアップ型ナノテクノロジーの基本的な考え方

ナノ製造技術は、トップダウン型とボトムアップ型とに分類できる。ナノリソグラフィやナノエッチングに代表される、従来の製造技術をナノオーダーのスケールまで極限化・高精度化するトップダウン型ナノ製造技術は、現在、最も大きな付加価値を生み出しているナノ製造技術であり、今後もその重要性は変わらないと思われる。しかし、これらのナノ製造技術は、ナノテクノロジーが第2期科学技術基本計画（2001～2005）において重点化される以前から、半導体集積回路製造技術として大規模に研究・開発されてきたものであり、ナノテクノロジー重点化の成果として声高に主張するには、やや説得力に欠ける面もある。

我が国の貿易黒字約50兆円／年を稼ぎ出し、エネルギー、資源、食糧等の輸入を可能にしているのは、高信頼性を誇る工業製品である。我が国は、高信頼性を具備した工業製品を製造技術を基に今後も国際競争力を維持していかななくてはならない。そして、その製造技術を革新する使命をナノテクノロジーが負っている。この使命に応えるナノテクノロジーとして、従来からあるトップダウン加工技術の延長ナノ製造技術の登場が期待される。その候補の1つがボトムアップ型ナノ製造技術であると考えられる。ここでの「ボト

ムアップ」とは、ナノメータオーダーのスケールまで微細加工を極める「トップダウン」に対し、原子・分子を組み上げて新材料や新デバイスを創製する手法を意味する。

上述のような背景を共通認識とし、今回、科学技術未来ワークショップ「ボトムアップ型ナノテクノロジー」ワークショップを開催した。

3. ワークショップ概要

○開催日時・場所

日時：平成16年11月13日（土）

場所：第一ホテル東京シーフォート ハーバーサーカス
（東京都品川区東品川2-3-15）

○プログラム

プロローグ <主催者挨拶/コーディネーター挨拶/参加者自己紹介>	10：00～10：15
セッション1 「ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観」	10：15～12：15
有機系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観	居城 邦治
金属・半導体系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観	村越 敬
「量子ドット」研究の動向 論文データによる研究動向調査	小口 信行
ボトムアップ（と自己組織化）に基づく新たなナノ加工技術の可能性	下村 政嗣
セッション2 「ボトムアップ型とトップダウン型との比較・評価」	13：15～15：45
ボトムアップナノテクノロジー ～自己組織化への期待～	横山 直樹
ナノプリント技術	宮内 昭浩
トップダウンとボトムアップのナノリソグラフィー	浅川 鋼児
トップダウン技術とボトムアップ技術	大泊 巖
ボトムアップ型ナノテクノロジー	青野 正和
自己組織化とナノテクノロジー	山口 智彦
セッション3 「真に有望で筋の良いボトムアップ型ナノテクノロジーとは」 第一部：総合討論	16：00～18：00
プログラムに基づくボトムアップ自己組織化	川合 知二
ナノ及びメゾスケールアーキテクニクス	清水 敏美
自己組織化のシミュレーションにおける課題	寺倉 清之
自己組織化の「種」	西浦 廉政
自己組織化の過去、現在、未来	国武 豊喜
ボトムアップナノテクの新方向：分子情報生命科学	茅 幸二
討論	
セッション3 「真に有望で筋の良いボトムアップ型ナノテクノロジーとは」 第二部：取りまとめ	18：45～19：50
エピローグ <総評（コーディネーター）/閉会挨拶（JST）>	19：50～20：00

○参加者

代表コーディネーター		
魚崎浩平	北海道大学大学院理学研究科化学専攻	教授
コーディネーター		
下村政嗣	北海道大学電子科学研究所 ナノテクノロジー研究センター	センター長・教授
村越 敬	北海道大学大学院理学研究科化学専攻	教授
居城邦治	北海道大学電子科学研究所	教授
発表者		
青野正和	(独)物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所 大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻	所長 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
大泊 巖	早稲田大学理工学部電気・情報生命工学科	教授
茅 幸二	(独)理化学研究所 和光研究所/中央研究所	所長
川合知二	大阪大学産業科学研究所	所長・教授
国武豊喜	北九州市立大学国際環境工学部 (独)理化学研究所フロンティア研究システム	副学長・教授 グループディレクター
小口信行	物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所	副所長
清水敏美	(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	センター長
寺倉清之	北海道大学創成科学研究機構 (独)産業技術総合研究所 計算科学研究部門	教授 研究コーディネーター
西浦廉政	北海道大学電子科学研究所	所長・教授
宮内昭浩	(株)日立製作所 日立研究所電子材料研究部	主任研究員
山口智彦	(独)産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 筑波大学大学院数理物質科学研究科	主任研究員 教授
横山直樹	(株)富士通研究所 フォトエレクトロニクス研究所 /ナノテクノロジー研究センター	所長 /センター長
JST側の参加者		
北澤宏一	JST	理事
村井眞二	JST-CRDS	上席フェロー
井下 猛	JST-CRDS	シニアフェロー
川田健司	JST-CRDS	シニアフェロー
佐々 正	JST-CRDS	シニアフェロー
三浦 登	JST-CRDS	シニアフェロー
田中秀治	JST-CRDS	フェロー
小泉輝武	JST-CRDS	アソシエイトフェロー
中山智弘	JST-CRDS	アソシエイトフェロー
伊東義曜	JST-CRDS	主任調査員
三吉威彦	JST戦略的創造研究推進事業 「自己組織化等の分子配列制御」研究事務所	事務参事

※なお、所属はワークショップ開催当時のもの

4. ワークショップ開催までの経過

○平成16年9月28日（火）に魚崎浩平教授（北大理；MEXT科学技術・学術審議会ナノテク・材料委員会委員）と村井Gメンバーとの間でワークショップの構想について意見交換を行った。

○ワークショップのコーディネーターを魚崎教授に、コアメンバーとして、下村政嗣教授（北大電子研；CREST研究代表者；本年1月のNSF-MEXT合同のナノテクシンポジウムのコーディネータ）、村越敬教授（北大理；PRESTO研究代表者（金属ナノ構造））、および居城邦治教授（北大電子研；元PRESTO研究代表者（人工光合成系））の3名を選出した。

他の構成メンバーについては、上述のNSF-MEXT合同シンポジウムの参加メンバーも参考にしながら、候補のリストアップを魚崎教授に依頼した。その際、有機（生物）系と無機（物理）系とで参加者の人数配分に留意した。

第II章 各セッションの検討結果

セッション1「ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観」

以下の3分野に分類し、プレゼンテーションが行われた。

- ・有機系：居城邦治（北大電子研）

有機系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観

- ・金属・半導体系：村越敬（北大理）、小口信行（物材機構）

金属・半導体系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観

- ・加工法：下村政嗣（北大電子研）

ビルドアップ（と自己組織化）に基づく新たなナノ加工技術の可能性

1. 有機系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観/居城邦治（北大電子研）

ナノデバイスの作製方法に関しては、下記の5種類のアプローチがある。

- ①トップダウン型：フォトリソグラフィ

利点：大量生産技術として確立していること、汎用性の高さ

欠点：加工寸法の限界（～50nm）、膨大な設備コスト

- ②トップダウン型：電子線リソグラフィ

利点：微細性（～10nm）、汎用性の高さ、マスクレス

欠点：低スループット、高コスト

- ③トップダウン型：ナノインプリント（微細転写加工）

利点：低コスト

欠点：加工精度・再現性の確保の困難さ（1：1転写であることによる）

- ④ボトムアップ型：マニピュレーション

利点：原子レベルで加工が可能であること、走査プローブ技術として確立していること

欠点：大量生産に不適であること

- ⑤ボトムアップ型：自己集積

利点：大量生産性・自己修復性・低コスト化・省エネルギー化の可能性があると

欠点：理論的・技術的に未確立であり、製造技術としての再現性や制御性に欠くこと

5種類のアプローチの中で、次世代産業革命と呼ぶべき非連続な進歩を生み出す可能性があるものが、⑤「ボトムアップ型：自己集積」技術である。

ボトムアップ法は下図1-1-1に示すように、要素、ユニット、鋳型、デバイスと4つの階層性を有している。現在、デバイスの作製方法としては、Whitesidesら（ハーバード大学）の方法、具体的には、自己集積の「プログラム」となるユニットと鋳型をトップダウン法によって作製した後、自己集積によるボトムアップ法でデバイスを作製する方法

が実用的と考えられている（図1-1-2）。しかし、近未来は、「プログラム」となるユニットもボトムアップ法で作製することが目標になると考えられる。ユニットおよび鑄型へのプログラムの組込み法の例を図1-1-3に示す。今後、プログラム化された加工システムの構築を確立するためには、生物に学ぶ新アルゴリズムの創成が鍵を握ると思われる。

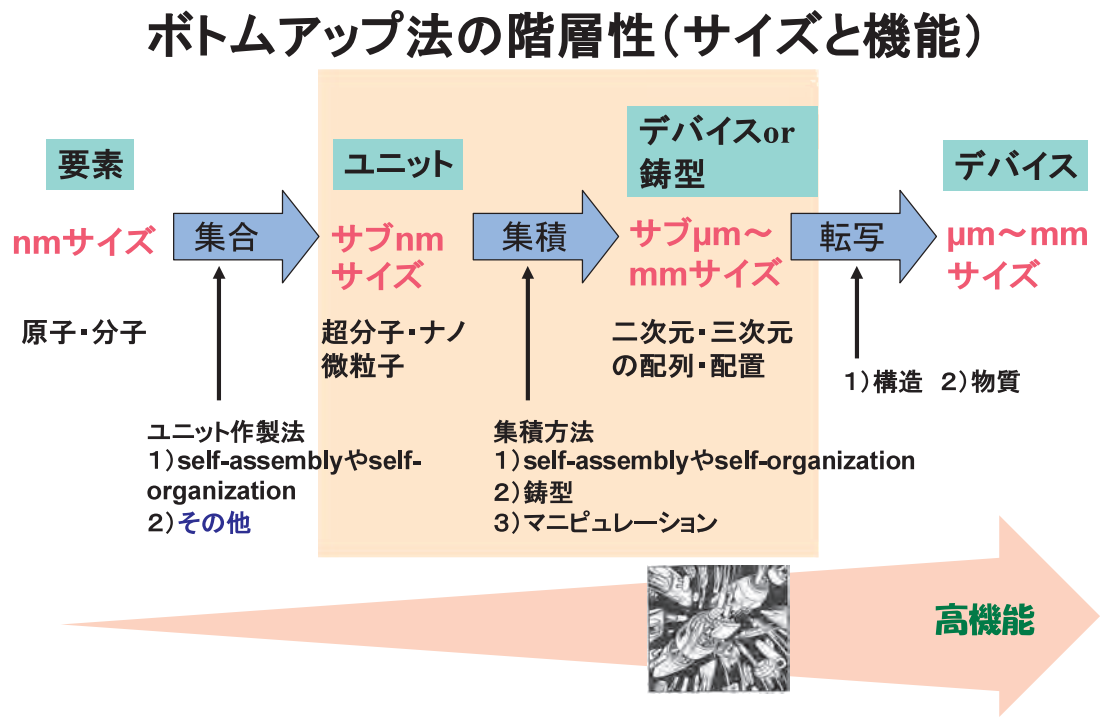


図1-1-1 ボトムアップ法の階層性

デバイス作製比較表

B：ボトムアップ法 T：トップダウン法

ユニット作り	鑄型	集積法	例	強い国	コメント
B	B	B	DNAのナノメッキ	日・欧	理想的しかし困難
B	T	B	コロイド集積	米・中	高いポテンシャル
T	B	B	なし	—	
T	T	B	Whitesides	米	現実的
B	—	T	コロイド結晶にレーザー描画	?	
T	—	—	半導体製造	日・韓・米	

日本はT、Bユニット作り、B集積法は得意。
しかし、TとBとのハイブリが不得意。

図1-1-2 デバイスの作製方法

プログラムの組込

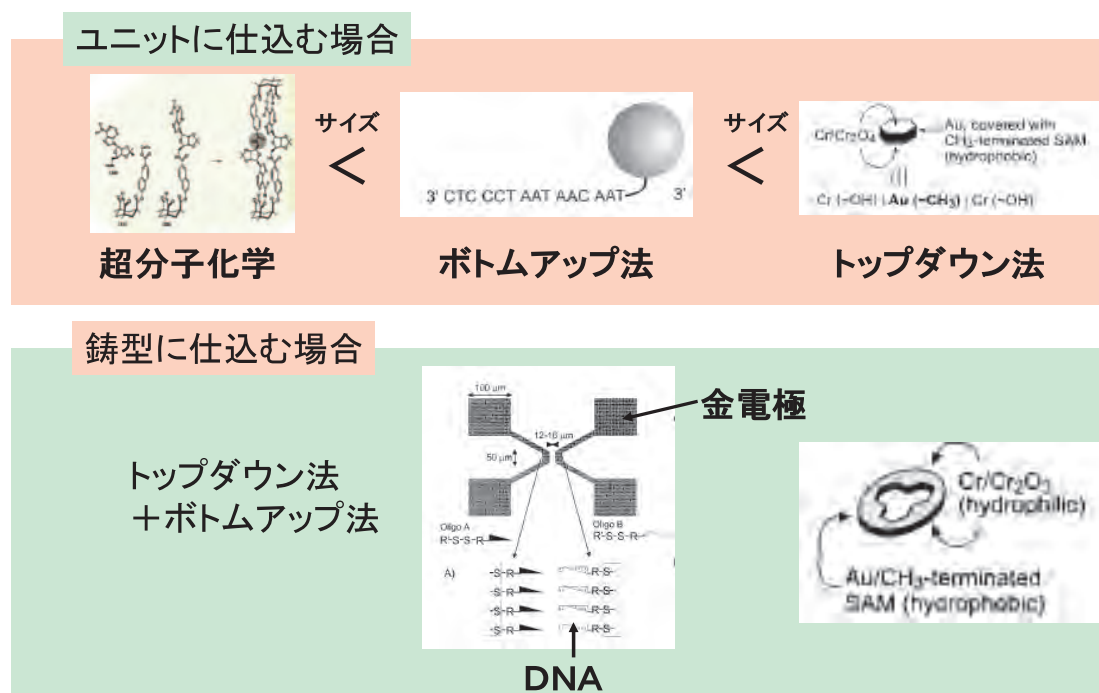


図1-1-3 プログラムの組込み法

2. 金属・半導体系ボトムアップ型ナノテクノロジーの現状の概観 ～金属・半導体系の自己組織化構造形成～/村越敬（北大理）

2-1. 静的な自己組織化と動的な自己組織化

自己組織化は、静的な自己組織化(自己集合、self-assembly)と動的な自己組織化(self-organization)に分類できる(図1-2-1)。

静的な自己組織化は、単分子膜、LB膜、原子・分子・粒子最密充填構造、超分子、単分子層などを形成する方法であり、構造が熱力学的平衡、すなわち最も安定な状態に落ち込むことで得られるものである。これに対して、動的自己組織化は、熱力学的非平衡下で得られる動的なパターン(散逸構造)、振動現象、カオス、フラクタル、時空間パターンなどを形成するものである。散逸構造の特徴は、非平衡条件下でエネルギーの散逸を伴いながら現れることであり、エネルギーの供給を止めると消失する。また、一定の外的条件下で、攪乱に対する自己修復能を持つ。たとえば、非常に高度な自己組織化構造である生命の形成では、

- ①外的条件が変化したときの自己保持能、
- ②有利な外的条件に向かう自己運動、
- ③自己複製、自己改造(自己創造)、進化

の特性を有している。

動的自己組織化は、上記のような特性を有しているため、新規材料創製への利用が期待されている。動的自己組織化過程利用の利点としては、以下の点があげられる。

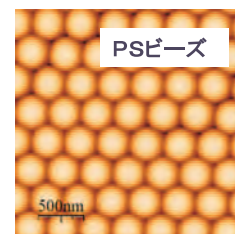
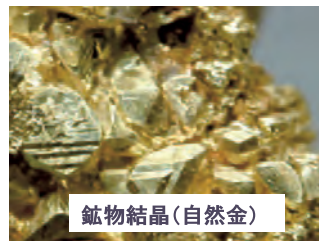
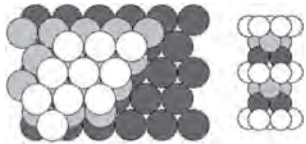
- ・系のサイズによらずLong-rangeの構造もできる。
 - ・自己集合法では単純な周期構造しか得られないが、動的自己組織化ではパターン形成に参与するパラメータが非常に多く、その分、多種多様な複雑なパターンも得ることができる。
 - ・大面積にわたる規則構造の構築が可能であり、安価な大量生産法となりうる。
 - ・自己修復、自己複製など生物類似の機能付加が期待される。
- ただし、次のような問題の克服が今後の課題となる。
- ・多くのパラメータの関与する複雑な現象であるため、機構解明が難しい。
 - ・時空間構造の固定化が難しい。

自己組織化の分類

静的自己組織化(自己集合 self-assembly)

単分子膜、Langmuir膜、原子・分子・粒子最密充填構造、超分子形成、単分子層形成など
構造が**熱力学的平衡下**で得られる

立方最密充填構造



動的自己組織化 (self-organization)

熱力学的非平衡下で得られる動的なパターン(散逸構造)
振動現象、カオス、フラクタル、時空間パターン形成など
散逸構造は非平衡条件下でエネルギーの散逸を伴いながら現れる。
エネルギーの供給を止めると消失
一定の外的条件下で、攪乱に対する**自己修復能**を持つ



非常に高度な自己組織化構造形成(生命)
外的条件が変化したときの自己保持能、
有利な外的条件に向かう自己運動、
自己複製、自己改造(自己創造)、進化

図1-2-1 自己組織化の分類

2-2. 自己組織化構造形成の目指すところ

近未来の目標は、第一に任意の不規則性を周期構造に導入することである。表面張力の異方性のパラメータを変化させるだけで、針状の結晶(異方性:大)から、ランダムな結晶(異方性:なし)まで様々な構造を再現できるとの計算例がある。

近未来の目標の2つ目は、原子・分子レベルにおける自己集合状態の利用である。最近、表面での不斉分子の自発的相分離、表面反応過程でみられる時空表面パターンなどが報告されており、今後の進展が期待される。

最終目標は、自己修復、自己複製機能を有する自己組織化の開発であるが、現在までのところ、そのような研究成功例は全くなく、大きなブレークスルーが求められる(図1-2-2)。

自己組織化構造形成

自己組織化構造形成は、機能単位を組み合わせ
高次構造を形成するためには必須の概念である。しかし…

現状

サイズ領域 μm – nm での長距離周期構造の自己形成の枠内にとどまっている
自己組織化の研究は、生物類似の機能を期待して研究されている
数理の方面やBZ反応などではかなり研究が進んでいる
材料形態制御では研究例が少なく、理解も十分ではない
原子・分子から nm レベルでの構造形成に自己集合を用いることは有用

近未来目標

あらかじめプログラムされた任意の不規則性を周期構造に導入する

最終目標

自己修復、自己複製

図1-2-2 自己組織化の現状と目標

3. 「量子ドット」研究の動向 論文データベースによる技術動向調査

/小口信行（物材機構）

ボトムアップ法としての「量子ドット」研究の動向を、論文データベースを用いて調査した。論文データベースとしては、SCI-EXPANDED (ISI) 1970-2004 Nov.6（論文総合計24,260,572件）を使用し、「量子ドット」研究は、何を目指し、どのようなアプローチが行われてきたのか、どこに向かおうとしているのか、さらに、最近のトピックスは何かについて調査した。

図1-3-1に、「量子ドット」の研究論文の中でトップダウン法、およびボトムアップ法の視点で研究しているとみられる論文を、各々「トップダウン」、「ボトムアップ」と色分けして示した。量子ドットの研究論文数は、2003年をピークに近年急激に増加してきた。その中で明らかにトップダウン法の視点で研究されている論文は、ボトムアップ法のものに比べ圧倒的に多い。

図1-3-2は、ボトムアップ法に関する論文全てについて、量子ドットの応用分野を国別に示したものである。レーザー発光素子の論文が極めて多く、ドイツ、アメリカ、日本、およびロシアが主たる論文発信国である。量子ドットの材料としてはⅢ-V族化合物半導体が多い（図1-3-3）。

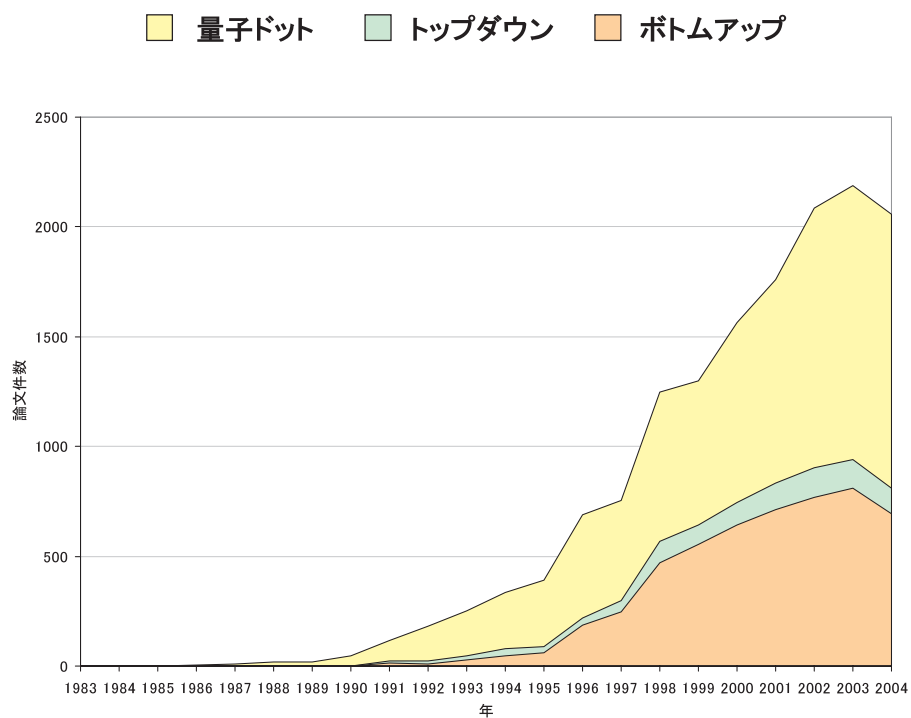


図1-3-1 量子ドットの論文件数

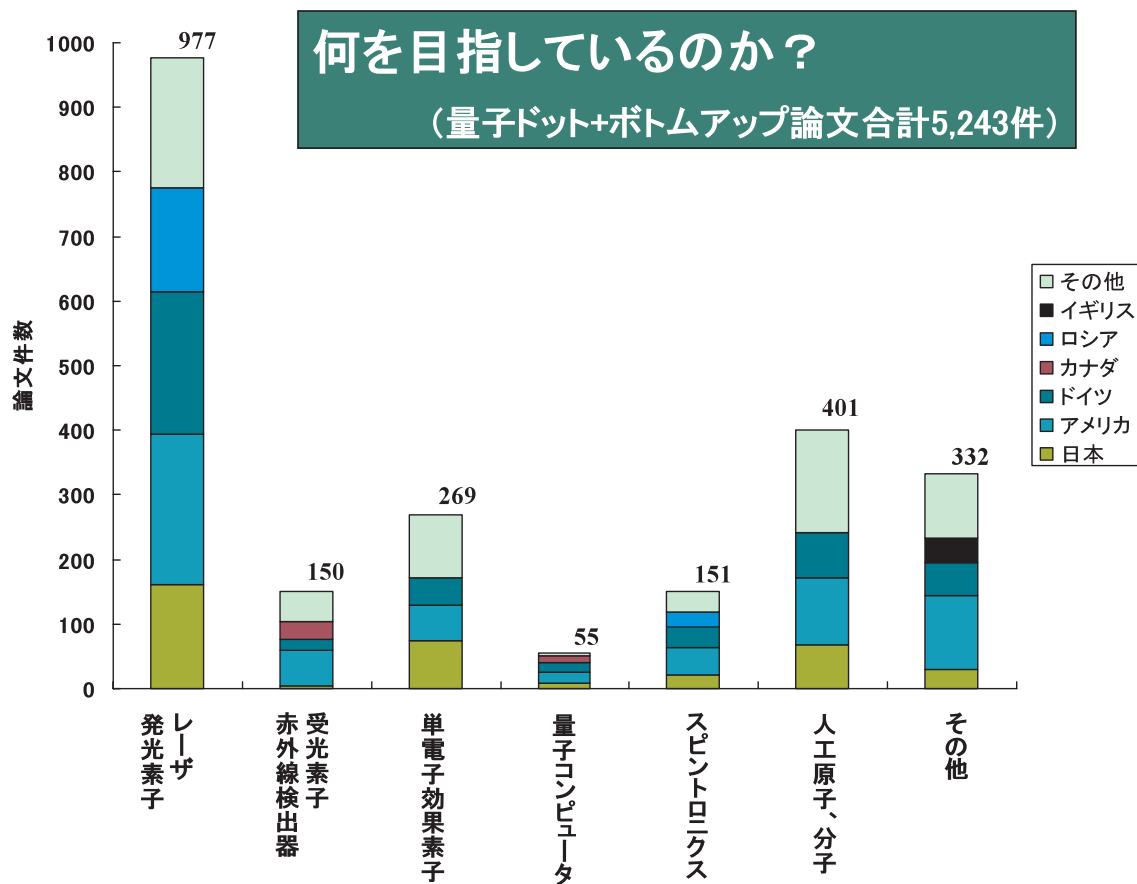


図1-3-2 量子ドットの応用

対象材料(量子ドット+ボトムアップ論文合計5,243件)

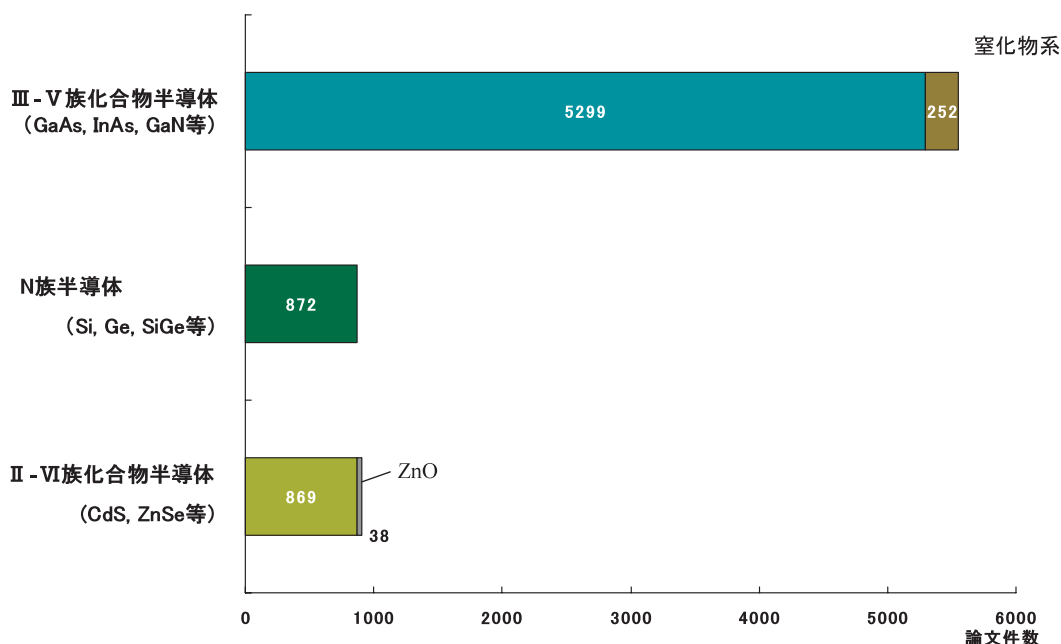


図1-3-3 量子ドットの対象材料

4. ボトムアップ（と自己組織化）に基づく新たなナノ加工技術の可能性

/下村政嗣（北大電子研）

ナノ加工技術の現状を俯瞰すると、下図1-4-1のようになる。生産プロセス技術には、今後、エネルギー消費及び環境負荷を最小限に抑えることが要求されており、ボトムアップ（ビルドアップ）法を活用したナノ加工技術の発展が益々重要となってきた。ナノ加工技術に今後期待されることを以下にまとめる。

- ①革新性
- ②生産性（ハイスループット、制御性）
- ③経済性（設備投資、省エネルギー、大量生産）
- ④社会性（環境、倫理）
- ⑤国際競争力（生産技術のブラックボックス化）

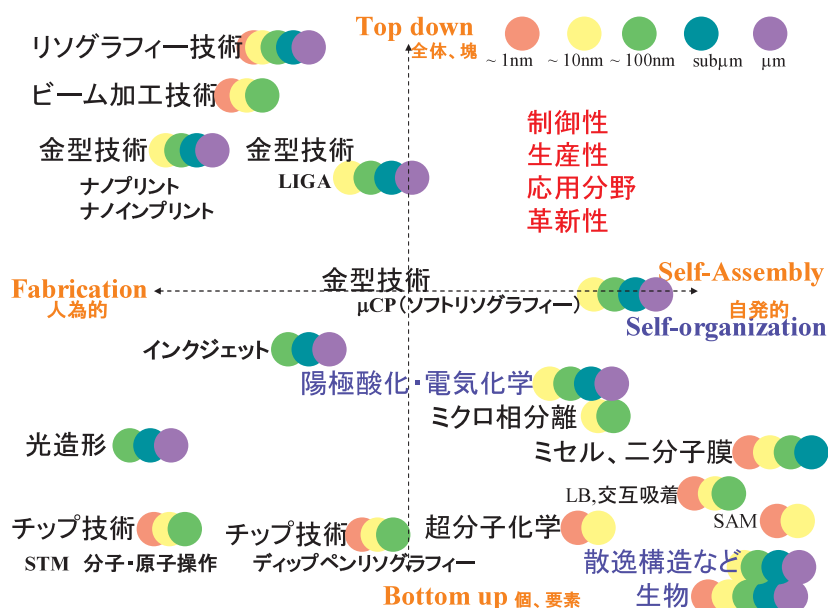


図1-4-1 ナノ加工技術の現状

セッション2「ボトムアップ型とトップダウン型との比較・評価」

以下の6名から話題が提供された。それらの概要を記す。

- ・ 横山直樹（富士通研究所）「ボトムアップナノテクノロジー ―自己組織化への期待―」
- ・ 宮内昭浩（日立製作所）「ナノプリント技術」
- ・ 浅川鋼児（東芝）「トップダウンとボトムアップのナノリソグラフィー」
- ・ 大泊巖（早大理工）「トップダウン技術とボトムアップ技術」
- ・ 青野正和（物材機構）「ボトムアップ型ナノテクノロジー」
- ・ 山口智彦（産総研）「自己組織化とナノテクノロジー」

1. ボトムアップナノテクノロジー ～自己組織化への期待～/横山直樹（富士通研究所）

ナノテクノロジー研究における重要な1つの分野:①ナノデバイス、②ナノマテリアル、③ナノバイオのいずれにおいても、今後の発展の鍵となる自己組織化技術への期待が寄せられている。各分野の話題を以下に記す。

①ナノデバイス

将来のITを担いうるナノデバイスを開発するためには、最先端の研究レベルを維持する必要がある。特に、量子情報通信技術を開発するために、量子ドット単一光子光源の研究が重要となる。量子ドット単一光子発生器による単一光子の発生も確認されており、量子ドットレーザー製品化への期待が高まっている（図2-1-1）。

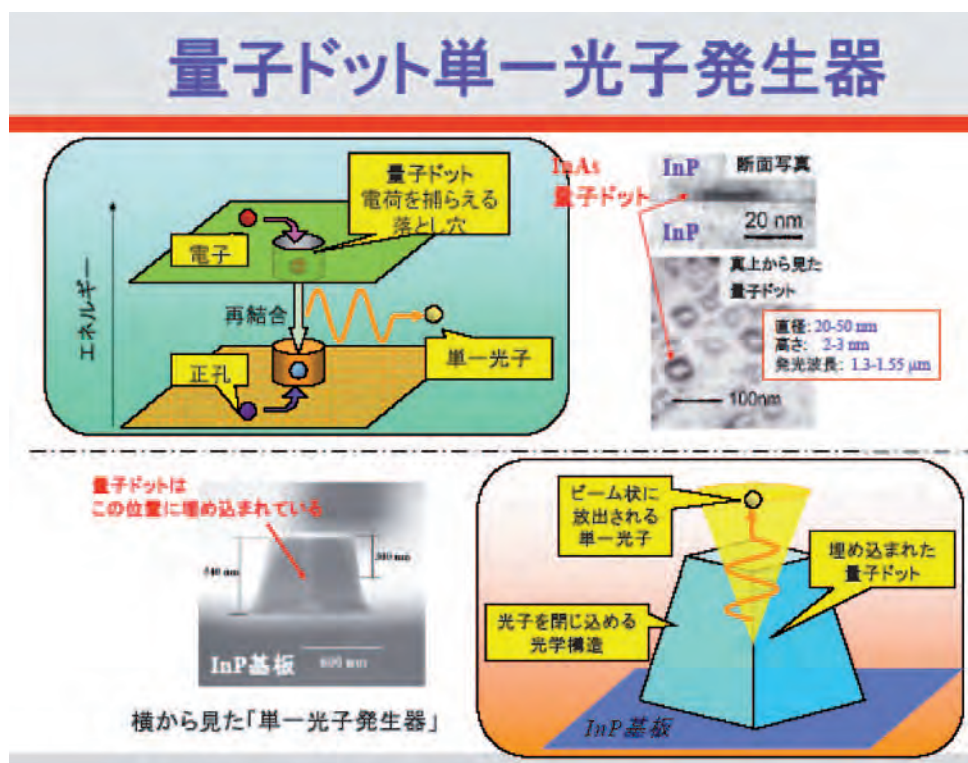


図2-1-1 量子ドット単一光子発生器

②ナノマテリアル

エレクトロニクスにブレークスルーをもたらす新しい電子材料を創生するために、ナノマテリアル、特にカーボンナノチューブの研究が進展しつつある。カーボンナノチューブ(CNT)は、下記のような特長を有している。

- 1) 高電流密度(Cuの1000倍)
- 2) 高機械強度
- 3) 高熱伝導度 (Cuの10倍)
- 4) 高速電子輸送 (Siの10倍)

カーボンナノチューブは、その構造によって金属または半導体の性質を示し、ポストCuやポストSiとして期待が寄せられている。現実的な目標としては、カーボンナノチューブのビア配線応用があり、Cu配線とCNTビアの混載構造の作製が報告されている。また、デバイス応用を視野に入れ、サイズ制御して作製した高純度触媒ナノ微粒子を用いて、CNTの直径制御が可能になっている(図2-1-2)。

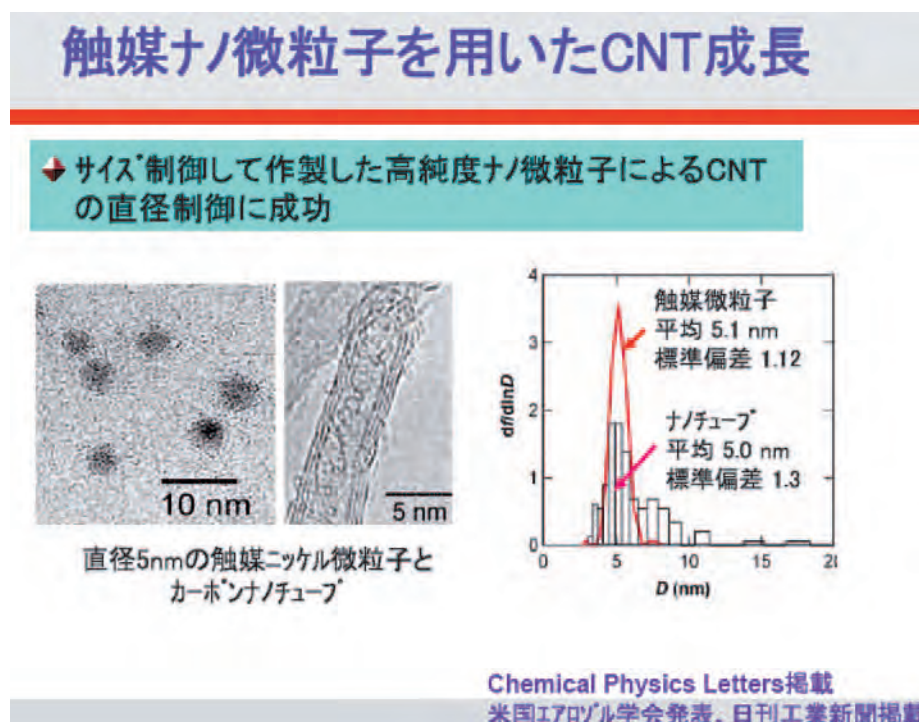


図2-1-2 触媒ナノ微粒子によるCNTの直径制御

③ナノバイオ

医療健康ネット社会を構築するためには、高感度健康疾病診断が必須であり、プロテインチップの開発に力が注がれている。標的たんぱく分子を認識して結合する抗体を自己組織化により合成し、これを結合を検知し外部信号を発生するナノワイヤトランスデューサーと組み合わせた疾患マーカー検出ユニットの開発などが行われている(図2-1-3)。

疾患マーカー検出ユニットの開発

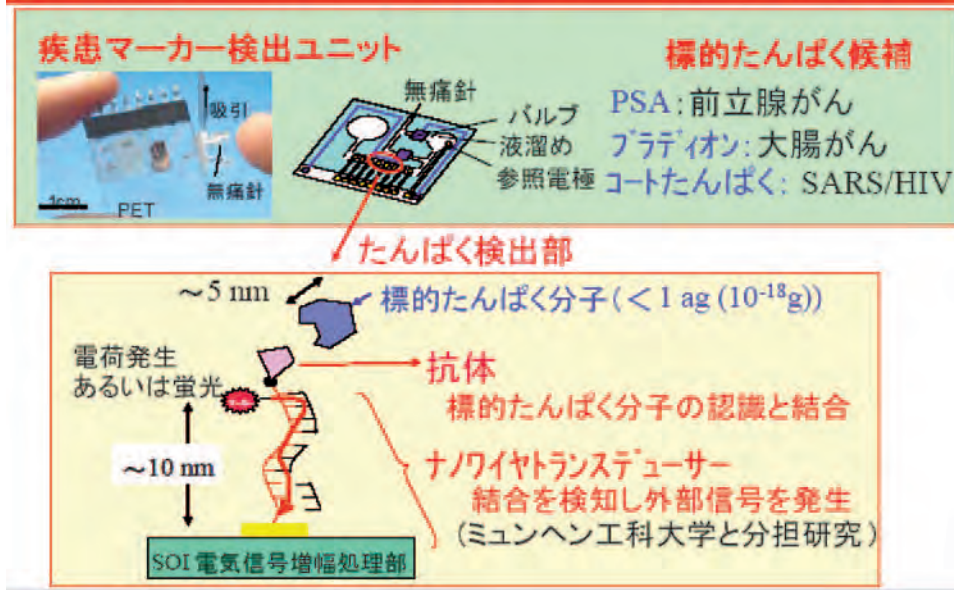


図2-1-3 疾患マーカー検出ユニットの開発

2. ナノプリント技術/宮内昭浩（日立製作所）

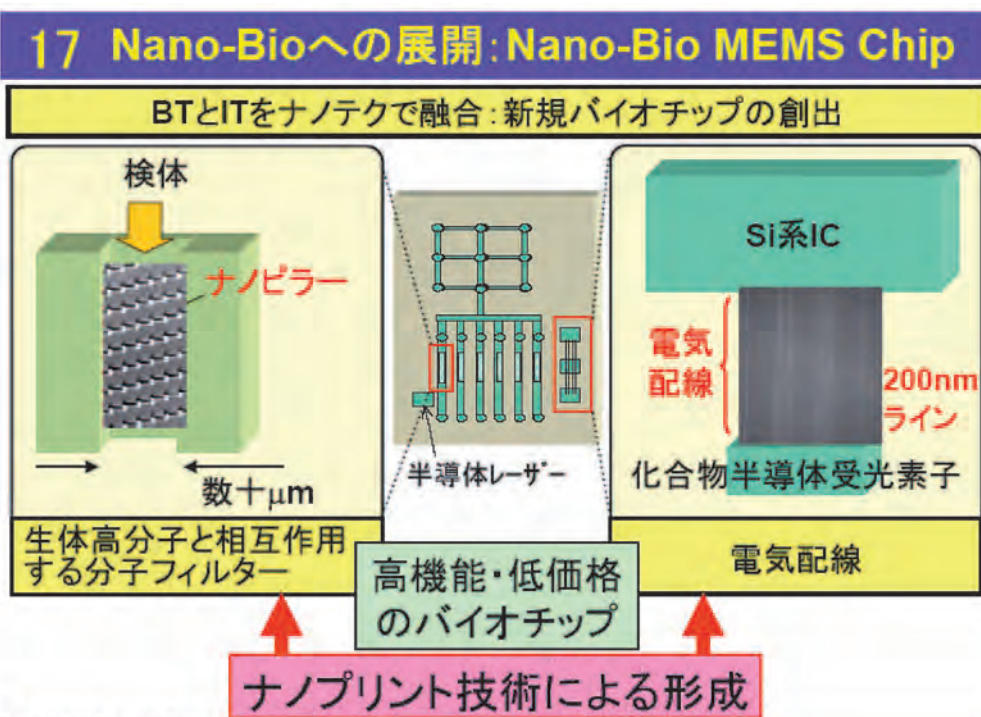
ナノプリント技術は、従来型ロードマップに載った光リソグラフィー法や電子線直接描画法に対し、デバイス・システムに新市場を創生する低コスト製造技術として期待が寄せられている。特に、最近、高アスペクト比構造に対応できるナノプリント技術が注目されている。高アスペクト比ナノプリント技術は、ナノスケール効果によって形成構造の高さが数百%延伸する新現象に基づいている。電子線直接描画法と比較すると、簡便なプロセスにより低コストで樹脂ナノピラーを作製できる特徴がある（図2-2-1）。

このような特徴を有するナノプリント技術は、光デバイスやナノバイオデバイスへの応用展開が期待されている。たとえば、ナノプリントによって形成したナノピラーのアレイを用いたフォトニック結晶デバイス、ナノピラーをバイオケミカル修飾し、生体高分子と相互作用する分子フィルターとして組み込んだ高機能・低価格のバイオチップなどが開発されている（図2-2-2）。

15 電子線直接描画法との比較		
加工例	高アスペクトナノプリント	電子線直接描画法
	樹脂 ナノピラー	ガラスピラーの加工例 : DNA高速分離チップ (2002.2) (東大・工 堀池靖浩教授)
	2工程 樹脂薄膜塗布↓ ナノプリント↓	7工程 ↓Crスパッタ、レジストコート ↓電子線描画 ↓Crドライエッチ ↓ガラスドライエッチ ↓Cr除去 ↓リンス
特徴	①簡便なプロセス ②樹脂ピラー作製 ③低コスト	①Si系材料の優れた加工精度 ②大面積形成

HITACHI Inspire the Next

図2-2-1 高アスペクト比ナノプリント技術と電子線直接描画法との比較



HITACHI Inspire the Next

図2-2-2 ナノプリント技術のナノバイオデバイスへの展開

3. トップダウンとボトムアップのナノリソグラフィー/浅川鋼児（東芝）

トップダウンリソグラフィー技術は、LSIの高密度化、低電力化、および高速化を支える微細加工技術である。現在でも、ArFエキシマレーザー液浸リソグラフィーなどの光リソグラフィーと電子線（EB）直接描画リソグラフィー技術が進歩を続けている。EB直接描画リソグラフィーは、マスクが不要で高い解像性を有するという利点があるが、処理速度が低いことが課題となっている。ハイスループットを実現するために、現在、低加速EB描画システム、マルチビーム描画システムなどが開発されつつある（図2-3-1）。

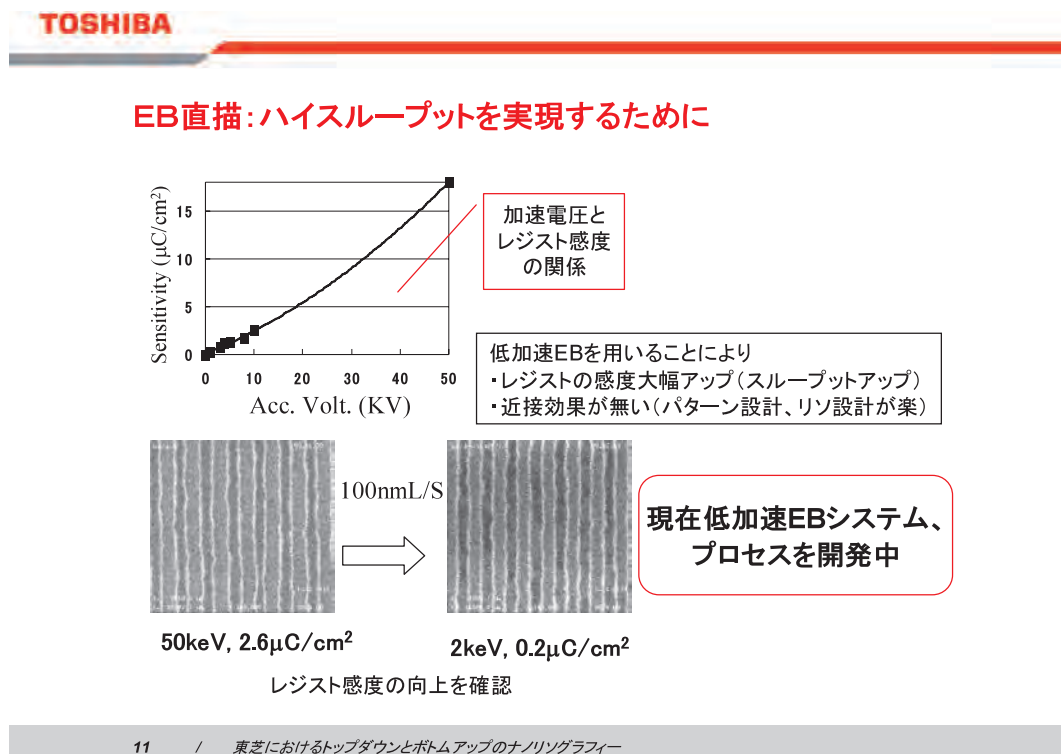


図2-3-1 電子線（EB）直接描画リソグラフィー

ボトムアップ技術であるブロックコポリマー技術は、加工サイズが微小になるにしたがってコストが急上昇するというEBリソグラフィーの問題点を克服するものとして期待されている。ブロックコポリマーによるパターンドメディアの加工プロセスを図2-3-2に示す。本技術を用いて、2.5インチのパターンドメディア磁気記録媒体が世界で初めて作成された。このように、トップダウン法による「枠」を用いて、ボトムアップ法によるナノパターンの位置決めをするような技術は、両者の特徴を生かし、欠点を補うことができるので、デバイスの製作に有用である。

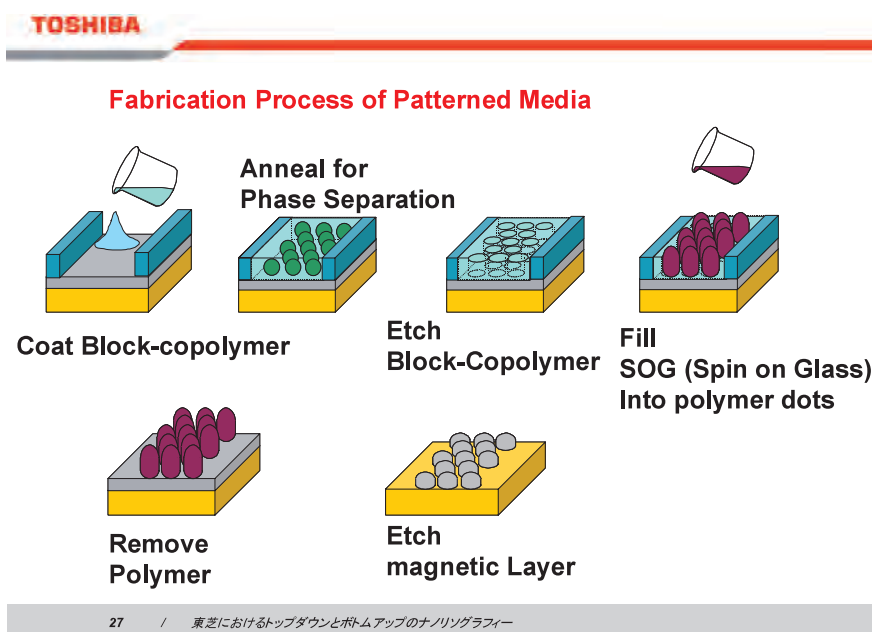


図2-3-2 ブロックコポリマーによるパターンドメディアの加工プロセス

4. トップダウン技術とボトムアップ技術/大泊巖（早大理工）

電子線リソグラフィーのトップダウンプロセスと生体分子の自己集積などのボトムアッププロセスを融合することによって、制御性良く簡便に、かつ低コストに新しい機能デバイスを創製することが、今後の分子ナノ工学の目標となる。たとえば、次のようなプロセスが研究されている。

- ① フォーカスドイオンビーム（FIB）でシリコンにボロン等の不純物を位置制御して打ち込み（トップダウンプロセス）、それをマスクにして結晶異方性エッチングで結晶依存の3次元ナノ構造を作成する（材料物性を利用したプロセス）。
- ② FIBで触媒原子を位置制御して打ち込み（トップダウンプロセス）、そこからカーボンナノチューブを成長させる（ボトムアッププロセス）。
- ③ 表面改質によって選択的に親水・疎水性を制御した基板表面に（トップダウンプロセス）、ナノ・マイクロ粒子を自己配列させる（ボトムアッププロセス）。
- ④ 電子線リソグラフィで形成した「島」に（トップダウンプロセス）、バイオ分子膜を自己組織的に形成する（ボトムアッププロセス）。

たとえば、④のプロセスを利用して、保健情報モニターシステムの構築など、高齢化社会における新産業の創生が期待される。

5. ボトムアップ型ナノテクノロジー/青野正和（物材機構）

近年、アトムクラフトによるボトムアップ加工が進展している。たとえば、水素をインクとする“ナノペン”（水素中で探針に+3.5Vの電圧をかけると、原子状水素が供給される）、あるいは銀をインクとする“ナノペン”によって、原子を任意の位置へ付与することが可能となってきている。これらのトップダウン加工法と自己組織化を融合することに

よって、ナノワイヤアレーなどの形成も報告されている。しかし、これを情報処理デバイスに応用するためには、これが1個形成できるだけでは不十分であり、集積しなければ意味がない。したがって、自己組織的にできるナノワイヤを集積化技術は、今後、力を注ぐべき課題である。

また、ナノ構造体は造っただけでは不十分であり、測らなければわからないことを忘れてはならない。つまり、ナノ物性計測が重要である。たとえば、電氣的ナノ計測のために、ナノスケールでの電気伝導度を計測する“ナノテスター”や多探針STMが開発されている。また、ナノ光学計測（ナノ発光分光）も発展しており、偏光解析光検出STMによって、STMの空間分解能で探針直下の試料の電子状態の軌道対称性をエネルギー分解して知ることできるようになっている（図2-5-1）。

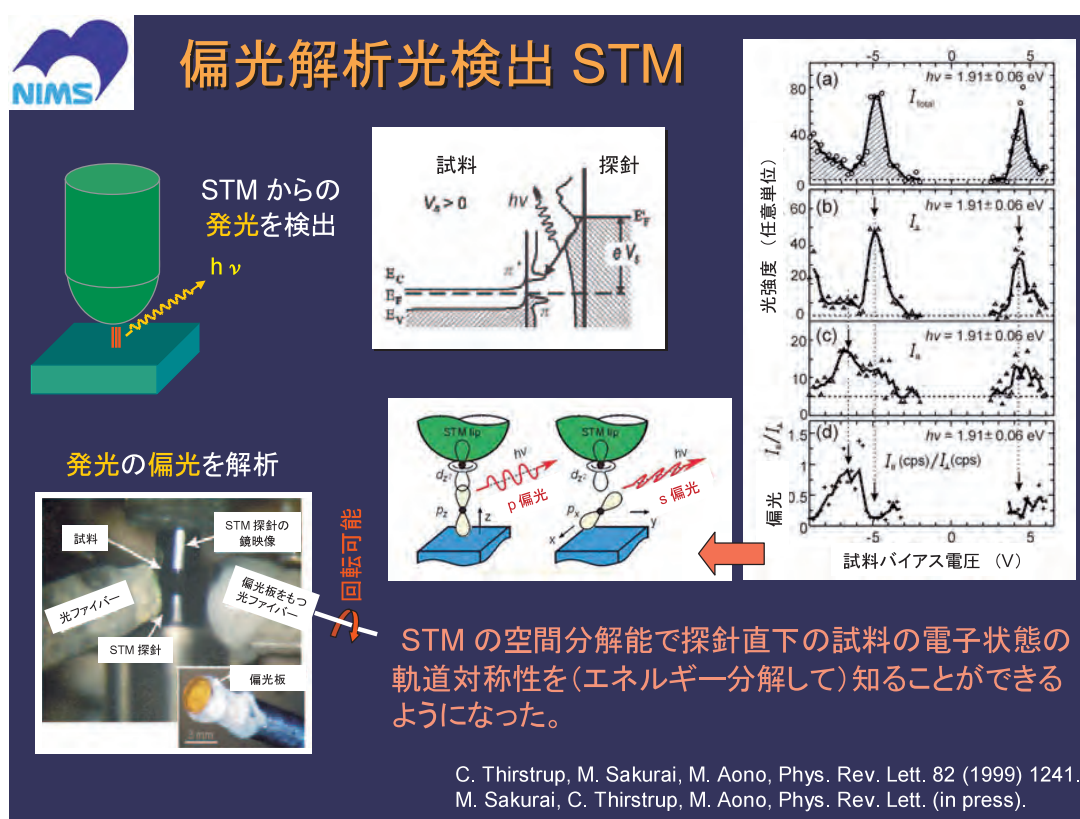


図2-5-1 偏光解析光検出STM

ボトムアップ型ナノテクノロジーの研究分野で、今後、重要になると考えられることを以下にあげる。

① トップダウン加工法と自己組織化の融合

近接プローブ法などによるトップダウン加工法と自己組織化のような自然現象に頼る物質制御法との適切な融合が重要である。特にアクティブな融合が必要である。「アクティブ」とは、自己組織化などの進行状況が監視され、その情報が近接プローブの制御にリアルタイムでフィードバックされることである。

②近接プローブ法の高度化

マルチプローブ化（1000～10000本以上）、マルチプローブの高度なコンピューター制御、各プローブの目的に応じた機能化などが重要である。各プローブは個々に異なる機能、たとえば、加工機能やセンシング機能を有し、センシングされた情報はコンピューター制御にフィードバックされる。これによって、「近接プローブはテンプレート作成、自己組織化は最終的な構造構築」という単純な役割分担的スキームから脱却できる。たとえば、不都合な構造が局所的に生じれば、それを消去して構築し直すという工程が一般的に行なわれることになる。

③「ナノイオニクスデバイス」の開拓

有望と思われる目指すべき新展開としては、ナノエレクトロニクスデバイスと対比的な「ナノイオニクスデバイス」の開拓である（生体はイオンの動きを巧妙に利用している）。電子は1種類しかないが（スピンを考えれば2種類）、イオンは多様である。また、電子の運動は外乱に影響されやすいが、イオンの運動はより安定である。さらに、電子の運動にはふさわしい大きさの空間が必要であるが、イオンの動きはより狭い空間でも可能である。

④新しいアーキテクチャーの開拓

脳のニューラルネットワークの結節点としてのシナプス間の「電線」は、細胞という極めて高度な機能体であり、それがネットワークの構築を制御し、構築されたネットワークの機能を支配している。現在、人工ネットワーク構造を構築する試みでは、最終的にどのような構造を構築すればよいか（構築したいか）が曖昧のままに残され、具体化されていないくらいがある。「こうした構造が構築できれば、こうした機能が現れる」という具体的な設計を明確にした上で、構造の構築を目指すべきである。

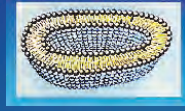
6. 自己組織化とナノテクノロジー/山口智彦（産総研）

「自己組織化の化学」に関する研究は活発に展開されているが、その多くは熱力学的平衡近傍での相分離や相転移に相当する自己集合の範疇に入る。一般に議論されているナノテクノロジーのための自己組織化は、自己組織化の化学に代表される平衡近傍での自己集合の原理である。しかし、すでにプリゴジンらは、非線形開放系では平衡から遠く離れた条件の下で平衡近傍の相分離とは質的に異なる秩序構造、すなわち散逸構造が現れると指摘している（図2-6-1）。

自己集合と散逸構造との比較を図2-6-2に示す。自然界ではヒエラルキーが上がる（複雑性が増す）にしたがって、散逸構造が自己集合の過程を助長する場合が多く、その典型的な例が自己組織化による「生命」の形成である（図2-6-3）。また、最近、階層間のコミュニケーションを解明しようとするダイナミックヒエラルキーに関する理論研究も進展しつつある。今後の研究の方向性として重要なことは、ナノテクノロジーの要請にかなう極微領域での構造形成と階層構造の自己組織化を可能にする新しい自己組織化の体系を整備することである。

Two “self-organizations” in chemistry

• Self-assembly



- Spatial periodicity
- Wave length λ
~order of components
- Physical force (~ 10 kcal)
- Phase separation
- Minimal dS/dt
= near-equilibrium

• Dissipative structure



by Prigogine

- Spatio-temporal periodicity
- $\lambda \sim 2-5$ orders larger
than the size of components
- Chemical force (~ 100 kcal)
- Instability
- (Energy dissipation minimum)
= far-from-equilibrium

図2-6-1 2つの自己組織化：自己集合と散逸構造

Comparison between two self-organizations

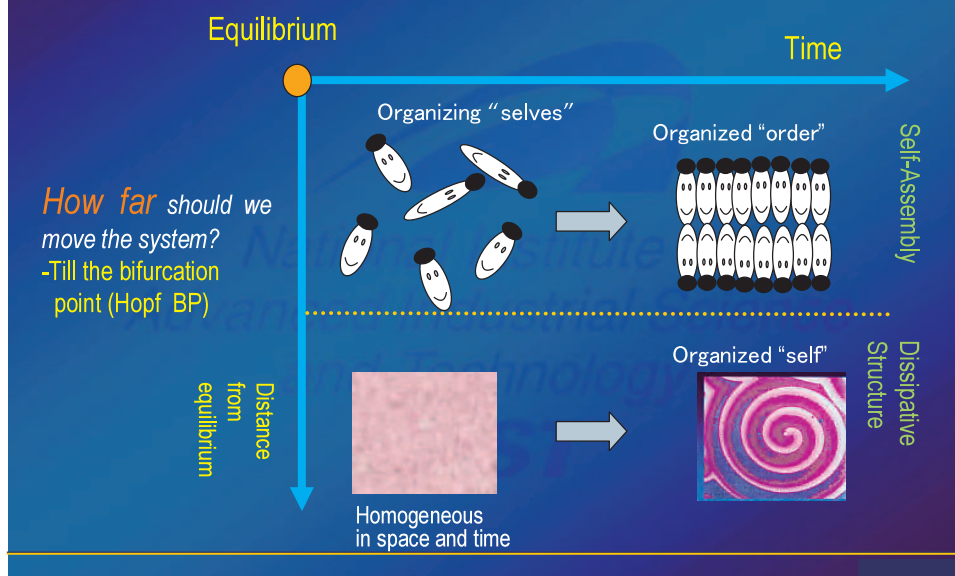
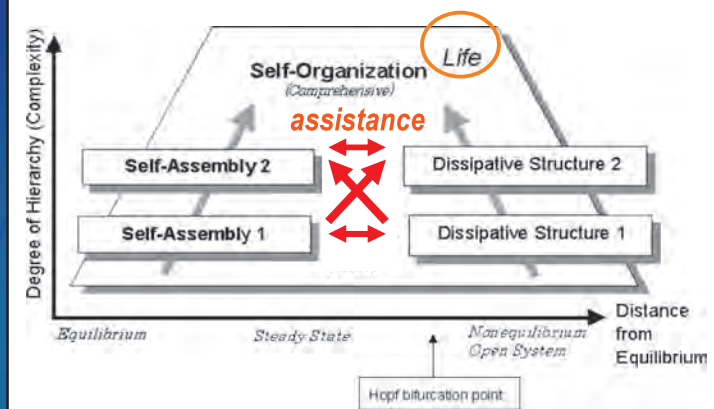


図2-6-2 自己集合と散逸構造との比較

Self-organization of Hierarchy - a process design for nanotechnology -

...might be close to the original idea of E. Schroedinger.



T. Yamaguchi, *Chem. Eng. (Japanese)* **54**, 1363 (2001).

T. Yamaguchi, N. Suematsu, H. Mahara, *ACS Symp. Ser.* 869, 16(2004).

図2-6-3 自己組織化の階層性

セッション3「真に有望で筋の良いボトムアップ型ナノテクノロジーとは」

本セッションは、将来の製造技術の柱となるナノテクノロジー、および真の自己集合・自己組織化を見極めることを目的とした。提供された以下の話題について、概要を記す。

- ・川合知二（阪大産研）「プログラムに基づくボトムアップ自己組織化」
- ・清水敏美（産総研）「ナノ及びメゾスケールアーキテクニクス」
- ・寺倉清之（北大創成）「自己組織化のシミュレーションにおける課題」
- ・西浦廉政（北大電子研）「自己組織化の『種』」
- ・国武豊喜（北九州市大）「自己組織化の過去、現在、未来」
- ・茅幸二（理研中央研）「ボトムアップナノテクの新方向：分子情報生命科学」

1. プログラムに基づくボトムアップ自己組織化/川合知二（阪大産研）

真に筋の良いボトムアップとは何かとの問いがある。いろいろな筋があるが、本当の王道は「階層を超えるプログラム自己組織化」である。ボトムアップのナノテクは大切だと認識されているが、現実的にはその歩みは遅い。その理由に学理や手法の未成熟があげられる。以下に現状認識から目標達成への道筋を述べる。

- ① 階層を越えた“本格的なボトムアップナノテク”はまだ未成熟である。「階層越え」とは「ナノからマイクロ、ミリ、メートル」への展開を意味する。
- ② 単なる自己集積（セルフアセンブリー）からプログラムされた自己組織化（セルフオーガニゼーション）へ展開を図る（図3-1-1）。目指すべきものは単成分系でなく、多種の原子分子と比較的複雑な分子（巨大分子）の情報が利用されるものである。しかも、それに基づいて、各分子のナノスケールでの“位置決めと配列・集積”が行われる。
- ③ 上記を実現するためには、次のような手法がある。
 - ・人工的な手法（トップダウン法など）との組み合わせ
 - ・より巨大な機能分子の設計法の確立（力づくでない方法によって）
 - ・自己組織化メカニズムの学理の確立
 - ・単なる物理的な自己集合メカニズムを利用するだけでなく、分子情報や新しい情報原理（たとえば、遺伝的アルゴリズム）を取り入れた分子進化法の適用
 - ・分子設計科学・情報科学の生命科学への展開（分子情報生命科学）
 - ・個々の学理としては、シーケンシャル自己組織化、多次元自己組織化、分子プログラム自己集積化などの利用

多様なボトムアップナノテクノロジーを組み合わせた研究例を以下にまとめる。

- (1) トップダウン法とボトムアップ法との組み合わせ：ナノインプリントによって「種」を植えることなどを含む。

- (2) 任意の不規則性の導入：途中でパルスの摂動を入れることによる散逸構造の形成など
- (3) 多成分の原子分子の個性を取り入れた自己組織化、あるいは分子情報（大きさ、官能基など）の取り込み
- (4) 自己組織化を越えた自己組織化（階層性）
- (5) プログラム自己組織化、シーケンシャル自己組織化、多次元自己組織化などの複雑な形を作る自己組織化（位置決め、多元配列）
- (6) 自己修復と自己複製
- (7) バイオチップ（近未来）や分子デバイス（遠未来）への応用
- (8) 非平衡ダイナミックスの凍結：①ダイナミックな系の凍結、②ゆらぎを利用する系の凍結
- (9) プログラムの内容の定義：①時間的、②空間的、③序列的

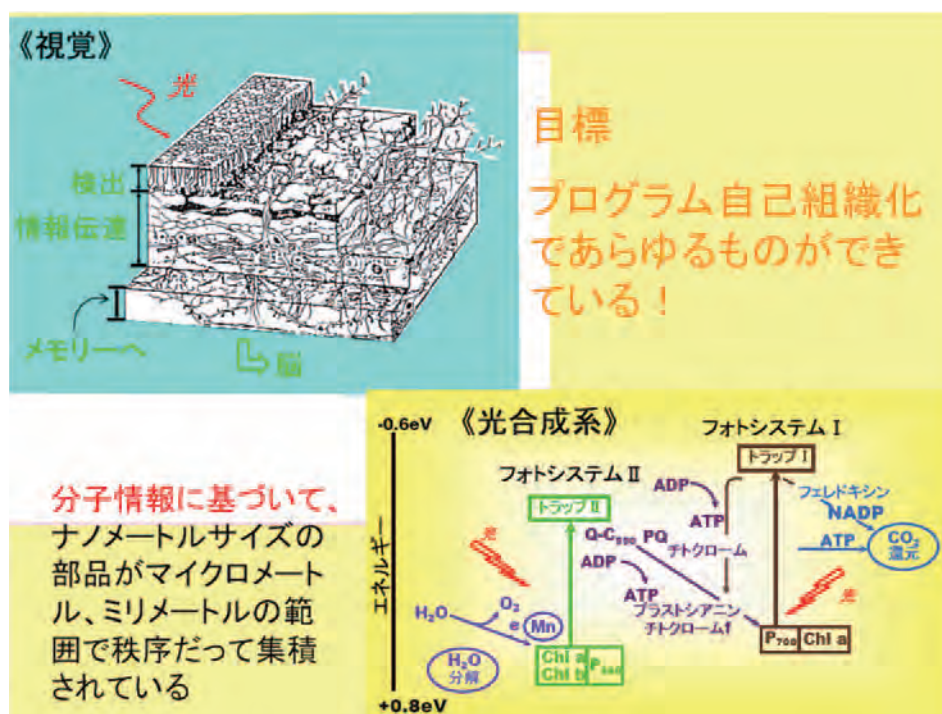


図3-1-1 プログラムされた自己組織化

2. ナノ及びメゾスケールアーキテクニクス/清水敏美（産総研）

「真に有望で筋の良いボトムアップ型ナノテクノロジーとは」に対する回答の方向性を図3-2-1に示す。

- ① トップダウンで作ったマイクロ構造の上または中に、ナノ構造を作ること：「ナノ@マイクロ」 → トップダウンとボトムアップの融合は重要
- ② 必要な場所に必要な資源を必要なときに入れる「オンデマンド」なものづくり

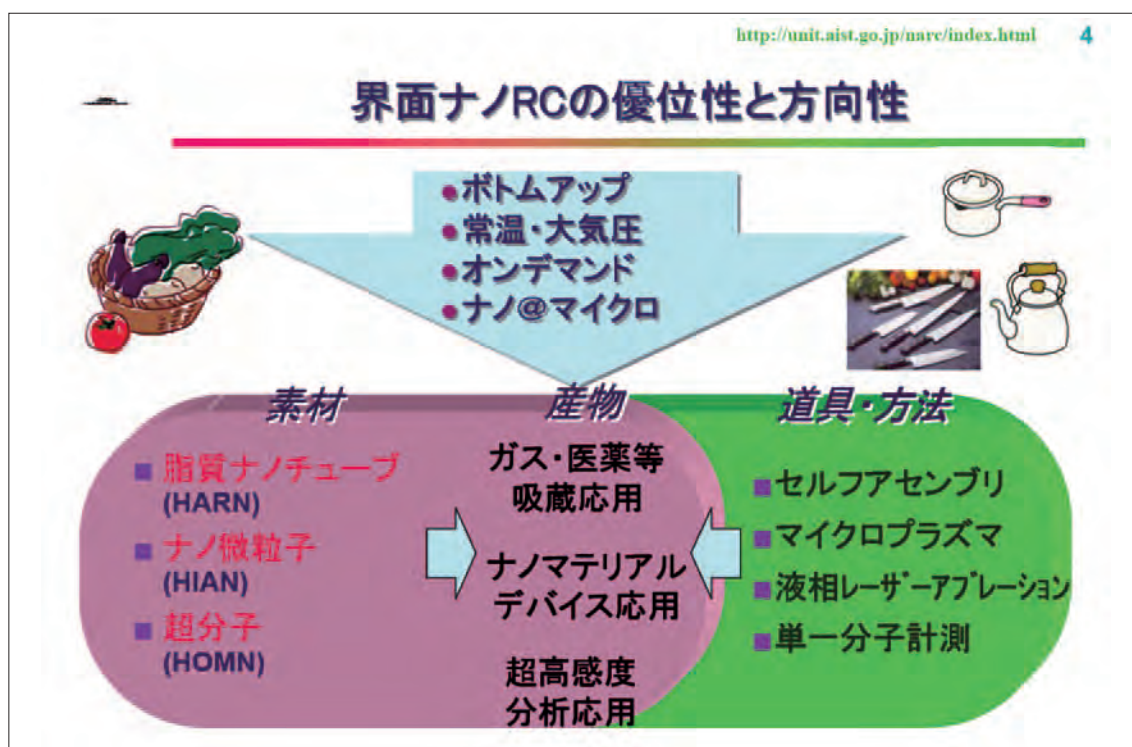


図3-2-1 ボトムアップ型ナノテクノロジーの方向性

3. 自己組織化のシミュレーションにおける課題/寺倉清之（北大創成）

原子スケールシミュレーションにおける重要課題を以下にあげる。

- ① 大規模な電子状態計算(原子の数が非常に多くなる):ある程度の目処がたった。必要に応じて、古典的・量子的な計算法のハイブリッドで対応する。
- ② Van der Waals力の計算:有機を計算する際にはきちんと扱う必要があるが、現状では十分に扱えていない。
- ③ 位相空間探索:原子が多くなったとき、位相空間をどのように探索するかが課題である。粗視化と自動広域探索が重要である。

上記の計算技術基盤の上で、種々の機能解析・予測が必要である。原子スケールシミュレーションを100nmスケールの現象にどうやって繋げるかが重要な課題である(図3-3-1)。

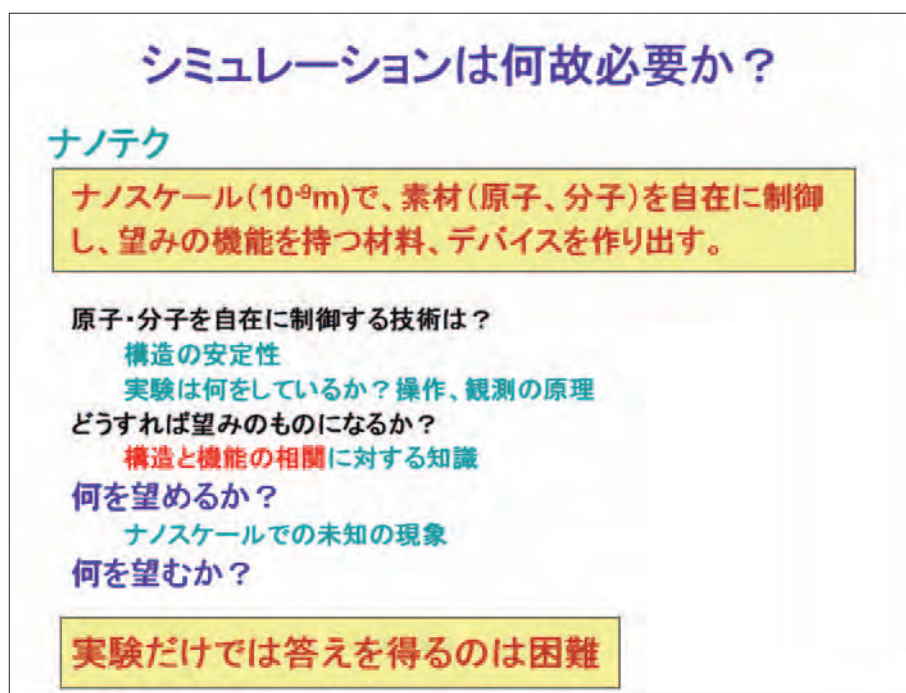


図3-3-1 シミュレーションの必要性

4. 自己組織化の「種」/西浦廉政（北大電子研）

自己組織化の「種」として、以下の2つがあげられる（図3-4-1）。

① Ultra transient dynamics

良い数理モデルは、非常に多彩な内部状態やダイナミクスを持っている。初期値をうまくとれば、多彩なダイナミクスを外部からのインプット無しで実現できる。短時間で見れば自己組織化でも、長く見ればenergy minimumに行く。

② Seed

閉じこめられた自己組織能力、あるいは再生の「種」に注目している。一見クローズなシステムが、あるトリガーや外的要因で次のステージに行くような発想が面白い。反自己組織的なダイナミクスがきちんとわからないと、自己組織化・階層を越えた自己組織化・プログラム化などは難しい。

自己組織化の「種」

- **Ultra transient dynamics**
 - 恒常的な外部注入はなし
 - 内部多様性を長時間かけて経巡る。ゆらぎの重要性:「有限性」「境界」
 - **Slow aging**: 少し見れば自己組織的、長く見れば **energy minimum**
- **Seed** (thanks to K.Kaneko)
 - 一見、closed system
 - 閉じ込められた自己組織能力、再生の「種」
 - 何千年も保存可能、持ち運び可能、しかし直ちに蘇る。
 - **Small trigger leads to big change in dynamics**

おまけ

- **Dissipative Particle** の個性(分子ではないが):異方性、極性、。。。
 - 単調テール
 - 振動テール

3種系のパラメータのみ変化



図3-4-1 自己組織化の「種」

5. 自己組織化の過去、現在、未来/国武豊喜（北九州市大）

自己組織化の研究開発に関する所見を以下にまとめる。

- ① 分子レベルの自己集合や組織化とそれをより高次構造にする組織化とでは、条件・方法論が大きく異なる。ナノとそうでないものをどう結びつけるかが鍵である。これと関連して、「ナノコピー」という手法の研究を行っている（図3-5-1）。
- ② 最初から大きなものを目指すことは難しい。パーツを作る技術をきちんとし、柔軟なデザインと機能化を考え、その上で組み合わせるのがよい。
- ③ 分子情報を大切にすることが重要である。サイズレベルを考慮した階層を、鋳型や枠組みで作ること（サイズマッチング）が有効であると思われる。

To fabricate 3D architectures from thin films

→ **Template shape is copied onto thin films**

Nanocopy

“**nano-sized structure is replicated**”



図3-5-1 ナノコピー

6. ボトムアップナノテクの新方向：分子情報生命科学/茅幸二（理研）

以下にボトムアップナノテクノロジーの新方向として、分子情報生命科学を進めていくための所見をまとめる。

- (1) フラーレンやナノチューブだけがナノテクノロジーの主役ではない。いわゆるナノ材料だけではなく、基礎的な材料の開発に本腰を入れなければならない。日本の有機化学が世界で超一流であるならば、是非その力を使うべきである。
- (2) 階層性を越えた組織化をどうするかが課題である。これを「分子情報生命科学」が先導する可能性がある。物理、化学、および情報学の研究者にマテリアルサイエンスに加わってもらうこと、あるいは有機化学の研究者が情報科学まで専門にするつもりで有機化学を構築することが重要である。
- (3) 物質化学（物性科学・合成化学）や生命科学において、1分子から発した情報がマクロレベルにまで階層構造をもって伝達し、機能発現する事実が解き明かされてきている。この段階で、物理、化学、生命化学、工学、および情報科学が融合して、柔軟な分子の集合を対象とする新しい物質化学が「分子情報生命化学」であり、この新しい物質の概念を次世代に伝えるべきである。

以上の川合、清水、寺倉、西浦、国武、茅による6つの話題を基にして、下記のような観点から議論を展開した。

- ① 生物に学ぶということの意味
- ② トップダウンとボトムアップの融合
- ③ ボトムアップならではの世界（たとえば、欠陥を許容するシステム、ゆらぎ、自己修復）

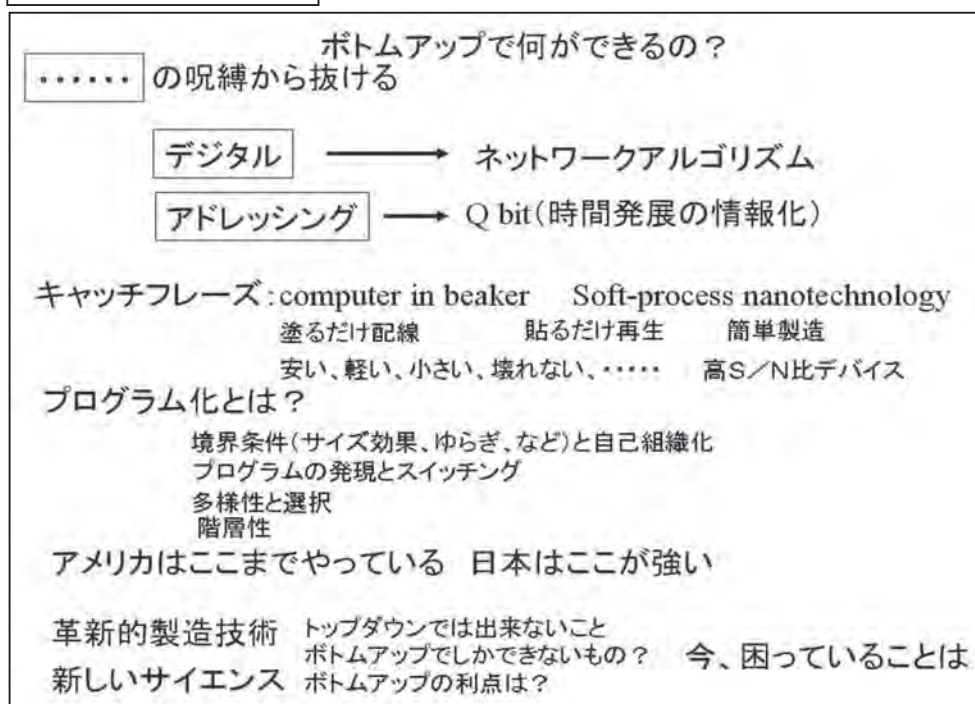
展開された議論の要点を以下に記す。

- 物理系と化学系で学問領域の差が大きい。言葉や概念がかみあっていない場合が多い。
- 物理の系統、化学や物質の系統、生物の系統といろいろあるが、考え方もアプローチも表現も成果に対する考えも違う場合が多い。しかし、本質的には「ナノ」という同じサイズで議論できることが、ナノテクノロジーのあるべき世界である。
- 「～の呪縛から抜ける」という考え方が必要である。ボトムアップ法で作った既存デバイスは、トップダウン法のものに比べて、今のところ全く利点がない。ボトムアップ法ならではのデバイスを考案することが必須である。これは、「既存デバイスの呪縛から抜ける」という考え方である。
- 革新的な製造技術が、真に有望で筋の良いボトムアップナノテクノロジーである。
- ある種のサイエンスを立ち上げるとか、予算獲得の努力とかは、大抵は研究者側のニーズから出ている。しかし、今までの大きなサイエンスは社会のニーズと不可分

に発達してきた。社会のニーズを踏まえて遡上するような努力をすれば、良いサイエンスは生まれてくる。

- ボトムアップで作った新しい材料で新しいマーケットや用途を考えることが、企業にとって重要である。もう1つ階層を上げて、ものを作るだけではなく、システムやそれでどのような社会ニーズを実現するかまで考える必要がある。
- トップダウン法は、必ずしも科学的にレベルが高いわけではないが、必要だから発展し、技術的に極めて高度化した。ボトムアップ法に関して、役に立つかどうかを真剣に考えて研究が行われていない感がある。
- ナノテクノロジーは、これまでの技術と違って、基礎研究と実用化との距離が非常に近い。したがって、サイエンス寄りの成果を製品に結びつける「マッチング」の力量が問われる。
- 生物のプログラムが完全に解明されるのは容易ではない。しかし、それからヒントを得る自己組織化に関しては、いくつかの有効なアプローチがあると考えられる。生命のプログラムに関して、表層的に議論するのではなく、いくつかきちんと項目にわけて議論した方がわかりやすい。
- デバイスの実現まで到達できるかどうかは別として、階層を越えてシステムを積み上げていくにはどのようなプログラムが必要なのか議論する必要がある。生物から学ぶのは重要だが、全部学んでいたら何もわからないままに終わるという危惧がある。
- 今、やらなければならないことは、役に立つことになる物質を選び出し、それに関する基礎的な研究を、実用化を意識しながらやっていくことである。また、有効な物性を作っていくことが重要である。

論点整理



第III章 総合討論および総括

1. 総合討論

討論の要点を以下に記す。

- 「安く早く簡単に無駄なく微細なものを作る製造技術」の概念は重要である。
- ナノテクノロジーは、サイエンスから順を追って構築していくものではない。サイエンスとテクノロジーが一緒に進むものである。
- 必ずしも、ボトムアップ法はソフトマテリアルに限ったものではない。
- 今回の議論では、電子的な話がほとんど抜けている。量子ドットレーザーが話題になっただけである。もっと具体的な問題にブレークダウンして話を詰めないと、架空の話ばかりになる。
- ナノテクノロジー・ナノサイエンスの知識を利用して、本質的な人間の生活に関わる問題を扱うことは重要な研究課題である。なぜナノテクノロジーを使うかという根本的な問題を議論することが重要である。たとえば、強電子相関にはナノテクノロジーで取り扱う本質がある。分子情報生命科学は、情報学的な知識・技術を取り入れながらの「ものづくり」と位置づけられる。
- キャッチフレーズとしてソフトマテリアル科学がいいのか疑問である。ボトムアップはどちらかというと湿式のプロセス・ウェットプロセスを用いて、最終的には固まったものを作るプロセスだと思われる。このキャッチフレーズは途中のプロセスがソフトだという意味であるが、最終形成物がやわらかい材料であるかのように聞こえる。
- 境界条件をすることで行われるナノテンプレートは、プログラムの1つの形態である。トップダウンで作ったテンプレートとボトムアップで作ったテンプレートがある。
- ボトムアップ法を使って、どのような電子デバイス、光デバイス、あるいは機能デバイスができるか議論が必要である。
- 光学素子は欠陥に対して比較的許容性が高いので、ナノテクノロジーを適用しやすい。ボトムアップ法がデバイスの作成に使える技術であるかどうかを考えるには、揺らぎをどのように扱うかを考える必要がある。たとえば、幼稚園児を整列させるような感じで、整列しないでチョコチョコしている連中がいても使えるデバイスかということが問題となる。既存LSIのようにきちんとした配線があるようなデバイスでは、このような揺らぎは許容できない。欠陥を許容する幅が、電子デバイスより光学デバイスで大きいので、光学デバイスがボトムアップ法によって作成できる最初の候補である。
- 上記議論は光デバイスだけではなく、バイオ関係のデバイスにも当てはまる。少々欠陥が存在しても構わないバイオデバイスが存在する。
- プログラム化は材料に設計図を持たせるということである。人間はナノメータより大きいところを作り、それより小さいところを自然界が自分で設計図に基づいて作るのがプログラム自己組織化である。

- 自己集積化でも自己組織化でも、階層を越えるには何らかの「指令」が必要である。その指令が外から来るか内にあるかなどいろいろな種類があるはずである。プログラムの種類を分類できるとよい。
- ボトムアップ／ビルドアップ法がナノテクノロジーとして認知されるには、従来技術が有するある性能を大きく超える必要がある。従来技術の延長上の性能では、存在価値がない。
- ナノテクノロジーはナノサイエンスを含んで進展していくべきである。技術論だけでは不足である。
- ナノメータの領域に入ると、有機も無機も金属も原子オーダーの科学技術として統一して扱える。階層性では界面が重要であるが、有機と無機、有機と金属など、いろいろ複合の界面を研究する必要がある。
- 今回の議論で、筋が良いという制約を外したら、非常に夢のある大きな話が出てきたかもしれない。もしそのような話があるなら、聞かせて欲しい。
- トップダウン法は製造技術、ボトムアップ法は創製技術と呼ぶべきである。製造という言葉にはトップダウン的なイメージがある。ボトムアップ法が何に使えるかの問いに対して、新しい材料を創り出すという答えがあってもよい。

2. 総括

本ワークショップを総括すると以下ようになる。

- ① 産業技術としては、トップダウン法とボトムアップ法の組み合わせが実用的である。トップダウン法によってプログラム（指令）を持つユニット・鋳型を作製し、続いてボトムアップ法によってそのプログラムに基づく自己集積によりデバイスを製造する。
- ② 将来は、プログラム化された自己集積を利用した一貫したボトムアップ法によるデバイスの製造が重要になる。特にユニット・鋳型の構築段階で、上位の階層へ（ユニットからデバイスへ）集積度を上げるために必要なプログラムを組み込むことが重要である。次のようなデバイス・材料が研究対象となる。
 - ・ 位置、形態などを完全に制御したデバイス
 - ・ 多少欠陥があっても動くタフなデバイス
 - ・ 自己修復材料などの新しいコンポジット材料
- ③ ボトムアップ法の研究は、サイエンスとして化学、生物、数理科学、物性物理、情報科学を融合した新領域を拓く可能性がある。

ボトムアップ法(ビルドアップ法)の未来

- サイエンスとしての将来性は？(something **BIG**は出てきそうか？)
安く、速く、簡単に、無駄なく微細な物を創る技術
量子科学
分子情報生命科学(化学、生物、数理科学、物性物理、情報科学を融合した新領域)
ソフトプロセスマテリアル科学
- テクノロジーとして使えるか？
 - 揺らぎや相転移、自己組織化を利用する材料の製造と制御
 - 階層性を有する新規物質・材料(C60,CNT以外の筋の良いナノ材料)
 - 製造プロセスの階層化(要素、ユニット、鋳型、システム)
 - プログラム化による多様性と選択(分子情報、環境からの情報)
 - プローブで作るナノテンプレート
 - ナノイオニクス
- 何に使えるか？
 - センサー(超高感度、超小型、超軽量、超高ダイナミックレンジ)
10-100nmは分子システムの機能する最小単位
 - 新デバイス(量子効果、光、バイオ…)
揺らぎの影響を受けない、多少欠陥があっても動くタフなデバイスの創成と製造
 - 新しいコンポジット材料(自己修復材料、ナノ化粧品)

**科学技術未来戦略ワークショップ
～ボトムアップ型ナノテクノロジー～
報告書**

CRDS-FY2005-WR-15

平成 18 年3月

発行者 独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
村井グループ
印刷所 株式会社 第一印刷所

©独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 2006
無断での転載、複写を禁じます。引用を行う際は、必ず出典を記述願います。