

ナノテクノロジー

アトム・ビット・ゲノムの邂逅

池澤直樹

CONTENTS

- | | |
|-----------------|-----------------|
| I 技術のパラダイム転換 | V ナノテクのもたらすもの |
| II NNIの衝撃と日本の対応 | VI ナノテクを実現するために |
| III 今なぜナノテクなのか | VII ナノテクとの付き合い方 |
| IV ナノテクの先人たち | |

要約

- 1 技術競争力のさらなる強化を図るために米国が策定したNNI（国家ナノテクノロジー計画）に端を発したナノテクは、半導体を中核としたハイテク製造業の競争力強化を目指す日本の思惑が加味され、現状のブームへと発展した。
- 2 ナノテクノロジーは、アトム・ビット・ゲノム（物質、情報、遺伝子）の各技術が邂逅する領域であるナノメートル（ 10^{-9} メートル）スケールに特有な新規現象を、実用材料・デバイスとして活用しようとするもので、21世紀初頭の先端産業分野である材料、情報、バイオの成長を支える共通基盤技術を提供する。適切に対応すれば、製造業を強みとしているわが国の先端企業に、多くの新規事業機会をもたらす。
- 3 ナノテクの開発に当たっては、マクロからミクロへの微細化を目指す「トップダウン」手法に加え、「ナノ構造」をテクノロジーとして機能する「マクロ構造」に積み上げる「ボトムアップ」手法が不可欠である。こうした「トップダウン」と「ボトムアップ」の融合がもたらす「パラダイム転換」にナノテクの本質がある。
- 4 ナノテクは、技術面だけでなく、マネジメント面にも革新的な変革をもたらす。ナノテク開発・事業化を実現するために、公共研究機関のマネジメント体制、産官学の役割分担と連携のあり方、知的財産の取り扱い、ベンチャー企業の立ち上げなどに関して、大胆な発想の転換が必要である。
- 5 日本にも多くのナノテクの先人たちが存在している。このポテンシャルを活かして、ナノテクに適したマネジメントに基づく事業化戦略を推進することこそが、日本経済の混迷を脱却する絶好の機会となる。

I 技術のパラダイム転換

ナノテクノロジー（以下、ナノテク）が連日、新聞紙面を賑わしている。あたかもナノテクは、21世紀の発展を支える先端技術の枕言葉のようである。しかし、日本の産業界は全体的には、ナノテクが事業として結実するのはまだ先のことという意識が強く、模様ながめの状態にあるように見受けられる。

一方で、ナノテクは「21世紀の産業に最も強いインパクトを与える可能性のある基本技術の一つである。IT（情報技術）やバイオテクノロジーも、ナノテクを抜きにしては十分な成長が期待できないだろう。言ってみれば、すべての産業の共通基盤技術である」^{文献1}と危機感を募らせる人もいる。

現在のナノテクブームは、クリントン大統領のNNI（国家ナノテクノロジー計画）から始まった（2000年）。このNNIは、日本が強いといわれているハイテク製造業に対抗し、10～20年後の米国産業の国際競争力強化を目的として構想されたアクションプランであると考えられる。

NNIの核心は、ナノテクを「原子・分子を、設計指針に基づき、ナノ（ 10^{-9} メートル）スケールに積み上げ、意図した機能を発現させる技術」ととらえ、この推進には「単なる現状の微細化とは異なる発想（ボトムアップ手法）が要求される」^{文献2}としたことにある。つまり、ナノテクの革新性は、半導体メモリーや磁気ディスクなどの微細化・精密化技術の推進に際して、従来のトップダウン手法にとどまっていたはずや遭遇する限界を、ボトムアップ手法を取り入れることで、乗り越えようとする点にある。

実際、ボトムアップというパラダイムのもとで、物質、材料自体やその機能を人工的に作り出すという考え方は、次世代のITを支える機能材料、新規エレクトロニクスデバイス分野で、必要性が高まっている。言い換えれば、新しいエレクトロニクスデバイスを微細加工だけによって作製するのではなく、原子や分子を単位として組み上げるといった方法は、今後の機能材料やデバイスの進歩に不可欠なのである。

そればかりではない。例えば、ヒトゲノムの解読が日米欧の協力のもとで一応の完了をみて、タンパク質解析やゲノム創薬、テーラーメイド医療に移行しつつあるポストゲノム分野でも、ナノスケールからの積み上げ、つまりボトムアップが有用な手法となりつつある。

それゆえ、微細化の既存技術であるトップダウン技術と新しく発展させるべきボトムアップ技術との融合をもたらすナノテクは、アトム・ビット・ゲノム（物質、情報、遺伝子）を貫く基盤技術ととらえることができる。

ナノスケール構造の持つ新規特性や、ボトムアップ手法に基づく機能材料・デバイスの開発は、決して未来の夢物語ではなく、すでに足元で進展しつつある。すなわち、ナノテクによる先端技術のパラダイム転換は着実に進行している。この成果を自らの事業に活用できる時期は、予想以上に間近に迫っているのである。実際、米国ではナノテクを新事業創出の好機ととらえ、新しい事業に挑戦するベンチャー企業が続々と誕生している。

また、ナノテクの多くの先人たちが日本にいたことも確かである。しかし、これらのポテンシャルを事業として具現化するシ

システムは未整備であり、こうしたシステムの構築こそ、わが国における重要な課題といえる。

個々の企業においてもパラダイム転換という認識のもと、長期的戦略として積極的に、ナノテクの備えている多様性と普遍性を踏まえ、事業戦略を作り出すことが重要になっている。

以下、第Ⅱ章では、NNIとして集大成された米国でのナノテクへの取り組み、およびそれに対応する日本の動きを概観する。第Ⅲ章では、ナノテクの技術的エッセンスと進歩の背景を説明する。

第Ⅳ章では、ナノテクについての概念やテクノロジーを生み出した先人たちについて紹介する。ここでは、NNIによって描かれた有望な応用事例に関し、日本にも多くの隠れた先人たちがいることを示す。また、いくつかの実例を通じ、ナノテクの技術的特徴を浮き彫りにする。

第Ⅴ章では、先人たちの実績を参考にしつつ、ナノテクのインパクトについて述べ、さらにボトムアップ手法の現状を紹介する。第Ⅵ章では、ナノテクを効果的に推進するための課題、特に研究開発マネジメントの変革を提案する。最後に第Ⅶ章で、まとめとして、民間企業におけるナノテクとの付き合い方について提言する。

Ⅱ NNIの衝撃と日本の対応

1 ナノテクの震源地米国

(1) クリントンの演説

米国のクリントン大統領は、任期が残り1年を切った2000年1月21日、後に紹介するファインマン教授をはじめ数多くの著名な学者を輩出したカリフォルニア工科大学

において、歴史的な演説を行った。

「私は5億ドルの予算を投入し、国家ナノテクノロジー計画を最優先順位で推進する。(ナノテクは)物質を原子・分子レベルで操作することに基づいている。その可能性を想像してみたい。(ナノテク推進計画が成功裏に進めば)鋼鉄よりも10倍も強く、しかも非常に軽い材料が実現する。国会図書館にあるすべての情報を記録するのに角砂糖の大きさのデバイスがあれば十分である。ガンの早期発見は、(ほんの初期段階の)数細胞段階で可能となる。こうした夢を実現するためには20年、あるいはそれ以上かかるかもしれないが、連邦政府は責任をもって推進することを決意した」^{文献2}。

20世紀末の技術転換期において、国民に知的フロンティア開拓者のプライドを与える格好のテーマとして、ナノテクが選ばれたのであった。

(2) NNIの策定

クリントン大統領の演説で初めて公にされた、国の戦略としてのナノテク推進、すなわちNNIを策定するために、産業界、学会、政界を巻き込んだ緻密な議論が4、5年間にわたって続けられていた。ホワイトハウスの国家科学技術会議は、各省庁の次官クラスで構成される技術委員会のもとに、各省庁数人の代表者から構成される「ナノサイエンス・工学・技術に関する委員会」を1998年9月に設置した^{文献3}。

同委員会は、産学の有識者を集めた研究会やフォーラムの開催を通して、計画原案の緻密化、具体化を図った。この計画策定において重要な役割を果たしたのが、ロヨラ大学の世界技術評価センターが1996～98

年に行った、ナノテク研究水準の国際比較調査である。

(3) ナノテク研究水準の国際比較

この調査では、レンセラー工科大学のリチャード・シーゲル教授を委員長として、大学（委員長を含めて4人）、産業界（4人）から専門家を集めたチームが編成された。チームメンバーは日本（18カ所）、欧州（6カ国、16カ所）などの関連研究機関を直接訪問し、ナノテク技術に関するヒアリングを実施した。その成果として、米国、欧州、日本のナノテク研究の現状をまとめ、さらに彼らの主観的評価ではあるが、各国のナノテク開発レベルの比較優劣表を提出した（表1）。

これによると、ナノ構造の製造やアセンブリ技術、触媒技術（表面活性材料）に関しては米国が最も強く、次いで欧州、日本の順である。また、バイオ的アプローチや応用技術、分散や表面コーティング技術では米国、欧州が同水準で、日本がそれに続く。一方、ナノデバイス（半導体や磁性・光デバイスなど）やナノ複合材料（高強度・軽量金属やセラミック、高性能磁石など）では日本がリードしており、欧州、米国がそれに続く。

(4) NNI予算の内容

NNIでは、2001年度（2000年10月～2001年9月）に、ナノテク推進のため、連邦政府予算4億9500万ドルを投資することが提案されている（次ページの表2）。その事業別内訳をみると、基礎研究と挑戦的研究（グランドチャレンジ）に62.6%、COE（中核研究拠点）の新設とそのネットワーク化、既存研究機関のインフラ整備に

表1 ナノテクノロジーの米国、欧州、日本のアクティビティ比較

技術	レベル		
	1（最も高い）	2	3
合成技術およびアセンブリ	米国	欧州	日本
バイオからのアプローチと応用	米国、欧州	日本	
分散とコーティング	米国、欧州	日本	
表面活性材料（触媒など）	米国	欧州	日本
ナノデバイス	日本	欧州	米国
ナノ複合材料	日本	米国、欧州	

出所) R. W. Siegel, E. Hu, M. C. Roco, WTEC, Loyola College in Maryland ed. "Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study," Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN), Sep. 1999より作成

31.7%が配分されている。加えて特記すべきは、大学がナノテク研究開発の中心となっていることである（予算配分でみると7割）^{文献2}。

また、この予算配分を省庁別でみると、NSF（全米科学財団）への配分が非常に多い。次いで、国防省とエネルギー省の比率が高い。これらの資金は、大学や企業に基礎研究を委託するのに使われる。

一方で、ATP（先端技術開発プログラム）として次世代半導体のSEMATEC（半導体製造技術コンソーシアム）や、高性能磁気ディスクの研究開発を進めているNIST（国立標準技術研究所）を傘下につつ商務省の予算配分が少ない。

また、米国のバイオ研究では主要な役割を担っているNIH（国立衛生研究所）への予算配分も少ない。ちなみに、このNNIにおけるNIH予算（2002年度45億ドル）は、連邦予算（同231億ドル）と比較しても極めて小規模である^{文献4}。

上述したように大学への予算配分が多いことは、NNIが、ナノテクでの中核技術はボトムアップ技術であるとみなし、それに関連した長期的基礎研究に集中すべきだと認識していることを示唆している。一方で、

表2 NNI（国家ナノテクノロジー計画）関連の連邦政府支出研究開発費の内訳

〈事業別〉	(単位：百万ドル)					
	基礎研究	グランドチャレンジ (挑戦的研究)	COE、ネット ワークの構築	研究インフラ の整備	社会倫理・制度、 教育制度	全体
2000年度 ¹⁾	87	71	47	50	15	270
2001年度	177	133	77	80	28	495
〈省庁・機関別〉	(単位：百万ドル)					
	NNI 予算			連邦政府科学技術予算		
	2000年度	2001年度	2002年度	2000年度	2001年度	2002年度
NSF（全米科学財団）	97	217 (150)	174	3,897	4,416	4,472
国防省	70	110 (110)	133	4,541	4,981	5,086
エネルギー省	58	94 (93)	97	4,353	4,910	4,682
NASA（航空宇宙局）	5	20 (20)	46	6,389	6,957	7,038
商務省	8	18 (10)	17.5	819	809	711
NIH（国立衛生研究所）	32	36 (39)	45	17,827	20,361	23,112
合計	270	495 (422)	518.9 ^{注2)}	83,138	90,010	95,253
うち基礎研究				19,421	22,018	23,352
応用研究				18,466	20,734	21,553
開発				40,524	42,594	45,954

注1) 2000年度は実際、2001年度、2002年度は要求ベース（ただし、カッコ内は実際の政府予算）
 2) NNIにおける2002年の合計には、法医学用DNAチップの研究を中心とした法務省の140万ドル、環境浄化などの研究を中心とした環境庁の500万ドルが含まれる
 3) 連邦政府科学技術予算の合計は、政府負担の全研究費を示す
 4) COE：中核研究拠点
 出所) National Science and Technology Council, "National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan," June 2000, "National Nanotechnology Investment in the FY 2002 Budget Request by the President" (<http://nano.gov/2002budget.html>) などより作成

商務省およびNIHへの予算配分が少ないのは、次世代半導体技術や情報蓄積技術などのトップダウン技術やバイオ技術をナノテクの枠外としているわけではなく、これらトップダウン技術は、基本的に民間に任せるべき段階であると判断していること、さらにNIHがすでに進めているバイオ関連研究資金との重複は避けるべきとの意向が働いたことが推測される。

(5) インフラ整備と人材育成

またNNIは、ナノテクの長期性にかんがみ、次の時代を担う人材の育成とそのためインフラの整備に注力していることにも留意する必要がある。NNIの5年間のマイルストーンにも、そのことが強く反映されている。

実際、このマイルストーンには、①2003年までに先述のCOEを整備し、ナノスケールの計測・製造装置を設備した研究センターを10ヵ所新設する、②2004年までにナノスケールの性能評価、操作、デバイスの標準システムや原子分解能を有する物理・化学的3次元計測手法を開発する、③2005年までに全国の半数以上の研究者や学生がネットワーク化されたCOEの研究設備を利用できる環境を整え、研究者の育成に当たる――ことが目標として明記されている。

すでに、NSFの支援のもとに、スタンフォード大学など全米の5大学のCOEを結んだネットワークとしてNNUN（国立ナノ製造ユーザーネットワーク）が構築されている。ちなみに、このNNUNの使命としては、すべての大学、国公立研究所、企業の研究

者・技術者や学生に対し、最先端のナノ製造技術を提供することが主張されている。

2 日本の対応

さて、上記のような米国に対して、日本はどのように対応してきたのか。

(1) NNIへの対応

わが国では、NNIが提案される以前から、第1期（1996～2000年度）の科学技術基本計画に基づき、5年間にわたり総額17兆円の研究投資がなされ、ナノテク関連分野でも優れた先駆的な成果をあげていた。しかし、それぞれの研究開発は、統合的ではなく、むしろ個別的に実施された。そのため、ナノテクが多岐の先端技術分野の共通基盤技術であり、研究開発、技術開発にパラダイム転換をもたらす基本的概念であるとの発想には至っていなかったと考えられる。

そうした状況のなかで、NNIの発表に対し最も機敏に反応したのは産業界、特に経団連であった。「『(NNIで定義されるナノテク分野での)日本の研究開発水準は世界のトップレベルにあり、今後ともリードできる分野。バイオの二の舞いは絶対さけるべきだ』(金井努日立製作所会長)との危機感」^{文献5}を持ち、ナノテクの一層の推進を政府に強く働きかけた。

(2) 科学技術会議の対応

(2000年3月～2001年4月)

上記を含め、次期科学技術基本計画の策定を科学技術会議に諮問した昨年3月から今年4月までについて、経団連を中心とした産業界の動き、および予算策定を中心とした官庁の動きを追いながら（次ページの表3）、わが国の主な対応について述べる。

経団連は、2000年5月16日に「需要と供給の新しい好循環の実現に向けた提言——21世紀型リーディング産業・分野の創出」を発表し、その中で、強化すべきニューフロンティア技術の1つとして、ナノテクを掲げた。翌月には、産業技術委員会（委員長：金井努氏）の下にナノテクノロジー専門部会（部会長：中村道治日立製作所理事）を新設して、「産業界の総意を取りまとめる」作業を開始した^{文献6}。

そして、「ナノテクノロジー研究の推進が、IT分野をはじめとしてわが国の産業競争力の強化に不可欠であるとの認識に立ち、産業競争力会議や科学技術会議の場において、その重要性を訴える」^{文献7}とともに、「新内閣に望む」（7月6日）、「21世紀を拓くナノテクノロジー——ナノテクノロジーに関する経団連の考え方」（7月18日）を発表し、ナノテクを国家的プロジェクトとして推進すべきことを提案した。

ここでの主張は、①ナノテクは、IT革命の進展を左右する基盤技術である、②次世代の産業、社会に大きな影響を与える基盤技術である、③基礎的・基盤的研究開発への長期的な重点的取り組みが必要であるとともに、その成果のタイムリーな実用化が重要である、④国家戦略のもとに、関係省庁や産官学が一体となって取り組むことが不可欠である——というものだった。

各省庁は、これらの動きに歩調を合わせ、2001年度の概算要求として、ナノテク関連の新規施策を盛り込んだ。例えば、文部科学省は、「ナノ物質・材料研究の推進」を強化し、総額149億円（前年度123億円）を要求した（「先端科学技術をリードするナノテクノロジーの推進」〈32.5億円〉の新規施策を含む）^{文献8}。

表3 ナノテクノロジーに関する日本の政府、産業界の動き

政府（科学技術会議など）の動き	産業界（経団連など）の動き
2000年3月24日 〈科〉次期科学技術基本計画を諮問 6月29日 〈科〉「平成13年度科学技術振興に関する重点指針」を決定。「物質・材料分野」を追加 8月31日 〈文、経〉2000年度予算の概算要求を提出 9月14日 〈科〉「ナノテクノロジーの戦略的推進に関する懇談会」を設置。目標・重要分野設定を開始 12月14日 〈科〉「ナノテクノロジーの戦略的推進に関する懇談会報告書」を発表 12月26日 〈科〉次期科学技術基本計画について答申。ナノテク・材料分野を重点分野に指定 2001年4月19日 〈科〉重点分野推進戦略専門調査会ナノテクノロジー・材料プロジェクトを設置	2000年5月16日 〈連〉「需要と供給の新しい好循環の実現に向けた提言」を発表。強化すべきニューフロンティア技術として、ナノテクを掲げる 6月下旬 〈連〉産業技術委員会の下にナノテクノロジー専門部会を新設 7月6日 〈連〉「新内閣に望む」を発表。産業技術力の強化策として、ナノテク推進を提言 7月18日 〈連〉「21世紀を拓くナノテクノロジー——経団連の考え方」を発表 9月29日 〈電〉「半導体先端技術共同開発計画」発表 2001年3月27日 〈連〉「ナノテクが創る未来社会〈n-Plan21〉」を発表

注）〈科〉科学技術会議、〈文〉文部科学省、〈経〉経済産業省、〈連〉経団連、〈電〉日本電子機械工業会

一方、経済産業省は新規に、「精密高分子技術」「ナノガラス技術」「ナノ金属材料」「ナノ粒子の合成と機能化技術」「ナノコーティング技術」「ナノ機能合成技術」「ナノ計測基盤技術」「材料技術の知識の構造化」の8つのプロジェクトから構成される「材料ナノテクノロジープログラム」として50億円を要求した^{文献9}。

また経済産業省は、集積回路の最小線幅の目標値として2004年度に70nm（ナノメートル）、2007年度に50nmレベルの技術確立を目指す「半導体デバイスプロセス技術開発（MIRAIプロジェクト）」事業として60億円を要求した。

産業界でも9月26日、「半導体先端技術共同開発計画（あすかプロジェクト）」が発表された^{文献10}。これは、100～70nmの設計技術、デバイスプロセス技術の開発を目

指して、半導体メーカー11社が5年間で総額760億円の研究開発費を投入する画期的なプロジェクトである。

こうしてトップダウン的ナノテク、特に半導体超微細化技術の研究開発に関しては、政府および産業界の共同開発体制が確立された。

以上の状況を集大成したといえるのが、2001年3月27日に発表された経団連の「ナノテクが創る未来社会〈n-Plan21〉」である。そこでは、①5～10年先の実用化・産業化を目指すフラッグシップ型プロジェクト（次世代半導体技術、テラビット情報記録技術、ネットワークデバイス）、②革新的な基盤技術を軸としたチャレンジ型プロジェクト（プロセス・マテリアル、バイオナノシステム、ナノデバイス、ナノ計測、ナノ加工、ナノシミュレーション）、③基

礎研究（ナノ構造における物性探索・機能解明、計測、理論計算解析）——に重点投資すべきことを提言している^{文献11}。

現在、科学技術会議「重点分野推進戦略専門調査会ナノテクノロジー・材料プロジェクト」（主査：白川英樹筑波大学名誉教授）において、2002年度予算概算要求に向けた重要施策、資源配分をとりまとめるために、「トップダウン手法とボトムアップ手法を融合させる技術を作り出すという重要課題」^{文献12}の具体化の検討が進められている。その成果は、2002年度概算予算要求の重要科学技術施策に反映される予定である。

以上が、NNI発表に続いた日本側の対応のあらましである。

III 今なぜナノテクなのか

1 「ナノ」とは10億分の1

以下では、これまで説明抜きで使ってきたナノテクについて、少し説明を行う。

ナノテクで使われている「ナノ」は、単位系で使われている接頭語の1つで、小さくなる方では、1000分の1がミリ（m）、その1000分の1、つまり100万分の1がマイクロ（ μ ）、さらにその1000分の1がナノ（n）である。すなわち、ナノは10億分の1を意味する、単位につける接頭語である。ナノテクでのナノは長さの単位であるメートルの接頭語として使われているので、ナノテクを厳密にいうとナノメートル（nm）テクノロジーとなる。

ここで、いくつかの例を示そう。よく小ささの例として出される髪の毛の太さが50ミクロン（ μm ）、赤血球や白血球が2～5 μm 、ミトコンドリアが100nm、ウイル

スが10nm、DNAの二重らせんの径が2 nm、水の分子で酸素と水素の結合の長さが0.1nmである。一般的にナノテクの対象は、0.1nmから100nmの範囲である。したがって、上記の例では水の分子からミトコンドリアの範囲に相当する。

一方、人間の目に感じる光（可視光）の波長は400～700nmである。したがって上記の定義では、可視光の波長はナノテクの範囲よりも大きなサイズということになる。光は波長以下の分解能を持つことができないので、100nm以下のナノスケールの構造は、可視光を用いて直接観測することはできない。光で測定する場合には、真空紫外（100nm）から軟X線（0.1nm）が必要となる。

2 ナノテク誕生の背景

前述したように、NNIではナノテクを「原子・分子を、設計指針に基づき、ナノスケールに積み上げ、意図した機能を発現させる技術」と定義している。こうしたナノテクの誕生には、主として3つの背景がある。

その第1は、ナノスケール構造を直接観察できる測定手法が開発されたことである。上で述べたように、光学的手段ではナノ構造を直接観測することはできない。それに代わるものとして、後で触れる「走査型プローブ顕微鏡（SPM）」「透過型電子顕微鏡（TEM）」などが開発され、結晶構造、DNA等のナノ構造を直接的に見られるようになったし、また後述するフラウンhoferなど新しいナノ構造の発見につながった。その結果、ナノ構造に基づく特異な機能が見出され、その機能を材料、デバイス、タンパク質合成、ゲノム創薬などへ応用する可能

性についての期待が高まった。

第2は、半導体の微細加工技術の進歩により、単位デバイスの大きさがナノスケール以下になったときに、本質的な技術的困難が発生すると予見されたことである。

より具体的に述べると、DRAM（半導体メモリー）の集積回路の微細化が進み、メモリーを構成する単位的なデバイスであるトランジスタの大きさがナノメートル領域に近づくと、多くの技術的困難が発生することが予見されている。これらの困難を解決するには、単位的なデバイスとして新しいデバイス、例えばナノスケールの「単電子トランジスタ」を開発し、それらを集積することが必要である。このようなナノスケールのデバイスを集積化するには、これまでのトップダウンアプローチとは抜本的に異なるアプローチへと転換することが必要と認識されている。

NNIでは、上記の従来とは抜本的に異なるアプローチをボトムアップアプローチと名づけている。このボトムアップアプローチの有効性と革新性についての認識が、ナノテク誕生の3つ目の背景である。

すなわち、ナノスケール構造になるとマクロ構造では見られない新機能が発現し、後述するように、そのナノスケール構造を単位として、機能を保持しながらマクロ構造へと積み上げる手法、つまりボトムアップアプローチを実現する手法は、バイオ、材料、情報関連デバイスなどの先端技術分野に共通して有効である。この複数の分野に共通して有効という普遍性こそが、ナノテクの革新性なのであり、ナノスケールでの測定手法の開発、半導体微細加工での技術的困難の発生と並んで、ナノテク誕生の3番目の背景といえる。

IV ナノテクの先人たち

1 概念の先人たち

(1) ファインマンの示唆

NNIには、量子電磁気学で優れた業績をあげたカリフォルニア工科大学のリチャード・ファインマン教授（朝永教授、シュビンガー教授と共に1965年にノーベル物理学賞を受賞）が、世に先駆けてナノテク概念を提唱したと記されている。彼は、今では有名となった「ボトム（ナノスケール領域）には（知的興味をそそる未知の現象が数多く残されており、研究の対象とすべき）多くの余地がある」^{文献13}と題した講演を、1959年にカリフォルニア工科大学で開催された米国物理学会で行った。

この講演においてファインマン教授は、人類の目指すべき知識・技術のフロンティアは、当時の物理学のフロンティアである素粒子論とか重力論だけにあるのではなく、原理的にはすべて理解できたと考えられているナノサイズの領域にも存在していることを指摘している。

加えて、実用性や社会に与えるインパクトの大きさの面から考えると、ナノサイズ分野の方が研究対象としてむしろ重要であることも主張している。その具体的な例示として、原子1000個程度で1ビットを担う高密度メモリー、ナノ構造の機能を利用した超高速コンピュータなどをあげている。NNIの示す長期ターゲットと重なる部分がほとんどであり、ファインマン教授の先見性に驚嘆の感を禁じえない。

(2) ドレクスラーの分子マシン

その後、フォーサイト研究所のエリック・ドレクスラー博士が、1986年に著した

『創造する機械——ナノテクノロジー』^{文献14}において、分子ナノテクノロジーを提案している。彼は、DNA（デオキシリボ核酸）からRNA（リボ核酸）、リボソーム（細胞内でのタンパク質合成の触媒反応を担う）を経てタンパク質が合成されてくるバイオの知見をベースとして、タンパク質を原子レベルから合成するロボット、「分子マシン」を構想する。

この概念は、MEMS（超小型電気機械システム）やマイクロマシンの研究に大きな影響を与えたといわれているが、あまりにも先駆すぎて「クレージー」と解釈され、現在のナノテクのような広い賛同を得るには至らなかった。

2 テクノロジーの先人たち

ファイマン教授の講演から半世紀ほど経過した現在でも、ナノスケール領域には、われわれにとって未発見の新構造、それに基づく新現象が多々残されている。

（1）大澤のフラーレンの予言

それをシンプルな形で見せてくれたのが「サッカーボール型分子フラーレンC60」の発見である。

炭素（元素記号C）の構造はダイヤモンド型、黒鉛（グラファイト）型、非晶質（アモルファス）型の3つが知られていた。しかし、1984年9月、英国サセックス大学のハロルド・クロトー教授、米国ライス大学のリチャード・スモーリー教授、ロバート・カール教授は、ナノスケールの新規な炭素構造として、サッカーボール状の球形構造（炭素数60個で、正五角形12個と正六角形20個からなる閉殻構造）を持つ第4の構造を発見し、フラーレン（C60を含め、

閉殻構造を持つ炭素ファミリーの総称）と名づけた（彼らはこの業績により、1996年度のノーベル化学賞を受賞した）。

実は、フラーレンの存在を予言していた日本人研究者がいたのである。1971年、当時京都大学助手だった大澤映二豊橋技術科学大学教授は、近畿大学の吉田善一教授と共著で『芳香族性』（化学同人）を上梓し、その中でサッカーボール分子C60を予言した。しかし、「日本語で書いたためもありますが、ほとんどといってよいほど反響はありませんでした」^{文献15}と、大澤教授はスモーリー教授との対談で述懐している。

それに対してスモーリー教授は、バックミンスター・フラーというドーム構造^{文献16}で有名な建築家、バックミンスター・フラーの名前になぞらえてフラーレンという名前を付けたことが大きな反響を呼んだ理由だと述べている。そして現在、後述するカーボンナノチューブについて彼らは、「バックミンスター・フラー」と呼ぶことに固執している（科学の世界ではゴッドファーザー、つまり名付け親であることがそのオリジナリティを保証するがゆえに、名前をめぐるしばしば国際的な競争が起こる）。

（2）フラーレンの発見

ここで、フラーレン発見についての話題に戻る。スモーリー教授とカール教授は、シリコンやゲルマニウムにレーザーを照射して、蒸発してくるクラスター（原子集団）を質量分析装置にかけ、特定の分子量を持つクラスターを探索する研究を行っていた。その装置に目をつけたのが、星間物質（宇宙空間のほぼ真空状態において存在する物質）を研究していたクロトー教授であった。彼は、星間物質中に新たに発見し

た大きな質量を持つ炭素クラスターを人工的に作製することを意図し、スモーリー教授に共同研究を申し込んだ。そして、この要請への対応は1年半後になされた。

クロトー教授からの共同研究に対する準備として、黒鉛板を用いた炭素クラスターに関する予察的な実験が行われた。実は、その予備実験で質量分析装置を操作していた大学院生が、炭素数60に対応する非常に強いピークが存在に気づいていた^{文献15}。しかし、クロトー教授らは小さい質量のクラスターに注目していたために大発見を逃した。同様のことが米国エクソン社の研究所でも起こっていたし、後にカーボンナノチューブを発見することになるNECの飯島澄男氏（名城大学教授を兼任）も、1980年に「タマネギのような球形」を電子顕微鏡で観測し、「六角形の他に五角形が12個必要だ」^{文献17}という論文を書いている。

つまり、炭素の新しい構造であるC60を見ていたが、新しい発見という認識はなかったのである。後にデータを見直して、スモーリー教授らはすぐにC60の存在に気がつき、第一発見者の栄誉に輝いた。

こうしたエピソードは、計測したデータの中に新しい発見があっても、それを認識することが難しいことを示す。新発見は、新しい知の交流による先入観の払拭が必要なのである。フラレンという物質の革新性が作り出したエピソードである。

（3）飯島のカーボンナノチューブ発見

C60が発見されると、炭素化学の分野は俄然活発になった。原子量70の分子（C70）や、それ以上の炭素数を持つ分子など、続々と新物質の発見が続いた。そして、1991年、今話題のカーボンナノチューブが

飯島氏によって発見される。

この発見をめぐるエピソードも、客観的といわれている実験、観察が既存のパラダイムにいかにつまられているかを如実に示してくれる。飯島氏が1995年5月9日に、ロンドンの王立研究所で行った「金曜講話」の講演「カーボンナノチューブ——人間の作った超微細チューブ」^{文献17}をもとに、発見の経緯を再現してみよう。

フラレン発見後、世界中の研究者がアーク放電法を用いて新しい炭素分子の発見に血眼になっていたが、すすとして析出される物質にこだわったために、フラレンしか発見できなかった。飯島氏はアーク放電の陰極である炭素電極に析出した炭素クラスターにも注目し、高分解能電子顕微鏡によりその中にフラレンとともに多くの針状結晶が存在することを見出した。これが、カーボンナノチューブの発見の瞬間である（1991年）。

そして、電子線回折法を用いて針状結晶構造を解析し、チューブの中に半径の小さなチューブが入り子になっている多層カーボンナノチューブ構造を明らかにした。1993年には、陽極の炭素電極に金属を加えることで、直径1 nmの単層カーボンナノチューブの合成にも成功している。

カーボンナノチューブは、不純物の添加などにより、電気伝導の性質を大きく変化させることができる。つまり、金属としての、半導体としての、あるいは超伝導材料としての性質を発現させることができ、それゆえ多様な応用が期待されている。

物質工学工業技術研究所（現経済産業省産業技術総合研究所）と昭和電工による「カーボンナノチューブの大量合成技術の開発」、グンゼ産業による「カップ型積層

構造ナノファイバーの量産開始」、伊勢電子工業による「電界放出型『超高輝度光源管』の開発」、IBMによる「世界初のトランジスタ技術の開発」、米国ベル研究所による「電界効果トランジスタ構造を用いた転移温度 -220°C の超伝導の実現」など、世界的に新発見が相次いでいる。

(4) 走査プローブ顕微鏡の発明

こうしたナノ構造を観測するための画期的な出来事が、1981年のゲラルド・ビニツヒ博士、ハインリッヒ・ローラー博士（IBMチューリヒ研究所）による、原子の像を直接「見る」ことのできるSTM（走査型トンネル顕微鏡）の発明であった。この業績により両博士は、電子顕微鏡の高分解能化に多大な貢献のあったアーネスト・ルスカ博士（マックス・プランク研究所）と共に1986年度のノーベル物理学賞に輝いている。

STMでは、先鋭な探針を試料表面に1 nm以下まで近づけ、試料と探針との間に電圧をかける。その際にトンネル効果により、試料と針の間に電流が流れる。針を走査しながら電流の変化を測定し、それを画像化することで、原子1個の解像力を有する像を得ることができる。さらにビニツヒ博士らは、STMの原理を拡張し、トンネル電流の代わりに探針と試料表面の間に働く原子間力を利用したAFM（走査型原子間力顕微鏡）を開発した。

STM、AFMおよび近接光場を用いたSNOM（走査型近接場光学顕微鏡）などは、SPM（走査プローブ顕微鏡）と総称され、原子像の観測に新しい世界を切り開いた。まさしく、このSPMの登場こそ、ナノスケールの世界を現実のイメージとした契

機であり、現在ではSPMはナノテク研究に必須の研究手段となっている。

(5) 量子蜃気楼

また、SPMで原子像観測に使われるトンネル電流、原子間力は、原子を移動させるのに十分なエネルギーを持っている。その結果、SPMは単なる原子像観測の手段にとどまらず原子一個一個を操作する手法として用いることができるようになった。

こうした原子操作を用いて、世界の科学者、研究者を魅了させた実験がIBMアルマデン研究所のドン・アイグラー博士によって行われた。彼は、STMを使って、35個のキセノン原子を、低温に保持したニッケル単結晶表面に1つずつ配列させて「IBM」の原子文字を書くことに成功した。人類史上、最小の文字である。

さらにアイグラー博士は、数十個のコバルト原子を並べて銅表面上に楕円リング（長径20nm、短径10nm）を作製し、その楕円リング内に閉じ込められた電子の密度が、あたかも水面のように波打つことを見出した。ナノスケール領域での電子は、量子力学が予言する通り、波の性質を持つことが直接的に示されたわけである。

その成果は1993年に発表されたが、最近、その研究をさらに進展させ、コバルト原子が囲む楕円の1つの焦点位置に、1個のコバルト原子を置き、その原子にエネルギーを注入した。その結果、コバルト原子を中心とした電子の波が発生し、その電子波はコバルト原子の壁で反射され、お互いに干渉して、コバルト原子が存在していないもう1つの楕円焦点位置で強いピークを持つことを発見し、その現象を「量子ミラージュ（蜃気楼）」と名づけた。

この実験は、楕円の焦点にあるコバルト原子から発した情報が、電子波によりもう1つの楕円焦点に伝達されたことを示しており、ナノスケールでの情報伝達の新しい方法を提案したと評価できる。マクロの世界では、光波を用いた通信、すなわち光通信が全盛だが、ナノサイズの領域では、電子波による通信が実現する可能性がある。

3 日本の先人たち

(1) 近藤効果

実は、上記の量子ミラージュには日本人の研究成果が深く関連している。つまり、アイグラー博士らは、ミラージュ現象は「近藤効果」によって説明できると述べているのである。日本人の名称がついた物理現象のなかで最もよく知られている「近藤効果」とは、温度を低下させると通常はそれとともに減少する金属の電気抵抗が、極低温で逆に増加するという効果である。

1964年に、近藤淳東邦大学名誉教授（当時電子技術総合研究所）は、こうした電気抵抗の増加は、伝導電子が金属中に含まれる磁性不純物により散乱を受けた結果であることを理論的に示した。この業績により、この電気抵抗増加現象は「近藤効果」と名づけられた。アイグラー博士によれば、量子ミラージュは磁性原子であるコバルトと伝導電子との相互作用の結果であり、近藤効果と同じ機構で発生しているという。量子ミラージュ効果の発見により近藤効果は、金属の電気伝導にかかわる基本的な理論であると再評価され、ノーベル賞受賞の可能性が再び高まってきたといえよう。

ナノテク分野は元来日本が強みを持つ分野であり、上記の近藤氏以外にナノテクの先人たちの中に数多くの日本人研究者を見

出すことができる。

以下では、ナノテクを構成する材料分野、情報関連分野、バイオ分野の各分野からいくつかの例を紹介しよう。

(2) 増本、井上の金属ナノ結晶

材料関連技術の代表として、増本健氏（元東北大学金属材料研究所所長、現電気磁気材料研究所所長）と井上明久氏（東北大学金属材料研究所所長）が開発した「アモルファス合金」、その発展としての「ナノ結晶合金」があげられる。両氏は、米国ISI社が制定した「引用最高栄誉賞」^{文献18}（研究者の客観的評価基準として重要視されている「サイテーションインデックス」すなわち、学術誌に掲載された論文が他の研究者の論文にどれだけ引用されているかを示す指数）において、それぞれ6位、2位と上位を占めている。

アモルファスは、原子の並び方に規則性を持たない物質構造である。結晶がエネルギー最低の安定状態であるのに対し、アモルファスはそれよりもエネルギーが高い準安定状態にある。このアモルファス状態は一般的に、物質を高温から急冷することで得られる。例えばアモルファス状態の金属は、高速回転する金属ドラムに溶融金属を吹き付けることによって作製できる。

このようにして作製されたアモルファス合金は、多結晶金属に比較して、強い、錆びにくい、磁化されやすいなどの優れた特徴がある。このアモルファス金属についての研究のなかで、先駆的実績をあげたのが増本氏らである。

1984年に、増本氏、井上氏は、組成およびアニール（焼き鈍し）過程を工夫することで、ナノ結晶が分散したアモルファス

合金を作り出し、ジュラルミンの3倍の強度を実現した。高強度実現のメカニズムは、金属の変形の原因となる結晶転位（原子配列の線状の乱れ）を結晶粒内へ抑え込んだことにある、と彼らは述べている^{文献19}。これは、ボトムアップアプローチによる結晶化の制御についての成功例であり、NNIのグランドチャレンジ（表4）にある鋼より強い軽量材料を実現する手がかりを与えたと評価することができよう。

（3）林のナノ粒子

上記と同様にボトムアップ技術の例であり、一部ではすでに事業化段階にあるのが、日本真空技術の林主悦氏らが開発した金のナノ粒子である。

金の融点は、通常は1063℃だが、ナノ粒子化し粒径5 nm程度になると融点が急激に低下し、3 nmでは527℃くらいで溶け始めることが発見されている。ナノ粒子では表面積の影響が大きく、バルク金属とは異なる融点を示すためである。こうしたナノ粒子を、互いにくっついて大きな塊にならないように工夫して一体化すると、マクロな状態でも低融点の特徴を保つことができる。すでに、この低融点という特徴を活かしたペーストが開発されており、プリント基板実装プロセスの低温化、高精細化の実現が期待されている。

（4）分子線薄膜成長——富士通のHEMTと伊賀の面発光レーザー

以上が材料分野についての例であり、次に情報関連分野の先人について触れる。

ナノスケール構造を情報関連デバイスに利用した例としては、HEMT（高速電子移動トランジスタ）および量子井戸構造半導

表4 NNIのグランドチャレンジの目標

- ①角砂糖サイズのデバイスに国会図書館の全情報が入る
- ②原子・分子から組み立てるボトムアップ技術（少ない材料で公害のない製造法）により、材料や製品を作る
- ③鋼より10倍強く、陸上・海上・空中・宇宙のすべての乗り物が軽量で優れた燃費を実現するために軽い材料を開発する
- ④今日の「ペンティアムIII」が遅く感じるような、数百万倍の性能のコンピュータを超小型トランジスタやメモリーにより実現する
- ⑤ガン細胞をわずか数細胞の発生段階で初期発見し、それを狙い撃ちする薬剤を開発する
- ⑥手頃なコストで環境の清浄化や飲料水を実現するために、空気や水からごくわずかな有害物を除去する
- ⑦2倍の性能を持つ太陽電池を開発する

出所) National Science and Technology Council, "National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan," June 2000より作成

体レーザーが代表的である。

電子を原子レベルの厚さの2次元領域に閉じ込めると、量子効果などにより電子の移動速度が大きくなるため高速デバイスが実現でき、かつ、電子の持つエネルギーを効率良く光へ変換できるため高機能の半導体レーザーが実現できる。

こうした構造を実現するための製法として、先駆的に開発が進められたのがMBE（分子線エピタキシー）法である。このMBEの開発は、2つの異なるモチベーションを背景として始められた。

第1は、江崎玲於奈博士らによるものである。トンネルダイオードに関する研究でノーベル物理学賞を受賞した江崎氏は、IBMワトソン研究所に移った後、直ちに、トンネル効果を起こす極薄の薄膜を作製することを目標として、MBEの研究を開始した。

第2は、半導体レーザーに関する開発に端を発している。半導体レーザーの最初の室温連続発振に成功したベル研究所の林厳雄氏（現日本工学アカデミー会員）、モートン・パーニッシュ博士、およびロシアのヨッフエ物理技術研究所のジョレス・アル

フェロフ博士ら（アルフェロフ博士は、半導体ヘテロ接合に関して業績をあげたクレマー教授、集積回路の発明者であるキルビー博士と共に、2000年のノーベル物理学賞を受賞した）は、その特性の抜本的な改善を図るために、急峻なヘテロ接合（異なる化合物半導体から構成される接合）を作製することを目的にして、MBEの研究を行っていた。

これらの研究はそれぞれ大きな成果を生み出しつつ、ナノテクの研究開発、技術開発に不可欠の手法として完成された。このMBEを代表とする原子レベル制御薄膜育成手法を用いて、富士通研究所によりHEMTが実用化された。このHEMTは、すでに衛星放送などで使われる高速電子デバイスとして広く実用化されている。また、伊賀健一氏（元東京工業大学教授、現日本学術振興会理事）の発明による面発光レーザーも、量子効果の利用により従来の半導体レーザーを高性能化し、将来の光通信用光源として最も適した性能を有していると評価が高まっている。

このようにナノ構造の情報関連デバイス分野への応用では、わが国が研究面でも、産業面でも、世界をリードする水準にあるといえる。

（5）柵の量子ドットレーザーと

中村の青色レーザー

ところで、上記のような技術は現在、電子を1次元（線）、さらには0次元（点）に閉じ込めるといった方向で研究が進められている。しかし、2次元構造を作製する場合はMBE法などにより比較的順調に成果が得られたのに比較すると、量子線、量子ドットの実現には多くの困難が伴い、現在

でも実用的な手法は開発されておらず、ナノテク分野での最優先開発課題の1つになっている。課題解決に向けては、主として2つのアプローチがとられている。

第1は、半導体プロセスで開発されてきた微細加工技術を用いることである。すなわち、2次元構造をMBE法などの極薄膜成長法で作製し、得られた2次元平面内のナノ構造を微細加工技術で形成する手法である。ボトムアップ手法とトップダウン手法の融合とみなすこともできる。この手法では、電子ビームおよびイオンビームを用いることで、研究レベルでは10nmレベルの微細加工が可能となっており、すでに1次元構造を持つ単電子トランジスタなどの作製に成功している。

第2のアプローチは、薄膜成長の際に、微粒子の析出など、あくまでも自己組織化によるボトムアップ的な手法を用いるものである。例えば、ガリウム・ヒ素薄膜中にインジウム・ヒ素ナノ結晶を析出させ、量子ドットとして機能させる手法が発明されている。すでに、こうした自己組織化薄膜を用いた量子ドット半導体レーザーが試作され、東京大学の榊裕之教授らにより理論的に予測されていた特性を示すことが確認されている。

日亜化学工業の中村修二氏（現カルフォルニア大学サンタバーバラ校教授）が発明したガリウム・窒素青色ダイオードにおいても、含まれるインジウムイオンが自己組織化され量子ドットを構成し、そのために発光効率が著しく高くなっているとのモデルが提案されている。もし、そのモデルが正しいとすれば、中村青色発光ダイオードも、無意識のうちにボトムアップ技術を応用していたということができる。

(6) 岸本のインターロイキン6

バイオ関連技術分野における日本人の代表者の1人が「引用最高栄誉賞」1位に輝いた岸本忠三大阪大学学長である。岸本氏は、ヒトの免疫において重要な働きを行っているインターロイキン6 (IL6) を発見している。NNIでも目標とされたガンの早期発見や治療薬の開発に貢献する成果である。

インターロイキン (IL) とは、「白血球と白血球の間をつなぐ」という意味で名づけられたものであり、細胞を活性化させる免疫の情報分子の1つである。その基本的な働きは、抗体の生産を誘導する情報分子であり、IL6が存在しないとウイルスが体内に侵入しても抗体が作られず、免疫不全となる。

最初IL6は、このような機能を持つ物質として発見されたが、18個見つかったILのなかでも多彩な働きをする生理活性物質であることもわかってきている。そして、IL6とIL6受容体 (レセプター) の結合を阻害する物質を作り出すゲノム創薬により、新たな治療が確立されつつある。IL6が関連する免疫分野には、ナノスケールの分子の立体構造自体が機能を発現するという、ナノテクの主要な特徴を明確にみることができる。

(7) ナノテクとノーベル賞

以上に示したように、材料分野、情報関連分野、バイオ分野のナノテクが関連する分野全般において、わが国の研究者は多くの先駆的成果を上げている。このことは、わが国の、ナノテクにおける研究ポテンシャルの高さを実証しているといえる。

次期科学技術基本計画には「50年間にノ

ーベル賞受賞者30人程度」が具体的目標として掲げられている。この目標の実現に、量子ミラージュに関連する学術基礎を提供した近藤氏をはじめ、ここに紹介した何人かを含む、ナノテクの先人たちが貢献するものと期待される。

V ナノテクのもたらすもの

ナノテクの技術的側面の要点に関しては第III章で述べたが、ここでは上記の先人たちの例も踏まえて、より詳しくナノテクの持つ技術的革新性について述べる。

1 先端技術分野へのインパクト

(1) ナノテクの普遍性

前章の先人たちの例で示されているように、ナノスケールの構造では、マクロスケールとは異なる新規な特性が発現する。

材料分野では、フラーレン、カーボンナノチューブ、金属超微粒子、情報関連分野では、量子蜃気楼、量子ドットレーザー、バイオ分野では、インターロイキンを含む免疫機能などにおいて、ナノスケールの構造に独特な特性が観測されている。

加えて、材料分野、情報関連分野、バイオ分野に共通して、ナノスケール構造の機能を損なうことなく、マクロなサイズまで積み上げ、ナノスケール構造の機能をマクロなスケールで実現するボトムアップ手法が有効であることが示されている。言い換えれば、ナノテクは、元来独自に進歩してきた各分野間に邂逅の場を提供し、研究開発を進めていくうえでの共通な指導原理を与えるものと認識することができる。

前記ではボトムアップ手法の重要性を主張したが、もちろん、現状の情報関連技術

の進歩などを支えているトップダウン手法の重要性を否定しているわけではない。一見対峙しているようにみられる「トップダウン」と「ボトムアップ」であるが、ナノテクが提供する邂逅の場で新しい指導原理を共有し、両者が融合した新しいパラダイムを生み出す可能性がある。

1つのパラダイムにとどまっているかぎり、やがては乗り越えがたい壁に突き当たることになる。新たなパラダイムが創生されて初めて、その壁を乗り越えるブレークスルーが達成されることを、多くの歴史の事実が示している。

(2) 材料技術分野へのインパクト

新しいパラダイムは、先端技術のフロンティアにだけ影響を及ぼすわけでない。ナノテクのインパクトは、進歩が停滞していると思われる分野に、思わぬ展開をもたらすことにも見出すことができる。むしろ、既存のパラダイムのもとで停滞しているような分野へナノテクを適用することで、短期的に目に見える成果が生み出せる可能性が大きい。

特に成果が期待されるのは、材料分野への展開についてである。現状の材料の開発は、電子分野および医用・薬剤への応用を目指したファインセラミックス、ニューガラス、ファインケミカルなどを旗印に開発が進められ、高純度化などのトップダウン的な手法により、大きな成果を上げてきたが、一部に手詰まり感が出ている。ニーズは明確であるが、それを実現するシーズが不足し、開発の方法論が未開拓であるためと考えられる。

こうした状況に、ナノテクの手法・考え方をもち込むことにより、大きなブレーク

スルーを生むことが期待される。つまり、ナノ構造は新しい機能材料に関するシーズの宝庫であるし、このナノ構造というシーズをボトムアップ手法と組み合わせれば、材料開発の革新的な方法論になりうるからである。先に紹介した、ナノ粒子応用製品や超微粒子を分散させた超硬金属はその例だし、カーボンナノチューブもこのカテゴリーに入る。

また、カーボンナノチューブの発見、新機能の出現自体はナノテクそのものだが、その作製技術は既存技術に属する。実際、産業化への動きはすでに始まっている。他にも、このようなケースが潜在されていることは十分に予想されよう。

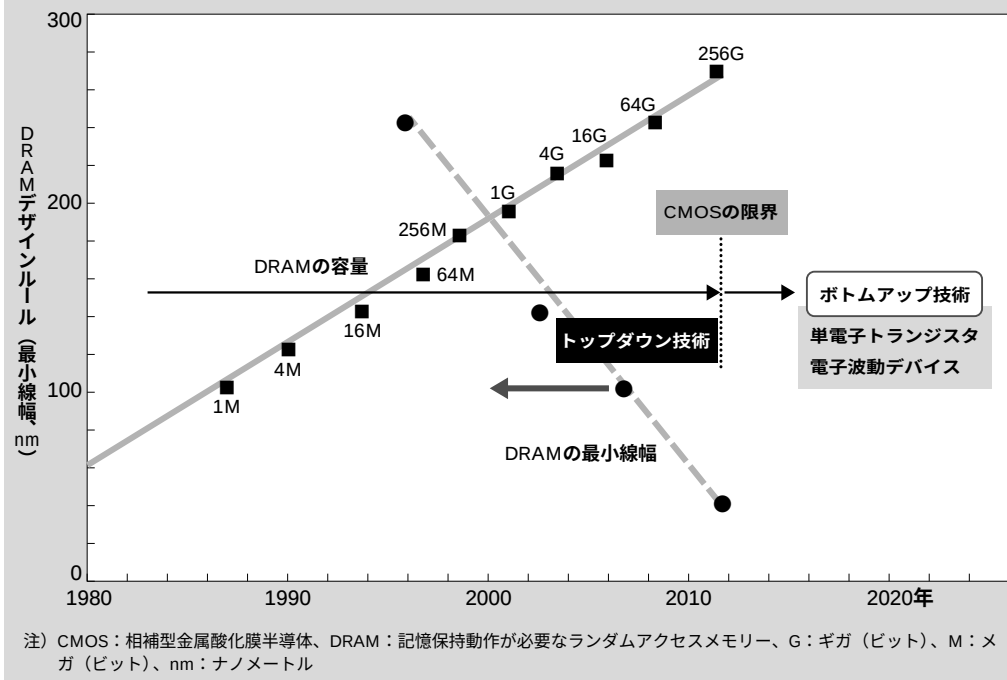
(3) 情報関連技術分野へのインパクト

現在の集積回路は、後で述べるようにボトムアップ的と解釈できる方法で作製されたシリコン単結晶を用い、トップダウン的な微細化手法により作成されている。この点を踏まえると、集積回路技術分野ではすでに、部分的ではあるにせよトップダウンとボトムアップの融合が実現しているとみなすことができる。この現状に対しナノテクは、この部分的融合を超えた、さらに高度な融合を目指している。

半導体メモリー（DRAM）のロードマップでは、DRAMの最小線幅が2005年に100nm、2008年に70nmに達するとされている（図1）。先に述べたように、このように微細化が進み、メモリーを構成する単位デバイスのサイズがナノメートル領域に近づくにつれ、多くの技術的困難が存在することが予見されている。

例えば、電子の波動としての性質が顕著になり、その結果、現状の集積回路の単位

図1 半導体メモリー（DRAM）のロードマップ



デバイスである電界効果型トランジスタが機能しなくなる、あるいは、絶縁膜が薄くなりすぎて、絶縁体として機能しなくなるなどの可能性が予見されている。

もちろん、電子の波動としての性質が顕著に表れないデバイス構造を考案し、さらに、より薄い膜厚で機能する絶縁膜材料を開発することで、現状の微細化路線、つまりトップダウン手法を使う路線の延命を図ることも、一時的には可能である。しかしそうした考え方に代わって、例えば、単電子トランジスタなど量子効果に基づくナノ構造デバイスを創造し、それらをボトムアップ的に集積する手法の開発こそ、情報関連分野の今後の進展のために、本質的であることをナノテクは示唆している。

(4) バイオ分野へのインパクト

ファインマン教授は、先に紹介した講演の中で、物理学の成果のうち、当時の「バ

イオ分野」の進展に最も大きなインパクトを与えるのは、量子力学に基づく理論計算手法をバイオに適用することではなく、原子一つ一つを識別して観測できる高分解能の顕微鏡の発明であると予言している。実際に、その予言通り、原子を直接的に観測できる高分解能電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡の発明が、DNAの解析をはじめ、バイオ分野の進歩に与えた影響は計り知れない。

今後とも、主として情報関連デバイス分野や材料分野を対象に高度化が進むことが予想されるこれらの計測手法は、すでに部分的には成果が得られているが、今後広くバイオ分野に適用され、バイオ分野の進展を支えられと期待される。

類似の例として、半導体・光デバイス分野で開発された微細化技術を用いて作製される「バイオチップ」（石英ガラス基板上に極細の溝を作り、拡散スピードの差によ

りDNA分離を実現する素子）があげられよう。バイオチップにより、バイオ創薬、タンパク質合成などが飛躍的に進捗すると期待される。また、バイオ分野でのボトムアップ手法が、情報関連分野に適用され、改良され、再びバイオ分野に戻る、ブーメラン現象により、バイオ分野に新たな進展をもたらすことも考えられよう。

これらは、いずれも、ナノテクの共通基盤技術的特徴がもたらす効用である。

2 ボトムアップアプローチ

ここで、ボトムアップアプローチに関して、もう少し具体的に述べておこう。

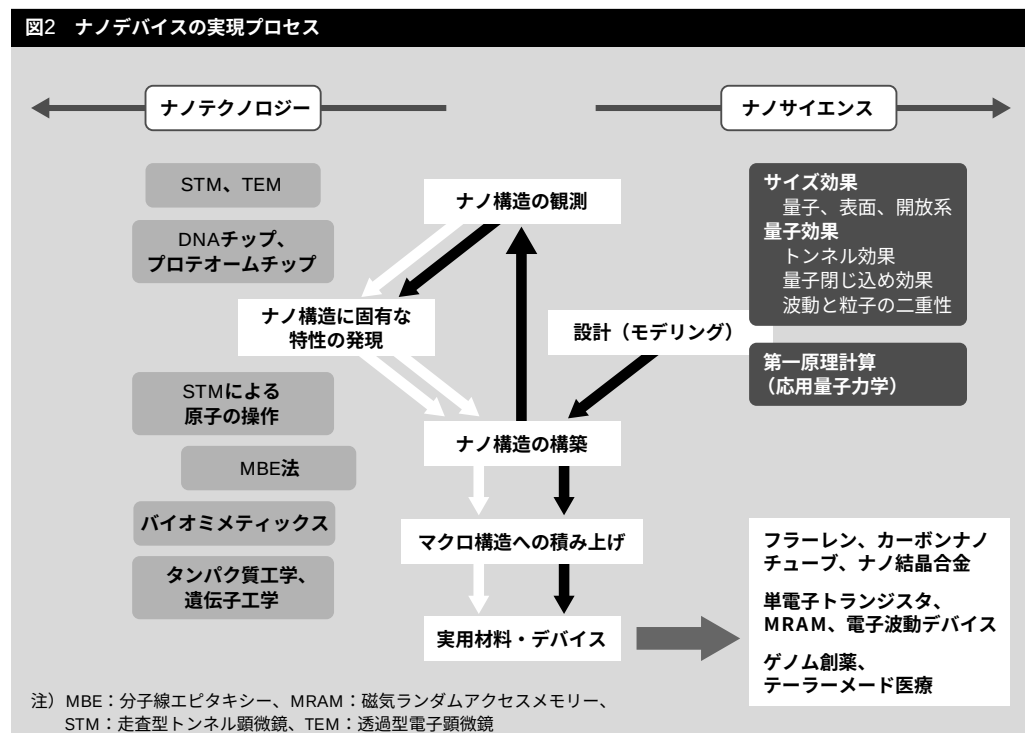
(1) 2つのボトムアップアプローチ

クリントン大統領の演説にもあった高い目標（71ページの表4）を実現していくために、ボトムアップアプローチが必要になるが、具体的にどのようなアプローチをとる

べきなのか、2つのアプローチを考えてみよう。

第1のアプローチは、自然界に存在しているナノ構造の特性を利用する場合のアプローチである。この場合は、自然界に存在するナノ構造を観測し、固有な特性を発現させ、それを設計（モデリング）に基づきマクロな構造へ積み上げ、機能材料・デバイスなどを実現することになる（図2、白抜き矢印）。自然界に存在しないナノ構造を人工的に開発する場合が第2のアプローチである。この場合には、ナノ構造の設計から開始される（同、黒矢印）。

第1のアプローチの事例としてバイオ分野を例にとる。ヒト体内に存在するDNAの構造を解析し（X線回折法など。以下、カッコ内は手段を示す）、塩基配列を解読し（電気泳動法など）、固有な特性をもつタンパク質とDNA配列とを関連づけ（プロテオームチップなど）、その知見をもとに、自



己増殖的に新しい機能のタンパク質を合成するといったプロセスとなる。

第2のアプローチの事例として量子デバイスを例にとる。ここでは、まず量子力学をもとに理論的なサイズ効果（量子効果）を予測し（応用量子力学）、所要の特性を持つナノ構造を設計する。次に、設計したナノ構造を実際に構築し（MBE法、リソグラフィ法など）、さらに、構築した構造を実測し（STM、TEMなど）、所定の特性が出現していることを確認する。最後に、ナノ構造をマクロ構造に積み上げ、新規機能材料・デバイスを実現させる。

（2）ボトムアップ手法の現状

さて、ナノスケール領域で動作する新しい構造、デバイスに関しては、すでにナノ粒子、量子ドット、単電子トランジスタ、量子蜃気楼、DNAなどいくつかのヒントを持っている。しかし、こうしたナノテクデバイスを一つ一つ積み上げ、あるいはナノ構造を機能材料にまで積み上げていく手法に関しては、現状どの程度まで進んでいるのだろうか。

機能材料に関しては、原子、分子レベルから積み上げ、巨視的な構造を作り上げる技術として、すでに単結晶育成技術を有している。原料の組成を決め、それらを熱平衡状態に保つことで、伸の見えざる手により、エネルギー最低状態である結晶を育成してきた（この意味で、単結晶育成は無意識のうちにボトムアップ手法を用いていたともいえよう）。多くの優れた特性を持つ結晶材料は、シリコンをはじめ電子デバイス材料として広く使われている。大型で良質な単結晶が得られて初めて、現在の半導体LSI（高密度集積回路）の盛況がある。

先人たちの項で紹介したMBE法による薄膜積層技術は、単結晶成長技術を発展させたもので、異なる組成を持つ結晶を一層一層順次積み上げていくことができる。この結果、膜厚方向でのナノ構造の作製が可能であり、将来的にわたってボトムアップ技術のなかで主要な役割を担うと考えられる。さらに、制御性には乏しいが、特定の条件下で、微粒子を析出させる方法も数多く試みられている。

しかし、こうした手法だけの応用でナノスケールの積み上げをすべて実現することは難しい。もちろん、上記とは違う積み上げ技術も、実験室レベルでは出現している。例えば、量子蜃気楼で威力を発揮した原子を一つ一つ摘み上げ、好きな場所に配列させる技術や、レーザー光をピンセットにして1つの原子を捕獲し、移動させる技術である。しかし、それらの手法で実用的なデバイスや機能材料を作り上げていくのは、量産性の点で、少なくとも現時点では乗り越え不可能な無理がある。

（3）未来のボトムアップ手法――

バイオミメティックス

以上のことを踏まえると、結晶育成と同じように、機能ユニットを所定の構造に積み上げる実用的な技術の開発が必要である。それができなければ、ボトムアップ手法は単なる「サイエンス」にとどまり、われわれの生活に真のインパクトを与える「テクノロジー」にはなりえない。こうした手法に対する明確な答えは、現状ではない。まさしくこの点が、ナノテクが実用化までに長期間を要し、挑戦的な未来の技術であるといわれる理由である。それでは、どうすればその答えが見出せるのか。

その答えは、バイオ（生物）分野の中にあるのではないかと考えられる。生物は、もともとこの地球上で、特定な条件（温度、圧力、紫外線）下で、酸素、水素、炭素などの元素から、偶然的に最初の単位ユニットが合成され、そのユニットが自己増殖し、長年かけて、現在の多様な種へと進化した。自らのコピーを作り増殖する機能がビルトインされていたことに、生物の本質がある。

すでに、塩基ユニットの配列が遺伝子を構成し、それらが化学的な相互作用に基づいて巧みにコピーされ、自己増殖されていくという、ナノスケールで起こる現象のメカニズムの主要部分については明らかにされている。

こうした生物の基本原理のなかに、所要の機能を有するナノ構造を自己増殖させ、巨視的な寸法の機能材料、デバイスにまで積み上げる方策を見出すうえでのヒントがあると考えられる。先に触れた米国のNNIでも示唆されていることだが、ナノテクには、生物に学ぶ究極のバイオミメティックス（生物模倣科学）といった性格もあり、これがボトムアップ手法を効果的なテクノロジーにする鍵である可能性が高い。

VI ナノテクを実現するために

ナノテクの出現を先端技術分野におけるパラダイム転換の契機ととらえるならば、ナノテクの開発を通じて新しい研究開発、技術開発マネジメントに関しても新しいパラダイムが誘導される可能性が大きい。逆にいえば、現状の研究開発マネジメントを抜本的に変革しないかぎり、ナノテクを効率的に推進するのは不可能ともいえよう。

1 研究開発体制の変革

研究開発の体制の変革を考えるうえでの踏まえるべきナノテクの特徴は、①広い分野にまたがる共通基盤の技術であり、研究テーマ間の相乗効果が大きいこと、②実用化まで長期間を必要とする技術が多いこと、③応用量子力学に象徴されるように、その本質を理解するために高度の専門知識を必要とすること——である。

このためナノテクの研究開発は一般的に、ある程度以上の規模と期間が必要となり、必然的に研究開発投資が増大する結果をもたらす。加えて、ナノテクの開発では、これまでのように独占的事業化による研究開発投資回収の道筋が明確にできないことも多い。すなわち、研究開発から事業化までを一貫して一企業の中で実施し、独占的事業化により、研究費を超える利潤を得ようとする、現在の企業内研究開発の考え方が成立しなくなる可能性が大きい。

こうした企業内一貫体制を前提とした企業研究所の存在は、歴史を振り返れば、むしろ過渡的にすぎず、将来は姿を変えるべきものとの指摘がなされている。実際に、多くの先端的企业では、アウトソーシング、特許クロスライセンシングを含む提携などを前提とした、新しい研究所の姿の模索が始まっている。

ナノテクが発展するにつれ、上記の傾向がいつそう強化され、例えば、研究開発のアウトソーシング・提携化、事業化以前に研究開発投資の回収を図る知的財産の商品化などが、より一般化すると考えられる。

2 国への期待

こうした状況は、見方を変えれば、ナノテク推進に際しては、公的機関の役割、す

なわち国の関与が大きくなることを意味している。ナノテクに関して国が施策を展開するに当たっては、具体的に以下の3点が重要となろう。

(1) 科学技術予算配分比率の見直し

第1は、原子力、宇宙開発などの分野を含めた、国の科学技術予算配分比率の総合的な見直しの遂行である。NNIではナノテクに関して予算の増大を実現し、初年度約500億円を充当した。その中には日本でナノテクの主流として扱われている情報関連技術についての予算はほとんど含まれていない。これは先に触れたバイオについてのNNI予算についても同様である。

つまり米国では、研究開発の対象となる技術の特性からすると、ナノテクに含まれる研究でも、NNI予算の枠外で行われていることも少なくない。しかも、先に連邦予算などに触れつつ指摘したように、その規模はNNIの予算を大きく上回っている。

わが国でも、ナノテク関連予算を米国並みに年間500億円程度にするとのおもひがみられるが、わが国の場合は半導体関連予算もナノテクに含まれている。このことを踏まえると、今後、米国などと競争して開発を進めるためには、ナノテク関連予算の大幅増額が必要となろう。

しかし、わが国の財政の現状を踏まえると、科学技術関連予算の突出が許される状況にないのは明らかである。したがって、科学技術関連予算配分比率の総合的な見直しが必要となる。総合科学技術会議の指導力に期待したい。

(2) 人材育成施策の充実

第2は、人材育成施策の充実である。ナ

ノテクが長期にわたる開発課題を含んでおり、しかも広い分野にわたる専門知識を持つ人材が必要とされるからである。

こうしたことを背景に、NNIに習って、複数の大学・研究所に分散した研究グループをネットワーク化し、独自性を保ちつつ効率的にナノテク研究開発を推進する体制を構築して、その中に人材育成を強力に押し進める制度をビルトインすることが望ましい。例えば、その体制の中にネットワーク大学院を創設し、アトム・ビット・ゲノム各分野の専門講義を各研究グループの専門家が分担して、テレビ講義を開催する。

また、そうした講義に加えて、ナノテク開発に必要な技術のトレーニング機能を持つセンターを新設することも有効である。ナノテクにおいては、STMなどの測定装置、コンピュータによるモデリング、マイクロリソグラフィ、MBE等の製造技術など、高度な専門技術を習得した多数の人材が不可欠と考えられるからである。

加えて、現状のわが国の大学院教育は、1つの研究室に縛られたオン・ザ・ジョブトレーニング的な色彩が強いが、ネットワーク化された教育体制をとれば、その方式が持つ欠点を補うことができ、幅広い知識と見識を持つ人材の育成が可能になろう。

(3) 公的研究機関のマネジメント改革

第3は、投入予算の有効活用のため、公的研究機関のマネジメントを改革することである。より具体的には、これら機関のマネジメントに、コストパフォーマンスについての意識の向上、経済原理の徹底を図る必要がある。

例えば、上述のトレーニングセンターのマネジメントを民間に委託し、経済効率を

追求することも、大学でのマネジメント改革の1つといえる。大学入試問題作成の外部委託、大学事務管理受託会社の設立などの状況をみれば、こうした施策も決して唐突ではない。いずれにしても、2001年から2003年にかけての実施が予定されている公的機関の独立法人化を通じ、マネジメント改革が実現することが期待される。

3 産官学の連携

国全体として重要なことは、民間企業と公的研究機関との役割分担を明確にして、産官学の連携をいかに強化するかである。産官学の研究組織は、異なる使命・役割があり、それを達成するために、それぞれの指導原理に基づいた価値観を持っている。それぞれの組織が持つ価値観を、完全に同一化する必要はない。しかし、効果的な連携を保つために共有化すべき価値観はある。特にその必要性が高いのは、次の2つ

の価値観である。

第1は、研究開発、技術開発についてのコストパフォーマンスを尊重するという価値観である。先に述べたように、税金で運営される公的機関においても、コストパフォーマンスについての意識向上が必要である。

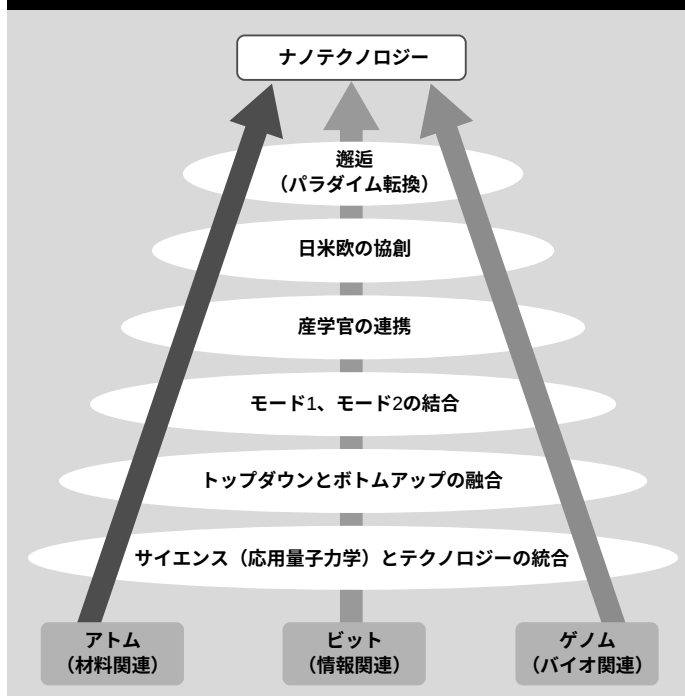
第2は、得られた知的財産についての価値観である。広い範囲の産業、企業に関連するナノテクに関しては、民間企業も、公的機関にみられるように知的財産を公共財的にとらえることが望ましい。このためには、製品化される以前の段階でも知的財産を価値化するなど、知的財産そのものの商品化を加速することが必要である。

一方、公的機関では、知的財産は個人に所属するとの意識が強いが、この点は、知的財産は機関に所属するという民間企業の考え方に近づくことが必要である。そうでないと、機関同士で長期的、安定的な契約関係を成立させることが困難である。

ただし、もちろん、特許の発明者には、その業績を具体的に評価する報償システム、例えば、特許実施料の還元システムの導入あるいは充実が前提である。そうしたシステムの充実は、研究開発者のモチベーションを高めるはずであり、したがって、コストパフォーマンスの向上を図る観点からも正当化されるはずである。

また、産官学の連携に当たっては、研究開発におけるモード1とモード2の結合を図ることも重要である^{文献20}。好奇心を原動力として個別の学問領域に閉じて発展するモード1の活動と、課題解決すなわち実用化を原動力として展開され、複数の学問領域が同時に関連するモード2の活動も、産官学連携のもとでは相互に強く関係しつ

図3 ナノテクノロジーへの流れ



つ、結合的に展開されることになる場合が多いと予想される。

以上これまでに、ナノテクが生み出す主要なインパクト、推進に必要な施策などについて述べてきたが、その背景には多様な邂逅がある。このことをイメージとしてまとめたのが図3である。

Ⅶ ナノテクとの付き合い方

最後に、多少繰り返しになるが、民間企業がナノテクについてとるべき対応についてまとめておく。

1 ナノテクの勧め

何よりも、ナノテクに前向きに取り組むべきである。言い換えれば、「ナノテクのすゝめ」である。

一般的な事業環境変化と同様に、ナノテクの進歩は企業に対して、大きな機会と脅威を与える。活用可能な事業資源が生み出されるということでは機会であり、パラダイム転換により既存資源の陳腐化が起こる可能性があるということでは脅威である。パラダイム転換が必須の流れであれば、ナノテクが生み出す機会に対して、積極的に取り組むべきである。

2 広い視野の確保

時間的にも空間的にも広い視野を持つべきである。事業化に当たっては、広い範囲の技術シーズを探索・調査する態度と、長い時間に対しシーズの発展を予測・分析する態度が必要である。

一般的にアプリケーションの多い技術は、開発テーマが発散し、開発投資が膨張して、開発期間が長期化する傾向がある。

例えば、現時点でナノテクの象徴的な役割を果たしているカーボンナノチューブでも、現在話題とされるアプリケーションは多岐にわたっている。事業化を目指すうえでは慎重な絞り込みが必要であり、その絞り込みを実現するためには、ナノテクに対する全体観を持つことが必要である。わが国では、過去、技術のブーム、科学技術バブルに乗って不経済な投資が行われたことも少なくない。こうしたことを繰り返すのは避けなければならない。

加えて、ナノテクの外部の世界からの影響についても視野に入れておく必要がある。例えば、ナノ構造の解析、ナノ構造の設計などを支えると考えられる、コンピュータソフトの進歩など、ITがナノテクに与える影響にも留意しなければならない。

3 研究開発マネジメントの変革

ナノテクがもたらすマネジメントの変革に迅速に対応すべきである。先にも述べたように、ナノテクによって引き起こされる技術のパラダイム転換は、知的所有権の扱い、あるいは自前主義のあり方など研究開発マネジメントについてパラダイムの転換を招くと考えられ、それへの迅速な対応が必要である。

ここで特に留意すべきは、研究開発を聖域化しないことである。ナノテクでは、サイエンスが直接テクノロジー化したり、知的所有権自体が事業化の対象となったり、研究と事業の間隔が狭まる可能性が高い。すなわち、ナノテクでは研究戦略と事業戦略とを緊密化する必要がある。したがって、マネジメントは、従来以上に研究開発現場へ踏み込むことが必要とされる。

先にも述べたように、事業部門では当然

となっているコストパフォーマンス意識の強化を図ることは特に重要である。それにより、例えば、研究開発から事業化まで一貫して自社内で実施することの是非についても、効果的な判断を下すことが可能となり、他社に先駆けて事業戦略に整合した新たな研究開発体制を築くことができる。

また、研究開発マネジメントでは当然、ナノテクが長期的課題であることを踏まえ、企業内でも、人材の確保と育成に特段の配慮を払う必要がある。今後、多くの新しいシーズが登場し、かつ陳腐化していくナノテク分野では、研究者の専門性が従来以上に短期間で揮発することも予想される。このため、貴重な人材資源の持続的活用を図るためには、従来以上に人材戦略が重要となる。

4 事業機会の積極的探索

ナノテク自体だけでなく、ナノテク周辺にも新規事業機会を見出す観点を持つべきである。例えば、研究開発支援事業の開拓やベンチャービジネスへの挑戦である。

半導体産業や情報産業も多くの周辺産業を育ててきたし、それらの産業に支えられてきた。ナノテクの産業化の過程でもそのような周辺産業が生まれる可能性がある。特に、自社の研究開発、技術開発によって獲得された、開発支援を機能とするテクノロジーは、そのような周辺産業を生み出す可能性が高い。半導体産業の周辺産業が、それ自体としては半導体技術ではないのと同様に、ナノテクの周辺産業もそれ自体としてはナノテクではない場合が多いと考えられる。

加えて、あるナノテクの開発を目的として開発された（研究開発）支援技術も、そ

の適用範囲はナノテク以外へと広がる可能性がある。現時点での支援技術やそれを活用した事業としては、計測、制御の側面が注目されやすい。しかし、今後テクノロジーの実用が進むと、検査、試験、メンテナンスの分野も支援産業として出現する可能性がある。

また、ナノテクの事業化には多くの経営資源の投入が必要になるといった観点とは矛盾するようだが、ナノテクには、大きな投資を前提としないベンチャービジネスへの挑戦機会も見出すことができる。

実際、類似の性格を有する半導体産業や情報産業では、新しいシーズの出現に呼応して数多くのベンチャー企業が誕生している。ナノテクでは、この傾向がいっそう強まると予想される。

そのように考えられる3つの根拠がある。第1に、ベンチャーが生まれにくいというこれまでのわが国の風土が、大学を中心に急激に変化しつつあること、第2に、このような分野を対象とするベンチャーキャピタルが充実されつつあること、第3に、ナノテクでは半導体産業以上に、自前で「作る」ものより他社から「買う」ものの方が多く、したがって、ある特定の製品やサービスの提供に特化した企業が起りやすくなると考えられるためである。

いずれにしても、ナノテクベンチャーへの挑戦は、産官学すべてにとって大きなチャレンジであることに間違いはない。そしてその挑戦に成功すれば、わが国の産業分野は新たな活力を獲得することになる。

本稿では、ナノテクが誕生してからの系譜、つまり誕生してから現在までの期間に重点をおいて分析を行った。しかし、ナノテクのインパクトが発生するのはこれから

である。ナノテクが開く将来社会やそこに至るロードマップについては、別に発表の機会を得たいと考えている。

参考文献

- 1 田中一宣「ナノテク・ウォーの火蓋は切られた——日本にはナノテク研究の国家戦略が欠如している」『エコノミスト』2000年12月11日号
- 2 National Science and Technology Council (NSTC), “National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan,” June 2000 (以下、この文献をNNIと称する)
- 3 M. C. Roco (NSF), “National Nanotechnology Initiative: From Vision to Implementation,” ASME, Dec. 6, 2000 (<http://www.asme.org/gric/presentations/Roco.pdf>)
- 4 “Budget of the United State Government, Analytical Perspectives, Fiscal Year 2002” (<http://whitehouse.gov/omb/budget/y2002/Spec.pdf>)
- 5 『『ナノ技術』必勝へ330億円、3省庁が概算要求、研究機構にセンター』『日本工業新聞』2000年8月24日。また、同様の発言を『日本機械学会誌』2001年1月号でも行っている。
- 6 『経団連インフォメーション』No.260、2000年6月16日
- 7 「21世紀を拓くナノテクノロジー——ナノテクノロジーに関する経団連の考え方」経済団体連合会、2000年7月18日
- 8 報道発表一覧「平成13年度文部科学省概算要求主要事」(http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/12/08/000845h.htm)
- 9 「平成13年度産業技術関係予算の重点」通商産業省 (<http://www.meti.go.jp/policy/strategy/downloadfiles/e01224fj.pdf>)
- 10 日本電子機械工業会「半導体先端技術共同開発計画の概要——プロジェクト：あすか」2000年9月29日
- 11 「ナノテクが創る未来社会〈n-Plan21〉」経済団体連合会、2001年3月27日
- 12 『ナノテクノロジーの戦略的推進に関する懇談会報告書——戦略的推進に向けた中間的な取りまとめとして』科学技術会議政策委員会、2000年12月14日
- 13 Richard P. Feynman, “There’s Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics” (<http://www.zyveX.com/nanotech/feynman.html>)
- 14 エリック・ドレクスラー『創造する機械——ナノテクノロジー』相澤益男訳、パーソナルメディア、1992年
- 15 R. E. Smalley、大澤映二「対談：サッカーボール分子C60の発見」『現代化学』1992年4月号
- 16 六角形の網目構造に五角形が含まれて球形をなすバッキーボール構造は、例えば、恵比寿ガーデンプレースのドームで見ることができる。その写真は、豊橋技術科学大学・大澤映二研究室「Fullerene Gallery」(<http://shachi.cochem2.tutkie.tut.ac.jp/Fuller/photo/index.html>)に掲載されている。
- 17 飯島澄男『カーボンナノチューブの挑戦』岩波書店、1999年、および飯島澄男「英国王立研究所『金曜講話』から：人間が作った最も小さなチューブの世界」『現代化学』1998年6月号、7月号
- 18 ISI Citation Laureate Award 1981–1998 (<http://www.med.osaka-u.ac.jp/pub/molonc/www/CitationClassicAwards.html>)
- 19 科学技術振興事業団「『急速加熱粉末鍛造法によるアルミニウム合金部品の製造技術』の開発に成功」2000年10月12日、同「『準結晶分散型アルミニウム合金の製造技術』の開発に成功」2000年8月31日
- 20 マイケル・ギボンズ編著『現代社会と知の創造——モード論とは何か』小林信一監訳、丸善ライブラリー、1997年

著者

池澤直樹（いけざわなおき）
チーフ・インダストリー・スペシャリスト
専門は研究開発マネジメント