

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—

第3期科学技術基本計画のナノテクノロジー・材料の分野別推進戦略では、その冒頭において、「我が国の材料技術は、(中略)全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている」と書かれている。しかしこれはあくまでも“材料技術”に対する記述である。同戦略では、ナノテクノロジー（以下、ナノテク）についても“世界トップレベル”と評しているものの、「材料技術の強みがナノテクノロジーの強みの源泉」としている。実際に、日本のナノテクに対し、危機感や閉塞感を強めている専門家も増えている。本稿では、論文や特許、アンケートなどの結果を踏まえた上で、定量的な分析からは十分に把握できない日本のナノテクの競争力および競争領域の変化について、ナノテクの持つ技術特性や産業構造の視点から検討を試みた。

その結果、論文や特許などから把握することが可能な個別要素技術で見た場合、日本のナノテクは相対的にアメリカと同等、あるいはそれに次ぐ評価が可能であることがわかった。しかし、将来ナノテクの事業化が本格化し技術競争領域が変化したとき、以下の2つの“システム化”の壁に直面し、日本は相対的にその競争力を弱めていく可能性がある。

①分子レベルで設計される機能性ナノシステム材料開発への挑戦

ナノテクは競争領域の変化を迎えつつある。スケールダウンを繰り返すことで従来の技術課題を突破し、材料の持つ機能と特性を向上させるトップダウン技術から、最終的には分子レベルで設計され、ナノ機能性材料のシステム化を目指すボトムアップ技術への変化である。これまでトップダウン技術の領域において強みを発揮してきた日本は、ボトムアップ技術へ競争領域が変化することで、徐々に競争力を弱めていくことが懸念される。ボトムアップ技術を発展させ、最終的にナノシステム化技術を実現させるには、それらを支えるサイエンスベースでの研究開発が不可欠となる。ナノテク研究者は、この不確実性の高い研究開発を強く意識して基礎研究を促進するべきであり、そのためにはまず、未だ確立されていないナノシステム化のための基礎研究手法を、構築・促進していく必要がある。

②ナノテクの実用化を目指したイノベーションシステムの構築

ナノテク、特にボトムアップ技術はその技術的特性から、極めて不確実性が高く、研究開発には長期間の継続的かつ漸増的な投資が必要となる。日本には、このような投資を可能とするためのイノベーションシステムが補完的制度として十分には確立されていない。政策や投資側から見た場合、いかにリスク分散したシステムを設計できるかが鍵となる。

また、技術ロードマップは、投資の方向性を明確にするとともに、社会経済的な波及効果まで見据えることによって事前の投資の合理性を担保する役割を担ってきた。しかし、ナノシステム化を目指すボトムアップ技術を中心とした将来のナノテクは、極めて技術的不確実性が高く、現在の手法では効果的な戦略の立案・推進に限界が生じている。今後は、このようなナノテクの特性を包含した戦略マネジメントツールの新たな作成方法の検討が求められる。

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—

金間 大介

ナノテクノロジー・材料ユニット

近藤 章夫

第1研究グループ

1 背景・問題意識

一般的に、“日本のナノテクノロジーは強い”と言われるが本当だろうか。

第3期科学技術基本計画のナノテクノロジー・材料の分野別推進戦略では、当分野の取り巻く状況として、「我が国の材料技術は、過去数十年にわたる多くの研究者、研究機関の弛まぬ取組と研究成果の蓄積により、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化にいたるまで全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている」と冒頭で書かれている¹⁾。しかしこれはあくまでも“材料技術”である。同戦略では、ナノテクノロジー（以下、ナノテク）についても“世界トップレベル”と評しているものの、「材料技術の強みがナノテクノロジーの強みの源泉」としている。実際に、ナノテク全てにおいてトップというのではなく、好調な材料分野に牽引されているという見方もある。日本のナノテクのみを

取り上げれば、危機感や閉塞感を強めているナノテクの専門家も増え始めている。

専門家が感じるこのような危機意識はどこからくるのか。また、そもそも何をもって強いと言うのか。本稿では、論文や特許、アンケートなどの結果を踏まえた上で、定量的な分析からは十分に咀嚼できない日本のナノテクの競争力および競争領域の変化について、ナノテクの持つ技術特性や産業構造の視点から検討を試みる。そして論文や特許などの個別要素で見た場合、日本のナノテクは確かに競争的優位にあるように見えるものの、将来ナノテクの事業化が本格化し、競争領域が変化したときに初めて顕在化してくるであろう日本の大きな問題点について、“システム化”をキーワードに私見を展開する。

近年ナノテクの定義として、1 nm から 100nm 程度までのスケールサイズを扱う技術というのが一般的になりつつある。前述し

た分野別推進戦略では、国が推進すべきナノテクは「従来の原理や常識を覆して科学技術の新しい世界を切り開き、その飛躍的な発展のみならず、産業競争力の強化や大きな新産業の創出に結びつく可能性のある技術」¹⁾であることを考慮し、そのような範疇に含まれる真のナノテクノロジーを『True Nano』と名付けている。さらに『True Nano』とは、ナノ領域で初めて発現する特有の現象・特性を活かすナノテクノロジーの中でも、

- 従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発
- 大きな産業応用が見通せる研究開発

である」と定義している。つまり、今後のナノテクは、単純な微細化技術の延長線上で 100nm 以下の領域に突入したものではなく、その先に新産業の創出や産業競争力強化に結びつく技術を対象としている。本稿でも、これをナノテクと考えることとする。

2 要素科学技術の定量的評価 —論文、特許、デルファイ調査結果から—

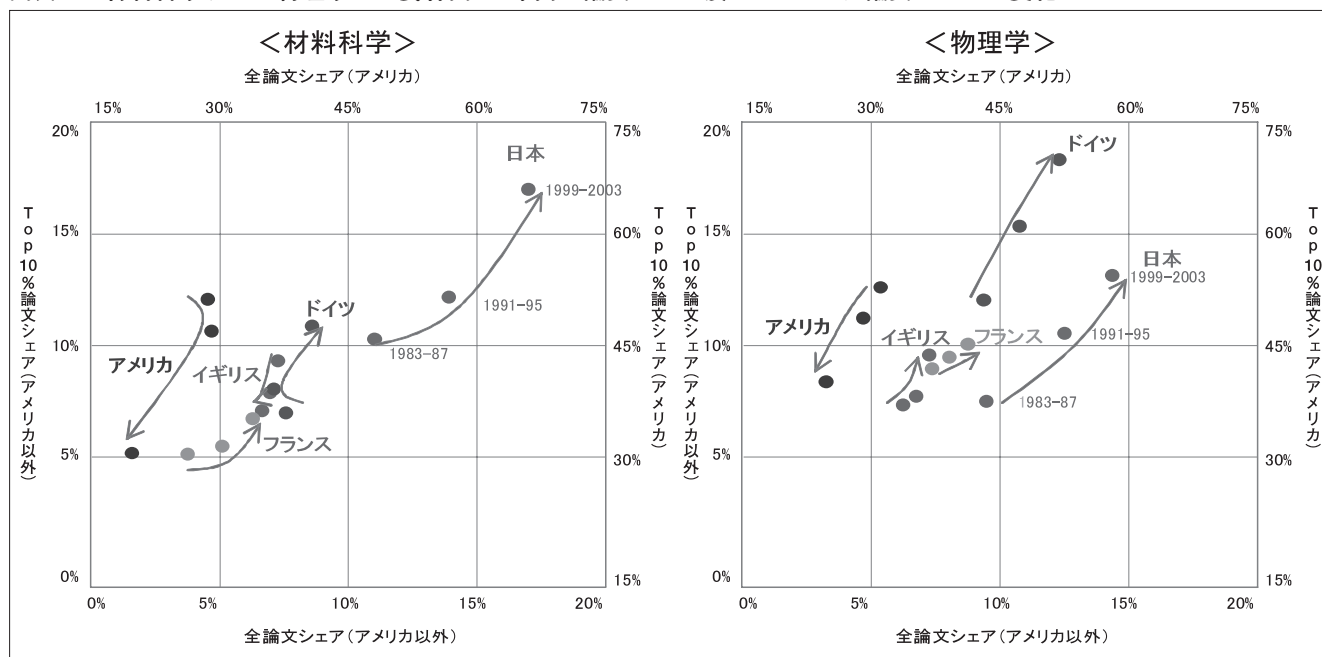
2 - 1

論文分析

基本的に論文からナノテクの研究成果を定量的に分析することは

難しい。ナノテクは学際的領域であり、“Nature Nanotechnology”のような最近発刊した専門雑誌を除くと、過去にナノテク分野固有の学術雑誌はほとんど存在しなかった。従って、最近のナノテク専

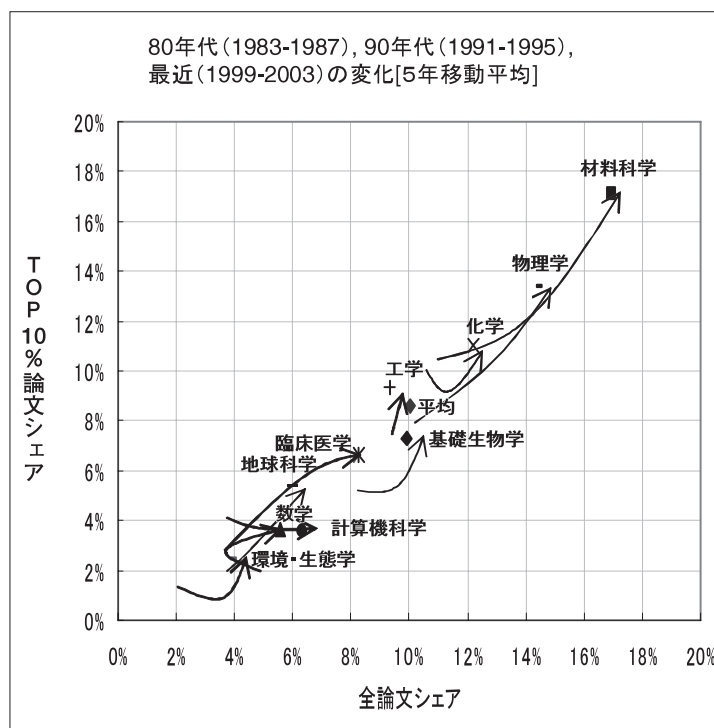
門誌のみでの分析は、質的あるいは量的にもまだ十分なデータとは言いがたい^{注1)}。そのため、ここではナノテクの基礎研究の成果について、ナノテクの基礎学問としての性質が強い材料科学および物

図表1 材料科学および物理学の主要各国 20 年間の論文シェア及び TOP10%論文シェアの変化²⁾

注1：ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンターによる「ナノテクノロジー文献動向調査」³⁾では、キーワード検索を基にしたナノテク関連文献調査を行っている。同報告によると、日本のナノテク関連論文数は、米国、中国について第3位となっている。

理学に注目した。

材料科学および物理学の分野における論文分析の結果では、物理学の被引用トップ10%論文シェアを除く、全論文シェア、材料科学の被引用トップ10%論文シェア共に日本はトップを走るアメリカに次ぐレベルにあり、年々その差は縮まりつつある（図表1）。特に材料科学ではアメリカ以外の国を大きくリードしている。日本における各分野との比較を見ても（図表2）、材料科学や物理学の他にも、化学においても日本の強さがある。

図表2 日本における各分野の20年間の論文シェア及びTOP10%論文シェアの変化²⁾

※1 基礎生物学には、農学、生物学・生化学、免疫学、微生物学、分子生物学・遺伝学、神経科学・行動学、薬理学・毒性学、植物・動物科学の分野が含まれている。

※2 矢印の根元は1983～1987年の5年移動平均シェア、矢印の先は1999～2003年の5年移動平均シェアを示している。

2 - 2

特許分析

特許に関しては、ナノテクあるいはナノテクを使った応用技術に関連したキーワード検索を用いて、各国のナノテク特許出

願の状況を見ることができる。4大特許機関（日本特許庁・米国特許商標庁・欧州特許庁・世界知的所有権機関（WIPO））へ出願された特許を、出願人の国籍の違いから分類を行った。図表3に、2003～2005年の出願人の国籍比較を

出願数の多い10ヶ国について示す^{4, 5)}。2005年でみると、米国籍が約6,700件と最も多く、日本は約4,200件で第2位となり、この2ヶ国が他国を大きく引き離している。経年変化で見ても、日本のナノテク関連特許は米国と並び

大幅な増加傾向となっている。

ただし、2005年の日本特許庁への出願のうち、上位5機関中3機関が公的研究機関からの出願となっている⁴⁾。

2 - 3

デルファイ調査における日本の研究開発水準

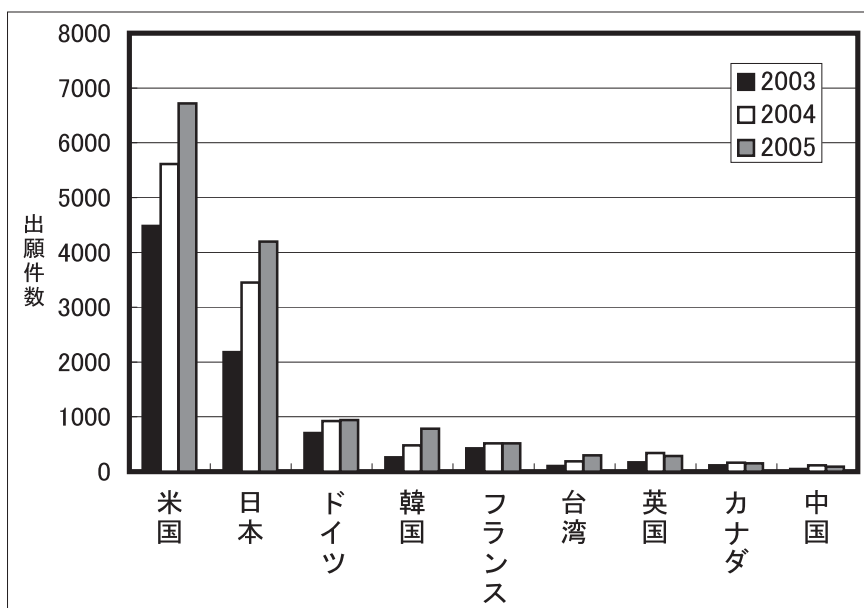
科学技術政策研究所が2004年に実施したデルファイ調査の中では、科学技術領域ごとに専門家に対し、対米、対EU、対アジアにおける日本の研究開発水準を優位から劣位までの5段階評価として質問している⁶⁾。その中から対米、対EUの結果を図表4に示す。図表中の軸は5段階の回答結果を指数化した数値である。この調査では、ナノテク・材料分野には10個の注目領域^{注2)}が設定されているが、それらのほとんどは図表の中央やや上方に位置している。すなわち、日本のナノテク・材料の研究開発水準は米国に対してはやや優位あるいは同等程度、EU諸国に対してはやや優位と判断されている。

2 - 4

定量的評価から言える日本のナノテクのポテンシャル

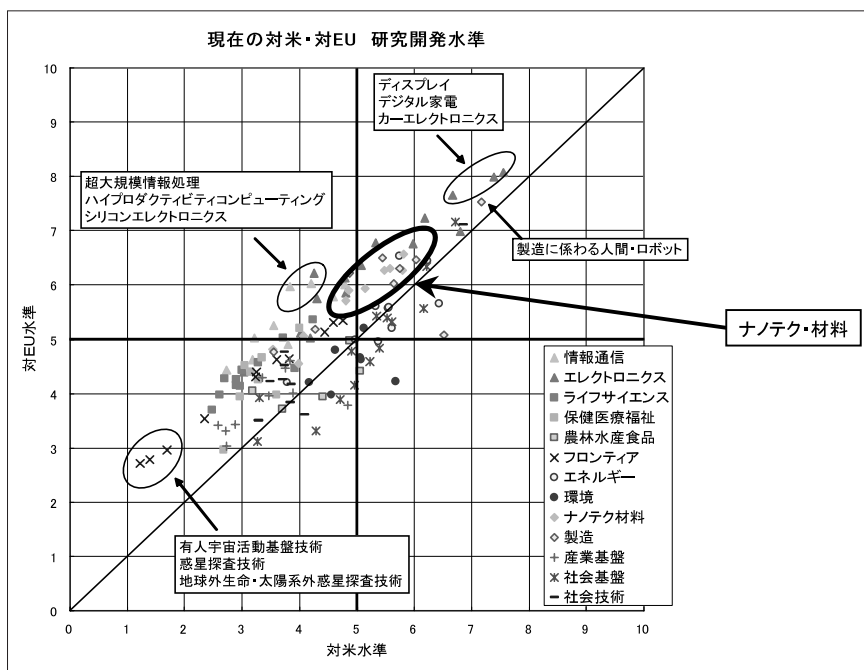
以上の結果から、“日本のナノテクは強い”という形式化された事実をある程度確認することができる。しかしこれらのデータから言えることは、日本が強いのは“ナノテクの個別要素科学技術”である、ということだろう。その意味では、日本のナノテクには大きなポテンシャルがあると言える。ただし、そもそもナノテクは、一部を除いて大部分の技術シーズはまだ事業化していない。従って、“テ

図表3 4大特許機関へ出願されたナノテク特許の国籍別件数



参考文献^{4), 5)}を基に、科学技術動向研究センターにて作成

図表4 デルファイ調査における日本の研究開発水準⁶⁾



注2：10領域は次の通り。「ナノ材料モデリング・シミュレーション」「ナノ計測・分析技術」「ナノ加工・造型・製造技術」「物質・材料の創製・合成技術・プロセス技術」「ナノレベル構造制御による新規材料」「ナノデバイス・センサ」「NEMS技術」「環境・エネルギー材料」「ナノバイオロジー」「安全・安心社会に関わるナノ科学」

クノロジー”の観点から現状のナノテク全体の国際競争力を評価するのは時期尚早である。次節からは、将来、ナノテクの研究開発が

直面するであろう技術的競争領域とその変化に焦点を当てて、日本のナノテクの将来性について検討する。

3 ナノテクの技術特性とナノシステム化への挑戦 ―直面する技術的不確実性の増大―

3 - 1

ナノテク研究開発の 今後の展望

図表5に米国国家ナノテクノロジー・イニシアティブ (NNI) を中心となって主導してきた M. Roco 氏が描く、ナノテク技術が産業化されるまでの時間と技術レベルを示す⁷⁾。この図では、従来の材料の微細加工技術を向上させた結果、これまでに無い新しい機能を発現することとなった受動型ナノ構造材料を第一世代とし、徐々にナノレベルにおいて発現す

る独自で新しい機能が他の材料やシステムに影響を与える能動型ナノ構造材料を第二世代、それらナノレベルの新機能が独自のシステムとなって新しい機構を発現するナノシステム構造を第三世代、そしてナノレベルの各分子が固有の機能を発現する分子デバイスとして原子・分子レベルから設計されるナノシステム材料 (第四世代) へと進んでいる^{注3)}。技術例としては、第一世代：コーティング、ナノ粒子、ナノ構造金属など、第二世代：ターゲット医薬、環境応答型構造材料、アクチュエータなど、第三世代：3次元ネットワー

ク構造材料、超分子材料など、第四世代：原子・分子レベルで設計・ナノシステム化された分子デバイスなどが挙げられている。

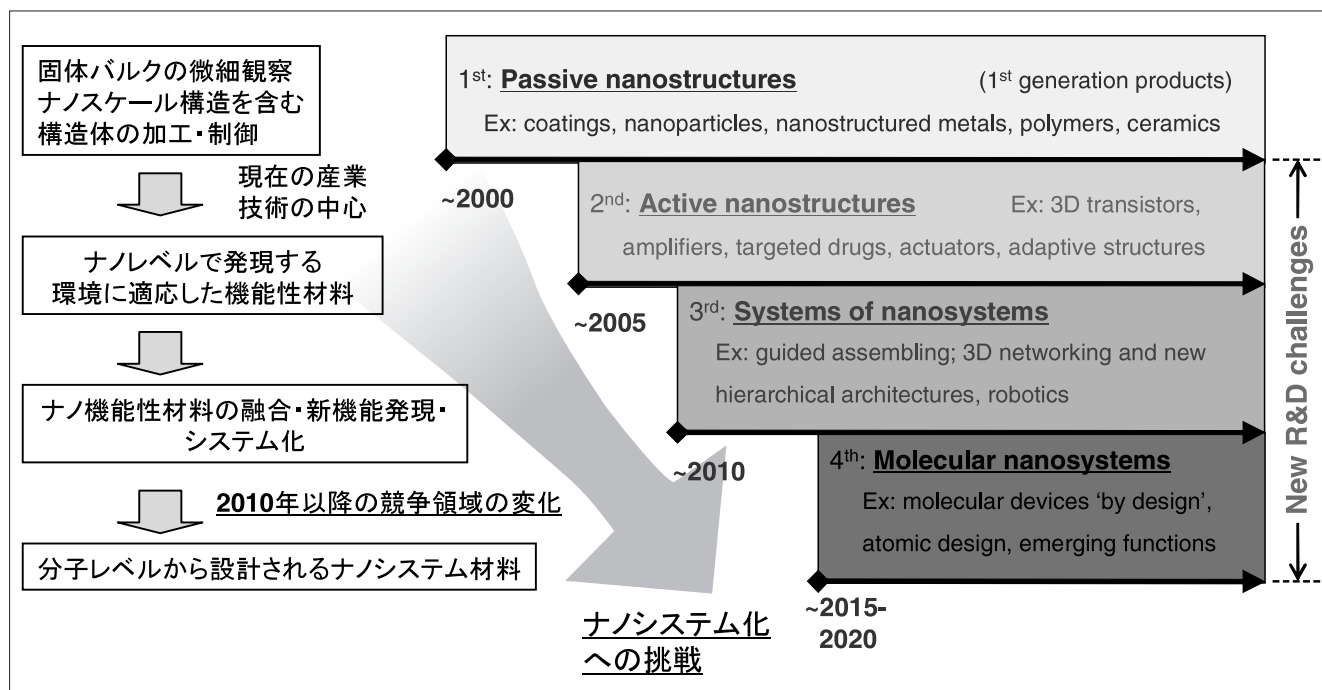
3 - 2

ナノテクの技術特性と挑戦 ―トップダウンからボトムアップ、 そしてナノシステム化技術へ―

図表5から、ナノテクが挑戦すべき課題が浮かび上がってくる。よく言われるように、米国でも連邦政府がナノテクを推進するはるか以前から物理学や化学、材料科学の分野ではナノレベルを対象とした研究は進められていた。しかしそれらは基本的にナノスケールの構造を包含した“集合体”としてバルク材料を扱っていたに過ぎない。近年は一部で、STM (走査型トンネル顕微鏡) や自己組織化技術など、分子レベルである程度の制御が可能となってきているが、まだまだ完全な制御や組立て

注3：“ナノシステム”という言葉は、米国では学会の分科会や、大学・研究所の研究拠点名等に使用されている。ナノシステム研究は積極的に推進されており、代表的な研究拠点の例としては、カリフォルニア大学ロサンゼルス校の“California NanoSystem Institute” (2000年設立)⁹⁾などが挙げられる。一方、日本でこの言葉はあまり目にすることはないが、(独) 科学技術振興機構が「ナノシンセシス―創造的ものづくり―」⁹⁾という戦略プログラムの中で、「ナノデバイス・ナノシステム」研究開発について広く分析し、その重要性を強く主張している。

図表5 ナノテクの技術的發展スケジュール



参考文献⁷⁾を基に、科学技術動向研究センターにて作成

をナノスケールで行うことは難しい。ここにこれからのナノテクの真の挑戦が待っている。分子レベルで設計・システム化された構造体は、機能や特性の面で従来とは全く異なった材料となりうるからである。このことを、“ナノテクの技術的不確実性”と表現する。

従来の技術的不確実性とは、微細化が進んで物理的限界が近づき、量子効果などが顕在化するときには現れる現象として解釈される。しかし、ナノテクの技術的不確実性とは、分子レベルにおいて設計されナノシステム化される際に、どのようにしたらそれらを組立てられるのか、そして組立てたナノシステム材料はどのような機能が発現されるのか全く分からない状態を指す。極端に言えば、無数と言ってもいい数の微小構造体材料とそれに関連する組立てあるいは制御技術が考えられ、結果として、理論上は無数のナノシステムの可能性が存在する。

ナノテク分野では一般に、微細化を中心とした前者の技術特性をトップダウン技術、ナノシステム化を目指す後者の技術特性をボトムアップ技術と呼ぶ。すなわち、スケールダウンを繰り返すことで従来の技術的課題を突破し、材料の持つ機能の向上を目指す技術

開発をトップダウン技術、最終的には分子レベルで設計されるナノ機能性材料のシステム化を目指す技術開発をボトムアップ技術としている。これらの分類については、これまでの「科学技術動向」誌のレポートでも度々取り上げられているため^{10, 11)}、ここでは詳述しないが、経営学などと言われる「トップダウン」「ボトムアップ」とは全く意味の異なるものである^{注4)}。

ナノテクの技術的挑戦は、トッ

プダウン技術からナノシステム材料開発を見据えたボトムアップ技術へと変化しようとしている。ボトムアップ技術は、機能性材料としてシステム化されなければ産業上大きな意味はない。両技術とも第1章で示した『True Nano』の性質を包含するが、ボトムアップ技術の方が、その革新性・不連続性から、飛躍的な発展や新産業の創出への期待は高い。そこで次節は、両技術における日本の競争力について考察する。

注4：一般に、経営学や技術経営論（MOT）などでは、政府や組織のトップが決定した研究開発戦略や方向性を重視したマネジメントのことをトップダウン戦略あるいはトップダウンアプローチと呼び、現場の研究者の発想や興味、個人レベルでの活動等を重視したマネジメントのことをボトムアップ戦略あるいはボトムアップアプローチと呼ぶ。ナノテク分野でのトップダウン技術とボトムアップ技術は、これらとは異なり、あくまでも技術的アプローチの違いから、広いナノテクの技術を分類するために用いた用語である^{10, 11)}。

ナノテクノロジーとナノサイエンスについて

ナノサイエンスの範疇として考えられるものは、既存物質の未知の特性の計測（電気伝導度や温度依存性の測定等）、新規物質の構造解析や相互依存性の解明、ナノシミュレーション計算手法開発等が挙げられる。“ノンリニアモデル”研究開発が主流になりつつある現在において、ナノテクノロジーとナノサイエンスの相互フィードバックは極めて重要になっている。本稿が主張するナノシステム化技術は、事業化を見据えたときにより顕在化するという点で“テクノロジー”の範疇となる要素が強いが、ナノシステムが持つ技術的複雑性から、今後は、ナノサイエンスのサポートとフィードバックが不可欠となる。

4 ナノテクの競争領域の変化と日本の強み・弱み

本節では、前節で示したトップダウン技術とボトムアップ技術の観点から、日本のナノテクの競争力について考察する。ここでは将来の科学あるいは技術を俯瞰的に網羅するデルファイ調査の結果を再び取り上げて、日本の研究開発水準の詳細を検討した後、技術あるいは製品化までを担う役割として年々重要性が増しているベンチャー企業の動向を考察する。

4 - 1

デルファイ調査に見る日本の強み・弱みの関係

2 - 3 節では、ナノテク・材料分野を他分野と比較することで分野全体における日本の位置付けを示したが、ここではデルファイ調査の同分野で挙げられた注目すべき9の科学技術領域とその一部の

技術課題を取り上げて、同分野の専門家が見る日本の研究開発水準を検討する。

図表6には、ナノテク分野に含まれる9の領域に対する研究開発水準（現在）の評価結果（5段階）を、領域名およびその概要から判断して、上方にボトムアップ技術の性質が強いもの、下方にトップダウン技術の性質が強いものを並べた。対米、対EUの列にある指数

は、領域ごとの5段階評価の集計結果を図表4と同じように10段階へ指数化した値である。これらの結果を見ると、トップダウン技術では日本は優位に立ち、ボトムアップ技術では相対的にやや劣位になっていることがわかる。特に対米では互角水準の5.0を境にして、形勢が2分されているのがわかる。

ただし、これらの領域の中には、割合に差はあるもののボトムアップ技術とトップダウン技術の要素の双方が混在している領域もある^{注5)}。そこで、ちょうど中間に位置付けられた「物質・材料の創製・合成技術・プロセス技術」領域内のデルファイ課題を取り上げ、図表7にその水準の評価結果を示す。全てのデルファイ課題は、現状ではまだ未実現で、将来実現すべき、あるいは実現されるであろう技術的課題となっている。図表7では、図表6と同様にボトムアップ的要素の強いデルファイ課題を上方に、トップダウン的要素の強いものを下方に位置付けてリスト化した。デルファイ調査では、これらのデルファイ課題において第一線にある国（地域）を日本、米国、EU、（日本以外の）アジア、その他より選んでもらっている。図表7には、その最も得票数の多かった国（地域）を並べた。結果として、図表6と同様に、トップ

注5： 本稿ではトップダウン技術とボトムアップ技術を相対的に扱っている。ここではナノ材料シミュレーション技術を代表的ボトムアップ技術と位置付けているが、もちろんこの中にもトップダウン的要素とボトムアップ的要素が存在している。例えば現在、実験で得られた結果をモデリング等でフィッティングすることで、実験だけでは得られない物理的機構の解明は多く行われているが、一方で分子のあらゆる振舞いをシミュレーションによって統合・ナノシステム化し、全く新しいナノ機能性材料の設計を試みるという挑戦も行われている。ナノテク分野では、前者がトップダウンの技術であり、後者がボトムアップの技術である。

ダウン技術では日本の優位性が現れているものの、ボトムアップ技術では一部（ナノチューブ作成技術）を除いて米国にその座を譲っていることが見てとれる。

なお、ここでは図表6において中央に位置した領域を取り上げて分析したが、その他の領域に属する課題でも、同様の傾向が現れている。例えば、ボトムアップ的要素の強い「ナノ材料モデリング・

シミュレーション」や「ナノバイオロジー」領域では、第一線にある国として米国が日本を圧倒しており、逆にトップダウン的要素の強い領域では日本を第一線とする回答結果が多くなっている。

将来的にナノテク研究の挑戦がボトムアップ技術へシフトしていくとき、日本は米国に対し、同分野の科学技術競争力を相対的に弱めていくことが懸念される。すな

図表6 ナノテク・材料分野の研究開発水準に関するデルファイ調査結果

	ナノテク・材料分野に含まれる領域 ^{※1)}	対米 ^{※2)}	対EU ^{※2)}
ボトム アップ ↑ ↓ トップ ダウン	ナノ材料モデリング・シミュレーション	4.06	5.07
	ナノバイオロジー	3.53	4.82
	ナノデバイス・センサ	4.81	5.72
	NEMS技術	4.85	5.90
	物質・材料の創製・合成技術・プロセス技術	5.58	6.31
	ナノレベル構造制御による新規材料	5.47	6.28
	ナノ計測・分析技術	5.15	5.94
	環境・エネルギー技術	5.80	6.27
	ナノ加工・造型・製造技術	5.82	6.56

※1 「安全・安心社会に関わるナノ科学」（対米：3.98）は技術的判断が困難なため除外した
 ※2 互角水準を5.0として指数化している

参考文献⁶⁾を基に、科学技術動向研究センターにて作成

図表7 「物質・材料の創製・合成技術・プロセス技術」領域に含まれるデルファイ課題の研究開発水準に関するデルファイ調査結果

	「物質・材料の創製・合成技術・プロセス技術」領域の技術課題 ^{※1)}	第一線にある国 ^{※2)}
ボトム アップ ↑ ↓ トップ ダウン	有機・無機・金属等の材料をナノレベルで自在にアッセンブリーする技術	米国
	mRNA、tRNAを用いないin vitroのシーケンス制御による、任意の構造を持つタンパク質合成法	米国
	設計通りの構造をもつナノチューブ作成技術	日本
	固体表面・界面の構造と性質を原子レベルで自在に制御する技術	米国
	光をエネルギー源として炭酸ガスと水から直接プラスチックを合成する技術	米国
	照明用の有機高分子面発光体	日本
	ナノ構造制御による超塑性セラミックス製造技術	日本
	気相コーティングでダイヤモンドより硬い工具を作製する技術	日本

※1 当領域には11の課題があるが、そのうち回答結果に明らかに有意な差（R1で10%以上）が現れた8課題をリスト化した

※2 第一線にある国を日本、米国、EU、（日本以外の）アジア、その他より選択

参考文献⁶⁾を基に、科学技術動向研究センターにて作成

わち、トップダウン技術が主流である現状においてある程度の強みを発揮してきた日本は、ボトムアップ技術あるいはナノシステム材料開発へとその競争領域が変化することによって、徐々にその競争力を低下させていく可能性がある。

4 - 2

ナノテクベンチャー企業の特徴

近年ナノテクや ICT、バイオテクノロジーなど最先端科学技術に基づいたイノベーション創出の担

い手として、ベンチャー企業の役割が重要視されている^{注6)}。そこで、図表8(1)および(2)に「ビジネスとしてのナノテク大全」(榊野村総合研究所)¹²⁾に収録された日米のナノテクベンチャー企業リストを示す^{注7)}。両図表では、左側に米国のナノテクベンチャーを、

図表8(1) 日米のナノテクベンチャー企業比較

ボトムアップ技術	米国ナノテクベンチャー企業		コア技術	日本ナノテクベンチャー企業	
	Nanocrystals Technology NANOSYS, INC. ZIA LASER, INC.		量子ドット		
	CALIFORNIA MOLECULAR ELECTRONICS CO. NANOLAYERS		ナノ分子デバイス		
	NANOLOGIC, INC.		新型コンピュータ		
	NANOPLEX TECHNOLOGIES, INC. NANOSPECTRA BIOSCIENCE, INC. NANOSPHERE, INC. QUANTUM DOT CORPORATION		ナノ粒子バイオ応用		
	NANOCHIP, INC. NANOMAGNETICS LTD. ZETTACORE, INC.		超高密度メモリ	オプトウエア	
	Biophan Technologies, Inc. Broptics Communications Corp. Konarka Technologies, Inc. Quantum Polymer Technologies		新機能材料 (シールド材、ポリマー太陽電池、 導電性プラスチックナノワイヤ等)	ナック	
	Molecular Nanosystems NANOMIX Zyvex Corporation		CNT (カーボンナノチューブ) デバイス	プロトン C60 パワー ジェイジーエス	
	AVIVA BIOSCIENCES BIOMICRO SYSTEMS, INC.		μ -TAS (マイクロ化集積分析システム)	マイクロ化学技研 フルイドウエアテクノロジーズ	
	FLUIDIGM CORPORATION Micronics, Inc. NanoSpire NANOSTREAM				
	iMEDD, INC.		ナノメンブレン	バイオ・ナノテク・リサーチ・インスティテュート	
	ARRAYX, INC.		fs レーザ、 レーザマニピュレーション等	アルネアラボラトリ サイバーレーザ	
	BIOFORCE NANOSCIENCES, INC. Cytoplex Biosciences, Inc. Excellin Life Sciences, Inc. GENICON SCIENCES CORPORATION IMAGO SCIENTIFIC INSTRUMENTS CORPORATION Integrated Nano-Technologies Nano0sensors PICOAL SPINELIX Triton BioSystems, Inc.		イノムアッセイ プロービング バイオセンサ バイオチップ	生体分子計測研究所	
	Quantum Precision Instruments Pty Ltd.		超小型センサ、MEMS センサ等	リベックス フォトリソグラフィテクノロジ	
	Alinis BioSciences, Inc. C SIXTY, INC. INSERT THERAPEUTICS, INC. NANOMED PHARMACEUTICALS, INC.		DDS (ドラッグ・デリバリー・システム)	LTI バイオファーマ インターサイト・ナノサイエンス ナノキャリア	
			人工皮膚・網膜	ニデック	
	NeoPhotonics OPTIVA, INC. SiWAVE, INC.		光 IC	フォトリソグラフィ デプト	
	NanoGram Devices NANOPOWDER ENTERPRISES, INC. Nano-Tex, LLC. NTERA LTD.		ナノ粒子物理応用	クリーンベンチャー 21	

参考文献¹²⁾を基に、科学技術動向研究センターにて作成

右側に日本のナノテクベンチャーをリストアップし、両者の中間に各企業のコア技術を示している。リストの並びはやや主観的ではあるものの、技術アプローチの違いを縦軸に示し、コア技術が前節と同様の基準でトップダウン的であるか、ボトムアップ的である

かで判断した。一見して、米国のベンチャーの方がボトムアップ技術の領域で起業に成功していることがわかる。一方、日本のベンチャーは、従来の延長線上にあるトップダウン技術の領域に数多く存在している。

産業全体から見れば、現状では

まださほど大きな違いは現れていないが、今後、ナノテクの競争領域がトップダウン技術からボトムアップ技術、あるいはナノシステム化技術へと変化したとき、これらのベンチャー企業の違いが、将来の日米のナノテク競争力に大きな影響を及ぼすことが懸念される。

図表 8(2) 日米のナノテクベンチャー企業比較 (続き)

米国ナノテクベンチャー企業	コア技術	日本ナノテクベンチャー企業
NANOMUSCLE nPOINT, INC.	ナノアクチュエータ	ナノコントロール イーメックス ヒーハリスト精工
CARBON NANOTECHNOLOGIES, INC. Eikos, Inc.	CNT 製造	カーボン・ナノテク・リサーチ・インスティテュート (有)ナノ炭素研究所 フロンティアカーボン
ADVANCED DIAMOND TECHNOLOGIES ATOMIC-SCALE DESIGN, INC. CHEMAT TECHNOLOGY, INC. INMAT LLC.	ナノコーティング	白鳥ナノテクノロジー ティーアンドケー
NANOINK, INC. NANONEX CORPORATION NANOOPTO CORPORATION	ナノインプリント	MEMS コア アイトリックス デバイス・ナノテク・リサーチ・インスティテュート ナノデバイス・システム研究所
ALTAIR NANOTECHNOLOGIES, INC. CIMA NANOTECH (Nano Powders Industries) Five Star Technologies, Inc. Hi-Q Materials, Inc. MATERIALS MODIFICATIONS, INC. Nano Interface Technologies, Inc. Nano Gram NanoHorizons, Inc. Nanomaterials Discovery Corp. Nanomys, Inc. NANOTECHNOLOGIES, INC. NANOVA, LLC. NANOVENTIONS, INC.	ナノ粒子・ナノ構造製造技術等	日本ナノテク ミレニアムゲートテクノロジー
Nanometrology LLC.	ナノ計測技術	つくばナノ・テクノロジー テクノス 東京インスツルメント ナノテックス ナノフoton 日本分光 ワイコフ科学
	ナノ加工、精密機械加工技術等	アデプト・ジャパン エックスレイプレジション エリオニクス クラスターテクノロジー クレストック ナノ
	結晶成長技術	ナノトライド・セミコンダクター ナノテコ シクスオン オキサイド
Sherman & Associates, Inc.	真空装置 / 微細加工プロセス装置等	アールデック アドテックプラズマテクノロジー オプトラ 片桐エンジニアリング サイエンステクノロジー ナノテック ユーテック リソテックジャパン

ト
ッ
プ
ダ
ウ
ン
技
術

参考文献¹²⁾を基に、科学技術動向研究センターにて作成

注6：これまでの技術経営論（MOT）の研究では、一般に大企業は製品化に対する不確実性が高く、また一定以上のマーケット規模が見出せないニッチな研究開発には、研究開発活動の効率性の低下等が考えられることから経営判断として消極的になる構造にあることが指摘されている（例えば参考文献13、14）。一方で、破壊的イノベーションを実現するためには、このような不確実性の高い研究開発が欠かせない。そこで、多様なファンディングによるリスクヘッジと小規模な経営および開発体制を採る研究開発型ベンチャー企業が注目されている（例えば参考文献15）。

注7：参考文献12では、米国77社と日本59社は、それぞれ下記の資料をもとに抽出されている。

米国：「Nanotech Venture Fair 2002 (San Diego)」
「Nanotech Planet Spring 2002 (San Jose)」
「Nanotech Venture Fair 2003 (Coronado)」

日本：「ナノテクベンチャーの先行事例」（経営情報サーチ2002/夏）、「日本のナノテクベンチャー（概要編）」（日経ナノテクノロジー2003.8.25）、「日本のナノテクベンチャー（個別企業編）」（日経ナノテクノロジー2003.9.8）「平成16年度超微細技術開発産業発掘戦略調査ーナノテクベンチャー企業の実態調査ー」（経済産業省委託調査）、その他日本経済新聞等から抽出

なお、2005年以降も次々と国内外でベンチャーが立ち上がっているが、それらは含まれていない。

図表9 トップダウン技術とボトムアップ技術の特徴比較

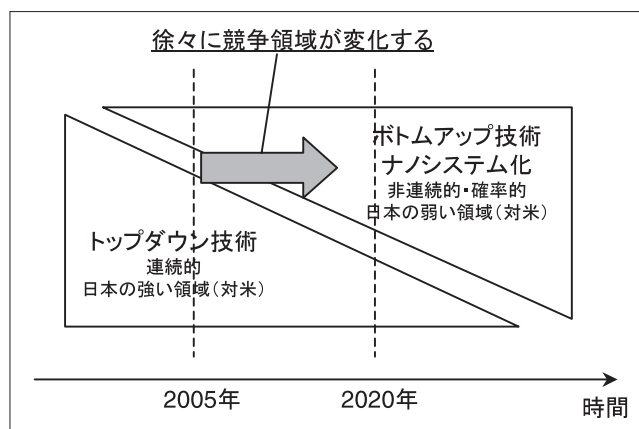
	トップダウン技術	ボトムアップ技術
研究開発の方向性 技術特性	微細化による物理的限界への段階的進行 (マイクロレベルから) スケールダウン 分析的	分子レベルからのナノシステム化 (ナノレベルから) スケールアップ 技術的不連続性大
研究開発戦略	ロードマップ的戦略 連続的	非ロードマップ的・新産業創出 確率的
研究開発のターゲット及びマーケット	(ある程度) 明確	不明確・探索的
相互関係	(ボトムアップ技術に対し) 課題の提示	(トップダウン技術に対し) ソリューションの提示
代表的技術	●半導体微細化技術 ●ナノ複合材料 等	●分子デバイス ●自己組織化技術 等
日本の競争力 (対米)	強い	弱い

4 - 3

トップダウン技術とボトムアップ技術の特徴比較と相対的低下が懸念される日本の競争力

図表9でトップダウン技術とボトムアップ技術の特徴比較を試みた。トップダウン技術は、現状技術の技術的課題の解決を目指し、次々と個別要素へ課題を移行させながら進行する。一方、ボトムアップ技術は、ターゲットの技術的不確定要素が大きいと、科学技術シーズのサーチコストが膨大となる可能性がある。しかし、ナノテク分野が将来的に図表5のように進み、ナノシステム化技術の研究開発が中心になったとき、その

図表10 今後予想されるナノテクの競争領域の変化



技術的先進性から競合相手は少ないと考えられる。その他、両技術における研究開発戦略やマーケットの有無、代表的技術などを図表9に示す。

図表10に、図表5および図表9を前提としたナノテクの競争領

域の変化の様子を概念的に示す。現在、トップダウン技術の領域において強みを発揮している日本は、技術の競争領域が変化することで徐々にその国際競争力を弱めることが懸念される。

5 ナノテク実用化へ向けたイノベーションシステムの考察 ●●●●●●●●●●

5 - 1

ナノシステム化を支える 基礎研究の構築と促進 (ナノテク研究へ向けて)

ボトムアップ技術を発展させ、最終的にナノシステム化技術を実現させるには、それらを支えるサイエンスベースでの研究開発が不可欠となる。4 - 1 節でボトムアップ技術の一端をデルファイ調査結果をもとに紹介したが、現在、トップダウン技術で強みを発揮している日本は将来、その国際競争力を弱めていく懸念がある。ナノシステム化技術の領域において国際競争力の向上を目指すためには、特に不確実性の高い領域の研究開発をナノテク研究者は強く意識して基礎研究を進めていくべきである。

ただし、ナノシステム化技術の研究では、論文などの研究成果を数多く出しにくい可能性がある^{注8)}。比較的容易にデータを蓄積できるトップダウン技術と異なり、ボトムアップ技術やその先のナノシステム化技術には無数に近い不確実的要素が関係するため、実験の再現性が得にくく、また仮説の検証も極めて難しいものとなるためである。そもそも、ナノサイエンスと考えられるような最先端の計測・分析は、周辺の測定条

件やパラメータを全て同一にした環境で行うため、どうしても分析や計測のみで終わってしまう傾向がある。そういう意味では、ボトムアップ技術やナノシステム化のための基礎的な研究手法は、まだほとんど確立されていないと言える。今後の真のナノテク競争力は、無数の要素が存在するナノスケール構造体の分子レベルでの組立て・ナノシステム化の領域で発揮されるというのが本稿の主張であり、日本は、この観点におけるナノサイエンス研究の構造化と強化が必要である。

5 - 2

ナノテクベンチャー創出システムと ファンディング機能の再考 (産業界へ向けて)

ナノテクベンチャー創出には、以下のような社会的・経済的特性を考慮しなければならない。

- 研究開発要素の越境や融合が多く、従来の学問分野や産業分類等のカテゴリーに収まらない
- 期待値が極めて大きい：マーケットから経済社会までを刷新する可能性を秘める
- 波及効果が極めて大きい
- 発見・発明から事業化に至るまでの投資金額が幾何級数的に増加する

- 事前に投資額の適正規模を見極めるのが難しいうえに、累積効果が大きいため、継続的かつ漸増的な投資を必要とする
- 高騰する投資額のリスク分散を図るためのイノベーションシステムが補完的制度として必要となる

以上のように、ナノテク、その中でも特にボトムアップ技術は、非常に技術的不確実性が高く、その投資効果も確率的にならざるを得ない。日本は、残念ながら先端的研究開発への投資メカニズムは米国ほど充実していないのが現状である。特にベンチャー企業への投資を見てみると、現状では一社あるいは複数の銀行・証券会社・大手製造メーカなどが共同出資体を作り、起業時から技術の育成、実用化まで通して支援する体制が主流である。しかし、新規事業への投資額が米国よりも小規模なうえ、投資活動や研究開発プロセスに重要な役割を果たすベンチャーキャピタルも十分には発展していない。すなわち、上記のようなナノテク、特にボトムアップ技術の特性を包含するイノベーションシステムは確立されていない。日本ではナノテクベンチャー企業の研究開発から事業化までを、公的支援でサポートしているのが現状である^{注9)}。しかし、ボトムアップ技術の実用化はときには15年以上の継続的投資を必要とする場合もあり、公的支援のみでは限界がある。スタートアップ期からアーリー、ミドル、レイターステージまで段階的に支援者が変わるような体制があれば、一支援者のリスク負担も大幅に減少し投資運用総額も莫大なものとならずに済む。

注8： 科学技術政策研究所が実施した共引用関係を用いた論文分析¹⁶⁾では、ボトムアップ技術に関連した研究領域「微粒子や高分子を用いたミクロからナノ構造の構築」が、133の研究領域の1つとして抽出されている。この研究領域中の高被引用論文に占める日本の割合は、約3.7%と、他のナノテク関連の研究領域と比較して低い。

注9： ナノテクベンチャーに関しては、野村総合研究所や多くの経済省委託調査などで詳しい分析が行われている。その中の1つ、参考文献17によると、ナノテクベンチャー企業の約79%が、何らかの公的な研究開発助成金の採択実績を持っている。しかもその採択率は約88%と非常に高い。ただし、それでもなお、ナノテクベンチャーの約55%が赤字の営業損益となっている。

新たな研究開発マネジメントツールの 作成手法の開拓 (マネジメント研究へ向けて)

トップダウン的研究開発の代表的な分野である半導体分野を中心としてこれまで発展してきた技術ロードマップは、投資の方向性を明確にするとともに、社会経済的な波及効果まで見据えることによって事前の投資の合理性を担保する役割を担ってきた。しかし、ナノテク分野、特にボトムアップ技術における以下のような特性から、同分野の研究開発戦略の策定においては、これまでの手法では限界が生じている¹⁸⁾。

- 他分野（特に半導体分野等）と比較して技術の構造化、将来市場の共通認識がなされていない¹⁹⁾
- ボトムアップ技術はその性質上、無数の技術シーズからなる集合概念であるため、事業化に有益な技術シーズを取捨選択するには膨大なサーチレンジとコストが必要となる
- 技術はノンリニアプロセスで発展する性質が強いため、投資から成果までの道筋が不透明である
- 技術の高度・複雑化にともなう、事前に投資の合理性を判断するのが困難で、かつ事後的な投資の経済効果を測定することも困難である
- 技術が発展するにつれ投資額が巨額になり、回収が難しくなる可能性が高まる
- 上記点から、ハイリスクハイリターン型の投資になるため、過少投資になりやすい

以上のような課題から、新しい研究開発マネジメントツールの作成手法の検討が必要となる。例

注 10：例えば、現在の技術ロードマップでは、毎年の改定作業で事前には予測不可能な変化を事後的に担保する仕組みになっている。しかし今後は、ロードマップに載らなかった技術（オフロード技術）も（オプションとして）見える形とするマネジメントツールの開発が求められる。

えば、近年のオプション理論の発展が注目される。ナノテク、特にボトムアップ技術ではその技術範囲の広さから、より高度に選択と集中がなされた技術ロードマップは、技術動向いかにでは将来的に全く利用されないロードマップとなる可能性が増加するという、皮肉的なジレンマを内包する。そこで、技術ロードマップの事前・事後のフレキシビリティ^{注10)}を高く保つことこそが、ナノテク分野の将来の運命を握る生命線となる^{20, 21)}。このような技術範囲の広さは、従来の技術ロードマップ策定手法では大きなリスクとなるが、一方で、その技術的オプションの多さは、将来増大する不確実性に対するリスクヘッジをもたらしものとなり得る。技術ロードマップの本質は、オプションの「可視化」にある。オプション理論では、期待や不確実性に関する事前の選択肢を事後的な価値としてみることが可能にする。不確実性は、従来はなるべく排除されるべきものであったが、オプション理論は不確実性にも価値があることを示すものである。オプション理論の発展によっては、潜在的に可能性を秘めている成果も明確に理論化できるかもしれない。

ここでは、オプション理論を一例として取り上げたが、もちろんこれに限るものではない。研究レベルではテキストマイニングを用いた技術ロードマップの作成手法なども検討されている²²⁾。オプションとしての多様性の確保という視点で、多くの技術課題とそれらに関する技術水準等の情報を含むことから、デルファイ調査も再注目される。マネジメント研究者は、

このような政策あるいは産業界のニーズを踏まえた新しい手法の検討を行う必要がある。ナノテク分野は、先端的研究開発マネジメントの難しさがいち早く顕在化してくる可能性がある。同分野での新たな戦略作成手法が確立されることは、他の先端研究開発分野に対する意義も大きい。

参考文献

- 1) 「分野別推進戦略 ナノテクノロジー・材料分野」総合科学技術会議（2006）
- 2) 「我が国の研究活動のベンチマーキング」(NISTEP REPORT No.90)科学技術政策研究所（2005）
- 3) 「ナノテクノロジー文献動向調査」ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター（2006）
- 4) 文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンターホームページ：
<http://www.nanonet.go.jp/japanese/>
- 5) 金間大介「ナノテクノロジー分野における各国の特許出願状況」（科学技術動向 2006年6月号）科学技術政策研究所（2006）
- 6) 「デルファイ調査」(NISTEP REPORT No.97) 科学技術政策研究所（2005）
- 7) Roco, M. C. (2004) “Overview of National Nanotechnology Initiative”, National Science Foundation ホームページ：
<http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/>
- 8) カリフォルニア大学ロサンゼルス校 カリフォルニアナノシステム研究所ホームページ：
<http://www.cnsi.ucla.edu/>
- 9) 「ナノシンセシス—創造的ものづ

- くりー」(独) 科学技術振興機構研究開発戦略センター (2006)
- 10) 高野潤一郎、小口信行「自己組織化材料研究の動向」(科学技術動向 2002 年 7 月号) 科学技術政策研究所 (2002)
- 11) 小松裕司、小笠原敦「エレクトロニクスへのナノテクノロジーへの適用例から」(科学技術動向 2005 年 1 月号) 科学技術政策研究所 (2005)
- 12) 池澤直樹「ビジネスとしてのナノテク大全：2010/2015 年のナノテク市場を可視化する」野村総合研究所 (2006)
- 13) 本庄裕司「ベンチャー企業」(『サイエンス型産業』(後藤晃、小田切宏之編) 第 5 章に収録) NTT 出版 (2003)
- 14) 後藤晃「イノベーションと日本経済」岩波新書 (2000)
- 15) 元橋一之「中小企業の産学連携と研究開発ネットワーク」(『日本のイノベーション・システム』(後藤晃、児玉俊洋編) 第 5 章に収録) 東京大学出版会 (2006)
- 16) 「サイエンスマップ 2004」(NISTEP REPORT No. 100) 科学技術政策研究所 (2007)
- 17) 「ナノテクベンチャー企業支援による産業活性化に関する調査研究」イノベーション・エンジン(株) (2006)
- 18) 金間大介「EU ナノロードマップ―ナノテクノロジー分野における技術ロードマップの課題と今後の展望―」(科学技術動向 2006 年 10 月号) 科学技術政策研究所 (2006)
- 19) 安永裕幸「イノベーションジャパン 2006『我が国のイノベーションシステム構築に向けた産官学によるロードマップ・コミュニケーション』」(2006)
- 20) Walsh, S. T. (2004) "Roadmapping a disruptive technology: A case study: The emerging Microsystems and top-down nanosystems industry", Technol. Forecast. Soc. Change, Vol. 71, pp.161 - 185.
- 21) Martin, R. (2004) "Technology roadmaps: Infrastructure for innovation", Technol. Forecast. Soc. Change, Vol. 71, pp.67 - 80.
- 22) Kostoff, R. N., Boylan, R. and Simons, G. R. (2004) "Disruptive technology roadmaps", Technol. Forecast. Soc. Change, Vol. 71, pp.141 - 159.

執筆者



ナノテクノロジー・材料ユニット

金間 大介

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

kanama@nistep.go.jp



科学技術と経済社会、イノベーションとの関係に興味を持つ。特にナショナルイノベーションシステムにおける大学・公的研究機関の役割や、公共性の重要性について調査・研究を行っている。また、ナノテクノロジー分野の研究動向についても興味を持ち調査活動を行っている。



第一研究グループ

近藤 章夫

<http://www.nistep.go.jp/>



半導体産業など科学技術のウエイトの高い産業の経済分析を行っている。科学技術を基盤とした産業競争力の強化、新産業の創出に効果的なナショナルイノベーションシステムや地域イノベーションシステムの構築に資する政策のあり方に関心をもつ。