

技術イノベーション理論の再考察

細野 央 郎

1. はじめに

今日、改めてイノベーション、技術革新の必要性が叫ばれているが、その議論・論理の前提となる研究対象は様々であり、あるイノベーション理論の説明可能性の範囲がどの程度であるか、ある理論が全体体系の中でどこに位置づけられるのかについては必ずしも明確になっていない。

通常、日本語ではイノベーションは技術革新と訳されるが、イノベーションとは技術革新に限定されるものではなく、顧客との関係性や生産プロセスについても見出されるものである。顧客との関係性においては、既存のテクノロジーを再編して従来の製品と市場とのつながりを変えてしまう市場創出イノベーションが生じ、他方、製品と工程に関する既成概念を洗練、拡張し、製品と市場との従来のつながりを強化する工程イノベーションが起こって産業の収益性に影響を与える。実際、日本企業の強みは工程イノベーションにあると考えられてきたし、また、社会経済が成熟化した中で、技術的な革新による限界生産性は逡減しつつあり、顧客志向に基づく市場創出型のイノベーションが重要であるともいわれている。

しかしながら、イノベーションの多様性については十分認識しつつも、“技術革新”に焦点を当てるのが肝要であるということが本稿の基本スタンスである。ビジネスにとって顧客志向は不可避であるが、そこから生まれてくるアイデアには現状技術を根本から変えてしまうような革新性はなく、えてして改良・改善の域を脱しきれないも

のが多い(内崎・佐藤1998年)。たとえば、先端医療にDDS (Drug Delivery Systems) というものがある。薬物はほとんどの場合、病変部への配送過程で不要なものとして分解されたり、健康な細胞に配送されて副作用を生み出したりする。DDSの中核手法である「ターゲティング療法」は、体内での薬物の行き先を積極的にコントロールし、薬物本来の効能をより発揮させるとともに、副作用の問題を解決し、薬物投与を最適化する(産業技術総合研究所2003年)。これについて顧客(患者)は、「健康になりたい」「副作用をさげたい」という要望は出せても、DDSのような技術的な解決法を示すことはない。DDSを可能としているのは、機能性高分子などの先端技術である。

加えて、技術革新に焦点を当てるとして、それにも多様性のあることを認識する必要がある。詳細は論じないが、そもそも、化学を母胎とする産業と物理学を母胎とする産業では基本技術及び製品製法について考え方がまったく異なっている。本稿では物理学を母胎とする産業を中心に検討を加えていくが、この分野では一般的に日本企業の“すり合わせ技術”に注目が集まっている。このすり合わせ技術について再検討を行うとともに、先行研究に基づいて、今日求められる技術革新の課題の本質について整理していくことが本稿のねらいである。

2. 産業進化プロセスとすり合わせ技術

Baldwin and Clark (1997) が、ハーバードビジネスレビュー誌に ‘Managing in an Age of Modularity’ を発表して以来、わが国でも製品アーキテクチャーによるイノベーションの議論が盛んである。自動車やコンピュータをみてもわかるように工業製品は多くの構成要素の集合体である。この構成要素の集合体である製品においては、システム全体をどのように（どのような視点で）構成要素へと分割するか、分割した構成要素（部分）をどのように関連づけるかという2つの課題が生じる。言い換えると、構成要素への“分け方”と要素の“つなぎ方”によって、製品性能に差異が生じるわけであるが、この“分け方”と“つなぎ方”の設計構想がアーキテクチャーである。

アーキテクチャーには「モジュラー型」と「すり合わせ型」がある。「モジュラー型」とは、機能と部品との関係が1対1のスッキリした形になっており、それぞれが自己完結的なものとなっ

ている。一方、「すり合わせ型」とは、機能群と部品群との関係が錯綜した形になっているものである。例えば、自動車には乗り心地という機能を実現する1つの部品があるわけではなく、タイヤ、エンジンなど複数の部品の相互調整によってシステムとしての性能を発揮している。こうした構成要素間の精密な調整によって目標性能を実現する技術がすり合わせ技術であり、これには作業者の豊富な経験と作業員間の密接な協力が必要であり、同技術は日本企業の強みであると考えられている（藤本・武石・青島2001年）。しかしながら、このこと（すり合わせ技術の強み）は一般であろうか。

図表1は、あらゆる産業の共通の進化プロセスを示したものである。まず宇宙や自然界が一定の法則にしたがって実在し、その法則が科学的に理解されて理論が構築される。理論は新しい技術を生み出し、その技術を応用して斬新な製品やサービスが開発され、ビジネスが誕生する。加えて、そのビジネスを効率よく管理・推進するための組

図表1 産業の進化プロセス



出典: Davis(1986) を参照作成

織（マネジメント）が形成される。もちろん、すでにみたように作業者の豊富な経験と密接な協力という組織（マネジメント）特性がすり合わせ技術を維持・強化しているという面があるように、進化の各プロセスは決して一方向的な影響のみに限定されるものではない。望遠鏡や顕微鏡の技術的發展はまぎれもなく現在の先端科学を支えている。

しかしながら、産業発展をより俯瞰的にとらえれば、図表1の進化プロセスは成立する。実際に近代産業をみても、化学の発展によって、化学反応技術を利用した化学工業、鉄鋼業、非鉄金属工業、石油精製業などが発達し、物理学の発展によって物理的な変換技術を基盤とした自動車、電子・電気機器、精密機器業などが発達したのである。

すり合わせ技術というくらいであるから、少し技術にフォーカスして議論を進めてみよう。生駒(1999年)は技術を以下の3つに分類している。

- ・ T1 経験に基づく技術（原始技術）
- ・ T2 科学的な法則に依拠する技術（科学の応用としての技術）
- ・ T3 ある条件下である目的を成就するための技術（工学技術）

この分類にしたがえば、すり合わせ技術はT1（技能）を基礎としてT3（製品システム）の性能実現を行うものであるといえよう。製品システムは、“ある科学原理”のもとで成立しているが、すり合わせ技術とは、このある科学原理の範疇で極力高い性能を実現するための技術である。

つまり、すり合わせ技術とは、ある科学原理のもとで成立している製品システムの現実の性能と、そのある科学原理に基づく理論的な限界性能の間に余白がある場合に効力を発揮する技術である¹⁾。ところが、先端科学関連産業である半導体などの分野では、製品性能がその技術を成立させている既存の科学原理の限界値（物理的限界＝中山1998年、物理限界＝藤村2000年、2002年、理論限界＝大見2004年）に達し、すり合わせ技術

による調整余白が消失（すり合わせが主たる競争要因とならない）してしまっている。こうした領域ではそもそも限界値を突破するための生駒のいうところのT2の科学に隣接した技術が競争要因となる。

以下では、まず、アーキテクチャーの議論の確認を行って、既存科学原理の限界値（以下、物理限界）にある産業について基本考察を行っていく。

3. 製品アーキテクチャーとその限界

アーキテクチャーには「モジュラー型」と「すり合わせ型」がある。青木（2001年）によれば、「モジュラー型」システムとは、ある連結ルールのもとで独立に設計され得るモジュールを結合することで、複雑なシステムまたはプロセスを構成したものである。モジュールとは、半自律的なサブシステムであり、他の同様なサブシステムと一定のルールに基づいて互いに連結することにより、複雑なシステムまたはプロセスを構成するものであり、一つの複雑なシステムまたはプロセスを一定の連結ルールに基づいて、独立に設計され得る半自律的なサブシステムに分解することがモジュール化である。

この定義に基づくならば古典的な機能分化も「モジュラー型」システムであるが、今日の「モジュラー型」システムの特徴としては以下をあげられる。

- 1) 相対的に個々のモジュール（サブシステム）内の複雑性が増している
- 2) モジュールの連結ルールが進化している
- 3) 全体システムの性質が事前的・中央集権的に構想されるよりも、個々のモジュールによって事後的・自律的に形成される比率が高まっている

また、「モジュラー型」システムは連結ルール（インターフェイス）が決められているので、構成要素間の調整にかかるコストを節約できる。さ

らに、モジュールの独立性が確保されることによって、システムに対する変化をモジュールレベルに局所化することができるのである。たとえば、「モジュラー型」システムの典型であるパソコンを考えてみると、デジタル・カメラの急速な普及でパソコンに高い処理能力が求められるようになって、パソコン全体を設計し直す必要はなく、高性能のCPUへの交換やグラフィックボードの装着によって対応することが可能である。加えて、モジュールの独立性が確保されていることで、製品開発、性能向上のスピードを大幅に向上させることができる。パソコンの性能向上は、CPU、ハードディスク、モニタなどの各モジュールの性能向上に依存しているが、他のモジュールとの調整コストが発生しないことでこのスピードアップが可能となるのである。

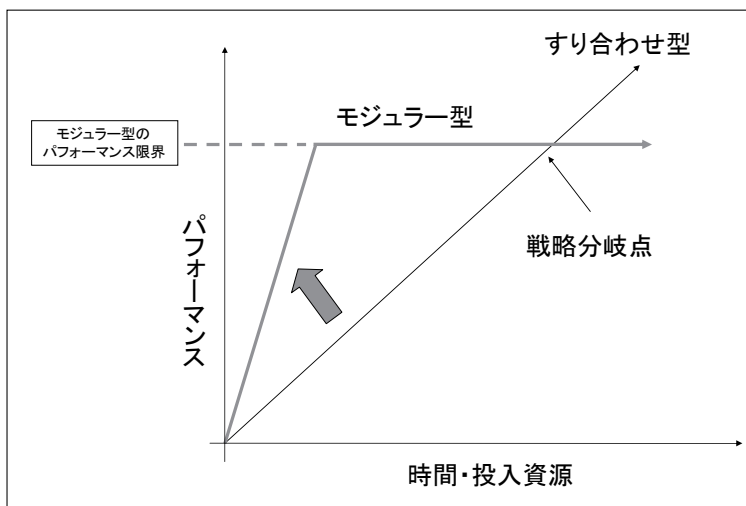
他方、「すり合わせ型」システムは、要素間の複雑な相互関係を積極的に許容し、相互関係を自由に解放して継続的な相互作用にゆだね、構成要素が微妙に調整し合ってトータルシステムとして性能を発揮する。

すでにみたように、「モジュラー型」システム

は分化した部分の改善・改良という範疇を超え、製品のスピード開発、スピーディな性能向上を実現している。しかし、同システムは、個々のモジュール内の変化には柔軟に対応できるが、モジュールをまたがる変化には弱い。加えて、達成可能な最大のパフォーマンス水準がインターフェイスによって制約されてしまう。それに対して、「すり合わせ型」システムでは、すべての構成要素を密接に相互作用させて、実現可能な最大パフォーマンスを引き出すことができるのである。一般に高度な安全制御の求められる自動車産業では、すり合わせ技術の適合度が高く、そのことが日本メーカーの競争力の要因となっていると見られている²。

ただし、「すり合わせ型」システムも、無制限のパフォーマンスを生み出すものではない。同システムでは、その認識範囲がシステム全体となるために、構成要素間の調整がきわめて複雑になる。図表3の左右の曲線は、ここでは同じ環境条件に直面しつつも、解決策の異なる2つのシステムを表したものであるととらえて欲しい。図表3の縦軸は、システムが発揮するパフォーマンス

図表2 「モジュラー型」と「すり合わせ型」のパフォーマンス比較



出典：藤本・武石・青島2001年

の高さを示しており、横軸は環境条件を示している。曲線はシステムの潜在性能（既存の技術で実現できる性能の限界）を示している。曲線の頂点はそのシステムにとっての理想環境を示している。理想環境の位置から他の環境条件（制約条件）が加わっていくと、システムのパフォーマンスは逓減していくことになるので凸型の曲線となっている。曲線の内側ではシステムを成立させることが理論上可能であるが、曲線の外側ではシステムを成立させることは物理的に不可能（限界）となる。

左右の曲線については、1つのシステムは1つの機能要素からなる単純システムであり、もうひとつは2つの機能要素によって性能が実現される複数システム（複雑システム）である。仮にこのシステムが製品であるとすれば、製品として成立（システム成立）するためには、社会または市場から要求されるパフォーマンス水準を超える性

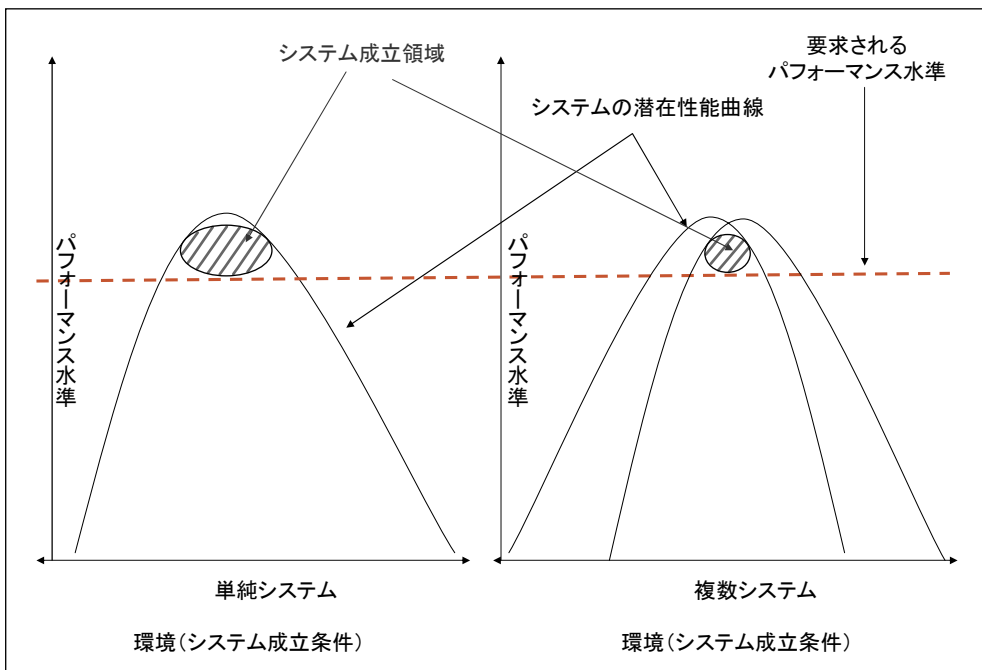
能を実現しなければならない。ゆえに、曲線の内側で要求されるパフォーマンス水準を上回る部分がシステム成立領域（斜線部）となる。図表3にあるように、他の条件が同一であれば、単純システムよりも2つの機能要素からなる複数システムの方がそれぞれの性能発揮及び理想環境の違いによって成立領域は狭くなる³。

要求されるパフォーマンス水準とシステムの複雑性が増すほど、システムを成立させるための「すり合わせ」の余地は少なくなるのである。こうした状況下ではアーキテクチャーよりも、物理限界の突破そのものが産業の競争要因となるのである。

4. 科学隣接型技術

産業技術は時代とともに高度化する。そして、今日の先端産業は、学問に基づいた本物の本当に

図表3 システム成立領域とシステム複雑性



出典：藤村2000年を参照作成

強い産業技術だけが勝ち残り、経験と勘に基づく産業技術だけでは手も足も出ない段階に突入している（大見2004年）。

図表4は“産業の米”といわれる半導体の回路の寸法幅（デザインルール）を細くする微細加工技術の進歩を示したものである。半導体は1.5年から2年で集積度が2倍向上するといういわゆるムーアの法則にしたがって性能向上が実現されてきた。たとえばDRAMの記憶容量を向上させる際にチップを大きくしたのでは性能面でも、コスト面でも意味がないので寸法幅を細くすることで集積度の向上を図ってきた。1980年代に登場した16KビットのDRAMの寸法幅は4 μm であったが、2004年時点の先端DRAMは1Gビット、寸法幅は90nmに達している。すでに半導体の先端技術はいわゆるナノ領域にある。

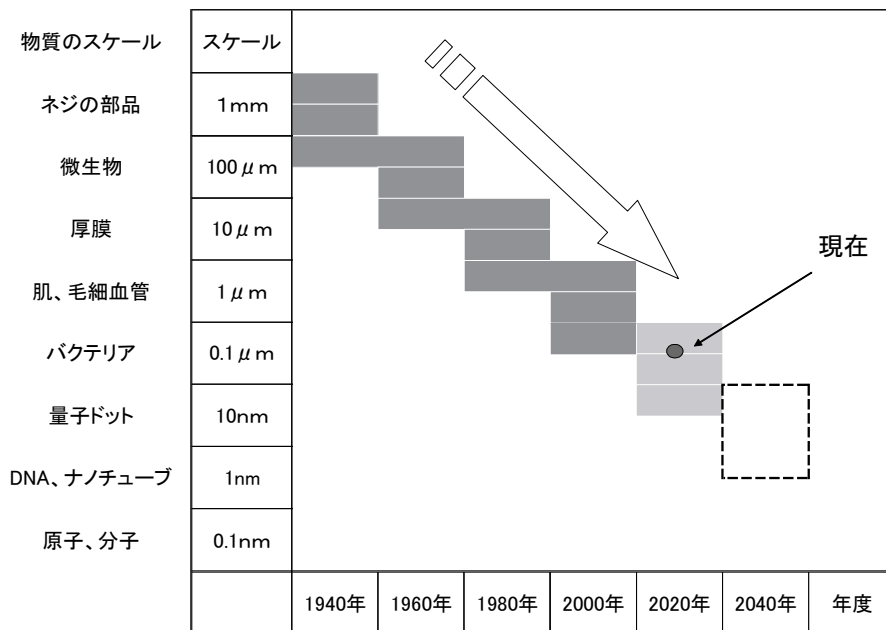
ナノ領域に達したということは、固体物理学に

基づいた技術の物理限界に接近したことを意味する⁴。通常、物理現象を考える場合には、原子や分子の集団としての振る舞いを対象とする。原子や分子を個別にはとらえず、現象の解析には集団の振る舞い（連続体）である電流や電気抵抗をとらえる。しかしながら、これがナノ領域という微視的世界に入ると、連続体科学としてみることの限界に達し、原子や電子の運動は量子力学に基づいて記述されるようになるのである。量子力学の世界に入るまで微細化が進行した半導体では、連続体の世界での動作原理とはまったく異なる原理が必要となる。（中山1998年）。

ゆえに、現在の半導体産業では、勘や経験による技術は通用せず、先端科学に裏打ちされた本物の技術が求められているのである（大見2004年）。

このように科学に隣接した技術が競争要因となる産業としては、半導体、先端金融、バイオテク

図表4：微細加工技術の進歩



出典：産業技術総合研究所（2003年）

ノロジー、先端医療・医薬、新素材、基本ソフトウェアなどがある。いずれも科学研究成果が産業に取り込まれるまでの時間が短い産業であり（藤村2000年）、高付加価値経営の求められるわが国企業にとって競争力の問われる領域である。

5. 技術の迂回戦略

物理限界に直面しているすべての技術について限界突破を図ることは容易ではない。物理限界の突破とは、そのシステムの技術体系そのものを根幹から再構築することを意味するからである⁵。その際には迂回戦略を採用することも選択肢の一つとなる。迂回戦略とは、ある技術から既に実用性が立証されている他の技術へ乗り換える、または実証されている他の技術との組み合わせによって課題解決を図ることである（中山1998年）。

例えば、半導体世界最大手のインテルは、MPUを微細化で高速化する従来方針を改め、複数のMPUを1つのチップに組み込む「マルチコア」方式への方向転換を打ち出している。すでにナノ領域にある回路設計について、微細加工技術を高度化しても2010年には限界に達すると判断しているのである。

このような迂回戦略は現在の自動車産業でも採られている。自動車産業では、厳しい環境基準をクリアできるエンジン開発が一つの技術課題となっている。しかしながら、エンジンの性能向上のみで環境基準をクリアするには技術的課題のハードルはあまりにも高いといわれている。そこで自動車メーカーでは、エンジンの性能向上についての技術課題の解決を試みるとともに、ITSなどを通じた複合的な課題解決を図ろうとしている。自動車は運行速度を上げると燃費改善（70～80キロまで）につながるがわかっている。つまり、料金所待ち、信号待ちによる渋滞を減らし、最短時間で目的地に到着できるようにすれば環境基準をクリアすることができる。ITSシステムは90年代半ばから一部実用化されているが、

これを活用・整備して、自動車という移動手段ではなく、交通システムといった観点から環境問題を解決していこうとしているのである。

物理限界の突破を試みるにせよ、迂回戦略を採用にせよ、高度で広範囲な知識と俯瞰的な視野が求められることに変わりない。この世界では経験や勘に基づく技術・技能だけでは通用しないばかりではなく⁶、従来の技術開発方法も通用しないといわれている。従来のように、大学や基礎研究所で基礎研究を行い、何か面白そうな成果が出てくると応用研究、実用化研究を行って事業化するというリニアモデルは通用しない。今後はターゲットを明確にして、5年後、10年後、20年後の実社会の強いニーズを予見・洞察し、その将来の実社会の強いニーズに対する最適解を最短時間で与えるために、必要な基礎研究、応用研究、実用化研究を同時並行で進めていかなければならないのである（大見2004年）。

理論構築に向けては、事例及び実証データを積み重ねなければならないが、先端産業の現状をみると、イノベーション理論の再検討が必要であるといえるかもしれない。

6. おわりに

最後に、これまでみてきたような変化が現実であるとすれば、今後の経営研究はどうあるべきかについて若干の検討を行ってみたい。まず、科学の中での経営学の位置づけについて考えてみよう。

科学とは、さまざまな事象の間に客観的・普遍的な規則や原理を見出し、全体を体系的に組織し、説明するものである。この科学はその対象によって自然科学と人文・社会科学とに大別される。自然科学が対象とするものは、客観的な実在と挙動である。自然科学では、実在に対する実験や観測が重視され、得られた結果を客観的事実として認め自然を理解する。したがって、その自然科学から得られる成果は、宇宙規模での“普遍的

な”自然の摂理である。一方、人文・社会科学の対象は人間の精神活動や生活環境、社会現象である。人文・社会科学によって得られる成果は、“普遍的な”ものにはなり得ず、個別的でローカルなものとなる(志村2002年)。

いうまでもなく、社会科学の一分野である経営学は、基本的にはローカルなものである。しかしながら、その考察対象であるビジネスそのものが、ユニバーサルな科学との隣接性を増しているとするならば、経営学の位置づけもいくらか再考されてしかるべきであろう。

われわれが研究対象とするビジネスや組織は、すでにみたように技術体系の上に成り立っている。産業革命以降の動力や制御などの技術革新とそれを体化した機械設備が登場しなかったら、巨大企業及び組織体制やマネジメントも成立し得なかった(Veblen, 1904)。加えて、インターネットという新しい技術が登場し情報伝達コストが低減したことで、機械設備に基づいて形成された組織及び管理様式は変容を迫られ、分散化・ネットワーク化がすでに現実となっている(Malone, 2004)。

機械設備の時代に問屋制家内工業を懐かしんでいるのは、経営学の発展はなかったように思う。

注

- 1 現実の性能と科学原理に基づく理論的な限界性能の間にあまりにも大きな余白がある場合にもすり合わせ技術は強みとはならない。調整余白が大きければモジュール化の効果の方が高いことが想定される。すり合わせ技術は適度な余白があるところでもっとも効果を発揮する技術である。
- 2 詳しくは藤本・武石・青島2001年を参照。
- 3 詳しくは藤村2000年を参照。なお、藤村は厳密には「物理限界」とその内側であって、工学技術的な限界である「装置限界」、またその技術を運用している人間の技能的限界である「実行限界」を区別している。あるシステムにおける最終的な実現性能は「実行限界」の位置によって規定される。
- 4 正確には60nm~40nmで物理限界に達するといわれている。
- 5 加えて、ある製品システムについての物理限界の突破は可能であっても、すべての科学・技術に共通した絶対的物理限界(中山1998年)を超えることはできない。たとえば、光の速度より速く移動する移動体を作ることはできない。
- 6 もちろん、個々の課題解決については経験や勘に基づく技術・技能は重要である。これらは藤村(2000年)のいう「実行限界」を規定するものである。

主要参考文献

1. Abernathy, W.J, K.B. Clark and A. M. Kantrow (1983) *INDUSTRIAL RENAISSANCE- Producing a Competitive Future for America*, Basic Books, Inc (望月嘉幸監訳, 1984年, 『インダストリアル・ルネサンス』TBSブリタニカ)
2. 青木昌彦, 2001年, 「産業アーキテクチャのモジュール化」青木昌彦・安藤晴彦編著『モジュール化』東洋経済新報社
3. Baldwin, C.Y. and K.M. Clark (1997) 'Managing in an Age of Modularity' *Harvard Business Review*, 75 (5), pp.84-93
4. Baldwin, C.Y. and K. M. Clark (2000) *Design Rules: The Power of Modularity vol1*, Cambridge, MA: MIT Press. (安藤晴彦訳, 2004年, 『デザインルール』東洋経済新報社)
5. Bore, E.P. (1999) *THE VALUATION OF TECHNOLOGY BUSIENS AND FINANCIAL ISSUES IN R & D*, John Wiley & Sons, Inc. (宮正義監訳, 2004年, 『技術価値評価』日本経済新聞社)
6. Christensen, C.M.(1997) *THE INNOVATOR'S DILEMMA*, Harvard Business School Press(伊豆原弓訳, 2000年, 『イノベーションのジレンマ』翔泳社)
7. Davis, S.M. (1986) *FUTURE PERFECT*, Raphael Sagalyn Inc. (日下公人訳, 1990年, 『ニュー

エコノミーがやってくる』講談社文庫)

8. 圓川隆夫・安達俊行, 1997年, 『製品開発論』日科技連
9. Fine. C.H. (1998) *CLOCKSPEED*, Linda Michaels Ltd. (小幡照雄訳, 1999年, 『サブライチェーンデザイン』日経BP社)
10. 藤本隆宏・武石彰・青島矢一編著, 2001年, 『ビジネス・アーキテクチャ』有斐閣
11. 藤村修三, 2000年, 『半導体立国ふたたび』日刊工業新聞社
12. 藤村修三, 2001年, 「モジュール化の有効性とその限界－技術の階層とモジュール化」青木昌彦・安藤晴彦編著『モジュール化』東洋経済新報社
13. 藤村修三, 2002年, 「研究開発における知識創造力」『一橋ビジネスレビュー』2002年AUT. pp.46-57, 東洋経済新報社
14. 畑村洋太郎編著, 1998年, 『実際の設計 機械設計の考え方と方法』日刊工業新聞社
15. 畑村洋太郎編著・実際の設計研究会編, 2002年, 『実際の設計第4巻 こうして決めた』日刊工業新聞社
16. 一橋イノベーション研究センター編, 2001年, 『イノベーションマネジメント入門』日本経済新聞社
17. 細野央郎, 2000年, 「資源展開、資源構造の競争戦略 新しい競争構造をみる基本枠組み」学習院大学大学院経済学研究科・経営学研究科研究論集第10巻第1号, pp.1-16
18. 生駒俊明, 1999年, 「産業界からみた応用物理学会への期待－科学技術再考」『応用物理学会誌』第68巻
19. 生駒俊明, 2004年, 「企業化値を最大化するための技術経営」『一橋ビジネスレビュー』2004年SPR. pp.10-16, 東洋経済新報社
20. 香山晋, 2004年, 「半導体産業にみる技術革新と技術経営」『一橋ビジネスレビュー』2004年SPR. pp.54-70, 東洋経済新報社
21. Malone, T.W. (2004) *THE FUTURE OF WORK*, Harvard Business School Press
22. 中山恒, 1998年, 『技術予測論』日科技連
23. 大見忠弘, 2004年『復活日本の半導体産業』財界研究所
24. 産業技術総合研究所ナノテクノロジー知識研究会, 2003年, 『ナノテクノロジー・ハンドブック』日経BP社
25. 志村史夫, 1997年, 『材料科学工学概論』丸善
26. 志村史夫, 2002年, 『文科系のための科学・技術入門』ちくま新書
27. 手塚典夫・米山猛・実際の設計研究会監修, 2003年, 『設計に必要な材料の基礎知識』日刊工業新聞社
28. 内崎巖・佐藤和正著・実際の設計研究会監修, 1998年, 『創造的技術者のための研究企画』日刊工業新聞社
29. Utterback, J.M. (1994) *MASTERING THE DYNAMICS OF INNOVATION*, Harvard Business School Press (大津正和・小川進監訳, 1998年, 『イノベーションダイナミクス』有斐閣)
30. Veblen, T. (1904) *THE THEORY OF BUSINESS ENTERPRISE*, NEW YORK (小原敬士訳, 1965年, 『企業の理論』勁草書房)
31. 渡辺千仞・宮崎久美子・勝本雅和, 1998年, 『技術経済論』日科技連
32. 山口栄一, 2003年, 「半導体・デバイス産業」, 後藤晃・小田切宏之編著『サイエンス型産業』NTT出版