

Title	NCシステムにおける製品アーキテクチャの特性とその進化のパターン
Author(s)	姜, 英美
Citation	年次学術大会講演要旨集, 23: 301-306
Issue Date	2008-10-12
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7560
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

姜 英美 (明治大学)

1. はじめに

製品アーキテクチャとは製品システムの性質を捉える概念であり、個々の製品の背後にある設計思想である。すなわち、システムの全体をどのように分割し、分割した部分をどのように関連づけるかということである。

製品アーキテクチャに関する既存の研究は個々の製品アーキテクチャを所与のものとして見なし、それぞれのアーキテクチャの便益や製品開発との適合性を論ずる分析枠組を採用している。例えば、同じコンピュータ産業であってもパソコンはオープン型アーキテクチャであるが、汎用機はクローズド型アーキテクチャに近いと考えられる(柴田・児玉, 2001)。このオープン・アーキテクチャかクローズド・アーキテクチャかという視点はインターフェースのルール化が公開されている製品であるかどうかの分類であって、具体的な個別技術内容によるものではない。したがって、もう一つの分析枠組として製品アーキテクチャの進化について議論する必要があると考えられる。

製品アーキテクチャは製品の設計を経営学立場から捉える概念である。どのようにして製品を構成部品や工程に分解し、そこに製品機能を配分し、それによって必要となる部品・工程間のインターフェースに関する基本的な設計思想のことである(藤本 2001)。

したがって、製品システム範囲内で構成要素をどう分けて、どうつなげるかによって2つの次元に記述できる¹。第一に、モジュラー型対インテグラル型という次元である。モジュラー型アーキテクチャとは規格化されたインターフェースをもつ相互依存度が低い自己完結型部品を組み合わせて製品を構成でき、部品の変更によって製品の性能変更ができる。一方、インテグラル型アーキテクチャは構成機能部品間の相互依存性が高く、性能向上のために構成部品間の微妙な調整を必要とする。第二に、クローズド型対オープン型である。これは構成部品間の相互依存関係(インターフェース)が特定企業内に限られたものをクローズド型アーキテクチャ、より広く特定企業を越えて通用する場合にオープン型アーキテクチャという。

以上のことを踏まえてここでは製品アーキテクチャを進化的視点、すなわち製品システム全体がどのようなサブシステム群の組合せと関係性で実現されているのかという観点から見る。そのために第1に、製品システムにおける機能要素と構造要素はどのような写像(mapping)関係であるか、第2に、構造要素間のインターフェースはどの程度ルール化されているのか(Ulrich, 1995)、という2つの視点から分析する。

2. 技術進化の方向性に関する先行研究

技術進化の方向性に関する研究は主に2つに分けることが出来る。その一つは技術進化を技術それ自体に重点を置く研究、もう一つは市場(外部環境)との相互作用を重視する観点である。

第一に、技術それ自体に重点を置くものとして「技術の内的論理」(inner logic) 的な立場であるローゼンバーク(Rosenberg, N., 1976)の研究である。彼は工作機械産業の歴史的分析からイノベーションの方向性が「技術的不均衡」(technical imbalance)により決定されると指摘している。すなわち、構成要素間の技術的不均衡が存在し、それを改善するためにそこに焦点が与えられる。そして、集中的な開

¹ ここでの製品アーキテクチャの諸タイプに関する用語は藤本(2001)が論述しているものを引用している。藤本はモジュールには「モジュラー型」モジュールと「インテグラル型」モジュールの二種類があると考えている。

発活動の結果、全体のパフォーマンスが達成されるが、同時にそれがまた新たな技術的不均衡を生み出す。このようなことを繰り返すことによってイノベーションが促進されると指摘している。同じく、ドーシ (Dosi, G., 1982) は技術進歩について一定の方向性を持った技術進歩のパターンを描いていく (技術軌道 (technological trajectory)) という主張し、ネルソンとウインター (Nelson, R.R. and Winter, S.G., 1982) は企業がこれまでの技術開発活動のなかで蓄積された技術がイノベーションに影響を与えるという経路依存性 (path-dependent) 主張した。

第二に、技術進化は市場 (外部環境) との相互作用であるという研究でアバナシーとアッターバックら (Abernathy, W.J., 1978, Utterback, J.M., 1994) が市場の支配を達成したドミナント・デザイン (dominant design) を用いて説明したものである。企業はドミナント・デザインが確立される前 (流動期) までは市場の動きを探索しながら多様な技術を試す。しかし、一応ドミナント・デザインが確立される (固定期) と競争優位の源泉が製品の技術的部分から補完財、あるいはコスト削減に移ることになりイノベーションはラディカルからインクリメンタルへ、プロダクトからプロセスへと移ることのなると主張している。

これら先行研究は各産業における技術進化の方向性とそれを決定する論理の解明ではあるが、技術進化それ自体における解明ではなかったと考えられる。したがって、ここで議論する NC システムにおける製品アーキテクチャのシフトの考察は技術進化それ実態を解明することに意義があると考えられる。

3. NC アーキテクチャの事例

ここでは NC (Numerical Control, 数値制御) システムのアーキテクチャの変化を事例分析し、製品アーキテクチャにおける変化の方向性を判断する。さらに、それら製品アーキテクチャの変化を規定する要因について議論する。分析視角は機能要素から構造要素への写像関係と構造要素間のインターフェースのルール化という 2 つの視点である。

NC システムの技術体系化の変化は 1962 年から 1969 年までのハードワイヤード技術を中心とした NC システムと 1975 年以降のマイクロプロセッサ技術中心の NC システムに大別できる。結論を先取りしていうと、MPU 技術の導入直後を除いてインテグラル型アーキテクチャからモジュラー型アーキテクチャへシフトしている。MPU 技術は NC システムの再構成を要するものであったため度入直後はモジュラー型からインテグラル型へシフトした。しかし、その後、再度モジュラー型の方向に向かって進化している。

3. 1 ハードワイヤード・モジュラー型 NC (1965 - 1969) : インテグラル型からモジュラー型へ

NC システムは 1952 年マサチューセッツ工科大学で初めて試作された NC フライス盤にさかのぼる。MIT が開発した NC フライス盤は世界最初の NC 工作機械であった点では重要なものであったが、実用性という面では多くの問題を抱えており、限られた特殊な領域しか利用しなかった。当時、トランジスタや IC などは存在しなかったため NC 装置の回路素子としては真空管が使われ、NC 装置だけで工作機械本体よりも大きかった。この時、使われた真空管だけで 2000 本に至った。その後、トランジスタやダイオード、集積回路 (IC) の採用により NC 装置の小型化、部品点数の削減、それらによるコストの削減が急速に進行した。詳しく見ると、1960 年代に入り、NC 装置はフライス盤、ボール盤、中ぐり盤、旋盤、研削盤、型彫盤など多様な工作機械へと搭載されるようになった。そのうえ、NC 装置の信頼性の向上、低価格化が進んでいた。この時期の NC 装置の主要な技術は 1966 年開発された FANUC260 であった。このモデルは世界で初めて回路素子がトランスジスタ多から IC 化され、300 枚近い制御回路のプリント盤が 40 枚へと削減 (小型化) された。これにより、さらなる信頼性の向上とコスト削減が可能となり、1969 年には完全にモジュラー化された NC、FANUC240A が開発された。NC 装置の完全モジュラー化により多様な市場の仕様に対して対応でき、コストも削減でき、ますます汎用化が促進されたのである。このモジュラー化を実現させたのが回路素子の IC 化とモジュラー化設計²にあった。

² NC 装置は工作機械に装着して使用されるものであるから基本的にはオーダーメイドに近いがモジュラー化によって汎用化が可能となったのである。このようなハードワイヤード・モジュラー型 NC はそれぞれの機能に応じて異なったハードウェアが用意され、それを基に構成されていた。すなわち、多様な工作機械に要求される複数の機能別モジュールを量産してユーザーの要求に応じて組み合わせる設計思想であった。

3. 2 コンピュータ技術との融合：モジュラー型から再度インテグラル型へ

NC にコンピュータが導入される先駆けとなったのは DEC 社の PDP-8 や日立の HITAC-10 といったミニコンピュータの出現であった。ハードワイヤード型 NC に対し、NC 内部に汎用の電子計算機を組み込み、そのプログラムによって NC 装置の機能を発揮することを目指し開発されたのが 1972 年に開発された世界最初の CNC (Computer Numerical Control) ,FANUC200A であった。この CNC の最も重要な特徴は汎用コンピュータを内蔵することによりプログラムを入れ替えるだけで同一の NC 装置で別の機能を遂行することが可能となることであった³。すなわち、高度の柔軟性と制御機能を兼備した NC 装置が実現できたことである。そして 1975 年の FANUC2000C をきっかけとして NC システムはハードワイヤードからソフトワイヤードへと移行することになった。

しかし、NC システムの小型化を目指してインテルが開発した MPU⁴技術を導入することによりモジュラー型から再びインテグラル型へ移行することになる。当時、ソフトワイヤード技術を中心としたデザイン・ルールでは画期的な技術であった MPU 技術を適合することができなかった。その理由はそれまで蓄積された技術は MPU には無効となり、そのため MPU をモジュラー化するためには新しいデザイン・ルールが必要であったがその時点ではまだ実現できず、再びインテグラルに向かざるを得なかったのである。表 1 で示しているように NC 装置の小型化の推移は回路素子が IC 化された 1966 年から進んできたが MPU 技術の導入直後 1975 年になるとプリント板面積比が増大している。すなわち、MPU という革新的な要素技術の導入によってアーキテクチャの設計に関する技術的問題が生じたことが推測できる (柴田・玄場・児玉,2002)。その技術的問題とは主に性能に関わるものであった。MPU の導入によって従来のハードウェアで行ってきた処理をソフトウェアで行うことを意味し、これによって性能が十分に出来るかという問題であった。すなわち、マイクロプロセッサを中心としたハードとソフトとの機能分担に関わる問題でまさに NC システムのアーキテクチャの設計に関わる問題であった。このように MPU 導入直後には一度インテグラル型へシフトするがその後、再度モジュール化にむかって進展する。1985 年を中心とした FANUC Series で既にモジュラー型アーキテクチャになった (表 1)。

表 1 NC 制御部プリント板面積比の推移と新しい要素技術

NC 装置名	出荷開始年	NC 制御部のプリント板面積比	主たる新しい要素技術と特徴
FANUC220	1962 年	60.2	トランジスタ
FANUC260	1966 年	7.5	完全 IC (集積回路) 化 その後、改良され 1969 年にモジュール化
FANUC200A	1972 年	未測定	NC 専用のミニコンピュータ内蔵 ソフトの入れ替えだけで、機能変更可
FANUC2000C	1975 年	9.5	マイクロプロセッサを初めて搭載
FANUC SYSTEM6	1979 年	4.6	カスタム LSI の採用 バブルメモリの採用
FANUC Series0	1985 年	2.7	大規模カスタム LSI
FANUC Series15	1987 年	未測定	表面実装、32 ビットバス
FANUC Series16	1991 年	1.5	電子部品のプリント板 3 次元実装
FANUC Series16i	1997 年	1.0	NC 制御部を液晶表示器と一体化

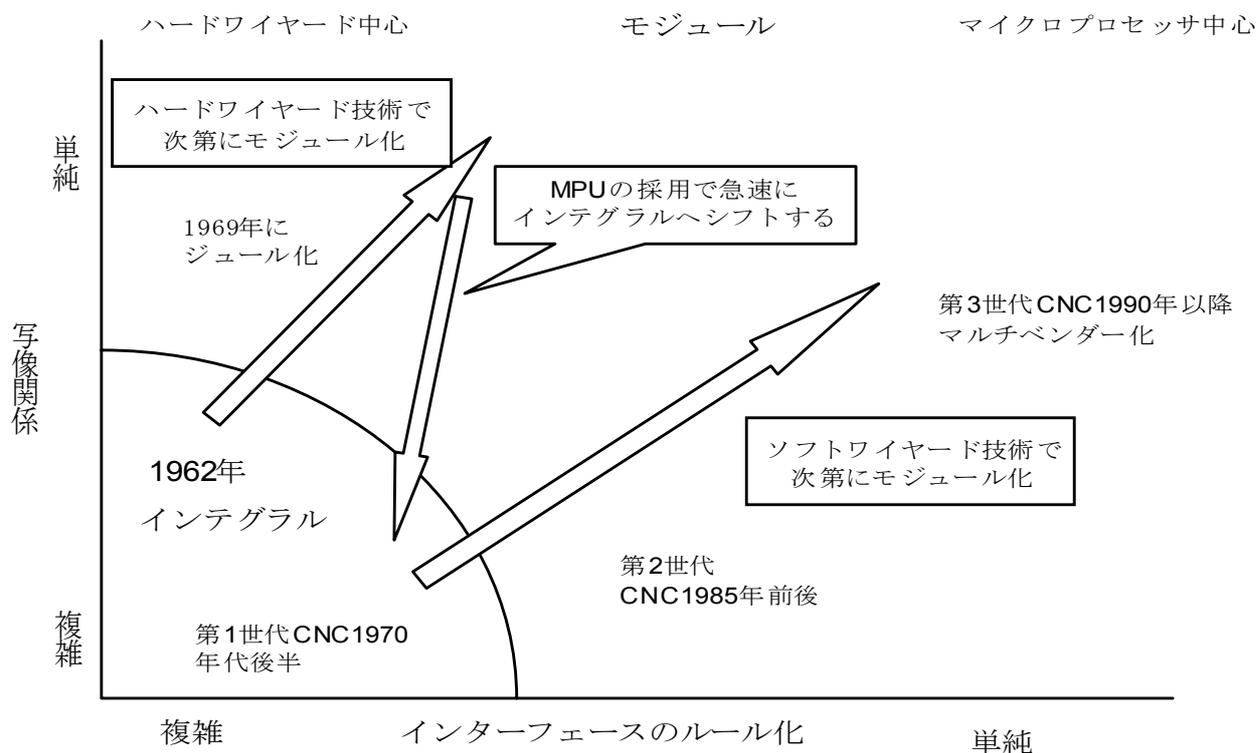
上表では最新機種である i シリーズを基準とした制御部のプリント板の面積比を表している。

出典：柴田・玄場・児玉 (2002) p.70

³ CNC になったことで機能や構成が多彩となり、NC の中に CPU を内蔵することによってハードとソフトとの関連が密接で混在的となった。

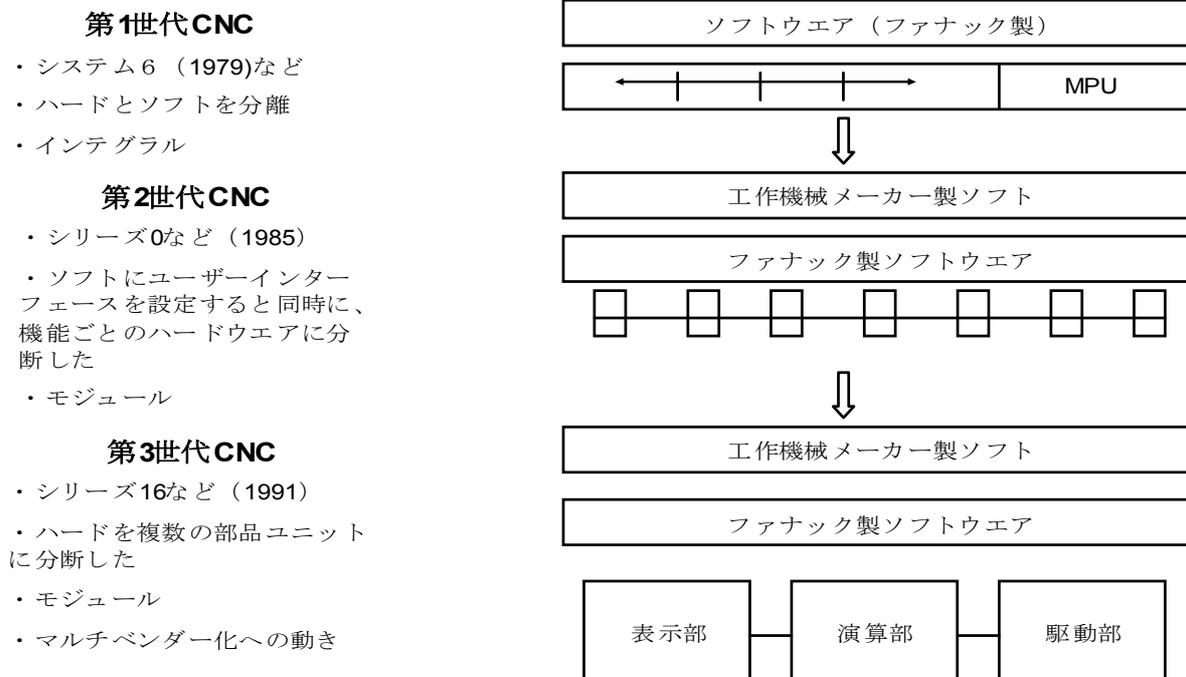
⁴ コンピュータのプログラム実行機能をすべて 1 チップの LSI 内に収納したものがマイクロプロセッサである。1971 年末にインテル社によって発表された 4 ビットチップ i4004 は 2300 個の MOS トランジスタからなり毎秒六万回の命令を実行できた。MPU の採用は NC 装置の価格を急速に引き下げる効果をもたらし、さらに 1974 年日本の NC 装置技術が初めて米国に対して先行することになった (河邑,2000) 破壊的なものであった。

図1 NCアーキテクチャの発展過程



出典：柴田・児玉（2001）、柴田（2008）基に作成

図2. MPU導入後の分断方法の変化



出典：柴田・児玉（2001） p.192

3. 3 製品アーキテクチャの規定要因

以上、NC システムにおける製品アーキテクチャのシフトを考察したが、次にそのようなシフトをもたらす要因はどのようなものがあるのか議論する必要が出てくる。ここで考えられるのは主として4つで、①は内生的なものであり、②から④は外生的なものであると考える。

①組織能力：製品システムが複雑であればあるほど高い組織能力を必要とする。製品システムがモジュラー型アーキテクチャである場合はそのデザイン・ルールの設定、あるいはインターフェースのルール化がそれほど複雑ではない。しかし、逆にインテグラル型アーキテクチャであると、システム全体をどう繋げる（インターフェースのルールの問題に関わる）か、さらに複雑で微妙な調整をどのようにして行うかという複雑で高度なデザイン・ルール設定が必要となる。たとえば、自動車産業（インテグラル型）におけるデザイン・ルールとパソコン（モジュラー型）産業におけるデザイン・ルールは異なる。したがって、組織が持っている学習能力、生産能力、設計能力、調整能力、開発能力などといった組織能力によって製品アーキテクチャが規定されることもあると考えられる。

②技術パラダイムの変化：既述した NC 装置で言う MPU 要素技術の変化である。当時、真空管やトランジスタからマイクロプロセッサへという技術革新は既存企業における破壊的な技術革新であった。そのため、米国の NC メーカーは従来の技術と不連続な特性を持ったマイクロプロセッサ技術の導入に躊躇したが、ファナックは従来のハードワイヤード NC の技術を捨て、マイクロプロセッサ技術を導入し、成功した。このように画期的な要素技術の登場により技術体系の変化が起きた場合、新たなデザイン・ルールを実現することができなければ、製品アーキテクチャがモジュラー型からインテグラル型へ逆戻りすることがあり得る。

③市場（ユーザー）からの要求：当時の NC は基本的にはオーダーメイドに近い製品であった。そのため大量生産はできなかつたし、コストを削減することもできなかつた。NC を大量生産しようとする多様な工作機械の限界パフォーマンスを満たすことができないというジレンマがあったからである。このように多様な市場の要求（様々な工作機械に対する特有な機能を発揮する）を満たしながらコスト削減を実現するという対立する要求に成功したのがファナックのトランジスタを採用した FANUC220⁶の開発であった。

④市場の評価：市場がコスト重視型であるか性能重視型であるかによって変化すると考えられる。当然のことながらコスト重視型であればモジュラー型に、性能重視であればインテグラル型に変化するであろう。また、市場が「変化・多様化」を求めるとなると、モジュラー型が有効であり、「統合性」を求めると、インテグラル型が有効である（藤本, 2002）。

まとめ

製品アーキテクチャのダイナミックなシフトについて製品の導入期ではモジュラー化するためのデザイン・ルールを設計することが困難であるため、インテグラル型アーキテクチャを採用するが、成熟期に入ると次第にモジュラー型アーキテクチャを採用すると論議されてきている。ここで考察を行った NC システムにおける事例をみると確かにそのような傾向が見られる。

しかし、製品アーキテクチャを変化させる何らかの要因によりインテグラル型からモジュラー型へ、また、再度インテグラル型へシフトすることもありうる。例えば、革新的な要素技術の登場によって再びインテグラル型にシフトすることもありうる。それは革新的な要素技術は今まで企業が蓄積してきた技術、設計能力、生産工程などを無効にし、さらに新たなデザイン・ルールの設定を要するからである。例えば、NC 装置における MPU 要素技術の登場がそれである。MPU 技術は米国企業には最初は受け入れず、日本の装置メーカーであるファナックが積極的に受け入れた。その結果、1952 年以来 20 数年間にわたる NC 装置の発達史の中で常に米国の後を追うようにして発達してきた日本の装置が初めて米国

⁵ 当時の米国における最大の NC 装置メーカーであった GM 社はマイクロプロセッサ技術を 1970 年代の終わりになって初めて導入し、1980 年に発売された 1050HTL において初めて MPU を採用した。しかし、この時期でも MPU 採用 NC 装置は機能と価格の両面において顧客の要求を満足することができなかつたため顧客によって拒否された（河邑, 2000）。MPU を開発したインテルさえも最初 4 ビット 4004 を売るために顧客を教育する必要があった（Rovert, 2002）。

⁶ ファナックは FANUC220 の開発によって NC 装置の部品点数を大幅に削減（コスト削減）でき、また、NC 内部に汎用の電子計算機を組み込み（CNC）、汎用コンピュータを内蔵することによりプログラムを入れ替えるだけで同一の NC 装置で別の機能を遂行することを可能にした（様々な工作機械に対する特有な機能を発揮する）。

を上回るようになったのである(河邑,2000)。その他、製品アーキテクチャの規定要因として市場の評価や要求(外生的要因)、組織能力(内生的要因)などについて議論を行った。しかし、これらの要因は既存の研究が個々の製品アーキテクチャを所与のものとして見なし、それぞれのアーキテクチャの便益や製品開発との適合性を論ずる分析枠組から起因するものであると考えられる。

したがって、ここでは製品アーキテクチャは必ずしも所与のものではないことを主張したい。企業が戦略的な意図をもって最初からインテグラル型アーキテクチャを選択し、ずっと変わることなく続く場合もありうる。また、インテグラル型を採用するにはあまり技術的に優位ではない場合、最初からモジュラー型を採用することもありうる。すなわち、企業自らが状況に応じて選択できる戦略の一部として製品アーキテクチャの位置づけもあり得るということである。

参考文献

- 河邑 肇(2000)「NC 装置メーカーの技術革新と工作機械の価格競争力」中央大学商学研究会編『商学論纂』第41巻4号。
- 楠木 建(1998)「システム文化の組織論」一橋大学イノベーション研究センター編『一橋ビジネスレビュー』第45巻1号。
- 柴田友厚・児玉文雄(2001)「製品アーキテクチャの進化」、一橋大学イノベーション研究センター編『一橋ビジネスレビュー』第49巻3号。
- 柴田友厚・玄場公規・児玉文雄(2002)『製品アーキテクチャの進化論』白桃書房。
- 柴田友厚(2008)『モジュール・ダイナミックスーイノベーションに潜む法則性の探求』白桃書房。
- 土井康弘・本田庸悟・井上久仁子編(1983)『NCシステム事典』朝倉書店。
- 原田 勉(2005)「汎用技術と技術アーキテクチャ：ファナックの事例」神戸大学経済経営学会編『国民経済雑誌』第191巻3号。
- 藤本隆宏・武石彰・青島矢一(2001)『ビジネス・アーキテクチャ：製品・組織・プロセスの戦略的設計』有斐閣。
- 藤本隆宏(2002)「製品アーキテクチャの概念・測定・戦略に関するノート」独立行政法人経済産業研究所『RIETI Paper Series』02-J-008, p.1-57.
- Abernathy,W.J.(1978),*The Productivity Dilemma: Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*, Johns Hopkins University Press, Baltimore
- Bladwin,C.Y. and Clark,K.B.(2000) *Design Rules: The Power of Modularity* Vol.MIT Press,Loden.
- Christensen,C.M.(1997),*The Innovator's Dilemma*,Harvard Business School Press,Boston. (伊豆原弓訳(2001)『イノベーションのジレンマ』翔泳社。
- Dosi,G.(1982),“Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technological Change”, *Research Policy*,Vol.11. Iss.3,pp.147-161. (川村尚也訳「技術パラダイムと技術軌道」今井賢一編・川村尚也訳『プロセスとネットワークー知識・技術・経済制度ー』NTT出版,1989)
- Rosenberg,N.(1976), *Perspectives on Technology* Cambridge University Press, London.
- Robert,A.B.(2001),*Strategy is Destiny:How Strategy-Making Shapes a Company's future*,The Free Press.(石橋善一郎・宇多 理訳(2006)『インテルの戦略』ダイヤモンド社。
- Ulrich,K.T.(1995), “The role of product architecture in the manufacturing firm” , *Research Policy*, Vol.24,Iss.3,pp.419-440.
- Ulrich,K.T. and Eppinger,S.D.(2004),*Product Design and Development*, third edition,McGraw-Hill/Irwin Publish,New York.
- Utterback,J.M.(1994),*Mastering the Dynamics of Innovation*, Harvard Business School Press, Boston.