

MMRC-J-145

我が国エレクトロニクス産業にみる  
モジュラー化の進化メカニズム  
-マイコンとファームウェアがもたらす経営環境の歴史的転換-

東京大学COEものづくり経営研究センター  
小川 紘一

2007年3月



東京大学21世紀COE [モノづくり]  
ものづくり経営研究センター



# 我が国エレクトロニクス産業にみる

## モジュラー化の進化メカニズム

—マイコンとファームウェアがもたらす経営環境の歴史的転換—

東京大学COEものづくり経営研究センター

小川 紘一

2007年3月

### 要約

製品の深部で進むモジュラー化のメカニズムを、半導体の技術革新に支えられたマイコンやファームウェアの基本的な作用から明らかにする。我が国の製造業で、特にエレクトロニクス産業だけが1995年から長期低迷を続けたが、その背景に製品アーキテクチャのモジュラー化現象があった。これを光ディスク・ドライブ技術の内部構造に立ち入って解明した。我が国のエレクトロニクス産業は、製品設計の深層に半導体技術が介在するようになった1990年代から、経営環境の歴史的な転換期に立っていたのである。我が国企業を支える産業の中で、特にマイコンやファームウェアが直接介在できないプロセス型の部品・材料を除き、製品アーキテクチャがモジュラー型へ転換される領域が今後ますます拡大する。我が国エレクトロニクス産業で1990年代に直面した同じ経営環境が、半導体技術が深く介在する21世紀の自動車産業でも散見されるようになった。擦り合せ型なら常に我が国企業が安定的に強い、という単純な構図が通用しない市場が深く静かに迫っている。我々の目に触れることない深層部で、製品機能・性能・品質やコスト、さらには競争優位の位置取りまでも支配するという意味で、マイコンとファームウェアは21世紀の人工ゲノムに位置取りされるのではないか。半導体産業の技術革新が人工ゲノムを生み出した。

### キーワード

エレクトロニクス産業、製品アーキテクチャ、モジュラー化、マイコン、ファームウェア、組み込みソフト、光ディスク、CD-ROM, DVD, デジタル家電、IBM PC, 人工ゲノム

## 1. はじめに

1980年代に世界市場を席卷した我が国の家電産業は、非常に早い段階から NIES 諸国で海外生産をスタートしてきたにもかかわらず、1990年代から急速に競争力を失った。筆者はその背景に製品アーキテクチャのモジュラー化現象があることを、光ディスク産業の事例で指摘した(小川、2005, 2006a)。新宅は同じ結論を多数の貿易統計データを使って導いた(新宅, 2006a, 2006b)。本稿では、光ディスクという特定産業で起きた現象と貿易データに見る諸現象とが、共に製品設計や製造の深層で進むマイコンとファームウェアの作用に起因していることを解明する。マイコンとファームウェアの作用は、まず製品の深層でアーキテクチャをダイナミックに変化させ、徐々に経営環境の変化となって顕在化する。半導体の技術革新が1990年代からマイコンの性能を飛躍的に高め、深層で起きるアーキテクチャ変化が瞬時に経営環境を変えるようになった。マイコンやファームウェアが製品設計と製造の深層で深く広く介在し易いという意味で、我が国エレクトロニクス産業は1990年代の後半から既に経営環境の歴史的な転換に立っていたと考えられる。

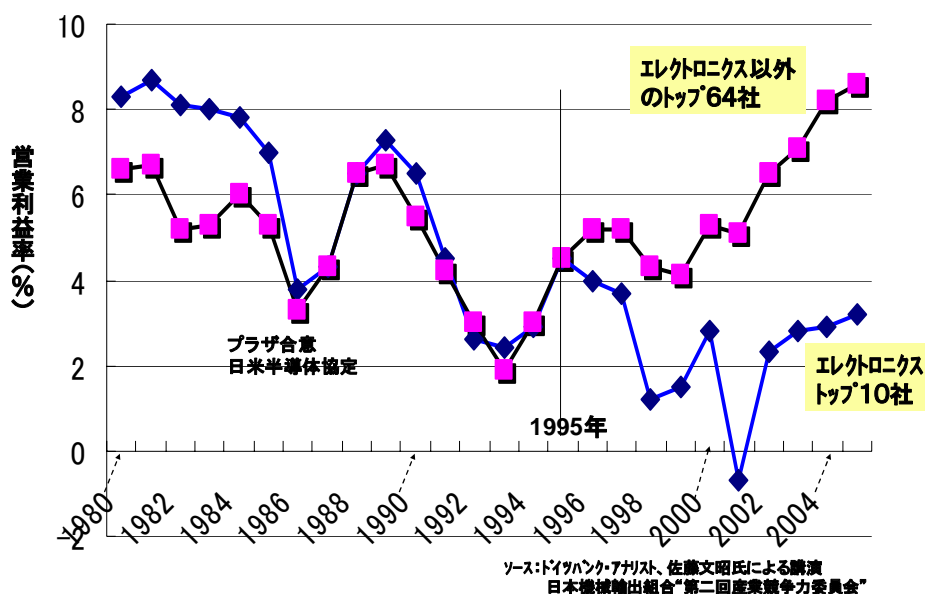
図1に我が国エレクトロニクス系企業のトップ10社とその他の製造業のトップ64社について、1980年から現在までの営業利益を示す(佐藤、2006a)。1980年から1995年までの15年間は、エレクトロニクス産業とその他の製造業で営業利益率が共に同じ推移を辿った。我が国の製造業が為替の変動や世界経済の好不況に対して同じ様な影響を受けたのである。1980年代前半のエレクトロニクス産業が相対的に高い営業利益を誇ったのは、VTRなど我が国発の技術イノベーションが国際競争力を飛躍的に高めていたためである。アナログ技術中心の当時は、イノベーションがそのまま国際競争力に直結する幸福な経営環境であった。しかし1990年代の中期からこの様相が一変する。多くの製造業は1994年ころから完全に回復基調に入って営業利益が8~9%台まで向上した。しかしながらエレクトロニクス産業だけが1996年ころから悪化の一途を辿り(佐藤、2006b)、未だ2~3%台に留まっている(図1)。我が国の製造業を取り巻く世界経済の好不況や為替変動、あるいは人件費などの経営条件が同じだったにもかかわらず、1995年を境に際立った違いが見られるのはなぜなのだろうか。“失われた10年”がエレクトロニクス産業にだけ見られるのはなぜなのだろうか。

著者が本稿で繰り返す基本メッセージは、我が国のデジタル家電、情報通信、半導体・液晶などのエレクトロニクス産業で、製品アーキテクチャが1990年代の後半から急速にモジュラー型へ転換され、その深層でマイコンやファームウェアが深く介在していた、という仮説である。多くの著作が、エレクトロニクス産業は他の産業にくらべてモジュール性が高いと指摘しているが(例えばスーザン・バーガー、2006)、マイコンとファームウェアの作用がその深層で重要な役割をしている、という事実に着目した研究は見当たらない。モジュ

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

ラー化の進化・深化が競争ルールを大きく変えてしまい、エレクトロニクス産業だけが経営環境の歴史的な転換期に立った。しかしながらこれが我々の目に触れない製品構造の深層で短期間におきた現象だったためか、我が国企業の経営システムや組織能力がこれに適応できず、従来型のままで転換期へ突入した。国際競争力が、技術力では無くアーキテクチャ構造に強く依存する事実については、すでに光ディスクの事例で繰り返し紹介した(小川、2006a)。ここに見る我が国企業の姿は、アナログ技術、すなわち擦り合わせ型のアーキテクチャに最適化されたままの経営システムでモジュラー化の時代に突入する姿であった。

図1 我が国エレクトロニクス産業に見る“失われた10年“



デジタル・テクノロジーの介在による製品アーキテクチャのモジュラー化現象は、我が国より 20~30 年も前のアメリカ・コンピュータ産業で顕在化した。その後アメリカのコンピュータ業界は、IBM, DEC, SUN, HP, INTEL などに例を見るように、1980 年代の後半から経営システムを再構築して現在の繁栄を築いた。我が国企業でも、少なくともコンピュータ関連の企業は、アメリカに起きたモジュラー化現象とこれがもたらす経営環境の激変を 1980 年代から理解していた。しかし当時はまだこの分野でキャッチアップ型に位置取りされており、モジュラー化現象は、むしろ我が国企業のビジネス・チャンスと捉えていたのである。1980 年代に見る我が国企業の姿は、1990 年代後半の韓国・台湾などに見るキャッチアップ型企業と同じである。

我が国製造業で製品アーキテクチャのモジュラー化現象が深刻な経営問題となったの

はエレクトロニクス産業が最初である。例えば 1980 年代まで世界市場を席卷した家電で、モジュラー化の兆候が既に 1980 年代後半の据え置き型 VTR で起きていた(小川、新宅、善本、2006)。垂直統合型で世界市場を席卷した当時の家電産業は、同じ垂直統合型の組織能力を持つ IBM というアメリカ企業のパソコン・ビジネスとほぼ同じ時期に、据え置き型の VTR でモジュラー化現象の兆候を掴んでいたが、VTR の事例を経営環境の歴史的転換を示す兆候と捉える視点は、我が国における製品アーキテクチャ論の興隆(藤本、2001,2003,2004)を待たねばならない。その後に登場したカムコーダー(8ミリビデオ)によって VTR のアーキテクチャを再び擦り合せ型へ引き戻し、モジュラー化の深化による経営環境の激変が回避されたためである。我が国企業の組織能力と相性の良い擦り合せ型製品への回帰は、確かに安定した収益の維持に貢献した。しかしこれを後知恵で分析すれば、その直後の 1990 年代末に全製品で顕在化する世界的レベルでのモジュラー化現象には、結果的に対応し難い組織能力へと逆戻りすることになった。

モジュラー化現象が我が国エレクトロニクス産業の完成品ビジネスを弱体化させている事実は、多種多様な貿易統計データによって指摘されている(新宅、2006a)。これが経営のレベルで深刻化したのは、マイコンとファームウェアが製品の内部構造に深く介在しはじめた最近のことである。DVD プレイヤーや携帯電話はもとより全てのデジタル家電で、設計工数の 60%以上がファームウェア開発に費やされている実態からもこれが理解されるであろう。2000 年から顕在化したデジタル家電の異常な価格下落、あるいは技術蓄積の少ないキャッチアップ型工業国が短期間で最先端製品に参入し、ここから我が国企業が競争力を失って行く姿は、1980 年代のアメリカ・パソコン業界で IBM がキャッチアップ型の互換機メーカーにシェアを奪われていく姿と全て重なる。モジュラー化がもたらす経営環境の劇的な変化、すなわち競争ルールの激変に組織能力が対応できなかったのである。1980 年代の IBM が、そして 15 年後の我が国エレクトロニクス産業に見る競争優位が、研究開発や技術力ではなく製品が持つアーキテクチャ構造そのものに大きく依存するようになってしまった。

1970 年代のアメリカで興隆したメイン・フレームやミニコン、パソコンでは、マイクロ・プロセッサ(MPU: Micro Processor Unit)とこれを動かすソフトウェアが、モジュラー化現象を加速させる主役であった。一方、1990 年代後半から DVD プレイヤーやデジタル家電でモジュラー化現象を担ったのは、マイコン(MCU: Micro Controller Unit)とこれを動かすファームウェアである。マイコンと愛称される MCU は、前者の MPU に周辺デバイスのコントローラ機能を持たせて集積化した半導体チップである。1970~1980 年代のアメリカでは、マイクロ・プロセッサ(MPU)をその中核に据えたホスト・コンピュータが多くの人目に触れる姿でオフィスや自宅に配置されており、これがもたらす経営環境への影響を理

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

解するまで長い時間を必要とはしなかった。しかしながらデジタル家電では、マイクロ・チップ化されたマイコンがファームウェアとともに製品内部に深く潜んで人の目に触れることは無い。ごく一部の設計技術者が目にしていたに過ぎない。我が国企業の経営者はもとより製品開発の前線を担うスタッフですら、デジタル家電がパソコン型の経営環境に激変するとは思ってもよらなかったのではないか。マイコンとファームウェアがもたらす作用は、深層にあって顕在化し難い製品アーキテクチャの構造転換であった。1995年ころにDVDの開発を担った多くの人の証言によれば、中国・台湾・韓国企業がDVDを作れるようになるとは夢にも思わなかったという。最先端の超精密エレクトロニクス技術で構成されたDVDならCD-ROMやCD-Rと違って高収益ビジネスになるはず、と信じて疑わなかった。これは多くのインタビューによって確認されている。しかしながらDVDプレイヤーはもとより、超精密技術で構成された記録型DVDドライブですら、急速にモジュラー型へ転換され、国際間の水平分業が加速した。そしてCD-ROMやCD-R/RW以上に激しく価格下落を繰り返した。

これまで国際間の水平分業化はネットワークの興隆に起因すると言われてきた。これは1980年代に興隆したアメリカ・ソフトウェア産業にそのまま当てはまるであろう。しかしながらパソコンでも、国際的な水平分業へ移行したのは現在のようなモジュラー型に完全転化した1990年代の初期である(立本、2007)。ハードウェア主体の製品の場合は、その前にアーキテクチャのモジュラー化現象が起きていなければならない<sup>1</sup>。特にハードウェア・ベ

---

<sup>1</sup> 1970年代の後半になると当時のDECを中心にNixsdorf, Wang, Primeなど、新興のミニコン・ベンダー群は、1980年代のIBMに見るパソコン戦略と違って積極的なオープン・モジュラー戦略を採り、モジュール・クラスター型の産業構造を作りあげた。一方、ミニコンの場合はIBMと異なり、トータル・バリュー・チェーンの一部しか担うことのできないベンチャー企業群が主導する産業だったためである。たとえばハード・ディスク・ドライブとミニコンを繋ぐSMD(Storage Module Drive)インタフェースをオープン環境で業界標準にし、多くのハード・ディスク・ドライブ・ベンダーをミニコン市場に引寄せた。これは、当時まだハード・ディスクを自主開発する力のないミニコン・ベンダーの知恵だったのである。1970年代後半にアメリカから遠く離れた日本の富士通が、例えミニコンそれ自身に関する技術知識を持たなくても、オープン化されたSMDインタフェースだけをガイドにハード・ディスク・ドライブを開発すれば、それだけでアメリカ市場でビジネスをすることができた。その後富士通は、1980年代の初期にミニコン市場のハード・ディスクOEM市場を席卷するまで成長した。以上のようにミニコン市場で国際的なモジュール・クラスター型の産業構造が1970年代の後半に興隆するが、これはネットワークがまだアメリカ軍や大学の特定用途に留まっていた時期である。

確かに1970年代の末にはアメリカ国防省の資金に支えられたARPA(高等研究計画ネットワーク)がスタンフォード大学などで運用されていたが、ビジネス用ではない。使い方が煩雑なARPAを介さず同軸ケーブルでネットワークに接続する方式でルーター・ボックス用の原始的なネットワークOSを開発したのが当時のスタンフォード大学職員だったレオナルド・ボザックとそのパートナーのサランド・ラーナーであり、1980年代の初期であった。ここからネットワークが少しずつ大学の外へ出るようになり、2人は1984年にシスコ・システムズを立ち上げる。一般用のインターネットが出現するのは1988年である〔上記のネットワーク関連は、ガウワー、クスマノ(2005)〕。富士通の立田事業部長(後に専務)に率いられたハード・ディスク・ビジネス部門は、当時世界的な名機とアメリカで絶賛されたEagle-Iディスク・ドライブ(独創的な10.5インチ・サイズのモジュール構造、340MB、1981

一スのものづくり経営を担う我が国製造業にとってはネットワークだけが進化しても国際的な水平分業は起き難い。東アジア諸国企業との水平分業を考える場合は、ネットワークの進化よりも製品アーキテクチャがモジュラー型に転換するタイミングに着目すべきではないか。

1990年代におきた半導体の驚異的な技術革新がマイコンの性能を飛躍的に向上させ、これがファームウェアの機能も進化させた。ファームウェアが製品設計の段階から内部構造に深く介在する場合は、本来なら擦り合せ型になるはずの製品が瞬時にモジュラー型へ転化する。光ディスク・ドライブやデジタル家電だけでなく、パソコン周辺機器、デジカメ・携帯電話・薄型テレビなどの全ての家電製品や情報通信機器でも、さらには半導体などあらゆるエレクトロニクス産業でも類似の現象が起きた。これが製品アーキテクチャと組織能力、あるいは産業アーキテクチャと組織能力との巨大な乖離を生み出したという意味で、我が国のエレクトロニクス産業はすでに1990年代の後半から経営環境が歴史的な転換期に立っていたのである。一部の経営者はその兆候を、デジタル化すると何故かジェット・コースターのように価格下落が起きてすぐに製品寿命が尽きる、という表現で捉えた。そして2000年ころからブラック・ボックス化という言葉が経営レベルで使われはじめる。ブラック・ボックス化という表現は、デジタル化に抗する一種の経営戦略と位置付けされたのである。しかし、コア・コンピタンスとしての技術ノウハウをブラック・ボックス化する経営戦略は、モジュラー化現象が競争ルールを変えてしまうという視点から理解されるべきである。そして我が国企業の国際競争力は、技術力では無くアーキテクチャの構造に大きく依存していることを再認識し、ここから経営システムの再設計を考えるべきである。『IT化という大きな波を日本経済がうまく捉えられなかった』という地上10,000mから見るマクロな指摘<sup>2</sup>、あるいは『エレクトロニクス産業の弱体化は経営者の責任である』という牧歌的な指摘では、経営者を経営システムの再設計へ向かわせることはできない。経営者は常に合理性を追求する人々であり、同時に現在の収益維持・雇用維持に大きな責任を持っているという意味で、市場の前線に陣取る事業部長と同じ地上1.5mの目線から語る助言が必用である。オープン環境でモジュラー型に転化しやすい製品アーキテクチャのビジネス環境では、技術力よりもむしろ経営イノベーションが企業の業績を左右する。この意味でスタッフ集団の機能・能力が非常に大きな役割を果すが、我が国企業のスタッフ集団は、残念ながらサムソンに比べよう

---

年出荷)で、アメリカ市場を席卷した。これが1980年代に富士通コンピュータ部門の収益に多大な貢献をしたのは言うまでもない。

<sup>2</sup> 経済学や経営学を高度に例えて表現したのは東京大学の藤本隆弘教授である。藤本教授は、高度10,000mでなく工場の天井と同じ高度5mから見たものづくり経営論を提唱している。本稿で著者は、市場の前線に陣取る事業部長と同じ目線の、高度1.5mから議論したい。



## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

も無く弱体である。逆説的ではあるが、我が国の経営戦略は市場の前線に陣取る事業部長の目線で語られて初めてその効力を発揮する。

アーキテクチャの転換が競争優位に与える影響が解明されていなかったためか、圧倒的な技術力を誇った我が国の光ディスク産業は、1990年代から現在まで新規製品の開発と市場撤退を何度も繰り返して力尽きた。しかしながらその中でも、モジュラー化による経営環境の激変を乗り切った幾つかの勝ちパターンが生み出されており（小川、2006b, 2006c）、我が国エレクトロニクス産業が参考にすべき経営システムの事例も幾つか見られる（小川、2007）。

マイコンとファームウェアは、半導体産業の技術革新に支えられて今後も急速に進化する。したがってマイコンやファームウェアが直接介在できないプロセス型の受動部品や材料を除き、例えアーキテクチャ構造が擦り合せ型であっても、これをモジュラー型へ転換させて組立・製造する製品領域がますます拡大すると考えざるをえない。そして1990年代のエレクトロニクス産業でおきた経営環境の激変は必ず他の産業へ伝播する。もしマイコンのサイズと消費電力が現在の1/10~1/100まで小さくなるなら、その活用範囲が無限に広がり我が国の産業構造に図り知れない影響を与えるであろう。観察や実験が主体だった生物学は、議論の対象が初期の分類学的なものから、構造、機能、組織の問題、そしてゲノムへと大きく変った（宇沢、2000）。製品アーキテクチャ論も、分類や構造からその構造を支配するゲノムの探索へと研究の対象が移るのは、自然の成り行きである。マイコンとファームウェアは、今後も我々の目に触れることなく製品の内部にますます深く介在しながら製品機能・性能、そして品質やコストまでも支配するようになった。この意味で、21世紀の人工ゲノムと位置取りされるのではなかろうか。以上のような問題意識を背景に、本稿では特にCD-ROMやDVDに焦点を当て、技術の内部構造に深く立ち入りながらモジュラー化のメカニズムを紹介したい。

## 2. マイコンとファームウェアの技術革新がものづくり経営環境に与える影響

### 2.1 マイコンの登場と製品アーキテクチャの動的転換

マイコンと呼ばれるマイクロ・コントローラ・ユニット（MCU）は、1971年にインテルから発表されたマイクロ・プロセッサ・ユニット（MPU, i-4004）をルーツに持つ。i-4004の誕生には嶋正利氏が偉大な貢献をしているが（嶋、1987）、そのルーツは更に1946年に開発されたプログラム内蔵方式のENIACコンピュータまで辿ることができる。目的に応じてプログラムを入れ替えながら、あるいはメモリーに蓄えられた複数のプログラムを順次呼び出しながら情報処理する。これはその後のメイン・フレームやミニコン、ワークステ

ーションを経てパソコンやサーバなどあらゆるコンピュータ・システムまで、その基本アーキテクチャを支える人工ゲノムとして伝承された。

プログラム内蔵アーキテクチャを1つのチップで実現したのが、1971年にアナウンスされたインテルの4ビット・マイクロ・プロセッサ(i-4004)であり、マイクロ・コードと称するソフトウェアで書かれたプログラムを、目的に応じてメモリーから呼び出しながら使う<sup>3</sup>。マイクロ・プロセッサは1970年代の初期に電卓用として開発され、キャッシュ・ディスペンサーで多用されるが、中期からその市場が徐々にパソコンに移って機能・性能が飛躍的な進化を見せた。1973年にモトローラから発表された6800や1974年にインテルから発表された8080(工作機械にも多用された)は、その後に出現するコンピュータの新時代、すなわちパソコン時代を予感させるものであったのである。高速四則演算を得意とするDSP(Digital Signal Processor)もマイクロ・プロセッサをルーツに持つ。1980年代初期に日本とアメリカ企業からほぼ同時に世に現われ、特定用途の高速専用プロセッサとして独自の進化を遂げた。

1970年代にマイクロ・プロセッサを介してハードウェアの動作を直接制御したプログラムがマイクロ・プログラムと呼ばれた。これがEP-ROMやフラッシュ・メモリーと呼ばれるROM(Read Only Memory)に格納される場合はファームウェア(Firm Ware)と呼ばれる。現在では組み込みソフトとも呼ぶ人もいる。本稿が着目するマイコンとしてのMCUとは、演算と制御が得意なマイクロ・プロセッサMPUに、メモリー機能や入出力回路および周辺制御回路などを組み合わせて1つのチップに集積したものであり、その機能・性能は

<sup>3</sup> MPUの基本コンセプトは1969年から1970年に日本のビジコン社で電卓を設計していた技術者によって考えだされた。1960年代の後半になると電卓もコモディティ化が進んで数十種類の電卓を世に出す必要があり、その都度設計しなおす従来の方法では対応が不可能になっていた。この問題を解決する手段として、ビジコン社の技術スタッフが考えたのが、演算命令およびこれを実行するオペランドをメモリー上に並べて実行するためのルーチンとを、プログラムによって入れ替えるというアーキテクチャであった。半導体電子回路をビジコン社が設計し、当時まだ半導体のベンチャー企業に過ぎなかったインテルをファンドリーとして活用しながら製造した。しかしながら電卓用としてはコストが高すぎたので、キャッシュ・ディスペンサーに最も多く使われた。キャッシュ・ディスペンサーへ積極的に応用したのも当時の我が国企業である。i-4004に続くi-8008も我が国の精工舎が費用の一部を負担して科学技術計算用のデスクトップ・コンピュータ開発にチャレンジしている。1970年代から1980年代の我が国企業は、ソニーのトランジスターに例だけでなく、非常に多くの分野で最先端技術へ果敢に取り組む姿勢が極めて強かった。1990年代にこれが一変するのはなぜだろうか。

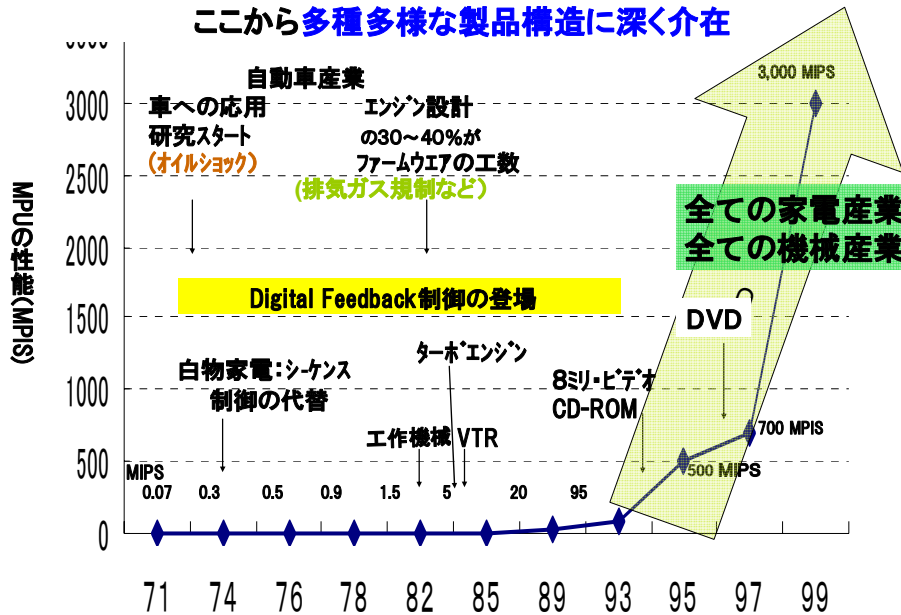
いずれにせよビジコン社から製造依頼されたインテルは、ビジコン社が設計した半導体電子回路のアーキテクチャが当時のメイン・フレームやミニコンで使われたCPU(Central Processor Unit)と同じコンセプトであることに気付き、MPU(Micro Processor Unit)と名付けた。これがi-4004である。このようにメイン・フレームとマイコンは、共通のアーキテクチャを持つ。人間社会の背後で動くコンピュータ・システムとデジタル家電の深部で動くマイコンが、結果的に同じ作用をしていることがここからも理解されるであろう。マイクロ・プロセッサの登場とその進化に嶋正利氏が深く関与なかった。その様子は嶋(1987、1995)に詳しく述べられている。

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

半導体の技術革新に支えられて 1990 年代から飛躍的に進化した。その様子を図 2 に示す。現在ではその処理性能が数 100 MIPS(Million Instruction Per Second)から数 1,000 MIPS という驚異的な性能を持つようになった。日本の家庭で 100~200 個のマイコンや DSP が使われているといわれる。またエレクトロニクス関連のコストが最新ハイブリッド車で車両全体の 47%に至り (安達、2006)、ここに 100 個を超えるマイコンや DSP が使われている<sup>4</sup>。

図2 MPU/MCUの性能1990年代から飛躍的に向上

ここから多種多様な製品構造に深く介在



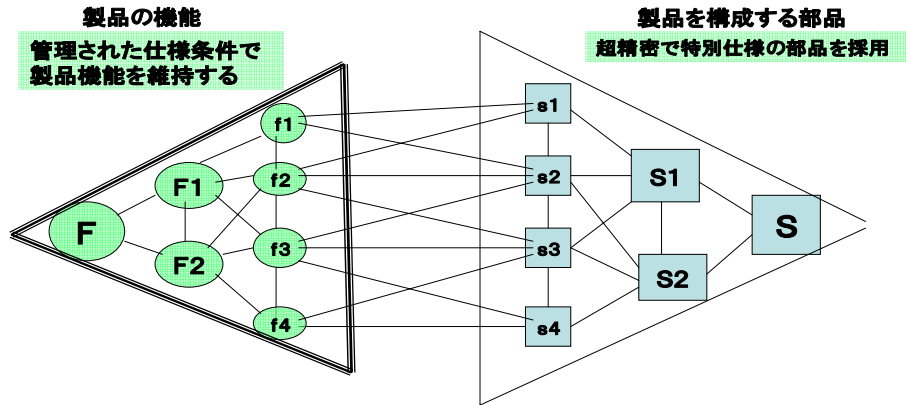
出典:この図に記載された数字はインテルCPUの性能、著者によるマイコン関係者へのインタビューによればマイコンMCUは数年遅れてほぼ同じ性能になる。

1980 年以前のアナログ技術で構成される電気製品では、要素技術・基幹部品が多層的なヒエラルキーを構成しながら多面的に絡み合った相互依存性を持つ。また製品が顧客に提供する機能ヒエラルキーでも、それぞれが多面的に絡み合って構成されている。その様子を図 3 で模式的に示した。この図で表現された部品と機能の多層的・複合的ヒエラルキーはそれぞれの相互依存性が極めて複雑であり、自動車における製品アーキテクチャ (武石、藤本、具 (2001)) と同じく“擦り合せ型”であった。

<sup>4</sup> 100 個はマイコンと DSP の合計、大部分が Electrical Control Unit(ECU)とよばれるモジュールで使われる。ECU の具体例が Engine Control Unit や Body Control Unit などの名前と呼ばれるモジュール群である。

図3 1980年以前:アナログ技術中心の家電製品(例:VTR)

基幹部品の相互依存性は非常に強く、  
超精密な部品の組み合わせによってはじめて製品機能を歩留まり良く復元可能



マイコンとファームウェアが家電機器やコンピュータ周辺機的设计に深く介在するようになったのは、低コスト化と高性能が同時に実現する 1990 年以降である。図 4 に示すように 1970 年代のマイコンは非常に性能が悪く、白物家電のシーケンス制御をマイコンで代行する単純用途であった。しかしその後続く半導体技術の進歩によって複雑な多重処理に耐えるまで性能が向上し、あるいは性能が急速に進歩した専用プロセッサ DSP との組み合わせによって実効性能が飛躍的に向上し、その上で更にコストが急激に下がったタイミングからカラー・テレビや VTR へ、そしてコンピュータ周辺機器やカメラへと応用範囲が広がった。現在ではマイコンと DSP がエレクトロニクス産業の中核技術に位置取りされており、これが無ければ製品設計さえ不可能になっている。国際的にデファクト規格になった CD-ROM や CD-R が大量普及しはじめ、そして同時に DVD 標準化の覇権争いが始まった 1995~1996 年は、マイコンや DSP とファームウェアによってもたらされたもの造り経営が歴史的な転換期に直面した時代だったのであり、我が国エレクトロニクス産業の競争優位が本質的に変わろうとしていた時代であった。競争ルールが激変したものの、製品アーキテクチャのモジュラー化現象に組織能力が対応できない状態は、現在でも変わっていない。

図4 マイコンの高性能化と応用範囲の拡大:



出典:我が国のマイコン・ベンダーであるF社の資料

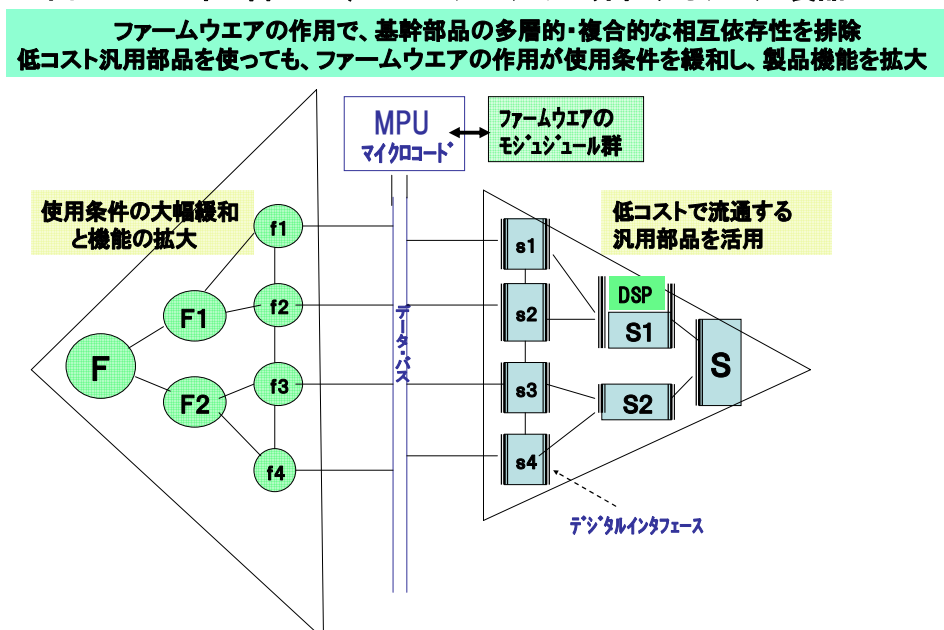
マイコンの急速な性能向上に支えられて進歩したのが、ファームウェア技術である。当初はハードウェア設計者がハードを動かす補助手段としてこれを開発し、EPROM やフラッシュ ROM メモリーに入れてマイコンから読み出す半固定的なプログラムとして使った。これがファームウェアと呼ばれる背景である。1990年代の後半から2000年代になるとファームウェアの設計者がハードウェアから切り離されたソフトウェア専門家の手に移るようになり、これを組み込みソフトと呼ぶようになった。しかし本稿ではファームウェアと統一して呼ぶことにする。マイコンの性能が悪かった1980年代は使えるメモリー容量が少ないために（コストが高いため）、ハードウェア側とファームウェアとの摺り合わせに技術者は大変な苦勞を強いられた。したがってモジュラー化現象は製品のごく一部で起きていたに過ぎない。しかしマイコンの性能が飛躍的に向上し、低コストのメモリーをふんだんに使える1990年代の後半になると、ファームウェアそれ自身が階層化された構造を取るようになった。そしてハードウェアから切り離されたソフトウェア専門家が、大挙して組み込みソフト開発へ参加できるようになった。ここから製品構造の全領域でモジュラー化が加速し、エレクトロニクス産業のあらゆる領域でものづくり経営が歴史的な転換期に立つ。

製品設計から見たファームウェアの役割は、多種多様な部品をマイコンの配下で連携させながら製品の機能を正しく復元する作用にあり、マイコンとファームウェアの役割を製品ヒエラルキーの中で位置付けると図5のようになる。マイコンが介在する製品では、基幹部品が直接あるいは間接的にマイコンのデータ・バスにデジタル結合されており、基幹部品の

動作は全てマイコンを動かすファームウェア・モジュール群によって制御される。例えば部品からマイコン側に送られてくる情報がファームウェアで処理され、この処理結果が部品の内部を制御する情報となってデータ・バスから再び部品側へと転送される。マイコンの時分割処理で対応できない超高速処理を必用とする部品は、それ自身に専用 DSP を内蔵して処理する（図5の右側）。この DSP もマイコンの管理下で動作する。

アナログ時代に見る部品の相互依存性（図3）は、デジタル時代になると全てマイコン配下のフラッシュ ROM にファームウェア・モジュールとして蓄積される（図5）。製品の機能もファームウェアが基幹部品の動作を組み合わせることによって表現される。製品を組み立てた後の検査・試験プロセスでは、マイコンがモジュール群から必用なファームウェア・モジュールを順次呼び出し、それぞれのヒエラルキーで製品機能を復元していく。

**図5 1990年代以降:マイコン/DSPとファームウェアが深く介在するデジタル家電製品**



以上のようにマイコンとファームウェアが深く介在する製品では、それぞれのヒエラルキーにおける部品相互の擦り合わせノウハウが全てファームウェアに蓄積され、多層的・複合的な構造が実質的に単純モジュラー構造へと転換される。これが更に進化すると、低コストで流通する汎用部品の単純組合せによる製品製造が可能になる。もし LSI Chip に内蔵されたファームウェアが基幹部品と一体になって流通すれば、技術蓄積の少ないキャッチアップ型工業国の企業が設計技術や信頼性良く組立・試験する技術ノウハウを持たなくても、DVD のような最先端製品の組立・製造ビジネスへ簡単に参加できる。これがマイコンとフ

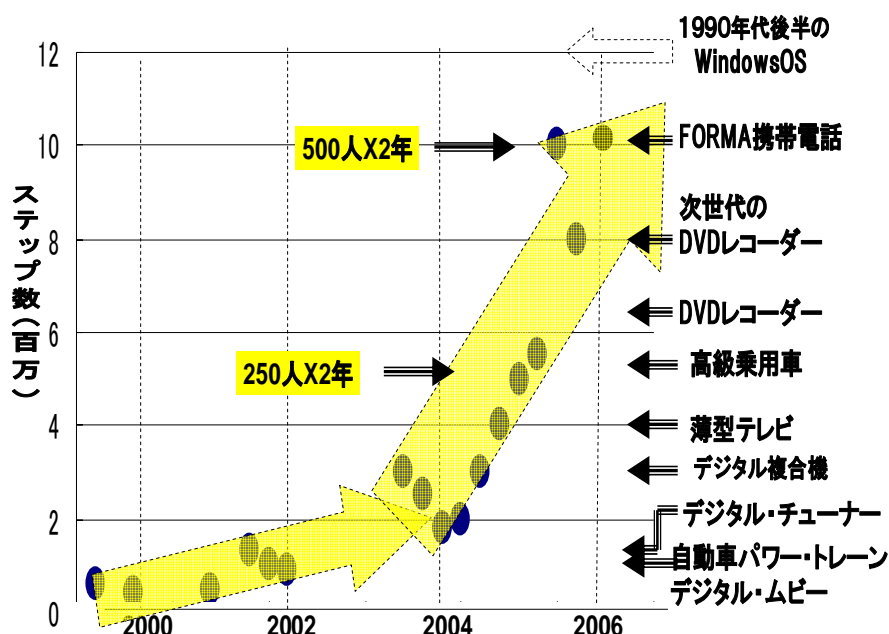
## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

ファームウェアによってもたらされた歴史的なもの造り経営の転換であり、1980年代に全盛を誇った我が国の全てのエレクトロニクス産業で、競争のルールが1990年代の後半に一変した。その背景に半導体技術のノイノベーションがあったのである。

### 2.2 ファームウェアの作用がもたらす経営環境の歴史的転換

ファームウェアのステップ数が2003年ころから急激に増えた様子を図6に示す。マイコン/DSPの性能アップがファームウェア・ステップ数を急増させてきた様子がエレクトロニクス製品以外でも多数観察される。

図6 マイコン/DSPの技術革新でファームウェアの規模が巨大化



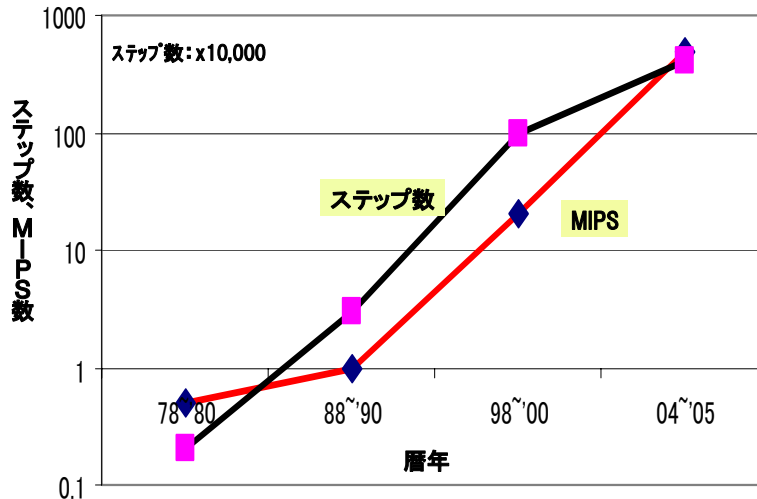
出典:著者による業界へのインタビュー

その代表的な事例として乗用車のエンジン・コントローラのケースを図7に示した。半導体の技術革新によってマイコン/ファームウェアの機能・性能が飛躍的に向上し、多種多様な産業で設計や製造のプロセスを支配するようになったことがここから理解されるであろう。2006年に中国で開催された自動車ショーに見る中国製自動車には、我が国企業の自動車エンジンとこれに最適化されたエンジン制御ソフトが多数搭載されていたという。10万Km走行後の乗心地も、決して悪くはないと専門家がいう。我が国エレクトロニクス産業が1990年代に直面した経営環境と類似のモジュラー化・水平分業化が、摺り合わせ型と言われる自動車産業でも顕在化してい



るが、その背景にマイコンとファームウェアの技術革新があることに、我々は注目しなければならない。

図7 乗用車のエンジン・コントロールで使われるマイコン/DSPの性能とファームウェア・ステップ数の関係



出典:日本の主要な乗用車メーカーに対する著者のインタビューによる

ファームウェアもマイコンの急速な性能向上に支えられて複雑になり最先端の携帯電話では1990年代後半のWindowsOSに近い1,000万ステップを超えた。1990年代のWindowsOS並みのソフトウェアが身近な家電製品で当たり前のように使われているが、この実態を知る人は少ない。最近のデジタル家電で設計工数の大部分がファームウェア開発、あるいは組み込みソフトの開発に費やされる事実が顕在化したのはごく最近のことだったためか、経営戦略に与える影響を論じる人はまだ少ない。例えば液晶テレビのファームウェアはすでに400万ステップを超え、DVDレコーダーも500万ステップを越えた。次世代DVDレコーダーでは800万ステップに及ぶという。800万ステップとは、約400人のソフトウェア・エンジニアが2年以上もかかって開発するソフトウェアに相当する。このように、設計工数の60%以上が1980年代のハードウェアでは無くソフトウェア開発に費やされている事実からも、エレクトロニクス産業が抱える構造変化を理解できるであろう。

しかしながら本稿でファームウェアを取り上げる視点は、単に設計工数の急増にあるのでは無い。ファームウェアが持つ本質的な作用は、部品と製品機能との関係を示す多層的なヒエラルキーを図3から図5へ転換させる作用である。これがものづくり経営環境を歴史的な転換点に立たせたファームウェアの本質的な作用となる。相互依存性が排除され、即ち製



## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

品アーキテクチャがモジュラー型に転換されて基幹部品が流通すれば、その単純組合せによって誰もが最先端の製品を製造できるようになり、競争のルールが根本的に変わる。そして組織の能力が競争ルールの激変に対応できない多くの企業が市場撤退への道を歩む。

アナログ技術で構成される家電製品は、要素技術や基幹部品が多層的なヒエラルキーを構成しながら多面的に絡み合った相互依存性を持つ。また製品が顧客に提供する機能のヒエラルキーでも、それぞれが多面的に絡み合って構成されている(図3)。このように部品と機能の多層的・複合的ヒエラルキーが強い相互依存性を持って構成されるアナログ型の製品は、例えば基幹技術や基幹部品が流通しても、この組み合わせから相互依存性を正しく再現することはできない。すなわち部品の単純組み合わせだけで製品を製造することはできない。試作はできても品質・歩留まり・コストを満足させるレベルの量産ができない。部品の単純組み合わせから製品の機能・品質を正しく復元し、その上で更に歩留まりとコストを満足させながら量産するには、深層の技術蓄積とこれを活用できる組織能力が必要だからである。したがってキャッチアップ型工業国が市場参入するのは困難であった。我が国企業に巨額の利益をもたらした1970年から1980年代中期までの据え置き型VTRや1990年代のカムコーダーは、このような幸福な時代の製品であった。長期的な視点で営々と続ける人材育成や技術投資が企業収益に直結しやすい経営環境であった、と言い換えてもよい。

しかしながらマイコンとファームウェアが製品設計の段階から深く介在すると、例えば相互依存性が非常に強くてもファームウェアの作用が製品アーキテクチャをモジュラー型へ転換させる(図5)。そして基幹部品の単純組合せによって誰でも品質・歩留まり・コストを全て満足させた量産ができるようになる。製品設計と製造技術開発のプロセスで蓄積される擦り合わせノウハウが全てLSI Chipに集中蓄積するので、これが他の基幹部品と共に流通すれば、技術蓄積を持たないNIES/BRICS諸国の企業ですら、超精密部品で構成されたVTRビジネス(小川、新宅、善本、2006)や最先端技術の粋を集めたDVDビジネスへ大挙して参入できるのである(小川、2006a, 2006b)<sup>5</sup>。1990年代後半から我が国エレクトロニクス産業の

<sup>5</sup> アジア諸国企業が部品を買い集めて完成品を組立て、これを先進国市場向けに売る姿は1990年代から顕在化したが、その後に出現したプラットフォーム化は、結果的に技術蓄積を全く持たない多量の新興企業群を最先端のハイテク市場に引き寄せた。最近の中国企業は、完成品に近い形態のソリューションとして丸ごと外資系企業から購入し、あるいはまる投げ設計発注しながらODM生産経由で半完成品を入手し、これに電源とケーブルだけを繋いで完成品にする生産形態も多くなってきた。最近の中国企業に見る携帯電話の端末機ビジネスがその代表的な事例である。

なおこのプラットフォームは摺り合わせ型のソリューションである。むしろ摺り合わせ型の方が中国企業に歓迎され、高い付加価値を持って流通する。このような傾向の延長で、先進工業国企業のブランド・プレミアムはどのように変貌するのであろうか。多量の摺り合わせ型技術を内包させるプラットフォームの大量流通は、我が国企業のブランド・プレミアムを失わせる方向に行くのではないか。このときデザイン力だけでなく、再度技術力による差別化が大きな意味を持つように思えてならな

ほぼ全ての製品がこのような経営環境に置かれたが、これは 1980 年代の IBM がパソコン・ビジネスで直面した経営環境と、その本質が同であった。

### 3. 光ディスク産業にみるモジュラー化のメカニズムと競争ルールの激変

ここでは CD-ROM ドライブと CD-R ドライブに焦点を当て、マイコンや DSP とファームウェアの作用によって製品アーキテクチャがモジュラー型に転換される様子を、光ディスク技術の細部に立ち入って紹介する。

#### 3.1 CD-ROM ドライブに見るモジュラー化のメカニズム

1990 年代のパソコン市場を席卷した CD-ROM は、音楽 CD が市場投入された翌年(1983 年 10 月)に CD プレイヤーのデータ版として規格化された。その後 1986 年に東芝やソニーからミニコン市場に出荷され、1990 年にはパソコン環境で多くの人々に使われはじめた。記録できる CD としての CD-R(Recordable)は 1989~1990 年にほぼ規格が固まり、これも同じく世界のパソコン市場に巨大な市場を作り出した(小川、2006a)。世界市場に君臨した CD-ROM ドライブや CD-R ドライブも、開発された初期の 1985 年から 1990 年ではまだアナログ技術が全盛の時代であって基幹部品の相互依存性が強く、設計はもとより組み立て製造も全て擦り合せ型の工程であった。したがって例え規格化によって技術のマニュアル化やオープン化しても、多層的・複合的な相互依存性を持つ部品から完成品としての CD-ROM ドライブを復元するのは非常に難しい。技術蓄積の浅いキャッチアップ型工業国が市場参入するのは困難だったという意味で、技術開発を主導しながら技術を蓄積した我が国企業だけが CD-ROM ビジネスに参加できた。

初期の CD-ROM ドライブは、高速ランダム・アクセスを必要としない CD プレイヤーの技術で製品化された。したがって所定のトラックをアクセスするスピードはもとより、そのトラックからデータを読み出すスピードも音楽再生に最適化されていたので非常に遅い。この遅さをカバーするために、CD-ROM のコンテンツを作るオーサリングの段階、すなわち CD-ROM メディアに情報を印刷する前の段階で、コンピュータ側が頻繁にランダム・アクセスしなくても済む編集方法に多大な労力が費やされた。しかしながら、Windows3.0 から WindowsME や Windows3.1 に移る 1990 年代の初めに CD-ROM のコンテンツが多数作られるようになると、オーサリングの時間とコストが重要問題となって顕在化する。このような背景からパソコン業界は、CD-ROM を提供する我が国企業に対して更なる高速化、すなわち高速ランダム・ア

い。もしこの予測が正しければ、コモディティ化する製品に対する我が国企業の経営戦略に、また一つの方向が出てくるであろう。

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

クセスとディスクの高速回転を強く求めるようになった。

当時のパソコン業界やユーザは、CD-ROM ドライブで音楽 CD ディスクも楽しむ使い方も期待したので、音楽 CD プレイヤーと同じ 1 倍速の機能を同時に持たせなければならなかった。ディスクを高速で回転させてデータを速くコンピュータに取り込む機能と同時に、1 倍速の低速回転を同じ CD-ROM ドライブでサポートしなければならなかったのである。当時世界最高レベルの高速 IC 技術を持った NEC など、多くの統合型企業がアナログ・サーボの腕を競って 1.8 倍速、2 倍速、2.1 倍速と差別化を競った。しかしながらアナログ・サーボ技術を使った CD-ROM ドライブでは、1つのアナログ電子回路で複数の回転数をサポートするのは難しく、1992～1993 年に登場した 2 倍速が限界であった。1980 年代の Laser Disc で最高の技術力を誇ったパイオニアは、早くも 1992 年にアナログ・サーボ技術によって 4 倍速 CD-ROM ドライブ開発へ果敢に挑戦したが<sup>6</sup>、これらは 6 枚のディスク・メディアを入れた業務用のジューク・ボックス用途であり、4 倍速の CD-ROM を再生する場合と 1 倍速の音楽 CD を再生する場合に、多数のアナログ・スイッチを切り替える方式であった。スイッチだらけのドライブだったという。1994 年にパソコン内臓用の 4 倍速ドライブを開発したが、アナログ方式（ソニー製 LSI）であり低コスト量産が困難であった。

この技術的な限界を打ち破ったのが 1994 年に東芝によって市場投入された 4 倍速 CD-ROM ドライブ用の IC 群、CD-X, EX シリーズであり、その中核になったのがデジタル・サーボ（デジタル・フィードバック制御）技術であった<sup>7</sup>。この IC Chipset を世界で初めて商品化したのが小嶋正氏と林康弘氏のチームであり<sup>8</sup>、その後の光ディスク産業の競争ルール

<sup>6</sup> パイオニア製 Laser Disc(直径 300mm)の 1 倍速と CD-ROM(直径 120mm)の 4 倍速で、週速度がほぼ同じだったので、パイオニアだけがアナログ・サーボで 4 倍速に挑戦できたという。業務用なので多数カスタム IC が使われていた。

<sup>7</sup> デジタル・サーボとは、デジタル・フィードバック制御の総称である。フィードバック制御系にデジタル技術を応用するデジタル・サーボはコンピュータの登場とともに研究が始まり、既に 1970 年代にはミニコンを使った工作機械など多種多様な分野に応用されていた。工作機械などの産業機械や事務機械・自動車でもミニコンやその後のマイコン/DSP の登場でデジタル・サーボが多用されたが、ここではパソコンやデジタル家電と全く異なる競争ルール出来上がって我が国企業を潤している。パソコンやデジタル家電と産業機械・事務機械・自動車とがなぜ競争ルールで際立った違いを見せるかについては、別稿に譲りたい。

<sup>8</sup> 小嶋正氏は 1980 年代当時の東芝・音響事業部・音響技術部の設計リーダーであり、林康弘氏は当時の小嶋氏のパートナーとしてプログラム方式のデジタル・サーボ IC の設計に従事し、CD プレイヤー用として 1989 年に商品化した。CD プレイヤーの技術を飛躍的に進化させたのが、1994 年に出荷された CD-ROM ドライブ用の CD-X, EX シリーズである。東芝は VTR でも 1980 年代初期のハード・ワイヤード方式、および中期のマイコンを使ったプログラム方式でデジタル・サーボ技術を開発し、広く外販した。これが当時の東芝半導体グループが持つ組織能力であった。

現時点でも多くの我が国企業は、東芝が CD-X, EX シリーズを外販したことで完成品としての CD-ROM ドライブ・ビジネスが崩壊した、と考える人が多いのではないだろうか。しかしオープン環境で標準化された製品では、付加価値が必ず完成品から基幹部品へシフトする。超精密な機械加工技術

## 小川 紘一

を一瞬にして変えた。CD-X, CD-EX のファームウェアには、完成品側 (CD-ROM ドライブ) の摺り合わせノウハウが詰め込まれていたという意味で、我が国におけるプラットフォーム戦略の原型を見ることができる。最先端の半導体技術から完成品にいたる全てを内部に持つ統合型の我が国企業だからこそ可能になる経営戦略であった。

小嶋氏や林氏が開発した当時はまだマイコンの性能が非常に遅く、高速 DSP をマイコンと連動させる方式が採用されていた<sup>9</sup>。1 倍速、2 倍速および 4 倍速のディスク回転のそれぞれで最適に擦り合せ調整されたフィードバック伝達特性は、マイコン配下の ROM メモリーに蓄積される。CD-ROM ディスクの回転数に合わせて、マイコン側がフィードバック制御の最適伝達特性 (具体的には伝達特性を決めるパラメータ) を ROM メモリーから呼び出し、これを光ピックアップ制御の DSP 側へ転送する仕組みになっていた。高速演算を得意とする DSP は、マイコン側から送られるパラメータを使いながらフォーカシングやトラック・フォローイングの制御信号をリアルタイムで生成し、これを対物レンズの駆動回路 (電流制御回路) へ送り出した。この駆動回路は、例え面ブレ (数 100 ミクロン) があっても CD-ROM メディア上で微小凹凸の情報ピットへレーザ光を常に正しくフォーカスさせように対物レンズを動かしたり ( $\pm 1$  ミクロンの精度)、あるいは例え偏心 (約 100 ミクロン) があっても凹凸ピットのあるトラックを常に正確にフォローさせように対物レンズを動かしたりした ( $\pm 0.1$  ミクロンの精度)。アナログ時代の CD-ROM ドライブで最も擦り合せノウハウが集中したが、このフォーカシングやトラック・フォローイングの設計と量産技術であった。しかしデジタル・サーボの時代になると状況が一変し、マイコンのプログラミングそれ自身が擦り合わせノウハウとなったのである。ファームウェアの開発力と開発マネジメントが、製品の

を必用とした VTR ですら例外ではなかった。1984~1985 年ころに少なからぬ家電メーカーがマイコン方式 (プログラム方式) のデジタル・サーボ技術を IC として外販してから韓国のサムソンや LG 電子が据え置き型 VTR 市場で躍進し、我が国企業は 1988 年ころから赤字撤退に追い込まれている。これらの現象は、インテルによる Chipset の低価格外販によって IBM やコンパック、パカード・ベル、AST リサーチなど多数のパソコン・ベンダーが市場撤退する姿と同じである。また TI やクアルコム社による Chipset/プラットフォーム提供で台湾・中国企業がデジタル携帯電話市場へ参入できるようになり、ここから先進工業国の携帯電話ベンダーが次々と市場撤退する姿もまた同じ現象である。さらには自転車産業でプラットフォームを提供するシマノと自転車の完成品ベンダーとの関係も同じである。すなわち、上記の現象は製品の内部構造がオープン環境で標準化される場合に必ず起きる経営環境、と捉えられなければならない。これらの経営環境に先手を打って勝ちパターンを作る企業戦略については、アーキテクチャ・ベースのプラットフォーム論として別項で紹介する (小川、2007)。なおここでは言及しないが、デジカメや自動車、オフィス複合機など、オープン環境の標準化が介在しない製品群では、基幹部品の外販が持つ意味が全く変わってしまう。これらはクローズド環境のプラットフォーム論として別途議論したい。オープン環境とクローズド環境の比較分析は、我が国企業にとって極めて重要である。

<sup>9</sup> 本来ならマイコンが DSP の機能も持つべきだが、CD-ROM ドライブのフォーカシング制御が非常に速いレスポンスのフィードバック制御を必要とするので、ここでは専用プロセッサとしての DSP がマイコンの下に配置された。

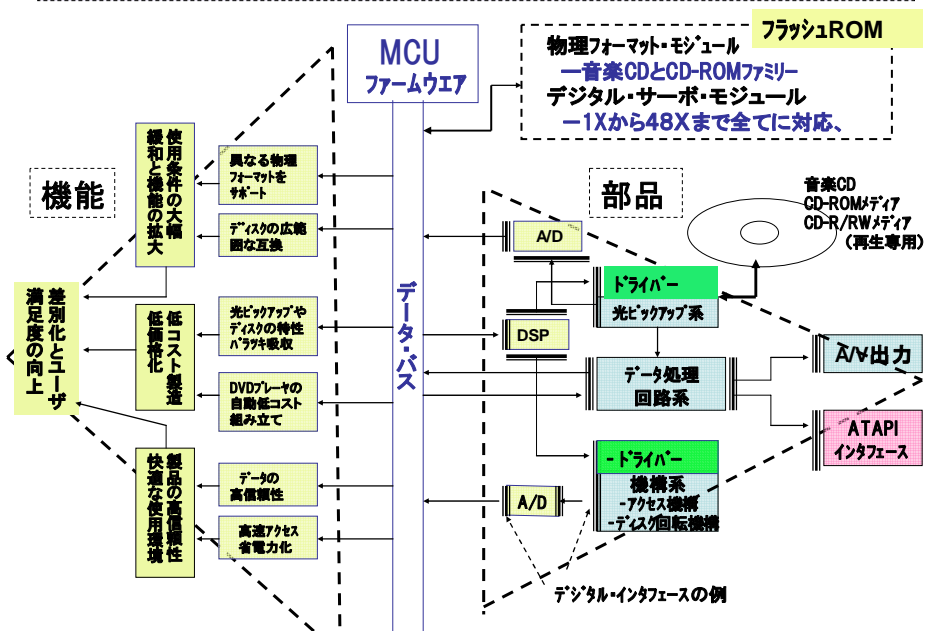
## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

開発・設計において最も重要な組織能力になった背景は、ここからも理解されるであろう。

1994年に東芝の小嶋正氏と林康弘氏のグループによって製品化されたデジタル・サーボ技術を契機に、CD-ROMドライブの基幹部品がマイコンのデータ・バスとつながるデジタル・インタフェースを持つようになった。その様子を図8で模式的に示す。ここでは製品機能や部品が、これらと次元の異なる電子回路図で結合されていて学問的な統一性を欠く。しかしその意味するところは理解されるであろう。

図8 マイコンとファームウェアが介在するCD-ROMドライブ

多層的・複合的な相互依存性を復元する組み合わせノウハウがファームウェア・モジュールに蓄積される



デジタル・サーボがもたらす象徴的な機能として、極端な環境や規格はずれの部品すらも使いこなす事例をここで紹介したい。CD-ROM が普及するにつれて、温度差が非常に大きい自動車の中で使われたり、あるいは南アジアなどの高温・多湿の環境、中東の乾燥地帯、さらには北欧や旧ソ連圏の極寒地域でも長期に使われ、CD-ROM メディアの基板に変形が生じて規格を外れる場合が多発するようになる。また光学部品が外部環境の変化によって位置ズレを起こし、光ピックアップの機能・性能が設計値と乖離する場合もある。ドライブ・ベンダーはこれらの全てに対応することが期待されており、その可否が顧客満足度を左右する。上記の極端な環境や規格はずれの部品への対応は、マイコンや DSP とファームウェアが登場して初めて可能になったのである<sup>10</sup>。

<sup>10</sup> ここで紹介したファームウェアの作用は光ヘッドの組立て製造もアナログ技術の時代から一変さ

CD-ROM ドライブにメディアが挿入された時、ドライブは光ピックアップを介して規格から外れた度合いをチェックする。ファームウェアはこの情報からメディアと光ピックアップに最適のフィードバック伝達特性を生成するが、同時に他の基幹部品が置かれた状況を瞬時に把握しながら、CD-ROM ドライブが全体として最適動作をするように擦り合わせ生成される。最適動作させるための伝達特性はマイコン側から DSP に送られる。DSP は制御回路を介して対物レンズを高速リアルタイムで動かし<sup>11</sup>、レーザ光の焦点を常に所定のトラックへ正しくフォーカシングさせたり、あるいは正しくトラック・フォローイングさせたりする。このような一連の動作によって規格外のメディアでも使えるようになる。

ここでマイコン側のファームウェアは、他の部品の動作状況と関連させながら伝達関数を生成すると言う意味で、基幹部品相互の依存性を外部環境に合わせて自動的に擦り合わせする機能を持つ。一方、DSP のファームウェアは、マイコン側で生成されたデジタル・パラメータを使いながら、CD-ROM ドライブが置かれた温度環境や CD-ROM メディアの状況にリアルタイムで適応する。そして自ら担当するハードウェア（例えば対物レンズの駆動）だけを最適制御させる。この意味で局所的な擦り合わせ機能を持つ。CD-ROM ドライブを構成するそれぞれの部品がどのように機能しているかは、マイコンに直結するデータバス（図 8）を介しながらファームウェアによって常に監視されている。そして他の部品の動作状況と関連させながら、CD-ROM ドライブが最適な状態で動くように全ての部品が連動して制御される。以上のことから、マイコン側のファームウェアが常に擦り合わせの中心になっていることが理解されるであろう。そして、擦り合わせノウハウが集中カプセル化されたファームウェア（LSI Chip に内臓）の作用によって、例え別々の場所や設備で作られた部品や CD-ROM メディアが流通しても、この単純組み合わせから高い品質を持つ CD-ROM ドライブが組立てられる。

CD-ROM ドライブに見る製品開発とは、それぞれの機能を担う基幹部品を互いに連携させながら如何にドライブの機能・品質を製造段階で復元させるかの擦り合せノウハウを、ファームウェア・モジュールに蓄積するプロセスであると言い換えられる。そしてコスト・ダウン設計とは、少ない部品点数あるいは精度バラツキの大きい低コスト部品を駆使して、如何に歩留まり良く高品質を実現するか、いわゆる擦り合せノウハウをファームウェアに蓄

---

せる効果があった。アナログの時代は光学部品のアライメントを厳密に調整し、しかも調整後に動かないようにする接着工程が極めて深いノウハウの塊であった。しかしファームウェアが介在することによってアライメントが多少変動してもその都度、自動調整できるようになった。このような事例は他の部品産業でも例外無く観察される。

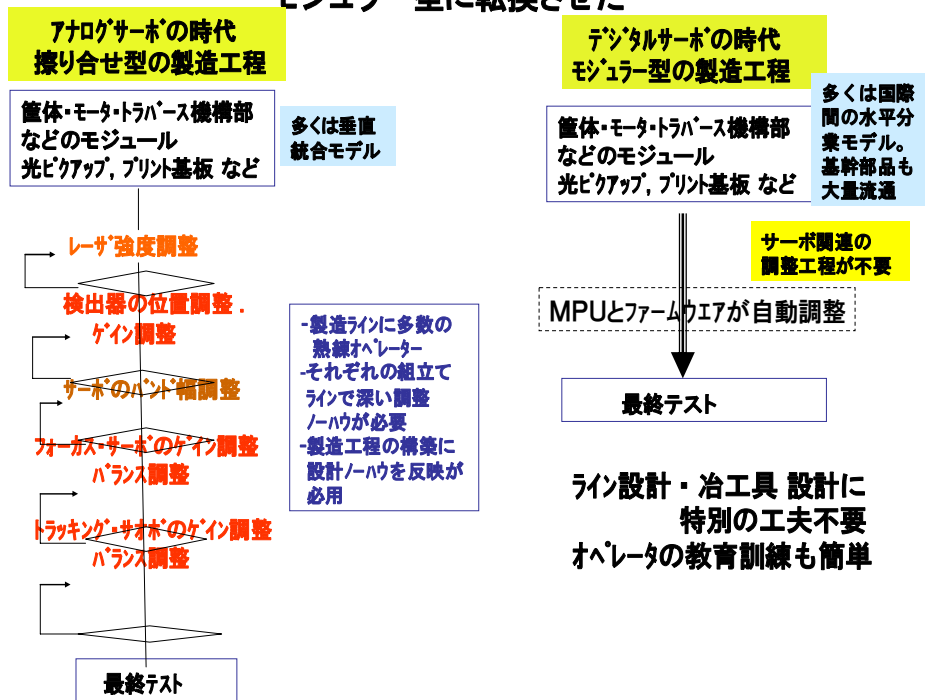
<sup>11</sup> レンズはコイルが巻かれたホルダに取り付けられており、ホルダの周辺には永久磁石が固定されている。コイルに流す電流によって磁界分布を変化させれば、フレミング左手の法則によってレンズが動く。

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

積するプロセスであると定義される。擦り合わせノウハウがファームウェア・モジュール群としてフラッシュ ROM に集中蓄積されているという意味で、製品を組立て製造する工場側の立場で見れば、恰もモジュラー型の製品アーキテクチャに見える。デジタル・サーボ技術がさらに進化した 1990 年代の後半では、ドライブとメディア、あるいはドライブと基幹部品の相互依存性がパソコンの場合と同等以上に弱まり、どのような利用環境下でもモジュラー型の製品アーキテクチャ構造を維持できるようになった。

デジタル・サーボが導入される前と後で CD-ROM ドライブの組立工程がどのように変わるかを図 9 で比較した。擦り合わせノウハウが最も集中するフォーカシング・サーボやトラックフォロ잉・サーボの代表的な調整工程だけをここで抽出しているが、アナログ時代の組み立てでは一つ一つが微細な調整プロセスと検査プロセスの組合せによって構成されていた。これらの微細調整で使う治工具とこれを使いこなすノウハウ、さらにはそれぞれの調整に最適化された検査ノウハウは、全て設計部門や組立部門および生産技術部門・検査部門が連携し合いながら積み重ねた擦り合わせノウハウの結晶である。またこれらに携わるスタッフやオペレータも、その企業が長年にわたる企業内教育で育成した人材である。

図9 マイコンとファームがCD-ROMドライブの組立てをモジュラー型に転換させた



しかし図 9 の右半分に示すように、デジタル・サーボが登場すると組立ての工程が一変して簡素化された。設計・組立・生産技術・検査部門などの擦り合わせノウハウが殆ど不要になり、

数日前まで畑仕事をしていた人でさえ汎用部品を買えば簡単に CD-ROM ドライブを組み立てられる工程になったことが、図9の右側から理解されるであろう。

ここで更にデジタル・サーボが持つ重要な機能について、光ピックアップの細部に立ち入りながら紹介したい。1970年代から研究が始まった光ディスク・ドライブで、世界中の技術者が競ったのは微少なフォーカスずれやトラックずれを検出するオプト・エレクトロニクス技術であった。オプト・エレクトロニクス技術が混在一体となって構成されるのが光ピックアップ (OPU) である。フォーカス/トラックずれ信号を検出する基本技術それ自身は、さほど深いノウハウを必要としない。レーザ光がディスク・メディアの凹凸ピットやトラックから少しでもずれると、光ディテクター上に集光されるレーザ光のパワー分布が変わる。この分布変化が光ディテクターを介して電気信号に変わり、ずれ情報としてのフィードバック信号を生成させる。この信号で対物レンズを動かすのがフォーカシング制御やトラック・フォローイング制御の原理である。しかしながら検出される信号は、ディスク・メディアや光ピックアップに内在する光学的な歪 (収差) によって歪められ、これがフィードバック信号のオフセットとなって現れる。そしてオフセットが少しでも重畳すればフィードバック制御のメカニズムが根底から崩れてしまう。

光ピックアップは多数の光学部品で構成されるが、これらの光学特性には当然バラツキがあり、少なからぬレベルの光学的な歪が発生する。またディスク・メディアの成型プロセスでは、1ミクロン前後の微小な凹凸ピットやトラック・ガイド溝が完全に転写されることは無く、ここでも少なからぬ歪が発生する。これら光学的な歪や転写の歪は、レンズで絞られてディテクターに集光されるレーザのパワー分布を変える。そしてディテクターから出力される電気信号は、正常なトラックずれ、あるいは正常なフォーカスずれ信号ではなく、ここにオフセットが重畳した姿になってしまう。

図9の左側に示す組み立てのプロセスでは、メディアや光ピックアップの特性バラツキに起因する上記のようなオフセットを、微妙な調整技術とこれを支える冶工具や検査ノウハウによってサーボ信号から取り去っていた。アナログ時代のオフセット除去には、組立のそれぞれの工程でサーボ回路のバランス調整やゲイン調整が必要であり、またオフセットを出難くする組み立て冶具とその活用ノウハウ、および組み立て工程に配置されたオペレータの深い作業経験に依存しなければならなかった。サーボ・オフセットを取り去る組立工程が最も深い擦り合わせノウハウを必用としていたのである。オフセットが多種多様な光学部品の特性バラツキやメディア側の微細な凹凸に起因しているだけに、光ディスク技術の全体系に関する深い技術とノウハウがなければ、排除することはできない。この意味で、オフセット



## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

調整には深い学問的な基礎知識を踏まえた上での、長期に渡る設計と組立との擦り合わせ型ノウハウを組織能力として蓄積しなければならない。技術蓄積の少ないキャッチアップ型工業国がアナログ・サーボの時代に CD-ROM ビジネスに参入できなかった理由が、ここからも理解されるであろう。なおこれを別の視点で言い換えれば、東芝が開発したデジタル・サーボのファームウェア (IC Chip にある) が介在することで初めて、技術蓄積の少ないキャッチアップ型工業国の企業がこれをモジュラー型と見なすのであって、光ピックアップそれ自身が単独でモジュラー型に転換されるのではない。光ピックアップはこれに最適化されたファームウェアとの組み合わせで (一体になって) モジュラー型へ転換されるのである。このプロセスで光ピックアップ側とファームウェア側が互いにノウハウを出し合う擦り合せ工程があるのはいうまでもない<sup>12</sup>。

デジタル・サーボの登場がもたらす第一の効用は、最もノウハウを必要とするこれらの工程を全て自動調整にした点にある。アナログ・サーボかデジタル・サーボかによって CD-ROM の設計・組立プロセスが違う様子を図 10 に要約した。CD-ROM ドライブに見る図 10 のデジタル自動調整機能は、その後続く DVD でもその原理はまったく同じである。自動調整ノウハウを含む部品の相互依存性がマイコン配下のフラッシュ・メモリーにファームウェア・モジュールとして集中カプセルされる。したがってこれらのファームウェアが封じ込められた LSI Chip を入手すれば、基幹部品の単純組み合わせだけで製品機能を正しく復元できるという意味で、恰も部品の相互作用が排除されたのと同じ効果が実現される。これまで何度も繰り返したように (小川、2006a) , 技術的な蓄積の無いキャッチアップ型工業国でも 1994 年のデジタル・サーボ Chip の流通によって光ディスク産業へ参入できるようになったが、その背景は図 9 と図 10 から理解されるであろう。

<sup>12</sup> 光ピックアップがファームウェアと深い擦り合せプロセスを経ることによって恰もモジュラー型に見えるようになるのは、自動車エンジン、エアコンのインバータ、洗濯機のモーターなどでも共通に観察される。ただ CD-ROM や DVD はオープン環境で標準化されたので光ピックアップと IC (ファームウェア) が一体になって流通する。流通しない自動車・エアコン・洗濯機の場合は、これを NIES/BRICS 諸国企業が完成品として組み立てることはできない。基幹部品とこれを動かすファームウェアが一体になって流通する場合に競争ルールが激変するのである。これらの詳細は別稿に譲るが、光ピックアップをモジュラー型に見せるには、完成品としての CD-ROM ドライブの全体技術を踏まえた上で光ピックアップとファームウェア側で長期にわたる擦り合せのプロセスを必用とする。完成品側のノウハウを持つこと無くして基幹部品のモジュラー化は不可能である。

図10 デジタル・サーボがもたらす効用

	アナログ・サーボ	デジタル・サーボ
特性調整への対応	個別部品の交換が必要	◎:MPU/DSPのファームウェアで自由に対応
機能・性能拡張への対応	ハード設計で機能固定	◎:MPU/DSPファームウェアで自由に対応
部品バラツキへの対応性	性能・品質の厳密管理	◎:MPU/DSPのファームウェアで全体最適
自動調整機能	組立てラインでモーターを見ながら工程間で擦り合わせ調整	◎:ボタンを押すだけで自動調整 例:フォーカシング・トラッキングのオフセット自動調整 エラーバランス自動調整 フィードバック・サーボ・ループのGain自動調整 例:光ピックアップ設計方式によるピックアップ構造の差異 エラー検出方式の差異などを自動吸収
課題:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>①ファームウェア開発工数の急増</li> <li>②アジア諸国との人件費の差</li> <li>③ファーム開発人材の育成・開発効率</li> <li>④擦り合わせノウハウの塊、“ファーム”の流通</li> </ul>		

技術蓄積の浅いキャッチアップ型工業国の企業が短期間で参入できる市場環境は、マイコンが無かったアナログ時代の家電製品で全く想像できなかった。製品アーキテクチャのモジュラー化が競争ルールを激変させるので、経営システムや企業の組織能力もこれに適応させなければならない。この意味でマイコンとファームウェアの作用がもたらすモジュラー化の時代は、技術イノベーションよりもむしろ経営側にこそイノベーションが求められる時代なのである。図1で示すように、我が国エレクトロニクス産業の“失われた10年”が依然として続いているのは、モジュラー化によって我が国の経営環境が歴史的な転換期に立った事実を、経営レベルでまた理解されていないためではないだろうか。あるいは、理解しても組織能力がこれに対応できないためではないだろうか。

### 3.2 記録型のCD-Rドライブに見るモジュラー化のメカニズム

CD-ROMドライブに於けるデジタル・サーボと類似の作用が、記録型のCD-R (Recordable)ドライブでも観測される。CD-Rドライブの基本技術は、CD-ROMドライブに記録機能を持たせたものである。CD-Rメディアは製造メーカーや製造プロセスに依存した多種多様な記録特性を持っている。したがって、メディアの互換性を維持するには特定のCD-Rメディアに合わせてドライブ側を調整し、ドライブ側が指定したメディアだけを使う以外に手がなかった。この問題が顕在化したのは4倍速(4X)記録のドライブが出荷され

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

る 1994~1995 年である。4 倍速の時点からドライブ側とメディア側の相互依存性が極めて高くなってしまい、特定のメディア・ベンダーだけしか市場参入できないビジネス環境となった。その上でさらに 1995~1996 年にはドライブ側との摺り合わせを考慮しない CD-R メディアが台湾企業から大量に出荷され、CD-R メディアの互換性が非常に深刻な問題になった。

この課題を解決するために考え出されたのが Write Strategy と呼ばれるコンセプトであり、CD-R メディアにデータを記録する際のレーザ強度と発光パターンを制御するためのファームウェア・モジュールから構成される。CD-R メディアには製造メーカを特定する Media-ID がついており、これをガイドに CD-R メディアに最適の Write Strategy をファームウェア・モジュールから呼び出し、メディアの互換性を保証するようにレーザ光の強度と発光パターンが制御される。従って、例え CD-R メディアの記録特性が製造メーカや製造プロセスで異なっても、多種多様なメディアに最適な Write Strategy のファームウェア・パッケージをドライブ側の LSI Chip に揃えておけば、どんなメディアでも互換性を維持することが可能になる。以上のように Write Strategy には、CD-R メディアの互換性を保証するために必要なメディアとドライブと相互依存性が、摺り合わせノウハウとして蓄積される。したがって、もし Write Strategy が市場に流通して全てのドライブに搭載されれば、恰もメディアとドライブの相互依存性が排除されたと同じ効果が期待されるであろう。

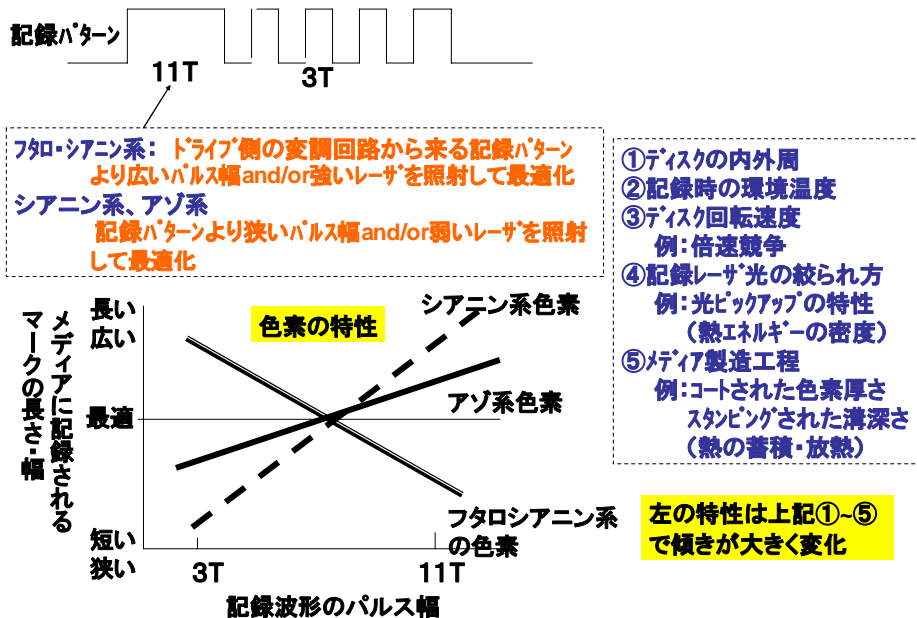
CD-R メディアが大量普及した第一の要件に金属薄膜とシアニン系の色素を組み合わせた記録層の構成にあったことはすでに述べた（小川、2006a）。しかし太陽誘電がシアニン系の色素をアナウンスした前後で、富士写真フィルム（現在の富士フィルム）<sup>13</sup>やコダック、三井東圧（現在の三井化学）、三菱化学、チバガイキー（ヨーロッパ）などが続々と CD-R 用の色素をアナウンスし、それぞれデファクト・スタンダード化を狙って製品化しはじめた。しかしながら各メーカで使われる色素は、アゾ系であったりフタロシアニン系であったり、あるいはフタロシアニンにベンゾフェロセンを添加するなどしてそれぞれ独自性を競ったので、同じパルス幅のレーザ光を照射しても、色素に形成されるマークの幅や長さが全て異なる事態となった。その様子を図 11 に示すが、例えばシアニン系の色素では 11T<sup>14</sup>のように長いパルスで書くと（レーザを当てる時間が長いと）、これに対応するマークの長さが最適値よりも長目に書かれるので、Write Strategy のファームウェアを工夫しながら少し短い記録パルスで半導体レーザを起動しなければならない。一方フタロシナニン系の色素の場合は、シアニン系と逆に少し長くする必要があった。パソコン側から送られてくるデータによ

<sup>13</sup> 富士写真フィルムは、太陽誘電の発表より約 5 ヶ月前の 1988 年 4 月にかなり完成度の高い論文として発表している（松本、栗山、1988）。

<sup>14</sup> T とは CD プレイヤー全体で規格化された信号の時間単位である。従ってレーザ発光を制御する駆動パルス幅の単位になる。11T とは基本単位の 11 倍の長さであることを意味する。

って、レーザを駆動するパルスは多種多様な長さの組み合わせとなる。また色素の種類だけでなくディスク・メディアの内周から外週までの半径位置でも全て長さを変えながらレーザ光の照射時間（パルス幅）を最適化しなければならない。その上で更にパルスの強さ（照射するレーザ光の強さ）も変えなければならない。レーザ光を出射する側の光ピックアップ（OPU）でも、光学的な歪（収差）に起因するレーザ光の熱エネルギー分布が、OPUベンダーで大きく異なる。したがってこれも考慮しながら最適化するという、非常に複雑で深い組み合わせノウハウを Write Strategy として蓄積しなければならない。これらの様子を図11の①から⑤に列記した。最近のDVDではDVD±Rメディアの製造プロセスによっても Write Strategy を変える必要があるといわれる。

図11 初期のCD-Rに見るドライブとメディアの相互依存性



Write Strategy が登場する以前にメディアの互換性を維持するには、CD-R ドライブが特定の色素を選んで使わざるを得ないという意味で、ドライブとメディアの相互依存性が非常に強かった。特に CD-R メディアを 4 倍速以上の高速回転で記録する場合は、互換性が殆ど絶望的だったのである。Write Strategy のコンセプトがデファクト・スタンダードにならなかったとすれば、互換性が特定のドライブと特定のメディアとの組み合わせだけに限定され、CD-R は 2000 年になってもニッチ市場に留まったであろう。

図 1 2 に Write Strategy の効用と意義を要約した。最高速の 48 倍速 CD-R ドライブを例にとると、LSI Chip に内蔵されたマイコンとファームウェア・モジュールには、1 倍速(1X), -----8 倍速 (8X), -----24 倍速 (24X) -----48 倍速 (48X) のそれぞれに対応した Write Strategy

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

が全て集中カプセル化されている。これらはシアニン系、フタロシアニン系、アゾ系など多種多様な色素材料ごとに区分けされており、またそれぞれが CD-R ディスクの内周部から外周部に区分したゾーンごとに違った Write Strategy が必用である。たとえ同じ記録材料であっても、CD-R ディスク基板の成型条件（トラック溝の深さや傾斜の微妙な傾きを左右する）と色素のコーティング条件で Write Strategy が変わるので、CD-R ドライブのファームウェア・モジュールはメディア・メーカーの製造ノウハウに合せた区分けも必用となる。

### 図12 Write Strategy登場の意味

1. Write Strategyのファームウェア・パッケージがドライブ側にあれば(DVDでは約3000種)、  
—メディアIDを認識するだけで、図11の①-⑤の要件に合った最適なモジュールを選択。  
—これによってどのメディアとどのドライブでも互換性が保証される
2. メディアIDとWrite Strategyは、メディアとドライブを繋ぐオープン・インタフェースなので  
—ドライブ側との相互依存性が排除されたと同等の効果が生まれる
3. 台湾のメディア・ベンダーはこのオープン・インタフェースを遵守しさえすれば、ドライブ側とその  
—つど擦り合わせをする必用が無く、自由にビジネス展開が可能になった。

CD-R の Write Strategy は少なくとも数 100 種類に及ぶモジュール群で構成されており、1つ1つが CD-R ドライブと CD-R メディアの膨大な擦り合わせ実験によって蓄積される。図 5 に示す CD-ROM のファームウェア・モジュールに Write Strategy のモジュールを追加すれば、多種多様な CD-R ドライブと多種多様な CD-R メディアのどんな組み合わせでも互換性が保証される。すなわち Write Strategy とは、製品開発のプロセスで、ドライブとメディアの相互依存性を排除する機能を持つファームウェアである、と定義される。同時にドライブ組立・製造においては、部品の単純組み合わせから相互依存性を復元するファームウェアである、と定義される。最先端の記録型 DVD では約 3,000 本のファームウェア・モジュールによって Write Strategy が構成されている。記録時のレーザ光のパルス幅だけでなく、パルス1つ1つの形状すらも、多種多様な条件に合わせながら微細に変えなければ互換性を維持できなくなったのである。これが製品の機能ヒエラルキーと部品ヒエラルキーを支配する擦り合わせのノウハウであった。

Write Strategy の基本コンセプトは、1994~1995 年ころにヤマハ、ソニー、パイオニア、ケンウッドなどの装置メーカーと、太陽誘電、TDK、三菱化学、三井東圧（当時）、コダックなどのメディア・メーカーが集まるボランディア・グループ（オレンジ研究会）によって生み出され、デファクト・スタンダードとして世に普及した（小川、2006a）。しかしながら Write Strategy の登場は、例えドライブ側との擦り合せをしなくても、誰もが CD-R メディアのビジネスへ参入できる経営環境が出現したことを意味する。そして 1996 年から台湾の新興企業が大量して CD-R メディア・ビジネスに参入し、異常な価格下落によって我が国企業は市場撤退への道を余儀なくされた<sup>15</sup>。それは Write Strategy が登場してわずか数年後の 1990 年代後半であった。

製品アーキテクチャのモジュラー化は競争ルールを激変させるので、経営システムや企業の組織能力もこれに適應させなければならない。すなわちモジュラー化の時代は、技術イノベーションよりもむしろ経営側にこそイノベーションが求められる時代なのである。この意味で、デファクト・フォーラム・デジュールなどを問わず、標準化が製品アーキテクチャをモジュラー型へ転換させて競争ルールを激変させる事実を、経営レベルで正しく理解しなければならない。我が国エレクトロニクス産業の“失われた 10 年”が依然として続いているのは、標準化・モジュラー化がもたらす競争ルールの激変を、経営レベルで理解されていないためではないだろうか。あるいは、理解しても組織能力がこれに対応できないためではないだろうか。更に言えば、国際標準化が製品アーキテクチャのモジュラー化を加速させるという意味で、我が国企業の標準化活動を現場の技術者や研究者に一任できた時代は、マイコンとファームウェアの技術革新によって終焉した。標準化は、競争ルールを変えて新たな勝ちパターンを構築するための経営ツールになったのである。

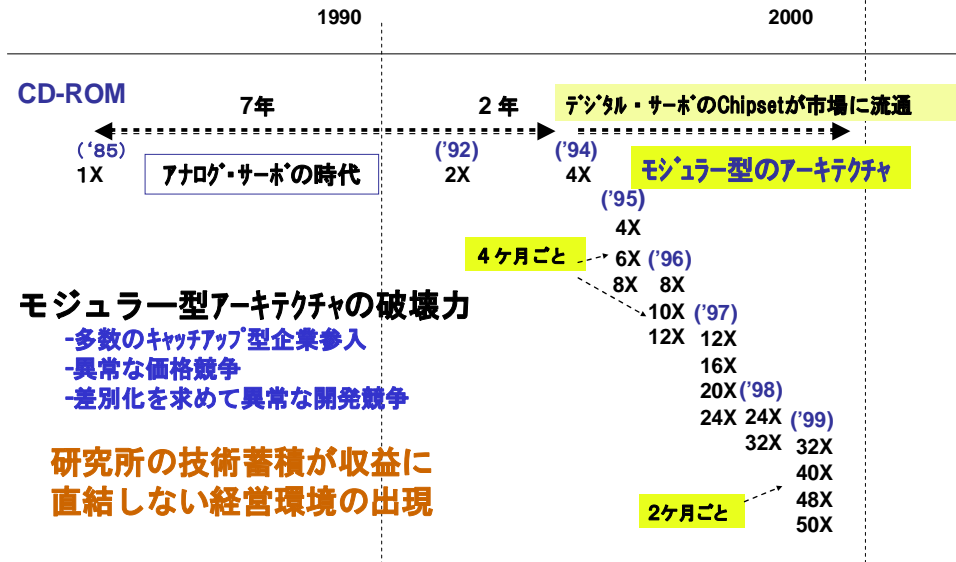
## 4. 製品アーキテクチャのモジュラー化による国際競争構造の変化

### 4.1 キャッチアップ型工業国の市場参入と競争の激化

デジタル・サーボの登場がもの造り環境を一変させ、キャッチアップ型工業国に市場参入の道を開いたが、同時にここからすざましい勢いで技術革新がはじまった。その様子を CD-ROM ドライブの事例で図 1 3 に示す。

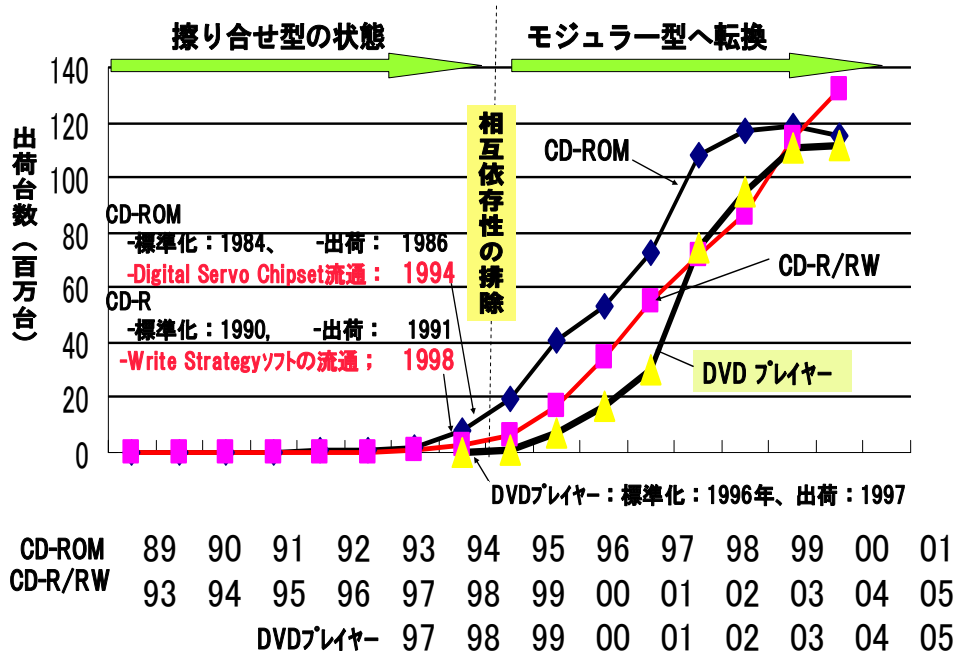
<sup>15</sup> 光ディスク・メディアは半導体や液晶パネルと同じく、設備投資が主導するビジネスである。光ディスク・メディアのコストに占める原価償却費の割合が非常に大きいので、その企業がおかれた国の柔軟な税制などの産業政策がその企業の競争力を左右する。また価格の下落と共にコストに占めるロイヤリティーの割合が極めて大きくなり、知財のポリス・ファンクションが機能しなかった光メディアのメディア・ビジネスでは、これが柔軟な産業政策との相乗効果となって実ビジネスに現れ、台湾企業の競争優位に決定的な影響を与えた。

図13 デジタル・サーボがもたらすモジュラー化と技術革新



デジタル・サーボ技術を取り込む前の CD-ROM ドライブでは、読み出し性能が1倍速(1986年)から2倍速になるまで7年の時間を必要とし、4倍速になるにはデジタル・サーボが登場する1994年まで待たねばならなかった。しかしデジタル・サーボの登場によってその翌年から4ヶ月ごとに高性能機が市場投入され、さらに1999~2000年になると2ヶ月ごとに高機能・高性能の新製品が出荷されるようになった。この技術革新がパソコン市場で新たな需要を生み出す。年間800万台だった1993年の市場規模が1995年に4000万台へ急増し、1998年には年間1億台という巨大な市場が作りだされた。その様子を図14で示す。CD-ROMは標準化によって大量普及したのではない。デジタル・サーボChipの流通、すなわち製品アーキテクチャのモジュラー化がもたらす価格競争と技術革新の同時進行が巨大市場を作り出したのである。これはCD-ROMだけでなく、CD-RでもDVDでも共通する現象であることが図14から理解されるであろう。

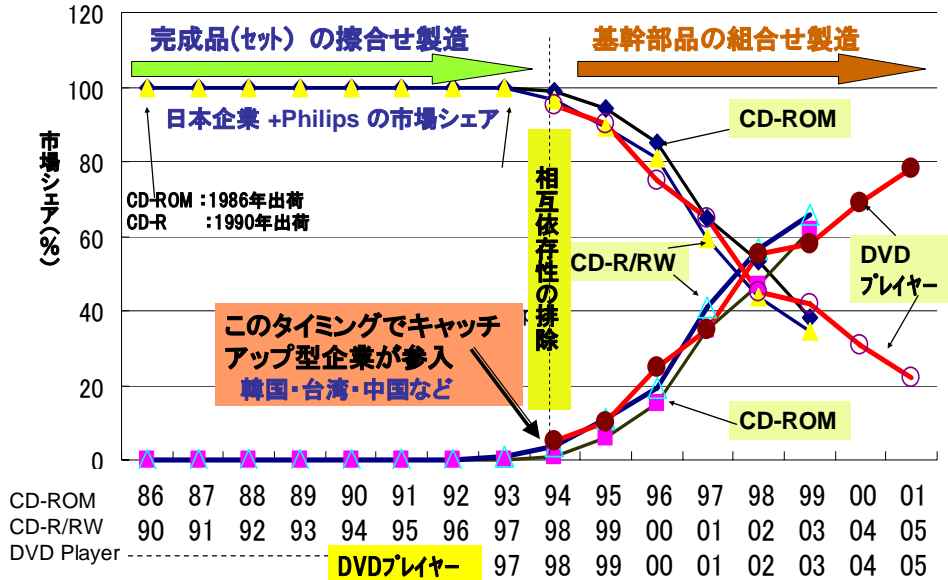
図14 製品アーキテクチャのモジュラー化を契機に、爆発的な普及が始まる



1995~1996年には台湾・香港・シンガポールで50社以上（人口150万人に1社）がCD-ROMドライブの市場に参入し、競って東芝製のデジタル・サーボChipsetを買い求めたという。これらキャッチアップ型のベンチャー企業は、小さなオーバーヘッドを武器に低価格戦略を採って市場を拡大させる。一方、フロント・ランナーとしての我が国企業は、技術力を駆使しながら高性能機や高機能機を生み出し、何度も擦り合せ型に戻して差別化するが、部品の流通とともにキャッチアップ型企業が再び追い付いて高性能・高機能機をモジュラー型へと引き戻す。光ディスクの場合は標準化によって記録容量が固定され、性能を競う倍速競争でもディスク・メディアが破壊に至る限界の48倍速が上限であり、数年にして差別化が困難になる。この時点から製品アーキテクチャは急速にモジュラー化への坂を転がって再び擦り合せ型に戻ることはなく、我が国企業は市場撤退の道を歩む。この様子を図15に示した。



図15 製品アーキテクチャがモジュラー型に転じた時点で NIES/BRICS諸国企業が大量して市場参入



Write Strategy がオープン環境でデファクト・スタンダードになったことは、その後の国際的な競争構造の変化に重要な影響を与えた。オレンジ研究会は、1996 年ころに台湾メディア・メーカーに対しても Disk-ID を割り振って公開した。多種多様な CD-R メディアの互換性を装置側で保証しながらスムーズに市場浸透を図る上で、これが重要な役目を果たした。Write Strategy というファームウェア・モジュールが流通したことは、CD-R メディアに関する一種のデジタル・インタフェースが全世界に向かって公開されたことを意味する。1998 年ころから Write Strategy が CD-R ドライブや光ピックアップと一体になって市場に流通し、韓国製や台湾製のドライブとメディアの相互依存性を大幅に軽減する効果をもたらした（モジュラー化を加速させた）。ドライブとメディアの互換性維持であれだけ深い擦り合わせノウハウを必用とした CD-R の市場にさえ、技術蓄積の少ないキャッチアップ型の企業が部品を買うだけで参入できたのである。1998 年ころから多数の韓国・台湾・香港/中国の企業が CD-R ドライブの市場に参入して価格競争が激化し、低価格がもたらす市場拡大が基幹部品それ自身のモジュラー化と低コスト化を加速させた。さらには互いに差別化を求める倍速競争（技術革新）の激化も、それまで我が国企業が思いもよらないスピードで展開された。モジュラー化がコスト競争と技術革新を同時に進行させたのである。Write Strategy がオープン環境で流通した後に CD-R ドライブが急速に普及する様子を、デジタル・サーボ LSI が流通した後の CD-ROM と比較し、これを図 14 に示した。製品アーキテクチャがモジュラー型に

転換した後の普及スピードは CD-ROM でも CD-R でもほぼ同じ傾向で推移することがわかる。Write Strategy のファームウェアが流通する前年の 1997 年に年間 230 万台であった CD-R ドライブは、流通した 1 年後の 1999 年に 1700 万台へと急増し、その 3 年後の 2002 年には年間 5700 万台まで巨大な市場を生み出した。CD-R 記録メディアの市場も、2002 年に 85 億枚、更に 2004 年には年間 100 億枚という巨大市場に生まれ変わった。この市場拡大スピードは DVD プレイヤー(小川、2007)でも同じように再現されている。1998 年に 80 万台出荷されたが、その 2 年後に 1,600 万台、3 年後には年間 3,900 万台もの DVD プレイヤーが出荷されている。この様子も図 1 4 に示した。CD-R の製品アーキテクチャがモジュラー型に転換した時点の 1998 年から、我が国企業の市場シェアは CD-ROM や DVD プレイヤーと同じカーブを描いて下落するのも図 1 5 から理解されるであろう。これは CD-ROM だけでなく CD-R や DVD プレイヤーでも、モジュラー化の進化プロセスで起きる共通の現象だったのである。そして基礎技術を開発し標準化をリードするのが我が国企業ではあったものの、大量普及を担うのはキャッチアップ型工業国の新興企業群であった。

## 4. 2 我が国光ディスク産業とアメリカ・パソコン産業の比較

製品アーキテクチャがモジュラー型に転換する時点で CD-ROM ドライブに新興企業が市場に参入する様子は、1984 年の BIOS Chip や 1985 年のパソコン基幹 IC (マザーボード用 Chipset の原型) の流通によって膨大な数のクローン・メーカーが IBM 互換 PC 市場に参入した現象と全く同じである。例えば BIOS は MPU や OS と周辺機器を繋ぐ論理インタフェースであり、パソコン周辺機器の情報の流れに関する論理的な互換性を保証するための「論理的擦り合せの中心」であった。しかしながら擦り合せの要に位置取りされたこの BIOS は、IBM PC のマニュアルにソース・コード(IBM は著作権を主張)まで記述されていたためか、Compaq を創設するロット・キャニオン氏など少なからぬベンチャー企業が互換 BIOS を開発し、IBM 互換パソコン市場に参入することができた<sup>16</sup>。1984 年に発表された IBM PC/AT

<sup>16</sup> Basic Input Output System の略称。パソコンの互換性・機能・性能などを左右するのが BIOS、バス、マイクロ・プロセッサなどである。アメリカで 1980 年に著作権法が大幅改定され、ソフトウェアも著作権として認められるようになった(立本、2007)。これを受けて IBM はソフトウェア・モジュールとしての BIOS を著作権で守れる、と判断したようだ。しかしながら 1982 年後半から Compaq など、互換 BIOS を独自開発する PC ベンダーや Phoenix 社などのような BIOS 専業ベンダーが続出した。初期の BIOS は数十ステップの小さなソフトウェア・モジュールだったので、当時の我が国においても多種多様な企業が独自に IBM 互換 BIOS を開発できたという。IBM の著作権に抵触しないように、命令の順番を変えたり意味の無い命令コードを挿入するなどした、と当時の人が語っている。しかし松下電器が IBM 互換パソコンをアメリカに輸出しようとしたとき、著作権法違反でシアトルの税関にストップをかけられたこともあって我が国の IBM 互換パソコン・ベンダーは勢いを失った。類似のことが台湾の互換機ベンダーに対しても起きていた。アメリカ国内では多数の IBM 互換 PC ベ

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

では、バッテリー・バックアップされた CMOS メモリーに BIOS のテーブルが記憶されており、例えばフロッピー・ディスク・ドライブに関する詳細パラメータとソース・コードまでユーザ・マニュアルに記載されていた。光ディスクの Write Strategy に相当する Write Precomp (Pre-compensation : 書き込むべきデータの“1”と“0”の組み合わせパターンによって記録電流波形や電流値を変える) がマニュアルに記載されてオープンになっていたのは驚きである。Phoenix Technology 社が、IBM の著作権に抵触しないと称する BIOS Chipset を 1984 年に発売し (もし IBM に訴えられて出荷が遅れても保険会社が損害を補償)、Chips & Technology 社が 63 個の IC で構成された IBM PC/AT の電子回路 (Gate Array) を 24 個 (立本、2007) で 1985 年から売り出し、その後すぐに僅か 5 個で組み立てられる IC Chipset に仕立てて売り出すにおよび、部品を買えばその単純組み立てだけで IBM PC/AT パソコンの機能を復元できる (互換機を組み立てられる) ようになった<sup>17</sup>。

1986 年には IBM クローンが約 250 社へと拡大したといわれる。人口 2 億 8,000 万人のアメリカで 250 社 (100 万人に 1 社) が新規にパソコン産業に参入したのは、その 10 年後に台湾・香港・シンガポールなどで人口 150 万人に 1 社が光ディスク産業に参入した現象と同じである。これがまさに製品アーキテクチャが擦り合せ型からモジュラー型に転じて生まれる産業の活性化現象であった。

図 16 に、CD-ROM ドライブで我が国企業のシェアが下落する様子と IBM 互換パソコン市場に於ける IBM の市場シェア推移を比較した。IBM がパソコンで市場シェアを落とすスピードは、我が国企業が CD-ROM ドライブで市場シェアを落とすスピードと殆ど同じである。つまり CD-ROM で我が国企業が経験した経営環境の転換は、1980 年代に IBM が経験した転換と同じであった。IBM PC におけるインテル MPU とこれを動かすファームウェアは、1994 年以降の CD-ROM におけるマイコンやファームウェアと同じ機能を持つ。IBM PC の製品アーキテクチャはその設計思想がモジュラー型であり、組み立てを含むトータルなアーキテクチャがモジュラー型に転換され易い構造になっていた。一方、CD-ROM ドライブの場合はアナログ技術の CD プレイヤーが基本になっており、マイコンとファームウェアが

---

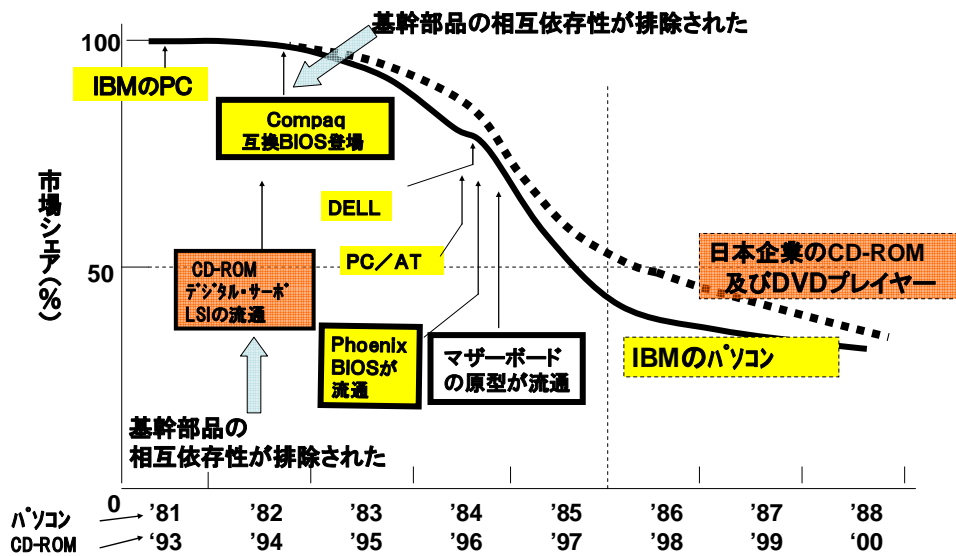
ンダーが排出したが、アメリカ以外の互換機ベンダーは完全に閉め出された。

<sup>17</sup> ハードウェア側の物理的な結合を保証するための互換性は、MPU と周辺機器を繋ぐバスのタイミング・チャート仕様 (タイミング特性) によって決められるが、IBM はこれを非公開にしていたので、周辺機器を提供するベンダーは常時 IBM PC との 100% 互換性を自らチェックして保証しなければならなかった。しかしながらハードウェアの物理互換を保証するバスの仕様が 1986 年以降に ISA バスとして標準化され、その上で更にパソコン性能を左右する MPU の技術革新がインテルに握られていたので、IBM は 1980 年代の後半からパソコン・ビジネスに対する支配力を失った (立本、2007)。

深く介在してモジュラー型に転換されたのは、出荷8年後の1994年であった。超精密な機構部品とアナログ電子回路で構成された据え置き型VTRの場合も、市場に出荷された8年後の1985年にマイコンとファームウェアの作用でモジュラー型へ転換された(小川、新宅、善本、2006)。ここから韓国のサムソンやLG電子の市場シェアが急増し、我が国企業は3年後の1988年ころから赤字に転落して市場撤退への道を歩む。

我が国企業は擦り合せ型の製品を垂直統合モデルで作り込む組織能力を長期に渡って育成した。しかしながらマイコンとファームウェアの作用がVTRを瞬く間にモジュラー型へ転換させ、垂直統合型の組織能力にトラップされた我が国企業は急速に競争力を失う。この延長で、マイコンとファームウェアが最初から深く関与するデジタル家電の時代が到来する。1980年代の擦り合せ型・統合型にトラップされた我が国企業の組織能力では、CD-ROM,CD-R,DVD および全てのデジタル家電に、IBMがパソコン・ビジネスで直面した市場が待ち受けていることを、経営の問題として理解できなかったのではないか。しかしこれは、我が国エレクトロニクス産業だけの問題ではない。オープン・モジュラー化への移行が急速に進んだ1980年代後半のアメリカで、メインフレーム・ビジネスという垂直統合型の組織能力にトラップされていたIBMでも同じだったのであり、また2000年前後にヨーロッパ諸国のデジタル携帯電話の端末機ビジネスで大手の統合型企業が市場シェアを失って行く姿も、世界で共通に現れる現象として捉え直す必要がある。

図16 IBM互換パソコンとCD-ROM装置のシェア推移



MMRC:小川紘一

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

しかしながら我が国企業が得意とした擦り合わせ型の製品では、マイコンやファームウェアがもたらす作用が製品アーキテクチャ構造の底流にあるマイクロ領域で起きたためか、これをもの造り経営環境の歴史的な転換として捉えることは1980年代のアメリカよりも遥かに困難だったはずである。2000年ころからブラック・ボックス化というスローガンによってその徴候が正しく捉えられてはいたが、その深層に1985年前後のIBM互換パソコンや1980年代後半の据え置き型VTR、あるいは1990年代中期のCD-ROMに見る、経営環境のドラスティックな転換が内包されていることを、経営のレベルで体系的に把握することができなかった。マイコンやファームウェアが深く介在する製品は、モジュラー化が進んで基幹部品が流通すればたちまちIBM PCやDVDと同じ経営環境になる。この事実をいち早く経営戦略に取り込んだのが、製品アーキテクチャが擦り合わせ型からモジュラー型に転じて生まれる破壊力を知ったデック（DEC）やサン（SUN）、シスコ（CISCO）あるいはインテルやデルであり、デジタル携帯電話市場のクアルコムやテキサス・インスツルメント、そしてノキア、サムソン、LG電子が続く。

次世代DVDでもパソコンや現在のDVDと同じ道を歩むのだろうか。次世代DVDのビジネスを担うエレクトロニクス系企業の人々にインタビューすると、パソコン市場と家電市場は全く違うという意識を、現在でも強く持っていることが分かった。しかし液晶テレビでは既にモジュラー化に転じる兆候が顕在化しており、パソコンにおけるデルと類似のビジネス・モデルが多数輩出するであろう。現在のデジタル家電市場には、欧米企業だけでなく多種多様なNIES諸国企業が、パソコンにおけるデルと類似のモデルを前面に出しながら果敢な攻勢を仕掛けている。モジュラー化が究極まで進んで加速される国際的な水平分業の姿がここにあり、マイコンとファームウェアが深く介在する製品で必然的に生まれる経営環境である。

技術蓄積の浅いキャッチアップ型工業国の企業が短期間で参入できる市場環境は、マイコンが無かったアナログ時代の家電製品で全く想像できなかった。アナログ技術で構成されたブラウン管式カラーTVでは、一度LSIを作れば1990年代の後半になってもLSIで数年は十分に利益を挙げることができた、と多くのテレビ技術者が証言している。1990年代はアナログ技術時代の擦り合わせ型経営環境とデジタル時代のモジュラー型経営環境が同居した時代だったのである。しかしながらエレクトロニクス関連の技術者は1980年代のアナログから急速にデジタル技術へシフトして1990年代の製品開発を担うようになった。これを後知恵で分析すれば、デジタル化が製品アーキテクチャのモジュラー化を加速させて競争ルールを激変させるので、経営システムや企業の組織能力もこれに適応させなければならなかった。マイコンとファームウェアはデジタル化の中核に位置取りされてモジュラー化時

代の主役になり、技術主導のイノベーションから経営主導のイノベーションが求められる時代へと転換させた。しかしながら我が国エレクトロニクス産業の“失われた10年”が依然として続いているのは(図1)、モジュラー化によって我が国の経営環境が歴史的な転換期に立った事実が、経営レベルでまた理解されていないためではないだろうか。あるいは、理解しても組織能力がこれに対応できないためではないだろうか。

#### 4. モジュラー化の時代を超えて

1990年代のアメリカは、既にモジュラー型に転換されたデジタル製品に着目し、多数のネットワーク型製品を生み出しながら経済成長を継続させた。多くのアメリカ企業は、製品アーキテクチャのモジュラー化現象によって1980年代から加速した経営環境の歴史的な転換期に立ち<sup>18</sup>、モジュラー型に最適な組織能力を企業のDNAとして身に付けた。塗炭の苦しみを味わいながら経営システムの再設計が完了したのは1990年代中期である。インテルによるプラットフォーム戦略(小川、2007)がその象徴的な出来事である。一方、擦り合わせ型の製品を得意にしてきた我が国企業では、まずマイコンとファームウェアが深く介在し易いエレクトロニクス産業から摺り合わせ型のアーキテクチャが崩壊した。この兆候が最初に出たのは1980年代後半の据え置き型VTRであったが、マグマとなって地上に噴出した代表的な事例が1994年のCD-ROMドライブや1998年のCD-Rドライブである。その延長にDVDプレイヤーがあり、現在のデジタル家電が位置取りされる。1980年代に世界市場を席巻した我が国のエレクトロニクス産業が1990年代から急速に競争力を失う姿(図1)は、以上のような背景から説明できるであろう。少なくとも我が国製造業に見る失われた10年とは、エレクトロニクス産業だけに起きた特異現象であった。マイコンとファームウェアがエレクトロニクス製品に介在しやすかったためである<sup>19</sup>。

マイコンとファームウェアの機能・性能は、図2に例を見るように今後も飛躍的な発展を続ける。過去30年に見る代表的な製品を図17で取り上げ、製品アーキテクチャがモジュラー型に転換されるタイミングを示した。21世紀の日本企業を支える産業の中で、例え最先端の技術で構成される超精密製品でも、その製品アーキテクチャが最初からモジュラー型に

<sup>18</sup> アメリカにおけるMOTの重要性は、アメリカ企業が不振から復活をめざす中で1990年ころ広く認識されるようになった(武石、2006,1.7,日経新聞21面)。

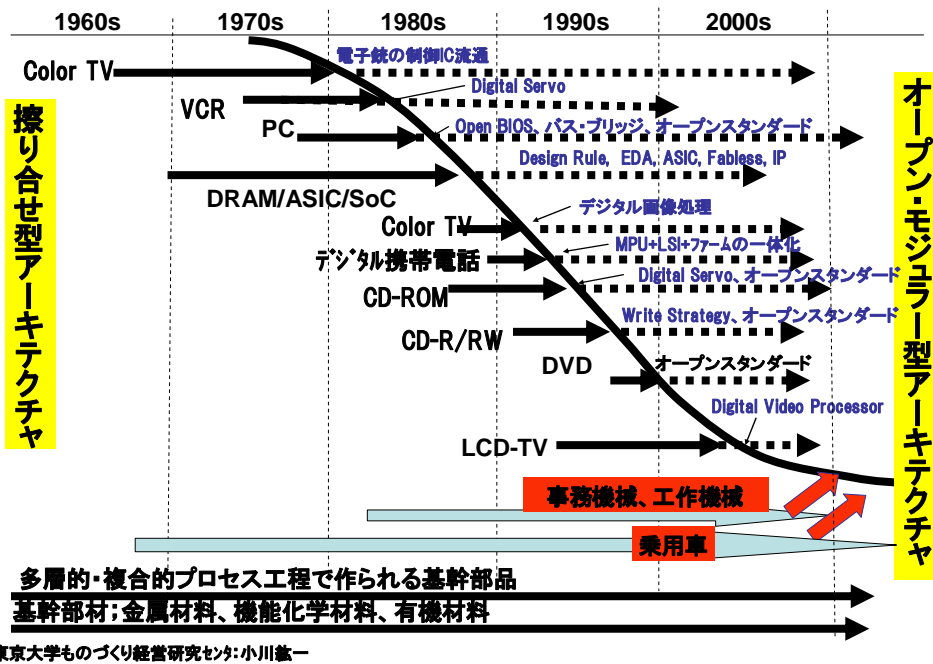
<sup>19</sup> これ以前に、電卓産業(新宅、1994)や時計産業(榊原、2006)でも類似の経営環境が観察されている。また半導体や光ディスク・メディアなど、巨大投資を伴う設備主導の産業でも類似の現象がおきている(小川、2003,2006a)。これらについては本稿で紹介する現象も含めながら、抽象度を高めた視点から別項で議論するが、その背後に潜む本質は同じである。

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

転換されて設計・製造される。部品産業・素材産業など、マイコンやファームウェアが直接介在できないプロセス型の部品・材料を除き、我々はこの流れに逆らうことはできない。この意味で、「擦り合わせ型の製品なら日本企業が常に安定的に強い」というような単純な図式はもう通用しないのではないか。半導体の技術革新によってマイコン/ファームウェアが多様な産業で設計や製造のプロセスだけでなく、コストや品質までもを支配し、競争優位に大きな影響を与えるようになるからである。2006年の北京自動車ショーに見る中国製自動車には、我が国企業の自動車エンジンとこれに最適化されたエンジン制御ソフトが多数搭載されていたという。10万 Km 走行後の乗心地も、決して悪くはないと専門家がいう。我が国エレクトロニクス産業が1990年代に直面した経営環境と類似のモジュラー化・水平分業化の兆候が、擦り合わせ型と言われる自動車産業でも急速に現在化しているが、その背景にマイコンとファームウェアの技術革新があることに、我々は注目しなければならない。

自動車産業の中でマイコン/DSP とファームウェアを中核に据えた電子部品の付加価値が急速に高まってきた。擦り合わせ型の典型といわれる乗用車においても、使われるマイコン/DSP が100個を超え、全コストに占めるエレクトロニクス関連部品が50%に近づく。また自動車産業で、4～5年前からヨーロッパを中心に国際的な標準化活動が活発になった。これに触発された我が国でも類似の標準化活動が進められているが、その狙いはコスト・ダウンや開発スピードに焦点が当てられており、製品アーキテクチャの転換がもたらす経営環境の転換にはまだ着目されていない。「擦り合わせ型の製品なので日本企業は今後も安泰」というような単純な図式が通用しなくなるという危惧を経営戦略の中核に据え、アーキテクチャ・ベースのプラットフォーム論を念頭におきながら国際標準化へ取り組むべきではないだろうか。

図17 擦り合せ型の製品でも今後安泰とは限らない



製品アーキテクチャと競争力や組織能力との相互作用の歴史を知ることは、アーキテクチャ論の複雑な深層とここから構築される新たな勝ちパターンを知るための扉を開けることを意味する。光ディスク産業は、製品アーキテクチャがダイナミックに変化する複合的なプロセスを何度も繰り返し経験してきた。そして例えば CD-ROM や DVD であっても、アーキテクチャのダイナミズムを事前に予測しながら経営システムや組織能力の再構築に挑んだ先進的な経営者の中に、長期にわたって競争力を維持した事例が多数見られた。あるいは逆に、自社の組織能力に合った製品アーキテクチャを選んでターゲット市場を絞り込み、ここから当たり前のように勝ちパターンを構築した寡黙の経営者も数多く存在した。例えばアーキテクチャのダイナミズムに気付いても、組織能力を無視して進む理念先行型の経営者は、その多くが企業業績を悪化させた。フルセット型・垂直統合型を得意とする我が国企業で、松下電器やシャープなどに例を見るように、その得意技を活かすもの造り経営を徹底した企業以外は非常に苦しい立場に立たされている。水平分業が加速する経営環境で、垂直統合型の組織能力が今後どこまで通用するか、あるいは通用させるにはどのような経営モデルを採用すべきであろうか。その試論として、アーキテクチャ・ベースのプラットフォーム形成を別稿で取り上げた（小川、2007）。

製品アーキテクチャのダイナミズムを前提にした我が国企業の勝ちパターンを分析する上で、『組織は製品アーキテクチャに従う』という仮説と『製品アーキテクチャは組織に従う』という2つの相反する仮説を立てたが、そのいずれも真実であった。そして非常に興



## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

味深いことに、再構築された最終的な勝ちパターンの姿は、欧米に見る姿その基本思想が同じであった。わが国企業と欧米企業とで、勝ちパターン構築に向けた取り組み手法やこれを具体化する経営手法だけが違っていただけに過ぎない。手法の違いは、それぞれの国や企業が得意とする組織文化・組織能力と製品アーキテクチャ構造との相性、あるいはその産業が持つビジネス・アーキテクチャ構造との相性に大きく依存していたのである。

製品アーキテクチャの構造はその深層でダイナミックに変化し、徐々に経営環境の変化となって顕在化する。自社製品のアーキテクチャ位置取りとその時間変化を冷静に予測し、これが顕在化する前に自社の組織能力と相性の良い手法で勝ちパターンを創り上げていく、あるいは顕在化する兆候を捉えて組織能力を順次適応させて行くという、アーキテクチャ・ベースの経営理論構築が、現在の我々に求められている。別項に述べるアーキテクチャ・ベースのプラットフォーム論も(小川,2007)、その一つに位置づけされるのではないだろうか。

### 謝辞

本稿を書くにあたって筆者は、ビジネスの前線に陣取る多くの人々にインタビューを繰り返した。直接面談によるインタビューやメールによるインタビューに応じて下さった人は30人を下らないであろう。ここで一人ひとりのお名前を列記することは出来ないが、本稿を公にすることでお礼に代えさせて頂きたい。しかしながら製品アーキテクチャ論の素晴らしい世界に導いて下さった東京大学ものづくり経営センターの藤本隆広センター長と新宅純二郎ダイレクターには、ここで改めて御礼を申しあげなければならない。お二人の導きがなければ本稿を書けなかったはずである。特に新宅先生は、経営学の基礎訓練を受けて来ない筆者をアジア諸国企業の現場へ何度もお連れ下さり、現場を見ながら経営学の手ほどきをして下さった。また我が国有数のアナリストを有するTechno Research System社(TSR)にも感謝したい。TSR社のご好意によって過去20年に光ディスク業界で起きたことを、我が国企業の立場だけでなく、韓国・台湾や中国・インドの視点からも正確に把握することが可能になり、製品アーキテクチャのモジュラー化が我が国企業の競争力に与える影響を、グローバルな視点から具体的なデジタル・データを用いて紹介することができた。

### 参考文献

安達和孝(2006),「電子プラットフォーム開発に関するJasParの取り組み」,Automotive Technology Days 2006 autumnのJasPar特別セッション予稿, Compact Car: 15%, Luxury Car: 28%, Hybrid Car: 47%

宇沢弘文(2000),『ヴェブレン』, p.44, 岩波書店

## 小川 紘一

- 小川紘一(2003), 『光ディスク産業のビジネス・アーキテクチャとその変遷』,  
赤門マネジメント・レビュー, 第2巻9号, pp.421、2003年9月
- 小川紘一(2005), 『光ディスク産業の興隆と発展』、東京大学ものづくり経営研究センター,  
ディスカッション・ペーパー, MMRC-J-28、2005年3月  
[http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC28\\_2005.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC28_2005.pdf)
- 小川紘一(2006a), 『光ディスク産業の興隆と発展』, 赤門マネジメント・レビュー, 第5巻  
3号, pp.97-170、2006年1月
- 小川紘一(2006b), 『製品アーキテクチャ論から見たDVDの標準化・事業戦略』, 東京大学も  
のづくり経営研究センター, ディスカッション・ペーパー, MMRC-J-64、2006年3月  
[http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC64\\_2006.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC64_2006.pdf)
- 小川紘一(2006c) 「DVDに見る日本企業の標準化事業戦略」, 経済産業省標準化経済性  
研究会(編)『国際競争とグローバル・スタンダード』, 第1章, 日本規格協会
- 小川紘一, 新宅純二郎, 善本哲夫(2006), 「製品アーキテクチャ論に基づく日本企業の標準  
化・事業戦略」『研究・技術計画学会』予稿集
- 小川紘一(2007), 『我が国エレクトロニクス産業に見るプラットフォームの形成メカニズム  
ーアーキテクチャ・ベースのプラットフォーム形成によるエレクトロニクス産業の再  
興に向けてー』, 東京大学ものづくり経営研究センター, ディスカッション・ペー  
パー, MMRC-J-146, 2007年3月、  
[http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC146\\_2007.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC146_2007.pdf)
- ガウワー、クスマノ(2005), 『プラットフォーム・リーダーシップ』、有斐閣のp.207~209
- 佐藤文昭(2006a)「日本の電機産業再編へのシナリオ」, 『日米欧アジア機械産業の国際競争  
力』に関する日本機械産業国際競争力委員会報告, 2006年11月
- 佐藤文昭(2006b), 『日本の電機産業再編へのシナリオ』、かんき出版、
- 嶋正利(1987), 『マイクロコンピュータの誕生: わが青春4004』, 岩波書店
- 嶋正利(1995), 『次世代マイクロプロセッサ』, 日本経済新聞社
- 立本博文(2007), 「PCのバスアーキテクチャの変遷と競争優位」, 東京大学ものづくり経  
営研究センター, ディスカッション・ペーパー, 2007-MMRC-163
- 新宅純二郎(2000a), 『日本製造業における構造変革』,  
東京大学ものづくり経営研究センター, ディスカッション・ペーパー, MMRC-J-83,  
[http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC83\\_2006.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC83_2006.pdf)
- 新宅純二郎(2006b), 『東アジアにおける製造業ネットワークの形成と日本企業のポジショ  
ニング』東京大学ものづくり経営研究センター, ディスカッション・ペーパー,  
MMRC-J-92, [http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC92\\_2006.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC92_2006.pdf)

## 我が国エレクトロニクス産業にみるモジュラー化の進化メカニズム

---

- スーザン・バーガー(2006),『グローバル企業の成功戦略』、p. 35, 草思社
- 藤本隆広, 武石彰, 青島矢一(2001)『ビジネス・アーキテクチャ』, 有斐閣,
- 武石彰, 藤本隆広, 具承桓(2001)「自動車産業におけるモジュラー化」,『ビジネス・アーキテクチャ』の第4章, 有斐閣
- 藤本隆広(2003),『能力構築競争』, 中公新書
- 藤本隆広(2004),『日本のもの造り哲学』, 日本経済新聞社
- 松本誠二、栗山隆之(1988),『Yamaha Programmable Disc System について』  
J A S コンファランス ‘88 予稿集、pp.1-4
- 善本哲夫(2007),『ブラウン管テレビに見る部門別事業戦略とモジュラー化』  
東京大学ものづくり経営研究センター, ディスカッション・ペーパー, MMRC-J-108,  
[http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC108\\_2007.pdf](http://www.ut-mmrc.jp/dp/PDF/MMRC108_2007.pdf)