



Hitotsubashi University  
Institute of Innovation Research



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1  
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>



# 『日本の半導体産業の栄枯盛衰要因を探る： イノベーション・デザインの視点から』<sup>1</sup>

中馬宏之

## 最終研究報告会・講義録

2014年3月4日(火)

一橋大学マーキュリータワー3302

---

<sup>1</sup> この DP は、2014年3月4日に実施された報告者による最終研究報告会に基づいて作成されたものである。作成に際しては、一橋大学・中馬ゼミ卒業生の久米功一氏（平成8年卒、現リクルートワークス研究所）作成のセミナー立ち上げ録を最大限活用させていただいた。この場をお借りして、同君の誠意溢れる貢献に心から感謝したい。また、このような報告会を開催していただいた一橋大学経済学部主催の産業・労働ワークショップのメンバーの方々、特に当日の臨時ワークショップをアレンジしていただいた神林龍（一橋大学経済研究所）准教授や当日のセミナーに御参加いただいた数多くの方々に心から御礼を申し上げたい。なお、掲載されている内容等を含め、全ての文責は報告者に帰する。

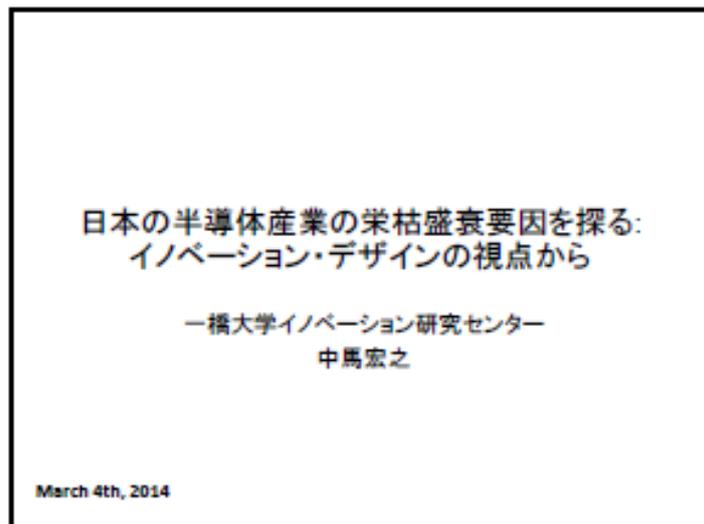
2014年3月4日(火)16:30~18:00

一橋大学マーキュリータワー3302

## イントロダクション

神林：今日のご足労いただきありがとうございました。臨時の産業労働ワークショップということですが、実は中馬先生の最後のご報告になりました。今年度いっぱいで一橋大学を去られるとのことで、最後のご報告をいただきたいと思い、この会を催しました。ご報告の時間は、通常の研究会の通り、90分間、すべて中馬先生にお任せしますので、お話をよろしく願いいたします。

## \*\*\* 最終研究報告・講義録 \*\*\*



## はじめに

中馬：こういう会を開催していただきまして、どうもありがとうございました。まるで青年のように朝からそわそわしてしまっていて、今も赤くなっています（笑）。こういう状態で最終報告がうまくいくかどうかちょっと分からないですけども、やらせていただきます。一橋に赴任して来たのは91年だったと思いますが、そこから大きく育ったのは僕のおなかだけで（その他は）全然進歩がないんです（笑）。私自身は、その間に労働経済学者から、小田切さんには叱られますけど、産業組織論的な分野の先生になってしまいました（笑）。いまだに労働経済学者と思っておられる方には誠に申し訳ないですが、宗旨替えをしておりますのでその点御諒解いただければ有り難いです。長年半導体産業のことをやっているものですから、今日はこちらから得られるインプリケーションみたいなものをお話したいと思えます。実際にはいっぱい用意しておりますので、その中の事例部分が配布資料（省略）です。こちら、カラーコピーをお配りできればよかったですけど、経済学部はカラーコ

ピー（の予算）がないそうで…（笑）。これからの報告は、だいたい 40 枚ぐらいのプレゼン資料をつかっての非常に大まかなお話になります。

## イノベーション・デザインとは？

スライドのタイトルに「イノベーション・デザイン」と書いてあります。商学部の方がおられると誠に申し訳ないですが、僕はちょっと前まで「イノベーションとモジュール設計思想」という MBA の授業をやっていたんです。ところが、分かりにくいので名前を変えて欲しいと言われてましてイノベーション・デザインという名前に変更しました。講義名が分かりにくいから受講する人数が少ない（20 名程度）のだとの理由でしたが、この講義名に変えてから受講する学生が少なく（10 名程度に）なってしまったんです…（笑）。でも、僕はこっちの新しい講義名のほうが良い響きだと思ったので、今日の報告でもこのタイトルにしました。

今日の主題である日本の半導体産業は、皆さんも御存知のとおり、長年にわたる栄枯盛衰プロセスを経て、現在ではかなり競争力を低下させてきています。その背後要因として何が考えられるのだろうか？という問いかけに対して、これまでの自分の研究成果に基づいて露の 1 滴ぐらいの答えは絞り出したいと思いながらこの場にやってき参りました。従いまして、今日は、いつもよりちょっと抽象度を上げたお話にしたいと思います。

## デザイン・アーキテクチャとは？

こういう名前（イノベーション・デザイン）にして欲しいということでしたが、デザインという単語に「アーキテクチャ（設計思想）」という単語を付け加えると自分の意図しているものに更にだいぶ近くなります。ではアーキテクチャとは何だろうということになります。それを僕が自分勝手に定義しても仕方がないので、このスライドにありますように、国際工学会(IEEE)の定義([http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_1471IEEE](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_1471IEEE) 参照)をちょっと拝借してきました。

## デザイン(・アーキテクチャ)?

『製品を形作る様々な構成要素とそれらの要素間の関係及びその製品の(使用)環境との関係が組み込まれた(上位)システムの基本構造ならびにそのような基本構造の設計指針や進化方向に関する指針』(IEEEの定義)

⇒製品内及び同製品を包摂する上位システム内での**コミュニケーション構造設計**やそれらの進化方向をも含んだ**設計指針**

IEEE では基本的にどう定義されているかというと、一つは、「製品を形作る様々な構成要素とそれらの関係」です。この最初の定義は、だいたい常識的にもそうかなと思うんですが、さらに「その製品の使用環境との関係が組み込まれた上位システムの基本構造」も含め、加えて「そういう基本構造の設計指針とか進化方向」までが含まれています。確かに、進化可能性 (Evolvability) の高いアーキテクチャでないと、それらに基づいた製品・サービスの寿命も短いでしょうから、アーキテクチャとして存在意義が薄くなってしまふ。従いまして、進化可能性までをも含めた「デザイン・アーキテクチャ」という視点は重要です。そして、日本の半導体産業が直面している大きな問題も、このような広義のアーキテクチャに密接に関わっています。したがって、今日のキーワードは、青島さん (イノベーション研究センター) が専門とされている「アーキテクチャ」になります。

### 半導体チップと社会で同一のフラクタル構造？

情報の転送・応答速度 & 自己再帰速度の増大 → コミュニケーション構造設計の類似性増大

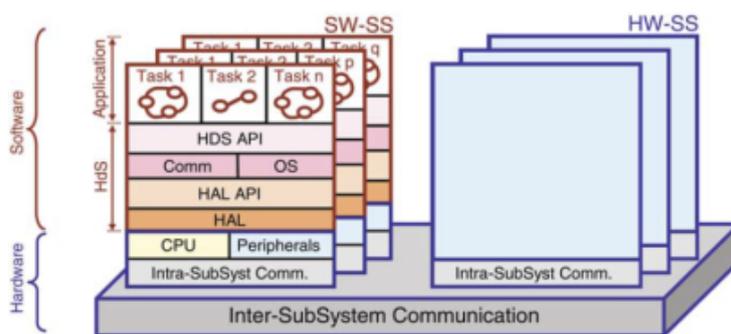


Fig. 1.2 MPSoC hardware-software architecture

K. Popovici他(2010) *Software Design and Programming of Multiprocessor System-on-Chip*

では、日本の半導体産業を分析する際に、半導体デバイス・アーキテクチャのどのような側面に注目するのか？それは、本日は半導体関係者が数多く出席しておられますのでやや恥ずかしいですけど、半導体チップ内のコミュニケーション構造ということになります。そのような構造を例示しているのが、このスライドです。半導体チップは、我々が日々愛用するスマホ用のものを含めて、ハードウェアとソフトウェアのシステムからなっています。スライドに **SW** と書いてあるのがソフトウェアシステム、**HW** と書いてあるのがハードウェアシステムです。半導体チップは、こういう風にソフトとハードの両システムから成っていて、ソフト内、ハード内、ソフト・ハード間をどうやってうまくつなぎ合わせるか、つまり、先ほどの IEEE の基本構造やそれらの進化可能性を考慮しつつ、どのようなコミュニケーション構造にするかが非常に重要です。実際、半導体産業内では、このようなコミュニケーション構造をどのようにして上手く設計するかということで熾烈(しれつ)な戦いが日々繰り返されています。

半導体チップ内でのコミュニケーション構造の良否を競う戦いに類似した戦いは、社会の中でも数多く起こっています。その様子は、まるでフラクタル構造を見るかのようです。日本の半導体産業を含む多くの産業では、残念ながらそのようなコミュニケーション構造設計の分野での戦いになかなかうまく対応できていない？と感じています。

## フィールドリサーチの本質とは？

### 最近の聞き取り調査事例(半導体関連)

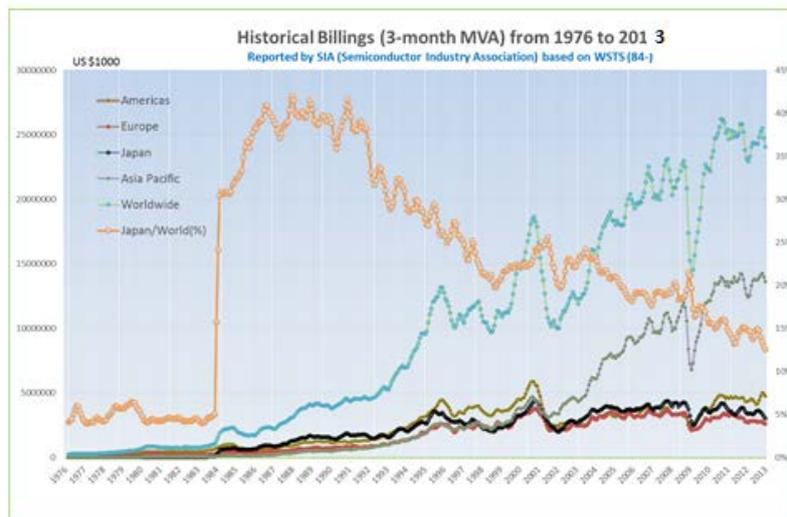
- 半導体メーカー: **Epson**, **NEC**, **Trecenti (現Renesas)**, **Mitsubishi Electric**, **Matsushita (現Panasonic)**, **Fujitsu**, **Fujitsu-AMD**, **SONY**, **UMCJ**, **Elpida (現Micron)**, **Toyota (Hirose-Fab)**, **Ricoh**, **Pioneer**, **TSMC (Taiwan)**, **Winbond (Taiwan)**, **ProMOS (Taiwan)**, **SMIC (China)**, **Intel (Ireland)**, **AMD (Germany)**, **Micron (Japan)**, etc.
- 半導体製造装置メーカー: **Nikon**, **Canon**, **ASML**, **Ultratech (US)**, **Ebara**, **Hitachi-High Technologies**, **Dai Nippon Screen**, **TEL**, **DaiFuku**, **AMAT (US)**, **Novellus (US)**, **Lam Research (US)**, **Mattson (US)**, **JEOL**, **Picosun (Finland)**, etc.
- 半導体材料メーカー: **JSR (Japan, US, Belgium, Korea, Taiwan)**, **TOK (Japan)**, etc.
- 半導体設計ツール/FPメーカー: **Tensilica(現Cadence)**, **ASIP-Solutions**, **Cadence**, **Synopsis**, **Target Compiler (現Synopsis)**, **ARM (英・日)**
- 研究開発コンソーシアム: **STARC**, **SELETE**, **MIRAL**, **ASPLA**, **CASMAT**, **IMEC (Belgium)**, **SEMATECH (US)**, **NYAlbany Nanotech. Center (US)**, **AI&ST**, **NIMS**, etc.
- その他: **IIRS & STRJ (Factory Integration)**, etc.

このスライドにも示してありますように、僕は色々な半導体関連の会社さんにフィールドリサーチをさせていただいてきました。(誤解している方々もおられますが) フィールドリサーチとは、自分で聞き取りしてきた事柄を第三者にオウム返しに伝えることではありません。それは、聞き取りで得られた事例に基づいて意義深い仮説を作るための方法論だとの理解です。そして、そのような仮説の妥当性を検討するという作業は、様々なハードエビデンス、ソフトエビデンスが必要ですので、聞き取り作業以上に大変なことです。

実際、私自身は、様々な半導体チップ、装置、材料のメーカーさんへの聞き取りや、最近では中屋さん(設計コンソーシアム STARC 社長)と一緒にやらせていただいているんですけど、設計ツール (EDA : Electronic Design Automation) メーカー、さらには各種 R&D コンソーシアムあるいは国内外の半導体ロードマップ委員会等々に、「もう来ないでほしい」と思われるぐらい頻繁に聞き取りをさせていただいてきました。特に、スライドの赤字で示してあります会社さんには非常にご迷惑をおかけしました。そのような赤字の会社さんには、本日も御出席いただいております龜山さんが勤めておられましたニコンさんも入っています。このように各所にご迷惑をおかけしながらの聞き取り調査なわけですが、本日はそういう聞き取り調査に基づくエッセンスをお話しさせていただければと思います。それらの事例はプレゼン資料の後半部分に置いてありますが、話の抽象度がやや高くなりますので、今日あまり触れる時間がないかもしれません。

## 日本の半導体産業の栄枯盛衰過程を眺める

日本の半導体産業は、全体としてみると現状どのような状況に直面しているのか？その様子を、数枚のスライドでまず示してみたいと思います。このスライドは、大勢の人たちが使っている WSTS (World Semiconductor Trade Statistics) のデータに基づいています。私自身、WSTS の統計会員となって 10 年位の間データを購入してきましたので、それらのデータを使って各地域別の半導体出荷額を国際比較してみました。このオレンジ色の折れ線が、半導体の世界出荷額の中の日本で出荷された額の比率です。このような世界全体での日本の比率がかなり減っている様子を見ますと、悲しさを覚えます。

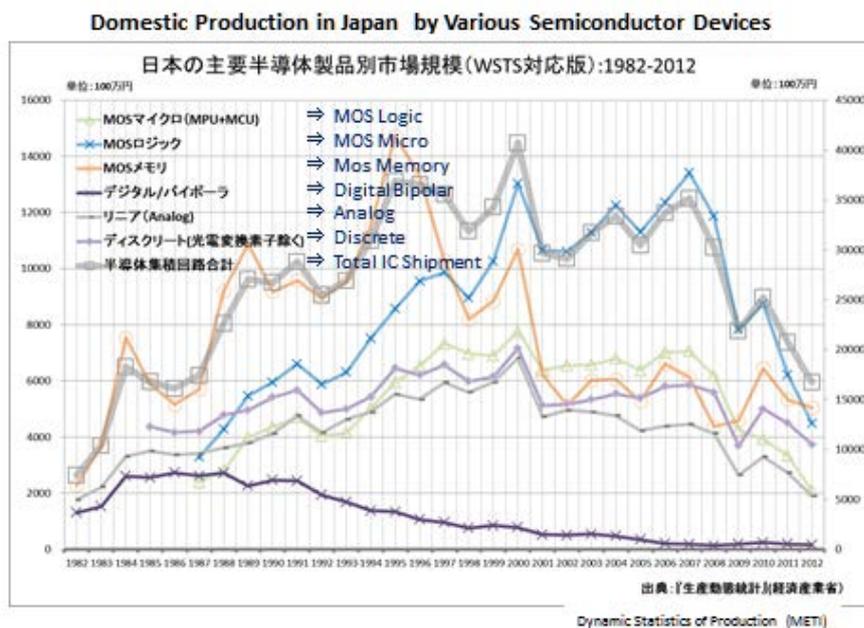
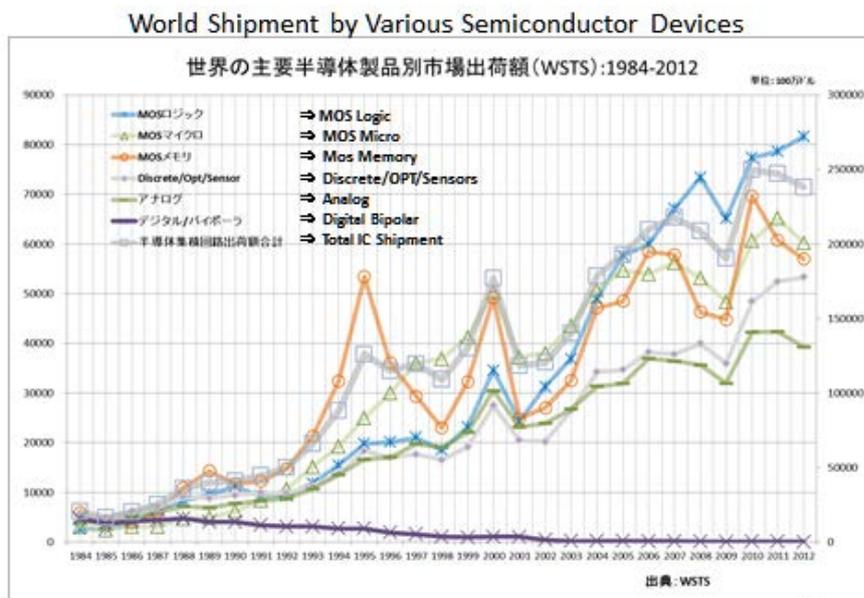


スライドの緑の右上がりの折れ線がワールド・ワイドでの推移 (1976-2013) です。紫色の右上がりの折れ線が日本を除くアジアパシフィックの推移です。日本の値が一番下の方の濃い茶色の折れ線ですが、最初に示しました日本の対世界比率の急減を反映し、世界全体は増えているのに日本の値は横這い状態です。ちなみに、グラフの 80 年代半ばまでのデータには日本が入っていませんでした。ところが、日米半導体協定(1986-94)が結ばれていく過程で、品がなくて申し訳ないですけど、データを全部出せとの米国からの要求でパンプの中までのぞかれるような事態になりました。その結果、80 年代半ばから WSTS に日本企業が急に参加しはじめて日本の対世界比率データが取れるようになりました。

次のスライドのグラフは、なかなか修行を積まないと作れないものなのですが、(半導体設計のプロである) 中屋さんに対抗して自分でどうにか作りまして、各種半導体デバイスの世界の流れ (出荷額) と日本の流れ (生産額) を比較してあります。この世界出荷額をデバイス別に示したグラフの一番上の方の青い折れ線は、半導体デバイスの中の MOS (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) ロジックの推移(1984-2012)です。MOS ロジックというと色々なものが含まれます。インテルのプロセッサもありますし、

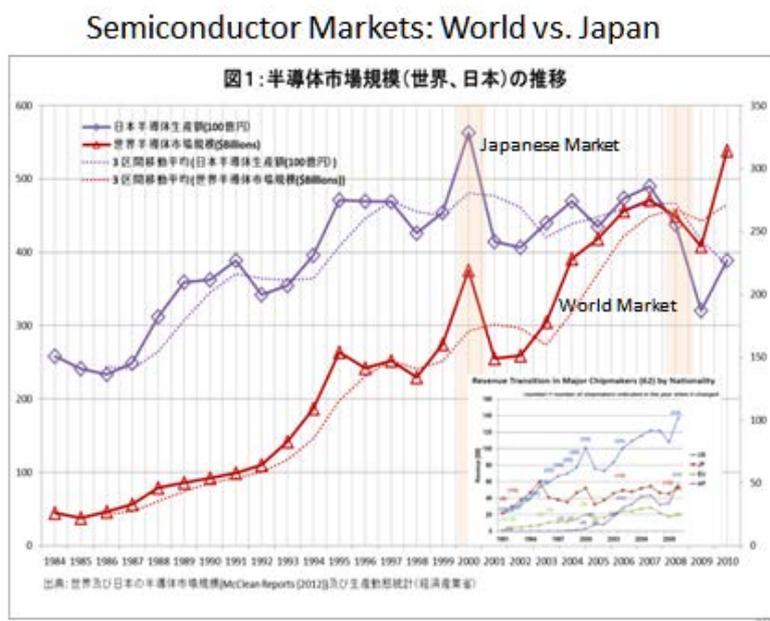
その他の様々な種類のプロセッサ（SoC : System-on-Chip 等）が含まれています。

現在半導体の世界出荷額はだいたい 30 兆円で、その額も長期にわたってほぼ一直線に増えてきています。そのことは、最初のグラフでも確認できます。他方、日本の半導体デバイスの生産額は、2000 年を境にほぼすべてのデバイスで下落しています。その深刻さは、グラフでも一目瞭然です。なお、日本のグラフは経産省のデータ（『生産動態統計』）に基づいたものですから、項目や変更履歴の違いもあり、WSTS のデータとうまく整合性を取るのには難しい部分があります。そこが、「なかなか修行を積まないと作れない」点です。



二つのグラフでは、同じデバイスと同じ色に統一してあります。例えば、MOS メモリは共にオレンジ色の折れ線ですが、ここには DRAM(dynamic random access memory)もフラッシュメモリー(Flash memory)も入っています。MOS メモリ出荷額は、世界でも激しく変動していますが長期的にはしっかりと増大しています。ところが、日本での MOS メモリ生産額は、95 年を境に急速に減少しています。しかも、日本での減少傾向は、MOS ロジックや MOS メモリだけではなく、ほぼ全ての半導体デバイスで起こっています。このような状況からも、日本の半導体産業が大変な状態になっていることがお分かりいただけるかと思えます。

次のスライドにありますように、先ほどの傾向は、世界全体の流れと日本の流れを各々合計した生産額で示してみても同じことが言えます。このグラフの右下の小さなグラフは会社の国籍別に集計した中屋さん作成の資料ですが、このグラフから最も儲かっているのはアメリカの企業だということが分かります。以下では、基本的になぜ日本勢にとってこのような厳しい状況が続いているのかについて検討したいと思います。

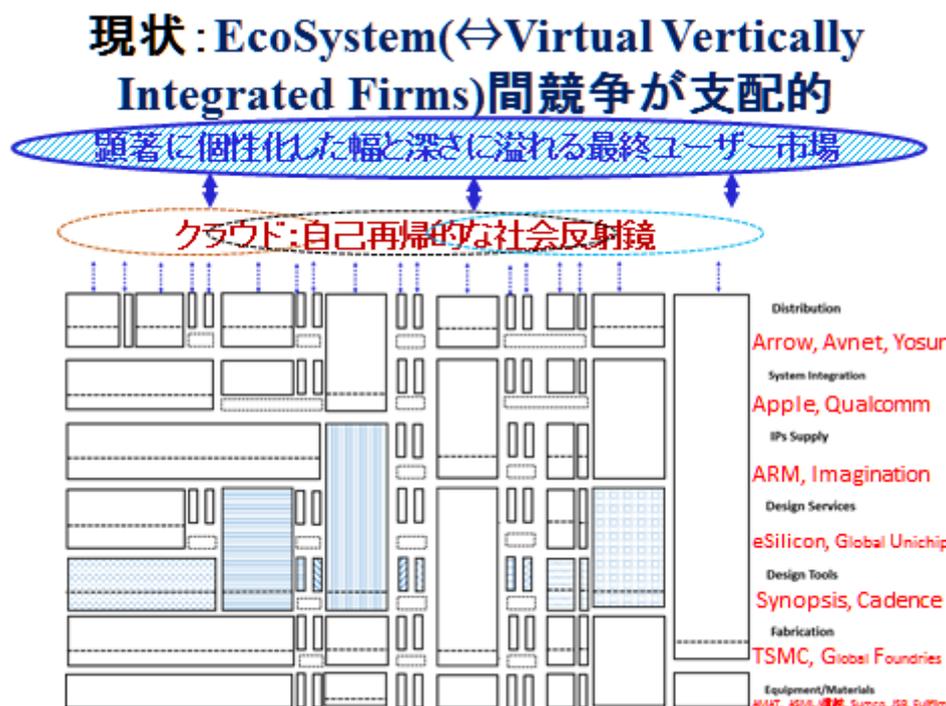


## 仮想的垂直統合型企業 (Virtual vertically integrated firm) の登場: 垂直知識の重要性急増

何をすれば、これから日本の電機・電子産業の世界貢献度があがっていくのだろうか? この産業が急速に凋落していった背後にどのような問題が隠されていたのだろうか? などに関しましてエッセンスを抽出してしゃべることができれば良いなと思っています。

次のスライドは、後ろでしゃべるために用意したものの一部を、話の流れから急にごこの時点でお見せする形にしましたのでやや唐突ですが、現状の半導体産業における産業組織上の特徴を示したものです。一般的に指摘されていることですが、1980 年代に優勢であ

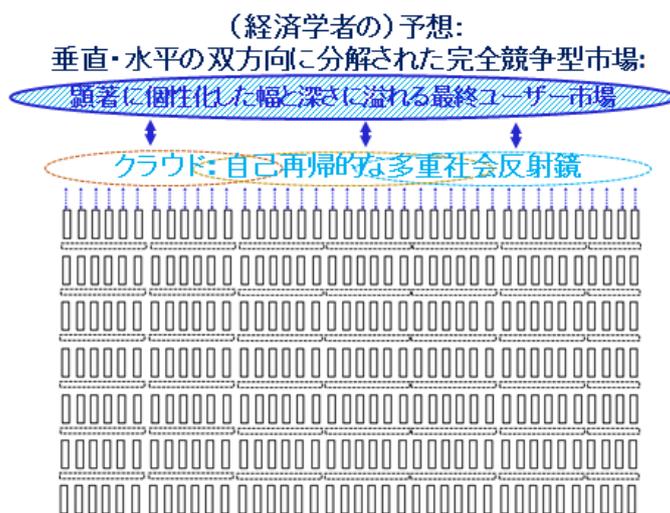
った IBM 等に代表される垂直統合型企業の多くが 80 年代末から 90 年代初頭にかけて解体されていき、代わって水平統合型の企業が優勢となってきました。そして、現状では、これらの水平統合型企業が垂直的に組み合わさった形の各種の複合体が登場してきて、これらの複合体間での垂直的な競争、いわゆるエコシステム間競争が起っています。



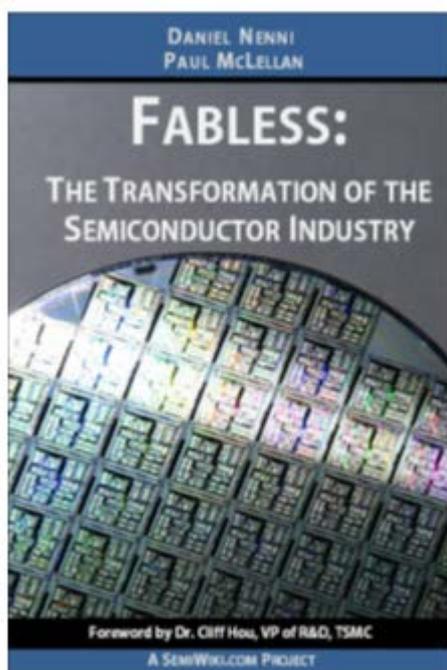
実際、半導体産業では、垂直統合型の企業が分解されて水平統合型な企業が数多く生まれました。例えば、流通分野だと、御存知の方もいらっしゃるかもしれませんが、米国系の Arrow とか Avnet と台湾系の Yosun が世界を支配しています。システムインテグレーターだと Apple や Qualcomm、Broadcom などが出てきました。それから IP サプライヤーだと、ARM とか Imagination Technologies とかですね。ARM とか Imagination などは、調べますと日本の電機メーカーが育てた側面が強いわけですけど……。あと e-Silicon とか Global Unichip とかのデザインサービスと呼ばれる半導体産業の川上と川下とを標準のインターフェースでつなぐようなビジネスも出てきています。その他に、設計ツールの Synopsis とか Cadence、製造専門の TSMC や Globalfoundries などがあります。このように川上・川下にわたって各種の水平統合型企業が出てきていまして、しかも、今や同じ層の水平統合型企業間の競争というよりも、これらの水平的に統合された企業からなる様々な複合体間の垂直的な競争、エコシステム間の競争が起きています。

そのような複合体は、産業の川上・川下に広くまたがった形ですから、“仮想的 (virtual) な垂直統合型企業” とも呼べるような形態を採っています。日本にはリアルな垂直型統合企業が数多く存在してきたわけですが、今やこの種の仮想的な垂直複合体が優勢となってきました。しかも、これらの複合体を構成する様々な水平統合型企業が、巨大なネットワ

ークを構成して財・サービスを提供する状態が一般的になっています。そして、そのようなエコシステムに入れないと、そもそも売れ筋のデバイス、多くの人達が買ってくれるデバイスを打ち出せなくなっている。日本勢はこの辺りでも非常に大きな問題を抱えているわけですし、そのあたりのお話をもうちょっと詳しくやってみようかと思えます。ちなみに、このプレゼン資料が示していますように、「顕著に個性化した幅と深さにあふれる最終ユーザー市場」が登場し、そこにクラウド(cloud computing)的な仕組みが導入されてきましたので、完全競争的な世界になるのではないかといまだに信じているおめでたい経済学者もおられるかもしれません。ところが、実際にはそういう状況にはなっていません。



**デジタル化の衝撃－メタ認知力の大衆化、一目瞭然化、社会実験の経済、社会学習の経済**



- Foreword
- Preface
- 1: Introduction
- 2: ASIC
  - In Their Own Words: VLSI Technology
  - In Their Own Words: eSilicon Corporation
- 3: FPGA
  - In Their Own Words: Xilinx
- 4: Fabless
  - In Their Own Words: Chips and Technologies
- 5: Foundry
  - In Their Own Words: TSMC and Open Innovation Platform
  - In Their Own Words: GLOBALFOUNDRIES
- 6: EDA
  - In Their Own Words: Mentor Graphics
  - In Their Own Words: Cadence Design Systems
  - In Their Own Words: Synopsys
- 7: IP
  - In Their Own Words: ARM
  - In Their Own Words: Imagination Technologies
- 8: What's Next

2014

このプレゼン資料で紹介しています『Fabless : The Transformation of the Semiconductor Industry』は、ほんの最近出た本ですけども、今日の僕の話と結構似たところがあります。自分の分析が一段落ついた時点でこの本に遭遇したわけですが、とても興味深い本ですので、もしご興味があればお読みください。電子媒体でしか売っていませんで、15 ドルです。この本で強調されているのは、一言で言えばデジタル化の衝撃です。そして、おそらくですが、日本の電機・電子産業が、このデジタル化の衝撃になかなか耐えきれず競争力を急速に低下させてきている。そういう話を次にしてみたいと思います。

## デジタル化の衝撃：第一波？

### ➤あらゆる事柄をコード化

⇒デジタル・コンバージェンス発生

### ➤あらゆる事柄を自動化

⇒HW & SW柔軟性誇る機械・設備(変種・変量)

⇒有形・無形資産の企業特殊性減少(⇔固定費用の埋没度減少)

⇒企業間情報転送・応答速度の優位性増大(⇔“取引費用”の減少)

⇒多様性ポートフォリオ (Variety Pooling) の威力増大  
(背景に将来の予測可能性大幅低下、垂直統合型企業の頑健性(Canalization)低下?)

なお、(私事で誠にすいませんが) 中岡哲郎という技術史で有名な経済史の先生がおられますけど、3月末にやっとお会いしていただけることになりました。なぜ中岡先生にお会いしたいのか？それは、先生が明治維新とはどういう時代だったのか？を世界史的な枠組みの中で新たな視点に基づいて考察されているからです(『日本近代技術の形成(伝統)と〈近代〉のダイナミクス』(2006)等)。中岡先生によれば、この頃の日本は、当時の歴史的な初期条件によって、18世紀半ばから19世紀にかけてヨーロッパで起こった産業革命の成果の言わば“おこぼれ”をアジア諸国の中で唯一ちょうどまい具合にキャッチできた国だったということです。つまり、そのような影響を効果的に吸収するための文化的・国家的基盤を運良く持っていた。ところが現状の日本には、明治維新の頃に吹いた産業革命の順風ではなく、どうもデジタル化の衝撃(⇔第三次産業革命の息吹)が逆風となって押し寄せている気がしてなりません。

そういう問題意識で、そもそもデジタル化がどんな衝撃をわれわれの社会に与えているだろうか？について次のスライド2枚にちょっと整理してみました。ここでは、デジタル化の衝撃としてほしい3つの項目を抽出しています(Zuboff (1984), *In the Age of Smart Machine: The Future of Work and Power* 参照)。

最初の衝撃は、「あらゆる事柄をコード化する」という点です。この衝撃によって、通

信と放送の融合といった形で語られることの多いデジタルコンバージェンス(Digital Convergence)現象があらゆる分野で発生しはじめました。この点は、良く指摘されていることです。二つ目のデジタル化の衝撃は、「あらゆる事柄を自動化する」という点です。より具体的には、ハードウェア・ソフトウェアの柔軟性の向上、企業組織や人的資本の特殊性の減少、企業間の情報の転送速度・応答速度の急増、あるいは将来の予測可能性が大幅に低下してきていますので多様性ポートフォリオ(Variety Portfolio)の役割の増大等々のインパクトとして出てきました。僕もこういうことを昔やっていましたけども、企業特殊などの表現は労働経済学者が好んで使うものですが、一般的には General-purpose Technology (汎用技術) という言葉がよく使われると思います。

自分もそうだったので笑えないんですけど、多くの経済学者は、このようなデジタル化の衝撃が激しさを増していく中で、垂直統合型企業=取引費用を軽減するための仕組みという風に何とかの一つ覚えみたいに唱えていました。確かに取引費用は重要ですが、デジタル化の流れはもっと大きな試練をわれわれに突き付けています。そのような試練として、一番目と二番目の項目は(多くの経済学者にも)諒解してもらえそうですが、三番目の「あらゆる事柄を一目瞭然化する」という項目については、なかなか諒解して貰えないかもしれません。このような一目瞭然化便益は、結果の見える化だけではなく、プロセスの見える化さえももたらします。

## デジタル化の衝撃: 第二波?

### ➤あらゆる事柄を一目瞭然化

⇒階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及(“Precise Abstraction & Unambiguous Traceability”)

⇒企業・組織、産業、国家内の特殊知識・ノウハウの一般化(General-Purpose Technologies)

⇔部分と全体の(代替・補完)関係に関するメタ認知力の大衆化

⇔社会実験・学習の経済(Economy of Social Experiments & Social Learning)の便益急増

あらゆる事柄を一目瞭然化するというデジタル化の衝撃は、ソフトウェアの専門家、特に組込ソフトウェア(embedded software)の専門家(e.g., D’Souza and Wills (1999), *Objects, Components, and Frameworks: The Catalysis Approach with UML*)が好んで使う言葉、“precise abstraction and unambiguous traceability”に端的に現れていますが、“ある階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及”を可能にするという大きな便益をもたらします。そして、それらの見える化の便益をどのような人々にまで還元するのか? どのような人々と共有するのか? という重要な事業・組織運営上の問題が生

まれてきます。そして、そのような問題は、デジタル化の衝撃の第二波というかたちで半導体産業に最も早く押し寄せてきました。それが、1980年代半ばの深刻な半導体不況以来の最も大きな不況であった2000年危機以降に特に顕著になってきたんだろと考えられます。

あらゆる事柄が一目瞭然化されるようになりますと、部分と全体の関係や全体の中での様々な部分の間に発生する代替・補完関係、特に補完関係に関する情報が、大勢の人々に見えるようになります。その結果、このスライドでは「メタ認知力の大衆化」と呼んでいます。天才・秀才だけではなくて大衆にも部分と全体の関係が容易に高解像度で分かるようになります。

西口さん（イノベーション研究センター）が良く言われる **Network-Centric Wars** が歴史上はじめて大規模に実践されたイラク戦争では、これから敵陣に突っ込もうとしている自分とあちら側の敵との状況を衛星画像で確認しながら、あるいはメタ認知しながら戦闘が開始されました。その結果自分が死ぬかもしれないことを部分と全体の関係に基づいて分かりながら、です。この事例が赤裸々に示していますように、デジタル化によってあらゆる事柄が一目瞭然化されるようになると、「メタ認知力の大衆化」現象が生み出されます。ところが、日本では、(Democracyの未成熟ということも影響しているかもしれませんが)メタ認知力の大衆化の便益を社会としてうまく享受できていないのではないのでしょうかね。

スライドの最後の方に **Economy of Social Experiments** (社会実験) and **Social Learning** (社会学習) の便益急増と書いてありますが、一目瞭然化の便益は、特定のグループ内での試行錯誤によって得られた成果を社会全体にも敷衍できる言わば社会実験の成果として位置づけることを容易にします。そのため、“規模の経済”ならぬ“社会実験の経済”や“社会学習の経済”といった便益を多くの人々にもたらしめます。そのような特定グループの境界を越えて波及していく社会実験や社会学習の便益を事業経営や組織経営に取り入れていけませんと、経済・社会システムから駆逐されて行きます。日本の企業・組織には、そういう社会実験や社会学習の便益を巧く取り入れることができないまま切羽詰まった状況に置かれているケースが多いのではないのでしょうか？本日の話は、そういう事柄に繋がっていきます。

このような状況は、さきほど話しました水平統合型企業の垂直的な複合体であるエコシステムの形成だとか、エコシステム間の競争といった事柄に繋がっています。エコシステム間競争の渦中にいたり、エコシステムの中で様々な情報を獲得したり、といったことができないと、社会実験や社会学習の便益を獲得できませんので、まるで竹槍で機関銃に挑んでいるような状況になってしまいます。エコシステム内での **Communication & Collaboration(C&C)**を通じてのみ獲得できる川上・川下にまたがる垂直知識、いわゆる **Vertical Knowledge** が利用できなければ、そもそも自分たちの製品・サービスのどのような仕様がどのような価値を生み出せるかの見当すらもつかなくなります。なお、NECはC&Cを **Computer & Communication** と未だに理解している様子でC&C財団もあるよう

です。ところが、今や C&C=Communication & Collaboration でないと急速な市場の動きについて行けないわけです。

## ICT 誘発型 Communication and Collaboration (C&C)：垂直知識獲得の方法

効果的な C&C を可能にするには、デジタル化がもたらす一目瞭然化便益の利用が必須になります。しかも、その便益を、企業・組織の境界を越え、各種の利益相反問題を解決したエコシステム内での C&C を通じて発揮することが必要になります。そうすることによって、急速に変化する環境変化に対応するためにより多くのリアル・オプション（意思決定の選択権や自由度：Real Options）を手に入れることができますし、エコシステム内での垂直知識の相互交換、つまり、C&C をさらに効果的に実践できるようになります。

### Economy of Social Experiments & Social Learningの便益急増

#### ◆垂直方向での利益相反問題解決

⇔不可欠なEcoSystem構築

(EcoSystem⇔Real Options拡大手段)

⇔EcoSystem内での垂直統合知識の相互交換 (Communication & Collaboration)

(EcoSystem⇔既存の境界の破壊手段)

⇔EcoSystem内でのアーキテクチャ探索

(EcoSystem⇔広大な空間で探索ツール)

僕としてはこの辺りの弱点補強が日本企業にとって一番重要なんじゃないかと思っています。先に紹介しましたように、世界での半導体出荷額の拡大傾向に反して日本ではあらゆる半導体デバイスの日本市場での生産額が低下しています。そういう状況が発生している実情の背後には、そもそも大きくヒットするデバイスを作れない、あるいはそのようなデバイスやその使用環境を含む進化可能性に富む（プラットフォームに代表される）上位システムのアーキテクチャをなかなか提示できないという現状があります。

実際、現在では、デバイスの複雑化と短ライフサイクル化、あるいは、それらを使った製品の複雑化・短ライフサイクル化によって、アーキテクチャ自体を迅速に探り当てることの重要性が急拡大してきています。ところが、複雑なデバイス・製品やそれらを包摂する上位システムのアーキテクチャを迅速に探索することは極めて難しくなっています。特定アーキテクチャの中だけで時間をかけて探索するのだったら未だ容易でしょうが、アーキテクチャ自体を探索し、しかも探索を迅速に実行しなければいけない。しかも、デバイス・製品の複雑化・高度化に伴い、今までとはレベルの異なる広大なアーキテクチャ空間の中での探索が不可避になるわけです。そうすると、自社・自組織内で閉じた形では、

広範囲にわたって迅速にアーキテクチャ探索できるはずがありません。したがって、エコシステム内で C&C をしながらアーキテクチャ探索をすることが必須となります。そういう風に自社・自組織の境界を頻繁に越えていくことが求められる時代になってきています。

エコシステム内では広大なアーキテクチャ空間内でより効率的に妥当なアーキテクチャ探索を行うためのツールを C&C を介して利用可能となるわけですが、多くの日本企業は未だこのようなエコシステムの外に位置していますので、そのようなツールをなかなか利用できない。おそらくですが、このような構図は半導体産業だけではなくて、製薬・バイオを含む色々なサイエンス型産業でも観察されるのではないかと思います。

社会実験の経済と社会学習の経済の便益を享受するためには、エコシステム内の構成メンバーとしての自分たちの立ち位置とといいますか、エコシステム全体の中での自らの状況を刻々とメタ認知しながら、クロックスピードの速い市場の変化に対応できなければならないわけです。ところが、そのようなメタ認知がなかなか迅速にできないため、現状認識が遅れがちとなり、結果として市場のクロックスピードについていけなくなっている。なお、このような構図は、残念ながら、自分も含む経済学者や経営学者自身にも当てはまっているのかもしれないです。

ではなぜクロックスピードになかなかついていけないのか？なぜ広大なアーキテクチャ空間でのアーキテクチャ探索競争に対応できないのか？ということを考えてみると、やはり、そこには企業・組織内および国内外の企業・組織間での C&C の失敗、このスライドで呼んでいる C&C Failure が頻発しているから、ということになります。そして、その原因は、企業・組織内および企業・組織間の情報転送速度・応答速度が上がらないからではないか？ということになります。従いまして、このような構図は、冒頭でもお話ししましたが、まるで半導体のチップの中で起きている現象を特徴付けるもののようにもあります。

## 現状認識：

- ◎複雑化する製品・テクノロジーや市場のクロック・スピードについて行けない？
- ◎広大なアーキテクチャ空間でのアーキテクチャ探索競争に対応できない？
- ⇒企業・組織内及び(国内外)企業・組織間での **Communication & Collaboration (C&C) Failures** が頻発？
- ⇒企業・組織内及び企業・組織間の **情報転送速度・応答速度** が上がらない？
- ⇒ **ICTの威力** を活かさない？

情報転送速度・応答速度が上がらない大きな理由は、社会にしても半導体チップにし

でも、コミュニケーション構造の設計（アーキテクチャ）に問題があるからだと思われる。構造設計が悪いと、システム内のあちこちで情報の流れが滞るボトルネックが発生したり、流れる情報間に深刻な干渉問題が発生したりしますので、システム内での情報の転送速度・応答速度がなかなか上がらないわけです。

そうすると、どういうコミュニケーション構造にすれば、情報の転送・応答遅延の発生を少なくしてシステム内での効率的な情報のやりとりができるようになるのか？何が問題なのか？このようなロジックを進めていって最終的にたどり着く要因は、時代背景を考えますと、やはり ICT の威力をうまく活かす組織構造になっていないからではないか？ということになると思います。とすると、そもそも、なぜ日本の企業や組織は ICT の威力をなかなか未だ活かせないのだろうか？というビッグ・クエスチョンにたどり着きます。そして、そのようなビッグ・クエスチョンへの答えが、先に触れました、産業革命の順風が吹いた明治時代とは異なり、現状の日本に ICT の逆風が吹いている理由なのではないでしょうか？

## Shoshana Zuboff の“Support Economy”： 需要側での大きな相変化と ICT

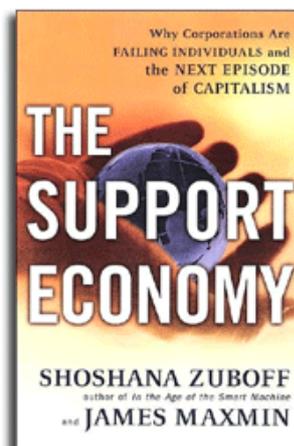
先ほどのスライドに「複雑化する製品テクノロジーや市場のクロックスピードについて行けない」と書いてあるわけですが、クロックスピードが加速してきたのは ICT の登場といった供給要因だけに起因するのではないですよ。では、その需要要因とは何か？そのような需要要因に触れているのが、こちらの二枚のスライドです。

### 顕著に個性化した最終ユーザー市場登場

<http://www.amazon.com/The-Support-Economy-Corporations-Individuals/dp/0670887366>

Keywords: **Individuation, Deep Support, Distributed Capitalism**

- ◆ 20世紀末 **Individuation** 水準が閾値突破  
⇒ 豊かな中間層拡大 & 急速なインターネット普及
- ◆ 価値創造主体が大量生産型企業から個人に移行  
⇒ **Elites(19世紀), Masses(20世紀), Individuals(21世紀)**
- ◆ 人々への **Deep Support** によるのみ価値発見可能  
⇒ “価値造り”の時代から“価値聞き取り”の時代へ
- ◆ **Deep Support** には企業・組織間連合体による意識・無意識への“密着”(取材)必須(e.g., クラウド)  
⇒ **Distributed Capitalism** (自律分散型資本主義)の時代に！



2004

最初のスライドは、Shoshana Zuboff さんの「The Support Economy」(2004)という本、ニューヨークタイムズのベストセラーになったと聞いていますが、この本の内容に基づいています。この本は、なかなか難しい英単語が頻発しますので読むのが大変なんです。Kindle があれば大丈夫という感じでしょうか。この本のエッセンスは、3つのキーワ

ード：Individuation（個性化）、Deep Support（親身の密着サポート）、Distributed Capitalism（自律分散型資本主義）で語ることができます。

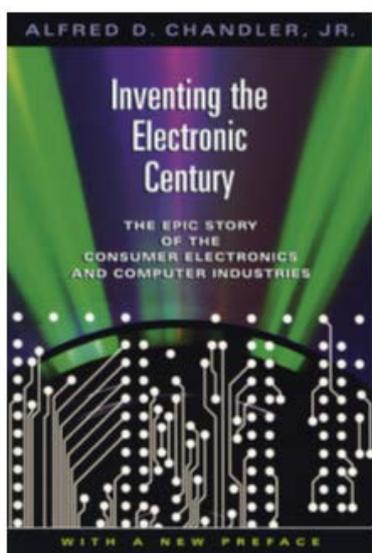
彼女によれば 20 世紀末に世界レベルでの個性化水準がある閾値を突破しました。その背景には、人々（中間層）が豊かになり、より高い教育水準を達成するようになり、といった要因がありますし、彼らはそのような個性化欲求を実現するためのインターネットという強力なツールを獲得しました。そのような個性化が急速に進んできたことにより、価値創造の主体が、大量生産を得意とする大企業から多様な個性を発揮する個人に移行してきました。その結果、エリート時代であった 19 世紀、大衆時代であった 20 世紀を経て、21 世紀は個々人の時代になったと Zuboff さんは表現しています。

多くの日本企業が、このような急速に高まった個性化欲求の流れになかなか対応できないでいる様子が思い浮かびます。彼女によれば、実際、このような時代の流れの中では、Deep Support できる企業しか生き延びることができない。しかも、Deep Support する形でしか個性化していく人々の欲求を満たすような製品・サービスを提供できなくなる。言い換えれば、これまで大量生産型の大企業が自ら主導するマーケティング活動によって大衆の消費活動の中から価値を見出して大衆に提示するといった時代から、個々人に四六時中密着しながら「価値聞き取り」を行っていく時代が変わって来ている。そして、そういう密着型の聞き取りを親身になって実践できない企業は駆逐されていく。Deep Support 型の聞き取りを行うには、個々のユーザーに密着する形の聞き取りが必須になりますから、例えばですが、個々人の体の一部と化しているスマートフォンの一挙手一投足にも配慮したような情報収集が要請される。そういう形の Deep Support を実施しないと、非常に個性化した最終ユーザー市場の流れについて行けなくなる。Zuboff さんは、このような形態の資本主義を Distributed Capitalism と呼んでいます。このような Zuboff 的な現状認識が妥当すると思えば、そのよう流れが、先ほどから強調してきました水平統合型企業の仮想的な垂直的複合体（＝エコシステム）間競争が熾烈になってきている需要側の要因だと指摘することができると思います。

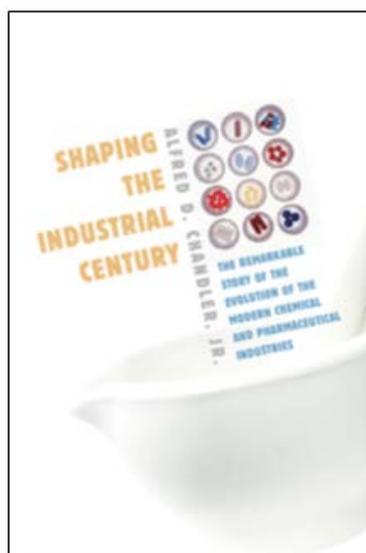
なお、以上の話には、ただし！という部分もあると思います。その点を指摘するために用意してきましたスライドがこちらです。この二つは、どちらもあの有名な経営史家の Chandler さんが 2001 年と 2009 年に書かれた本の表紙です。米倉さん（イノベーション研究センター）の先生である Chandler さんですので誠に申し訳ないけど「本当に自分で全部書かれたんですか」という感じの本があります。この二冊も、そういう風に思ってしまうような本です。ただし、要所・要所では、100 年前後のスパンで電機・電子産業と化学・製薬産業の大きな流れとそのような流れの規定要因がとても興味深く総括されています。半導体は電機・電子産業に属しますが、この産業では 100 年というスパンで眺めると、化学・製薬産業に比べてドミナントなプレイヤー（覇者）が頻繁に代わっています。他方、化学・製薬産業、特に前者では、順位の変化は多少あっても登場する覇者には殆ど変化がありません。Chandler さんの問題意識は、そうだとすると、産業毎になぜこのような大き

な違いが起きるのか？ということです。

では、なぜ電機・電子産業では覇者がより頻繁に代わるのでしょうか？これまでお話ししました脈絡に関連させてまとめますと、電機・電子産業では IEEE 流の広義の意味での製品アーキテクチャが大きく、しかも高い頻度でどんどん変わっていくということに起因しているように感じられます。つまり、アーキテクチャが大きく変わる毎に覇者が代わるというパターンです。ちなみに、Chandler さんの総括は、化学・製薬産業では、各社の弛まぬ学習活動によって積み重ねられてきた科学技術的な知識の賞味期限が長い云々という感じのものです。



(2001)



(2009)

以上のような意味では、これまで指摘しました特徴は、電機・電子産業に限定的な側面が強いということになりましようかね。ただし、電機・電子産業は、半導体産業の急速な発展を媒介として、化学・製薬産業を含めてあらゆる既存産業をハイブリッド化させてきています。従いまして、電機・電子産業の特徴は、C&Cを軸とした産業内・産業間融合を誘発しながら、あらゆる産業に波及していくだろうと言えるのではないのでしょうか。いずれにしても、今日の話は、特にアーキテクチャの変動が激しい電機・電子産業に特徴的なものですから、ちょっと気をつけていただければ、ということをお皆さんにリマインドする意味で Chandler 関連のスライドを持ってきました。

### 王道としてのモジュール設計思想：アーキテクチャ探索の視点から

最初にも申し上げたんですけど商学部の MBA の授業をしているときに、僕は「イノベーションとモジュール設計思想」という授業をやっていたんですけど、「分かりにくいから講義名を変えほしい」との要請があり「イノベーション・デザイン」という授業になりました。学生さんにとってどちらが分かりやすい講義名かはよく分かりませんが、先ほどか

ら強調しています（広義の意味での）アーキテクチャという視点からは、モジュール設計思想がとても重要ですので、その意味では「イノベーションとモジュール設計思想」という授業名の方が適切かもしれません。それはともかく、今日の話の流れからしますと、やはりモジュール設計思想がキーワードになりますので、これからはその点についてもう少し掘り下げてみたいと思います。この話題は、次の4～5枚のスライドで紹介します Baldwin・Clarkの本を訳された（本日も御出席いただいております）安藤さんにかかわるようなお話になります。

### モジュール設計思想のイノベーション抑制 vs. 促進効果：進化・発生生物学に学ぶ

#### <イノベーション抑制効果>

- ⇒徹底したムダ・ムラ・ムリ排除
- ⇒極めて安定な基底状態(Ground State)に到達
- ⇒頑健性&保守性(⇔Canalization)発現! (⇔"Structural Lock-in"状態出現)
- ⇒大きな環境変化の時代に不可欠なMacro Innovations発現を阻害

#### <イノベーション促進効果>

- ⇒突然変異の悪弊局所化
  - ⇒並列性による進化速度の加速
  - ⇒累積されてきた知識・ノウハウ(IPs)の再利用性増大⇔Real Options ↑
  - ⇒冗長性(想定内/想定外転用)による選択圧への自由度増大
- #### <二律背反状態打破の妙薬?>
- ⇒機能モジュール間における情報転送速度・応答速度の向上
  - ⇒部分と全体の関係の一目瞭然化(Precise Abstraction & Unambiguous Traceability)
  - ⇒社会実験・学習の経済(Economy of Social Experiments and Learning)活用
  - ⇒アーキテクチャ探索の容易化

21

イノベーション（特に、社会に変革をもたらす創造的な発見・発明・改良）を継続的に生み出していくためには、冒頭に触れました IEEE のアーキテクチャの定義にありますように進化可能性（Evolvability）の高いアーキテクチャの果たす役割が重要になります。そのようなアーキテクチャ候補として最も有望なものがモジュール設計思想だと断言して良いでしょう。ところが、よくよく考えてみますと、スライドに示していますように、モジュール設計思想には、イノベーションを抑制してしまう効果もありますし、促進する効果もあります。従いまして、モジュール設計思想が王道だと主張する場合、この設計思想には、抑制効果を上回る促進効果を誘発する仕組みが組み込まれていて、その結果、進化可能性を高めるための王道になるんだ、といった説明ができなければならないはずです。なお、これから日本の半導体産業の脈絡の中でお話する意図は、もしかしたら日本の半導体産業、あるいは電機・電子産業には、このようなモジュール設計思想に基づいてイノベーションを誘発する仕組みに大きな弱点があるのではないだろうか？ということになります。

このスライドのアイデアには、進化発生生物学分野での成果がアチコチに含まれています。それらを、本日の脈絡に合わせる形でお話してみます。スライドにあります「イノ

バージョン抑制効果」が生み出されるロジックでは、まずトヨタ的なムダ・ムラ・ムリを取り払うということが関連してきます。モジュール化を推し進めていって可能な限りムダ・ムラ・ムリを取り去っていけば、製品とかその製品を包摂する上位構造には、ちょっとやそっとの環境変化ではビクともしない頑健性が生み出されます。理工学的な表現をすれば、そのような製品や構造体は、(機能美をも誇る) 極めてエネルギー的に安定な状態に到達することになります。その結果、それらには、経済環境の変化に対する頑健性とか保守性が生み出されます。ただし、そのような頑健性・保守性は、より大きな経済環境の変化が起こりますと、却ってそういう変化への適応速度を低下させる可能性も大きくなります。少々の攪乱(かくらん)があっても大丈夫なので、本来は新しい構造変革が要請されているにもかかわらず、現状にロックインされてしまう、あるいは構造的なロックイン (structural lock-in) 状態になって身動きが取れなくなってしまう、結果として、イノベーションの発現を阻害するということになります。まだ大丈夫だ! まだこれで行ける! という風に、ズルズルと竹槍の改良改善に拘る形で勝負しようとしてしまう、ということでしょうか。

他方、モジュール設計思想は、モジュール間の繋がりには共通のインタフェースを通じて可能な限り少なくなるように工夫されていますので、スライドにありますように、斬新な試みの負の側面、つまり、突然変異の悪弊を極小化できます。ですから社会実験をより頻繁に実施することができ、それらの試みの良否をより多く事前に試すことができます。しかも、そのような実験の効果が局所的ですから、各モジュール内で並立的に実験を試してみることができる。その結果として、逐次の一つずつ実験するスタイルに比べると、並列処理が利用可能ですので、進化速度を大幅に加速することもできる。加えて、各々のモジュールの独立性が高く細分化されていればいるほど、それらのモジュールの汎用性が増大するので、蓄積された知識・ノウハウの再利用性が拡大する。加えて、モジュール設計思想によって設計されている場合、モジュール間の連結度がかなり抑えられているので、冗長性 (Cooptions 又は Co-option) が必然的に生まれる。そして、そのような冗長性は、思ってもみない経済環境の変化が起きたときに想定内のみならず想定外転用ができる可能性を高める。したがって、イノベーション促進効果が高まる。そういうロジックです。

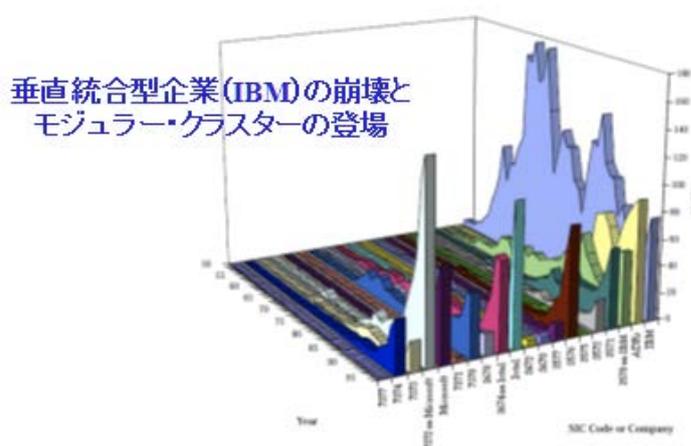
## **Baldwin and Clark (2000) “Design Rules”: 再考**

次のスライドで紹介するように、Baldwin・Clark も名著『デザイン・ルール』でこの二番目のイノベーション促進効果をすごく強調しています。ですから、ここに居られる皆さんから「では中馬さん、彼らのロジックにプラス・アルファで何を強調できるの?」という厳しい質問が飛んでくるかもしれません。それに答えるために用意したのが三番目のスライドになります。そして、このスライドでは、モジュール設計思想のイノベーション抑制効果を上回る促進効果を生み出すためのロジックを説明しようとしています。スライドに明示してあります「どのようにすれば機能モジュール間の転送速度や応答速度を上

げられるのか？」という問いへの返答でもあります。

そのようなロジックを紹介する前に、Baldwin・Clarkのロジックは、そもそもどのようなものだったのか？その説明のために、このスライドに彼らの有名なグラフを持ってきました。このグラフは何を意味しているかと言いますと、縦軸には年次が、横軸には、右端にIBMだけが抽出されていますが、コンピュータ産業に関連した4桁分類による色々な産業が明示されています。高さの軸は、4桁分類別の市場価値（1996年価格に換算）です。縦軸の一番奥が1950年、一番手前が2000年位です。

Figure 1  
The Market Value of the Computer Industry  
By sector, 1950-1996 in constant 1996 US dollars



Source: Baldwin and Clark, 2000, Plate 1-1.

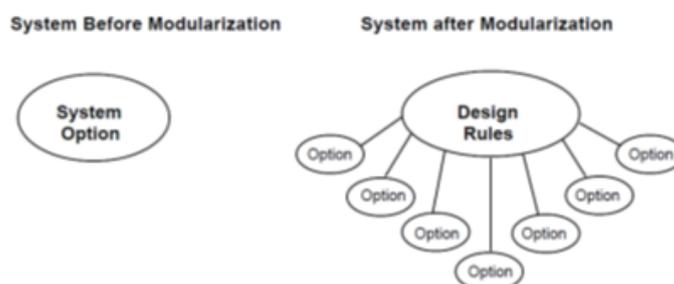
Carliss Y. Baldwin and Kim B. Clark (2000), *Design Rules: The Power of Modularity*, 邦訳は2004年)

このグラフによれば、1980年代初頭まで、ほぼ全ての価値は、基本的に垂直統合型企業であったIBMによって生み出されていました。ところが80年代半ばを過ぎてきますと、インテルやMicrosoftに代表される水平統合型の企業がそれまでIBMの独壇場だった分野で大きな価値を生み出していきます。そして、1990年を過ぎる頃には、IBM自体の価値が大幅に低下していったのとは裏腹に、4桁分類で示された様々な水平統合型企業の生み出す価値が増えていきます。言い換えれば、それまでIBMが担っていた統合的機能がモジュール化されて企業外に押し出され、それらの専門化したモジュール型企业群（モジュール・クラスター）に代替わりしていきます。そのような事実をこういう1枚の絵で一目瞭然化するのは、たいしたものですよ。

この図の次に彼らが使うのが、次のスライドにありますモジュール設計思想の役割を明示した図です。そこで強調される点は、増大する複雑性に対処するには、モジュール設計思想が不可欠だ、組合せ複雑性による対処が不可欠だ、ということです。より具体的には、スライドの右側の一塊（ひとかたまり）になっている楕円と右側のそのような楕円に数々の（リアル）オプションが付いた図とを使って説明します。こんな風にです。左側の楕円のように完全に統合化されているような製品アーキテクチャでは、大きな経済環境の

変化が起きたときに対処のしようがない。ところが、右側の多数のオプションを備えた製品アーキテクチャでは変化への対応ができるし、先ほどの想定外転用すらも可能である。そして、そのような柔軟性は、オプションの数が増得れば増えるほど増大する。このように、先ほどのスライドで説明しました二番目のモジュール設計思想のイノベーション促進効果を強烈に主張します。ちなみに、彼らの本では、一番目のイノベーション抑制効果については触れられていません。

### 複雑性に対処にはモジュール設計思想の力 (組合せ複雑性の威力) 不可欠



Moduleのリアルオプション・バリューは、想定外の用途に活用(転用)される(⇔Pre-adaptation(前適応)、Exaptation or extra-adaptation(外適応)、cooption(想定外転用))可能性が高まることにも起因

『デザイン・ルール=モジュール化パワー』(キム・クラーク & カールス・ボールドウィン、邦訳は2004年)

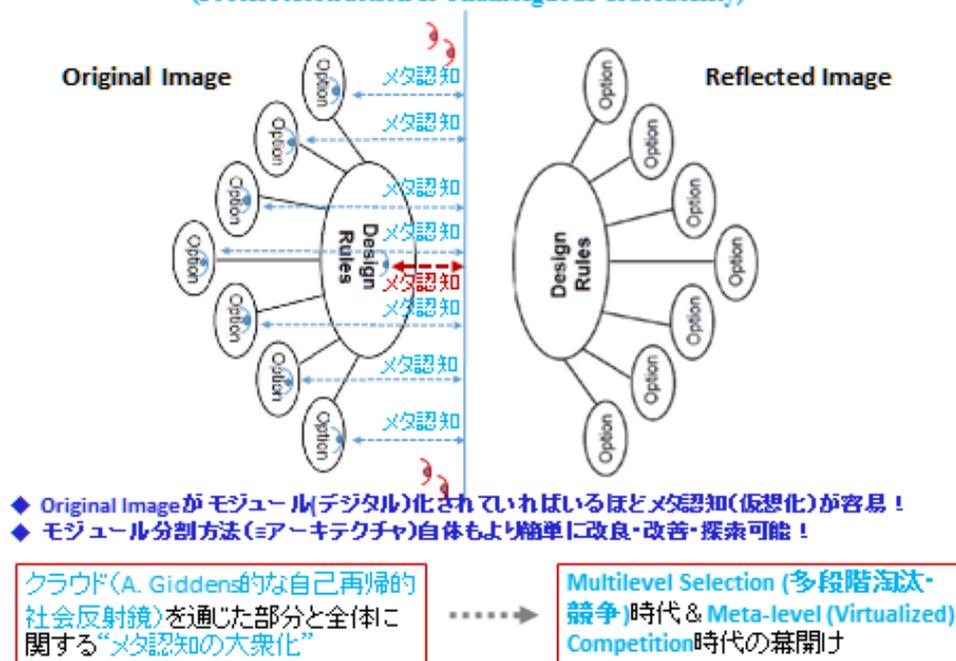
### モジュール設計思想の便益：自己再帰的なミラーイメージ獲得とメタ認知の大衆化

モジュール設計思想の本質に関して以上のようなボールドウィン・クラーク流の説明で納得しますか？と問いかけられますと、先に紹介しましたモジュール設計思想に関する(1)~(3)の視点の中の(2)だけが強調されていますので、ちょっと満足できません。それで、僕なりの拡張した解釈を提示してみたいと思います。こういう考え方もあるんじゃないかと提案です。それは、次のスライドで表現することができます。このスライドは、どんな風にすれば Baldwin・Clark 流の解釈を拡張して先の(1)~(3)、特に(3)の「二律背反状態打破の妙薬」を巧く導き出せるかを説明するために今朝作成してみたものです。このスライドで彼らの“揚げ足を取る”試みをしてみます。皆さん、「本当に(彼らのような優れた人達の)揚げ足を取れるの？中馬さん」とお思いでしょうが・・・(笑)。

先に紹介しました(3)では、モジュール設計思想のイノベーション抑制効果(1)をイノベーション促進効果(2)が上回るようにするための提案をしています。そこで第一に強調しているのが「機能モジュール間における情報転送速度・応答速度の向上」です。そのために人類が手に入れた画期的イノベーションが ICT だと言えます。そして、この ICT を有効利用すれば、先に触れましたように「部分と全体の関係の一目瞭然化」あるいは「メタ認知の大衆化」が可能となりますので、Precise Abstraction & Unambiguous Traceability (階

層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及)によって結果のみならずプロセスの見える化がかなり容易になります。

モジュール設計思想がもたらす部分と全体の(補完・代替)関係の一目瞭然化  
(Precise Abstraction & Unambiguous Traceability)



(参考)

モジュール設計思想のイノベーション抑制 vs. 促進効果: 進化・発生生物学に学ぶ

<イノベーション抑制効果>

- ⇒徹底したムダ・ムラ・ムリ排除
- ⇒極めて安定な基底状態(Ground State)に到達
- ⇒頑健性 & 保守性(⇔Canalization)発現! (⇔“Structural Lock-in”状態出現)
- ⇒大きな環境変化の時代に不可欠なMacro Innovations発現を阻害

<イノベーション促進効果>

- ⇒突然変異の悪弊局所化
- ⇒並列性による進化速度の加速
- ⇒累積されてきた知識・ノウハウ(IPs)の再利用性増大 ⇔ Real Options ↑
- ⇒冗長性(想定内/想定外転用)による選択圧への自由度増大

<二律背反状態打破の妙薬? >

- ⇒機能モジュール間における情報転送速度・応答速度の向上
- ⇒部分と全体の関係の一目瞭然化(Precise Abstraction & Unambiguous Traceability)
- ⇒社会実験・学習の経済(Economy of Social Experiments and Learning)活用
- ⇒アーキテクチャ探索の容易化

21

しかも、モジュール設計思想によって構築されたシステムでは、モジュール間の関係がかなりスッキリと分かり易く整理されていますので、クラウド的な仕組みが導入されていけば、システム内の利害関係者達に自分たちの実空間での諸活動が、“自己再帰的な社会反射鏡”を介してミラーイメージ(鏡像)として刻々とフィードバックされて行きます。

その結果、自分たちの振る舞いのみならず、それらがシステム全体の中で絡み合っている様子を、メタの視点から、より高い解像度で眺めることができます。しかも、システムのモジュール化が効果的に達成されていればいるほど、より大勢の人々に分かり易いより高解像なメタ認知ができます。

そういう環境では、自分が大きなシステムの中でいかに小さな歯車的な役割しか果たせていないのか？でもそのような自分の小さな歯車としての役割がシステム全体の中でどれほど重要なのか、あるいは重要でないのか？といったことも含めて、よりハッキリと分かるはずです。このようなロジックは、西口さんに発音が悪いと叱られるかもしれませんが、世界的に有名な社会学者 **Anthony Giddens** の近代社会を特徴付ける **Self-Reflexivity** という考え方にそのまま通じるものだと思います(*The Consequences of Modernity*, 1990)。

このような良循環がビルトインされますと、システム内の利害関係者間にどのような代替・補完関係が成立しているか、成立しそうかについても、大勢の人々に一目瞭然化ができるようになります。例えば、このようなシステムを先のプラットフォームだと見なせば、川上・川下にまたがってどのような補完関係が成立しているか、といった垂直知識、いわゆる **Vertical Knowledge** をより多くの人々・企業がより高い解像度でより容易に獲得することができます。プラットフォーム内での自分の立ち位置とか、部分と全体の関係での役割、あるいは自分は何をすればいいのか、自社は何をすればいいのか、そもそもシステム内のどんな相互補完関係の中で自分たちは、自社は生きているのか、等々をメタ認知できます。特に、そういうメタ認知がクラウドを介して可能になりますと、自我像が社会反射鏡に当たって自己再帰的に戻ってくる速度がかなり高速になりますから、その分、学習速度も急速に上昇する。

残念ながら、日本の多くの組織では、そういうクラウドに代表される自己再帰的な社会反射鏡の便益を享受するという点で、かなりビハインドしているのではないのでしょうか。政府関係者の方もおられて申し訳ないですけど、その中でも最もビハインドしているのはおそらく日本の中央・地方政府でしょう。それは、政府の様々な会議に出席されると、情報の転送・応答速度の遅さ、部分と全体に関して提示される諸提案の解像度の低さ、等々を直ぐに感じられると思います。司令塔がなぜ司令塔の機能を果たせないのか？それは、司令塔に見える筈のものが見えていないから、たとえミラーイメージが見えていたとしても、そこに写っているのは、(先の **Baldwin・Clark** に関連して提示しました二枚目の左側の図のように) 一塊(ひとかたまり)のミラーイメージに留まっている！そういう構図がアチコチで観察されるようです……。

繰り返しになりますが、自らの実空間での振る舞いと実空間内での部分と全体の関係の中での有り様が、より高解像度でより迅速により簡単にメタ認知できるようになりますと、まるでジャズの即興演奏をするかのように、よりの的を射た **C&C** を実行できるようになる。そういう便益こそ、モジュール設計思想がもつ「二律背反状態打破の妙薬」だろう、というのが先に示しましたスライドでの主張です。

なお、ミラーイメージが描かれていますスライドには、トヨタの人がよく使う目の印が示されています。トヨタさんの現場を調査させてもらいますと、現場の職長さんなどが使われる人員配置図には、ヒトの代わりにこの目が描いてあります。このスライドには、上下に二つつつ赤い色で目の印が入れてあります。これらの赤い目の印は、システム内で活動している利害関係者だけではなく、第三者的な人達を示しています。その意図は、同じモジュール化されたシステムのイメージでも、それがクラウド的な仕組みを介してデジタル化されたイメージである場合、内部の人達と同じようなレベルの解像度で第三者にも見えるようになりますよ！ということ強調するためです。このようにデジタル化された環境では、モジュール設計思想がもたらす一目瞭然化便益が、既存の境界を容易に飛び越えて外部にも漏れていきます。その結果、社会実験の経済や社会学習の経済の便益を容易に組み込むことも可能になりますし、仮想的な実験（シミュレーション）もできるようになります。

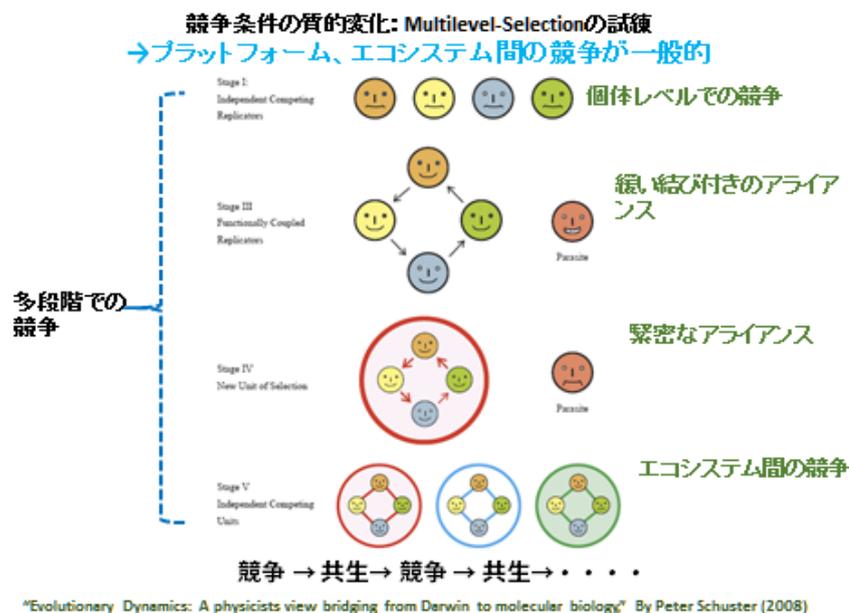
モジュール設計思想に基づくクラウド型の事業・組織経営システム、そこで生まれるメタ認知の大衆化、社会実験・社会学習の経済便益の大幅増大、そういうプラスのフィードバック効果が組み込まれている社会や会社、そういうことがなかなかできにくい社会や会社、両者が戦うとしますと、後者はまるで竹槍で機関銃に挑むような戦いになるはずですよ。

### **モジュール化がもたらす多段階競争：アーキテクチャ探索の重要性急増と高難度化**

なお、今までのモジュール設計思想に関する説明では、プラットフォームといった特定のシステム内での一目瞭然化の便益について強調してきました。ただし、モジュール設計思想のインパクトは、そのような特定のシステムを遙かに超える形のインパクトを社会にもたらします。それが、先ほどのスライドの右下にあります「Multilevel Selection (多段階淘汰・競争)時代及び Meta-level Competition (メタレベルでの競争)時代の幕開け」に関連する事柄です。つまり、モジュール設計思想がもたらす大きな便益であるメタ認知の大衆化が、マーケットでの競争次元をメタ、メタ、メタという風に抽象度を高めて行く多段階淘汰・競争状況を必然的にもたらすということです。この点に関して、次のスライドでは、(Hyper-Cycle や Quasi-Species 概念の提示で)世界的に有名な理論生物学者 Peter Schuster の絵を拝借しながら説明します。(参考：Peter Schuster (2008), Evolutionary Dynamics: A physicist's view bridging from Darwin to molecular biology”)

生命体の進化のプロセスでは、個体（例えばウイルスやバクテリア）レベルの競争からプラットフォーム、エコシス間競争という風に、どんどん多段階での淘汰・競争が起きてきていることは周知の事実です。もちろん新しいメタレベルでの淘汰・競争が起こっても、それ以前のレベルで競争している主体も数多く残っています。ただし、環境変化に対してより高度な適応能力を組み込んだ複雑な生命体が緊密なアライアンスによって次々に生まれてきている。このような多段階淘汰・競争がもたらされる背後でも、モジュール設

計思想が重要な役割と果たしていると言えます。



単純な類推は慎むべきですが、先程から指摘してきましたプラットフォーム間やエコシステム間の競争も、多段階淘汰・競争の一つとして理解できると思います。しかも、人間社会でのこのような淘汰・競争の場合、メタ認知能力の多寡によって大きく左右されると言えるでしょう。そして、先ほど触れましたように、このようなメタ認知能力は、モジュール設計思想に基づくクラウド型の事業・組織経営システム、そこで生まれるメタ認知の大衆化、社会実験・社会学習の経済便益の大幅増大、そういうプラスのフィードバック効果が組み込まれている社会においてより効果的に生み出されていきます。そして、現在、それらの便益を生み出す源泉となっているのが ICT という風に理解できるのではないのでしょうか。そうしますと、電機・電子産業に代表されるように、日本にはそのような流れにビハインドしている企業・組織も多いですから、今後さらに厳しい状況が訪れる可能性も大いにあると感じています。

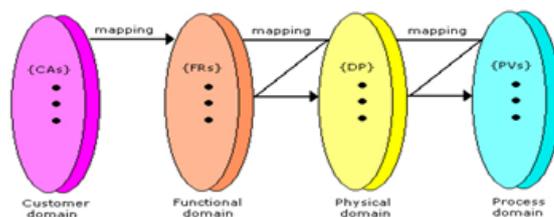
このように多段階淘汰・競争にビハインドしている様子を電機・電子産業の脈絡でより例示するとしたら、次のような説明が可能になると思います。この例は、冒頭で触れました「世界の半導体デバイスの出荷額が過去数十年にわたってほぼ全ての製品系列で一直線に増えてきているにもかかわらず、日本の半導体デバイスの生産額は、2000年を境にほぼすべての製品系列について下落してきている」という現象に密接に関連しています。というのは、世界の半導体市場が、既存のアーキテクチャ内の競争から（広義の意味での）アーキテクチャ自体を生み出す競争に抽象度を上げてきており、日本勢の多くがそのような多段階競争状況の中で萎んできている、という構図があるからです。

この様子を絵解きで説明しようと思ひまして用意しましたのが次の二つのスライドです。このスライドの大元は、韓国人の Nam P. Suh という方の有名な『Axiomatic design』

という本から拝借してきています。ただし、私流の少し違った解釈が付け加えてあります。なお、この本は、数年前に MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)で世界的にも名高い東北大学の江刺先生に、「理系出身のエンジニア・科学者向けのドクターコース用に経済学・経営学関連の授業を集中で 1 週間ほどやって欲しい」との依頼を受けまして講義をしていましたときに、受講生だった東芝の R&D 開発者の方に紹介してもらったものです。その時、「中馬先生、御主張に関連したことが『Axiomatic design: Advances and Application』(2001)という本の中に少し出ていますよ。読んでみられたらどうですか」とのアドバイスを受けました。

この『Axiomatic design』の中では、最初のスライドに示されていますように、ある特定のアーキテクチャの中でのもの造りが成されていくフローが Consumer Domain、Functional Domain、Physical Domain、Process Domain という風に描かれています。より分かり易く言えば、左端からマーケティングによって（特定アーキテクチャ内の）製品仕様が決まり、それが R&D・生産技術・製造という分野間の行きつ戻りつの過程を経て製品として結実する、といった形になると思います。

製品に具現化されたアーキテクチャーの役割:  
マーケティング・R&D・生産技術・製造間を貫く“造り込み”

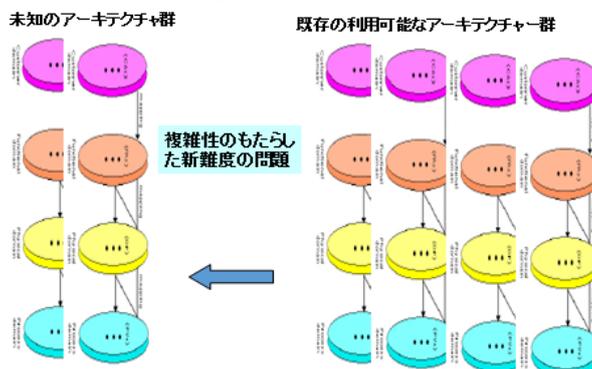


For each pair of adjacent domains, the left domain represents "what we want to achieve," while the right one represents the design solution of "how we propose to achieve it." The contents of each domain are:

<b>Customer</b>	The benefits customers seek
<b>Functional</b>	Functional requirements of the design solution
<b>Physical</b>	Design parameters of the design solution
<b>Process</b>	Process variables

<http://www.axiomaticdesign.com>より抜粋)及び Nam P. Suh 著 Axiomatic Design(2004)参照

アーキテクチャ自体の探索と設計・生産とを同時に実施しなければならない時代へ！



ところが、彼はそう言うてはいないですけど、時代はそういう風なもの造りシステムで勝負する時代から、広大なアーキテクチャ空間内でのアーキテクチャ探索で勝負する時代が変わってきています。その様子を表現しているのが、次のスライドです。

実際、電機・電子産業、特に半導体産業では、ムーアの法則にそって微細化と低価格化が急速に進んできましたので、それに伴い一つのチップ内で利用可能なトランジスタの数が指数関数的に増大してきました。トランジスタが短時間で指数関数的に増えてきますと、それらを有効活用するために設計の抽象度が5~10年のスパンで不連続的に増えていきます。そのため、対応して製品のアーキテクチャが大幅かつ急速に変化してきました。その傾向は、特にモバイル機器がブレイクしました2000年を過ぎる頃から顕著になってきたように感じられます。言い換えれば、最近になればなるほど、多段階競争が極めて短いスパンで不連続的に起きるようになり、その結果としてアーキテクチャ探索競争の重要性が増してきました。したがって、このようなアーキテクチャ探索競争で頭角を現せないと急速に淘汰されていきます。そして、残念ながら、日本の半導体メーカーの多くが、そのような新しい次元での競争に右往左往する状況となり淘汰されはじめた、そういうお話に繋がっていきます。

本日わざわざお越しいただいておりますアリジェン（製薬・社長）の所さんは、以前のイノ研の米倉さん主催の大きな勉強会で「日本のバイオ・医薬品産業の競争力が弱いのは、文系がばかだから」というギクッとするコメントをされていました。ただし、以上のような問題意識で日本の半導体産業を中心とした電機・電子産業について調査・研究してきますと、「文系もそうでしょうけど、おそらく理工系も大変な状況にあるのではないだろうか」と思い始めました。こういう高飛車な表現をして申し訳ないですけども、競争次元が上がっているのにそれになかなか気づかないで依然として上がる前の次元での競争で頑張ろうとしている、そういう構図になかなか気がつかないという意味では、文系も理工系も同じ穴のムジナかなという感じがします。

こういう風に短期間で次々に新しい次元でのアーキテクチャ探索競争で勝ち抜いて行かなければならない電機・電子産業での事業・組織経営は、とても難しいのではないかと思います。特に、半導体デバイスやそれらを利用した製品が複雑になっていきますし、それらを上手にまとめ上げる（広義の意味での）アーキテクチャ探索もしなければならぬんですから。しかも、アーキテクチャ探索には、企業の境界を遙かに超えて世界規模でのC&Cが不可欠なわけですから・・・。

実際、次のスライドにまとめてみましたが、半導体産業での事業・組織経営は、他の産業に比べてとても難しいのではないのでしょうかね。ここに指摘してありますように、巨額のR&D投資が必要ですし、一方で半導体デバイスはどんどん短ライフサイクル化していきます。つまり、通常なら巨額の投資をする際には慎重に時間をかけて投資決定をするわけですが、半導体デバイスの賞味期限はまるで生鮮食品のように短いんですから、Speed-to-Marketが命になります。事実、最近では、1つの工場を作るのに5,000億から1

兆円ぐらいかかってしまいます。しかも、それを3年から5年で償却しなければいけない。加えて工場の運営費やR&D費用は莫大です。こんな産業で長期にわたって勝ち抜くということは、至難の業ではないでしょうかね。実際、インテルでさえも5年後どうなるのか分からないような時代になりつつありますからね。

### 半導体事業経営の難しさ

◆巨額のR&D投資必須な巨大装置産業

⇒最重要課題：“埋没(固定)費用”削減

⇔“待ち”の最適化

(新規最先端工場建設には5000億~1兆円必要! 3年~5年で償却! +R&D費用+運営費+……)

⇒リアル・オプション戦略の採用不可欠!

◆製品の複雑化・多様化・短ライフサイクル化

◆⇒最重要課題：“Speed-to-Market”

⇒事前・事後の柔軟性増強! How?

### モジュール設計思想との親和性が高いトヨタ生産方式

先ほど、半導体産業における事業・組織経営の難しさという点に関しまして、巨大投資をしなければならないので待ち戦略が望ましいが、にもかかわらず市場のクロックスピードが極めて速いので Speed-to-Market が命だ、という風に申し上げました。次のスライドでは、このような相矛盾する状況に直面した場合に、そのような状況の打開策として何が考えられるのか?ということを考えてみたいと思います。「中馬さん、すごく国粋主義的だね」と言われそうスライドなのですが……。

### モジュール設計思想としてのトヨタ生産方式

「Lean Software Development: Agile Toolkit」(邦訳2004, 原著2003)の7原則

Mary Poppendieck (著), Tom Poppendieck (著)

1. ムダを排除する⇒目的意識性共有↑
2. 学習効果を高める⇒動機の内発性↑
3. 決定をできるだけ遅らせる⇒事前柔軟性↑
4. できるだけ早く提供する⇒事後柔軟性↑
5. チームに権限を与える⇒自律分散性↑
6. 統一性を造り込む⇒相互認知環境の解像度↑
7. 全体を見る⇒一目瞭然性↑

先ほど触れました二律背反状況の克服策について考えていましたときに、「あれっ、この構図ってトヨタ生産方式の特徴と同じじゃない？」と感じる瞬間がありました。なお、このスライドでトヨタ生産方式として紹介しておりますのは、いわゆる“トヨタ生産方式”ではありません。実は、スライドに参考文献として明記しているのですが、『Lean Software Development: Agile Toolkit』（Mary Poppendieck 及び Tom Poppendieck 著、原著 2003）に明示されています 7 原則を取り出してきています。矢印より右側は私が追加した文言です。この本は、ソフトウェア・エンジニアリングや論理学が御専門の京都大学の林晋先生に紹介されました。いつかディスカッションさせていただきました際に、「中馬さんのアイデアは、Poppendieck 夫妻の主張していることとすごく似ている」と指摘していただきましたので読んでみました。

Poppendieck 夫妻がどのような必要性にかられてトヨタ生産方式をソフトウェア開発に導入するに至ったかという、ソフトウェアの複雑性の急増によって、発注元と開発元とでスペックを決めるためのコミュニケーションが効果的にできない、バグがいつまでもとれない、開発リードタイムがどんどん長くなっていく、等々の問題が中心にあったということです。そのような難点を克服するために生みだされた開発方法が Lean（トヨタ的）Software Development という方法でした。この本の該当箇所からキーワードを拾ってきて作成したのがこのスライドです。

このスライドに示されている項目の中で最もトヨタ生産方式の本質を捉えているのは、私の考えでは青字で示してあります 3.と 4.だと思えます。3.の「決定をできるだけ遅らせる」という原則は、有名な「後工程引き取り」、つまり、将来を予測するための最適予測子（best predictor）として後工程の要求値が最も当てはまりが良いという原則です。もちろん、後工程の要求値が最適予測子となるためには、生産システム全体の（ムラのない）整流化が達成されていることが不可欠です。ただし、決定を最後の最後まで遅らせてしまうと、完成のために必要な時間的余裕がなくなりますので、ビジネスチャンス逃してしまいがちです。でも、将来の不確実性が大きい状況下では最後まで待ちませんと相応しいスペックを十分に詰められません。相応しいスペックを見つけられないまま見切り発車してしまうと、取り返しのつかない事態に陥りがちです。このような切羽詰まった状況下で力を発揮するのが、「できるだけ早く提供する」という原則です。この原則にマッチするのが、トヨタで言うサイクルタイム短縮、開発・生産リードタイム短縮です。

このように将来の不確実性が大きいと、事前柔軟性と事後柔軟性の双方を備えていなければなりません。両原則は一件矛盾しているように見えますが、確かな将来予測を行うためにできるだけ決定を遅らせ、方向性が明らかになってきたら決定の実行速度をできるだけ上げる、と解釈すれば何の矛盾もなくなります。

スライドでは 3.を事前柔軟性、4.を事後柔軟性と呼んでいますが、この二つは、先ほど特徴付けました巨大投資の必要性和製品の生鮮食品化の二重苦に晒されている半導体産業に特に重要になるはずで、事前柔軟性をできるだけ確保するためには、クロックスピー

ドの速い市場の動静を、サブシステムとしての自社と自社を取り巻くエコシステム全体の関係を高解像度で、しかも、迅速に一目瞭然化できる仕組みが必須です。さもなければ、自らの立ち位置を的確に認知できません。そのためには、先ほどから何度も強調してきました社内外での C&C (communication & collaboration) が不可欠になります。C&C を上手く達成するには、スライドにあります「目的意識を共有する」、「動機の内発性を高めて学習効果を高める」、「自律分散型の組織運営を行う」、「相互認知環境の解像度を上げて統一性を造り込む」、「一目瞭然化によって全体を見る目を養う」といったトヨタ生産方式を支える事業・組織経営を社内外で実践することが不可欠になります。

なお、“相互認知環境”とは、(関係性理論を提唱している) 言語学者が良く利用する言葉のようですが、ある事象が起こったときに知覚したり推論したりすることのできる事実の当事者間での共通部分をさしています。従いまして、その解像度が高ければ高いほど、当事者間であうんの呼吸が通じますので、組織体としての意思決定を素早く行えます。

このように、半導体産業が直面する二律背反状況の打開には、“灯台もと暗し”だったのかもしれませんが、日本発のトヨタ生産方式が参考になる可能性が高い。先にも触れましたが、最先端の工場一式を導入するために 5000 億~1 兆円も要するような時代になりました。世界を見渡しても、もはや数社しかそういう投資はできなくなっています。ですから、共同研究者の中屋さんとも度々お話しているんですが、もしかしたら、このような状況は 10 年もしたら大きく様変わりして、現状とは大きく異なる半導体産業ができていられるかもしれない。その時点では、もしかしたらインテルやサムソンの独壇場ではなくなっているかもしれません。従いまして、このような相変化が刻々と生じてくるような時代においては、先ほどの事前柔軟性と事後柔軟性とを合わせもった事業・組織経営の重要性がさらに増していくでしょう。しかも、そのような事業・組織経営が、企業レベルのみならず、国レベル、あるいは国境を跨いだ形で達成できていないとなかなかクロックスピードの速い経済環境の変化に適応していけない。半導体産業は、なんとも大変な産業になってしまったものです。

## **トヨタ生産方式の本質：結果ではなく、プロセスの見える化を重視**

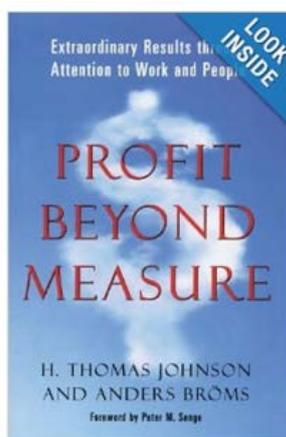
高難度の事業・組織経営手腕が必要な半導体産業ですから、当事者達にとっては、僕らのような傍目（おかめ）八目で適当なことを言っている人達の指摘には腹が立つだろうということはよく分かります。ただし、傍目八目にも通常では見えないものが見えている場合もあるかもしれないと思ってちょっと我慢していただければ有難いところです。

先ほどのトヨタ生産方式の話になりますと、かなり洞察力に富んだ指摘をされる方々も少なからずおられます。次のスライドには、主に会計学の研究者に好む人達が多い Thomas Johnson さんの『Profit Beyond Measure』という非常に売れた本の表紙が示されています。日本語のタイトルは『トヨタはなぜ強いのか—自然生命システム経営の真髄』となっていてだいぶ原著のタイトルと違います。このようなタイトルにしないと日本

人は買わないからじゃないかと思うんですが（笑）、原著のタイトルのほうが素晴らしいですよ。



Management by Results vs. Management by Means (or Process-Visualization)  
ICTによるメタ認知の大衆化⇒成功・失敗プロセスの透明化、トヨタ生産方式の大衆化？



2008

この本のエッセンスは何かと言いますと、スライドの左下にも書いてあるんですが、「management by result じゃなくて management by means だ」という主張です。まるで、これは、先に紹介しました Anthony Giddens (の *The Constitution of Society* (1984) や *Modernity and Self-Identity* (1991)) を思い起こさせる主張ですね。また、この点を僕流に表現しますと「大切なことは、結果が見える化することではなくて、プロセスが見える化することだ」ということになります。Johnson の主張は、「人というものは、プロセスの見える化によって士気が自然に高まるんだ、それが自然の摂理なんだ」、「トヨタ生産方式の本質も、結果の見える化ではなくプロセスの見える化なんだ」、「そのような事業・組織経営の結果として、トヨタの高い競争力が生まれて来ているんだ」ということになります。彼はこう続けます。「結果なんて、なかなかユニークな値として測定できないでしょう。評価する人の主観が違えば、測定基準が違うんだから。」「だから、結果による事業・組織経営ではなく結果に至るプロセスが見える化する事業・組織経営、つまり、ある結果が生みだされていく際に組織内外で起こる様々な状況を大勢の関係者に劇場風に見えるようにする事業・組織経営が重要なんだ！」と。だから『Profit Beyond Measure』という本のタイトルが出てくるわけです。

先ほど紹介しましたトヨタ生産方式を特徴付ける事前柔軟性と事後柔軟性の双方を実現するためには、結果よりもプロセスの高解像度な見える化が必須だ、というロジックともかなり親和性の高い主張です。

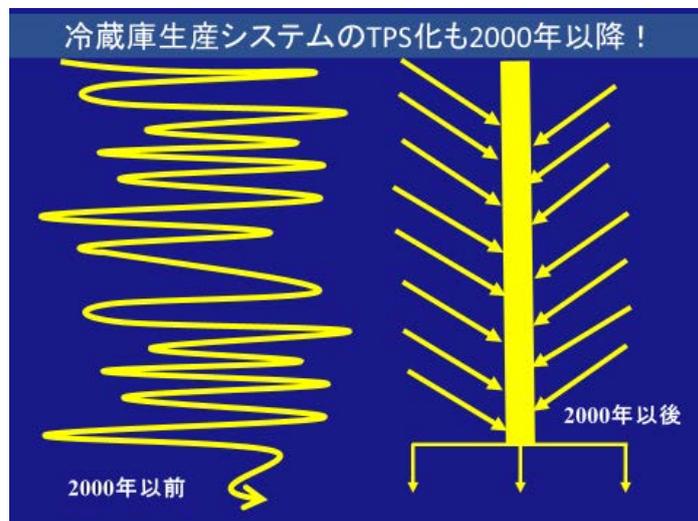
## 電機・電子産業でかなり遅れてしまったトヨタ生産方式の導入： 転機は 2000 年

先ほどはトヨタ生産方式のエッセンス（事前柔軟性と事後柔軟性の重視）が、相変化の著しい半導体産業の事業・組織経営にとって必須であるとの主張をしました。ところが、

トヨタ生産方式と電機・電子産業とは、実は、ごく最近までビックリするほど疎遠でした。この点について、少しだけ触れてみたいと思います。

米国でトヨタ生産方式の大きなブームが起きたのは 80 年代半ばや 90 年代初頭だったと思いますが、日本では大変遅く 2000 年前後でした。なぜ日本では 2000 年前後にブームが起きたかといいますと、このことは色々な方々に聞き取りをさせていただきましたはじめて分かったのですが、2000 年に日本でキャッシュフロー会計（計算書作成）が義務づけられることになったためです。それ以前の会計原則では、仕掛在庫や流通在庫は、たとえ大きく目減りしていたとしても取得価格で評価された資産としてバランスシートに計上されていました。ところが、キャッシュフロー計算書が義務づけられるようになった 2000 年度以降は、そのような資産が不良資産であることがより明白になりました。したがって、より大きなキャッシュフローを確保するために仕掛在庫や流通在庫を可能な限り削減することが、重要な事業経営上の課題になりました。もちろんですが、このような背景には、市場のクロックスピードが加速してきたために、仕掛在庫や流通在庫の実際の価値が急速に低下していくことになったという事情もあります。

このようなキャッシュフロー経営重視の流れは、半導体生産システムにも大きな変化をもたらしました。この点を昔ある同僚に話したところ「中馬さんのような生産システムの素人に分かるようなことを、実際に業務に携わっている人達に分からない筈はないでしょう」と相手にされなかったことがあります。ところが、素人でも仰天するほどの長いサイクルタイム・リードタイムで特徴付けられるプッシュ型生産システム（個別の製造装置の稼働率が最大になることを目的とした作り置きを旨とする局所最適型生産システム）が長期間導入されていました。聞き取り調査を続けていきます中で、半導体生産システムでこれほどまでに時代遅れのプッシュ方式が 2000 年頃まで温存されていたとしたら、同じことが電機・電子産業全体でも起こっていたのではないか？という疑問が湧いてきました。それで、そのハードエビデンスを獲得するために、日本を代表する H 社と M1 社と M2 社の電気冷蔵庫の生産システムの調査を 1 年位やらせていただきました。



なぜ電気冷蔵庫かと言いますと、青島さんと別の調査で中国・無錫市に行きました際に、たまたま M1 社の工場見学をさせていただくことができました。そこで拝見しました生産ラインが、僕にとってとても驚きだったからです。M1 社には申し訳ありませんが、「何て効率の悪いラインを導入しているんだろう」との第一印象でした。そのような印象を持った理由は、その工場での生産ラインが、中学校の体育館のようなガランとした大きな建物内をへびのように曲がりくねる形のラインだったからです。それは、スライドの左側のラインのようなものでした。同じような蛇のようなラインは、M2 社のバンコクの生産ラインや H 社のバンコク郊外の生産ラインでも見られました。それで、本国のマザー工場も同じような曲がりくねった一本のラインなのだろうと思っていましたら、それは、三社共々スライドの右側のような特徴を持つ極めてトヨタ的なラインでした。つまり、いずれの生産ラインも、メインラインが太くて短くサブラインをメインラインに数多く入れ込むタイプのシステムでした。なお、様々な家電製品の中でも電気冷蔵庫の工程は、その他の家電製品とは異なり、工程内に断熱材の注入工程などの高度な技能を要するとてもボトルネック化し易い工程です。そのため、プッシュ型の弊害がかなり出やすくなっています。

スライドの右側のようなモジュール型ラインですと、生産ラインが整流化されている限り並列処理が可能ですし、生産ラインの見える化やその結果を用いた同期化が効率的に達成できますから、サイクルタイムや生産リードタイムをかなり短縮できます。驚きでしたが、日本の冷蔵庫工場がこういうトヨタ的なラインを導入したのは 2000 年頃でした。なお、なぜ日本のマザー工場ではトヨタ的な生産システムなのに同時代の中国やタイなど自社工場ではプッシュ型の生産システムが導入されていたのか？それは、昔の日本の古いラインを、中国やタイの自社工場に持って行ったからです。ただし、現在は、どちらもトヨタ的な生産システムに変わったそうです。

このように、半導体産業だけではなく電機・電子産業でも、プッシュ型の生産システムがかなり最近まで多くの企業で一般的に導入されていたようです。このような点からも、日本の電機・電子産業には、既に 2000 年頃に陰りが見えていた様子をうかがい知ることができます。実際、世界の覇者として君臨した日本の電機・電子産業では、ごく最近までトヨタ的な生産システムとはまったく違うプッシュ型システムに依存していたという事実は大きなショックでした。

## **”Accelerating Network”としての社会システム、生命体、半導体(回路)**

このような日本の電機・電子産業の振る舞いの本質を見極めるために、ここからはさらに抽象度を高めた議論をしてみたいと思います。ここまでは抽象的な話が多かったので、もしかしたら、むしろ「抽象度を下げてほしい」という方々がおおいかもしれませんが、お許しください。

先ほどからの話の抽象度をもうちょっと上げるために、次のスライドでは、Mattik と Gagen が 2005 年のサイエンス (Science) 誌で導入しています”Accelerating Network”と

いう概念を紹介してみたいと思います。Mattik さんは、世界的にも有名なオーストラリアの分子生物学者です。彼らは、社会、生命体、半導体（回路）等のシステムの複雑性が急増してくると、いずれのシステムも極めて御しがたい複雑性起因の問題に直面してしまうロジックを簡単明瞭に説明しています。それで、ここでは、彼らの視点を援用しながら、先ほどから強調してきました C&C (communication & collaboration) 失敗による垂直知識 (Vertical Knowledge) 不足に苛まれている日本の電機・電子産業の様子をより抽象度を高めた形で浮き彫りにしたいと思います。

では、彼らの論文の表題にもなっている”Accelerating Network”とはどのようなものでしょうか？僕らが日常的にアクセスしていますインターネットは、”Accelerating Network”ではありません。サーチエンジンを使って検索する場合、インターネット全体がどのような構造特性をもっているか全く気にしなくて良いからです。事実、ユーザーは、自分の知りたい事柄に関連するキーワードをサーチエンジンに打ち込むだけです。このようなタイプのネットワークは、Scale-Free ネットワークと呼ばれます。経済学者の好きな言葉で言うと Constant Return to Scale (収穫一定) のシステムです。

## C&C失敗の原因は垂直統合知識 (Vertical Knowledge)不足？(1)

- ◆ Mattik & Gagen 流“Accelerating Network” (AN)の限界にヒット？(ANの例：社会組織、組込制御ソフト、遺伝子制御システムなど)
- ◆ AN運営には、構成ノード(N個)と構成ノード間の配線関係(最大 $N(N-1)/2$ 個)に関する垂直統合知識が不可欠
- ◆ 配線数はNの増大に伴い加速度的( $N^2$ )に増大
- ◆ 複雑性軽減のためのイノベーション無しには垂直統合知識不足による連繋の失敗不可避

参考: J.S. Mattick and M.J. Gagen (2005) "Accelerating Networks," *Science*, Feb. 11

人々が Scale-Free ネットワーク内で活動する場合、基本的にはネットワーク全体がどうなっているか気にしていない、あるいは気にしないで済みます。ところが、スライドに例示してあります社会組織、組込制御ソフト、遺伝子制御システムなどを設計・活用するためには、システム全体を構成する垂直知識 (Vertical Knowledge) が不可欠です。このようなネットワークは、先に例示しましたような意味での Scale-Free ではありません。彼らは、そのようなネットワークを”Accelerating Network”と呼びます。

では、なぜ Scale-Free ではなく”Accelerating”と呼ぶのでしょうか？その理由が、先のスライドの2番目～4番目の◆に示されています。”Accelerating Network”では、ネットワークを構成する一つ一つの構成要素 (node) が N 個あるとしますと、それらを二個ずつ

なぎ合わせる方法、つまり配線の仕方が  $N \times (N-1)/2$  通りあります。もちろん、配線された一群の上にさらに配線するという風にメタ、メタ、メタに配線をしていけば配線の仕方はもっと増えていきます。ただし、ここではそういうメタ配線は考えないことにします。となりますと、構成要素の数 (N) がどんどん大きくなっていきますと、配線数が  $N^2$  で増えていくこととなります。つまり、N が大きくなっていくと、配線数が N の増加速度とは異次元の  $N^2$  という加速された速度で増えていきます。そうなりますと、その他の条件が一定だとしますと、”Accelerating Network”は、垂直知識を上手く獲得し処理することできなくなりますから、C&C 失敗によって遅かれ早かれ崩壊していきます。

Mattik & Gagen は、このような構図は、社会組織、組込制御ソフト、遺伝子制御システム等の典型的な”Accelerating Network”にも当てはまるので、そのような状況を打開するには、複雑性軽減のためのイノベーションが不可欠だと主張します。例えば、半導体の回路設計ですと、半導体デバイスの構成要素としてのトランジスタの数が増えていきますと、設計ツール (EDA) の抽象度が不連続的に上がっていきます。先ほどモジュール設計思想関連で触れました多段階淘汰・競争も、C&C 失敗を打開するためのシステム・イノベーションだと言えるでしょう。あるいは、もっと踏み込んだ表現をすれば、そのような複雑なシステムの進化可能性自体の進化 (Evolution of Evolvability) を加速するために、モジュール設計思想というものが、自然淘汰のプロセスの中から設計思想として生みだされてきたとも言えると思います。

## Accelerating Network(AN)の運営 ⇔ Architectureの考案?

### ・アーキテクチャ(Architecture):

製品を形作る様々な構成要素とそれらの要素間の関係及びその製品の使用環境との関係が組み込まれた上位システムの基本構造ならびにそのような基本構造の設計指針や進化方向指針

### モジュール設計思想と進化可能性: メタ認知機能を付与するアサーション、アスペクト

ただし、モジュール設計思想に基づいたシステムでも、システム全体をどのように切り分けたモジュールの集合体とするかによってシステムのパフォーマンスや進化可能性に大きな違いが生まれます。例えば、切り分け方の違いによって情報の転送速度・応答速度も大きく異なってきますし、システム内の川上・川下にわたる垂直知識の得やすさも異なります。そうすると、モジュール設計思想に基づいてどのような具体的なアーキテクチャ

に落とし込むかという問題が重要になりますよね。このような問題を解くには、先に紹介しました IEEE の定義に戻りますと、構成要素間の関係、製品の使用環境が組み込まれた上位システム、そのような上位システムの設計指針や進化方向指針をうまく考えなければいけません。しかも、製品が複雑になっていくと、妥当なアーキテクチャを探索する作業がどんどん難しくなっていきます。

実際、半導体産業では、ムーアの法則に従う形で同一チップ内のトランジスタ数が指数関数的に増えてきました。例えば、現状の最先端の FPGA (Field Programmable Gate Array) ですと一つのチップ内に 60 億個を超えるトランジスタが造り込まれているので、それらのトランジスタを配線する方法は天文学的と言って良いほど数多く有り得ます。したがって、チップ設計を、トランジスタレベルから始めることはほぼ不可能です。そのようなトランジスタ数を誇るチップを設計するためには、設計ツールの抽象度をどんどん上げていかなければなりません。事実、トランジスタ数の急増に対応して、これまでも 5～10 年のスパンで設計危機が叫ばれてきました。そして、それらの危機を乗り越えるための様々なイノベーションが導入されてきました。その結果、現状の半導体チップ設計では、ESL (Electronic System Level) と呼ばれるかなり製品に近いシステムレベルでの設計が多用されるようになってきています。

そのような危機を克服するために導入された設計ツールのイノベーション特性を知ることが、我々社会学者にとってもとても興味深いと感じています。それらは、次のスライドの◆部分に“設計危機”克服方法としてまとめてあります。

## C&C失敗の原因は垂直統合知識不足？(2)

- ◆ C&C失敗の克服方法⇔“設計危機”克服方法
  - 要素間情報転送速度・応答速度の高速化
  - ⇔情報の転送・応答速度を誇るCommunication構造
  - 設計抽象度の上昇による複雑性軽減
  - ⇔“Precise Abstraction & Unambiguous Traceability”
  - 部分と全体の関係の階層的可視化(例: Assertions(EDA)やAspects(組込ソフト)挿入)
  - ⇔高い進化可能性を持つ組込制御システムの構築
  - ⇔“Aspect-Oriented”型組織(例:メタ認知層が豊富なトヨタ的組織や同社の見える化ツール:A3レポート)

克服方法の一つは、これまでも繰り返して主張してきました要素間の情報転送速度・応答速度を高速化するためのコミュニケーション構造を考案することです。例えば、最近のインテル製プロセッサには数多くの CPU コア (マルチコア) が含まれていますが、そ

これらのコア間の転送・応答速度を上げたり、各コアと HDD(Hard-Disk Drive)やシステムメモリ (DRAM) との間の速度ギャップを解消するために設けられているキャッシュメモリ (cache memory) との転送・応答速度を上げたり、という工夫が行われてきました。二つ目は、スライドにあります設計抽象度の上昇による複雑性の軽減です。その際の複雑性軽減には、Precise Abstraction & Unambiguous Traceability (階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及) 原則に基づく一目瞭然化が不可欠です。

これらの二つの克服策に加えて、ちょっと専門用語が頻発して誠にすいませんが、2000年頃から興味深い Assertion (アザーション) と呼ばれる克服策が導入されはじめました。Assertion とは、組込ソフトウェア開発設計を行っていく過程でどのようなモジュール化 (構成要素間の切り分け方法) を行えば局所的な動作がシステム全体の振る舞い (大局的な振る舞い) に対して大きな影響を与えないか、したがって、システム内での複雑性を軽減できるか、を逐次確認していくための窓の役割を果たしています。つまり、Assertion とは、先に説明しました結果の見える化に加えてプロセスの見える化を実行する仕組みということになります。実際、素人目にも、このような Assertion 窓が階層モジュール構造をしているチップ内の組込ソフトウェアの各所に設けられていれば、どのようなモジュール構造を持つアーキテクチャが妥当かをより多くの人々がより容易に判断できることとなります。(参考 : <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20090107/163733/>)

このような Assertion 的なプロセスの見える化を重視する方法論は、一般のソフトウェア開発でも Aspect-Oriented Programming として、その重要性を増しています。ソフトウェア開発の分野では、Object-Oriented Programming という方法論が有名ですが、これまで言及してきましたモジュール設計思想と極めて親和性の高いものです。ところが、開発されるソフトウェアの複雑性が或閾値を超えて増大していきまると、Poppendieck 夫妻によって生み出された Lean Software Development 法に関する箇所でも説明しましたように、どのような Object (⇔モジュール) に切り分けたアーキテクチャが妥当かを知ることがかなり難しくなってきます。そこで脚光を浴び始めた方法論が、Aspect-Oriented Programming ということのようなようです。(参考 : Sommerville (2011), *Software Engineering Ninth Edition* 及び Engelen and Voeten 編、*Ideals: evolvability of software-intensive high-tech systems: A collaborative research project on maintaining complex embedded systems*)

実際、この Aspect (アスペクト) とは、開発されるソフトウェアの各所に設けられたのぞき窓を意味します。こののぞき窓から階層構造を持つソフトウェア全体の振る舞いを様々なレイヤー (階層) で観察し、モジュールの局所的な動作がシステム全体の大局的動作にまでできるだけ波及しないようなモジュール切り分け方法を探索するわけです。したがって、Assertion と同じく、結果の見える化だけではなくプロセスの見える化を導入する方法論です。様々なレイヤーに設けられた Aspects で該当レイヤーの挙動を監視するわけですから、Aspect が設けられているレイヤーは、実質的にはその上下にあるレイヤーの様

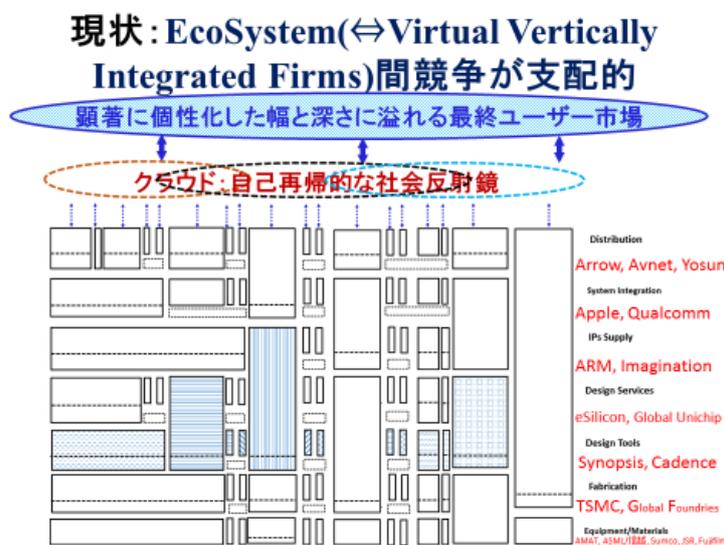
子をメタで認知するための認知レイヤーとも見なすこともできます。したがって、システムが複雑になると”Accelerating Network”の特性がズシリと現れはじめますから、システムの各所にメタ認知レイヤーを設けてプロセスのより高解像度での見える化をすれば、複雑性に対処しやすくなるということではないでしょうかね。

このような Assertions や Aspects の導入により、結果だけではなく、プロセスを高解像度で見える化できるようになりますから、より進化可能性 (Evolvability) の高いアーキテクチャをより迅速に探索することができるようになります。このように、社会であれ、組込ソフトであれ、プロセスの見える化・一目瞭然化は、複雑性を増していく Accelerating Network に対処するための本質的な対処法だと言えるのではないのでしょうかね。

### ICT がもたらす一目瞭然化便益のインパクト： サッカー、建築・施工、営業活動

ここまでやや抽象的なお話に終始してきましたが、残りの時間も少なくなりましたので、最後に、これまでの話の妥当性を確認するために、いくつかの実例を紹介してみたいと思います。なお、本日は、通常のセミナースタイルとは異なり、ここまで話の途中で質問を受け付けられないスタイルでやらせていただきました。途中で質問を受け付けると、自分のしゃべりたいことの 1/100 程度しかしゃべれないという風になりがちなものですから。この点に関しましては、誠に申し訳ありませんでした。コメントは、後ほどいただければと思います。

本日の話を少し振り返らせていただきますと、日本の半導体産業の栄枯盛衰要因に着目し、最初の部分で下記のスライドにありますような産業構造内の川上と川下にまたがる水平統合型企業が垂直的に結びついた複合体間の競争が行われている様子、そのような競争に日本勢がなかなか参加できない様子、そのようなことが発生している背後要因などについて、各種の文献紹介を交えて私が日頃考えて参りましたことを話させていただきました。



そのような話の中で着目した点は、デジタル化の衝撃、その中でも、あらゆる事柄を一目瞭然化する、というデジタル化の衝撃について詳しく触れました。また、そのような一目瞭然化便益とモジュール設計思想とが深く絡み合っていることを繰り返し強調しました。さらに、そもそもエコシステム間の競争がなぜ必須になってきているかを、半導体デバイスやそれらを活用した製品の複雑化、あるいは、それらを利用する需要側の急速な個性化・多様化に伴いアーキテクチャ探索の重要性が急増していることを紹介しました。そして、そのようなアーキテクチャ探索において、一目瞭然化便益を十分に活用できない日本勢がビハインドしていることやその原因などについても触れました。そして、「中馬さん、楽観的だね」と思われたかもしれませんが、そのような弱点を克服することが、日本勢の競争力挽回にかなり有効なのではないかといった感想を述べました。

残りの時間では、このような構図が、実は半導体産業だけではなく、この産業とほとんど関係しないと思われるような産業でも観察できるということを事例ベースでお話してみたいと思います。なお、お配りしてあります事例のスライドは、本来はカラーなので、残念ながら白黒ですので、意図が伝わりにくくなっています。

**プロ・サッカーでもデジタル化の遅れ！**

1) 韓国サッカー(日本サッカーに比べ)急速に洗練?なぜ?  
⇒韓国サッカー協会、2000年にSportsCode導入

2) 日本チームのAmisco-Pro導入：2009年3月のバーレン戦  
⇒ごく最近まで機関銃に竹槍で挑んでいた・・・

3) 非常に良くできている現在トップシェアのProZone  
(ProZone：http://www.prozonesports.com/product-prozone3.html)  
◆システム既にリアルタイム化(試合中に使用)  
◆PROZONE3：本体(選手・審判追尾システム)；  
◆Match-Viewer, Playback：予習・復習、  
◆TREND: マルチゲーム分析や他チーム・選手とのベンチマーキング；  
◆Dash-board：分かりやすい説明；  
◆Recruiter：http://www.prozonesports.com/product-recruiter.html  
⇒自チーム及び他チームの試合経験から素早く学習、結果としてコーチ・選手・審判等の成長スピード加速！

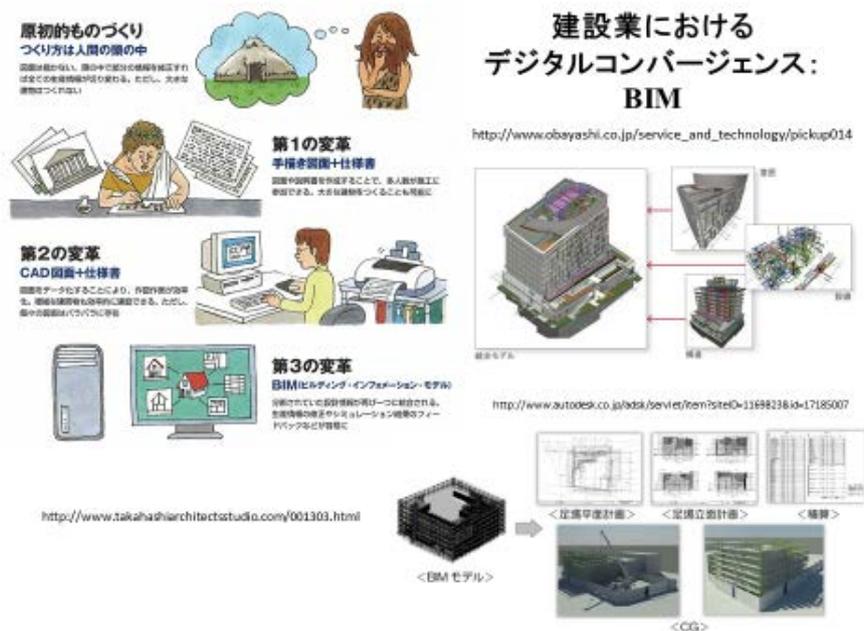
4) 欧州の強豪チームは2000年頃にAmisco-ProやProzoneを導入  
⇒専門Analystを7～8名抱えるチームも出現

最初の興味深い他産業の事例は、サッカーに関するものです。サッカーに関してとても気になっていた点は、なぜ2010年頃までの全日本チームは、今のチームに比べてあんなに(戦略的に)弱かったんだろうかという点でした。それで少し調べてみたら、日本チームがAmiscoProだとかProZoneといったサッカーの見える化ソフトを使い始めたのが、スライドにも書いてありますが、2009年3月のバーレン戦以降であることを知りました。(これらのソフトでは、競技場に備え付けられた数十台のデジタルカメラで、あらゆる角度から試合中の選手や審判を四六時中追尾し、各選手の走行距離やパス・シュートに絡む動き、各チームの攻撃・守備システムの特徴、等々を示すデータを生みだしていきます。)素人にも、この種の見える化ソフトを使ってサッカーのコーチングをしているかどうかは、

チーム力に大きな差をもたらすであろうことが容易に想像できます。事実、スライドの3)に示していますように、このような見える化ソフトを利用しますと、(使い方にはよりますが) コーチ、選手、審判 (そして観客) も、自分・自チームの経験のみならず他チームの経験からも素早く学習できます。欧州の強豪チームは、この見える化ソフトを 2000 年頃に導入開始しました。Manchester City などのチームは、この種のソフトを有効活用するために数名のアナリストを雇ってチーム強化に勤めたということです。韓国チームの導入も、2000 年頃でした。

なお、明日は、サッカーのニュージーランド戦ですが、国立で行われるそうです。真意は分かりませんが、ザッケローニ監督は、国内での国際試合の際にこれまで国立ではなく埼玉スタジアムを好んで使ってきています。なぜか? おそらくですが、AmiscoPro が埼玉スタジアムには備わっていますが、国立には何も備わっていないからだと思います。竹槍での戦いしかできない国立競技場と機関銃の使える埼玉スタジアムとでは、メタ認知による学習量が大きく異なる筈です。

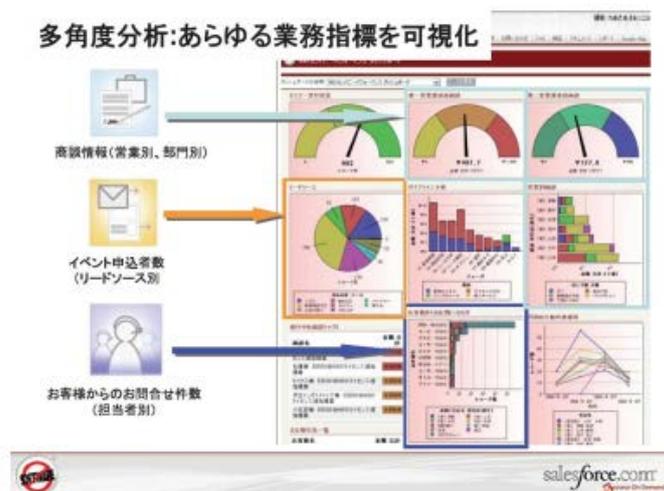
もう一つは、建設業に大きな衝撃をもたらしている BIM (Building Information Modeling) の例です。BIM の大きな特徴は、設計図面に示される構築物の精巧な出来上がりイメージ (3D モデル) をプロジェクト実施の早い段階からコンピュータ上に作り上げて、そのようなモデルを施主、設計会社、施工 (監督) 会社、駆体・設備・内装等の協力企業、等々の関係者が事前に見て細部の仕様に至るまで改訂・改良することができる点です。BIM が導入されていると、まるで Google Earth を操るような感覚で構築物のマクロ的な様子をズームアウトして確認したり、構築物内部の箇所の様子をズームインして確認することができます。(参考: R. Deutsch (2011), *BIM and Integrated Design: Strategies for Architecture Practice*)



したがって、施主、設計会社、施工（監督）会社、駆体・設備・内装等の協力企業の間でこれまで不可能だった類のコミュニケーションが可能になります。例えば、二次元の図面ではイメージの湧かなかった素人的な施主が、ここの窓の構造をちょっと変えてください、ここのドアは狭すぎますから広くしてください、この手術室だと照明はこのあたりにある方が良いです、等々を出来上がりイメージやその修正イメージを見ながら対話形式で要求できます。BIM が日本の建設業に導入されたのは 2000 年頃のように、アメリカではその 10 年前位から導入され、その結果、既に建設業が大きく変わってきているようです。

最後の例は、セールスオートメーション（Sales Automation）と呼ばれる事柄に関連するソフトウェアシステムの話です。この分野では、Salesforce.com 社が大きなシェアを持っています。Salesforce.com の HP には、色々な事例が置いてあって興味深いです。このスライドも同社の HP から拾ってきたものです。この種のソフトウェアシステムの特徴は、本日の話でも繰り返し強調してきましたデジタル化が持たした **precise abstraction & unambiguous traceability**（階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及）で特徴付けられる一目瞭然化便益を営業活動に導入する点です。例えば、一群の営業マン達は、自分達が所属する部署での情報共有を効果的に実施するために、誰もがまず共通のダッシュボードを見ます。そうすると、部署全体としてはどのような目標が達成されているか？同僚達がそれらの目標達成にどのような方法でどのくらい努力・貢献してきているか？等々が分かりますし、そのダッシュボードが描いている抽象度よりも高い抽象度の画面や低い抽象度の画面を参照すれば、部分と全体の中での自らの様子を自在にズームアウト・ズームインする形でメタ認知できます。このような営業活動での一目瞭然化は、これまで極めて属人的だった営業現場での働き方を大きく変えてきているようです。

**営業分野におけるデジタルコンバージェンス：  
Salesforce.comのDashboard画面(⇔“Bible-Layer”)**

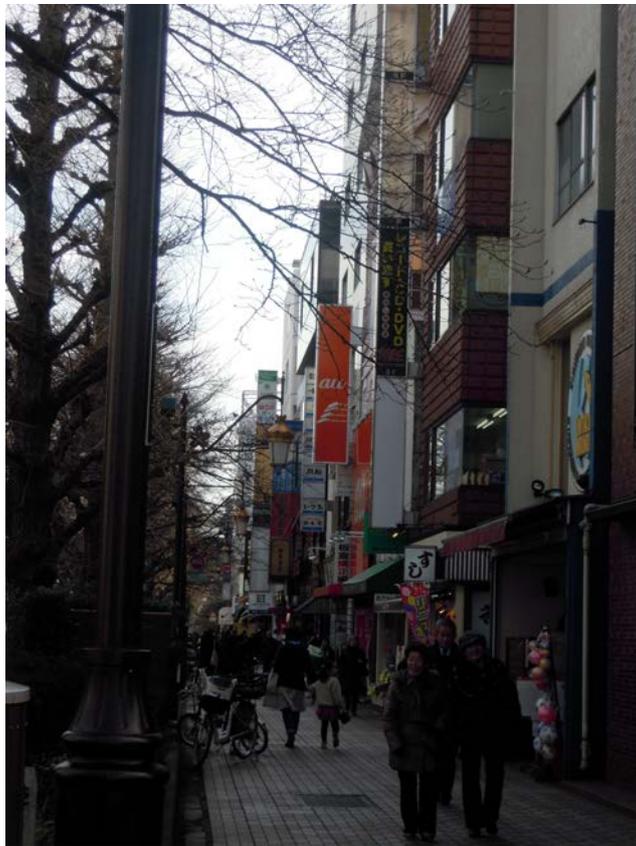


以上のように、今日お話しさせていただきました構図は、半導体産業だけではなく、プロスポーツ、建設業、サービス業を含むあらゆる産業で一般的になりつつあるようです。以上でひとまずプレゼンを終了させていただきます。

(拍手)

### **質疑応答(省略)**

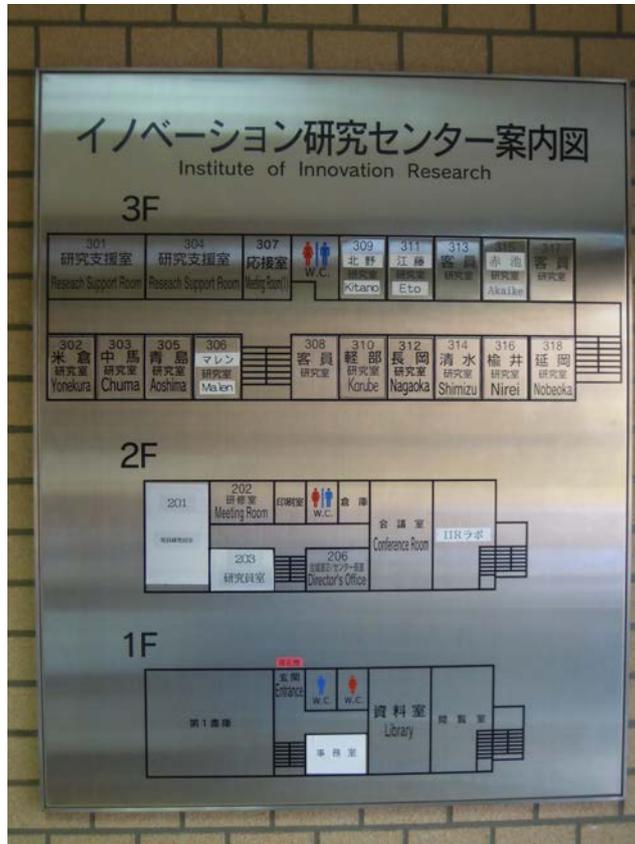
～01 : 38 : 24

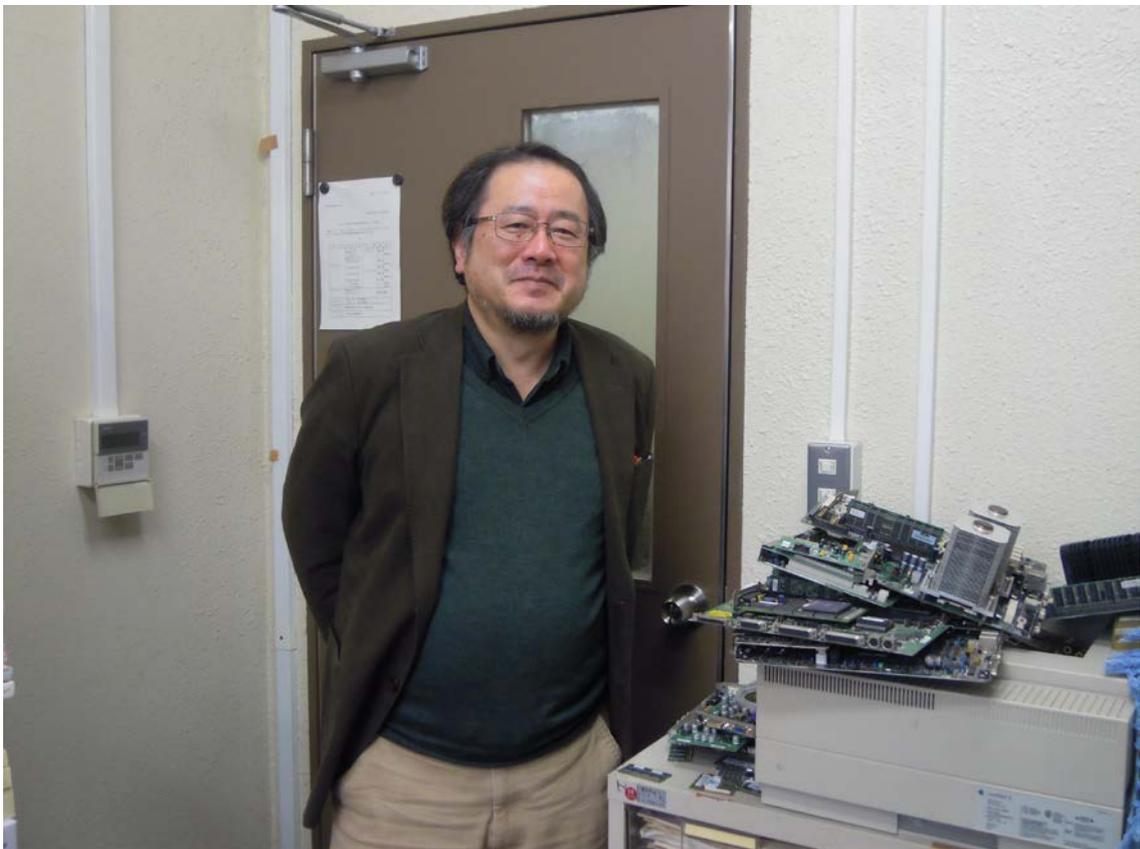






























中馬宏之教授 最終研究報告会 講義録

2014 年 5 月発行

編集：中馬ゼミ  
久米功一（平成 8 年卒）