

# 自然科学と経営学の接点

東京理科大学 経営学部 経営学科 教授 さとう おさむ 佐藤 治

## ■ はじめに

世界中の国々、企業は社会課題の解決と経済成長の両立を目指し、イノベーションの実現に躍起になっています。グローバル化の進展、科学技術の加速度的進化などにより、新たな発見や基礎研究段階の知見が短期間で実用化に直結し、社会に大きな影響を与える状況が出現しつつあります。このような環境変化を踏まえ、日本政府は「我が国が世界に先駆けてイノベーションを実現するためには、グローバルな視座に立ち、基礎研究から社会実装まで一気通貫の戦略が必要」との方向性を示しています<sup>1)</sup>。一方で、基礎研究から社会実装まで一気通貫の戦略を立案することは容易なことではありません。研究、開発、社会実装の各過程において、試行錯誤を繰り返しているのが現実であると思われまふ。このような事態に陥る最大の要因は、基礎研究から社会実装まで一気通貫で検討することができる学問体系が確立されていないことに因ると考えられます。研究、開発段階で取り扱われるのは主に自然科学の知識であり、社会実装においては経営学的知見が必要となります。すなわち、基礎研究から社会実装までの一気通貫の学問体系の構築には、自然科学と経営学の融合が必須と考えられるのです。

「製品」とは、顧客ニーズを満足し、消費の対象となって、経営の根幹をなすものである一方、工学的な観点から眺めると、顧客ニーズを満足すべく、自然科学の法則を適切に組み合わせたものと捉えることができます。本稿では、「製品」を自然科学と経営学の接点として捉え、「製品アーキテクチャー論」を用いて自然科学と経営学の融合を図り、基礎研究から社会実装まで一気通貫で検討できる学問的基盤の構築を目指す試みの一端をご紹介します。

## ■ 製品アーキテクチャー論

1980年代以前のイノベーション研究では、技術の連続性・非連続性に焦点が当てられ、既存技術の延長線上にあるイノベーションをインクリメンタル・イノ

ベーション、既存技術から非連続的な技術へと変化するイノベーションをラディカル・イノベーションと呼び、インクリメンタル・イノベーションでは既存企業の競争力が向上するのに対し、ラディカル・イノベーションでは従来技術が陳腐化し、既存企業の競争力低下を引き起こすとされてきました。一方、従来のインクリメンタル、ラディカルという区分では説明できない事象を解明するために、製品設計の詳細に目が向けられるようになっていきました。製品を構成する要素間の関係性の変化によって起こるイノベーションをアーキテクチャル・イノベーションと呼び、製品を構成する主要要素が変わらないにも関わらず、組織が有する知識や組織構成を不適切なものとし、市場で支配的な地位を占める企業の競争力を低下させることが指摘されています。このような背景から、製品設計の変化が経営に与える影響への関心が次第に高まり、1990年代になって製品アーキテクチャーに注目が集まるようになっていきました。

製品アーキテクチャーとは、設計段階において、製品の機能を部品に如何に割り当てるかという手法、すなわち設計概念です。製品アーキテクチャーの概念は、Karl Ulrichにより機能と部品との対応関係、および部品間のインターフェース仕様として精緻化され、製品構造が企業活動に与える影響が様々な観点から盛んに議論されるようになっていきました<sup>2)</sup>。製品アーキテクチャーは機能と部品間の対応関係の疎密さ、および部品間の相互依存性の程度に応じて、モジュラー型とインテグラル型に分類されます。モジュラー型アーキテクチャーを有する製品は機能と部品の対応関係が1対1に近く、部品間の相互依存性が弱いという特徴を有します。一方、インテグラル型アーキテクチャーを有する製品は機能と部品間が複雑な対応関係となっており、かつ（あるいは）部品間の相互依存性が強いという特徴を有します。日本で「擦り合わせ型」の製品と呼ばれるものがこれに相当します。

製品アーキテクチャー論に関する研究では、モジュラー化の利点を強調するものが多くみられます。モジュラー設計は最適な設計方法論であるとされ、開発の

複雑性を簡略化するためにモジュラー性の活用が推奨されています。製品がモジュラー化されると、製品は複雑性の小さな多くのモジュールに分解され、企業内部、外部の技術者によって独立に開発が可能となり、製品開発期間を短縮できます。また、複数のプロジェクトに対して、部品が製品系列で再利用されるならば、開発コストの低減と開発期間の短縮の両方を実現することが可能となります。さらに、モジュラー型設計は製品の変更を比較的容易に実現でき、市場の反応を探りつつ開発を行ったり、製品の微調整を行ったりする際の便益に繋がります。このようなモジュラー性のメリットは結果的に企業による製品の複雑性のマネジメントを容易にし、イノベーションを促進します。これに対し、共通モジュールの再利用や互換性への要求が設計者の自由度を低減させ、革新的な製品創造の妨げとなることや模倣のリスク、コモディティ化の促進など、モジュラー型設計の短所も指摘されています。一方、自動車のように顧客要求が高度、かつ複雑で、それらを実現するために部品間の微妙な調整を必要とする分野では、インテグラル型が優位であると主張する研究も存在します。これらの議論が示すとおり、製品アーキテクチャーはイノベーションに様々な影響を与えるとともに、製品アーキテクチャー論は製品戦略だけでなく、組織設計やサプライチェーン設計など企業活動の様々な分野に適用可能であることから、幅広い観点から盛んに研究がなされています。

## ■ 自然科学の法則と製品アーキテクチャー

一般的に、製品は階層構造を有する複数の機能（部品）で構成され、各機能（部品）はそれぞれ固有の動作原理を有しています。製品の動作原理は各動作原理と製品全体を制御するシステムルールから構成され、各動作原理が製品全体を制御するシステムルールに従って作動することによって、製品の最上位の機能が実現されます。ここで動作原理とは、所望する機能を実現するために自然科学の法則（自然法則）を効率的に作動させる仕組みのことであり、単独、あるいは複数の自然法則とシステムルールから構成され、それらが一体となって所望の機能を実現しています。また、システムルールとは、エネルギーや物質などの入力をトリガーとして、自然法則が連続的、あるいは並列的に作動していく順序とそれらが作動するための物理条件を規定するものです。なお、動作原理の階層構造や製品全体を制御するシステムルールもまた自然法則に則

り設計されることは言うまでもありません。すなわち、製品とは、機能、性能、品質、コストなどを考慮しつつ、自然科学の法則を適切に組み合わせたものと捉えられます。このように考えるならば、製品アーキテクチャーとは人工的なものではありませんが、製品アーキテクチャーには自然法則に起因する可能性や制約（自然科学的な可能性や制約）が内包されていると言えます。

前例のない新規製品の設計を行う際には、最初に技術選択の階層構造の頂点に位置する技術、すなわちコア設計コンセプトの選択がなされます。コア設計コンセプトとは、自動車のエンジンのように製品を特徴づける根本的な機能であり、その技術が決まれば、関連する設計要素（補完機能）はそれに従うとされています。実際の製品設計においては、最初にコア設計コンセプトの決定がなされ、次にコア設計コンセプトが最大のパフォーマンスを発揮するように補完機能が選択されます。次いで機能間の階層構造や関係性が決定され、最後に最下層の機能を実現する部品が選択される（機能から部品への写像）という流れで設計が具現化されていきます。一方、製品は自然法則に従って機能し、自然法則に従って製造されます。よって、コア設計コンセプトの選択、補完機能の選択、機能間の階層構造と関係性の決定、あるいは機能から部品への写像を検討する際には、第一義的に自然法則に則して実現性のあるものが現実的なアイデアとして抽出され、次ステップで特性やコストなどを考慮しつつ、設計が具現化されていきます。

開発とは、市場ニーズを満たし、他社との競争優位を確立する活動です。そのため技術者は、自然科学的可能性を最大限有利に活用しようとする一方、自然科学的な制約を様々な手段を駆使し、克服しようとし、また、企業も自然科学的な可能性を活かすよう、製品開発を推進し、それを製品のプロモーションなどにも利用しようとし、したがって、開発の初期段階において、製品アーキテクチャーという形で製品に埋め込まれる自然科学的な可能性や制約はその後の開発戦略に影響を与え、結果的に製品の市場競争にまで影響を及ぼしている可能性が高いと考えられます。次項以降では、薄型テレビ市場における液晶ディスプレイ（LCD）とプラズマディスプレイ（PDP）の競争を取り上げ、自然科学的な可能性や制約が開発戦略や市場競争に影響を及ぼした事例を紹介します。

## ■ LCDとPDPの動作原理と 製品アーキテクチャー

ディスプレイとは、「電気信号の形で作られたり送られて来たりした情報の内容を色と明るさの識別により眼に見える形で表示するもの」と定義されます。電気信号情報を視覚情報に変換するために、ディスプレイには、電気信号を光情報に変換する「電気光学変換」と位置情報に変換する「アドレッシング」の機能が必要です。「電気光学変換」は「色表示」と「調光」により、「アドレッシング」は「走査」と「同期」により実現されています。

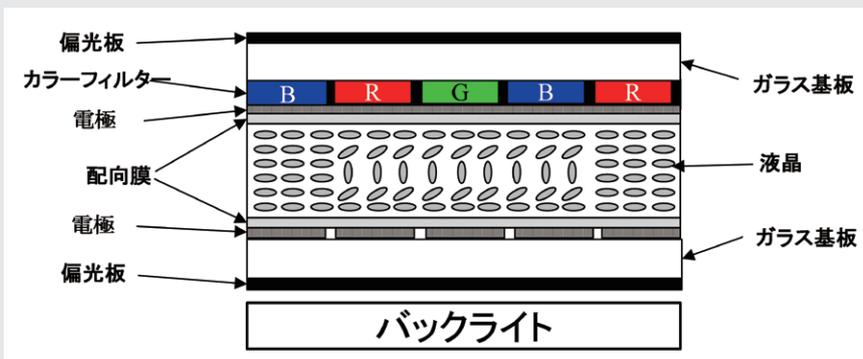
LCDは電界を加えることにより液晶の光学的性質が変化する現象を利用したディスプレイで、自ら光を発しない受光型のディスプレイです【図1】。Thin Film Transistor (TFT)などの電極が各画素に駆動信号を伝達する機能を担い、液晶セルは「光透過量調整機能(光シャッター)」のみを担っています。ゆえに、ディスプレイとしての機能を実現するためには、必然的に「発光機能」と「着色機能」が必要となり、バックライト(BL)が「発光機能」を、カラーフィルター(CF)が「着色機能」を担っています。電極を介して液晶セルに電圧が印加されると、印加電圧に応じて液晶セルの光透過量が調整されます。このような調整を画素単位で行うことによって、様々な色や明るさが表

現されます。この時、BLは常時点灯したままで、CFも常に一定の波長領域の光を透過しているだけで、これらは「電気光学変換」の実現に直接的には関与していません。LCDのコア設計コンセプトは、液晶セルによる「光透過量調整機能(光シャッター)」であり、LCDでは、各機能が概ね独立した状態を保ちつつ、ディスプレイに必要な機能を協同的に実現しているのが特徴です。

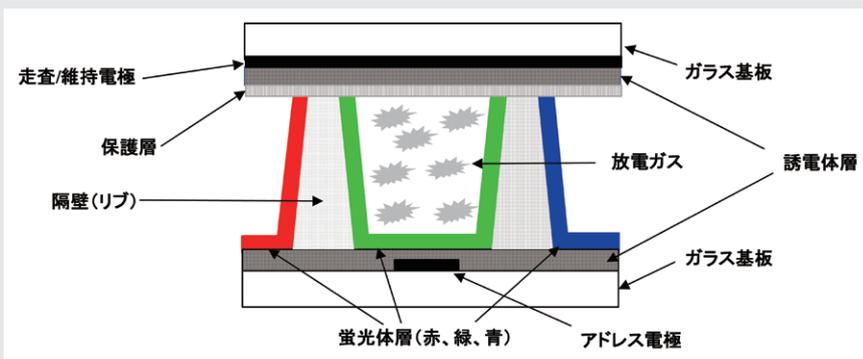
一方、PDPはガス放電の際の発光を利用した自発光型のディスプレイです【図2】。PDPでは、電極を介して放電ガスに電圧が印加された後、「プラズマ放電」、「(放電ガスからの)紫外線放射」、「蛍光体の(紫外線吸収に伴う)可視光発光」の三つの機能が連続的に作動することにより、「電気光学変換」が実現されています。このような動作を画素毎に短時間で繰り返し、一定時間内の発光回数を変えることによって様々な色や明るさが表現されます。三つの機能が一体となってPDPの「電気光学変換」の中核機能を担っており、これらがPDPのコア設計コンセプトと言えます。このように、PDPはコア設計コンセプトだけで「電気光学変換」を果たす素養を持つ一方、コア設計コンセプト自体に複雑性が内包されています。

【図3】にLCDの、【図4】にPDPの製品アーキテクチャー(機能構成、および最下層の機能要素と対応する部品の関係)を示します。図中の破線より上側が機能領域を、下側が実体領域(部品領域)を示しています。FEは機能要素を、PCは部品を意味し、機能要素間を結ぶ実線は上位の機能要素から下位の機能要素への分解を、機能要素から部品に向かう矢印は機能要素から部品への写像を現しています。

【図3】に示すとおり、LCDでは映像信号変換、同期、走査機能についてはいずれも駆動回路が担っていますが、その他の主要機能については機能要素と部品間の関係が1対1に明確に分離されています。また、映像信号の駆動信号への変換、画素への駆動信号伝達(電圧印加)、それに伴う光透過量調整は一連の動作であり、これらの機能を担う駆動回路、電極、液晶セル間には一定の相互依存性



【図1】LCDの構造



【図2】PDPの構造

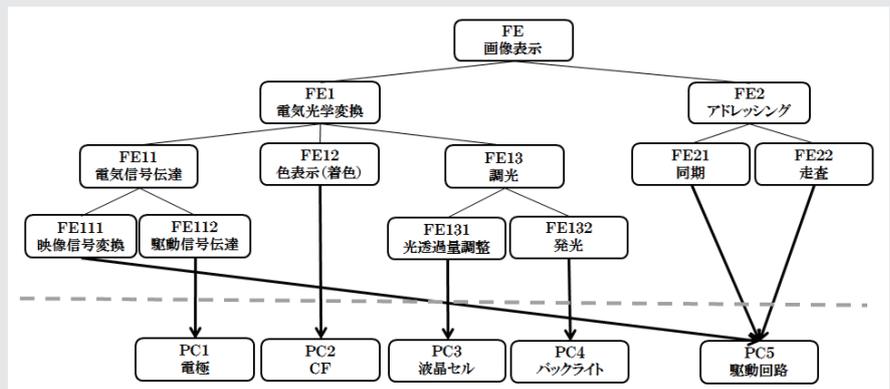
が存在します。これに対し、BLやCFはこれら一連の動作とは無関係に機能を果たしており、BL、CFと他の部品間の相互依存性は比較的弱いと言えます。以上のことから、LCDはモジュラー型に近い製品アーキテクチャーを有していると判断できます。

一方、【図4】に示すとおり、PDPでは機能要素と部品間の対応関係が非常に複雑です。加えて、画素への駆動信号伝達（電圧印加）、放電ガスのプラズマ放電、紫外線放射、蛍光体による可視光発光は一つが欠けても、あるいは順番が入れ替わっても所望の機能を実現することができない一連の動作であり、これらの機能を担うPDPの各部品は非常に強い相互依存関係によって結びつけられています。以上のことから、PDPはインテグラル型の製品アーキテクチャーを有していると判断できます。

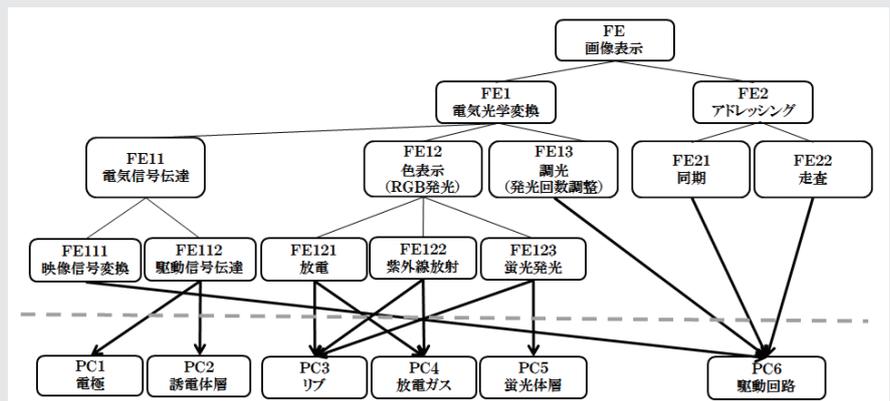
### ■ 薄型テレビ市場におけるLCDとPDPの競争

薄型テレビは21世紀初頭から本格的に普及し始め、ブラウン管（CRT）の代替に留まらず、40インチ超の大型テレビ市場を新たに開拓し、わずか10年足らずで4兆円という巨大市場を創造しました。薄型テレビの普及開始当初、PDPメーカーは、LCDには性能面の課題があることに加え、PDPは半導体プロセスを使用しないため、性能、コストの両面で将来に渡ってPDPが優位であると主張していました。また、PDPメーカーは構造上、生産プロセス上の利点から、PDPは大型化に有利と認識し、40インチ前後を境にLCDとの棲み分けが可能と考えていました。しかしながら、現実には2000年代半ば以降、LCDは30インチ台だけでなく、40インチ台、50インチ以上の市場においても急速にシェアを拡大し、2010年にはLCDが全てのサイズ領域でPDPを圧倒する状況となり【図5】、2013年のパナソニックのPDP事業からの撤退を以て、薄型テレビ市場におけるLCDの勝利が確定しました。

当初不利であったLCDは画質、コストの両面で

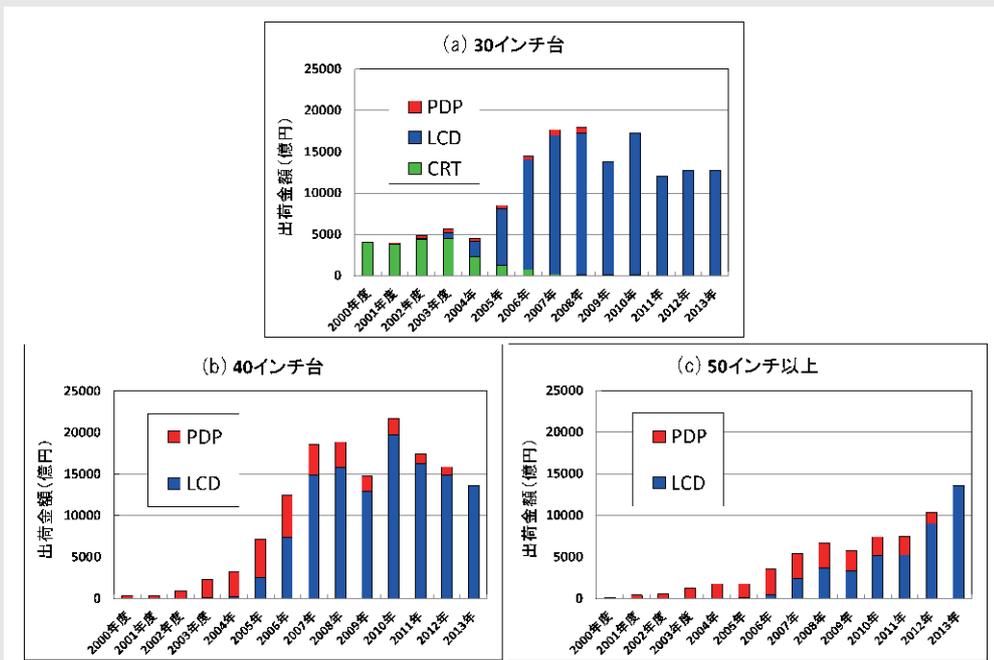


【図3】LCDの製品アーキテクチャー



【図4】PDPの製品アーキテクチャー

PDPに急速にキャッチアップしていきました。2000年代半ばにはLCDとPDPの画質はほぼ同等となり、消費電力はLCDがPDPよりも小さく、また価格もPDPと同等程度にまで低下しました。一方、PDPは当初大画面化を先行して実現することによって、LCDとの競争を有利に進めていましたが、画素数の向上に苦しみ、PDP陣営がLCDとの棲み分けを想定していた40インチ台のフルHD（1920×1080画素）製品の開発に大きく後れを取ることになりました。LCDが2003年に37インチのフルHD製品の製品化に成功したのに対し、PDPメーカーが40インチ台のフルHD製品を初めて上市したのは2007年のことでした。PDPメーカーはフルHD製品の必要性は十分に認識していましたが、技術的な課題により40インチ台へのフルHD製品の投入に遅れをとったことが確認されています。2003年に地上デジタル放送が開始され、フルHD製品のニーズが高まっていたことを考慮すると、40インチ台のフルHD製品はLCDメーカーにとって顧客に対する重要な訴求ポイントとなり、消費電力面でのメリットと30インチ台の製品で培ったコスト競争力も相俟って、2000年代半ば以降、LCDは40インチ台だけでなく、50インチ以上のサイズ領域においても次第にPDPを圧倒していきました。



【図5】サイズ別のディスプレイ出荷金額推移 (a) 30インチ台、(b) 40インチ台、(c) 50インチ以上

## ■ 製品アーキテクチャーがLCDとPDPの競争に及ぼした影響

本項では、PDPの40インチ台でのフルHD製品の投入の遅れ、およびLCDの性能、価格面での急速なキャッチアップに焦点を当て、製品アーキテクチャー論の観点から、それらに対するPDPメーカー、LCDメーカーの対応について検討します。

PDPでは、画面サイズが同一の場合、HD(1366×768画素)からフルHDに切り替わることによって、画素面積がほぼ半分となります。さらに、PDPは画素寸法が小さくなるにしたがって、発光効率が低下するという課題を有していました。PDPがフルHD化を実現するためには、消費電力の上昇を最小限に抑えつつ、約半分の画素面積で所望の輝度の光を発光させる必要があります。開口率と発光効率の向上を同時に達成することが求められていました。これらの課題に対し、PDPメーカーは多くの部品による統合的な対策を推進し、それに伴う部品間の調整に多くの時間を費やすこととなりました。前者の課題に対しては、隔壁細幅化、および電極の細線化などによる改善を推進しましたが、画素の微細化、隔壁細幅化に伴って隣接画素間の放電干渉が起これ、クロストークが発生するという課題が生じ、これを駆動技術によって改善しました。また、後者の課題に対しては、画素面積低下に伴う放電の火種となる電子数の低減や蛍光体塗布面積の縮小を補うために、放電ガスや保護層の改善、隔壁構造の

工夫による蛍光体発光面積の拡大など複数の部品による統合的な対策を推進しました。PDPでは主要部品が強い相互依存関係によって結びつけられているため、一つの部品を変更すれば他の部品の調整が必要となります。すなわち、上記の統合的な対策、およびそれに伴う部品間の調整はPDPのインテグラル性によって引き起こされた必然的な結果であり、PDPメーカーはPDPが有するインテ

グラル型アーキテクチャーの影響を受け、40インチ台のフルHD製品の開発に遅れをとったのです。

これに対してLCDメーカーは、部品間の相互依存性が小さいというLCDのモジュラー性の特長を積極的に活用し、部品単独の改良によって主要特性の改善、コストダウンを実現していきました。液晶セル単独の改良によって応答速度や視角特性の改善を、BL光源の冷陰極管からLight Emitting Diode(LED)への変更、あるいはCFの改良によって、色再現性の改善や消費電力の低減を実現しました。一方、モジュラー型アーキテクチャーを有する製品は部品の組み合わせにより特性を向上させるため、製品が達成できる最大パフォーマンスに一定の制約を受けることが指摘されています。これは高画質が求められる領域(ハイエンドゾーン)でLCDがインテグラル製品であるPDPと競争していく際の大きな課題でした。これに対し、LCDメーカーはコア設計コンセプトと部品はそのまま、機能要素と部品の関係性を変更し、部品間の相互依存性を強める手法、いわゆるアーキテクチャル・イノベーションでPDPに対抗していきました。このような手法は、特にLCDがPDPに劣るとされていた動画特性、コントラストなどの改善に大きな貢献を果たしました。紙面の関係上、LCDの動画特性の改善事例のみ紹介します。LCDは液晶自身の応答性の課題に加え、表示フレーム時間中発光し続けるホールド型発光方式の影響(人間の網膜の残像効果)によって動画応答性が低下するという課題を有していまし

た。後者の課題に対して、LCD メーカーは表示フレーム時間内の一定時間 BL を消灯し、ブラウン管や PDP のように表示フレーム時間の一瞬のみ発光するインパルス型発光方式に近づける技術によって動画応答性に関する課題を克服しました。この改善手法は光透過量調整機能 (FE131) と BL (PC4) 間に新たな関係性を設け、液晶セルと BL の関係を強化したものです。このように部品間関係性を比較的容易に変更できるのもモジュラー型アーキテクチャーの特長と言えます。加えて、LCD メーカーはフル HD 化の過程においても LCD のモジュラー性を有効に活用し、30 インチ台、40 インチ台での早期のフル HD 製品投入に成功しました。開口率の向上は電極と CF のブラックマトリクスの細線化により達成され、また BL の効率化により消費電力の上昇を抑制しつつ、輝度向上を実現しました。このように、LCD メーカーは LCD のモジュラー型アーキテクチャーの特長を活かし、短期間で特性、コストの両面で PDP にキャッチアップしたのです。

## ■ 製品アーキテクチャーが企業経営に影響を及ぼすメカニズム

製品アーキテクチャーはコア設計コンセプトを構成する機能間、あるいはコア設計コンセプトを構成している機能と主要な補完機能間の動作原理上の関係性の影響を強く受けます。LCD では、コア設計コンセプトである「光透過量調整機能 (光シャッター)」と主要な補完機能である「発光機能」や「着色機能」との動作原理上の相互依存性が弱いため、LCD はモジュラー型アーキテクチャーとなったと考えられます。一方、PDP では、コア設計コンセプトを構成する三つの機能「プラズマ放電」、「紫外線放射」、「蛍光体の可視光発光」が一体となって PDP の「電気光学変換」を担っており、それらが動作原理上、強い相互依存性で結びついているため、PDP はインテグラル型アーキテクチャーとなったと考えられます。LCD と PDP の動作原理はそれらが初めて発明されて以来、変わっていません。LCD と PDP の製品アーキテクチャーはそれらが発明された時点で決定され、アーキテクチャーが内包する自然科学的な可能性や制約を技術者は意識的に、あるいは無意識のうちに感じ取り、その後の研究・開発方針に反映させていったと考えられます。

企業は研究・開発の初期段階でコア設計コンセプトの選択を行い、アーキテクチャーの大枠が決定されま

す。この時、製品アーキテクチャーという形で自然科学的な可能性や制約が製品に埋め込まれます。その後、企業は製品が内包する自然科学的な可能性を活かし、制約を打ち消すように研究・開発を推進し、それらを製品のイメージ作りやプロモーションにも活用します。企業がある時点で判断に間違いがあったと気づいたとしても、それまでの資源投下量が重しとなって、逆戻りすることは極めて難しくなっています。すなわち研究・開発の初期段階における一つの選択が将来の研究・開発戦略や経営判断に一定の制約を課すだけでなく、それを意識した時には不可逆的な状況に陥っている可能性が高いということです。製品アーキテクチャーそのものは人工的なものであり、企業にとってはコントロール可能な内生的な要因であるのに対し、自然科学的な可能性や制約は外生的な要因であり、コントロールが困難なものです。研究・開発の初期段階で製品に埋め込まれる自然科学的な可能性や制約は短期的には大きな影響を及ぼしませんが、次第に影響が巨大化し、長期的には企業経営に致命的な影響を及ぼす可能性が高いのです。

## ■ おわりに

本稿では、一見無関係に思える自然科学と経営が関係していることを紹介しました。製品が内包する自然科学的な可能性や制約が製品アーキテクチャーの型や製品アーキテクチャーが発現する性質を決定する重要要因であるとともに、それらは企業の研究・開発戦略に影響を及ぼし、結果的に企業経営に重大な影響を与えるのです。コア設計コンセプトを構成する機能、あるいはコア設計コンセプトと補完機能との関係性に着目し、ある技術が持つ自然科学的な可能性や制約について深く洞察することで、研究・開発の初期段階で対象技術の未来をある程度予見できる可能性があると考えています。基礎研究から社会実装まで一気通貫で検討できる学問的基盤の構築の実現には、自然科学と経営学の融合が必須です。理科系の方々にも経営学に関心を持って頂けると幸いです。

## 参考文献

- 1) 内閣府 第 34 回総合科学技術・イノベーション会議参考資料 1  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/senryakukaigi/1kai/sanko1.pdf> (2022 年 8 月 15 日参照)
- 2) Ulrich K. The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. *Research Policy*. 1995; 24: 419-440.