

MMRC-J-179

人工物の複雑化とメカ設計・エレクトロニクス設計
—自動車産業と電機産業のCAD利用を中心に—

株式会社 函研 取締役営業本部長
上野 泰生

東京大学ものづくり経営研究センター長
東京大学経済学研究科 教授
藤本 隆宏

東京大学ものづくり経営研究センター特別研究員
朴 英元

2007年 11月



東京大学21世紀COE [整備型]
ものづくり経営研究センター

人工物の複雑化とメカ設計・エレクトロニクス設計
—自動車産業と電機産業のCAD利用を中心に—

株式会社 図研
上野 泰生

東京大学ものづくり経営研究センター長
東京大学経済学研究科
藤本 隆宏

東京大学ものづくり経営研究センター特別研究員
朴 英元

2007年 11月

要約：自動車・デジタル機器・精密機械など、人口物としての機械製品が複雑化していく中で、メカ・エレキ・ソフトの開発プロセス等を効果的に連動させることが、新製品開発の生産性、リードタイム、設計品質などに大きく影響するようになってきた。しかし、この問題に、体系的にアプローチした研究はまだほとんどない。そこで本稿では、エレキ系設計とメカ系設計の開発支援ITの対比、さらには自動車と家電系の開発プロセスの対比に重点を置き、複雑化する人工物の設計に対して、設計プロセス、IT、組織能力、アーキテクチャがどのように共進化するか、その方向性を探った。また、自動車産業と電機産業を比較した場合、ライフサイクルや収益構造などのビジネスモデルには大きな違いがあり、一製品あたりの開発投資や組織の規模も異なる。しかし、両産業で使われているエレキCADとメカCADは、ソフトウェアとしてはまったく同一のものであり、その間の違いは、自動車がメカCADに、電機がエレキCADに依存する比重が大きいという点だけである。ここ数年、クルマの電装化が急激にすすむのと同じく、家電にも意匠性が強くもとめられ、両者の製品開発において、課題の多くが共通化してきている。製品の複雑化はエレキ・メカ各々の設計現場のみならず、エレキ・メカを横断する課題を困難にする傾向があり、自動車、家電双方の製品開発において、エレキ・メカ、そして設計・製造間にコンカレントエンジニアリングを実装することが急務となっている。一方、自動車の場合、元来は被制御系であった自動車に、近年電子制御系が急速な勢いで入り込んでいることが、メカ・エレキ・ソフト設計の間の相互作用と緊張関係を生み出しており、それが製品開発の複雑化に拍車をかけている。とりわけ、制御系であるエレキやソフトは機能設計重視、被制御系であるメカ設計は構造設計重視である、という設計風土の違いが、両者の融合を難しくする一因である。さらに、製品設計を人工物を表象する記号系と考えた場合、メカとエレキでは、選択される記号系や翻訳のタイミングの違いがあり、これらの設計をコンカレントに行おうとしたとき、情報のやりとりにおいてタイミングのずれが生じうることを示した。

キーワード：CAD、設計プロセス、メカ・エレキ・ソフト設計、組織能力、アーキテクチャ、
自動車産業、電機産業、フロントローディング、デジタルモックアップ、
製品設計の3次元化

目次

1. はじめに

- 1.1 本稿の目的-複雑なメカ・エレキ・ソフト製品の開発とは
- 1.2 分析枠組み-アーキテクチャ・プロセス・IT・組織能力の相互適合
- 1.3 プロセス・アーキテクチャ・IT・組織能力の相互適合

2. メカ・エレキ・ソフトの設計思想と設計プロセス

- 2.1 メカ設計
- 2.2 エレキ設計
- 2.3 ソフト設計
- 2.4 機能設計と構造設計の関係
- 2.5 製品間の比較

3. 自動車産業と電機産業におけるCAD・CAE・CAMの活用

- 3.1 電機および自動車産業におけるエンジニアリングITとフロントローディング
- 3.2 CAD 活用の変遷
- 3.3 CAE(解析)とデジタルモックアップ
- 3.4 PDM / PLM について
- 3.5 CAD ベンダーの変遷

4. 自動車の電装化にともなう課題

- 4.1 自動車の電子制御の進展
- 4.2 自動車用 ECU の変遷と高度化
- 4.3 電子制御とソフトウェアの関係
- 4.4 自動車、電気製品の構造比較と課題

5. メカ設計・エレキ設計の分化と融合

- 5.1 複合的な記号系としての人工物設計
- 5.2 自動車設計におけるメカからエレキ・ソフトへの重心移動
- 5.3 家電製品における設計情報の比較分析
- 5.4 ソフトウェア開発への IT 適用の現状
- 5.5 若干の作業仮説

1. はじめに

1.1 本稿の目的 - 複雑なメカ・エレキ・ソフト製品の開発とは -

消費者のニーズが不確実性・多様性・洗練性を増す中で、現代の製品はますます複雑性を高める傾向がある。しかもその開発期間は短縮化を必要とする。かくして、複雑化する製品を短期間に設計・開発することは、現代企業にとってますます困難な作業となりつつある。すなわち、顧客が要求する製品機能の数、それに応じる部品など構造的要素の数、そしてこれら機能要素・構造要素間の相互関係の数が増えることにより、開発作業の手順も増加し、しかもそれらの間の同期化・重複化が要求され、全体として、プロダクト・プロセス双方における複雑化を引き起こしているのである。

とりわけ、多くの機構部品(メカ)から構成され、それらが多数の電気回路(エレキ)によって統合的に制御され、しかもそうした制御系にソフトウェアが深くかかわるタイプの製品において、製品の複雑化が著しい。これを仮に、「メカ・エレキ・ソフト複合製品」と呼ぶことにしよう¹。例えば、自動車はおよそ3万点の機構部品からなる複雑な製品であるが、近年はその多くが電子的に制御され、そのための回路基盤は数十を超え、組み込みソフトウェアは1千万ステップを超える規模に達するものがあると言われる。半導体製造装置、携帯端末、デジタル家電、複合型事務機などの中にも、同様の複雑さを備える製品が出現しつつある。そして、こうしたタイプの製品では、単に製品の機能や構造の数や相互作用だけでなく、メカ・エレキ・ソフトという異なるタイプの設計論理が複合化し絡み合っていることが、製品および製品開発プロセスの複雑化に拍車をかけているように見える。

そこで本稿では、こうしたメカ・エレキ・ソフト複合製品の設計・開発プロセスが持つ複雑性の源泉を分析し、より効果的なプロセスに関する探索的な考察を行うことにしたい。とりわけ、現代企業の製品開発リードタイム短縮に不可欠といわれる設計・開発支援のためのIT(デジタル情報技術)、とりわけCAD(コンピュータ支援設計)、CAE(コンピュータ支援解析)、CAM(コンピュータ支援の金型等設計)に着目し、その背後にある設計のロジックが、メカ(機構)系、エレキ(電気)系、そして組み込みソフト系で異なっていることが、この種の複雑な製品の短期開発を難しくしているのではないかと、この仮説を立てる。

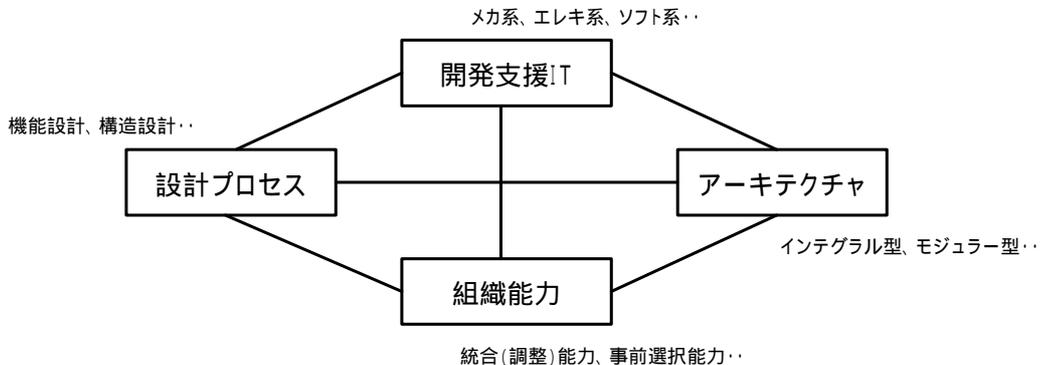
1.2 分析枠組 - アーキテクチャ・プロセス・IT・組織能力の相互適合 -

本稿は、複雑なメカ・エレキ・ソフト複合製品の開発に関する探索的な研究であるが、その背景には、これまでの研究を踏まえた、おおまかな分析枠組が存在する。それは、製品の設計思想(アーキテクチャ)、その製品の設計(開発)プロセス、開発支援IT、ものづくりの組織能力の間には、一種のダイナミッ

¹ 従来、こうした製品は「メカトロニクス製品」と総称されてきた。当初は、一つの機構を一つの回路で制御するような単純なものが多かった。しかし近年はそれらが複数化・統合化、つまり複雑化しており、またソフトウェアが占める役割も増している。

クな相互適合関係(フィット)が存在する、というものである〔図1〕²

図1 分析の枠組み



ものづくり・設計情報・製品

本稿で考える「ものづくり」とは、人工物の設計・開発・生産・購買・販売を通じて顧客満足を生み出す、企業全体・産業全体の取り組みを指す広義の概念である。それは顧客へと向かう「製品設計情報の流れ」を司る汎用技術であり、生産(=設計情報の素材への転写)のみならず製品開発(=設計情報の創造)も含む³。

「製品」とは、顧客を満足させるために企業が作る人工物のことである。ここで「人工物」とは、あらかじめ「設計」されたもの全てを指し、それは、有形、無形を問わない。従って、本稿における製品(=人工物)は、物財のみならずサービスも包含する広義の概念である。いずれにせよそれは、顧客にとっての付加価値を期待される「設計情報」が、何らかの「媒体」に転写されたものである。

この観点から見た広義の「ものづくり」とは、設計情報を創造し、媒体に転写し、出来上がった「製品=人工物」を顧客に伝達するまでの、「設計情報の流れ」をつくる企業活動全体のことである。言い換えれば、「ものづくり」の本質は、「ものをつくる」ことではなく、設計情報を「もの(媒体)につくりこむ」ことである(藤本、2003)。このように、ものから情報へと発想転換することにより、ものづくりは工場の生産現場だけで閉じたプロセスではなくなり、むしろ開発・購買・生産・販売の現場が連携し、本社部門も経営トップも、サプライヤーも販売店も顧客も巻き込む、一つの開かれたプロセスとなる。設計情報を創造するのが開発の仕事、創造された設計情報を媒体(もの)に転写するのが生産の仕事、転写する媒体を確保するのが購買の仕事、転写された設計情報を顧客に向けて発信するのが販売の仕事である。そして、顧客はそうした設計情報を企業から受け取り、いわば設計情報を消費するのである(藤本、2006)。以上のように、

² 藤本(2003)、藤本(2004)、他。

³ この意味での広義の「ものづくり技術」は、2006年に開始された第3次科学技術基本計画における8本の柱の一つに加えられた。

ものづくりにおいて最も本質的なのは、「もの = 媒体」ではなく「設計」であるといえる。

設計プロセス

前述のように、「ものづくり」という企業活動において中核的な概念は「設計」である。「設計活動」とは、ある人工物に関して、その機能と構造との対応関係を、現物の制作に先立って事前に構想することであると定義できるだろう。言い換えれば、設計プロセスとは、ある人工物の顧客・使用者が要求する機能パラメータ群に対して、構造パラメータ群を確定するプロセスとして描写される(Suh, 1990)。

ある製品 = 人工物を設計する場合、顧客ニーズを繁栄する製品機能は、複数の機能要素群に分解され、多段階の階層構造として示される。これが機能設計である。同様に製品の構造(形状・寸法・材質など)も、複数の構造要素群(例えば集成部品・単体部品)に逐次的に分解され、多段階の階層構造(例えば部品表 = BOM)として記述される。各階層の部品本体の設計は、製品特殊的、社内共通、業界標準のいずれでもありうる。

また、構造的要素の間には相互依存関係が発生するが、これら構造的要素(部品・モジュール)を結び結合部分のことを「インターフェース」という。インターフェースの設計は、本体と同様、製品特殊的、社内共通、業界標準のいずれでもありうる。

アーキテクチャ(設計思想)

以上のような、製品 = 人工物における設計情報の諸要素の「切り分け方・つなぎ方」に関する基本思想をアーキテクチャと呼ぶ(Ulrich, 1995; 青島・武石, 2001; 藤本, 2001; 他)。製品アーキテクチャはさまざまな形で分類できるが、最も重要な分類としては、「モジュラー型」と「インテグラル型」の区別、また「オープン型」と「クローズ型」の区別があるといわれる(Ulrich, 1995; Fine, 1998; Baldwin and Clark, 2000; 藤本, 2001)。

詳細は他に譲るが、簡単に言えば、製品機能要素(要求機能)と製品構造要素(部品)の関係が1対1対応に近く、インターフェースも共通化されている結果、既に設計済みの部品を組み合わせれば全体製品の機能を保証できる、というタイプの製品 = 人工物が「モジュラー型」、逆に、製品機能要素と製品構造要素の関係が多対多対応で錯綜し、インターフェースも製品特殊的である結果、製品ごとに部品を新規に最適設計しないと全体性能が出ない、というタイプの製品 = 人工物が「インテグラル型(擦り合わせ型)」である。また、モジュラー型のうち、社内共通部品の組み合わせで全体機能を実現する人工物を「クローズド・モジュラー型」、業界標準インターフェースによって異なる企業の既設計部品を組み合わせることができる人工物を「オープン・モジュラー型」という。

しかし、実際の製品は、単純な分類では把握しきれない。同じ製品でも、部位やレイヤー(階層)によって異なるアーキテクチャ特性を持ちうる(藤本, 2003)。したがって、実際の製品は、インテグラルからモジ

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

ユラーまでのスペクトル上に連続的に分布すると考えるべきだろう。大鹿・藤本(2006)は、いくつかのアーキテクチャ特性をリカート尺度で主観的に評価し、多変量解析を用いて集計した[インテグラル度指数]によってこのスペクトルを推定した。また、新宅(2003)、新宅・善本・加藤(2004)や延岡他(2006)も、ケーススタディの積み重ねにもとづき、こうしたスペクトルを推定している。

その結果を見ると、例えば大鹿・藤本(2006)では、最もインテグラル度の高い領域に自動車・同部品、最も低い(逆に言えばモジュラー度の高い)領域に電気機器類が分布する傾向を見出した。また、藤本(2001)、新宅(2003)、延岡他(2006)はいずれも、ケース分析をベースに、クローズド・インテグラル型アーキテクチャの製品代表的な製品として自動車、オープン・モジュラー型の代表としてデスクトップ型PCを挙げている。また多くのデジタル家電はモジュラー寄りのアーキテクチャ特性を持つと、これらの研究は指摘する。

一般に、インテグラル型製品は、要求性能や構造・機能のトレードオフなど、制約条件が厳しい中でぎりぎりの構造設計を行う製品である。例えば、市場ニーズを所与とすれば、重量・強度・容積などの制約の厳しい小型のメカ製品、構造設計・機能設計を連続量で表現する必要のあるアナログ型製品(西村、2004)が、インテグラル(擦り合わせ)寄りである傾向がある。

したがって、インテグラルな組み立て製品は、製品特殊的なカスタム設計部品の比率、社内設計基準による部品の比率、アナログ系の部品、そしてメカ系の部品が多い傾向がある。モジュラー型製品はその逆で、業界標準的な汎用部品、社内共通部品、デジタル系の部品、そしてエレキ・電子系の部品の比率が高い傾向があると言われる。例えば、製品原価に占めるエレキ・電子系部品の比率は、PCやデジタル家電では50%以上、高級自動車で30%、低価格自動車で10%とみられる。また同様に、製品原価に占める汎用部品の比率は、PCでは50%以上、白物家電で30%、高級自動車で10%以下といわれる。これらが、アーキテクチャを判断する上での大まかな目安だと言える。

設計・開発支援 IT

一方、開発や生産の現場において「良い設計情報の流れ」を作るツールとして、近年存在感を増しているのが、デジタル情報技術、いわゆるITである。とりわけ、CAD・CAM・CAEといった、いわゆる製品開発支援ITである。

設計プロセスとは一般に、問題に対する解決案(設計案)を決めるプロセスであり、その主たる要素は、代替的設計案の探索(サーチ)、および各設計案の問題解決力の事前検証(シミュレーション)である。そして、主に設計案のサーチを支援するデジタル情報技術をCAD(Computer - Aided - Design)、設計案の問題解決シミュレーションを支援するデジタル情報技術をCAE(Computer - Aided - Engineering)と呼ぶ。また、特に金型設計を支援するITをCAM(Computer - Aided - Manufacturing)と呼ぶが、これは金型設計用のCADと考えてもよいだろう。

以上のように、開発支援 IT は、単にその上で設計が行なわれるだけでなく、蓄積された電子媒体の設計情報を用いて製品性能や製造性のシミュレーションが行なわれる。これにより、実物の試作品による機能・製造性のチェックに先立って、バーチャルな問題解決サイクル(設計・試作・実験サイクル)を回すことが出来るようになる。これを、問題解決の「前倒し」という意味で「フロント・ローディング」といい、今日、開発の競争優位を築く決め手の一つと言われている。

ものづくり組織能力

一般に組織能力(Organizational Capability)とは、ある企業あるいは組織に独特の組織ルーチン(繰り返し行動のパターン)であって、他の企業に対して競争力や収益力の持続的優位をもたらすものを指す。それは他社にとって真似しにくく、継続的に蓄積され、創発的に進化するものである。

これを、前述の広義の「ものづくり」概念に適用するならば、「ものづくりの組織能力」とは、「設計情報の良い流れ」を作る組織能力のことである。すなわち、顧客へ向かう設計情報の創造・転写・発信のプロセスを、競合他社よりも常に正確に(高品質で)、効率良く(低コストで)、迅速に(短いリードタイムで)遂行する組織ルーチンの体系を指す。つまり、いわゆる QCD の同時達成・同時改善を行う能力である。ここでは、開発・購買・生産・販売の現場の組織能力が一体となって緊密に絡み合っている(藤本、2001)。

いわゆるトヨタ生産方式は、こうした「ものづくりの組織能力」の典型である(藤本、1997;藤本、2003;藤本、2004)。すなわち「設計情報の創造・転写が行われない時間」を最小化し、顧客へと向かう設計情報の、淀みない「流れ」をつくることがその要諦である。

また、製品の設計・開発における組織能力とは、前述のような「問題解決としての設計プロセス」において、他社に対する持続的優位性を持つ組織能力であり、要するにそれは、「組織的問題発見・問題解決の能力」である(Clark and Fujimoto, 1991)。

製品開発におけるITと組織能力

製品開発におけるITと組織能力の関係は、どう考えるべきだろうか。過去十数年の実証研究においては、以上のような枠組を製品設計・開発を支援するデジタル情報技術(IT)に応用することによって、以下のような結論が得られた。すなわち、90年代における3次元ソリッドモデルCADなど、先端的な開発支援ITの導入そのものは、産業の競争優位確立にとって必要十分条件とはならない。言い換えれば、ITは、それを使いこなす「ものづくり組織能力」、例えばチームワークによる問題発見・問題解決能力が伴わない限り、競争優位をもたらさない(藤本、1997;藤本・延岡・青島・竹田・呉、2002; Thomke-Fujimoto, 2000)。例えば、まったく同じCADのパッケージを使いながら、結果としての「裏の競争力」では、企業によって大きな差が出ることもある。現場において、電子媒体とヒトの集団は、密接に

絡み合いながら一つの設計情報システムを形作っているからである。

1.3 プロセス・アーキテクチャ・IT・組織能力の相互適合

ダイナミックな相互適合

製品特性、開発プロセス、IT ものづくり組織能力は、短期的には不適合があるとしても、長期的には互いに適合的な方向に共進化する傾向がある。そうした相互適合が競争力、すなわち表の競争力(製品の存続力)および裏の競争力(現場の存続力)をもたらすからである。例えば、戦後の日本企業では、歴史的な経緯により、多能工のチームワークを強みとする「統合型ものづくりの組織能力」が偏在する傾向があったが、これと相性のよい設計思想は設計要素間の複雑な相互調整を要する「擦り合わせ型アーキテクチャ」であり、適合的な IT は協調環境でチームワークを支援する IT であり、フィットしやすい開発プロセスは部門間・部門内のチームワークを要する同時並行開発(サイマルエンジニアリング)・前倒し開発(フロントローディング)・大部屋型開発(コロケーション)などである傾向がある⁴。これらは相互適合的である。

インテグラル型アーキテクチャと統合型設計プロセス

インテグラル型アーキテクチャの製品の開発の場合は、顧客が要求する機能要素群に対して、新たに構造設計を行う部品が多くなる。しかも、そうした部品間の機能的相互依存性(複数部品が協調してひとつの機能を達成すること)、逆機能的相互依存性(電磁干渉など)、構造的相互依存性(部品配置の相互干渉など)があり、まして、設計の途中で事後的に発覚する相互干渉も少なくない。したがって、個々の部品の構造設計や、部品間の相互依存性のチェックを事前に周到に行うことが重要である。つまり、インテグラル型製品の設計プロセスは、個別部品の構造設計や部品設計間の相互調整に力点が置かれる傾向がある。後述の「メカ設計」は、こうした統合型設計プロセスの特徴を反映する傾向がある。

しかし、これらの新規部品設計をゼロから行うことは、複雑なインテグラル製品の場合、莫大な設計工数につながる怖れがある。そこで、工数節約のために、いくつかの手段が採用される。

例えば部品構造の「編集設計」である。機構部品の場合、新規設計といっても、既存設計に新たな要求水準や制約条件を加えて修正すればよい場合が多い。編集設計は新しいアイデアを抑圧する逆機能も指摘されるが、インテグラル型開発には不可欠なツールである。

一方、「機能要件の絞り込み」も一つの方法である。この場合顧客は、製品差別化にとって必須の機能要件のみを提示する。構造設計者は、その機能要件を満たしつつ、指定されていない「隠れた機能要件」を補完し、顧客に形(構造設計)で示す。それを顧客が承認することで、事後的にすべての機能

⁴ 藤本・東京大学ものづくり経営研究センター(2007)

要件が確定する。つまり、事実上、全機能要件の確定タイミングを遅らせることによって複雑性を部分的に吸収するのである。

このように、製品全体機能が最適設計された部品群に依存する擦り合わせ(インテグラル)型アーキテクチャの場合、製品ごとに新規設計部品を「起こす」こと、つまり最適化プロセスが重要になる。したがって、設計プロセスにおける代替設計案のサーチでは、既存の設計案の探索よりはむしろ、新しい設計案を「起こす」ことが、インテグラル型製品の設計プロセスの特徴となる。

したがって、組織能力としては、リアルタイムで部品設計間の相互調整を行う「統合力」「調整力」がポイントとなる。そして、開発支援ITとしては、「新規部品設計の最適化」に力点を置いたCADが重要になる。後述のような、構造設計重視のメカ系CADはこの色彩が強い。

モジュラー型アーキテクチャと分業型設計プロセス

他方、モジュラー型アーキテクチャ製品は、製品を構成する各構造要素(部品)間の機能的・構造的な相互依存性が低いので、仮に、機能向上のために新しい部品を設計しなければならない場合でも、それぞれの部品の設計を他から独立して進行できるので、部品間の設計パラメータの調整負荷はあまりかからない。

また、従前どおりの要求機能で十分な場合は、設計済みの部品を社内・社外の既存部品のリスト(ライブラリー)から選べば済むので、部品の新規設計作業は発生しない。一方、まったく新しい一群のモジュラー型製品の設計プロセスでは、長く陳腐化しない、拡張性の高いインターフェース(デザイン・ルール)を周到に構想することが重要になるので、インテグラル型製品に比べれば、こうした事前の骨格作りにより多くの設計工数が割かれる傾向がある。

このように、製品の要求機能ごとに機能完結的な部品が1対1で対応する「モジュラー型アーキテクチャ」の製品は、既に設計済みの部品をカタログから選んで購入し、それらを組み合わせる傾向が強い。つまり、設計代替案のサーチにおいて、既存設計部品の探索が優先される。言い換えれば既設計部品を「拾う」こと、つまり選択プロセスが重要になる。組織能力とすれば、製品をあらかじめ機能完結部品群に切り分ける構想力、あるいは素性の良い既存部品を選ぶ「事前の目利き能力」がポイントになる。そして、開発支援ITとしては、「最適の既存設計部品の選択」に力点を置いたCADが重要になる。電子部品のデータベース(ライブラリ)の整備に力点を置くエレキ系CADはこの色彩が強いといえよう。

このように、製品ごとのアーキテクチャ特性によって、開発プロセスや適合的なITが異なるとすれば、その間の相性(フィット)を考える必要がある。そして、製品ごとのアーキテクチャは、その製品に対する市場ニーズの特性(例えば極限性能が要求されるか、機能間のバランスを重視するか、軽量化・小型化が重要か)、あるいは製品に含まれる技術の特性に影響される。

情報転写様式；一括転写か逐次転写か

また、アーキテクチャに関わらず、設計情報を媒体(素材)に転写するときの転写様式も、重要な製品特性である。例えば、多くの機能を担う設計情報を「一括転写」する方式(半導体上流工程や一体成形プレスなど)と機能要素・構造要素ごとに分かれたディスクリートな部品を結合することで設計情報を「逐次転写」する方式(プリント基板実装工程や自動車組立工程など)とでは、開発や生産の考え方に違いが生じると予想される。

メカ・エレキ・ソフトの比較分析：概要

とくに技術特性として、その製品が機構設計中心のいわゆる「メカ製品」であるか、あるいは電気設計中心のいわゆる「エレキ製品」であるか、あるいはコンピュータが読み込んだソフトが機能実現の鍵を握る「ソフト製品」であるかは、アーキテクチャに少なからぬ影響を与えるとみられる。例えば、他の条件を一定とすれば、プリント基板をベースとするエレキ設計は、「既存設計部品を拾う製品設計プロセス」を通じてモジュラー型の製品になりやすく、またディスクリートな部品の逐次転写様式が基本である。一方、メカ設計は、「新規設計部品を起す製品設計プロセス」を通じてインテグラル型の製品になりやすいと予想される(詳細は後述)。

また、メカ部品の組立は基本的に逐次転写様式であるが、半導体設計は、アーキテクチャに関わらず、設計情報の一括転写方式が基本である。

この観点から言うなら、複合的なメカ・エレキ・ソフト製品は、上記のすべての特性がひとつの製品の中に同居しており、したがって、1製品の中に、インテグラル的な部位とモジュラー的な部位、あるいは逐次転写様式と一括転写様式が混在している。しかし言うまでもなく、これらの異なる部位は、異なる設計ロジック、設計思想、開発プロセス特性などに支配されている可能性が高く、そうした異なるロジックにもとづく開発プロセスをどのようにして統合化・同期化するかが、各企業にとって重要な課題になるのである。

小括

ここまでの議論をまとめておこう。自動車・デジタル機器・精密機械などの機械製品が複雑化していく中で、メカ・エレキ・ソフトの開発プロセス、IT、組織能力を効果的に連動させることが、新製品開発の生産性、リードタイム、設計品質などに大きく影響するようになってきた。しかし、この問題に、体系的にアプローチした経営学的な研究はまだほとんどない⁵。

⁵ 例えばITの関連では、メカ系について新木(2005)、エレキ系について上野(2005)、メカ・エレキ・ソフトの連動については富士通・日本発ものづくり研究会(2007)など、実務系の著者による論考が既にある。しかし、設計論・製品開発論の基本に戻った学術的な分析はまだ始まったばかりである。

そこで本稿では、複雑なメカ・エレキ・ソフト複合製品に関する研究のひとつの出発点として、機構(メカ)系・電気(エレキ)系・ソフト系のアーキテクチャおよび設計プロセスの共通点・相違点について、できるだけ設計論の基本に戻って考察を加える。とりわけ、筆者の一人が専門とするエレキ系開発とメカ系開発の比較分析を、事例に即してより詳細に行うことにする。

2. メカ・エレキ・ソフトの設計思想と設計プロセス

以上の予備的な考察を踏まえて、次に、エレキ設計・メカ設計・ソフト設計の特徴を比較分析してみよう。

2.1 メカ設計

機構製品は、前述のように、重量、容積、強度などの物理的制約条件の下で所定の機能を達成するための部品群の設計である。こうした物理的制約条件は個別製品ごとに異なる傾向があるので、新製品ごとに各部品を新規に構造設計する傾向が高まることが、前述のようにメカ製品の特徴である。また、外觀の意匠性も重要な機能的要素となることが多い。とくに、顧客の機能や意匠に対する要求水準が高い場合に、メカ製品はインテグラル型アーキテクチャになりやすい。

したがって、製品の機能を論理的に記述するだけでは部品ごとの構造設計には移れない。つまり、機能設計の完了 → 構造設計への移行、という理論的に想定される順序が完全な形で実行されるケースは少ない。例えば自動車などにおいては、簡単な機能要件の提示という形で、要点を絞り込んだ機能設計が行われ、その後、詳細な構造設計に移り、それにもとづく試作と機能検証によって、機能設計が事後的に補完される傾向が見られる。また、当初の基本設計の段階から、機能要件の設計に加えて、概略の構造設計(レイアウト)や概略の意匠設計(デザイン・スケッチ)が開発プロセスの上流段階において示され、その意味で機能設計・構造設計混在となりやすい。

しかも、メカ設計の場合は、質量・体積のある部品を機械的に連結し、強度を保ち、かつ部品干渉を避けながら、部品間で運動エネルギー等のやりとりをするので、構造設計面の制約条件は非常に複雑になる。性能や小型・軽量化の要求が厳しい場合は特にそうである。

反面、メカ製品は、構造 → 機能関係は多くの場合力学的な因果関係なので、いったん形(構造)ができれば、機能のチェックは一目瞭然なところがある。ある構造設計を機能設計者や顧客に示すことによって、隠れた機能要件を逆提案することが可能である。つまり、一部の要求機能の提示は、構造設計の時点にまで遅らせることができる。

以上をまとめると、公理系設計の理論では「機能設計 → 構造設計」という形でシーケンシャルに設計が進むことになっているが、メカ設計の場合は、構造設計の先行、機能設計の延期という両方の意味で、

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

機能・構造設計の重複・混在化が一つの特徴といえよう。特に、自動車のような、機能的にも構造的にも複雑なメカ製品の場合に、この傾向が著しい。

要するに、メカ設計の一つの特徴は「構造設計重視」といえよう。しばしば「メカ設計は図面重視」といわれる所以であって、機能設計の中に構造設計が浸透しているのである。

2.2 エレキ設計

電気設計とは要するに、制御系の設計である。そして、制御系の機能設計は、論理回路で表現することができる。AND, OR, NOTなどの汎用的な論理素子をブール代数的に結合し、独自の機能 = 論理を構築する(澤井監修・緒方, 1970)。汎用的な論理素子や論理ブロック(言語で言えばアルファベットや単語)から一気に機能を立ち上げるため、比較的フラットな構造ヒエラルキー(部品表)となりやすい。また、言うまでもなく、汎用的な論理素子で機能を構成するため、少なくとも階層の下位レベルはオープン・モジュラー型のアーキテクチャになりやすい。論理素子・論理ブロックに対応する汎用的な個別電子部品あるいは半導体の物理設計を対応させるわけであるが、いったん論理設計(機能設計)が完成すれば、物理設計への展開は繰り返し作業的な部分が多く、自動化を進めやすい。

したがって、エレキ設計の場合、回路設計により顧客が要求する機能をどう論理的に表現するかに重点が置かれる。つまり、機能設計(回路設計)が構造設計(レイアウト設計)より重視される傾向がみられる。また、メカ設計に比べれば、「機能設計 構造設計」という順序関係が明確である点も、エレキ設計の特徴といえそうである。したがって、開発初期において、機能設計情報を完備させねばならない、というプレッシャーは、メカ設計以上かもしれないのである。

2.3 ソフト設計

複雑なメカ・エレキ・ソフト製品におけるソフト設計とは、通常は、メカを制御対象物とする制御ソフトであり、いわゆる「組み込みソフト」と呼ばれる人工物である。こうした人工物の制御系は、エレキ設計とソフト設計で分担することになるが、エレキとソフトをどこで切り分けるかについては、設計者はかなりの自由度を持つようである。

ソフトウェアは、制御系を担うという意味ではエレキ設計と同様の役割を担う。しかし、いわゆる電気設計の場合、PCB上で汎用的な部品を選択して挿入する、という「逐次転写型」(組立型)のものづくりであるのに対し、半導体の場合は、文字通り、トランジスターと回路を一括して掘り込んでいく一括転写型(加工型)のものづくりであり、この点で大きく異なる。

ソフトウェアが担う制御情報は、半導体上で表現される。したがって、機能要件は、論理設計情報として事前に完備していなければならない。その表現は、より自然言語に近い、コンパイラ言語で表現されている。つまり、ソフトウェアの場合は、機能の記号(言語)表現 論理設計表現 物理設計という順に

翻訳されることになる。しかも、メカ設計のように、機能要件の提示を遅らせることはできない。この意味で、ソフト設計は、機能設計の完備性という点ではエレクトロニクス設計と同様であるが、論理設計から物理設計への翻訳は、かなり異なる方法なのである。

制御対象になる機器のリアルタイム要求が厳しい場合、ソフトには割り込み処置が複雑に入り、ソフトのアーキテクチャはインテグラル型になりやすい。また、CPU(半導体のハード)に直接、アセンブラで記述したアプリケーション・ソフトが乗るような非階層的な構造になる傾向があり、その点から見てモジュラー的である。

そうした機能要求が厳しくない場合は、CPU OS アプリケーション、あるいはCPU OS ミドルウェア アプリケーションといった階層構造になり、全体にソフトウェアはモジュラー化しやすい。つまり、ソフトのアーキテクチャは、機能要求に応じて、モジュラーにもインテグラルにもなる。しかし、リアルタイム要求の厳しい製品の場合は、インテグラル寄りになりやすい。

2.4 機能設計と構造設計の関係

前述したように、製品アーキテクチャによって機能と構造設計との関係は異なる。特にメカ開発においては、要求機能の定義が不完全でも、構造設計の側から不足する要求機能を細かくすることが可能である。ところが、こうした補完はエレクトロニクス設計では難しく、ソフトではさらに難しいといわれる。ここに、メカ、エレクトロニクス、ソフトのスペック決定における根本的な違いがありそうである。ここでは、[表1]に沿って、メカ・エレクトロニクス・ソフトにおける機能と構造との関係を概略説明する。

メカ設計

機能設計は、要点を絞り込んだ数値目標群(スペック)や自然言語で示す(人馬一体)ことができる。構造設計は、図面、CAD設計情報などで表示している。メカ設計は、制御される側のアクチュエータ系であり、機能と構造との関係は、構造 機能の因果関係が明確である。設計プロセスは、構造設計が主体であり、図面中心主義である。機能設計は、事後的に補完される。そのため、機能を目標値として完全に記述しなくても良い。

エレクトロニクス設計

機能設計は、フロー図や回路図であり、完全に記述する必要がある。構造設計は、物理設計のレイアウト図である。そのため、エレクトロニクス設計は、制御する側であり、当然制御目標も明確である。機能と構造との関係は、機能 構造の因果関係が明確である。設計プロセスは、機能設計が主体であり、構造設計は、部品を拾うことで完成される。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

[表 1] メカ・エレキ・ソフトの比較

	メカ設計	エレキ設計	ソフト設計
機能設計	数値目標群(スペック)や自然言語で示す(人馬一体)。	フロー図や回路図で。完全に記述。	機能設計は、従来はPADやフローチャート。UMLでは、ユースケース図、ドメイン構造図(階層)、クラス図(階層)など。
構造設計	図面、CAD設計情報など	物理設計のレイアウト図	構造設計はソースコード
制御の主体	制御されるアクチュエータ系。	制御する側。制御目標が当然明確。	制御する側。制御目標が当然明確。
機能と構造設計の主体	構造設計主体。図面中心主義	機能設計主体	機能設計主体
機能と構造の因果関係	構造 機能の因果関係が明確。機能設計は事後補完される。機能を目標値として完全に記述しなくても良い。	機能 構造の因果関係が明確。	機能設計 構造設計の翻訳が、なかば自動化されている。ソフトウェア工学では要件定義が鍵を握る。構造設計は自動化されている。

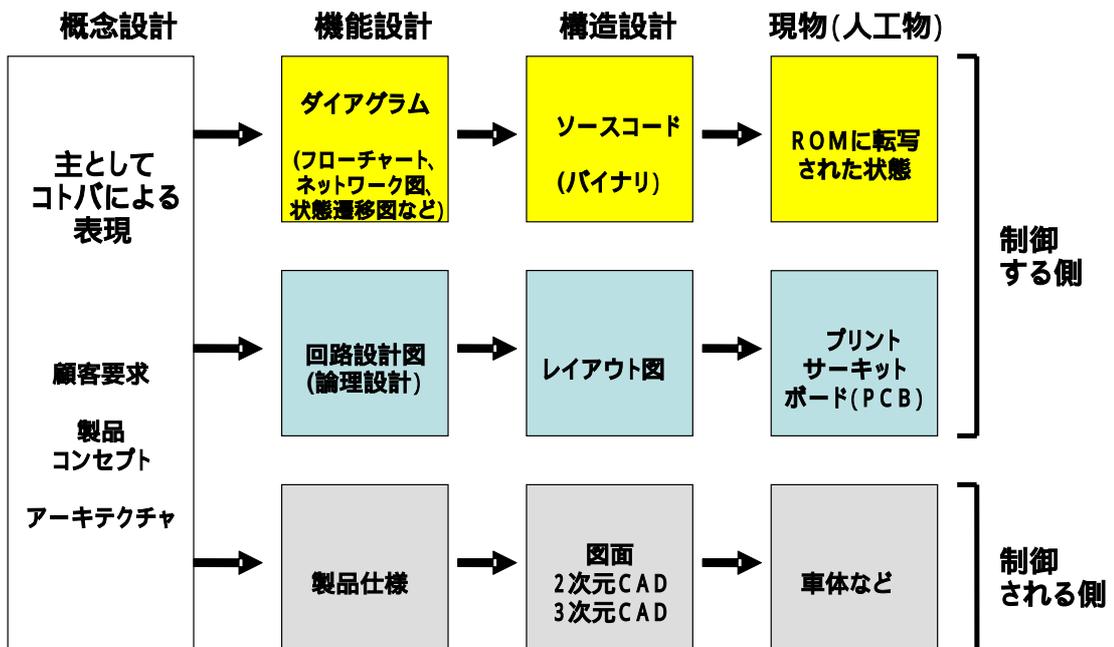
ソフト設計

ソフトウェアの機能設計は、従来はPAD(Program Analysis Diagram: 問題分析図)やフローチャートのような、いわゆる回路図的な設計情報が中心であった。より新しい表現方法であるUML(オブジェクト指向ソフト設計におけるモデル表記方法を標準化した言語である Unified Modeling Language)では、ユースケース図(ユーザと要求機能の関係をモデル化した図)、クラス図(オブジェクト間の関係をモデル化した図)、状態遷移図(ユーザーに関わる状態の変化をモデル化したフロー図)などが提示されている。一方、構造設計はソースコードであると考えられる。いずれにせよ、ソフト設計は、エレキ設計とともに「制御する側」の設計であり、したがってそれは、制御対象におけるインプットとアウトプットの関係、すなわち機能を詳細に明示しなければならない。つまり、機能設計と構造設計との関係においては、機能設計が主、構造設計は従であり、機能設計の詳細が確定すれば、構造設計(ソースコード)への翻訳は、なかば自動化されている。このように、ソフトウェア工学では機能要件定義、すなわち機能設計を詳細に行うことが重要であり、その点では、構造設計の詳細な確定を要するメカ設計とは対照的とも言える。

以上、メカ・エレキ・ソフトと、機能と構造設計との関係をまとめた。図2は、メカ・エレキ・ソフト別に、ある

特定製品の設計プロセスを、コトバ(コンセプト)から、機能 構造 生産の流れによって具体的に示している。このフレームワークに基づき、3章からの自動車産業と電機産業を予備的に比較することにする。

[図 2] 製品の設計プロセスとメカ・エレキ・ソフトとの関係



2.5 製品間の比較

次に、こうしたメカ・エレキ・ソフトと、製品のアーキテクチャとはどのような関係があるのだろうか。ここでは、製品アーキテクチャが異なるといわれている、自動車製品とエレクトロニクス製品を取り上げて比較してみる。

自動車

代表的なインテグラル製品である自動車の場合、最初の製品設計においては、構造設計は全体機能設計に従属するが、デザイン重視の傾向が強い製品の特性ゆえ、機能設計と構造設計が順次的プロセスを描くにのみならず、構造設計に進行した段階で逆順に製品機能が確定される場合もありえる。自動車という製品は従来エレキ部品より、メカ部品が重視され、エレキ部品とエレキ部品に組み込まれるソフトはそれに従属していたが、近年、エレクトロニクス化が急速に進むにつれて、ECUなどの電子部品が急激に増加しており、エレキの重要性と組み込みソフトの影響も大きくなっている。例えば、自動車の電子部品の中で重要視されているカーナビのソースコードは500万行を増しており、単体のエレクトロニクス製品のソースコード以上である。自動車では、カーナビだけではなく、多様な電子部品を使わざるを得

ないので、ソフトの重要性は今後増すと思われる。

エレクトロニクス製品

一方、エレクトロニクス製品の場合、自動車に比べると、電子部品が製品設計を主導しており、意匠部品などのメカ部品よりエレキ部品の重要度が高かった。とくに、近年、様々な機能を盛り込む小型製品の増加によって、メカ部品よりエレキ部品の重要性は増しており、したがってエレキ部品を制御する組み込みソフトの重要性がますます高まっている。ソフトの重要性の具体例を取り上げると、FOMAの携帯端末で、ソースコードにして1000万行、DVDプレイヤーで600万行、薄型テレビで400万行などである。また、設計費で見ると、DVDレコーダーは、60%がソフトウェアであり、携帯電話では、80%を占める⁶。その結果、エレクトロニクス製品においては、ソフト設計をどのように効率的にするかによって、製品の競争優位は決まってくる。

しかし、最近、エレクトロニクス製品の場合、市場成熟によって製品差別化の誘引が強くなればなるほど、エレキ部品のみならず、小型化、省エネ化、意匠デザインを重視するようになり、メカ設計の重要性も再び強調されている。何故なら、形状の小型化と、省エネのための低電圧化は、小さな空間に高密度に部品を配置しなければならないので、ノイズ問題や発熱問題を顕在化させ、メカ設計の難易度は上昇しているからである。また、デザイン上での高級感や見栄えを重視する戦略から、外装素材もプラスチックからマグネシウム合金へ、アルミニウムからチタン合金へ変化しており、従来のメカ設計ルールの変革が求められている(富士通・日本発ものづくり研究会、2007)。このような傾向は、小型化が差別化の要因となる製品では顕著である。

[表2] 製品のタイプとメカ・エレキ・ソフトの重要度

製品	メカ・エレキ・ソフトの重要度
自動車(インテグラル製品)	メカ > エレキ > ソフト
エレクトロニクス製品(モジュラー製品)	メカ < エレキ < ソフト

3. 自動車産業と電機産業におけるCAD・CAE・CAMの活用

以上のように、自動車その他の機械製品においては、製品の複雑化が著しく、また、その一因がエレキ・メカ・ソフト設計の相互作用にあることが予想される。そこで、本稿では、主にエレキ設計とメカ設計、とりわけそのコンピュータ支援IT技術(CAD・CAM・CAE)に焦点を当て、自動車および電機産業における実態に関して比較分析を試みることにする(エレキと並ぶ制御系設計であるソフト設計については、

⁶ 富士通・日本発ものづくり研究会、2007

別の機会に改めて論じることとする)。

3.1 電機および自動車産業におけるエンジニアリングITとフロントローディング

すでに述べたように、自動車産業においても電機産業においても、製品単体の複雑化の傾向は明らかである。またそれに加え、顧客嗜好の多様性、変化、予測困難性が高まり、上市までの開発期間の短縮や製品バリエーションの増加といった傾向も著しい。これにより、開発作業そのものも複雑化しており、従来の手作業や人的コミュニケーションだけに頼った開発方法だけでは、開発期間の短縮化に対応できなくなってきた。そうした中で近年、IT(情報技術)による、この複雑性と期間短縮のジレンマ克服が、各社の課題となっている。

これに対する一つの答えは、製品開発における問題発見・問題解決のフロントローディング(前倒し)である。製品開発におけるITを活用したフロントローディングは、電機業界においても自動車業界においても、ここ数年、開発期間短縮の切り札として重要視されてきた。

フロントローディングの主たる目的は、電機、自動車共に、問題発見・問題解決の早期化であり、その点では共通している。しかし、力点の置き方は、両者でやや異なる。自動車の場合、安全対策、燃費改善、排ガス対策など、制約条件は年々厳しくなる一方であり、自動車に求められる機能要件はきわめて複雑化している。しかも、自動車を構成する部品も3万点近くあり、制御系の部品やソフトは増加しており、構造的にも自動車はきわめて複雑になっている。この結果、機能検証の内容も複雑化しており、機能検証や製造性の前倒し検証に必要な試作車(1台数千円におよぶ)の費用も上昇傾向にある。このように、機能・構造ともに極端に複雑化する製品の開発において、品質を維持しようとするれば開発費・開発工数・開発期間ともに増加してしまい、品質そのものの事前検証も困難化している、という現状に対するひとつの解決策が、自動車開発におけるIT利用、とりわけフロントローディングである。

一方、エレクトロニクス製品開発のフロントローディングの場合、製品の機能的・構造的複雑化の問題は、自動車ほどではないかもしれないが、開発期間短縮による収益確保の要請は、自動車よりもむしろ厳しいといえる。例えば、エレクトロニクス製品の構成部品点数は多くても数千点であり、また電子部品のほとんどは汎用品であるため、自動車と比較して試作に大きなコストがかかるわけではない。しかし、製品のモデルライフは数ヶ月と、自動車(数年)にくらべて極端に短く、1回の試作を待つ時間は、競合との競争上、時に致命的になる。したがって、自動車以上に、開発リードタイムを短縮することによる先行利益の獲得⁷に、IT活用の力点が集中する。

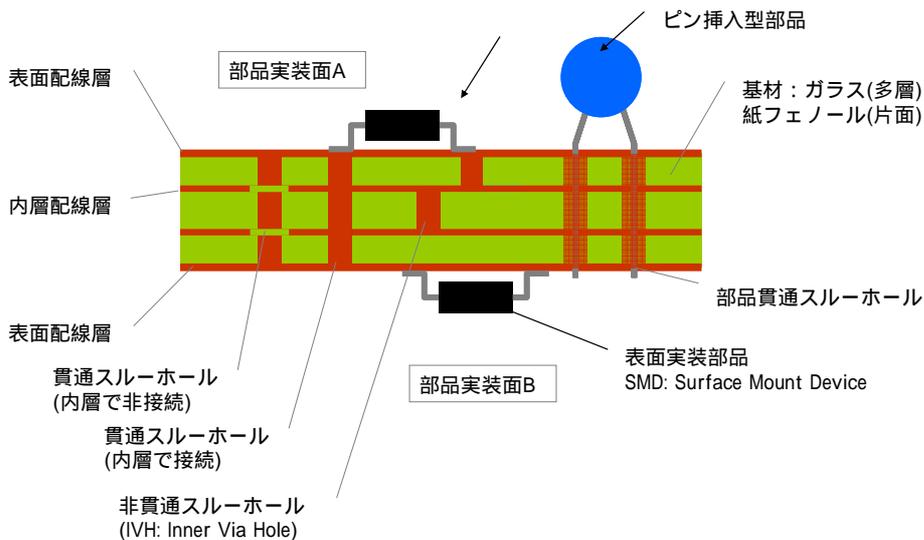
このように、製品の複雑性、および市場の不確実性に対応する製品開発支援ITは、メカ設計主導の自動車産業においても、エレクトロニクス設計主導の電機産業においても、重要な役割を演じている。しかしながら、まさにエレクトロニクス設計とメカ設計の違いを反映して、両者におけるITのあり方には、一定の違いが見られ

⁷ アビームコンサルティングでは市場投入時間を25%早めることで5%利益が上昇すると試算している。

るようである。そこで本稿では、以下において、筆者の実践的な体験に基づき、主にエレクトロニクス業界を中心に、エンジニアリングITの根幹である CAD/CAE/CAM 活用の現状を分析し、自動車業界との比較を試みることにする。

3.2 CAD 活用の変遷

[図 3] 多層基板の断面図(例)



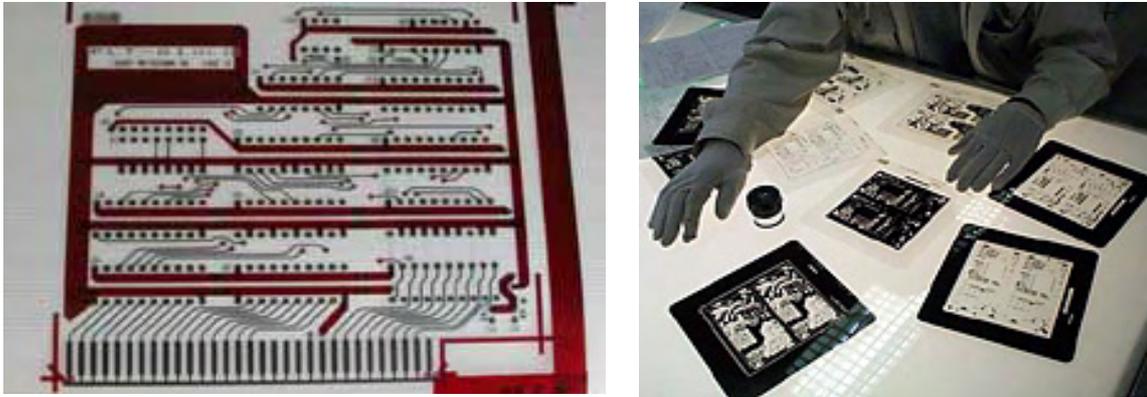
まず、自動車・電機両産業、あるいはエレキ・メカ両分野における CAD 活用の変遷について概略を示すことにしよう。CAD 活用の原点は、エレキ、メカを問わず、製品開発の下流にある生産準備への活用、

すなわち高精度な NC データ(加工のための数値制御情報)を出力することにあつたといえる。例えば自動車業界では、CAD はまず車体設計工程に適用された。CAD 導入以前は、ボディの断面ゲージを作成するために、現図台と呼ばれる作業台上で設計者(製図担当者)がボディ図面の現寸線図を描いていた⁸のだが、この作業は設計者 10 人月以上の工数を要する新車開発上のボトルネックであり、自動化による効率のアップが強く望まれていた。そこで、CAD により図面情報を電子化し、それを NC (数値制御) 工作機の制御情報に変換することによって、マスターモデルや金型を直彫りすることが検討された。これにより、外観デザインプロセスにおいて作成された車体の曲面情報を、誤差の累積を避けつつ高い精度でプレス金型に転写する一連のプロセスが完成したのである。

一方電機業界においても、80 年代には大きな技術革新が起こったことにより、エレキ CAD 普及に弾みがついた。ひとつは表面実装部品の一般化であり、もうひとつは非貫通スルーホールの出現である(図 3)。プリント基板はその名の通り、回路生成に印刷技術を用いており、フォトマスクの精度が品質を左右する。プリント基板の黎明期は、原寸の 2~10 倍に拡大されたフィルムの上に設計者がアートワークテープで回路をつくり、それを縮小印画したものを版下として使っていた(図 4)。

⁸ 5m x 3m の作業台上での作図。作図精度は 0.1mm 程度。

[図 4] プリント基板の配線パターン



*注：従来配線パターンは倍寸図にしてテープで作成していた。(写真左)

これを写真に撮って原寸大に縮小したものがフォトマスク。(写真右)

このフォトマスクで露光とエッチングを行い、基板上の配線パターンを形成する。

しかしこれでは、高密度配線に限界があり、また自動実装のための部品座標の誤差もおさえることが出来ない。そこで、CAD上で配線パターンを入力し、そのデータベースから直接フォトマスク用の高精度な描画データ(Gerber Format)⁹やスルーホールを穿つためのドリルデータを出力することが始まった。ちなみにこの当時のプリント基板CADは1台1億円以上の高価なものであり、設計者が思考をとまなしながら直接画面に向かって設計するのは、原価償却面から効率的ではなかった。したがって、設計者が手書きで描いた倍寸パターン図を座標読みとり装置(デジタイザ)に貼り付け、熟練したオペレータが一点一点なぞっていく作業が一般的であった。

このように、CADは、設計者の設計活動を支援するためのツールというよりも、設計データから製造データを作成するためのツールとして発祥したというのが、電機・自動車に共通したその生い立ちであることがわかる。しかしながら、CADは今日、単なる製造データを出力する目的だけでなく、設計検証および仮想試作のプラットフォームとして、CAEやCAMと組み合わせて利用されるところまで進化してきている。一言でいうなら、CADの利用の重点がリアエンド(次工程への設計情報の正確な受け渡し)から、フロントエンド(設計情報の正確な創成)に移ったとみることができる。その後の変遷については、以下において、エレクトロニクス業界、自動車業界とに分けて考察することにしよう。

⁹ 版下作成用の精密露光装置メーカー・米国 Gerbaer 社の NC フォーマット。このフォーマットはどんな CAD からでも出力され、またどんな露光装置でも受け取れるため、版下データの流通としては完全にデファクト化している。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

[表 3] エレキCADとメカCADの歴史

	エレキCAD(電機産業)			メカCAD(自動車産業)		
	テーマ	目的	モデル	テーマ	目的	モデル
80年代	版下データ直接出力	版下精度、自動実装精度アップ	アートワーク図形(導体、シルク、レジスト、メタルマスク)	金型直彫り	金型作成時間短縮、精度アップ	ワイヤフレーム
90年代	物理拘束ベース回路設計	物理設計ルールミスによる下流からの手戻り防止	アートワーク図形+レイアウト制約(接続情報、導体距離、禁止領域)	設計の3次元化	意匠、構造、製造部門によるコンカレントな設計、解析	サフェースモデル、ソリッドモデル
2000年代	電気ルールベース回路設計	電気設計ルール(配線トポロジーなど)ミスによる下流からの手戻り防止	アートワーク図形+レイアウト制約+解析モデル(導体モデル、部品ピンIOモデル)	流用設計対応	パラメトリック機能によるエンジンなど機能部品設計の効率化	ソリッドモデル+拘束条件
現在	フロントローディング	CAE,ナレッジ活用によるPCBアセンブリの試作レス	アートワーク図形+接続情報+解析モデル+ナレッジ(設計ルール)	フロントローディング	CAE活用による解析、デジタルモックアップ作成	ソリッドモデル+拘束条件+物性情報

エレクトロニクス業界における CAD の変遷

まず、エレクトロニクス業界のCAD利用について考察する。80年代初頭のエレクトロニクス製品は、カスタム IC も少なく、回路はほとんどディスクリート部品(個別半導体)で構成されており、また今日課題となっているソフト開発についても、ドライバソフトなど小規模なものに限られ、回路の補完的な位置づけでしかなかった。当時、電気回路設計者の多くは、論理(機能設計)と物理(製造性も含む PCB レイアウトなど構造設計)の両方を司り、なおかつ機構(メカ)との間の制約条件についても把握しながら設計を行っていた。全体を理解しながら、アイデアや工夫を凝らし、独自の技術や知見を回路設計として転写するという、いわゆるアナログ時代(回路がアナログという意味だけではない)に独特のプロセスである。

今と同じく当時も、韓国や台湾の後発メーカーは必死になって日本の製品を分解し、模倣を試みた。しかし回路の接続関係はリバーエンジニアリングできても、部品の使い方やパターン形状など、レイアウト設計には、回路動作だけでなく製造性も含むノウハウが暗黙知として詰め込まれおり、単に回路の形状をコピーするだけでは、その競争力の源泉を再現することは不可能であった。日本の家電メーカーがかつて、長く世界市場を席卷できたのは、こうしたアナログ技術の模倣困難性に起因するところが大きい

¹⁰。

¹⁰ 卓抜した‘アナログ’技術で廉価な中国部品を使いこなし、また基板層の低層化などの徹底したコストダウンにより、最後までブラウン管 TV、VTR で高い残存者利益を上げていた船井電機も、製品の中心が

設計業務の分業化が進んでいなかったこの時代、論理設計と物理設計の両方を頭に入れながら設計できるエンジニアは、いきなり物理設計(レイアウト)を行った後、プロセスを逆行してそれに応じた回路図を記録として残すと言うようなことも、現実の開発のなかで普通に行っていた。つまり、機能設計と構造設計が混在していたのである。上流で論理(機能設計)をきちんと入力しなければレイアウト設計(構造設計)を開始させない欧米の CAD ベンダーからすれば、これは下流にツケを持っていく破綻したプロセスであり、そうした日本企業の設計プロセスに対応可能な CAD が欧米で開発されることはなかった。

また、今もその傾向はあるが、日本の回路エンジニアは、論理設計だけでなく物理設計の美しさ、すなわちパターン配線やアートワーク処理、図面様式などにこだわりがある。いくら回路が同じように動作しても、美しさのない配置配線を嫌う傾向があった。もちろんこれについても、欧米の CAD ベンダーは美観的要素には重要性を認めず、むしろ自動配線などに向かっていった¹¹。このため、上記のような日本流の設計プロセスを理解し、それに適応するエレキ系 CAD を開発した日本の CAD ベンダーが評価されたのだと推測される¹²。

しかし、90年代に入ると、製品の複雑化によって回路規模が急激に大きくなり、管理するネット数や部品点数が増加した。そしてそれに伴い、機能(回路)設計と構造(物理)設計の分業が進んだ。回路設計者の仕事は、機能設計が主体となり、レイアウト(構造設計)を正しく行わせるために、まず機能的に完全な回路設計情報を入力することが必須となってきた。これに応じて CAD ベンダーも、回路設計ソフトの改善や Windows OS への移植などにより、使い勝手の向上とコストダウンにつとめた。その結果、以前は専任のオペレータによって入力されていた回路が、今日ではほぼ 100%、設計者自らが端末に向かって回路を試行した入力形式が定着している¹³。その後も回路の高速化、高密度化がすすむ中、設計意図の伝達を確実にするために、回路設計とレイアウト設計の CAD 間で電気・物理制約条件(Constraints)情報を共有し、これにもとづいた設計指示およびデザインレビューを行える環境が一般的となっている。

しかしながら、その後もプリント基板設計は複雑度と設計難易度を増してきており、例えばデジタル家電のメイン基板は、いずれも一人で完結できる規模ではもはや無い。その上納期は短縮化する一方だが、回路の動作や製造面でのノウハウを体系的に理解できるレイアウト設計者はそう簡単には育たない。設計時間を短縮化させるために、単一のプリント基板を複数に分割し、各々の担当者が持ち分の中で

液晶 TV や DVD などデジタル製品に移行してからは中韓メーカーのキャッチアップが早まり、収益性は落ちてきている。

¹¹ 自動配線技術は、特に欧米を中心に四半世紀にわたり様々に研究開発されてきており、長足の進歩を遂げているが、人間の配線技術を越えた事は一度もない。現在でも動作周波数が低く、大きさや層数などに制約が少ない基板設計には使えるが、例えばデジタル家電の量産モデルなどには適用できない。仕上げではなく、配線難易度の見積などで使われるケースはある。

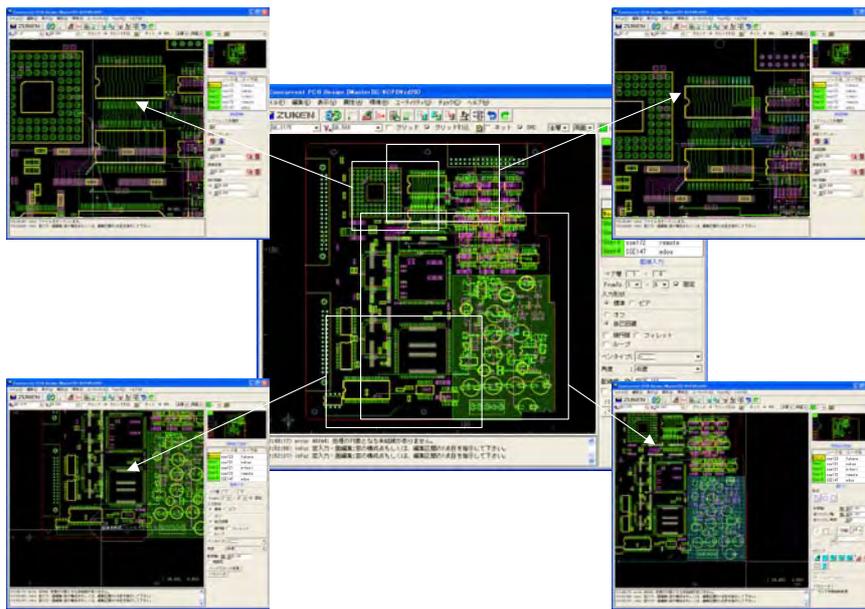
¹² 矢野経済研究所 2006 年資料より、図研のシェアは約 52%、日本で 1 位。

¹³ オペレータの入力による CAD 運営はクローズショップ、設計者自らのツールとして位置づける運営はオープンショップと呼ばれる。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

設計を進めていくモジュラー・アーキテクチャ的な方法もあるが、この方法は最初から領域や担当回路を決める必要があり、設計の自由度は低い。そこで、この問題を抜本的に解決するために、製品をモジュール分割することなく、複数のレイアウト設計者がコンカレント(同時)に設計に参加できる同時並行設計機能を備えたCADが開発されている。これにより、特に大規模基板において著しい時間短縮効果が出ている¹⁴。

[図 5] 同時並行設計ツールによる重なる領域の同時設計



こうした新しい同時並行設計方式の導入により、付随したいくつかのメリットがでてきている。ひとつは、設計者の設計活動への参加が柔軟なタイミングで行えるため、作業の負荷分散が行えるということである。つまり、分割設計の場合は、設計の初期段階で、厳密に自分の設計領域を切り出さなければなら

ないが、同時並行設計であれば、各設計者が時間の空いた時に、出来る範囲で参加することが可能になる。

また、ひとつの基板をみんなで設計することにより、スキルの低い設計者が何に悩んでいるのかについて、スキルの高い設計者が理解し指導することができる。すなわち、設計現場で実践的な教育を施せる点も同時並行設計の大きなメリットである。この場合、設計管理者は、ひとつの画面から全ての進捗を俯瞰することが可能となり、それだけプロジェクト管理が容易となる。これらはまさに、自動車開発の現場で、現図台にみんなが上って、設計を行っているイメージに近い。これは日本企業に偏在する「統合型製品開発の組織能力」(前述)とマッチングの良いCADだといえる。そして現図台よりも優れているのは、ネットワークさえつながっていれば、どんなに距離が離れていても、こうした同時並行設計の環境がつけられるということである。たとえば中国やベトナムなど、工賃の低い国との遠隔設計指導や分業なども、実

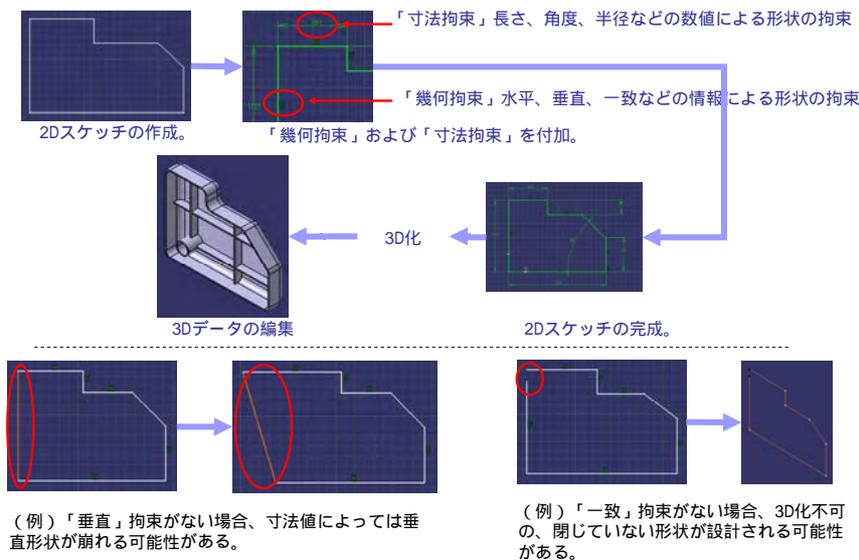
¹⁴ 5000ピン、8層、BGA×4のIVH基板で、単独設計だと246時間、分割設計だと2人で232時間かかる設計が、同時並行設計では2人で180時間に短縮。単純計算では1.5倍の工数をかけて27%の時間短縮が実現できることになる。

現可能となるのである。

自動車業界での CAD 変遷

一方自動車業界では、前述のように、当初は金型などの加工のための数値制御(NC)データ)を出力することを目的としたワイヤフレーム(輪郭表現)式の3次元CADが、また後には、概観デザイン情報の正確な反映や検証のためにサーフェス(表面表現)式の3次元CADがモデルとして用いられた。これに対し、エンジンや足回り部品などの機能部品は、機能などの解析を目的として、最初からソリッド・モデリング(立体表現)の3次元CADが導入されたようである。後に、このソリッドモデルを生かした、パラメトリック設計(拘束設計)と呼ばれる、寸法駆動による立体形状の連立的な変更機能が実装されることで、特にエンジンなどの設計変更や流用設計が大幅に効率化された。

[図 6] 拘束設計の考え方



今日では自動車を構成するほぼ全ての部品がソリッドモデルで表現されている。これは意匠から設計、生産まで、あるいは外部のサプライヤーが設計情報を正しく活用することを目的としているためである。しかしこのソリッドモデリングは、設計者が CAD を使って簡単に行えるものではない。

[図 7] ソリッドモデルの考え方



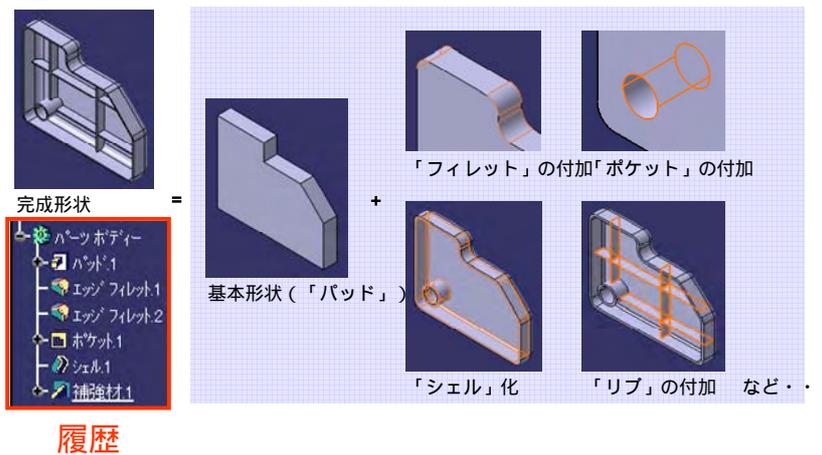
図7に、ソリッドモデリング作成の一例を示しているが、ここでも示唆されるように、今日の3D CAD は分業化及び個々に完結したプロセスを前提としており、確定した部品形状を厳密にモデル化しなければならない。

言い換えればヒストリ(図 8)や前述の拘束条件を盛り込める数学的につくりになっているた

め、設計者が機能設計から構造設計を導き出す、というエンジニアリング的な発想とは自ずと異なる。

そのため、このモデリングを行うためのトレーニングを受けた専任のオペレータ(モデラー)が必要となる。例えば日産自動車では、モデラーが全リソースに占める比率は16%にものぼるとい¹⁵。

[図8] ソリッドモデリングにおけるヒストリの考え方



一方、前述の通りエレクトロニクス製品開発では、ほぼ100%、設計者が直接CADを使って回路を設計している。回路の規模や複雑さが増大する中で、回路設計の推敲を繰り返し、下流工程への正確な指示を行うためには、自らCADを

操作しないと、情報の正しい転写が行えないと考えられているためだ。この点において、構造設計をオペレータに任せる傾向のある、近年の自動車開発とは全く対照をなしている。

以上のように、生産準備(金型設計)への利用から出発したCADは、自動車業界においては設計者の手元をはなれ、専任のモデラーによる構造表現ツールとなる傾向が強まったが、エレクトロニクス業界においては、逆に設計者自身が使いこなすツールとして定着したというのが、筆者の理解である。

新木(2005)も指摘するように、自動車設計においても、ボディの現図を設計チームが手書きしていた頃は、それなりに利点もあった。例えば、現図台の上で先輩、後輩の設計者同士が交流しながら構想検討・設計を行い、その中で後輩は、先輩に設計指導を受けることができた。また設計マネージャーは、現図を一覧し、進捗状況をほとんど瞬時に把握し、設計指揮することが可能であった。さらに、前後工程の設計者と生産技術者のほか、マネージャークラスが集まって、様々な設計・生産技術上の事前検討を重ねることができた。なぜならボディの現図は全体形状や、個々の部位の設計状況などを、一目で見通せる一覧性があり、また設計変更など、すべての改訂内容は現図上に反映されていたからである。さすがに遠隔地対応には困難を伴ったが、IT化以前の日本企業の設計プロセスは、今日の日本企業のITに必要な協調設計環境の条件を備えていたといえる。

このように、日本の統合型ものづくりでは、設計側と生産側において暗黙知的な「阿吽の呼吸」が要求されるし、また実際、最終目的を共有する形でのチームワーク(助け合い)は自然な形で行なわれてきた。

¹⁵ 2007年1月30日東大安田講堂で行われたシンポジウム、「ITとものづくり:デジタル設計開発の課題と展望」より。後に詳述。

そのため、分かる範囲で必要最低限の情報があれば、ものづくりができた(新木、2005)。

そもそも自動車は、典型的なインテグラル型アーキテクチャの製品であり(藤本、2003)、全体を分割して設計した後に、再び結合すれば出来上がる類の製品ではない。設計開始段階で コトバ(自然言語)によって製品設計が完全に表現されているわけではなく、したがってそれが、完全な形で論理設計や物理設計に翻訳されているわけでもなく、前後左右を見ながら都度摺り合わせを行い、チーム全員で設計図をさわりながら完成に向かうという試行錯誤的な開発方法で、日本の優良ものづくり企業は大いなる成功をおさめてきたのである。

このやり方に、プロセスを分割してそのインプット/アウトプットを確定させる手法をベースにした欧米の分業型 CAD が、果たしてうまく適合するのかという点については他に譲るが¹⁶、自動車開発プロセスにおける近年の設計プロセスの変化と CAD の関連については、今後、さらなる分析が必要だと思われる。

3.3 CAE(解析)とデジタルモックアップ

次に、デジタル情報技術を用いた設計の機能検証について概略を説明しよう。前述したとおり、近年の自動車設計において、専任のオペレータ(モデラー)を使ってでも、車の全てをソリッドモデリングしようとしている企業があるのは、コンピュータ上で仮想的に自動車を組み上げ、それにより、増大する実物試作および実物実験の負荷を軽減しようという意図があったからである。例えば日産自動車では、ラベルなどほんの一部を除き、ほぼ 100%の構成部品が、実物試作以前の段階で、ソリッドモデリングで出来上がっていると言う。

クルマ 1 台丸ごとのフルソリッドモデリングが、製品開発の競争力に貢献できることは大きく2つある。ひとつはコンピュータ支援の解析(CAE; Computer Aided Engineering)である。自動車開発における CAE は劇的に進化しており、各企業は、強度・剛性、振動、熱、空力などの車両性能の評価(機能検証)だけでなく、プレス成型性や金型内での樹脂の流れを検証するモールドフロー解析など製造性(DFM, Design For Manufacturability)に関する検証をも行うことで、開発リードタイムの短縮と共に、生産コストの削減や品質の向上を狙っている。

もうひとつはデジタルモックアップ(DMU)である。ソリッドモデリングにより、どんな複雑形状でも、対象を任意の視点から正しく観察することができるようになった。また、現物モックアップ(形状チェックのための実物試作)より優れている点として、バーチャル(仮想)化により製品断面のカットや細部へのウォークスルー¹⁷が可能となることが挙げられる。これにより、2次元図面では困難であった部品同士の干渉や問

¹⁶ 例えば、東大・日経共催のシンポジウム(2007年1月30日開催)資料=日経紙面(2007年2月24付け)注15と同。藤本(2006)

¹⁷ 3次元で表現された仮想空間の中を実際に歩く視点で評価を行うこと。

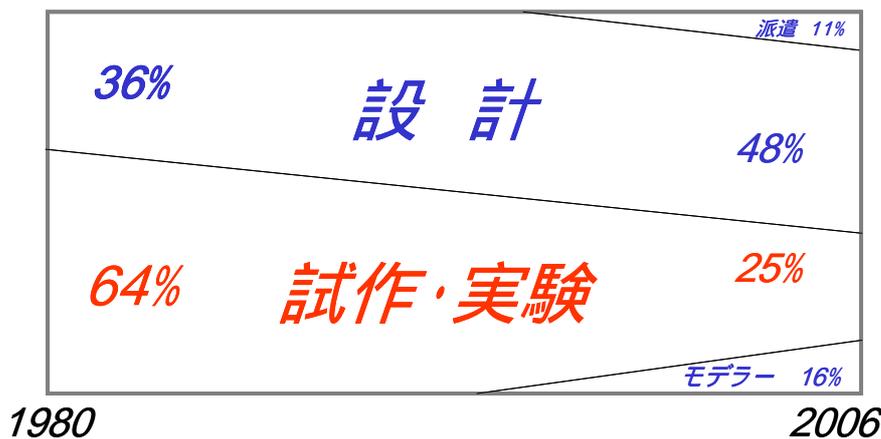
人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

題が検出され、実物試作がない段階でも検証結果を設計部門にフィードバックすることができる。また意匠面では、レンダリング処理¹⁸によって、テクスチャ¹⁹や光源の変化による、ボディ表面への景色の映り込みや見映えの違いを検討することにも用いられている。

こうしたCAEとDMUの活用により、近年の日本の自動車企業の中には、プラットフォームを変更しない派生車種であれば開発試作は省略して量産試作も1回、またその際の、各評価項目に対する合格率は95%にも達する例も見られている。

図9は、近年の日産自動車²⁰における職能分布の推移について表したものである。前述したとおりモデラー(CADによる構造設計の専門家)という職能が出現し、その割合が16%にも上っているのと同時に、仮想試作により、1980年初頭に比べて試作・実験リソースが40%以下になっており、ITの力によって、試作レスという究極の狙いに徐々に向かいつつあることがわかる。

[図9] 近年の日産自動車における職能分布の推移



こうした自動車開発におけるデジタルものづくりと比較してみると、エレクトロニクス製品開発はまだまだ現物の試作に頼る傾向が相対的に強いといえる。これには

いくつかの原因が考えられる。例えば、開発リードタイムが数ヶ月と短期間であるため、そもそも解析のためのモデル作成を行っている時間が無いことが挙げられる。また、製品を構成する部品点数が少なく、また汎用調達できる部品の比率が高いことから、比較的安価で迅速な試作が可能であることも、主要な要因であろう。

しかしその電機業界もここ数年、開発リードタイムの短縮、テーマの増加に対応するべく、デジタルものづくりへのシフトは加速している。今日エレクトロニクス製品開発で最大の課題はシグナル・インテグ

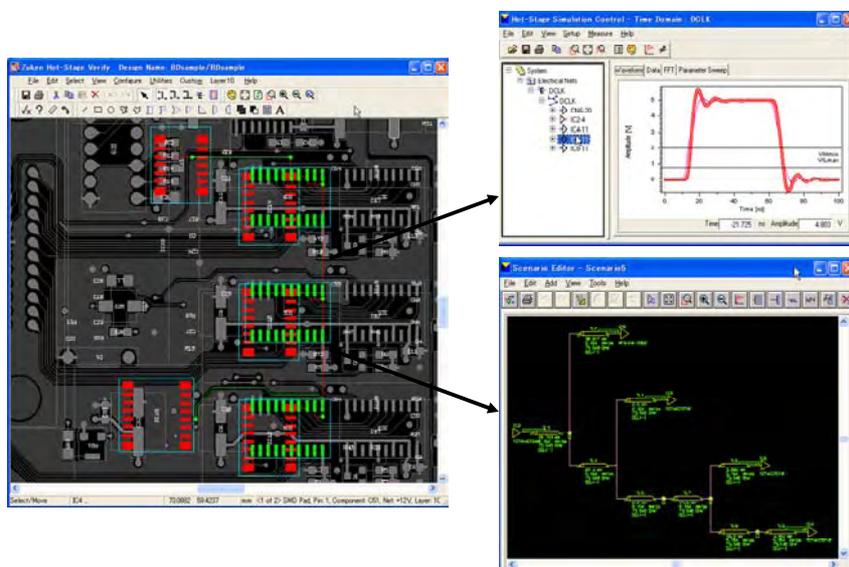
¹⁸ 視点の位置や、光源の数や位置、種類、物体の形状や頂点の座標、材質を考慮して陰面消去や陰影付けなどを行い、グラフィック表現を行う処理(IT用語辞典 e-Word 参照)。

¹⁹ 物体の表面の質感を表現するために貼り付ける画像。同じ立方体のグラフィックでも、金属のテクスチャを貼り付ければ金属片に見え、木目のテクスチャを貼り付ければ木片に見える。(IT用語辞典 e-Word 参照)。

²⁰ 注15と同シンポジウムの、日産・大久保宣夫最高技術顧問の基調講演資料より引用。

ティ(信号精度、SI)やエレクトロマグネティック・コンパティビリティ(電磁環境適合性、EMC)²¹に関するものである。今日の電子機器に搭載されるマイコンの周波数が上がるに連れて、今まで単純な抵抗値ゼロの導体として扱われていたプリント基板の配線パターンが、コイルやコンデンサ、抵抗などの成分を持つ、見えない回路を構成することになり、隣接するパターンに信号が漏れたり、信号がスムーズに導体の中を流れないために、波形に乱れをおこすなどの問題を発生している。ある水準までこれを抑え込まないと、部品ロットのバラツキなどで動作不良をおこすこともあり、製品出荷に関わる問題に発展するため、今日の回路設計者が最も注意を払っている設計のひとつである。これがSI(Signal Integrity; 信号精度)設計であり、解析による伝送線品質の確保が急務となってきている(図10)。

[図10] SI設計ツールによる仮想的な信号の観測・検証



もうひとつの課題は EMC (電磁環境適合性)である。これも SI と同じく、マイコンの高速動作や低電圧化、部品やプリント基板の小型化により、電磁波の影響を受けやすくなっていることから、ここ数年大きくクローズアップされてきている課題である。電子機器の外来電磁波に対する耐性(EMS、

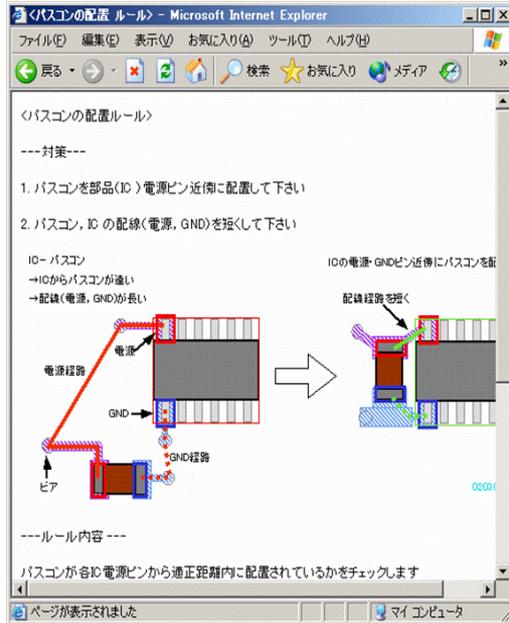
Electro Magnetic Susceptibility、イミュニティ)や、電磁妨害波 (EMI, Electro Magnetic Interference、エミッション)が他の装置に影響を与えないことを、電磁環境両立性(EMC、Electric Magnetic Compatibility)と呼び、自動車や家電を販売する際には、IEC による国際的な標準規格だけでなく、各国の規格²²に準拠することが求められている。しかし従来、この EMC 確保についてはあまり重要視されておらず、問題が発生したときにフィルタなどの対策部品を回路に挿入したり、あるいは筐体にシールドを施したりと、開発

²¹ 回路の動作速度が高まるにつれ重要な課題となっている SI/EMC 設計は対で語られることが多いが、ビジネス的には全く別の課題である。高速回路の動作整合を取ることを意味する SI(Signal Integrity)は Performance & Quality Test であり、目標値、基準値はメーカーが決定する。一般的に評価対象値が目標値(理想値)に近づくほど、性能や品質が向上し競争力を持つ。一方回路から発生するノイズへの対策を施すための EMC(Electric Magnetic Compatibility)は、Compliance Test (法令適合評価)であり、目標値、基準値は「法令」が決める。基準値を達成するか否かだけが問題であり、基準値に合格すればそれ以上の対策は不要コストでしかない。

²² IEC (International Electrotechnical Commission) による標準規格。その他日本では VCCI、米国では FCC、欧州では EN、中国では GB 規格など各国の規格、規制がある。

の後半において対症療法が行われてきた事実がある。

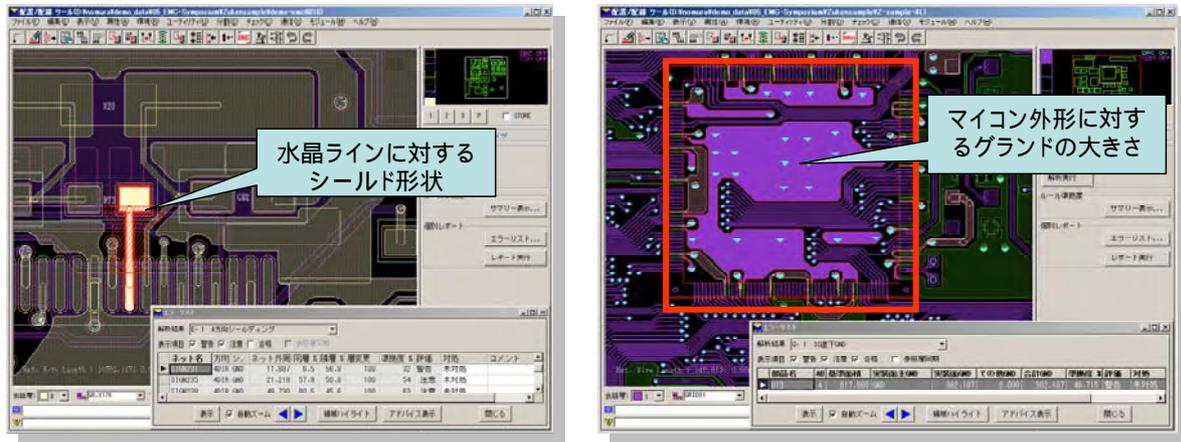
【図 11】 EMC 設計ナレッジのデータベース化



これをフロントローディングするために、EMC ルールチェッカーの利用が進んでいる。熟練の EMC 設計者は原理的、経験的に、ノイズを抑制しやすいレイアウトや対策部品の巧い使い方を心得ており、そのノウハウをデータベース化²³したもの(図 11)を、回路設計データと照らし合わせることで、EMC 設計上トラブルとなり得る基板上的の問題箇所を自動抽出することができる(図 12)。

この設計検証のベースは演繹的な解析ではなく、あくまでも帰納的なチェックであるため、悲観的すぎる結果やまたその逆もありうるが、設計基準をあるレベルまでに平準化することが可能であり、このフロントローディングにより、試作からの大きな手戻りを防ぐ事が出来る。

【図 12】 EMC 設計上問題となる箇所を検出している例(左:水晶ラインに対してとるべきシールド長さが不足している 右:マイコン外形に対して直下のとるべきグランド面積が不足している)

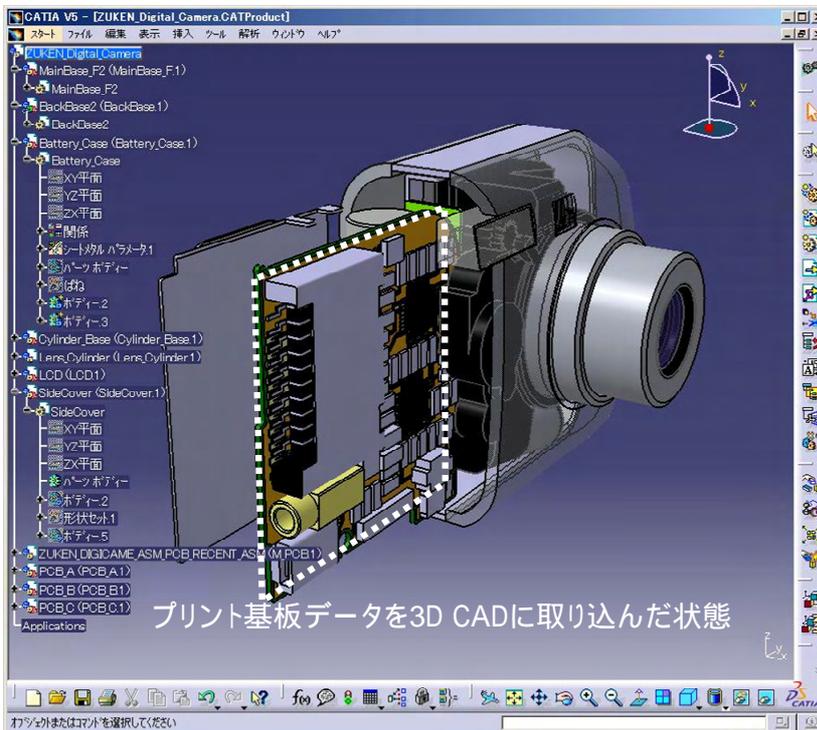


ナレッジベースを用いた設計検証は、EMC 設計だけでなくプリント基板の製造性検証でも行われている。これは DFM(Design For Manufacturing)と呼ばれており、プリント基板そのものや、アセンブリ(部品実装)の歩留まりに問題がある設計に対し、ルール化された製造知識に基づいてチェックを行い、フロントローディングを実現している。

²³ 図研の EMC アドバイザでは、NARTE(National Association of Radio and Telecommunication Engineers Inc.) 資格者による 39 種類の EMC ナレッジがルールデータベースとして提供されている。

一方、DMU(Digital Mock Up)に関しては、自動車に比べればまだまだ緒についたところであるが、モバイル製品など小型製品を開発している企業から、その導入が始まっている。今日の携帯電話や携帯プレイヤーなど、究極の高密度実装機器では、プリント基板アセンブリと外装の取り合いが数十ミクロンのレベルに達しており、試作して初めて干渉が判明するようなことが頻発している。これら干渉をフロントローディングすることで、増大する試作からの手戻りコストや時間を大幅に削減することが狙いである。製品の物理的な大きさは異なるものの、その狙いは自動車と同じところにある。

[図 13] 3D CAD でプリント基板データをソリッド化



再び話を CAE にもどすが、この DMU と CAE を組み合わせで発展させようとしているのが、エレクトロニクス製品の 3 次元解析である。今日の複雑化がすすむ製品においては、もはやプリント基板や筐体単体で行う検証は意味がなく、熱や強度の検証は、外装も含めた製品全体で行う必要がある。その際に、解析の要となるのがプリント基板である。効果が最も期待されているのが熱解析であり、電子部品から発生する熱がプリン

ト基板を通じてセットの中でどう分布するのか、それをどう放熱するのが効果的かなどについて、検証手法や環境構築が試行されている(上野、2007)。

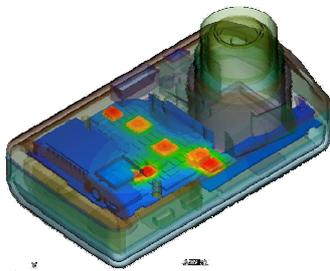
熱解析も含め、今後エレクトロニクス製品の 3 次元設計がすすむに連れて、有効性が高まるであろう、代表的な CAE について図 14 に示した。また、前述した EMC 設計についても、基板単体では検出できない問題が多い。セット全体の中で、検証するべきであり、CAD / CAE ベンダー各社は筐体も含めた EMC 設計支援環境の開発に向けて、3 次元のルールベースを整理し、それを適用できる最適な 3 次元設計モデルを検討中である。詳しいことは、次章で詳述する。

しかし、これらベンダーが提供するエンジニアリング IT が、全ての製品開発に適用できるわけではない。安全や信頼性を最重要視する自動車の電装設計が、枯れた技術や部品を採用することに対し、旬が短くコスト競争の厳しいエレクトロニクス製品では、そのビジネス構造上、部品メーカーや製造機器メ

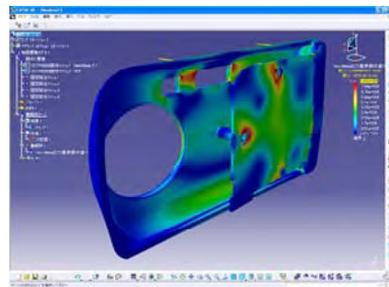
人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

カーなどを巻き込んだ先端技術の取り込みを、常に行わざるを得ない。したがってこの先端技術に対し、その時々において CAD/CAE/CAM ツールが追いつかない事態が発生する。例えば、携帯電話などで採用されつつある、電子部品をプリント基板内に埋め込む 3 次元実装を、CAD で本格的に設計支援するためには、データベース構造はもとより寸法精度の拡張などが必要となる。回路の高速化についても同様であり、各種シミュレータがここ数年長足の進歩を遂げているにもかかわらず、最先端の製品化技術は更にその一歩先を走っている。EDA (Electronic Design Automation: エレキ系 CAD を含むプリント基板設計のツール) ベンダーは、「製品メーカー」ではないため、製品開発のための新技術に先回りすることは難しいにしても、一旦出現した技術に対して、追いつく時間を更に縮めることが、「デジタルモノづくり」を実現支援するための使命であろう。

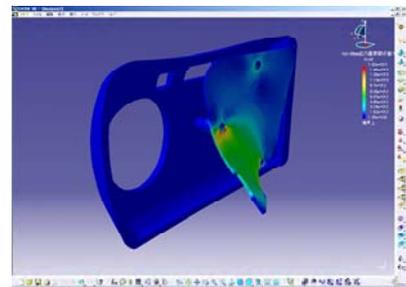
[図 14] エレクトロニクス製品開発で利用される CAE



熱伝導・流体解析...セット内における熱ストレスの影響確認



強度解析...外部ストレスのプリント基板に対する影響確認



振動解析...筐体のねじれ振動が半田接合部へ与える影響確認

以上、電機業界における CAE 及び DMU の現状を説明したが、この IT 活用全般に関して、藤本 (2003) は、以下のように指摘している。「先端的な IT を持つことは、開発期間短縮競争に勝つための「必要条件」ではあるが、「十分条件」では決してない。IT がそれ単独で、競争力の企業間格差に影響を与えるというのは、多くの場合、幻想であり、結局、製品開発の問題解決タスクに対して深い知識と高い「ものづくり組織能力」を持つ企業のみが IT 活用に成功し、パフォーマンス向上に結びつけることができたのである。自動車業界が、1990 年代終わりには欧米企業に開発リードタイムで圧倒的な差をつけることができた基本は、地道な「統合型組織能力」の構築と改善であり、むしろ IT の導入によって組織能力の差が増幅し、競争力の差となって顕在化する。」

この命題は、エレクトロニクス業界のケースにも当てはまる。単に CAD/CAE/CAM ツールを導入するだけで、自動的に開発効率が上がるわけではないことは、各社とも理解しているのだが、これらエンジニアリング IT を活用するためのリソースや仕組みを開発組織内にきちんと確保している企業は少ない。これは前述した、先端技術に対するツールの能力不足を差し引いたとしても、自動車業界と比べて相対的に遅れている。

数多くの企業が「デジタルものづくり」を経営戦略に位置づけており、製品開発への IT 活用について、

その是非を議論する段階はすでに終了している。今からはいかにして効果的にこれを製品開発に実装するかが課題であり、そのためにも経営側の明確なコミットメントを得て、IT 部門と開発現場およびベンダーが三位一体となり、環境構築をすすめる必要があると思われる。

3.4 PDM / PLM について

自動車一台、数万点にも及ぶ部品とそのアセンブリの設計を、大規模なチームで長期間にわたりすすめて行くためには、CAD データに対して適切に排他制御(図 15)をかけると同時にバージョン管理を行わなければならない。対象となるファイル数からしても、これを人手で管理することは不可能であり、設計情報をコンピュータ上で管理する PDM (Product Data Management) システムが 1990 年代の始めに登場した。本来、PDM システムが目指していたところは CAD データ管理にとどまらず、その名の通り「製品情報管理」全般を行うところにあっただが、その後もデータや図面を管理することから大きく脱皮することは無かった。一方、電機設計環境において、設計データは基板と部品の 1 階層という単純な構造であり、チーム設計もせいぜい数人レベルで、PDM による CAD データの版や構成を管理する必要性が低いことから普及せず、むしろ PDM の次の概念である PLM(Product Lifecycle Management)²⁴に近いソリューションが当時から求められていた。

エレクトロニクス製品には、回路(PCB アセンブリ)だけでなく、メカ・アセンブリも重要な構成要素であり、ハイエンド製品になればなるほど双方にその難しさが増してくる。しかしながら相対的に見れば、製品価格や機能性、デザイン(大きさ、重さ)、省電力、高信頼性など、製品競争力の主たる要素は、PCB アセンブリに依存しているケースが多く(図 16)、したがって、エレクトロニクス製品開発において、管理すべき対象として重要なのは、PCB アセンブリのライフサイクル (PCB assembly Lifecycle Management)であるという前提に立ち、以下エレクトロニクス製品の PLM について、論考してみたい。

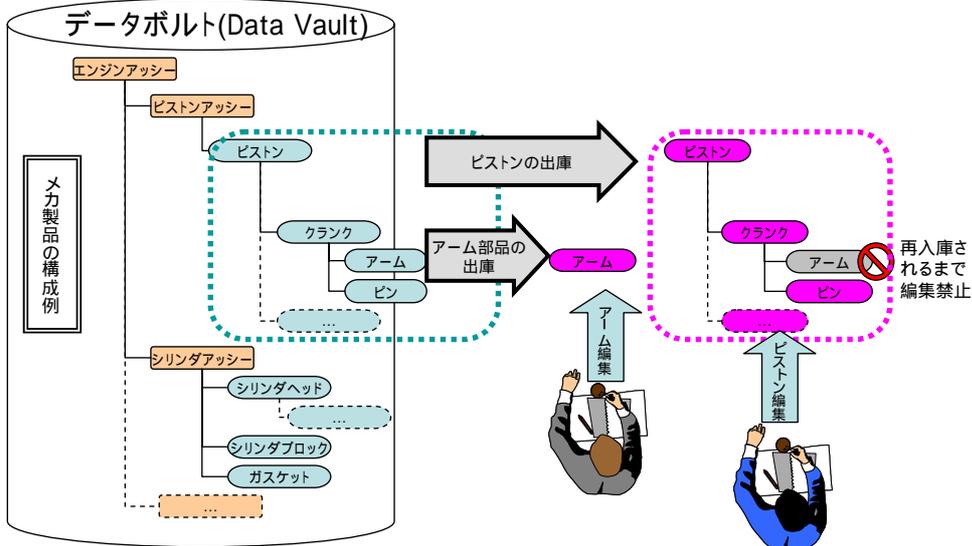
PLM の意味するところは厳密に定義されているわけではなく、使う人や場面によってその幅や役割はまちまちであるが、少なくともエレクトロニクス製品開発における大きな役割のひとつに、PCB アセンブリ部品表が挙げられる。一般的に部品表とは、前述のファイル構成や、あるいは製品の構成などが想起されるため、それは PLM というよりはむしろ PDM の範疇ではないかと思われるのだが、エレクトロニクス製品開発においては、この部品表がものづくりの源泉情報である設計情報を、後段の調達や生産へ橋渡ししており、まさにライフサイクルを管理するに欠かせない重要な情報なのである。後に詳述するが、電子部品は製品の競争力を左右する命綱であるにも関わらず、基本的に外部調達品であり、そのスペックやコスト、品質は完成品メーカー側ではコントロールできない。端的に言えば、優秀なスペックを持つ部

²⁴ 製品の構想企画から設計、製造、出荷後のサポートやメンテナンスに至る、製品のライフサイクル全般を包括的に管理することで利益を最大化する経営手法。実現の仕組みとして、製品情報を軸とした製品ライフサイクル全体の統合管理環境と企業内外におけるコラボレーション環境があげられる。

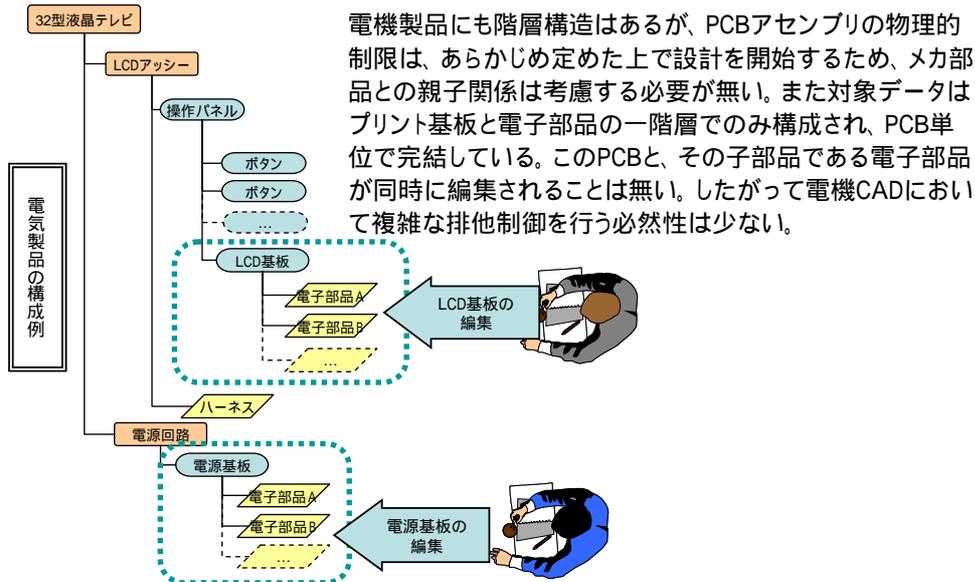
人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

品を探し出し、出来るだけ安く調達し、歩留まり良く実装することが製品競争力を高めることにつながる。この設計から製造までに行われるレビューの最小単位が PCB アセンブリである(上野、2006)。

[図 15] メカCADと電機CADデータの排他制御の違い

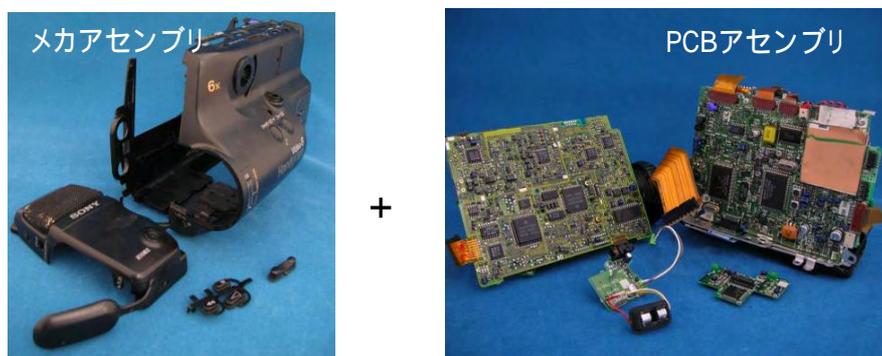


メカCADデータはアセンブリ単位および単一部品への編集を前提とした多段階の階層構造を持っており、複数の設計者でこの製品データを編集することが一般的である。そこで、誤って上書きを行うなどの問題を未然に防ぐために、特定の部品(アセンブリ)を編集する際には、当該部品だけでなく、親子関係を持つ部品に対し編集権限を適宜設定する必要がある。この例ではアームの編集と平行して上位のピストン全体を編集する際には、アームの編集は禁止されていなければならない。これがPDMの基本機能としての排他制御であり、設計データは専用のデータボルト(Vault)により、入出庫(Check in /out)管理される。



電機製品にも階層構造はあるが、PCBアセンブリの物理的制限は、あらかじめ定めた上で設計を開始するため、メカ部品との親子関係は考慮する必要が無い。また対象データはプリント基板と電子部品の一階層でのみ構成され、PCB単位で完結している。このPCBと、その子部品である電子部品が同時に編集されることは無い。したがって電機CADにおいて複雑な排他制御を行う必然性は少ない。

[図 16] エレクトロニクス製品の構成要素



エレクトロニクス製品における商品力へのインパクト、開発プロセスの複雑さは一般的に

メカ・アセンブリ < PCBアセンブリ

競争力 = 価格、機能性、デザイン(小型、軽量)、省電力、高信頼性...

制約条件 = 開発LT、コスト、ノイズ対策、実装歩留、環境規制対応...

したがってエレクトロニクス製品開発におけるProduct Lifecycle Managementを構築する上で

Part Lifecycle Management...製品に部品コストが占める割合は60%~70%、不良原因の20%は部品に依存

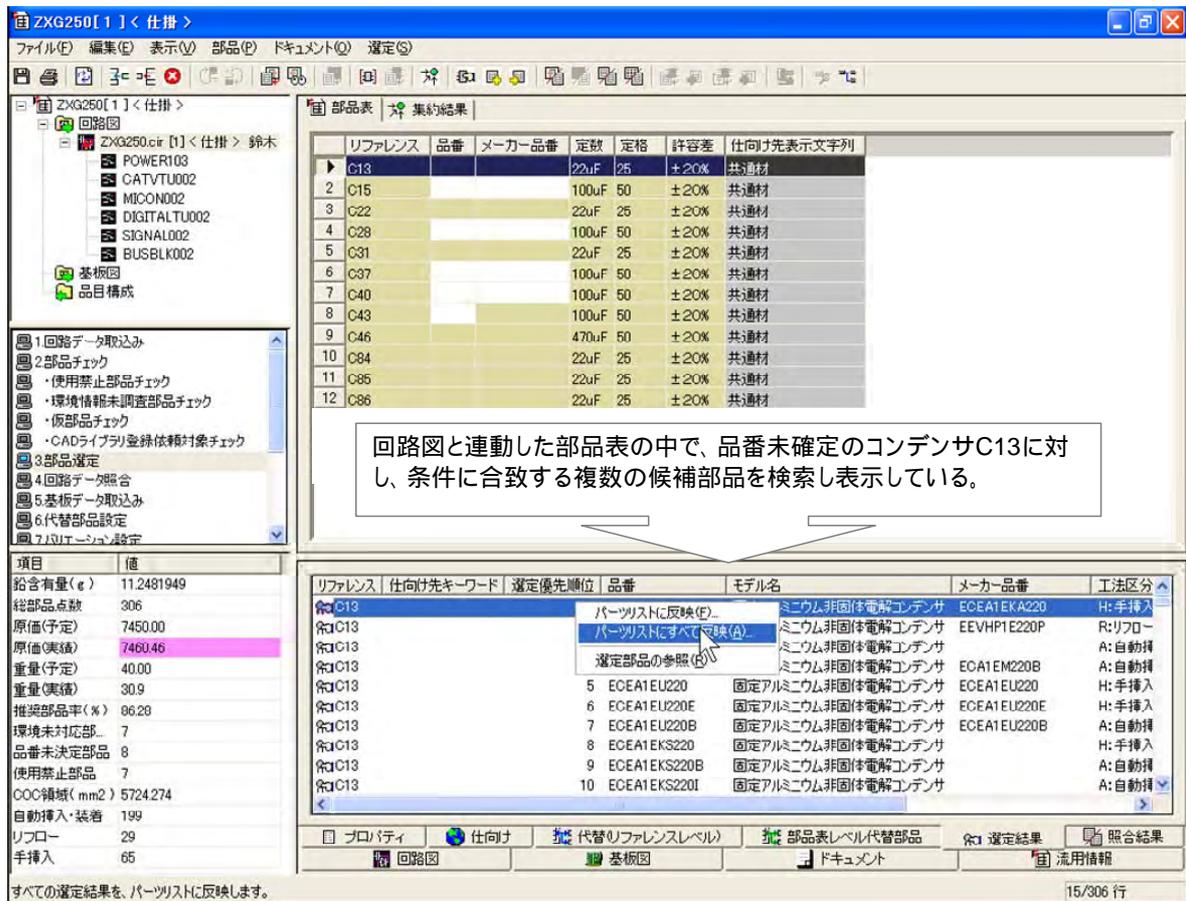
PCB Lifecycle Management...機能やデザイン、回路品質や製造性はPCB ASSYの善し悪しに大きく依存

の検討は必須

そしてエレクトロニクス製品はバリエーションや仕向地が莫大であり、コンシューマでは量産に向けて設計変更が短期間に頻発し、また産業機器では生産中止などのステータスを管理しなければならない。調達部品表や実装工程部品表などの作成に膨大な手間がかかるだけでなく、人為的なミスを避けることはむずかしい。そのためにも部品表生成を自動化することで、発注ミスによる不良在庫の増加や、生産中止部品や長納期部品の早期検出、実装工程の事前準備などの効率化を各社図ろうとしている。

この部品表生成の自動化は、開発工数の低減のみならず、標準化への誘導という大きなメリットがある。前述の通り電子部品のほとんどは汎用品であり、品種を絞り込むほど大量購買につながり、直接費、間接費のコストダウンが図れるのだが、一般に回路設計(論理設計)段階では CAD の役割は、部品の機能を決定することであり、LSI など特殊な部品を除いては、回路図上でどの部品を使うかは、通常一意に絞り込まれない。そこで、このCADと部品データベースを連動することで、回路図上に記載されている限られた部品仕様(ex.定数、定格)をもとに、コストや在庫数量、推奨ランクなどの重み付けから最適な部品を探し出し、自動決定するしくみなどが構築されている(上野、2005)(図 17)。

[図 17] エレクトロニクス製品開発における部品表の役割



次に上市後における、部品表の役割について、触れておきたい。電子部品は外部調達品であるがゆえに、メーカーの都合による生産中止だけでなく、低コスト化、品質トラブル、数量確保などの諸事情による、部品の切り替えリスクは常に存在しており、これに備えなければならない。この際に、対象の部品がどの回路にまたがって使用されているのか、逆展開して調べるためにも部品表が用いられる。部品表が、設計から調達、製造まで一貫性を持ってきちんと整備されていれば、その部品の在処について、製品単位ではなく対象の生産ロットまで絞り込むことが可能になる。ライフサイクルの長い、産業機器の追加生産やメンテナンスはもとより、部品に問題が発生したときのトレーサビリティにも部品表は必須のデータベースと言える。以上、エレクトロニクス製品のライフサイクル全般において、回路部品表の果たす役割は大きい。また現在、メカ側に圧倒的な競争の源泉がある自動車においても、今後一層の電装化がすすむにつれ、これらエレキ側のプロセス及び情報管理の重要性が高まってくるであろう。

電子部品情報管理

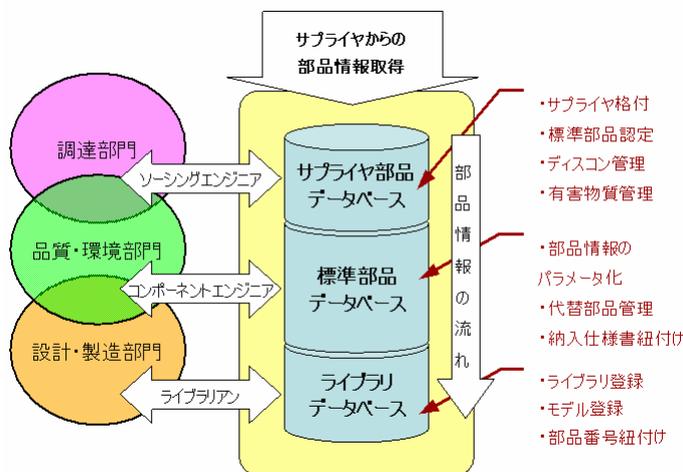
電子部品は、エレクトロニクス製品のコストの半分以上を占め、製品不良の多くに対して因果関係を持ち、

いわゆる RoHS 指令など環境への影響も大きい。つまり、エレクトロニクス製品開発の正否を大きく左右する最大の要素である。しかしながら、エレクトロニクス製品の場合、電子部品のほとんどが外部調達を前提としており、なおかつそれらのほとんどは汎用部品である。自動車業界のように製品特殊部品を作る系列部品サプライヤーを持っているわけではないため、完成品メーカー側からの支配力は弱い。以下に電子部品の特徴を示す。

- ・需給間に強い主従関係は無く、必要数量が常に確保できるとは限らない
- ・数量、価格を別にすれば、ほぼ全ての部品は誰でも買うことが出来る
- ・同じ部品、同じ数量でも代理店によって価格は異なる
- ・異なるメーカーが類似した性能の部品を供給している
- ・フットプリント(ランド)形状によって実装歩留まりに大きな差が出る
- ・日々新しい部品がリリースされていると同時に、多くの部品が生産中止になっている
- ・生産中止予定、環境負荷物質含有量、動作モデル、形状公差などの情報は一般に公開されていない

エレクトロニクス製品の QCDE (品質・原価・納期・環境対応) を上流で正しくつくりこむためにも、完成品メーカーはサプライヤーの特徴を知り、コントロールしていく必要がある。図 18 に、一般的な部品データベースの構造と役割を示した。(図 18)

[図 18] 一般的な部品データベースの構造と役割



部品データベース構築の最大の狙いは、標準化による、直間コストの削減にある。日本の総合電機メーカーは、おおよそ数百～千社の部品サプライヤーと取引があり、50～100万点の認定部品が登録されている。まず、より高度な購買戦略を立てるには、その入り口となるサプライヤー・部品データベースが重要であることがわかる。しかし、現在のところ、メーカーを横串で統合した部品カタログは存在しない²⁵ため、

各社は個別に情報を入手し、評価を行う必要がある。これは手間のかかる面倒な作業であり、このため大手メーカーでは、部品種毎にソーシングの担当者を置いていることが多い。一旦標準部品として認

²⁵ ELISNET や CAPS など、市販の電子化された部品カタログもあるが、部品ベンダー各社の HP などにくらべ網羅度や鮮度は低い。またロゼッタネットなども EDI としては利用されているが、この上で部品仕様などを供給しているサプライヤーは少ない。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

定されたものについては、設計者が検索しやすいように部品スペックをパラメータ化して入力し、また納入仕様書の紐づけや、代替部品設定などが行われ、設計者に提供される。

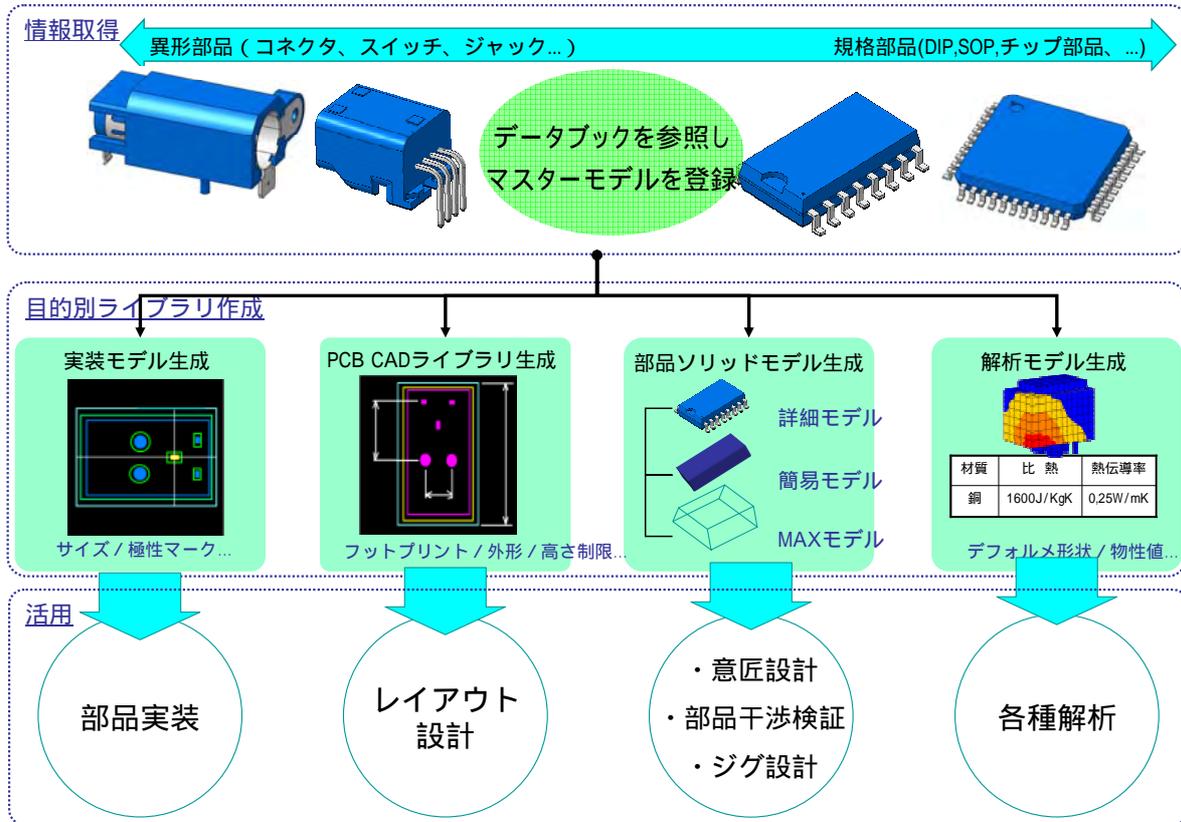
前述したとおり、この部品データベースと設計部品表を組合せると、各部品の利用頻度や、製品をまたがった出現頻度が明らかになり、より精度の高い標準部品を絞り込むことができる。これをもとにして、製品毎の標準化得点を算出し、またCADと標準部品を連動させることなど誘導の仕組みを構築することで、設計者が実績のないサプライヤーを勝手に選んだり、似たような部品の採用が抑制される。こうした部品標準化は、間接コスト削減への効果も大きい。一部品あたりの調査・認定からその品番が生産中止になるまでを管理するライフサイクルコストは、1品種あたり約 40～50 万円と試算されている。仮に年間 1000 個の部品が新規登録されるのを 10%抑制(100 個)できれば、それだけで 4～5 千万円の間接費をセーブすることが出来る計算になる。電子部品データベースの構築は、回収計算の容易な投資と言える。

電子部品ライブラリの統合

こうした部品情報活用に加え、ライブラリデータベース(図 18)の構築は CAD/CAE/CAM ツールを効果的に活用するために無くてはならない。しかし、代表的な電子部品ライブラリであるフットプリント²⁶については各社ともほぼ整備されているが、意匠や機構の 3 次元設計で使われるソリッドモデルや、自動実装機が部品の光学認識を行うために必要な部品認識形状、熱解析やノイズ解析、構造解析などで用いられる解析形状については、設計や製造、解析の各部門が各々に登録を行っており、きちんと整備されているとは言い難い。またこれら部門をまたがって形状登録を行うことは、重複作業によるロスだけでなく、登録時に原点座標や登録角度、公差の処理などの基準にずれが生じる可能性もあり、せっかくの設計上流データをそのまま使うことができない。各部門とも目的は異なるものの、元の部品形状から必要とされる情報(ライブラリ)を作成していることに変わりがないのであれば、これらの問題を解決するために、3 次元ソリッドモデルを電子部品のマスターライブラリとして位置づけ、そこから電気設計や機構設計、実装に必要な部品形状やモデルの要素を取り出して各々のライブラリを生成していく仕組みが考えられる。すでに先進的な電機メーカーでは、設計～検証～製造の各プロセスにおける IT 活用を効率化するために、物理ライブラリのワンストップデータベース構築を始めている(図 19)。

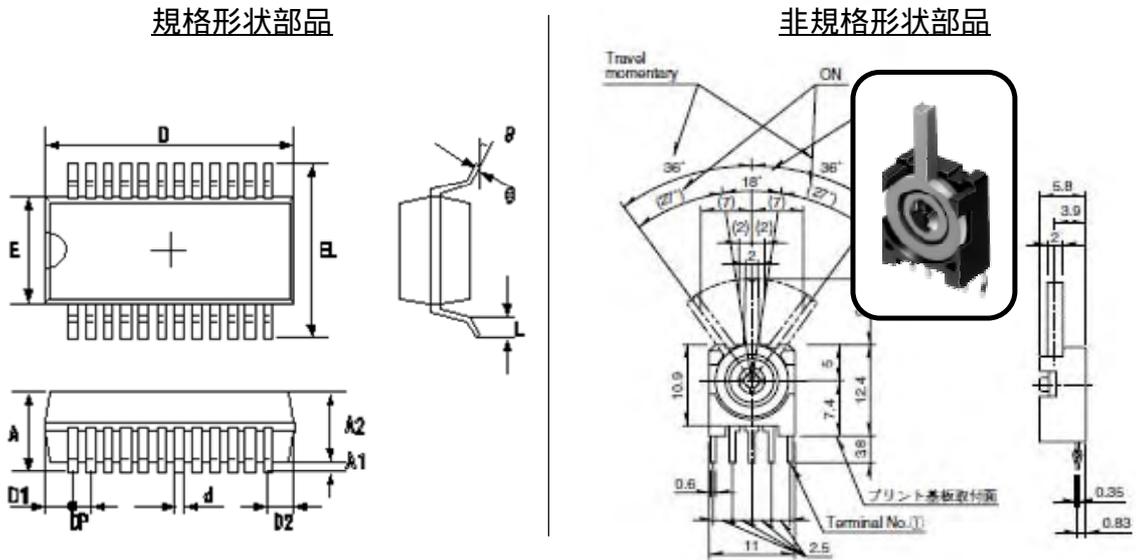
²⁶ プリント基板に形成される足跡形状で、部品リードと半田付けされる。この形状の善し悪しによって、歩留まりに数十倍の差が出ることもあり、各社の製造技術部門はその改良に力を入れている。

[図 19] マスターモデルと目的別ライブラリの作成・活用



しかしながら、3次元の部品形状を作成することは容易ではない。SOP や DIP 形状など規格化された部品については、パッケージテンプレートを用意することで比較的容易に、形状登録ができるが、コネクタやスイッチなど、特殊な形状を持つ部品については形状規格もなくテンプレートをあらかじめ用意できないため、一からつくらざるを得ない。(図 20)このような異形部品を登録するコストは1点あたり数万円～数十万円にも上り、その費用は莫大である。CAD ベンダーである(株)図研のライブラリセンターからも約 200 万点の 3 次元部品モデルが提供されているが、日々リリースされる新規部品を全て網羅することは出来ていない。

[図 20] 規格形状部品と非規格形状部品の例

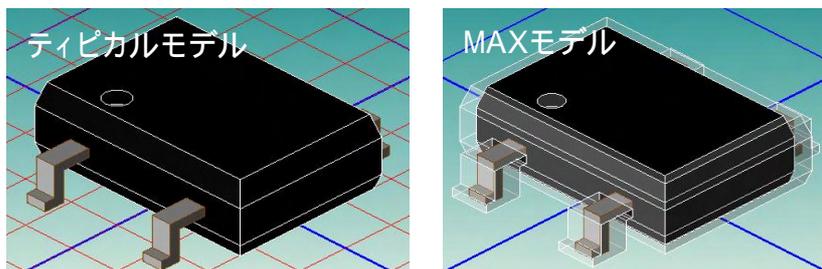


2方向検知タイプ検出スイッチ SSCFシリーズ 出典:アルプス電気HP

左の部品形状はピン数と各寸法値を変えることで、ほぼ全てのSOP(Small Outline Package)形状を表現できるモデリングテンプレートが作成可能。一方右の部品形状は、特定の部品向けにつくられているためピン数や寸法値は固定。すなわち一品一様でモデリングしなければならない。

加えて部品の寸法公差についての課題がある。通常、部品形状モデルは、Typical 値(寸法の中心値)でつくる。しかし工業製品には必ず製造上の寸法ばらつき及び公差ばらつきの許容範囲があり、精密な部品間干渉(部品どうしが物理的にぶつかること)を検証する²⁷には、公差の上限値を考慮したモデル作成の必要がある(図 21)。

[図 21] プラス公差を考慮したモデル作成



エレクトロニクス製品開発を効率化するために、CAD/CAE/CAM ライブラリの重要性は言うまでもないが、現実にはこれら部品情報やライブラリを管理してい

くのは、膨大なコストがかかっている。自動車部品と違って、電子部品は汎用品がほとんどであり、その外観上の物理形状は普遍的なものであるにも関わらず、この登録作業を、電機メーカー各社が重複して行っていることは、無駄なコストの発生を意味しており、これにより本来の製品競争力を下げている可能

²⁷ エレクトロニクス製品ではすでに数十ミクロン単位での嵌合が問題となっており、ECU などのカーエレクトロニクスも同程度まで狭小化がすすむ可能性がある。

性がある。

これら部品情報全般を解決するひとつの試みとして、半導体、企業横断的な電子部品技術情報の作成および流通に関する実用化実証プロジェクトが実施された。ECALS プロジェクトと呼ばれたこの実証実験は JEITA (社団法人 電子情報技術産業協会 Japan Electronics and Information Technology Industries Association) 主導で 1996 年と 1998 の 2 回にわたって実施され、最終的に ECALS 部品辞書が制定された。そして 2002 年には JEITA 支援のもと、一般電子部品メーカーの出資による、一般電子部品情報を ECALS 辞書ベースで配信する事業会社として PartsWay が設立され²⁸、また、半導体部品の情報提供会社のエリスネットもこの辞書に準拠してコンテンツ作成と配信を開始した。しかしながらこの ECALS においても CAD/CAE/CAM で用いられるライブラリに関する規格や情報流通についての取り決めは無く、前述の PartsWay やエリスネットからも ECALS ベースの部品情報は入手出来るものの、ライブラリの配信は行われていない。ECALS の是非はともかくとして、デジタルモノづくりによる製品開発競争力を高めるために、部品情報やライブラリの取得をもっと効率化すべきであることは間違いない。これはエレクトロニクス製品にとどまらず、電子回路の搭載が増加している自動車の開発においても同様と思われる。特に今後活発化するデジタルモノづくり環境実現のためには、形状情報だけでなく物性情報や動作モデルなどの供給可否が、自動車メーカーや電機メーカーにとって今後サプライヤーを選択する際の重要な判定材料になることは間違いない²⁹。

一部の半導体集積回路をのぞき、日本の電子部品は世界で圧倒的なシェアを持っている。世界的な競争に直面する日本の完成品メーカーと、それを支える電子部品メーカーは、同じ日本という土壌を上手く活かし、業界全体で、部品情報流通の規格や標準化、その役割分担について、再検討するときに来ていると思われる。

3.5 CAD ベンダーの変遷

次に、CAD ソフトの供給企業の変遷について簡単に分析しておこう。

自動車用の CAD ベンダー

一般に欧米の CAD は、欧米ユーザー企業の分業重視型の製品開発プロセス(ステップごとに分業し、その間での完全な設計情報の一方向的な受け渡しを重視する)を暗黙の前提に開発される傾向があり、

²⁸ 同社は 2007 年に清算し、半導体の部品情報を配信している株式会社エリスネットに、事業を継承した。
²⁹ 自動車産業においても、たとえば日本のある大手企業は 1 台あたり数週間をかけてライバル社の車輛を分解し(テアダウン)構成部品を詳細に分析しているが、工数や予算の制約ゆえに分析対象モデルの数は年間十数台にとどまる。しかし単体部品の形状情報は、工数をかければ相互に知ることのできるものなのだから、自動車の子部品(車体部品)のライブラリ化は、商品力を落とさぬ範囲での部品の企業間共通化にとって意味がある試みではないかと考えられる。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

その意味では、必ずしも決して日本の擦り合わせ型アーキテクチャ製品のチームワーク設計に向いているわけではない(藤本・東京大学ものづくり経営研究センター、2007)。にもかかわらず、自動車設計のITツールである3次元CADのパッケージは、ほぼ世界市場全体が欧米のCAD(例えばCATIA, UG, Pro/ENGINEER)に席卷された。

日本の自動車メーカー自身による内製CAD(例えばトヨタの「統合CAD」)や日本のベンダー(例えばトヨタケラムや日本ユニシス)によるCADも長らく健闘したが、自動車の開発や部品調達を世界規模で行う流れは必然であり、いくらソフトウェアとして優秀であったとしても、世界中でそのソフトが認知され、また販売・サポートされる環境ができあがらないと、いわゆるネットワーク外部性の存在により、グローバルな開発や調達を支援するための条件は満たせない。そういう意味で、今生き残っているCAD専門メーカーは、ソフトウェアの開発だけでなく、拠点の開発についても少なくない投資を続けている。

しかしこれらのCADベンダー、とりわけ欧米のCAD/PLMベンダーにはベンチャー的な要素が多く、その継続性や一貫性についての懸念が専門家の間でも指摘されている(日経新聞07年2月24日付)。確かにこの3年間を見てもMatrix-One(2006年Dassault Systemesが4.08億ドルで買収)、UGS(2007年SIEMENSEが35億ドルで買収)、Agile(2007年Oracleが4.95億ドルで買収)、CoCreate(2007年PTCが250万ドルで買収)など、CAD、PLMベンダーの大型買収が続いている。買収による製品の統合・整理などにより、ベンダーの製品戦略が変わることは避けられず、各社の開発ITに影響が無いとは言えない。

M&Aの有無に関わらず、ユーザーの心配事は、CADベンダーが如何にユーザー企業の開発現場の声を汲み取ってシステムに反映してくるかという点にある。これは電機も自動車も変わらない。理想としては、CADベンダーが、ユーザーの開発プロセスを正確に知っているのが望ましい。

しかし、CADというソフトウェア自体が非常に複雑になってきている現状からすれば、全ての面に関してそれを望むことは難しい。CADの機能やシステムの開発を行う際にも、昔と違って実現手段は無数にあり、システム化技術の見地から最適なものを選ぶとしても、深くかつ広範な知見が求められる。専門家の間でも、CADベンダーのソフトウェア技術者が、ユーザー企業の製品開発プロセスを知らないとの指摘は聞かれるが、ユーザーの開発プロセスを深く理解し、なおかつソフトウェア開発技術に長けている、というようなスーパーな技術者はそういないし、それを育てることも極めてむずかしい。

もちろん開発プロセスを知っているに越したことはないのだが、はたして現状のプロセスが正しいのかどうか、本当はどうあるべきなのかについてきちんと議論できることの方が重要だと思われる。ユーザーの要求がいつも、必ずしも正しいわけではなく、顧客に密着して話を聞いたとしても必ずしも良い設計支援ソフトが出来るとは限らないからである。これは、ある程度の実力に達した技術者が落ちいりやすい陥穽である。本当に効果の高いシステムをつくるには、ユーザーとソフトウェア開発者の間に位置するSE(System Engineer)の存在が重要になってくる。SEは、ユーザーの開発プロセスや言葉をきちんと理解し

ているのは当然として、そのみならず、あるべき姿 (To Be) についての構想も持っていなければならない。このような SE が、ユーザーと共に現状分析 (As Is Analysis) を充分に行った上で設計開発支援ソフトを基本設計し、実現性 (Feasibility) や性能 (Performance) を試しながら数多ある開発方式の中から、最適な技術を決めていくのがベストな方法と言える。

電機用の CAD ベンダー

次に、電機業界における CAD ベンダーの変遷をみてみよう。今日電機 CAD は EDA (Electronic Design Automation) と呼ばれる市場³⁰を形成しており、半導体設計ツールが金額的に大きなシェアを占めているが、電機 CAD の原点は第 3 章でも述べた通り、プリント基板設計 CAD ツールにはじまっている。まず第 1 に、日本のエレクトロニクスメーカー各社は、元来、自動車業界以上にエレキ CAD を内製していた³¹。しかし 80 年代後半以降、電機業界全般の収益性が下がる中、プリント基板の技術革新が相次いだことなどを契機として、多くの開発現場で、自社開発 CAD から市販 CAD への移行が始まった。

自動車の場合と同様、エレキ系の市販 CAD の多くは欧米で開発されたものであった。しかし欧米のエレキ CAD はメカ CAD と同じく、開発プロセスを分業化し、開発ステップごとに設計情報を完成させて次のステップにつなぐ事を前提としている。また、欧米のエレキ CAD の指向するところは、何よりもまず自動化であった。一方日本のユーザー企業は、擦りあわせ的な相互調整が設計プロセスの前提であり、なおかつ匠の技としての設計術を大事にしている。このため、ユーザーは、欧米製 CAD の自動配線機能などに興味は惹かれたものの、当時のコンピュータ性能やソフトウェアの出来から、欧米の PCB CAD が日本を席巻することはできなかった。買収などのケースを除いては、1980 年代前半に日本にいた欧米系の CAD ベンダーは今日 1 社も存在していない。

自動車業界では、組立メーカーが指定した CAD データで設計することを条件としているため、サプライヤーは一斉に同じ CAD を導入する傾向があるが、しかし、少なくとも日本の電機業界においては、完成品メーカーのサプライヤーに対する影響力は、自動車に比べれば弱い。また同じ会社でも事業部が違えば異なる CAD を採用することもめずらしくなく、自動車メーカーのように、1 社で同じ CAD を何千台も導入するというような集権的な決定がなされることはあり得ない³²。エレキ CAD の場合、多くても 1 事業部あたり 100 台 ~ 200 台程度であり、またサプライヤー³³では更に少なく数台 ~ 10 台程度のユーザーが

³⁰ 米 Gartner, Inc. Dataquest, Market Trends: Electronic Design Automation, Worldwide, 2005 によると 2005 年の EDA 世界市場規模は約 40 億ドル。そのうち約 20% 程度が日本市場と推察される。

³¹ 80 年代までは松下、日立、東芝、三菱、日本電気、シャープ、富士通など大手電機メーカーのほぼ全てがエレキ CAD を開発しており、一部は外販も行われていた。

³² 欧米の電機メーカーの IT に関するガバナンスは、日本とは少し様子が異なり、例えば携帯電話メーカーなど、グローバル規模でビジネスを行っている会社では、社内の統一はもちろん、世界中のサプライヤーに対しても、同じ CAD を使うことを取引の条件としており、この点自動車メーカーに極めて近い。

³³ 完成品メーカーに対する主なサプライヤーは、設計ビューロ、基板メーカー、電子部品 (ユニットも含む) メーカー。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

大半を占める。日本の電機業界における CAD ビジネスは、地道で丁寧な営業活動によってのみ成り立つ。例えば、前述の図研の CAD が国内を寡占しているのは、完成品メーカーだけでなく、プリント基板メーカーや設計会社など周辺サプライヤーに対し、永年にわたって営業努力を重ね、これらの多様なユーザー企業に浸透してきた結果と言える。

CAD のグローバルサポートについては、電機業界は開発活動が拠点ごとに完結しており、また現地法人への統制力も強くないことから、同じ CAD 環境を世界中で提供することは、そう強くは求められてこなかった。しかし今日では、世界市場でのシェア獲得のため、製品を世界同時立ち上げすることは必須要件となってきている。そのため、生産拠点のアジアだけでなく、世界中の開発センターで日本と同じ CAD を使い、並列して設計を行うことが各社で求められている。この経営環境に対し、システムとサポートを世界中で供給できるベンダーだけが、選択される時代となった。この点は自動車向け CAD と状況は似てきている。

4. 自動車におけるエレキ設計とメカ設計

以上の分析を踏まえて、自動車作業におけるエレキ設計とメカ設計の対比と、その融合化の可能性について、若干の考察を加えることにする。

4.1 自動車の電子制御の進展

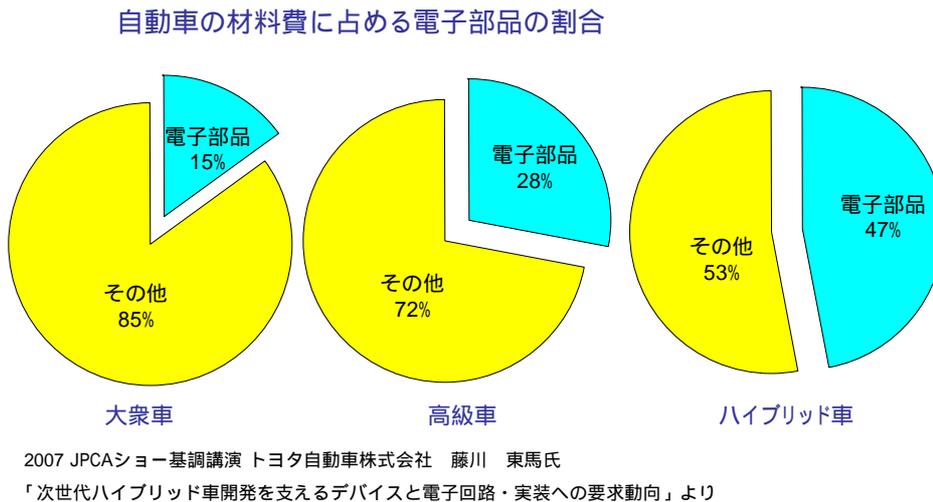
自動車のエレクトロニクス化が急激に進んでいる。下に、トヨタ自動車における、車 1 台あたりに占める電子部品の割合を示しているが、ハイブリッド車においては、約半分が電子部品となっており、構成比率だけを見ればすでに電子機器と言っても良いぐらいである(図 22)。

もともと自動車の高度なエレクトロニクス制御は、燃費向上や排ガスのクリーン化など、エンジン性能向上を目的として始まった。マイコン搭載回路によりエンジンを制御するこの装置は、もともとは ECU(Engine Control Unit)と呼ばれ進化してきたが、今日、ECU はエンジンをコントロールするだけでなく、自動車の様々な挙動をエレクトロニクスで制御する意味の Electronics Control Unit として、数多く搭載されている。

現在の車載 ECU の中では、予防安全システムの制御にもっとも高度な機能と品質が見られる。事故を回避するために、一瞬で認識、判断、操作を人間が行うには自ずと限界があるため、メカトロニクスによりこれらを補助する仕組みが開発されており、人間の知覚の代わりに、各種センサーやカメラ、レーダなどが状況の認識を行い、それをもとにコンピュータが状況判断を行う。例えば車間やカーブでの傾き、速度をもとに、追突やスピン、異常な軌跡が発生することを危険予測した場合には、ドライバーが対応しなくても、サスペンションを制御しながらブレーキをかけシートベルトを巻き上げる、またスピン防止のた

め車輪の回転制御や操舵を行うなど、一連の複雑な操作が ECU(エレキ)からの指令と機能部品(メカ)の動作によって一瞬にして処理されている。

[図 22] 自動車の材料費に占める電子部品の割合



1970 年代までの自動車は、基本的には人間が制御するメカ製品であり、その商品価値は、ボディ・デザイン、内装デザイン、車両レイアウト(機構部品の配置)、エンジン本体の設計、サスペンションの形式やジオメトリー(形状)など、メカニカルな設計から生み出されることがほとんどであった。しかし今日の自動車において、人間による制御(運転)を補完する形で動力性能、乗り心地、利便性、安全性能、燃費向上、排ガス抑制などの制御を行っているのはエレクトロニクスであり、制御系の電気設計やソフトウェアの出来の良し悪しが、その付加価値に大きく影響している。環境・燃費問題への対応でハイブリッド車や電気自動車が増加すれば、この傾向はさらに強まるであろう。ECU、すなわち自動車の電子制御システムは、まさに「設計者の意図(コトバで表現された自動車)を詰め込む箱」であり、車体内外装のデザイン(意匠)と並んで、これからの車づくりにおける付加価値の最大の源泉となっているのである。

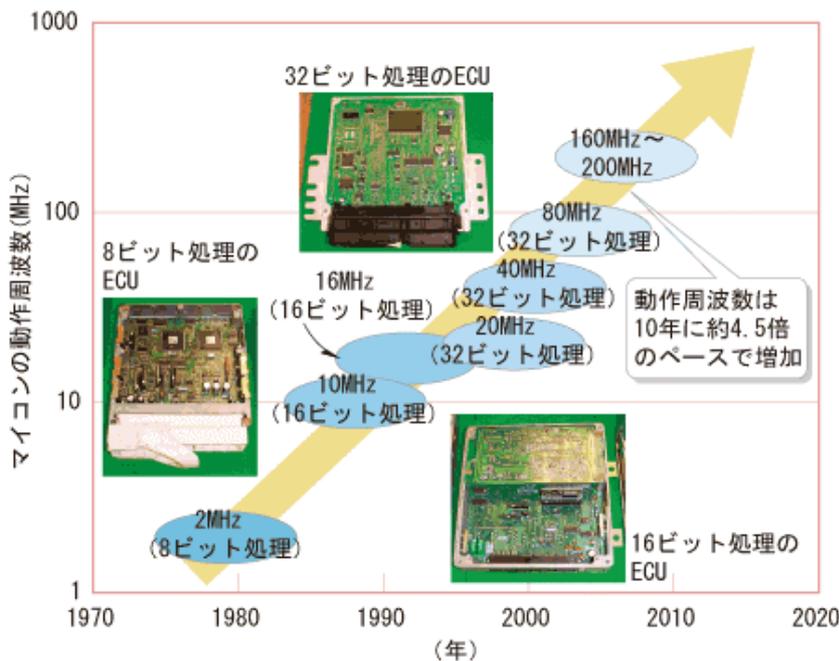
4.2 自動車用 ECU の変遷と高度化

前述のとおり、今日の自動車開発においては、電子制御系(ECU)の高度化がすすんでいる。回路の高度化はもちろん、複雑な制御を行うために、ソフトのコーディング量は 1994 年モデルと比べると、2007

年モデルでは約 16 倍にも増加³⁴していると言う。

ソフトウェア開発が自動車開発のボトルネックになってきており、今日この成否が直接クルマづくりの成否につながるといっても過言ではない。そしてソフトウェアが大規模化するにしたいが、これを動作させるための CPU やメモリも高速、高容量になってきている。図 23 は、その ECU に搭載されているマイコンの大規模化、高速化の変遷を示している。

[図 23] ECU に搭載されているマイコンの大規模化、高速化の変遷



10年で約4.5倍になる動作周波数 (資料:ルネサス テクノロジ, 写真:日立製作所)日経BP Tech-On!用語辞典より

また ECU は、回路が大規模化しているだけでなく、車一台当たりの使用数も増加の一途をたどっており、今日、高級車クラス (例えばトヨタ・クラウン) では、100 個近く搭載されている。

ECU が増えれば、自ずと配策するワイヤハーネスが増加し、その機能検討や調整といった作業が一層複雑になり、車体軽量化への取り組みにも、大きく逆行することになる³⁵。いずれにせよ、これ以上 ECU が増えても、これらの「箱」を

納める空間はほとんど残されていない。

こうした電子制御系の複雑化・重量化・スペース不足の問題を解決するためには、ECU の機能を整理して統合することと、ECU そのものの小型化が必須となってきており、家電などと同様に、半導体の集積度向上による部品点数の削減、およびプリント基板の高密度化が自動車の ECU 設計においてすすんでいる。そして自動車の半導体は、家電のそれに比べ特殊性がある。例えば、トヨタ・プリウスには、数十 KW の大型モータが搭載されており、これを駆動させるインバータ回路には最大 200A の大電流が流れ

³⁴ 2007 年 JPCA ショーでのトヨタ自動車株式会社の基調講演・「次世代ハイブリッド車開発を支えるデバイスと電子回路・実装への要求動向」より。ナビなどここ数年でコーディング量が急増したものを除いた数値。

³⁵ 中型セダンのハーネス総延長距離は 1500 メートル、重量は 40~50kg にもおよび、部品としてエンジン、シートに次ぐ重さ。一方車体の軽量化は 100 グラム単位の取り組み。

るため、小型でかつ耐高電流、耐ノイズ性を高めた IC を開発しなければならない。トヨタ自動車は、自社の半導体工場³⁶を持っているのは、これら自動車特有のスペックを満たす高集積・高品質の半導体を確実に手に入れるためと考えられる。また半導体の集積と平行してプリント基板の高密度化もすすんでいる³⁷。例えばパワーコントロール系の ECU 回路は、大電流を扱うため、密度を上げるとパワーデバイスが発熱し、回路にダメージを与えてしまう。この熱を逃がすために、自動車向けに特別な、アルミなどの金属をベースにした放熱対策基板をプリント基板メーカーと開発し、採用している³⁸。しかし、全てにおいて、このような特殊な半導体や基板が使われているわけではない。回路の規模と要求品質のトレードオフにより、最適なものが選択されていることについて、以下に述べる。

ECU の回路規模と要求品質

[図 24] 自動車の電子化に関する品質と回路規模の関係

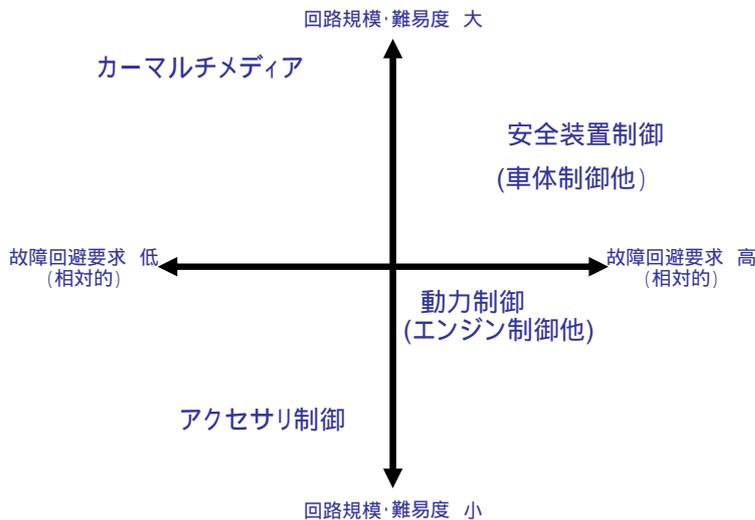


図 24 は、自動車の電子化に関する品質と回路規模の関係を図示したものである。縦軸は回路やソフトの規模や難易度、横軸には反応速度や信頼性など、回路設計に要求される品質・機能の相対的な高さを示している。例えばエンジン制御とカーマルチメディアを比較すると、動くという基本機能を司っているエンジン制御は、リ

アルタイム性や故障への信頼性など、より高い回路性能が求められる。

一方、ナビなどのカーマルチメディアは、故障回避要求のレベルは相対的に低い反面、対顧客機能の複合化などにより、回路や組み込みソフトの量は、エンジン制御よりもはるかに複雑で大規模となっており、しかもコストダウンへの要求は厳しい。そして第 1 象限に位置する安全装置制御は、人間の生命に関わる車体制御部分であることから、回路やソフトウェアは大規模かつ複雑であり、しかも最高レベルの回路性能が要求される。

上図に示した各制御系の位置づけは、そのまま、各 ECU に搭載される電子部品やプリント基板に対

³⁶ 広瀬工場は、IGBT などのパワーデバイスや車載用 IC 開発に 1000 名以上がたずさわっているトヨタの主力半導体工場。

³⁷ 2004 年と 2008 年モデルで比較すると ECU に搭載されているプリント基板の実装密度は 4 倍に上がっている。

³⁸ コンシューマ製品の基板導体厚が数十ミクロンであるのに対し、これら放熱を目的とした基板の導体厚は数百ミクロンから数ミリになることもある。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

する性能要求のレベルに投影される。例えば車体やエンジン制御の半導体は、車の信頼性や特性を決める重要な部分であり、その高度な要求機能や仕様を満たすために、特殊設計のカスタム IC を新規に開発する事が多い。一方、カーマルチメディアは、平均的な ECU よりも回路規模は大きく、搭載される部品も多いが、必ずしもカスタム IC をおこすわけではなく、要求機能や仕様に適合するならば、むしろコストの低い汎用 IC が使われる。これはプリント基板についても同様で、設置条件が過酷でなおかつ高い動作品質が求められるところには、高価であってもアルミ基板など特殊なものが使われるが、そうでなければコストを優先して安価な紙フェノール基板なども採用されている。

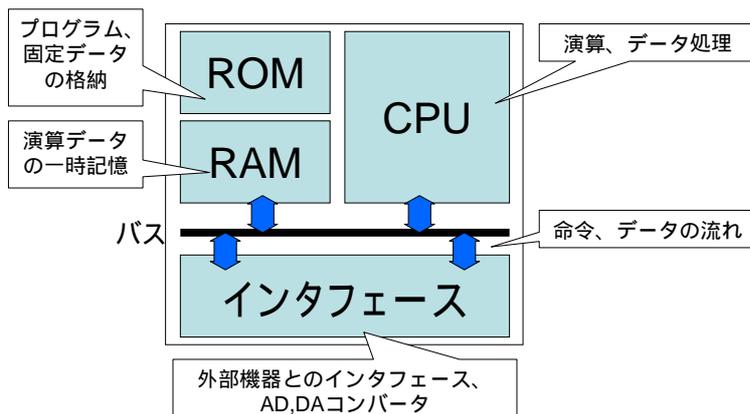
自動車の開発は、動作保証は航空機並みに過酷な環境で、コストは家電並みに、ということを目指している。そうした厳しい条件の中で開発される ECU は、上図のどの象限であれ、コストと品質・機能とが高い次元でトレードオフされており、その意味では、一般の家電製品を超えた極限性能をねらう、究極のエレクトロニクス製品ともいえる。

4.3 電装化とソフトウェア

本章の冒頭より繰り返し述べているとおり、自動車の電装化はここ十数年大きな発展を遂げてきたのだが、それを支えるためにシステム LSI などによる回路規模の大規模化、組み込みソフトの大型化も加速してきている。本項では、制御回路で重要な組み込みシステムとシステム LSI について、その概要を紹介し、ハードウェアとソフトウェアがどう関連しているかについて、考察してみたい。

組み込みシステムの複雑化

[図 25] ワンチップマイコンの基本構成



自動車、家電を問わず、実現すべき機能が複雑になるにつれて、組み込みシステム³⁹が、数多く使われている。自動車における組み込みシステムは、北米における排ガス規制(マスキー法)のクリアにはじまった。理想的な燃焼を実現するエンジン制御をハードウェアだけで行うことは難しく、より細かな制御を行うためにマイコン

³⁹今まで電子回路だけで実現していた制御回路の一部を、コンピュータとソフトウェアによって代替する手法。用いられるコンピュータ資源は、マイコンからシステム LSI まで様々であるが、組み込むソフトウェアを変えるだけで、機能追加や変更ができるメリットは同じであり、今日数多くの制御回路やエレクトロニクス製品に用いられている。

(図 25)によるソフトウェア制御に移行したのが、自動車電装化のはしりである。一方エレクトロニクス製品においても、情報をデジタルで扱う DVD やデジタルカメラ、携帯電話などのいわゆるデジタル家電だけでなく、炊飯器や冷蔵庫、洗濯機など一見デジタルとは無縁の白物家電でも、組み込みシステムは一般化しており、これによるきめ細かいサービスや機能が提供されている。

マイコンが一般化する以前は、機能仕様が決まった後に、ディスクリート部品によるプリント基板上での回路生成やカスタム IC の開発など、全てをハードウェア(電子回路)で実現していた。しかし、多様化する市場ニーズに追随するために、機能の追加や変更は増えつづけ、都度この様なハードワイヤリングを行ってはいはコストも納期もビジネスの間尺に合わなくなってきた。そこでマイコンとソフトウェアにより、回路を変更することなく、機能の追加や変更を可能にする組み込みシステムが発展してきたのである。

今日では自動車や家電のみならず、ほとんどの電子機器で、目的に応じた大小様々なマイコンが組み込みシステムとして使われている。マイコンには、演算やデータ処理を行う CPU だけでなく、プログラムやデータを格納するメモリや、入出力処理など、通常考えられる処理を行うのに必要な機能を 1 チップ化している。デジタル家電に多用されている音声処理・画像処理など、一定の演算処理を高速に行なうことを目的に作られた DSP(Digital Signal Processor)も広義の意味ではマイコンの一種である。またこの DSP など各種機能ブロックを組み合わせたシステム LSI においても、これを動作させるためのソフトウェア開発が必要であり、大規模な組み込みシステムのひとつと言える。

この組み込みシステムの対極にあるのが汎用システムであり、その代表であるパソコンとの比較をすることで組み込みシステムの特徴を明らかにしてみたい。まずパソコンには高速な CPU と大規模なメモリ、複数の入出力装置とそれをコントロールする OS が付いており、アプリケーションをロードするだけで MP3 プレイヤーはもちろんのこと、DVD レコーダーや、デジタル TV にもなり得る。

動作だけであれば、おそらく ECU などについても、その機能のほとんどを実現することは可能であろう。しかし実際の組み込みシステムでは、これらパソコンで採用されている汎用 CPU や OS はほとんど使われていない。その理由はコスト対性能にある。

先ほどパソコンで MP3 プレイヤーを実現できると述べたが、実際にはコーデック⁴⁰処理をソフトで行うのは効率が悪い。音楽を聴くためだけの装置であれば、音声専用の DSP を用いるのが性能・コスト両面に優れている。これは DVD や TV など、他の AV 機器においても同じである。実際に、パソコンでも AV 機能を売り物にしている機種では、映像や音声処理を高速化するために、専用の DSP やメディアプロセッサ⁴¹を搭載し、ハードウェアで主要な処理を行っている。

以上は一例であるが、通常、組み込みシステムでは、目的に応じた必要最低限のパフォーマンスを發

⁴⁰ 音声や画像を圧縮・伸長するアルゴリズムやソフトウェアを指す。

⁴¹ グラフィックアクセラレーション、MPEG データの再生、モデム、サウンドなどのマルチメディア処理を 1 チップで行える高性能な DSP の一種。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

揮するCPUとメモリ、インターフェースが確保されていれば良い。このためマイコンは機能別にビット幅やメモリサイズ、処理内容や処理速度などによって1個100円程度から数万円まで、様々なタイプが汎用部品として、供給されており、ユーザーはこの中から、最終製品の価格目標や回路の目的に応じて、最適なものを選ぶことができる。汎用CPUに比べて価格が安い上に周辺部品が少なくすむため、回路はシンプルになり、基板上のレイアウトスペースも大きく稼げる。また構成が小さく処理が限定される分、消費電力も抑制できる。

そしてこのマイコンの上で開発されるソフトウェアは、その資源の大きさによって変化する。例えばビット幅が4～8ビットで、メモリも小さいマイコンでは、多くの場合OSは搭載されず、プログラミングもアセンブラで行われる。しかしビット幅が32ビット以上のマイコンやシステムLSIでは、開発効率を上げるために、OSを搭載⁴²し、CやC++、JAVAなどの高級言語を用いて開発するのが一般的になってきており、自ずとソフトウェアも大規模化がすすんでいる。しかしそれでも、コストとのかね合い上、組み込みシステムにおけるCPUパフォーマンスとメモリサイズは基本的に必要最低限でしかなく、処理速度やメモリ使用量の効率化のために、ハードウェアに近いところでプログラミングする技術が求められる。また、センサーやアクチュエータ、表示装置などのデバイスを制御するためにも、ハードウェアに対する理解が必要であり、このあたりがオープンシステム系のソフトウェアとは異質な開発の難しさと言える。

今日、この組み込みソフトウェアは携帯電話やDVDレコーダーなどでは千人・月以上を費やし、何百万ステップものソースコードを組み上げる、巨大な開発規模となっている。結果ハードとソフトの関係性どころか、ソフトウェアそのものを全体で俯瞰することも極めて難しくなっており、開発の遅延や上市後のトラブルが頻発している。

オープン系のソフト開発では、これら大規模ソフトウェア開発の問題を未然に防ぐために、開発者がシステム全体を共通に理解する言語(表記)として、UML⁴³といったオブジェクト指向の手法を取り入れ出し、一定の成果を上げている。一方組み込みシステムでは、こういった手法があまり活用されていない。これは組み込みシステムを用いる製品の多くが、すでにリリースされた製品をもとにした改版設計であることに起因していると思われる。納期とコストに制約がある中、各種デバイスやインターフェース回路との連携動作の信頼性を確保するためには、既存のソースコードをできるだけ生かし、実績のある枯れたモジュールやライブラリを再利用する開発手法に、今のところ一番の合理性を見いだしているのだろう。

⁴² 今日組み込みシステムのOSとして、LinuxやITRONなどがポピュラーである。これらのOSは無償か、あるいは非常に安価であり、またオープンソースであることから複雑な問題が起きたときにも、深いレベルで原因を調査することが出来るため、多くの組み込みシステムで採用されている。

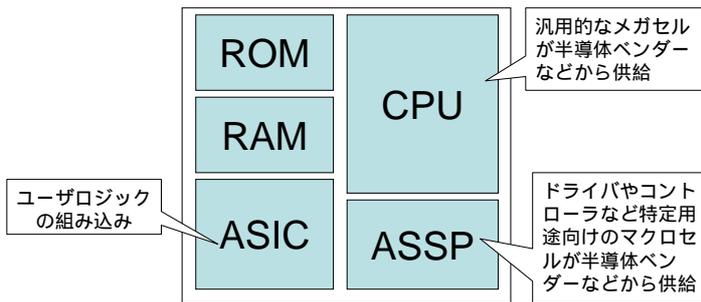
⁴³ UML, Unified Modeling Language ソフトウェア開発のための統一モデリング言語であり、基本的にはオブジェクト指向にのっとった分析、設計を行う際の手法、および成果物の記法を規定している。大規模な組み込みソフトウェアを開発する現場では、いずれも独自の仕様書記述標準(ドキュメント)およびコーディング上のルール、テスト仕様が必ず存在し、これに基づいて開発が行われている。

システム LSI

製品の更なる小型化、省電力化、信頼性アップ、高機能化を実現するために、CPU やメモリなどの個別半導体や ASIC などにより、プリント基板上で形成していた回路をワンチップ化したものがシステム LSI であり、今日 ECU やデジタル家電でも数多く使われている。前述したマイコンも、汎用システム LSI の一種といえるが、一般的にはユーザーが機能セルを選択、あるいは自社開発したマクロセルを組み合わせでワンチップ化する、大規模なカスタム LSI を指すことが多い。規模にもよるが、このシステム LSI を開発するには最低でも数億円レベルの投資が必要で、一定以上の数量が出ないと投資の回収は出来ない。

したがって特に大規模な LSI については、特定製品への適用だけでなく様々な製品で利用できるよう、あるいは長期間にわたって使えるよう、ソフトウェアでスケラビリティや機能追加を実現する構造にしているものもある。システム LSI を設計する際には、CPU などのメガセルや、通信 I/F、コーデックなどの機能セルが半導体ベンダーなどから供給されており、これらの中から最適なものが選択できる。また自社で開発した ASIC についても、このシステム LSI の中に組み込むことが可能である。

【図 26】 システム LSI の概念⁴⁴



システム LSI (SoC) の概念

そして半導体は、大規模 LSI であろうが、数百ゲートの小規模 IC であろうが、最終的にはセル⁴⁵と配線を物理設計(レイアウト)し、シリコン上に転写することには変わりはない。このもととなる情報は、ゲートレベル⁴⁶の回路図(ゲートネットリスト)である。まだ回

路規模が小さかった 1980 年代では、いずれの機能ブロックもこのゲートレベルの回路図で描かれていた。しかしその後ゲート数は劇的に増え、回路図を描いて機能を設計することは不可能となった。そこで現れたのが HDL(Hardware Description Language)と呼ばれるハードウェア記述言語である。この HDL⁴⁷はゲートレベルに比べると抽象度が高く、そのままでは半導体のレイアウトはできないが、論理合成ツ

⁴⁴ ASIC(Application Specific IC)はユーザーごとに開発する特定用途向けカスタム LSI。この ASIC がユーザー固有に開発し、利用されるのに対して、ASSP(Application Specific Standard Product)は半導体ベンダーが市場ニーズを見込んで特定のアプリケーション用に開発する LSI。メモリや CPU などの汎用 LSI と ASIC の中間的な位置づけと言える。

⁴⁵ 本来は複数の論理ゲートからスイッチやカウンタ機能を構成する単位を指すが、これらを集約してつくる CPU やメモリなどの機能ブロックをコアセルやマクロセルと呼ぶこともある。

⁴⁶ デジタル回路を実現する最小単位で、回路上では論理ゲートと呼ばれるシンボルで表現される。ゲートは AND, NOT, OR の 3 種類があり、演算、比較、条件分岐、状態保持などデジタル回路の基本が全てカバーできる。

⁴⁷ 具体的には HDL の中の RTL(Resister Transfer Level)を指している。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

ルで前述のゲートレベルのネットリストを生成することが出来るため、今日半導体の機能を表すのは回路図ではなくほとんどがこの HDL によるものとなっている。半導体メーカーから提供されるマクロセルも HDL で提供されており、システム LSI を開発する際には自社で開発した ASIC などの HDL と合わせ、全体の再設計を行う。しかし LSI には CPU コアとメモリが搭載されているのが一般的であり、機能をソフトウェア、あるいはハードウェアのどちらで実現させるべきか、その役割分担を適切に行わねばならず、ここに大規模 LSI 設計の難しさがある。このハードウェアとソフトウェアの協調設計のために、最近注目されているのが C 言語設計である。HDL よりもさらに抽象度が高い C 言語による仕様設計では、LSI 設計全体を俯瞰することが可能で、また取り扱えるゲート数も論理的には制限がない。この C 言語のソースから、動作合成ツールを用いて HDL を生成することができるため、HDL で書かれた既存のセルと組み合わせることも可能である。

この設計手法によれば、いわゆる LSI 設計者と組み込みシステムのソフトウェア設計者を分けることなく、大規模な LSI の開発がすすめられるという利点があり、大きく期待されている。そしてここでも明らかとなっているのは、半導体開発の成否さえも、その依って立つところがハードウェア設計能力から、ソフトウェア設計能力へシフトしてきているという事実である。

制御方式とソフトウェア、ハードウェアの相関

図 27 に、ECU や家電を構成する、半導体、組み込みソフト、プリント基板各々の異なる制御手法について、その構想設計から人工物への流れについてまとめた。この表からもわかるように、つい 20 年ほど前までは、制御回路のほとんど全てがハードウェアとして設計され人工物となっていたが、今日においては設計手法および人工物のいずれも純粋なハードウェアと言えるのは、プリント基板による回路だけである。そして、このプリント基板もその上にマイコンやシステム LSI が搭載されると、回路を実現する難易度の重心は、たちまち「ソフトウェア」側に移動する。

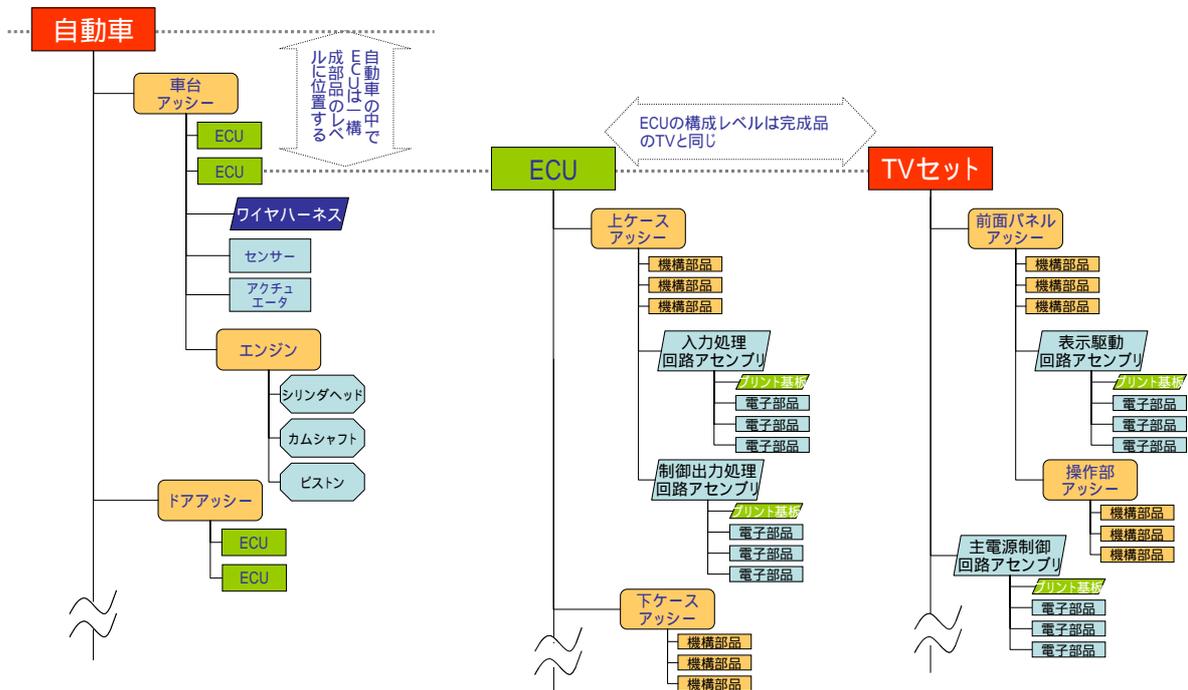
これらを支援する IT は、もともと各々の人工物をつくるための物理設計支援にはじまり、後に問題発生を未然におさえるために、設計の上流プロセスへと遡る傾向にある。半導体はそれが特に顕著で、すでに設計の主流となっている HDL などの言語設計から、さらに上流の C 言語設計を支援する方向へ向かっている。プリント基板においても回路図と PCB レイアウト設計の支援だったものが、上流の構想設計ツールへとカバレッジが広がっていく途上にある。しかしソフトウェア開発においては、まだまだ上流の設計に IT が適用される様子はなく、先述した UML などで機能設計を共通表現するところにとどまっている。これら IT 活用の深度は、試作に費やすコストとの間に相関があると推測する。半導体開発における IT の活用が著しいのは、その試作コストが莫大になるからであり、これは自動車の開発において、IT 投資が積極的に行われていることと同じ理由である。そして、ソフトウェア開発の試作(ビルド)コストが相対的に見て低いことも、この推測を裏付けている。

4.4 自動車、電気製品の構造比較と課題

ここで、以上の議論を整理し、自動車と家電製品(例えばTV)の制御系が、どんな点で共通であり、またどんな点で異なるかを、課題も含めて比較分析してみよう。

両製品の構造を図 28 のような部品表で階層表現してみると、TV などのエレクトロニクス製品と同様、自動車の ECU にもメカ・アセンブリとプリント基板アセンブリがあることがわかる。一般に ECU に搭載されている回路ユニットは安全への要求が高く、過酷な環境に耐えて永続的に動作させるために、使われている電子部品の公差や精度、基板の材料や特性などは家電とは異なる基準で選択されているものの、回路ユニットに関して言えば、その基本構造(プリント基板と電子部品、組み込みシステム、システム LSI)そのものは家電と変わりなく、また設計に用いられる CAD/CAE/CAM ツールも同じである。しかし、いまでもなく、ECU はそれ自体が完結した最終製品ではなく、車全体から見れば、センサーやモータ、エンジンなどと接続されることによって機能を果たす一構成部品に位置づけられ、この観点から自動車と家電の部品階層構造を比較するならば、自動車の製品のアセンブリ階層の方が家電製品のそれより一段「深い」と言える。

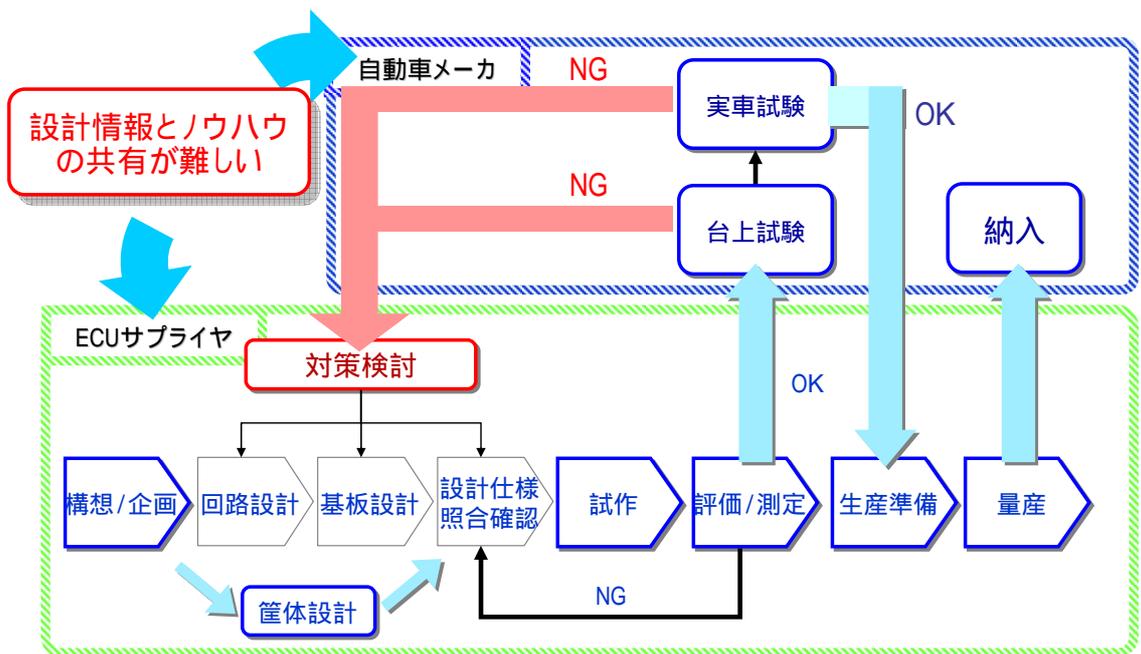
[図 28] 自動車とTVの部品表の階層表現



さてこの ECU であるが、自動車メーカーからの要求仕様に基づき、複数のサプライヤーから供給されている。ECU によって制御される機能部品(エンジン、パワーステアリング、etc...)の性能や品質/仕様、および ECU に要求される品質/仕様(振動、熱、EMC、空間占有領域、設置制約条件、etc...)など、自

自動車メーカーから出される要求にもとづいて、機能および構造設計を行い、製品として自動車メーカーに納めるのがサプライヤーの役割である。そしてこの ECU は、前述の通り自動車全体の構成における一部品であるため、車全体の物理的な納まりと挙動の確認は、ボディ・シャシー・エンジンなどのメカ部品、および他の電装品と接続して初めて行うことが出来る。しかし自動車メーカーにとって、クルマを構成する部品の全てがサプライヤーから供給されるのを待って評価を行っているのは、開発リードタイムに多くの無駄が生じ、Time To Market が実現できない。そこでリードタイムを可能な限り短縮するためにも、ECU など個々の車載デバイスが完成した時点において、それが制御する部品ハードウェア単体のレベルで評価できる試験項目を設定している。この試験は台上試験ともよばれ、自動車メーカーでの実車試験前に、サプライヤー側で事前に評価確認しておくことが義務付けられている。試験内容は、解析ツールなどを用いたバーチャルな検証もあれば、試作によるリアルな評価も含まれ、いずれも台上試験ではあるものの、その試験方法は自動車メーカーのノウハウを結集させたものであり、できるだけ実車搭載条件に近い評価手法が練られている。

[図 29] ECU の設計から納入フロー



しかし、通常部品サプライヤーは、車両全体に関するシステム知識を有しておらず、自動車メーカーも設計のノウハウや情報を完全に公開してはいない。また、サプライヤー間で、設計能力にはばらつきがある。したがって、走行試験(実車試験)で最終の適合判定において、特に他の搭載デバイス、あるいは機械部品との相互作用がある状況における性能、品質の問題により、電子制御系の手戻り(設計変更)は起こり得る。仮にボディやシャシー、機能部品など、いわゆるメカ設計における量産試作が1回だとしても、

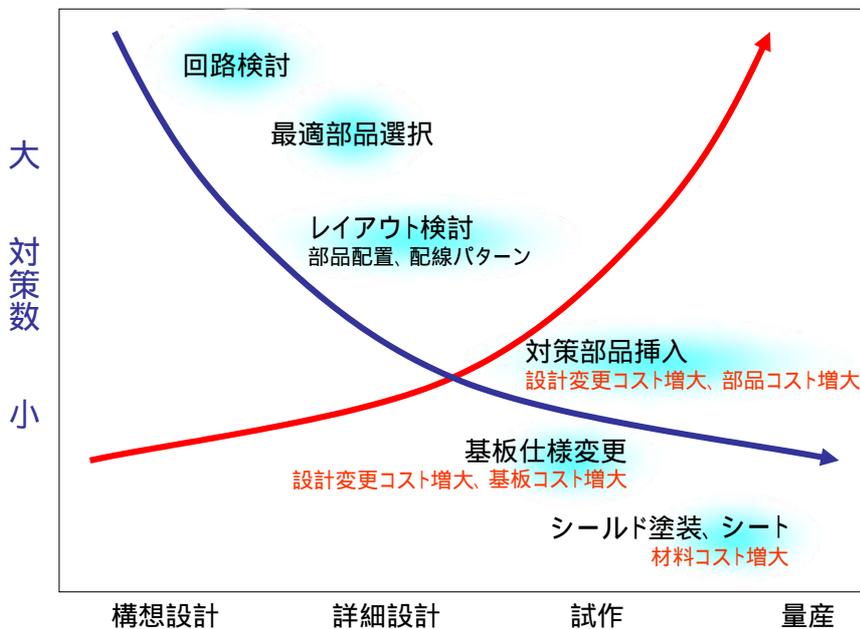
人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

電子制御系との最終チューニングやデバッグは、1度では終わらず、相当な数の設計変更が発生しているはずである。図 29 に、そうした ECU 設計から納品までのフローについて示す。

以上の理由により、数万点に上る大規模なアセンブリに対し、意匠、品質、性能およびコストのトレードオフを高いレベルで達成させるためには、メカ系だけでなく、エレキ系を含む総合的な仮想試作が必要であると考えられる。そしてメカ・エレキを融合した自動車の仮想試作の中で最も実現性が高く、かつ設計効率化の効果が大きいソリューションとして、EMC とレイアウトの設計検証をフロントローディングする試みがある。以下にその内容を説明する。

EMC 品質の確保

[図 30] EMC における対策コストと打ち手の関係



自動車には、エンジンや安全走行を制御するための ECU だけでなく、ラジオや TV、カーナビなど、電波を受信する機器も数多く搭載されている。ECU は前述のとおり搭載数は増加の一途をたどっており、回路の高速化も進んでいることから、これらが強力なノイズ源となる危険性が高

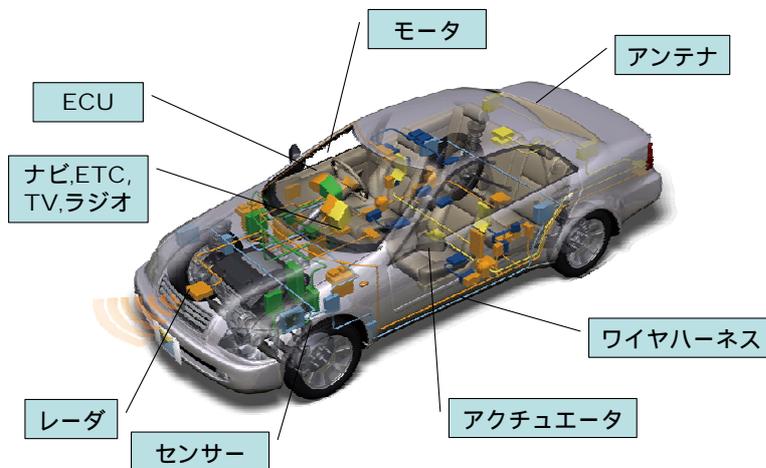
まってきている。また車内には、ノイズを伝導するだけでなく、それを放射する「意図せざる逆機能」を持つ、いわば「アンテナ」として、ハーネス(電線)類が張り巡らされている。このように電波を受信する装置と妨害電波を放射する可能性のある機器が、自動車という閉じた空間に混在しているため、双方の装置をトラブルから避けるためにも、設計検証が必要となってきている。しかし前述したとおり、従来この EMC (Electro-Magnetic Compatibility) の確保についてはあまり重要視されておらず、問題が発生したときに、フィルタなどの対策部品を回路に挿入したり、あるいは筐体にシールドを施すなど、開発の後半において対症療法が行われてきたのが事実である。

しかし、現物試作車の完了段階で EMC を評価し、その結果から EMC 対策を実施していくという開発手順では、後工程で多くの設計変更を発生させることになり、自動車開発の効率の面でも開発期間の

面でも望ましくない。実車の試作評価後という遅いタイミングで EMC 対策(デバグ)を行っても、残された打ち手は少なく、結果として部品や回路の設計変更にとまなう期間や費用のロス増大は回避できないのである(図 30)。

したがって、開発の下流で「EMC 対策」を行うのではなく、開発初期段階において作り込む「EMC 設計」を前倒して実施し、ノイズ源を開発早期の段階で抑え込むことが重要である。これは、前述したデジタル家電などとも共通する課題であり、QCD をフロントローディングするために、ナレッジベースの EMC チェッカーが数多くのコンシューマ製品や車載機器に適用されており、その効果が確認されている。この仕組みを、プリント基板単体ではなく、ボディも含めた全体に適用することを考えてみる。一般の家電製品と比べ自動車の EMC 設計が異なるのは、自動車には車体そのものやハーネスが、強固なグランド(電位の基準。接地、アースと同義)やシールド(電磁波や磁気などを防御するもの)、あるいはノイズ放射アンテナとして電子回路に置き換えられることにある。つまり EMC の視点で自動車を設計するために、機構部品は「高周波部品」として扱わなければならない。(図 31)以下、車体やハーネスの 3 次元設計と組み合わせた特徴的な EMC 問題への適用について、例を示す。

[図 31] 自動車における電子部品の構成



イミュニティ(EMS)伝導経路確認

人体から放電される静電気 (ESD; Electro Static discharge) は数十 KV に及ぶ場合があり、電装機器が物理的に破壊されこともある。走行中にこれが発生すると、自動車乗員の人命に関わるため、EMC の中でも重要な品質確認の1つになっている。車体および ECU やセンサーな

どの 3 次元位置およびその材質などがわかれば、人間が接触可能な導体箇所、および静電気から保護すべきデバイスの情報をもとに、放電箇所から素子に達するまでの経路について ESD の有効減衰距離を確保することができる。あるいは、ESD を車体へ逃がすため、車体へ伝導するまでの低インピーダンス経路についても検討することができる。

自動車ハーネスと車体との距離

車体は自動車部品の中で最も電位が安定した機構部品である。そのため、一般的に車体からハーネ

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

スを遠ざける程、車体とハーネス間の結合容量が減少するため、結合に関与していた電荷エネルギーが、電磁波放射エネルギーに変換されやすくなり、不要な放射ノイズ増加に繋がる。

これを抑制するために、設計初期段階において、車内におけるハーネスの 3 次元的位置と車体の位置関係を検証しておくことで、ハーネスに起因するノイズ発生リスクを抑え込むことができる。

ノイズ送受信源隔離

自動車は、電子デバイスが詰め込まれている狭いシールドルームのようなものである。自動車に搭載される ECU は一部の高級車では 100 個を超え、また各種アンテナ (TV、ラジオ、GPS、ETC、VICS、非常通信、etc...) も増えてきており、ノイズを放射するデバイスと受信するデバイスを隔離検証しながら車内空間にレイアウトしなければならない。このような検証課題についても、ノイズ源と保護対象のデバイス、および必要な隔離距離を条件として設定しておけば、3 次元設計状況から、全ての検討対象デバイスが距離の条件を満たしているか、短時間で検証することができる。

グラウンド(接地、アース)の安定化、分離の確認

グラウンドは回路の電位基準点である。これが不安定になると回路中の電位が全て不安定になり、と同様本来グラウンドに容量結合すべき電荷エネルギーが、不要な電磁波放射エネルギーに変換されやすくなる。EMC 品質を向上させるために、グラウンドの扱いは重要であり、電位基準を安定させるためにグラウンドに接続する導電体を可能な限り低インピーダンス(抵抗)で接続させることや、逆に高電流、高電圧デバイスについては、グラウンドを分離独立させるなどの検討が必要である。複雑な自動車アセンブリ構造において、導電体部品各々の接続インピーダンスを確認し、更にもその上で各デバイスのグラウンドの種類による接続や分離を平行して確認していく、という検証を机上で行うのは非常にむずかしい。特に自動車開発は、多くのサプライヤーによって設計作業が集約されているため、なおさらである。しかし、3 次元の車体データにデバイスやハーネスの情報を取り込み、導体に関するチェックを行う仕組みを構築できれば、設計初期段階から効果的なグラウンド処理の検討が行える。

以上、2 次元 CAD で活用されている EMC 検証環境を自動車全体にまで拡大することができれば、設計初期段階における EMC 設計の練り込み効率は大幅に上がると思われる。しかし、EMC 設計検証ツールを 3 次元設計に応用することによるメリットはこれだけではない。電気設計者と機構設計者の間で、EMC の問題や解決ノウハウが共有化されることにより、部門間、あるいは自動車メーカーとサプライヤー間での EMC 設計に関する調整業務が大幅に削減されることも大きく期待できるのである。また自動車のみならず、エレクトロニクス製品開発においても同様の効果が期待できる。今までの、製品全体における EMC 品質の確保は、どちらかという回路設計側の仕事となっていたのだが、3 次元 EMC 設計ツール

の活用がすすめば、メカ設計部門での課題認識は高まり、結果、両部門の協調がすすむことで、問題解決の質や速さに大きな改善が見込めると考えられる。

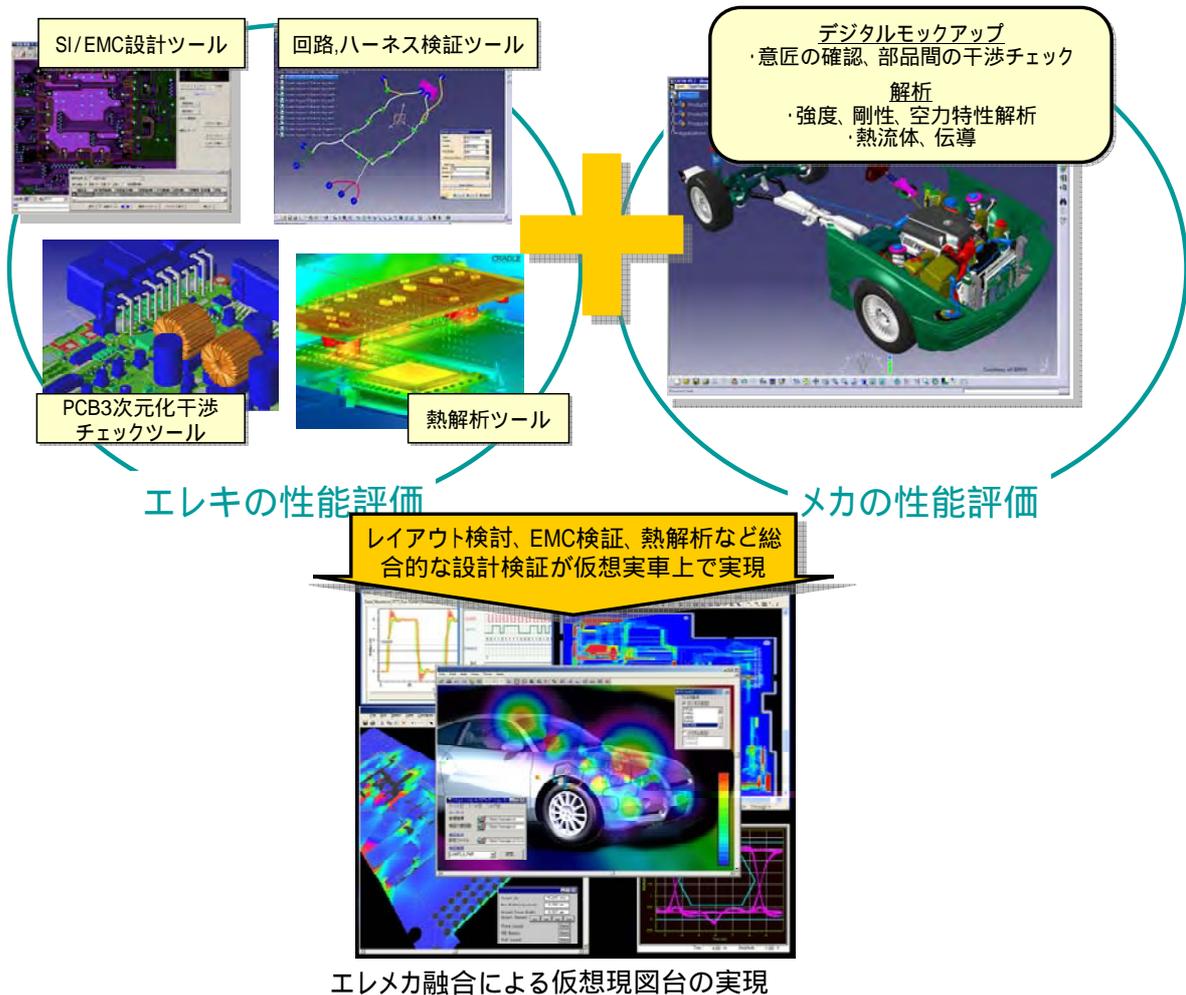
デバイスのレイアウト検証

ECU の増加にともない、これ以上多くの ECU (形状的には弁当箱状の部品) を車体内にレイアウトできる場所はほとんど無くなってきている。ECU をアクチュエータ(制御対象)に直接搭載したり、狭小なボディ空間の隙間に押し込んだりするには、モバイル機器並みに、メカ・アセンブリと PCB アセンブリの間で厳しい空間の取り合いを行う必要がある。しかし自動車の場合、基本的に ECU の外装形状は単純であり、また車体やハーネスが 3 次元で設計されているため、配置場所さえ決めれば、空間の取り合い検討は家電と比べてさほど難しくない。それよりも重要なのは、配置のトレードオフの検討である。自動車の客室外はいずれも振動や熱、埃や水など、精密機器にとって過酷な環境であり、回路への影響が著しい。ECU などデバイスやワイヤハーネスの配置は、EMC 以外にも熱、製造効率、メンテナンス性、耐振動など多くの検証項目によるトレードオフ検討が必要である。これを支援するためには、PCB アセンブリやハーネスなどの情報を車体の一部として解析ツールが取り込めるようにモデル化し、3 次元で検証する環境が求められている。その中でも、熱に対する解析は、重要度と共に実現性も高いと考えられる。ただ自動車の場合は TV などの家電と比べて検証の難易度が高く、ECU 自身が発熱するのに加えて、-30 度 ~ 120 度程度まで変化する外気温を考慮しなければならない。特にエンジンに近い場所では、単に温度が高いだけでなく、急激な加熱/冷却の繰り返しが起こるため、筐体や基板の膨張による反り、たわみから、クラック(ひび割れ)の発生などがあり、経年変化をも考慮した判定が求められる。先進的なサプライヤーはすでに、ECU 単体での熱ストレスが電子部品にどうかかるかについて、外気温を拘束した状態での解析を試みており、次のステップとして、エンジンなどの熱源と車体内の空気の流れをモデル化した、より実車に近い検証へすすむであろう。

今日のコンピュータ技術で、エレキ・メカ・ソフトのジオメトリ(幾何学的配置)、物性、ふるまいの全てをモデル化し、車両全体の動作検証をバーチャルに行うというのは、現実的にはかなり難しい。しかし前述したとおり、エレキの要素をメカ設計に融合することで、デジタルモックアップによる意匠の確認や、部品間の干渉チェック、強度や剛性、空力特性解析などメカの性能評価に加えて、ECU の適切な設計やレイアウトの指示など、現在は実車でないと検証できないエレキとメカの検証を一部でも仮想的に行うことができれば、最終評価における大幅な手戻りを減少することはできると思われる(山本、2007)。

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

[図 32] メカ設計とエレキ設計、実物試作と仮想試作を統合した「仮想現図台」



もともと電気系の CAD/CAE/CAM は、TV セットや ECU といった、いわばモジュールレベルを対象に開発されてきた。一方メカ系のそれは、構成するひとつひとつの機構部品の作り方とその構成にのみ着目しており、例えばその中で表現される PCB アセンブリは、単なる構成部品のひとつでしかなかった。しかし今後はその階層を一段上げて、モジュールの複合体である自動車一台分を見据えた開発支援 IT を、自動車メーカー、部品サプライヤー、およびエレキ・メカ双方の CAD/CAE ベンダーが協力して構築する必要性が高まってきている⁴⁹。自動車設計では、設計に関わる人、物、コストの規模が非常に大きく、部門間やサプライヤーとの調整に費やす労力は一般の家電製品とは比べ物にならない。自動車における電機設計の重要性が増す中、今後は電機業界で実用化されているエレクトロニクス製品開発における回路解析やルールベース設計と、航空機や自動車業界などで発展してきた 3 次元シミュレ

⁴⁹ 図研はプリント基板、ハーネスの CAD ベンダーとして、メカ CAD ベンダーのダッソーシステムズ社や UGS 社との連携を深めている。

ーションを組合せ、自動車開発における、強力な開発支援プラットフォームを完成すべきであろう。複雑化する現代の自動車設計、とりわけ日本企業のそれにおいて重要であるメカ設計とエレキ設計、実物試作と仮想試作を統合した、「仮想現図台」の出現が待たれる(図 32)。また、本稿では詳しく見てこなかったが、組み込みソフトウェアについても、設計支援(プリプロセス)や動作検証(ポストプロセス)でどう扱うかは、今後の重要な課題である。

5. メカ設計・エレキ設計の分化と融合

5.1 複合的な記号系としての人工物設計

以上、本稿では、複雑化する人工物である自動車のエレキ・メカに関して、主に電子化の変遷とその対応技術について述べてきた。我々は、自動車産業において近年、メカ設計に加えてエレキ設計の比重が高まりつつあること、それにもかかわらずメカ設計とエレキ設計の融合化は必ずしも十全ではないことを実証的に確認した。

そこで、以上を踏まえて、このことが、現在の製品開発に対して持つ意味を考察しよう。我々は、「設計情報とは人工物の機能と構造を表象する記号の体系である」という基本認識に立ちかえて、この問題を考えてみる。

まず、自動車、とりわけ乗用車は消費財であり、一般消費者が自然言語(コトバ)で理解できる人工物でなければいけない、ということが、自動車設計の原点である。コトバで要約された製品設計情報のことを製品コンセプトといい、自動車設計の起点はここにある(Clark and Fujimoto, 1991)。したがって、自動車の製品開発とは、コトバで表した製品コンセプトを、現物であるクルマに落とし込む、設計情報の翻訳・転写作業(藤本, 1997; 藤本, 2003)だとみなすことができる(図 33)。

次に、製品コンセプトと実物を結ぶ設計プロセスは、前述のように機能設計と構造設計を主たる要素としていることを指摘しておこう。論理的には製品コンセプトを機能設計に、さらに機能設計を構造設計に、という順序で逐次的に翻訳が行われるのが基本であるが、これも前述のように、実際には構造設計を行い、試作品で機能検証を行うことで、はじめて機能が顕在化する場合もある。このように、機能設計と構造設計の関係は、順行、逆行、平行など実際には様々である。

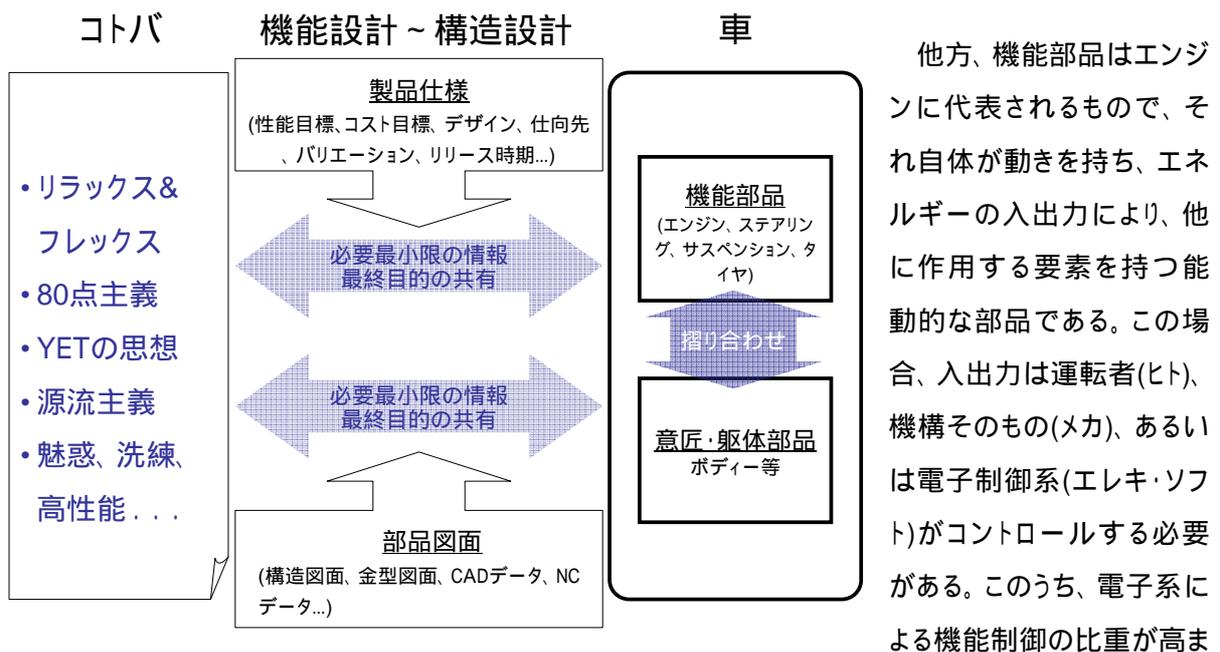
いずれにせよ、こうした設計プロセスにおいては、自然言語に加えて、論理言語(抽象的な記号の間に厳密な論理演算が成立するもの)、物理言語(対象物の物理特性を表象した記号。図面やレイアウトなど)などがあり、開発者は、設計の段階と用途に合わせてこれらの記号系から適切なものを選ぶ。そして、同じ人工物を表象するこうした記号系・言語系の間で、しかるべき翻訳を行うのが、製品開発の仕事の重要な部分である。

このような観点から自動車の構造を見直すと、機能部品と意匠・躯体部品という二つの系統に大別で

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

きることが分かる(図 33)。このうち、意匠・躯体部品は、それ自体が何かに作用することの無い部品である。いわば、構造特性そのもの(例えば美観や構造維持)が顧客満足に作用する部品である。純粋な意匠・躯体部品(例えばクルマのボディ)には、したがって、制御系は付かない。

[図 33] 車の機能設計と構造設計の関係



っていることは既述のとおりである。

そして、コトバはこの 2 系統の部品を設計情報として記号表現し、さらにその設計情報を現物に転写する、という一連の開発活動の原点であるという仮説が成り立つ。つまり、コトバとモノをつなぐ設計情報は、それ自体が複合的な記号系であり、機能設計と構造設計、制御系と制御対象系、エレキとソフトとメカ、機能部品系と意匠・躯体部品系、といったような分類が可能である。そして、これらの記号系の選択と統合の良し悪しが、複雑な人工物の設計においては重要な意味を持つと考えられるのである。

5.2 自動車設計におけるメカからエレキ・ソフトへの重心移動

さて、こうした観点から、自動車設計の過去・現在・未来をどう考えるべきだろうか。電子制御系の発達という、過去四半世紀ほどの間に起こった自動車の進化が、ここで重要な意味を持つ。

かつて、ボディだけでなく、エンジンやステアリングといった機能部品も全て「メカ」でつくられていた時代の自動車は、おそらくコトバと物理的に部品をつくる(部品を組み立てる)ことはかなりのレベルで直結していたと思われる。単純化して言うならば、かつては「流れるような曲面ボディ・デザイン、最高スピード

と加速性能を持つスパルタンなコンパクトカー」という製品コンセプトをコトバとして共有することで、その解釈に厳密な取り決めがなくとも、最小限の機能設計情報で、構造設計へ直ちに移行し、部品の詳細設計をとりあえず行い、部門間で設計の擦りあわせを行い、試作車両を完成させ、それによって機能検証を行うことで、機能設計・構造設計双方の完成度を試行錯誤的に高めることが可能であった。

しかし今日の自動車を、この様な方法で開発するのは難しい。それは自動車の電子制御が、少なくとも大半の機能部品、あるいはそれらをシステム化した自動車の機能系において、設計の大前提となってきたからである。こうした「制御」の観点から、筆者は自動車について、以下の様にその設計の発展経路を考察している(藤本、2007; RIETI向け資料⁵⁰)。

- ・ 自動車はもともと、メカニカルな「制御対象」、つまり「制御されるもの」であった。制御系は運転者自身、つまり人間であった。自動車は、自動制御機械ではなく、手動制御機械であった。
- ・ したがって、伝統的な自動車設計は、運転者の操作(z)に対して、ある環境(e; 例えば路面状況)のもとで、あるべき反応(y)をするような、メカニカルな構造設計パラメータ(x)を探索することであった。また、テストドライバーが運転者(z)、テストコースが環境(e)、試作車が構造設計(x)をシミュレーションする実物での機能検証が中心であった。
- ・ このため、伝統的には、自動車の設計はメカニカルな人工物の設計プロセスであり、それは本質的に、制御対象(制御されるもの)の設計であった。制御する側の設計、すなわちエレキやソフトの設計は、この段階では重要ではなかった。
- ・ メカニカルな設計は、構造設計重視であった。機能設計は比較的シンプルであり、一方、構造設計は精密である傾向があった。それがメカ設計の分化だと言えよう。

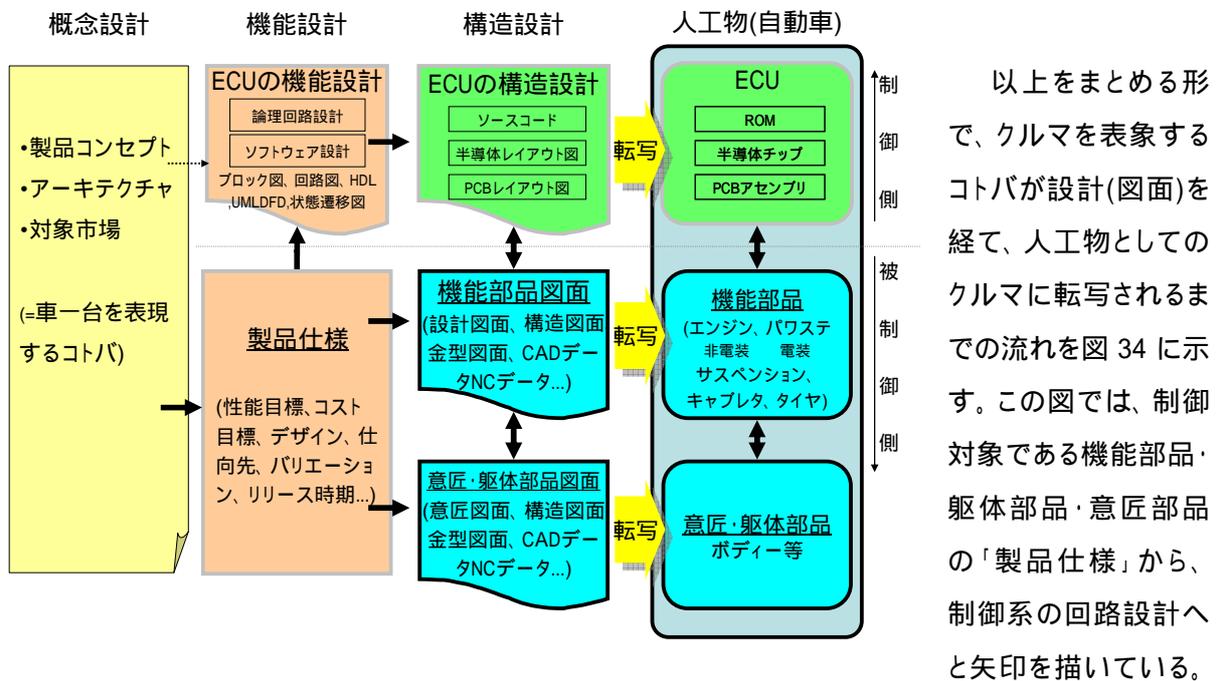
この論考で示した通り、もともと人間に制御される複雑なメカであった自動車だが、人間の車に対する制御行動の一部を、電子回路で置き換える機能部品の電装化比重や複雑さが近年急激に加わってきている。4章の ECU の項で詳述したとおり、自動車の電装化がはじまった当時、電子化といえば純粋なハードウェア回路を指していたが、今日ではハードウェアとしての電子回路と、その回路上で実行される組み込みソフトウェアの両方を指し、とくにソフトウェアの大規模化がすすんだ結果、開発の難しさは増大してきている(図:組み込みソフトウェアについては別の機会に分析する)。そして、制御行動の置き換えがすすむにつれ、ECU の搭載数は増加する一方であり、今日自動車メーカー1社につき数十社以上の電装系サプライヤーが対応している状況である。自動車メーカーからの要求仕様に基づき、サプライヤーは回路の設計から電子部品の選択、実装までを行い、ECU を「自動車部品」として納入する。自動

⁵⁰ 経済産業研究所 (RIETI) の研究プロジェクト企画資料、「複雑化する人工物と設計プロセス」2007年7月

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

車メーカーはこれらを受け入れるのだが、実際にはサプライヤー各社の技術レベルや得意とする回路にはばらつきがあり、車両に組み込んだときに、必ずしも自動車メーカーが納得できるものばかりではない。必要としている「自動車部品」を確実に手に入れるためには、サプライヤーとの間で設計ノウハウや情報を高いレベルで共有することである。そのためには明確な要求仕様と、出来上がったモノに対する評価仕様の取り決めをあらかじめ行い、それにもとづくレビューを繰り返す必要がある。機能部品の電装化がすすめばすすむほど、また開発プロセスが自社完結の垂直統合から水平分散すればするほど、かつてのような、行きつ戻りつの試行錯誤的なクルマづくりは期間的・工数的・品質的にも難しいと言える。

[図 34] クルマを表象するコバが設計(図面)を経て、人工物として転写されるまでの流れ

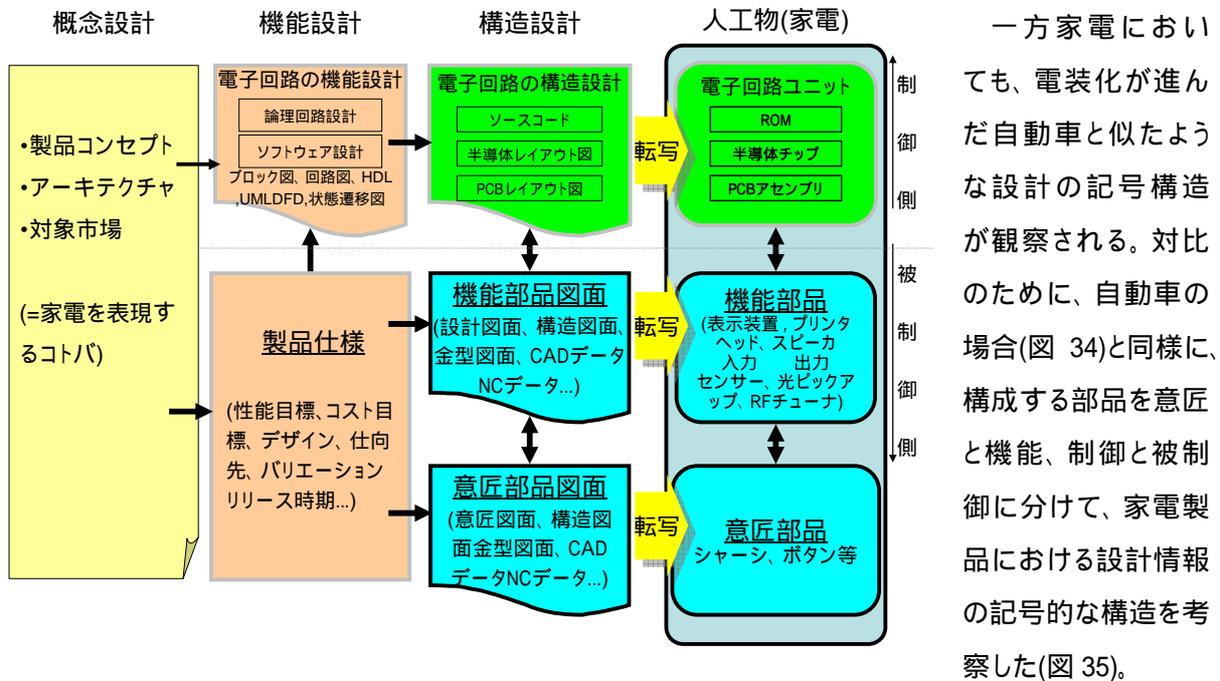


ここで示したように、現実の自動車設計プロセスを見ると、歴史的経緯(設計組織の成立順)などの結果、被制御系が上位で制御系が下位(メカ設計者 > 電子回路設計者 > ソフト設計者)という暗黙の序列があり、これはそのまま、自動車メーカー > ECU サプライヤー > ソフト開発協力会社という、制御系における企業間の力関係に反映している。

しかしながら、自動車を制御系として見直してみるならば、実際に電装化された機能部品、すなわち制御対象を支配しているのはソフト > 回路 > メカの順である。そして、今日自動車開発が複雑化し難しさを増しているのは、まさにこの機能部品の電子回路やソフトに占める割合が大きくなってきたことに起因している。つまり、制御系としてのロジックと、現実の設計プロセスや組織的な力関係の間に、ある種のギャップが存在しているのである。

5.3 家電製品における設計情報の比較分析

[図 35] 家電の概念設計から人工物として転写されるまでの流れ



一方家電においても、電装化が進んだ自動車と似たような設計の記号構造が観察される。対比のために、自動車の場合(図 34)と同様に、構成する部品を意匠と機能、制御と被制御に分けて、家電製品における設計情報の記号的な構造を考察した(図 35)。

エレクトロニクス製品における機能部品は、入力した情報をもとに何か処理を行い、出力するのが制御側の部品(回路)であり、LCD や PDP などの表示装置やスピーカユニット、アクチュエータは出力側の、CCD や光ピックアップ、チューナなどは入力側の被制御部品として位置づけることができる。

TV を例にとって部品の相関を説明すると、制御側部品は電子回路ユニットであり、これが被制御部品であるチューナユニットが受信した信号をユーザーの操作にもとづき処理し、その信号を音声や画像として同じく被制御部品であるブラウン管などの表示ユニットに送るといった構造をもつ。かつてアナログ回路の時代には、ここで非常に高度な擦り合わせが行われていた。画像の美しさや安定度はこの制御回路の善し悪しはもとより、入出力ユニットとの相性などを如何にうまく調整するかによって決定される。部品個々の特性や組合せのクセなどを見抜き、バラツキの大きい部品でもうまく使いこなすという、回路を外部から見ただけでは知り得ない、優れたコストダウンと高品質化のノウハウが各社にあった。まさに擦り合わせの妙味であり、結果として各社の技術はブラックボックス化されたのである。

ところが、デジタル家電時代に突入し、状況は一変する。マイコンはもとより、DSP や I/O コントローラなど、デジタル家電に必要な主要回路が次々と汎用 IC としてソフトウェアと共に供給されだした。カスタム IC もよほどうまく作り込まないと、外部から構造を簡単に推測することが出来てしまう。この情報をもとに、台湾などに無数に存在するファブレス(設計専門企業)などが、同等な IC を設計・生産し、市場に提供し出すのである。もちろん、IC を買ってきてそのまま実装しても、簡単には安定動作しないし、ノイズを

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

抑え込むための工夫なども必要なのだが、それでもアナログ時代に比べて、技術的キャッチアップがより容易になり、タイムラグが縮まったことは確かである。

特にDVDプレーヤーや低画素のデジカメなどは、アナログ時代では考えられなかったかなり低い技術レベルの企業が、低価格のみを売り物に、新規参入してきている。極論すれば、コモディティ化が進んだエレクトロニクス製品は、部品さえ手に入れば、だれでもそこそこの製品がつくってしまうのである(新宅・善本・加藤、2004 ;延岡、2006)。

このように、デジタル化の時代、制御回路で大きな差を付けられないとすると、日本企業は、被制御系である機能部品あるいは意匠部品での差別化に進まざるを得ない。代表的な事例としては、サムソンとソニー共同のLCDパネル生産、シャープのLCD工場コンビナート化、松下の国内PDP工場やイメージャーデバイスへの大型投資など、製品の競争力を左右する主要機能部品について、自社開発による囲い込みが行われている。結果としてソニーや松下、シャープ、キヤノンなどは、これら機能部品を用いたデジカメやデジタルTVである程度の収益を上げており、現時点における、垂直統合型のものづくりの成功例と言える。

国内の電機業界が低収益であえていた2000年初頭に、この垂直統合型のものづくりに対極する、新しい水平分散型ビジネス形態として、EMSが脚光を浴びた。しかし、EMSの主たる役割は、単に組立と汎用部品の調達を代行するのみにとどまり、企業のバランスシートを改善する効果はあるものの、製品開発や製造における組織能力の進化を生み出す動態的能力は弱く、日本のものづくりの切り札にはなり得なかった。ビジネスモデルが水平か垂直かにかかわらず、収益を上げている製品、企業に共通なのは、キーとなるデバイスの開発や、電機、機構の設計に対する改革、生産技術の強化に対して、たゆまなく能力構築と開発投資を行っていることである。しかしながらこの開発投資は、特に半導体やFDP(Flat Display Panel)などのデバイス関連において莫大な金額がかかる。中途半端な資本力や組織体制では、逆にコストを圧迫し、技術のブラックボックス化も実現できないため、経営者の強い覚悟と先見性(戦略)が常に求められているのである。

一方意匠(外観デザイン)については、自動車では最大の競争源泉であることに対し、エレクトロニクス製品では、あまり重要視されてこなかった。しかしコンスーマ・エレクトロニクス製品のコモディティ化が加速している今日、技術面での差異化は難しく、デザインは重要な差別化要素になりつつある⁵¹。特に携帯電話やMP3プレーヤー、デジカメなど、モバイル製品におけるデザインは製品の売れ行きを大きく左右するため、最後までなかなか決まらない。その上デザイン性が即ち小型化、薄型化に直結する傾向が強く、意匠部品(主に外装)と機能部品(主にPCBアセンブリ、電子部品)の空間レイアウト設計が難しさ

⁵¹ 2006/12 経産省が実施した「感性価値と価格プレミアムに関する意識調査」によると、こだわりのある商品のトップに家電(70%)があげられ、自動車(58%)よりも高い数値を示している。また商品購入時に選択するポイントのトップ3は品質、機能、デザインであり、これらが際だっていれば、他社より1割高くても購入する人の割合は全体の8割を占めるという調査結果がでている。

を増しているのは前述した通りである。

そして最後にソフトウェアについてだが、エレクトロニクス製品の場合も、自動車の ECU と同様、ソフトウェアによって機能実現される比率が増大している。特にデジタル家電では、開発コストに占めるソフトウェアの比率は大きく、デジタル TV などでは 7~8 割と試算されているものもある。また開発納期のボトルネックや製品品質も、従来のハードウェア設計(回路設計)からソフトウェア設計に移ってきており、相対的に意匠部品の重要度が低い分、ソフトウェア開発の優劣が、製品全体に及ぼす影響は、自動車以上といえる。

本稿の目的は、複雑化するエレクトロニクス設計に対する IT の適用であり、ハードウェアの設計における IT 化を中心として論じてきたのだが、最後に、ソフトウェア設計における現状と IT の適用について若干触れておきたい。

5.4 ソフトウェア開発への IT 適用の現状

本稿でも述べてきた通り、ソフト設計は電機、自動車開発にとって共通の重要課題であり、この効率化をはかるために IT 適用の取り組みがはじまっているが、では一体エレクトロニクスと機械とを比較し、ソフトウェア開発(設計~実装~検証)の現場における IT 化のメリットは何なのかについて、考えてみたい。

ソフトウェア開発を IT 化するメリットは、ハードウェア開発と同じく、設計プロセスそのものを効率化するものと、プロセス間のつながりを効率化するものとに大別できる。設計プロセスは大きくソフトウェア全体の構造や役割を決める仕様設計(機能設計)と、C++や JAVA などのコンパイラ言語でコーディングを行う実装設計(構造設計)にわかれる。例えばハードウェア設計で使われている HDL 開発環境や回路設計 CAD などは、機能仕様を論理設計し、実装設計にその情報をわたすツールであり、開発メンバーが共通して理解できるように標準規格で書かれている。ソフトウェア開発ではこれらに相当するものとして、現在 UML がポピュラーになりつつある。この UML は「統一モデリング言語」と訳されているのだが、言語といっても言葉ではなく、ソフトウェア設計手法や図の表記方法を統一した標準規格のひとつである。今日の大規模ソフトウェアを開発する際に、開発者各々の設計手法や表記方法を持ち込んでいては、コミュニケーションを取ることは難しい。そのため効率化をはかることを目的とし、UML は米国 Rational software 社 (後に IBM が買収)で誕生した。UML は、オブジェクト指向の考えに基づいており、C++、Java 等のオブジェクト指向言語で実装を行う際には、仕様設計をそのままソースコードに展開することもできる。今日 UML に準じたチャートを描くだけであれば十分に使えるフリーや数万円の安いツールが出回っているため、今後も UML をベースとした、ソフトウェアの記述と共有の普及はすすむであろう。

次に、この UML など書かれた仕様設計と、コンパイラ言語による実装設計のつながりに対する IT 化のメリットについて考えてみたい。結論から言うと、ハードウェア設計における論理設計と実装設計、すなわち、回路図とプリント基板設計、HDL と論理合成の関係と比べて、ソフトウェアにおいて仕様設計と実

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

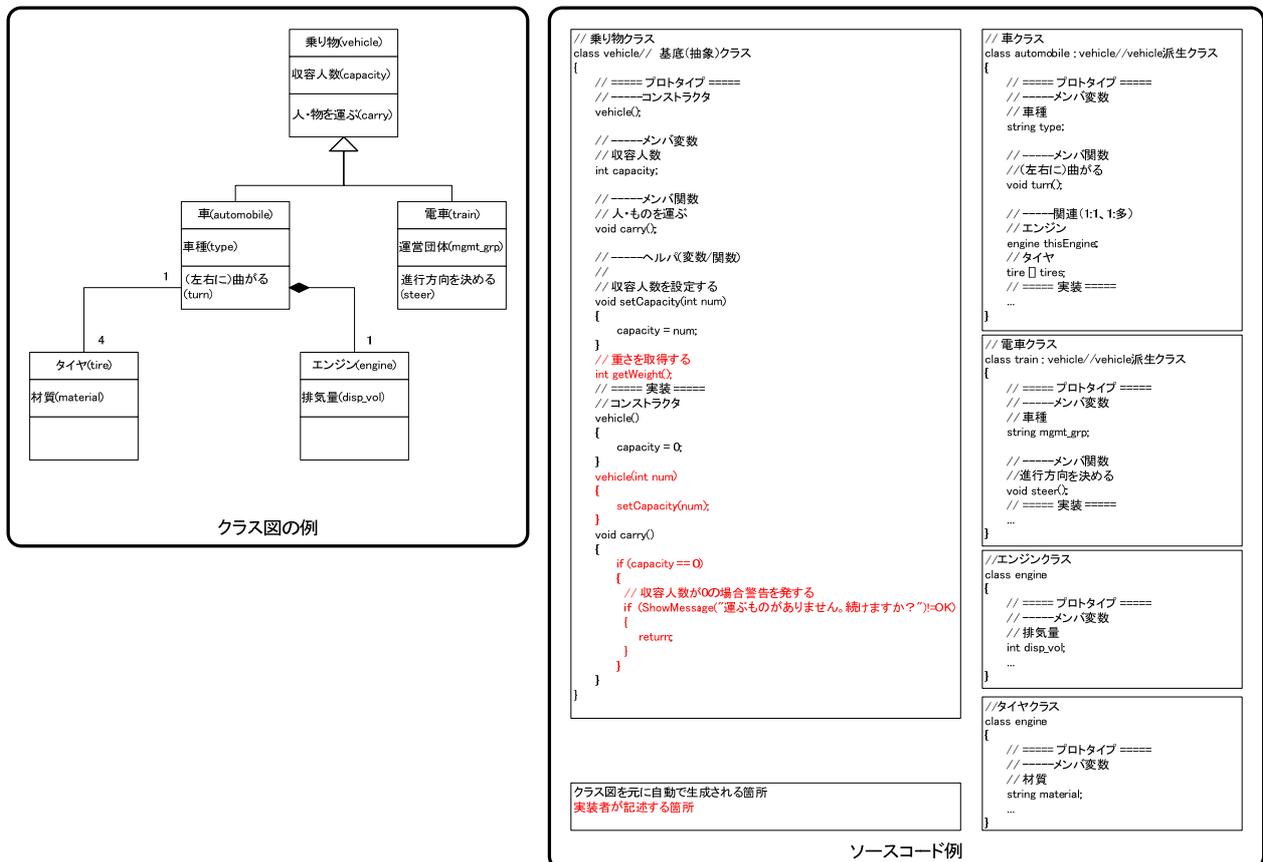
装設計をつなぐしくみのレベルは高いとは言えない。

その理由のひとつに、ハードウェアに比べてソフトウェア開発の場合、仕様設計と実装設計との間でやりとりされる情報量が格段に多く複雑であり、また全てを仕様設計段階で表現することができないという点が挙げられる。比較の例として、回路図とプリント基板との間でやりとりされる情報は、基本的に部品情報とネット情報(ピン間接続情報)であり、これらの情報に忠実にもとづいて、効率的な部品の配置や配線を行うのが実装設計者であり、接続情報の変更や、部品の追加削除を実装設計者が直接行うことはあり得ない。実装側で何か問題を発見しても、必ず上流の回路にもどって、部品やネットの設計変更検討が行われ、その差分情報を実装設計に伝達するというサイクルを経る。したがって、回路図(ドキュメント)とプリント基板(成果物)の間に齟齬はない。

一方ソフトウェア開発では前述のとおり、UML に従って仕様設計すれば、その成果物のひとつであるクラス図(図 36)を利用してソースコードを自動的に出力することができる。しかし自動的に展開されたソースコードだけでは不十分なため、実装設計段階で追記や変更を必ず行う。

この実装設計段階でソースコードに加えた変更は、どの部分を仕様設計の成果物へ反映すべきかを人手で判断しなければならない。また、要件変更等により、実装設計開始後に仕様設計の変更を行った場合、そこから既存のソースを保持しながら、再び意味のあるソースコードを出力することはできない。これは、既に存在するソースコードと仕様設計間の齟齬が、仕様設計が変更されたことによるものなのか、実装設計者が意図的に変更したものなのかを自動的に判別できないからである。

[図 36] クラス図とソースコードの関係



いずれにせよ、設計変更時には必ず仕様書(ドキュメント)とソースコード(成果物)の一貫性を持たせるために、人による判断と作業が発生し、これを怠るとレビューやデバッグの効率が著しく落ちる。

加えてソフトウェア開発は、ハードウェアと違い、基板を発注する、部品を購入するなど、物理的な制約条件無しにビルド(試作)を行うことが可能であるため、仕様設計の一部が完了した段階で同時並行的(サイマルテニヤス)に実装設計を開始し、さらにそれと並行して他の部分の仕様設計を行ったり、ユーザー要求に基づいて仕様設計変更 実装を行うことが出来る。こうした「設計変更」の回数は、ハードウェアのそれに比べると圧倒的に多い。そうした中で仕様設計と実装設計のつながりが上手く行くかどうかについては、ソフトウェア開発の品質・コスト・リードタイムといった競争力の観点から見ても重要なのであるが、具体的に何らかの IT を適用し、改善に効果を出している事例は聞かない。

結局のところ、現時点において、UML や CASE などのソフトウェア開発ツール⁵²は、プログラム生成やテストなど、開発作業で使っているケースはあるにしてもそれらは部分的な適用であり、エレキ設計やメカ設計のように、CAD や PDM が開発プロセスの中に開発支援 IT としてしっかりと位置づけられている状況とは言い難い。

しかし、今までのように卓抜したハードウェア設計技術に支えられてきた、日本のエレクトロニクス製品や自動車が、今後その付加価値の源泉をソフトウェアにシフトさせつつあることは明らかである。したがって今後の日本のものづくりの発展のためには、ソフトウェア開発力の強化が鍵を握っていると言える。自国のものづくりをドラスティックにソフトウェア・半導体産業へシフトさせ、数多くの人材や企業、IP を蓄積してきているアメリカや、国をあげてソフトウェア立国をめざすインドなどを含む、新たなグローバル競争概念に適応するためにも、日本のソフトウェア開発の現場においては、開発プロセスや設計手法の整備が急務である。とりわけ今後のソフトウェア開発に必要な IT はどうあるべきか、ベンダーも交え最適なソリューションを議論すべき時に来ていると思われる。

5.5 若干の作業仮説

以上、本稿では、メカ・エレキ・ソフト複合製品の設計・開発プロセスが持つ複雑性の源泉を分析し、より効果的なプロセスに関する探索的な考察を行なった。とりわけ、現代企業の製品開発リードタイムの短縮に不可欠といわれる設計・開発支援のための IT(デジタル情報技術)、特に CAD(コンピュータ支援設計)、CAE(コンピュータ支援解析)、CAM(コンピュータ支援の金型等設計)に着目し、その背後にある設計のロジックが、メカ(機構)系、エレキ(電気)系、そして組込みソフト系で異なっていることを確認し

⁵² CASE(Computer Aided Software Engineering) UML 作成ツールをはじめとして、テストの自動化、テストコードの自動生成、構成管理(プログラムコードのバージョンやリリースの管理)などをふくむ開発支援ソフト群を指す。効果を出すためには設計手法や開発プロセスなどの厳密な運用が必要であり、開発環境ふくめ、使いこなせるだけの技術を持った企業はまだ少ないと思われる。

た。

その上で、エレキ系とメカ系の開発支援ITの対比、自動車と家電系の開発プロセスの対比に重点を置き、複雑化する人工物の設計に対して、設計プロセス、IT、組織能力、アーキテクチャがどのように共進化するか、その方向性を探った。自動車の場合、元来は被制御系であった自動車に、近年電子制御系が急速な勢いで入り込んでいることが、メカ・エレキ・ソフト設計の間の相互作用と緊張関係を生み出しており、それが、製品開発の複雑化に拍車をかけていることに注目した。

とりわけ、制御系であるエレキやソフトは機能設計重視、被制御系であるメカ設計は構造設計重視である、という設計風土の違いが、両者の融合を難しくする一因であることを指摘した。また、製品設計を人工物を表象する記号系と考えた場合、メカとエレキでは、選択される記号系や翻訳のタイミングに違いがあり、これらの設計をコンカレントに行おうとしたとき、情報のやりとりにおいてタイミングのずれが生じうることを示した。

しかしながら本稿は、複雑化する人工物の設計に関する研究における端緒的なものであり、したがって、探索的、かつ仮説構築的である。研究は未だ出発点にあり、今後の研究課題は多い。例えば、自動車という人工物の複雑化と企業の対応に関して、我々は以下のような予想をしている(藤本、2007)。

- ・ 顧客の要求機能や社会的な制約条件(環境・安全対応など)が高度化・複合化すると、人工物としての製品は機能的に複雑化する傾向がある。自動車はそうした製品である。
- ・ こうした機能の複雑化・高度化に対して、ある製品は製品の大幅なモジュール化で対応する。例えばPCである。
- ・ しかし、要求機能や制約条件が一定以上に厳しくなると、モジュラー化による処理は難しくなり、製品はインテグラルかつ複雑なものにならざるをえない。こうした人工物を正確に機能させるには、電子制御系の発展は必須である。自動車はそうした製品である。
- ・ また、機能の複雑化・高度化に対して、ある種の家電エレクトロニクス製品は、制御系・被制御系の双方をメカからエレキ・ソフトに置き換え、さらに全体をデジタル化させることによって開発の複雑性を低減させること(例えば回転部品の廃止)で対応している。例えばテープレコーダーに対するICレコーダーである。
- ・ しかし、技術的・物理的な理由により、被制御系を中心に機構部品(メカ)が多く残り、結果としてメカとエレキ・ソフトの共進化が促進される製品もある。自動車はそうした製品である。
- ・ この結果、自動車は、被制御系であるメカ設計の高度化と、制御系であるエレキ・ソフト設計の高度化とが、同時進行で起こる傾向がある。しかし、メカ・エレキ・ソフトの設計高度化が、相互に協調的な形で起こるとは限らない。
- ・ とくに、この3つの設計系は、機能的および歴史的な理由から、機能設計重視か構造設計重視か、

記号系として何を選択するか、記号間の翻訳をどのように行うか、などに関して、異なる設計風土を持つ傾向があり、それらは分化していく傾向さえある。

- ・ また、自動車に関しては、もともと被制御系の人工物であったという歴史的な経緯もあって、メカ > エレキ > ソフトという力関係が今でも見られる。
- ・ こうした分化傾向に対抗して、複雑化する人工物におけるメカ・エレキ・ソフト設計の統合化を進めるには、設計活動の源流にある「自然言語=コトバによる人工物の表現」をより精緻なものにする、あるいは開発上流におけるメカ・エレキ・ソフト設計者を巻き込んだチームワーク設計を促進する新たなITを模索するなど、開発上流における統合化の努力が極めて重要である。

消費者のニーズが高度化し、環境、エネルギー、安全などに関する制約条件が厳しくなる傾向は、今後も長期にわたって続くと我々は考える。したがって、これに対応する人工物の複雑化も、長期的なトレンドと考えるべきだろう。それに対する対応策としては、製品アーキテクチャのモジュラー化、開発支援IT(3次元CAD・CAE)や品質工学などによるフロントローディング、電子制御系(とりわけソフトウェア)の高度化、チーム開発の組織能力の構築など、様々な打ち手を総動員する必要がある。

この問題に対する総合的な解に関しては、まだ探索の緒に付いたばかりである。しかし、少なくとも現段階で予想できることは、この問題への対応を誤る企業は、窮地に陥る怖れがある、ということである。本稿は、こうした人工物の設計あるいはものづくりの、長期的な課題に対する、端緒的な試論と位置づけられよう。

参考文献

- 青島矢一、武石彰(2001)「アーキテクチャという考え方」『ビジネス・アーキテクチャ』藤本隆宏・武石彰・青島矢一編、有斐閣
- 新木廣海(2005)『日本コトづくり経営』日経BP社
- Baldwin, C. Y. and K. B. Clark(2000) Design Rules: The Power of Modularity, MIT Press, Cambridge, MA. (安藤晴彦訳『デザイン・ルール』東洋経済新報社、2004)
- Clark, K.B. and Fujimoto, T.(1991) *Product Development Performance*, Harvard Business School Press, Boston (田村明比古訳『製品開発力』ダイヤモンド社、2003)
- Fine, Charles. H.(1998) *Clockspeed: Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage*, Perseus Books, MA. (小幡照雄訳『サプライチェーン・デザイン』日経BP社、1999)
- 藤本隆宏(1997)『生産システムの進化論』有斐閣
- 藤本隆宏(2001)「アーキテクチャの産業論」『ビジネス・アーキテクチャ』藤本隆宏・武石彰・青島矢一編、有斐閣

人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計

- 藤本隆宏 延岡健太郎・青島矢一・竹田陽子・呉在恒 (2002)「情報化と企業組織：アーキテクチャと組織能力の視点から」『電子社会と市場経済』奥野正寛・竹村彰通・新宅純二郎編著、新世社
- 藤本隆宏 (2003)『能力構築競争』中央公論新社
- 藤本隆宏 (2004)『日本のもの造り哲学』日本経済新聞社
- 藤本隆宏・東京大学 21 世紀 COE ものづくり経営研究センター (2007)『ものづくり経営学』光文社
- 藤本隆宏 (2007)「人工物の複雑化とものづくり企業の対応 ～制御系の設計とメカ・エレキ・ソフト統合～」ディスカッション・ペーパー、RIETI 近刊
- 富士通・日本発ものづくり研究会 (2007)『モノを作らないものづくり』日科技連出版社
- 西村清彦 (2004)『日本経済見えざる構造転換』日本経済新聞社
- 延岡健太郎 (2006)『MOT [技術経営] 入門』日本経済新聞社
- 緒方興助 (1970)『入門自動制御』(澤井善三郎 監修) オーム社
- 大鹿隆、藤本隆宏 (2006)「製品アーキテクチャ論と国際貿易論の実証分析」『赤門マネジメントレビュー』5 巻 4 号、233-271 .
- 新宅純二郎 (2003)「アーキテクチャ論から見た中国との分業」『日本機械輸出組合 JMC ジャーナル』11 月、2-7 .
- 新宅 純二郎・善本哲夫・加藤寛之 (2004)「中国モジュール型産業における日本企業の戦略」『赤門マネジメントレビュー』3 巻 3 号、95-114.
- Suh, N.P. (1990) *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York (畑村洋太郎監訳『設計の原理』朝倉書店、1992)
- Thomke, S. and Fujimoto, T. (2000) “The Effect of ‘Front-Loading’ Problem Solving on Product development Performance.” *Journal of Product Innovation Management* 17: 128-142.
- 上野泰生 (2005)『実践デジタルものづくり』白日社
- 上野泰生 (2006)「デジタルモノづくりへのアプローチ」『エレクトロニクス実装技術』技術調査会 11 月号、24-29 .
- 上野泰生 (2007)「3 次元ソリューションによるデジタルものづくりの実現」『エレクトロニクス実装技術』技術調査会 7月号、26-31 .
- Ulrich, K. T. (1995) “The Role of Product Architecture in the manufacturing Firm,” *Research Policy* 24: 419-440.
- 山本悦史 (2007)「自動車 EMC 設計における EDA ツール活用の実際」『電磁環境工学情報 EMC』ミマツコーポレーション、No.229(5月号)、13-21.