

自動車生産でのモジュール化の検討

日本大学大学院総合社会情報研究科
立石 佳代

Considerations on the Modularity in the Automobile Industry

TATEISHI Kayo
Nihon University, Graduate School of Social and Cultural Studies

Modularity is a technique to separate the inner structures and the interface among them by setting up architecture in the relationships among modules that are the constitutional units of a machine. Interface stipulates in detail how modules interact, how they are placed (or connected), and how they exchange information. By disclosing the interface the supplier can maintain specialty and differentiation and hence the supplier can take an advantage over the users since the users must rely on them. The source of a complex system is the complex interactions among many parts. Knowledge about a system is a complex knowledge system that involves subsystem selection to be combined and the logic that works behind the system, which is an implicit knowledge that is difficult to formalize and transfer. The knowledge system is indispensable for product development projects. Modularity is considered to be inadequate for automobiles, which need the integrity of whole product, however, modularity of core parts such as hybrid systems has been under way in Japanese companies.

キーワード モジュール化、システムの複雑性、インテグラル・アーキテクチャ、ハイブリッド・システム、ブラックボックス化

はじめに

モジュール化が進み組立工程のローテク化が進んだ製品分野とは異なり、自動車は製品と部品の連関性が高く、製品ごとに細部まで擦り合わせを行いながら専用部品を設計・開発し、全体最適のもとに組み立てられるインテグラル型の完成財だといわれている。日本では自動車などのインテグラル型製品分野において、国際競争力の優位性を発揮し、企業活動も国内を拠点に展開していくことが期待されている。

近年、アーキテクチャという言葉のもとで、モジュール化の議論を企業経営上の指針としてとして利用することが多く、そこでは、「モジュール」と「インテグラル」という分類が選択肢として提示され、設計上の複雑な「擦り合わせ」を必要とするインテ

グラルな領域で日本企業は競争すべきである、といった議論が見られる。しかし、Baldwin and Clark はシステムの進化は飽くまでもモジュール化によって進むのであり、モジュール化されないインテグラルな構造を維持する組織は、変化への対抗力を失い「複雑性の破局」¹⁾に至るとしている。この違いの理解は重要だと思われる(青島,2005)。

藤本(2003)は、欧米の初期の事例を見る限り、名前は「モジュール化」でも、実態はアーキテクチャの改変を伴わぬ単なるアウトソーシングの拡大、つまり購入部品のサブアッセンブリー化²⁾であることが多かった。したがって、全体的には産業の構図を一変させる威力はなかった、と指摘する。

筆者も自動車生産のモジュール化を実現することは容易ではなく、また、日本では購入部品のサブ

アッセンブリー化への方向にも進まないと考える。しかし、製品全体の統合性が不可欠な自動車には、モジュール型構造は不適切ともいわれてきたが、自動車部品のモジュール化がある程度進んでいるのも事実である。

そもそもモジュール化とは、あらかじめ規定されたデザイン・ルールによって接続された、相互に独立性の高い複数のユニットに分解することによって、システムの複雑性を減少させる設計上の行いである。複雑なシステムを取り扱う多くの分野において、モジュール化は有益な概念と認められている³⁾。インテグラルな構造を維持しようとする組織は、変化への対応力を失い、いずれ複雑性の破局に至ることになる。製品システムの進化は、一般的にインテグラルからモジュール化の方向に進む。他方で、製品システムの進化は技術上のイノベーションが起こったりすると、再び、インテグラルな方向へと戻るものである。

本稿ではユニット部品で構成される「ハイブリッド・システム」から、これらのシステムが、より複合度を高めたモジュール化への移行に向かうというモデルを提示し、日本の主要な自動車企業におけるモジュール化推進の実態解明に少しでも迫ることを目的としたい。さらに、ハイブリッド・システムのモジュール化が、外部に情報を漏らさないブラックボックス化となり、国際競争の優位性の維持となることを付け加える。

1. モジュール化と自動車産業

(1) モジュール化とは

モジュールはひとつの単位のことであり、その内部では構造的要素が強く結びつき、他ユニットの要素とは比較的弱く結びつくものである。モジュールは構造的には互いに独立したものであるが、一緒になって働く大きなシステム内の単位であるため、システム全体は、構造面の独立性と機能面の統合を可能にする枠組みが必要になる。そのため、アーキテクチャ(規則)を提供することになる。機械の構成単位となるモジュールの相互関係にアーキテクチャを設定し、インターフェース部分と内部構造を分離する技法が、モジュール化といわれるものである。

モジュール化がもたらす有益性に関する先行研究では、Baldwin and Clark (2000)、藤本・武石・青島(2001)が挙げられる。そこでの有益性は、システムを構成する複数の要素間の調整を簡略化することができ、また調整のためのコストが削減できる、モジュール・レベルの独立性が確保されると、システムに対する変化をシステム全体で見直すことなくモジュール・レベルで対処することができる、サブシステム・レベルでの再利用が可能になる、複数のモジュールに対して同時並行的に設計・開発を効率的に集中できることで、技術革新のスピードを上げることができる、とされている。

(2) 先行研究の検討と本研究の視点

モジュール化といわれる現象には、「製品アーキテクチャのモジュール化(製品開発におけるモジュール化)」、「生産のモジュール化」、「企業間システムのモジュール化(調達部品の集積化)」というものがある(武石・藤本・具,2001)。藤本(1997,2001)は、複合のヒエラルキーという概念を使い、自動車の開発・生産システムを、複合的な階層構造、すなわち、開発・生産の各段階の階層構造が、それぞれ互いに対応し合う複合化した体系を形成しているとし、生産のモジュール化の現象を次のように説明する。

生産のモジュール化を「製品構造ヒエラルキー」と「生産工程のヒエラルキー」で分けると、「製品構造ヒエラルキー」は製品機能との関係を意識しつつ、各部品ができる限り「機能完結」を目指す結果として階層構造が出来上がる。それに対して、「生産工程のヒエラルキー」の場合は、生産工程との関係を意識しつつ、「構造一体」という基準で部品の階層構造を組む。つまり、それは物流・搬送や作業性、製造品質管理などの点で扱いやすい「構造一体モジュール」を指向することである。生産のモジュール化が高いのは「生産工程のヒエラルキー」の方である⁴⁾。

モジュール化の取り組みとしては、欧米の自動車産業では「企業間システムのモジュール化」が進み、日本の自動車産業では「生産のモジュール化」が進展している。このように日本と欧米では、モジュール化への取り組みは異なる。

Baldwin and Clark(2002)は、これまで世界の主要な自動車企業は中央集権化された設計システムに依存してきたが、これから離れつつあると見ている。この見方は、コスト削減、技術革新の加速度、品質改善などの厳しい圧力のもとで、自動車の設計者と技術者は、複雑な電氣的・機械的システムの設計を小さな単位に分割する方法を模索していることからであり、その説明として以下の事例を挙げている。

独メルセデス・ベンツは、米アラバマ州で新型スポーツ車の組立工場建設を計画したとき、複雑な供給システム全体を管理することよりも、大きな生産モジュールからなる、より少数の部品群に再構成することを考えた。自動車部品企業デルファイのもとで、エアバック、暖房・空調システム、計器パネル、ハンドル、ハーネス類などを含む運転席全体を1単位のモジュールとして生産することになった。デルファイの責任範囲は、一定の仕様とスケジュール面の条件のもとでの運転席モジュールの生産のすべてとなり、運転席モジュールのための多くのサプライヤーからなるネットワークを独自に構築するようになった。メルセデス・ベンツ側の仕様とスケジュール情報は、明示的情報として、部品サプライヤーのネットワークの調整と管理、さらに最終製品に組み込まれるモジュール製造のために利用された。

フォルクスワーゲンのアプローチは、さらに進んだ事例となる。ブラジルの同社レゼンデトラック工場では、生産工程のアーキテクチャとそれぞれのセル間のインターフェースを構築し、品質基準を定め、それをサプライヤーに提供している。各サプライヤーは単独で材料を調達し、労働者を確保して、個々のモジュール部品を製造する。それらのモジュール部品を組み立てることで車両を完成させる。フォルクスワーゲンは、サプライヤーにモジュール部品を納入させ、そのモジュール部品と製造されたトラックを検査するだけとなる。

これらは最終組立企業となる自動車企業が、製造工程を多数のサプライヤーに委託することにより、コスト削減や柔軟性を得ようとするもので、これは購入部品のサブアッセンブリー化となるものである。米国の自動車産業におけるモジュール化の進展も、部品を大きくまとめ、その開発・生産をモジュール・

サプライヤーに依頼する傾向にある。

日本自動車産業でのモジュール化は、主にエレクトロニクス技術の分野で進展している(柴田・玄人・児玉,2002)。ITS(Intelligent Transport Systems)などのエレクトロニクス技術の応用により、各自動車企業は製品の差別化を図る。自動車のエレクトロニクス化が進展し多様化すると、自動車企業の開発負担も多くなり、それに対応するために、サプライヤーに依存していかざるを得なくなった。すでに、エレクトロニクスの技術を搭載した部品の開発ができるサプライヤーは、モジュールにまとめあげ、自動車企業に納入している。日本でもエレクトロニクス技術分野での「企業間システムのモジュール化」は進展している。

しかし、インテグラル型の代表的なシステムであるエンジン制御システムなどについては、サプライヤーに依存する方向に動くとは考えにくく、「企業間システムのモジュール化」の方向に進展していかないと予測する。本稿では、自動車産業のモジュール化といわれる現象のうち、日本の自動車企業内における「生産のモジュール化」を取り上げていく。

2. システムの複雑性とアーキテクチャ

(1) 技術の相互依存性

技術をサブシステムから構成される複雑なシステムと見なすと、サブシステムは要素技術であり、それぞれの要素技術が相互に依存し合い、さらに結合して、全体としての技術システムとなる。自動車の場合、エンジンの性能が向上してもそれだけでは機能部品として用いることはできない。エンジン性能の向上を自動車という製品全体に反映させるには、ブレーキにもそれに適合する性能が求められる。エンジン性能を高めるためには、ブレーキの性能向上の開発にも取り組み、最終製品を構成するサブシステムとしての部品の性能を向上させることになる。Rosenberg(1982)は、サブシステム間の性能の不一致を「技術不均衡」と呼ぶ。この技術不均衡を解消するためには、性能が向上した部品に牽引される形で、関係する他機能部品の性能も高めていくことになる。

次に、サブシステム間のインターフェースをどの

ように設計するかということも問題となる。システム製品は、複数のサブシステムにより構成されるもので、それらは一定のインターフェースのもとで結合され、それが協調して動作することで最終製品として機能していくものである。複雑なシステムは、製品設計の段階で、個々の要素技術の性能に加えて、サブシステム間の関係性をどのように設計するかということが問われる。システムを複数のサブシステムにどのように分断するのか、そしてサブシステム間にどのようなインターフェースを設定するというのが、システムの信頼性と性能や拡張性、さらにシステムの発展性に影響を与えることになる。製品システムでは、サブシステム群に分断する仕方が製品の成功を決める要因ともなる。それゆえ、分断されているサブシステムが有機的に統合させるように、1つの製品システムとしてまとまった機能に設計することになる。

サブシステムへの分断には多くの方法があるが、最適な分断方法を選択するには、サブシステムの関係にかかると知識やノウハウが必要になる。それは、どのような方法でサブシステムを分断し、どのようにインターフェースを設定すれば、全体システムとして最適なシステムが構築できるか、という知識である。インターフェースの集合としてのアーキテクチャの功拙、つまり全体網羅・相互背反で設計されているかが、システムの競争源泉として極めて重要である（末松,2005）。

青島（1997）は、このようなシステムに関する知識は、結合させるサブシステムの選択や、システムとして機能する裏面に存在するロジックなどにかかわる複雑な知識系となり、形式化して他に移転することが難しい暗黙的な知識となるという。

（2）製品のアーキテクチャという視点

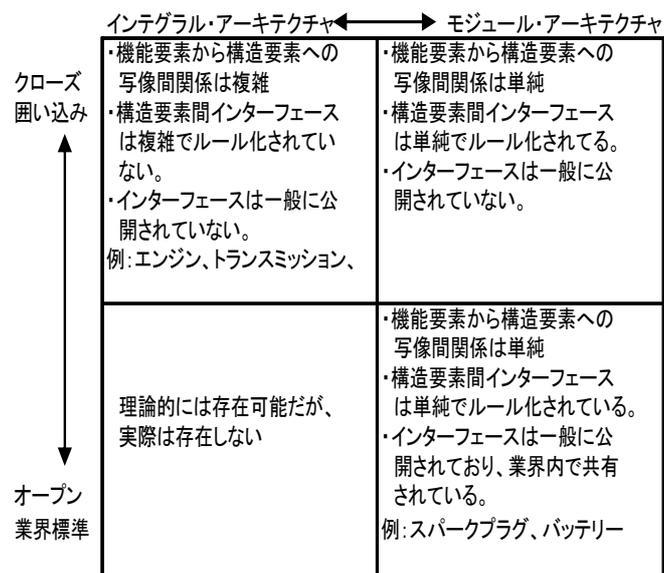
製品アーキテクチャとは、システムを構成部品や工程に分断し、そこに製品機能を配分して、必要となる部品間のインターフェースをいかに設計・調整するかに関する基本的な設計思想のことであり、複雑なシステムを構成するサブシステム間の関係性を規定するものである。

また、製品アーキテクチャは技術の相互作用を組

織構造との関係で捉える概念でもあり、ここでは製品アーキテクチャの類型化として、インテグラル型（擦り合わせ）とモジュール型（組み合わせ）の2つに分類する方法が用いられている。さらに、「オープン型」と「クローズ型」の区分で説明されている。

製品システムは複数のサブシステムから構成されている。それと同じくビジネス・システムも複数に構成されているため、アーキテクチャという共通のフレームワークを採用して製品システムの技術進化と、ビジネス・システムとの適合関係を見ることができる。ここでは、自動車製品はインテグラル型であることを前提に、藤本（2001）による製品アーキテクチャの分類にしたがって、インテグラル・アーキテクチャ モジュール・アーキテクチャ クローズ・アーキテクチャ オープン・アーキテクチャの4つに分類していく（図1）。

図1 製品アーキテクチャの類型



注：現時点での分類

出所：藤本隆宏（2003）『能力構築競争』中央公論新社。柴田友厚、玄場規規、児玉文雄（2002）『製品アーキテクチャの進化論』、白桃書房を参考に作成。

インテグラル・アーキテクチャ

インテグラル・アーキテクチャ製品は、機能群と部品群との関係が錯綜しているもので、自動車はその典型的な製品となる。自動車という製品は、すべての部品が相互に微妙に調整しあってトータル・シ

ステムとして力を発揮する。車の乗り心地は、さまざまな部品をうまく噛み合わせることによって決まってくる。ボディ、エンジン、トランスミッション、シャーシ、タイヤなどの部品は相互に依存して、他の部品と調整してつくられる。さらに、サスペンションのわずかなジオメトリーの違いや、エンジンの重心がアクセルよりわずかに前の位置にあるか、後の位置にあるかという点でも、製品の性格に大きく影響する。また、1つのモジュールが多くの機能を担う。機能と部品が「多対多」の関係にあるため、それぞれの部品の設計者は、設計の微調整を行い、緊密な連携を取り合う。

インテグラ・アーキテクチャ製品は、擦り合わせの巧みさで製品の完成度を競うことになる。モノコック構造を持つセダン系の乗用車は、インテグラル型のアーキテクチャを持つ。

モジュール・アーキテクチャ

モジュール・アーキテクチャの製品では、機能と部品の関係がほぼ1対1になっており、部品には独立性の高い機能が与えられている。部品の機能は、ほぼ完結的であるため、部品相互間の信号やエネルギーのやり取りもさほど必要としない。そのため、インターフェースが比較的シンプルになっている。モジュール・アーキテクチャの製品は、例えば、全体で5個の機能の束を達成したいというとき、1個ずつの機能を完結的に受け持つ5個の部品を寄せ集め的に結合すれば、製品全体の機能が達成されることになる。各モジュールの設計者は、インターフェースの設計ルールについての事前の知識さえあれば、他の部品の設計を確認しなくても独自に設計することができる。

モジュール・アーキテクチャの製品は、組み合わせの巧みさで製品の完成度を競うことになる。キャビン、フレーム、エンジン、車輪などが構造的・機能的にそれほど分離していないトラック系の自動車は、比較的モジュール化されている。

クローズ・アーキテクチャ

複数企業間の連携関係という軸でアーキテクチャ分類を行うと、「クローズ・アーキテクチャ」と「オープン・アーキテクチャ」に分けることができる。日本の自動車企業の場合、各部品の詳細設計はサブ

ライヤーと一緒に設計するか、または任せることもある。しかし、インターフェース設計や機能設計などの基本設計の部分は、自動車企業1社で完結している。セダン型乗用車はクローズ型であり、かつインテグラル型の典型的な製品となる。

オープン・アーキテクチャ

オープン・アーキテクチャ型製品は、基本的にモジュール型製品であり、それに加えてインターフェースが企業を超えて業界レベルで標準化されている製品のことをいう。つまり、企業の枠を超えた寄せ集め設計を可能とし、適切な部品を集めて連結すれば、機能性の高い製品が完成することになる。

日本企業が得意とするのは「クローズ・インテグラル型」の製品分野である。日本製の自動車は「クローズ・インテグラ型」の典型的な製品だといわれている。しかし、自動車も製品全体は、アーキテクチャのタイプが異なる部品の混じり合いで成立している。バッテリーは、インターフェースも標準化されているため「オープン・モジュール型」となる。サスペンションは、周辺の他の部品と相互依存的な関係でインターフェースも複雑であるため、「クローズ・インテグラル型」となる。特にエンジンは高度な技術の集積が必要であるため、擦り合わせの巧みさで製品の完成度を競うことになる「クローズ・インテグラ型」の部品となる。

日本の自動車企業では、品質、性能、コストの全てで競争力の強化が不可欠となっていることから、企業内での機能部品のモジュール化が進展している。その1つが、ハイブリッド・システムのモジュール化である。モジュール型でありながら、「インテグラル/クローズ・アーキテクチャ」の設計思想を持っていると考える。

3. 自動車のハイブリッド・システム

(1) ハイブリッド・システムの構成

自動車のハイブリッド・システムとは、エンジンと電気モーターのように作動原理の異なる2種類の動力源を組み合わせるシステムである。モーターを使用するが、電気自動車のような外部からの充電の必要はない。そのため、燃料供給施設な

ど既設のインフラストラクチャーに適合している。

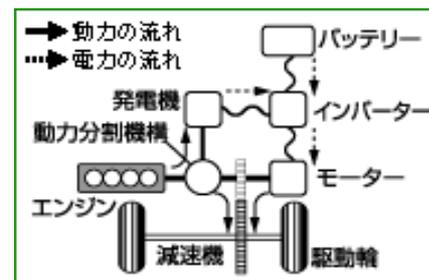
ハイブリッド化による燃費向上には、エネルギーロスの低減（アイドリング運転を自動停止し、無駄となっていたエネルギーを削減）、エネルギーの回生（減速・制動時に熱となっていたエネルギーを電気エネルギーとして回収し、その電気エネルギーを、スターターやモーターの電力として再利用）、モーターアシスト（加速時にエンジン駆動力をモーターが補助）、高効率運転制御（エンジン効率の低い走行条件ではモーターのみで走行し、エンジン効率の高い条件で発電するなど、車両のトータル効率が最も高くなるように制御）の4要素の組み合わせと、エンジンやモーターなどの構成要素の高効率化と最適化が条件となる。

日本の主要な自動車企業の中でも、ハイブリッド・システムの構成やその仕様諸元に違いはある⁵⁾。本田技研工業の「アコードハイブリッド」と「シビックハイブリッド」に搭載されている「平行方式」は、動力の流れが並列であるところから平行方式と呼ばれている。この方式はエンジンとトランスミッションの間にモーターを補助電力として配置し、制動時のエネルギー回生とそのエネルギーを加速時のトルクアシストに使用する。制動時にはエンジンでのエネルギー消費の発生を抑えるため、制動時吸排気バルブを停止し、エネルギー回収効率を高める。

トヨタ自動車が採用するシリーズ・パラレル方式は、エンジン動力を動力分割機構により分割し、一方で直接車輪を駆動し、他方は発電に使用し使用割合を自在に制御する方式である（図2）。電力でモーターを駆動させるため、平行方式に比べてモーターの使用割合は多くなる。この方式は、動力分割機構により直接エンジン動力を駆動させる機械経路、発電機によって電気動力に変換する電力と電池動力を合わせてモーター駆動する電気経路、を持つ。この構成により、クラッチも変速機も使わずに、アイドリングストップ、走行中のエンジン停止やモーター走行を実現し、さらに効率の高いエネルギー回生を可能とさせた。そのため、モーターには低速トルクが大きく、出力の大きいモーターが使われている。2モーター式になっているので、効率性の高

い走行条件によってモーターのみで走行したり、エンジンとモーターの駆動力を合わせて走行したりもする。また、必要な時は発電機で発電しながら走行もする。この方式は、ハイブリッド車「プリウス」や「エスティマハイブリッド」に採用されている。

図2 シリーズ・パラレルハイブリッド構成図
（プリウス用ハイブリッド・システム）



出所：トヨタ自動車 技術情報

（2）ハイブリッド車用の電池システムの開発

ハイブリッド・システムは、エンジン、変速機、ECUなどの制御装置に加えて、走行時に必要な高電圧電池、インバーター、駆動用モーターなどの部品と、エンジンを停止させることに伴い必要となるDCDCコンバーター、電気パワーステアリング、電動エアコンなどの部品で構成されている。ハイブリッド・システムは、駆動力伝達経路に、車を走行させるエネルギーを一時的にストックできる出し入れ可能なエネルギーバッファーとして高い出力と容量の電池を搭載し、貯蔵されたエネルギーを有効に使う循環経路を持つという特徴を持つ。

トヨタ自動車では、ハイブリッド・システムにおいて重要なユニット部品となる電池システムを、搭載性と冷却性能の両立が可能なように、電池やパッケージの小型化や冷却性の向上を主体に開発を進めてきた⁶⁾。プリウス用の電池には、ニッケル水素電池が用いられている。小型で高出力・長寿命のニッケル水素電池は、主に正極にニッケル水酸化物、負極に水素吸蔵合金を用いた蓄電池で、電解液には水酸化カリウムを主成分としたアルカリ水溶液が使われている。1997年に販売されたプリウスでは、円筒型の6セル直列ニッケル水素電池を採用、さらに、2000年からはモジュール形状として放熱性、搭載性

に優位な角材が用いられ、また電槽素材には樹脂を用いた6セル直列ニッケル水素電池モジュールが使われるようになった。

2003年からは、電池モジュールと電池セルに関して、電極素材の改良による極板抵抗の低減と、セル間接続構造の改善による部品抵抗の低減により、内部抵抗をさらに減らしている。新型の電池パックでは、電池モジュールの側圧力は左右の拘束プレートと拘束ロッドとロアケースで受けるようにし、車両から受ける力はロアケースと電池モジュール締結部で受け止める構造になっている。電池モジュール数を減らすと電源電圧の低下でモーターや発電機の効率が下がる。この課題に対して、可変電圧システムを採用し、電池電圧を500Vの高電圧に昇圧して使用することにより、モーターや発電機を効率よく駆動させ、これにより電池パックとしての出力性能を確保しながら、電池モジュール数を減らすことになった。こうした電池モジュール数の低減と拘束プレートの樹脂化などにより、従来の電池パックに比べて体積で15%減、重量で25%減と、小型軽量化を達成させている。

さらに電池の安全性の面から、システムメインリレー（電源を遮断するシステムメインリレーは、イグニッションキーのオンオフに連動して開閉し、オフ時には電圧系を切り離し、安全を確保する）ヒューズ一体型サービスプラグ（ヒューズは衝突事故などで電池が短絡したときの感電災害や車両の火災を防止し、サービスプラグは作業者の安全を機械的に回路を切断することにより確保する）電池ECU、電流センサー（電池ECUは電池電流、電圧、温度をもとに充電状態を計算し、車両制御側へ通信することと、電池の異常監視を行う。電流センサーは電池の充電状態を算出する）という高圧関係部品も内蔵している。

電池モジュール数を減らしたため、同様のパワーの充放電を行った場合でも従来に比べて電池の入出力電流は増えた。これに対して、電池モジュールの内部抵抗を低減させることで発熱量を抑制させている。このようにして、ハイブリッド・システムで重要なユニット部品となる電池システムの搭載性と冷却性能の両立を可能とさせたのである。

（3）ハイブリッド・システム用のユニット部品

1997年に発売された量産ハイブリッド車プリウスに搭載されたハイブリッド・システムは、パワーユニット、パワーコントロールユニット、バッテリー、シャーシ、の新コンポーネントで構成され、内燃機関だけで動く従来車にないモジュール型構造となっている（表1）。

表1 主なハイブリッド・システム用のユニット

| コンポーネント | 構成ユニット |
|---------------|--------------------------------|
| パワーユニット | エンジン トリアクスル (含むモーター/発電機) |
| パワーコントロールユニット | インバーター インバーター・ECU |
| バッテリー | バッテリー バッテリー・ECU |
| シャーシ | 電気パワーステアリング 回生ブレーキ ABS |

出所：佐藤修治、早川聖、蝦名博明、田中義博、近藤基志、中川元（1998）『プリウスユニットラインの新生産技術』『TOYOTA Technical Review』第48巻 No2Dec、オーム社。

ここでは、量産ハイブリッド車プリウスに搭載されたハイブリッド・システムの主なユニット部品を取り上げる⁷⁾。パワーユニットの構成は、トランスアクセスとエンジンのユニットからなる。トランスアクセスとは、モーター、プラネタリ式差動装置、発電機が同軸配置されたエンジンからの出力およびモーターからの出力とを合わせた力を車軸に伝達する無段変速機である。モーターには永久磁石型3相交流モーターが使われ、そのモーターの性能は出力、トルク、効率が指標となる。出力向上のためにステーターのロットには多数のコイルが巻かれ、磁束密度が高められている。さらに、複数のステータスロットをまたいでコイルを巻く分布巻きも採用された。コイル巻きには産業用誘導モーターで行われているコイルインサート方式が用いられ、高占積率を確保しながら、コイルを短時間でスターターに巻き固定されるようになっている。

パワーユニット内のモーターの入力と出力の割合を効率と呼んでいるが、ここでの入力と出力との

差となる損失のほとんどはコイル、電磁鋼板を通して熱が発生する。コイルによる発熱はジュール熱であり、電流の2乗と直流抵抗値の積に比例する。そのため、いかにコイルの抵抗値を下げるかが問題となった。その対処として、コイル断面積を増やすこととコイル全長を短縮することが行われた。

高膨張比サイクルの代表的なシステム「アトキンソンサイクル」を応用したエンジンが搭載されている。車軸の駆動力は、エンジンからの駆動力とモーターからの駆動力との相乗の力となる。エンジン停止状態時でも、モーターの駆動力だけで車両を発進させることもできる。エンジンとトランスミッションの結合部分には、マニュアルトランスミッションで用いられているトランスミッションダンパーが使われている。エンジンの回転軸とトランスミッションダンパーの中心が合致しないと、それに導かれる発電機軸とエンジンの回転軸は芯ずれが生じる。そのため、この2軸の芯ずれをいかに少なくするかが取り付けの課題となった。エンジンのクランク回転軸とトランスミッションダンパーの中心を合致させるため、組み付け姿勢を縦置きとして重力が原因となる芯ずれを防止するとともに、クランクシャフトにセンサベアリングを設置するなど、センサー基準で取り付ける工夫がなされた。

電気パワーステアリングとは、電動モーターをハンドル操舵力軽減の動力源として使うパワーステアリングのことである。この電子パワーステアリングの特徴は、ハンドル操舵時のみモーターにて直接アシストすることによる燃料向上で、このシステムの構成は、アクチュエータのステアリングギヤ制御機のコントロールユニット、車速センサーなどからなる。

パワーコントロールユニット内には、バッテリーの直流をモーター駆動用の交流に変換するインバーターが配置されている。このインバーターは、電池から供給される直流を3層交流に変換する装置であり、交流の電力・周波数を変えることによりモーターの速度制御を行うものである。車両1台に対して2式のインバーターが搭載され、6つのトランジスタブロックを交互に開閉させることにより交流を持たせていく。開閉のスピードは数十kHzと高速あるた

め、このときに発生する熱損失を少なくするために半導体スイッチング素子(IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor)が採用された。IGBTはバッテリー電圧を昇圧し、昇圧後の直流をモーター駆動用に交換する半導体素子である。その特徴を挙げると、高速スイッチング、低電力駆動、導通抵抗が少ない、となる。IGBTは大電流をスイッチングする。そのために発熱を抑えることが課題となり、結晶レベルにまで踏み込んだ素子が開発された。

IGBTを組み合わせたトランジスタロック群を、「IGBTモジュール」と呼んでいる。IGBTモジュールは、制御電流600A仕様のもので樹脂ケース内にIGBTとダイオードが3組並列のものが5組並び、1,000本近くのアルミワイヤーで配線される。そこへ600Aの電流が流れると、IGBTを使用しても数kWの熱が発生する。発生した熱をいかに逃がすか、発熱しても従来車車両用ユニットと同様の耐久をいかに保証するかなどの課題が持ち上がり、次の方法が用いられた。

IGBTモジュールには素子の下には導体貼りの絶縁基板が、その下側には放熱板が積層され、そのインターフェースの部分には「はんだ」が使用されている。放熱板は樹脂ケースと接着した外殻で形成され、絶縁基板、はんだなど構成部材の材質やサイズは、線膨張率や熱伝導率、剛性、比重などの要因を考慮して選定された。このモジュールは、本冷機構を待つアルミケースにグリスを介して取り付けられる。素子で発生した熱は、はんだ、絶縁基板、はんだ、放熱板、アルミケース、冷水という経路で放出される。モジュール取り付けの際の課題となったのが、はんだ付けである。このはんだ付けには水素還元リフローと呼ばれる、連続炉の内室を水素雰囲気中に保ち、この中で部材やはんだ箔に熱を加えて、表面の酸化膜を還元しながら付けられる方法が採用されている。

ワイヤボンドの長命化には、接続面積の増加が有効となり、接合が長い方が破断までの時間が稼げ、電気抵抗が減少し接合部分の温度が下降する。剪断力と亀裂進展速度が小さくなり寿命も長くなる。だが、単純に接合径を大きくするだけでは、剪断力と亀裂進展速度が大きくなり不利となった。その対応

として、外縁部がなるべく内側になるように、初期荷重を軽くして、潰れを小さくしてある。

このように、モーターのインサータ方式によるコイル巻き、エンジンの異種共用加工、電気パワーステアリングの品質保証、インバーターのワイヤボンドの長寿化が実用化され、ハイブリッドユニットの性能が高められた。

4. ハイブリッド・システムの基幹ユニットは企業内開発・生産

トヨタ自動車は、地球温暖化防止のためのCO₂排出削減という国際的課題への取り組みのなかで、ハイブリッド車の開発を進め、1997年にエンジンと電気モーターによるハイブリッド・システムを完成させた。遡れば、1970年代にガスタービンハイブリッド車の開発から始められ、電気自動車・ハイブリッド車を対象としたモーター、インバーター、電池の開発が継続されてきた。この絶え間ない取り組みにより、小型バスのコスタハイブリッド(1997年発売)、量産型乗用車プリウスのハイブリッド・システムの開発にもつながってきたのである。このハイブリッド・システムは、ミニバンのエスティマにハイブリッド・システム(THS-C)、乗用車クラウンに同THS-Mの開発に展開されている。さらに、2003年には出力を大幅に向上させたハイブリッド・システム(THS-H)が、新型プリウスに搭載された。このハイブリッド技術は、ディーゼルエンジン車、燃料電池自動車にも応用されている。トヨタ自動車のハイブリッド車累計販売台数は、2005年10月までに5,133百万台となった(表2)。主なハイブリッド車の車名別累計販売台数は表3となる。

表2 ハイブリッド車の累計販売台数 単位：万台

| 年 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 1-10月 | 累計 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|-------|---------------|-------|
| 国内 | 3 | 177 | 153 | 125 | 185 | 199 | 272 | 687 | 494 | 2,295 |
| 海外 | — | — | — | 65 | 184 | 214 | 261 | 660 | 1,454 | 2,838 |
| 合計 | 3 | 177 | 153 | 190 | 369 | 413 | 533 | 1,347 | 1,948 | 5,133 |

出所：トヨタ自動車ニュースリリース(2005年11月25日)

表3 主なハイブリッド車の車名別累計販売台数

単位：万台

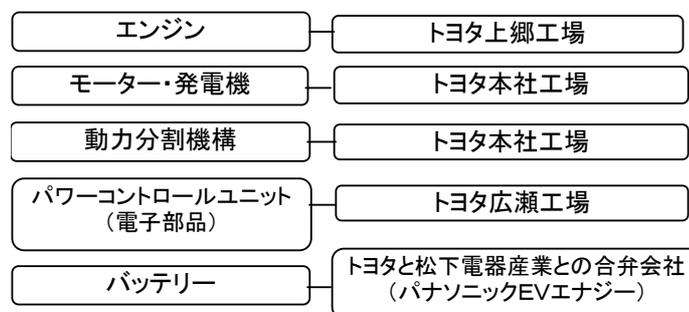
| 車名 | プリウス | エスティマ ハイブリッド | マイルド ハイブリッド 搭載クラウン | ハリアー ハイブリッド | クルーガー ハイブリッド |
|--------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| 国内発売 開始時期 | 1997年12月 | 2001年6月 | 2001年8月 | 2005年3月 | 2005年3月 |
| 国内 | 1,776 | 269 | 59 | 41 | 21 |
| 海外 | 2,492 | — | — | 206 | 140 |
| 合計 | 4,268 | 269 | 59 | 247 | 161 |

出所：表2と同じ。

ハイブリッド・システムの生産技術の面では、例えば、高電圧で作動するモーターの絶縁性能向上やインバーターの大電力に対応した半導体素子、放熱のためのハンダ付け技術の向上などの技術革新が積み重ねられ、性能と品質が高められてきた。

注目すべきは、ハイブリッド・システムの基幹ユニットを企業内開発・生産していることだ。ハイブリッド・システムのエンジンや動力分割機構をはじめ、発電機、パワーコントロールユニットなどの電気、電子部品に至るまで、このシステムに欠かせない基幹ユニットと位置づけられ、図3のように日本の自社工場生産されている⁸⁾。さらに、2006年からは本社工場の機能をハイブリッド車に集中し量産化を図り、日本、米国、中国のハイブリッド車組立工場に安定的に供給する体制に見直されている。

図3 ハイブリッド・システム基幹ユニットの企業内生産
主要コンポーネントの生産工場



出所：トヨタ自動車 技術情報より作成。

5. まとめと今後の課題

(1) 組織内におけるハイブリッド・システム用ユニットのモジュール化の推進

企業内に蓄積された技術を活用して開発された要素技術は、試行錯誤を伴う地道な研究開発から誕生し、開発と製造部門の緊密な情報交換を通じて築き上げられる。日本の自動車企業ではハイブリッド・システムの完成に向けて、システム開発と生産技術開発が同時進行という方法で行われてきた。部門間を越えて連携強化を図ることにより、困難な課題の解決を実現してきたのである。

これまで日本企業は、インテグラル型の製品分野で優位性を発揮してきた。インテグラル型の製品のメリットとして挙げられる非言語的コミュニケーション、例えば以心伝心、暗黙の了解などは、長年の年月をかけて構築されたインターフェースであり、そのインターフェースを共有することにより、相互が半自律的に行動することを可能とする（末松,2005）。

組織の中での複雑なやりとりによって対処されていた相互依存関係の内容が科学的に解明されることで、事前のデザイン・ルールによって最適にコントロールされるようになったとき、モジュール部品が新たに形成される（青島,2005）。多くの部分間の相互作用にある複雑なシステムは、組み合わせるサブシステムの選択や、インターフェースに関する深い理解と知識を必要とする。これらの知識は、組織内部のやり取りのパターンや相互作業や問題解決の方法の中に埋め込まれている複雑な知識系となり、形式化して外へ移転することが困難な暗黙知的性格を持つ知識となる。そのため、複雑なシステムを持つ製品は、他の組織へのスピナウトを促進する可能性は低くなる。

当初、ハイブリッド・システムもインテグラルな技術思想のもとで開発・生産されてきたが、企業内での技術革新によりインテグラルからモジュールの方向に進んだ。それは、エンジンと動力分割機構、発電機、モーターおよび減速機等で構成されるトランスミッションが一体化するような技術革新であったため、モジュール化が可能になったといえるのではないか。

Baldwin and Clark (2000) は、モジュール化の推進は「複雑の破局」を回避し、ある複雑なシステム内で柔軟性を維持する方法を提供することになる。そして、このモジュール化を追い求めようとする推進力は、不確実性と複雑性との間の適切なバランスを確保したいという願いからだと説明する。

製品全体の統合性が不可欠な自動車にはモジュール型構造は不適切とも見られていたが、日本企業の組織内でハイブリッド・システム用のユニットのモジュール化は進んでいた。「複雑性の破局」に至らないための継続的な技術革新を進めていくことが重要である。

(2) 自動車生産でのモジュール化の有益性

モジュール化の補助概念は、「抽出 (abstraction)」、「情報を隠す (information hiding)」、「インターフェース (interface)」の3つの言葉で捉えられ、Baldwin and Clark (2000) は、「ある複雑なシステムは、より小さな部分に分割し、それぞれを別々に見ることで管理できる。ある要素の複雑さが一定の限界を超えるときには、単純なインターフェースを持つ別個の抽出を定義することで、その複雑性を隔離することができる。抽出によって、その要素の複雑性が隠される。すなわち、インターフェースは、より大きなシステムにおいて要素がどのように作用するのかを示す。また、人間にとって、ある複雑なシステムを管理し、または、ある複雑な問題を解決する唯一の方法は、それを分解することである」と説明する。

複雑な設計には、システム内に可視情報と隠された情報がある。システムや問題は、それを分割することで、各部分の複雑性を抽出することができ、さらにインターフェースの陰に隠して見えないようにすることもできる。インターフェースは、モジュールがどのように相互作用するか、相互にどのように置けるのか、情報交換するかというポイントを詳細まで規定するものである。そのインターフェースを公開しないことにより、特殊性と差別性は保たれ、使用者はそれに依存することになるため、提供する側は強い優位性を享受できることになる（末松,2005）。

ただし、インターフェースを公開し企業間のモジ

ジュール化が進展したとしても、複雑なシステムに形成されていったとき、モジュール間の相互作用の内側から、予測できない不具合を生じることもあり得る。また、インターフェースの標準化は、容易に組み換えを可能にするため、システムの最適化を損なうことにもなりかねない。そのため、システム全体が機能しなくなることもある。

これらのことから、日本企業では自動車の性能を統制する機能部品に関わるシステム・モジュール化技術の開発は、企業内で進められると考える。それは、外部に情報を漏らさないブラックボックス化となり、新たな国際競争の優位性を生むことになるであろう。

海外生産拠点の拡大に伴い、部品点数の削減やモジュール化も推進されてくる。また、生産コストの低い国に製造機能が移転している現状からも、日本国内で高機能部品を開発し製造することが求められる。本稿において、企業内で進められているユニットで構成される「ハイブリッド・システム」の開発・生産が、より複合度を高めた「生産のモジュール化」の取り組みであったことを示した。今後の課題として、このモデルの精緻化と、自動車企業別モデルの具体的例別による検証も行っていきたい。

注

- 1) Baldwin and Clark が「複雑性の破局」と呼んでいるのは、相互依存を解明するための科学的努力を行わない組織の状態のことである。
- 2) サブアッセンブリー化は、組立工程の一部をサブラインに移すことにより、メインラインの作業能率の向上、機種間の工数差の平準化を図るものである。最近では、サプライヤーがサブアッセンブリーとなった状態で納入するものと、サプライヤーが組立ラインの脇で、モジュール(サブアッセンブリー化)にする場合がある。このモジュール生産は、完成品メーカーと部品メーカーの労働コスト格差が大きい欧州で進展している。
- 3) ここでの有益な概念と認められている分野は、人口知能・認知、生産工学、ロボット工学などとなる。
- 4) 藤本が複合のヒエラルキーという概念を使い「生産のモジュール化」を説明するのに対して、Baldwin and Clark は、

生産のモジュール化を次のように説明している。製造者は、1世紀以上にわたって複雑なプロセスを単純化するために「生産のモジュール化」を用いてきた。一般的には、複雑な製造物は、製造プロセスをさまざまなプロセス・モジュールまたは「セル」に分割することで製造できる。例えば、自動車企業は、通常、異なる工場で自動車の部品を作り最終組立用に集められてくる。それが可能なのは、完全かつ厳密に各部品の設計スペックが決められているからである。ある部品のエンジニアリング・デザイン(寸法や公差など)は、部品を供給する工場の「デザイン・ルール」の集合を構成している。

- 5) 佐々木正一(2005)「ハイブリッド車とその構成部品」、『自動車技術』Vol.59.No.2、および、トヨタ自動車、技術情報「トヨタハイブリッドシステム」、
<http://www.toyota.co.jp/jp/tech/environment/ths2/> を参考にした。
- 6) 伊藤真典、永田修一(2005)「ハイブリッド車用新型電池システムの開発」、『TOYOTA Technical Review』第54巻 No1.Aug、オーム社を参考にした。
- 7) 佐藤修治、早川聖、蝦名博明、田中義博、近藤基志、中川元(1998)「プリウスユニットラインの新生産技術」、『TOYOTA Technical Review』第48巻 No2.Dec、オーム社を参考にした。
- 8) トヨタ自動車、技術情報「トヨタハイブリッドシステム生産技術」、
<http://www.toyota.co.jp/jp/tech/environment/ths2/seisan.html>、
を参考にした。

参考文献

- 青島矢一、延岡健太郎(1997)「プロジェクト知識のマネジメント」、『組織化学』Vol31,No1。
- 青島矢一(2005)「書評デザイン・ルール：モジュール化パワー」、『組織化学』Vol39,No2。
- 伊藤真典、永田修一(2005)「ハイブリッド車用新型電池システムの開発」、『TOYOTA Technical Review』第54巻 No1.Aug、オーム社。
- 井村直恵(2004)「商品化プロセス管理」、日置弘一郎、川北眞史編『日本型MOT 技術者教育からビジネスモデルへ』、中央経済社。
- 川北眞史(2004)「製造技術・技能管理」、日置弘一郎、川北眞史編『日本型MOT 技術者教育からビジネスモデル

- へ』、中央経済社。
- 佐藤修治、早川聖、蝦名博明、田中義博、近藤基志、中川元 (1998)「プリウスユニットラインの新生産技術」、『TOYOTA Technical Review』第48巻 No2.Dec、オーム社。
- 佐々木正一(2005)「ハイブリッド車とその構成部品」、『自動車技術』Vol.59.No.2。
- 佐々木正一(2005)「トヨタにおけるハイブリッド車開発の歴史」、『TOYOTA Technical Review』第54巻 No1.Aug、オーム社。
- 佐藤修治、早川聖、蝦名博明、田中義博、近藤基志、中川元 (1998)「プリウスユニットラインの新生産技術」『TOYOTA Technical Review』第48巻 No2 Dec.オーム社。
- 経済産業省 産業競争力戦略会議『競争力強化のための6つの戦略』、2002年5月10日。
- 柴田友厚、玄場公規、児玉文雄(2002)『製品アーキテクチャの進化論』、白桃書房。
- 末松千尋(2005)「モジュールとインターフェース、あるいはネットワークの効用」、「商品開発・管理学会第5回全国大会講演・論文集」。
- 田上健、宮崎寛、川端康己、山本俊彰、広瀬降雄、中川元 (1997)「EV、HVユニットの生産技術開発」『TOYOTA Technical Review』第47巻 No2 Nov.オーム社。
- トヨタ自動車、技術情報「トヨタハイブリッドシステム」、
<http://www.toyota.co.jp/jp/tech/environment/th2/>。
- トヨタ自動車ニュースリリース(2005年11月25日)。
- 藤本隆宏(1997)『生産システムの進化論 トヨタ自動車にみる組織能力と創発プロセス』、有斐閣。
- 藤本隆宏、武石彰、青島矢一編(2001)『ビジネス・アーキテクチャ製品・組織・プロセスの戦略的設計』、有斐閣。
- 藤本隆宏(2003)『能力構築競争』、中央公論新社刊。
- 藤本隆宏(2001)「アーキテクチャの産業論」、藤本隆宏、武石彰、青島矢一編『ビジネス・アーキテクチャ 製品・組織・プロセスの戦略的設計』、有斐閣。
- 武石彰、藤本隆宏、具承桓(2001)「自動車産業におけるモジュール化 製品・生産・調達システムの複合ヒエラルキー」、藤本隆宏、武石彰、青島矢一編『ビジネス・アーキテクチャ 製品・組織・プロセスの戦略的設計』、有斐閣。
- Baldwin, Carliss Y., Kim B. Clark (2000), “Design Rules: The Power of Modularity,” MIT Press, (安藤晴彦訳『デザイン・ルール』東洋経済新報社、2004年)。
- Baldwin, Carliss Y., Kim B. Clark (2002)「モジュール化時代の経営」、青木昌彦、安藤晴彦編『モジュール化 新しい産業アーキテクチャ』、東洋経済新報社。
- Rosenberg (1982) Inside the Black Box : Technology and Economic, and History, Cambridge University Press.
- 八重樫武久(2005)「ハイブリッド技術の現状と将来」、『TOYOTA Technical Review』第54巻 No1 Aug、オーム社。

2006年6月15日受理
2006年8月30日採録