



複雑化する人工物の設計・利用に関する 補完的アプローチ

藤本 隆宏*

Complementary Approaches for Designing and Using Complex Artifacts

Takahiro FUJIMOTO*

Abstract— This paper explores the complementary nature of multiple approaches for designing and using complex artifacts when users' functional requirements are highly demanding, and environmental constraints that their designers confront are stringent. Such approaches include axiomatic design, architecture theory, quality function deployment (QFD), quality engineering (QE), total quality management (TQM), technology and operations management (TOM), industrial engineering (IE), digital engineering, and automation. The paper argues that practitioners should use these approaches in more systematic ways, and researchers in each approach need to share each other's knowledge for achieving the same goal – coping with complex artifacts.

Keywords— design, complexity, architecture, artifact

1. はじめに：グローバル化と比較優位原則

21世紀はグローバル化の世紀だといわれる。グローバル化とは、国境を越えヒト・モノ・カネ・情報の相互依存性が強まることを意味する。その点、20世紀は、二度の大戦、保護貿易、イデオロギー対立など、グローバル化への逆行が目立つ世紀であった。21世紀は、そうした逆行現象が減り、また技術革新によりモノや情報の移動コストが飛躍的に下がったのである。

確かに21世紀の最初の10年、投機経済の野放図なグローバル化が米国発の経済危機を招いた。よって当面、投機マネーへの規制は強まろう。世界不況に応じた保護貿易の動きも、一部で一時的に強まろう。しかし実体経済のグローバル化、つまり、自らのニーズで買う者と、自らのリスクで生産する者の間のグローバルな取引自由化（貿易自由化）の流れは逆転しないだろう。

貿易自由化が進むとき、産業ごと国ごとの相対生産性の違いが国際分業を生み、各国民はその便益を受ける。この基本論理を「比較優位原則」という。しかし「微細な産業内貿易」、例えば自動車の車体内板用の鋼板を韓国から輸入、外板用の鋼板を韓国へ輸出することが常態

の現代において、比較優位産業の見極めは難しい。そこで筆者は、従来の「生産の比較優位説」に対し、「設計の比較優位説」を提起する。詳細は他に譲るが[1]、顧客に至る「設計情報の流れ」を制御する現場の「ものづくりの組織能力」がある国に偏在し、製品の設計諸要素（機能・構造・工程）間の抽象的な対応関係を表す「アーキテクチャ」がそれと適合的であるとき、その製品はその国で競争力を持つ傾向がある、との仮説である。ここで留意すべきは、第1に、設計者が事前に決める「ミクロ・アーキテクチャ」と、市場により事後に淘汰される「マクロ・アーキテクチャ」を混同しないこと、第2に、製品カテゴリー（例えば「自動車」）に固有のアーキテクチャは存在しない、という認識である¹。

2. 制約条件と擦り合わせアーキテクチャ

さて、実体経済がグローバル化する時代に、日本にはどの現場、どんな産業が残るのか「設計の比較優位」をベースに考えてみよう、というのが筆者の提案であるが、産業（製品ジャンル）に固有のアーキテクチャが存在しない以上、我々は、より抽象度の高い表現で、個物の製品特性を見極めねばならない。

*東京大学大学院経済学研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Received: 30 January 2009, 14 February 2009

1. 本稿は、藤本隆宏「人工物と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」(MMRC Discussion Paper No. 187, 東京大学, 2007) を大幅に加筆修正したものである。

設計論の基本に戻るならば、機能設計に対する要求水準が高い場合、あるいは構造設計にかかる制約条件が厳しい場合、他の条件を一定とすれば、当該人工物（例えば製品）のアーキテクチャはインテグラル寄りになると予想される。条件が厳しければ、機能パラメータも構造パラメータもピンポイントで厳しく最適化する必要が出てくるからである。その場合、ある人工物に対応する機能・構造連立方程式の解は、製品特殊な解となりやすい（解法が特殊だという意味ではなく、設計パラメータの値が製品特殊的という意味である）。いい換えれば、一般に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、モジュラー化による対応は難しくなり、製品アーキテクチャはインテグラルかつ複雑なものになりやすいと、筆者は予想する。

さて、こうして見ると、21世紀のもう一つの特徴として浮上りつつある「21世紀は環境制約がグローバルに共有される時代だ」との認識が、重要な意味を持つことになる。いうまでもなく現代は、地球環境に関する制約が厳しくなる時代である。希少なエネルギー資源の国際競争奪戦、地球温暖化論議、国境を越えた環境汚染物質の移動、また、それらを背景とした環境規制・エネルギー消費規制・安全規制の国際調整と厳格化など、人工物の利用者・設計者が、国を越えて厳しい制約条件を共有する時代になったのだ。

こうして、実体経済、環境制約、両面におけるグローバル化が今後進むと仮定するならば、日本の産業・経済に対して、次のような基本指針が妥当であるかもしれない。すなわち、日本の設計現場は、要求水準の高い顧客、達成困難な環境規制など、制約条件の厳しい設計から逃げず、むしろ「複雑な人工物」を、日本の設計現場の十八番としていく必要がある。大部屋でのチーム設計を持ち味とする日本の設計現場は、そういう厳しい製品でこそ、設計の比較優位を發揮してきたのである。ある製品に関して、市場が「複雑なインテグラル・アーキテクチャ」を選択する場合、日本の設計現場は、あえてそうした困難な設計に挑戦し続け、結果としてそれを得意技として体得すべきであり、それが21世紀の日本産業の競争優位の源泉となる。仮に、個々の設計者が、マイクロ・アーキテクチャのモジュラー化に邁進するとしても、事後的に世界市場により選択される日本製品は、インテグラルである可能性が高いのである。

3. ピンポイント機能実現のための総動員

こうした「製品（＝人工物）の複雑化」に対して、現代の企業は、複数の補完的なアプローチで対応する必要がある。一部で既に、単一のアプローチでは手に負えないほど複雑化が進行しているからである。

- (1) 設計学的な観点から、製品アーキテクチャのモジュラー化が複雑化に対抗する有力な手段とされる。品質機能展開（QFD）も、この系統の手法である [2]。
- (2) 社会的・市場的理由により徹底したモジュラー化が難しい場合、設計・試作・実験・評価の「問題解決サイクル」を早期・迅速・高効率・正確に回す「統合型組織能力」を開発段階においても高める [3, 4]。経営学の技術管理論・生産管理論（Technology and Operations Management）や技術経営論がこの領域に近い。
- (3) 経営工学的な手法の応用（例えば待ち行列問題の応用など）により、開発プロセスの短縮化・合理化を支援する [5]。
- (4) 開発支援 IT（例えば3次元CADなど）を活用した試行錯誤的なデジタル開発により、設計問題の解決を前倒しで行う（フロントローディング [6]）。これには、メカ系のCADだけでなく、後述の電子制御系の設計を支援する電気設計（エレキ）系のCAD、あるいは組み込みソフトウェアの設計を支援するモデル・ベース開発なども含まれる [7, 8]。
- (5) はじめから機能のばらつきが少ない構造設計を効率的に探索する品質工学（QE）を活用する [9, 10]。
- (6) 機能・構造・工程のばらつきの制御を現場の継続改善を通じて行う全社的品質管理（TQC, TQM）を維持・強化する [11]。
- (7) 設計・生産段階でとれないばらつきを、人工物利用の場でリアルタイムに除去し、最終的に目標機能の実現を保証するため、電子制御系（自動制御）を多用する。

このように、仮に21世紀における日本産業の戦略が、市場の機能要求の高度化や環境制約の厳格化による「複雑化する人工物」にほとんどチャレンジし、複雑な人工物で比較優位を獲得・維持することであるならば、従来、長期雇用、長期取引、設計調整力、大部屋開発、チームワーク、多能工化などを特徴とする「統合型ものづくり」の現場の能力を、いかに高めていくかが一つの鍵を握る。チームワーク、多能工化、相互信頼など、組織風土や組織特性の醸成がその大前提となる。

しかし同時に、それを支える工学的な諸ツール、諸アプローチも、いわば総動員で、補完的に活用されなければ、これから日本の現場が狙っていく「複雑な人工物の機能実現」は、おぼつかないと考える [12]。

たしかに従来は、工学系と社会科学系（経営学・経済学など）の知的交流はやや希薄であったし、工学系の諸分野（固有技術系、制御工学系、管理工学系など）の間

の連携も、また設計現場における機械工学系・電気工学系・ソフトウェア系の技術者集団間の連携も、外野から見ての限り、必ずしも円滑には見えなかった。しかし、現代の人工物利用者・人工物設計者が直面する複雑化問題の大きさを考えるとき、ある種の大同団結は社会にとり必須と考える。いわゆる「横幹連合」は、その重要な一歩であったと解釈することもできよう。

とりわけ「人工物」「設計」「管理」「制御」などをキーワードとする諸領域は、ある意味で、問題意識を共有している可能性が高い。「管理」も「制御」も、英語にすれば control であり、その対象物は人工物 (artifact, 被設計物) なのである。

4. 人工物の利用プロセス：人工物・出力・入力・外部環境

それでは、複雑化する「製品 = 人工物」において、ねらった製品機能の確実な発現を保証するために、企業はどのような方策をとるのだろうか。

前述のように、「複雑な人工物の機能保証」という課題については、固有技術系の工学諸領域 (機械工学、電子工学など)、それを一般化・抽象化した公理系設計論、実物試作を用いた試行錯誤による開発、デジタル情報技術 (IT) を用いた試行錯誤による開発、実験計画を活用する品質工学、現場継続改善によるばらつき制御を目指す品質管理 (TQM)、利用の現場でバラツキを押さえ込む自動制御など、様々な手法が補完的に使われているのが実態であるが、その間の相互関連性は必ずしも明確に意識されていない。本稿では、人工物の利用プロセスを視覚的なモデルとして表現することで、これらの諸手法の間の関連性について考察しよう。

出発点として、制御理論の基本枠組みを援用し、人工物・外部環境・入力・出力の関係を記述してみよう (Fig. 1)。そもそも、人工物の設計プロセスとは、人工物の利用プロセス (人工物の構造が機能を発現するプロセス) を事前にシミュレーションする活動に他ならない [3]。したがって、人工物の設計に関する諸アプローチは、当該人工物の利用プロセスをどのように事前表現するか、という問題に帰着するのである。

そこでまず、人工物の利用プロセスを、最もシンプルな基本形で表現して見よう。Fig. 1 に示したように、「開かれたものづくり論」の枠組にしたがうなら、人工物 (x) は設計情報が媒体に転写された現物である。例えば、構造設計情報 (例えば構造パラメータ群) が物的な媒体に転写されたものが、物財としての製品である。

これに対して、アウトプット (y) は、エネルギーという媒体に機能設計情報 (例えば機能パラメータの経時変化) が転写されたものとみなせる。人工物が利用者や社

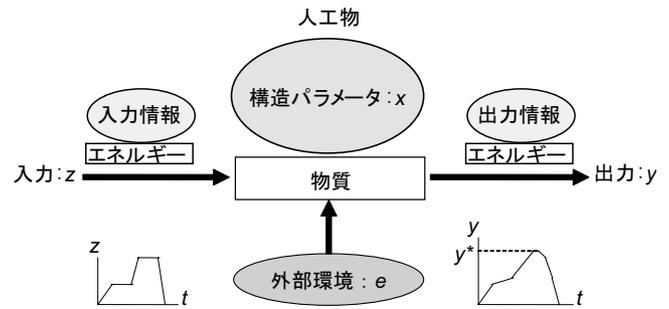


Fig. 1: 機能...パラメータ y^* または機能...関数 f

会にもたらす効用、すなわち機能は、人工物がその利用者に対して行う仕事 (サービス) であり、基本的にそれは、エネルギー媒体に乗った機能設計情報である。要するに、顧客が要求する機能設計情報 (y) はエネルギーに転写され、構造設計情報 (x) はモノに転写される。

また、インプット (z) とは、アウトプットの制御を意図して外から与えられるエネルギー、およびその操作である。機能の発揮を目的として操作されたインプットは、いわば機能設計情報を内包したエネルギーである。制御理論ではこれを操作量 (z) という。

最後に、所与の人工物において、インプットとアウトプットの関係に影響を与える外部の諸力を外部環境 (e) という。人工物の構造 (x) と出力の経時変化 (yt) および入力の経時変化 (zt) の関係は、外部環境 (et) の影響を受けることが多い。

このように、所与の人工物 (構造設計情報 x) は、ある環境条件 (e) のもとで、ある操作入力 (z) に反応して、使用者が要求する機能 (機能設計情報 y) を発揮 (発信) することを期待される。つまり、人工物における機能保証は、最も基本的な形としては、 $y = f(x, e, z)$ と示せる。

5. 公理系設計論：縮約化された表現

この枠組みで見ると、公理系設計 [13] は、人工物の利用プロセスに対する、ある意味で縮約化された事前表現だと考えられる。すなわち、公理系設計は、代表的な環境条件と最適の入力を仮定し、人工物を、その構造要素パラメータ (x) と、代表的な外部環境におけるその機能要素の最適値 (y) との間の関数関係で記述する。つまり、 $y = f(x, e, z)$ は、 e と z を所与とした形で、 $y = f(x)$ と縮約的に表現される (Fig. 2)。

公理系設計は、要求仕様 y^* を所与として、あるべき構造パラメータ x^* を探索する過程であると、近似的に表現される。また、いわゆる品質機能展開 [2] や思考展開図 [14] も、この系統に近い形で設計問題を表現している。

一例として、自動車の燃費性能を考察しよう。自動車

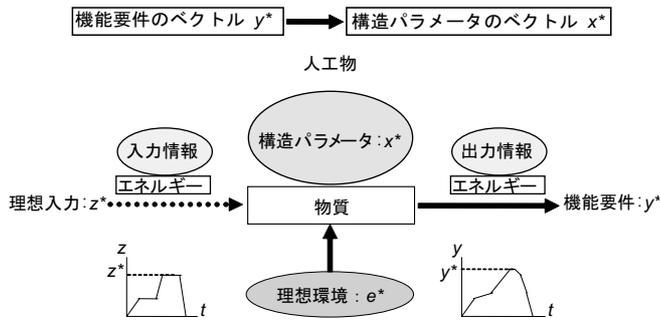


Fig. 2: 公理系設計: $y^* = Ax^*$... 縮約化された表現

の車体, エンジン, トランスミッションなどの構造設計 (x) が決まれば, 所与の走行環境 (e : 路面, 勾配, 曲がり, 標高, ガソリンの質など), 所与の操作入力 (z : スロットル, ギア選択, ブレーキ)のもとにおける燃費性能 (y : ガソリン 1 リッターあたり走行距離など) は推定できるが, その数値はむろん, 走行環境や操作入力の違いによって千差万別である.

これに対して, 例えば日本の自動車業界では, 10 モードと呼ばれる所定の走行環境・操作入力 (平地・平坦・直線舗装路での加速・減速パターン) を前提に, 各モデルの燃費性能を測定することが慣例である. つまり「このクルマ (x) は燃費がリッターあたり 20 キロメートル (y) だ」といった形で表現する. これは, $y = f(x)$ という, 公理系設計の人工物表現と整合的である. したがって, たとえば「燃費 20 キロ (y^*) の新型車を開発せよ」という開発命令が経営陣から出れば, 設計者は, 他の性能要件を所与として, また 10 モードの走行条件 (e, z) を前提に, この性能を満たす構造設計パラメータ (x^*) を探索するのである.

6. 品質工学: 機能パラメータのばらつき制御

田口メソッドとして知られる品質工学 [9] は, きわめて有力な設計パラメータ探索法としても知られるが, その中核をなすパラメータ設計・ロバスト設計は, 制御理論の枠組と, 基本論理において親和的と思われる. すなわち, 品質工学によれば, 入力信号 (M : 本稿では z) に対して, さまざまなノイズ因子 (本稿の外部環境 e 出力に近い) が介在した結果としての出力 (y) のばらつき (S/N 比) を最小に抑え, かつ, 出力の平均値を目標とする出力 (y^*) に近づける努力をするために, 適切な制御因子 (本稿における構造設計パラメータ x に近い) を探索するのが, パラメータ設計である (Fig. 3). ノイズ因子に対して出力のばらつきが少ないことをロバスト性 (頑強性) ということから, これは「ロバスト設計」とも呼ばれる. いずれにしても, 目標機能の達成よりも機能のばらつきの制御を先行させ, ばらつきを抑え込む

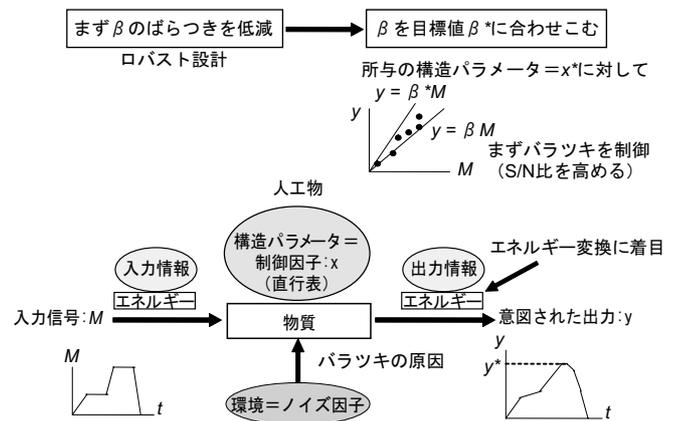


Fig. 3: 品質工学: まずバラツキを制御

構造設計パラメータの探索を, 実験計画法を応用して迅速に行うことが, 品質工学の主たる効能の一つである.

品質工学の基本形では, 入力と出力の関係は比例的と仮定され ($y = \beta M$; β は傾き), この関係あるいは関数 ($y = \beta M$) のことを「基本機能」と呼ぶ (これに対して, 公理系設計では, 出力 y のことを「要求機能」と呼ぶ). 田口メソッドを創出した田口玄一氏は, 人工物の基本機能を見つけるときにはエネルギーの流れに注目せよ, と示唆しているが, これは, 人工物の入力, 出力がエネルギーを媒体にした機能設計情報である, というものづくり論の考え方とも整合的である.

このように, 品質工学におけるパラメータ設計の基本形は, 「出力 = f (制御因子, ノイズ因子, 入力信号)」であり, 上述の制御アプローチにおける $y = f(x, e, z)$ と同形である. 複雑な人工物に対して, フィードバック機構などを用いてリアルタイムで出力 (機能) のばらつきを抑え込もうとするのが自動制御の考え方だとすれば, 品質工学とは, 構造設計パラメータ最適化によって, ばらつき制御を, 構造の中に, いわば事前に埋め込んでしまおうとする試みだと解釈することができよう.

7. 伝統的な機械設計: 制御対象のメカ設計

次に, 機械工学における伝統的な機構設計の考え方をみておこう. もともと機械とは, 機構 (メカニズム) に埋め込まれた構造設計パラメータ (x) によって入力 (z) と出力 (y) の関係を統御するシステムであり, とりわけ入力・出力が人力以外の, たとえば水力, 蒸気力, 火力, 電力などであるものを指す. しかし, 自動制御は機械の要件ではない. 伝統的な機械は, 人間による手動制御が基本である. 産業史においても, イギリス産業革命の「機械化」(mechanization) とは, 人力から蒸気力などへのエネルギーの切り替えを意味していたのに対し, 20 世紀における「自動化」(automation) は, 制御情報を担う

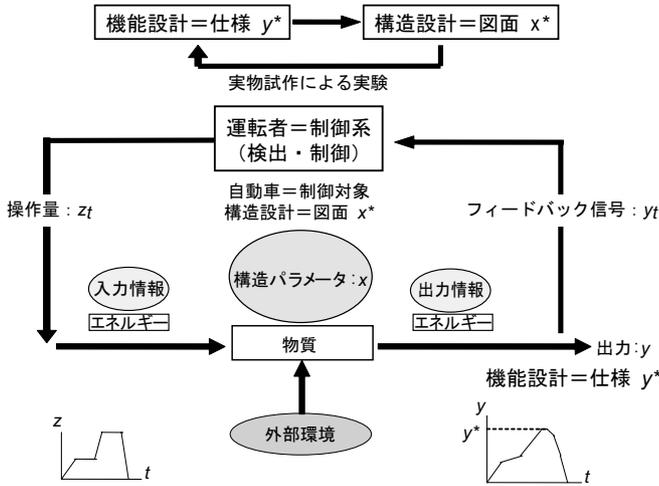


Fig. 4: 自動車設計の伝統的な考え方...自動車 = 制御されるもの メカ (機構) 設計中心

媒体を人の頭脳から他の媒体に移すメディアの切り替えであり、両者は本質的に異なる。

例えば自動車は、20世紀前半には、もっぱら人間が操作する機械であった。いい換えれば、自動車はもともとメカニカルな「制御対象」つまり「制御される側」であり、その制御系（制御する側）は運転者自身、つまり人間に他ならなかった。自動車は、自動制御機械ではなく、手動制御機械だったのである。

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 ; 例えば路面状況や燃料属性) 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。またその開発では、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における機能検証が中心であった (Fig. 4)。

以上をまとめるならば、20世紀前半の伝統的な自動車の設計は、ほとんどが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。制御するのもっぱら運転者であり、制御する側の人工物設計、すなわちエレキやソフトによる制御系の設計は、この段階では視野に入っていなかったのである。

そして、自動車の開発が元来「メカニカルな制御対象の設計」であったがゆえに、基本的には構造設計重視につながった。すなわち「人間がうまく操作すれば狙った機能が実現するような構造設計を行え」というのが伝統的な自動車設計の考え方であるから、あるべき機能を決める機能設計は比較的シンプルでよかったが、構造設計はそれなりに精密なものが要求されたのである。

こうした、伝統的な機械設計における構造設計重視は、いわゆる「図面主義」と呼ばれる傾向にもつなが

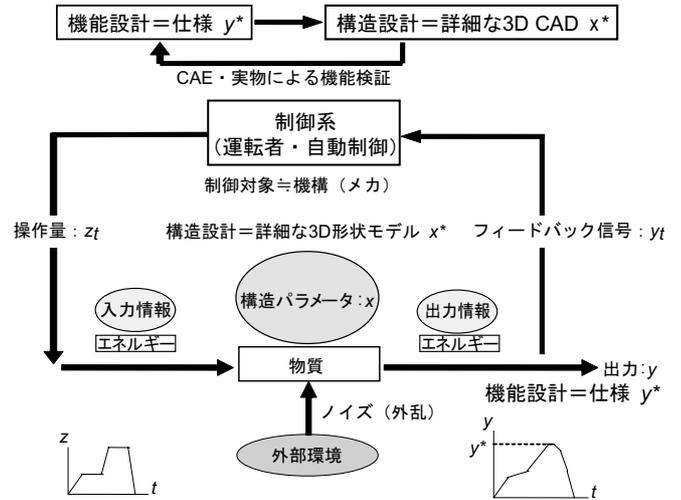


Fig. 5: メカ (機構) 設計中心の CAD/CAE システム

たとえられる。図面主義とは、人工物の設計において最も重要な情報は、人工物の形状・寸法を2次元で図形表現した構造設計情報、すなわち図面だ、という考え方である。あるいは、所与の人工物の製作に必要な情報は図面によって完全に記述できる、という考え方である。この発想のもとでは、図面の構造情報さえ完全であれば、その機能はおのずと推定できるとして、図面が重視される。要するに「機能設計（仕様）は簡潔に、構造設計（図面）は精密に」ということである。

8. 機械設計：CADに残る構造設計重視の伝統

現代の人工物設計では、デジタル情報技術 (IT) による開発支援が普及している。例えば、製品の構造設計情報を電子媒体上で表現する CAD (コンピュータ支援設計)、構造設計情報をもとに機能検証 (シミュレーション) を電子媒体上で行う CAE (コンピュータ支援エンジニアリング)、構造設計情報をもとに金型などの工程設計情報を電子媒体上で表現する CAM (コンピュータ支援マニファクチャリング) などである。CAD は、もともとは2次元の図面情報の電子媒体化から始まったが、近年は3次元の構造設計情報を電子化した3次元 CAD が普及している。

このように、機械設計ではデジタル情報技術の発展が著しいが、それは、機械設計の伝統をある意味で継承しており、したがって、現代の3次元 CAD 主体の設計にも、構造設計重視の発想が色濃く反映されていると考えられる (Fig. 5)。

例えば、現代の自動車設計、とりわけ制御対象である機構 (メカ) 部分の設計では、自動車の各部品を表裏面と質量を伴う3次元形状で表現できるソリッドモデルによって、精密に表現しようとする流れが一部で顕著であ

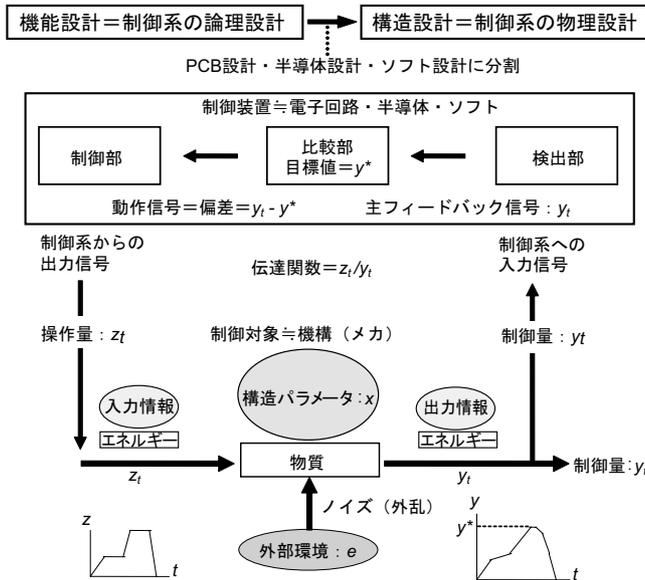


Fig. 6: 制御工学：電気設計・ソフト設計が中心

る！製品構造の完全な3次元表現さえできれば、あとはシミュレーション（CAE）や精密な実物試作によって、機能の検証と改善は後からいくらでもできる」という考え方がその背後にありそうである。

かくして、「機能設計は簡潔に、構造設計は精密に」という、機械（メカ）設計の伝統は、ソリッドモデルによる先進的なデジタル・エンジニアリングに継承されている。そしてこれは、後述のように、機能設計の精密な記述を重視する制御系設計の考えかたと、ある意味で対照的なのである。

9. 機械の電子制御化とエレキ・ソフト設計

しかし、20世紀後半、とくに最後の四半世紀には、メカ的な人工物の電子制御化が急速に進んだ。エレクトロニクスとメカニクスの融合という意味で、この傾向はしばしば「メカトロニクス」と呼ばれる。その背景には、コンピュータなどの電子技術の発展もあったが、同時に、機械システムに対する機能的要求や社会的制約の高まりを指摘できる。

例えば自動車の場合、安全、環境、燃費、利便性などに対する市場および社会の要求が高まるとともに、1970年代ごろから、自動車の電子制御化が急速に進んだ。当初は、一部の機能部品（例えば燃料噴射装置）に、部品単体ごとに電子制御装置が付く程度であったが、21世紀に入るあたりから、これらの電子制御装置が車載ネットワークでつながった車両統合制御へ向かい、自動車の電子制御系は急速に複雑化した。

つまり、自動車は、手動制御のメカ製品から、急速に、手動・自動混合型の人工物へ変化してきた。そしてこれに伴い、電子回路（エレキ）およびソフトウェアからな

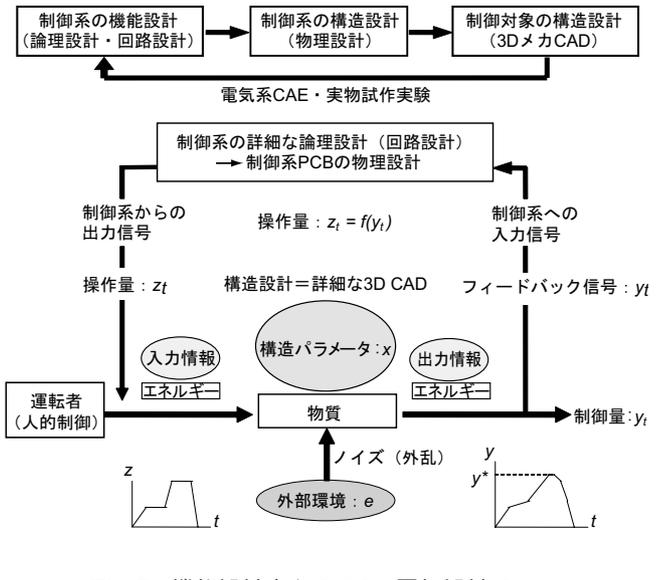


Fig. 7: 機能設計中心のPCB電気設計CAD

る電子制御系が急速に複雑化していった。人工物におけるエレキ設計・ソフト設計の比重増加とは、このように、本質的には自動制御系の拡大を意味している（Fig. 6）。

一般に「制御」(control)とは、ある目的に向けて制御対象（機械など）に操作を加えることである。したがって、制御すべき機能を、事前に明確に記述する必要がある。つまり、機能設計を周到に行う必要がある。制御工学では、人工物の振る舞い、働き、出力、すなわち機能は、例えばブロック図・フロー図・状態遷移図などで表現することになる。

このように、制御部分の設計を担当する制御工学の発想では、人工物の入力（操作量； z ）と出力（制御量； y ）のあるべき姿の明確な記述が、何よりもまず重視される。重要なのはあくまでも $y = f(z)$ であり、構造パラメータ (x) は、この入力・出力関係の実現に貢献する限りにおいて重視される。つまり、制御工学を支える電気設計・半導体設計・組込みソフトウェア設計などでは、機能設計が重視される傾向がある²。

10. 電気設計におけるデジタル情報技術の利用

エレキ系の設計プロセスにおいても、メカ系同様、デジタル情報技術（IT）による開発支援ツールが発達している。しかし、この分野における開発支援ITの発達の態様は、制御系を中心におくエレキ系と被制御系が中心のメカ系では、かなり異なる[7,8]。すなわち、エレキ系の設計支援ITは、制御系の設計プロセスを前提にした、機能設計重視・論理設計重視という、制御系の設計の特性を色濃く反映しているように見える（Fig. 7）。要

2. 奥野・龍澤・渡邊[15]らによる人工物の経済モデルは、こうした制御系としての特性を抽出しており、ここでの分析と親和的である。藤本・大隈・渡邊[16]も同様である。

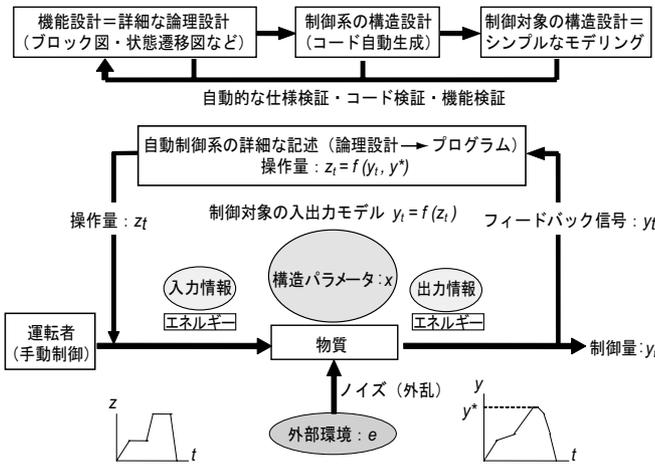


Fig. 8: 機能設計中心のモデルベース開発（ソフトウェア）

するに、エレキ・メカ設計の比重拡大は、制御系の設計の拡大に他ならず、それは機能設計重視のカルチャーを持つ。例えば、制御工学では、構造設計は、ある環境・入力のもとで所定の機能をもたらす関数（たとえば伝達関数）で示される。製品構造は関数によって抽象化されるわけであり、形状・寸法・材質といった構造情報を図面や3次元CADで精密に再現することは、メカ設計の場合ほどには重要ではないのである。

11. ソフトウェア設計とモデル・ベース開発

ハードウェアの振る舞いを制御する「組み込みソフトウェア」(embedded software)も、本質的に「制御系」の設計であり、したがって機能設計重視の傾向が顕著である。すなわち、まず要件の定義を明確にし、制御対象である人工物の振る舞い、すなわち機能の詳細な記述が要求される。ソフトウェア工学において、顧客の要求機能を明晰に記述する要求工学が重視されるのは、その一つの現れである。一方、いったん機能が精密に定義されれば、ソフトウェアの構造設計に当たるソースコードは、自動生成も程度可能である。

つまり、ソフトウェアのモデル・ベース開発は、(1) 詳細な機能設計（論理設計）(2) 自動化の進んだ制御系の構造設計（コード生成）(3) シンプルなモデリングによる制御対象の構造設計を内容とする、機能設計重視の体系だといえる（Fig. 8）。

12. 人工物複雑化に対し補完的アプローチを

以上、「人工物の設計プロセスは人工物の利用プロセスのシミュレーション（事前描写）である」という共通の観点から、設計論、品質機能展開、品質工学、デジタル開発ツール、自動制御などが、「人工物複雑化への対

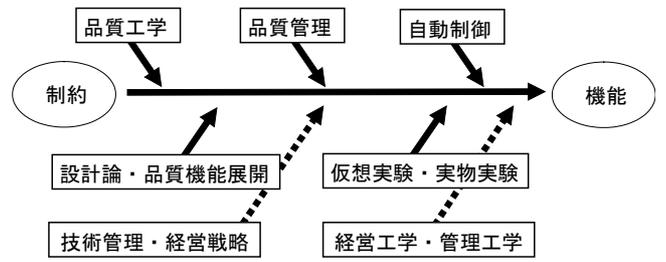


Fig. 9: 機能実現へ向けた方策の総動員

処」という目的を共有し、相互補完することが可能ではないかと論じた。それぞれの専門家から見れば、いかにも粗略な描写であろうが、外野席の社会学者から見える、人工物創造ゲームの素描とご了解いただきたい。

また、本稿では紙面の関係上、管理系のアプローチ、例えば管理工学、品質管理論、経営学系の技術管理論などへの言及はできなかったが、いずれも、製品がねらった機能を発揮することを目標とする設計・開発・製造プロセスそのものを管理・改善するアプローチともみなすことができよう [17,18]。これらを総合するなら、Fig. 9のような系統図となろう。人工物の利用者・設計者を取り巻く制約条件が厳しくなる中で、ねらった要求機能をピンポイントで達成するためには、工学系、社会科学系を問わず、可能なアプローチを総動員する必要がある。それらは、設計・生産・販売・利用の流れのある段階において機能の実現、あるいはばらつき抑制に貢献する。公理系設計論、品質機能展開、品質工学、仮想実験などは、開発プロセスの上流段階（基本設計段階）で威力を発揮する。実物実験や品質管理は、中流から下流（詳細設計から生産まで）で活躍する。自動制御は、利用段階で機能のバラツキを抑える。技術管理論や経営工学は、そのための設計プロセスそのものの改善を支援する。

総括しよう。21世紀、実物経済と制約条件のグローバル化が進む中で、日本のものづくり現場は、どんな組織能力を強化し、どんな固有技術・制御技術・管理技術を練成し、どんな設計現場・生産現場を日本に残すかを体系的に考えていく必要がある。その際、歴史的経緯から「統合型ものづくり」の組織能力が偏在する日本の現場は、常に要求機能や制約条件の厳しい人工物、すなわち、複雑なインテグラル（擦り合わせ）型の製品・工程にチャレンジし続けることに活路を見出すしかなかる。そのためには、不況下においても「統合型ものづくり」の能力構築を怠ってはならぬが、それに加え、管理系、制御系を含む設計支援の諸アプローチを相互補完的に総合し、いわば総動員で現場の技術者を支える必要がある。

仮にそのような総合化が、日本において実現し、日本の統合型ものづくり現場をフルにサポートできるようになれば、きわめて難度の高い人工物の設計・開発が、か

らくも可能になるかもしれない。そしてその時、チームワークで鍛えられた日本の設計現場でしか開発できない人工物（製品や工程）が続出する可能性も出てくる。

デジタル化やモジュラー化の技術が発展した21世紀、少しでも制約条件の緩い製品の設計は、たちまち簡素化、コモディティ化してしまう[19,20]。そうした製品で、日本の設計拠点・生産拠点が比較優位を確保できる可能性は少ない。企業を超える存在である多国籍企業は、むしろ世界中どこに設計拠点・生産拠点を移してもよいわけだから、モジュラー化に対しては海外展開で応じればよいわけだが、日本住民を食わせていく日本の優良現場をどう残していくかは、また別問題なのである。

そうした中で、日本の現場の活路は、個々の設計者にとっては悪夢かも知れないような、きわめて難度の高い設計問題に、集団として挑戦し続けることである。そして日本の産官学は、総がかりで、そうした現場を支援していかなばならない。設計支援アプローチの横断的連携も、その一つの試みであろう。

かくして、21世紀の日本の貿易財セクターにおいて、比較優位のよりどころになるビジョンは、おそらくは、製造業立国論でも、ポスト工業化論でも、電子立国論でも、総花的なハイテク路線でも、後追的な高付加価値路線でも、効率軽視の研究開発大国論でも、漠とした大型イノベーション待望論でもない、と筆者は考える。

それではどこへ向かうべきか。強いて言うなら、日本は「設計大国」になるべきだと、筆者は考える。すなわち、他国のものづくり現場が二の足を踏むような、制約条件や性能要求の厳しい設計難題に取り組む組織能力を鍛え続け、「日本に持っていけば何とか解決してくれる」と世界中で認識されるところまで持っていくのである。

それは、必ずしも先端技術の追求ということではない。たとえ先端技術であっても、技術が部品や機器の中にカプセル化され、他部品とのインターフェースが標準化され、システム全体がモジュラー化されれば、人工物の設計そのものは簡単になってしまう。ハイテク製品であっても、ハイテク部品の寄せ集め（例えばDVDプレイヤー）、あるいはハイテク設備の寄せ集め（例えば汎用液晶）となれば、日本の現場は勝てなくなる。それが、過去十数年における、日本企業の教訓ではなかったか。環境・エネルギー・安全制約の厳しくなる21世紀、そのような設計の無理難題は、増えこそすれ、減りはしないだろう。ここに日本のものづくり現場の活路がある、と筆者は推測する。しかし、設計大国は、鍛えられたものづくり現場、統合型の組織能力、そして総合的な設計支援アプローチを必要とする。とくに、そうした総合的な設計支援アプローチが、欧米でも中印でもなく、日本で確立することになれば、かなりの数の日本住民が、しばらくの間、日本の現場で安定的に食べていけるはずで

ある。今回の不況から回復期に入る201X年の時点で、そのような見通しが立っているかどうか、ここしばらくが、正念場であるようにも思える。

参考文献

- [1] 藤本隆宏: 設計立地の比較優位: 開かれたものづくりの観点から、一橋ビジネスレビュー, Vol.55, No.1, pp. 22-37, 2007.
- [2] 水野滋, 赤尾洋三: 品質機能展開, 日本科学技術連盟, 1978.
- [3] K. B. Clark and T. Fujimoto: Product Development Performance, Harvard Business School Press, 1991. (田村明比古訳, 製品開発力, ダイヤモンド社, 2003.)
- [4] 藤本隆宏, 安本雅典編著: 成功する製品開発, 有斐閣, 2000.
- [5] D. G. Reinertsen: Managing Design Factory, Free Press, 1997.
- [6] S. Thomke and T. Fujimoto: "The effect of 'front-loading' problem solving on product development performance," Journal of Product Innovation Management, Vol.17, pp. 128-142, 2000.
- [7] 上野泰生: 実践デジタルものづくり, 白日社, 2005.
- [8] 上野泰生, 藤本隆宏, 朴英元: 人工物の複雑化とメカ設計・エレキ設計, MMRC Discussion Paper No.179, 東京大学, 2007.
- [9] 田口玄一: 品質工学の数理, 日本規格協会, 1999.
- [10] 橋広計, 河村敏彦: 設計科学におけるタグチメソッド, 日科技連, 2008.
- [11] TQM委員会編著: TQM: 21世紀の総合「質」経営, 日科技連, 1998.
- [12] 藤本隆宏: 人工物の複雑化と設計組織: 自動車を事例に, システム/制御/情報, Vol.52, No.2, pp. 70-75, 2009.
- [13] N. P. Suh: The Principles of Design, Oxford University Press, 1990. (畑村洋太郎監訳, 設計の原理, 朝倉書店, 1992.)
- [14] 畑村洋太郎: 技術の創造と設計, 岩波書店, 2006.
- [15] 奥野正寛, 瀧澤弘和, 渡邊泰典: 人工物の複雑化と製品アーキテクチャ, MMRC Discussion Paper No.81, 東京大学, 2006.
- [16] 藤本隆宏, 大隈慎吾, 渡邊泰典: 人工物の複雑化と産業競争力, 一橋ビジネスレビュー, Vol.56, No.2, pp. 90-109, 2008.
- [17] 藤本隆宏: 生産マネジメント入門, 日本経済新聞社, 2001.
- [18] 藤本隆宏: 広義のもの造りと経営工学, 経営システム, pp. 261-262, 2006.
- [19] 延岡健太郎: MOT[技術経営]入門, 日本経済新聞社, 2006.
- [20] 新宅純二郎: アーキテクチャ論から見た中国との分業, JMC ジャーナル, Vol.51, No.10, pp. 2-7, 2003.

藤本 隆宏



1955年6月生。1979年東京大学経済学部経済学科卒業, 1989年ハーバード大学経営学博士号取得。1990年東京大学経済学部助教授, 1998年同教授。2004年東京大学ものづくり経営研究センター長。