エンジニアリング・デザイン理解を 深めるための知識教育

Fundamentals of the Engineering Design Education

別 府 俊 幸^{※1}
Toshiyuki BEPPU

The creative aspects of product design must be incorporated into a procedure that ensures that client requirements and expectations are satisfied. Manufacturers develop design processes to enhance value to clients and to improve product quality and reliability. A typical design process involves clarification of clients' requirements, identification of both constraints and the context in which the product will be used, and development of one or more design concepts for consideration by the client. The process of defining functions and specifications, detailed design, and analysis of production issues follows. A lecture series on the design process, will enable students to grasp the necessity for having a design procedure and will make them more effective both as designers and as decision makers. This paper presents the course content and gives examples of the teaching approach used.

Keywords : Engineering Education, Engineering Design, Lecture

キーワード : 工学教育, エンジニアリング・デザイン, 授業・講義法

1. エンジニアリング

アーサー¹⁾ はテクノロジーを

- (1) 人間の目的を達成する手段
- (2) 経験 (practice) と構成要素 (components) の集まり
- (3) 文明に役立てることのできる装置 (devices) と工学的経験 (engineering practices) の集まりと定義した。アーサーの定義は、テクノロジーを構成する一要素としてのエンジニアリングにも適応可能と考える。

エンジニアリングでは、人間の要求を満たすために新たな設計解が作り出される。電磁波の反射からレーダーが開発されたように自然現象を特定の目的のために利用し、トランジスタからICが開発されたように既存の技術を組み合わせて新たな技術を作り出す。そして高速輸送機関や通信網のようにエンジニアリングが作り上げたシステムは、文明そのものを発展させる。

このようにエンジニアリングでは、人間の目的を達成する手段が作り上げられる。この人間の要求を設計解へと転換するプロセス、すなわち目的から手段を作り上げるプロセスが、エンジニアリング・デザインである。

2. エンジニアリング・デザイン

開発プロセス (デザイン・プロセス) においてエンジニアは、保有する技術と過去の経験を基に設計解を提案する。このため要求に対する設計解は、エンジニアによって異なったものとなる。

さらにエンジニアは一個人、一企業だけではなく、集団としても過去の経験を活用する。建築における尺モジュールは日本人の生活寸法から踏襲された経験であり、規格化されたパーツ、たとえばJISやANSIスタンダードは、成功した経験の蓄積である。

あるいは、技術以外の要因によっても設計解は変化する。保有あるいは他社特許、工場設備や協力工場の状況、パーツ調達コスト、他社や市場の動向など、設計解に影響を与えるパラメータは少なくない。

このように工学における装置やシステムは、技術的な必然性あるいは最適性からストレートに求められる解ではない。要求を満たす設計解は、実現可能な選択肢の中から、エンジニアの経験に基づいた選択を繰り返して作り上げられる。エンジニアリング・デザインは意志決定のプロセスであり、エンジニアの経験や能力が、設計解の優劣に大きく影響する。

3. エンジニアリング・デザイン教育

新しい国際線旅客機の要求に対してボーイングは787を、エアバスはA350を開発したように、作り上げ

2013年9月28日受付

※1 松江工業高等専門学校

られる設計解は、エンジニアやメーカーによって異なったものとなる。しかし設計解が異なるとしても、エンジニアやメーカーは、クライアント要求の満足を目指している点では同じである。

このため、クライアント要求を見落とさず、さらに要求に対する満足を高め、加えて信頼性を確保するための開発手法が研究されてきた^{2)~5)}。そして、適切なデザイン・プロセスの運用が設計解の品質につながる事が明らかにされ、プロセスの向上が計られてきた。さらにデザイン・プロセスは、品質向上を目的としてISOマネジメントに標準化されている⁶⁾。

エンジニアリング・デザイン知識教育では、先人がどのように設計解を作り上げてきたかを教示し、高品質・高信頼の製品を生み出すためには何をすべきかを議論する。そして優れた設計解とは何か、優れた設計解を作り出すためにはどうすべきかを推考する。

工学理論の習得だけでは、優れたデザインは生み出されない。あるいは、設計解の作成トレーニングだけでも不十分である。完成してもクライアント要求を解決する設計解でなければ、売れない製品であり、使われない装置である。

エンジニアリング・デザイン能力養成のためには、知識として設計解構成のための方法論を教示し、そしてデザイン・プロセスにおける意志決定を演習し、さらにクライアント要求解決を目標とする設計解作成をトレーニングすることが有用と考える⁷⁾。

4. エンジニアリング・デザイン知識教育

以下に知識教育内容を議論する。

4.1 エンジニアリング・デザイン・プロセス

デザイン・プロセスを表すモデルはいくつか提案⁸⁾されているが、本論ではプロセスを以下の6段階とし

図1 エンジニアリング・デザイン・プロセス

て議論する(図1)。

- (1) クライアント要求の明確化
- (2) 制約条件・環境条件の決定
- (3) 評価基準の策定
- (4) コンセプト考案
- (5) 目標(機能・仕様)の策定
- (6) 設計解の開発

(1)~(3)のプロセスの前半では、設計解に求められる要求を見出し、デザインの可能性を幅広く考える。続く(4)~(6)の後半では、要求を可能な限り高い水準で統合する設計解へと集約する。

以下、それぞれの段階および教育内容を議論する。

(1) クライアント要求の明確化

クライアントは、装置やシステムを使用することによって、要求を実現したいと希望している。移動を楽しむために自動車を使いたい、業務を効率化するためにコンピュータを使用したい、などと望んでいる。エンジニアリング・デザインの目標は、クライアント要求を解決する設計解の完成である。

「クライアント要求」と記せば、当初から明らかなのにも思われる。ところが多くの場合、要求を解き明かすことが必要となる。クライアント要求のほとんどは、「売り上げを増やすホームページ」のように漠然とした曖昧なものである。あるいは仕様書が示されることもあるが、その中には多くの未決定要素が残されている。したがってエンジニアは、曖昧な要求に隠された真の要求を探り出して、明確化(文書化)することから始めなければならない。

最終的に作り上げられる設計解には、エンジニアが認識した要求だけが組み込まれる。リストアップされていない要求が、設計解に反映されることはない。要求が誤って定義されていれば、たとえばサーバーに必要な通信能力が不足していれば、開発された設計解は使い物にならない。

要求が定義されなければ、要求を解決する設計解は開発できない。デザインを完成させるためには、要求定義のための考え方や方法論を学ぶことが必要である。

(2) 制約条件・環境条件の決定

設計解を作り上げるためには、設計解が満たさなければならない制約条件や、装置やシステムが使用される環境条件を明らかにしなければならない。

制約条件には、法律や安全基準などの文書化されたものだけでなく、社会通念や慣習など明示されないものもある。たとえば駅の券売機は、既存の装置と置き換え可能な大きさであるだけでなく、当該国や地域の料金体系や乗車方法に適合し、ユーザにとっては従来装置と違和感のない操作性でなければならない。

さらに製品が使用される環境を正しく把握することも不可欠である。熱帯で使われる装置には強制換気が必要かもしれないが、極地で使われる装置には凍結防

止が必要かもしれない。しかし「かもしれない」では、設計解に向けての決定はできない。ワーストケースでは何℃になるのか、湿度や風や結露や塩分はどうか、安定した電源は得られるのかなど、環境条件を明らかにしなければ、環境に対応できる設計解は開発できない。

実際、多くの製品事故は使用環境を見誤ったことに起因する^{9), 10)}。事故に至らないまでも、故障や十分な性能を発揮できない原因となり得る。

設計解を完成するためには、制約条件や環境条件を十分に調査し、設計解が条件に適合できることを確認しなければならない。しかし筆者の経験では、ほとんどの学生は、これらの条件が存在することに気づいていない。知識として教示し、議論し、意識を向けることが必要である。

(3) 評価基準の策定

設計解に対する要求や条件は多岐多様である。その中で絶対に必要な要件は何か、優先される要件はどれか、許容範囲はどれだけか、許容範囲の中にも望まれる範囲があるのか、などを検討して評価基準を作成する。

評価基準では、クライアント要求への適合度を評価する。デザイン・プロセスの途上では、エンジニアはさまざまな選択に直面する。その際の判断基準は、どのアイデアがもっとも要求に適合するかである。複数の案を作れば良いのではない。要求に適合する設計解を作り上げることがデザイン・プロセスの目標である。要求適合度の評価基準は、多数のアイデアからどれを選ぶべきかの基準となり、よりよい設計解へと要素を組み合わせる指針ともなる。

評価方法を議論し、基準を策定し、要求適合度からアイデアを評価するトレーニングは、よりよい設計解を作り上げるためだけでなく、アイデアを説明し、賛同を集め、合意を形成する能力へとつながる。

(4) コンセプト考案

設計解の開発に先立って、最終的な設計解を詳細に表すコンセプトを作成する。そしてコンセプトを、すべてのクライアント要求、すべての制約条件や環境条件に適合するよう改良する。

コンセプトは、開発チームの目標であるだけでなく、失敗を防ぐためにも重要である。開発途上で問題が明らかになったのでは、プロジェクトの遅延や開発費用の増加を招く。コンセプト段階での十分な確認が、プロセスを確実に進めるためにも必要である。

また逆説的ではあるが、コンセプトを作らなければクライアント要求を明確化することも、制約条件を明らかにすることもできない。家の間取り図を見て生活スタイルに合うかをチェックするように、クライアントは提示されたコンセプトから、設計解が自らの要求を解決するものであるかを判断する。あるいはコンセ

プトを確認することによって、未知であった自らの要求そのものを認識する。

採用するアイデアによっては、特有の制約を持ち込むこともある。リチウムイオン電池は、容量によっては航空機に持ち込みできない。このようにコンセプトが変われば、制約条件や環境条件も変わることがある。

設計解のコンセプトは、プロセス途上での手戻りを防ぎ、デザイン・プロセスを確実に進めるためにも重要である。コンセプト考案を通じて設計解のアイデアを明確化し、コンセプトの要求適合度を検討することは、設計解作成における実際的なトレーニングであり、エンジニアリング・デザイン能力向上にも有効と考える。

(5) 目標（機能・仕様）の策定

エンジニアリング・デザインは意志決定のプロセスである。エンジニアは定められた機能や仕様を実現するためにパーツを選定し、コンポーネントの組合せを考え、選択を繰り返す。

したがって、ゴールとなる機能や性能仕様の定めなければ、設計解に必要な機能が欠落したり、性能が不足するかも知れない。あるいは開発チームのメンバーがそれぞれ異なった決定をしたために、統一性のない設計解となるかも知れない。

たとえばモバイル機器の仕様に「8時間以上の動作」と定められていたら、エンジニアは仕様実現のために電池容量を増加させる、電力消費を下げるなどの工夫をする。しかし「長い動作時間」との曖昧な仕様では、あるエンジニアは不十分と考えて電池容量を増やすかも知れないが、別のエンジニアは十分と考えて何もしないかも知れない。このように不明確な仕様は、設計解に不確定な要素を持ち込む。

設計解の開発にあたっては、機能や仕様を定めなければならない。したがってクライアント要求から機能や仕様をまとめる方法や技術を学ぶことも、優れた設計解を作り上げるために必要となる。

(6) 設計解の開発

デザイン・プロセスの最終段階では、全体構成から各個の細部に至るまで、定義された要求から仕様を満足する工学的設計解へとデザインが進められる。

この最終段階で必要とされる工学的構成力は、課題（仕様）に合致する設計解を作る演習として、それぞれの工学分野において育成されなければならない。演習は、応力に対応する構造の設計、雑音除去のための電子回路設計、インタフェースのためのプログラミングなど、すべての高等教育機関において実施されていると考える。

エンジニアリング・デザインでは、工学的要素を統合する。工学的技術に対する知識と理解がなければ、それらを組み合わせることはできない。したがって、エンジニアとしての構成力が、エンジニアリング・デ

ザイン能力を身につけるために必須となる。各工学分野における設計演習として工学的構成力を養成し、さらにエンジニアリング・デザイン教育を実施し、統合的なデザイン能力として高めることが重要である¹¹⁾。

4.2 設計解の高品質化

開発される設計解は、必要とされる期間、使用される環境において、仕様性能を達成するものでなければならない。加えて製品は、クライアントが直接に意識していないとしても、安全であり信頼できるものでなければならない。

製品の不具合原因の多くは、デザイン・プロセスの中で潜り込む。たとえば自動車リコールの約70%は、設計段階の見落としに起因する¹²⁾。しかし筆者の経験では、学生は、ほとんどの不具合は製造に起因し、設計に瑕疵はないと思い込んでいる。設計解の信頼性を高めるためにも、デザイン・プロセスは重要である。

不具合に対処し再発防止を図ることは当然であるが、今日では不具合を生じる前に防ぐ未然防止が重要とされている¹³⁾。しかし未然防止策も、事前想定がなければ採用できない。将来発生するかもしれない不具合を想定し、エンジニアリング・デザイン段階において設計解に組み込むことが未然防止となる。

未知の不具合を想定するためには、当該製品分野に関する深い理解が必要となる。そして当該分野に限らず不具合事例を物理的・化学的原理にさかのぼって、あるいはエラーのメカニズムに則って分析し、その結果を上位概念として一般化・体系化し、開発システムに適応して考える想像力が重要となる¹⁴⁾。

メーカーにおける設計標準や評価基準は、当該メーカーにおける技術の蓄積である。と同時に、不具合を再発させないための経験の蓄積でもある。エンジニア個人としての経験は限られたものであるが、メーカーとして、あるいは業界としての経験は膨大となる。メーカーでは見落としを防ぎ、品質を高める方法としてデザイン・プロセスが重要視されている¹⁵⁾。

設計解の品質は、最終的にはエンジニアがどれだけ注意深く、見落としなく設計できたかに依存する。エンジニアリング・デザイン知識教育では、信頼性に関する基本を教示し、さらに設計のハザードが事故に繋がりがねないことを認識させ、意識を高めることが重要と考える。

このためには知識を伝えるだけではなく、知識から学び得たことを新たな設計解へと展開するための思考法を教示する。同時にデザイン対象への、注意深い観察と想像力が大切であることを伝えなければならない。

5. エンジニアリング・デザイン知識の有用性

実務に際して、在学中に学んだエンジニアリング・デザイン知識を有用と感じたかを、松江工業高等専門学校専攻科修了生を対象にアンケート調査した。アン

ケートは2011年3月修了生のうち、エンジニアリング・デザイン知識科目に合格した35名から、大学院在学中の1名および連絡先不明の2名を除いた32名を対象として、2013年11月メールにて送付した。図2にアンケート設問を示す。

回答者は14名、うち1名は大学院修士課程修了者であり7ヶ月間、他の13名は2年7ヶ月の実務を経験している。就業先は12名が製造業、2名が非製造業であった。

図3に、現在の業務に関係するエンジニアリング・デザイン知識を示す。回答者全員が、いずれかのエンジニアリング・デザイン知識が現在の業務にある程度または大いに関係していると回答した。項目別では、いずれの知識も71%以上、平均では86%であった。

図4に在学中に学んだエンジニアリング・デザイン知識の現在業務への役立ちを示す。項目毎の平均では74%が、ある程度または大いに役立っていると回答した。なお、現在の業務と関係していないとの回答を除いた場合、役立っていると回答は86%となる。修了生の多くが、在学中に学んだエンジニアリング・デザイン知識を有用と感じていることが示唆される。

アンケートでは「担当業務は個別要素開発であり、顧客要求分析など上流プロセスに関与していないが、在学中に習った製品ができるまでのプロセスをイメージしながら仕事の役割を考えている」、「制約条件や環境

1. 講義科目で説明した以下の知識は、現在の業務に関係していますか（それぞれ1～3より選択してください。1：まったく関係していない、2：ある程度関係している、3：大いに関係している）。
2. 現在の業務に従事して、講義科目で説明した以下の知識は、事前知識として役に立ちましたか（それぞれ1～4より選択してください。1：役立っていない、2：ある程度役立っている、3：大いに役立っている、4：業務と関係しない）。

製品設計においては、

- 1) 製品はクライアント要求を解決すべきものであり、クライアント要求の収集、分析、明確化が必要であること。
- 2) 製品が満たさなければならない制約条件（法律、規則、社会通念など）があること。
- 3) 製品が使用される環境条件（温度、湿度、振動、大気ほか）を明らかにすることが重要であること。
- 4) クライアント要求適合度や環境条件適合度などを評価しながらプロセスが進められること。
- 5) 初期の段階で、設計解の目標となるコンセプトが設定されること。
- 6) 製品が達成すべき機能や仕様が設定されること（仕様が設定され、その仕様を達成するように開発すること）。

図2 修了生アンケート設問

図3 現在の業務に関係するエンジニアリング・デザイン知識

条件など、社内の品質基準が全製品に統一的に適應されるため、知識は直接には活用できていないが、マーケット毎にオーバースペックを解消してコストダウンを図ることを考えている」など、エンジニアリング・デザイン知識を積極的に活用している意見もあった。さらに「開発業務に携わる中で、課題解決能力の高さが重要であることを強く認識させられるが、エンジニアリング・デザインの授業で習得した知識・技術は、この能力向上に大いに役立ったと感じている」との積極評価もあった。

6. おわりに

筆者は松江高専専攻科において2008年よりエンジニアリング・デザイン知識教育科目を、2010年よりデザイン技法演習を実施している。筆者の経験では、製品にはクライアントがあり、クライアント要求を満足するようデザインが進められることに気づいている学生は多くない。ところがクライアント視点を学び、クライアントの視点から要求を考えることによって、学生の製品への見方が変わる。また、多くの学生は要求が見出されたとしても、それをどう設計解へと反映させるかに戸惑う。そこで機能と実現方法を分ける考え方やQFDなどの技法を学ぶと、それらをデザインに活用できるようになる。

エンジニアリング・デザイン知識教育では、デザインにおける視点、考え方、意志決定の方法を教示する。学生は、これらの活用を通じて、デザイン能力を向上させると考える。

アンケートでは、サンプル数は少ないが、エンジニアリング・デザイン知識は実務に役だっているとの評価を得た。アンケート結果もまた、エンジニアリング・デザイン知識を学ぶことが、デザイン能力の向上につながることを示唆する。これはデザイン・プロセスを学ぶことにより、プロセスの中における業務の位置づ

図4 在学中に学んだエンジニアリング・デザイン知識の現在業務への役立ち

けを理解し、全体としての最適化を考慮できるためと考える。

学生のエンジニアリング・デザイン能力を高めるためには、まず、デザインに必要な知識や技術を教授し、視点、思考法や意志決定法を議論する。これにより学生は、なぜデザイン・プロセスが用いられているのかを理解し、どのように意志決定を進めるべきかを学ぶ。次に、クライアント要求の把握、コンセプト考案、機能・仕様の策定など、プロセスにおける意志決定を演習し、知識を使えるものとする。そして、設計解作成をトレーニングする。クライアント要求を設計解へと転換するプロセスを通じて、学生は、よりよい設計解とは何かを考え、それを目標としたデザインに取り組むことができる。

理論を講義で学び、演習で身につけ、実習で使い方をトレーニングするカリキュラムである。

謝 辞

アンケートに協力戴いた松江工業高等専門学校専攻科修了生に感謝する。

参 考 文 献

- 1) W・ブライアン・アーサー：テクノロジーとイノベーション、みすず書房、2011
- 2) G・ポール、W・パイッ：工学設計、培風館、1995
- 3) 久米 均、設計開発の品質マネジメント、日科技連、1999
- 4) K. T. Ulrich, S. D. Eppinger：Product design and development, 4th ed., McGraw-Hill Inc., 2008
- 5) C. L. Dym, P. Little: Engineering design, a project-based introduction 3rd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2009
- 6) 矢野友三郎、平林良人：新世界標準ISOマネジメント、日科技連、2003

- 7) 別府俊幸：工学教育におけるエンジニアリング・デザイン教育, 工学教育, 59-4, pp.72-79, 2011
 - 8) ナイジェル・クロス：エンジニアリングデザイン, 培風館, 2008
 - 9) 中尾政之：失敗百選, 森北出版, 2005
 - 10) 中尾政之, 宮村利男：知っておくべき家電製品事故50選, 日刊工業新聞社, 2010
 - 11) ABET: Criteria for accrediting engineering programs, 2012-2013, p.4, Webページ, http://www.abet.org/uploadedFiles/Accreditation/Accreditation_Process/Accreditation_Documents/Current/eac-criteria-2012-2013.pdf
 - 12) 国土交通省自動車交通局：平成20年度自動車のリコール届出内容の分析結果について, 2010, Webページ, <http://www.mlit.go.jp/common/000113163.pdf>
 - 13) 鈴木和幸：未然防止の原理とそのシステム, 日科技連, 2004
 - 14) 濱口哲也：失敗学と創造学, 日科技連, 2009
 - 15) 佐々木眞一：トヨタのめざす品質保証活動, クオリティマネジメント, 58-4, pp.36-43, 2007
-

著 者 紹 介

別府 俊幸

博士(医学), 博士(工学). 松江工業高等専門学校電気工学科教授. 2006年カリフォルニア大学サンディエゴ校にてInternational Engineering Design Processを受講. 研修で用いたN. Cross, Engineering Design Methodsを翻訳(共訳). 2008年より松江高専専攻科においてエンジニアリング・デザイン科目を担当
連絡先 beppu@matsue-ct.jp