

# 要件ベースのシステムズ・エンジニアリングとシックスシグマを活用したコスト最適化手法の紹介

## Applying Systems Engineering and Design for Six Sigma in a Requirements-Based Cost Modeling Process

George W. Chollar (Statistical Design Institute LLC)

○ 戸水晴夫 (正, SDI Japan, Haruo TOMIZU)

### 1. はじめに

近年、多くの企業では製品開発プロセスの改善を目的とした新たな手法の開発が行われてきている。特に、IoT を活用した情報の集積と分析技術の進展が著しく、PLM の実用化が進むにつれて、設計手法の手順にまで影響を及ぼすものとなった。なかでも顧客要件を満たし、製造要件を満たし、開発プロセス全体に影響を与える設計要件の抽出と最適化の方法が研究されてきた。通常、このような最適化問題では、解析のためのモデルを作成することが求められる。これらの数学式で記述されたモデルを使って、開発中の製品の設計品質を統計的に予測し、設計パラメータの妥当性をモノを作る前に評価するのである。

一方、製品開発の早期の段階で開発コスト、直材費、間接費を予測し、それらを最小にするような要件定義を行うことはビジネスにとって有用といえる。設計品質の最適化は、機能の最適化に止まらず、コスト要件の最適化をも求めるものである。そのため、製品開発では個々の機能に関する設計パラメータに関して、品質要件とコスト要件間の適切なバランスをとるトレードオフの実行が求められる。このとき、複数の要件を満たすコストモデルを作成することが要求される。本報では、システムズ・エンジニアリングのプロセスの上で、設計のためのシックスシグマの技法により作成したモデルの利用を提案している。図 1 に利用可能となるツールを含めた全体像を示す。

### 2. システムズ・エンジニアリング (SE) と設計のためのシックスシグマ (DFSS) の統合

システムズ・エンジニアリングに関しては、これまで欧米政府機関や関連委員会などで定義されてきた<sup>1)2)3)</sup>。また、様々な企業ニーズに適合するように整えられてきた歴史がある。International Council on Systems Engineering (INCOSSE)では、「システムズ・エンジニアリングとは、ツールやテクニックに関する科学的成果物の借用や導入を行う学際的研究の一つであり、製品開発を成功に導くことを目的としている。顧客ニーズや機能を早期に定義し、要件に書き下ろすことから始め、操作性、コスト、スケジュール、品質、製造、テスト、トレーニング、保守、廃棄に関する様々な問題をクリアにするために設計を評価し、設計を最適化することに重点をおいている。従って、システムズ・エンジニアリングとは、概念設計から生産に至る開発プロセスのすべてのフェーズに適用し、顧客が必要とするビジネス及び技術的ニーズを考慮しながら、顧客のニーズに合致する製品品質を提供するエンジニアリング手法といえる。」と定義されている。近年、様々な技術や目的に基づくハードウェアやソフトウェアが、製品に複合的に組み込まれるようになった結果、システムズ・エンジニアリングの適用は、より重要性が増したといえる。そして、システムズ・エンジニアリングは、あらゆる分野の技術とマネジメントのプロセスを統合するものとしての役割を果たすようになった。

シックスシグマでは、はじめに問題が何かを定義し、改善のための計数値を決める。その後、統計的ツールを使用してデータを分析し、問題解決のソリューションを提案し、問題の再発を防ぐための保守プロセスを定めるという 5 段階のデータ分析を基本とした品質改善のための問題解決技法である。一般的なシックスシグマのプロセスは、Define (定義)、Measure (計測)、Analyze (分析)、Improve (改善)、Control (管理) の頭文字を採った DMAIC プロセスとして知られる。一方で、設計開発のためのシックスシグマ DFSS (Design for Six Sigma) とは、シックスシグマを設計プロセスに適用しようとしたものである。当初、シックスシグマは製造後の品質問題の解決に重点を置いていた。その後、DFSS として製品ライフサイクルの上流にあって、製品となる前に問題が起きる芽を摘み取ることを目的としたエンジニアリング手法として発展した。DFSS は、対象や

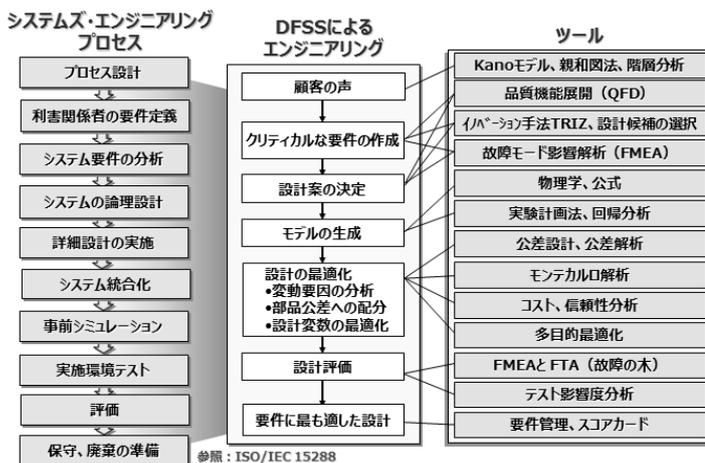


図 1 システムズ・エンジニアリングと DFSS を統合した全体像

手法を開発した組織別にいくつかのプロセスの頭文字の組み合わせで表現されている。例えば、IDOV, DMADV, DMEDI などがある。DFSS とは、顧客の声 (VOC) を特定する様々な手法やツールを用いて製品が製造される前に、設計の品質を分析、予測、最適化する製品開発エンジニアリングのことを意味する。そして、DFSS を使えば、製品品質上の不確定要素についての分析とその影響度を予測することができる。

以上のことから筆者らは、システムズ・エンジニアリングのプロセスに DFSS を統合することが、製品開発の最も有効な技法となり得ると考えた。図2に、システムズ・エンジニアリングのプロセスに配備した DFSS のツールを示す。

### 3. 要件ベースのシステムズ・エンジニアリング

システムズ・エンジニアリングのプロセスを要件ベースで組み立てていく理由は、製品ライフサイクル全体に渡るコストに関する要件を漏れなくモデリングし、最適なソリューションに至る統合モデルを制作するためである。個々のシステム要件から正確なコスト予測モデルを生成することを課題とし、最終的に、これらモデルを使って製品価値を最適化することを目指している。

しかし、実際はコストだけではなく、製品特性の目標値に関して、コストにどのように影響するかを観点から統合的な検討を行うことが必要とされる。従来、多くの製品開発プロジェクトでは、こういった検討作業が製品開発のライフサイクルの中に位置付けられておらず、設計が終わった後に実施される場合が多かった。また、コストモデルは製品開発のライフサイクルと切り離され、単独の検証用として利用されていた。その結果、今日の製品開発プロジェクトにあっては、設計上流でのコスト予測の失敗が再設計の主原因となる場合が多かったと考えられる。従って、製品開発の手戻りを減らすには、コストの影響を評価できるように、システムズ・エンジニアリングで定義された製品開発プロセスの初めの段階からコストモデルを利用した最適化が必要と考えられた。そして、製品開発プロセス中の様々な面からコストに影響する要件を考慮できるようにすることである。

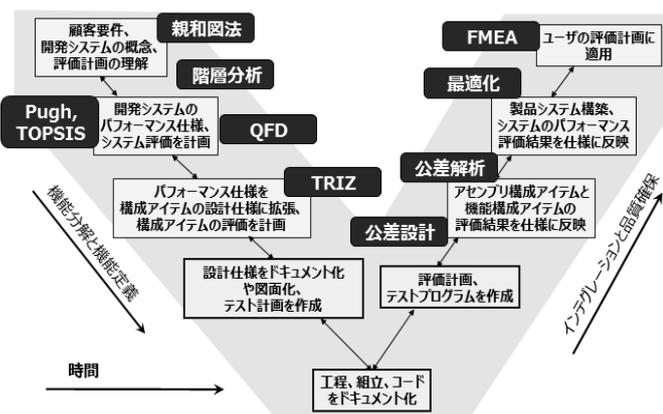


図2 SEのプロセスに配備したツール

しかし、全てのコストに影響する要件を分析しようとするれば、逆にそのことが大きなコスト的リスクとなる。データが利用できない場合や要件に間違っただけの記述がある場合があるからである。そのため、本研究では、3つの主要な顧客の要件であるコスト、スケジュール、パフォーマンスに絞って、顧客の目標値を同時に満足させるような製品開発段階における最適化の方法を探ることとした。

### 4. 不確定要素を含んだ要件の構造化

要件とは、製品開発における達成事項、マイルストーンなどのドキュメントのことである。ここで、要件を構造化する手順の例を図3に示す。最初に製品の機能について記述した設計要件のドキュメントを基に、製品機能の論理構成ツリーを作成する。これが、パフォーマンス要件ツリーとなる。そして、製品に関わる組織の構成ツリーを作成する。これが、スケジュール要件ツリーとなる。そして、最後に製品を形づくる物理構成ツリーを作成する。これが、コスト要件ツリーとなる。図3にそれらの構成例を示す。しかし、上記のように他のツリーに独立したまま、3つの要件ツリーとしてしまうのでは機能のひとつの目標値が変動しただけで対応できないものとなる。不確実な要因を含んだまま、一様な結果しか生み出せず、ビジネスの判断基準とは、なり得ないものである。そのため、目標値の変化に対してダイナミックに連動するモデルの作成を目指した。

本報における要件ベースのモデリングの方法は、コスト、スケジュール、パフォーマンスの観点で検討するものであり、それは製品のライフサイクル途上でなされた要件で構成され、要件ツリーに添付されたエンジニアリング・インストラクションなどのドキュメント内にリンクを持たせることによって要件ツリー間の連携を保持するものである。それらはそれぞれの要件ツリーの中でリンクを持って存在する。通常、システムズ・エンジニアリングでは要件を構造化して捉える。製品が目的とする要件を最上位に置き、そこから下位にシステム、製品、アセンブリ、

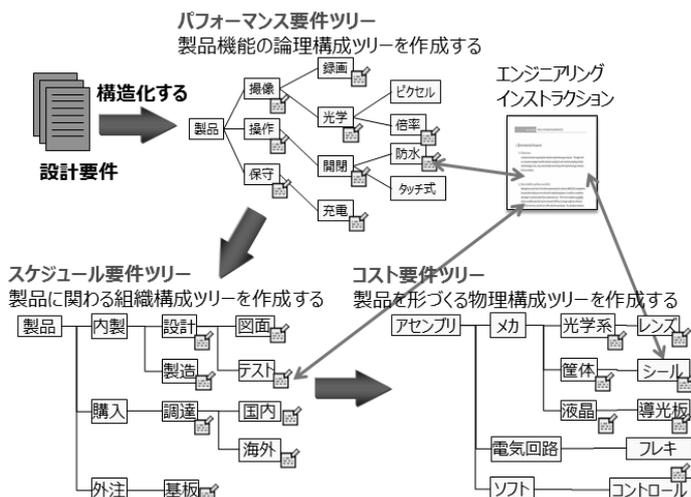


図3 目的別に構造化された要件ツリーの例

部品、プロセスなどに分解して構造化する。また、開発プロセスの上流で要件に関連付けられたパラメータ値が、実際には達成困難を予測する数値を示すならば、製品開発上に問題点があると分かるであろう。そのままであれば、受け入れがたい品質や納期遅れ、手戻り、再設計が発生し、最適とはいえない設計候補の選択に陥ることになる。National Research Council report<sup>4)</sup>では、「開発プロセスの上流でコストやスケジュールが明示的に決められていなければならない、それが不確実性を減少させる方策として計画されるべき。」と記されている。さらに、「設計のコンセプト毎に評価するための十分なモデルを用意すべき。」と述べている。

最終的に、マネジメントとエンジニアリングが連動するプロセスにする必要がある。そして、コストやスケジュールに影響を与える要件を管理しながら開発する必要があるだろう。そして実際にそれぞれの要件の実現度を測るためには、個別の要件に対応するモデリングが行われなければならない。つまり、図3に示すような要件ツリーに関連付けられたコスト、スケジュール、パフォーマンスのモデルが必要となるのである。要件の構造化とモデルの統合化は、要件ベースでモデリングすることによって実現できる。このことによって、製品開発の早期の段階からコスト予測を行い、より手戻りの少ない設計を行うことができると考えている。

## 5. コストモデルのタイプと特性

コストモデルとは、要件定義時にコストに影響すると思われる全ての要因を考慮し、特定要件のコストを予測する数学式のことである。それはまた、物理的なハードウェアによる実験、データセットの回帰分析、ルールやガイドライン、既存の実績情報の中から得られるものである。そして、コストモデルを使ったシミュレーションの結果によって、開発の方向性を判断できる。結果は、絶対的な予測値であったり、相対的な関係性値であったりする。開発チームには、製品開発の様々なフェーズにおいて、コストモデルから得られる結果で判断することが求められるため、製品開発のライフサイクルのできるだけ早い段階からモデル構築することが望ましい。

製品開発で利用されるコストモデルには、相対モデルと絶対モデルの2タイプがある。相対モデルとは、設計パラメータが変化するときの質的变化に着目したモデルである。これらは、製品ライフサイクルの上流において多く利用される。例として、システム概念を定義する場合、何が製品重量を増加させやすいか、何が操作時間を減少させやすいかを知れば、システムの複雑性が与えるスケジュールへの影響度や製造コストの改善についての洞察を得ることができる。こういった求めるべき条件に対して、複数の構造化された数学的な関係式を用いて作られる相対モデルは比較のための予測値を導き出すものである。

主要3項目に関する相対モデルの方程式の例を以下に示す。

### ①コスト

= f (部品の値, 部品の公差, 製造プロセス, 材質)

### ②スケジュール

= f (設計難易度, 製造プロセス, サプライヤ能力)

### ③パフォーマンス

= f (部品の値, 部品の公差, 操作条件)

初期の製品の評価は、これらの変数の相対的なレベル値やランキング値に基づいて行われるものであり、それは一つの変数が目的関数にどのように影響を及ぼすかを予測するものである。そして、製品開発の初期において、技術的コンセプトの大まかな実現可能性に関する推定値を得ることは、相対値であっても有用である。しかし、製品開発のプロセスを進めるにつれて、さらに正確な予測値が求められ、絶対値が得られるモデルの必要性が増すであろう。絶対モデルは、設計フェーズの最後に近づくにつれ重要となる。これらのモデルは数学的な数式で記載され、物理学、プロセス動作原理など、製品プロセスの様々な面での詳細なパラメータや経営上のリソースのパラメータを含んでいる。そして、何がいつ、どのようになるかなど、要件と仕様に記載されている内容を検証するための具体的な手段を提供するものである。そこでは、開発サイクルや製品の成熟段階を表現したモデルも評価の対象としなければならない。一般に、開発段階の最初に検討するモデルは、時間が経過し、市場で成熟度したモデルとは絶対値が相違する。

従来、絶対値によるモデル化は、製品開発プロセスの様々なフェーズで多く行われてきた。例えば、Liang and Zuo は、航空機のメンテナンスに関するコストモデルの開発についての検討を行った。<sup>5)</sup> アセンブリ内の非互換性コンポーネントに関するモデル化の信頼性向上については、Kim and Kuo によって検討がなされた。<sup>6)</sup> 不確実要因を持つ鍛造プロセスのパラメータの最適設計は、Repalle and Grandhi によって研究された。<sup>7)</sup> 同様に、工場内の機器のリニューアルやコンカレント・エンジニアリング環境での管理<sup>8)</sup>、マルチステートシステムの定期的メンテナンス<sup>9)</sup>などが挙げられる。矛盾した複数の目標値の多目的最適化については、数多くのトレードオフ研究で取り組まれてきた。

製品開発プロセスでは、目的別のモデルが作成される。それらに使用されるモデルが相対的であるか絶対的であるかにかかわらず、モデルそのものの不確実性の問題や設計パラメータの不確実性の問題は、それらモデルを使用した結果に重大な影響を及ぼし

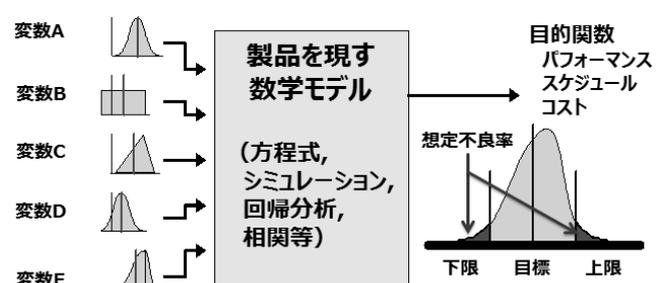


図4 目的関数の応答の分布への影響

ている。モデル自体が包含する不確かさは、図4のように応答の分布に影響する。不確か性の要因によって特性は変化し、設計パラメータ、製造方法、環境要因、経過年数、操作方法、ユーザー/オペレータの人的要因、またはモデルそのものの不完全さによって結果は異なる。これらの不確か性の要因の影響は、結果的にモデルから予測される応答値の想定不良率として表現されるものである。

## 6. 価値の最適化を目的とした要件ベースのコストモデル

要件ベースのモデリングの目的は、製品のライフサイクルを通してコスト、スケジュール、パフォーマンスに関する製品価値の最適化を行うことである。要件ベースで構成されたモデルをもとに、開発プロセスの中で不確実な要因を分析し、評価を行い、最適化する。そして、新たな製品の分析方法や評価方法、あるいは製造方法、保守の具体的手段を考案するのである。不確実要因が存在する中でコスト、スケジュール、パフォーマンスに関する複数要件の最適化問題は、優れた製品を作り上げるためのキーとなる要素技術である。特に、最適化の手法は、通常は限られた製品やシステムの一部に対して、開発プロセスの最後に検証用に用いられてきた。図5に示すような多目的の最適化手法は、検討対象となったすべての設計候補に対して、それらが複数目的を同時に達成できるかどうかを評価するものである。そして、設計候補が最終的に絞られたときに、目標値や拘束条件を満たすような設計パラメータの組み合わせを遺伝的アルゴリズムによって選び出すものである。

多目的最適化は、目標値や拘束条件を含む設計パラメータのモデル式で構成される。そして、最適化アルゴリズムとは、結果が満足されるまで設計パラメータの組み合わせを設計領域の中から探索する仕組みのことをいう。製品開発プロセスでは、複数の候補を設計パラメータに基づいた環境内で繰り返し評価し、要件ベースのモデルを使用して実現の効果を測ることになる。

## 7. おわりに

システムズ・エンジニアリングのプロセスから生み出された要件ツリーと要件に関する目的関数を使って、連動した多目的最適化を行い、利害関係者の

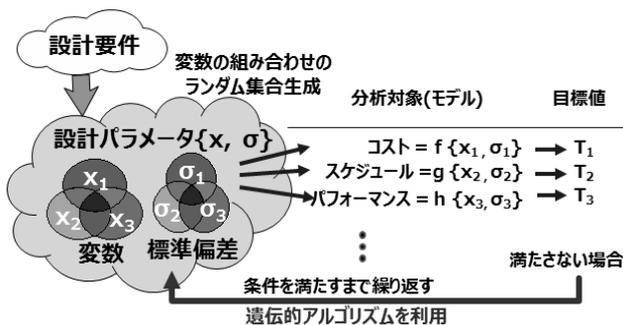


図5 多目的最適化の仕組み

主要な目的であるコスト、スケジュール、パフォーマンス間のバランスをとる考え方について述べた。

多目的最適化は、設計開発のためのシックスシグマの統計的解析を適用した相対値あるいは絶対値をベースとした解析モデルに基づくものである。その方程式をもとに条件を振れば、機能の許容範囲、設計パラメータ、製造条件などの要素において最適なコストとなるパラメータの抽出が可能となるであろう。本報で紹介したシステムズ・エンジニアリングと設計開発のためのシックスシグマのフレームワークは、ビジネスとして重要なコスト、スケジュール、パフォーマンスを最適化するためのシナリオを提供するのみならず、利害関係者が目指す製品開発の成功に導くことができる手法になると考えている。

## 参考文献

- 1) Joint OSD/Services/Industry Working Group: Systems Engineering, Mil-Std-499B, (1993),
- 2) Government Electronics and Information Technology: Association. Processes for Engineering System, ANSI/EIA, (1999), 632
- 3) The Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc.: IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, IEEE Std, (1998), 1220
- 4) National Research Council: Pre-Milestone A and Early-Phase Systems Engineering A Retrospective Review and Benefits for Future Air Force Acquisition, The National Academies Press, (2008)
- 5) Liang Jian and Zuo Hong-fu: The Predictive Models of Maintenance Costs for a Civil Airplane, Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. 218, Part G Journal of Aerospace Engineering, (2004) 347-351
- 6) Kim, K.O. and Kuo, W.: Two-level Burn-In for Reliability and Economy in Repairable Series Systems Having Incompatibility, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 11, No. 3, (2004), 197-211
- 7) Repalle, J. and Grandhi, R.V., Optimum Design of Forging Process Parameters and Preform Shape under Uncertainties, Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, NUMIFORM (2004), 2032-2037
- 8) Szczerbicki, E. and Orłowski, C.: Qualitative and Quantitative Mechanisms in Managing IT Projects in Concurrent Engineering Environment, Systems Analysis Modeling Simulation, Vol. 43, No. 2, (2003), 219-230
- 9) Su, C-T, Chang, C-C, Minimization of the Life Cycle Cost for a Multistage System under Periodic Maintenance, International Journal of Systems Science, Vol. 31, No. 2, (2000), 217