

設計プロセスのモデリングと可視化*

Product design process modeling and visualization

中沢 俊彦**

(Toshihiko NAKAZAWA)

1. はじめに

製品設計の現場では製品に求められる設計品質を確保するための数々の手法・仕組みが活用されている。例えば、Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) は設計成果物である図面や CAD データに内在する不具合を予見し、未然防止策を導くための手法である。また、チェックリストや失敗事例集は、過去の失敗体験を蓄積し、同種の不具合の再発を防止する手法として用いられている。さらに、それらの未然防止策や再発防止策を製品構造にまで落とし込んだ設計標準が多く設計現場で整備されている。チェックリストや失敗事例集といった定型化された設計知識の構造化手法を駆使する一方、非定型の知識を活用するための仕組みであるデザインレビューも多くの設計現場で実践され効果を上げている。

しかしながら注意深く見てみると、これらの仕組みは、その全てが設計の中間成果物や最終成果物といった設計作業のアウトプットに対する品質検証を目的としていることに気付く。生産現場では、かねてより、半製品検査や完成品検査によって不良品のプロセス外への流出を完全に防ぐのは困難であるとの認識から、プロセスそのものの品質を高めることによって不良の発生を食い止め、製品品質保証を行おうとしている。このような生産現場の取り組みとは対照的に、設計現場ではプロセスから出力される成果物にのみ注目した品質保証を行っていると思われる。

生産現場においては有名な標語にもなっている「品質は工程で作りこむ」という思想は、設計現場においても有効な考え方であると思われるが、なぜ設計現場ではそれが具体的な施策として実現されないのであろうか。生産プロセス内の不具合発生防止の仕組みには、プロセスパラメータ管理、作業手順の標準化、ポカヨケなど様々なものがある。しかし、それらの仕組みは明示化された、または実体のあるプロセスが存在して初めて、計画、導入、管理できるものである。プロセスが明示化されていなければ、

変更すべき作業が認識・共有できず、従ってプロセス品質を高めるための仕組みを埋め込むことは難しい。設計プロセスの中にプロセス品質を高めるための仕組みが容易に構築できないのも、実は、その前提である設計プロセスの明示化が難しいという問題が存在するからであると考えられる。

2. 設計プロセスの特徴

設計プロセスを明示化しにくいには幾つか理由がある。一つの理由は、自動車と家電製品の設計プロセスが同じではないことが容易に想像できるように、設計の対象物が異なれば設計プロセスも異なるからである。たとえ同種の製品であっても、製品ごとに仕様が異なるため、全く同一の製品設計プロセスを複数回繰り返すような機会は現実にはあまり存在しない。従って、設計プロセスは、特定の製品設計に対して一度だけ実行される製品固有の手順となり、このような再利用性に乏しいプロセスを苦勞して明示しようという動機はなかなか生まれにくいと思われる。

またもう一つの大きな理由として、設計は製品に関する概念の創造プロセスであり、そのほとんどの部分が設計者の頭の中で行われることが挙げられる。その意味では、図面や CAD データは、生成された概念を記述したドキュメントに過ぎない。大まかな手順に関しては、自動車の設計で適用されている「企画設計 基本レイアウト 詳細設計 試作検証」といった標準手順、また Pahl と Beitz の推奨する「役割の明確化 概念設計 実体設計 詳細設計」といった体系的な設計手順¹⁾など、ある程度標準化されたものが存在している。しかし、細部にいたっては、ほとんどが設計者の頭の中で行われる暗黙的なプロセスである。従って、過去に実行された設計プロセスは、ほとんどの場合、明示的には残されておらず、設計者ごとの癖や習慣としてその設計者の中に閉じた知識として継承されているのである。

このような要因の一方、設計プロセスそのものが

持つ特徴も設計プロセスの明示化を難しくする要因となっている。それは、設計プロセスが反復 (Iteration) を特徴とするプロセスであるということである。設計プロセスが反復する理由は次章で論ずるが、この特徴が設計プロセスを既存の多くのプロセス記述手法が前提としている逐次実行型の手順として記述することを困難にしている大きな理由の一つになっているのである。

3. 設計プロセスのモデル化手法

以上のように、設計プロセスを明示的に記述することには困難さが付き纏う。その一方で、設計プロセスの幾つかの側面を捉え、プロセスの性質を把握するための様々なモデル化手法が提案されてきた。本章ではその諸方法とそれらの特徴を紹介する。

3.1 ガントチャート

ガントチャートは、縦軸に作業項目を、横軸に時間を取り、作業の実行期間をバーを用いて視覚的に表現したチャートである。プロジェクトの作業計画と進捗管理を行う際に活用され、設計現場においては設計作業計画を立案、管理することに用いられる。

設計プロセスのモデル化とは、記述する対象と記述の方法を明確に定めたルールに基づいて設計プロセスを記述することであると定義するならば、設計作業計画を記述したガントチャートは設計プロセスモデル化の最も基本的な形態の一つと考えることができる。記述対象となるのは構想設計、レイアウト、詳細設計といった大まかな設計局面や作業項目であることが多い。日程チャート上にその作業期間をバーで示すことにより通常左から右へと作業の順序が可視化される。作業間の入出力関係を明示的に示したい場合は、図1のように作業期間を示すバーを矢印で結び、その関係を明確化する場合もある。また、作業進捗管理の目的で、日程チャート上に主要な設計プロジェクト上のイベントなどのマイルストーンが記載されることもある。

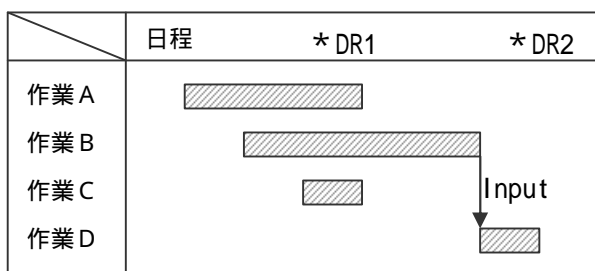
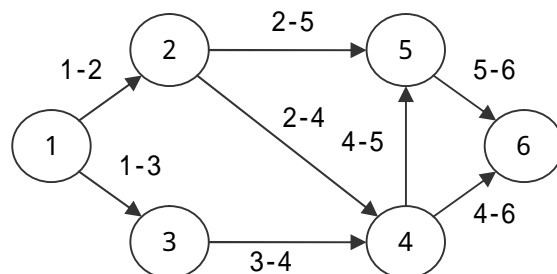


図1 Gantt Chart

3.2 PERT

Program Evaluation and Review Technique (PERT) もガントチャートと同様にプロジェクトの作業計画を行うための手法であるが、作業の実行順序付けを厳密に行うことから、作業の進行管理の目的で活用されることが多い。記述するのは作業項目、作業間の前後関係 (依存関係)、およびそれぞれの作業項目に必要な工数や時間である²⁾。PERT が設計プロセスの記述に用いられる機会は多くはないが、図2に示すようにプロセスを多数の作業のネットワークとして捉える考え方は、プロセスをどちらかという逐次実行型のフローとして記述するガントチャートに比べ、設計プロセスをありのままに捉えるのに適していると考えられる。なぜならば、設計プロセスはプロセスを構成する作業が $n \times n$ で相互依存するネットワーク型のプロセスとなるからである。しかしながら、プロセスを構成する作業数が多くなると PERT のようなネットワーク表記では線が複雑に交差してしまい、そこから意味ある情報を読み出すことができなくなるという問題がある。それ故、PERT はプロセスの可視化手法というよりは、むしろ予め計画された前後関係を有する作業の実行順序を管理するツールとして活用されている。



丸内の数字は事象を、矢印上の数字は作業を示す。

図2 PERT

3.3 IDEF0&3

Integration Definition (IDEF) は米国空軍の資材調達プロセスを記述するために開発された14のビジネスプロセスモデリング手法の総称である³⁾。ここでは IDEF の中でも設計プロセスモデルへの適用が研究されている IDEF0 と IDEF3 について述べる。

IDEF0 はプロセスを構成する作業を静的な機能モデルで記述する手法で、図3に示すように、作業 (アクティビティ)、作業に対するインプットとアウトプット、作業を行うための仕組みやリソースを表現するメカニズム、制約条件を示すコントロールという4種類の要素によって設計プロセスを記述す

る⁴⁾。IDEF0はその記述の過程でプロセスを構成するおのこの作業の本質的な構造を浮き彫りにするが、それ故にプロセス内に暗黙的に存在する数々のルールや仕組みを一つ一つ明示化しなければならないという困難さを伴う。

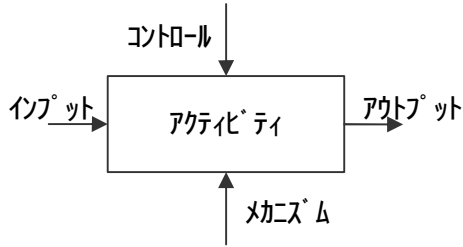


図3 IDEF0

この困難さを避けて、プロセスの流れを簡易的に表現するために開発された手法が IDEF3 である。図4に示すように、IDEF3ではUnit of Behavior (UOB) と呼ばれる作業を表すボックスと、作業の前後関係を表す矢印、及び流れの分岐を表すジャンクションによってプロセスを記述する⁵⁾。このことから分かるように、IDEF3もPERTと同じようにプロセスをネットワーク表現によって記述する手法であり、それ故、設計プロセスの記述に用いる場合には、設計フェーズを一つのUOBとして表現するといったように、複雑なネットワークにならず、かつ逐次実行型に記述が可能な作業粒度の記述にとどめられるのが普通である。

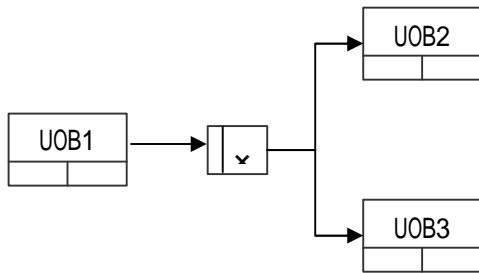


図4 IDEF3

3.4 DSM

このように、PERTやIDEFに代表されるネットワーク表現は、設計プロセスの大まかな流れを捉えることはできるが、設計プロセス上の個々の意思決定レベルまで詳細度を上げた場合の表記方法としては適当な方法とは言えない。

Design Structure Matrix(DSM)は $n \times n$ のマトリックスを用いることによって、詳細度の高い設計作

業でも作業間の前後関係を表現することを可能にした⁶⁾⁷⁾。DSMは複雑に絡み合った設計作業間の依存関係を整理して記述する優れた方法であり、この手法が提案されたことによって設計プロセス内に存在する反復が一目瞭然に視覚化されることとなった。このことにより設計プロセス内の反復を管理することの重要性が明らかになったのである。

図5にDSMの例を示す。ここでは一列目に表示したAからGの作業が一行目に表示した同じ作業に依存している場合、その交差セル上に数字を示すことによりその関係を記述している。作業が実行順に並んでいるとすると、対角成分の下にある「1」の依存関係は、下流工程から上流工程への順方向の依存関係を表している。これに対して、対角成分の上にある「2」は上流工程から下流工程への逆方向の依存関係を示し、ここに手戻りが発生していることが可視化されている。また、「3」の依存関係のように作業が相互に依存しているもの、「4」の作業のように依存関係が循環しているものは、作業をグループ化して同時実行させることにより、作業の手戻りの影響を低減できる可能性があることを示している。

	A	B	C	D	E	F	G
A	x			2			
B	1	x					
C			x	3			
D			3	x			
E					x	4	
F						x	4
G					4		x

図5 DSM

DSMを記述することによって明らかになったように、設計プロセスは反復を特徴とするプロセスである。反復には幾つかの異なる原因があるが、製品の設計には試行錯誤が伴うこと、製品定義の後に新たな条件が明らかになるなど、最初の想定を覆す要求が後工程で発生する場合があること、検証によって設計の修正が必要になる場合があること、などが主な原因と考えられている⁸⁾⁹⁾。現在のところDSMは設計プロセスのような複雑なプロセスの反復を視覚的に明らかにするほとんど唯一の方法である。

しかしながら、100の設計作業の依存関係をDSM上で整理するためには、10000通りの作業間関係を検討しなければならない。そのため、自動車部品のような数百以上の作業によって構成される設計プロセスをDSMにモデル化するのは困難なことが多くの

モデリング実践者によって指摘されている。このことが、DSMを使って設計プロセスを記述する際の最大の障害である。今日、設計作業間の依存関係をDSM上で人が整理するのではなく、設計者間の情報のやり取りをモニタリングするなど、自動的に捕らえる方法が模索されている。

3.5 GATE モデル

GATE モデルは設計プロセスの幾つかの側面をあるがままに捉えようとするモデル化手法とは異なる。このモデルでは、図6に示すように設計プロセス内の随所に作業の完成度を測るためのクオリティーゲートを設ける。これによって設計作業が複数の作業フェーズに分類され、ウォーターフォール型のプロセスを構成する。

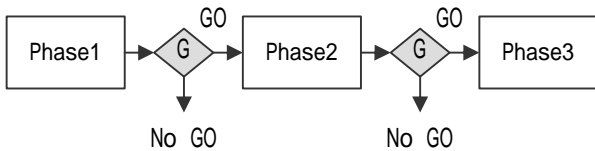


図6 クオリティーゲート

GATE モデルは自動車業界や電子機器業界などはじめとした多くの製造業で運用されている。設計対象となる製品の特性に応じた、企業や組織ごとの工夫の積み重ねによって形成されてきたため、様々なタイプのものが存在するが、概ねコンセプトフェーズから生産準備フェーズまでの設計プロセスを10程度のゲートによって区分けすることが多い。表1に一例としてGeneral Electric(GE)社のTollgateモデルを示す¹⁰⁾。ここでは、例えばTG1として“要件探索と概念設計”に関わるゲートが存在するため、このゲートより上流の設計作業は、このゲートを通過するための要件定義と製品の概念設計の作業が中心となる。またTG1とTG2の間の作業は、TG2ゲートの規定を満たすために、コストと性能を加味した最良の製品コンセプトの選定となるであろう。このように、ゲートの存在によって設計プロセスは複数の作業フェーズにモデル化されるのである。

表1 GE Tollgate

Tollgate	アクティビティ
TG1	要件探索と概念設計
TG2	経済性の検討と最良の選択肢の選定
TG3	顧客フィードバックの獲得とリファイン

TG4	提案の開発/プログラム計画
TG5	開始要件の定義
TG6	開始準備
TG7	詳細設計と生産計画
TG8	検証準備
TG9	検証実施
TG10	製品支援と改善機会の探索

GATE モデルは基本的には設計成果物の品質管理手法であるが、見方を変えると、設計プロセス内に設置された各ゲートによって、ある製品設計プロジェクトがゲートを通過する際の設計の完成度を可視化する仕組みになると考えることもできる。

3.6 品質機能展開

品質機能展開(QFD)¹¹⁾を設計プロセスモデリング手法の一つとして捉えるのはあまり一般的とはいえないが、QFDは設計プロセスにおける要求の認識から部品機能特性を設定までの要件定義のプロセスを詳細にモデル化する手法と考えることができる。QFDは図7に示すHouse of Qualityと呼ばれる2段階の要求品質の変換マトリクスによって要求を抽象度の高い顧客要求(Voice of Customer = VOC)から計測可能な工学的尺度へ、工学的尺度から部品機能特性へと変換する方法論である。この2つの変換マトリクスによって、要求がその抽象度別にモデル化されると考えることができるのである。

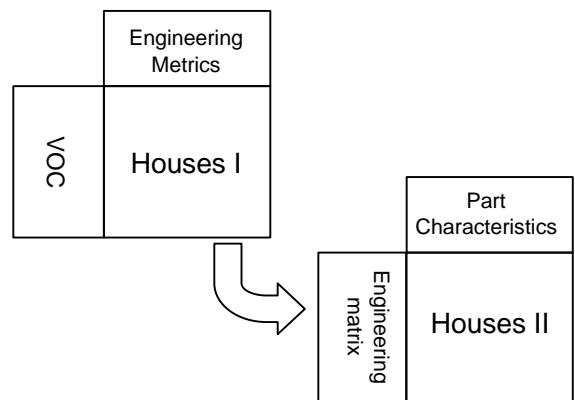


図7 品質機能展開(QFD)

設計作業においてはあいまいな要求に基づいた意思決定が頻繁に求められる。例えば、「使いやすいこと」という要求は解釈可能な範囲が広く、あいまいさの大きい要求である。一方、「寸法が10mm以内であること」という要求は具体的であいまいさがほとんど存在しない。QFDは2段階のHouse of

Quality という要求品質の入れ物によって要求をそのあいまいさの程度別に分類する。上述の「使いやすいこと」という要求は House の VOC に位置付けられ、また「寸法が 10mm 以内のこと」という要求は House の部品機能特性 (Part Characteristics) に位置付けられる。このように設計要件として認識された要求が QFD のどの House of Quality に位置付けられるかを調べることによって、要求のあいまいさの程度を可視化することができる。

3.7 IPO モデル

情報システムの構築においてはビジネスプロセスをモデル化することが必須の作業であるが、人・物・金などの流れを扱うビジネスプロセスの場合には、インプット・プロセス・アウトプットモデル (以下 IPO モデル) が成立することを前提とし、プロセスをモデル化するのが一般的である。IPO モデルは、あるプロセスに特定のインプットを与えるとプロセスに規定した処理を実行し、特定のアウトプットが返されるような決定論的なモデルのことである。

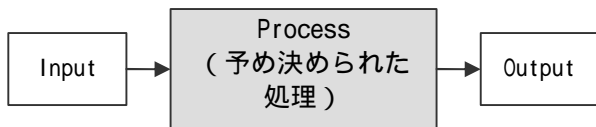


図 8 IPO モデル

昨今では、3次元 CAD の普及に伴い、IPO モデルを用いて 3次元 CAD モデルの幾何形状の作成手順を記述する試みが行われている。この試みは同一製品の設計における定常的な 3次元 CAD モデルの作成作業を解析することによって、CAD モデル作成作業を半自動化することに役立っている。ただし、設計プロセスは DSM や QFD の節で解説しているように、反復やあいまいさを多く含んだプロセスであり、本来 IPO モデルのような決定論的なモデルでは記述することができない特性を持ったプロセスであることに留意する必要がある。A というインプットをプロセス P に入力しても、アウトプットが必ず B になるとは限らないといった不確定性を多く内包しているところに設計プロセスを決定論的に扱うことの難しさがある。

3.8 SIGNPOSTING モデル

Signposting モデル¹²⁾は Signposting パラメータ、状態、タスクという 3つの要素によって、ある設計プロセス内の作業 (タスク) を実行したときの設計の状態の遷移をモデル化する手法である。

図 9 に Signposting モデルの概念図を示す。この例では、ある設計タスク A を実行したときに、設計の状態がインプット状態 1 からアウトプット状態 A、B、C のいずれかに変化しうることを示しており、その可能性の大きさを各ボックス間に表記している。ボックス中の SP1~3 は Signposting パラメータと呼ばれ、設計の成熟度、要求への適合度、品質レベルなど設計の状態を表す様々なパラメータを設定することができる。それぞれのパラメータにはパラメータの状態を抽象的に示す尺度が付加されている。また、付加情報として、そのタスクを実行するためのコストや時間などの情報が示されている。

このことから理解できるように、Signposting モデルはある作業における設計の状態遷移の可能性をモデル化することによって、そのタスクの実行が有効であるかどうかの判断を支援するのである。

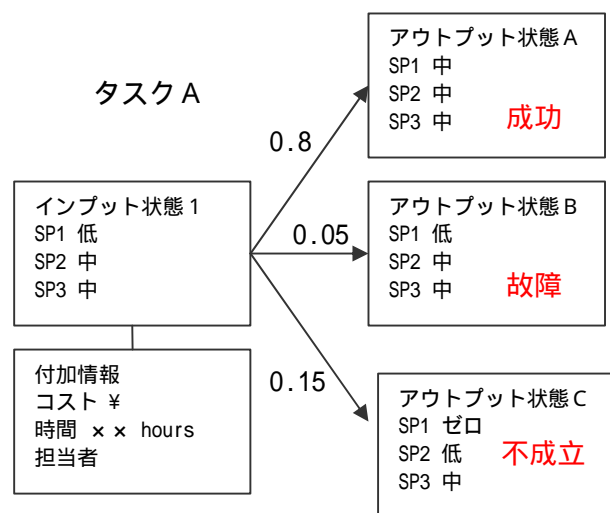


図 9 Signposting モデル

3.9 RDC モデル

RDC モデル (Requirement - Definition - Confirmation モデル)^{13) 14)}は設計プロセスを構成する三種類の作業要素である要求認識作業、設計定義作業、確認・検証作業とその作業間関係をつめることによって、設計プロセス内のあいまいさや反復と、設計定義作業間に発生するコンフリクト状態 (あちらを立てればこちらが立たずの状態) を可視化することのできるモデル化手法である。

モデル化の作業は図 10 に示す複数の「適合項

目」と呼ばれる設計要求の発生源の洗い出しを行うことから始まる。この適合項目ごとにそれぞれの適合項目が発生させる要求である「外部要求」の認識作業、外部要求より設計コンセプトを決定する作業である「概念定義」作業、決定された概念定義の詳細仕様を決める「内部要求」の決定作業、及び内部要求を満たすための設計パラメータを決定する「詳細定義」作業が抽出される。さらに、これらの四種類の作業の不確実性を補完するために実施される様々な確認・検証作業を捉え、これらの作業の相関関係をモデル化する。

この一連の流れを図 11 に示すが、この手順を踏むことによって論理的な連なりを持ったプロセスを抽出することができる。

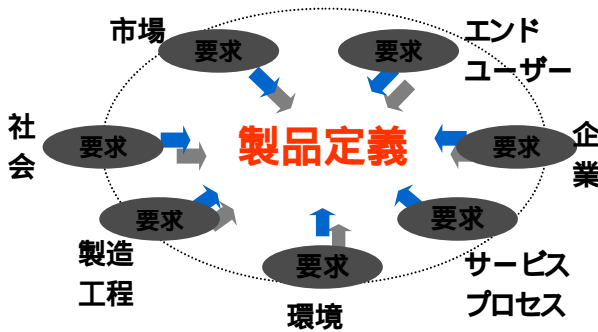


図 10 適合項目

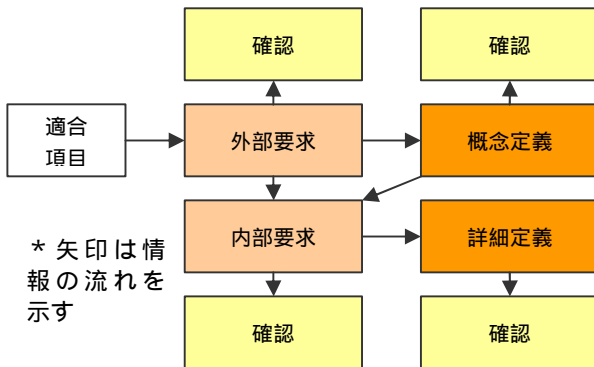


図 11 RDC モデル

3.10 モデルと可視化

以上のように設計プロセスのモデル化手法には様々な種類のものが存在し活用されている。表 2 には本章で紹介したモデル化手法が、設計プロセスの何をモデル化し、何を可視化するのかをまとめた。ここに示すように、これらのモデル化手法は設計プロセスの様々な要素に着目し、それぞれの視点でのプロセスの姿を描き出す。従って設計プロセスのモ

デルリングと可視化を行う際には、プロセス上の何を可視化するのかという目的を明確に持ち、それに応じた手法を適切に選択しなければならない。

表 2 モデル化手法の特徴

モデル化手法	何をモデル化するか	何が可視化されるか
ガントチャート	・設計作業 ・作業の日程	・大まかな作業順序 ・日程上の作業分布
PERT	・設計作業 ・作業間の前後関係 ・作業時間	・厳密な作業順序 ・任意の 2 作業間のリードタイム ・クリティカルパス
IDEF0 IDEF3	・設計作業 ・作業のインプット、コントロール、メカニズム、アウトプット ・プロセスフロー	・プロセスの構造 ・設計リスク ・作業順序
DSM	・設計作業 ・作業間の依存関係	・作業の反復 ・反復が最小の作業順序 ・相互依存する作業のグループ
GATE モデル	・設計作業 ・設計局面	・作業局面の完了条件 ・作業のデッドライン
QFD	・要求品質 ・品質特性 ・機能特性	・要求のあいまいさ
IPO モデル	・インプット、プロセス、アウトプット	・作業の実行順序
Signposting モデル	・タスク ・設計の状態 ・設計遷移の可能性	・タスクの有効性
RDC モデル	・設計作業（外部要求、概念定義、内部要求、詳細定義） ・定義間の依存関係 ・設計作業間の関係 ・設計作業の不確実性	・作業の反復 ・反復が最小の作業順序 ・相互依存する作業のグループ ・作業及びプロセスの不確実性の大きさ ・作業間のコンフリクト

さて、冒頭で論じた設計プロセス品質の向上を目的とする場合には、どのモデリング手法の活用するのが良いのであろうか。

設計プロセスの品質を「製品の目標機能や制約条件などの要求を満足する製品設計を確実に行うためのプロセスの能力」と考えると、作業局面の完了条件を明確化する GATE モデルや、要求のあいまいさを可視化する QFD、作業とプロセスの不確実性の大きさを可視化する RDC モデルなどが設計プロセス品質を管理する機能を有していると考えられるであろう。

4. あとがき

設計プロセスモデル活用の際の一般的な障害として、その構築にかなりの手間を要するという問題がある。さらに、仮に手間をかけて製品設計のプロセスモデルを記述したとしても、そのモデルをそのまま他の製品設計プロジェクトに適用できる可能性は少ない。通常は、製品の変化に伴い設計プロセスも柔軟に変更していくことが必要となる。

設計プロセス品質向上のためにはプロセスモデリング手法によるプロセスの記述と可視化が不可欠ではあるが、そのためには、プロセス記述を容易に行うことのできる方法論と、編集可能な柔軟性のあるプロセス記述情報の表記・管理手段、および有用な可視化機能を実装したプロセスモデリング支援ツールの実現が必要となろう。現在、筆者の所属する東京大学大学院、設計工学研究室では、これらの特徴を備えた設計プロセスモデリングツールを研究開発中であり、近い将来その第一版を公開できるものと考えている。

参考文献

- 1) Pahl, G., Beitz, W., (設計工学研究グループ訳) : 工学設計 体系的アプローチ, 培風館(1995)
- 2) 宮川公男 : OR 入門, 日本経済新聞社
- 3) 松本巖 : ビジネスモデリング手法 IDEF, ビジネスモデル学会年次大会(2002)
- 4) The National Institute of Standard and Technology of USA: Announcing the Standard for INTEGRATION DEFINITION FOR FUNCTION MODELING (IDEF0) (1993)
- 5) Mayer, R.J., Menzel, C.P., Painter, M.K., deWitte, P.S., Blinn, T., and Perakath, B.: Information integration for concurrent engineering (IICE), *IDEF3 Process Description Capture Method Report*, Armstrong Laboratory (1995)
- 6) Steward, D.: The Design Structure System, A Method for Managing the Design of Complex Systems, IEEE Transaction on Engineering Management, vol. 28 (1981), pp. 71-74.
- 7) Eppinger, S.D., Whitney, D.E., Smith, R.P., and Gebala, D.A.: Organizing the Tasks in Complex Design Projects, Massachusetts Institute of Technology, Working Paper No. 3083 (1989)
- 8) 中沢俊彦, 清水剛 : RDC モデルによる設計プロセス内の手戻りの可視化に関する研究, Design Symposium (2004)
- 9) 中沢俊彦, 清水剛 : 設計作業の内部循環に起因する手戻りの削減に関する研究, 設計工学, 39, 9 (2004)
- 10) Chao, L.P., and Ishii, K.: Design process error-proofing: Benchmarking GATE and phased review life-cycle models, Design Engineering Technical Conference: DFM, Long Beach, CA. (2005)
- 11) 吉澤正, 大藤正, 永井一志 : 持続可能な成長のための品質機能展開, 日本規格協会 (2004)
- 12) O'Donovan, B.D., Clarkson, P.J., Eckert, C.M.: Signposting: Modeling Uncertainty in Design Processes, International Conference of Engineering Design, ICED, Stockholm (2003)
- 13) 中沢俊彦 : 要求・確認・定義モデルによる製品開発プロセスの分析, 設計工学, Vol38 No.12 (2003) 631-640
- 14) Nakazawa, T., and Masuda, H.: Requirement-Definition-Confirmation Modeling Approach for Identifying Uncertainties in Product Design Processes, Design Engineering Technical Conference: DTM, Philadelphia, PA. (2006)