

設計プロセスの確からしさの可視化に関する研究

Visualization of Design process certainty

○中沢俊彦（東京大学）*1 増田宏（東京大学）*2

*1 Toshihiko Nakazawa, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, nakazawa@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

*2 Hiroshi Masuda, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, masuda@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

This paper proposes a way to quantify certainties of design activities within a design process based on the combination of Requirement-Definition-Confirmation (RDC) modeling to analyze design activities and their interrelations within the process and newly developed metrics to evaluate certainty of the design activities. As a consequence of this modeling and the quantification of the certainties of the design process, the potential risks in the product design can be visualized over the entire design process. In this paper, we present the results of an experiment using a real product design case.

Key Words: Design, Process, Modeling, Certainty, Visualization

1. 緒 言

設計者は日々の設計作業において、不完全な知識や情報を元に多くの設計上の意思決定を行わなければならない。一つの例として、製品の使用環境を明確にしたいと考えても、製品を市場に投入する前に、その製品の全ての使用環境を調査し想定することはたいへん難しいことである。さらに、仮に製品の使用環境がはっきりと認識できたとしても、製品をその環境に耐えうように設計するための十分な設計根拠が常に存在するとは限らない。このような恒常的な情報不足の中で、設計者は短い開発日程を守りつつ、設計作業を進めて行かなければならないのである。

ところが不完全な情報を元に設計を進めれば、設計作業の成果物である設計図面や CAD モデルの中に不確かな設計情報が蓄積されていくことになる。このように、設計作業の結果として生成される設計情報の確からしさは設計作業の集合としての設計プロセスの確からしさによって決定付けられると考えることができる。

このような設計品質の決定要因である設計プロセスの質を、設計プロセスモデルによって可視化することが本研究の目標である。

2. 設計の確からしさを管理するための既存手法

設計の確からしさを定量的に評価する方法として Probabilistic Risk Assessment（確率論的リスクアセスメント、以下 PRA）がある。PRA は、原子炉の開発やプラント開発、宇宙開発などミッションクリティカルな開発作業において、システム上のリスクを確率論的に評価することによって、定量的な指標に基づいた意思決定を行っていくことを目指した総合的な方法論である。具体的には、複数の分析手法を体系的に組み合わせて製品の故障の発生確率を定量的に評価するための分析ステップと考えればよい。

Table.1 PRA Steps in NASA

ステップ	説明
1. PRA の目的とスコープの明確化	PRA を実施する目的を明確化する。通常、PRA の目的やスコープはプロジェクトの目的そのものとは同じにはならない。プロジェクトの達成を阻害する重大なリスクの評価などを目的とし、分析の範囲を規定する。
2. プロジェクトの成功条件定義	どのような状況が達成できた場合にプロジェクトが成功したといえるのかを明文化する。
3. プロジェクトの終了条件定義	プロジェクトの成功と失敗による終了条件を記述する。
4. 開発対象システムの理解	システム構成、システムの操作、設計のねらい、故障モードなどの記述や分析を通じてリスクを評価しようとしているシステムに対する理解を進める。対象システムの正しい理解なくしては、正しいリスクのアセスメントは不可能となる。
5. 開始イベントの作成	同類の設計経験者やエキスパートによるコンサルティング、プレインストーミング、過去の経験の調査、システムシミュレーションの実行などを通じて、故障や障害の出発点となる開始イベントを広範囲にリスト化する。必要に応じてマスターロジックダイアグラム（MLD）や FMEA を用いて開始イベントを導く。リスト化された開始イベントをグルーピングし整理する。
6. ESD アナリシス	開始イベントごとにイベントシーケンスダイアグラム（ESD）を開発する。
7. 開発対象システム成功条件定義	システムの冗長性と操作時間の 2 つの観点から、どのような条件を達成すれば成功といえるのかを定義する。
8. ET アナリシス	ESD 基にイベントツリーを記述する。
9. FT アナリシス	開発対象システム成功条件より論理的に導かれたトップイベント（システムが成功しない条件）より故障木（FT）解析を行う。
10. データアナリシス	定量的な評価の基となる基礎データの収集と決定を行う。
11. モデルの統合と定量評価	故障の確率密度を計算する。

一例として NASA の PRA ガイド⁽¹⁾で推奨されている PRA 手法を用いた分析ステップについて述べる。NASA では

PRA の実行ステップを予備的な作業も含めて 11 のステップに分割して実施している。表 1 に NASA の PRA ガイドブックより推定した NASA の PRA 実行ステップとその概要を示す。

本表に示したステップからも理解できるように、PRA は信頼できるデータを基に設計段階において製品の故障の発生確率を定量的に導出し、設計開発上の客観的な意思決定を支援する手法である。反面、その実行には極めて複雑な手続きと多大な分析作業工数が必要となる。

それ故に、多くの製造業における一般的な設計活等においては、より簡便に設計の確からしさを管理する方法が求められていると考えられる。

3. 本研究のアプローチ

本研究におけるアプローチでは、まず、設計作業の結果生成される設計情報が設計対象である人工物の全ての要求値を 100% 満足している「理想的な設計作業の状態」を仮定する。実際の設計においては、設計対象における要求値がはっきりしない、要求値を十分満足する設計解が得られないなどといった理由により、理想的な設計作業の状態とは異なった実現可能な設計作業の状態に従って設計作業が進められていると考えられる。従って、このような状況においては、理想的な設計作業の状態とは仮想的な設計環境となる。

既に述べたように、設計活動は人工物を製造するための設計情報を創造することに他ならないので、図 1 に示すように、この理想と現実の設計作業の状態の差とは、設計情報の確からしさへと反映されていると考えて差し障りがないであろう。本稿では、この設計作業の理想と現実の差を定量化することによって、設計プロセス内に内在し、設計作業によって製品に転写される設計リスクの相対的な大小を可視化する方法について論じる。



Fig.1 Gap of a design certainty

設計作業の理想と現実の差の簡便な管理方法として、本研究では以下のステップにより設計作業の確からしさの管理を行うことを提案する。

- STEP1: 設計プロセス内の作業を記述 (モデル化) する
- STEP2: 記述した作業要素の確からしさを評価する
- STEP3: 作業間の関連を考慮してプロセスとしての確からしさを再評価する

設計プロセスの記述には、設計プロセスのモデル化手法の一つである RDC モデル⁽²⁾⁽³⁾を用いる。

また、モデル化された設計プロセス作業の確からしさを評価するために、新たに開発した評価指標によって確から

しさの点数化を行う。

3.1. 設計プロセスのモデル化方法

本アプローチの例として、工場の生産設備に合うように製品のレイアウトを決める設計場面を考えてみる。まず、設計者は設計対象製品がどのような生産設備で生産されるのかを想定するはずである。このような設計条件や目標値を明らかにする作業が要求の明確化作業である。この場合、設定される要求値は設計者の想定なので、ある程度の不確かさを伴う可能性がある。そこで、生産技術者によるデザインレビューがこの不確かさを解消する一つ的手段として実施されることが考えられる。このレビュー作業は、設計者によって想定される要求値に対する検証作業として機能し、想定によるところの要求値の不確かさを低減する役割を担っていることが理解できる。

次に、このデザインレビュー後の要求値を元に設計者は製品のレイアウトを決めることになるが、このような設計上の意思決定作業が定義作業である。上述の要求認識作業と同様に、この定義作業においても不確かさが入り込む余地がある。レイアウトを決めたものの、その部品形状や配置が想定している生産設備で問題なく加工や組み付けやできるかどうかは、この段階ではまだ定かではないという状況であることは多い。このような不確かさは、生産トライアルなどの検証作業を通じて低減しなければならないが、このような検証作業が、設計によって決定されたレイアウトに対する確認作業である。

以上の一連の作業の関係を設計プロセス分析手法の一つである RDC モデルによってモデル化したものを図 2 に示す (上述の他にも、要求認識作業や確認作業が存在する可能性があるが、ここでは、それらの作業を省略して R と C で示してある)。

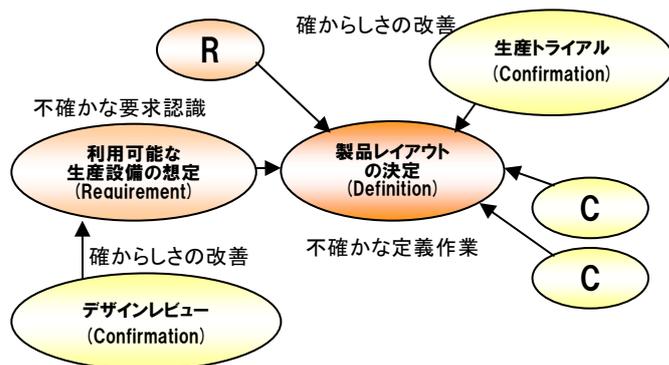


Fig.2 Design certainty in a RDC Model

3.2. 設計プロセス上の作業の確からしさの評価方法

次に、モデル化された設計プロセスを構成する各構成作業要素に対して、複数の視点で確からしさの評価を行う。評価の視点は、異なる製品の設計者によって設計の不確かさの要因を分析することによって、経験的に導いたものを一般化したものである。

まず、要求認識作業である“利用可能な生産設備の想定”については、「成熟度」、「解釈の多様性」、「出所の正当性」という 3 つの指標によって評価することとする。「成熟度」は認識対象となっている要求値が環境条件などの推移によ

って将来変化しないかどうかを判定するための指標、「解釈の多様性」は要求値が誰にとっても一義的に解釈しうるかかどうかを判定するための指標、「出所の正当性」は要求値が正しいソースより出されたものかどうかを判定するための指標であり、それぞれその確からしさの度合いによって1（最も確からしい場合）から0.5（不確かな場合）の間の点数化を行う。例えば、「利用可能な生産設備の想定」という要求認識作業については、「成熟度」：0.6、「解釈の多様性」：0.6、「出所の正当性」：1などとその要求認識の状況に応じて点数化する。

この要求認識作業の不確かさを改善する作業として、要求認識作業に対する確認作業である“デザインレビュー”がある。この確認作業は、「網羅性」と「測定可能性」の2つの指標によってその確からしさを評価することとする。点数化の範囲は要求認識作業に対するものと同様、確からしさの度合いに応じて1から0.5とする。

同様に、定義作業である“製品レイアウトの決定”に対しては「定義の根拠」、「トレードオフにおける優先度」という2つの指標によって1から0.5の範囲で点数化する。

同様に、定義作業に対する確認作業である“生産トライアル”に対しては、「現実との相関性」と「測定可能性」という2つの指標によって1から0.5の範囲で点数化する。

図2に示した例に対する、以上の点数化作業の結果をまとめると、表1のようになる。

Table.2 Design certainty indicators

設計作業要素	確からしさ指標	確からしさ点数
利用可能な生産設備の想定	成熟度	0.6
	解釈の多様性	0.6
	出所の正当性	1
デザインレビュー	網羅性	1
	測定可能性	0.7
製品レイアウトの決定	定義の根拠	0.7
	トレードオフにおける優先度	0.9
生産トライアル	現実との相関性	1
	測定可能性	1

3.3. 設計プロセスの確からしさの計算方法

確認作業の確からしさを尤度と考えると、確認作業前の要求認識作業と定義作業の確からしさは、以下のベイズの式によって確認作業後の確からしさに変換することができる。

$$P_{POST} = \frac{P_{PRI} \times P_C}{(P_{PRI} \times P_C) + (1 - P_{PRI}) \times (1 - P_C)} \quad (1)$$

ここで P_{PRI} は要求認識作業および定義作業の確認前の確からしさを、 P_C は確認作業の確からしさを、 P_{POST} は要求認識作業および定義作業の確認後の確からしさをそれぞれ示す。

そこで、図1に示した“利用可能な生産設備の想定”の確認前の確からしさを表2より $0.6 \times 0.6 \times 1 = 0.36$ 、確認作業（デザインレビュー）の確からしさを $1 \times 0.7 = 0.7$ とすると、この要求認識作業の確認（デザインレビュー）後の確

からしさは、

$$P_{POST} = \frac{0.36 \times 0.7}{(0.36 \times 0.7) + (1 - 0.36) \times (1 - 0.7)} = 0.57$$

と計算される。

ここで、設計作業の理想的な状態とここまでの計算から得られた現実の状態との差は、この計算結果の逆数の対数を取り、次式によって計算するものとする。

$$P = \ln \frac{1}{0.57} = 0.56$$

さらに、確認前の定義作業“製品レイアウトの決定”の確からしさは、上述の確認後の要求認識作業の確からしさと表2の定義作業の確からしさを掛け合わせ、 $0.57 \times 0.7 \times 0.9 = 0.36$ とすると、この定義作業の確認（生産トライアル）後の確からしさは、確認の確からしさが $1 \times 1 = 1$ であるので、

$$P_{POST} = \frac{0.36 \times 1}{(0.36 \times 1) + (1 - 0.36) \times (1 - 1)} = 1$$

と計算される。従って、図2に示した設計プロセス全体としての確からしさは1と計算される。

要求認識作業の場合と同様、理想的な状態と現実の状態との差は、

$$P = \ln \frac{1}{1} = 0$$

と計算される。この数字は図2に示した一つの定義作業に関わる要求認識作業と確認作業よりなる系（設計作業単位と称する）全体の確からしさも示す（但し、上記の計算では図2の中で省略しているRとCの影響は考慮していない）。

4. 自動車部品の設計プロセスへの適用例

上述のように、RDCモデルは設計プロセスの定義作業とそれらに関連する要求認識作業、確認作業に分解してモデル化するが、ある製品の設計プロセスには、そのような定義作業が複数個存在する。それらの全ての定義作業の確からしさを同様の方法で数値化すれば、設計プロセスを構成する定義作業の確からしさの相対的な大小を可視化することができる。

図3は140の要求認識作業、126の定義作業、60の確認作業からなる自動車部品の設計作業単位ごとの確からしさをグラフ化した計算例の一部である。ここでは、バーが高い設計作業単位ほど、当該設計プロセス内で相対的な確からしさが低い作業となっていることが示されている。

この分析作業は3章に示した1から3までのステップに従って、当該部品の設計者によって実施され、この場合の作業工数は1週間程度であった。

本適用事例において確からしさが低いと算定された定義作業には、車両レイアウトに関わる定義（空間的にムリな設計を強いられているためと推定される）、標準的な対処方法が確立していない防水に関わる定義、サービス要件や製造要件など設計段階で曖昧な要件への適合性が要求されている定義などが目立つものとして挙げられる。

反対に機能要件や顧客試験要件など管理の厳しい要件に対しての適合が求められている定義作業は確からしさが高い

との計算結果となった。これは設計プロセス内での作業管理が慎重かつ幾重にも為されているためであると考えられる。

Detail definitions	Uncert
レンズ面	0.21072
レンズ端面	0.10536
レンズ外周R	0.10536
バルブセンター	0.10536
リフレクターF	0.10536
リフレクタ開口面	0.35667
レンズ材質選定	0.21072
F	0
リフレクタ幅	0
リフレクタ高さ	0
リフレクタパターン	0
レンズ接着面	1.06932
レンズ抜き角	1.06932
レンズ抜き方向(水平方向)	0.21072
フィラメントセンター	0.97397
F	0.07862
ピボットレイアウト	0.35929
レンズフック位置	1.68621
呼吸穴位置	0.91294
呼吸穴防水リブ位置	0.68059
ハウジング補強リブ位置	0.12092
リフレクタ固定レイアウト	0.55664
金属部表面処理	0.03455
ハウジング形状	0.04423
ハウジング材料選定	0.0212
レンズ材料選定	0.21072
正面取り付け位置4箇所	0
上面取り付け位置1箇所	0
バルブカバー上に組み付け後上方を示す印の設置	0
H4ハロゲンランプの使用	0.16402
標準規格コネクタの使用	0.16402
バルブセンター位置	0.16402
バルブカバー径	0
レンズ材質の決定	0
ハードコートグレードの決定	0
蒸着時間の決定	0.09278
リフレクタ用BMC材質の選定	0
レンズ、ハウジング位置決め方法の決定	0
リフレクタパターン	0.0274
ハウジング材質PPタルク入りとする	0.0274
ハウジング成形機サイズの決定	0.0274
レンズPCグレードの選定	0.0274
金型メーカーの選定	0.05699
クリーンルームの管理基準の決定	0.29657
工程内検査基準の決定	0.39532
取り付け足形状	0.11307
アジャストスクリュー位置	0
位置決めピン位置	0.29657
バルブセンター位置の決定	0.00821
リフレクタパターンの決定	0
Fの決定	0.03245
サブリフレクター側へのローレットの設置	0
レンズ形状	0.42258
レンズ接着ライン吹流し	0.61655
型割りライン	0.61655
基本抜き方向	0.42258
スライド抜き方向	0.42258
抜き角	0.06634
ゲート位置の決定	0.13524
突き出しピン/レンズ接着リブ上に設定	0.42258
抜き方向の決定	0.37952
型割りラインの決定	0.34628
突き出しピン位置の決定	0.20123
ゲート位置の決定	0.03128
リフレクタ反射面パターン	0.05699
基本抜き方向	0.18351
接着溝吹流し	0.18351
取り付け足部形状	0.18351
灯体ボケット部形状	0.18351
バルブ挿入口形状	0.18351
アジャストスクリュー挿入口形状	0.18351
リフレクタ固定ボス形状	0.18351
サブリフレクタ固定ボス形状	0.18351
突き出しピン位置	0.10263

Fig.3 Design certainty of an automotive part

5. 考察

本研究では、設計情報の確からしさを設計プロセスの確からしさという代替特性値で表すことを提案している。さらに、設計プロセスの確からしさを分析するために、設計プロセスを構成する作業要素である要求認識作業の確からしさ、定義作業の確からしさ、および確認作業の確からしさという3種類の確からしさを個別に検討し、それらを合成することによって設計作業単位ごとの確からしさを定量化している。このような分析的な手法を取ることによって、主観的な判断になりがちであった製品個々の設計プロセス品質、ひいては設計情報の品質評価を、より客観的に実施できるようになったものと考えられる。

これまで、設計プロセス品質の評価という観点では、NASAのTRL (Technology Readiness Level) ⁽⁴⁾やCMMI (Capability Maturity Model Integration) ⁽⁵⁾などの方法論が知られている。これらの方法は、設計対象製品を限定せずにプロセス品質を評価するため、個別の製品の設計品質の代替特性とするには曖昧さが残る。このような方法と比較して、本研究で提案する手法は、特定の対象製品の設計プロセスを分析す

ることから出発するため、その製品の最終的な品質との関連性がより直接的で、高いものと考えられる。

従って、従来困難であった製品全体に渡った設計完成度の定量的な計測を可能にし、設計に起因する製品リスクの流出（特に、市場での故障やトラブル）の未然防止に役立つことが期待できる。さらに、設計プロセスの効率化や適正なリソース配分の促進が可能になるとと思われる。本手法によって設計プロセス全体の主観的な確からしさの大きさを判別し、問題の起こりそうな領域を特定した上で、それらの領域へ焦点を絞った既存手法による精密な検討を行うことによって、既存手法の直接の適用のみでは見落としていた設計品質の向上が達成できるものと期待できるのである。

6. 結 言

本研究で用いた確からしさ評価指標は自動車部品とオフィス機器の2種類の製品の設計者によって、それらの設計プロセスに起こりうる設計の不確かさの状況を検討し、洗い出した不確かなケースを基に導出したものである。今回の研究では、これらのケースを整理し、そのケースを表現する適切な名称を与えて評価指標とした。従って、本稿で述べている評価指標がどの程度汎用的に適用できるかは、今後の、様々な製品の設計プロセスにおける検証を通じて確認して行かなければならないと考える。

それゆえに、ここでは評価指標の妥当性についての検討を行う前段階として、設計プロセスの品質をこのようなアプローチにより評価することが可能であるということが本研究での主張となっている。

本研究の目標は、製品に発生する問題を設計段階に予測し、防止することにあるので、本方法論に有効性の検証のためには、本手法で得られた設計プロセスの確からしさと実際に製品上で発生している問題との相関関係の検証は不可欠であると考えており、製品を製造する企業にとって非常にセンシティブな情報へのアプローチが必要となるもの、ぜひ実現して行きたいと考える。

文 献

- (1) NASA, Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners Version 1.1, (2002).
- (2) 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, Vol.38, No.12, 631-640, (2003).
- (3) Nakazawa, T., and Masuda, H., Requirement Definition Confirmation Modeling Approach for Identifying Uncertainties in Product Design Processes, IDETC&CIE, Philadelphia, (2006).
- (4) Zang, T.A., Hensch, M.J., Hilburger, M.W., Kenny, S.P., Luckring, J.M., Maghami, P., Padula, S.L., and Jefferson Stroud, W., Needs and Opportunities for Uncertainty-Based Multidisciplinary Design Methods for Aerospace Vehicles, NASA Langley Research Center, NASA/TM-2002-211462, (2002).
- (5) 能力成熟度モデル統合(CMMI) 1.1 版, CarnegieMellon, Software Engineering Institute, (2002).