

設計負荷と効率の定量的評価手法

Approach for Quantitative Estimation of Design Load and Efficiency

小沢 正則

■ OZAWA Masanori

上流設計における早期性能検証の重要性は、経験的・直感的によく認知されており、設計早期の支援手法も数多く提案されている。しかしながら、それらを定量的指針に基づいて議論することは困難であった。

そこで東芝は、“設計の仕事量”や、実験・解析による“設計の効率”といった、従来は抽象的にしか議論されない傾向にあった概念について、情報工学的手法を応用した定量的評価手法を提案する。この手法を実際の設計プロセスに適用することにより、現状の設計効率の定量的ベンチマーク分析が可能になる。

The importance of performance evaluation at the early stages of product design has been widely acknowledged empirically and intuitively. However, few studies discuss this subject based on quantitative indices.

In this paper, Toshiba proposes a methodology to measure the load and the efficiency of design by introducing basic information theory. We have applied this methodology to the analysis of actual design processes.

1 まえがき

近年、コンピュータの高性能化や低価格化が進み、実用性や使い勝手の成熟が進んだ結果、CADやCAEを活用した設計は、主として設計の下流段階から一般化してきた。

一方、設計品質の向上と開発期間の短縮の両立のためには、上流設計における早期性能検証の重要性が、経験的・直感的によく認知されている。しかし、各種設計支援ツールや手法が実際にどの程度、設計期間の短縮や製品の品質・競争力の向上に寄与しているかを、定量的に評価することは困難であった。

そこで東芝は、情報工学的手法を応用した設計の負荷や効率の定量的評価手法を提案し、実際の設計プロセスの改善・構築手法の確立を目指している。

ここでは、この手法の具体的な内容について、実設計プロセスの時間評価へ適用した事例とともに述べる。

2 設計負荷の定量評価指標

設計作業とは、仕様を満たす具体的な機構を実現するために、白紙の状態を起点として、もっとも上位の大きくなりな方式から決定し、徐々に詳細な項目決定に進んでいくプロセスとみなすことができる。そして、最終的にすべての未知数が決定された時点で、その設計プロセスは完了する。

したがって、このプロセスのどこかで決定を誤れば、それが上位であるほど深刻な設計変更につながり、設計期間延長のダメージも大きくなる。このことが、上流における性能

検証や設計支援技術の重要性の認識にもつながっている。

これを非常に簡単な例で説明する。図1に示す例は、まず最上位の分枝部(図1の左端部)で“方式”を二者択一で選択した後、下位の“サブ方式”をやはり二者択一で選択する設計プロセスである。すると、2段階の代替案選択プロセスがあるので、系全体では合計4種類の設計代替案があることになる。図に示すように、各分枝には確率分布が付与されており、各分枝部での確率分布の総和は100%とする。

ここで、すべての代替案選択において、どちらを選ぶべきか情報がまったくない状態を初期状態と考える。すなわち、すべての2分枝で確率分布が50%ずつの場合である。

次に、実験や解析などの作業によって得られた情報により、上位の“方式”の二者択一でどちらか片方を選んだとすると、系全体の代替案数は、当初の4から2に半減する。

一方、選択にあいまいさを含む場合、すなわち、分枝部における確率分布が0:100(%)でない中間的な確率分布が与えられた場合にも、選択枝数を連続的に計算することができる。この方法を以下に示す。

2.1 情報のエントロピー

m 個の事象に対する生起確率 p_i を持つ離散確率変数 X がある場合、その情報量は(1)式で表現される。

$$H(X) = -\sum_{i=1}^m p_i \cdot \log_2 p_i \quad (1)$$

$$\text{ここで、} \sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad (i \text{ は } 1 \sim m \text{ の整数})$$

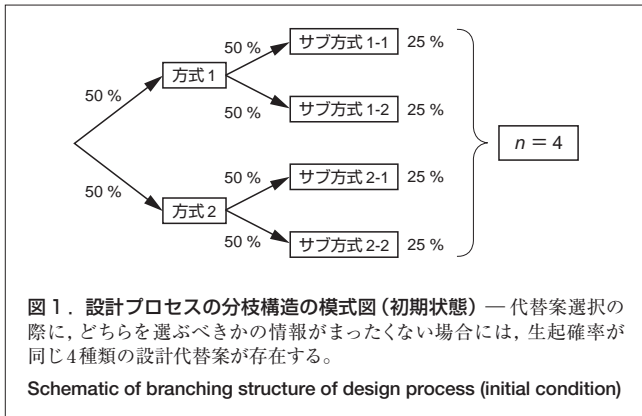


図1. 設計プロセスの分枝構造の模式図(初期状態) — 代替案選択の際に、どちらを選ぶべきかの情報がまったくない場合には、生起確率が同じ4種類の設計代替案が存在する。
Schematic of branching structure of design process (initial condition)

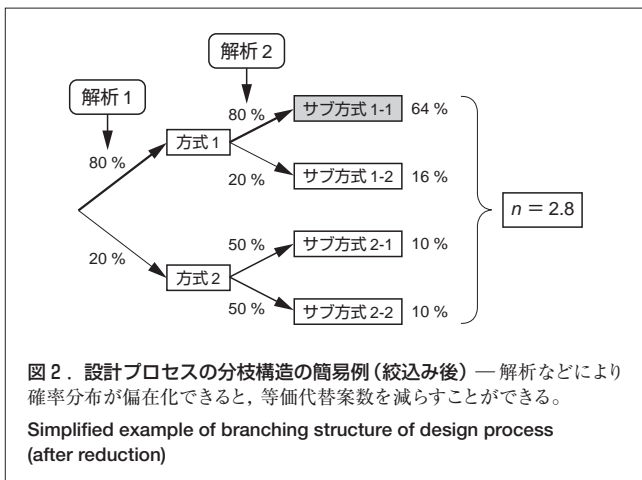


図2. 設計プロセスの分枝構造の簡易例(絞込み後) — 解析などにより確率分布が偏在化できると、等価代替案数を減らすことができる。
Simplified example of branching structure of design process (after reduction)

この H は情報のエントロピーと呼ばれ、Shannonによって、事象の生起・選択の不確かさの尺度として1948年に提唱されて以来、情報理論の基礎として広く知られている⁽¹⁾。

2.2 等価代替案数

H の単位はビットである。図1の例では、末端での確率分布(p_1, p_2, p_3, p_4)をすべて25%として(1)式に代入すると、 $H(X)$ は2となり、代替案数が $2^2 = 4$ 通りであることに対応している。このように二進数で計算されたエントロピーを十進数の代替案数に換算した値を、ここでは“等価代替案数(n)”と呼ぶことにする。すなわち、 n は、 $n = 2^H = 4$ のように計算される。

次に、図2に示すように、上位の分枝部で解析1を実施し、方式1が優れた設計解であることを示唆する結果が得られたとする。この結果は完全に確信には至らないまでも、経験的にもしくは解析ツールの信頼性などから、確率分布が仮に80:20(%)と見積もられたとする。また、下位の分枝部でも解析2を実施し、同様に確率分布を80:20(%)に偏在化できたとする。この場合の系全体の等価代替案数 n を(1)式により計算すると、約2.8と小数値で求めることができる。

ここで、解析1及び解析2を単独で実施した場合の系全体の等価代替案数 n はそれぞれ3.3及び3.6であり、同程度の確率偏在化効果でも上流での解析のほうが効果が大きく、

より重要であることを示している。このように、(1)式によれば、プロセスの構造と確率分布からプロセス全体の“規模”を定量的・連続的に見積もることが可能になる⁽²⁾。

3 設計過程のモデル化方法

2章では非常に簡単な例で説明したが、この方法をより複雑な現実の設計プロセスに適用するにはいくつかの仮定が必要となる。まず、設計問題では、設計変数として離散量と連続量が混在しているのが普通であるが、第一の仮定として、設計変数が連続の場合も、工学的に意味のある分解能で除算することにより離散化して扱えるものとする。

第二の仮定が“対称性”の概念である。分枝部において複数の代替案から一つを選び、その先の詳細プロセスをモデル化した場合に、ほかの代替案のモデル設計プロセスの規模が未知の場合でも、選択した代替案と同程度と仮定してエントロピーを推測計算する。

以下に、設計過程のモデル化方法について説明する。

3.1 分枝構造の分類

まず、設計過程における分枝には2種類あることに着目し、それぞれを次のように分類する。

- (1) 代替案選択 (Alternative Selection) どちらかに決める分枝
- (2) モジュール 部品や設計要素など、独立又は並行して進める設計単位

この2種類を用いた分枝構造の表記例を図3に示す。(1)の等価代替案数の計算は2章で示した方法に従い、(2)の等価代替案数は、モジュールでの和を取り計算する。

3.2 分枝分解性の利用

エントロピー計算において実用上、重要な性質が分枝分解

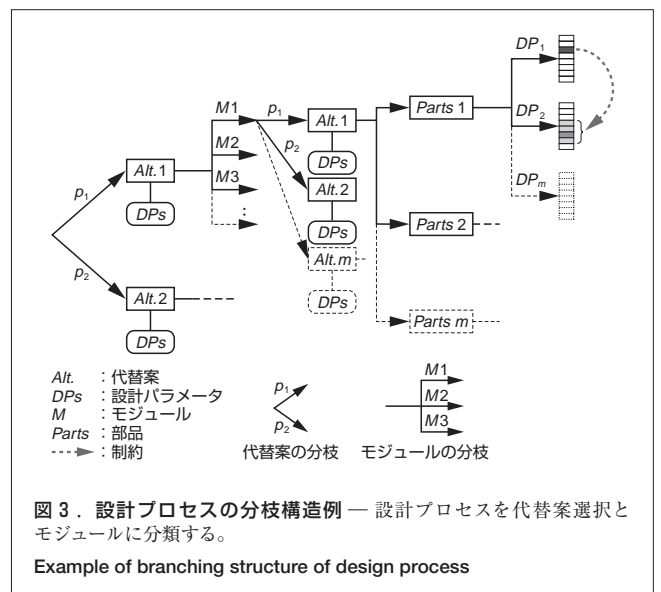


図3. 設計プロセスの分枝構造例 — 設計プロセスを代替案選択とモジュールに分類する。
Example of branching structure of design process

性である。これについて以下に説明する。

代替案 (Alternatives, 図3では *Alt* と略記) 選択が多階の木構造を持つ場合、エントロピーは (2) 式により簡易に逐次計算できる。

$$H_l = H(p_{l,1}, \dots, p_{l,n_l}) + \sum_{j=1}^{n_l} p_{l,j} \cdot H_{l+1,j} \quad (2)$$

添字 l は最上位からの分枝のレベルを表し、 $l=1$ が最上流の代替案選択である。 $H_{l+1,j}$ はレベル $l+1$ の j 番目の代替案のエントロピーを示し、 n_l はレベル l において着目している分枝部の持つ代替案の数である。右辺第1項は、確率分布 $(p_{l,1}, \dots, p_{l,n_l})$ に対して (1) 式で計算されるエントロピーである。

(2) 式は、上流で確率分布を偏在化させたほうが、下流の枝で偏在化させるよりも、総エントロピーを削減させる効果が高いことを定性的に示しており、上流設計の重要性を示唆している。

3.3 エントロピーと設計所要時間との関係

前節までに設計プロセス構造とエントロピーの関係や性質について示してきたが、実設計において、すべてのプロセスにわたってすべての設計変数のエントロピーを精度よく積算していくことは困難である。そこで、現実的に評価可能な方法として、細部のエントロピーを直接求める代わりに各設計ステップに要する時間と確率分布を調査し、分枝分解性や条件付きエントロピーの性質だけを利用することにより、対象部分の設計時間と確率分布との関係を評価することを考える。そのために、時間係数 k を導入して、エントロピーと設計所要時間 T (h) との換算式を (3) 式のように定義する。

$$T = k \cdot 2^H = k \cdot n \quad (3)$$

つまり設計所要時間は、等価代替案数に比例すると仮定する。もちろん、設計プロセスの部分ごとに設計難易度が異なれば k の値は一定ではないが、その場合の詳しい計算方法は参考文献 (3) に示す。設計に要するコストも、同様の考え方でエントロピーと換算することができる⁽³⁾。

4 実設計プロセスの設計負荷定量評価

ここでは、実設計プロセスを対象に、この手法による設計効率評価の効用について述べる。

4.1 設計者からの取材内容

設計者から取材して得た情報は、対象の設計プロセスを構成するステージ (設計プロセスのおおまかな区切り) の数、各ステージの代替案の数、選択確率の概略見積り、やり直しの部位、最小作業時間 (そのプロセスをやり直しなく設計するのに要する時間)、プロセスごとの総設計時間などである。

4.2 計算結果

取材結果をスプレッドシートで分析した例を図4に示す。

モデル化対象の設計プロセスは7ステージから成り、図4は、全7ステージの木構造全体及び上位から4番目のステージの拡大図である。確率分布変更後の変数には区別のためにダッシュ (') を付してあり、また、斜体の数字は取材結果から得られた値、そのほかは評価式から導出した計算値である。

このモデルで、次の三つ (番号は図4と対応) の関係が整合性よく表されるかを検証した。

- (1) ステージごとの総設計時間
- (2) ステージの最小作業時間
- (3) 代替案の確率分布

その結果、実際の総設計時間と評価式から算出したそれは、良好な一致を示した⁽²⁾。このことから、“設計者が感覚的に提示する確率分布の妥当性”、“その確率分布からこの手法で求めた等価代替案数の規模”及び、“設計所要時間が等価代替案数にほぼ比例するという仮定の正しさ”が総合的に示されたと考えられる。

4.3 設計期間短縮時間の算出

図4⑤の“変更後”の列に示すように、確率分布を 50 : 30 : 20 (%) から 70 : 20 : 10 (%) に変化させた場合の設計短縮時間を試算した。この確率分布の変化は、実験や解析による情報により、正しい解の存在確率分布が偏在化したことに相当する。その結果、設計期間短縮が 14.3 h と予測された (図4⑥)。このように、確率分布の初期値と変更後の値を入力し設計期間短縮効果を比較することには、以下のような意味がある。

ある代替案選択時に、もともと一つの非常に有力と考えられる代替案が存在する場合と、そうでなく、まったくどれが良いか見当が付かない場合があったとする。ここで実験や解析などで、一つの代替案に絞り込めた場合を考える。前者の場合、もともと有力候補があったので、得られた“情報の価値”はそれほど高くないが、後者の場合は相対的に価値が高いことになる。したがって、各分枝部で代替案の“現状の自信度合い”としての確率分布をあらかじめ見積もっておき、それぞれに設計支援手法導入後の確率分布の変化を代入して時間変化に換算することにより、情報の価値も考慮して設計期間短縮効果を比較することが可能になる。

また、極端な場合として、次のような仮想的な時間も算出できる。

- (1) すべての分枝部で、一つの代替案の確率を 1、他を 0 とし、理想的に最短 (設計効率が最良) の設計をした場合
- (2) すべての分枝部で、すべての代替案を設計する、最長 (設計効率が最悪) の設計をした場合

これらと現状の総設計時間を比較することにより、最短ケースと最長ケースを両極として、現状の設計効率がどの

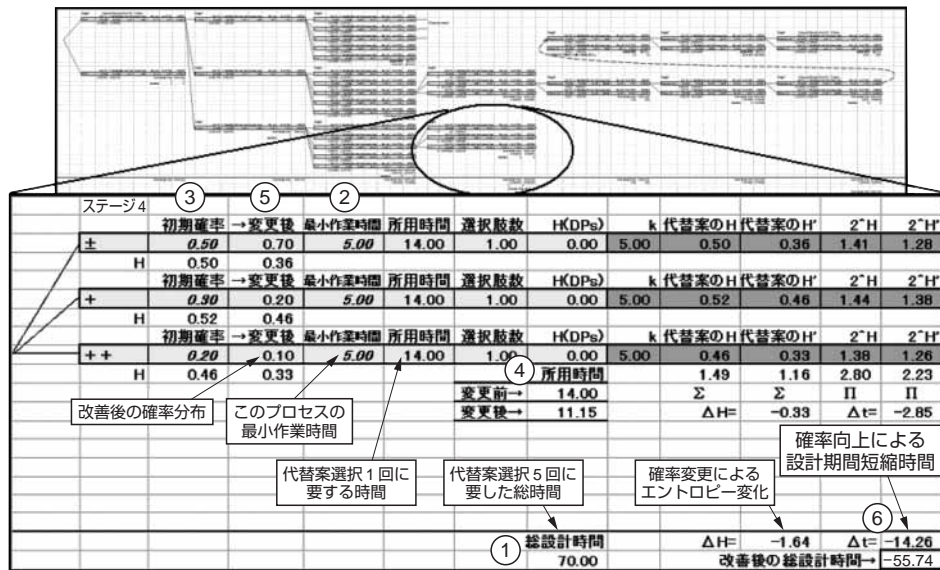


図4. 対象プロセスの概観とステージ4の拡大 — 設計者から得た情報により、設計プロセスを定量化することができる。
General view of total design process and enlarged view of stage 4

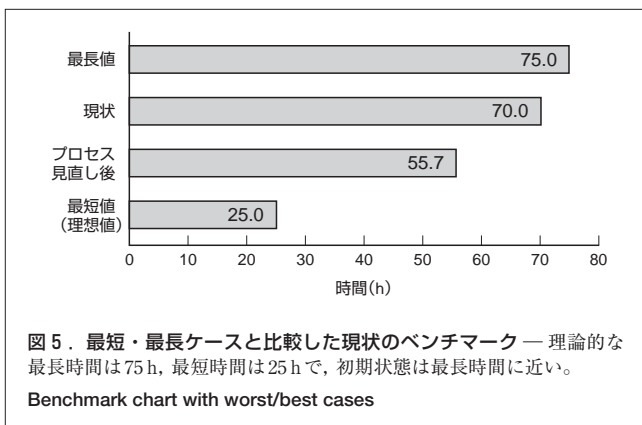


図5. 最短・最長ケースと比較した現状のベンチマーク — 理論的な最長時間は75h、最短時間は25hで、初期状態は最長時間に近い。
Benchmark chart with worst/best cases

位置にあるのかをベンチマーク分析することも可能である。例えば、ステージ4での計算結果を図5に示す。プロセス分析の結果、現状の設計所要時間は70hであり、最長設計時間の75hに近いことが判明した。また、プロセスの見直しにより55.7hに短縮できる。理想的な最短設計時間は25hであり、これにいかに近づけるかが目標である。

各ステージにおいて同様の分析を行い、その改善に要するコストや手間なども含めて総合的に判断することで、設計支援手法の導入効果や優先順位を評価でき、合理的に設計プロセスを改善することが可能になる。

5 あとがき

ここでは、情報工学的手法を応用して設計負荷と効率を定量的に評価することにより、合理的な設計プロセス改善を

支援する手法を提案した。これにより、設計プロセスの分枝構造と確率分布から系全体の規模と時間を概算することができ、現状の設計効率を最短・最長ケースとのベンチマークにより定量比較し、設計プロセス改善の優先順位を合理的に決定することが可能となる。

今後は、実験や解析によって得られた情報が、確率分布を偏在化させる効果や、ある設計支援手法を導入することにより、どれほど意思決定の精度や解の信頼性が向上するのかを定量評価する手法を確立することにより、より実用的な手法として体系化していくことが課題である。

文献

- (1) Shannon, C. E. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal. 27, July and October, 1948, p.379-423 and p.623-656.
- (2) Ozawa, M.; Inoue, K. "An approach for quantitative estimation of design load and efficiency". Proceedings Fifth International Symposium on the Tools and Methods of Competitive Engineering, Lausanne, Switzerland, 2004-04. Millpress, 2004, p.811-821.
- (3) 小沢正則, 井上克己. "設計負荷と効率の定量的評価手法の提案と応用". Design Symposium 2004講演論文集. 東京, 2004-07, 東京大学. p.281-288.



小沢 正則 OZAWA Masanori

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。
CAE技術, 設計工学, 品質工学の研究・開発に従事。ASME, 日本機械学会, 設計工学会, 品質工学会会員。
Mechanical Systems Lab.