

設計業務への多基準意思決定手法の適用 (TOPSIS 法の実用的な使用法とスプレッドシートの作成)

Applying Multi Criteria Decision Making Method to Design Process (Practical usage of TOPSIS and Creation of spreadsheet)

○戸水晴夫 (正, SDI Japan, Haruo Tomizu)

1 はじめに

新製品を開発しようとする場合、通常は企業内で組織横断的なプロジェクトが組まれる。集められたプロジェクトメンバーは、企業内の各組織の利益を代弁する利害関係者だといえる。同じ設計部であっても、機械設計者、電気設計者、ソフトウェア設計者では、自ずと製品仕様に対する考え方が異なる。生産技術者や製造技術者は、よりモノづくりがしやすい仕様を求めたであろうし、保守サービス部門のメンバーは、分解や廃棄がしやすい構造を望むであろう。近年では、外部の業務委託会社のエンジニアやデザイナーが参加する場合も多い。そのような様々な価値観を持つ人々が集まる製品開発プロジェクトでは、いかに早期に意見集約し、市場で売れる製品に作り上げていくかがプロジェクトリーダーの役割となる。往々にして声の大きな人が設計仕様を決めてしまったり、組織の力関係や役職の上下関係で決まったりすることがあるが、そのようなプロジェクトでは、製品の成功は望むべくもない。あるいは、いつまでたっても最終仕様決めることができずに、設計品質が不十分なまま時間切れスタートすることになるケースもある。このような事態を解決するために、プロジェクトリーダーとなる人には、多基準意思決定手法を利用することを提案したい。本報では多基準意思決定手法のなかでも、特に優劣順位技法として知られる TOPSIS 法の実用的な使用方法について提案する。

2 設計候補を選択するための手順

従来から、設計候補の特性を分析し、選択する手法は数多く存在していた。¹⁾ しかしながら、それぞれの手法を使った場合の分析結果に関する評価は行われてきていたが、手法を組み合わせることで使うことの利点や欠点に関する評価が、あまり行われてこなかった。例えば、多基準意思決定手法の中で代表的な階層分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process)²⁾ や包絡分析法 DEA (Data Envelopment Analysis)³⁾ などと TOPSIS 法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)⁴⁾ の単独利用での比較検証は行われることがあっても、組み合わせる場合のメリットが論じられることが少なかったように思われる。米国 Statistical Design Institute LLC. では、1999 年以來、最良の設計候補を選択するためのメソドロジーを組み込んだ SDI Tools を開発・販売してきた。図 1 に示すように Affinity Diagram と AHP, TOPSIS を組み合わせる Microsoft® Excel® に実装し、ひとつの Excel®ブック内で連続的に使えるようにした設計候補選択ツールとなっている。

2.1 評価項目の抽出と分類を行う

製品開発プロジェクトでは、最初に各部署の代表が持ち寄った新製品に関するアイデアを様々な観点から分類し、評価項目を抽出する作業を行う。この時に図 2 に示すような親和図法に基づく Affinity Diagram のツールを使えば、アイデアの整理が行える。図 2 は、スプレッドシート上の 16 個のアイデアを SDI Tools を使って 4 個のグループにまとめた状況を示している。

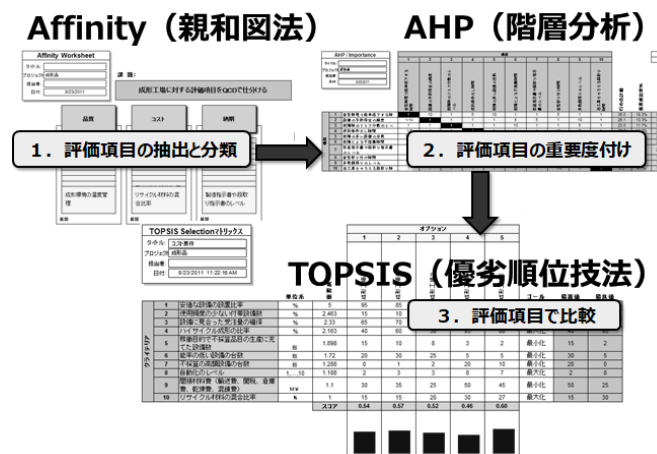


図 1 TOPSIS 法の利用手順の概要



図 2 Affinity Diagram の概要

2.2 評価項目の重要度付けを行う

階層分析 AHP は、評価項目の相対的な重要度付けを行うために用いられる。重要度を決定する手法は、一対比較法である。この手法は 1970 年代に米国ピッツバーグ大の Thomas L. Saaty により提唱された階層分析理論に基づいている。一対比較法とは、評価項目のすべての対となる組合せに対して、どちらがどれほど重要かを比較していくものである。その結果をマトリックスに統合し、数学的に評価項目の重要度を算出する。図 3 は、Affinity Diagram で抽出した 4 個の製造評価項目を階層分析 AHP のスプレッドシートを使って重要度付けを行った結果を示している。階層分析 AHP のマトリックスは、横の項目と縦の項目に同じものが入る。横の項目に対し、縦の項目がどれほど重要であるかを 5 段階評価(10>5>1>1/5>1/10)で選択し、マトリックスの横方向で集計する。集計値をパーセンテージで表し、それを 1 から 5 の数値に読み替えて評価するのである。こういった階層分析法は一人でも実施できるが、通常は、プロジェクトメンバー全員が、スプレッドシートに記述された AHP のマトリックスを見ながら意見を交わし、個々の評価項目の重要度を決めていくという使われ方をする。

2.3 評価項目で設計候補の比較を行う

TOPSIS 法の判断基準は、選ぶべき設計候補が、最良の解決策に対して最も近い距離にあり、最悪の解決策に対しては最も遠い距離にあるというものである。そして、最良の解決策に対する個々の設計候補の相対的距離を計算するために、幾何学のユークリッド距離が使われる。ここでは、図 4 に示した TOPSIS のマトリックスを例として、以下に解説する。

- はじめに、横軸に評価要件を置き、縦軸に設計候補を置いたマトリックスを作成する。
- 次に評価項目に重要度を割り振る。この時の重要度とは、図 3 の階層分析 AHP で求めた相対重要度である。
- 個々の評価項目に対する設計候補の目標値を入力する。それらは実際の値であったり、ランキングのレンジであったりする。
- 評価項目が最良となる方向を決める。最小化または最大化を選ぶ。
- ユークリッド距離をもとにスコアリングを行う。スコアの値が 1 に近いほど、良い設計案と見なされる。

		項目				5 1	最大値 最小値	
		1	2	3	4			
項目	1 コスト	1	5	10	5	21	42%	5
	2 納期	1/5	1	0.1	10	11	23%	2
	3 部品寿命	1/10	10	1	0.2	11	23%	2
	4 内製	1/5	1/10	5	1	6	13%	1

図 3 AHP による評価項目の重要度付け

3 TOPSIS のアルゴリズム

TOPSIS のマトリックスは、スプレッドシートに記述された n 個の評価項目と m 個の設計候補のマトリックス D で表すことができる。

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで x_{ij} は、 i 番目の設計候補の j 番目の評価項目の目標値である。

TOPSIS による最良候補を選び出す最初の手順は、スプレッドシートに記述した設計候補と評価項目のマトリックス D の正規化を行うことである。正規化する理由は、物理量や単位系の違いに関わらず要素間の比較ができるようにするためである。その後、評価項目の重要度に基づき、それぞれの要素に重み付けを加える。次に、最良または最悪の設計候補を定義する。そして、マトリックスの要素ごとに n 次元のユークリッド距離を計算し、最後に、最良の設計候補からの無次元化した相対距離を計算する。最良候補とは、最良とした設計候補にユークリッド距離で最も近い候補のことである。この時、最良の候補は最悪の候補から最も遠い位置に在る。

3.1 マトリックスの正規化と重み付けを行う

スプレッドシートに記述されたマトリックス D を正規化し、マトリックス R とする。正規化された目標値 r_{ij} は、式(2)によって計算される。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (2)$$

マトリックス R は横方向が n 個の評価項目の行となり、式(3)で表すことができる。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

		オプション				5 1	最大値 最小値			
		1	2	3	4					
クライテリア	1 コスト	円	5	3500	3800	2000	5400	最小化	5400	2000
	2 納期	月	2	6	6	2	5	最小化	6	2
	3 部品寿命	年	2	10	3	3	5	最大化	3	10
	4 内製	ランク	1	5	4	2	1	最大化	1	5
		スコア	0.59	0.38	0.65	0.13				

図 4 TOPSIS による設計候補の比較

次に、AHP を使って計算した評価項目に関する重要度を加味する。重要度は、相対重要度 W に変換し、 $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ で表される。この時、 $\sum w_i = 1$ となる。

相対重要度を式(3)のマトリックス R に積算すると、重み付けしたマトリックス V が作成できる。

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & w_3 r_{13} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & w_3 r_{23} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & w_3 r_{m3} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 最良または最悪の設計候補を定義する

各評価項目 n に対する最良の値は A^* として表し、最悪の値は A^- として表すと m 個の設計候補に対するそれぞれの定義式は(5), (6)になる。

$$A^* = \left\{ \left(\max v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\min v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \\ i = 1, 2, 3, \dots, m \\ = \{v_{1^*}, v_{2^*}, \dots, v_{n^*}\} \quad (5)$$

$$A^- = \left\{ \left(\min v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\max v_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \\ i = 1, 2, 3, \dots, m \\ = \{v_{1^-}, v_{2^-}, \dots, v_{n^-}\} \quad (6)$$

ここで、 J は評価項目の値が、増加方向が良い場合であり、 J' は評価項目の値が、減少方向が良い場合である。

$$J = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (7)$$

$$J' = \{j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (8)$$

3.3 n 次元のユークリッド距離を計算する

n 次元のユークリッド距離を計算する意味は、各設計候補が最良の設計候補からどれだけ離れているか、あるいは最悪の設計候補からどれだけ離れているかを表すためである。

最良の設計候補からの距離は、以下の式(9)で表した各要素データの値と最良値との差の 2 乗を全評価項目で計算した和の平方根式で表される。一方、最悪の設計候補からの距離は、式(10)で表した各要素データの値と最悪値の差の 2 乗を全評価項目で計算した和の平方根式で表される。

J11										Options					
										1	2	3			
										Point A	Point B	Point C	Goal	- Ideal	+ Ideal
Criteria	1	X-axis				Units	Importance	1	1	2	3	minimize	3	1	
	2	Y-axis					2	1	2	3	maximize	1	3		
	3	Z-axis					3	1	2	3	minimize	3	1		
Score									0.61	0.50	0.39				

(Delta from + Ideal) *(Importance)				+Ideal Vector Length			最良の設計候補からの距離		
X-axis	0	0.25	0.5	1	0.935414	1.581139			
Y-axis	1	0.5	0						
Z-axis	0	0.75	1.5						

(Delta from - Ideal) *(Importance)				-Ideal Vector Length			最悪の設計候補からの距離		
X-axis	0.5	0.25	0	1.581139	0.935414	1			
Y-axis	0	0.5	1						
Z-axis	1.5	0.75	0						

Separation Distance			
0.612574	0.5	0.387426	

設計候補 1 に関する計算式：

- ① 最良の設計候補からの距離 J11 (数式) = ABS(J5-\$O5)/(N5+O5)*\$I\$5
- ② 最悪の設計候補からの距離 J17 (数式) = ABS(J5-\$N5)/(N5+O5)*\$I\$5
- ③ 最良の設計候補からのユークリッド距離 J14 (数式) = SQRT(J11^2+J12^2+J13^2)
- ④ 最悪の設計候補からのユークリッド距離 J20 (数式) = SQRT(J17^2+J18^2+J19^2)
- ⑤ 最良の設計候補からの相対距離 J22 (数式) = J20/(J20+J14)

図 5 TOPSIS スプレッドシートの作成

最良の設計候補からの距離：

$$S_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^*})^2} \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

最悪の設計候補からの距離：

$$S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^-})^2} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

3.4 最良の設計候補からの相対距離を計算する

TOPSIS の最終的な判断基準となる最良の設計候補からの相対距離 C_{i^*} を計算する。最良の設計候補に最も近いということは、最悪の設計候補に最も遠いということを示す。つまり、相対距離の比率が 1 に近づくにつれて、最良解に近づくと考えられる。設計候補を昇順で順序付けするには、式(11)で相対距離を計算すればよい。

$$C_{i^*} = \frac{S_{i^-}}{S_{i^*} + S_{i^-}} \quad (11)$$

ここで、 $1 \geq C_{i^*} \geq 0$; $i = 1, 2, 3, \dots, m$
 C_{i^*} が 1 に近づくにつれて、設計候補 A_i は最良解に近づく。

もし、 $A_i = A^*$ ならば、 $C_{i^*} = 1$ となる。

もし、 $A_i = A^-$ ならば、 $C_{i^-} = 0$ となる。

最終的な解決策のランキングは、 C_{i^*} の大きさの順に従うものとなる。その結果、最良の候補は、最も 1 に近いものとなる。

4 TOPSIS 法のスプレッドシートを作る

評価項目と設計候補のマトリックスから最良の設計候補を決定する TOPSIS 法の計算式を含んだスプレッドシートを作成する手順を図 5 に示す。ここで、各設計候補に対する評価項目の目標値が大きい方が最良値に近い場合は、最大の目標値を持つ設計候補の値が O 列の+ Ideal (最良) に入り、評価項目の目標値が最小の設計候補の値が N 列の-Ideal (最悪) に入る。逆に、評価項目の目標値が小さい方が良い場合は、最大値が最悪で、最小値が最良となる。設計候補ごとの+ Ideal からの距離は、最良値と各評価項目値との差の絶対値で表される。例えば、スプレッドシート上の J11 のセルは、J5 の値から O5 の最良値との差分を求め、それを最悪値と最良値の和で割算した結果に I5 の重要度の値を掛けたものになる。つまり、J11 の値が一番目の評価項目に関して、1 番目の設計候補の最良の設計候補からの距離を表すものとなる。同様に、各設計候補と評価項目のペアごとに計算する。次に、設計候補列の評価項目ごとのユークリッド

距離を計算する。最良の設計候補からのユークリッド距離は式(9)によって、または最悪の設計候補からのユークリッド距離は式(10)によって、それぞれの列の二乗平方和で求めることができる。

最後に、各設計候補列に対する最良の設計候補からの相対距離を、式(11)によって計算する。この値が 1 に最も近い設計候補が最も良いと判断される。例えば、J22 は一番目の設計候補の値で 0.612574 となっている。これは、J20 を J20 と J14 の和で除して求められたもので、設計候補の中で最も 1 に近い値である。従って、設計候補の 1 番目が最良の設計候補であると結論付けることができる。

5 おわりに

本報で紹介した Microsoft® Excel® に実装した Affinity Diagram, AHP, TOPSIS については、いずれも SDI 社独自のものである。それらは独自の画面構成や他のツールとのデータ・インタフェースを持つアドインのプログラムとした。AHP は Thomas L. Saaty が提唱した 17 段階評価 (9>8>7>6>5>4>3>2>1>1/2>1/3>1/4>1/5>1/6>1/7>1/8>1/9) では使いにくいとため、5 段階評価に変更している。TOPSIS では近似値計算を採用して簡略化している。

製品開発プロジェクトの中で、設計候補を絞り込む場合、いかにプロジェクトリーダーが論理的に最良のものを選び出せるかが重要である。プロジェクトメンバーは部門を代表する利害関係者であるため、各自の判断基準は異なり、当然の帰結として多基準の中での意思決定が求められる。通常は設計部門からプロジェクトリーダーを出すことが多いが、一方で、設計者として最良と思っても、製品として常に市場で成功するわけではない。プロジェクトメンバー内で論理的に意見集約した製品仕様としなければ、後々になぜそのような機能を必要としたのかを問われる場合がある。本報では、製品開発プロジェクトのどのようなステージにあっても、プロジェクトリーダーとなる設計者が明確に数値で自らの意思決定のプロセスを説明できるようになることを目指している。

参考文献

- 1) 社会基盤投資における多基準分析手法に関する調査報告書, パシフィックコンサルタンツ株式会社, (2003), 29
- 2) Saaty T.L, The Analytic Hierarchy Process, New York McGraw Hill, (1980)
- 3) Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E., Measuring Efficiency of Decision Making Units, European Journal of Operational Research, 2, (1978), p429-444
- 4) Ching-Lai Hwang, Yoon, K., Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, New York Springer-Verlag, (1981)