

簡易版 TPA 実施マニュアル

2010 年 3 月 15 日

(独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門

1. はじめに

このマニュアルは、平成 21 年度「サプライチェーン省資源化連携促進事業」の一環として開発した簡易版トータルパフォーマンス分析(TPA)手法の実施手順を示したものです。TPA 手法は、製品・サービスのライフサイクル全体を通じて生み出される製品の価値（使用価値）と環境負荷、コストのバランスを製品、部品、機能のレベルで比較することで製品・サービスの弱点や強みを「見える化」することで環境調和製品の設計を支援する手法です。TPA 手法は、産業技術総合研究所の先進製造プロセス研究部門によって開発され、2008 年 10 月にはトータルパフォーマンス評価・分析ソフトウェア Ver1.00 が公開され、国内、国外をあわせ現在までに 160 件以上ダウンロードされています。しかし、単にソフトウェアをダウンロードするだけで TPA を理解し、実施できるわけではなく TPA を実施するためには、製品ライフサイクル全体を通じての環境負荷やコストデータの収集に加えて、製品の付加価値を製品の機能と関連付けて評価するための各種パラメータ値を推計することが必要であります。このことが個別ユーザ単独で TPA を実施する際に大きな障害となっていました。そこで、本事業では TPA 手法を中小企業でも比較的容易にデータ収集し、分析ができるように簡易化し、簡易版 TPA マニュアルを作成いたしました。

2. TPA の概要

TPA では 1 式であらわされるトータルパフォーマンス指標(TPI)を、製品のみならず機能、部品についても計算することで、ボトルネックとなっている部品や、効率的に製品の「使用価値」を高める機能をあぶり出す手法です。

$$TPI = \frac{\text{使用価値}}{\sqrt{\text{環境負荷} \cdot \text{コスト}}} \quad (1)$$

ここで使用価値とはユーザにとっての製品の価値を使用期間について時間積分したものです。使用価値の詳しい考え方については別文書の「トータルパフォーマンス分析の考え方」をご参照ください。

図 1 に TPI の概念を示します。

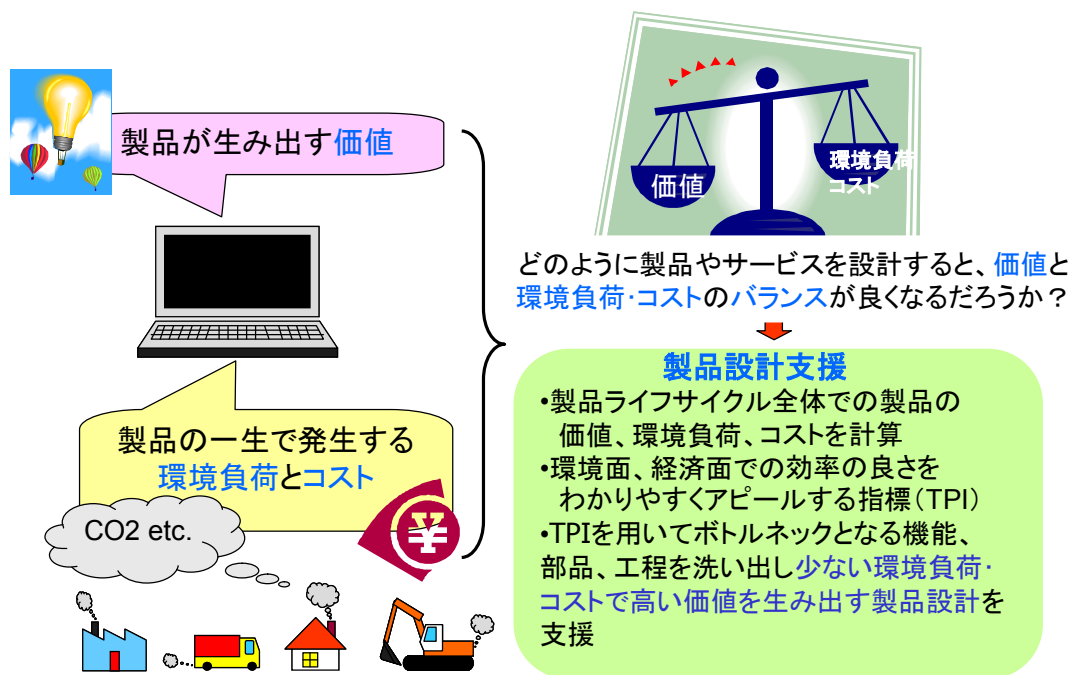


図1 TPA の考え方

3. TPA の入力データ

TPA には以下のデータが必要となります。

(1) 製品の価値を決める機能のリストと、機能毎の価値を算定するためのアンケート調査データ、販売価格と製品性能の時系列変化データ、製品、部品や機能の寿命など

機能毎の価値の算定には、コンジョイント分析を実施することが望ましいのですが、これは実施に手間がかかること、アンケート調査であるため現在のデータは取れても過去のデータや未来のデータをとりにくいことなどの欠点があります。そこで、アンケート手法と時系列変化を追いやすい製品性能と価格の時系列変化データなどを相補的に用いながら機能毎の価値とその時間変化を算定する必要があります(表1参照)。なお、本マニュアルでは、もっとも実施が容易であるインタビュー調査に基づいて、重要度を決定する手法を説明します。

(2) 部品のリスト

TP 解析ではどの部品をリユース、リサイクルするべきか、あるいはどの機能をアップグレード、長寿命化、性能向上するべきかを分析します。したがって、機能に対応するモジュールレベルの部品をリストアップします。

(3) 機能と部品の相関関係

TP 分析では価値は機能毎に算出し、コスト、環境負荷は部品毎に産出します。機能自体は「コト」であって、「モノ」ではないので、各機能実現にはどの部品が必要であるか?どのくらい重要であるか?を表現する二元表を作成し、これに基づいて各機能

に部品を対応づけ、機能を実際に実現するのに必要となっている環境負荷・コストを計算します。

(4) 部品毎のライフサイクルコスト、環境負荷

環境負荷とコストは既存のライフサイクルアセスメントやライフサイクルコストティングの考え方で計算します。ここでは環境負荷の単位としては簡単のために kgCO₂ を用いています。TPA は製品設計の上流段階における戦略的な意思決定支援を目的としているので、かならずしも詳細な LCA や LCC の結果が必要なわけではありません。製造拠点や製品の部品構成、素材構成などが類似している製品等の LCA, LCC 結果から類推するなどして計算します。部品の環境負荷、コストは、流通工程においては重量に、廃棄（埋立）工程においては体積に比例配分するものとして割り振っています。使用段階における各部品の環境負荷およびコストは使用段階における各部品のエネルギーや消耗品消費量を参照して割り振っています。

(5) ライフサイクル段階の期間

TPA では、価値の時間変化を考慮しますので、それぞれのライフサイクル段階、すなわち製造、流通、使用、回収、廃棄の時期、期間を明示的に指定することが必要です。部品のリユースやリサイクルを考える場合、その効果を評価するためには製品の 2 ライフを考えることが有効です。

表 1 機能毎に価値を割り振るための手法

	価値の評価 しやすさ	簡便さ	複数時点 でのデータ の取得し やすさ	備考
スペックと販売価格の重回帰分析	○	○	◎	過去の様々な製品についての価格やスペック情報は得るのが容易。しかし、販売価格はユーザにとっての便益を直接表現するものではなく、販促キャンペーンなどの効果が含まれてしまうことなどから販促活動で焦点にならない機能(たとえば、寿命や信頼性など)の価値が埋もれてしまう傾向がある。
コンジョイント分析	◎	×	×	仮想製品も含めて、様々な製品を被験者に提示することで、機能の潜在的な重要度を炙り出せる点で極めて有効。大規模な実施には手間がかかること、また、アンケート調査に基づくので時系列データ(現在のデータは得られるが過去のデータが得られない)を得るのが難しい。
アンケート調査または関係者に対するインタビュー調査による重要度割り振り	△	△	△	アンケート調査で直接機能の重要度を聞く方法は簡便でよく用いられるが、全ての機能の重要度が高く見積もられ、重要度の差が明確に現れにくい。
AHP	○	×	△	機能を相互に一対比較することにより、各機能の重要度を合理的に算定する手法。重要度割り振りによく用いられるが、機能項目数が多くなったときに、一対比較のための質問が膨大になるためアンケート等による実施が困難になる。

4. TPA の実施手順

TPA 実施の全体の手順は以下のとおりです。

Step 1 製品およびライフサイクル定義

対象製品について、価格とその寿命、ビジネス形態、EOL (End of Life) 処理などにつ

いて商品企画、商品設計担当者にヒアリングし、対象製品のライフサイクル（使用期間、EOL）を定義します。これらの情報に基づいて、環境負荷、コストを評価するバウンダリー、つまり対象製品・サービスの範囲を決定します。おおよその所要時間は 2 時間程度です。

Step 2 製品価値の定義

商品企画担当者にヒアリングし、製品の価値を決める要求品質（FR）とその重要度（1,3,9）を決定します。重要度にはメリハリをつけるため、1,3,9 の数字を割り当てます（9 が最も重要度が高く、1 が最も重要度が低いことを意味しています）。表 1 に示した他の方法（たとえばコンジョイント分析を用いる手法など）については、別文書の「トータルパフォーマンス分析の考え方」をご参照ください。要求品質は多くても 20~30 個程度までとし、製品使用時のシーンを網羅するように収集するよう心がけてください。おおよその所要時間は 2~4 時間程度ですが、関係者間でお互いに納得がいくまで、議論を繰り返すことが重要です。

Step 3 機能—部品対応テーブル作成

製品設計者にヒアリングし、主要な部品をリストアップするとともに、機能と部品の因果関係を設定します（1,3,9）。ここでも、製品設計の良いところと悪いところのメリハリをつけるために、1,3,9 を用いて設定してください（部品と機能が強く関係しているときに 9、部品と機能が関係しているときに 3、部品と機能に弱いけれども依存関係が考えられるときに 1 を設定します）。

ここでは、部品は、ネジ一本のような単位でもなければ、外注部材などのような調達の観点から整理した部品群でもなく、機能単位、あるいは、リユース、リサイクル、リデュースするのに適当な単位に設定することが重要です。おおよその所要時間は 2~4 時間程度ですが、関係者間でお互いに納得がいくまで、議論を繰り返してください。

Step 4 環境負荷、コストデータ収集

環境担当部、および工場関係者に対するヒアリングから、マテリアルフローを集計し、製品製造段階のコスト、環境負荷データを収集します。使用時、流通時コストについては、製品企画担当者等へのヒアリング結果（Step1）から推定します。所要時間は製品の大きさや、社内におけるデータの整備具合、過去にライフサイクルアセスメントの経験があるかどうかによって左右されますので、このステップについては所要時間を記しません。環境負荷評価には kgCO₂ など、一元的でわかりやすい指標を用いるのが良いでしょう。

Step 5 TPI 計算

Step 4 までで収集したデータをもとに製品、機能、部品毎の TPI を算出し、ボトルネックとなる部品、機能を抽出します。計算にはマイクロソフト社のエクセルなどの表計算ソフトを使用します。フルスクラッチでエクセルシートを作成する場合は 6 時間程度、過去の事例を計算したエクセルシートを修正・上書きして計算する場合は 1~2 時間程度の所要時間を要します。

なく、複数の機能に貢献していることに注意してください。たとえば、レンズユニットは「精細な写真が撮れる」以外にも、「いろいろな状況で写真が撮れる」、「ブレのない写真が撮れる」、「人物が綺麗に撮れる」にも貢献しています。したがって、これら複数の機能に対する貢献度を考慮して、部品の使用価値を計算しなくてはなりません。具体的には、表7に示すように、すべての機能に関係する使用価値を足し合わせて部品の使用価値を計算します。テンプレートの④の部分に該当します。表7の吹き出し中の表の再下行が部品の使用価値になります。

表6 機能-部品関係マトリクスを横方向の和が1になるように正規化

②部品の価値計算用マトリクス

製品機能	FR0	FR1	FR2	FR3	販売単価	販売単価(比率)	部品							部品(関係強度の横方向の和を1に正規化)							部品価値									
							レンズユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体	バッテリー	レンズユニット	CCDユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体		バッテリー								
製品機能	FR0	精細な写真が撮れる	3	0.4	2545.7	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.38	0.00	0.04	0.38	0.00	0.04	0.04	1					
	FR1	いろいろな状況で写真がとれる	2	0.2	848.57	0	3	0	3	0	1	1	1	1	1	1	0.50	0.17	0.00	0.17	0.00	0.06	0.06	0.06	1					
	FR2	ブレのない写真が撮れる	1	0.1	242.88	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.13	0.39	0.00	0.13	0.04	0.13	0.04	1					
	FR3	人物が綺麗に撮れる	1	0.1	242.88	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20	0.20	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1					
合計					14	3960	11	13	5	4	21	2	5	3																
															部品価値															
															FR0	1.89	3.13	0.34	4.50	7.89	0.11	1.59	0.21	19.67						
															FR1	10.88	5.02	1.63	2.48	4.09	0.85	3.00	1.38	28.52						
															FR2															
															FR3															
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															
															FR0	11														
															FR1	11														
															FR2	11														
															FR3	11														
															部品価値															

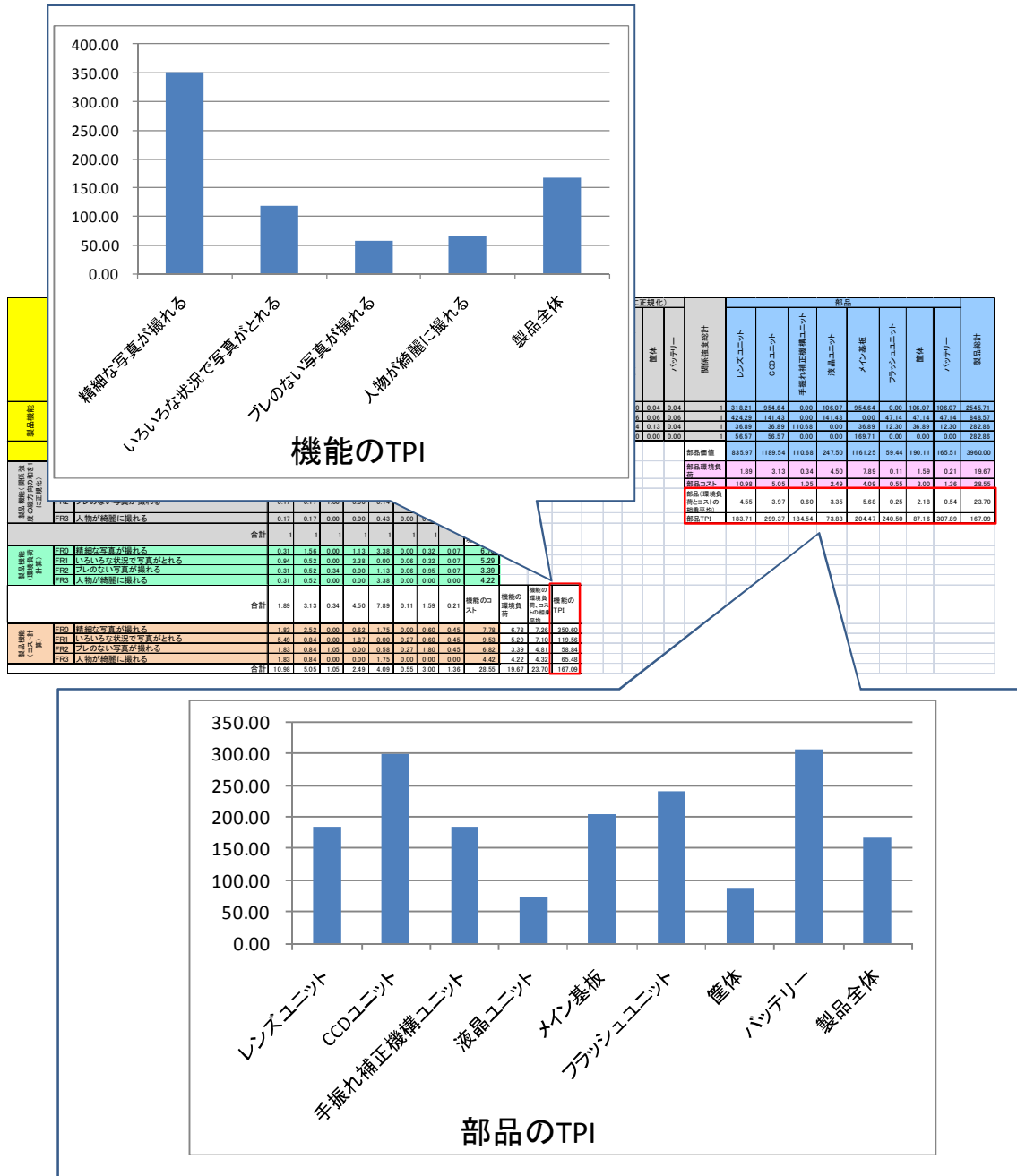
表9 機能の環境負荷、コスト計算

製品機能 (製品機能計算)	顧客重要度 (比率)	顧客重要度 (千円×月)	部品								関係強度総計	部品 (関係強度の積算値を1に正規化)								関係強度総計											
			レンズユニット	CCDユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体	バッテリー		レンズユニット	CCDユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体	バッテリー												
FR0 精細な写真が撮れる	0.04	2545.7	3	3	0	1	3	0	1	1	24	0.13	0.38	0.00	0.04	0.38	0.00	0.04	0.04	1	318.21	854.84	0.00	108.07	854.84	0.00	108.07	108.07	2545.71		
FR1 いろいろな状況で写真がとれる	0.2	848.57	3	3	0	3	0	1	1	1	18	0.50	0.17	0.00	0.17	0.00	0.06	0.06	0.06	1	424.29	141.43	0.00	141.43	0.00	47.14	47.14	47.14	848.57		
FR2 フレのない写真が撮れる	1.0	247.89	3	3	0	0	3	1	3	1	23	0.13	0.13	0.39	0.00	0.13	0.04	0.13	0.04	1	38.89	38.89	110.68	0.00	38.89	12.30	38.89	12.30	247.89		
FR3 人物が綺麗に撮れる	1.0	332.81	3	3	0	0	3	0	0	0	15	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	38.57	38.57	0.00	0.00	119.71	0.00	0.00	0.00	332.81		
合計	1.4	3960	18	18	0	4	21	2	2	3											825.87	1189.54	110.68	247.50	1161.25	58.44	160.11	165.51	3960.00		
製品環境負荷																															
製品コスト																															
製品TPI																															
製品環境負荷	FR0	精細な写真が撮れる	0.17	0.50	0.00	0.25	0.43	0.00	0.20	0.33																					
製品環境負荷	FR1	いろいろな状況で写真がとれる	0.50	0.17	0.00	0.75	0.00	0.50	0.20	0.31																					
製品環境負荷	FR2	フレのない写真が撮れる	0.17	0.17	1.00	0.00	0.14	0.50	0.60	0.33																					
製品環境負荷	FR3	人物が綺麗に撮れる	0.17	0.17	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00																					
合計			0.31	0.31	0.00	0.19	0.38	0.00	0.32	0.07																					
⑥機能毎の環境負荷計算			0.94	0.52	0.00	0.38	0.00	0.32	0.07	5.29																					
⑦機能毎の環境負荷計算			1.83	0.84	0.00	1.75	0.00	0.82	0.45	8.82																					
合計			10.98	5.05	1.05	2.49	4.09	0.55	3.00	1.36	28.55																				

製品機能 (環境負荷計算)	顧客重要度 (比率)	顧客重要度 (千円×月)	部品								関係強度総計																				
			レンズユニット	CCDユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体	バッテリー																					
FR0 精細な写真が撮れる	0.04	2545.7	3	3	0	1	3	0	1	1	24	0.13	0.38	0.00	0.04	0.38	0.00	0.04	0.04	1	318.21	854.84	0.00	108.07	854.84	0.00	108.07	108.07	2545.71		
FR1 いろいろな状況で写真がとれる	0.2	848.57	3	3	0	3	0	1	1	1	18	0.50	0.17	0.00	0.17	0.00	0.06	0.06	0.06	1	424.29	141.43	0.00	141.43	0.00	47.14	47.14	47.14	848.57		
FR2 フレのない写真が撮れる	1.0	247.89	3	3	0	0	3	1	3	1	23	0.13	0.13	0.39	0.00	0.13	0.04	0.13	0.04	1	38.89	38.89	110.68	0.00	38.89	12.30	38.89	12.30	247.89		
FR3 人物が綺麗に撮れる	1.0	332.81	3	3	0	0	3	0	0	0	15	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	38.57	38.57	0.00	0.00	119.71	0.00	0.00	0.00	332.81		
合計	1.4	3960	18	18	0	4	21	2	2	3											825.87	1189.54	110.68	247.50	1161.25	58.44	160.11	165.51	3960.00		
製品機能 (環境負荷計算)																															
製品機能 (コスト計算)																															
FR0 精細な写真が撮れる	0.17	0.50	0.00	0.25	0.43	0.00	0.20	0.33																							
FR1 いろいろな状況で写真がとれる	0.50	0.17	0.00	0.75	0.00	0.50	0.20	0.31																							
FR2 フレのない写真が撮れる	0.17	0.17	1.00	0.00	0.14	0.50	0.60	0.33																							
FR3 人物が綺麗に撮れる	0.17	0.17	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00																							
合計			0.31	0.31	0.00	0.19	0.38	0.00	0.32	0.07																					
⑥機能毎の環境負荷計算			0.94	0.52	0.00	0.38	0.00	0.32	0.07	5.29																					
⑦機能毎の環境負荷計算			1.83	0.84	0.00	1.75	0.00	0.82	0.45	8.82																					
合計			10.98	5.05	1.05	2.49	4.09	0.55	3.00	1.36	28.55																				

以上で、機能および部品の使用価値、環境負荷、コストをそれぞれ求めることができました。これらの値を(1)式に代入することで機能、部品のTPIを計算することができます。表10にTPIの計算結果を示します。

表 10 機能、部品毎の TPI 計算



Step 6 改善案検討と、TPI 再計算

表 10 に示した TPI の計算結果から次のような改善指針が導出されます。

● TPI の高い機能

「高精度な写真が撮れる」は TPI が高い、つまり、この機能が生み出す価値は、それに伴う環境負荷、コストに比べて十分に大きいので、この機能の性能を高めることで、より TPI の高い製品になると期待できます。

- TPIの低い部品

液晶ユニットと筐体は TPI の低い部品です。つまり、これらが生み出している価値に比べて、相対的に大きな環境負荷やコストが発生する部品ということです。したがって、これらの部品をリユース、リサイクルできないか考えることで環境負荷、コストを削減できないかどうか検討してみましょう。

以上の二通りの改善指針について、その効果を推定するために TPI の再計算を行います。まず、TPI の高い機能「精細な写真が撮れる」について、性能、環境負荷、コストが全て 2 倍になったと想定して TPI の再計算を行います。ここで性能に加えて、環境負荷やコストも 2 倍にしているのは、性能を上げるためになんらかの努力を行うと、通常は環境負荷やコストも増加するからです。実際にどの程度増加するかは、具体的にどのような技術で、あるいはどのような設計で性能向上を実現するかによりますので、実現手段をある程度念頭において性能向上幅、環境負荷、コスト変化幅を見積もってください。表 11 に計算結果を示します。この設計改善で TPI が 26% 向上することが示されています。

次いで、部品のリユース、リサイクルの効果についても推定しましょう。液晶ユニットをリユース、筐体をリサイクルするとして、それぞれのコスト、環境負荷がバージン素材からの製造に比べて 30%、50%にとどまると仮定して TPI を再計算した結果を表 12 に示します。この改善では TPI が 19% 向上することが示されています。

このように、改善指針に基づいて TPI を再計算することで、それぞれの改善指針がどの程度の効果を持っているかを見積もることができます。通常的设计業務では、全ての改善指針を実施することは現実的ではないことも多いでしょう。そのようなときには、改善指針の効果を事前に見積もり、現在のシーズ技術やリユース、リサイクルの実施状況、実現可能性などを勘案して、効率的に設計改善を実施してください。

6. おわりに

TPA は上記のような流れ、考え方で将来の製品価値の時間変化を見据えて戦略的に強化すべき機能、アップグレードすべき機能、工程見直しやリユース、リサイクルなど製品廃棄処理を見直すことで環境負荷を削減すべき部品を発見し、改善案を再評価することで意思決定を支援しようとする考え方です。

本マニュアルでの説明では、商品企画担当者等へのヒアリングによって、製品の価値を機能と関係づける方法を説明しました。他の方法を用いてより客観的に機能の重要度を求めたい、あるいは、機能の陳腐化をも併せて評価したい方は、別文書の「トータルパフォーマンス分析の考え方」をご参照ください。本マニュアルが、私どもの TPA の考え方をご理解いただける一助となれば幸いです。

7. 付録：デジタルカメラ TPA 計算テンプレートの使い方

このマニュアルに付属のエクセルファイル「デジカメ簡易 TPA テンプレート」は以下に示す 4 枚のシートから構成されています。

- 部品 LCE、LCC シート

ライフサイクル全体を通じた部品の環境負荷、コストを記述するシートです。環境負荷、コストのテーブル最下行の合計値が TPI 計算で使用される値です（緑色で着色しているセルに相当）。次に説明する TPI 説明シートでは、部品の環境負荷、コストの値として、このセルの値を参照しています。

- TPI 計算シート

TPI を計算するためのシートです。図 2 に、各テーブル間の主な値の参照関係を矢印で示しました。ユーザが直接入力する部分は緑色で着色したセルのみで、その他の部分は自動的に計算されます。具体的な計算の中身については、各セルの中の入力式をご確認ください。

図 2 TPI 計算シートの主要なテーブル間の参照関係

- 改善効果計算シート（機能）

機能に着目して、改善効果を評価するためのシートです。表 11 で黄色に着色されたセルが、設計改善案によって何倍程度、性能、環境負荷、コストが変化するかを示す部分です。具体的な改善イメージをもとに、この部分を変更することで、改善効果を評価することができます。

表 11 改善効果計算テーブル（機能）

		オリジナルの計算値				想定改善率			改善効果					
		機能の使用価値	機能のコスト	機能の環境負荷	機能の環境負荷、コストの相乗平均	機能の使用価値	機能のコスト	機能の環境負荷	機能の使用価値	機能のコスト	機能の環境負荷	機能の環境負荷、コストの相乗平均	機能の TPI	
製品機能 (製品全体)	FR0	2545.71	7.78	6.77682	7.26	350.60	2	2	2	5091.429	15.55971	13.55365	14.52	350.60
	FR1	848.571	9.528	5.28723	7.10	119.56	1	1	1	848.5714	9.527762	5.287233	7.10	119.56
	FR2	282.857	6.825	3.38669	4.81	58.84	1	1	1	282.8571	6.824502	3.386689	4.81	58.84
	FR3	282.857	4.422	4.21925	4.32	65.48	1	1	1	282.8571	4.422381	4.219254	4.32	65.48
	製品全体	3960	28.55	19.67	23.70	167.09				6505.714	36.33436	26.44682	31.00	209.87

● 改善効果計算シート（部品）

部品に着目して、改善効果を評価するためのシートです。表 12 で黄色に着色されたセルが、リユース、リサイクル、リデュースなどによって何倍程度、性能、環境負荷、コストが変化するかを示す部分です。製品の回収率や、使用可能な回収部品の割合、リユース、リサイクル工程の環境負荷やコストなどを考慮して、この部分を変更することで、改善効果を評価することができます。

表 12 改善効果計算テーブル（部品）

		部品								製品総計
		レンズユニット	CCDユニット	手振れ補正機構ユニット	液晶ユニット	メイン基板	フラッシュユニット	筐体	バッテリー	
オリジナルの計算値	部品価値	835.97	1189.54	110.68	247.50	1161.25	59.44	190.11	165.51	3960.00
	部品環境負荷	1.89	3.13	0.34	4.50	7.89	0.11	1.59	0.21	19.67
	部品コスト	10.98	5.05	1.05	2.49	4.09	0.55	3.00	1.36	28.55
	部品（環境負荷とコストの相乗平均）	4.55	3.97	0.60	3.35	5.68	0.25	2.18	0.54	23.70
	部品TPI	183.71	299.37	184.54	73.83	204.47	240.50	87.16	307.89	167.09
想定改善率	部品価値	1	1	1	1	1	1	1	1	
	部品環境負荷	1	1	1	0.3	1	1	0.5	1	
	部品コスト	1	1	1	0.3	1	1	0.5	1	
改善効果	部品価値	835.97	1189.5	110.68	247.5	1161.25	59.441	190.11	165.51	3960.00
	部品環境負荷	1.8854	3.1289	0.344	1.35147	7.89489	0.11198	0.7935	0.2129	15.72
	部品コスト	10.983	5.046	1.0458	0.74832	4.08553	0.5455	1.4988	1.3571	25.31
	部品（環境負荷とコストの相乗平均）	4.55	3.97	0.60	1.01	5.68	0.25	1.09	0.54	19.95
	部品TPI	183.71	299.37	184.54	246.11	204.47	240.50	174.33	307.89	198.51

デジタルカメラ簡易 TPA 計算テンプレートは、様々な数値を自動的に計算する仕組みになっていますので、各セル内の値の参照関係をご確認の上、皆様が TPA を実施する製品に合わせて機能や部品数を増やしたり（減らしたり）、緑色に着色した入力データを変更することで簡単に TPA 計算を実施することができます。ぜひご利用ください。

トータルパフォーマンス分析の考え方

(独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 エコ設計生産研究グループ

1. はじめに

環境問題の解決に向け、資源循環型のものづくりを実現することが強く求められている。このためには、製品設計現場における環境調和設計の普及が不可欠である。環境調和設計においては、製品のリサイクル性設計や、易分解性設計などが適用されるが、これらの個別の特性を向上させるだけでは十分な効果を発揮することが出来ない。なぜなら製品のリサイクル性設計は、実際に製品あるいは、その一部が材料リサイクルされた場合のみ効果を発揮するのであり、製品やその構成部品が将来どのようなライフサイクルプロセス（たとえばリマニュファクチャリング、リユース、材料リサイクルなど）を経て最終処理されるのかについての具体的な計画（以下、これをライフサイクルシナリオと呼ぶ）に適合するように製品を設計して初めて環境調和設計が達成されるからである。したがって製品だけを設計対象にするのではなく、製品のライフサイクルシナリオを設計し、これに適合するように製品を設計する「製品ライフサイクル設計」を実施することが重要であり、これを効率的に支援する技術の開発が求められている。

製品ライフサイクル設計では、製品の製造から使用、廃棄までのライフサイクル全体を通して発生する環境負荷を削減することを目指す。製品の環境負荷削減は、しばしばコスト削減や製品価値向上とトレードオフの関係にある。したがって、製品ライフサイクルを効率的に設計するためには、製品ライフサイクル全体を通して製品の価値と環境負荷・コストのバランスを合理的に決定するための手法を開発することが重要となる。

このような観点から、これまでに **Factor X** などの様々な環境効率指標 [1-5] が提案されてきているが、既存の環境効率指標は次のような問題点を抱えている。

(i) 製品がライフサイクル全体を通じて生み出す価値を十分に評価していない

Factor X [たとえば 1] などでは、製品の価値をサービス量として表現しているため同一のサービスを提供する製品の比較にしか利用できないという問題がある。たとえば洗濯機のサービス量は、単位時間に洗濯することの出来る洗濯物の量として表現されるが、このとき基本機能以外に差異のある製品（たとえば乾燥機付洗濯機と通常の洗濯機）の間で、どちらが環境効率が良いかを問うことは出来ないのである。小林ら [3] は、品質機能展開法 (QFD) [6] を用いて、複数の機能の価値を定量化することを試みているが、製品の価値のライフサイクルを通しての時間変化は考慮されておらず、製品がライフサイクル全体を通して生み出す価値を十分に評価できていない。

(ii) 製品の環境効率に最も影響を与える部品や機能を抽出して製品設計にフィードバックできない

既存の環境効率を計算する枠組みでは、製品の環境効率を計算するのみであり、具体的に環境効率を向上させる（製品の価値を高め、同時に製品ライフサイクル全体で発生するコストと環境負荷を削減する）ためにはどのような機能の実現レベルを向上させるのが良いのか？あるいは、どのような部品のコストや環境負荷を削減すれば良いのか？そのためには、どのようなライフサイクルシナリオが適当なのかを設計者に示すことが出来ない。

著者らは上記 (i) (ii) の問題点を解決し、製品ライフサイクル設計を効率的に支援するため、製品の製造時から使用時、廃棄後のリサイクルやリユース処理にいたるまでのライフサイクルシナリオを考慮し、製品ライフサイクルを通して製品が生み出す価値と環境負荷・コストを統合化して評価する製品ライフサイクルのトータルパフォーマンス指標 (TPI) を開発している。本稿ではノートブックパソコンを例題に、TPI の考え方を紹介する。

2. 製品のトータルパフォーマンス指標 (TPI)

製品の全ライフサイクル（以下 LC）を通じてのトータルパフォーマンスは、次の 2 つの観点から評価することが出来る。すなわち (i) 価値生産効率 (PP): LC 全体を通じて製品が生み出さる価値が、どの程度のコスト、環境負荷を必要としたか、(ii) 価値消費効率 (CP): 全価値のうち、どの程度が消費者により消費されたか の 2 つである。そこで、製品の TPI を (1)~(3) 式のように定義する。

$$TPI = \frac{UV}{\sqrt{LCE \cdot LCC}} = PP \cdot CP \quad (1)$$

$$PP = \frac{MLCV}{\sqrt{LCE \cdot LCC}} \quad (2)$$

$$CP = \frac{UV}{MLCV} \quad (3)$$

LCE, LCCはそれぞれ、製品 LC 全体で発生する環境負荷とコストである。UVは LC を通じてユーザが消費した価値を意味し、MLCV は製品が最も効率的に使用されたときに LC 全体で生じる価値を意味している。著者らは、LC を通じて発生する価値 (LC 価値) を「製品の価値の時間積分」として定義する。これは、高い価値を長期間にわたって維持する製品がもっとも効率が良いと考えることができるからである。このとき、UV は「全使用期間にわたっての製品価値の時間積分」として、MLCV は「製品製造時から製品が完全に価値を喪失するまで製品価値を時間積分したものの」として表現することが出来る。

なおトータルパフォーマンス評価においては製品の TPI に加え、製品の持つ機能や品質 (ポンプの揚程や吐出量など、以下、FR と記述) および部品毎の TPI もあわせて計算する。これは、FR 毎、部品毎の TPI を計算し、それらを比較することで、設計者はどの FR や部品に着目して、機能実現レベルの向上を図ればよいか、あるいは、リユースやリサイクルなどのライフサイクルオプションを適用すればよいかを判断することができるからである。FR および部品の TPI は、FR や部品毎の UV, MLCV, LCE, LCC を用いて、製品の TPI と同様に定義する。

3. TPI 計算のアプローチ

図 1 に TPI 計算のアプローチを示す。TPI 計算のためには、製品、FR、部品について MLCV, UV, LCC, LCE の 4 つの値を計算することが必要である。一般に製品の価値は製品の機能 (FR) と強い相関関係をもつ (つまり、性能の高い製品は高い価値を持つ)。そこで、本研究では製品の価値 (貨幣価値に換算) からコンジョイント分析 [7] などを用いて各 FR の価値を計算し、FR 毎に価値の時間変化をモデル化することで FR および製品の MLCV, UV を計算する手法を開発する。一方、製品の LCE および LCC は、既存のライフサイクルアセスメント (LCA) や、ライフサイクルコストリング (LCC) 手法を用いて計算できる。LCA や LCC では通常、製品の環境負荷やコストを計算するが、本研究では、これらの値を部品に割り振ることで部品の LCE や LCC を計算する。

ここで、FR については MLCV と UV のみが、部品については LCE と LCC のみが計算されていることに注意してほしい。FR および部品の TPI を計算するためには、FR の LCE, LCC、部品の MLCV, UV をそれぞれ計算することが必要である。そこで本研究では、品質機能展開 (QFD) [6] を用い、FR と部品の依存関係を記述し、これを用いて部品の LCE, LCC を FR に、FR の MLCV, UV を部品へそれぞれ転写することで、FR の LCE, LCC、部品の MLCV, UV を計算し、FR および部品の TPI を計算する。以下、4 節では製品および FR の MLCV, UV を定量的に評価する手法について述べる。

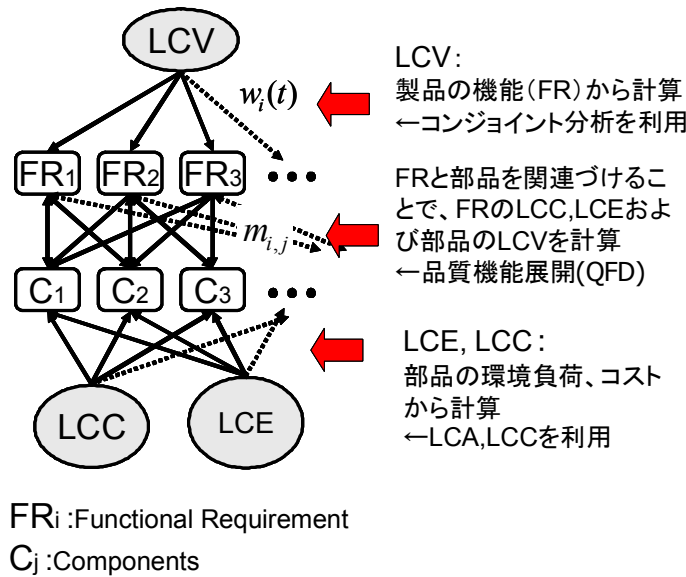


図1 TPI 計算のアプローチ

4. LC 価値の計算

4.1 製品価値の時間変化

MLCV, UV を計算するためには、製品の価値の時間変化と、製品が完全に価値を喪失するまでの時間（以下、製品の限界寿命 ml ）を推定することが必要である。著者らは (i) 製品の価値を製品が持つ FR の重み付き和として表現し（(4)式参照）、(ii) 製品の市場価値の変化を FR の品質尺度の低下（磨耗などによる物理的劣化）と、FR そのものの重要度の低下（陳腐化などによる価値低下）の組み合わせとしてモデル化することで製品の価値変化と限界寿命を推定する。このとき、製品の価値 $V(t)$ は(4)式で与えられる。

$$V(t) = \sum_i w_i(t) FR_i(t) \quad (4)$$

ここで、 t は製品ライフサイクル設計開始後の経過時間、 $w_i(t)$ は時間 t における i 番目の FR の重要度、そして $FR_i(t)$ は i 番目の FR の品質尺度である。

$FR_i(t)$ は機能の物理的劣化に対応するので、過去の類似製品の機能劣化データを信頼性工学の手法により解析することで推定する。

一方、 $w_i(t)$ の推定にはマーケティング分野で広く用いられるコンジョイント分析 [7] を利用する。コンジョイント分析は様々な機能・品質（製品販売時点における $FR_i(t)$ に相当）を組み合わせることで複数の製品プロファイルを作成し、これらの製品が消費者にどの程度選好されるかをアンケート調査等で調べることにより、それぞれの FR が製品全体の価値にどの程度貢献しているか（すなわち(4)式の $w_i(t)$ ）を定量的に評価する手法である。本研究では複数の時間においてコンジョイント分析を実施することで $w_i(t)$ を推定する。

このとき $FR_i(t)$ および $w_i(t)$ を近似する最も単純な関数として、時間 t の一次関数 ((5)式および(6)式) または指数関数 ((5)' 式および(6)' 式) の二通りを想定することができる。前者は、時間経過とともに製品の重要度および機能尺度が一定の量ずつ減少する関係を、後者は製品の重要度および機能尺度が経過時間あたり一定の割合で減少するような関係を記述するものである。(5)または(5)'、(6)または(6)' のいずれの式を採用するかは、製品の機能劣化データおよび、コンジョイント分析から得られる FR の重要度 w_i の時系列データを参照して判断する。

$$w_i(t) = a_i t + b_i \quad (5)$$

$$w_i(t) = b_i' \cdot \exp(a_i' t) \quad (5)'$$

$$FR_i(t) = c_i(t - st) + d_i \quad (6)$$

$$FR_i(t) = d_i' \cdot \exp(c_i'(t - st)) \quad (6)'$$

ここで a_i, c_i, b_i, d_i (または a_i', c_i', b_i', d_i') はそれぞれ, FR_i の陳腐化率と劣化率、重要度と製品発売時の機能レベル (スペック値) を表す。 st は実際に製品を使用開始する時間である。

4.2 UV および MLCV の計算

(1) UV の計算

UV は、製品の使用期間にわたって製品の価値を時間積分したものであった。したがって、製品、 FR_i の UV、すなわち UV, UV_i はそれぞれ、(7), (8) 式で与えられ、これらの式に(4), (5) または(5)', (6) または(6)' 式を代入して計算することができる。

$$UV = \int_{st}^{tt} V(t) dt \quad (7)$$

$$UV_i = \int_{st}^{tt} w_i(t) FR_i(t) dt \quad (8)$$

ここで st, tt は、それぞれ製品の使用開始時間、使用終了時間である。

(2) MLCV の計算

(4) 式に示すように、製品の価値は複数の FR の価値の重み付和として表現されるので、製品が完全に価値を喪失する時間、すなわち製品の限界寿命 ml はすべての FR が持つ価値がなくなる時間として計算することが出来る。一般に FR には、所要の機能を満足するための最低限のスペック値 sl が存在する。本研究では w_i についても同様に、価値を認めうる最低限の重要度 M_i が存在すると考え、(9), (10) 式を満たす時間 t をそれぞれ、 FR_i の物理寿命 pl_i 、価値寿命 vl_i と定義する。

$$FR_i(t) = sl_i \quad (9)$$

$$w_i(t) = vl_i \quad (10)$$

このとき FR_i の限界寿命 ml_i および製品の限界寿命 ml は、それぞれ(11), (12) 式のように計算できる。

$$ml_i = \text{Min}(vl_i, pl_i) \quad (11)$$

$$ml = \text{Max}(ml_i) \quad (12)$$

以上から、製品および FR の MLCV はそれぞれ、(13), (14) 式で与えられる。

$$MLCV = \int_0^{ml} V(t) dt \quad (13)$$

$$MLCV_i = \int_0^{ml_i} w_i(t) FR_i(t) dt \quad (14)$$

図 2 に $w_i(t), FR_i(t)$ をそれぞれ(5), (6) 式で、近似した場合の FR の MLCV, UV, 物理寿命, 価値寿命の関係を示す。

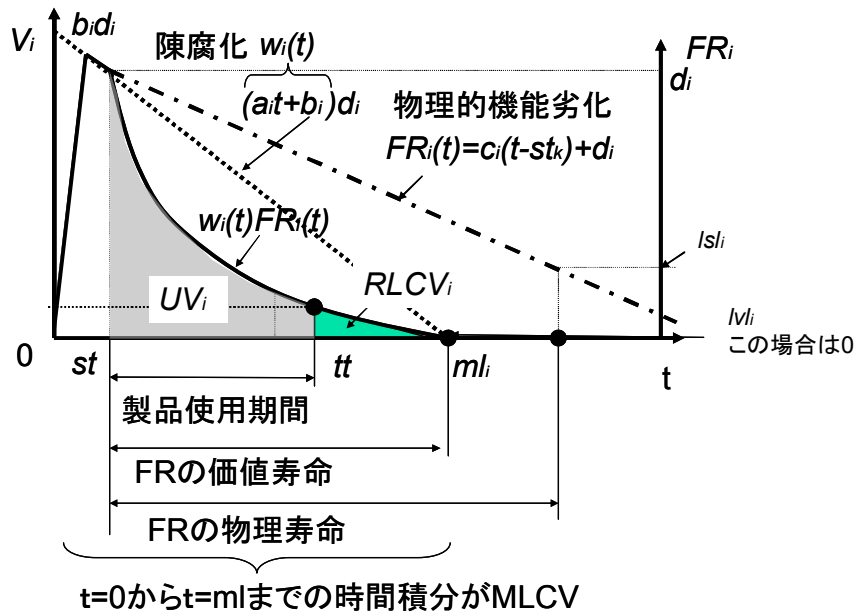


図2 FRの価値の時間変化

表1 ノートパソコンのライフサイクルシナリオ

ライフサイクル段階		開始時間 [月]	備考
ライフサイクル ル1	生産1	0	2002年1月から生産開始
	流通1	2	
	使用1	3	1日あたり2時間使用
	回収1	55	
	EOL1	56	埋立処理
ライフサイクル ル2	生産2	57	
	流通2	59	
	使用2	60	1日あたり2時間使用
	回収2	112	
	EOL2	113	埋立処理

表2 ノートパソコンのFR

番号	ノートパソコンの機能・品質	代表尺度	第一世代製品	第二世代製品
FR1	素早く動作する(計算が速い)	CPUクロック [GHz]	1.7[GHz]	3[GHz]
FR2	大きなデータを扱える	メモリ容量 [GB]	0.25[GB]	2[GB]
FR3	沢山のデータを保存できる	HDD容量 [GB]	60[GB]	180[GB]
FR4	持ち運びが容易	重量 [kg]	3.5[kg]	3.5[kg]
FR5	画面が見やすい	画面の対角線長×輝度	381[mm]×200[cd/m ²]	381[mm]×200[cd/m ²]
FR6	いろいろな記録メディアを扱える	読み書き可能メディア種類数	3	6
FR7	デザインが良い	メーカーの部分効用値の0.5	A社製 (0.492)	A社製 (0.492)
FR8	操作性が良い	メーカーの部分効用値の0.5		

5. TPI評価の流れ

本節では、ノートパソコンを例題にトータルパフォーマンス指標の計算方法を説明する。

5.1 ライフサイクルシナリオ

TPI の計算に先立ち、評価対象となる製品の仕様、LC シナリオと評価範囲を明らかにしなくてはならない。ノートパソコンの LC シナリオを表 1 に示す。2002 年 1 月から生産が開始されるものとし、製品の 2 ライフ、2011 年 6 月までを評価対象とした。2 ライフを評価対象とするのは、製品ライフサイクルオプションの効果を評価するためである（リサイクルやリユース等による環境負荷、コスト削減効果は次の製品ライフにおいて評価されるため、2 ライフ以上の評価を行うことが必要である）。製品の使用期間 52 ヶ月は、内閣府調査によるパソコンの平均使用年数 4.3 年 [8] から設定した。また対象製品のスペックを表 2 のように設定した。

5.2 LC 価値の計算

ノートパソコンの価値は、表 2 に示す 8 個の FR によって決定されるとする。それぞれの FR は表 2、3 列目の品質尺度によってその性能が代表されるとする。たとえば、FR1「素早く動作する」の機能実現レベルは CPU の動作速度で表現できると考える。なお FR7「デザインが良い」、FR8「操作性が良い」はパソコンメーカー毎にもっとも達成度の異なる FR であると考えられるので、これらがメーカーに対する部分効用値（メーカーの差異によって生じる製品価値の違い）に対応するとした。

ついで、これらの FR を代表する品質尺度の値と製品の価値の相関関係をしらべるため、表 2 で与えられる品質尺度の水準を様々に変化させ、2002 年、2006 年の 2 度にわたってコンジョイント分析を実施した（サンプル数 800）。表 3 に 2002 年、2006 年における各 FRi の重要度 w を示す。

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
2002年	58.861	116.77	1.7935	21.31	0.0015	29.359	10.14	3.38
2006年	36.955	24.646	0.1922	17.699	0.0018	9.9466	6.357	2.119

表 3 FR 毎の重要度

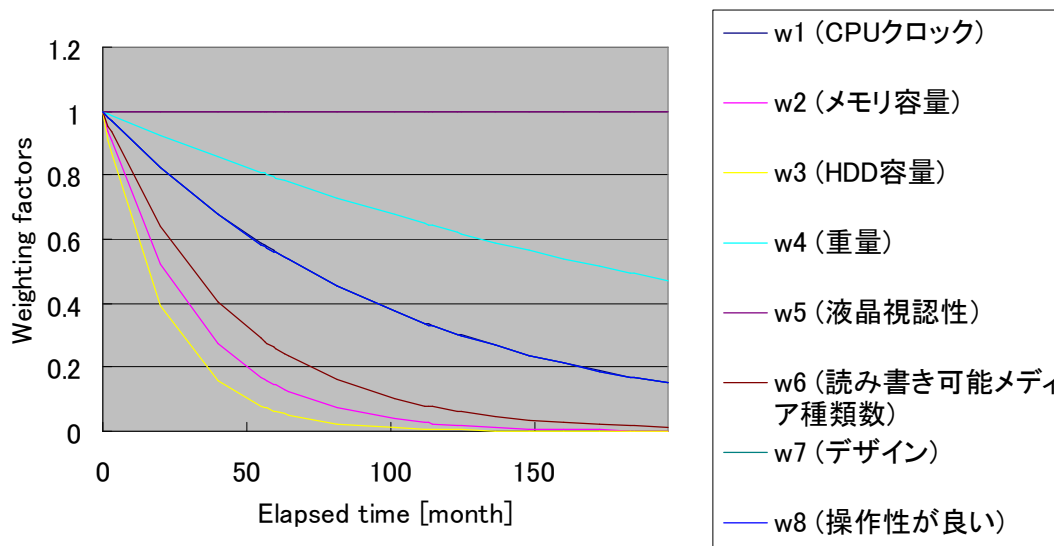


図 3 FR の重要度の時間変化

本計算例では、 w の時間変化は、(5)式を用いて近似した。これはパソコンの FR に対応する価値は急速に低下するため(5)式の一次式で近似すると速やかに価値が 0 となり現実とそぐわないためである。図 3 に各 FR の重要度の相対変化（ライフサイクル開始時での重要度との比）を示す。最も急速に陳腐化する機能は FR3（HDD 容量で代表）であること、反対に最も陳腐化しにくい機能は FR4（重量）であることがわかる。なお今回の調査では FR5（液晶視認

性)の重要度が、2002年から2006年までの間でわずかに増加していた。これはFR5の品質尺度としてとりあげた液晶サイズと輝度以外の技術的進展(色再現性や応答速度の向上など)が、液晶画面の総合的な見易さの向上に寄与していたためと考えられる。ここではFR5の陳腐化率を0として扱う。

表2の8個のFRのうち、機能が物理的劣化により徐々に低下するのはFR5のみであり(輝度は使用に伴い低下する)、他のFRは関連する部位の故障時に一斉に機能を喪失する(価値も0になる)と考えてよい。これらのFRの寿命は文献等から、たとえばFR6は60ヶ月、FR1は180ヶ月というように個別に設定した(いずれの値も製品使用期間よりも長いので使用期間中の製品価値低下には影響を与えない)。FR5の機能の漸減的劣化は、(6)式で近似して推定した。

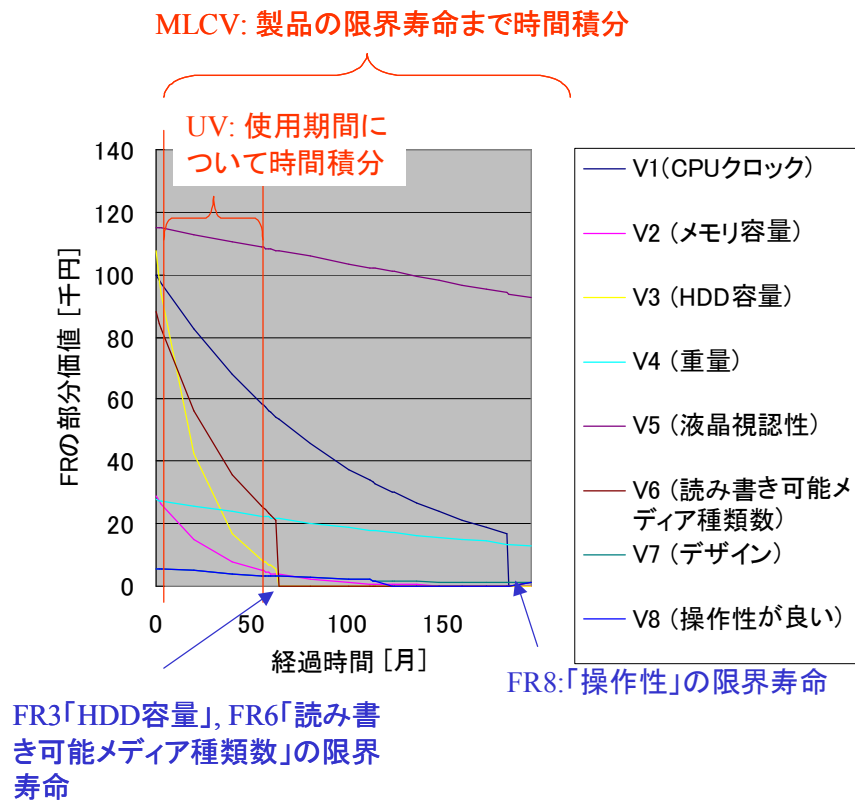


図4 FRの持つ価値の時間変化

図4に最初のライフサイクルにおけるFR毎の価値の変化を示す。FR5は物理的要因のみで、それ以外は価値的要因のみにより価値が低下し、限界寿命に達した時点で価値が0となることが見てとれる(一般には物理的要因と価値的要因は同時に作用する)。

図4で示す価値の低下曲線から、FR毎にUVおよびMLCVを計算する。たとえば、1ライフ目のUVの場合、使用期間(3ヶ月~55ヶ月)にわたってFRが持つ価値を時間積分し、これらを集計して製品のUVを求める。1ライフ目のMLCVも同様に、FR毎にそれぞれ限界寿命まで部分価値を積分し(たとえばFR3,FR6の場合63ヵ月後まで)、これらを集計して製品のMLCVを求める。表4に製品およびFRのMLCV,UVの計算結果を示す。

5.3 LCEとLCCの計算

製品および部品のLCC、LCEは、LCA、LCCを用いて計算する。ここで部品のLCEやLCCは、それぞれの製品ライフサイクル段階において、部品が消費したエネルギーや物質量を参照することで計算する。たとえば、製品の流通や、回収段階においては部品重量に応じて製品のLCE、LCCを部品へ配分する。本計算では、ノートパソコンの既存のLCA事例[9]や、パソコン部品の標準的な価格等を参考にLCE(CO2排出量換算[CO2kg])およびLCC[千円]を計算した。表5および6に、部品毎の各ライフサイクル段階におけるLCEおよびLCCを示す。

5.4 TPIの計算と評価

第3節で述べたように、FRのMLCV、UV、部品のLCE、LCCを部品およびFRへそれぞれ転写するには、品質機能展開(QFD) [5]を用いる。QFDはユーザの製品やサービスに対する要求を、製品やサービス設計、さらにはその実現手段である製造工程に対するさまざまな技術的要求へ関連づけることで、製品やサービス、製造工程を系統的に設計するための手法である。本研究では、顧客の要求機能であるFRと部品との関係をFR-部品関係行列 m_j を用いて表現する。

表4 FR毎のLCV

単位 [千円×月]		FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8	トータル
		CPUクロック	メモリ容量	HDD容量	重量	液晶画面の見易さ	読み書き可能メディア種類数	デザイン	操作性	
ライフサイクル ₁	生産1	98.1414496	27.3596	98.0502459	27.489083	114.674957	84.193411	5.708269	5.7082695	461.3253
	流通1	97.6671112	26.921021	95.804343	27.435985	114.674957	83.251246	5.680607	5.6806068	457.1159
	使用1	3969.47501	665.776381	1832.68113	1289.8449	5808.05735	2520.3922	230.7311	230.73105	16547.69
	回収1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	EOL1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MLCV1	8468.88038	869.20023	2082.16962	4336.3253	43232.4665	2874.3667	536.404	411.75042	62811.56
ライフサイクル ₂	生産2	99.6461236	34.5109065	20.7427793	22.049793	114.674963	46.569292	3.279437	3.2794372	344.7527
	流通2	99.1645128	33.9576907	20.2676528	22.007202	114.674963	46.048159	3.263545	3.2635448	342.6473
	使用2	4030.33376	839.798329	387.708361	1034.6222	5808.05768	1394.0863	132.5565	132.55646	13759.72
	回収2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	EOL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MLCV2	8546.2896	1096.08527	436.578759	3452.0997	43232.4682	1553.3508	307.2091	233.47502	58857.56
UV		7999.80877	1505.57471	2220.38949	2324.4671	11616.115	3914.4785	363.2875	363.28752	30307.41
MLCV		17015.17	1965.2855	2518.74838	7788.425	86464.9347	4427.7175	843.6131	645.22543	121669.1

表5 部品毎の環境負荷

単位[kgCO2]		部品								トータル
		マザーボード	メモ리카ード	HDDユニット	光学ドライブ	電源	バッテリー	筐体	LCDモニター	
ライフサイクル1	生産1	80	8	1	7	1	2	5	5	109
	流通1	0.03293	0.011	0.016	0.0376	0.03	0.032	0.112	0.228	0.5
	使用1	29.5481	1.555	1.555	3.8879	1.555	0	0	17.88	55.986
	回収1	0.03293	0.011	0.016	0.0376	0.03	0.032	0.112	0.228	0.5
	EOL1	0.06586	0.022	0.032	0.0753	0.059	0.065	0.224	0.457	1
	LC1計	109.68	9.598	2.62	11.038	2.673	2.129	5.449	23.8	166.99
ライフサイクル2	生産2	80	8	1	7	1	2	5	5	109
	流通2	0.03293	0.011	0.016	0.0376	0.03	0.032	0.112	0.228	0.5
	使用2	29.5481	1.555	1.555	3.8879	1.555	0	0	17.88	55.986
	回収2	0.03293	0.011	0.016	0.0376	0.03	0.032	0.112	0.228	0.5
	EOL2	0.06586	0.022	0.032	0.0753	0.059	0.065	0.224	0.457	1
	LC2計	109.68	9.598	2.62	11.038	2.673	2.129	5.449	23.8	166.99
LC計		219.36	19.2	5.239	22.077	5.347	4.258	10.9	47.6	333.97

表6 部品毎のコスト

単位[千円]		部品								トータル
		マザーボード	メモ리카ード	HDDユニット	光学ドライブ	電源	バッテリー	筐体	LCDモニター	
ライフサイクル1	生産1	70	10	20	20	4	10	12.5	30	176.5
	流通1	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	使用1	1.1161	0.0587	0.0587	0.1469	0.0587	0	0	0.6755	2.1147
	回収1	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	EOL1	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	LC1計	71.709	10.252	20.349	20.824	4.591	10.58	14.52	34.788	187.61
ライフサイクル2	生産2	70	20	22.5	15	4	10	12.5	7.5	161.5
	流通2	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	使用2	1.1161	0.0587	0.0587	0.1469	0.0587	0	0	0.6755	2.1147
	回収2	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	EOL2	0.1976	0.0645	0.0968	0.2258	0.1774	0.194	0.673	1.371	3
	LC2計	71.709	20.252	22.849	15.824	4.591	10.58	14.52	12.288	172.61
LC計		143.42	30.505	43.198	36.649	9.182	21.16	29.04	47.077	360.23

表7 FR-部品関係マトリクス

		部品								トータル
		マザーボード	メモ리카ード	HDDユニット	光学ドライブ	電源	バッテリー	筐体	LCDモニター	
要求品質	FR1	計算が速い	0	3	1	0	1	0	0	15
	FR2	大きなデータを扱える	3	9	1	0	0	0	0	13
	FR3	沢山データを保存できる	0	3	9	3	0	0	0	15
	FR4	持ち運びが容易(重量が軽い)	0	0	0	1	0	3	9	13
	FR5	画面が見やすい	0	0	0	0	3	3	1	9
	FR6	いろいろな記録メディアを扱える	1	0	0	9	0	0	0	10
	FR7	デザインが良い	0	0	0	0	0	9	0	9
	FR8	操作性が良い	0	0	0	0	0	9	0	9
	トータル		13	15	11	13	4	4	22	18

表7にノートパソコンのFR-部品関係行列を示す。表7の行、列はそれぞれ、FR、部品に対応し、表中の数(1,3,9)はそれぞれ、弱い依存関係、中程度の依存関係、強い依存関係を表している(数字の書かれていない部品とFRの組には関係がないことを意味している)。

たとえば、表7はFR1「計算が速い」はマザーボードの性能に強く依存し、メモ리카ードには中程度に、HDDユニット、電源、バッテリーには弱く依存していることを示している。

m_j を用いてFRのMLCV,UVを部品へ、部品のLCE,LCCをFRへそれぞれ転写する変換行列 m_j', m_j'' を(15),(16)式に示すように計算する。

$$m_{i,j}' = \frac{m_{i,j}}{\sum_i m_{i,j}} \quad (15)$$

$$m_{i,j}'' = \frac{m_{i,j}}{\sum_i m_{i,j}} \quad (16)$$

ここで、 m_j' は部品jのFRiの価値に対する貢献度を、 m_j'' は部品jのコストや環境負荷に対するFRiの寄与度をそれぞれ表している。 m_j', m_j'' を用いて、FRiのLCC,LCEおよび部品のMLCV,UVは以下のように計算できる。

$$LCC_i = \sum_j m_{i,j}' LCC_j \quad (17)$$

$$LCE_i = \sum_j m_{i,j}' LCE_j \quad (18)$$

$$MLCV_j = \sum_i m_{i,j}'' MLCV_i \quad (19)$$

$$UV_j = \sum_i m_{i,j}'' UV_i \quad (20)$$

ここで、 ij はそれぞれFR、部品を表す添え字である。

以上の手順から計算した製品、部品、FRのTPIを表8,9に示す。表8から、もともとTPIの低い部品はマザーボードであることがわかる。特にPPの値が低いので、マザーボードを製造時のコストや環境負荷を削減することが重要であることがわかる。また、電源、バッテリー、筐体、LCDの4部品はCPが小さいことがわかる。これはこれらの部品の価値が十分に使いきれないまま製品が廃棄されていることを意味しているので、これらの部品がリユース出来ないかどうかを検討すべきことがわかる。

一方、FRに着目するとFR3「沢山のデータを保存できる」およびFR5「画面が見やすい」が高いTPIを持つことがわかる。つまりFR3,FR5の性能を向上させることで、効率的に製品のLC価値を高めることができるのである。そこでマザーボードをリサイクルし、電源、筐体、LCDをリユースすることとしてTPIを新たに計算した数値を表8下段に示した(リサイクル、リユースによって部品製造時の環境負荷、コストがそれぞれ80%、20%に低下するものと仮定している)。マザーボードのPP、電源、筐体、LCDのCPがそれぞれ向上し、製品全体でもTPIが8%向上していることがわかる。なお、表10に適用すべき製品LC設計オプションとTPIとの関係をまとめた。

表8 部品・製品のTPI

		製品全体	部品							
			マザーボード	メモ리카ード	HDDユニット	光学ドライブ	電源	バッテリー	筐体	LCD
改良前	TPI	87.37848	31.2272716	127.5425	131.7024	145.75486	386.959	285.632	111.81	172.032
	PP	350.781	62.611584	217.6716	185.9025	178.86825	2475.67	1827.41	488.49	1141.38
	CP	0.249097	0.49874591	0.58594	0.708449	0.8148728	0.1563	0.1563	0.2289	0.15072
	設計Op.		リデュース、リサイクル				リユース	リユース	リユース	リユース
改良後	TPI	94.45179	34.1416555	127.5425	131.7024	145.75486	519.842	279.507	177.91	192.545
	PP	230.8929	68.4550082	217.6716	185.9025	178.86825	1866.09	1768.28	453.81	709.19
	CP	0.409072	0.49874591	0.58594	0.708449	0.8148728	0.27857	0.15807	0.392	0.2715

表9 FRのTPI

	FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7	FR8
	CPUクロック	メモリ容量	HDD容量	重量	液晶視認性	読み書き可能メディア種類数	デザイン	操作性
TPI	58.75449	25.5797	86.446	81.2707	299.949	114.408	49.918	49.9183
PP	124.9677	33.3902	98.061	272.308	2232.68	129.408	115.92	88.6585
CP	0.470157	0.76608	0.8815	0.29845	0.13434	0.88408	0.4306	0.56304
劣化率(正規化)	0	0	0	0	-0.001	0	0	0
陳腐化率	-0.0097	-0.0324	-0.047	-0.0039	0	-0.0225	-0.01	-0.0097
設計Op.		アップグレード	アップグレード		性能向上	性能向上		

表10 製品・LC設計オプション

製品・LC設計オプション	コスト、環境負荷削減		価値向上		
	CPの低い部品	PPの低い部品	TPIの高いFR	陳腐化率の高いFR	劣化率の高いFR
リユース	○				
リサイクル		○			
リデュース		○			
物理寿命の延長					○
アップグレード				○	
機能の向上			○		

6. おわりに

本稿では、製品 LC を通じて変化する製品の価値を FR の劣化と FR の重要度の陳腐化から計算する手法を説明し、後者にコンジョイント分析を用いて製品、部品およびFRのTPIを計算する手法を説明した。

参考文献

- [1] T. Aoe et. al., "A Practical Method for Quantifying Eco-Efficiency Using Eco-Design Support Tools," In Proc. of EcoDesign 2003, 2003, pp.254
- [2] 高橋徹也ほか、製品価値の向上と環境負荷低減の両面を評価可能とする指標「ファクターX」の評価手法とその適用事例, エコデザイン 2004 ジャパンシンポジウム論文集, pp.284-287
- [3] 小林由典ほか、製品環境効率指標の提案と活用, エコデザイン 2004 ジャパンシンポジウム論文集, pp.264-267
- [4] Dewulf, W., Willems, B., and Dufloy, J.R., "Estimating the environmental profile of early design concepts for an electric fruit juicer using the Eco-PaS methodology," In Proc. of the 12th CIRP Int. Seminar on Life Cycle Engineering, 2005.

- [5] Oberender, C. and Birkhofer, H., "Design environmentally friendly products in conformity with the market - a holistic analysis of product characteristics," In Proc. of Electronics Goes Green 2004+, 481-486, 2004.
- [6] Akao K, Quality function deployment, Productivity Process, Cambridge, MA., 1990.
- [7] Green, P. E., and V. Srinivasan, Conjoint Analysis in Consumer Research: Issues and Outlook, J. of Marketing Research, XV, 132-136, 1978.
- [8] 内閣府消費動向調査 平成 16 年 3 月調査
- [9] M. Tekawa, S. Miyamoto, and A. Inaba, "Life Cycle Assessment, An Approach to Environmentally Friendly PCs," In proc. of 1997 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, pp.125-130, 1997.