

環境配慮設計のための統合的 QFD

Integrated QFD for Design for Environment

○戸水晴夫（正, SDI Japan, Haruo Tomizu）

1 はじめに

環境に配慮して製品を設計することを環境配慮設計（Design for Environment）という。狭義には、有害物質を環境に排出しないような設計をすることを意味するが、近年では温室効果ガス削減を目的とした低消費エネルギー設計を意味するエコデザインの概念までを含むようになった。そして、2016年のパリ協定に基づく温室効果ガスの排出制限を実現させるために設計にリサイクルやリユースの原則までを含ませるようになった。さらに、EUでは、従来のエネルギー使用製品のエコデザインに関する指令 EuP 指令に代わり、より広範囲な製品を対象とした ErP 指令を発効させた。これは、エコデザインの対象を単なるエネルギー消費製品から、エネルギー消費に関与するすべての製品にまで拡大したものである。その結果、コンシューマー製品であってもエコデザイン指令に対応したエネルギー消費量以下でないと EU に輸出できない製品が出てきた。このことが、環境配慮設計を早急に推し進めなければならない経済的な主要因となっている。現在、輸出企業が守らなければならない主な規制には以下がある。¹⁾

- (1) ELV – End of Life Vehicles Directive
廃自動車規制法。2000年10月21日施行。
自動車から出る廃棄物を現状で85%、2015年までに95%回収を義務付け。
- (2) REACH – Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
化学品規則法。2007年6月1日に施行。EU域内で1トン/年以上の化学品を販売するには、欧州化学品庁（ECHA）への「登録」が必要。
- (3) ErP – Energy related Products
エコデザイン指令。2009年9月24日施行。
家電製品を含むすべてのエネルギー消費製品について環境配慮設計を義務付け。
- (4) RoHS2– Restriction on the use of certain Hazardous Substances 2
電気電子機器に関する特定有害物質の使用制限法。2011年7月1日に改正施行。従来のRoHSの6物質から10物質に制限を拡大。
- (5) WEEE – Waste of Electric and Electronic Equipment
廃電気・電子製品回収法。2012年7月4日改正施行。製品各カテゴリーでリサイクル率とリカバリー率を規定して、達成を義務付け。

2 環境配慮設計の課題

環境規制法の目的は、世界各国から持ち込まれる様々な有害化学物質（金属、気体を含む）の種類と量を把握し、それらのリスクを確認し、搬入量の増大を抑制することによって、国民の健康と環境に対する負荷を低減することにある。そして、それら物質の廃棄処理において、製造者責任の明確化を求めている。具体的には、費用負担と循環型システムの構築を製造者に課していることなどである。また、直接的に有害とは言えない二酸化炭素についても、排出量抑制を行うことによって、地球温暖化を止めることに繋がるものとして、製品種別ごとに消費エネルギーを制限する規制となっている。いずれの規制も、レポートの作成や指定環境機関への報告を製品や部品の製造者に義務付けたものである。²⁾

2.1 環境規制法が求める製品ライフサイクル管理

国や地域ごとに時系列で異なる環境規制に製品や部品の製造者が十分に応えることは容易ではない。さらに、現時点では解決不可能な技術的課題も存在する。一方で、製品のライフサイクルに渡り、環境規制法に関する管理が行えなければ、以下のような課題に応えることがより困難になると予測できた。

- (1) 以前に出荷した製品で、閾値以上の有害物質を含む製品のシリアルナンバーと顧客名を特定し、リコールを通知しなければならなかった。
- (2) 以前に購入した特定部品の特定ロットが新たな規制対象になった。その部品を組み込む予定の全ての製品をリストアップして、部品変更指示をしなければならなかった。
- (3) 消費者団体から特定製品に含まれる有害物質の情報の開示を要求された。
- (4) 過去5年間で、ある国に輸出した全製品の特定有害物質を把握して、その国での製品販売の許可を再度得なければならなかった。
- (5) 政府機関に製品毎に使用した特定化学物質の全量と回収量を年度毎に報告しなければならないが、同時に二酸化炭素の排出量を報告しなければならなかった。

従来の環境規制法は、主として製造業へ有害化学物質や二酸化炭素の製品ライフサイクルを通じての排出に一定量の削減を求めたものだった。現在では、製品種類別にエネルギー消費量を制限することまで求められる。早急に既存製品のエコデザイン化を進めなければ、どこにも販売ができなくなるリスクをはらんでいる。そのため、環境規制法の変遷に応じた設計要件の再検討と仕様の見直しが必要になった。

2.2 残された技術的な課題

製品を構成する共通的な要素部品や基本的技術において、まだ解決できていない環境に関する課題が残っている。以下に4件の例を示す。³⁾

2.2.1 はんだ接合での技術課題

電子回路などの基板には電子部品を実装するために、鉛と錫の合金であるはんだが大量に使用されている。鉛は人体に有害であり、また廃棄物として自然環境に対する悪影響も懸念されたため、鉛を含まない鉛フリーはんだの開発や普及が進められてきた。その結果、多くの金属接合で鉛フリーはんだが使われるようになった。しかし、すべてを鉛フリーはんだで完全に置き換えるまでには至っていない。特に、半導体の場合は、内部に Cu マイグレーションが発生して短絡したり、応力により表面から錫ウイスカが発生して短絡したり、高粘度のため連続はんだメッキが不可となるケースがある。また、半導体自体が発熱するために最初から高温での金属接合が必須となる集積回路などには、中低温でしか機能しない鉛フリーはんだが使えないという問題がある。

2.2.2 メッキ部品での技術課題

従来、クロメート処理といわれる防錆処理には、発がん物質の六価クロムメッキが使われてきた。ネジ部品などの一般的な防錆用の後処理であり、メッキ色により用途を分けるユーザーが多く存在していた。この六価クロムが RoHS では使用禁止になっている。そのため、三価クロムメッキへの変更が求められたわけだが、六価クロム皮膜に比べて三価クロム皮膜は傷がつきやすい欠点があること。また、六価クロム皮膜のような傷の自己修復機能がないため錆びやすい欠点があった。さらには、三価クロムメッキは六価クロムメッキよりも摩擦係数が大きいため、従来と同じトルクで締め付けた場合、締結体に発生する軸力は低くなる。すると、ねじが緩み、完全に締め付けられないねじ浮きが発生するのである。特に、徹底した締め付け管理を実施してきた自動車分野では、ねじの締め付けが安全に関係してくる重大問題となった。

2.2.3 耐熱樹脂での技術課題

耐熱、耐火、耐油、絶縁性能が高い樹脂として熱硬化性樹脂がある。フェノール、ユリア、ウレタン、不飽和ポリエステル、エポキシなどが代表格で、以前から多くの製品に用いられてきた。しかし、こういった樹脂の製造過程で臭素系の難燃剤が用いられてきたことが問題となった。臭素系の難燃剤は熱を加えることによって、発がん物質のダイオキシンを発生させる。微量でも人体には猛毒である。また、100 度以下で軟化する熱可塑性プラスチックに耐熱・耐火性を加えるために臭素系難燃剤を加える場合もある。電線の被覆に使われるポリ塩化ビニルなどが代表的なケースである。また、柔軟剤として使用されるフタル酸エステルも RoHS2 で発がん物質として 2019 年から規制されるようになったため問題となった。

2.2.4 規制の複雑化による技術課題

環境規制は国や地域で管理対象や範囲が異なるため極めて複雑な対応が企業側に求められている。例

えば、回路基板は RoHS2 規制の最小報告単位である。そのため、基板上の個々の部品の有害物質の規制値がクリアされていたとしても、一つの基板上に集積された部品に含まれる有害物質の合算値がオーバーすれば、そこで基準超えとなる。また、各部材名(含有物名)は国際的な基準である CAS Number に基づかなければならない。化学的な材料成分% (重量比) で評価が行われるからである。こういった測定方法の統一の問題だけではなく、規制値そのものが、その時によって国や地域別に異なる問題がある。

3 環境配慮設計のための品質機能展開

従来から環境配慮設計をスムーズに実行するために、品質機能展開 QFD を評価ツールの中心において、複数のツールや手法を組み合わせる利用することが提案されてきた。⁴⁾ 本報では、環境配慮設計の複雑で多岐にわたる検証プロセスを、ひとつのワークフローにのせて行えるように、Microsoft Excel® に複数のツール実装し、スプレッドシート上でデータ連携させた運用事例を紹介する。このことによって、従来の QFD の概念を拡張した環境配慮設計のための統合的 QFD といえるものとなったと考えている。以下に、どのような手順で、どのツールを使って何をするかについて、ヘアードライヤーを例題として説明する。

3.1 親和図法で顧客要件と環境要件を分類

はじめに製品に求められる顧客要件と環境要件を親和図法 Affinity ワークシートに書き出す。図 1 に記述された項目が品質表の What 項目になる。



図 1 顧客要件と環境要件の記述例

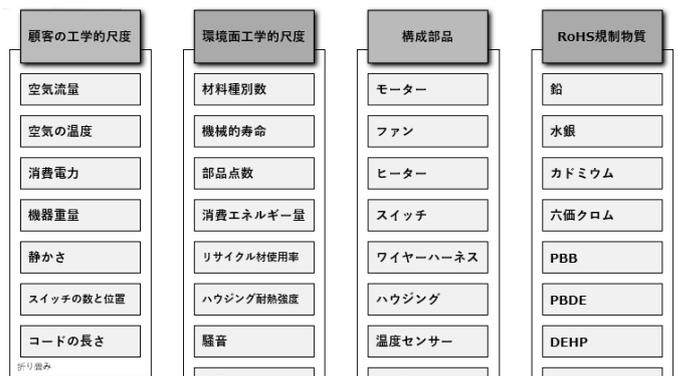


図 2 工学的尺度の記述例

同様にして顧客要件と環境要件に関連する属性項目を、Affinity ワークシートにリストアップする。いずれも工学的に計測できるものであり、これら **図 2** に記述された項目が品質表の How 項目になる。

3.2 Affinity をもとに特性要因図を作成

特性要因図を使用して、顧客要件と顧客要件の属性値との関係性を図式化する。同様に、環境要件と環境要件の属性値の関係性を図式化する。**図 3** は、後から作成することになる環境要件とその属性値に関する品質表の関係性欄に記載する関係性レベル H, M, L の記入位置を事前に示すものとなっている。

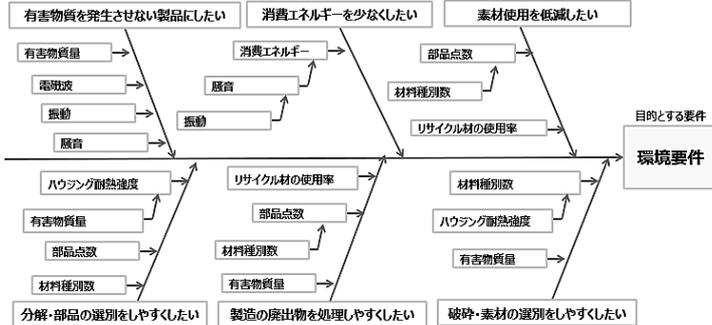


図 3 環境要件の特性要因図の記述例

3.3 階層分析で顧客要件と環境要件の重要度を決定

顧客要件と環境要件の重要度を算出するために、Affinity ワークシートから、階層分析 AHP のマトリックスにそれぞれの項目を転送する。一対比較法によって、項目の相対重要度を割り出す。**図 4** で得られた相対重要度が、QFD の What の重要度になる。

項目	項目							相対重要度
	1	2	3	4	5	6	7	
1 有害物質を発生させない製品にしたい	1	5	10	10	5	5	10	5.00
2 消費エネルギーを少なくしたい	1/5	1	1	10	10	10	10	4.65
3 素材使用を低減したい	1/10	1/10	1	1	10	5	5	3.25
4 製造の廃出物を処理しやすい	1/10	1/10	1/10	1	5	1	5	1.88
5 再利用しやすい	1/5	1/10	1/5	1/5	1	1	5	1.45
6 分解・部品の選別をしやすい	1/5	1/10	1/5	1	1	1	1	1.16
7 破砕・素材の選別をしやすい	1/10	1/10	1/5	1/5	1/5	1	1	1.00

図 4 環境要件 AHP への記述例

3.4 顧客要件と環境要件を品質表 HOQ に展開

顧客要件の品質表 HOQ (House of Quality) を作成するには、AHP ワークシートから求められた重要度を項目名と共に顧客要件の品質表に転送し、What 項目とすればよい。品質表の How 項目は **図 2** の工学的尺度 Affinity の属性値から転送する。その後、**図 3** の顧客要件特性図をもとに、品質表の関係性マトリックスに関係性レベル H, M, L を記入する。環境要件についても同様の処理を行う。環境配慮設計では顧客要件と環境要件を共に満足することが必要となるため、はじめに二つの HOQ を作成して分析を行う。

How	How							品質表	
	1	2	3	4	5	6	7		
1 信頼性が高い	5.00	H	H	L				95	
2 安全に操作できる	4.24		M	-	H		L	59.41	
3 早く乾かせる	3.51	H	H	M				73.62	
4 使用時の生活環境を守りたい	1.84			M		H		22.1	
5 静かに動作	1.45	M				H		17.45	
6 操作が簡単	1.38				M		H	17.92	
7 持ちやすい	1.37					H		M	16.43
8 ポータブルである	1.00					H	L	L	11
技術仕様Howの量り付け	絶対値	80.91	89.28	21.04	63.65	29.66	17.65	10.73	
	相対比率	26%	29%	7%	20%	9%	6%	3%	
	重要度	4.57	5.00	1.53	3.69	1.96	1.35	1.00	

図 5 顧客要件 HOQ への記述例

How	How										品質表			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1 有害物質を発生させない製品にしたい	5.00		H									170		
2 消費エネルギーを少なくしたい	4.65	-		H				L	L			51.15		
3 素材使用を低減したい	3.25	H		M		L						42.25		
4 製造の廃出物を処理しやすい	1.88	M		M		H						H	45.12	
5 再利用しやすい	1.45	L	H			H							H	40.6
6 分解・部品の選別をしやすい	1.16	H		M			L						M	18.56
7 破砕・素材の選別をしやすい	1.00	H	L					H					L	20
技術仕様Howの量り付け	絶対値	56.78	59.06	18.87	41.86	33.22	55.16	18.85	8.85	16.00	79.45			
	相対比率	14%	15%	5%	11%	9%	14%	5%	2%	4%	20%			
	重要度	3.64	3.83	1.53	2.85	2.35	3.61	1.57	1.00	1.31	5.00			

図 6 環境要件 HOQ への記述例

ヘッドライヤーの例題では How 技術仕様の重要度から、**図 5** の顧客要件 HOQ で着目すべき項目が、①空気の流れ、②空気温度、③機器重量であることが分かった。また、**図 6** の環境要件 HOQ から着目すべき項目は、①有害物質、②機械的寿命、材料種別数、③ハウジング耐熱強度であることが分かった。

3.5 顧客要件 HOQ と環境要件 HOQ を一つに合成

顧客要件 HOQ と環境要件 HOQ の What 項目を合成して、新たに構成部品 HOQ を作る。その品質表の How 項目に構成部品名を記入する。これが環境配慮設計のための品質表となり、この構成部品 HOQ の作成が環境配慮設計のポイントになる。そして、関係性マトリックスに関係性レベル H, M, L を記入すると構成部品 HOQ の How の重要度から改善すべき部品の優先順位が分かる。**図 7** に示した ①モーター、②ハウジング、③ファン、ヒーターの順になった。

How	重要度	How								品質表Whatの計画値	Wの計画値	
		1	2	3	4	5	6	7	8			
1 空気温度	5.00		M	H							105	
2 有害物質	5.00	H				L	H				140	
3 空気流量	4.57	M	H							H	96.051	
4 機械的寿命	3.83	L	L	H	H				M		88.09	
5 機器重量	3.69	H				M	H			L	81.279	
6 材料種別数	3.64	H			M						43.68	
7 ハウジング耐熱強度	3.61		L	L			H			L	43.32	
技術仕様Howの量り付け	絶対値	128.56	108.60	94.00	34.47	16.08	110.74	56.49	48.47			
	相対比率	22%	18%	16%	6%	3%	19%	9%	8%			
	重要度	5.00	4.29	3.77	1.65	1.00	4.37	2.44	2.15			
	重要度グラフ	[Bar chart showing relative importance of How items]										

図 7 構成部品 HOQ への記述例

3.6 TRIZ を用いたアイデアの創出

環境配慮設計を遂行するために、どの部品を改善すべきかが分かれば、それらをどのように改善するのかのアイデアをまとめることが次の課題となる。アイデアの創出方法は、TRIZ を使った。例題では着目すべき改善部品それぞれについて図 8 に示すようなプロジェクトアイデアが生み出された。

TRIZ 技術的矛盾		TRIZ 一般的解決策			プロジェクトアイデア
改善される機能	悪化する機能	TRIZ 発明原理	解説	事例	
22-エネルギー損失	17-温度	間歇動作	連続的な動作の代わりに断続的あるいはパルスの動作にすること	連続的サイレンを繰り返してパルス音に置き換える	整流子電動機の動作で、外側に配置される異磁に付属する整流子と、内側に回転する電機子に付属するブラシによる構成で電流方向を変えてモーターを回転させる。その整流子とブラシの代わりにトランジスタのスイッチング回路に置き換える。
			動作がすでに断続的ならばその強度や振動数を変更すること	強度と周波数を変えた音で連続的サイレン音を置換	
31-物質を生成する有害要素	13-構成物体の安定性	複合材料	単一材料から複合材料に変えること	グラスファイバーのサフボードは、より軽くより制御可能。木製のものより成形が容易	ABS樹脂の臭素系難燃剤を除去するために、耐熱性エンジニアプラスチックのPBT（ポリブチレンテレフタレート）に変更する。

図 8 TRIZ ワークシートへの記述例

3.7 アイデアの要素技術を検討

TRIZ で得られた基本的アイデアをもとに具体的な要素技術を検討する。着目すべき改善部品は、構成部品 HOQ からモーター、ハウジング、ヒーター、ファンの 4 点だった。検討結果の一例を以下に示す。

- (1) モーター寿命を長くするには、整流子の耐摩耗性を上げればよいが、有害物質が増える。有害物質を含まず長寿命とするには整流子のないブラシレスモーターへの設計変更が必要となった。
- (2) プラスチック筐体の耐熱性を上げるために臭素系難燃剤を ABS 樹脂に混練している。プラスチック材料を PBT に変更すれば有害な臭素系難燃剤を使用せずに耐熱性を上げることができる。
- (3) 早く乾かそうとするとファンとヒーターの消費エネルギーが増える。ヒーターのみを間欠 ON・OFF として消費電力を低減することができる。

3.8 設計改善候補を TOPSIS で決定

最終的に設計改善のための設計候補がいくつか挙がってきたときに、それらのどれを最良候補とするかについては TOPSIS ツールを使う。図 9 にモーターについて検討比較した結果を示す。

	単位系	重み	オプション				
			1	2	3	4	
クワイアリア	1 質量・重量	g	1.06	400	300	500	600
	2 空気の流量	dm ³ /分	4.24	60	70	55	30
	3 空気の温度	°C	2.41	150	170	140	100
	4 バランス (トルク)	N・m	3.48	0.1	0.15	0.08	0.05
	5 体積	cm ³	1.45	700	500	650	700
	6 材料種別数	種	2.96	32	27	45	30
	7 部品点数	個	5.00	15	12	18	18
	8 消費エネルギー量	W	3.74	1200	1000	1500	800
	9 リサイクル材の使用率	%	1.66	35	38	12	10
	10 騒音・振動・電磁波	MHz	3.03	30	25	45	50
	11 有害物質質量	重量%	4.14	0.5	0.005	1	1.2
	スコア		0.60	0.93	0.27	0.24	

図 9 TOPSIS ワークシートへの記述例

3.9 FMEA により環境影響リスクを事前に把握

FMEA を使って現状の環境影響リスクを評価する。着目した部品の危険優先度を計算し、設計で事前対策すべき項目を洗い出す。図 10 の環境リスクモードと影響の欄に想定内容を記入し、環境要因欄に現状のインシデント防止の仕組みについて記入する。

対象とする機能		環境リスクモードと影響			
対象品目 / 機能	サブ品目 / サブ機能	環境リスクモード (予見項目)	インシデントの影響		
			発生の可能性	検出可能性	危険優先度 RPN
ヘアードライヤー	ハウジング	ABSに有害なTBPPA(臭素系難燃剤)を含有	臭素系シバノソダイオキシン発生	7	環境
	ファン	PCに有害なDBDE(臭素系難燃剤)を含有	加熱工程でダイオキシン、フラン発生	6	環境
	ハーネス	ビニール被覆の差動剤に有害なカドミウムを含有	人体への直接的影響	10	環境
	モーター	モーター整流子に有害なカドミウムを含有		10	環境
	ヒーター	コントロール不可の熱暴走	過熱、発火	3	事故
	温度センサー		過熱温風による火傷	5	事故
環境要因					
インシデント原因 / メカニズム	発生頻度	現状の設計管理		検出難易度	危険優先度 RPN
		防止方法	検出方法		
再生加熱工程がコントロール不足	5	EUリスクアセスメントチェックリスト	デザインレビュー	7	245
再生加熱工程でダイオキシン、フラン発生	5	EUリスクアセスメントチェックリスト	デザインレビュー	7	210
海外調達のため規格ミス、再生不可	2	EUリスクアセスメントチェックリスト	業者提出リストのチェック	7	140
再生時の廃液で流出	3	EUリスクアセスメントチェックリスト	デザインレビュー	8	240
連続通電する設計	4	EUリスクアセスメントチェックリスト	デザインレビュー	7	84
回路基板の非熱不良	2	EUリスクアセスメントチェックリスト	デザインレビュー	7	70

図 10 FMEA ワークシートへの記述例

4 おわりに

国際標準化機構 ISO は、2002 年に環境配慮設計に関する規定を設けた。日本工業規格においても 2011 年に電気・電子製品の環境配慮設計 JIS C9910 が定められた。その結果、電気・電子製品の設計者にとっては、環境に配慮した設計を行うことが必須となった。そして、環境配慮設計を実行する具体的な設計手順と実用的な手段を得ることが最も重要な技術者のスキルとされたのである。本報で紹介した環境配慮設計のための統合的 QFD の手法では、手順が明確であり、かつ様々な分析ツールを SDI Tools 上でデータ連携しながら使うことができる。結果として、環境に影響のある要件を抽出し、改善を行い、必要な部品構成図を作成することができる。また、FMEA により環境インシデント発生時の対策をあらかじめ予測しておくことができ、設計起因の環境問題への対策の迅速化が図れるようになったと考える。

参考文献

- 1) 環境配慮設計規格、ガイドライン等の動向及び適合性評価手法に関する分析・検討：環境省、(2006), 94
- 2) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略：内閣府、令和 2 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書、(2020), 44
- 3) 日経エレクトロニクス編：グリーンエンジニアリング 2005：日経 BP 社、(2005), 94
- 4) 坂尾知彦：循環ビジネス人材教育・循環ビジネスアドバイザー派遣事業研修用テキスト 環境適合設計 (DfE) / 製品アセスメント、(社)産業環境管理協会、(2005), 83