

# 設計要件の多目的最適化の考え方と手法の紹介

(電気回路の構想設計時における構成部品の選定事例)

戸水 晴夫 (正, SDI Japan)

## 1. はじめに

従来の日本企業におけるコンシューマー・エレクトロニクスに関する製品開発の考え方には、早い、軽い、小さい、壊れにくいことが世界一であるという暗黙の目標があったように思われる。筆者がかつて在籍していた総合電機の研究所などでは常に世界一の品質を製品に求める企業風土が存在し、それが商品力であり、市場での産業障壁になると信じていたところがあった。そして、世界一になるような特徴がなくとも、ただ安価であるといった製品開発については、まったく対象外であったように思う。そもそも顧客要件に基づくデザインやコンセプトだけで勝負するような製品は、技術オリエンテッドな固定観念から抜け出せない頭では発想できなかったのかもしれない。いま思えば、壊れやすいような製品を設計するのは、技術者としての矜持が許さない、あるいは中途半端な品質の製品は市場には出せないといった頑なな開発姿勢があり、そのことが真のグローバル化を阻んできた一因であったように思われる。

一方で、近年のグローバルマーケットでの成功事例を見ると、最高品質の製品だけが売れている訳ではなくて、ある一定の品質を維持しながらローカライズされたものが受け入れられているように見受けられる。つまり、現地での顧客要件を実現した製品の方が、目に見えない長寿命や他社よりも少しだけ高性能などという製品よりも優先されるという意味である。例えば、ちょっと前まで中国人観光客がこぞって爆買いしていた日本製の電気炊飯器を考えてみればよい。日本では最近の高価格帯の電気炊飯器は黒色を基調としたものが多くなっている。しかし、中国人の好みから言うと赤色の方が良い。中国本土で

赤色の冷蔵庫が好まれるのと同じ理由である。日本では黒色の方が高級と見なされるが、顧客が中国人ならば赤色にしておいた方が売り上げは上がると想像がつく。そのように考えると、顧客にとってその製品の機能が世界一であるかどうかということが、必ずしも購入の選択肢とはなり得ず、顧客自身が求めているものかどうか、あるいは顧客の求めている基準を上回っているかどうかということだけが重要視されるということになるであろう。

本報では、製品を真にグローバル対応させるために、顧客要件に基づき設計品質自体をローカライズする手法について、図 1 に示す一般的な周波数フィルター回路に使われる部品の選定過程を事例として解説する。ここで説明したいことは、技術者が開発しようとする製品の品質に対して、いわゆる「さじ加減」をさせる方法である。最高品質の機能を求めるだけではなく、現地のマーケットが求める品質と価格などを調整して製品を仕上げる方法である。具体的に多目的最適化と称される手法を用い、設計品質に長寿命を求めるのか、ハイパフォーマンスなのか、単に安ければ良いのか、納期が短ければ良いのかといったバリエーションを与える設計方法を紹介する。

## 2. ローパスフィルターについて

パソコンなどに使われる音声認識システムでは、フィルター回路が重要な役割を担っている。特定の音域の信号を選択的に取り出したり、ノイズを排除したりする目的で使われる。このようなフィルター回路を使用することで、音声の品質を上げることができるからである。また、一般的な音声認識システムには、2 次のローパスフィルターが使われることが多い。ローパスフィルターとは、フィルターの種類であり、なんらかの信号のうち、遮断周波数より低い周波数成分のほとんどを減衰させず、遮断周波数より高い周波数の成分を減衰させるフィルターのことである。ここで次数というのは、特性を式で表した場合の次数のことである。減衰域における減衰傾度を表すものだと考えてもよいだろう。ちなみに、ローパスフィルターでは、次数が 1 につき 6dB/oct となる。従って、2 次では 12dB/oct である。ローパスフィルターを設計する上での課題は、R1 と R2 に適切な抵抗を選ばなければならないこと。C1 と C2 に適切なコンデンサーを選ばなければならないことである。また、オペアンプ増幅器を選択する必要がある。具体的には、各抵抗とコンデンサーの許容値

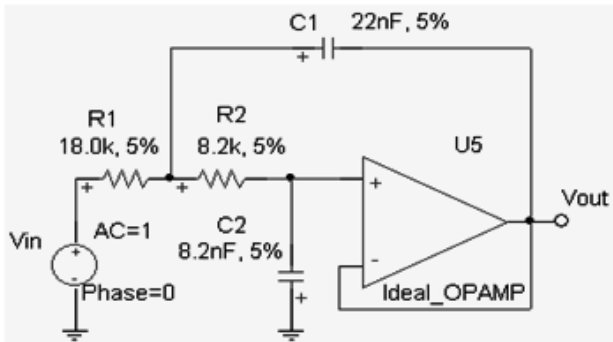


図 1 ローパスフィルターの回路図

にパーセント表記の標準値を指定しなければならない。回路を構成するコンポーネントについては、すべてが一様分布を持つと仮定して、コンポーネントごとの標準偏差の計算を行う。さらに、異なる故障率を持つコンポーネントを選択することもできる。より高い故障率のコンポーネントは、価格面でより安い反面、それほどの信頼性は望めないということになる。そして、実際は標準品のカタログリストや在庫リストからコンポーネントを選択しなければならない。従って、通常は規格部品の性能や品質の組合せを考慮して回路設計を行うことになる。

### 2.1 ローパスフィルターの設計パラメータ

これから事例として説明するローパスフィルターの構成コンポーネントに関する設計パラメータと標準的な選択可能値を表 1 に示す。パラメータ値のタイプは離散的である。離散的という意味は、標準値が表によって与えられるということである。また、標準偏差は ON/OFF を表現する一様分布であるため公差半値を 3 の平方根で除して求めることができる。抵抗とコンデンサーの許容値は、1%、2%、5%のいずれかであり、小さい値ほど価格が高いと想定する。

### 2.2 目標とする設計仕様

開発目標としたローパスフィルターの特性要件は、遮断周波数を 1,000Hz とすること。そして、振幅周波数特性曲線の周波数応答  $Q$  が 0.707 に近いことが求められた。ここで、フィルターの特性を表現する一般的な特性曲線を図 2 に示す。この特性図上の周波数応答  $Q$  が 0.707 の場合に、バターワース特性を示すという。<sup>2)</sup> 周波数応答  $Q$  というのは、共振回路の選択度を表すパラメータであり、遮断周波数のゲインを通過域のゲインで割ることで計算できる。バターワース特性は、最大平坦型と表記される場合もあり、英国の技術者スティーブ・バターワースが指摘した回路特性のことである。2 次のローパスフィルターでは、実用上、バターワース特性となるように設計される。そして、遮断周波数  $F_c$  と周波数応答  $Q$  の想定不良率 PNC (Probability of Non Compliance) は 0.1%以下が求められた。さらに、フィルター回路の信頼性を 10 年間保証することが必要である。これは製造物責任法で定められた製品としての最低寿命である。<sup>3)</sup> さらに、より安いコストであることが望ましいが、コストについては、比較が可能な相対的なインデックスを用いることにした。

表 1 ローパスフィルターの設計パラメータ

	パラメータ名	タイプ	標準偏差	選択可能な標準値 (太字は図 1 の値)	単位
1	R1	離散的	$= \frac{R\%T \cdot R1}{100\sqrt{3}}$	6800; 7500; 8200; 9100; 10000; 11000; 12000; 13000; 15000; 16000; <b>18000</b> ; 20000; 22000; 24000	Ohm
2	R2	離散的	$= \frac{R\%T \cdot R2}{100\sqrt{3}}$	6800; 7500; <b>8200</b> ; 9100; 10000; 11000; 12000; 13000; 15000; 16000; 18000; 20000; 22000; 24000	Ohm
3	C1	離散的	$= \frac{C\%T \cdot C1}{100\sqrt{3}}$	1e-10; 1.2e-10; 1.5e-10; 1.8e-10; 2.2e-10; 2.7e-10; 3.3e-10; 3.9e-10; 4.7e-10; 5.6e-10; 6.8e-10; 8.2e-10; 1e-9; 1.2e-9; 1.5e-9; 1.8e-9; 2.2e-9; 2.7e-9; 3.3e-9; 3.9e-9; 4.7e-9; 5.6e-9; 6.8e-9; 8.2e-9; 1e-8; 1.2e-8; 1.5e-8; 1.8e-8; <b>2.2e-8</b> ; 2.7e-8; 3.3e-8; 3.9e-8; 4.7e-8; 5.6e-8; 6.8e-8; 8.2e-8	Farad
4	C2	離散的	$= \frac{C\%T \cdot C2}{100\sqrt{3}}$	1e-10; 1.2e-10; 1.5e-10; 1.8e-10; 2.2e-10; 2.7e-10; 3.3e-10; 3.9e-10; 4.7e-10; 5.6e-10; 6.8e-10; 8.2e-10; 1e-9; 1.2e-9; 1.5e-9; 1.8e-9; 2.2e-9; 2.7e-9; 3.3e-9; 3.9e-9; 4.7e-9; 5.6e-9; 6.8e-9; <b>8.2e-9</b> ; 1e-8; 1.2e-8; 1.5e-8; 1.8e-8; 2.2e-8; 2.7e-8; 3.3e-8; 3.9e-8; 4.7e-8; 5.6e-8; 6.8e-8; 8.2e-8	Farad
5	抵抗の許容値 R%T	離散的	0	1; 2; <b>5</b>	%
6	コンデンサーの許容値 C%T	離散的	0	1; 2; <b>5</b>	%
7	抵抗の故障率 $\lambda_R$	離散的	0	0.0022; 0.0037; 0.051; 0.07	故障回数/ 百万時間
8	コンデンサーの故障率 $\lambda_C$	離散的	0	0.001; 0.0017; 0.039; 0.064	故障回数/ 百万時間
9	オペアンプの故障率 $\lambda_{OP}$	離散的	0	0.033; 0.11	故障回数/ 百万時間

### 2.3 数学モデルと設計仕様値

複数の仕様値を満たすかどうかを検討するためには、目的に応じた複数の目的関数が必要となる。それらは、数学モデルとして表現されるものである。以下に今回の4つの目標に関する目的関数の応答値をあらわす数学式を示す。

(a) 遮断周波数  $F_c$

$$F_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}} \quad (1)$$

下限値=900  
上限値=1100

(b) 周波数応答  $Q$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{R1 \cdot C2}{R2 \cdot C1}} + \sqrt{\frac{R2 \cdot C2}{R1 \cdot C1}}} \quad (2)$$

下限値=0.636  
上限値=0.778

(c) コスト Cost

$$Cost = \frac{1}{R\%T} + \frac{1}{C\%T} + \frac{1}{1000\lambda_R} + \frac{1}{100\lambda_C} + \frac{1}{10\lambda_{OP}} \quad (3)$$

相対コストの考え方としては、はじめに抵抗とコンデンサの許容値の逆数を加算する。これは、許容値が大きければ安価であるという考え方に基づく。さらに、故障率が高いものほど安価であるという考え方に基づき、故障率の逆数も加算する。但し、故障率は許容値の1/10程度の影響度とする。この場合も、抵抗の故障率はコンデンサの1/10程度であるという考えに基づいている。

(d) 信頼度関数  $P(\text{Life} > 10\text{years})$

$$P(\text{life} > 10\text{years}) = e^{-\left(\frac{10 \cdot 24 \cdot 365 \cdot (2\lambda_R + 2\lambda_C + \lambda_{OP})}{1,000,000}\right)} \quad (4)$$

信頼度関数はコンポーネントの故障率が定数であるため、指数分布となる。<sup>4)</sup> 指数部分は百万時間の故障率を合計した故障率に10年の時間を掛けたものとなる。信頼度関数  $P(\text{Life} > 10\text{years})$  の値は、10年間故障しない確率である。

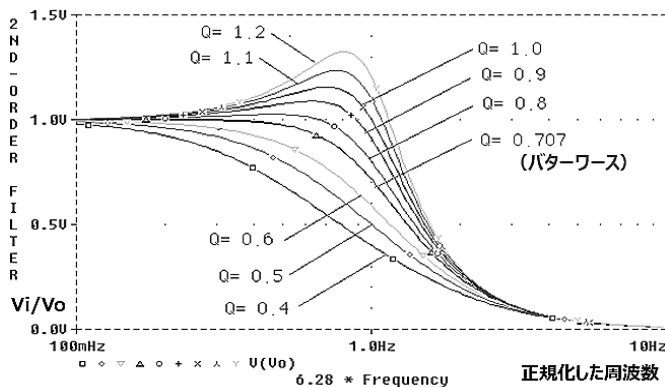


図2 バタワースフィルタ特性

### 3. 多目的最適化のプロセス

はじめに図1で与えたコンポーネントの値をもとに解析的に計算を行ってみる。

$R1=18,000 \text{ Ohm}$ ,  $R2=8,200 \text{ Ohm}$   
 $C1=22 \text{ e-9 Farad}$ ,  $C2=8.2\text{e-9 Farad}$

を式(1), (2)に代入すると、  
遮断周波数  $F_c=975 \text{ Hz}$   
周波数応答  $Q=0.759$   
と求められる。

しかし、上記の計算結果にはそれぞれのコンポーネントの許容値が5%であることが考慮されていない。また、コンポーネントの故障率も選択されていない。そのため、これだけでは量産時の不良率、コストや寿命などの予測ができない。そのため、SDI ToolsのApogeeモジュールに含まれる統計的シミュレーションのツールを用いて最適解を求めることにした。

最適化問題を作り上げるための最初のステップは、Excelワークシートを使用して複数の競合する要件に関するパラメータ、応答、公差半値、標準偏差、拘束条件とゴールを定義することである。図3にExcelワークシート上に定義したローパスフィルタの定義事例を示す。パラメータが取り得る値は全て表1に示された離散値であり、各応答は式(1)から(4)に示された数学式が各セルに関数として定義されている。そして、複数の目的を満足させるような最適化問題を解くためには、目標値ごとに相対的なプライオリティを変えながら異なった複数のシナリオを構成することが必要になる。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		パラメータ						
3		変数名	値	下限値	上限値	標準偏差		
4		R1	18000	17100	18900	519.630485		
5		R2	8200	7790	8610	236.7205543		
6		C1	2.20E-08	2.09E-08	2.31E-08	6.35104E-10		
7		C2	8.20E-09	7.79E-09	8.61E-09	2.36721E-10		
8		R%T	5					
9		C%T	5					
10		$\lambda_R$	0.0700					
11		$\lambda_C$	0.0640					
12		$\lambda_{OP}$	0.1100					
13		保証寿命(年)	10					
14		応答						
15		応答名	値	下限値	上限値			
16		周波数応答 Q	7.60E-01	0.636	0.778			
17		遮断周波数 $F_c$	9.75E+02	900	1100			
18		信頼度	0.9874					
19		相対コスト	1.4796266					
20								
21								
22		標準在庫の抵抗値		標準在庫のコンデンサ値				
23		Ohm		Farad				
24		6800	13000	1E-10	5.6E-10	3.3E-09	0.000000018	
25		7500	15000	1.2E-10	6.8E-10	3.9E-09	0.000000022	
26		8200	16000	1.5E-10	8.2E-10	4.7E-09	0.000000027	
27		9100	18000	1.8E-10	1E-09	5.6E-09	0.000000033	
28		10000	20000	2.2E-10	1.2E-09	6.8E-09	0.000000039	
29		11000	22000	2.7E-10	1.5E-09	8.2E-09	0.000000047	
30		12000	24000	3.3E-10	1.8E-09	0.000000056	0.000000056	
31				3.9E-10	2.2E-09	0.000000012	0.000000088	
32				4.7E-10	2.7E-09	0.000000015	0.000000082	
33								
34								
35								
36		故障率/百万時間		選択可能な許容値と故障率				
37		0.0331128		%T	$\lambda_R$	$\lambda_C$	$\lambda_{OP}$	
38				1	0.0022	0.001	0.033	
39				2	0.0037	0.0017	0.11	
40				5	0.051	0.039		
41					0.07	0.064		

図3 Excel ワークシート

#### 4. 多目的最適化のシナリオ

最適化ツールを使用すれば、コスト、信頼性、パフォーマンスの要件をトレードオフして、パレート解を生成できる。パレート解とは、優劣が付けられない解の集合であり、現実的にはひとつの最適な解決策だけが存在する訳ではないからである。このような多目的最適化を活用することによって、設計チームでは様々な顧客要件を満たす「バランスのとれている」設計を行う一方で、「さじ加減」をした設計も実行することができるようになるのである。

事例として挙げたローパスフィルターの開発に関するの 4 つのシナリオを以下に示し、最適化シミュレーションによって得られた結果を表 2 に示す。

- (a) コストバランス重視のシナリオ  
 優先度 1 : 相対コスト=0  
 優先度 2 :  $P(\text{Life}>10\text{years}) \geq 0.98$   
 優先度 3 :  $F_c\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6, Q\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6$
- (b) 信頼性バランス重視のシナリオ  
 優先度 1 :  $P(\text{Life}>10\text{years}) \geq 0.98$   
 優先度 2 : 相対コスト=0  
 優先度 3 :  $F_c\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6, Q\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6$
- (c) 性能バランス重視のシナリオ  
 優先度 1 :  $F_c\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6, Q\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6$   
 優先度 2 : 相対コスト=0  
 優先度 3 :  $P(\text{Life}>10\text{years}) \geq 0.98$
- (d) 高信頼性のシナリオ  
 優先度 1 :  $P(\text{Life}>10\text{years}) \geq 0.999$   
 優先度 2 : 相対コスト=0  
 優先度 3 :  $F_c\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6, Q\_PNC \leq 3.4 \text{ e-}6$

#### 5. おわりに

ローパスフィルターの事例では 1000Hz の近傍に定格上の遮断周波数となる抵抗とコンデンサーの複数の組み合わせがあり、公称周波数応答をほぼ 0.707 にすることができた。コストバランスを目的とした解決策では、安価なコンポーネントを使用し、許容性能内で 97%の確率で 10 年の寿命とすることが可能と分かった。性能のバランスを望む場合は、コストは高くなるが、許容値 2%のコンポーネントを使用することで、シックスシグマより良いレベルの品質にできることが分かった。また、高信頼性が求められるならば、コストはさらに増加するが、10 年の保証寿命の確率は 99.7%まで向上できるであろう。結局、どの解決策が最も良いかは、顧客要件によって選択されるべきものである。多目的最適化の手法を用いれば、多くの設計案に関してより適切に判断することができるようになると思う。

#### 参考文献

- 1) 朴英元, 藤本隆宏, 阿部武志 : 統合型ものづくりと IT システム 競争優位をもたらす IT 活用のフレームワークの提案, 東京大学ものづくり経営研究センター ディスカッションペーパー, No.302 (2010), 36.
- 2) James Karki : Analysis of the Sallen-Key Architecture, Application Report, Texas Instruments Inc., (2002), 4
- 3) 戸水晴夫 : 製品寿命を考慮した設計手法と試験計画ツールの紹介, 日本設計工学会 九州支部 平成 27 年度研究発表講演会, (2015), 1.
- 4) Reliability Engineering eTextbook Library : Life Data Analysis Reference, ReliaSoft Corporation, (1996), 322

表 2 ローパスフィルター特性の多目的最適化結果

重視する項目 パラメータ	コストバランス	信頼性バランス	性能バランス	高信頼性
R1	91000	15000	15000	18000
R2	22000	7500	7500	8200
C1	1.80 e-08	2.20 e-08	2.20 e-08	2.20e-08
C2	6.80 e-09	1.00 e-08	1.00 e-08	8.20 e-09
R%T	5	5	2	1
C%T	2	2	2	1
$\lambda_R$	0.07	0.0037	0.07	0.0022
$\lambda_C$	0.064	0.039	0.064	0.001
$\lambda_{OP}$	0.11	0.11	0.11	0.033
<b>シミュレーション結果</b>	<b>安価で許容値内</b>	<b>安価で長寿命</b>	<b>安価で高品質</b>	<b>高価だが長寿命</b>
遮断周波数 $F_c$	1016.7106	1011.6552	1011.6552	975.3459
$F_c$ 標準偏差	22.3528	22.2417	11.6819	5.6313
$F_c$ 想定不良率 PNC	9.7317 e-05	3.5890 e-05	1.9768 e-14	3.9688 e-41
応答周波数 $Q$	0.7402	0.6992	0.6992	0.7595
$Q$ 標準偏差	0.008706	0.007431	0.0060	0.0033
$Q$ 想定不良率 PNC	7.1068 e-06	9.0837 e-18	4.1911 e-26	1.2153 e-08
相対コスト Cost	1.7796	2.1357	2.0796	15.4848
$P(\text{Life}>10\text{years})$ 確率	0.9674	0.9830	0.9674	0.9966