



ロバストネスを優先した多特性の設計最適化 タグチメソッドの考え方と中沢メソッド連携活用の提案

林 利弘^{*1} · 館野 寿丈^{*2} · 立林 和夫^{*3} · 飛田 朋之^{*4} · 仲畑 光蔵^{*5} · 松田 光栄^{*6}

Robustness-Preceded Multi-Criteria Design Optimization – Proposition of New Method Based on Combinational Use of Taguchi Method Concept and Nakazawa Method –

Toshihiro HAYASHI^{*1}, Toshitake TATENO^{*2}, Kazuo TATEBAYASHI^{*3},
Tomoyuki TOBITA^{*4}, Kozo NAKAHATA^{*5}, and Mitsuhide MATSUDA^{*6}

Abstract– This paper deals with a design optimization process with some experiments that are often executed in design and development phase. In order to avoid repetition of experiments as possible, Taguchi method has been proposed from a view point of robustness. And, Nakazawa method has been proposed from a view point of optimal balance among multi-required specifications. However, these methods have not been used together in practical engineering fields although both methods commonly use the orthogonal array in the experimental design. There are rare studies of combinational use to make the most of characteristic points of the both methods. In this paper, the characteristic points of these methods are examined and arranged first. Then, an efficient combinational use of these methods is proposed. A simple case study shows that the proposed method is useful for practical design and development processes.

Keywords– design optimization, Taguchi method, Nakazawa method, experimental design, orthogonal array, design and development process

1. 緒言

製品開発においては、要求される性能を有した高品質のものを、低コスト、短リードタイムで市場に出すことが強く求められている。このため、経験の少ない技術者であっても、合理的な処理を行っていけば、一定の結果を得ることができるような設計方法が望まれている。

この問題に対して、従来よりロバストな設計品質確保の立場からタグチメソッドのパラメータ設計（以下、タグチメソッド）[1, 2] が提案され、バランスの良い設計の立場から中沢メソッド [3, 4] が提案されてきた。開発・設計現場の立場からは、その活用条件が厳しいあるいは逆に条件を規定できないといった問題があり、うまく現実の問題に適用できないケースも多々存在した。即ち、タグチメソッドは、システムの基本機能（一つのみ）に着目して、システムとしてのロバストネスの最適化を図るが、各種の設計目標特性に対してバランスよく設計パラメータを決定したいという要求は扱っていない。一方、中沢メソッドは各種の目標仕様をバランスよく実現する設計パラメータの決定法を与えているが、ロバストネスという特定の設計目標特性に優先度を与えてその条件下での全体最適をはかるという要求には対応していなかった。このため、両者はいずれも直交実験を実施する手順を踏むにも関わらず、独立して活用されていることがほとんどであり、両者の特徴を活かして開発・設計現場の現実的ニーズを満たすような連携活用手法についてはこれまで検討されてこなかった。そこで、本論文では、両

*1 林技術士事務所

*2 首都大学東京

*3 富士ゼロックス (株)

*4 (株) 日立ハイテクノロジーズ

*5 (株) 日立製作所

*6 パナソニックコミュニケーションズ (株)

*1 Hayashi Professional Engineer Office

*2 Tokyo Metropolitan University

*3 Fuji Xerox Co., Ltd.

*4 Hitachi High-Technologies Corporation

*5 Hitachi, Ltd.

*6 Panasonic Communications Co., Ltd.

Received: 20 July 2007, 7 September 2007

者の特徴を整理した上で、各手法の良い点を組み合わせた新しいやり方を提案し、ケーススタディを用いながらその有効性を考察する。

2. 設計者が直面する課題と対応の考え方

2.1 ばらつきと多特性両立への課題

製品開発では一般に、要求項目において高い特性を持ち、しかもその特性が安定して得られる設計が必要である。その要求項目に影響する設計変数は多数存在し、それらが特性やばらつきに複雑に影響を及ぼすことから、要求が満たされるように設計変数値を決定することは難しい処理となる。しかもこの処理をできる限り少ない実験回数で済ませなければならない。さらに実際の開発設計では、設計対象物に要求される特性を一つに絞り込むことは困難で、複数でしかもトレードオフが存在する多特性を扱わざるを得ない。また、高い特性を得ることと、特性がばらつかずに安定することでは、一般にばらつきを抑えることを製品設計では優先するが、ばらつきのみを考慮した設計では十分な特性が得られなかったり、他の特性とのバランスを欠いたりする場合もある。基本構造を見直すことで全てを解決する解が得られればよいが、必ずしもそうとは限らず、ばらつき最小化の問題と多特性の最適化問題の両方を考慮した総合的な評価によって設計することが求められていた。

2.2 課題への対応の考え方

著者らは、実際の開発設計における最適化の問題を実務上の経験的な側面から次のように捉えるべきと考えた。

対象領域には複数の要求項目とそれに対する要求仕様があるが、それら要求項目に中枢的影響を及ぼす一つの機能的な要求項目（タグチメソッドでいう基本機能）に着目してそのシステムのばらつきを抑制し、その条件を維持した上ですべての項目の特性が要求仕様に対してバランスよく満足するよう設計するのが望ましい。

3. 技法の連携手法

3.1 技法の選択

ばらつきのあるデータに基づいて状態を推定したり意思決定したりするための手法は数多く存在する。最小二乗法や EM アルゴリズム [5] といった一般的な統計的最適化の方法から、品質管理分野での管理図 [6] といった分野固有の方法まで多岐に渡る。開発設計の分野でも、2章で示した課題への対処として、種々の手法が設計思

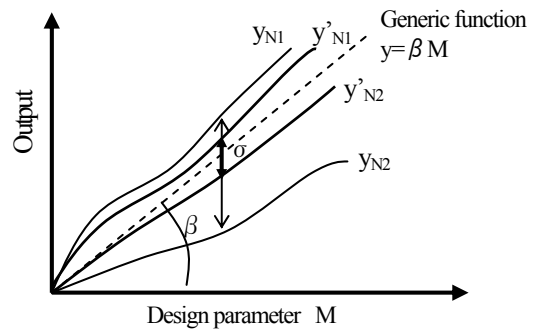


Fig. 1: Taguchi method

想と共に提案され、活用されてきた。その中に、少ない実験回数で解を得る実験計画法を利用した手法としてタグチメソッド、中沢メソッドがある。

タグチメソッドは製品が使われる環境などに影響されず、決められた性能が常に発揮されるような設計を指向し、それを評価する方法である。使用環境の影響をノイズ因子と呼び、ノイズに対して頑健な設計パラメータを選択する。

一方、中沢メソッドは、ばらつき、特性を問わず、複数の要求項目に対し、総合的にバランスの取れるように設計を評価する。

これらの技法を連携すれば、両者の特徴を兼ね備えた手法となり、前節で挙げた設計問題の解決に適した手法になりうる。

3.2 タグチメソッドの最適化戦略

タグチメソッドは、すべての設計対象をひとつのシステムと捉え、システムの働きを根源的に支配する一つの基本機能が存在する、との考えのもと、その基本機能の特性をばらつきのない理想的な特性に近づけることで、結果的に各種のシステムの出力特性も向上させることができるとの考えを基本とする。そして Fig. 1 のように、入力信号に対して比例出力を生ずるものを基本機能の理想特性とする。実際の特性は種々の条件によって十分な直線性が得られなかったり、ばらつきを生じ、出力を最も大きくするノイズ条件 N1 での結果が y_{N1} 、最も小さくするノイズ条件 N2 での結果が y_{N2} になったりする。タグチメソッドでは、ノイズ条件 N1, N2 の影響によるばらつきが最小になるように、設計パラメータを定めていく。

タグチメソッドの最適化処理は二段階の手順を踏む。第一段階では、ばらつきに強く影響を及ぼす設計変数を特定し、その変数の水準をばらつきが小さくなる水準に設定してロバストネスを確保する。

第二段階では、ばらつきにあまり影響を及ぼさず出力に影響する設計変数を調整することによって出力を要求仕様に合わせ込む。

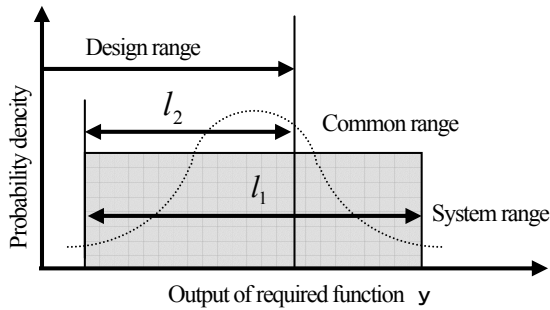


Fig. 2: Calculation of Recsat

第一段階におけるばらつきを抑える設計をするための指標として、SN比を用いる。SN比は出力感度 β とばらつき σ との相対的な大きさ関係を指数化したものである。

実際のシステムの実特性は

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

ただし、

$x_1 \sim x_n$: 出力に影響する全ての要因

と表現できるが、この関数は、

$$y = \beta M + (f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \beta M) \quad (2)$$

と変形でき、式(2)第二項が0になるとこのシステムは理想機能

$$y = \beta M \quad (3)$$

を実現したことになる。一方この第二項のばらつき σ が小さいほどSN比が大きくなり、実験の結果から、設計変数の中でSN比に強く影響を及ぼす変数を選択し、そのSN比が大きくなるよう水準を選択することで、ばらつきを抑える設計ができる。

そして第2段階では、ばらつきに影響を与えず、かつ、感度を大きく変える設計変数(調整因子)を用いて目標の出力特性に合わせ込むが、調整すべき設計変数の選択、調整に関わらない設計変数値の決定にかかる具体的な指標については設計者の判断に任されている。

3.3 中沢メソッドの最適化戦略

中沢メソッドの基本的な考えの中には、シャノンの情報量の概念がある。Suh [7] は情報理論を設計問題に当てはめて、めったにない特性を出すために必要な労力を情報量とし、情報量が小さいほど良い設計であることを公理とした。中沢 [3] はこの情報量を具体的に評価できるようにし、情報量に相当する量としてレクサット(Recsat, Reciprocal of satisfaction)を定義し、レクサットが小さいほど良い設計であるとした。

ある設計変数値を決めて実験すると、実験結果はばらつきを生ずる。ばらつきには、実験条件による影響、他

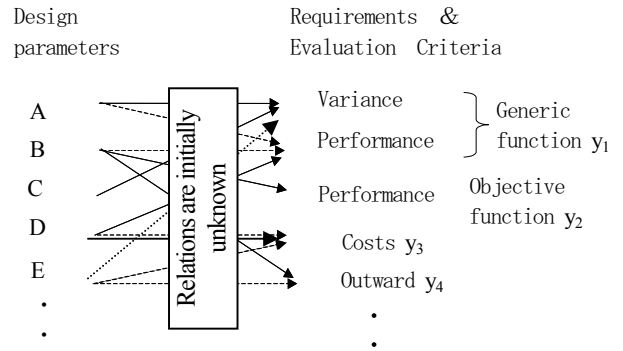


Fig. 3: An example of relation between design parameters and requirements

の設計変数の値による影響、さらには偶然誤差を含めたすべての要因によるものがある。Fig. 2はある要求項目でのばらつきの様子を示したものである。

ばらつきの分布を正確に求めることは難しいので、これを簡単のため一様分布として近似する [3]。このとき、ばらつきの範囲をシステムレンジと呼ぶ。次に、デザインレンジを定める。デザインレンジは要求仕様が相当する。デザインレンジとシステムレンジが重なった部分をコモンレンジと呼ぶ。

このとき、レクサットは次の式で表される。

$$R = \ln \frac{l_1}{l_2} = \ln \frac{\text{システムレンジ}}{\text{コモンレンジ}} \quad (4)$$

システムレンジがすべてデザインレンジの中に入れば、すべての条件で要求仕様を満たし、レクサットは0となる。

一般に要求項目は複数になるがレクサットは無次元化された量であるため異なる尺度を一本化でき、総合評価は複数の項目でのレクサットを加算した総合レクサットによって評価できる。交互作用の影響が小さければ、単純に総合レクサットが最も小さくなるように各設計変数の水準を設定することで、複数の要求項目において無理がなく、バランスのとれた設計ができることになる。

3.4 連携活用の提案

Fig. 3に、ある設計課題における設計変数 A, B, C...と要求項目 y_1, y_2, y_3, \dots の関係例を示す。

この例では複数の要求項目の中に2つの機能的要求が含まれているが、ばらつき抑制の要求は基本機能として定めた出力 y_1 に絞り込まれており、残りの目的機能 y_2 に関しては性能の要求となる。それぞれの要求項目に影響する変数は多数存在し、影響度も異なるが、設計者にとってはこれらの関係は未知であるため、実験によって推定しながら最適な設計変数値を定めていくことになる。例えば変数の中で、基本機能 y_1 のばらつきに強く関係するのは変数 A と C であったならば、残りの変数は y_1 のばらつきにはあまり関係しない。通常、このよ

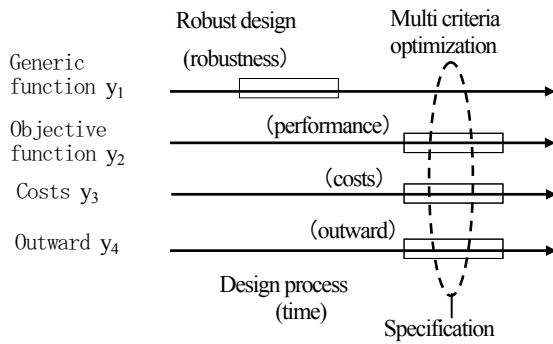


Fig. 4: Combinational use of Taguchi and Nakazawa method

うに一つの評価項目のばらつきや特性に強く関係する設計変数は、完全に区別できないものの、ある程度限定できる。また、性能、コスト、概観などの要求は、決められた仕様があり、それを満たせばよいが、ばらつきを抑える要求は仕様が定められるのではなく、可能な範囲でできる限り追求するものであり、要求の性質が異なる。そのため、ばらつきと特性とを同等に評価するのはふさわしくない。

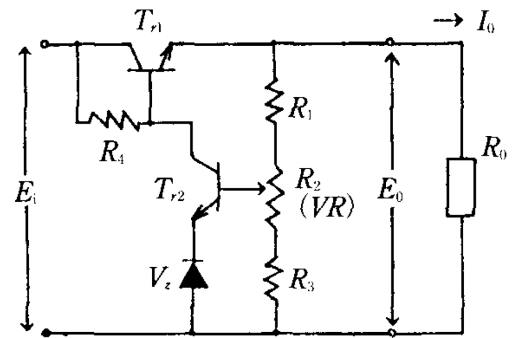
そこで、ばらつきに強く影響する変数 A と C に関してはばらつきをできるだけ減らす設計をし、それ以外の変数については、要求項目間のバランスが取れた最適値を導いていくことが合理的といえる。これを実現する方法として、タグチメソッドの考え方と中沢メソッドとを連携活用する方法が考えられる。すなわち、タグチメソッドの第一段階により導出された設計空間に基づき、第二段階として中沢メソッドを実施すれば、ロバストネスを確保しながら、さまざまな要求項目を満たす設計ができると考えられる。

Fig. 4 に連携手法の概念を示す。横軸は設計プロセスの時間的な流れを示しており、ロバストネスを重視する要求機能について設計変数を決定する処理を初めに行うことを意味している。続いて、性能を重視する目的機能やコストなどの要求項目間のバランスをとる設計を行う。中沢メソッドでは要求機能実現の困難さを、要求性能と実験結果との関係から導くので、それぞれの要求仕様を定めてから中沢メソッドを適用する。

3.5 具体的な連携手順

具体的な手順を次に示す。

- (1) 対象とする製品の要求仕様を明確にし、基本機能、目的機能、コストなどの要求項目を定め、各要求項目に影響を及ぼす設計変数、ノイズを整理する。
- (2) 整理した設計変数、ノイズの種類により直交表を選択し、直交実験計画を立てる。設計変数の水準、ノイズの可動範囲を決めて表に割付ける。
- (3) 実験計画に基づき実験を行い、結果を整理する。



$$E_0 = (P_2 + P_3) / P_1$$

ここで、

$$P_1 = \frac{(R_1 + R_2/2)(1 + h_{fe1}) + R_4 \cdot h_{fe2}(1 + h_{fe1}) + R_4}{(R_1 + R_2/2)(1 + h_{fe1})}$$

$$P_2 = E_i - V_{BE1} + \frac{(V_{BE2} + V_Z) \cdot h_{fe2} \cdot R_4}{(R_1 + R_2/2)} + \frac{(V_{BE2} + V_Z) \cdot h_{fe2} \cdot R_4}{(R_3 + R_2/2)}$$

$$P_3 = \frac{V_{BE2} \cdot R_4 + V_Z \cdot R_4 - I_0 \cdot R_4(R_1 + R_2/2)}{(R_1 + R_2/2)(1 + h_{fe1})}$$

Fig. 5: Electronic circuit used for the experiments

- (4) ばらつきを重視する要求項目である基本機能について、SN 比、および、出力平均を算出し、タグチメソッドで用いられる要因効果図を描く。
- (5) 基本機能の SN 比改善に大きく影響を及ぼす設計変数を選択し、SN 比が大きくなる水準を設定する。もし SN 比の改善が充分得られない場合は基本構造を見直すか、設計変数を見直して再実験を検討する。
- (6) 残りの設計変数において、各要求項目のレクサットを算出し、総レクサット曲線を算出する。もし、総レクサットが非常に大きかったり無限大になる条件が多い場合は、基本構造を見直すか、水準の範囲を狭くした再実験を検討する。
- (7) 総レクサットが最小になる値を決定する。
- (8) 確認実験を行う。もし、再実験において十分な性能や SN 比が得られない場合は、基本構造を見直して再度手順 (1) からやり直す。

4. ケーススタディ

4.1 ケーススタディでの課題

一つの設計課題を対象に提案する連携手法を適用し、その有効性を検証する。

設計対象は電源回路とする。電気回路を用いる理由は、理論的な解が得られるので手法の評価がしやすいためである。本ケーススタディは静特性の望み特性における最適設計問題である。

Fig. 5の電源回路では、電圧 E_i の入力に対して E_i が変動しても出力 E_o を安定して出力することが一つの要求項目となるが、価格を安く作成することをもう一つの要求項目とする。よって、安定した出力を要求しつつ、その特性はコストとのバランスを考慮して決めていく。設計変数は4つの抵抗と2つのトランジスタからなり、これらの組み合わせの最適化を図る。それぞれの抵抗の抵抗値、トランジスタの電流増幅率は、ばらつきを生ずるものとする。そして、各素子には価格が設定されているとする。電源回路の抵抗・トランジスタの値と出力電圧の理論的な値は、Fig. 5中の式でモデル化されている [2]。

抵抗やトランジスタの性質は使用条件や実験条件によりばらつきが生ずるので、このばらつきをノイズとして与えた。 $R_1 \sim R_4$ まだがそれぞれ $\pm 10\%$ 、 T_{r1}, T_{r2} の電流増幅率 h_{fe1}, h_{fe2} は $\pm 30\%$ 、 E_i は $\pm 10\%$ の範囲でばらつくとする。今回のケーススタディでは $E_i = 20\text{ V}$ 、 $E_o = 10\text{ V}$ を設計仕様として、これを実現する最適な回路定数の決定を行うものとする。この場合、 I_o は負荷 R_o によって $0 \sim 800\text{ mA}$ の範囲で変動するとする。 V_{BE1}, V_{BE2}, V_z はばらつかずに 0.6 V 一定とする。また、誤差因子としては、モデル式に照らし合わせて、それぞれの素子のばらつきが出力を最も大きく変化させる組み合わせを求める。すなわち、 $R_1-10\%$ 、 $R_2+10\%$ 、 $R_3+10\%$ 、 $R_4-10\%$ 、 $h_{fe1}-30\%$ 、 $h_{fe2}+30\%$ 、 $E_i-10\%$ 、 $I_o = 0.8\text{ A}$ の組み合わせが出力を最も小さくし、 $R_1+10\%$ 、 $R_2-10\%$ 、 $R_3-10\%$ 、 $R_4+10\%$ 、 $h_{fe1}+30\%$ 、 $h_{fe2}-30\%$ 、 $E_i+10\%$ 、 $I_o = 0\text{ A}$ の組み合わせが最も大きくする。それぞれの組み合わせを調査誤差因子 $N1, N2$ として設定して、各設計変数に誤差を与えてばらつきを考慮した実験とする。

コストは R_1, R_3, R_4 は一定であるとして考慮に入れず、 R_2 は抵抗値によって価格が変化し、抵抗値の5倍を価格とする。トランジスタは T_{r1}, T_{r2} とともに電流増幅率 h_{fe1}, h_{fe2} がそのまま価格になるものとする。すなわちコストは、

$$C = R_2 \cdot 5 + h_{fe1} + h_{fe2} \tag{5}$$

で計算する。ただし、抵抗や電流増幅率のばらつきによってコストがばらつくと実際的でなくなるので、ばらつきの無い想定した値により計算する。

4.2 提案手法の適用

この設計課題に対し、3.4節に示した手順にしたがって処理を進めていく。

- (1) 課題での要求項目は目標出力電圧の安定的確保と低コスト性の両立である。
また、それぞれの要求仕様は次の通りとした。
< 出力電圧 > 目標値である 10 V との差が $\pm 1\text{ V}$ 以

Table 1: Experimental levels of design variables

Design variables	The first level	The second level	The third level
R1	2.2kΩ	11kΩ	56kΩ
R2	0.11kΩ	0.56kΩ	2.7kΩ
R3	0.3kΩ	1.5kΩ	7.5kΩ
R4	0.08kΩ	0.42kΩ	2.2kΩ
h_{fe1}	18	35	70
h_{fe2}	50	100	200

内

< コスト > 135 以内

- (2) この課題では、設計変数は6個で、いずれも3水準であるので、 L_{18} 直交表を使用する。 $R_1 \sim R_4$ を第2列~5列に割付け、 h_{fe1}, h_{fe2} を第6と第7列に割り付けた。各設計変数の実験水準はTable 1の通りとした。
- (3) 各水準組み合わせに対してノイズ因子を調査した2回 ($N1, N2$) の実験を行う。2回の実験によって抵抗やトランジスタの性質のばらつきを反映させる。
- (4) 各実験毎にSN比、出力平均、コストが実験結果として算出される。
実験番号1を例にとると、まず出力平均を計算する。

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{9.19 + 15.33}{2} = 12.26\text{ (V)} \tag{6}$$

次に、分散 s^2 を計算する

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} = \frac{(9.19 - 12.26)^2 + (15.33 - 12.26)^2}{2 - 1} = 18.85 \tag{7}$$

SN比 η (db) は、式(6)(7)の結果から計算される。

$$\hat{\eta} = 10 \cdot \log(\bar{y}^2 / s^2) = 10 \cdot \log(12.26^2 / 18.85) = 9.02\text{ (db)} \tag{8}$$

コストは、式(5)を使って、

$$C = 0.11 \cdot 5 + 18 + 50 = 68.55 \tag{9}$$

となる。

同様に、実験番号18までの実験結果を計算して表に整理する。Table 2にこれを示す。

Table 2: Experimental conditions and results

No.									Output voltage V		SN ratio db	Output average V	Cost
	1	2	3	4	5	6	7	8	N1	N2			
1	-	2.2	0.11	0.3	0.08	18	50	-	9.19	15.33	9.02	12.26	68.55
2	-	2.2	0.56	1.5	0.42	35	100	-	2.73	4.59	8.91	3.66	137.8
3	-	2.2	2.7	7.5	2.2	70	200	-	1.52	1.96	15.03	1.74	283.5
4	-	11	0.11	0.3	0.42	35	200	-	29.39	42.80	11.61	36.10	235.55
5	-	11	0.56	1.5	2.2	70	50	-	5.86	11.84	6.41	8.85	122.8
6	-	11	2.7	7.5	0.08	18	100	-	8.40	15.64	7.41	12.02	131.5
7	-	56	0.11	1.5	0.08	70	100	-	19.43	24.37	15.95	21.90	170.55
8	-	56	0.56	7.5	0.42	18	200	-	3.84	16.49	1.11	10.16	220.8
9	-	56	2.7	0.3	2.2	35	50	-	12.45	38.93	2.75	25.69	98.5
10	-	2.2	0.11	7.5	2.2	35	100	-	1.13	1.92	8.74	1.53	135.55
11	-	2.2	0.56	0.3	0.08	70	200	-	6.67	9.85	11.32	8.26	272.8
12	-	2.2	2.7	1.5	0.42	18	50	-	1.62	6.29	1.55	3.95	81.5
13	-	11	0.11	1.5	2.2	18	200	-	6.15	11.95	6.87	9.05	218.55
14	-	11	0.56	7.5	0.08	35	50	-	11.21	17.79	9.87	14.50	87.8
15	-	11	2.7	0.3	0.42	70	100	-	9.22	14.71	9.78	11.97	183.5
16	-	56	0.11	7.5	0.42	70	50	-	10.41	19.46	7.36	14.94	120.55
17	-	56	0.56	0.3	2.2	18	100	-	64.35	110.71	8.53	87.53	120.8
18	-	56	2.7	1.5	0.08	35	200	-	16.71	22.91	13.10	19.81	248.5

- (5) 設計変数毎の要因効果は、各水準の条件で実験した結果を平均して整理することで求める。たとえば、第1水準 $R_1 = 2.2 \text{ k}\Omega$ の条件下での実験は6回あるので、これらのSN比、出力平均を平均して、この第1水準での効果とする。同様に第2水準 11 kΩ, 第3水準 56 kΩ の条件でも同様に求められる。

$$R_1 \text{ の第1水準での出力平均の平均} = \frac{12.26 + 3.66 + 1.74 + 1.53 + 8.26 + 3.95}{6} = 5.23 \text{ (V)} \quad (10)$$

$$R_1 \text{ の第1水準でのSN比の平均} = \frac{9.02 + 8.89 + 15.03 + 8.74 + 11.32 + 1.55}{6} = 9.09 \text{ (db)} \quad (11)$$

算出されたSN比と出力平均に対する要因効果図を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。図中の設計変数にある1と8は、直交表の第1列と第8列に相当する見かけの結果である。

- (6) Fig. 6 を見ながらSN比に大きく影響を及ぼす設計変数を選択する。ただし、SN比が同水準ならば同時に Fig. 7 の出力結果も見比べて、出力が目標値とかけ離れてしまう水準の設定は避ける。選択の基準は経験によるが、この場合、 R_4, h_{fe1} がSN比に強く影響すると判断した。SN比を高くする設定が、出力を目標値の10Vに近づける設定にもなるので、 $R_4 = 0.08 \text{ k}\Omega, h_{fe1} = 70$ と設定することにした。 h_{fe2} もSN比に比較的強く影響を及ぼし、第二

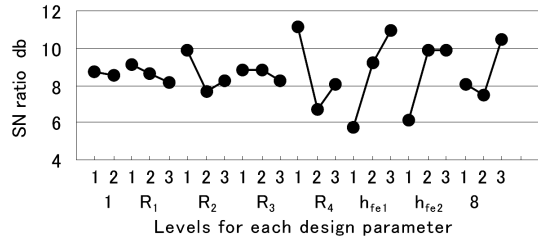


Fig. 6: Average response graph of SN ratio

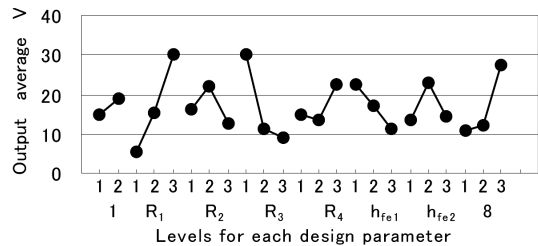


Fig. 7: Average response graph of output voltage

水準と第三水準のいずれかが候補になるが、出力結果も考慮にいれて、第三水準をとることにする。ただし、第一段階で多くの変数値を決定してしまうと、第二段階での自由度を狭くしすぎてしまう可能性もあるので、 h_{fe2} を設定する場合(条件(R))と、設定しない場合(条件(M))との両方で第二段階の処理を行うことにする。

- (7) R_4, h_{fe1} の値は決定したので、それ以外の設計変数を決定する。評価は出力電圧とコストの2項目であり、それぞれでレクサットを算出することになる。まず出力電圧の例で説明する。設計変数毎に各水準における特性のばらつきを求める。たとえば、 R_1 の第1水準であれば、出力電圧の平均、分散は、

$$R_1 \text{ の第1水準での出力電圧の平均} \bar{y}' = (12.26 + 3.66 + 1.74 + 1.53 + 8.26 + 3.95)/6 = 5.23 \text{ (V)} \quad (12)$$

$$R_1 \text{ の第1水準での出力電圧の分散} s'^2 = ((12.26 - 5.23)^2 + (3.66 - 5.23)^2 + (1.74 - 5.23)^2 + (1.53 - 5.23)^2 + (8.26 - 5.23)^2 + (3.95 - 5.23)^2)/(6 - 1) = 17.72 \quad (13)$$

で求められる。

この結果からシステムレンジを定める。システムレンジはシステムが取りうるばらつきの範囲のことであるが、実験結果の平均を中心に、標準偏差にある係数をかけた値の幅を上下両側にとったものをシス

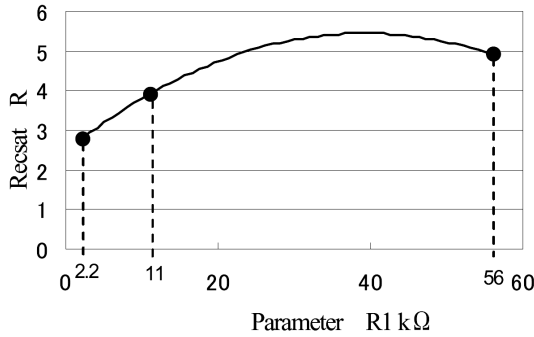


Fig. 8: Recsat curve for R_1

テムレンジとする．係数は安全率と呼ばれ，経験的に 1.5 が良いとされている [4]．よって，システムレンジの上限 SR_u と下限 SR_l は次のように求められる．

$$SR_u = \bar{y}' + k \cdot s' = 5.23 + 1.5 * \sqrt{17.72} = 11.55 \text{ (V)} \tag{14}$$

$$SR_l = \bar{y}' - k \cdot s' = 5.23 - 1.5 * \sqrt{17.72} = -1.08 \text{ (V)} \tag{15}$$

出力電圧のデザインレンジは 9~11 V であったので，デザインレンジがシステムレンジに含まれるので，そのままコモンレンジとなり，レクサットは次のように求められる．

$$R_o = \ln \frac{\text{システムレンジ}}{\text{コモンレンジ}} = \ln \frac{11.55 - (-1.08)}{11 - 9} = 1.843 \tag{16}$$

さらに，コストに関しても水準毎にレクサットが計算できる．例えば，コストの第 1 水準のレクサットを計算すると次のように算出される．

$$R_c = \ln \frac{303.2 - 23.3}{135 - 23.3} = 0.919 \tag{17}$$

出力平均のレクサットとコストのレクサットをそれぞれ R_o, R_c とすると，それらを加算することで，総合レクサット R_l が求められる．第 1 水準の総合レクサットは次のように算出される．

$$R_{l,1} = R_{o,1} + R_{c,1} = 1.843 + 0.919 = 2.762 \tag{18}$$

同様に，第 2 水準，第 3 水準を計算して，水準とレクサットの関係をグラフにする (Fig. 8)．

本論文で使用した計算方法は簡易計算法であり，詳細な計算が必要な場合は詳細計算法 [3] を使用する．他の設計変数についても同様に総合レクサットが計算できる．

Table 3: Results of confirmation tests (Proposed method)

No.	R1 kΩ	R2 kΩ	R3 kΩ	R4 kΩ	hfe1	hfe2	SN ratio db	Output average V	Cost
Proposed method (M)	2.2	2.7	7.5	0.08	70	50	9.97	10.12	133.5
Proposed method (R)	2.2	2.7	7.5	0.08	70	200	9.82	5.07	283.5

総合レクサットのグラフにおいて最小となる値を最適解とする．ただし，最適値として水準値間を任意にとれる場合と，そうでなく離散的にしかとれない場合がある．この提案手法の結果においては，最適値として選択できる値が離散的に限られている場合を想定する．

デザインレンジを出力電圧 $10 \pm 1 \text{ V}$ ，コスト 135 以下にとった場合，それぞれの設計変数での最適値は $R_1 = 2.2 \text{ k}\Omega$ (第 1 水準)， $R_2 = 2.7 \text{ k}\Omega$ (第 3 水準)， $R_3 = 7.5 \text{ k}\Omega$ (第 3 水準)， $h_{fe2} = 50$ (第 1 水準) となった．

(8) R_4, h_{fe1} は，すでに SN 比にもとづいて決定しているので，これらの設計変数値での条件で，シミュレーションによる確認実験を行う．

確認実験の結果を Table 3 に示す．条件 (R) と条件 (M) とは h_{fe2} の値のみ異なり，条件 (R) では h_{fe2} を第一段階での SN 比の評価により $h_{fe2} = 200$ (第 3 水準) と決めた場合で，条件 (M) は第二段階でのレクサットの評価により $h_{fe2} = 50$ (第 1 水準) とした場合である．いずれの条件でも比較的 SN 比は高く，条件 (M) で出力平均およびコストともに良い結果が得られている．条件 (M) で使用された $h_{fe2} = 50$ は，要因効果図では SN 比を低くするように見え，タグチメソッドでは得られない解だが，他の変数との組み合わせによっては適切な解となり得ることが分かる．

この結果にあるように，第一段階で設定する設計変数の水準選択には任意性があるが，これが正しく選択されれば，ロバストネスを重視しつつ複数の要求項目を満足する設計変数値が決定できることが確認された．

4.3 他の手法による結果との比較および提案手法の評価

本提案手法の有効性を検証するため，提案手法による解 (条件 (M)) (S1) に加え，タグチメソッドで第二段階まで実施したときの解 (S2)，中沢メソッドのみで得られた解 (S3)，および GA (Genetic Algorithm) [8] による探索で得られた解 (S4) について，それらの条件での確認実験の結果と合わせて Table 4 にまとめた．GA との比較は，提案手法による結果がどの程度最適解に近

Table 4: Results of confirmation tests

No.	R1 k Ω	R2 k Ω	R3 k Ω	R4 k Ω	hfe1	hfe2	SN ratio db	Output average V	Stand. dev. (σ_{E_o})V	Cost	
S1:Robustness and multi-criteria	2.2	2.7	7.5	0.08	70	50	9.97	10.12	0.953	133.5	
S2:Robustness	6.8	0.56	1.5	0.08	70	200	10.04	10.26	0.671	272.8	
S3:Multi-criteria	2.2	2.7	4.7	0.08	55	50	9.76	10.16	0.952	118.5	
S4:Searching (GA)	A	3.99	0.11	7.46	0.08	18	50.	6.56	10.09	1.10	68.6
	B	5.05	1.04	7.49	0.10	62.6	64.8	8.77	10.10	0.947	132.6

づいているかを評価するために行った。本来であれば、全探索をして最適解を得ることが望ましいが、探索領域が膨大であるために、探索効率の良いGAを採用し、その結果を最適解に近い値として扱うことにした。

Table 4では、確認実験の結果としてN1とN2の2条件における結果から求めたSN比と出力平均に加え、ばらつきの評価として324条件におけるシミュレーション結果の標準偏差も記す。324条件の具体的な値は後述する。また、Table 4ではもう一つの評価としてコストも記した。

S2では、第一段階の処理でSN比に影響すると判断された R_4, h_{fe1}, h_{fe2} を $R_4 = 0.08$ k Ω , $h_{fe1} = 70$, $h_{fe2} = 200$ に設定した後、第二段階の処理として R_2, R_3 をそれぞれ第2水準の $R_2 = 0.56$, $R_3 = 1.5$ とし、 R_1 を調整して出力平均を10Vに近づけた結果である。タグチメソッドではロバスト性確保の観点から第一義として最適化するので、SN比に関しては提案手法よりも高い結果が得られているが、コストの考慮はされていないので、コストは高くなっている。

S3では、設計変数値を水準間からも選択できる（非離散系）と仮定した場合での結果である。 R_3 と h_{fe1} がいずれも第2水準と第3水準の間から選ばれている。その他の変数は水準として振った範囲の端点が選ばれているので、この範囲を超えた点にもっと良い結果があることを示唆しているが、この範囲以外には値を設定できないと仮定する。結果を見ると、提案手法S1に比較してコストは大幅に削減されたがSN比は若干低くなった。

S4では、Fig. 5のモデルを使ったGAの探索により最適解を求めた。探索条件として次のように許容条件と目的関数を設定した。許容条件は2種類の条件で実施した。

<許容条件> 出力9.0~11.0V(条件A)
出力9.8~10.2V(条件B)

<目的関数> C, σ_{E_o} を最小化

ただし、

C: コスト(式(5))

σ_{E_o} : 設計変数の設定値(中心値)に対して、各変数に種々の誤差を仮定して組み合わせて与えたとき、出力電

Table 5: Fluctuation conditions for calculating standard deviation at a design parameter setting

Design variable	Combination of error settings					
	The first orthogonal array		The second orthogonal array			
	R1~R4	hfe1,hfe2	R1~R4	hfe1,hfe2	Ei	Io mA
Value	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 1\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	0 or 500

圧に生ずる標準偏差とした。誤差の組み合わせは、L18直交表にもとづいた18通りの誤差の組み合わせを2種類設定し、さらにそれらを組み合わせて $18 \times 18 = 324$ 通りの組み合わせを作成した。

これら2種類の直交表を第1直交表、第2直交表と呼ぶこととし、それぞれで仮定した誤差の設定をTable 5に示す。

第1直交表は、 $R_1 \sim R_4$ に $\pm 5\%$ の誤差を与えた3水準、 h_{fe1}, h_{fe2} に $\pm 10\%$ の誤差を加えた3水準としてL18に割り付けた組み合わせとした。第2直交表では、第1直交表で与えられた誤差に重ねて $R_1 \sim R_4$ に $\pm 1\%$ の微小な誤差、 h_{fe1}, h_{fe2} には $\pm 10\%$ の誤差を与えた3水準、入力電圧(E_i)に $\pm 10\%$ の変動を与えた3水準、出力電流(I_o)が0もしくは500mAの場合とした2水準としてL18に割り付けた組み合わせとした。

Table 4に記した標準偏差は、このばらつき条件をS1~S4に適用して算出した結果である。

設定した許容条件と目的関数での最適解は、出力が許容条件を満たした上での、ばらつきとコストのパレート解となる。この結果をFig. 9に示し、多数得られた解の中から2つS4_A, S4_BをTable 4に示した。また、Fig. 9には、提案手法(条件(M))S1、タグチメソッドS2、中沢メソッドS3それぞれの手法によって得られた最適解による結果も記した。

Fig. 9のGAの結果から、以下の内容が判る。

(1) 出力条件A、条件Bの許容条件の差のみで、パレートラインは明らかに、2本存在している。条件Aではラインの連続性が見られず、特に、出力値の標準偏差0.5~0.8V範囲では、コストが250を越えており、目標指標を満足出来ていないことが判る。更に、2本のパレートラインから、最適解域が2ヶ所存在(C, D)していることが判る(条件Aでは劣解域であるが条件Bでは良解域であり、それらの領域を包含した領域)。従って、本システム(Fig. 9)は多峰性或いは、設計変数間の交互作用が非常に強く、設計変数の設定や誤差の確認には労力を要するものと推定できる。(実験計画時の初期値の設定や結果確認、再実験計画・実行等への労力)

GAの最良解は、条件Aのパレートライン上:Eであるが、Fig. 9に示すように、設定値が少しでもずれると(公差等の許容誤差が付加)、パレートラインBに移行

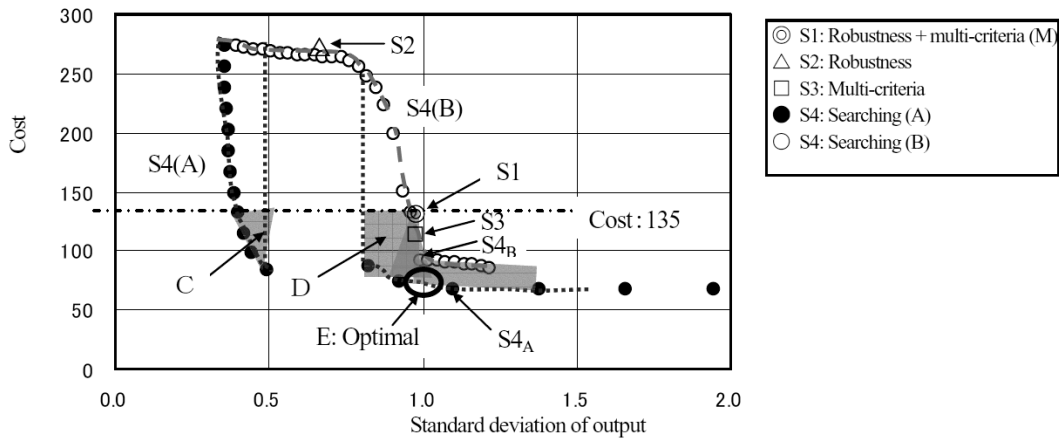


Fig. 9: Comparison of result data by several optimization methods

し、コスト高になる可能性がある。

(2) Fig. 9の結果から、タグチメソッド、中沢メソッドの結果とも、明らかに条件 B での劣解域である。しかし、提案手法の結果は、ほぼ条件 B のパレートライン上にあり、最良解の一つとなっていることが判る。

(3) Fig. 9の結果から、GA の 2 本のパレートラインから推測される最良解域 (C) には、提案手法 S1、タグチメソッド S2、中沢メソッド S3 の結果とも、該当なしとなっている。これは、かかる最適値を求めるための適用手法やプロセスの相違に起因している。GA の場合は、設計変数の可変範囲が広くても、その値の増加・減少を微小なステップで逐次更新して行くので、他の手法に比較して、より微小な最適域をも探索できるという長所がある。本例題のように、システムの入出力関係を理論式や実績ある実験式等にて表現できる場合や、シミュレーションと連携して、入力-出力関係を見出すことのできる場合に好適な手法であると言える。但し一般には、未知のシステムを扱うことになり、先ず実験を行って同定式を作成し、その同定式にて最適化手法を活用して行く手順を取るのので、必ずしも微小な最適域を見つけ出せるとは限らない。

以下に GA の結果を纏める。

本例題においては、条件 A, B での抱合域 (C, D) が最も望ましい解域を導出している。しかし、GA での結果は何万回もの試行の結果得られているのに対し、他の手法では 36 回 (L18 直交表による N1, N2 の 2 条件での実験) での実験により得られていることを考慮すると、いずれも効率の良い最適化がされていると言える。本提案手法の最適化結果は、出力の許容範囲を狭めた (より厳しくした) GA の B 条件のパレートライン上にあり、その最良解が良好に一致した。

提案手法と、GA、タグチメソッド、中沢メソッドの結果を比較すると、提案手法による結果は、ばらつき、コストともに両手法の中間となり、ばらつきが少ない設計を実現するタグチメソッドの利点と、仕様に応じたバ

ランスの良い設計を実現する中沢メソッドの利点を合わせ持つ結果を導きだせ、且つ、実験効率や期間の短縮化を期待できることを確認できた。

5. 結言

- (1) 実験をしながら設計変数値を決定していくプロセスにおいて、実際の最適化設計問題をばらつきと多特性の問題として整理した。
- (2) タグチメソッドと中沢メソッドの特徴を整理し、連携活用の手法を提案した。
- (3) ケーススタディを用いて、提案手法の有効性を確認した。

本論文での提案手法と同様に、複数の手法を組み合わせることで問題解決を効率的に行っていく手法は他にも多く考えることができる。開発・設計プロセスの研究として今後の展開を期待したい。

謝辞: 本論文は NPO 横断型基幹科学技術連合 (横幹連合) の開発・設計プロセス工学技術調査研究会での議論の成果に基づいている。研究の機会を与えてくださった横幹連合に謝意を表す。

参考文献

- [1] 田口玄一: 開発設計段階の品質工学, 日本規格協会, 1988.
- [2] 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連, 2004.
- [3] 中沢弘: 中沢メソッド, 工業調査会, 2006.
- [4] 中沢弘: デザイン・ナビゲーション・メソッドによる製品開発法の研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 67 巻, 658 号, pp. 2090-2097, 2001.
- [5] A. P. Dempster, N. M. Laird, and D. B. Rubin: Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, Journal of the Royal Statistical Society, Ser.B, Vol.39, pp. 1-38, 1977.

- [6] W. A. Shewhart: Economic Control of Quality of Manufactured Product, D. Van Nostrand, 1931.
- [7] N. P. Suh: The principles of Design, Oxford university press, 1990.
- [8] D. Goldberg: Genetic algorithm in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, 1989.

立林 和夫



1972年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業、同年富士ゼロックス株式会社入社。現在富士ゼロックス株式会社勤務、東京工業大学工学部非常勤講師、明治大学理工学部兼任講師。入門タグチメソッド、日科技連(2004)、革新のための7つの手法、日経BP社(2006)[共著]ほかがある。

飛田 朋之



1978年4月日立製作所計測器事業部入社。計測機器(センサ)・システムの開発に従事。2001年10月日立ハイテクノロジーズに統合設立に伴い、転籍。生産技術の開発とDigital Engineering技術開発に従事。

林 利弘



1967年大阪大学工学部通信工学科卒業、同年(株)日立製作所入社後ソフトウェア工学技術の開発と適用普及に従事。97年以降全社への開発・設計プロセス工学技術の導入と適用普及に従事。この間横幹連合理事を務め、現在、林技術士事務所を主宰。日本TRIZ協議会代表。

仲畑 光蔵



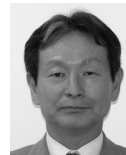
1972年早稲田大学理工学部電気工学科卒業、同年(株)日立製作所生産技術研究所勤務、2000年(株)日立製作所モノづくり技術事業部主任技師、現在開発・設計技法推進センタ業務に従事、品質工学会会員、日本TRIZ協議会メンバー。

館野 寿丈



1989年早稲田大学理工学部機械工学科卒業、91年同大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年、東京都立大学工学部助手。現在、首都大学東京システムデザイン学部助教。01-02年Stanford大学客員研究員。博士(工学)。設計生産システム、開発プロセスの研究に従事。

松田 光栄



1983年東京理科大学理工学部機械工学科卒業。同年日本ビクター、テレビ研究所。88年九州松下電器(現パナソニックコミュニケーションズ)入社。開発研究所を経て01年よりDigital Engineeringとタグチメソッド、TRIZなどの技法を用い全社の開発プロセス革新活動に従事。