

# 論文 SQCとデジタルエンジニアリング\*

## —設計パラメータ最適化の技術動向と今日的課題—

### SQC and Digital Engineering

### — Technological Trends in Design Parameter Optimization and Current Issues —

吉野 睦

Mutsumi YOSHINO

仁科 健

Ken NISHINA

From the early developmental stage of SQC, various types of design parameter optimization have been undertaken through statistical techniques. The most common procedure was to select the optimal level according to the results of an experiment, in which a set of design parameters were allocated and tested in a multi level - based design of experiments. As parameter optimization procedures, a combination of response surface modeling and the operation research method has been employed to estimate the optimum value among parameter levels. Approximately ten years ago response surface methodology-based optimization support software made its first appearance, enabling simultaneous optimization of multidisciplinary responses. This evolved into robust optimization featuring simultaneous optimization of the mean and variability of the responses. In recent years, simulation-based design parameter optimization has been extensively conducted, replacing actual experiments. However, it has never been free of problems.

In this paper, methodologies relating to simulation-based robust optimization are reviewed. In addition, simulation data and actual experimental results are compared to highlight the peculiarities of the characteristic values derived from such simulations in order to present the current issues inherent in modern technologies.

**Key words** : Design parameter optimization, Multiobjective optimization, Robust optimization, Design of experiments, Response surface

## 1. はじめに

統計的品質管理（以下、SQC）手法を用いて設計パラメータを最適化することはSQCの黎明期から行われてきた。一般的な手順は多水準系実験計画に設計パラメータを割付けて実験を行い最適水準を選択する方法であるが、一部では応答曲面近似式と数理計画法を組み合わせて水準の間の最適値を推定する方法も使用されてきた。近年、応答曲面を用いた最適化ソフトの進歩により、複数の応答を対象とした同時最適化が可能となった。これを利用し、特性値の平均値と誤差の応答を対象にして同時最適化するロバスト最適化が行われるようになった。

本論文では、その方法論を解説するとともに、今日的な課題として、特性値をシミュレーションで求めた場合の特殊性について問題点を整理する。

## 2. 最適化技術の動向

現在、設計環境のComputer Aided Design（以下、CAD）化が急速に進行している。また、CADとComputer Aided Engineering（以下、CAE）や

Computer Aided Machining（CAM）とのリンクも進んでいる。CADとCAEがリンクすることによって、設計と同時に製・部品の有限要素解析用メッシュモデルが自動生成され即座に解析が実施される。言い替えば、強度不足や共振などの問題点をCAD画面上で即時チェックすることなどが一般的に行われている。有限要素解析ソフト（以下ソルバー）の機能も向上し、多くの問題が解けるようになってきている。

近年、このような設計環境のデジタルエンジニアリング化に呼応して、設計パラメータを実験計画に割付け解析する機能とソルバーを直接制御する機能の両方を兼ね備えた最適化支援エンジンと呼ばれるソフトが登場した。その結果、設計者が試行錯誤を繰り返さなくても、コンピュータが設計パラメータを変化させ、最適値を求めてくれるようになった。このように設計者が実験計画法等の知識を有していなくても、コンピュータ画面の裏側で各種SQC手法が駆使され、最適設計値を求めてくれる環境が構築されつつある。近年の最適化の特徴は、従来のSQC手法が扱った現物を用いた実験ではなくCAEを用いたシミュレーションによっ

\* (社)日本品質管理学会の了解を得て、「品質」Vol.34, No.3, pp.5-12より一部加筆して転載

て特性値を求め解析していることである。

尾田ら<sup>1)</sup>の報告によれば、1990年頃までは、最適化支援エンジンの最適化部は数理計画法や最適性規準法のみであり、数理計画法のルーチンが直接ソルバーを動かしながら最適点への収束が図られていた。つまり設計者の試行錯誤を肩代わりする程度のものであった。1995年頃になると、最適点探索にも効率が求められるようになった。川面ら<sup>2)</sup>は、設計パラメータを実験計画に割付け、特性値の応答を少ない解析回数で曲面関数に近似し、効率的に最適値に到達するという手法を紹介している。1994年から隔年で開催されている日本機械学会最適化シンポジウムでは2000年度の報告の約25%を応答曲面近似による最適化事例が占めていることから、現在では応答曲面から最適点を求める手法が一般的になっていると考えられる。1998年には、柏村・白鳥ら<sup>3)</sup>のロバスト最適化の研究が日本機械学会の論文賞を受賞している。このように近年ではロバスト最適化も行われるようになってきている。

最適化支援エンジンは1995年GEから独立したDr.Tongが作ったi-SIGHTが代表的である。これは主にメインフレーム上で動作するソフトで、年間ライセンス料も高額であるが、急速に普及しつつある。また、ソルバーを制御する機能は無いがパソコン上で動作する安価な最適化ソフトも普及している。

品質工学会では2000年のシンポジウムより「シミュレーションを用いたロバスト設計」と題したセッションを開設している。タグチメソッドもデジタルエンジニアリング時代に呼応して変化している。これまでタグチメソッドでは理想機能を直線モデルで表していた。一方、シミュレーションでは後述するように、誤差の大きさが変化するのは非線形特性でしかない。そこでこの問題点に対して、標準SN比という非線形モデルを持ち込んだのである。

### 3. 最適化問題の種類

最適化問題には、単一目的の最適化、多目的最適化、複合領域の最適化がある。それらをFig. 1に示す。

単一目的の最適化とは、系の応答を設計パラメータを変更しながら測定し、応答が目的の値になるように設計パラメータを最適化するという問題である。

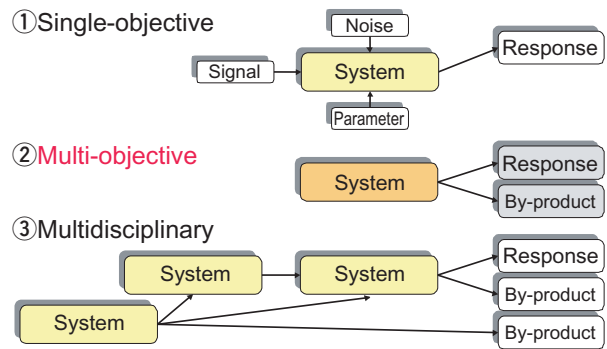


Fig. 1 Category of optimization

多目的最適化とは最適化したい系は一つであるが応答が複数ある場合である。応答を平均値と誤差にするとロバスト最適化問題になる。

複合領域の最適化とは巨大システムの最適化であり、ここではある系の応答が別の系の設計パラメータになるなど、問題が複雑になる。山川<sup>4)</sup>によれば米国機械学会（ASME）では、近年この話題が中心になっているということである。

## 4. 最適化の方法

### 4.1 事例の概要

事例として、RC（ラジコン）カーの設計パラメータの最適化を取り上げる。Table 1のように19のパラメータとそれらの値の幅が与えられている。特性値はサーキットを周回するラップタイムである。最小のラップタイムで周回できるようにするには、各パラメータをいくらに設定すればよいかという最適化問題である。

Table 1 Parameter list of RC-car

Chassis parameter	Abbr.	MIN	MAX	MEAN
Weight (kg)	SZ	1.2	1.8	1.5
Tire grip (G)	TG	1.28	1.92	1.6
Weight ratio of traction wheels	KH	0.8	1.2	1
Diameter of driving wheel (mm)	KC	56	84	70
Gear ratio	GR	2.0	6.0	4.0
Gear efficiency	GK	0.68	1.02	0.85
Rolling resistance coefficient	KT	0.0528	0.0792	0.066
Apparent weight of rotation (kg)	KS	0.18	0.27	0.225
Loading ration on braking wheel	SK	SK=KK		
Decrease of load on braking wheel	SU	0.56	0.84	0.7
Loading ratio on front wheel	ZK	ZK=1-KK		
Loading ratio on rear wheel	KK	0.4	0.6	0.5
Aerodynamic parameter	Abbr.	MIN	MAX	MEAN
Drag coefficient (CD)	CD	0.294	0.788	0.541
Front projection area (m <sup>2</sup> )	ZT	0.0191	0.0224	0.02075
Lift coefficient on braking wheel (Cl)	SD	SD=KD		
Lift coefficient on front wheel (Clf)	ZD	-0.032	0.186	0.077
Lift coefficient on rear wheel (Clr)	KD	0.082	0.84	0.461
Motor power	Abbr.	MIN	MAX	MEAN
Maximum speed (r/min)	MR	16500	23700	20100
Maximum torque (kg-cm)	MT	1.73	1.98	1.855

る。なお、シミュレータはインターネット<sup>9)</sup>から入手できる。

応答曲面の関数を作るには、各パラメータの1次効果(主効果)、2次効果、2因子交互作用の各係数と、定数項を求めなければならない。したがって必要な方程式の数すなわち独立な解析の回数 $N$ は、パラメータ数を $p$ とすると式(1)のようになる。

$$N = p + p + {}_p C_2 + 1 = (p+1)(p+2)/2 \quad (1)$$

$p=19$ の場合、必要な解析回数は210回にもなり非効率である。そこであらかじめ効果の大きいパラメータだけを選定する。このステップをスクリーニングと呼ぶ。 $p=5$ まで絞り込めれば、式(1)より21回の解析で済むことが分かる。

スクリーニングの後、応答曲面を求める。21回程度の解析数で各係数がきちんと分離して求められるような実験の割付けを行う必要がある。その割付けに沿ってラップタイムを求め、最適化ソフトに入力すれば応答曲面が計算される。応答曲面の極小値がラップタイム最小であるので、その時のパラメータが最適設計値となる。

最適値はこのように求められるが、実際の設計ステップとしては不十分である。最適値付近の応答曲面をみるとFig. 2のように傾斜が急な曲面や、Fig. 3のように比較的なだらかな曲面がある。傾斜が急な曲面は、最適値の付近でパラメータがばらつくと急激に特性値が悪化すると思われる。一方傾斜がなだらかな曲面はパラメータが少々ばらついても特性値は安定している。したがって傾斜がなだらかな場合のほうが好ましい。このようにパラメータの変動に対して特性値を安定させることも重要である。いわゆるロバスト化である。

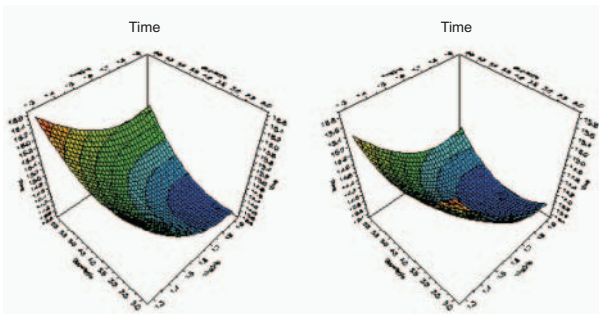


Fig. 2 Sharp response

Fig. 3 Flat response

次節以降、最適化に用いるSQC手法について手順を追って説明する。なお、本論文ではパソコンで動くMODDE(株インフォコム)という最適化ソフトを用いた。

#### 4.2 設計パラメータのスクリーニング

スクリーニングでは、各パラメータが特性値に効いているか否かだけが分かればいいので、1次の効果が分離できれば十分である。したがってレゾリューションⅢの2水準系実験計画が用いられる。このとき、凸形の効果のために有効なパラメータを見落とす可能性がある。念のためすべてのパラメータの中心点を加えておくことが多い。シミュレーションでは誤差が無いので中心点の繰り返しは1回で十分である。

本事例ではパラメータ間に関数関係があるものが存在するので、それらを除いた16パラメータの効果が測定対象となる。パラメータを定義して最適化ソフトでスクリーニングを指定すると、次のようにいくつかの実験計画が提案され、下線のものを推奨してくる。

Design	Recom.	Runs	Model
Frac Fac Res V		256	Interaction
D-Optimal		144	Interaction
<u>Frac Fac Res IV</u>	<u>First</u>	<u>32</u>	<u>Linear</u>
Plackett Burman	Second	20	Linear
D-Optimal		32	Linear

レゾリューションⅣの実験計画で、実験回数は中心点を加えて33回である。もっと小規模な実験も可能であるが、交絡が一番少ないものがデフォルトであるので、ここでは指示に従ってこの実験計画を使用する。

割付け表も最適化ソフトが作成するので、これをシミュレータにカット&ペーストしてラップタイムを計算し再び最適化ソフトに戻る。

次に、計算結果を元に16パラメータの中でどれが特性値に効いているかを調べる。現物実験では分散分析を用いたが、シミュレーションでは繰り返し誤差が発生せず群内変動が0になる点に注意が必要である。

基準化した各パラメータの値を $x_i$ 、モデルのあてはめの欠如を $\xi$ 、実験誤差を $\varepsilon$ とするとスクリーニング実験における特性値 $y$ は式(2)のように表される。

$$y = \sum \beta_i x_i + \xi + \varepsilon \quad (2)$$

$\beta_i$ はそれぞれのパラメータの効果である。シミュレーションでは $V(\varepsilon) = 0$ であるから $\varepsilon$ と $\beta_i$ の分散比は計算できず、原理的に分散分析はできない。

スクリーニングでは交互作用を考慮していないため、これによるあてはめの悪さが $\xi$ に入っている。したがって、 $\xi$ に対する $\beta_i$ の大きさを記述的に比較することは可能である。ただし、実験計画の規模により $\xi$ の大きさが変化することに注意が必要である。

一方、効果の小さいパラメータを誤差に埋もれるとみなし $\varepsilon$ にプーリングして分散分析を行うことはできない。なぜならば、シミュレーションではパラメータの値はすべて計算結果に反映されそれらの効果はどんなに小さくてもすべて観測可能でかつ偏りを持っているため、これらをプーリングした $\varepsilon$ は正規分布に従わないからである。したがってプーリングを行った時のF値で統計的有意性を判定することは避けるべきである。残念ながら有意性を判定するより所は現在のところ存在しない。

そこで、ここでは $\beta_i$ の絶対値をパレート図で比較し大きい方から5個採用することにする。Fig. 4よりTG, GR, MR, KC, KTを効果ありと見なす。念のため、凸形のために見落とししたパラメータが無いか調べておく。散布図を一つひとつ確認したところ、本事例では上記パラメータ以外に凸形は存在しなかった。

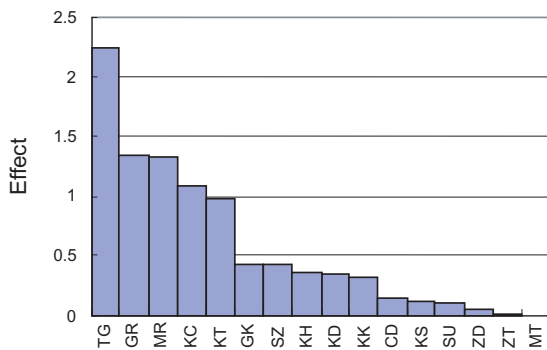


Fig. 4 Pareto chart of effects

### 4.3 応答曲面モデリング

効果が大きいと分かった5個のパラメータの値を振って応答曲面を求める。これら以外のパラメータは、値を振っても特性値への影響は小さいので中心値に固定する。応答曲面モデリング（以下RSM）を目的とした実験計画はレゾリューションVで、かつ2次の推定を行う必要があるので3水準系実験計画が用いられる。

最適化ソフトでRSMを指定すると、次のような実験計画が提案され、下線のものが推奨される。

Design	Recom.	Runs	Model
Full Fac (3 levels)		243	Quadratic
Box Benhken		40	Quadratic
CC (回転可能)		26	Quadratic
<u>CC (面内)</u>	<u>First</u>	<u>26</u>	<u>Quadratic</u>
D-Optimal	Second	26	Quadratic

中心点を加えて27回の実験からなる中心複合計画 (Centered Composite Design) である。

スクリーニング同様、割付け表を作成してくれるので、シミュレータにカット&ペーストしてラップタイムを計算し再び最適化ソフトに戻る。すると即座に応答曲面近似式を計算してくれる。

ここで本来なら回帰診断に基づいて変数選択を行い、不要な交互作用項や2次項を除外する必要がある。本論文では紙幅の都合でその説明は省く。

生成された応答曲面をFig. 5に示す。ロバスト最適化を行わない場合は、この応答曲面の極小値を与えるパラメータが最適値となる。

### 4.4 ロバスト最適化

ロバスト最適化は、特性値の偏差の統計量（レンジあるいは標準偏差）を求めて誤差とみなし、この応答と先に求めた特性値の応答とを併せて最適化を行うことで達成される。本来偶然であるべき誤差にモデルを仮定するのは間違いであると批判が出そうだが、求めているのはFig. 6に示すように特性値の応答曲面近似式にパラメータの変動した値を代入したときの偏差の応答であり、パラメータの関数として表現するのは間違いではない。

一方、特性値の平均値の応答と偏差の応答は、共通の関数から導出され独立ではない。そこで、Myers et al.<sup>9)</sup>が提案する“dual response modeling approach”の考え方にに基づき、多目的同時最適化を行う。

このステップでは、設計パラメータの関数で誤差を近似することがポイントとなる。赤木<sup>7)</sup>が紹介するように、応答曲面関数を偏微分して得られる勾配から1次近似するか、関数に乱数を代入して応答の偏差を求め、これを特性値の誤差と見なす方法が用いられる。

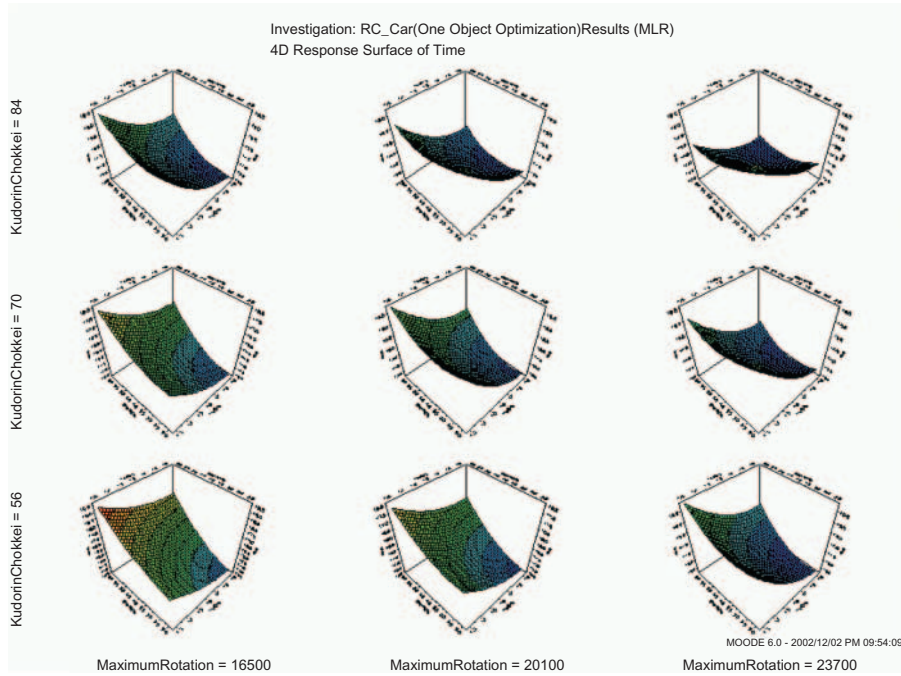


Fig. 5 Response surface of lap-time  
(axis Right: TG–Left: GR, array Horizontal: MR–Vertical: KC)

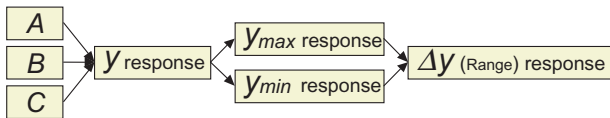


Fig. 6 Measurement of error response

これらは内乱の影響を評価する方法である。特性値が非線形となるパラメータのみに誤差の応答変化が現れることが特徴であり弱点でもある。外乱の影響を評価するときは、外乱を外側に割付けたときの応答の偏差を用いる。

タグチメソッドでは応答の偏差が十側に振れる最悪のパラメータセットをN1、一側に振れる最悪のパラメータセットをN2とする“誤差の調合”により実験回数を減らすことを奨励しているが、シミュレーションでは行ってはならない。なぜならば偏差が最大となる方向は応答曲面の最大傾斜方向であるが、それは一定方向ではないので常に同じパラメータセットで表すことができないからである。

本事例では、近似式にパラメータの上下限値を総当りで代入して特性値の変化幅を求め、その応答曲面を作る。パラメータが3個の場合の実験空間のイメージをFig. 7に示す。この方法のメリットは応答曲面の極値においても1次近似法のように偏差が0にならない

ことおよび乱数法より効率的であることだが、偏差が最大となる偏微分係数の最大方向の組合せを必ずしも含まないというデメリットもある。

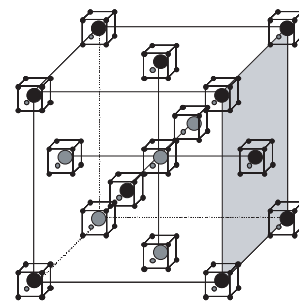


Fig. 7 Experiment points for error estimation  
( $p=3$  for example)

ここで各パラメータはとり得る値の1割程度はばらつくと仮定し、最適化ソフトの特性値予測機能を用いて計算させ偏差の統計量（レンジ）を求める。得られた応答曲面をFig. 8に示す。

最後に、二つの応答曲面関数を用いて多目的最適化を行う。多目的最適化とは、同時に複数の特性値を対象にして最適化することである。中山ら<sup>8)</sup>が示すように、まず各々の特性値のターゲット値と側面制約条件から好ましき度あるいは乖離度を求め、これにそれぞれ

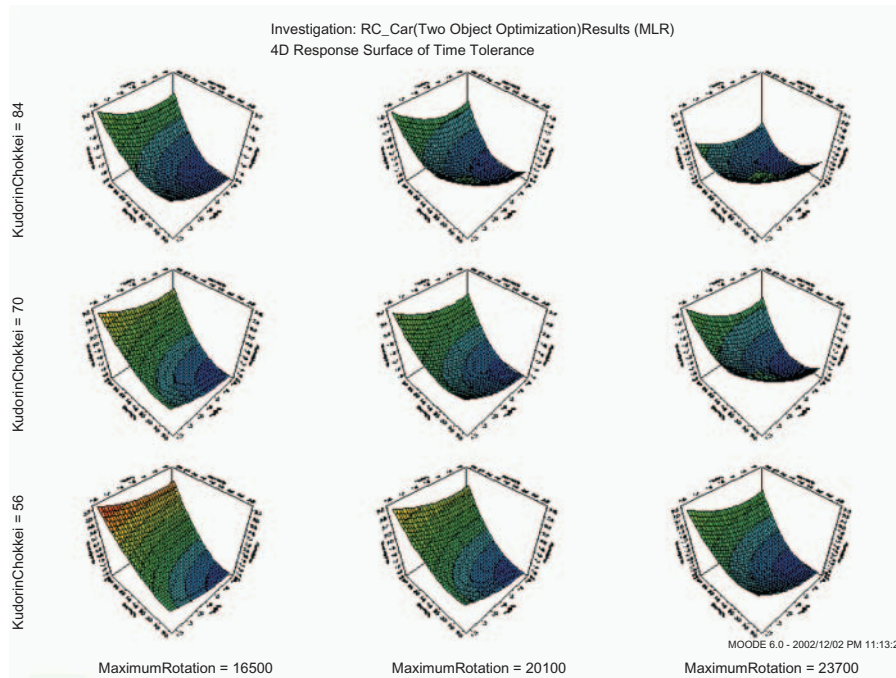


Fig. 8 Response surface of error  
(axis Right: TG–Left: GR, array Horizontal: MR–Vertical: KC)

れの特徴値のウェイトを乗じて合算したスカラー量を求めておく。次に単一目的の最適化手法を用いて、このスカラー量の最適値を探索する。

好ましさ度、乖離度の算出方法はソフトにより異なる。そこで、特徴値のターゲット値を50、側面制約(許容範囲)を±20として、算出方法の違いを比較する。

JMPおよびJUSE-STATWORKSはDerringer and Suich<sup>9)</sup>の方法を採用している。この方法はFig. 9のように側面制約条件範囲内の関数を定義しているが、側面制約を外れると、いくら外れても悪さ加減は同じと仮定し0と置いている。

MODDE<sup>10)</sup>は異なる方法を採用している。この方法はFig. 10のように側面制約条件範囲内では乖離度を

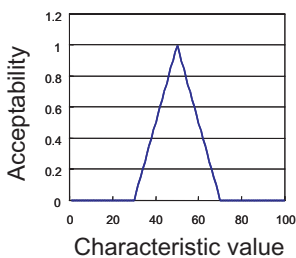


Fig. 9 Function of acceptability

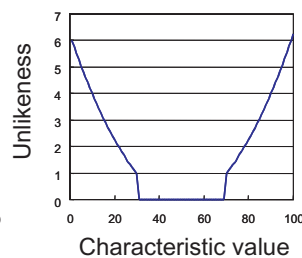


Fig. 10 Function of unlikeliness

0としているが、側面制約を外れたときは、外れ量の2乗で乖離度が増加する関数になっている。どちらを用いるにしてもユーザがその性質を理解していることが重要と思われる。

最適化ソフトで多目的最適化を指定すると、Fig. 11のような画面が現れる。本事例ではウェイトを両者とも1と仮定した。解析を指示すると数理計画法ルーチンが起動しFig. 11のハッチング部のようにパラメータの最適値を求めてくれる。

## 5. 最適化手法の今日的課題

### 5.1 課題の背景

最適化ソフトを用いることにより設計パラメータの最適化を簡単に行うことができるので、ほとんどの設計者はSQC手法の手順をブラックボックスのまま使用している。しかし、ある程度の知識がないと最適化ソフトの出力の意味やステップが理解できず、誤った解に到達するという問題がある。特に特徴値としてシミュレーションの結果を用いる場合は、多くの点が従来のSQC手法と異なるので問題は深刻である。前述したように、この技術は1995年頃から急速に普及してきたため解説が十分に行われていないなど、問題は利用者の責任ばかりともいえない。例えば柏森ら<sup>11)</sup>による解説では、2次の応答曲面近似式を求めるのに直交表が

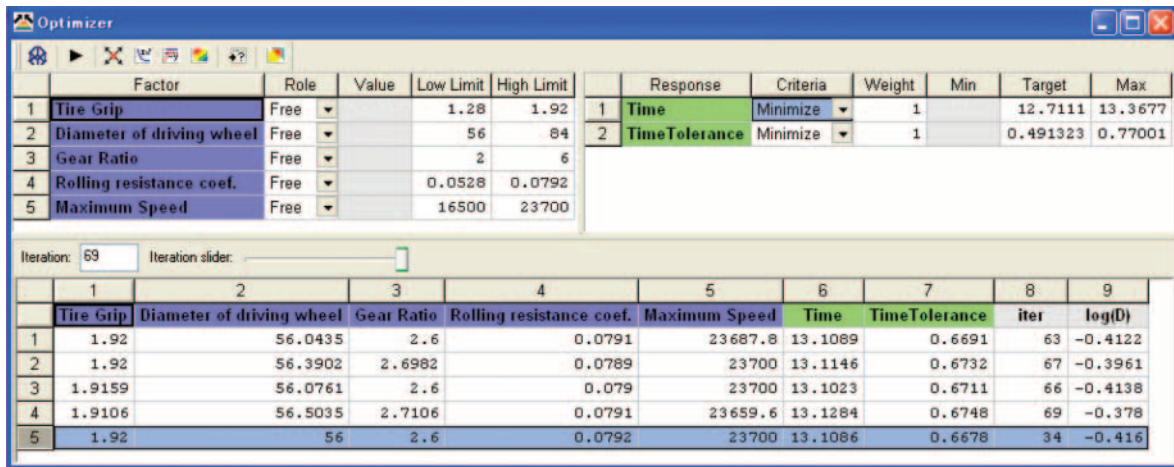


Fig. 11 Screen image of multi-objective optimization software

使用してあったり、分散分析を従来の方法で用いたりするなど普及する立場から見て問題が多い。

以下、ステップごとに主な例をあげて問題点を整理する。このほかにも問題点をあげれば枚挙にいとまがない。

### 5.2 スクリーニングのステップの問題点

シミュレーションを用いる場合は分散分析の意味が現物実験のときとは異なるので、そのことを知らなければスクリーニングの結果が違ってくる。シミュレーションでは、分散分析を従来どおりに用いると、多くの場合ほとんどのパラメータが有意になってしまう。

### 5.3 応答曲面モデリングのステップの問題点

応答曲面を作るにはそれに適した実験計画が必要であり、最適化ソフトはD-Optimalも含め多くの計画を提案してくれる。しかしこれらの計画の知識がなければ戸惑う。直交表はレゾリューションⅢの実験計画であるため不適切であるが、これまで慣れ親しんだ直交表を使用するケースも数多く見受けられる。

また、近似解の精度向上と称して、応答曲面の極値付近の実験点を追加しながら近似式を収束させた事例も見られるが、近似式の推定精度の点では問題がある。これも計画の最適性や回転可能性の知識がなければ見過ごす問題である。

### 5.4 最適化のステップの問題点

多目的最適化の際の重み付け方法が確立していない。特に応答間に内部従属関係がある場合は適切に重みの再配分を行わないと、一部の特性値を犠牲にした

解しか得られない。

ロバスト最適化に関しても、誤差の応答の求め方とともに、誤差の重みの考え方も検討が必要である。

### 5.5 シミュレーション特有の問題点

事例説明のところでは避けて通ったが、さらに根源的な問題もある。一般的に応答曲面近似式は最小二乗法によって求められる。最小二乗法には、測定値に偏りがなく、モデルにも近似の誤差がない（等分散である）という前提がある。

シミュレーションは誤差が出ない。正しく言えば測定点ごとに一方向のみに偏った大きさ一定の誤差を持っている。すなわち最小二乗法が適用できる前提が崩れており、最小二乗法そのものを適用すべきではないという議論がある。最小二乗に代わるペナルティ調整法が必要であると考えられる。

また等分散を仮定したにもかかわらず、ロバスト最適化を行う際は誤差の応答を求める。この行為は明らかに自己矛盾である。この対策としては最初から実験計画を飽和させておくか、応答の近似式を作るときに自由度が無くなるように高次の式を作ることである。4次5次の近似式を作った事例も見受けられるが、固有技術的には全く意味の無い対応である。

誤差のモデル化の点でも問題がある。現物の実験では、Fig. 6のA, B, C以外の制御できない因子や測定不可能である因子はモデルに取り込まなくても、1/fゆらぎのような確率的変動とともに、これらによる摂動を実験誤差として捉えることができた。しかしシミュレーションではこれらを全く評価できない。したがって、いわゆるノイズファクターをどのようにモデル

に取り込んでいくかは大きな課題である。このとき、応答、パラメータ、およびノイズファクター間の統計的因果モデルの構築が解決の糸口になると考える。

これらについては今後の研究成果が待たれる。

## 6. おわりに

デジタルエンジニアリング、特にCAEとSQCを融合した設計特性の最適化技術について述べた。利用されている手法はSQCの分野では従来から一般的に用いられてきたものである。しかしCAEを用いた最適化は次の点で現物実験の場合とは異なる。

- ① CAEでは、繰り返し誤差が発生しないので中心複合計画の中心点の繰り返しや実験の自由度は無意味になる。従来の統計ソフトを使用するときは注意を要する。

- ② ロバスト最適化が行われるが、誤差と称して扱っているのは実は応答の偏差であり真の誤差ではない。

- ③ 現物実験を利用したタグチメソッドと比較して、 $1/f$  ゆらぎなどの真の誤差に対するロバストネスは解析できない。すなわち応答を非線形に変化させることのできるパラメータしか評価できない。

以上述べたように、手法は急速に普及しているが解決すべき課題や啓蒙すべき問題点は山積している。これらをTable 2にまとめた。今後我々SQCの研究者がこれらの問題点に取り組み、正しい姿に発展させることが重要であると考えられる。

Table 2 Issues of optimization

解析のステップ	変数のスクリーニング		モデル化 (応答曲面法を中心に)		最適化		
	実験の計画	結果の解析	実験の計画	結果の解析	単一特性最適化	多特性最適化	複合領域最適化
統計学の分野では確立しているが、その他の分野や市販ソフトでは、必ずしも適用されていない事柄。	<ul style="list-style-type: none"> <li>直交表より効率的なブラケット・バルマンのような一部実施要因計画があるのに利用されないケースがある。</li> <li>スクリーニングを行わず、最初から大規模計画に割付けて応答曲面を導いているケースがある。</li> <li>割付けが適切でないソフトがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自由度の扱い方が旧来のままで、コンピュータ実験を解析しているという認識がないケースがある。</li> <li>分散分析を従来そのまま適用している。(統計的意味は同じではない。効果の小さいものをプリーングすれば可能だがそれらに偏りがあるため適用できない。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中心複合計画など交互作用項を求めのに適した計画を用いず、直交表を用いているケースがある。</li> <li>計画の別名関係に応じた交互作用の割付けを行っていないケースがある。</li> <li>水準幅が一定でないケースがある。</li> <li>すべて内側に割付けるケースがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次項と2次項を直交させるための、重心化と水準幅の調整を行っていないケースがある。</li> <li>変数選択を行わないケースがある。</li> <li>ロバスト最適化のための各実験点におけるパラメータ摂動量は共通にすべきであるが、共通にしていないケースがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数理計画法で最適点を求められるが、手動操作で最適点を捜すソフトがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>パラメータの摂動で誤差を作っているにもかかわらず2段階設計法を用いるケースがある。</li> <li>特性値とばらつきの2特性同時最適化をせず、統合的測度SN比を使用するケースがある。</li> <li>スカラー化しないケースがある。(右へ続く)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状ではシリーズで行なわれている。</li> <li>単なる多目的最適化を複合領域と呼ぶケースがある。</li> <li>多峰だと認識せずにの高次の応答曲面に同時最適化を適用するケースがある。</li> </ul>
統計学の分野でも意見が分かれる事柄。	<ul style="list-style-type: none"> <li>外乱も内側に割付けてよいか。(本来は内側と外側の交互作用が問題だが、内側に割付け一緒にスクリーニングしてよいか。)</li> <li>交絡はどの程度許容すべきか。</li> <li>事前に特定の因子間の交互作用があることが分かっているケースの計画はどうか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分散分析を用いない時の、有意な要因の抽出方法は何か。</li> <li>2水準系実験において非線形特性(2次以上の高次の特性)をどのように見出すか。(中心点の追加でよいか。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>シミュレーションでは同一の値しか得られない実験点の繰り返し。</li> <li>実験を飽和させることができないケースは自由度をどう扱うか。</li> <li>スクリーニングで除外された変数に代入する数値は一定でよいか、摂動させるべきか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多特性のケースにおいて変数選択は共通で行なうべきか、各々の目的関数ごとに行なうべきか。</li> <li>ロバスト最適化のための各実験点における偏差量はどの程度の幅で振ればよいか、ウエイトとの関連は。</li> <li>ばらつきを1次近似2次モーメント法で求める方法は適切か。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロバストの定義。ばらつきが最小となる点とするか、ばらつきも含めて側面制約を満足する点とするか。</li> <li>極値を収束させるために、仮の極値を新たな実験点として加えて再度モデル化する方法はどの程度問題か。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各特性の最適点からの好ましき度乖離度を単一尺度に統合してスカラー化する方法が数種あるが、どの方法が適切か。</li> <li>目的関数毎のウエイトの与え方の方法論が統一されていないが、どうあるべきか。</li> <li>トレードオフの特性の扱い方はどうあるべきか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最適化をシリーズで行なうとき、その順序について決める手法が統一されていない。(代表的なものはMITのDSM法。)</li> </ul>
未解決の事柄。	<ul style="list-style-type: none"> <li>過飽和計画の適用のしかたは？</li> <li>多峰性のある特性の解析における一様計画の適用のしかたは？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロバスト最適化に用いるべきパラメータがスクリーニングの過程で除外されることはないか？(すなわち、特性値を非線形とし誤差の応答を変化させているパラメータは、必ず特性値に影響を与えスクリーニングで有意になると考えてよいか。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外乱を扱う際の外側割付けの最適方法論は？(直交表がモンテカルロか。)</li> <li>ロバスト最適化のために各実験点の偏差を与えるが、持つべき偏差点の最適規模は？(総当たりより少)</li> <li>モンテカルロ法で行なうときの偏差点の最適規模は？(〇)</li> <li>多峰性のある特性の解析における一様計画の適用方法は？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各偏差点からばらつきを求める際、偏差点における特性値は近似へ代入して得られた値でよいか、再度CAEで解析して求めるべきか？</li> <li>ばらつきの応答曲面を用いるとき、どのような統計量を特性値とすべきか？</li> <li>モデルのあてはめの良さのベナルティは最小2乗でよいか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>応答曲面の精度を上げるために、実験点を追加していく時のルールは？(どこに追加すべきか。)</li> <li>以前の実験点を保存しながら実験点を追加できる計画はあるか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>目的関数間に内部従属関係があるケースの最適化方法は？</li> <li>ばらつきに与えるウエイトは？</li> <li>ばらつきの側面制約の大きさはどう与えるか？</li> <li>シミュレーションのパラメータにできない要因の影響はどう見積もるか？(因果モデルを利用できないか？)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>方法論が未確立。</li> </ul>



## 謝辞

本論文の執筆を進めるにあたり貴重なご意見を頂きましたJSQCの「シミュレーションとSQC拡大研究会」第1分科会の委員の皆様には謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 尾田十八(日本機械学会編)(1989):「構造材料の最適設計」, 技報堂出版, p.246.
- 2) 川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志 (2000):「最適化理論の基礎と応用」, コロナ社, pp.186-194.
- 3) 柏村孝義, 白鳥正樹, 于強 (1997):“統計的最適化手法におけるばらつきと構造信頼性の評価”, 日本機械学会論文集A編, 63. [610], pp.1348-1353.
- 4) 山川宏 (2000):“複合領域の最適設計の動向”, 日本機械学会第4回最適化シンポジウム2000特別講演 I
- 5) <http://member.nifty.ne.jp/QYR03001/calc/calctop.htm>
- 6) R.H. Myers, D.C. Montgomery(2002): 「Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiment 2nd edition」, John Wiley & Sons Inc., USA, pp.557-586.
- 7) 赤木新介(1991):「設計工学(下)」, コロナ社, p.112.
- 8) 中山弘隆, 谷野哲三(計測自動制御学会編)(1994): 「多目的計画法の理論と応用」, コロナ社, p.38.
- 9) G. Derringer, R. Suich (1980): “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, Journal of Quality Technology, 12. [4]. pp.214-219.
- 10) MODDEオンラインマニュアル
- 11) 柏森孝義, 白鳥正樹, 于強 (1998):「実験計画法による非線形問題の最適化」, 朝倉書店



## <著者>



吉野 睦  
(よしの むつみ)

生産技術開発部  
接合に関連する要素技術開発に従事



仁科 健  
(にしな けん)

名古屋工業大学教授 工学博士  
おもひ領域, 都市社会工学科, 産業戦略工学専攻, 社会工学専攻担当  
品質管理, 特にモノづくりのプロセスにおける品質情報解析に従事