

HOPEによる超設計とその一貫教育

Hyper Design by HOPE and Its Consistent Education

高橋 武則
(Takenori TAKAHASHI)

【要 約】

超構造関数とはある変数（超因子）に関する関数の係数部分が他の変数（設計因子）の関数となっている関数である。そして、超構造関数に基づく設計が超設計である。超設計のために高橋によって開発された設計技法はHOPEと呼ばれている。HOPEによる超設計の手続きにおいては、最初に超因子で関数構造を決定し、次に実験データに基づいて設計因子を用いて具体的な関数を推定する。その後それを用いて数値計画法による最適化で設計を行う。本研究では最初にこの方法の数理を明らかにする。そしてHOPEの手続きである設計から量産までのすべてのプロセスの一貫教育を行う方法について提案する。その教育では模擬実技を用いるが、それには現物のタイプと仮想のタイプがあることを示し、後者のアプローチについて詳細に議論する。

キーワード：超構造関数，超因子，超設計，模擬実技教育，仮想型実技教育

【Abstract】

The hyper structure function is the function in which the coefficient part of the function about a certain variable (hyper factor) becomes the function of other variables (design factors). The design based on the hyper structure function is a hyper design. The design methodology for the hyper design is developed by Takahashi, and it is called as HOPE. In the design procedure of HOPE, the structure of function is decided by the hyper factor at first, and then a concrete function is decided with a design factor based on experiment data. This paper clarifies the mathematical structure of this method first and then discusses its simulated coherent practice education which covers programs from design to mass production. There are an actual type education and a virtual type education in it. The latter is discussed precisely in this paper.

Keyword : hyper structure function, hyper factor, hyper design, simulated practice education, virtual simulated practice education

1. はじめに

本研究は設計の概念と数理と技法およびそれらの論理について議論する。概念とは思考基盤とその骨組みをなす数理を意味し、技法とは手順とそれを行うために必要な手法を意味する。これらを論じて設計から量産までを一貫して学ぶ教育について議論し新しい提案を行う。このために超構造関数と超変数（設計では超因子）を定義し、それに基づいて超設計を明らかにする。

超構造関数とは、多数の独立変数の中の注目した変数（超因子）により関数の本質的構造を構成し、その係数部分が他の因子（設計因子）の関数であるという構造（超構造）の関数である。そして、超設計（第2章で詳述）とは、超因子と設計因子で超構造関数を構成し、これを用いた最適化で設計を行うことである。

上記のことは言い換えると次の様になる。設計においては、機能（数学的には関数の基本構造）を決める上位の因子（最初に注目する変数）を超因子と呼び、その係数を決める下位の因子（他の変数）を設計因子と呼ぶ。すなわち、まず超因子で関数構造を決定し、次に設計因子で具体的な関数を決定するという2階層の構造の関数になっている。この場合、超因子と設計因子は一つの式の中に併存する。以下に超構造関数の簡単な例を示す。なお、本研究では超構造関数と超因子は大文字で表現し、通常の変数と因子は小文字で表現する。

$$\begin{aligned} y &= F(H; x) \\ &= b(x)H \\ &= (c_0 + c_1 x)H \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)は超変因子 H に関して原点比例式の構造があり、その傾きが H とは別の変数 x の1次式になっているという超構造関数である。紙ヘリコプター（図7）の例で説明すると、飛行時間は機体を解放する高さ H に比例するが、その傾きはヘリコプターの翼の長さ x の1次式で決まるという構造である。具体的な設計の場合において x は設計因子と呼ばれ、高さ H は入力因子と呼ばれかつ記号として M が用いられることが多い。

超因子 H にはその果たす役割に関して以下の4種類のものがある。与えられた役割に対応

して因子名および用いる変数記号（ローマ字の小文字）を示している。そして、直後の行には紙ヘリコプターを例として取り上げて、その場合における因子の具体的な例を示している。

- (1) 入力因子 M : 出力を制御するもの
 - * 高度, * 錘の重量
- (2) 攪乱因子 Z : 出力を攪乱するもの
 - * 紙の種類, * 印刷方向
- (3) 連合因子 U : 意思決定をするもの (= 設計主体)
 - * 班, ときには班を細分（最小単位は個人生産となる）
- (4) 描写因子 T : 座標となるもの（空間, 時間）
 - * 翼の翼面のたわみやしわ

いずれの超因子に関しても多因子および多水準で扱うことが可能である。これらの超因子の詳細に関しては以後の章で解説を行う。なお、描写因子の詳細に関しては別の機会に議論する。

超構造関数は合成関数とは異なるものである。合成関数とは、ある変数に関する関数においてその変数部分に他の変数の関数が代入された入れ子構造の式のことであり、以下その簡単な例を示す。

$$\begin{aligned} y &= f(t), t = g(w) \text{ のとき} \\ y &= f\{g(w)\} \\ &= \xi(w) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)より明らかのように、合成関数において変数 t は最終的には消え去るために t と w は併存しない。これに対して、超因子 H と設計因子 x は式中に併存し、両者は異なる役割を有している。

2. 質の時制とHOPE

本研究で議論するHOPEとは、超設計のための概念と技法と数理を体系的にまとめたものである。これは以下に示す英語表記の頭文字を取り出した略称である。

Hyper Optimization for Prospective Engineering 工学はもの作りのための学問であり、その中で質に焦点を合わせて経営的な観点からアプローチする分野が質経営（Quality Management, 以後QMと略記する）である。ここで扱う質

(Quality) には時制があり、質を過去・現在・未来の3時制に分けると設計は未来時制に属している。未来時制をさらに細かく分けると近未来・中未来・遠未来の3つに分けることができ、設計は近未来に属している。

2.1 質の時制のパラダイム・シフト：過去→未来

図1に示すように質には過去、現在、未来の3つの時制がある。QA (Quality Assurance: 品質保証) のパラダイムを歴史的に俯瞰すると、過去、現在の質に対するものから、未来に対するものへ移行していることが明らかである。

2.2 過去の質：検査によるQA

QAに関して誰でも直感的に理解できるのは検査によるQAである。製品が良品かどうかをきちんと検査を行ったうえで、検査に合格した製品のみを市場に出すならば、多数の製造された製品の中に不良品が混在していたとしても、それらを検査ではねればQAは可能である。検査はQAの基本であり、これには全数検査と抜取検査があるが、その詳細については紙面の都合で割愛する。

検査はQAの最期の砦として極めて重要なものではあるが、製品は既に作られているわけであるから、そこで扱っているのは過去の質である。検査は良品を選別しているだけで良品を作っているわけではないことに注意が必要である。

2.3 現在の質のQA：工程管理によるQA

製品を作っているのは工程（製造工程）である。したがって工程を管理すれば検査に頼らな

くともQAが可能である。すなわち、工程能力指数 (Cp, Cpk) が十分に高くかつ管理図による工程管理がなされていれば無検査でも品質は保証される。それでも、もし不良品が発生した場合には、その原因を調べて対策をとり再発防止をする。このことを繰り返せばやがてほとんど不良品は発生しなくなる。

工程を管理することでQAを行うことはできるが、作りやすさ、コストの安さ、本質的なばらつき（製造現場が最大限の努力をした場合に達成できるばらつき）の大きさは工程管理の良し悪しとは切り離して考えるべきもので、これは設計に起因する別の問題である。

例えば、現場がたいへんな努力をしても不良率が十分に小さくならない場合は、設計に起因する問題である。あるいは、不良率が十分に低くても、作りにくい、コストが高いという問題を抱えることが少なくない。これらの問題もまた設計に起因する問題である。質やコストに関する根源的な問題は設計にあり、現場がいくら努力しても設計の本質的なレベル以上に不良率の低減やコストダウンは不可能である。そこで次に設計について議論する。

2.4 未来の質：設計・開発・企画によるQA

設計という行為の段階ではまだ製品は存在していない。設計はこれから作る製品の条件を決めるので、ここでの質は未来の質である。未来という時制自体はさらに、近未来、中未来、遠未来の3つに分類する必要がある。

設計・開発・企画のアプローチには、図1における上段のNeeds型と、同じ図の下段のSeeds型の2通りのケースがある。

* Needs型 (要求先行型)：これは最初に顧客要求を把握し、それに基づいて企画を行い、それを作る技術を開発し、量産のために設計を行うアプローチである。すなわち、近未来が設計、中未来が開発、遠未来が企画になる。最初に顧客ニーズを把握したうえで企画し、企画したのものを作るために必要な技術を開発し、実際にどう作るかの条件を設計するというアプローチとなる。

* Seeds型 (技術先行型)：これは最初に開発

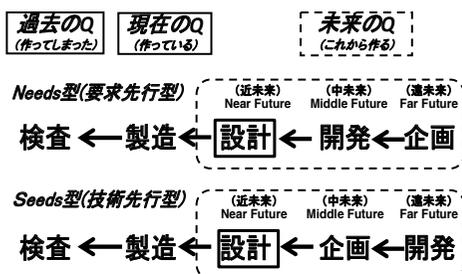


図1 質の時制 (矢印は取り組む順番)

で独自の技術を創り出し、技術ができればそれに基づいて何を作るのかを企画し、その後設計するというアプローチである。すなわち近未来が設計、中未来が企画、遠未来が開発になる。開発が先行し、技術的に可能になったものをベースにした企画が興こされ、その後設計が行われるというアプローチとなる。

上記のいずれの型の場合においても設計は近未来の質であり、設計因子を明らかにし各々の因子の水準を決定する。しかし、現状では、これを技術者の経験・勘・感覚によって主観的に進める場合が少なくない。科学的な手法に基づいた合理的な設計手法の確立が未来の質の課題である。なお、HOPEが対象とするのは未来時に位置する設計と企画であり、今回の報告では設計に焦点を合わせている。開発を対象としないのは、これは重要ではあるが固有技術に大きく依存するからである。なお、企画については別の機会に報告を予定している。

2.5 質の時制のパラダイム・シフトに伴うQMの課題

QMにおいては、過去の質の検査から現在の質の管理へ、そしてさらに未来の質の準備へとパラダイム・シフトが生じている。過去の質および現在の質のQMに関する手法は十分に整備されてきてはいるが、未来の質のQMに関する手法の整備は現在進行中である。未来の質の準備のためには科学的な手法、つまり実験で客観的なデータをとり、次にデータを用いてモデル(数式)を作成し、最後にモデルに基づいて設計因子の水準を合理的に決定するという客観的で合理的な設計手法の確立が課題である。

2.6 PDCA最適化による設計

設計は数理的な観点から見たら最適化である。しかし、工学と経営の総合的な立場(QM)に立って見たら設計は単なる数理としての最適化ではない。一つの製品に関する設計には顧客、メーカー(設計部門、製造部門、調達部門ほか)、サプライヤーほかの多種多様な関係者が絡む条件決定のために合意形成と捉えるのが自然である。このときPDCAサイクルに基づく

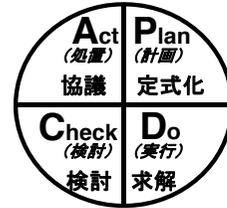


図2 管理のPDCAサイクルと設計のPDCAサイクル

合意形成を行うことが有効である。

PDCAサイクルとは管理(マネジメント)のサイクルとも呼ばれ、以下の4つのステップを確実にを行うことを意味する。

- ①計画(Plan)：計画を立てる
- ②実施(Do)：計画に沿って実施する。
- ③検討(Check)：実施の結果を
- ④処置(Act)：問題があれば処置をとる。

これはQM(Quality Management)において方針管理から日常管理まで広く管理に用いられるものである。本研究では、このPDCAサイクルを設計に適用する。設計とはもともと設計因子の水準を決定することであり、本研究では設計という行為を数理的には模型(式)に基づく最適化ととらえ、最適化そのものは定式化した上で解を求めるという求解という手続きである。

一方、本研究ではQMの立場から設計とは関係者の合意形成という考えに立つため、合理的な合意形成のアプローチが必要である。合意形成においてPDCAサイクルのアプローチを適用する。本研究ではこれを設計のPDCAサイクルと呼び、設計のPDCAサイクルを回して合意を形成する。

【注】設計のPDCAサイクルは求解のPDCAサイクルとも呼ぶ。設計の数理的な実体は最適化という形の求解である。したがって設計という行為と求解という行為は本質的に同値である。

設計のPDCAサイクルとは以下のステップを回して関係者の合意を形成することであり、合意が形成された場合にこのサイクルは終了する。そしてそのときの解がPDCA最適解である。その過程のいずれの段階においても式化をすれば最適解が得られるが、それはあくまでも数理的な解でありかつ合意が形成される過程で

の過渡的な解でしかない。その解で合意が形成できなければさらに設計のPDCAサイクルを回して次の解を求めることになる。

- (1) 定式化 (Plan) : 構築した数理モデルに基づいて制約条件 (クリアすることが必要な条件) と目的関数 (最大化, 最小化, 接近化 (目標値に最接近させること) のいずれか) を設定することである。
- (2) 求解 (Do) : 制約条件と目的関数を満足する最適解 (全因子の水準) を求めることである。数理的には最適解であるが, 次の検討で関係者の合意が得られなければPDCA最適解ではなく過渡解である。
- (3) 検討 (Check) : 関係者がそれぞれ自分および他の人の状況や立場を踏まえた上で, 納得 (事態を受け入れること) できるかどうかを吟味する。もし関係者全員が納得し, 現在の解で合意ができた場合にはそこで終了し, その時点の解がPDCA最適解となる。全員の納得が得られない場合には次の協議に移行する。
- (4) 協議 (Act) : 関係者が譲歩 (自分の主張を譲ること) と要求 (相手に譲歩を願い出ること) について協調的に話し合う。その結果として落ち着いた条件を整理し, 次の定式化 (再定式化) に移行する。そして, 具体的な定式化は次の定式化 (Plan) で数理的に行う。

なお, 設計のPDCAサイクルを回す上でシナリオは重要である。闇雲に定式化を行うのではなく, 戦略的なシナリオを作成したうえで定式化を行う。その際, シナリオは複数あることが望ましい。

科学的な根拠に基づくPDCAサイクルは数式に基づいて最適化を行い, その結果を関係者が一堂に会して検討し, 合意が得られなければ協調的に議論 (歩み寄り) を行って次の回の定式化に移行する。このようなPDCAサイクルのプロセスを経て合意された設計をPDCA最適解と呼ぶ。

2.7 超構造関数を用いた最適化としての超設計

本研究が扱う設計は単なる多変数関数を用い

た条件決定ではない。次章で述べる超構造関数を用いた最適化である。通常の関数のもとの条件決定を行う通常の設計と異なり, 超構造関数を用いた最適化で条件決定を行うためにこれを超設計と呼ぶ。

単なる多変数関数を用いた設計は, 超因子に基づいて構造化した関数である超構造関数を用いた設計 (超設計) の退化した形 (超因子のない設計) である。このため超設計は従来の設計を理論的に内包している。

2.8 HOPEという名称

本章の冒頭に示したようにHOPEとは英大文字による略記表現であるが, 本節でこの名称について解説する。英語表現においては, 何かに取り組む場合に, その取り組みの時間的な向き合い方に2つの方向がある。一つは過去である後ろを振り返る (後方視) アプローチで, もう一つは未来である前を見据える (前方視) アプローチである。前者をretrospective approachといい, 後者をprospective approachという。もの作りである工学においても, 過去を振り返るのはretrospective approachで検査や原因追究・再発防止などがそれにあたる。未来を見据えるのはprospective approachで設計・開発・企画はそれにあたる。この視点では工程管理は両者の中間に位置するが, 本研究の立場では工程管理の時点では作るべきものと作り方は既に決まっているという理由からretrospective approachの方に分類している。そして, 未来時制の質を扱う工学 (設計, 開発, 企画) のことを総称してprospective engineeringと呼ぶ。また, 本研究の設計における数理的な中核は, 超構造関数に基づく最適化であるためにこれをhyper optimizationと呼ぶ。

以上のことから提案する設計方法はその本質を英語で表現すると以下の様になる。

Hyper Optimization for Prospective Engineering
上記の英語表現の頭文字をとってHOPEと略称する。

3. 超設計HOPEの数理

本章では, 設計という観点で数式を捉えて様々な設計を体系的に整理する。図3に因子の

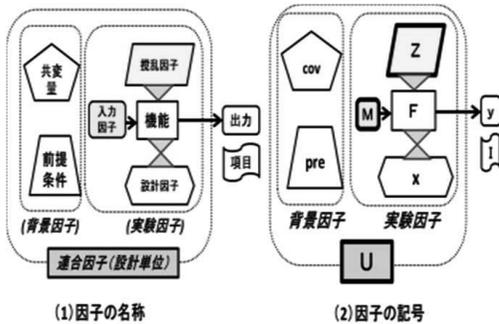


図3 因子の名称と数式における因子の表現記号

名称と数式表現の際に用いる因子の記号を示している。以下の記述において関数の具体例を示す場合には簡単のために多変数の1次式を用いるが、理論としては多変数の高次式を対象としている。

以後の関数表現において、大文字 (F, B, A, D, G) で表現する超構造関数にはその独立変数に大文字で表現する (T, U, Z, M): 一般的表現では H) 超因子が含まれている。これに対して、小文字 (f, b, a, d, g) で表現する通常の関数には超因子は含まれておらず、設計因子 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ のみで構成されている。大文字で表現する超構造関数においては多数の因子を ; (セミコロン) で区切り、超因子はこの前に大文字で示し、設計因子はこの後に小文字で示す。そして設計因子の数が多き場合には因子を列挙する表示をせずにベクトル記号で表示する。

超因子が含まれる関数は超構造関数で、超因子が含まれない関数は通常の関数である。超因子がある設計を超設計と呼び、超因子がない設計を通常設計と呼ぶ。通常設計は超因子のない場合なので、数理的には超設計を退化した形 (特殊形) である。したがって、超設計は通常設計を中に含んだ広い概念の設計である。

なお、数学的には超因子も設計因子も出力 (特性) という目的変数 (従属変数) に対して説明変数 (独立変数) としてすべて対等である。しかし、設計においては両者は因子としての役割がまったく異なる。そしてどれを超因子にし、どれを設計因子にするのかは設計の目的や設計者の置かれている立場や状況で異なる (流

動的である) ことに注意が必要である。

3.1 超因子がない場合とある場合

3.1.1 通常設計 (超因子なし)

通常設計は超因子がなく、設計因子の関数を用いて行われる設計である。これは数学的には以下に示す多変数関数である。

$$y = f(\mathbf{x}) \\ = c_0 + \sum_{i=1}^p c_i x_i \quad (3) \\ \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$$

これは製品の特性 (出力) y に関する関数で、この場合は入力因子がないため y の値は固定された場合を意味しており、本研究ではこれを固定出力と呼ぶ。ここでは話を簡単にするために関数は1次多項式にしているが、高度な設計では高次多項式を扱うことになる。なお、設計にあたっては、 y を最適化 (最大化, 最小化, 目標最接近化) するために数理計画法に基づいて定式化をした上で求解すればよい。設計因子が p 個ある多変数関数なので、いろいろな条件を用いた定式化のもとで解くことができる。すなわち、設計因子を多数持つことが設計の成功の解後を握っているわけである。

式 (3) が示す通常設計は設計因子のみで構成される関数であるため、その関数記号は小文字を用いている。

3.1.2 超構造の設計のための超構造関数 (超因子あり)

超構造関数とは、ある変数 H に関する関数における係数が他の多数の変数 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ の関数となっている構造の関数のことである。

(1) 超因子が量的因子の場合

H に関する1次関数の中の係数が p 個の変数 \mathbf{x} の1次多項式の場合には式 (4) のようになる。係数 c の添え字は最初に切片と傾きの区別 (切片は0, 傾きは1を使用) を示し、次に設計因子の番号を示している。

$$\begin{aligned}
 y &= F(H; \mathbf{x}) \\
 &= b_0(\mathbf{x}) + b_1(\mathbf{x})H \\
 &= (c_{00} + \sum_{i=1}^p c_{0i}x_i) \\
 &\quad + (c_{10} + \sum_{i=1}^p c_{1i}x_i)H
 \end{aligned} \tag{4}$$

このとき H を超因子と呼び、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ を設計因子と呼ぶ。超因子のうちの入力因子は使用者が使用時に用いる因子であり、他の超因子である攪乱因子と連合因子と設計因子および描写因子は設計者が設計時用いる因子である。製品の機能構造は超因子に関する構造で決まり、その具体的な係数は設計因子で決まる。設計そのものにおいては、まずは超因子に関する機能構造を決め（宣言し）、その上で設計因子を決め、最後に設計因子の水準によって係数を決める。つまり設計の観点では超因子が上位の因子（基本的構造を決める因子）で設計因子は下位の因子（具体的な状態を決める因子）となる。

(2) 超因子が質的因子の場合

上記の超因子 H の使い方としては入力因子 M として扱われることが少なくない。特性（出力） y は入力因子 M の値を入力（制御）すると望みの値を出力する（実現する）ことができるからである。

そして、多くの場合には入力因子の M は量的因子であるが、数理的にはこれを質的因子にしてもよい。そして、 H が質的な因子の場合にはダミー変数となり、これを水準の数 k より 1 つ少ない $(k-1)$ 用意すれば k 水準をダミー変数の組合せで切り替えることができる。

以下に H が質的因子でかつ 2 水準の場合を取り上げる。まず 2 水準の各々の関数を以下のように表現し、

$$\begin{aligned}
 {}^1y &= {}^1f(\mathbf{x}) \\
 {}^2y &= {}^2f(\mathbf{x})
 \end{aligned} \tag{5}$$

つぎに両者の平均と乖離（差の半分）を以下のように表現する。

$$\begin{aligned}
 a(\mathbf{x}) &= ({}^1y + {}^2y)/2 \\
 d(\mathbf{x}) &= ({}^1y - {}^2y)/2
 \end{aligned} \tag{6}$$

このときダミー変数 H を用いることにより、以下に示すように両者を一つの式にまとめることができる。この場合には平均パートと乖離パートは a と d で区別できるので添え字は因子の番号だけを示している。

$$\begin{aligned}
 y &= F(H; \mathbf{x}) \\
 &= a(\mathbf{x}) + d(\mathbf{x})H \\
 &= (a_0 + \sum_{i=1}^p a_i x_i) + (d_0 + \sum_{i=1}^p d_i x_i)H \\
 H &= 1, -1
 \end{aligned} \tag{7}$$

ダミー変数 H は 1 を代入した場合に第 1 水準となり、 -1 を代入した場合を第 2 水準となる。第 1 項の $a(\mathbf{x})$ で示したものは和の半分（平均）にあたるものでこれを平均パートと呼び、第 2 項の $d(\mathbf{x})$ で示したものは差の半分にあたるものでこれを乖離パートと呼ぶ。

質的因子（ダミー変数）である H を入力因子と考えるならば、これはハイブリッド自動車のモード切替のように考えればよい。すなわち H によってモードを選択的に切り替えるのである。一方、量的な場合には既に説明したように M と表記し、これは出力を連続的に変えられるので自動車のアクセルをイメージすればよい。すなわち M の水準によって出力の値を連続的に好きな値に切り替えるのである。

ところで、 H を質的因子である攪乱因子 Z と考えるならば、入力因子の場合とは異なる設計を行うことになる。例として紙ヘリコプターの材料である紙の種類を取り上げる。ここでは 2 種類（2 水準）の紙なので時間 y は Z によって出力の値を切り替えれば得られる。一方の紙ならば Z に 1 を入れれば得られ、他方の紙ならば Z に -1 を入れれば得られる。ところが、2 種類の紙の滞空時間の違い（乖離）を小さくしたいという場合には乖離パートの絶対値を小さくすればよい。理想は 0 にすることである。このように設計因子を決めるのが頑健設計である。

ここまでの説明は概要説明である。以後、詳細な説明を行う。なお、一部の説明は重複するが、それは重要な内容であることを意味している。

3.2 超設計 (基本的な超設計)

超設計とは、超構造関数に基づく設計である。すでに量的因子の場合は M を用いて説明し、質的因子の場合は Z を用いて説明をした。一般に、超因子 H が量的な場合には入力因子と呼んで変数記号として M を使用し、質的な場合には攪乱因子 (誤差因子) と呼んで変数記号として Z を使用することが多い。しかし、量的であっても攪乱因子として扱えるし、質的であっても入力因子として扱うことができるのである。重要な点を以下に示す。

- * 係数を用いて出力を制御すれば入力因子である。
- * 係数の絶対値を小さくして影響を減衰すれば攪乱因子である。

なお、超因子には連合因子や描写因子もあるが、これについては後述する。

1) 4種類の超因子

超因子には以下の4種類のものがある。

- ①入力因子 M : これを用いて出力を制御する。
- ②攪乱因子 Z : これの影響を減衰する。
- ③連合因子 U : これにより設計の主体が異なるので相互に協議する。
- ④描写因子 T : これを用いて結果の姿形を描写する。^{[56], [57]}

2) 添え字の表記ルール

設計のための模型 (数式) の表現において、係数の添え字は極めて重要な意味を持っている。それを見ることで、式の本質が読み取ることができなければならない。簡単な構造の設計ならば簡単な添え字のルールでよいが、超設計は体系的ではあるが少し複雑な表記ルールを必要としている。本研究では以下の表記ルールを用いる。

[右下]: 設計因子の次数

[右上]: 入力因子/描写因子の次数

※ べき指数と区別するために
() の中に表記する。

[左上]: 攪乱因子の水準

[左下]: 連合因子の水準

超設計のロジックでは複雑な構造を体系的に

表現することが不可欠である。そして超因子が複数混在することが少なくない。このために模型 (数式) における係数に関する添え字の表記ルールを上記のように定めている。

なお、多特性の場合の特性を示す場合には右下に表記し、最初に右括弧記号の) 付きで表記する。

3) 量的超因子として入力因子 M がある場合

固定出力 (特定の出力値) が保証されても、それは顧客にとって不本意な場合が存在する。より望ましい製品として、顧客の望み通りの出力が自由に得られるという機能を有するものがしばしば求められる。その場合には、出力を制御できる入力因子 M を用いてそのニーズを実現する。入力因子 M を持って出力 y を自由に制御できる場合を自由出力と呼ぶ。紙ヘリコプターの場合には高さや錘の重さなどがそれにあたる。この場合の設計に用いる関数は以下の様になる。

$$\begin{aligned} y &= F(M; \mathbf{x}) \\ &= b_0(\mathbf{x}) + b_1(\mathbf{x})M \\ &= (c_0^{(0)} + \sum_{i=1}^p c_i^{(0)} x_i) \\ &\quad + (c_0^{(1)} + \sum_{i=1}^p c_i^{(1)} x_i)M \end{aligned} \quad (8)$$

第1項は切片パートで、第2項は傾きパートである。ここでも話を簡単にするために入出力は1次式にし、設計因子の関数は1次多項式にしているが、高度な設計では後者の関数を高次多項式にすればよい。また、原点を通る原点比例式の場合には切片がないために第1項が落ちて第2項の傾きだけの簡単な式になる。この場合には M に関する式の係数 (パラメータ) である傾きだけが残って設計因子の関数になっているという簡単な構造になる。

$$\begin{aligned} y &= F(M; \mathbf{x}) \\ &= b_1(\mathbf{x})M \\ &= (c_0^{(1)} + \sum_{i=1}^p c_i^{(1)} x_i)M \end{aligned} \quad (9)$$

この具体的な例としては紙ヘリコプター (図7) において高度 (解放高度) を入力因子とした場合がある。機体が解放後直ぐに回転を始め

るならば時間は高度に比例するからである。

4) 質的超因子として攪乱因子 Z がある場合

一方複数のもの(材料, 工程条件, 製造環境, 使用法, 使用環境など)を対象にした設計では, 対象の全体に関してできれば同じ設計を適用したいという場合がある。しかし, 安易に同じ設計を複数の対象に統一的に適用すると対象の間で出力が異なる(乱れる)ため, このような因子のことを攪乱因子と呼ぶ。紙ヘリコプターの場合でいうと, 紙の種類がA紙でもB紙でも同じように飛ぶ機体にしたいたいような場合である。この場合の設計に用いる関数は以下の様になる。

$$\begin{aligned} y &= F(Z; \mathbf{x}) \\ &= a(\mathbf{x}) + d(\mathbf{x})Z \\ &= ({}^a c_0 + \sum_{i=1}^p {}^a c_i x_i) \\ &\quad + ({}^d c_0 + \sum_{i=1}^p {}^d c_i x_i)Z \\ Z &= 1, -1 \end{aligned} \quad (10)$$

第1項を平均パート(average part)と呼び, 第2項を乖離パート(divergent part)と呼ぶ。2種類の紙の場合にはダミー変数 Z で切り替える。多数の紙質の場合は紙の種類の数 k より1つ少ない($k-1$)のダミー変数を用意すればよい。ここでは話を簡単にするために紙は2種類とする。この場合の設計は, 乖離パートを0に近づけたもとで平均パートを最適化(最大化, 最小化, 目標最接近)することになる。実験計画法では乖離パートのことを効果と呼んでいる。

式(8)と式(10)はその本質的構造がまったく同じであることに注意されたい。すなわち, M を量的攪乱因子として扱うこともできるし, Z を質的入力因子として扱うこともできるのである。

5) 質的超因子として連合因子 U がある場合

例として紙ヘリコプター実験を取り上げると, もし班が複数あった場合には, 通常は班ごとにそれぞれの設計が行われる。固定出力の頑健設計の演習においては紙による違い(乖離)を減衰し, 平均を目標時間になるように設計す

る。それが成功すれば, 班ごとの設計(機体デザイン)が異なっても教育の目的は達成されたことになる。しかし, より高度な教育では全ての班で同じ設計(機体デザイン)を共有するようにという課題が与えられる。つまり複数の班が連合して同じ機体デザインの設計を行うわけである。この場合には, 以下に示すように班によって前提条件が異なることに注意が必要である。

- ①人数が異なる。
- ②レイアウトが異なる。
- ③ライン編成が異なる。
- ④使用する工具・治具が異なる。
- ⑤作業方法が異なる。
- ⑥部屋が異なる。
- ⑦同じ部屋の中でも場所が異なる。

上記の事情から, 班ごとに独立して設計を行った場合には, 全ての班の設計(機体デザイン)が同じになることはあり得ない。しかし, 実務においては全ての班の設計を揃えたいという要求が存在する。例を挙げれば, 同じ会社の複数の工場で生産する製品のデザインが異なることは避けるはずである。したがって, このような場合には各班が連合して設計することになる。すなわち第1班と第2班の設計(機体デザイン)を同じものにしようというわけである。

この場合の設計において用いられる超構造関数は以下の様になる。なお, 話を簡単にするために入力因子 M も攪乱因子 Z もなく, 連合因子のみがある場合を取り上げ, かつ班の数については2つの場合とする。

$$\begin{aligned} y &= F(U; \mathbf{x}) \\ &= c(\mathbf{x}) + s(\mathbf{x})U \\ &= ({}_c c_0 + \sum_{i=1}^p {}_c c_i x_i) \\ &\quad + ({}_s c_0 + \sum_{i=1}^p {}_s c_i x_i)U \\ U &= 1, -1 \end{aligned} \quad (11)$$

この例における連合因子, つまり班とは設計を行う組織のことで U (unit)というダミー変数を用いて式(11)を表現している。この第1項を共通パート(common part)と呼び, 第2項を個別パート(specific part)と呼ぶ。もし2つの班がともに2種類の紙を取り上げて頑健設計を

行う場合にはダミー変数 Z も用いて共通パートの中も個別パートの中もそこに平均パートと乖離パートを用意すればよい。その場合、ダミー変数 Z は攪乱因子で、ダミー変数 U は連合因子である。

多数の班の場合は、班の種類の数 k より1つ少ない個数 $(k-1)$ のダミー変数を用意すればよい。ここでは話を簡単にするために班は2つにしている。この場合の設計は、個別パートを0に近づけたもとの全体パートを最適化（最大化、最小化、接近化）することになる。

これは攪乱因子（紙質）の場合と似ており、式(11)の構造は式(10)の構造と数理的に同じである。しかしながら攪乱因子と連合因子は本質的に異なる。以下にその本質的な違いを示す。

- * 紙質の場合には、その種類が異なってもそれを用いて作る製造の前提条件が同じである。
- * 班の場合には、製造の前提条件（すでに述べた多種類の条件）が異なる。
- * 班は意思決定ができるが、紙は意思決定ができない。
- * 攪乱因子には質的ではなく量的な場合も多いが、連合因子は質的な場合しかあり得ない。

国語の文法の表現で言うならば、設計において主体（行為をなすもの）と客体（行為の対象になるもの）の違いである。

- * 設計の客体：紙（攪乱因子）に関して設計が行われる。
- * 設計の主体：班（連合因子）が設計を行う。なお、連合因子と攪乱因子は本質的に異なることに十分な注意が必要である。両者の本質的な違いは以下の様になる。
- * 攪乱因子：意思決定することはあり得ない。
- * 連合因子：意思決定をするものでなければならぬ。意志決定を放棄した場合には攪乱因子となる。なお、多くの場合には水準間で前提条件は異なっているのでこの点に注意が必要である。

ここで注意すべきことは意思決定を放棄した連合因子は攪乱因子となるという点である。紙へ

リコプターの場合を例にあげると、紙質や印刷方向は攪乱因子になり得るが連合因子にはなり得ない。これに対して班は連合因子になり得るとともに、もし班が意思決定を放棄したならば攪乱因子となるものである。同じ工場の複数のラインの場合、ラインという組織として意思決定権を有していれば連合因子であるが、決定された結果に基づいて指示通りに製造すると言うのであれば攪乱因子である。

マーケットセグメントの場合には、購入とは消費者の意思表示であるために原則として意思があると考えて連合因子として扱うことが望ましい。この場合にはマーケットセグメントの立場に立って考えてその意思決定を代行する形がとれば連合設計を行うことは可能である。ただし、プロダクトアウトの立場にたつて作り手の考えで作ったものを市場に投入するのであれば、これはマーケットセグメントの意思（実態は顧客ニーズ）を無視しているので攪乱因子となる。

ところで、前提条件が同じか異なるかは模型化に関して影響する。前提条件が同じならば一体型で模型化（一つの式で推定）するとよい。しかし前提条件が異なる場合には、それぞれごとに個別に模型化（個別模型化）したうえで、得られた各水準の模型（関数）を用いて改めて平均と乖離に関する関数を用意し、これらを用いて設計を行うことが原則である。

高度な設計においては、設計単位（設計組織単位）が複数存在する場合がある。典型的な例は、企業が複数の工場を持っており、いずれも工場も同じ製造条件で同じ出力の製品を作りたい場合である。工場が異なれば前提条件（気候、水質、社員の習慣や気質、サプライヤーほか）が異なる。この場合に、前提条件はそのまま認めたいという場合で工場間の差を減衰したいという場合である。

個々の工場ごとに超構造の関数を求めればこれまで述べた設計を行う事ができる。しかし、それらを合わせて、より高度な超設計を行うアプローチについて解説する。

6) 連合因子による満足度の設計

ここでは連合因子（これは設計単位でもあ

り、設計主体とも言う)を正確にかつ詳細に記述する。分かり易い場合として満足度に関する設計を例に取り上げる。設計主体(連合因子)が複数ある場合には、設計条件が決まった際には満足度に関して共通パートと個別パートに分けることができる。満足度のような場合には必ずしも連合設計においてロバストな解にする必要はない。容易にロバストな設計を行なうと全水準の相異(差)は小さいが共通(平均)は受け入れ難いという解になることが少ない。むしろある程度の相異が生じても水準ごとの値が受け入れられるという解の方が納得してもらえるので合意形成の可能性が高い。基本は連合メンバーの合意形成であるからである。すなわち水準間の差を許容して求解をすれば、個別の水準の値がよくなりその結果平均がよくなるという場合が少なくない。以上のことは、利益や不利益に関してもまったく同様である。

そして、連合設計は数理的には連結して解いた方がよい。重要な理由は水準(設計単位)が異なると前提条件が異なり、モデル化はそれぞれごとに行った方がよい。しかしながら、設計においては設計条件を共有するわけであるから同一の設計条件のもとで定式化して解く必要がある。このために2つのファイルを結合するのがポイントである。

連合設計としては、個別の水準とともに全体を同時に目配せすることが必要である。全体がどうなっているのか、自分はその中で現在の解の状況ではどの位置にいるのかを同時に把握理解して求解のPDCAサイクルを回す必要である。

このためには以下の情報が必要になる。

- *全体の平均, *全体の最大, *全体の最小
- *全体の範囲(=最大-最小)
- *上記の中で自分の位置
- *他の水準の要求に対する解のレベル
- *自分の水準の要求に対する解のレベル

これらの情報に関する式は、各水準の式を用いた計算により作成すればよい。そして、上記の情報を一堂に会して可視化された画面を見ながら協調的な話し合いをすることが必要である。なお、合成関数はすべて設計因子の関数なの

で、これらを最適化の画面に登場させて定式化や求解の結果を協議すればよい。

ところで、共通パートと個別パートはしばしばトレードオフの関係になるので、求解に関して以下の点に十分注意されたい。

*共通パートは平均⇒全体の中心的なレベル

*個別パートは水準間の違い⇒不公平さ
定式化で公平さに強くこだわって個別パートに厳しい制約条件を与えると得られた解のもとの平均パートは思わしくないものになる危険が高い。これは、不公平さを揃えるために全体が同じように不幸になるという解である。このような場合には、一歩下がって個別パートに許容できる範囲の緩めの制約条件を与えることで、差は少し大きめで出ても全体の平均が向上し、そのことでそれぞれの値が向上することが少なくない。

典型的なシナリオにはMinimax戦略とMaxmin戦略の2つがある。前者は満足度や利益などのメリットを扱う設計の場合に用いられ、最小のメリットを最大化するシナリオである。これに対して後者は不満足や不利益などのデメリットを扱う設計に用いられ、最大のデメリットを最小化するシナリオである。これらのシナリオを用いて合意形成をはかることが少なくない。

7) 描写因子の扱い方

描写因子は原因ではないことに注意が必要である。もし描写因子が質的ならば、これは本質的に標示因子と同じである。^{[56]. [57]}しかし質的として扱っている描写因子(標示因子)の多くは少し工夫をすれば量的描写因子になる。量的描写因子は関数として扱えるので入力因子に似ている。しかし、量的描写因子は姿形を描写する座標でしかない。設計にあたっては望む形状になるように係数を定式化する。たとえば形状をフラットにしたければ、定数項以外の係数を0に近づけたうえで定数項を最適化(最大化、最小化、目標最接近化)すればよい。なお、姿形が4次以上の高次式を必要とするような複雑な形状の場合には差分法か多頭法を用いればよい。^{[44]. [45]}

8) 超因子における2つの応用法

これまでの説明では入力因子を量的な場合で説明し、攪乱因子を質的な場合で説明した。しかし、入力因子が質的という場合があり、攪乱因子の中には本質的に量的なものが少なくない。これらの場合に対してどのように考え、どのように対応したら良いかについて解説する。

(1) 質的超因子として入力因子がある場合

直前の説明では、 Z を質的攪乱因子として扱った。しかし、超構造の関数はそのまま、この Z を質的入力因子と扱うことができる。この場合にはダミー変数 Z で入力を切り替えることになる。ただし、直前の例では2水準のためにいずれかの切り替えとなる。もし多段階の切り替えが必要な場合には水準を増やし、水準数 k より1つ少ない($k-1$)個のダミー変数を用意すればよい。なお、入力因子は量的なものであることが望ましいが、質的でも入力因子として扱うことができることに注意されたい。

(2) 量的超因子として攪乱因子がある場合

最初に入力因子として扱った M に関してこれを超構造の関数構造はそのまま、量的攪乱因子と扱うことができる。この場合には攪乱因子の減衰には以下に示す2つのアプローチが存在する。

① 頑健設計の場合

量的攪乱因子の傾きの絶対値を小さくし、中心化切片を最適化する。

② 改善の場合

量的攪乱因子そのもののばらつきを低減することでその影響を減衰することができる。これは受け入れ検査をしたり、設備導入などで量的攪乱因子のばらつきを小さくすることを意味する。なお、影響は傾きと中心化切片の両方があるのでこの場合の設計は乱数シミュレーションの実験を行って実行するのが良い。

結果として出力 y のばらつきを減衰することが目的である。頑健設計のように係数部分の絶対値を小さくすることも選択肢であるが、量的攪乱因子のばらつきそれ自体を低減することも選択肢であることに注意する。なお、質的攪乱因子の場合には、水準を限定するという選択肢もある。実際には原料・材料・部品などの受け入

れ先を限定したり、あるいは受け入れ検査の段階で条件に合致するものだけに限定する(受け入れる)という限定対応も選択肢の一つである。すなわち、設計は自由にかつ戦略的に考えることが重要である。

量的攪乱因子は量的に扱えば問題解決における選択肢が増える。量的攪乱因子自体のばらつきを自責の問題としてそのばらつきを低減することも重要な選択肢となるからである。

3.3 複合超設計(発展的な超設計)

発展した設計では超設計を複合した形で行う必要がある。これは構造を複合的に組合せることで可能になる。以下に代表的な3つの場合を示す。

1) 攪乱因子と入力因子の複合

入力因子と攪乱因子の2つがある場合である。実験のサイズが大きくなるが、高度な設計が可能になる。

$$\begin{aligned} y &= F(Z, M; \mathbf{x}) \\ &= A(M; \mathbf{x}) + D(M; \mathbf{x})Z \\ &= \{a_0(\mathbf{x}) + a_1(\mathbf{x})M\} \\ &\quad + \{d_0(\mathbf{x}) + d_1(\mathbf{x})M\}Z \end{aligned} \quad (12)$$

2) 連合因子と入力因子の複合

自由出力の設計を複数の班で共有したいという場合である。

$$\begin{aligned} y &= F(U, M; \mathbf{x}) \\ &= C(M; \mathbf{x}) + S(M; \mathbf{x})U \\ &= \{c_b(\mathbf{x}) + c_l(\mathbf{x})M\} \\ &\quad + \{s_b(\mathbf{x}) + s_l(\mathbf{x})M\}U \end{aligned} \quad (13)$$

3) 連合因子と攪乱因子の複合

頑健設計を複数の班で共有したいという場合である。

$$\begin{aligned} y &= F(U, Z; \mathbf{x}) \\ &= C(Z; \mathbf{x}) + S(Z; \mathbf{x})U \\ &= \{c_a(\mathbf{x}) + c_d(\mathbf{x})Z\} \\ &\quad + \{s_a(\mathbf{x}) + s_d(\mathbf{x})Z\}U \end{aligned} \quad (14)$$

3.4 多重複合超設計（高度に発展的な超設計）

高度に発展的な場合には攪乱因子と自由出力の複合を連合因子の複数の水準（設計単位：設計を行う組織単位）の間で行う場合である。

$$\begin{aligned}
 y &= F(\mathbf{H}; \mathbf{x}) \\
 &= F(U, Z, M; \mathbf{x}) \\
 &= C(Z, M; \mathbf{x}) + S(Z, M; \mathbf{x})U \\
 &= \{ {}_c A(M; \mathbf{x}) + {}_c D(M; \mathbf{x})Z \} \\
 &\quad + \{ {}_s A(M; \mathbf{x}) + {}_s D(M; \mathbf{x})Z \}U \quad (15) \\
 &= [\{ {}_c b_0(\mathbf{x}) + {}_c b_1(\mathbf{x})M \} \\
 &\quad + \{ {}_s b_0(\mathbf{x}) + {}_s b_1(\mathbf{x})M \} Z] \\
 &\quad + [\{ {}_c b_0(\mathbf{x}) + {}_c b_1(\mathbf{x})M \} \\
 &\quad + \{ {}_s b_0(\mathbf{x}) + {}_s b_1(\mathbf{x})M \} Z] U
 \end{aligned}$$

この場合の設計は、例えば個別パートの違いを減衰するのであれば、式（15）の後半部分の4つの係数（設計因子の関数）の絶対値を小さくしたうえで、前半の全体パートの中の4の係数を最適化する。このような高度な設計を行うためには多数の設計因子が必要である。

4. 質的外側因子に対する5つの対応

4.1 直積実験と超因子

直積実験は内側配置と外側配置の積の実験である。このために内側に存在するモデルの全ての項と外側に存在する全ての項の積を扱うことができる。変数選択をすれば有意な項によって全体のモデル化が可能になる。このとき、一方の側あるいは両方の側に積項（交互作用）があれば、両者の積として3次ないしは4次という高次の積項（交互作用）が扱えるために様々な設計が可能になる。

高次の積項（交互作用）があると次の様に関数構造を形成することができる。最初にある因子に注目してその因子を用いて多項式の関数構造を形成する。このとき多項式の各項の係数部分が残りの因子の関数となっている。このような構造の関数を超構造の関数と呼ぶ。最初に注目して多項式の関数構造を形成する変数は超変数であるが、設計の場合にはこれを超因子と呼び、係数の関数を形成するその他の変数を設計因子と呼ぶ。超因子も設計因子も複数のもので

構成される。

一般には外側配置の因子を超因子として用いることが多い。すなわち、量的外側因子は入力因子で、質的外側因子は攪乱因子として用いられている。しかし、逆転の発想で、内側の設計因子を超因子として扱うことも可能である。この場合、数学的には外側と内側は双対の関係（互いに裏返しの関係）になっている。さらに一層柔軟に考えれば、積項を持つ因子であればどれでも超因子とすることができる。すなわち、直積実験のデータによって得られる高次の積項のある式を基盤式と呼び、これの中の因子を自由に選んで超因子とする設計を柔軟設計^{[42], [43]}と呼ぶ。これを行うと、様々な設計の可能性を検討することができる。この柔軟設計の詳細については別の機会に報告を予定している。

4.2 4種類の外側因子

外側因子は直積実験の外側に配置されるものである。内側因子の全てとの組合せが実施されるので、内側の構造に対して全ての交互作用を吟味することができる。この外側因子はこれまで入力因子の場合を除いてほとんどの場合質的因子として扱われている。しかし、量的外側因子は量的入力因子と同様に量的に扱うことができる。つまり量的な攪乱因子は量的に扱うことができるのである。そして、入力因子はこれまで量的因子しか扱われてこなかったが、これは質的因子でも構わない。入力により出力が変わればそれは入力因子として扱うことができ、量的であっても質的であっても構わないのである。

これまで質的外側因子は攪乱因子として扱われ、その影響を減衰するという頑健設計が行われてきた。しかし、本来質的外側因子の扱いは多様に考えることができる。そして、その扱い方により最適解は大きく異なる。以下に代表的なものを示すとともに、その扱い方に応じて質的外側因子の呼び方を変えている。

- ①攪乱因子：因子の水準間の乖離を減衰した上で最適化する。
- ②標示因子：因子の水準ごとに最適化する。
- ③戦略因子：考え方により様々な最適化ができる。
- ④連合因子：交渉に基づいて様々な最適化が

できる。

以上のことを整理するには「設計とは柔軟な対応である」ということに注目しなければならない。設計は数理的には最適化であるが、最適化は定式化がなされた後に行われる数値処理である。したがって、定式化は置かれている状況に対する対応の考え方で大きく変わり、定式化が変われば最適解が変わる。そこで、質的外側因子に対する5つの対応について次節で明らかにする。

4.3 外側因子における5つの対応

本節では高度な設計について議論する。外側因子が質的でその水準が多い場合には5つの対応が存在する。以下に示す質的外側因子に対する5つの対応を試して関係者の合意が得られるものを選択することが望ましい。

- (1) 統一対応：全水準で同じ最適条件を採用する
- (2) 個別対応：各水準で個別の最適条件を全て採用する
- (3) 限定対応：各水準で個別の最適条件のうちの一部の水準だけを採用する
- (4) 層別対応：全水準を層別して層ごとに統一対応する
- (5) 混合対応：全水準を層別してそれぞれの層において(1)、(2)、(3)のうちのふさわしいものを別々に選択する

【注】混合対応において全ての層で(1)を選択した場合が層別対応である。

頑健設計ではしばしば攪乱因子の調合が行われるが、安易に調合したもとの統一対応においてはリスクが伴うことに注意が必要である。この場合には調合戻しを行って確認をすべきである。すなわち解(設計)が定まった後に、攪乱因子の本来の水準に関する必要な組合せのもとで実験を行って実現の確認をすべきである。このことにより、複数の攪乱因子の間の交互作用はどうなっているのかが明らかになる。

質的外側因子に関して統一対応が常にベストであるとは限らない。統一対応の微妙な点は、全体の乖離を優先すると「乖離を減衰すると平

均のレベルが悪化する」(頑健のパラドックス、乖離と平均のトレードオフ)ということがしばしば発生する。その際に、ある程度の乖離は許容する(範囲=最大-最小を少し緩めたレベルの制約にする)ことによって平均のレベルがより良くなることが少なくない。ただし、乖離が大きくなるために個別の水準の間には特性に関して設計主体間の格差(相異)が多少開くことになる。しかし、それぞれの水準の特性は乖離をできるだけ減衰した場合の結果に比べていずれも好ましくなる事が多い。ここで重要なことは、いずれが良いかではなく、幾つかの可能性を試した上で関係者の合意形成を行って最終的な解(合意解)を決定することである。

上記の分類のうちで、質的攪乱因子の水準が2の場合には層別対応と混合対応はあり得ない。質的攪乱因子の水準が3の場合には層別対応はあり得るが混合対応はあり得ない。質的攪乱因子の水準が4以上の場合には5種類のすべての場合が対象となる。

以上の5つの対応を踏まえて質的外側因子の分類について議論する。質的外側因子はその扱い方で4つに分類することができる。

- ①攪乱因子：統一対応を行う。
- ②標示因子：個別対応を行う。

※これは描写因子が質的の場合に相当する。

- ③戦略因子：統一、個別、限定の3つの対応の中から選択する。

※これには3つの対応を自由に選べるという特徴がある。本来は制御できない攪乱因子や標示因子であるものに対して制御を可能にする手当をすることによって自由に選択することができる。もともと設計因子であるものも戦略因子として用いることができる。

- ④連合因子：関係者が話し合って5つの対応の中から選択する。

多くの場合には①の攪乱因子として扱って頑健設計が行われる。しかし②の標示因子としての検討を行ない、その上で③の戦略因子として扱って3つの対応を検討して戦略的に望ましいものを選択するとい設計が望ましい。そして、主体(設計の意思決定を行う組織や人など)が多

い場合には残りの④を加えた上で層別を工夫して5つの対応を取り上げて交渉を通して関係者が合意できるものを選択するのがよい。教育の場合には班の数が多い場合であり、実務では工場の数が多いとか、サプライヤーの数が多いという場合である。

これまでの設計は原則として設計単位が単一の場合であった。しかし、これからの設計は設計単位が増える。したがって連合設計の重要さはますます高まる。

4.4 複数の選択枝の中からの最適解の選択

設計で重要なことは複数の選択枝の中から最適解を選択することである。複数の選択枝はそれぞれのシナリオのもとでの最適解である。シナリオを複数持つことで広い視野に立って合理的な最適解が選択できる。

- * 主立った選択枝を吟味した上で意思決定をする。
- * 意思決定に当たっては関係者で合意を形成する。

なお、選択枝は少な過ぎてもまずいが、多過ぎても混乱の原因になるので問題である。選択枝の数は3～5程度が望ましい。ただし、格子点解と実験点解は安全カードであって選択枝ではない。なお、格子点解と実験点解については次節の[8]で論じている。

4.5 HOPEの9ステップ

本節では技法としてのHOPEの持つ9ステップについて具体的に解説する。なお、説明の中でとりあげる各種の図表の実例は第7章の中に登場する。

[1] 設計目的の明示

そもそも何のために何を設計するのかを明示する。基本的な内容はWhat（何がどうなって欲しいのか）とWhy（それは何故、何のためなのか）の2つである。

これは設計の成否を判断するものであり、かつ設計の戦略・戦術の変更の際に譲ってはいけない（ぶれてはいけない）基盤でもある。新しい何かができただけで成功とは言えないし、以前よりは良くなったというだけでも成功と言うことはできない。設計の成功とは、

設計目的が達成されたことを意味する。そして設計の多くはその過程で紆余曲折が避けられないが、本質的な部分を変えてはならない。逆に言えば、本質を変えない限り、むしろ柔軟に必要な変更は受け入れることが重要である。

[2] 特性要因図の作成（図13参照）

最も重要で基本的な情報を示している特性要因図がなければ何も始まらない。この段階では重要な要因がカバーされていることが必要条件である。それが抜けているとその後に大きな痛みを受ける。

[3] 因子役割図の作成（図15参照）

特性要因図は因果関係を体系的に整理して示すものであるため必要ではあるが、これがあっただけでは設計はできない。製品の設計においては以下の整理を行って因子役割図を作成し、可視化する必要がある。

〈実験因子〉

* 機能を決める。

- ・何を出力 y とするのか
- ・入力因子 M は何か

※入力がない場合は、本来は入力にすることができものが前提条件として固定されていると考えれば良い

- ・設計因子 (x_1, \dots, x_p) は何か
- ・攪乱因子 Z は取り上げるのか

- * 連合因子 U （工場、市場ほか）はあるのか。
- ・多くの設計では連合因子はない（一つである）。
- ・連合因子の水準間における前提条件の違いに十分な注意が必要である。

〈背景因子〉

前提条件と共変量を明示する。

* 前提条件は因子と水準を明示する。

* 共変量は明らかにしてそのデータを記録する。

- ・共変量は実験を混乱させるので要注意である。できることながら然るべき対策を講じて共変量の影響を遮断するか回避することが望ましい。
- ・データがとってあれば事後の対応として統計的な処理をすることができる。

* 特に悩ましい共変量は攪乱因子にするとよ

い。

[4] 構造模型表の作成

解析も設計も模型（数式）が根幹をなすものである。模型を決定するためには模型を作ることのできるデータが必要で、そのためにはそれを推定することが可能な実験を計画しなければならない。例えば、2次項が予想される因子は3水準以上が必要となる。このためには構造模型を明らかにする必要がある。これを簡潔かつシステムティックに表現するには表形式による表現である構造模型表が適している。

設計は真理の追究ではないために必要な範囲における局所的な近似式で十分であり、むしろ多くの実験では時間・費用・手数から実験回数に上限があることがほとんどである。したがって十分なレベルの寄与率が得られるのであれば、小さな寄与率の因子は落として誤差に回して実験サイズの縮小をはかるのは重要な選択肢である。ただし、次の点は重要である。因子が結果に与える影響の大きさを◎（大）○（中）△（小）×（無）に分類した上で

*◎と○は必ず取り上げる。

*×は取り上げない。

*△はできれば（実験数に余裕があれば）取り上げるが、余裕がなければ取り上げない。

※△は取り上げれば安全であるし知見が得られる。しかし、寄与率が低いならば外す勇気も要る。つまり、工学における設計の立場では割り切りも必要なのである。実験を行わなければ何も始まらないので、時には実験の実施を可能にするためにマイナーな因子を取り上げずに実験サイズを縮小することも検討することが重要である。

[5] 実験の計画

スクリーニング実験を行って因子を絞り、その後の本実験で詳細な模型を作るのが望ましいことは言うまでもない。しかし、現実はこのような2ステップのアプローチは困難であることが多い。この点で推奨されるのは最適計画である。これは必要な模型を確保するために効率的な計画である。しかし、そのベースは構造模型の準備である。好い加減な構造模型の予想の場

合には安全性を考えると最適計画よりも直交実験の方が望ましい。そして直交実験の場合において実験数を抑えるにはResolution IV（主効果と交互作用は交絡しない）を用いる。中でもL12は任意の2列の交互作用が残りの9列に均等配分されるという近似的Resolution IVであるため割付が簡単でかつ最大11因子までが扱えるので初心者に向いている。

実験効率の観点からは直積実験は必ずしも望ましいものではない。外側と内側の全ての交互作用を把握できる計画のために、もし交互作用が

・ないかほとんどない

・あるが無視してもクリティカルな問題はな

い

ならば、その分は実験サイズ縮小した方がよい。このとき最適計画が有用になる。

[6] 実験の実施

実験中は実験因子は計画通りかどうか確認することが重要である。例えば実験計画では温度が50度となっても、実際の実験時には50度ではないことが多い。このとき、実際の値が記録されていれば対応ができる。むしろ、正しい値（実際に実施された値）を用いなければならない。

また、実験因子以外のデータもきちんととっておく。重要な（影響の大きい）共変量のデータは必ずとっておく。前提条件は実験中にその条件（値）が変化していないことを確認する。

[7] 解析（模型化）

模型化は原則として変数選択に基づいて行う。選択指標としてはいろいろなものがあるが、汎用性と分かりやすさから寄与率（自由度調整済み寄与率）を用いるとよい。また、選択後の結果を分散分析表で確認する。可能であれば、分散分析表の右端に寄与率を示しておくともよい。因子が統計的に効いる（有意である）ということとその寄与率がどれくらいかについては後者の方が圧倒的に情報量が多いからである。

なお、係数については以下の3種類を把握する事が重要である。

* 中心化変換を施したもとの偏回帰係数

* 偏回帰係数

*標準偏回帰係数

直交実験でない場合には必ずトレランス（その逆数のVIFでもよい）を確認する。トレランスとはその変数が独自に持っている情報の割合のことで、他の全ての変数に対して独立ならば1.0となる。したがって、トレランスが0.5を割るものがあった場合には要注意で、0.1を割るものがあった場合にはクリティカルであると判断しなければならない。なお、式の意味解釈では偏回帰係数が分かり易いが、もし実験が最適計画でトレランスが十分に高くない場合には中心化変換を施したもとの偏回帰係数を用いる。また、因子の出力に対する影響の強さについては単位に依存しない標準偏回帰係数で判断すべきである。

[8] 設計（最適化）

設計目的に基づいてシナリオを複数用意する。各々のシナリオごとに求解し、複数の解の候補を用意する。

- * 妥当解（内挿解）
- * 格子点解（質的水準解）
- * 安全解（実験点解）
- * 挑戦解（外挿解）

多くの場合の設計では妥当解だけしか求めている。しかし、可能であれば上記の4種類の解をもつことが重要である。ただし、上記のものは解の種類が4つあることを意味しているのであって、これらの4種類の解はシナリオごとに求めることができる。したがって、合計するとかなりの数の解の候補が得られることになるので、最終的に実現確認をするのはそれらの中から幾つかをピックアップすることになる。その場合でも、全体の中から妥当解、格子点解、安全解、挑戦解の4種類の解を準備しておくことと確実な成果に結び付くのでこれを推奨したい。

なお、解には準解があることに注意する。定式化において多数の制約条件を用意すると全ての制約条件を満たすことが困難になる。このとき準解は実務的に重要なものである。準解とは制約条件のうちで幾つかを満たしていない設計条件のことであるが、それが画面に表示された時点で受け入れが可能と判断されたものである。それは数学的には解ではないが、解に準ずるものとして選択肢に加えることができる。ち

なみに、次の定式化で制約条件を緩めれば、そのもとの解となるのである。ただし、制約条件を緩めたことで、改めて求解するとよりよい解が得られる可能性がある。準解についてはそのまま採用せずに譲歩した制約条件のもとの解き直しをして解を求めることが望ましい。

[9] 実現の確認

設計はあくまでも仮説でしかない。すなわち実験で得られたデータを用いて推定した統計的モデルに基づく解である。したがって、これが本当に実現するののかの吟味は不可欠である。ただし、すべての候補を試す必要はない。妥当解が実現すれば格子点解や実験点解の実現確認は行う必要はない。しかし、挑戦解を試した方がよい。もし妥当解が実現しなければ格子点解を試すことになる。これが実現した場合には実験点解の実現確認は必要ない。そして妥当解が実現に失敗した場合には挑戦解の成功はほとんど望めない。実験の費用が高い・時間がかかる・危険を伴うなどの場合には実現確認に関してはそのための実施戦略を組んで実施すべきである。

5. 模擬実技を用いた模擬体験教育

5.1 模擬体験教育

模擬体験教育は本物体験で得る本質的な内容と同質のものを学べる教育である。模擬実技(simulated practice)は本質的に似せたものであることが不可欠であり、表面的・表層的に似たものを用いて騙す疑似実技(suspected practice)とは決定的に異なる。模擬体験教育の最も重要なことは、本質を分かり易く、安全で、短時間に安く実施でき、それを通して本質を体験的に理解することである。

模擬体験教育に用いる体験学習の教材には現物模擬実技によるものと仮想模擬実技によるものがある。本研究は両者の共通点と各々が固有に持っている特徴を明らかにしQM(Quality Management: 質経営)のための仮想演習の要件について議論する。

著者が開発した各種の模擬体験教育は「ゲーム(Game)」を基盤としている。人間の子供や動物の子供が遊び(Game)を通して様々なことを学ぶことが原型である。それは本物の体験ではないが、遊びという模擬体験を通して学ぶと

いう点で教育の一形態である。しかし、世の中には楽しむこと自体が目的の遊びも少なくない。面白い、スリルがある、わくわくするということが重要な評価となるタイプのものである。それは疑似体験の範疇に属するものである。

本稿では、製造現場での活動をモデル化して設計した「模擬的なもの作り」を通して、班対抗で品質向上を競い合う形を「ゲーム(Game)」と呼ぶ。そして、ゲームには以下の2つの面が存在する。

(1) 模擬体験としてのゲーム

それを通して目的の知識・技術の習得や実践的な教訓が得られる場合で、「役に立つか?」という評価がベースになる。この場合には目的とする「ホンモノ」があり、ゲームはその代用品(モデル, よくできたニセモノ)であるため、用具やルールはホンモノとの本質的な対応が問われる。

(2) 遊戯・遊びとしてのゲーム

それ自体が目的で、「ホンモノ」は意識せず、用具やルールはそれを楽しくするものであればよいため、「面白いか?」という評価がベースになる。

前者には「対象」(ホンモノ)があり、これを抽象化(本質を抽出し抹消を捨象)したものが「モデル(模型)」である。そして、それを通して目的の知識・技術の習得や役に立つ教訓が得られることが重要である。

後者はそれ自体が目的のため、ゲームとして面白ければよい。この場合でも、結果としてある種の知識・技術や役に立つ教訓が得られることは少なくない。しかし、それはあくまでも結果としてであり、期待したものが得られるかどうかは別であるし、誰が何をどのようにして得るのかは予想できないために不確定性を帯びてしまう。

体験学習では、自発(自ら進んで取り組む)と自律(自分達でやり方を決定する)が重要である。これらによる取り組みがなされ、納得(理解+受容)でき、創造的提案のためには、よいモデルを用意し、守るべきルールは必要最小限にして自由度をなるべく確保し、評価は客観的なもので、その評価基準や評価方法を事前に示しておく。

表1は講義(受動的な理解)から実技(能動的な実践)までの各種の教育の構造と特徴を示している。近年は講義主体の教育から実技演習主体の教育への移行が進んでいる。

表1 講義(受動的な理解)から実技(能動的な実践)へ

形態⇒	学習		意思表示		行動	
要素	知識	◎		○		○
	考案	x		◎		◎
	実践	x		x		★
キーワード	受動	能動	主張	応答	闊論	実績
行動	講義	読書	レポート	プレゼン	ケルリ	実技

※ ☆極めて有効, ◎有効, ○扱い可能, ○扱い不可

5.2 模擬実技の開発の流れ

伝統的なチップ実験は人の手によるデータ発生のために計算演習の枠を越えることができない。そこで著者が開発してきた実技演習型教育は以下の流れとなっている。

- (1) 維持+改善を伴うデータ発生が可能な教育
 - ①コイン射撃
- (2) 改善+開発の活動を伴うデータ発生が可能な教育
 - ②紙グライダー
- (3) 開発・設計+維持を伴うデータ発生が可能な教育
 - ③複葉型紙ヘリコプター

③複葉型紙ヘリコプター

※複葉型紙ヘリコプターは多変数(10~20変数)を扱うために著者が独自に開発したものである。

それぞれの特徴は表2に示すとおりである

*【維持】一端作業標準を決めたならそれを順守する。

*【改善】結果全体(分布)が悪ければ標準

表2 活動と教育プログラムの特徴

プログラム活動	コイン	グライダー	ヘリコプター
維持	★	△	○
改善	○	★	△
開発	△	○	★
コンテスト	ピリヤード	フライト	ロバスト

※ ★極めて有効, ○有効, △扱うことは可能

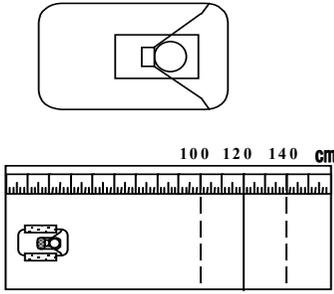


図4 コイン射撃

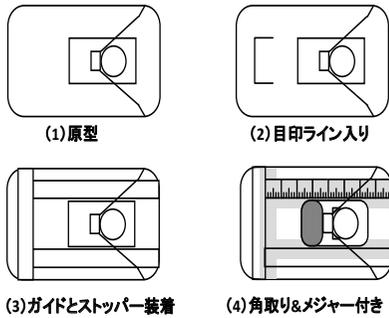


図5 射撃機の改善による進化

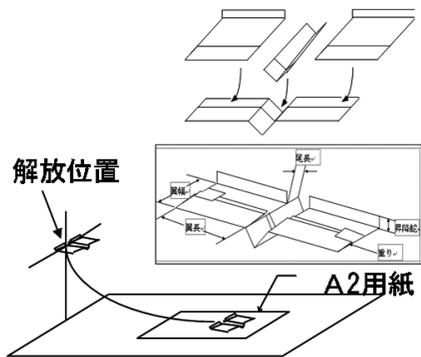


図6 部品組立て型紙グライダ

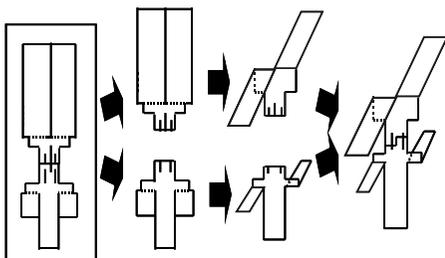


図7 複葉型紙ヘリコプター



図8 ビリヤード射撃 (撞球型射撃)

を変更する。

- *【開発】新しい製品を創造しその品質を保証する。
- *【コンテスト】多量の製品を実際に作成することで多量のデータを発生させて競争評価する。

漫然とした教育では効果が期待できない。教育の目的を明確にして設計したプログラムを実施することが重要である。特に最後に工夫したコンテスト（競技）を用意することが意欲向上と理解力の向上に欠かせない。

- *ビリヤード：弾丸コインを撃って標的コインにぶつけ、標的コインを目標範囲に止める。

- *フライト：目標着陸領域に着陸させる。

- *ロバスト：複数の紙質の差（乖離）を減衰する。

科学とは自然界のメカニズムを明らかにした知識 (knowledge) であり、技術とは科学を活用する知恵 (know-how) である。前者は主に理学の守備範囲であり、後者は主に工学の守備範囲である。決定的な違いは、前者では本質を捉えた厳密な式が重要であるということに対して、後者では限られた範囲での近似式でも十分であるということである。つまり前者では「論理的に正しいか」が問われるのに対して後者では「顧客にとって有用か」が問われる。したがって、最終的な評価は顧客要求を実現したかどうかである。これをコンテストで確認することは工学教育では不可欠である。

5.3 固有技術・管理技術とModelを用いた実技演習

5.3.1 固有技術・管理技術

近年もの作りは大きく変化をしている。これを量の観点（「たくさん作ろう」）と質の観点（「よいものを作ろう」）から整理する。工学はものを作る学問であり、ものを作る上で最低限必要な学問は固有技術の学問である。しかしながら、もの作りが企業の行う経営活動になると、良いもの（Quality）を、安く（Cost）、早く（Delivery）、安全に（Safety）作るが必要になる。このために、必要となるのが管理技術で、これは合理的なもの作りのためのアプローチ全体を意味し、その目指すところは、QCDS E（5つのキーワードの英語頭文字）の合理的な実現である。

Quality（品質）、Cost（費用）、Delivery（納期）、Safety（安全）、Environment（環境）

管理技術には様々なものがあるが、その中でQを中核とした取り組みがQM（質経営）である。

5.3.2 Modelとは抽象化されたもの

管理技術としてのQMを学ぶ上で、何らかの固有技術を用いないと具体的に学ぶことは不可能である。しかし、難しい固有技術を用いるとそれ自体を学ぶことがたいへんでとても管理技術まで手が回らない。ここで重要となるのがModelという考え方である。

Modelとは日本語で模型・雛形と呼ばれ、本物の持っている本質だけを取り出した「よくできたニセモノ」のことであり、難しい言葉で言うと、本物を抽象化したもののことである。

抽象 = 抽出 + 捨象

抽出：本質を取り出すこと

捨象：枝葉末節なものを捨て去ること
つまり抽象化されたものとは、本物を分かり易くしたり、取り扱い易くしたりするために用意された便利で有用な道具（教材）でのことである。

6. 模擬実技の要点

6.1 設計から量産までの一貫教育

Quality Management（以下QM）は質を中核

とした経営のことである。これを総合的に理解するためには設計から量産までを一貫して学ぶことが重要である。しかし、本物の製造現場でこれを短期間に行うことは現実的には不可能である。このために模擬実技による教育が開発され、既に多くの成果をあげてきている。しかし設計から量産までの全体を一貫して扱うには模擬実技でも数日の日程を要するため、その実施は可能ではあるが容易ではない。時間的な制約と準備・運営の観点から新たなアプローチが求められている。本研究は模擬実技の要点を整理し、これを短時間で分かり易く実施できる教材（SAS Japanの岡田が開発した飛球シミュレーター）とそれを用いた仮想模擬実技教育を紹介する。

6.2 質の保証を妨げる3種類のばらつきとその対応

QMの本質を統計的に表現すると、①ばらつきを低減して②平均を望ましい状態にすることである。本章では3種類のばらつきの統計数理的な整理と、それらへの対応の仕方及びそれを体験的に学ぶための教育における現物模擬実技と仮想模擬実技について議論する。

6.2.1 3種類の攪乱要素と複合攪乱

ばらつきとは同一の対象に関して繰り返しとったデータが一定でないことである。その原因を考える場合に重要なことは結果のばらつきとの関係である。何かばらついても、それが結果に影響しなければそのばらつきは問題とはならない。原因が結果（特性、出力）にばらつきをもたらすことを本研究では攪乱する（乱す）と表現する。これには以下の3種類のものがある。

- (1) 誤差攪乱（変量） ε ：出力（特性）につく誤差
- (2) 内的攪乱（変量） λ ：設計因子につく誤差
- (3) 外的攪乱（母数） Z ：水準の変化による関数の乖離

※実験時は制御するので λ はなしで Z は母数とする。

以後はそれぞれを略して誤差、内乱、外乱と呼

ぶ、誤差は出力（結果系）につく攪乱で、これはいわゆる「誤差」のことである。これに対して内乱も誤差ではあるが要因（原因系）につく誤差なので内乱と呼び区別する。内乱は変数（制御因子）の乱れであるが最終的には出力を乱すことになる。外乱はその水準によって生じる関数の乖離である。もともとは変数であっても実験時は数個の水準として質的に扱う。なお、外乱に関してはそれが量的な因子の場合には量的に扱うことができるが、これについては別の機会に報告予定している。

以上のことを数理的に表したものが以下の式である。

$$\begin{aligned} y &= F(Z; \mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda}) + \varepsilon \\ &= a(\mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda}) + d(\mathbf{x} + \boldsymbol{\lambda})Z + \varepsilon \\ \mathbf{x} &= (x_1, \dots, x_p), \boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_p) \quad (16) \\ Z &= 1, -1 \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \end{aligned}$$

式(16)は3種類の攪乱（ ε , λ , Z ）が複合している一般形の表現である。これは以下の4つのタイプに分類できる。

- ① ε と λ なし：多くのシミュレーションに対応する。
- ② ε のみの単一の攪乱：通常の統計モデルである。
- ③ 2種類の複合攪乱：さらに2つの場合に分かれる。
[A] Z と ε の場合：多くの場合の頑健設計
[B] λ と ε の場合：特殊な場合の頑健設計
- ④ 3種類の複合攪乱（ ε , λ , Z ）：高度な頑健設計

※実験では λ はなく Z にはばらつきはないと仮定することが多いが、現実の実験では π が存在することが少なくない。

6.2.2 自責・他責の観点から見た3種類の攪乱要素

ばらつきを自責と他責で分けると以下のようになる。

誤差：他責のものが多くが自責のものもある。

※自責のものは改善の対象である。

内乱：自責のものが多くが他責のものもある。

※他責のものは攪乱因子にできる。

外乱：原則は他責だが見方により自責もある。

※原則として攪乱因子にする。

自責のものは改善を行うのが原則だが、時には攪乱因子にしてその影響を減衰することも選択肢である。他責の場合には攪乱因子にしてその影響を減衰することが原則であるが、設備導入などにより制御することでその影響を遮断する（経営的判断を伴うが）ことも選択肢である。

1) 誤差 ε の対応：実験誤差と工程能力に大きな影響

誤差は実験時には実験誤差に、量産時には工程能力に影響するので、その低減は重要である。このためヒストグラムの形状^{[78],[80]}に基づいた層別により原因を把握して然るべき手を打つことが不可欠である。

〈1〉離れ小島型（異常値）：これは見てすぐにわかる。

異常値には際だった特徴があるため原因が分かりやすく、原因に手を打ってこれを再発防止する。

〈2〉二山型（二層への層別）：これも見て直ぐにわかる。

二つの層が混合しているのでそれを突き止める。二層を一層にすることでばらつきが低減できる。

〈3〉尖塔型（二層への層別）：尖度を調べるとわかる。これは尖度が3より大きい場合である。

平均がほぼ同じでばらつきの異なる二層が混合している。層別に成功したら、二層になる原因を調べてばらつきの小さい方の層に統一する。

〈4〉扁平型（多層への層別）：尖度を調べるとわかる。これは尖度が3より小さい場合である。

平均の異なる複数の層が混在している。層別に成功したら、複数の層になる原因を調べて望ましい層に統一すればばらつきは小さくなる。

改善（問題解決）による誤差の低減は全ての基本である。

2) 内乱 λ への対応

- [a] 改善：ばらつきを低減することが本来の姿である。
*内乱は「自責」で自助努力することが原則である。
- [b] 非線形の応用：傾きの緩やかな場所を採用する。
*試みると良いが必ずしもうまくいくわけではない。
- [c] 攪乱因子への転化：本来は内乱であるものを外乱として外側に割付る。
*ただし減衰してくれる設計因子が不可欠である。

管理された実験では λ はないと仮定できる。しかし量産時は λ が無視できないため、 λ が特性に与える影響（制御因子に誤差を付与）を乱数シミュレーションで把握し、それを踏まえて設計すべきである。その結果が思わしくなければ λ のばらつきを上記の方法で低減すべきである。

3) 外乱 Z への対応

外乱に対する基本的対応は頑健設計で、これは式 (16) の 2 行目の第 2 項の乖離パートにお

ける係数部分の絶対値を小さくし、平均パートを最適化することである。なお、 Z は量的因子であっても質的因子として扱うことが多いが、これは量的因子として扱うべきものである。

6.3 模擬実技の要点とそのアプローチ

6.3.1 QMの3つの活動と工程の6つのステージ

模擬実技においては、どの教材（モデル）を用いる場合でも、QMには維持・改善・開発の3つの活動があり、工程には6つのステージがあることを認識し、各々の内容を体験に基づいて確実に理解することが重要である。

1) QMの3つの活動

QMには、以下に示すタイプの異なる3種類の活動（紙ヘリコプターの実技を例に記述）があることを理解する。

- ①維持：所与のデザインを所与の方法で確実に生産
 - ②改善：所与のデザインをより良い方法に変えて生産
 - ③開発：新たなデザインを新たな方法で生産
- 特に①と②で混乱が生じやすい。①は方法を変

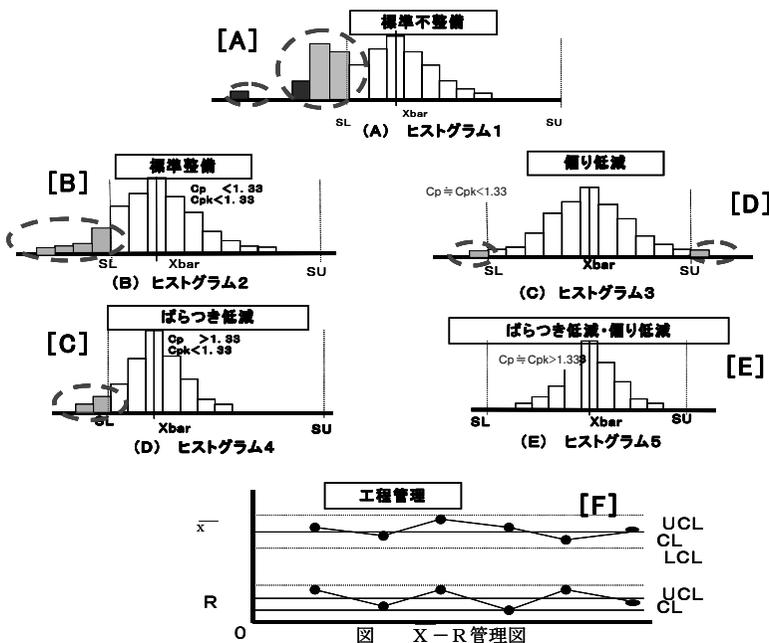


図9 工程の6つのステージ (全体構造, 世界地図)

えるなど言っているのに②は方法を変えろと言っているからである。一見矛盾する両者を理解するには図9に示す工程の進化の6つのステージの理解が不可欠である。

2) 工程の進化の6ステージ（新製品立ち上がりから工程管理まで）

ある製品が新製品として登場し、その後量産され、最終的に生産中止に至るまでの生涯を整理すると、それは図9に示すように6つのステージで構成される。

- [A] 新製品立ち上がり（不良率はかなり大きく、廃棄率も無視できない）
作業標準が不整備のため正規分布にはほど遠い。
- [B] ばらつき大・偏り大（不良率は大きい）
整備が進み正規分布には近づいたがばらつきも偏りもかなり大きい。
- [C] ばらつき小・偏り大（不良率は中or小程度である）
ばらつきは抑えたが偏りが抑え切れていない。
- [D] ばらつき大・偏り小（不良率は中or程度である）
偏りは抑えたがばらつきが抑え切れていない。
- [E] ばらつき小・偏り小（不良はほとんど無しである）
ばらつきと偏りの両方を十分小さく抑えている。
- [F] 工程管理
状態を監視し問題があれば原因追求・再発防止をし[E]の状態を管理図を用いて維持する。

以上の6つのステージを実技体験で理解することが品質保証のための必須事項である。

6.3.2 ばらつきの低減（例は紙ヘリコプターの場合）

前項の6つのステージのうちでばらつきの低減は難度が高い。異常値を再発防止したりや二山を見つけて一山にするとばらつきは大きく低減する。しかし、ヒストグラムの形状が一山の場合に、そのばらつきを低減することは容易で

はない。これを学ぶために、次に示す「分散の加法性」を逆手に取った「ばらつきの分解」のアプローチが有効である。

結果がばらつくのは原因がばらつくからである。ばらつく原因には3種類のもの存在し、それらの構造は式(17)のようになる。

$$\sigma_T^2 = \sigma_P^2 + \sigma_0^2 + \sigma_M^2 \quad (17)$$

[全体のばらつき] = [生産のばらつき]
+ [操作のばらつき] + [計測のばらつき]

- ①実験1（分散 V_1 ）：n機を製作し各々を飛行して計時
- ②実験2（分散 V_2 ）：1機をn回飛行して計時
- ③実験3（分散 V_3 ）：VTR（1機1飛行を録画）をn回計時

上記の3種類の実験で得たデータを用いて、分散は以下の様に推定し寄与率の大きいものを低減する。

$$V_P = V_1 - V_2, \quad V_0 = V_2 - V_3, \quad V_M = V_3$$

6.3.3 偏りの低減

ばらつきの低減後は偏りの低減である。これは回帰分析の活用で達成できる。設計因子と特性（出力）の関係を回帰式として把握して平均を目標に近づけることで偏りが低減できる。その際、設計因子の数を増やして重回帰式を用いて確実・柔軟に偏りを低減することが望ましい。

6.3.4 QMの導入教育における4つの基本的な課題

QMの導入教育での4つの基本的な課題を図10に示す。

- [1] 計測管理：信頼のおけるデータをとる。
- [2] 問題解決（改善）：層別比較で問題を解決する。
- [3] ばらつき低減：ばらつきを低減し管理する。
- [4] 平均制御：平均を制御して目標値に合わせる。

6.3.5 一貫したものづくり全体の構造

教育では以下の5つの内容を一貫して一気に

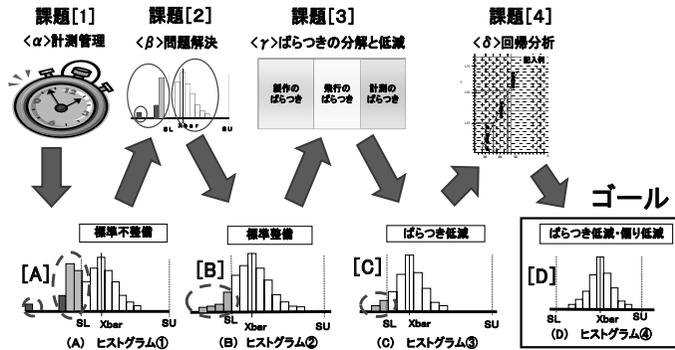


図10 QM教育の標準的なプログラム（例は紙ヘリコプターの場合）

行うことが望ましいが、現実としては複数回に分けて実施することが多い。

- ①準備：各種のばらつき低減
- ②設計のための実験：通常実験，直積実験
- ③設計のための解析：重回帰分析（ダミー変数を含む）
- ④設計：通常設計，頑健設計，連合設計
- ⑤量産：攪乱（誤差，内乱，外乱）と管理図による管理

教育の主題は②～⑤の一貫した体験による理解である。しかし模擬実技でこれに成功するためには①の準備不可欠である。ばらつき大きいと実験誤差が大きくて解析に失敗しその結果設計も失敗する。仮に運良く解析と設計が何とかなかったとしても量産では必ず失敗する。

7. 仮想実技用の飛球シミュレーターとその活用

6.2.1項の①～④の4つのタイプの攪乱や6.3.5項の①～⑤の内容を短時間で分かり易く体験的に理解するためには仮想模擬実技教育が有効である。現物実技の中で最も扱い易いのが図4および図5に示すコイン射撃で、コインは2次元の平面上を直線で滑走するものである。この発展形の仮想模擬実技番としてコインを球にしたうえでこれをバネの力で空中に飛ばし、3次元空間で風や天候他のいろいろなもの影響を受けて飛んでいく状況にすると様々なタイプの仮想模擬実技が可能である。入力としてはバネと連動した発射レバーの引き量や角度やバネの本数などが利用できるため多入力を扱うことが可能となる。これはSAS Institute

Japanの岡田雅一により開発されたJMP上で動く仮想模擬実技用のAdd-inソフトで、球を空中に飛ばすことをシミュレートしているので「飛球シミュレーター」と命名されている。これは現物模擬実技で行うことに比べると極めて合理的かつ効率的である。これをもし現物実技にすると、コイン射撃に比べてはるかに面倒な模擬実技になってしまう。すなわち実験の準備自体がたいへんであり、場所や環境の点で実施は容易でなくかつ時間がかかりかかるからである。

図11に示しているものは飛球シミュレーターの画面である。この教材で実施する場合の特性要因図を図13に示し、これを出力と各種の因子という観点で分類を行ってベン図の形に整理したものを図14に示している。

6.2.1項の①～④をこの教材で行う場合、最初の導入として①の誤差 ε がない場合はシミュレーションとなり、これは自動実行すればよい。このケースは現物実技では不可能である。②の誤差 ε のみの単一の攪乱は世の中の多くの統計モデルである。③の2種類の複合攪乱の[A]は頑健設計となり、これは現物実技の場合には誤差の低減と管理をきちんと行わないと失敗する。[B]は現物実技の場合には λ の把握が困難である。しかし、仮想実技ならばコンピュータの利用により λ の把握は可能である。最後の④の3種類の複合攪乱は現物実技のもとでは行うことは困難であるが、これも仮想実技ならばコンピュータの利用により可能である。

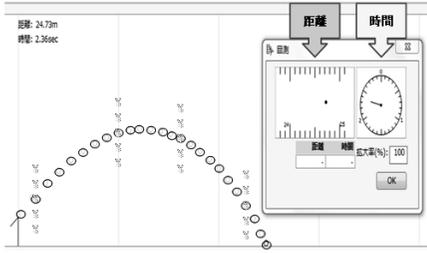


図11 仮想模擬実技の計測のばらつきの低減

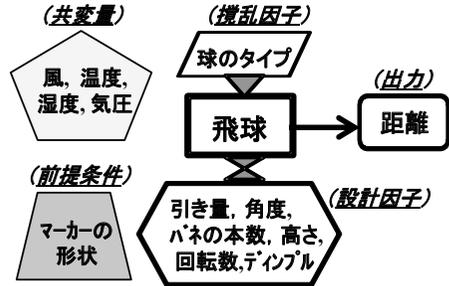


図15 因子役割図の例 (固定出力の頑健設計)

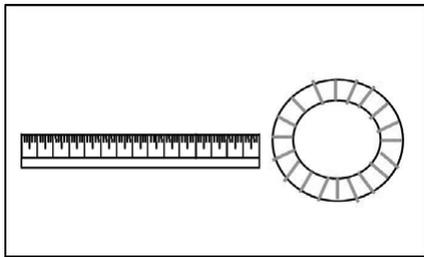


図12 位置と時間の計測用の治具 (物差しと厚紙による手作り)

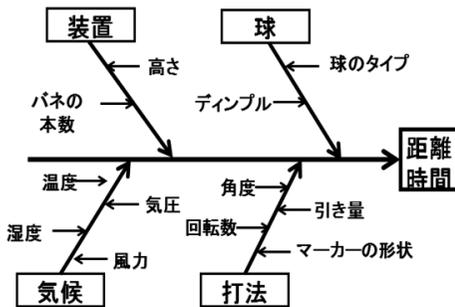


図13 仮想模擬実技の特性要因図

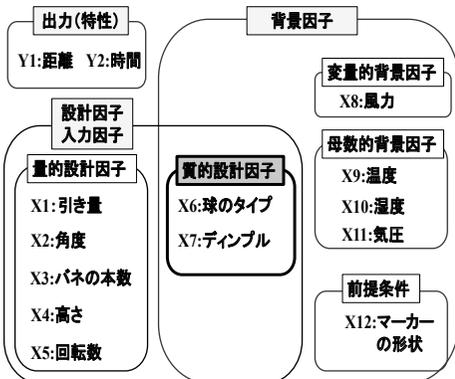


図14 出力と各種の因子

7.1 治具による改善を通しての計測管理と自動計測

教育の最初の段階で計測管理の重要さと誤差の低減のアプローチが体験できるために、結果(特性、出力)である距離と時間を図11の右上に示すように画面にアナログ表示している。これらを用いて計測誤差(偏りとばらつき)の理解とその低減(改善活動)が学習できる。

治具の重要さは仮想実技でも教え方を工夫すれば体験的に学習する事ができる。一例として距離の計測(位置計測と時間計測)の改善を紹介する。発射後に球が着地すると画面上に着地点とメジャーが登場する。しかしメジャーが小さくかつ目盛りは荒い。しかも画面上なので計測がしにくい。このため精度が悪くかつ時間もかかる。これらの問題を創意工夫して解決する。このことによりもの作りの重要な基礎が学べる。このことにより今後の実験のための確実な基盤ができていく。

(1) 画面の拡大パラメータを用いて目盛りを拡大して物差しと同じ大きさにする。

このことにより物差し(実物あるいはコピー)が利用でき、計測精度が向上し計測時間が短くなる。

(2) 物差しを画面の上に脱着できるように工夫する。

透明な板(透明な下敷きほか)の上に物差しをビニールテープで貼り、結果が画面に出現したら直ぐに透明な板を画面の上に載せて位置を計測する。時間に関しては細かな目盛りの入ったものを作成して同様に透明板の上に貼るとよい。

以上により計測精度が向上し計測時間が短くな

る。

計測方法の改善により計測誤差が小さくなった時点で人による計測は止め、それ以後はコンピュータの記録データを用いる。このことにより教育は内容そのものに焦点を合わせることができ、時間を短縮することおよび集中力を切らさないようにすることができる。人による計測は合理的な仕組みにしたとしても、計測のために時間がかかるとともに疲労により集中力を途切れさせる原因になる。しかし、コンピュータの自動記録データを用いることでこれらの問題が解決できる。

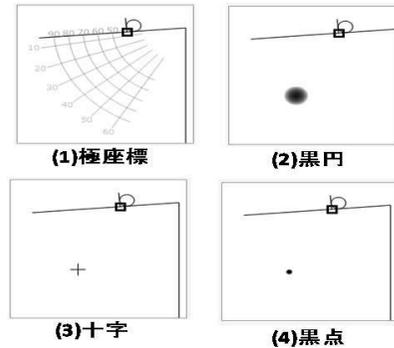


図16 操作のばらつきの低減（例：マーカー）

7.2 量産時を意識した操作（発射）のばらつき低減

現物での模擬実技では人の行為が介在するためばらつきは必然のものとして存在する。しかし、仮想模擬実技の場合はコンピュータベースになるので、人の行為を介在させる必要がある。既に述べた計測が人の行為が介在する一例である。本節では操作のばらつきを取り上げる。

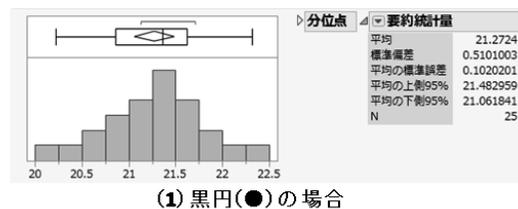
人による操作はばらつきかつ時間がかかることの理解およびそのばらつきの低減と時間短縮（改善）のために実際にマウスを用いてレバーを発射位置（角度と引き量）にセットする。初期には座標（極座標）が現れ、これでレバーをセットするが、この場合、座標は合わせにくくかつ時間がかかる。この状態は実験時と量産時においてクリティカルな問題となることが分かる。

発射のゼットはマーカーが好ましい。その形状の候補として以下の3種類を与えて実験により選ばせる。

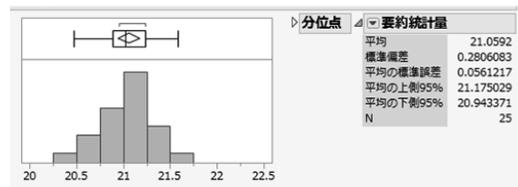
- ①円（●）：中心点が発射点である大きな円
- ②十（+）：中央の交差位置が発射点である十字
- ③点（・）：中心点がほんの少し拡大した小さな円

7.3 自責のばらつき（内乱）と他責のばらつき（外乱）

飛球シミュレーターはいわゆる誤差の他に自責のばらつき（内乱）と他責のばらつき（外乱）



(1) 黒円(●)の場合



(2) 十字(十)の場合

図17 マーカーによるばらつきの違い（●と十）

を扱うことができる。実際には自責のばらつきとして発射位置（角度と引き量のゼット）のばらつきを取り上げ、他責のばらつきとしては多種のもの（ボールのタイプ、ディンプルの有無、風力ほか）を取り上げることができる。

他責（例えば球のタイプ）の場合、その条件を固定するならば前提条件となり、固定しなければ頑健設計ができる。高度な連合設計としては、例えば2つの班の前提条件を変えたもとで、各班で頑健設計を行った上で、班の間の乖離を減衰するというアプローチである。その際、班の間の違いを減衰するという選択肢とともに各班が独立に個別の最適化をするという選択肢もある。なお、連合設計の発展形として設計因子の全てを共有するという全共有の選択肢だけでなく、設計因子の一部だけを共有するという部分共有の選択肢もある。これらについて

は別の機会に報告を予定している。

7.4 単入力と多入力および1次関数と2次関数

単入力の場合は引き量のみあるいは角度のみとすればよい。そして両方を用いれば2入力を扱うことができる。従来の現物模擬実技では2入力がたいへんであるという理由から原則として単入力しか扱っていない。しかし、飛球シミュレーターの場合には、角度と引き量で2入力を容易に扱うことができる。

また、角度の水準を広くとると2次関数が扱える。さらに、2入力のもとで範囲を広く振って2次を扱えば等高線図を用いた応答曲面法の教育も可能である。

7.5 頑健設計と双対性および柔軟設計の学習

頑健設計やその発展形も可能である。図15は球のタイプを攪乱因子とした固定出力（静特性）の場合である。表3はこれに対応した構造模型表で、この場合は初心者用に主効果だけで十分な構造になっている。この例では交互作用は無視できるので混合系直交表L12を用いることが望ましい。なお、引き量や角度を入力として用いるならば自由出力（動特性）が実施できる。

直積実験における内側と外側は数学的には双対（互いに裏返し）の関係にあるため、外側因子と内側因子の交換が可能である。さらには因子役割を自由に変更する柔軟設計も^[51]含めて仮想模擬実技はこれらのすべてを学習することが可能である。

7.6 飛球シミュレーターの場合の連合設計 紙ヘリコプターを始めとした現物実技の場合

表3 構造模型表（図15に対応）

因子	主効果	引き量	角度	バネ数	高さ	回転数	ディグル
引き量	◎	x	x	△	x	△	x
角度	○		x	x	x	x	x
バネ数	◎			x	x	△	x
高さ	△				x	x	x
回転数	◎					x	△
ディグル	△						x

には、メンバー・レイアウト・作業標準・役割分担・場所の環境などが異なるために必然的に班ごとに前提条件が異なる。したがって、ある班の設計を他の班にデッドコピーした場合にはうまく行かないことが多い。しかし、飛球シミュレーターの場合には注意が必要である。条件設計を同じにするといずれの班も同じ結果を得ることになるからである。

飛球シミュレーターの場合の連合設計については、複数の班を対象にした場合には班の間であえて意図的に前提条件を変えることが必要である。このことにより、ある班の設計を他の班にデッドコピーすることは危険な状態になる。そのために4.3節で述べた5つの対応のいずれが良いかを検討する必要がある。この場合には攪乱因子がなくても連合設計となる。そして、より高度な場合には、攪乱因子を取り上げた上で頑健設計に関して5つの対応を考えれば、頑健設計を連合設計のアプローチで行うことができる。

8. 仮想模擬実技を用いた模擬実技の理論的整理

本章ではこれまで述べた設計（創造）から量産（保証）までの一貫模擬実技と仮想模擬実技について体系的に整理する。

SQM (Statistical Quality Management : 統計的質経営) の観点から言うと、保証とは特性（出力）の分布に関して余裕を持って規格内に入れることであり、それはばらつきを小さく抑え平均を目標値に近づけることである。言い換えれば工程能力指数Cpkを高めることである。そして、平均値と目標値（規格中央値）のズレであるバイアスは多くの場合に重回帰を用いることで対応が可能となるが、ばらつきはその低減のためにハードウェア（工具、治具、原材料ほか）、ソフトウェア（作業標準ほか）、システム（ライン編成、レイアウトほか）に関して様々な創意工夫をする必要がある。

8.1 超構造関数における高次の積項

設計の重要なポイントは直積実験のデータによって得られた高次の積項のある基盤式を超構造関数に構造化することとそれを用いた最適化

である。直積実験を行う事で高次の積項（高次の交互作用）のある基盤式を把握（モデル化）することができ、これを超構造関数に構造化することができる。そしてこれを用いて数理計画法を適用すれば最適化はそれほど困難ではない。

かつて高次の積項（高次の交互作用）の扱いが敬遠されたのは以下の問題があったからである。

（１）数理的に扱い難い。

（２）実際の管理がたいへんである。

コンピュータの進化が（１）と（２）の問題を解決し、様々な分野のハードウェアの進化が（２）を容易化している。したがって、高次の積項（交互作用）は把握した上で有効活用することが重要である。そもそも頑健設計は設計因子と攪乱因子の積項（交互作用）を利用して攪乱因子の影響を減衰しているわけであるから、積項（交互作用）は重要である。しかし、設計因子の間の交互作用は忌み嫌われることが多い。「設計因子と攪乱因子の間の交互作用があるが設計因子の間には交互作用がない」という都合の良いケースはそれほど多くはない。したがってこのような都合の良いケースを求めてアプローチすると失敗するリスクが高くなる。

8.2 チーム活動学習における先導と協働

QM (Quality Management: 質経営) は質を中核としたマネジメント (経営, 運営, やりくり) である。かつてはQC (Quality Control: 品質管理) と呼ばれたが、TQCがTQMと呼ばれるようになったことからQMと呼ばれるように変化した。Qualityについては変わらないが、その次の単語がかつてのControlからManagementに変化したわけである。

管理 (Control) という言葉に近いものには監督, 統制, 制御があり, 原則として管理する側が管理される側を押さえつけるニュアンスがある。しかしながら, これは対象がハードウェアや機械的あるいは電気的なハードウェアのシステムならばともかく, 人の集団や組織を対象にした場合には現代においてはなじまない。人の集団や組織においては, 管理する/管理されるという関係ではなく, 先導する/協働するという関係が重要となる。小集団活動, 現場での取

り組み, TQM (Total Quality Management) のいずれにおいてもチームでの取り組みが重要で, そこでは先導と協働が不可欠である。

この2つのキーワードの意味は以下の通りである。

*先導 (leading): 先に立って導くこと。

*協働 (collaboration): 同じ目的のために協力して働くこと。

したがって以下の言葉が対応する。

*先導者 (leader): 先に立って導く人。

*協働者 (collaborator): 同じ目的のために協力して働く人。

先導と協働はしばしば表裏一体の関係にある。

[先導できない人は協働できない]

⇒目的が示せない人は目的が理解できない

[協働できない人は先導できない]

⇒目的が理解できない人は目的を示せない

どちらの役回りになるのかは巡り合わせ (運, 状況ほか) であるが目的達成の構成員としては変わりがない。『先導するときは先導し, 協働するときは協働する』ことができるという事が重要である。これらを知識として理解するだけでなく経験・体験を通して理解することが人財 (人材ではない) 育成において不可欠である。この教育においては先導者も協働者も設計から量産までの全体を一貫して理解する必要がある。すなわち,

設計 (質創造) から提供・量産 (質保証) までの一貫体験教育

という一貫体験教育カリキュラムが必要である。そして, これを体験することで以下のことが体験できる。

*設計が所与のもとでも, その後の対応で事態は大きく変化する。

*しかし, おおもとになる設計の影響が後に与える影響が極めて大きい。

8.3 計算演習と模擬実技演習

教育において, 単に統計的方法を学ぶのであれば計算演習は有効である。計算演習に関しては, 古くはチップ実験があり, 近年はコンピュータシミュレーションがある。しかしこれらは計算演習でしかないために, 実技を通しての集団活動としてQMの理解とは異なる。例えば,

分布Aと分布Bの比較に関して検定を行い、有意であれば推定を行うことは統計数理として理解することは意義深い。しかし、分布Aがそれまでのやり方のもとでのデータの母集団であり、分布Bが新しいやり方のもとでのデータの母集団であるということは扱えない。言い換えれば、集団活動としてQMにおいては、それまでのやり方Aのどこに問題があり、新しいやり方Bは何をどういう理由でどのように変えたかが重要となる。そのためには①問題の発見（何が問題なのか）、②原因の追究（何が原因なのか）、③対策の立案（何をしたらよいのか）そして④効果の確認（効果はあったのか）が必要である。実際の問題解決はデータの掘って来たところを抜きにデータ処理をすることはできない。データとその背景とが一体にならないと実践的なQMの理解は困難で、「畳の上の水練」に終わる危険が高い。すでに述べたように実践的なQMの集団活動を構成するものは以下の4つの活動である

- ①問題の発見、②原因の追究、
- ③対策の立案、④効果の確認

これらを学ぶには実技が不可欠となる。ただし、本物の実技で学ぶことは多くの場合困難なために模擬実技で学ぶことが意義を持つ。

しかしながら、実技を行うとなると、先導と協働という形のチームワークが必要になる。学習といえども以下の諸点は欠くことができない。

- *実技をロールプレイとして理解する。
- *話し合いにより様々な知恵出し（文殊の知恵）をする。
- *工具はできるだけ改良し、治具は新たに作り出す。
- *設計の影響が極めて大きいことを理解する。
- *所与の状況に対して創意工夫すれば改善の余地があることを理解する。

このために高橋は模擬実技として「コイン射撃」、「紙グライダー」、「複葉型紙ヘリコプター」などを提案し実施してきた。^{[77]~[81]. [83]. [88]. [90]. [93]~[109]} その結果、現物を用いた模擬実技が有効であることは明らかになった。

8.4 仮想模擬実技の特徴とその活用

現物模擬実技には以下の点が課題として残っている。

- *準備が大変である
- *時間がかかる
- *データとして記録できるものが限られている

これらの点を解決するものとして本研究は仮想模擬実技を提案する

「仮想」と「実技」は一見すると両者は相反する言葉である。しかし、仮想実技の意味するところはモデルをコンピュータで用意しそのもとで実技を行うというものである。つまりシミュレーター（コンピュータで作出したモデル）を用いた実技のことである。

【注】シミュレーターとは、対象を模擬的に再現する機能を持ったもののことである。これは模擬的に動くということが重要で、対象から本質を抽出して対象を記述しただけのもの（数式やアルゴリズムなど）はシミュレーターではない。

もの作りを「紙ヘリコプター」で学ぶ場合には、これはシミュレーターではなくモデルである。モデルは対象の本質が抽出され両者の間で本質的な対応（本質模擬）がとればよいが、シミュレーターの場合には対象と本質的に同様の挙動（挙動模擬）を実現することが要求される。

本質模擬：XXの挙動はYYの挙動に本質的に対応

表層模擬：XXの挙動はYYの挙動に表層的に対応

シミュレーターがあれば実物を使わずに様々な条件下での実験や訓練などを行なうことができる。楽しむためのコンピュータゲームの場合には表層模擬となる。そして、ゲームを面白くするためにしばしば本質から大きく遠ざかった誇張や変形が行われる。

コンピュータで作出した模型には理論的仮想模型、設定的仮想模型が存在する。前者は挙動（振る舞い）をできるだけ本物との間に本質的な矛盾がないように作られたものであり、これはシミュレーターと呼ばれる。後者は挙動を表層的に似せた擬似的なものである。一見似た

挙動はするが、もととなるモデルは制作者が設定したもので本物の本質とは整合しない。今回提案するものは前者である。この高度な例としてはパイロットを養成するフライトシミュレータがある。本研究ではQMを学ぶための物理的仮想モデルとして「飛球シミュレーター」(SAS Japanの岡田が作成)を取り上げる。

(1) 飛球シミュレーターの教育の仕組みの主な特徴

- ①教育側が意図する状況を設定できる。
- ②受講者側は設定を踏まえて実技ができる
- ③事後に追跡型のシミュレーションができる。
- ④新たな状況を設定して何が起こるかが試せる。

(2) 飛球シミュレーターの教育内容の主な特徴

教育の内容に焦点を合わせると、飛球シミュレーターでは以下に示すことが可能である。

- ①3種類の攪乱(誤差, 内乱, 外乱)が扱える。
- ②因子が質的と量的を合わせて12個扱える。
- ③実技の仮定の記録が全て残せる。
- ④人の実射撃と機械の自動射撃とが選択できる。

[注] 自動射撃は実射撃をシミュレートできる

- ⑤準備も含めて設計から量産を一貫して扱える。

計画→実験→解析→設計→量産

そして、これに先立って改善を扱うことができる。

計測のばらつきの低減

射撃のばらつきの低減

つまり仮想実技ではあるが、改善や管理も生部ができるのである。

8.5 仮想模擬実技における先導と協働

仮想実技の場合は現物実技とは異なり以下のことが可能である。

- *一人でも実施ができる。
- *計測のばらつきや射撃のばらつきを低減・

管理しなくても実施ができる。

しかし、先導と協働を学ぶ上では、チームを組んで実施することが望ましい。

飛球の着地点の位置を画面で計測するうえではばらつきがありかつ計測のための時間がかかる。これを改善することはQM教育として有意義である。具体的には計測のばらつきを低減しかつ計測時間を短縮することである。その後射撃のばらつき低減と射撃時間の短縮に取り組むとよい。計測の改善も射撃の改善も、チームを構成して実施すればチーム活動となる。

教育の時間を短縮する場合には射撃を「自動実行」にすると有効である。指定した条件(角度と引き量)で自動的にしかも正確に射撃することができる。この場合も、単純に自動実行するのではなく、事前に射撃のばらつきの分布を把握し、それをういたばらつきをシミュレートした形で自動実行するとよい。すなわち、自動実行の際に引き量と角度にばらつきを入れるわけである。この場合のばらつきの分布は、実際に当人が行った場合のデータから計算した推定母数に基づいて2次元正規乱数を加えるのである。これは後にのべる内乱である。

8.6 質保証を妨げる3種類の攪乱

仮想実技では以下に示すように、統計そのものおよび統計を用いたQMであるSQM(SQCとも呼ばれている)が可能である。

*統計の基礎(推定, 検定を含む)

*実験計画法

*回帰分析

*直積実験

*頑健設計

仮想実技が優れているのは既に6.2.1で述べたところの以下に示す3種類の攪乱が短時間で明確な形で扱えることである。

*誤差(総合攪乱):多種類の微小な攪乱の総合である。

*外乱(外的攪乱):実験で取り上げて意図的に水準を振る攪乱である。

*内乱(内的攪乱):重要な因子による攪乱で誤差から抜き出して扱うものである。

それぞれは以下の様にして把握する事ができる。

- (A) 誤差は同じ条件のもとでの繰り返しを
とうことで把握できる。
- (B) 外乱は実験で取り上げて意図的に水準
を振ることで把握できる。
- (C) 内乱は同一条件で多数回の繰り返しを
行うことで把握できる

しかし、これらは実物実技の場合には3種類の攪乱を短時間で明確な形で扱うことはなかなか難しい。

8.7 仮想模型における理論模型と設定模型

仮想模型には理論模型と設定模型がある。理論模型は仮想といえども理論に忠実である。設定模型は理論には忠実ではない。多くのコンピューターゲームは設定模型のもとで動いている。いずれの場合も実験データをとれば統計模型が近似式として手に入る。しかし良くできた理論模型は推論が自然でやりやすい。

実践的な力を要請するには現物模型が優れている。現物模型は物理模型であるために自然な模型である。したがって三現主義（現場で現物を現実的に）や五ゲン主義（三現主義+原理・原則）がそのまま行うことができる。理論模型は本質に注目し末梢は捨て去るためにきれいな姿であるが故に理論的な推論はやりやすいが、現実的なやりくりの学習がやりにくい点がアキレス腱である。したがって仮想模擬実技と現物模擬実技を併用することが望ましい。

9. おわりに

本研究は設計の概念と技法と数理について議論した。概念として思考基盤およびその骨組みをなす数理について述べ、技法として手順とそれを行うために必要な手法について述べた。これらを論じたうえで設計から量産までを一貫して学ぶ模擬体験教育についてその構造と要点について論じた。教育の中身としては準備も含めた設計から量産までの一貫模擬実技の要点を示した。

実際の教育においては限られた時間の中で教育後に実際の問題に取り組むことのできる実践力を養成しなければならない。そこで、教育実施の容易さやQM教育のレベルアップと時間効率を高めるために、仮想実技教育の提案とその

ための有用な教材として開発された飛球シミュレーターおよびその活用方法を紹介した。仮想模擬実技は双対性や柔軟設計も学習ができる点でも優れている。しかし、現物には仮想にはない利点もあるので、現物模擬実技と仮想模擬実技の両者を併用することが望ましい。

本研究の内容を実事例に応用することが今後の課題である。

参考文献1 (理論)

- [1] 飯塚悦功 (2009):「現代品質管理総論」, 朝倉書店.
- [2] 飯塚悦功 (2013):「品質管理特別講義基礎編」, 日科技連出版社.
- [3] 飯塚悦功 (2013):「品質管理特別講義運営編」, 日科技連出版社.
- [4] Joseph, V. R. and Wu, C. F. J. (2002): "Robust Parameter Design of Multiple-Target System", *Technometrics*, 44, [4], 338-346.
- [5] Joseph, V. R. (2003): "Robust Parameter Design With Feed-Forward", *Technometrics*, 45, [4], 284-292.
- [6] 河村敏彦, 高橋武則 (2012): "誤差因子に繰り返しがある場合の望目特性に対するパラメータ設計", *Research Memorandum No.1157* (統計数理研究所), 1-12.
- [7] 河村敏彦, 高橋武則 (2013):「統計モデルによるロバストパラメータデザイン」, 日科技連出版社.
- [8] 河村敏彦, 高橋武則 (2013): "動特性のパラメータ設計に対する統計的モデリングと最適化", "品質", 43, [3], 102-109.
- [9] 今野浩 (1987):「線形計画法」, 日科技連出版社.
- [10] 久保幹雄, 田村明久, 松井知己 (2005):「応用数理計画ハンドブック」, 朝倉書店.
- [11] 久野誉人, 繁野麻衣子, 後藤順哉 (2012):「数理最適化」, オーム社.
- [12] 松岡由幸編著 (2006):「製品開発のための統計解析学」, 共立出版
- [13] 松岡由幸, 加藤健郎 (2013):「ロバストデザイン～『不確かさ』に対して頑強な人工物の設計法～」, 森北出版株式会社.
- [14] Miller, A. and Wu, C. F. J. (1996): "Parameter design for signal-response systems: a different look at Taguchi's dynamic parameter design",

- Statistical Science*, 11, [2], 122-136.
- [15] 宮川雅巳 (1998): 「工系数学講座第14巻統計技法」, 共立出版.
- [16] 宮川雅巳 (2000): 「品質を獲得する技術」, 日科技連出版社.
- [17] 宮川雅巳 (2006): 「実験計画法特論」, 日科技連出版社.
- [18] Montgomery, D. C. (2001): *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- [19] 森輝雄 (2005): 「タグチメソッドの応用と数理」, トレンドブック.
- [20] Mori, T. (2011): *Taguchi methods: Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications*, ASME PRESS, New York.
- [21] Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson Cook, C.M. (2009): *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (3rd ed.)*, Wiley, New York.
- [22] 永田靖 (2009): 「統計的品質管理」, 朝倉書店.
- [23] Phadke, M. S. (1989): *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey.
- [24] (社) 日本品質管理学会編 (2009): 「新版品質保証ガイドブック (2009)」, 日科技連出版社.
- [25] (社) 日本品質管理学会中部支部産学連携研究会編著 (2010): 「開発・設計における“Qの確保” —より高いモノづくり品質をめざして」, 日本規格協会.
- [26] Shoemaker, A. C., Tsui, K. L., and Wu, C. F. J. (1991): “Economical experimentation method for robust design”, *Technometrics*, 33, [4], 415-427.
- [27] 鈴木義一郎 (1995): 「情報量規準による統計解析入門」, 講談社サイエンティフィク.
- [28] 鈴木圭介, 高橋武則, 川崎昌 (2015): “医療・福祉の設計における部分共有”, 日本品質管理学会第108回研究発表会発表要旨集, 21-24.
- [29] 鈴木圭介, 高橋武則, 川崎昌 (2015): “医療・福祉のハードエアの設計における設計因子の部分共有化”, 日本品質管理学会第109回研究発表会発表要旨集, 19-22.
- [30] 田口玄一 (1976, 1977): 「第3版実験計画法 (上) (下)」, 丸善.
- [31] 高橋武則 (1991): “問題を構成する要素と構造”, 「品質」, 21 [2], 23-33.
- [32] 高橋武則, 田原慎一郎 (2003): “因子数の多い実験のための複葉型紙ヘリコプターの提案”, 日本品質管理学会第71回研究発表会発表要旨集, 219-222.
- [33] 高橋武則 (2008): “超回帰最適化に基づく総合的頑健設計—統計的質経営と頑健設計の融合—”, 日本品質管理学会第86回研究発表会要旨集, 95-98.
- [34] Takahashi, T. (2010): “HOPE Theory and JMP Software for Robust Design”, *Discovery Summit 2010*, 1-20.
- [35] 高橋武則 (2010): “顧客要求域とPDCA型設計”, 日本品質管理学会第93回研究発表会発表要旨集, 103-106.
- [36] 高橋武則 (2010): “複数の特性の結合設計”, 日本品質管理学会第93回研究発表会発表要旨集, 53-56.
- [37] 高橋武則 (2010): “HOPE (階層構造最適化) を用いた設計における最適解の摂動的変更による上位の最適化”, 日本品質管理学会第40回年次大会, 109-112.
- [38] 高橋武則 (2011): “解像度の高い階層解析”, 日本品質管理学会第95回研究発表会発表要旨集, 233-236.
- [39] 高橋武則 (2011): “調和設計”, 日本品質管理学会第95回研究発表会発表要旨集, 237-240.
- [40] 高橋武則 (2011): “頑健設計のための分離型の設計”, 日本品質管理学会第95回研究発表会発表要旨集, 241-244.
- [41] 高橋武則 (2011): “HOPEにおける超設計～複数の設計単位に対する構造的設計～”, 日本品質管理学会第96回研究発表会発表要旨集, 57-60.
- [42] 高橋武則 (2012): “因子役割未定型設計の理論”, 日本品質管理学会第98回研究発表会発表要旨集, 233-236.
- [43] 高橋武則 (2012): “因子役割未定型設計の適用”, 日本品質管理学会第98回研究発表会発表要旨集, 237-240.
- [44] 高橋武則 (2012): “入出力データの差分への分解と復元”, 日本品質管理学会第42回年次大会研究発表会発表要旨集, 141-144.
- [45] 高橋武則 (2012): “入出力データに対するベクトル型の超回帰”, 日本品質管理学会第42回年次大会研究発表会発表要旨集, 145-148.
- [46] 高橋武則 (2012): “調和設計の構造”, 日本品質管理学会第100回研究発表会発表要旨集, 25-28.
- [47] 高橋武則 (2012): “非線形入出力の解析と設計”, 日本品質管理学会第100回研究発表会発表要旨集, 29-32.

- [48] 高橋武則, 河村敏彦 (2012): “多水準をもつ誤差因間の交互作用を考慮した望目特性のロバストパラメータ設計”, *Research Memorandum No.1160* (統計数理研究所), 1-11.
- [49] 高橋武則, 鈴木圭介 (2013): “調和設計の企画化とモデル化と最適化”, 目白大学経営学研究, 11, 17-43.
- [50] 高橋武則 (2013): “調和設計における超設計”, 日本品質管理学会第101回研究発表会発表要旨集, 135-138.
- [51] 高橋武則 (2013): “調和設計における事前モデル化と事後モデル化”, 日本品質管理学会第102回研究発表会発表要旨集, 37-40.
- [52] 高橋武則, 河村敏彦 (2013): “非線型システムに対するロバストパラメータ設計”, 「品質」, 43, [2], 85-92.
- [53] 高橋武則 (2013): “入出力データの差分への分解と復元”, 日本品質管理学会第42回年次大会研究発表会発表要旨集, 141-144.
- [54] 高橋武則 (2013): “入出力データに対するベクトル型の超回帰”, 日本品質管理学会第42回年次大会研究発表会発表要旨集, 145-148.
- [55] 高橋武則 (2014): “超最適化による調和設計—未来時制工学のための超最適化HOPE—”, 目白大学経営学研究, 12, 73-111.
- [56] 高橋武則・三井正 (2014): “特性の空間分布を制御するパラメータ設計”, 日本品質管理学会第44回年次大会研究発表会発表要旨集, 213-216.
- [57] 高橋武則 (2015): “解析および設計のための形状や状態の時空間を用いた描写”, 日本品質管理学会第107回研究発表会発表要旨集, 87-90.
- [58] 高橋武則 (2015): “関数の部分モデル化と設計因子の部分共有”, 日本品質管理学会第109回研究発表会発表要旨集, 15-18.
- [59] 高橋武則 (2015): “設計における基本描写と合成描写”, 日本品質管理学会第108回研究発表会発表要旨集, 13-16.
- [60] 高橋武則 (2015): “解析および設計のための形状や状態の時空間を用いた描写”, 日本品質管理学会第107回研究発表会発表要旨集, 87-90.
- [61] 立林和夫 (2004): 「入門タグチメソッド」, 日科技連出版社.
- [62] 刀根薫 (2007): 「数理計画」, 朝倉書店.
- [63] TQM委員会 (2008): 「TQM—21世紀の総合的質経営」, 日科技連出版社.
- [64] 椿広計 (2006): 「ビジネスへの統計モデルアプローチ」, 朝倉書店.
- [65] 椿広計 (2006): “統計科学の横断性と設計科学への寄与”, 「横幹」, 1, [1], 22-28.
- [66] H.Tsubaki, K.Nishina, S.Yamada (Eds.) (2007): *The Grammar of Technology Development*, Springer.
- [67] 筑波大学ビジネス科学研究科編 (2003): 「ビジネス数理への誘い」, 朝倉書店.
- [68] 鷺尾泰俊 (1988): 「実験の計画と解析」, 岩波書店.
- [69] 鷺尾泰俊 (1997): 「実験計画法入門 (改訂版)」 (第2版), 日本規格協会.
- [70] Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2009): *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization (2nd ed.)*, Wiley, New York.
- [71] 渡辺美智子, 椿広計編著 (2012): 「問題解決学としての統計学」, 日科技連出版社.
- [72] 山田秀 (2004): 「実験計画法—方法編—」, 日科技連出版社.
- [73] 谷津進 (1991): 「実験の計画と解析基礎編」, 日本規格協会.
- [74] 谷津進 (1991): 「実験の計画と解析応用編」, 日本規格協会.
- [75] 谷津進 (2001): 「技術力を高める品質管理技法」, 朝倉書店.
- [76] 吉澤正 (1992): 「統計処理」, 岩波書店.

参考文献2 (教育)

【書籍】

- [77] H.Kume, T.Takahashi, et.al (1985): *Statistical Methods for Quality Improvement*, The Association for Overseas Technical Scholarship.
- [78] 高橋武則 (1986): 「統計的推測の基礎」, 文化出版局.
- [79] 高橋武則 (1992): 「統計的方法と管理・改善」, 品質月間委員会.
- [80] 高橋武則 (1993): 「統計モデルとQCの問題解決法」, 日本規格協会.
- [81] 高橋武則 (1998): 「模擬生産・模擬実験と統計的品質管理」, 品質月間委員会.
- [82] 椿広計, 河村敏彦 (2008): 「設計科学におけるタグチメソッド」, 日科技連出版社.
- [83] 東京理科大学工学部経営工学科 (2005): 「マネジメントサイエンス」, 培風館

【テキスト・実験指導書・実験資料集】

- [84] 高橋武則 (1993): 「品質管理の手法」日本科学技術連盟テキスト (第58回品質管理セミナー)

一), 日本科学技術連盟.

- [85] 東京理科大学工学部経営工学科 (1999): 「経営工学実験資料集」, 東京理科大学.
 [86] 東京理科大学工学部経営工学科 (2000): 「経営工学実験指導書」, 東京理科大学.

【論文】

- [87] Box, G. (1992): "Teaching Engineers Experimental Design with a Paper Helicopter", *Quality Engineering*, 4, [3], 453-459.
 [88] 高橋武則 (1997): "模擬生産・模擬実験を用いた使命遂行型教育のもとでの回帰診断", 品質管理, 48, [1], 86-95.
 [89] Takahashi, T. (2003): "Robust design for mass production", *Journal of Materials Processing Technologies*, 143-144, 68-73.
 [90] Takahashi, T. and Saito A. (2005): "Education of Robust Parameter Design by Twin Rotor Paper Helicopter", *Proc. of International Conference on Quality '05 Tokyo*, CD proceeding.
 [91] Takahashi, T. (2009): "Quality Design and Evaluation Based on Hyper Structure for Quality Management ~ Hyper-regression and Hyper-index ~", *Proc. of the 7th Asian Network for Quality Congress, Tokyo*, 1502-1511.
 [92] Takahashi, T. (2009): "Robust Design by Hyper-regression Optimization ~ Fixed Output and Free Output ~", *Proc. of the 7th Asian Network for Quality Congress, Tokyo*, 1512-1521.

【学会発表】

- [93] 高橋武則ほか (1994): 統計モデルとQCの問題解決の教育に関する研究—製造工程のモデルとしてのコイン打撃ゲーム—, 日本品質管理学会第46回研究発表会発表要旨集, 12-15.
 [94] 高橋武則ほか (1995): 紙グライダーの製作と飛行を用いたSQC教育の設計—統計モデルとQC的問題解決の教育に関する研究 (第2報) —, 日本品質管理学会第49回研究発表会発表要旨集, 53-56.
 [95] 高橋武則ほか (1996): 組立型紙グライダーのライン生産を用いたSQC教育—統計モデルとQC的問題解決の教育に関する研究 (第3報) —, 日本品質管理学会第52回研究発表会発表要旨集, 133-136.
 [96] 高橋武則ほか (1998): SQC教育における品質と生産性, 日本品質管理学会第58回研究発表会発表要旨集, 123-126.

- [97] 高橋武則ほか (1999): SQC教育における模擬体験学習のためのゲーム設計, 日本品質管理学会第29回年次大会研究発表会発表要旨集, 137-140.
 [98] 高橋武則ほか (2000): インドア・スポーツとアウトドア・スポーツをモデルとしたSQC教育, 日本品質管理学会第30回年次大会研究発表会発表要旨集, 37-40.
 [99] 高橋武則ほか (2001): アウトドア・タイプSQCの使命達成型教育—インドア・スポーツとアウトドア・スポーツをモデルとしたSQC教育 (2) —, 日本品質管理学会第66回研究発表会発表要旨集, 161-164.
 [100] 西浦淳, 高橋武則 (2001): 紙グライダーを用いた多特性の同時最適化の教育方法に関する研究, 日本品質管理学会第67回研究発表会発表要旨集, 29-32.
 [101] 高橋武則ほか (2002): 模擬実験を用いた実践的統計教育の研究, 日本品質管理学会第69回研究発表会発表要旨集, 169-172.
 [102] 今井雅浩, 高橋武則ほか (2004): 統計的質管理の実技演習に基づく教育に関する研究, 日本品質管理学会第74回研究発表会発表要旨集, 77-80.
 [103] 高橋武則ほか (2004): 動特性を対象とした統計的質管理の実技演習教育, 日本品質管理学会第75回年研究発表会発表要旨集, 49-52.
 [104] 高橋武則ほか (2004): マハラノビスの距離を用いた工程管理の模擬体験—Shooting Machineを用いたマハラノビスの距離の教育カリキュラム—, 日本品質管理学会第34回年次大会研究発表会発表要旨集, 177-180.
 [105] 高橋武則ほか (2005): 紙グライダーを用いた回帰分析に基づく再発防止の教育—回帰診断, 外れ値の原因追究・再発防止, 効果の確認の追加—, 日本品質管理学会第77回研究発表会発表要旨集, 87-90.
 [106] 高橋武則ほか (2005): コイン射撃実験を用いた多変量データにおける2群判別の教育—教育目的に適合した変数の設計と相関係数行列, 日本品質管理学会第77回研究発表会発表要旨集, 91-94.
 [107] 高橋武則 (2006): 紙グライダーを用いた製造教育における開発に関するカリキュラム, 日本品質管理学会第36回年次大会研究発表会発表要旨集, 94-98.
 [108] 高橋武則ほか (2008): 超回帰最適化の体験型教育と支援ソフト, 日本品質管理学会第87

- 回研究発表会発表要旨集, 21-24.
- [109] 濱口勝重, 高橋武則ほか: 模擬体験型SQC
教育のノウハウ, 日本品質管理学会第92回研究
発表会発表要旨集, 111-114.