

MMRC
DISCUSSION PAPER SERIES

MMRC-J-211

品質工学ノート
—実験計画法入門／開発と品質工学—

東京大学ものづくり経営研究センター

稲垣 雄史

立本 博文

東京大学大学院経済学研究科

増田 陽介

2008年6月



東京大学21世紀COE [整備済]
ものづくり経営研究センター

品質工学ノート

—実験計画法入門／開発と品質工学—

東京大学ものづくり経営研究センター

稲垣 雄史

立本 博文

東京大学院経済学研究科

増田 陽介

2008年6月

要約

本論文では、品質を定量的にあつかう品質工学の手法を説明する。経営学、とくに製品開発分野では、品質は最も重要な概念となる。しかし、品質そのものを正面から、しかも、マネジリアルな対象として捉えることは、困難である。いままで多くの実証研究では、生産管理またはマーケティングにおける品質概念を用いて、測定を行ってきた。しかし、設計の本質を明らかにするためには、設計論視点から品質をもう一度定義することは、意義がある。この目的のために、本論文では、実践的につかわれる設計方法である品質工学をとりあげた。品質工学は、設計論の立場から品質を定量的に捉える手法であり、特にパラメータ設計（2段階設計・ロバスト設計）は品質獲得の実践的なモデル・手段である。

パラメータ設計を理解するために、第1節では、文系の学生には、なじみの薄い実験計画法と分散分析を説明した。パラメータ設計では、実験計画法によるバランスの良いデータの獲得と、分散分析で紹介される統計的道具が基本となる。第2節では、設計論に品質概念の導入を行うとともに、品質がどのように定量化されるのかを説明する。第3節では、品質工学の中心的な設計手法であるパラメータ設計を説明する。パラメータ設計は、基本機能・理想機能をもとに、各パラメータ（制御因子）を用いてS/N比と感度をコントロールする手法であり、実践的な意味を持つとともに、設計論的見地から製品開発のモデル化に大きな知見をもたらすものである。第4節では、パラメータ設計を用いた設計事例を紹介する。ここでは、具体的な事例紹介にとどまらず、最後に、第5節では、本論文で扱った内容を簡単にまとめる。

本論文のもう一つの特徴は、想定する読者を文系学部に所属する一般的な学部生とし、統計・数理的バックグラウンドを求めない事にある。いわば、文系学生への実践的な設計論の紹介となっている。このため、トピックスは網羅的になっている反面、わかりやすさのために大胆な簡略化も行っている。各トピックの詳細については、専門的な教科書を参照されたい。

1. 実験計画法入門	4
1.1 実験計画法のテーマと目的	4
1.2 実験計画法のステップと用語	5
1.3 実験配置：実験計画の種類	7
1.4 効率的な実験の方法：実験計画（実験配置）	10
2. 開発と品質工学（品質概念の導入）	13
2.1 品質と評価	13
2.1.1 品質の概念	13
2.1.2 品質の課題	15
2.1.3 品質評価測度・・損失関数の導入	16
2.1.4 損失関数	16
2.2 経営から見た開発の課題と対応	19
2.2.1 市場競争激化、開発費負担増、技術難化、経営資源の膨張	19
2.2.2 品質工学を用いたフロントローディング	19
3. 開発と品質工学（パラメータ設計とその事例）	22
3.1 前節のまとめ：	22
3.2 品質工学～二段階設計法（ロバスト設計）について	22
3.3 直交表	23
3.4 S/N比	23
3.5 損失関数	24
3.6 基本機能・理想機能	24
3.7 パラメータ設計の具体的手順	27
4. 品質工学を用いてトラブルフォローから「フロントローディング」へ	33
4.1 品質工学導入事例	33
5. まとめ	39
参考文献	40

1. 実験計画法入門

1.1 実験計画法のテーマと目的

なぜ実験をするのだろうか？

そもそも実験には3種類の目的がある。

- 1.検査・評価のための実験
- 2.要因分析のための実験
- 3.最適化のための実験

これらの特徴を、もうすこし詳しく説明する。

1) 検査・評価のための実験は、例として抜き取り検査などがあげられる。ある製品の特性に対して[Good (良品) /No Good (不良品)]を決定し、「市場に不良品を流出させない」という目的を達成するための方法として用いられる。

2) 要因分析のための実験は、例として本講義で解説する実験計画法があげられる。ある現象を引き起こすメカニズムを解明し、原因とその結果の変化量を定量的に理解するための方法として用いられる。

3) 最適化のための実験は、例として品質工学があげられる。詳細な解説は本講義後半になる。希望した特性を安定的に実現し満足いく品質を獲得するために、システムを構成するパラメータの最適化を行う方法として用いられる

ここでは、要因分析のための実験(for analysis)についての理解を深めていく。

ある現象とそれを引き起こす原因との間に存在する因果関係を明らかにしたい場合、因果関係の解明には「実験」と「観察」の2種の研究方法が存在する。その際、もし実験可能なら「観察」よりも「実験」のほうが因果関係の解明には有効である。しかし、「実験」には多大なコストを要求されるのが一般的である。よって、実験研究は効率的に行わねばならない。実験研究の中でも、もっとも効率的で正確に因果関係を解明できる方法が実験計画法を利用することである。

実験計画法は、2つのテーマから構成されている。実験配置と分散分析である。前者の実験配置は、偏りがなくバランスの取れたデータを効率的に獲得するための実験レイアウト（実験条件の組合せ）を計画するものである。実験計画（法）と呼ばれているのは、この為である。良質なデータを獲得するためには、除去しきれない測定誤差を最小化するための繰り返し実験、複数ある因子の影響を因子毎に評価できるようなデータにするための因子配置の工夫、膨大な要因の組み合わせに応じて実験を効率化するための大規模実験の一部実施法といったものを組み合わせていく必要がある。

一方で後者の分散分析は実験によって得られたデータの定量化、指標化および評価の方法である。得られたデータから要因分析を行うためには、変動や分散などを使ってデータを定量化・指標化が必要である。その際に、どうやって誤差を適切に把握するかが問題になる。因子による影響が（誤差ではなく）有意であることを正しく評価するためにF検定を使うことや、因子が結果に与える影響がどの程度かを把握するためにt検定を用いることなどが、具体的な手法となる。これらの統計的な手法を組み合わせ、データを評価・分析することが、分散分析である。

1.2 実験計画法のステップと用語

実験計画法は推計統計学の創始者と言われるフィッシャー(Ronald Fisher:1890~1962)というイギリスの統計学者によって考案された。この実験計画法には大きく分けて3つのステップが存在する。

ステップ1)「何を測定したいのか？」をはっきりとさせる

原因系と現象系、結果系の3つに分類して整理していく作業にあたる。

ステップ2)「要因」と「影響」を最も効率的に測定できるような実験手順を考える。

現実的には無理な回数の実験を行わなければすべてのデータが得られないような場合、実験回数を減らしながらも、すべて行った場合とほぼ同等の成果を得られるような実験パターンを、直交表を用いた一部実施法によって計画する。

ステップ3) 得られたデータをもとに、要因の影響度を定量化し評価する

得られたデータより、結果の変化量の分散が「誤差」でなく「要因」による影響であることをはっきりと示すために分散分析を用いて評価を行う。

ステップ1～3の手順で実験計画法は行っていく。そのために、いくつかの用語を定義しておく。

まず、実験計画用語として解明したい因果関係のうち原因に含まれるものを「要因」と呼ぶ。そして、結果のうち実験者の興味対象となっている測定値を「特性値」と呼ぶ。また要因の中で実験に用いたものを「因子」とよび、その影響量の増減を計るために割り当てた基準値のことを「水準」と呼ぶ。例えば、「因子 A (添加剤) を水準 B (2.5%濃度) に割り当てる」というような使い方をする。

また、得られたサンプルの特性値から平均を導き水準別に並べたものを「水準別平均」と呼び、これをグラフ化したものを「要因効果図」と呼ぶ。このグラフによって因子の効果を明確に理解することができる。

一方、得られた特性値は水準ごとに平均値に対してばらつきがある。このばらつきを評価するために、データ数、平均、変動、分散、標準偏差といったばらつき尺度を導入する。

ばらつきを示す尺度の定義：平均・変動・分散・標準偏差

測定して得られたデータ数（個数）を n とした時に、次のように平均・変動・分散・標準偏差を定義する。

$$\text{平均} : \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

$$\text{変動} : S = (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2$$

$$\text{(不偏) 分散} : V = \frac{(\text{変動})}{(\text{変動の自由度})} = \frac{S}{n-1}$$

$$\text{標準偏差} : s = \sqrt{(\text{分散})} = \sqrt{V}$$

分散・標準偏差が大きいほど、測定したデータセットの、ばらつきが大きいと判断できる¹。たとえば、A = {8, 9, 10, 11, 12} と B = {6, 8, 10, 12, 14} という 5 個のデータからなる 2

¹ 分散の定義で、変動の自由度を・・・として定義した。自由度の厳密な定義を、入門者に説明するのは難しい。自由度とは、独立に観測されたデータ数の事である。(不偏)分散の場合は、分子が平方和ですが、この平方和が、独立に決められる(自由に決められる)個数はいくつかとすることが、自由度になる(つまり変動の自由度(独立に決められる個数)はいくつか、ということ)。変動は、定義式内に、平均値が入っており、この分拘束されており、自由度は $n-1$ となる。例えば、3つの測定値から変動を計算しようとする時に、2つの測定値までは自由に値を入れ替えることができるが、3つめ目の測定値は、2つの測定値が決まると、自由に入れ替えることができない。なぜなら、3つめも変更してしまうと、平均値が変わってしまうからである。このことから、(不偏)分散の自由度は $n-1$ となるのが分かる。

つのデータセットがあったとしよう。このときAもBも平均値は10であるので、平均値から違いを見分けることは出来ない。しかし、両者を比較した時に、明らかにBの方がばらついているように見える。Aの方がBよりも、平均値10のまわりにデータが集中している。このばらつきの感覚を定量化するのが、分散（標準偏差）である。AとBの分散（標準偏差）は、それぞれ、2.5(1.581139)と10(3.162278)である。2.5と10の比較から、Aの方がばらつきが少なく、Bの方がばらつきが多いということがわかる。

1.3 実験配置：実験計画の種類

実験計画には1因子の水準変化とその影響を把握する一元配置実験と、2因子以上の水準変化とその影響方法を把握する多元配置実験（総当り法）、そして直交表を用いて実験数を減らす一部実施法などがある。どの実験配置を使うかは、把握したい因子数や実験の予算・期間による。

次の例では、一元配置実験と得られたデータの分散分析の例を示す。

【分散分析の事例】

①コンクリート強度と添加剤Aの関係を測定。

コンクリート強度 (N/mm²)

A1=添加剤A濃度3%

A2=添加剤A濃度5%

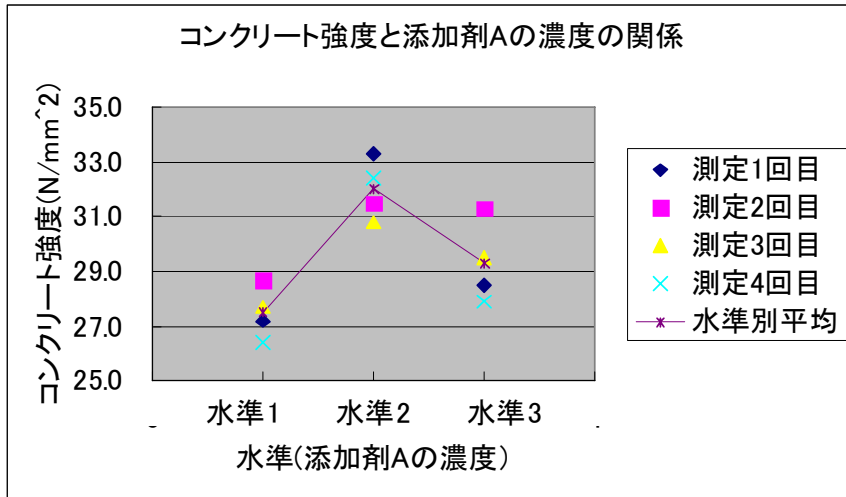
A3=添加剤A濃度7%

測定回数	水準		
	A1	A2	A3
1回目	27.2	33.3	28.5
2回目	28.7	31.5	31.3
3回目	27.7	30.8	29.5
4回目	26.4	32.4	27.9
水準別平均	27.5	32.0	29.3

実験の結果、上図のようなデータが得られた。例えば、左上のセルに27.2と記入されているのは、水準A1(すなわち添加剤Aの濃度3%)とした時に、1回目の測定で、27.2N/mm²のコンクリート強度が得られた事を示している。A1水準時に、1回目は27.2 N/mm²であるのに2回目が28.7 N/mm²であるのは、測定間の誤差が生じているためである。現実の実験

では、どのように正確に条件を揃えたとしても、必ず誤差が入り込む。この誤差を、最小にするように実験条件を組み合わせる事が、実験計画法のテーマである。一元配置実験では、繰り返し測定をすることによって、測定による誤差を最小化することを行っている。

②測定した結果を元に、添加剤の濃度変化をみるために要因効果図を作成する。



水準別平均値（折れ線グラフ）を見る限りでは、濃度変化と強度との間に関係性がありそうであることが、要因効果図から観察できる。もしも、添加物 A の濃度とコンクリート強度の間に、関係がないのであれば、折れ線グラフに変化は生じない。しかし、実際には水準別平均値では、水準 1 から水準 2 にかけて、コンクリート強度が上がっている。そして、水準 2 から水準 3 にかけて、コンクリート強度が落ちている。

ただし、測定回目別のデータプロットから観察できるように、測定回目によるばらつきも大きい。このため、水準間での変化なのか測定間（測定回目間）の変化なのかを、グラフからはっきりと決めることは出来ない。よって、分散分析を用いた定量化を行い、水準間変化であるのか、測定間変化であるのか、の分別を行う。

水準間変化、測定間変化を定量化するためには、全変動を、平均変動、因子変動、残差変動の 3 つに分別すればよい。全変動は、データ全体の変化を表す。これを、平均値の変化を表す平均変動と、水準を変化させた時のデータの変化を表す因子変動に分けるわけである。そして、残りの誤差が残差変動となる。つまり、水準間の変化は因子変動に代表され、水準変化によらない測定間変化（すなわち誤差）は、残差変動に代表されるのである。これを下図に示す。

品質工学ノート

測定回数	水準		
	A1	A2	A3
1回目	27.2	33.3	28.5
2回目	28.7	31.5	31.3
3回目	27.7	30.8	29.5
4回目	26.4	32.4	27.9
水準別平均	27.5	32.0	29.3
全平均	29.6		
水準平均-全平均	-2.1	2.4	-0.3



(3つに分解)

A1	A2	A3
29.6	29.6	29.6
29.6	29.6	29.6
29.6	29.6	29.6
29.6	29.6	29.6

(全平均)

A1	A2	A3
-2.1	2.4	-0.3
-2.1	2.4	-0.3
-2.1	2.4	-0.3
-2.1	2.4	-0.3

(水準平均-全平均)

A1	A2	A3
-0.3	1.3	-0.8
1.2	0.5	2.0
+	0.2	-1.2
-1.1	0.4	-1.4

(残差)

全平均、(水準-全平均)、残差をそれぞれ二乗すると下図のようになる。

水準		
A1	A2	A3
(27.2) ²	(33.3) ²	(28.5) ²
(28.7) ²	(31.5) ²	(31.3) ²
(27.7) ²	(30.8) ²	(29.5) ²
(26.4) ²	(32.4) ²	(27.9) ²
27.5	32	29.3
29.6		
-2.1	2.4	-0.3

(全変動)

10567.92



(3つに分解)

A1	A2	A3
(29.6) ²	(29.6) ²	(29.6) ²
(29.6) ²	(29.6) ²	(29.6) ²
(29.6) ²	(29.6) ²	(29.6) ²
(29.6) ²	(29.6) ²	(29.6) ²

(平均変動)

10513.92

+

A1	A2	A3
(-2.1) ²	(-2.4) ²	(-0.3) ²
(-2.1) ²	(-2.4) ²	(-0.3) ²
(-2.1) ²	(-2.4) ²	(-0.3) ²
(-2.1) ²	(-2.4) ²	(-0.3) ²

(因子変動)

41.04

+

A1	A2	A3
(-0.3) ²	(1.3) ²	(-0.8) ²
(1.2) ²	(0.5) ²	(2.0) ²
(0.2) ²	(-1.2) ²	(0.2) ²
(-1.1) ²	(0.4) ²	(-1.4) ²

(残差変動)

12.96

平均変動、因子変動、残差変動のような「変動」はデータの個数によって大きく影響を受けるので、自由度で調整した単位「分散 (S)」を計算する。各変動から、分散を算出したものが、次表である。

		自由度	分散	分散比(F値)
全変動	10567.92	11	960.72	-
因子変動	41.04	2	20.52	14.25
残差変動	12.96	9	1.44	

分散はそれぞれ、(各変動)/(各変動の自由度)で求められ、分散比は(因子変動) / (残差変動)で求められる。水準変化にともなうデータ変化が、意味があるかどうかを判断するには、因子変動と残差変動を比較すれば良いことが分かる。もしも、残差変動の方が、因子変動よりも大きいならば、因子変動はほとんど意味がない。この分散比のことをF値とよぶ。因子による影響があったかどうかを判断するF検定は、このF値を用いて判断する。

$$\text{分散比(F 値)} = \frac{\text{因子による影響 } 20.52}{\text{残差による影響 } 1.44}$$

つまり・・・

F > 1であれば、仮説通り、取り上げた因子は効果を及ぼしている

F値の検定

**1% 有意 *5% 有意

F(2,9)** < 14.25

因子の効果は、危険率1%で有意である。本当は因子の効果がない(誤差と同レベルなのに)のに、効果有りとして誤判断してしまう確率が1%である。

1.4 効率的な実験の方法：実験計画（実験配置）

普通のテキストなどでは2因子を扱う二元配置実験までしか説明していない。なぜなら因

品質工学ノート

子数が増えると実験数は等比級数的に増大し、二元配置以上の実験配置は現実的でないからである。

予算・期間に制約がある中で膨大な実験数をこなすのは非現実的であるが、調べたいシステムの因子数は、多いことが一般的である。このジレンマを解決するために直交表を用いて一部実施法により実験をする。直交表を用いることによってすべての組み合わせを総当りで行ったのと同じ効果をもつデータセットをより「少ない」実験で獲得することができる。

直交表は、縦軸(行)に実験 No、横軸 (列) にそれぞれの因子を割当て、ある実験では当該の因子をどの水準にするかを示す表である。例えば、下図の直交表の実験 No.2 では、因子 1~7 に対して、順に、水準 1、水準 1、水準 1、水準 2、水準 2、水準 2、水準 2 とする実験をすることを意味する。

直交表の基本的な考え方は、なるべく似通った因子水準の実験を省き、各因子の効果が判断できるようにバランス良く各因子の水準の振り分けをする、というものである。このために、直交表では縦軸(行)に実験 No、横軸 (列) にそれぞれの因子を置き、ある列のどの水準に対してもほかの列の水準が同じ回数だけ表れるようにしている。

例として 7 因子 2 水準の実験を考えてみる。この場合、多元配置実験を行うと 128 回もの実験が必要になってしまう。しかし、直交表を用いて実験計画をすると、合計 8 回の実験で得られた測定値で、最大 7 因子の効果を把握できる。

直交表(L8)をつかった直交表実験

		因子の割付列						
		1	2	3	4	5	6	7
実験No.	1	水準1	水準1	水準1	水準1	水準1	水準1	水準1
	2	水準1	水準1	水準1	水準2	水準2	水準2	水準2
	3	水準1	水準2	水準2	水準1	水準1	水準2	水準2
	4	水準1	水準2	水準2	水準2	水準2	水準1	水準1
	5	水準2	水準1	水準2	水準1	水準2	水準1	水準2
	6	水準2	水準1	水準2	水準2	水準1	水準2	水準1
	7	水準2	水準2	水準1	水準1	水準2	水準2	水準1
	8	水準2	水準2	水準1	水準2	水準1	水準1	水準2

結果、合計 8 回の実験でえられた測定値から最大 7 因子までの効果を把握できるという非常に効率的な実験とすることができる。

多元配置の実験では因子間の交互作用をみることができるが、直交表を用いるとすべての交互作用を観察することはできなくなる。全ての交互作用を観察することを諦める代わりに直交表を用いた一部実施法では大幅な実験数の節約を達成する事が出来る。

では、交互作用は無視してよいものだろうか？それは、直交表を用いた実験が多用されるのは通常の実験目的が「どのような条件であっても安定して効果のある因子（＝工場の生産現場のようにいろいろな環境条件があっても安定して効果を発揮する因子）」をみつけることにあるので、交互作用に対する興味がそこまで大きくないという点にある。

2. 開発と品質工学(品質概念の導入)

グローバルなビジネス競争の中でアジア諸国、特に中国・韓国市場の進出および台頭はあきらかで、日本企業はコスト差で大きく水をあげられ、一方で優位に立っていたはずの技術差は縮小傾向にあり、日本のものづくりの相対的地位にかげりが出始めている。それを脱却するには「品質」と「コスト」の圧倒的な改革、「技術革新」が必要である。

本講義では「技術革新」という点で、素早い開発、ロバスト設計、生産さらには試作レスでの量産化などを可能とする新しい手法として「品質工学(QE)」が 21 世紀のものづくりに活用できるのではないかと期待から、品質工学の解説を行う。

優位なポジショニングを得るために QCD の一つ、「総合製品品質」の向上が目的の一つとなるが、経営学的にみると優れた総合製品品質は高い「設計品質」と高い「適合品質」に分解され、それらが組み合わさって初めて達成される[藤本(2001)]。具体的には、加工精度や工程能力を高めることで製造段階の情報転写ミス減らす(設計の意図通りの製品を作る力を上げる)こと、開発段階ではじめから生産しやすいような製品設計にするという心がけ、わかりやすい説明書で適切な使用方法をきちんと伝達するなどが考えられるが、本講義では、本来重要な使用時の環境変動、計時変化あるいはロット変動に強い「ロバストな製品設計にする」ことで総合製品品質の向上を目指し、そのための手法として品質工学を学ぶことにする。

2.1 品質と評価

まずは、従来の経営学でみる、品質の概念とその課題、さらには品質の評価についてみる。

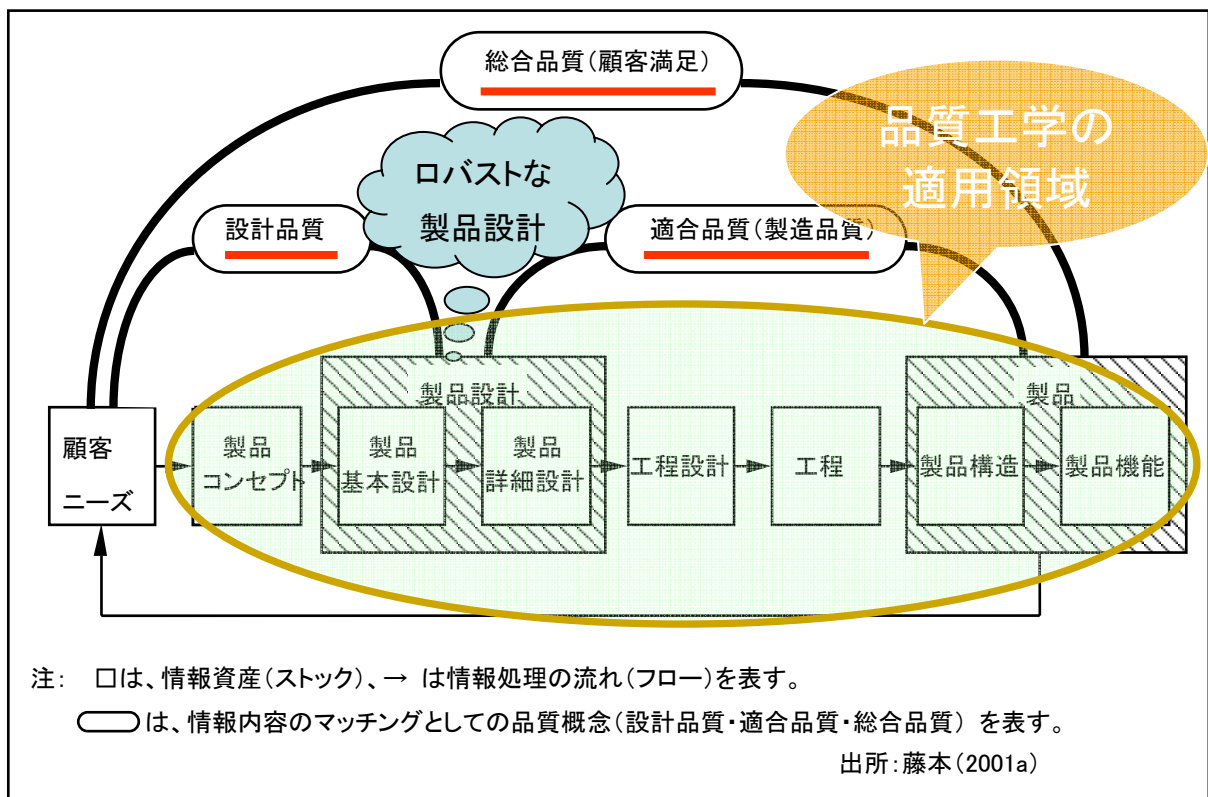
2.1.1 品質の概念

品質を考える場合、顧客満足をベースにした総合製品品質を、図 1 に見るように「品質の連鎖と品質の概念」としてとらえることができる。図で情報資産(ストック)は矢印にそって、上流部分の顧客ニーズの翻訳から始まり、機能設計・構造設計、さらには下流の製品詳細設計から、工程設計、工程をへて製品機能の搭載された製品構造ができあがり、顧客に提供・享受される。

総合製品品質は「長くよく売れる製品は良い品質である」の言葉[石川(1989)]で表現されるように顧客満足の概念で把握されている。顧客の直接的・潜在的ニーズ情報が機能要求の束となり製品コンセプトとしてとらえられ、製品設計ステージでは基本設計、詳細設計へと翻訳され、製造段階では、その設計通りにしかも作りやすくその上製造時の「情報転写ミス」をいかに減らすかが製造を担う側の役割となっている。しかし、問題は適合品質(製造品質)を実現する前提となる「設計品質」

にはほとんど間違いがないと想定されて情報転写が行われていることである。製品の機能は顧客の使用時の環境変動や経時変化の影響を受けやすく(交互作用がある)、目的とする機能がばらつき、使用に耐えないと感じるとクレームとなり、製品は品質不良ということになる。設計者にとって目的機能への環境変動や経時変化などの影響を抑えること(以後「ロバストにする」と言う:本来頑強の意味であるが耐力があること)は容易でなく、大変難しく、重要であることはよく知られている。しかも、ばらつき問題はその原因の大半が前工程の設計にあるにもかかわらず適切な方法が知られていない。

図1 品質の連鎖と品質概念



これは、品質の連鎖と品質概念のなかでのミッシングリンクともいえる課題であり、総合製品品質向上にとって「ロバストな製品設計」が必要となる理由でもある。したがって、ロバストな製品を設計・製造するということは、まずは製品の目的機能をはっきりさせ、ロバストとなる設計を行い創造した「製品設計情報」を、適切な製造工程をへて、忠実にばらつき少なく転写し、狙う機能を搭載した製品を製造することである。したがって、後に説明する品質工学はこの両者に有益な手法を持っており、ロバストな設計品質と適合品質の両方に係わる部分に位置している。

ここで、品質の良否にかかわるとい意味で従来の時間軸で見た製品の設計品質、初期適合品

質、経年適合品質についても抑えておく。

初期適合品質: 購買時点での性能・たてつけ・仕上がりなどをいう。

信頼性: 経年的な適合品質(故障頻度が少なければ高い)

設計品質: 顧客に約束された機能のレベル、

整備性: 修理に出してから戻ってくるまでの期間

購買一年後の製品ユーザーに、買い換えをするならばまた同じメーカー、同じモデルを選ぶかどうかを聞いていく。これに対する返答率が、ユーザーの過去1年間の各品質を経て得た製品使用体験を凝縮して総合製品品質の代理変数となっている。

2.1.2 品質の課題

製品の機能不良をばらつきを圧縮して押さえ込むか、公差で抑えるか? という課題が存在する。

検査を厳しくし公差を厳しく設定して工場内で不良品を排除してしまえば、内部不良率は上がるかもしれないが市場では不良品がでるはずがない。不良がでるとすれば、顧客の品質評価尺度に厳しいものや易しいものがあり、厳しいものにより受容率が下がり、結果として外部不良率として現れるのだから公差を厳しくすれば良いとする考え方がある。一方、工程能力を上げ、ばらつきを圧縮することにより製品が顧客に届いてから発覚するような不良品をできるだけ排除し、外部不良率をさげるやりかたがある。両者のうちどちらをとるかという問題である。

以前ブラウン管を用いた TV で、アメリカで生産する企業は設計が決めた公差の中ならどの値でも良品とし、公差から外れた場合はすべて不良品として排除し、外部不良率0%を期待して生産していた。日本企業では製造時に製品毎の性能のばらつきの圧縮を図り、内部不良を見つけ出すだけでなく、市場で使う顧客が製品機能のばらつきによって感じる不満をへらし、外部不良を減らそうと努力していた。その結果アメリカ製のソニーの TV ではなく日本製の TV がほしいと言われ [朝日新聞 (1979)]、それが市場での日本製品の評価となっていたと言われている。

TV に関して、規格不良率と市場故障率の関係をみるとアメリカ工場では一様分布、日本の工場では正規分布をしており、出荷時の不良率はアメリカの工場は0%、しかし日本の工場は0.27%となるのに、実際の不良実感はお金に換算して前者が3倍ほど損失が大きいものであった(田口, 1999)。

2.1.3 品質評価測度・・損失関数の導入

製品機能のばらつきについては、かなり長期間使ってみるとか、何台もあつめて直接比較しないと分かりにくい。工場では製造品質あるいは工程の均一性について工程能力として平均値±3σ 標準偏差(σ)で評価、管理されるが、なじみの無い表現で今ひとつ分かりにくい。それに対し、田口(1999)は品質を技術品質と商品品質に分け定義し、品質水準について経済的評価測度を提案した。技術品質を良くするというのは、「消費者がのぞまないもの、製品が出荷後社会に与える損失」などを減らすこと。望まないこととは、機能が十分でないことによる損失(ばらつき)、使用コスト、それに公害である。例えば、出荷後に不良を起こして社会に与えてしまう損失や、製品が顧客に約束した機能を環境の変動などで発揮しないことや製品機能のばらつきである。一方商品品質を良くすることは、「消費者が望むもの」で、機能や外観を良くすることなどである。ここから、製品機能の目標値 m と製品の機能 y との差の関数として損失関数 $L(y)$ を表現した。

2.1.4 損失関数

品質の評価を行うために目標値と特性値との差にもとづく損失関数 $L(y)$ の導入を行う。

m : 望み特性 y の目標値。ここで、望みとは、ある有限の目標値がありそれより大きくても小さくても良くない特性をいう。

$L(y)$: 目標値 m から外れたときの経済的損失をいい、特性値 y の状態で出荷された製品 (N 個) が様々な使用条件下で、製品の平均寿命(T)の間使用したときの平均的損失をあらわす。

$$L(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_0^T L_i(t, y) dt$$

目標値の回りに $L(y)$ をテーラー展開を考えると、目標値からの差分による損失を考え y が目標値に等しいときは $L(m)=0$ 、損失関数の微係数 $L'(m)=0$ となるので、

$$L(y) \cong k(y - m)^2 = \frac{A_0}{\Delta_0} (y - m)^2 = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \sigma^2$$

で表される。

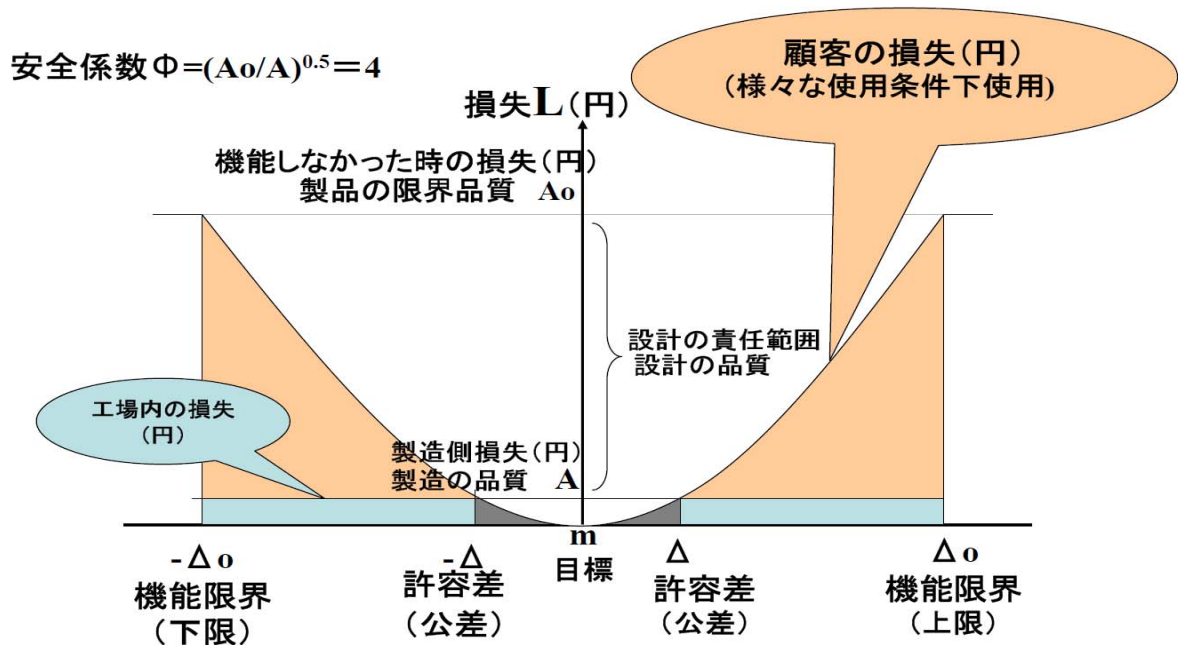
Δ_0 は機能限界を表し、実際に機能しなかった時の損失(金額)を A_0 として製品の品質を表わす。 σ^2 は平均二乗誤差で、分散をあらわす。

したがって、品質による損失を小さくするには、上式から限界損失 A_0 を小さくするか、 Δ_0 を大きくするか、ばらつきの σ^2 を小さくすることになる。 A_0 については安全設計して小さくするか、 Δ_0 については、このシステムを包括する上位のシステムのパラメータ設計を行い、マージンを増やして Δ_0 を大きくする。さらに σ^2 については $(y-m)^2$ の平均を小さくするよう生産工程の設計や管理を行うことになる。

図2に損失関数を模式的に表す。

この損失関数で表現される許容差は製造の品質による工場側の損失と顧客側の損失がバランスをとれたところで設定されており、いずれにせよ目標値から特性値 y がずれることにより損失 L が発生し、これを社会の損失としてとらえることになる。機能限界 Δ_0 をこえると客が許容できず、クレームがあがる。

図2 損失関数



同様に、非負で小さいほど良い特性である望小特性。非負で大きいほど良い特性である望大特性があり、それぞれの損失関数を図3にまとめて示す。

図3 損失関数の関係

	望目特性	望小特性	望大特性
機能限界	Δo	Δo 以下	Δo 以上
機能限界での損失	Ao	Ao	Ao
比例定数 k	$Ao/\Delta o^2$	$Ao/\Delta o^2$	$Ao/\Delta o^2$
特性値 y の損失 $L(y)$	$k(y-m)^2$	$k y^2$	k/y^2
許容差 Δ $\phi=(Ao/A)^{0.5}$ *1	$\Delta o/\Phi$	$\Delta o/\Phi$	$\Delta o\Phi$

*1: ϕ は A を不合格品の製造側損失（金額）としたときの安全係数。

ここで、損失関数を用いた有名な安全設計の試算例が有る [田口ら (1988)] ので簡単に紹介する。東京のあるディスコで 1.6t の質量の照明装置がワイヤーで吊られ、装置をチェーンで動かす構造になっていた。しかし、ワイヤーは自由に伸びる構造になっており、チェーンが切れて照明装置が落下して、3 名が死亡し、数人がけがをした。この場合の安全係数はいくつであるべきかの算定である。照明装置の下には平均数名の人が踊っており、この当時の人命損失を 1.55 億円/人にみるとその人数は 4 人。したがって $Ao=6.2$ 億円。損失関数は、チェーンの強さにたいして望大特性を適用することができる。切れたチェーンの安全係数は 4 として設計されていたので、その品質水準を計算すると、

$$L = \frac{A_0 \Delta_0^2}{y^2} = \frac{6.2(\text{億円}) \times 1.6^2}{(1.6 \times 4)^2} = 3875 \text{万円}$$

3,875 万円になる。1 本 10 万円程度のチェーンを 2 本使っていたので、それと比較すると約 190-200 倍の損失がチェーン 1 本あたりにかかっていた。したがって、安全係数の取り方

に問題があることになる。その上安全設計という視点でみると、チェーンが切れたときでも人にぶつからないよう短い長さのワイヤーで吊るという安全設計をしていれば、チェーンがきれても修理費用程度ですむことになる。修理費を 100 万円程度で見積もると、損失は約 6 万円程度になりチェーン価格 20 万円より安くなり、10 万円のチェーンでさえも過剰品質となり、経年劣化を考慮してもまだ安くできる。このように、損失関数を用いて最適解の設計を行い、さらに安全設計の最適解をもとめ、損失金額を比較すると安全設計の良さがわかり、生産性の比較もできることになり、正しい形で安全設計を導入するとよいことも理解できるようになる。

2.2 経営から見た開発の課題と対応

2.2.1 市場競争激化、開発費負担増、技術難化、経営資源の膨張

先にも述べたとおり海外企業の参入・成長もあって市場での競争は激化している。さらに自社製品の 2～3 割程度は新規開発品の投入が必要で、新製品がないと売上を維持することすらできなくなってしまう。

価格面での競争もまた激化している。そのため、新製品の開発を行う中で、開発機種数の増加、開発期間の短縮、SCM 対応やジャスト・イン・タイムなどの方策を用いて需要分以外を生産せずに在庫を削減し、極力無駄を省く必要がある。

自動車業界ではノークレーム要求といった桁違いの品質を求められるのだが、自動車産業に関わらず、今日の社会では製品に欠陥が発生していることが分かり、それを自ら是正しないでマスコミに取り上げられた場合、企業にとって致命的なダメージとなる可能性は高い。

また、商品の高機能化（ネットワーク対応、カラー対応 etc.）と多機能化に伴って搭載されるソフトウェア数の増大（ここ 3 年で約 2 倍に）など、要求される技術が難化したことや、新規開発サイクルが短くなることで人員、開発費等の面でも経営資源の膨張と費用負担が急増している。

2.2.2 品質工学を用いたフロントローディング

フロントローディングとは、時間やコストのかかる開発段階後半での、設計変更の繰り返し回数を減らすことを目指した問題解決の概念である。開発初期の段階で出来るだけ多くの「仕込み」を行い後半に出てくる問題解決負荷を減らすのであるが、ここでいう「仕込み」にあたるのがたとえば CAD や CAE の導入や、問題解決パターンの知識蓄積などがあげられる。

しかし、事前に発見できない問題を見逃したままどんなに努力をおこなって「仕込み」をしたとしても、その問題が後で顕在化して設計変更を迫るようであれば「仕込み」を行った苦勞は報われない。それどころか前の段階で仕込みを行った分が余計な無駄になりかねない。フロントローディングと開発期間の短縮にはミッシングリンクが存在していて、そこを繋ぐ決定的なツールが何かあるのではないだろうかと考えられる。

さて、前にあげた、経営からみた開発の課題であるが、具体的な対応方向として、開発において品質の早期安定化を早く達成し、後戻りなく、評価を手早く回し、作らないで済むような試作の回数を減らし試作レスの追及を図るといった「**トータル開発期間の短縮**」と、不良品流出撲滅などによってクレームレスを達成することで「**桁違いな品質**」を実現すること、そして投資資源の最小化をはかるということが考えられる。

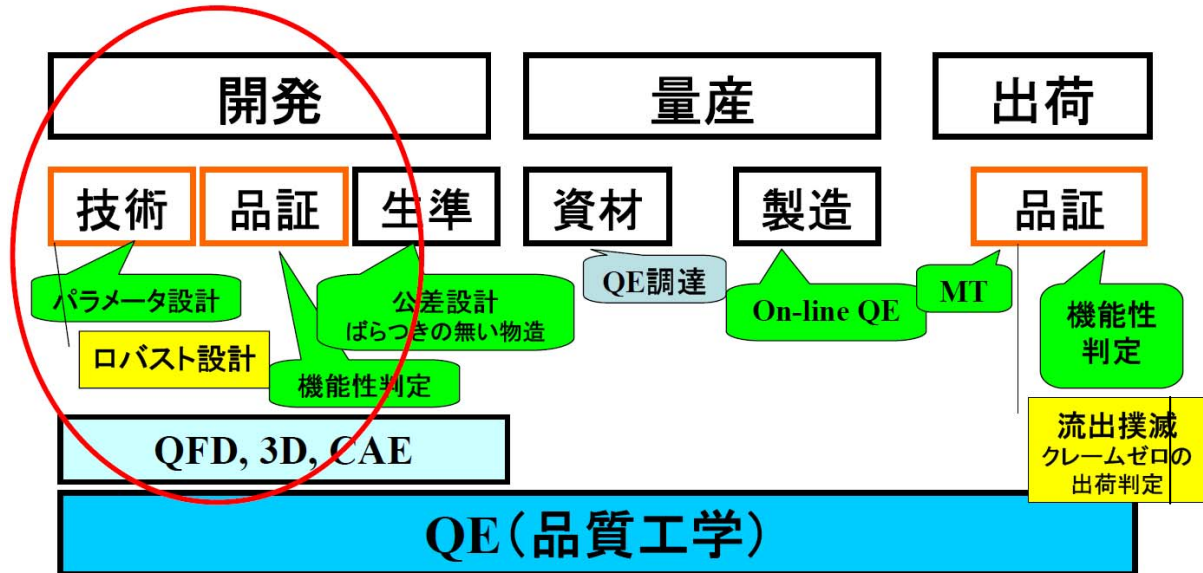
この対応を実現するにはフロントローディングが必要だが、事前に発見できない問題を解決する手法が見当たらない。そこで品質工学が登場するわけである。

例えば、「ジャスト・イン・タイム」方式工場での品質の作りこみについて考えてみると、

- 1：そもそも不良品をださないこと⇒流出撲滅
 - 2：不良をできるだけ作業ステーションの中から外にださないこと⇒自主検査・全量検査
 - 3：作業ステーションから出た不良はなるべくすぐに把握する⇒1個流し etc
 - 4：不良の根本原因を迅速にみつけてその改善に結びつける⇒見える管理
- ここでも品質工学（MT法）を用いることができる。

部品の開発・製造システム～年間ノークレーム、4000万個でたった1個しか機能不良のなかったアルプス電気の品質工学の適用による技術品質と製造品質に優れた開発・生産システムがひとつの成功事例としてあげられる。その概念的なプロセスを図4に示す。これは全体として品質工学のデジタル・マニファクチャリング（DM）といい、ベースに品質工学の各種手法をとりいれ、組織的な仕組みができあがっている。特にその鍵の一つとなっているのが、ミッシングリンクになっていた設計の課題、ロバストな製品設計を可能とする「パラメータ設計」技術である。

図4 品質工学による技術品質と製造品質に優れた開発・生産システム(例)



出典：谷本勲（2004.2005）

次の章から、品質工学のパラメータ設計とその事例を中心に学ぶことにする。

3.開発と品質工学(パラメータ設計とその実例)

3.1 前節のまとめ：

前節の内容をまとめると、市場において、企業は激しい競争の嵐に巻き込まれ、求められる技術の難化、それを達成するために割くコストも膨大になっている。これをどうにかする必要はある。

高い総合製品品質を達成するには製造段階での情報転写ミスを減らし適合品質をあげるだけでなく使用時の環境変動や時間経過あるいはロットばらつきに強いロバストな製品設計にしなければならない。

藤本(2003)の「能力構築競争」によると、フロントローディングをもちいて未解決問題の最小化を行うことが、製品開発において重要なのは理解できる。しかし、一体どうすればできるのか？

問題解決といっても問題の所在の大半は設計にあり、製造での不具合はそれに比べればわずかである。設計段階での問題解決を図っていくほうが重要である

さらに、アルプス電気の事例のように 4,000 万個に 1 個の不具合（ロバストな設計）レベルを達成するためには設計段階での問題解決が要求され、それにはパラメータ設計が必要とされる。

損失関数は品質工学の創始者、田口玄一先生が精魂こめて作ったもので品質の測度をお金で表現できるため特に米国で共感を得た。工場内の損失と顧客の損失を関数によって表現し、両者のバランスした特性値を許容差とし許容差設計を可能とする。

前回しゃべらなかつた点としては、上位システムのパラメータ設計により損失関数の機能限界 Δo をいかに大きくするかの工夫が必要なことも付け加えた。

3.2 品質工学～二段階設計法（ロバスト設計）について

従来の設計法では、狙う機能のシステムを標準条件でテストしながら開発をする。標準条件で機能がえられることが分かると、いくつかの条件にしたがって、例えば使用環境をかえたり負荷試験をおこなったりしてテストする。問題は、各種条件を変えてテストしたとき目的の機能を満たさない場合が発生すると、設計定数（design parameter）を変えながら狙う機能を持つように調整することである。調整（チューニング）では設計パラメータと信号やノイズとの間の交互作用を押さえ込む設計にはならないのでモグラたたきで際限のない設計作業となりがちである。

一方、タグチメソッドでロバスト設計を行うというのは、二段階設計法を用いて行うことである。手順としては、まず機能のばらつきを減らした後、狙う機能の目標値や目標曲線にあわせていく。タグチメソッドでは、具体的な手法（工学的手段）として、

1：直交表 2：SN比 3：損失関数 と、この3つのツールを用いる(田口,2005)。

これらのツールを用い、さまざまな使用条件下でも正しく機能するような製品を効率的に設計するというのが品質工学（タグチメソッド）でロバスト設計を行うということである。

まず、この3つのツールを使う理由について説明を行う。

3.3 直交表

直交表について、前述の実験計画法の説明で触れた。直交表を用いる理由は、一つとして開発の効率をあげるために、できるだけ上流で最適設計を研究するということであり、フロントローディングの発想を取り入れるためである。

もう一つの理由は、下流条件に対する信頼性の評価を行うためである。つまり上流での最適設計が下流でも品質問題を起こさず最適であるために直交表に主効果のみを割付け、設計者が自由に選択・実施することのできる制御因子の主効果に加法性があるかどうかのチェックをおこなう必要があるからである。

3.4 S/N 比

SN比とはシグナル（信号）ーノイズ(雑音)比のことで、通信や記録・再生など通信工学・電気工学など多くの分野で幅広く使われる。いくらシグナルが大きくてもノイズの占める割合が大きいのであれば機能としては良くないといえる。

このSN比を用いる理由について説明する。まず市場での、あるシステムに対するさまざまな使用条件は「信号」か「ノイズ」である。

「ノイズ」も「信号」も設計者が制御できない因子で、例えば車を使う時のガソリンの残量やアクセルのふかし具合などがそれにあたる。

その中で「信号」は、使用者が製品を使う一般的な条件のことで、様々に想定される使用条件の中でもできるだけ信号因子の範囲は広く取り上げその機能を調べる必要がある。

一方の「ノイズ」は、信号因子とは異なるばらつきの原因で特性値に影響を与える要因であり、その条件を把握する必要がある。

なぜこういう切り分けをするのかというと、設計者の自由にできない使用条件に対して製品が正しく機能するか評価を行うためである。これがSN比を用いる理由である。このSN

比が高いということはさまざまに想定された信号因子に対してノイズが引き起こす製品機能のばらつきへの影響が小さいということにあたり、想定どおりの製品機能を発揮していることに繋がる。

3.5 損失関数

損失関数を導入した理由は、先に述べたとおり、品質の評価を、社会的損失（円）という具体的な数値に置き換えることで品質の良否をわかりやすく定量的に評価するためである。

ここでひとまず品質工学におけるロバスト設計の特長を纏めると、

- 1：損失は目標値と機能のずれの二乗で表現し、損失関数として表現できること。
- 2：基本機能を使うことにより、創造した技術の機能を、入出力が互いに直線的であることを理想機能で表現できること。尚、標準 SN という手法を用いることで入出力が非線形の場合でもそれを理想機能としてパラメータ設計が可能である。
- 3：理想機能（または目的機能）と実際の特性値との差を機能性としてとらえ SN で表現できること。
- 4：直交表を用いることにより…主効果の加法性の確認ができること。加法性が確認できれば上流での主効果が下流でも再現可能となること。

3.6 基本機能・理想機能

狙う機能を実現するシステム（アイデア）の選択を行った後、従来はまず機能設計を行い、その後に機能性（ばらつきを抑える）設計を行っていた。そのためばらつき圧縮が困難で十分な機能性を確保するための確認・調整の繰り返しが多かった。先に目標機能を標準条件で得てから、次にいろいろな条件下で機能のばらつきを圧縮しようとする、そのばらつきや交互作用の影響を抑えきれなくなる。

一方で品質工学法では機能性設計を行った後で機能設計が行われる。まず先に機能のばらつきを減らした後に目標値かあるいは目標曲線にあわせるように機能設計を行っていくことでばらつき圧縮にかかる労力などを解決している。

システムの機能はエネルギーの変換で作られられる。システム機能のロバスト化はエネルギー変換の「理想機能」、すなわちそのシステムが最終的に生み出す仕事を考えることであり、仕事量とかそれへの応答から狙う機能の有るべき姿が見えてくる。理想機能を実現するにはシステムの個別の特性が絡んでくるので理想機能をどのように設定するかは工夫が要

る。理想機能や理想機能の実現に関していくつか例をあげていく。

例えば、ボールペンの機能を達成するにはボールの噛み具合、インクの濡れ具合などが絡んでくる。従来法ではこれらひとつひとつを組み合わせてそれぞれ対応しなければならない。しかし本来のボールペンの理想機能はどんな紙にも、書いているときの温度が変わっても綺麗にかけるということだけである。したがって、紙や温度はノイズになり、理想機能としてはインクの転写距離とインク量(筆記された線幅)の関係が直線性を持つということになる。

冷蔵庫で冷却に用いる風を作り出すファンの理想機能は、風量とファンの回転エネルギーの関係をゼロ点を通る直線関係(モーターの入力電力に対して生み出す風量は直線であるとする)であらわす。この直線で表された理想機能と現実の差をいかにうめるかが品質工学の力を発揮する場である。

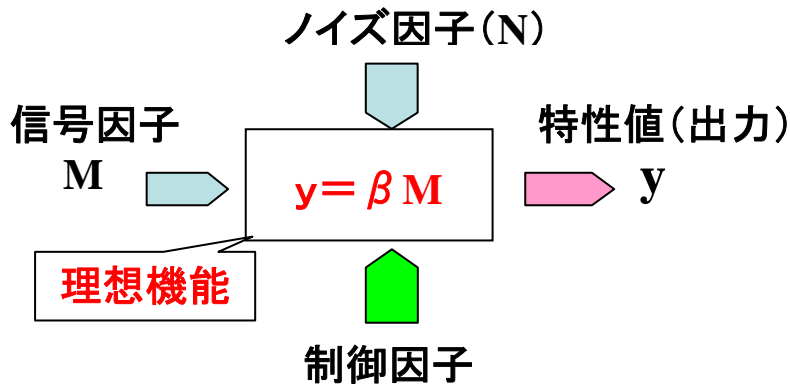
自動車のプレス成形で使われるテーラードブランク工法で、溶接ブランク材にたいし理想機能を未溶接の母材の特性としてとらえる。この場合は、母材の非線形変形領域を含め、引張伸び即ち反力特性を理想機能としてとらえ、標準条件での出力を信号値に用い標準 SN として直線関係の理想機能式として表す方法である。その適用領域はひろい。

光ディスクの場合は、レーザー光を用いてビット情報をディスクに書き込むので、レーザー発光時間とマークの形状(書込みの正確さ)書込みとの関係が基本機能になり、理想機能としてはレーザー発光時間に応じて正しいマーク形状と長さが書き込まれることである。

また多くの産業機器に用いられている DC モーターの場合、電流とトルクを基本機能としてみると、理想機能はモーターの入力(電流)と出力(トルク)がゼロ点を通る直線関係になることである。

つまり、ここまでの議論を纏めると理想機能と信号因子(入力)、ノイズ因子、特性値(出力)と設計者が制御できるパラメータである制御因子の関係で表されるシステムが第5図に示すようにわかってくる。●

図5 線形な理想機能をもつ信号因子、ノイズ因子、制御因子と特性値の関係



タグチメソッドのパラメータ設計では、顧客はさまざまな状態で製品を使いたいので信号 (M) は広く変化させる。通常、出力特性は信号因子のレベルに応じて影響を受ける。同時にノイズ因子 (N) の影響を受けるため出力特性 y のばらつきが大きくなる。ばらつきをひきおこすノイズ因子にはシステム中で最大と最小の影響を与えるノイズを代表として取りあげ、特性値に及ぼす影響を小さくすることを考えるわけである。調合して最大のノイズの影響を小さくできれば、その間にあるノイズの影響も押さえ込めると考えている。

次に二段階設計法とパラメータ設計の手順と概念を示す。

二段階設計

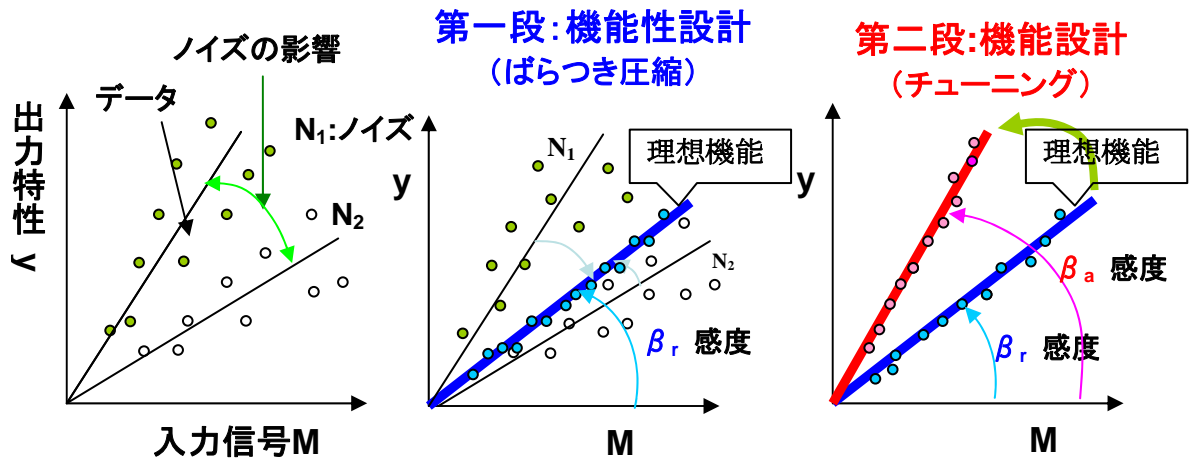
タグチメソッドによる二段階設計 (パラメータ設計ともいう) は次のようなステップを経て、最適設計がなされる。図 6 に二段階設計の概念を模式図で示した。

第 1 段：機能性設計 (ばらつき圧縮) ～狙っている理想機能 (式) からのズレを、SN 比を基準に制御因子の水準を評価、選択してばらつきを最少にするよう最適化する。

第 2 段：機能設計 (チューニング) ～ばらつきのない標準条件下で、SN 比への影響が少ない因子を用いて感度を調節 ($\beta_r \rightarrow \beta_a$) して合わせこむ。あるいは、入力信号 (M) を選択して出力特性 (y) を合わせる。

ここで、入力信号 M に対する出力特性 y が線形な関係にあり、それを理想機能式とすると、動特性の SN 比といい図 6 に示すようになる。式の σ^2 はノイズの影響をあらわす程度をしめし、 β^2 は感度をあらわしている。

図 6 二段階設計の概念



$$\text{SN比 } \eta \text{ (デシベル)} = 10 \log(\beta^2 / \sigma^2) \text{ 、 感度 } S \text{ (デシベル)} = 10 \log \beta^2$$

3.7 パラメータ設計の具体的手順

パラメータ設計は具体的に次の手順で実施することになる。

- 1) システムの選択⇒アイデア・機能設計、専門の技術者が行う本来の仕事。
- 2) 理想機能の決定⇒理想機能、信号、ノイズ、制御因子の決定
- 3) 実験計画 ⇒直交表へ各因子を割付
- 4) 実験 ⇒各因子の割付に基づいて実験あるいはシミュレーションを行う。
- 5) 最適条件決定 ⇒SN 比および感度の計算。要因効果図を用いて、最適条件の組み合わせを得る。
- 6) 確認実験 ⇒最適条件で得た利得の推定値の再現確認を行う。

タグチメソッドは評価システムで、狙いとする機能を実現するアイデアはそれぞれの専門技術者が行うものであり、そのアイデアの良否を判定すると同時に最適化を図るのに用いる。そこで、スタタパルトという教育用の装置を用いて、このパラメータ設計の手順を踏むことにする。

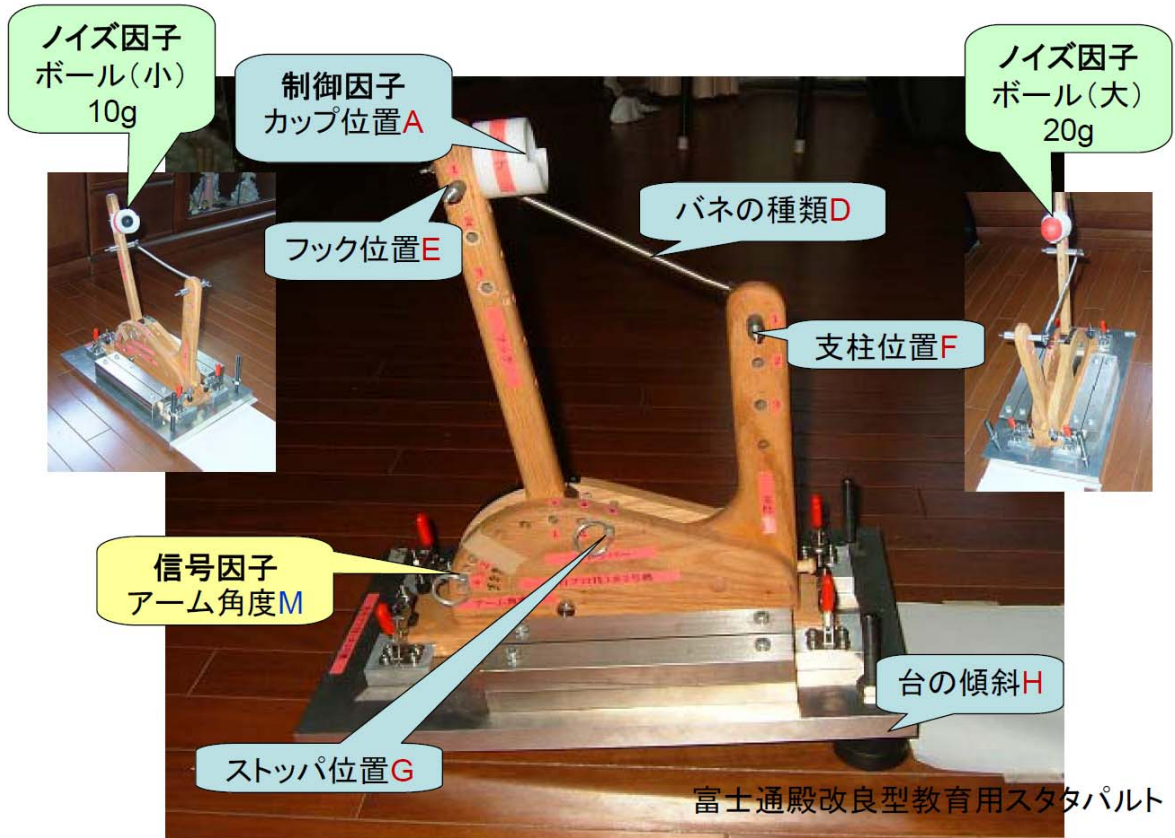
【スタタパルトに見るパラメータ設計】

スタタパルトとは統計的投石機の意味で球を投擲する機械である。品質工学を感覚的に実感するために良く使われる教育装置である。このスタタパルトを通じてパラメータ設計の具体例を学んでいく。

1) システムの選択：システムは既に選択されており、それがスタタパルトである。図 7 にその構造をしめす。

2) 理想機能の決定：①スタタパルトの理想機能を $y = \beta M$ として、座標変換も含み線形式を考える。入力 M はアーム角度、特性値 y は実際の飛距離である。実際の飛距離 y をアーム角度 M と係数 β に比例して現れるようになれば理想機能が実現したことになり、今回の目的となる。

図7 スタタパルトの構造と各因子



②制御因子の決定（最適化したいもの）

設計者が設定できる制御因子をまず選ぶ必要がある。制御因子の主効果をそれぞれ独立して試みることでできる混合型直交表L18を用いて実験をするため、制御因子として8個選定できるが、カップの位置A、バネの種類D、フックの位置E、支柱の位置F、ストッパーの位置G、ベース台の傾斜Hを取りあげ、合計6因子とした。ここでB,Cは誤差項として制御因子を割り付けていない。カップ位置には2水準、それ以外の因子には3水準を設ける。

③信号・誤差因子の決定（変動、ばらつきを与えるもの）

設計者が制御できない因子を設定する。

信号因子には、3水準（アーム角度141°、149°、157°）を選び、一方の誤差因子には投擲球の大きさの違い2水準（N1:小球 [黒い球]、N2:大球 [赤い球]）を設定した。

3) 実験計画

直交表L18へ各因子をわりつける（図8）。それぞれ内側わりつけは制御因子のパラメー

タが、外側わりつけには信号因子 (M1,M2,M3) とノイズ因子 (N1,N2) が挙げられている。

図8 直交表への各因子の割り付けと実験結果

									M1		M2		M3	
									141		149		157	
L18	A	B	C	D	E	F	G	H	N1	N2	N1	N2	N1	N2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	653	587	783	746	892	880
2	1	1	2	2	2	2	2	2	1113	1013	1326	1637	1637	1988
3	1	1	3	3	3	3	3	3	1386	1386	1762	2165	2115	3098
4	1	2	1	1	1	2	3	3	628	907	713	705	785	773
5	1	2	2	2	2	3	1	1	907	628	1208	1135	1386	1407
6	1	2	3	3	3	1	2	2	2139	2139	2139	2139	2139	2139
7	1	2	1	1	1	2	3	3	1708	1708	1708	1708	1708	1708
8	1	2	2	2	2	3	1	1	4742	4742	4742	4742	4742	4742
9	1	3	3	1	3	3	3	2	413	399	531	493	628	566
10	2	1	1	3	3	3	2	1	1215	1276	1553	1765	2064	2422
11	2	1	2	2	2	2	3	2	626	631	645	708	678	746
12	2	1	3	3	3	3	1	1	2139	2139	2139	2139	2139	2139
13	2	1	1	1	1	2	3	3	1708	1708	1708	1708	1708	1708
14	2	2	2	3	1	2	1	1	4742	4742	4742	4742	4742	4742
15	2	2	3	1	2	3	2	2	644	644	644	644	644	644
16	2	3	1	3	2	3	1	1	3645	3645	3645	3645	3645	3645
17	2	3	2	1	3	1	2	2	645	645	645	645	645	645
18	2	3	3	2	1	2	3	1	893	1042	1046	1281	1214	1580

最適化したい制御因子 (パラメータ)

信号因子 M
M1=141°, M2=149°, M3=157°

誤差因子 N1,N2
N1=小球, N2=大球

実験結果
データは
18x2x3=108個

4) 実験

各因子の割り付けに基づいて実験を行う。その結果は図8に示す。

制御因子6個と外側へわりつける信号3水準とノイズ2水準で、実験回数は108回となる。最適条件での確認実験もおこなわれる。

5) 最適条件の決定

SN比と感度Sの要因効果図。これは制御因子の各水準がばらつき抑制、感度向上にそれぞれの程度効いているかを見える化したもので、それぞれ図9と図10に示す。

図9 SN比の要因効果図

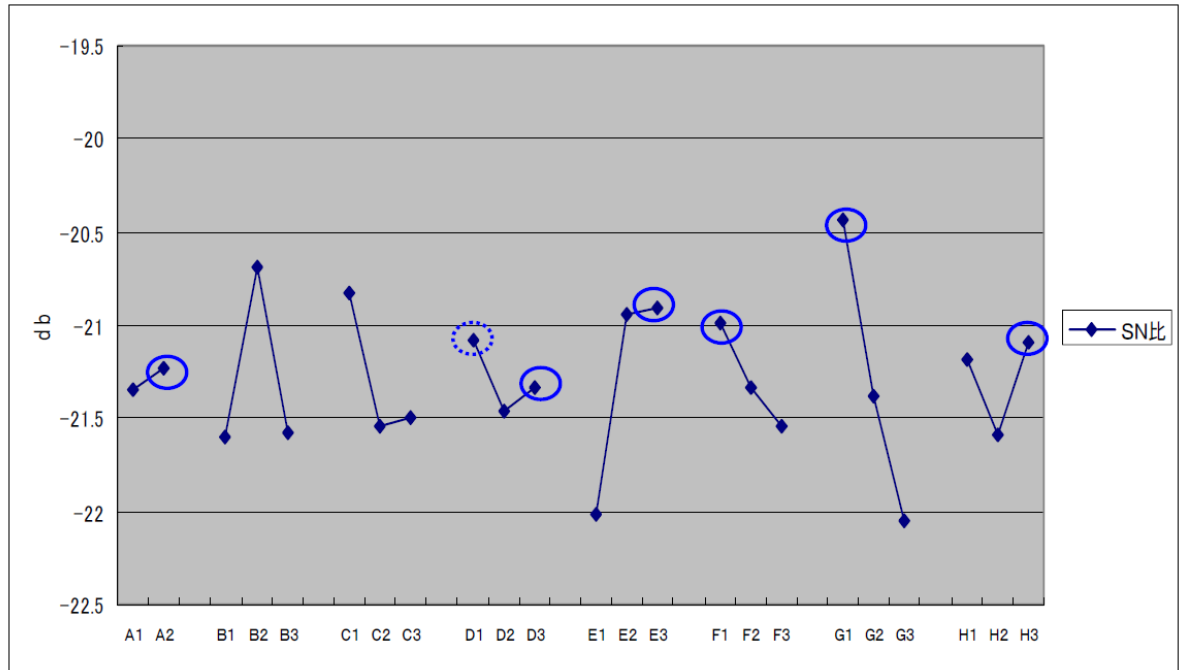
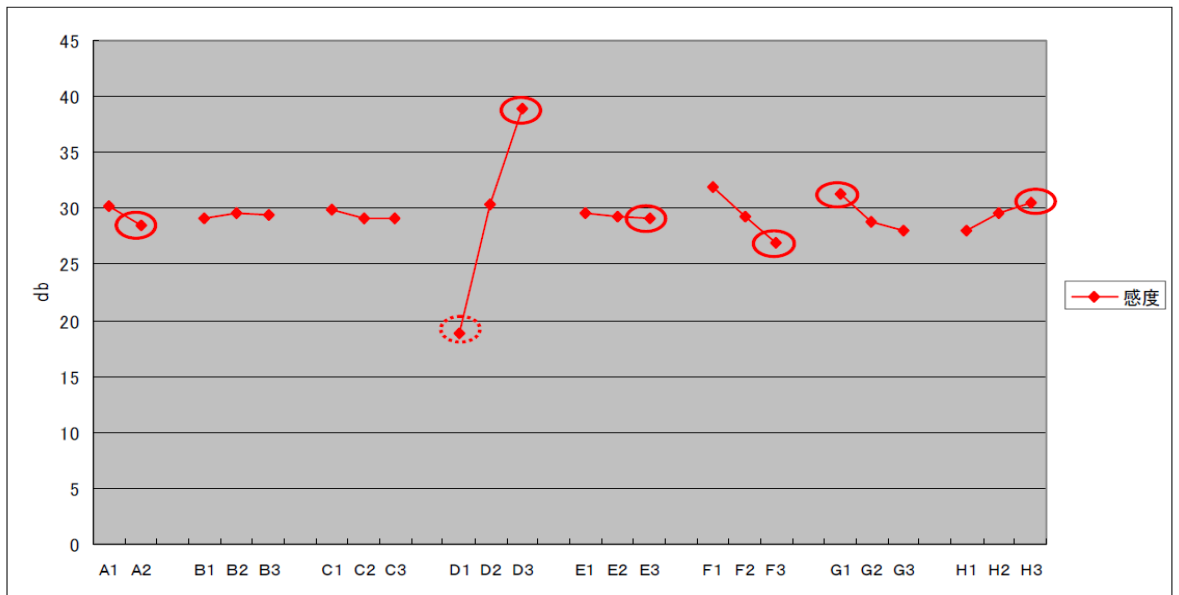


図10 感度 (S) の要因効果図



S/N 優先で判断し、S/N があまり変化しないときは、目的から判断して取捨選択した。
 制御因子とその水準の最適な組み合わせは $A_2D_3E_3F_1G_1H_3$ であり、最悪の組み合わせは $A_1D_2E_1F_3G_3H_2$ 、ここでは感度の大部分を決めているのがバネであり、S/N はバネ D の水準でそれほど変わらないので、感度優先で D_1 ではなく D_3 を選択している。結局最適な組み合わせ

せを選ぶと最悪に比較して S/N は推定値 4.3db, その確認値 6.5db, 感度は推定値 15.0db, その確認値 13.6db となり比較的再現性もあり、特性値のばらつきは約 1/3、感度は 15 倍ほどよくなり、ロバストなパラメータ設定ができた。

このように、タグチメソッドによるパラメータ設計は、手順を追って設計パラメータの組み合わせを一部実験で評価、最適化、確認を行うことができ、その結果選択したアイデアの善し悪しや最適なロバスト設計ができることが理解される。

4.品質工学を用いてトラブルフォローから「フロントローディング」へ

これまでの話は品質工学を模式的に見たもので、次は実例を紹介していく。

従来は製品のトラブルフォローだったがフロントローディングによるトラブルの押さえ込みに有効に活用され、特にコンピューターのシミュレーションだけでは評価できないようなトラブルを品質工学は解決していく。

4.1 品質工学導入事例

ここでは主に三つの分野での事例をみることにする。

1) システムの事例

部品の開発製造システムの例 (A社) : 年間ノークレームの達成

作らずに創るシステムの構築 (R社)

2) 製品の事例にみる品質工学

- ・ 家電 (冷蔵庫)
- ・ パソコン関係 (MO装置)

3) 技術の事例にみる品質工学

- ・ 自動車関係 (テーラードブランク工法)
- ・ モーター技術 (シミュレーションによるトルクむら低減)

【システムの事例】

最初のシステムの事例は、既にやや詳しくふれたのでここでは触れない。

「作らずに創るシステムの構築」

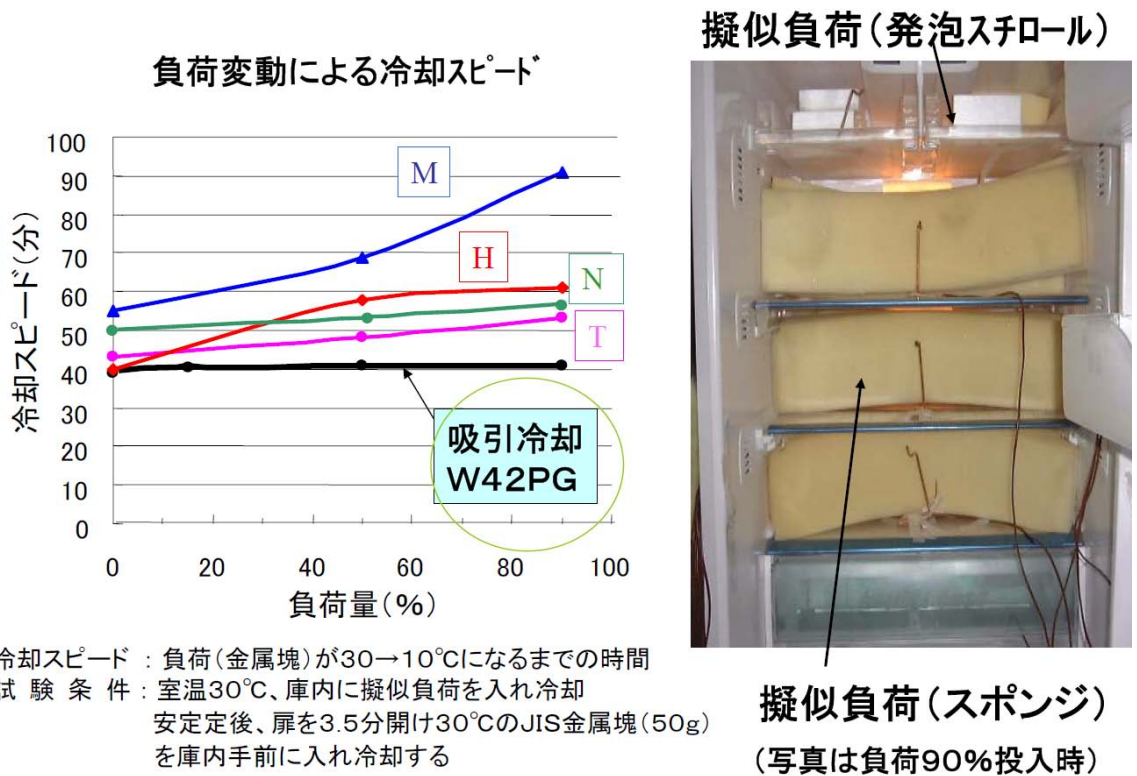
開発プロセス改革の方向性として“作らずに創る”(試作レス)を進めている事例。映像システム事業において市場競争の激化、開発機種数の増大、技術が難しくなったこと、経営資源の膨張などの課題にたいし、フロントローディング型をめざしツールにタグチメソッドを使い、作らずに創る、試作をするな!のコンセプトによりシミュレーションの増加(4-5倍)、機能性評価が定着してきた。特に3D設計、ロバスト設計、人材育成、設計情報管理、プラットフォーム&モジュール化の促進を体系化して実施し、効果をだしている。(近藤ら,2005)

【家電製品（冷蔵庫）の事例】

「吸引冷却方式」冷蔵庫を開発し、吸引冷却と吸引脱臭という2つの機能にロバスト設計を適用して製品化した事例(江藤ら,2006)。

そもそも冷蔵庫の使用状況はまちまちである。冷蔵庫内が満杯であることもあればわずかしか物が入っていない場合もある。特に、冷蔵庫内がひどく満杯である場合には冷えムラがおきるし、日常よく使う冷蔵庫ならばドアの開閉回数が多くなり手前の食品が冷えにくいし、奥のほうからは匂いが出るという問題が出てくる。

図 11 パラメータ設計をした吸引冷却方式冷蔵庫の負荷変動と冷却速度の特性比較



出典：江藤ら（2006）

これを、モーター入力電力と冷却ファンの風量との理想機能をゼロ点比例の関係にとり、パラメータ設計をおこなうことにより食料品などの庫内負荷が0から90%以上変動してもばらつきのないロバストな冷却特性をもつ冷蔵庫を開発し、商品化した(図11)。この技術を市場に発表したとき、タグチメソッドが機能のロバスト化に大きな役割をはたしているの

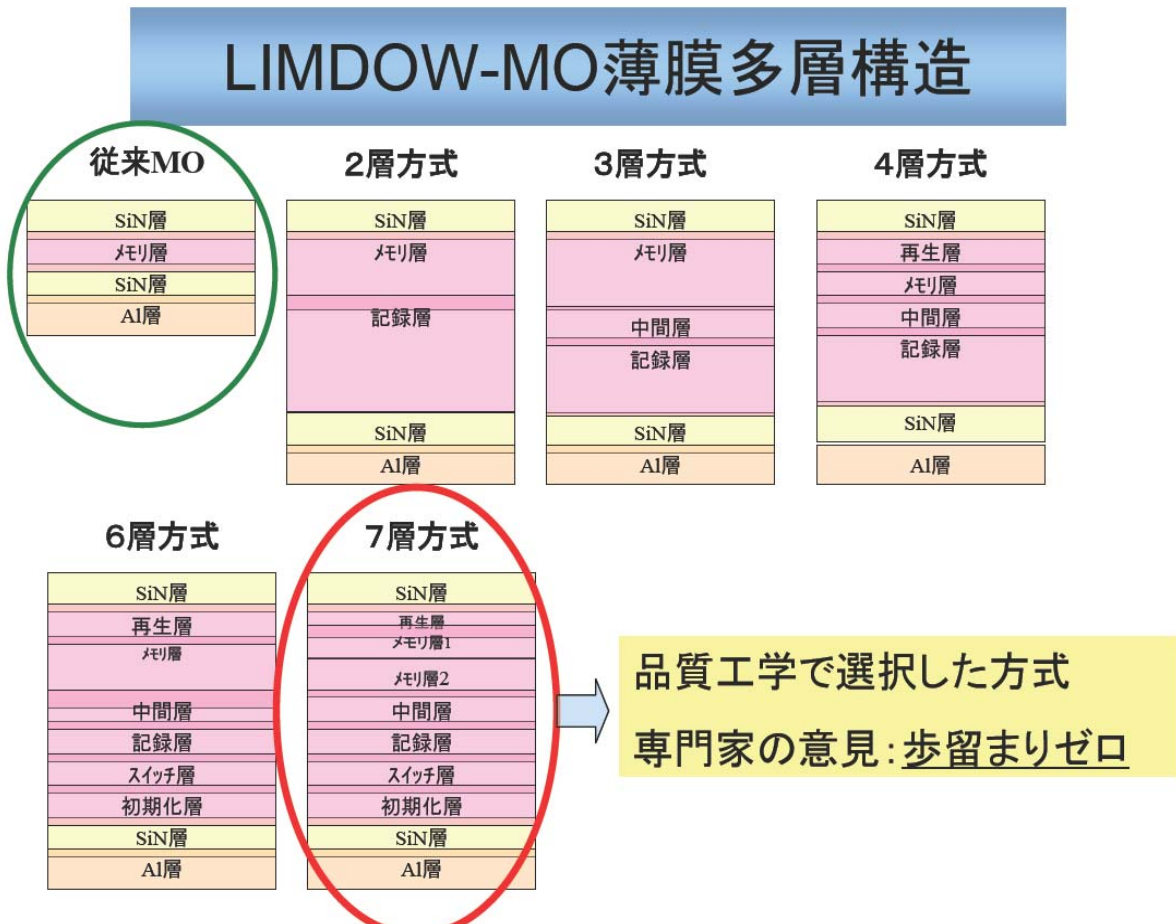
に、ノウハウとしてそのことが新聞記事上にも出ないように発表されている。品質工学が扱う領域ではそれが効果をあげれば上げるほど、抑えられているという傾向がうかがえる例である。

【LIMDOW MO の事例】

品質工学の中でも有名な事例。Over write MO 媒体に対し、レーザー発光時間とマークの長さの関係の理想機能をゼロ点比例式で表現するという事例(図 12 細川,1994)。

一般的な MO は 4 層構造だが歩留まりはせいぜい 80%程度でしかない。MO 媒体の特性をあげるには多層構造が有力な手段だったが、構造を 6 層くらいにしようとするとならつきが酷くなり歩留まりは 30%を割ってしまう。

図 12 LIMDOW MO 薄膜多層構造の模式図



出典：細川（1994）および、細川（2005）private letter による。

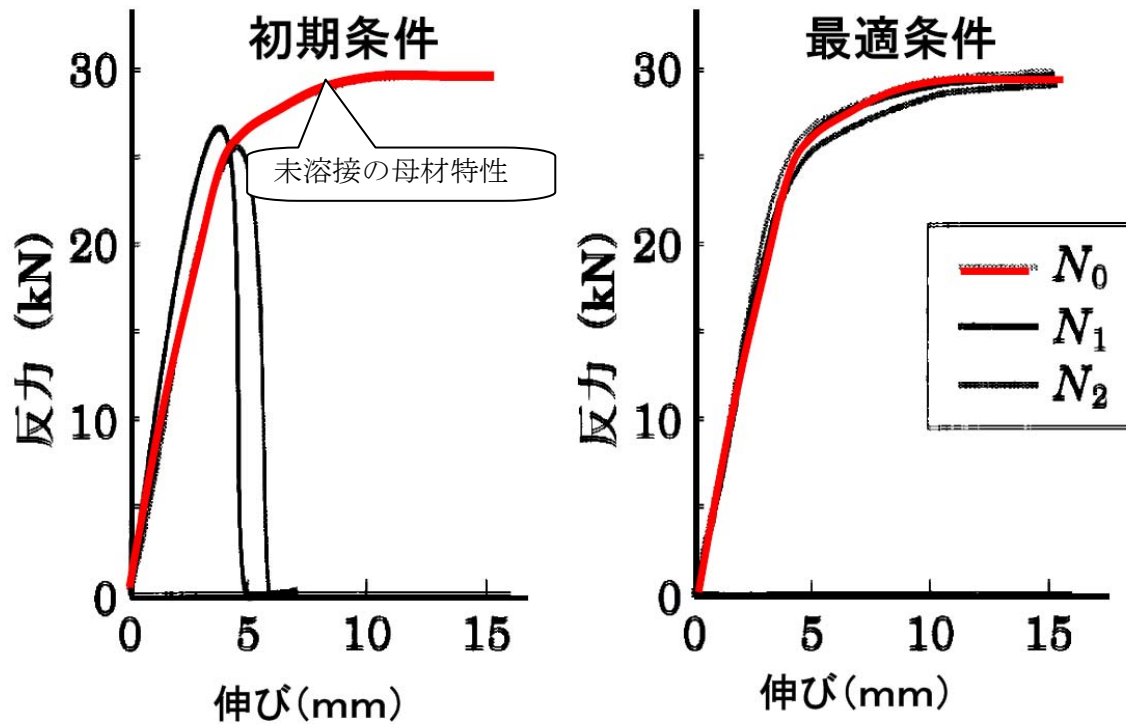
ひとつの制御因子でもコントロールしきれないときに、多くの制御因子を持ち込みタグチメソッドでパラメータ設計を行うことで目標を達成した。直感的には制御因子の組み合わせはシンプルなほうが良いはずなのにその逆をおこなったものであるが、およそ2年で7層方式のMOの開発に成功したという面白い事例である。つまるところ、理想機能式との差分を押し込め込むというパラメータ設計法は個別の課題の原因追求型では克服できない課題をかえって複雑なシステムにすることで全体として最適化を図っている。

【テーラードブランク工法の事例～標準SNによる二段階設計の実験例】

品質工学の適用例としては有名な、自動車製造メーカーN社の事例である（図13 中澤ら，2002）。

自動車には金属材料のプレス成型品が多く用いられている。あらかじめ数点のブランク材に切り分けておき、必要に応じて溶接して、それをプレス成形にかけて製品とするテーラードブランク工法への品質工学の適用例である。この方法は部材の資源有効活用とコストダウンにつながる。この工程で溶接の有無で成型材の特性が変わってくれてはこまるので、理想機能を未溶接の母材の特性としてとらえる。この場合、母材の弾性変形領域のみならず塑性変形領域を含め、引張伸び即ち反力特性を理想機能としてあつかい、標準条件の出力を信号値に用いる標準SNをつかう。その結果直線関係であらわされる理想機能となる。したがって、溶接があるというのはノイズになる。

図 13 テーラードブランク工法に標準SNを用いたパラメータ設計を行った実験結果



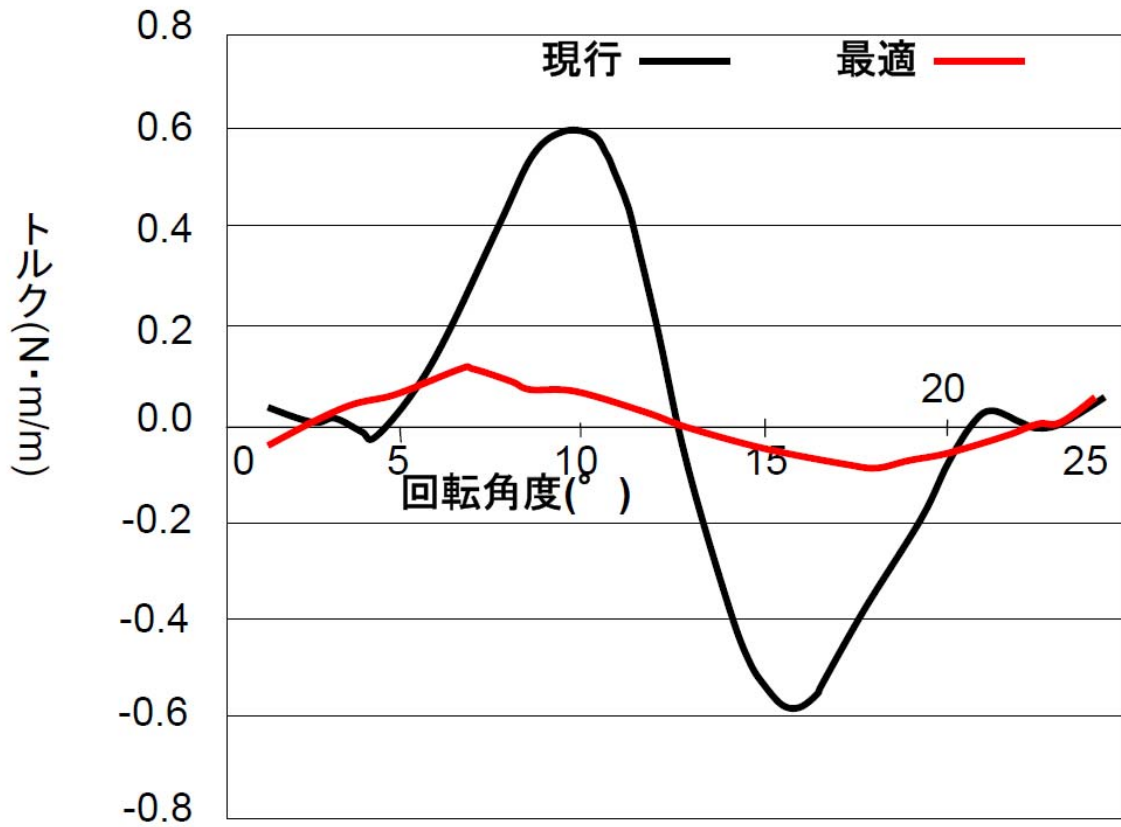
出典：中澤 栄ら（2002）

【シミュレーションによる DC モーターのトルクむら低減】

電動工具用 DC モーターの小型・高出力化がすすんでいるが、磁気的なアンバランスによるトルク変動は大きく、振動や騒音問題がある。これに対してシミュレーションにより DC モーターのトルクむらを、標準 SN を用いて改善した事例で、シミュレーションによる初めてのケースである（図 14 田頭ら, 2004）

シミュレーションで DC モーターのトルクむらの評価を行うのに基本機能として電流とトルクの関係をもちい、解析は標準 SN 比で行っている。その結果を図 13 にしめす。

図 14 パラメータ設計によるDCモーターのトルク改善



出典：田頭ら（2004）の図 7

従来の SN 比では、本来信号に含まれる効果であるはずの二次以降の項をノイズとして処理していたために信頼性が悪かった。この標準 SN を使い、ノイズの影響による最適条件を求めて、その後で最適条件を目標曲線にチューニングする方法をとっており、ロバスト化の効果が高い。

5.まとめ

品質工学が徐々に普及していることは品質工学会の発表テーマ件数を見ても分かる。

2005年6月の第13回大会ではパラメータ設計に関する発表が多かったようだが、全体件数でも120に近く品質工学に関する関心は高まっている。

では品質工学の経営戦略的な側面とはなんだろうか？ 現在、品質工学(タグチメソッド)の位置づけは研究開発における技略のひとつとして位置づけられており、研究開発の面では、個別の品質特性の評価よりも目的機能を包含する基本機能で評価することにより一石百鳥をねらっている。目的機能を理想機能におき、理想機能と実際の特性との違いに着目し機能性を評価することは開発の短縮に寄与し、生産性の向上に有益である。

最後に、本講義の内容を簡単にまとめると、品質工学における二段階設計法(パラメータ設計)は開発の効率化に非常に有効であること。この品質工学とは、選択したシステムの機能性の向上とロバスト性を与え、システム自体の良否を早期に評価できる評価方法であるため、後になって無駄な設計変更を差し迫られる可能性を減らす。この手法をもちいることにより設計品質と適合品質の基礎となっているロバストな製品設計を可能にし「総合製品品質」の向上とフロントローディングに寄与する。

参考文献

- 朝日新聞 (1979.4.17) 「日本企業・イン・アメリカ」
- 石川 馨 (1989) 『品質管理入門』 (第3版). 日科技連. p45
- 江藤雅隆・稲垣雄史 (2006) 「品質工学を用いた吸引冷却方式冷蔵庫の開発」 『第14回品質工学研究発表大会』
No. 21
- 近藤史郎・長谷部光雄 (2005) 「経営課題に対する品質工学からのアプローチ」 『第13回品質工学研究発表大会』
No. 9
- 藤本隆宏 (2001a) 『生産マネジメント入門[I』』 (第1版), 日本経済新聞社.
- 藤本隆宏 (2001b) 『生産マネジメント入門[II』』 (第1版), 日本経済新聞社.
- 藤本隆宏 (2003) 『能力構築競争』 (1版), 中央公論新社, pp. 27-60.
- 田頭康範、小川和昭 (2004) 「シミュレーションによるDCモータのトルクむらの低減」 『品質工学』 Vol.12, No.5,
pp47-51
- 田口玄一(1999) 「マネジメントのための品質工学 3.製造における品質水準の評価は金額で」, 『品質工学』, vol.7.
No.4. pp4-10
- 田口玄一・吉澤正孝 (1988) 『品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学』 日本規格協会, pp34-37
- 田口玄一 (2005) 『研究開発の戦略』 日本規格協会
- 谷本 勲 (2004) 「経営が品質工学を必要としている」 第12回品質工学研究発表大会, 54
- 谷本 勲 (2005) 「品質工学を普及させる方法と成果 経営が品質工学を必要としている」、第9回 経営者懇談
会 品質工学会主催
- 中澤 栄・高木正臣・小山優 (2002) 「テーラードブランク工法における溶接の機能性評価」、『第10回品質工学
研究発表大会』 No3
- 細川哲夫・岡室昭男・宮田一智・松本広行 (1994) 「交換結合オーバーライト光磁気ディスク開発への品質工学
の適用」 『品質工学』 vol.2, No2, p26-31