# パラメータ設計入門

## 目　次

はじめに　----------1
第1講　品質工学の発想の原点を考える----------4
1.一石三島（Q,C,Dの同時達成）の品質工学　4
2.技術や商品の品質を評価する方法　6
3.技術戦略と組織の役割と責任　6
3.1　技術開発におけるマネジメント戦略と戦術　6
3.2　組織の役割と責任　7
4.従来設計（問題解決型）と品質工学（技術開発型）の違い　8
5.科学と技術は別物　9
5.1　科学と技術の違い　9
5.2　実験計画法と品質工学の違い　10
5.3　ロケット打上げの失敗と反省　11
6.ノイズとの戦い　12
7.品質とは何か　13
7.1　品質の定義　13
7.2　品質損失と損失関数　14
7.3　「不良率」では品質は分からない　15
8.設計責任と製造責任　16
8.1　市場クレームの94％は設計費任である　16
8.2　「設計品質」によるクレームの損失計算　17
9.品質工学の役割　1810.開発プロセスにおける品質工学の役割　19
第II講　機能性の評価とパラメータ設計----------20
1.特性値と因子　20
1.1　「データ（特性値）」とは何か　20
1.2　品質工学的なデータの扱い方　20
1.3　データの誤差とは　20
1.4　「データの2乗和の分解」の計算に慣れよう　21
①　2乗の計算の意味　21
データの2乗の分解の意味　22
②　目標値からの差の2乗の計算例
1.5　特性値の分類　24
1.6　特性値に関係する因子の分類　25
2.機能性の評価　26
2.1　技術レベルの評価方法（SN比と感度）　26
2.2　“顧客が満足する”機能性の評価と改善　27
2.3　信号因子の種類　28
2.4　動的SN比の実験と解析　29

2.5　動的SN比の具体事例（切削寸法精度の改善）　30
2.6　静的SN比の実駿と解析　31
2.6.1　望目特性のSN比　31
2.6.2　望小特性のSN比　32
2.6.3　ゼロ望目特性のSN比　32
2.6.4　望大特性のSN比　32
2.6.5　百分率特性のSN比　32
2.7　体重計の計測誤差の評価　33
2.8　直交表の目的と使い方　34
2.9　商品開発から技術開発へ（4段階の品質分類）　35
2.10　試験から評価へ①　ー材料の寿命試験を機能性の評価でー　36
2.11　試駿から評価へ②　ー市場クレームと機能性の評価ー　37
2.12　購入部品の機能性の評価　38
2.13　購入商品の機能性の評価　42
2.14　「機能性」のとらえ方練習問題　44
［機能性の評価の演習問題］　45
3. パラメータ設計　46
3.1　パラメータ設計の目的　46
3.2　パラメータ設計の原理　46
3.3　パラメータ設計の手順　47
3.4　パラメータ設計の演習問題（大砲の最適化設計）　58
3.5　紙で簡単に実験した冷却システムのパラメータ設計　61
3.6　漢方薬の配合比の最適化とモデル動物による薬効評価　65
3.6　21世紀型パラメータ設計ー標準SN比の活用ー　70
参考文献・図書　74

# 開発設計段階におけるパラメータ設計の活用

—試作レス・試験レスによるシステムの評価と改善—

## はじめに

最近，市場における家電商品や自動車の品質トラブルによるリコール問題が多発して，消費者の信頼を裏切るような事件や事故が多発している。

また，ものつくりのやり方も問題解決型が大半で，再発防止型の開発が主流を占めているのが実態である。

これらのトラブルを未然に防ぎ，新製品開発のスピードアップと生産技術力の体質強化を図るためには，汎用性や再現性の高い技術開発を先行することが望まれている。

そのためには，経営者や管理者のマネジメント戦略が最も重要であるが，技術者は品質工学の考え方と進め方を身につけて「技術者の役割と責任」を果たすことが大切である。

本文の中で説明するが，市場におけるクレームの９４％は設計責任だといわれている。製造責任は僅か６％に過ぎないのである。この設計責任の大半を占める技術開発や商品設計に活用するのが，今回の研修で学ぶ「パラメータ設計」である。

## 第Ⅰ講 「品質工学の発想の原点」

品質工学では，社会全体とか地球規模に立った発想で物事を考えるから，個人とか生産者の立場を優先する従来の考え方とは本質的な違いがある。

すなわち，生産者側の論理ではなく，お客様の立場にたって，市場に出てからの「見えない品質損失（技術品質）」を評価することが大切であると考えている。

したがって，品質工学では「品質とは，商品を出荷後の損失と定義している」

また，企業においては，クレームの撲滅とコスト低減と開発期間の短縮を同時に達成することが望まれる。

研究開発手法としては，現象解明の科学的思考ではなく，目的追求の技術的思考が大切であるから，従来の演繹法的な手法（古典的実験計画法）に対して，帰納法的な手法（パラメータ設計）の重要性について説明する。

## 第Ⅱ講 「機能性の評価とパラメータ設計」

たくさんのアイディアの中から選んで開発したシステムが，市場において信頼性や耐久性においてお客様の期待に応えることが大切です。そのために，従来は，信頼性試験や寿命試験で規格に対する合否の判定をしてきましたが，特定な試験に合格しても市場のクレームを撲滅することは出来ないのです。

品質工学では，「試作レス・試験レス」を提唱していますが，試作や試験を行う前に，コンピュータシミュレーションを用いて，市場のノイズ（使用環境条件や劣化など）に強いシステムの最適化を図る「パラメータ設計」について説明します。

# 第 Ⅰ 講 品質工学の発想の原点を考える

## 1. 一石三鳥（QCDの同時達成）の品質工学

…「品質工学」は，田口玄一博士によって創始され，技術に求められる要件を効率的に実現していくための技術的な方法論として研究開発されてきた．品質工学はアメリカでは「タグチメソッド」と呼ばれ世界的に評価されている。

まず，開発設計段階で管理者や技術者に求められる要件は，「開発期間の短縮」と「市場クレームの撲滅」と「商品の低コスト化」の三つの課題を同時に克服することである。

### ① 市場クレームを撲滅するには(Quality)

市場におけるクレームを撲滅するためには，設計段階においてお客様の使用環境条件や商品の劣化ノイズに対して頑健であることが大切である。このように，頑健性の高い設計のことを英語では「ロバスト設計（Robust Design）」という。

ニコンと日立マクセルが開発した、次世代光磁気ディスクでは，多層（6層）の磁性膜の製造工程のロバスト設計で， データの書き込み速度が，従来のMOの約1/2と速くなり，市場品質が向上した。

### ② コストを低減するには（Cost）

商品のコストを削減するためには，CAEを活用して試作レス・試験レスで「ばらつきを削減して」品質改善の成果をコスト改善に還元すると同時に，開発期間の短縮で開発コストを削減することが大切である。

光磁気ディスクの場合，低コストの部品でロバスト設計を行い，約1/2のコスト低減に成功した。また，開発期間の短縮や無駄な試験の削減で，間接コストの大幅な削減を実現することに成功した。

### ③ 開発期間を短縮するには（Delivery）

要素技術や製造技術の「機能性の評価とパラメータ設計」で汎用性と再現性の高い技術開発を先行して，商品設計では，それらの技術を活用して「技術の編集設計」を効率的に行うことが大切である。

光磁気ディスクの開発は，従来6年以上の開発期間が必要であったものが，タグチメソッドを導入した結果，3 年で開発を完了する事に成功した。また，フォードや日産やトヨタなどの自動車産業でも，燃料噴射機構や技術進歩の早いエレクトロニクス系の制御機構にタグチメソッドを導入して，新車の開発期間を18～20ヶ月（従来は3年）に短縮した。

**モノつくりでは，開発から販売に至る開発スピードが求められているが，Quality(品質)とCost（コスト）とDelivery（期間）が矛盾しないように，同時に解決できるのが，品質工学（タグチメソッド）である。**

## 2. 技術や商品の品質を評価する方法

品質工学における評価のために使われる3種類の汎用的な手法は，いずれも技術の個別的な内容である「個有技術(Art)」や「固有技術(Technology)」そのものを扱うのではなく「技術内容の確実性(Engineering)」を評価する方法である。

（１） ＳＮ比　：機能性（機能のばらつきの程度）に対する評価尺度
（２）直交表　：要因効果の下流での再現性の評価方法
（３）損失関数：品質特性のばらつきによる損失を経済的に評価する方法

こうした手法を駆使して評価を行うことにより，今の企業が抱えている技術課題を効率よく解決していくことができる。

まさに品質工学は「前人未到の大海原を航海する羅針盤とも導きの杖ともいえる技術開発手法」なのである。

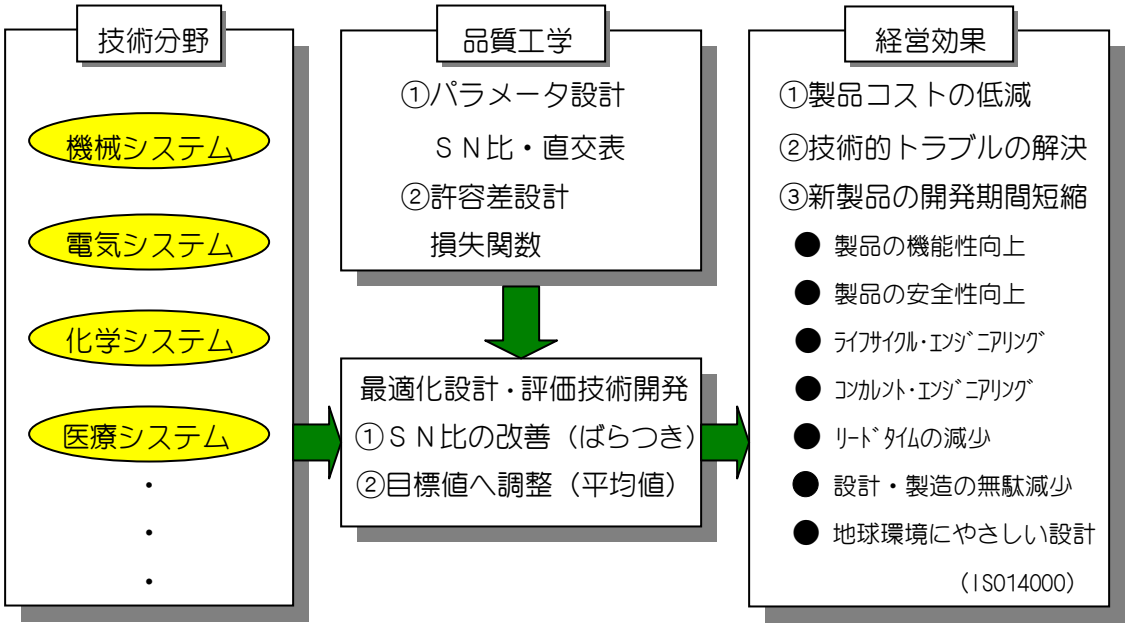



図 1　品質工学の狙い

**☆　品質工学適用による三つのメリット（技術開発の戦略）**

① 先行性：製品設計の前に，製品に必要な技術の「機能性（機能の安定性）」を確保する技術開発を先行させる。

② 汎用性：「機能性の評価」は，固有技術や特定商品だけでなく，技術や商品の機能が同じモノに適用可能である。

③ 再現性：研究所で開発した技術の成果（機能性や目標性能）が大規模な生産工程や市場において効果の一致性が高まる。

# 3. 技術戦略と組織の役割と責任

## 3.1 技術開発におけるマネジメント戦略（Strategy）と戦術（Tactics）

技術開発の戦略（Strategy）には次の 4 種類がある。これらは専門技術ではなく，広い範囲の技術分野に長期的に役立つものである。 これは部門長の仕事である。

(1) 技術テーマの選択

独創的な新製品につながる基礎的な研究で，次世代の商品企画に役立つ技術開発の「マネジメント戦略（技術戦略）」が必要である。CAEやテストピースの小規模の研究で，大規模生産や様々の使用条件で十分機能して，公害などのトラブルが少ない製品を開発することが大切である。

戦術（Tactics）にあたるものは。下記の二つである。

- 商品品質：消費者が望んでいるもので， 機能やデザインや価格
- 技術品質：消費者が望まないもので， 機能のばらつきや使用コストや公害など

死ぬまでボケない研究や経営の良し悪しや商品の良し悪しの「評価技術」が21世紀の戦略課題である。

(2) システム（コンセプト）の選択

技術者は目的機能を満足するシステムを沢山考案する人である。単純なシステムでは大きな機能性の改善は望めない。複雑なシステムは，たくさんの制御因子があるので「非線形効果」で，目的機能を達成することができるのである。

- トランジスタはあまりにも簡単なシステムであるから機能のばらつきを減らすことができない。
- ホイストンブリッジは複雑であるから，機能性の改善ができる。
- ニコンと日立マクセルが共同開発した「LIMDOW（光磁気ディスク MO）は TM
- （タグチメソッド）を使って悪魔のチューニングから脱出した典型的な例

(3) パラメータ設計（2段階設計）と許容差設計

目的機能や基本機能を満足するシステムの機能性の改善を低コスト部品で短時間に達成することができる。そのために，下記の「2段階設計」を行う。

① パラメータ設計（第一段階）：市場の様々な使用条件で， 長い間機能が変わらないようにする。（ロバストネスの研究）

② パラメータ設計（第二段階）：標準条件で目的機能に合わせ込む設計研究でチューニングという。（チューニングの研究）

③ 許容差設計：パラメータ設計の品質改善の成果をコスト改善に還元することと両者の和を最小にすることである。

(4) 設計のためのツール

1. 汎用的なツール:コンピュータ，直交表
2. 専門的なツール:有限要素法ソフト，回路計算用ソフト，その他
3. 計測標準:JISZ9090 測定•校正方式，JISZ8430 製品の品質特性（規格値の決め方）

「伝統的なパラメータの因果関係の研究をやめさせ，機能性の評価へパラダイムシフトをさせるのが技術部門の戦略であり，研究のマネジメントである。」

## 3.2 組織の役割と責任

経営の中で戦術(tactics)にあたるものは，個々の商品開発である。商品開発には次の二つの品質がある。

○ 商品品質：消費者が望んでいるもの，機能，外観（デザイン）をいう。
● 技術品質：消費者が望まないもの，故障などの機能のばらつき，使用コスト（燃費や使用電力），公害（騒音やNOｘなど）をいう。

品質工学では，商品品質のことを「品種問題（価値）」として扱い，技術品質のことを「品質問題（損失）」として扱うように区別している。

その理由は，消費者としては，購入前は品種問題が重要であるが，購入後は品質問題で商品を廃棄するまで悩まされるからである。

商品設計技術者は，商品品質を頭に入れながら，技術品質を改善するように設計することが大切である。

競合会社があるときは，上記の二つの品質が他社よりも優れていることをベンチマーキングで評価することが大切である。

ベンチマーキングテストは，生産コストのほかに，商品品質と技術品質（ＳＮ比）の評価で行われる。

経営の中の品質とコストの責任について各部署の役割と責任を以下に示す。

1. 商品企画部門
消費者の商品品質（品種問題）についての１００％の責任を持っている。
（機能，設計寿命，価格やデザインについて全部の責任を取ることである）

2. 開発設計部門
システム設計，パラメータ設計，許容差設計における技術品質（品質問題）についての全部の責任を持っている。
（安全率が4の場合，市場クレームの９４％は設計責任である）

3. 生産技術と製造部門
市場クレームについては，６％の責任しかないが，標準条件における製造品質や間接部門のコストを含む商品コストの責任を持っている。

4. 品質保証部門
設計品質については，設計で見逃した項目不明の問題を含む市場でのリコールの１００％の責任を持っている。

5. 品質管理部門
製造ミスによる市場リコールの１００％の責任を持っている。

最近市場で発生している品質問題は，上記のような役割と責任が明確でないため，問題が発生すると社長の退陣でお茶を濁す程度で，本質的な改善にならないのである。

## 4. 従来設計（問題解決型）と品質工学（技術開発型）の違い

従来の開発や設計では，実物を作ってから標準条件で設計定数（パラメータ）を変えて，品質特性の目標値に合わせ込むために，精密なレスポンスの研究が主流であるから，設計段階では下流における問題が見えてこない。すなわち、問題が起こるまでは，問題はないと思っている。「見えない品質」を見ていない。

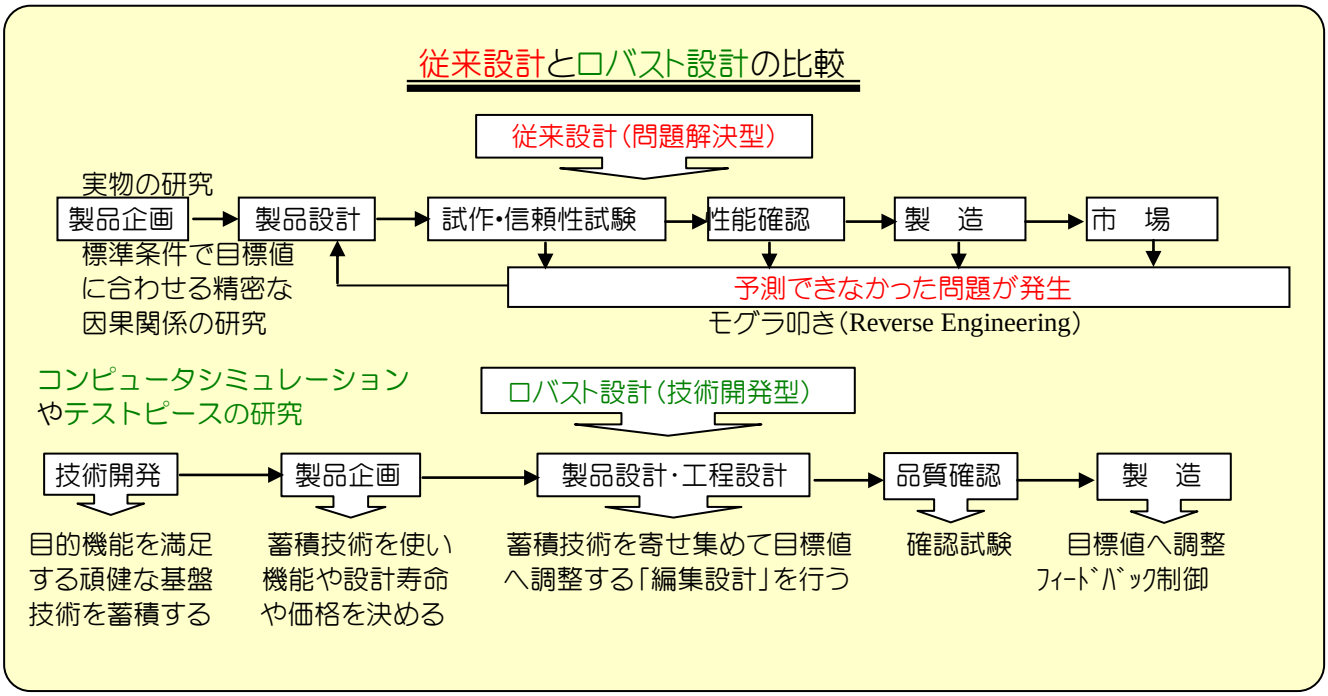
すなわち，品質評価は信頼性試験や寿命試験で規格に対する合否の判断で行われているが，合格した商品の品質に問題がある場合には，製造や市場で問題が起こるまで分からないのである。また，品質特性ごとで設計定数を変えて，目標値に合わせ込んでいるため，別の問題が発生した場合には「モグラ叩き」を繰り返して際限がないのである。

また，品質特性は商品の一部の品質問題を扱っているに過ぎないので，商品の機能のすべてを満足するにはたくさんの品質特性で改善する必要があるため，効率的でないのである。品質特性は下流における検査や管理を行う結果特性であって，源流の開発設計段階で品質を改善する特性には適していない。

品質工学では，「品質を改善するときには，品質は測るな，機能性を評価せよ」英語では

“To get Quality, Don’t measure Quality, Measure Functionality”を合言葉にしている。

従来の設計と品質工学のロバスト設計との違いを説明することで，品質工学の本質を理解して戴きたい。




品質工学では，CAEと品質工学の融合で「試作レス」「試験レス」でやり直しをしない開発の効率化を図ることが大切であると考えている。

## 5. 科学と技術は別物

### 5.1　科学と技術の違い

従来の設計のように，現象を観察して原因を究明して，問題を解決するやり方を「科学的アプローチ」と呼んでいる。

ここで，「科学と技術の違い」について説明する。

「科学者」は自然現象を解明して，原理を発見する人である。（WHY型思考）
「技術者」は自然現象の原理を利用して，目的機能を満足する無数のシステムの中から，経済的に最適な答えを出す人である。　（WHAT型思考）

**科学的思考**

「原因」の追求（WHY）
↓
自然現象の「解明」
↓
答えは「一つ」（知識）
↓
特性値と因子との精密な
「レスポンスの回帰式」
「実験計画法」の利用
↓
「平均値」で目標値へ調整後、製造の「ばらつき」で品質評価を行う
↓
よい物を造るには「よい材料，よい機械，熟練者」が必要
↓
「ノイズ」を除去
（もぐら叩き）
↓
「平均値優先」で目標達成
（ばらつきは「偶然誤差」）

【結果評価型】

**技術的思考**

「目的」の追求（WHAT）
↓
自然現象の「利用」
↓
答えは「沢山」（知恵）
↓
理想機能に近づくような
「レスポンスの最適化」
「品質工学」の利用
↓
「ＳＮ比」で品質評価の実施後、「感度」で目標値へ調整を行う
↓
よい物を造るには「悪い材料，悪い機械，未熟者」で達成
↓
「ノイズの影響」を除去
（パラメータ設計）
↓
「ばらつき優先」で目標達成
（ばらつきは「必然誤差」）

【結果予測型】

## 5.2　実験計画法と品質工学の違い

「5.1 科学と技術の違い」の中で，実験計画法と品質工学の活用の比較をしているが，その違いを下記に示す。

| 実験計画法<br>（科学的な態度） | 品質工学<br>（技術的な態度） |
|---|---|
| 原因の追求（WHY）<br>↓<br>特性値と因子との精密な「レスポンスの回帰式」を求める<br>↓<br>「主効果と交互作用を求めるために直交実験」を行う<br>↓<br>評価尺度は計測値の平均値や分散の推定や検定で因子の「有意差や寄与率」を求める<br>↓<br>計測値の平均値で「目標値に調整」を行う<br>目標値:$y=m$（品質特性）<br>計測値:$y=f(A,B,C\cdots a,b,c)$<br>↓<br>ばらつきは「偶然誤差」で母集団分布から製造の誤差を推定する「等分散と正規分布」を考える | 目的の追求（WHAT）<br>↓<br>理想機能に近づけるような「レスポンスの最適化」を図る<br>↓<br>「主効果と交互作用を交絡させた直積実験」で交互作用がないことを証明<br>↓<br>評価尺度は計測値の SN 比や感度で「機能の安定性」を評価する<br>↓<br>SN 比で「目標値に調整後のばらつき」を最小にする<br>理想機能:$y=\beta M$<br>計測特性:$y=f_d(M,N1,N2)$<br>↓<br>ばらつきは使用環境や劣化の「必然誤差」で市場の誤差を推定する「不等分散で分布は考えない」 |

1．古典的実験計画法は，特性値に対しする制御因子や変動因子のレスポンスを調べて現象解明を行い，精密な回帰式を求めることが目的である。

そのため，すべての因子を一つの直交表に割り付けて，主効果だけでなく交互作用も含めて，レスポンスを求めて現象を説明することである。（科学的な態度）

2．品質工学のパラメータ設計の実験計画は，レスポンスを求めることが目的ではなく、制御因子（設計条件）を内側直交表に割り付け、誤差因子（使用条件）を外側に割り付けて，両者の交互作用実験でレスポンスの最適化を図ることが目的である。

また，許容差設計の実験計画は，特性値に対する制御因子の許容差の影響を求めることが目的である。（技術的な態度）

## 5.3　ロケット打ち上げの失敗と反省

１９９８年，日本の宇宙ロケット（ＨＩＩＡ）が打上で失敗したのは皆様の記憶に新しことと思う。当時の宇宙開発事業団から失敗の原因が明らかになった。

それは，「海底から回収したエンジンの液体水素ターボポンプのインジューサ翼に大きな欠損した破面があり，この破面が極低温下で設計の範囲を超えたキャビテーションと振動による疲労破壊の様相が確認された。」という発表が行われた。

いかにも科学的な説明で国民は騙されそうだが，ただ、事故が起こらないとわからなかったと言い訳しているに過ぎないのである。

ロケットの研究開発には何百億円という費用がかかり，すべて国民の税金で賄われているのである。

### “何故このようなことが起こるのか”

3 節でも説明したように，従来の開発では，信頼性試験や寿命試験で問題が起こらなければ問題がないと考えていたから，考えられる品質特性についてたくさんの試験を行って，機能する規格限界内であれば問題ないと考えていたのである。

例えば，大学の入試試験でも 60 点が合格ラインであれば，60 点以上の人は合格して、59 点以下の人は不合格になる。この場合、59 点と 60 点では僅か 1 点の差を問題にしているが能力的には殆ど同じである。しかし，60 点と 80 点では能力的に差があるはずだが全く問題にしていないのである。

このように試験では，０と１の「２値判定」であるから良品の品質レベルは不明であり，出荷後の市場における良品が問題を起こすことは十分に考えられる。

多分，ロケットの場合でもたくさんな品質項目について考えられるだけの試験を行ったはずだが，結果的には試験の意味がなかったということになる。

このことを品質工学的に簡単に説明すると，あらかじめ考えられるノイズ（極低温下，振動による共振現象）に対して，インジューサ翼の「機能性（ﾛﾊﾞｽﾄﾈｽ）設計」が行われていなかったのである。ＮＡＳＡではとっくの昔にこんなレベルは卒業しているはずである。

すなわち，極低温下（－４０℃）と極高温下（＋８０℃）や振動やキャビテーションの大小をＮ１（負側最悪条件）とＮ２（正側最悪条件）にとって，Ｎ１とＮ２の差が少ない設計条件を選んで最適化設計（ロバスト設計）を行えばよいのである。

## 6. ノイズとの戦い

システムの機能を悪化させるものを，品質工学では「ノイズ」と呼んでいる。

例えば，複写機の用紙送り装置の場合，用紙の種類（銘柄）や用紙の大きさ，用紙の裏表，用紙の吸湿状態，用紙送りローラの磨耗や劣化などは用紙送り機能を悪化させる。これらのノイズが，システムの機能に影響を及ぼすからといって，これらを全て抑え込もうとすることは不可能であるし，コスト高の原因にもなる。

品質工学では，こうした「ノイズの影響による機能のばらつき」を次のように３種類に分類している。

① 外乱：消費者の「使用条件や環境条件によるばらつき」をいう。
② 内乱：市場における「部品や材料の劣化によるばらつき」をいう。
③ 品物間のばらつき：製造における「部品や材料のばらつき」をいう。

**従来設計の考え方**

n 個の品物で試験や検査を行い
「製造のばらつき」を調べる

↓

統計的な「偶然誤差」を求める

↓

品物間のばらつき($\sigma_p^2$)
「平均値からのばらつき($\sigma_e^2$)」
製造のばらつき($\sigma_p^2 = \sigma_e^2$)

↓

古典的な「実験計画法」
（レスポンスの調査）

↓

目標値へ調整(ﾁｭｰﾆﾝｸﾞ)
1. ばらつきの小さい部品
2. ﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御
3. 温度や電圧の補正回路

**品質工学の考え方**

１個の品物で品質評価を行い
「市場のばらつき」を調べる

↓

技術的な「必然誤差」を求める
1.使用環境条件のばらつき($b^2\sigma_\theta^2$)
2.劣化によるばらつき($\beta^2 T^2/3$)
3.品物間のばらつき($\sigma_p^2$)
「目標値からのばらつき($\sigma_T^2$)」

$$\sigma_T^2 = (\bar{y} - m)^2 + \sigma_e^2$$

↓

$$\boxed{\sigma_e^2 = \sigma_p^2 + b^2\sigma_\theta^2 + \beta^2 T^2/3}$$

↓

パラメータ設計
(レスポンスの最適化)

↓

２段階設計法
1. 機能の安定化（ﾛﾊﾞｽﾄﾈｽ）
2. 目標値へ調整（ﾁｭｰﾆﾝｸﾞ）

# 7. 品質とは何か

## 7.1　品質の定義

品質工学では，モノ造りによって発生するコストを「生産者の投入コスト」と，「消費者に与える損失コスト」と考えて，両者の和を下記の「社会的損失」と考えて

社会的損失（L）＝投入コスト（C）＋消費者の品質損失（Q）

「社会的損失の最小化」を考える。

「品質（技術品質）」は次のように定義する。

品質とは、商品を出荷後，使用期間内で社会に与える「損失」である。
① 機能のばらつきによる損失（但し，機能による損失は除く）
② 使用コスト（燃費，使用電力）による損失
③ 弊害項目（発熱，騒音などの公害）による損失

生産者の投入コスト

| コスト | | |
|---|---|---|
| 変動費 | C | 原材料費<br>加工費<br>動力光熱費 |
| | Q | 廃棄・手直費<br>検査・調整費 |
| 固定費 | C | 設備償却費 |
| | Q | 一般管理費<br>品質管理費 |

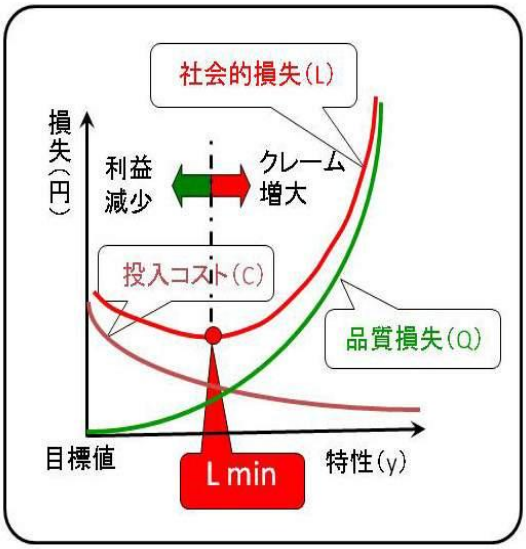
消費者に与える損失

| 品　質 | | |
|---|---|---|
| 機能のばらつきによる品質損失 | 損失関数適用 | |
| 使用コスト | 経済性 | 電力、燃費 |
| 弊害項目による品質損失 | 故　障 | 修理費用 |
| | 安全性 | 感電,火災 |
| | 公　害 | 排気ガス |
| | 操作性 | 施工時間 |

品質とコストのバランスが重要で，品質改善（パラメータ設計）の成果をコストに還元する「許容差設計」を行い，社会的損失の最小化（Lmin）を図る。

そのためには，パラメータ設計で，「品質を改善しなければ，コストは改善できない」と考えている。

したがって，逆にコストの改善を優先しても，品質の改善にはならず，むしろ品質低下の原因にもなる。



## 7.2　品質損失と損失関数

従来の品質管理では，図 2.1 に示されるように，規格外のものは不良品として廃棄または手直しを行う「不良率管理」が行われてきた。したがって，品質損失は規格外のものだけが対象であった。

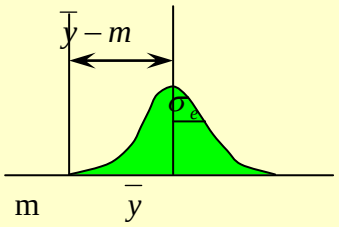
品質工学では，図 2.2 に示されるように，規格外は勿論のこと規格内でも品質損失は発生すると考えてきた。実際には，図面やスペックの品質項目に対して，式（1）に示すように，「目標値からのばらつき」に比例する「損失関数」を最小にする設計を行うことになる。

$$\sigma_T{}^2 = \left(\bar{y} - m\right)^2 + \frac{n-1}{n}\sigma_e{}^2 \qquad (1)$$

$\sigma_T{}^2$ :目標値からのばらつき

$\bar{y} - m$ :目標値からの平均値の偏り

$\sigma_e{}^2$ :平均値からのばらつき




目標値 m と平均値 $\bar{y}$ との関係

市場における実際の損失は，消費者 N 人が設計寿命 T 年間用いたときの経済的損失の平均として，式（2）の損失関数であらわされるが，実際上調査は不可能であるからテーラー展開して，式（3）のような近似式を求める。設計や製造においては，式（4）の損失関数を用いて市場における損失を計算する。

$$L(y) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int_0^T L(t, y)dt \quad \text{（円）} \qquad (2)$$

これをテーラー展開すると

$$L(y) = L(m + y - m) = L(m) + \{L'(m)/1!\}(y - m) + \{L''(m)/2!\}(y - m)^2 + \cdots$$

ここで，$L(m) = 0, L'(m) = 0$ であるから，式（3）は

$$L(y) = \{L''(m)/2!\}(y - m)^2 \qquad (3)$$

となる。ここで，$L''(m)/2! = k$ とおくと，式（3）は

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad \text{（円）} \qquad (4)$$

ここで，$y - m = \Delta$ としたときの損失を　$L(y) = A$（円）

とすると，比例定数は　$k = A/\Delta^2$　となる。

また，データが n 個の場合の損失関数は，式（5）で表される。

$$\boxed{L(y) = \frac{A}{\Delta^2}\sigma_T{}^2 \quad \text{（円）}} \qquad (5)$$

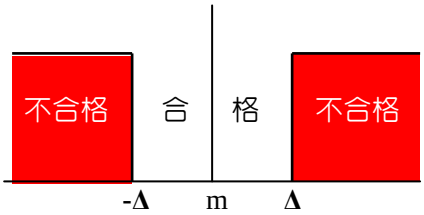



図 6.1　品質管理の考え方

**m** :目標値
**Δ0** :機能限界
**Δ** :規格値
**A0** :消費者損失
**A** :生産者損失

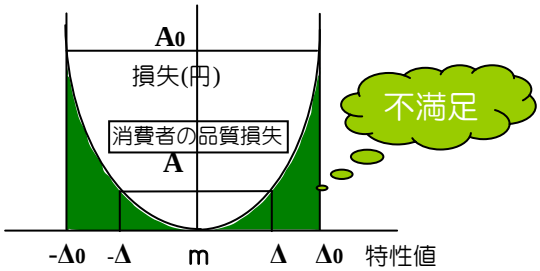
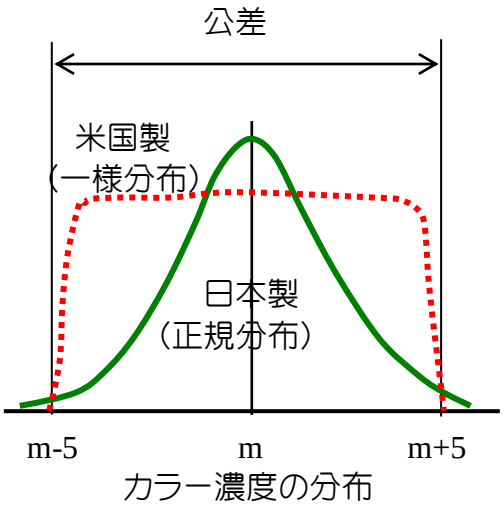



図 6.2　品質工学の考え方

## 7.3　「不良率」では品質は分からない

1979年4月17日　朝日新聞による抜粋
　米国ソニー製TVと日本製ソニーのTVの市場の品質を比較したところ，米国製の方が市場における「故障」が多いという結果が発表された。




米国製のTVの品質（標準偏差）

一様分布：$\sigma = \dfrac{2\Delta}{\sqrt{12}}$

日本製のTVの品質（標準偏差）

正規分布：$\sigma = \dfrac{2\Delta}{6}$

（１）工程能力指数での評価

$$C_P = \frac{2\Delta}{6\sigma}$$　　$\Delta$：許容差　$\sigma$：標準偏差

日本製　$C_P = \dfrac{2\times 5}{6\times\dfrac{2\times 5}{6}} = 1.0$　　米国製　$C_P = \dfrac{2\times 5}{6\times\dfrac{2\times 5}{\sqrt{12}}} = 0.577$

（２）損失関数による評価

$$L = \frac{A_0}{\Delta_0{}^2}\sigma^2 = \frac{600}{5^2}\times\sigma^2 = 24.0\times\sigma^2$$

日本製　$L = 24.0\times\left(\dfrac{10}{6}\right)^2 = 66.7$円　米国製　$L = 24.0\times\left(\dfrac{10}{\sqrt{12}}\right)^2 = 200.0$円

| 製造場所 | 目標値 | 標準偏差 | 損失関数 | Cp値 | 不良率 |
|---|---|---|---|---|---|
| 日本製SONY | m | 10/6 | 66.7円 | 1.00 | 0.27％ |
| 米国製SONY | m | 10/√12 | 200.0円 | 0.577 | 0.00％ |

「不良率」では日本製の方が悪いのに，「損失関数」では日本製の方が約1/3の損失金額で，市場における評価が高いことがよくわかる。

この理由は，平均値が同じでも，ばらつきが異なるために，市場における品質損失が発生したのである。不良率は不良品の評価尺度であって，良品の品質を評価することは出来ないのである。勿論，この場合のばらつきとは「ノイズの戦い」で説明したように，使用環境条件や劣化などのばらつきのことで，製造における標準条件の製造ばらつきではないことを理解して欲しい。

## 8. 設計責任と製造責任

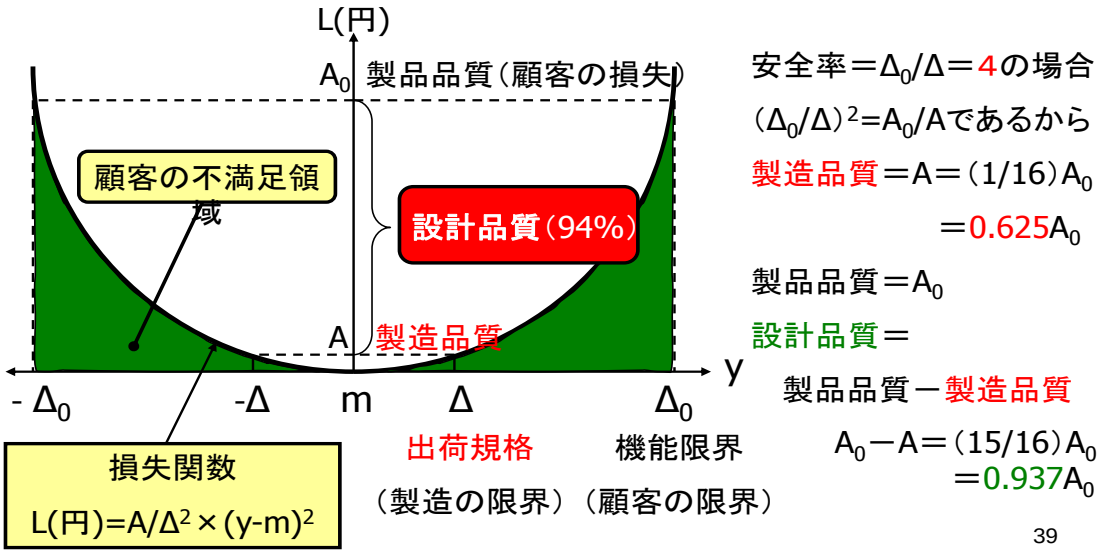
### 8.1　市場クレームの94%は設計責任である

市場のクレームは製造におけるミスも考えられるが，大半は設計問題が原因で起こっている。市場のクレームを 100%とすると，製造責任は僅か 6.25%であるのに対して，設計責任は 93.75%もあるということが損失関数から求められる。

すなわち，

製品品質（$A_0$）＝製造品質（A）＋設計品質（$A_0$-A）

- 製造品質（A）は標準条件の n 個のデータのばらつき損失である
  （生産者の許容限界である規格⊿で管理する）
- 設計品質（$A_0$-A）は環境や劣化のデータによるばらつき損失である
  （消費者の許容限界である機能限界$⊿_0$で設計する）




従来このような具体的な数字で設計責任を表すことが出来なかったのは，市場における「品質損失の定義」が明確でなかったためである。

また，設計の限界を消費者の許容限界である「機能限界」で考えて，機能限界から生産者の「出荷規格」を決める考え方がなかったためである。機能限界は許容差設計でも説明するが，薬で言う副作用の限界のことで，正常の人が薬を飲んで半分の人が副作用を起こすところである。平均死亡率（50%破壊点）と考えてもよい。

設計段階では，この機能限界をいかにして広げるかを「パラメータ設計」で行うことが大切になるのである。

## 8.2　「設計品質」によるクレームの損失計算

製品の品質（ばらつき）は製造品質と設計品質の和で表される。「ノイズの戦い」で説明したように，製品ばらつき＝製造ばらつき＋設計ばらつき

ここで，製造ばらつきは製造問題であるから，工程管理で小さく出来るので設計では考える必要はない。しかし，設計ばらつきは製造では抑えられないのである。設計ばらつきの中で，使用環境条件による製品ばらつきは，温度や湿度などの変化変で起こるばらつきで，温度係数を$b$，温度を$\theta$として，$y=b\theta$で製品特性が変化すると考えると，温度による製品ばらつきは$\sigma^2=b^2\sigma_\theta^2$で求められる。

また，劣化による製品ばらつきは，年間あたりの劣化量を$\beta$，設計寿命を$T$年としたときの誤差分散は次のように表される。

$$\sigma^2=\frac{1}{T}\int_0^T(\beta t)^2dt=\frac{\beta^2}{3}T^2$$

したがって，設計ばらつきは次式で与えられる。

$$\sigma^2=b^2\sigma_\theta^2+\frac{\beta^2}{3}T^2$$

損失関数は　$L(円)=\frac{A_0}{\Delta_0^2}\sigma^2$　で表される。

【練習問題】

温度係数や劣化係数が分かっている場合の設計ばらつきによる品質損失を損失関数を用いて解いてみよう。

3種の材料A1,A2,A3の寸法の温度係数$b$（温度１℃あたりの伸びの％）と1年あたりの磨耗量$\beta$（1年あたりの磨耗量の％）を調べたら次の表のようである。

この寸法が，機能限界$\Delta_0$=6%変化すると市場でトラブルが発生し，そのときの品質損失$A_0$は18000円である。3種の材料の中で最適なものはどれか。

ただし，その材料の使用される温度条件$\theta$の標準偏差$\sigma_\theta$は15℃，設計寿命は20年である。これらの数値は「パラメータ設計」で推定した値である。

| | $b$（%） | $\beta$（%） | 価格（円） | 設計品質 $\sigma^2$ | 品質損失 L（円） | 総損失（円） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 0.08 | 0.15 | 180 | 4.44 | 2220 | 2400 |
| A2 | 0.03 | 0.06 | 350 | 0.6825 | 341 | 691 |
| A3 | 0.01 | 0.05 | 630 | 0.3558 | 178 | 808 |

・設計品質は　$\sigma^2=b^2\sigma_\theta^2+\frac{\beta^2}{3}T^2$　で求める。

・品質損失は　$L(円)=\frac{A_0}{\Delta_0^2}\sigma^2$　で求める。

・総損失は価格と品質損失の和で求める。

## 9. 品質工学の役割

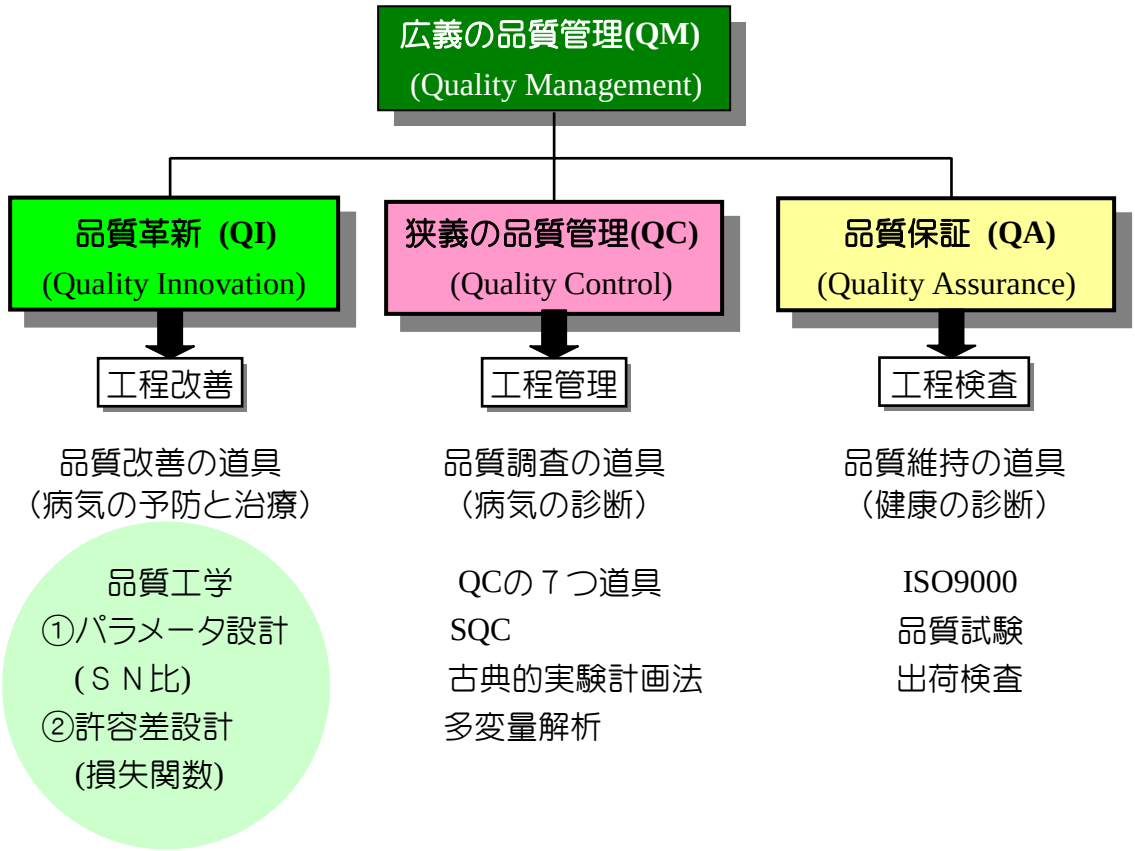
日本の経済成長を支えた品質管理の基本は，生産された商品の「出来栄え品質」について，統計的手法を使って解析して，問題をＳＱＣで解決することであり，あくまでも，結果管理に重点がおかれている。勿論，品質管理でも問題を起こさないように，源流でＦＭＥＡやＦＴＡや信頼性工学（故障率）などの手法を使って，過去の経験則や固有技術に基づいた未然防止対策を行うことを考えているが，主体は「原因追求型の問題解決手法」である。そのために，過去のデータを活用する「多変量解析」や特性値と要因の因果関係（レスポンス）を調べる「古典的実験計画法」が技術者の解析手法として活用されてきた。これらの手法は科学的な解析手法であり，現象を解明するときには有効な手段であるが，原因が分かっても根本的な対策を打つことは困難な場合が多いのである。

品質工学は，お客の要求である「機能やデザイン」は価値に関する文化の問題で技術的な問題ではないので取り扱わない。ここでは，「機能のばらつきと使用コストや公害などの弊害項目」などの品質問題だけを取り扱う。

また，品質工学は，「統計的な分布手法を用いずに，設計から製造の全般について，少ない試料で短時間に品質を評価して改善する手法」である。

品質工学の「パラメータ設計における実験計画法」は，レスポンスを調べるためではなく，機能性を改善するために行うものである。

下表に「品質工学」と「品質管理」と「品質保証」の違いを示す。



# 10.　開発プロセスにおける品質工学の役割

| ［ス テ ッ プ］ | | ［ 実 施 項 目］ | ［ 実 施 内 容］ | ［解 決 手 法］ |
|---|---|---|---|---|
| 1.　商品と技術の企画 | | | | |
| 1．1 ニーズの抽出 | N－1 | 社会的背景の探索 | 世の中の変化と需要の予測 | NCP |
| | N－2 | ユーザーの実態把握 | ユーザーの要求品質（$S_0$） | 多変量解析 |
| | N－3 | 市場動向変化の予測 | 競合品の普及率と使用率 | |
| | N－4 | 戦略計画の立案 | 商品と技術の中長期計画<br>（商品，技術，販売戦略） | ポートフォリオ<br>新QC7つ道具 |
| 1．2 商品コンセプトの決定 | C－1 | 狙いの明確化<br>（ニーズから機能へ ） | 要求品質の展開<br>（$S_0$ ➡ $S'$の設定） | 品質表<br>S－H変換 |
| | C－2 | 計測特性の決定 | 機能を目標性能へ変換<br>（$S'$ ➡ $H'$の設定） | 品質工学<br>（機能性の研究） |
| | C－3 | アイディアの検討 | 技術手段の具体化<br>（$H'$ ➡ $H_0$ の設定） | 創造性工学<br>（PAT） |
| | C－4 | 目標品質の設定 | 機能,寿命,価格,発売時期 | 品質機能展開表<br>（QFD） |
| 1．3 技術開発<br>（技術の蓄積） | G－1 | 商品の関連技術の抽出 | 商品と技術の関連表作成 | 商品／技術関連表 |
| | G－2 | 要素技術の確立 | 部品，素子，回路の安定性の確保（購入部品を含む） | 品質工学（ SN比 ）<br>（パラメータ設計） |
| | G－3 | 製造技術の確立 | 製造技術の安定性の確保 | 品質工学（ SN比 ）<br>（パラメータ設計） |
| 2.　商品と工程の開発 | | | | |
| 2．1　商品設計<br>（技術の活用） | D－1 | 商品構想の具体化 | システムの選択 | 創造性工学 |
| | D－2 | 安全性の確保 | 安全設計 | 品質工学（損失関数） |
| | D－3 | 商品の最適化設計 | 要素技術の編集設計 | 品質工学（ SN比 ）<br>（パラメータ設計） |
| | D－4 | 商品の詳細設計 | 品質とコストのバランスによる許容差の決定 | 品質工学（損失関数）<br>（許容差設計） |
| | D－5 | 商品の品質確認 | 信頼性試験と寿命試験 | FMEA，FTA<br>信頼性工学 |
| 2．2 工程設計 | D－6 | 工程の最適化設計 | 製造技術の編集設計 | 品質工学（ SN比 ）<br>（パラメータ設計） |
| 3.　生産準備と工程管理 | | | | |
| 3．1　量産試作 | P－1 | 設計仕様の確認 | 図面やスペックと品物の一致 | 品質目標設定書 |
| | P－2 | 工程能力の確認 | 管理項目と管理限界の決定 | 工程能力指数 |
| | P－3 | 外注部品の品質評価 | 部品素子の機能性の評価 | 品質工学（ SN比 ） |
| 3．2　本各生産 | P－4 | 工程の管理 | 工程管理方式の決定 | 品質工学（制御設計） |
| | P－5 | 商品の検査 | 検査方式の決定（臨界不良率） | 品質工学（検査設計）<br>（無検査か全数検査か） |
| | P－6 | 商品の実用試験 | 実使用条件における耐久試験 | 信頼性工学 |

# 第 Ⅱ 講　機能性の評価とパラメータ設計

ここでは，従来の信頼性試験や寿命試験に代わって商品の機能性を評価する考え方と，機能性を利用してシステムを評価するパラメータ設計の手順や応用を学ぶ。

## １．特性値と因子

### 1.1「データ（特性値）」とは何か

品質工学で扱うデータと科学的データとの違いを説明する。

●科学的実験データは，「因果関係」を調べる。（原因追求）

「実験の結果」で「現象を解明する」

「問題が起きてから，問題の原因を考えて対策を立てる」

統計的な扱い ➡ 「平均値のばらつき（偶然誤差）」

例：$y = \dfrac{V}{R + j\left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)}$ で電流値 $y$ が 10A に設計したい場合

従来の解析では，設計定数やそのばらつきや電圧変動や温度変化に対して「レスポンスの研究」を行う。

○品質工学データは，「理想状態」を考える。（目的追求）

「実験の計画」で「現象を活用する」

「問題が起こる前に，問題を予測して対策を立てる」

人工的な扱い ➡ 「理想と現実の差（必然誤差）」

レスポンスの研究の前に，「レスポンスの最適化」を考える。

### 1.2　品質工学的なデータの扱い方

① データの「目的」は何か（目的機能）
② データの「あるべき姿」は何か（理想機能や目標値）
③ 「何を測る」べきか（計測特性） ➡ 特性値と因子の選択
④ データの「解析と評価」をどうすべきか（ＳＮ比と感度）

例：電流値の目標値が 10A であるとき，目標値にチューニングする前に，電圧と電流の比例関係（オームの法則）を「理想機能」と考えて，ノイズによるデータの乱れをＳＮ比で評価して「レスポンスの最適化」を図る。その後で，10A にチューニングすることは簡単に出来る。

### 1.3　データの誤差とは

商品の場合：目標値―測定値＝製品誤差（$\sigma_p^2$）（品質の定義）

計測器の場合：真値―測定値＝計測誤差（$\sigma_M^2$）（誤差の定義）

いずれの場合も，実際は目標値や真値は不明のまま，測定値のデータだけで誤差を求めるしかない。これらの誤差を求める尺度が「ＳＮ比」である。

商品の誤差（$\sigma_y^2$）＝製品誤差（$\sigma_p^2$）＋計測誤差（$\sigma_M^2$）

## 1.4「データの2乗和の分解」の計算に慣れよう

### ①　2 乗の計算の意味

データは普通 1 次式で表されるが，データを解析するためには 2 乗の計算に慣れることが必要である。その理由は，エネルギーだけが「加法性」があり，加法性のあるデータによる解析だけが下流において「再現性」が得られるからである。

ある部品の特性として，$y_1, y_2, \ldots y_n$ という n 個のデータを求めた。ある値 $m$ からの差を 2 乗して，次のように分解した。

エネルギーの 2 乗を分解すると

$$\sum(y-m)^2 = \sum\left(y_i^{\,2}\right) - 2m\sum(y_i) + nm^2 \qquad (2.1)$$

この値が最小になる条件は，$m$ で微分してゼロと置くと

$$m = \frac{\sum(y_i)}{n} = \bar{y} \quad \text{（データの平均値）}$$

ここで重要なことは，$m$ が平均値 $\bar{y}$ と一致したとき，データの差の 2 乗和が最小になるということである。これが「最小 2 乗法」の基本である。

これを上式に代入すると

$$\sum\left(y-\bar{y}\right)^2 = \sum(y_i)^2 - \frac{1}{n}\left[\sum y_i\right]^2 \qquad (2.3)$$

$$S_e \quad = \quad S_T \quad - \quad S_m$$

$S_T$：全 2 乗和，$S_m$：平均値の効果，$S_e$：誤差変動（ばらつきの効果）

誤差変動は平均値を目標値に調整した後の誤差である。

データの 2 乗（$S_T$）の意味は，2 乗することによって，平均値の 2 乗の集まり（$S_m$）と,平均値からの差の 2 乗の集まり（$S_e$）に分解される。

例えば，電気回路で交流のパワー（仕事量）$P$ は全 2 乗和から直流のパワーを引いた値で表される。

$$P = \int_0^T \left[y(t) - \bar{y}\right]^2 dt = \int_0^T y^2(t)dt - \frac{1}{T}\left[\int_0^T y(t)dt\right]^2 \qquad (2.8)$$

これを書き直すと

全 2 乗和＝直流パワー＋交流パワー

これは

全 2 乗和（$S_T$）＝一般平均（$S_m$）＋誤差変動（$Se$）

（全エネルギー＝有効成分＋有害成分）

と同じ形である。

後で「機能性の評価」を考えるときこの考え方が重要になる。

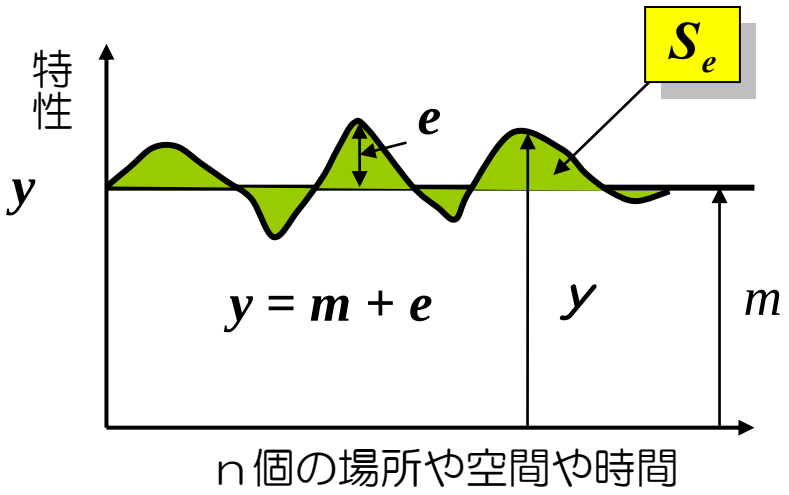
品質工学で，「2 乗の成分がエネルギー」を表わすというのは，まさにこのことである。

2 乗の世界で技術を評価することは，経済的にも技術的にも妥当なことである。

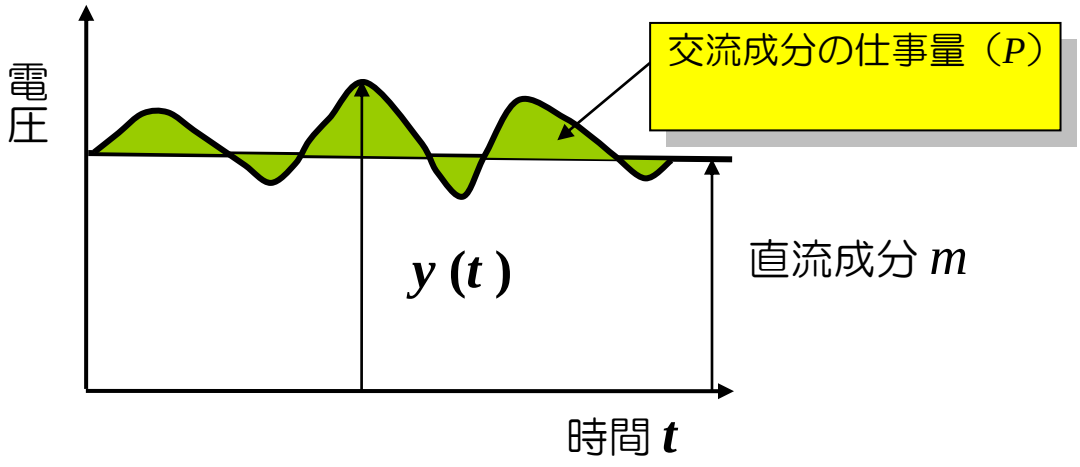
# データの２乗の分解の意味

データは平均値からの誤差があるから，加法性のある２乗の世界ではエネルギーの有害成分（$S_e$）は全出力（$S_T$）から有効成分のエネルギー（$S_m$）を引いた値で表される。

$$S_e = S_T - S_m$$




電気の世界でも交流のパワーの仕事量（$P$）は全出力から直流のパワーを引いた値で表される。 $P = \int_0^T \left[y(t) - \bar{y}\right]^2 dt = \int_0^T y^2(t)dt - \frac{1}{T}\left[\int_0^T y(t)dt\right]^2$



## ②　目標値からの差の 2 乗の計算例

プラスチックの成形寸法を調べたところ，目標値からの差が以下のようであった。

-28,-11,-29,-19,-14,-29,-23,-32,-14,-19,-8,-12,-11,-20,-10（単位：μm）

全 2 乗和　$S_T = (-28)^2 + \cdot\cdot\cdot + (-10)^2 = 6083.0$

平均値の効果　$S_m = \dfrac{(-28\cdot\cdot\cdot-10)^2}{15} = \dfrac{(-279)^2}{15} = 5189.4$

誤差変動　$Se = S_T - S_m = 6083 - 5189.4 = 893.6$

平均値　$\bar{y} = \dfrac{-28\cdot\cdot\cdot-10}{15} = \dfrac{-279}{15} = -18.6\mu m$

ここで大切なことは，$S_m$を計算するときに，**桁数の表示**です。小数点2桁まで計算して四捨五入して，小数点1桁まで出しておけば，2乗和を求めたときのデータの最終桁には，計算誤差が入らないようになる。平均値の場合も小数点1桁までの表示をする。

## ③　目標値からの差の 2 乗の平均と平均値からの差の 2 乗の平均は違う

第Ⅰ講の（7. 2）でも説明したが，目標値からの差の 2 乗の平均誤差$V_T$は

全2乗和　$S_T = \sum_{i=1}^{n}(y_i - m)^2$ に対して，その平均値である**平均2乗誤差**$V_T$は

平均2乗誤差　$V_T = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - m)^2$　で表される。

【計算例】

平均2乗誤差　$V_T = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - m)^2 = \dfrac{1}{15}\left[(-28)^2 + \cdot\cdot\cdot + (-10)^2\right] = \dfrac{6083}{15} = 405.5(\mu m)^2$

平均値からの差の2乗の平均は

誤差分散　$V_e = \dfrac{S_e}{n-1} = \dfrac{893.6}{15-1} = 63.8(\mu m)^2$

また，両者の関係は次式のようになっている。

$$V_T = (\bar{y} - m)^2 + \frac{n-1}{n}V_e$$

右辺の第1項が平均値の目標値からの「偏り」を表し，第2項が平均値の周りの「ばらつき」を表している。

$V_T$と比べると，Veの方が小さくなっている。平均値を目標値に合わせた後のばらつきを合わせる前に知ることが重要である。

品質工学では，目標値に合わせた後の誤差分散を重視する。

Veの平方根がいわゆる標準偏差というもので，ばらつきの指標になっている。

標準偏差　$\sigma = \sqrt{V_e} = \sqrt{63.8} = 8.0\mu m$

## 1.5　特性値の分類（機能特性と品質特性）

品質の定義は，「機能のばらつきや騒音などの弊害項目による損失」であると述べたが，品質問題に正面から取り組むためには，商品や要素技術の「機能の発揮度合い（機能性）を研究することが重要で，副作用として出てくる騒音や振動や発熱などの品質特性は研究すべきではない」というのが，品質工学の立場である。たとえば，車の目的機能は「確実にスタートして、確実にストップする」ことであるから，振動や騒音などの弊害項目である副作用の品質特性を調べてみても，根本的な解決にはならないのである。

品質工学では，特性値を下記のように分類する。

| 特性値の分類 | | 理想機能 | 定義と事例 |
|---|---|---|---|
| 機能特性<br>（動特性） | | $y = \beta M$ | 一定の目標値をもたず、入出力の比例関係で表される。<br>例．転写性（射出成形，ＮＣ切削加工<br>ＩＣ加工，複写機など）<br>計測性（センサー，計測器など）<br>変換性（送信機，受信機，ＲＣＬ，<br>増幅回路など）<br>制御性（ﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御，<br>車の操縦性など） |
| 品質特性<br>（静特性） | 望目特性 | $y = m$ | 一定の目標値をもつ特性<br>例．電圧，抵抗値，ばね定数，寸法 |
| | ゼロ望目特性 | $y = \pm 0$ | 目標値がゼロで正負の値をとる特性<br>例．反り，たわみ，円筒度など |
| | 望大特性 | $y = \infty$ | 大きければ大きい程よい非負の特性<br>例．接着強度，引張り強度など |
| | 望小特性 | $y = 0$ | 小さければ小さい程よい非負の特性<br>例．騒音，振動，摩耗量，排気ガス |
| | 百分率特性 | $p = 100\%$ | **0～100%**の百分率を表す特性<br>例．信頼度データ（不良率，故障率） |

機能特性：商品の「目的機能」や技術手段の「基本機能」を改善する特性で，システムの入出力の比例関係で表される。これを「理想機能」という。

品質特性：商品の図面やスペックの中で，お客の要求する品質項目として，一定の目標値をもった特性（スカラー量）で「商品の検査や管理に用いる特性」である。

## 1.6 特性値に関係する因子の分類

品質や機能を表す特性値（1.5節）に影響する因子を下表に示す。

| 因子名 | 設定の目的と定義 | 設定の留意点 |
|---|---|---|
| 制御因子 | 設計条件の最適水準を選ぶためのシステムを構成する設計定数で，設計者が水準を自由に選択できる因子（設計条件）<br>例．金型温度，射出圧力など | ① 沢山の制御因子を取り上げないと改善できない。<br>② 交互作用が小さくなるように密接に関係する因子間の水準を選ぶ。（水準ずらし法） |
| 誤差因子 | 特性に影響を与える外的因子で設計者が水準を設定できるが，自由に選択できない因子（使用条件）<br>例．使用温度，劣化条件など | ① 使用環境条件や劣化のなかで代表的な条件を選ぶ。<br>② パラメータ設計では，できるだけ大きい水準幅をとる。<br>③ 許容差設計では，$\pm\sqrt{3/2}\sigma$ の水準幅をとり，正しい誤差を推定する。 |
| 信号因子 | 特性値と比例関係のある因子でシステムの機能を評価するために，設計者が自由に水準を設定できる因子（使用条件）<br>例．金型寸法（基本機能）<br>射出圧力（調整機能） | ① システムの機能の基準となる入力信号で信号の誤差は小さいことが望ましい。<br>② 水準数は３個以上で，できる広い範囲でたくさんとる。 |
| 標示因子 | 商品の品種や工法の違いなどで水準別の品質を比較したいときに選択する因子（使用条件）<br>例．成形機の種類など | ① 標示因子ごとにＳＮ比を求めて品質比較を行う。<br>② 使用条件の場合，ノイズとする場合がある。 |

《因子と水準の選び方》

① 因子はできるだけ簡単に測れるものを選ぶ 。

因子は直接測ることが望ましいが，測れない場合には代用因子を用いる．例えば，焼入れ工程で加熱温度を取り上げる代わりに，電気炉の変圧器のタップ目盛りを代用因子とする。

② 因子の水準幅と水準値は目的に応じた範囲を決める。

因子間で交互作用がある場合，「水準ずらし法」を用いて，右表のように水準値を設定する。

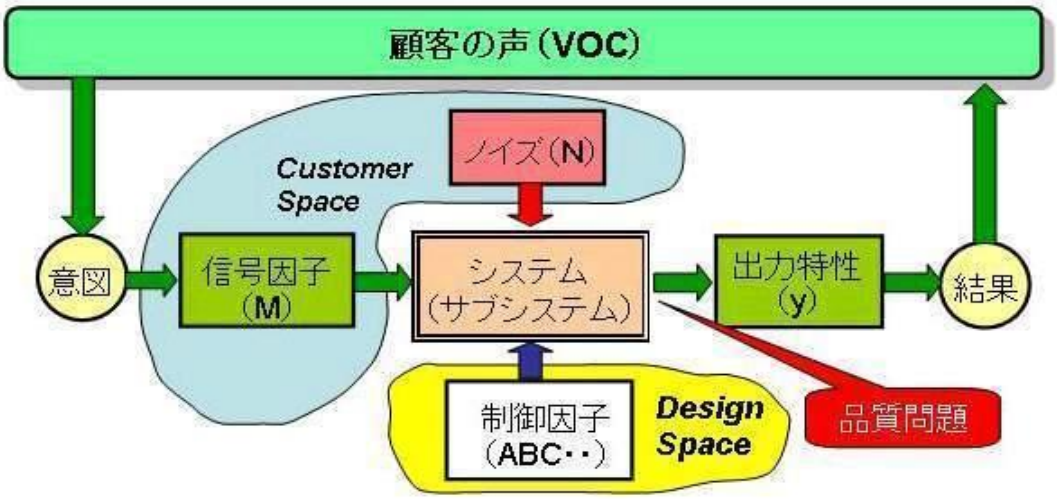
因子間で水準の組合せのエネルギー がほぼ同じになるように予め検討しておくこと。

| | | 焼入れ時間 | | |
|---|---|---|---|---|
| 焼入れ温度 | 500度 | 7 | 8 | 9 |
| | 600度 | 6 | 7 | 8 |
| | 700度 | 5 | 6 | 7 |
| | 800度 | 4 | 5 | 6 |

# ２． 機能性の評価

## 2.1 技術レベルの評価方法（SN比と感度）

品質工学では，顧客が満足する目的機能や技術手段の基本機能について技術開発では機能の安定性（理想機能からのばらつき）を評価する尺度が「ＳＮ比」であり，性能レベルの大きさの尺度が「感度」である。




この理想関係は，オームの法則，フックの法則等の「物理的な原理」に基づいたものが存在する。この理想関係を品質工学では「理想機能」という。

ところが，実際には，この理想関係がノイズや信号の乱れによって崩れるのが普通である。ＳＮ比による解析は下記のように行う。

理想機能　$y = \beta M$　（1）

計測特性　$y = f_d(M, N_1 N_2) = \beta M + e(M, N)$　（2）

＝理想機能＋理想機能からのずれ

＝有効成分＋無効成分（品質問題）

そこで，（2）式の両辺を$\beta$で割って，実際の入力$M_0$と，理想機能であるとして推定した入力$M$　の平均二乗誤差は

$$\sum (M_0 - M)^2 / n = \sum \left(\frac{e}{\beta}\right)^2 / n = \frac{\sigma^2}{\beta^2} = \frac{1}{\eta} \qquad (3)$$

で表わされ，（3）式の逆数で「SN比の真数」を（4）式で表わされる。

SN比の真数は　$\eta = \beta^2 / \sigma^2$ ＝有効成分／無効成分　（4）

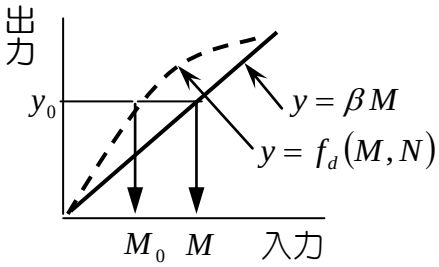
このＳＮ比の常用対数を10倍して，デシベル単位（db）で表すと　$\eta = 10 \log(\beta^2 / \sigma^2)$ (db)　（5）

となり，さらに加法性の高い解析データになる。

また，比例定数の感度をＳとすると

$S = 10 \log \beta^2$　(db)　（6）

で表される。



## 2.2 “顧客が満足する”機能性の評価と改善

第１講で「品質改善するときには,品質は測るな」ということを述べたが，その場合，顧客が満足する目的機能を考えて機能性の評価と改善を行うが，具体的な例として，オートマチックトランスミッションに用いられている摩擦材のスリップ機構の事例で説明する。

１．理想機能の定義（信号因子と出力特性）

顧客の要求する摩擦材の目的機能は，信号因子の押し付け量の面圧強さと出力の比例関係が理想機能である。

２．機能性の評価（誤差因子）

理想機能を乱すものは，使用環境条件や劣化の誤差因子（ノイズという）で，この例ではATF油温や劣化度合いが機能に影響するノイズである。

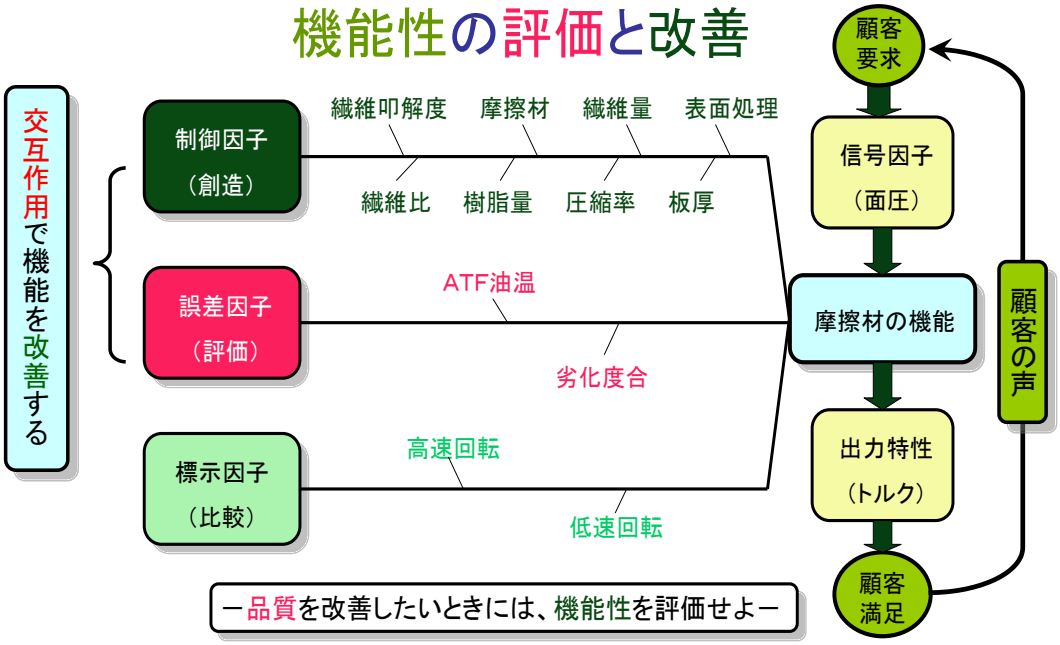
３．機能性の改善（制御因子）

ノイズによる理想機能の乱れを改善する因子が制御因子で，摩擦材を構成する要素技術や製造技術の設計定数であるが，システムを考案するのは技術者の技術力の問題であるから，複雑なシステムでなければ機能性の改善はできない。

４．機能性の比較（標示因子）

高速や低速の回転数のように使用条件が異なるような場合には別々な評価を行う。

W型特性要因図

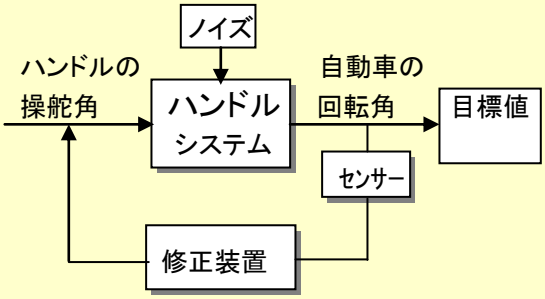



15

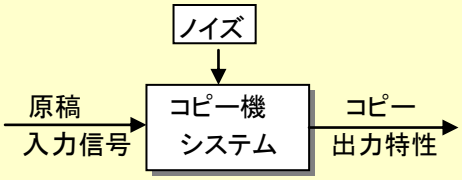
## 2.3 信号因子の種類

お客様の使用条件である信号因子には，能動的なものと受動的なものとがある。「能動的信号因子」とは，製品や工程の使用者が目的や条件に応じて能動的に水準を変え出力特性を変えるものである。たとえば，車のハンドルの操舵角やアクセルやブレーキのペダルの位置などである。「受動的信号因子」とは，使用環境の変数の中で，その値をシステムの機能に用いるものである。たとえば，カメラの絞りや露出時間を自動的に変える外界の明るさである。

| 能動的信号因子と出力特性 | | 受動的信号因子と出力特性 | |
|---|---|---|---|
| M=能動的信号因子<br>y =出力特性 | | M=受動的信号因子<br>y =出力特性 | |
| ハンドルシステム | M＝ハンドルの操舵角<br>y＝車の回転方向 | コピーシステム | M＝原稿の画像<br>y＝コピーの画像 |
| ブレーキシステム | M＝ブレーキペダル位置<br>y＝車の制動距離 | 電話（送話器） | M＝音声<br>y＝電流 |
| スイッチング | M＝On/offの動作の電流<br>y＝On/offの結果の電流 | 電話（受話器） | M＝電流<br>y＝音声 |
| 薬の効能 | M＝投薬量<br>y＝治癒の速度<br>x＝副作用の速度 | 体重計 | M＝真の重量<br>y＝計測重量 |
| | | 温度センサー | M＝温度（絶対温度）<br>y＝電圧 |
| 化学反応 | M＝時間<br>y＝正反応<br>x＝副反応 | 電気回路 | M＝電流または電圧<br>y＝電圧または電流 |
| 射出成形 | M＝金型寸法<br>y＝成形品寸法 | フレーム強度 | M＝歪みまたは応力<br>y＝応力または歪み |
| NC工作機 | M＝指示寸法<br>y＝加工品寸法 | カメラシステム | M＝風景や人物の画像<br>y＝フィルムの画像 |
| ロボットアーム<br>の位置決め | M＝駆動モーター回転数<br>y＝アームの回転角 | 光検知素子 | M＝光量　M*＝電圧<br>y＝電流 |




ハンドルシステムの入出力関係




コピー機システムの入出力関係

## 2.4 動的SN比の実験と解析

1.5「特性値の分類」で説明した動特性のSN比の求め方を説明する。

入力信号$M$を3水準とし，ノイズ$N$を2水準として，下表のような実験を行い，出力特性$y$を計測する。

| | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | 線形式 |
|---|---|---|---|---|
| $N_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $L_1$ |
| $N_2$ | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{23}$ | $L_2$ |

技術の問題の殆どは，エネルギーの変換であるから，入力がゼロのとき出力がゼロであるから，$y=\beta M$ の「ゼロ点比例式」で表されるが，計測器の校正問題では，精度を高めるために「基準点比例式」や「一次式」が用いられる場合が多い。 上記の実験データから分散分析を行い，動的ＳＮ比を求める。

全2乗和 $S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \cdots + y_{23}^2$ （ $f$=6 ）

線形式 $L_1 = M_1 y_{11} + M_2 y_{12} + M_3 y_{13}$

$L_2 = M_1 y_{21} + M_2 y_{22} + M_3 y_{23}$

有効除数 $r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2$

比例項の変動 $S_\beta = \dfrac{(L_1 + L_2)^2}{2r}$ （ $f$=1 ）

ノイズ×比例項の変動 $S_{N\times\beta} = \dfrac{(L_1 - L_2)^2}{2r}$ （ $f$=1 ）

誤差変動 $S_e = S_T - S_\beta - S_{N\times\beta}$ （ $f$=4 ）

誤差分散 $V_e = S_e / 4$

総合誤差変動 $S_N = S_e + S_{N\times\beta}$ （ $f$=5 ）

同上誤差分散 $V_N = S_N / 5$

ＳＮ比 $\eta = 10\log \dfrac{\frac{1}{2r}(S_\beta - V_e)}{V_N}$ (db)

感　度 $S = 10\log \dfrac{1}{2r}(S_\beta - V_e)$ (db)

実験の留意点

1） 信号因子の水準幅は，将来を考えて機能範囲の限界まで広げて実験すること。

2） 入力信号は基準になるものであるから，計測がしやすくて計測誤差を小さくできるもの（テストピース）が望ましい。（単純形状の金型，位相ゼロの正弦波電圧など）

3） 品質を評価するときには，ノイズは代表的な使用条件の正負の最悪の２水準で行うことが望ましい。（理由：ＳＮ比による改善の利得を知るため）また，信号による出力の乱れが大きい近辺の水準が含まれていることが望ましい。

## 2.5　動的SN比の具体事例（切削寸法精度の改善）

ＮＣマシンの切削性の目的機能の理想機能は「加工品寸法が，ＮＣデータに比例する」ことである。しかし，実際の加工寸法は，切削条件や被削材料の違いで，入力信号に一致せず，加工精度が問題になるのである。

理想機能を $y=\beta M$ として，計測特性を $y=f_d(M,N_1N_2)$ とすると

$y$：加工寸法（切削条件や被削材料の違いで誤差が発生する）

$M$：ＮＣデータ（ＮＣマシンの入力信号で，今回は３水準とする）

$\beta$：比例定数（目標値は $\beta_0=1$ であるが，実際は切削条件や被削材料の影響で乱る）

$d$：切削条件（切削速度や送り速度や切込み量などの制御因子である）

$N$：ノイズ（被削材料の材料硬度など，切削性を乱す誤差条件を選ぶ）

$N_1$：軟らかい材質　$N_2$：硬い材質

| | $M_1$(0.5) | $M_2$(1.0) | $M_3$(1.5) | 線形式 |
|---|---|---|---|---|
| $N_1$ | 0.477 | 1.001 | 1.489 | 3.473 |
| $N_2$ | 0.499 | 1.038 | 1.581 | 3.659 |

| 要 因 | $f$ | S | V |
|---|---|---|---|
| $\beta$ | 1 | 7.2665 | 7.2665 |
| $N\times\beta$ | 1 | 0.0049 | 0.0049 |
| $e$ | 4 | 0.0012 | 0.0003 |
| (N) | (5 ) | 0.0062 | 0.0012 |
| T | 6 | 7.2727 | |

全２乗和　$S_T=0.477^2+1.001^2+\cdots+1.581^2=7.27$.　（ $f=6$ ）

線 形 式　$L_1=0.5\times0.477+1.0\times1.001+1.5\times1.489=3.473$

$L_1=0.5\times0.499+1.0\times1.038+1.5\times1.581=3.659$

有効除数　$r=0.5^2+1.0^2+1.5^2=3.5$

比例項の変動　$S_\beta=\dfrac{(3.473+3.659)^2}{2\times3.5}=7.2665$　（ $f=1$ ）

ノイズ×比例定数の変動　$S_{N\times\beta}=\dfrac{(3.473-3.659)^2}{2\times3.5}=0.0049$　（ $f=1$ ）

誤差変動　$S_e=7.2727-7.2665-0.0049=0.0012$　（ $f=4$ ）

誤差分散　$V_e=0.0012/4=0.0003$

総合誤差変動　$S_N=0.0012+0.0049=0.0061$　（ $f=5$ ）

総合誤差分散　$V_e=0.0061/5=0.0012$

切削性の安定性（ＳＮ比）　$\eta=10\log\dfrac{\frac{1}{2\times3.5}(7.2665-0.0003)}{0.0012}=29.25\ (db)$

切削性の比例定数（感度）　$\beta=\sqrt{\dfrac{1}{2\times3.5}(7.2665-0.0003)}=1.038$

感度の推定は（$\beta=1.038$）となるから，目標値（$\beta_0=1$）に調整後の誤差分散は

$$\sigma^2=\beta_0{}^2\times(1/\eta)=1\times(1/841.188)=0.0012$$

であるから，誤差の限界は（$\pm3\sqrt{0.0012}=0.1034$）と推定できる。

また，加工寸法（$y$）が欲しい場合，ＮＣデータ（$M$）は

$$M=y/\beta=(1/1.038)y=0.9634y$$

で求められる。

## 2.6　静的SN比の実験と解析

品質改善で重要なのは動的ＳＮ比であることは述べたが，商品開発において，品質目標があるとき「目標値からのばらつき」を評価するのが「静的ＳＮ比」である。しかし，この場合も，商品の目的機能について，動的ＳＮ比で機能性が改善されておれば，個々の品質特性は目標値への調整だけでよい場合が多い。

### 2.6.1　望目特性のSN比

望目特性は，固定した目標値のある特性であるから，目標値からのばらつきの改善と目標値への調整は下記のように行う。この実験では繰返しデータ（偶然誤差)よりノイズ（必然誤差）の範囲を広くとることが大切である。（理由：ＳＮ比の改善の利得を問題にしているから）

| | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ |
|---|---|---|---|
| $R_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ |
| $R_2$ | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{23}$ |
| 計 | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y_3$ |

N：ノイズ
R：繰返しデータ
Y：合計データ

| 要 因 | $f$ | $S$ | $V$ |
|---|---|---|---|
| $m$ | 1 | $S_m$ | |
| $N$ | 2 | $S_N$ | $V_N$ |
| $e$ | 3 | $S_e$ | $V_e$ |
| $(N+e)$ | (5) | $S_{N+e}$ | $V_N'$ |
| $T$ | 6 | $S_T$ | |

平均値　$\bar{y} = (y_{11} + y_{12} + \cdots + y_{23})/6$

全2乗和　$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \cdots + y_{23}^2$　（ $f = 6$ ）

平均の変動　$S_m = (y_{11} + y_{12} + \cdots + y_{23})^2/6$　（ $f = 1$ ）

ノイズの効果　$S_N = (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2)/2 - S_m$　（ $f = 2$ ）

$Y_1 = y_{11} + y_{21}$ ，$Y_2 = y_{12} + y_{22}$ ，$Y_3 = y_{13} + y_{23}$

誤差変動　$S_e = S_T - S_m - S_N$　（ $f = 3$ ）

誤差分散　$V_e = S_e / 3$

総合誤差分散　$V_N = (S_e + S_N)/5$

品質の安定性（ＳＮ比）

$$\eta = 10\log\frac{\frac{1}{6}(S_m - V_e)}{V_N} \quad (db)$$

「ばらつき」は　$\sigma^2 = 10^{0.1(S-\eta)}$　で推定できる。

ここで，$V_N$ が $V_e$ に比べて数倍ある場合には，$V_N$ をＳＮ比の分母に用いるが，両者が同程度ならば，大きい方を分母に選ぶ。

平均値の大きさ（感度）

$$S = 10\log\frac{1}{6}(S_m - V_e) \quad (db)$$

「平均値」は　$m^2 = 10^{0.1S}$　で推定できる。

ただし，ばらつきを推定するときには，市場におけるノイズの誤差を$\sigma$とすると，ノイズの水準幅を$\pm\sqrt{3/2}\sigma$に設定することが条件である。

## 2.6.2　望小特性のSN比

望小特性は，小さければ小さい程よい非負の特性であるから，目標値（ゼロ）からのばらつきの評価や改善を下記のように行う。

「目標値（ゼロ）からのばらつき」は

$$V_T = \frac{1}{n}\sum y^2 = m^2 + \sigma^2$$

となり，平均値の２乗とばらつきの和で表される。

そこで，ＳＮ比は

$$\eta = -10\log V_T \quad (db)$$

で求められる。　この場合，ＳＮ比が最大になる設計条件は求められるが，平均値を目標値ゼロに調整することはできない。

## 2.6.3　ゼロ望目特性のSN比

ゼロ望目特性は，ゼロが目標で正負の値をとる特性であるから，目標値（ゼロ）からのばらつきの評価や改善を下記のように行う。

「目標値（ゼロ）からのばらつき」は，「平均値からのばらつき」と同じであることが望ましいから

$$V_T = V_e = \frac{1}{n-1}\sum\left(y-\bar{y}\right)^2$$

となり，ＳＮ比は

$$\eta = -10\log V_T \quad (db)$$

で求められる。　望小特性と違って，平均値は目標値ゼロに調整できるから，ＳＮ比が最大になる設計の最適条件において　$\bar{y}=0$　になるように調整を行う。

## 2.6.4　望大特性のSN比

望大特性は，大きければ大きい程よい特性であるから，目標値（無限大）からのばらつきの評価や改善は下記のように行う。

目標値が無限大であるため，データの逆数をとって，望小特性と同じＳＮ比を求める。

$$V_T = \frac{1}{n}\sum\left(\frac{1}{y^2}\right) = \frac{1}{m^2}\left(1+\frac{3\sigma_e^2}{m^2}\right)$$

となり，ＳＮ比は

$$\eta = -10\log V_T = -10\log\frac{1}{n}\sum\left(\frac{1}{y^2}\right) \quad (db)$$

で求められる.

望小特性と同じように，平均値を目標値に調整することはできない．また，この実験ではノイズの範囲を大きくとらなければ，平均値だけの従来の実験と同じである。

したがって，望大特性の実験でも解析は望目特性で行い，ＳＮ比と感度を求めて，両者とも最大になるように解析することが大切である。

## 2.6.5　百分率特性のSN比

信頼性などの百分率特性のＳＮ比は，100%とデータの差を望小特性として扱うこともできるが，百分率特性の加法性があるように下式のように「オメガ変換」してからＳＮ比解析を行うことが大切である。

$$p^* = -10\log\left(\frac{1}{p}-1\right) \quad (db) \qquad p：\%のデータ \qquad p^*：\Omega変換後のデータ$$

## 2.7 体重計の計測誤差の評価—真値不明で誤差を求める—

1. 目的：家庭にあるヘルスメータの精度を人間とバケツ 2 個で求める。

誤差＝真値—読み値（誤差の定義）

であるが、「真値不明で誤差を求める」ことが大切である。

2. 実験：水の入ったバケツを 2 個用意する。ヘルスメータでバケツの水の重さが全く同じで 3kg になるように水量を調節する。
次に、硬い床の上（$N_1$）と軟らかいﾏｯﾄの上（$N_2$）で、下表のような実験を行う。

| | $M_1$（人）kg | $M_2$（人+ﾊﾞｹﾂ 1 個） | $M_3$（人+ﾊﾞｹﾂ 2 個） |
|---|---|---|---|
| $N_1$（硬い床の上） | $y_{11}$（77.0） | $y_{12}$（79.5） | $y_{13}$（82.5） |
| $N_2$（軟らかいﾏｯﾄの上） | $y_{21}$（78.0） | $y_{22}$（80.5） | $y_{23}$（84.0） |

$M_2$ を基準にしてデータの基準化を行うと下表のようになる。
校正は「基準点比例式」 $y - y_0 = \beta(M - M_0)$ で行われる。
$M_2$=$M_0$ の時のデータの平均値は $y_0$=80$kg$ である。

| | $M_1$-$M_0$（-3kg） | $M_2$-$M_0$（0kg） | $M_3$-$M_0$（+3kg） |
|---|---|---|---|
| $N_1$（硬い床の上） | $y_{11}$-$y_0$（-3.0） | $y_{12}$-$y_0$（-0.5） | $y_{13}$-$y_0$（+2.5） |
| $N_2$（軟らかいﾏｯﾄの上） | $y_{21}$-$y_0$（-2.0） | $y_{22}$-$y_0$（+0.5） | $y_{23}$-$y_0$（+4.0） |
| 計 | $y_1$（-5.0） | $y_2$（0.0） | $y_3$（+6.5） |

3. 解析と精度の推定

全 2 乗和 ： $S_T = \sum (y_{ij} - y_0)^2$

$$= (-3.0)^2 + (-0.5)^2 + 2.5^2 + (-2.0)^2 + 0.5^2 + 4.0^2 = 35.75$$

有効除数 ： $r = (M_1 - M_0)^2 + (M_3 - M_0)^2 = (-3.0)^2 + 3.0^2 = 18$

比例項の変動: $S_\beta = \{\sum (M_i - M_0) y_i\}^2 / 2r = \{(-3.0)\times(-5.0) + 3.0\times 6.5\}^2 / 36 = 33.06$

誤差変動 ： $S_e = S_T - S_\beta = 35.75 - 33.06 = 2.69$

誤差分散 ： $V_e = S_e /$自由度$= S_e/5 = 2.69/5 = 0.538$

ＳＮ比 ： $\eta = \beta^2/\sigma^2 = \{(S_\beta - V_e)/2r\}/V_e$

$$= \{(33.06 - 0.538)/36\}/0.538 = 0.903/0.538 = 1.673$$

感　度 ： $S = \beta^2 = (S_\beta - V_e)/2r = (33.06 - 0.538)/36 = 0.903$

校正後のばらつき ： $\sigma^2 = \beta_0{}^2/\eta = 1/1.673 = 0.5977$

校正後の誤差 ： $\sigma = \sqrt{0.5977} = 07731$

正規分布を仮定した誤差の範囲 ： $\pm 3\times 0.7731 = \pm 2.32kg$

読み値 $y$ と信号 $M$ との関係から、校正後の「真値の推定と誤差の範囲」は

$$M = M_0 + (y - y_0)/\beta \pm 3\sigma = 1.05y - 4.21 \pm 2.32kg$$

で推定することができる。

## 2.8 直交表の目的と使い方

直交表の目的は，研究実験の結果が製造や市場において「再現性」があることを検査するためである。制御因子間の「交互作用の有無」を判断するために直交表を使うのである。交互作用が無いということは，一つの因子が他の因子の影響を受けずに「安定した効果（主効果）」が得られることである。

再現性の有無は「確認実験」による利得の比較で判断する。

直交表の性質：多数の因子を同時に動かしながら実験できる。

↓

直交表の種類：「混合系」と「標準系」とに分けられる。

↓

**混合系直交表**
（交互作用が交絡）

| | |
|---|---|
| L12 | 2水準×11因子 |
| L18 | 2水準× 1因子<br>3水準× 7因子 |
| L36 | 2水準×11因子<br>3水準×12因子 |
| | 3水準×13因子 |

↓

品質工学では，交互作用がないことが理想であるから「混合型」を推奨する。

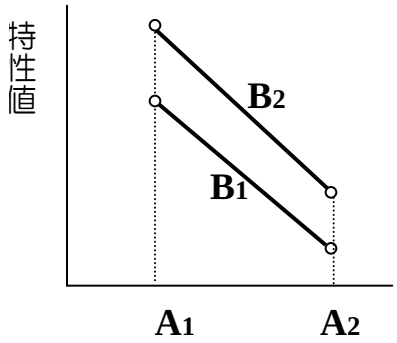
**標準系直交表**
（交互作用が独立）

| | |
|---|---|
| L4 | 2水準× 3因子 |
| L8 | 2水準× 7因子 |
| L16 | 2水準×15因子 |
| L32 | 2水準×31因子 |

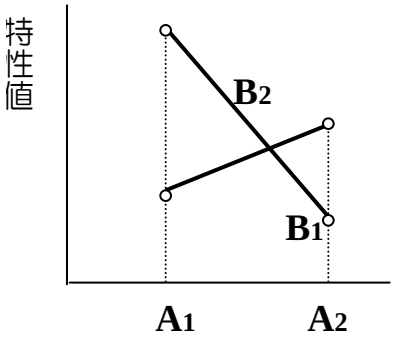
| | |
|---|---|
| L9 | 3水準×4因子 |
| L27 | 3水準×13因子 |

ダミー法　：3水準の列に2水準の因子を割り付ける

多水準作成：混合系ではL 18の1列+2列で6水準ができる



交互作用がない場合



交互作用がある場合

## 2.9 商品開発から技術開発へ

品質を分類すると次の４段階になる。

| 品質の分類 | 具体的事例 |
|---|---|
| 顧客の品質（下流の品質）<br>顧客の要求である故障，振動，騒音燃費，公害などで，経営者がマネージメント用に使用する品質 | 接着剤の目的は<br>くっつける ➡ 剥がれない<br>シールする ➡ 隙がない |
| 製造の品質（中流の品質）<br>図面やスペックなどの品質特性で，製造の検査や管理用のもので，計測可能の品質 | 検査項目として<br>$1kgf/cm^2$ の力で10秒間耐えること<br>（接着 5分後の標準条件で） |
| 商品の品質（上流の品質）<br>商品設計や工程設計用の品質特性で品質目標からのずれを静的ＳＮ比で評価する品質 | 設計品質として<br>接着力：$1kgf/cm^2$ 以上<br>漏れ水量：$0.5cm^3$ 以下<br>接着剤の粘度：3.5 Poise |
| 技術の品質（源流の品質）<br>要素技術や製造技術の機能性の品質で，基本機能の確実性を動的ＳＮ比で評価する品質 | 「接着性」の基本機能は<br>「接着力は接着面積に比例する」<br>理想機能：$y=\beta M$<br>計測特性：$y=f_d(M,N1,N2)$<br>$y$：接着力$(kgf)$<br>$M$：接着面積$(cm^2)$<br>$\beta$：比例定数<br>$N1$：接着しやすい材料<br>$N2$：接着しにくい材料 |

市場における「顧客の品質」を聞いて，自社の商品の品質状況を判断するのは経営者の仕事であるが，技術者が「顧客の品質」や「製造の品質」を見て品質の判断をしているようでは問題である。

技術者が「顧客の品質」を改善するときには，源流の「技術の品質」を改善することが極めて大切である。**（To get quality，Don't measure quality）**

何故ならば，顧客の品質である振動や騒音や排気ガスや燃費や使用電力などは，本来のシステムの機能が十分に発揮されていないために起こる副作用であるから，副作用を抑えることは効率が悪い仕事（もぐら叩き）である。

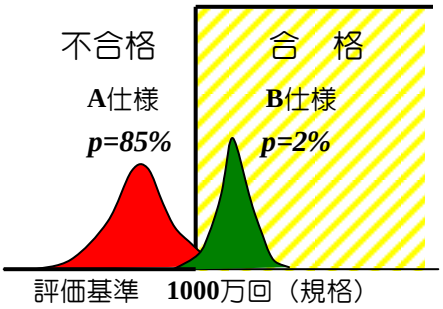
## 2.10　試験から評価へ①－材料の寿命試験を機能性の評価で－

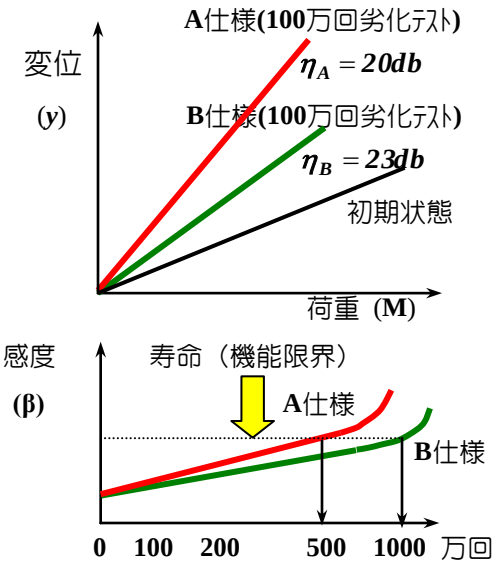
**従来の寿命試験**

1．「破壊」した状態を見る
　－破壊した回数や時間－
2．「沢山の試料」が必要
　－偶然誤差－
3．「規格」に対する合否
　―不良率（$p$%）－
4．長期間かけて予測する

**品質工学の寿命の推定**

1．正常の「機能」を見る
　－フックの法則－
2．「数個の試料」でよい
　－必然誤差－
3．「初期値からのずれ」
　－ＳＮ比（$\eta db$）－
4．短期間で予測できる




**従来の問題点**

1．「破壊点(異常)」だけの情報では合格品の品質が分からない
2．いつ破壊するか予測できないため長時間の試験が必要である
3．沢山の試料が必要で費用がかかる

**正しい寿命の評価**

1．お客様が欲しいのは破壊点ではなく，使用中の「機能」の安定性である
2．劣化ノイズによる「SN比」の利得で，A仕様よりB仕様の方が寿命が2倍長いと予測できる
3．「感度」の変化率から，A仕様は500万回，B仕様は1000万回と寿命が推定できる

## 2.11 試験から評価へ②－市場クレームと機能性の評価—

★市場クレーム発生★

自動止水栓を開発して、１億回の寿命試験をして止水機能を確認して、出荷したところ、市場では半年足らず（約 200 回）で故障してしまった。　原因は，スリップ機構（下図）の摩擦トルクが増大して機能限界を超えたことである。

品質工学では下記のような品質評価を行います

１．問題を起こしたスリップ機構の「理想機能」を「皿ばねの締め付け量 $M$ と回転力 $y$ との比例関係」を $y = \beta M$ と考える。

・信号因子：締め付け量 $M$（皿ばねの撓み量 mm）

・出力特性：回転力 $y$（トルク計で測る　kg・cm）

２．ノイズ（誤差因子）は，理想機能を乱す使用条件として最も影響が大きいと思われる温水を劣化条件として選ぶ。

$N_1$（ 25℃の水で，0 時間）　$N_2$（100℃温水で 72 時間放置）

3.　機能性を評価するために，SN比と感度を求める。

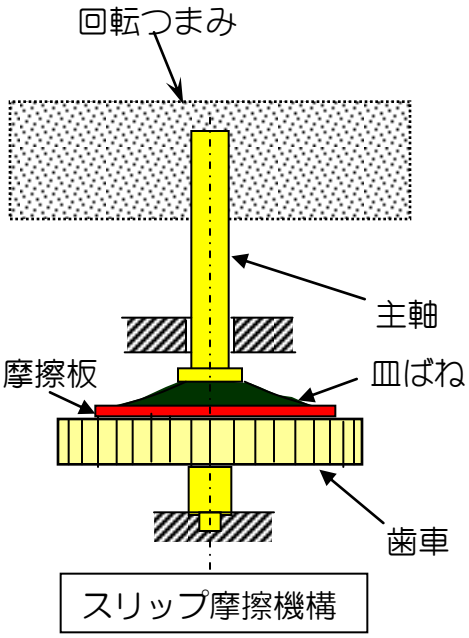
4.　機能性を改善するために，制御因子（皿ばね，摩擦板の材質や寸法）を選んで直交表に割り付けて，パラメータ設計を行い，最適条件を求める。

【機能性の評価のメリット】

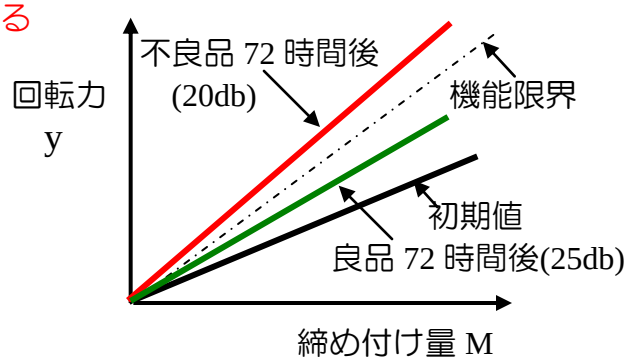
１．寿命試験では市場の品質は分からない

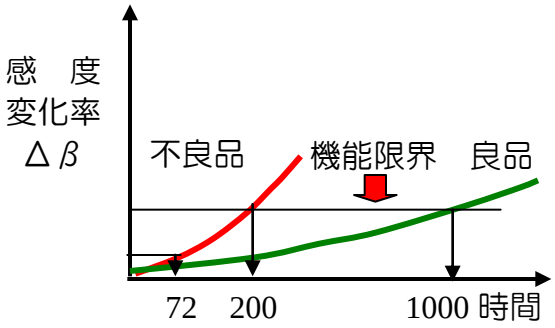
２．僅か 72 時間で品質評価ができる（ＳＮ比）

３．感度の変化率から寿命の推定ができる




スリップ摩擦機構



## 2.12 購入部品の機能性の評価

他社から部品や素子を購入する場合に，品質特性でなく短時間に機能性評価することが大切である。

### 2.12.1 ＣｄＳ素子の目的機能と基本機能

CdS素子は電気回路の開閉を周囲の明るさによって，自動的に制御するために開発されたものである。設計者の要求する品質特性としては，式（1）のようなγ率（抵抗比の対数／光量比の対数）などが考えられる。

$$\gamma_{10}^{100} = \{\ln(R_{10} / R_{100})\} / \{\ln(L_{100} / L_{10})\} \tag{1}$$

品質の安定性を確保するためには、開発設計段階に於いて、回路素子の基本機能について下記のような評価を行うことが大切である。

CdS素子の目的機能は「光量の変化で抵抗値が変わること」であるから，式(2)のような指数関数が成り立つことが予測される。

$$\boldsymbol{R = R_0 e^{-\alpha(L-L_0)}} \tag{2}$$

そこで、CdS素子の基本機能，「光量にって変化する抵抗の機能である電圧と電流の比例関係（オームの法則）」を式(3)のように考える。

$$\boldsymbol{I = (1/R)V = \{e^{\alpha(L-L_0)} / R_0\}V} \tag{3}$$

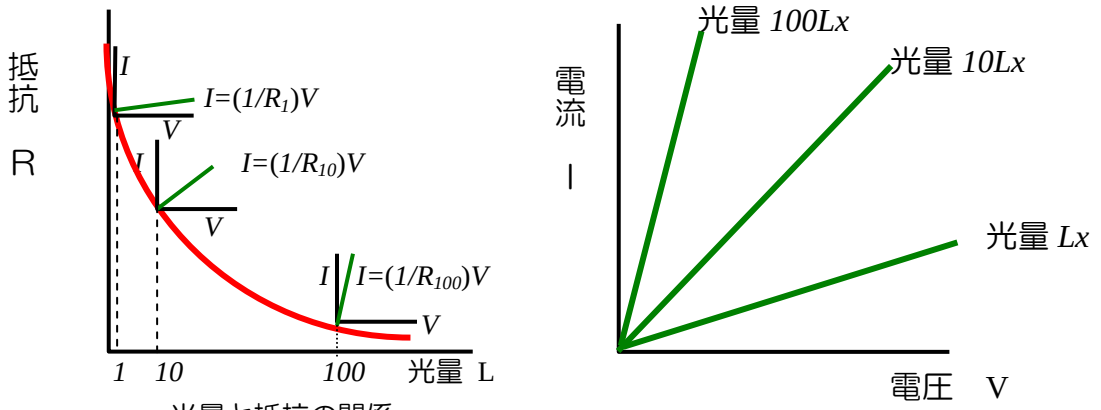
ここで、

$I = y, 1/R = \beta, V = M$ とおくと

理想機能は

$$\boldsymbol{y = \beta M} \tag{4}$$

で表わされる。




（製品の目的機能）　　（技術手段の基本機能）

図１　ＣｄＳ素子の機能説明図

### 2.12.2 基本機能の評価実験

基本機能の計測特性について、入力信号を電圧、出力特性を電流として、光量や劣化ノイズ別に表１のように計測する。

この実験においては、光量と電流の物理的な関係が分からなかったので、光量は信号因子として扱わず使用条件（標示因子）と考えた。

この実験の調合ノイズは下記のとおりである。

$N_1$：初期状態（常温、常湿）

$N_2$：劣化状態（高温、高湿）

表１のデータは表２に示す品種６の製品について実験したものである。

| | | M1（2V） | M2（8V） | M3（14V） | 線形式 |
|---|---|---|---|---|---|
| N1(初　期) | A1（　1lx） | y 11（　2.5） | y 12（ 11.0） | y 13（　20.0） | L 1=　373.0 |
| | A2（ 10lx） | y 21（ 20.0） | y 22（ 93.0） | y 23（ 170.0） | L 2= 3164.0 |
| | A3（100lx） | y 31（184.0） | y 32（820.0） | y 33（1480.0） | L 3=27648.0 |
| N2(劣化後) | A1（　1lx） | y 41（　2.5） | y 42（ 10.2） | y 43（　18.2） | L 4=　341.4 |
| | A2（ 10lx） | y 51（ 21.0） | y 52（ 90.0） | y 53（ 164.0） | L 5= 3058.0 |
| | A3（100lx） | y 61（178.0） | y 62（800.0） | y 63（1400.0） | L 6=26356.0 |

表　１　電圧と電流の入出力関係

### 2.12.3　実験データの解析

実験データを解析して、基本機能のSN比を求めるときには、入力信号である光量は信号にも誤差にも入れずに変動の分解を行い、SN比の解析を行った。

次に、表１のデ-タについて解析した結果を示す。

全出力（全変動）

$$S_T = y_{11}{}^2 + y_{12}{}^2 + \ldots + y_{63}{}^2 = 2.5^2 + 11.0^2 + \ldots + 1400^2 = 560269.5 \qquad (f=18)$$

線形式

$$L_1 = M_1 y_{11} + M_2 y_{12} + M_3 y_{13} = 2\times 2.5 + 8\times 11 + 14\times 20 = 373.0$$

同様にして、$L_2$，$L_3$，$L_4$，$L_5$，$L_6$ を求めると

$$L_2 = 31640$$

$$L_3 = 276480$$

$$L_4 = 341.4$$

$$L_5 = 30580$$

$$L_6 = 263560$$

有効除数（入力信号の大きさ）

$$r = M_1{}^2 + M_2{}^2 + M_3{}^2 = 2^2 + 8^2 + 14^2 = 264$$

線形式$L$間の変動（感度$\beta$の変化）

$$S_L = (L_1{}^2 + L_2{}^2 + \ldots + L_6{}^2)/r = (373.0^2 + 31640^2 + \ldots + 263590^2)/264 = 5601017$$

（$f=6$）

感度$\beta$の一次変動（有効成分）

$$S_\beta = (L_1 + L_2 + \ldots + L_6)^2/6r = (373.0 + 31640 + \ldots + 263560)^2/(6\times 264) = 2344528$$

($f=1$)

劣化ノイズによる感度$\beta$の変動　（有害成分）

$$S_{N\times\beta} = [(L_1 + L_2 + L_3)^2 + (L_4 + L_5 + L_6)^2]/3r - S_\beta = [(373.0 + 31640 + 27680)^2 + (341.4 + 30580 + 253560)^2]/(3\times 264) - 2344528 = 1290$$

($f=1$)

光量による感度$\beta$の変動（信号にもノイズにも入れない）

$$S_{A\times\beta} = \left[(L_1 + L_4)^2 + (L_2 + L_5)^2 + (L_3 + L_6)^2\right]/2r - S_\beta = [(373.0 + 341.4)^2 + (3164.0 + 3058.0)^2 + (27648.0 + 25356.0)^2]/(2\times 264) - 2344528 = 3253304$$

（$f=2$）

劣化ノイズ ×光量×感度$\beta$の変動（有害成分）

$$S_{N\times A\times\beta} = (L_1^2 + L_2^2 + \ldots + L_6^2)/r - S_\beta - S_{A\times\beta} - S_{N\times\beta}$$
$$= (373.0^2 + 31640^2 + \ldots + 263560^2)/264 - 2344528 - 3253304 - 1290 = 1895$$

（$f=2$）

誤差変動（個体誤差の有害成分）

$$S_e = S_T - S_L = 560295 - 5601017 = 1678$$

($f=12$)

誤差分散（個体誤差のばらつき）

$$V_e = S_e/\text{自由度}f = 1678/12 = 140$$

全体の誤差変動

$$S_N = S_e + S_{N\times\beta} + S_{N\times A\times\beta} = 1678 + 1290 + 1895 = 4863$$

($f=15$)

全体の誤差分散（ノイズと信号の非直線性の有害成分）

$$V_N = S_N/15 = 4863/15 = 324$$

抵抗機能の安定性（SN比）

$$\eta = 10\log\frac{\frac{1}{6r}(S_\beta - V_e)}{V_N} = 10\log\frac{\frac{1}{6\times 264}(2344528 - 140)}{324} = 6.60db$$

抵抗値の大きさ(感度)

$$S = 10\log\frac{1}{6r}(S_\beta - V_e) = 10\log\frac{1}{6\times 264}(2344528 - 140) = 31.70db$$

実際にSN比を求めるときには，有効成分$S\beta$と有害成分$S_N$の比で求めればよいのだから，個別誤差は（$S_{A\times\beta}$，$S_{N\times A\times\beta}$）は求める必要はないが，表3に示すように，変動の大きさを知るために念のため求めた。

### 2.12.4 評価の結果と考察

市場における３社の９品種について、上記の評価実験を行い、初期と劣化後のSN比を求めた結果と総コスト（製品コスト＋品質損失）の比較を表２に示す。

| メーカー | 初期値 | 24時間後 | 損失コスト | 製品コスト | 総コスト |
|---|---|---|---|---|---|
| １ | １０．２９ | １２．０８ | ９．４円 | ８０円 | ８９．４円 |
| ２ | １０．２１ | １１．４９ | １０．６円 | １００円 | １１０．６円 |
| ３ | １３．１２ | １５．１９ | ４．５円 | ８０円 | ８４．５円 |
| ４ | ８．２１ | ０．５１ | １３３．９円 | ５０円 | １８３．９円 |
| ５ | ５．６４ | ４．４２ | ５４．１円 | ４０円 | ９４．１円 |
| ６ | ８．１２ | ６．６０ | ３２．８円 | ６０円 | ９２．８円 |
| ７ | ７．７４ | ４．６２ | ５１．９円 | ４０円 | ９１．９円 |
| ８ | １４．３４ | １３．２４ | ７．１円 | ９０円 | ９７．１円 |
| ９ | －１１．７０ | －９．０５ | １２５０．５円 | ３０円 | １２８０．５円 |

表　２　メーカー別の機能性のＳＮ比評価（db）とコスト比較

損失コストは下記の「損失関数」で求めた値である。比例乗数を１５０円に設定した。
メーカーで感度の目標値 $\beta_0$ と品種ごとの感度 $\beta$ の差がある場合は，ＳＮ比のばらつきだけでなく，感度の校正後のばらつきで損失関数を下記のように求めることになる。

$$L(\text{円}) = \frac{A_0}{\Delta_0{}^2}\beta_0{}^2 \times \left(\frac{1}{\eta\ (\text{真数})}\right) = 150 \times \beta_0{}^2 \times \left(\frac{1}{\eta\ (\text{真数})}\right)$$

品質とコストの両面から評価すると，品種３の製品が最も良くて，品種９の製品が最も悪いことがわかる。実際に購入するときには，品質・コストの両面から判断して決めることになる。（参考のために品種４と品種６の２４時間後の分散分析を表３に示す。）

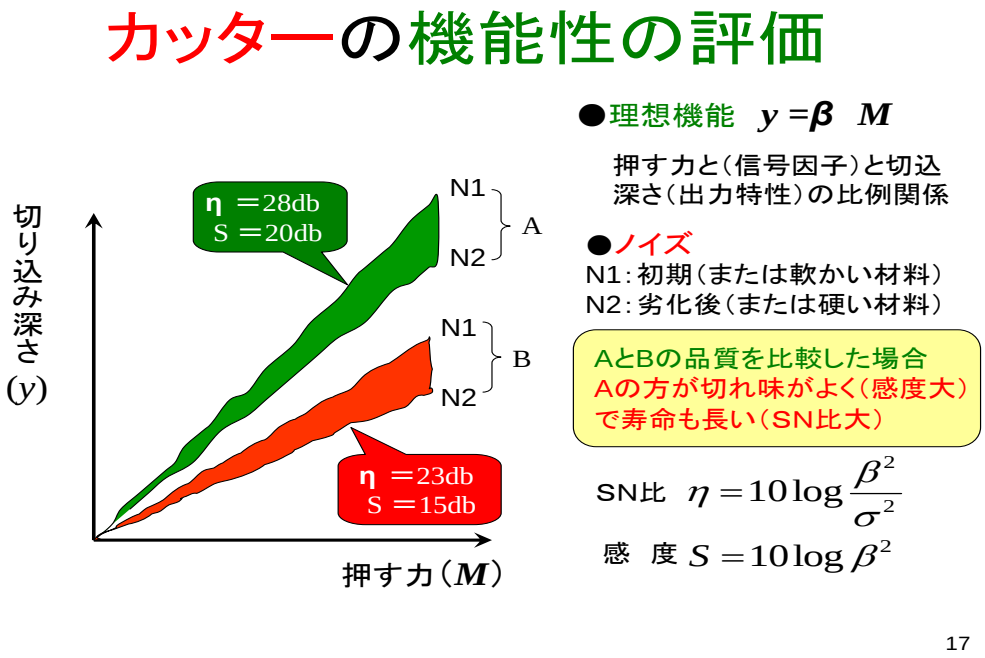
| 要因 | 自由度 | 品種４ | | 品種６ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | S | V | S | V |
| $\beta$ | １ | 14768365 | 14768365 | 2344528 | 2344528 |
| A×$\beta$ | ２ | 15641274 | 7820637 | 3253304 | 1626652 |
| N×$\beta$ | １ | 41584 | 41584 | 1290 | 1290 |
| N×A×$\beta$ | ２ | 36385 | 18193 | 1895 | 948 |
| e | １２ | 46415 | 3868 | 1678 | 140 |
| N×$\beta$＋N×A×$\beta$＋e | １５ | 124384 | 8292 | 4853 | 324 |
| T | １８ | 30534023 | | 5602695 | |
| ＳＮ比 | | ０．５１ | | ６．６０ | |

表　３　分散分析表（サンプル別の比較）

## 2.13 購入商品の機能性の評価

システムの評価をする場合には，顧客の満足する機能について機能性評価を行うことが大切であるが，購入商品の場合も顧客の望む機能について機能性の評価を行い購入することが大切である。

カッターなどでは「切れ味」について下記のような機能性を評価する。




### 2.13.1 評価実験

| 比較 | ノイズ | M1 5g | M2 10g | M3 15g | 腺形式 L |
|---|---|---|---|---|---|
| A社 | N1 | 0.62 | 1.23 | 1.82 | 42.7 |
| | N2 | 0.51 | 1.04 | 1.51 | 35.6 |
| B社 | N1 | 0.43 | 0.85 | 1.28 | 29.9 |
| | N2 | 0.32 | 0.65 | 0.95 | 22.4 |

目的：A社とB社の切れ味（機能性）を評価する。
信号因子：押付け力（M）
出力特性：切込み深さ（y）
誤差因子（ノイズ）：N1は軟らかい材料
N2は硬い材料

### 2.13.2 データ解析（A 社の場合）

全2乗和　$S_T = 0.62^2 + 1.23^2 + \cdots + 1.04^2 + 1.51^2 = 8.832$　$(f = 6)$

有効除数　$r = 5^2 + 10^2 + 15^2 = 350$

線形式　$L_1 = 5 \times 0.62 + 10 \times 1.23 + 15 \times 1.82 = 42.7$

$L_2 = 5 \times 0.51 + 10 \times 1.04 + 15 \times 1.51 = 35.6$

比例項の変動　$S_\beta = \dfrac{(L_1 + L_2)}{2r} = \dfrac{(42.7 + 35.6)^2}{2 \times 350} = 8.758$　$(f = 1)$

ノイズの変動　$S_{N\times\beta} = \dfrac{(L_1 - L_2)}{2r} = \dfrac{(42.7 - 35.6)^2}{2 \times 350} = 0.072$　$(f = 1)$

誤差変動　$S_e = S_T - S_\beta - S_{N\times\beta} = 0.002$　$(f = 4)$

誤差分散　$V_e = S_e / 4 = 0.002 / 4 = 0.0005$

総合誤差変動　$S_N = S_e + S_{N\times\beta} = 0.002 + 0.072 = 0.074$　$(f = 5)$

総合誤差分散　$V_N = S_N / 5 = 0.0148$

切れ味の安定性（SN比）　$\eta = 10\,log\,\dfrac{\frac{1}{2r}(S_\beta - V_e)}{V_N} = 10\,log\,\dfrac{\frac{1}{700}(8.758 - 0.0005)}{0.0148} = -0.73db$

切れ味（感度）　$S = 10\,log\,\frac{1}{2r}(S_\beta - V_e) = 10\,log\,\frac{1}{700}(8.758 - 0.0005) = -19.03db$

### 2.13.3 切れ味の評価【演習問題】

1．B 社のデータを解析せよ。

2．A 社とB 社の切れ味の安定性（寿命）と切れ味の比較をせよ。

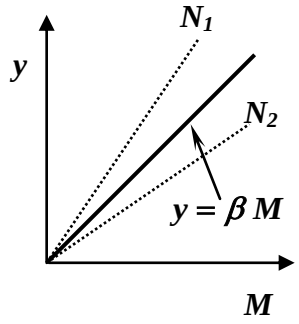
| | SN比<br>（db） | 感度<br>（db） | β<br>切れ味 |
|---|---|---|---|
| A 社 | −0.70 | −19.03 | 0.112 |
| B 社 | | | |

□社の方が切れ味も□倍よく，寿命も□db（□倍）長いことが分かる。

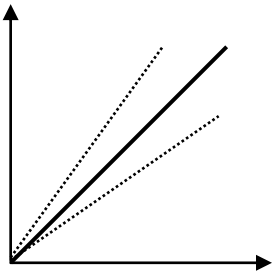
## 2.14「機能性」のとらえ方演習問題

次の製品または部品の「目的機能」を満足する「理想機能」と理想機能を乱す「ノイズ」を書きなさい。

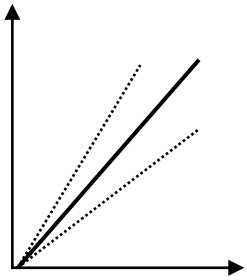
（1）コンデンサ



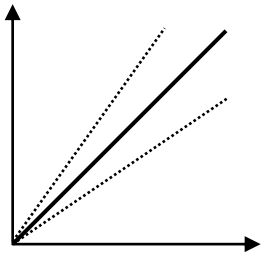

（2）ナイフの切れ味



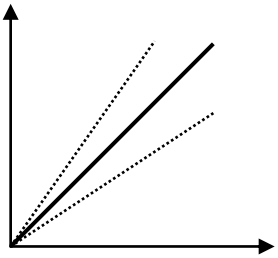
（3）テレビ（画像）



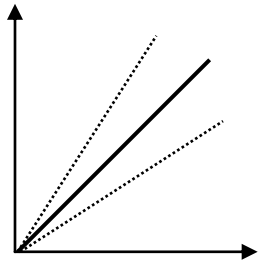
（4）プリンタの印字品質



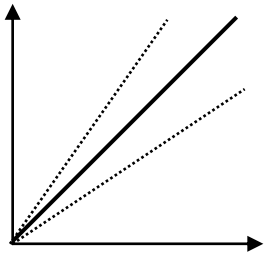
（5）ボールペンの書き味



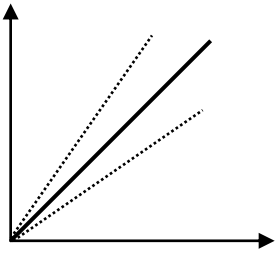
（6）掃除機の吸引性能



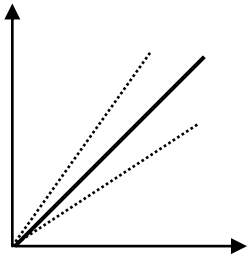
（7）レーザー溶接強度



（8）血圧計の計測精度



（9）自動車の燃費



## 【機能性の評価の演習問題】

１．コピー機のコピー性能の評価において，原画に対するコピー画像の線幅が下表の通りである。このデータから線幅の誤差を求めよ。

| 原画 / 測定場所 | M1(0.2mm) | M2(0.4mm) | M3(0.8mm) |
|---|---|---|---|
| N1 | 0.24 | 0.40 | 0.79 |
| N2 | 0.21 | 0.41 | 0.81 |
| N3 | 0.22 | 0.38 | 0.79 |
| N4 | 0.19 | 0.39 | 0.78 |
| 計 | 0.86 | 1.58 | 3.17 |

２．下表は2種類のトランジスタA1とA2の機能を電源電圧Mと出力電流yとの比例関係で求めたものである。　両者をＳＮ比で比較して優劣を評価せよ。

| A \ N \ M | | 0.5(V) | 1.5(V) | 2.5(V) | 線形式 |
|---|---|---|---|---|---|
| A1 | N1 | 0.72(mA) | 2.62(mA) | 4.52(mA) | L1= |
| | N2 | 1.02(mA) | 3.02(mA) | 4.84(mA) | L2= |
| A2 | N1 | 1.40(mA) | 4.50(mA) | 7.58(mA) | L1= |
| | N2 | 1.48(mA) | 4.68(mA) | 7.80(mA) | L2= |

３．あるポンプの機能性の評価は，入力動力と出力動力の比例関係である。
測定データは下表の通りである。品質を評価せよ。

入力動力　$M = \left(\frac{2\pi}{60}\right) nT$　　出力動力　$y = \left(\frac{9.8}{60} \times 10^{-3}\right) \gamma QH$

ここに，M：入力動力（kW）　　ここに，y：出力動力（kW）
n：回転数（rpm）　　$\gamma$：水の密度
T：トルク（N･m）　　Q：吐出し量（$m^3$/min）H：全揚程（m）

| ノイズ \ 回転数（rpm） | | 5000 | 6000 | 7000 |
|---|---|---|---|---|
| N1（60 $m^3$/min） | M（入力動力） | 336 | 555 | 817 |
| | y（出力動力） | 110 | 167 | 234 |
| N2（100 $m^3$/min） | M（入力動力） | 315 | 567 | 852 |
| | y（出力動力） | 120 | 210 | 316 |

入出力が仕事量の場合には，データの平方根をとって解析する。

# 3. パラメータ設計

## 3.1 パラメータ設計の目的

ある電子回路を設計するとして，回路のシステム設計が行われたとき，その回路定数を決めることが設計者の仕事である。従来は，商品の性能や信頼性を確保するために，初めからグレードの高い部品を使うことが多いため，コストが高くなり，他社との競争力に負ける場合が多かった。

パラメータ設計では，価格の安い並級の部品を使って，性能や信頼性の高い商品を造ることを考える。勿論，部品の段階でも，コストを上げずに品質を上げるために，パラメータ設計を行うことも重要なことである。

## 3.2 パラメータ設計の原理

特性値と設計定数（パラメータ）やノイズとの間には，下図のような線形や非線形の因果関係が存在する。パラメータ設計では，この「非線形効果」を利用して，出力特性のばらつきの最小化を図る。設計定数$A$のばらつきは，$A_1$，$A_2$のどの水準でも同じであるが，出力への影響が異なっている。特に，$A_1$の水準を選べば，目標値$m$に合わせることはできるが，出力にかなりのばらつきが発生する。

このような場合，出力のばらつきを減らすために，ばらつきの小さい部品を使うと，コストアップになるばかりでなく，ノイズの影響に弱いことになる。

このようなとき，パラメータ設計では，最初に目標値に関係なく，出力に影響の少ない$A_2$の水準を選ぶことによって，設計定数がノイズの影響でばらついても，出力のばらつきが小さくなるようなノイズの影響に強い最適な設計条件を求めることができる。（ロバストネスの研究）

しかし，$A_2$の水準を選ぶと，出力が目標値より$d$だけ大きくなってしまうので，出力が目標値より$d$だけ小さくなるように，線形性の高い設計定数$B$の$B_2$の水準を選ぶことによって，出力を目標値へ調整することができる。(チューニングの研究）

このような設計を，品質工学では「２段階設計」と呼んでいる。

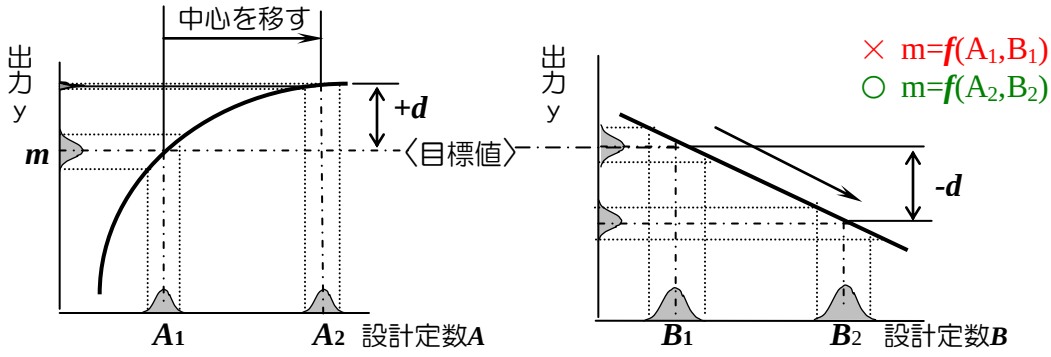



図　3.1　出力のばらつきを減らす　　図　3.2　出力を目標値に合わせる

パラメータ設計の原理（２段階設計法）

## 3.3 パラメータ設計の手順

### QE ステップ概要

―― パラメータ設計の手順をわかり易く説明する ――

**説明**

この欄ではパラメータ設計の手順の一般的説明を行う。手順は下記10項目に分類し、項目毎に説明して行く。

1. テーマ分析
2. 目的機能の明確化
3. 計測特性の決定
4. 信号因子の決定
5. 誤差因子の選定
6. SN比・感度の計算式
7. 制御因子の選定
8. 因子の割り付け
9. データ解析
10. 確認実験と結論

最後に品質工学の主な参考書を一覧とする。

**具体例**

左側の欄の説明に対して、より理解を深める目的で具体例を当てはめ、どのように実施しているか示す。

例題として取り上げた論文は信号因子と特性値の関係がやや難解な例ではあるが、第1回品質工学研究発表大会('93年9月)で発表し、品質工学賞を受賞した

㈱リコー 野島岳史氏ほかによる

「用紙送り機構の安定性設計」

である。

**ポイント**

この欄には説明に対する重要ポイント・誤解の多い点などを箇条書きにした。

## 1. テーマ分析

―― 目的を明確にする ――

### 説明

取り上げたテーマの目的・必要性を直接的且つ、具体的に捉え明確にする。

業務における位置づけ？
部門の目標・方針？
次の目標との関係？　など。

「何のために何をどうしたいのか？」を考え、技術目標を具体的に明示する。

品質工学では下流の目的から、より上流における目的機能や技術の基本的な働きを目的として考える。

品質の分類

| 分類 | | 目的 | 計測特性 |
|---|---|---|---|
| 源流 | 技術開発用 | 機能性の改善 | 基本機能の入力と出力 |
| 上流 | 製品開発用 | 安定性の改善 | 目的機能 |
| 中流 | 工程管理用 | 工程・製品のコントロール | 寸法<br>スペック |
| 下流 | マネージ用 | 検査・管理 | 弊害項目<br>振動・発熱 |

### 具体例

複写機・印刷機メーカーにとっては、「用紙送り機構」は重要なシステムである。

対象の紙送り機構は？

『用紙を摩擦部材によって分離搬送する摩擦部材方式』

以前は、重送・ミスフィードなど不良率を評価していた。
最近は紙送り精度として、送りローラまで紙を搬送させた時の位置ずれをゼロ望目特性として解析していた。

↓

目的機能

紙送りの機能そのものを安定化することにより、最適化を計る。

テーマ　「用紙送り機構の安定設計」

部門の目標・方針に合致するだけでなく、将来の製品開発においても重要な要素技術である。

### ポイント

1. 当面の技術的要求を満足するだけでなく、将来の製品開発にも役立つ技術開発を積極的に意識することが望ましい。
2. 品質工学では弊害項目より品質特性、品質特性よりは目的機能、さらには源流の基本機能を考えることが汎用性・先行性の高い技術開発であるとしている。

## 2. 目的機能の明確化

―― 目的機能の追求 ――

### 説明

品質工学では目的機能をどう捉えるかが重要であり、目的機能が判明すればパラメータ設計の半分が終了したと言っても過言ではない。

目的機能とは、システムが果たすべき役割のことをいう。

品質特性は一般に

望小特性　(非負で小さいほど良い)
　例：磨耗量、不純物量
望大特性　(非負で大きいほど良い)
　例：接着力、材料強度
望目特性　(目標値がある)
　例：塗布膜厚、材料厚さ
ゼロ望目特性　(ゼロが目標値)
　例：紙送りずれ(スキュー)、色ずれ

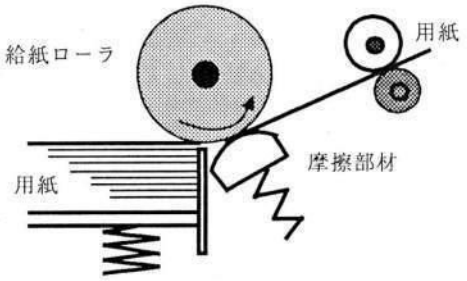
に分けられるが、効率が良い改善を行うためには、このような品質特性は計測せず、目的機能(動特性)を計測することを品質工学では推奨している。

目的機能が達成されていれば、不良等の弊害項目も改善される。

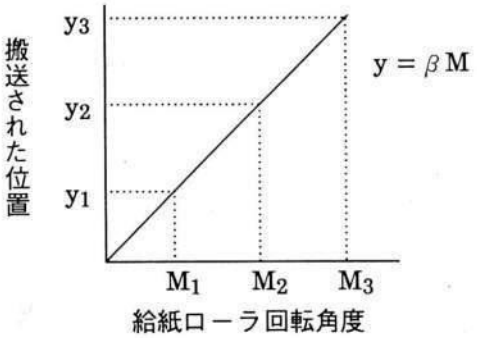
目的機能を取り上げることにより、他の類似製品にも設計情報が生かせ、技術の汎用性が広がる。

### 具体例

用紙送り機構の安定性設計で重要なのは、紙をある位置まで送るという技術的手段の機能性の研究を行うことである。ここでは、給紙ローラと摩擦部材の組合せで用紙を搬送する摩擦部材方式について検討する。




紙送り機構の目的機能は「給紙ローラの回転により用紙をある位置まで搬送すること」である。紙送り量をｙ給紙ローラの回転角度をＭとすると、$y = \beta M$ ($\beta$:定数) が理想関係である。




### ポイント

1. システムの入出力を明確にし、その関係を考える。特に両者の間にどのような原理・法則を利用しているかを明確にする。
2. 使用するシステムの限界を調べるために動特性を用いる。
3. 目的機能が達成できれば、使用するシステム内のエネルギーロスが最小となり、エネルギーのロスによる騒音・発熱などの弊害項目も改善される。
4. 開発・設計段階では品質特性を評価せず、機能性を評価することが重要である。

# 3. 計測特性の決定

―― 計測特性と計測方法を考える ――

## 説明

品質工学の動特性では、種々の入力信号に対して、出力された値を計測する。

特性とは、製品の性能・化学的性質・物理的性質などを定量的または定性的に表わすものである。

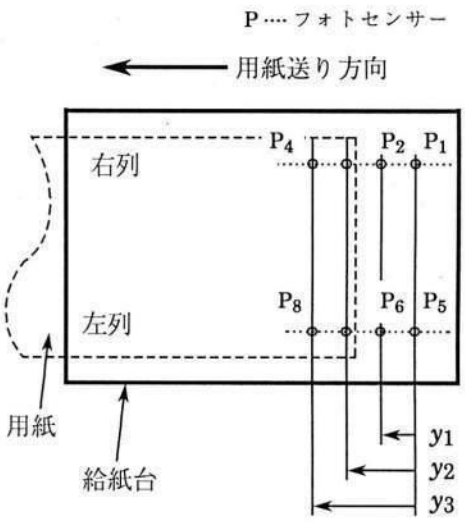
実験を行う上で、評価対象を計測する目的を明確にし、計測特性を考えることが重要である。その目的を表すものを目的特性と呼ぶ。

目的特性のままでは、技術的に計測できない場合、新規の計測方法と計測特性を考える。

## 具体例

出力である用紙送り量を直接計測することが困難なため、信号因子である給紙ローラの回転角を計測する。

給紙ローラを回転させて紙を送ると、信号因子であるローラの回転角度に比例したパルスがエンコーダから出力されるので、紙の後端が各センサーを通過した時のローラの回転角度を測定する。




センサー配置図

## ポイント

1. 製品の設計段階では、対象システムの機能に関係した計測特性を選定することが重要である。
2. 計測特性としては、良・不良などの計数値より、対象の基本的な働きを表す連続的な計測特性を用いる方が良い。

## 4. 信号因子の決定

―― 入出力関係を考え、広い範囲の水準を取る ――

### 説明

出力特性 y を変化させようとする為の入力信号を信号因子といい、M で表す。

信号因子は出力特性を変化させるもので、その値を制御できるものを選ぶ。

一般に、入出力の理想関係を

$$y = \beta M$$

とした比例関係を考えることが多い。

このように入力信号と出力特性を考え、信号因子を数水準取った入出力の関数関係を動特性という。

信号因子の水準数は、入出力の関数関係を非直線性も含めて評価できるように、3 水準以上とする。

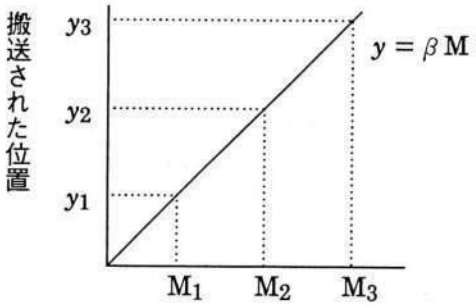
### 具体例

紙送り機構の目的機能を「給紙ローラの回転により用紙をある位置まで搬送する」と考えているので、

入力はローラ回転角度 : M

出力は搬送された位置 : y

となり、信号因子は「給紙ローラ回転角度」となる。




ここでは給紙ローラ回転角度を計測するので、信号因子は搬送位置 y から決まる 3 水準となる。

$M_1 = 47$ 度　$M_2 = 95$ 度　$M_3 = 144$ 度

### ポイント

1. 信号因子の水準は、制御因子と同様に、将来の製品や生産技術のことを考え、機能する範囲で、できるだけ広く取ることが大切である。
2. 信号因子はゼロ近傍の水準を含み、3 水準以上取ることが重要である。

## 5. 誤差因子の選定

―― 製造上・使用上の誤差はどんなものを考えるか？――

### 説明

誤差因子とは

量産製造時や使用時に入出力の関数関係を乱す因子で、実験室ではその値を制御できるもの。
例えば、使用環境や使用材料の変化・材料の不均一性・使用による劣化などである。

誤差因子の取上げ方

誤差因子の数が複数ある場合、誤差の効果を大きくする為に

$N_1$：出力を小さくする水準の組合せ
(負側)
$N_2$：出力を大きくする水準の組合せ
(正側)
の2つにまとめるのが良い。(誤差因子の調合)
出力を大きくするか小さくするか、不明なものは調合できない。

影響が大きい因子があれば、それ1つだけを誤差因子として取り上げれば良い。

### 具体例

前後方向の紙送り誤差 (搬送距離のばらつき) に対する誤差因子

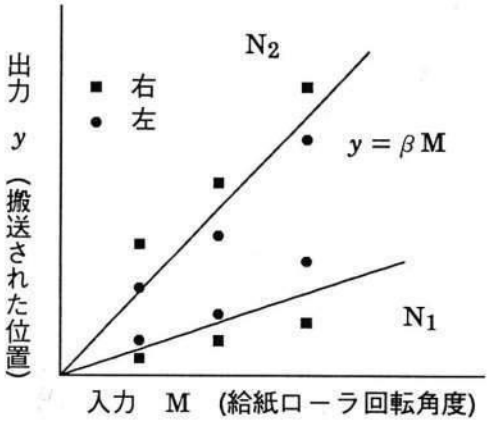
R：ローラの劣化
S：紙の種類

これを調合して、
$N_1 = R_1S_1$：搬送距離が短くなる方向
$N_2 = R_2S_2$：搬送距離が長くなる方向
とした。

左右方向の紙送りの誤差 (スキュー) に対する誤差因子

T：測定位置　左右2ヶ所
(材料などの不均一性)

誤差による直線性の乱れ




### ポイント

1. 入出力の関係を乱す誤差因子を積極的に取り入れ、誤差の変化に対して出力が安定する条件を探すことにより、実験結果の再現性を確保することができる。
2. 繰り返しは誤差としての影響が小さいので誤差因子として不適当である。

## 6. SN比・感度の計算式

―― 機能の安定性を計る尺度を求める ――

### 説明

表のデータに対して、SN比 ($\eta$) と感度 (S) を求める一般式を示す。

データ

| | $M_1$ | | $M_2$ | | $M_3$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | L | R | L | R | L |
| $N_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{14}$ | $y_{15}$ | $y_{16}$ |
| $N_2$ | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{23}$ | $y_{24}$ | $y_{25}$ | $y_{26}$ |

全変動 ($S_T$)

$S_T = y_{11}{}^2 + y_{12}{}^2 + \cdots\cdots + y_{26}{}^2$ ①

(f = 12)

線形式 (L)

$L_1 = M_1y_{11} + M_1y_{12} + \cdots\cdots + M_3y_{16}$ ②

$L_2 = M_1y_{21} + M_1y_{22} + \cdots\cdots + M_3y_{26}$ ③

有効除数 (r)

$r = 2 \times 2 \times (M_1{}^2 + M_2{}^2 + M_3{}^2)$ ④

比例項の変動 ($S_\beta$)

$S_\beta = (L_1 + L_2)^2 \div r = L^2 \div r$ ⑤

誤差分散 (Ve)

$Ve = (S_T - S_\beta) \div (12 - 1)$ ⑥

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{r}(S_\beta - V_e)}{V_e} \quad ⑦$$

$$S = 10 \log \frac{1}{r}(S_\beta - V_e) \quad ⑧$$

### 具体例

実験 No.1 のSN比と感度を求める。
ここでは信号因子 M とデータ y が逆の関係のため、M と y の対応表を作る。

No.1 計測データ

| M | $y_1 = 20$ | | $y_2 = 40$ | | $y_3 = 60$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ |
| R | 48.4 | 47.2 | 96.4 | 94.6 | 144.6 | 142.2 |
| L | 47.6 | 45.8 | 96.6 | 93.6 | 144.6 | 140.6 |

No.1 データ、M と y の対応表

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ···· | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M | 48.4 | 47.6 | 47.2 | 45.8 | 96.4 | ···· | 142.2 | 140.6 |
| y | 20 | 20 | 20 | 20 | 40 | ···· | 60 | 60 |

$S_T = y_1{}^2 + y_2{}^2 + y_3{}^2 + y_4{}^2 + \cdots\cdots + y_{12}{}^2$
$= 20^2 + 20^2 + \cdots + 40^2 + \cdots\cdots + 60^2$
$= 22\,400$

$r = M_1{}^2 + M_2{}^2 + M_3{}^2 + \cdots\cdots + M_{12}{}^2$
$= 48.4^2 + 47.6^2 + 47.2^2 + \cdots\cdots + 140.6^2$
$= 127\,075.96$

$S_\beta = L^2 \div r$
$= (48.4 \times 20 + 47.6 \times 20 + 47.2 \times 20 + 45.8 \times 20 + \cdots\cdots + 140.6 \times 60)^2 \div 127\,075.96$
$= 22\,396.13$

$Ve = (S_T - S_\beta) \div (12 - 1)$
$= (22\,400 - 22\,396.13) \div 11$
$= 0.35$

$\therefore\ \eta = -3.01$ (db)　　$S = -7.54$ (db)

### ポイント

1. SN比とは機能の安定性を計る尺度であり、$\eta$ で表し一般に下式になる

   $\eta = 10 \log (1 / \text{ばらつき})$ (db)　(ばらつき：理想とする機能と得られたデータとの離れ量)

2. 直線の傾きを希望の角度にしたい場合は感度で調整する。

   $S = 10 \log \beta^2$ (db)

3. 誤差を調合した時の計算式は上記と異なる。

# 7. 制御因子の選定

## ―― 改善に効果のあるパラメータを選び出す ――

### 説明

制御因子とは

目的機能を満足するために、その最適条件を選ぶ因子である。
パラメータ設計では、制御因子の値を積極的に変えて、SN比が高くなる条件を見い出す。

制御因子を選ぶ

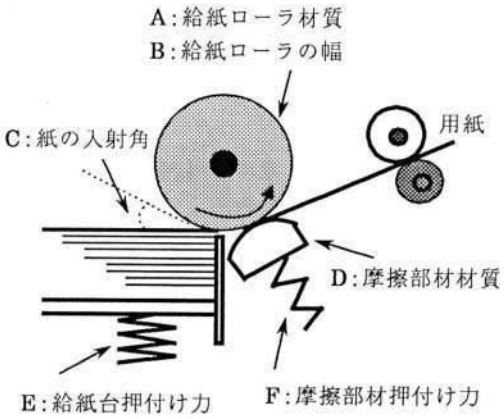
システムの中からできるだけ多くの設計パラメータを数え上げ、その中からSN比の改善に効果があると思われる因子を実験に取り上げる。

制御因子の水準を決める

制御因子の水準は通常3水準とする。
連続量の場合、等間隔になるように水準を設定する。

第1水準と第3水準の間隔は、システムが機能する範囲で、できるだでけ広く設定する。

### 具体例




担当設計者は、ここでA~Fまでの因子を制御因子として取り上げ、目的機能を満足させようと考えている。
紙の種類に依存しない安定した紙送り機構を考えると、紙の種類はこの目的に役に立たないので、制御因子として取り上げなかった。

制御因子と水準

| 制御因子 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| A 給紙ローラ材質 | T35 | M30 | M37 | H30 | H35 |
| B 給紙ローラの幅 | 小 | 中 | 大 | | |
| C 紙の入射角 | 小 | 中 | 大 | | |
| D 摩擦部材材質 | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | | |
| E 給紙台押付け力 | 小 | 中 | 大 | | |
| F 摩擦部材押付け力 | 小 | 中 | 大 | | |

### ポイント

1. できるだけ多く設計パラメータを抽出し、その中からSN比の改善に効果があると考える因子を実験に取り上げる。
2. 制御因子の水準の幅は機能する範囲で、できるだけ広く取る。

# 8. 因子の割り付け

## ―― 再現性の高い最適条件を得る直交表を使う ――

### 説明

制御因子は $L_{18}$ 直交表に割り付ける。

$L_{18}$ には、2水準の制御因子1ヶと3水準の制御因子7ヶが割り付けることができる。

6水準1ヶと3水準の制御因子6ヶとすることも可能である。

直交表 $L_{18}$ $(2^1 \times 3^7)$

| No. ＼ 列 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |

$L_{18}$ $(6^1 \times 3^6)$

| No. ＼ 列 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 5 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 6 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 6 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 6 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |

### 具体例

この実験では、$L_{18}$ $(6^1 \times 3^6)$ 直交表を用いた。5水準の制御因子Aは1列、4列を誤差列とし、下記のように割り付けた。

直交表の外側に用紙送り量毎に誤差因子を割り付けた。

| | A | B | C | e | D | E | F | $y_1 = 20$ | | | | … | | 60 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | $N_1$ | | $N_2$ | | … | … | | $N_2$ |
| | | | | | | | | R | L | R | L | ⋮ | | | L |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | … | ⋮ | … | | $M_{12}$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | | | | | | | | |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | | | | | | | | |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | | |
| 10 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | |
| 11 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 12 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | | | | | | | | |
| 13 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 14 | 5 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | | | | | | | | |
| 15 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | | | | | | | | |
| 16 | 3′ | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | | | | | | | | |
| 17 | 3′ | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | |
| 18 | 3′ | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | | | | | | | | |

実験No.1～18の各条件で12水準の信号因子の値を計測する。

1列の3′は第3水準のダミーである。

また実験No.1で得られるデータは12ヶのデータとなる。

外側の計測データ (ローラの回転角)

| | $y_1 = 20$ | | $y_2 = 40$ | | $y_3 = 60$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ |
| R | 48.4 | 47.2 | 96.4 | 94.6 | 144.6 | 142.2 |
| L | 47.6 | 45.8 | 96.6 | 93.6 | 144.6 | 140.6 |

### ポイント

1. 制御因子は、直交表のどの列に割り付けても良い。
2. 直交表の列に空きがあっても無意味なので、全ての列に制御因子を割り付ける。

## 9. データ解析

### —— 最適条件の決定と効果の推定 ——

**説明**

SN比 ($\eta$) 感度 (S) の算出

直交表 $L_{18}$ の実験 No.1～18 のSN比 ($\eta$) 感度 (S) を求める。

要因効果の推定

水準別平均値を求め補助表を作成。

要因効果図の作成

補助表のグラフ化

最適条件の決定

SN比の要因効果図から、SN比の大きい水準を選定し、最適条件を決定する。

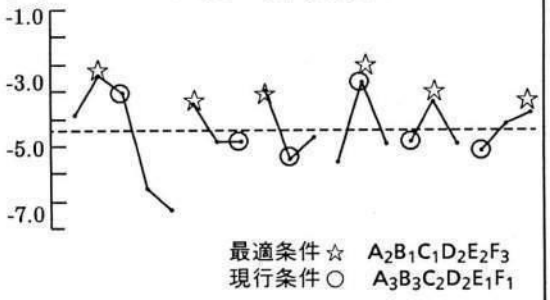
効果の推定

SN比と感度それぞれに対して影響の大きい制御因子を用いて、最適条件と現行条件の工程平均を求める。

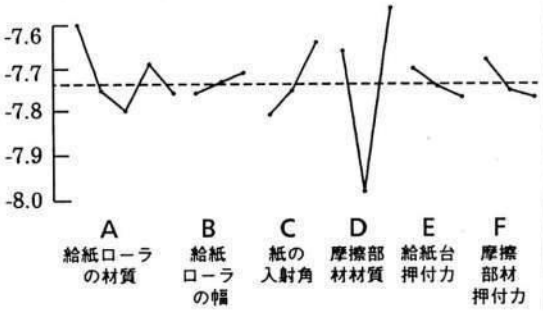
最適条件と現行条件のSN比の工程平均の差から利得を推定する。

**具体例**

SN比の要因効果図




感度の要因効果図




工程平均と利得の推定

| 項　目 | 推定式 | 推定値 (db) | |
|---|---|---|---|
| | | $\eta$ | S |
| 最適条件 | $A_2+C_1+D_2-2T$ | 1.72 | −8.07 |
| 現行条件 | $A_3+C_2+D_2-2T$ | −1.47 | −8.06 |
| 利　得 | (最適) − (現行) | 3.19 | —— |

**ポイント**

1. 連続量の水準を持つ制御因子の要因効果図が V字形になったときは、因子間の交互作用が考えられるので、確認実験のときに要因効果を再度確認するなどの対応が有効である。
2. 工程平均の推定では、全因子を用いると利得が過大に推定されるので、取り上げた因子の半分とする。
3. 要因効果図を書くときは、具体的な因子名・水準を記載する。

## 10. 確認実験と結論

—— 再現性の確認と技術情報の獲得 ——

### 説明

確認実験とは

データ解析から得た最適条件と現行条件の2通りの条件での実験を行う。

2つの条件に対しては直交実験と同様に、外側に割り付けた信号因子・誤差因子の組合せを実験する。

結果

確認実験のデータから、SN比・感度を求める。これから利得を求め推定値と比較する。

推定値と大きな差があった時は実験の再現性がないことなる。この場合は、制御因子間の交互作用が大きいと考えられるので、制御因子・水準などに技術的再検討が必要である。

まとめ

実験結果の全体に関して考察し、実験から得られた技術情報を整理する。

### 具体例

確認実験の結果

| 項目 | | $y_1=20$ | | $y_2=40$ | | $y_2=60$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ | $N_1$ | $N_2$ |
| 現行 | 右 | 51.2 | 50.0 | 102.6 | 100.0 | 155.0 | 151.6 |
| | 左 | 49.8 | 49.0 | 102.8 | 100.6 | 154.8 | 151.8 |
| 最適 | 右 | 52.0 | 49.8 | 103.4 | 103.0 | 155.4 | 153.8 |
| | 左 | 51.4 | 49.4 | 103.2 | 102.0 | 155.4 | 153.6 |

SN比と感度の計算結果

| 項目 | $\eta$ (db) | | S (db) | |
|---|---|---|---|---|
| | 推定値 | 確認値 | 推定値 | 確認値 |
| 最適条件 | 1.72 | -0.17 | -8.07 | -8.20 |
| 現行条件 | -1.47 | -3.34 | -8.06 | -8.12 |
| 利　得 | 3.19 | 3.17 | —— | —— |

結果とまとめ

利得の推定値3.19 dbと確認値3.17 dbは一致しており、再現性が確認された。用紙送りの誤差分散は利得が3.17 dbであることから、半減した。

再現性が確認されたことから、要因効果の大きな$A_2C_1D_2$は、他の機種への展開を推奨する。

### ポイント

1. 利得の推定値が再現されているかどうか、直交実験と同じ外側条件で実験を行い確認する。
2. 確認実験は、最適条件と現行条件との2通りをペアで行う。
3. この実験から、得られた情報を整理しておく。

## ３．４ パラメ ータ設計の演習問題

大砲などの砲弾到達距離の最適化の問題は，入力エネルギー$M$ と出力の砲弾到達距離 $y$の比例関係が理想機能であるから，機能性の評価問題における理想機能は $y=\beta M$ で表わされる。

ここでは，目標値があ場合の望目特性のパラメータ設計について演習を行う。

（理論式がある場合）

### 理論式による望目特性

大砲の弾の到達距離($y$)は発射する力(F)と，仰角(α)の関数で表される。

ここで$m$は砲弾の質量，$g$は重力加速度である。

$$y=\frac{1}{g}\left(\frac{F}{m}\right)^2 \sin 2\alpha$$

ばらつきなく，150mの目標値に弾を打ち込もうとしたら，パラメータFとαの値をいくらにしたらよいか？

ただし，仰角αは0度から45度の間で変えられ，Fは0から17Nの間で変えられる。弾の質量は0.2kgで一定とする。

2

従来の科学的研究で理論式がある場合は，設計定数に数値をあてはめて，答えを求めることが普通であるから，目標値の150m を達成するためには，外力 F に仮の値 10N を理論式に代入して，仰角 α を求めて，目標値に合わせることで設計を完了する。

理論的に正しい答えは求めたが，市場において安定した答えとは限らない。

### 従来の設計のやり方
－機能設計（チューニング）－

理論式の因果関係から，力$F$を区切りのよい10Nにして，αは目標値に合わせるために，式を変形して

$$\alpha=\frac{1}{2}\sin^{-1}\left\{\left(\frac{m}{F}\right)gy\right\}$$

$$=\frac{1}{2}\sin^{-1}\left\{\left(\frac{0.2}{10}\right)\times 9.807\times 150\right\}=18.02\text{度}$$

と求めて，設計定数（パラメータ）の値を決定して，システム設計を完了する。

3

パラメータ設計では，目標値がある場合は，望目特性と考えて，理想機能は$y=m$と考えて，到達距離のばらつきは SN 比で表わし，目標値は感度として，デシベルで求める。

パラメータ設計の２段階設計を行うために，まず SN 比でばらつきを安定させて，感度で目標値に合わせこむことになる。

### パラメータ設計のやり方
－機能性設計（２段階設計）－

- パラメータ設計では，目標値がある場合には望目特性と考えて，目標値を $y=m$ とするとSN比と感度は下式で求められる。

$$\eta_{db}=10\log\frac{m^2}{\sigma^2}=10\log\frac{\frac{1}{n}(S_m-V_e)}{V_e}$$

$$S_{db}=10\log m^2=10\log\frac{1}{n}(S_m-V_e)$$

4

直交表には，内側に制御因子の外力 F と仰角 α の 2 水準の値をとり，外側にはノイズとして，外力と仰角のばらつきを 2 水準とって，内側と外側の交互作用実験を行い，砲弾の到達距離を求める。

到達距離が 9m から 694m の大きな範囲でばらついていることが分かる。目標値の 150m はどこにも見られない。

## 直積実験とSN比

| 制御因子 | | | ノイズ | Fのばらつき −10% α のばらつき −5度 | Fのばらつき −10% α のばらつき ＋5度 | Fのばらつき ＋10% α のばらつき −5度 | Fのばらつき ＋10% α のばらつき ＋5度 | SN比 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 力 F (N) | 5 | 仰角 α（度） | 10 | 9 | 26 | 13 | 39 | 3.63 |
| | | | 40 | 49 | 52 | 72 | 77 | 12.90 |
| | 15 | 仰角 α（度） | 10 | 81 | 232 | 121 | 347 | 3.82 |
| | | | 40 | 437 | 465 | 652 | 694 | 12.66 |

5

望目特性の SN 比は右のように計算で求める。右の計算は F=5N,α=10 度で F のばらつきが-10%と+10%で，α のばらつきが-5 度と+5 度の場合の SN 比を求めたものである。同じように，実験番号ごとに SN 比を求めて，上表を完成する。

## SN比の計算例

- F=5N,α＝10度の場合のSN比の計算

全変動 $S_T = \Sigma\left(y_i^{\,2}\right) = 9^2 + 26^2 + 13^2 + 39^2 = 2447$

平均値の変動 $S_m = n\left(\bar{y}\right)^2 = 4 \times \left(\dfrac{9+26+13+39}{4}\right)^2 = 1892.25$

誤差の変動 $S_e = S_T - S_m = 2447 - 1892.25 = 554.75$

誤差分散 $V_e = \dfrac{S_e}{n-1} = \dfrac{554.75}{3} = 184.9167$

SN比 $\eta = 10\,log\,\dfrac{\frac{1}{n}\left(S_m - V_e\right)}{V_e} = \dfrac{\left(1892.25 - 184.9167\right)}{4 \times 184.9167} = 3.63\ db$

6

SN 比を求めてから，F と α の水準ごとの SN 比の平均値を求めて，次の要因効果図を求めるための補助表を作成する。

## 補助表

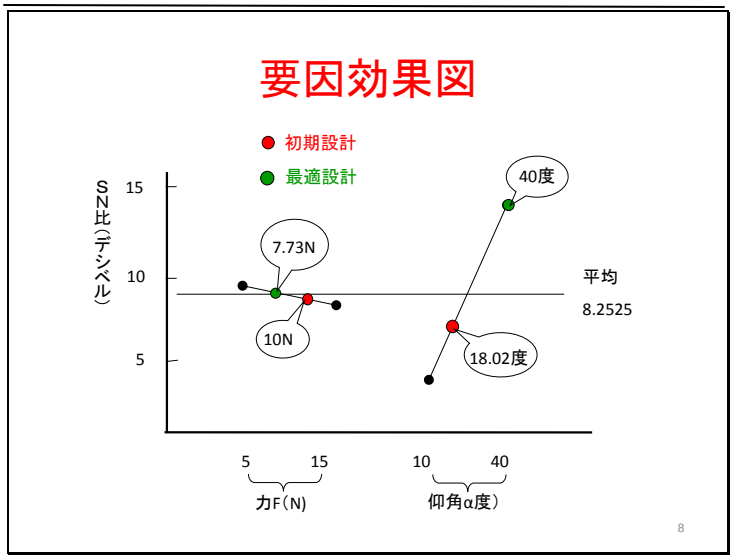
－各因子の水準ごとのSN比の平均値－

| | | |
|---|---|---|
| F | $\overline{F_1}$ | (3.63+12.9)/2=8.265 |
| | $\overline{F_2}$ | (3.82+12.66)/2=8.24 |
| α | $\overline{\alpha_1}$ | (3.63+3.82)/2=3.725 |
| | $\overline{\alpha_2}$ | (12.90+12.66)/2=12.78 |

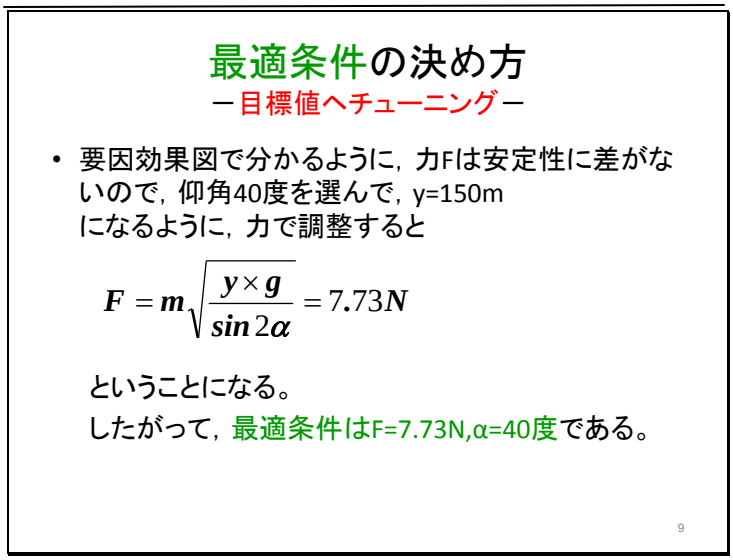
7

補助表からFとαの要因効果図を右のように作成する。

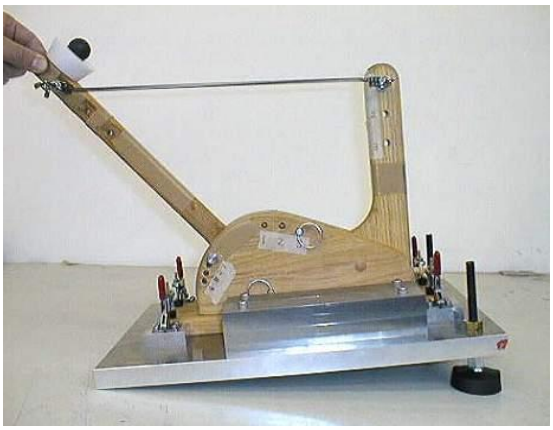
F は水準の差で SN 比のばらつきがあまりないが，α は水準の差が大きいことが分かる。すなわち，α=40 度の方が SN 比が大きく，ばらつきが小さいことが分かる。

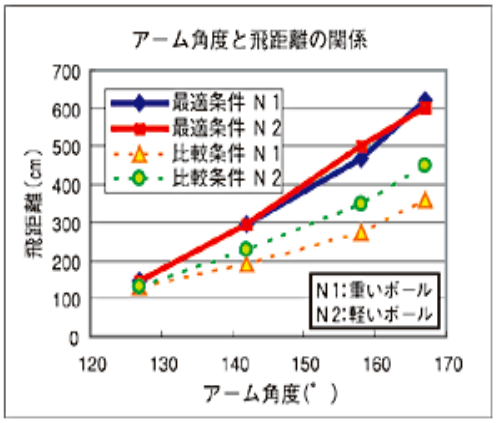



チューニング設計で，目標値へのチューニングを行う場合には，仰角 α=40 度を選び，到達距離が y=150m になるためには，力 F=7.73N を選べば，安定した距離の最適条件を求めることができる。




（注）スタタパルト実験　投石器を使って動特性で行った機能性評価のパラメータ設計





## ３．５　紙で簡単に実験した冷却システムのパラメータ設計

この事例は 1999 年に品質工学会の論文賞銀賞を授与された論文で，発熱という品質問題を機能性評価で改善した画期的な研究である。
しかも，紙を使って実験して開発期間を極めて短く短縮した点が評価された。

### パラメータ設計の事例研究（1）

－温度上昇を機能性評価で改善して開発期間を短縮－

- マイクロリーダプリンタの光源ランプの温度上昇が問題になったが，コストアップを伴う耐熱材料の採用や耐熱機能の付加などによらず，冷却システムの改善により汎用性の高い技術開発で課題解決を図った。
- 「品質を得たければ，品質を測るな」を実践した好例である。
  To get Quality, Don’t measure Quality.

1

複雑な空気の流路システムを L18 直交表に割りつけるため，紙で 18 通りのサンプルを作成してコスト低減と実験時間の短縮を図った。

### １．ランプシステムの概略構造

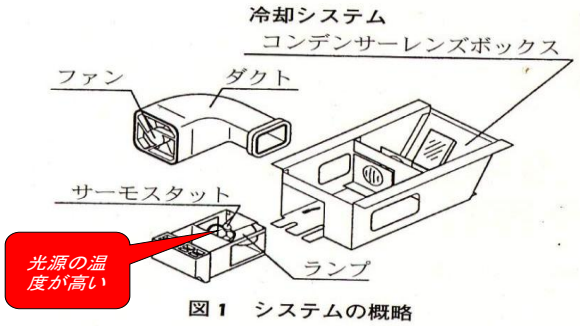



図１　システムの概略

2

温度を下げる目的に対して，理想機能はモーターの電力エネルギーを風量に変換することを考えた。実際には，入力は電圧で出力は風速の比例関係で機能性評価を行った。

### ２．目的機能を満足する理想機能を定義

－温度を下げたいときには、温度を測るな－

- 目的機能
  光源の温度を下げるには
  ファンを回転させて熱源近傍の空気を除去する
- 理想機能（$y = \beta M$）
  ファンの回転数の変化（代用としてモータ電圧）に比例して熱源の風速が直線的に変化して，かつ傾き（感度）が大きいこと

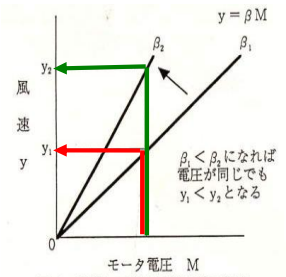



図-2　冷却システム技術手段の理想

3

温度上昇を防ぐために，風量を増やしてランプを冷やすことを考えて，モータ電圧に対するファンの風速を計測特性として実験を行った。

## 3.「計測特性」は何を測ればよいか

- ファン回転数の代用としてファンモータの電圧を入力として，モータ電圧に対する風速を出力特性として計測する
- 最終的な入出力の理想関係： $y = \beta M$

  $y$：風速（出力）

  $M$：モータ電圧（入力）

  $\beta$：感度

感度は入出力の変換効率で大きいほうが望ましい

4

信号因子は電圧の 3 水準をとり，ノイズは排気口の障害物のありなしで実験を行った。
ノイズは機能性を最も大きく阻害するものとして，排気口の有無を選んで，SN 比の差が大きく変化する実験をおこなった。

## 4. 評価と改善の因子の選定

- 評価因子は使用条件
  信号因子（電圧（V））
  $M_1$：5
  $M_2$：15
  $M_3$：25
  誤差因子（排気口の障害物）
  $N_1$：無し
  $N_2$：有り
- 制御因子は設計条件
  パラメータ設計を行うために右表の8因子とその水準を選んで直交表に割付ける。

表 2　誤差因子の水準

| 誤差因子 | 第 1 水準 N1 | 第 2 水準 N2 |
|---|---|---|
| 障害物 | 無　し | 有　り |

表 3　制御因子と水準（*：現行条件）

| 制御因子 | 第 1 水準 | 第 2 水準 | 第 3 水準 |
|---|---|---|---|
| A 遮光板 | 無し * | 有り | |
| B 外装と吸気部の距離 | 20* | 40 | 60 |
| C 吸気部と熱源の距離 | 110* | 60 | 40 |
| D 開口部高さ | 30* | 15 | 0 |
| E 排気ダクト高さ | 30* | 15 | 0 |
| F 熱源上部穴径 | 大 * | 中 | 無し |
| G 熱源下部穴径 | 無し * | 中 | 大 |
| H 熱源と排気ダクト距離 | 60* | 50 | 40 |

5

制御因子は 8 個であるのでL18直交表を選んで，3 水準の割り付けを行い，外側には顧客の使用条件である 3 種類の電圧の信号因子と排気口の有無の 2 水準を選んで，両者の交互作用実験を行い 18×6=108 個の風速データを求めた。

## 5. 直交表L18へ割付と風速データ

表 4　割り付けと風速データ

| 番号 | $L_{18}$ 制御因子 A…H 1…8 | 風速データ [m/sec×100] 信号因子／誤差因子 M1=5V N1/N2 | M2=15V N1/N2 | M3=25V N1/N2 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1…1 | 12　9 | 31　26 | 44　41 |
| 2 | 1…2 | 18　15 | 28　23 | 44　32 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 18 | 2…1 | 28　19 | 76　57 | 106　71 |

6

L18 直交表の実験番号ごとに 18 個の SN 比と感度を求める。
SN 比は風速データのばらつきを表し，感度は入出力の変換効率を表す。

## 6. SN比と感度の計算

SN比と感度の計算は $y = \beta M$ のゼロ点比例式を理想として計算した。
No.1の実験データを用いた計算例を示す。

**全出力** $S_T = 0.12^2 + 0.009^2 + \cdots + 0.44^2 + 0.41^2 = 0.5479$

**有効除数** $r = 5^2 + 15^2 + 25^2 = 875$

**線形式** $L_1 = 5 \times 0.12 + 15 \times 0.31 + 25 \times 0.44 = 16.25$

$L_2 = 5 \times 0.09 + 15 \times 0.26 + 25 \times 0.41 = 14.60$

**有効成分** $S_\beta = \dfrac{(L_1 + L_2)^2}{2 \times r} = \dfrac{(16.25 + 14.60)^2}{2 \times 875} = 5.4384 \times 10^{-1}$

**無効成分** $S_{N \times \beta} = \dfrac{L_1^2 + L_2^2}{r} = \dfrac{16.25^2 + 14.60^2}{875} - S_\beta = 1.5574 \times 10^{-3}$

**無効成分** $S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 2.5012 \times 10^{-3}$

**無効成分（分散）** $V_e = S_e / 4 = 2.5012 \times 10^{-3} / 4 = 6.253 \times 10^{-4}$

**全無効成分（分散）** $V_N = (S_e + S_{N \times \beta}) / 5 = 8.1172 \times 10^{-4}$

**安定性** $SN比\eta = 10 \log \dfrac{\frac{1}{2r}(S_\beta - V_e)}{V_N} = -4.17\,(db)$

**変換性** $感度 S = 10 \log \frac{1}{2r}(S_\beta - V_e) = -35.08\,(db)$

7

L18 直交表の実験番号ごとに SN 比と感度を求めて，右表のようにまとめる。

## 7. SN比と感度の計算結果

表 5 SN比と感度の計算結果［db］

| 番号 | A 1 | B 2 | C 3 | D 4 | E 5 | F 6 | G 7 | H 8 | SN比 | 感度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | −4.17 | −35.08 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | −12.77 | −35.86 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | −5.99 | −23.94 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1.76 | −26.29 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | −4.81 | −26.36 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | −5.35 | −26.74 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | −15.93 | −35.41 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | −14.45 | −30.67 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | −5.35 | −26.15 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | −8.82 | −26.58 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | −11.40 | −37.24 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | −1.08 | −23.41 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | −5.57 | −27.06 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | −4.92 | −23.97 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | −8.00 | −33.99 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | −9.13 | −24.54 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | −4.89 | −26.25 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | −11.99 | −28.41 |

例）外側の割付とNo．1条件のデータ

単位：m/sec × 100

| | $M_1$ 5 | $M_2$ 15 | $M_3$ 25 |
|---|---|---|---|
| $N_1$ | 12 | 31 | 44 |
| $N_2$ | 9 | 26 | 41 |

SN比＝−4.17 (db)
感　度＝−35.08(db)

8

8 個の制御因子ごとに 3 水準の SN 比と感度の平均値を求めて，右図の要因効果図を作成する。
SN 比，感度とも 3 水準の最も高い水準が最適条件と考える。
現行条件は，最初に設計して発熱が大きかった初期条件である。

## 8. 要因効果図の作成と最適条件の決定

SN比の総平均値＝−7.38 (db)
感度の総平均値＝−28.78 (db)

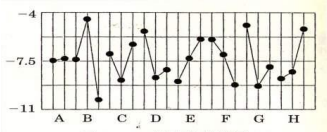



図 6a SN 比の要因効果図

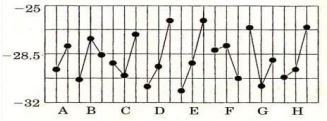



図 6b 感度の要因効果図

最適条件の決定

本事例ではSN比，感度ともに大きいことが望ましい。要因効果図から最適条件を決定する。

最適条件：A2B2C3D1E3F1G1H3
初期条件：A1B1C1D1E1F1G1H1

表 3 制御因子と水準（* ：現行条件）

| 制御因子 | 第 1 水準 | 第 2 水準 | 第 3 水準 |
|---|---|---|---|
| A 遮光板 | 無し * | 有り | |
| B 外装と吸気部の距離 | 20* | 40 | 60 |
| C 吸気部と熱源の距離 | 110* | 60 | 40 |
| D 開口部高さ | 30* | 15 | 0 |
| E 排気ダクト高さ | 30* | 15 | 0 |
| F 熱源上部穴径 | 大 * | 中 | 無し |
| G 熱源下部穴径 | 無し * | 中 | 大 |
| H 熱源と排気ダクト距離 | 60* | 50 | 40 |

9

L18 直交表で求めた最適条件がはたして信用できるかどうかを確認するために，再度最適条件と現行条件でサンプルを作って，確認実験を行うことが大切である。両者の利得が同じであれば再現性が高いということで最適条件を信用することができる。

## 9. 効果の推定と再現性の確認実験

表 6　再現性の確認結果［db］

| 条　件 | SN 比 [db] 推定値 | SN 比 [db] 確認値 | 感度 [db] 推定値 | 感度 [db] 確認値 |
|---|---|---|---|---|
| 最　適 | 2.23 | 1.66 | −23.7 | −24.0 |
| 現　行 | −4.30 | −4.17 | −32.4 | −35.1 |
| 利　得 | 6.53 | 5.83 | 8.7 | 11.1 |

推定実験では制御因子の最適条件が求まったが，再現性を確認するために最適条件と現行条件で確認実験を行った結果，改善の利得がSN比と感度ともに高いので再現性があると判断できる。
確認実験でAssessment（評価）に対するValidation（認証）を行うことは下流における信頼性の評価になる。

10

機能性評価で確認できた設計条件が，目的である発熱防止に効果があったかを確認することで，機能性評価の効果を確認することができる。

右図でもわかるように，温度上昇を 15 度ほど低下させることに成功した。

## 10. 確認実験の風速データと感熱部の温度変化

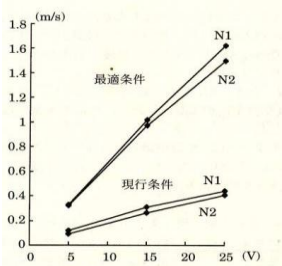


図 7　電圧と風速の関係

最適条件の風速が現行条件より高いことが分かる。

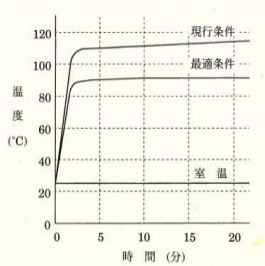


図 8　サーモスタット感熱部の温度変化

品質特性の温度も確実に低下していることが分かる。

11

## ３．６　漢方薬の配合比の最適化とモデル動物による薬効評価

### １．テーマの分析

漢方薬は中国４０００年以上の歴史があるが，その特徴は生薬の「配合の妙」にある。従来の一因子実験や繰り返し試験によらず，配合理由を科学的に証明する。配合の最適問題だけでなく，生体への薬効評価に品質工学のパラメータ設計を活用して，従来の科学的に証明できなかった部分を明らかにする。

### ２．目的機能の明確化

温脾湯（おんぴとう：慢性腎不全の透析導入遅延薬）の目的機能は血液中に存在する血清クレアチニンが低くなる方が健康な状態である。

理想機能の薬効は薬剤投与後の時間変化で血清クレアチニンの減り方を評価する。

信号因子：経過時間（T）

出力データ：血清クレアチニンの量（y）

理想機能は　y=β T　　β は薬効を表し小さい方がよい。

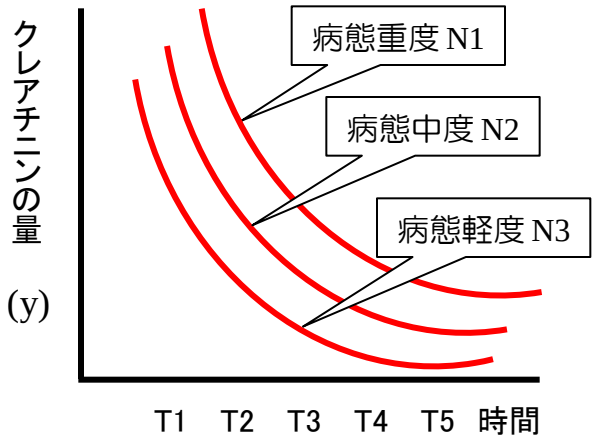
### ３．計測特性の決定

一般には血清クレアチニンの逆数（1/Cr）をとって回帰直線を求めるが、品質工学ではエネルギー関係を考慮して、ゼロ点比例式で、薬効は薬剤投与後の時間変化に対する病態の改善を計測特性とする。

時間を信号因子にとって血清クレアチニンの値が、時間Tがゼロの血清クロアチニンの量を基準点にとって基準点比例式を用いる。

### ４．理想機能と計測特性

理想機能は指数関数を変換して次のようにゼロ点比例式で表される。計測特性はノイズとしてラットの病態を3水準取って経過時間ごとのデータをとる。




$$y = y_0 \varepsilon^{-\beta T}$$

$$\frac{y_0}{y} = \varepsilon^{\beta T}$$

$$\ln \frac{y_0}{y} = \beta T$$

ここで　$\ln \frac{y_0}{y} = Y$　とおくと

$Y = \beta T$　が理想機能である。

## 5. 信号因子と誤差因子の選定

| | 投与時間(week) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 |
| N1:病態軽度 | y01 | y11 | y21 | y31 | y41 |
| N2:病態中度 | y02 | y12 | y22 | y32 | y42 |
| N3:病態重度 | y03 | y13 | y23 | y33 | y43 |

生物実験に必須である繰返しを行わない代わりに大きな誤差因子として，ラットに内臓亜摘出の手術を行い，意図的に病態モデルを上表のように作成する。予備実験で経過時間に対して血清クレアチニンの差が大きいことを確認しておく。

## 6. SN比と感度の計算

全二乗和

$$S_T = (y_{11} - y_{01})^2 + \ldots + (y_{43} - y_{03})^2$$

有効除数

$$r = 1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 = 30$$

線形式

$$L_1 = 1 \times (y_{11} - y_{01}) + \ldots + 4 \times (y_{41} - y_{01})$$
$$L_2 = 1 \times (y_{12} - y_{02}) + \ldots + 4 \times (y_{42} - y_{02})$$
$$L_3 = 1 \times (y_{13} - y_{03}) + \ldots + 4 \times (y_{43} - y_{03})$$

比例項の変動

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2 + L_3)}{3r}$$

比例項との交互作用

$$S_{N\times\beta} = \frac{L_1{}^2 + L_2{}^2 + L_3{}^2}{r} - S_\beta$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{10} = \frac{(S_T - S_\beta - S_{N\times\beta})}{10}$$

総合誤差分散

$$V_N = \frac{S_e + S_{N\times\beta}}{11}$$

SN比

$$\eta = -10 \log V_N$$

感度

$$\beta = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3r}$$

【考察】

・計測特性(血清クレアチニン)は低ければ低いいほどよい(望小特性)ものであるが、理想的には負の値をとる方が望ましい。

・感度β は薬効を表し、血清クレアチニンの変化率であり、SN比が高いのは病態に関係なく効能を発揮していること(薬効のばらつき)である。

## 7. 制御因子の設定

| 因子／水準 | 第1水準 | 第2水準 | 第3水準 |
|---|---|---|---|
| 1列　誤差 | ― | ― | ― |
| 2列　誤差 | ― | ― | ― |
| C　構成生薬1 | 少 | 中 | 多 |
| D　構成生薬2 | 少 | 中 | 多 |
| E　構成生薬3 | 少 | 中 | 多 |
| F　構成生薬4 | 少 | 中 | 多 |
| G　構成生薬5 | 少 | 中 | 多 |
| 8列　誤差 | ― | ― | ― |

制御因子はどの列に割り付けても構わないが，ここでは3列から7列に割り付けた。

## 8．因子の割付

| 実験番号 | 制御因子：　配合生薬の種<br>A　B　C　D　E　F　G　H | 誤差因子：病態N1<br>信号因子（時間T）<br>T0 T1 T2 T3 T4 | 誤差因子：病態N2<br>T0 T1 T2 T3 T4 | 誤差因子：病態N3<br>T0 T1 T2 T3 T4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1　1　1　1　1　1　1　1 | y101 | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| ・・・

## 9. データ解析

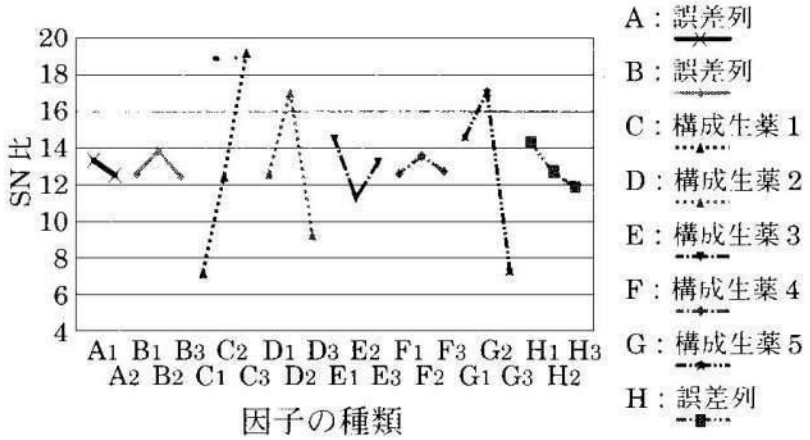



図3　SN比の要因効果図

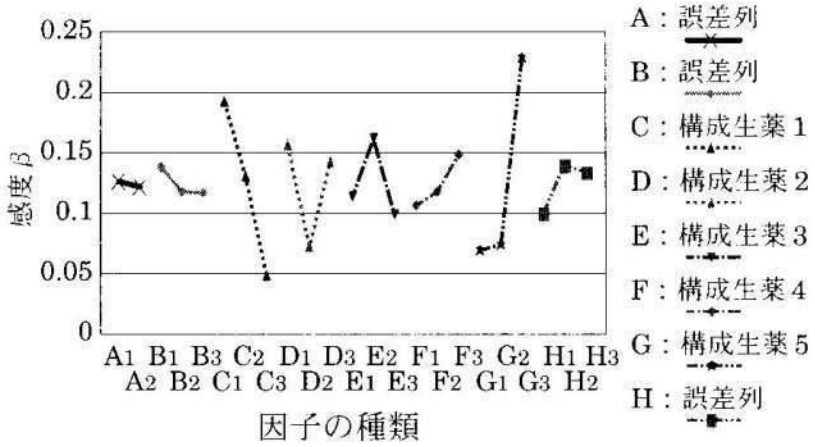



図4　感度βの要因効果図

薬効のＳＮ比と感度の評価

・最高効果条件：
C3D2E3F1G1
$\eta$＝24.740（db）
$\beta$＝-0.09(mg/dl・week)

・現行条件：中国４千年の配合
C2D2E2F2G2
$\eta$＝19.507（db）
$\beta$＝0.058(mg/dl・week)

・最低効果条件：
C1D1E2F3G3
$\eta$＝-0.767（db）
$\beta$＝0.389 (mg/dl・week)

## 10. 確認実験と結論

| | SN比η（db） | | 感度β（mg/dl・week） | |
|---|---|---|---|---|
| | 推定 | 確認 | 推定 | 確認 |
| 最高条件 | 24.70 | 15.00 | −0.099 | 0.018 |
| 最低条件 | −0.767 | −0.915 | 0.389 | 0.172 |
| 利得 | 25.467 | 15.915 | −0.488 | −0.154 |
| 現行条件 | 19.50 | 14.50 | 0.058 | 0.062 |

最低に対して最高は16db改善されており薬効ばらつきが1/40に低下した。病状に関係なく安定的に薬効が発揮されたことを意味する。

## 11. 確認実験による薬効の比較

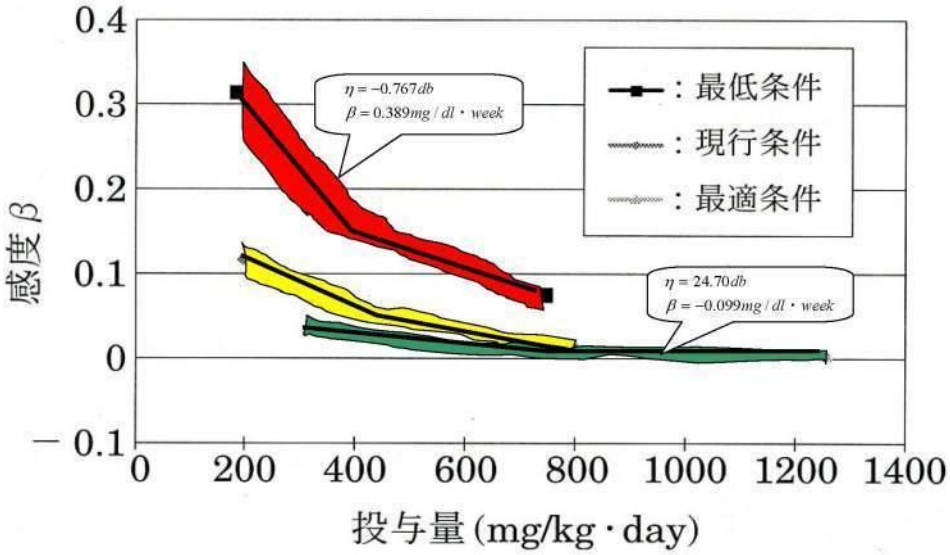



図5　確認実験における各条件の感度βの差と投与量の関係

最適条件の配合比による薬効は，中国4000年の歴史がある配合比（現行条件）より高い薬効を得ることができた。

## 12. 品質工学による成果

- 漢方薬の配合比の最適化と薬効の検討で10年以上も解決不可能の問題で、行政機関への提出データを超短期間で解決した。

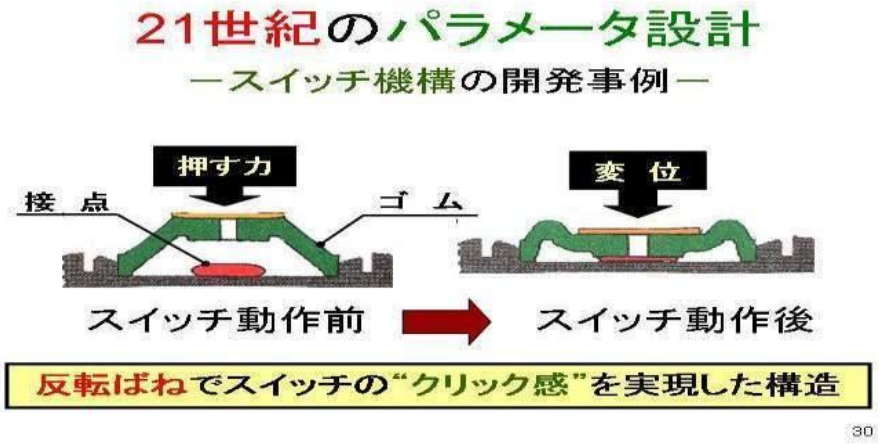
- 最終的な開発の成功は臨床試験の結果次第であるが、時間と費用のかかる医薬品開発において、時間と費用の節約（18匹の動物で済ませた）また精度の高い結果を得たことになる。

## ３．７　21世紀型パラメータ設計―標準ＳＮ比の活用―

20世紀の品質工学においては，ＳＮ比の中に，信号因子の乱れである2次誤差（$S_{mres}$）もノイズの効果の中に加えて評価してきた。3.2のパラメータ設計の例では，比例関係が理想であるから，2次誤差も誤差の仲間と考えてもよかったが，比例関係が曖昧の場合や次の例のように目標曲線がある場合には，標準ＳＮ比を用いて解析を行う。

この標準ＳＮ比は，最初にノイズの影響でＳＮ比の最適条件を求めて，その後で，最適条件を目標曲線にチューニングする方法である。

具体的にスイッチ機構の例で説明する。




スイッチ機構の開発事例（機能性の評価とチューニング）

### ①　目的機能の理想機能

目的機能はクリックモーションの反転機能であるから，下図のような目標曲線を理想と考える。テストピースでも良いがパラメータ設計では１８個のサンプルを作る必要があるので，コンピュータシミュレーションの方が簡単で開発期間が短縮できる。

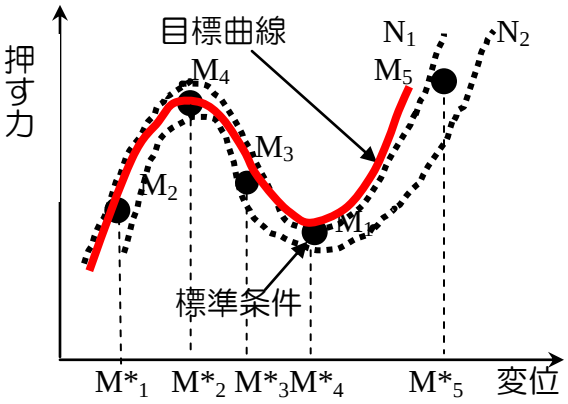



図１スイッチの押す力と変位量の関係

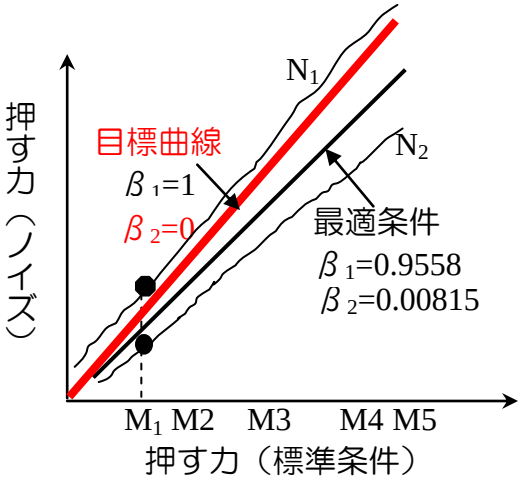



図２　標準条件とノイズとの関係

## ②　機能性の評価

最初は目標値や目標曲線は考えずに，ノイズを選んで機能性の評価を行う。シミュレーションの場合は、部品のばらつきをノイズにとって外側直交表に配置して、内側直交表に制御因子を割り付けて、信号因子（変位量）に対する押す力のレスポンスについて，ノイズを変えてノイズと制御因子の交互作用で押す力のデータを表２のように求める。

シミュレーションの場合、ノイズとして部品のばらつきを採るのは、部品が環境像件や劣化したとき、部品がばらつくためである。　ノイズは、正側の最悪条件と負側の最悪条件に調合して N1 と N2 の二つのノイズで実験(計算)を行う法が効率的である。

再現性を高めるためには、ノイズのエネルギーによって出力特性に加法性があるように使用環境条件や劣化を選ぶことが大切である。

表２　変位量と押す力の関係データ

| M*変位量 | $N_1$ (負側最悪条件) | $N_2$ (正側最悪条件) | M(標準条件) | 目標値 |
|---|---|---|---|---|
| $M^*_1$ (1.5) | $F_{11}$ (2.3) | $F_{12}$ (2.9) | $M_2$ (2.6) | $m_2$ (2.5) |
| $M^*_2$ (2.2) | $F_{21}$ (3.7) | $F_{22}$ (4.2) | $M_4$ (4.0) | $m_4$ (4.5) |
| $M^*_3$ (3.2) | $F_{31}$ (1.8) | $F_{32}$ (2.4) | $M_1$ (2.1) | $m_1$ (2.0) |
| $M^*_4$ (4.2) | $F_{41}$ (2.9) | $F_{42}$ (3.5) | $M_3$ (3.2) | $m_3$ (3.0) |
| $M^*_5$ (6.3) | $F_{51}$ (5.2) | $F_{52}$ (5.8) | $M_5$ (5.5) | $m_5$ (5.0) |
| 線形式 | $L_1$ (62.44) | $L_2$ (72.48) | | |

$M^*_1$，$M^*_2$・・・：変位量(mm)
$F_{11}$,$F_{21}$・・・：各変位におけるノイズ N1 のときの押す力(g)
$F_{12}$,$F_{22}$・・・：各変位におけるノイズ N2 のときの押す力(g)
$M_1$,$M_2$・・・：各変位における標準条件の押す力(g)
$m_1$,$m_2$・・・：各変位における押す力の目標値(g)

このような実験計算を直交表の実験番号ごとに行う。この実験の結果，標準条件の値を信号値として下記のような解析を行う。

## ③　データの解析（機能性の評価）

線形式 $L_1=M_1\times F_{11}+M_2\times F_{21}+\cdots+M_5\times F_{51}$
$=2.6\times2.3+4.0\times3.7+2.1\times1.8+3.2\times2.9+5.5\times5.2=62.44$
$L_2=M_1\times F_{12}+M_2\times F_{22}+\cdots+M_5\times F_{52}$
$=2.6\times2.9+4.0\times4.2+2.1\times2.4+3.2\times3.5+5.5\times5.8=72.48$

有効除数　$r=M_1^2+M2^2+\cdots+M5^2=2.6^2+4.0^2+2.1^2+3.2^2+5.5^2=67.66$

全出力　$S_T=F_{11}^2+F_{12}^2+\cdots+F_{52}^2=2.3^2+3.7^2+\cdots+5.8^2=135.37$　(f=10)

比例項の変動　$S_\beta=(L_1+L_2)^2/2r=(62.44+72.48)^2/2\times67.66=134.5212$　(f=1)

N×β の変動　$S_{N\times\beta}=(L_1-L_2)^2/2r=(62.44-72.48)^2/2\times67.66=0.7449$　(f=1)

誤差変動　$Se=S_T-S_\beta-S_{N\times\beta}=135.37-134.5212-0.7449=0.1039$　(f=8)

誤差分散　$Ve=Se/8=0.01299$

総合誤差分散　$V_N=(Se+S_{N\times\beta})/9=0.09413$

SN 比　$\eta=10\log[(1/2r)(S_\beta-Ve)/(1/2r)V_N]=10\log[2r/V_N]=31.550$　db

（感度　$\beta=(1/2r)(S_\beta-Ve)=0.9940$）

この段階で，目標値は考えず標準条件における機能性の評価を行い，SN 比が最大になるように制御因子の最適条件を求める．この場合の感度は意味のない値である。

## ④　目標値へのチューニング

次に，ＳＮ比の最適条件で，標準使用条件 M のデータのみで機能を目標値に合わせる方法を説明する。

そのためには，表４のデータをＳＮ比最適の標準条件 M で求める。

表４.1　ＳＮ比が最適のデータ

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| M*（変位量） | $M^*_1(1.5)$ | $M^*_2(2.2)$ | $M^*_3(3.2)$ | $M^*_4(4.2)$ | $M^*_5(6.3)$ |
| m　(目標値) | $m_2(2.5)$ | $m_4(4.5)$ | $m_1(2.0)$ | $m_3(3.0)$ | $m_5(5.0)$ |
| M（標準条件） | $M_2(2.4)$ | $M_4(4.3)$ | $M_1(1.8)$ | $M_3(2.9)$ | $M_5(4.8)$ |

ここでは，目標値 m とＳＮ比が最適な標準条 1 件 M との間で次の直交多項式を考える。

$$M = \beta_1 m + \beta_2 (m^2 - \frac{K_3}{K_2} m) + e$$

ここで，$\beta_1 \beta_2$ を求め 1 次項と 2 次項の変動を求めて目標値へ合わせ込みを行うが，

$\beta_1$（または感度 $S = 10\log\beta_1^2$）よりも，２次項の係数 $\beta_2$ の方が重要で，$\beta_2 = 0$ になるような制御因子を探すことで合わせ込みを行う。

まず，比例項（1 次項）の線形式 $L_1$ を求める。

$$L_1 = m_1 M_1 + m_2 M_2 + \ldots + m_5 M_5$$
$$= 2.0\times1.8 + 2.5\times2.4 + 3.0\times2.9 + 4.5\times4.3 + 5.0\times4.8 = 61.65$$
$$r_1 = m_1^2 + m_2^2 + \ldots + m_5^2 = 2.0^2 + 2.5^2 + \ldots + 5.0^2 = 64.5$$
$$\beta_1 = \frac{L_1}{r_1} = \frac{61.65}{64.5} = 0.9558$$
$$S_T = M_1^2 + M_2^2 + \ldots + M_5^2 = 1.8^2 + 2.4^2 + \ldots + 4.8^2 = 58.94 \quad (f=5)$$
$$S_{\beta 1} = \frac{L_1^2}{r_1} = \frac{61.65^2}{64.5} = 58.9259 \quad (f=1)$$

2 次項の線形式 $L_2$ は

$$L_2 = (m_1^2 - \alpha m_1)M_1 + \ldots + (m_5^2 - \alpha m_5)M_5$$
$$= (-4.272)\times1.8 + (-4.089)\times2.4 + (-3.408)\times2.9 + 1.640\times4.3 + 4.32\times4.8 = 0.4016$$
$$\alpha = \frac{K_3}{K_2} = \frac{53.35}{12.9} = 4.136$$
$$K_2 = \frac{1}{5}(m_1^2 + m_2^2 + \ldots + m_5^2) = \frac{64.5}{5} = 12.9$$
$$K_3 = \frac{1}{5}(m_1^3 + m_2^3 + \ldots + m_5^3) = \frac{266.75}{5} = 53.35$$

したがって，$L_2$ の 2 次項の係数は

$$m_1(m_1-\alpha)=2.0(2.0-4.136)=-4.272$$
$$m_2(m_2-\alpha)=2.5(2.5-4.136)=-4.089$$
$$m_3(m_3-\alpha)=3.0(3.0-4.136)=-3.408$$
$$m_4(m_4-\alpha)=4.5(4.5-4.136)=1.640$$
$$m_5(m_5-\alpha)=5.0(5.0-4.136)=4.32$$
$$r_2=\left(m_1{}^2-\alpha m_1\right)^2+\left(m_2{}^2-\alpha m_2\right)^2+\ldots+\left(m_5{}^2-\alpha m_5\right)^2$$
$$=(-4.272)^2+(-4.089)^2+(-3.408)^2+1.640^2+4.32^2=49.274$$
$$\beta_2=\frac{L_2}{r_2}=\frac{0.4016}{49.274}=0.00815$$
$$S_{\beta 2}=\frac{L_2{}^2}{r_2}=\frac{(0.4016)^2}{49.274}=0.003273 \quad (f=1)$$

比例項と 2 次項を除いた誤差変動 Se は

$$S_e=S_T-(S_{\beta 1}+S_{\beta 2})=59.09\text{-}(59.0216+0.00357)=0.0108 \quad (f=3)$$

これらは表 4.2 のようにまとめられる。

表 4.2　ANOVA

| Source | 自由度（f） | 変動（S） | 誤差分散（V） |
|---|---|---|---|
| $\beta_1$ | 1 | 58.9259 | |
| $\beta_2$ | 1 | 0.00327 | |
| e | 3 | 0.01083 | 0.00361 |
| 計 | 5 | 58.94 | |

したがって，比例項と 2 次項のチューニングを正しくやれば誤差分散 $\sigma^2$ は 0.0216 となる。これは誤差の標準偏差が $\sigma=\sqrt{0.00361}=0.0601(g)$　となる。

比例項のみで合わせ込みをした場合には，誤差の標準偏差 $\sigma$ は

$$\sigma=\sqrt{\frac{S_{\beta 2}+S_e}{4}}=\sqrt{\frac{0.00327+0.01083}{4}}=0.167\,(g)$$

ここで，0.167g の誤差を許すならば，目標値への合わせこみは比例項 $\beta_1$ だけで行い，$\beta_1=1$ になるように，$\beta_1=\frac{L_1}{r_1}=\frac{61.65}{64.5}=0.9558$ で割ってやればよいが，そのときの誤差は 0.167g となる。

もしこれ以上の誤差を改善したい場合には，制御因子を割り付けた直交表で $\beta_2$ の値を求めて，$\beta_2=0$ になるように，1 個の制御因子でチューニングすればよい。

しかし，表 4.2 を見ると 3 次項の誤差が大きいので，この誤差を改善する必要があれば更に合わせ込みを行うために，$S_{\beta 3}$ を求めてチューニングを行うが，ここでは省略する。

参考文献・図書

## 入　門

1. 品質工学入門　矢野　宏　日本規格協会　2200 円
   技術を変革する新しい考え方について経営者，管理者，技術者の格好の入門書.
2. 品質工学計算法入門　矢野　宏　日本規格協会　2800 円
   データの扱い方について懇切丁寧に解説されている
3. おはなし品質工学　矢野　宏　日本規格協会　1600 円
   品質工学講座全７巻の要約になっており，品質工学を学び始める技術者の入門書.
4. 技術再構築　上野憲造　日本規格協会　1600 円
   自動車開発現場での品質工学による技術開発の実践をふまえ，企業の技術再構築への提言
5. タグチメソッド
   -その発展の流れをたどる-　田口玄一　産能大学出版部　2000 円

## 基　礎

1. 疑問に答える実験計画法問答集　富士ｾﾞﾛｯｸｽ QC 研究会　日本規格協会　2800 円
   実際の適用に当たっての実験計画法と品質工学の疑問を問答形式でやさしく解説.
2. 計測管理の実際　矢野　宏　工業調査会　4000 円
3. 計測のおはなし　矢野　宏　日本規格協会　1300 円
   品質工学を進める上で重要な計測の役割や考え方が具体事例を含めて解説されている.
4. 品質工学講座（全７巻）　田口玄一　日本規格協会
   品質工学の集大成．基本的概念から応用まで幅広く詳細に解説しており，品質工学を体系的に理解できる．多様な技術分野の実施事例を豊富に盛り込んでいる.
   ① 開発設計段階の品質工学　吉澤正孝編　3800 円
   ② 製造段階の品質工学　山本昌吾編　2900 円
   ③ 品質評価のためのＳＮ比　小西省三編　3400 円
   ④ 品質設計のための実験計画法　横山巽子編　3800 円
   ⑤ 品質工学事例集 日本編一般　田口玄一編　3200 円
   ⑥ 品質工学事例集 欧米編　田口　伸編　5600 円
   ⑦ 品質工学事例集 計測編　矢野　宏編　4800 円
5. 校正方式マニュアル　田口玄一編　日本規格協会　3200 円
   計測器の校正システムへのオンライン品質工学の考え方の適用.
6. 規格値の決め方　田口玄一　日本規格協会　3600 円

## 応　用

1. 技術開発のための品質工学　田口玄一　日本規格協会　4800 円
   技術開発を実現する品質工学の神髄に迫っている.
2. ロバスト設計のための機能性評価　田口玄一　日本規格協会　3300 円
3. 品質工学の数理　田口玄一　日本規格協会　2900 円
4. 転写性の技術開発　田口玄一　日本規格協会　3500 円
   転写性という概念を多岐の技術分野に適用した事例を収録.
5. 加工品質工学　矢野　宏　工業調査会　4800 円
6. 半導体製造の技術開発　坂野　進編　日本規格協会　3900 円
7. 電子・電気の技術開発　原　和彦編　日本規格協会　4700 円
8. 機械・材料・加工の技術開発　矢野　宏編　日本規格協会　4200 円
9. 化学･薬学･生物学の技術開発　久米昭正編　日本規格協会　4800 円
10. MT システムにおける技術開発　兼高達貳編　日本規格協会　4500 円
11. やさしい成形品質工学　矢野　宏　工業調査会　2800 円
12. 新製品開発における パラメータ設計　計量管理協会　日本規格協会　3200 円
13. 第３版 実験計画法 上　田口玄一　丸善　4000 円
14. 第３版 実験計画法 下　田口玄一　丸善　5000 円
15. 計測管理必携　計量管理協会　コロナ社　4800 円
16. パソコンによる 生産データの効果的利用法　矢野　宏他　工業調査会　5500 円
17. JIS 校正方式マニュアル　田口玄一　日本規格協会　3200 円
18. JIS プラスチックの寸法許容差 の決め方（K7109）　日本規格協会　1300 円
19. JIS 製品の品質特性 ー規格値の決め方通則（Z8403）ー　日本規格協会　2900 円

品質工学 （機関誌は一回/2 月，品質工学フォーラムの会員に配布，会費 8000 円/年間）
品質工学フォーラムは，1993 年 3 月に発足し，会員数は約 2000 名（2002 年 5 月現在）