

StatWorks/V5[®] (品質工学編) の新機能“エネルギー比型 SN 比”を用いた設計品質の評価

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所
鶴田 明三

1. はじめに

機能の安定性を評価するための新しい尺度である“エネルギー比型 SN 比”¹⁾²⁾を用いて、品質工学の解析がシームレスに行える市販の解析ソフトウェアとして StatWorks/V5[®] (品質工学編) (以下、単に StatWorks と記す)がある。エネルギー比型 SN 比は、品質工学における新しい評価尺度であり、SN 比の比較対象間でデータの数や信号値の大きさが異なる場合でも、公平な比較が可能である。実務者にとって従来の SN 比の制約を気にしながら、ケースバイケースで使いこなすのは煩雑であり、また間違いの原因ともなる。本稿では、従来 SN 比の課題を具体例でひも解きながら、エネルギー比型 SN 比の数理や利点を解説し、StatWorks を用いたエネルギー比型 SN 比の計算例とともにその活用成果を示す。

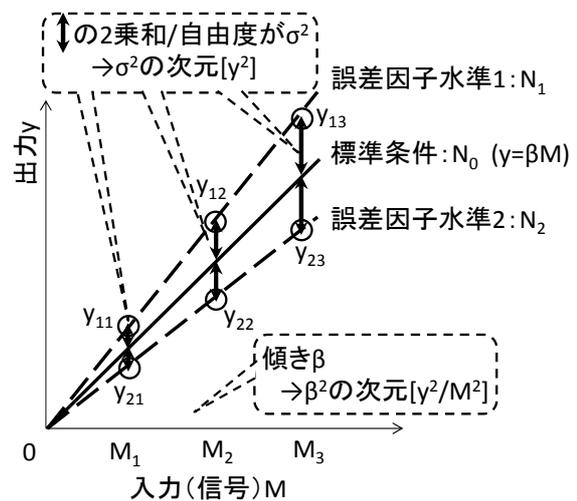
2. 技術評価における SN 比

2.1. 従来の SN 比

まず品質工学³⁾ (タグチメソッドとも。本稿では StatWorks の表記に合わせる)になじみのない読者に向けて、技術評価における SN 比を概説する。品質工学がめざす「社会的損失の最小化」や「技術開発の効率化」を実現するためには、設計・開発の初期段階で、対象の機能 (技術的な働き) の安定性を効率よく評価することを中心におく (機能性評価)。製品が出荷されたあとの使用段階において、さまざまなお客様の使用条件、環境条件に対して安定な製品を作り、送り出すことで、故障や公害にかかわるコストや損失を最小化する。あわせて、そのような安定な製品は、社内の製造や試験での手戻りも起こりにくく、開発や生産の効率化にも寄

与する。

品質工学における SN 比は、前記の機能の安定性の尺度 (ものさし) である。お客様の使用条件・使用環境の組み合わせを模擬した条件 (誤差因子) を印加した場合に、対象の機能の出力がどれくらいばらつくのか、変動するのかなの尺度である (図表 2.1.1)。



| | M ₁ | M ₂ | M ₃ |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| N ₁ (誤差因子水準1) | Y ₁₁ | Y ₁₂ | Y ₁₃ |
| N ₂ (誤差因子水準2) | Y ₂₁ | Y ₂₂ | Y ₂₃ |
| N ₀ (標準条件) | βM ₁ | βM ₂ | βM ₃ |

図表 2.1.1 動特性 (ゼロ点比例式) のデータモデル

求めるべき誤差 (誤差因子の影響と偶然誤差) は、出力の大きさに比例すると考えて、標準条件 $y = \beta M$ からのばらつき σ (偏差 2 乗和) を機能の入出力の傾き β で割った、式 2.1.1 で計算される (※ 計算は 2 乗で行われる)。品質工学の SN 比は「傾き β を 1 に校正したときの誤差分散」という当初の計測法の評価思想⁴⁾が表われた定義である。

$$\eta = \frac{1}{\left(\frac{\sigma^2}{\beta^2}\right)} \quad \text{-----(2.1.1)}$$

式 2.1.1 の分母は β で基準化(校正)されたばらつきを表したもので、機能の安定性の悪さを示している。SN 比は良さを表す尺度のため、全体の逆数をとっている。これが品質工学における、動特性(入力と出力がある場合)の SN 比の定義である⁵⁾。なお、以下の SN 比もすべて真数で示すが、StatWorks では、 $10\log \eta_{\text{真数}}(\text{db})$ で計算、表示される。

2.2. 従来の SN 比の課題(1)

～信号の大きさによる影響～

図表 2.1.1 から分かるように、ばらつき σ の大きさは傾き β だけではなく、出力の大きさそのものにも影響を受けるため、入力信号 M の大きさは、比較対象間でそろえておかなければならない。SN 比 $1/(\sigma^2/\beta^2) = \beta^2/\sigma^2$ の次元を考えると、 $[y^2/M^2]/[y^2] = [1/M^2]$ であるので、従来の SN 比は入力信号 M の-2乗の次元をもっている。

したがって、入力信号が 2 倍になると、SN 比は 1/4 小さく表示されることになる。機能の安定性の尺度となるばらつき σ の変化率が同等でも、SN 比の表示値が、入力信号 M の大きさ(範囲)によって変わってしまうことは、従来 SN 比使用上で留意しておく必要がある。

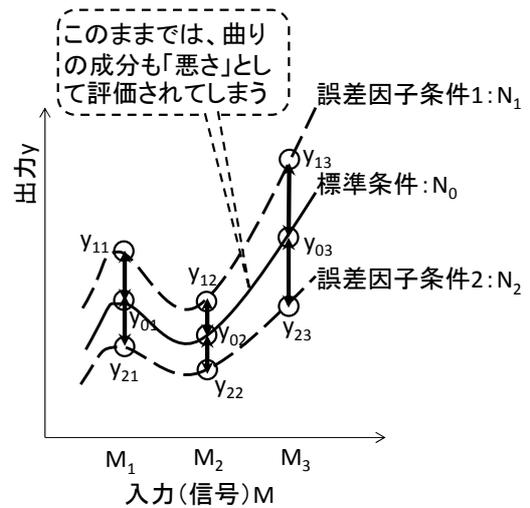
次節以降に示す課題も含めて、従来の SN 比で使用上の留意点があることはあまり知られていなかった。比較対象間で入力信号の大きさが異なるなどの場合(そうならざるを得ない場合)に実務上での対処方法は明示されておらず、「技術者が自己責任で考えて対処すべきもの」として、各事例での個別判断にゆだねられていたと考える。

2.3. 従来の SN 比の課題(2)

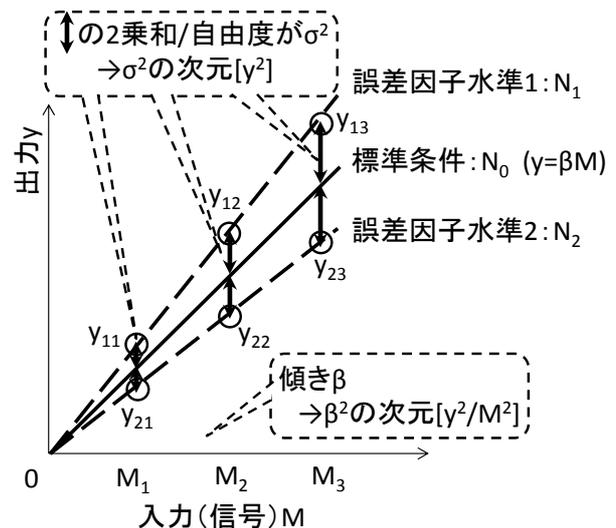
～データ数による影響～

機能の入出力の理想的な関係が、ゼロ点比例式でない場合がある。このような場合に、前記のゼロ点比例式の SN 比を用いると、入出力の非線形の成分(信号の影響による曲りの成分:たとえば 2

次の成分)が有害な成分として評価されてしまう。これに対処したのが、田口玄一氏によって考案された標準 SN 比である⁶⁾(StatWorks では「非線形の標準 SN 比」。別途、デジタルの標準 SN 比もあるため、単に標準 SN 比という場合、この非線形の標準 SN 比を指すことにする)。これにより、出力の非線形の成分と、誤差因子の影響によるばらつきの成分を分離して、後者のみを評価できるようにした。すなわち図表 2.3.1 のようなデータを図表 2.3.2 によるゼロ点比例式モデルに置き換えて評価する。



図表 2.3.1 動特性(非線形)のデータモデル



| | M ₁ | M ₂ | M ₃ |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| N ₁ (誤差因子条件1) | Y ₁₁ | Y ₁₂ | Y ₁₃ |
| N ₂ (誤差因子条件2) | Y ₂₁ | Y ₂₂ | Y ₂₃ |
| N ₀ (標準条件) | M ₁ '=Y ₀₁ | M ₂ '=Y ₀₂ | M ₃ '=Y ₀₃ |

図表 2.3.2 標準条件の出力を新しい信号とした場合のデータモデル

標準 SN 比は式 2.3.1 で表される(21 世紀型 SN 比ともいわれることから、添字を 21C とする。またゼロ点比例式の SN 比であることを明示する場合は、添字を 20C とする)。ここに、「'」がついた成分は非線形成成分分離後であることを示す。また n は誤差因子の水準数、 k は信号因子の水準数、 $\overline{M'^2}$ は非線形成成分分離後の信号 M' の各水準値の 2 乗の平均値(平均的な信号の大きさ)である。 $k \cdot \overline{M'^2}$ は、有効除数 r' ともいう。

$$\eta_{21C} = \frac{1}{\left(\frac{\sigma'^2}{\beta'^2}\right)} = \frac{\beta'^2}{\sigma'^2} = \frac{(S_{\beta}' - V_e') / \overline{nkM'^2}}{V_N' / \overline{nkM'^2}} \quad \text{-----}(2.3.1)$$

式 2.3.1 第 4 式の分子、分母は、それぞれ単位データ数(nk)、単位入力量($\overline{M'^2}$)あたりの出力の変動($S_{\beta}' - V_e'$)と誤差分散(V_N')を示している。 $-V_e'$ の部分については 2.5 節で述べる。

さらに、標準 SN 比では式 2.3.1 第 4 式の分母の誤差分散 V_N' を変動/自由度の形で書くと、以下のようになる。

$$\eta_{21C} = \frac{(S_{\beta}' - V_e') / \overline{nkM'^2}}{S_N' / (nk - 1) / \overline{nkM'^2}} = \frac{S_{\beta}' - V_e'}{S_N'} \cdot (nk - 1) \quad \text{-----}(2.3.2)$$

式 2.3.2 第 3 式の第 1 項は、平均的な出力の大きさと出力のばらつき(分散)の大きさの比になっており、次元は、 $[y^2]/[y^2]=1$ 、すなわち無次元である。第 2 項は、 nk が全データ数なので次元をもたないが、標準 SN 比が(データ数-1: 誤差分散の自由度)に比例することが分かる。したがって、データ数 nk が 2 倍になると、SN 比は約 2 倍大きく表示されることになる。機能の安定性の尺度となるばらつき σ の変化率が同等でも、SN 比の表示値が、全データ数 nk によって変わってしまうことは、従来の標準 SN 比の使用上で留意しておく必要がある。

2.4. 従来の SN 比の課題(3)

～個別的な計算方法～

品質工学ではさまざまな型の SN 比が広く用いられてきた。以下、主な SN 比の分類を示す。

(1) 静特性の SN 比

…主に品質特性の評価に用いる

(1-1) 望小特性の SN 比

出力の大きさ y の平均を誤差成分と考える。

$$\eta_{望小} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n y_i^2 / n} \quad \text{-----}(2.4.1)$$

(1-2) 望大特性の SN 比

出力の逆数 $1/y$ の望小特性と考える。

$$\eta_{望大} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/y_i^2 / n} \quad \text{-----}(2.4.2)$$

(1-3) 望目特性の SN 比

誤差分散 σ^2 を、「1 データあたり($1/n$)の平均の変動($S_m - V_e$)」で除したものを誤差成分と考える。

$$\eta_{望目} = \left(\frac{\sigma^2}{m^2}\right) = \frac{(S_m - V_e) / n}{V_e} \quad \text{-----}(2.4.3)$$

(1-4) ゼロ望目の SN 比

平均値からの偏差 2 乗和を誤差成分と考える。このとき平均値 m は 0 に調整(校正)可能で、誤差成分の大きさの校正にも用いないので、SN 比には出てこない。

$$\eta_{ゼロ望目} = \frac{1}{\sigma^2} = \frac{1}{V_e} \quad \text{-----}(2.4.4)$$

(2) 動特性の SN 比

…主に機能の安定性の評価に用いる

(2-1) ゼロ点比例式の SN 比

2.2 節で述べたとおり、入力 M の-2 乗の次元 $[1/M^2]$ をもつ量である。

$$\eta_{20C} = \frac{1}{\left(\frac{\sigma^2}{\beta^2}\right)} = \frac{\beta^2}{\sigma^2} = \frac{(S_{\beta} - V_e) / \overline{nkM^2}}{V_N} \quad \text{-----}(2.4.5)$$

(2-2)標準 SN 比

2.3 節で述べたとおり、誤差変動の自由度($nk-1$)に比例する量である。

$$\eta_{21c} = \frac{(S_{\beta}' - V_e') / \overline{nkM^2}}{S_N' / (nk-1) / \overline{nkM^2}} = \frac{S_{\beta}' - V_e'}{S_N'} \cdot (nk-1) \quad \text{-----}(2.4.6)$$

これらの SN 比は、問題の性質や目的、対象、データ形式などによって、異なる SN 比がケースバイケースで用いられる。これについても、各事例での個別判断にゆだねられていたと考える。

2.5. 従来の SN 比の課題(4)

～計算の複雑さ(使用面、教育面での困難性)～

たとえば動特性の SN 比の場合、偶然誤差の変動 V_e を計算する必要があり、そのため、交互作用項を含めた複雑な分解計算が必要である。また自由度の理解も必須となる。図表 2.5.1 のような、標示因子 P 、誤差因子 N 、信号因子 M 、繰り返しがある場合のデータの場合、以下の要因の変動をすべて計算して V_e を求める必要がある(カッコ内は自由度)。交互作用は残差にプールできるものも多いが、そのためには分散分析が必要で、いずれにしても多数の変動への分解は必要である。

図表 2.5.1 標示因子・信号因子・誤差因子・繰り返しを含むデータモデル

| 入力信号→ | | M ₁ | M ₂ | M ₃ |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P ₁ (標示因子条件1) | N ₁ (誤差因子条件1) | Y ₁₁₁₁ | Y ₁₁₂₁ | Y ₁₁₃₁ |
| | | Y ₁₁₁₂ | Y ₁₁₂₂ | Y ₁₁₃₂ |
| | N ₂ (誤差因子条件2) | Y ₁₂₁₁ | Y ₁₂₂₁ | Y ₁₂₃₁ |
| | | Y ₁₂₁₂ | Y ₁₂₂₂ | Y ₁₂₃₂ |
| P ₂ (標示因子条件2) | N ₁ (誤差因子条件1) | Y ₂₁₁₁ | Y ₂₁₂₁ | Y ₂₁₃₁ |
| | | Y ₂₁₁₂ | Y ₂₁₂₂ | Y ₂₁₃₂ |
| | N ₂ (誤差因子条件2) | Y ₂₂₁₁ | Y ₂₂₂₁ | Y ₂₂₃₁ |
| | | Y ₂₂₁₂ | Y ₂₂₂₂ | Y ₂₂₃₂ |

全変動: $T(24)$

主効果: $\beta(1), P(1), N(1), M(2)$

2 因子交互作用: $\beta \times P(1), \beta \times N(1), \beta \times M(2), P \times N(1), P \times M(2), N \times M(2)$

3 因子交互作用: $\beta \times P \times N(1), \beta \times P \times M(2),$

$\beta \times N \times M(2), P \times N \times M(2)$

残差: $e(3)$

以下、エネルギー比型 SN 比について従来の SN 比との比較で議論していくが、SN 比の違いにかかわらず、SN 比計算で使用するデータ(機能の定義:何を計測するか、誤差因子の定義:どのような有害要因に対する評価なのか)の質が重要である。しかし本稿ではそれは前提条件として成り立っているものとする。つまり技術的には正しい機能、誤差因子を用いているのに、計算方法によって、結果に違いが表れる場合を議論する。

3. エネルギー比型 SN 比

2008 年に筆者を含む研究グループが提言したエネルギー比型 SN 比は、技術評価における SN 比である。機能の出力における「有効エネルギー S_{β} (目的に使用された成分)」と「有害エネルギー S_N (目的外に使用された有害な成分)、必要に応じて「無効エネルギー S_0 (有効でも有害でもない無効成分、標示因子の変動)」に分解して、 S_{β} と S_N の比をエネルギー比型 SN 比と定義した。

$$S_T (\text{全エネルギー}) = S_{\beta} (\text{有効エネルギー}) + S_N (\text{有害エネルギー}) + S_0 (\text{無効エネルギー}) \quad \text{-----}(3.0.1)$$

なおここでの「エネルギー」は広義にとらえており、出力の 2 乗の量(2 乗和)を指している。したがって、機能の出力をエネルギーの平方根(1/2 乗)の単位にとると、2 乗和がエネルギーに相当することになり、2 乗和の分解が数学的に成立するだけでなく、「物理的にも」成立しやすくなる。

そこで、エネルギー比型 SN 比を η_E で表すと、式 3.0.2 のように非常に簡明な形になる。

$$\eta = \frac{(S_{\beta} / nkM^2)}{(S_N / nkM^2)} = \frac{S_{\beta}}{S_N} \quad \text{-----}(3.0.2)$$

従来の SN 比と形が似ているが、これは「基準化した誤差成分の逆数」という観点ではなく、「目的に使用された有効成分と、目的外に使用された有害成分の比」という技術的な観点を明確にした SN 比である。 η_E では自由度の計算も、 V_e の計算も不要である。分母の S_N は主に誤差因子による影響の成分 $S_{N \times \beta}$ であるが、さらに偶然誤差 S_e を含めてもよい(そのほうが、総合評価になるし、後述のように計算がより簡単)。

エネルギー比型 SN 比は、技術者が考える能動的な誤差因子(統計的な偶然誤差でないことに注意)を導入して、その水準の端と端の差をそのまま変動と認めて記述するという考え方をとる。

簡単のため $n=2$ 水準の場合、エネルギー比型 SN 比の分子(有効エネルギー成分)は、

$$S_{\beta}/2kM^2 = \left(\frac{\beta_{N1} + \beta_{N2}}{2}\right)^2 = \beta_{N0}^2 \quad \text{-----}(3.0.3)$$

である。これは平均の傾き β_{N0} の 2 乗である。

一方、分母(有害エネルギー成分)は主に、能動的な誤差因子の影響の成分 $S_{N \times \beta}$ であり、

$$S_N/nkM^2 \approx S_{N \times \beta}/nkM^2 = \left(\frac{\beta_{N1} - \beta_{N2}}{2}\right)^2 = (\Delta\beta)^2 \quad \text{-----}(3.0.4)$$

である。これは、平均の傾き β_{N0} からの変化量 $\Delta\beta$ の 2 乗である。

つまり、エネルギー比型 SN 比とは、出力の大きさ(平均的な傾き成分の大きさ)を有効エネルギー成分、傾きの変化の大きさを有害エネルギー成分として、それらの比をとったものである。無限母集団とは結び付けず、自由度や統計的推定($-V_e$ の処理)は不要としている。これは誤差因子の水準値は与えるものであり、偶然はないからである。

4. エネルギー比型 SN 比の検証

4.1. 従来の SN 比の課題(1)

～信号の大きさによる影響～

エネルギー比型 SN 比は、式の形から分かるように分母と分子の単位は同じ [y^2] のため、全体として

無次元であり、信号の大きさによる影響を受けない。このことを実際の評価データで確認した。

StatWorks では品質工学のパラメータ設計のための解析ツールが実装されている。これはその目的以外にも、機能性評価(2 つ以上の評価対象の SN 比の比較)に用いることもできる。具体的には、2 つの評価対象の比較を行う場合は、それを第 1 列(A 列)に割り付けて解析する。すなわち、実験 No.1~9 に対象①、実験 No.10~18 に対象②の評価データを入力すれば、対象①、②の SN 比が計算され、要因効果図の第 1 列の因子のところに表示される。評価対象が 3 つの場合は第 2 列(B 列)に割りつけばよい。

異なる 2 種類の LED 光源の機能の安定性を比較したデータ⁷⁾を図表 4.1.1 に示す。定格が異なるため入力信号である電流の範囲が異なる(A 社製は 20mA、B 社製は 150mA 定格)。LED 光源を実製品に組み込むときは、光源を複数組み合わせ、所望の明るさを得るため、異なる定格の光源が比較対象として選ばれうるのである。

図表 4.1.1 LED 光源の電流-輝度値評価データ

| A社製LED輝度値 (cd/m ²) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 誤差因子 ↓ | 電流 [mA] → | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 初期 | サンプル1 | 169 | 316 | 438 | 578 |
| | サンプル2 | 159 | 297 | 424 | 541 |
| 劣化後 | サンプル1 | 116 | 217 | 313 | 399 |
| | サンプル2 | 126 | 199 | 285 | 363 |

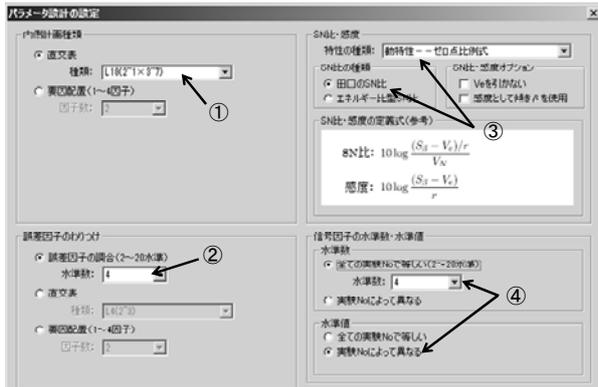
| B社製LED輝度値 (cd/m ²) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------|------|------|------|
| 誤差因子 ↓ | 電流 [mA] → | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 初期 | サンプル1 | 1753 | 2556 | 3307 | 4026 |
| | サンプル2 | 1817 | 2664 | 3443 | 4185 |
| 劣化後 | サンプル1 | 1653 | 2433 | 3163 | 3824 |
| | サンプル2 | 1741 | 2568 | 3339 | 4046 |

これらの A 社、B 社の LED の機能の安定性を SN 比で比較するにはまず、StatWorks の「手法選択」で「品質工学→パラメータ設計」を選択する。図表 4.1.2 の画面にて、①「L18 直交表」、②「誤差因子水準数 4」、③「SN 比の種類」として「田口の SN 比」または「エネルギー比型 SN 比」、④「動特性-ゼロ点比例式信号因子水準数 4」、「水準値」は

「実験 No.によって異なる」を選択する。

つぎに、**図表 4.1.3** の信号因子の水準値を設定する画面にて、実験 No.1~9 に A 社の信号因子の水準値(5,10,15,20)、実験 No.10~18 に B 社の信号因子の水準値(60,90,120,150)を設定する。

つぎに進むと「実験データ」タブにて、**図表 4.1.4** の L18 直交表の実験データ入力シートが表示されるので、No.1~No.9 に A 社製の輝度値データ、No.10~18 に B 社製の輝度値データを入力する。



図表 4.1.2 「パラメータ設計の設定」画面

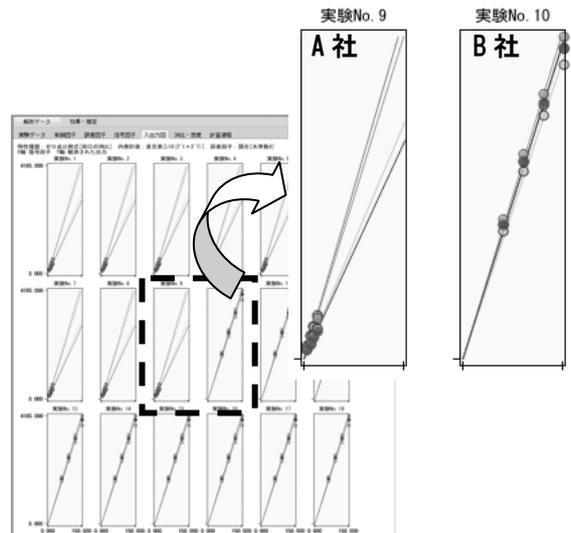
| 実験No | M1 | M2 | M3 | M4 |
|------|----|----|-----|-----|
| 1 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 4 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 5 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 6 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 7 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 8 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 9 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 10 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 11 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 12 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 13 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 14 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 15 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 16 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 17 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| 18 | 60 | 90 | 120 | 150 |

図表 4.1.3 「信号因子の水準値」画面

| 実験No | E | F | G | H | M1 | N1 | N2 | N3 | N4 | M2 | N2 |
|------|----|----|----|----|------|------|------|------|------|----|----|
| 1 | E1 | F1 | G1 | H1 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 2 | E2 | F2 | G2 | H2 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 3 | E3 | F3 | G3 | H3 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 4 | E2 | F2 | G3 | H3 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 5 | E3 | F3 | G1 | H1 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 6 | E1 | F1 | G2 | H2 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 7 | E1 | F3 | G2 | H3 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 8 | E2 | F1 | G3 | H1 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 9 | E3 | F2 | G1 | H2 | 169 | 159 | 116 | 126 | 316 | | |
| 10 | E3 | F2 | G2 | H1 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 11 | E1 | F3 | G3 | H2 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 12 | E2 | F1 | G1 | H3 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 13 | E3 | F1 | G3 | H2 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 14 | E1 | F2 | G1 | H3 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 15 | E2 | F3 | G2 | H1 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 16 | E2 | F3 | G1 | H2 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 17 | E3 | F1 | G2 | H3 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |
| 18 | E1 | F2 | G3 | H1 | 1753 | 1817 | 1853 | 1741 | 2556 | | |

図表 4.1.4 「実験データ」画面

「入出力図」タブを選択すると、**図表 4.1.5** のような入力データが確認できる。A 社(代表で実験 No.9)と B 社(同 No.10)で信号範囲が大きく異なる様子や、傾きの変動は、A 社の方がかなり大きく、機能の安定性が悪いことが見てとれる。これが従来の SN 比(田口の SN 比)とエネルギー比型 SN 比でどのように計算されるかを評価した。



図表 4.1.5 「入出力図」画面

SN 比の計算結果は「SN 比・感度」タブ、2 乗和の分解などは「計算過程」タブで確認できる(図示略)。以上のデータで A 社、B 社の LED の機能の安定性を、従来の SN 比とエネルギー比型 SN 比で比較した場合の結果を**図表 4.1.6** にまとめた。

図表 4.1.6 ゼロ点比例式の SN 比における従来 SN 比とエネルギー比型 SN 比の比較

| ゼロ点比例式の SN 比の比較 | A社のSN比 (db) | 大小関係 | B社のSN比 (db) | SN比の差(db) (A社-B社) |
|-----------------|-------------|------|-------------|-------------------|
| 従来のSN比 (田口のSN比) | -8.795 | > | -13.447 | 4.652 |
| エネルギー比型 SN 比 | 14.217 | < | 27.679 | -13.462 |

エネルギー比型 SN 比では**図表 4.1.5** の傾きの変動から判断できる機能の安定性(A 社が悪く、B 社が良い)と一致している。いっぽう、従来の SN 比ではその関係が逆転している。いうまでもなく、これは従来の SN 比が入力信号データ(ここでは電流)の大きさの影響を受けているためである。A 社、B 社のそれぞれのケースで信号の 2 乗平均を比較すると、

$$\overline{M_A^2} = (5^2 + 10^2 + 15^2 + 20^2) / 4 = 187.5$$

$$\overline{M_B^2} = (60^2 + 90^2 + 120^2 + 150^2) / 4 = 12150$$

となり、両者には 64.8 倍の違いがある。つまり db 単位では、 $10\log(64.8) = 18.1(\text{db})$ だけ、信号が小さい方 (A 社) の SN 比が大きくなるということである。

従来は、このように信号水準がそろわないケースでは上記のような点に留意して SN 比を比較する必要があったが、エネルギー比型 SN 比ではその手間は無用である。信号水準範囲が異なる場合でも、対象間をより公平に比較することができる。

4.1 節補足

信号因子の水準値が比較対象間で異なりうるのは特殊なケースではない。以下のような例がある。

- 電力と加工量の関係のように、入出力とも計測値で、値が成り行き決まるような場合⁸⁾、信号の範囲が比較対象間で異なる場合がある。
- 入力信号に時間をとって、処理(動作)完了までデータを取得する場合⁹⁾に、比較対象間で時間(信号)範囲が異なる。
- MT(マハラノビス・タグチ)システムにおいて、推定精度を SN 比で評価する際に、データセット間で信号の範囲・大きさが異なる場合¹⁰⁾がある。

4.2. 従来の SN 比の課題(2)

～データ数による影響～

3.3 節で述べたように、従来の標準 SN 比は $nk-1$ (データ数-1: 誤差分散の自由度) に比例する。つまり、データ数の違いによって、SN 比が公平に比較できないケースがありうる。いっぽう、エネルギー比型 SN 比は、式の形から分かるように分子の S_β と分母の S_N はいずれも単純な平方和の形をしており、サンプル数分の 2 乗の和を表している。したがって、これらの比である SN 比はデータ数の違いによる影響を受けにくい。

従来の標準 SN 比と、エネルギー比型 SN 比を比較するために、前節と同様の手順で StatWorks による検証をおこなった。エネルギー比型 SN 比を

標準 SN 比として使用する場合は、新しい信号として標準条件 N_0 の出力をとる点が従来と同様で、式の形は S_β/S_N で共通である。データの種類によってエネルギー比型 SN 比の形や考え方が変わらない利点については 4.3 節で改めて述べる。

異なる 2 種類の引張試験装置にて接合部の機能の安定性(変位-荷重特性の安定性)を比較する場合¹¹⁾を考える。この評価では、入力信号(変位)の範囲や誤差因子の水準(8 水準: 4 サンプルの新品条件と劣化条件)は共通であるが、引張試験装置によって、入力信号である変位の水準間隔が異なっており、信号因子水準数が異なる。その結果両者で、全データ数が異なる。ただし、本節の SN 比の比較検証では同一サンプル・同一試験装置において、信号因子水準数 $k=20$ の試験結果と、そこからデータを均等に間引いて $k=5$ としたものを比較した。これは、引張試験は破壊試験のため、同一サンプルを 2 つの異なる引張試験機でデータ取得することはできないためである。データを図表 4.2.1 に示す ($k=20$ の場合は全データを使用し、 $k=5$ の場合はハッチングのデータを使用、単位省略)。

図表 4.2.1 引張試験データの例

| 変位 | 荷重1 | 荷重2 | 荷重3 | 荷重4 | 荷重5 | 荷重6 | 荷重7 | 荷重8 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.559 | 0.969 | 0.597 | 0.816 | 0.729 | 1.080 | 0.718 | 0.508 |
| 2 | 0.670 | 1.162 | 0.717 | 0.979 | 0.874 | 1.296 | 0.861 | 0.610 |
| 3 | 0.782 | 1.356 | 0.836 | 1.142 | 1.020 | 1.512 | 1.005 | 0.712 |
| 4 | 0.894 | 1.550 | 0.956 | 1.306 | 1.166 | 1.728 | 1.148 | 0.813 |
| 5 | 1.117 | 1.937 | 1.195 | 1.632 | 1.457 | 2.160 | 1.435 | 1.017 |
| 6 | 1.006 | 1.743 | 1.075 | 1.469 | 1.311 | 1.944 | 1.292 | 0.915 |
| 7 | 1.232 | 2.263 | 1.358 | 1.936 | 1.656 | 2.547 | 1.579 | 1.118 |
| 8 | 1.347 | 2.588 | 1.522 | 2.240 | 1.856 | 2.934 | 1.722 | 1.220 |
| 9 | 1.463 | 2.914 | 1.685 | 2.544 | 2.055 | 3.321 | 1.866 | 1.322 |
| 10 | 1.578 | 3.240 | 1.848 | 2.848 | 2.254 | 3.708 | 2.009 | 1.424 |
| 11 | 1.693 | 3.565 | 2.012 | 3.151 | 2.454 | 4.095 | 2.153 | 1.525 |
| 12 | 1.808 | 3.891 | 2.175 | 3.455 | 2.653 | 4.483 | 2.296 | 1.627 |
| 13 | 1.923 | 4.217 | 2.339 | 3.759 | 2.852 | 4.870 | 2.440 | 1.729 |
| 14 | 2.038 | 4.543 | 2.502 | 4.063 | 3.052 | 5.257 | 2.583 | 1.830 |
| 15 | 2.153 | 4.868 | 2.666 | 4.367 | 3.251 | 5.644 | 2.727 | 1.932 |
| 16 | 2.268 | 5.194 | 2.829 | 4.671 | 3.451 | 6.031 | 2.870 | 2.034 |
| 17 | 2.434 | 5.541 | 3.067 | 4.976 | 3.740 | 6.383 | 3.184 | 2.451 |
| 18 | 2.601 | 5.889 | 3.306 | 5.281 | 4.029 | 6.736 | 3.498 | 2.868 |
| 19 | 2.767 | 6.236 | 3.544 | 5.586 | 4.318 | 7.088 | 3.812 | 3.285 |
| 20 | 2.934 | 6.583 | 3.782 | 5.891 | 4.607 | 7.440 | 4.126 | 3.702 |

つぎに、「パラメータ設計の設定」画面で前節と異なるのは、図表 4.2.2 に示す部分である。①誤差因子の水準は 8 水準である。②「SN 比の種類」では、「田口の SN 比」あるいは「エネルギー比型

SN 比」を選択したのち、「動特性-非線形の標準 SN 比」を選択する。③標準条件は「平均値を標準条件の出力とする」を選択した。

以下の操作は 4.1 節と同様である。同一サンプルで $k=20$ の場合と $k=5$ の場合で、従来の SN 比とエネルギー比型 SN 比を比較した結果を図表 4.2.3 に示す。

図表 4.2.3 標準 SN 比おける
従来の SN 比とエネルギー比型 SN 比の比較

| 標準SN比の比較 | k=20の場合 (db) | 大小関係 | k=5の場合 (db) | SN比の差(db) (k=20)-(k=5) |
|-----------------|--------------|------|-------------|------------------------|
| 従来のSN比 (田口のSN比) | 31.595 | > | 25.598 | 5.997 |
| エネルギー比型 SN比 | 9.581 | ≒ | 9.687 | -0.106 |

$k=20$ の場合と $k=5$ の場合は、いずれも同一サンプル・同一試験装置のデータであるので、入出力の傾きの変動に大きな差はない。信号水準数が増加したとしても、安定性の尺度である SN 比はほぼ同じ値になるべきである。上の結果から分かるように、従来の標準 SN 比の場合は、同一サンプルにも関わらず、SN 比に約 6db の差が発生する。これは信号水準数(データ数)が 4 倍異なるためである。いっぽう、エネルギー比型 SN 比の場合は、差は -0.1db と微小である。なお、エネルギー比型 SN 比で両者の SN 比が完全に一致しないのは、間引いたデータによる影響であり、 $k=5$ でどのデータを選択するかによって依存するものである。ちなみに、全く線形なデータの場合は信号水準数によって(どのデータを間引くかによって)エネルギー比型 SN 比



図表 4.2.2 「パラメータ設計の設定」画面

の値が変化することはない。

以上のように、従来の標準 SN 比はデータ数の影響を強く受けるため、実際に機能の安定性が異なる対象間で比較を行う場合は、データ数の違いによって機能の安定性と SN 比の値が逆転する可能性があることに留意する必要がある。エネルギー比型 SN 比ではデータ数をそろえる手間は無用である。信号水準数等が異なる場合でも、対象間をより公平に比較することができる。

4.2 節補足

このようなデータ数が比較対象間で異なりうるのは特殊なケースではない。以下のような例がある。

- 入力信号に時間をとって、一定時間間隔でデータを取得する場合⁹⁾に、比較対象間で処理(動作)時間が異なると、データ数が変化する。
- MT(マハラノビス・タグチ)システムにおいて、推定精度を SN 比で評価する際に、データセット間でサンプル数が異なる場合¹⁰⁾がある。
- 転写性の評価において、有限要素法などのシミュレーションを使用する場合、比較対象間でモデルのメッシュが異なることで、頂点数が変化することが想定される。これによって信号因子である頂点間の距離数も変化する。

4.3. 従来の SN 比の課題(3)

～個別的な計算方法～

2.4 節で従来の SN 比が細かく分類されていることを示したが、エネルギー比型 SN 比ほとんどの SN 比を1つの考え方と数理の中で運用することができる。なお、エネルギー比型 SN 比でもメニューでは「ゼロ点比例式」と「非線形の標準 SN 比」に分かれているが、表示される定義式 (S_{β}/S_N) は同じであることが確認できる。入力信号をもとの信号値 M とするのか(ゼロ点比例式の場合)、新しい入力信号 M' として、標準条件 N_0 の出力を用いるのか(非線形の標準 SN 比の場合)の違いである。

動特性の 2 つの SN 比(ゼロ点比例式の SN 比、標準 SN 比)についてはすでに述べたので、静特性の SN 比の場合について述べる。基本の考え方

は「2 乗和に分解して、有効成分と有害成分に分けてそれらの比を取る」ということである。

(1) 静特性の SN 比

(1-1) 望小特性の SN 比

全変動 S_T を平均の成分 S_m とばらつき成分 S_e に分解して考えると、望小特性では S_m も S_e も小さいほうが望ましいため、いずれも有害成分である。有効成分はないので、便宜上 1 と定義する。これを 1 データあたりに基準化して、以下ようになる。これは結果的に従来の SN 比と同一になる。

$$\eta_{E望小} = \frac{1}{(S_m + S_e)/n} = \frac{1}{(S_T/n)} \quad \text{-----(4.3.1)}$$

(1-2) 望大特性の SN 比

望大特性はその定義から、まずもとのデータ y の逆数 $1/y$ を評価するというものである。望小特性と同一の式になる。したがって、結果的に従来の SN 比と同一になる。

(1-3) 望目特性の SN 比

全変動 S_T を平均の成分 S_m とばらつき成分 S_e に分解して考えると、望目特性では S_m は有効成分で大きいほどよく、 S_e は有害成分で小さくなってほしいため、これらをそれぞれ 1 データあたりに基準化して、比をとる。StatWorks では「エネルギー比型 SN 比」を選択すると「静特性-望目特性」が選択可能になる。

$$\eta_{E望目} = \frac{S_m/n}{S_e/n} = \frac{S_m}{S_e} \quad \text{-----(4.3.2)}$$

(1-4) ゼロ望目特性

全変動 S_T を平均の成分 S_m とばらつき成分に分解 S_e して考えると、ゼロ望目特性では S_m は有効成分でも有害成分でもない無効成分となる。平均値は最終的にゼロに調整(校正)可能と考え、その大きさは安定性の評価に含めない。 S_e は有害成分で小さくなってほしい。有効成分はないので、便宜上 1 と定義する。これを 1 データあたりに基準化して、以下ようになる。従来の SN 比とは、自由度 $(n-1)$

で割るのかデータ数 n で割るのかの違いである。なお、StatWorks ではゼロ望目特性のエネルギー比型 SN 比は実装されていない。

$$\eta_{Eゼロ望目} = \frac{1}{S_e/n} \quad \text{-----(4.3.3)}$$

4.4. 従来の SN 比の課題(4)

～計算の複雑さ(使用面、教育面での困難性)～

エネルギー比型 SN 比は式の形から分かるように、 V_e の計算(そのための交互作用項への分解)や自由度の考え方が不要であるため、計算が理解しやすく簡便である。用いる数理は、2 乗和の分解だけである。全 2 乗和 S_T と有効エネルギー成分 S_β が求めれば、有害エネルギー成分は $S_T - S_\beta$ で求められ、 $S_{N \times \beta}$ 等への分解は不要である。

$$\eta_E = \frac{S_\beta}{S_{N \times \beta} + S_e} = \frac{S_\beta}{S_N} = \frac{S_\beta}{S_T - S_\beta} \quad \text{-----(4.3.4)}$$

4.4 節の補足

エネルギー比型 SN 比において、SN 比の分子の S_β から V_e を引く必要がないと考える数理的な理由、品質工学の思想からくる理由、実務的な理由をいくつか挙げる事ができるが本稿では割愛する。ここでは、健全な事例では S_β に比べて V_e は非常に小さな値であるという理由だけで、実務上は十分である。品質工学会誌に掲載された報文において、標準 SN 比を用いた 40 事例を調査した結果、 V_e の S_β に対する比は平均 1:3000 にすぎない。

なお、公知の事例でも、自由度の計算や 2 乗和の分解の計算を間違えているものが散見される。これは、計算の複雑さ、理解へのハードルの高さに原因の一端を求めることができるだろう。StatWorks のような解析ソフトウェアを用いると、この種の間違ひはなくなると言える。しかしなぜそのような計算方法になっているのかの理解や、後進への教育の局面で、あまり本質的でない複雑な数理の部分で時間をかけるのは効率的ではない。

4 節全体の補足

2 節および 4 節で従来 SN 比の 4 つの課題とそれに対するエネルギー比型 SN 比における解決策、その効果を検証してきた。ここでは、エネルギー比型 SN 比におけるそのほかの利点を付記しておく。

エネルギー比型 SN 比の他の利点として、SN 比の絶対値化が挙げられる。機能の安定性の相对比较に用いられてきた従来の SN 比を、誤差因子による傾き(入出力の変換効率、変換係数)の変化率という指標にしたのである。つまり摂氏温度のように差だけに意味があるのではなく、絶対温度のように原点や比に意味を持つ尺度となった。たとえば機能の入出力のグラフ上で、傾きの大きさの 1%ばらついていれば 40db、10%ばらついていれば 20db となる。そのため、機能の安定性や MT システムの予測精度に用いる SN 比に対して、「0db 以上」といった目標値を設定することが初めて可能となる。また、グラフのばらつきのイメージと SN 比の値そのものに対応がつかため、計算間違いがあった場合に気が付きやすいことも実務的には重要である。

本稿では割愛したが、エネルギー比型 SN 比は品質工学の重要な評価指標である「損失関数」とも完全に整合する尺度になっており¹⁾、その点でも使いやすく、品質工学の本意に沿うものである。

5. おわりに

本稿ではエネルギー比型 SN 比の特徴やメリットを分かりやすく説明するために機能性評価(2 つの評価対象間の比較)の例を示したが、当然ながら従来 SN 比で発生する前述の課題はすべて、パラメータ設計でも発生する。パラメータ設計の内側直交表(制御因子を割り付ける直交表)の実験 No.ごとに、入力信号の大きさや、データ数が異なるケースでは、SN 比が公平に比較されないので、要因効果図での水準選択判断に影響を与える。余計な手間をかけたり、心配をすることなく、妥当な要因効果図を得るためには、エネルギー比型 SN 比の使用を勧める。StatWorks はエネルギー比型 SN 比を用いてパラメータ設計を行える唯一の市販ソフトウェアである。

謝辞

エネルギー比型 SN 比の StatWorks への導入に尽力いただいた元富士ゼロックス株式会社の立林和夫氏、エネルギー比型 SN 比の共同研究者である、株式会社シマノの太田勝之氏、合同会社オフィスワイ・エスの清水豊氏、三菱電機株式会社の鐵見太郎氏に感謝する。

参考文献

- 1) 鐵見, 太田, 清水, 鶴田:品質工学で用いる SN 比の再検討, 品質工学, 18, 4, (2010), pp80-88 .
- 2) 鶴田, 太田, 鐵見, 清水:新 SN 比の研究(1)~(5), 第 16 回品質工学研究発表大会論文集, (2008), pp.410-429.
- 3) たとえば、田口, 矢野, 品質工学会:品質工学便覧, 日刊工業新聞社, (2007)
- 4) 田口玄一: 22 章 計測法のための実験計画と SN 比, 第 3 版実験計画法, (1977), pp.611-618
- 5) 田口, 横山:ベーシックオフライン品質工学, 日本規格協会, (2007), pp.57-71.
- 6) 田口, 横山:ベーシックオフライン品質工学, 日本規格協会, (2007), pp.77-82.
- 7) 三菱電機(株):技術品質評価のための新しい評価尺度-エネルギー比型 SN 比-, 三菱電機技報, 85, 1, (2011), p44.
- 8) たとえば、奈良, 石坪, 志村, 理寛寺:機能性評価による小型 DC モータの最適化, 品質工学, 9, 5, (2001), pp.34-41.
- 9) たとえば、矢野, 西内, 小山, 北崎, 木村:宇薬品の噴霧乾燥の品質工学による機能性評価, 品質工学, 5, 5, (1997), pp.29-37.
- 10) たとえば、矢野, 早川:MT システムによる地震の予測の可能性の研究, 標準化と品質管理, 62, 7, (2009), pp.27-40.
- 11) 鶴田, 太田, 鐵見, 清水:新 SN 比の研究(1), 第 16 回品質工学研究発表大会論文集, (2008), pp.410-413.

本著作物は原著作者の許可を得て、株式会社日本科学技術研修所（以下弊社）が掲載しています。本著作物の著作権については、制作した原著作者に帰属します。

原著作者および弊社の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず、本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は、公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>