

技術論文

品質工学を用いたサーモモジュールの熱応力耐久性評価の研究 Study of Thermal Stress Durability Evaluation for Thermoelectric Module Using Quality Engineering

田中 哲史
Tetsushi Tanaka
近内 三沖
Mitsuoki Konnai
小西 明夫
Akio Konishi
細井 光夫
Mitsuo Hosoi
大谷 敬司
Keiji Ohtani

サーモモジュール(TEC)はペルチェ効果によって電気エネルギーを吸熱エネルギーに変換する固体デバイスである。TEC には、投入電力に対する吸熱量の効率が求められるのと同時に、TEC 内部に発生する熱応力に対しての耐久性も求められる。本研究では TEC の熱応力耐久性向上に関し、従来の耐久試験に依らず、品質工学に基づいた機能性評価方法を検討しパラメータ設計を実施した。機能性評価においては、TEC への所望の熱応力付与という誤差因子下での TEC の電圧応答を計測し、標準 SN 比で評価した。機能性評価に要した時間は TEC 1 個あたり 5 時間であり、これは耐久試験 500 時間と較べて短時間と言える。パラメータ設計においては、一定の加法性を有した結果が示唆され、利得としては現行条件と比較して少なくとも 1.78² 倍の機能性向上が見込める結果であった。同時に、結果に含まれる誤差について考察し、さらなる加法性および機能性向上のために今後注目すべき要因についての知見を得ることができた。本研究での利得が、耐久試験での寿命に対して、どの程度の効果を及ぼすのかは今後検証を行う。

A thermoelectric module, or TEC (thermoelectric cooler), is a solid-state device that converts electric energy to endothermic energy using the Peltier effect. The requirements for TEC include the durability against the thermal stress generated inside TEC as well as the endothermic efficiency with respect to input power. For increased thermal stress durability of TEC, we examined functionality evaluation methods and conducted a parameter design based on quality engineering without using the conventional approach of durability testing. In this functionality evaluation, we measured the voltage response of TEC under the noise factor of applying the desired thermal stress to the TEC, and made an evaluation based on the standardized signal-to-noise (S/N) ratio. The time it took for functionality evaluation was 5 hours per one TEC, which is considered to be a short time as compared with the 500 hours needed for durability testing. The results of the parameter designing indicated a certain additivity, which could provide at least 1.78² times improvement in functionality in terms of gain as compared with the current condition. We also examined the errors included in the results, which provided us with insight into the factors to be considered for further improvement in additivity and functionality. We are planning to examine the effect of the gain achieved in this study on TEC's life in durability tests.

Key Words: サーモモジュール, TEC, 熱応力, 品質工学, 機能性評価, パラメータ設計, 利得, 加法性, 耐久試験

1. はじめに

株式会社 KELK ではサーモモジュールを製造販売している。サーモモジュールは一般的に TEC (ThermoElectric Cooler)とも呼称される。TEC はペルチェ効果によって電気エネルギーを吸熱エネルギーに変換する固体デバイスであり、精密かつ応答の速い温調が可能であるという特長を有している。その特長により、株式会社 KELK が製作す

る TEC は、主に、光通信におけるレーザーダイオード等の光学部品の温調や、半導体製造プロセス上の温調に用いられている。図 1 に示すとおり、一般的な TEC は P 型および N 型熱電素子をセラミック基板上の電極を介してギリシャ文字の「Π」の字型に直列接続した構造を有する。TEC 動作時には基板間で温度差が発生するので、投入した電気エネルギーに対する吸熱量の効率が求められると同時に、温度差によって TEC 内部に発生する熱応力へ

の耐久性も要求される。熱応力耐久性に関する既存の評価方法の一つとして ON/OFF 通電試験があるが、これは TEC 1 個あたり 500 時間という長時間を要する¹⁾。従って、当該方法はある型式の TEC の最終的な品質確認において実施されるものであって、多岐に渡る TEC の設計要素の妥当性検証、即ち、技術開発段階におけるスループットの高い評価とは言い難い。そこで本研究では、品質工学の考え方にに基づき、技術開発段階で短時間に TEC の熱応力耐久性を評価する方法を検討した。さらに、熱応力耐久性向上に効果的な設計パラメータを探索すべく、L₁₈ 直交表を用いたパラメータ設計を実施したので報告する。なお、本報告は、筆者らが品質工学会で発表した内容を、コマツ技報向けに加筆省略等を加えたものである²⁾。

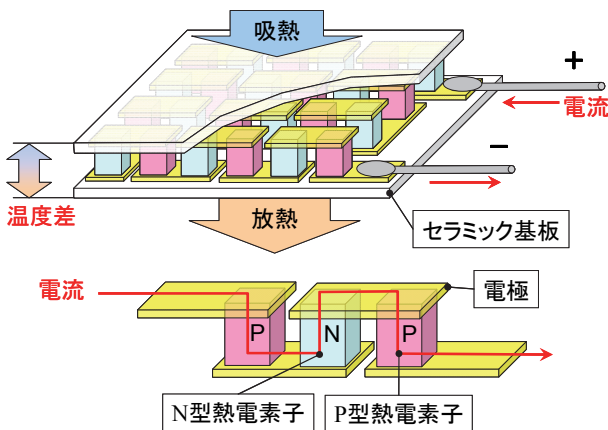


図 1 TEC の構造

2. TECの動作原理

TEC の働きは「投入された電気エネルギーを吸熱エネルギーに変換すること」と言える。そのエネルギー収支として、図 2 に吸熱量 Q_c 、放熱量 Q_h 、投入電力 P の関係を示す。また、TEC へ電流 I を印加した時に、これらは式(1)~(3)で表される³⁾。ここで、 T_c 、 T_h 、 ΔT は、それぞれ TEC の吸熱温度、放熱温度、温度差 ($=T_h - T_c$) である。 A 、 R 、 K は、それぞれ TEC のゼーベック係数[V/K]、内部抵抗[Ω]、熱コンダクタンス[W/K]であり、主には熱電素子の材料物性、形状、実装個数で決まる。

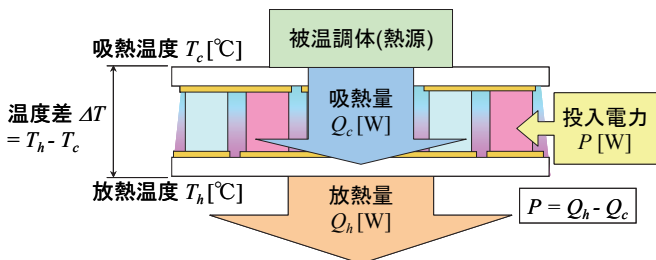


図 2 TEC のエネルギー収支

$$Q_c = AT_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K\Delta T \quad (1)$$

$$Q_h = AT_h I + \frac{1}{2} I^2 R - K\Delta T \quad (2)$$

$$P = Q_h - Q_c \quad (3)$$

式(1)、(2)ともに、右辺第 1 項はペルチェ効果、第 2 項はジュール発熱、第 3 項は固体熱伝導に関する熱の寄与である。式(3)が示すとおり、TEC 動作においては、放熱量と吸熱量の差が電力に相当する。式(3)に式(1)、(2)を代入すると P は式(4)のように表され、一般に、電力は電流と電圧の積であることから、TEC の電圧 V は式(5)で表される。即ち、TEC の電圧は、オームの法則による電圧降下 (IR) と、温度差に比例して発生する熱起電力 ($A\Delta T$) の和として観測される。

$$P = I(IR + A\Delta T) \quad (4)$$

$$V = IR + A\Delta T \quad (5)$$

3. TECの評価

3.1 一般的な評価方法

TEC の性能を表す一般的な品質特性は式(1)に基づいた ΔT 、 Q_c 等であり、株式会社 KELK が販売している TEC についても型式毎にこれらの品質特性を公開している⁴⁾。 ΔT 、 Q_c は実測による評価が可能であり、試料 TEC に熱源および温度センサを取り付け、熱源の発熱量 Q_c 下での I に対する ΔT 、 V を計測する⁵⁾。当該計測は、TEC の品質特性の規格値を決定するような場においては直接的であり有効な方法である一方、温度や熱量を計測するという性質上、センサ類の取り付け方法の如何によっても結果がばらつき易く、計測作業の標準化や繰り返し計測といった手間を要する方法である。実際、TEC の耐久試験では ΔT 、 Q_c を計測することは稀であり、内部抵抗 R を代表特性として計測する機会が多いが、これは TEC の劣化の全てが R 上昇として発現するという仮定に基づいており、TEC の働きを直接評価している訳ではない。

3.2 本研究での評価方法

本研究での適用を試みた品質工学においては、製品機能の外乱に対する安定性(機能性)を評価する。品質工学という機能とは、単なる品質特性ではなく、その品質特性を支えているより基本的な機能の入出力関係(動特性)のことを指す。例えば、ある電子部品の内部抵抗に注目する際、単に品質特性値としてはテストにて抵抗値を計測すれば良いが、品質工学においてはオームの法則に従って電流-電圧特性を機能として扱い、この機能性を評価対象とする。これは電流-電圧特性そのものが外乱に対して安定であれば、抵抗値という品質特性値も必然的に安

定するはずであり、技術開発段階においては、品質特性ではなく機能性向上のための研究を行うべきという考え方に基づいている。本研究における機能性評価について、筆者らは TEC への定電流 I_0 のステップ入力に対する電圧応答 $V(t)$ に注目した。TEC 動作の定常状態において吸熱面に熱源が無い場合では $Q_c=0$ であるが、 ΔT が定常状態に達するまでの過渡状態については、TEC の熱容量を C 、時刻を t として式(6)のように表すことができる。

$$Q_c = C \frac{d\Delta T}{dt} \quad (6)$$

式(6)に式(1)を代入すると、これは $\Delta T(t)$ に関する線形微分方程式であり、 $\Delta T(0)=0$ での解 $\Delta T(t)$ 、定常状態の $\Delta T(\infty)$ 、時定数 τ は次のとおりに表される。

$$\Delta T(t) = \Delta T(\infty) (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

$$\Delta T(\infty) = \frac{AT_h I_0 - \frac{1}{2} I_0^2 R}{K + AI_0} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{C}{K + AI_0} \quad (9)$$

さらに式(5)、式(7)より電圧応答 $V(t)$ は式(10)で表される。また、その立ち上がりの速さは式(11)で表され、これらを図示すると図 3 のようになる。

$$V(t) = I_0 R + A \Delta T(t) \quad (10)$$

$$\frac{dV(0)}{dt} = A \frac{\Delta T(\infty)}{\tau} \quad (11)$$

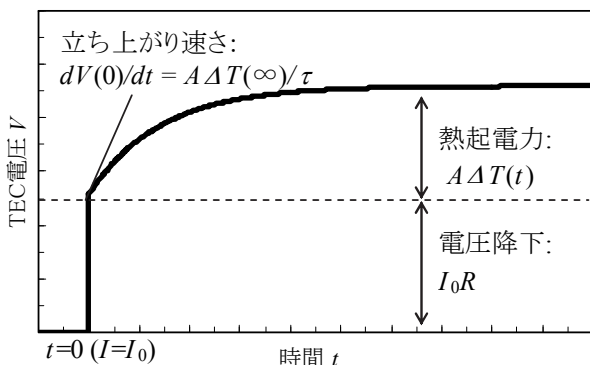


図 3 TEC への定電流ステップ入力時の電圧応答

このように、 $V(t)$ は TEC の働きを表す Q_c 、 ΔT に関する情報を含んでいると言え、かつ、 $V(t)$ の計測は温度計測と比較してばらつきが少なく計測時間も短時間で済む。よって本研究では定電流 I_0 のステップ入力に対する $V(t)$ を TEC 機能と捉え、これが熱応力に対して安定であること

が機能性の高い、即ち、熱応力耐久性の高い TEC であると考えた。

4. パラメータ設計

4.1 誤差因子

品質工学において誤差因子とは使用者の条件である。つまり、使用者が製品を手に入れて使っている間に影響を受ける全ての条件、例えば、材料や部品のばらつき、加工や組立のばらつき、使用条件や使用環境のばらつき、さらに経年劣化を含んでいる。その誤差因子に対する機能の安定性(機能性)は SN 比で評価する。SN 比と直交表を用いて機能性改善に寄与する設計パラメータを探索することをパラメータ設計と呼ぶ。市場においては設計者の自由にならない誤差因子であるが、機能性を評価するパラメータ設計においては意図的かつコントロールされた誤差因子の影響下にて行われる。即ち、品質工学においては、機能をどのように定義し計測するか他に、目的に対して適切な誤差因子をどのように設定するかが重要であって、これらは固有技術に依存するところが大きい。本研究においては TEC の熱応力耐久性を対象とし、TEC 動作時の温度差 ΔT によって発生する熱応力に対する機能性を評価することにした。そこで、市場での熱応力負荷に代わるものとして、所望の方法によって意図的に TEC に熱応力を付与し誤差因子とした。また、従来の ON/OFF 耐久試験では 500 時間をかけて ΔT による熱応力サイクルを付与していたが、本研究での方法においては試験時間を短縮すべく、より短時間に効率的に、かつ再現性よく熱応力を付与する方法を考案した。その際、誤差因子が過大であると TEC 機能が完全に観測されなくなるリスクもあったので、予備実験を通して適度な熱応力の付与方法を考案し、誤差因子の水準を N_0 : 熱応力の付与無し(標準条件)、 N_1 : 中位の熱応力の付与、 N_2 : 高位の熱応力の付与とした。

4.2 制御因子と直交表への割り付け

誤差因子が、製品機能に対する市場での不随意的な外乱に相当するのに対し、制御因子は設計者が随意に選定できる製品設計パラメータに相当し、直交表に割り付ける因子である。直交表は、多くの因子の水準の組合せ全て、莫大な数になる実験をしたならば得られるであろう情報を、できるだけ少ない数の実験で得ようとする実験計画法にて使用される。ちなみに、品質工学の創始者である田口玄一は、元々実験計画法の大家であり、線点図を考案してデミング賞本賞を受賞したことでも知られている。その実験計画法の大家が、さらなる直交表の有効利用を考えて発展させたものが品質工学に他ならない。従来の実験計画法では主に 2 水準系あるいは 3 水準系の直交表

が使用されるのに対し、品質工学でのパラメータ設計においては混合系の直交表を用いることが多い⁶⁾。2水準系あるいは3水準系の直交表では、交互作用が現れる列(その様子を示したものが線点図である)があり、その列には因子を割り付けることができない、つまり、実験数に対して割り付けられる因子の数が少ないというデメリットがある。一方、混合系の直交表では、交互作用が特定の列に現れないので、従来に較べて、少ない実験数で多くの因子の効果を調べられるというメリットがある。交互作用が直接的に得られない混合系の直交表を使う品質工学では、交互作用がどこにどれだけあるかは分からないものの、交互作用の有無を調べる手段が別途用意されており、これは後述の確認実験にて再現性(加法性)をチェックすることによって行う。詳細の開示は控えるが、本研究ではTECの機械的構造に関する設計パラメータを制御因子に取り上げ、表1のとおり L_{18} 直交表に割り付けた。表の横方向が因子の種類(A~H)、縦方向が実験番号(1~18)であり、表の中の数字は各因子の水準(1~3)を表している。例えば、実験番号1の各因子の水準は全て第1水準である。因子Aは2水準、因子B~Hは3水準であり、全ての組合せは、 $2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 4,374$ 通りになるが、それを18通りだけで済ませるわけである。ただし、今回のパラメータ設計では因子Aと因子Bは影響し合っているものを選んだため、2水準の因子Aと4水準の因子Bの組合せのうち実現可能なものから表にある6通りを選択して割り付けた。因子Eは2水準しか設定することができなかつたので、E列の第1水準E1をE列の第2水準にダミーとして割り付けた(E1')。G列、H列には制御因子を割り付けず、誤差列とした。その結果、全ての組合せ、 $6 \times 3 \times 3 \times 2 \times 3 \times 1 \times 1 = 324$ 通りから18通りの組合せを抜き出して実験したことになる。今回のパラメータ設計では、表1に従い、実際に18個のTECを試作しテストピースとした。

表1 L_{18} 直交表への割り付け

実験 No.	制御因子の記号						
	A×B	C	D	E	F	G e	H e
1	1×1	1	1	1	1	1	1
2	1×1	2	2	1'	2	2	2
3	1×1	3	3	3	3	3	3
4	1×2	1	1	1'	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	1'	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	1'	1	1	3
13	2×4	1	2	3	1	3	2
14	2×4	2	3	1	2	1	3
15	2×4	3	1	1'	3	2	1
16	2×3	1	3	1'	3	1	2
17	2×3	2	1	3	1	2	3
18	2×3	3	2	1	2	3	1

4.3 実験手順

先述の通り、定電流 I_0 に対する電圧応答 $V(t)$ が計測項目であるが、テストピース間で $t=0$ 時の投入電力が同一になるよう印加する I_0 を決定した。当該投入電力水準を信号因子 M_j とし、低電力側から順に $j=1, 2, 3, 4$ の4水準とした。誤差因子 N_i ($i=0, 1, 2$) 各々で M_j 時の電圧応答 $V_{ij}(t)$ を計測するので、1個のテストピースに対して電圧応答は $4 \times 3 = 12$ 回計測した。順番としては、まず N_0 の $V(t)$ を $M_1 \sim M_4$ の順に計測し、次に N_1 を付与後の $M_1 \sim M_4$ の順に、さらに N_2 を付与後の $M_1 \sim M_4$ の順に計測した。以上の実験を実験No.1~18として18個のテストピース全てに対して実施した。

4.4 実験結果と標準SN比

実験No.12を例に、図4に $V(t)$ の計測結果を示す。

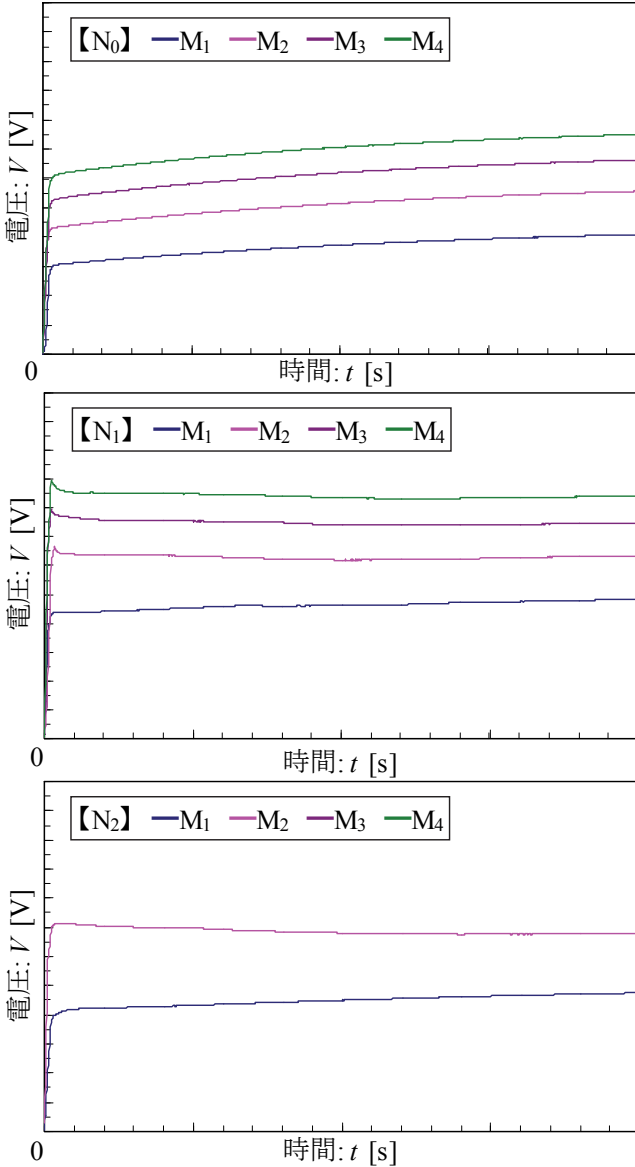


図4 電圧応答 $V(t)$ の計測結果 (実験 No.12 の例)

N_0 においては図3と同様の $V(t)$ を示し、これは TEC 機能が保たれている状態と言える。しかし、 N_1 以降では通電初期時間における電圧の立ち上がりの消失が起こり、さらに N_2 の M_3 以降は内部抵抗 R が ∞ になり通電不能となったので計測できなかった。これらの状態は熱応力による劣化破壊により TEC の機能が失われた状態(機能限界)である。全実験 No. を通して、誤差因子付与により半数以上の TEC が機能限界に至ったが、品質特性値を計測対象とする一般的な実験では、テストピースを破壊せぬよう注意を払って計測することに対し、品質工学では半数以上の破壊が起こっていても解析可能である。また、本実験に要した時間は、TEC 1 個あたり 5 時間であり、これは従来の耐久試験によって評価する場合よりも大幅に短時間と言える。実験結果を SN 比で表すにあたり、本研究で

は、 N_0 の時の計測データを基準とした N_1 と N_2 の標準 SN 比で表した。誤差因子 N_i 、信号因子 M_j 、 t_n 秒の電圧値を $V_{ij}(t_n)$ と表すと、機能限界に至って通電不能になったテストピースは原理的に $V_{ij}(t_n) \rightarrow \infty$ であり標準 SN 比が計算できなかった。よって $V_{ij}(t_n)$ の逆数 $y_{ij}(t_n)$ を用いることにより、この場合は $y_{ij}(t_n) \rightarrow 0$ として標準 SN 比を求めた。 $y_{0j}(t_n)$ を信号 W_j 、 $y_{ij}(t_n)$ ($i=1, 2$) を出力として、時間区間を $t_0 \sim t_k$ とすると、有効除数 r_{0j} および線形式 L_{ij} は式(12)、式(13)によって算出した。また、計算処理上で用いる N_i ($i=1, 2$) の仮想データ $y_{i'j}(t_n)$ は式(14)とし、同様に線形式 $L_{i'j}$ を式(15)にて計算した。

$$r_{0j} = \sum_{n=0}^k \{y_{0j}(t_n)^2\} \quad (12)$$

$$L_{ij} = \sum_{n=0}^k \{y_{0j}(t_n) \cdot y_{ij}(t_n)\} \quad (13)$$

$$y_{ij}(t_n) = 2y_{0j}(t_n) - y_{ij}(t_n) \quad (14)$$

$$L_{i'j} = \sum_{n=0}^k \{y_{0j}(t_n) \cdot y_{ij}(t_n)\} \quad (15)$$

上記の有効除数および線形式を使って、最小 2 乗法を適用して、全平方和 S_T を式(16)のように分解した(2 乗和の分解)。各項の計算は式(17)~式(20)に従い、標準 SN 比 η は式(21)および式(22)にて算出した。

$$S_T = S_\beta + S_{N \times \beta} + S_{W \times \beta} + S_e \quad (16)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{n=0}^k \{y_{ij}(t_n)^2 + y_{i'j}(t_n)^2\} \quad (17)$$

$$S_\beta = \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (L_{ij} + L_{i'j}) \right)^2 / 4 \sum_{j=1}^4 r_{0j} \quad (18)$$

$$S_{N \times \beta} = \sum_{i=1}^2 \left[\left\{ \left(\sum_{j=1}^4 L_{ij} \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^4 L_{i'j} \right)^2 \right\} / \sum_{j=1}^4 r_{0j} \right] - S_\beta \quad (19)$$

$$S_{W \times \beta} = \sum_{j=1}^4 \left[\left\{ \sum_{i=1}^2 (L_{ij} + L_{i'j}) \right\}^2 / 4 r_{0j} \right] - S_\beta \quad (20)$$

$$S_N = S_e + S_{N \times \beta} + S_{W \times \beta} \quad (21)$$

$$\eta = 10 \log \left(\frac{S_\beta - V_e}{V_N} \right) \quad (22)$$

S_β は、信号成分(標準 SN 比の場合は $\beta \equiv 1$ となる)の 2 乗和であり、有効除数の 4 倍にほぼ一致する。 $S_{N \times \beta}$ は、誤差の効果であり、誤差因子 N_1 および N_2 の影響の大きさに相当する。 $S_{W \times \beta}$ は、入力電力の違いの効果であり、 $W_1 \sim W_4$ の違いによる影響の大きさに相当する。 S_e は、信号成

分、誤差の効果、入力電力の違いの効果を除いたエラーの2乗和であり、誤差と入力電力の交互作用、 N_0 と対比させたときの N_1 および N_2 の非線形性、偶然誤差などを含む。エラーの分散 V_e は、 S_e を自由度 f で除して得られるものであり、 β^2 の推定値の補正項となるため、SN比 η の分子で使われる。 S_N は、全平方和 S_T から信号成分を引いた残り、つまり、誤差成分の2乗和である。 S_N を自由度 f で除して得られるものが誤差成分の分散 V_N であり、SN比 η の分母になる。なお、音響学や信号理論にならって扱いやすい数字にするため、SN比は常用対数をとって10倍することにより、db(デシベル)単位にしている。以上の具体例として、実際の $V_{ij}(t_n)$ 計測値の逆数 $y_{ij}(t_n)$ に関し、 $y_0(t_n)$ に対する $y_{ij}(t_n)(i=1, 2)$ をグラフ化したものを図5に、2乗和の分解結果を表2に示す。また、標準SN比 η の計算結果一覧および要因効果図を表3および図6に示す。要因効果図は L_{18} 直交表の実験番号ごとのSN比を、制御因子の水準別に平均して、それぞれの制御因子の水準の効果を図表化したものである。要因効果図を見ると、効果のある制御因子、水準による効果の程度が一目瞭然となる。現行の設計パラメータ(現行条件)とSN比が最大になる組合せ(最適条件)に印を付した。

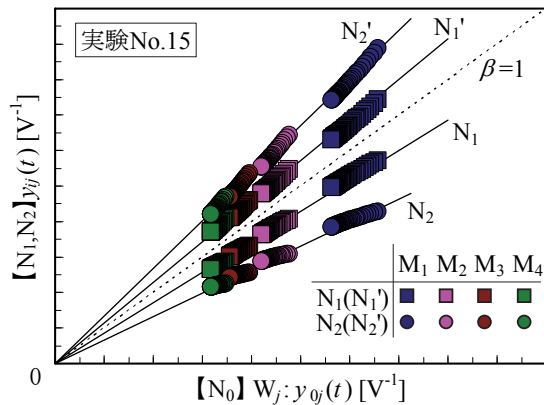


図5 $y_0(t_n)$ に対する $y_{ij}(t_n)(i=1, 2)$ (実験 No.15 の例)

表2 2乗和の分解結果(実験 No.15 の例)

Source	S	f	V
β	66683.336	1	66683.336
$N \times \beta$	4542.317	3	1514.106
$W \times \beta$	0.000	3	0.000
e	41.218	79209	0.001
(N)	4583.535	79215	0.058
T	71266.872	79216	0.900

表3 標準SN比 η 計算結果一覧

実験 No.	η [db]	実験 No.	η [db]	実験 No.	η [db]
1	87.11	7	64.19	13	72.05
2	74.93	8	80.13	14	68.24
3	70.74	9	79.17	15	60.62
4	81.22	10	65.34	16	67.12
5	60.16	11	48.99	17	54.39
6	78.21	12	56.51	18	81.14

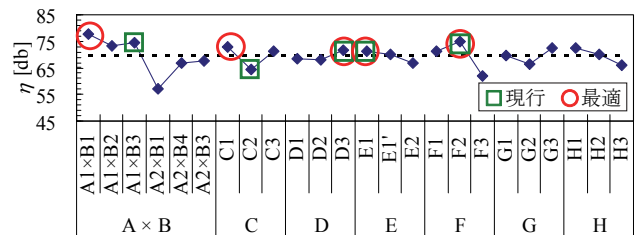


図6 標準SN比の要因効果図

4.5 確認実験

品質工学においては、要因効果図が示す現行条件および最適条件の水準の組合せで改めて試作をし、確認実験を行う。確認実験では、SN比の推定値と実験値の比較を行い、その再現性(加法性)を評価する。SN比の推定は、任意の組合せの各制御因子の水準ごとの効果を加算するだけである。そのような計算で正しい推定ができる保証はないが、加法性が有るときには交互作用が少なく精度の良い推定が可能と言え、むしろ、精度の良い推定ができたときに、加法性があったと言える。品質工学によれば、加法性がある技術が市場でも再現性が高く、優れた技術であると考えられる。直交表実験の真の目的は、評価する技術に加法性があるかを確認し、市場での予期せぬ不具合を未然に防止しようとすることである。図6によれば、SN比が最大になる最適条件はA1xB1-C1-D3-E1-F2の組合せであり、その推定値は89.93[db]であった。同様に、現行条件はA1xB3-C2-D3-E1-F2であり、推定値は78.47[db]であった。最適条件および現行条件の組合せにてTECを試作し、直交表実験と同様にSN比の実験値を求めたところ、最適条件、現行条件それぞれで86.28[db]、73.19[db]であった。以上を確認実験結果として表4に示す。

表4 確認実験結果

条件	組合せ	推定値	実験値
最適	A1xB1-C1-D3-E1-F2	89.93	86.28
現行	A1xB3-C2-D3-E1-F2	78.47	73.19
	利得	11.46	13.09

ここで、利得とは最適条件と現行条件との SN 比の差を取ったものであり、パラメータ設計による機能性の改善の程度を表している。これによると、SN 比の絶対値は推定値の方が実験値よりも大きいと言えるが、利得として見ると推定値、実験値でそれぞれ 11.46 [db], 13.09 [db]であり、再現性は比較的良い結果となった。

5. 考察

確認実験結果での推定値、実験値の差について、図 6 の要因効果図において加法性が良ければフラットであるはずの誤差列 G および H が約 6 [db] の幅を持っていることから想定される値よりも小さな差異になっている。また、利得については推定値、実験値ともに 11 [db] 以上という結果であったが、当該誤差を考慮すると、実際の利得は 5 [db] の可能性もある。5 [db] を真数で表すと 1.78^2 であり、これは今回のパラメータ設計における熱応力に対する機能性が少なくとも 1.78^2 倍向上したと言える。このように誤差を含んだ結果であるものの、推定値、実験値ともに利得の傾向は一致した。このことは、今回の直交表を用いたパラメータ設計には、ある程度の加法性が有ることを示唆しており、誤差因子の設定方法や機能の評価方法が妥当であったと言える。一方で、筆者らは制御因子の水準 A2 を改善水準として設定したが、図 6 の要因効果図が示すとおり、水準 A2 は全般的に水準 A1 より SN 比が小さく、これは目論見に反した結果であった。今回のパラメータ設計においては、TEC の機械的な設計条件に関する要因を制御因子として取り上げたが、水準 A2 を適用した TEC の試作にあたって、その製作プロセス面で条件を変更せざるを得ない部分があり、そこへの配慮が不十分だったことが目論見に反した一因であると考察している。即ち、プロセス上のコントロールされていない要因がテストピースの中に誤差として含まれてしまった可能性があり、これが先述の誤差列の効果に寄与しているものと考えられる。目論見どおり水準 A2 で SN 比が改善されなかったという点においては失敗と言える結果であるが、逆に、次回のパラメータ設計の際には水準 A2 適用と関係する製作プロセス上の要因を、制御因子や誤差因子として積極的に取り上げるべきであることに気付くことができた。また、本研究での機能性評価による利得に一定の再現性が有ることが判ったので、今後は、利得が従来の耐久試験の寿命にどの程度の効果を及ぼすのか、検証を行う予定である。

6. おわりに

本研究では TEC の熱応力耐久性向上に関し、品質工学に基づいた機能性評価方法を考案しパラメータ設計を実施した。機能性評価においては、TEC への所望の熱応力

付与という誤差因子下での TEC の電圧応答を計測し、標準 SN 比で評価した。機能性評価に要した時間は TEC 1 個あたり 5 時間であり、従来の耐久試験 500 時間と較べて短時間であった。パラメータ設計においては、一定の加法性を有した結果が示唆され、利得としては現行条件と比較して少なくとも 1.78^2 倍の機能性向上が見込める結果であった。同時に、誤差要因について考察し、さらなる加法性および機能性向上のために今後注目すべき要因についての知見を得ることができた。また、本研究での利得が、耐久試験での寿命へのどの程度の効果を及ぼすのか、今後検証を行う。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、品質工学初学者である筆者らは、品質工学会元会長である応用計測研究所株式会社 矢野宏博士より御指導をいただいた。この場にて謝意を表する。

参考文献

- 1) GR-468-CORE Issue 2: Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment, Telcordia Technologies, Inc., (2004).
- 2) 田中哲史 他: 第22回品質工学研究発表大会論文集, pp.70-73 (2014).
- 3) 坂田亮 編: 熱電変換-基礎と応用-, (株)裳華房, pp.207-211 (2005).
- 4) 例えば
<http://www.kelk.co.jp/thermo/pdf/KSML007.pdf>.
- 5) 梶川武信 他: 熱電変換技術ハンドブック, (株)エヌ・ティー・エス, pp.447-452 (2008).
- 6) 田口玄一 監修: 品質工学便覧, 日刊工業新聞社, pp.780 (2007).

筆者紹介



Tetsushi Tanaka

田中 哲史 2002年(株)KELK入社。
現在、(株)KELK 基盤技術部所属。熱電素子に関する研究開発に従事。



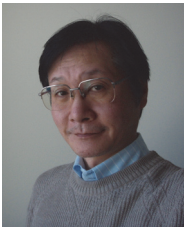
Mitsuoki Konnai

近内 三沖 2010年(株)KELK入社。
現在、(株)KELK 基盤技術部所属。サーモモジュールの信頼性および組立プロセスに関する研究開発に従事。



Akio Konishi

小西 明夫 1993年 コマツ入社。
現在、(株)KELK 素子技術営業部所属。サーモモジュールの設計開発に従事。



Mitsuo Hosoi

細井 光夫 1983年 コマツ入社。
現在、コマツウェイ総合研修センター 教育企画部(兼)開発本部 業務部所属。統計的品質管理および品質工学の教育・普及に従事。



Keiji Ohtani

大谷 敬司 1974年 コマツ入社。
開発本部で建機のパワートレイン開発に従事。2007年 研究本部で建機の燃費向上研究後、現在は品質工学の教育・普及に従事。

【筆者からひと言】

技術開発という上流段階において市場における製品ばらつきを少なくするために、技術者が先手を打って何を為すべきかを考えるにあたって、品質工学は非常に良い方法、良い機会と思いました。未だ品質工学そのものに対しては何かと不勉強な部分もありますが、この上流からの活動と、従来の下流からのQC活動を併せたTQM活動として、より品質的に優れたサーモモジュールを提供できるよう努めて参ります。