

新しい開発技法CS-T法の提案

Proposal of a New Product Development Methodology: The CS-T Method

細川 哲夫* 岡室 昭男** 佐々木 康夫* 多田 幸司*
Tetsuo HOSOKAWA Akio OKAMURO Yasuo SASAKI Kohji TADA

要 旨

タグチメソッドの代表的な技法であるパラメータ設計は、品質を改善することを目的として、幅広く活用されている。しかしながら、目的特性を使ったパラメータ設計は、開発の対象システムをブラックボックス化してしまうため、品質改善のメカニズムに関する情報を得ることが困難という問題があった。本論文では、この問題を解決する新たな技法CS-T法(Causality Search T-Method)を提案し、それが開発の上流段階で有効な技法であることを示す。CS-T法の実験計画は目的特性パート、T法パート、直交表パートの3つのパートからなる。T法パートに複数の現象説明因子を割り付けて、直交表パートの実験を1行追加実施するごとにT法解析を実施し、目的特性と現象説明因子の因果関係を最少実験回数で把握する。この因果関係を把握することによって、技術者がシステムや制御因子を考案する的確性が高まり、開発期間の短縮及び開発成功率の向上が期待できる。

ABSTRACT

Parameter Design, the representative methodology of the Taguchi Method, is widely utilized in product design to improve quality. One of the primary limitations, however, has been the difficulty in obtaining useful data on the mechanisms behind the quality improvement, as the systems utilized by the target characteristics-based Parameter Design are essentially black boxes. This paper proposes a new development methodology, which we call the Causality Search T-Method (or CS-T Method), to overcome this limitation. Composed of three segments—the Target Characteristics, T-Method, and orthogonal array segments—the CS-T method is highly effective when applied during the early stages of product development. Multiple Effective-Explanation Factors (EEFs) are assigned to the T-Method segment, after which T-Method analyses are performed for each successive line of experiments conducted in the orthogonal array. Through this approach, the causal relationships between the target characteristics and EEFs can be determined with far fewer experiments than previously possible. With an understanding of this causality, the design engineer is then able to devise Control Factors and systems with much greater accuracy, which can be expected to yield shorter development periods as well as higher development success rates.

* 品質技術本部 RICOH Quality推進室

RICOH Quality Promotion Department, Quality Management Division

** リコーインダストリアルソリューションズ株式会社 品質保証センター

Quality Assurance Center, RICOH Industrial Solutions Inc.

本稿は、日本品質管理学会に帰属の著作権の利用許諾を受け、品質、Vol. 45, No. 2 (2015)に掲載した論文を基に作成した。

1. はじめに

タグチメソッドでは開発をシステム選択, パラメータ設計, 許容差設計の3ステップで実施している¹⁾. この中でパラメータ設計はシステム選択が完了した後に, システムの品質を改善することを目的に実施されることが多い. ところで, この3つの開発ステップの中で性能と品質への寄与が最も大きいステップがシステム選択であり, システム選択が不適切なケースではパラメータ設計を実施しても十分な性能と品質を確保できない. よって, システム選択の目的は, 第2ステップのパラメータ設計において性能と品質の両方の目標を達成できるシステムと制御因子を考案することにあると言える.

システム選択段階においても, 技術手段を考案する活動のためにパラメータ設計を活用することは可能だがその事例は少ない^{2,3)}. その第一の理由は, 最も頻繁に実施される目的特性を使ったパラメータ設計は, 対象システムをブラックボックス化してしまうため, 改善効果のメカニズムを把握できないことがある. 第二の理由は, 調べたい制御因子が数多くある場合, 直交表を使ったパラメータ設計は実験規模が大きくなってしまい, 必要な技術情報を得るまでの時間が相當にかかるてしまうことである. さ

らに, 制御因子間の交互作用の寄与が大きくなると要因効果図の傾向が信頼できなくなってしまい, 技術情報すら得られないこともある.

これらの問題を解決するために, 新たな開発技法 (CS-T法) を開発し, システム選択段階にある複数の開発テーマに活用して, その効果を確認した⁴⁾. なお, CS-T法の一部を構成するT法は予測を目的とした技法である⁵⁾.

2. システム選択段階の開発活動の課題

Fig. 1にシステム選択段階の開発活動の全体像を示す. システム選択段階の開発活動はマネジメントパート, アナリシスパート, シンセシスパートの3つのパートからなる.

お客様の要求 (Voice of customer: VOC) を計測可能な特性値で代用したものを計測特性 y とする. 開発目標は計測特性 y の目標値, 様々な誤差因子の影響による計測特性 y のばらつきの許容差等の目的特性によって与えられる. 開発目標は企画からの要求に従って決定するものなので, この活動をマネジメントパートと呼ぶことにする.

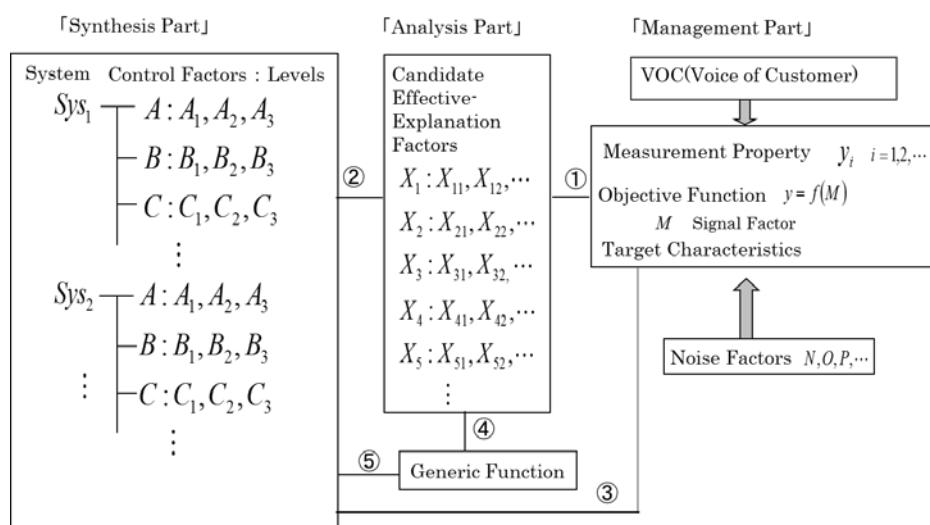


Fig. 1 Overview of product development activity.

開発目標が設定された後の開発活動は技術者が自由に活動する領域であり、それはアナリシスパートとシンセシスパートからなる。多くの開発では既存のシステムの中から最適なシステムを選択し、選択したシステムの性能と品質を目標レベルまで引き上げる過程でシステムや制御因子を考案する。ここでは最初に選択したシステムを Sys_1 とする。

次に一般的な開発活動を Fig. 1 の①と②で説明する。ここでアナリシスパートにある因子 X_j は目的特性を得るメカニズムを記述する様々な特性値であり、物性値、分析値、センシングデータ等である。Fig. 1 の①は目的特性と因子 X_j の因果関係を把握する活動であり、その狙いは目的特性の改善メカニズムを明らかにすることである。目的特性が改善したとしたら、そこには何らかのメカニズムが働いているはずであり、それを記述するという意味で因子 X_j を現象説明因子と呼ぶことにする。現象説明因子は観察データであり、自らその水準を変えることはできない。よって①の活動を実施するためには、シンセシスパートにある制御因子 (A, B, C, \dots) の水準を変えなければならない。(②で示した) 一般的な開発活動では、選択したシステムから制御因子を選択し、その水準を変えることで現象説明因子の水準を変化させ、Fig. 1 の3つのパートの因果関係を把握する。ここで、システムや制御因子を的確に考案するためには、目的特性と現象説明因子 X_j との因果関係を把握することが必須であるが、制御因子の選択数が少ないと目的特性と現象説明因子 X_j の変化幅が小さくなり、両者の因果関係の把握が困難になってしまふ。それが従来から実施されている一般的な開発活動の問題である。

一方、パラメータ設計は複数の制御因子を同時に取り上げて直交表に割り付けるため、目的特性の変化幅が広くなる。しかし、Fig. 1 の③で示したように目的特性を利用したパラメータ設計はアナリシスパートを解析対象としないため、改善メカニズムを把握することができない。また、シンセシスパートにある制御因子とマネジメントパートにある目的特性は直接的な因果関係を持たないため交互作用の影

響を受けやすい。つまり、パラメータ設計は多くの制御因子を取り上げ、さらに直交表による水準組み合わせ効果も利用するので少ない実験回数で大きな改善効果が得られるというメリットがあるが、改善効果のメカニズムを把握できないというデメリットがあり、さらに加えて交互作用の影響を受けやすいという弱点もある。交互作用の寄与が大きくなると、最も有益な技術情報である要因効果図の傾向の信頼度が低下する⁶⁾。

ところで、アナリシスパートから目的特性と因果関係を持ち、かつ目的特性のようにシステム全体の評価が可能な現象説明因子 X_j があればそれが基本機能となる。(④で示した) 現象説明因子 X_j と制御因子は因果関係が直接的なので、基本機能を利用したパラメータ設計(⑤で示した)は、交互作用の影響を受けにくい。しかしながら、開発活動を開始する前にシステム全体の評価が可能な現象説明因子 X_j が的確に把握されているケースは少ない。基本機能を的確に定義するためにも目的特性と現象説明因子の因果関係を把握する開発活動は必要である。

3. CS-T法とその狙い

3-1 CS-T法の構成

CS-T法の実験計画のイメージを Fig. 2 に示す。CS-T法は Fig. 1 に示した3つのパート全てを網羅した技法である。以下に3つのパートについて説明する。

- 目的特性パート
目的特性を定義する。目的特性として目的機能あるいは望目特性のSN比を利用した場合、Fig. 2 はパラメータ設計にT法パートを挿入した構造となる。
- 直交表パート
Fig. 1 のシンセシスパートから制御因子を選択して Fig. 2 の直交表パートに割り付ける。ここで、目的特性の改善効果を高めるためにできるだけ多くの制御因子を取り上げる。

・ T法パート

目的特性の改善メカニズムを説明できる可能性のある現象説明因子をできるだけ多く取り上げ、T法パートの現象説明因子として直交表の行ごとに計測（あるいは計算）する。多く取り上げることで目的特性と因果関係のある現象説明因子の検出確率を高める。

A	B	C	…	X ₁	X ₂	X ₃	…
Orthogonal Array 【assign the Control Factors】				T-Method 【measure the candidate Effective-Explanation Factors】			Target Characteristics
"enable to set the level"				"unable to set the level"			Measurement Property y Variance V_y SN ratio η_y

Fig. 2 Visual overview of CS-T experimental design.

3-2 CS-T法における直交表とT法の役割

CS-T法では、目的特性が改善されたサンプルを効率的に作成するツールとして直交表を活用する。そして、目的特性と現象説明因子の因果関係の把握を目的としているので直交表パートを解析対象としない。よって、直交表の全ての行の実験を実施する必要はない。T法パートの解析から目的特性の改善効果を説明する現象説明因子が十分な精度で検出できたと判断できた時点で直交表の実験を打ち切ることができ。このことは、実験期間の短縮に大きく貢献できる。打ち切り方法については4章で説明する。以下の(1)がCS-T法における直交表の役割であり、(2)がT法の役割である。

- (1) 少ないサンプル数で性能・品質を改善できるサンプル作成条件を決定する。
- (2) 目的特性と因果関係を持つ現象説明因子を検出し、性能・品質の改善メカニズムの把握に結び付ける。

4. 小型折り機構開発への活用

用紙を搬送しながら用紙を折りたたむ折り機構の小型化開発にCS-T法を活用した。その内容を以下に説明する。なお実験は全てシミュレーションを利用して実施した。

4-1 実験計画と解析方法

計測特性はFig. 3に示すように、用紙端部から折れた位置までの距離とした。実験計画の概要をFig. 4に示す。誤差因子はN（カール）、O（摩擦係数）、P（クラーク剛度）の3つを取り上げて直交表L₄に割り付けた。直交表L₄から得られる4つのデータ $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}$ から分散 V_y を計算し、これを目的特性とした。ここで添え字の i は制御因子を割り付けた直交表L₃₆の実施順番である。制御因子はローラの形状、表面材質等を12個抽出し直交表L₃₆に割り付けた。T法パートの現象説明因子には、機構内数箇所における荷重、及びその時間依存、用紙搬送速度及びそのばらつき、ローラたわみ等を40個取り上げた。

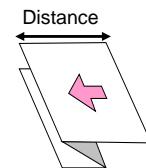


Fig. 3 Definition of measurement property y .

No.	Inside Orthogonal Array L ₃₆	T-Method Effective-Explanation Factors X ₁ , X ₂ , X ₃ , …, X ₄₀	Outside Orthogonal Array L ₄ Noise Factors N,O,P
1			$y_{11} \quad y_{12} \quad y_{13} \quad y_{14}$ $y_{21} \quad y_{22} \quad y_{23} \quad y_{24}$
2			$V_{y1} \quad V_{y2}$
⋮			⋮
36			

T-Method Analysis

Fig. 4 Experimental design of CS-T method.

CS-T法の解析方法について説明する。T法パートの解析は現象説明因子40個の計算結果の平均値を基準点とするTa法を利用する⁷⁾。次にTa法の解析から得られた、目的特性である分散の推定値 \hat{V}_y の全変動 S_T を比例項変動 S_β と誤差変動 S_e に分解し、相関係数の2乗、

$$R^2 = S_\beta / S_T \quad (1)$$

を計算する。例えば、直交表L₃₆の実施が5行であれば、5行分の分散の結果からTa法の推定式を求めて、5つの分散の推定値 \hat{V}_y を算出し、真値を分散 V_y として、以下のように(1)式を計算する。

$$r = \sum_{i=1}^5 V_{yi}^2 \quad (2)$$

$$L = \sum_{i=1}^5 \hat{V}_{yi} V_{yi} \quad (3)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^5 \hat{V}_{yi}^2 \quad (4)$$

$$S_\beta = L^2 / r \quad (5)$$

$$S_e = S_T - S_\beta \quad (6)$$

(1)式は取り上げた現象説明因子と目的特性との因果関係の強さを示していることから、この相関係数の2乗 R^2 を説明率と呼ぶことにする。説明率は以降に述べる直交表実験の打ち切り判断の指標として利用する。

現象説明因子に対する項目選択には直交表L₄₈を利用し、48個の総合推定SN比、

$$\eta = 10 \log_{10} (S_\beta / S_e) \quad (db) \quad (7)$$

を計算する。(1)式の説明率は値そのものが意味を持つが、加法性がないので直交表を利用した項目選

択には適さない。一方、(7)式のSN比は値そのものに意味がない相対値だが、加法性に優れているので、直交表を利用した項目選択に有効である。48個の総合推定SN比から各現象説明因子の水準平均値を算出し、その水準差 $\Delta \eta$ を算出する。また48個の総合推定SN比を使って分散分析を実施し、各現象説明因子の寄与率 ρ_x も算出する。この寄与率 ρ_x も直交表実験の打ち切り判断の指標として利用する⁸⁾。

CS-T法は直交表の一部実施により、実験の効率化を目指しているため、サンプル数が少ないケースを想定しなければならない。少ないサンプル数では現象説明因子と目的特性（本事例では折れ位置までの距離の分散）が偶然に相関を持つ可能性が高まり、それによって説明率が高くなる。しかし、取り上げた現象説明因子の中に目的特性と因果関係を持つものがなければ、直交表L₃₆の実施行を増やしてサンプル数を増やすとともに、偶然の相関を持つ現象説明因子数が減少し、説明率が低下傾向を示す。逆に取り上げた現象説明因子の中に目的特性と因果関係を持つ現象説明因子が含まれていれば、直交表L₃₆の実施行を増やすことで、一旦低下した説明率が再び上昇するか、あるいは説明率は直交表L₃₆の実施行に大きく依存せずに高い値を維持する。同時に特定の現象説明因子の寄与率が大きくなる。このように説明率と寄与率の直交表実施行数依存性から直交表実験の打ち切りを判断することがCS-T法の特長である。Fig. 5にCS-T法の解析手順を示す。小型折り機構の開発では結果的に直交表L₃₆の実験を13行の実施で打ち切った。

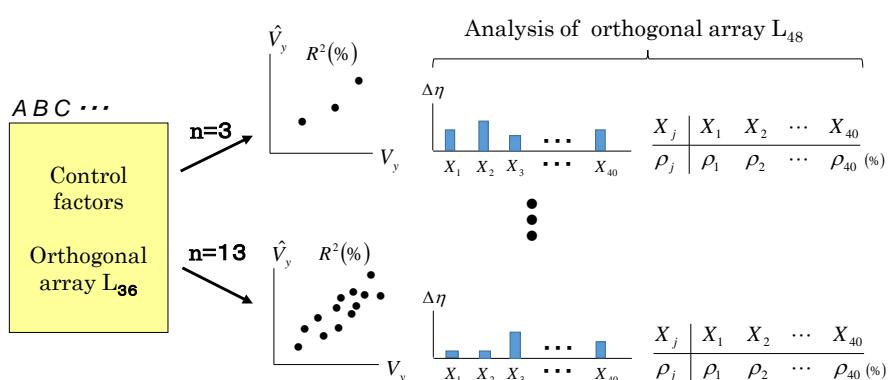


Fig. 5 Procedure of CS-T method analysis.

4-2 実験結果

以下にCS-T法の解析方法を説明する。最初に制御因子を割り付けた直交表L₃₆の各行の条件を固有技術的な観点で眺めて、できるだけ折り位置までの距離の分散が広い値をとるような網羅性の高い行を選択する。選択した行の実験をランダムな順番で実施し、3行分が完了した後からT法解析を実施し、説明率を算出する。また直交表L₄₈を使った項目選択を実施し、各現象説明因子の寄与率も算出する。

Fig. 6に直交表L₃₆の実施行を3行から13行まで増やしたときの説明率、Fig. 7に寄与率の推移をそれぞれ示す。Fig. 7は、結果的に寄与率が大きかった2つの現象説明因子X₁₄とX₂₈の傾向のみを取り上げている。Fig. 6で最初の3行実施行時からすでに高い説明率となっているが、これはサンプル数が少ないことに起因した偶然の相関によるものである。一方、Fig. 7を見ると（7行実施行時までは、寄与率の大きい特定の現象説明因子は抽出されていないが）8行実施行時からX₁₄とX₂₈の2つの現象説明因子の寄与率が際立って大きくなり、さらに実施行を増加させても等しい寄与率が再現している。また、Fig. 6では実施行数の増加とともにわずかに低下傾向を示していた説明率が8行実施行以降で上昇し、その後は高い説明率が再現している。Fig. 6の高い説明率の再現性と、Fig. 7の寄与率の再現性から、折れ位置までの距離の分散を改善する現象説明因子はX₁₄とX₂₈の2つであると判断できる。なおFig. 6、Fig. 7の傾向は実施行の順番を入れ替えても再現する。

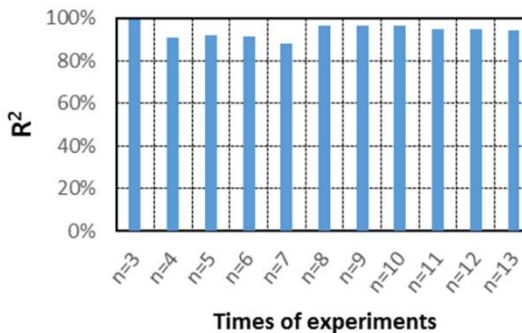


Fig. 6 Trend of R^2 .

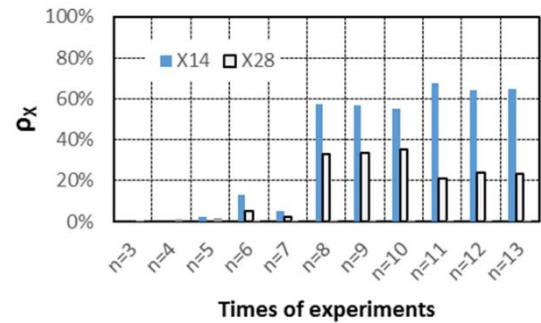


Fig. 7 Trend of ρ_X .

13行を実施した後の折れ位置まで距離の分散の真値（シミュレーションによる実際の計算値）と、T法解析で得られた推定値の散布図をFig. 8、直交表L₄₈を使った項目選択の要因効果図をFig. 9に各々示す。Fig. 8の説明率は94.6%であり十分な推定精度である。また、Fig. 9のASN比の結果からX₁₄とX₂₈の2つの現象説明因子の寄与が十分に大きいことがわかる。打ち切り判断は、例えば60%以上の説明率を維持しながら、特定の現象説明因子の寄与率が有意に5行以上継続したら十分な精度と判断する、というような基準を設ける。また、割り付けた制御因子全ての水準が必ず2水準以上出現するように下限を設定する。例えば直交表L₃₆の場合であれば、12行+1行は実施するようとする。

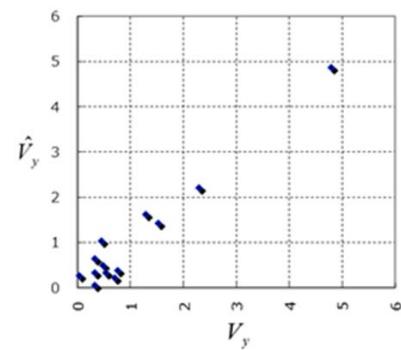


Fig. 8 Scatter diagram of V_y vs. \hat{V}_y .

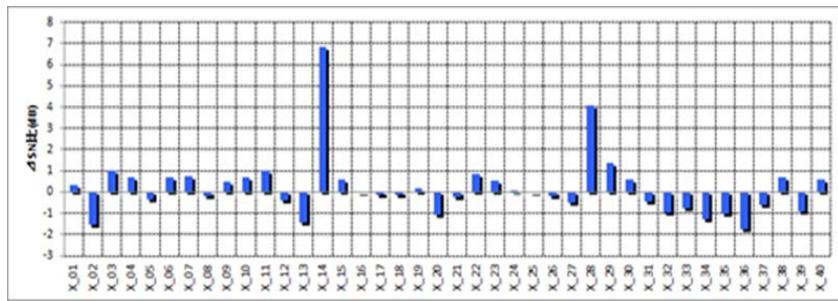


Fig. 9 Results of item selection analysis.

次に、目的特性に寄与する現象説明因子が存在しない場合には説明率が実施行に依存して低下することを示す。Fig. 9の項目選択結果から ΔSN 比がマイナスとなっている現象説明因子のみを選択し、Fig. 6と同様にして説明率の実施行依存性を示した結果がFig. 10である。Fig. 10から、目的特性と因果関係を持つ現象説明因子が含まれない場合は説明率が低下していくことが確認できる。これは、実施行数が少ないとときは偶然の相関によって説明率が高くなるが、実施行数を増やすことによって偶然の相関を持つ現象説明因子が減っていくからである。

このように実施行数を増加させたときの説明率の傾向の違い (Fig. 6とFig. 10を比較) からも X_{14} と X_{28} の2つの現象説明因子が目的特性と因果関係を持つことを確認できる。

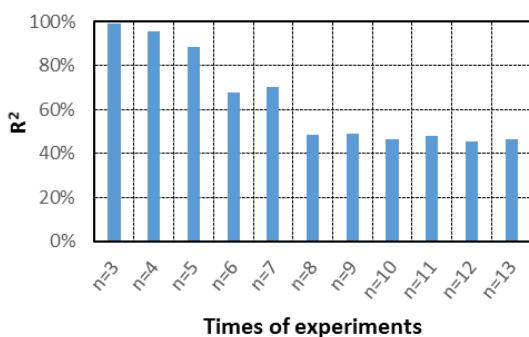


Fig. 10 Tendency of R^2 using negative ΔSN data.

5. 試作結果

現象説明因子 X_{14} は、機構内のある位置での用紙搬送の移動速度の平均値であり、 X_{28} はその標準偏差である（誤差因子を割り付けた直交表 L_4 の4つのデータから算出）。このことから、機構内部のある位置での用紙搬送の搬送距離と時間の関係がキーファクターであり、本システムの基本機能であることを明らかにできた。特に現象説明因子 X_{28} の用紙搬送速度のばらつきの抑制がシステムの目的特性を改善するキーファクターであることがわかったことによって、開発の方向性が明確になり、直交表 L_{36} で取り上げた制御因子以外の新たな制御因子を考案することが可能となった。従来のパラメータ設計では、取り上げた制御因子の改善効果の情報が得られるが、そこから新規の制御因子を的確に考案することは難しかった。一方、CS-T法では目的特性を改善するメカニズムの情報をT法パートから得ることが可能となり、それが新たな制御因子を的確に考案する原動力となる。

本開発では、前述した13回のシミュレーション結果からシステム構造と制御因子を考案し、それを反映したプロトタイプを1回だけ試作し、十分な品質が確保されていることを確認して開発を完了している（従来機に比べて分散 V が約1/4に低減：SN比で6 db相当の改善）。本開発によって実現した製品（RICOH SP C541：2016年10月市場投入）の仕様を従来機の仕様と比較してTable 1に示す。また、製品の概観イメージをFig. 11に示す。従来製品に比べて

体積が約11%まで小型化され、重量も約16%まで軽量化されている。その一方で、従来製品の約21%の低価格を実現している。さらに、Fig. 12に折り高さを従来製品と比較した結果を示す。従来製品以上にしっかりと折り目をつけることが可能となり、結果として折った用紙を重ねたときの高さが低くなっている。これは、折れる位置の安定性向上が結果として折り機能の確実性の向上にもつながっていることを示している⁹⁾。

Table 1 Comparison of specifications.

Specification terms	Conventional model	Proposed model
Volume (e.g.cm ³)	336,238	35,431
Weight (kg)	95	15
Price (US\$)	6,100	1,300

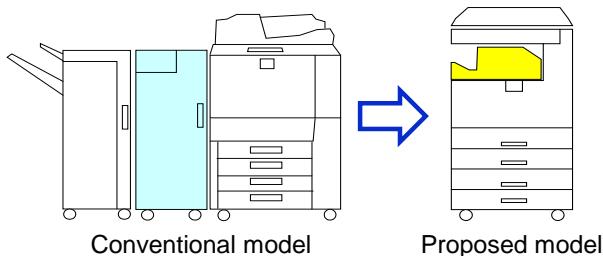


Fig. 11 Comparison of the two models.

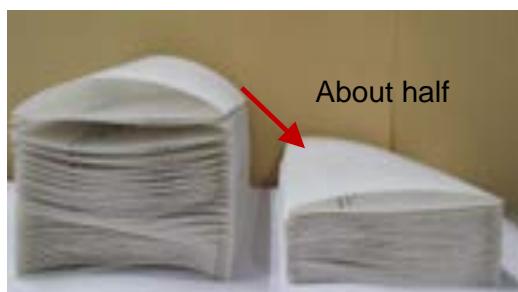


Fig. 12 Comparison of stack height.

6. まとめ

本論文では、システム選択段階における新たな開発手法（CS-T法）を提案した。CS-T法ではパラメータ設計にT法パートを挿入し、T法の項目として水準設定できない現象解明のための因子（現象説明因子）を取り上げる。直交表に割り付けた制御因子の水準値に従って作成したサンプルをT法解析用のサンプルとして、T法解析を逐次的に実施する。それによって、解析精度を確保できる必要最小限のサンプル数を判断しながら、目的特性と因果関係を持つ現象説明因子を効率的に抽出する。

CS-T法により、システムの目的特性の改善メカニズムを効率的に把握することが可能となり、開発目標を達成するための新たなシステムや制御因子を的確に考案することが可能となった。そして、CS-T法はフロントローディングの実現に有効であることを実際の開発事例への活用によって示した。今後は、メカ系以外も含めた様々なテーマにCS-T法を活用し、さらなる技法の進化を目指していく。

参考文献

- 1) 田口玄一: 品質工学講座I 開発設計段階の品質工学, 日本規格協会 (1988).
- 2) 細川哲夫: 全体最適を目指すR&Dマネジメント (1), 品質工学, Vol. 17, No. 6, pp. 47-59 (2009).
- 3) 細川哲夫: 全体最適を目指すR&Dマネジメント (2), 品質工学, Vol. 18, No. 1, pp. 64-70 (2010).
- 4) 細川哲夫ほか: パラメータ設計とT法を融合した開発手法の提案, 品質, Vol. 45, No. 2, pp. 64-72 (2015).
- 5) 田口玄一: 目的機能と基本機能(6) T法による総合予測, 品質工学, Vol. 13, No. 3, pp. 5-10 (2005).
- 6) 細川哲夫: 開発活動での品質工学活用方法－創造的な技術者を目指して－第1回 開発活動と設計活動におけるパラメータ設計の狙い, 標準化と品質管理, Vol. 69, No. 10, pp. 50-55 (2016).

- 7) 稲生淳紀ほか: タグチのT法およびその改良手法と重回帰分析の性能比較, 品質, Vol. 42, No. 2, pp. 103-115 (2012).
- 8) 田口玄一: 第3版 実験計画法 上巻, pp. 9-10, 丸善 (1976).
- 9) 細川哲夫: 開発活動での品質工学活用方法—創造的な技術者を目指して—第6回 新しい開発技法CS-T法の紹介, 標準化と品質管理, Vol. 70, No. 3, pp. 53-61 (2017).