

パラメータ設計における統計数理的方法論の開発

河村 敏彦 データ科学研究系 助教

1. ロバストパラメータ設計とは

ロバストパラメータ設計(Robust Parameter Design)は、創始者である故田口玄一博士が半世紀かけて体系化した、品質を向上させるための技術方法論である。これは、使用環境条件などの誤差因子に対してロバスト(頑健)になるように制御因子を設計することにより、特性や機能性のばらつきを低減する方法である。パラメータ設計の基本的な考え方は、ばらつきの原因となる誤差因子をコントロールするのではなく、設計に有効な制御因子と誤差因子の交互作用(誤差因子の影響がなるべく小さくなるような制御因子の水準条件)を見つけることにより誤差因子の影響を減衰させようとするものである。パラメータ設計は、制御因子の水準変更のみでばらつきの低減を図れるという、経済的かつ効果的な方法であるため、わが国の「ものづくり」の設計開発の現場を中心に利用されてきた(例えば、椿・河村(2008))。

海外に目を向けると、1980年代、田口がベル研究所滞在中にパラメータ設計を指導して以来、一流の統計研究者らによってその学術的な研究が展開されてきた。Leon, Schoemaker, and Kackerの研究成果の一つであるロバストパラメータ設計の理論は1987年に米国品質管理学会の機関誌 *Technometrics* に掲載され、これは今日でも2段階設計法の理論的研究を行ううえで基礎論文となっている。また、統計的実験計画法の権威であるウィスコンシン大学のBox教授はパラメータ設計を産業界へ適用することには批判的であったが、その統計的側面を考慮した代替案を国際的な学術誌に発表している。

現在ではジョージア工科大学のWu教授らがロバストパラメータ設計の積極的な理論展開を行っている。それらの成果をまとめたものとして2009年に *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* 2nd ed., (Wiley) が出版されている。

2. 田口流実験計画法 - 伊奈製陶のタイル製造実験 -

1953年、愛知県にあるタイルメーカー伊奈製陶(現INAX)では、ある実験が行われていた。当時、伊奈製陶では、イタリアから高価なトンネル窯を購入し、貨車に焼成前のタイルを積み窯内で焼いていた。しかし、トンネル窯内部は温度のばらつきが大きく、その結果、焼成後のタイル寸法がばらつくという品質問題に悩まされていた。

タイルは、調合した材料粉末をプレスしトンネル窯で焼成して固める。窯は外からバーナーで加熱されるため、外壁に近い端部では温度が高くなり、そこに置かれたタイルは内部に置かれたものに比べ焼成収縮が進み、焼成後の寸法が小さくなってしまふのである。

このとき、ばらつき低減のための対策は、

- ① 原因そのものの除去
- ② 原因の影響を減衰

の2つのうちどちらかだといわれている。以下にそれぞれの方法を説明する。

ばらつき低減のための対策①：原因そのものの除去

対策①は、タイル寸法のばらつきの原因を見つけ、その原因をコントロールすることで特性のばらつきを低減することである。伝統的な統計的品質管理(SQC: Statistical Quality Control)においては、主に製造現場でこの方法が用いられてきた。狭義の問題解決型QCストーリーで代表されるアプローチは、原因を発見すれば撲滅せよという方針である。このとき「原因の除去」の対策は固有技術的に発案され、その効果が確認されたらストーリーは終了となる。

ばらつき低減のための対策②：原因の影響を減衰

対策②の「原因の影響の減衰」について考えてみる。トンネル窯内の温度が一定でなくてもタイルの寸法が一定となるようにするには、どうすればよいだろうか。

田口は、温度のばらつきというノイズに対して、タイルの材料粉末(設計パラメータ)を最適化することにより、トンネル窯内の温度の影響を受けにくい安定性のある製品を設計(ロバスト設計)しようという技術方法論を提唱した。これが、田口流実験計画、特にロバストパラメータ設計(タグチメソッド、品質工学)と呼ばれるものである。

設計パラメータの決定に際しては、設計者が自由に条件変更できる制御因子(control factor)を取り上げる。実際、タイル実験では制御因子として原料である粘土と各種の石類、添加物(計7つ)を直交表 L_{27} に割り付けて実験を行っている。そして、これらとトンネル窯内部における位置または温度条件を誤差因子あるいはノイズ因子(noise factor)として取り上げた。これらがばらついていたとしてもタイル寸法が一定になるようにしたのである。

結果として、田口は制御因子(設計パラメータ)の一つである添加物とトンネル窯内の位置との間に有効な交互作用を見つけることができたのである。

3. 統計的モデルによるロバストパラメータ設計

本研究では、通常のSN比解析に加え、統計的モデリングアプローチを大きく2つに分けて紹介する。

- (i) 平均(Location) & ばらつき (Dispersion) モデリング (L&D Modeling)
- (ii) 応答関数モデリング (RFM: Response Function Modeling)

(i) では、直積実験データに対して誤差因子を単なる繰り返しとみなし、平均と分散を計算する。そして、これらをあらためて特性値とみなし、それぞれ制御因子の関数として同時要因解析(dual response approach)を行う。ここで、ばらつきの測度として範囲やSN比などの要約統計量も考えられる。パラメータ設計では特にSN比が用いられ、この場合にはSN比解析とほとんど変わらない。また、平均のみに興味がある場合の方法として応答曲面法が知られている。

一般に、2段階設計法(two step procedure)においてばらつきの測度として何を採用するかは、それと独立な調整因子の存在PerMIA (Performance Measure Independent of Adjustment) に依存する。(i)は簡便的で有効な方法であるが、同時に2つの特性に縮約しているため、個別の誤差因子の効果はわからない。

(ii)では、特性を内側直交表に割り付けた制御因子とその外側の誤差因子の関数で表現し、モデリングを行う。この方法は、複数の誤差因子が存在するとき、その個々の効果が詳細に認識できることがメリットである。応答関数モデリングでは、特性の誤差因子を考慮した平均構造に着目する。すなわち、誤差因子の水準の違いによる特性の平均の差を乖離(効果)とみなし、それを減衰することを目的とする。しかし、平均に比べ乖離の変動が相対的に小さい場合には誤差因子の乖離を減衰できない。その場合には、特性にスケール変換を施すことで乖離の減衰を第一義とした解析が可能になる。

参考文献

- [1] Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2009): *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2nd ed.), New York: Wiley.
- [2] 椿広計, 河村敏彦(2008):『設計科学におけるタグチメソッド』, 日科技連出版社.
- [3] 河村敏彦(2011):『ロバストパラメータ設計』, 日科技連出版社.
- [4] 河村敏彦, 高橋武則(2013):『統計的モデルによるロバストパラメータ設計』, 日科技連出版社.