

統計モデルによるロバストパラメータ設計

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))。

海外では、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 Kackar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イスコンシン大学の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. 統計モデルによるロバストパラメータ設計

ロバストパラメータ設計の目的は誤差因子を意図的に設定し、設計パラメータ(制御因子)と誤差因子の有効な交互作用を見つけ、その制御因子の水準選択によって特性ないしは機能のばらつきを低減させることである。Fisher流実験計画法では平均の変化に興味があり、パラメータ設計では乖離の減衰を第一義とする。

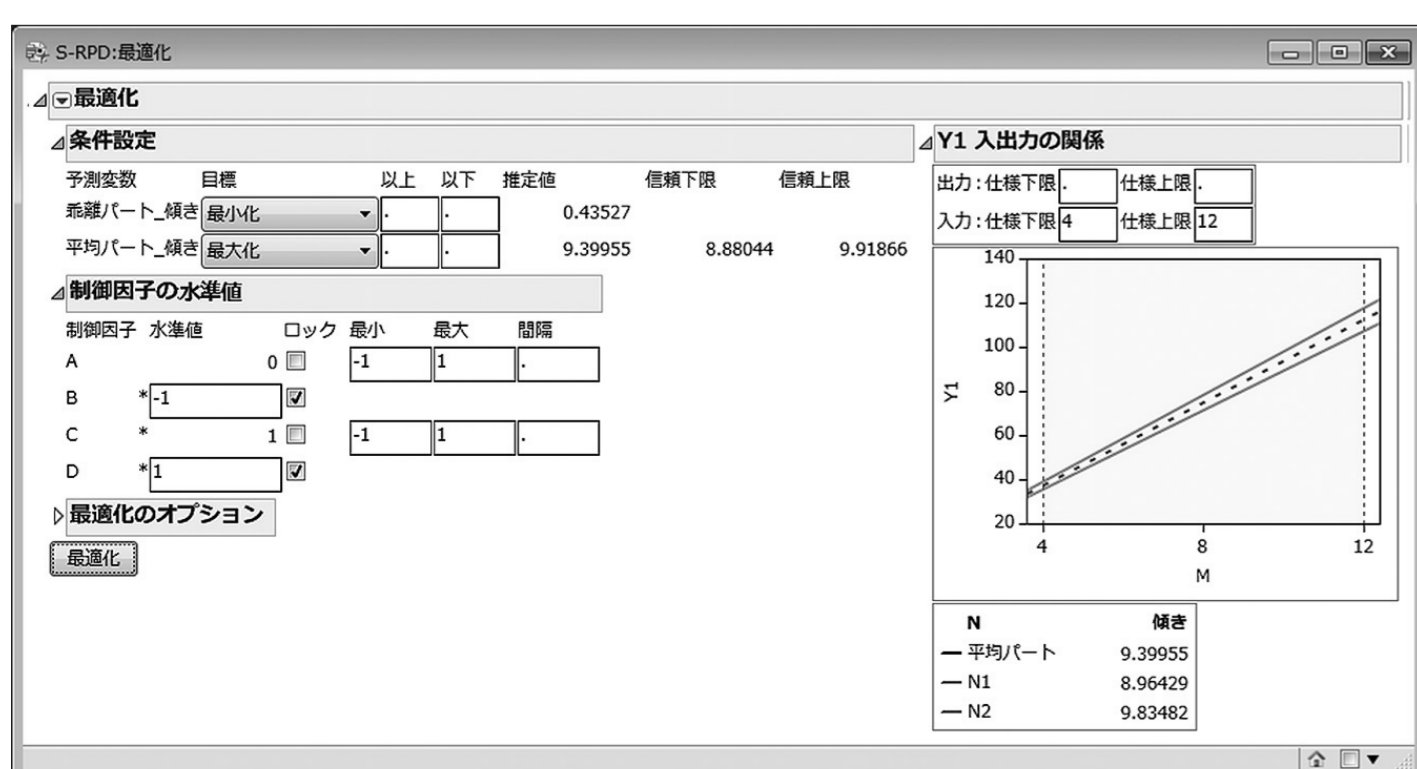
本書ではその目的を達するために通常のSN比解析に加え統計的モデリングアプローチを大きく2つに分けて紹介する(河村・高橋(2013))。

- (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) は直積実験データに対し誤差因子を単純繰り返しとみなし平均と分散を計算する。これ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を行う方法である。

(ii) 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方法である。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は誤差因子を考慮した特性の平均構造に着目する。すなわち誤差因子の水準に対応したダミー変数を用いて平均の水準間の差を乖離(効果)とみなし、それを減衰することを目的とする。

これらはSAS社JMPのアドインである統計ソフトウェア【S-RPD】に実装され、タグチメソッド(SN比解析)、L&Dモデル、応答関数モデリングによる統計解析・最適化がソフト上で可能となっている。図1は応答関数モデリングによる出力図である。



3. 数値実験統計学の研究

近年、技術開発で利用されているCAE (Computer Aided Engineering) により、実実験を行わなくても大規模シミュレーションによる実験が可能になってきている。これら数値実験計画(コンピュータ実験)から生成されたデータに基づく実験計画法は急速に発展してきている。

コンピュータ実験が伝統的な実験計画法と異なる点は、制御因子で規定された条件のもとではデータが全く同じになることである。すなわち、実実験と異なり繰り返し誤差が含まれていないことが大きな特徴である。

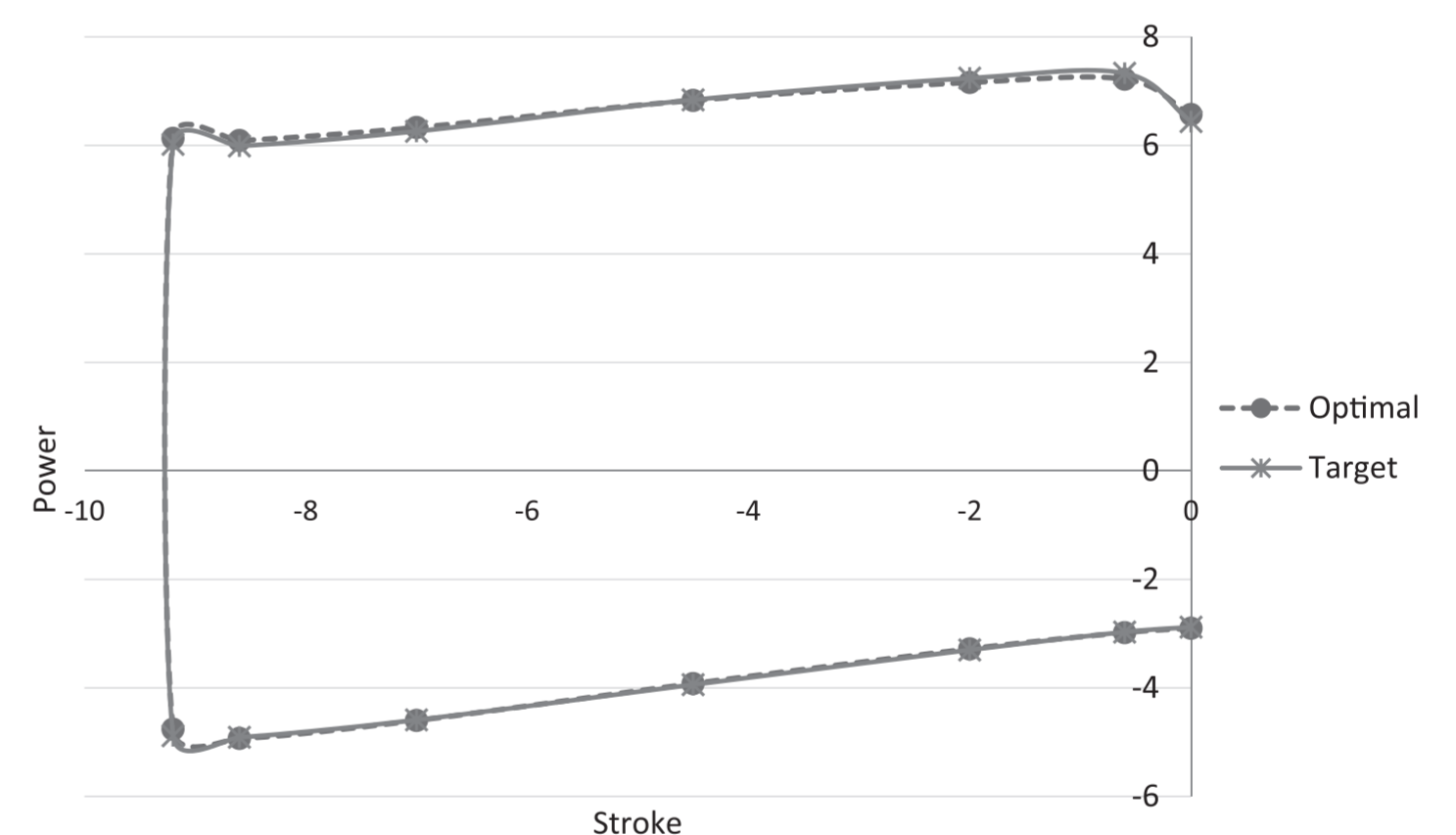
大規模コンピュータ実験に対する統計的方法は、従来の「統計学」の枠組みを越えたアプローチが必要となる。これまで比較的単純な線形システムのロバストパラメータ設計は研究が進めてきたが、複雑かつ非線形システムに対するそれはほとんどなされていない。特に数値実験統計学の分野は十数年以上、欧米の研究に比べ遅れているといっても過言ではない。

このような背景から従来の統計的実験計画およびSN比解析の枠組みを超えた統計的モデリング手法および最適化手法を開発し、「ものづくり」における設計品質向上に向けたロバストパラメータ設計の技術的方法論の体系化は喫緊の課題である。当面の研究課題は“ *The Design and Analysis of Computer Experiments* ”であり、主要テーマは

- Mean-Variance Modeling, Responce Modeling, Kriging Modeling
- Analysis of Computer Experiments with Functional Response

とする。特に実験計画段階における一様計画、Space-Filling 計画や非線形システムに対するKriging (Gauss過程) モデリングなどを適用した数値実験計画法やロバストパラメータ設計の統計的方法論の開発を行う予定である。

図2はKriging法による自動車のパドルシフト(非線形システム)に対する最適化後の結果である。



Georgia Institute of Technology (ジョージア工科大学) との共同研究:

現在、テクノメトリクス(主に統計的実験計画法)の研究拠点である米国ジョージア工科大学産業システム工学科のC. F. Jeff. Wu教授とR. V. Joseph教授らの研究グループと統計的方法論の共同開発を継続的に行っている。既にプロジェクトの開始し、産業界における実データ(パドルシフトおよび押ボタン事例)への応用も進めている。これらの研究と同時に最新手法を搭載した統計解析ソフトウェアを開発する予定である。

参考文献

- [1] Santner, T. J., Williams, B. J., and Notz, W. (2003): *The Design and Analysis of Computer Experiments*, New York: Springer.
- [2] Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2009): *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2nd ed.), New York: Wiley.
- [3] 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.
- [4] 河村敏彦(2011): 『ロバストパラメータ設計』, 日科技連出版社.
- [5] 河村敏彦, 高橋武則(2013): 『統計モデルによるロバストパラメータ設計』, 日科技連出版社.