

# モデルベース開発のためのCAE活用法

満 嶋 弘 二 ・ 永 溝 喜 也

## 1 はじめに

モデルベース開発 (MBD) は、組み込み系システムの開発において、モデルをベースにシミュレーション機能を活用することで、開発期間の短縮とソフトウェアの品質を向上させる開発手法である。最近では、適用対象を機械設計 (強度、振動、運動…) にも広げ、CAEを活用した机上開発という意味で使われることも多い<sup>1)</sup>。本解説では、後者の意味でMBDを捉え、机上開発を効率良く進める方法論を紹介する。製品開発の上流段階で問題を早期に潰しこむフロントローディング手法としてのCAE活用の歴史は古い。文献<sup>2)</sup>によれば、設計とは、「目標品質の商品を作り出すための新着想を得て新要素を作りこれを組み合わせる統合する」ことで完結させずに、「設計の根拠を理論化し多数の代替案と効率良い評価手法を用意し、活気と人間味あふれるDRで最適案を選択すること」と定義されている。

「設計根拠の理論化」の部分に関して、CAEソフトウェア技術の飛躍的な進歩により、使い勝手の良い物理モデリングツールが登場し、広く使われるようになった。「多数の代替案と効率の良い評価手法の用意」の部分では、優れたアイデアを早く選択するために評価の自動化と合理化が必要とされる。評価の自動化はアイデアを考える時間と回数を増やし、評価の合理化は設計者が失敗に事前に気づく心のゆとりを育む<sup>3)</sup>。

開発の上流段階でこれを実践することで、機械設計におけるMBDを効率良く進めることができる。以降では、その方法論の一つとして、パラメータ設計を用いたパラメトリックCAE活用法について、具体的な事例を交えて紹介する。

## 2 パラメータ設計

### 2.1 機能性評価について

初めに「設計根拠の理論化」という観点で、技術の働きについて考える。この働きは機能と言い換えることができ、例えば油圧ポンプの機能は、外部か

ら駆動力を入力し、高圧、高流量の油を吐出することである。機械製品の場合、一般に機能はエネルギー変換として表される。油圧ポンプは、駆動エネルギー (回転数×トルク) を油の流体エネルギー (吐出圧力×流量) に変換する装置である。

製品が出荷された後、市場では様々な条件下で使用される。出荷時には何の問題もなかった製品が、ユーザの使い方、温度や湿度等の環境、時間的な劣化等の様々な条件にさらされ、故障や不具合が引き起こされる。品質とは、市場の様々な条件下における、製品の機能の安定性と定義できる。

製品の品質を見極める信頼性試験には、通常多くの時間が必要である。これを短時間で行える手法として、機能性評価がある。機能性評価では、対象製品の機能を考え、これを市場での様々な使われ方を想定して意地悪条件の下で計測し、その安定性を評価する。この時、安定性を評価する指標として、SN比が用いられる。SN比とは、元々情報工学で用いられる信号 (Signal) と雑音 (Noise) の比のことであり、Signal/Noiseで定義される。信号とは、複数の意地悪条件を負荷した際の平均値、雑音は標準偏差 (ばらつき) を表す。これに常用対数を用いて、 $SN比 = 20 \log (平均値 / 標準偏差) [db]$

と表される。真数部は変動係数の逆数である。

機能性評価の例として、2種類の油圧ポンプAとBに対して、意地悪条件を低温、高温の2水準に設定し、効率試験を行った結果について、表1に示す。両ポンプの平均性能は同一であるが、SN比の大きいポンプAの方が、安定性に優れている。

表1 SN比の計算例

ポンプ	意地悪条件		平均	標準偏差	SN比 [db]
	低温	高温			
A	0.88	0.92	0.90	0.028	30.1
B	0.85	0.95	0.90	0.071	22.1

### 2.2 パラメータ設計とその手順

次に「多数の代替案と効率の良い評価手法」につ

いて考える。パラメータ設計とは、複数の設計パラメータの組み合わせを変更して機能性評価を実施し、安定性の優れた設計条件を求める手法である。表1の例では、2種類のポンプに対して、2水準の意地悪条件を設定したため、計4回の実験が必要となる。これに対して製品開発時には、検討すべき多くの設計パラメータが存在する。また、意地悪条件も、市場での使われ方を考慮して、なるべく多く取り上げることが推奨される。それらすべての組み合わせで実験をする場合、実験数が膨大となる。そこで、実験計画法の考え方を応用し、実験数を大幅に削減する手法として、パラメータ設計が産み出された。パラメータ設計では、直交表を使って実験回数を削減する。例として、L18直交表を図1に示す。

列番号	設計パラメータ							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	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	2	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	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

図1 L18(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>) 直交表

この直交表では、最大8種類の設計パラメータを、2水準1因子、3水準7因子で割り付け、18回の実験で分析できる。L18直交表の他にも、取り上げたい設計パラメータの数に応じて、L36、L54等様々な直交表を利用できる。

設計パラメータを直交表に割り付け、意地悪条件の下で実験を行い、表1の例と同様に、直交表の各実験番号におけるSN比を計算する。この結果を統計的に処理し、設計パラメータ毎の要因効果を計算し、図2のようにグラフ化する。平均値についても同様の処理をし、図3のようにグラフ化する。これら2つの図から、より安定性が高く(SN比大)、狙いの平均値を満たす設計パラメータの組み合わせを選択する(最適化)。

ここで、要因効果図から選択された最適値は、直交表による一部の組み合わせの実験結果から、数式的に推定されたものであることに注意されたい。そのため、実際の組み合わせを用いて再実験を行い、推定精度の確認を行う。これを確認実験と呼ぶ。推定結果

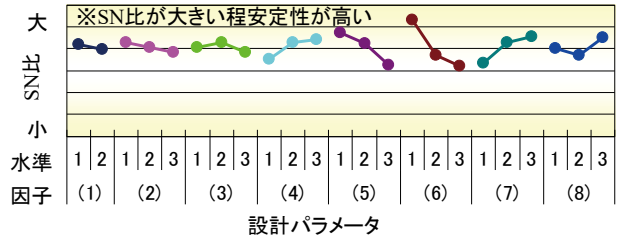


図2 SN比の要因効果図

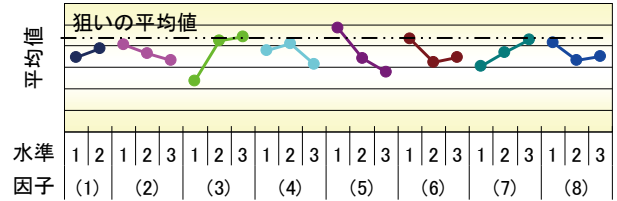


図3 平均値の要因効果図

と確認結果に差がなければ、正しい実験が行えたと判断する。逆に両者に差が生じた場合、機能の安定性を評価するプロセスに問題があると判断する。推定精度を悪化させる原因の多くは、設定した設計パラメータ間に、出力値に対する交互作用が存在する場合である。交互作用が含まれると、特定の組み合わせに出力の大小が影響され、調整が難しくなる。良い設計とは、設計思想を反映した個々の設計パラメータが、出力値に独立して作用するという考えに基づいている。

表2に、パラメータ設計の適用手順を示す。統計処理の計算方法等、より詳しい説明に関しては、参考文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

表2 パラメータ設計の8ステップ

- (1)テーマ選択・目的とプロジェクト範囲の明確化
- (2)機能の定義と計測モデル作成
- (3)意地悪条件の戦略を決める
- (4)設計パラメータを設定し、直交表に割り付ける
- (5)実機実験またはCAE計算し、データを収集する
- (6)SN比を使って、データ解析する
- (7)最適化、推定、確認実験をする
- (8)アクションプランを立てる(文書化する)

### 3 適用事例

建設機械の油圧システムに用いられる電磁比例減圧弁には、比例ソレノイドが用いられている。市場ニーズである安価で性能の良い製品を開発するため、設計工数低減と開発手戻り防止が必要とされていた。そこで、比例ソレノイドの吸引力特性の安定化設計に、パラメータ設計とパラメトリックCAEを活用した事例を紹介する。

(1)テーマ選択・目的とプロジェクト範囲の明確化

比例ソレノイドに求められる特性として、

- ①ストローク-吸引力特性が平坦であること
- ②電流-吸引力特性が比例関係にあること

③これら特性が市場で安定して発揮されることが挙げられる。これらを同時に満足させる設計条件を求める。

(2)機能の定義と計測モデル作成

(3)意地悪条件の戦略を決める

比例ソレノイドの機能を、電流に比例した吸引力が発生する装置と定義した(図4)。

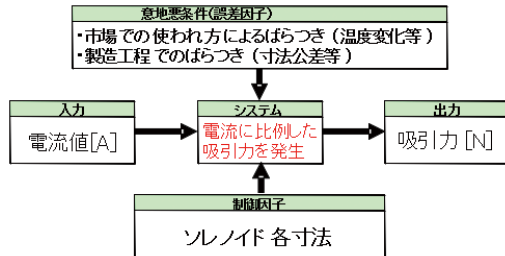
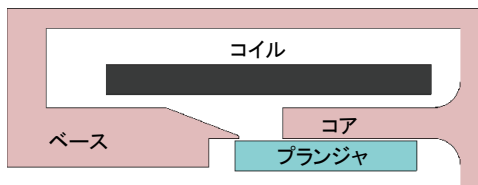


図4 システムチャート

実験には図5に示すCAEモデルにて計算を行う。このモデルは、形状寸法(44種類)をパラメトリックに変更した計算が可能であり<sup>5)</sup>、技術的な検討の結果、21種類を設計パラメータとして採用した。意地悪条件の設定において、CAEモデルでは、市場での使い方として製品の劣化や摩耗等を考慮することが難しく、設計パラメータの公差に倍率をかけて設定した<sup>6)</sup>。安定化の概念を図6に示す。



※44種類の形状寸法を変更した計算が可能

図5 CAE磁場解析モデル

(4)設計パラメータを設定し、直交表に割り付ける

(5)実機実験またはCAE計算し、データを収集する

設計パラメータが21種類であることから、最大26因子を割付可能な、L54直交表を用いた。意地悪条件21種類も同様にL54直交表に割り付けた。計算では、設計パラメータの直交表と意地悪条件の直交表のすべての組み合わせで実施する必要があり、総計算数として、 $54 \times 54 = 2,916$ ケースを計算した。

(6)SN比を使って、データ解析する

(7)最適化、推定、確認実験をする

計算結果を統計処理し、SN比、吸引力の大きさ、吸引力のストロークに対する安定性の3項目に対して、要因効果図を作成する(図7)。横軸の設計パラメータの各水準値を、

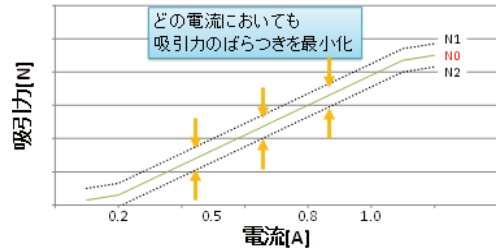
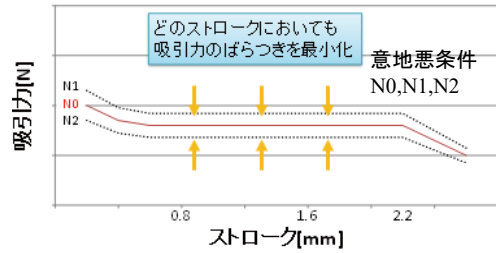


図6 安定化させるべき特性

①吸引力のばらつきが小(SN比が大)

②吸引力の大きさが大

③吸引力のストローク安定性が良

となるように選択し、最適化を実施する。最適条件のSN比の推定値は、49.9[db]であった。比較のために設定した基準条件(初期の設計条件を設定することが多い)の推定値は44.7[db]であり、両者の差は5.2[db]である。SN比は対数で定義され、その差は真数の比を表している。5.2[db]とは、ばらつきを表す変動係数で約40%減に相当する。次に最適条件と基準条件に対して、実際の組み合わせを用いて確認実験(計算)を実施した。結果を表3に示す。

表3 確認実験の結果

SN比 [db]		
条件	推定値	確認結果
最適条件	49.9	48.4
基準条件	44.7	45.0
差	5.2	3.4

SN比の推定値と確認結果は概ね一致している。確認結果の最適条件と基準条件の差は3.4[db]であり、性能ばらつきで約30[%]の低減に相当する。各印加電流におけるばらつき低減効果を図8に示す。推定値と確認結果で生じた差に関しては、設計パラメータの取り方に改善の余地があることを示唆しており、今後の課題とする。

(8)アクションプランを立てる(文書化する)

①市場を想定した意地悪条件の下で、性能ばらつきを約30[%]低減する形状を考案できた。

②固有ノウハウのため紹介できないが、要因効果図の技術的な分析から、性能ばらつきを低減するための磁路設計方法を確立できた。



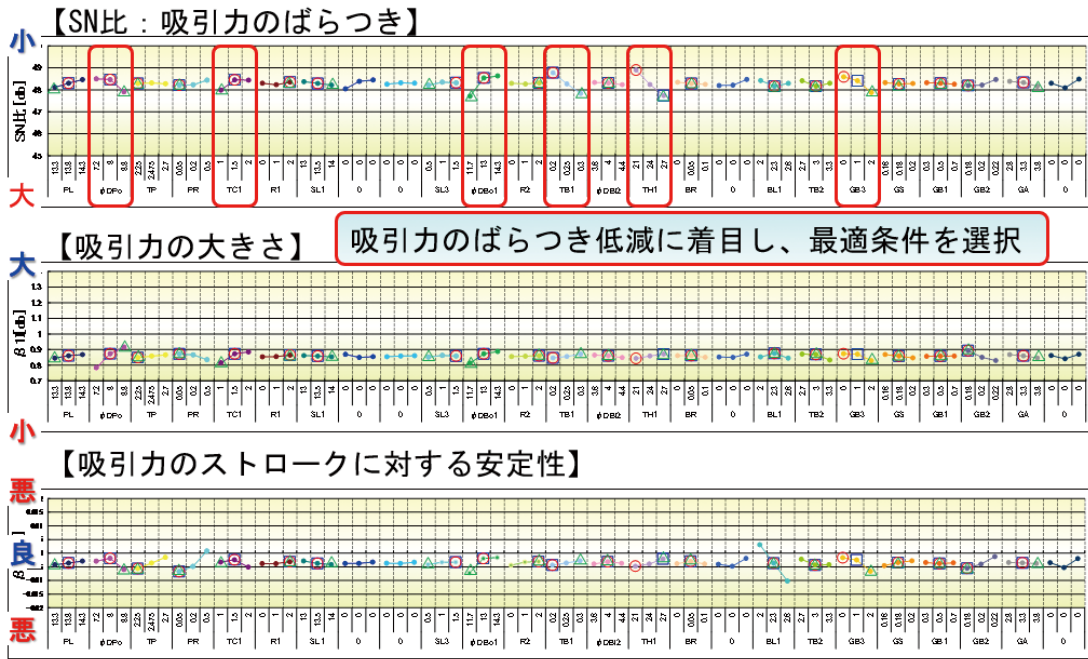


図7 要因効果図

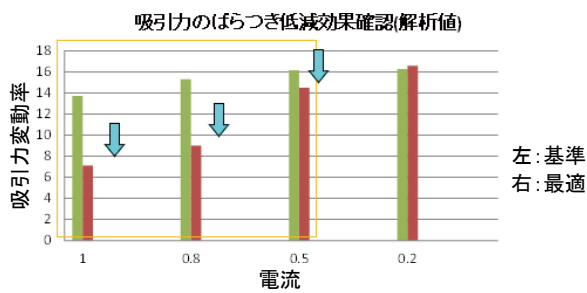


図8 印加電流別のばらつき低減効果

本結果を設計マニュアル化して、日常的な設計業務において活用する。

#### 4 おわりに

パラメータ設計を用いたパラメトリックCAE活用が、MBDの効率化に有効な点として以下が挙げられる。

- ①製品の機能に着目して安定化することで、問題が発生する前の開発上流段階で検討を行える。
- ②多数の設計パラメータを変化させて、抜け漏れ

のない検討が実施できる。

- ③手法が手順化されており、共通の方法で結果を確認できる等、開発プロセスに組み込み易い。
- これに加えて、本手法は、技術の本質を追求し、技術者の想像力を引き出す方法論の一つとして、モノづくり企業の次世代を担う若手、中堅の技術者の育成にも活用できると考えている。

#### 参考文献

- 1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，マツダ技報 No. 31, pp.44-47 (2013)
- 2) 岸本行雄：設計の方法 創造的設計へのアプローチ，日科技連 (1988)
- 3) 馬場：解析主導型設計のCAE推進，KYB技報 第39号 (2009)
- 4) 田口伸：技術情報を想像するためのデータ解析法 タグチメソッド入門，日本規格協会 (2016)
- 5) 満嶋：CAEと品質工学，KYB技報 第41号 (2010)
- 6) 沢田龍作：複雑系のロバスト設計—品質工学とMBD—，品質工学会誌 Vol. 27 No. 6 (2019)

#### 著者



満嶋 弘二

1987年入社。技術本部DX推進部部長。CAE解析業務，社内展開業務を経て，DX推進業務に従事。



永溝 喜也

2012年入社。技術本部CAE推進部。主にCAE解析業務に従事。