

比例ソレノイドに対する 磁場解析を活用した吸引力特性の最適設計

Optimal Design of Magnetic Attractive Force Characteristics by Utilizing Magnetic Field Analysis for the Proportional Solenoid

弘 中 剛 史 ・ 島 田 美 穂 ・ 亀 田 幸 則
Tsu Yoshi HIRONAKA ・ Miho SHIMADA ・ Yukinori KAMEDA

要 旨

比例ソレノイドは多くの産業用機器に用いられているが、例えば油圧用ソレノイドバルブとして用いられる場合、比例ソレノイドの吸引力特性のばらつき（以下、特性ばらつき）が流量や圧力特性のばらつきとなり、その結果、省エネ化などへの阻害要因となり得る。この特性ばらつきは、製造工程での加工・組立誤差や市場での使われ方（以降、誤差因子）から発生し、最悪の場合は市場クレームなどに発展する可能性もある。近年では、前述したような省エネ化を目的に比例ソレノイドを組み込んだシステムは多くの市場で使用されているため、このような特性ばらつきを未然に防止することの重要性は、ますます高まっている。

そのため本報では、特性ばらつきの要因となる誤差因子を考慮して、様々な状況下においても安定した機能（ロバスト性）を発揮できる比例ソレノイドの最適設計技術の構築を目的とした。

最適設計には磁場解析に品質工学を活用し、比例ソレノイドの設計パラメータと誤差因子による特性ばらつきとの関係を把握することで、シミュレーションにより誤差因子に対してのロバスト化を行った。更に、実機による効果確認として各種信頼性試験を実施し、ロバスト性の向上を確認した。

Abstract

The proportional solenoid is used in many types of industrial equipment. However, when it is used as a hydraulic solenoid valve, for example, variation in the attractive force characteristics of the solenoid (referred to below as “characteristic variation”) leads to variation in flow rate and pressure characteristics, and this hinders energy-saving performance. Characteristic variation occurs due to machining/assembly tolerances in the manufacturing process and usage in the market (referred to below as “problem factors”), and in the worst case may result in a market claim. In recent years systems incorporating proportional solenoids have come into use in many markets for the purpose of saving energy, as noted above, and thus it has become increasingly important to prevent this sort of characteristic variation before it happens.

Therefore, this study was carried out to develop optimal design technology for proportional solenoids, so they can exhibit stable function (robustness) under various usage conditions. This was done by considering the problem factors which cause characteristic variation.

For optimal design, the relationship between proportional solenoid design parameters and characteristic variation due to problem factors was ascertained by applying quality engineering to magnetic field analysis. Simulations were then used to improve robustness against the problem factors. Furthermore, the improvement in robustness was confirmed by carrying out various reliability tests in order to check effectiveness using actual equipment.

1 緒言

比例ソレノイドは、電磁力を利用して電気エネルギーを機械的運動に変換するアクチュエータの1つである。同じアクチュエータである電動モータが回転運動であるのに対して比例ソレノイドは直線運動となり、電動モータに比べ小型で応答速度が速いなどの特長が挙げられる。また、各種油圧バルブなどと組み合わせて使用した場合、流量や圧力の細やかな制御により無駄なエネルギーを低減でき省エネ化が可能のため、現在では多くの油圧機器に使用されている。このような観点から近年では、多くの分野においても比例ソレノイドが用いられている。

ここで油圧用ソレノイドバルブとして用いられる場合、比例ソレノイドの特性ばらつきは流量や圧力特性のばらつきとなり、その結果、省エネ化などへの阻害要因となり得る。この特性ばらつきは、製造工程での加工・組立誤差や市場での使われ方などにより発生する。そのため、この特性ばらつきを開発段階で未然に防止でき、様々な状況下でも安定した機能を発揮できる最適（ロバスト）設計が求められる。これに対してKYBではこれまで、比例ソレノイドの開発では磁気特性の高効率化やコストを重視しており、誤差因子による特性ばらつきに対する最適化の検討は十分には行われていない。

そこで本報では、誤差因子による特性ばらつきを抑え、製品本来の機能を最大限発揮する設計技術の構築を目的とした。

今回、最適設計には磁場解析に品質工学を活用し、比例ソレノイドの設計パラメータと誤差因子による特性ばらつきとの関係を把握することで、シミュレーションによるロバスト化を行った。更に、実機による効果確認として各種信頼性試験を実施し、ロバスト性の向上を確認した。

2 ソレノイド設計への品質工学の適用

2.1 油圧用ソレノイドバルブの構造・原理

一例として図1に油圧用ソレノイドバルブの構造を示す。油圧用ソレノイドバルブは、左側のバルブ部と右側のソレノイド部で構成される。作動原理としては、比例ソレノイド部のコイルが非通電時の場合、スプールはスプリングにより右側に押し付けられて開口部の開度が最大となる。一方、通電時の場合、コイル周りに磁界が生じ、プランジャにベースへ吸着する力が発生する（以下、吸引力）。この吸引力により、プランジャの吸着面間距離（以下、ストローク）を調整することでスプール開度がこれに

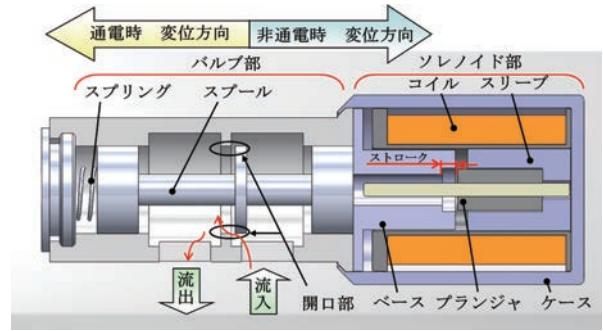


図1 ソレノイドバルブ構造図

追従し、流量制御や圧力制御を行うことができる。

2.2 課題の確認

比例ソレノイドには、図2、3に示すストロークと吸引力との関係（以下、S-F特性）や通電電流と吸引力との関係（以下、I-F特性）といった基本特性がある。図2に示すコントロールゾーンとは、油圧用ソレノイドバルブとして使用する場合のストローク範囲を指し、フラットな特性が求められる。また、ソレノイドバルブの使われ方を考えた場合、入力電流に対して流量などが比例的に制御できることが望まれるため、図3に示すように吸引力に関しても電流に比例的である必要がある。このように比例ソレノイドの設計要求をまとめると、以下の2点になる。

- ①コントロールゾーン内での吸引力のフラット性確保と向上
- ②入力電流に対する吸引力の比例特性

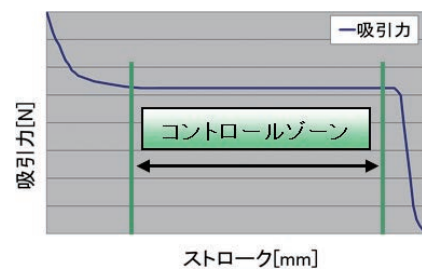


図2 S-F特性（例）

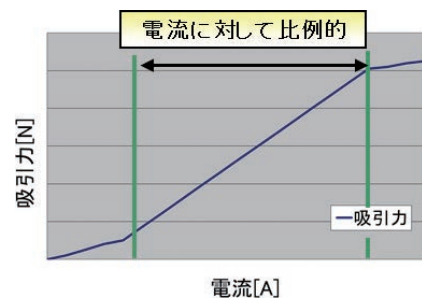


図3 I-F特性（例）

上記2点に関しては、従来の技術においても磁性部の形状や材料選択の適正化を行うことで任意に設計が可能である。しかし、誤差因子による特性ばらつきに対してロバスト性が求められる場合は、現状では設計パラメータと特性ばらつきとの関係が十分に明確にできていないという課題がある。

そこで品質工学を適用することでこれらの関係を明確にし、吸引力のばらつきを抑えた比例ソレノイドの最適設計を行った。

2.3 機能の定義

品質工学では、対象とするシステムにおける課題を解決するために、始めに入力と出力の関係といった機能を定義する必要がある。比例ソレノイドの機能を考えた場合、入力とは比例ソレノイドに通電する電流値、出力は吸引力となる。このことから、比例ソレノイドの基本機能を「制御電流に応じた吸引力を発生すること」と定義した。また品質工学では、市場での使い方や製造工程などから出力の誤差を生み出す要因である誤差因子を考える必要がある。誤差因子は、設計者側でこの値を設定することや固定することができないパラメータである。これに対して、誤差因子と同様に出力に影響する因子である制御因子も考える必要がある。制御因子は、誤差因子の影響下でも安定して高い機能を持つように、設計者が自由に設定できる設計パラメータである。以上のことをまとめると、図4に示すエンジニアードシステムと呼ばれる関係が成立する。

今回は、図4に示すように制御因子には磁気特性に大きな影響を与え、設計者が自由に設定可能な比例ソレノイドの磁路形状を選んだ。また誤差因子には、市場での使い方や製造工程を考えた場合に温度変化や劣化、寸法公差や組立誤差などから特性がばらつく想定してこれらを設定した。

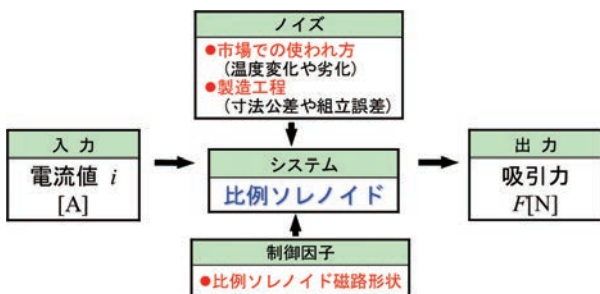


図4 エンジニアードシステム

3 パラメータ設計

3.1 理想機能

品質工学では、製品の理想とする入出力関係を理

想機能として、誤差因子による特性ばらつきを最小化し、これに近づくことを狙いとするパラメータ設計と呼ばれる手法を用いるが、本報でもこれを適用した。

なお、2.2節で述べた比例ソレノイドのI-F特性は磁性材料の磁気特性が非線形であることから、入出力の関係も非線形となってしまふ。そのため、本報ではこのような非線形の特性に対応可能な動特性の分析手法である標準SN比¹⁾²⁾を用いた。標準SN比では、製品の標準的な使い方を表す標準条件を考える必要がある。しかし、本報で対象としている比例ソレノイドの標準条件は明確になっていない。そのため今回は、誤差因子による特性ばらつきの平均値(N0)を標準条件とし、誤差因子による特性ばらつき(Ni)を標準条件に近づけることで、以下となるように試みた。

- ①各ストローク(S)による吸引力(F)のばらつき最小化(図5)
- ②各電流値(I)による吸引力(F)のばらつき最小化(図6)

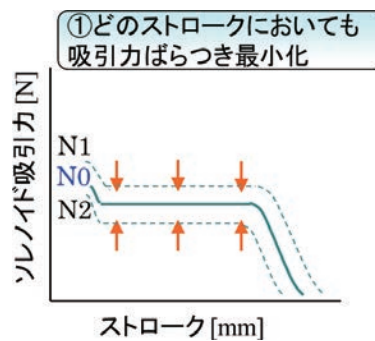


図5 理想的なS-F特性

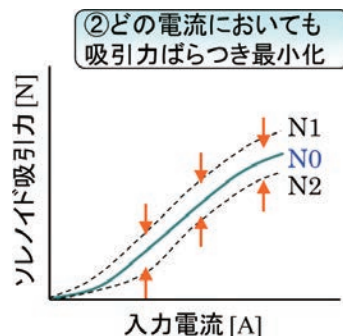


図6 理想的なI-F特性

3.2 制御因子および誤差因子

過去の比例ソレノイド設計の知見に加えて事前の解析的な検討から、磁気特性に影響を及ぼすと予想される全ての磁路形状を調査し、最終的に表1に示すような21個の制御因子と3つの水準を決定した。

また誤差因子に関しては、例えば組立誤差では磁路の位置関係が変化し、温度変化では膨張・収縮によって磁路の形状が変化することで最終的に磁気特性がばらつくと考えられる。そこで、表2に示すように、選定した制御因子つまり磁路形状のばらつきを誤差因子として模擬できると考え採り上げた。なお、最適設計のベンチマークとなる現行条件は、対象としている比例ソレノイドの現状の設計値とした。

また、2.2節で述べたように比例ソレノイド設計への要求事項の1つとして、コントロールゾーンのフラット性が求められる。ただし、過去の設計の知見より、特性ばらつきに対しては制御因子のばらつきに比べてストロークのばらつきが大きく影響することが分かっている。そのため両方を誤差因子としてしまうと、ストロークのばらつきに対する対策しきれなくなってしまう。そこで本報では、これらを2つに分離するため、ストロークは誤差因子の一種である標示因子¹⁾²⁾として扱った。

表1 制御因子

制御因子	水準1	水準2	水準3
プランジャA	小	現行	大
プランジャB	小	現行	大
プランジャC	小	現行	大
プランジャD	小	現行	大
ケースA	小	現行	大
ケースB	現行	中	大
スリーブA	小	現行	大
スリーブB	小	現行	大
スリーブC	小	現行	大
スリーブD	小	現行	大
スリーブE	小	現行	大
ベースA	小	現行	大
ベースB	小	現行	大
ベースC	小	現行	大
ベースD	小	現行	大
ベースE	小	現行	大
ベースF	現行	中	大
ベースG	小	現行	大
ベースH	小	現行	大
ベースI	小	現行	大
ベースJ	現行	中	大

表2 誤差因子

誤差因子	水準1	水準2	水準3
プランジャA	小	現行	大
プランジャB	小	現行	大
プランジャC	小	現行	大
プランジャD	小	現行	大
ケースA	小	現行	大
ケースB	小	現行	大
スリーブA	小	現行	大
スリーブB	小	現行	大
スリーブC	小	現行	大
スリーブD	小	現行	大
スリーブE	小	現行	大
ベースA	小	現行	大
ベースB	小	現行	大
ベースC	小	現行	大
ベースD	小	現行	大
ベースE	小	現行	大
ベースF	小	現行	大
ベースG	小	現行	大
ベースH	小	現行	大
ベースI	小	現行	大
ベースJ	小	現行	大

3.3 直交表への割付

3.2節で選定した制御因子および誤差因子と信号因子である入力電流と標示因子であるプランジャのストロークを、表3に示すように直交表へ割付けた。

今回はL54直交表¹⁾²⁾を使用し、信号因子である入力電流は5水準 (I_1 【電流小】～ I_5 【電流大】)、ストロークはコントロールゾーン内の4水準 (St_1 【ストローク小】～ St_4 【ストローク大】)とした。

表3 直交表

標示因子 (St_1 【ストローク小】～ St_4 【ストローク大】)ストローク										信号因子 (I_1 【電流小】～ I_5 【電流大】)電流							
信号因子	I	St_1				St_2				St_3				St_4			
標示因子	St	N_1		N_2		N_3		N_4		N_5		N_6		N_7		N_8	
誤差因子	N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	N_{12}	N_{13}	N_{14}	N_{15}	N_{16}
1	1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2	2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...
53	53	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
54	54	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

このことから54(制御因子)×54(誤差因子)×4(標示因子)×5(信号因子)と、総実験として58,320ケースをシミュレーションにて行った。

3.4 解析モデル

特性値である比例ソレノイドの吸引力を解析的に求めるために汎用の磁場解析ソフトを用いた。また、モデル形状の作成から解析条件の設定、解析実行の一連の作業を繰り返し自動で実行するツールを構築しシミュレーションを行った。

ただし、今回は因子数が多くなることで、2つ以上の因子が互いに影響を及ぼす交互作用の発生が懸念された。そこで過去のソレノイド設計の知見から、全ての因子において一定の水準幅を確保しつつ、磁気特性に大きく影響する因子は水準幅を調整し、交互作用の影響を受けにくくした。

また、シミュレーションケースが多いことに関しては、膨大な計算時間を費やしてしまうことが懸念される。そこで、図7に示すように2次元モデルを使用するとともに、例えば磁気特性の影響が少ないコイル部ではメッシュを粗くし、磁気特性の影響が大きいプランジャ部ではメッシュを密にするなどしてメッシュサイズを最適化したモデルを作成することで計算時間短縮を図った。本解析モデルを使用することにより、解析時間を従来に比べ、1/20以下(1ケース当たり：120秒⇒5秒)に短縮することができた。

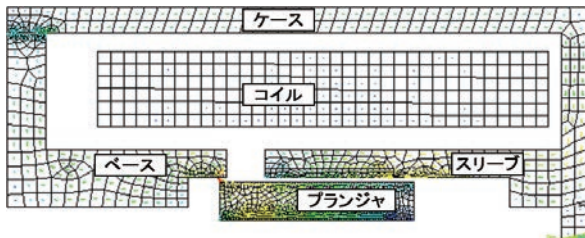


図7 解析用モデル

3.5 要因分析と再現性の確認

3.4節で述べたシミュレーションより得られた吸引力について、誤差因子に対する制御因子の寄与度を評価した結果を、図8～10に要因効果図として示す。要因効果図では横軸に各因子とその水準をとり、縦軸に基本機能の良さ、悪さの加減を表す指標であるSN比や $\beta 1$ 、 $\beta 2$ ⁽¹⁾⁽²⁾を図示する。

ここでSN比は誤差因子に対する吸引力のばらつきの度合を表し、SN比が高いほどばらつきが小さいという意味になる。また、 $\beta 1$ は1に近づくほど目標とする入出力関係(目標曲線)の感度に近づき、例えばI-F特性の傾きがこれと一致する。これに対して、 $\beta 2$ は0に近づくほど目標曲線への適合度(微

小な変動に対する一致性)が良くなることを表す。

要因効果図では、各因子で2水準目を中心に傾向が大きく山または谷形状になっている場合、一般的に交互作用が生じている可能性があり、分析の精度が低いとされている。それに対して今回の結果からは、このような現象は確認されないことから、交互作用はないと判断できる。全体として結果をまとめると、以下になる。

- ①吸引力のばらつき(SN比)に大きく影響する因子はケースA、ベースGである。
- ②プランジャA、プランジャD、ベースB、ベースCについても僅かであるが、吸引力のばらつき(SN比)に影響する。
- ③吸引力の大きさ($\beta 1$)に影響する因子は、プランジャB、プランジャD、ケースB、スリーブE、ベースGである。
- ④目標曲線への適合度($\beta 2$)に影響する因子は、プランジャB、プランジャC、ケースA、ベースGである。
- ⑤プランジャA、プランジャDは、適合度($\beta 2$)を悪化させずに吸引力を大きくでき、かつばらつきを小さくすることが可能な因子である。

上記の結果を踏まえて、吸引力を低下させずにばらつきを抑えることを重視し、SN比が大きく $\beta 1$ が低下しない条件(以下、最適条件①)を選定した。

次に、実施した要因分析の精度を確かめるために再現性の確認を行った。再現性の確認は、まず要因分析結果より現行条件に対する最適条件のばらつき低減効果である利得を推定し、これと実際にその組み合わせで解析した確認実験から求めた値との差(以下、利得差)により評価する。なお、シミュレーションの場合、一般的には利得差が1[db]以下であれば再現性が良いとされている。

表4に示す再現性の確認結果より、推定値の利得2.0[db]に対して確認実験では1.06[db]と、利得差は0.94[db]となり良好な再現性が得られた。また、表には記載していないが $\beta 1$ 、 $\beta 2$ に関しても良好な再現性が得られた。

そして更なるばらつき低減を狙い、図8の要因効果図を基にSN比が高くなる方向に、各制御因子が干渉しない程度まで水準を調整し、新たに最適条件②を決定した。

その結果、表4に示すように確認実験において2.17[db]までの利得の向上が得られた。

また、利得の向上が実際の吸引力ばらつき低減にどの程度効果があるかを確認するため、SN比の計算式である式(1)を単位吸引力当たりのばらつき(以下、吸引力変動率=誤差因子による吸引力のばらつ

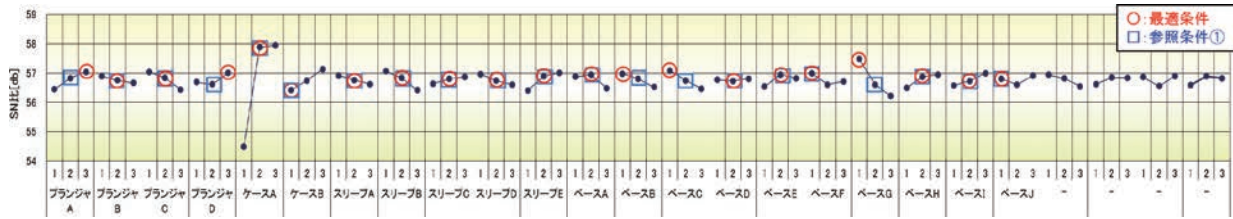


図8 SN比の要因効果図

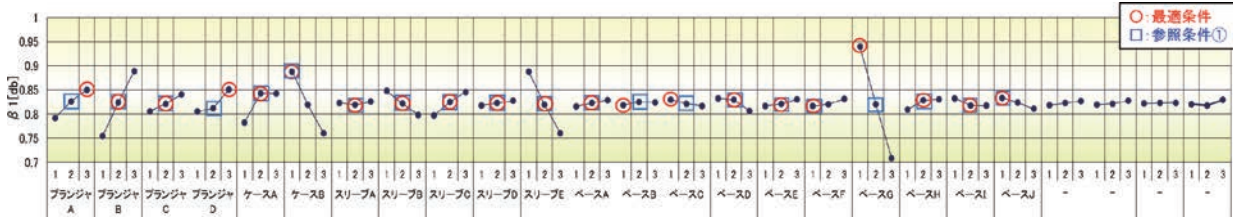


図9 beta 1の要因効果図

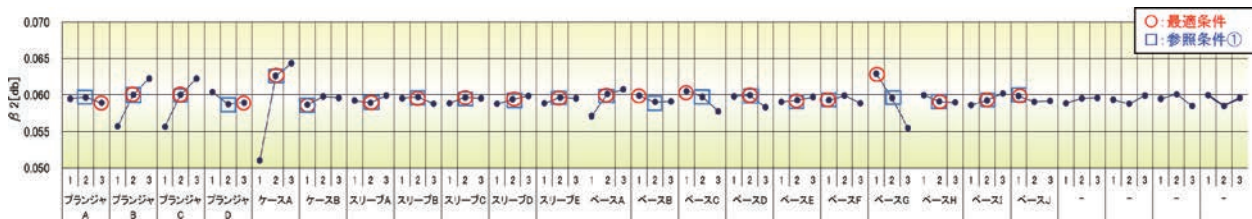


図10 beta 2の要因効果図

き/誤差因子による吸引力の平均値)を表す式(2)に変形し、表4のSN比の値を用いて吸引力ばらつきの低減率を式(3)より算出した。その結果、現行条件に比べ最適条件②では、吸引力ばらつきが約28%低減していることが確認できた。

$$\eta = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{\sigma} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma}{m} = \frac{1}{10^{\frac{\eta}{20}}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{re} &= \left(\frac{\frac{\sigma_2}{m_2}}{\frac{\sigma_1}{m_1}} - 1 \right) \times 100 = \left(\frac{10^{\frac{\eta_1}{20}}}{10^{\frac{\eta_2}{20}}} - 1 \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{10^{\frac{59.55}{20}}}{10^{\frac{57.38}{20}}} - 1 \right) \times 100 = 28(\%) \end{aligned} \quad (3)$$

- η : SN比, m : 吸引力平均値, σ : 吸引力ばらつき
- σ_{re} : 吸引力ばらつき低減率
- σ_1 : 吸引力ばらつき (現行条件)
- σ_2 : 吸引力ばらつき (最適条件)
- η_1 : SN比 (現行条件), η_2 : SN比 (最適条件)

また、図11に示すように各電流値 (I_1 [電流小] ~ I_5 [電流大]) での吸引力変動率を比較した結果、現行条件に対して最適条件の吸引力変動率が低減できていることも確認できた。

表4 再現性の確認

		推定値	確認実験
SN比 [db]	最適条件①	60.2	58.4
	現行条件	58.2	57.4
	差 (利得)	2.0	1.1
	差 (再現性)	0.9	
	最適条件②		59.6
	差 (利得)		2.2

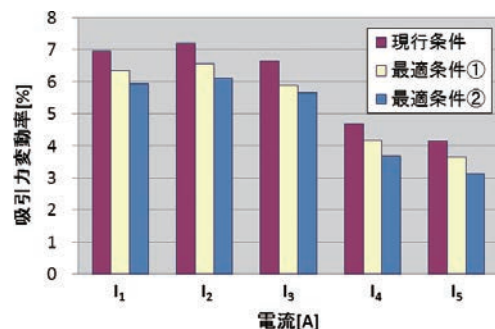


図11 ばらつき低減効果比較 (シミュレーション)

4 実機によるロバスト性評価

4.1 誤差因子と割付け方法

3章ではシミュレーションを活用したパラメータ

設計について述べたが、実機においても同様の効果が得られるか、実機ロバスト性評価を行った。

実機によるロバスト性評価として、先ずシミュレーションで決定した最適条件②と現行条件について、それぞれn=12個の試作を行った。この試作では、n=12個の寸法公差のばらつきや組立誤差から磁路形状が若干でもばらつくことで、誤差因子に挙げた製造ばらつきを評価できると考えた。

しかし、厳密に製造ばらつきを評価するためには大量の試作品が必要であり、現実的には困難である。そこで今回、高温作動試験や低温作動試験を実施し、試作品に常時大きな温度変化を加え、部品を膨張・収縮させた状態で特性を測定することで、寸法値のばらつきと同様の影響が発生すると考えた。また、市場での使われ方に関しては、実際に温度変化や振動を加えることで再現することとした。

以上のことより、実際の条件を再現可能な評価を行うことを目的に、n=12個の試作品に対して表5に示すような、ヒートショック試験などを含む6種類の信頼性試験を、それぞれn=2個にて実施した。

表5 組み合わせ表

		ノイズ(市場での使われ方)		
		信頼性試験		
		N ₁ ' (試験前)	N ₂ ' (試験中・後)	
寸法/組立ばらつき ノイズ製造ばらつき	N ₁	高温放置試験
	N ₂	...	...
	N ₃	高温作動試験
	N ₄	...	...
	N ₅	低温放置試験
	N ₆	...	...
	N ₇	低温作動試験
	N ₈	...	...
	N ₉	振動試験
	N ₁₀	...	...
	N ₁₁	ヒートショック試験
	N ₁₂	...	...

4.2 実機によるロバスト性評価結果

実機ロバスト性評価には、信頼性試験前後の吸引力を特性値として、シミュレーションと同様に標準SN比による分析を行った。分析結果を表6、電流違いによる吸引力変動率を図12に示す。

表6より最適条件②の利得は2.3 [db] となり、シミュレーションと同様、実機においても利得の向上が確認できた。また図12より、現行条件に比べて最適条件②では、全ての電流値において吸引力変動率が低減できていることが確認できる。

このロバスト性評価の結果より、温度変化や劣化

に対してもロバスト性が向上していることが確認でき、本最適設計手法の妥当性を得ることができた。

表6 利得の再現性

SN比 [db]	
	実測値
最適条件	60.8
現行条件	58.5
利得	2.3

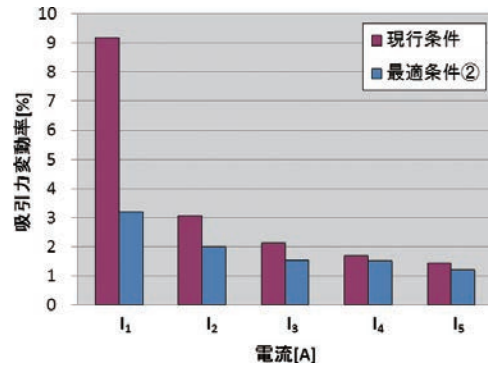


図12 ばらつき低減効果比較 (実測値)

なお、図12に示す現行と最適条件との比較より、小電流のI₁のみ吸引力変動率の低減に大きな差がみられた。これには、摩擦力といった要因が考えられる。今回、シミュレーションに関しては摩擦の影響を考慮していないが、実機においては摩擦力が発生する。摩擦に関しては、仮にこれを一定とした場合、磁力の小さい小電流時では吸引力に対する寄与度が高くなるため吸引力変動率が大きくなる。これについて今回の評価では、現行条件に対して最適条件での摩擦力が何らかの要因により低減したことで、特に小電流時に顕著な差となって表れたと考えられる。

5 結言

市場での使われ方や製造工程などから発生し得る特性ばらつきを、開発段階で未然に防止することが可能な比例ソレノイドの設計技術の構築を目的として、シミュレーションを活用した最適設計を行い、実機評価を実施した結果、以下の結論を得た。

- ①品質工学を活用することにより、比例ソレノイドの設計パラメータと誤差因子による特性ばらつきとの関係を明確にした。
- ②シミュレーションにより最適設計を行い、更にその実機評価により、各種信頼性試験に対するロバスト最適化の効果を確認した。
- ③以上のことから、本最適設計手法の妥当性および有効性を示すことができた。

現在、他の形状の比例ソレノイドに対しても本手法を適用し、設計パラメータと特性ばらつきとの関係を明確にすることで、大きなばらつき低減の効果も得ている。

また本報では、比例ソレノイドの最適設計について述べたが、冒頭に記したように一般的な産業用機器ではソレノイドバルブとして広く使用されるため、今後はバルブ側の最適設計にも取り組みたい。

参 考 文 献

- 1) 立林和夫：入門タグチメソッド，(株)日科技連出版社，2013.
- 2) 品質工学フォーラム埼玉ワーキンググループ：早わかりタグチメソッド用語集，(株)日科技連出版社，2009.

著 者



弘中 剛史

2009年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。ソレノイドバルブの研究・開発に従事。



島田 美穂

1989年入社。技術本部CAE推進部相模分室室長。CAE推進業務に従事。



亀田 幸則

2005年入社。技術本部基盤技術研究所電機電子研究室。電動モータの研究・開発に従事。