

油圧バルブ用ソレノイドの吸引力の改善

Improvement of the pulling force of solenoid

キーワード

品質工学, 二段階設計, ソレノイド, 吸引力, 標示因子, 再現性, 誤差因子

部品事業部技術二部

奥出 敏史

■ 適用

ソレノイドは電源の ON/OFF によって簡単に制御できるアクチュエータとして、各種の産業機器に広く用いられている。

当社においても油圧バルブ用として各種のソレノイドを使用しており、用途に応じて設計、製作している。設計に際してはサイズ、消費電力などの制約条件の中で最適な設計をいかに速く実現するかが重要である。本報では、品質工学を適用し、ソレノイドの性能向上と開発期間短縮を行った事例について述べる。

■ Abstract

Solenoids are used in many fields of industrial systems.

In NACHI-FUJIKOSHI, many types of solenoids are desinged and manufactuerd for hydraulic valves.

It is important to design solenoid fast and make performance good.

This paper discrives the improvement of the pulling force of solenoid and the reduction of development term based on Quality Engeneering for development of solenoid.

1. ソレノイドの吸引力

ソレノイドの吸引力はソレノイドバルブの性能を決定づける重要な特性である。高い吸引力を広いストローク範囲で発揮することで、より高性能のソレノイドバルブの設計が可能となる。また、ソレノイドの高吸引力化による性能の余裕はバルブの信頼性向上につながることから、ソレノイドの高吸引力化は、ソレノイドバルブの品質向上に対して不可欠である。

今回開発したソレノイドバルブは、マニホールドブロックにねじ込んで使用するカートリッジ形の 3ポート弁であり、フォークリフトやクレーン車といった各種車輛のトランスミッション制御、建設機械のパイロット圧力制御等への応用を主な用途として開発した。(図1)

また、従来品に対して小形化、省エネルギー化を目指している。具体的な指標としては次の2項目である。

(1) 小形化

(外径 46mm→35mm, 24%減少)

(2) 省エネルギー化

(消費電力 24W→19W, 21%減少)

しかし、小形化と省エネルギー化は、いずれも吸引力の低下に直結する。

そのため、品質工学を適用して設計定数を最適化することにより、吸引力の向上を図ることにした。



図1 カートリッジソレノイドバルブ

2. 従来の評価方法

従来の評価特性としては以下に示すように多く特性があり、しかもお互いに関連しあっているため、ある特性の変更は他の特性に大きく影響する。そのため開発期間の多くを各評価特性のトレードオフに費やし、開発期間の短縮を困難にしていた。

(1) 吸引力

吸引力は図2に示すようにグラフの横軸をストローク、縦軸を吸引力にとり、電流をパラメータとして、ストローク吸引力特性として評価している。吸引力は高いほど良い。

(2) 使用可能なストローク

設計上必要とする吸引力がどのストロークまで得られるかを示す。使用可能なストロークの範囲が広いほどバルブのスプールストロークを長くすることができ、バルブ圧力損失の低減が可能になってくる。

吸着面形状を段付形状とすることで使用可能なストローク範囲を大きくすることが可能であるが、一般的には吸引力とトレードオフの関係がある。

(3) コイル消費電力

コイルは通電により発熱する。また通電時間が長いほどコイル抵抗は増加する。コイルは直流電圧で駆動されるので、結果としてコイル電流が減少し、吸引力が低下する。

発熱を減らすためには消費電力は低い方が望ましい。また、車輛関係では電気系の負荷軽減のためにも低消費電力化は有効である。

しかし、低消費電力化により必然的に吸引力は低下する。

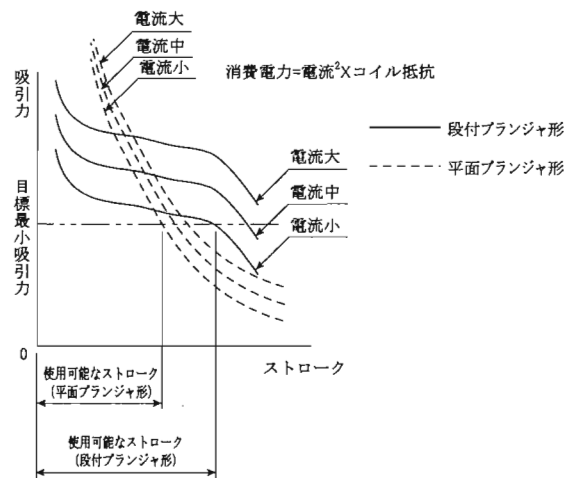


図2 従来の評価特性（ストローク吸引力特性）

3. 基本機能

ソレノイドを電気エネルギー機械エネルギー変換器と考え、入力として電気エネルギー、出力として機械エネルギーを考える。

まず、図3に示す単純な形状を持つ平面プランジャ形のソレノイドのストローク吸引力特性は式1で示される。

$$F = k \times A \times I^2 / St^2 \quad (式1)$$

F：吸引力

k：比例定数

A：吸着面面積

I：電流

St：プランジャのストローク

図4に示す段付プランジャ形のソレノイドにおいては、式1の定数kはストロークの関数となり式2となる。ここでストロークを固定して考えれば、式3に示されるように吸引力は電流の二乗に比例することになる。

$$F = k(St) \times A \times I^2 / St^2 \quad (式2)$$

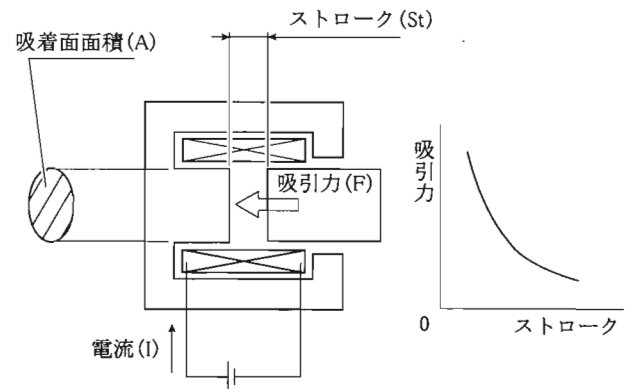


図3 平面プランジャ形ソレノイド

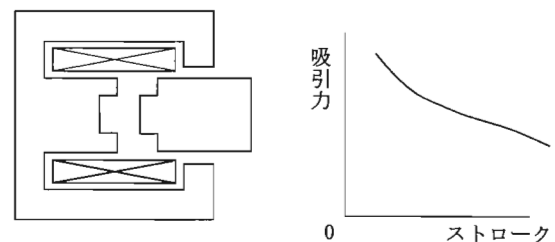


図4 段付プランジャ形ソレノイド

$$F=k \times I^2 \quad (式 3)$$

品質工学の解析ではデータを二乗して計算を実施する。解析での二乗の成分がエネルギーのディメンジョンとなるよう、式 3 の両辺の平方根をとった式 4 を基本機能とした。(図 5)

$$F^{1/2}=k \times I \quad (式 4)$$

解析は、電流(信号因子)の値が 0 の時、吸引力は 0 となるので、ゼロ点比例式を用いることとする。信号因子の水準は定格電流比で 33%、66%、100%、133%の 4 水準とした。

4. ストロークの取扱い

式 4 ではストロークを固定した場合を考えたが、実際はストロークを何らかの形で含めた形で吸引力を評価したい。そのため、ストロークを誤差因子とするか標示因子とするかを検討し決める必要がある。

誤差因子として考えるならば、式 4 の比例定数 k がストロークに関係なく一定であることが理想である。

例えば図 6 のようにストローク St_1 での k を β_1 、ストローク St_2 での k を β_2 とすれば、 $\beta_1 = \beta_2$ としたい場合である。

この場合のストローク-吸引力特性はいわゆる水平吸引力特性となる。(第 8 節の注参照)

しかし、この場合は式 1 からわかるように、小ストローク時急増する吸引力を何らかの手段で低くする必要が生じる。

そのため入力エネルギーを有効に活用できないので、

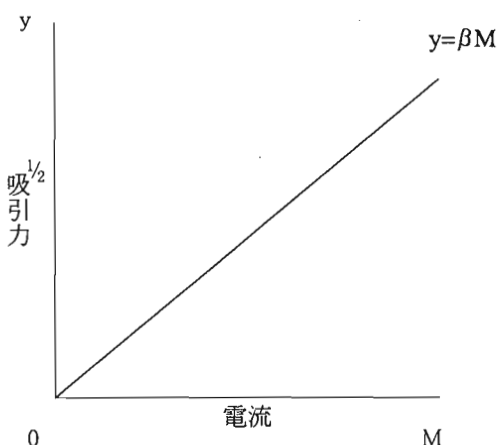


図 5 基本機能

全体的な吸引力が低くなりやすい。

一方、ストロークを標示因子として考えれば、図 7 のように β_1 と β_2 のは違って当たり前であるという立場である。(計算上は β_1 と β_2 の差を誤差に含めない)

この場合は小ストローク時に無理に吸引力を減少させる必要がないため、高い吸引力を得る事が可能となる。

開発目標は吸引力の向上にあるので、今回はストロークを標示因子として取り扱うこととした。

標示因子であるストロークの水準は、実際の使用範囲の 1mm から 2.75mm の間で 0.25mm おきに取り 8 水準とした。

5. 誤差因子

コイル、コイルケースはバルブ本体に対し 360 度回転可能な構造としている。コイルケースには図 8 に示すようにコイルのリード線取り出しのための切

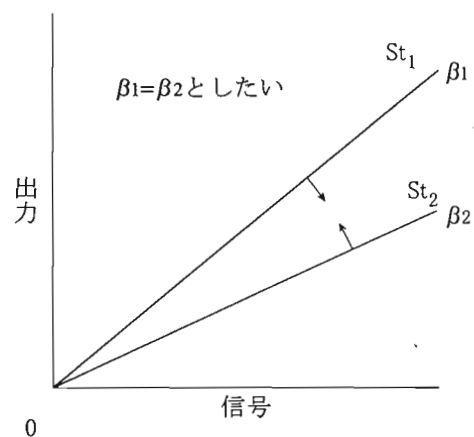


図 6 ストロークを誤差因子とした場合

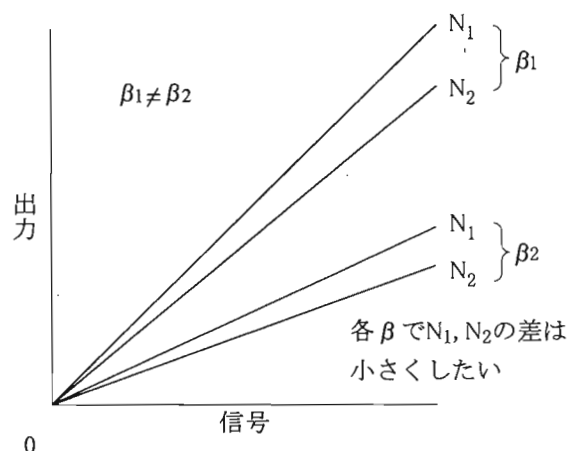


図 7 ストロークを標示因子とした場合

り欠きを設けている。実際に使用する際の切り欠きの方向は、コイルの取付方向によるため特定できない。

また、バルブ本体にはマニホールドブロックにねじ込む際に使用するスパナ掛け用の二面幅を設けている。この二面幅の方向も特定することが出来ない。

この部分はソレノイドの磁路として使用しており、コイルケースと二面幅の重なり方により、磁路面積が変化し、吸引力に影響する可能性がある。

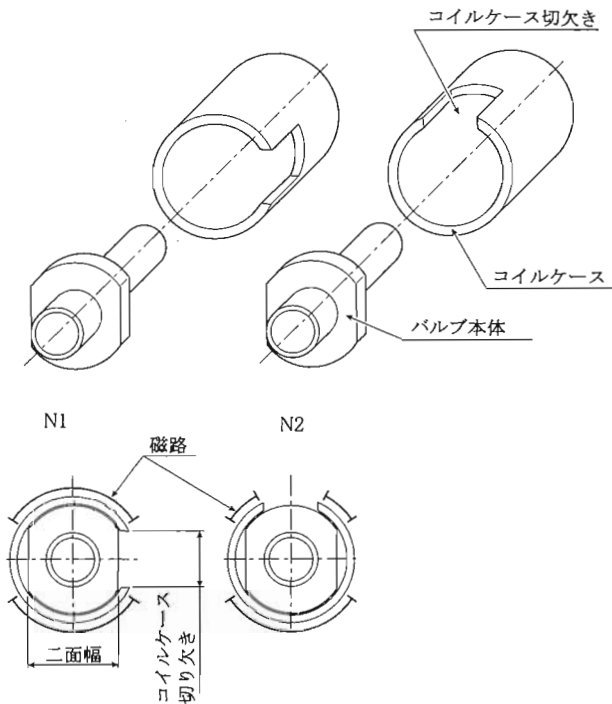


図8 誤差因子

バルブを軸方向から見たところ

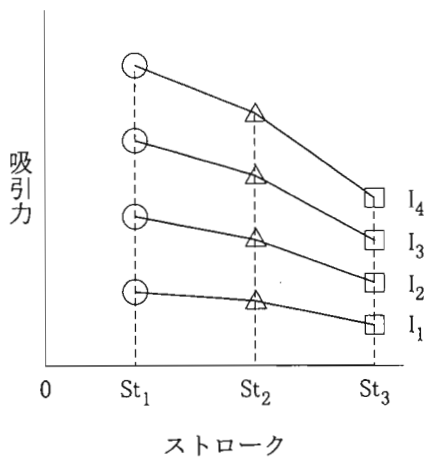


図9(a) ストローク-吸引力特性

そこで、コイル組み付け方向を誤差因子として取り上げた。

水準は磁路面積の大 (N_1)、小 (N_2) の2水準とした。

6. 制御因子と水準

制御因子は表1に示すソレノイドの形状に関する設計定数を8個取り上げ、L18直交表に割り付けた。

表1 制御因子

制御因子		1	2	3
A	吸着面穴径	大	小	近
B	吸着面位置	遠	中	近
C	段部の径	小	中	大
D	段高さ	低	中	高
E	段テーパ	無	小	大
F	鉄心長さ	短	中	長
G	軸方向隙間	小	中	大
H	径方向隙間	小	中	大

7. 実験方法

図9(a)に示すように、4水準の電流(信号因子)をパラメータとしてストローク-吸引力特性を測定する。このデータに基づき、それぞれの電流、ストロークでの吸引力の平方根をとり、図9(b)に示す電流-吸引力^{1/2}特性を得た。

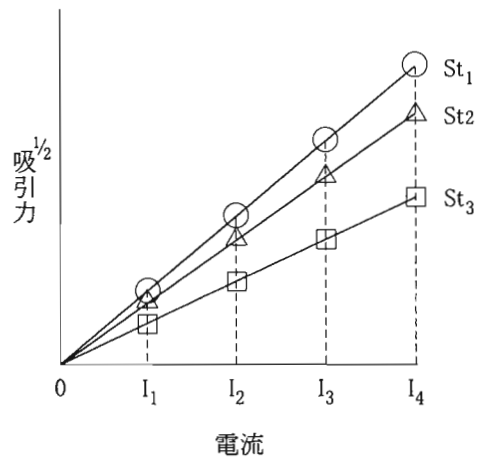


図9(b) 基本機能による表示

(電流-吸引力^{1/2}特性)

8. 実験結果と解析

L18 直交表の 1 行目の実験データを図 10 に、SN 比と感度の計算結果を表 2 に、要因効果図を図 11、12 に示す。

SN 比と感度の計算方法について簡単に説明する。

表 3 は L18 直交表の第 1 行目のデータの一部である。

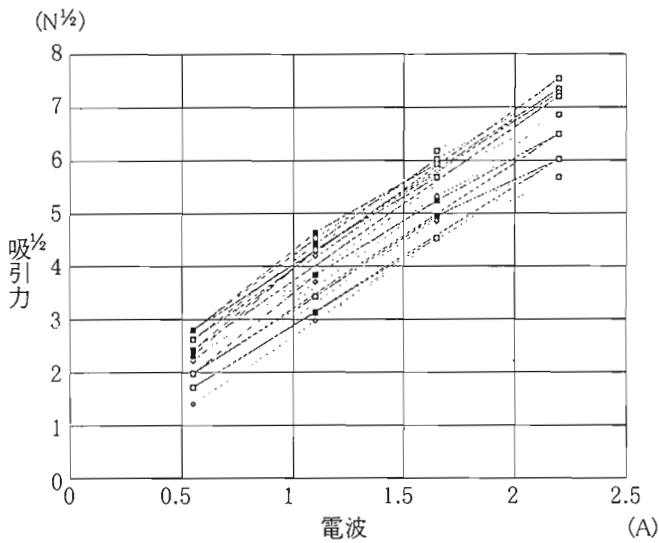


図 10 1 行目のデータ
標示因子，誤差因子ごとのプロット

表 2 SN 比と感度

No	SN 比	感度 (db)
1	29.42	12.46
2	28.79	11.64
3	29.82	12.14
4	33.02	12.41
5	30.23	12.20
6	22.02	6.28
7	30.83	11.73
8	26.60	8.54
9	34.65	12.55
10	30.03	12.47
11	30.29	12.85
12	30.53	11.32
13	33.12	12.26
14	32.10	8.87
15	28.70	13.57
16	28.61	10.98
17	35.92	12.33
18	24.99	11.32

表 3 1 行目のデータ (一部)

ストローク	誤差	信号因子				線形式
		M1	M2	M3	M4	
1mm	N1	2.32	4.32	6.17	7.54	L1
	N2	2.32	4.32	6.17	7.54	L9
1.25	N1	2.63	4.41	6.01	7.36	L2
	N2	2.22	4.32	6.01	7.36	L10
1.5	N1	2.79	4.54	6.01	7.26	L3
	N2	2.63	4.54	6.01	7.26	L11
1.75	N1	2.79	4.63	5.95	7.20	L4
	N2	2.63	4.54	5.95	7.20	L12
2.0	N1	2.41	4.32	5.70	6.86	L5
	N2	2.22	4.19	5.70	6.86	L13
2.75	N1	1.72	3.13	4.54	5.70	L8
	N2	1.41	2.97	4.54	5.70	L16

注 データは吸引力の平方根を示す

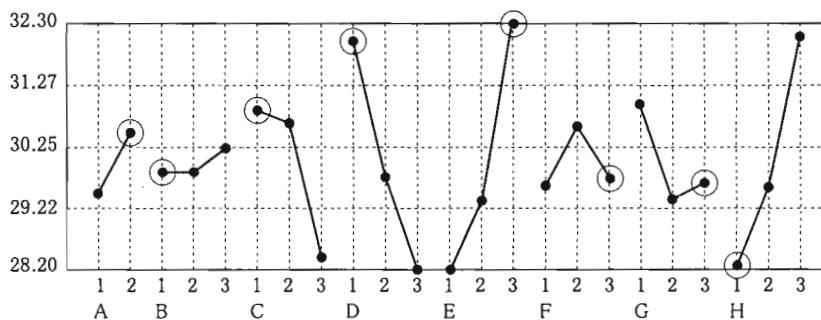


図 11 SN 比の要因効果図

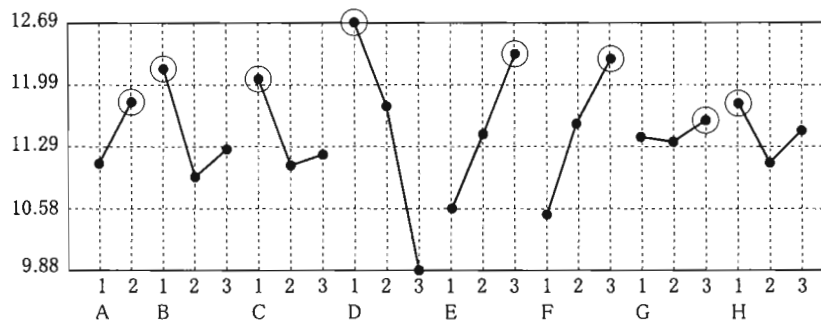


図 12 感度の要因効果図

なお、1行分のデータは4（信号因子の水準数）
×8（標示因子の水準数）×2（誤差因子の水準数）=64
個となる。

$$\begin{aligned} \text{全変動 } S_T &= 2.32^2 \times 4.32^2 \times 6.18^2 \times \dots \\ &\quad \times 5.70^2 \\ &= 1595.9300 \quad (f_t=64) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{線形式 } L_1 &= 0.55 \times 2.32 + 1.10 \times 4.32 \\ &\quad + 1.65 \times 6.18 + 2.20 \times 7.54 \\ &= 32.8105 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_2 &= 0.55 \times 2.62 + 1.10 \times 4.43 \\ &\quad + 1.65 \times 6.02 + 2.20 \times 7.34 \\ &= 32.3978 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{16} &= 0.55 \times 1.40 + 1.10 \times 2.97 \\ &\quad + 1.65 \times 4.54 + 2.20 \times 5.69 \\ &= 24.0331 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{比例項の変動 } S_\beta &= (L_1 + L_2 + \dots + L_{16})^2 \\ &\quad / r / 16 \\ &= 1568.5280 \quad (f_\beta=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r &= 0.55^2 + 1.10^2 + 1.65^2 + 2.20^2 \\ &= 9.075 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{誤差因子間の変動 } S_{N \times \beta} &= (L_1 + L_2 + \dots + L_8)^2 / r / 8 \\ &\quad + (L_9 + L_{10} + \dots + L_{16})^2 / r / 8 \\ &\quad - S_\beta \\ &= 0.0180 \quad (f_{N \times \beta}=2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{標示因子間の変動 } S_{S \times \beta} &= (L_1 + L_2)^2 / r / 2 \\ &\quad + (L_3 + L_4)^2 / r / 2 \\ &\quad \vdots \\ &\quad + (L_{15} + L_{16})^2 / r / 2 \\ &\quad - S_\beta \\ &= 16.5320 \quad (f_{S \times \beta}=8) \end{aligned}$$

誤差変動

$$\begin{aligned} S_e &= S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} - S_{S \times \beta} \\ &= 10.8520 \quad (f_e=64-1-2-8=53) \end{aligned}$$

プールした誤差分散

$$\begin{aligned} V_N &= (S_e + S_{N \times \beta}) / (f_e + f_{N \times \beta}) \\ &= (10.8520 + 0.0180) / (53 + 2) \\ &= 0.1976 \end{aligned}$$

誤差分散

$$\begin{aligned} V_e &= S_e / f_e \\ &= 10.8520 / 53 \\ &= 0.2048 \end{aligned}$$

SN比

$$\begin{aligned} \eta &= 10 \times \log((S_\beta - V_e) / r / V_N) \\ &= 10 \times \log((1568.5280 - 0.2048) / 9.075 \\ &\quad / 0.1976) \\ &= 29.42 \text{ (db)} \end{aligned}$$

感度

$$\begin{aligned} S &= 10 \times \log((S_\beta - V_e) / r) \\ &= 10 \times \log((1568.5280 - 0.2048) / 9.075) \\ &= 12.46 \text{ (db)} \end{aligned}$$

*注 ストロークを誤差因子として考えた場合、
 V_N は次式となる。

$$\begin{aligned} V_N &= (S_e + S_{N \times \beta} + S_{S \times \beta}) \\ &\quad / (f_e + f_{N \times \beta} + f_{S \times \beta}) \end{aligned}$$

V_N には標示因子間の変動が含まれること
になり、SN比は $S_e + S_{N \times \beta} + S_{S \times \beta}$ が小さいほど高
くなる。特に $S_{S \times \beta}$ が小さいということは、ス
トロークによらず吸引力が一定であることを
示している。この様な特性を水平吸引力特性
と呼ぶ。

9. 最適条件

品質工学では最初に機能のばらつきを小さくして
おき、次に出力を目標値になるよう調整する二段階
設計法を推奨している。

機能のばらつきはSN比によって評価し、SN比が
大きいほど機能のばらつきが小さい。出力は感度に

よって評価され、図 5 の基本機能のグラフの傾きβの目標値に合うように SN 比に影響しない制御因子を使用して調整する。

一方、今回の実験の目的は吸引力の向上であるので、SN 比を若干犠牲にしても感度を大きくしたい。そこで図 12 の感度の要因効果の大きい水準（○印）を重視し、表 4 に示す最適条件を決定した。

表 4 最適条件

制御因子	A	B	C	D	E	F	G	H	感度の推定値
感度の最適条件	2	1	1	1	3	3	3	1	16.50db
試作条件	1	2	2	1	2	1	2	1	10.77db

10. 確認実験

直交表を利用した実験においては、確認実験での SN 比の利得の再現性の有無が最も重要である。確認実験とは 2 種の実験条件 A と B で実験し、SN 比の利得（2 種の実験条件 A と B の SN 比の差）が、推定値と実験値で差がないかどうかを確認することである。

確認実験で利得の再現性があるということは、開発段階での最適条件が、製造段階や市場においても成立することを示している。

今回の実験では、確認実験は試作条件（試作品の設計条件）と最適条件にて実施した。

SN 比、感度の推定は、すべての因子で行っている。その結果、表 5 に示すように利得の推定値と実験値で差があり SN 比の利得の再現性はあまり良くなかった。

感度の利得についても推定値に対して確認実験の利得は小さかった。

表 5 SN 比の再現性

項目	推定	実験
最適条件	33.27	28.49
試作条件	28.83	29.94
利得	+4.44	-1.45

表 6 感度の比較

項目	推定	実験
最適条件	16.50	13.58
試作条件	10.77	12.68
利得	5.73	0.90

11. 実験の再現性について

再現性が得られない場合には、基本機能が良くない、制御因子間の交互作用が大きい、誤差因子の傾向が制御因子の組合せによって変化している等の理由が考えられる。

図 10 に示すように電流と吸引力の平方根には直線性があると判断され、基本機能に大きな問題があるとは考えられない。

制御因子間の交互作用が大きい場合、図 11、12 の要因効果図の形状に山谷ができるが、極端な山谷は無い。

実験データを詳細に検討してみると、誤差因子による出力の変化が非常に小さく、また実験の一部で誤差因子の傾向が逆転していた。

SN 比ηの計算式は

$$\eta = 10 \times \log((S_{\beta} - V_e) / r / V_N)$$

である。また、SN 比の式中において

$$V_N = (S_{N \times \beta} + S_e) / (f_{N \times \beta} + f_e)$$

である。

V_N の中身は偶然誤差の分散 V_e と誤差因子の分散 V_{N×β} である。

試作条件、最適条件で V_β と V_N を比較すると表 7 のようになり、V_N の大きさが V_β に対し非常に小さい。

したがって、SN 比の計算式から分かるように V_N のわずかな変動によっても SN 比が大きく変化することになる。

誤差因子の効果が大きければ偶然誤差の影響が小さくなるが、今回の実験では誤差因子の分散 V_{N×β} が誤差分散 V_e に対し圧倒的に小さい。このため、SN 比が偶然誤差に対し大きく影響を受けていることになる。以上の考察から、実験の再現性が良くなかった理由は、誤差因子の効果が小さすぎたことに原因があると考えられる。

結果的に誤差因子の選択に問題があったことになり、どのような誤差因子を選択するかは、今後の検討課題である。

もう一つ考えられる原因として、試作条件と最適条件の水準の取り方の問題がある。図 11 の SN 比の要因効果図から、SN 比への効果が大きい制御因子は

表 7 分散の比較

	V _β	V _N	V _{N×β}	V _e
試作条件	1674.8	0.1771	0.0003	0.1838
最適条件	2071.7	0.3049	0.0001	0.3164

C, D, E, H である。確認実験ではこのうち D, H が同一水準, C は効果に殆ど差がない水準であり, 実質は制御因子 E の効果のみの比較実験となっている。

このことも, 実験の再現性が悪くなった理由と考えられる。

12. 従来の評価特性での比較

実験の再現性は悪かったが, 開発の目的である吸引力の向上は達成することができた。

従来の評価特性である, ストローク-吸引力特性による比較を図 13 に示す。

試作条件に対し最適条件ではストローク 1mm で吸引力が 24% 向上した。

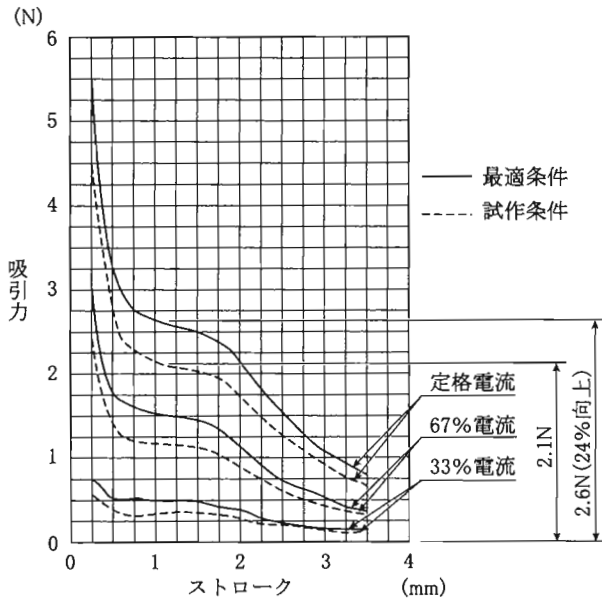


図 13 ストローク-吸引力特性の比較

13. まとめ

- (1) 実験の目的である吸引力の向上に関しては, 試作時に対し吸引力が 24% 向上し大きな成果を得ることができた。
また達成した吸引力は従来品並を確保し, ソレノイドバルブとしても従来品と同等の性能を達成することができた。
- (2) 加えて, 開発期間も品質工学を適用せずに従来の手法で試行錯誤を続けていた場合に比較し約 2 分の 1 に短縮することができた。
- (3) 実験的には誤差因子は役割を果たしていなかったが, このことは今回取り上げた誤差因子の影響が非常に小さいことを示しており, コイルの向きが性能に影響しないことを実証することになった。
- (4) 今後の課題として, ソレノイドの誤差因子として何が適当であるかを検討していきたい。

14. おわりに

今回の実験では実験の再現性に若干問題があったものの, 当初の目的である吸引力の向上を短期間で実現することができた。

また, 制御因子, 誤差因子に対し重要な知見を得ることができた。

今後も品質工学を活用し, よりよい製品を市場に送りだしていきたいと考えている。



奥出 敏史

1991 年 入社
以来, 部品事業部技術二部に
てソレノイドバルブの開発・
設計を担当。
現在に至る。