

品質工学を用いた CAE による電磁比例弁の開発

Design of Linear Solenoid Valve by CAE applied to Quality Engineering

キーワード

CCV, CAE, 品質工学, 比例弁, 電磁力, 磁場解析

部品事業部 技術二部 CCV

宮武 慎

開発本部 開発企画部 CAE

島崎 泰治

品質保証部

戸田 雅規

■ 摘要

油圧機器に使用される電磁比例弁は、小型・軽量化が求められており、従来から試行錯誤的な開発が主体で、目標性能を実現する最適な形状を見いだすには、多くの試作工数や開発期間を要していた。そこで本論では、この電磁比例弁の効率的な開発を行うために、CAE を利用して試作コストの低減を図り、L18 直交表によるパラメータ設計で効率的に設計値の最適化を行った。その結果、主要部分である電磁部は、性能を低下させることなく小型化を達成することができ、開発期間の短縮とコスト削減に効果があることを確認できた。

■ Abstract

Linear solenoid valve for hydraulic is often developed by the trial and the error. Therefore, it is necessary to make many test production to find the best design. In this paper, apply to QE and parameter design for optimizes Solenoid, we achieve a miniaturization of solenoid without disimprove the performance. And the development period has been shortened, by using the CAE to experiment for the parameter design.

1. はじめに

現在日本で販売される乗用自動車において、自動変速機搭載車を選ぶユーザーの割合は 90% を大きく超えている。ほとんどの自動変速機は、エンジンにより駆動される油圧ポンプを変速時のパワーソースとしており、発生させた油圧力をコンピューターで制御するために多数の電磁弁（電氣的に作動する弁）が使用されている。電磁弁は大別して油圧回路の切替に使用するためのものと、圧力を制御するためのものがあり、圧力制御用の電磁弁の代表的なものに電磁比例減圧弁がある。その比例減圧弁の開発はノウハウと試行錯誤に寄るところが大きく、特に電力を物理的な力に置き換える電磁部の形状開発に

は非常に手間がかかっていた。

自動車用制御弁の開発に CAE 解析を適用することにより、これらの開発期間短縮に効果があることは報告済みであるが¹⁾、品質工学の考え方を組み合わせた例として、比例弁電磁部の開発について詳細を報告する。

2. 比例弁の用途

電磁比例減圧弁の主要用途を表 1 に示す。比例弁は、半クラッチ状態の制御などきめ細かな圧力制御が必要なところへ用いられており、スムーズでショックのない変速やロックアップを実現している。

現在、MS 製造部では車両挙動制御用の電磁比例

表1 比例弁主要用途

種類	使用箇所
有段変速機	ロックアップ制御
	変速クラッチ制御
無段変速機	プーリー比制御
	ロックアップ制御

減圧弁を製造しているが、より低コスト／小型の比例弁のニーズが高まっており新規に比例弁の開発を行う必要がある。

3. 比例弁の機能と構造

3.1 圧力調整原理

電磁比例減圧弁は、電気エネルギーを投入して電磁石によって得られる力を油圧力とバランスさせることにより回路の圧力制御を行う弁である。構造図のサンプルを図1に示す。

この弁は、大きく電磁部と油圧部の2つに分けて考えることができる。

電磁部はプランジャ・ストッパ・ガイド・コイルで構成される電磁石となっており、プランジャがストッパに吸引され、スプールを押す方向に電磁力が発生する構造になっている。本論では、プランジャとストッパの距離をストロークと呼び、ストロークと電磁力の関係で電磁部の性能を評価している。

また、油圧部はスプールとそれを保持するスリーブおよびスプリングにより構成される。制御圧力はフィードバックポートに入力され、スプール段部の面積差によって、軸方向の力が発生する構造となっている。また、スプリングはスプールを電磁部側に押し、油圧による力が働かない場合にスプールの位置が不定になるのを防いでいる。これらの力が電磁力と釣り合うようにスプールが動き圧力を調整するため、制御圧力は電磁力に比例した圧力となる。

3.2 電磁部の機能

圧力と電磁力のバランスで圧力を調整するためには、スプールが動き、ストロークが変化しても一定の電磁力が発生していることが要求される。もし、ストロークの変化により電磁力が変動すると、入力信号が変化することと同じ状態となり、適切な圧力特性とならない場合がある。

しかしながら通常の平面吸着面の電磁石は、力を F_m 、電流を I 、ストロークを x_{st} とすると $F_m \propto I^2 / x_{st}^2$ の式で表される距離の2乗に反比例した特性となり (図2参照)、比例弁に使用することは困難である。

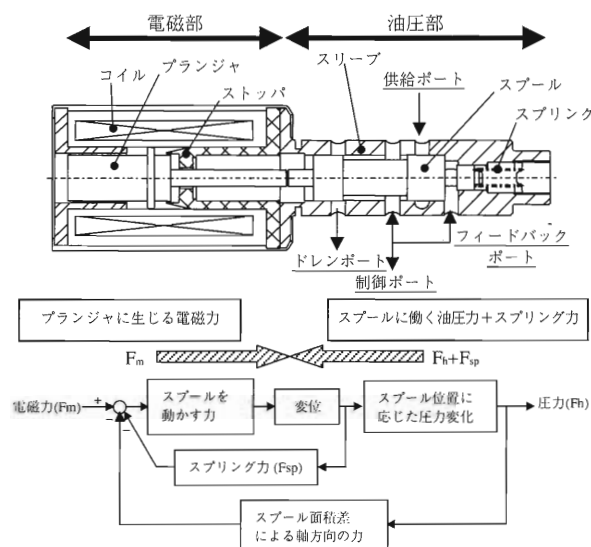


図1 比例減圧弁の構造

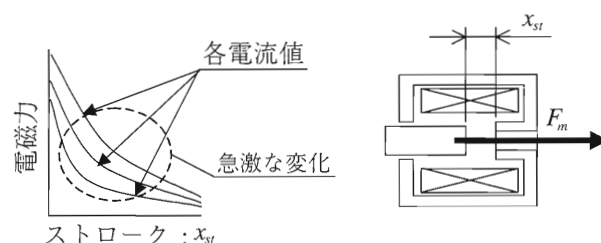


図2 平面プランジャタイプの電磁力

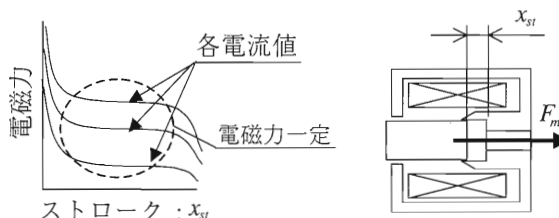


図3 比例弁に望ましい電磁力

そのため、吸着部の形状を工夫し、電磁力の特性を平坦にする必要がある (図3参照)。

この際、平坦度のみを追い求めると、電磁力の絶対値が小さくなり、制御できる圧力の範囲が狭くなってしまいうため、平坦度と電磁力の両者をうまく両立させてやる必要がある。

従来は適切な形状を見いだすために、多くの試作と実験を繰り返して行っていたため手間がかかっていた。今回はこの最適形状を効率よく探索し、より高いレベルで機能する比例弁を開発することが狙いである。

4. 基本機能と評価特性

電磁部をエネルギーの入出力関係で考えると、外部から入力されるものは電流であり、出力は電磁力に他ならない。つまり、

【電力を電磁力に変換する】

が基本機能（製品や技術の働き）となる。また、電流が流れない場合は電磁力が発生しないことから、電流と電磁力の関係をゼロ点比例式： $y = \beta M$ の動特性で評価を行うことにする。（図4参照）

また3.2節の内容より、比例弁電磁部は以下の2点が求められることになる。

- (1) ストロークが変化しても電磁力の変化が少ない
- (2) 電磁力が大きい

そこで、誤差としてストロークを用い、ストロークによる電磁力のばらつきが小さく、且つ β が大きい（電磁力が大きい）形状の検討をおこなうことにする。

評価に使用する入力信号 M （電流値）と誤差 N （ストローク）は電流制御回路の特性および油圧部の必要寸法を考慮して選定し、電流3水準、誤差4水準とした。（表2参照）

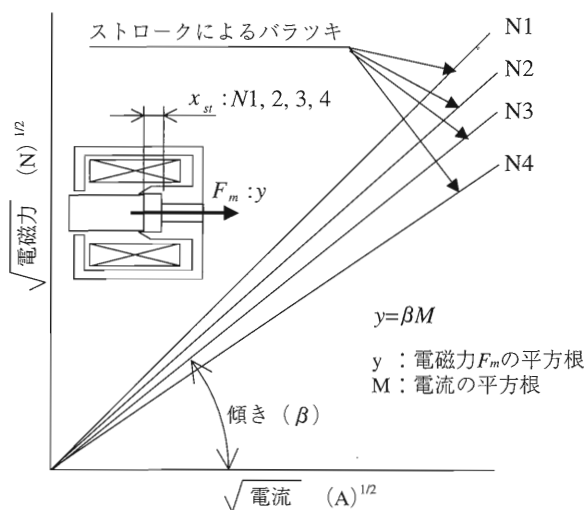


図4 評価特性

ただし、実際に計測する電磁力が電流の2乗であるエネルギーの次元であるため、基本機能として1次元に戻して評価するために、入力と出力の平方根を取り評価をおこなっている。

5. 実験方法

今回は、最終的な確認試験を除き全ての実験をCAEの一つである電磁場解析シミュレーションでおこない、計算結果をもとに最適品の検討を行う。CAEでは、部品形状、材質、電流を与えることで、電磁力と磁束密度・ベクトルを机上で求めることが可能となる。実験をCAEで行うことにより、以下のようなメリットがある。

1. 時間・コストの縮減
コンピュータ上で部品を製作・組立するため、時間とコストが大幅に縮減できる。
2. 寸法の変更が容易
部品種類に配慮することなく制御因子を選ぶことが出来る。
3. 実験の再現性
実験自体の計測ミスや評価ワークの部品寸法誤差がないため、予測結果の再現性が期待できる。
4. 磁束密度がわかる

電磁場解析による計算により、各部位の磁束密度がわかるため、実機ではわからない寸法の重要度が検討できる。それにより、公差/寸法を検討する際の参考に出来る。

また、各部品のどこがうまく機能しているのか・いないのかを検討することが可能であり、新しい制御因子の検討が可能となる。

もともと、品質工学では直交表の利用により実験回数の効率化を図っているが、実機による実験は試作費も含めるとかなりの工数となる。その点、実験を電磁場解析シミュレーションで行うことにより、かなりの効果が期待できる。

表2 信号と誤差因子

		電流 (信号)		
		M_1 $I_1 (A)$	M_2 $I_2 (A)$	M_3 $I_3 (A)$
ストローク (誤差)	N_1 $L_1 (mm)$	y_{11}	y_{12}	y_{13}
	N_2 $L_2 (mm)$	y_{21}	y_{22}	y_{23}
	N_3 $L_3 (mm)$	y_{31}	y_{32}	y_{33}
	N_4 $L_4 (mm)$	y_{41}	y_{42}	y_{43}

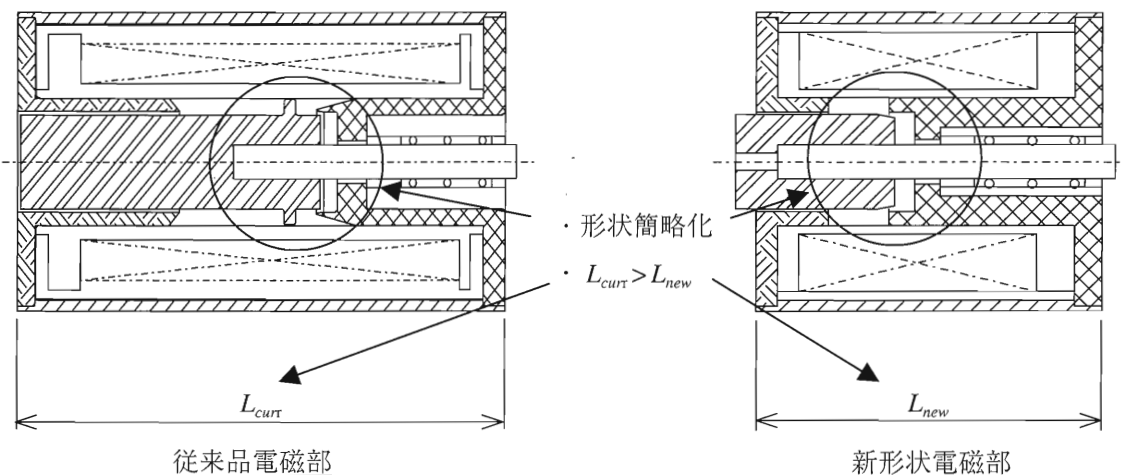


図5 電磁部基本構造

6. 実験基本モデル

パラメータ設計を行うために、基本的な構造を最初に決定する必要がある。ここでは設計目標として、従来品に対し以下の2点の改良を目指し、構造を決定した。(図5参照)

1. 小型化

全長を短くし小型化する。今回は 40%小型化したモデルにて検討をおこなう。

2. 形状簡略化

ストッパ・ガイドの鋭角部の廃止やプランジャの形状簡略化により加工が容易になると同時に、部品の輸送・組立時のトラブルを防止できる。
→基本形状を従来と大幅に変更する。

7. 制御因子

前節の基本構造をもった電磁部の各寸法から、電磁力に有効な設計寸法を制御因子としてピックアップし、表3のようにL18直交表へ割り付けた。具体的に電磁場解析のモデルに割り付けた状態を図6に示す。

今回の解析では、計算とモデリングを簡略化するために、計算モデルは2次元で定義し、計算時に軸対称として3次元の計算を行っている。このような2次元軸対称のモデルで計算する場合、コイル巻数と電流は図中のコイル部分の面積に加わる電流密度として与えることになる。

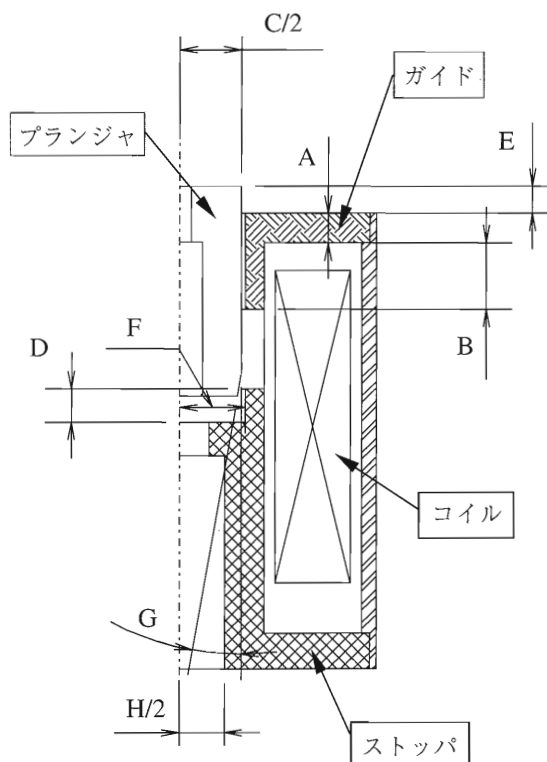


図6 制御因子の割付

表3 制御因子と水準

制御因子	水準1	水準2	水準3	
A	ガイド厚さ	厚い	薄い	
B	ガイド長	短い	中間	長い
C	プランジャ径	小	中	大
D	ストッパ穴深	浅い	中間	深い
E	飛び出し長	短い	中間	長い
F	ストッパ内径1	小	中	大
G	プランジャテーパ角	無し	小	大
H	ストッパ内径2	小	中	大

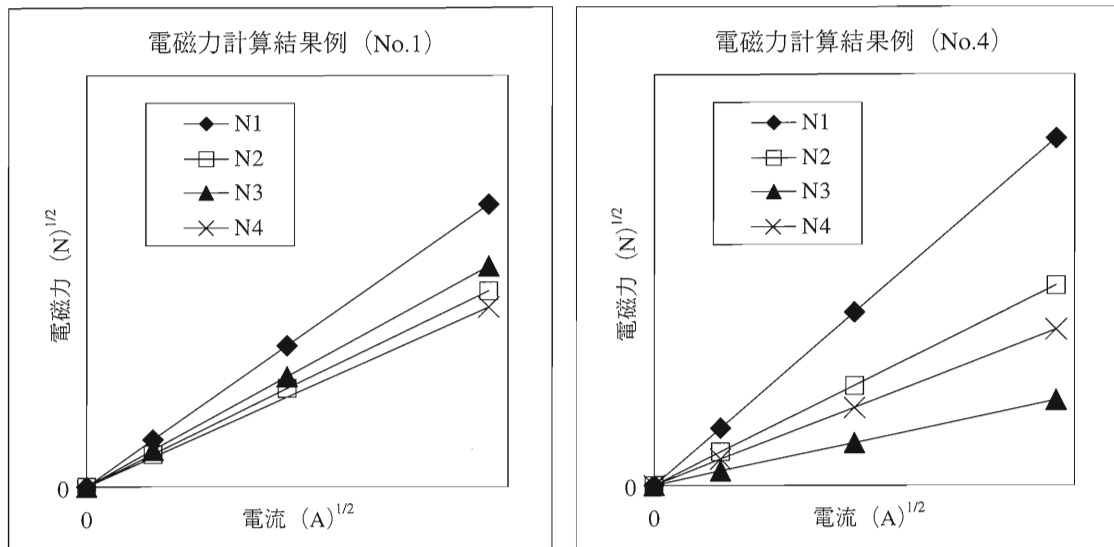


図7 電磁力計算結果例

表4 実験毎のSN比と感度

	SN比 (db)	感度 (db)	L18 直交表							
			A	B	C	D	E	F	G	H
No.1	11.95	7.88	1	1	1	1	1	1	1	1
No.2	11.32	7.26	1	1	2	2	2	2	2	2
No.3	9.30	4.80	1	1	3	3	3	3	3	3
No.4	6.51	6.93	1	2	1	1	2	2	3	3
No.5	10.95	7.67	1	2	2	2	3	3	1	1
No.6	8.38	6.18	1	2	3	3	1	1	2	2
No.7	6.98	5.36	1	3	1	2	1	3	2	3
No.8	8.03	6.39	1	3	2	3	2	1	3	1
No.9	8.66	9.77	1	3	3	1	3	2	1	2
No.10	11.49	5.47	2	1	1	3	3	2	2	1
No.11	7.66	6.68	2	1	2	1	1	3	3	2
No.12	12.63	6.82	2	1	3	2	2	1	1	3
No.13	10.73	7.49	2	2	1	2	3	1	3	2
No.14	13.82	6.09	2	2	2	3	1	2	1	3
No.15	7.95	8.85	2	2	3	1	2	3	2	1
No.16	13.69	5.88	2	3	1	3	2	3	1	2
No.17	9.07	8.95	2	3	2	1	3	1	2	3
No.18	9.91	7.84	2	3	3	2	1	2	3	1

8. 実験結果

前節のモデルに基づき、L18の各組み合わせについて電磁場解析をおこない、電磁力を求める。組み合わせ毎に4通りの誤差と3通りの信号の組み合わせが必要であり、計18×4×3=216通りの電磁力計算が必要である。

この計算結果の例として、直交表のNo.1とNo.4を図7に示す。No.4はNo.1と比較して最大値は大きいですが、ストローク間でのばらつきが大きいことがグラフよりわかり、この両者ではNo.1の方が良い電磁部と言える。

このような良い・悪いの評価を定量的に行うため、品質工学ではSN比と感度という考え方を適用する。SN比とはばらつき度合いの逆数であり、数値の大きい方がばらつきの少ないことを意味する。感度は信号に対する出力の度合いを示し、ゼロ点比例式の

傾きの平均、すなわち電磁力である。つまり、この実験ではSN比と感度が出来るだけ高く（大きく）なる因子の組み合わせを見つければ良いことになる。具体的なSN比と感度の計算式を以下に、計算結果を表4に示す。

SN比と感度の計算

$$S_i = \sum y_{ij}^2 \quad (f=12)$$

$$L_n = M_1 y_{n1} + M_2 y_{n2} + M_3 y_{n3}$$

$$r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2$$

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2 + L_3 + L_4)^2}{4r} \quad (f=1)$$

$$S_{N \times \beta} = \frac{(L_1)^2}{r} + \frac{(L_2)^2}{r} + \frac{(L_3)^2}{r} + \frac{(L_4)^2}{r} - S_\beta \quad (f=4-1=3)$$

$$S_e = S_i - S_\beta - S_{N \times \beta} \quad (f=12-1-3=8)$$

$$V_e = \frac{S_e}{8}$$

$$S_N = S_e + S_{N \times \beta} \quad (f=8+3=11)$$

$$V_N = \frac{S_N}{11}$$

$$\eta = 10 \log \left[\frac{1}{4r} \frac{(S_\beta - V_e)}{V_N} \right] \quad (\text{db})$$

$$S = 10 \log \left[\frac{1}{4r} (S_\beta - V_e) \right] \quad (\text{db})$$

f : 自由度

S_i : 全2乗和

L_n : 線形式

γ : 有効除数

S_β : 比例項の変動

S_{N×β} : 比例項の差の変動

S_e : 誤差変動

S_N : プールした誤差変動

V_e : 誤差分散

V_N : プールした誤差分散

η : SN比

S : 感度

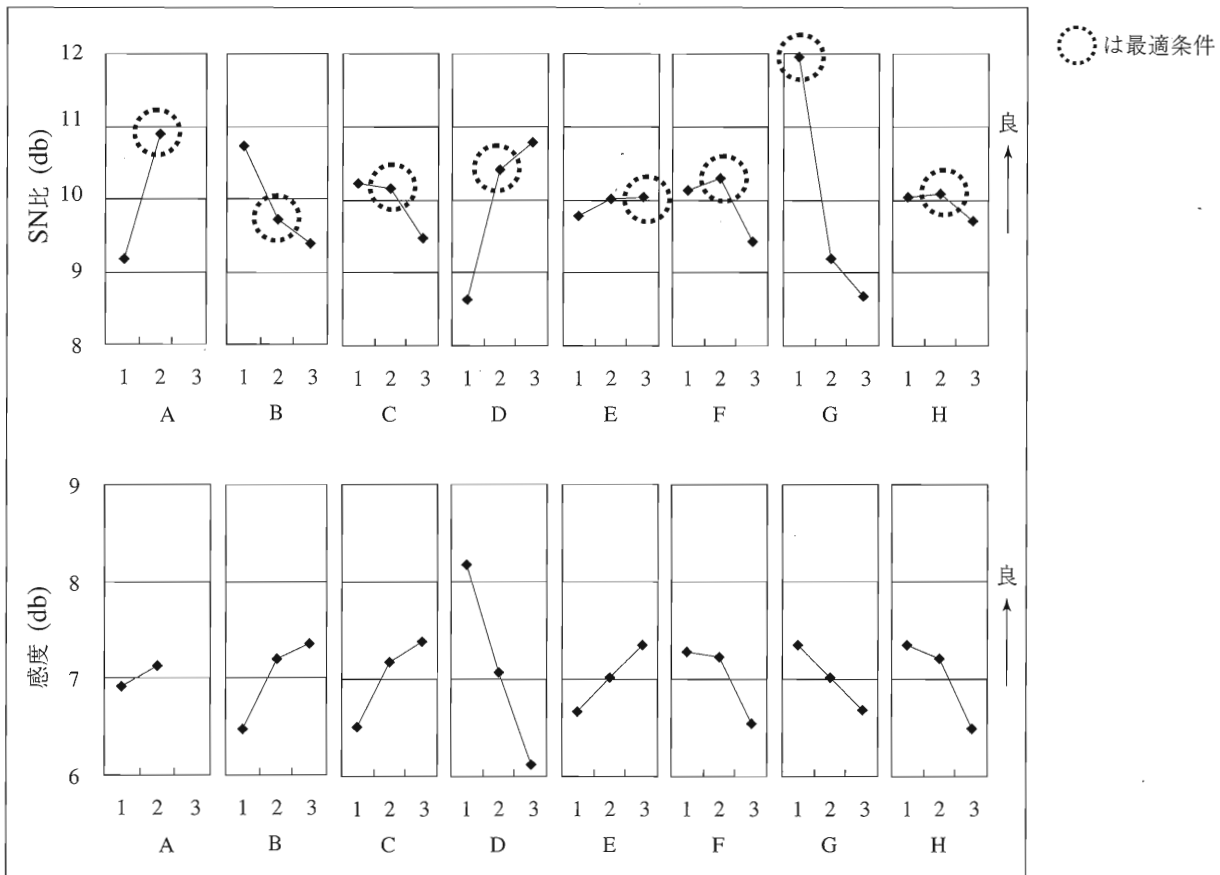


図8 SN比と感度の要因効果図

表5 制御因子の水準毎のSN比と感度

因子	SN比 (db)			感度 (db)		
	水準1	水準2	水準3	水準1	水準2	水準3
A	9.12	10.77	-	6.91	7.12	-
B	10.73	9.72	9.39	6.49	7.20	7.37
C	10.23	10.14	9.47	6.50	7.17	7.38
D	8.63	10.42	10.79	8.18	7.07	6.13
E	9.78	10.02	10.03	6.67	7.02	7.36
F	10.13	10.29	9.42	7.29	7.23	6.54
G	11.95	9.20	8.69	7.35	7.01	6.69
H	10.05	10.07	9.72	7.35	7.21	6.49

次に、このようにして求めた18個の結果から、制御因子A, B, C...Hの各水準について、その平均値を求め各要因の効果を推定する。たとえば、A1の効果を求める場合は、A1が使用されているNo.1~No.9の値の平均値をもってA1の効果とする。これを全ての因子についてまとめたものを表5、図8に示す。これにより、どの要因がSN比・感度に効果があるかを定量的に把握することができた。

9. 最適条件と比較条件

図8の要因効果図をもとに、最適な設計値の組み合わせ(最適条件)の選択を以下の基準で行った。

1. 各制御因子の水準からSN比が高いものを選

表6 最適条件と比較条件の組み合わせ

制御因子	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比の推定値	感度の推定値
最適条件	2	2	2	2	3	2	1	2	13.8 (db)	8.6 (db)
比較条件	2	3	3	1	3	1	1	2	10.8	10.1

択する。→電磁力の平坦度を優先

2. SN比がほぼ同等の場合、感度の高い物を選択する。→可能な限り力の強いもの

ただし、因子Bに関してはもっともSN比の良い物の感度がもっとも低いため、両者のバランスがとれているB2を選択した。結果を表6および図8中の丸印で示す。

次に、おこなった実験・計算の再現性を確認するために、比較用の条件を選定する。

比較条件の因子は、電磁力を優先した場合どのくらいばらつくかを確認する意味で、感度のもっとも大きい因子を選択した。

最適・比較それぞれの電磁部のSN比・感度は、各因子のSN比・感度から計算で推定することができる。表6中に推定値をしめす。この最適と比較のSN比の差(=利得)が実際に得られるかどうか、現実に部品を製作し確認実験をおこなう。

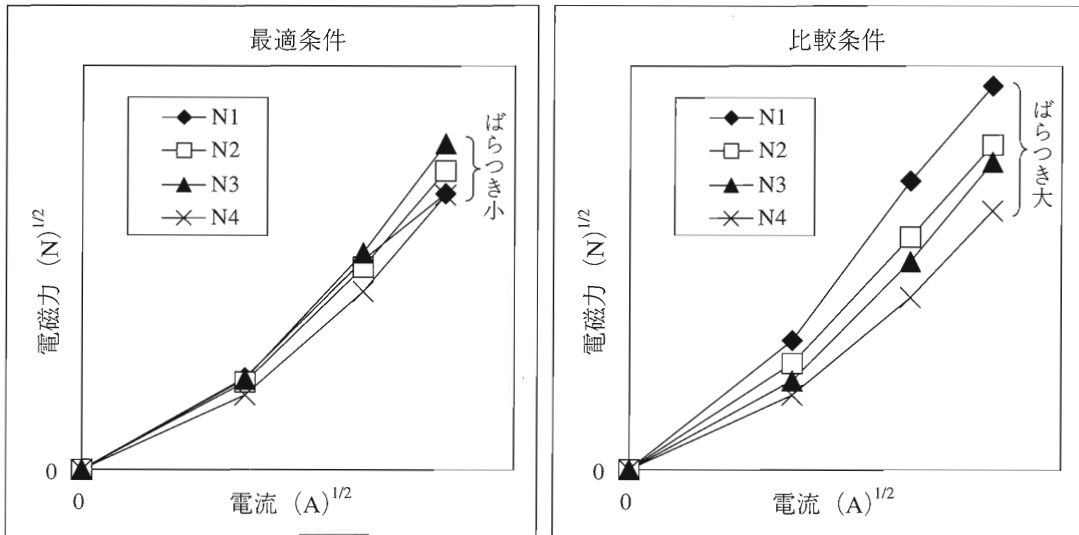


図9 確認試験データ

表7 確認実験結果—利得—

項目	SN比 (db)		感度 (db)	
	試作品実験値	CAE推定値	試作品実験値	CAE推定値
最適条件	19.1	13.8	10.5	8.6
比較条件	16.3	10.8	11.3	10.1
利得	2.8	3.0	-0.8	-1.5

10. 確認実験

前節で選定した2つの条件で電磁部を製作し、最適品と比較品の利得と、推定値の利得を比較する。利得が同等であれば、SN比に再現性があり加法性が成立していると判断することが出来る。なお、確認実験は現実を確認する意味で、電磁場解析シミュレーションではなく実際に部品を製作しておこなった。

実験結果を図9に示す。最適条件と比較条件を比較すると、ばらつきは最適条件の方が小さく、比較条件の電磁力が強いことがわかる。これは条件選択時の狙い通りと言える。

次に利得を計算する。SN比と感度の計算は8節と同様である。確認実験の結果と推定値を表7に示す。SN比をみると、推定値3.0dbに対し実測値が2.8dbであり利得は十分に再現したと考える。

11. 従来品との比較

最適品と従来品の電磁力を比較したグラフを図10に示す。小型化をしたにも関わらず、平坦な範囲を狭めることなく同等以上の電磁力を得ることに成功した。

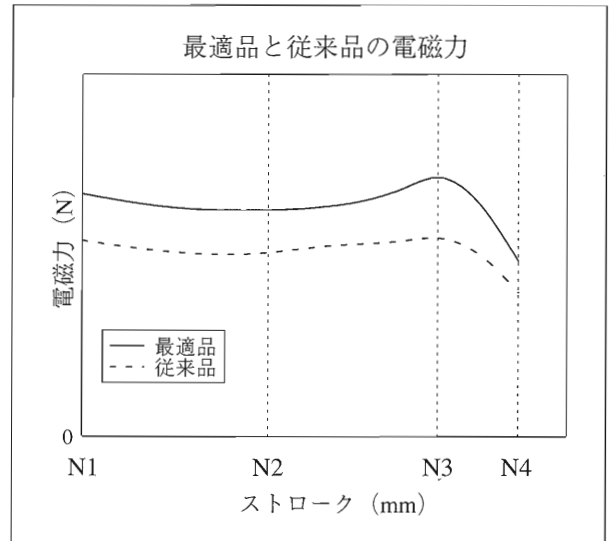


図10 開発品と従来品の電磁力

12. まとめ

1. 小型化したにも関わらず、従来品と同程度のストロークで電磁力の強い電磁部形状を求めることができた。
2. 電磁力に非常に効果がある制御因子とそうでない因子を定量的に把握することが出来た（要因効果図による）。これにより、次の開発時に取り入れる因子と除外する因子を選考することが可能となり、実験数を減らせる可能性がある。
3. 電磁場解析シミュレーションにより、組み合わせ実験に必要な時間を大幅に短縮することができた。品質工学の手法による短縮効果と合わせると、非常に時間が短縮できるため、有効な手法であることを確認出来た。（図11参照）

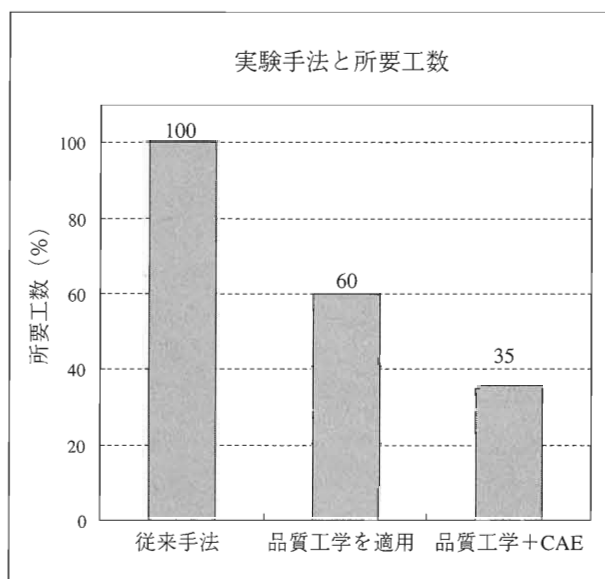


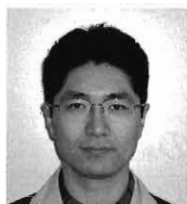
図 11 実験手法と所用工数

今回の新たな試みとして、CAE による解析と品質工学の考え方を組み合わせたことにより、試作する部品を大幅に減らし、最小限の試作数で成果を上げることが出来た。

自動車用の油圧制御弁に対する小型化の要求は非常に高く、市場で競争力を持つためにはさらなる小型化が必要である。今回得られた知見・手法をもとに、さらなる制御因子の取り込みを含めた開発を進めていく予定である。

【文献】

[1] 島崎, 岩村, 宮武; 不二越技報, 57(2), 17



宮武 慎

1997年 入社
部品事業部技術二部[CCV]に従事し、現在に至る



島崎 泰治

1980年 入社
工具製造所で製作、生産技術に従事
90年より技術開発部に移り、FA, CAD, CAM, CAE 等に従事し、現在に至る



戸田 雅規

1987年 入社
技術開発部で電着、射出成形、コーティングなどの技術開発に従事し、97年より現職