

# 品質工学による比例ソレノイドの開発

Development of Proportional Solenoid with Quality Engineering

## キーワード

品質工学, パラメータ設計, 比例ソレノイド, ストローク吸引特性, 基本機能, 誤差因子, 信号因子, 制御因子, 要因効果図, 利得

油圧製造所技術部

浜本 智

## ■ 摘要

品質工学とは、田口玄一博士により提唱された技術開発のための方法論である。従来からの開発では、ユーザとの取り決めで決まる製品の仕様値を特性値としてそのまま計測し、その良しあしで製品を評価するのが一般的である。ところが、仕様値は製品の機能を表現していないことが多く、また、全ての仕様値を同時に満足するように設計定数を決めることは困難である。品質工学では、対象としている製品（システム）の基本的な働きを表現する唯一の特性値である「基本機能」を定義し、その基本機能を計測しシステムの良しあしを評価する。その結果、製品が市場へ出てからのトラブルを未然に防ぐと同時に、研究開発の効率化が図れるのである。本稿では、油圧部品の比例ソレノイドの開発に品質工学を適用した例を通じて、製品開発における品質工学の成果を紹介する。

## ■ Abstract

Quality engineering of having been advocated by Dr. Gen-iti Taguchi is a methodology for the product development. In a current development, the specification values of the product decided by the contract with the user were measured as a characteristic values. And, the product was evaluated by the characteristic values. However, the specification values do not often show the function of the products. Moreover, it is difficult to decide the parameters of the design to satisfy all the specification values at the same time.

In quality engineering, the generic function is defined as the only characteristic value by which a basic working of the product (system) is expressed. And, the generic function is measured as a characteristic value and the system is evaluated. As a result, the trouble of the products which have been sold to the market can be prevented. The efficiency of the research and development can be raised at the same time. In this paper, the effect of quality engineering is seen through the development of the proportional solenoid by quality engineering.

## 1. はじめに

品質工学は、田口玄一博士により提唱された技術開発のための方法論で、欧米では氏の名前を取り「タグチメソッド」と呼ばれている。1993年に学会に準じた組織である「品質工学フォーラム」が設立され、（品質工学フォーラムは1997年には学術団体として認可され、現在では「品質工学会」と改名）それをきっかけに各地方で品質工学研究会が相次いで結成されて、業種に関わらず多くの企業の技術者や研究者が参加し、社会的な広がりをみせている。

品質工学は、評価手段としての汎用技術を提供す

るものであり、機械や電気といった従来からの分野のみならず、最近では、化学、農学、薬学、医学、の分野にも適用され始めている。当社においても、1993年ごろから盛んに適用されはじめ、年々成果が上がってきている。

本稿では、油圧部品である電磁比弁用比例ソレノイドコイルの開発にオフライン品質工学、とりわけパラメータ設計を適用した事例を、パラメータ設計の解説を交えながら紹介する。

## 2. 品質工学とパラメータ設計

品質工学では、技術部門（開発，設計，生産技術）で活用されるオフライン品質工学と，ライン部門（製造，営業）で活用されるオンライン品質工学を区別し，それぞれの方法論を提起している。本稿の課題であるオフライン品質工学で中心的な役割を果たすのがパラメータ設計である。パラメータ設計とは，設計における設計定数を製品の機能（機能性）から見て最適化する過程である。<sup>(1)</sup> 従来からの製品開発で製品を評価する際には，ユーザとの取り決めで決まる製品の仕様値を特性値としてそのまま計測し，その良しあしで評価するのが一般的であった。また，設計定数を決定する場合には，それらの特性値の平均値を操作することに専念し，平均値が目標値と一致するように設計定数を決めることが最適化であるとされてきた。

この過程には2つの問題点が存在する。1つ目の問題点は，一般的に仕様値が製品の機能を表現していない場合が多いことである。仕様を満足していることと，きちんと機能を果たすというのは，全く別のことである。さらに，仕様値をそのまま特性値として評価した場合，1つのシステムであっても複数の特性値が存在し，全ての特性値を同時に満足するように設計定数を決めることができないのである。

2つ目の問題点は，設計定数の決定に際し，ばらつきを評価していないことである。仕様で決められている実験の条件は，ある特定（標準）の条件であって，仮にその時点での出力が目標値に一致していたとしても，使われる条件が異なれば出力はどうなるかわからないのである。

これらの問題点に対し，パラメータ設計では次のことを提案している。1つ目の問題点に関しては，製品（システム）の評価を仕様値で行うのではなく，対象としているシステムの基本的な働きを正しく表現するための唯一の特性値として「基本機能」を定義し，その基本機能を計測することである。2つの問題点に関しては，基本機能を計測するに際し，実験条件をある特定（標準）の条件で行うのではなく，わざと出力が大きくなる条件と，小さくなる条件（この実験条件のことを誤差因子という）で計測して，SN比という数値で評価することである。これにより，機能のばらつきを最小にした上で，次にシステムの出力を目標値に一致させるという調整を行い設計定数の最適化を行うのである。

これによって得られたシステムは，いろんな使われ方に対して，安定した機能を発揮するものとなる。また，仮にパラメータ設計を行っても目標とする機能が得られなかった場合は，そのシステム（技術）の限界がそこまでであったことを教えてくれたことになる。その場合は，これまでのシステムをあきらめて，新たに別の方法を考えるべきであることを示唆しているのである。そういう意味で最近では，「品質工学とは，技術の良しあしを判定する評価手段」であるといわれている。<sup>(2)</sup>

## 3. 品質工学による比例ソレノイドの開発

### 3.1 開発の背景

近年，建設機械や車輛の分野において，熟練オペレータ不足及び危険作業の低減等に対処するため，遠隔制御や半自動制御などのメカトロ化が進められている。そのため，これまででない，小形，軽量，低価格な電磁比例弁が求められている。この課題に素早く対応するためパラメータ設計を行い，小形の比例ソレノイドを開発することとした。

### 3.2 従来の評価方法とプロトタイプのパフォーマンス

これまで，比例ソレノイドのパフォーマンスは，図1に示す「ストローク吸引力」特性で評価するのが一般的であった。評価に使用していた特性値は，以下に示すように多くのものがあつた。

#### (1) 水平吸引力の大きさ

・図1における定格電流での吸引力で，大きいほ

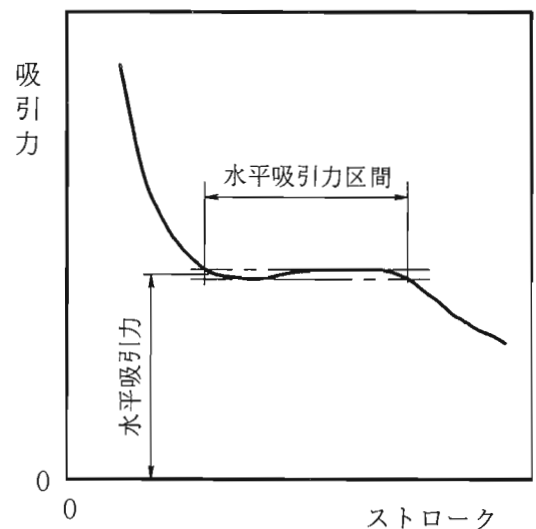


図1 ストローク吸引力特性

ど良い。

(2) 水平吸引力区間

- ・ 図1において、ほぼ水平と見なせるストロークの範囲で、長いほど良い。

(3) コイル温度上昇

- ・ 定格電流を連続通電した際の、コイル温度で低いほど良い。

(4) 吸引力のヒステリシス

- ・ ストロークをゼロから徐々に増加させながら計測した場合の吸引力と、逆にストロークを徐々に減少させながら計測した場合の吸引力の差で小さい程良い。

図2に、従来サイズの比例ソレノイドの経験に基づき試作したプロトタイプの構造を、図3にプロト

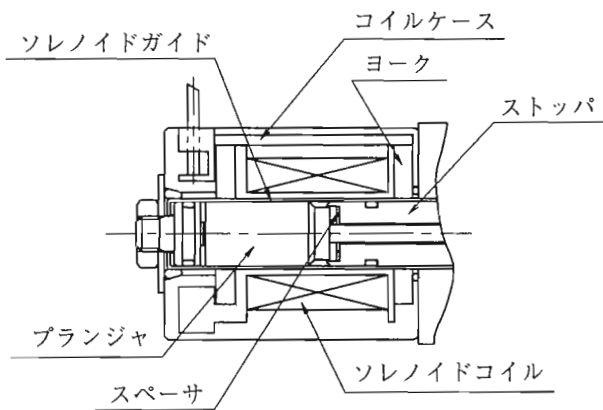


図2 プロトタイプの構造

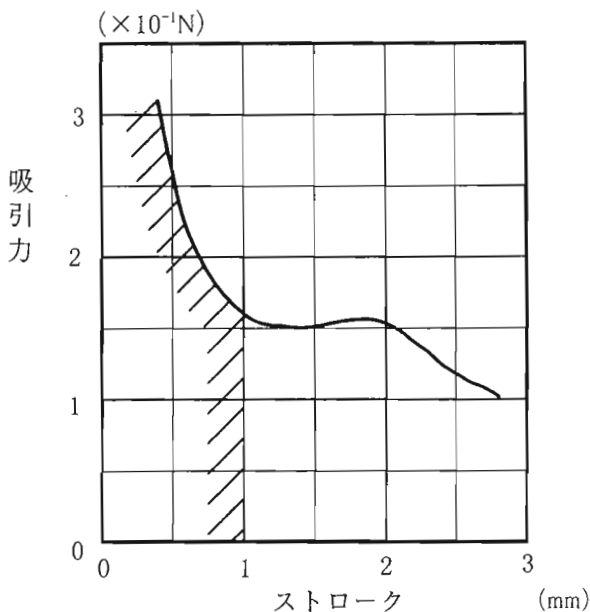


図3 プロトタイプのストロークー吸引力特性

タイプでの「ストロークー吸引力」特性を示す。プロトタイプでは、上の(1)(3)(4)の特性値に関しては目標値を満足していたが、(2)水平吸引力区間が短く問題であった。なお図3において、ストローク1mm以下で吸引力が急激に増大しているが、実際に電磁比例弁として使う場合は非磁性体のスペーサを挿入し、この区間(1mm以下)のストロークを使用しないことにしている。(図3の斜線部分)

### 3.3 基本機能の定義と信号因子

従来の開発では、比例ソレノイドの設計定数を色々な水準に変化させて、図1に示した「ストロークー吸引力」特性を計測し、前述した多くの特性値によりソレノイドの良しあしを評価していた。当然これらの特性値には、相反する傾向を示すものもあった。そこで、今回は「基本機能」として、図4に示す「入力電流ー吸引力」特性を考えることにした。すなわち、比例ソレノイドの本来の働き(機能)は、入力された電流値に比例した吸引力を得ることであると見た。なお、品質工学では、入力のことを信号因子という。

### 3.4 誤差因子について

パラメータ設計では、誤差因子を導入し、わざと出力が大きくなる実験条件と小さくなる条件で実験を行う。これは、出力にばらつきが出る極端な条件で実験を行い、機能のばらつきが小さくなるような制御因子(設計定数)の組合せを見つけて最適化を行うことで、ユーザでのトラブルを未然に防ぐためである。そういう意味で、通常誤差因子としてはお客様での使い方、すなわち「環境条件」や、「劣化」などが選定されることが多い。今回の実験では、プランジャのストロークを誤差因子とした。すなわち、使用され得る全てのストローク範囲で、安定

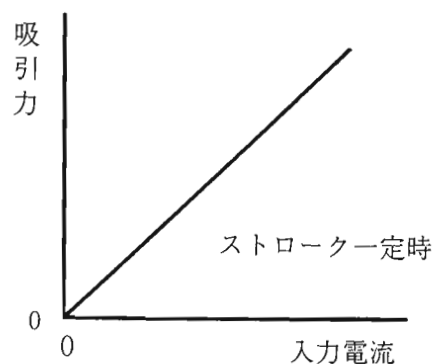


図4 入力電流ー吸引力特性

した吸引力を得ることを目的とした。表1に今回選定した、基本機能、信号因子、誤差因子のまとめを示す。

### 3.5 制御因子の選定

最適化を行うに際し、比例ソレノイドの様々な制御因子（設計定数）の中で、吸引力に影響を及ぼすものを洗い出し、効果と実現性を考慮して、6つの

表1 基本機能と信号因子、誤差因子の水準

項目	内容
基本機能	「入力電流-吸引力」特性（動特性のSN比）
信号因子	入力電流：100, 200, 300...800mA までの8水準
誤差因子	ストローク：0.4, 0.6, 0.8...2.6mm までの12水準

表2 制御因子の選定

部位	制御因子	効果	実現性	採用した制御因子
ソレノイドコイル	・巻数	○	×	
コイルケース	・材質	△	×	
ヨーク	・クリアランス	○	△	
ソレノイドガイド	・材質	○	×	
ストップ	・材質	△	×	
	・外径	○	×	
	・内径	○	○	○
	・先端の肉厚	○	○	○
	・座面の座グリ径	○	○	○
	・座グリ深さ	○	○	○
	・ストップ角度	○	○	○
	・ロッド部内径	△	△	
	・リング溝位置	△	○	
	・吸着面の位置	△	○	
・ストップとプランジャのクリアランス	○	○	○	
プランジャ	・材質	△	×	
	・外径	○	×	
	・端面のキリ穴数	△	△	

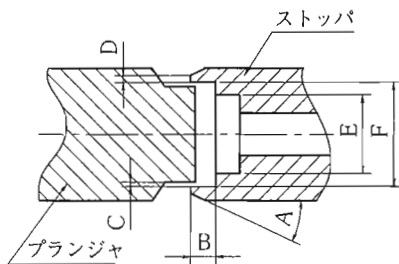


図5 制御因子の説明

制御因子に絞り込んだ。表2に絞り込んだ制御因子を示す。

### 3.6 制御因子と水準

表2で絞り込んだ制御因子について、表3に示すように水準を設定し、L18直交表に割り付けて実験を実施した。図5には、制御因子の内容を示す。

なお、パラメータ設計において、直交表を用いるのは、一般には実験の効率化のためと思われるが、本来の目的は、実験結果の下流（製造現場や実際の使用）における再現性の確認のためである。

### 3.7 実験の方法

表4に、実験の計画を示す。L18直交表の1行の実験組合せに対し、8個の信号水準×誤差条件12個=96個のデータを測定することになる。全体では、それが18行分あることから、全データ数は96×18=1728個となる。ただし、サンプルはあくまで18個である。

### 3.8 実験結果と解析

表5に実験NO.1（L18直交表の1行目）で得られた実験結果を示す。表5のデータより、SN比( $\eta$ )と感度(S)を計算する。SN比とは、単位出力（傾き）当たりのばらつきの逆数で、SN比=1/( $\sigma^2/\beta^2$ )で示される。この式の中の $\sigma^2$ は、出力のばらつきで、表5の列のデータが誤差条件によらず一定であるほど、また信号の水準に対する直線性が良いほど、小さな値となる。なお、 $\beta$ は出力の傾き（の大きさ）を示す。従って、SN比とは、その値が大きいほど、ばらつきが小さく信号に対する直線性が良い、すなわち機能性が良いということになる。また、感度Sは $\beta$ そのものを示し、出力（傾き）が大きいほど、その値は大きくなる。なお、SN比、感度ともに対数をとってdb値で表示される。これは、制御因子の要因効果の加法性を考慮してのことである。

表6に、今回の実験で得られた全てのデータより、各実験NO.毎に計算した、SN比と感度の計算結果を

表3 制御因子の水準

記号	制御因子	L18割付列番	水準1	水準2	水準3	プロトタイプ
A	ストップ角度(°)	1	A1	A2	-	A2
B	ストップ座グリ深さ(mm)	3	B1	B2	B3	B1
C	ストップとプランジャのクリアランス(mm)	5	C1	C2	C3	C1
D	ストップ先端の肉厚(mm)	6	D1	D2	D3	D2
E	ストップ座面の座グリ径(mm)	7	E1	E2	E3	E3
F	ストップ内径(mm)	8	F1	F2	F3	F1

表 4 実験の計画

誤差因子 (12 個)      信号水準 (8 個)

制御因子 実験 No	入力電流 100mA								ストローク(mm)								800mA	SN 比 (dB)	感度 (dB)	
	A	e	B	e	C	D	E	F	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8				2.0
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												

表 5 実験結果の一例 (実験 No.1)

誤差条件	ストローク	入力電流	信号因子							
			100mA	200mA	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA	800mA
	0.4mm		0.06	0.20	0.48	0.87	1.26	1.63	1.92	2.24
	0.6mm		0.05	0.17	0.42	0.72	1.08	1.41	1.71	2.00
	0.8mm		0.05	0.17	0.42	0.71	1.04	1.36	1.66	1.96
	1.0mm		0.06	0.22	0.45	0.72	1.04	1.36	1.66	1.97
	1.2mm		0.08	0.25	0.48	0.75	1.05	1.37	1.67	1.98
	1.4mm		0.10	0.27	0.51	0.78	1.08	1.38	1.68	1.99
	1.6mm		0.11	0.30	0.56	0.81	1.11	1.40	1.71	2.02
	1.8mm		0.12	0.33	0.59	0.86	1.15	1.44	1.73	2.04
	2.0mm		0.10	0.29	0.54	0.81	1.08	1.38	1.65	1.96
	2.2mm		0.08	0.22	0.44	0.68	0.94	1.21	1.48	1.79
	2.4mm		0.06	0.18	0.35	0.56	0.79	1.05	1.30	1.58
	2.6mm		0.06	0.14	0.28	0.47	0.68	0.90	1.14	1.40

示す。なお、SN 比と感度の具体的な計算方法については、参考文献を参照されたい。(3)

### 3.9 要因効果図と最適条件

図 6 に SN 比の要因効果図を、図 7 に感度の要因効果図をそれぞれ示す。要因効果図とは、表 6 の SN 比と感度について、それぞれの制御因子の水準別合計をグラフ化したものである。SN 比については、値が大きい制御因子の水準を選択した方が、ばらつきが小さく安定した条件ということになる。パラメータ設計では、まず SN 比が大きい制御因子の水準を選択した上で、次に感度を目的とする値に合わせる調整 (チューニング) を行う。今回の場合は、出来る限り大きい吸引力を得たいので、感度も大きいほど良いということになる。この考えに従って選定した制御因子の最適条件の組合せを表 7 に示す。ただし、制御因子の B と E については、SN 比の要因効果が小さく、感度の方を重視し選定した。

表 6 SN 比と感度の計算結果(dB)

実験 No.	S N 比	感度
1	20.62	6.76
2	21.59	6.83
3	19.53	4.77
4	20.47	6.36
5	18.68	4.84
6	22.58	6.14
7	19.33	5.65
8	21.57	6.58
9	20.32	4.92
10	15.14	7.89
11	15.15	7.50
12	18.06	6.58
13	17.71	8.37
14	17.33	7.10
15	14.15	6.82
16	16.00	7.22
17	15.27	7.69
18	15.42	7.46
プロトタイプ	15.17	6.83

### 3.10 利得の推定と確認実験

パラメータ設計では、直交表による実験が正しいかどうかを確認するために、選定した最適条件と比較のため比較条件 (比較条件には、最悪条件もしくは中間条件や初期条件を用いる) にて、SN 比を推定

し利得の計算を行う。利得とは、それら2つの条件の差で「利得＝最適条件のSN比－比較条件のSN比」で示される。その後、実際に最適条件と比較条件で確認実験を実施し、利得の推定値と確認実験で得られた利得が一致するかどうかを確認する。利得の推定値と確認実験で得られた利得が一致すれば、実験は成功し直交表の実験より得られた結論は正しく、下流での再現性が保証されることになる。表8に、今回の実験での利得の推定値と、確認実験で得られた利得を示す。利得の推定値 5.9db に対し、確認実験で得られた利得は 5.6db であり、実験の再現性が

確認された。

### 3.11 「ストローク吸引力」特性での比較

図8にプロトタイプと最適条件品の「ストローク吸引力」特性を示す。最適条件品では、水平吸引力区間が大幅に長くなっていることがわかる。この様に、従来の特性値でも改善の効果がはっきりと認められる。なお、本開発に要した期間は、従来のトライアル&エラーによる開発期間と比較した場合の約1/3程度で、大幅な短縮が可能となった。

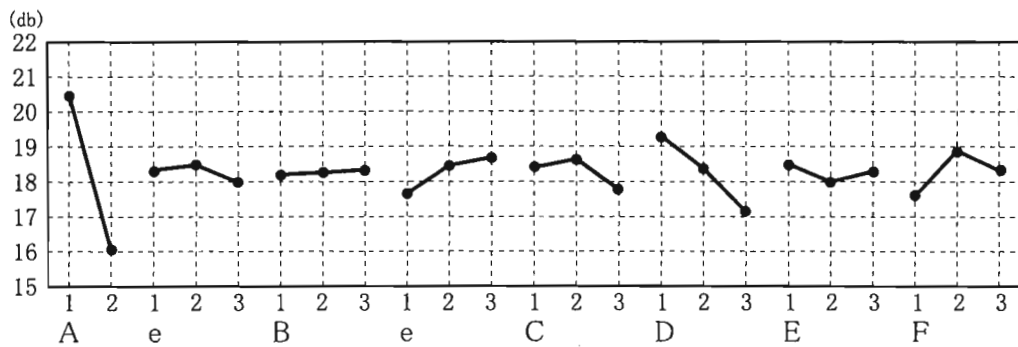


図6 SN比の要因効果図

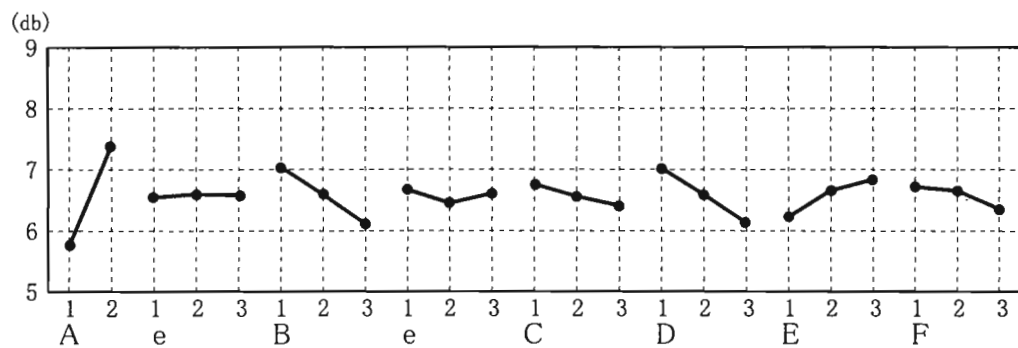


図7 感度の要因効果図

表7 制御因子の最適条件

制御因子 特性	A	B	C	D	E	F
SN比	A1	B3	C2	D1	E1	F2
感度	A2	B1	C1	D1	E3	F1
全体	A1	(B1)	C2	D1	(E3)	F2

表8 確認実験の結果

SN比	(db)			
	推定値	最適条件	プロトタイプ	利得
SN比	推定値	21.5	15.6	5.9
	確認実験	20.8	15.2	5.6
感度	推定値	6.7	6.5	0.2
	確認実験	8.4	6.8	1.6

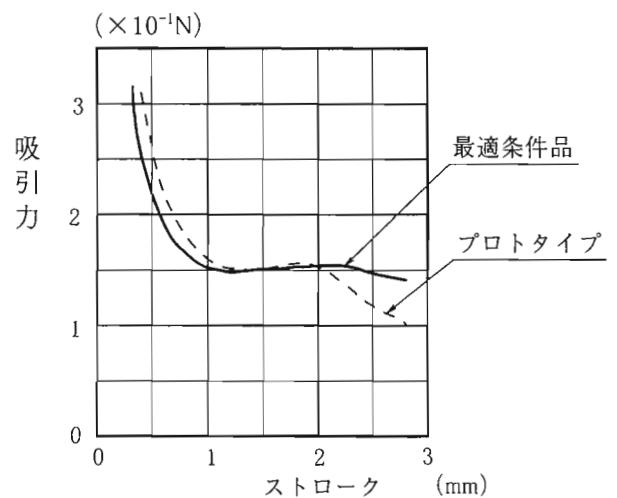


図8 ストローク吸引力特性の比較

## 4. おわりに

以上、品質工学を用いた比例ソレノイドの開発事例を紹介したが、品質工学を適用すると全てが目標通りに行くとは限らない。当然のことながら、本来のシステム（技術）が悪ければ目標達成はできない。ただし、品質工学は選択したシステムで目標達成が可能かどうかを、いち早く判定してくれるのである。従って、これまでのように「出来るはず」という幻想を抱いて、トライアル&エラーを繰り返し無駄な時間を浪費することは無くなり、結果として開発期間の短縮が可能になるのである。

## 文献

- (1) 矢野 宏；知りたい用語・気になる概念「品質工学」日本機械学会誌，97(910)(1994)
- (2) 林 達彦；再入門・品質工学，日経メカニカル(518)，(1997)
- (3) 矢野 宏；品質工学計算法入門，日本規格協会，(1998)



浜本 智

1983年入社  
油圧製造所技術部にて高速応答電磁弁、  
電磁マルチバルブ等の建設機械用コント  
ロールバルブの開発・設計に従事。  
現在に至る。