パラメータ設計の極意（無用の用）

―システムは複雑でなければ改善できない―

１．信頼性試験でトラブル発生

デイジープリンターを開発したとき、電磁石のプランジャーが内部から発生する発熱で「２度打ち」を起こす現象が発生した。

原因は、プランジャーが衝突するゴムの緩衝体が温度上昇で硬化するという現象が起きた。バウンド量の規格が 0.5mm 以内に対して最大 2.5mm まで上昇した。

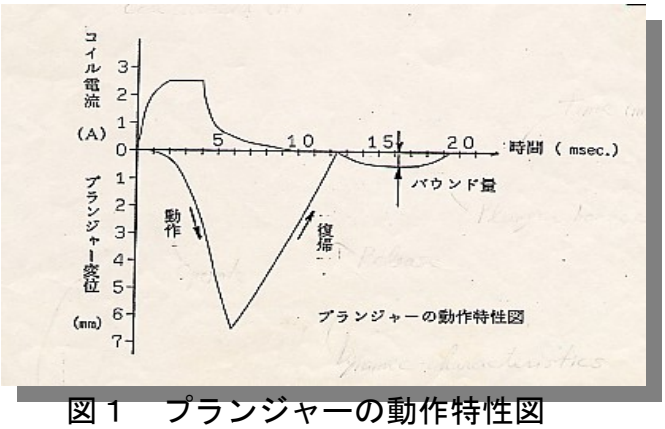


図１　プランジャーの動作特性図

電磁石のコイルに加わる入力電流によって、プランジャーは動作と復帰を繰り返しますが、復帰したときに緩衝体に衝突して跳ね返るためバウンド量が発生します。バウンド量を 0.5mm 以内に抑えることが今回の技術課題です。

２．従来のトラブル対策

温度が変化してもバウンド量が 0.5mm 以内になるようにゴムの材質を変更するか、それでも駄目なら、温度が 40℃以上にならないようにファンを付ける。しかし、この対策はコストアップになる。

３．品質工学の機能性の評価と改善（パラメータ設計）

品質工学ではコンピュータシミュレーションを活用して、プランジャーの衝突前後のマクスウェル運動方程式を作って、それぞれの機能についてパラメータ設計を行った結果、温度変化のノイズに強いシステムを考案することに成功した。

たくさんのシステムから「複雑なシステム」を創造することで、バウンド量を最小にすることができた事例である。

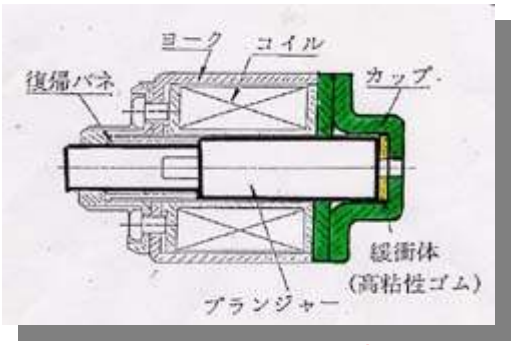


図２　従来品の構造図

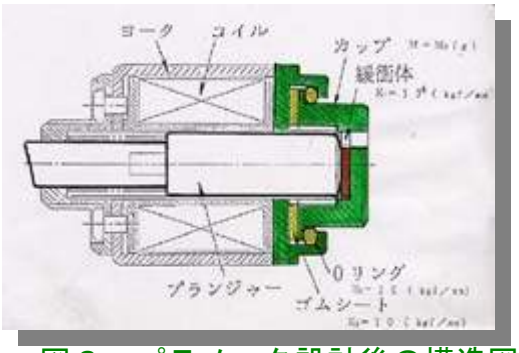


図３　パラメータ設計後の構造図

パラメータ設計においては、システムが複雑でなければ、大きな改善はできないと考えている。

その理由は、制御因子（部品）が沢山あることによってノイズと制御因子との交互作用が顕著に現れて、温度などのノイズの影響に強い制御因子の水準が見つかる。つまり、温度が変化してもバウンド量が変化しない設計ができるのである。

今回紹介するパラメータ設計は 1980 年に行われたものだが、バウンド量が最小となる最適なシステムを考案した当時としては画期的なパラメータ設計の事例である。

このシステムはデイジープリンタに用いる電磁ソレノイドであるが、最初のシステム設計では、図１のような単純な構造であったため、使っていると図 4 に示すように、電磁石自体の温度上昇でプランジャーの２度打ち現象が発生してバウンド量が許容差の 0.5mm を遥かに越える状態が起きたのである。

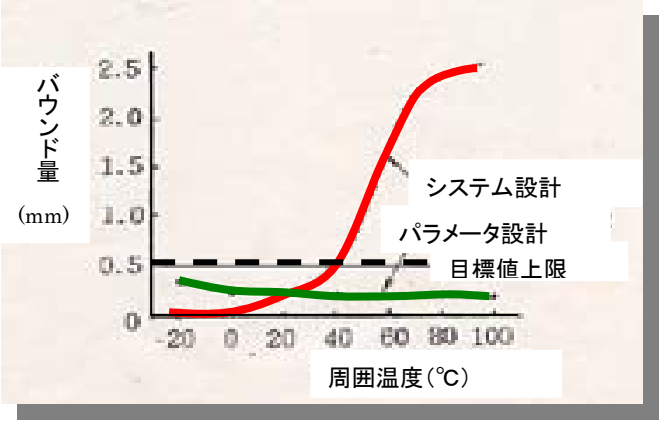


図 4　周囲温度とバウンド量の関係

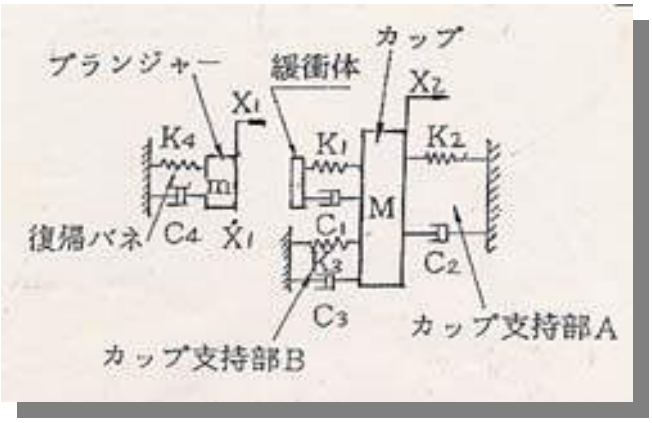


図 5　シミュレーションモデル

そこで、この問題を解決するために、図５のようなシミュレーションモデルの等価回路を考えて、プランジャーが衝突する前と衝突後のマックスウェルの運動方程式をつくり、パラメータ設計を行うことにしました。

M：カップの慣性質量
K_1：緩衝体の等価ばね定数
C_1：緩衝体の等価粘性係数
K_2：カップ支持部 A の等価ばね定数
C_2：カップ支持部 A の等価粘性係数
K_3：カップ支持部 B の等価ばね定数
C_3：カップ支持部 B の等価粘性係数
m　：プランジャーの慣性質量
K_4：復帰ばねの等価ばね定数
C_4：復帰ばねの等価粘性係数
ΔX_i：K_2，K_3 の圧縮量

■　プランジャーが緩衝体に衝突する前後の運動方程式を使って「バウンド量」を「ゼロ望目特性（バウンド量 X1=±０）」として解析する。

ゼロ望目特性の SN 比

$$\eta(db) = -10\log V_e = -10\log\left(\frac{1}{n-1}\right)\sum\left(X_1 - \overline{X_1}\right)^2$$

① プランジャーと緩衝体が接触中の等価モデル（バウンド量のゼロ望目特性）

$$m\frac{d^2X_1}{dt^2} = -K_1(X_1 - X_2) - C_1\left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt}\right) - K_4X_1 - C_4\frac{dX_1}{dt} + F_{set}$$

$$M\frac{d^2X_2}{dt^2} = K_1(X_1 - X_2) + C_1\left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt}\right) - K_2(X_2 + \Delta X_2) - C_2\frac{dX_2}{dt} - K_3(X_2 - \Delta X_3) - C_3\frac{d^2X_2}{dt}$$

② プランジャーが単独で運動中の等価モデル（プランジャーの過渡応答性）

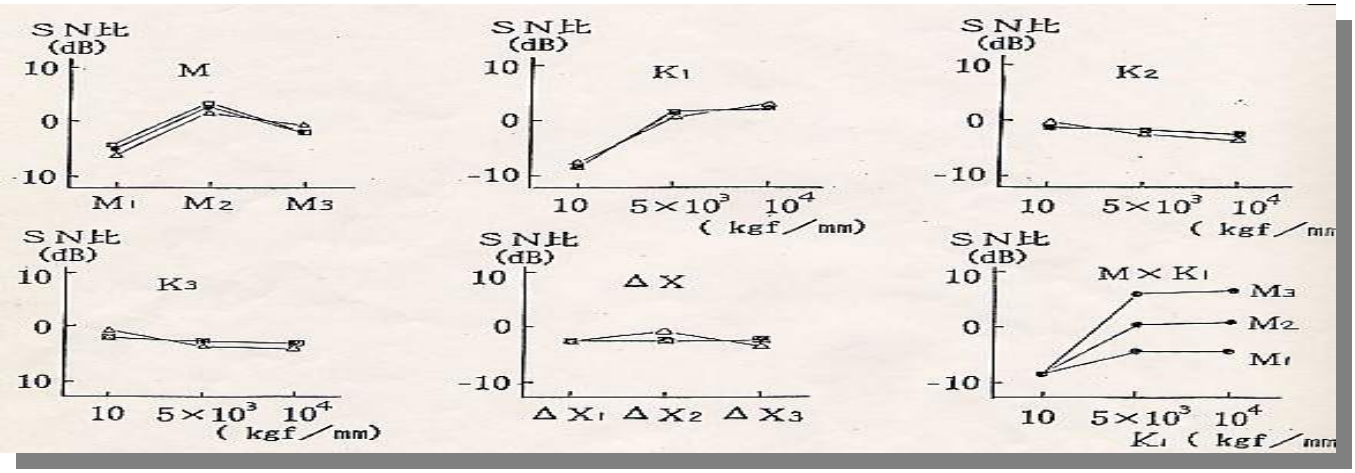
$$m\frac{d^2X_1}{dt^2} = -K_4X_1 - C_4X_1 + F_{set}$$

$$M\frac{d^2X_2}{dt^2} = -K_2(X_2 + \Delta X_2) - C_2\frac{dX_2}{dt} - K_3(X_2 - \Delta X_3) - C_3\frac{d^2X_2}{dt}$$

■ 制御因子と誤差因子の水準の設定

制御因子	水準		
	1	2	3
M：カップ慣性質量（g） K1：緩衝体ばね定数(kgf/mm) K2：カップ支持 A ばね定数(kgf/mm) K3：カップ支持 B ばね定数(kgf/mm) ΔX：K2,K3 の圧縮量（mm）	M1 １０ １０ １０ ΔX1	M2 5000 5000 5000 ΔX2	M3 10000 10000 10000 ΔX３
誤差因子	水準		
	1	2	3
M：カップ質量（g） K1：緩衝体ばね定数(kgf/mm) K2：カップ支持 A ばね定数(kgf/mm) K3：カップ支持 B ばね定数(kgf/mm) ΔX：K2,K3 の圧縮量（mm）	−10% −20% −20% −20% −40%	0 0 0 0 0	+10% +20% +20% +20% +40%

■ 要因効果図の作成



コンピュータシミュレーションの場合、制御因子の水準は自由に選択できるから、ばね定数は非常に大きな範囲に設定した。誤差因子の水準幅も大きく設定した。

直交表 L27 と L18 と L36 でシミュレーションによる実験を行った結果の分散分析で，**寄与率**を比較すると下表のようになる。要因効果図もほぼ同じ傾向を示す。**L27 は交互作用を求められるが，L18 の誤差と一致している。**この交互作用はばね定数の水準幅を大きく設定したために生じたものであるから，ばね定数 K1 を 5000 から 10000 の間にとっておれば交互作用はないことが分かる。

新しいシステムに変更すれば，K1 の最適条件は 10000 であるから，交互作用は存在しないことになる。

Control Factor &Interaction	L27	L18	L36
M; Inertial Mass of cap	22.6	27.3	26.2
K1; Stiffness of damping plate	57.7	40.9	46.9
K2; Stiffness of support portion A	0.3	0.2	0.2
K3; Stiffness of support portion B	0.5	3.9	2.0
⊿X; Deflection of K2,K3	0.2	9.7	0.9
M×K1; Interaction	16.0	-	-
K1×K2; Interaction	0.5	-	-
e ; Error	2.2	18.0	23.8
T; Total (%)	100	100	100

Comparison of contribution ratio

設計段階	平均値	ばらつき	品質損失（円）	コスト（円）	全損失（円）
初期設計	2.230	5.160	10,320	C	10,320＋C
パラメータ設計	0.375	0.154	308	C＋15	323＋C
許容差設計	0.240	0.068	136	C＋15	151＋C

表 3.　設計の各段階における品質損失とコストの比較

品質損失は市場における損失で、下式の「損失関数」を用いる。

$$L(\text{円}) = \frac{A_0}{\Delta_0^{\,2}} \times \sigma^2 = \frac{4500}{1.5^2} \times \sigma^2$$

ここに A_0（円）は機能限界 Δ_0=1.5mm を越えたときの損失金額(4500 円)

4．考　察

1．　初期のシステム設計は構造が簡単で改善の余地が少なかった。
2．　シミュレーションを行ったため、新しいシステムを考案することができた。
3．　たくさんの制御因子とノイズの非線形効果でばらつき改善ができた。
4．　僅かなコストアップで品質改善を図ることができた。

５．２１世紀の品質工学（標準 SN 比）

最近の品質工学においては、望小特性のような加法性のない品質特性ではなく、加法性の高い機能性の評価が普通であるが、更に応用範囲が広く「再現性」が高い「標準 SN 比」という概念を用いてパラメータ設計することが当たり前になってきた。

■　このソレノイドでは、プランジャーが単独で飛行中の「機能性」は次のように評価する。
すなわち、入力電流（M）を「信号因子」と考えて、出力変位(y)の過渡特性の機能性を評価すればよいのである。　この場合、時間は「標示因子」である。　理想機能は　$y(t)=\beta M(t)$　と考える。

時間 / ノイズ	T1	T2	T3	T4	T5
N0 【M(t)】	y_{101}	y_{102}	y_{103}	y_{104}	y_{105}
N1	y_{111}	y_{112}	y_{113}	y_{114}	y_{115}
N2	y_{121}	y_{122}	y_{123}	y_{124}	y_{125}

N0：出力変位の標準条件でこれを信号として、N1 と N2 で SN 比を求める。
N1：正側の最悪条件　N2：負側の最悪条件　Ti：過渡応答時間
このような機能性の評価は「２１世紀の品質工学」と呼ばれている。