

“閉じられた世界から開かれた世界へ”

2016 年新春講演

原 和彦

「遺囑（ゆいげ）」という言葉を使い、死に臨んでこの世に残しておきたい言葉として、日頃からのライフワークとしている持論を述べてみたい。

■ ノーベル賞の受賞と最近のモノづくりの世界

昨年は大村博士がノーベル賞の生理学・医学賞の受賞は特筆すべきことである。「イベルメクチン」の発明で熱帯で流行する寄生虫病に威力を発揮し多くの人々を救ったことは素晴らしいことであるが、この薬をマイクロソフトのビルゲイツ夫妻の財団が4700億円寄付したことに感動した。

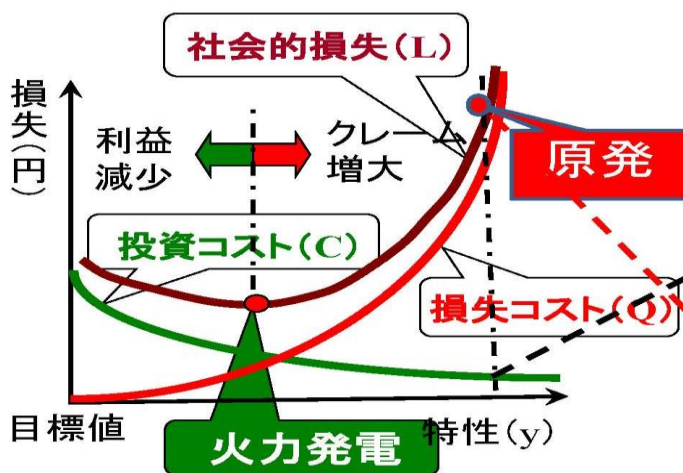
その反面では、世の中では不祥事件や事故が頻発していることは残念である。

東洋ゴムや三井不動産の旭化成偽装事件やVW(フォルクスワーゲン)の排ガス規制問題は恣意的に行われた確信犯の事件や、自動車のブレーキやエアバック問題や原発などの事故が頻発しているのが実態なのである。

原発の損失は30兆円以上

— 社会的損失(原発 > 火力発電) —

社会的損失(L円) = 投資コスト(C円) + 損失コスト(Q円)



➤ 原発の投資コスト：
福島原発は4基で約
1兆6千億円

➤ 原発の損失コスト：
廃炉までの費用は約
30兆円で30年以上
と考えられている。

原発の場合で説明すると、「投資コスト」と「市場品質コスト」のアンバランスが招いた結果だと考えている。

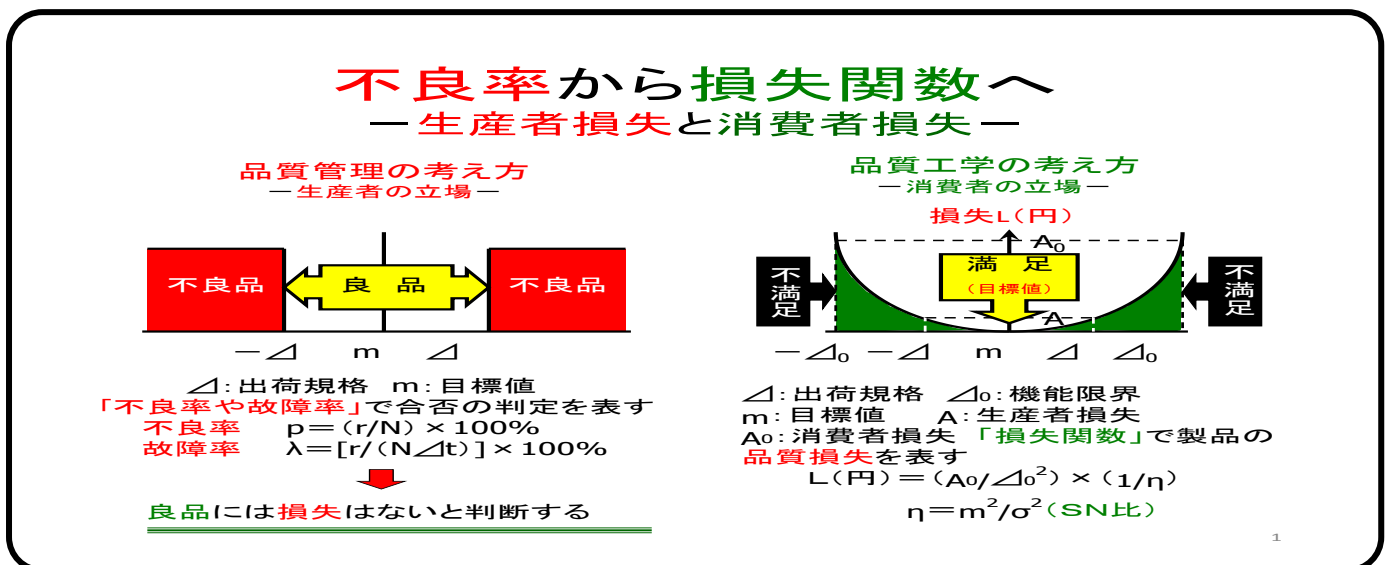
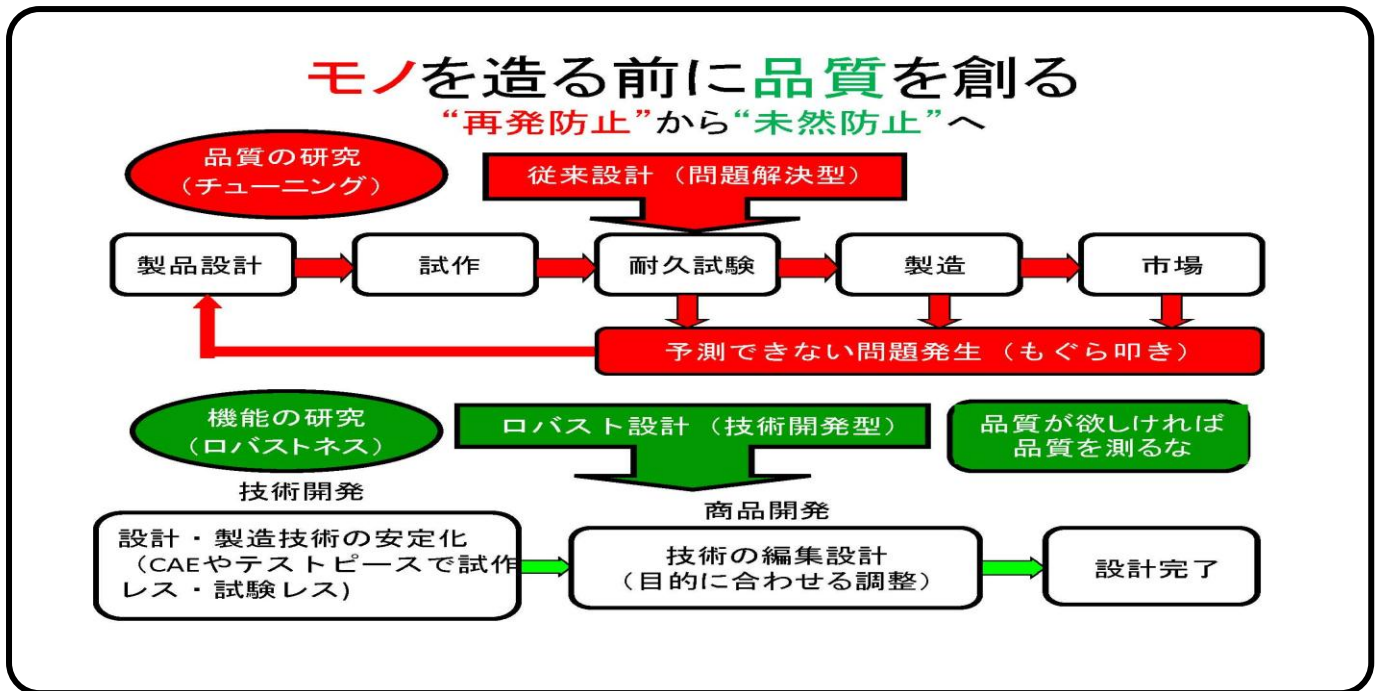
最近ドイツで第4次産業革命と称して生産システムの総合化（インダストリ4.0）でIT+ロボットの生産で労働力の削減を考えているが、VWの排ガス規制問題のようなトラブルが出る原因は、ものを効率的に生産することが先行して、品質工学の「ものを作る前に、品質を創る」機能性評価の考え方が欠如しているからである。

■ 戦後のモノづくりの変遷と品質工学の役割

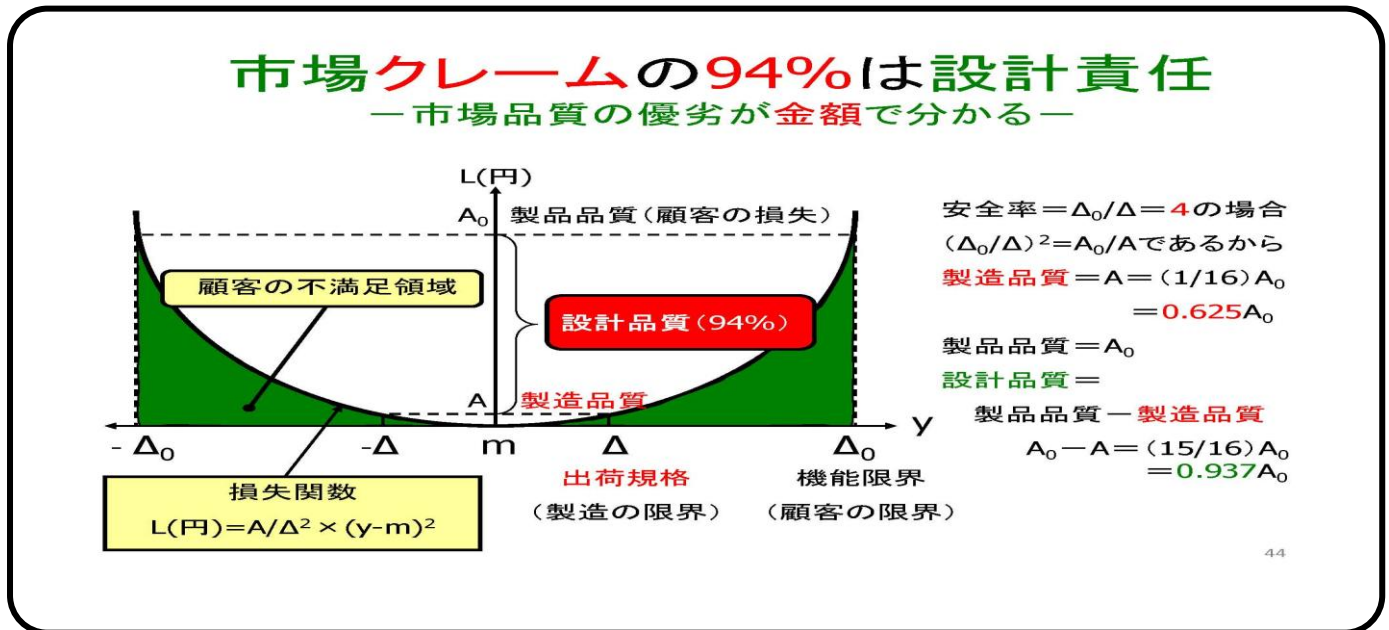
戦後、日本のモノづくりは、田口先生のビデオで説明されたように、モグラたたきの問題解決型の開発体制から出発したが、米国のデミング博士による「品質管理」が普及して、製品の出荷品質は向上したが、出荷前の工程品質の評価は「不良率」であって、出荷後の市場品質は「故障率」で評価していたが、いずれも市場で事故が起こらないと分からないのが実情であった。

それに対して、「品質工学」では、モノを作る前に、技術開発段階で「機能性評価」をSN比と損失関数で行い、市場品質を創ることで、トラブルを未然防止して、「開発期間の大幅な短縮」を図ることができたのである。

モグラたたきの従来設計を「**閉じられた世界**」とすれば、品質工学の機能性評価を活用したロバスト設計は「**開かれた世界**」の開発ということができる。



品質工学では、安全率を4とした場合、市場のトラブルは製造責任は6%しかなく、**94%が設計責任**と考えている。市場でトラブルが起こるのは、検査に合格した製品の品質が悪いからである。



■ ノーベル賞とアブダクション思考

最近目立つノーベル賞受賞には、偶然からの発見というセレンディピティという言葉も使われている。ノーベル賞クラスの発見は論理では類推できない偶然性が必要であること、つまり開かれた世界であることを示している。超一流の科学者は、開かれた世界にチャレンジしているが、一流以下の科学者は閉じられた世界から離れないので、品質工学の考え方は理解できないのである。

田口先生が数々の基本機能を提唱されたが、いずれも**アブダクション思考のひらめき**によるものである。

アブダクション思考 (仮説的推論) では

13568=3 35280=3 48920=4 86938=6 56821=3 56390=?

(?) はいくつですか。

ところが、私達が受けた教育は $1 + 2 = 3$ という答えが一つしかない理論的な科学的思考の「閉じられた世界」の教育が主流を占めていたのである。

それに対して、技術的思考では、試行錯誤のアブダクション思考で無数の答えが存在する「開かれた世界」の課題を解決することが大切だから、 **$1 + 2 = 3$ にはならない**のである。

日本でトラブルが絶えないのは、大学教育をはじめ、企業のものづくりのやり方に大きな欠陥があるからです。

大学では「専門技術 (電気・機械・化学など)」を教えているが、専門技術を評価する「評価技術」は教えていないことが問題である。

■ 「科学的思考」から「技術的思考」へ

私が田口哲学に目覚めたのは、47歳（1980年）である。
開発した製品は設計段階で「信頼性試験」を行って出荷したのだが、出荷後に市場でトラブルが発生したことで、仕事のやり方に疑問を抱き品質工学の道に入った。

「科学的思考」時代（閉じられた世界）

- 1953年 静岡大学工学部で鴨川教授の助手として毎秒1万コマの高速度カメラを設計して島津製作所で製品化
- 1957年 松下電工（株）入社、技術部電気特別研究課に所属して、日本で最初のはがき切手自動販売機を開発して、郵政省へ納入
- 1966年～1971年 総合技術研究所で小型歯車の研究（0.1モジュール）や世界最高速の電磁カウンタの開発
- 1969年（30歳）欧米視察（電磁カウンタ調査と欧米の大学訪問45日間の旅）
- 1970年 松下幸之助社主の依頼でPHP販売機完成
- 1971年～1984年 時計事業部で技術部長として、水晶時計やタイマーの開発指導
TQC推進責任者としてデミング賞受賞のために貢献（S-H変換を確立）



「技術的思考」時代（開かれた世界）

- 1980年（47歳） 田口玄一先生の指導で、品質工学の道に入る。
- 1980年～1994年 中部品質管理協会での田口先生の指導会に参加する。
- 1984年～1990年 電機開発研究所技師長として、世界最小有極リレーの開発
- 1993年（59歳） 品質工学会設立 副会長
- 1994年（60歳） 松下電工（株） 定年退職
- 1994年（60歳） 関西品質工学研究会を設立して会長就任
- 2000年（66歳） 関西品質工学研究会 会長退任して顧問
- 2002年（68歳） 大阪市大大学院（鈴木研究室）で品質工学講義
- 2004年（70歳） 日本機械学会関西支部学会貢献賞受賞
- 2004年（70歳） 品質工学会貢献賞 金賞受賞
- 2005年（71歳） JAXA（日本宇宙開発機構）のロケット打ち上げ試験の指導
- 2008年（74歳） 静岡大学特別講師（品質工学）4年間
- 2010年（76歳） 品質工学会副会長退任して名誉会員
- 2015年（82歳） 日本の多数の企業の指導ができたのは、品質工学が専門技術を評価する汎用技術であったからである。

■ ロケットの打ち上げ失敗とその後

1998年にHIIAロケットの打ち上げ失敗の原因が、当時の宇宙開発事業団から「**海底から回収したエンジンの液体水素ターボポンプのインジェーサ翼に大きな欠損した破面があり、この破面が極低温下で設計の限界を超えたキャビテーションと振動による疲労破壊の様相が確認された。**」という報道が行われた。

いかにも科学的な説明で国民は騙されそうだが、事故が起こることが事前にわからなかったと言いつけているに過ぎないのである。そのために、数百億円の費用が使われていたのである。

このことを私がメールで、「**極低温下（-40℃）と極高温下（+80℃）や振動やキャビテーションの大小を外乱ノイズと考えて、環境条件の違いによってトラブルが起きない「ロバスト設計（頑健な設計）を行えばよい**」のだと指摘したところ、JAXAからご意見拝聴と信頼性担当執行役員と二名のプロジェクトマネージャーが訪ねてこられた。JAXAではトラブル個所を直して、地上で試験した結果問題がないので、1カ月後に種子島で打ち上げることになった。彼らに従来の開発のやり方のまずさを説明したところ、彼らは柔軟な思考の持ち主であったため、その後のロケット打ち上げでは事故がほとんど起きなくなった。

■ 品質工学の宇宙機への適用調査、検討（JAXAホームページから）

Study of application to quality engineering for spacecraft
宇宙開発事業団契約報告 NASDA Contract Report ■発行機関など
宇宙開発事業団 National Space Development Agency of Japan
(NASDA) 発行年月日：2001-05-31 ■抄録など

品質工学は、世界中で田口メソッドとして知られているが、日本の宇宙開発に対して効率よい技術開発を推進させ、その有用性を明確にする目的で本研究を行った。2つのワーキング・グループを組織し、以下の3テーマについて実験とデータ解析を行った。すなわち、

- (1) **ロケット用エンジンのターボポンプ難削材の高速機械加工**
- (2) **ロケット、宇宙機の誘導プログラムに関わる最適化
（品質工学適用効果の評価）**
- (3) **搭載機器データからの故障判定機能の設計
（品質工学適用可能性検討）**。

■最近では、イプシロンロケットの打ち上げのために2台のパソコンで品質工学の「MTシステム」を使って成功したことについては、共同開発者の手島昌一様からお話ししていただきます。

■パラメータ設計の極意(1980年の事例)

—システムは複雑でなければ改善できない—「無用の用」

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のである。

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。

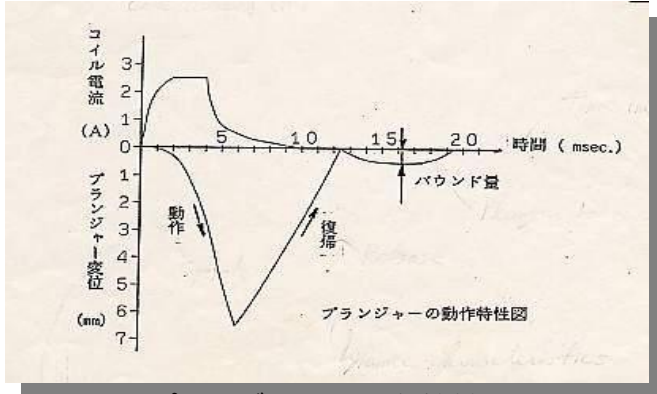


図1 プランジャーの動作特性図

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. システム設計とパラメータ設計

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使って、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。

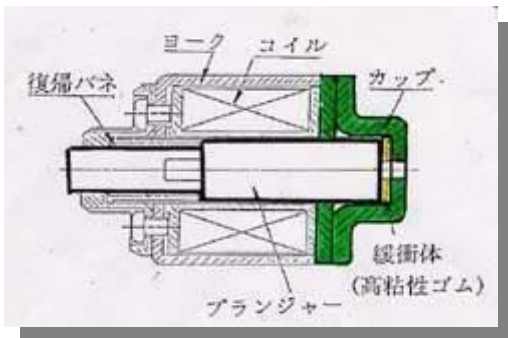


図2 従来品の構造図

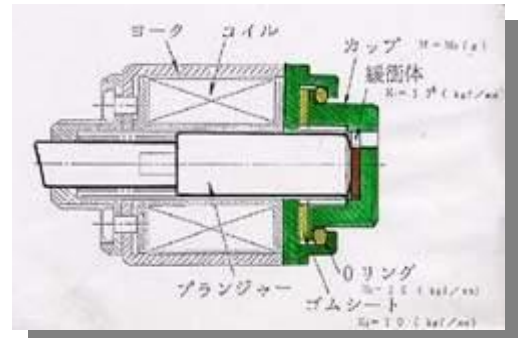


図3 パラメータ設計後の構造図

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ます。その理由は、制御因子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による非線形効果によって、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のである。

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 2 のような単純な構造であったため、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。

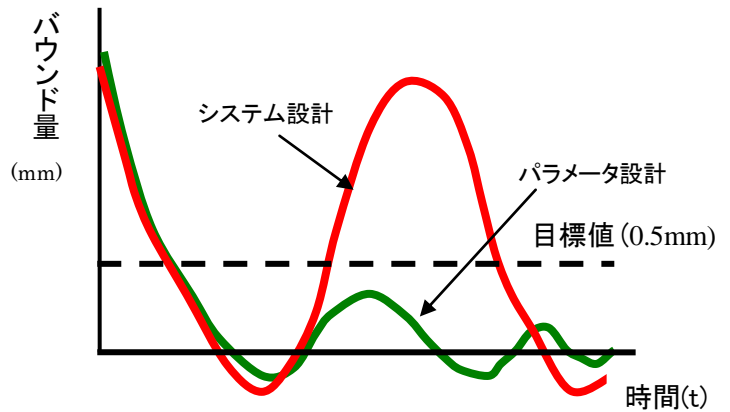
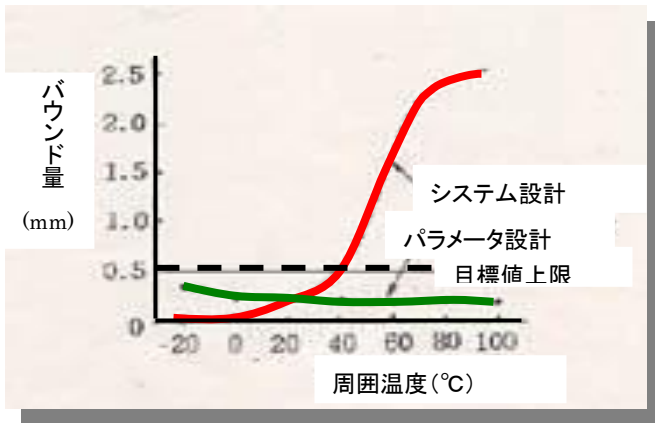


図 4 周囲温度とバウンド量の関係

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った。

- 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

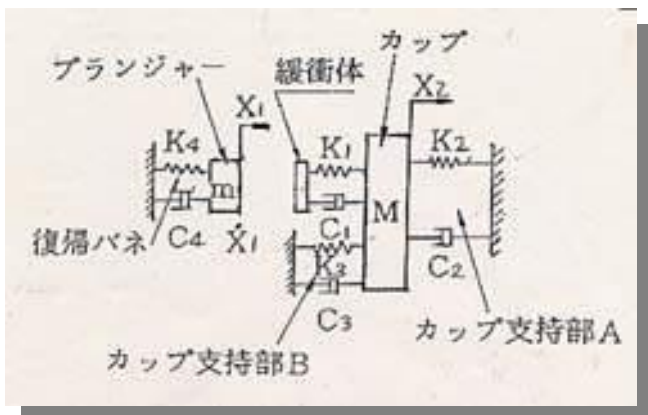


図 5 シミュレーションモデル

- プランジャ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 $X_1 = \pm 0$)」として解析した。
- ゼロ望目特性の SN 比

$$\eta(db) = -10 \log V_e = -10 \log \left(\frac{1}{n-1} \sum (X_1 - \bar{X}_1)^2 \right)$$

プランジャ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)

$$\begin{aligned}
 m \frac{d^2 X_1}{dt^2} &= -K_1(X_1 - X_2) - C_1 \left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt} \right) - K_4 X_1 - C_4 \frac{dX_1}{dt} + F_{set} \\
 M \frac{d^2 X_2}{dt^2} &= K_1(X_1 - X_2) + C_1 \left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt} \right) - K_2(X_2 + \Delta X_2) - C_2 \frac{dX_2}{dt} \\
 &\quad - K_3(X_2 - \Delta X_3) - C_3 \frac{d^2 X_2}{dt}
 \end{aligned}$$

■ 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: カップ質量 (g)	M1	M2	M3
K1: 緩衝体ばね定数(kgf/mm)	10	5000	10000
K2: カップ支持 A ばね定数(kgf/mm)	10	5000	10000
K3: カップ支持 B ばね定数(kgf/mm)	10	5000	10000
ΔX : K2, K3 の圧縮量 (mm)	$\Delta X1$	$\Delta X2$	$\Delta X3$
誤差因子	水準		
	1	2	3
M: カップ質量 (g)	-10%	0	+10%
K1: 緩衝体ばね定数(kgf/mm)	-20%	0	+20%
K2: カップ支持 A ばね定数(kgf/mm)	-20%	0	+20%
K3: カップ支持 B ばね定数(kgf/mm)	-20%	0	+20%
ΔX : K2, K3 の圧縮量 (mm)	-40%	0	+40%

■ 要因効果図の作成

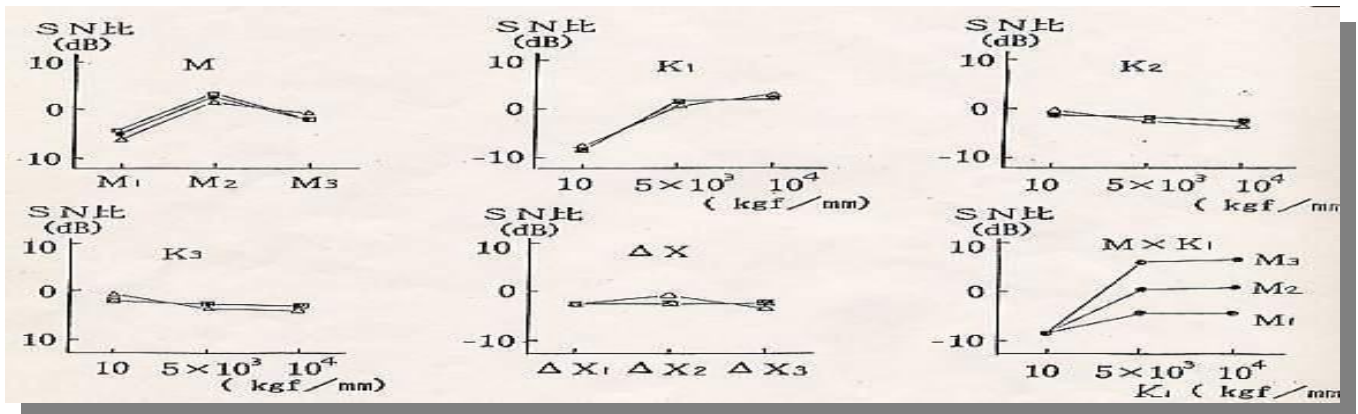


表2は、直交表(L27, L18, L36)で寄与率を比較したものである。L27は交互作用を求められるが、L18では交互作用は各列に均等に割りつけられて「誤差」と考えられる。CAEシミュレーションでは、モノにこだわらず、制御因子の水準幅を大きくとった「レスポンスの研究」で、最適システムを選択することが大切である。

制御因子と交互作用の寄与率	L27	L18	L36
M: カップの慣性質量(g)	22.6	27.3	26.2
K1: 緩衝体ばね定数(kgf/mm)	57.7	40.9	46.9
K2: カップ支持部 A のばね定数(kgf/mm)	0.3	0.2	0.2
K3: カップ支持部 B のばね定数(kgf/mm)	0.5	3.9	2.0
ΔX : K2, K3 の圧縮量(mm)	0.2	9.7	0.9
M x K1: M x K1 の交互作用	16.0	-	-
K1 x K2: K1 x K2 の交互作用	0.5	-	-
	2.2	18.0	23.8
合計(寄与率%の合計)	100.0	100.0	100.0

表2 L27, L18, L36 直交表による寄与率の比較

	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」を用います。

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

ここに A_0 (円) は機能限界 $\Delta_0=1.5\text{mm}$ を越えたときの損失金額(4500 円)

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、ゼロ望目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」は次のように評価します。

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す。この場合、時間は「標示因子」です。

理想機能は $y(t) = \beta M(t)$ と考えます。

時間 ノイズ	T1	T2	T3	T4	T5
N0【M(t)】	y101	y102	y103	y104	y105
N1	y111	y112	y113	y114	y115
N2	y121	y122	y123	y124	y125

N0:出力変位の標準条件でこれを信号として、N1とN2でSN比を求めます。

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」と呼ばれています。

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のである。

バウンド量の規格が 0.5mm 以内に対して最大 2.5mm まで上昇しました。

■仕事量は入力ではなく、出力で評価せよ

最近、TPP問題で日本の農業の将来の生き方が問題にされているが、インプット(入力)に対するアウトプット(出力)の生産性の悪さを改善しなければ、いずれは自然淘汰されるのは自明の理なのです。

農業に限らず、汗水たらして働いても、効率の悪い仕事を続けている限り、GDPの低下は明らかなのです。

機能性評価では、出力エネルギーは(S_T)で表され、仕事量は有効成分(S_β)と無効成分(S_N)に分割されて、出力は無効成分の最小化を図り S_β/S_N を最大にするように「**研究開発の生産性の最大化**」を図り、

直交表を活用した「パラメータ設計」で、「**駄目なものは駄目**」という結論を早く出すことを考えている。直交表は、システムの悪さを早く見つけるもので、最適条件を求めるのは技術者の「**技術力**」である。

“時間の壁を破れ”

—研究開発の生産性＝アイデアの生産性×**評価の生産性**—

物理学では仕事量は力と時間の積($F \times t$)で定義しているが、効率が問題にならない**自然現象の世界**ではそれでよいが、一生懸命長い間働いたけれどその成果がゼロだった時、その人の仕事量はゼロと考えるのである。

仕事量はアウトプット(出力)で測るべきで、インプット(入力)で測ってはならないことは**応用の世界**では明らかなことである。

(「実験計画法」下巻538ページ)