

高速度保護継電器用エアダンパ接点

Non-bouncing Contacts with Air Damping for High-speed Protective Relays

渡 井 三 夫* 新 井 健*
Mitsuo Watai Takeshi Arai

歌 川 正 博** 松 永 鍬 造***
Masahiro Utagawa Tetsuzô Matsunaga

要 旨

高速度保護継電器の接点として、固定接点部に空気制動効果を持たせたエアダンパ接点を開発し、動作時の反跳をほとんど完全に防止することができた。

この接点のチャタリング時間や、バウンスの発生限界などについて理論的解析を行なうとともに、実験によりその妥当性を検討した。

1. 緒 言

現在重要送電線、機器の高速度保護継電器としては誘導円筒形継電器が広く用いられており、安定した構造と動作特性で保護の重責にこたえている。

しかしこれら電磁形継電器の出力部としての接点は、運動体の衝突、接触という現象によっているため、接点のチャタリング(主として局部的な接触部の振動に起因し、比較的短い周期で接点が開閉を反覆する現象)や、バウンス(全般的な可動部の振動に起因して、比較的長い周期で接点が開閉を反覆する現象)というような反跳現象による接点障害からは解放されていない。特にキャリヤリレー方式においては多くの高速度保護継電器が使用され、それら継電器の接点協調を必要とするので、接点の反跳には注意を要する。

このため保護継電器の接点機構については長い間研究が続けられてきたが、まだ決定的な解決は得られていないというのが実情であろう。

日立製作所においても、この困難な問題の解決に努力を続け、本報告に記すような空気制動効果を有するエアダンパ接点を開発した。この接点は工場における試験と、数年来の実用結果から、ほぼ現在の保護継電器が要求する範囲においては十分に反跳を除くことができるようになったので、その構造と現象の理論的解析などについて述べる。

2. 接 点 の 構 造⁽¹⁾

図1はエアダンパ接点を取り付けた誘導円筒形継電器要素を、図

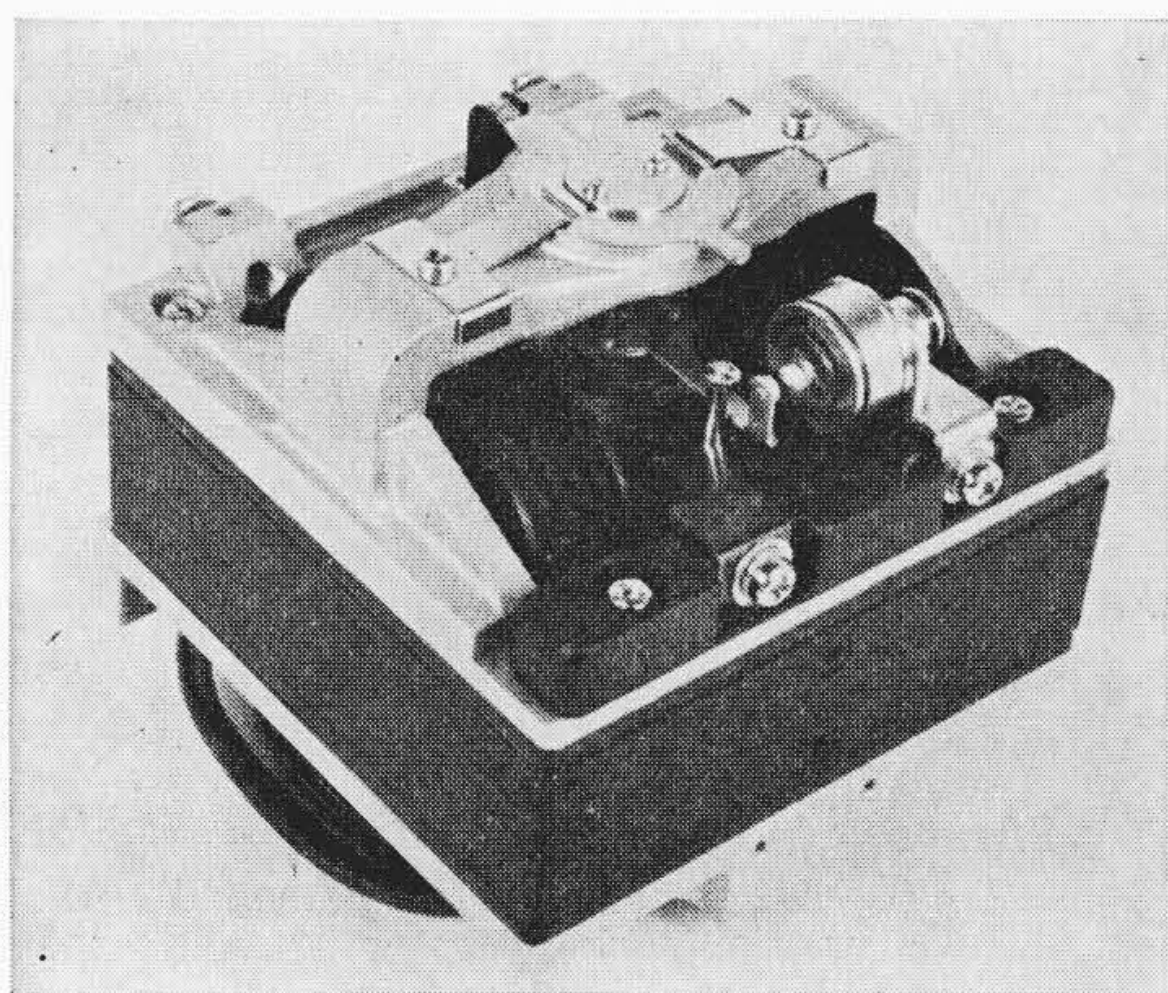


図1 誘導円筒形継電器要素

2は可動部を、図3は接点の構造を示したものである。継電器の動作値以上の電氣的入力を与えられると、誘導円筒が反時計方向に回転し、可動接点が固定接点に接触して接点回路を形成する。固定接点にはピストンを装着してあり、これが可動接点の圧力によりシリンダ内部を移動する際の空気制動効果により、可動部の運動のエネルギーを吸収して接点の反跳を防止する。

なお継電器入力が断たれて接点が開路する際、可動部は直ちに復帰するが、固定接点は制動効果によりやや遅れて復帰するので継電

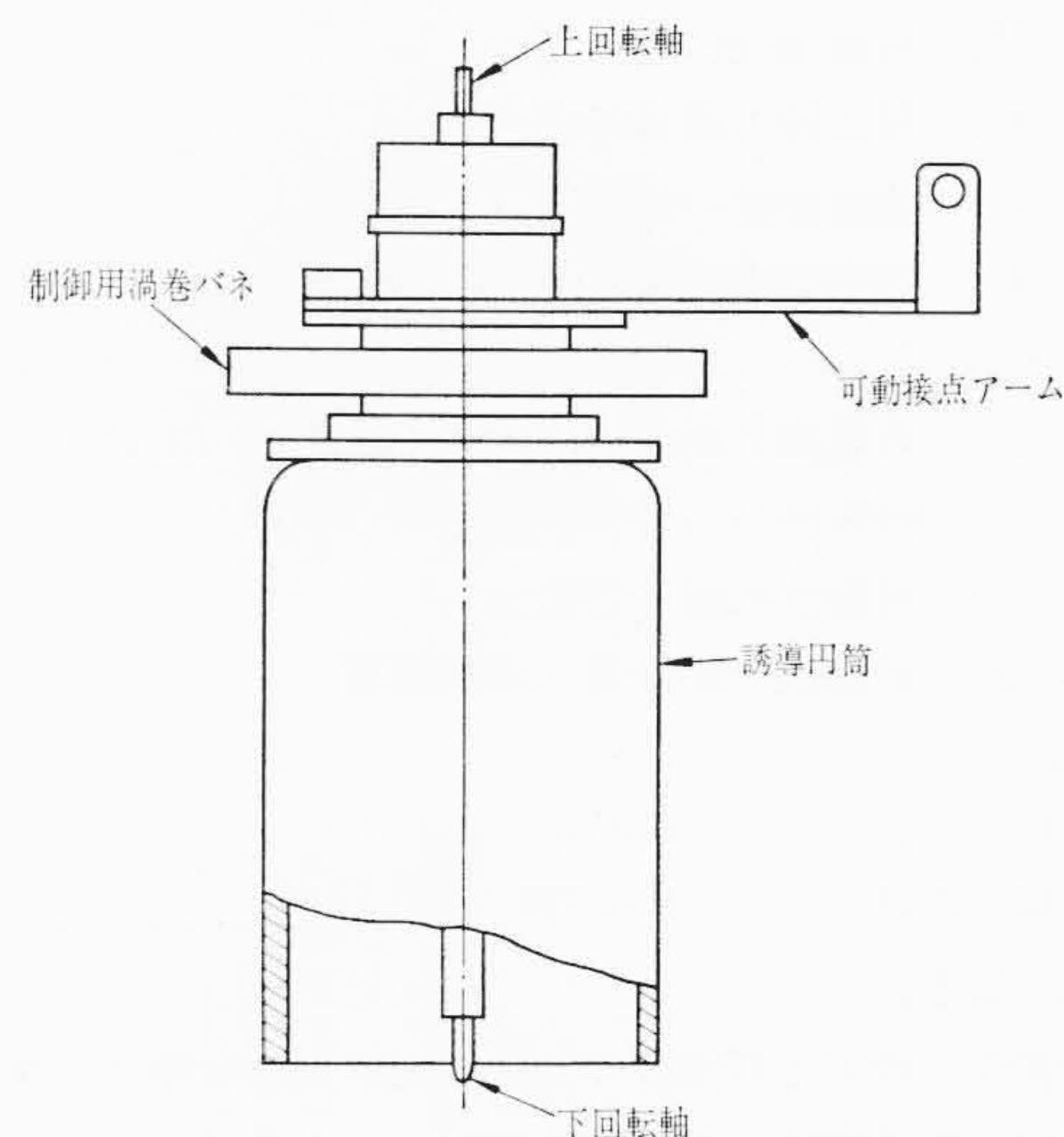


図2 誘導円筒形継電器の可動部

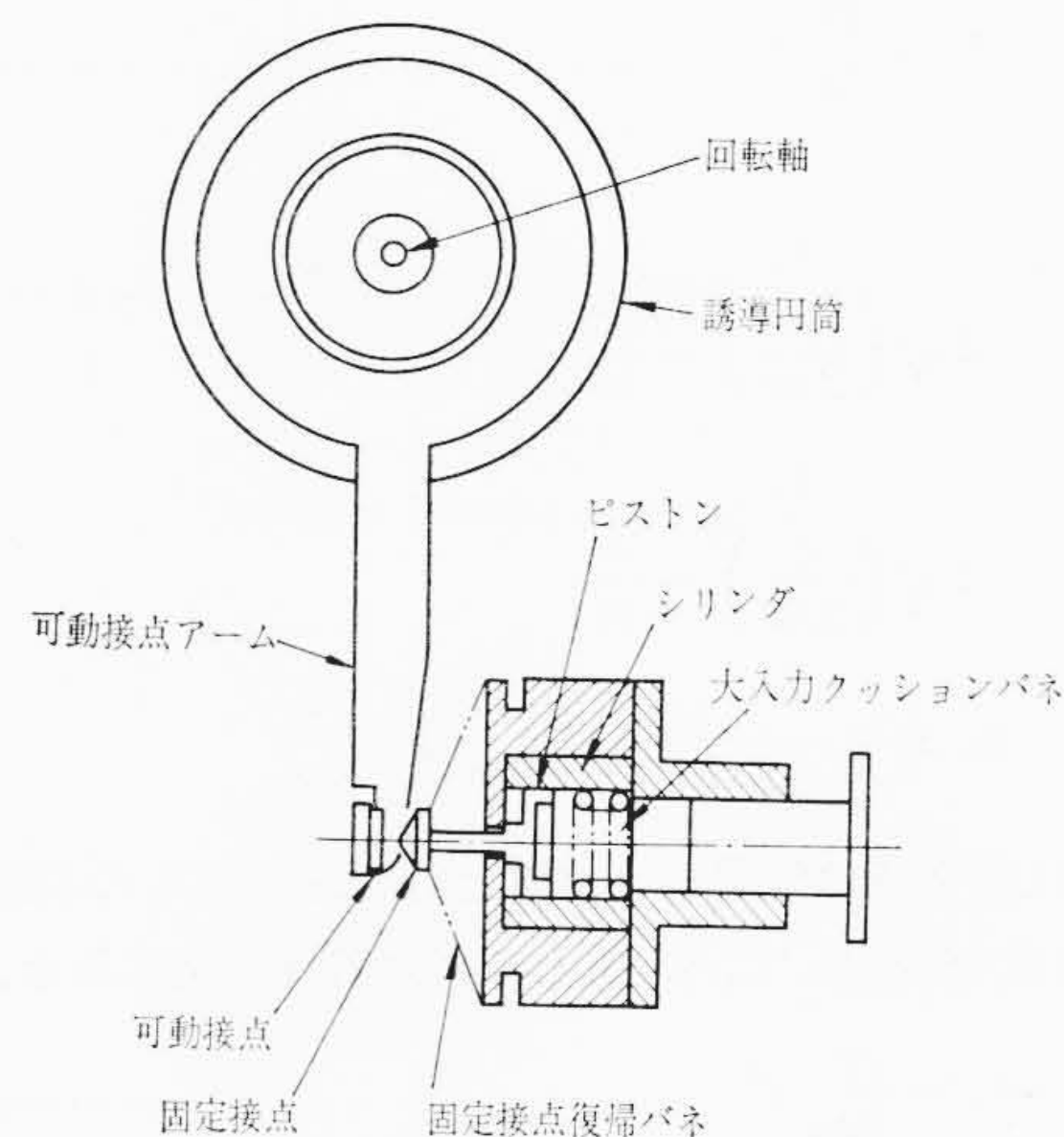


図3 エアダンパ接点の構造

* 日立製作所那珂工場

** 日立製作所中央研究所 工学博士

*** 日立製作所機械研究所

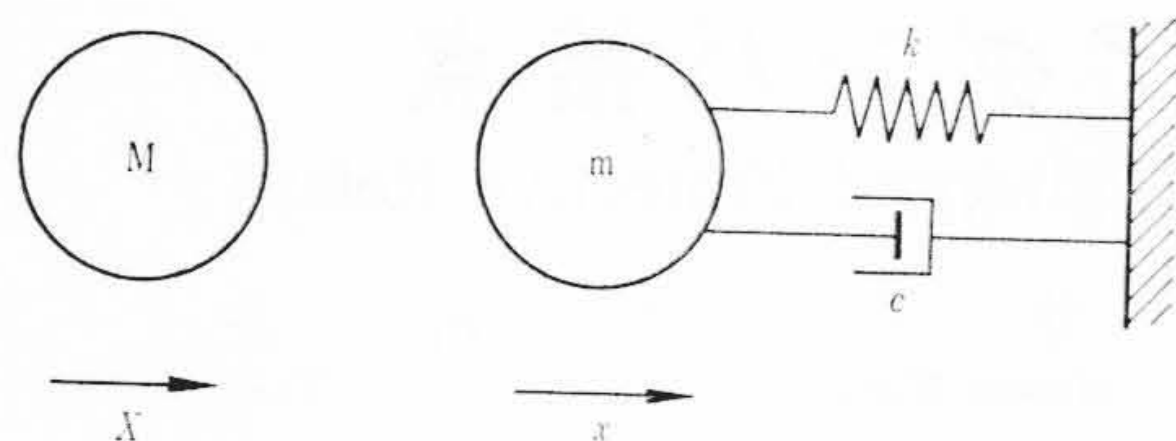


図4 エアダンパ接点のモデル図

器の接点開路時間はきわめて短くなり、保護継電器用としては好適である。

3. 理論的検討

3.1 チャタリング時間

接点を不完全弾性体としてその衝突現象を取り扱い、衝突後接点が接触している時間内のことは考えず、離れてから再び接触するまでの時間を計算する。

図3に示す接点を図4のような系におきかえる。ここで

V_n, v_n : 可動, 固定接点の n 回目の衝突後接点が離れ始める時の速度

V_n', v_n' : 可動, 固定接点の $n+1$ 回目の衝突直前の速度

t_n : n 回目の衝突から $n+1$ 回目の衝突までの時間

M, m : 可動, 固定接点の等価質量

ε : 両接点間の反発係数

P : 可動接点に働く力

d : 静止時の接点間げき

c : 固定接点の減衰定数

k : 固定接点復帰バネのバネ定数

とし、さらに

I : 可動部の回転軸に対する慣性モーメント

l : 回転軸から可動接点までの距離

T : 可動部に働く回転力

$\omega, \ddot{\omega}$: 可動部の回転角, 角加速度

とすると,

$$\begin{aligned} I\ddot{\omega} &= T, & X &= l\omega \\ \therefore M &= I/l^2 & P &= T/l \end{aligned} \quad (1)$$

なる関係にある。

図5は変位, 時間と可速度の関係を図示したもので, n 回目の衝突後の両接点の運動は, M について,

$$X = V_n t + \frac{P}{2M} t^2 \quad (2)$$

$$V = V_n + \frac{P}{M} t \quad (3)$$

m について

$$x = \frac{v_n}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (4)$$

$$v = \frac{v_n}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}} (s_1 e^{s_1 t} - s_2 e^{s_2 t}) \quad (5)$$

$$\text{ただし, } s_1, s_2 = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

で, X, x は衝突時の位置を 0 位置として求めたものである。

次に(4)式を展開して, t^3 以上の高次項を省略すると,

$$x = v_n t - \frac{cv_n}{2m} t^2 \quad (4')$$

したがって n 回目の衝突から $n+1$ 回目の衝突までの時間 t_n は(2)

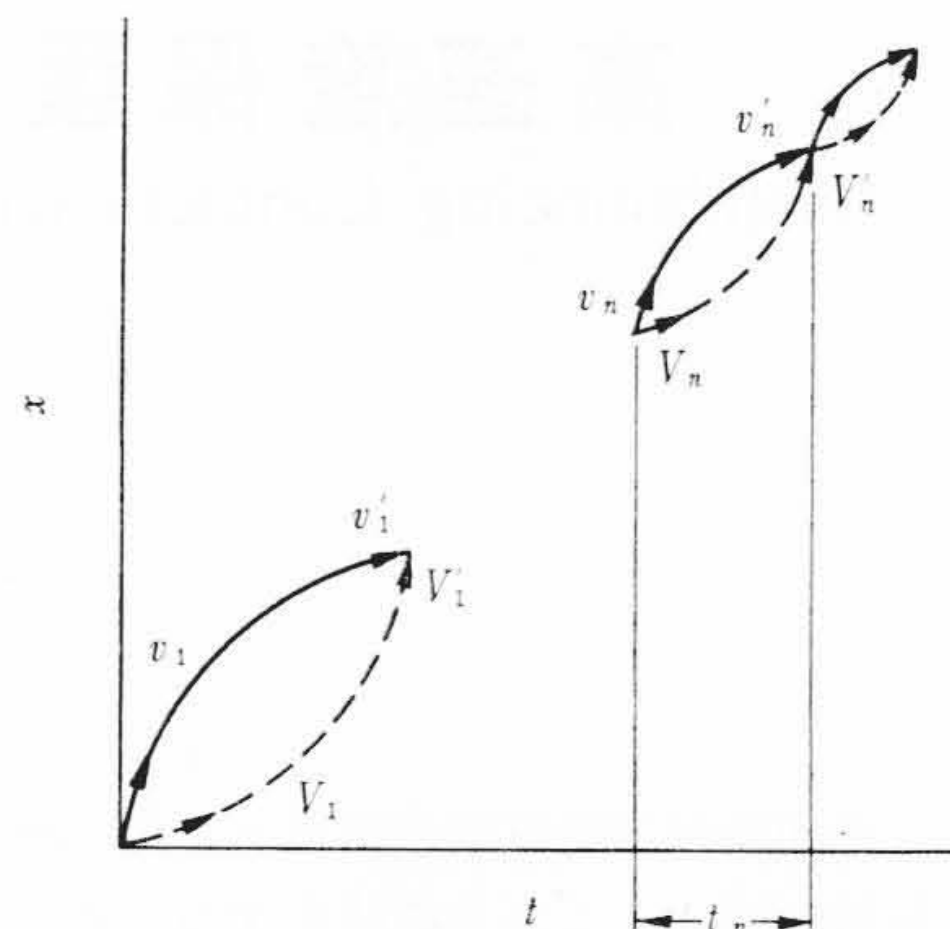


図5 チャタリング時間の説明図

式および(4')式の t に t_n を入れて等しくおく。すなわち

$$V_n t_n + \frac{P}{2M} t_n^2 = v_n t_n - \frac{cv_n}{2m} t_n^2$$

$$\therefore t_n = \frac{2mM(v_n - V_n)}{mP + Mcv_n} \quad (6)$$

したがって

$$V_n' = V_n + \frac{P}{M} t_n \quad (7)$$

$$v_n' = v_n - \frac{cv_n}{m} t_n \quad (8)$$

ここで, それぞれ V_n', v_n' なる速度を持つ M, m が衝突すれば, 衝突後には

$$V_{n+1} = V_n' + (v_n' - V_n') (1 + \varepsilon) \frac{m}{m + M} \quad (9)$$

$$v_{n+1} = v_n' - (v_n' - V_n') (1 + \varepsilon) \frac{M}{m + M} \quad (10)$$

(6), (7), (8) 式より

$$V_n' - v_n' = v_n - V_n \quad (11)$$

が得られ, また衝突の基本式より

$$v_{n+1} - V_{n+1} = -\varepsilon (v_n' - V_n') \quad (12)$$

$$\therefore v_{n+1} - V_{n+1} = \varepsilon (v_n - V_n) \quad (13)$$

となる。(6) 式より

$$t_{n+1} = \frac{2Mm(v_{n+1} - V_{n+1})}{mP + Mcv_{n+1}} = \frac{2Mm\varepsilon(v_n - V_n)}{mP + Mcv_{n+1}} \quad (14)$$

次に 1 回目の衝突までの時間を考えると

$$v_0' = 0 \quad (15)$$

$$V_0' = \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \quad (16)$$

$$\therefore V_1 = \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \frac{M - \varepsilon m}{M + m} \quad (17)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \frac{(1 + \varepsilon)M}{M + m} \quad (18)$$

$$v_1 - V_1 = \varepsilon \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \quad (19)$$

チャタリング時間 T_c を計算するのには, まず(6), (14) 式から

$$t_n = \frac{2Mm\varepsilon^{n-1}(v_1 - V_1)}{mP + Mcv_n} = \frac{2Mm\varepsilon^n}{mP + Mcv_n} \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \quad (20)$$

$$\therefore T_c = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Mm\varepsilon^n}{mP + Mcv_n} \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \quad (21)$$

としてチャタリング時間が求められる。

接点が開離している時間は $n=1$ において最も大きく, 2 回目以降は順次減少していく。そこで t_1 がどのような傾向を持つかをさらに

検討するため(20)式において $n=1$ とすると,

$$t_1 = \frac{2Mm\varepsilon}{mP + Mcv_1} \sqrt{\frac{2Pd}{M}} \quad (22)$$

ここで

$$mP \ll Mcv_1$$

と仮定することができれば

$$t_1 = \frac{m \left(1 + \frac{m}{M}\right)}{c} \cdot \frac{2\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (23)$$

となる。すなわち t_1 は m が小さいほど, M, c が大きいほど小さくしうることがわかる。 $2\varepsilon/(1+\varepsilon)$ は ε に関して増加関数で $\varepsilon=1$ で1, $\varepsilon=0$ で0となるから ε は小さいほど t_1 は小さくなる。

3.2 バウンスの発生限界

次にチャタリングが終わり, 可動, 固定両接点と一緒に運動しているときには, 両接点の接触力(内力)を F とすると,

$$M\ddot{x} = P - F$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$$

$$\therefore (M+m)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P \quad (24)$$

上式より x を求め

$$F = P - M\ddot{x} \quad (25)$$

により接触力が求められ, $F \geq 0$ の間は可動, 固定接点間に接触を保つ。

したがってバウンスしない条件は

$$F \geq 0 \quad (t=0 \sim \infty \text{ において}) \quad (26)$$

である。 $F < 0$ になるときは $F=0$ の瞬間に両接点は離れ始めるが, そのときの速度を初期条件として

$$M\ddot{X} = P, \quad m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad X = x$$

なる関係よりバウンスの継続時間を求めることができるが, 本文ではバウンスを生じない条件を求めてみる。

(24)式の初期条件は(13), (19)式より

$$v_n - V_n = \varepsilon(v_{n-1} - V_{n-1}) = \varepsilon^n V_0' \quad (27)$$

で, $\varepsilon < 1$ であるから $n \rightarrow \infty$ において

$$v_\infty = V_\infty$$

となる。また(10), (12), (14)式より

$$v_{n+1} = v_n - \frac{cv_n}{m} \cdot \frac{2\varepsilon^n V_0'}{P + \frac{cv_n}{m}} + \varepsilon^n V_0' (1 + \varepsilon) \frac{M}{m+M} \quad (28)$$

$$\text{ここで, } m \ll M, \quad mP \ll Mcv_n \quad (29)$$

と仮定すると,

$$v_{n+1} - v_n = -\varepsilon^n (1 - \varepsilon) V_0'$$

$$\therefore v_{n+1} = v_1 - \varepsilon(1 - \varepsilon^n) V_0' \quad (30)$$

(29)式の仮定の下では(18)式より $v_1 = (1 + \varepsilon) V_0'$ となるので

$$v_{n+1} = \{(1 + \varepsilon) - \varepsilon(1 + \varepsilon^n)\} V_0'$$

$$\therefore v_\infty = V_0' \quad (31)$$

よって(24)式の初期条件は

$t=0$ において

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \\ \dot{x}=V_0' \end{array} \right\} \quad (32)$$

となる。

したがって(24)式の解は, $M \gg m$ として,

$$x = \frac{V_0'}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (33)$$

$$\text{ただし, } s_1, s_2 = -\frac{c}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}$$

次に $\ddot{x}_{\max}$ を求めるために, $t=t_0$ において $\ddot{x}=0$ とおき

表1 チャタリング, バウンスの関係項目

関係項目	チャタリング時間を短くするには		バウンスを生じにくくするには	
M : 可動部の等価質量		大		小
m : 固定接点部の質量	○	小	○	小
ε : 反発係数	○	小		—
P : 可動接点に働く力		大	○	大
d : 接点間げき		小		小
C : 固定接点の減衰定数		大	○	大
k : 固定接点のバネ定数	○	大	○	小

○ 特に影響の大きい項目

$$t_0 = \frac{1}{s_1 - s_2} \ln \frac{s_2^3}{s_1^3} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{\max} &= \frac{V_0'}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}} \frac{s_2 - s_1}{s_2} s_1^2 e^{s_1 t_0} \\ &= \frac{V_0'}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}} \frac{s_2 - s_1}{s_1} s_2^2 e^{s_2 t_0} \quad (35) \end{aligned}$$

となる。ここでさらに

$$\left(\frac{c}{2M}\right)^2 \gg \frac{k}{M} \quad \text{すなわち} \quad \frac{c}{M} \gg \frac{k}{c} \quad (36)$$

とすると

$$\ddot{x}_{\max} = \frac{V_0'}{2\sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}} (s_2 - s_1) \frac{s_1^2}{s_2} = V_0' \frac{Mk^2}{c^3} \quad (37)$$

となり, バウンスしない条件は $F = P - M\ddot{x}_{\max} \geq 0$ より

$$P \geq M\ddot{x}_{\max} = 2dM \left(\frac{Mk^2}{c^3}\right)^2 \quad (38)$$

である。この力が可動接点に働けばバウンスを生じなくなる。

以上の検討においては結果を初等数式で表わすために相当な省略を行なっているが, 各定数がチャタリング, バウンスにどのように影響するかを知るには十分であると考ええる。

表1はチャタリング時間を短くし, バウンスを生じないようにするためには, 各定数をどのように選んだらよいかを示したものである。

4. チャタリング時間などの数値的検討

前節では接点の接触を弾性体の衝突現象として取り扱い, 図4のようなモデルを考えた。このモデルの妥当性やチャタリング時間などに関し若干の数値検討を試みる。

可動部の等価質量は自由振動周期と, 接点部に既知の質量を付加した場合の自由振動周期とを測定することにより求めた。その結果

$$M = 9.84 \times 10^{-3} \quad (\text{g} \cdot \text{s}^2/\text{cm})$$

固定接点側の質量は接点およびピストンと, バネの1/3程度が有効と考え, 測定結果から,

$$m = 0.4 \times 10^{-3} \quad (\text{g} \cdot \text{s}^2/\text{cm})$$

復帰用渦巻バネ常数は, 実測の結果

$$k = 2 \quad (\text{g}/\text{cm})$$

である。

ピストン, シリンダの減衰定数については計算法もあるが, 加工精度, 摩擦などを考えると, 必ずしも正確な計算とはいえないので, やはり実測によって求めた。

図6に示すように固定接点と復帰バネを取り去り, 接点の部分に薄い銅板(重量 W_0)を取り付け, その上におもり W_1 を載せ, 荷重 $W = W_0 + W_1$ を変えてピストンの速度を測定した。ストロークを1, 2, 3 mmの三種に変えて測定した結果, 図7に示すように, 速度の一乗に比例するような減衰定数が得られた。すなわち

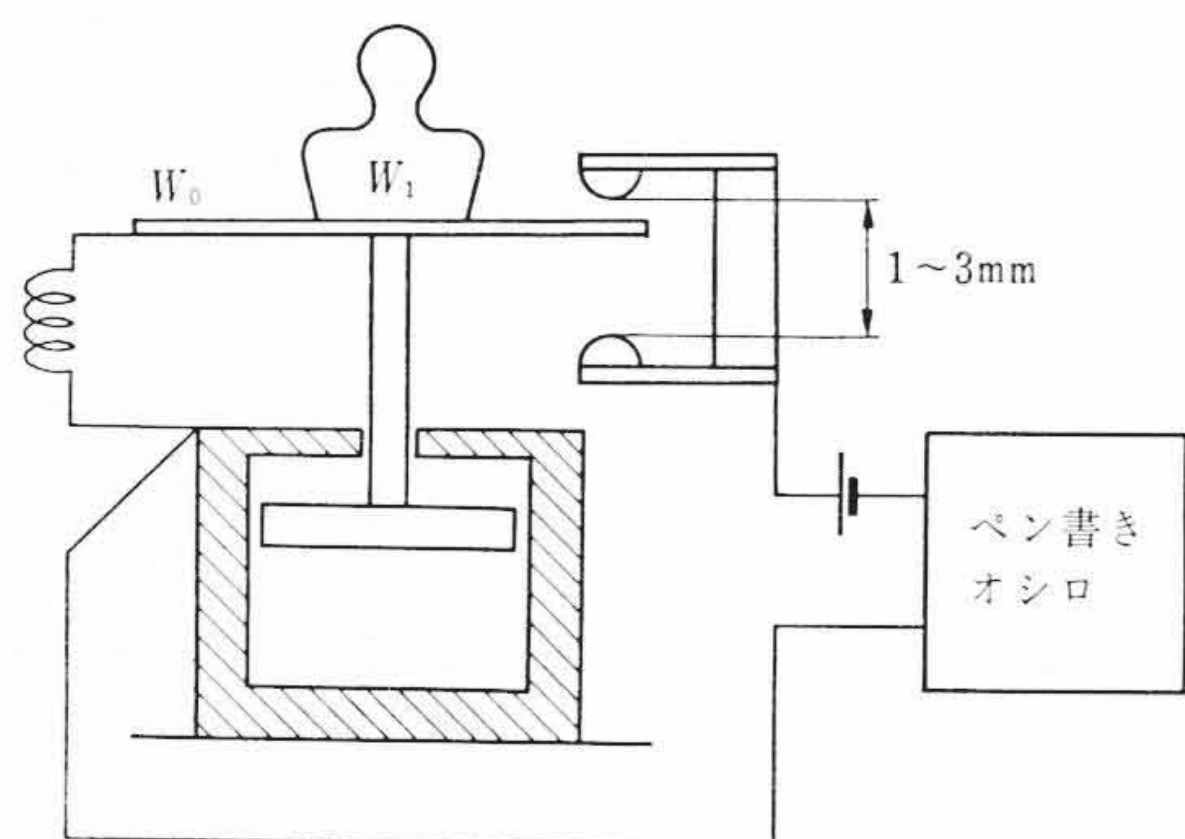


図6 エアダンパの減衰定数測定法

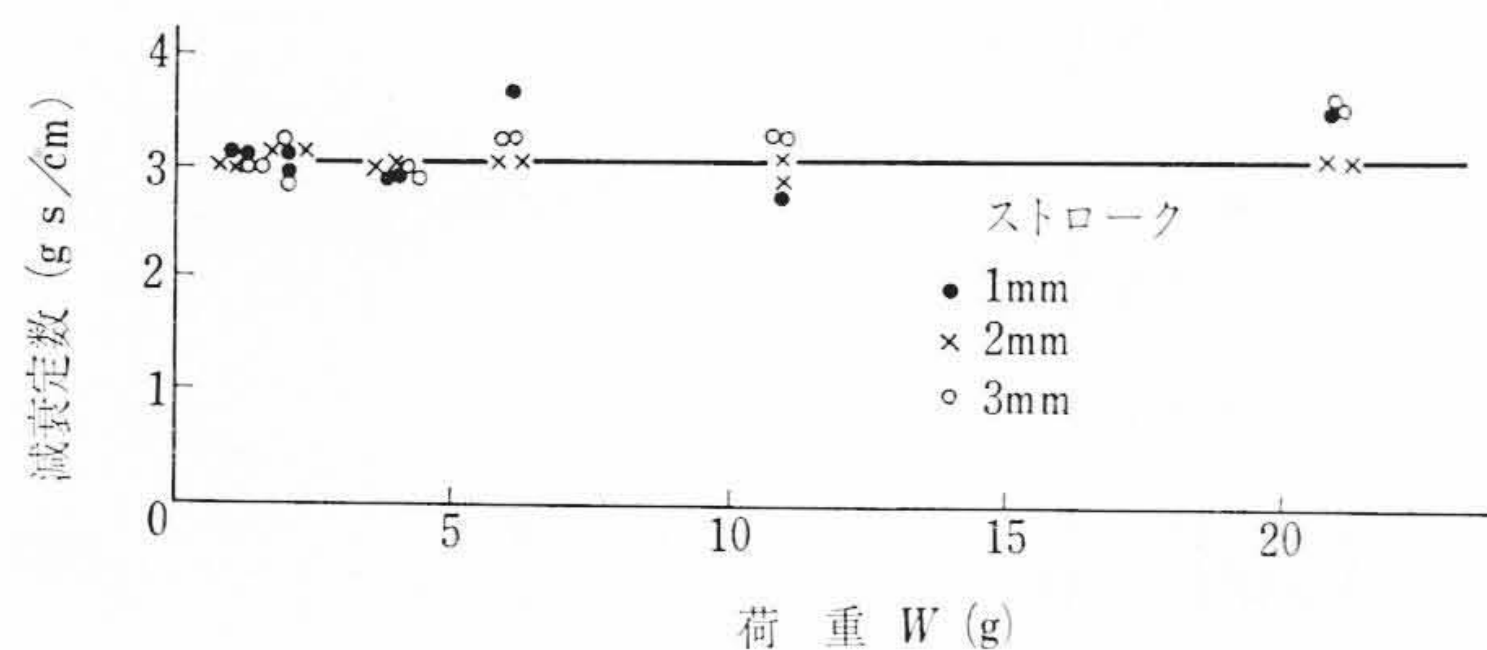


図7 エアダンパの減衰定数の測定値

$$c=3 \text{ (g・s/cm)}$$

接点間げき $d=0.1 \text{ cm}$ とし $\varepsilon=0.5, 0.7$ の場合について $P=10 \text{ g}$ として V_0' や t_1 などを計算すると表2(A)のようになる。

また P を $1 \sim 50$ (実用最大値) g の範囲について t_1 を計算した結果は表2に示すようになる。

すなわち、1回目の衝突から2回目の衝突までの時間間隔はほぼ 0.2 ms 以下になり、2回目以降の時間間隔は順次減少していく。

次に M と m の間のバネ定数について検討する。前節の理論では m に連なる k と c とを考え、 M と m の間のバネ定数は十分大きいとして M, m の運動を調べたが、厳密には接触面に弾性変形があり、両者の間にバネが存在する。

可動接点面は平面、固定接点の先端は直径 6 mm の球面をなしているため、球面の接触変形の公式

$$y=1.55 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 D}}$$

において、

$$P=25 \text{ g}, \quad E \doteq 1.0 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2 = 1.0 \times 10^9 \text{ g/cm}^2 \\ D=0.6 \text{ cm}$$

とおけば

$$\frac{P}{y} = \frac{1}{1.55} \sqrt[3]{E^2 D P} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ (g/cm)}$$

となり、前述の k に比べて著しく大きな値となることがわかる。したがって M と m とこの P/y なるこわさを持つバネによって形成される固有振動数は

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{y} \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right)} = 1.11 \times 10^3 \text{ Hz}$$

となり、衝突時に実際に接触している時間はきわめて短いことがわかる。いま固有周期の $1/2$ だけ接触していると仮定すると、その時間は

$$\frac{1}{f} \times \frac{1}{2} = 0.045 \times 10^{-3} \text{ s}$$

となり表2の t_1 の数分の1の時間となる。

以上の数値検討によって、チャタリングを起こした

表2 数値的計算例

(A) ε と諸速度, t_1 の関係

	式番号	$\varepsilon=0.5$ の場合	$\varepsilon=0.7$ の場合
V_0'	(16)	33 cm/s	33 cm/s
V_1	(17)	24.1 cm/s	23.0 cm/s
v_1	(18)	40.7 cm/s	46.0 cm/s
$v_1 - V_1$	(19)	16.6 cm/s	23.0 cm/s
t_1	(22)	$0.09 \times 10^{-3} \text{ s}$	$0.11 \times 10^{-3} \text{ s}$

ただし $P=10 \text{ g}$ にて

(B) P と t_1 の関係

$P \text{ (g)}$	1	2	3	5	10	20	30	50
t_1 $\varepsilon=0.5$	0.028×10^{-3}	0.04×10^{-3}	0.052×10^{-3}	0.064×10^{-3}	0.09×10^{-3}	0.13×10^{-3}	0.16×10^{-3}	0.20×10^{-3}
(S) $\varepsilon=0.7$	0.034×10^{-3}	0.048×10^{-3}	0.059×10^{-3}	0.076×10^{-3}	0.11×10^{-3}	0.15×10^{-3}	0.19×10^{-3}	0.24×10^{-3}

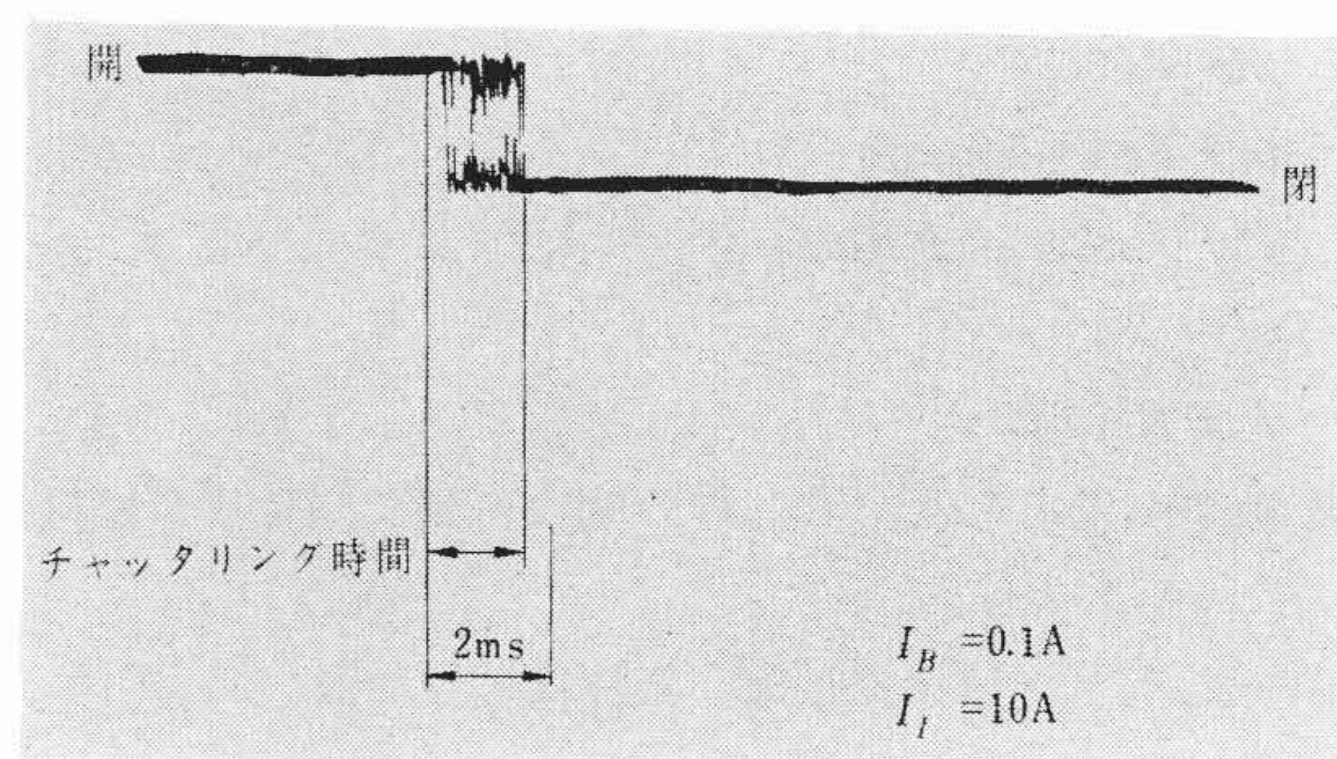


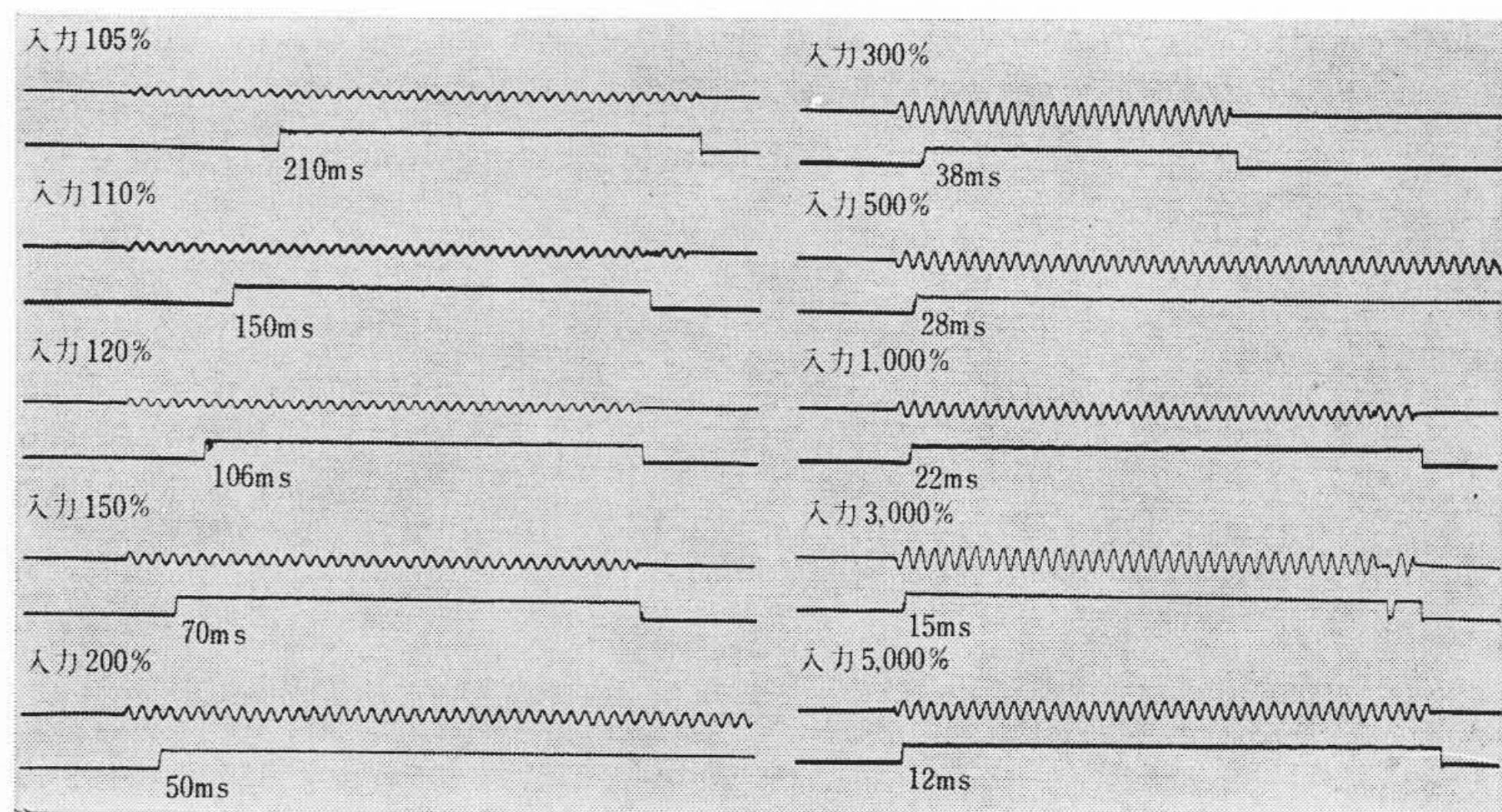
図8 チャタリングのオシロ波形

とき、接点が離れている時間は 0.2 ms 、接点が接触している時間はその数分の1程度であるということが出来る。図8は $P=25 \text{ g}$ における接点のチャタリングの状況を示し、上記の検討によって実際の現象をほぼ説明しているものと考えられる。

チャタリングをこのような衝突現象としてみると、接点そのものに減衰効果をもたせるようなこと（極端に言えば接点そのものが粘土か水あめのような性質を持つこと）がない限り、チャタリングを完全になくすることは困難である。ただ実用的にはチャタリングがおさまるまでの時間を数 ms 以下に押えることは可能で、エアダンパ接点はこれを実現している。

次にバウンスを生じない限界の可動接点に働く力を計算する。(38)式に前記諸定数を入れると $P \geq 2.8 \times 10^{-9} \text{ g}$ 以上の力になればバウンスを生ずることはない。

いま継電器の制御回転力が $1 \text{ g} \cdot \text{cm}$ ($P=1/3.3=0.3 \text{ g}$) の電力継電



電力継電器を電圧一定として使用。入力は最小動作電流に対する%で示す。
接点回路電圧 DC 110 V 接点回路電流 1.3 mA

図9 エアダンパ接点の接触状況

器についてみると、最小動作電流の $(1+2.8 \times 10^{-9}/0.3)$ 倍、すなわち測定可能なすべての動作電流域でバウンスを生じないことになる。しかし実用されている接点では全動作電流に対し全くバウンスを生じないものもあるが、最小動作電流の 110% 程度までバウンスを生ずることもある。

この相違はピストンとシリンダの間の摩擦に起因するものと考えられる。いま摩擦力を F_f とすると実際に固定接点を押す力 P' は $P'=P-F_f$ となる。固定接点部の重量は約 0.4 g で、摩擦係数を 0.1 と仮定すると摩擦は 0.04 g となり、可動接点の駆動力の 10% 強になり、これがバウンスを生ずる主因をなすものと考えられる。しかし固定接点は復帰バネでささえられているので、組立方によってはほとんど摩擦のないものがあり、このような接点ではバウンスはほとんど生じないと考えられる。

図 9 は制御回転力を 1 g・cm に選んだ電力継電器（駆動力は入力電流に比例する）の動作電流を最小動作電流の 105% から 5,000% の範囲で変えた場合のオシログラフを示したもので、バウンスは認められない。

5. 結 言

現在、日立誘導円筒形継電器には空気制動作用を有するエアダン

パ接点を採用し、数年来の工場試験と実用の結果、現在、保護継電器が要求する範囲においては十分にチャタリングやバウンスを防止している。

このエアダンパ接点についてチャタリング時間とバウンスの発生限界が、接点の機械的諸定数とどのような関係にあるかを理論的に解析するとともに、保護継電器の実用上の要求を十分満たすものであることを明らかにした。ただ衝突を含む動的な現象は、衝突機構そのものが理論的に明らかでなく、また結果を初等数式で表わすためにいくつかの仮定、省略を行なっているが、数値的検討の結果は実際の現象をほぼ十分に説明しており、省略にも無理はなかったものと考えられる。

本研究の推進ならびに製品の開発に当たって、接点障害除去のための反跳防止、あるいは品質管理、工作方法、無調整組立などに関して、数多の貴重なご助言を賜った東京電力株式会社取締役技術開発本部副本部長 高木利夫氏に厚くお礼申し上げますとともに、解析と実験についてご指導いただいた日立製作所機械研究所 須之部副部長、中村主任研究員、加賀研究員、ならびに家電研究所 新井研究員に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 渡井, 伊藤, 片田: 実用新案 第 798688 号

お 知 ら せ

創刊 50 周年記念

日立評論論文集

昭和 43 年 12 月発行

「日立評論」創刊 50 周年を記念し、「日立評論論文集」の発行を予定しております。

掲載論文は、日立製作所における最近の研究・技術開発成果の一端を紹介したものであり、読者諸賢の期待にこたえる好適な論文集であります。

目 次

- | | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1. エネルギー | ・日立製作所におけるオンラインシステムの開発 |
| ・ポンプ水車の運転特性 | ・テレビ電話 |
| ・原子炉圧力容器の応力解析 | 5. 生活環境 |
| ・500 kV 空気遮断器 | ・ESP 法による音響機器の設計 |
| ・高性能タービン翼形の研究 | ・全自動食器洗い機の開発 |
| 2. 運輸・運搬 | ・活性炭法排ガス脱硫 |
| ・サイリスタ式電気車の開発 | 6. 学術研究 |
| ・超高層ビル用高速エレベータの展望 | ・高分解能電子顕微鏡の問題点と応用 |
| ・レールクレーンガーダの実働荷重と疲れ強さ | ・分光光度計のシステム解析 |
| 3. 自動制御 | 7. 部品材料 |
| ・最近の圧延設備の自動制御 | ・高信頼 MOSIC 技術 |
| ・制御用電子計算機とその応用 | ・配電近代化用 22 kV 級ケーブルおよび付属品 |
| ・分岐合流システムのスケジュール制御 | ・ヤスキ海綿鉄プラントの完成と特殊鋼の品質向上 |
| 4. 情報産業 | ・印刷配線用積層板 MCL の諸特性 |
| ・HITAC 5020 系タイムシェアリング・システム | |

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内 1 丁目 4 番地
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地
郵便番号 101
振替口座 東京 20018 番