

リードスイッチのリードの設計法と加工条件

Design and Pressworking Conditions of the Reed of Reed Switch

木下素男* 小坪泰正*
Motoo Kinoshita Yasumasa Koakutsu

要 旨

リードスイッチは作動時間が早く、接点部分が大気中の有害ガスや塵芥(じんかい)から保護されるなどの特長を持っている。このため電子交換機の通話路素子、制御素子の接点として注目されてきている。この目的に対応するリードスイッチとしては従来のものと比較してより以上の小形化、高信頼性、長寿命などが要求され、これを満たすために、リードスイッチの設計法、加工技術についての改善、向上が必要となった。リードはリードスイッチの中心部品となるため、リードのスティフネス、共振周波数、形状寸法に精度が強く要求されるに至った。本文ではスティフネス、共振周波数と寸法形状との関係を理論的に解析し、スティフネスと共振周波数から寸法形状を決定する設計方法を確立するとともに小形化、高信頼性に対する技術的検討を行なった。

1. 緒 言

リードスイッチ(以下リード SW と略す)に使用されるリードは図1の形状(図2参照)をしており、材質は52% Niを含むFe合金でその特性(スティフネス S_f 、共振角振動数 ω)は素線径 d 、つぶし厚さ t_0 、つぶし幅 b_0 、つぶし肩の丸み半径 R 、可動部分の長さ l_1 などの因子に左右される。

リードSWの設計にはまずこの特性値 S_f 、 ω を満足するようなリードの寸法を決めることがたいせつである。

一般にリードのスティフネス S_f は荷重 P 、たわみ δ により

$$S_f = \frac{P}{\delta} \dots\dots\dots (1)$$

で求められるが、リードの先端のたわみ S を従来は可動部分の長さ l_1 、断面形状 $b_0 \times t_0 (=A_0)$ なる一定値のはりと考えて設計していた。設計式は次のとおりである(図3参照)。

$$\delta = \frac{4Pl_1^3}{Eb_0t_0^3} \dots\dots\dots (2)$$

本式は図中の x_0/l (または R/l) の値が十分小さいときは問題ないが、大きい値になると誤差が大きくなる。図4はスティフネスに及ぼす R/l の影響を実験的に調べた結果である。

またリードをプレスで圧縮加工をする場合、肩の丸み半径 R の部分には軸方向の力が作用する。これにより材料が軸方向に移動し加工後の断面積は元の断面積に比較して変化する。断面積の減少する割合を減面率と名付けるとその最大値は半径 R と平坦部のつなぎ目付近に表われる。減面率と R 、つぶし率の関係を図5に、断面積の変化状況の一例を図6に示す。

断面積の減少が起きるとリードを流れる磁束が減少部分で絞られリード先端の磁束量が不足する。このため素線径を太くすることが考えられるが、これはスティフネスの増加をもたらす磁気吸引力を

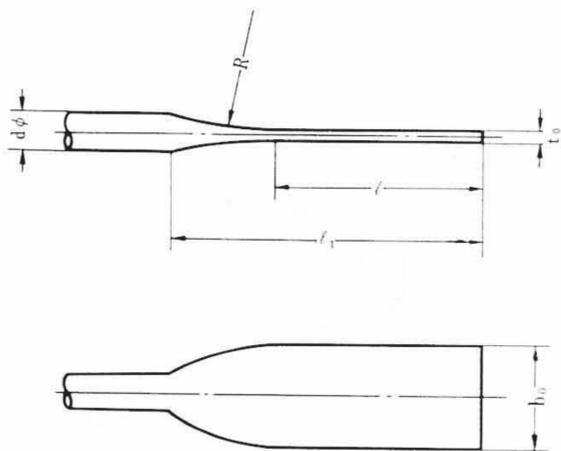


図1 リードの一般形状

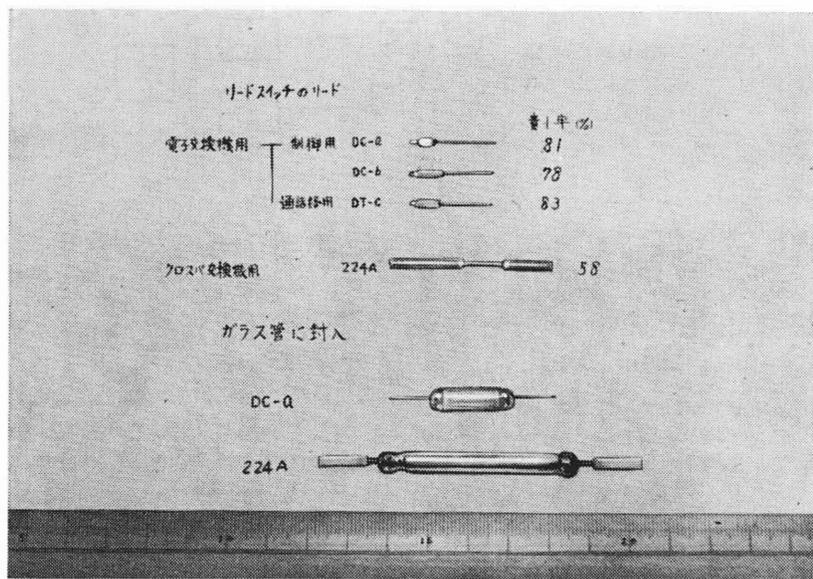


図2 電子交換機用のリードスイッチのリードとクロスバ交換機用のもの、およびガラス管に封入されたリード

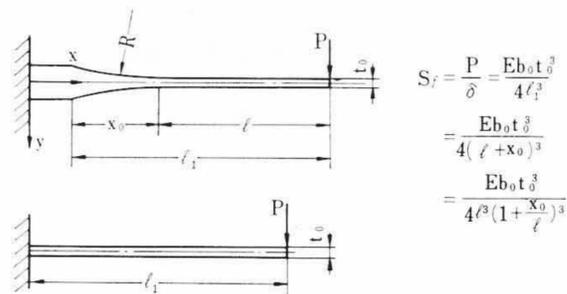


図3 従来のスティフネス算出に仮定したはり形状と実際の形状

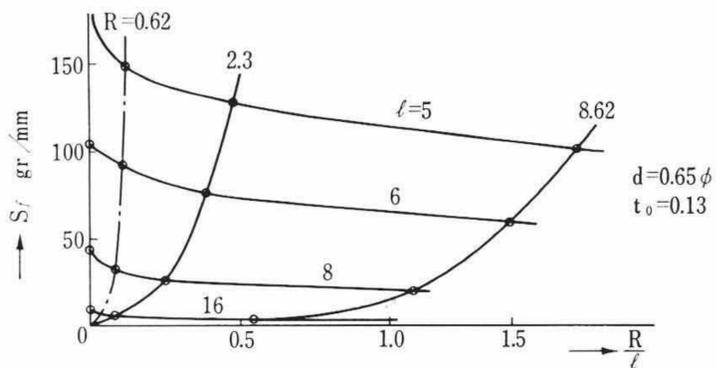


図4 スティフネスと肩の丸み半径の関係

* 日立製作所戸塚工場

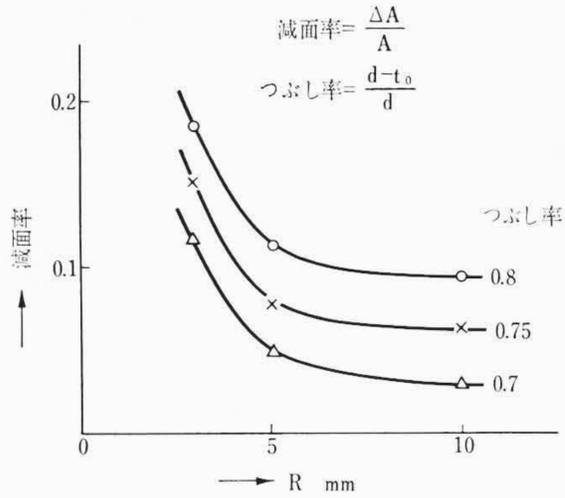


図5 肩の丸み半径と減面率の関係

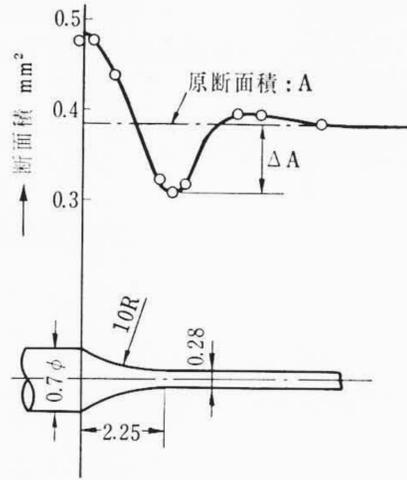


図6 減面現象の一例

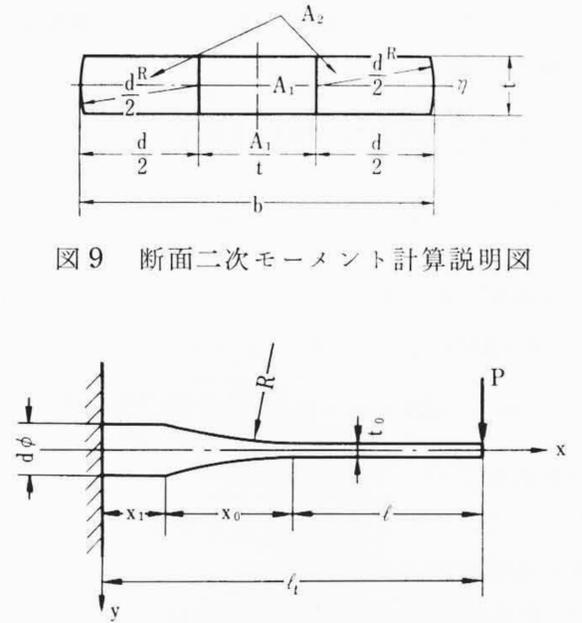


図9 断面二次モーメント計算説明図

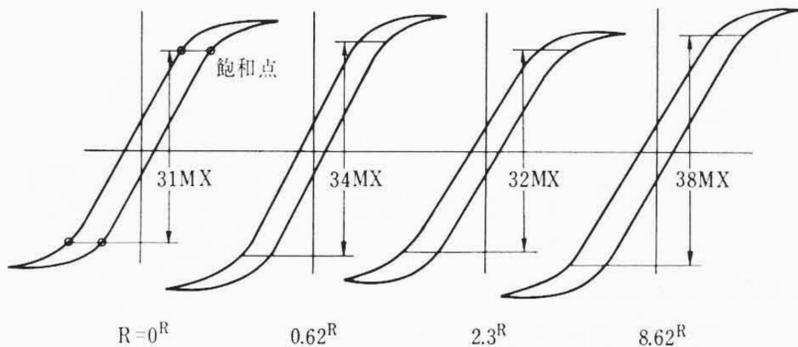


図7 肩の丸み半径と磁気飽和の関係

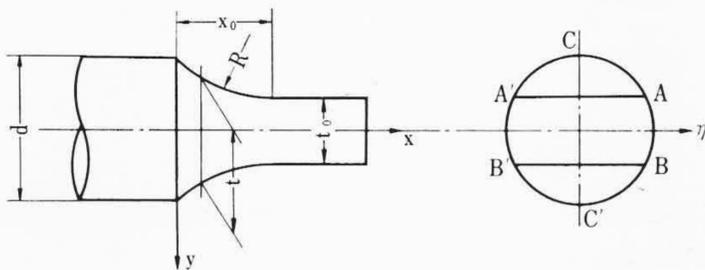


図8 断面変化部分の記号説明図

増加させるために多くの磁束を必要とする。また線径を太くしても減面の現象はなくなり磁束が流れにくいことには変わりがない。リードの線径を太くすることはリードSWが大形となるだけで利点はない。また線径の大小は磁気飽和と関係があり線径を極度に小さくもできない。磁気飽和と肩の丸み半径Rの関係を図7に示す。図から明らかなようにRはある程度大きい必要がある。かつリードSWの小形化に伴い全長が短くなるため前に述べた x_0/l (R/l) が大きくなり、したがって(2)式による設計では実際と合致せず差が大きくなってくる。このためより精度の高い設計法の確立が必要となるに至った。

ここでより精度の高い計算寸法として以下の二つの方法を用いた。

- (a) 断面形状変化部分も考えに取り入れた方法、断面形状の変化する部分も考慮し計算式に取り入れたもので軸方向直角断面の断面積を一定と仮定する。
- (b) 等価はりによる方法、断面形状の変化する部分を断面一樣な長さのはりに等価的に置き換える。この置き換えの条件としては両者のスティフネスが等しいという条件を用いる。

2. リードの特性値の理論的計算

2.1 リードの断面二次モーメント

リードのつぶし部分は図8に示されるように厚さtの変化する部分(肩の丸み部分)を持つ。ここでは厚さtにつぶされた断面の断面二次モーメントを求める。いま、つぶしが原断面の断面積Aを変え

ずに行なわれたとする。すなわち素線径dがつぶされて厚さtになった場合、つぶされた面積ACA'A+面積BC'B'B=A₁が厚さtで幅方向に移動したとする。厚さtの所の断面は、面積[AA'B'B(=A₂)+A₁/t×t]=π/4・d²となる。つぶし部分の幅はd+A₁/t=bとなる(図9参照)。図においてη軸まわりの断面二次モーメントは面積A₁部分と面積A₂部分の断面二次モーメントの和で表わされる。計算により

$$I_t = \frac{d^4}{96} \left[2e^2\pi + (3-4e^2) \sin^{-1}e + e(2e^2-3) \sqrt{1-e^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

をうる。ただし

I_t : η軸まわりの断面二次モーメント
 $e=t/d$

図9において厚さtにつぶされたとき、幅方向の外周の曲率半径をd/2としたが、実際はtの減少、つぶし率の増加にしたがい曲率半径は減少しd/2なる一定値を取ることはない。

2.2 リードのスティフネスと共振角振動数

まず特性値の理論計算を断面形状変化部分も考慮して行なうにあたり、以下の仮定を設ける。

- (1) リードのつぶし部分は肩の丸み半径Rと平面で成形される。
- (2) リードの中心軸に直角な断面の断面積は一定である。
- (3) つぶし加工による材料の加工硬化がなく、弾性係数は一定である。
- (4) 材料の密度も加工程度によって変わらない。
- (5) リードの特性値を計算するために与える初期条件は

図10において、 $x=0$; $y=0$, $y'=0$ とする。

以上の仮定の下でリードのスティフネス S_f を求める。図10において、はりのたわみは

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-M}{EI} \dots\dots\dots (4)$$

によって求められる。ただし

- M: 考える断面に作用するモーメント。はりを上に凹に曲げようとするモーメントを正とする。
- E: 弾性係数
- I: 断面二次モーメント

なお、厚さの変化している部分の長さ x_0 は幾何学的計算から次のように導かれる。

$$x_0 = \frac{d}{2} \sqrt{(1-e_0)(4h-1+e_0)} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $e_0 = \frac{t_0}{d}$, $h = \frac{R}{d}$

厚さ t は区間, $x_1 \leq x \leq x_1+x_0$ で

$$t = 2R + t_0 - 2\sqrt{R^2 - (x_1+x_0-x)^2}$$

$$e = \frac{t}{d} = 2h + e_0 - 2\sqrt{h^2 - \left(\frac{x_0+x_1-x}{d}\right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

と表わされる。

したがって、リード先端に P なる集中荷重が作用した場合、たわみを求める式は次のようになる。

(1) $0 \leq x \leq x_1$ 求める解を $G_1(x)$ とする。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(l_1-x)}{EI_1} = \frac{P}{Ed} \frac{d^2}{dx^2} \{G_1(x)\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $l_1 = x_1+x_0+l$, $I_1 = \frac{\pi}{64} d^4$,

初期条件は、 $x=0$; $y=y'=0$ である。

(2) $x_1 \leq x \leq x_1+x_0$ 求める解を $G_2(x)$ とする。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(l_1-x)}{EI_2} = \frac{P}{Ed} \frac{d^2}{dx^2} \{G_2(x)\} \dots\dots\dots (7')$$

ただし、

$$I_2 = \frac{d^4}{96} \left[2e^2\pi + (3-4e^2) \sin^{-1}e + e(2e^2-3)\sqrt{1-e^2} \right]$$

境界条件は、 $x=x_1$; $G_1(x) = G_2(x)$,

$$\frac{d}{dx} \{G_1(x)\} = \frac{d}{dx} \{G_2(x)\}$$

(3) $x_1+x_0 \leq x \leq x_1+x_0+l$ 求める解を $G_3(x)$ とする。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(l_1-x)}{EI_3} = \frac{P}{Ed} \frac{d^2}{dx^2} \{G_3(x)\} \dots\dots\dots (7'')$$

ただし、 I_3 は I_2 の e の代わりに e_0 とした値である。

境界条件は、 $x=x_1+x_0$; $G_2(x) = G_3(x)$,

$$\frac{d}{dx} \{G_2(x)\} = \frac{d}{dx} \{G_3(x)\}$$

以上によりたわみの式は、

$$y = \frac{P}{Ed} G(x) = \begin{cases} \frac{P}{Ed} G_1(x) & 0 \leq x \leq x_1 \\ \frac{P}{Ed} G_2(x) & x_1 \leq x \leq x_1+x_0 \dots (8) \\ \frac{P}{Ed} G_3(x) & x_1+x_0 \leq x \leq x_1+x_0+l \end{cases}$$

となる。スティフネス S_f は

$$S_f = \frac{P}{y_{x=l_1}} = \frac{Ed}{G_3(l_1)} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

次に共振角振動数を求める。求め方としては簡単なエネルギー法を適用する。すなわち

$$\bar{T} = \bar{V} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 \bar{T} : 平均運動エネルギー

\bar{V} : 平均弾性エネルギー

上式から共振角振動数を求めることができる。

$$\bar{T} = \frac{1}{4} \frac{\rho}{g} A \cdot \omega^2 \int_0^{l_1} \left\{ \frac{P}{Ed} G(x) \right\}^2 dx$$

$$= \frac{1}{4} \frac{\rho}{g} A \cdot \omega^2 \cdot d \int_0^{L_t} \left\{ \frac{P}{Ed} G(X) \right\}^2 dX$$

$$\bar{V} = \frac{1}{4} \int_0^{l_1} EI \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx$$

$$= \frac{1}{4} \int_0^{L_t} \frac{P^2(L_t-X)^2}{E \cdot d \cdot f(e)} dX$$

したがって、

$$\omega^2 = \frac{g}{\rho} \frac{E}{A} \frac{\int_0^{L_t} \frac{(L_t-X)^2}{f(e)} dX}{\int_0^{L_t} \{G(X)\}^2 dX} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 ρ : 単位体積当たりの重さ

g : 重力加速度

A : リード片の中心軸に直角な断面の断面積

$$X = \frac{x}{d}$$

$$L_t = \frac{l_1}{d}$$

$$f(e) = \frac{I}{d^4}$$

断面二次モーメント I はスティフネスの計算の場合と同様に3区間に分割して考える。

$$I = d^4 f(e) = \begin{cases} \frac{d^4 \pi}{64} & 0 \leq X \leq X_1 \\ \frac{d^4}{96} [2e^2\pi + (3-4e^2) \sin^{-1}e + e(2e^2-3)\sqrt{1-e^2}] & X_1 \leq X \leq X_1+X_0 \\ \frac{d^4}{96} [2e_0^2\pi + (3-4e_0^2) \sin^{-1}e_0 + e_0(2e_0^2-3)\sqrt{1-e_0^2}] & X_1+X_0 \leq X \leq L_t \end{cases}$$

以上(9)式、(11)式を用いて数値計算を行ない計算図表として示すと図11になる。

設計寸法は、設計仕様として S_f , ω が与えられた、素線径 d , 肩の半径 R , 支持長さ x_1 も与えられると図の縦軸、横軸である

$$\frac{S_f}{Ed} = S_{fn}, \quad \omega \sqrt{\frac{\rho \cdot A}{g \cdot E}} = \omega_n$$

が求まり、つぶし厚さ e_0 , 長さ $j (=l/d)$ を決定するということになる。なお図の助変数 X_1 , h が計算で求められた x_1/d , R/d に等しくない場合は補間法を用いて求めることになる。

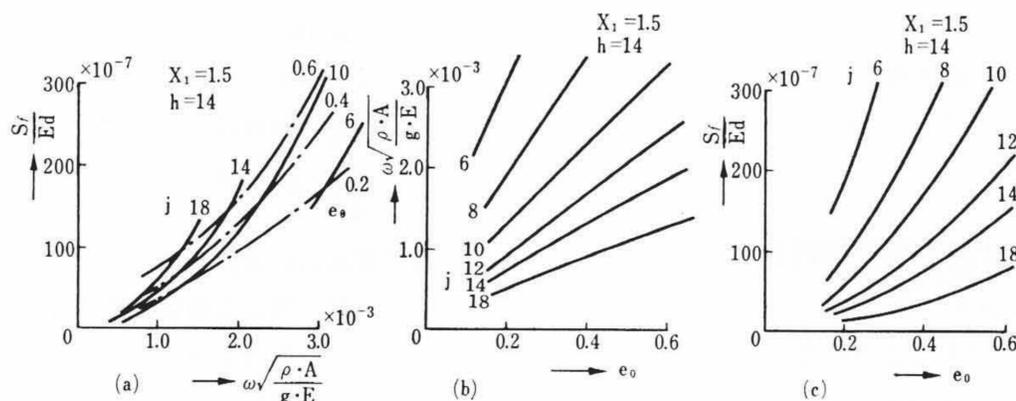


図11 特性値による設計図表

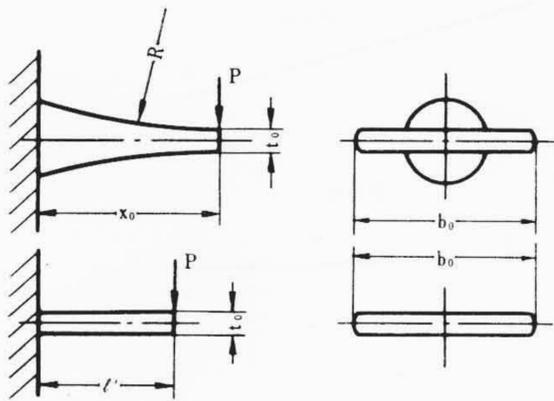


図12 断面形状変化部分と等価長さ

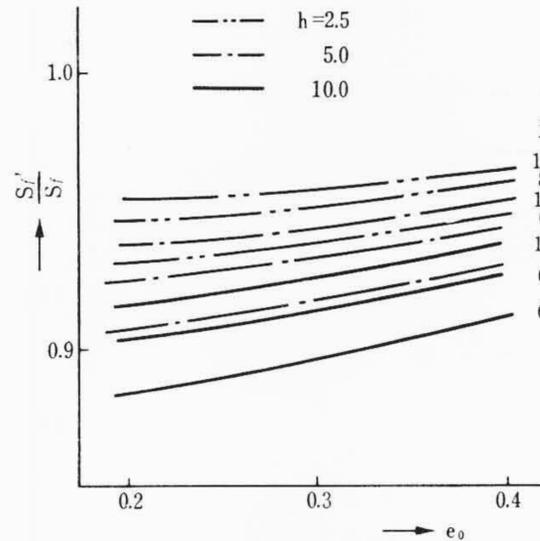


図13 理論スティフネスに対する等価はりスティフネス比とつぶし厚さの関係

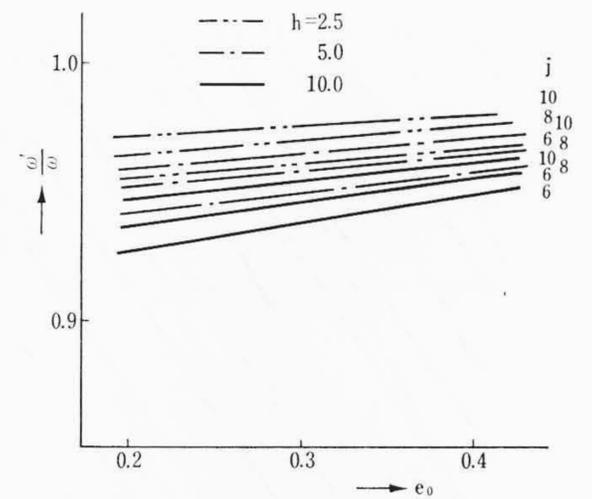


図14 理論共振周波数に対する等価はり周波数比とつぶし厚さの関係

2.3 等価はりによる設計方法

前節では X_1 , h について補間法を用いなければならず, かなりの手数をかけないとスティフネス, 共振角振動数からつぶし厚さ, 長さを決定できなかった。そこで近似式として等価はりという概念を取り入れ設計を試みることにする。

前にも述べたようにリードには断面形状の変化する部分があり計算を複雑にしている。この部分を等価的に断面一様なはりに置きかえることにする。図12において上側の断面形状の変化するはりのスティフネスと下側の断面形状の一様なはりのスティフネスが等しいとして等価長さ l' を求める。

図の上側のはりのたわみの式は

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P(x_0-x)}{EI}$$

$$y = \frac{P}{E \cdot d} F(x)$$

となる。ただし,

$$I = \frac{d^4}{96} \left[2e^2\pi + (3-4e^2) \sin^{-1}e + e(2e^2+3)\sqrt{1-e^2} \right]$$

スティフネスは $E \cdot d / F(x_0)$ となる。また一様断面の先端のたわみは $Pl^3/3EI'$ である。ただし $l' = 1/12 b_0 t_0^3$ と長方形断面 ($b_0 \times t_0$) を想定した。また,

$$b_0 = d + \frac{d}{4e_0} \left\{ \pi - 2(\sin^{-1}e_0 + e_0 \sqrt{1-e_0^2}) \right\} \text{ である。}$$

したがって等価長さは

$$l' = de_0^3 \sqrt{\frac{F(x_0)}{4} \left[1 + \frac{1}{4e_0} \left\{ \pi - 2(\sin^{-1}e_0 + e_0 \sqrt{1-e_0^2}) \right\} \right]} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

等価はりのスティフネス S'_j は

$$S'_j = \frac{3EI'}{(l+l')^3} = \frac{Eb_0 t_0^3}{4(l+l')^3} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となり, 共振角振動数はエネルギー法を用いて計算すれば次式のようにになる。

$$\omega^2 = \frac{140}{11} \frac{g}{\rho A} \frac{EI'}{(l+l')^4} \quad \dots\dots\dots (14)$$

(断面形状変化部分を考慮した設計方法による) 特性値すなわち S_j , ω と等価はりの特性値 S'_j , ω' との関係を探るため比 S'_j/S_j , ω'/ω を考えこれを図13, 図14に示す。この結果から等価はりの特性値のほうが元のはりの特性値より小さく, スティフネスの差異は共振角振動数の差異の約2倍くらいである。

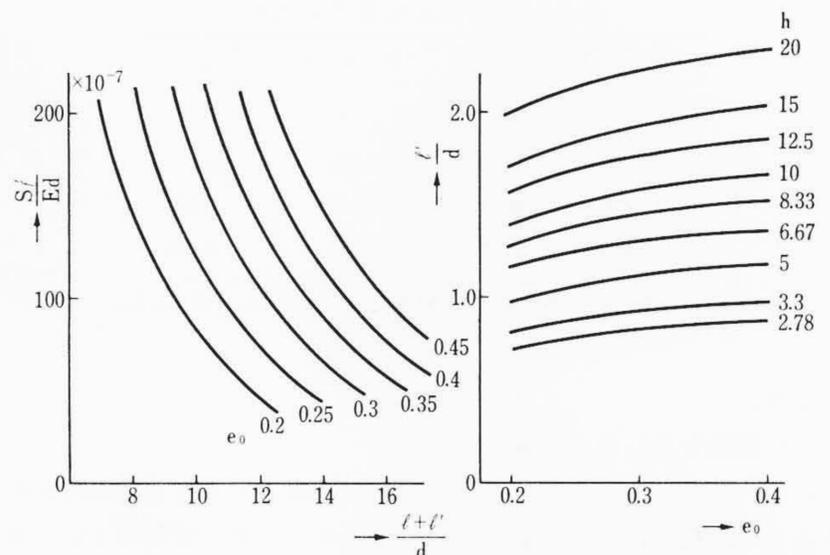


図15 等価はりによる設計図表

なお, 等価はりの考えを用いて設計図表を求めた。これを図15に示す。図はリード寸法が与えられたときスティフネスを求めるものである。

3. 特性値に影響を及ぼす加工上の変動要因

実際に製作したリードは計算値と多少相違する。この理由としておもなものを列記すると次のようになる。

- (1) つぶし厚さ, 切断長さのばらつき
- (2) 加工程度の差による弾性係数の変動
- (3) 面積の増減の現象

プレス作業でリードがつぶされ切断されるが, このときつぶし厚さと切断長さにより特性値がいかに変化するかを理論式から求めてみる。

(13)式から, 長さ $l+l' = \bar{l}$ の変動量を $\Delta \bar{l}$, 厚さ t_0 の変動量を Δt_0 , スティフネス S'_j の変動量を $\Delta S'_j$ とすると

$$S'_j + \Delta S'_j = \frac{EA(t_0 + \Delta t_0)^2}{4(\bar{l} + \Delta \bar{l})^3} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\Delta S'_j}{S'_j} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta t_0}{t_0}\right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta \bar{l}}{\bar{l}}\right)^3} - 1 \quad \dots\dots\dots (16)$$

をえる。

共振角振動数については (14) 式から, 共振角振動数の変動量を $\Delta \omega'$ とすると

$$\frac{\Delta \omega'}{\omega'} = \frac{1 + \frac{\Delta t_0}{t_0}}{\left(1 + \frac{\Delta \bar{l}}{\bar{l}}\right)^2} - 1 \quad \dots\dots\dots (17)$$

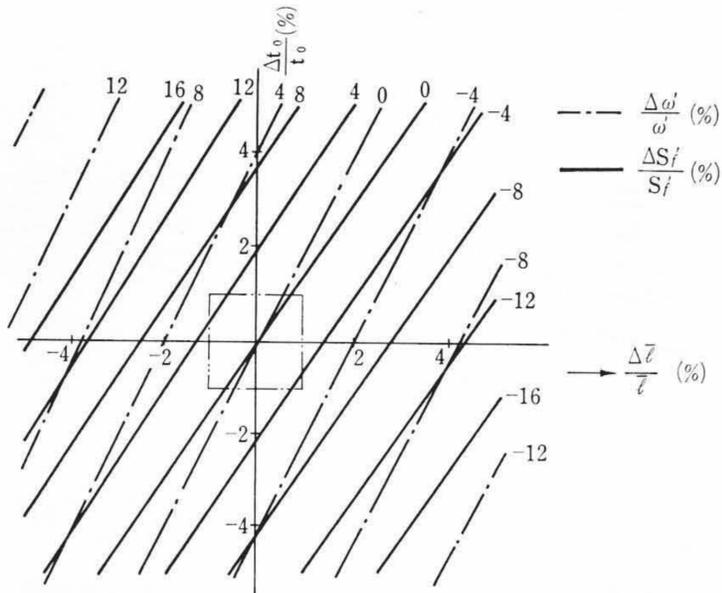


図16 切断長さ、つぶし厚さの変動による特性値の変動

表1 設計値と実測値の比較

	仕様	実測値	ばらつき (σ)
S_f $\frac{qr}{mm}$	85	83.7	2.1
f c/s	1,600	1,565.2	20
t_0 mm	0.245*	0.249	0.001
l_1 mm	10.5*	10,486	0.005

* 印の値は $R=10\text{ mm}$ $d=0.69\text{ mm}$ として設計した値である。

をえる。

この関係を示したのが図16である。

いま、長さ、厚さの変動がそれぞれ1%あるとすると図からわかるように、相互に打ち消しあう場合はステイフネス変動で1%、共振角振動数変動で1%であるが相互に助長する場合はステイフネス変動で5%、共振角振動数変動で3%となる。特性値を一定範囲内に押えるためにはつぶし厚さ、切断長さを押える必要があり、特に製品の寸法が絶対的に小さくなると従来の加工精度では相対的に誤差が大きくなり、特性値の変動も大きくなる。

以上理論的に設計方法を確立したが、これを用いて実際にリードを設計、試作した。そして特性値を比較することによって設計方法の信頼度を確かめ、製品寸法のばらつきを調べて加工条件の検討を行なった。この結果を表1に示す。設計による値は実際の特性値に比較すると高く、ステイフネスで4~5%、共振角振動数で6~7%のずれを生ずる。ばらつきの点からは3σをノミナル値で割った相対的なばらつきがステイフネスで7.5%、共振角振動数で3.8%となり、つぶし厚さの相対的なばらつき1.2%と長さのばらつき0.15%による特性値の変動量(2.4%)以上のばらつきを示すといえる。これは断面積の不均一や弾性係数のばらつき、またリードのつぶし形状の近似によると考えられる。加工の点からはつぶし厚さのばらつきがノミナル値が小さいために相対的に大きくなっているといえる。つぶし加工のばらつきは被加工材(この場合素線)の直径に大きく影響されるが、被加工材の寸法精度を押え、つぶし形としても弾性係数の高い超硬合金を使用しつぶし厚さのばらつきを押える必要がある。また特殊工具鋼ではつぶし率が70, 80%と高くなるとリードの幅方向に平坦な面がえられず、中央部分がふくらむという現象が生ずるため型の表面にクラウニングを施す必要がでてくる。

最後に特性値のばらつきに影響を及ぼすと考えられる弾性係数の

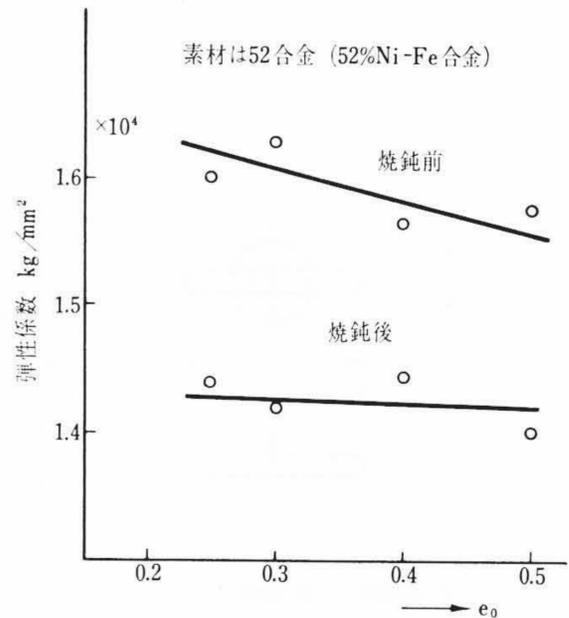


図17 つぶし厚さによる弾性係数の変化

変化について調べた結果を述べる。実測した結果を図17に示す。弾性係数の算出は片持はりのステイフネスから行なわれたもので、試験片の断面形状が長方形(幅 b 、厚さ t)で長さが l あれば、実測のステイフネスを S_{f0} として

$$E = \frac{4l^3}{bt^3} S_{f0}$$

なる式から計算される。つぶし加工により弾性係数は $1.6 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ くらいの値をとり、水素中 850°C 1時間の焼鈍によって $1.43 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ くらいの値に落ちる。図からわかるようにつぶし厚さによって弾性係数の値も異なる。また焼鈍でかなり弾性係数が低くなるが不完全な焼鈍では弾性係数が一定値にならないことが起こる。弾性係数に変動があれば特性値にもばらつきが生じる。このため焼鈍条件の確立を図り特性値のばらつきを少なくする必要がある。他方、つぶし厚さによる弾性係数のばらつきは不可避で特性値のばらつきの一つの原因となる。

4. 結 言

リードSWに用いられるリードの性能仕様を満たすため基準寸法の決め方として理論計算による方法を検討し、次の結論をえた。

- (1) ステイフネス、共振角振動数を与えてリードの寸法を理論的に決定する計算図表を確立した。
- (2) 加工の点から、特性値を仕様どおりに満足させるにはつぶし厚さと切断長さの管理が重要で特に絶対量の小さいつぶし厚さのばらつきを押える必要がある。このため素材の寸法精度を上げること、またつぶし形に弾性係数の高い超硬合金を使用することが必要である。
- (3) 設計で使用する弾性係数としては $1.45 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ を用い、この値による設計精度はステイフネスで4~5%、共振角振動数で6~7%の相対誤差の程度である。

なお、特性値を変化させるおもな要因は減面の現象で今後さらに精度を上げた理論式を展開する場合には減面を考慮する必要がある。

終わりにあたり本研究に対しご指導をいただいた電気通信研究所宅内機器研究部、伊藤部長、継電器研究室高村室長、加藤室長補佐に謝意を表する次第である。