

油圧サーボ装置のスティックスリップについて

大 住 剛
中 川 孝 之

On the Stick Slip of hydraulic servo mechanism

Tsuyoshi OSUMI

Takayuki NAKAGAWA

When work is cut by using a lethe or the table with much friction is moved, the table is unable to move smoothly at the constant speed. This phenomena is called "Stick Slip" as wellknown. We made an experiment on it by using a hydraulic servo mechanism and then was able to explain qualitatively the mechanism of Stick Slip by a model.

1. ま え が き

バイトによる切削作業のビビリ現象、或は工作機械のテーブルのような摩擦力の大きなものを駆動する時、低い速度の状態では、一様な動きをしない。この現象はスティックスリップとして良く知られ、加工物の精度の低下や、工具摩耗に影響する。この現象は摩擦力が速度の関数であり、摩擦速度の増加に対して摩擦力の減少するネガティブスロープを有するため起ると言われている。

本実験では、四方弁と直動形油圧シリンダーを組み合わせたサーボ機構に於て、スティックスリップの現象を実験的に調べ、ひとつのモデルによって定性的説明を加えることにする。

2. 実験装置及び実験方法

2. 1 油圧回路

図-1は本実験に用いた油圧回路であり、シリンダーと方向切換弁を結ぶ管路は針金入りビニールパイプ及び銅パイプの二種類を使用した。

シリンダー-負荷用のテーブルはV溝と鋼球により、コロガリ摩擦により極力摩擦力を小さくするように作った。

2. 2 検出装置

(1) 変位検出

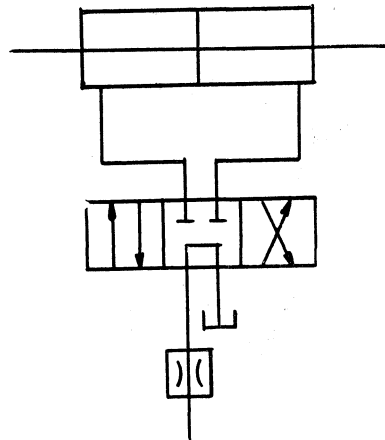


図-1 油圧回路

変位の検出に関しては、ポテンシヨメーターにより電圧の変化として取り出した。

(2) 速度検出

前述した如く、摩擦力は速度の関数であり、速度を如何に検出するかが本実験を成功させる鍵でもある。速度は変位の微分であることより図-2に示すような近似微分回路が考えられる。

本実験では(b)の回路を検出に用いた。従って実験誤差の存在は無視できない。しかし、この方法を取ったのは、現象の動作の特徴を知ること重点を置いてあるからである。

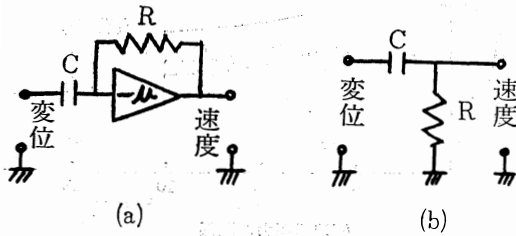


図-2 近似微分回路

又1スリップ毎にピストン変位が積分されるため、変位-速度位相平面上で図形が横に移動する。このため、図-3のような回路を用いることにより同一平面上に図形を描かせるようにした。

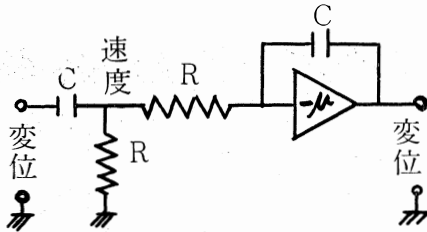


図-3 変位速度検出回路

これに用いた近似積分回路用増幅器は写真-1に示す。

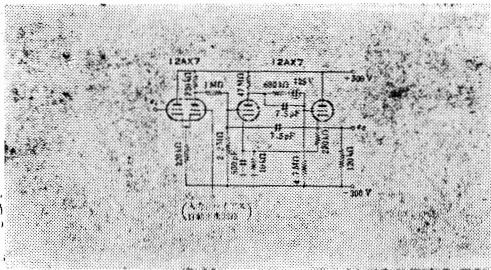


写真-1 増幅器

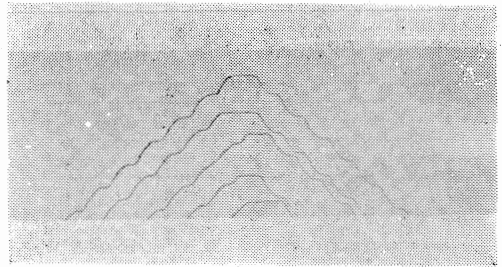
(3) 圧力検出

半導体圧力変換器により電圧変化として取り出した。出力感度は 4mV/kg/cm^2 である。

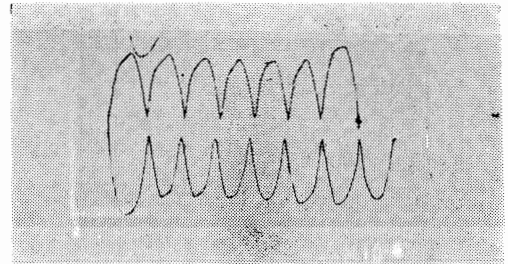
3. 実験結果

スティックスリップの現象に影響を与える因子として、元圧、流量、ピストン負荷、温度等が考えられるが、これらをパラメーターとし、変位-速度、速度-圧力の位相平面より導びかれた結果を次に示すことにする。

先づスティックスリップの現象の一例を図示すると写真-2になる。



(a) 時間変位の関係



(b) 変位速度の関係

写真-2 スティックスリップ

ここに示された変位と速度の関係では、一現象毎に変位軸が移動することは前述した通りであるが、各スティックスリップにばらつきがあるため、同一平面上に描かせることにより、平均的なものを知ることができる。使用した検出回路は先に述べた 図-3 によるが、その結果を写真-3に示す。

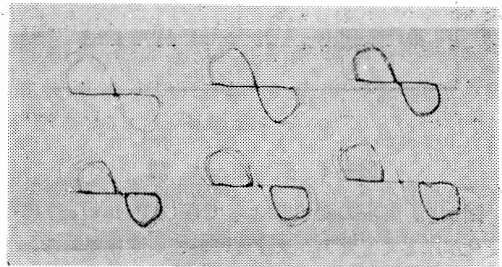


写真-3 変位速度の関係

速度と圧力の関係の一例を示すと写真-4、写真-5となる。写真-4は比較的流量の少ない場合で、スティックスリップの様子が顕著に現われているが、流量が増加してピストン速度が速くなると安定した動きを示す。その様子が写真-5である。

以上スティックスリップを位相平面上に図示してみたが、不安定な状態でのデータ収集は困難なため、安定状態から不安定状態を推測することにする。

元圧を 6kg/cm^2 から 24kg/cm^2 まで変化した時の速度、圧力の変化をグラフに表わすと図-4となる。

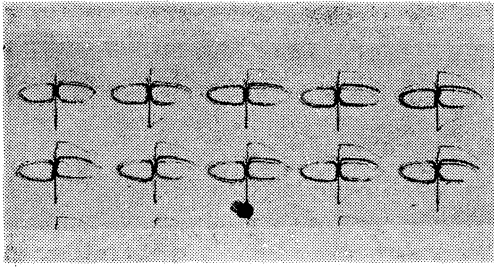


写真-4 不安定状態

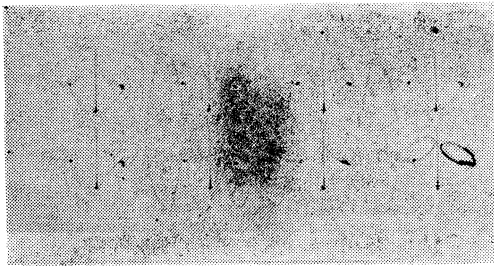
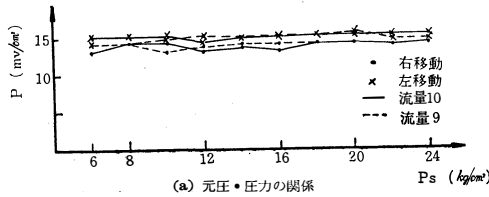
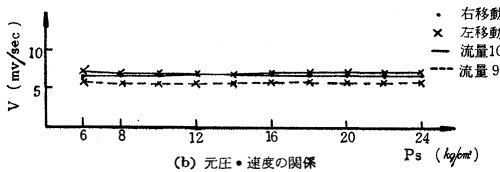


写真-5 安定状態



(a) 元圧・圧力の関係



(b) 元圧・速度の関係

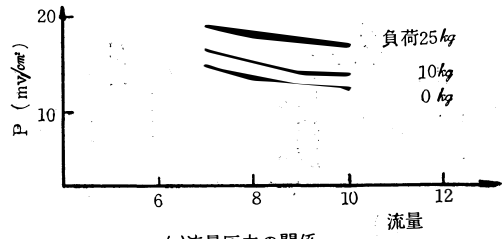
図-4 安定状態

図より、元圧の変化によって圧力 P (mv/cm²)には変化がほとんどない。又速度に於ても同様である。

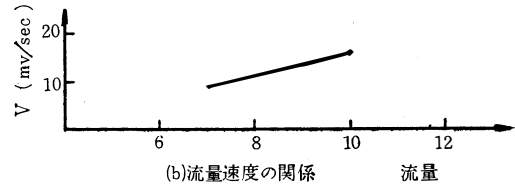
次に流量変化に対するシリンダー圧力 P (mv/cm²)、ピストン速度 V (mv/sec)の関係を図-5に示す。

図に於て流量7→8の変化に対して圧力は減少し、9→10の変化に対して圧力の変化はほとんどない。又テーブル上の負荷の変化に対しては、図より明らかに、25kg負荷では0kg負荷の時より約4mV/cm²(1kg/cm²)シリンダー圧力が増加している。負荷速度は流量の増加に従って増加している。

温度影響については、本実験に於て、流量制御弁目盛10の状態では温度26°Cから32°Cまでスティックスリップは起らないが、温度が上昇すると、写真-6(b)に示すようにスティックスリップが起り易くなる。

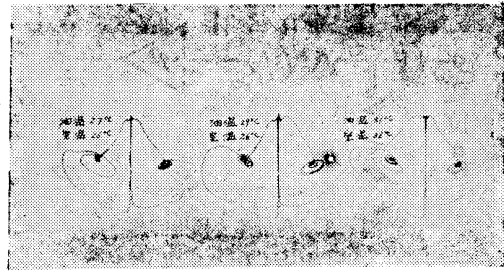


(a) 流量圧力の関係

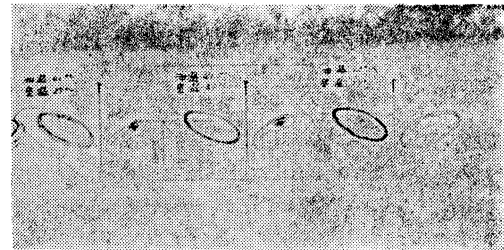


(b) 流量速度の関係

図-5 安定状態



(a) 安定状態



(b) 不安定状態

写真-6 温度の影響

そこで温度変化につれて安定点 (v, P) がどのように変化するかをグラフに表わすと図-6となる。

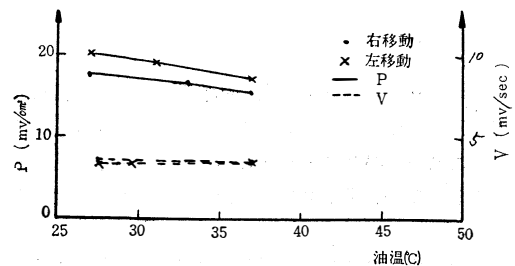


図-6 温度の影響

温度の上昇に伴って圧力はやゝ低下する。一方速度はほとんど変化しない。

以上ステイックスリップに影響する因子として、元圧、流量、負荷、温度に付いて実験の結果を述べた。この結果に対して定性的であるが現象説明のモデルを考え考察を加えることにする。

4. 考 察

油圧源からスプールの変位によって、この動作系に加わる力F、テーブル等の質量M、ピストンシリンダー間の粘性抵抗で油の粘性係数に関係する量γ、装置全体のバネ定数k、摩擦力f_c(v)とすれば、運動方程式は次のようである。又摩擦特性は速度の関数で、次の近似式を用いる。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + k(x-x_1) + f_c \left(\frac{dx}{dt} \right) = F \dots\dots(1)$$

$$f_c \left(\frac{dx}{dt} \right) = m \frac{dx}{dt} + n \left\{ \frac{dx}{dt} - \frac{1}{6} \left(\frac{dx}{dt} \right)^3 + \frac{1}{120} \left(\frac{dx}{dt} \right)^5 \right\} \dots\dots(2)$$

電磁バルブのスプールの変位δ、流量q_m、圧力p_m、シリンダーの内面積A、容積V、そして油の体積弾性率βとし、計算を簡単にするため、定数k_δ、k_F、k_e、そしてCを用いて弁の特性をあらわすと次のようになる。

$$q_m = \frac{\partial q_m}{\partial \delta} \delta + \frac{\partial q_m}{\partial p_m} p_m = k_{\delta} \delta - k_F p_m \dots\dots(3)$$

$$q_m = A \frac{dx}{dt} + \frac{1}{2} \left(k_e + \frac{V}{\beta} \right) \frac{dp_m}{dt} = Av + C \frac{dp_m}{dt} \dots\dots(4)$$

F = A p_mなることを考慮して(3),(4)式よりq_m, p_mを消去すると

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{k_F}{C} F + \frac{k_{\delta} A}{C} \delta - \frac{A^2}{C} \frac{dx}{dt} \dots\dots(5)$$

従って動作系は(1), (5)式にしたがう運動を行う。dx/dt = vであることを考慮して、v-F位相平面上で系の動作を考えることにする。

$$\frac{dv}{dF} = \frac{F}{M} - \frac{1}{M} \left\{ \left[(r+m+n) - \frac{n}{6} v^2 + \frac{n}{120} v^4 \right] v + k(x-x_1) \right\} \frac{k_{\delta} A}{C} \delta - \frac{A^2}{C} v - \frac{k_F}{C} F \dots\dots(6)$$

これが実験の際、記録計のペンの運動を決める基礎的な方程式で、(6)式の積分曲線は位相平面上の軌跡をあらわすものである。

位相平面上の特異点は(6)式の分母、分子を0と同時満足する値として、一般に三点定まり図-7のA,

B, Cであらわされる。その中のB点は不安定点、A, C点は安定点である。

次に、計算を簡単にするため、x-x₁ = xであると見做して

$$a_0 = \frac{1}{M}, a_1 = \frac{k}{M} \left(1 - \frac{x_1}{x} \right) = \frac{k}{M},$$

$$a_2 = \frac{r+m+n}{M}, a_3 = \frac{n}{6M}, a_4 = \frac{n}{120M},$$

$$b_0 = \frac{k_F}{C} A, b_1 = \frac{k_{\delta}}{C} A \text{ として } b_2 = \frac{A^2}{C} \text{ とおけば (6)}$$

式は次のようにならわされる。

$$\frac{dv}{dF} = \frac{a_0 F - [a_1 x + (a_2 - a_3 v^2 + a_4 v^4) v]}{-b_0 F + b_1 \delta - b_2 v} \dots\dots(7)$$

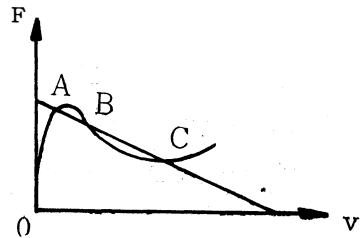


図-7

(7)式を満足する積分曲線を求めるため、等傾曲線の方法を用いる。(7)式の分母、分子を0とするF-v曲線上では、積分曲線の方向係数は0か∞である。なお勝手な値の方向係数αを持つ等傾曲線は(8)式から求められる。ここでα = dv/dFとなる。従って

$$F = \frac{1}{a_0 + a_1 v} [f_1(v_1, x) + f_2(v)] \dots\dots(8)$$

$$f_1(v_1, x) = a_1 x + b_1 a \delta - b_2 a v$$

$$f_2(v) = (a_2 - a_3 v^2 + a_4 v^4) v$$

(8)式のf₁(v₁, x)は次の(9)式より明らかなように

$$x_0 = \frac{-ab_1 \delta}{a_1}, v_0 = \frac{b_1}{b_2} \delta, \text{ そして } f = ab_1 \delta \text{ を切片とする平面の方程式である。}$$

$$\frac{x}{\frac{-ab_1 \delta}{a_1}} + \frac{v}{\frac{b_1}{b_2} \delta} + \frac{f}{ab_1 \delta} = 1 \dots\dots(9)$$

いま電磁弁のスプール変位δを一定値だけ変化したとすれば、図-8のQは固定され、いろいろのαに対する(9)式はPQR平面、P'Q'R'平面などをあらわす。

又系は時間とともにxの値を変化するが、極めて短時間内でx=x₀の際の等傾曲線を求めることにすれば、f₂(v)はxに無関係であるから、図-9に示すような曲面をあらわし、これがx₀を通りv, f軸に平行な平面との交線は摩擦特性をあらわす曲線と同じい。一方x₀を通りv, fに平行な平面とPQR平面の交線は直線で、f₁(v₁, x)をあらわす。かゝる意味で異なるαに対する等傾線は容易に求められる。ところで我々は縦軸を

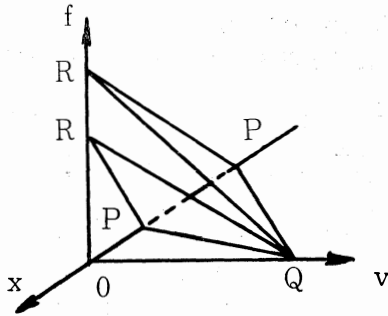


図-8

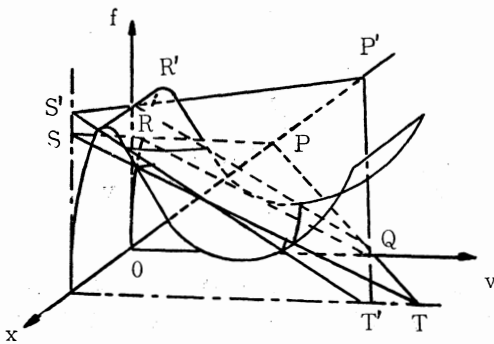


図-9

$(a_0 + ab_0)F$, 横軸を v に選んだ面上に上述の $f_1(v_1, x)$ $f_2(v)$ の代数和の作図が可能となり図-10のように定まる。かようにして得られた等傾曲線を用いて積分曲線を図示すると、積分曲線は、あるリミットサイクルに巻きつくことがわかる。

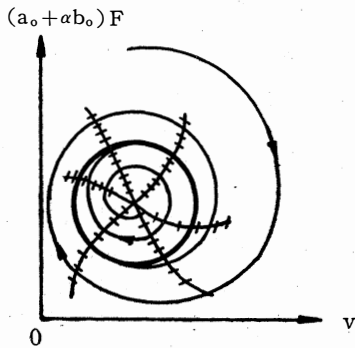


図-10

次に写真-6のように温度の上昇や、負荷の増大に伴ない、スティックスリップが起り易いことは $x_0 = \frac{-ab_1 \delta}{a_1}$ が M の関数であることに原因し、これはリミットサイクルの大きさを変えることになり、又一方、温度の上昇と共に作動油の粘性が減少し、粘性

抵抗の大きさを小さい方向に変化させることになり、方程式の形から振動性をおびやすくなることによると考えられる。

なおその外、 b_1, b_2 等は、シリンダー、パイプの特性から定まる量で、特にパイプの性質が伸縮するような場合には、 x_0, v_0 の値が変化しこれが必然的にスティックスリップの大きな要因となることが、モデルからわかる。

いま試みにかゝる点に注意し、パイプを銅製で短かくしたり、同質のビニールパイプで短かい場合について、実験をした結果を写真-7、写真-8に示す。写真-7は銅パイプ、写真-8はビニールパイプを短かくした例で、その結果、前述したモデルを承認して良いように思われる。又空気のような圧縮性の大きい流

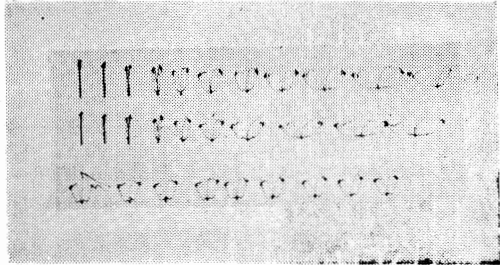


写真-7

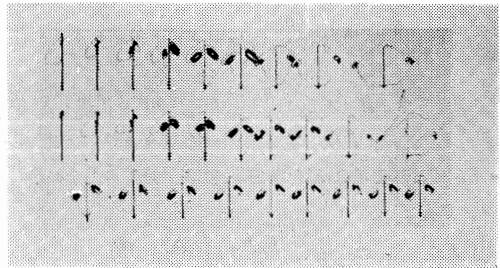


写真-8

体を使った時に、速度の調整が困難であり、パイプを短かく剛性の大きなものを選ぶべきことも、此のモデルから理解できる。

本実験は、ピストンが中心付近にあり、シリンダー入口、出口の体積がほとんど等しい場合について行なったものであるが、いずれか一方に片寄った場合については、さらに実験を行ない次の期会に報告したい。

最後に、本実験に際し協力いただいた本学高瀬技官に感謝いたします。

昭和43年機械学会金沢地方講演会
昭和43年9月20日発表

参 考 文 献

- (1) 松崎, 橋本 機械学会論文集 28—194 (昭37. 10) P1394
- (2) 松崎 機械学会論文集 29—206 (昭38. 10) P1615
- (3) N Minorsky, *Introduction to Non-Linear Mechanics*, 1947
N. W. McLachlan, *Ordinary Non-Linear Differential Equations* 1956

(43. 10. 31受付)