

切削中に生ずる油圧駆動往復台のスティックスリップ

堀 込 泰 雄

1. ま え が き

工作機械の自動化にしばしば採用される油圧駆動送り装置は、その剛性の低さにより、低速送りのときにスティックスリップを生ずることがある。特に切削していない状態で円滑な運動をしている場合でも、切削の状態に入ると、切削力の周期的変動とスティックスリップとが互に相手を強めあう状態が作り出される⁽¹⁾。ここでは、切削中に生ずるスティックスリップを実験的に観察し、その発生機構の説明づけをし、それにもとづいた解析結果と実験結果との比較について述べることにする。

2. 実験装置および実験方法

切削中に発生するスティックスリップを観測するための実験装置の概要を図1に示す。使用した旋盤の大きさは、ベッド上の振り450mm、最大センチ間距離800mmである。この旋盤の送り用ピニオンをとりはずし、往復台を油圧で駆動する構造とした。流量制御弁は圧力補償形(0.1~1l/min)で、作動油はDTE oil Lightを用いた。また切削工具には、P20, 33-3形を用い、工具形状は(0, 6, 6, 8, 0, 0.5)とした。

実験方法は次のとおりである。往復台を油圧駆動によって送り、切削中における往復台の変位と切削力送り分力とを、それぞれ差動変圧器とストレンゲージで同時に検出して電磁オシロに記録させた。差動変圧器の拡大率を大にし、しかも記録値がすぐに測定範囲からはずれないようにするため、同期電動機で駆動される

摩擦円板で、差動変圧器の鉄心に結合している直定規を駆動させて、往復台との相対速度を0に近くさせた。

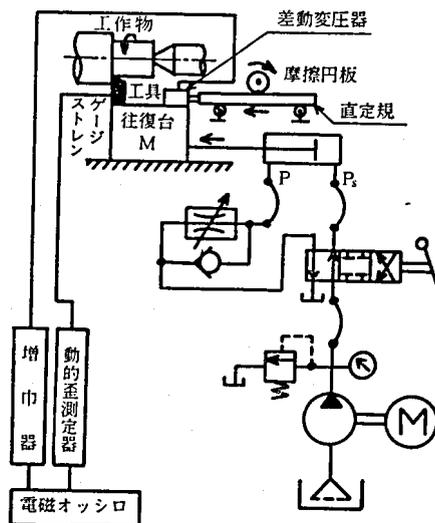


図1 実験装置

3. スティックスリップの発生原理

記号を次のように定める。

t : 時間 s

M : 往復台の等価質量 $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$

- β : 油の体積弾性係数 kg/cm^2
- P_s : 油圧源の圧力 kg/cm^2
- P : シリンダ背圧 kg/cm^2
- K_p : 背圧側配管の体積膨張係数 cm^3/kg
- V : 背圧側シリンダ体積 cm^3
- y : 往復台変位 cm
- v : 往復台速度 cm/s
- v_{mean} : 往復台平均速度 cm/s
- q_v : 流量制御弁を通過する流量 cm^3/s
- F_s : 静摩擦力 kg
- f_v : 動摩擦力 $= F_d + cv$ kg
- c : 粘性抵抗係数 kg/s/cm
- A_s : 油圧源側シリンダ断面積 cm^2
- A : 背圧側シリンダ断面積 cm^2
- R_{ps} : 毎秒主軸回転数
- u : 切削厚さ cm
- f_c : 切削力 kg
- k_c : $\Delta f_c / \Delta u$ kg/cm

次の仮定をたてて往復台の運動方程式を作った。

- (1) 油圧系を集中定数系としてとりあつかう。
- (2) 流量制御弁を通過する油の流量はスティックスリップ発生中にも変化しない。
- (3) 摩擦力は速度だけの関数として表わす。
- (4) ピストンとシリンダ間における油のもれはない。

$v < 0$ のとき (スリップの間)

$$M \frac{dv}{dt} + cv = A_s P_s - AP - f_c - F_d \quad \dots\dots (1)$$

$$qv = Av - \left(\frac{V}{\beta} + K_p \right) \frac{dP}{dt} \quad \dots\dots (2)$$

$$q_v = Av_{mean} \quad (\text{一定}) \quad \dots\dots (3)$$

$$f_c = k_c u = k_c \{ y(t) - y(t-1/R_{ps}) \} \quad \dots\dots (4)$$

$v < 0$ のとき (スティックの間)

$$A_s P_s - AP - f_c < F_s \quad \dots\dots (5)$$

なお(2), (3), (4)式はそのまま成立する。

(5)式が成立している間往復台は静止し、不等号が逆になる瞬間に運動を開始し静止するまでは(1)~(4)式に従って運動するものとする。もちろんスティックが発生せず(1)~(4)式だけに従って運動を続けることもありうる。

図2はスティックスリップの発生原理を説明するもので、横軸は工作物外周を360°にわたって展開したものを示す。スティック期間中は(2)~(5)式を満足させ、(2)および(3)式により背圧Pは減少する。図のA点は1回転前にスリップの始まった点であり、以後切削厚さが減少し、したがって切削力 f_c も減少する。B点に至りついに(5)式の成立が破れ、スリップが始まる。スリップ中は(1)~(4)式に従う。C点は切削厚さが最小になる点であり、D点は1回転前にスティックの始まった点である。図において切削厚さが周期的に変化している。すなわち切削力の周期的変動をひきおこす。スティックスリップと切削力の周期的変動が互に原因となり結果となる。なおスティックスリップの周期は工作物1回転の時間より必ず長くなり、また2回転の時間より短い。

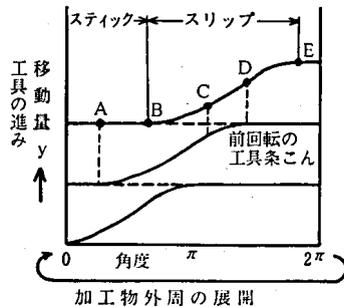


図5 スティックスリップの発生原理

4. 実験結果および考察

実験の諸値は測定の結果次のとおりである。

- $M=0.26\text{kgs}^2/\text{cm}^2$
- $F_s=106\text{kg}$
- $F_d=102\text{kg}$
- $A_s=19.60$
- $A=15.69\text{cm}^2$
- $\beta=1.25 \times 10^4\text{kg}/\text{cm}^2$
- $K_p=0.5\text{cm}^5/\text{kg}$
- $c=11.1\text{kgs}/\text{cm}$
- $k_c=360\text{kg}/\text{cm}$

(図3, a)

$k_c=800\text{kg}/\text{cm}$ (図3, b), $P_s=10\text{kg}/\text{cm}^2$, $V=180.44\text{cm}^3$

F_s と F_d は摩擦力の静特性の測定結果より得た値である。同測定からは c は負になるが、実際には他の原因により何らかの減衰力が働くと考えられる⁽²⁾。ここでは油圧系の過渡応答特性の振巾減衰率より求めた。

図3にスティックスリップ発生時における実験結果の記録を示す。図中の y_1 は、曲線全体

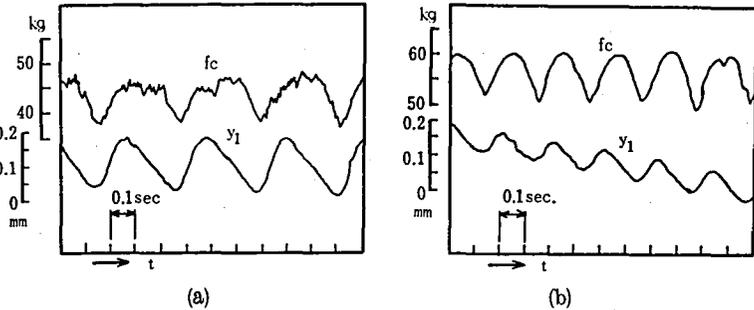


図3 実験結果

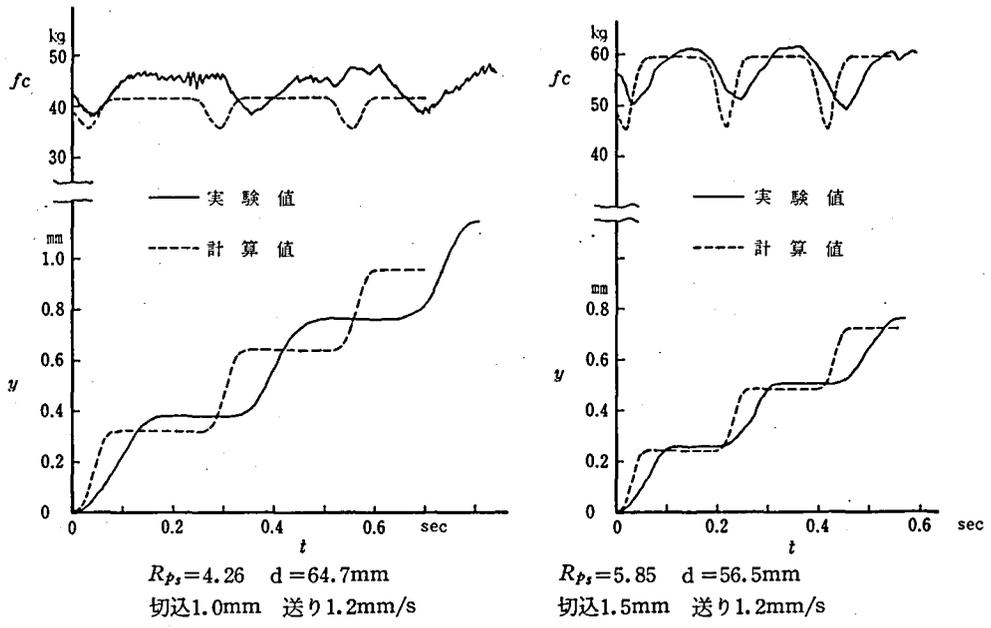


図 4

の傾斜を除けば、 $y-v_{mean}t$ である。また T_{stick} 、 T_{slip} はそれぞれスティック時間、スリップ時間を表わす。

図4は、図3で得られた記録をかきなおした実験結果と、上記諸値を(1)~(5)式へ代入して計算した結果との比較を示す。なお計算はデジタル計算機によるシミュレーションの方法を用いた。実験結果では、工具の切れ味、構成刃先の生成脱落、工作物材料の不均一等の原因により、切削力の変動が見られる。しかし全体としては、両者の変動の挙動はよく類似しているといえよう。このことは図2で説明したスティックスリップ発生の原理の正当性を裏付けている。計算機によるシミュレーションは、いずれも実験結果に比較してスリップ時における立ち上りが急であり振動の周期は短くなっている。その理由は、スリップ時における摩擦特性と切削力変動の非線形性によるものと考えられる。特に摩擦力を静摩擦と動摩擦とに分け単に速度の関数として取り扱ったことに問題があるろう。なお、スティックスリップの発生するのはある回転数の範囲内であり、他は同じ条件で回転数を速くしても、おそくしてもスティックスリップは消失する。また同じ回転数で、切込量、送りを小さくするとスティックスリップは発生しない⁽¹⁾。

5. ま と め

以上をまとめると次のようになる。

- (1) スティック状態とスリップ状態について(1)~(5)式の方程式を作り、図2のようなスティックスリップ発生のモデルを作成した。
- (2) 実験により得られた結果と、数学的モデルをデジタル計算機で計算した得られた結果とを比較した。その結果、周期変動に関して類似性が見られ、発生機構の説明の妥当性を裏付けている。
- (3) しかしなお実験結果と計算結果との間に、スリップ時間その他に相当の差が見られる。その理由は、摩擦力、切削力の非線形性によるものであると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 堀込, 長野工業高専紀要, No.3, 1969
- (2) 竹中・浦田, 油圧工学, 養賢堂, P57~P70