

実験を中心にしたスティックスリップ現象について

明石 一・中川 孝之・大住 剛

An Experimental Study of Stick Slip Motion

Hajime AKASHI・Takayuki NAKAGAWA・Tsuyoshi OSUMI

This report describes the experimental results of a certain stick slip motion.

1. は し が き

油圧駆動によるスティックスリップ現象について既に多くの理論や実験に関する報告⁽¹⁾がある。

摩擦特性や、流量調節弁とシリンダのもつ流量一圧力特性の非線形性が、この現象に大きく影響しているという観点から、我々は、この現象を非線形振動論的に解析した。その理由は、従来この現象に対する取扱いから求まる解析結果が、我々の実験結果と振動数、波形および振幅に対し、その特色が著しく異なることがわかったからである。

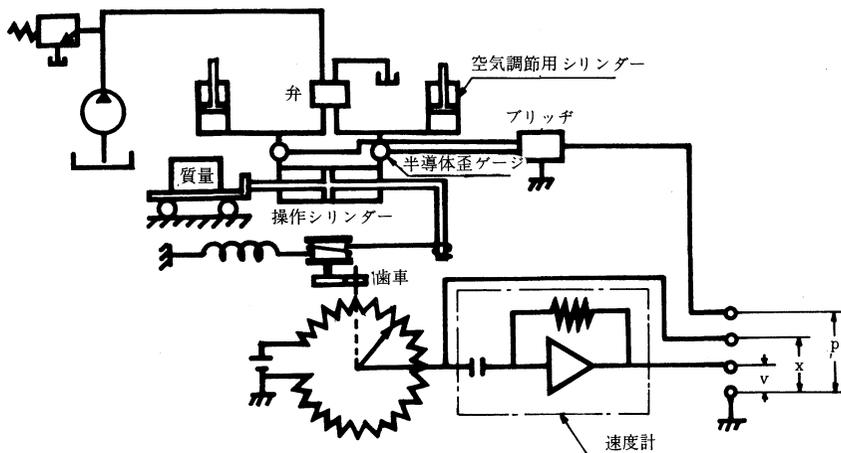
本報では、我々がスティックスリップの波形、振動数、変位振幅及び圧力差振幅の負荷荷重に対する

影響について行なった実験結果を中心に述べることにする。

2. 実験装置及び方法と結果

実験装置の概略は図一1に示す通りである。図中弁は手動調節弁(不二越CFG02-2)又はサーボ弁(東測3F-7.5L-6.0)の何れかを使用する。

負荷荷重を乗せるテーブルの摺動面は、V溝の上に数個の鋼球を介してテーブルを置き、鋼球の数を変えてテーブルの摺動状態が変化するようにした。テーブルの摺動は図のように、ピストンロッドに結合したピストンの動作によるようにした。各検出部については、ピストン変位は精密形ポテンシオメー



図一1 実験装置概略図

* 京都大学工学部

ター、又は微小変位計を用い、ピストン速度は微分演算器⁽²⁾をもつ速度計、そしてシリンダー内部圧力は半導体歪ゲージ(トヨタ工機PMS-5)を用いて、それぞれの機械量を電氣量に変換し、これら機械量の動作の時間的変化を記録計によって計測することにした。

今、我々が考えるスティックスリップ現象は、装置の種々な摺動部の摩擦特性や、ピストンシリンダーと流量調節弁のもつ流量-圧力特性の非線形性が組み合せて起ることはすでにのべた。なお、これらの特性に関係する機械的な物理量として、供給圧力($P_s \text{ kg/cm}^2$)、負荷荷重($M \text{ kg}$)、流量バルブ開度(q)、油中の混入空気量($V \text{ cm}^3$)、等が考えられる。そこでこれらの諸量によって、この現象がどのように影響を受けるか、実験した結果を次に述べる。

2-1 ピストンシリンダーと流量調節弁による 圧力-流量特性

この圧力-流量特性をもとめるため、つぎのように実験した。

サーボ弁に微小電流($i=0\sim 3.0\text{mA}$)を流し、シリンダーへ供給する流量を変えて、シリンダー両室の圧力差($P \text{ kg/cm}^2$)と微小変位($x\text{mm}$)の関係をもとめた1例は図-2のようである。この時の速度は非常に小さい。なお図-2において(a)図は一定負荷質量に対しサーボ弁電流をパラメータとしたシリンダ圧力とピストン変位の関係をもとめたものであり、(b)図は一定サーボ弁電流に対し負荷質量をパラメータとした圧力差と変位の関係を求めたものである。図-2(a)より電流の変化に対して $P-x$ 曲線はほとんど変わらないから、 (dp/dx) は*i*に対してほぼ変わらないと考えられる。図-2(b)より負荷の増加につれて (dp/dx) が増加し、変位の大きいところでは $dp/dx=\text{const}$ なることがわかる。負荷と (dp/dx) の関係を変位 0.36mm の点に於いて図示すると図-3となる。この実験式は質量に関して増加関数と考えることができる。

また、図-2(a)、図-2(b)から明らかなように、ピストン変位が小さい時と大きい時では曲線の形が異なるため、圧力とピストン変位は非線形性を有する。

ピストン変位はシリンダーに流れ込む流量と関係があるから図-2(a)、(b)は、シリンダと流量調節弁のもつ圧力-流量特性を間接的に示していると考えられる。

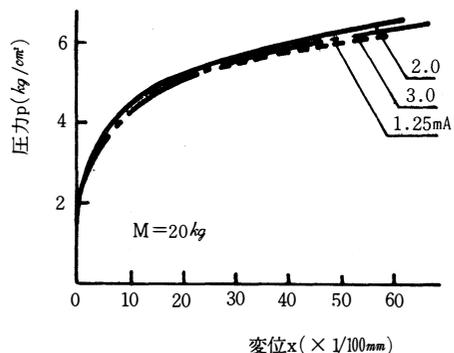


図-2(a) 圧力差と変位の関係

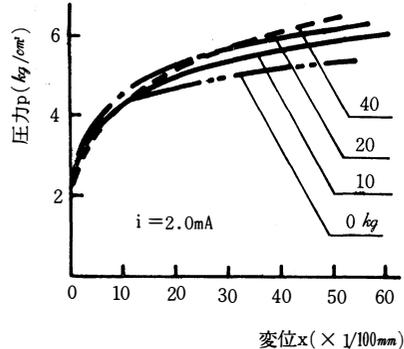


図-2(b) 圧力差と変位の関係

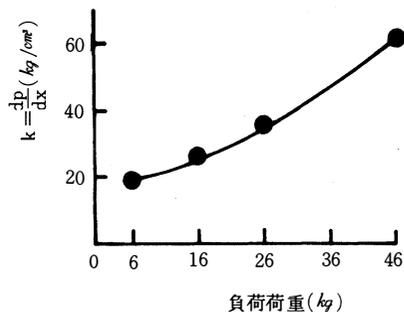


図-3 kと負荷荷重の関係

2-2 質量と摩擦特性及び弁の流量特性の関係
スティックスリップ現象はサーボ弁より手動調節弁による方が顕著に生ずるので、主に調節弁により実験を行ない、必要に応じてサーボ弁と比較を行なうことにした。

速度($v\text{cm/S}$)に比例した電圧を横軸に、圧力差($P \text{ kg/cm}^2$)に比例した電圧を縦軸の入力としてこの現象の位相面上の動作をXYレコーダーで記録した。そして、この動作の位相面上の平衡点のみを記録し、各点を結ぶと図-4(a)、(b)がもった。図において、負荷荷重一定の平衡点を結んだものが摩擦特性を表わし、流量調節弁開度一定の平衡点を結んだもの

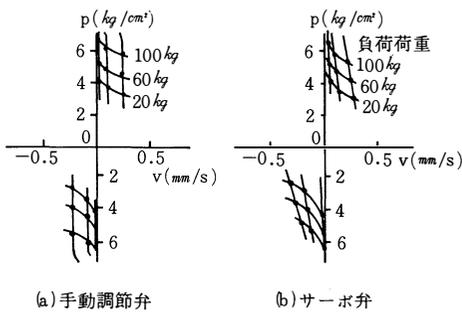


図-4 摩擦特性及び流量特性

のが弁の流量特性を表す。この図-4(a)から調節弁の圧力影響度はサーボ弁に比較して非常に小さいことがわかる。すなわち、流量の大きい所では圧力補償の効果が比較的良くきくが、流量が小さくなると速度軸に対する勾配が目につくようになる。これは負荷重量が比較的大きくなると供給油圧と圧力差との差が小になり、圧力補償が行われなくなることが影響していると考えられる。

2-3 負荷重量と変位及び圧力差振幅の関係

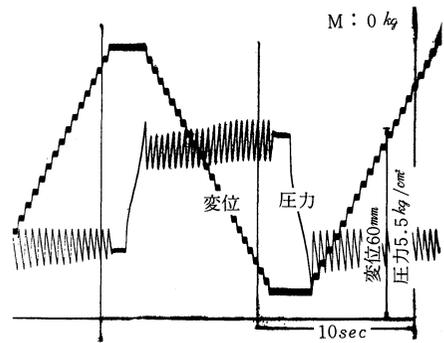
2-1、2-2、で負荷重量と(dp/dx)、そして摩擦特性、および手動調節弁の流量特性などとの関係を調べた。そして、これらの特性のからみ合いとしてスティックスリップ現象が起ると我々は考える。そこで、この現象が負荷重量と変位、圧力差振幅、そして波形の間にどんな関係があるかを述べる。写真-1は、負荷重量が0 kg、30 kg、60 kgの時の現象の1例を示す。

これらの実験結果から、変位振幅、圧力差振幅に付いてまとめると図-5が得られた。図-5から、変位、圧力差振幅共に、負荷の増加につれて減少する傾向が見られる。また、ピストン変位振幅は流量によって余り変わらないことがわかる。しかし、シリンダー両室の圧力差の振幅は流量の減少と共に増加の傾向にある。この負荷による振幅の減少は、線形振動論では説明できないことの1つである。

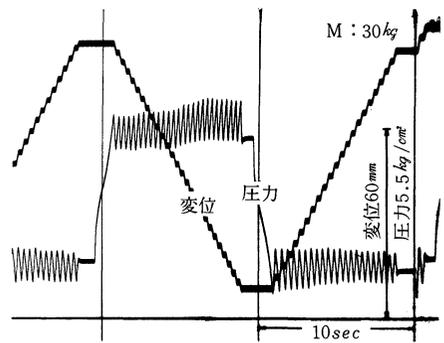
2-4 質量と振動数の関係

油圧駆動によるスティックスリップ現象に関する論文には、質量及び摩擦力の関数として現象は説明されているが、詳細な実験はされておらず、質量によって振動数が減少することが記されている。⁽³⁾

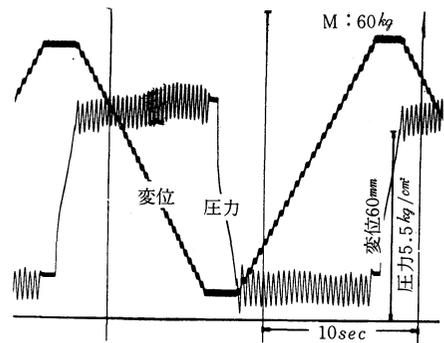
我々は、この点について詳細に実験を行なった。実験の1例は写真-1に示す通りである。



(a)



(b)



(c)

写真-1

質量に関して振動数(周期)を整理すると図-6のようになり、質量の増加につれて振動数が増加することがわかる。しかし或る負荷重量以上になるとスティックスリップを起さなくなる。その理由は、負荷重量が重くなると、ボール1個の支持する荷重が大きくなって、摺動面の摩擦変化が大となり、荷重に対する振動数の変化のようすが急変する。そのため、実験が困難となるためと考えられる。そこでこ

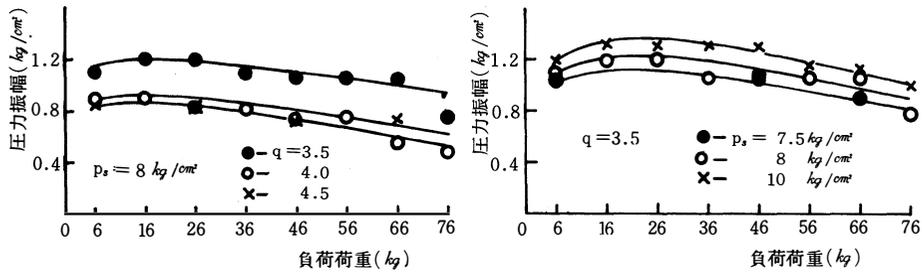


図-5(a) 圧力振幅と負荷荷重の関係

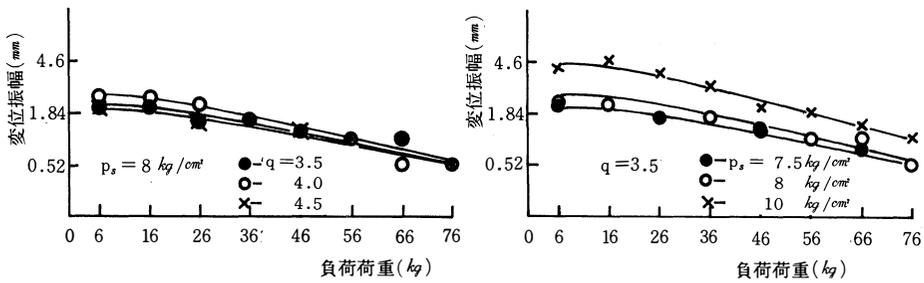


図-5(b) 変位振幅と負荷荷重の関係

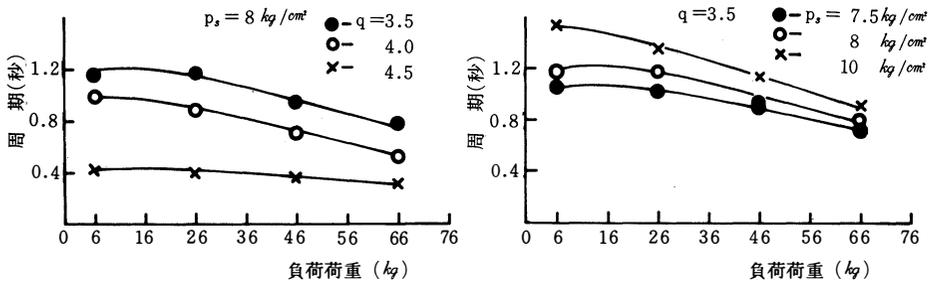


図-6(a) スティックスリップ周期と負荷荷重の関係

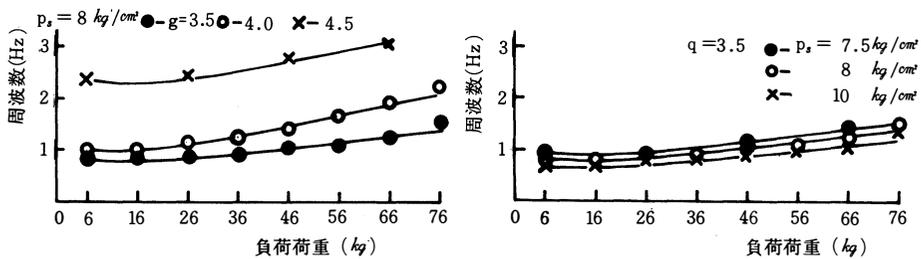


図-6(b) スティックスリップ周波数と負荷荷重の関係

の欠点を除くため支持ボールの数を減らすことにした。支持ボールの数を変化させて平衡状態のシリンダー両室の圧力差を測定して見ると、ボールの増加につれて圧力差が減少していることが図-7よりわかる。そこで鋼球を10個に増加し荷重に対する周期

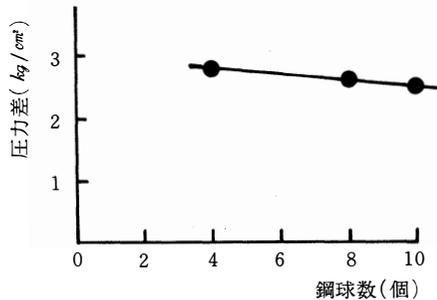


図-7 平衡圧力差と鋼球数の関係

の実験を行った結果、図-8のように周期に最小値を持つ荷重があることがわかる。このことを、我々は、次のように考える。

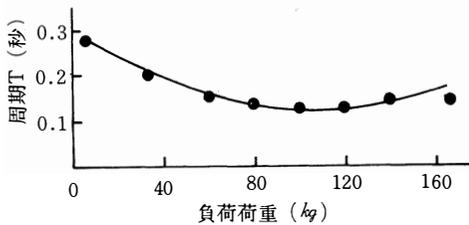


図-8 周期と負荷荷重の関係

図-6の周期(T)は、ピストン速度の小さい部分と速度の大きい部分の時間の和と考えられるので、図-6の周期を2つの部分に分けて整理すると図-9図-10のようになる。図-9に示すように速度の小さな部分、すなわち圧力差が上昇する時間(T₁sec)は質量の増加につれて減少する。一方図-10に示すように速度の速い部分、すなわち圧力差が減少する時間(T₂sec)は負荷の増加とともに増加の傾向にあるが、増加率は非常に小さく時間も小であり、ほとんど一定とみなせる。そして二者の和として負荷荷重の増加によって周期が定まると考え、その概念図を図-11に示すものであり、この図は、図-8に示した実験結果の特徴と一致するものである。

2-5 振動波形について

写真-1の圧力波形を見ると、圧力差の上昇部分は比較的ゆるやかな上昇曲線を描き、つぎに急激な減少を行なう。それで、圧力波形は弛張振動波形で決して正弦波波形でない。そこで我々はサーボ弁及び調節弁、両者の圧力波形を比較して図-12を得た。この図から波形は比較的良く似ているが、圧力上昇部分ではサーボ弁の方が手動調節弁に比べて曲線的であり、2-1で述べた様に、サーボ弁と調節弁の圧力-流量特性の相異にその原因があると考えられる。

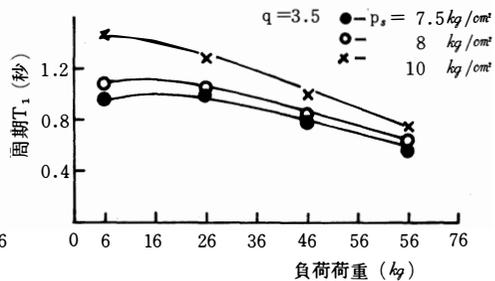
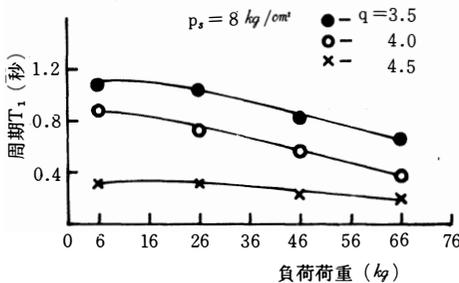


図-9 周期(T₁)と負荷荷重の関係

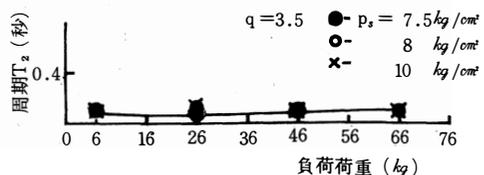
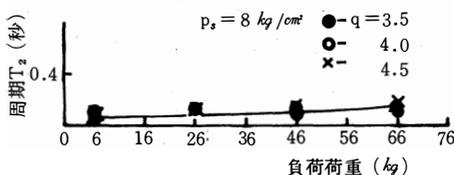


図-10 周期(T₂)と負荷荷重の関係

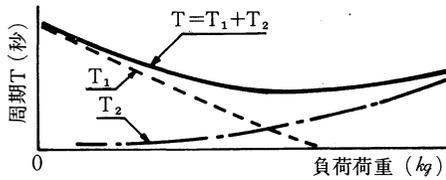


図-11 周期概念図

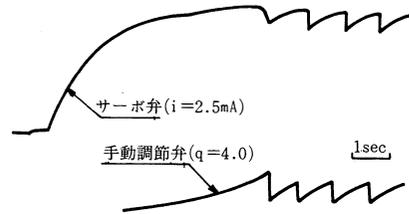


図-12 圧力変動曲線

2-6 ピストンシリンダ内の空気の影響

油中に含まれる混合空気は油のバネ性を大きく変え、スティックスリップ現象の振動数、変位振幅、圧力差振幅に大きく影響する。これらの様子を調べるため、シリンダー内に積極的に空気を入れ、その様子を調べると図-13のようになる。この図から、よく知られているように当然のことであるが、空気の増加につれて振動数は減少し、変位、圧力差の振幅

は大きくなる。実験では最初に混入した空気による周期、振幅の変化は大きいですが、その後、逐次混入する空気量とは比例しない。この理由は、さらに詳細な実験によらねばならない。実験によれば、この場合振動数は減少し、変位振幅、圧力差振幅は増加する傾向にある。なお質量の増加に対する諸量の性質の傾向は2-3で述べた通りであることを付記する。

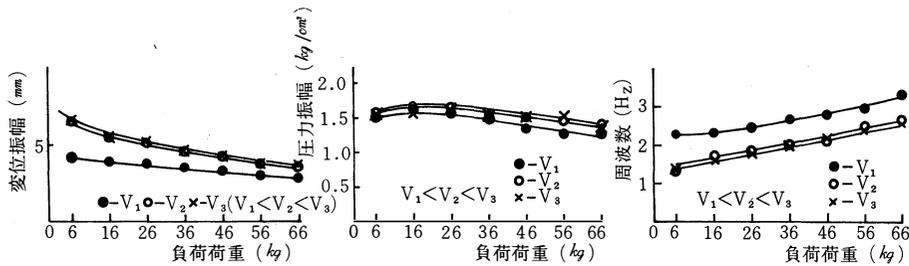


図-13 ピストンシリンダー内の空気の影響

3. あとがき

以上、各要素の特性やスティックスリップ現象の負荷荷重の影響を中心に調べて来た。我々はとりあえず実験によって、変位振幅、圧力差振幅、振動数(周期)及び振動波形と負荷荷重の関係を明らかにすることができた。その結果、負荷荷重による変位振幅、圧力差振幅の増加、振動数及び弛張振動波形に対する議論は、線形振動論の立場では説明し得ない所であり、運動部の摩擦特性、ピストンシリンダー両室圧力差、および調節弁による圧力-流量特性の非線形性を考慮した非線形振動論の立場で説明しなければならないことがこれらの実験結果から考えられ

る。

(本報は機械学会49期全国大会(46.10.18)及び機械学会北陸信越支部講演会(46.9.9)発表の内容の詳細な実験結果をまとめたものである。)

参考文献

- (1) 松崎、橋本：機械学会論文集28巻 194号 (S37-10)
- (2) 高瀬、中川：富山大学紀要23巻1・2号 (S47-3) P73
- (3) 竹中、浦田：油圧制御 丸善(1967) P177-P179