

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-448

## 空気圧回路におけるスティックスリップ現象の 発生限界の考察

(その2. 非対称型空気圧シリンダの実験)

池谷 光栄 ・ 松本 和幸

1976 年 3 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 空気圧回路におけるスティックスリップ現象の 発生限界の考察\*

(その2. 非対称型空気圧シリンダの実験)

池谷 光 栄\*\*・松本 和 幸\*\*\*

## Analysis of Critical Conditions of Stick-Slip in a Pneumatic Driving System

### Part II Double Acting Single Rod Type Pneumatic Driving System Experiment

By Mitsuei IKEYA and Kazuyuki MATSUMOTO

#### ABSTRACT

This paper deals with an experiment to establish a practical design criteria for a pneumatic driving system. Meter-in- and meter-out-type experiments on a pneumatic driving cylinder were carried out. The data obtained were compared with the results of calculation of mathematical models which had been established in the 1-st report to evaluate the usefulness of the mathematical models and the analytical method. The results of this evaluation showed that both are satisfactory, and it was shown that to prevent the occurrence of stick-slip or speed vibration, a pneumatic system should be designed to, 1) supply high pressure, 2) enlarge equivalent area of restrictor, 3) enlarge mass load, and, 4) especially reduce stiction/dynamic friction. Finally, the analytical method was evaluated as very useful for the practical synthesis method.

#### 1. 序 言

空気圧アクチュエータ, 特に空気圧シリンダは, 数多い空気圧回路の中でも最も工業的に用途が広い制御機器の一つである<sup>1)</sup>。然し空気圧シリンダは実用に際して駆動ピストンや負荷の動きにしばしばスティックスリップ現象を生ずることがあり, 安定な動作機能を果す上で妨げになる。これは空気圧シリンダを実用する上で極めて大切な問題である。このようなスティックスリップ現象は一般に系に働く摩擦に起因して発生する一種の自励振動と考えられている<sup>2)</sup>。前報<sup>3)</sup>ではこのスティックスリップ

現象に着目し, その発生限界を定量的に定める解析手法を確立した。この手法は又同時に同じく空気圧シリンダの安定な動作を制約する速度振動の発生限界も規定することができる。すなわち同報告では先づ空気圧シリンダの一般方程式を規定し, その無次元化を図ってから, 位相解析により各現象の発生限界を定量的に求める手法を確立し, かつ計算例を示した。このように一般的な解析手法が得られた場合に, 工学的な観点からはこれに対して実験による評価を求めておくことが望ましい。これにより本手法の適用可能な範囲が明確化されよう。

本報告は上述事項を考慮に入れて, 実用空気圧シリンダの中でもとりわけシーケンス制御に頻用される二位置動作方式の非対称型シリンダを採上げ, 先づ, 1) 空気圧シリンダの実験を行ない, かつ系の挙動に影響を及ぼ

\* 昭和51年2月4日受付

\*\* 計測部

\*\*\* 東京工業大学 (現帝人精機K.K.)

すと考えられる幾つかのパラメータの効果について考察し、更に、II) 前報に示した解析手法をそこに適用し、解析結果と実験結果を対比してその評価を求める。これにより、より一般的な空気圧回路に関して有用な技術データを提供し、かつその実用的な設計理論の確立に資し得ることを目的とする。

### 記号と添字

〔記号〕

本報告で使用する大文字記号は原則として無次元化した量を（\*の記号を付ける）、小文字記号は有次元量を表わす。又2個の添字を有するものは前者がメータイン回路、後者がメータアウト回路の場合である。なお圧力は原則として絶対圧力で示す。

$$D_1 = F_C + H$$

$$D_2 = \frac{1 - F_C}{H}$$

$F_C$  : 動摩擦\*

$F_S$  : 静摩擦\*

$$G_1 = \frac{F_S + H}{D_1}$$

$$G_2 = \frac{1 - F_S}{D_2}$$

$H$  : 標準圧力\*

$L_{1,2}$  : ピストンの全行程  $L$  上の特定位置\*

$P_g$  : 平衡点における圧力  $P^*$

$P_{1,2}$  : シリンダ室の圧力\*

$R = 2927 \text{ cm}^3/\text{K}$ , 気体定数

$S_{1,2}$  : 絞り部の有効断面積\*

$T = t_L + t_T$ , 周期

$T_S$  : 供給空気の絶対温度

$U$  : ピストンの速度\*

$Y$  : ピストンの変位\*

$a_{1,2}$  : シリンダ室の有効断面積

$d$  : 絞り部の有効直径

$d_{c,r}$  : シリンダ及びピストンロッドの直径

$f$  : 力, 特に摩擦

$f_C$  : 動摩擦

$f_K$  : 始動摩擦

$f_S$  : 静摩擦

$f(u)$  :  $u$  の関数と考えた  $f$

$g = 980.7 \text{ cm}/\text{sec}^2$ , 重力加速度

$k = 1.4$ , 空気の比熱比

$l$  : ピストンの全行程

$m$  : 質量, 特に負荷質量

$p_A = 1.033 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , 標準圧力

$p_S$  : 供給圧力

$p_{ST}$  : 設定供給圧力

$s$  : ラプラスの演算子

$s_{1,2}$  : 絞り部の有効断面積

$t$  : 時間

$t_L$  : スリップ時間

$t_T$  : スティック時間

$u$  : ピストンの速度

$w$  : 重量流量

$y$  : ピストンの変位

$y_L$  : スリップ距離

$d$  : 差分

$\varphi(-)$  : 流量特性関数

$$\varphi'(\lambda) = \frac{d\varphi(\lambda)}{d\lambda}$$

$\mu$  : 摩擦係数

〔添字〕

1 : 空気供給側シリンダ室の関係量

2 : 空気排出側シリンダ室の関係量

(0) : 動作開始時の初期値を表わす

## 2. 非対称型空気圧シリンダの実験装置

### 2.1 空気圧シリンダの実験装置の構成

空気圧シリンダ(以下シリンダ)の実験の主な目的は次の二点である。すなわち、I) 実際のシリンダはどのような動作をしているかを実験で数値データとして求める。特にシリンダの実用上でしばしば問題をひき起すと云われるスティックスリップや速度振動の発生メカニズムを検討し、どのような条件の時にこれらの現象が発生するか、更にその時に系全体の挙動がどのようになるかなど、シリンダの動作状態を具体的に把握する。II) 上述実験データに基づいて、前報<sup>3)</sup>で規定したシリンダの挙動を支配する諸式を実際の系に当てはめて解析を行ない、特にこれら摩擦負荷を考慮した数学モデルの妥当性や近似度、更には解析手法の有用性がどのように評価できるかを知る。

上述から、シリンダの実験装置はなるべく一般的な実用空気圧回路の動作機能を模擬することを考えて、電磁弁制御による二位置動作方式の非対称型シリンダを採上げた。

実験装置の外観と機器構成は図1, 2に示す。又その主な仕様は表1に示す通りである。

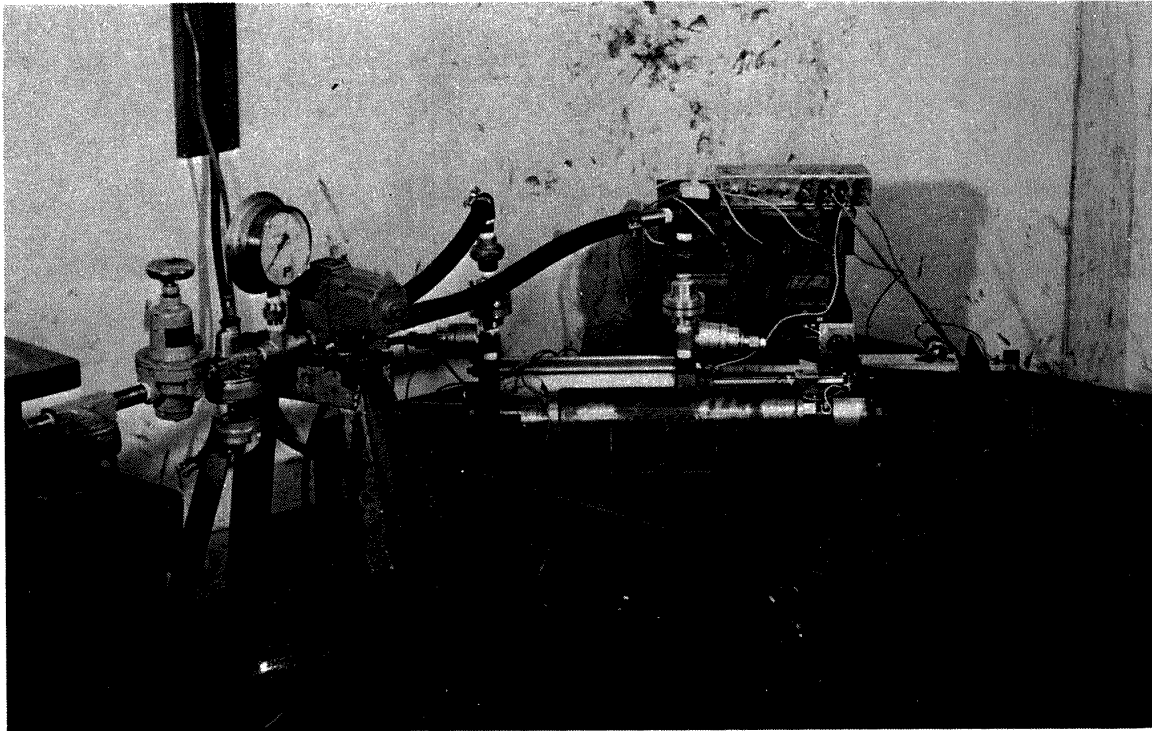


図1 空気圧シリンダの実験装置の外観

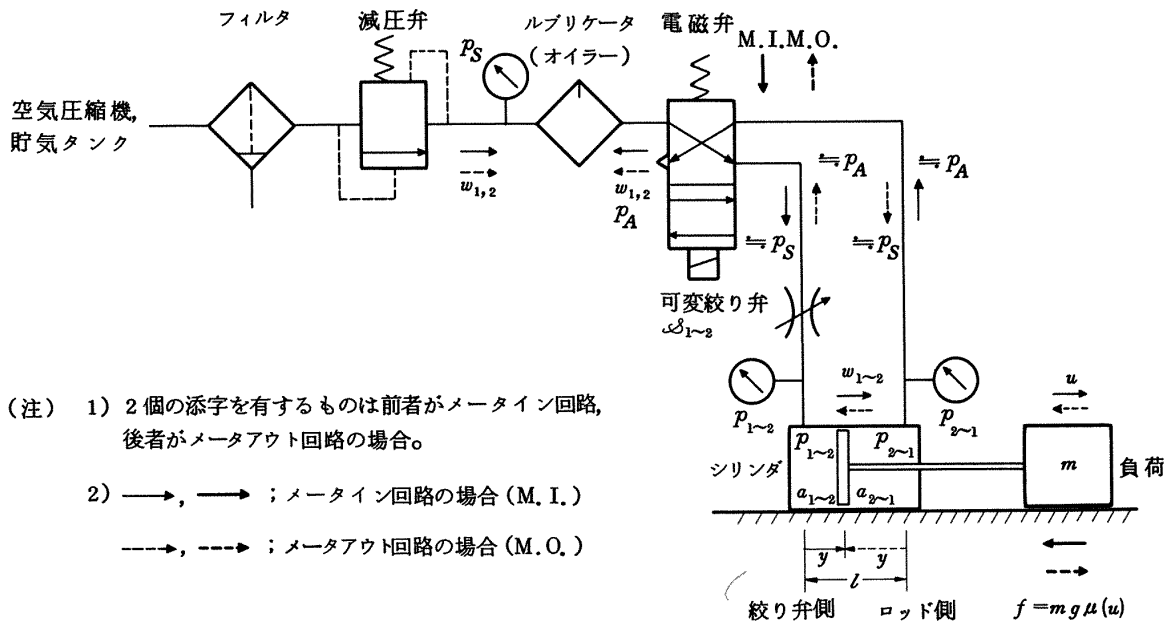


図2 非対称型空気圧シリンダ実験装置の機器構成系統  
 (電磁弁が動作したメータイン回路の状態)

表 1 非対称型空気圧シリンダの主な仕様

項目	(単位)	仕様
ピストン行程	( $l$ ) [cm]	20.2
シリンダ内径	( $d_c$ ) [cm]	6.3
ピストンロッド外径	( $d_r$ ) [cm]	2.0
シリンダ室断面積		
電磁弁側	( $a_{1\sim 2}$ ) [cm <sup>2</sup> ]	31.17
ロッド側	( $a_{2\sim 1}$ ) [cm <sup>2</sup> ]	28.06
絞り板径(絞り弁)	( $d_{s1\sim 2}$ ) [cm]	0.090 及び 0.135
絞り部有効断面積	( $\omega_{1\sim 2}$ ) [cm <sup>2</sup> ]	0.0063 及び 0.0143

## 2.2 非対称型空気圧シリンダの実験装置の構造と動作機能

図 1, 2 に示した非対称型空気圧シリンダの実験装置の構造は実用シリンダのそれと殆んど類似している。ただしここでは実験の主な目的の一つから、シリンダの挙動に関して殊更スティックスリップ現象を発生し易くするために、空気圧系統に可変絞り弁を設けて適宜流量を絞れるようになっている。これにより、実験に際してスティックスリップ現象を故意に起させ、しかもその限界条件がほぼ求められるようにした。なお通常の場合は実用シリンダの空気圧系統にわざわざ絞り弁を設けるような回路方式は少ない。然し実用回路では一般に途中にバルブが設けられており、更に相当な長さの空気圧配管には屈曲、継手などがあるなど、絞り相当効果を与えるものが必ず存在する。ここでは実験室的にシリンダの実用状態に相当する機能を模擬し、かつ任意にスティックスリップ現象が発生し易い状態にもたらしめるために可変絞り弁を設けたものである。ただし実際の絞り弁の構造は、有効断面積が異なる絞り板を準備して、これを交換、挿入するようにしている。なお配管は絞り板の直径に比べて充分太く、かつ電磁弁の抵抗も充分小さいものを使用している。

図 1 の実験装置の基本的な動作は以下の通りである。すなわち図 2 の構成系統が示すように、空気圧縮機から送られた圧縮空気は元圧約  $7 \text{ kg/cm}^2$  (ゲージ圧) で一旦貯気タンクに貯えられる。貯気タンクの圧縮空気は、フィルタ、減圧弁、ルブリケータ(オイル)を経由し、この間、空気中のごみや水分を除去し、実験時の規定圧力に設定後、潤滑油を混入してから、シリンダへの空気圧系統切換え電磁弁に送る。ここで圧縮空気は電磁弁の動作状態に応じてシリンダの何れかの側のシリンダ室に送られて、ピストンと一体の負荷を駆動し、その動きに

伴ない逆側シリンダ室の空気は電磁弁を経由して大気中に排出される。この間圧縮空気は管路の途中に設けた可変絞り弁を通過し、その置かれる位置によって、空気圧回路の動作がメータイン回路、メータアウト回路の何れかに定まる。<sup>3)</sup> 仮りに図 2 のように電磁弁が作動状態

(On) になっておれば、圧縮空気は同図実線矢印のように電磁弁から可変絞り弁を経由して絞り弁側シリンダ室に送られ、ロッド側シリンダ室の空気はピストンに押されて大気中に排出されるからメータイン回路が構成される。又電磁弁が休止状態(Off)になれば、圧縮空気は破線矢印のように流れの向きが変わってメータアウト回路が構成されることになる。すなわち、この実験装置は電磁弁の動作状態をスイッチで切換えさえすれば、一台の装置でメータイン回路、メータアウト回路の実験を交互に行なうことができ、従って、両者の実験条件を殆んど一致させることが可能になる。このような機器構成は、実用空気圧回路でも電磁弁の使用個数を減らすためにしばしば採られる方式である。このことからここで採上げた図 2 の機器構成は充分実用空気圧回路のそれを模擬したものと云うことができる。なお図 2 におけるシリンダ室の呼び方は前報<sup>3)</sup>と異なるが、ここでは非対称型シリンダを用いて二位置動作方式で実験を行なうから、両シリンダ室を明確に区別するために、本報告では上述によることにする。

## 3. 非対称型空気圧シリンダの実験

### 3.1 実験項目(及び解析項目)

非対称型空気圧シリンダの挙動を支配する主なファクタは、図 2 に示した機器構成の系統から考えて、設定供給圧力  $P_{ST}$ 、絞り部分の有効断面積  $\omega$ 、ピストンを含む負荷質量  $m$  及び摩擦  $f$  の四個と考えられる。従って、メータイン回路、メータアウト回路のそれぞれの場合につ

表2 実験・解析項目

項目	(単位)	条件
設定供給圧力	( $p_{ST}$ ) [kg/cm <sup>2</sup> ]	約 3 及び 4
絞り部有効断面積	( $a_1 \sim a_2$ ) [cm <sup>2</sup> ]	0.0063 及び 0.0143
負荷質量	( $m$ ) [kg sec <sup>2</sup> /cm]	0.0118 及び 0.0215
静摩擦	( $f_S$ ) [kg]	約 15 及び 50
動摩擦	( $f_C$ ) [kg]	約 12 及び 40

(注)  $p_{ST}$ ,  $f_S$  及び  $f_C$  の正確な計測値は各実験結果を示す図中に記載してある。

いて上記をパラメータとする実験を行なうことにした。又第4章で述べるシリンダの解析条件も実験時のそれと対応させることにした。

上述による実験・解析項目は表2に示す通りである。なお同表の  $p_{ST}$  及び  $f$  の値は実験時の概略設定値であって、個々のデータはそれぞれの実験結果を示す図中に記載することにする。

### 3.2 計測方法

実験時のデータ計測方法は以下の通りである。設定供給圧力  $p_{ST}$ 、各シリンダ室の圧力  $p_{1 \sim 2}$  は、ストレインゲージ型圧力変換器を予め精密圧力計で較正し、原則として絶対圧力で求めた。ピストンの変位  $y$  は直線形ポテンシオメータにより、又その速度  $u$  は可動永久磁石とコイルによる速度変換器で検出した。トランスデューサの外観は図3に示す通りである。トランスデューサの出力は出力レベル、出力インピーダンス、負荷効果のことを考慮に入れ、バッファを兼ねた増幅器を挿入してその出力を直記式電磁オシログラフに記録した。又摩擦  $f$  は実験の都度、その前後に計測して平均値を求めている。この実験の計測状態ではシリンダのピストン摺動面は常に潤滑油で濡れており、かつ各回毎の計測値は比較的落ち着いたものが得られた。ここで摩擦特性が図4で表わせることを仮定する時、ピストンが動き出す瞬間の最大値を静摩擦  $f_S$ 、動き出してから速度振動を生じない範囲で比較的ゆっくりした一定速度で引張った時の値を動摩擦  $f_C$  と定めた。これらの値は上述の実験状態から考えて、それぞれ静止摩擦領域及び境界摩擦領域に対する  $f_S$ ,  $f_C$  を与えるものと考えられよう。なお始動摩擦  $f_K$  の計測は極めて困難であり、実際上も  $f_S \simeq f_K$  と考える。

### 3.3 実験結果

二位置動作方式によるシリンダのメータイン回路及びメータアウト回路の動作は実験時に以下の初期条件から開始される。すなわち図2に示すように、今メータイン回路として電磁弁に対する動作信号が与えられ、既にシ

リンダの動作が整定した状態になっておれば、絞り弁側シリンダ室の圧力  $p_1$  は設定供給圧力  $p_{ST}$  と、又ロッド側シリンダ室圧力  $p_2$  は標準圧力  $p_A$  と等しく、ピストンはシリンダの終端位置  $y = l$  まで全行程を完全に移動し終っている。ここで電磁弁の動作を切換えればこの場合はメータアウト回路になり、上述状態が初期条件になって、ロッド側シリンダ室圧力  $p_1$  は  $p_1 = p_A \rightarrow p_1 = p_{ST}$ 、絞り弁側シリンダ室圧力  $p_2 = p_{ST}$ ,  $y = 0$  でシリンダの動作が開始され、動作が終了すれば  $p_1 = p_{ST}$ ,  $p_2 = p_A$ ,  $y = l$  で整定する。この状態から更に電磁弁の動作を切換えれば、メータアウト回路の最終整定状態がメータイン回路の初期条件として与えられ、 $p_1 = p_A$ ,  $p_2 = p_{ST} \rightarrow p_2 = p_A$ ,  $y = 0$  でシリンダの動作が開始することになる。以下、実験の都度上述のことが繰返される。

上述の動作状態に対するメータイン回路及びメータアウト回路において、共にスティックスリップ現象を生じた状態を示す実験結果は図5に一例を示す通りである。

実験結果についての解析と詳細検討は次章以降で行なう。

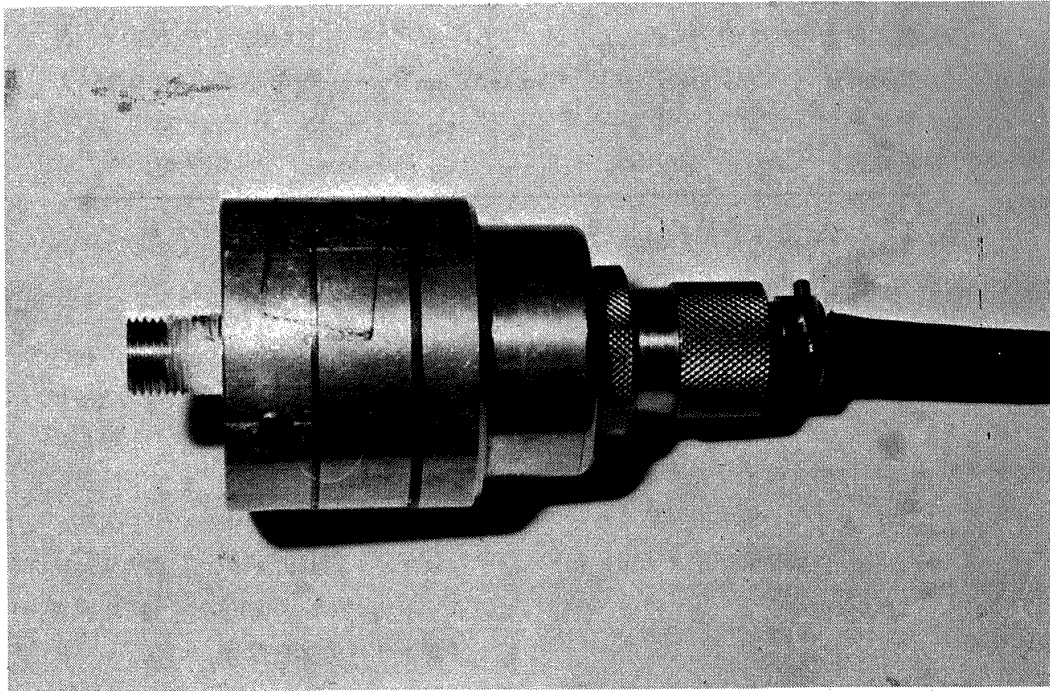
## 4. 摩擦の影響を受ける非対称型空気圧シリンダの位相面軌道

### 4.1 非対称型空気圧シリンダの運動方程式

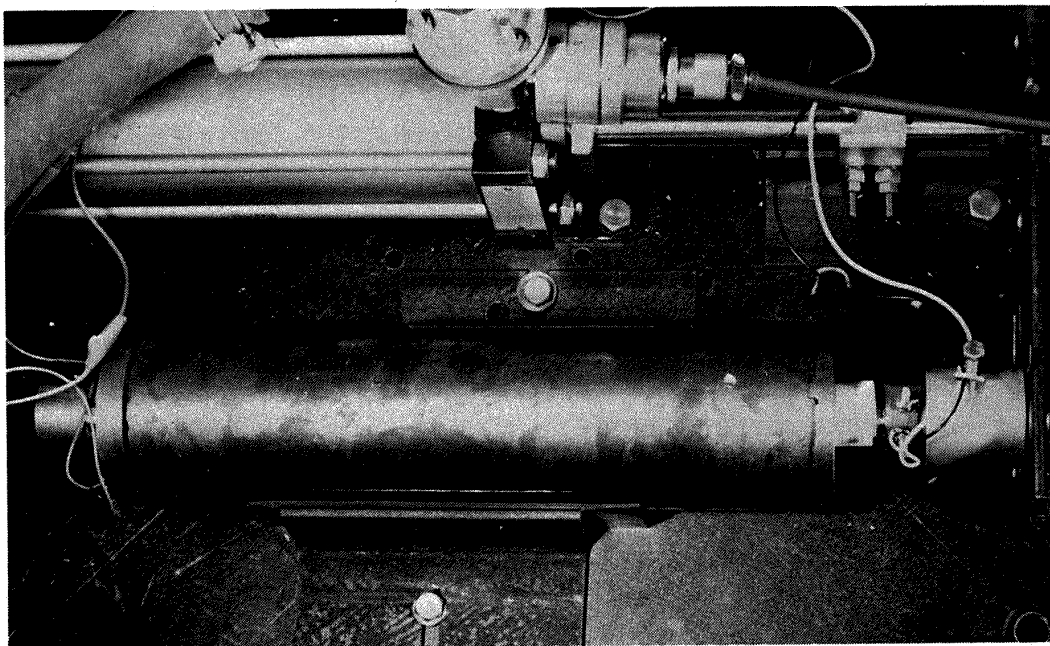
図2に示した非対称型空気圧シリンダの構造をモデル化して図6で表わす。ここでは負荷  $m$ 、摩擦  $f$  は共にピストンのそれに含めて示し、 $f_S$ ,  $f_C$  はそれぞれ静摩擦及び動摩擦である。同図の記号に従い、シリンダの運動方程式は何れの回路についても同じく下式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} p_1 a_1 = p_2 a_2 + p_A (a_1 - a_2) + f_S & \quad u = 0 \\ = p_2 a_2 + p_A (a_1 - a_2) + f_C + m\dot{u} & \quad u > 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

上記に  $u$  の範囲は限っても問題の一般性は失われぬ。ここでメータイン回路の場合には  $p_2 = p_A$ 、メータアウト回路の場合には  $p_1 = p_S$  を仮定すれば、式(1)は下式のように変形される。

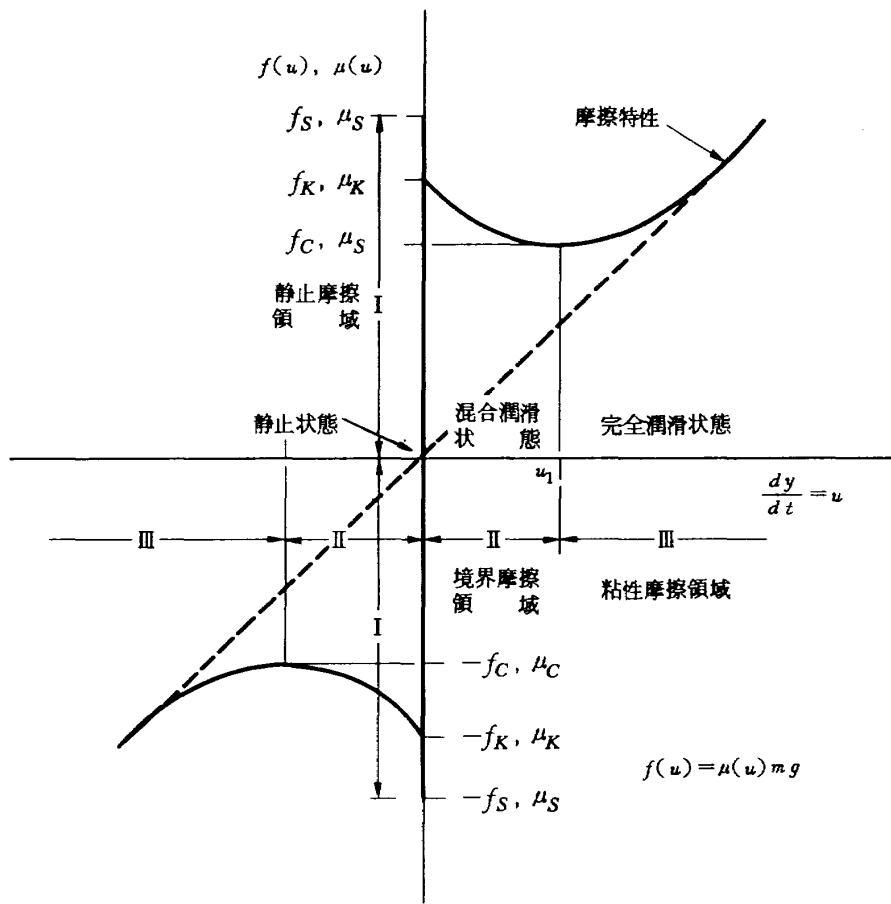


(a) 圧力トランスデューサ

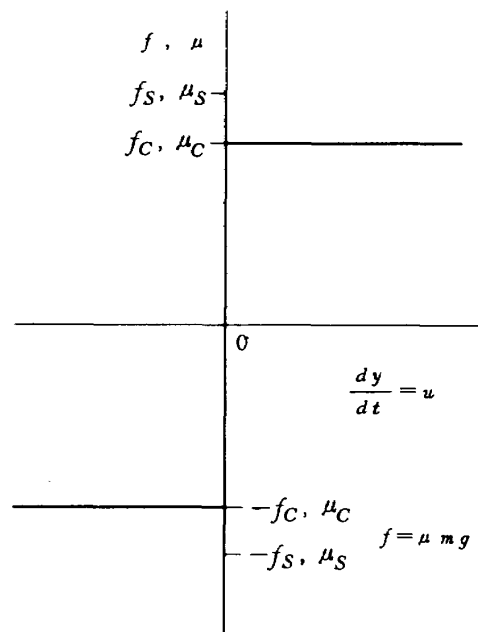


(b) 速度トランスデューサ

図3 トランスデューサの外観



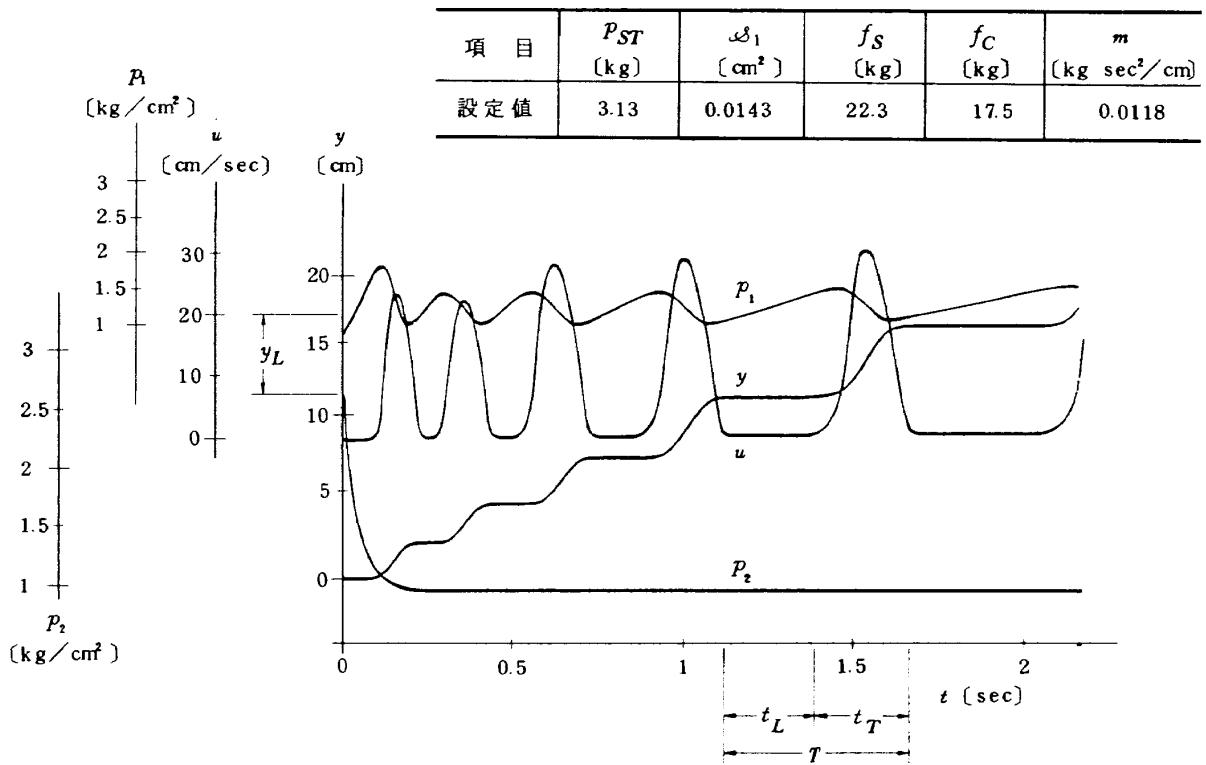
(a) 実際に観測される摩擦の状態



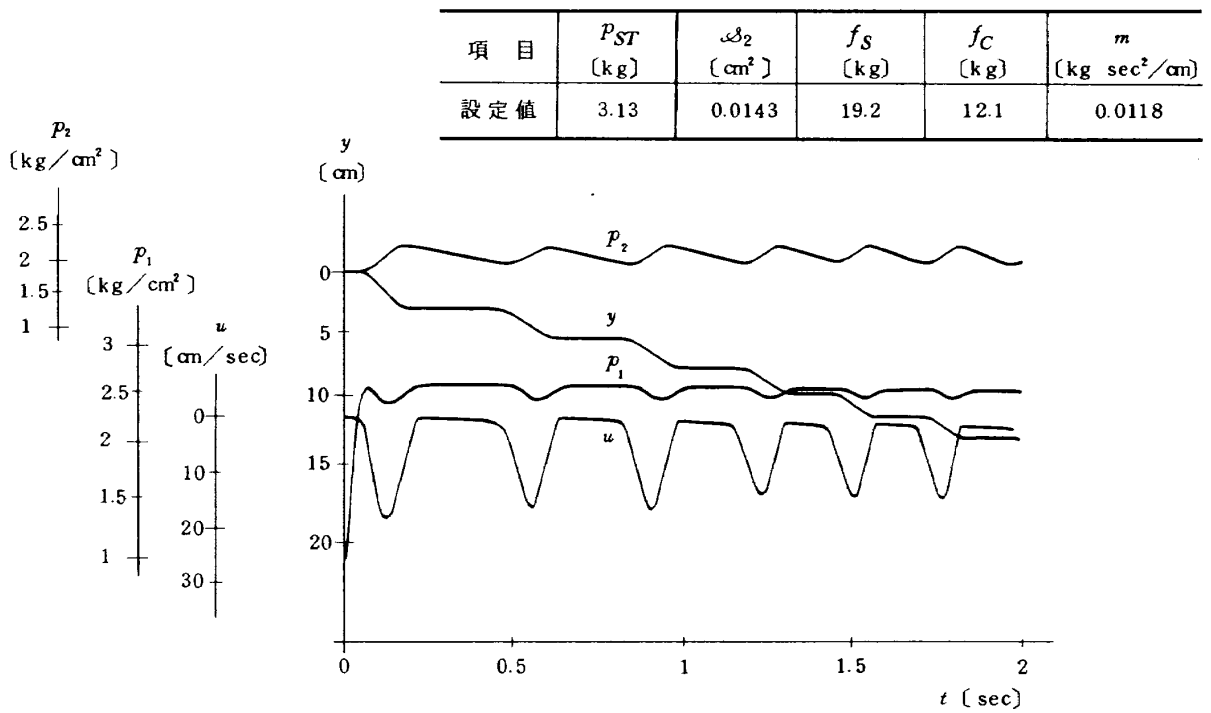
(b) 単純化した摩擦特性

図4 摩擦特性





(a) メータイン回路



(b) メータアウト回路

図5 電磁オンログラフによる記録データ

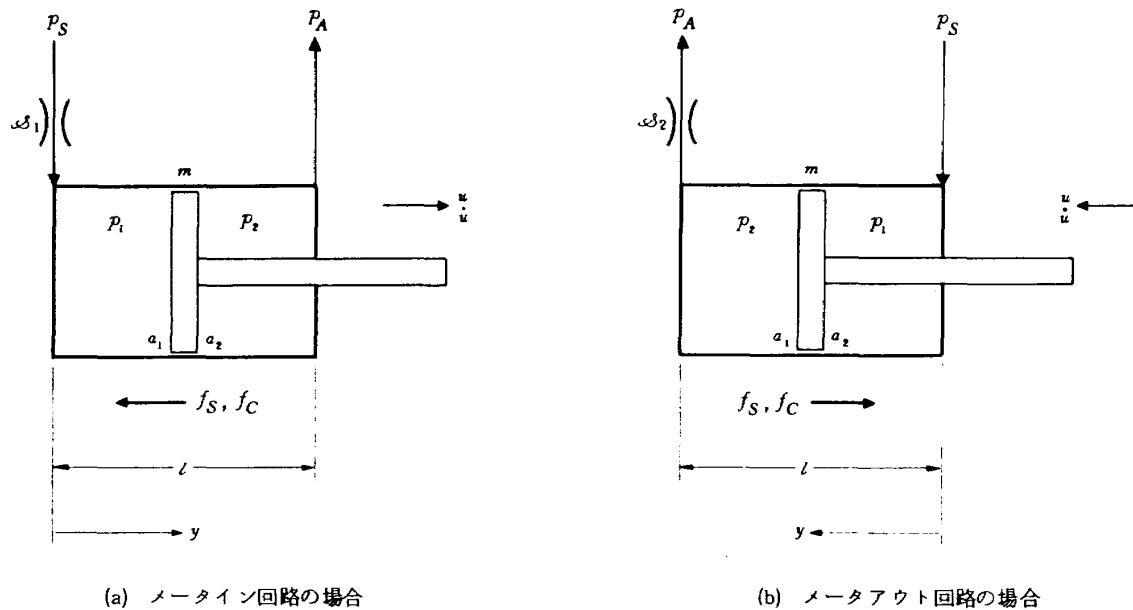


図6 非対称型空気圧シリンダの動作モデル

メータイン回路の場合：

$$\begin{cases} P_1 a_1 = P_A a_1 + f_s & u = 0 \\ = P_A a_1 + f_c + m\dot{u} & u > 0 \end{cases} \quad (2)$$

メータアウト回路の場合：

$$\begin{cases} P_2 a_2 = P_S a_1 - \{P_A (a_1 - a_2) + f_s\} & u = 0 \\ = P_S a_1 - \{P_A (a_1 - a_2) + f_c + m\dot{u}\} & u > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)或は式(2), (3)で表わされるシリンダの挙動は、ここで行なった実験のように空気圧回路に絞り弁を設けて空気流量を制限し、スティックスリップ現象が発生し易い、或は既に発生しているような動作条件のもとでは摩擦の影響を大きく受ける。然もこのような系の特性解析は通常の数学的取扱いによることが困難であるから、前報<sup>3)</sup>と同じく速度  $u$ 、シリンダ室圧力  $p_{1\sim 2}$  に関する無次元位相面上の軌道を求めて考察を行なう。

#### 4.2 実験結果の位相面軌道

非対称型空気圧シリンダについて、メータイン回路及びメータアウト回路の実験結果に対する  $u \sim p_{1\sim 2}$  位相面軌道は図7に一例を示す通りである。その詳細計測データは図中に記入した。

図7は有次元量による表現であり、ここで表3に従い  $u$  の無次元量  $U$ 、 $p_{1\sim 2}$  の無次元量  $P_{1\sim 2}$  を求めて図7を無次元化すれば図8のようになる。又表2に示した各実験項目に対する位相面軌道を求めれば図9ないし図12に示す通りである。なお詳細計測データは各図中に記入してあり、又これらの図には次節で述べる解析結果を併記してある。

#### 4.3 解析結果の位相面軌道

非対称型空気圧シリンダの解析を行なうために、その運動方程式、式(2), (3)の無次元化を行なう。ここで図4に示した摩擦特性の内で同図(b)によることを考えれば、摩擦  $f$  は、

$$\begin{cases} f = 0 \sim f_s & u = 0 \\ = f_c & u > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)及び式(2)或は(3)に表3に示した無次元化を施して重量流量をも考慮に入れて整理すれば<sup>3)</sup>、下記の無次元方程式が得られる(前報<sup>3)</sup>式(42)及び式(65))。

メータイン回路の場合：

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\tau_1} = \frac{k}{L_1} [S_1 \varphi(P_1) - P_1 U] \\ \frac{dU}{d\tau_1} = P_1 - F_C - H & : U > 0 \end{cases} \quad (5)$$

メータアウト回路の場合：

$$\begin{cases} \frac{dP_2}{d\tau_2} = \frac{k}{L_2} \left[ P_2 U - S_2 \varphi\left(\frac{1}{P_2}\right) P_2 \right] \\ \frac{dU}{d\tau_2} = \frac{1 - F_C}{H} - P_2 & : U > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$P$  はシリンダ室の圧力、 $H$  は標準圧力、 $U$  はピストンの速度、 $S$  は絞り部の有効断面積、 $F_C$  は動摩擦、 $\tau$  は時間の無次元量、 $k$  は空気の比熱比、 $\varphi(-)$  は流量特性関数である。

式(5), (6)に計測データを与えて数値計算を行なうに当り留意すべきことは、1) 計測データには必ず実験誤差

表3 無次元量の定義と定数表

(a) 無次元量の定義

項 目	定 義	
	メータイン回路	メータアウト回路
絞り部有効断面積 ( $S_{1\sim 2}$ )	$\sqrt{\frac{mg}{a_1 P_S}} \sqrt{\frac{2RT_S}{l}} \frac{\omega_1}{a_1}$	$\sqrt{\frac{mg}{a_2 P_A}} \sqrt{\frac{2RT_S}{l}} \frac{\omega_2}{a_2}$
時間 ( $\tau_{1\sim 2}$ )	$\frac{t}{\sqrt{\frac{mg}{a_1 P_S}} \sqrt{\frac{l}{g}}}$	$\frac{t}{\sqrt{\frac{mg}{a_2 P_A}} \sqrt{\frac{l}{g}}}$
変位 ( $Y$ )	$\frac{y}{l}$	$\frac{y}{l}$
速度 ( $U$ )	$\frac{\sqrt{\frac{mg}{a_1 P_S}} \sqrt{\frac{l}{g}}}{l} \frac{dy}{dt}$	$\frac{\sqrt{\frac{mg}{a_2 P_A}} \sqrt{\frac{l}{g}}}{l} \frac{dy}{dt}$
標準圧力 ( $H$ )	$\frac{a_2 P_A}{a_1 P_S}$	$\frac{a_2 P_A}{a_1 P_S}$
シリンダ室圧力 ( $P_{1\sim 2}$ )	$\frac{a_1 P_1}{a_1 P_S}$	$\frac{a_2 P_2}{a_2 P_A}$
力 ( $F$ )	$\frac{f}{a_1 P_S}$	$\frac{f}{a_1 P_S}$
静摩擦 ( $F_S$ )	$\frac{f_S + P_A (a_1 - a_2)}{a_1 P_S}$	$\frac{f_S + P_A (a_1 - a_2)}{a_1 P_S}$
動摩擦 ( $F_C$ )	$\frac{f_C + P_A (a_1 - a_2)}{a_1 P_S}$	$\frac{f_C + P_A (a_1 - a_2)}{a_1 P_S}$
係数 $\left[ \begin{array}{l} D_1 = F_C + H \\ D_2 = \frac{1 - F_C}{H} \end{array} \right.$	$\frac{f_C + P_A a_1}{a_1 P_S}$	$\frac{a_1 P_S - \{f_C + P_A (a_1 - a_2)\}}{a_2 P_A}$
係数 $\left[ \begin{array}{l} G_1 = \frac{F_S + H}{D_1} \\ G_2 = \frac{1 - F_S}{D_2 H} \end{array} \right.$	$\frac{f_S + P_A a_1}{f_C + P_A a_1}$	$\frac{a_1 P_S - \{f_S + P_A (a_1 - a_2)\}}{a_1 P_S - \{f_C + P_A (a_1 - a_2)\}}$

表3(b) 定数表(その1 有次元量)

項 目	[ 単位 ]	定 数
標準圧力	( $P_A$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	1.033
重力加速度	( $g$ ) (cm/sec <sup>2</sup> )	980.7
気体定数	( $R$ ) (cm <sup>3</sup> /°K)	2927
供給空気の絶対温度	( $T_S$ ) (°K)	288
空気の比熱比	( $k$ ) (—)	1.4

(注) 残余定数は表1及び実験結果を参照。

表3 (c. 1) 定数表 (その2 無次元量, メータイン回路の場合)

項目	$S_1$	$P_{1(0)}$	$D_1$	$G_1$
計測データによる:				
比較基準データ	0.02017	0.4855	0.4477	1.081
$p_S$ 変更	0.01750	0.3632	0.3472	1.069
$\omega_1$ 変更	0.04563	0.5500	0.5094	1.097
$m$ 変更	0.02854	0.5336	0.5067	1.063
$f$ 変更	0.02001	0.8387	0.7351	1.146
計測データ $p_{1(0)}$ より $f_S$ を算出:				
比較基準データ	0.02017	0.4855	0.4477	1.085
$p_S$ 変更	0.01750	0.3632	0.3472	1.046
$\omega_1$ 変更	0.04563	0.5500	0.5094	1.079
$m$ 変更	0.02854	0.5336	0.5067	1.053
$f$ 変更	0.02001	0.8387	0.7351	1.141
計測データ $f_S$ より $p_{1(0)}$ を算出:				
比較基準データ	0.02017	0.4855	0.4477	1.081
$p_S$ 変更	0.01750	0.3704	0.3472	1.069
$\omega_1$ 変更	0.04563	0.5591	0.5094	1.097
$m$ 変更	0.02854	0.5372	0.5067	1.063
$f$ 変更	0.02001	0.8419	0.7351	1.146

表3 (c. 2) 定数表 (その2 無次元量, メータアウト回路の場合)

項目	$S_2$	$P_{2(0)}$	$D_2$	$G_2$
計測データによる:				
比較基準データ	0.03501	2.449	2.577	0.9522
$p_S$ 変更	0.03501	3.408	3.535	0.9740
$\omega_2$ 変更	0.07946	2.188	2.450	0.9113
$m$ 変更	0.04725	1.956	2.213	0.9186
計測データ $p_{2(0)}$ より $f_S$ を算出:				
比較基準データ	0.03501	2.449	2.577	0.9504
$p_S$ 変更	0.03501	3.408	3.535	0.9641
$\omega_2$ 変更	0.07946	2.188	2.450	0.8931
$m$ 変更	0.04725	1.956	2.213	0.8835
計測データ $f_S$ より $p_{2(0)}$ を算出:				
比較基準データ	0.03501	2.459	2.577	0.9522
$p_S$ 変更	0.03501	3.446	3.535	0.9740
$\omega_2$ 変更	0.07946	2.236	2.450	0.9113
$m$ 変更	0.04725	2.033	2.213	0.9186

計測データ

回路	$P_{ST}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$P_{1\sim 2}(0)$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\omega_{1,2}$ [cm <sup>2</sup> ]	$f_S$ [kg]	$f_C$ [kg]	$m$ [kg sec <sup>2</sup> /cm]
M. I.	3.11	1.51	0.0063	14.7	11.2	0.0118
M. O.	3.11	2.53	0.0063	11.4	7.43	0.0118

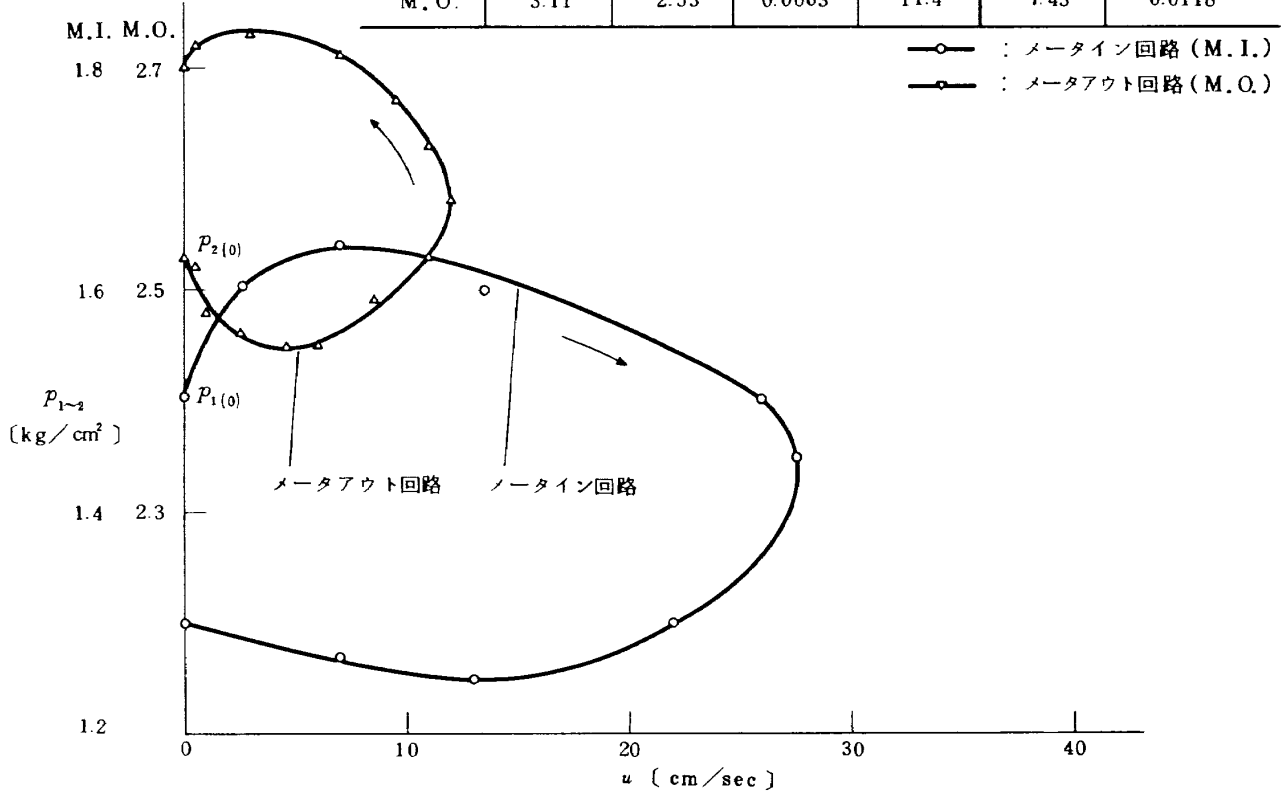


図7 非対称型空気圧シリンダの位相面軌道 (その1 有次元表示)

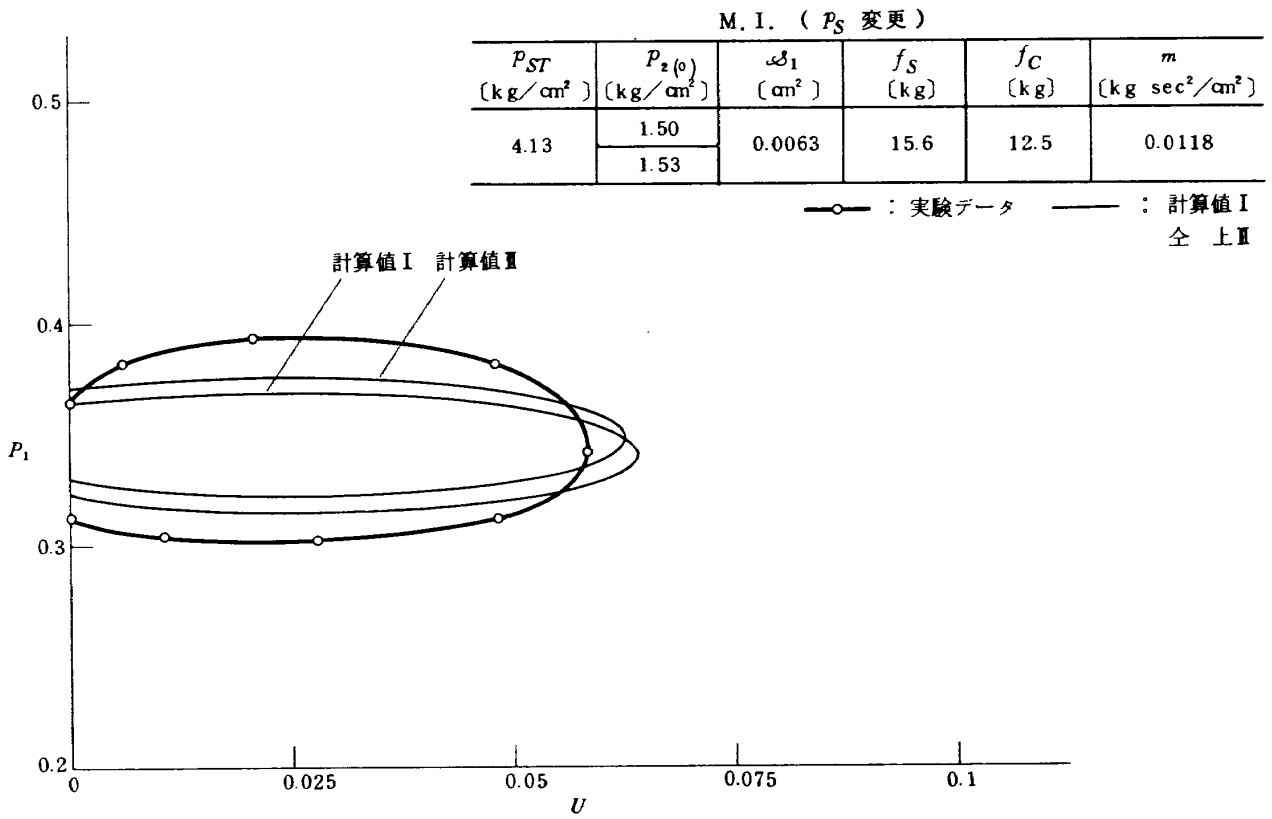
を伴っていること、II)  $f_C$  は  $u$  にかかわらず一定であること、の二点である。前者は例えば計測データを式(2) 或は(3)に代入しても必ずしも等号が成立しないことを意味する。又後者は数値計算に当たっての初期値と計算手法に 関係する。ここで実験時の計測精度について考える。 $u = 0$  から  $u > 0$  に移る瞬間の  $p_{1\sim 2}$  を求めたものは  $\Delta p / \Delta u$  が大きいために誤差が大きい(図5参照)。これに反して  $f_{S,C}$  は電磁オンログラフで記録を取る前後の計測値平均であるが、これらは各実験時について比較的良く一致しており(第3章2節参照)、しかもこの時  $f_S$  は必ず最高値を求めることができ、かつ  $f_C$  よりも大きい。更には  $f_C$  =一定でないしは  $f_S / f_C$  =一定であるから、数値計算の方法も前報で述べたものとは少しく異なり簡単化される。

従って、上述のことを考慮に入れれば、数値計算に当たっては、式(2)或は(3)に対し  $u = \dot{u} = 0$  において  $f_S$  を与えて  $p_{1\sim 2}$  を求めたものを初期値  $p_{1\sim 2}(0)$  とすることが、

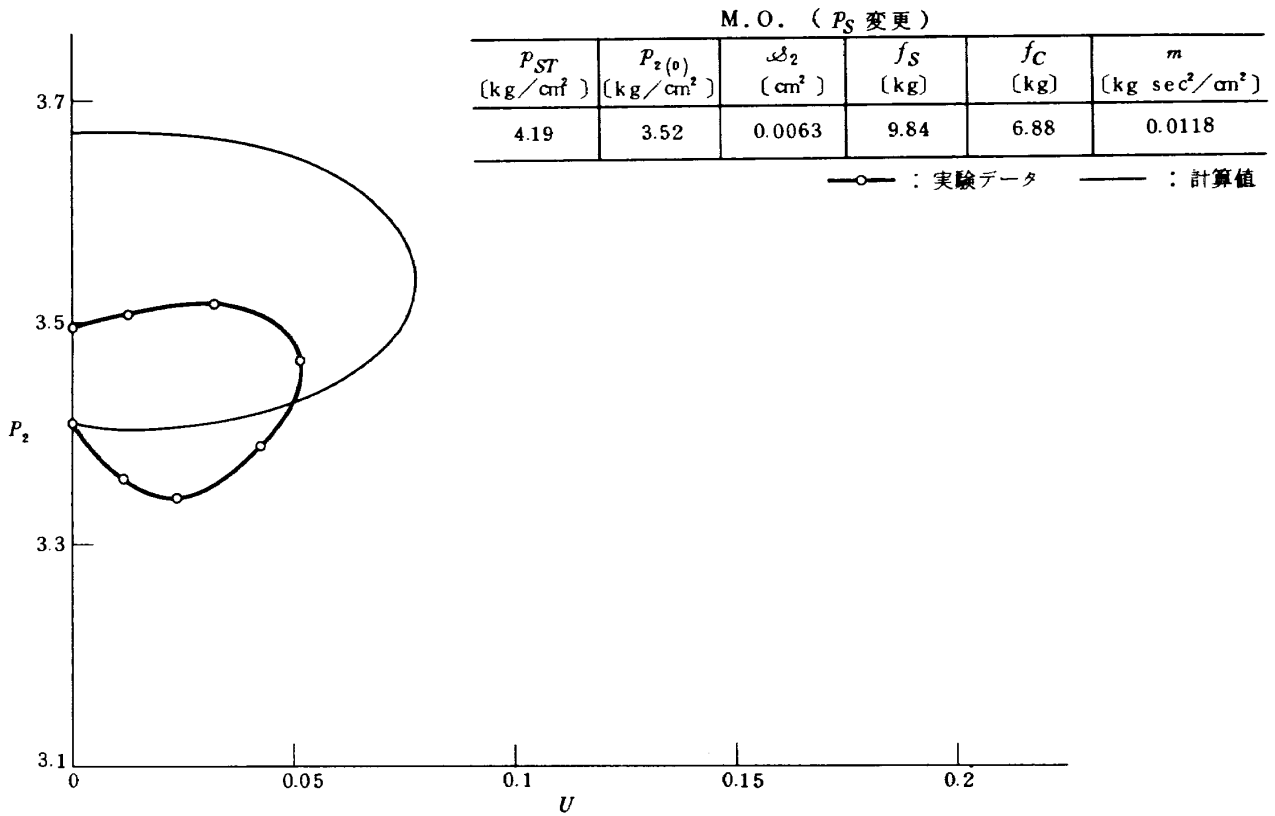
計測データをそのまま与えて計算するよりも妥当と考えられる。ここで  $f_S$  から逆算した  $p_{1\sim 2}$  を初期値とする計算結果と、計測データの  $p_{1\sim 2}$  をそのまま初期値  $p_{1\sim 2}(0)$  とするものを求めた所、図8(b)、図9(b)に示すように、両計算結果に多少の相違は認められるが、ともに実験結果との相違が大きく、これと対比すれば両計算結果の相違は当面無視できることが判る。なお表3(c)に関して  $D_{1\sim 2}$  は定数であり、又図4(b)で表わされる摩擦特性によっては  $G_{1\sim 2}$  は定数となって、かつその影響は計算に入っていないから、 $p_{1\sim 2}(0)$  から  $f_S$  を算出した場合の軌道は計測データによるものと同じ軌道を与えることになり、計算結果は計測データから求めたものと、 $f_S$  から  $p_{1\sim 2}(0)$  を求めたものの二種類の軌道だけが得られる。これら のことについては第5章3節で検討を行なう。従ってここの数値計算はすべて計測データだけによることにする。

上述による解析結果の位相面軌道は実験結果のそれを示す図8ないし図12に併記した。





(a) メータイン回路の場合

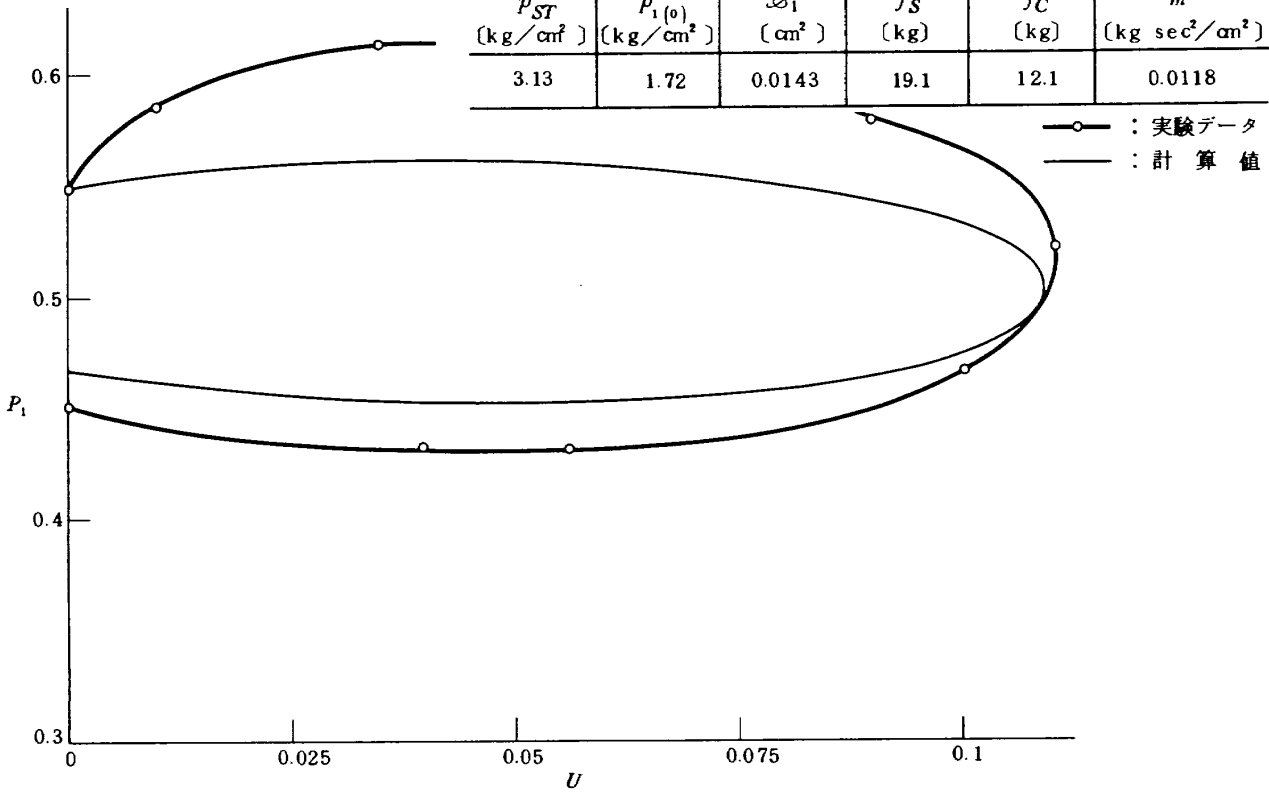


(b) メータアウト回路の場合

図9 設定条件変更時の非対称型空気圧シリンダの位相面軌道 (その1 設定供給圧力  $P_{ST}$  を変更)

M. I. ( $\omega_1$  変更)

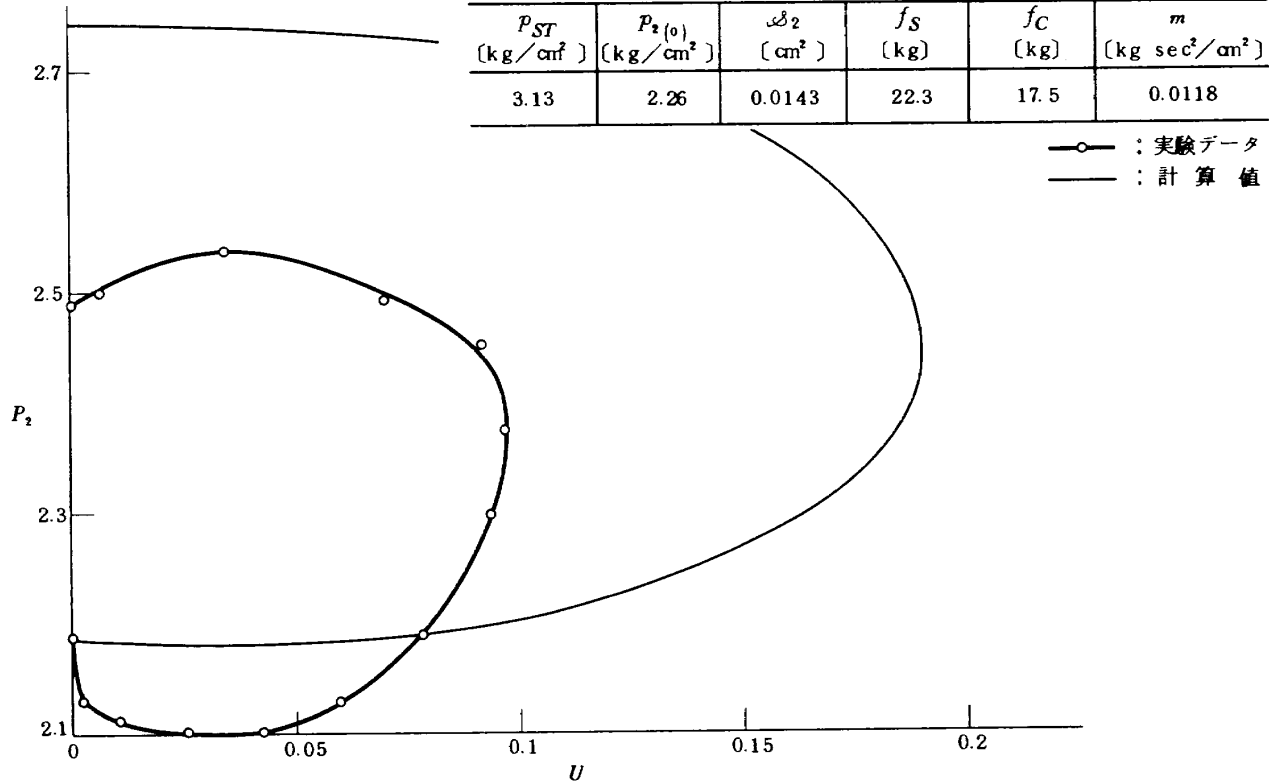
$P_{ST}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$P_{1(0)}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\omega_1$ [cm <sup>2</sup> ]	$f_S$ [kg]	$f_C$ [kg]	$m$ [kg sec <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> ]
3.13	1.72	0.0143	19.1	12.1	0.0118



(a) メータイン回路の場合

M. O. ( $\omega_2$  変更)

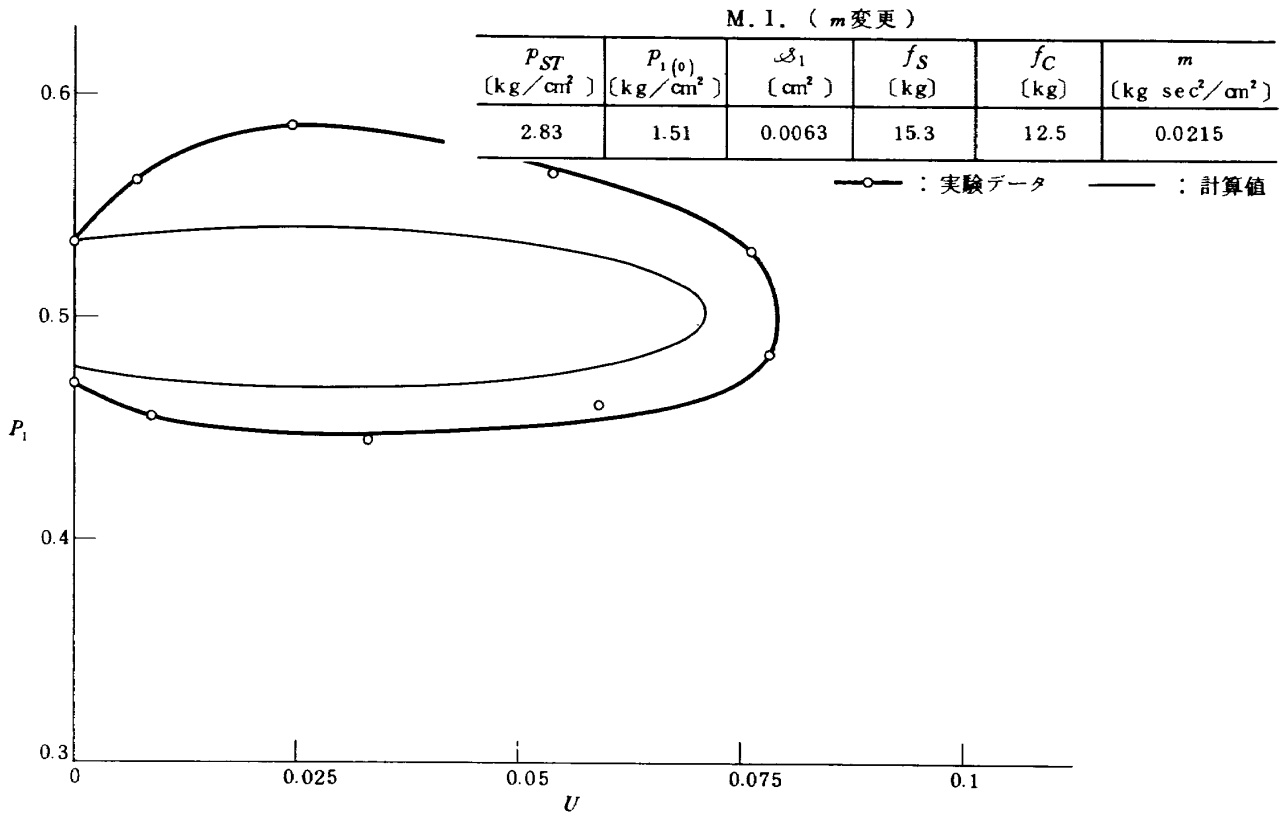
$P_{ST}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$P_{2(0)}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\omega_2$ [cm <sup>2</sup> ]	$f_S$ [kg]	$f_C$ [kg]	$m$ [kg sec <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> ]
3.13	2.26	0.0143	22.3	17.5	0.0118



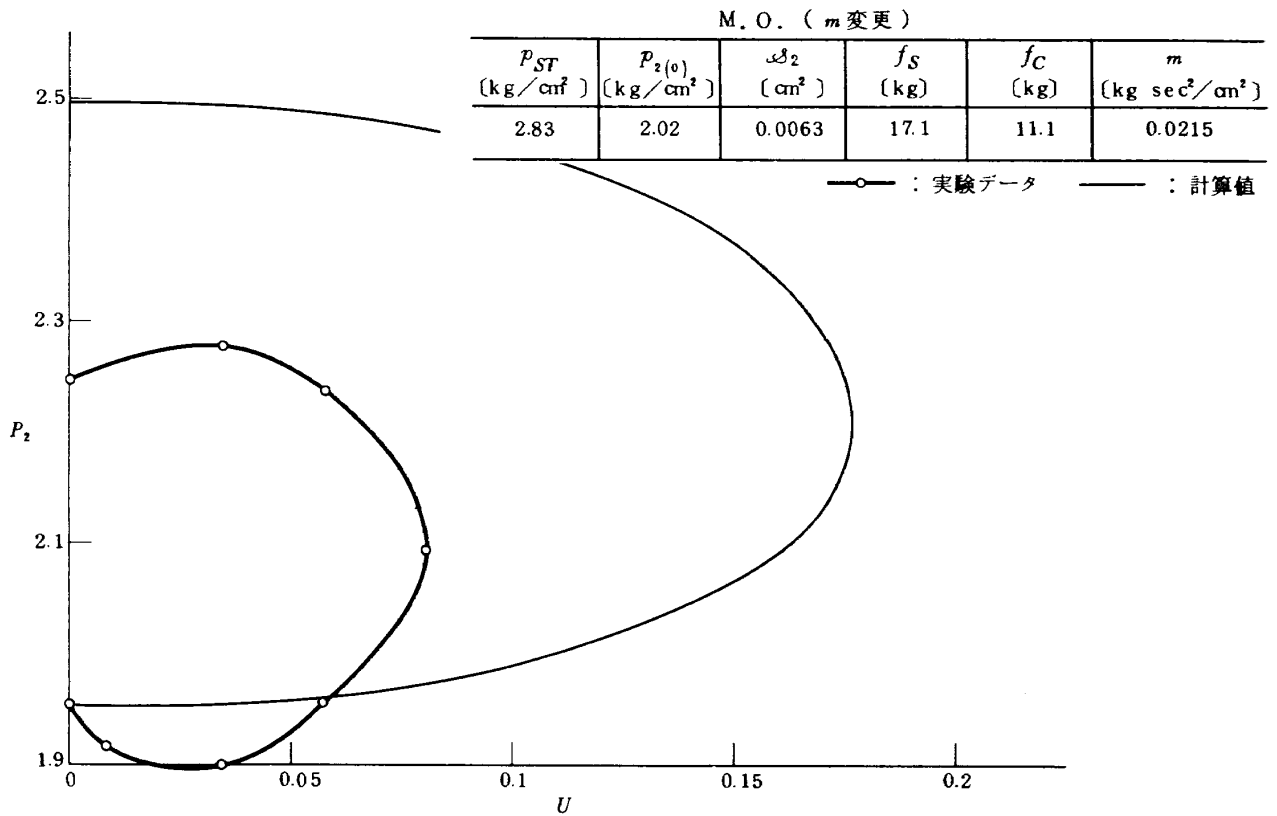
(b) メータアウト回路の場合

図 10 設定条件変更時の非対称型空気圧シリンダの位相面軌道 (その2 絞り部の有効断面積 $\omega$ を変更)





(a) メータイン回路の場合



(b) メータアウト回路の場合

図 11 設定条件変更時の非対称型空気圧シリンダの位相面軌道 ( その 3 負荷質量  $m$  を変更 )

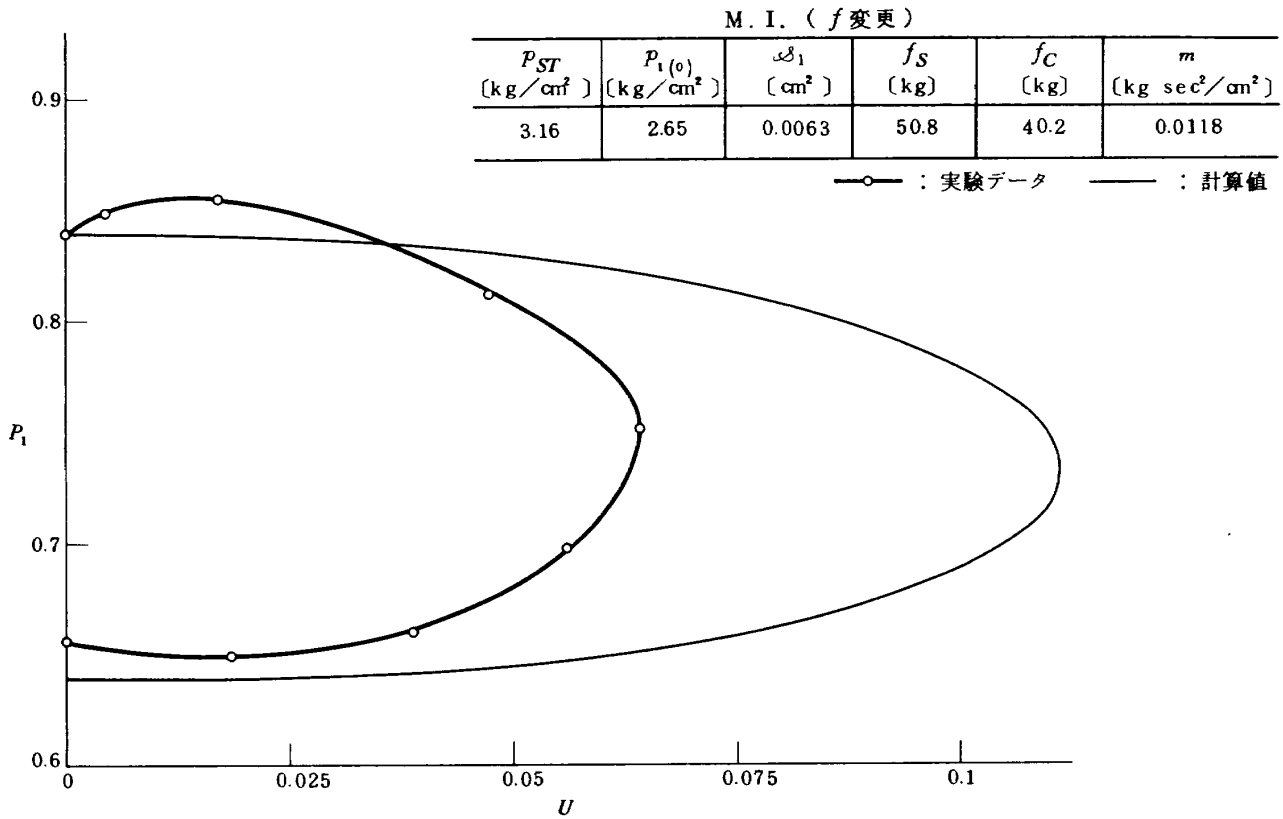


図 12 設定条件変更時の非対称型空気圧シリンダの位相面軌道  
(その4 摩擦  $f$  を変更, メータイン回路の場合)

### 5. 非対称型空気圧シリンダの挙動の考察と解析手法の検討

#### 5.1 非対称型空気圧シリンダの挙動

図5は二位置動作方式による非対称型空気圧シリンダのメータイン回路及びメータアウト回路に対する実験の電磁オシログラフによる記録であり,これを考察すると以下に述べる事が判る。ここでそれぞれの回路の初期条件は第3章3節で述べた通りである。

メータイン回路の場合は(図5(a)),メータアウト回路の状態を整定していたものに対し,時間  $t=0$  に電磁弁を作動状態(On)にすることにより,時間  $t=0$  には入口側シリンダ室圧力  $p_1 = p_A$  であったものが圧縮空気が絞り  $\omega_1$  を経由して加わり,  $p_1$  は徐々に上昇する。同時にロッド側シリンダ室は大気に開放され,その圧力  $p_2$  は先の設定圧力  $p_{ST}$  であったものが急減して標準圧力  $p_A$  に戻る。この間ピストンは暫時スティックを生じてシリンダ始端  $y=0$  ( $y$  はピストンの変位)に留まっている。 $p_1$  が次第に上昇し,  $t=t_T$  ( $t_T$  はスティック時間)において  $p_1$  がある値に達した瞬間,ピストンの駆動力  $p_1 a_1$  ( $a_1$  は受圧面積)は式(2)に示す摩擦力  $f$  などに打ち

克って動き出し,スリップが始まる。その後  $y=y_L$  まで  $t_L$  なる時間をかけてスリップ後,再び停止,すなわちスティック状態になる。この間  $p_1$  は停止する少しく前まで減少して後既に増加し掛けており,又変位速度  $u$  は急増して一旦ピーク値に達してから零に戻る。この時  $u$  のピークで  $p_1$  の変化傾向が反転する。ピストンは逐次このようにスティック,スリップの過程を交互に繰返しながら,やがて  $y=l$  なるシリンダ終端に到達して整定する。この時には  $p_1 = p_{ST}$ ,  $p_2 = p_A$  である。各回毎のスティックスリップ現象の周期  $T = t_T + t_L$  は  $y$  が大きくなるにつれて大幅に長くなり,同時に  $u$ ,  $y_L$  も次第に大きくなる事が良くうかがえる。このことから,メータイン回路の場合は  $y=l$  において最もスティック状態に陥り易いことが云えよう。

又メータアウト回路の場合は(図5(b)),電磁弁を切替えてから  $t=0$  において直ちに  $p_1 = p_{ST}$  に移り,  $p_2 = p_{ST}$  は絞り弁  $\omega_2$  を通じて漸減するが,ピストンは  $y=0$  (メータイン回路におけるシリンダ終端位置)なる位置に留まる。 $p_2$  がある程度減少し,ピストンの駆動力  $p_1 a_1$  が式(3)に示す  $f$  などに打ち克ってようやくスリップが始まる。このように,メータアウト回路の場合は

メータイン回路の場合に比べて、 $p_1, p_2$  の変化状況は少しく異なるが、スティックスリップ現象そのものには差がない。ただしこの場合は  $y=0$  (メータイン回路におけるシリンダ終端位置) において最もスティック状態に陥り易いと云えることが異なる。

## 5.2 諸パラメータが非対称型空気圧シリンダの挙動に及ぼす影響

非対称型空気圧シリンダの挙動に関して、図8ないし図12の位相面軌道を基とし、表2に示した実験・解析の諸条件を変更した場合に、各パラメータがシリンダの挙動にどのような影響を及ぼすかについて考察を行なう。この時特性変化の傾向を判断するために、比較データとして図8を基準とし、実験結果の位相面軌道に主体をおいて考察する。これにより、特にシリンダの挙動に関してスティックスリップ現象の発生など、系の安定が乱れるような状態に陥らないためには、各パラメータの値はどのようにあるべきかに重点をおいて検討する。

### (1) 設定供給圧力 $p_{ST}$ を変更した場合 (図8, 図9の対比)

メータイン回路の場合は供給圧力  $p_S$  が高くなると、重量流量  $w_1$  が増加してピストン速度  $u$  が大きくなることが期待できるから、スティックスリップ現象が起り難くなるはずである。しかし実験結果からはこのことが必ずしも顕著ではない。又メータアウト回路の場合は  $p_S$  がロッド側シリンダ室に加わって直ちに  $p_1 = p_S$  になると考えても、絞り弁側シリンダ室は初期条件  $p_2 = p_S$  の状態から絞り弁  $\omega_2$  を経由して空気が流出するから、 $p_2$  は徐々に減少し、それに応じて差圧  $\Delta p = p_1 - p_2$  を徐々に生じてようやくピストンの駆動力  $a_1 \Delta p$  を生ずる。然もピストンは  $a_1 \Delta p$  が式(3)に示した静摩擦  $f_S$  などに打ち克つまでは動くことができず、動き出して以後も  $\Delta p$  はさして大きな値が期待できないために、 $p_S$  を高めても必ずしも  $u$  が大きくなるものとは限らない。従って何れの回路の場合でも、スティックスリップ現象発生の可能性に対して  $p_S$  と  $u$  の簡単な関係を定めることは適当ではない。

すなわち上述から、 $p_S$  を変更した場合の影響は  $p_S$  が高くなれば多少は良くなることが期待されるが、何れの回路方式によっても顕著には認められないと考え、以後の実験においては基準値を  $p_{ST} \cong 3 \text{ kg/cm}^2$  と定めた。

### (2) 絞り部の有効断面積 $\omega$ を変更した場合 (図8, 図10の対比)

メータイン回路の場合は、 $\omega_1$  を大きくすれば  $w_1$  が増加して  $u$  が大きくなるのが当然期待されるから、スティックスリップ現象は起り難くなるはずであり、この

ことは図10から明らかに認めることができる。然しメータアウト回路の場合は、元来  $p_2 = p_S$  の状態から動作が開始され、かつ高い  $\Delta p$  は常に期待できないから、 $u$  も前者ほどには大きくなり得ない。しかし特性変化の傾向は両者共に同様であると云うことができる。

### (3) 負荷 $m$ を変更した場合 (図8, 図11の対比)

$m$  を変更した場合には、ここでの実験条件では図11が示すように  $m$  が大きくなるとスティックスリップ現象が起り難くなることが判る。何れの回路の場合でも、仮りに  $p_S, f$  が同じであれば、 $m$  が大きくなるにつれてピストンを加速するために同一速度に達するまでには長時間掛り、逆に  $u$  は余り大きくなり得ないであろうから、位相面軌道は横軌方向が収縮したものになるはずである。然し  $u_{\max}$  はさほど大きくなりなくてもその慣性力が大きいから、減速期間中に  $u=0$  になるよりも以前に再び加速されてスティックスリップ現象が起り難くなり、このようなことを繰返している間に  $u$  が整定することも予想される。すなわちシリンダの挙動はスティックスリップ現象の発生領域から速度振動領域に移り、更に定速駆動領域へ入ることになる。

上述のことはメータイン回路の場合には明らかに判るが、メータアウト回路の場合にはさほど顕著でない。これは摩擦特性が変化していることも一因であり、特性変化の傾向は両者共に同様であると云うことができる。

### (4) 摩擦 $f$ を変更した場合 (図8, 図12の対比)

実験時に  $f$  の値を任意の特定値に定め、かつ繰返し実験を行なっている間中その値を持続すること、言い換えれば安定した特性の摩擦条件を定めることは難しい。このことからここではメータアウト回路の実験を削除した。

$f$  の及ぼす影響は、メータイン回路の場合に静、動摩擦  $f_S, f_C$  が共に小さくなれば、 $p_1$  の最大値が低くても良いことが先づ判る。同じく  $f_S - f_C$  が小さければ  $u$  は大きくなるから、特異点が縦軸から遠く離れてスティックスリップ現象は起り難くなることも判る。これらのことは前報で行なった解析結果<sup>3)</sup>、図13と対応しても、その特性変化の傾向と実験結果とが良く符合する。

上述(1)~(4)を総括して表4に示す。

## 5.3 空気圧シリンダの挙動の位相面軌道解析手法の評価

前章に示した位相面軌道、図8ないし図12は、非対称型空気圧シリンダの挙動で現われるスティックスリップ現象の発生状況に関して、同一計測データに基づき実験結果及び数値計算結果の両者を対比したものである。これらの図を考察すると、先づ定性的には位相面軌道の挙

表4 動作方式に応じて諸パラメータが空気圧シリンダの挙動に及ぼす影響\*

回路方式		メータイン回路	メータアウト回路
パラメータ, 発生現象			
供給圧力 $p_s$ (図9)		$p_s$ は高い方が解析的には有利, 実験では顕著でない	顕著でない
絞り部の有効断面積 $\omega$ (図10)		$\omega$ は大きい方が明らかに有利	$\omega$ は大きい方が有利, 顕著でない
負荷質量 $m$ (図11)		$m$ は大きい方が明らかに有利, $u_{max}$ は小さい	$m$ は大きい方が有利, $u_{max}$ は小さい
摩擦 $f$ (図12)	静摩擦 $f_s$ 動摩擦 $f_c$ 両者の差 $f_s - f_c$	共に小さい方が $p_1$ も低く明らかに有利 小さい方が明らかに有利	解析的にはメータイン回路と同じ
最大速度 $u_{max}$		同条件であればメータアウト回路よりも大きい	同条件であれば小さい
速度振動現象の発生		同条件であればメータアウト回路よりも発生し難い	同条件であれば発生し易い
スティックスリップ現象発生中の挙動		$y \rightarrow l$ に伴って, $y_L$ 大, $u_{max}$ 大, $T$ 大	$y \rightarrow l$ に伴って $y_L$ 小, $u_{max}$ 小, $T$ 小
スティックスリップ現象, 速度振動現象の発生可能性が大きい位置		シリンダ終端, $y \approx l$	シリンダ始端, $y \approx 0$

(注) 空気圧シリンダの挙動が安定な側にあるために望ましい条件。

動ないしは変化の傾向は充分良く一致し, もとより前報で行なった解析結果と同様のものを与えており, 満足できる。然し定量的には幾つかのものが両者の間で甚だしきは数+%の相違を生じている。特にすべてに共通する著しい特徴は,  $U \approx 0$  近傍における  $U$  に対する  $P_1 \sim 2$  の変化状況である。これは同所における摩擦特性のモデル化に際して, 図4(a)によれば  $F = F(U)$  であるべきものを同図(b)に従って  $F = F_c (F_s > F_c)$  として数値計算を行なった結果,  $P_1 \sim 2$  が殆んど変化しないままに  $U$  が急増したことによるものと考えられる。そのため  $P_1 \sim 2_{max}, U_{max}, P_1 \sim 2_{min}$  が両者の間で大きく異なり, 一般に実験結果の位相面軌道は比較的円形に近く, これに反して数値計算によるものは横軸方向が大きく伸び,

軌道の形状がかなり異なって見えることになる。ここで行なったシリンダの実験は, 特に摩擦の影響を主体にその効果の顕著な状態に対するものである。このように摩擦を含む系の実験は同一条件の設定が困難なために, 繰返し実験を行なって所要のデータを求めることが望ましいとされる。然しここでは一個のシリンダの摩擦特性を厳密に規定することが目的ではなく, 図4で近似した摩擦特性をも含めて, シリンダの数学モデル, 式(4), (5)の数値計算及び実験結果を対比し, その妥当性, 有用性を検討, 評価し, 更に一般空気圧回路の実用的な設計計画にかかる手法の適用を図ることである。この観点からは, ここで解析に用いた数学モデルはシリンダの定性的な挙動を充分妥当に表現しているが, 定量的な精度を問題と

するにはなお摩擦特性の表現，すなわち図4(b)に代えて同図(a)によるべきことが云えよう。又このように精度をも充分考慮した数学モデルによらなければ，設計計画に実用する上で不充分さが残るものと考えられる。

然し図8ないし図12で与えた計測データは，メータイン回路，メータアウト回路の何れについても常に必ずスティックスリップ現象を生ずる条件を予め実験的に求め，これに基づき表1に示したシリンダ諸元を定めた状態に対するものである。又数値計算はその時の計測データを初期値としており，その結果は現象発生の限界値を示すものではない。ここで実験そのものの性格を考えれば，計測精度をも含めてスティックスリップ現象を生ずる限界値を実験的に求めることは不可能である。然も解析的には実験条件と相似法則が成立つ限りにおいて，数値計算を行なうことにより，任意のデータを与えてその条件に対するスティックスリップ現象の発生限界，或は速度振動現象の発生限界をも求めることができることは，その手法を含めて既に前報で明らかにしてある。しかしここではこれらの発生限界を解析的に求めることは省略し，計測データを数学モデルに代入した解析結果を実験結果と対比するに留めた。これは両者を対比すると近似度の低いものが多く，このモデルにより発生限界を算出することの意義が薄れ，ひいては解析手法そのものの評価が低下すると考えたことによる。このように近似度が低い原因は主として摩擦特性の数学モデルの不完全さによるものと予想される。従って，今後摩擦特性の再吟味により，解析結果が実験結果に対して満足な精度で表現できれば，これにより解析手法そのものが充分妥当なものと評価できよう。この時解析的な発生限界の求め方そのものは既に明らかにしているから，計算の実行は比較的容易である。更にこのようにして解析手法の有用性が明らかになれば，本手法は実用設計計画を行なう上で極めて有力なものと考えられる。

## 6. 結 言

本報告においては，工業的に最も適用分野が広いと云われる空気圧回路の一形態，電磁弁制御による二位置動作方式の非対称型空気圧シリンダを採上げて，実用回路相当の実験装置に殊更可変絞り弁を設けた摩擦の影響を大きく受けるような装置を使用し，メータイン回路，メータアウト回路の実験を行なってシリンダ挙動の考察を行ない，更にその挙動に影響を及ぼすであろうパラメータを幾つか変更して，特にスティックスリップ現象を生ずるような実験条件における各パラメータの効果について検討を行なった。その結果，回路方式にかかわらず

一般的に云って，供給圧が高く，絞り部の有効断面積が大きく，負荷質量が大きく，動摩擦及び静摩擦が小さく，かつその差が小さい方が，スティックスリップ現象は発生し難いことが明らかになった。これらの考察はピストン速度・シリンダ室圧力位相面上の軌道について行ない，更に実験時の計測データと同一条件に対する解析結果（数学モデルの数値計算）を求めて両者の比較，検討を行なった。この時，摩擦特性を極く単純化した数学モデルによっては，定性的には充分満足できるが，精度的にはなお不満なことが示された。従って，シリンダに関して特にスティックスリップ現象ないしは速度振動現象の発生が，系の安定な動作機能を妨げるものとして問題視される空気回路の場合には，前報ないし本報告で示した解析手法により相当程度実用的な設計計画を遂行することが可能であり，この時精度的にはより一層厳密な摩擦特性の数学的模擬の望ましいことが判った。

## 後 記

本研究に関して，その実験は松本が東京工業大学において，その数値計算などの解析及び考察は池谷が航空宇宙技術研究所において行なった。

終りに平素御指導を賜わっている東京工業大学教授竹中俊夫，浦田暎三の両氏と，実験，計算に協力された東京工業大学城所武男，上智大学梶井誠の両君に厚くお礼を申上げる。

## 文 献

- 1) 日本油圧協会編：油空圧便覧 p.650 オーム社（昭50）
- 2) 松崎：機械学会論文集 29 p.1615（昭38）
- 3) 池谷，松本：航技研報告 TR-426（昭50）

---

## 航空宇宙技術研究所報告 448号

昭和51年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

---