

UDC 521.787:
62-984

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-415

低圧における圧力測定系の時間遅れ

黒田行郎・阿部 登・宮島 博

1980年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

低圧における圧力測定系の時間遅れ*

黒田 行郎** 阿部 登** 宮島 博**

RESPONSE TIME DELAY OF GASEOUS PRESSURE MEASURING SYSTEM AT SUBATMOSPHERIC PRESSURES

By Yukio KURODA, Noboru ABE, and Hiroshi MIYAJIMA

ABSTRACT

In order to estimate the response time of a gaseous pressure measuring system, in which the volume of the pressure tubing is comparable to, or larger than, the cavity volume of a pressure transducer, it is necessary to consider the effect of the accumulation of gases in the tube. The effect of compressibility of the flow in the tube must also be taken into account, when the pressure change is large, especially in the case of low pressures. A simple, one dimensional, quasi-steady flow model is proposed. A reasonable agreement between calculated and experimental response time was obtained for the step pressure change at the entrance of the tube. It is assumed in the model that the system is overdamped, i.e., the pressure at the transducer cavity changes smoothly without any oscillation. Under some conditions, however, the response was oscillatory, i.e., the system was underdamped. An empirical critical damping condition was obtained under limited geometrical and operating parameters, as an approximate correlation equation between cavity volume, tube diameter, step height, and tube length.

概 要

圧力変換器部のキャビティ体積に比べて導圧管部の体積が大きく、かつ、測定部の圧力変化が大気圧以下の比較的高い圧力の場合の時間遅れの推定に当っては、導圧管内の流れの圧縮性および導圧管内の気体の蓄積を考慮しなければならない。また、これを乱流として取り扱う必要がある。簡単な一次元準定常モデルによって導圧管入口における圧力のステップ入力に対する応答を計算し実験と比較して良い一致が得られ、ここで取扱った推定方法が有用であることが確認された。この計算は圧力測定系の出力が測定圧力に漸近的に近づく場合には適用可能であるが、ある条件で圧力測定系の出力波形は振動しながらある一定の値に近づくことがある。そこで、導圧管径とキャビティ径の比、導圧管径、キャビティ体積および圧力差をパラメータとして、圧力測定系の出力波形に振動が生じなくなる条件を実験的に求め、そのときの実験パラメータのあいだの関係式を求めた。

1. まえがき

ロケットエンジンの高空性能試験においては、低圧室圧力、ノズル壁面静圧、ディフューザ壁面静圧等の比較

的低い圧力の測定が必要となる。これらの圧力測定においては、振動や熱の影響を少なくする、定常値を精度良く測定する、あるいは校正等の作業性を向上させるため圧力変換器を一箇所に集めるなどの必要性から、通常、圧力測定部と圧力変換器のあいだを数mの導圧管で結んで圧力測定系を形成する。このような圧力測定系において、

* 昭和54年12月7日受付

** 角田支所

エンジンの作動条件の変化に伴う圧力変化あるいはエンジン着火およびエンジンの停止に伴う圧力変化を適切に理解するためには、この圧力測定系の応答時間の推定が必要となる。導圧管と圧力変換器、キャピティからなる系の測定圧力の応答時間は、キャピティ体積、導圧管径、導圧管の長さ、および変化する圧力の大きさ等に依存する。圧力変換器部のキャピティ体積に比べて導圧管部の体積が小さく、かつ、圧力変化が小さいとき、導圧管内の充分発達したポアズイユ流れを仮定した応答時間の計算は古くからおこなわれている。その代表的なものに Larcomb & Peto¹⁾ の仕事がある。ショックチューブやガンタンネルにおける測定ではその応答時間を短くするためきわめて短い導圧管が用いられる。曾我^{2,3)} は低圧で導圧管が短い場合にも適用し得るように助走区間における流れの発達過程を考慮した圧縮性の流れについて解析をおこない実験と良い一致をみている。しかし、通常のロケットエンジン高空性能試験に用いられる低圧圧力測定系では圧力変換器部の体積に比べて導圧管部の体積が大きき、過渡時の圧力変化が大きいことから、導圧管内の流れの圧縮性、および導圧管内流れが主として乱流となること、ならびに導圧管内におけるガスの蓄積を考慮しなければならない。圧縮性、乱流および導圧管内蓄積を考慮した圧力応答の計算法は筆者らの知る限りでは発表されていない。これらの三点を考慮した厳密な解析は可能であるとしても、きわめて困難なものと思われる。

ここでは、問題を単純化することによって上記の三点を考慮したステップ入力に対する応答時間を計算することを試みた。まず、導圧管内の流れを一次元準定常流として取り扱った。この取扱においては乱流の効果は単に平均管摩擦係数の値として計算にはいってくるだけであり、また、導圧管内の気体の軸方向の密度分布は、導圧管入口におけるマッハ数によって一義的に定まり、計算はきわめて単純となる。上述の単純化は計算を可能にするためにおこなったものであるが、実験との比較によってその実用性が確かめ得るものである。実験は管径 2～4 mm、管長 50～150 cm、キャピティ体積 1.7～4.5 cm³、キャピティ径 14～84 mm の範囲で大気圧以下の圧力においてステップ入力に対する圧力測定系の出力波形を測定した。キャピティ内の圧力変化はある場合には初期圧力から最終圧力までなめらかに変化し（ここでは、このように圧力測定系の出力が測定圧力に漸近的に近づく現象を簡単のために、以下、過制動と記す。）、ある場合には、圧力測定系の出力波形は振動しながらある一定の値に近づく（ここでは、このような現象を簡単のために、以下、不足制動と記す。）。前者の場合には、上記の簡単なモデ

ルによる計算は、ここで行なった本実験範囲内では有効であることがわかった。また、上記のモデルによって計算結果の適用が不可能な不足制動の起る範囲を前述の実験パラメータについて求める試みもおこなった。

記 号

- D : 導圧管の内径
- d : キャピティ径
- f : 摩擦係数
- \bar{f} : 平均管摩擦係数
- $I(u_{i0})$: 導圧管出口において $M=1$ になった時の管内の気体の質量
- $I(u_{it})$: 時刻 t における管内の気体の質量、(15) 式で定義
- L : 導圧管長
- M : マッハ数
- m_p : 導圧管内の気体の質量
- m_v : キャピティ内の気体の質量
- P : 圧力
- P_{c0} : 初期キャピティ圧
- ΔP_c : P_c のわずかの増分
- ΔP : 初期のタンクとキャピティ間の差圧（ステップ巾）
- P'_i : 不足制動におけるキャピティ圧力の実験後での定常圧力値と初期ピーク圧力値の差圧
- R : 気体定数
- Re_i : 導圧管入口におけるレイノルズ数
- S : 断面積
- T : 温度
- t : 時間
- t^* : $P_c = P^*$ になるまでの時間
- t_d : 時間遅れ
- U : 速度
- V_c : キャピティ体積
- x : 管端からの距離
- γ : 気体の比熱比
- μ : 粘性係数
- ρ : 密度
- τ_w : 壁における剪断応力
- 添字
- c : キャピティ内の状態
- i : 導圧管入口での気体の状態
- l : 導圧管出口での気体の状態
- 0 : 被測定気体のよどみ点状態
- $*$: $M=1$ での気体の状態

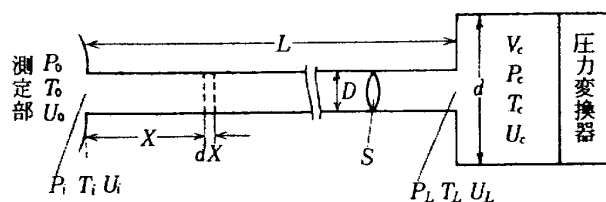
2. 計算方法

ここでおこなう計算は、導圧管入口部におけるステップ入力に対する圧力測定系の応答を求めるものであるが、応答は初期圧からなめらかに最終圧力まで変化する場合、すなわち過制動の場合を対象とする。圧力測定系は断熱されているものと仮定する。従って導圧管内の気体と導圧管壁間の熱伝達は考えないものとする。導圧管内の乱流を理論的に正しく取り扱うのは困難であるが、これを一次元流として取り扱い、不確定要素を後述の平均摩擦係数 \bar{f} に含める近似的な取り扱いをおこなう。そのためには導圧管径が一定であり、急な曲りがない事他に管軸にそう異なる断面における径方向の速度および温度の分布が相似となることが望ましい。十分発達した流れにおいては上記の仮定は、ほぼ満たされるものと考えられる。導圧管内の流れは時間的に変化する流れであるが、簡単のため、準定常流、すなわち任意の時間におけるキャビティ圧力に対応して導圧管内の流れは定常流として取り扱えるものとする^{1,2)}。以上の仮定をおこなうと、任意の時間における導圧管内流は、一次元定常の質量、エネルギーおよび運動量保存式によって書きあらわすことができる。圧力応答に重要な役割を果たす管の摩擦は、運動量保存式に摩擦係数としてはいつてくる。管摩擦係数は、一般的にはマッハ数、レイノルズ数の関数であるばかりでなく、助走区間では十分発達した流れにおけるその数倍になるといわれている。十分発達した亜音速流においてはマッハ数依存性はきわめて小さいといわれている⁴⁾。ので、助走区間を除けば軸方向に渡って平均値を用いることが可能であろう。任意の時間において各々異なる平均摩擦係数を用いた計算をおこなうことには、本質的な困難が伴うわけではないが、ここでは、さらに問題を単純にするため、ステップ入力に対する応答のあいだ摩擦係数は一定値をとるものとした。この仮定はあまりにも単純化しすぎたように見えるが、準定常、断熱、および一次元の仮定等を考え合せ、部分的に厳密な取り扱いをする意味はあまりないものと筆者らは考えた。

キャビティ体積に比較して導圧管内の内径が小さく、長さも短い場合には、導圧管内での気体の蓄積は考えなくても良いが、この実験で使用した導圧管のようにキャビティ体積に比較して内径及び長さが大きい場合には、導圧管内での気体の蓄積は、応答時間に大きく影響を及ぼすため、それらを簡単に取りあつかえることを主眼とした。

(1) 導圧管へ気体が入る場合

第1図によって図式的に示す圧力測定系において、系



第1図 圧力測定系の形状

内全域に渡って圧力 P_{c0} (初期キャビティ圧) であるとする。時間零において被測定気体のよどみ点圧力 P_0 ($P_0 > P_{c0}$) をステップ状に測定部に与える。この場合は、測定部からキャビティ部への流れが生じる。よどみ状態 0 から導圧管入口 i までは等エントロピー変化をし、また i から導圧管出口 L までは断熱的な変化をするものと仮定する。

質量保存の法則により

$$S \rho_i U_i = dm_p/dt + dm_v/dt \quad (1)$$

上式において、 t は時間であり、 m_p は導圧管内の気体の質量、 m_v はキャビティ内の気体の質量、 S 、 ρ_i 、 U_i はそれぞれ導圧管入口 i における断面積、密度と速度である。完全気体とすれば(1)式から

$$\frac{S P_i U_i}{R T_i} = \frac{d}{dt} \int_0^L \frac{S}{R} \left(\frac{P}{T} \right) dx + \frac{V_c}{R T_0} \frac{d P_c}{dt} \quad (2)$$

ここで R は気体定数、 T_i は導圧管入口 i における温度、 T_0 はよどみ状態 0 における温度、 P_c はキャビティ圧力、 V_c はキャビティ体積、 S 、 P 、 T はそれぞれ導圧管の任意の位置における面積、圧力、温度である。導圧管内の流れを準定常流として取り扱う。すなわち、任意の時間に導圧管内の任意の位置において下記の定常状態の保存式が成り立つものとする⁴⁾

$$\rho U = \text{const} \quad (3)$$

$$-dP - 4f\rho U^2 dx/2D = \rho U dU \quad (4)$$

$$C_p dT + d(U^2/2) = 0 \quad (5)$$

この式において、 ρ 、 U は導圧管の任意の位置における密度と速度である。また D は、導圧管の内径、 C_p は定圧比熱、 f は摩擦係数で $f = \tau_w / (\rho U^2/2)$ によって与えられる。ここで、 τ_w は壁における剪断応力である。以下の計算において局所の摩擦係数 f を導圧管の全長によって平均化した値 \bar{f} を用いることにする。しかし \bar{f} は平均摩擦係数として定式化したものであるが、後に実験結果の項で述べるように(4.1参照)、一次元、準定常、あるいは断熱等の仮定をこの \bar{f} の値に負わせ、実験範囲において最も応答を忠実に再現する値として $\bar{f} = 0.006$ という

一定値とした*。

導圧管入口にステップ状の圧力 P_0 を与えると、キャビティ内の圧力 P_c は、その初期値から時間と共に P_0 に漸近するが、この過程を P_c が上昇して臨界値 P^* に達するまでの過程と P^* を越えた以後の過程の2つに分けて考える。第1の過程 ($P_c < P^*$) では、導圧管出口断面 (L) でマッハ数が1になる。(3)~(5)式および理想気体の状態式から入口におけるマッハ数 M_i は次式によって求められる。

$$4\bar{f} \frac{L}{D} = 4\bar{f} \frac{L_{\max}}{D} = \frac{1-M_i^2}{rM_i^2} + \frac{r+1}{2r} \ln \frac{(r+1)M_i^2}{2+(r-1)M_i^2} \quad (6)$$

ここで r は、気体の比熱比であり、 L_{\max} は管の出口においてチョークする場合の入口からの導圧管の最大の長さで(20)式により定義される。(6)式から M_i を求めると導圧管の入口における圧力 P_i と温度 T_i は次式によりあらわされる。

$$P_i = \frac{P_0}{\left(1 + \frac{r-1}{2} M_i^2\right)^{r/(r-1)}} \quad (7)$$

$$T_i = \frac{T_0}{\left(1 + \frac{r-1}{2} M_i^2\right)} \quad (8)$$

臨界値 P^* と T^* は次式により求める。

$$P^* = \frac{P_i}{\frac{1}{M_i} \sqrt{2 + \frac{r-1}{2} M_i^2}} \quad (9)$$

$$T^* = \frac{T_i}{\frac{r+1}{2 + (r-1)M_i^2}} \quad (10)$$

入口より距離 x の位置のマッハ数を M とすれば、次式が成り立つ。

$$4\bar{f} \frac{x}{D} = \left(4\bar{f} \frac{L_{\max}}{D}\right)_{M_i} - \left\{ \frac{1-M^2}{rM^2} + \frac{r+1}{2r} \ln \frac{(r+1)M^2}{2+(r-1)M^2} \right\} \quad (11)$$

(11)式において、 L_{\max} は導圧管入口のマッハ数が M_i で導圧管出口においてチョークしているときの、入口からの導圧管の長さである。第1の過程のあいだは、導圧管出口断面でマッハ数が1なので $L_{\max} = L$ である。 x を与えると M が求まり x の位置における圧力 P と温度 T は次式により求める

$$P = \frac{P^*}{M} \sqrt{\frac{r+1}{2\left(1 + \frac{r-1}{2} M^2\right)}} \quad (12)$$

$$T = T^* \frac{r+1}{2\left(1 + \frac{r-1}{2} M^2\right)} \quad (13)$$

(2)式より、

$$(P_c - P_{c0}) = \frac{RT_0}{V_c} \left[\frac{S}{R} \int_0^t \frac{U_i P_i}{T_i} dt - I(u_{it}) + I(u_{i0}) \right] \quad (14)$$

ここで、

$$I(u_{it}) = \int_0^L \frac{S}{R} \left(\frac{P}{T}\right)_{U_i} dx \quad (15)$$

$I(u_{it})$ は、時間 t (入口面における速度 U_i) における導圧管内の気体の質量をあらわし、 $I(u_{i0})$ は、導圧管出口において $M=1$ になった時の導圧管内の気体の質量である。また、 P_{c0} は初期キャビティ内圧力である。時間零から $P_L = P^*$ になるまでの時間は a を音速として L/a のオーダーであり簡単のためここでは無視し、 $t=+0$ で $P_L = P^*$ となるものとする。従って、 $P_c \leq P^*$ の間は $P_L = P^* = \text{一定}$ すなわち U_i は一定であり、 $I(u_{it}) - I(u_{i0}) = 0$ となる。従って、 $P_c = P^*$ になるまでの時間 t は次式により求まる。

$$t^* = \frac{(P_c - P_{c0}) V_c T_i}{P_i U_i S T_0} \quad (16)$$

第2の過程 ($P_c > P^*$) では、 $P_L = P_c$ となり M_L と M_i の関係は次式により与えられる。

$$M_L = \frac{P_0 M_i \left(1 + \frac{r-1}{2} M_i^2\right)^{-(r+1)/2(r-1)}}{P_c \sqrt{1 + \frac{r-1}{2} M_L^2}} \quad (17)$$

$$4\bar{f} \frac{L}{D} = \left(\frac{4\bar{f} L_{\max}}{D}\right)_{M_i} - \left(\frac{4\bar{f} L_{\max}}{D}\right)_{M_L} \quad (18)$$

(18)式の第1項の L_{\max} は、導圧管の入口のマッハ数が M_i で導圧管出口においてチョークするときの導圧管入口からの長さであり、第2項は導圧管入口のマッハ数が M_L で導圧管出口においてチョークするときの導圧管入口からの長さである。

P_c を与えれば、(17)式と(18)式を連立させることにより M_i および M_L が求まる。 M_i が求まれば、 x の位置におけるマッハ数 M は、

$$4\bar{f} \frac{x}{D} = \left(\frac{4\bar{f} L_{\max}}{D}\right)_{M_i} - \left(\frac{4\bar{f} L_{\max}}{D}\right)_M \quad (19)$$

* 各ケースについて \bar{f} の値を変えることによって、より良い一致が得られはするが、 \bar{f} の値は摩擦係数との良好な対応をしていない事から(第12図参照) \bar{f} の値は単にここで用いた計算モデルにおける実験定数と考えるべきものであり、各ケースについて \bar{f} の値を変えることによる利点はあまりないものと判断される。

によって求められる。ただし、ここで

$$\left(4\bar{f}\frac{L_{\max}}{D}\right)_M = \frac{(1-M^2)}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma+1)}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \quad (20)$$

$t=t^*$ から $t=t$ までの時間は、

$$(P_c - P^*) = \frac{RT_0}{V_c} \left[\frac{S}{R} \int_{t^*}^t \frac{U_i P_i}{T_i} dt - I(u_{it}) + I(u_{i0}) \right] \quad (21)$$

によって求められる。この式において、 $I(u_{it})$ は時間 t (入口面における速度 U_i) における導圧管内の気体の質量をあらわし、 $I(u_{i0})$ は $P_c = P^*$ となったときの導圧管内の気体の質量である。(21) 式において、時間 t における気体の質量 $I(u_{it})$ は以下の方法により求める。(19) 式により求めた x の位置のマッハ数と(7), (8), (17), (18) 式より求めた P_i , T_i , M_i を(22), (23)式へ代入して、 P/T を求める。

$$\frac{P}{P_i} = \frac{M_i \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2}}{M \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}} \quad (22)$$

$$\frac{T}{T_i} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \quad (23)$$

同様に、 $x=0$ から L までの P/T を求めて(15)式へ代入し、 $x=0$ から L まで積分することにより任意の時間 t における気体の質量 $I(u_{it})$ が求まる。

$P_c > P^*$ に対応する時間を求めるためには、 P_c のわずかの増分 ΔP_c ($P_{c1} = P^* + \Delta P_c$) について前述の方法により u_i , P_i , T_i , $I(u_{it})$ を求め(21)式の左辺と右辺が等し

くなるように Δt_1 ($t_1 = t^* + \Delta t_1$) を求める。次に(21)式の P^* , t^* をそれぞれ P_{c1} , t_1 におきかえ $P_{c2} = P_{c1} + \Delta P_c$ とあたえ、同様に Δt_2 を求める。 $P_c = P_{c0} + 0.95 \Delta P$ となるまで以上の手順をくり返すことによって応答時間 $t_d = \sum \Delta t + t^*$ を求めることができる。

(2) 導圧管から気体が出る場合

系内全域に渡って圧力 P_{c0} (初期キャビティ圧) であるとする。時間零において圧力 P_0 ($P_{c0} > P_0$) をステップ状に測定部にあたえる。この場合は、キャビティ部から測定部への流れが生じる。

質量保存の法則により

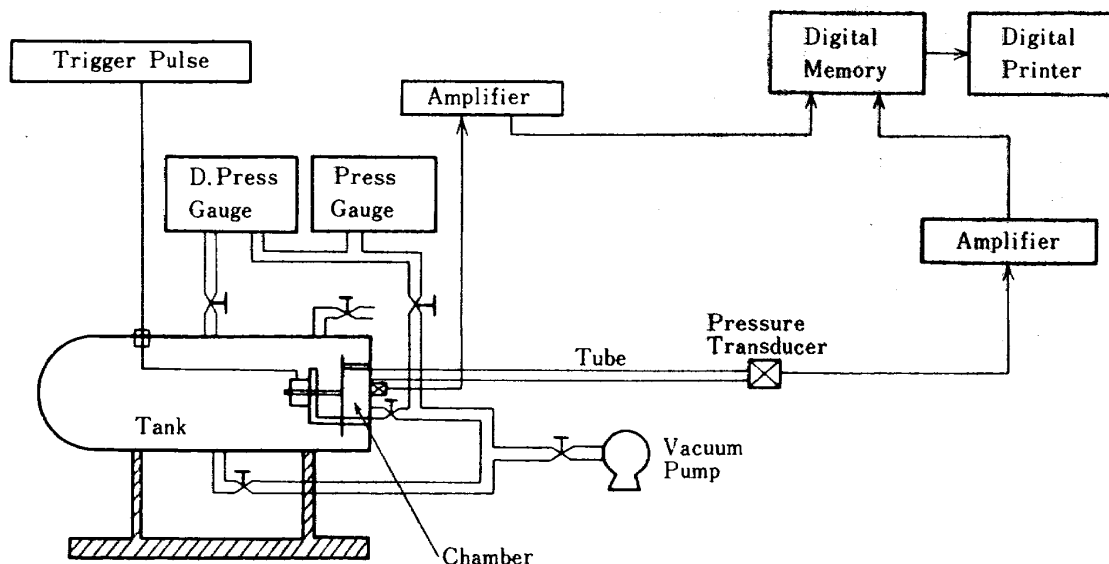
$$S \rho_i U_i = -dm_p/dt - dm_v/dt \quad (24)$$

キャビティ圧 P_c が十分高い場合には、導圧管入口(第1図の i の部分)でチョークする。この場合、気体の流出に従って P_c が下がるので導圧管内へ気体が入る場合と違いチョークしている時にも系内の気体の流出によって導圧管内の状態量が増加する。従って、最初から導圧管へ気体が入る場合の第2の過程と同様の方法で圧力測定系の応答時間を調べる。

3. 実験装置と実験方法

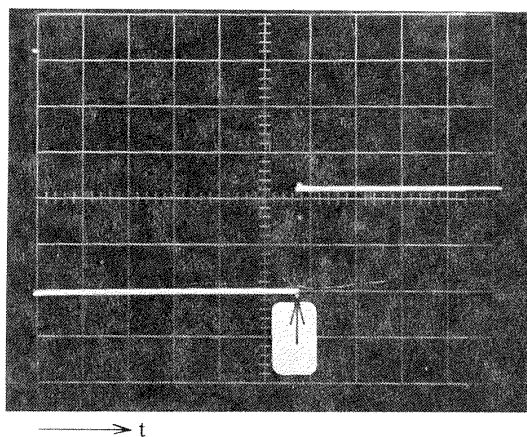
実験装置は第2図に示すように、大容量のタンクと導圧管がつながれている小室とからなっている。タンクと小室のあいだは試験前にセロファン膜によって仕切られている。導圧管の径は2mm~4mmであり、その長さは0.5~1.5mとした。タンクの容量は小室および圧力測定系(導圧管およびセンサキャビティ)体積に比べて十分大きいので、実験前後におけるタンク内の圧力の変化はないものとする。

実験の標準的手順は以下の通りである。まず、実験に

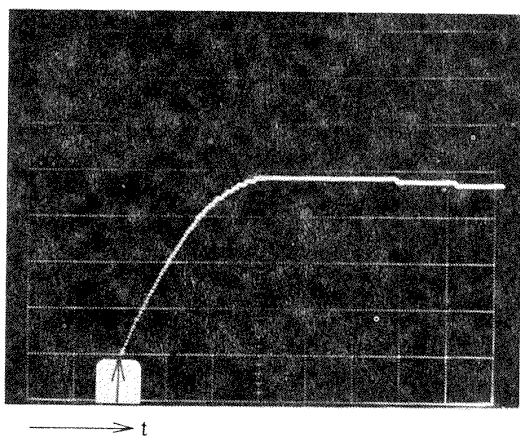


第2図 実験装置のブロック図

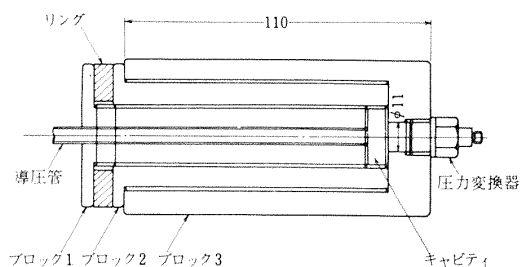
先立ち、真空ポンプによってタンク圧力およびキャビティ圧力を各々異なる一定の圧力にした後に、その間の圧力差を保持している膜を電磁石駆動の針により破り、任意に設定した一定圧力を瞬間的に圧力測定系に与える。ステップ入力の与え方は2通りの方法で行なった。1つは、タンク圧力をキャビティ圧力より大きく設定して気体をキャビティへ入れる方法である。他の方法は、その逆にキャビティからタンクへ気体を出す方法である。導圧管の入口におけるトリガー用として始動時刻を知るため、導圧管の入口面と同じ位置に圧力変換器（Kistler社製、202A5型）を取り付けて、それをデジタルメモリ（岩通社製、DM-701型、書き込み速度100ns/word～50ns/word）の書き込みスタート信号とし、その時点から記録できるようにした。導圧管入口面における圧力の応答波形を第3(A)図に示す。第3(A)図の矢印の時点に、



第3(A)図 導圧管入口圧力のシンクロスコープ写真
100 msec/div



第3(B)図 キャビティ内圧力のシンクロスコープ写真
(キャビティへ気体が入る場合)
100 msec/div. $D=2\text{ mm}$ $L=1\text{ m}$
 $V_c=48.5\text{ cm}^3$ $\Delta P=514\text{ mm Hg}$
 $P_{c0}=246\text{ mm Hg}$



第4図 キャビティ部の略図

導圧管入口へステップ状の圧力が加えられる。第3(B)図は圧力測定系の出力波形であるが、同図の矢印の位置は第3(A)図の矢印の位置に相当し、この時点からステップ圧力が導圧管入口へ加えられるのである。そこから、導圧管を結んで導びいている圧力変換器へ導き、この系によって得られた圧力測定系の出力波形をデジタルメモリへ記録する。使用した圧力変換器（Kistler社製、206型）の立ち上がり時間は $3\mu\text{sec}$ で、圧力計そのものの遅れは無視し得るので本実験目的にかなうものである。圧力測定系のキャビティは、第4図に示すように種々の長さおよび径のブロック1と2の組み合わせによって、キャビティの径と体積を任意に設定できるようにして導圧管の径、長さ、キャビティ体積および圧力差などが圧力測定系の応答時間に及ぼす影響をしらべた。また、導圧管の径とキャビティ径の比およびキャビティ体積などが圧力波形の立ち上がり時にあらわれる振動的な現象におよぼす効果についても調べた。

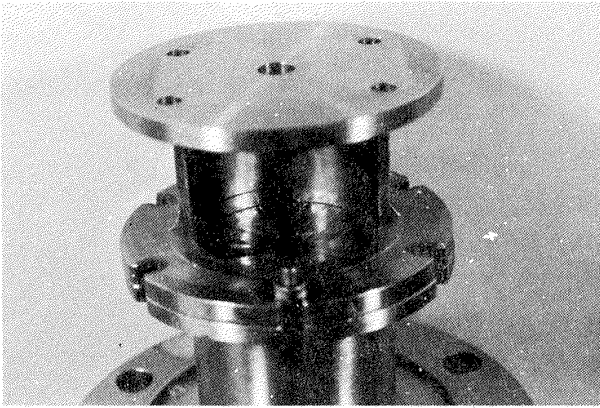
実験に使用した気体は空気（室温）で、設定圧力範囲は200～760 mm Hgである。

正のステップすなわち、導圧管内へ気体が入る場合には最終測定圧力を760 mm Hgとし、負のステップの場合すなわち、導圧管内から気体が出る場合には初期キャビティ圧 P_{c0} を760 mm Hgとした。

4. 実験結果

4.1 過制動における圧力応答の時間遅れ

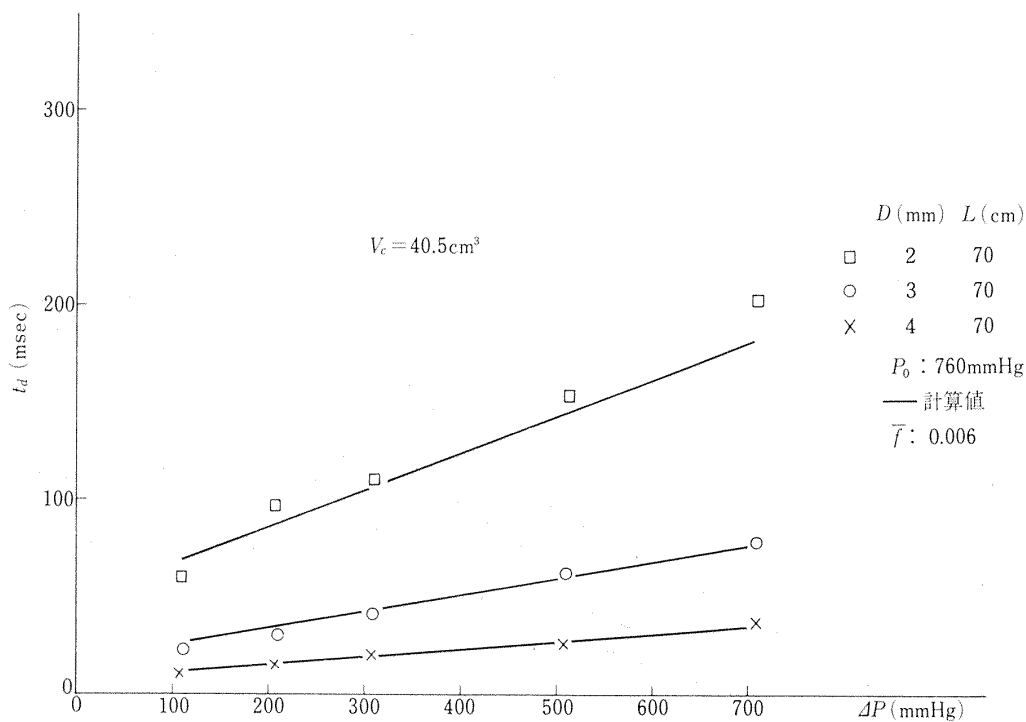
圧力測定系内を任意の一定圧力にした後に、瞬間的に膜を破り、それによって作られたステップ状の圧力を圧力測定系に与えると、過制動の場合にはキャビティ内の圧力はなめらかな変化をして一定の圧力に近づく。タンクからキャビティ内へ気体が入る場合についての圧力変換器出力の時間的変化を測定して得られたシンクロスコープ写真の一例を入力波形と共に第3(B)図に示した。入力は、ほぼステップとみなすことができる。ステップ状の入力を得るためには、瞬間的に膜が破れなければならない。第5図に示すように、きわめて均一に膜が破れて



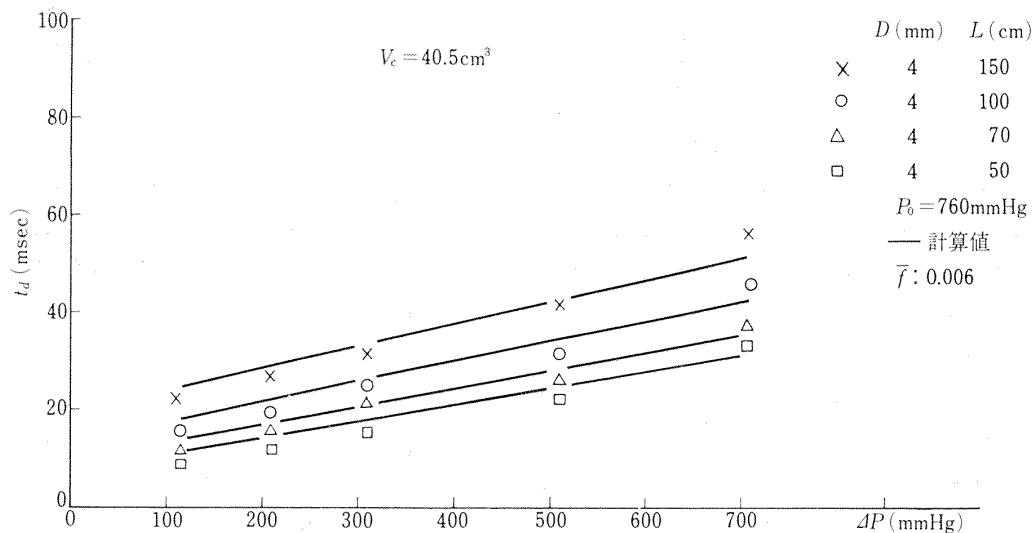
第5図 実験後の膜の写真

いる。実験結果の読み取りの困難さから実験前に設定したタンク圧とキャビティ圧の圧力差に対して95%の圧力に達した時間 t_d を遅れ時間と定義した。

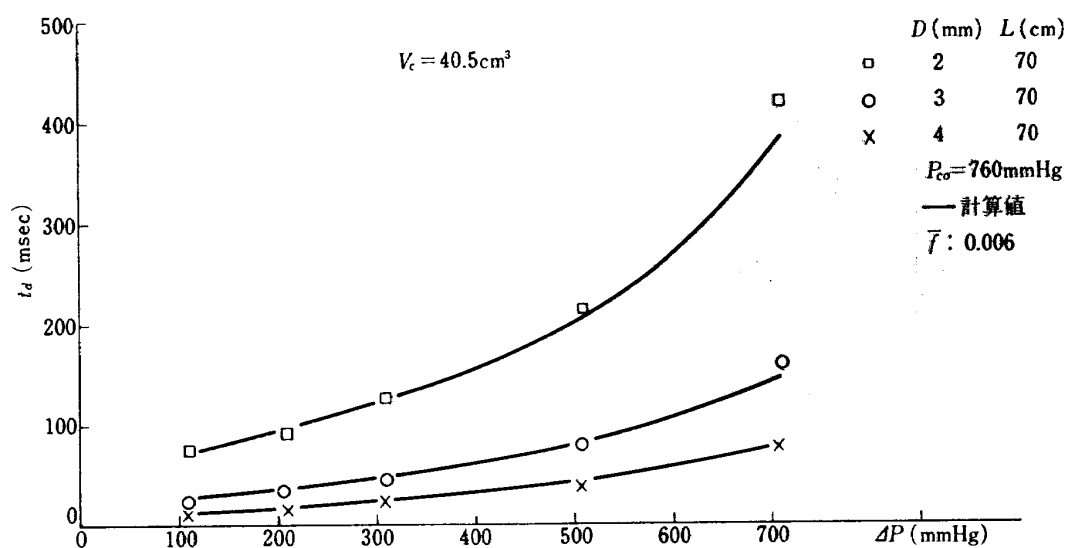
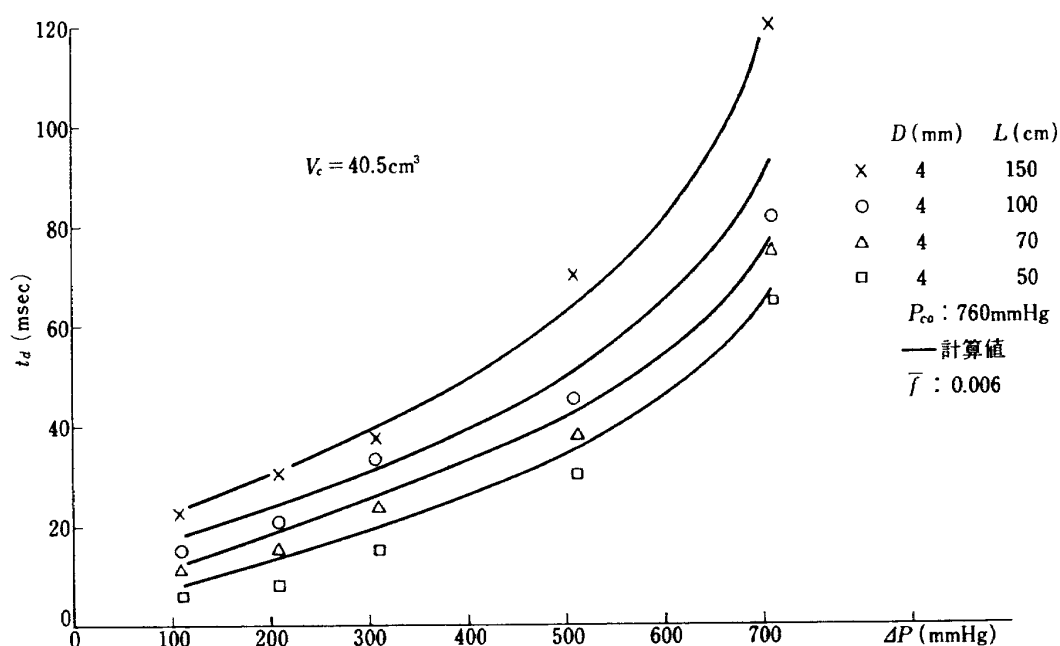
第6, 7, 8, 9図には、キャビティ体積一定の場合の t_d の測定値と計算値を示す。第6, 7図は導圧管へ気体が入る場合であり、第8, 9図は導圧管からタンクへ気体が出る場合の結果である。この図において、横軸は初期タンク圧と初期キャビティ内圧の圧力差（ステップ巾）である。縦軸は、時間遅れである。導圧管へ気体が入る場合には、タンク側の圧力 P_0 を760 mm Hg一定とした。従って、この場合は測定すべき圧力は760 mm Hgとなる。



第6図 t_d 対 ΔP (キャビティへ気体が入る場合)



第7図 t_d 対 ΔP (キャビティへ気体が入る場合)

第8図 t_d 対 ΔP (キャビティから気体が出る場合)第9図 t_d 対 ΔP (キャビティから気体が出る場合)

また、導圧管から気体が出る場合には初期キャビティ圧力を760 mmHgとした。従ってこの場合には測定すべき圧力はステップ巾を ΔP とすると $760 - \Delta P$ mmHgとなる。実験した圧力測定系の時間遅れは、ステップ巾が大きければ大きい事、導圧管径が小さい場合には特にこの傾向が顕著であることがわかる(第6図、第8図)。直径2 mm、長さ70 cmの場合と、直径4 mm、長さ150 cmの場合ではほぼ同一の長さ/直径の比であるが、2 mmの場合の時間おくれは4 mmのそれの約4倍にも達する(第6図と第7図あるいは第8図と第9図の比較)。このことから、時間おくれは、導圧管長さよりも導圧管径によ

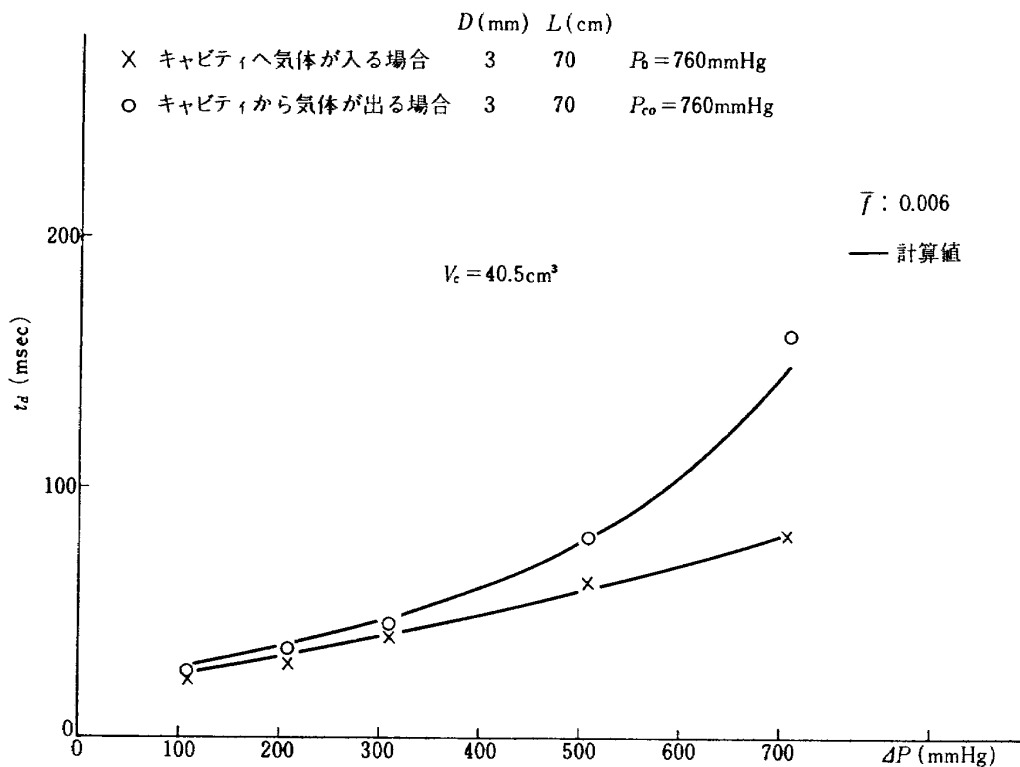
る影響が大きいことがわかる。計算に用いた摩擦係数は、実験で得た P_c 対 t の関係を最も良く再現する値として $\bar{f} = 0.006$ とした。第6図から第9図の実験範囲では、 $\bar{f} = 0.006$ 一定値としてもおくれ時間の計算値は実験値と良く一致する。

第6図から第9図においては、初期キャビティ圧力はほぼ大気圧に等しいが、後述のようにおくれ時間 t_d だけではなく、 P_c 対 t の関係においても計算値は実験値を再現する能力があるので(第11図参照)、 $\bar{f} = 0.006$ なる“実験定数”は数100 mmHg程度の測定圧力までは有効であるものと考えられる。

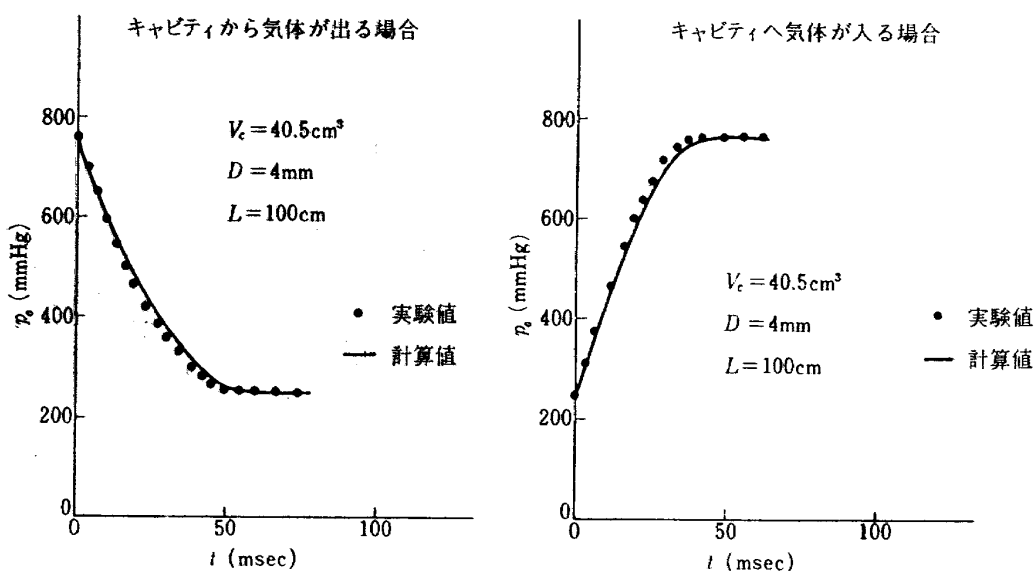
導圧管から気体が出る場合には、導圧管径と長さに対する時間遅れの関係は、導圧管内へ気体が入る場合と同じ傾向であるが、一般に導圧管内へ気体が入る場合に比べて時間遅れが大きい。これは導圧管内における気体の蓄積による影響が、導圧管内へ気体が入る場合に比べ出る場合の方が大きいためである。導圧管内へ気体が入る場合と、導圧管内から気体が出る場合の時間遅れの差をより明確にするために第10図に代表的な形状について比較した。この図から圧力差が約300mmHg以上で、時間

遅れに大きな差が生じることがわかる。

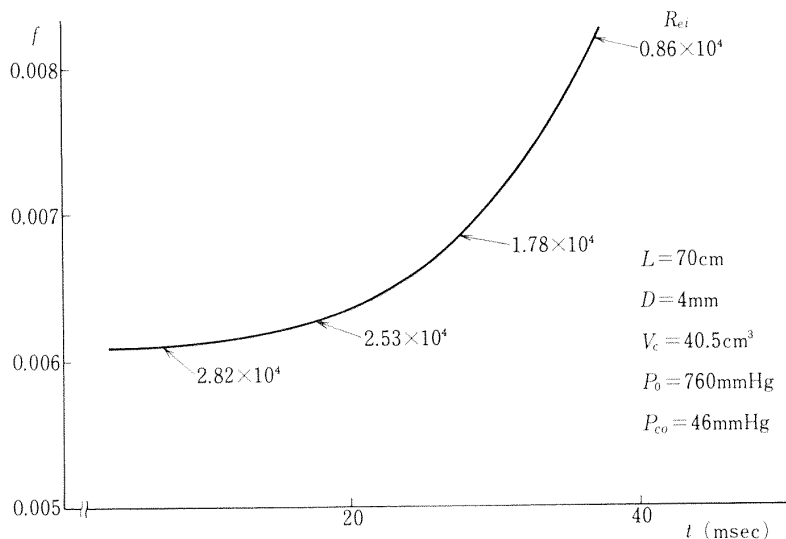
これまでは、 t_d の計算と実験の比較をおこなったわけであるが、 t_d までの圧力変化の経過についても計算と実験が一致すれば、前節のモデルはより信頼性があるものと考えられる。実験によって得られた圧力測定系の出力波形と、計算結果との比較を第11図に示した。この図における横軸は時間で、縦軸はキャビティ内の圧力である。計算では、導圧管内へ気体が入る場合にキャビティ内の圧力が P^* の値になるまではキャビティ内の圧力は時間に



第10図 キャビティから気体が出る場合と入る場合の比較



第11図 キャビティ圧力の時間変化



第12図 摩擦係数の時間変化

対し直線的に上昇しなければならないが、第11図の実験結果によってこの仮定は満たされていると思われる。また、導圧管内から気体が出る場合も計算と実験は良い一致をしている。導圧管内における気体の蓄積項を入れて時間遅れを計算した場合と、蓄積項を入れないで行なった時間遅れの計算結果との差は、導圧管の長さが1 mで管径が2 mm～4 mm程度の場合には約30%であった。

すでに述べたように \bar{f} の値は実験範囲において圧力応答を再現する値として決めたものであるが、実際の導圧管内の摩擦係数の値と比較してみることは興味がある。導圧管の入口での流れのレイノルズ数の時間に対する変化の1例を第12図に示した。第12図は、管内4 mmの場合について、

Blasius の式⁵⁾

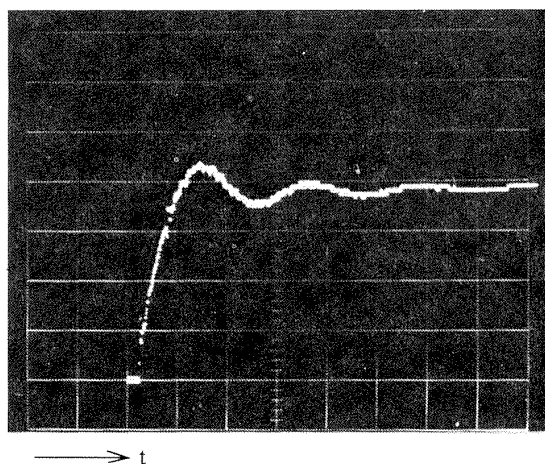
$$f = 0.0791 / R_e^{1/4} \quad 2.1 \times 10^3 < R_e < 10^5$$

を用いて計算したものであるが、摩擦係数 f は0.006よりも一般に大きくなっている。導圧管径基準のレイノルズ数 ($R_{ei} = \rho U D / \mu$, μ は導圧管入口の値を用いる) は臨界レイノルズ数をはるかにこえているので、流れは主として乱流となっているものと考えられる。導圧管径がより小さな場合には、 R_{ei} はやや小さくなる傾向にあるので、 f の値は図示した場合よりもやや大きくなる。さらに、導圧管の粗さ等を考慮に入れば、 f の値は大きくこそあれ、小さくはならない。 \bar{f} が定常の十分発達した導圧管内乱流のそれよりも小さくなる可能性についてはより詳細な検討が必要である。

4.2 不足制動における圧力応答

圧力の測定において、圧力の応答時間を速くしたい場合がある。そのためには、キャビティ体積を小さくした

り導圧管を短くする必要がある。しかし、このようにすると、導圧管の入口でステップ状の圧力を加えた場合に、圧力測定系の出力が振動的になり、応答時間の推定が困難になる場合がある。この現象の一例をシンクロスコープ写真に撮ったのが第13図である。入力波形は第3(A)図と同じである。圧力測定系の出力が振動的になる条件は、キャビティ体積だけでなく導圧管径とキャビティ径の比および導圧管の長さ、圧力差などの条件によって影響される。圧力の測定においては、圧力の変化に対しての応答時間が速く、しかも振動的でない条件が望ましい。キャビティ径と導圧管径の比を変えて圧力波形の振動的な現象の起こる条件を実験により調べるためには、キャビティ径が圧力変換器の径より小さい範囲で行なう

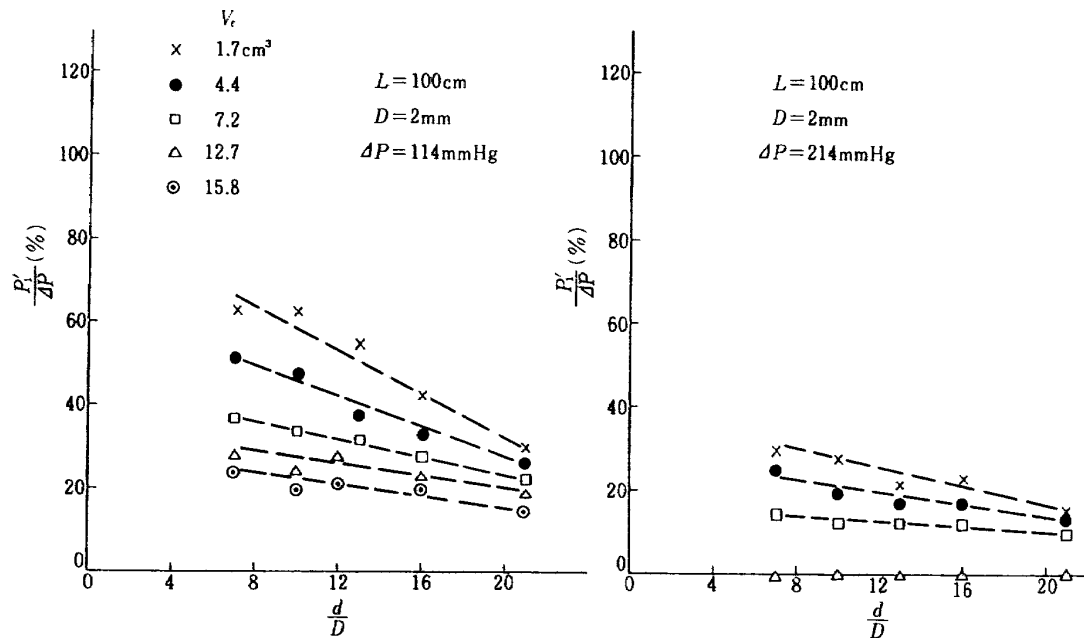
第13図 キャビティ内圧力のシンクロスコープ写真
(キャビティへ気体が入る場合)

10 msec/div. $D = 4$ mm $L = 1$ m
 $V_c = 9.4$ cm³ $\Delta P = 514$ mm Hg
 $P_0 = 760$ mm Hg

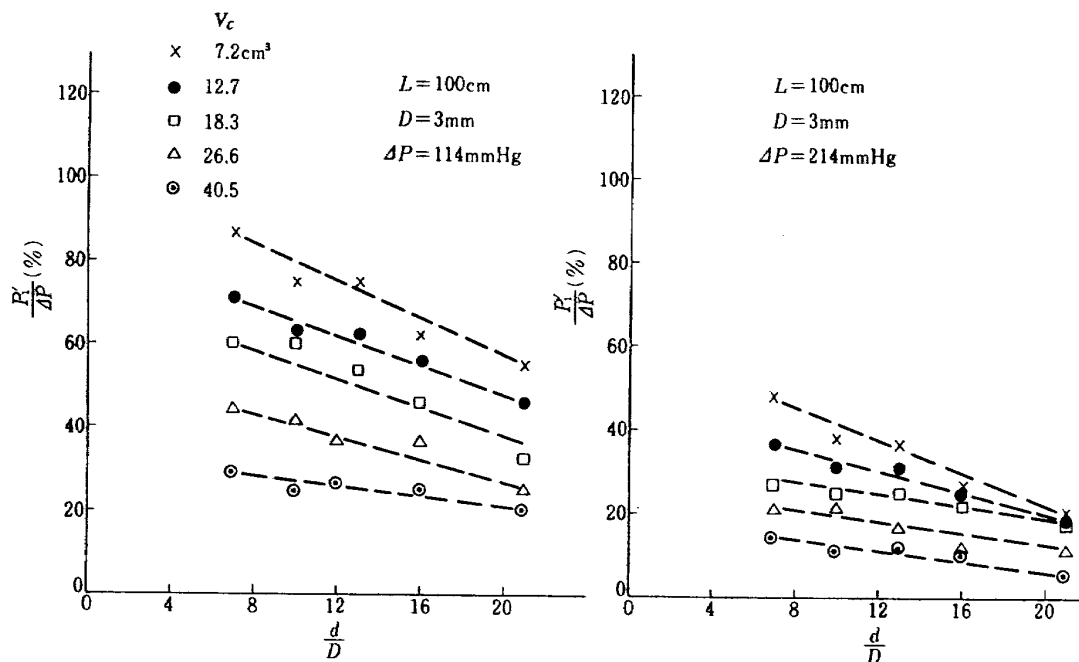
ことが望ましいのであるが、応答性の良い圧力変換器は、受感部の面積が小さくキャビティ径の影響を調べるためにはキャビティを大きくして調べる必要があった。そこで、第5図に示すようにブロック1とブロック2の組み合わせによりキャビティ径と体積を任意に設定できる装置を作り実験を行なった。第14, 15, 16図はキャビティ径と導圧管径の比 d/D が $P'_1/\Delta P$ におよぼす効果を表わすものである。ここで $\frac{P'_1}{\Delta P}$ は定常圧力値と初期ピーク圧力値の差をステップ巾で割ったものである。これらのグラフから導圧管径が大きくなれば $\frac{P'_1}{\Delta P}$ は大きくなること

がわかる。また、キャビティ体積が一定でも導圧管径に対するキャビティ径の比が大きくなり、圧力差 ΔP が大きくなると振幅が小さくなる傾向があるので同一導圧管を使用して振動を押えるためには、キャビティ体積だけでなく、キャビティ径も考慮する必要があることがわかる。

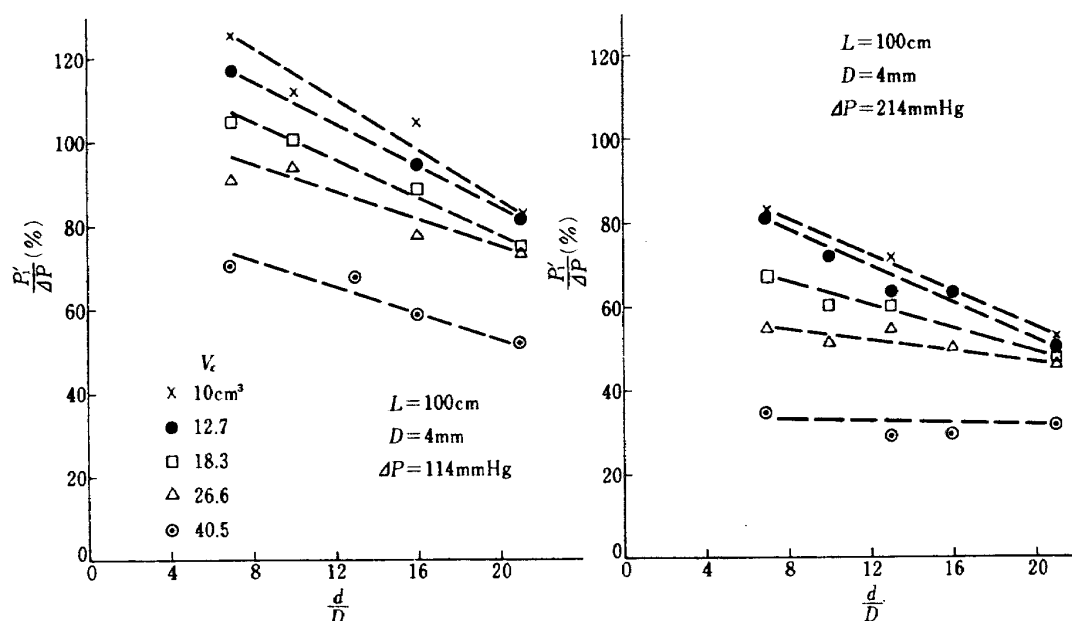
次に、不足制動と過制動の境界条件すなわち中立制動の条件を調べるために、導圧管の長さを一定にし導圧管の径とキャビティ径、圧力差およびキャビティ体積の関係を調べるための実験を行なった。その結果を第17図に示す。この図における横軸は、導圧管径で縦軸はキャビ



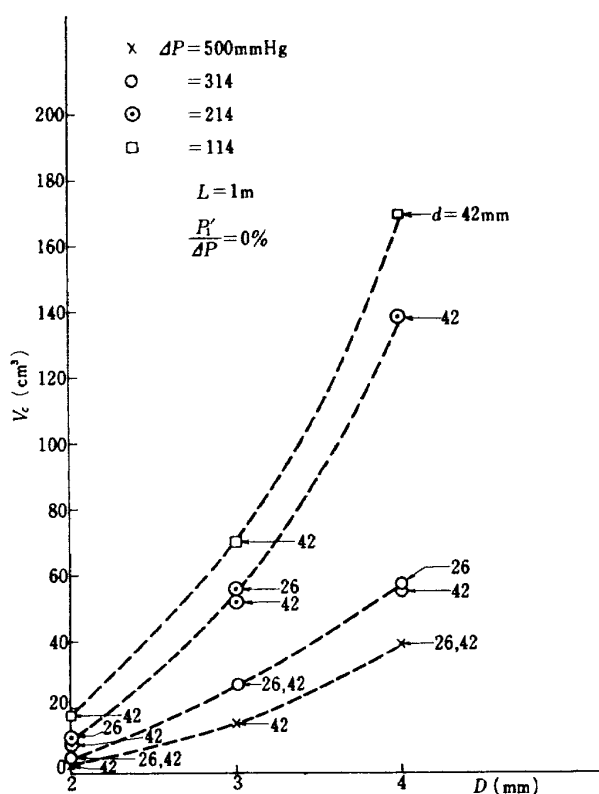
第14図 変動圧とキャビティ径の関係



第15図 変動圧とキャビティ径の関係



第16図 変動圧とキャビティ径の関係



第17図 臨界制動時のキャビティ体積におよぼす配管径の影響

ティ体積である。圧力差 ΔP が小さいときには、不足制動とならないためには、キャビティ体積 V_c を大きくしなければならない。また、中立制動条件におよぼす D/d の影響はほとんどないことがわかる。この図において、点線を境にして V_c の大きい領域は過制動で V_c の小さい領域

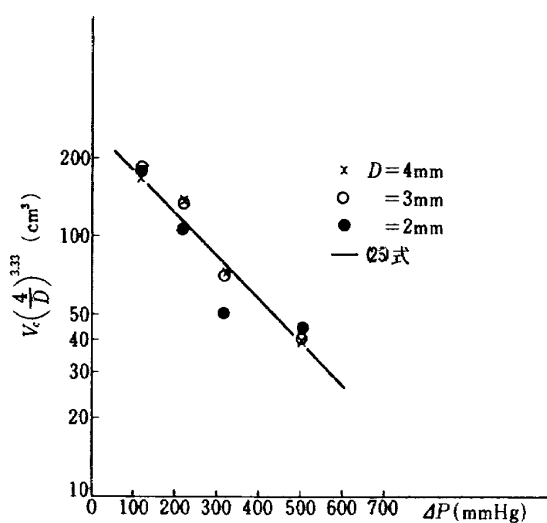
は不足制動である。この結果から導圧管の長さ L を一定にした場合の中立制動条件として近似的に次の相関式が得られる。

$$\log V_c \left(\frac{4}{D} \right)^{3.33} \approx -1.65 \times 10^{-3} \Delta P + 2.4 \quad (25) \quad (L = \text{const})$$

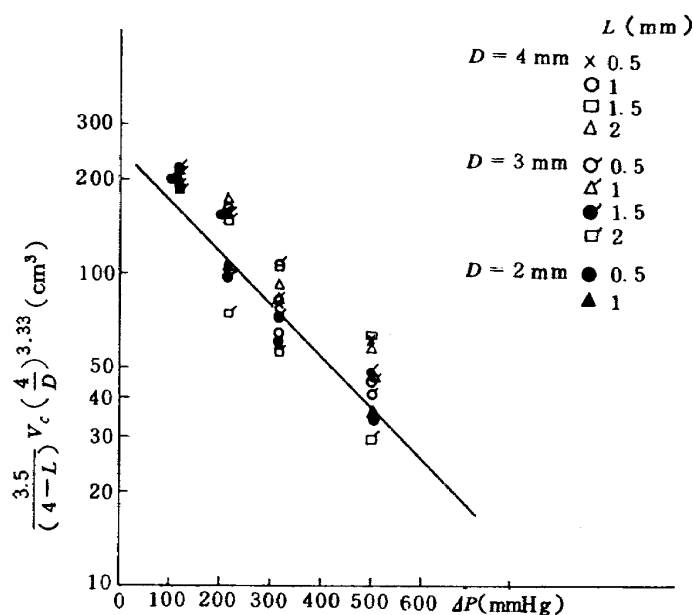
V_c はキャビティ体積 (cm^3)、 D は導圧管の内径 (mm)、 L は導圧管の長さ (m)、 ΔP は初期設定圧力から最終圧力 760 mm Hg までの変化に対するステップ巾である。この式の適用範囲は、導圧管径 $D = 2 \sim 4 \text{ mm}$ 、導圧管の長さ $L = 1 \text{ m}$ 、圧力差 $\Delta P = 100 \sim 500 \text{ mm Hg}$ で、最終測定圧力 $P_0 = 760 \text{ mm Hg}$ の場合である。第18図に(25)式による中立制動の相関式と実験結果の比較を示した。この図で、実線を境にして $V_c \left(\frac{4}{D} \right)^{3.33}$ の大きい領域は過制動で小さい領域は不足制動である。(25)式には、導圧管の長さ L の影響が示されていないので、中立制動条件におよぼす導圧管長さの効果を調べるために、導圧管の径を一定にして導圧管の長さ、キャビティ体積および圧力差を変えて実験を行なった。その結果を第19図に示す。圧力差 ΔP が小さくなるにつれて導圧管の長さ L による影響が大きくなっていく。これらの結果から、(25)式へ導圧管の長さ L の影響を入れると、中立制動条件として次のような近似的な実験式が得られる。

$$\log \frac{3.5}{(4-L)} V_c \left(\frac{4}{D} \right)^{3.33} \approx -1.65 \times 10^{-3} \Delta P + 2.4 \quad (26)$$

この式の適用範囲は、導圧管の長さ $L = 0.5 \sim 2 \text{ m}$ の場合で、導圧管径 D と圧力差 ΔP は(25)式の場合と同じであ



第18図 臨界制動条件の相関 ($L=1\text{m}$)



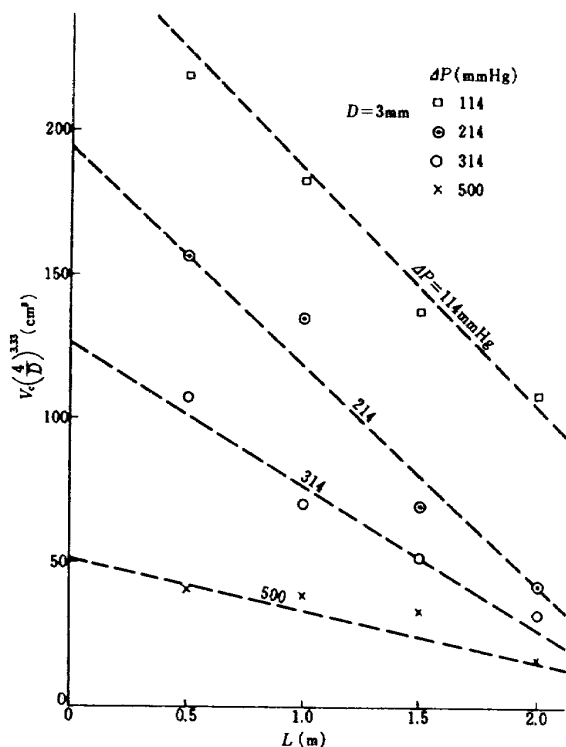
第20図 臨界制動条件の相関

5. むすび

ロケットエンジンの高空性能試験における大気圧以下の比較的高い圧力の測定にみられるように、圧力測定孔と変換器のあいだを2~4mm径の導圧管数mで結ぶ場合には、エンジンの操作条件の変化あるいは過渡時の圧力変化に伴って導圧管内での流れが主として乱流となることとならびに導圧管内での流れの圧縮性および気体の蓄積などを考慮して圧力測定系の時間遅れを見積ることが必要である。ステップ入力に対する圧力測定系の出力はある場合には初期圧力から最終圧力までなめらかに変化し（過制動）、また導圧管が太くてキャビティ体積が小さい場合には圧力測定系の出力は振動的（不足制動）となる。過制動の場合は導圧管内流を準定常圧縮性一次元流れとしたモデルによって導圧管入口におけるステップ入力（キャビティ内へ気体が入る場合と出る場合）に対する計算を行ない実験と比較した結果、導圧管径2~4mm、導圧管長0.5~1.5m、測定部圧力の大気圧から60mmHgへの変化あるいは60mmHgから760mmHgまでの範囲の変化に対して、1コの実験定数を定めることによっておくれ時間の予測が可能であることが示された。

上記のモデルによって計算が不可能な不足制動領域は、導圧管径の約3乗に比例して大きくなること、また、ステップ巾が小さい場合には不足制動領域が大きくなる傾向があることがわかった。前述の実験範囲に対して低圧から大気圧までの変化に対する中立制動条件をひとつの実験式としてまとめた。

不足制動の場合のオーバーシュートの大きさは、キャビ



第19図 臨界制動におよぼす導圧管長の影響

る。この式から中立制動にするためには、圧力差および導圧管の長さが一定ならば、キャビティ体積 V_c は管径の約3乗に比例して大きくなることが示された。

第20図に(26)式に示す中立制動の相関式と実験結果の比較を示した。この図における実線を境にして、キャビティ体積の大きい領域は過制動で小さい領域は不足制動である。

ティ体積に大きく依存するが、同時に導圧管径に対するキャピティ径の大きさにも依存することがわかった。

〔謝 辞〕

本研究をおこなうに当り、また、それをまとめるに当り適切な助言をいただいた航空宇宙技術研究所空気力学第一部の曾我国男室長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. J. Larcombe and J. W. Peto; The Response Times of Typical Transducer—Tube Configurations for the Measurement of Pressures in High-Speed Wind Tunnels, Aeronautical Research Council, C. P. No. 913, 1966.
- 2) 曾我国男：広範囲の圧力導入管長さを有する圧力測定系の応答時間，日本航空宇宙学会誌，第24巻，第273号，1976年10月．
- 3) 曾我国男，小野寺信幸：圧力測定的时间遅れにおよぼす圧力孔の影響，NAL TM-238，1972年11月．
- 4) Ascher H. Shapiro; The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Ronald Press, New York, 1954, pp. 162 ~ 186.
- 5) R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot; Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, June 1960, pp. 187.

航空宇宙技術研究所資料415号

昭和55年5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 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan