油圧作動油のキャビテーション (第1報)*

—せん断流下の初生—

山 口 惇**

Cavitation in Hydraulic Fluids*

(1st. Report-Inception in Shear Flow)

Atsushi YAMAGUCHI**

In this paper experimental results on the cavitation characteristics of hydraulic fluids using a new apparatus are presented. In this apparatus a fluid studied is enclosed in the annulus between two concentric cylinders, the inner one of which is rotating and the outer one is at rest. The special merit of the apparatus is that it enables to obtain the velocity and the pressure distribution theoretically and to set up the velocity gradient and the pressure almost independently. The fluids studied are base oils and include four kinds of paraffinic and two kinds of naphthenic mineral oils.

Following results are obtained :

- (1) In case of the rate of pressure reduction $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$ (p : absolute pressure, t : time) :

When the rotational speed of the inner cylinder $n=0$, the inception pressure p_1 is less than 60 mmHg and in many cases the incipient cavitation does not appear even at 0 mmHg. As n increases, p_1 increases rapidly and then reaches a constant value which is nearly equal to atmospheric pressure.

The pressure p_2 at which bubbles are in a row at axially regular spaces is almost equal to p_1 when n is large, but bubbles do not break out extensively even at 0 mmHg when $n=0$.

For all fluids studied, p_1/p_s is expressed as a function of a and Re , and at $80 < Re < 2200$

$$p_1/p_s = 0.42 \sqrt[3]{a}$$

where p_s : saturation pressure of air = atmospheric pressure in this experiment, a : volumetric ratio of air content %, $Re = UC/\nu$: Reynolds No., $U = 2\pi nR$: peripheral velocity, R : radius of inner cylinder, C : width of the gap, ν : kinematic viscosity, and the tested range of Re was 0~2200.

- (2) In case of $n = \text{constant}$:

As $|dp/dt|$ increases, p_1 shows a tendency to decrease.

1. 緒 言

油圧作動油のキャビテーション (あるいはエアレーション) は油圧機器あるいは油圧回路の特性に大きな影響を及ぼすために、その発生を予測することは、油圧工学上大切な問題である。

油に比べ大部以前から研究の対象となっている水の場合、そのキャビテーションはつぎのように取扱われている¹⁾。すなわち、水が流路を流れる (あるいは物体が水中を運動する) とき、水と壁面 (物体面) との相対速度が大きくなり、流れの局所の静圧が低下して限界値を超えると、その領域にキャビテーションが発生する。そしてその限界値は、流れの温度における蒸気圧との関連において論ぜられ、キャビテーション係数を用いる場合、一般には、限界値は蒸気圧に等しいとしている。しかし蒸気圧を限界値としたキャビテー

* 昭和48年8月25日 原稿受付 (Received August 25, 1973)

** 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama)

ション係数を用いて、キャビテーションの発生や影響を予知することは困難な場合が多く、種々の流体力学的条件や水の物理的あるいは化学的な状態を加味する必要が認められており、これらの影響を寸度効果(scale effect)と総称している。

さて、油圧作動油のキャビテーションの場合、i) 油の飽和蒸気圧は水に比べ大部小さいこと、油の空気(気体)含有量は水の数倍にも達すること^{2,3)}などの物性上の相違、ii) 油圧回路においては、高压から一度に減圧することがひんぱんに行なわれるなどの流体作動上の相違とが考えられる。このためキャビテーション発生限界値として、気ほう分離圧が一般に用いられ、その測定結果もいくつか発表されている^{4,5)}。しかしながら、気ほう分離圧に対する油の物性や測定条件の影響について、ほとんど明確にされておらず、測定条件の影響が著しいことが石原ら⁶⁾の実験で示されている程度である。

水のキャビテーションについても、寸度効果に関して未知の事柄の多いことを考慮すると、流れの場がほぼ完全に記述できる状態でキャビテーションの発生条件を求めることが、油圧作動油のキャビテーションに関する基礎知識をうる点から、必要であろう。このため、内円筒の回転する同心円筒間に油を封入する方式の実験装置を製作し、流れのせん断に着目して、キャビテーションの発生条件を求めた。この装置の特長は、流れの場がほぼ完全に理論的に求められることのほかに、流れのせん断状態と圧力とをほぼ独立に変更しうることにある。また試験油として、パラフィン系4種、ナフテン系2種の基油を用い、その組成などの影響に

Fig. 1 Test apparatus (see Table 1)

Table 1 Dimensions of test apparatus

apparatus No.	inner cylinder (rotor)	radius of inner cylinder R [mm]	width of gap C [mm]	surface roughness $R^*_{max} [\mu]$	length of observation section L [mm]
I	A	56.3	3.7	3~7	232
	B	56.75	3.25		
	C	57.65	2.35		
II	D	55.0	5.0	4	150

* peak-to-valley height

Fig. 2 Test circuit

Table 2 Properties of tested oils

	design- nation	kinematic viscosity ν cSt (at 40°C)	dissolved air content a^{**} (%)	specific gravity (at 40°C)
paraffinic	P-1	12.9	10.7	0.822
	P-2	29.2	10.4	0.861
	P-3	50.2	7.5	0.874
	P-3	95.7*	8.3	0.880
naphthenic	N-1	20.4	8.4	0.879
	N-1	96.1	9.1	0.895

* 85.0 cSt at 42°C

** volumetric ratio converted to 760 mmHg, 0°C

ついても検討した。なお、水の場合についてもこのような実験方法は、まだ用いられていないようである。

2. 実験装置および方法

装置本体の構造を Fig. 1 に示す。内円筒(ロータ)は鋼製、外円筒はアクリル製である。ロータには端面からの気ほうの流入を防止するためにOリングを装着してある(Oリングと外円筒間にはすきまがある)。Oリング間の長さ、すなわち観察部長さならびにロータと外円筒間のすきま(半径すきま)、ロータ表面粗さは、Table 1 に示すとおりである。

流体回路を Fig. 2 に示す。試験油は添加剤の影響を除去するため、基油を用いた。特性を Table 2 に示す。ここに、空気含有量は、室温大気圧下に長時間放置した状態での値であり、本実験では油はすべてこの状態に保った。なお空気含有量測定方法については、付録に示す。

キャビテーションの判定は目視によった。この場合の照明が問題となるが、撮映用ライトとストロボライトとを比較検討した結果、後者を採用した。特に観察時には、ロータ回転速度の数倍にストロボを同期させた。圧力は水銀マンオメータにより、油温は外円筒よりそう入した水銀温度計によって測定した。

回転速度の調節はスライダック、整流子電動機およびVベルトの組合せで行ない、特に低速域での実験

(P-1 油) には、減速機（ハーモニックドライブ）を用いた。温度の調節は、装置に流入する油を熱交換器で加熱するとともに、装置本体外側にバンドヒータを取付けて行なった。

実験上注意した点は、i) 試験油の種類を変える場合を除き、装置本体内部を大気にさらさないこと、ii) キャビテーションを生じた油を、飽和状態の油で徐々に押し出すことによって、油の交換を十分に行ない（同種の試験油の場合）、空気含有量をほぼ一定に保つこと、などである。実験手順はつぎのとおりである。飽和状態の油に交換した後（油面は外円筒から約 10 cm 上とする）、油温を $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{deg}$ に調整し（交換後 1 時間以上経過させている）、内円筒を設定回転速度でまわす。ついで大気に通じているバイパス管路を絞って、時間的に一定の割合で圧力を低下させ（以下この割合を減圧率と呼ぶ）、キャビテーションの発生した圧力を測定する。

3. 実験結果および考察

キャビテーションの状態としては、気ほうの初生し

P-1 oil, 40°C . A rotor, rotational speed of inner cylinder $n=600$ rpm

Fig. 3 Cavitation in the test apparatus

たときの圧力と観察部全域に気ほうの発生したときの圧力（以下全面発生圧と呼ぶ）とを主に測定した。気ほうの発生状態は、減圧率一定の場合、ロータ回転速度や油の種類によっても相違するが、おおよそ 2 様式に分けられる。

i) 低回転速度の場合。まずロータ表面に微小気ほうが発生する。大きさは $0.5 \sim 1 \text{ mm}\phi$ であり、高粘度油で $1 \sim 2$ 個、低粘度油で $2 \sim$ 数個である。気ほうは圧力の減少につれ成長し、ロータから離れさらに成長する。なお特に低い回転速度においては、初生はロータ表面とは限らない。

ii) 高回転速度の場合。輝点が観察部全域に霧状に発生する（これはロータ表面に発生しているとは限らないようである）。輝点が $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}\phi$ の気ほうに、ついで $1 \text{ mm}\phi$ の気ほうに成長する。同時にロータ軸方向にほぼ等間隔にならぶ（この発生状態に対応する写真を Fig. 3 に示す）。

O : incipient cavitation, $\times$: developed cavitation (Bubbles are in a row at axially regular spaces), p : absolute pressure, t : time, n_T : rotational speed corresponding to Taylor $\text{No.}=41.3$, n_T' : Taylor $\text{No.}=400$

Fig. 4 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of P-1 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

Fig. 5 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of P-2 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

なお回転速度一定の場合には、初生の状態は減圧率が大きくなるにつれ輝点から微小気ほうにうつる傾向が認められる。

減圧率 -5 mmHg/min 一定におけるキャビテーション発生圧力に対する回転速度の影響を Fig. 4~Fig. 9 に示す。横軸は回転速度、縦軸は絶対圧力であり、○印は初生を、×印は全面発生を示す。特に Fig. 4 には、低回転速度におけるキャビテーションを観察した結果を示してある。

回転速度 0 rpm の場合、すべての試験油において、

Fig. 6 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of P-3 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

Fig. 7 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of P-4 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

Fig. 8 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of N-1 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

Fig. 9 Effect of rotational speed on the pressure at the onset of cavitation of N-4 oil in case of $dp/dt = -5 \text{ mmHg/min}$

○, × : same as Fig. 4, 40°C, D rotor

Fig. 10 Effect of the rate of pressure reduction dp/dt on the pressure at the onset of cavitation of P-1 oil in case of $n = 500 \text{ rpm}$

Fig. 11 Effect of dp/dt on the pressure at the onset of cavitation of P-2 oil in case of $n = 500 \text{ rpm}$ (40°C, D rotor)

Fig. 12 Effect of dp/dt on the pressure at the onset of cavitation of P-4 oil in case of $n = 500 \text{ rpm}$ (42°C, D rotor)

Fig. 13 Effect of dp/dt on the pressure at the onset of cavitation of N-4 oil in case of $n=500$ rpm (40°C , D rotor)

Fig. 14 Effect of dp/dt on the pressure at the onset of cavitation of N-4 oil in case of $n=500$ rpm (40°C , D rotor)

圧力約 0 mmHg でも全面発生は認められなかった。しかし P-4 油が 10~50 mmHg で初生したのをはじめ(測定回数 3 回)、パラフィン系の油では約半数について、10~60 mmHg で初生が認められた。ナフテン系の油では初生も認められない。

減圧率一定の実験結果をまとめると、全体的な傾向として、つぎようになる。すなわち

- i) 油が静止状態にあるとき、初生圧は数十 mmHg 以下、全面発生圧は 0 mmHg 以下である。
- ii) 油がせん断状態にさらされると、初生圧、全面発生圧ともずり速度（あるいは回転速度）の増大につれ急激に上昇し、ついではぼ一定値となる。その値は大気圧、すなわち空気の飽和圧力に近い。
- iii) ii) において、初生圧、全面発生圧がほぼ一定となるずり速度は、高粘度の油ほど大となる。またその一定値は、一般に、低粘度の油ほど大である。
- iv) ずり速度の大きい場合、初生圧と全面発生圧とはほぼ等しい。すなわちこの場合、可視範囲での気ほうの成長は急激である。

回転速度 500 rpm における減圧率の影響を求めた結果を Fig. 10~Fig. 14 に示す。横軸は時間、縦軸は絶対圧力である。右下がりの直線は、それぞれの減圧率における圧力と時間の関係を示し、線上の○印は初生を、×印は全面発生を示す。図には○印を結んだ曲線を記入してある。これらの図から、いずれも減圧率が大きくなるほど、初生圧、全面発生圧が低下することが認められる。また Fig. 4~Fig. 9 における減圧

率 -5 mmHg/min は、初生圧、全面発生圧に対する減圧率の影響が顕著でない範囲にあるといえる。

さて、ここで回転円筒を利用した本実験装置の流れの状態について検討しておく。すなわち半径方向の圧力およびずり速度の分布ならびにテイラーウズの検討を行なう。

円筒が完全に同心であり、流れが軸対称であるとする。また軸方向には流れが存在しないとすると、連続方程式より半径方向流速は 0 となる。したがって、ナビエ・ストークス方程式は

$$\rho \frac{u^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (2)$$

となる。ここに u : 流体の周方向速度、 p : 圧力、 r : 半径、 ρ : 密度である。(1)、(2) 式を $r=R$ で $u=U(=2\pi nR)$ 、 $r=R_2$ で $u=0$ の下に解くと (R : ロータ半径、 R_2 : 外円筒半径)。

$$u = \frac{UR}{R_2^2 - R^2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) \quad (3)$$

$$p = [p]_{R_2} + \frac{\rho U^2 R^2}{(R_2^2 - R^2)^2} \left[\frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{r^2} - 2 R_2^2 \ln \left(\frac{r}{R_2} \right) \right] \quad (4)$$

$$S = - \frac{2 U R R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R^2)} \quad (5)$$

となる。ここに、 $S = \partial u / \partial r - (u/r)$: ずり速度であり、 $[]_{R_2}$ 、 $[]_{R_1}$ はそれぞれロータ表面、外円筒面における値を示すことにする。半径方向圧力差 Δp は

$$\frac{\Delta p}{\rho U^2} = \frac{R^2 R_2^2}{(R_2^2 - R^2)^2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{R_2}{R} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{R_2} \right)^2 + 2 \ln \frac{R}{R_2} \right] \quad (6)$$

となり、本実験における値を代入すると、 $n=1000$ rpm で $\Delta p=3.1 \sim 6.4$ mmHg となり、半径方向の圧力変化は無視できる。

一方ずり速度に対する半径方向の差は

$$\frac{[S]_{R_2} - [S]_{R_1}}{[S]_{R_1}} = -1 + \left(\frac{R}{R_2} \right)^2 \quad (7)$$

となり、数値としては $-0.077 \sim -0.160$ となる。気ほうの発生状態からは、ロータ表面における値を重視すべきであろう。

内円筒の回転する場合、円筒間の流れの状態は、テイラー数

$$Ta = \frac{UC}{\nu} \sqrt{\frac{C}{R}} \quad (8)$$

によりつぎのように分けられる⁷⁾。

$Ta < 41.3 \cdots \cdots$ 層流クエット流

$4.13 < Ta < 400 \cdots \cdots$ テイラーウズを伴った流れ

O : inner cylinder rotating, A rotor,
 Δ : outer cylinder rotating, C=2.0 mm,
 R=38.0 mm, U_R : peripheral velocity
 of rotating cylinder, p_i : inception
 pressure

Fig. 15 Effect of Taylor vortices on incipient cavitation in case of $dp/dt = -5$ mmHg/min

$T_a > 400$ ……乱流

ここに ν : 動粘度, C : 半径すきまである. 本実験に関する問題として, テイラーウズのキャビテーションに及ぼす影響がある. このため $T_a = 41.3$ に対応する回転速度 n_T を Fig. 4~Fig. 9 に示した. $T_a < 41.3$ においては回転速度の上昇につれ, 初生圧, 全面発生圧が上昇し, $T_a > 41.3$ においてはこれらがほぼ一定であるように見える. しかしすべての実験値を横軸に T_a , 縦軸に初生圧をとって整理してみると, $T_a \div 30$ ですでに初生圧はほぼ一定となる. したがってテイラーウズの影響が強いとは考えられない.

この点を確かめるために, テイラーウズの生じない外円筒回転形の装置を製作し ($R=38.0$ mm, $C=2.0$ mm), P-1 油について減圧率 -5 mmHg/min, 回転速度 200, 350, 500 rpm で実験を行なった. キャビテーション発生状況はつぎのようであった. 内円筒表面近くに 0.2 mmφ 程度の単一気泡が発生し, ついでこれが全面に及ぶ. しかし輝点状気泡の発生および気泡が軸方向にほぼ等間隔にならぶ状態はみられず, この点内円筒回転の場合と相違する.

p_s : saturation pressure of air=atmospheric
 pressure in this experiment,
 U : peripheral velocity of rotor

Fig. 16 Inception pressure p_i versus Reynolds No. UC/ν for paraffinic mineral oils

初生圧 p_i に対する実験結果を Fig. 15 に示す. 内円筒回転 (○印) と外円筒回転 (Δ印) との比較のために, 横軸に回転円筒の周速と半径すきまとからなるレイノルズ数をとった. 外円筒回転の場合, 初生圧が多少低くなるが, 初生圧についてテイラーウズの影響は, ほとんどないといえる. 全面発生圧についても同様である.

本研究は, キャビテーションに対するせん断の影響を求め, 油を作動油のキャビテーションの基礎的事項を明らかにするのが目的であるため, 実験結果をそのまま図に示したが (Fig. 4~Fig. 14), ここで, 温度, 減圧率一定の場合における初生圧についての結果をまとめてみる. 関与する物理量として, p_i , R , U , C , ν , a および p_s (空気の飽和圧力, 本実験の場合大気圧) が考えられる. 次元解析により, これらをまとめると

$$\frac{p_i}{p_s} = f\left(\frac{UR}{\nu}, \frac{C}{R}, a\right) \quad (9)$$

の関数関係が求まる. これに基づいて, すべての試験油のロータ A~D における実験結果を整理すると, 上式は

$$\frac{p_i}{p_s \sqrt[3]{a}} = F\left(\frac{UC}{\nu}\right) \quad (10)$$

とまとめられる.

パラフィン系 4 種の試験油に対する整理結果をレイノルズ数の $UC/\nu < 150$ 範囲について Fig. 16 に示す. レイノルズ数の大きい領域では

$$\frac{p_i}{p_s \sqrt[3]{a}} = 0.42 \left(\frac{UC}{\nu} > 80\right) \quad (11)$$

が成立つ. Fig. 16 および (11) 式において, a の単位は % である. また本実験におけるレイノルズ数の最大値は, P-1 油に対して 2200, P-4 油に対して 300 である.

ナフテン系 2 種の試験油に対しても, 同様の整理が可能であり, レイノルズ数の大きい領域では,

$$\frac{p_i}{p_s \sqrt[3]{a}} = 0.44 \left(\frac{UC}{\nu} > 80\right) \quad (12)$$

となる. (11) 式と同じく a の単位は % であり, 本実験における最大レイノルズ数は N-1 油に対して 1400, N-4 油に対して 300 である. 上式右辺の値 0.44 はパラフィン系の 0.42 に比べ多少大きい, この差は実験誤差内に含まれよう. なおレイノルズ数の小さい範囲については, Fig. 16 の整理結果がそのまま適用できる.

4. 結 言

新たに考案した実験装置を用いて, 6 種の油圧作動

油基油のキャビテーション発生条件について検討し、流れのせん断状態がそれに大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

試験油の提供を受けた三菱石油会社ならびに実験について助力を受けた本学技官 鈴木利行、および当時の本学学生 笹本隆、五藤裕二、小島定の四君に謝意を表す。

文 献

- 1) たとえば, R. T. Knapp et al.: Cavitation (1970), McGraw-Hill, 村井: キャビテーション, 油空圧協

会第1回セミナー教材, 27/63 (1971)

- 2) 板谷, 河野: 油中に溶解する空気量, 機械学会誌, 48:332, 75/77 (1945)
- 3) 石原ほか: 油圧油のエアレーションについて, 油空圧協会第2期通常総会講演論文集, 13/17 (1971-5)
- 4) 板谷, 辻: 歯車ポンプのキャビテーションに関する研究, 機械学会前刷集, No.100, 9/12 (1963-11)
- 5) 井田ほか: 歯車ポンプのキャビテーション性能, 機械学会第768回講演会前刷集, 179/182 (1967-5)
- 6) 石原, 森: 油圧油のキャビテーションに関する一実験, 油空圧協会第3期通常総会講演論文集, 39/42 (1972-5)
- 7) H. Schlichting: Boundary-Layer Theory, 6th ed., 503 (1968), McGraw-Hill

□ 付録——空気含有量測定方法 □

空気（気体）含有量測定装置の概略を Fig. 17 に示

Fig. 17 Apparatus for air content test

す。実験方法はつぎのとおりである。まず弁（ピンチコック）b を閉じ a, d を開として試料をフラスコ A に満たし、あふれださせる。弁 a, d を閉じる。弁 c をあけてフラスコ B, C を真空ポンプにより 0.1 mmHg 程度まで減圧し、弁 c を閉じる。このときの圧力 p_t を測定し、ついで弁 b をあけ、試料を徐々に流下させる。フラスコ B 内には折り曲げたブリキ小片を入れておき、フラスコを加振する。装置内圧力がほぼ一定となった状態の圧力 p_f を測定する。なお圧力の測定は回転マクレオド真空計によっている。

基準状態（760 mmHg, 0°C ）に換算した空気含有割合 $a\%$ は、つぎのようにして求まる。

測定開始時の装置内空気（弁 bc 間）に対して

$$G_0RT = p_t V_0 \quad (13)$$

が成立つ。ここに G_0 : 重量, V_0 : 体積, R : ガス定数, T : 絶対温度である。測定終了時には

$$(G_0 + G_1 + G_3)RT = p_f V_0 \quad (14)$$

が成立つ。ここに G_1 : 試料からの放出空気の重量, G_3 : もれ空気の重量であり、それぞれに対する体積を V_1, V_3 で表わす。760 mmHg, 0°C に対する換算値に* を付けると、(13), (14) 式から

$$V_1^* + V_3^* = \frac{273}{760} \frac{V_0}{T} (p_f - p_t) \quad (15)$$

p_f が絶対 0 気圧ではないため、未放出空気が残留するはずであり、その空気体積を V_2 とすると、試料に含有されていた空気体積は

$$V^* = V_1^* + V_2^* \quad (16)$$

となり、ヘンリーの法則から

$$V_2^* = V^* \frac{p_f}{p} \quad (17)$$

が成立つ。ここに p : V^* に対応する飽和圧力である。

一方、もれ空気に対して、その分圧を p_3 とすると

$$G_3RT = p_3 V_0 \quad (18)$$

が成立し、 G_3 に対応する体積として

$$V_3^* = \frac{273}{760} \frac{p_3 V_0}{T} \quad (19)$$

が求まる。(17), (19) 式を (15) 式に代入すると

$$V^* = \frac{273}{760} \frac{V_0 (p_f - p_t - p_3)}{T \left(1 - \frac{p_f}{p}\right)} \quad (20)$$

したがって、

$$a = 35.9 \frac{V_0}{v} \frac{p_f - p_t - p_3}{T \left(1 - \frac{p_f}{p}\right)} \quad (21)$$

をうる。ここに v : 試料の体積（弁 ab 間）であり、圧力の単位は mmHg, 温度は $^\circ\text{K}$, a は % である。ここで $p_3 = 0$ とし、 $1 - (p_f/p)$ の代りに 1 と置けば、上式は ASTM D 831-48 と一致する。

本装置の場合、 V_0 は 500 cc と 1000 cc のフラスコを、 v は 100 cc のフラスコを主体に構成してあるが、接続部には真空用ゴムホースを使用している。このため、 v 中に大気圧の空気を入れておき、それを $v + V_0$ まで膨張させ、このときの圧力から V_0/v を求め、11.6 をえた。

測定時の圧力は $p_t \sim 0.1$ mmHg, $p_f \sim 6$ mmHg, $p = 760$ mmHg, $p_3 \sim 0.8$ mmHg であった。なお p_3 は、 p_f に対応する装置内圧力において、あらかじめ測定しておいた値であり、1回の測定時間は数十分である。