油圧作動油のキャビテーション (第2報)*

——ステップ状減圧時の発生おくれ——

山 口 伸**

Cavitation in Hydraulic Fluid*

(2nd Report—Delay Time for Stepwise Reduction in Pressure)

Atsushi YAMAGUCHI**

In this paper experimental results concerning the delay time of cavitation in hydraulic fluids for stepwise reduction in pressure from atmospheric pressure to a given pressure are presented. In the same way as in a previous paper, the fluid under study is enclosed in the annulus between two concentric cylinders, the inner one being rotating and the outer one at rest.

1) In case of a paraffin based oil, the delay time is experimentally obtained for speeds of the inner cylinder n between 100 and 1000 rpm, pressures p_1 between 140 and 700 mmHg, a fluid temperature θ of $40^\circ\text{C} \pm 1$ deg and Reynolds numbers Re determined by the width of the gap and the peripheral velocity of the inner cylinder between 72 and 718. As n is increased, and as p_1 decreases, the delay time shortens. The delay time calculated on the basis of the diffusion theory agrees approximately with the experimental result in the high speed range but not in the low speed range.

The particulate contamination level of the oil is 0.11 mg/100 ml of ARP 785. In this connection, a few experiments were performed on oils, the contamination levels of which were changed by adding AC test dust up to a level of 3.5 mg/100 ml. However, no particular effect on the delay time was observed.

2) In addition to various petroleum based hydraulic fluids, water-glycol fluids, phosphate ester and tap water were also tested. The test were carried out with $n = 400$ rpm, p_1 from 140 to 450 mmHg, $\theta = 40^\circ\text{C} \pm 1$ deg and $Re \approx 220$. For the tap water, θ and Re were modified to 30° and 1.08×10^6 , respectively.

The longest delay time for incipient cavitation was obtained for water-glycol fluids and the second longest was for tap water. Petroleum based hydraulic fluids and the phosphate ester have almost same delay times, which are slightly longer than that for the paraffin based oil.

1. 緒 言

内筒の回転する同心円筒間に油圧作動油基油を封入した装置により、キャビテーションの発生条件を検討し、油の特性のほかに流れの状態としてずり速度（半径方向速度こう配）と減圧率（圧力の時間減少割合）とが大きな影響を及ぼすことを、前報¹⁾で明らかにした。たとえば、内筒（以下ロータとよぶ）回転速度一

定の場合には、減圧率（本報では絶対値をとる）が大きいほど気ほうの初生圧および全面発生圧が小さくなる傾向を示している。しかし、この実験の場合、減圧率は $5 \sim 40 \text{ mmHg/min}$ であり、一般のポンプやバルブに生じる値に比べ、きわめて小さい。

このため、本報においては、ステップ状の比較的大きな減圧率の場合を検討する。すなわち、まず一種類の石油系油圧作動油基油についてキャビテーションの発生おくれ（圧力変化開始からキャビテーションが観測されるまでの時間）とロータ回転速度、設定圧力との関係を調べ、拡散理論に基づく計算結果と比較する。ついで石油系油圧作動油、水・グリコール溶液、リン

*昭和49年11月25日 原稿受付(Received November 25, 1974)

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

酸エステルならびに水におけるキャビテーションの発生おくれについて実験を行い、相互の比較を行う。

2. 記 号

本報において使用する主な記号は、つぎの通りである。 C : 半径すきま (両円筒半径の差), n : ロータ回転速度, p : 圧力, p_1 : 設定圧力, p_a : 空気の高圧, R : ロータ半径, t : 時間, 発生おくれ, U : ロータ周速度, ν : 動粘度。

3. 実験装置および方法

実験回路を Fig. 1 に示す。装置本体は前報の装置 I と同様である (ただし $R = 56.30 \text{ mm}$, $C = 3.65 \text{ mm}$)。ステップ状の圧力降下を発生させるために、装置本体

the test apparatus is same as the No. 1 of the 1st report except that the radius of rotor $R = 5.63 \text{ cm}$ and the width of gap $C = 0.365 \text{ cm}$.

Fig. 1 Test circuit

と真空ポンプとの間に電磁弁 a 、真空タンクを設けた。また電磁弁 a と真空タンクとの間に孔径の異った絞りを挿入することによって、減圧率をある程度変えることができる。電磁弁 b は圧力をパルス状に変える場合に用いる。

本実験に使用した試料油の特性を Table 1 に示す。基油は前報の $p-2$ 油に対応する。基油については、室温大気圧下に放置したものを 40°C に設定した恒温槽内に大気と接した状態で数時間保った後、装置に封入した。恒温槽内での保持時間は、最大 36 時間まで変えたが、空気含有量の時間的変化はほとんど認められなかった。基油以外の試料については、室温大気圧下に放置したものをを用いた。Fig. 1 において、恒温槽出口のフィルタはろ過粒度 $5 \mu\text{m}$ であり、基油の汚染度は重量法 (ARP-785) で 0.11 mg/ml であった。

実験方法はつぎの通りである。電磁弁 a, b が閉の状態では真空タンク内の圧力を設定値まで減圧し、ロータを規定の回転速度で回転しておく。このとき試料の圧力は大気圧のままである。ついで電磁弁 a を開き、気ほうの初生および全面発生するまでの時間を測定する。圧力の測定には半導体圧力変換器を用い、ビジグラフ上に記録し、回転速度の測定は光電式回転計によって、気ほうの観察はストロボを用いた目視によって、その発生時刻は電池、ガルバノメータ、抵抗およびスイッチを結んだ回路のスイッチのオン、オフにより、ビジグラフ上に記録した。なお試料油の交換などの取扱いは、前報に同じである。

気ほうの発生状態をその初生と全面発生とで表示する方法は、前報と同じであるが、本実験の場合、状態が比較的早く変化するから、測定精度を高めるため判定基準をつぎのように定めた (基油の場合であり、他はこれに準じた)。気ほうの初生は、微小な気ほう (直径 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$) が円周方向に筋状に発生した状態をとる。回転速度 100 rpm では、これよりも大きな気ほう (直径 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$) が 1 ないし数個発生することがあり、この場合、それを初生とした。時間の経過につれ、低回転速度では、筋状にならんだ気ほうの中に大きな気ほう (直径 2 mm 以上) をまじえた状態が観察部全域に発生することが多くなる。高回転速度では、ほぼ大きさのそろった気ほう (直径約 1 mm) が長手方向に規則正しい間隔に並んだ筋状となって、観察部全域に発生することが多くなる。いずれにせよ、これらの状態を全面発生状態とした。

基油については、実験方法の検討上、特につぎの 2 点を調べた。まず回転速度を 400 rpm とし、圧力を大気圧として 30 分間保持した後圧力をステップ状に変化させたが、保持時間 2 ~ 3 分の標準方式と発生

Table 1 Properties of tested liquids

	kinematic viscosity ν [cSt] at 40°C *	dissolved air content a^{***} [%]	number of samples
paraffinic base oil	30.0	8.8	1
petroleum base hydraulic fluid	30.9 ~ 55.8	7.3 ~ 8.3	3
water-glycol	38.0 ~ 40.3	2.2 ~ 2.5	2
phosphate ester	42.0	5.8	1
tap water	0.80 **	2.5	

* test temperature, $40^\circ\text{C} \pm 1 \text{ deg}$ except water

** ν at 30°C

*** volumetric ratio converted to $760 \text{ mm Hg}, 0^\circ\text{C}$

おくれに差が認められなかった。また圧力の時間変化状態の発生おくれに及ぼす影響を調べたが、その実験結果を Fig. 2 に示す（数回の実験の平均値）。図で○印は初生を、●印は全面発生を示す。曲線 B, C は

○: incipient cavitation, ●: developed cavitation (bubbles are in a row at axially regular spaces), p: absolute pressure, t: time, initial pressure is atmospheric pressure, the curve A is adopted in this experiment

Fig. 2 Effect of the rate of pressure reduction $|dp/dt|$

装置本体と真空タンクとの間に絞りを入れた場合である。圧力の安定以後に初生する曲線 A と、それ以前に初生する B, C とでは、発生おくれに差が生じる。なお $|dp/dt|_{\max}$ は電磁弁開の際に生じるが、B, C ではきわめて瞬時的である。一方設定圧力 450 mmHg の場合、絞りの状態を同一とすると、安定時間は短くなるが圧力は Fig. 2 と同様の変化をしめす。そしていずれの場合も安定以後は初生し、発生おくれはほぼ一致した。以上により、本実験では、絞りをを用いない状態で圧力を変化させることとした。この結果、実験の範囲内では、発生おくれは安定時間より大きくなり、圧力変化をステップ状であると認めることができる。

4. 実験結果および考察

4-1 石油系油圧作動油基油

基油については、ロータ回転速度 100~1000 rpm、設定圧力 140~700 mmHg の範囲で実験を行った。ロータ表面でのずり速度の最大値は $1.8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 、レイノルズ数 CU/ν の最大値は 718 である。

Fig. 3, Fig. 4 は設定圧力一定のもとにロータ回転速度の影響を示したもので、縦軸はロータ回転速度、横軸は圧力変化開始からキャビテーション発生までの時間、発生おくれである。Fig. 3 は設定圧力 450 mmHg の場合、すなわち圧力を大気圧から 450 mmHg までステップ状に変化させた場合の初生（○

p_1 : setting pressure, t: delay time (the time required from the beginning of pressure change to the occurrence of cavitation).

Fig. 3 Effect of rotor rotational speed n

Fig. 4 Effect of rotor rotational speed

Fig. 5 Effect of setting pressure

Fig. 6 Effect of setting pressure

Fig. 7 Effect of setting pressure

印)と全面発生(●印)を示す。Fig. 4は設定圧300 mm Hgの場合である。発生おくれは回転速度の増加につれ減少するが、高回転速度での初生に対する減少の程度は小さくなっている。Fig. 5～Fig. 7は回転速度100, 400, 700 rpmの場合の設定圧力の影響を示す。縦軸は設定圧力、横軸は発生おくれである。Fig. 5, Fig. 6には、比較のため前報と同様の方法により減圧率5 mm Hg/minとして求めた初生点、全面発生点をそれぞれ□, ●として記入してある。図

Fig. 8 Diffusion of gas

から回転速度が大きくなるほど、発生おくれに対する減圧率の影響の大きいことがわかる。

ここで、発生おくれについて、拡散理論に基づいて検討する。ただし取扱いとしては、近似解報²⁾を適用する。Fig. 8において、液体が一定速度 u_0 で x 方向に流れるとき、拡散方程式は

$$u_0 = \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (1)$$

となる。ここに c : 空気の溶解度、 D : 液と空気間の拡散係数。圧力のステップ状変化に対し境界条件は

$$\left. \begin{aligned} x=0: c &= c_\infty \\ y=0: c &= c_0 \\ y=\infty: c &= c_\infty \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ここに c_0 : 変化後の圧力に対する c 、 c_∞ : 変化前の圧力に対する c である。(2)式を満たす(1)式の解は次式となる。

$$\frac{c}{c_0} = 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{c_\infty}{c_0} - 1 \right) \int_0^{\frac{y}{\sqrt{4Dx/u_0}}} e^{-\eta^2} d\eta$$

局所物質移動速度は

$$N_y(x) \Big|_{y=0} = D \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{c_0}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{c_\infty}{c_0} - 1 \right) \sqrt{\frac{u_0 D}{x}}$$

であり、空気の平均物質移動速度は

$$\begin{aligned} N_{avg} &= \frac{1}{L} \int_0^L \int_0^w N_y(x) \Big|_{y=0} dx dw \\ &= (c_\infty - c_0) \sqrt{\frac{4Dw_0}{\pi L}} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここに L : x 方向寸法、 w : z 方向寸法である。(3)式で L/u_0 は液体が空気と接している時間を表わすから、本実験の場合、つぎのように算定できよう。速度こう配は近似的に U/C 、気ほうはこの速度こう配に基づきその中心に相当する速度で運動しているとすると、周囲の液体との相対速度の最大値は、気

ほう直径を d として、 $(U/C)d/2$ となる。これを u_0 とする。 L としては d をとるから

$$L/u_0 \approx 2C/U$$

となる。

気ほう内空気重量の増加割合 $(d/dt)(\pi d^3 \tau / 6)$ は、気ほう表面からの空気の移動量 $\pi d^2 N_{avg}$ に等しいことから、気ほうの d_0 から d までの成長所要時間 t は

$$t = \tau(d - d_0) / (2N_{avg}) \quad (4)$$

となる。ここに τ : 変化後の圧力に対する空気の単位体積当り重量である。 $D: 6.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, $c_\infty/\tau = 0.088$, $d = 10d_0$, $d_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}$ とした成長所

p_s : saturation pressure of air = atmospheric pressure in this experiment

Fig. 9 Comparison of the calculated delay time to the incipient cavitation with the experimental results

要時間を Fig. 9 に示す。ここに用いた拡散係数は、静止した油中で気ほうを壁面に接触させておき、圧力をステップ状に増加させたときの気ほう直径の減少から、次式に求めた値である。すなわち静止液体中におかれた球形気ほうからの気体の拡散に対して、拡散方程式の対流項を近似的に考慮すると

$$\frac{d\epsilon}{dx} = - \left(1 - \frac{c_\infty}{c_0} \right) \left(\frac{\varphi_1}{\epsilon} x + 2\varphi_2 b \right) \quad (5)$$

が成立³⁾。ここに $\epsilon = d/d_0$, $x^2 = 8Dc_0 t / \tau d_0^2$, $\varphi_1 = 0.9253 \sqrt{3/\pi}$, $\varphi_2 = \sqrt{3}$ であり、 $\varphi_1 = \varphi_2 = 1$ とすると、対流項を無視した場合⁴⁾と一致する。この実験では $d_0 \approx 0.1 \text{ cm}$, $c_\infty/c_0 = 4 \sim 6$ とした。ただし実験時の油温が約30℃であったため、拡散係数と粘度 μ 、絶対温度 T との間に成立⁵⁾関係⁵⁾

$$D\mu/T = \text{一定} \quad (6)$$

を用いて40℃における値を算出した。なおFig. 9の $n=0 \text{ rpm}$ の曲線は、(1)式では非定常項を含めていないために、(5)式の過飽和状態に対応する式

$$\frac{d\epsilon}{dx} = \left(\frac{c_\infty}{c_0} - 1 \right) \left(\frac{\varphi_1}{\epsilon} x + 2\varphi_2 b \right) \quad (5')$$

より算出した。

Fig. 9 には初生に対する発生おくれの実験値も記入してある。理論値と実験値とは、 $n=400 \text{ rpm}$, 700

rpmの場合大よそ一致するが、 $n=100$ rpmの場合は差が大きく、実験値は $n=0$ rpmの理論値とほぼ等しくなっている。この原因として、拡散係数はパラフィンの大きな値であることとともに、理論における L の取扱いが、低回転速度や気ほう径の小さい場合に、不適当であることが考えられる。しかし $n=0$ rpmでは、実験の圧力範囲内で30分間の保持に対しても初生がみられなかったにもかかわらず、理論値がかなり低くなっている点からみて、基本的には、特に低回転速度において、比較的大きな気ほうが存在している場合（拡散係数を求めたときのように）、気ほうが存在していてもそれが小さい場合とで、同じ拡散係数を用いる点に無理があるためと考えられる。これと関連して表面張力の影響について検討しておく。 $n=0$ rpmの場合、表面張力を考慮すると²¹⁾、 $A/p_0=0.1$ において発生おくれは約18%増加するが、 A/p_0 の増加につれ増加割合は減少する。また $d_0=2 \times 10^{-4}$ cm、 $d/d_0=100$ としても、 $A/p_0=0.1$ において、発生おくれが約17%増にすぎない。なお理論計算における d の値 2×10^{-4} cmは、明らかに観察できる気ほう径の最小値として選んだ。

以上はステップ状の減圧に対する事柄であるが、減圧と増圧とをFig. 10のように加えた場合、つぎのよ

Fig. 10 Schematic diagram for pulse change of the pressure

うな結果がえられた（ロータ回転速度 400 rpm、設定圧力大気圧と 350 mm Hg）。ただし実験方法としてステップ状の増圧は、Fig. 1の電磁弁 a, b について、ほぼ同時に b を開き a を閉じることによって与えた。図示の時間 t_1 内に気ほうが発生した場合には圧力増加とともに気ほう径は小さくなり、もちろん全面発生には至らない。 t_1 内に気ほうの生じない場合には、大気圧下で数分間保持しても気ほうは生じない。この場合に、 $t_0=1 \sim 6$ s として再び減圧すると、初生および全面発生までの時間 t_2, t_3 は共に単純なステップ状減圧の場合より短くなる。ところで t_1+t_2, t_1+t_3 について比較すると、平均値として単純ステップの初生と全面発生に対する発生おくれにほぼ同じになる（7回の実験の平均として、 $t_1=1.9$ s, $t_2=4.0$ s,

$$t_1+t_3=3.2 \text{ s}, t_1+t_3=7.8 \text{ s}).$$

以上の結果から、気体状キャビテーションの発生防止の1つの対策として、キャビテーションの発生おくれを利用することが可能であることがわかる。

すでに記したように基油の汚染度は重量法で 0.11 mg/100 ml であるが、その影響を確かめるために AC テストダストを加え 3.2~3.5 mg/100 ml とし、ロータ回転速度 400 rpm、設定圧力 125~450 mm Hg で実験を行ったが、初生、全面発生とも発生おくれに差は生じなかった。

4.2 各種油圧作動油

Table 1 に示した基油を除く各種油圧作動油について、ステップ状の減圧を加えた場合の発生おくれを Fig. 11~Fig. 14 に示す。いずれもロータ回転速度は 400 rpm、温度は水（約 30℃の室温）を除いて

Fig. 11 Delay time of petroleum base hydraulic fluids at $n=400$ rpm

40℃=1 deg としている。Fig. 11 は3種類の石油系油圧作動油（市販品）の設定圧力と発生おくれの関係を示す。高い設定圧力でパラフィンの大きい作動油があるが、3種間では発生おくれにあまり大きな差はない。4.1 に記した基油よりも発生おくれは大きい。

Fig. 12 Delay time of water-glycol fluids at $n=400$ rpm

Fig. 12 は2種類の水-グリコール溶液の場合を示す。特に初生に対する発生おくれが大きく、石油系作動油の10倍程度となっている。石油系作動油に比べ初生と全面発生とが時間的に接近しているのは、気ほうの発生様式に差があるためである。すなわち、まず微小な凝点がほぼ装置全面に発生し（初生とする）、ついで凝点が成長し筋状となる（全面発生とする）。

Fig. 13 Delay time of phosphate ester at $n = 400$ rpm

test temperature $\pm 30^\circ\text{C}$, air content of filtered tap water = 2.6%,
the flow is turbulent

Fig. 14 Delay time of water at $n = 400$ rpm

Fig. 13 はりん酸エステルの場合であり、発生おくれはほぼ石油系作動油に同じである。Fig. 14 は水道水の場合で、初生に対する発生おくれは水-グリコール溶液と石油系作動油の中間となっている。発生様式は水-グリコール溶液にほぼ同じである。

Fig. 11 ~ Fig. 13 においてレイノルズ数 $CU/\nu \approx 2.2 \times 10^3$ であるが、Fig. 14 では 1.08×10^4 (テイラー数 2.75×10^3) であり、水の場合流れは乱流とみなせる。したがって気ほうの発生には乱流拡散を考慮しなければならない。しかし気体と液体との界面においては、渦運動が減衰され乱流拡散が卓越した効果を示し得ない⁶⁾。このことがテイラー渦を伴ってはいるが層流流動となっている他の液体に比べ発生おくれにあまり差の生じない原因であろう。

なお Fig. 14 にはメンブランフィルタ ($0.45 \mu\text{m}$) でろ過した水道水 (空気含有量 2.6%) の場合の平均値も示してあるが、発生おくれは多少短くなっている。この差は試料採取から実験までの放置時間がろ過水の場合短かったこと (空気含有量の差もこれに原因すると考えられる) に基づくと思われる。また参考までにイオン交換樹脂処理をした水道水 (いわゆる純水) についても発生おくれを測定したが、未処理の水道水より約 10 倍ほど発生おくれが長くなった。この主要な原因は空気含有量の差 (純水は 2.1%) にあると思われる。

5. 結 言

内筒の回転する同心円筒間に水道水、基油を含む各種油圧作動油を封入し、圧力をステップ状に減少させて、キャピテーションの発生おくれを求めた。特に基油については、拡散理論に基づく計算値と比較した。

試料油の提供を受けた三菱石油会社、シェル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君と当時学生木村久幸君に謝意を表す。

文 献

- 1) 山口：油圧作動油のキャピテーション (第 1 報、せん断流下の初生)、油圧と空気圧、5-2, 79/85 (1974)
- 2) R.B. Bird et al.: Transport phenomena, 539, John Wiley (1960)
- 3) 島・辻野：水中におけるガス気泡の溶解と成長、機械学会講演論文集、730-6, 71/74 (1973)
- 4) P.S. Epstein & M.S. Plesset: On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions, J. Chem. Phys., 8-11, 1505/1509 (1950)
- 5) 佐藤：物性定数推算法、308, 丸善 (1962)
- 6) J.T. Davies: Turbulence phenomena, 186, Academic Press (1972)

■ 前号主要目次 ■

【展望】	レジャー産業における空気圧の応用	南 誠	181
【研究】	同軸対向衝突噴流の定常特性	山本圭治郎・野本 明・横山 雅夫	188
〃	液体管路系の周波数特性の図式計算法	鈴木 勝正	197
【教室】	[XIX] フルイディクス (1)	原田 正一	203
【講座】	アキシシャルピストンポンプの弁板面における軸受スラスト	上原 一男・石原 智男	209
【解説】	コンタミネーション・コントロール (3)	山下 憲一	217