研 究

円筒絞りの非定常キャビテーション特性*

柯 堅**, 山 口 惇***

Cavitation Characteristics of Long Orifices in Unsteady Flows

Jian KE and Atsushi YAMAGUCHI

As regards fluid power systems, cavitation under unsteady flow conditions plays an important role regarding their dynamic characteristics. To clarify the unsteady cavitation mechanisms, as the first step, cavitation of long orifices in unsteady flows was studied. Sinusoidal and stepwise flows were obtained from a variable displacement piston pump. Long orifices made of steel were 2.0mm and 2.5mm in diameter, and the length/diameter ratios were 5.0 and 4.0 respectively. The fluid tested was ISO VG 32.

Gavitation was detected mainly in the pressure ripples obtained by the pressure sensor positioned on the outlet side of the orifice. Also, a strobo-light and TV camera was used to observe the cavitation clouds.

The test results, related to inception and desinence of cavitation choking, were mainly shown as the relationship between cavitation number and the amplitude and frequency (0.0~1.0Hz) in case of the sinusoidal flow, and the step height of the stepwise flow. In conclusion, it could be shown that the cavitation in an unsteady flow occurs much easier than that in a steady flow and discontinuous cavitation choking with stepwise flow input could be explained by the numerical results for the unsteady pipe flows.

Keywords: Cavitation, Cylindrical orifice, Unsteady flow, Hydraulic system, Cavitation number for chokings

1. ま え が き

定常条件下でのキャビテーションの機構については、従来から多くの研究がある。しかしながら、油圧システムでは非定常流れのキャビテーションが問題となる場合は多い。山口ら¹⁾²⁾は円筒絞りを通る流れの圧力や流量をステップ状に変えた場合のキャビテーションの発生遅れと気泡の成長解析を行った。BackeとRiedel³⁾は円筒絞りについて、下流圧力を正弦波に変化させた場合のキャビテーションの初生と消滅を報告した。また最近、青山ら⁴⁾は円筒絞りの下流圧力を台形波状に変化をさせた場合の非定常キャビテーションについて、キャビテーション係数との関連について研究した。

しかし、非定常キャビテーションの発生機構に関し、掘り下げた研究はほとんどない。本研究は、この目的のための研究の一環であって、円筒絞りの入口にス

テップ状流量あるいは正弦波状流量を加え、非定常キャビテーションの特性に関する実験を行い、流量の振幅、周波数等とキャビテーションの発生や消滅の関係を明らかにする。

2. 記 号

- D : 管路直径 (m)
- d : 絞りの内径 (m)
- f : 流量変動の周波数 (Hz)
- k_{ci} : 閉塞発生に対するキャビテーション係数
- k_{cd} : 閉塞消滅に対するキャビテーション係数
- L : 絞りの長さ (m)
- p_1 : 絞り入口圧力 (MPa)
- p_2 : 絞り出口圧力 (MPa)
- p_3 : 絞り下流圧力 (バルブ3の入口圧力) (MPa)
- p_v : 油の蒸気圧力 (MPa)
- q : 流量 ($\text{cm}^3/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)
- q_0 : 平均流量 ($\text{cm}^3/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)
- q_a : 振幅流量 ($\text{cm}^3/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)
- Re : レイノルズ数
- θ : 油温 ($^{\circ}\text{C}$)

*平成6年6月17日 原稿受付

**横浜国立大学大学院工学研究科

***横浜国立大学工学部

(所在地 〒240 横浜市保土ケ谷区常盤台156)

ρ ：油の密度 (kg/m^3)

ν ：油の動粘度 ($\text{mm}^2/\text{s}=10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)

c ：音速 ($1.33 \times 10^3 \text{m/s}$)

3. 実験装置および実験方法

実験回路をFig. 1に示す。ピストンポンプ吐出し口から絞り入口までの管路長さは1.9m, 絞り出口から p_3 測定点までの管路長さは0.16m, 絞り出口から管路端(タンク)までの管路長さは5.9m, 管の内径 D は0.014m, 絞り出口と p_2 の測定点までの管路長さは0.014mである。定常流の実験において, 管路の Re は40~450の層流範囲内なので, p_3 の測定点からタンク入口までの圧力損失は $128\rho\nu L_c q/\pi D^4$ で表せよう。ここに, L_c は冷却器などの圧力損失を含めた管路等価長さで, $Re=40$ の場合 $L_c=7.4\text{m}$, $Re=450$ の場合 $L_c=8.9\text{m}$ に対応する。供試流体は石油系作動油ISO VG32である。

絞りは入口に丸味のない円筒絞り(材質はS45C)で, $L=10\text{mm}$, $d=2.0\text{mm}$, $L/d=5$ および $L=10\text{mm}$, $d=2.5\text{mm}$, $L/d=4$ の二つを用いた。ポンプとして, 押しつけ容積 $15.8 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{rev}$ の変容容量形ピストンポンプを用いた。ポンプの流量設定電圧値と流量の関係は, 定常流量下で質量法を利用して実験的にチェックした。ステップ状流量設定電圧と絞り入口での流量の遅れは, 流量の増加に対し0.20s, 減少に対し0.21sであることを, ターゲット流量計*によって確かめた。以上の結果に基づき, キャビテーション実験では, キャビテーションに影響を及ぼす恐れのある流量計を取り除き, 設定電圧を基準とした。冷却器によって油温一定(差±

Fig. 1 Experimental Circuit

弾性体で片持ちはり状に吊るした円板の円形端面に流れを垂直に当てると, 質量流量のほぼ二乗に比例する力が検出される。この力と流量との関係を利用して流量を求める流量計をターゲット流量計と呼び, 原理的に高周波の非定常流に適用できる(液体で100Hz)。

1°C)を実現した(主な実験温度23°Cにおける密度は 861kg/m^3 , 動粘度は $75\text{mm}^2/\text{s}$)。

圧力センサ1, センサ2で絞りの入口圧力と出口圧力を測った。絞り観測部はアクリル樹脂製でキャビテーション気泡の発生点, 消滅点等が観測でき, そして, ビデオカメラでこの過程を連続的に撮影した。正弦波状流量に対する実験方法は, q_0 , q_a , p_3 , θ , f のうち一つをパラメータとして変化させて, p_1 , p_2 を記録した。ステップ状流量に対する実験方法は, 一定値の q_0 , q_a , p_3 を選定して, 絞り入口流量をステップ状に変化させ, p_1 と p_2 をビジュグラフに記録した。いずれの場合も, 主として p_2 に含まれる高周波変動の有無を基準として, キャビテーション状態を判定した。なお, 本報においてキャビテーション係数は以下のように定義する。

$$k_{ci} = [p_2 - p_v] / (p_1 - p_2)_{ci}$$

$$k_{cd} = [(p_2 - p_v) / (p_1 - p_2)]_{cd}$$

4. 実験結果と考察

1) 正弦波状流量変化

Fig. 2に, ポンプ吐出し量を正弦波状に変化させた場合の, 絞り入口圧力と出口圧力の変化およびキャビテーション閉塞の発生と消滅を示す。図(a)は, $d=2.0\text{mm}$, $\theta=23^\circ\text{C}$, $q_0=90.9 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$, $q_a=30.4 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$, $p_3=0.19\text{MPa}$, $f=0.2\text{Hz}$ の場合である。図において, 下流バルブ3の開度は固定してある。絞り入口の流量が正弦波状に増加すると, p_1 も正弦波状に増加する。出口圧力 p_2 に着目すると, 流量の増大につれ, 微小振動が加わり, ついに点Aでキャビテーション閉塞を生じる。この時, p_2 は0.022MPaの急激な上昇を示し, ついで激しい振動が始まる。点Aでは, 上流圧力および瞬時流量がほとんど変わらないので, 流量係数はわずかではあるが, 増大したことがわかる。従来の実験

Fig. 2(a) Sinusoidal flow input

Fig. 2(b) Sinusoidal flow input

データから判断して、物理的には、絞り入口から気相によるノズル状流路が短時間に形成され、流動抵抗が多少減少したためと考えることができる^{*}。なお、閉塞期間において、 p_1 には特別の振動は生じない。逆に、点Bでは、流量の減少によって絞り内の気相流路が壊れ、キャビテーション閉塞は消滅し、流動抵抗は多少増加する。この時に、 p_2 は0.015MPaだけ急激に降下し、激しい振動も無くなる。ただし、 p_1 にも0.052MPaの上昇（点C）があり、流量係数の減少の程度は閉塞発生時よりも大きいことがわかる。 p_2 の不連続的上昇、降下の大きさは p_3 、 q_0 、 q_a の大きさによって変わる。 p_2 が不連続的に上昇あるいは降下する現象は、閉塞を生じないオリフィス絞りでは測定されない⁵⁾。

定常流下の絞りのキャビテーションでは、 k_{cd} は k_{ci} より大きい、すなわち、 $k_{cd} - k_{ci} > 0$ である^{6)~8)}。この結論は、正弦波状流量変化にも成立つ。すなわち、図(a)において、閉塞の発生点(A)から圧力最大点までの時間は1.3s、閉塞消滅点(B)から圧力最大点までの時間は1.7sである。従って、キャビテーション閉塞の遅れがはっきり認められる。図(b)に流量の周期とキャビテーション閉塞の周期が異なる場合を示す。ただし、実験条件は、 p_3 が0.11MPaであることを除いて、図(a)の場合と同じである。

Fig. 3に、Fig. 2(a)の条件下で、ビデオカメラで撮影したキャビテーション閉塞の発生と消滅過程の写真を示す。16枚の写真を並べているが、時間は左から右へ、上から下へと移る。この場合、時間間隔は約0.37sである。時間順の第5コマが閉塞発生時に、第13コマ

^{*}閉塞が進展すれば、気相部分の変動が著しくなり、このようなノズル状流路の形成は不可能となる。ここでは、閉塞の発生や消滅に注目して検討している。

Fig. 3 Sinusoidal flow input

Fig. 4 Effect of f on cavitation

が消滅時に、ほぼ対応する。

a) キャビテーション特性に対する周波数の影響

Fig. 4にキャビテーション閉塞の発生、消滅に対する周波数の影響を、キャビテーション係数について示す。同条件($\theta = 23^\circ\text{C}$, $q_0 = 90.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $q_a = 30.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $p_3 = 0.11 \text{ MPa}$)の下で、周波数 f を0.015から1.0Hzまで変化した実験である。この範囲で k_{cd} 、 k_{ci} はほとんど変わらないが、絞り直径の増加によって係数値は増加する(q_0 に対応する絞りの Re は、 $d = 2 \text{ mm}$ に対し771、 $d = 2.5 \text{ mm}$ に対し617である)。なお、1.0Hz以上の周波数において、いったん閉塞が発生すると消滅しない場合も認められた。この現象はキャビテーションの遅れに基づき、閉塞の消滅している期間の長さが少なくなっていくために生じる。すなわち、キャビテーションは、周波数 f が設定条件より大きくなると、閉塞が連続的に発生する傾向となり、一方図の条件下で f

 Fig. 5 Effect of q_a on cavitation

 Fig. 7 Effect of p_3 on cavitation

 Fig. 6 Effect of q_0 on cavitation

→ 0 では q_0 に対してキャビテーション閉塞状態となる。

b) キャビテーション特性に対する振幅流量の影響

Fig. 5に $q_0 = 90.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $f = 0.2 \text{ Hz}$, $\theta = 23^\circ \text{C}$, $p_3 = 0.11 \text{ MPa}$ の条件下でのキャビテーション特性に対する振幅流量の影響を示す。振幅 q_a の増加につれ、 k_{ci} , k_{cd} は多少変化する。 $d = 2.0 \text{ mm}$ の絞りに対して q_a が $30 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の場合、キャビテーション閉塞は発生すると消滅しない。 $d = 2.5 \text{ mm}$ の絞りに対しては、 q_a が $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下になると同様であった。なお q_a が $55 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($d = 2.0 \text{ mm}$), $60 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($d = 2.5 \text{ mm}$) 以上については、装置容量の不足で実験できなかった。設定条件より振幅 q_a が増大すると、キャビテーション

閉塞は期間が短くなり、断続する傾向へ発展するが、振幅 q_a が減少すると、期間が長くなり、連続する傾向へいく。

c) キャビテーション特性に対する平均流量の影響

Fig. 6は、 $q_a = 30.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $f = 0.2 \text{ Hz}$, $\theta = 23^\circ \text{C}$, $p_3 = 0.11 \text{ MPa}$ の下に、 q_0 の影響を示す。 q_0 の k_{ci} , k_{cd} に及ぼす影響は小さい。 $d = 2.0 \text{ mm}$ に対し、 $q_0 < 64 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ でキャビテーションの閉塞の発生と消滅が周期的にくり返された。 $d = 2.5 \text{ mm}$ の絞りに対して q_0 が $82 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ぐらいの場合には、周波数によりキャビテーション閉塞を生じたり、生じなかったりしたが、多少平均流量が増加すると、閉塞は流量正弦波に従って周期的に発生、消滅した。 q_0 がそれぞれ $92 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $121 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以上になると、キャビテーション閉塞は持続した。

d) キャビテーション特性に対する下流圧力 p_3 の影響

Fig. 7は、 $q_a = 30.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $f = 0.2 \text{ Hz}$, $\theta = 23^\circ \text{C}$ とし、 q_0 を $90.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($d = 2.0 \text{ mm}$), $120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($d = 2.5 \text{ mm}$) とした場合の、 p_3 とキャビテーション閉塞係数の関係を示す。特に k_{ci} , k_{cd} は p_3 の増加につれ、増加する。ただし、 $d = 2.0 \text{ mm}$ と $d = 2.5 \text{ mm}$ の絞りに対して、 p_3 がそれぞれ 0.27 MPa , 0.30 MPa になるとキャビテーション閉塞の生じない期間が認められた。

e) キャビテーション特性に対する油温の影響

Fig. 8は油温 θ による k_{cd} , k_{ci} の変化を示す。 $q_0 = 90.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $q_a = 30.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $f = 0.2 \text{ Hz}$, $p_3 = 0.11 \text{ MPa}$ の場合である。油温が高いほど k_{cd} , k_{ci} が大きくなる。つまり、キャビテーション期間が長くなる。なお、 $d = 2 \text{ mm}$ ($q_0 = 90.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) に対し $\theta = 17$,

Fig. 8 Effect of θ on cavitation

Fig. 9(a) Step flow input

Fig. 9(b) Step flow input

23, 30°Cでの絞りの Re は、それぞれ597, 771, 1157であり、 $d=2.5\text{mm}$ に対しては、477, 617, 925であった。

2) ステップ状流量変化

Fig. 9にポンプ吐出量をステップ状に変化させた場合の圧力 p_1 と p_2 の変化を示す。 p_3 をパラメータとすると、図9(a)(b)に示す結果を得た。図(a)は $d=2.0\text{mm}$ 、 $q_0=73.4\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $q_a=34.2\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $p_3=0.25\text{MPa}$ であり、流量増加の初めにキャビテーション閉塞状態が発生していたが、時間の経過につれ、閉塞は消滅した。 p_1 は閉塞の消滅した後、0.079MPa(点D)増加し、 p_2 は0.024MPa減少した。同図(b)は、同じ振幅流量で、 $d=2.5\text{mm}$ 、 $q_0=83.1\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $p_3=0.145\text{MPa}$ の場合であり、初めキャビテーション閉塞は発生していないが、時間の経過につれ、閉塞が発生した。この場合、 p_1 には変化は認められなかった。なお、図(a), (b)と同じ条件下で、 $q_0+q_a=107.6, 117.3\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ に相当する定常流の場合では、キャビテーションは初生状態であるが、閉塞状態に達していない。定常流量をそれぞれ $0.8\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1.2\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ だけ増加すれば、キャビテーション閉塞は q_0+q_a の範囲で連続して発生する。このことから、Fig. 9は q_0+q_a においてキャビテーション閉塞が持続しない場合を、特に選び出していることになる。念のため付言する。

5. 理論的考察

1) 正弦波状流量変化

ポンプ出口から絞り入口までの管路、および絞りの出口からタンクまでの管路に、波動方程式（一次元、非粘性）を適用し、円筒絞り部に次式（定常値に基づく慣性、圧縮性、粘性を考慮したモデル）を用いて、 $d=2.0\text{mm}$ に対する周波数特性を計算した。結果をFig. 10に示す。

$$\begin{pmatrix} Q_2 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{V}{K}\xi s & \frac{V}{K}s \\ R_1 & 1 + \frac{\rho LV}{A_0 K}s^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ P_1 \end{pmatrix}$$

$$R_1 = -\left(\xi + \frac{\rho L}{A_0 K}s + \frac{\rho LV}{A_0 K}s^2\right); \xi = \frac{128\mu L}{\pi d^4}$$

ここに P_1, Q_1 :絞り入り口圧力と流量、 P_2, Q_2 :絞り出口圧力と流量、 A_0 :絞りの断面積($=\pi d^2/4$)、 K :体積弾性係数、 V :絞り部容積、 s :ラプラス変数。図の縦軸は絞りの入口圧力とポンプ吐出し流量の比で、横軸は周波数である。本実験のように低周波数範囲では、ポンプと絞り入口の管路は絞り入口圧力にほとんど影響しないことが分かる。

2) ステップ状流量変化

Fig. 11は、流量のステップ状変化($q_0=0$ 、 $q_a=107.6\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 、 $d=2.0\text{mm}$ 、 $\theta=23^\circ\text{C}$)に伴う絞り出入口の圧力の理論計算結果である。計算は、前の計算にJohnson方法⁹⁾を適用して行った。図において、横線

Fig. 10 Frequency characteristics of long orifice

Fig. 11 Step response of pressure

p_{10} は定常流量 $107.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 下での p_1 である。ステップ状流量下での圧力の最大値は定常時より 0.09 MPa ほど大きい。この波動がステップ状流量増加の場合、キャビテーションが定常状態より少ない流量で生じる原因であり、またときどき消滅する原因でもあると説明できる。

6. 結 言

1) 円筒絞りの非定常キャビテーション特性について実験的研究を行い、流量の非定常性がキャビテーション閉塞の発生、消滅に影響し、非定常流の閉塞キャビテーション係数 k_{cd} 、 k_{ci} は定常流の係数より大

きくなることを明らかにした。

2) 正弦波状の流量に対し

- k_{cd} 、 k_{ci} は周波数 f の低い範囲内で、変化しない。
- 平均流量 q_0 、振幅流量 q_a の k_{cd} 、 k_{ci} に及ぼす影響は少ない。
- 下流圧力 p_3 が増加すると、 k_{ci} 、 k_{cd} は大きくなるが、キャビテーション閉塞の発生期間は短くなる。
- 油温が高くなると k_{ci} 、 k_{cd} は大きくなるが、1周期中におけるキャビテーション閉塞の発生期間は長くなる。

3) 流量をステップ状に増加させると、定常流でのキャビテーション閉塞発生の流量より少ない流量下で、キャビテーション閉塞は発生する。減少する場合は、定常流でのキャビテーション閉塞消滅の流量より小さな流量になって、消滅する。絞り出口圧力 p_2 はキャビテーション閉塞の発生点および消滅点でステップ状に増加、減少する現象を示した。

4) ステップ状流量変動下のキャビテーション閉塞に対する定常流との差異は、ポンプ出口からタンクまでの油柱の慣性効果と圧縮性効果により説明できる。

参 考 文 献

- 山口，油圧作動油のキャビテーション（第3報），油圧と空気圧，9-2（1978），113/119
- 山口，油圧作動油のキャビテーション（第4報），油圧と空気圧，10-6（1979），368/374
- Backe, W. und Riedel H.P.: Kavitation in Olhydraulischen Systemen, Ind. Anz. 94-8（1972），153/158
- 青山ら，円筒絞りのキャビテーション特性，機論B，57-544（1991），3991/3996
- 柯，山口，オリフィスの非定常キャビテーション特性，平成6年春季油空圧講演会論文集（1994）
- 日比，市川，宮川，円筒絞りの特性，油圧と空気圧，2-2（1971），72/80
- 稲熊，日比，油圧2段絞りのキャビテーション（第1報），油圧と空気圧，19-7（1988），572/579：（第2報），20-1（1989），77/83：（第3報），20-4（1989），3363/343
- 市川，日比，井上，2次元絞りにおける油のキャビテーション，油圧と空気圧，15-7（1984），545/551
- 増淵，自動制御基礎理論（1989），83/85，コロナ