水グリコール系作動油使用時のキャビテーションに関する研究*

(円形オリフィス型絞り部の場合)

片倉 寛** 辻 茂** 山田勝彦*** 山田尚志**** 大古 淳*****

Cavitation in Water-glycols (at a Circular Orifice)

Hiroshi Katakura**, Shigeru Tsuji**, Katsuhiko Yamada***,
Naoshi Yamada****, Atsushi Ohko*****

In this report, some effects of the water contents of water-glycols, which are typical water-base fire-resistant hydraulic fluids, on the cavitation characteristics at a circular orifice are mainly presented. All the results were obtained experimentally. Tap water and petroleum-base hydraulic fluid were also tested to compare the experimental results with the water-glycols. The water contents of the water-glycols tested in this experiment were from 46 wt% to 90 wt%, the diameter and length of the orifice were 2 mm and 1.5 mm, respectively. The pressures in the higher reaches, P_u , and in the lower reaches, P_l , in this experiment were $1 \text{ MPa} \leq P_u \leq 6 \text{ MPa}$ and $0.1 \text{ MPa} \leq P_l \leq 3 \text{ MPa}$, respectively.

The information below is some of the results of this report.

- (1) When the water-glycols with a higher water content were tested at the temperature $T = 20^\circ\text{C}$ and the pressure $P_u = 2.1 \text{ MPa}$, flow coefficients at the orifice clearly reached their local maximums near the points of cavitation inceptions.
- (2) When the water-glycols with a lower water content were tested at the temperature $T = 20^\circ\text{C}$, cavitation coefficients at the points of cavitation inceptions increased with an increase in the pressure P_u .
- (3) When the water-glycol with a water content of 90 wt% were tested at the temperature $T = 20^\circ\text{C}$, cavitation coefficients at the points of cavitation inceptions decreased with an increase in the pressure P_u .

1. 緒言

近年、省資源や安全性に対する社会的要求は多大なものとなってきている。油空圧機器を利用する分野も例外ではないように思われる。特に、油圧機器内で大

量に使用されている作動油として、従来、主として、鉱油系作動油が利用されてきたため、石油資源の枯渇の影響や防火上の難点が無視できないものとなっている。以上の理由により、その将来性を大きく期待されている作動油が、水グリコール系作動油等の、含水系難燃性作動油である。

この含水系難燃性作動油を利用する際の、重要かつ未解決の問題の一つが、この作動油の使用時に発生するキャビテーション現象である。

キャビテーション現象に関する研究は、19世紀以来、

* 昭和57年11月29日 原稿受付
** 東京工業大学工学部
*** 三菱重工業株式会社 広島研究所
**** 東京工業大学大学院
***** 日野自動車工業株式会社

オリフィス型絞り部上流側圧力 P_u および、下流側圧力 P_l は、3個の絞り弁 (Fig. 1のD・E・H) の開度を調整することにより設定され、2個のブルドン管圧力計 (Fig. 1のK・L) と2個の半導体圧力変換器 (Fig. 2のF・G) により測定された。各供試液体の温度 T は、管路系に取り付けられた2個の油冷却器 (Fig. 1のJ・M)、および、油タンク内の電気ヒータにより、設定温度 $\pm 1^\circ\text{C}$ に保たれていた。また、絞り部より約2cm下流側の、比較的に明瞭にキャビテーションによる光電子増倍管 (Fig. 2のE) の出力の変化が現われる位置において、噴流軸を垂直に、波長632.8nm・ビーム径0.8mmのレーザ光線が横切っており、この光の一部が、気泡等により散乱され、噴流軸およびレーザ光線に垂直な位置に置かれたこの光電子増倍管に到達するようになっていた。絞り部 (Fig. 2のC) 付近における発生音の測定は、ガラス窓 (Fig. 2のD) から1cm程度離れた位置にマイクロフォンを設置することにより行なわれた。

本研究においては、含水率 C_w の異なる、

供試液体A： 鉱油系作動油 ($C_w \approx 0 \text{ wt}\%$)

供試液体B： 水グリコール系作動油

($C_w = 46 \text{ wt}\%$)

供試液体C： 水グリコール系作動油

($C_w = 64 \text{ wt}\%$)

供試液体D： 水グリコール系作動油

($C_w = 77 \text{ wt}\%$)

供給液体E： 水グリコール系作動油

($C_w = 90 \text{ wt}\%$)

供給液体F： 水道水 ($C_w \approx 100 \text{ wt}\%$)

の、6種類の液体を用いて実験を行なった。各供試液体の密度 ρ 、および、動粘度 ν は、Fig. 3・Fig. 4に示

Fig. 3 Densities of the liquids

Fig. 4 Kinematic viscosities of the liquids

Fig. 5 An example of outputs of photo-multiplier.
(Liquid B, $T = 30^\circ\text{C}$)

す如くであった。

なお、本研究においては、キャビテーションの発生を検出する方法として、レーザ光散乱法を主に用いた。すなわち、本研究においては、Fig. 5に示すように、オリフィス型絞り部上流側の圧力 P_u を一定に保ちながら、下流側の圧力 P_l を、弁操作により徐々に下げながら、その時の光電子増倍管の出力を電磁オシログラフに記録し、この記録上で出力が大きく変動し始めた点を、本研究におけるキャビテーション初生点とした。また、常に、測定部 (Fig. 1のG) における発生音の音色や大きさの変化にも注意し、レーザ光散乱法のみでは誤差が大きい場合には、この発生音の変化をも参考にしてキャビテーション初生点を決定した。

4. 実験結果および考察

Fig. 6～Fig. 9が、オリフィス型絞り部上流側の圧力 $P_u = P_u = 2.1 \text{ MPa}$ (一定) とし、下流側圧力 P_l を徐々に下げた場合の実験結果の例である。これらの図

には、各図の左上隅の記号で表わされる供試液体を使用した場合における、絞り部の平均動圧 P_d ($\equiv \rho v^2/2$)、および、レーザ光散乱法等により求めたキャビテーション発生領域が示されている。なお、各図に描かれている多数の細い実線は、参考のために載せた。絞り部の流量係数 C_f ($\equiv Q/S \cdot 2 \cdot \Delta P / \rho$) が枠外に示す値となった場合に現われる、平均動圧 P_d と圧力差 ΔP ($\equiv P_u - P_i$) の関係である。

以上の図からも分かるように、含水率 C_w にかかわらず、水グリコール系作動油使用時においても、鉱油系作動油使用時や水道水使用時と同様に、キャビテーション初生点付近を挟んで、傾向が大きく変化していた。特に、水グリコール系作動油使用時には、キャビテーション初生点付近を除き、圧力差 ΔP がキャビテーション初生点における圧力差 ΔP_i より小さい範囲——すなわち $\Delta P < \Delta P_i$ ——においては、平均動圧 P_d と圧力差 ΔP は、流量係数 C_f がほぼ一定となる線型な関係にあり、 $\Delta P > \Delta P_i$ においては、圧力差 ΔP の増加と共に、流量係数 C_f は減少しながら、平均動圧 P_d が増加する関係を示していた (Fig. 7・Fig. 8 参照)。また、含水率 C_w の比較的高い水グリコール系作動油 (供試液体 D・E) 使用時には、Fig. 8 にも現われているように、キャビテーション初生点付近において、流量係数 C_f が、圧力差 ΔP の変化に対し、はっきりした極大値をもっていた。

Fig. 10 は、オリフィス型絞り部上流側の圧力 P_u を $P_u = 2.1$ MPa (一定) とし、下流側の圧力 P_i を徐々

に下げた場合の発聲音の測定結果を C 特性を用いて表わしたものである。含水率 C_w にあまり関係なく、水グリコール系作動油使用時においても、水道水や鉱油系作動油使用時と同様に、圧力差 ΔP がキャビテーション初生点の圧力差 ΔP_i よりわずかに高くなった状態で、キャビテーションが発生していない場合に比べて、20 dB～30 dB 大きい音を発生していたことが分かる。このキャビテーション発生に伴う発聲音の変化

Fig. 7 Relations between the dynamic pressures at the orifice and the pressure difference of Liquid B at $P_u = 2.1$ MPa and $T = 20^\circ\text{C}$.

Fig. 6 Relations between the dynamic pressures at the orifice and the pressure difference of Liquid A at $P_u = 2.1$ MPa and $T = 20^\circ\text{C}$.

Fig. 8 Relations between the dynamic pressures at the orifice and the pressure differences of Liquid D at $P_u = 2.1$ MPa and $T = 20^\circ\text{C}$.

Fig. 9 Relations between the dynamic pressures at the orifice and the pressure differences of Liquid F at $P_u = 2.1 \text{ MPa}$ and $T = 20^\circ \text{C}$.

Fig. 10 Relations between the sound C levels L and $\Delta P - \Delta P_i$ at $P_u = 2.1 \text{ MPa}$ and $T = 20^\circ \text{C}$.

は、供試液体の温度を 10°C 程度、Fig. 10の場合に比して上昇させた実験においても、ほぼ同様であった。また、この発生音を、オクターブバンド・バンドパスフィルタを用いて周波数分析した結果においては、キャビテーション初生点を狭んで、高周波数側成分のみが、すべての供試液体使用時に、大きく変化しており、含水率 C_w の違い等による影響は見られなかった。

Fig. 11は、キャビテーション初生点における、オリフィス型絞り部上流側の圧力 P_u と下流側の圧力 P_i

Fig. 11 Relations between the pressures in the upper reaches and in the lower reaches at the points of cavitation inception. ($T = 20^\circ \text{C}$)

の関係の測定結果である。すなわち、本実験で扱った範囲においては、含水率 C_w にかかわらず、すべての供試液体使用時に、キャビテーション初生点における絞り部下流側の圧力 P_{ii} は、絞り部上流側の圧力 P_u を用いて、ほぼ、

$$P_{ii} = A_i \cdot P_u + B_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

(A_i, B_i : 定数)

また、Fig. 12は、キャビテーション初生点における、絞り部の平均動圧 P_d と絞り部上流側の圧力 P_u の関係の測定結果である。すなわち、本実験で扱った範囲においては、含水率 C_w にかかわらず、すべての供試液体使用時に、キャビテーション初生点における絞り部の平均動圧 P_{di} も、絞り部上流側の圧力 P_u を用いて、ほぼ、

$$P_{di} = A_d \cdot P_u + B_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

(A_d, B_d : 定数)

Fig. 12 Relations between the pressures in the upper reaches and the dynamic pressures in the orifice at the points of cavitation inception. ($T = 20^\circ\text{C}$)

と表わし得ることが分かる。

なお、Fig. 13 と Fig. 14 は、最小二乗法を用いて測定値より求めた、式(1)と式(2)の各定数の値を、含水率 C_w の関数として表わしたものである。すなわち、供試液体にかかわらず、液温 $T = 20^\circ\text{C}$ において、常に、 $0.5 \geq A_i \geq A_d \geq 0.3$, $0.1 \text{ MPa} \geq B_d \geq -0.1 \text{ MPa}$, $0.1 \text{ MPa} \geq B_i \geq -0.2 \text{ MPa}$ で、含水率に対し、あまり大きな変化は示さなかった。

ここで

$$K_1 = \frac{P_i - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{P_i - P_v}{P_d} \quad \text{..... (3)}$$

$$K_2 = \frac{P_i - P_v}{P_u - P_i} \quad \text{..... (4)}$$

(ただし P_v : 供試液体の飽和蒸気圧)

で定義される2種類のキャビテーション係数 K_1 , K_2 について考えてみる。すると、本研究で扱った範囲に

Fig. 13 Values of A_d and A_i

Fig. 14 Values of B_d and B_i

において、 $P_i \gg P_v$ であるので、キャビテーション初生点におけるこの2種類のキャビテーション係数——初生キャビテーション係数と呼ぶ—— K_{1i} , K_{2i} を、

$$K_{1i} = \frac{P_{ii}}{P_{di}} = \frac{A_i P_u + B_i}{A_d P_u + B_d} \quad \text{..... (5)}$$

$$K_{2i} = \frac{P_{ii}}{P_{ui} - P_{ii}} = \frac{A_i P_u + B_i}{(1 - A_i) P_u - B_i} \quad \text{..... (6)}$$

と表わすことができる。よって

$$\frac{\partial K_{1i}}{\partial P_u} = \frac{A_i B_d - A_d B_i}{(A_i P_u + B_d)^2} \quad \text{..... (7)}$$

$$\frac{\partial K_{2i}}{\partial P_u} = -\frac{B_i}{\{(1 - A_i) P_u - B_i\}^2} \quad \text{..... (8)}$$

に Fig. 13, Fig. 14 に示した値を代入することにより、本研究で扱った範囲において、

(1) 鉱油系作動油 (供試液体 A) および比較的含水率 C_w の小さい水グリコール系作動油 (供試液体 B~D) では、絞り部上流側の圧力 P_u の増加と共に、両初生キャビテーション係数 K_{1i} , K_{2i} が増加する傾向を示す。

(2) 含水率 $C_w = 90 \text{ wt\%}$ の水グリコール系作動油 (供試

液体 E) では、絞り部上流側の圧力 P_u の増加と共に、両初生キャビテーション係数 K_{1i} , K_{2i} が減少する傾向を示す。

(3) 水道水 (供試液体 F) では、絞り部上流側の圧力 P_u の増加に伴ない、初生キャビテーション係数 K_{1i} は少し減少傾向を示すが、初生キャビテーション係数 K_{2i} はほとんど変化しない。

であることが分かる。特に、絞り部上流側の圧力 P_u が十分に大きい場合には、両初生キャビテーション係数 K_{1i} , K_{2i} を、それぞれ、

$$K_{1i} \approx \frac{A_i}{A_u} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K_{2i} \approx \frac{A_i}{I - A_i} \quad \dots\dots\dots (10)$$

と、絞り部上流側の圧力 P_u に無関係な定数として表わし得ることが分かる。これらの初生キャビテーション係数の値は、含水率 C_w に対して、Fig. 15 に示す変化をしていた。すなわち、絞り部上流側の圧力 P_u が十分に大きい場合、含水率 C_w にかかわらず、水グリコール系作動油使用時において含水率 C_w に対する小さな減少傾向が見受けられるものの、鉱油系作動油や水道水を含むすべての供試液体において、初生キャビテーション係数 K_{1i} が、 $K_{1i} = 1.1 \sim 1.2$ の値を示していたことが分かる。故に、本研究で取り扱った範囲では、絞り部上流側の圧力 P_u が十分に大きい場合、供試液体にかかわらず、絞り部の平均動圧 P_d が絞り部下流

側の圧力 P_i の 8 割～9 割程度となった場合に、キャビテーションが発生し始めるものと思われる。

5. 結言

本論文においては、含水率 C_w の異なる 4 種類の水グリコール系作動油、および、水道水と鉱油系作動油の、6 種類の液体を使用し、それぞれの液体が、直径 2 mm の円形オリフィス型絞り部を通過する場合におけるキャビテーション現象について実験的に研究し、絞り部上流側の圧力 P_u が $1 \text{ MPa} \leq P_u \leq 6 \text{ MPa}$ 、温度 T が $T = 20^\circ\text{C}$ 付近、含水率 C_w が $46\text{wt}\% \leq C_w \leq 90\text{wt}\%$ である場合に対し、

- (1) 含水率 C_w が比較的高い水グリコール系作動油が、上流側圧力 $P_u = 2.1 \text{ MPa}$ で用いられた時には、キャビテーション初生点付近において、絞り部の流量係数 C_f が明らかな極大値をもった。
- (2) 含水率 C_w が比較的低い水グリコール系作動油が用いられた場合には、初生キャビテーション係数が、絞り部上流側の圧力 P_u の増加と共に、増加していた。
- (3) 含水率 $C_w = 90 \text{ wt}\%$ の水グリコール系作動油が用いられた場合には、絞り部上流側圧力 P_u の増加につれて、初生キャビテーション係数が減少していた。

等の結果を得たことを記した。

最後に、供試液体の入手や分析等の際に多大の援助をいただいた、丸善石油株式会社に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Pernik, A.D.: Problems of Cavitation, Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force Base, (1969) .
- 2) Knapp, R.T. et. al.: Cavitation, McGraw-Hill (1970) .
- 3) 山崎：キャビテーション工学, 日刊工業新聞社(1978) .
- 4) 加藤：キャビテーション, 横書店 (1979) .
- 5) Tsuji, S. and Katakura, H.: A Fundamental Study of Aeration in Oil, Bull. JSME, 19-138, 1497/1503 (1976) .
- 6) Tsuji, S. and Katakura, H.: A Fundamental Study of Aeration in Oil (2nd Report) , Bull. JSME, 21-156, 1015/1021 (1978) .
- 7) 山口・斉藤：油圧作動油のキャビテーション (第 5 報), 油圧と空気圧, 13-4, 269/275 (1982) .

Fig. 15 Cavitation coefficients K_1 and K_2 at the points of cavitation inception for the case of high pressures in the upper reaches.