油圧作動油のキャビテーション

(第5報 絞り部キャビテーションに及ぼす液体特性と絞り材質の影響)*

山口 惇**・斉藤 寛泰***

Cavitation in hydraulic fluids

(5th Report, Effects of fluid properties and orifice plate materials on the cavitation of long orifices)*

Atsushi Yamaguchi**・Hiroyasu Saito***

In this report, effects of the fluid properties and orifice plate materials on the cavitation characteristics of long orifices are presented. The cavitation characteristics were evaluated by the cavitation number corresponding to the disappearance of the choking. The fluids tested were two kinds of hydraulic fluid (petroleum base), a water-glycol, a spindle oil, five kinds of high water base fluid (HWBF), a tap water and a n-hexane. The orifices 2.5mm in diameter and 20.0mm in length were made of brass, acrylic resin, stainless steel and carbon steel.

The results obtained are as follows.

- (1) Desinent cavitation number of choking k_d for the hydraulic fluids, the water-glycol and the spindle oil, where orifice Reynolds Number Re has a magnitude of 10^3 , increases with an increase in Re . k_d for the water and the HWBF, where Re has a magnitude of 10^4 , is nearly constant, and k_d for the n-hexane, where Re has a magnitude of 10^5 , decreases rapidly with an increase in Re .
- (2) For the test where the outlet pressure is constant and the inlet pressure is varied, k_d is less than that for the test in a reverse pressure condition, with a difference up to 0.1 at the same Re .
- (3) Difference in k_d in terms of the orifice plate material is less than 0.05, and in the case of a material easily wettable with the fluid, k_d has a tendency to be smaller.

1. はじめに

油圧機器の作動限界を定める一つの要因は、作動油のキャビテーションである。作動油はエネルギーの伝達媒体であるから、システムの性能面はもとより、経済性、保守管理面までを検討し、最適の液体を作動油として選定できるはずである。水・グリコールは難燃性

作動油として使用されているし、水を高い割合で含有する作動液(以下、HWBFと記す)を実用化しようとの試みもある。このような観点から、液体特性のキャビテーションに及ぼす影響を検討することは、有意義であろう。また、これに関連して、部材材質の影響についても、調べておく必要がある。

本研究は、このような意図から、円筒形絞りをを用いる試験装置を製作し、石油系作動油2種、水・グリコール、スピンドル油、HWBF5種、水道水およびヘキサンの11種について、キャビテーション閉塞の消滅限界を求めたものである。また、絞り材質としては、黄銅、

* 昭和56年10月9日 原稿受付

** 横浜国立大学工学部

*** ㈱日立製作所

**** 油圧と空気圧 Vol.13, No. 4

アクリル樹脂、ステンレス鋼、炭素鋼について検討した。

円筒形絞りに生じるキャビテーションの液体に基づく差異に関しては、石油系作動油、水・グリコールおよびりん酸エステル+塩化炭化水素について、発生限界はほとんど一致するとの報告¹⁾、石油系作動油、ケロシン、水について同様の報告²⁾がある。本研究では、HWBFを含むより多くの液体について実験を行い、液体の種類あるいは絞り材質による差異を調べるとともに、差異を生じる理由についても考察を加える。

2. 記 号

d : 絞り内径

$k = (p_2 - p_0) / (p_1 - p_2)$: キャビテーション係数

k_c : 閉塞消滅に対応する k

l : 絞り長さ

p : 圧力 (本報では絶対圧力を用いる)

p_1 : 絞り入口圧力

p_2 : 絞り出口圧力

p_3 : 絞り中央の圧力

p_a : 大気圧

p_v : 蒸気圧

$Re = 4Q / \pi d \nu$: 絞り内径を用いたレイノルズ数

μ : 粘度

ν : 動粘度

θ : 液温

3. 実験装置および方法

実験回路を Fig. 1 に、測圧孔を設けた絞り形状を Fig. 2 に示す。絞りは装置を小形にする点から小さいことが望ましいが、実験のしやすさ、結果の精度や再現性の点から、入口丸味のない円筒絞り、 $d = 2.5$ mm, $l = 20.0$ mm とした。ちなみに、 $d = 2.0$ mm, $l = 20.0$ mm の絞りでは、石油系作動油に対して、特に低レイノルズ数でのデータのバラツキが多かった。絞り材質は、黄銅、アクリル樹脂、ステンレス鋼 (SUS 304)、炭素鋼 (SS41) の 4 種であり、入口部に丸味のない同一形状に仕上げた。なお、黄銅については絞り中央に測圧孔を設けたものと設けないものを用いたが、他の絞りはいずれも測圧孔を設けてある。

絞り上流側の管路は内径 22.5 mm, 下流は 20 mm であり、上下流に内面をクロムメッキしたタンクを設けてある。所要試料は約 30 l である。上流側に設けたタンク内には、加圧用空気の試料への混入を防ぐため、ビニル製のプラグを装着した。液温はタンクを油浴に入れ、絞り出口で $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲内となるよう調整し

Fig. 1 Test circuit

Fig. 2 Test orifice with pressure tap

た。

標準的な実験方法は、次のとおりである。上流側タンク内の試料を十分な時間 (最も短くて 1 時間、標準は 2 時間とした) 温度一定の油浴内に保ち、ついで圧縮空気より所定の圧力に加圧する (最高で 700 kPa)。主管路の弁を開きキャビテーション閉塞を発生させる。ついで、上流側タンク内を徐々に減圧し (実験方法 1 と呼ぶ) あるいは主管路の弁を絞って下流圧力を増し (実験方法 2)、閉塞の消滅する圧力を求める。増圧あるいは減圧の速さは、4 ~ 5 kPa/s 程度である。この際、絞り入口圧力 p_1 、出口圧力 p_2 あるいは絞り中央の圧力 p_3 をシンクロスコープ上で観察し、あるいは電磁オシログラフに記録する。

キャビテーション状態の判定は、1) 絞り下流に設けたアクリル管路部における目視、2) 絞り出口直後の圧力に生じる高周波の変動 (半導体圧力ピックアップ使用、絞り中央に測圧孔のない場合)、3) 絞り中央に設けた半導体圧力ピックアップの圧力変化 (測圧孔を設けた絞りの場合) によった。Fig. 3 に圧力変化の様子を模式的に示すが、閉塞終了時には p_3 は急激な回復を示す。

一つの供試液体についてのレイノルズ数範囲を拡大するために、 p_1 、 p_2 、 θ を適宜変えて、実験した。つ

Fig. 3 Trace of pressures
hydraulic fluid A - steel plate, orifice Reynolds number $R_e = 2230$, desinent cavitation number of choking $k_d = 0.423$, fluid temperature $\theta = 52^\circ\text{C}$, inlet pressure P_1 , outlet pressure P_2 , pressure at the middle of orifice P_3

まり、実験方法1では一定に保つ p_2 の設定を変えて、実験方法2では一定に保つ p_1 の設定を変えて、レイノルズ数を変化させている。もちろん、高粘度の液体に対しては、 θ も積極的に変えた。

供試液体の種類と物性値を Table 1 に示す。ここで、マイクロエマルジョン、ソリューションおよび水

溶性高分子溶液の水（イオン交換水を使用）の含有割合は、いずれも95%（重量）であり、添加剤については次のとおりである。

マイクロエマルジョン：石油系基油（ 40°C における動粘度、Aでは $30.5\text{mm}^2/\text{s}$ 、Bでは $88.4\text{mm}^2/\text{s}$ ）4重量%、添加剤（商品名ノニオン S-207を4とノニオン OP-80を1の重量割合で混合したもの）1重量%。

ソリューション：界面活性剤スタフォーム Fを3、ナイミーン T₂-230を2の重量割合で混合したものの5重量%、シリコン系消泡剤（ディスフォーム BW-4）を全体に対し100ppm 添加。

水溶性高分子溶液：Aに対してユニループ75DE-3800、Bに対して PEG20000を、それぞれ5重量%。

液体粘度は毛細管粘度計により測定し、蒸気圧はガラス管と水銀とでトリチェリの真空を作り、下方から試料を挿入して、水銀柱の高さの変化より求めた。HWBFの蒸気圧は水よりも低下するはずであるが、本実験の範囲では、水の場合でも p_v の k_d に及ぼす影響は2%以下であるため、データ整理では水の p_v で代用した。

Table 1 Properties of fluids tested (at 101.3kPa)

type		temperature ℃	density g/cm ³	kinematic viscosity mm ² /s	vapour pressure kPa	air content %
Hydraulic fluid A		40	0.845	30.0	~0	9.5
Hydraulic fluid B		40	0.864	62.0	~0	—
Spindle oil		40	0.871	9.90	~0	—
Water glycol		40	1.066	41.9	1.33*	22
Tap water		15	1.00	1.14	2.13*	20~25
H W B F	Emulsion A	15	0.98	2.37	**	***
	Emulsion B	15	0.98	4.70		1.5~1.8
	Surfactant solution	15	1.01	1.59		
	Polymer solution A	15	1.01	4.90		
	Polymer solution B	15	1.01	5.75		
n-Hexane		15	0.66	0.495	1.30	—

* 18°C

** 0.53 kPa for a emulsion of 96.2% water

*** for a emulsion and a polymer soquion of 95% water

4. 実験結果

石油系作動油 A に対する結果を、Fig. 4, 5 に示す。横軸は絞りに対するレイノルズ数 R_e 、縦軸は閉塞消滅に対応するキャピテーション係数 k_d である。Fig. 4 は黄銅製の絞りの場合であって、実験方法や条件を変えた場合の結果をまとめて示した。すなわち、実験方法 1 の下に、測圧孔のない絞りについて $p_2 = p_a$ (○印)、 $p_2 > p_a$ (×印) の結果、測圧孔のある絞りについて $p_2 = p_a$ (○印) の結果、さらに実験方法 2 (ただし $p_1 = 490\text{kPa}$ 一定) の下に測圧孔のある絞りについての結果 (▽印)、とを示している。実験方法 1 による k_d 値に対し、実験方法 2 による値はそれを約 0.05 上回っている。Fig. 5 は、測圧孔を有する絞りをを用い実験方法 1 によって、絞り材質に基づく差異を調べた結果であり、同じ R_e に対し黄銅の k_d が最も小さく、アクリル樹脂のそれが最も大きい傾向がみられる。

なお、 $d = 2.5\text{mm}$ のアクリル樹脂製の円筒絞りについて、循環方式による実験では、 $k_d = 0.50$ (40°C , $R_e = 2 \times 10^3$) を得ているが、本実験のアクリル製絞りでは $k_d \approx 0.42$ ($R_e = 2 \times 10^3$) であった。この差は、油中の微小気泡の含有状況の差に主として基づくであろう。

Fig. 6 は、測圧孔のない黄銅製の絞りに対する実験

Fig. 4 R_e vs. k_d for hydraulic fluid A – brass plate
test condition: method 1 (constant P_2) ... ○, ×,
method 2 (constant P_1) ... ▽,
○: with and without P_3 tap, ▽: with P_3 tap,
×: without P_3 tap

Fig. 5 R_e vs. k_d for hydraulic fluid A
(effects of orifice plate material, method 1,
with P_3 tap)

方法 1 による結果である。石油系作動油 B の k_d は、同一 R_e において、油 A を少し下回っているが、 $R_e - k_d$ のこの配は大きく、 $R_e \approx 3 \times 10^3$ ではその差はわずかである。スピンドル油の場合、 k_d は油 A よりも大きく、 $R_e \approx 5 \times 10^3$ で $k_d \approx 0.6$ とみなせる。Fig. 7 は、スピンドル油に対して、実験方法と絞り材質の差を調べた結果である。絞りは測圧孔を有する場合である。実験方法 1 による黄銅の結果は、Fig. 6 に示す結果とよく一致している。アクリル樹脂の k_d が黄銅を上回る傾向は、実験方法 1, 2 について認められるが、実験方法 2 の方が明らかで、差が 0.05 以上となるとところがある。なお、実験方法 2 の方が、データのパラツキが多い。また、ステンレス鋼、炭素鋼の結果は、黄銅に近い。

Fig. 8 は、水・グリコールの結果であり、測圧孔の

Fig. 6 R_e vs. k_d for spindle oil and hydraulic fluid B – brass plate (method 1, without P_3 tap)

Fig. 7 R_e vs. k_d for spindle oil
(effects of orifice plate material, with P_3 tap)

Fig. 8 R_e vs. k_d for water-glycol
(method 1, without P_3 tap)

ない黄銅製の絞りについて実験方法1の場合である。 p_2 が大気圧の場合と大気圧より大きい場合とで傾向に差を生じているともいえるので、記号を変えて表示してある。 k_d の大きさは、石油系作動油A、Bのほぼ中間となっている。

Fig. 9は水道水に対する結果であり、測圧孔のある絞りをを用いている。 k_d は R_e によらず、ほぼ一定となっている。実験方法は、同一絞り材質に対する最小レイノルズ数のデータが方法1、他は方法2である。この場合、予備実験の結果等も合わせ考慮すると、黄銅を除いて方法1、2の差はほとんどないといえる。 k_d の値は黄銅とアクリル樹脂がほぼ一致し、ステンレス鋼がこれらを上回っている。ステンレス鋼製絞りについては、イオン交換水での結果を表示してあるが、水道水との差異は認められない。低いレイノルズ数での測定を実現するために、方法1において、 p_2 を大気圧以下とした予備実験も行った。結果は、 R_e の減少に対し逆に k_d は増大した。これは、液体中の空気が分離しやすくなり、閉塞の発生を助長するためであろう(水ほど顕著ではないが、同様の傾向は入口に丸味のある円筒絞りでの石油系作動油の場合にも認められている⁴⁾)。なお、液温は室温として実験したが⁵⁾、液温の影響については、文献5)が参考となる。

HWBFに対する結果をFig.10に示す。測圧孔を有するステンレス鋼製の絞りの場合である。高分子溶液の k_d は他の液に比べ小さく、エマルジョンとソリューションの k_d は水道水とほぼ一致している。1種類の液

Fig. 9 R_e vs. k_d for tap water-stainless steel plate (key: same as Fig. 5, Δ: deionized by ion exchange)

Fig. 10 R_e vs. k_d for HWBF - stainless steel plate
○: emulsion A, ●: emulsion B,
x: surfactant solution, Δ: polymer solution A
▲: polymer solution B; with P_2 tap

体に対する最小 R_e のデータは実験方法1 ($p_2 = p_0$)、他は実験方法2であり、エマルジョンBおよびソリューションでは実験方法による差が認められる。なお、材質の影響は、水道水と同様であった(実験方法2)。

石油系作動油と同じく炭化水素であるn-ヘキサンに対する結果をFig.11に示す。測圧孔のある絞りに対する結果であり、 R_e の増大につれ k_d が減少している。黄銅とステンレス鋼について実験したが、材質の差は認められなかった。実験方法は、水道水と同じく、最小の R_e に対する結果が方法1、他は方法2である。

Fig. 11 R_e vs. k_d for n-hexane (with P_2 tap)

5. 考察

5.1 液体特性

液体種類による差異を明らかにするため、黄銅製絞りに対する k_d と R_e の関係をFig.12に示した。石油系作動油、スピンドル油については実験方法1のデータ

Fig. 12 Summary of effects of fluid type on R_e - k_d characteristics for brass plate

1. hydraulic fluid B	2. water-glycol
3. hydraulic fluid A	4. spindle oil
5. polymer solution A, B	6. emulsion A, B
7. surfactant solution	8. tap water
9. n-hexane	

を、他の液体では方法2も含めてある(水道水、ソリューションは方法2のみ)。一見して、 R_g が 10^3 の大きさでは R_g の増大につれ k_d も増大する傾向にあり、 R_g が 10^4 の大きさでは k_d は一定、 10^5 の大きさでは R_g の増大につれ k_d が急激に減少することがわかる。

n-ヘキサンに対する結果で、 $k_d \sim R_g$ が右下りとなる理由を考えてみよう。黄銅製絞りでのデータは、すべて $\theta = 14.5 \pm 1^\circ\text{C}$ に対するものである。閉塞状態における p_s は、高周波の変動が加わっているが、平均値として絶対0気圧あるいはそれ以下となつて、この温度の飽和蒸気圧より大部低くなっている。このことから、微小気ほうの含有が少ない方法で実験しているため、気ほう核の生成と生長に必要な時間がとれないことが、右下りの原因であるといえる。閉塞終了後もキャビテーション気ほうが、絞り下流に流出するのを目視できたが、このことも上記推論の妥当性を示す(水道水では目視できない)。

ところで、 10^3 の R_g 範囲で明らかなように、同じ絞りを同じ R_g を同一としても、液体によって k_d に差を生じることから、キャビテーション係数を用いても、液体特性の処理に不十分な点のあることがわかる。同一 R_g における k_d は、低粘度液体ほど大きくなる傾向が認められるから、物性上粘度の重要性に気付く。超音波でのキャビテーション限界を測定したBriggsら⁹⁾も、音波の限界振幅と粘度との関係を認めている。

本実験では微小気ほう(entrained air)の混入は少ないので、その影響を無視して、粘度とキャビテーション特性の関連を考察してみよう。液体分子は不規則なブラウン運動をしているので、たまたま、大きな空孔の生じることがある。単位体積の液体中に単位時間に、体積 $v \sim v + dv$ の空孔の生じる頻度を $f(v) dv$ とする。 v が臨界値 v^* を超えるときだけ、キャビテーションの核となると考える。そうすると、単位体積、単位時間に核の発生する確率 ϕ は

$$\phi = \int_{v^*}^{\infty} f(v) dv \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに、 $f(v)$ ：確率密度関数。さて、単位体積内の全空孔を、全液体分子について割り当てると、分子の自由に動ける空間の平均値、自由体積が求まる。これを v_f と表示すると、 $f(v)$ は統計力学により

$$f(v) \propto \exp(-Av/v_f) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わせる⁷⁾。ここに A ：定数。これを式(1)に代入すると

$$\phi \propto \exp(-Av^*/v_f) \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方、液体の粘度 μ は

$$\mu \propto \exp(Av^{**}/v_f) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表わせる⁷⁾。ここに v^{**} ：粘度に対する臨界値(応力緩和に寄与する臨界値)。したがって、

$$\phi \propto \mu^{-(v^*/v^{**})} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が導かれる。

つまり、低粘度の液体ほど、気ほう核が生成しやすい。核からの生長に対し蒸発が主因子であれば、この過程で粘度は主要な影響を示さない(拡散が主であれば、拡散係数は粘度に逆比例するため、低粘度液体ほどその生長が速くなる)。

キャビテーションの場合が同一形状、同一 R_g であれば、粘度が小さいほどキャビテーション係数は大きく、逆に粘度が大きくなれば、キャビテーション係数は小さくなる。本実験において、炭化水素である石油系作動油A、Bおよびスピンドル油では、この関係は明らかに成り立っている。また、水、エマルションや溶液については、一応の説明を与えられとえられる。

5.2 絞り材質

本実験では、絞り部の閉塞終了に基づいてキャビテーション特性を評価しているが、それに絞り材質が影響を及ぼすことがわかった。石油系作動油などの鉱油の場合、アクリル樹脂の k_d が最も大きく、黄銅のが最も小さい。閉塞開始時の p_s は、黄銅の場合、瞬時的に絶対0気圧以下となるが、アクリル樹脂ではほぼ絶対0気圧どまりである。閉塞中の p_s は、黄銅の方がアクリル樹脂より多少高くなる。一方、水道水やHWBFでは、黄銅とアクリル樹脂の k_d はほぼ等しく、ステンレス鋼の k_d が最も大きくなった。Fig.10と12について比べると、0.05程度の差がある。

このことは、次のように、絞り材質と液体とのぬれやすさから説明できる。まず、鉱油について検討する。固体表面の液体によるぬれやすさは、(固体の表面エネルギー) - (液体の表面張力)で表わされ、同一の液体に対しては固体の表面エネルギーの大小が問題となる。本実験に使用した材質に関連する表面エネルギーとしては、銅 > 鉄 > アクリル樹脂(ポリメタアクリル酸メチル)であり⁹⁾、黄銅が最もぬれやすくアクリル樹脂がぬれにくいことがいえる。ぬれにくいほど、固体表面をキャビティで覆いやすいから、材質の k_d に及ぼす影響を説明できる。

一方、水や水を多量に含むHWBFでは、アクリル樹脂が水を吸収しやすいために⁹⁾、見掛け上、ぬれやすい固体面となったと考えられる。なお、一般には固体表

面（特に高エネルギーである金属表面）は、吸着による汚れのため、見掛け上、低エネルギー表面となる。しかし、キャビテーション閉塞の状態では、いはば超音波洗浄を受けている状態となるため、固体表面は汚れのない表面と考えられる。

5.3 実験方法

本実験において、ヘキサンや一部の HWBF を除いてほとんどの場合に、実験方法 1 と 2 とによる差がみられた。同一の R_e 、液体、絞りを前提として、この原因を検討する。

実験方法 1 として $p_2 = p_0$ の場合をとると、方法 2 に比べて動粘度は小さく、流量は大となるので、気ほう核の生成あるいはその生長の容易さに対する差異として理解できる部分もある。しかしながら、方法 1 でも $p_2 > p_0$ の場合では、動粘度や流量がほぼ等しいにもかかわらず、 k_d に差を生じることになる。したがって、この差異は、実験方法に本質的な事項として考察の要がある。

閉塞の発生機構として、絞り壁面上に形成されたキャビティが細まりノズルを形成し、気液混相となった主流がノズル出口で音速に達している状態を考えることができる⁴⁾。 p_2 を上昇させる実験方法 2 では、当然のことながら、 p_2 を生じた変化は直接上流には伝わらず、閉塞の消滅はキャビティの後端部からはじまる縮小あるいは消失による細まりノズルの崩壊に対応するであろう。これに対し、 p_1 を下降させる実験方法 1 では、はく離部（キャビティ）には時々刻々の変化が伝えられ、キャビティの縮小が遅れなく行われることになる。したがって、実験方法 2 の方が、閉塞消滅が遅れがちとなり、相対的に大きな k_d が得られる。

6. 結 論

キャビテーション特性に及ぼす液体特性および材料特性の影響を明らかにする目的で、孔径 2.5mm、長さ 20mm の円筒形絞りを用いた装置により、キャビテーション閉塞の消滅を評価対象として、一連の実験を行った。液体としては、石油系作動油 2 種、水・グリコール、スピンドル油、HWBF 5 種（エマルジョン 2 種、界面活性剤ソリューション、高分子水溶液 2 種）、水道水、ヘキサンの 11 種類、絞り材質としては、黄銅、アクリル樹脂、ステンレス鋼、炭素鋼の 4 種類である。

主な結果は次のとおりである。

1) 絞りレイノルズ数 R_e と閉塞消滅に対応するキャビテーション係数 k_d の関係を概念的にまとめると、石油系作動油、スピンドル油などでは R_e が 10^3 の大きさとなり k_d は Re の増大につれ増加し、水道水、HWBF

では 10^4 の大きさで k_d は一定、n-ヘキサンでは 10^5 の大きさとなり k_d は Re の増大につれ急激に減少する。

2) 石油系作動油、スピンドル油では、同一 R_e 、同一絞りにおいても、 k_d の値に差がみられ、低粘度の油ほどそれが増大する。すなわち、低粘度の油ほどキャビテーションを生じやすい。このことは、粘度の大きさ自体の効果として、説明できる。

3) HWBF の k_d は全体として、水道水のそれにほぼ等しいが、高分子水溶液は 0.06 程度小さく、エマルジョンはやや大きい。

4) 絞り材質は、 k_d に 0.05 程度までの影響を及ぼす。液体にぬれにくい材質の絞りでは、キャビテーションを生じやすいこと（閉塞消滅に対応するキャビテーション係数の増大すること）が認められた。

5) 下流圧力 p_2 を一定として上流圧力 p_1 を変えて閉塞を消滅させた場合と、逆に p_1 を一定として p_2 を変えた場合とでは、後者の k_d が大きくなり、0.1 以下の差を生じた。

本研究に使用した HWBF は、科学研究費総合研究「高濃度含水作動液の油圧機器への適用」（代表者 石原智男 東大教授）の標準作動液として作成されたものである。実験には、横浜国立大学技官 宮本栄治、当時の卒研学生 元村元明、北村博史の諸君の助力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Riedel, H.P.: Kavitationsverhalten von verschieden Druckflüssigkeiten, Ind. Ang., 94-71 (1972), 1724/1727
- 2) Lichtarowicz, A. and Pearce, I. D.: Cavitation and aeration effects in long orifices, Conf. on Cavitation (1974), 129/144, Inst. Mech. Eng.
- 3) 山口：油圧作動油のキャビテーション（第 4 報、絞り部キャビテーションの発生遅れ）、油圧と空気圧、10-6 (1979), 368/374
- 4) 山口、鈴木：同上（第 3 報、円筒絞りに生じるキャビテーションについて）、油圧と空気圧、9-2 (1978), 113/119
- 5) Lienhard, J. H. and Stephenson, J. M.: Temperature and scale effects upon cavitation and flashing in free and submerged jets, Trans. ASME, J. Basic Engg. 88 (1966), 525/532
- 6) Briggs, H. B., 他 2 名： Properties of liquids at high sound pressure, J. Acoust. Soc. Am., 19-4 (1947), 664/677
- 7) 和田：液体の粘性、潤滑、25-1 (1980), 19/22
- 8) 日本化学会編：新実験化学講座 18, 界面とコロイド (1977), 105, 丸善
- 9) 渡辺、他 2 名、表面および界面 (1973), 127, 共立
- 9) 浅見：プラスチック材料講座 12, アクリル樹脂 (1970), 85, 日刊工業