

噴流キャビテーションの初生条件とその付近における臨界流量について

山 崎 堯 右

(農学部機械工学研究室)

On the Incipient Conditions of Jet Cavitation and Its Two Phase Critical Flow

T. YAMASAKI

Preface

When the liquid, which is dissolved saturated or super-saturated gas at about normal temperature and pressure, produces "cavitation", gas expands or compresses in proportion to the flowing condition. Finally, apparent density and sonic velocity remarkably decrease at the place where the cavitation has occurred. Accordingly, flowing condition cannot be prescribed only by the cavitation factor introduced from Bernoulli's equation dealing with incompressible fluid.

The author, under the limited condition of employing water and turbine oil including gas in the vicinity of normal temperature and pressure, could introduce the condition of critical flux at a lower pressure so cavitation can be produced, in the consequence of the derivation of the approximate theoretical sonic velocity and density on two phase flow (gas and liquid) and energy equation. As the results of the comparison, the equation above mentioned with the experimental value, this concept has been well established. Besides, the incipient pressure of cavitation cannot be distinctly measured. According to the former thesis and experiments which this author did separately, the first condition of cavitation occurs in the domain of critical flux above mentioned. In the down-stream after occurrence of cavitation, the conception of two phase flow should be taken. Since it has been ascertained, as mentioned above, the details will be reported here.

1. 緒 言

油圧回路における絞りの部分で発生するキャビテーションの初生条件には、多数の因子が関与し、単にその個所の絶対圧力がそのときの飽和蒸気圧に達することのみでは計算で求めることは困難である。また、壁面の静圧が蒸気圧以上においてキャビテーションが発生することがあり、この場合は流れの中に発生する渦の中心圧力が飽和蒸気圧に達しているといわれる。油圧回路系では上流圧力、温度が大きく変化し、上記のような条件を考慮に入れ、粘性流体としてのキャビテーション初生限界を逐一求めることは不可能に近い。

さらに、液体中に浮遊している気泡があれば、その周りの流れはさらに複雑なものとなるであろう。

著者は、とりあえず製作上容易で、キャビテーションがおこり易く、また実際でも多く用いられている角のある急激な縮小、拡大する絞りをを用い、後者の型のキャビテーションの初生条件の総括

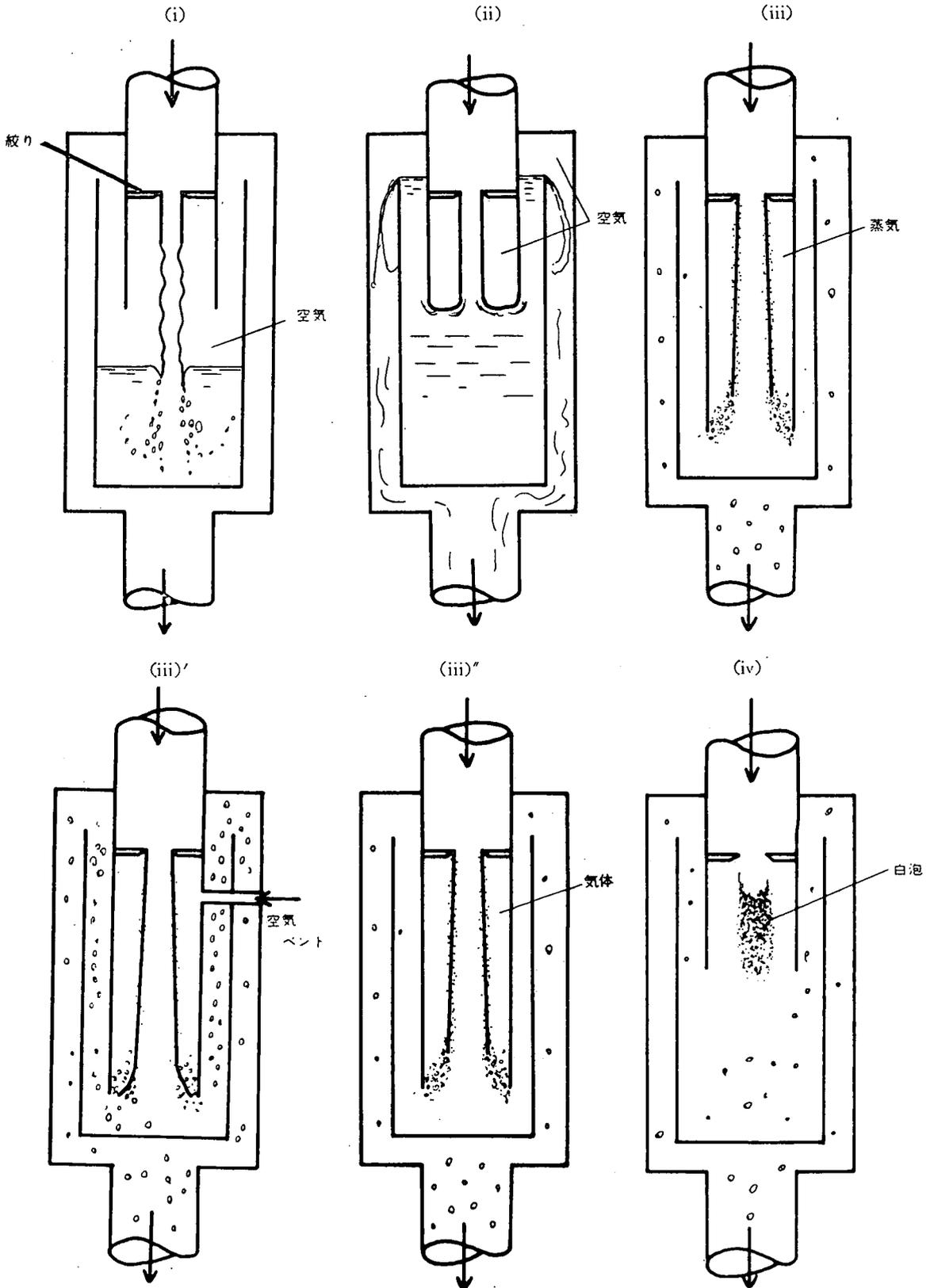


図1 キャビテーション様相の模型

的な概要を実験的に把み、回路設計の資料を提供するものである。また、キャビテーションの発生後におこる臨界流量の現象に対して理論的考察を加えたので、その詳細をここに報告する。

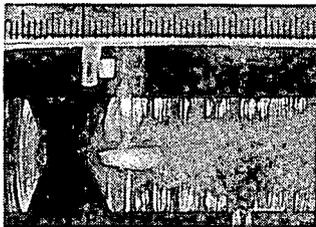
2. キャビテーションの種類について

今迄用いてきたキャビテーションの言葉の概念をここでもう一度規定する。

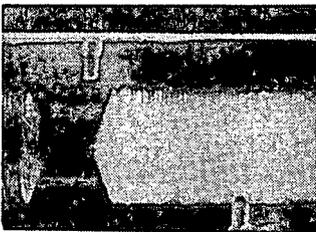
従来キャビテーションについて数多くの研究がなされてきたが、いまだに各分野の発生個所に適応される統一的な発生条件に関する見解はえられていない。

この原因はもちろんその現象の複雑さに負っているわけだが、それ以上に従来キャビテーションという同一の用語を使用したことからくる概念の格一性から、逆に現象の抽象的な細分化が阻害されているところに、根本的な問題が残されていると思われるので次のように分類することにする。

実際には超音波発信器の振動面によって加振された場合⁽¹⁾、急激な膨脹によって引張りをうけた場合⁽²⁾、水力機械の途中の絞りに発生する場合⁽³⁾などがあるが、これを空洞部分の状態から区別すれば、(i) 供給自由な気相領域から、まきこまれて泡となって液相部分に混入されていく状態、(ii) なんらかの機会に入りこんだ一定重量の気相部分が流下せず、また増えも減りもせず周りの液体の流動条件に応じて膨脹、圧縮し一定の個所に滞っている場合、(iii) 一定の個所において流体から溶けだした気体と逆に空洞部分から流体中にひきこまれる気体とが平衡状態を保ち、空洞が存在する場合である。この場合は気体はとけこんでいた酸素、窒素、炭酸ガスのような気体



ivの型のキャビテーション



ivの型のキャビテーションが十分発達した場合

写真1 向って左が上流

これら5つの型のうち最初の4つを模型的に一つの装置で発生さすとすれば図1のようになる。図中各々 (i), (ii), (iii), (iv) は上で記した4つの形式に相当する。

(i) の型の発生条件は水道の蛇口によって筆者が実験したところによると、棚沢⁽⁶⁾らが指摘した層流域から乱流域にうつる遷移域から発生し初める。(iii) の形式のうちその液体の蒸気によって空洞部が満たされる場合の発生条件は空洞部の静圧がそのときの飽和蒸気圧に達することである。液中に含有する空気が一定位置の空洞部分へ移行する (iii) の形式については、それ以前に (iv) の形式のキャビテーションが必ず先行して発生するために、安全側の (iv) の型式の発生条件を本論文では検討するものである。

3. 実験装置および実験方法

まず、油の場合の装置の概要を図2に示す。多くの回流型の回路でそうであるように、絞り部分のある個所でキャビテーションが発生すると分離した気泡が浮上する暇なく定常的に平衡を保っていることが少なくない。この意味から本実験では油槽を小さくし回流方式をとった。したがって、キャビテーション初生条件も微小な気泡を含んだ油の実測値を得ることになる。回路でまず上流側圧力をポンプ③によって上げ、ポンプ内の絞りによってキャビテーションを発生させたり攪拌を十分に行う。これから吐出される油

- ① モータ
- ② リリーフ弁
- ③ 二段歯車ポンプ
- ④ 三方コック
- ⑤ 三方コック
- ⑥ 流量調節弁
- ⑦ 供試絞り
- ⑧ 油槽
- ⑨ 上流圧力計
- ⑩ 下流圧力計
- ⑪ 流量測定用容器
- ⑫ 天秤
- ⑬ もどり管 (サイホンをかねる)
- ⑭ 空気含有率測定装置へ配管

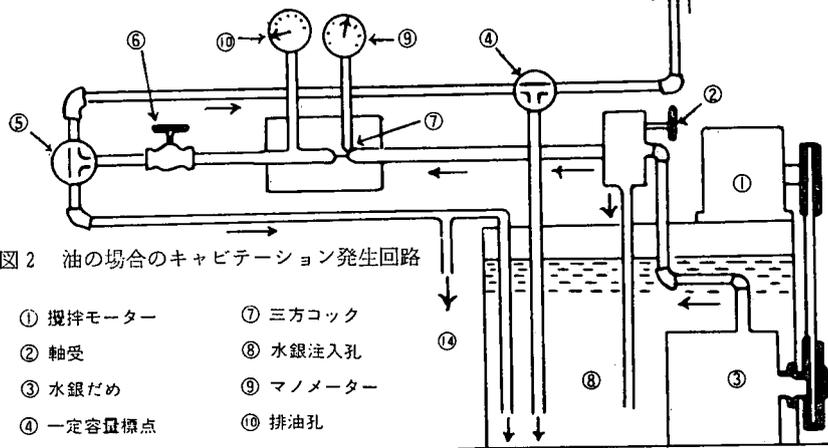


図2 油の場合のキャビテーション発生回路

- ① 攪拌モーター
- ② 軸受
- ③ 水銀だめ
- ④ 一定容量標点
- ⑤ 供試液だめ
- ⑥ メス入り注射器
- ⑦ 三方コック
- ⑧ 水銀注入孔
- ⑨ マノメーター
- ⑩ 排油孔
- ⑭ 供試油吸込孔

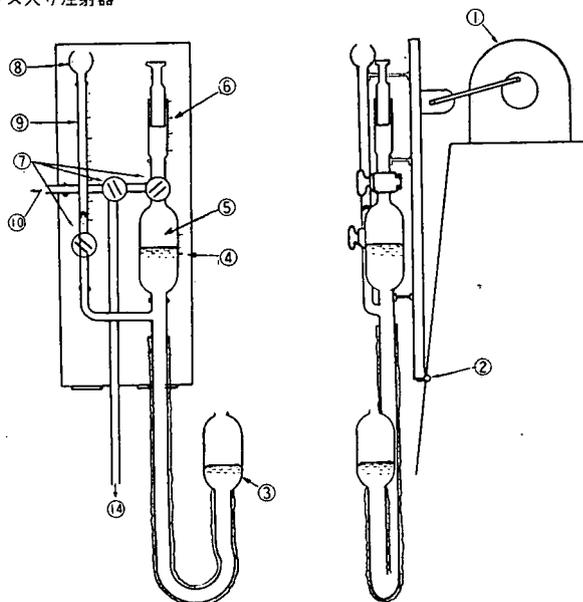


図3 空気含有率測定装置

の圧力をリリーフ弁②で設定し、供試絞り部分⑦を通過させる。下流圧と流量は絞り部分の下流に設けた弁⑥で調節する。流量の測定には、発生した気泡の容積の誤差を避けるため、天秤⑫によって単位時間当りの通過重量を求めた。

空気含有量は沼知^{(7), (8)}によって考案された方法を2, 3改めて図3のような装置を用いた。

この装置のうち、空気含有量は上部に設けられた注射器⑥によって吸いとり、注射器内の圧力は向って左の水銀マノメータ⑨で読みとり、0°C 1気圧のときの単位体積中の液体に含まれ

る。

る気体分の容積をもって X_1 とした。測定に際してはビニールパイプ⑭から吸入孔⑬に接続し、水銀だめ⑯を下げて吸いこむことによって、直接空気に触れることなく主管内から供試油をとりだした。また水銀だめの水銀面が攪拌中に上昇するので、30分間を10分ごとと3回攪拌し抽出し、30分後の総計の容積を求めた。上流側の油槽は30ℓ入りの小さいものを用い、分離気体が油面から逃げないうちに再び主流にもどるようところがけた。キャビテーションを発生さず絞り部分と、その下流部分は図4、表1に示す形状で透明のアクリル樹脂製である。供試油はタービンオイル180#のベースオイルで、温度密度曲線は図5に、温度動粘度曲線は図6に示してある。

キャビテーション初生点は、下流圧力を徐々に下げていったときに発生する状態と、発生後に徐

表1 単位 1/100mm

No. 1 $d=0.65mm\phi$		No. 5 $d=1.26mm\phi$ 油		No. 6 水		No. 7 水	
R	Z	R	Z	R	Z	R	Z
0.00	0.00	0.63	0.00	15.00	0.00	9.00	0.00
0.20	(7)	1.02	0.50	15.02	2.04	9.08	1.30
0.40	11.0	1.24	1.00	15.16	4.04	9.12	1.40
0.61	16.0	1.41	1.50	15.74	6.04	9.21	1.60
0.81	23.0	1.69	2.00	16.65	8.04	9.37	1.80
1.00	30.5	1.98	2.50	17.82	10.04	9.67	2.20
1.22	37.5	2.32	3.00	19.74	12.04	9.99	2.60
1.43	44.0	2.63	3.50	23.46	14.04	10.57	3.00
1.63	53.0	3.04	4.00	27.02	16.04	10.82	3.10
1.83	62.3	3.37	4.50	28.58	16.04	10.96	3.14
2.03	72.5	3.65	5.00				
2.24	80.5	3.97	5.50				
2.44	89.5	4.78	6.00				
3.06	133	5.98	6.50				
3.48	159						
3.88	189						
3.99	191						
4.09	203						
4.19	214						
4.28	223						
4.35	—						

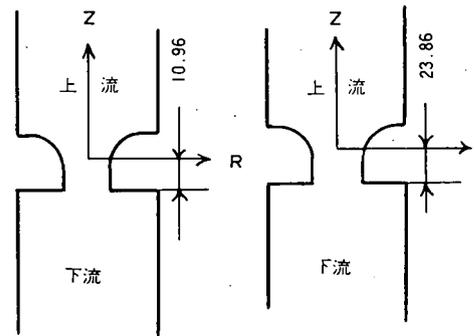


図8

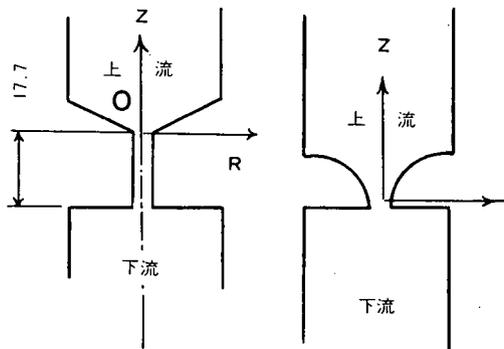


図4* 絞りの形

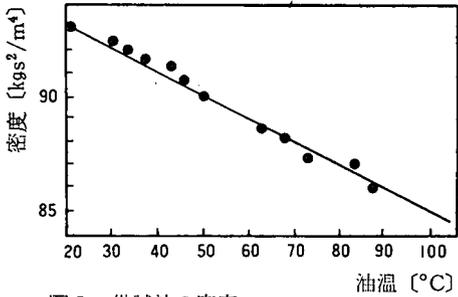


図5 供試油の密度

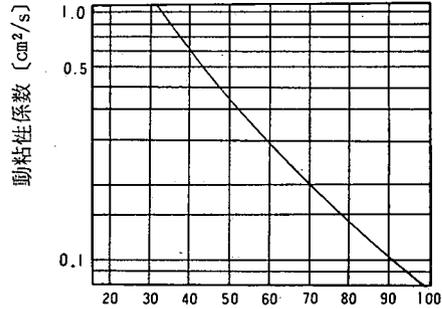


図6 供試油の動粘性係数

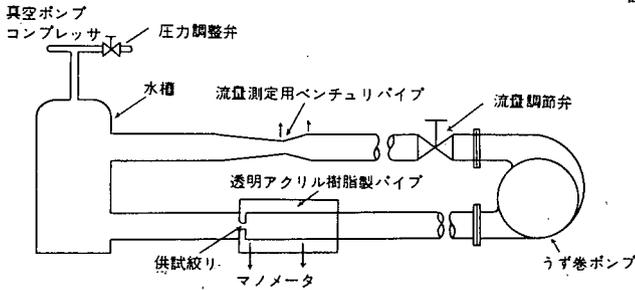


図7 水の場合のキャビテーション発生回路

よりも多少安全側によっている。主管の直径は絞り部分の上流と下流で8.7mmφの場合と上流8.7φ, 下流 17mmφ の場合である。これらの場合上流側, 下流側の十分しもの方ではその平均流速は絞り部分の平均流速に比べて著しく小さく, 且, その速度水頭は圧力水頭に比べて無視出来るほど小さいのでこれを省略した。

次に付帯的に行った水の場合の回流型キャビテーション水槽を図7に示す。油の場合と同じ理由によって, 容量の小さい回流型的水槽を設けた。使用したポンプは口径 1 1/2', 毎分0.15m³の吐出し量, 揚程10m, 1/2HP, 1750rpmの片吸込ディフューザポンプである。絞り部分は図8, 表1に示す寸法である。

々に圧力をあげていったときに消滅する状態とは一致しない。この実験では設定のし易さから一旦キャビテーションを発生させて流れが安定した後に徐々に白泡を小さくしていった消滅する寸前の圧力, 流量を測定した。したがってその逆の場合よ

4. 実験結果と検討

まず以下使用する記号をここで定義する。

- α : 絞り部分の流量係数
- β' : 使用する気液2相流体のみかけの圧縮率
- C : 使用する気液2相流体のみかけの局所音速
- γ_A : 気体のみの比重量
- γ_L : 液体のみの比重量
- γ' : 気液2相流体のみかけの比重量
- d : 絞りの直径
- d_o : とりあげる絞りより上流主管の直径
- d_2 : 絞りより下流の主管の直径
- $f \equiv \pi d^2 / 4$
- g : 重力加速度
- G : 単位時間当りの通過重量

$\theta \equiv P/P_0$

K_A : そのときの温度; 圧力における気体の体積弾性係数

K_L : そのときの温度, 圧力における液体の体積弾性係数

K' : 使用する気液 2 相流体のみかけの体積弾性係数

κ : 気体の断熱指数

M : 気液 2 相流のみかけのマッハ数, $M \equiv u/C$

m : 絞り部分の開口比

ν : 使用する液体の動粘性係数

n : 気体のポリトロプ指数

P_0 : 上流の加圧された主管もしくはリザーバ内の絶体圧力

P_1 : 標準状態の絶対圧力。液中の空気含有率 x_1 を求めるとき P_1 のときの値に換算

P : とりあげる個所の絶対圧力

ρ' : 使用する気液 2 相流体のみかけの密度

ρ_A : 気体の密度。添字 1 は圧力 P_1 のときの密度を表わす。以下添字の意味は同じ

ρ_L : 液体の密度

$$\sigma \equiv G / \frac{\pi}{4} d^2 g \sqrt{2 \rho_L P_0}$$

$$R_e \equiv \text{レイノズル数} \equiv d \cdot u / \nu$$

T : その個所の絶体温度

T_0 : 273.16°K

u : 管路方向にとった絞りの部分におけるみかけの平均流速

x' : そのときの温度, 圧力における単位体積の液体に含まれる気体の容積。 x を空気含有率と呼ぶことにする

x_1 : 圧力 P_1 のもとにおけるそのときの温度の空気含有率

X_1 : 標準状態のもとにおける空気含有率

x_s : そのときの温度, 圧力のときの飽和空気含有率

z : 主管の流線方向にとった距離

空気を飽和もしくは過飽和に含有する状態で供試絞り No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 についてキャビテーション初生圧と温度の関係を実測した結果が図 9, 図 10, 図 11, 図 12 である。パラ

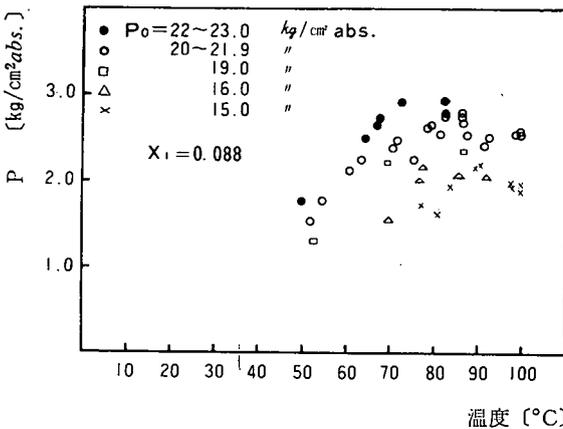


図 9 絞り No. 1 の下流のキャビテーション初生圧
($d=0.65\text{mm}\phi$
($d_0=d_2=8.7\text{mm}\phi$))

メータは上流圧 P_0 である。縦軸は、絞りの出口より 65mm 下流に 1mmφ の測定孔をあけブルドン管によって測定した静圧で、横軸はその個所の温度である。 P はほぼ P_0 に比例し、また d に比例するようである。

(図 13, 図 14)

いま、上流圧力 P_0 を基準にとった圧力係数 $2(P_0 - P)/\rho' u^2$ において、キャビテーションがはじめるときに * 印を付せば、 $P_0 \gg P^*$ であり、 P_0 と P^* の間の個所に存在する最低圧力個所 (キャビテーション発生点) にいたってはなおさら $P_0 \gg P_{min}$ である。いまあらたに最低圧力個所から選んだ P_0^* をおさえることにして新らしく

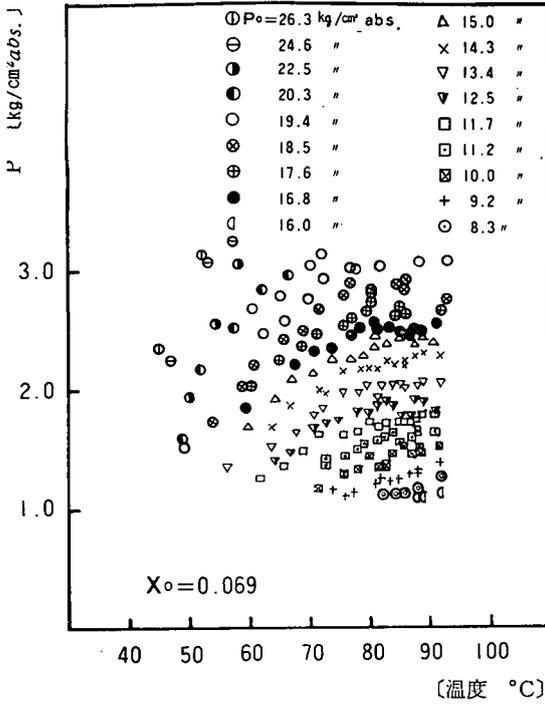


図10 絞りNo. 2の下流のキャビテーション初生圧
($d=0.95\text{mm}\phi$
($d_0=d_2=8.70\text{mm}\phi$))

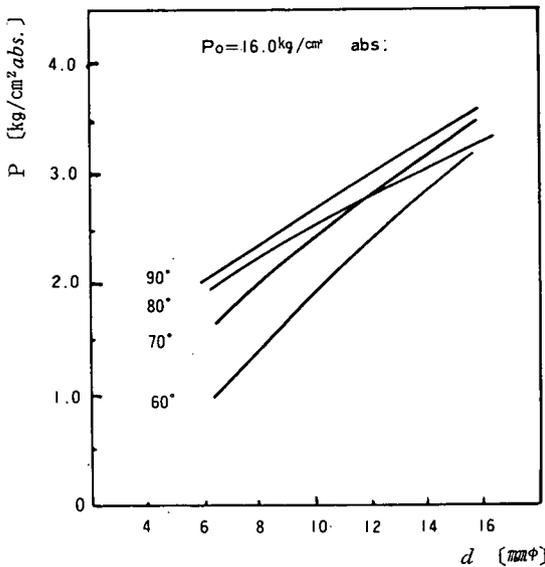


図14 絞り口径とキャビテーション初生圧の関係

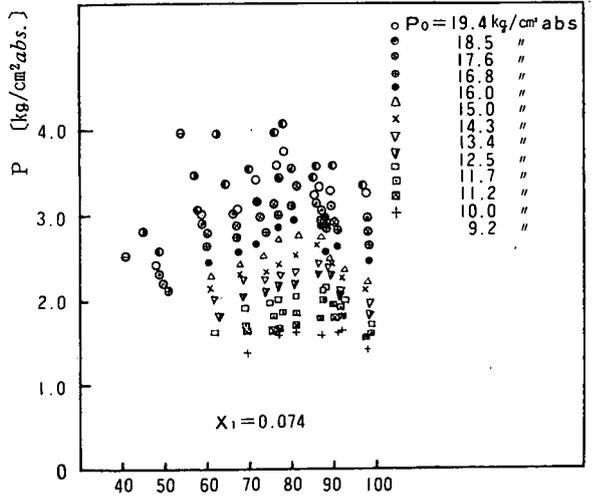


図11 絞りNo. 3の下流のキャビテーション初生圧
($d=1.17\text{mm}\phi$
($d_0=d_2=8.70\text{mm}\phi$))

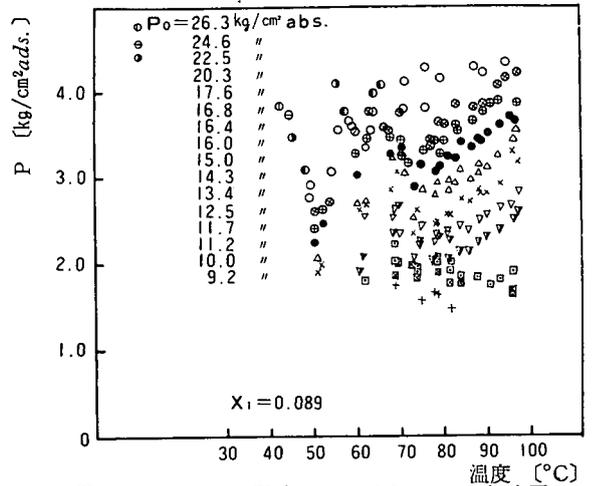


図12 絞りNo. 4の下流のキャビテーション初生圧
($d=1.5\text{mm}\phi$
($d_0=d_2=8.70\text{mm}\phi$))

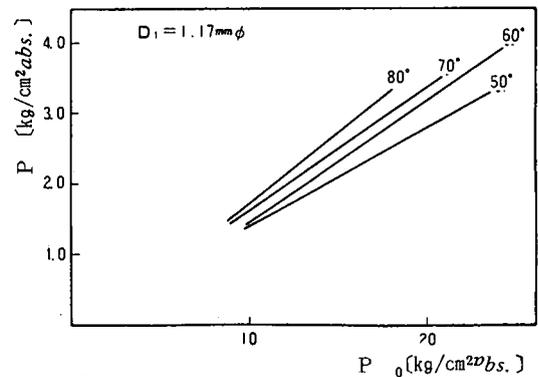


図13

初生キャビテーション係数 K^* を

$$K^* \equiv \frac{P_o^*}{\frac{\rho}{2} u^{*2}} = \frac{1}{\alpha^2(1-\theta)} = \frac{1}{\sigma^{*2}} \dots\dots\dots (1)$$

と定義する。

この K^* と α^* について上の4つの絞りの実測値を整理したものが図15である。図中下の実線は $\theta=0$ のときの K の値であり上の線はこの図からキャビテーション初生の限界線をひいたものである。したがってこの2曲線の間がキャビテーション発生領域であり、上の曲線より上は安全側である。この図15から逆に θ^* と σ^* を求めた値が図16である。ほぼ $\theta \geq 0.25$ であれば安全である。

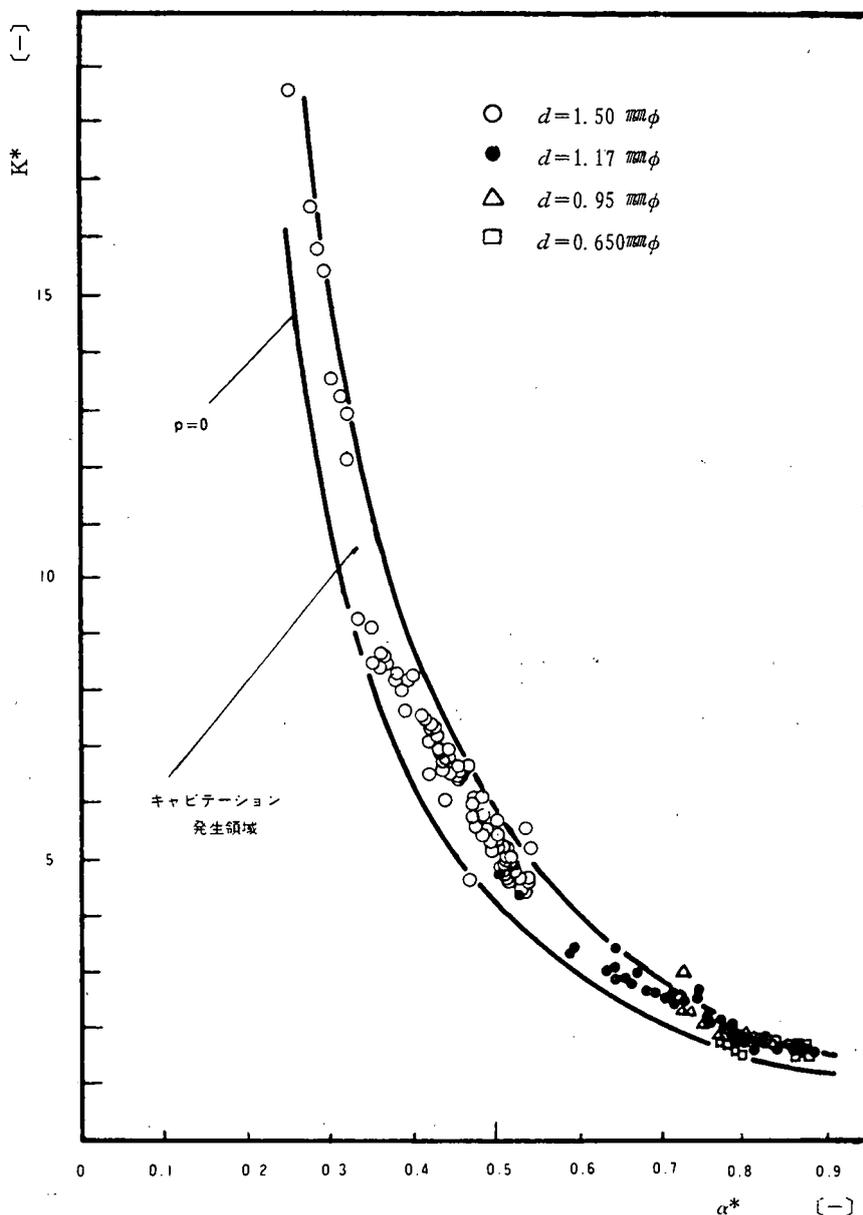


図15 初生キャビテーション係数と流量係数の関係

次に、No. 5の絞りをを用いた場合のキャビテーション初生圧 P^* と温度の関係を図17に示す。 P の圧力測定孔は前と同じく絞りの下流65mmの距離で測ったものである。絞りの下流側直後において測定した値は図18の通りであって、本実験において下流側の測定孔の位置の差異はほとんど認められない。

なお未発表の同様な実験に関して、空気含有量の多少については図15の曲線の上では差異がほとんど認められない(図19)。したがって、油圧回路で P_0 が大きく変る場合、それに比較して P^* の空気含有率による影響は実用上小さく一律に考えてさしつかえないと思われる。図16のような絞りのキャビテーション初生に対する一般的表示は、高圧回路系の制御設計の避くべき条件の総括的表示としてきわめて有用である。

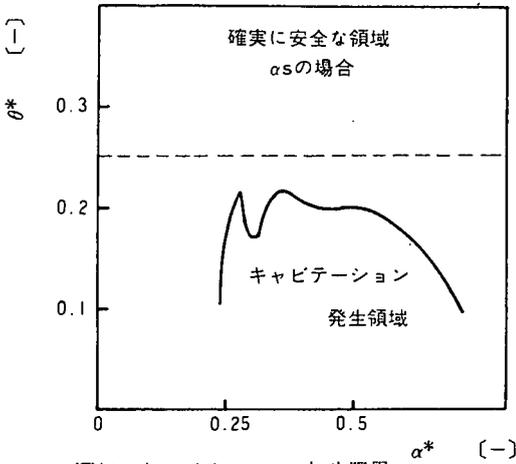


図16 キャビテーション初生限界 No. 1, 2, 3, 4の絞りの場合

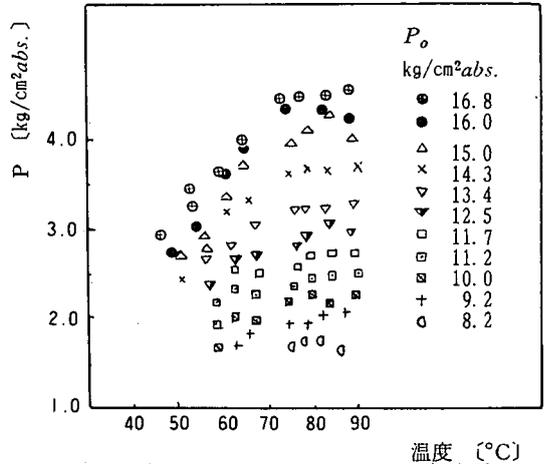


図17 絞りNo. 5のキャビテーション初生圧 ($P=1.26\text{mm}\phi$ ($d_2=17\text{mm}\phi$, P は絞り出口より65mm下流で測定)

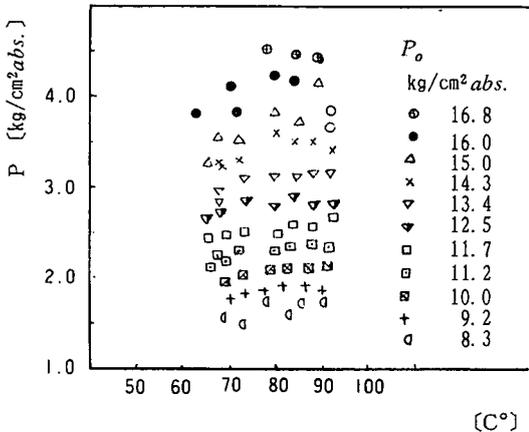


図18 絞りNo. 5のキャビテーション初生圧 ($d=1.26\text{mm}\phi$ ($d_2=17\text{mm}\phi$, P は絞り出口直後)

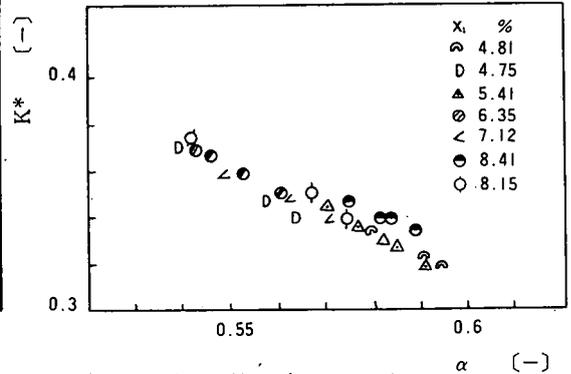


図19 写真1の絞り ($d=1.0\text{mm}\phi$)

次に、図20、図21、図22、図23は P_0 を一定にして σ と θ の関係を実測した1例である。 θ の小さいところではキャビテーション発生後急激に泡が大きくなり、流量が増加しなくなった。場合によってはわずかに σ が小さくなることすらある。このような状態の下流の様子は写真2のように、管断面全体が白泡におおわれている。当然乍ら絞りの部分の収縮係数がキャビテーション発生後に変化することから σ が増加しない説明はつけけれども、下流に対してはそれに加えてみかけ

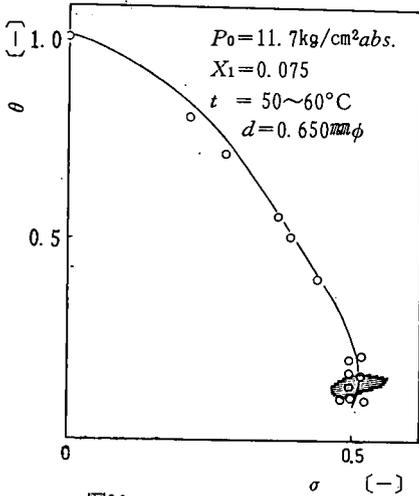


図20

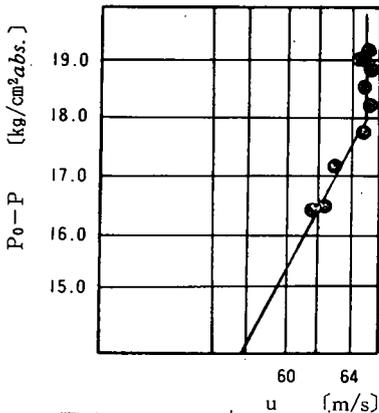


図21 $d=1.26\text{mm}\phi$
 $P_0=20.3\text{kg/cm}^2\text{abs.}$
 $X_1=0.082$

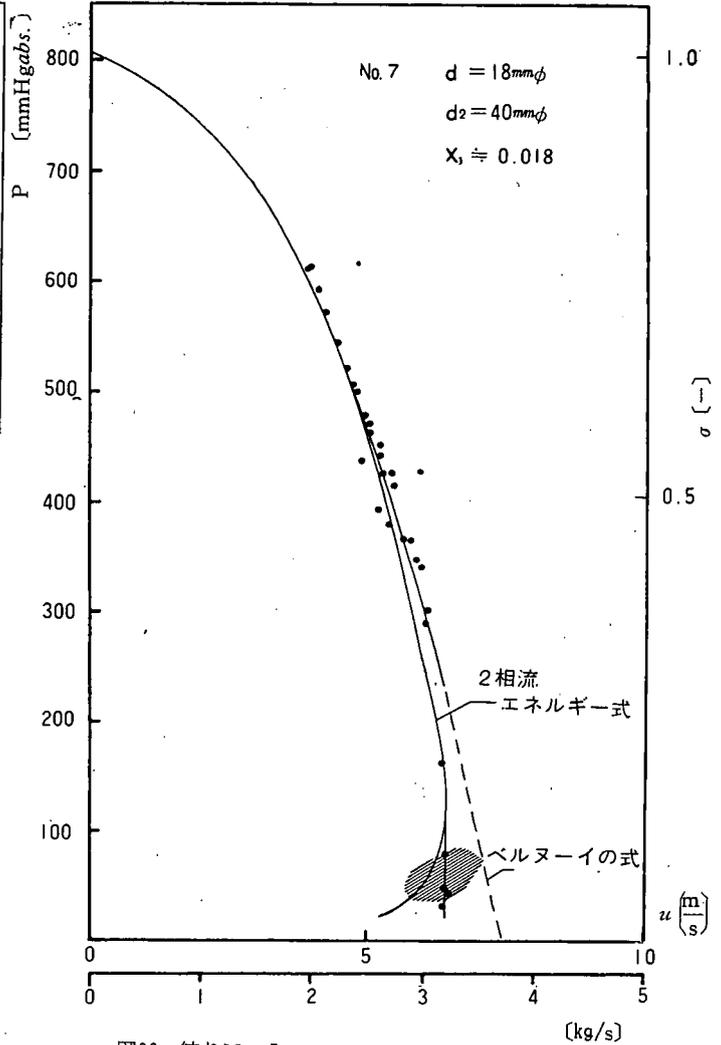


図22 絞りNo. 7

の密度が減少すると思われる。特にNo. 5についておこなった図21の流量の増加しない現象については、絞りの入口が丸味を持ち流れがはがれたり、死水域が絞りの部分で生じたりすることがないためになおのこと従来の説明では納得がいかない。

以後、白泡状の流れが観察されることから、密度の変化のみをとりあげ、これによって普通の油圧系の絞りの部分の流れの条件の範囲で、臨界流量となり得るかどうかを考えてみる。

いま流れの過程は図24に示すような履歴を経るものとする。すなわち、最初大気圧下の空気に長時間さらされたリザーバ内の液体が、ポンプによって吸込まれ、途中の羽根車その他の絞りの部分で一旦キャビテーションが発生して、溶解していた気体が気泡状に分離したまま、流下するものとする。この気相と液相とが分離したいわば気液2相流体が、さらに次の絞りの部分に到着して、キャビテーションを発生する場合、あるいは噴流中にあらわれる白泡のキャビテーションの下流に対して以後考えることにする。実際の閉回路で、脱気装置が装備されていない場合、翼面上で白泡上のキャビテーションが発生している領域などについては、空気泡の浮上分離速度に比べて、回流速度が速いため、そこに発生している2相流体は図23の履歴に近いものと思われる。この場合はスーパー・キャビテーションのように、気相部分が定常的にわかれて自由流線が形成されてはいない。

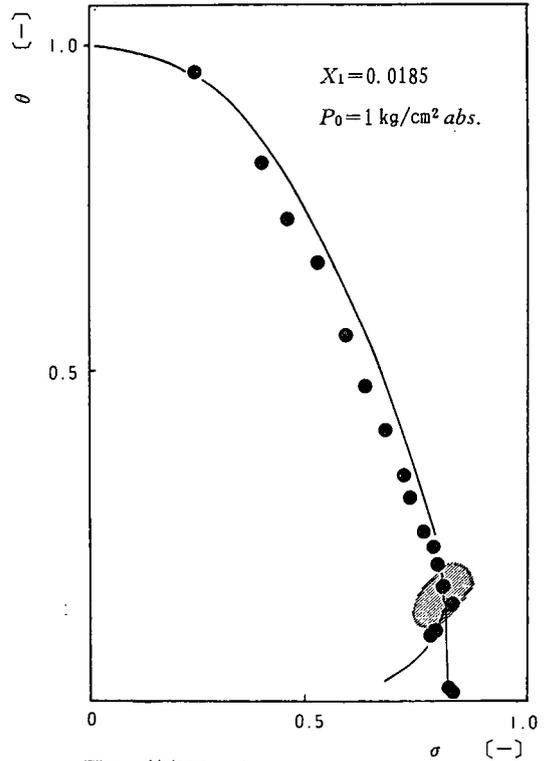
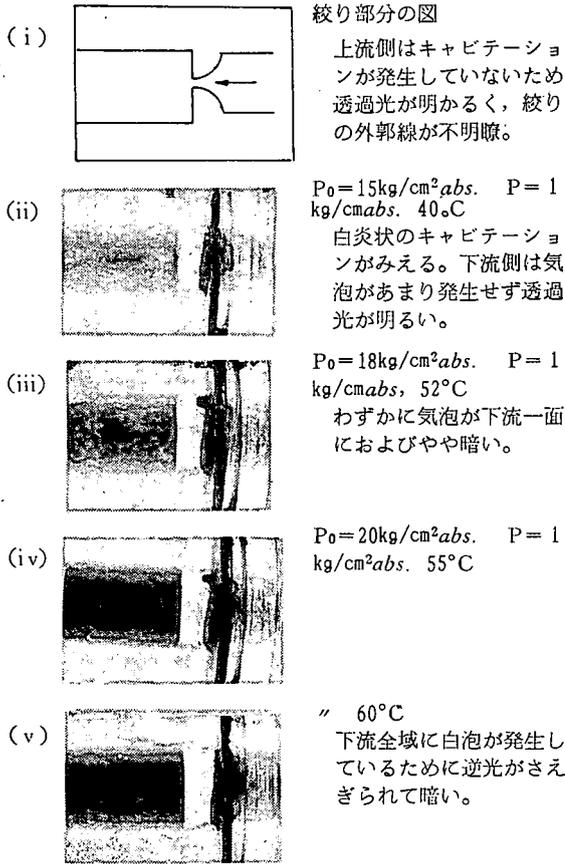


写真2 キャビテーション発生状況絞りNo. 5

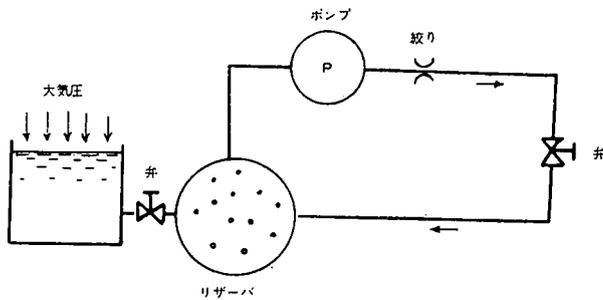


図 24.

そこで、最初のキャビテーション発生後の流れでは、流下する気泡分に着目し、気相と液相とが各々単独に気体あるいは液体の性質を示すとすれば、気体に対しては圧力 P と比重量 γ_A との間にポリトロープ変化

$$P=A \cdot \gamma_A^n \dots\dots\dots (2)$$

が関係づけられる。ただし A は常数。したがって

$$K_A=n \cdot p \dots\dots\dots (3)$$

また大気圧 F の体積は気体と液体で

$$V_{A1} = x_1 \cdot V_1' \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{L1} = (1 - x_1) \cdot V_1' \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。圧力 P のとき、 $\Delta P \equiv P - P_1$ とすれば、減少した体積 $\Delta V'$ は第1次の項の近似のみを考え

$$\Delta V' = \Delta V_A + \Delta V_L \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに

$$\Delta V_A = x \cdot \Delta V' \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta V_L = (1 - x) \Delta V' \quad \dots\dots\dots (8)$$

となるから、ポリトロップ変化より圧力 P のときの体積 x_A は

$$(x_1 \cdot V_1')^n \cdot P_1 = x_A^n \cdot P \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\therefore x_A = (P_1/P)^{1/n} \cdot (x_1 \cdot V_1') = (1 - \Delta P/P)^{1/n} \cdot x_1 \cdot V_1'$$

$$\approx (1 - \Delta P/nP) x_1 \cdot V_1' \quad \dots\dots\dots (10)$$

液体の場合も同様に考えて

$$x_L = \left(1 - \frac{\Delta P}{K_L}\right) x_1 \cdot V_1' \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\therefore \frac{x_A}{x_L} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta P}{nP}\right) x_1 \cdot V_1'}{\left(1 - \frac{\Delta P}{K_L}\right) (1 - x_1) V_1'} = \frac{x \Delta V'}{(1 - x) \Delta V'} \quad \dots\dots\dots (12)$$

これより

$$x = 1 - \left\{1 + \frac{x_1}{1 - x_1} \cdot \frac{1 - \Delta P/nP}{1 - \Delta P/K_L}\right\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

したがって、大気圧下において空気が x_1 だけ混入していれば、圧力 P のときの空気含有率は上式の x に補正する必要がある。

みかけの体積弾性係数 K' は

$$K' \equiv \frac{1}{\beta'} = \frac{K_L \cdot K_A}{K_A + x (K_L - K_A)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

以上は板谷・竹中⁽⁹⁾が油圧系のオイル・ハンマに関して誘導した式であるが、この場合のように少くとも、何回も回流される液体に対しては上の(14)式がそのまま適用できると考える。

上の関係を使って、さらにみかけの密度 ρ' を求めると

$$\rho' = (1 - x) \rho_L + x \rho_A \approx (1 - x) \rho_{L1} \cdot e^{-\Delta P/K_L} + x_1 \rho_{A1} (P/P_1)^{1/n} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ところで、 $\Delta P \ll K_L$ だから上式の exponential の指数は 0 とし(13)式を代入して

$$\begin{aligned} \rho' &\approx (1 - x) \rho_{L1} + x_1 \rho_{A1} (P/P_1)^{1/n} \\ &\approx \left\{1 + \frac{x_1}{1 - x_1} \left[1 - \frac{P - P_1}{nP}\right]\right\}^{-1} \cdot \rho_{L1} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

(14)式と(16)式を使用して、気液2相流体のみかけの音速 C を求めれば

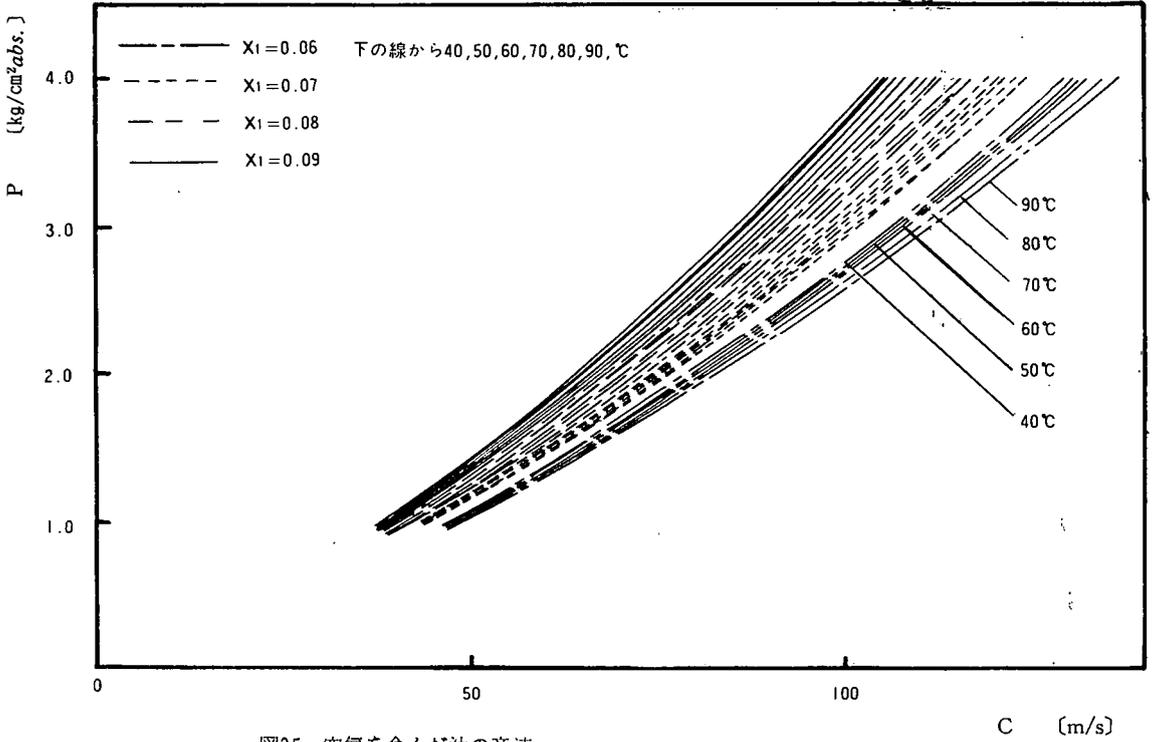


図25 空気を含んだ油の音速

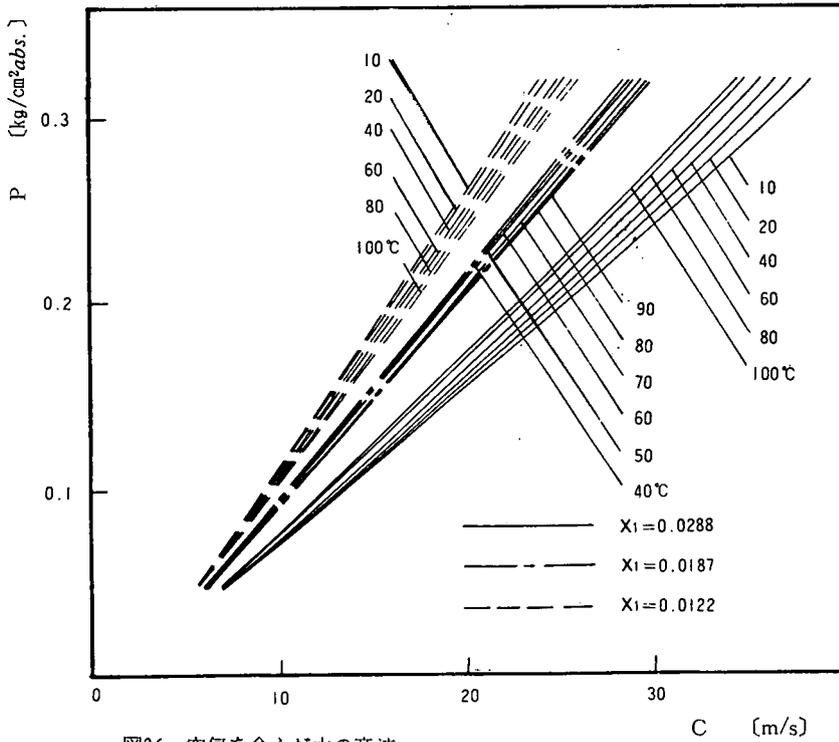


図26 空気を含んだ水の音速

$$\begin{aligned}
 C &= \sqrt{\frac{K'}{\rho'}} \left\{ 1 + \frac{x_1}{1-x_1} \left[1 - \frac{P-P_1}{\kappa \cdot P} \right] \right\} \left\{ \frac{K \cdot P}{\rho_{L1} \frac{x_1}{1-x_1} \left[1 - \frac{P-P_1}{\kappa \cdot P} \right]} \right\}^{1/2} \\
 &= \sqrt{\frac{P_1}{\rho_{L1}}} \left\{ \frac{1.4 \frac{P}{P_1} + \frac{x_1}{1-x_1}}{\sqrt{\frac{x_1}{1-x_1} \left(0.4 \frac{P}{P_1} + 1 \right)}} \right\} \dots\dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

ただし、溶解気体のほとんどは単原子分子故 $\kappa=1.4$ とする。

水と油の場合の一番多く用いられると思われる P, x_1 について(17)式から計算した値が図25、図26である。大気圧の値は Mallock⁽¹¹⁾ による計算値と近い。

水、油の場合に常温、常圧付近で空気が溶けこみ、主管内の温度があまり高くなければ x_1 から求めた x はほぼ0.1以下であるから、気相と液相の間に相対すべりはほとんどないとみて、ここでは考えない⁽¹⁰⁾ことにする。

いま、一次元の水平な定常流の運動方程式

$$u \frac{du}{dz} = -\frac{1}{\rho'} \frac{dp}{dz} \dots\dots\dots (18)$$

については、単相流、混相流を問わないから、上式における ρ' に(15)式を代入して z 方向に積分すれば

$$\frac{1}{\rho_{L1}} \int_2 \left[1 + \frac{x_1}{1-x_1} \left(1 - \frac{P-P_1}{nP} \right) \right] dp + \frac{u^2}{2} = \text{const} \dots\dots\dots (19)$$

となる。この積分を行って

$$\therefore \left[1 + \frac{x_1}{1-x_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right] \frac{P}{\rho_{L1}} + \frac{P_1}{n\rho_{L1}} \cdot \frac{x_1}{1-x_1} \ln P + \frac{u^2}{2} = \text{const} \dots\dots\dots (20)$$

さらに ρ_i は時間によって変化しないとして連続則については

$$G = f \cdot \rho' \cdot g \cdot u = f \cdot g \cdot \frac{\rho_{L1}}{\left\{ 1 + \frac{x_1}{1-x_1} \left[1 - \frac{P-P_1}{nP} \right] \right\}} \cdot u \dots\dots\dots (21)$$

が成立する。

次に加圧された容器に設けられたオリフィスから噴出するジェット内に発生するキャビテーション下流に対してエネルギー方程式を考える。

上流容器内の圧力を P_0 とすれば、ここではほぼ $u_0=0$ とみて(20)式より

$$\left[1 + \frac{x_1}{1-x_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right] \frac{P_0 - P}{\rho_{L1}} - \frac{P_1}{n\rho_{L1}} \cdot \frac{x_1}{1-x_1} \ln \frac{P}{P_0} = \frac{u^2}{2} \dots\dots\dots (22)$$

α を導入し、これを連続則に代入すれば流出量は

$$G = \alpha \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\rho_{L1} \cdot g \sqrt{2}}{1 + \frac{x_1}{1-x_1} \cdot \frac{P_1}{nP}} \sqrt{\left[1 + \frac{x_1}{1-x_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right] \frac{P_0 - P}{\rho_{L1}} - \frac{P_1}{n\rho_{L1}} \cdot \frac{x_1}{1-x_1} \ln \frac{P}{P_0}} \dots\dots\dots (23)$$

となる。

したがって、(23)式の u と(17)式の C となる u の交点が $M=1$ となる条件である。このときの

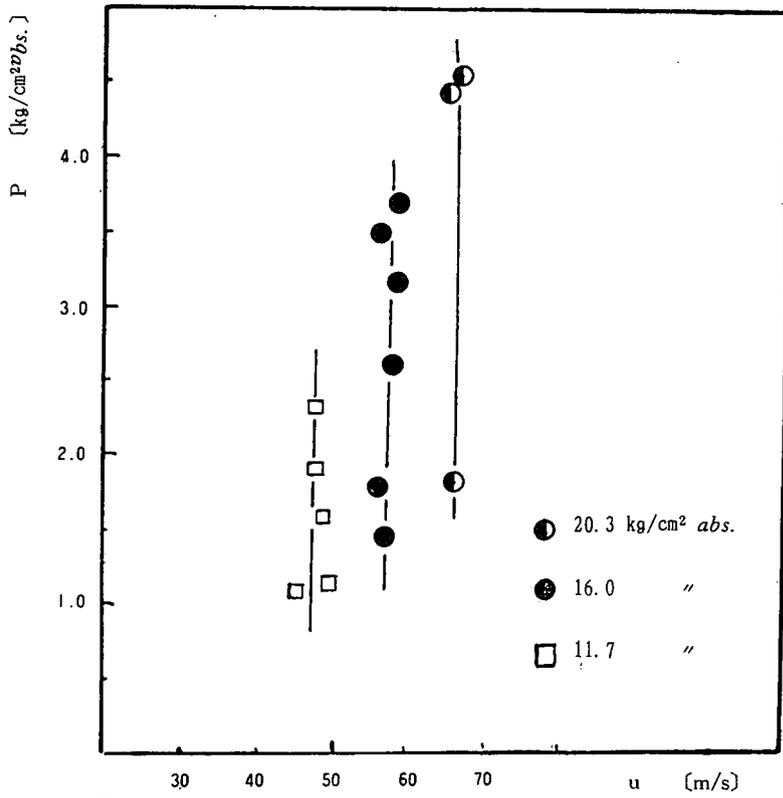


図27

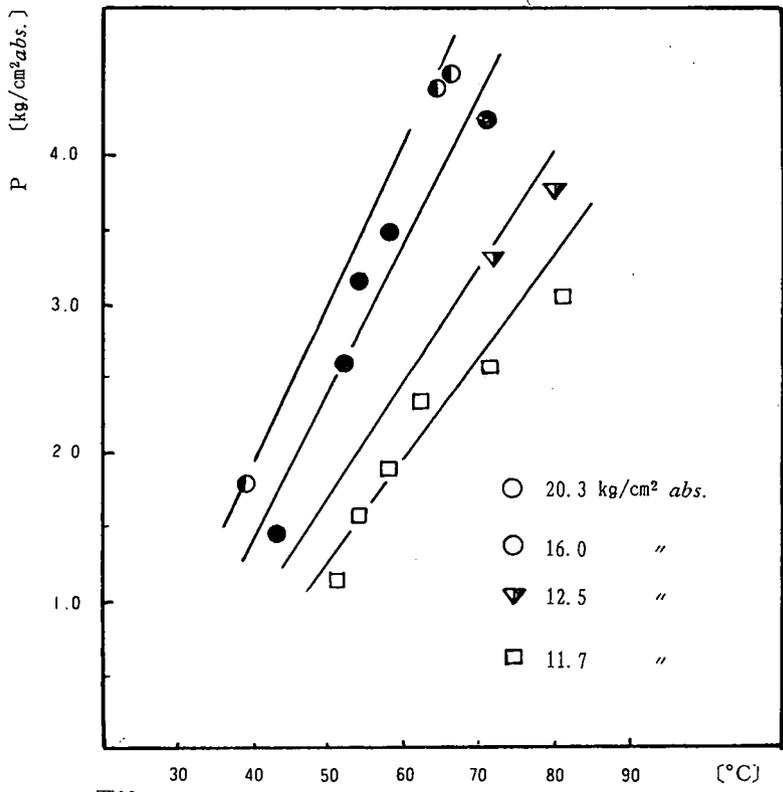


図28

圧力以下に下流側の圧力をさげても、下流の管全断面のみかけの密度変化は上流に伝わらない。このときの G の値が臨界流量となる。ただし P の値はそのときの温度の飽和蒸気圧以上の場合に限る。上の(23)式で $\varepsilon \equiv \left(\frac{x_1}{1-x_1} \right) \cdot P_1/P_0$, $n=\kappa$ とすれば

$$\sigma = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon/\kappa \cdot \theta} \sqrt{1 - \theta - \frac{\varepsilon}{\kappa} \ln \theta} \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。したがって収縮係数の変化は α に入っているけれども、それ以外に ε の項が影響してくる。従来のキャビテーション領域の流れの状態にまで適用した Bernoulli 式は $\varepsilon=0$ の場合である。

(22)式と(17)式の交点の位置は、普通の絞りから流出する流れの条件の中に入っており、十分その条件の流動に遭遇する可能性は考えられる。

いま、図20、図21の実測値でキャビテーションが発生しない出来るだけ θ の小さい値を使って α を計算し、その α を使って(24)式から θ と σ の関係を求めたのが図20、図21、図22、図23の実線であり図中の斜線が図24、図25から求めた音速の領域である。

なお、偶然であるが、絞りNo. 4の場合に、絞りの入口の角付近で強い紫色の発光現象がみられた。空気の音速旋回流の場合や超音波によって静止液を振動した場合の発光現象の例はあるが、流れのキャビテーションのときに発生する例は他に見あたらない。図27は発光のときの u と P の関係、図28は絞りの部分の温度と下流側の静圧 P の関係を示したものである。

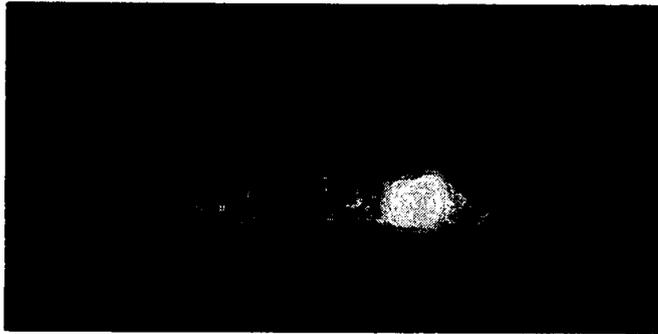


写真3 絞りNo. 4, 絞りにおける発光現象 (約10倍に拡大)

5. 結 論

油圧回路系などのように上流圧が変化する場合、油温がことなる場合に対しては従来のキャビテーション係数だけでは $P \sim v$ 平面上の一点は定まらない。また小さな絞りの通路上の一点の流速、静圧分布は実測することが困難である。このような場合に上流の点と下流の点を規定することによってその中間の点のキャビテーション初生条件をおさえることができる。本実験の条件に関する限り総括的には $K^* \sim C$ の曲線でその限界を知ることができた。他の形の絞りや開口比の大きい絞りについて $K^* \sim C$ の曲線が求めれば設計に際してきわめて便利である。

また、噴流に発生する気泡状のキャビテーション下流の流動に対してはみかけの密度の減少が著しく、流れを全体として取扱う場合には第1近似的に本論文で取扱った概念が適用された。したがって、このような状況下では収縮係数の変化と、密度の減少を含めて論じなければならない。

最後に、当研究室員森田南海男氏から、実験、作図その他の助力を賜ったことを感謝します。

文 献

- (1) 超音波技術便覧, (昭35—11), 128—163, 日刊工業新聞社.
- (2) 能本, 日本物理学会誌, 15—1 (昭35—1), 1.
- (3) 沼知, 東北大学高速力学研究所報告, 11—101 (1954—9), 1—10.
- (4) D. Gilbarg & R. A. Anderson, J. Appl. Phys., Vol. 19, Eebr., (1948), 127.
- (5) L. J. Briggs, J. Appl. Phys., 21 (1950), 721.
- (6) 棚沢・豊田, 機会学会論文集, 20 (第2部), (昭29), 306.
- (7) 沼知・椎名, 機会学会論文集, 3—11 (昭—12), 143.
- (8) 沼知, 機会学会論文集, 3—11 (昭12), 148.
- (9) 板谷・竹中, 機会学会誌, 66—537 (昭37), 74.
- (10) 村田, 水工学便覧, (昭41—8), 第14章, 179, Fig. 15·3. 森北出版
- (11) A. Mallock, Proc. Roy. Soc. London, 84 (1911), 391.
- (12) 山崎, 機械学会70周年記念東京講演会講演論文集 No. 179 (昭42—10), p. 105.