

## 外周噴流形ジェットポンプの研究\*

### (第3報, キャビテーション性能について)

清水幸丸\*\*, 葛原定郎\*\*, 中村彰吾\*\*\*  
Yukimaru SHIMIZU, Sadao KUZUHARA, Syogo NAKAMURA

**Key Words:** Fluid Machinery, Annular Jet Pump, Swirling Flow, Cavitation Factor, Required NPSH, Central Type Jet Pump

#### 1. ま え が き

第1報<sup>(1)</sup>および第2報<sup>(2)</sup>において, 外周噴流形ジェットポンプの形状と性能の関係, および噴流に旋回成分を与えた場合のポンプ性能, 内部の流動状態について検討し, 外周噴流形ジェットポンプの各種特性を明らかにしてきた。

ところで, ポンプを実際に運転する場合, 最大効率点近くで, キャビテーションが発生し, ポンプの性能および運転上種々の影響をもつことが明らかになった。従来の中央噴流形ジェットポンプの形状とキャビテーション性能の関係については, 理論的実験的に多くの報告<sup>(3)(4)(7)</sup>がなされているが, 外周噴流形ジェットポンプのキャビテーションについては, ほとんど不明であり, その発生状態も中央噴流形とは相当異なる。

本報では, 外周形ジェットポンプのキャビテーション発生状態およびその諸特性を明らかにした。特に本ポンプでは, 噴流に旋回成分を与えると種々の利点があるが, 噴流旋回強度とキャビテーション特性の関係を明らかにし, 有益な結果を得た。また, 従来の中央噴流形ジェットポンプとの比較検討を行った。

#### 2. 記 号

前報<sup>(1)(2)</sup>と同一のものは説明を省略し, 他は本文中に述べる。

#### 3. 実験方法および装置

図1に供試ポンプの概略と諸寸法の定義を示す。測

定方法は第1報<sup>(1)</sup>および第2報<sup>(2)</sup>と同一である。キャビテーションの写真撮影には, 透明アクリル製ポンプを使用し, 光源にはストロボを使用した。絞り5.6, シャッタースピード1/60sである。

#### 4. 実験結果の表示式

ジェットポンプのNPSHはターボ形ポンプと同様, 吸込口の全水頭と飽和蒸気圧との差として定義する。

$$NPSH = P_s / \rho g + v_s^2 / 2g - P_v / \rho g \dots\dots\dots (1)$$

NPSHの最小値を必要NPSH (Req. NPSH)として定義する。

トーマのキャビテーション係数に対応するものとして, 成井ら<sup>(3)</sup>による $\sigma$ を用いる。

$$\sigma = NPSH / (H_d - H_s) \dots\dots\dots (2)$$

$H_d, H_s$ は吐出し側および吸込側の全水頭。

限界キャビテーション係数は必要NPSHに対応するもので, 次式になる。

$$\sigma_c = \text{Req. NPSH} / (H_d - H_s) \dots\dots\dots (3)$$

ジェットポンプの比速度は, 種々提案されているが, 本報ではLa Verne<sup>(4)</sup>による次式を用いる。

$$n_{sj} = M_{op}^{1/2} / N_{op}^{3/4} \dots\dots\dots (4)$$

また, 他の研究結果との比較のため, 成井らによる比

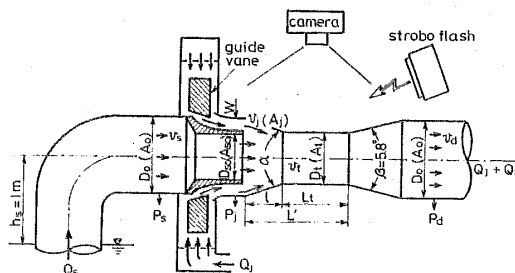


図1 外周噴流形ジェットポンプ(概略および主要寸法の定義)

\* 昭和56年8月5日 第911回講演会において講演, 原稿受付昭和57年5月19日。

\*\* 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

\*\*\* 准員, 富士電機製造(株)川崎工場 (〒210 川崎市川崎区田辺新田1-1)。

速度を用いる。

$$n_{sj}' = Q_s / \{ (H_a - H_s)^{1/2} D_n^2 \} \dots \dots \dots (5)$$

ここで  $D_n$  は中央噴流形の噴流出口径であるが、外周噴流形の場合次式のように求める。

$$D_n^2 = D_0^2 - (D_0 - 2W)^2$$

流量比  $M$ , 水頭比  $N$ , 効率  $\eta$ , 旋回強度を表す無次元角運動量流量  $I_j'$  はそれぞれ第1報<sup>(1)</sup>の式(1), (5)および第2報<sup>(2)</sup>の式(1), (2)に等しい。

5. 実験結果と考察

5.1 性能曲線とキャビテーション 外周噴流形ジェットポンプの性能曲線は、ポンプ下流側管路系の抵抗の大きさ、すなわち背圧の大小によってポンプ内のキャビテーションの大きさが異なるため、違いが生じる。図2にはその一例を示す。背圧がほぼ大気状態の場合の最大効率は①で表され、最大効率点以後、噴流流量を増すにつれて激しいキャビテーションを生じ、効率は●印のような経路をたどりながら急激に低下する。一方、背圧を高めていくと最大効率は②, ③, ④の順に低くなり、それぞれの背圧のもとで流量  $Q_j$  を増しキャビテーションを発生させると、その経路は各点より垂直に下がり●印線に至る ( $Q_{j0}$  は点①における噴流流量)。このような性能曲線の変化の理由は次のごとく考えられる。ポンプ下流側の抵抗を増大させると最大流量  $Q_0$  は減少するが、一方では背圧増大のためキャビテーション領域が減少し、有効通路面積が増えるため流れやすくなる。この両者の現象が打ち消し合って流量比は変化しなくなる。これに対して、●印においては、大気開放のため背圧が高まらず、キャビ

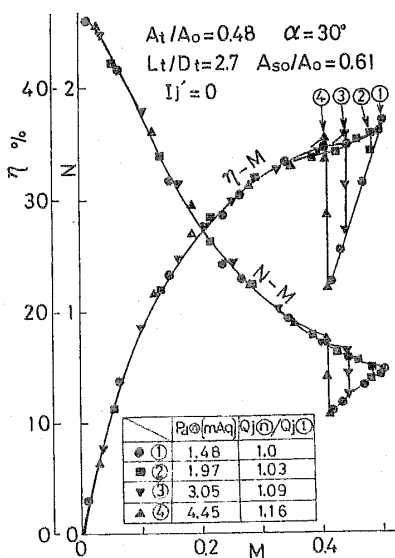
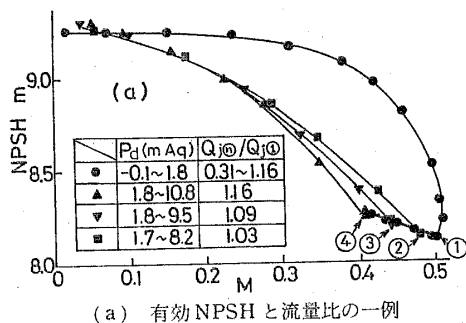


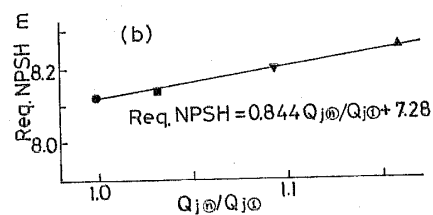
図2 ポンプ下流側背圧(流体抵抗)を変化させた場合の縮小形状ポンプの性能曲線

テーションがますます発達し、有効通路面積を狭めるため、流量比は減少していく。図3(a)には図2に示したポンプの有効NPSHと  $M$  の関係を示す。背圧が大気状態の場合(●印), NPSH は  $M$  の増加に伴って減少し、キャビテーション初生点①で最少になる。これよりキャビテーションが発達すると  $M$  は減少し、NPSH は増加する。背圧を変えた場合には NPSH は緩やかに減少し、キャビテーション初生点で大気状態●印のキャビテーション領域上の点②, ③, ④に達し、その後さらにキャビテーションが発達しても値は変化しなくなる。このように背圧によって必要NPSHが変わるので、以下のキャビテーション性能の議論においては、大気状態を一応の基準にとり、その状態で得られるキャビテーションの諸性能を論ずることにする。なお、背圧を加えた場合には、必要NPSHの値は絶えず大気状態より大きくなり、大気状態は下限とみて差しつかえない。図示のポンプ形状について、大気状態より背圧を高めた場合の必要NPSHと  $Q_{j0}/Q_{j1}$  の関係を求めると図3(b)のごとくなる。この形状では  $Req. NPSH = 0.844(Q_{j0}/Q_{j1}) + 7.28$  の関係があるが、他の形状でも同様の方法で必要NPSHと  $Q_{j0}/Q_{j1}$  の関係を求めておけば、随時背圧を変化させた場合の必要NPSHを推定できる。

外周噴流形ポンプの性能曲線は、基本的に図2と同様になるが、形状によってキャビテーション発生点に違いが生じるので、その代表例を図4(混合室を1/2に縮小)に示し、図5の可視化写真と併用して、キャ



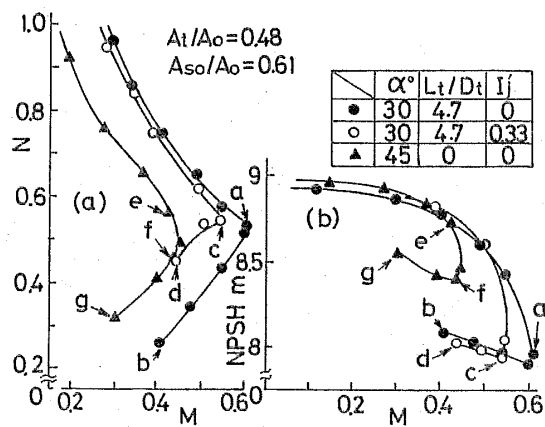
(a) 有効NPSHと流量比の一例



(b) 必要NPSHと最高効率点における無次元噴流流量

図3 ポンプ下流側背圧(流体抵抗)を変化させた場合の有効NPSHと必要NPSH(ポンプ形状寸法は図2に同じ)

ピテーシヨンの発生状態と性能の関係を検討する。図4(a)には水頭比と流量比の関係を示す。噴流が無旋回時の●印 ( $A_{s0}/A_0=0.61, \alpha=30^\circ$  で  $L_t/D_t=4.7$ ) では  $M$  の増加に伴い  $N$  は減少し、点a ( $M=0.60$ ) で図5(1)に示すような環状気泡群が現れ、初生キャビテーション状態になる。これよりも流量  $Q_j$  が増し、キャビテーションがさらに発達すると  $N, M$  ともに減少し、不連続的に折れ曲がる特異な後戻り曲線になる。図5(2)の写真は点bに相当する。この状態では気泡を伴った流れは直管部入口ではなく離し、少し下流で気泡群は壁面に再付着しディフューザ内にまで達する。○印は●印状態に比較強い旋回強度を噴流に与えた場合である。初生キャビテーションは点c、発達状態は点d [図7(1)]である。この形状に対して、混合室に直管部を設けず、通路縮小後直接ディフューザに接続する ( $L_t/D_t=0$ ) 場合は異なった傾向を示す。この形状では初生キャビテーション点e [図5(3)]に達しても  $M$  は減少せず、さらにある程度増加してから点fで減少し始める。この場合の写真は図5(4)に示す。さらにキャビテーションが発達すると点gまで達し、図5(5)のような状態になる。また、この状態では  $N-M$  曲線は連続的に変化し、 $L_t/D_t \neq 0$  のポンプのような屈折点は存在しない。図4(b)には有効NPSHと流量比の関係を示す。いずれも  $M=0$  付近でNPSHは9m、 $M=0.4$  までは同一経路をたどり、緩やかに減少する。その傾向は形状によって異なるが、いずれの有効NPSHも最小値を示した後再び増加する。 $L_t/D_t=4.7$  では、キャビテーション初生点a、cと必要NPSHはほぼ対応する。しかし、 $L_t/D_t=0$  ではNPSHの減少途中の点eで初生キャビテーションになり、必要NPSHはこの点よりもさらに0.5mほど低下する。



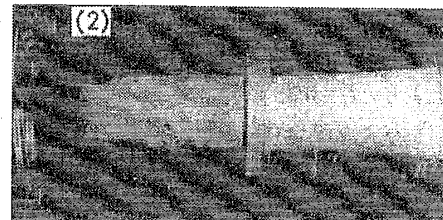
(a) 水頭比と流量比の関係 (b) 有効NPSHと流量比の関係  
図4 縮小形状ポンプの場合のキャビテーション発生点

混合室を1/5まで縮小する形状については、最高効率が20%以下であり、実用上あまり重要でないので、この形状のキャビテーション性能については文末に[付録]として示す。

5.2 噴流に与えた旋回成分の影響 図6は必要NPSHと噴流旋回強度  $I_j'$  の関係を、最も良い効率を示す  $L_t/D_t=2.7$  のポンプについて示す。縮小角  $\alpha$  と吸込ノズル面積  $A_{s0}$  は変化させた。図から明らかかな

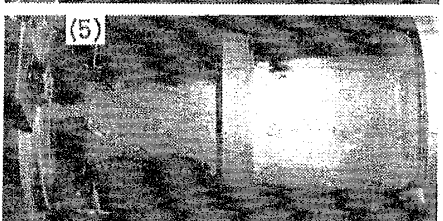
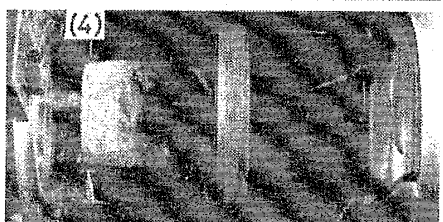
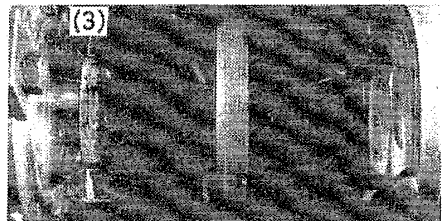


(1) 初生キャビテーション(図4の点a)



(2) 十分に発達したキャビテーション(図4の点b)

(1),(2)  $A_t/A_0=0.48, \alpha=30^\circ, L_t/D_t=4.7, A_{s0}/A_0=0.61, I_j'=0$



(3)~(5)  $L_t/D_t=0$  形ポンプのキャビテーションの発達過程(図4の点e~g)

(3)~(5)  $A_t/A_0=0.48, \alpha=45^\circ, L_t/D_t=0, A_{s0}/A_0=0.73, I_j'=0$

図5 外周噴流形ジェットポンプに発生するキャビテーション

うに、いずれの形状においても  $I_j$  の影響はほとんどない。図は省略したが  $L_t/D_t$  を変えても同様の傾向になる。しかしながら、キャビテーションの発生状態は旋回成分の影響を受ける。図7には噴流に旋回を与えた場合のキャビテーション写真を示す。図7(1)は図4に示した中で、 $I_j=0.33$  の比較的強い、中程度の旋回を与えた場合のキャビテーション写真である(図4の点d)。直管部入口には図5(1)と同様の、環状のキャビテーション気泡群が分布し、その中央から円筒状気泡群が発達している。図7(2)~(4)には、吸込ノズル面積が広いタイプ ( $A_{s0}/A_0=0.5$ ) で、強い旋回を与えた場合のキャビテーションの発達過程を示す。初生キャビテーションは図7(2)のように、直管部入口付近の断面中央部とディフューザ入口部に発生する。さらに発達すると図7(3)のごとく下流側より気泡群が発達し、つづいて図7(4)のようにポンプ中央部にねじれた気泡群を形成し、噴流出口断面近くまで達する。以上より、 $I_j=0.33$  の前後あるいはそれより少し強い旋回を与えた場合には、気泡群を管中央部に集中させ、しかも旋回の影響で管壁の圧力が増加する(後述の図15参照)ため、キャビテーションによるポンプ損傷を低減できるものと予想される。

**5.3 揚水不能現象** 図7は噴流に旋回を与えた場合のキャビテーションの発生状況を示す写真であるが、これからキャビテーションが管中央部に集中移動していることをよく知ることができる。しかし、旋回噴流を実際に適用する場合には、考慮すべき点がある。図8は縮小形状ポンプ ( $\alpha=30^\circ$ ) の最高効率  $\eta_{max}$  と噴流旋回強度  $I_j$  の関係を示す。吸込ノズル面積および直管部長さはそれぞれ2種類に変えた。この形状では、斜線で示す  $I_j$  が  $0.4\sim 0.5$  の間においてポンプの自吸作用がなくなる。このような場合には、特別な方

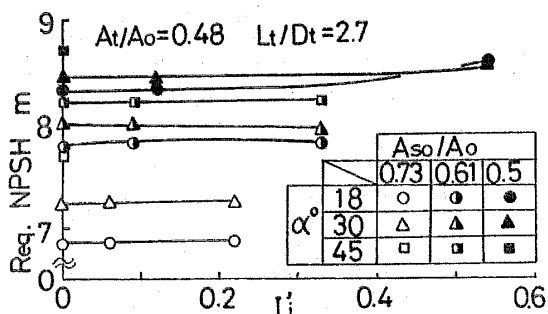


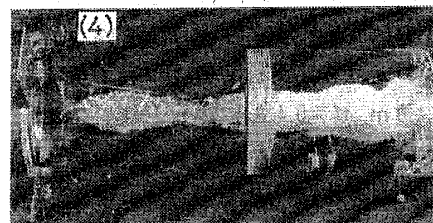
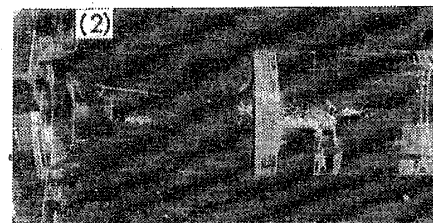
図6 縮小形状ポンプの場合の噴流旋回強度と必要NPSHの関係

\* このような状態で揚水を行うには弱旋回時の安定揚水状態より、徐々に案内羽根角度を増し、噴流旋回強度を強めていく方法を用いる。急激に案内羽根角度を増すと揚水不能になる。

法<sup>\*</sup>で揚水しなければならない。図9には流れ方向壁圧分布を示す。実線の  $I_j=0$  の場合、直管部入口  $X/D_0$



(1)  $I_j=0.33$  の旋回を与えた場合 ( $A_{s0}/A_0=0.61$ )



(2)~(4)  $I_j=0.54$  の強い旋回を与えた場合の発達過程 ( $A_{s0}/A_0=0.5$ )

図7 噴流に旋回を与えた場合のキャビテーション(ポンプ形状  $A_t/A_0=0.48$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $L_t/D_t=4.7$ )

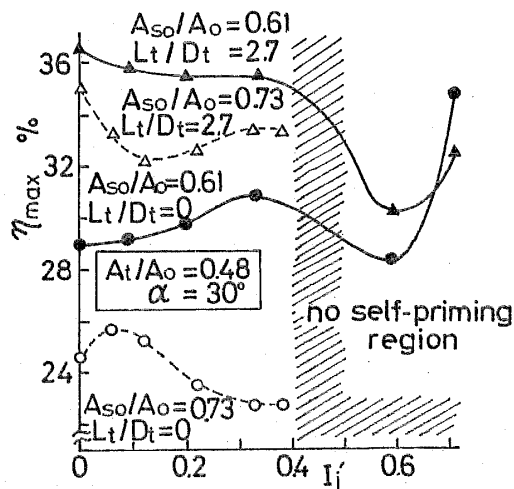


図8 縮小形状ポンプの場合の最大効率値に対する噴流旋回強度の関係

$\alpha=1$ の圧力が最小であり、図5に示すキャビテーションの発生点と対応する。また、初生キャビテーション(△印)と十分に発達したキャビテーション(△印)では、 $X/D_0=1\sim 4$ の直管部の壁圧はかなり低く約-0.6で一定になる。破線で示す $I_j=0.54$ の場合、脚注(1)で述べた特別な操作により実現された●印の揚水状態では、壁圧分布は無旋回の非キャビテーション時と相似になるが、旋回の影響で値は全体に高くなる。この状態では、流量を減少させても、また、流量を増してキャビテーションを発生させても、揚水不能になる。●印は流量低下による揚水不能直前、○印は過大キャビテーションによる揚水不能直前の限界状態の壁圧分布である。いずれも安定揚水時に比べ、 $X/D_0=0\sim 1$ の部分の壁圧がノズル出口部静圧よりもかなり高くなる。以上、図8および図9の結果から明らかごとく、過大な旋回を与えた場合には、流れは不安定になり、噴流が吸込管に逆流しはじめ、揚水不能になるので注意を要する。

5.4 ポンプ形状と必要 NPSH の関係 図10には必要 NPSH (Req. NPSH) と縮小角の関係を示す。

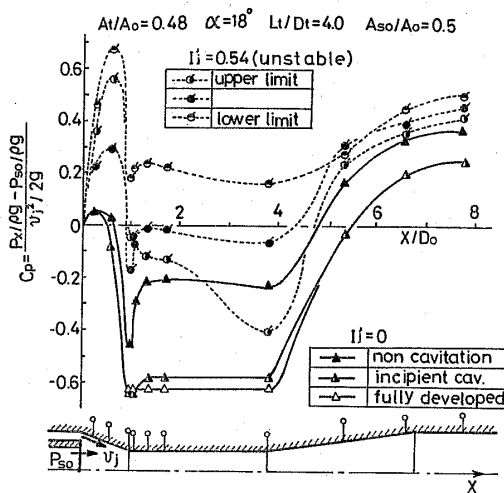


図9 縮小形状ポンプの壁圧分布

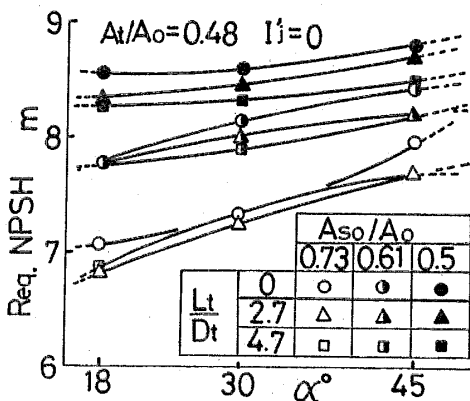


図10 縮小形状ポンプの場合の必要 NPSH と縮小角の関係

いずれの吸込ノズル面積  $A_{s0}$  においても縮小角を  $\alpha=18^\circ$  から  $45^\circ$  まで大きくするにつれて Req.NPSH は増大する傾向を示す。しかし、その増加割合は  $A_{s0}$  によって異なり、 $A_{s0}$  が大きいほどこう配は大きく、 $A_{s0}$  が小さくなるにつれて緩やかになる。Req. NPSH は  $A_{s0}$  が大きくなるほど小さくなる。この理由を検討する。吸込ノズル面積を大きくすると流量比は増加し[第1報の図10(b)], 初生キャビテーション時の吸込流量も増加する。ここで吸込み槽水面とポンプの吸込側側圧力取り出し断面にエネルギー式を適用すると

$$P_s/\rho g + v_s^2/2g + \xi v_s^2/2g + h_s = P_{atm}/\rho g \dots\dots\dots (6)$$

$\xi$  は吸込管路の全損失係数である。式(6)を式(1)に代入すると

$$\text{Req. NPSH} = P_{atm}/\rho g - \xi(Q_{sic}/A_0)^2/2g - h_s - P_v/\rho g \dots\dots\dots (7)$$

水の飽和蒸気圧  $P_v$ , 吸込高さ  $h_s$  および大気圧  $P_{atm}$  が一定ならば、Req. NPSH は初生キャビテーション時の吸込流量  $Q_{sic}$  のみに依存する。図11には吸込流量  $Q_{sic}$  を  $\alpha=18^\circ$ ,  $L_t/D_t=2.7$  の最大吸込流量  $Q_{sic\max}$  で割った無次元値と吸込ノズル面積  $A_{s0}$  の関係を示す。 $\alpha$ ,  $L_t/D_t$  は変化させた。図より  $A_{s0}$  が大きいほど、また縮小角が小さいほど  $Q_{sic}$  が大きくなる。したがって、式(7)より Req.NPSH は吸込ノズル面積が大きいほど低下することになる。

図12は本研究で得られた Req.NPSH を縮小角  $\alpha$  について、La Verne<sup>(4)</sup>の比速度  $n_{sj}(M_{op}^{1/2}/N_{op}^{3/4})$  を用いて整理したものである。これを最小二乗法により二次曲線近似すると以下の式を得る。

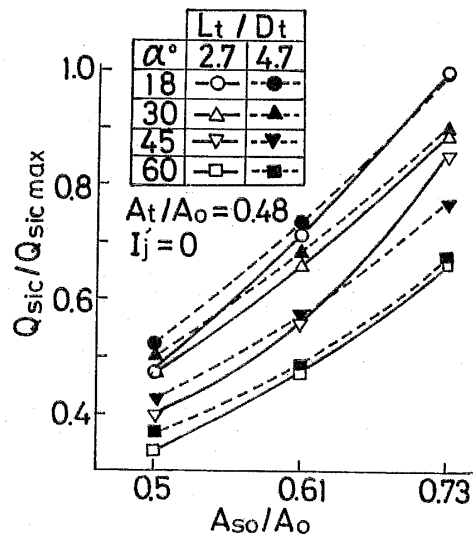


図11 縮小形状ポンプの場合の初生キャビテーション時の吸込流量と吸込ノズル面積の関係

$$\left. \begin{aligned} \text{Req. NPSH} &= A n_{sj}^2 - B n_{sj} + 9.12 \\ A &= -0.0028\alpha + 0.265 \\ B &= -0.0157\alpha + 1.64 \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

実験式(8)は  $\alpha=0^\circ$  の場合<sup>\*2</sup>を除いて良く一致する。

キャビテーション性能を議論する場合には、Req. NPSH と同時に限界キャビテーション係数  $\sigma_c$  [式(3)] が重要な目安になるので、これを検討する。図13(a)には  $\sigma_c$  と縮小角の関係を示す。直管部長さは3種類に変えた。いずれの場合も  $\sigma_c$  は  $\alpha$  が増加するに伴い増大するので、 $\alpha$  が大きくなるほど、キャビテーションが発生しやすくなる。この理由については5.5節で検討する。また吸込ノズル面積が小さくなるほど  $\sigma_c$  は大きくなる。図13(b)には  $\sigma_c$  と  $L_t/D_t$  の関係を示す。いずれも  $L_t/D_t$  が大きくなると  $\sigma_c$  は緩やかに一定こう配で増加する。この理由は、直管部の圧力が著しく低下し(図9)、長くなるほどキャビテーション気泡が低圧にさらされる時間が長くなり、気泡がよりいっそう発達しやすくなる結果と考えられる。

**5.5 キャビテーションの発生位置** 供試ポンプ形状は円すい形ベンチュリ管と同一構造である。しかし速度分布は相当異なる。以下ではベンチュリ管に発生するキャビテーションと本ジェットポンプの結果を比較し、キャビテーションの発生位置について検討を加える。ベンチュリ管に発生するキャビテーションについては、沼知ら<sup>(5)</sup>、Lehman ら<sup>(6)</sup>が報告している。図14は Lehman による壁圧分布と本結果を比較したも

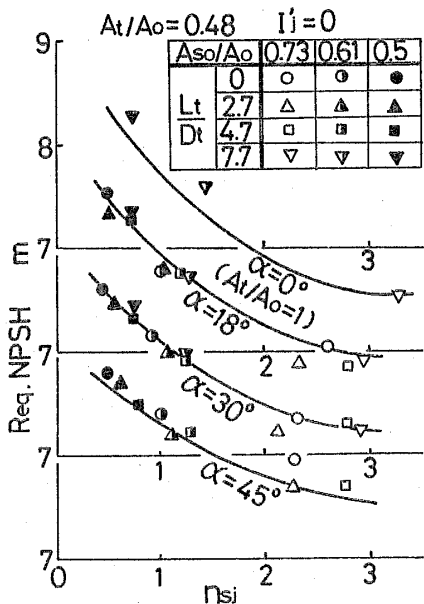
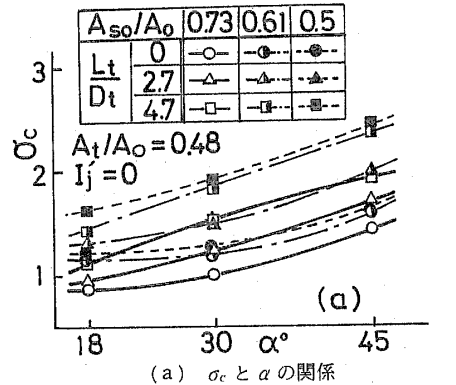


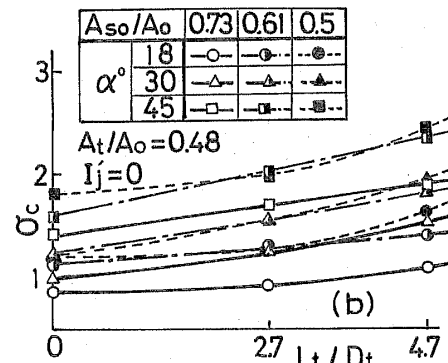
図12 必要NPSHと比速度の関係

\*2  $\alpha=0^\circ$  の場合、本実験範囲内ではキャビテーションは生ぜず図に記入するのは不適当かと思われるが、参考のため、最高効率点におけるNPSH値を記入した。

のである。破線は Lehman らが計算により求めた圧力係数  $C_p$  で、記号は本結果である。また図の下部には実線で Lehman の用いた流路形状を、一点鎖線で本ポンプ形状を示す。両形状とも直管部の径は 1.5 in である。Lehman の計算方法の詳細は不明なので、本実験値は  $C_p = (P_x - P_{min}) / (1/2)\rho v_i^2$  より求めた。 $v_i$  は混合室直管部平均流速を表す。定量的な比較は困難であるが、両結果とも縮小後の直管部入口で  $C_p$  は最小になっている。また Lehman, 沼知の報告の中にも、上記



(a)  $\sigma_c$  と  $\alpha$  の関係



(b)  $\sigma_c$  と  $L_t/D_t$  の関係

図13 縮小形状ポンプの限界キャビテーション係数  $\sigma_c$

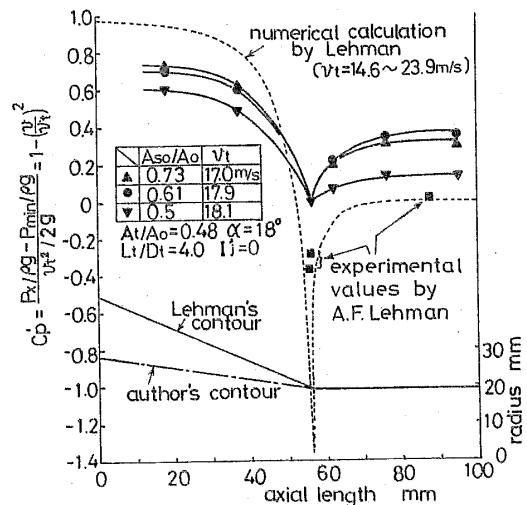
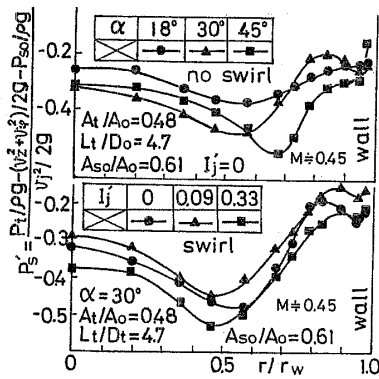


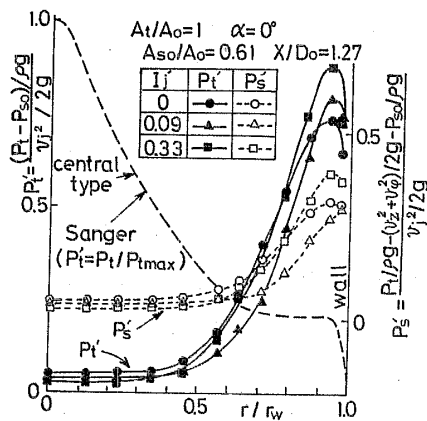
図14 縮小形状ポンプと円すい形ベンチュリ管の壁圧分布の比較(縮小部と直管部)

と同一場所で図5(1)と類似した初生キャビテーション写真が示されている。図15(a)には縮小形状ポンプにおいて、壁圧が最も低下する(図9, 14)混合室直管部入口断面の半径方向静圧分布を示す。測定は速度分布を明確にするため、キャビテーション発生以前<sup>\*3</sup>の流れ状態、 $M=0.45$ で行った。図の上側には無旋回噴流で、縮小角を $18^\circ$ から $45^\circ$ まで変化させた場合の静圧分布を示す。縮小角がいずれの場合も静圧は管壁より低下し、 $r/r_w$ が $0.7$ から $0.55$ の間で極小値を示し、その後管中心に向かってゆるやかに増大する。管壁の圧力は管中心部よりやや高くなる。圧力の極小値は $\alpha$ が大きくなるにつれて低下し、 $\alpha=45^\circ$ で最小になる。図13(a)で述べたが、 $\alpha$ が大きくなるにつれてキャビテーションが発生しやすくなるのはこの理由に基づく。図13(a)の下側には縮小角を $30^\circ$ で一定に保ち、噴流旋回強度を $I_j=0$ から $0.33$ まで三とおりに変化させた場合の静圧分布を示す。噴流に旋回を与えると、

無旋回時と比べ壁圧は管中心圧より相当高くなる。静圧の極小値は半径位置 $r/r_w=0.5$ においてみられ、無旋回時より管中心側へ移動する。図9, 14の壁圧分布および図5, 7の可視化結果では判定できなかった断面上の初生キャビテーション発生位置は、静圧が極小になる部分と予想される。また、噴流に旋回成分を与えることにより管壁圧力を増大させ、キャビテーションを管中心部へ閉じ込め得ることが上記の結果からよりいっそう明確になった。図15(b)には直管形状ポンプ噴流出口下流断面( $X/D_0=1.27$ , 縮小形状の直管部入口に相当する)の全圧 $P_t'$ 分布および静圧 $P_s'$ 分布を示す。図には比較のためSanger<sup>(7)</sup>が求めた中央噴流形ポンプの全圧分布も示す。直管形状では、静圧は管壁近傍で最も高く、管中心部に向かって減少し、 $r/r_w \leq 0.5$ ではほぼ一定になる。縮小形状でみられた静圧の極小値はなくなり、キャビテーションは起きにくくなるものと推定される。全圧分布は外周形と中央形ではちょうど逆の関係になる。



(a) 縮小形状ポンプの縮小部と直管部接続断面の半径方向静圧分布



(b) 直管形状ポンプの噴流出口断面  $X/D_0=1.27$  の静圧分布および全圧分布

図 15

\*3 キャビテーション発生直前では流れ中にピトー管を挿入すると、ピトー管より空洞が発生し、測定に不都合になる。したがってここではピトー管まわりから空洞が発生しない状態で速度分布を測定した。

5.6 従来の研究結果との比較

図16には、中央噴流形のSanger<sup>(7)</sup>の結果と、NPSH-Nの関係と比較する。Sangerの実験方法は本研究と異なるため厳密な比較はできないが、 $M=1.6$  (○印) と本結果の $\alpha=18^\circ$  (●印) はReq.NPSHがほぼ同じである。また本結果のNPSHが急激に低下する場合のNの値は約0.27で、Sangerの $M=1.30$  (◇印) と良く対応する。図17では、成井ら<sup>(3)</sup>が中央噴流形ポンプに用いた $\sigma_c-n_{sj}$ 線図上に本結果を記入した。 $n_{sj}$ は式(5)参照。中央噴流形の $\sigma_c$ はいずれも $0.6 \sim 2.0$ であり、本結果も同様な範囲にある。以上よりReq.NPSH,  $\sigma_c$ については中央噴流形も外周噴流形もあまり変わらないと言える。

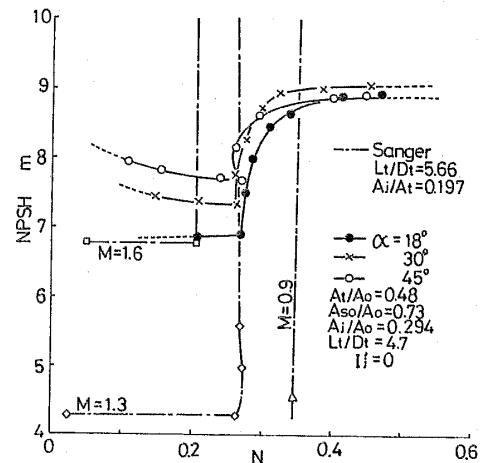


図 16 有効NPSHと水頭比についての本結果とSangerの結果の比較

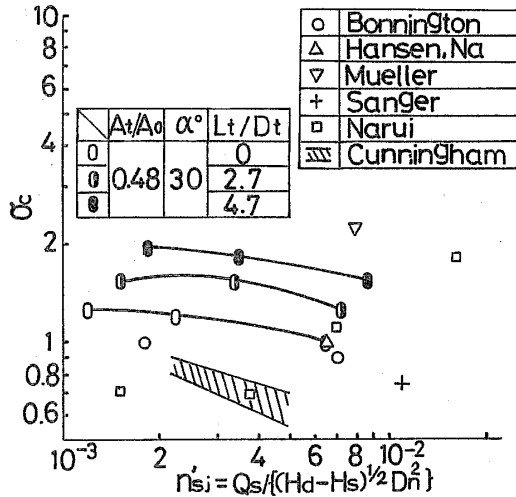


図 17 限界キャビテーション数について、本結果と中央噴流形に関する他研究者の結果の比較

6. 結 言

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 各種外周噴流形ポンプの必要 NPSH はポンプ構成要素によって変化する。また、これらの値はポンプにかかる背圧によっても変化するが、このような場合でも、必要 NPSH は出口が大気状態の性能曲線から推定できる。
- (2) 比速度  $n_{sj}$  と必要 NPSH の間には一定の関係があり、実験式で表すと式(8)のごとくなる。
- (3) 噴流に旋回を与えた場合、発生するキャビテーション気泡群を管中央に集中させる効果がある。しかし、旋回が強すぎると流れは不安定になる。また、必要 NPSH は噴流旋回強度を変えてもほとんど変わらない。
- (4) 外周噴流形も中央噴流形と同程度の限界キャビテーション数を示す。

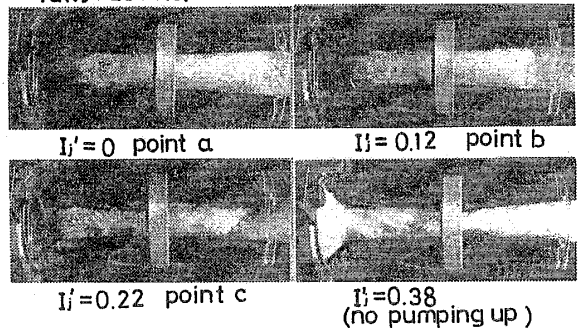
【付 録】 図 18 には 1/5 縮小形状ポンプのキャビテーション性能を示す。

図(c)は、必要 NPSH と縮小角  $\alpha$  の関係を、図(d)は必要 NPSH と混合室直管部長さ  $L_i/D_i$  の関係を表す。必要 NPSH は  $\alpha=30^\circ$  において最大になり、混合室直管部長さが長くなると低下することがわかる。

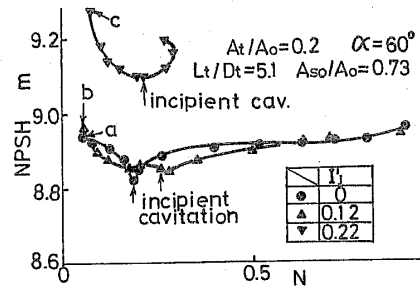
図(b)は NPSH- $N$  の関係を表す。入口旋回強度  $I_j$  を変化させた。  $I_j$  が 0 から 0.12 までは、NPSH と  $N$  の関係は変わらないが、  $I_j=0.22$  まで強くすると、NPSH は急激に大きくなり、  $N$  は 0.3 以下まで小さくなる。キャビテーション初生点と NPSH の最小点とはほぼ対応することがわかる。

図(a)の写真はキャビテーションが十分発達した状

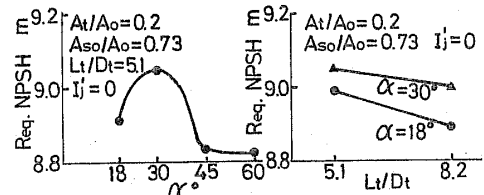
$A_t/A_o=0.2$   $\alpha=60^\circ$   $L_t/D_t=5.1$   $A_{so}/A_o=0.73$   
fully developed cavitation



(a) 代表的なキャビテーション写真(図中の点 a~c)および揚水不能時の写真



(b) 旋回強度を変えた場合の NPSH と N の関係



(c) Req. NPSH と縮小角  $\alpha$  の関係 (d) Req. NPSH と直管部長さ  $L_i/D_i$  の関係

図 18 1/5 縮小形状ポンプのキャビテーション性能

態を表し、図(b)の NPSH- $N$  曲線中の点 a, b および c に対応する。旋回強度を 4 種類に変化させた場合を示す。1/2 まで縮小する形状と同様、旋回を与えるとキャビテーションが管中央に閉じ込められることがわかる。この形状では  $I_j=0.38$  で揚水不能に陥る。

文 献

- (1) 葛原・ほか 3 名, 機論, 48-436, B (昭 57), 2510.
- (2) 清水・ほか 2 名, 本論文集 2746 ページ.
- (3) 成井・原田, 機論, 44-384 (昭 53), 2772.
- (4) La Verne, M.E., *Pumphlet pub. ASME Winter Ann. Meeting*, (1965), 120.  
Cunningham, R.G., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. D*, 92-3 (1970), 483.
- (5) 沼知・ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. D*, 84-3 (1962), 351.
- (6) Lehman, A. F. and Young, J.O., *Trans. ASME, Ser. D*, 86-2 (1964), 275.
- (7) Sanger, N.L., *Trans. ASME, Ser. D*, 92-1 (1970), 11.



討 論

〔質問〕 大場利三郎・井小萩利明

(東北大学高速力学研究所)

(1) 本ポンプ内で観測したキャビテーションがどのようなタイプのものかに興味がある。ついては、写真観測用ストロボのせん光時間を明記願いたい。

(2) キャビテーションのタイプは試料水の状態(キャビテーション核、温度、空気含有量など)ならびに発生域での境界層の状態(はく離泡の有無、渦など)によって大幅に変化するので、本ポンプの性能にもこれらの影響が及ぶことが考えられる。したがって、上記の事項を明示すべきではないか。また、キャビテーション気泡の状態をもう少し詳細に説明願えれば幸いである。

〔回答〕 (1) ストロボ放電管はクセノン放電管を使用しており、せん光時間は  $10^{-5}$  s である。

(2) 実験時の水温は  $12^{\circ}\text{C}$  前後である。実験では地下水槽にためられた水を使用しているが、ポンプからの放出水はせきを通過する。本実験では正確に空気含有量は測定していないが、通常の水温と大気圧に対応した空気量が含まれていると考えている。また、キャビテーション核の個数も測定していない。

次に、ジェットポンプ内の境界層を含めた速度分布であるが、これについては第2報(付1)に詳しく示してあるのでこれを参照願うことにして、ここでは簡単に説明する。はく離泡はピトー管で測定されるほど大きくない。また、境界層は通常の壁面噴流とほぼ同一の形状になる。

キャビテーション形状の正確な判定はきわめてむずかしい問題である。したがって、みかけ上の結果になるが、次のように追加説明する。

噴流に旋回を与えない場合、 $I_j=0$ 、キャビテーションの初生状態図5(1)では環状のクラウド状のキャビテーションになり、キャビテーションが発達した状態では混合室直管部入口のコーナからシート状に、シートの終わった部分から下流ではクラウド状のキャビテーションが観察された。

噴流に旋回を与えた場合、 $I_j=0.54$  の強い旋回を与えた場合には、図7(2)~(4)のごとく混合室直管部下流で直管部が終わりになる部分、出口部分の渦心からキャビテーションが発達し、流量が増すにつれて上流側へと発達し、最後には噴流出口近くの管中心部まで達する。キャビテーションの状態は、クラウド状

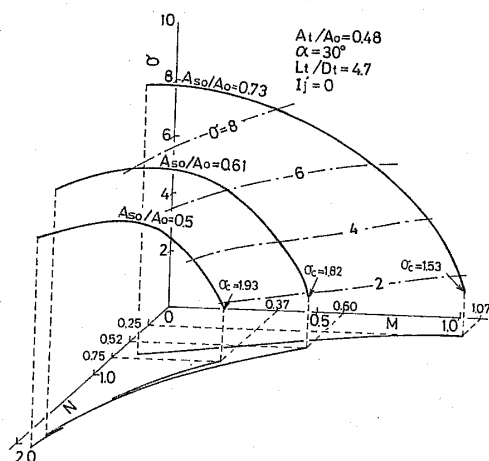
(付1) 清水・ほか2名、本論文集2746ページ。

と大きな気泡の混じり合った状態になる。渦心部には、含有空気の遊離による空気泡も混じっているものと考えられる。

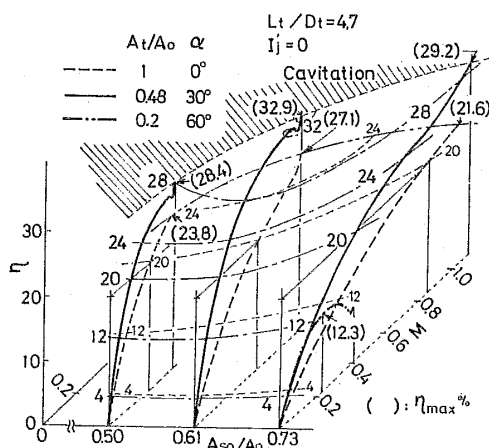
$I_j=0.33$  の中程度の旋回では、初生状態では混合室直管部の入口のコーナの壁面近くからキャビテーションが発生するが、流量を増すと入口部はそのままであるが、入口よりすぐ下流の渦心部分からキャビテーションが発達する。この部分では壁面のキャビテーションはみられない。渦心領域に集中している。この状態が図7(1)に相当する。この状態はクラウド状と大きな気泡の混じり合った状態である。

〔質問〕 豊倉富太郎 (横浜国立大学工学部)

外周噴流形ジェットポンプのキャビテーション性能について詳細な実験を行って検討を加えられているこ



付図1 キャビテーション係数  $\sigma$ 、限界キャビテーション係数  $\sigma_c$  と流量比  $M$ 、水頭比の関係



付図2 高効率を示す外周噴流形ジェットポンプの効率と流量比の関係

とに敬意を表す。次の点についてお伺いしたい。

効率が良好でキャビテーション性能が優れているポンプ形状としては、本実験の範囲ではどのようなものか。また、その場合について、横軸に流量比をとった性能曲線を示すグラフ上に、限界キャビテーション係数の曲線を示していただくと参考になると思う。

〔回答〕 本実験範囲で高効率を示すポンプの形状

は  $A_t/A_0=0.48$ ,  $\alpha=18^\circ\sim 30^\circ$ ,  $L_t/D_t=2.7\sim 4.7$  である。この中の一形状について噴流面積比  $A_{s0}/A_0$  を変えた場合のキャビテーション係数  $\sigma$ , および限界キャビテーション係数  $\sigma_c$  を付図1のごとく示す。図は縦軸がキャビテーション係数  $\sigma$ , 横軸が流量比および水頭比を表す。この場合の効率は付図2に示すので、合わせて比較参照願いたい。