

水中噴流のまわりのキャビテーション

山崎卓爾*, 鈴木鐸士**, 三浦誠二***

(昭和50年9月8日受理)

Cavitation Observed at the Surroundings of a Submerged Water Jet

TAKUJI YAMAZAKI, TAKUJI SUZUKI and SEIJI MIURA

Abstract:—The cavitation observed at the surroundings of a submerged water jet is one of the vortex-type cavitations formed in the velocity discontinuity regions between the ambient and jet flows. This cavitation was supposed to appear when the pressure in the vortex center drops to a critical pressure for the cavitation occurrence, which is approximately equal to the vapor pressure.

Authors observed the cavitation occurring around the jet in detail. Observations were ranged from the conditions under which no audible or visible cavitation can be detected to those under which a well developed cavitation can be observed. The condition of cavitation occurrence was studied. And the effects of various conditions on the cavitation phenomena (its size, location, form, mean frequency, mean life time, etc.) were studied, too.

The behavior of the submerged water jet cavitation has been understood to some extent. These results will contribute for understanding the cavitation occurring in the velocity discontinuity regions.

1. 緒 言

キャビテーションの発生は一般に流れの静圧に加えて、流体の流動に伴う圧力の低下、渦の形成によるその中心部の圧力の低下などが加算される時に見られ、また振動体周辺の一部に顕著な発生が見られることも周知のところである。

多くの流体機械では、流動に伴う圧力低下現象を主体としたキャビテーションが最も重要性を持ち、これまでこの面からの研究が数多く行なわれている。しかし流体機械内の特に流れの良好でない状態の個所には渦が形成され、もし渦が強くその中心部の圧力が異常に低くなるときには、たとえ周囲の圧力がキャビテーションの発生に必要な低下をみななくても、渦の中心部にはキャビテーションが発生することになり、上述の流動に伴う圧力低

下とは別に考慮される必要がある。

このような渦を伴う流体機械の部分の例は決して少ない。従ってこの面からの研究もかなり行なわれている。たとえばオリフィスやノズルにおける噴流におよぼすキャビテーションの影響¹⁾²⁾、水中噴流まわりのキャビテーションの研究³⁾⁴⁾などが見られるが、キャビテーションの発生状態については特に詳細な説明は行なわれていない。筆者らの一部は先にちょう形弁の二次元的研究や流水中におかれた障害物の上流側の二次流れ領域に認められる⁵⁾ひも状のキャビテーション⁶⁾について詳細な観測を行なって来た。

本研究では水中噴流のまわりのキャビテーションについて種々の観測方法を用いて詳細な観測を行い、これもやはり噴流のまわりの速度不連続により形成される渦の中心部に生じる渦キャビテーションであることを確かめ、またその発生状況を解析してみた。

* 玉川大学工学部機械工学科 (町田市玉川学園)

茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

*** 日立製作所日立研究所 (日立市幸町)

2. 実験装置および実験方法

実験装置全体の概略を Fig. 1. に示す。実験装置は低速度で回流する周囲流系統, 高速度で水を噴射させる噴流系統および観測部の3つに大別される。周囲流系統は渦巻きポンプ (PUMP1) を主体とした管路から成り, 水は貯水タンク (TANK1), 整流タンク (TANK2), 観測部を通過し貯水タンクに戻る。図中矢印は流れの方向を示す。以上は観測部における周囲流が比較的低圧の状態にある場合の実験方法であるが, 観測部における周囲

流の圧力が比較的高い場合の実験には PUMP1 を TANK1 と周囲流用オリフィスとの間に設置することによって圧力状態の変更を行った。これにより周囲流の圧力を $0.60 \sim 1.71 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$ の範囲に変えることができた。噴流水は高圧ポンプ (PUMP2) により送り出され, 流量調節部 (BYPASS), 噴流用オリフィスを経て観測部に達し周囲流中に噴出される。観測部はキャビテーションの発生を容易にするため TANK1 の水位より約 $2.5m$ 上方に配置されている。Fig. 2. に観測部付近の詳細を示す。観測部は $50 \text{ mm} \times 122 \text{ mm}$ の長方形断面で, 撮

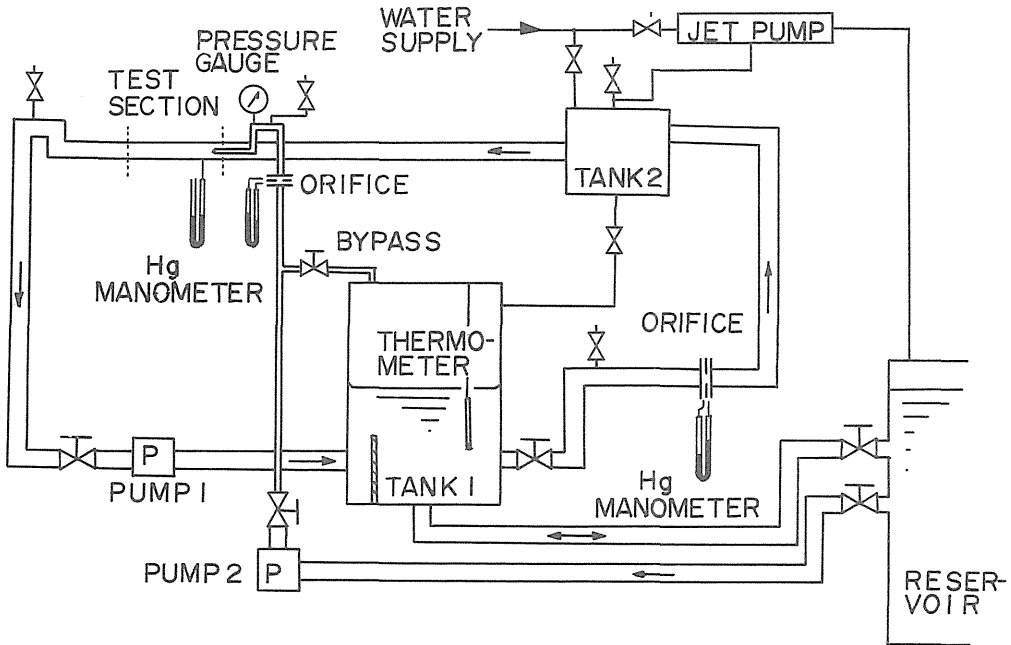


Fig. 1 Schematic experimental apparatus

影や観測に便利のように3面を透明アクリル樹脂板にしてある。観測部の他の1面(裏側面)は真鍮製側壁で, この側壁のノズルより下流側ノズル軸線に平行な一線上に水路の静圧測定のための4個の測定孔が設けられている。噴射用のノズルを Fig. 3. に示す。ノズルは真鍮製で出口内径 5 mm , 内面が $1/3$ のテーパを持つ軸対称円形ノズルである。

観測は, 多少のはらつきが生じることは避けられない方法であるがまず聴覚, 視覚による直接観察を行い, その後に写真観測を行なった。写真観測の場合には様々な角度から現象を観測するため撮影方向などを変えた。またキャビテーションの連続的な挙動の観測のため 16 mm

フィルムの高速度映画の撮影を行なった。撮影は最高速度約 $1/16,000$ [秒/コマ] で行ない, 解析に便利のようにフィルム編集機を利用したり, 映画フィルムを焼付けて連続写真としたりして観測を進めた。

流れの場とキャビテーションの発生状態との関連を調べるために Fig. 2. の⑤のピトー管挿入孔より先端外径 1 mm のステンレス細管で作られたピトー管を挿入して流れの速度分布を測定した。このピトー管の流れ方向部分の長さを変えることにより噴流出口下流部の6断面 ($3, 4, 6, 8, 10, 16 D$ ここで D : ノズル内径) における噴流半径方向の速度分布の測定を行なった。本実験のキャビテーション係数の算出に用いた静圧 P は Fig. 2. の

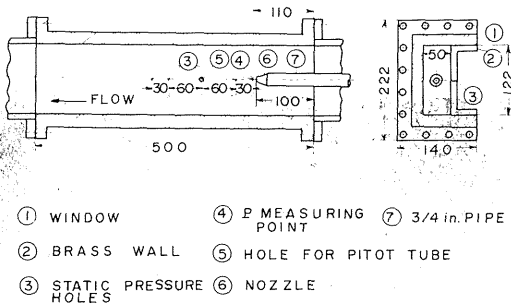


Fig. 2. Test section

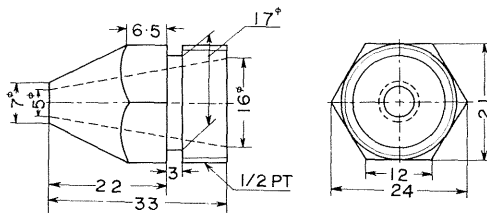


Fig. 3. nozzle

4 個の静圧孔のうち噴流出口に最も近い④の点で測定した値を用いた。これは噴流の噴射状態に最も直接的な関連があると考えられたからである。他の3点での測定値は流れの様子を知る参考にした。

なお本実験の整理に用いたキャビテーション係数は

$$K = \frac{P - P_v}{\rho V^2 / 2}$$

である。ここで

P : 噴流出口近傍の観測部側壁 (Fig. 2. の④) での静圧

P_v : 実験水の飽和蒸気圧

ρ : 水の密度

V : 相対速度 ($= v_2 - v_1$)

v_1 : 周囲流の速度

v_2 : 噴流出口の速度

である。実験は P が $0.60 \sim 1.71 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$ の範囲で行なった。なお、 v_1 は $0 \sim 1.7 \text{ m/s}$ 、 v_2 は $10 \sim 40 \text{ m/s}$ の範囲である。

3. 実験結果および考察

キャビテーションの発生状況はその程度により著しく違った様相を示すので次のような代表的な4つの段階に

限定して検討を進めることにした。

a) 音の発生 (audible)

肉眼ではキャビテーションを認められないが、チルチルという特有の音が聞こえ始める状態。

b) 初生 (inception)

噴流出口より $6 \sim 9 D$ 下流にキャビテーションがチラチラと見え始める状態。一般にキャビテーションは音の発生を伴うので音の発生の状態を初生とする考え方もあるが、ここでは上のように区別した。

c) 成長 (developed)

キャビテーションが噴流出口近くから見られるようになり、キャビテーションの観察される領域の長さが流れ方向に $10 \sim 12 D$ の長さまで成長した状態。

(d) 発達 (fully developed)

キャビテーションの観察される領域の長さが流れ方向に $15 \sim 16 D$ の長さまで発達した状態。

写真観測

Fig. 4. は露出時間 $1/1,000$ 秒の成長段階での写真である。流れは右側から左側へ向かっている。肉眼でもこのようにキャビテーションが連続したすじ状に観察される。

Fig. 5, 6 および 7 は初生, 成長, 発達のそれぞれの段階でのストロボスコープの単発発光 (発光時間約 $1/10$ 万 秒) による写真である。初生段階では噴流を取り囲む円周上と思われる数点にキャビテーションが発生しているのが見られる。成長段階では上流より下流にまで数個のキャビテーションが配列しているのが見られるが常に判然とした位置を保つとは限らないようである。発達段階ではキャビテーションの領域がさらにのびている。以上の各段階を比較してみると初生の場合の発生位置は成長, 発達の場合に比較して噴流出口より離れた位置 ($6 \sim 9 D$ の位置) にある。初生時には噴流出口付近では渦の形成が不十分でキャビテーションを形成するに十分な低圧状態になっていないと考えられる。ここでは低圧の程度と時間が関係してくるものと推定される。初生時の噴流半径方向の発生や消滅の位置は噴流中心軸より約 $1 D$ 以内である。このことから渦による極度の低圧箇所の発生は噴流中心軸より約 $1 D$ 以内にあるといえる。

Fig. 8, 9 および 10 はストロボスコープの単発発光 (発光時間約 $1/10$ 万 秒) による写真例である。キャビテーションの濃度を比較してみると中央部では薄く、まわりでは濃く、キャビテーションは噴流の内部に発生しているのではなく、噴流と周囲流との境界付近に発生し

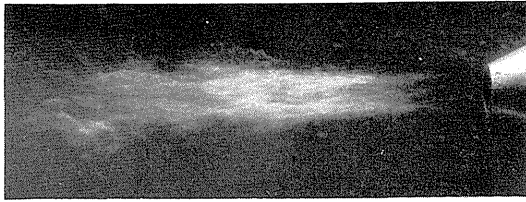


Fig. 4 Cavitation photograph
(atP = 1.01 kg/cm² abs, V = 32.5 m/s,
K = 0.18 ; 0.001 sec exposed).

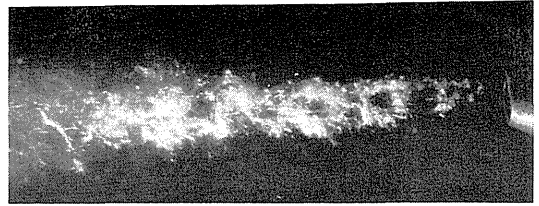


Fig. 8 Cavitation photograph
(atP = 0.60 kg/cm² abs, V = 30.8 m/s,
K = 0.12 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

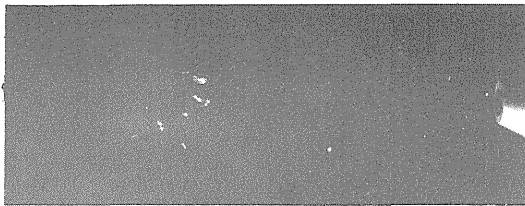


Fig. 5 Cavitation photograph
(atP = 0.98 kg/cm² abs, V = 27.6 m/s,
K = 0.25 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

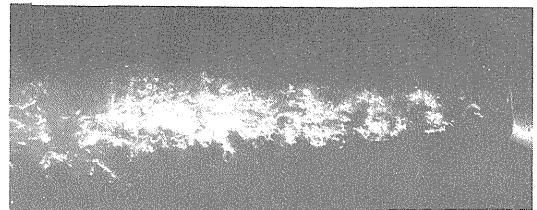


Fig. 9 Cavitation photograph
(atP = 0.60 kg/cm² abs, V = 30.8 m/s,
K = 0.12 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

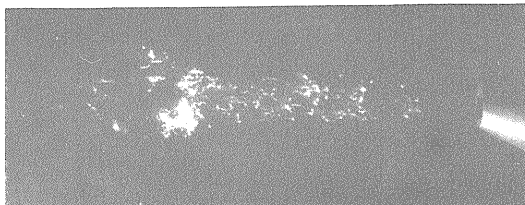


Fig. 6 Cavitation photograph
(atP = 0.97 kg/cm² abs, V = 32.5 m/s,
K = 0.18 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

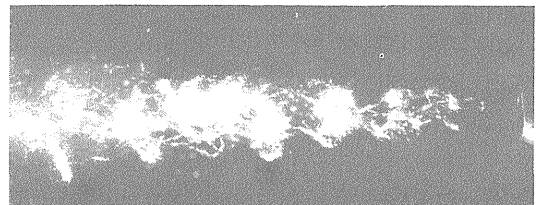


Fig. 10 Cavitation photograph
(atP = 0.68 kg/cm² abs, V = 33.1 m/s,
K = 0.12 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

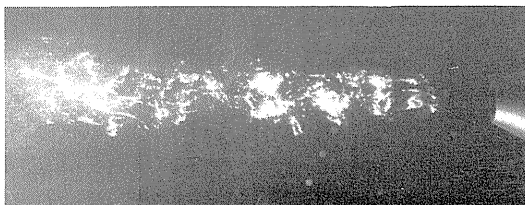


Fig. 7 Cavitation photograph
(atP = 0.87 kg/cm² abs, V = 35.7 m/s,
K = 0.13 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

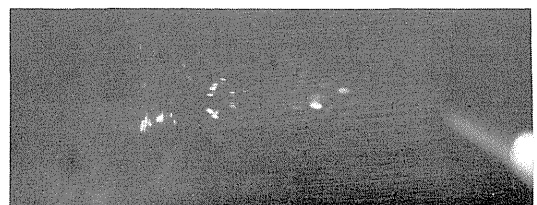


Fig. 11 Cavitation photograph
(atP = 0.98 kg/cm² abs, V = 30.2 m/s,
K = 0.21 ; 1 × 10⁻⁵ sec exposed).

ていることがわかる。

Fig. 11 は上流側から斜めにキャビテーションをとらえた一例である。キャビテーションが噴流を取り囲むリング状に発生していることがわかる。右端の不鮮明な物体はノズルである。

Fig. 12 は高速度映画を連続写真としたものである。この写真は発達段階のものである。写真中右側の物体は

ノズルであり、時間は上から下へと進む。左下から右上へと写真は続く。1コマの進行速度は約 $1/16,000$ 秒である。気泡は発生した当初は比較的整然とした様子を示しているが下流に移動するにつれて変化に富んだ運動をし、形状も複雑になる。気泡の存在する位置によってその移動速度が違うこと、周期的にキャビテーションが発生していることなどもわかる。

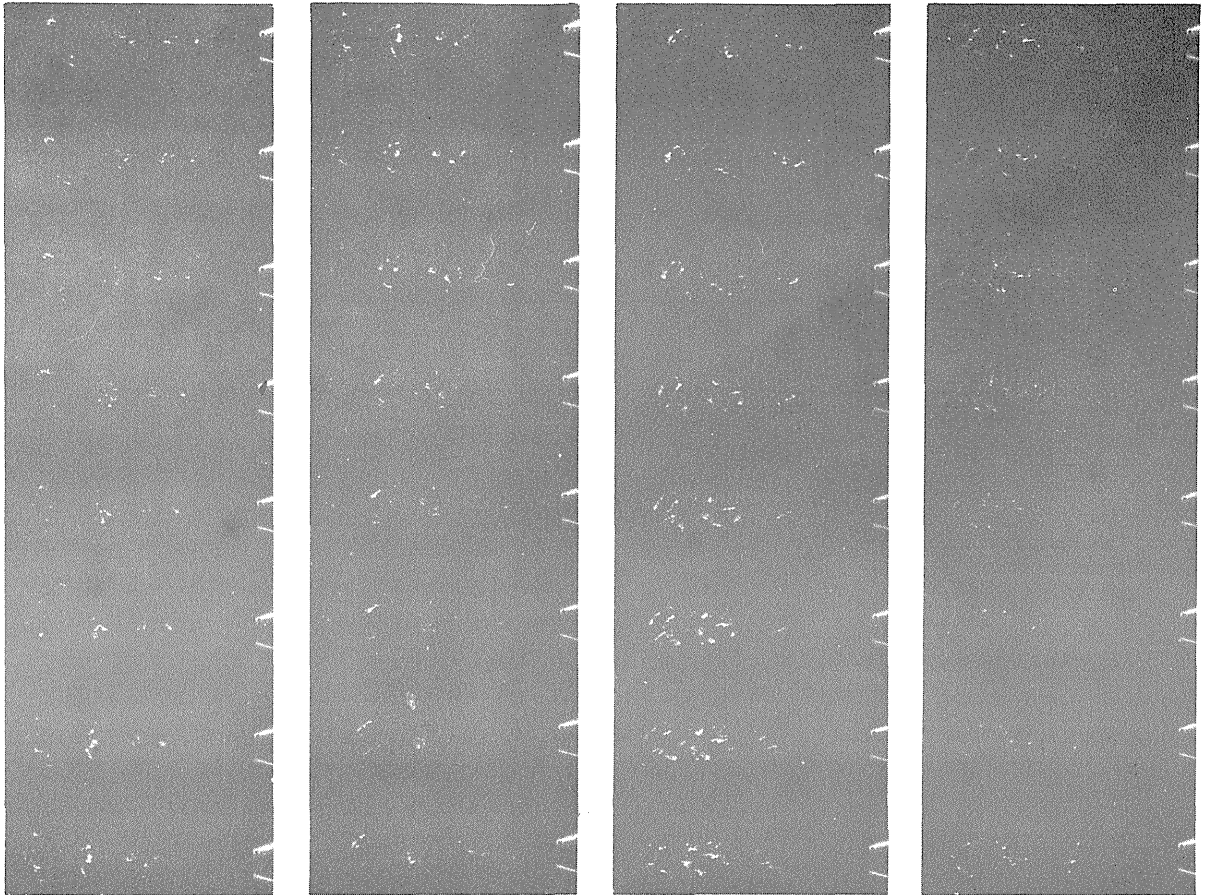


Fig.12 High-speed motion pictures of cavitation (at $P = 0.74 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$, $V = 24.3 \text{ m/s}$, $K = 0.24$; 16,000 frames per second).

相対速度とキャビテーション係数の関係

Fig.13 は P が $0.60 \sim 1.71 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$ の実験範囲における相対速度 V とキャビテーション係数 K との関係を示す。音の発生、初生、成長、発達のいずれの場合でもキャビテーション係数の値は相対速度が増加する

につれて減少する傾向にある。相対速度が約 25 m/s 以上では勾配が緩やかになり初生時のキャビテーション係数の値は相対速度が 25 m/s 以上では約 0.26 でほぼ一定している。一般的には速度が増加するとキャビテーション係数は増加する傾向にあるとされているが、ベンチュリー管における Hammit t の実験結果にも本実験の

結果と同様に速度が増加するとキャビテーション係数が 減少する傾向を示す例がみられる。

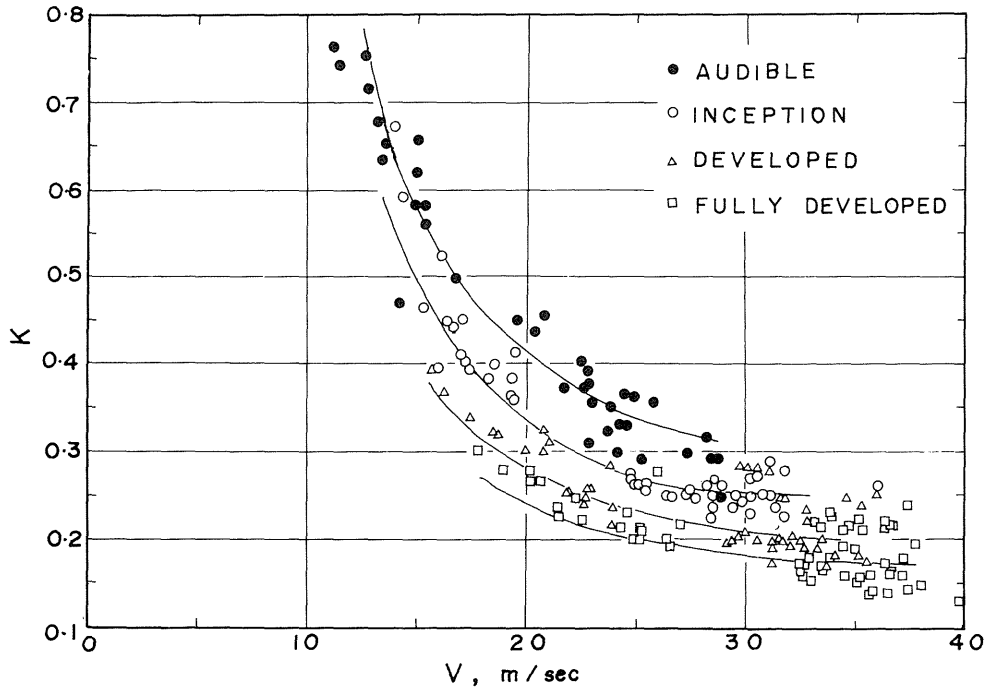


Fig.13 Cavitation number K versus relative velocity V .

速度分布

水中噴流の平均速度の分布は Fig.14 のように考えられている。このような速度分布は流体の粘性に基く乱れの混合、拡散によって引き起こされ、噴流出口から下流に移るにつれて、噴流まわりの混合領域 (*mixing*

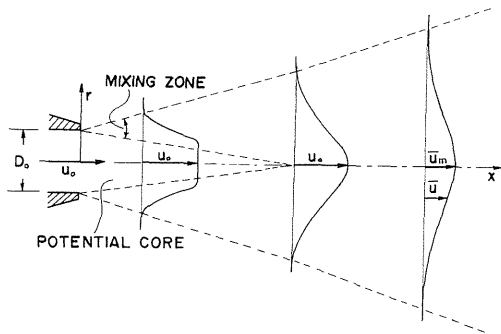


Fig.14 Structure of submerged jet.

zone) はしだいに拡がり、混合、拡散のおよばない定速度の中心部 (*potential core*) は狭くなる。この定速度の中心部がみられなくなる位置付近より下流では混合、拡散がさらに活発になり、噴流の幅が拡がる速度は増大し、噴流中心部の速度はしだいに減少する。

Fig.15 は測定された平均速度分布の一例で噴流出口速度 $v_2 = 25$ m/s の場合である。 v は軸方向速度で v_0 は $D/2$ 、 r は中心軸からの半径方向距離である。混合領

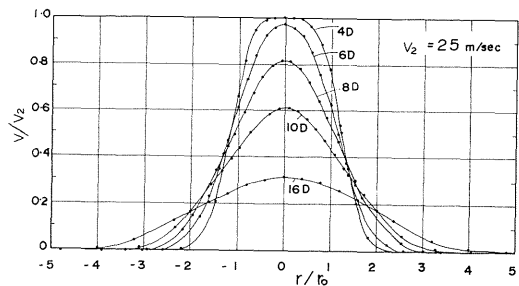


Fig.15 Velocity profiles of the submerged jet.

域がだんだん広がって行き, *potential core*の部分が $6D$ の手前で終わっていて, 中心の速度が下流に行くにつれて減少しているのがわかる。観察されたキャビテーションの発生状態と測定された速度分布を対比させてみるとキャビテーションの観察される領域と最大平均速度勾配の領域はほぼ一致している。

キャビテーションの生存時間と発生回数

キャビテーションは渦の中心部に見られ, 断続的に発生するものであるが, その生存時間と発生回数 n を高速映画フィルムを基にして測定すると次のようになる。ここで, 生存時間とはある1つのキャビテーションが発生してから下流に移動し消滅するまでの時間であり, 発生回数とは1秒あたりのキャビテーションの発生数である。

キャビテーションの生存時間はFig.16 のようである。キャビテーション係数が減少すると生存時間が長くなる傾向が見られる。

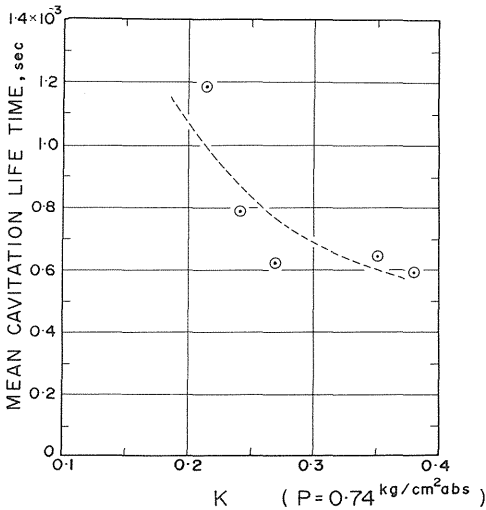


Fig.16 Mean cavitation life time

キャビテーションの発生回数についてはFig.17 のように示される。キャビテーション係数が減少するとやはり発生回数も増加する傾向が見られる。さらにこのキャビテーション発生回数を無次元化してStrouhal 数 nD/V で表示するとFig.18 のようになる

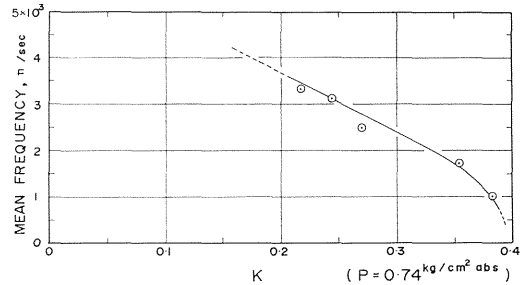


Fig.17 Mean cavitation frequency

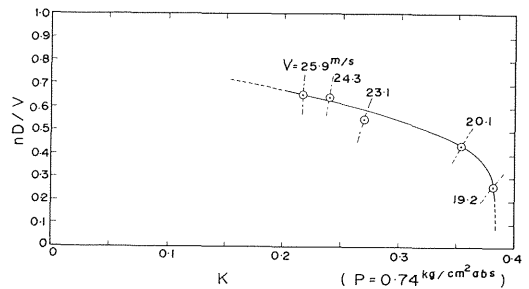


Fig.18 nD/V versus cavitation number K

キャビテーションの移動速度

Fig.19 はキャビテーションの移動速度を調べた結果である。 V_{cavi}/V_{max} の値は0.5を中心にばらつきがみられる。ここで

X : 噴流出口からの軸方向距離

V_{cavi} : 高速映画の連続写真より測定された
キャビテーションの移動速度

V_{max} : 速度分布の測定より得られたその位置
での最大平均速度

である。

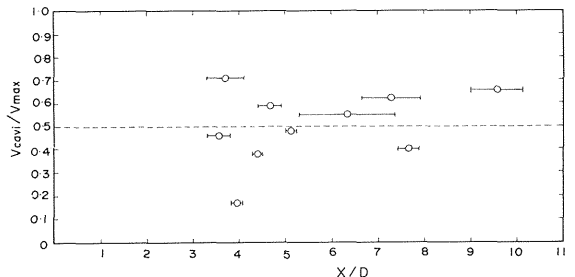


Fig.19 Cavitation transfer velocity.

5. 結 言

水中噴流のまわりのキャビテーションについて実験観察的に解明を行ない次のような結論を得た。

水中噴流のまわりのキャビテーションは

- (1) 音の発生, 初生, 成長, 発達, 発達のいずれの場合でもキャビテーション係数の値は相対速度が増加するにつれて減少する傾向にある。
- (2) 噴流の最大平均速度勾配の部分でよく観察される。
- (3) 初生, 成長, 発達とキャビテーションの程度が進むにつれて噴流出口近くから観察されるようになり, 下流側も発達して行く。初生段階での噴流半径方向の発生位置は噴流中心軸から約 $1 D$ 以内にある。
- (4) 断続的に発生し, その発生回数および生存時間はいずれもキャビテーション係数が減少するにつれて増加する傾向にある。

終りに臨み, 卒業研究をとおして実験に御協力戴きました宮本卓二, 片方喜信, 飯泉清, 階広孝の諸君に, 有意義な御討論を戴きました平野敏右助教授, 益子一郎技官に, ならびに貴重な参考資料の提供と御助言を戴きました吹田年教授に心から感謝の意を表します。

(昭和50年8月21日 日本機械学会第858回講演会=流体力学・流体機械にて講演¹¹⁾)

参 考 文 献

- (1) Numachi, F., Yamabe, M. and Oba, R. *Trans. ASME, Ser. D, Vol. 82* (1960), pp. 1 - 11.
- (2) 沼知・小林, 東北大学高速力学研究所報告, 20 巻, 196 号 (1964/1965), pp. 103 - 122.
- (3) Rouse, H., *La Houille Blanche*, Jan. - Feb. (1953), pp. 9 - 19.
- (4) Rouse, H., Jr. *Boston Soc. Civil Engrs.*, Vol. 53 (1966), pp. 255 - 271.
- (5) 鈴木・山崎, 茨城大学工学部研究集報, 21 巻 (1973), pp. 31 - 40.
- (6) 山崎他 3 名, 茨城大学工学部研究集報, 23 巻 (1975).
- (7) Knapp, R. T., Daily, J. W. and Hammit, F. G., *Cavitation*, (1970), P. 222, McGraw-Hill.
- (8) Hammit, F. G., *Trans. ASME, Ser. D*, Vol. 85 (1963), pp. 1 - 16.
- (9) 例えば Rouse, H., *Advanced Mechanics of Fluids*, (1955), John Wiley & Sons.
- (10) Forstall, W. and Gaylord, E. W., *Trans. ASME, Jr. Appl. Mech.* Vol. 77 (1955), pp. 161 - 164.
- (11) 山崎・鈴木・三浦, 日本機械学会第 858 回講演会講演論文集, No. 750 - 8 (1975), pp. 301 - 304.