

二次元スルース弁および各種絞り付近に生ずる キャビテーション

川又正昭*, 吹田 年**

(昭和60年9月6日受理)

Cavitation in the Two Dimensional Sluice Valves and a Few Chokes

Masaaki KAWAMATA* and Minoru SUITA**

Abstract — Cavitation occurs in a liquid flow where the pressure is reduced locally due to the dynamic action of the fluid in the fluid machine and in the control valve or choke of the pipe line.

The cavitation has a bad influence on the property of the fluid machine, and generates cavitation noise. In the case of intense cavitation occurrence, serious erosion damage occurs on the solid surface. Thus, it is important how we should prevent the generation of the cavitation.

In this study, we observed condition of the cavitation in the two dimensional sluice valves and a few chokes, to examine the difference of the cavitation property with the variation of the flow field.

1. まえがき

キャビテーションに関する研究は昔から多くの研究がなされてきており、今も、多方面に渡り数多くの研究が活発に行われている。(1)~(4) 近年の工業界の発展にともない、各種流体輸送における大流量化、高速化が要求され、それにともない、流体機械や弁・絞りなどの流体制御部品等に生ずるキャビテーションが重要な問題となってきた。キャビテーション発生により、流体機械の性能劣化はもとより、振動、騒音および壊食などの障害が発生するので、如何に、それらを適確に予測し、その防止策を検討するかが大きな研究課題となっている。

そこで、本研究の目的は二次元スルース弁の弁先端形

状および数種類の絞り形状について、開度および流速を変化させたときのキャビテーションの発生状況を観察し、キャビテーション防止の基礎的資料を得ようとするものである。

2. キャビテーション係数と圧力係数

キャビテーション係数はキャビテーションの発生の割合を表わす係数で、流体力学的条件（圧力、流速、温度）を基にした無次元数で表わされ、一般に次式で定義される場合が多い。(5)

$$K = \frac{P_o - P_v}{\rho/2 \cdot V_o^2} \dots\dots\dots (1)$$

* 茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University,
Hitachi 316, Japan

** 茨城大学名誉教授（工学部）

Emeritus Professor, Ibaraki University (Faculty of Engineering)

ここで P_0 : 流体中の基準点における圧力
 P_v : 流体の蒸気圧
 V_0 : 流体中の基準点における流速
 ρ : 流体の密度

今、このキャビテーション係数を絞りの場合に適用する場合、 P_0 、 V_0 を一般に用いられる無限遠前方における圧力と流速を使用するとキャビテーション係数が非常に大きな値になってしまう。そこで、無限遠前方における圧力 P_0 と流速 V_0 を絞り部の最低圧力 P_e と流速 V_e に置き換えると、

$$K = \frac{P_e - P_v}{\rho/2 \cdot V_e^2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

ここで P_e : 絞り部における最低圧力
 V_e : 絞り部における流速

また、絞りのある管路内においてベルヌーイの式を適用すれば、

$$\frac{V_0^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} = \frac{V_e^2}{2} + \frac{P_e}{\rho} \dots\dots\dots (3)$$

の様な関係があるので(2)式と(3)式より

$$K = \frac{P_e - P_v}{\rho/2 \cdot V_0^2 + (P_0 - P_e)} \dots\dots\dots (4)$$

と表わされる。

また、圧力係数は一般に表わされる様に

$$C_p = \frac{P_x - P_0}{\rho/2 \cdot V_0^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで P_x : 任意の断面における圧力

以上の(4)式のキャビテーション係数 K および(5)式の圧力係数 C_p を使って本研究のデータを整理した。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

Fig. 1 は実験装置全体の概略図を示す。1のボリュームポンプにより地下水槽から揚水し、3の電磁流量計で平均流速を測定する。5のセッティングチャンバー、6のダンピングスクリーンにより流れを一様に整流し、7のテストセクションを経て元の地下水槽へと水が循環している。流量の変化はポンプを駆動する電動機の回転数

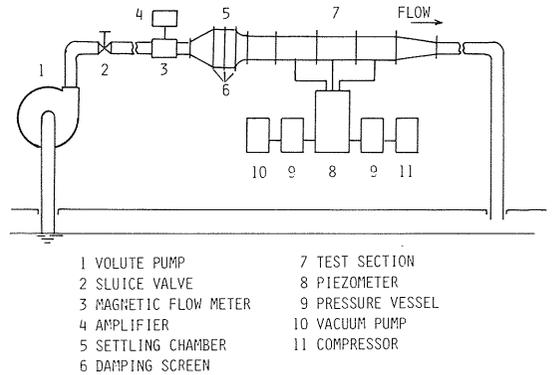


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

を変化させることにより行なった。管路系は主に内径50mmの塩化ビニール管を使用し、7のテストセクションは幅60mm、高さ50mmの方形断面を持ち、長さ800mmで厚さ10mmの透明アクリル板で作られている。テストセクションを透明アクリル板で製作したのはキャビテーションの発生の様子を観測するためである。テストセクション上流先端から300mmの所に実験に供試された各種絞り、あるいはスルース弁が設置される。テストセクション部の静圧を測定するために、流路側壁中心線上に直径1mmの静圧孔を設けた。供試絞り、あるいはスルース弁取り付け部の位置から20mm間隔で、上流側へ4個、下流側へ9個さらに、その上流側、下流側へは50mm間隔でそれぞれ3個、5個、合計22個の静圧孔を設けた。

圧力の測定には8の多管マンノメータを使用したが高測定点が多いため、切換えコックを使用して行なった。正圧の測定時には11のコンプレッサーによる加圧、負圧の測定時には10の真空ポンプによる減圧を行ない、マンノメータの液面の位置を調整した。

Fig.2 は実験に用いた供試スルース弁の先端形状を示す。弁は10mmの透明アクリル板を使用し、先端形状は図中の(a)~(d)に示すように、それぞれ、方形型、円弧型、45°型、90°型の4種類とした。弁の取り付けは、開閉可能な構造にして、弁開度 ϕ はそれぞれ10%、20%、30%、50%の4種類に設定して実験を行なった。

Fig.3 は実験に使用した各種絞り形状を示す。図は全て側面から見た図で、絞り形状は、それぞれ、(a)~(c)に示すように、円弧絞り、三角絞り、方形絞りの3種類を用いた。また、絞り開度 ϕ ($= h/D$) は、弁開度と同様にそれぞれ、10%、20%、30%、50%の4種類の開度

に変えた絞り部を製作し実験を行なった。

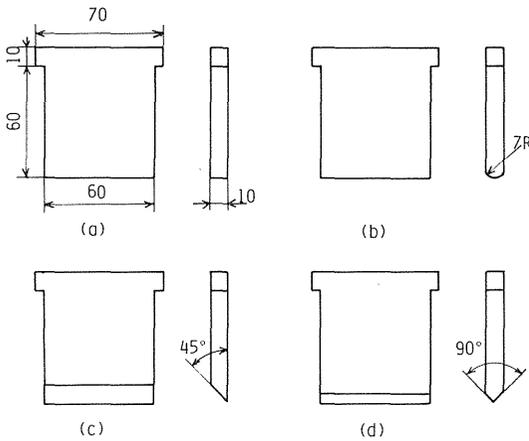


Fig. 2 The edge types of sluice valves.
 (a) rectangle type
 (b) circular arc type
 (c) 45° angle type
 (d) 90° angle type

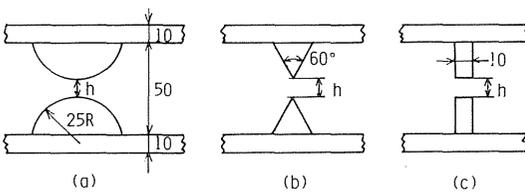


Fig. 3 The types of chokes.
 open ratio $\phi = 10\%$, 20% , 30% and 50% ($h = 5\text{mm}$, 10mm , 15mm and 25mm)
 (a) circular arc type
 (b) triangle type
 (c) rectangle type

3.2 実験方法

管路系内に気ほう等の付着物が無くなるまで、十分に水を流した後、実験を行なった。キャビテーションの発生状況は液体中に含まれるキャビテーション核数に大きく左右されると考えられているが⁶⁾、本研究で用いた水槽は十分大きく、溜め水を使用しているので、供試水に含まれるキャビテーション核は比較的少なく、実験を続行しても、ほとんど変化しないと考えられる。

スルース弁の各種先端形状, 各種絞り形状に対し, 前述の様に開度 ϕ を10%, 20%, 30%, 50%の4種類について実験を行なった。平均流速を数種類変え, その時のテストセクション部の各断面上における静圧を測定した。

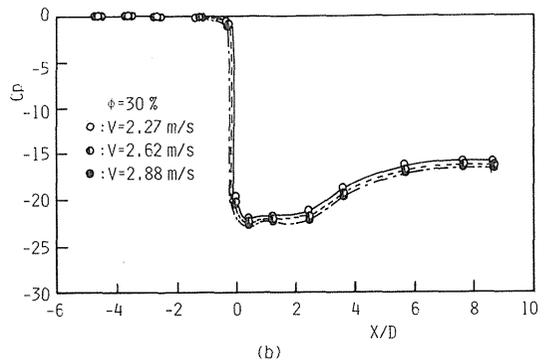
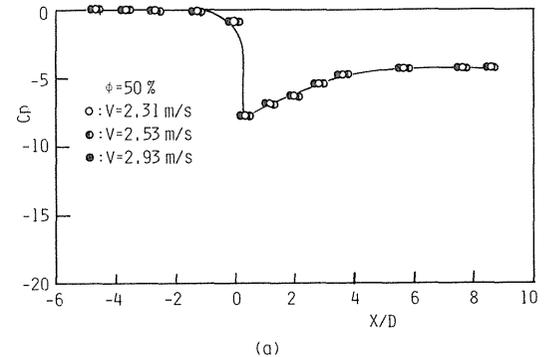
スルース弁および各種絞り部におけるキャビテーションの発生状況を観察するため, 聴覚および目視による方法で行なうと同時に写真撮影も行なった。

4. 実験結果および考察

4.1 圧力係数について

テストセクション部の流れ方向の圧力分布を測定し, 測定位置の無次元量 X/D による圧力係数 C_p の変化を, 各種絞りおよびスルース弁について調べ, 流れの場の状況を明確にした。測定位置の無次元量 X/D は絞りおよびスルース弁の中心位置を0として, 上流側を負, 下流側を正とし, 中心位置からの距離 X を管路の代表長さ $D = 50\text{mm}$ で除した値である。

Fig. 4はその代表例として方形絞りにおける各開度においてのキャビテーション発生状況に応じた3種類の流速について, 圧力係数の分布の様子を示す。(a)は開度50%で, 各流速とも圧力係数の分布はほとんど一致してお



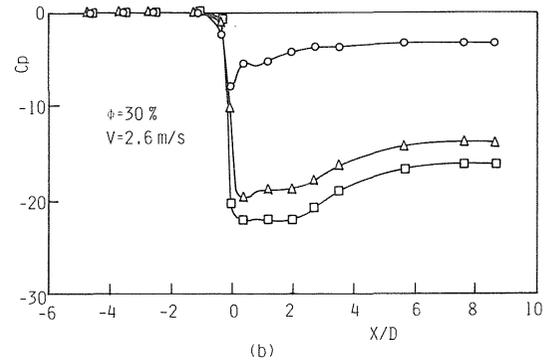
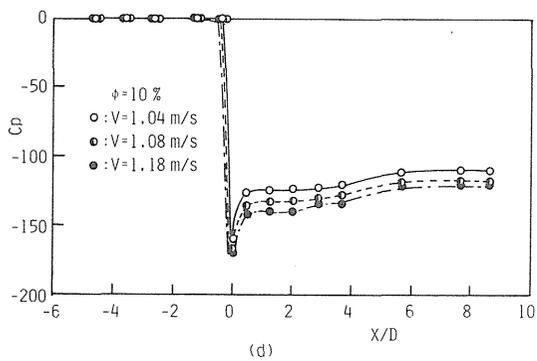
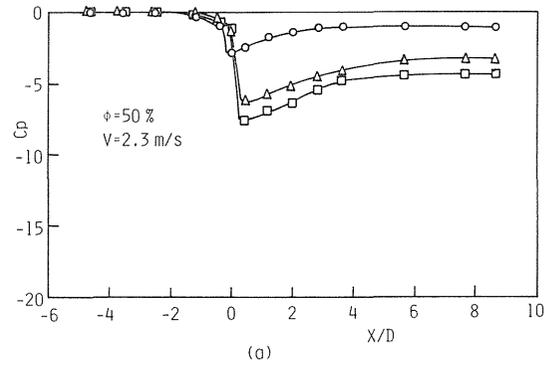
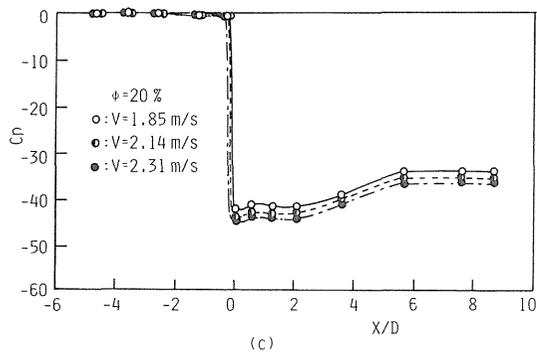


Fig. 4 Variation of resistance coefficients for rectangular choke.

り、キャビテーションの発生は見られない。(b)~(d)はそれぞれ開度30%, 20%, 10%のもので、それぞれの3種類の流速は、低い流速ではキャビテーションの発生は見られず、中間の流速では初生付近、高い流速では成長キャビテーションの発生時の流速を表わしている。これらの結果から、キャビテーションが発生するに従い絞り下流側の圧力係数が小さくなり、その差は開度の小さいものほど大きくなることがわかる。

Fig.5はそれぞれ同一開度、同一流速における各種絞りによる圧力係数の違いを示している。(a)は開度50%、流速2.3 m/sの場合で、各種絞りにおけるキャビテーションの発生は見られないが、方形絞りの場合の圧力低下が最も大きく、円弧絞りの場合の圧力低下は非常に小さい。また最低圧力位置は円弧絞りでは $X/D = 0$ 付近であるが、三角絞り、方形絞りにおいては $X/D = 0$ の位置より若干後流へずれており、圧力回復は円弧絞りでは $X/D = 3$ 、三角絞り、方形絞りではそれぞれ $X/D = 6$ 付近で回復している。(b)は開度30%、流速2.6 m/sの場合で、方形絞りにおいてキャビテーションの発生が

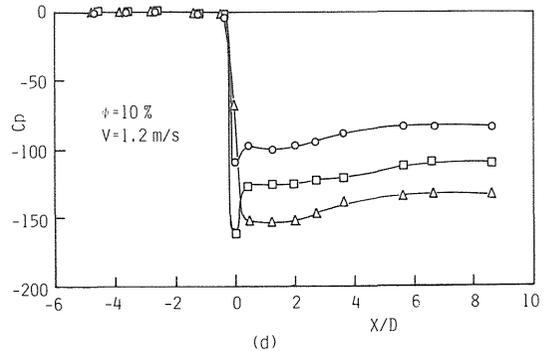
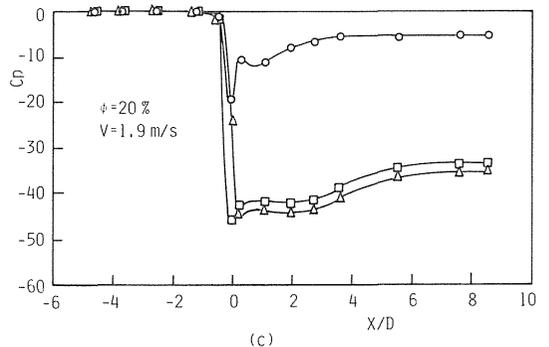


Fig. 5 Variation of resistance coefficients for various chokes.

- : circular arc type
- △: triangle type
- : rectangle type

見られたが, 他の絞りにおいてはキャビテーションの発生は見られなかった。三角絞りと方形絞りにおいては X/D が 0 から 2 付近まで低圧の領域が形成されている。(c)は開度20%, 流速 1.9 m/s の場合で, 方形絞りにおいては発達したキャビテーションが認められ, 三角絞りにおいてもわずかながらキャビテーションの発生が確認された。しかしながら円弧絞りにおいてはキャビテーションの発生は認められなかった。(d)は開度10%で流速 1.2 m/s の場合で, 方形絞り, 三角絞り共に発達したキャビテーションが確認され, 円弧絞りにおいてもキャビテーションの発生が認められた。

Fig. 6 はスルース弁における無次元位置 X/D と圧力係数 C_p の関係を表わしたグラフである。(a)は開度50%, 流速 2.5 m/s の場合で, いずれの弁先端形状においてもキャビテーションは発生していない。圧力低下の大きい順は方形型が最大で, 次ので 90° , 45° , 円弧型の順になっている。また最低圧力はそれぞれ $X/D = 1$ 付近に存在している。(b)は開度30%, 流速 2.6 m/s の場合で, この場合もキャビテーションは発生しておらず, (a)と同様の傾向を示しているが全般に圧力係数は低下し, 各弁先端形状とも低圧の領域が広がり, X/D が 0 から 2~3 付近まで達している。(c)は開度20%, 流速 2.3 m/s の場

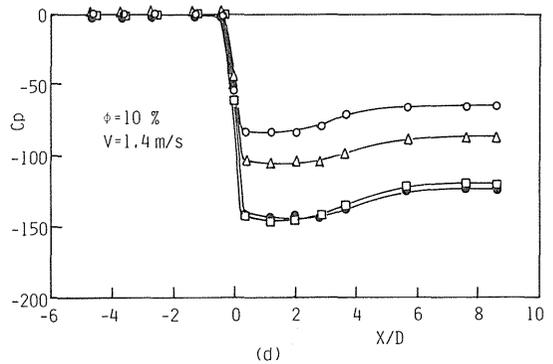
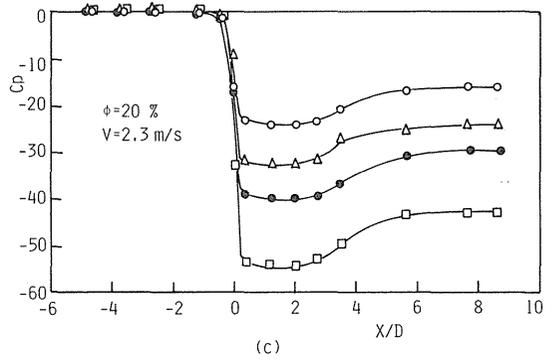
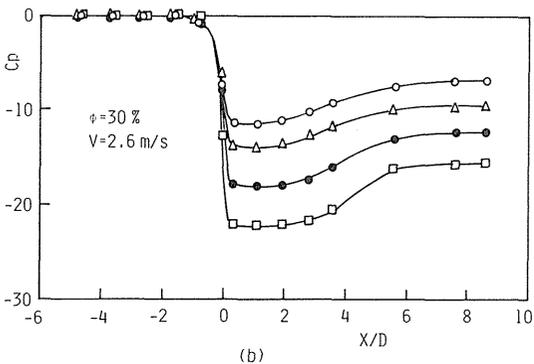
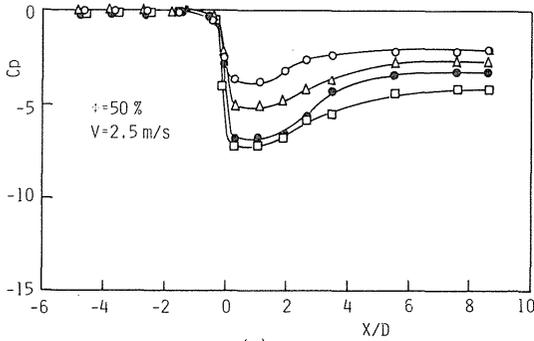


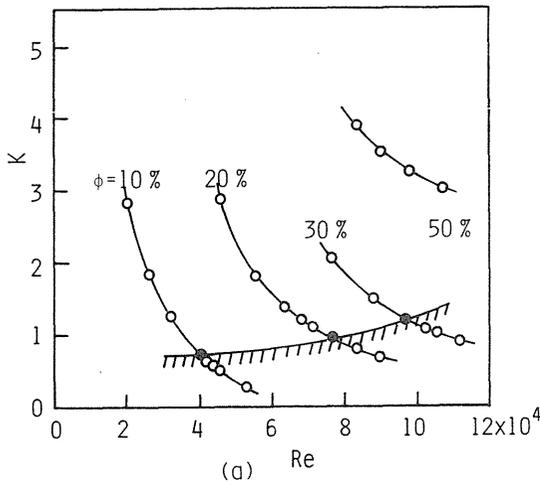
Fig. 6 Variation of resistance coefficients for various sluice valves.

- : circular arc type
- △: 45° angle type
- : 90° angle type
- : rectangle type

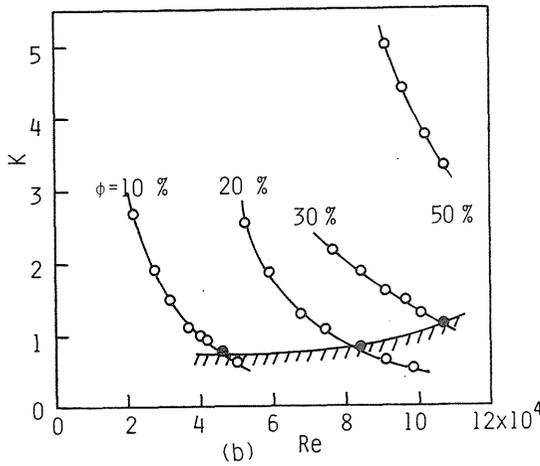
合で, 方形型において発達したキャビテーションが見られ, 90° 型と 45° 型においては可聴による初生キャビテーションが認められた。しかしながら円弧型においてはキャビテーションの発生は認められなかった。(d)は開度10%流速 1.4 m/s の場合で方形型においては発達したキャビテーションが認められ, 90° 型においては目視によるキャビテーション発生は見られなかったが音により弱いキャビテーションの発生が確認された。 45° 型と円弧型においてはキャビテーションは確認できなかった。

4.2 キャビテーション係数について

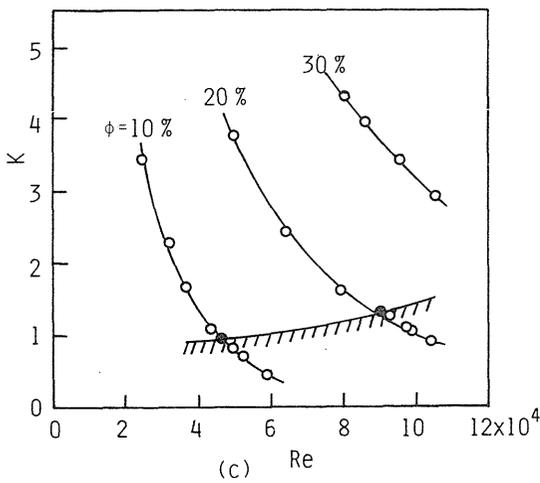
Fig. 7 は各種絞りにおけるキャビテーション係数 K とレイノルズ数 Re の関係を示したグラフである。(a), (b), (c)はそれぞれ方形絞り, 三角絞り, 円弧絞りについてのグラフであり, 図中のそれぞれの曲線は開度別になっている。それぞれの図中の曲線上の●印はそれぞれの開度におけるキャビテーションの初生点を示している。故に,



(a) Re



(b) Re



(c) Re

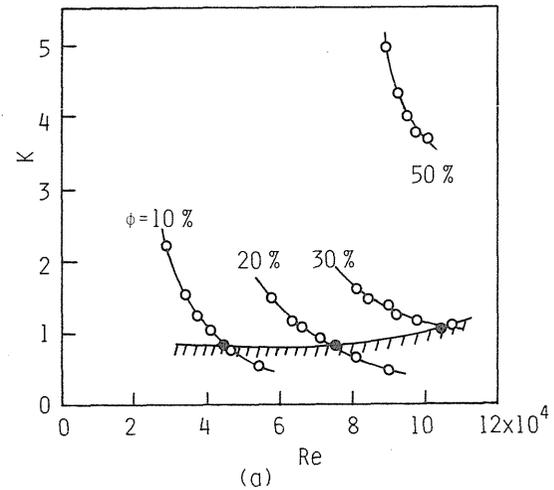
Fig. 7 Variation of cavitation coefficients for various chokes.

- : inception of cavitation
- (a) rectangle type
- (b) triangle type
- (c) circular arc type

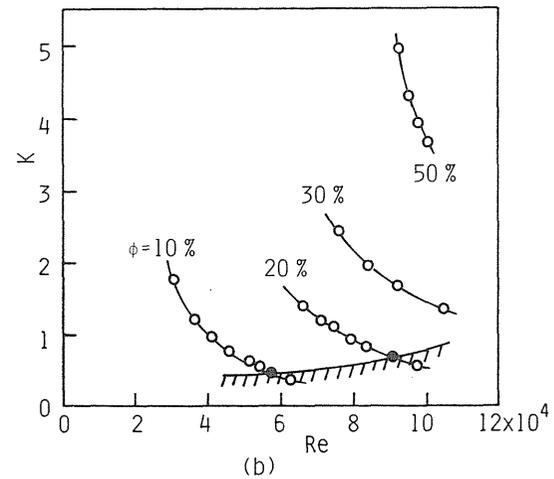
それらの点を結んだ斜線部より下の部分においてキャビテーションが発生している。全般に開度が大きくなるに従い初生キャビテーション係数に対するレイノルズ数は方形絞りが一番小さく、三角絞り、円弧絞りの順に大きくなっている。

Fig. 8は二次元スルース弁におけるキャビテーション係数とレイノルズ数の関係を示したもので、図中の表示はFig. 7と同様である。全般にFig. 7と同様の傾向を示しているが、方形型を除いては開度30%以上でのキャビテーションの発生は観察されなかった。

本研究におけるキャビテーション検出法については前述した聴覚および目視による方法で行なったが、初生キャビテーション時には気ほうの発生は見られずリチ



(a) Re



(b) Re

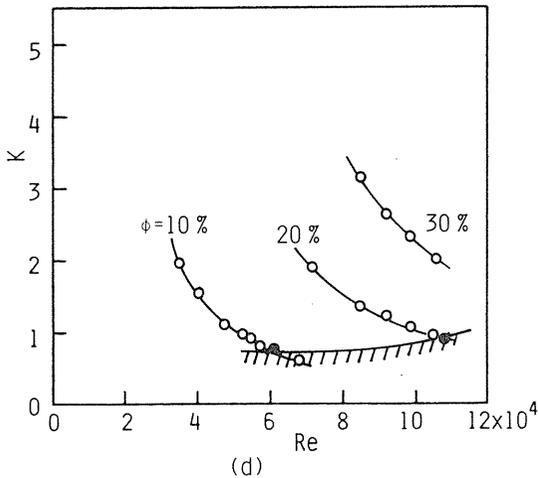
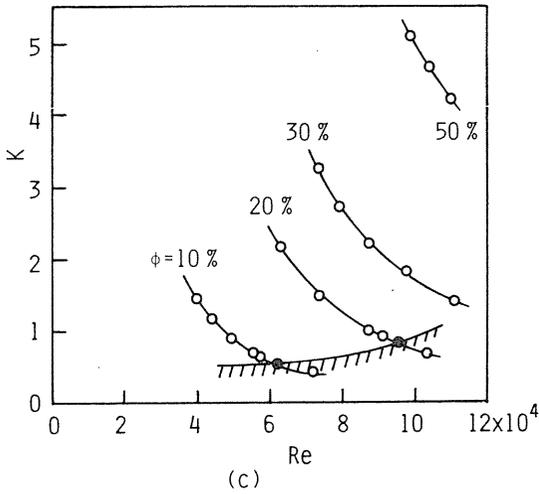


Fig. 8 Variation of cavitation coefficients for various sluice valves.

- : inception of cavitation
 (a) rectangle type
 (b) 90° angle type
 (c) 45° angle type
 (d) circular arc type

りと云う音が出てくるので, これを本研究において初生キャビテーションとした。さらにキャビテーション係数が小さくなるに従い, 弁や絞り部の先端付近より微細な気泡が断続的に発生し, さらにそれが連続的になり, ついには後流側全体にわたり, 非常に激しいキャビテーションの発生が観察された。

これらのキャビテーション発生の原因は流速の増加にともなう静圧の減少と渦の発生による圧力の低下などが考えられる。本研究において開度, 流速をそれぞれ一定とした場合においても, 弁や絞り形状の違いにより縮流部における流れの加速および渦の発生状況が異なり, 縮流部での圧力低下の度合いが異なることは明らかである。したがって縮流の度合いおよび渦の発生が顕著な形状ほどキャビテーションの発生しやすい傾向があると考えられる。

各種絞り形状について前述の実験結果と合せて考えてみると方形絞りで発生するキャビテーションは方形絞りの入口の角の部分と絞り出口から下流の2ヶ所に発生している。入口の角より流れのはく離が起これ, そこに死水領域が発達するのが予測され, 流速の増大とともに初生キャビテーションの発生が確認される。この死水領域内では当然, 強い渦運動が生じていると考えられる。また絞り出口から下流においては絞りにより生ずる噴流とそれに接する流体との間に不連続面が発達し, そこに生ずる渦による圧力低下により, キャビテーションが発生すると考えられる。故に流速の遅い場合などは, 不連続面の発達が少ない, 下流部でのキャビテーション発生は起これずらい。また, 円弧型絞りに生ずるキャビテーションは円の頂点付近から円弧に沿って死水領域が出来て, この領域付近でキャビテーションが発生している。しかし, この場合, 流れは円弧に沿って流れる傾向があるので方形型絞りに比べ死水領域があまり発達しないのでキャビテーションは起これずらいと考えられる。三角絞りにおいては三角の先端付近から下流に向かって糸状にキャビテーションが発生している。これは明らかに流れが噴流になっていることを示している。

二次元スルース弁の先端形状の違いによるキャビテーション発生状況について調べてみると各種絞りの場合と同様のことが云える。すなわち, 方形型スルース弁は方形型絞りと同様であり, 45°型および90°型スルース弁は三角型絞りと似た形状なので, 先端付近のキャビテーション発生機構は三角型絞りと同様と考えられる。また円弧型スルース弁の場合のキャビテーション発生状態は45°型, 90°型スルース弁の場合と大差は認められなかったが, キャビテーション係数とレイノルズ数との関係など総合的に判断すると, 円弧型絞りの場合と似たような傾向が確認された。すなわち, 円弧型の場合, 圧力分布よりみる圧力損失が角のある形状よりも少なく, Fig. 8に示すように角のある形状よりもキャビテーション係数が大き

な値をとる。

以上のことから、キャビテーションの発生しづらい形状とは、死水領域が少なく、流れに乱れが生じにくい形状となっていることが必要であると考えられる。本研究では絞りにおいては、方形型、三角型、円弧型の順にキャビテーションが発生しづらくなり、二次元スルース弁においても、方形型、90°型、45°型、円弧型の順に発生しづらくなることがわかった。

5. 結 論

本研究で得られた結果より次の様な結論を得た。

- (1) キャビテーションが発生しづらい形状は絞りにおいては、円弧型が一番発生しづらく、次いで三角型、方形型の順となる。また、二次元スルース弁においても円弧型が一番発生しづらく、次いで45°型、90°型、方形型の順となる。
- (2) 圧力分布より低圧領域は絞りおよび弁直後より $X/D = 3$ 付近まで続き、 $X/D = 6$ 付近で圧力が回復する。
- (3) 圧力分布は同一開度において流速が変化してもほぼ

一定の分布形状を示しているがキャビテーションを発生すると最低圧力値、圧力回復値が低下する傾向がある。

- (4) 初生キャビテーション係数は開度が大きくなる程、大きくなる傾向がある。
- (5) 初生キャビテーション係数は各種絞りでは0.75～1.2、二次元スルース弁では0.5～1.13の範囲にある。終りに、本実験に尽力された当時の卒業研究生、石川仁君、高津戸智史君へ謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) たとえば、Knapp, R.T. et al., Cavitation, McGraw-Hill, New York (1970).
- (2) キャビテーションに関するシンポジウム (第1回) 日本学術会議 (1975)
- (3) キャビテーションに関するシンポジウム (第2回) 日本学術会議 (1978)
- (4) キャビテーションに関するシンポジウム (第3回) 日本学術会議 (1983)
- (5) 村井等, ターボ機械, 第3巻, 第2号(1975), 52
- (6) たとえば川又他, 茨城大学工学部研究集報30(1982), 1