円筒絞りを通る海水のキャビテーション特性*

横田 源弘**・ 望月 敬美***
中川 隆夫**

Cavitation Characteristics of Sea Water Through Long Orifices

By Motohiro Yokota, Hiromi Mochizuki, Takao Nakagawa

This paper describes the discharge coefficient C_d and the critical cavitation number σ_{cr} in sea water through sharp-edged, bevel-edged and round-edged long orifices.

The ranges of test conditions are 0.39~0.59 MPa for the upstream pressure, 295~355 K for the upstream temperature and 7.7~28.5 m/s for the mean velocity, so that the cavitation number $\sigma=0.11\sim10.99$ and the Reynolds number $Re=(2.1\sim15.4)\times10^4$. Further, the cavitation characteristics of sea water are compared with those of fresh water. And the results are summarized as follows:

- (1) C_d and σ_{cr} in sea water for sharp-edged long orifices agree well with those in fresh water. That is, the difference between sea water and fresh water has little effect on the cavitation characteristics. The same can be said about the effect of sea water temperature on the cavitation characteristics.
- (2) As for sharp-edged long orifices, the ratio of orifice length to orifice diameter has an effect on C_d . But the effect in the supercavitating region of $\sigma<\sigma_{cr}$ is different from that in the subcavitating and transient regions of $\sigma>\sigma_{cr}$. This is because the separated supercavitating cavity exists in the supercavitating region, and it does not exist in the subcavitating and transient region.
- (3) The tendency of C_d and σ_{cr} for bevel-edged long orifice agrees qualitatively with those for sharp-edged one.

1. 緒 言

絞り機構は、オリフィス、ノズル、毛細管、隙間、弁などの形で海水を取扱う船舶用の種々の流体機器および管路に多く用いられている。そして、この絞り機構に一度キャビテーションが発生すれば、圧力、流量特性への重大な影響ばかりでなく、下流側壁面のキャビテーション腐食、振動などの致命的障害も起こり得るから、このようなキャビテーションの解明は重要課題と言えよう。

円筒絞りのキャビテーション特性は、水および油の場合については、いろいろ解明されている^{1)~18)}。周知のように、海水におけるキャビテーションの初生条件が、清水、食塩水の場合のそれに対比して著しい特異性があることが知られている^{1)~4)}から、海水キャビテーションが十分発達した状態における円筒絞りの流出特性すなわちキャビテーション特性についても、十分明らかにしておく必要がある。

よつて本報では、各種入口形状をもつ円筒絞りについ

て海中でのキャビテーション特性を、レイノルズ数 $Re=(2.1\sim15.4)\times10^4$ の範囲において系統的に調べた。次いで、絞りの性能(例えば、流量係数)が劣化し始める臨界キャビテーション係数についても検討した。

2. 記 号

A : 絞りの流路断面積

C_d : 絞りの流量係数

d : 絞りの内径

l : 絞りの長さ

m : 質量流量

P : 圧力

P_v : 海水または清水の飽和圧力

ΔP : 差圧 $= P_1 - P_2$

Re : レイノルズ数 $= V_0 \cdot d / \nu_1$

V_0 : 平均流速

θ, ν, ρ : 海水または清水の温度、動粘度、密度

σ : キャビテーション係数 $= (P_2 - P_v) / \Delta P$

添字

1, 2 : 絞りの入口、出口

* 原稿受付 昭和63年7月30日

** 正会員 水産大学校(下関市吉見永田本町1944番地)

*** 正会員 東京水産大学(東京都港区港南4丁目5番7号)

3. 実験装置と方法

図1には、実験装置の概略を示す。タンク内のヒータで一定温度に温度調節された海水または清水は、渦巻ポンプによって測定部に送られている。絞り入口圧力 P_1 は、絞り上流側の圧力調整弁で、また出口圧力 P_2 は下流側の圧力調整弁で、十分なめらかに調節され得る。絞り入口・出口側の静圧 P_1 、 P_2 より定義したキャビテーション係数 $\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P$ は、 P_1 を固定し、 P_2 を変えて変化させた。また、質量流量は天秤で計量した。

図1 実験装置の概略

図2には、測定部の詳細を示す。絞り出口側の噴流キャビテーションの様相は、透明アクリル樹脂製の円筒内で観察された。

図2 テスト部の詳細

表1には、供試絞りの入口形状、内径 d および絞りの長さ l と d との比 (l/d) を示す。

実験結果の整理に用いたキャビテーション係数 σ 、レイノルズ数 Re および流量係数 C_d は、次のように定義した。

$$\sigma = (P_2 - P_v) / \Delta P$$

$$Re = V_o \cdot d / \nu_1 = 4m / \pi d \nu_1 \rho_1$$

$$C_d = m / A \sqrt{2 \rho_1 \Delta P}$$

本実験の条件は、 $\sigma = 0.11 \sim 10.99$ 、レイノルズ数 $Re = (2.1 \sim 15.4) \times 10^4$ 、 $V_o = 7.7 \sim 28.5 \text{ m/s}$ 、入口側静圧 $P_1 = 0.39 \sim 0.59 \text{ MPa}$ 、入口側温度 $\theta_1 = 295 \sim 355 \text{ K}$ である。試料海水は、東京湾内の晴海埠頭で採取

表1 供試絞りの形状・寸法

No.	Type	Dia. d	l/d
1	Sharp - edge	1.51	5.0
2	"	2.02	5.0
3	"	2.49	5.1
4	"	3.01	5.0
5	"	2.00	2.5
6	"	2.03	12.2
7	"	2.06	24.3
8	Bevel - edge	2.02	5.0
9	Round - edge	2.02	5.0

したもので、その物性値は 303 K の時、密度 $\rho = 1,020 \text{ kg/m}^3$ 、動粘度 $\nu = 0.825 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ および Cl 濃度 12~18% であった。

4. 実験結果

4.1 円筒型絞りの特性 一般に、良く使用されているシャープエッジ型円筒絞り（以下単に円筒型絞りという）のキャビテーション特性を、海水、清水および油について比較検討してみよう。

図3(a)には、絞りの流量係数 C_d とレイノルズ数 Re およびキャビテーション係数 σ との関係、更に図3(b)には、臨界キャビテーション係数 σ_{cr} と Re との関係を、海水、清水の両場合および種々の海水温度 θ_1 の下で示す。図より以下の事柄が読み取れる。1) C_d および σ_{cr} は海水、清水のいずれに対しても一致する。すなわち、キャビテーション特性に対する海水、清水の差の効果（海水効果）は僅少である。2) 更に、特性に対する海水温度効果も僅少である。

図4には、種々の絞りの流量係数 C_d を σ に対して示す。既存の水や油の研究から予想されるように^{5)~19)}、 $\sigma > \sigma_{cr}$ のでせん移領域、サブキャビテーション（以下 Sub. C という）領域および非キャビテーション領域（空洞はく離流れをほとんど伴わない領域）では、一般に C_d はキャビテーション係数 σ にはよらず Re および (l/d) に依存している（図3(a)も参照）。本実験範囲の $15 > Re \times 10^{-4} > 2$ では、 C_d は Re にもよらず、ほぼ一定の C_{du} であった。この C_{du} 値はもちろん (l/d) の関数で、(l/d) の増大とともに減少している。そして、それらは Duggins の清水の結果⁹⁾ と一致している（図5参照）。一方 $\sigma < \sigma_{cr}$ のスーパキャビテーション（以下 SC という）領域（著しい空洞はく離を伴う領域）では、 C_d はキ

図3 海水と清水との比較

図4 円筒型絞りの流量係数 C_d 図5 l/d に対する C_{du} の変化
(円筒型絞りの場合)

キャビテーション係数 σ と (l/d) に依存している (図3(a), 図4(b)参照). C_d に対する (l/d) の影響は, $(l/d) < 10$ では十分小さいが, $(l/d) > 10$ では (l/d) の増大とともに C_d は若干上昇する (図5参照). すなわち, C_d に対する (l/d) の影響は, $\sigma < \sigma_{cr}$ の領域と $\sigma > \sigma_{cr}$ の領域とでは, すなわち, 絞

り内の空洞はく離の有無によって大いに異なる.

次に, 実用上の重要特性数である臨界キャビテーション係数 σ_{cr} を調べてみよう. 図6(a)には, 円筒型絞りの σ_{cr} と Re の関係を種々の d (ただし, $l/d \doteq 5$) の下に示す. 図より明らかなように, Re の増大とともに σ_{cr} は増大する傾向がある. 更に, 図6(b)には σ_{cr} を種々の (l/d) (ただし, $d \doteq 2\text{mm}$) に対して示す. これより, 海水における σ_{cr} は清水に対する Duggins の結果⁹⁾ よりやや下回り (定性的傾向は一致), 無視できない絞り口径の差の影響が現われている.

4.2 各種形状の円筒絞りの特性 各種形状の円筒絞りまわりのキャビテーションの様相を示した図7より, まず, 入口形状の違いによってキャビテーションの様相が異なることが見てとれる.

円筒型絞りでは, σ の低下 (P_1 を一定に保ち, P_2 を減圧) とともに, ある σ (初生近傍^{7),14)} で音は明りょうに高くなる. しかし, 絞り出口下流では気泡はまだ目視できない. σ を更に低下させると, 臨界キャビテーション係数 σ_{cr} 近傍で騒音は著しく高くなり, 絞り出口端付近の下流で気泡は認められ, 閉塞状態となる. キャビテーションが十分発達した状態では, 下流の気泡領域は

図6 円筒型絞りの臨界キャビテーション係数 σ_{cr}

図7 海水キャビテーションの様相 (露出時間 1/2000 s)

著しく増大している。

次に、円錐型では円筒型絞りとほぼ同様で、 σ_{cr} 近傍で音は突然高くなるとともに、絞り出口端付近の下流で気泡は確認され、閉塞状態に至る。キャビテーションが十分発達した状態では、気泡群は円錐状に観察され、円筒型と明らかに異なっている。

一方、丸型絞りでは、まず出口端から少し離れた下流側の位置に気泡が認められ、音も生じる。 σ の低下とともに、気泡の発生点は次第にオリフィスに接近し、また気泡量も漸次増大している。キャビテーションが十分発達した状態では、円筒型や円錐型に比べて気泡領域は広く、遠くまで及んでいるが、絞り出口端近くでは気泡はほとんど観察されなかった。なお、騒音は丸型、円錐型、円筒型絞りの順で激しく高いことを付記する。

以上を要するに、海水キャビテーションの様相および騒音特性は水および油キャビテーションのそれら^{7), 13)-18)}と基本的には変わらないと言える。

次に、図8には各種入口形状をもつ円筒絞りの流量係数 C_d を Re および σ に対して示す。図中の $\sigma > \sigma_{cr}$ の場合には清水や油で得られた他の研究結果^{12), 19)}も併記した。これより、円錐型絞りの C_d は円筒型と丸型のそれらの間に位置し、その定性的傾向は円筒型のそれと一致する。すなわち、SC領域 ($\sigma < \sigma_{cr}$) では流量の飽和現象を起こし、 σ の減少とともに C_d は漸次減少する。丸型絞りでは、発達したキャビテーション状態においても流量の飽和現象は見られないが、あるキャビテーション係数以下の小 σ 側では流量の増加割合は減少する。すなわち、ある程度発達したキャビテーション状態では、

図8 流量係数 C_d に及ぼす入口形状の影響

丸型絞りでも σ の低下に伴う流量係数 C_d の減少が見られる。なお、 $\sigma > \sigma_{cr}$ の範囲における供試丸型絞りの C_d は、日比らが与えた油での実験式¹²⁾より若干下回っている。これは入口丸み(曲率)の違いが僅かながら現われているのであろう。

図9には、入口形状の異なる絞りの臨界キャビテーション係数 σ_{cr} と Re との関係を、種々の θ_1 の下に示す。従来の水・油試験^{1)~18)}によれば、円筒型、円錐型、丸型絞りの順でキャビテーションは発生しにくくなることがわかっている。図9によると、SC状態への移行も、円筒型、円錐型、丸型絞りの順で移行しにくくなることが見て取れる。そして、 Re に対する σ_{cr} の変化の傾向は、円筒型、円錐型とも同等 (Re の増大とともに、 σ_{cr} は増大する) である。

図9 臨界キャビテーション係数 σ_{cr} に及ぼす入口形状の影響

5. 結 論

絞りの海水キャビテーション特性を、各種入口形状をもつ円筒絞りを用いて実験的に解明した。得たる結果を要約すると、次の通りである。

(1) 円筒型絞りの流量係数 C_d および臨界キャビテーション係数 σ_{cr} は、海水、清水のいずれに対しても一致すると言える。すなわち、キャビテーション特性に対する海水、清水の差の効果(海水効果)は僅少である。したがって、当然のことながら、従来得られた油のデータとも定性的に一致している。また、キャビテーション特性に対する海水温効果も僅少である。

(2) 円筒型絞りの C_d に対する (l/d) の影響は $\sigma < \sigma_{cr}$ の領域 (SC領域) と $\sigma > \sigma_{cr}$ の領域 (せん移領域, Sub. C領域および非キャビテーション領域) とでは、すなわち、空洞は分離の存在の有無によって異なる。

(3) 円錐型絞りの C_d および σ_{cr} の傾向は、円筒型絞りのそれらと定性的に一致する。すなわち、 $\sigma < \sigma_{cr}$ (SC領域) では流量の飽和現象を起こし、 σ の減少とともに C_d は漸次減少する。一方、 σ_{cr} は Re の増大とともに、増大する傾向をもつ。なお、円錐型絞りの σ_{cr} は円筒型絞りのそれより小さい。

最後に、本研究に関してご教示を賜った東北大学教授高速力学研究所 大場利三郎先生に謝意を表します。更に、本実験を行うにあたり助力を受けた海鷹丸機関部の諸氏に感謝致します。

文 献

- 1) 沼知・椎名, 機論, 3-11 (昭12-5), 177.
- 2) 沼知・黒川, 機論, 3-11 (昭12-5), 182.
- 3) 沼知・黒川, 機論, 4-17 (昭13-11), 334.
- 4) 沼知・黒川, 機論, 4-17 (昭13-11), 341.

- 5) Bergwerk, W., Proc. I. Mech. E., 173-25 (1959), 655.
- 6) Backé, W. und Benning, P., Ind. Anz., 63-7 (1962-8), 1563.
- 7) Pearce, I.D. and Lichtarowicz, A., 2nd Fluid Power Symp. BHRA, Paper D2 (1971-1), 13.
- 8) Lichtarowicz, A. and Pearce, I.D., Conf. on Cavi., I. Mech. E., Paper C 161/74 (1974-9), 129.
- 9) Duggins, R.K., Proc. IAHR Symp., (1976), 217.
- 10) Backé, W. und Riedel, H.P., Ind. Anz., 94-8 (1972-1), 153.
- 11) Riedel, H.P., Ind. Anz., 94-71 (1972-8), 1724.
- 12) 日比・ほか2名, 油圧と空気圧, 2-2 (昭46-4), 72.
- 13) 稲熊・ほか2名, 油圧と空気圧, 7-6 (昭51-11), 341.
- 14) 市川・ほか2名, 油圧と空気圧, 15-7 (昭59-11), 545.
- 15) 山口・鈴木, 油圧と空気圧, 9-2 (昭53-3), 113.
- 16) Oba, R., ほか2名, Trans. ASME J. Fluid Eng., 104-1 (1982-3), 94.
- 17) 佐藤・ほか4名, 機論, 51-470 (昭60-10), 3285.
- 18) 横田・ほか2名, 機講論, 第947回 (昭62-11), 115.
- 19) Lichtarowicz, A., ほか2名, I. Mech. E. Sci., 7-2 (1965), 210.
- 20) Sverdrup, H. U., ほか2名, THE OCEANS THEIR PHYSICS, CHEMISTRY, and GENERAL BIOLOGY, (1952), 113, PENTICE-HALL, INC.