

ITTC Foil-Headform Combination

によるキャビテーション初生試験

門井 弘行*・黒部 雄三*・吉田 三雄*・牧野 雅彦*

Cavitation Inception Tests on the ITTC Foil-Headform Combination

By

Hiroyuki KADOI, Yuzo KUROBE, Mitsuo YOSHIDA
and Masahiko MAKINO

Abstract

The Cavitation Committee of the 15th ITTC submitted the following recommendation:

“A test program should be initiated with the Cavitation Committee’s proposed foil-headform combination to evaluate facility cavitation characteristics and for comparative measurements between facilities.”

According to this recommendation the Cavitation Committee of the 16th ITTC organised a comparative test program with the foil-headform combination.

The foil-headform combination has been tested in the several facilities. In participating in the comparative test program, cavitation inception tests with the foil-headform combination were carried out in the cavitation tunnel of the Ship Research Institute, and the results of the tests are compared with the results in the other facilities.

目 次

| | |
|---|--|
| <p>記 号</p> <p>1. はじめに</p> <p>2. 供 試 体</p> <p>3. 試 験 方 法</p> <p>4. 試験結果および考察</p> | <p>5. 試験結果の比較</p> <p>6. 空気含有率の影響</p> <p>7. おわりに</p> <p>参 考 文 献</p> |
|---|--|

記 号

$$\sigma_0 = \frac{P_0 - P_V}{(1/2)\rho V_0^2} = \text{キャビテーション数}$$

$$\sigma_i = \frac{P_i - P_V}{(1/2)\rho V_0^2} = \text{初生キャビテーション数}$$

P_0 = 供試体の軸中心における静圧 (kg/m²)

P_i = キャビテーション初生時の供試体の軸中心における静圧 (kg/m²)

P_V = 供試水の蒸気圧 (kg/m²)

V_0 = 計測部における一様流速 (m/s)

ρ = 供試水の密度 (kg·m⁻⁴·s²)

α/α_s = 供試水の空気含有率

α = 標準状態 (0°C, 760 mmHg) における供試水の空気含有量 (体積比)

α_s = 標準状態における供試水の飽和空気含有量

$C_{p \min}$ = 最小圧力係数

C_{ps} = 剝離点の圧力係数

* 推進性能部

原稿受付: 昭和58年9月2日

1. はじめに

キャビテーション現象は周囲の環境に影響される度合が大きく、キャビテーション試験水槽の形式・仕様、供試体の寸法等の他に、水槽水の水質・気泡核の分布・空気含有量、試験時の水温、流速等の物理量も影響因子として考えられる。したがって環境の異なる試験水槽間で、同じ供試体により試験を行ってその試験結果を比較することは有意義である¹⁾。

第15回国際試験水槽会議 (ITTC) において、キャビテーション技術委員会より、試験水槽のキャビテーション特性を評価し、各試験水槽間で比較試験を行うために、foil-headform combination を用いた試験の計画を行うことの必要性が勧告された²⁾。この勧告をうけて、第16回 ITTC のキャビテーション技術委員会で比較試験の計画が行われ、foil-headform combination がベルリン工科大学 (Technische Universität Berlin) で製作された。最初にオランダの Netherlands Ship Model Basin (現在の Maritime Research Institute Netherlands) の大型キャビテーション試験水槽においてキャビテーション初生試験が行われた。その後、foil-headform combination は各国のキャビテーション試験水槽を持ちまわりされ、同様なキャビテーション初生試験が実施され、その結果が比較、検討されている³⁾。

我国でもこの比較試験計画に協力することになり、船舶技術研究所の大型キャビテーション試験水槽においても foil-headform combination のキャビテーション初生試験が実施され、他水槽の試験結果と比較された。

2. 供試体

foil-headform combination はステンレス製で、Fig. 1 に示すようにハブに取り付けられた2枚の3次元翼と、ハブの上流部分に取り付けられた半球状試験体で構成されている。3次元翼の全翼幅は300mmで、翼断面形状は NACA 16-012 の上下対称翼で、一方の翼は $+10^\circ$ 、他方の翼は -10° の迎角がついている。半球状試験体の直径は40mmである。Fig. 2 に示すように、試験体は2本のストラットにより上部観測窓の亚克力製の取り付け板に固定される。試験体の軸中心は取り付け板の下方200mm、水槽中心より上方130mmの位置にある。

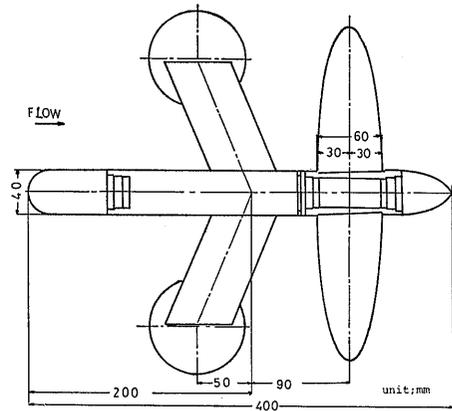


Fig. 1 ITTC foil-headform combination

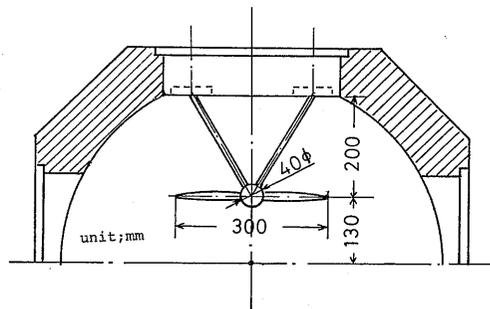


Fig. 2 The foil-headform combination attached to the tunnel

3. 試験方法

試験は、大型キャビテーション試験水槽の第1計測部で、空気含有率=0.2と0.6の2状態について、流速を種々に変化させて行った。

キャビテーション初生の定義は、ITTCの定義に従い、次のように行った。

ハブボルテックスキャビテーション：ハブに付着したキャビテーションが観測に要した時間の75%の時間の間、連続して発生している場合。

サクシオンサイドキャビテーション：翼面上の前縁に近い部分に帯状にキャビテーションが発生し始めた場合。

チップボルテックスキャビテーション：翼先端に付着したボルテックスキャビテーションが観測に要した時間の75%の時間の間連続して発生している場合。

半球状試験体上のキャビテーション：試験体上にバブルキャビテーションもしくは細い帯状にシートキャビテーションが発生し始めた場合。

3次元翼のキャビテーション初生については1翼毎別々（迎角=+10°の翼では翼上面に，迎角=-10°の翼では翼下面にキャビテーションが発生）に観測を行い，初生を判定した。

4. 試験結果および考察

キャビテーション発生状況の概略を Fig. 3 に，試験結果を Table 1 & 2 および Fig. 4~Fig. 7 に示す。

最初にハブボルテックスキャビテーションが発生するが，発生状況は不安定で間欠的であり，初生の判定が難しい。

次に3次元翼の翼面上，前縁近くに翼幅方向に翼幅の約1/2長さのごく微細なバブルが集ってできた帯状

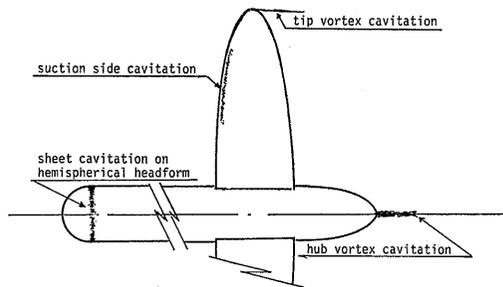


Fig. 3 Cavitation patterns

のサクションサイドキャビテーションが発生する。発生状況は比較的安定している。また，迎角=+10°の翼の方が，迎角=-10°の翼よりキャビテーションの

Table 1 Inception cavitation number for $\alpha/\alpha_s=0.2$

| Vo (m/s) | Hub vortex | Suction side | Tip vortex | Headform |
|----------|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 10.0 | — | 2.89 (L) 2.76 (U) | 1.38 (L) 1.41 (U) | 0.611 |
| 9.0 | — | 2.64 2.83 | 1.32 1.38 | 0.609 |
| 8.0 | 4.60 | 2.75 2.72 | 1.33 1.43 | 0.592 |
| 7.0 | 4.15 | 2.58 2.60 | 1.29 1.34 | 0.599 |
| 6.0 | 4.00 | 2.41 2.53 | 1.28 1.35 | 0.563 |
| 5.0 | 3.44 | 2.04 2.48 | 1.22 1.31 | 0.555 |
| 4.0 | 3.70 (3.03) | 2.03 2.30 | 1.15 1.20 | — |
| 3.5 | 3.44 | 2.05 2.00 | — — | — |

Remarks; (L) is lower and (U) is upper side of the foils

Table 2 Inception cavitation number for $\alpha/\alpha_s=0.6$

| Vo (m/s) | Hub vortex | Suction side | Tip vortex | Headform |
|----------|------------|----------------|-------------------|----------|
| 10.0 | — | 3.03 (L) — (U) | 1.40 (L) 1.53 (U) | 0.658 |
| 9.0 | — | 2.83 3.26 | 1.43 1.49 | 0.648 |
| 8.0 | 4.84 | 2.74 3.15 | 1.42 1.49 | 0.625 |
| 7.0 | 4.49 | 2.62 3.08 | 1.38 1.43 | 0.637 |
| 6.0 | 4.12 | 2.61 2.92 | 1.34 1.46 | 0.600 |
| 5.0 | 3.80 | 2.48 2.97 | 1.32 1.38 | 0.630 |
| 4.0 | 3.50 | 2.15 2.80 | 1.25 1.38 | — |
| 3.5 | 3.63 | 2.11 2.61 | — — | — |

Remarks; (L) is lower and (U) is upper side of the foils

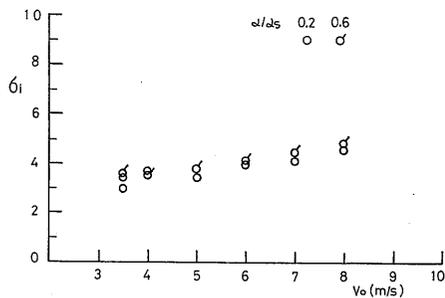


Fig. 4 Hub vortex cavitation inception

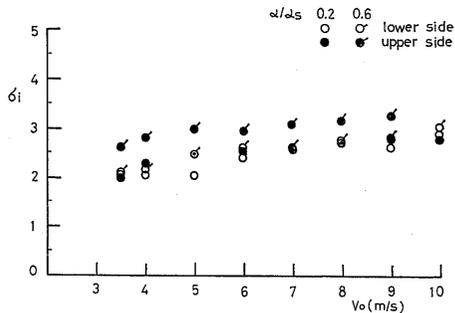


Fig. 5 Suction side cavitation inception

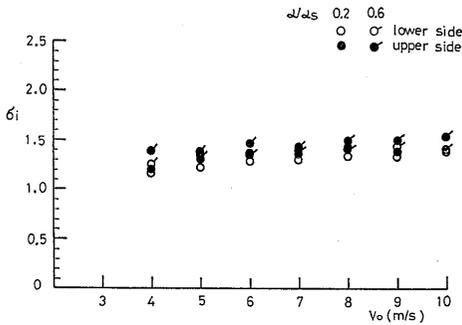


Fig. 6 Tip vortex cavitation inception

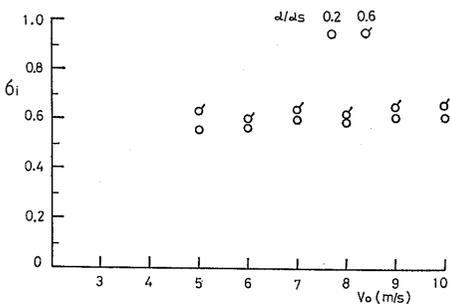


Fig 7 Cavitation inception on hemispherical headform

初生が早い。これは試験体が $0^\circ \pm 0.1^\circ$ 程度の精度で取り付けられ、迎角 $= +10^\circ$ の翼は迎角が増え、迎角 $= -10^\circ$ の翼は迎角の絶対値が減ったためである。

続いて翼の先端からチップボルテックスキャビテーションが発生する。発生状況は安定しているが、これはサクションサイドキャビテーションが翼先端近くまで発達した後、これに付随した形でチップボルテックスキャビテーションが発生するためと考えられる。ただし、初生の判定に観測者の個人差の入り込む余地があり、初生の判定に多少のあいまいさが残る。

最後に半球状試験体の外周に沿って、試験体の上側部分に細い帯状のシートキャビテーションが発生する。児玉他⁴⁾は直径 30mm の半球状試験体を用いてキャビテーション初生試験を行ったが、その際に計算した半球状試験体の圧力分布を Fig. 8 に示す。また Fig. 8 中に児玉他⁴⁾および Arakeri 他⁹⁾が計測した剝離泡の発生位置と今回観測したシートキャビテーションの発生位置が矢印で示されている。児玉他の計測結果には水槽側壁の影響が強く入っており、測壁影響が小さいと考えられる Arakeri および今回の試験結果と直接比較するには多少問題があるが、定性的な傾

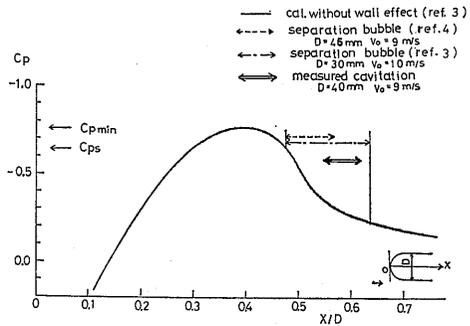


Fig. 8 Location of separation bubble and cavitation on hemispherical headform

向をみるために、あえて引用した。シートキャビテーションの初生は物体表面の境界層剝離と密接な関係があり、層流境界層が剝離を起し、乱流に遷移して再付着すると剝離点の下流に剝離泡が形成される。この剝離泡内を起源としてキャビテーションが発生すると、それは上流端が剝離点近傍にあって物体表面に固定された扁平なキャビティ、すなわちシートキャビテーションである⁴⁾といわれている。また、剝離泡内の圧力はほぼ一定で剝離点での圧力(係数) C_{ps} に一致し、このためシートキャビテーションの初生キャビテーション数 σ_i は最小圧力係数 C_{pmin} よりも C_{ps} に左右されるという実験結果⁹⁾、さらには2次元翼の圧力分布と σ_i の比較から、 σ_i は $-C_{ps}$ に等しいかまたはやや小さいという結論^{7),9)}が得られている。これらの結果を踏まえて今回の試験結果を検討してみると、初生キャビテーション数の値およびシートキャビテーション発生位置ともに妥当なものと評価できる。なお、今回の試験では ITTC ヘッドフォーム¹⁾について行った試験⁹⁾の場合と異なり、バブルキャビテーションはまったく観測されなかった。

5. 試験結果の比較

これまでに行われた他の試験水槽の試験結果と今回得られた試験結果との比較を行った。比較した研究機関名およびキャビテーション試験水槽の概要を Table 3 に、空気含有率 $= 0.2$ の場合の比較を Fig. 9~Fig. 12 に示す。なお、空気含有率 $= 0.6$ の場合の各試験水槽の試験結果の間にみられる差の傾向は、空気含有率 $= 0.2$ の場合と大差がない。

初生キャビテーション数で比較すると、

1) ハボルテックスキャビテーションは、NSMB および PARIS の σ_i が一番高く、SRI, CTU およ

Table 3 Characteristics of cavitation test facilities

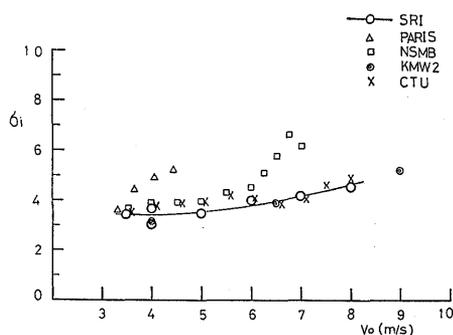
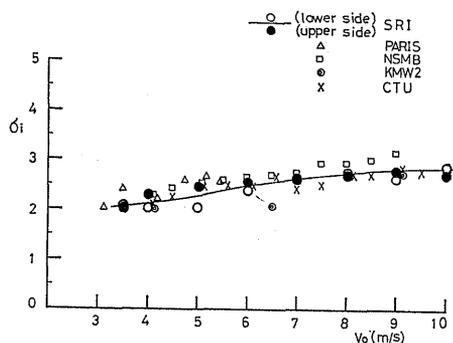
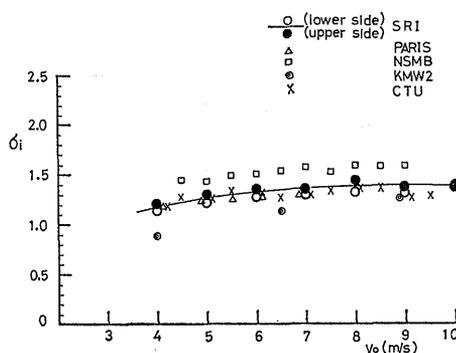
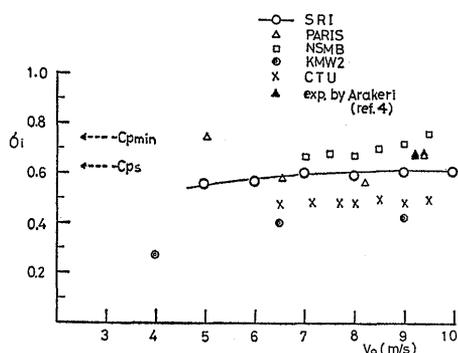
| Institute | Tunnel Abbrev. | Essential Features of tunnel |
|-------------------------------|----------------|--|
| Ship Research Institute | SRI | Closed jet, 0.75 m circular test section, $V_{max} = 20$ m/s |
| Netherlands Ship Model Basin | NSMB | Closed jet, 0.9 m square test section with rounded corners, $V_{max} = 10$ m/s |
| KAMENA AB Marine Laboratory | KMW2 | closed jet, 0.8 m square test section with rounded corners, $V_{max} = 15$ m/s |
| Shanghai Jiao Tong University | CTU | closed jet, 0.6 m circular test section, $V_{max} = 15$ m/s |
| Basin d'Essais des Carenes | PARIS | Free surface 0.4 m x 0.35 m rectangular test section, $V_{max} = 12$ m/s |

び KMW2 の σ_i がほぼ等しい値を示しており, Fig. 9 に示されるように, いずれも流速が増すと σ_i が増大する傾向がみられる。

2) サクシヨンスайдキャピテーションは, NSMB および PARIS の σ_i が一番高く, SRI, CTU および KMW2 の σ_i がほぼ等しい値を示しているが, Fig. 10 に示されるように, 5 水槽間の σ_i にあまり大きな差違はなく, ハブボルテックスの場合と異なり比較的まとまっているといえる。

3) チップボルテックスキャピテーションは, NSMB の σ_i が一番高く, SRI, CTU および PARIS の σ_i がほぼ等しく中間にあり, KMW2 の σ_i が一番低い値を示している。

4) 半球状試験体については 5 水槽間の σ_i の値に

**Fig. 9** Hub vortex cavitation inception for $\alpha/\alpha_s=0.2$ **Fig. 10** Suction side cavitation inception for $\alpha/\alpha_s=0.2$ **Fig. 11** Tip vortex cavitation inception for $\alpha/\alpha_s=0.2$ **Fig. 12** Cavitation inception on hemispherical headform for $\alpha/\alpha_s=0.2$

大きな差異がみられる。NSMB の σ_i が一番高く, $\sigma_i = -C_{p\min}$ の関係にあり, 中間に SRI および PARIS での値があり, $\sigma_i = -C_{ps}$ の関係がみられ (但し, PARIS の場合には $\alpha/\alpha_s=0.6$ のデータは発表されていない), CTU, KMW2 の順に低い値を示している。なお, キャピテーションの種類としては, NSMB が

バブルキャビテーション, SRI および CTU がシートキャビテーション, KMW2 では $\alpha/\alpha_s=0.2$ の場合にシートキャビテーション, $\alpha/\alpha_s=0.6$ の場合はバブルキャビテーションが発生している。PARIS の場合は種類が報告されていない。このように水槽によって発生するキャビテーションの種類が異なる傾向は, 第 12 回 ITTC のキャビテーション技術委員会の報告¹⁰⁾にも述べられている。

以上の比較から, 本供試体のキャビテーション初生に関する一般的傾向として;

- 1) 3 次元翼については, NSMB の場合が一番早くキャビテーションが発生し, KMW2 の場合がキャビテーション初生が一番遅く, SRI と CTU がその間でほぼ等しい。
- 2) 半球状試験体については, 5 水槽間で発生するキャビテーションの種類も異なり, かつ, 初生キャビテーション数の値にも大きな差がみられるが, キャビテーション初生に重要な影響をもつ気泡核分布の計測の必要性が痛感される。

6. 空気含有率の影響

SRI, CTU および NSMB の場合をとりあげて, キャビテーション初生にたいする空気含有率の影響を調べた結果を Fig. 13 a, b に示す。

それぞれのキャビテーションについて, 空気含有率の大きい場合に多かれ少なかれキャビテーション初生

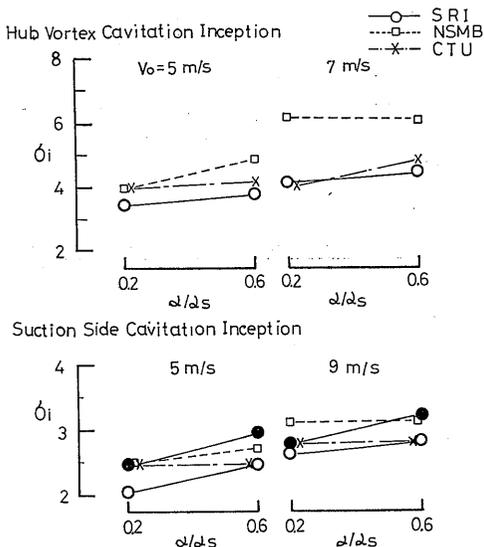


Fig. 13 (a) Influence of air content

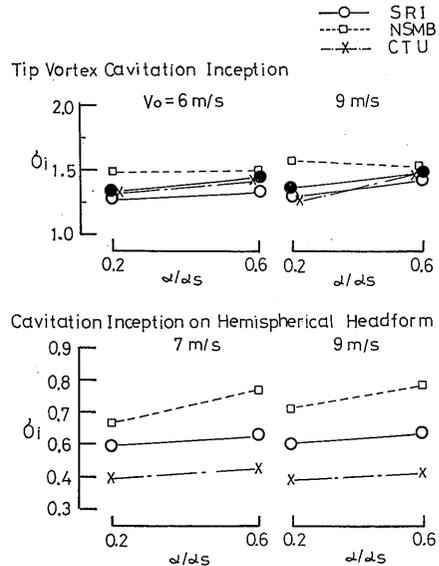


Fig. 13 (b) Influence of air content

が早くなる傾向がみられる。しかし, キャビテーションの初生は, 気泡核の分布, 個数によっても大きく影響される。したがって同じ空気含有率の場合でも, キャビテーション試験水槽の大きさ, 空気含有量調整の方法によっても σ_i は異なることが十分考えられる⁸⁾。

7. おわりに

今回, ITTC・キャビテーション技術委員会の比較試験計画に協力して, ITTC foil-headform combination のキャビテーション初生試験を実施して, 他のキャビテーション試験水槽の試験結果と比較・検討を行い, 以下の結論を得た。

- 1) ハブボルテックスおよびチップボルテックスキャビテーションについては, 初生の判定に多少の問題があるので, 初生キャビテーション数の値が 5 水槽間である程度のばらつきがみられる。
- 2) サクシオンサイドキャビテーションについては, 初生の判定が比較的是っきりとできるためか, 初生キャビテーション数が 5 水槽間であまりばらつきがみられない。
- 3) 半球状試験体の初生キャビテーションについては, 各試験水槽毎に発生するキャビテーションの種類も異なり, 初生キャビテーション数の値も 5 水槽間に大きな差異がみられる。
- 4) 上記, 1), 2) および 3) のいずれの場合にも, 5 水槽間の初生キャビテーション数の値の大小関係に

試験水槽のキャビテーション特性に基づくものと考えられる, ある一定の傾向が認められる。これは主に, 気泡核の分布に基づくものと考えられる。したがって, 初生キャビテーション試験のさいには, 気泡核分布計測を行うことが望まれる。

5) 船舶技術研究所の試験結果は, 3次元翼については他の試験水槽の試験結果のばらつきの間にある, また半球状試験体については $\sigma_i \doteq -C_{ps}$ であり, 常識的な値を示している。

参 考 文 献

- 1) Lindgren, H. and Johnson, C. A.: Cavitation Inception on Head Form-ITTC Comparative Experiments, Appendix V, Report of Cavitation Committee, Proceedings of the 11th ITTC, Tokyo (1966), pp. 219~232
- 2) Recommendations of the Cavitation Committee, Proceedings of the 15th ITTC, the Hague, Vol. 2 (1978), p. 224
- 3) Report of the Cavitation Committee, Proceedings of the 16th ITTC, Leningrad (1981), pp. 421~424
- 4) 児玉良明 他: キャビテーション初生に関する研究 (第2報), 造船学会論文集, 第146号 (1979), pp. 53~55
- 5) Arakeri, V. H. and Acosta, A. J.: Viscous Effects in the Inception of Cavitation on Axisymmetric Bodies, J. of Fluid Engineering, T. of SNAME, Vol. 95 (1973)
- 6) Gaster, M.: The Structure and Behaviour of Separation Bubbles, A.R.C. Report and Memoranda No. 3595 (1967)
- 7) Casey, M. V.: The Inception of Attached Cavitation from Laminar Separation Bubbles on Hydrofoils, Conference on Cavitation, Edinburgh (1974)
- 8) Ukon, Y.: Partial Cavitation on Two- and Three-dimensional Hydrofoils, and Marine Propellers, Proc. of the 10th IAHR Symposium, Tokyo (1980), Vol. 1
- 9) 右近良孝, 黒部雄三: ITTC ヘッドフォームを用いたキャビテーション初生観測について, 第30回船研研究発表会講演集 (1977), pp. 21~24
- 10) Report of the Cavitation Committee, Proceedings of the 12th ITTC, Rome (1969)