(昭和 62 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

シートキャビティの内部流れに関する研究

正員 吉 原 敬 一* 正員 加 藤 洋 治**
 正員 山 口 一** 宮 永 大**

A Study on the Internal Flow of a Sheet Cavity

by Keiichi Yoshihara, *Member* Hiroharu Kato, *Member*
 Hajime Yamaguchi, *Member* Masaru Miyanaga

Summary

A sheet cavitation is usually treated as a free stream flow where the pressure is assumed constant and its internal flow is neglected. However the study of the internal flow becomes important for the following two cases:

(1) Estimating the amount of collapsing cavity bubbles at the trailing edge of a sheet cavity:

(2) Estimating the change of cavity vapour pressure in liquid cryogenics.

The flow pattern and flow rate in a natural (vapour) cavitation are of interest but their measurements are very difficult. Therefore the flow of a ventilated cavitation has been measured as the model of natural cavitation. This paper discussed first on the similarity between the natural and ventilated cavitations on two hydrofoils. The ventilated cavitation was realized by ejecting N_2 -gas from a slit at the leading edge of the foils. The shape and pressure distribution were very similar as those of natural cavitation. Estimating from those experiments including the measurement of ventilated flow rate, it was found that the internal flow pattern was a recirculating flow where a reverse flow was near the solid surface. The averaged velocity of the internal flow was about one tenth of main flow.

記 号 表

1. A, b, c, d : 係数

B : 試験体の幅

C : コード長さ

C_P : 無次元圧力 $\equiv P / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$

C_Q : 無次元ガス流量, (2)式

D : 試験体の直径または厚さ

F_r : フルード数 $\equiv U_\infty / \sqrt{gD}$

L : キャビティ長さ

P : 圧力

Q : ガス流量

Re : レイノルズ数 $\equiv U_\infty D / \nu$

S : キャビティ幅

U : 流速

X : 流れ方向の距離

α : 空気含有量

δ : キャビティの厚さ

ρ : 密度

σ : キャピテーション数

添字

G : キャビティ内

s : 飽和

v : 蒸気

∞ : 一般流

1 序

一般にシート・キャピテーションは、キャビティ外部の流れに注目して研究されており、キャビティ内部は流れを無視し、簡単に「キャビティ内では圧力が一定である」として取扱っている。実際にはキャビティの界面から蒸発によりキャビティ内へ蒸気が供給され、それはキャビティ内を流れ後縁で凝縮しているはずであるが、これらを無視して扱っても常温の水の場合には、キャビティの形状や流力特性は精度よく求められる。

* 運輸省九州運輸局(研究当時東京大学船舶工学科)

** 東京大学船舶工学科

しかし以下のような場合にはキャビティの内部流れを考慮する必要がある。

(1) キャビティの崩壊による振動・騒音・壊食などの問題を考える時、キャビティの後縁付近で単位時間にどれほどのキャビティ量が崩壊しているかを知る必要があり、その際はキャビティの内部流れの考察が重要になる。

(2) 高温の水やフロン、液体酸素等の冷媒においては、相変化に伴う温度変化が無視できず、それに伴ってキャビティ内の蒸気圧が変化する。この場合には、もはやキャビティ内の圧力が一定であると仮定することはできない。その場合には外部流れの式と内部流れの式を連立させて解を得ることになる^{1),2)}。

この論文では、これらのことを考える第一歩として行った、キャビティの内部流れについての実験的研究について述べる。普通の蒸気キャビテーション（ナチュラル・キャビテーションと呼ぶ。NC と略記する）において、キャビティ界面からの蒸気量や内部の流動の様子を計測することは、極めて困難である。実際、本研究においてもレーザ流速計を用いて内部流の速度分布計測を試みたが、成功しなかった。そこで、翼面にスリットを切り、そこから気体を吹き出してできるキャビティ（ベンチレーテッド・キャビテーションと呼ぶ。VC と略記する）について、その現象がNC に酷似していることを確認し、その類推からNC 内部の流れを推定することにした。

このような手法は、すでに1960年代から前述の(2)の場合の研究に関連して行われている。Brennen³⁾ は後方から支持された球形のヘッドフォームの後方にスーパーキャビテーションを発生させ、その中に吹き込むガス（空気）の量を変化させて、キャビティ内の圧力を測定し、界面からキャビティ内に流入するガス量すなわち物質伝達量を推定している。もし物質伝達と熱伝達のアナロジ（相似性）が成り立つとすると、上述の測定から熱伝達量が求められ、蒸発量が推定できるはずである。いづれにしても基本的な仮定として、次式のキャビテーション数 σ_G が同じなら、同じ形状のキャビティが発生するものとしている。

$$\sigma_G = \frac{P_\infty - P_G}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

ここで、 P_G はキャビティ内圧力である。

Billet ら^{4),5)} はキャビテーションに対する熱力学的影響、すなわち、前述の(2)の問題を解析するために、種々の軸対称体で Brennen と同様の実験を水-酸素ガス系で行って、キャビティ内のガス流量を求めている。ここでも基本的な仮定は「NC と VC で、キャビティ長さ

Table 1 Constants and exponents by Billet et al^{4),5)}.

	A	b	c	d
Zero-caliber ogive	42.0×10^{-4}	0.16	0.13	0.69
45-deg cones	0.595×10^{-4}	0.41	0.15	0.81
Venturi	0.676×10^{-4}	0.48	-0.21	1.06
Quarter-caliber ogive	0.320×10^{-4}	0.46	0.26	0.74

が同じならば、内部流の流量は同じになる⁶⁾ という仮定である。結果はレイノルズ数、フルード数の関数として下記のように整理されている。

$$C_Q \equiv Q/U_\infty D^2 = AR_e^b Fr^c (L/D)^d \quad (2)$$

実験より求められた各係数 A, b, c, d の値は Table 1 のようになっている。

これらの実験はいずれも軸対称体に対するものである。また Table 1 の結果を見ると、ベキ数の値は場合により大きく異なっている。これらの結果から実用上重要である2次元翼型の場合を類推することはむずかしい。そこで本研究では、著者らがこれまでに多くの実験と理論解析を行っている EN 翼型^{7),8)} と、Hord⁹⁾ が液体酸素、液体窒素のキャビテーションについて、数多くのデータを公表している2次元ヘッドフォーム（Hord は Hydrofoil と呼んでいる）の2種の試験体について上述の NC と VC の実験を行うことにした。

2 実 験

2.1 実験装置

実験は東京大学船舶工学科の TE 型キャビテーション・タンネルで行った。本実験では、タンネルに気体を吹き込むという通常とは異なった使い方をする。そしてそのままでは実験中にタンネル内の圧力が増加して行くことになる。そこで下記の対策をとることにした。

(1) 各所にガス抜き配管をし、一実験終了ごとにガス抜き操作を行う。

(2) 調圧タンクの上部を空気で満たし圧力変化のダンパーとして使うと同時に、実験中も調圧タンクから空気が少しずつ流出するようにし、タンネルの圧力が一定になるようにつとめる。

本実験で計測すべき量は、主流流速、静圧、翼面圧力分布、キャビティ形状、長さなどの他、吹き出したガスの流量、流量計測位置での圧力、温度などがある。実験装置のダイアグラムを Fig.1 に示す。

主流流速は He-Ne 20mW レーザを光源とする前方散乱型レーザ流速計で、静圧はタンネル備え付けの圧力変換器で計測した。

翼面上の圧力分布は小型薄肉の圧力ゲージ（共和電業：PS-2KA）を受圧面が翼面と一致するように埋め込んで計測した。圧力ゲージは実験中少なくとも一日1回キャリブレーションを行い直線性、再現性をチェックし

Fig. 1 Diagram of experimental set-up

ている。本圧力ゲージの直線性は0.3%程度である。本実験においてはすべてのデータを12チャンネルのトランジェントレコーダに同時に取込み、マイクロコンピュータで処理し、データの同時性を確保した。このため得られたデータは、系全体の比較的ゆっくりした圧力変化に対して精度良いものになっている。また真横および上方から二台のカメラで同時撮影し、後のキャビティ形状の解析に使用した。

吹き出す気体はコンプレッサによる加圧空気、ポンペからの窒素ガスなどが考えられるが、コンプレッサを使用すると僅かながら脈動流となり好ましくない。そこで窒素ガスを市販の窒素ポンペから供給することにした。

管路の途中にオリフィス流量計を設け、同時に計測した圧力、温度を使って、キャビティ内の圧力、温度に換算し真の吹き出し量を求めた。2次元ヘッドフォームの場合には後に示すように、上下対称の2カ所のスリットから同量吹き出すため、流量計は2セット使用している。

2.2 試験体

試験体は先に述べたようにキャンパのない2次元翼型(EN翼型)および、Hord⁹⁾が液体水素、液体窒素のキャビテーション実験に用いた先端が半円形の2次元ヘッドフォームである。

EN翼型はFig. 2に示すように、コード長さ100mm、スパン50mmのステンレス鋼製で前縁から1mmのところ幅0.4mmのスパン全体にわたる吹き出しスリットが設けられている。スリットの位置は、スリットがない場合のNCの前縁位置⁷⁾に合わせている。またコード長さの10%、20%、30%、45%、60%、80%の位置に圧力ゲージが埋め込まれている。窒素ガスの供給は、スパン方向に一樣な吹き出しを得るために、両側から行うよう設計されている。後に示すVCの写真に示すよう

Fig. 2 EN-foil

に、流場の2次元性は満足すべきものである。

EN翼型はTE型キャビテーション・タンネルの2次元翼型用テストセクション(断面形状120mm×50mm)の中央に迎角4°で取付けて実験を行った。

2次元ヘッドフォームはFig. 3に示すように前縁が半径12.48mmの半円で、後半はテーパした直線で構成されている。材質はステンレス鋼である。先に述べたHordの試験体は、25.4mm×25.4mmのセクション用に作られているが、本実験で使用するセクションは80mm×80mmであるので、相似となるように寸法を拡大してある。

これは、Hordの実験において試験体がテストセクション寸法に比べ大きく上下壁影響が無視できず、将来両者のデータを比較する場合、テストセクション寸法も含めて相似であることが重要であると考えたためである。試験体はテストセクションの中央に迎角0°(実測値-0.5°)でセットされる。

スリットは、上下面とも計算より求めた層流剝離点の位置に切っており、予想されるNC発生位置に合せてあ

Fig. 3 2D-headform

る。スリット幅は 0.4 mm であり、上下独立に吹き出し流量を調整できる。

2次元ヘッドフォームの表面にも5個の圧力ゲージを埋め込み、圧力分布を測定できるようになっている。

2.3 実験条件

実験はNCの場合には流速を一定にして系の圧力を変化させることにより、キャビテーション数を変化させて行った。VCの場合には流速を一定にして、吹き出し流量を変化させ、キャビティ内圧力を計測している。主流流速はEN翼型で6m/s、2次元ヘッドフォームで5m/sと8m/sである。これらはいずれも公称で、データの解析には実験ごとに計測したLDVのデータを使っている。溶存酸素計で計った空気含有量は $\alpha/\alpha_s=0.22 \sim 0.28$ である。

3 実験結果および考察

3.1 翼面上圧力分布およびキャビティ形状

3.1.1 EN翼型

非キャビテーション時の圧力分布をFig.4に示す。圧力ゲージによる直接計測、レーザ流速計により流速を求めベルヌイの式により圧力に換算したもの、および上下壁影響を考慮したHess and Smith法の計算結果の3者はほぼ一致している。計算ではスリットや粘性の影響を考慮していないので、その影響により前縁近傍で実測値との差異が生じたことが考えられるが、詳細な検討は行っていない。

キャビテーション時の圧力分布と写真解析により求めたキャビティ形状を、Fig.5に示す。この時キャビテーション数の定義は(1)式によっている。そしてキャビティ内圧力としては、キャビティにおおわれた部分のほぼ中央の圧力ゲージの読みを採用している。図に見られるようにVCはNCに圧力分布、キャビティ形状とも

Fig. 4 Pressure distribution along EN-foil with no cavitation

驚くほど良く一致している。VCはNCと異なりキャビティ後縁で、キャビティが崩壊することはない。それにもかかわらずVCの後縁はNCの場合と同様、半閉鎖的になっている。これは次に述べる2次元ヘッドフォームの場合も同様である。

3.1.2 2次元ヘッドフォーム

非キャビテーション時の圧力分布をFig.6に示す。図中にはHordによる液体窒素のデータ⁹⁾も合わせて示している。液体窒素のデータは上下壁影響を考慮したポテンシャル流計算に、また本実験の結果は対応するレイノルズ数における翼面、およびタンネル壁面の境界層の排除厚さを考慮した計算結果に一致する。液体窒素は動粘性係数が小さく($\sim 6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)、実験の主流速度が50m/s程度と大きいこととあいまって、境界層の排除厚さが薄くなり、その効果を考慮していない計算結果と

Fig. 5(a) Pressure and cavity thickness distributions along EN-foil

Fig. 5(b) Pressure and cavity thickness distributions along EN-foil

Fig. 5(c) Pressure and cavity thickness distributions along EN-foil

一致したものと思われる。

キャビテーション時の圧力分布とキャビティ形状の一例を Fig. 7 に示す。EN 翼型、2 次元ヘッドフォームの両者の実験を通じ、NC と VC の圧力分布、キャビティ形状の類似性は極めて良いといえ、Brennen, Billet らの仮定は 2 次元翼型においても成り立つと考えてよい。

3.2 キャビティの観察

3.2.1 EN 翼型

Fig. 6 Pressure distributions along 2D-headform with no cavitation

Fig. 7 Pressure and cavity thickness distributions along 2D-headform

NC と VC の様子を両者比較して、Fig. 8 に示す。上方からの観察によると NC, VC ともキャビティの前縁付近ではタテ波（スパン方向に凹凸のある波）が見られ、下流に行くに従い気泡群でおおわれ白濁するようになる。NC においてはその他に、横波状のかなり明瞭な攪乱が見られる場合がある。既報告の実験⁷⁾においてはタテ波状の攪乱は見られるが、大気泡が合体したようにも見える横波状の攪乱は生じていない。前縁近傍のスリットは気泡核の供給源にも、シートキャビティの強制的

な前縁にもなっている可能性があり、興味ある現象であるが、本研究ではこれ以上立ち入らないことにする。

他の多くの翼型と同様、EN 翼型においてもキャビティ長さが翼のコード長さに近付いてくると、キャビティ長さが大きく変動するようになり、周期的に気泡塊をキャビティ後流中に放出する。Fig. 8(b) の3組の写真はそのような場合の変動の代表的な様子を示したものである。キャビティが気泡群となって後流に流れて行く様子や、渦糸状のキャビテーションが発生する様子などよく似かよっている。一方 NC と VC の一番大きな差異は、VC ではキャビティが消滅しないため、翼の後流においても気泡群が見られることである。

しかしシートキャビティ部に限って見れば、両者はほとんど区別がつけられないほどであり、このことはキャビティ長さが、キャビティの消滅ではなく、他の要因たとえばその流体力学的な不安定性から決定されるものであることを暗示しており、興味深い。

3.2.2 2次元ヘッドフォーム

この試験体では NC, VC ともキャビティが長くなっても不安定になることはなかったが、その他の挙動は EN 翼型と同様である。Fig. 9 にその様子を示す。この場合も特に NC の場合にスリットの存在が、シートキャビティの発生に影響を与えているようである。しかしスリットの位置はスリットがない場合でもシートキャビテーションの発生が予想される位置にしており、スリットによって発生位置が大きく変化することはないと思わ

れる。また NC, VC の両者でキャビティ前縁の位置を一致させた実験を行ったものとも考えることもできる。

3.3 キャビティ長さ

キャビティ長さを連続したシートキャビティが切れる点と定義すると、NC, VC 両者に使え、また NC でこれまで行って来た定義⁷⁾と一致する。

Fig. 10 に EN 翼型のキャビティ長さの計測結果を示す。EN 翼型においては、非線型キャビテーション理論⁷⁾の計算結果に上下壁影響の修正を行ったものは、実験結果をかなりよく説明する。ここでキャビテーション数 σ_g は前述のように、実測したキャビティ内圧力を基にしたものである。実験時の水温に対応した飽和蒸気圧は、実測のキャビティ内圧力より 1~4kPa 程度低い圧力であるが、この飽和蒸気圧値を基にしたキャビテーション数 σ_v を求め、この値に対してキャビティ長さをプロットすると、Fig. 10 の四角印のようになり、全く一致しなくなる。このことは2次元ヘッドフォームの場合も同じである。

Fig. 11 は2次元ヘッドフォームのキャビティ長さである。特に NC の場合 $\sigma_g=2.1$ 前後でキャビティ長さは急激に大きくなり、キャビテーションによるチョーク現象が起きている。VC においても $\sigma_g<2.1$ の領域でデータのばらつきが大きい。2次元ヘッドフォームはテストセクション断面に比べ試験体の断面が大きく、圧力が先端付近で大きなピーク、その後で長いフラットな分布になっている。圧力が低下するとシートキャビティが

Fig. 8 Comparison of natural and ventilated cavitation at EN-foil
(a) Steady cavity region

Fig.8 Comparison of natural and ventilated cavitation at EN-foil
(b) Unsteady cavity region (at 3 different times)

急激に成長し、チョークを起こし易いことが考えられる。

3.4 吹き出し流量とキャビティ内流量

VC においてキャビティ長さや吹き出し流量、すなわちキャビティ内流量の関係を計測した結果を Figs. 12, 13 に示す。

EN 翼型の実験ではキャビティが振動している場合には、 $L/C < 0.5$ の安定なキャビティに比べるとクラウド

キャビティの周期的な放出による量に加わっているはずである。そこでこの3点を除いて、残りのデータから

$$C_q \equiv \frac{Q}{U_\infty BD} = A(L/C)^n \quad (3)$$

という式の形を仮定して A, n の値を最小2乗近似で求めてみると次式が得られる。ここで B, D はそれぞれ翼型あるいはヘッドフォームの幅および厚さである。

EN-foil

Fig.9 Comparison of natural and ventilated cavitation at 2D-headform

Fig.10 Cavity length vs. cavitation number at EN-foil($U_\infty=6\text{m/s}$) Fig.11(b) Cavity length vs. cavitation number at 2D-headform($U_\infty=8\text{m/s}$) Fig.11(a) Cavity length vs. cavitation number at 2D-headform($U_\infty=5\text{m/s}$) Fig.12 Volume flow rate of ventilated cavity at EN-foil ($U_\infty=6\text{m/s}$)

Fig. 13 Volume flow rate of ventilated cavity at 2D-headform

$$C_Q = 7.66 \times 10^{-2} \times (L/C)^{0.88} \quad (U_\infty = 6 \text{ m/s}) \quad (4)$$

$L/C > 0.5$ においては、この値と実測値の差が周期的に放出されるクラウドキャビテーションとなる量と考えてよからう。このクラウドキャビテーションは翼後縁付近で一時に崩壊するから、その体積の推定は騒音、壊食の解析に重要となる。

Fig. 13 に示す 2 次元ヘッドフォームでは主流速度 U_∞ を 2 種変えているが、 U_∞ によって明らかに差が見られる。この場合も実験式はそれぞれ下記のようになる。

2 次元ヘッドフォーム

$$U_\infty = 8 \text{ m/s} \quad C_Q = 8.69 \times 10^{-3} \times (L/D)^{0.82} \quad (5)$$

$$U_\infty = 5 \text{ m/s} \quad C_Q = 7.09 \times 10^{-3} \times (L/D)^{0.85} \quad (6)$$

これらの実験結果によれば、キャビティ長さ L に対する C_Q のべき数は 1 よりやや小さい数であり、Billet らによる種々の軸対称体の場合 (Table 1) に近い値となっている。また 2 次元ヘッドフォームの 2 種の流速における実験から、主流流速に対するべき数を求めてみると、実験範囲内では 0.4 前後 ($C_Q \propto U_\infty^{0.4}$) で Table 1 の実験と同じ傾向である (Table 1 の b と c を加えたものが流速のべき数となる)。

さて実測のキャビティ厚さからキャビティ内の平均流速を計算すると、その値は主流流速より 1 桁程度小さい値となり、このことは、Fig. 14 に見るようにキャビティ内の流れは逆流になっているか、大部分が低速の順流になっていることを示している。シートキャビティが発生した固体面のせん断応力を実測してみると、上流へ向いたせん断応力が計測される¹⁰⁾。また有限要素法を使ってキャビティ内の流動を解析して見ると、Fig. 14(a)の

Fig. 14 Possible flow patterns inside a cavity

Fig. 15 Ventilated flow thickness at various test bodies

流れパターンが得られた¹¹⁾。計算に使用したプログラムはストークス近似を用いているので、レイノルズ数が小さい場合にしか適用できないが、参考となる。

以上のことから、キャビティ内の蒸気の流動はキャビティ界面では界面の液流に引きずられて、大きな速度の流れが生じているが、それ以外では壁面近傍での逆流を伴うゆっくりした循環流を形成しているものと思われる。

Fig. 12, 13 では代表長さ D が異なるため直接の比較がしにくい。そこで Fig. 15 のように整理してみた。 S は流れに直角方向のキャビティの長さ (幅) であるから、縦軸は境界層の排除厚さと似た意味を持つ長さで、吹き出し気体が U_∞ で流れた時の気体の厚さを与える。また図中に、前述の Billet らの軸対称体の実験結果もかかげる。キャビティ長さに対する吹き出し量の変化はいずれの試験体でも似た傾向を示すが、量そのものはかなりの差異がある。たとえば Zero-caliber ogive では、キャビティ前縁が主流に角度を持って形成され、キャビティが厚くなる。このため必要な吹き出し量が相対的に大きくなるものと考えられる。

キャビティ形状は主として外部流によって支配されると思われるが、そのような形状を作るのに必要な内部流の流量はキャビティ前半部での蒸発量と、後半部での凝縮量とキャビティの不安定性により後流に持ち去られる量によって決まり、運動量、他エネルギー、物質の輸送現象を含んだ複雑な興味ある問題である。今後の研究がまたれる。

4 結 論

2 次元の EN 翼型と 2 次元ヘッドフォーム (参考文献 9) で Hydrofoil と呼ばれている形状と相似のもの) の先端付近に設けたスリットから窒素ガスを吹き出させ

て、ベンチレーテッド・キャビテーションを発生させ、キャビティ内での流れの様子を推定した。得られた結論は次のようである。

(1) キャビティ内部の圧力分布、キャビティ形状、キャビティ観察結果より、通常のナチュラル・キャビテーションと上述の方法によるベンチレーテッド・キャビテーションは現象が極めてよく似ており、前者の解析に対して、後者は有力な手段となり得ることを示した。また、両者のキャビティ長さや後流の様子が同じキャビテーション数においてほぼ等しいことから、キャビティ長さはキャビティの消滅により決まるのではなく、他の要因たとえばキャビティ界面の不安定性によって決まることが考えられる。

(2) ベンチレーテッド・キャビテーション内に吹き出した気体流量を測定し、ナチュラルキャビティにおける界面からの蒸発量を推定した。この蒸発量はキャビティ後縁で崩壊するキャビティの時間当りの体積となるため、その量の多少はキャビテーションによる騒音、壊食などに直接影響を与え重要である。

(3) キャビティ内部の流れは、キャビティ界面近傍では界面の流れに引きずられた流れとなるが、キャビティ体積のうち大部分がおそい循環流を生じていると考えられる。キャビティ内の流れ方向に垂直な断面を通過する気体の平均流速は、キャビティ界面速度の 1/10 程度の遅い流れである。

本研究の遂行に当たり、東京大学船舶工学科高速力学研究室の諸氏に多大なるご助力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kato, H.: Thermodynamic Effect on Incipient and Developed Sheet Cavitation, Int. Symp. on Cavitation Inception—1984, ASME, FED—Vol. 16, pp. 127–136.
- 2) Kato, H.: On the Structure of Cavity—New Insight into the Cavity Flow: A Summary of the Keynote Speech, Jets and Cavities—Int. Symposium, ASME, FED—Vol. 31 (1985), pp. 13–19.
- 3) Brennen, C.: The Dynamic Balances of Dissolved Air and Heat in Natural Cavity Flows, J. Fluid Mech. Vol. 37 (1969), Part 1, pp. 115–127.
- 4) Billet, M. L. and Weir, D. S.: The Effect of Gas Diffusion on the Flow Coefficient for a Ventilated Cavity, J. Fluids Eng., Trans. ASME, Vol. 97 (1975), pp. 501–506.
- 5) Billet, M. L. et al.: Correlations of Thermodynamic Effects for Developed Cavitation, J. Fluids Eng., Trans. ASME, Vol. 103 (1981), pp. 534–542.
- 6) Holl, J. W. et al.: Thermodynamic Effects on Developed Cavitation, J. Fluids Eng., Trans. ASME, Vol. 97 (1975), pp. 507–514.
- 7) 山口 一, 加藤洋治: 翼型に発生する部分キャビテーションの非線形理論(第1報), 日本造船学会論文集, Vol. 152 (1983), pp. 117–124.
- 8) 山口 一ほか: 翼型に発生する部分キャビテーションの非線形理論(第2報), 日本造船学会論文集, Vol. 154 (1983), pp. 95–101.
- 9) Hord, J.: Cavitation in Liquid Cryogenics: II—Hydrofoil, NASA CR-2156 (1972).
- 10) 麻岡秀行, 山田義博: キャビテーション発生による摩擦抵抗の低減, 東京大学船舶工学科卒業論文 (1987).
- 11) 吉原敬一: キャビティの内部流れに関する研究, 東京大学船舶工学科修士論文 (1987).