シートキャビティの内部流れに関する研究 (第2報)

正員 加藤 洋 治* 正員 山 口 一*
 正員 鴨 野 博 道** 正員 小 川 洋***
 宮 永 大*

A Study on the Internal Flow of a Sheet Cavity (2nd Report)

by Hiroharu Kato, *Member* Hajime Yamaguchi, *Member*
 Hiromichi Kamono, *Member* Hiroshi Ogawa, *Member*
 Masaru Miyanaga

Summary

This paper describes the experimental result of ventilated cavitation on a two dimensional foil. The ventilated cavitation could be compared directly to the natural cavitation when the cavitation number was evaluated by the pressure in cavity. The flow rate of ventilation was measured at 4 and 8 degrees of angles of attack. The velocity distribution in cavity was also analysed numerically and compared with experiment.

The conclusions are follows;

- (1) Both ventilated and natural cavitations were comparable on cavity length, shape, and C_p distribution at the same cavitation number.
- (2) Partial cavity began to pulsate when it grew more than 60 % of the chord. In this region, the flow rate increased rapidly to the cavity length. Whereas, it changed little at the super cavitating condition. The empirical equations for the flow rate were obtained.
- (3) The flow in the cavity was reverse near the foil surface, so it made a full rotational flow within the cavity. The reverse flow velocity was about one fourth of the main flow velocity.

記号表

B : 翼幅
 C : コード長
 C_p : 無次元圧力
 C_q : 無次元流量
 d : 係数
 L : キャビティ長さ
 P : 圧力
 Q : 吹き出し流量
 Re : レイノルズ数
 t : 翼の最大厚さ
 u, U : 流速

x : キャビティの長さ方向
 y, η : キャビティの厚さ方向
 α : 迎角
 δ : キャビティ厚さ
 ρ : 密度
 σ : キャピテーション数
 τ : 剪断応力
 添 字
 A : 大気
 F : 吹き出し流量計測部
 G : キャビティ内
 w : 翼面
 δ : キャビティ表面
 ∞ : 無限遠

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

*** IHI (研究当時東京大学工学部)

1. 序

原稿受理 平成4年7月10日
 秋季講演会において講演 平成4年11月9, 10日

一般に、シートキャピテーションに関する問題を取り扱う場合にはキャビティ内の圧力を一定として、キャビティ

外部の流れを解析することが多いが、次のような場合にはキャビティ内の流れが重要となる。

シートキャビティの崩壊による騒音やエロージョンの発生を考察する際には後縁でのキャビティの崩壊量を推定する必要がある。そのためにはシートキャビティ後縁から主流中に放出される水蒸気の量を知る必要がある。また、高温の水や液体水素等では気化熱の影響によりキャビティ内で蒸気圧が変化するため、キャビティ内の圧力は一定とならず、キャビティ内部と外部の両方の流れ場を連成して解く必要がある。

しかし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。以下 NC と呼ぶ）において、具体的にキャビティ界面からの物質伝達量やキャビティ内部の流動の様子を知ることは理論的にも実験的にも困難である。そこで、翼面から気体を吹き出してキャビテーション（ベンチレートッドキャビテーション。以下 VC と呼ぶ）を発生させ、その現象が NC に非常に良く似ていることから、類推により NC の内部の流れを推定することが行われている^{2,3)}。ここで、次式で定義されるキャビテーション数と同じなら VC で NC をシミュレートできるとしている。

$$\sigma_c = \frac{P_\infty - P_c}{(1/2)\rho U_\infty^2}$$

前報⁴⁾では2次元ヘッドフォームと EN 翼型についての実験を行い、NC と VC は現象が極めて良く似ており NC の解析のために VC は有力な手段となり得ること、キャビティ長さはキャビティの消滅により決まるわけではないことを示した。また、VC の吹き出し流量を測定することにより NC における界面からの蒸発量を推定するとともに、キャビティ内部の流れはキャビティ体積の大部分が遅い循環流となっていること等を示した。

しかし実験の困難なこともあって実験データは吹き出し流量の小さい範囲に限られていた。

本報では EN 翼型についてのさらに広範な実験を行った。

2. 実験

2.1 実験装置

前報と同じ装置を用いたので概略を述べるに止める（詳細は文献⁵⁾）。

実験は東京大学船舶海洋工学科の TE 型キャビテーション・タンネルで行った。実験の際には、主流流速・静圧、翼面上圧力分布、キャビティ長さ、吹き出し流量・圧力・温度などを計測した。

主流流速は He-Ne レーザ流速計（KANOMAX（株）27-0900 シリーズ）で、静圧はタンネル備え付けの圧力変換器で計測した。翼面上圧力は試験体に埋め込んだ小型薄肉の圧力ゲージ（共和電業（株）PS-2KA）により計測した。

吹き出す気体はコンプレッサによる加圧空気を用いた。

吹き出し流量は管路の途中にあるオリフィス流量計で、圧力は管内の圧力ゲージで計測した。これらのデータは全てトランジェントレコーダに同時に取り込まれパソコンで処理される。

また同時に真横及び上方から2台のカメラでキャビティを撮影し、キャビティ長さの計測に使用した。

キャビテーション数を変化させる方法として、NC の場合には流速を一定にして系の圧力を変化させた。VC の場合、やはり流速を一定にして吹き出し流量を変えてキャビティ内圧力を変化させた。

タンネル内に気体を吹き込むことは実験の継続時間を大きく制約する。そこで Fig. 1 に示すようにテストセクションの下流に脱気装置を新たに設置することによりタンネル内の空気抜きが容易になり、前回の実験では困難であった大きな流量の実験とスムーズな遂行が可能となった。

2.2 試験体

試験体は、前報と同じキャンパのない2次元翼型（EN 翼型）を使用した。EN 翼型は Fig. 2 に示すように楕円形と直線を組み合わせた形状の翼型でコード長さ 100 mm、幅 50 mm、最大厚さ 8 mm である。材質はステンレス鋼で、前縁から 1 mm のところに幅 0.4 mm のスリットが切っている。スリットの位置はスリットがない場合の NC の前縁位置^{6,7)}に合わせている。またコード長の 10, 20, 30, 45, 60, 80% の位置に圧力ゲージが埋め込まれている（10% の位置にあるゲージは今回使用していない）。

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 120 mm × 50 mm）の中央に取り付けられる。

2.3 実験条件

前報では迎角 4°・主流流速 6 m/s の一条件であったが、今回は迎角を 4° と 8°（実測値 3.89° と 7.65°）、流速を 4, 6, 8 m/s の3種類とした。また、重力の影響を見るため迎角 -8° についても実験を行った。

溶存酸素計で測った空気含有量は 12~28% であった。

Fig. 1 View of experimental equipment

Fig. 2 EN-foil

3. 実験結果及び考察

3.1 翼面上圧力分布

キャビティがないときの圧力分布について、圧力ゲージによる値、及びレーザ流速計で測った流速からベルヌイの定理により求めた値をプロットすると Fig. 3 のようになる。実線は上下壁影響を考慮した Hess & Smith 法で計算した理論値である。3 者の値は良い一致を示している。

キャビテーション時の圧力分布について近いキャビテーション数 σ_c の値の NC と VC を比較した一例を Fig. 4 に示す。図中の曲線は非線形キャビテーション理論^{6,7)}で計算したものである。キャビテーション数は 20% の位置の圧力の計測値から求めている。

実際のキャビティは後端が絶えず変動するため、その影響で理論曲線よりなだらかな分布になっているが NC と VC で傾向は一致している。

3.2 キャビティ長さ

VC は気泡が流れ去っても消滅しないのであるが、キャビティはある長さで一旦ちぎれる。NC と VC を対比させた写真を Fig. 5 に挙げる。

キャビティ形状が酷似していることが見てとれる。

NC と VC の類似性を調べるため、コード長で無次元化したキャビティ長さをキャビテーション数 σ_c に対してプロットし両者を比較したものを Fig. 6 に示す。キャビティ長さはスチル写真により翼前縁からひと続きとなっている部分を測ったので、振動する領域ではキャビティ長さのバラツキがとくに大きい。

キャビティ長さがコード長のおよそ 60% を越えるとキャビティは大規模に振動するようになり、スーパーキャビテーション状態になると再び安定する。これは NC と VC に共通した性質である。この大規模な振動の様子をさらに詳しく調べると、同じ σ_c で両者は周波数が等しく、高速度カメラを用いた観察でも極めて類似の発達・渦運動・流失過程を繰り返すことが分かった^{5,8)}。

図中の曲線は非線形キャビテーション理論で計算したものである。実験データは理論値より若干長くなっているが、 σ_c の値が同じであれば両者は同じ長さになるということが再確認された。流速が変わっても同様の結果であった。

迎角が -8° のときのデータは $+8^\circ$ のものと変わらなく、重力の影響は顕著にはみられなかった。

3.3 吹き出し流量

吹き出し流量は、オリフィス位置とキャビティ内の圧力差を考慮して次式のように補正を行った後、無次元化した。温度影響はほとんど無かったので省略した。

$$C_q = \frac{P_A + P_F}{P_A + P_C} \times \frac{Q}{U_\infty B t}$$

キャビティが振動を始めても、吹き込む気体の圧力と流量には振動はみられなかった。

キャビティ長さに対して C_q を整理すると Fig. 7 の様になる。ここで、振動するキャビティの崩壊・成長途上のデータは除外した。振動が始まるまでの領域では増加の割合が小さく、振動が始まると増加率が上がる。スーパーキャビテーションになると再び増加率は小さくなる。振動の有無、或いは流量の増加傾向より、3 つの領域に区分することができる。

前報では振動が始まる前のデータについて次の実験式を示した。

$$C_q = 7.66 \times 10^{-2} \times (L/C)^{0.88}$$

今回は振動が始まる手前までのデータと、振動している領域のデータをそれぞれべき乗回帰分析して次の実験式を得た。

$$C_q = 9.11 \times 10^{-2} \times (L/C)^{1.1}$$

$$C_q = 1.19 \times 10^{-1} \times (L/C)^{4.0}$$

前報において、振動領域の流量と振動前の流量の外挿との差がクラウド・キャビテーションの形態で流れ去る量である、という考察を行ったが、今回高速度カメラを用いて、キャビティがシート状に発達したのち後端に発生した不安定さが一気に前縁に達し『キャビティ全体積』がクラウド状に巻き上がって流れ去ることが観察された。

σ_c/a について整理すると Fig. 8 のようになって、流速の違いだけでなく迎角にも関わらず良くまとめることができた。 σ_c を下げてゆくとスーパーキャビテーション状態に不連続に移行する。この移行の手前までのデータをべき乗回帰分析して次の実験式を得た。

$$C_q = 3.6 \times 10^{-4} \times (\sigma_c/a)^{-3.1}$$

Fig. 3 (a) C_p distribution at non-cavitating condition
($\alpha = 4^\circ$; $U_\infty = 6$ m/s)

(b) C_p distribution at non-cavitating condition
($\alpha = 8^\circ$; $U_\infty = 6$ m/s)

Fig. 4 (a) C_p distribution at cavitating condition
($\alpha=4^\circ$; $U_\infty=6$ m/s)

(b) C_p distribution at cavitating condition
($\alpha=8^\circ$; $U_\infty=6$ m/s)

Fig.5 (a) Comparison of natural and ventilated cavity ($\alpha=4^\circ$; $U_\infty=6$ m/s)

(b) Comparison of natural and ventilated cavity ($\alpha=8^\circ$; $U_\infty=6$ m/s)

Fig. 6 (a) Cavity length vs. cavitation number
($\alpha = 4^\circ$; $U_\infty = 6$ m/s)

(b) Cavity length vs. cavitation number
($\alpha = 8^\circ$; $U_\infty = 6$ m/s)

Fig. 7 Flow rate of ventilation vs. cavity length
($\alpha=4^\circ, 8^\circ$; $U_\infty=4, 6, 8$ m/s)

Fig. 8 Flow rate of ventilation vs. σ_c/α
($\alpha=4^\circ, 8^\circ$; $U_\infty=4, 6, 8$ m/s)

VCは σ_c を用いてNCに対応づけできる、一方NCではキャビティ後方で気泡が消滅するがVCでは消滅しない。従って、VCで下流に流れ去る気体流量がNCで崩壊する量に等しい。このことから、上の式によりキャビティ内の

体積流量あるいはキャビティの崩壊量を推定することができると思われる。

3.4 キャビティ内流れ

キャビティ内流れについて次のように積分型の運動方程

式を作り数値計算を行った。

キャビティ形状は非線形キャビテーション理論^{6,7)}により定めた。また、キャビティ内の圧力は一定とした。キャビティ内のレイノルズ数はキャビティ長さを代表長さとして $Re=10^4 \sim 10^5$ の程度であり層流と考えられる。そこで、流速分布を以下のように3次式で近似する。

$$u(x, y) = U_{\infty} \{d_0(x) + d_1(x)\eta + d_2(x)\eta^2 + d_3(x)\eta^3\}$$

ここで

$$\eta(x, y) = \frac{y}{\delta(x)}$$

連続の条件より、吹き込み流量を Q とすると

$$\int_0^{\delta} u dy = Q$$

運動量保存の式は

$$\rho_c \int_0^{\delta + \frac{d\delta}{dx} dx} \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)^2 dy - \rho_c \int_0^{\delta} u^2 dy = \tau_s dx - \tau_w dx$$

これを整理して

$$\rho_c \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} u^2 dy = \tau_s - \tau_w$$

これらの式を係数 d について整理して得られた微分方程式を、Runge-Kutta 法で数値的に解いた。

Fig. 9 Calculated velocity distribution in a sheet-cavity

Fig. 10 Arrangement of hot wire anemometer

迎角が 4° 、キャビティ長さがコード長の78%の場合($\sigma_c = 0.66$)をFig. 9に示す。キャビティ長さの4%の点で既に逆流がみられる。36%の点では界面近くで急に減速し翼面側で主流流速の1/5程度の遅い逆流となっている。前報で紹介した、有限要素法によるキャビティ内の流動の解析結果⁹⁾と同様の流れパターンが得られた。

数値計算の妥当性を見るため、熱線流速計によるキャビティ内流速の計測を試みた。Fig. 10に示すように、翼前縁から53%のところに直径 $25\mu\text{m}$ の白金線を流れに垂直に2本渡し、抵抗変化の相関を取って時間遅れを求め流速を算定する。

迎角は 8° 、主流流速は 4 m/s とした。キャビティの大規模な振動にさらされると線が切れてしまい、キャビティ長さが目測で120%のときにかるうじて計測することができた。NCの電圧信号をFig. 11に、VCのものをFig. 12に示す。

共通して言えることは下流側の信号が上流側より先に起こることがある、つまり逆流が計測されていることである。この時の逆流は $1\sim 1.5\text{ m/s}$ 、主流速度のおよそ $1/4\sim 1/3$ であった。

数値計算をした条件はキャビティが振動している領域で、熱線流速計で計測したのがスーパーキャビテーション

であるとはいえ、キャビティ内の流れが翼面側で遅い逆流の全体的な循環流であると言えることができるであろう。

4. 結 論

翼型のベンチレーティッドキャビテーション(VC)の実験とキャビティ内流場の解析を行って、ナチュラルキャビテーション(NC)との類似性を検討し、NCの機構の理解のためにVCの研究結果がどの様に活用できるかを考察した。得られた結論は以下の通りである。

(1) キャビティ内圧力を用いたキャビテーション数で比較すると、VCでは気泡の消滅が起こらないにも関わらず、両者はキャビティ長さ、形状、翼面上圧力分布ともに一致することが再確認された。

(2) キャビティ内流量は、キャビティの振動が起きるまではキャビティ長さに比例して増加し、キャビティが振動する領域では増加率が格段に増える。スーパーキャビテーションになると再び増加率は小さくなる。

(3) VCをNCに対応づけることのできるキャビテーション数からキャビティ内流量を推定した。この量はキャビティの崩壊量と考えることもできる。

(4) キャビティ内の流速分布は翼面側の広い範囲で主流流速の $1/4$ 程度の逆流であり、キャビティのほぼ全長にわたる循環流をなしている。

参 考 文 献

- 1) Hord, J.: Cavitation in Liquid Cryogenics: II-Hydrofoil, NASA CR-2156 (1972).
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 吉原敬一ほか：シートキャビティの内部流れに関する研究, 日本造船学会論文集, Vol. 162(1987), pp. 61-70.
- 5) 小川 洋, 鴨野博道：ベンチレーティッドキャビテーションの研究, 東京大学船舶海洋工学科卒業論文 (1992).
- 6) 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.
- 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2報), 日本造船学会論文集, Vol. 154 (1983), pp. 95-101.
- 8) 鴨野博道ほか：ベンチレーティッドキャビテーションの研究, キャビテーションに関するシンポジウム(第7回), 日本学術会議 (1992).
- 9) 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).

Fig. 11 Signal of hot wire anemometer (Natural Cavitation)

Fig. 12 Signal of hot wire anemometer (Ventilated Cavitation)