二次元翼型に発生するキャビテーションの研究

正員 泉 田 泰 弘* 正員 田 宮 真**
正員 加 藤 洋 治*** 正員 山 口 一***

The Cavitation Characteristics of Two-Dimensional Hydrofoils

by Yasuhiro Izumida, *Member* Shin Tamiya, *Member*
Hiroharu Kato, *Member* Hajime Yamaguchi, *Member*

Summary

In this paper the authors describe investigations of the detailed cavitation structure, those are cavity length and its fluctuation, cavity shape and volume, void ratio in the cavity and velocity and pressure distribution around a cavitated foil. The following six foil sections were tested :

Non-burst type : NACA 0015, NACA 16-015, NACA 4415

Burst type : MAU 0.6r, MAU 0.9r, 4% thickness Plano-Convex

Results are as follows ;

(1) At a bursted foil, a vortex cavitation occurs first in the shear layer of the leading edge separation zone, when the cavitation number is greater than $-C_{Pmin}$ of the foil. This vortex cavitation is very similar to the cloud cavitation. Decreasing pressure, it changes to the ordinary sheet cavitation.

(2) Sheet cavity is trapped in the separated zone, which does not coincide with the lowest pressure zone. Consequently a region, whose pressure is lower than vapour pressure, does exist at the upstream of the sheet cavity on a foil.

(3) Cavitation characteristics of foils can be classified into two categories according to whether the lamina separation bubble will burst or not. Cavity length of a bursted thin foil can be calculated by the linear closed cavity model theory. On the contrary, the cavity length of a non-burst foil agrees with the result of "lift equivalent method" (empirical method).

(4) Cavity volume can also be classified by the condition of burst or non-burst. Empirical formulas are proposed from the present experiment.

1 緒 言

本研究では、キャビテーションに関する問題の中からキャビテーションの発生範囲、形状、構造に関する問題を取り上げ、その基本的モデルとして二次元翼型に関する研究を行なった。ここでいう構造の問題とは、キャビティ発生中の流速分布、キャビティ内水蒸気の体積率、キャビティの非定常性などの微視的な問題を意味する。本論文で対象としているのは、いわゆる fixed cavitation であり、その後端が翼後縁を越えない部分キャビテーションである。

キャビテーション流場をポテンシャル流として解くと

きには、キャビティをどのようにモデル化するかを第一に考えねばならない。特にキャビティ後端は実際には、水と気泡が混在していると考えられ、その境界は明確でなく何らかの仮説を導入する必要がある。

非線形理論において、空洞後端模型としては垂直平板の後ろの流れに対して、Riabouchinsky 模型 (1920)、re-entrant jet 模型 (1946)、Roshko 模型 (1954) 等のものが考えられてきた。Wu らは Roshko 模型に基づきスーパ・キャビテーションの場合に翼特性を計算して実験と良く一致する結果を得ている。しかし、このような非線形理論を任意形状の翼型に適用することは難しく、さらに部分キャビテーションへの適用も難しい。そこで解析的にキャビテーション流場を解くために線形理論の必要が生じてきた。

線形理論では、理論の取扱い上、非線形理論とまった

* 日本鋼管(株)津研究所

** 筑波大学構造工学系

*** 東京大学工学部

く同じ模型を考えるわけにはいかないが、普通キャビティ後端に特異性を持つ閉鎖・半閉鎖型、特異性を持たない開放型の三つの後端模型が考えられている。

線形理論による解析法には、等角写像法、特異点法の二つがある。本論文で取り上げた部分キャビテーションの翼型理論については、Geurst³⁾らが平板の場合に閉鎖型モデルに対して等角写像法を用いて解析解を示している。後にMeijer²⁾、Wadeらが薄い円弧翼について実験を行い、キャビティ長さ、揚力等を測定し、特に平板に非常に近い形状である上下対称の円弧面を持つ翼型に対してはGeurstの結果と非常に良く一致することを示した。このように等角写像を用いると解析的な解を得ることが可能である。しかし3次元へ応用することができないという欠点を持つ。

また特異点による解法については、花岡、西山・伊藤⁴⁾らが、閉鎖・半閉鎖・開放それぞれの場合に対して数値解を示している。これらの手法を平板に適用すると閉鎖型モデルの場合にはGeurstの等角写像による結果と良く一致する。また特異点法には、任意翼型への適用が簡便であるという利点がある。

このような線形理論により計算した結果は、巨視的なキャビティ発生中の揚力・抗力の変化という問題に対しては良い結果を与えるが、微視的な圧力分布、キャビティ長さ、キャビティ形状という問題に対しては、実測値と良く合わない。

本論文では、特異点による西山・伊藤の方法を用いて計算を行い、参考文献1)で使用した5種類の翼型(NACA 0015, NACA 16-015, NACA 4415, MAU0.6r, MAU0.9r)および円弧翼に対する測定結果と比較した結果次のような点が不満足であることがわかった。

(1) 閉鎖型モデルでは、キャビティ後端において積分可能ならしめるように特異性を持たせ、キャビティ後端は翼面に垂直に接続される。このため、キャビティ後端が岐点となり翼表面上の圧力分布が発散し、キャビティ形状も実測値と比べ著しく厚くなる。

(2) 開放型モデルでは、後端で特異性がないため圧力分布は連続となるが、キャビティ厚みが実測値より薄くなる。またキャビティ後端がほぼ翼面と平行に開いたままであり実際の形状と異なる。

(3) 半閉鎖型モデルは、上述の閉鎖、開放両モデルの中間的性格を持つもので後端の開き幅を操作することにより、キャビティ形状を実測値に合わせることができ。しかし、後端での特異性のため閉鎖型と同様圧力分布は発散し、また後端の開き幅が一義的に決められず現実的でない。

(4) 西山・伊藤の方法では、翼前縁でキャビティが発生するように特異性を与えており、このため実際には

キャビティが翼前縁から発生しない翼型、例えばNACA 4415, NACA 0015等のような翼前縁の厚みのある翼型には不相当である。

上述のように、非粘性・線形範囲では、特にキャビティ後端のモデルが妥当でないことがわかったが、この問題を非粘性・非線形の立場から考えてみても、やはり後端の特異性の処理においては同様であろう。すなわち、キャビティ後端を正しく表わすためには粘性を考慮したモデルが必要であると思われる。ところが、キャビティの機構・挙動も十分に明確でない現段階では、粘性まで考慮したモデルを作ることは困難である。

そこで著者らは、こういった問題に対するアプローチとして、まずキャビテーションが発生していない状態での翼表面圧力分布に及ぼす粘性の影響を研究した¹⁾。

最近、キャビティの発生が層流剥離現象と非常に密接な関係にあることがArakeriらによって明らかにされている。そこで、キャビテーションの発生には粘性の影響を無視できないということを考慮に入れて、もう一度キャビティの構造を詳しく調べ、キャビテーションという物理現象を明確に把握することが必要であろうと考えられる。

このような立場から、本論文ではキャビティ表面・翼表面流速分布の測定、キャビティ内水蒸気の体積率の測定、非定常現象の観察等の実験を行った。

これらは、理論的に問題にアプローチするための基礎的研究であるが、キャビテーションによる侵食・振動等の実際問題に対応するためキャビテーションの発生範囲、体積を推定する実験的研究も必要である。この問題に関する実験例としては、前述のMeijer, Wadeらの円弧翼に関するもの、東北大速研での系統的試験例、Kermeen⁶⁾の行ったNACA 4412翼型に関するものなどがあるが、まだ十分でない。

本論文では、以下の6種類の翼型を用いて系統的なキャビテーション試験を行い、キャビティの長さ、形状、振動を測定し、西山・伊藤の線形理論および現在よく使われている揚力等価法と比較した。

(a) non-burst type NACA 0015, NACA 4415, NACA 16-015

(b) burst type MAU0.6r, MAU0.9r, Plano-Convex

(a), (b)の分類は翼型を粘性影響により区別したもので参考文献1)による。

なお、本研究と参考文献1)は一連の研究であり、供試翼は同一のモデルを用いている。試験装置等についても逐次参照されたい。

2 キャビティの構造

2.1 キャビティの発生 (初生), 前縁と層流剥離

キャビティの初生点については, Arakeri の報告以来層流剥離点に一致するという事実が確認されている。

この現象は層流剥離泡の存在を考えることにより理解することができる。つまり, 層流剥離泡内は低圧であること, 流れがよどんでいるため十分な気泡の成長時間があることなどの理由で, キャビティが成長するのに格好の条件を備えているということである。

キャビティが初生してのち, さらにキャビテーション数 (σ) を下げると初生したキャビティはすぐ剥離泡内を満たし安定なシート・キャビティとなることが予想される。実際にシート・キャビティは初生してから次第に長さを増すのではなく, 発生するとすぐ一定の大きさを持つという性状を示す。本論文では, この「最初に安定となるシート・キャビティ」を「初生シート・キャビティ」と呼ぶこととする。

Photo.2.1 には, 初生して間もないキャビティの様子を示している。これを見ると, non-burst type の翼型には明らかにシート・キャビティが生じているが, burst type の翼型にはクラウド状の vortex cavitation が生じていることがわかる。

non-burst type の翼型について, 油膜法により測定した剥離泡の領域と初生シートキャビティの領域とを迎角を縦軸にとり比較したのが, Fig. 2.1 である。これを見ると剥離泡内で発生し, 成長したキャビティが安定し

Fig. 2.1 Relationship between separation bubble and region covered with incipient sheet cavity

た大きさを持ち初生シートキャビティとなるとときには, 剥離泡を押し広げたようにして存在することがわかる。

一方, burst type の翼型である MAU の二つの翼型では, 初生時のキャビテーションパターンが異なる。つまり翼前縁部が薄いため翼先端で剥離が生じ, そこから shear layer が発達する。この shear layer 中の渦の核内は低圧となり vortex cavitation が sheet cavitation よりも早く初生する。この vortex cavitation は翼端渦中のものなどとは異なり cloud cavitation 的な様相を示す。この型の翼型では翼先端の負圧のピークが剥離により平坦になっていることが報告されている⁷⁾が, この先端の平坦になった圧力係数 ($-C_p$) よりキャビテーション数 (σ) が下がると vortex cavitation は消滅し, sheet cavitation が発生する。以上の過程を MAU 0.9r の場合を例にとり, Photo.2.2 に示しておいた。この場合, 圧力分布先端の平坦になった圧力係数は, $-C_p = 1.5$ であるが, 写真に示されるように, σ が 1.5 以上では, クラウド状の vortex cavitation が発生しており, σ が 1.5 以下ではシート・キャビテーションとなっている。

Photo. 2.1 Photographs of incipient sheet cavity ($\alpha=8^\circ$)

Photo. 2.2 Variation of cavity pattern at MAU 0.9r section ($\alpha=8^\circ$)

どちらのタイプの翼型に対しても、キャビティ先端は第一近似的には層流剥離点であると考えて良い。

また上記の結論は、あくまでも翼表面状態が滑らかであり、ピット等の翼表面粗さにより発生するキャビテーションを含まない場合のものである。

2.2 キャビティの構造 (圧力分布, void 率)

2.2.1 キャビティ発生中の圧力, 流速分布

Fig. 2.2 に、NACA0015 翼型でのキャビティ発生中の表面圧力分布のキャビテーション数に対する変化を示してある。また Fig. 2.3 には、レーザ流速計を用いてキャビティ表面上の流速測定を行い圧力分布に換算した結果が示してある。この二つの図から次のようなことがわかる。

(1) キャビティが発生すると負圧面側の表面圧力はキャビティ発生範囲内ではほぼ蒸気圧と等しくなり、そこからゆるやかに上昇しキャビティがない状態での圧力分布に漸近する。またキャビティが翼弦長の半分以上を越えて成長すると、圧力分布形状は次第に平坦となっていく。正圧面側では、キャビティが発生すると、その長さにかかわらず圧力分布は平坦となる傾向を持つ、さらにスーパー・キャビテーションに近づくにつれ上下面で圧力分布に差がなくなる (Fig. 2.2)。

(2) Fig. 2.3 をみると、キャビティが発生している

Fig. 2.2 Variation of pressure distribution due to the change of cavitation number (NACA 0015, $\alpha=4^\circ$)

Fig. 2.3 Change of pressure distribution in cavitating flow measured by L. D. V. (NACA 4415, $\alpha=4^\circ$)

Fig. 2.4 Schematic diagram of void ratio measurement apparatus

上流にさらに圧力の低い、圧力分布の安定なピークが存在していることがわかる。このように蒸気圧より低い圧力の部分が液体の流れの中に存在していることは驚くべきことであろう。また、この事実はキャビティが最小圧力点でなく、層流剥離点で発生するということを立証している一つの資料といえよう。なお、図中 σ_e は蒸気圧に基づくキャビテーション数の値で、 σ_c とはキャビティ内圧に基づくキャビテーション数の値である。

(3) キャビティが発生している領域で翼表面と、キャビティ表面の圧力はほぼ等しく、蒸気圧と比較してやや高めである。このことからキャビティ内には水蒸気だけではなく、水中に存在している空気がある程度含まれていると思われる。

2.2.2 キャビティ内のボイド率の測定

通常キャビティ内は水蒸気で満たされていると考えられているが、実際はどうかを確かめてみることは、キャビテーションを物理現象として基礎から把握していくという意味で重要であると思われる。

本実験では、ガンマ線の物質透過性に着目し、ガンマ線ボイド計を用いてキャビティ内水蒸気の体積率を測定した。水と水蒸気とはガンマ線の透過率が異なるのでキャビテーションの発生によって生じる水と水蒸気の体積比に対応してガンマ線の透過率が変化し、キャビティ内の水蒸気の体積率が測定できる。配置図を Fig. 2.4 に示す。線源から発生したガンマ線は直径 1mm のスリットを通過し、アクリル窓を通して測定すべきキャビティ内を通り、シンチレーションカウンターでその量を計測される。線源としては、(i) 半減期が長いこと、(ii) 放射するエネルギー量が適当であること、(iii) 放射線であるので安全性が高いことが主として必要とされ、本実験では ^{241}Am 、100 mCi が使用された。測定結果を Fig. 2.5 に示す。

一番下の図は、定常なスーパー・キャビテーションの状態、ガンマ線が翼表面で散乱するのを避け翼下流で測定したものである。これによるとキャビティ内では水蒸気の体積率はほぼ 100% であり従来の仮説の正しいこ

とがわかる。

また、非定常な部分キャビテーションについて測定したのが、上の三つの図で、それぞれ翼面上 20% コードおきに測定を行なった。これによるとキャビティ内は 100% 水蒸気で満たされているという仮説に反して 30~50% の値を示すことが明らかにされた。これはキャビティが振動しており、測定装置が一定時間内の平均値を算出することが一因であろうと考えられる

が、部分キャビティをモデル化して理論に適用するときには注意すべきことの一つである。またキャビティ後端付近で、非定常振動のため発生している cloud cavity のボイド率は 10% 程度と低いことがわかる。

2.3 キャビティの後縁

2.3.1 キャビテーションの非定常性

実験結果を整理する場合に問題となるのは、キャビテーションの非定常性である。これは、キャビティ後端が翼弦長のほぼ半分を越えるとコード方向に激しく振動を開始する現象で、photo 2.3 に示されるようにその範囲は翼全長にわたる。

この写真からもわかるように、キャビティは成長→収縮→成長というサイクルを常に描きながら、収縮過程で

Fig. 2.5 Measurement of void ratio inside of cavity (NACA 0015, $\alpha=4^\circ$)

(a) $\alpha = 4^\circ, \sigma = 0.75, U_\infty = 35 \text{ m/s},$
 $L_{st} = 27.3(\%C), L_{mean} = 66(\%C)$

(b) $\alpha = 8^\circ, \sigma = 1.03, U_\infty = 25 \text{ m/s},$
 $L_{st} = 31.4(\%C), L_{mean} = 64.5(\%C)$

Photo. 2.3 Two examples of unsteady cavitation at NACA 0015 section

クラウド状のキャビティを下流に放出している。このパターンは迎角により少し異なる。これらの現象については尾崎が詳しい報告を行っている⁷⁾。

著者らは、以上のようなキャビテーションの非定常性は本質的なものであると考え、一つの実験条件に対し、多くの写真を撮影し、キャビティ後端位置の頻度分布を求めた。

Fig. 2.6 Fluctuation of cavity end

そして、その平均値をキャビティの後端位置と定め、標準偏差を非定常性の強弱を表わす指数と考えた。この一例を Fig. 2.6 に示す。これによるとキャビテーション数が減少していくと非定常現象が顕著となり、翼長をキャビティ後端が越えるとスーパ・キャビテーションとなり逆に安定する様子がよくわかる。

さらにキャビティ後端の非定常性が、その後端位置に依存することに着目し、標準偏差とキャビティ後端位置の相関を各翼についてまとめたのが、Fig. 2.7 である。

これにより以下のようなことがわかる。

- (1) 一般に、キャビティ後端位置が 50% コードを越えると非定常性は強くなる。
- (2) 翼厚の厚い翼型ほど非定常性は強くなる。つまり、non-burst type の翼型では非定常性が強く、burst type の翼型では弱いと考えられる。
- (3) 迎角が高くなると非定常性は強くなる。

以上の考察からキャビテーションは本質的に非定常であることを認め、その程度により安定であるか、不安定であるかを次のように分類することとした。

$$L_{st} \left(\begin{array}{l} \text{キャビティ後端位置の} \\ \text{頻度分布の標準偏差} \end{array} \right) \begin{array}{l} > 10\%C \cdots \text{不安定} \\ < 10\%C \cdots \text{安定} \end{array} \quad (2.1)$$

キャビティモデルとしては理論的手法にしる、経験的手法にしるまず安定な範囲でキャビティ後端位置を正しく推定できるものを考えるべきであろう。

Fig. 2.7 Fluctuation of cavity end vs. mean cavity end

(1)

Fig. 2.8(1~5) Comparison of cavity end measurement with lift equivalent method

2.3.2 キャビティ後端位置

上記の考えにより、各翼型のキャビティ後端を定めて Fig. 2.8 に示した。なお図中の計算により得られた曲線

(2)

(3)

(4)

(5)

については後で述べる。

この一連の図から翼型の圧力分布の特徴がどのようにキャビティ後端位置に対応するかについて考察すると、以下のような結果が得られる。

(1) non-burst type の翼型である NACA の3種の翼型について比較してみると、圧力分布の特徴が良くキャビティ後端位置に反映されていることがわかる。例えば、NACA16-015 翼型では、先端近傍で圧力が急激に上昇し中央部で平坦になる傾向を持つが、これに対応してキャビティ後端位置もキャビテーション数がこの平坦部の圧力係数の絶対値と等しくなる近傍では急激に後方に進むという傾向を持つ。一方三角形の圧力分布を持つ NACA 0015, NACA 4415 翼型では、その圧力分布と対応して直線状に移動する。

また、キャンパーの効果については、キャンパー分だけ全体的に圧力分布が低めとなり、同じキャビテーション数に対してキャビティ後端位置は後方となる。

(2) burst-type の MAU の2種の翼型では、迎角が少しくと翼先端で剥離が生じ、圧力分布はポテンシャル理論では計算できない平坦な形状を呈する。このため特に迎角が高くなるとシート・キャビテーションが発生する前に vortex cavitation が生じる。しかしキャビテーション・パターンは異なるがキャビティ後端位置は滑らかに変化する。また厚みのある 0.6r 翼型のキャビティ後端位置は、同じキャビテーション数のとき 0.9r

翼型にくらべ上流側にある。

Fig. 2.9 には円弧翼の実験結果を Meijer の結果と比較して示してあるが、ほぼ良い一致を示し本実験の妥当性が確認された。

3 考 察

3.1 キャビティ理論とキャビティの構造

緒言でも述べたように任意翼型のキャビテーション流場を理論的に解く試みは現段階では成功しているとはいえない。しかし Meijer の薄い円弧翼に関する実験によればキャビティ長さ、揚力とも Geurst の解析解と良い一致を示すことが報告されている。

これはこの翼型が burst type に属していて翼先端で剥離を生じかつ薄いため非線形影響が小さい等の特徴が線形空洞モデルに似ているためであると考えられる。

Fig. 3.1 には、MAU0.9r 翼型で、キャビティ長さを西山・伊藤の線形理論と比較した結果が示してある。これをみると上記の理由により、閉鎖型による結果は定量的にも良い一致を示していることがわかる。さらに Wade が指適したように、キャビテーション数を蒸気圧ではなく、キャビティ内圧から計算すると見事な一致を示す(図中の塗りつぶした実験点)。

ところが同じ burst type の翼型である MAU0.6r に対しては良い一致を示さない。これは翼厚が 0.9r と比べて厚くなったことによる非線形の影響のためと考えられる。

以上のように、西山・伊藤の線形理論が適用できるのは、burst type で翼厚が薄い(4% C 以下)翼型に限られると考えられる。

3.2 揚力等価法との比較

揚力等価法とは、キャビティが発生してもあまり大きくならねば揚力に変化はないという経験的事実に基づいて、Fig. 3.2 に示されるように A と B の部分の面積が等しくなるようにキャビティ後端位置を定めるという経験

Fig. 2.9 Comparison of Meijer's experiment for 4% thickness Plano-Convex hydrofoil

Fig. 3.1 Comparison of cavity end measurements with linearized theory (Nishiyama-Ito's method)

Fig. 3.2 Concept of lift equivalent method

的手法である。理論的手法があまり良い成果を与えていない現状では、このような経験的手法が暫定的なものとして必要であろう。

揚力等価法を用いて計算した結果と実験値との比較を Fig. 2.8 に示す。

揚力等価法を用いるには翼背面（キャビティが生じている側）での圧力分布が必要であるが、参考文献 1) で示したように、non-burst type の翼型については、理論的に粘性影響を修正した圧力分布を計算することができる。この修正された圧力分布による結果を、破線で、また比較のために、修正を施していない結果を実線で示

Fig. 3.3 Observed cavity shape

してある。

粘性修正を施した圧力分布に基づく結果は、キャビティ後端が翼弦長の半分を越えない範囲では非常に良い一致を示す。キャビティ後端が翼弦長の半分以上を越えると、揚力が等価であるという根本仮定がくずれるという点、また非定常性が強くなるため、キャビティ後端頻度分布の平均値を代表長さとする、実験から求めたキャビティ後端位置に疑問がある点などから合わなくなると考えられる。

burst type の翼型である MAU の翼型では、圧力分布を正しく知るためには、詳細な実験を行う必要があり¹⁾、揚力等価法を適用するのは一般的には有効でない。実際に Fig. 2.8 をみるとあまり良い結果が得られていないことがわかる。

3.3 キャビティの体積

Fig. 3.3 には、各翼型での迎角 4° における写真から読みとったキャビティ形状を示してある。non-burst type では、キャビティは先端では翼面に対して接線方向に成長し滑らかな曲線を描いている。一方、burst type では先端で強い剥離が生じているため、キャビティは盛り上がるように成長していく。このような観察か

ら、burst type と non-burst type でキャビティ体積に特徴的な差があると考え以下のような考察を行った。

まず、Fig. 3.3 のような一連の図からキャビティ体積を計算し、それを各翼型についてプロットしたのが Fig. 3.4 である。これを見ると一般に迎角の高いほど、キャビティ体積は大きいことがわかる。

さらに線形理論で扱われているように、キャビティ体積は迎角に比例すると考え、体積を迎角でわり Fig. 3.4 をまとめたのが Fig. 3.5 である。図中○印は non-burst type の翼型であり、●印は burst type の翼型を意味する。また◇印は MAU 0.6r の迎角 2° の場合であるが、この場合は迎角が低いため non-burst type に属していたのではないかと考えられる。

この図から、キャビティ体積も翼型が non-burst type であるか burst type であるかにより、見事に分類されるという興味ある結果が得られた。

Fig. 3.5 から任意翼型に発生するキャビティの体積を推定する次の実験式が定められた。

$$\bar{V} = \begin{cases} 1.25 \times 10^{-2} L^2 + 8.75 \times 10^{-3} L & (\text{burst type}) \\ 1.45 \times 10^{-2} L^2 & (\text{non-burst type}) \end{cases} \quad (3.1)$$

ただし、 $\bar{V} = V/C^2 B \alpha$

V = キャビティ体積

C = 翼弦長

B = 翼幅

α = 迎角 [deg]

L = キャビティ後端位置 (コード長さで無次元化)

4 結 論

キャビティの発生範囲、形状、構造 (流速分布、

Fig. 3.4 Non-dimensional cavity volume vs. cavity-end at each hydrofoils

Fig. 3.5 Cavity volume classified into burst or non-burst

ポイド率)について研究を行った結果、次のような結論が得られた。

(1) burst type の翼型では、翼先端から剥離した shear layer 中に、vortex cavitation が発生する。この時のキャビテーション数は翼面の最小圧力係数の絶対値 ($-C_{pmin}$) より大きい。

(2) NACA4415 翼型でのキャビティ発生中の流速分布測定結果 (Fig. 2.3) によると、キャビティが発生している上流にさらに圧力の低い圧力分布の安定なピークが存在していることがわかる。この事実は、キャビテーションは最小圧力点から発生するという従来の考え方をくつがえすものであり、Arakeri らによって報告されている層流剥離泡内でキャビティが初生するという考え方を裏付けるものである。

(3) キャビティ内水蒸気の体積率は、定常なスーパー・キャビテーションでは 100% を示し、非定常な部分キャビテーションでは 30~50% を示す。

(4) キャビティの先端は層流剥離点に一致すると考えてよい。

(5) non-burst type の翼型では、キャビティ後端は実現象に合う圧力分布に基づき計算すれば、キャビティ後端が翼弦長の 50% を越えない範囲で、揚力等価法によりかなり良くその位置を推定することができる。

(6) burst type の翼型で翼厚が 4% 以下のものに対しては、西山・伊藤の線形理論を適用することができる。この時キャビティ後端モデルとしては閉鎖型がよい。

(7) キャビティ体積とキャビティ後端の関係は burst type と non-burst type に分けて考えられることを示し、それぞれについて実験式を提案した。

謝 辞

本研究は東京大学船舶工学科において、著者の一人の修士論文の一部として行われた。

本研究に用いた試験翼等については、日本造船研究協会 (SR174)、三井造船(株) から御援助をいただいた。実験にあたり、同学科高速力学研究室 小村隆士助手、前田正二技官、宮永 大技官に多大の御助力をいただいた。ここに記して関係各位に厚く感謝の意を表する。

本論文の数値計算には、東京大学大型計算機センターの HITAC 8700/8800 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 泉田, 田宮, 加藤, 前田: 粘性影響を考慮した二次元翼型の翼特性の研究, 日本造船学会論文集, 146 号 (1979).
- 2) Meijer, M. C.: Some Experiments on Partially Cavitating Hydrofoils. Int. Shipbuilding Progress Vol. 6, No. 60 (1959).
- 3) Geurst, J. A.: Linearized Theory for Partially Cavitating Hydrofoils. International Shipbuilding Progress, Vol. 6, No. 60 (1959).
- 4) 西山哲男, 伊藤 淳: 特異点法による部分空洞翼の流れ場の基礎式とその解法 (第一報 二次元単独翼), 機械学会論文集, 43 巻, 370 号 (1977).
- 5) Arakeri, V. H. & Acosta, A. J.: Viscous Effect in the Inception of Cavitation on Axisymmetric Bodies. Journal of Fluids Engineering (1973).
- 6) Kermeen, R. W.: Water Tunnel Test of NACA 4412 and Walchner Profile 7 Hydrofoils in Noncavitating and Cavitating Flow. Hydrodynamics Laboratory, CIT, Report No. 47-5 (Feb. 1956).
- 7) 尾崎裕之: 一様流中のキャビテーション, 東京大学修士論文 (1978).