有限幅直進翼に発生するキャビテーション の差分計算

正員 加藤 洋 治* 正員 山 口 一*
正員 高 杉 信 秀** 正員 金 丸 正 憲***

Finite Difference Calculation of Cavitating Flow around a Finite Span Hydrofoil

by Hiroharu Kato, *Member* Hajime Yamaguchi, *Member*,
Nobuhide Takasugi, *Member* Masatoshi Kanamaru, *Member*

Summary

Characteristics of cavitating flow around a finite span hydrofoil are studied by a finite difference computation using Bubble Two-phase Flow model. The flow with Reynolds number of 10^3 is calculated at the angle of attack of 10 deg. on a NACA 0012 hydrofoil with elliptic planform of aspect ratio of 3.

The mechanisms of the cavitating flow, particularly the relationships between the vortex system around the hydrofoil and the cavitation, are investigated with the use of the high spatial resolution in the numerical calculation although the Reynolds number is low because of the computation time and memory capacity problem. The discussions on the calculated results give the following results:

- (1) Since the planform of the hydrofoil is elliptic, the ratio of cavity length to chord length becomes almost constant along the span when the cavity is small. But as the cavity grows, the tip region begins to generate larger cavity. The reason for this is that the tip vortex expands the separating flow region on the suction side of the hydrofoil near the tip.
- (2) The larger cavity weakens the tip vortex because of the reduction of the lift force and/or the diffusion of flow due to cavity. The diffusion due to cavity also increases the width of its wake.
- (3) The above calculated results agrees qualitatively with the existing experimental results. It can be said that even the present calculation with low Reynolds number has clarified many of the mechanisms of cavitating flow around a finite span hydrofoil.

1. 記 号 表

*……有次元値
 d^* ……翼弦長
 f_g ……ボイド率
 n ……気泡核数密度
 P ……局所の圧力
 P_v ……蒸気圧
 R ……気泡半径
 Re ……レイノルズ数
 Δr ……グリッドスケール
 t ……無次元時間

U_∞ ……一様流速
 $\mathbf{v}$ ……速度ベクトル (u, v, w)
 μ ……混相流の粘性係数
 μ_L ……液相の粘性係数
 μ_G ……気相の粘性係数
 ρ ……混相流の密度
 ρ_L ……液相の密度
 ρ_G ……気相の密度
 $\rho \mathbf{v}$ ……質量流束ベクトル
(x, y, z)……物理空間
(ξ, η, ζ)……計算空間
(i, j, k)……計算格子番号
 j_{up} ……翼背面を 1 とし, 上側に増加する計算格子番号

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

*** NKK (研究当時, 東京大学工学部)

2. はじめに

キャビテーションは相変化を伴う高速の現象であり、古くから実験的・理論的研究が継続されているが、そのメカニズムが十分に解明されたとは言いがたいのが現状である¹⁾。最近、著者らの研究室では、気泡2相流モデルという新しいキャビテーション流れのモデルを差分法で解くことにより、主に翼まわりのキャビテーション流れの機構を調査している。このモデルは、密度が不連続的に変化するシート・キャビティ界面を表しづらいという欠点があるものの、キャビテーション気泡と粘性流の非線形干渉を調査できるという大きな利点を持っている。また、計算結果によれば、シート・キャビティの形状もボイド率の等値線という形で、ある程度の確かさで表現できている。久保田ら^{2),3)}は、このモデルを用いて2次元翼まわりの2次元流場計算を行い、キャビティによって持ち上がった境界層が自由剪断層になり、その巻き上がりによってキャビティの分断が起こりクラウド・キャビテーションが発生することや、高迎角大剝離時の水中気泡量、キャビテーション、剝離渦の相互干渉を明らかにしている。また、田中ら^{4),5)}は、2次元翼まわりの3次元流場計算を行い、シート・キャビティ後流のU字型渦の発生機構を調査している。

一方、船用プロペラまわりの粘性流の計算は児玉ら⁶⁾が非キャビテーション状態について行っているが、計算格子の生成が難しく、ピッチ比の非常に大きいプロペラしか計算されていない。しかしながら、この様な方法は、原理的には発進時や逆転時の過渡状態や剝離を伴う状態でのプロペラ性能を計算できるという高いポテンシャルを持っており、腰を据えた取り組みが望まれるところである。

本研究では、以上の状況を鑑み、将来の回転翼の数値解析への第一歩として、上記気泡2相流モデルを直進有限幅翼に適用し、計算する。特に、数値流体力学の利点の一つである高い空間解像度を利用して、有限幅翼に独特の3次元キャビテーションの構造や流れ場を考察することを目的とする。また、2次元計算と比較して飛躍的に増大する計算量に対処するために、ダミーグリッド⁷⁾を計算コードに取り入れることによる計算速度の向上の可能性を調査する。

3. 数値計算法

3.1 気泡2相流モデルと基礎方程式

キャビティモデルとしては気泡2相流モデル (Bubble Two-phase Flow Model) を用いる^{2),3)}。これはキャビティをミクロとマクロの視点からモデル化するものである。マクロ的には、大規模渦構造を捉えるために、流場を密度変化の大きい圧縮性粘性流体であると見なし、キャビティ内外を一つの連続体としてあつかう。また、ミクロ的にはグリッドスケール程度の領域で、キャビティ流場を局所的に

均一な微小気泡の集合体としてモデル化する。従って、流場の局所的密度は気泡数密度と気泡半径から求められる。気泡半径と圧力の関係は、気泡群の成長崩壊に関する運動方程式により与えられる。これらマクロモデルとミクロモデルとの間の非線形相互干渉を表現することが可能となるのがこの気泡2相流モデルである (Fig. 1)。

以下に気泡2相流モデルの構成式を示すが、ここでは各値を一様流速 U_∞^* 、翼弦長 d^* 、及び液相の密度 ρ_L^* と粘性係数 μ_L^* により無次元化を施す。すなわち肩字(*)がついているものを有次元値として次の通りである。

$$P = P^*/(\rho_L^* U_\infty^{*2}), \quad t = t^* U_\infty^*/d^*, \quad v = v^*/U_\infty^*, \\ \rho = \rho^*/\rho_L^*, \quad \mu = \mu^*/\mu_L^*, \quad n = n^* d^{*3}, \quad R = R^*/d^*, \\ x = x^*/d^*, \quad y = y^*/d^*, \quad z = z^*/d^*$$

このモデルの下で、マクロな流場の支配方程式としては、連続の式、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

および、Navier-Stokes 方程式、

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \frac{1}{Re} \mu \left\{ \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right\} \quad (2)$$

を用いる。また、ミクロの視点すなわち、気泡の成長崩壊には、Rayleigh の式にグリッドスケール Δr 以下の領域に存在する気泡の相互影響を考慮した次式を用いる。

$$(1 + 2\pi \Delta r^2 n R) R \frac{D^2 R}{Dt^2} + \left(\frac{3}{2} + 4\pi \Delta r^2 n R \right) \left(\frac{DR}{Dt} \right)^2 \\ + 2\pi \Delta r^2 \frac{Dn}{Dt} R^2 \frac{DR}{Dt} = \frac{P_v - P}{\rho_L} \quad (3)$$

これらの間を結ぶ関係として、ボイド率を用いる。すなわちボイド率 f_g により混相流の密度が次のように表わされる。

$$\rho = (1 - f_g) \rho_L + f_g \rho_g \quad (4)$$

Fig.1 Governing Equations of Bubble Two-Phase Flow Model

ただし、 ρ_c は ρ_l に比べて桁違いに小さいので、ここでは、(4)式右辺第2項を省略して用いる。また、ボイド率 f_g は気泡数密度 n と気泡半径 R から、

$$f_g = n \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (5)$$

で与えられ、混相流の粘性係数 μ は、

$$\mu = (1 - f_g)\mu_l + f_g\mu_c \quad (6)$$

で与えられるものとする。

3.2 数値解法

この気泡2相流モデルの非定常解を求めるプログラム・コードが SACT (Solution Algorithm for Cavitation and Turbulence) である。このプログラムは物体適合座標系を用いた差分法により、前述の方程式群を解くものである。このプログラムでは特に乱流モデルは使用せず、対流項について4階の拡散項だけを用いている。アルゴリズムはMAC法に準じており、圧力の擬ポアソン方程式を解くことにより、時間発展的にキャビティ流場を計算する。モデル及び数値解法の詳細については、文献2), 3), 5)を参照していただきたい。

久保田・田中の計算では計算格子にCグリッドが用いられている。しかし、本研究のような有限幅翼にCグリッドを適用すると、翼端より外側の領域で格子が180°折れ曲がり、大きな誤差の発生が予想される。そこで本研究ではFig.2に示す、H-Hグリッドを用いる。グリッド生成には児玉⁹⁾の方法及びプログラムコードを用いた。このグリッドは翼列、プロベラへの拡張が容易であるという利点がある。しかし欠点としては、翼面境界が計算領域の中央にくるため、その部分の計算が複雑化してスーパーコンピュータのベクトル演算に適用しにくいことや、翼のエッジやチップ付近でグリッドの歪が大きくその部分での計算が不安定になり易いことがある。

本研究では、Fig.3に示すように、物体適合格子に関する差分を計算空間内の直交格子に関する差分に変換して計算した。計算空間と物理空間の対応はFig.3の通りである。また、図の各境界面に関して与える境界条件は、計算空間の上下面、上流側及び翼端側側面では一様流条件、翼根側側面は対称条件、下流側面では0次流出条件、翼面上では

Fig.2 H-H Grid System Used for Computation

Fig.3 Physical Domain (x, y, z) , Computational Domain (ξ, η, ζ) and Boundary Conditions

No-Slip 条件である。

3.3 ダミーグリッド

翼面境界条件が計算領域の中央にくる H-H グリッドで気泡2相流モデルの計算を行うために、筆者らは2つのプログラムコードを開発した。それらは、SACT-III/H と SACT-IV/H と名付けられている。前者は条件文を計算ループ内に置き、翼面であると判断された場合には、翼面境界条件を入れて計算を続行するものである。しかしこの方法では計算ループ内に条件分岐が入り、また最内側ループが翼面上の値のリストアという短いものとなり、スーパーコンピュータのベクトル演算に関しては非常に効率の悪いものになってしまう。

そこで、ベクトル化率が高まるようにプログラムにダミーグリッドを組み込み、さらに解法にも改良を加えたのが後者の SACT-IV/H である。ダミーグリッドとは翼面を含んだ格子面（以下カット面という）の上側領域と下側領域の間に設けた仮想的なグリッドである。このグリッドにあらかじめ値を入れておくことにより、全領域が一気に計算できるようになる。すなわち、計算ループ内から条件文をなくすることが可能となる。また圧力の擬ポアソン方程式の解法には、緩和係数を導入したりチャードソン法^{4),5)}を用いて圧力の再帰的引用を避け、ベクトル化率の向上をはかった。本論文での計算結果は、プログラムコード作成時期の違いのため、すべて SACT-III/H のものである。SACT-IV/H でもほとんど同じ結果が得られることは確認している。

4. 計算条件

本論文で計算の対象とした翼は、断面が NACA 0012, 平面形がアスペクト比3の楕円翼で、迎角は 10° を与えた。またレイノルズ数は 1000 で、非キャビテーション状態とキャビテーション状態の2通りについて計算する。計算に用いたグリッドは前述の H-H グリッドで、格子点数は $45 \times 30 \times 32$ の 43200 である。

キャビテーション状態の場合、キャビテーション数は 0.3 とし、流場の初期気泡核半径は 2.0×10^{-4} 、気泡核数密度は 3.375×10^7 (流場全体にわたり一定) としている。これらの値を翼根部での翼弦長 $= 0.3 \text{ m}$ を仮定して有次元のものに変換すると、初期気泡核半径は $60 \mu\text{m}$ 、気泡核数密度は $1.25 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ となる。さらに、 $60 \mu\text{m}$ という数字が、気泡核半径 $0 \sim 120 \mu\text{m}$ の代表値であるとしてそのバンド幅で気泡核分布密度に変換すると、 $1.25 \times 10^9 \text{ m}^{-3} / 120 \mu\text{m} \approx 1.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-4}$ になる。一方水中気泡核の計測結果によると、半径 $60 \mu\text{m}$ の気泡核分布密度は $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^{-4}$ であるが¹⁾、キャビティの発生により気泡核が増加することを考えると、本計算の値はほぼ妥当なものと言えよう。事実、小さなシート・キャビティでも、その下流では気泡核が2桁増加するという計測結果が報告されている⁹⁾。

計算は流場の流速 0 から開始し、 $t=1.0$ まで流場を加速し、その後、キャビテーション状態の計算では $t=2.0 \sim 3.52$ の間にキャビテーション数を減少させて所定のキャビテーション数まで下げている。これらの変化の様子を Fig.4 に示す。

5. 計算結果

以下に示す計算結果は、Fig. 5 に示す格子面のいずれかのものである。 i がスパン方向断面、 j_{up} が水平断面、 k が翼弦方向断面にほぼ相当する。

5.1 非キャビテーション時の結果

前述の条件のもとで非キャビテーション状態について計算した結果を、以下に示す。なお非キャビテーション状態

Fig. 4 Variation of Uniform Flow Velocity and Cavitation Number in the Computation

Fig. 5 Grid Planes Where the Calculation Results are Shown

Fig. 6 Time Variation of Velocity Vectors and Pressure Coefficient Contours at the Grid Plane of $k=1(\text{root})$; No-Cavitation, $t=1.0, 1.6$ and 2.2

の計算は $t=2.2$ まで行った。

Fig. 6 は圧力係数および速度ベクトルの時間変化を翼根 ($k=1$) の部分で見たものである。時間と共に境界層が発達し、圧力分布の空間変化が少しずつなだらかになって行くことが分かる。

Fig. 7 Velocity Vectors and Pressure Coefficient Contours at the Grid Planes of $i=11, 21, 25, 31$ and 35 ; No-Cavitation, $t=2.2$

次に $t=2.2$ の時について見てみる。Fig. 7 は速度ベクトル、圧力係数をいくつかのコード位置について下流側から見たものである。速度ベクトルの図から、翼端渦が発生しているのが明瞭に観察され、この翼端渦は翼の後方まで続いていることが分かる。また渦の中心では圧力が低下しており、翼端渦が翼後方まで伸びていることに対応して、この低圧部も翼より後方でも見られる。

Fig. 8 は Fig. 7 と同じ位置での流れ方向に軸を持った渦度の等値線図である。翼下流での渦度の翼端側への集中、すなわち翼端渦へのロールアップ現象がみられる。また翼が存在する部分では、渦度のピークが翼の上面と下面の両方に存在している (特に $i=21$ の図)。このように渦核が 2 つ存在するのは、翼端渦が翼上下面それぞれの境界層に起因しているためと考えられる。今回の計算では 2 つの渦核は翼の後方ですぐに 1 つに合体してしまう。このことはレイノルズ数が低いためか、あるいは翼端部及びその下流部の格子が十分に細くないためと思われる。実験においては、Fig. 9¹⁰⁾ のようなツイストするリボン状のチップ・ボルテックス・キャビテーションがしばしば観察されるが、これは、2 つの渦核の存在を表していると思われる。

Fig. 8 Chordwise Axis Vorticity Contours at the Grid Planes of $i=11, 21, 25, 31$ and 35 ; No-Cavitation, $t=2.2$

Fig. 9 Photograph of Twisting Ribbon Form Tip Vortex Cavity; Reproduced from Higuchi et al.¹⁰⁾

5.2 キャビテーション時の結果

キャビテーション状態の計算結果を以下に示す。キャビテーション計算は $t=4.0$ までの結果が得られている。これは、この後 $t=4.18$ 付近で計算が発散したためである。そのため、定常解や周期解には到っていない。

Fig. 10 はボイド率の等値線図の時間変化を表わしたものである。a) は翼根断面のものであり、b) は翼上面のものである。 $t=3.2$ 付近で発生したキャビテーションはその後キャビテーション数の減少とともに成長を続け、 $t=3.52$ 以降キャビテーション数一定 ($\sigma=0.3$) とした後も発達を続け

Fig. 10 Time Variation of Void Fraction Contours Which Represent the Cavity Appearance, at Root Section ($k=1$) and Suction Side Surface; $t=3.2(\sigma=0.51) \sim t=4.0(\sigma=0.30)$

Fig. 11 Experimental Cavity Area Variation due to Cavitation Number on an Elliptic Planform Hydrofoil, Non-Dimensionalized by the Local Chord-Length; Reproduced from Yamaguchi et al.¹¹⁾

る。キャビティが最も成長した $t=4.0$ ではその長さが翼根でも翼弦長の 50% 程度となっている。

また Fig. 10b) の翼面上でのキャビティ形状を見ても

Fig. 12 Comparison of Velocity Vectors between Cavitating ($\sigma=0.3, t=4.0$) and Non-Cavitating ($t=2.2$) Conditions, and between Root ($k=1$) and Near-Tip ($k=17$) Sections

と、 $t=3.4$ 前後のキャビティが比較的小さいところでは、翼輪郭にほぼ相似の形状をしているが、キャビティが大きくなると翼端側のキャビティが翼根側と比べて大きくなる。同様の現象は実験でも見られる。Fig. 11¹¹⁾ は、アスペクト比 3.68 の楕円翼のキャビティ発生範囲を局所翼弦長で無次元化し、キャビテーション数をパラメータとして表したものである。キャビティが大きくなると翼端側のキャビティが長くなっていることが分かる。その原因として、翼端渦の作用が考えられる。Fig. 12 はキャビテーション状態と非キャビテーション状態の速度ベクトルを、翼根と翼端付近で比較したものである。翼根、翼端ともキャビティ発生部分に低速域が広がっているが、翼端の方が大きな剥離流になっていることが分かる。この渦の回転方向は翼端渦と同じ向きであるから、翼端渦により翼端近くの翼面上の剥離流が促進され、そこでキャビティが大きくなったものと考えられる。

Fig. 13 Comparison of Chordwise Axis Vorticity between Cavitating ($\sigma=0.3, t=4.0$) and Non-Cavitating ($t=2.2$) Conditions

Fig. 10b)を今一度見ると、 $t=3.8, 4.0$ で翼端より外側にもキャビティの領域があり、チップ・ボルテックス・キャビティが発生していることが分かる。ただしこのキャビティはそれほど明瞭なものではない。この原因は計算で与えているレイノルズ数が低いことや、翼端付近及びその後方のグリッドが粗すぎて、いわゆる格子粘性が大きいためと考えられる。

Fig. 13は、非キャビテーション時(左側)とキャビテーション時(右側)の流れ方向に軸を持つ渦度を比較したものである。a)が $j_{up}=5$ の格子面で比較したものであり、b)が翼より後方の鉛直断面($i=39$ の格子面)で比較したものである。キャビテーション時の方が、渦度の最大値は小さく、広がりが大きいことが分かる。これはキャビテーションのために翼端渦が拡散されるためか、キャビテーションの発生により翼の揚力が低下するためと考えられる。実験においてもFig. 14のように、キャビティが小さいときには翼端から下流まで長く伸びていたチップ・ボルテックス・キャビテーションが、翼面上のキャビティが大きくなると弱くなる。

Fig. 14 Photographs Showing a Larger Cavity on the Hydrofoil Weakens the Tip Vortex Cavity

Fig. 15 Comparison of Spanwise Axis Vorticity between Cavitating ($\sigma=0.3, t=4.0$) and Non-Cavitating ($t=2.2$) Conditions, at Root Section ($k=1$); A cavity increases the width of its wake.

Fig. 15はスパン方向に軸を持つ渦度を翼根部断面でみたものである。非キャビテーション時に比較してキャビテーション時の方が翼背面下流の渦度の領域が広がっている。これはキャビティの発生により、その下流の境界層及び後流が広がったことを意味している。キャビティの発生により後流が広がり、最低流速点が上方へ移動することが、2次元翼の実験により確かめられているが¹²⁾、この現象に対応するものである。

5.3 ダミーグリッドの使用による計算速度の向上

これまで述べてきた計算結果は SACT-III/H によるものである。このコードで、 $t=0.0\sim 2.0$ まで計算するために CPU タイムで 24050 秒必要であった。同じ条件でダミーグリッドを使用した SACT-IV/H で計算したところ CPU タイムは 1975 秒であり、約 12 倍の速度向上となった。またこれら 2 つのコードによる計算結果はほとんど同一である¹³⁾。

なお、これらの計算で、SACT-III/H は東京大学大型計算機センターの汎用機 M-682H, SACT-IV/H は同センターのスーパーコンピュータ S-820 を使用した。スカラー演算のみの場合、後者の計算速度は前者の 1.5 倍程度とされている。

6. 結 論

本研究では有限幅翼まわりの流れを気泡 2 相流モデルを用いて計算し、以下のような結論が得られた。

(1) 有限幅翼のキャビテーションは、その発生時にはスパン方向にほぼ一定の(キャビティ長さ)/(翼弦長)比になるが、キャビティが大きくなると翼端側のキャビティが長くなる。これは翼端渦によりキャビティの成長が促進されるためである。

(2) 大きなキャビティが発生すると、翼端渦が弱くなる。さらにキャビティの発生にともなって、後流が拡散され、幅が広がる。

(3) これらの計算結果は、実験結果と比較するとレイノルズ数が違うため定量的には比べられないが、定性的には一致し、その原因が数値計算により示された。すなわち、本手法が、有限幅翼キャビテーションの様なキャビテーション・粘性・渦の相互影響を含んだ複雑な流れの検討に、有効であることが示された。

(4) 翼上下面の間にダミーグリッドをおくことでベクトル演算に適するコードを開発した。これにより計算時間が 1 桁短縮された。高レイノルズ数の計算やプロペラなどの計算も可能となるであろう。

謝 辞

本研究で用いた計算格子作成コードは船舶技術研究所推進性能部の児玉良明博士作成のものである。また、グラフィックス・コードも氏が作成されたものに若干手を加えて

使用した。貴重なコードを心良く提供して下さいた氏に、深甚なる謝意を表する。

東京大学久保田晃弘講師, NKK(当時, 東京大学大学院) 田中道成氏には SACT コードに関するアドバイスを頂いた。また, 東京大学工学部船舶海洋工学科流体工学研究室の職員諸氏には, 論文中の写真について御協力頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。

本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けて行われ, 数値計算には東京大学大型計算機センターの汎用機 HITAC M-682H, スーパーコンピュータ S-820 を使用した。御関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 加藤洋治: キャビテーション (増補版), 槇書店, (1990)
- 2) Kubota, A., Kato, H. and Yamaguchi, H.: Finite Difference Analysis of Unsteady Cavitation on a Two-Dimensional Hydrofoil, Proc. 5th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Part 2 (1989), pp. 472-487
- 3) Kubota, A.: Numerical Studies of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil by a Bubble Two-Phase Flow Model, Ph.D. Dissertation, Department of Naval Architecture, The University of Tokyo, (1988)
- 4) 田中道成, 加藤洋治, 山口 一, 久保田晃弘: 翼型に発生するキャビティ後流の縦渦構造, 第3回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 中央大学理工学部 (東京), 文部省重点領域研究「数値流体力学」実施グループ, (1989), pp. 495-498
- 5) 田中道成: 翼型のキャビテーション流場の3次元構造に関する研究, 平成元年度東京大学工学部船舶海洋工学科修士論文, (1990)
- 6) 児玉良明, 松田 登: プロペラまわり流場の NS-Solver による計算, 平成元年度秋期 (第54回) 船舶技術研究所研究発表会講演集, (1989), pp. 68-71
- 7) Uto, S.: Computation of the Two-Dimensional Incompressible Turbulent Flow around a Wing Section in Cascade, Rep. Ship Research Institute, Vol. 26, No. 4 (1989), pp. 149-176
- 8) 児玉良明: 格子生成における直接的数値制御法, 第3回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 航空宇宙技術研究所, (1985), pp. 209-216
- 9) Tamura, T., Kato, H., Yamaguchi, H., Komura, T., Maeda, M. and Miyanaga, M.: Measurement of Bubble Nuclei by a Scattered Light Technique, Laser Doppler Velocimetry and Hot Wire/Film Anemometry, Proc. 2nd Osaka Symp. Flow Measuring Techniques, Osaka, Association for the Study of Flow Measurement, (1984), pp. 281-294
- 10) Higuchi, H., Arndt, R. E. A., Arakeri, V. H. and Killen, J. M.: The Structure of Tip Vortices Over a Range of Cavitation Number, 22nd American Towing Tank Conference, (Aug. 1989)
- 11) 山口 一, 加藤洋治, 前田正二: 有限幅翼のシート・キャビテーションに対する揚力面理論の有用性に関する研究, キャビテーションに関するシンポジウム (第5回) 講演論文集, 日本学術会議 (東京), (1987), pp. 75-84
- 12) 山口 一, 加藤洋治, 前田正二, 宮永 大: 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, 第154号, (1983), pp. 95-101
- 13) 高杉信秀, 金丸正憲: 有限幅翼に発生するキャビテーションの数値計算, 平成元年度東京大学工学部船舶海洋工学科卒業論文, (1990)