

# 角柱周り及び二次元流体翼周りの キャビテーション流れの LES 解析

Large Eddy Simulation of cavitating flow around a prism and a hydrofoil

山 出 吉 伸\*・加 藤 千 幸\*\*

Yoshinobu YAMADE and Chisachi KATO

## 1. はじめに

ポンプやプロペラといった水力機械においては、場所により流体が大きく加速され圧力が下がるため、圧力が蒸気圧以下にまで下がり、液体中の気相で沸騰が発生する場合がある。この現象をキャビテーションという。キャビテーションの発生は、一般にターボ機械の水力性能の低下を引き起こすばかりでなくキャビテーション崩壊時に発生する衝撃圧により機械の損傷や騒音が工学上の問題となる場合もある。したがって水力機械の設計においては、キャビテーションの影響を正確に予測することが重要である。

近年、ターボ機械の設計段階において数値流体解析がさかんに適用されるようになった。またキャビテーションの影響を数値流体解析に取り込むためにいくつかのモデルが提案され、多くの研究者によりその実用化を目指した研究が進められている。しかしながらキャビテーションの発生や崩壊に関する時間スケールは、流体中における流れの時間スケールに比べ非常に小さいため、流体の運動に注目して解析する場合、キャビテーションに関してかなり大胆なモデル化が必要となる。このため現状では実用上の問題に適用できるキャビテーションモデルは確立されていない。

筆者らはこれまで、ターボ機械を主な解析対象として、有限要素法に基づく LES 解析コードを開発し、空力騒音解析やターボ機械の変動流体力解析などへの適用を図ってきた。本研究ではターボ機械におけるキャビテーションの影響を数値流体解析により定量的に評価することを最終的な目的とし、上記コードにキャビテーションモデルを導入した。導入したキャビテーションモデルの基礎検証を行うため、図 1, 2 に示すような角柱回りもしくは翼周りの基礎的な流れ場を対象に、実験値<sup>1,3)</sup> との定量的な比較を行うことにより、モデルの評価を行う。ここではキャビテーションモデルの導入方法と基礎検証結果について報告する。

WALL (prism)  
INLET  
OUTLET  
SYMMETRIC (Z-direction)

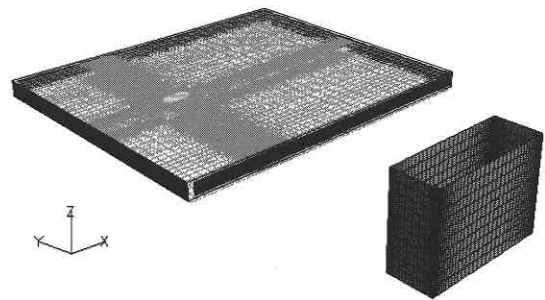


図 1 Computational mesh of prism flow calculation

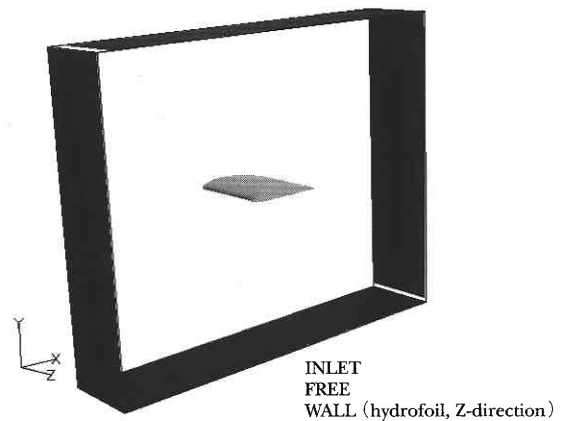


図 2 Computational mesh of hydrofoil flow calculation

## 2. 計 算 方 法

ターボ機械中のキャビテーションを解析するため、これまで我々が開発した LES 解析コードに沖田らが提唱したキャビテーションモデル<sup>2)</sup> を適用した。紙面の都合上ここではキャビテーションモデルについて説明しその他の手法については概略のみを示す。

我々が導入したキャビテーションモデルは沖田らが提唱

\*アドバンスソフト株式会社

\*\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

した均質流れの仮定に基づく発生・消滅モデルである。本モデルでは流れの圧力と飽和蒸気圧との関係に応じて、キャビテーション（気相）の発生・消滅を決定する。キャビテーションは液相体積率として扱われる。実際には式 (1) に示す発生・消滅を表す生成項を含む液相体積率に関する輸送方程式を解くことによりキャビテーションの非定常分布が計算される。

$$\frac{Df_L}{Dt} = \{C_{gas}(1-f_L) + C_{liq}f_L\}(P - P_v) \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $f_L$ ,  $P_v$ ,  $P$  はそれぞれ、液相体積率、飽和蒸気圧及び流れの圧力である。また  $C_{gas}$ ,  $C_{liq}$  はモデルパラメータである。なお本計算では、実際の流れにおいても乱流渦によりキャビテーションの拡散が起こるとする考えのもと、式 (1) の右辺に加え流れ場から計算されるサブグリッドスケール拡散を加算している。

キャビテーションの発生や崩壊は次の式 (2) に示す連続の式を介して流体に影響を与える。

$$\frac{Df_L}{Dt} + f_L \left\{ M^2 \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $M$ ,  $u_i$  はそれぞれ、液相のマッハ数及び流体速度の各成分である。式 (2) ではキャビテーション発生時 ( $Df_L/Dt < 0$ ) に圧力が増加し、崩壊時 ( $Df_L/Dt > 0$ ) に圧力が低下することがモデル化される。また式は省略するが、液相体積率は流体の慣性の変化として運動方程式に反映される。

最後にその他の解析手法の概略を示す。本研究で用いる解析コードは非圧縮ナビエーストックス方程式を解く、六面体ベースの有限要素法コードである。乱流モデルとしては、ダイナミックスマゴリンスキーモデルを用いている。圧力解法としては fractional-step 法を用いている。また非圧縮流体を仮定しつつキャビテーションを扱う困難を避けるため、低マッハ数近似を施している。式 (2) の第 2 項はこれによる圧縮性を表しており、ここではマッハ数  $M = 0.1$  とした。行列解法としては共役勾配法 (BCG-STAB) を用いている。

### 3. 計算結果

キャビテーションモデルの初期検証のために図 1 に示すような縦横比 2.8 の角柱周り流れの LES 解析を行った。角柱幅を基準とするレイノルズ数は  $1 \times 10^4$  である。用いた格子データは全体で 72,000 要素、角柱近傍の格子幅は角柱幅を基準にして 0.01 程度である。またスパン方向には角柱幅の 2 倍の計算領域をとり、スパン方向の要素数は 10 とした。まず初期計算として、流入速度及び角柱幅を基準とする無次元時間で  $t^* = 200$  までキャビテーションを含まない流れを計算し、その後  $t^* = 200 \sim 300$  の間でキャ

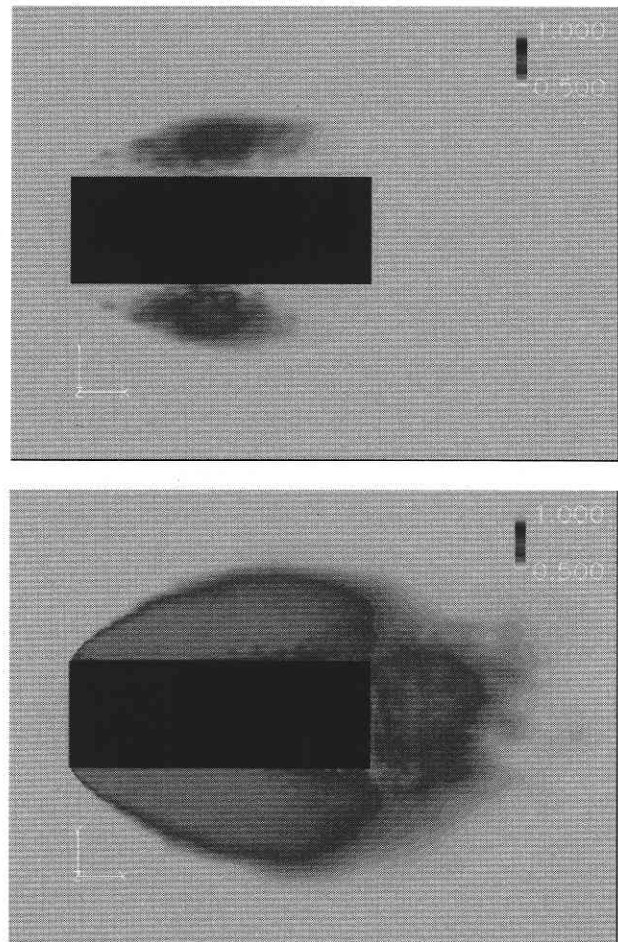


図 3 Time averaged liquid fraction distribution at the mid-span plane in the prism flow  
(top:  $\sigma = 1.5$ , bottom:  $\sigma = 1.0$ )

ビテーション計算を行い流体力に関する統計量を評価した。モデルパラメータは  $C_{gas} = 1000$ ,  $C_{liq} = 0.1$  とした。図 3 に角柱近傍における液体体積率の時間平均分布を示す。キャビテーション数  $\sigma$  の低下に伴ってキャビテーションの発生が増加しており定性的にキャビテーションの影響を捕らえられていることが確認できる。またキャビテーション数  $\sigma = 0.75 \sim 3.0$  の範囲での流体力特性（時間平均抗力係数、抗力係数変動及び揚力係数変動）を実験値<sup>3)</sup> 及び沖田らによる二次元計算結果<sup>2)</sup> と比較した結果を図 4 に示す。抗力係数の時間平均値と変動値に関しては、本解析結果は定量的にも実験値とよく一致している。揚力の変動値に関しては定性的な傾向は一致しているものの全体的に過大評価されており今後の課題である。

角柱周り計算では、LES 解析に必要とされる解像度にくらべ、実際の解像度が十分でないため、キャビテーションが起きない場合の流れ場も必ずしも正確に捉えられていない。次の段階では、流れ場が可能な限り正確に捉えられている状況におけるキャビテーションモデルの検証を行った。具体的には二次元流体翼 (Clark-Y 11.7%) 周りの流れに

研究速報

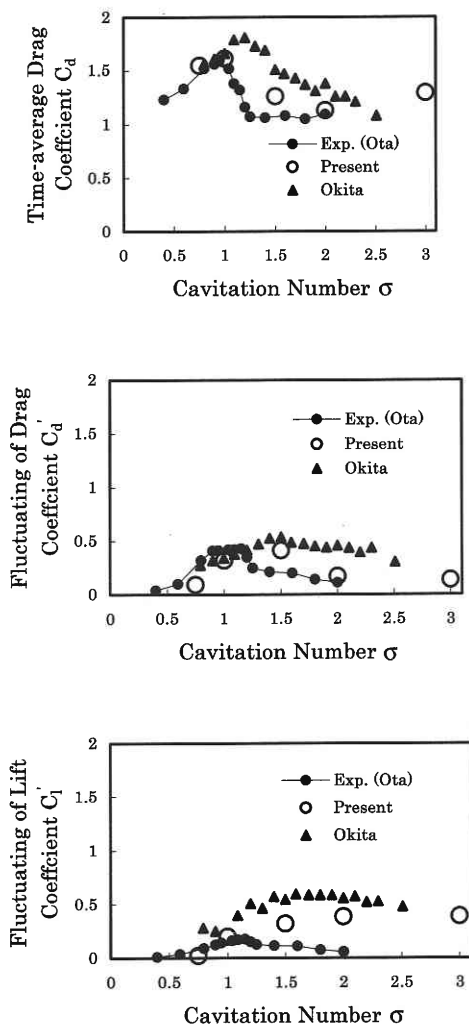


図4 Comparison of fluid forces in a prism flow (top: drag, middle: drag fluctuating, bottom: lift fluctuating)

ついて、コード長を基準とするレイノルズ数  $5 \times 10^5$ 、迎角0度の流れを対象に検証計算を行った。計算の概要及び用いた格子を図5に示す。本計算では境界層の遷移及び乱流境界層を効率的に解像するために、図5に示すようなオーバーセット格子を用いた。翼近傍の計算格子はコード長を基準にして、壁面と垂直方向、及び流れ方向にそれぞれおよそ  $0.25 \times 10^{-3}$ 、 $5.0 \times 10^{-3}$  とした。またスパン方向にはコード長の計算領域をとり要素数は99とし、スパン方向の境界条件は実験<sup>1)</sup>に従い壁面境界 (no-slip) として扱った。全体の要素数は約350万である。

計算はまず、キャビテーションが発生しない条件において、流入速度とコード長を基準とする無次元時間で  $t^* = 25$  まで行った。これにより計算された流体力は実験値<sup>1)</sup>と比較して抗力、揚力とも4%以下の誤差で一致している。図6に抗力、揚力係数の実験値及び沖田らの計算結果<sup>2)</sup>との比較を示す。キャビテーションを想定しない計算結果は図6においてキャビテーション数  $\sigma = 3.0$  の結果として示

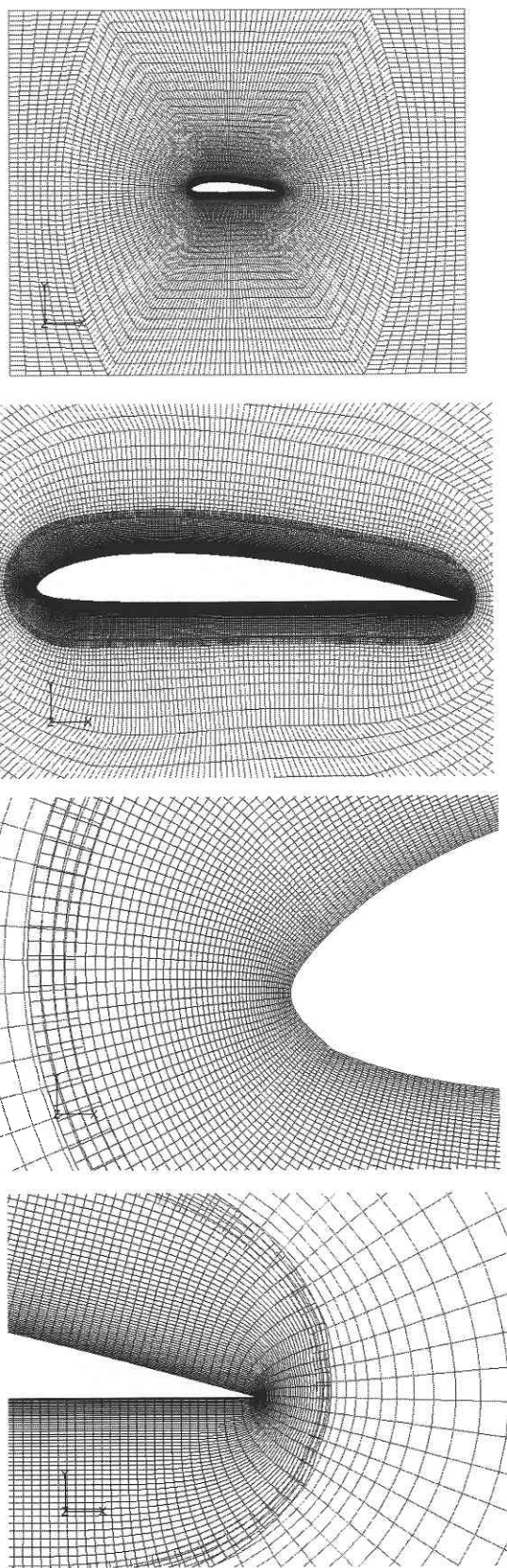


図5 Computational grid used for the hydrofoil flow calculations (From top entire domain, near the hydrofoil, near the leading edge, near the trailing edge)

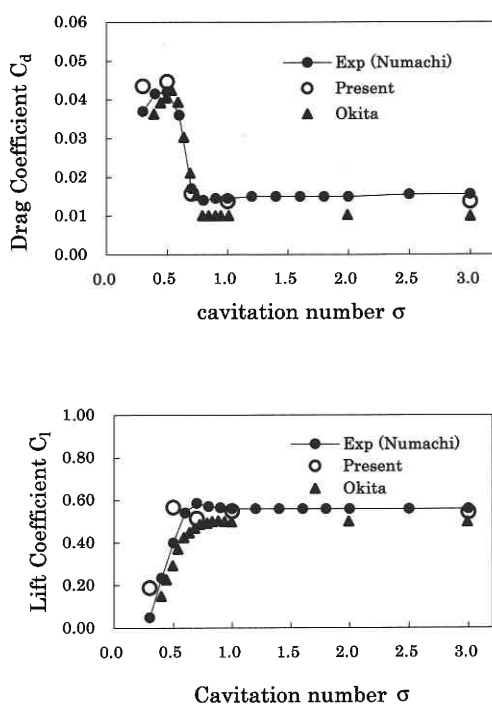


図6 Comparison of fluid forces on hydrofoil (top: drag, bottom: lift)

されている。以上の結果から判断して、少なくともキャビテーションを含まない場合の流れ場を正確に捉えていることが確認できる。

次に得られた流れ場をもとにキャビテーション数  $\sigma = 0.3 \sim 1.0$  に関してキャビテーション計算を行った。モデルパラメータは沖田ら<sup>2)</sup>に従い、圧力が飽和蒸気圧以下の場合には  $C_{gas} = 1000$ ,  $C_{liq} = 1$ , それ以外の場合には  $C_{gas} = 100$ ,  $C_{liq} = 1$  とした。図6に示すように、キャビテーションを考慮した計算においても抗力及び揚力ともに良好な結果を得ることができた。

また、図7に計算結果の典型的な例としてキャビテーション数  $\sigma = 0.5$  の場合のミッドスパン平面における瞬時圧力場、及び、翼表面における瞬時圧力場及び同時刻の液体体積率70%の等値面を示す。負圧面側ではキャビテーション発生領域で圧力が飽和蒸気圧 ( $C_p \approx -\sigma = -0.5$ ) となっていることが確認できる。キャビテーションの3次元構造及び非定常構造に関する検討は今後の課題である。

#### 4. 結 論

本研究はターボ機械中のキャビテーションの影響を数値流体解析により定量的に予測することを目的としている。そのために筆者らがこれまで開発したターボ機械を解析対象とするLES解析コードに、沖田らが提唱した均質流れ近似に基づくキャビテーションモデル<sup>2)</sup>を導入した。モデルの検証は、角柱周り ( $Re$  数 =  $10^4$ ) 及び流体翼 (Clark-Y 11.7%,  $Re$  数 =  $5 \times 10^5$ ) 周りの流れに対し行われ、それぞ

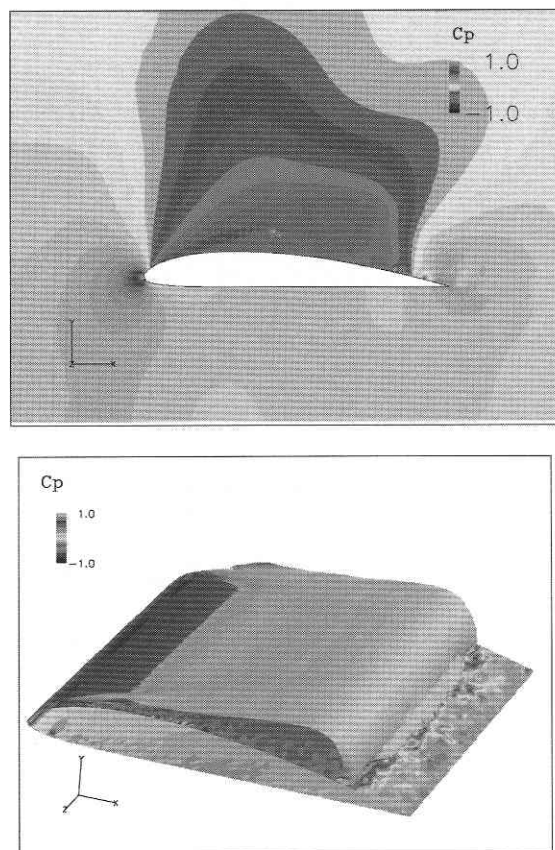


図7 instantaneous pressure and liquid fraction field (up: pressure coefficient at mid-span plane, down pressure coefficient on the hydro foil surface and iso-surface that liquid fraction is 0.7.)

れ実験値と比較して定量的に概ね妥当な結果を確認できた。ただし、本モデルは経験的なパラメータを含むため、より広範囲な検証が必要であると考えられる。

今後、モデルの信頼性・精度の向上のために、改良及び基礎検証を続ける予定である。それと同時に、より実用的な問題への適用を行い、ターボ機械におけるキャビテーションの影響の定量的な予測を可能なものにしていきたい。

#### 謝 辞

本研究の一部は文部科学省ITプログラム「戦略基盤ソフトウェア」の一環として行われた。ここに謝意を表す。

(2003年11月10日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 沼地・角田・千田, 既存翼型6個のキャビテーション性能, 東北大学高速力学研究所 Technical Rep. 1-1 (1949)
- 2) 沖田浩平, 数値シミュレーションによる非定常キャビテーション流れに関する研究, 大阪大学学位論文 (2002)
- 3) 太田・角田・加賀, 角柱周りのキャビテーション流れにおける励振挙動, 機論B編 60-579 (1994) 3789-3796
- 4) 加藤洋治 (編著), キャビテーション, 横書店