

船外機におけるキャビテーションを考慮した CFD 計算

CFD Calculation of Cavitation in Outboard Motors

南 郷 あや香*
Ayaka NANGO

伊 賀 由 佳**
Yuka IGA

要 旨

船外機用のプロペラ形状を対象に、計算コストと計算精度の両立を目的として、キャビテーション現象を考慮した CFD 計算をおこなった。境界層格子解像度による主要なプロペラ性能値（スラスト係数、トルク係数、プロペラ効率）への影響を明らかにした。得られた CFD 計算の結果は、模型試験と定性的に一致し、その精度は $\pm 7\%$ であった。以上により、船外機の開発初期段階から、キャビテーション影響を考慮することができるようになった。

ABSTRACT

CFD calculations accounting for cavitation in outboard motor propellers were performed to save calculation cost and calculation accuracy. The impact of the boundary layer mesh resolution on the main propeller performance values of thrust coefficient, torque coefficient, and propeller efficiency was clarified. The obtained results of CFD calculation were qualitatively consistent with the results of model tests, and its accuracy was within $\pm 7\%$. With the above, cavitation effects can be accounted for from the early stages of outboard motor development using CFD calculation.

1. まえがき

船外機において、プロペラやギヤケースにキャビテーションが発生することが知られている。キャビテーションとは Fig. 1 に示すように圧力の低下によって、液体が気体へと相変化する現象である。

キャビテーションが発生すると、一部の例外⁽¹⁾を除いて、性能が低下することが知られている⁽²⁾。プロペラであれば推力の低下、ギヤケースであれば抵抗値の増加が起き、艇体の速度低下や船外機の燃料消費の増加をまねく。さらにキャビテーションは外観品質低下をもたらすエロージョンの原因にもなる。そのため本来は開発初期段階から、キャビテーション影響を考慮に入れることが望ましい。

これまで弊社の船外機開発における船外機燃費と動力性能予測の事例⁽³⁾では、キャビテーションを考慮しない計算

で、性能計算を実施してきた。しかしながら船外機は近年、高出力化が進み、キャビテーションが発生する高速領域で使用されるようになってきている。そのため、キャビテーションを考慮した予測計算の必要性が高まっている。

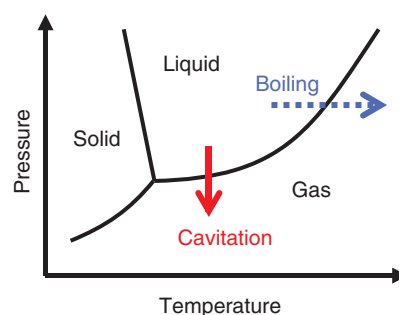


Fig. 1 Phase diagram of water

* パワープロダクツ R&D センター

** 東北大学流体科学研究所

キャビテーション現象は商用 Computational Fluid Dynamics(CFD)ソフトウェアでも計算可能^{(4), (5)}となっているものの、キャビテーションのモデル化手法はいまだ確立されていない⁽⁶⁾。一般的に CFD 計算においては、格子解像度を増加させれば、キャビテーションを精度よく予測できるが、これは計算時間、すなわち計算コストの増大につながる。このことから開発初期段階での CFD の活用に向けては、計算精度と計算コストの両立に注意を払う必要がある。

船外機で発生するキャビテーション予測の研究事例としては、二次元翼での試験と CFD 計算の比較⁽⁷⁾、キャビテーション CFD 計算結果を元にしたエロージョン予測⁽⁸⁾などがある。しかし、両者とも三次元でのキャビテーション予測精度について、船外機開発における実用性の観点での議論はない。

そこで、本論文では、船外機のプロペラに発生するキャビテーションを考慮した性能予測を目的とし、計算コストと精度の関係を明らかにする。

2. キャビテーション予測計算

2.1. 計算対象

本稿では、液体中の物体まわりの圧力状態を再現し、キャビテーションの発生箇所を予測できることを目標とした。

計算対象は、船外機での活用を見込み、外部流れかつ一般での研究事例が多い、水中におけるプロペラ形状とした。

2.2. 計算手法

2.2.1. CFD ソルバ

計算には商用 CFD ソフトウェアを使用した。計算設定を Table 1 に示す。キャビテーションは実際には非定常の現象であるものの、計算コストを考慮して、定常のレイノルズ平均流れ (RANS) として取り扱った。液相と気相の流れがほぼ同じと仮定し、気相のモデル化には、気液間の速度差がないオイラー型の混合物モデルを用いた。キャビテーションモデルは気泡力学モデルの Zwart-Gerber-Belamri モデル⁽⁹⁾を使用した。

2.2.2. 安定性の高い計算手順

キャビテーションが発生すると、液体から気体への急激な密度変化が起きる。計算上でもキャビテーション生成のタイミングで、物理量の急変が原因で計算が不安定となり、計算が発散して解が得られなくなることがある。

Table 2 に示すように、計算初期は高圧の環境条件を設定し、単相流、混相流とステップを分けて計算を実行し、最後に徐々に圧力を減少させることで、安定した計算が可能となった。

Table 1 Calculation settings

CFD software	ANSYS Fluent 16.0
Time	Steady
Viscous model	SST k- ω
Multiphase flow model	Mixture model
Cavitation model	Zwart-Gerber-Belamri

Table 2 Calculation procedures

Step 1	Single phase flow calculation with high pressure
Step 2	Multiphase flow calculation with high pressure
Step 3	Cavitation calculation with high pressure
Step 4	Cavitation calculation while reducing pressure

2.2.3. 計算領域

計算領域を Fig. 2 に示す。本検討では後述するキャビテーション水槽試験との比較による計算精度検証のために、各寸法を試験条件と合わせている。計算領域は水槽試験装置流路断面面積相当の円筒管形状とした。計算領域全体を回転させ、円筒管の外周側壁を絶対座標系に対し固定することで、プロペラの回転を模擬した。また、計算コストを下げるため、計算領域はプロペラ翼 1 枚分のみの、プロペラ軸を中心とした三回対称の領域とし、境界面は周期境界とした。

2.2.4. 計算格子

前述のように、キャビテーションは物体表面近傍の流れの再現が重要である。本稿では乱流モデルとして、低レイノルズ数型の SST k- ω モデルを使用しているため、物体表面近傍の格子解像度が細かいほど、計算精度は良くなると考えられる⁽¹⁰⁾。ただし格子解像度が細かくなると、計算コストが増加してしまう。そこで、物体表面近傍の境界層格子のみを変更し、格子解像度の違いによる計算結果と計算コストのトレードオフを検証した。

計算した境界層格子の生成パラメータを Table 3 に示す。なお各々の計算格子の境界層格子領域の厚さは同程度となるようにした。

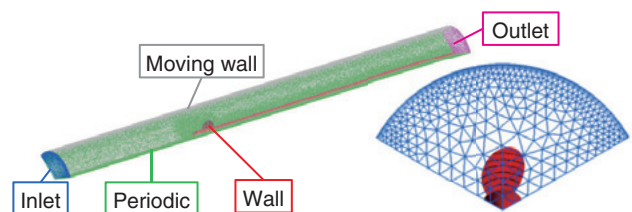


Fig. 2 Calculational domain

Table 3 Mesh generation parameter for boundary layer

	Mesh i	Mesh ii	Mesh iii
Number of boundary layers	25	15	5
First layer height [mm]	0.025	0.05	0.2
Growth rate	1.05		

3. 結果と考察

3.1. 計算精度検証試験

計算精度検証のため、CFD 計算結果をキャビテーション水槽でおこなった模型プロペラ試験結果と比較する。キャビテーション水槽試験は東京大学の船用プロペラキャビテーション水槽⁽¹¹⁾において実施した。キャビテーション水槽は回流型の水槽で、水槽内の圧力と流速を変更することで、実使用環境を模擬したキャビテーションを発生させることができる。四角柱形状の流路の中でプロペラを回転させ、動力計を使って推力 T とトルク Q を計測しながら、観察窓からキャビテーションの様相を把握した。

プロペラの主要目を Table 4 に示す。本稿では3種類のプロペラで検討を実施した。この表において D はプロペラの直径である。

ここで、船舶推進分野において使用されている、一般的な無次元数である前進係数 J 、スラスト係数 K_T 、トルク係数 K_Q 、プロペラ効率 η と、キャビテーション数 σ_n は以下の数式を用いて表される。

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q}$$

$$\sigma_n = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$$

V_A はプロペラ流入速度、 n はプロペラ回転数、 ρ は液体密度、 p_0 は液体の基準圧力、 p_v は液体の飽和蒸気圧を表す。

前進係数 J はプロペラに流入する流れの角度を示す無次元数であり、同じ回転数ならば船速が速いほど J が大きくなる。キャビテーション数 σ_n はプロペラにおけるキャビテーションの発生しやすさを示す無次元数であり、 σ_n が小さいほどキャビテーションが発生しやすい。

キャビテーション水槽試験において、前進係数 J とキャビテーション数 σ_n を実使用環境と合わせることで、相似なキャビテーションを観察できる。

本試験では、前進係数 J 0.99、キャビテーション数 σ_n

Table 4 Key propeller characteristics for cavitation tunnel test

Propeller name	A	B	C
Diameter [m]	0.220		
Pitch ratio (at 0.7D)	1.26	1.06	1.12
Expanded area ratio	0.481	0.481	0.460
Number of blades	3		
Rotational direction	Counter-clockwise		
Material	Corrosion resistant aluminum alloy		

Table 5 Relative calculation time

	Mesh i	Mesh ii	Mesh iii
Relative calculation time (Mesh i as 1.00)	1.00	0.83	0.58

0.53 を基準の試験条件とした。この条件は、実使用環境で250馬力船外機を搭載した滑走艇の最高速度域である、流速70 km/h、プロペラ回転数3000 rpmから設定した。試験中は、プロペラ回転数を一定とし、水槽内流速を制御することにより、前進係数 J を変更した。

3.2. 計算格子検証結果

2.2.4. 項で述べたとおり、境界層が異なる3種類の計算格子を用いてCFD計算を実施した。計算対象はTable 4のプロペラAとした。Mesh iの計算時間を基準として、各計算格子条件でのイタレーション1回にかかる計算時間はTable 5のようになった。

プロペラ翼負圧面のキャビテーション様相をFig. 3に、プロペラ性能線図をFig. 4に示す。格子が細かいほど、プロペラ翼負圧面のキャビテーションで覆われる領域が広

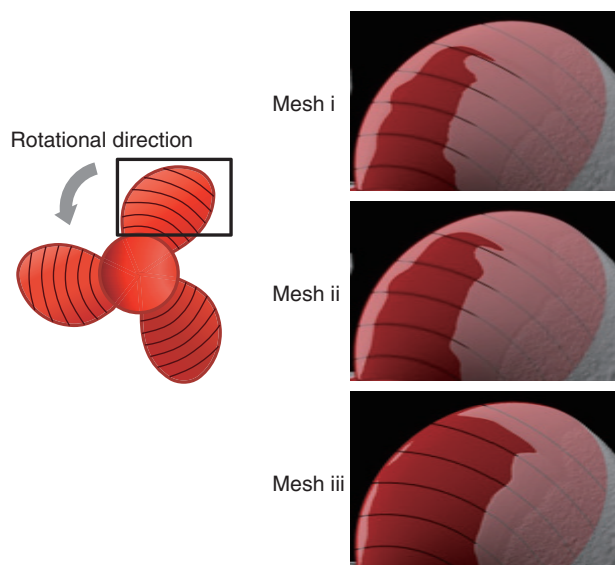


Fig. 3 Influence of boundary layer mesh resolution on cavitation on blade suction side

くなっている。負圧面側ではキャビテーションで覆われる領域が広いほどスラストの増加につながるため、これが、Fig. 4 のスラスト係数 K_T の差の原因と考えられる。

本検証の結果、Mesh i と Mesh ii はキャビテーション

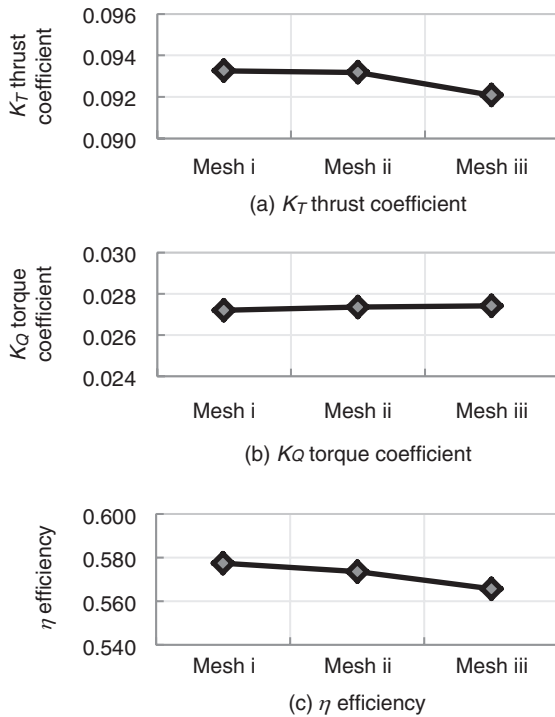


Fig. 4 Influence of boundary layer mesh on propeller performance

様相が良く似ており、プロペラ性能の差異も 1% 以下と小さいため、計算精度と計算コストのバランスから以後の計算は Mesh ii を使用した。

3.3. 試験との比較検証結果まとめ

試験との比較検証結果を定性的なキャビテーション様相と、定量的なプロペラ性能に分けてまとめる。なお、1 計算条件あたりの計算時間は 48 コア 2 CPU の並列計算機で約 9 時間であった。

3.3.1. キャビテーション様相

Fig. 5 にプロペラ A の負圧面側の、模型プロペラ試験と CFD 計算のキャビテーション様相の比較結果を示す。左から前進係数 J が 0.80, 0.99, 1.10 のときの結果である。

- ・ 前進係数 J が 0.80, 0.99 のときは、翼前縁部全体から面状のシートキャビテーションが発生しているが、 J 1.10 では翼の先端近傍 $0.8D$ 以上の位置からのみ発生している。
 - ・ 一つ手前の翼で発生したキャビテーションは J が小さいほど長く伸びている。
- といった様相はよく一致している。

J 1.10 の翼面中央部に見られる泡状のバブルキャビテーションは再現できていないものの、バブルキャビテーションは非定常性が強く、本稿で実施した定常計算での再現は容易ではないと考えられる。また J 1.10 は使用したプロペラの効率ピークを超えた領域であり、実使用範囲外である。

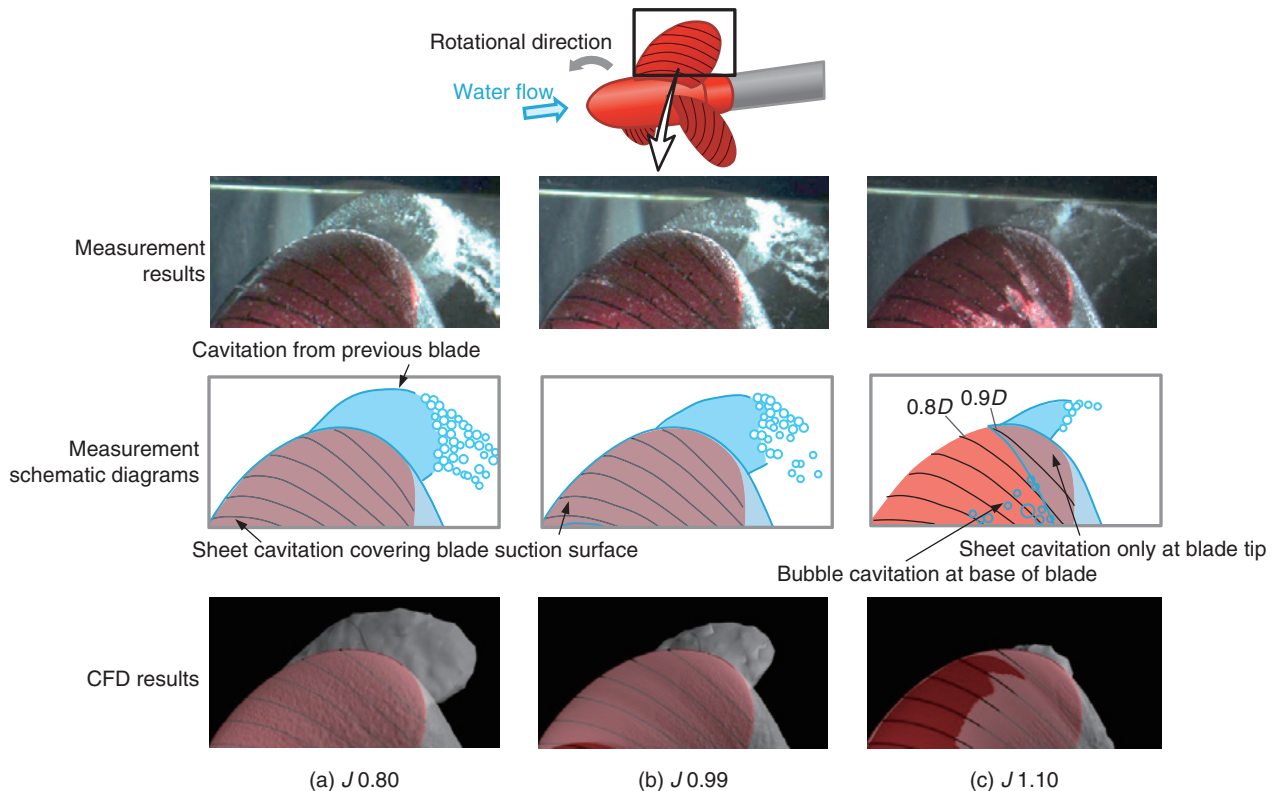


Fig. 5 Propeller blade cavitations, compared between test and calculation

実使用状態である J 0.80, 0.99 で発生するシートキャビテーションの様相は再現できていることから、本検討により定性的なキャビテーション様相を再現できたと判断した。

3.3.2. プロペラ性能

Fig. 6 に模型プロペラ試験と CFD 計算のプロペラ性能

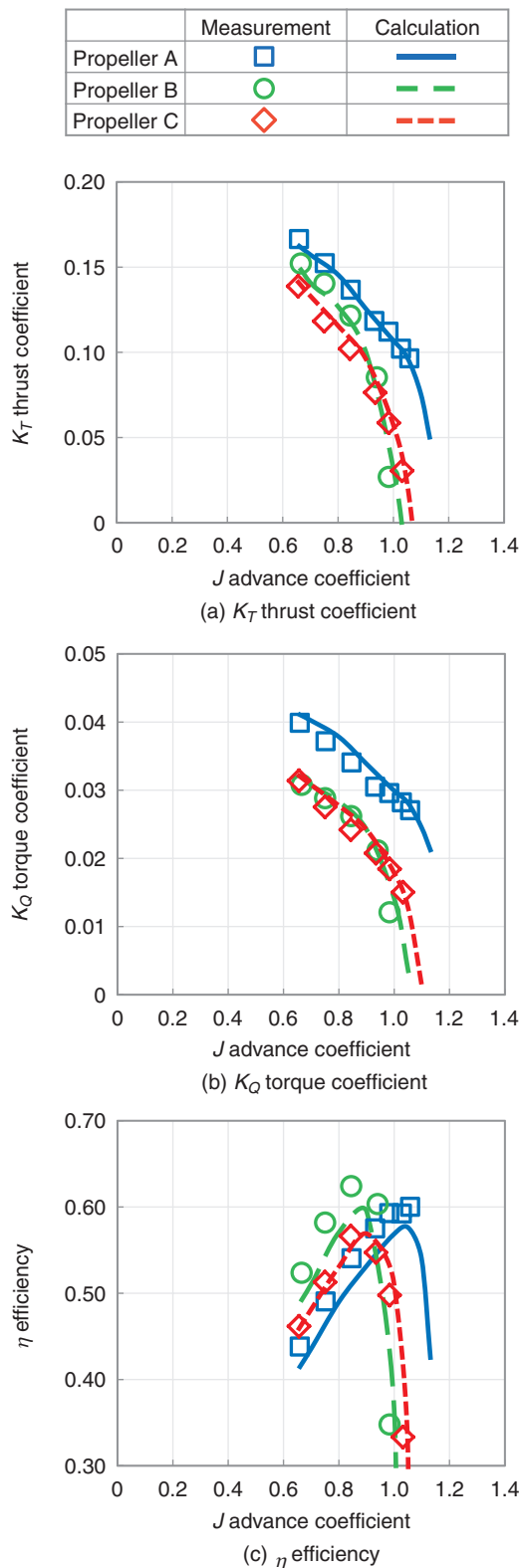


Fig. 6 Propeller performance curve compared with model test results

の比較を示す。各プロペラ間のスラスト係数 K_T の高低順序や、プロペラ効率 η のピーク位置は、模型プロペラ試験結果と CFD 計算で一致しており、プロペラ仕様の違いによる性能の差異を再現できている。

さらに、実際の走行時に使用する前進係数 J の効率ピークまでの領域で、模型試験と CFD 計算で誤差 $\pm 7\%$ 以内の精度で各性能値 (スラスト係数 K_T , トルク係数 K_Q , プロペラ効率 η) が定量的に一致した。

本検討の結果、船外機用プロペラの実使用状態に対して、キャビテーションが発生する条件下でのプロペラ性能を、CFD 計算を用いて定量的に再現できるようになった。

4. まとめ

船外機用のプロペラ形状を対象に、キャビテーション現象を、計算コストと計算精度を両立しながら予測することを目的として、以下の結果を得た。

- (1) 物体表面近傍の境界層格子の変化による計算コスト、ならびに主要なプロペラ性能値 (スラスト係数 K_T , トルク係数 K_Q , プロペラ効率 η) への影響を明らかにした。
- (2) 模型プロペラ試験と CFD 計算の結果を比較し、定性的にキャビテーション様相が一致することおよび、定量的に主要なプロペラ性能値が $\pm 7\%$ の精度で一致することを確認した。

以上の結果から、高出力化、高速化していく船外機の開発において、開発初期段階からキャビテーション影響を考慮することができるようになった。

参考文献

- (1) 右近良孝, 藤沢純一, 工藤達郎, 黒部雄三: SCP 理論設計法の実機プロペラへの応用, 西部造船会々報, 100 号, p. 133-143, (2000)
- (2) 鈴木和夫, 佐々木紀幸, 川村隆文: 船体抵抗と推進 (船舶海洋工学シリーズ②), 成山堂書店, p. 143-162, (2012)
- (3) 栗岡俊介: CFD 解析を用いた小型高速滑走艇における船外機の燃費と動力性能予測の研究, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 1, p. 166-173
- (4) Fujiyama, K.: Numerical Simulation of Ship Hull Pressure Fluctuation Induced by Cavitation on Propeller with Capturing the Tip Vortex, International Symposium on Marine Propulsors smp' 15, June, (2015)
- (5) 富松重行, 角晃太郎, 大谷亮介: ポンプ開発におけるキャビテーション CFD, ターボ機械, 42 巻, 第 11 号, p. 707-712, (2014)

- (6) 能見基彦: キャビテーション CFD の問題点, ターボ機械, 42 巻, 第 11 号, p. 694-700, (2014)
- (7) Kamiya, A.: Prediction of the Cavitation Effect on the Flow Around the Outboard Motor Propeller Blade Hydrofoil Section Using CFD, SAE Technical Paper, 2013-32-9157, (2013)
- (8) Watanabe, T., Sakamoto, H.: Method for Predicting Erosion Due to Cavitation of Outboard-Motor, SAE Technical Paper, 2014-32-0054, (2014)
- (9) Zwart, P. J., Gerber, A. G., Belamri T.: A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics, ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, Japan, Paper No. 152, May 30-June 3, (2004)
- (10) ANSYS, Inc. Fluent 16.0 Theory Guide, Chapter 4: Turbulence, (2014)
- (11) 川村隆文, 前田正二: 東京大学の船用プロペラキャビテーションタンネル, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 43 巻, 5 号, p. 720-725, (2008)

■ 著 者 ■



南郷あや香



伊賀由佳