# 数値シミュレーションによる 舶用プロペラ・キャビテーション予測技術

Numerical Simulation of Cavitation around Marine Propeller



佐藤	圭*1	
Kei Sa	ato	

江頭 久幸<sup>\*3</sup> Hisayuki Egashira 大島 明\*<sup>2</sup> Akira Ohshima

髙野 真一<sup>\*4</sup> Shinichi Takano

舶用プロペラは船体後方の不均一な流れの中で作動するため、プロペラ周辺の海水が気化するキャビテーションと呼ばれる現象が発生する.このキャビテーションは船体後方の流れの中で変動し船体振動の原因となるため、振動の小さい船舶を実現するためには、プロペラの設計段階でキャビテーションの挙動を的確に予測することが重要となる.そこで、数値シミュレーションによりキャビテーションの挙動を予測する技術を構築し、実験結果と比較することでこの妥当性を検証したので、これを紹介する.

## 1. はじめに

舶用プロペラは一般に船体後方に設置され、伴流と呼ばれる船体からの不均一な流れの中で 作動する.この結果、プロペラ翼の周りではキャビテーションと呼ばれる海水の気化現象が発生 する.このキャビテーションの体積は、伴流の影響によりプロペラ1回転中に変動するため、プロ ペラ上方の船底に圧力変動が作用し、船体振動の原因となる.このキャビテーションの発生量を 小さくするためには、プロペラ翼の面積を増やすなどが行われるが、これはプロペラの推進効率 を低下させ、船舶の燃費性能を悪化させる恐れがある.このため、キャビテーションの発生量と挙 動を精度良く予測し、これを適切なレベルに抑えつつ、燃費性能の悪化も防止することが、プロ ペラの設計で重要なポイントとなる.そこで、数値シミュレーションによりキャビテーションの挙動を 予測する技術を構築し、実験結果と比較することで、この妥当性を検証した<sup>(1)</sup>.

## 2. 数値シミュレーション法の概要

数値シミュレーションには市販の CFD (Computational Fluid Dynamics:数値流体解析)ソフトウ ェアを用い,液相(水)と気相(蒸気)を同時に取り扱う手法によってキャビテーションをモデル化し た.計算格子は、キャビテーションの発生する翼周辺部で特に細かいものとし精度の向上を図っ た.プロペラ周辺の計算格子のイメージを図1に示す.計算格子数は解析領域全体で 180 万程 度であり、並列計算機を用いることで、設計時に短時間で解析を行うことができる.船体からの不 均一な流れ場である伴流は、その流速分布を計算領域の上流に与えることで再現した.解析領 域と伴流の例を図2に示す.なお、伴流の流速分布は、船の種類、船型やその載貨状態に応じ て変更することで、解析対象のプロペラの実際の作動状態を再現することができる.



し,精度向上を図っている.

翼周辺部に細かい格子を配置 プロペラ上流の流入境界部に,伴流に対応する流速分布を 与える.

## 3. 実験法の概要

数値シミュレーション結果の検証のため、模型プロペラと当社が保有するキャビテーション水槽 を用いた実験を行った.キャビテーション水槽とは,水槽を密閉し,水槽内の気圧を調整すること が可能な水槽で、実際と相似なキャビテーションを発生させることができる、プロペラの上流には、 伴流に相当する流速分布を発生するよう調整した金網を設置し、プロペラに流入する不均一流を 再現した.また、プロペラに発生する推力を計測しながら水槽内の流速を調整することで、実際の プロペラと相似な作動状態を再現した.実験では、模型プロペラに発生するキャビテーションの挙 動を観察したほか、プロペラの上方に圧力センサを設置し、キャビテーションの変動による圧力変 動を計測し、シミュレーション結果との比較を行った.

## 4. 数値シミュレーション結果

#### 4.1 検証に用いたプロペラ

検証には、実際の設計における数値シミュレーション法の適用性を検証するため、当社での設 計作業で実際に検討されたプロペラ形状を対象とした.対象としたプロペラを表1に示す.ここ で、prop.C1~5、及びprop.D1~D3は、それぞれ同一タイプの船種を対象としたものであり、これ らの差を適切に評価できることが、設計時により良いプロペラを選定できることにつながる。

	船種	形式	翼数	ピッチ比	展開面積比	スキュー角(deg.)
prop.A	А	FPP	6	1.0	0.8	30
prop.B	В	CPP	4	1.4	0.7	40
prop.C1	С	CPP	4	1.1	0.6	40
prop.C2	С	FPP	5	1.0	0.8	30
prop.C3	С	FPP	5	1.0	0.8	30
prop.C4	С	FPP	6	1.0	0.7	30
prop.C5	С	FPP	6	0.9	0.7	30
prop.D1	D	FPP	5	0.9	0.6	20
prop.D2	D	FPP	5	0.9	0.7	20
prop.D3	D	FPP	6	0.9	0.7	30

表1 供試プロペラ

当社での設計にて実際に検討されたプロペラを,複数の船種から選定した. FPP:固定ピッチプロペラ, CPP:可変ピッチプロペラ

### 4.2 キャビテーション発生範囲の比較

prop.A におけるキャビテーション発生範囲の比較を図3に示す.ここで,θはプロペラの回転 角度であり、0 deg.にてプロペラ翼が真上にくることを表す. 今回対象としたプロペラにおけるキャ ビテーションの挙動は概略次のとおりであり、数値シミュレーションはこの挙動をおおむね再現で きている.

- (1) 翼前縁からキャビテーションが発生しはじめる.(θ=0deg.)
- (2) プロペラの回転に伴い, 翼後縁に向かってキャビテーションの発生範囲が広がっていく.  $(\theta = 20 \text{deg.})$

- (3) やがてキャビテーションは翼前縁から離れ,発生範囲が翼後縁に向かって移動していく. (θ=40deg.)
- (4) 後縁に達したキャビテーションは, 翼端に向かって発生範囲を狭めていき, 消滅する.
  - ( $\theta$  =50 ${\sim}70 {\rm deg.})$



図3 キャビテーション発生範囲の比較(prop.A) 数値シミュレーションは,実験で見られるキャビテーションの挙動をおおむね表現できている.

ー方,細部に注目すると,数値シミュレーションではθ=0deg.で薄いキャビテーションが翼前縁の広い範囲で発生しており,また,θ=60deg.,θ=70deg.にて,実験で見られる翼端渦キャビテーションが数値シミュレーションでは表現できていないといった課題もある.これらの改善には,翼前縁,翼端での計算格子の見直しや,キャビテーションモデルの改善が必要と考えられる.

表1に示した10種のプロペラについて、キャビテーション発生範囲の比較を図4に示す.



図4 プロペラによるキャビテーション発生範囲の比較 数値シミュレーションはプロペラによるキャビテーション発生範囲の相違を表現できている. ここで、例えば、prop.D1、prop.D2、prop.D3におけるキャビテーション発生範囲の違いに注目 すると、prop.D2で最小、prop.D1で最大となる実験結果の傾向を、数値シミュレーションは表現で きていることが分かる.この結果から、数値シミュレーションはプロペラによるキャビテーションの発 生範囲の相違を評価できており、よりキャビテーション発生範囲の小さいプロペラの選定に利用で きると考えられる.

#### 4.3 圧力変動の比較

キャビテーションによってプロペラ上方に発生する圧力変動について,実験結果と数値シミュレ ーション結果の比較を図5に示す.数値シミュレーションは,実験結果に比較して単調な波形とな るものの,圧力変動の概略の大きさを表現できている.なお,本図は,prop.D3について比較した ものであるが,他のプロペラについても傾向は同様である.



#### 図5 圧力変動の比較

数値シミュレーションで圧力変動の大きさを表現できている.

この圧力変動から,船体振動に寄与する振幅を求め,実験と数値シミュレーションとで比較した 結果を図6,図7に示す.図6は,翼周波数の1次成分(周波数=プロペラ回転数×翼数),図7は 翼周波数の2次成分(周波数=プロペラ回転数×翼数×2)である.図5にて数値シミュレーション は圧力変動の概略の大きさを表現できていたことから,図6においても,数値シミュレーションはプ ロペラごとの圧力変動の振幅の相違をおおむね表現できており,翼周波数の1次成分について は,その大小を数値シミュレーションで略予測できるものと考えられる.



## (翼周波数1次成分)

船体振動にて特に重要となる翼周波数1次成 分は、実験結果の傾向を、数値シミュレーション はおおむね表現できている.

## (翼周波数2次成分) 周波数の高い成分は数値シミュレーション

では過小評価している.

一方,図7に示す翼周波数2次成分は,数値シミュレーションでは実験に比較して過小評価する傾向がある.これは,図5にて,数値シミュレーションでの圧力変動が単調な波形となっていることと対応していると考えられる.この改善としては,解析における時間刻みを小さくすることが考えられる.図5と同じ prop.D3について,時間刻みを小さくすることを試行した結果を図8に示す.時間刻みを小さくすることによって,より詳細なキャビテーションの変動を計算でき,より周波数の高い細かな波形の振動が数値シミュレーションでも表れている.



#### 図8 圧力変動の比較(時間刻み小) 解析における時間刻みを小さくすると、キャビテーションのより詳細な変動を計算でき、 より細かな圧力変動が表れる。

### 5. まとめ

舶用プロペラに発生するキャビテーションと、それによる圧力変動を予測する数値シミュレーション法を構築し、その結果を実験結果と比較し検証した.この結果、次のことが分かった.

- (1)数値シミュレーションにより、キャビテーション発生範囲とその変化の概略を予測できる.また、 プロペラによるキャビテーション発生範囲の相違を予測でき、設計時のプロペラ選定に利用可 能である.一方、キャビテーション発生の初期、及び、翼端渦キャビテーションなど、より詳細の 予測は改善を要する.
- (2) 圧力変動の振幅について, 翼周波数の1次成分は, プロペラによる相違の傾向を予測するこ とができる. 一方, 翼周波数の2次成分の予測には, 数値シミュレーションの時間刻みを小さく するなどの改善を要する.

今後,この数値シミュレーション法を利用して,プロペラ設計時にキャビテーション挙動を的確 に予測することで,低振動と高効率・省燃費を両立するプロペラの開発を行っていく.

## 参考文献

 Sato, K. et al., Numerical Prediction of Cavitation and Pressure Fluctuation around Marine Propeller, Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation No.141 (2009)