

プロペラチップボルテックスキャビテーション 騒音の相似則

Scaling of Tip Vortex Cavitation Noise of Propeller

技 術 本 部 大 島 明^{*1}

プロペラキャビテーション騒音の相似則は、水中騒音源の一つとして実船のプロペラ騒音を推定する上で重要である。プロペラ翼面上に発生するキャビテーションによる騒音の相似則は確立されているが、プロペラの翼端渦中に発生するチップボルテックスキャビテーションの騒音については明確ではない。チップボルテックスキャビテーション騒音の相似則を把握するために、模型及び実船でチップボルテックスキャビテーションの観察と騒音計測を行った。本報では、その結果得られたチップボルテックスキャビテーション騒音の相似則について述べる。

Scaling of propeller cavitation noise between model and full scale is an important factor to predict full scale propeller noise. The scaling method of noise radiated from cavitation occurring on propeller blade is well established. On the other hand, that is not clear on noise radiated from tip vortex cavitation. In order to understand scaling of tip vortex cavitation noise, cavitation patterns and noise characteristics of a propeller were investigated by model tests and full-scale measurements, the results are described in this paper.

1. ま え が き

航行中の船舶のプロペラに発生するキャビテーションは、船舶の主要な水中騒音源の一つである。海洋調査船等水中音響機器を装備した船舶では、キャビテーション騒音が音響機器使用の妨げとなる場合がある。したがって、騒音源としての実船のキャビテーション騒音レベルの推定は、低騒音プロペラを設計する上で重要な課題である。プロペラキャビテーション騒音の推定は、通常、キャビテーション水槽で模型プロペラにキャビテーションを発生させてその騒音を計測し実船の騒音レベルに換算することにより行われる。この場合、キャビテーション騒音の相似則を把握しておく必要がある。

ところで、プロペラに発生するキャビテーションは、プロペラ翼面上に発生するキャビテーションと、プロペラ翼面から離れた点に発生する渦キャビテーションに大別される。後者の典型的な例が図1に示す翼端渦中に発生するチップボルテックスキャビテーションである。キャビテーション騒音の相似則は、前者については確立されているが後者については明確ではない。そこで、チップボルテックスキャビテーションのみが発生するプロペラについて模型及び実船試験を実施し、プロペラチップボルテックスキャビテーション騒音の相似則を把握することとした⁽¹⁾。

2. プロペラキャビテーション騒音の相似則

2.1 キャビテーション騒音の相似則

キャビテーションが多数の気泡からなり、個々の気泡の成長・崩壊に伴い騒音が発生すると考えると、単一気泡からの騒音に基づいた以下に示すキャビテーション騒音の相似則が導かれる⁽²⁾。

$$\frac{f_s}{f_m} = \frac{R_m}{R_s} \left(\frac{\Delta P_s \rho_m}{\Delta P_m \rho_s} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$\frac{G_s}{G_m} = \left(\frac{r_s}{r_m} \right)^2 \left(\frac{R_s}{R_m} \right)^3 \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_m} \right)^{1.5} \left(\frac{\rho_m}{\rho_s} \right)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、

f : 周波数

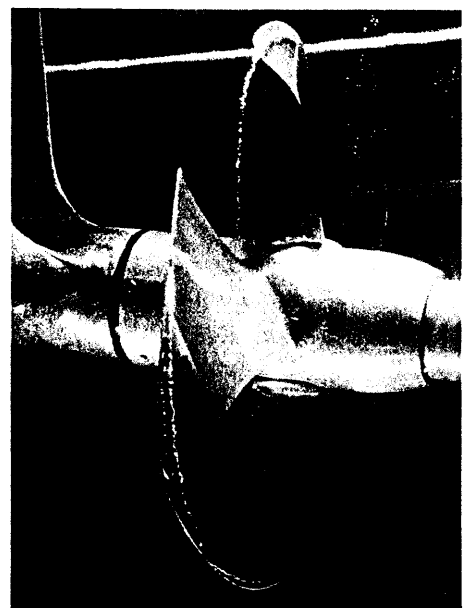


図1 プロペラチップボルテックスキャビテーション
Propeller tip vortex cavitation

G : パワースペクトラム

R : 気泡半径

$\Delta P = P_0 - P_v$

P_0 : 気泡周囲の圧力

P_v : 水の蒸気圧

ρ : 水の密度

r : 気泡と受音点の距離

添え字

m : 模型

s : 実船

模型と実船でキャビテーションが幾何学的に相似であるとすれば、プロペラのキャビテーション騒音の相似則は以下のようになる。

*1 長崎研究所船舶・海洋研究推進室

$$\frac{f_s}{f_m} = \frac{N_s}{N_m} \left(\frac{\sigma_{ns}}{\sigma_{nm}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$\frac{G_s}{G_m} = \left(\frac{r_s}{r_m} \right)^2 \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^6 \left(\frac{N_s}{N_m} \right)^3 \left(\frac{\sigma_{ns}}{\sigma_{nm}} \right)^{1.5} \quad (4)$$

ここで、

N : プロペラ回転数

D : プロペラ直径

σ_n : キャビテーション数 $= \Delta P / [1/2(\rho N^2 D^2)]$

2.2 キャビテーションの尺度影響

プロペラに発生するキャビテーションは、プロペラ翼面上に発生するキャビテーションと、プロペラ翼面から離れた点に発生するチップボルテックスキャビテーションに大別される。プロペラ翼面上に発生するキャビテーションは、実船と等しいキャビテーション数で模型試験を行えば、実船と模型のキャビテーションを幾何学的に相似とすることができる。このとき、式(3)、(4)はさらに簡略化されて式(5)、(6)となる⁽³⁾

$$\frac{f_s}{f_m} = \frac{N_s}{N_m} \quad (5)$$

$$\frac{G_s}{G_m} = \left(\frac{r_s}{r_m} \right)^2 \left(\frac{D_s}{D_m} \right)^6 \left(\frac{N_s}{N_m} \right)^3 \quad (6)$$

一方、チップボルテックスキャビテーションは、発生において粘性による尺度影響を受けることが知られている⁽⁴⁾。チップボルテックスキャビテーションの場合、キャビテーションが発生するときの圧力で定義される初生キャビテーション数 σ_1 と粘性の影響を表すレイノルズ数 Re との間には式(7)の関係がある。

$$\sigma_1 \sim Re^k, \quad Re = CU/\nu \quad (7)$$

ここで、

C : 代表長さ

U : 代表速度

ν : 水の動粘性係数

式(7)の定数 k は三次元の翼型の実験では 0.35 となっている⁽⁵⁾。実船のレイノルズ数は模型試験時のレイノルズ数より大きいので、式(7)により実船では模型試験よりチップボルテックスキャビテーションが発生しやすいこととなる。この事実は、チップボルテックスキャビテーションの場合、実船と同じキャビテーション数で模型試験を行っても、キャビテーションが模型と実船で相似となるとは限らないことを示している。しかし、チップボルテックスキャビテーションが実船と相似となる模型試験のキャビテーション数が分かれば、キャビテーション数をパラメータとして含む式(3)、(4)により、模型試験から実船のキャビテーション騒音を推定できるものと思われる。

3. 模型及び実船試験

チップボルテックスキャビテーション騒音の相似則を把握するために、チップボルテックスキャビテーションのみが発生するプロペラ及び作動条件を選んで調査を行った。

3.1 供試船及び供試プロペラ

供試船の主要目を表1に示す。本船の主機は回転数一定で使用されるため、可変ピッチプロペラが装備されている。本船は航海速度で水中音響機器を使用する。このため、本船のプロペラは定格ピッチでキャビテーションの発生を極力抑えた設計がなされている。表2にプロペラの主要目を示す。

3.2 模型試験

模型試験は当社長崎研究所船型試験場のキャビテーション水槽

表1 船体主要目
Principal particulars of ship

項目	要目
長さ (垂線間長)	90.0 m
幅 (型)	16.2 m
深さ (型)	8.9 m
満載喫水 (型)	6.0 m
航海速度	16.0 kn
主機出力	3 800 PS×2

表2 プロペラ主要目
Principal particulars of propeller

直径	実船	3.7 m
	模型	0.25 m
ピッチ比		1.295
展開面積比		0.602
ボス比		0.265
スキュー角		39.2°
翼数		4

表3 試験条件

Test conditions

ピッチ比 p	0.614	0.871	0.952
推力係数 K_T	0.038	0.072	0.083
キャビテーション数 σ_n	2.0~3.56		

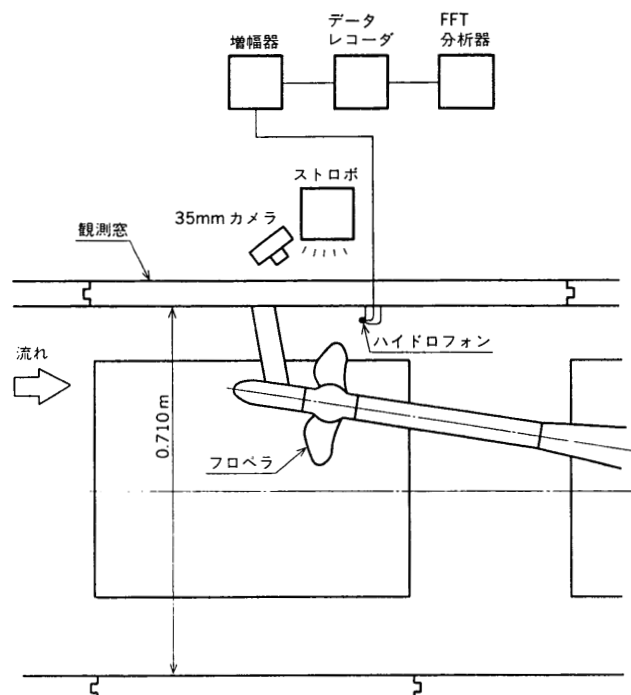


図2 空洞水槽における試験配置 空洞水槽でのキャビテーション観察及び騒音計測の試験配置と計測線図を示す。
Test arrangement in cavitation tunnel

で実施した。図2に模型試験の試験配置を示す。キャビテーションの観察には、プロペラの回転に同期したストロボ発光装置を用いた。キャビテーション騒音は空洞水槽内部に取付けたハイドロフォンにより計測し、FFT分析器を用いて解析した。

可変ピッチプロペラの作動条件は、ピッチ比 p 、推力係数 K_T $[= T/(\rho N^2 D^2)]$ 、 T : プロペラ推力、キャビテーション数 σ_n で定義される。表3に試験条件を示す。

プロペラ翼面上にはキャビテーションは観察されず、ピッチを定格ピッチより小さくしたときに、プロペラの翼正面側にチップボルテックスキャビテーションが観察された。チップボルテックスキャビテーションが実船と相似となる試験条件を求めるために、キャビテーション数を幅広く変えて模型試験を行った。模型試験で観察されたキャビテーションパターンを図3に示す。キャビテーション数が小さくなるほど、チップボルテックスキャビテーションの長さ及び径は大きくなる。

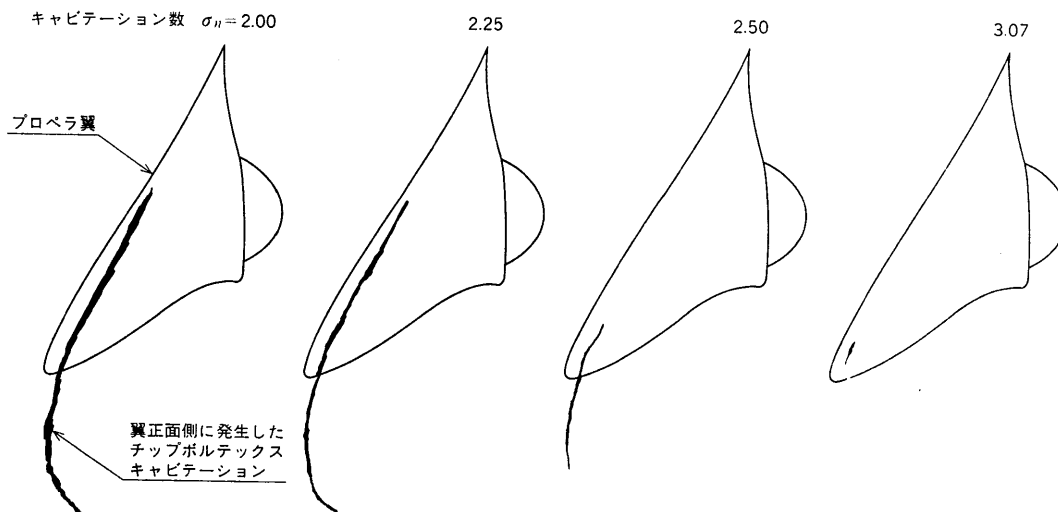


図3 模型試験で観察されたチップボルテックスキャビテーション
 観察されたチップボルテックスキャビテーションのパターンを比較して示す。
 Tip vortex cavitation observed in model tests

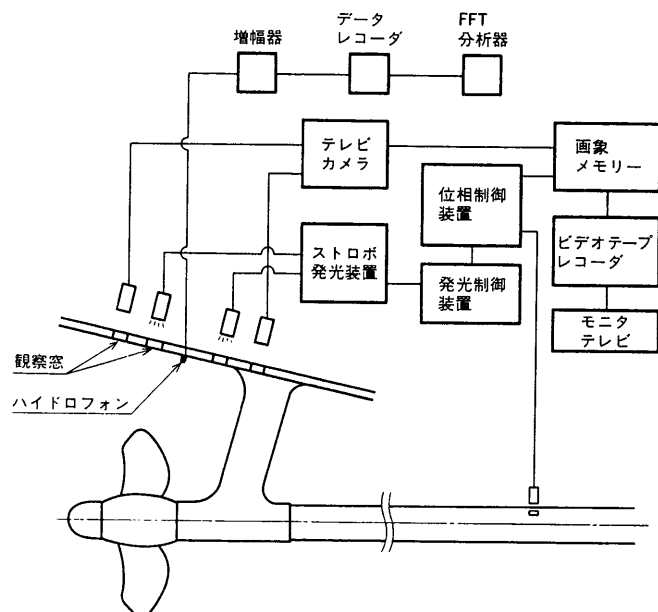


図4 実船試験における試験配置
 実船試験でのキャビテーション観察及び騒音計測の試験配置と計測線図を示す。
 Test arrangement in full scale measurements

3.3 実船試験

実船試験の試験配置を図4に示す。プロペラ直上の船底外板に観察窓を設けてキャビテーションの観察を行った。プロペラの回転に同期させてストロボ発光装置を発光させ、その瞬間のキャビテーションパターンをテレビカメラを通して画像メモリーに記憶させてビデオレコーダに記録した。キャビテーション騒音はプロペラ直上の船底外板に設置したハイドロフォンで計測し、FFT分析器を用いて解析した。本船は2軸船なので左右両舷のプロペラについて騒音計測を実施した。

実船で観察されたキャビテーションパターンを図5に示す。模型試験と同様に翼正面側のチップボルテックスキャビテーションのみが観察された。

4. 考 察

図3と図5を比較すると、チップボルテックスキャビテーシ

キャビテーション数 $\sigma_n = 3.56$

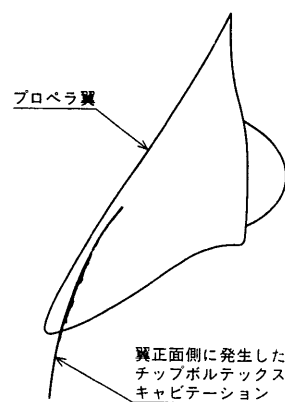


図5 実船試験で観察されたチップボルテックスキャビテーション
 実船で観察されたチップボルテックスキャビテーションのパターンを示す。
 Tip vortex cavitation observed in full scale measurements

ンが実船と相似となるのは、模型試験でキャビテーション数 σ_n が2.25と2.5の間にある場合であることが分かる。 $\sigma_n = 2.25$ のほうが $\sigma_n = 2.5$ よりも実船により近いキャビテーションが発生しているので、騒音の比較には $\sigma_n = 2.25$ で計測した騒音データを用いることとした。図6は、キャビテーション騒音が支配的となる1 kHz以上の周波数域でのピッチを変えたときの実船計測値と、式(3)、(4)を用いて模型試験から推定した騒音レベルとを比較したものである。実船計測値と推定値は良く一致している。

キャビテーションパターンが模型と実船で相似となるキャビテーション数と、プロペラの $0.9R$ ($R = D/2$) における翼弦長と周速で定義したレイノルズ数の関係を図7に示す。式(7)の関係が成り立つとすれば、キャビテーション数とレイノルズ数は以下に示す関係にある。

$$\frac{\sigma_{ns}}{\sigma_{nm}} = \left(\frac{Re_s}{Re_m} \right)^k \quad (8)$$

図7では k の値は0.15となる。この値は先に述べたチップボルテックスキャビテーションの初生における値0.35⁽⁶⁾より小さな値となっている。

チップボルテックスキャビテーション騒音について今回実施したような模型と実船での比較計測を行った例は少ない。したがって、今回得られた0.15という k の値が一般的であるか否かは定かではない。むしろ、 k の値は実船のキャビテーション数に対応して変化するものと考えられる。すなわち、実船のキャビテーシ

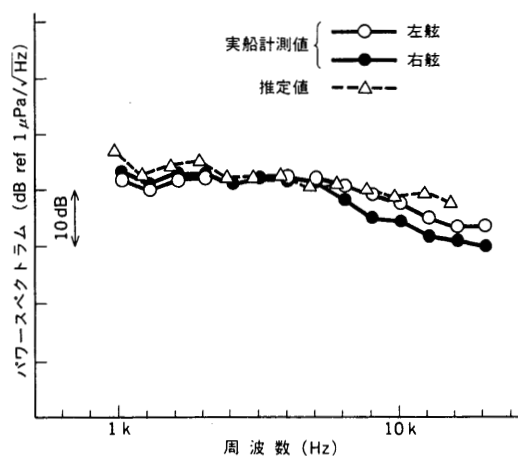
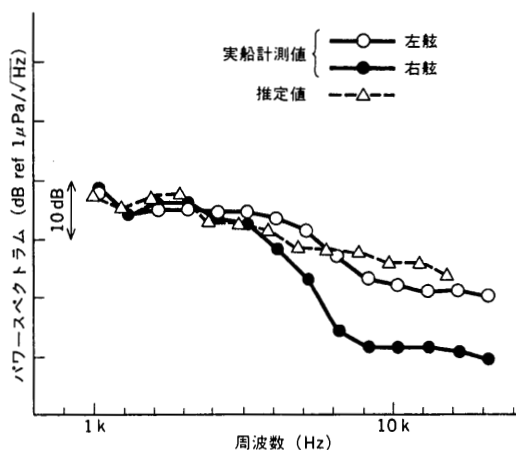
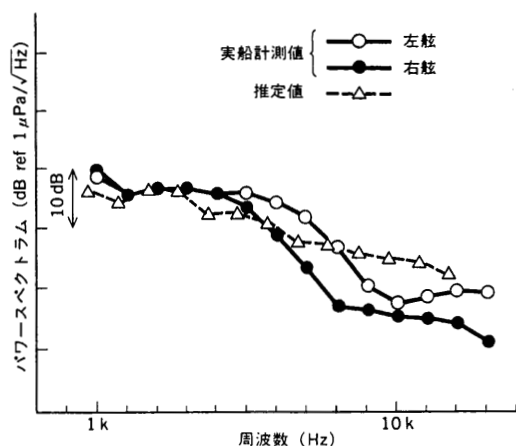
(a) ピッチ比 $p=0.614$ (b) ピッチ比 $p=0.871$ (c) ピッチ比 $p=0.952$

図6 実船での計測値と推定値の比較 実船計測値と模型試験で $\sigma_n=2.25$ で計測された騒音データを用いた推定値を比較した図。両者は良く一致している。
Comparison between full scale measurements and estimation

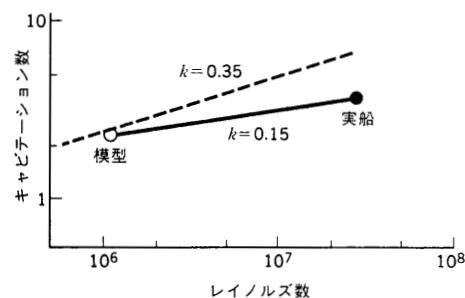


図7 キャビテーション数とレイノルズ数の関係
実船とチップボルテックスキャビテーションが相似となる模型試験のキャビテーション数をレイノルズ数に対してプロットした図。
Relation between cavitation number and Reynolds number

ン数が大きくチップボルテックスキャビテーションの初生に近いときは0.35に近づき、実船のキャビテーション数が小さいときは0.15より小さな値になるものと思われる。この点を明らかにするには、模型及び実船で種々のキャビテーション数におけるキャビテーションの観察と騒音データの収集を行う必要がある。

5. む す び

プロペラチップボルテックスキャビテーション騒音の相似則を把握するために、模型試験及び実船計測を行った。両者の比較により、チップボルテックスキャビテーションが模型と実船で相似であればキャビテーション騒音の相似則により模型試験から実船の騒音レベルを推定できることが明らかとなった。また、チップボルテックスキャビテーションが実船と相似となる模型試験のキャビテーション数とレイノルズ数の関係について知見を得ることができた。この知見を一般的なものとして適用するのは早計であるが、実船のチップボルテックスキャビテーション騒音の推定を行う際の指針を与えるものであり、今後の低騒音プロペラの開発に反映していくことができる。

参 考 文 献

- (1) 大島 明, A study on correlation of vortex cavitation noise of propeller measured in model experiments and full scale, 日本造船学会論文集, Vol.168 (1990) p.89
- (2) Levkovskii, Y.L., Modeling of cavitation noise, Soviet Physics Acoustics Vol.13 No.3 (1968) p.337
- (3) Bark, G., Prediction of propeller cavitation noise from model tests and its comparison with full scale data, Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME Vol.107 No.1 (1985) p.112
- (4) McCormick, B.W., On cavitation produced by a vortex trailing from a lifting surface, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME Vol.84 No.3 (1962) p.369
- (5) Billet, M.L. et al., Scale effects on various cavitation types of limited cavitation, International Symposium on Cavitation Inception, ASME (1979) p.11