翼端小翼付きプロペラの研究

(第 2 報 キャビテーション特性)

正員 伊藤 真一郎*

Study of the Propeller with Small Blades on the Blade Tips
(2nd Report : Cavitation Characteristics)

by Shin'ichiroh Itoh, Member

Summary

The author performed cavitation test (cavitation observation, propeller open test, fluctuating pressure measurement and noise measurement) in uniform flow to compare the characteristics between the conventional (original) and the propeller with small blade on the blade tips (bladelet propeller).

From these test, it was suggested that the reduction was confirmed about cavitation noise and fluctuating pressure amplitude, due to the reduction of the strength of tip vortex by the small blades, compared with the conventional propeller, which was observed at the model tests as shown in the first report. The reduction of sheet cavitation region was also observed. However, the cloud cavitation was occurred at the root of bladelet.

Key word : propeller, bladelet, cavitation, reduction, pressure fluctuation, noise, tip vortex, cloud cavitation

1 緒 言

前報¹⁾の翼端小翼付きプロペラの研究においては、系統的に小翼の形状、取付位置、取付角度を変化させプロペラ単独試験により基礎データを得、翼端小翼を取り付けることで原型プロペラ比較で 1~4% 程度の効率上昇するものが得られることを報告した。しかしながら新型種のプロペラの研究開発に当っては、効率が MAU 型より向上するだけでは実用に供することができない。キャビテーション特性^{2)~5)}、船尾振動の起振力の原因となるプロペラが誘起する変動圧力^{6),7)}の面でも現在の船舶の要求を満たすものでなくてはならない。

本研究ではキャビテーション水槽において基礎研究として均一流中における原型プロペラと翼端小翼付きプロペラ (ブレードレットプロペラ) を対象にキャビテーションパターンの観測、プロペラ近くに置かれた平板に及ぼす変動圧力ならびに騒音を計測し、その結果を比較検討したものである。

2 均一流中キャビテーション試験

供試模型プロペラは前報で述べた直径 (D) 300mm,

ピッチ比 (H/D) 0.8, 二翼, 展開面積比 0.2, ボス比 0.18 で, 断面形状船舶技術研究所 MAU 型の原型プロペラとブレードレットプロペラ No. 59-7 (前進常数 $J=0.4$ において原型比約 3.5% の効率上昇を得たもので, 以下図中では BLP と記す) を用いた。実験施設には(株)三井造船昭島研究所のキャビテーション水槽を用いた。

実験状態を Table 1 と Table 2 に示す。水温はそれぞれ 11.2°C および 13.2°C 程度で, 小翼部の翼根接合強度からプロペラ回転数 (n) は 14.0rps, 16.66rps に設定し, キャビテーション発生状況を調べると共にプロペラの単独性能を調べた。Table 1 の条件ではキャビテーション試験のみ, Table 2 の条件では変動圧力測定, 騒音測定を併わせて行った。前進常数 J は想定実船のプロペラの作動状態を考え $J=0.4, 0.5, 0.6$ に合わせ流速を変化させた。キャビテーション数には $\sigma_N=(P-P_V)/(1/2\rho n^2 D^2)$ を用いた。ただし ρ は密度, P は計測洞静圧, P_V は計測時における水温での飽和蒸気圧である。

2.1 キャビテーション観察

実験状態はキャビテーション初生 (TVC), シートキャビテーション発生面積比 1~2%, 6~9%, 33~47% キャビテーション, の 4 状態になるように段階的に減圧しながらキャビテーション数を下げて, その状態につい

* 防衛大学校機械工学教室

Table 1 Cavitation test condition

Propeller model	J	n (r.p.s.)	σ_H	$R_s (\times 10^5)$
Original	0.401	14.0	2.49 ~ 12.5	9.99
	0.495	14.0	3.18 ~ 12.3	9.88
	0.601	14.0	1.86 ~ 12.4	9.98
No.59-7	0.390	14.0	3.06 ~ 12.0	10.29
	0.496	14.0	2.36 ~ 12.0	10.30
	0.598	14.0	3.30 ~ 12.0	10.31

Table 2 Cavitation, pressure, and noise measurement test condition

Propeller model	J	n (r.p.s.)	σ_H	$R_s (\times 10^5)$
Original	0.400	16.66	2.63 ~ 8.73	12.51
	0.496	16.66	1.96 ~ 8.69	12.51
	0.599	16.66	1.52 ~ 8.60	12.51
No.59-7	0.402	16.66	2.41 ~ 8.61	12.77
	0.500	16.66	2.01 ~ 7.42	12.77
	0.600	16.65	1.47 ~ 8.25	12.77

Fig.1 Cavitation pattern of original propeller ($J=0.4$) Fig.2 Cavitation pattern of original propeller ($J=0.5$) Fig.3 Cavitation pattern of original propeller ($J=0.6$)

Fig. 4 Cavitation pattern of bladelet propeller ($J=0.4$) Fig. 5 Cavitation pattern of bladelet propeller ($J=0.5$) Fig. 6 Cavitation pattern of bladelet propeller ($J=0.6$) Fig. 7 Photograph of bladelet propeller cavitation, $J=0.4$, $\sigma_N=2.40$ Fig. 8 Photograph of bladelet propeller cavitation, $J=0.5$, $\sigma_N=2.01$

Fig. 9 Photograph of bladelet propeller cavitation, $J=0.6$, $\sigma_N=1.47$

Fig. 10 Photograph of tip vortex of original propeller, $J=0.4$, $\sigma_N=4.11$

Fig. 11 Photograph of tip vortex of bladelet propeller, $J=0.4$, $\sigma_N=3.33$

ての単独性能を調べた。

Table 2 の条件下で各状態のキャビテーションパターンのスケッチと主な写真を Fig. 1~11 に示す。

シートキャビテーションの平均的な発生範囲は横縞のハッチングで示し、非定常的位置は点線で、バブルキャビテーションを○ハッチングで、シートキャビテーション、バブルキャビテーションの崩壊部を×ハッチングで示している。原型プロペラのキャビテーション発生状況について、Fig. 1 は $J=0.4$ のものであり、キャビテーション数を下げて行くと背面には翼端からシートキャビテーションが広がって行き $0.45r/R$ 付近まで覆われるキャビテーション数まで減圧した場合である (Fig. 1c)。

$J=0.5$ (Fig. 2) においても同様であるがシートキャビテーションの発達が $J=0.4$ に比べて遅かった。これは迎角が小さくなるためである。 $J=0.6$ (Fig. 3 b, c) においては、このようなシートキャビテーションの成長は見られず、翼中央付近にバブルキャビテーションが発生した。これは背面の圧力分布が、中央部に緩やかな負のピークになっていると推定される⁸⁾。さらに翼端部をとめている取付けネジ穴が引金になって定常的にバブルキャビテーションが発生したものと考えられる。

翼端小翼付きプロペラにおいては $J=0.4$ で、後縁側翼端小翼から翼端渦キャビテーション (TVC) が発生し、さらに前縁側翼端小翼からも TVC が発生し、前縁側翼端小翼と主翼との付根部を中心に前縁キャビテーションが発生する (Fig. 4a)。減圧すると (Fig. 4b) これはシートキャビテーションに発達し、一方、後縁側翼端小翼には前縁からシートキャビテーションが成長してくる。また後縁側翼端小翼の前縁と主翼の付根部からクラウド状キャビテーションが発生する。さらに減圧すると (Fig. 4c)、主翼からのシートキャビテーションは成長して後縁側翼端小翼のシートキャビテーションとつながり、後縁側翼端小翼の翼根部からはクラウド状のキャビテーションが盛んに発生する。小翼の翼根部でクラウド状に崩壊するためかシートキャビテーションの大きさは原型プロペラより若干小さい。Fig. 4d およびその写真である Fig. 7 はさらに減圧しキャビテーション数を下げたものであるが、後縁側小翼取付部からキャビティは渦状になって放出されている。この翼根部は油膜法による流れの可視化結果では小翼翼根付近の主翼背面に油膜筋の包絡線が現われた位置であり、翼端小翼翼根部では小翼と主翼との干渉で大きな縦渦が生じているのではないかと推定される。

$J=0.5$ (Fig. 5) においても同じような経過をたどるが、後縁側小翼翼根部からはバブルキャビテーションが発生し (Fig. 5b)、減圧すると前縁小翼からはシートキャビテーションが発達し、一方、後縁側小翼翼根部からはクラウド状キャビテーションが盛んに発生し流れ去る (Fig. 5c)。Fig. 5d とその写真 Fig. 8 の試験状態は原型プロペラ Fig. 2c の試験状態に相当する。主翼におけるシートキャビテーションの発達は原型プロペラと同程度であるが、翼端小翼においては前縁側のみシートキャビテーションが発達するので、シートキャビテーションの面積としては原型プロペラより小さい。

Fig. 6 は $J=0.6$ のものである。原型プロペラと同様にキャビテーション数が低くなくてもシートキャビテーションは成長しないが、後縁側翼端小翼の翼根部からクラウド状キャビテーションが渦状になって放出される。さらに減圧すると (Fig. 6c, d, Fig. 9) 主翼中央付近に

間欠的なバブルキャビテーションが発生し、かつ翼端部をとめている取付けネジ穴からも定常的にバブルキャビテーションが発生した。

全体を通して翼端小翼の翼根部からはクラウド状キャビテーションが発生し縦渦も発生しているようである。この翼根部を滑らかに整形することでこの現象は改善できると思われる(註、付録)。

Fig. 10, 11 は Table 2 に示す条件での $J=0.4$ における原型プロペラ、翼端小翼付きプロペラの後流にみられる翼端渦の様子である。キャビテーション数はそれぞれ $\sigma_N=4.11$, $\sigma_N=3.33$ である。翼端渦に関しては原型プロペラからは強い TVC が生じているのに対し、翼端小翼付きプロペラからは細く弱い TVC を生じている。なお後者ではクラウド状キャビテーションを放出しているが、これは小翼翼根部から生じているものである。翼端小翼付きプロペラの TVC が原型プロペラに比べ小さいことは前報の流れの可視化の結果とよく一致している。

2.2 キャビテーション面積、推力、トルク、効率に関する影響

Fig. 12 は Table 2 に示す条件での前進常数 J ベースでシートキャビテーション発生領域の大きさを示したものであるが、翼端小翼付きプロペラにおける TVC の初生は原型プロペラに比較して大きなキャビテーション数で起こっており、早く現われることを示している。しかし、シートキャビテーションの成長においては、同じ面積のシートで比較すると原型プロペラのキャビテーション数の方が高い。これは原型プロペラの方がシートキャビテーションの成長が早いことを示している。原型プロペラではシートキャビテーションが翼端から徐々に広が

Fig. 12 Comparison of cavitation region based on advance coefficient

Fig. 13 Comparison of cavitation region based on K_T/J^2

るのに対して、翼端小翼付きプロペラにおいてはシートキャビテーションは小翼翼根部でクラウド状キャビテーションに変化し、シートキャビテーションの成長を押えているように見える。しかしながら船用プロペラにおいては、このようなクラウド状キャビテーションは好ましくなく、安定なシートキャビテーションの発達の方が良いと言える。

TVC の初生に関しては製作誤作により後縁側翼端小翼は $1.01R$ の外縁であること、また翼端小翼の前縁半径がほとんどナイフエッジ状であること等の理由により、原型プロペラより初生が早かったものと思われる。

また Fig. 13 はキャビテーション発生領域の大きさを K_T/J^2 ベースで示したものであるが、上記と同様の傾向がみられる。

Fig. 14, 15 は Table 2 に示す条件でのキャビテーション発達に伴う推力係数、トルク係数の変化をみたものであるが、原型プロペラはキャビテーションが成長するにつれて一時、推力、トルクが増加してから break down する傾向を示している。一方、翼端小翼付きプロペラは徐々に減少している。これはシートキャビテーションの発達による有効翼型の変化からの性能の違いを示したものと考えられ、翼端小翼付きプロペラにおいては翼端付近のシートキャビテーションが小さく、これによる有効翼型の変化が少ないことにより翼に働く揚力、抗力ともに影響が少ないためであると思われる。

Fig. 16 は Table 2 に示す条件におけるキャビテーションの発達状態に伴う効率の変化を示したものである。 $J=0.4$ では約 5.1%, $J=0.5$ では約 2.5%, $J=0.6$ では約 0.96% 翼端小翼付きプロペラの効率が良いことを示している。

Fig. 17 は Table 1 に示す条件での K_T/J^2 ベースにおける効率曲線の $\sigma_N=\text{atm}(12) \sim 3.2$ までのキャビテーション

Fig. 14 Comparison of K_T in cavitating condition Fig. 15 Comparison of K_Q in cavitating condition Fig. 16 Comparison of η in cavitating condition

ン数の違いによる変化を示すが、翼端小翼付きプロペラがいずれのキャビテーション数においても原型プロペラを上回り、たとえば $K_T/J^2=0.6$ で対原型プロペラ比較で 3.0% の効率上昇がある。

これらのことから、キャビテーション発生時における性能変化はほぼ原型プロペラ程度であることが分かつ

Fig. 17 Comparison of η based on K_T/J^2 in the same cavitating condition

Fig. 18 Experimental apparatus of fluctuating pressure measurement

た。

2.3 変動圧力計測

試験装置の配置を Fig. 18 に示す。チップクリアランス $0.067 D$ (20mm) の位置で長 1,000mm × 幅 500mm × 厚 40mm のアクリル平板を水平に設けた。この板にはチップ直上を中心に $0.083 D$ (25mm) 間隔で 5 個の歪ゲージ式圧力変換器 (周波数応答 2kHz, 最大計測圧力 $\pm 1 \text{ kgf/cm}^2$) を取り付けしている。

変動圧力波形の一例として、 $J=0.5$ のプロペラ直上における計測波形を Figs. 19~20 に示す。その a は原型プロペラ、b は翼端小翼付きプロペラのものである。Fig. 19 は 大気開放状態におけるもので、基本波形は翼端小翼付きプロペラには二つのピークがあり、翼端小翼の影響であることが分かる。Fig. 20 はキャビテーションが発達した状態であるが、これらの基本波形にキャ

a. Original Propeller

b. Bladelet Propeller

Fig. 19 Examples of measured pressure fluctuations in atmospheric pressure condition ($J=0.5$)

a. Original Propeller

b. Bladelet Propeller

Fig. 20 Examples of measured pressure fluctuations in $\sigma_N=2$ ($J=0.5$)

ビテーションによる高周波が加わり、翼端小翼付きプロペラには小翼の影響であった二つのピークは消えてしまい、キャビテーション発達状態では小翼の変動圧力への影響はなくなる。これから翼端小翼付きプロペラは基本波形を大きく変化させるものではないと言える。

これらの変動圧力波形をスペクトルアナライザーを用いて周波数分析すると Fig. 21, 22 となる。Blade frequency 成分 (33.75 Hz) を基本周波数とする調和成分に分解されることが示されている。小翼による圧力波形は位相がずれているだけであるため周波数解析結果には現われていない。キャビテーションが発生すると連続スペクトル状の高周波成分が増加していることが分かる。

Fig. 23 は縦軸にこれらの変動圧力の Blade frequency 1 次成分を無次元化 ($\Delta P / \rho n^2 D^2$) したもので、横軸はキャビテーション数で、前進常数ごとにまとめたものである。両プロペラにおいて前進常数が低いほど、変動圧力が高いことを示している。またキャビテーション数が小

さくなるに従って変動圧力が増加する。しかしながらキャビテーションが発達しても原型プロペラと翼端小翼付きプロペラの差はあまり変わらない。同一の σ_N ではいずれの前進常数においても変動圧力は翼端小翼付きプロ

a. Original Propeller

b. Bladelet Propeller

Fig. 21 Power spectrum of pressure in atmospheric pressure condition ($J=0.5$)

a. Original Propeller

b. Bladelet Propeller

Fig. 22 Power spectrum of pressure in $\sigma_N=2$ ($J=0.5$)

Fig. 23 Comparison of blade frequency amplitude of fluctuating pressure based on σ_N

Fig. 24 Longitudinal distribution of blade frequency amplitude of fluctuating pressure

Fig. 25 Transverse distribution of blade frequency amplitude of fluctuating pressure

ペラの方が、10～20%減少している。この理由として翼厚変化に相当するシートキャビテーションの発達の相異よりも (Fig. 10, 11) から TVC の大きさに依存するものと考えられる。

Fig. 24 は $\sigma_N=3.0$ で翼端に翼面積 10% 程度のシートキャビテーションの覆っている状態における、プロペラ軸心直上の上流側から $-0.083D$, $0.0D$, $0.083D$ の位置における変動圧力の Blade frequency 成分を無次元化したものを前進常数別に分類したものである。 $0.0D$ は原型プロペラのチップ直上である。翼端小翼のチップは前縁、後縁小翼がそれぞれ $+0.05D$, $-0.05D$ の位置にある。いずれの前進常数においても翼端小翼付きプロペラの方が原型プロペラよりも変動圧力が 10～20% 小さい。翼端小翼チップが上流下流の計測点に近いにもかかわらず、平板に与える変動圧は小さいことによって翼端渦の強さが TVC の可視化から類推されたようになり小さいことが分かる。Fig. 25 は同様に $\sigma_N=3.0$ におけるプロペラ回転面の両舷における変動圧力の Blade frequency 成分を無次元化したものを前進常数別に分類したものである。この場合も同様に、翼端小翼付きプロペラが原型プロペラよりも低い変動圧力をもたらすことが分かる。また均一流場のため左右ほぼ対称の分布を持っている。

これらの変動圧力の実験結果により、船尾伴流が均一な船に限り、翼端小翼付きプロペラは Surface force を減少し船尾振動の起振力を多少減少させることが推定される。なお、一般の不均一流場分布を持つ船においても同様な効果を期待できるであろう。

2.4 騒音計測

計測には B & K 8103 型ハイドロホンを用いた。計測位置は、プロペラ下流約 $0.5D$ にチップクリアランス $0.167D$ の位置とした。Fig. 26 は原型プロペラの大気開放状態と十分に発達したキャビテーション状態での騒

Fig. 26 Sound pressure level in non cavitating and cavitating flow

Fig. 27 Comparison of measured sound pressure level between bladelet and original propeller

Fig. 28 Comparison of Over All SPL based on advance coefficient

Fig. 29 Comparison of blade frequency fluctuating pressure/mean disc load

音計測解析結果で、1/3 オクターブバンドで解析を行ったものである。このような閉空間における騒音計測に際してはその音響特性を十分調査する必要がある。他の水槽中の計測例⁹⁾よりキャビテーションのようなホワイト

ノイズに対しては pure tone に比べ、閉空間内の場合による音圧レベルの変化が極めて小さいことによりキャビテーションノイズの計測において相対比較には差し支えないものとする。本計測は同時刻、同条件で実施されたことにより、暗騒音は同程度であった。測定機器の関係より 5kHz までしか解析していないが、1kHz 以上の高周波域で 20dB 程度上がっておりキャビテーションの発生状況を表わしている。Fig. 27 は $J=0.5$ ではほぼ同じキャビテーション数での騒音解析結果である。翼端小翼付きプロペラが原型プロペラよりもほぼ全域にわたって音圧が低くなっている様子が分かる。キャビテーション数によって、両プロペラの騒音の Over All Sound Pressure Level (O. A. SPL) を分類すると Fig. 28 のようになる。前進常数の低い場合ほど、音圧は大きく、キャビテーション数が小さくなるに従って増加することが分かる。原型プロペラと翼端小翼付きプロペラを比較すると、翼端小翼付きプロペラが平均 1~2dB 低く差は出ているものの、本図より O. A. SPL の改善を判断するのは困難である。

Fig. 29 はプロペラ変動圧力振幅を(推力/プロペラ全円面積)で無次元化し、プロペラ円平均荷重に対するプロペラ直上の変動圧力 (Fig. 23) の割合をみたものであるが、前進常数別にみると Fig. 28 の音圧とよく対応し、したがって、この周波数範囲の O. A. SPL は Blade frequency のプロペラ円平均荷重の変動圧力に対する割合に強い相関を持つようである。

Fig. 27 に示すように 0 kHz~5 kHz の周波数範囲で音圧が小翼付きの方が小さい理由は原型プロペラに比べ TVC の大きさが極端に小さいことに起因するものと思われるが、更に詳細な検証が必要であろう。

3 む す び

想定実船でのプロペラ作動点付近での翼端小翼によるキャビテーション性能、起振力発生の原因となる変動圧力に及ぼす影響、騒音を明らかにする一連の実験を行い、翼端小翼付き船用プロペラの流体力学的特性を解明した。

キャビテーション試験においては、単独試験性能とキャビテーションパターンの観察を行った。

その結果、チップボルテックスキャビテーションの初生は原型プロペラに比較すると発生が早い、同じ条件下におけるシートキャビテーションの面積は小さいことが示された。しかしながら流れの可視化によっても確認された後縁小翼翼根部の油膜の包絡線付近に翼根部を中心にクラウド状キャビテーションを生じ、小翼翼根部形状の問題点が明らかになった。またキャビテーション状態と非発生時との単独効率との関係はほぼ原型プロペラ

のそれと相似であり、単独効率に対するキャビテーション影響は MAU 型プロペラ程度であることを示した。またチップボルテックスキャビテーションの大きさから小翼付きプロペラの翼端渦はかなり小さいと推定され、前報の流れの可視化実験や流速分布計測の結果と同様、それによる誘導抵抗の減少が推測される。

プロペラ近くに置かれた平板に及ぼす変動圧力の計測により、非キャビテーション時の翼端小翼による二山の基本波形はキャビテーション状態になると、ほとんど消滅し原型プロペラと類似の波形となった。いずれの前進常数においても変動圧力は翼端小翼付きプロペラが低く 10~20% 減少することが分かった。この理由として非キャビテーション状態では小翼による弱い翼端渦から誘起される誘導速度により変動圧力が減少すること、またキャビテーション状態では TVC が原型プロペラに比べて極めて小さいことによるものと考えられる。

また騒音面においてはいずれの前進常数においても計測した周波数範囲に限れば、翼端小翼付きプロペラが数 dB 減少することが分かった。

謝 辞

終りに本研究の遂行に当たり、防衛大学校別所政利教授には貴重な御助言を賜った。今回の実験の実施に御尽力いただいた(株)三井造船昭島研究所の安部光弘氏、湯浅肇氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 伊藤真一郎, 田古里哲夫, 石井規夫, 井手敏治: 翼端小翼付きプロペラの研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第159号(1986).
- 2) 高橋通雄, 奥 正光: MAU 型プロペラのキャビテーション特性に関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第141号(1977).
- 3) 高橋通雄, 奥 正光: MAU 型プロペラのキャビテーション特性に関する研究(第2報), 日本造船学会論文集, 第143号(1978).
- 4) 高橋通雄, 奥 正光: MAU 型プロペラのキャビテーション特性に関する研究(第3報), 日本造船学会論文集, 第143号(1978).
- 5) 泉田泰弘: キャビテーションを考慮したプロペラ

設計法の研究, 日本造船学会論文集, 第155号(1984).

- 6) 外山 聰, 加藤洋治, 前田正二: 不等角プロペラの研究, 日本造船学会論文集, 第154号, p.86, 昭和58年11月.
- 7) 池畑光尚, 船木 洋: プロペラ上方における変動圧力分布の特性解析, 日本造船学会論文集, 第159号(1986).
- 8) 加藤洋治: キャビテーション, 棋書店, 1979, p.252~p.297.
- 9) Yuasa, H., Kamiirisa, H., Nojiri, T.: Study on the Characteristics of Propeller Cavitation and Its Noise, 16th UCB ONR Symposium.

付録 主翼から滑らかに接続をした翼端小翼付きプロペラについて

小翼と主翼との取付部から発生するクラウド状キャビテーションを改善するために、70°C で鋳造可能な合金センアロイを用いて No.59-7 翼端小翼付きプロペラチップを母型にし、ピッチ面投影面積の等しい滑らかな接続をした翼端小翼付きプロペラ (Fig. A) を製作し、キャビテーション試験を行った。合金の強度の関係で回転数を 10.21 rps に落としてキャビテーション試験を行った。製作上、小翼の翼厚がかなり厚く模型精度の悪いものであったため、期待したプロペラ単独性能、キャビテーション性能は得られず、後縁小翼から定常的にバブルキャビテーションが発生した。しかし従来の翼根部のクラウド状シートキャビテーションは発生しなかった。そこで Fig. B に参考までにキャビテーション観察の結果を示すにとどめる。

Fig. A Photograph of bladelet propeller attached small blades smoothly ($J=0.5$, $\sigma_N=3.63$)

Fig. B Cavitation pattern of bladelet propeller ($J=0.5$)