低速船用バックワードチップレーキプロペラの設計と模型実験

正員 山 崎 正三郎* 正員 岡 崎 全 伯*

Design and model tests of a backward tip rake propeller for a low speed ship

by Shosaburo Yamasaki, Member Akinori Okazaki, Member

Summary

The design of unconventional blade tips has been studied for many years to increase propeller efficiency. The forward tip rake propellers (FTRP) having the tip rake to the suction side are expected to provide the propeller efficiency gain, while the backward tip rake propellers (BTRP) having the tip rake to the pressure side are expected to reduce the pressure fluctuations.

In our previous study, BTRP was designed for a container ship and tested. Comparing with a standard propeller, the propeller open efficiency of BTRP was equivalent and the pressure fluctuations of BTRP decreased. But the risk of the cavitation erosion was confirmed around the trailing edge at $0.9R$ of BTRP.

In this paper, three types of propellers were designed for a low speed ship of which the pressure fluctuations (2nd blade frequency) was high; a standard propeller, a tip unloaded propeller (TULP) and a backward tip rake propeller. The new BTRP was designed such that the blade surface changing due to a rake was smoother than that of previous BTRP in order to avoid the cavitation erosion. The theoretical calculation showed that the load around the tip of new BTRP was reduced and the axial induced velocity decreased considerably. And as a result of model tests, it was confirmed that the propeller open efficiency of new BTRP was equivalent and the pressure fluctuations (2nd blade frequency) of new BTRP was reduced by about 51% comparing with a standard propeller without the risk of the cavitation erosion due to the new rake distribution.

1. 結 言

翼端に生じる渦（翼端渦）により誘導抗力が発生する。この誘導抗力を減らすために翼端に小翼を取付けて効率向上を図る試みがおこなわれた。航空機の主翼ではウィングレットと呼ばれて実用化されている。船用でもブレードレットプロペラ、CLT プロペラ等と呼ばれるプロペラが検討され、CLT プロペラは実用化されている。¹⁾

翼端に小翼を取付けると揚力が発生するが、同時にそれ自体が抵抗となる。また、製造面でもコストアップの要因となる。そこで、小翼と同様の効果をうる目的でプロペラの翼端付近に局所的にレーキをつけたプロペラ、すなわちチップレーキプロペラ（以下 TRP）が考案された。TRP はバック面方向に曲げたフォワードチップレーキプロペラ（以下 FTRP）とフェイス面方向に曲げたバックワードチップレーキプロペラ（以下 BTRP）に分けられ、ともに誘導抗力を減らす効果が期待される。Poul Andersen らは FTRP について理論設計、模型実験、実船実験等の系統的研究をおこない、

35,000DWT のプロダクトキャリアで 4%の省エネ効果を確認した。^{2)、3)} また、振動、キャビテーションについても従来プロペラより改善されて問題なかった。しかし、FTRP では従来プロペラと比較して翼先端部の荷重が増えるためにキャビテーション、船尾変動圧力が懸念される。上記研究においてもその設計過程において数多くの模型プロペラを設計して振動、キャビテーションの改善を図っている。一方、BTRP では逆に翼先端部の荷重が減るのでキャビテーション、船尾変動圧力の軽減が期待される。

これまでに著者らも、コンテナ船を対象に、BTRP を設計し、模型実験により性能面の特徴、キャビテーション消滅時の挙動ならびに船尾変動圧力を確認した。その結果、BTRP は高効率を維持したまま、船尾変動圧力軽減に有効であること、しかし $0.9R$ (R : プロペラ半径) 付近の後縁部でキャビテーションエロージョンの危険性が高いことが確認された。⁴⁾

本研究では、船尾変動圧力の 2 次翼振動数成分が大きい大型低速船を対象に、基準プロペラ、翼先端の荷重を減少させたチップアンロードプロペラ（以下 TULP）と BTRP を設計し、理論計算により性能について調査した。次に模型を製作して、プロペラ単独性能試験とキャビテーション試験を行い、性能面の特徴、船尾変動圧力軽減効果およびキャビテーションエロージョン回避の可能性について調査したので、その結果を報告する。

* ナカシマプロペラ株式会社

2. プロペラの設計と理論計算

2.1 プロペラ設計

大型低速船を対象にプロペラ揚力面理論計算⁵⁾を用いて、基準プロペラ、TULP、BTRPの3種のプロペラを設計した。プロペラ設計条件を Table 1、プロペラ主要目を Table 2 に示す。また模型プロペラの写真を Fig. 1a、1b、1c に、プロペラ側面投影図を Fig. 2a、2b、2c に示す。

プロペラ番号をそれぞれ (A)、(B)、(C) として、設計の概要を下記する。

PNO.(A) : 比較の基準となるプロペラ。5翼、直径 6.3m、展開面積比 0.52、スキュー 25° 、有効レーキ⁶⁾ 2° としている。

PNO.(B) : 船尾変動圧力全体を減らすことで2次翼振動数成分の軽減を期待して設計した TULP。PNO.(A) をベースとして翼先端側の翼幅を広くし、ピッチを遅減している。(0.9R において PNO.(A) に対してピッチ 7%減、翼幅 7%増、キャンバー25%減) さらに設計条件を満たすようにピッチを修正している。

PNO.(C) : BTRP とした時、キャビテーションエロージョンを回避するために PNO.(A) のレーキを幾何レーキ $(-1)^\circ$ に変更し、さらに翼先端付近のレーキを 0.7R から後方に 5° 曲げて、翼面変化を滑らかにした BTRP。それ以外の形状は PNO.(A) と同じとしたため、設計条件は満たしていない。

Table 1 Propeller design condition

BHP	(kW)	8,500
RPM	(rpm)	100
RPM margin	(%)	4.0
Vs	(knot)	15
1-ws		0.670
Immersion	(m)	8.5

Table 2 Propeller main dimension

PNO.	(A)	(B)	(C)
Type	—	TULP	BTRP
Number of Blades	5		
Diameter (m)	6.3		
Expanded Area Ratio	0.52		
Pitch Ratio (0.7R)	0.777	0.781	0.777
Skew Angle (deg.)	25

Fig. 1a PNO.(A)

Fig. 1b PNO.(B)

Fig. 1c PNO.(C)

Fig. 1 Propellers designed for a low speed ship

Fig. 2a PNO.(A)

Fig. 2b PNO.(B)

Fig. 2c PNO.(C)

Fig. 2 Side view (projection)

2.2 循環分布とプロペラ誘導速度

プロペラ性能の違いを調べるために、プロペラ揚力面理論計算により、プロペラ設計点 ($J=0.474$) における一様流中の性能計算を行った。計算結果から無次元循環分布を Fig. 3 に、プロペラ誘導速度 (半径方向分布) の軸方向成分 w_x 、半径方向成分 w_r 、回転方向成分 w_θ をプロペラ前進速度 va で無次元化したものをそれぞれ、Fig. 4a、4b、4c に示す。プロペラ誘導速度 (半径方向分布) は、循環分布密度を用いて揚力面上の誘導速度を翼弦方向に荷重平均したものである。

Fig. 3 から、PNO.(A) と比較して PNO.(B)、(C) とともに 0.8R 付近から翼先端にかけて循環が小さくなり、0.9R 付近で約 10%減少している。PNO.(B) については意図したとおりにチップアンロードの循環分布となっている。従来、プロペラ性能へのレーキの影響はほとんどないと言われていたが、PNO.(C) もチップアンロードとなっている。

PNO.(B)、(C) とともにチップアンロードとなっているが、揚力面上のプロペラ誘導速度はかなり異なる。Fig. 4a、4b、4c から、PNO.(A) と比較して PNO.(B)、(C) は循環分布と同

様に $0.8R$ より先端側で w_x が小さくなり、PNO.(C)は $0.9R$ 付近で約 30%減少している。また PNO.(C)の w_R は縮流(マイナス方向)が約 50%強くなっている。なお、 w_θ については大きな差は見られない。

Fig. 3 Circulation distribution

Fig. 4a Induced velocity (axial)

Fig. 4b Induced velocity (radial)

Fig. 4c Induced velocity (circumferential)

3. プロペラ模型試験

3.1 プロペラ単独性能試験

PNO.(A)、(B)、(C)の模型プロペラ(直径 250mm)を製作して(株)明石船型研究所の曳航水槽にてプロペラ単独性能試験を実施した。プロペラ試験回転数は Kempf のレイノルズ数が 6×10^5 となるように設定した。プロペラ設計点でのプロペラ単独性能試験結果を Table 3、揚力面理論計算結果を Table 4 に示す。

Table 3 から実験結果を PNO.(A)と比較すると、PNO.(B)、(C)ともに $J=0.474$ において K_T 、 K_Q が約 5~6%小さい。また $K_T/J^2=0.885$ での η_o はほとんど差がない。

Table 4 から、計算結果を PNO.(A)と比較すると、PNO.(B)は $J=0.474$ において η_o が約 1%低下している。これは翼先端側の翼幅を増やし、キャンバーを減らしたためと考えられる。なお、PNO.(B)では K_Q が一致するようにピッチを決定している。

PNO.(C)については実験結果と同様に $J=0.474$ で K_T 、 K_Q が 2~3%減少し、 $K_T/J^2=0.885$ で η_o はほとんど差がない。

実験結果と計算結果を比較すると、PNO.(B)は K_Q の実験値が PNO.(A)より小さくなり、 $K_T/J^2=0.885$ での η_o が計算では、PNO.(A)を約 1%下回っていたが、実験ではほとんど差がない結果となった。

PNO.(C)は PNO.(A)と比較したときの、実験値と計算値の傾向が良く一致していること、バックワードチップレーキを採用しても高効率を維持できることが確認された。

Table 3 Propeller open characteristics at design point (Experiment)

PNO.	(A)	(B)	(C)
J	0.474		
K_T	0.200	0.190	0.191
$10K_Q$	0.259	0.243	0.244
η_o	0.583	0.591	0.591
PNO.	(A)	(B)	(C)
K_T/J^2	0.885		
J	0.474	0.467	0.467
K_T	0.200	0.194	0.194
$10K_Q$	0.258	0.246	0.247
η_o	0.582	0.584	0.584

Table 4 Propeller open characteristics at design point (Calculation)

PNO.	(A)	(B)	(C)
J	0.474		
K_T	0.199	0.197	0.195
$10K_Q$	0.252	0.252	0.245
η_o	0.595	0.591	0.601
PNO.	(A)	(B)	(C)
K_T/J^2	0.885		
J	0.474	0.473	0.472
K_T	0.199	0.197	0.196
$10K_Q$	0.252	0.252	0.246
η_o	0.595	0.589	0.597

3.2 キャビテーション試験

3種の模型プロペラを使用して(財)日本造船技術センターのキャビテーションタンクで伴流中のキャビテーション観察および船尾変動圧力計測を行った。

船尾変動圧力はプロペラ直上に挿入したアクリル板に埋め込んだ圧力センサにより計測した。試験状態は Full/MCR 状態($K_T=0.203$, $\sigma_n=2.44$)とし、キャビテーション数はトップポジションの $0.7R$ 位置で設定した。

3.2.1 キャビテーション観察

PNO.(A)、(B)、(C)のキャビテーション最大発生時と消滅時の写真を Fig. 5a、5b、5c に示す。いずれのプロペラも、回転角 30° 付近でキャビテーション発生量が最大となり、回転角 $50\sim 60^\circ$ 付近で翼面上のキャビテーションが消滅している。またキャビテーションの発生から消滅までの状況は、いずれのプロペラともに良く似ている。発生量を比較すると $PNO.(A) > (B) > (C)$ の順で減少しており BTRP が最も少ない結果となった。

以前のコンテナ船用 BTRP の研究で見られた、 $0.9R$ 翼後縁付近のキャビテーションエロージョンの兆候は、今回は見られなかった。これはキャビテーション発生量がもともと少ないこと、また PNO.(C)の $0.9R$ 、翼後縁部の曲面変化を滑らかにしたことなどによるものと考えられる。

3.2.2 船尾変動圧力計測

船尾変動圧力の計測結果を Table 5 と Fig. 6a、6b、7 に示している。表中の K_{p1} 、 K_{p2} 、 K_{p3} 、 K_{p-p} は船尾変動圧力振幅の1次、2次、3次翼振動数成分および全振幅を $\rho n^2 D^2$ (ρ : 海水密度、 n : プロペラ回転数、 D : プロペラ直径)で無次元化したものであり、Table 5 はプロペラ直上付近における各翼振動数の振幅の最大値を示し、Fig. 6a、6b は最も振幅の

Fig. 5a PNO.(A) (30°)

(60°)

Fig. 5b PNO.(B) (30°)

(60°)

Fig. 5c PNO.(C) (30°)

(50°)

大きな2次翼振動数成分($100 K_{p2}$)の前後方向と左右舷方向の振幅の分布を、Fig. 7 はプロペラ1回転中の変動圧力波形を示している。

Table 5 より、1次と比較して2次翼振動数成分が大きい。プロペラ直上付近の2次翼振動数成分の最大振幅を比較すると、PNO.(A)と比較して、PNO.(B)は約23%減、PNO.(C)は約51%減となっており、とくにBTRPの軽減効果が大きいことがわかる。Fig. 6a、6b よりプロペラ直上点以外の位置でも振幅の大きさの順番は $PNO.(A) > (B) > (C)$ と Table 5 と同様の結果となり、分布形状もおおむね同じ傾向を示している。なお、もともと小さい1次と3次翼振動数成分については大きな差は見られなかった。

また3種のプロペラの変動圧力波形を比較すると、 $PNO.(A) > (B) > (C)$ の順で波形の崩れ(および全振幅)が小さくなり、翼数と同じ5つのピークが目立つ波形となっている。その結果、前述の2次翼振動数成分が減少したものと考えられる。

Table 5 Amplitude of fluctuating pressure

PNO.	(A)	(B)	(C)
100 K_{p1}	0.82	0.97	0.90
100 K_{p2}	1.80	1.39	0.89
100 K_{p3}	0.64	0.57	0.62
100 K_{p-p}	5.84	5.67	5.03

Fig. 6a Longitudinal distribution of fluctuating pressure amplitude (2nd blade frequency)

Fig. 6b Transverse distribution of fluctuating pressure amplitude (2nd blade frequency)

Fig. 7 Reinforced signals of fluctuating pressure during one revolution

4. 結 言

船尾変動圧力の 2 次翼振動数成分を軽減すべく、大型低速船に対してチップアンロードプロペラ (TULP : PNO.(B)) とバックワードチップレーキプロペラ (BTRP : PNO.(C)) を設計し、基準プロペラ (PNO.(A)) と比較理論計算、比較模型実験を行い、次のことを確認した。

- (1) プロペラ揚力面理論計算から、意図的にチップアンロードとした TULP と同様に、バックワードチップレーキを適用した BTRP もチップアンロードとなること、さらに BTRP では軸方向誘導速度が大きく減少する結果が得られた。
- (2) プロペラ単独性能試験では、TULP と BTRP のスラスト係数、トルク係数は基準プロペラと比較してプロペラ設計点 ($J=0.474$) で約 5~6% 小さく、プロペラ単独効率はプロペラ設計点 ($K_T/J^2=0.885$) でほとんど変わらない結果であった。
- (3) 伴流中のキャビテーション試験から基準プロペラと TULP、BTRP のキャビテーションパターンは良く似ており、基準プロペラ>TULP>BTRP の順で発生量は減少し、BTRP が最も少ない。以前の研究で問題となった BTRP の 0.9R 翼後縁付近のキャビテーションエロージョンの兆候も見られなかった。
- (4) 基準プロペラ>TULP>BTRP の順で船尾変動圧力の波形の崩れ (および全振幅) が小さくなり、最も圧力振幅が大きい船尾変動圧力の 2 次翼振動数成分が TULP では約 23% 減、BTRP では約 51% 減となった。なお、比較的振幅の小さい 1 次と 3 次成分については大きく変わらなかった。

以上の結果から BTRP は低速船についても高効率を維持したまま、船尾変動圧力の 2 次翼振動数成分を軽減できることが確認できた。また 0.9R 翼後縁部の曲面変化を滑らかにするなどのチップレーキ分布を工夫することにより、キャビテーションエロージョンの問題も回避できることができ、BTRP の実用化に向けて前進することができた。なお引き続き、実用化に向けて BTRP による船尾変動圧力軽減の原因調査、軽減量推定法の開発、BTRP 単独性能の推定精度向上などを進めていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 伊藤真一郎：プロペラまわりの流れの制御，船体まわりの流れと流体力 (第 3 回推進性能研究委員会シンポジウ

- ム), 日本造船学会, (1989), pp.321-349.
- 2) Andersen, P. et. al, : Development of a Marine Propeller With Nonplanar Lifting Surfaces, Marine Technology, Vol.42, No.3, (2005).
 - 3) Andersen, P., Andersen, S.V., Bodger, L., Friesch, J., Kappel, J.J., : Cavitation Consideration in the Design of Kappel Propellers, Proc. of NCT'50, Int. Conference on Propeller Cavitation, (2000), pp.159-174.
 - 4) 山崎正三郎, 岡崎全伯: ストレートリーディングエッジプロペラとチップレーキプロペラのキャビテーション試験, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号, (2005), pp.271-277.
 - 5) 山崎正三郎: 非線形定常プロペラ揚力面の数値解法とその応用例, 西部造船会会報, 第62号, (1981), pp.47-68.
 - 6) 山崎正三郎: 第1章 設計図表と理論計算を用いたプロペラ設計, 船用プロペラに関するシンポジウム(第5回), 日本船舶海洋工学会, 東京, (2005, 12), pp.1-32.
-