半没水プロペラに関する実験的研究

正員 岡田 善久* 吉岡 勝*
藤田 拓未** 渡辺 和裕**

Experimental Study on Surface Piercing Propeller

by Yoshihisa Okada, *Member*, Masaru Yoshioka
Takumi Fujita, Kazuhiro Watanabe

Summary

For this paper, the authors designed three types of SURFACE PIERCING PROPELLERS. Each propeller was constructed with a different type of blade section, one wedge-shaped, one crescent-shaped, and one with an improved wedge shape. We checked the propeller's performance around the planned ship speed and also the performance in the astern direction. In order to study the possibility for improvement in lower-medium speed performance, additional model tests were conducted with the submersion ratio, which strongly influences lower-medium performance, changed. Lastly, the authors verified that in an actual vessel, where the submersion ratio can be adjusted by changing the propeller shaft's inclination angle, the performance of the SURFACE PIERCING PROPELLER was improved.

1. 結 言

近年、船舶の高速化が著しく、それに対応した高速艇用プロペラとして、スーパーキャビテーション（以下、SC）プロペラと半没水プロペラがある。これらの高速艇用プロペラは、作動時にキャビテーションの有害な影響が無いという利点がある。特に、半没水プロペラはブラケットや推進軸の抵抗がSCプロペラ等の全没水プロペラに比べて低減できるため、その高速性能は高く評価されている。

しかし、SCプロペラの研究^{1) 2)}は数多く行われているものの半没水プロペラに関する研究事例³⁾は少ない。さらに、僅かな条件の違いでも半没水プロペラの性能は変化するため、精度の高い設計は困難とされている。また、半没水プロペラの翼型には、SC翼型として代表的な楔翼型や三日月翼

型などが採用されているが、NACA翼型などを有する全没水の高速艇用プロペラと比較して、低中速域における加速性能と後進性能の悪さが指摘されている。この様な理由により、高速艇全般に渡って半没水プロペラが採用されるという状況にはない。

本研究では、3種類のSC翼型を採用した模型プロペラを用いて計画速力付近の性能試験と後進性能試験を行い、翼型の相違による半没水プロペラの性能影響を調査した。次に、低中速性能に大きく影響すると思われるプロペラ没水率を変更した模型試験を行い、加速性能向上の可能性について検討した。最後に、プロペラ軸傾斜角の調整機構を備えた高速艇を用いて実艇試験を行い、半没水プロペラの加速性能の向上を確認した。

2. 翼型とプロペラ性能

SC翼型として代表的な2種類の翼型と性能向上を目的に形状を変更した翼型の計3種類の翼型を採用したNo.1～3の模型プロペラを用いて、前後進の模型試験を行い、半没水プロペラに対する各翼型の特性を調査した。

* ナカシマプロペラ（株）

** 新潟コンバーター（株）

2.1 供試プロペラと試験方法

供試プロペラの翼数は5翼とした。No.1の翼型は後縁の厚い楔翼型、No.2は楔翼型の後縁厚みを薄くした三日月翼型を採用した。No.1及び2のフェイスラインにおけるキャンパー最大位置は前縁から翼弦長の70%位置とした。

また、競艇用プロペラの研究において、翼型の後縁付近にカップを付ける等、フェイスラインにおけるキャンパーの最大位置を後縁に近づけると、プロペラのスラスト、トルクが増加し高効率の範囲が広がるものがある^{1) 5)}。No.3では高速域での効率の改善を狙い、No.1の翼型を基にキャンパー最大位置を前縁から翼弦長の85%位置とした。また、後進性能の向上を目的に翼後縁端を尖らせた。

試験装置に装着された模型プロペラをFig.1、各プロペラの0.7Rの翼型をFig.2、主要目をTable1に示す。本研究で用いた模型プロペラは全て右回転である。

前進時のプロペラ単独性能は(財)日本造船技術センターの自由表面付き減圧回流水槽 (Fig.1) にて行った。本装置は水槽内の気圧を調整することにより、キャビテーションと空気吸い込み現象の影響を考慮した試験を行うことができる。プロペラ特性の計測は6分力計測装置を傾斜させることにより、プロペラ軸傾斜角を設定して行った。本研究では、プロペラ特性は軸傾斜角を考慮した船の

Fig.1 Model propeller mounted on measurement equipment

Fig.2 Blade sections of model propellers

Table 1 Model propeller's principal particulars

Number of blades	5
Diameter	250 mm
Pitch ratio (0.7R)	1.37
Exp. area ratio	0.78
Boss ratio	0.15

推進方向の特性にて表すものとする。また、ウェーバー数 Wn の影響を考慮してプロペラ試験回転数を設定した。

模型試験の作動条件は半没水状態での高速航走を仮定して、没水率 I/D は43%、軸傾斜角が 8° 、キャビテーション数 σ_n を0.4とした。尚、後進性能は同センター曳航水槽にて没水率110%として単独性能試験を行った。

2.2 試験結果

(1) 計画速力付近の性能

没水率43%におけるNo.1~3の前進時の模型試験結果をFig.3に示す。各プロペラの最高効率はNo.1は0.664、No.2は0.668、No.3は0.665であり、ほとんど差は見られなかった。

後縁厚みが異なるNo.1とNo.2の比較では、三日月翼型のNo.2の方がNo.1よりも、 $J=0.9$ 付近より大きい範囲で若干 K_T 、 K_Q が大きくなったが、全体的にはNo.1と2では大きな差は見られなかった。

Fig.3 Propeller characteristics near planned ship speed

No.3はNo.1, 2よりも K_T , K_Q 共に大きくなった。No.2と比較してNo.3のプロペラ単独効率 η_o は、 $J=1.0$ では約2.6%上昇している。No.3は $J=0.9\sim 1.0$ 付近においては、No.1, 2よりも効率が高くなり、効率の高い範囲が広がる結果となった。

今回の試験では、翼型のフェイスラインにおけるキャンパー最大位置を後縁に近づけることにより、半没水プロペラにおいても競艇用プロペラの研究と同様の高効率の範囲が広がる傾向となった。しかしながら、本試験結果の効率差は僅かであり、半没水プロペラの試験精度を考慮すれば、計画速力付近の性能に関しては、さらに詳細な調査が必要であるものと思われる。

$J = 0.7$

$J = 0.9$

$J = 1.1$

Fig.4 Comparison of spray patterns (No.3)

Fig.4はNo.3の $J=0.7, 0.9, 1.1$ における試験を上から見た写真である。 $J=0.7$ では白濁した後流が発生している。 J が大きくなるに従いスプレーが安定し、 $J=1.1$ 以上は同じようなスプレーの形状に落ち着いた。この傾向は翼型に関係なく、No.1, 2においても同様に見ることができた。

(2) 後進性能試験

次に、No.1～3の後進性能の試験結果をFig.5に示す。楔翼型のNo.1と三日月翼型のNo.2の比較では、No.2の方が K_Q が小さく、 K_T が大きくなっている。このため、後進時の効率は後縁の薄いNo.2の方が良くなっている。後進性能の向上を目的に後縁部を尖らせたNo.3については、 K_T はNo.2とほぼ同等であるが、 K_Q はNo.1, 2よりも大幅に減少し、最も効率が低いプロペラとなった。

No.3はNo.1と同等以上の前進性能であったことから、後縁の厚いSC翼型についても、後縁形状を変更すれば前進性能を損なうことなく後進性能が向上し、三日月翼型よりも良くなることがわかった。

Fig.5 Propeller characteristics of astern condition

3. 没水率とプロペラ性能

半没水プロペラの特性は没水率に大きく影響される。低中速時に半没水プロペラの K_T が大きくなれば加速性能が向上するものと考えられる。ここでは、低中速域を想定した J の低い範囲における没水率によるプロペラ特性への影響を調査する目的で、半没水プロペラの没水率変更試験を行った。

3.1 供試プロペラと試験方法

本試験では、試験装置の許容値の関係で2章で用いたNo.1のピッチ比を1.04 (0.7R) に減少させたプロペラを用いて水槽試験を行った。

試験は2章の性能試験と同様の自由表面付き減圧回流水槽にて行った。ここでは、没水率は43%, 70%, 110%に設定して試験を行った。没水率43%の条件は2章と同様であるが、没水率70%では軸傾斜角は 12° 、キャビテーション数を1.0、没水率110%では軸傾斜角は 16° 、キャビテーション数を3.0とした。

3.2 試験結果

プロペラ没水率の変更試験結果をFig.6に示す。没水率43%と比較して、没水率70%の K_T , K_Q は共に約1.3倍大きくになっている。

没水率110%では特にJの低い範囲において K_T , K_Q が大幅に増加し、43%と比較して $J=0.15$ では K_T は約5.4倍にもなっている。 $J=0.15 \sim 0.4$ においては43%に対する増加量は K_Q よりも K_T の方が多く、その結果、没水率110%では効率は高くなっている。

各没水率における $J=0.15$ の時の左側面から見た試験の写真をFig.7に示す。没水率43%と70%では水面上に飛び出した翼が空気を掻き込み、水中の大きな気泡の中で翼が作動しているのがわかる。それに対して、没水率110%では空気吸い込みを起こしてはいるものの、プロペラ全体が水中で作動しているため、半没水状態のように翼が空気を掻き込むことはなく、激しい空気吸い込みにはなっていない。

Fig.6 Propeller characteristics with I/D changed

I/D=43%

I/D=70%

I/D=110%

Fig.7 Comparison of air draw ($J=0.15$)

このように、没水率43%と70%の半没水状態と没水率110%の全没水状態では、大きく現象が異なり、Jの低い範囲で K_T を大きくするにはプロペラを全没水状態で作動させることが効果的である。つまり、加速時において低中速の範囲では没水率が大きくなるようにプロペラ軸傾斜角を調整すれば加速性能が向上する可能性があることがわかった。

4. 実艇試験

3章の模型試験結果から、加速時にプロペラ没水率を大きくすれば、低中速域における加速性能が向上する可能性があることがわかった。本試験では、軸傾斜角可変機構を備えた高速艇を用いて、没水率を変化させた場合の加速性能の調査を行った。

4.1 供試プロペラと試験方法

供試プロペラは、模型試験で用いたNo.1プロペラをベースに実船試験用プロペラを設計した。供試船はTWIN DISC社のアーネソン・サーフェス・ドライブ（以下、A.S.D.）を搭載したスポーツ・フィッシャーを使用した。Table2とTable3にプロペラの主要目と船体の主要目、Fig.8とFig.9に試験に用いた船とA.S.D.の写真を示す。

Table 2 Principal particulars of actual propeller

Number of blades	5
Diameter	800 mm
Pitch ratio (0.7R)	1.4
Exp. area ratio	0.76
Boss ratio	0.15
Material	CAC703

Table 3 Vessel's principal particulars

Overall length	19.5 m
Width	4.5 m
Depth	0.84 m
Engine horsepower	846 kW × 2
Engine/prop. shaft speed	2400 /1600 rpm

Fig.8 Sportfisherman used for experiment

Fig.9 Arneson surface drive

A.S.D.は軸傾斜角を操作してプロペラの没水率を調整できる構造になっている。本装置は世界各国でレジャーボート、バトロールボート等に多く採用されており特に中小型高速艇に適する推進装置として評価されている。

実船での加速試験では、A.S.D.の軸傾斜角を5°と9°及び13.5°に設定し、プロペラ没水率を変更した。本試験におけるA.S.D.の軸傾斜角は船体のベースラインを0°として表している。3種類の軸傾斜角において、プロペラの回転数をおよそ1200rpmを保つようにスロットルを操作しながら、アイドリング状態（5kt）から一定船速に到達するまでの加速試験を行った。計測項目は、軸傾斜角、船速（対地）、プロペラ回転数、船体トリム角である。軸傾斜角は、A.S.D.の軸傾斜角をトリムインジケータのメータより取り込んだ。

4.2 試験結果

加速試験の結果をFig.10に示す。軸傾斜角が5°と9°では20ktまではほとんど差はないが、20kt以降の船速において、軸傾斜角が下方である9°の方が加速が良くなる傾向が得られた。さらに、25kt通過時の軸傾斜角が13.5°と5°の時のタイム差は23secにも達し、軸傾斜角が下方の方が加速時間が短くなる傾向が明確になった。

また、軸傾斜角を調整した時の最高船速の計測結果をFig.11に示す。軸傾斜角9°での最高船速は44.0ktであったのに対し、軸傾斜角3.5°において最高46.5ktの船速が得られた。ここでは軸傾斜角を上方にすることにより、最高船速が高くなる傾向が得られた。

Fig.10 Comparison of acceleration performance

Fig.11 Comparison of top speed

5. 結 論

以上の研究の結果、次のことがわかった。

- 1) 没水率43%における半没水プロペラの単独性能試験より、楔翼型と三日月翼型の半没水プロペラの性能は、計画速力付近では大きな差は見られなかった。また、楔翼型ではキャンバー最大位置を後縁に近づけた場合、 K_T 、 K_Q が大きくなり、効率の高い範囲が僅かに広がった。
- 2) 半没水プロペラの後進性能試験より、楔翼型よりも三日月翼型の方が後進性能が良いことがわかった。楔翼型は後縁形状を変更することにより、三日月翼型よりも後進性能が改善された。
- 3) 半没水プロペラの没水率変更試験より、没水率を変化させた場合の K_T 、 K_Q の変化量を把握できた。特に、全没水状態である没水率110%では、半没水状態と比較して空気吸い込みが減少するため、 $J=0.15$ では没水率43%の K_T に対して約5.4倍に増加した。
- 4) プロペラ軸傾斜角の可変装置を装備した高速艇を用いた実船試験より、25ktまでの加速試験において、軸傾斜角を下方に設定した方が加速時間が短縮されることがわかった。また、最高船速も軸傾斜角の調整により上昇した。

今回の研究により、翼型の違いによる半没水プロペラの性能への影響が調査できた。半没水プロペラの欠点であった後進性能と低中速性能は、翼後縁端部の形状の変更と、プロペラ没水率の変更により改善できることがわかった。但し、計画速力付近の性能に関しては効率差は僅かであり、詳細な調査が必要である。

また、A.S.D.のような軸傾斜角調整機構は、計画船速域の高速性能と低中速域における加速性能において最適な軸傾斜角に調整できるため、半没水プロペラには有効な手段である。

記 号 表

- D: プロペラ直径
 H: 表面張力
 I: 水面からプロペラ浸水部の下端までの深さ
 I/D: プロペラ没水率 [%] ($=I/D \times 100$)
 J: プロペラ前進率 ($=V_A/nD$)
 K_Q : トルク係数 ($=Q/\rho n^2 D^5$)
 K_T : スラスト係数 ($=T/\rho n^2 D^4$)
 n: プロペラ回転数 [rpm]
 P_A : タンク内気圧
 P_v : 水の蒸気圧
 Q: プロペラトルク
 T: 船体の推進方向のプロペラスラスト
 V_A : プロペラの前進速度
 W_n : ウェーバー数 ($=nD/(H/\rho D)^{1/2}$)
 η_o : プロペラ単独効率 ($=J \cdot K_T / 2\pi \cdot K_Q$)
 ρ : 水の密度
 σ_n : プロペラ回転数ベースのキャピテーション数
 ($= (P_A - P_v) / (1/2 \rho (nD)^2)$)

謝 辞

本研究の一部は競艇公益資金により(財)日本財団の援助を受けて(財)シップ・アンド・オーシャン財団が行う技術開発資金による補助金を賜り実施したものであります。実船試験につきましては、(有)マリクラフト風の子の関係各位に多大なご協力を頂きました。このご好意に対し厚くお礼申し上げます。

貴重な意見を頂いた(財)日本造船技術センターの佐藤和範流体技術部長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 右近良孝, 工藤達郎, 黒部雄三, 星野徹二: スーパー・キャピテーティング・プロペラの設計, 日本造船学会論文集, 第174号 (1993.12), pp.101-111
- 2) 工藤達郎, 右近良孝, 黒部雄三: 渦格子法によるスーパー・キャピテーティング・プロペラの設計, 日本造船学会論文集, 第175号 (1994.6), pp.47-56
- 3) 永井保, 田中宏績: サーフェスプロペラの系統模型試験結果について, 西部造船学会会報, 第47号 (1974.2), pp.57-67
- 4) 競走用ボート・モーター開発研究委員: 競走用ボート・モーターの開発研究, 昭和58年度報告書, 全国モーターボート競争会連合会 (1984.3)
- 5) 競走用ボート・モーター開発研究委員: 競走用ボート・モーターの開発研究, 昭和61年度報告書, 全国モーターボート競争会連合会 (1987.3)