

競艇用プロペラへのスーパーキャビテーション・ プロペラの応用

正員 右近良孝* 正員 工藤達郎*
 正員 黒部雄三* 松田登*
 正員 加藤洋治** 佐々木民雄***

Design of Supercavitating Propellers for a Racing Boat

by Yoshitaka Ukon, *Member* Tatsuro Kudo, *Member*
 Yuzo Kurobe, *Member* Noboru Matsuda,
 Hiroharu Kato, *Member* Tamio Sasaki

Summary

This paper describes the successful application of a theoretical supercavitating propeller design method to racing boat propellers. Two propellers were designed, manufactured and tested on a newly developed full-scale boat.

The first one, the SC-2 propeller, was designed at an advance ratio of 1.371 and a cavitation number of 0.3, and tested at the Kiryu racing site together with two target propellers, the SC-1 propeller which was previously designed by a Bp-chart method, and a commercial racing boat propeller, the "Record Propeller". No remarkable difference in the measured speeds of the racing boat equipped with each propeller was observed at full throttle condition, while the performance of the SC-2 propeller was superior to that of the SC-1 propeller at the prescribed design conditions in tests in two cavitation tunnels.

The second propeller, the SC-3 propeller, was designed by changing the propeller diameter from 165 mm to 175 mm to make the diameter more optimum at an advance ratio of 1.197. The blades of this propeller were designed to be as thin and narrow as possible to get the optimum lift-drag ratio at each radial position within the limitation of having the same strength requirement as that for the SC-1 propeller. At the propeller root, aerofoil blade sections were applied from the view points of strength and efficiency.

The second propeller was also tested at the racing site with the SC-1, the SC-2 and another famous commercial propeller, the "Rolla Propeller". The racing boat with the SC-3 propeller ran at the highest speed of about 97 km/h in the full-scale test. At the racetrack, a running test around two turning buoys 300 m apart gave the following results; the racing boat with the SC-3 propeller completed a lap within 33.8 seconds which was 1.4 seconds faster than that with the "Rolla Propeller". The test in cavitation tunnels endorsed the higher performance of the SC-3 propeller than those of other propellers.

1. はじめに

著者ら^{1),2)}は、新しいスーパーキャビテーション・プロペラ(以下、SCPという)の理論設計法を提案している。

* 運輸省船舶技術研究所推進性能部

** 東京大学工学部船舶海洋工学科

*** (社)全国モータボート競走会連合会

原稿受理 平成7年7月10日

秋季講演会において講演 平成7年11月16,17日

この設計法により、船速50ノット、一軸当りの推力100トン、キャビテーション数0.4という極めて過酷な作動条件に対して、要求されるスラストを発生し、かつ高効率なSCPを設計できることを示した。しかしながら、設計されたSCPの性能の検証はキャビテーション水槽での模型実験だけによりなされていたので、このSCP設計法で設計されたSCPの、実用時での優秀性を確認することが課題の一つであった。

一方、競艇で用いられている競走用モータボートに関して、現在、現用ボートをプロトタイプに新型エンジンを

搭載し、大型化及び高速化(最高速力 100 km/h)を目指した新型艇“ハイテク・ボート”の開発が行われている³⁾。この艇用のプロペラの一つとして、長年の研究により作成した B_p チャートを用いて、プロペラが設計されており、良好な性能を発揮している。

このプロペラを基準プロペラとして、更に高性能なプロペラを開発すべく、運輸省船舶技術研究所(以下、船研という)で開発した理論設計法^{1),2)}によって、2個のSCPを設計し、実艇及びキャビテーション水槽で比較試験を行った。

最初のプロペラは基準プロペラと同じ設計条件で設計した。SC翼型断面形状は、従来、SCPに適用して高性能を発揮している“SRJN-II”SC翼断面^{1),2)}を用いた。しかし、このプロペラは実艇試験で基準プロペラより格段に秀でた性能を発揮するに至らなかった。

このため、第2のSCPを設計では、設計条件を見直した。また、SCP初期設計プログラム¹⁾を用いて、プロペラ直径の最適化を図って、大型化した。更に、強度要件と高効率を満たすために、ハイブリッド・プロペラ²⁾として、設計した。この他、強度が許す限り、翼厚を薄く、翼弦長を短くして、翼断面性能の最適化を図るとともに、加速時の性能も設計時に考慮した。この第2のプロペラは実艇試験及び水槽試験により、基準プロペラよりも、また既存プロペラよりも格段に高性能であることを確認した。

競艇用プロペラは300 m離れたブイの間を周回するため、加減速を繰り返す、時には空気吸い込みをも起こしながら、航走するものと考えられている。このような競艇用プロペラに対して、SCPを適用することの是非を確認するのが本論文の趣旨である。

以上の設計を通じて得られた知見について報告する。

2. SCP の 設 計

2.1 供試プロペラ及び設計法

本論文中で述べられる実艇及び水槽試験に用いた5個のSCPの主要目をTable 1に示す。これらのSCPのうち、SC-1プロペラはSCP用設計 B_p チャート³⁾で設計され、本論文において設計したSCPとの性能比較の対象となる基準プロペラとした。レコード及びローラ・プロペラ⁴⁾は市販のプロペラであり、レース等に良く用いられる実用的プロペラであるが、Table 1に示すデータ以外、詳細は不明である。SC 2及び3プロペラの2個のプロペラは、船研で開発したSCP理論設計法^{1),2)}を用いて設計した。

この設計法を簡単に述べると、

(1) プロペラの流体力学的ピッチ角及び推力分布は Lerbs の揚力線理論⁵⁾で求めた。

(2) 揚力面補正は“キャンバ変形法(Camber Deformation Method)”²⁾を用いて行った。

(3) 翼断面形状は非線型SC翼型理論⁶⁾に基づき作成された理論チャート¹⁾により求めた。SC-3プロペラについ

Table 1 Principal Particulars of Tested SCPs

Propeller Name	SC-1	SC-2	SC-3	Record	Rolla
M.P.No.	377	378	388	-	-
Diameter [mm]	165	165	175	166	165
Pitch Ratio (0.7R)	1.65 (Const.)	1.697 (Variable)	1.454 (Variable)	1.731	1.749
Exp. Area Ratio	0.400	0.616	0.475	0.407	-
Boss Ratio	0.1606	0.1606	0.1514	0.1386	-
Rake Angle [deg]	10	10	10	-	-
Skew Angle [deg]	58	43	32	-	-
Number of Blade	3	3	3	2	3
Blade Section	Mod. Tulin	SRJN-II	SRJN-II NACA16	Crescent with Cup	-
Direction of Rotation	Left	Left	Left	Left	Left
Material	ALBC3	ALBC3	ALBC3	-	-

ては、翼根部での翼強度条件が有利となることから、NACA 16系翼型を翼根部で用いるハイブリッド型のSCP²⁾とした。

(4) 翼強度に関しては、梁理論によってスラスト分布から各半径位置での翼応力¹⁾を計算した。安全率と破断応力を与えて、最大許容応力を満たす様に翼輪郭を決めた。

(5) スキュー分布はSC-1プロペラを参考として、翼根部で穏やかな分布となる様にした。

以上の設計法により得られたSCPの最終ピッチ分布は、SCP性能解析法SC-VLM⁷⁾を用いて、必要な推力を発生するように調整した。

2.2 設計条件及び設計結果

(1) SC-1及び2プロペラ

プロペラを設計するためには作動状態を推定し、設計条件を決定する必要がある。SC-1及び2プロペラに対しては、Table 2に示すCond. Iなる設計条件が与えられた。SC-1プロペラは、プロペラ回転数 N が7,000rpmの時、馬力 P が64 PS、船速 V_s が100 km/h(=54 kt)、キャビテーション数 σ_v が0.3になるとして、設計 B_p チャートにより設計された³⁾。このため、設計スラスト係数 K_T はTable 2のCond. Iと異なり、0.120である。但し、伴流係数 $1-w_s$ を0.95としている。SC 1プロペラの翼形状をFig. 1に示す。

一方、SC-2プロペラはSC-1プロペラと同様の設計条件とした。ここで用いる設計法はスラストに基づく理論設計法であるため、設計スラストを予測する必要がある。ここでは、プロペラ単独効率を0.80と仮定し、スラスト係数を0.138、スラスト T を145 kgとして設計した。安全率を3、破断応力を75 kg/mm²としたので、最大許容応力は25 kg/mm²である。SC-2プロペラの設計は上述の設計法で行い、翼断面形状は全ての半径位置でSRJN-II翼型とした。この設計で得られたSC-2プロペラの翼形状をFig. 2に示す。

(2) SC-3プロペラ

キャビテーション水槽での試験の結果、SC-2プロペラは前述の設計条件ではSC-1プロペラより優れた性能を示

Table 2 Design and Estimated Operating Condition

	Cond. I	Cond. II	
		Acc.	Full
BHP [PS]	64	67	67
Prop. Rev. Rate [rpm]	7,000	7,000	7,000
Boat Speed [km/h]	100.0	74.1	92.6
Boat Speed [kt]	54.0	40.0	50.0
Wake Ratio $1-w_s$	0.95	0.95	0.95
Advance Speed [m/s]	27.8	19.6	24.4
Cav. Number	0.30	0.47	0.30
Advance Ratio [175mmφ]		0.957	1.197
Advance Ratio [165mmφ]	1.371		
Torque [kg-m]	6.55	6.86	6.86
K_Q [175mmφ]		0.0294	0.0294
K_Q [165mmφ]	0.0376		
K_T [175mmφ]		Max.	0.111
K_T [165mmφ]	0.138		
Thrust [kg]	145	Max.	144.5

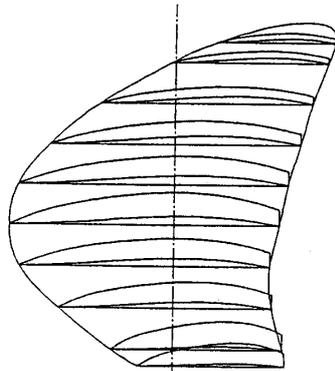


Fig. 1 Propeller Shape of SC-1 Propeller (M. P. No. 377)

した。また、実艇試験から、プロペラ前進速度が 95 km/h にはなっていないものと推定された。このため、SC-3 プロペラを設計するにあたり、設計条件の設定の見直しを行った。また、Fig. 3 に示す新型エンジンの特性カーブ等を検討した結果、最高速巡航時のプロペラ回転数は 7,000 rpm と仮定し、馬力は 67 PS、即ち、トルクは 6.86 kg-m になるものとし、プロペラ前進速度は 47.5 kt (=88.0 km/h)、キャビテーション数は 0.3 を、設計条件とした。スラストは 144.5 kg とした。 $1-w_s$ については、設計時には直接関係ないので、後述する。

このプロペラの設計に際して、まず、エンジンが与えられているので、最適直径の検討を行った。上記の設計条件に対して SCP 初期設計プログラム¹⁾により、直径を 165 mm から 10 mm づつ大きくして、設計点での効率を検討

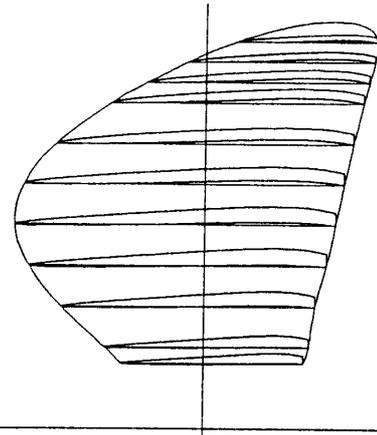


Fig. 2 Propeller Shape of SC-2 Propeller (M. P. No. 378)

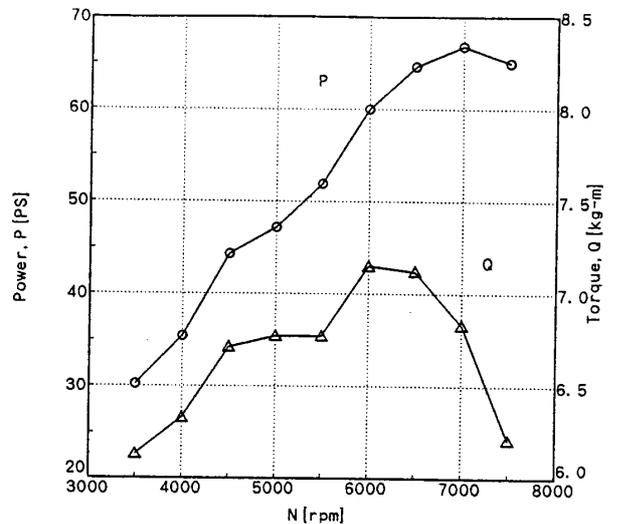


Fig. 3 Characteristics Curves of Tested Engine

した。この結果、直径が 165, 175, 185 mm の時、プロペラ効率は 0.789, 0.800, 0.808 となり、直径 185 mm のプロペラの効率が最も高いものの、直径 175 mm の時ほどの効率向上が期待できなかったので、船外機への収納を考慮して 175 mm をプロペラ直径とした。よって、このプロペラの設計条件は Table 2 に示す。Cond. II の Full の条件に対応する。

次に、0.4 R 以下の翼根部での翼断面形状は SC 翼型 (SRJN-II) から NACA 16 系の翼厚と NACA $a=0.8$ のキャンバから成る翼型に変更し、翼根部での断面係数を SC-1 プロペラの断面係数と同等となる様に、SC 2 プロペラより強度条件を緩め、可能な限り薄い翼型となるようにした。一方、0.85 R 以上の翼端近傍では、翼厚が薄くなりすぎたので、当初の背面形状に対して翼根部で最大 1 mm 程度翼厚を増加させた。SC-2 プロペラより翼弦長を小さくすることによって揚抗比を最適化し、効率の向上を図っ

た。

次に、後述の実艇試験から、SC-2 プロペラは加速性能で SC-1 プロペラよりかなり劣っていたので、SC-VLM による最終ピッチ調整時に、Table 2 の Cond. II の Full に対応する上述の巡航時に加え、加速時の性能もチェックした。プロペラ回転数が 7,000 rpm で前進速度が 38 kt の加速状態において、最も大きなスラストを発生する様にした。この設計条件は Table 2 の Cond. II の Acc. に示す。

SC-3 プロペラは、巡航時には、馬力が 60.6 PS で、トルクが 6.20 kg-m の時、設計条件を満たす 146 kg のスラストを発生し、加速時には馬力が 73.8 PS で、トルクが 6.90 kg-m の時、180.7 kg のスラストを発生する。一方、SC-1 プロペラは、馬力が 70.3 PS、トルクが 7.19 kg-m の時、164.7 kg のスラストを発生することが予測される。設計で得られた SC-3 プロペラの翼形状を Fig. 4 に示す。

3. 性能確認試験

3.1 SC-2 プロペラ

(1) 実艇試験

本プロペラを開発中の新型競艇用ボートの船外機に、Fig. 5 に示す様に取り付け、桐生の競艇場で性能確認試験を行った。試験の種類としては、速力試験 (4,000 rpm, 6,000 rpm, 全速)、加速試験 (3,000 rpm, 4,000 rpm) 及び周回試験を行った。これらの試験 (シリーズ I) では、先ず、既に設計がなされている SC-1 プロペラと好事家に用いられる 2 翼のレコード・プロペラについて比較航走を行った。次いで、SC 1 プロペラと SC 2 プロペラの比較航走を行った。シリーズ I では、SC-1 プロペラを共通にして、日を変え、2 回にわたって計測を行ったことになる。船速はリモート・モニタリング・システム (RM システム)⁹⁾ によって計測した。

SC-1 プロペラについて、シリーズ I における 2 回の計測データ間に大きな差がなかったため、2 回の速力試験の結果を併わせて、Fig. 6(a) に示す。4,000 rpm の回転数の

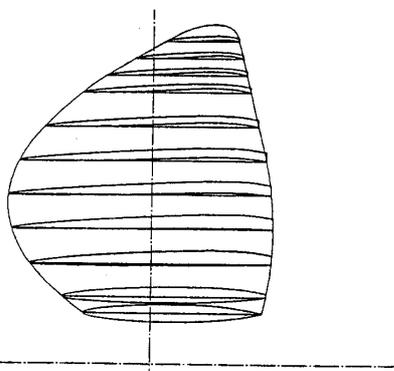


Fig. 4 Propeller Shape of SC-3 Propeller
(M. P. No. 388)

時には、SC-2 プロペラは 11.3 m/s (I-2-4000)、レコード・プロペラは 11.8 m/s (I-1-4000) であり、SC-1 プロペラの 14.1 m/s (I-1-4000) 及び 13.8 m/s (I-2-4000) と比べて両者の速力は低かったものの、フルスロットル時には、SC-1 プロペラ速力は 26.7 m/s (I-1-Full) 又は 26.5 m/s (I-2-Full) であり、一方、SC-2 及びレコード・プロペラのそれぞれの速力は 26.3 m/s (I-2-Full) 及び 27.1 m/s (I-1-Full) となり、レコード・プロペラが若干速いものの 3 者の速力は大きく異ならなかった。

周回試験の結果を Fig. 7(a) に示す。第 1 回目の周回航走では、SC-1、SC-2 及びレコード・プロペラはそれぞれ 34.2、34.7、34.6 秒となり、SC-2 プロペラはレコード・プロペラと差は殆どないものの、SC-1 プロペラより 0.5 秒程度遅かった。乗艇者からは、SC-2 プロペラは SC-1 プロペラより旋回の後期での引っかかりが良く、多少小回りができるものの、低速からの加速性が良くなかったとの感想があった。

(2) 水槽試験

船研の大型キャビテーション水槽第 1 計測部で、ノン・キャビテーション状態の他、7 種類のキャビテーション数について、プロペラ性能計測を行った。計測は主動力計 (Kempf & Remmers 社製、J 26 型; スラスト 600 kg, トルク 30 kg-m, 最高回転数 60 rps) で行った。プロペラ軸はプロペラ上流に配置されるタイプであり、下流に配置されるタイプの動力計の計測値と比べて、最高効率の領域では、効率が若干高い値が得られる傾向がある⁹⁾。

SC-1 及び SC-2 プロペラについての性能計測結果の一部を Figs. 8 と 9 に示す。水槽試験の結果、設計点 ($J=1.371$) では、SC-1 と SC-2 プロペラの効率はそれぞれ

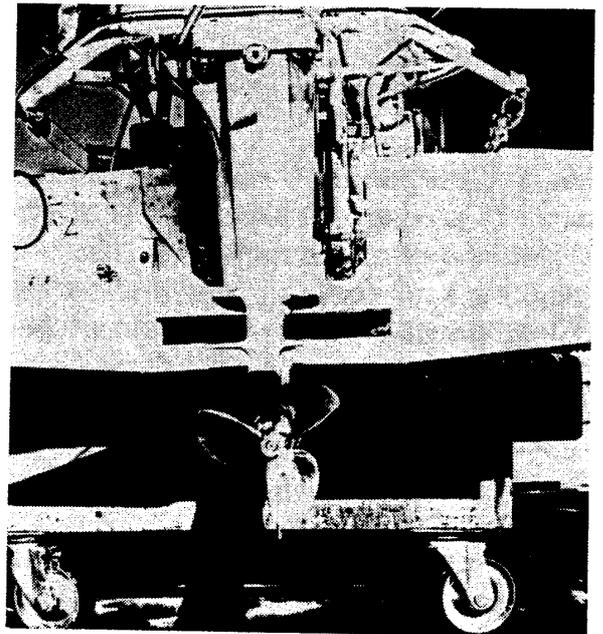
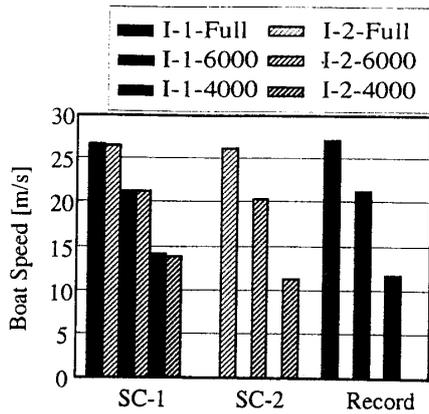
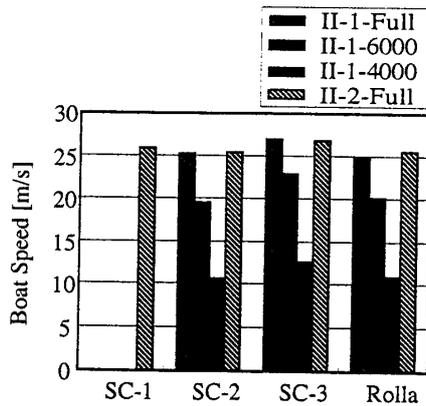


Fig. 5 Installation of Propeller to Racing Boat



(a) Series I



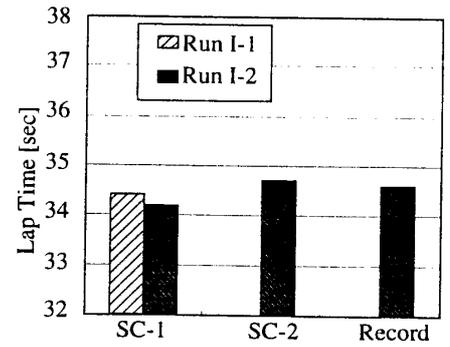
(b) Series II

Fig. 6 Result of Steady Speed Running Test

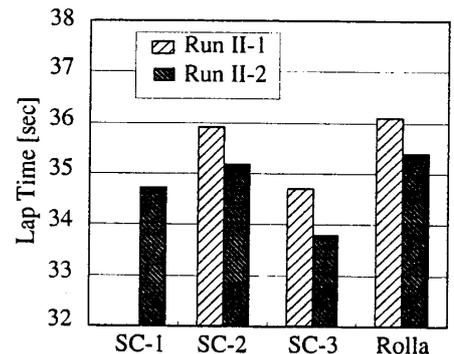
0.70, 0.72 で, SC-2 プロペラは SC-1 プロペラより効率が高くなり、一方, SC-2 プロペラはスラスト, トルクとも設計値よりかなり大きな値を発生し, “重たいプロペラ” となったことが分かる。東京大学でのキャビテーション試験においても, キャビテーション数 0.5 で, 同様の計測結果が得られている。

水槽試験と実艇での計測の結果において, SC-1 と SC-2 プロペラの性能の関係が逆となることから, その原因を検討した結果, 設計条件, とりわけ, プロペラ前進速度の設定が適切でなかったことが挙げられた。

設計条件における 2 つのプロペラのキャビテーション・パターンを Figs. 10 と 11 に, SC-VLM による計算結果を Figs. 12 と 13 に示す。両プロペラとも, 計算と実験との対応は十分でない。両者とも, 翼端側でのキャビテーションの発生量がシミュレーション計算より少ない。特に, SC-2 プロペラのキャビテーション発生量は大幅に少なく, スキュー分布の変化の激しい 0.5 R から前縁剝離渦が発生しており, これがキャビテーション・パターン及び性能に関するシミュレーション計算の精度を低下させたものと考えられる。



(a) Series I



(b) Series II

Fig. 7 Result of Racetrack Running Test

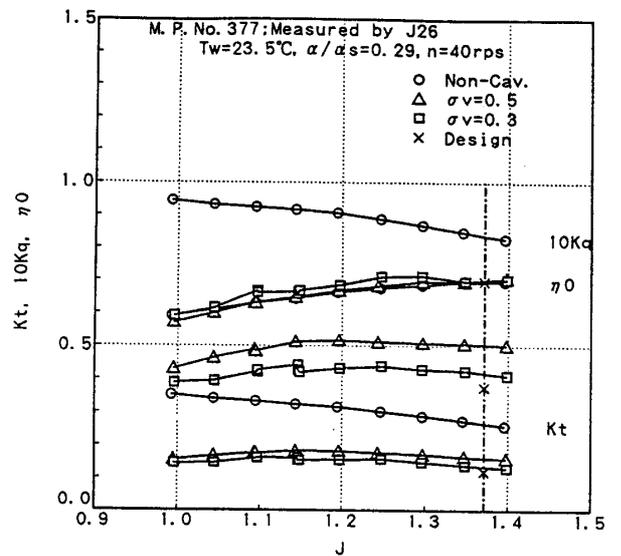


Fig. 8 Propeller Characteristics of SC-1 Propeller in Cavitation Tunnel under Various Cavitation Number

3.2 SC-3 プロペラ

(1) 実艇試験

SC-3 プロペラについても, 桐生で実艇による性能計測を行った。試験内容は SC-2 プロペラの計測 (シリーズ I) と同様である。この計測 (シリーズ II) では, 比較のため,

SC-1 及び SC-2 プロペラとともに、高速艇用市販プロペラとして世界的に最も有名なローラ (Rolla)・プロペラ⁹⁾ を供試プロペラとして用いた。

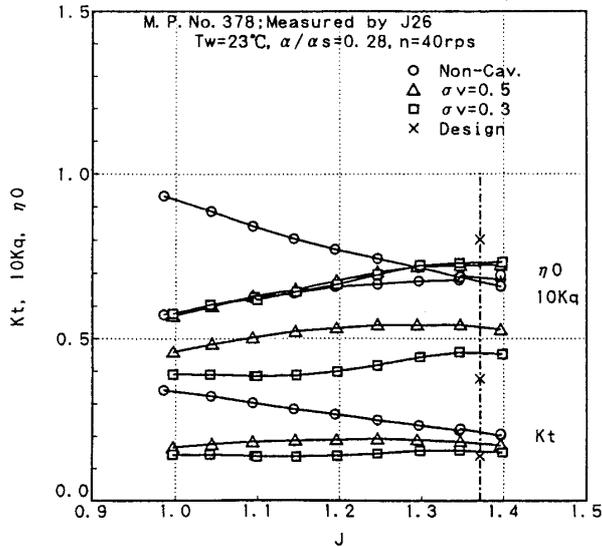


Fig. 9 Propeller Characteristics of SC-2 Propeller in Cavitation Tunnel under Various Cavitation Number

シリーズIIの計測は、プロペラの組み合わせを変え、2回にわたって行った。2回の速力試験の結果を Fig. 6 (b) に併せて示す。1回目の計測では、4,000 rpm の回転数の時 (II-1-4000), SC-3 プロペラは 12.6 m/s であり、SC-2 プロペラの 10.6 m/s, ローラ・プロペラの 11.0 m/s より大幅に速かった。フルスロットル (II-1-Full) でも、SC-3 プロペラは 27.0 m/s であり、SC-2 及びローラ・プロペラの 25.3 m/s, 24.9 m/s と比べて、格段に高速であった。

2回目の計測では、SC-3, SC-2 及びローラ・プロペラはフルスロットル (II-2-Full) で、それぞれ 26.8, 25.4 及び 25.5 m/s であり、1回目とほぼ同じであった。2回目の計測では、SC-1 プロペラも比較航走しており、SC 1 プロペラの速力は 25.9 m/s であり、SC-3 プロペラには及ばない。一方、Fig. 7 (b) に、2回にわたって行われた周回試験 (シリーズII) の結果を示す。周回試験の1回目の計測時 (Run II-1), SC-3 プロペラは一周のラップは 34.7 秒であり、SC-2 プロペラの 35.9 秒より速く、また、ローラ・プロペラの 36.1 秒より 1.4 秒も速かった。2回目の計測 (Run II-2) でも、SC-3, SC-2 及びローラ・プロペラはそれぞれ、33.8,

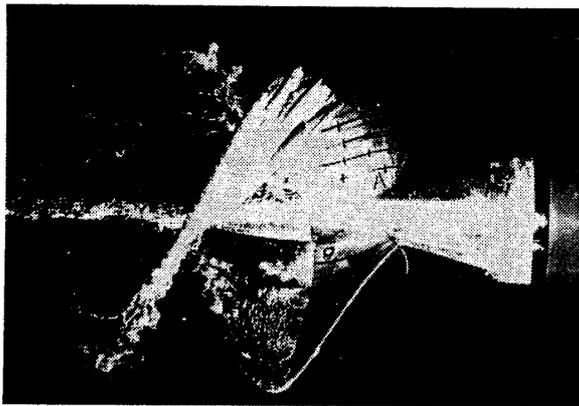


Fig. 10 Observed Cavitation Pattern of SC-1 Propeller

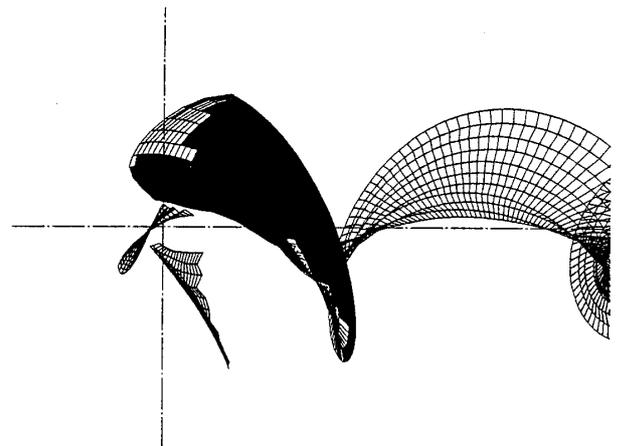


Fig. 12 Simulated Cavitation Pattern of SC-1 Propeller by SC-VLM Calculation

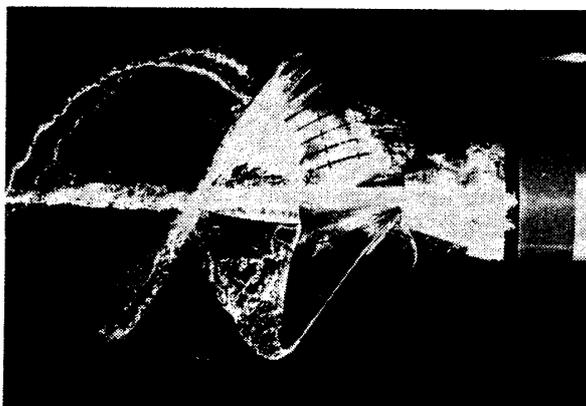


Fig. 11 Observed Cavitation Pattern of SC-2 Propeller

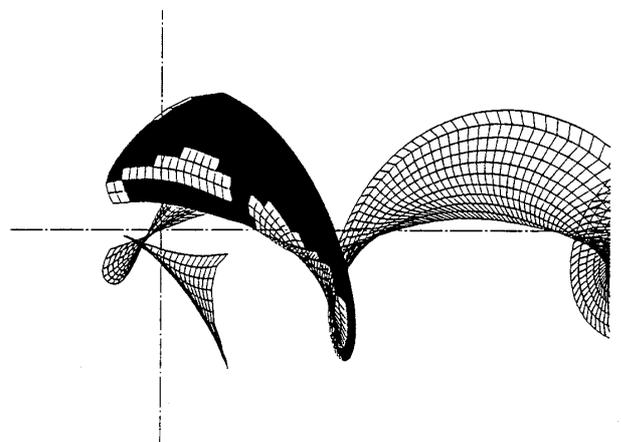


Fig. 13 Simulated Cavitation Pattern of SC-2 Propeller by SC-VLM Calculation

35.2 及び 35.4 秒である。SC-3 プロペラは格段に速く、周回時間の絶対値は1回目と2回目とでかなり異なるが、3者の時間差は両計測とも全く同じであった。これは、1回目の方が艇の重さが約 10 kg 重かったためと思われる。2回目のみに航走した SC-1 プロペラは 34.5 秒と SC-3 プロペラに次いで速いものの、0.7 秒遅い。

また、SC-2 プロペラの設計時の実艇試験（シリーズ I, Fig. 7(a)参照）と今回の計測（シリーズ II, Fig. 7(b)参照）比べると、両者の絶対値に差がある。これは、シリーズ I の時の艇の重さが、シリーズ II の2回目より更に約 20 kg 軽かったため、シリーズ I の周回時間がシリーズ II の周回時間より短かったものと考えられる。しかしながら、各プロペラの周回時間の相対関係については再現性が高い。

(2) 水槽試験

SC-3 プロペラのキャビテーション試験の結果を Fig. 14 に示す。巡航時に相当する $\sigma_v=0.3$ の設計点 ($J=1.197$) では効率は 0.75, 加速時に相当する $\sigma_v=0.47$ では 0.61 になり、SC-1 や SC-2 プロペラより大幅に高性能となっている。しかしながら、 $\sigma_v=0.3$ では、効率は設計時の予測値より若干低く、SC-2 プロペラと同様、やはり計測されたスラスト及びトルク係数とも設計点で予測値より高い値となっている。 $\sigma_v=0.47$ では、スラスト及びトルク係数はともに設計値と比較的良く合っている。実艇試験と水槽試験の結果は定性的には良く対応しており、設計は的を得ていたものと思われる。

SC-3 プロペラの $\sigma_v=0.3$ の設計点でのキャビテーション・パターンの写真と計算結果を Figs. 15 及び 16 に示す。やはり、シミュレーション計算と比べて、翼端側でのキャビテーション発生量はかなり少なく、水槽試験ではベース・ベンティド状態のキャビテーションが発生しているのが確認された。

4. 考 察

4.1 理論予測

本論文で設計した2個の SCP は、初期設計プログラムで得られたピッチ分布や翼断面形状に対して揚力面補正を行い、最終の設計ピッチ分布は SCP 性能解析プログラムで決定される。しかしながら、Fig. 17(a)に示す様に、SC-2 プロペラの性能計算では、スラスト及びトルクとも前進率の小さい時には良く対応するものの、本プロペラの設計点から最高効率となる領域では計算値が実験値より小さくなる傾向があった。

この原因としては、Fig. 11 の写真からも分かる様にキャビテーションが翼全面で発生しないこと、スキュー・プロペラ独特の前縁剥離渦が半径中央付近で発生し、シート・キャビテーションではなく、ヴォルテックス・キャビテーションとなることが挙げられる。一方、計算では、キャビテーションが翼端近傍で全面的に発生するのに対して、実

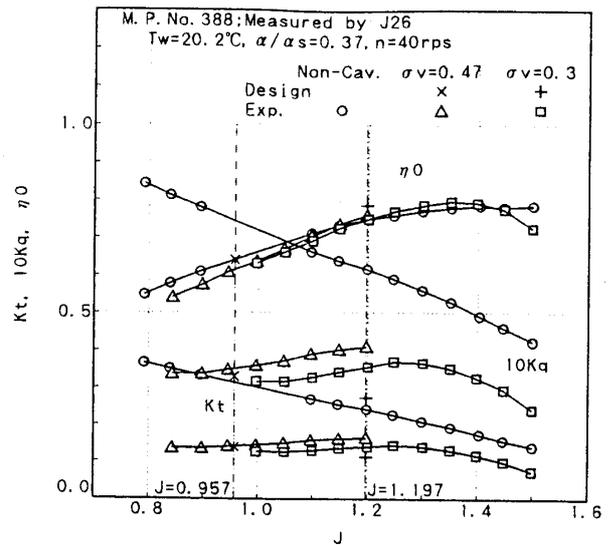


Fig. 14 Propeller Characteristics of SC-3 Propeller in Cavitation Tunnel under Various Cavitation Number

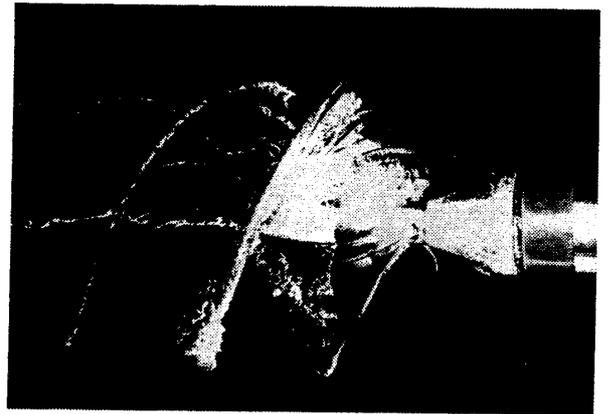


Fig. 15 Observed Cavitation Pattern of SC-3 Propeller

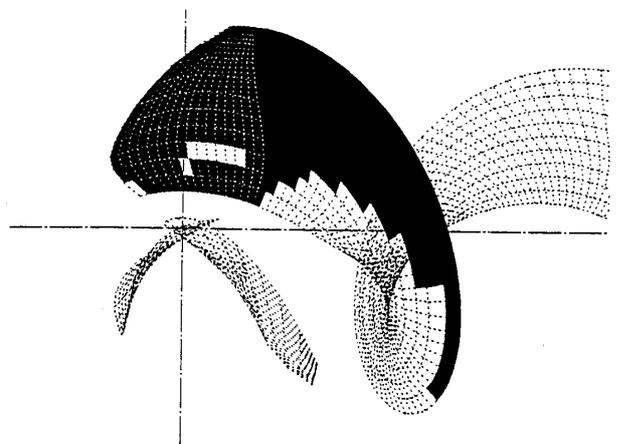
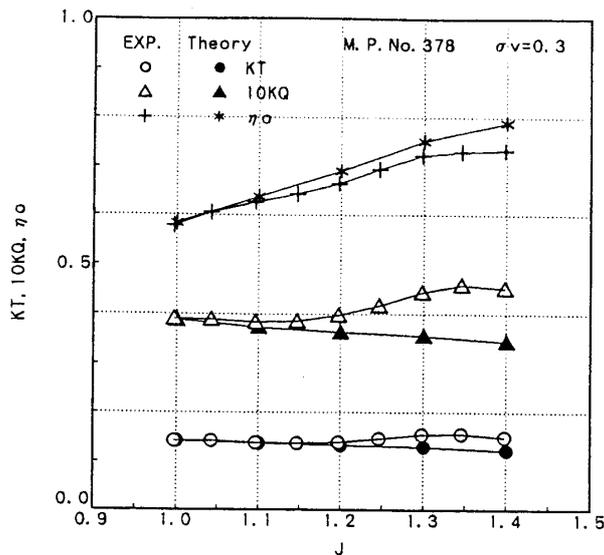
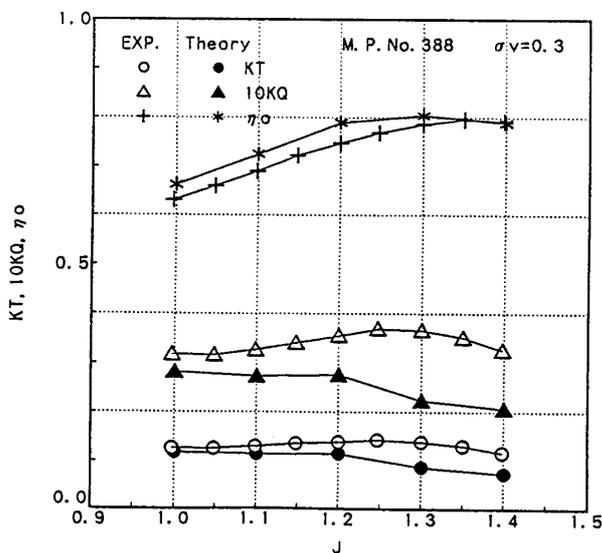


Fig. 16 Simulated Cavitation Pattern of SC-3 Propeller by SC-VLM Calculation



(a) SC-2 Propeller



(b) SC-3 Propeller

Fig. 17 Comparison of Propeller Characteristics between Theory and Experiment

験では、翼後縁のみにシート・キャビテーションが発生している。この差が影響しているものと思われる。

SC-3 プロペラについての計算結果を Fig. 17(b) に示す。SC-2 プロペラと同様の傾向が見られた。実験と理論計算との対応は SC-2 プロペラの場合より良くなく、前進率が小さくなっても余り良く一致しない。本論文で用いたプロペラ性能解析法⁷⁾は、部分シート・キャビテーション、ベース・ベンチド・キャビテーション、およびスーパー・キャビテーションが混在した状態のプロペラに対して計算が可能であるが、今後はヴォルテックス・キャビテーションやバブル・キャビテーションを含めた状態を扱えるプロペラ性能解析法の開発と、粘性影響を受け易いと考えられる薄い部分シート・キャビテーションの推定法の高精度化

が必要である。

4.2 設計条件

SC-3 プロペラに関しては、SC-2 プロペラの設計条件を見直し、変更することによって、目標とするプロペラを設計することができた。ここで、設計条件を水槽試験結果を用いて検討する。

実艇試験では、プロペラ回転数が 4,000 と 6,000 rpm で一定となる様にスロットル開度を保ったり、スロットルを全開して、その時の速度を計測する速力試験が行われた。艇速は RM システムで計測され、かつ、プロペラ回転数は知ることができるので、伴流係数 $1-w_s$ が推定できるとプロペラの作動状態が特定できる。一方、もし、速力試験で実艇が空気吸込みを起こしていないとすれば、キャビテーション水槽でのプロペラ性能計測から実艇のプロペラの作動状態を逆解析できる。伴流係数を 0.90 と 0.95 の 2 通りに仮定して、3 つのプロペラについて逆解析した。得られた結果を Figs. 18 及び 19 に示す。

Fig.18 は、船速に対して 3 種類のプロペラが発生しているスラストを示している。推力係数 $1-t$ が船速に依らず、また、推進器効率比 η_R を 1 とすれば、この図は船艇抵抗の船速による変化を定性的に示すことになる。図中のカーブはプロペラの違いによらず、船速に対してほぼ一本の曲線でまとまっているので、艇の抵抗曲線に対応するものと思われる。10 m/s (フルード数 $Fn=1.72$) 以下にハンブがあり、その後はほぼ単調に増加する。

伴流係数が 0.90 でも 0.95 でも高速域では余り関係がないことが分かる。スラスト係数が SC 状態では前進率の変化に対してほぼ一定なためである。よって、精度の高い設計をする上で、必要スラストの予測精度の向上が重要となる。

一方、Fig. 19 はプロペラ回転数に対するプロペラのトルク変化を示す。この図にエンジン単体のトルク・カーブも併せて示す。4,000 rpm では、各プロペラにより種々のトルク値が得られているが、6,000 rpm 及びフル・スロットル時にはプロペラによる違いは少なくなる。また、逆解析されたプロペラのトルクは、エンジン単体のトルク特性とかなり異なる傾向となっている。特に、フルスロットルでは、エンジンがプロペラのトルクを吸収できないという解析結果となっている。この原因は必ずしもはっきりしないが、もし実艇のプロペラ性能が SCP 性能解析法で予測される通りだったと仮定して逆解析すると、SC-3 プロペラに関しては、プロペラのトルクはエンジンのそれとかなり近づいてくる。実艇でのプロペラは水槽試験の時より高いレイノルズ数で作動し、気泡核も格段に多いと考えられる。このため、実艇でのプロペラのキャビテーション発生状況は水槽試験の時と異なり、翼端でもスーパー・キャビテーション状態で作動していると考えると、2 つのトルクに関する矛盾はある程度説明することができる。しかし、SC-2 プ

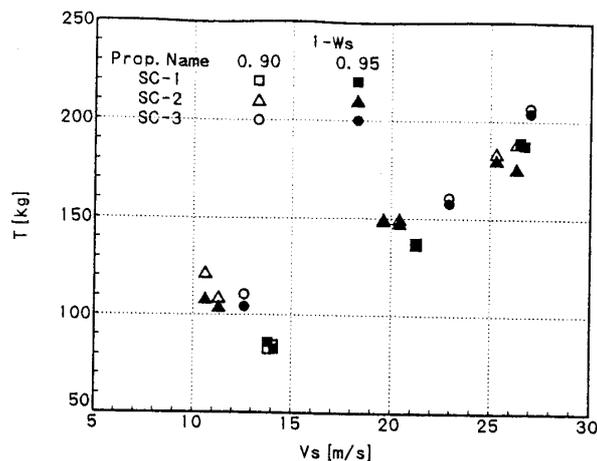


Fig. 18 Variation of Thrust due to Ship Speed Based on Results of Cavitation Experiment

ロペラについての計算値より逆解析されたトルクは実験値によるトルクより、エンジンのトルクに近づくものの、差は大きく、現状では説明が出来ない。空気吸い込みを起していることも考えられるが、この点に関しては、今後の研究課題としたい。

伴流係数の違いによるトルクへの影響は低速域と高速域では大きいものの、中速域では少ない。実艇試験の性能を考慮すると、Fig. 19 は低回転域では軽く、高回転域では大きなトルク、即ち、スラストを発生するプロペラが良いと言われることを裏付けている。

今回の設計では、エンジン単体のトルク特性に基づき設計したが、SCP 性能解析法によりスラストとトルクが適切に推定されたことによって、エンジンとほぼバランスした SC-3 プロペラを設計できたのではないかと推定される。定量的に完璧な設計を行うためには、前述の様に、より軽荷重時で種々のキャビテーションが発生したプロペラの粘性影響を考慮した性能解析法の開発とともに、艇の抵抗、エンジン・カバーの伴流、エンジン特性の把握による設計条件の詳細な検討が更に高性能なプロペラを開発する上で課題となる。

4.3 実艇試験と水槽試験

今回、水槽試験はキャビテーション水槽のみで行ったので、空気吸い込み時の性能は不明である。実艇試験での航走状態を見る限り、回転時や加速初期を除き、空気吸い込みが起る可能性が少ないと思われる。よって、作動状態の推定が適切であれば、キャビテーション水槽でのプロペラ状態は実艇の状態を反映しているものと期待される。実艇では風等の自然現象の影響を直接受けるばかりでなく、エンジン・カバーの後方で作動するため、伴流による非定常影響はあるものと考え、今回の水槽試験では、無視している。

しかしながら、今回の水槽試験では、SCP の翼端側ではシート・キャビテーション状態とならず、一方、翼中央部

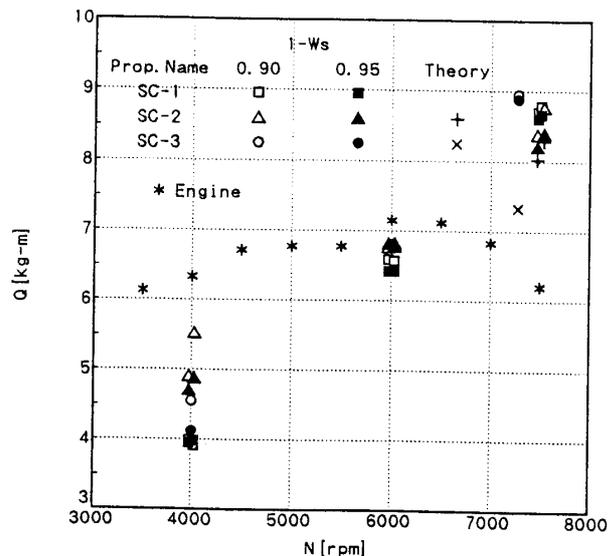


Fig. 19 Variation of Torque due to Propeller Revolution Rate Based on Results of Cavitation Experiment

ではバブル・キャビテーションが発生した。一つには気泡核が少なかったためと思われる。試験前に、空気含有率を低くコントロールして試験を行ったことにもよる。次に、プロペラ回転数は、水槽試験では 40 rps で、実艇では 67~125 rps であり、水槽試験の方がかなり低いので、粘性影響も無視できないものと思われる。シート・キャビテーションを強制的に発生させるため、前縁粗さとしてカーボランダムを塗布する方法がある。しかしながら、カーボランダム自身の抗力がかなり大きく、トルクが大幅に増加し、効率の低下が避けられない。このため、性能評価が難しくなるので、高速艇プロペラのキャビテーション試験では、粗さの塗布が採用しづらい。水槽試験では、粗さ付きプロペラのキャビテーション・パターンの方が実艇でのパターンに近いものになる¹⁰⁾と思われる。

また、4.2 で述べた様に、実艇でのプロペラはフルスロットルではプロペラ翼のほぼ全面で SC 状態となっているのではないかとと思われる。このことから、この種のプロペラのキャビテーション試験法の改良が今後の課題である。今後、性能劣化をさせず、かつ、乱流促進と気泡核の安定供給を行うことのできる試験法の確立が、軽荷重時の高速艇プロペラのキャビテーション試験の精度向上をする上で重要である。

5. 結 論

本研究の結果、次の様な結論を得た。

- 競艇用プロペラに対して、スーパーキャビテーション・プロペラ (SCP) 理論設計法を適用して、SCP を設計した。実艇試験の結果、格段に高性能なプロペラが設計できたことを確認した。最適直径、揚抗

比の最適化, ハイブリッド型プロペラの採用が有効であった。

2. 最高速巡航時ばかりでなく, 加速時も考慮して設計することが, より実用的な SCP を設計する上で重要である。
3. 軽荷重で作動する場合には, 水槽試験での SCP は完全なスーパーキャビテーション状態とならないので, 水槽での性能計測結果と SCP 性能解析法の計算結果と一致しないことが生じる。しかしながら, 両者は定性的には一致するので, より高性能な SCP の設計は可能である。

今後の課題として, 次の点が挙げられる。

キャビテーション水槽と実艇での性能評価を定量的に対応させ, 特に, 軽荷重時の実艇のプロペラの性能を高精度で計測するためには, 乱流促進や気泡核の供給法など, この種のプロペラのキャビテーション試験法を確立する必要がある。

次に, キャビテーションの発生状態がスーパーキャビテーション状態と部分キャビテーション状態の中間程度の発生状態となるプロペラは粘性の影響が SCP より格段に大きいので, 新たにその性能計算法の開発が不可欠である。

最後に, 小型高速艇のプロペラに関しては, 艇の性能やエンジン等に不明な点が多いことから, 設計条件の推定が最も重要となる。このため, 実験や理論を総合的に組み合わせた検討がこの種のプロペラの設計には不可欠である。

あとがき

本研究の一部は運輸省船舶技術研究所の指定研「SCプロペラの設計に関する研究」の一部として行われた。

本プロペラの設計の機会を与えていただいた競走用モーターボート性能調査委員会の矢崎教生委員長及び実艇試験を行った関係者に感謝いたします。

本論文で使用した SC-2 及び 3 プロペラは(財)日本造船技術センタで制作された。御協力いただいた北川弘光日本造船技術センタ理事長及び関係者の方々に感謝いたします。

貴重な意見を頂いた山口眞裕推進性能部長に感謝いたします。

記号表

- D : プロペラ直径
 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]

n : プロペラ回転数 [rps]

P_0 : 無限遠方の静圧

P_V : 水の蒸気圧

Q : プロペラトルク

T : プロペラスラスト

T_w : 水温

V_A : プロペラ前進速度 ($= V_s \times (1-w_s)$)

V_s : 船速

$1-w_s$: 伴流係数

α/α_s : 供試水の空気含有率

η_0 : プロペラ単独効率 ($= J \cdot K_T / 2\pi \cdot K_Q$)

ρ : 水の密度

σ_v : プロペラ前進速度に基づくキャビテーション数
 $(= (P_0 - P_V) / (1/2 \rho V_A^2))$

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・キャビテーション・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ビテーション・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) 競艇用モーターボート性能調査研究委員: 競艇用モーターボート性能調査研究, 平成5年度報告書, 全国モーターボート競走会連合会 (1994.3)
- 4) Rose, J.C. & Kruppa, C.: Methodical Series Model Test Results, Proc. of Fast'91, Trondheim (1991, 6), pp. 1129-1147
- 5) Lerbs, H.W.: Moderately Loaded Propellers with a Finite Number of Blades and an Arbitrary Distribution of Circulation, Trans. SNAME, Vol. 60 (1952. 11), pp. 73-117
- 6) 工藤達郎, 右近良孝: 一次渦パネル法による SC 翼型の性能計算, 西部造船会会報, 第86号 (1993.8), pp. 37-46
- 7) 工藤達郎: 渦格子法によるスーパーキャビテーション・プロペラの性能計算, 日本造船学会論文集, 第174号 (1993.12), pp. 113-120
- 8) Yazaki, A., Wakamatsu, S., Tagori, T., Nakato, M., Kato, H., Tanaka, H. and Abe, M.: Performance Analysis of Small Racing Boat in Smooth Water and Its Design Application, Trans. SNAME, Vol. 96 (1988), pp. 309-332
- 9) 松田登, 黒部雄三, 右近良孝, 工藤達郎, 岡本三千朗: スーパーキャビテーション・プロペラの性能計測, 船研報告, 第31巻, 第5号 (1994.11), pp. 161
- 10) Sumino, Y. & Ukon, Y., Model Test on Performance of Propellers Driven by an Outboard Motor, Proc. of 1991 Small Engine Technology Conference, Yokohama (1991, 10), pp. 153-158