

実用型スーパーキャビテーション・プロペラの研究

正員 姫井 弘平* 正員 山崎 正三郎*
山崎 幹夫* 正員 工藤 達郎**

A Study of Practical Supercavitating Propeller

by Kouhei Himei, *Member* Shosaburo Yamasaki, *Member*
Mikio Yamasaki, Tatsuro Kudo, *Member*

Summary

This paper describes the design and performance of practical supercavitating propellers (SCPs).

Prototypes of SCPs were designed using two design methods, in order to check both geometric forms. One was developed by SSPA, and the other was based on the theoretical research having been advanced in recent years. The differences were shown about the blade contours and the blade section distributions.

Moreover, prototypes of SCPs were designed using the theoretical design method on several design points corresponding to the practical use range. Then, the series of standard geometric form for practical SCP model was determined based on the geometric form acquired by these prototype designs.

Using the theoretical design method and this series, two models of SCPs were designed, manufactured, and tested in a large cavitation tunnel at the National Maritime Research Institute. As the result, the performance of the practical SCP model was shown to be equivalent or better than that of the theoretically designed SCP.

1. 緒言

高速艇では高馬力の主機が装備され、プロペラ回転数が高いためにプロペラ翼面上にキャビテーションが発生しやすくなる。通常型のプロペラではキャビテーションが多く発生するとキャビテーションによる激しい振動と共にスラスト・ブレイクダウンと呼ばれる現象が起き、スラスト、効率ともに急激に低下する。

これらの問題に対して考案されたのがスーパーキャビテーション・プロペラ（以下 SCP とする）である。SCP はプロペラ設計点で積極的にキャビテーションを起こすことにより、スーパーキャビテーション状態（以

下 SC 状態とする）とし、その状態で必要な推力を高効率で実現できる。

近年、船舶の高速化が推し進められ SCP の需要も高まってきた。SCP に関する論文も重要性を増し、SC 翼型や理論設計法、理論的性能解析などに関する論文もこれまで数多く発表されている。

従来、SSPA で開発された SCP 設計法（以下 SSPA 法とする）¹⁾ が主流とされてきた。SSPA 法は、系統試験結果をベースとした（設計図表による）設計法であり、信頼性は高いものの、翼数、ピッチ、展開面積比等に制限があるために適用範囲は限られて、性能面でも改善の余地を残していた。

近年、著者の一人らによって SCP の理論的研究^{2),3)} が進められ、渦格子法を用いた SCP 設計法や性能解析結果が報告されている。^{4),5)}（以下 海技研法とする）最近ではトランスキャビテーションプロペラの考え方を

* ナカシマプロペラ㈱設計部

** 海上技術安全研究所輸送高度化研究領域

導入した理論設計法が開発され、SCP の高効率化がさらに図られている。^{(9),(7),(8)}

しかし、理論設計法は高性能でかつ広範囲のプロペラに適用できる反面、設計結果の信頼性や設計所要時間、複雑さ等に問題がある。とくに設計毎に翼断面形状が変化すると設計を難しくし、結果的に信頼性を失うことになりかねない。

したがって系統試験結果（データベース）の信頼性、簡便さと、理論計算の高性能、広範囲性をうまく融合した実用的な SCP 設計法が望まれる。（これを実用型 SCP 設計法と呼ぶものとする。）今回、その母型となる実用型 SCP 標準形状の開発を行った。

本論文では、まず SSPA 法と海技研法を用いて SCP を試設計し、両設計法による幾何形状の主要な違いを確認した。次に広範囲の設計条件で海技研法により SCP 理論設計を行い、それらの結果から実用型 SCP 標準形状を導いた。そして海技研法による理論設計 SCP と実用型 SCP との模型を製作し、キャビテーション試験水槽でプロペラ単独性能の比較試験を実施したので、これらの結果について報告する。

2. SSPA 法と海技研法による SCP 設計

2.1 SCP 設計

SSPA 法と海技研法による SCP 幾何形状の違いを明らかにするために、SCP の平均的な設計点において直径指定（700mm）で SCP を設計した。SCP 設計条件を Table 1 に示している。

Table 1 Design conditions of SCPs

Number of Blade	3
Diameter (mm)	700
J	1.40
K_T	0.16
σ_v	0.40

SSPA プロペラの設計図表は 3 翼、展開面積比 0.50 の 1 種類がある。SSPA 法では本図表を用いてプロペラ主要目、ピッチ分布、キャンバー分布、翼幅分布等を求めた。

海技研法では著者の一人らの開発した、渦格子法を用いた SCP 理論設計プログラムを適用した。

2.2 プロペラ幾何形状

SSPA 法と海技研法によって設計した SCP 主要目を Table 2 に示している。展開面積比が異なるのは SSPA

法では設計図表により 0.50 に制限され、海技研法では設計結果として決定されるためである。ピッチは SSPA 法の方が若干大きめとなった。

次に半径方向の分布形状について、翼輪郭形状を Fig.1 に、各 r/R でのピッチ比 H/D を Fig.2 に、フェイスキャンバーを直径で割った値 f_{face}/D を Fig.3 に示す。また 0.7R の断面形状を Fig.4 に示す。

Table 2 Main particulars of SCPs

MP No.	MP01	MP02
Number of Blade	3	
Diameter (mm)	700	
aE	0.50	0.55
H/D (0.7R)	1.766	1.689
Boss Ratio	0.19	
Design Method	SSPA	NMRI

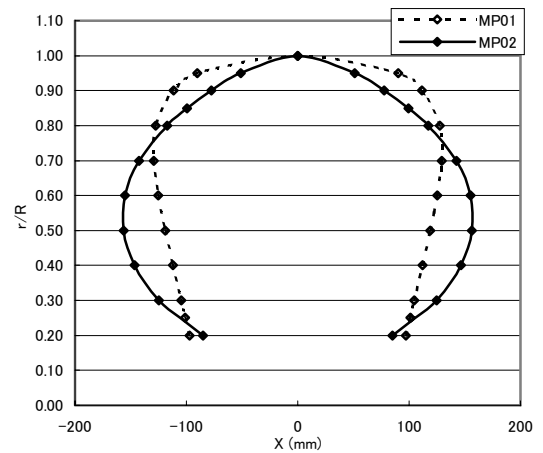


Fig.1 Blade contours

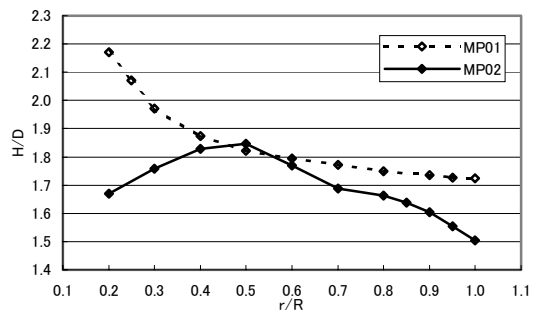


Fig.2 Pitch distributions

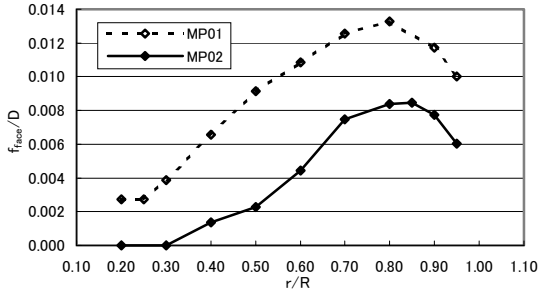


Fig.3 Distributions of maximum face camber

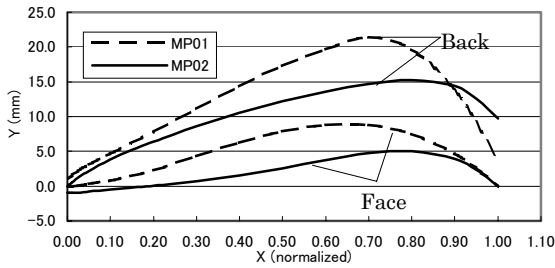


Fig.4 Blade sections (0.7R)

翼輪郭形状は海技研法が 0.7R より翼先端側でかなり狭くなっている。これは Lerbs の最適循環分布⁹⁾より得られた揚力係数に対して、SC 状態で揚抗比が最大となるような翼幅を求めるためである。一般に SCP で適用される翼幅分布と比較して翼先端側がかなり幅狭であることから、実用型 SCP 設計で修正してみる価値はあるものと思われる。

ピッチ分布について、0.5R から翼先端側ではともに逆減分布であるが、減少量は海技研法が大きい。翼根側では逆方向の分布形になっている。

最大フェイスキャンパーの半径方向の分布を比べると、ともに 0.8R 付近にピークを持つ、よく似た分布形であるが、SSPA 法がかなり大きい。

また、翼断面形状は、両設計法で異なる。SSPA 法による断面形状がフェイス面側を Johnson3 項翼型、翼厚分布を TMB 翼型のものとしており²⁾、ピッチからキャンパー値を決定しているのに対し、海技研法はフェイス面側が Johnson5 項翼型を基とし、さらに循環分布、圧力分布による揚力面補正を行っている。キャンパーは翼幅と関連して、必要揚力を得るように求められる。バック面側はフェイス面と翼前縁端形状から得られるキャビティ形状の最も内側のライン(フェイス面に近い端のライン)として定義される。そのため海技研法では SSPA 法とは異なり、各 r/R での最大翼厚位置が変わり、前縁側へ移る。

3. 実用型 SCP 設計

実用型 SCP の標準形状選定にあたり、現在実用されている SCP について J , K_T , σ_v を実績調査した。その結果を Fig.5, Fig.6 にハッチングして実用域として示している。この実用域内で J , K_T , σ_v の代表点 3 点を選び、それらを組み合わせて Table 3 に示す 7 ケースについて海技研法により SCP を試設計した。

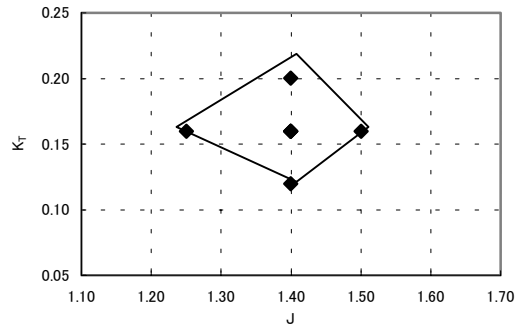


Fig.5 Practical use range and design points of SCPs using NMRI method (K_T)

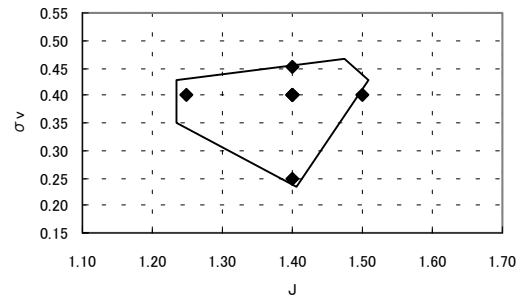


Fig.6 Practical use range and design points of SCPs using NMRI method (σ_v)

Table 3 SCPs design points (NMRI method)

J	K_T	σ_v
1.40	0.16	0.40
1.25	0.16	0.40
1.50	0.16	0.40
1.40	0.12	0.40
1.40	0.20	0.40
1.40	0.16	0.25
1.40	0.16	0.45

翼幅および f_{face}/D を Fig.7, Fig.8 に、各 r/R でのピッチ比 H/D および最大翼厚比 T_{max}/D を Fig.9, Fig.10 に、0.7R の断面形状を Fig.11 に示す。

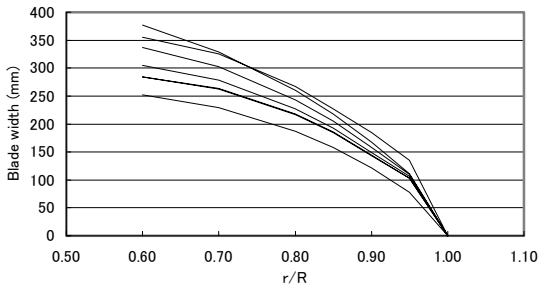


Fig.7 Distributions of blade width

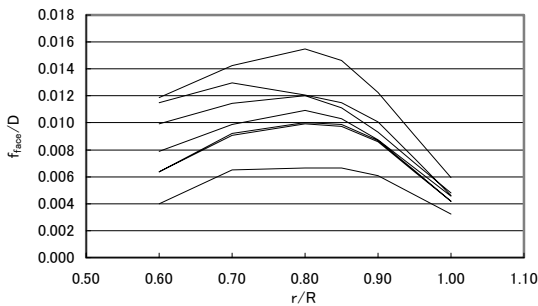


Fig.8 Distributions of maximum face camber

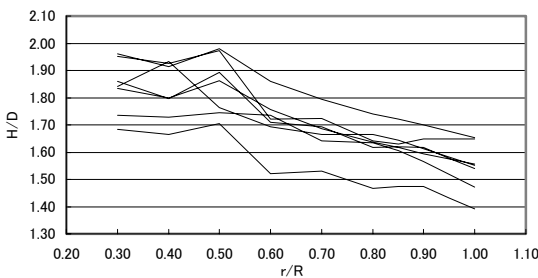


Fig.9 Pitch distributions

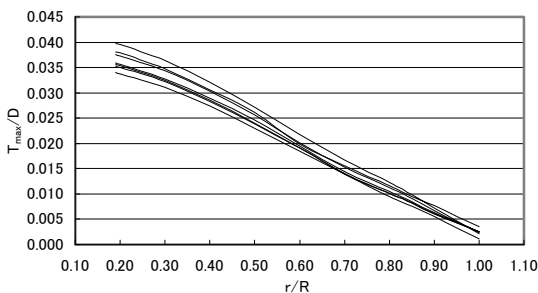


Fig.10 Distributions of maximum blade thickness

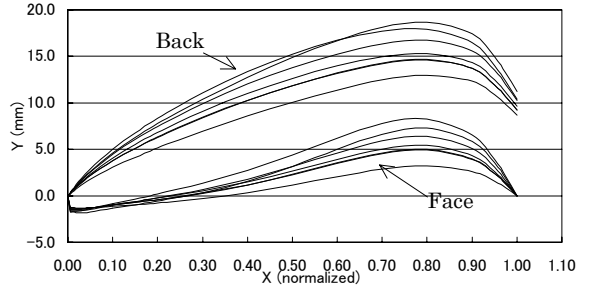


Fig.11 Blade sections (0.7R)

各分布では、設計条件の違いによって値の大小はあるものの、分布形はよく似ていることが確認された。

以上の結果をふまえて実用型 SCP の標準形状を下記要領で定めた。

- (1) ピッチ分布、キャンバー分布、最大翼厚分布、翼断面については、海技研法による試設計結果を単純平均し、半径方向でフェアな形状とする。
- (2) 翼幅分布については、海技研法より翼先端側で少し幅広（海技研法より 0.95R で約 10%増）とする。

次に、Table 1 の設計条件で展開面積比を 0.55 として、上述の標準形状を用いて実用型 SCP を設計した。平均ピッチについては、著者の一人らの開発した、渦格子法を用いた SCP 性能解析プログラム(SC-VLM)⁹⁾を用いて定めた。実用型 SCP の主要目を Table 4 に、翼輪郭と翼断面形状(0.7R)を Fig.12 に示している。

Table 4 Main particulars of practical SCP

MP No.	MP03
Number of Blade	3
Diameter (mm)	700
aE	0.55
H/D (0.7R)	1.700
Boss Ratio	0.19
Design Method	Present Method

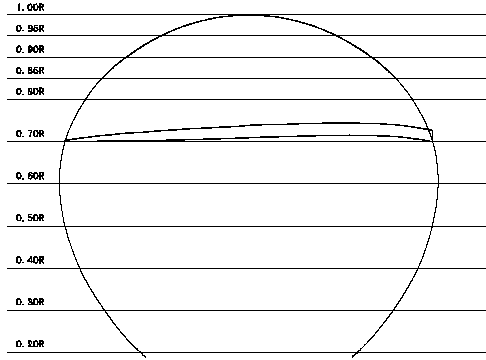


Fig.12 Blade contour and section (0.7R) of practical SCP

4. SC-VLM による性能解析

SSPA 法, 海技研法により設計した SCP と実用型 SCP との性能を比較評価するために, SC-VLM を用いてプロペラ単独性能を計算した。計算はキャビテーション数を $\sigma v=0.4$ で一定とし, J を変化させて行った。

(1) SSPA 法 SCP と海技研法 SCP の比較

計算結果を Fig.13 に示す。また, Table 5 に設計点におけるスラスト係数 K_T , トルク係数 K_Q , 単独効率 η_o の値を示す。SSPA 法 SCP では J が 1.4 より大きくなると収束解が得られなかった。また, SSPA 法 SCP では $J=1.35$ にピークがあり, J がそれ以上の値になると, K_T , K_Q , η_o とともに減少している。設計点では非 SC 状態になり, η_o も海技研法と比較して約 6% 低下している。また, 全般的に SSPA 法 SCP は海技研法 SCP と比べて K_T , K_Q の値が大きめとなっている。

(2) 海技研法 SCP と実用型 SCP の比較

計算結果を Fig.14 に示す。また, Table 5 に設計点における K_T , K_Q , η_o を示す。海技研法 SCP と比較して実用型 SCP は, K_T , K_Q が若干大きめで η_o の差はほとんど無い。ほぼ同等の性能が期待される。

Table 5 Propeller open characteristics calculated by SC-VLM ($J=1.4$, $\sigma v=0.4$)

	K_T	$10K_Q$	η_o
MP01	0.1537	0.4786	0.7151
MP02	0.1541	0.4422	0.7762
MP03	0.1616	0.4645	0.7748

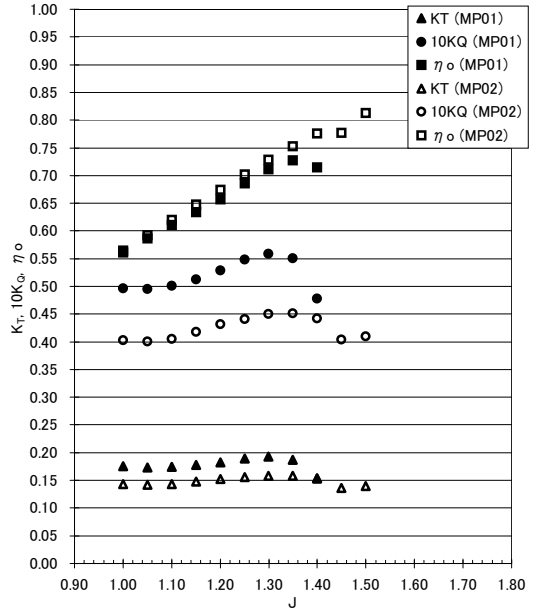


Fig.13 Comparison of propeller open characteristics calculated by SC-VLM between MP01 and MP02 ($\sigma v=0.4$)

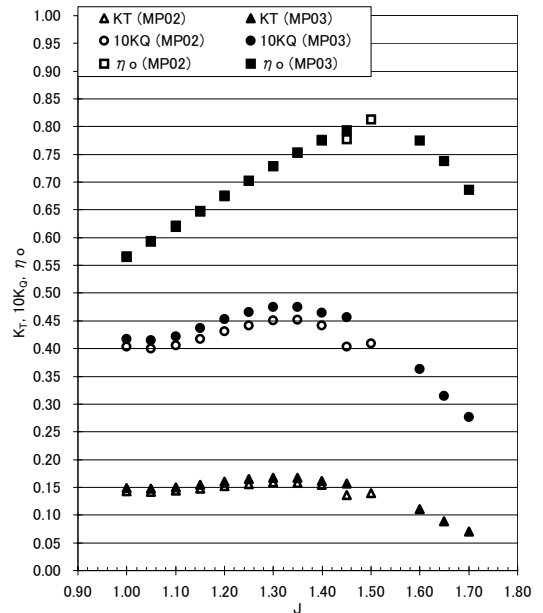


Fig.14 Comparison of propeller open characteristics calculated by SC-VLM between MP02 and MP03 ($\sigma v=0.4$)

5. 実用型 SCP と海技研法 SCP の比較模型試験

前章で性能の比較計算した、実用型 SCP と海技研法 SCP のプロペラモデルを製作し、海上技術安全研究所の大型キャビテーション試験水槽で、非キャビテーション状態及び $\sigma v=0.4$ のキャビテーション状態についてプロペラ単独性能試験を行った。計測は主動力計 (Kempf&Remmers 社製 J26 型 容量;スラスト 600kgf、トルク 30kg-m 最大回転数 ; 60rps)を用いた。

(1) 非キャビテーション状態

試験結果を Fig.15 に示す。海技研法 SCP に比べて、一般的に実用型 SCP の K_T , K_Q の値が大きくなっている。また、 η_o も少し増えている。

(2) キャビテーション状態

試験結果を Fig.16 に、荷重度 C_T と η_o との関係を示す。SC-VLM による性能計算と同様に試験でも、 K_T , K_Q ともに実用型 SCP が少し大きい。 η_o については、SC-VLM ではほとんど同じだったが、試験では差がみられ、実用型 SCP が少し良くなっている。設計点 $J=1.4$ での試験結果を Table 6 に示す。

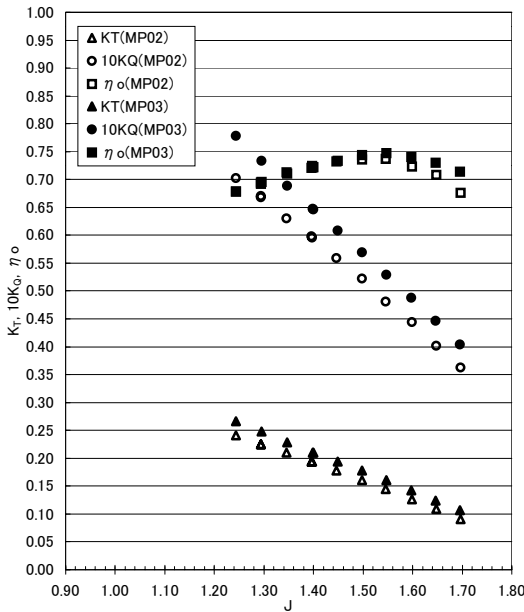


Fig.15 Comparison of Propeller open characteristics between MP02 and MP03 (experiment under Non-cavitation condition)

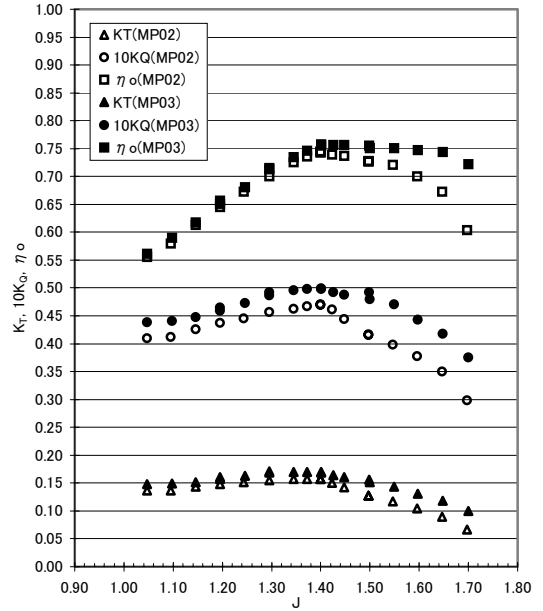


Fig.16 Comparison of propeller open characteristics between MP02 and MP03 (experiment under $\sigma v = 0.4$ condition)

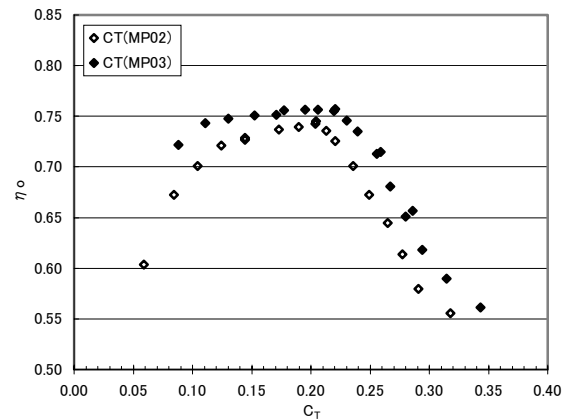


Fig.17 Comparison of propeller efficiency between MP02 and MP03 (experiment under $\sigma v = 0.4$ condition)

Table 6 Propeller open characteristics of MP02 and MP03 (experiment at design point)

	J	K_T	$10K_Q$	η_o
MP02	1.400	0.1570	0.4701	0.7437
MP03	1.400	0.1693	0.4989	0.7562

実用型 SCP と海技研法 SCP を比較すると、設計点では K_T で 7.8%, K_Q で 6.1%, η_0 で 1.7% の差がある。Table 5 と Table 6 をあわせてみると、実用型 SCP について試験結果と SC-VLM を比較して、 K_T で 4.7%, K_Q で 7.4%, η_0 で -2.4% の差がみられる。さらに同荷重量に対する η_0 でみると、プロペラ効率がかかなり向上していることがわかる。

また、実用型 SCP と比較して海技研法 SCP ではやや厚いキャビティに覆われていた。

6. 結 言

1 例について SSPA 法と海技研法により SCP を試設計してプロペラ幾何形状を比較し、とくに海技研法では、翼先端付近の翼幅がかかなり幅狭となることを確認した。

次に、SCP 設計実績による J , K_T , σ_v の実用域をカバーするように 7 ケースの SCP を海技研法で理論設計し、キャンパー分布、ピッチ分布、翼断面の分布形の変化を確認した。

そこで 7 ケースの平均的な SCP 幾何形状をベースとして、翼幅分布を少し翼先端付近で幅広にして、実用型 SCP の標準形状を定めた。また、平均ピッチを SC-VLM 計算により定めるものとした。

そして、代表的設計点において実用型 SCP を試設計して、海技研法による SCP と比較模型試験を行い、設計点 ($J=1.4$) においてプロペラ効率 η_0 の 1.7% アップを確認した。 K_T , K_Q も増加しているため、同一荷重量で比較すると効率差はかなり大きい。1 例ではあるが本報告の実用型 SCP は、海技研法によるものと同等以上の高効率であることが模型試験により確認された。

今後、本実用型 SCP を標準形状とした系統試験を実施して、その試験結果をデータベースとし、標準形状で不十分な場合、SCP 理論計算で補う形の実用的 SCP 設計法の開発を進めたい。

一方、揚力線理論に基づいた Lerbs の最適循環分布に替わる、SCP に適した最適循環分布の理論的検討も進めていく必要があるだろう。

参 考 文 献

- 1) Rutgersson, O. : Supercavitating Propeller Performance. Influence of Propeller Geometry and Interaction between Propeller, Ruder and Hull. SSPA Publ., No.82 (1979)
- 2) 工藤達郎, 右近良孝 : 第 5 章 高速船用プロペラの理論とその応用, 次世代船開発のための推進工学シンポジウム, 日本造船学会, (1991.4),

pp.127-166

- 3) 右近良孝他 : 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
- 4) 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.101-111
- 5) 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
- 6) 工藤達郎, 右近良孝, 加藤洋治 : トランスキャビテーション・プロペラの理論的設計に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 186 号 (1999.12), pp.41-49
- 7) Ukon, Y., Kudo, T., Fujisawa, J., Sasaki, N. : Computational Design of Trans-Cavitating Propellers and Experimental Evaluation of Their Performance. 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, (2004.8)
- 8) 右近良孝他 : SCP 理論設計法の実用プロペラへの応用, 西部造船学会会報, 第 100 号 (2000.9), pp.133-143
- 9) 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

記 号

J	: プロペラ前進率	$J = \frac{V_A}{n \cdot D}$	
K_T	: スラスト係数	$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$	
K_Q	: トルク係数	$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$	
σ_v	: キャビテーション数	$\sigma_v = \frac{P - P_v}{0.5 \cdot \rho \cdot V_A^2}$	
η_0	: プロペラ効率	$\eta_0 = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q}$	
C_T	: 荷重量	$C_T = \frac{8 \cdot K_T}{\pi \cdot J^2}$	
V_A	: プロペラ前進速度	T	: スラスト
N	: プロペラ回転数	Q	: トルク
D	: プロペラ直径	ρ	: 水密度
H	: プロペラピッチ	P	: 静圧
aE	: 展開面積比	P_v	: 水の蒸気圧