

# スーパーキャビテーション・プロペラの設計に関する研究

右近 良孝\*

## Research on Design and Application of Super-Cavitating Propellers

by

Yoshitaka UKON

### Abstract

This paper describes extensive work on the design of supercavitating propellers. In this research, outstanding results were obtained.

- (1) An accurate non-linear prediction theory for hydrodynamic characteristics of two dimensional supercavitating hydrofoils has been developed, based on a higher-order vortex panel method. Reasonable agreement with existing experimental data was obtained by this theory.
- (2) An effective design theory for two-dimensional supercavitating hydrofoils was developed, extending the principle of the above-mentioned theory.
- (3) High performance supercavitating hydrofoils were developed. Experimental results showed that the lift/drag ratio was around twenty one at an angle of attack of 1.5 degrees and a cavitation number of 0.21.
- (4) A reliable theoretical design method for supercavitating propellers was developed. Several high performance supercavitating propellers were designed and examined experimentally in the SRI large cavitation tunnel.
- (5) A rigorous theory was developed for predicting the hydrodynamic characteristics of supercavitating propellers. The predicted results agreed with the experimental results to within a few percent.
- (6) The present theoretical design method was successfully applied to the propeller of a racing boat. In the full scale test, the racing boat with the designed propeller achieved a maximum speed of about 97km/h and was faster than that with a Rolla propeller.

---

\* 推進性能部

原稿受付 平成8年3月29日

審査済 平成8年9月11日

—目次—

1. はじめに	2
2. スーパーキャビテーション・プロペラ とは	3
3. スーパーキャビテーション翼型の研究	4
3.1 はじめに	4
3.2 スーパーキャビテーション翼型 の性能計算法	4
3.3 高性能スーパーキャビテーション 翼型の開発	5
3.4 スーパーキャビテーション 翼型設計法	6
3.5 スーパーキャビテーション 翼型性能計測	7
3.6 まとめ	11
4. スーパーキャビテーション・プロペラ の設計法及び性能計算法の研究	12
4.1 はじめに	12
4.2 スーパーキャビテーション・プロペラ の設計法の開発	12
4.2.1 既存設計法	12
4.2.2 新設計法（その1）	13
4.2.3 新設計法（その2）	15
4.2.4 新設計法（その3）	16
4.3 スーパーキャビテーション・プロペラ の性能計算法の開発	18
4.4 スーパーキャビテーション・プロペラ の性能計測	21
4.5 まとめ	21
5. 設計法の適用例	22
5.1 50ノット高荷重超高速船プロペラ	22
5.2 60ノット高荷重超高速船プロペラ	23
5.3 競艇用プロペラ	24
6. まとめ	28
6.1 総合成果	28
6.2 今後の課題	29
謝辞	29
参考文献	29

## 1. はじめに

本研究は平成4年～6年度の3年間にわたって船舶技術研究所（以下、船研という）の指定研究として行われた。本報告ではこの研究で得られた総合的成果について平易に述べる。

この研究が開始される前の1980年代後半には、超高速船に関心が大いに向けられ、テクノ・スーパーライナを始め、海外でも同様のプロジェクトが開始された。この種の船艇のプロペラとして、ウォータージェット

ト・ポンプが採用されたが、プロペラサの専門家の間では、疑問の声があった。ポンプ・ダクト部の長い管路での摩擦損失や水を高くに持ち上げ、船内に積載することに依るエネルギー損失に起因する劣悪な効率や重量増加、ゴミ等の海上浮遊物の吸込みによるポンプの停止、取水口及びインペラ翼並びにダクト内のキャビテーションによる騒音・振動及びエロージョンの発生、波浪中での空気吸込みによるエンジンのオーバーレブ（回転数の過上昇）などのウォータージェット・ポンプ固有の深刻な問題があることが知られていた。高速艇においてウォータージェット・ポンプがプロペラサとして最近用いられるようになってきたのは、推進効率の観点からではなく、諸外国では浅吃水船とせざるを得ない場合に用いられており、この他操船上の要求によるものと思われる。

これに対して、超高速船用のプロペラサとして、効率に関してスーパーキャビテーション・プロペラ（SCP）が最も優れていることは学問上、良く知られていた [1, 2]。このため、米国を始めとする先進国、特に米海軍において熱心に SCP の開発研究が行われたが、その設計法が確立できず、十分な成果は挙げられなかった。設計で狙った効率を得られないとか、効率の良いプロペラが得られても、設計で要求するスラスト（推力）を発生しない [3] ことなどから、各国とも SCP の開発を断念した。例外的に、SSPA から設計チャートが発表された [4] が、必ずしも高性能とは言えないものであった。この様に高性能 SCP の設計法がなかったため、SCP を超高速船に採用するには、相当の設計リスクを覚悟する必要があった。

船研では、効率の点において他のプロペラサより明らかに格段に優れている SCP を設計するためのツールを開発し、具体的に SCP の設計法を開発する研究プロジェクトを平成4年度から平成6年度の3年間にわたって船研の指定研として開始した。一方、船研は（株）日本造船研究協会と共同研究（平成3年度～5年度）を結び、造船所・プロペラ・メーカー及び大学と協力して、具体的に従来より大幅に効率の高い SCP の開発研究を行った。

SCP の研究の進め方としては、本指定研に先立って、一般研「高速船プロペラサの性能予測の研究」において行った調査研究の成果 [5] を活用した。まず、文献調査を行った結果、既存の SCP の設計法では思う通りのスラストと効率を得られない。一般に、設計スラストより15%低いスラストしか得られないことが明らかになった [5]。従来の SCP 設計法 [3] を用いて模型プロペラを設計した結果、効率が低く、設計点でスーパーキャビテーション（SC）状態とならないことが分かった [6]。これは、従来用いられていた

SCPの設計に用いられる翼素の設計計算があまりにもズサンであることによる。このため、先ず、SC状態の翼素の性能計算法及びプログラム・コードを開発した [7, 8]。これとともに、翼素の性能計測法も研究した [9]。次に、SCPの設計法とそのプログラム・コードを開発した [8, 10]。同時に、SCPの性能計算法とプログラム・コードを開発し [11, 12]、設計精度の向上を図り、最終的に設計されたSCPについてのみ、模型を製作し、模型実験で所定の性能が得られることを確認した。この模型実験においても計測精度を確保するため、計測法について注意を払って行った [13]。更に、設計法の厳密化を図る [14, 15] とともに、模型プロペラの他にも、実際に用いられている高速艇にSCPを適用し、その実用性及び有効性を確かめるため、競艇用プロペラを設計し、競艇場において性能確認を行い、従来のプロペラより格段に高性能であることを証明した [16]。

この他、SCPの他にも、高速船艇用プロペラにおいて、理解が充分でない現象や問題についても取り組んだ [17~21]。

本報告では、以上に述べた研究成果について総合的に取りまとめて述べる。

## 2. スーパーキャビテーション・プロペラ (SCP) とは

一般商船用プロペラは回転数が毎秒1~2回転程度と遅いものの、プロペラ直径が大きいため、プロペラ翼の端になるに従ってプロペラへの流入速度は大きく

なる。このため、翼の表面やまわりの圧力は低くなり、ほぼ真空に近い圧力 (蒸気圧) より低下すると、常温でも蒸発現象が生じ、Fig. 1 に示す様に翼の表面が無数の蒸気の泡や気泡が合体して膜状になったもの (キャビティという) で覆われる。この現象はキャビテーション (Cavitation) と呼ばれる。キャビテーションが発生すると、プロペラの効率や推力が低下したり、船体の起振源となって、不快な振動・騒音が発生したり、気泡がつぶれる時の衝撃圧で翼の表面が損傷したりする。これらのどの問題についても、過去100年間の研究で進展はあったものの、未だにそのメカニズムが十分に解明されておらず、キャビテーションの引き起こす問題を思いのままに制御できていない [22]。

キャビテーションの状態を説明するための幾つかの分類法があるが、キャビティの長さが翼の長さより長くなると、スーパーキャビテーションと呼ばれ、短いと、部分キャビテーション又はサブキャビテーションと呼ばれる。これをプロペラの要素である翼型で対比させ、Fig. 2 に示す。

船を高速で航走させようとする、通常、比較的小さい直径のプロペラを毎秒20~30回転の高速で回転させるため、プロペラ翼面の全部がキャビティに覆われ、SC状態となったりする。エアロfoil型の翼素からなる一般商船用プロペラをこの様な状況で使用すると、推力が出ず、あたかも空回りしたかのごとくになり、目的の船速が出ない。また、Fig. 2 に示す様に、SC状態となるエアロfoil型であるため、キャビティも含め翼素としての抗力が大きくなるので、プ

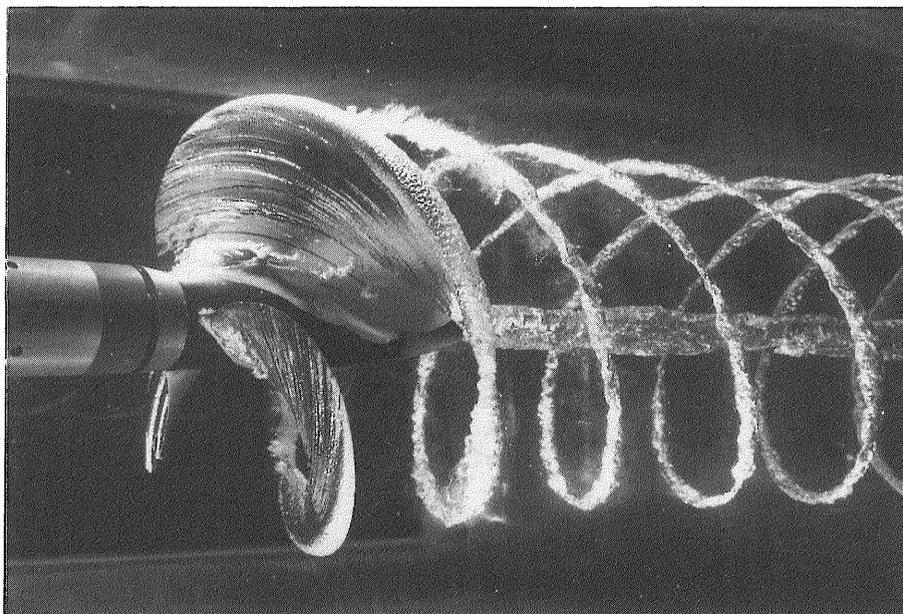


Fig. 1 在来型高速艇用プロペラに発生したキャビテーションの写真

ロペラの効率が大幅に劣悪化する。

一方、スーパーキャビテーション (SC) 翼型はこの様なキャビテーション状態となることを前提にして設計されるので、適切に翼型を設計すると、エアロfoil翼型にキャビテーションが発生していない時や部分キャビテーション状態となっている時と同等の性能を発揮させることができる。翼型の背面形状はキャビティの内に入るので、任意となり、正面形状のみしか設計の自由度がないが、最適な正面形状はキャビテーション流理論 (Cavity Flow Theory, 空洞理論) [23, 24] を用いることによって得られる。この様な翼素まわりの流れ場をプロペラで実現すれば、効率の優れたプロペラを設計できることになる。これが、スーパーキャビテーション・プロペラ (SCP) の原理である。

よって、SCP の設計法を確立するためには、SCP そのものの設計法はもとより、SC 翼型の設計法も重要となる。更に、設計した SCP が所要の性能を発揮するかの確認は模型試験や実機試験で行う。しかし、模型プロペラは非常に高価であるので、性能を予め評価できる SCP の性能計算法もツールとして必要となる。本研究ではこれらの理論とプログラム・コードの開発を行った。

### 3. SC 翼型の研究

#### 3.1 はじめに

SCP は前述の様に通常型のプロペラと異なる概念で設計されるので、プロペラの翼断面形状はその流体力学的状況に対応して最適化された形状となる必要が

ある。この翼断面を切り取った翼型について、性能計算、設計及び性能計測が精度良くできないと良い SCP を設計することはできない。よって、SCP そのものの研究の前段階として SC 翼型の研究を行った。

#### 3.2 SC 翼型の性能計算法

キャビテーション状態の翼型性能計算法は古くから提案されており、花岡 [23] 及び西山の理論 [24] は有名であり、現在でもキャビテーションが発生したプロペラの性能計算やキャビテーションの発生範囲の推定 [25~27] に使われている。これらの計算法は線型理論と呼ばれるものであり、翼の前縁端が、カミソリの刃の様に鋭くとがっており、その点からキャビテーションが発生することを前提としている。一方、実機では実用上の観点から前縁端にある程度の厚みをつける必要があること、また、設計条件によっては、粘性影響でキャビテーションが必ずしも前縁から発生しないことがあり、この様な場合に線型理論を適用することに無理がある。このことから、非線型理論による SC 翼型性能計算法を開発することとした。

本研究では、非線型理論のうちでも、最も進んだ高次渦パネル法 (Higher Order Vortex Panel Method) に基づく SC 翼型性能計算法を採用することとした。この方法は翼型の表面を多数のパネルで表現し、各パネルでの渦の強さを一定にしたり、一次式や二次式などで変化させて、翼の性能等を計算する方法であり、航空工学でかなり前から用いられている。SC 翼型の計算で高次渦パネル法を用いるのは、翼前縁近傍では SC 翼型はエアロfoil翼型より格段に薄いためである。非線型理論で良く用いられる渦の強さ一定のゼ

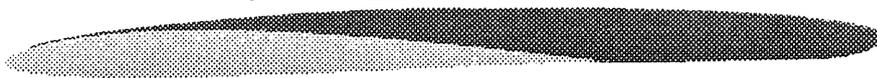
#### サブ・キャビテーション



抵抗小

$$C_D = 0.008$$

#### スーパー・キャビテーション エアロ・foil型



抵抗大

$$C_D = 0.020$$

#### スーパー・キャビテーション SC翼型



抵抗小

$$C_D = 0.008$$

Fig. 2 翼型とキャビテーション

ロ次渦パネル法では「リーク現象」のため、計算精度が悪くなり、キャビテーションの計算が困難となるためである [27]。本研究では、計算量と精度の妥協として、一次渦パネル法 (LVPM; Linear Vortex Panel Method) に基づく計算法とした [7]。また、キャビティの数学的特異性を考慮し、計算効率を上げるため、翼正面やキャビティ後端は一次渦パネル、キャビティ表面はゼロ次渦パネル、キャビティ前端及び翼正面後縁端は特異渦パネルを用いた。

キャビテーションは層流剥離点から発生すること [25~27] が良く知られており、本計算法でもこの点

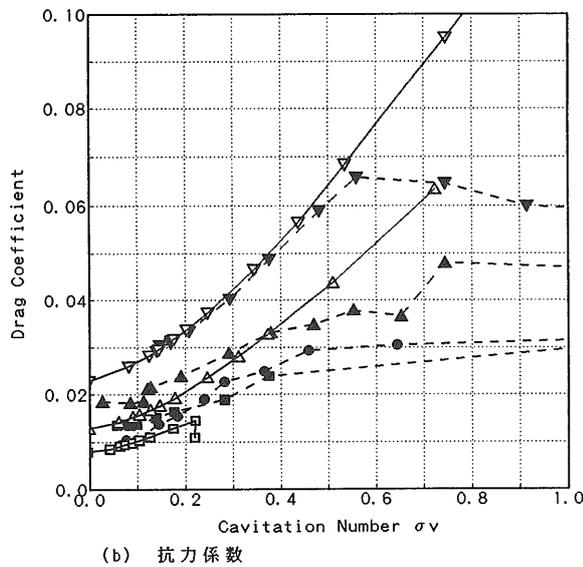
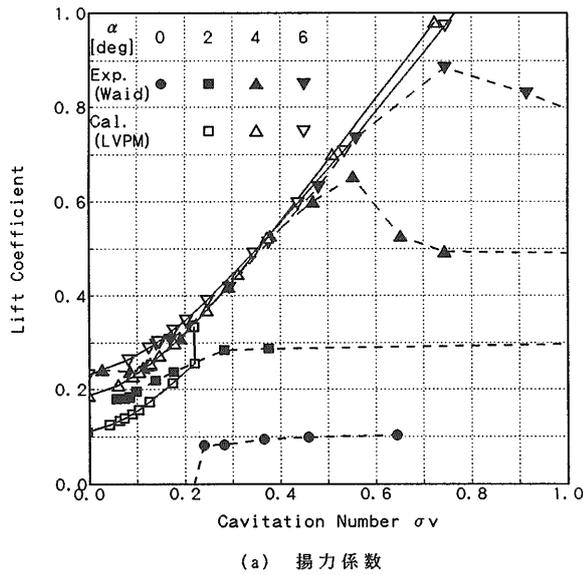


Fig. 3 Waid翼型キャビテーション特性に関する理論と実験の比較

を考慮している。キャビティの形状は逐次近似計算によって、境界条件を満たす様に行われる。翼に加わる力は各パネルに働く圧力を積分して求める。粘性影響は層流境界層理論を用いて計算している。

本計算法により、SC翼型のはしりとして有名なTulin 2項翼について計算し、カリフォルニア工科大学CITでWaidによって行われた実験 [28] と比較した。この結果を Fig. 3 (a)と(b)に示す。揚力及び抗力とも、大迎角の6°や4°で計算値と計測値は比較的良く一致するが、2°の低迎角では一致が良くない。

キャビティ長さに関して、本計算法と計算結果を比較したものを Fig. 4 に示す。計算によるキャビティ長さは計測値より大きく (縦軸がキャビティ長さの逆数となっていることに注意)、本計算法はキャビティの長さを長目に予測する。この原因として採用したキャビティ後端モデルが閉塞型 [23~25] によるものと考えられ、今後の課題と考えられる。

本計算法は定量的には完璧に実験値と一致しないものの、定性的には実験結果と良く一致する。一方、SC翼型の実験は後述の様に、特に抗力に関して精度の良い計測が難しいことから、本計算法は今後の理論的検討や設計に耐えられるものと判断した。

### 3.3 高性能SC翼型の開発

SC翼型として、前述のTulin 2項翼型が有名であり、SCPの翼断面として採用されてきた [3, 4]。しかしながら、この断面は翼前縁近傍で翼厚が非常に薄いため強度不足となるので、背面の翼厚を増して使用されたため、理論で予測された性能が発揮できなくな

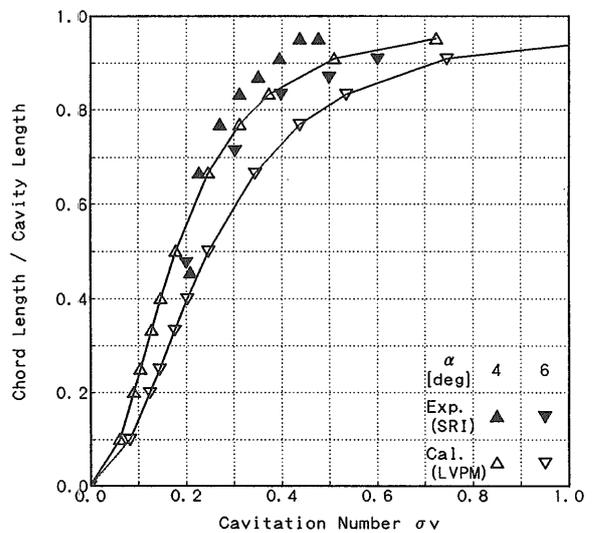


Fig. 4 Waid翼型のキャビティ長さの理論と実験の比較

ていた。そこで、先ず、Johnsonの線型理論[29]で性能の良い、即ち、揚抗比の高い翼型を検討し[5]、Johnson 5項翼型を基本形状とすることにした。Johnson翼型とは、キャビティの長さを無限大とした時に、正面形状が理論で与えられる特殊な多項式により表現され、揚抗比が最大となる翼型である。項数の増加とともに揚抗比は増加するが、5項以上としても、大幅に揚抗比は増加しない[5]ので、5項翼とした。線型理論で得られる背面形状では強度不足であるので、翼厚を若干増した翼型(Johnson Five Terms M.W. No.34)とした。Fig.5に示す。実験を行った結果、設計迎角である $2.07^\circ$ で、理論値の揚抗比32.3には達せず、計測で得られた揚抗比は迎角 $5^\circ$ で10程度であった。

この翼型を実用的に改良するため、正面形状は線型

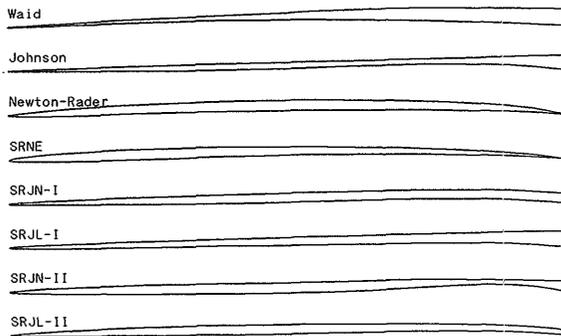


Fig. 5 各種SC翼型

理論で与えられるものとし、前述の一次渦パネル法を用い、設計迎角でいかなるキャビテーション数 $\sigma_v$ でも翼背面がキャビティを突き破らない様な背面形状を計算して求めた。得られた翼型(SRJN-I, M.W. No. 36)をFig.5に示す。この翼型は迎角 $2^\circ$ 、キャビテーション数が0.18で、15程度の揚抗比を与えることを実験で確かめた。これをFig.6に示す。

更に、翼型性能を向上させるため、線型理論で与えられるJohnson 5項翼型の正面での圧力分布を満たす様な正面形状を一次渦パネル法で求めた。この際、Fig.7に示す様に正圧のピークを85%から90%翼弦長位置に設定し、翼正面前半部の圧力を下げ、着力点を翼後縁側に寄せた。背面形状も一次渦パネル法で求めたが、翼強度上の余裕を考慮して、低迎角でもキャビテーションが発生し易くしたりする等の工夫を行った[8]。Fig.5に示すこの翼型(SRJN-II; M.W. No. 38)は、Fig.8に示す様に迎角 $1.5^\circ$ の時、キャビテーション数0.23で21、0.12で18程度の揚抗比を与えた。これらの値は理論予測値に近い値であり、設計の意図が着実に反映された翼型にほぼなった[8]。この翼型を、後述の様に、本研究で設計するSCPの基本翼断面とした。

### 3.4 SC翼型設計法

SC翼型性能計算法である一次渦パネル法は翼面形状を与えて、2次元翼面上の圧力分布を解くとともにキャビテーション発生域については、圧力分布が既知として、キャビティの形状を逐次近似によって変形させ、境界条件を満たす様に求めている。ここで、発想

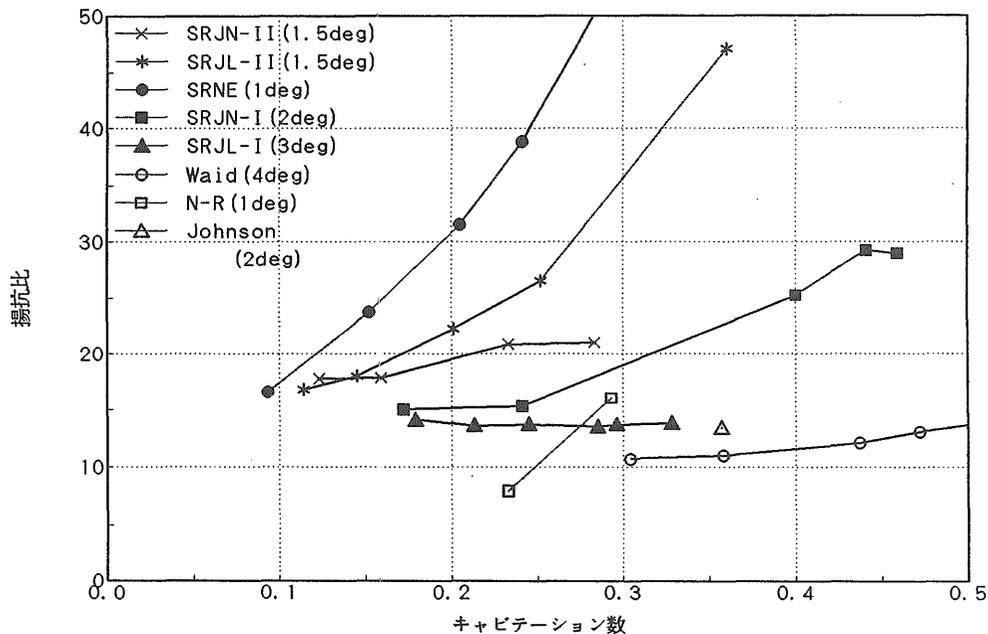


Fig. 6 SRJN-I翼型の揚抗比

を変えて、翼面自身をも変形可能なものとする、翼面、特に、翼正面側での圧力分布を与えると、逐次近似により翼形状を求めることができる。よって、正面側の最適圧力分布を与えることができればSC翼型が設計できることになる。前述のSRJN-II翼型はこの考え方によって設計されている。最適性能をもつ翼型の圧力分布が与えられれば、最適性能翼型が設計できる [7, 8, 9]。この手法はSC翼型以外についても応用できる手法で、今後も応用可能なアイデアの一つである。

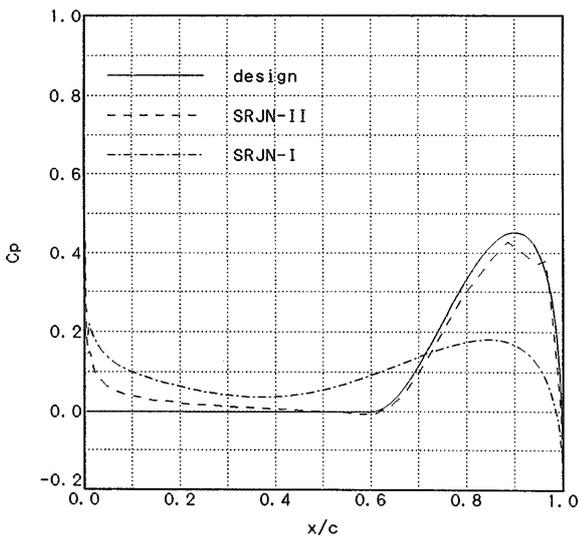


Fig. 7 設計圧力分布

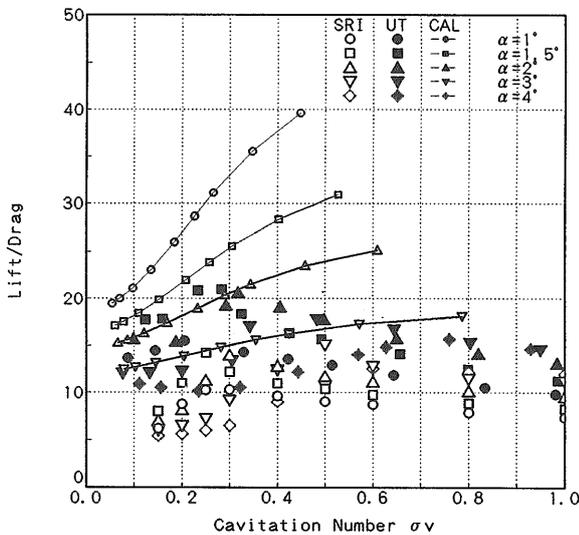


Fig. 8 SRJN-II翼型の揚抗比

### 3.5 SC翼型性能計測

翼型性能計算法の精度確認及び設計結果の評価をする上で、性能計測は重要な役割を果たす。また、実験は計算と比べて、時間と費用がかかるため、最近では理解が得られず、行いにくなっている。このような状況から、逆に、実験データは大変に貴重なものとなってきている。実験は理論の検証、モデル化などに使われることから、すべての基準となるので、計測精度の確保については万全の注意を払う必要がある。

船研の大型キャビテーション水槽は、建設当時の考えでは基本的にプロペラの性能計測を第一として設計された。このため、第一計測部は直径750mmの円筒形状であり、翼型性能計測、特に2次元翼型の試験が極めて行にくい計測部の形状になっている。2次元SC翼型の試験を行うため、Fig. 9に示す様に、計測部に各種の治具を設計、取り付けることにより、実験可能とした。翼型に加わる力は防水型三分力計(日章電機製;容量;揚力、抗力200kgf)で計測した [9]。また、翼型まわりの流場を計測するために、レーザ・ドップラ流速計(LDV)を用いた。このLDVを用いて、翼型の後流を計測することにより、抗力が求められることができ、三分力計による抗力計測との対応を調べることができる。本研究では、10個の2次元SC翼型その他、4個の3次元SC翼型について計測を行った。これらの翼型のうち、主なものについての要目をTable 1に示す。

本研究で行った翼型試験のうち、重要な幾つかの例について述べる。

#### (1) Waid翼型

この翼型は理論翼型であるTulin 2項翼型の翼厚を実用上の観点から増したもので、第一計測部における

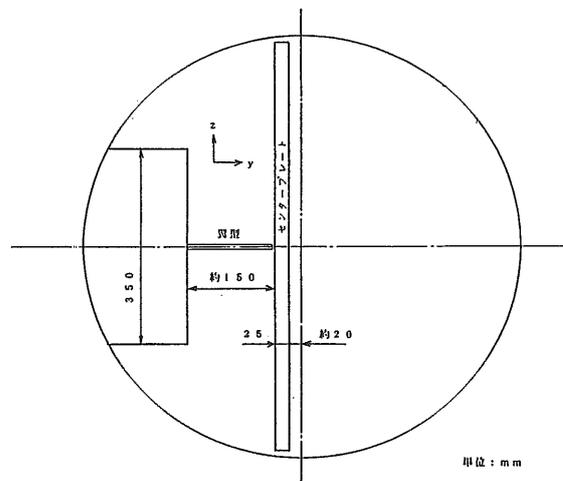


Fig. 9 SC翼型試験部

SC 翼型翼力計測法の精度確認に用いられた。先ず、キャビテーションが発生していない (NC) 状態について、翼型の揚力、抗力の計測を行った。船研での計測データを東京大学 (UT) と CIT での計測結果 [28] と比較した結果、東大と船研の計測値は揚力、抗力とも一致するが、CIT での計測値は両者について低い計測値となった。翼型の製作精度の違いとも思われるが、不明である。

キャビテーションが発生した状態の揚力及び抗力とも、船研の計測値は東大や CIT の計測値により大きくなった。揚力については、東大の計測値の違いは静圧の計測位置の違いによるもので、これを補正すると両者は近づく。一方、抗力の不一致については、船研の計測装置の一部であるセンタープレートからキャビテーションが発生したためでないかと推測され、計測部の改造を行った。Johnson 5 項翼型 [29] について

も計測値に同様の傾向がみられた。

(2) SRJN-I 翼型

Johnson 5 項翼型計測の結果、性能に関して不満が残ったので、前述の様に一次渦パネル法によって背面形状の設計を行った [9]。設計された翼型は SRJN-I 翼型と呼ばれ、改造された計測部で翼力計測を行った。NC 状態では、揚力に関して、東大の計測値と一致したが、抗力の計測値が若干大きくなる傾向は変わらなかった。キャビテーション状態では、揚力に関しては Fig. 10 に示す様に迎角 1.5° での両機関の計測は大略一致する。理論計算とは、船研の計測値が特に良く一致する。一方、抗力に関しては、Fig. 11 に示す様に船研の計測値は東大のそれより大きく、計算値と東大の計測値は一致する。また、迎角 4° の時も同様な傾向があり、船研の抗力の計測値は、Fig. 12 に示す様にキャビテーション数の低下とともに、2つのピー

Table 1 供試翼型の主要目

M.W.No.	29	30	31	32	34	36	38	40	41	42
Name	Step	Delta	A	Wald	Johnson 5 Term	SRJN-I	SRJN-II	Wedge	B	C
2D or 3D	2D	3D	3D	2D	2D	2D	2D	2D	3D	3D
Chord Length $c_f$ [m]	0.150	0.180	-	0.150	0.150	0.15	0.15	0.150	-	-
Chord Distribution	Const.	Linear Tapered	Tapered	Const.	Const.	Const.	Const.	Const.	Tapered	Tapered
Mean Chord Length $c_m$ [m]	0.150	-	0.0765	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.0785	0.0785
Semi-Span Length [m]	0.149	0.045	0.2470	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.2236	0.2236
Aspect Ratio	2	1.0	7.30	2	2	2	2	2	6.24	6.24
Wing Section	Newton-Rader	Flat	-	Tulin 2 Term	Johnson 5 Term	Mod. Johnson 5 Term	Mod. Johnson 5 Term	Wedge (10deg)	-	-
Material	Anodized Al 52S	Anodized Al 52S	SUS304	SUS303	SUS303	SUS303	SUS303	Anodized Al 52S	SUS304	SUS304

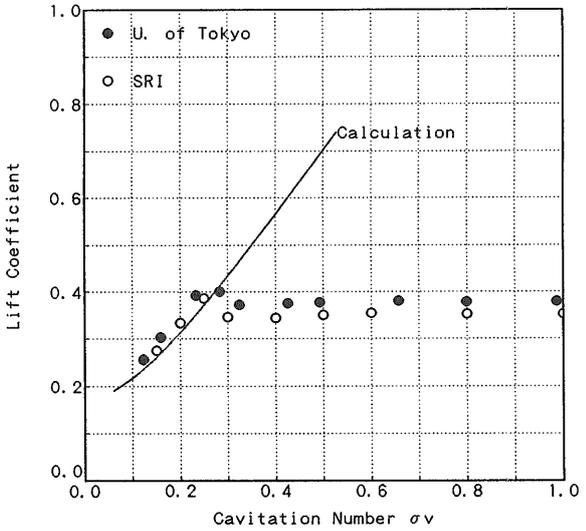


Fig. 10 SRJN-I 翼型の揚力 (迎角1.5度)

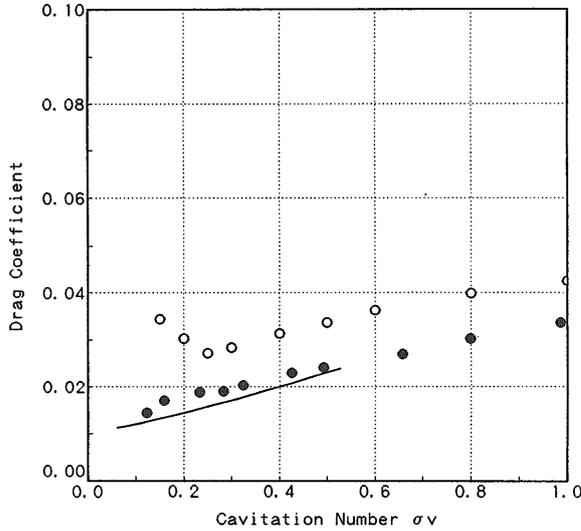


Fig. 11 SRJN-I 翼型の抗力 (迎角1.5度)

クが生じ、これらのピークの出現後、単調に減少する。この傾向は、東大での計測にも見られるが、東大のデータは理論との矛盾をおこすほど極端ではない。

船研の翼力計測法の精度を調べるため、LDVを用いて後流計測を行い、抗力を求めた。Fig. 12に示す様に、抗力計測値と完全に一致することから、翼力計測等の計測に問題があるのではなく、流場がその様な計測値を与える状況となっていることが明らかにされた。更に、この模型についてはキャビティのモデリングのためにキャビティ表面近傍の流速分布を計測し、境界層の発達の様子を調べたり、キャビティの不安定現象のメカニズム解明の努力がなされた。その一例 [17] として、LDVによるキャビティ表面近傍の流場の計測結果を Fig. 13に示す。縦軸は翼の上下面方向

の空間座標を示し、Z座標は翼弦長で無次元化されている。キャビティ表面の外側に境界層が存在し、その外端での流速はキャビテーション流理論の仮定と一致することを確認した。

(3) SRJN-II 翼型

前述 (3.3節) の様に、低迎角でもSC状態となり、より高い揚抗比が得られる様により厳密に設計した翼型 (SRJN-II) [9] について、翼三分力計測を行った。NC状態では、船研で計測された揚抗比は理論より30~40%低くなる傾向は同じであった。Fig. 8に示すキャビテーション状態での計測の結果、船研での揚力の計測値は理論計算と良く一致するが、抗力は大きくなり、揚抗比に関しては、理論や東大の計測値より小さくなる。これらの計測では、側壁の境界層の影響の補正な

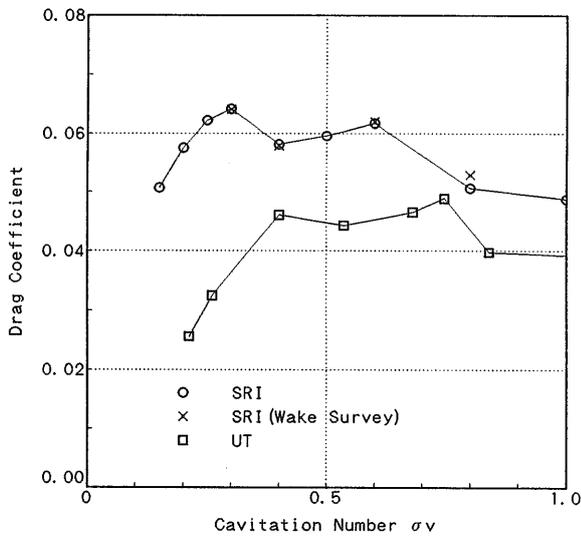


Fig. 12 LDVによる抗力計測 (迎角4度)

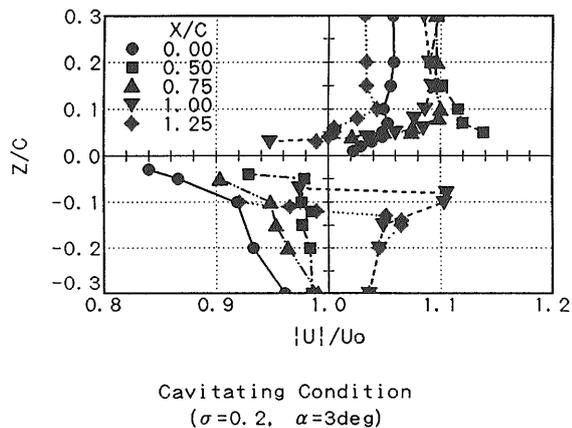


Fig. 13 キャビティ表面の流場計測

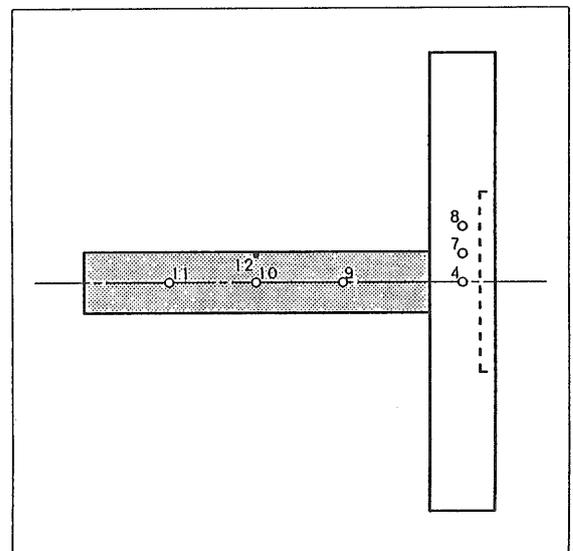
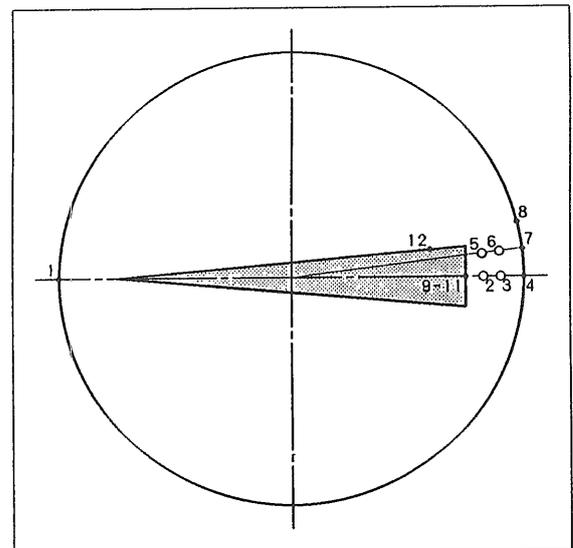


Fig. 14 楔型翼型

どをしていないことから、低キャビテーション数での計測においては今後、データ解析法を改良する必要があるものと思われる。

(4) 楔型翼型

SC翼型に発生するキャビテーションのモデル化のための知見を得るため、Fig. 14に示す翼型後縁に圧力孔を設けた楔型翼型 [30] についても計測を行った [31]。翼型以外にも、ディスク側面にも圧力孔を設け、前述の翼型の抗力計測において現れた異常現象の原因を検討した。Fig. 15に示す様にやはり、この翼型においても、船研での計測では抗力に2つのピークが現れた反面、Parkinの実験 [30] ではその様な異常現象は見られない。

(5) ステップ付翼型

SC翼型について理論計算をする時、キャビティ内は一定の蒸気圧になっているとして計算する。キャビ

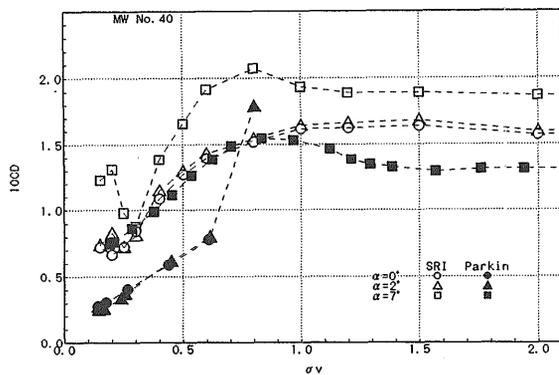
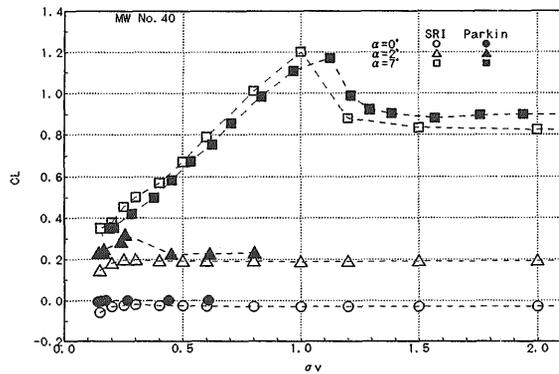


Fig. 15 楔型翼型の揚力と抗力の計測値

ティ内の圧力計測は多く行われているが、計測の難しさから、今一つ明確でない。特に、キャビティ表面が変動する場合や白濁した様相のキャビティとその内部圧力の関係について調べるため、Fig. 16に示すニュートン・レーダ翼型の前縁から20%の背面を削ぎ落としたステップ付翼型を製作した。ステップの後方の40%、60%、80%翼弦位置に圧力計を貼り付けて計測を行った [20]。キャビティ内の前縁側では、迎角にかかわらず、蒸気圧よりわずかに高い圧力になるが、後縁側のキャビティ変動域ではキャビティ内の圧力が蒸気よりかなり高く、一様な圧力となっていないことなどが分かった。

(6) デルタ翼

Fig. 17に示すデルタ翼は強い前縁剥離渦が発生し、Fig. 18に示す様な渦の構造をもつことが風洞での豊富な計測データで分かっている [32]。そこで、この翼型について渦の構造とキャビテーション発生メカニズムやキャビティ内の流れ構造について調べてみた [19]。この実験ではキャビティ内のリエントレント(出戻り)・ジェットの見視化を行うことができ、今後の研究のベースとして有益なデータが得られた。また、翼端渦キャビテーション (Tip Vortex Cavitation) の初生時に、大きな騒音が生じることから、キャビテーション騒音の研究のための有効な手段となると考えられ、今後の研究に活用できることが分かった。

(7) 3次元水中翼

高速船用水中翼の性能向上は重要な課題であるが、水中翼はストラットやウォータージェット・ポンプの

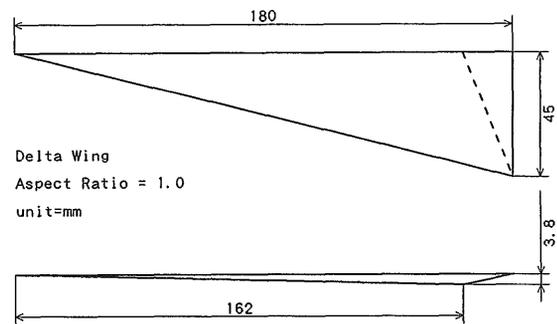


Fig. 17 デルタ翼の形状

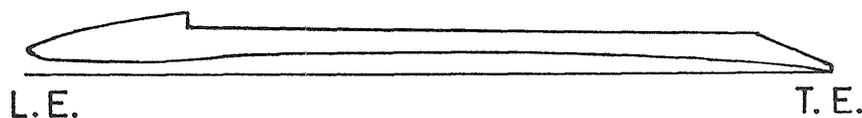


Fig. 16 ステップ付翼型の形状

インレットのあるポッドに取り付けられるため、キャビテーションが発生するばかりでなく、エアドロウも伴うことがあり、流れが複雑である。このため、解決すべき技術的問題は少なくない。水中翼の性能把握をする上で、キャビテーションの影響は甚大で、キャビテーション水槽での性能計測が実船性能を予測する上で不可欠である。Fig. 19 に示す様にフラップ付き水中翼の性能向上の研究を行い、既存の水中翼と性能向上をめざして設計された新しい水中翼について3分力計測とキャビテーション観測の他、レーザ光による翼変形量の計測を行った。新しい水中翼は設計迎角で既存翼より揚抗比が26%向上し、振動を起こすようなキャビテーションは発生しなかった。

### 3.6 まとめ

本研究ではSC翼型の研究を行い、高次渦パネル法に基づくSC理論を用いたSC翼型の性能予測法を開発した。実験結果と比較し、SC翼型設計に用いることができる精度をもつことを確認した。この性能予測法を拡張することにより、応用範囲の広いSC翼型設計法を考案した。この設計法を用いて、揚抗比が高く、キャビテーションの発生が安定した高性能SC翼型を開発した。この翼型はSCP用として用いられ、高性能SCPの開発を可能とした。

SC翼型の性能計測及び流場計測法について研究を行った。揚力について精度の良い計測が可能となった

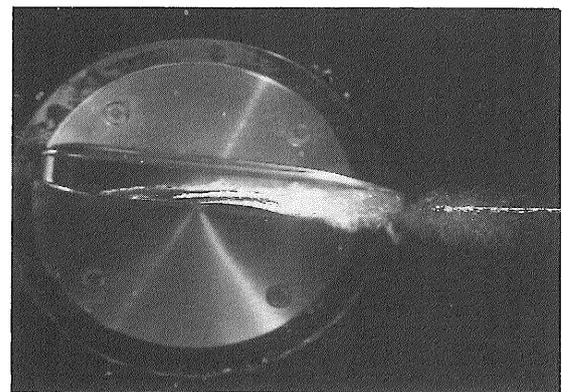
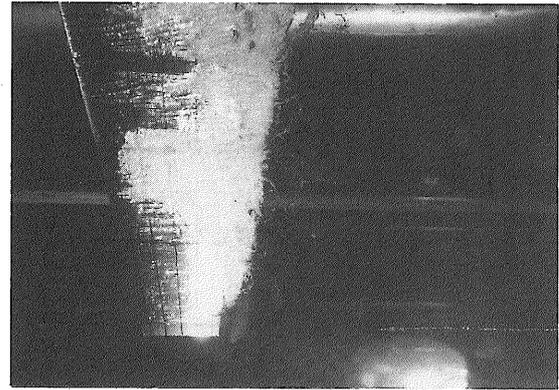


Fig. 19 水中翼のキャビテーションの写真

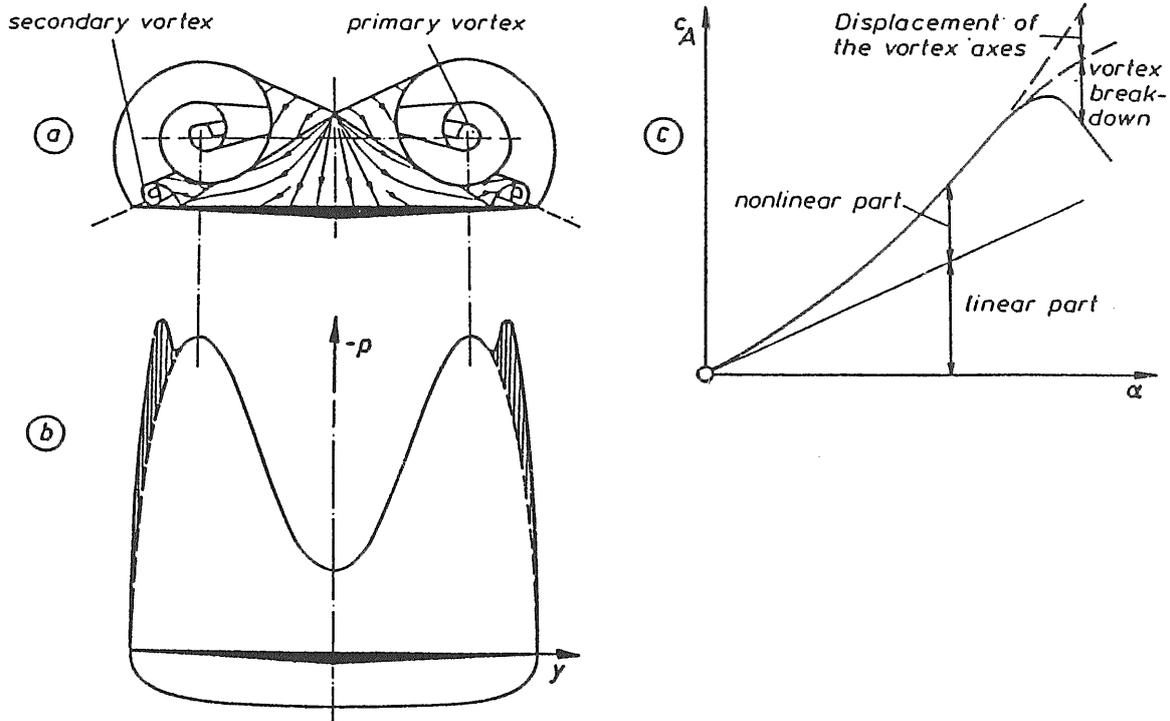


Fig. 18 デルタ翼の渦構造 [Hummelによる]

が、抗力については、非常に低いキャビテーション数で抗力の計測値に2つのピークが現れ、十分な計測精度が得られなかった。LDV計測や既存データのある翼型について試験などを行い、計測技術の問題点の解明に努めた。

高速船用水中翼についての実験的研究を行い、新しい水中翼が従来の翼より揚抗比で26%性能向上をすることをキャビテーション水槽での実験で確かめ、性能向上に寄与した。

## 4. スーパーキャビテーション・プロペラの設計法の研究

### 4.1 はじめに

本研究では前章のSC翼型の研究を踏まえて設計法を開発し、具体的に50kt級の超高速船用高荷重プロペラ、60kt級の超々高速船用高荷重プロペラを具体的に設計しながら、設計法の改善を行った。設計法と平行して開発を行っていた性能予測計算法ができあがってからは、性能予測法で性能確認をしながら設計を行ったので、信頼性の高い設計法として作り上げることができた。これらの設計の評価は主に模型プロペラについて行ったので、計測法についても述べる。SCPの設計法として完成の域に達することができた。本研究で扱ったSCPの主要目をTable 2に示す。

### 4.2 スーパーキャビテーション・プロペラの設計法の開発

#### 4.2.1 既存設計法

既存のSCPの設計法としては、実験的設計法と理論的設計法の2種類がある。前者は、幾つかのSCPをシリーズで製作し、膨大なキャビテーション試験を行い、設計チャートとしてまとめあげたものであり、

とりえず信頼性のある結果が得られる長所がある反面、設計されたプロペラの効率が必ずしも十分高くない。この例として有名なものに、SSPAチャート[4]がある。通常型プロペラの場合ではMAUチャート、Wageningen-Bチャート、SRI-bチャートなどがあり、現在でも使用されている。

一方、後者の例としては、DTMBのSCP設計法が知られている。設計スラストを満たす最適循環分布を持つプロペラをプロペラ揚力線理論により計算する。強度条件から翼弦長分布、即ち、翼輪郭を決める。これから、各半径位置での設計揚力が分かるので、これを満たすSC翼型をキャビテーション数ゼロの線型理論から計算した図表から求める。この後、後述のSC翼断面に対するプロペラへの「曲がり流れ」の影響を補正するため、揚力面補正をLudwig-Ginzlerの方法で行う。また、有限キャビテーション数の影響を考慮したピッチ修正も行って、SCPを設計する。しかしながら、この設計法で設計されたSCPは設計上必要なスラストより15%低いスラストしか発生しないとか、高いプロペラ効率が得られないなどの種々の問題[3]を抱えていた。

#### (1) DTMBプロペラ-1; MP No.231

本研究に先立って、このDTMBのSCP設計法[3]で具体的に $J=1.01$ 、 $\sigma_v=0.4$ で、 $C_T=0.217$ のSCP(MP No.231)を設計し、設計で狙った性能が得られるかを確かめた。この際、性能向上のため、Fig. 20に示す様に翼後縁断面形状を楔型から楕円形に変更した。模型実験の結果[6]、設計予測値よりスラストは前述の従来の傾向と異なり、9%大きく、プロペラ効率は9.5%も低くなってしまった。DTMBの設計法に問題があるとともに、翼断面の変更により性能が大幅

Table 2 SCPの主要目

名称	N-R	DTMB	SSPA	SRIJ-I	SRIJ-II	SRIJ-A	SRIJ-III	SRNJ	SRIJ-IV
M.P.No.	339	341	345	354	356	365	366	367	369
直径[mm]	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
ピッチ比(0.7R)	1.650	1.054	1.600	1.533	1.470	1.749	1.379	1.370	1.487
展開面積比	0.950	0.512	0.500	0.641	0.641	0.825	0.529	0.641	0.833
ホス比	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
レーキ角[deg]	0	10	10	10	10	10	10	10	10
スキュー角[deg]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
翼数	3	3	3	3	3	3	3	3	3
翼断面	翼端側	N-R	DTMB	SSPA	SRJN	SRJN	SRJN	SRJN	SRJN
	翼根側							SRNE	NACA16
回転方向	右	右	右	右	右	右	右	右	右
材料	NiAlBr	SUS303	NiAlBr	SUS303	SUS303	SUS303	SUS303	SUS303	SUS303

に変わりうることも確認した。

(2) DTMB プロペラ-2; MP No.341

設計条件を変え、DTMB の設計法を用いて、比較的高荷重の SCP を設計した。設計条件は  $J=0.775$ 、 $\sigma_v=0.4$ 、 $C_T=0.334$  である。この設計条件は具体的には、一軸あたり 100 トンのスラストを発生して、船速 50 ノットで航走できる SCP を設計することであり、テクノ・スーパー・ライナ (TSL) レベルの超高速船を 3 軸で航走させることが想定されている。

この設計法を用いるとスラストが 15% 低めの SCP になる傾向を考慮して、15% 増した  $C_T=0.384$  で Fig. 21 に示す SCP を設計した。Fig. 22 に示す様に船研での模型実験の結果、設計の前進率でスラストが 34% も設計目標値より多くなり、効率も 5% 低い SCP となった。また、背面は SC 状態とならず、設計がうまくいっていないことが分かった。しかしながら、効率はノン・キャビテーション状態よりも SC 状態となった方が大幅に高くなることから、SC 状態となる様に設計できれば高効率 SCP の設計の可能性があることが理解された。

(3) SSPA プロペラ; MP No.345

次に、実用的プロペラ設計法である SSPA チャート法により、SCP を設計した。設計条件は  $J=1.1$ 、 $\sigma_v=0.4$ 、 $C_T=0.33$  ( $K_T=0.159$ ) である。Fig. 23 に示す様な模型プロペラを製作し、大型キャビテーション水槽で性能計測を行った結果、Fig. 24 に示す様に設計点でスラストが 7% 大きくなったものの効率は 0.649 で、設計値と一致し、まずまずの SCP が得られた。しか

しながら、キャビティが厚く、これが SSPA-SCP の効率が高くないことの原因であることが分かった。

4.2.2 新設計法 (その 1)

以上に述べた調査研究の結果、SCP の理論設計法を新たに開発する必要が明らかになった。本研究では通常型プロペラ設計法を確立し、欧米で用いられている方法と同様の考え方に基づいた SCP 設計法を創った。即ち、プロペラの設計で不可欠な最適循環分布は Goldstein のプロペラ揚力線理論 [3] によるものとした。次に、より高性能な翼断面形状が採用できるように、翼輪郭形状は従来の SCP に拘らず翼強度を満

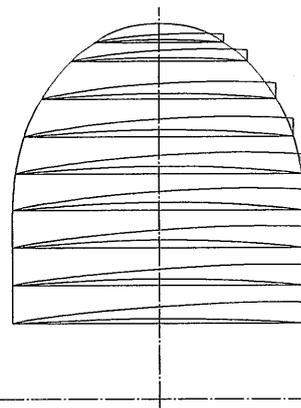


Fig. 21 DTMB SCP の形状

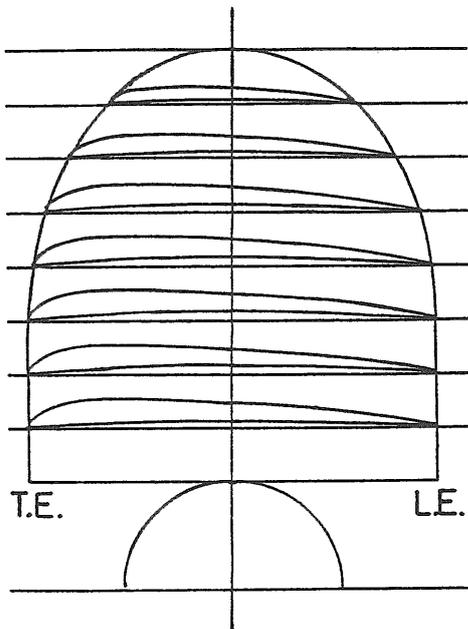


Fig. 20 改良 DTMB プロペラの形状

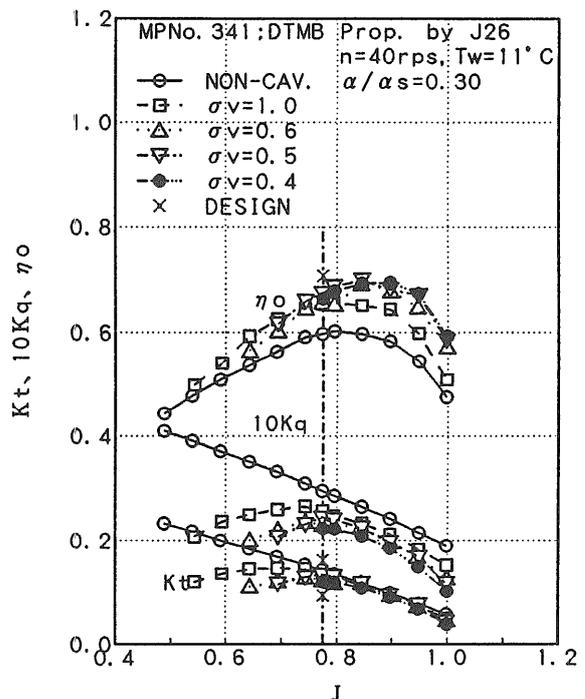


Fig. 22 DTMB SCP のキャビテーション性能曲線

たす範囲で任意の形状とできる様にした。SCP の性能を決定する翼断面形状は前章で述べた SC 翼型の研究の成果を用いて、SRJN-II 翼型とした。

この翼型を SCP の翼断面として具体的に適用する形とするのには簡単ではない。即ち、設計条件が与えられればプロペラ揚力線理論で循環分布は一義的に決まるが、翼断面形状は各半径位置のキャビテーション数や揚力係数を与えると求められる。この設計揚力係数は翼弦長が変わると変化する。つまり、強度上の要件で流体力学的设计条件が左右されるので、設計チェックの都度、翼断面形状の設計計算をする必要があり、

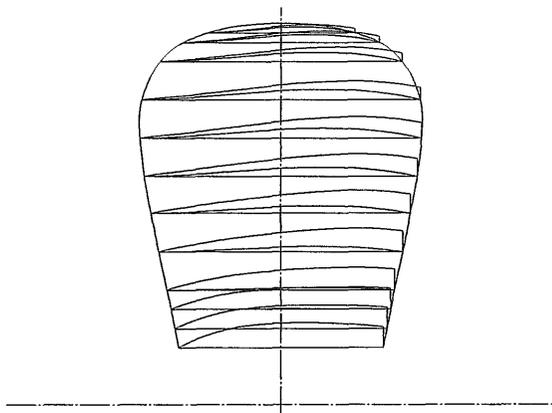


Fig. 23 SSPA SCP の形状

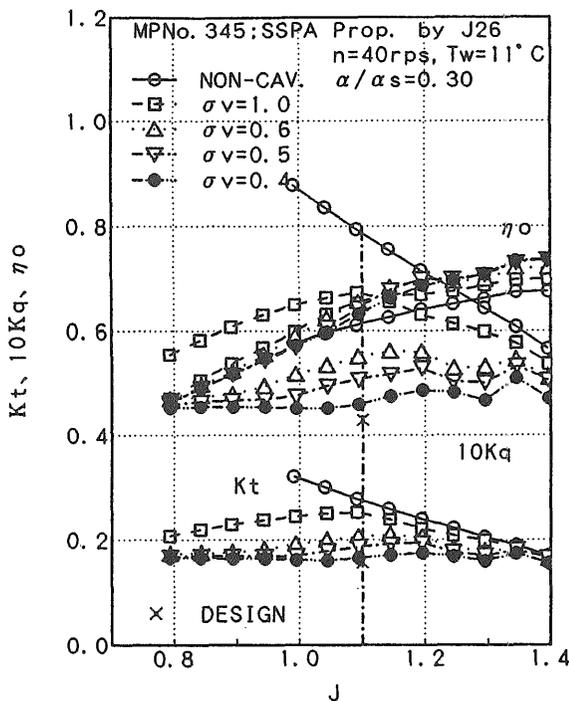


Fig. 24 SSPA SCP のキャビテーション性能曲線

計算量は膨大となる。この作業を効率的にコンピュータ・プログラムで短時間でできる様に設計迎角を $2^\circ$ と一定とし、正面形状を Johnson 5 項翼型の正面形状とし、非線形 SC 翼型理論で計算して設計揚力係数、キャビテーション数や前縁半径などをパラメータとする理論設計チャートを作成した。これをプログラムコード化する事によって、初期設計が非常に容易となった。

次に、プロペラの各翼面断面形状を求めるためには、理論チャートで求めた SC 翼型を、Fig. 25 に示すプロペラの独特の流れの「曲がり流れ」にマッチングさせる必要がある。理論チャート、即ち、2 次元 SC 翼型理論から得られた SC 翼型は真っ直ぐな流れの中だけで要求された性能を発揮しないからである。この曲がり流れの他に、流れの向きも補正する必要がある、これを揚力面補正という。揚力面補正法としては、通常プロペラに用いられていた Ludwig-Ginzler の方法 [3] を用いた。最後に、SC 状態となるとキャビティの存在によって翼間の流れが塞がれる（翼列効果）ことから、これを補正するピッチ修正を SSPA 法 [4] に倣って行った。以上が新しい SCP 設計法 [8, 10] の概略であり、Fig. 26 にフローチャートで示す。

(1) SRIJ-I プロペラ; MP No.354

前述の SSPA プロペラと同じ設計条件で SCP を設計した。翼断面形状としては設計迎角 $2^\circ$ の SRJN 翼型を用いた。この SCP のプロペラの効率の予測値は 79%であった。この設計法により設計スラスト係数を

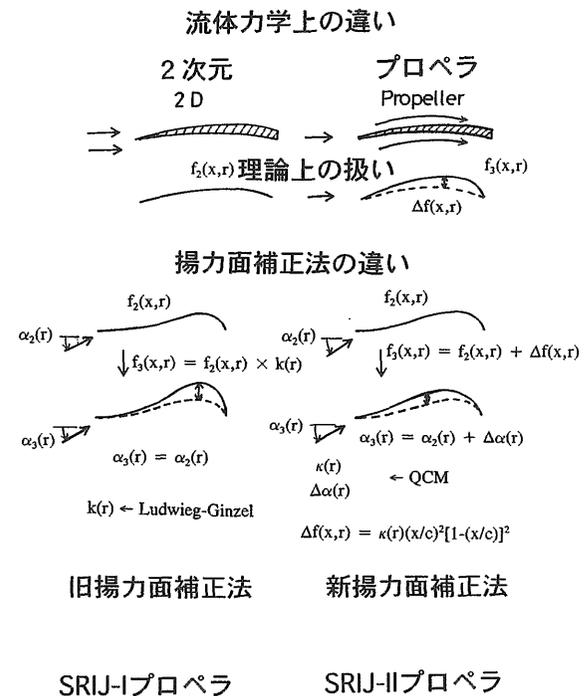


Fig. 25 プロペラまわりの流れと揚力面補正法の概念

満たすかを確認するため、Fig. 27 に示す模型プロペラを製作し、性能計測を行った。その結果、Fig. 28 に示す様に設計点で設計スラストより約15%過大なスラストを発生し、約14%低い効率のSCPとなった。しかしながら、SSPA プロペラより約4%効率向上した。この原因を検討した結果、Fig. 29 に示す様に設計点でキャビティが設計の意図より厚く、ピッチが過大であったことが分かった。また、翼端での太い TVC の他、0.9R 付近からも trailing vortex が発生したことからもピッチが過大であったことが明らかであった。また、翼断面のキャンバについても Fig. 27 に示す様にカップ状でかなり大きいキャンバであったことも、スラストが過大となった原因と結論づけられる。また、このプロペラは作動点の変化に対して複雑な性能となることが問題となった。これらの結果を踏まえ、新しい SCP 設計法を改良することとした。

4.2.3 新設計法 (その2)

プロペラ作動点の変化に対してもキャビテーションを安定して発生させるため、設計迎角  $2^\circ$  から  $2.5^\circ$  へ

と増し、これに伴い、翼断面設計理論チャートを作成し直した。Ludwig-Ginzel の揚力面補正法は翼弦方向の荷重分布が一定で流体力学的キャンバが放物線形状に近いプロペラを前提としているので、適用が妥当でなかったと判断された。そこで与えられた任意の翼弦荷重分布に対して幾何学的キャンバ分布を与えることのできる通常型プロペラの揚力面設計法で3次元キャンバを求めた。しかしながら、この設計法はキャビテーションが発生していないプロペラの設計法であるので、そのままでは使えない。求められた3次元キャンバは

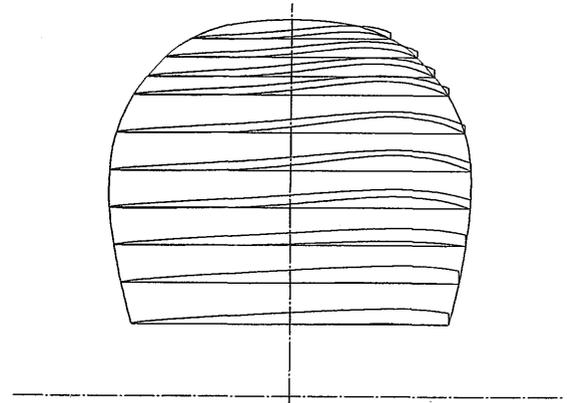


Fig. 27 SRIJ-I SCP の形状

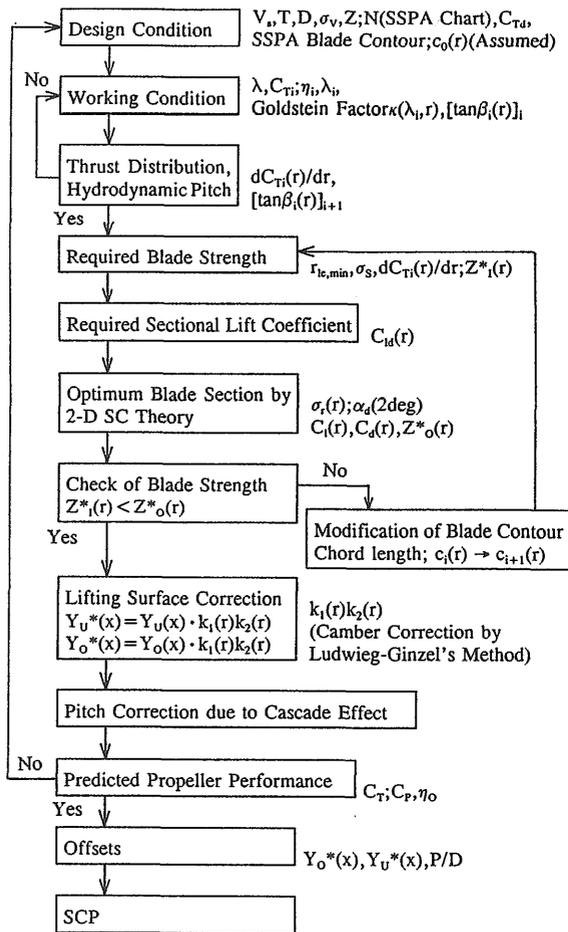


Fig. 26 SCP 設計フローチャート (その1)

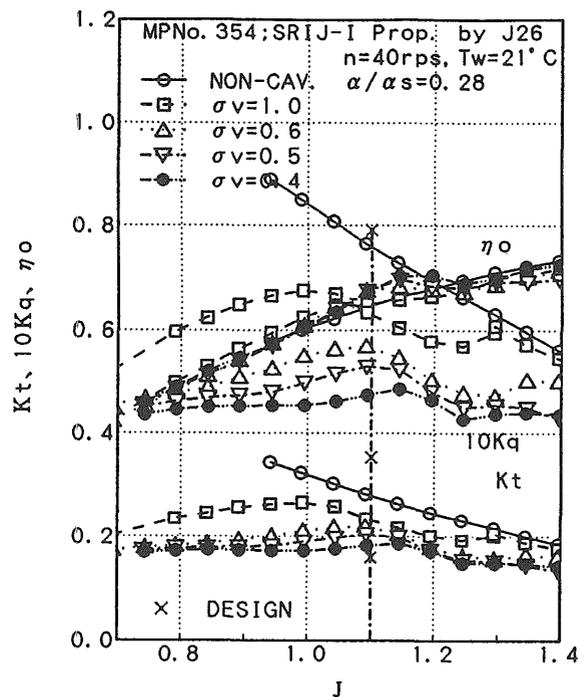


Fig. 28 SRIJ-I SCP のキャビテーション性能曲線

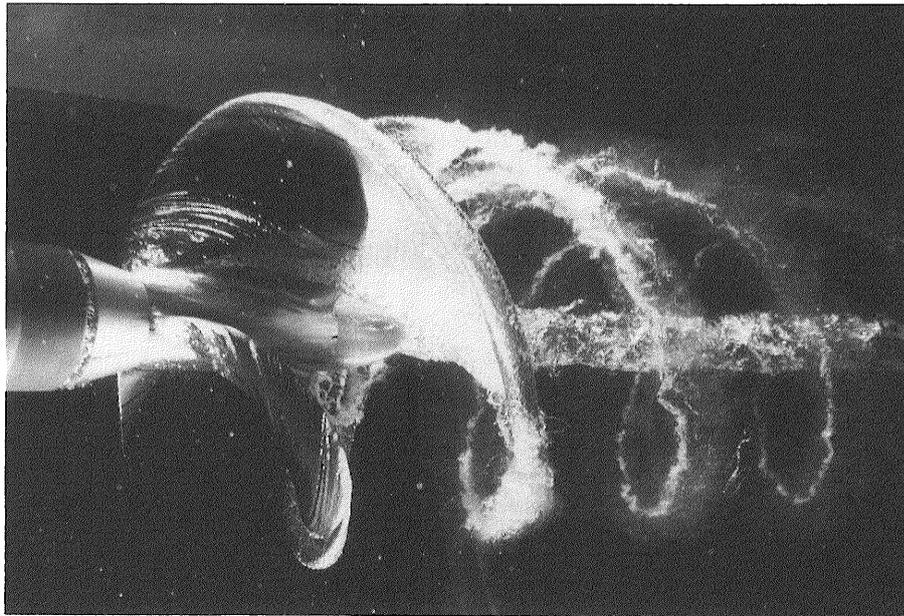


Fig. 29 SRIJ-I SCP のキャビテーション・パターンの写真

プロペラとキャビティから形成される流体力学的3次元キャンバである。一方、非線形SC理論によって、各半径位置での2次元SC翼断面の流体力学的2次元キャンバが計算できることから、両者の差が揚力面補正量となることを見いだした。この量は簡単のために、4次式で近似してこのプロペラの設計に用いた。よって、Fig.25に示す様に理論チャートから求めたSC翼断面の正面及び背面形状をこの量を用いて変形することによって、SCPとしての翼断面形状が求められる。ピッチについても、揚力面設計法で得られたピッチに調整するとともに、キャビティのカスケード効果に関するピッチ補正も行う。以上が改良されたSCP設計法 [8, 10] の概略であり、フローチャートをFig. 30に示す。

(1) SRIJ-II プロペラ; MP No.356

改良SCP設計法により、前述のSRIJ-Iプロペラと同じ設計条件に対してSCPを設計し、Fig. 31に示す模型を製作して性能計測を行った。この結果、Fig. 32に示す様に設計点において約6%の過大なスラストを発生するものの、効率は74.5%に達し、SSPAプロペラ及びSRIJ-Iプロペラより、それぞれ約15%及び10%も効率向上がなされた。キャビティの厚さもFig. 33に示す様に目測ではあるがかなり薄くなり、設計の意図が反映したプロペラを得ることができた [8, 10]。

4.2.4 新設計法 (その3)

前述のSRIJ-IIプロペラ的设计例にある様に、設計の目論見をほぼ満足するSCPの設計が可能となった

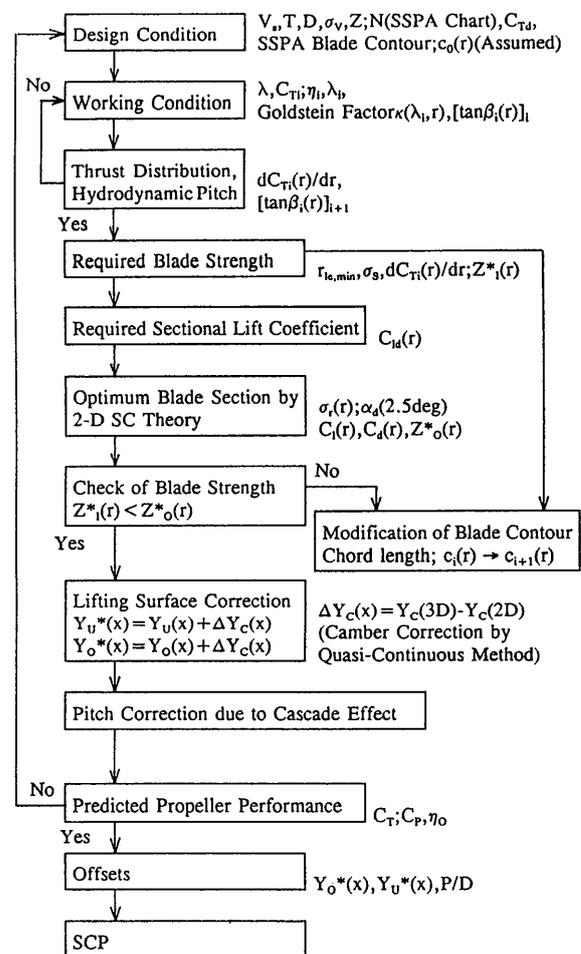


Fig. 30 SCP設計フローチャート (その2)

ので、設計精度と更なる効率向上を目指して、設計法の改良を行った [14, 15]。

まず、最適循環分布を求める方法は Goldstein の理論から Lerbs の揚力線理論に変えた。後者は任意のホス径、任意の翼数についても計算ができ、計算精度も大幅に向上させることができる。次に、揚力面補正法としては、後述の SCP 性能計算法 (SC-VLM) [11, 12] で用いるキャンバ変形の原理に基づく方法を開発した。キャビテーションの発生を考慮した3次元キャンバ計算法となる。

以上により、SCP の各半径位置のピッチや SC 翼断面形状が求められることになるが、設計で必要とした

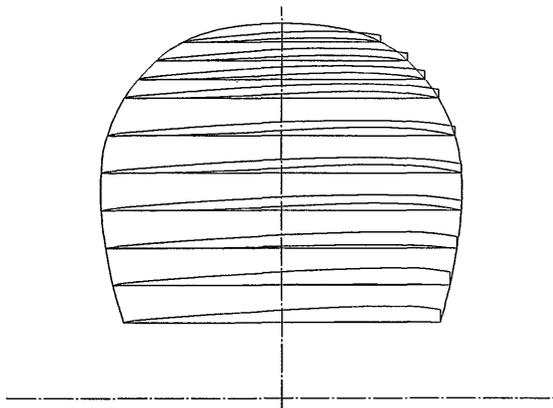


Fig. 31 SRIJ-II SCP の形状

スラストや効率ができるかを確認するために、SCP 性能計算法により性能評価を行い、設計条件が満たされるかを調べた。もし、性能、特に設計スラストが満たされない時にはピッチの修正を行い、最終の SCP 形状を求めるようにした。これにより、スーパーキャビテーションが発生することによって生じる止堰効果に

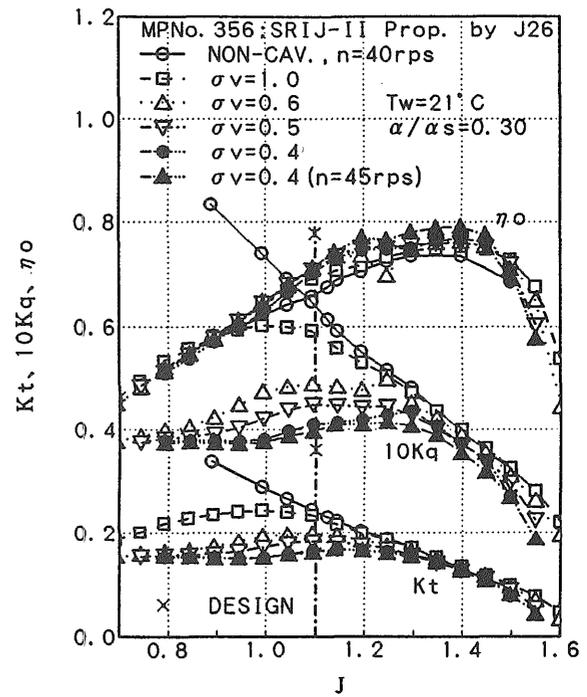


Fig. 32 SRIJ-II SCP のキャビテーション性能曲線

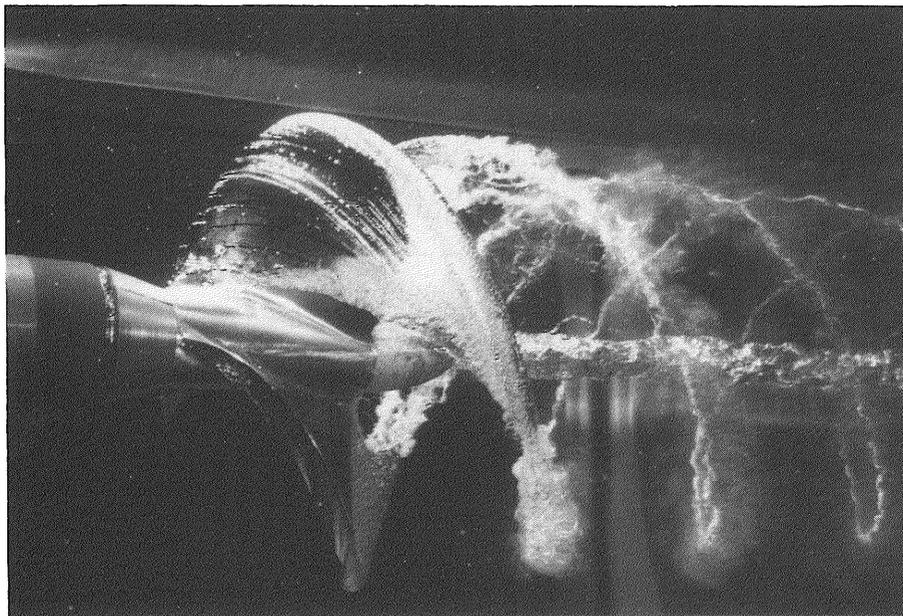


Fig. 33 SRIJ-II SCP キャビテーション・パターンの写真

対するピッチ補正が実質的になされていることになる。

次に、以上の設計法では、翼断面形状は翼根から翼端に至るまで、SRJN翼型という同系統のSC翼型に統一して用いていた。しかしながら、各半径位置での局所的キャビテーション数は翼根ではかなり高くなり、設計条件によっては翼根部でSC状態とすることが不可能な場合が多くなる。前述のSRIJ-Iや-II SCPでは、この領域は部分キャビテーションないしベース・ベンティド・キャビテーション状態であった。SC翼型はこの様な状態では、一般に翼後縁が厚くなることから、エアロfoil翼型と比べて抗力が大きくなるので、翼根部でSC翼型を用いることは効率上の観点から不利である。

一方、翼強度の観点からも、同じ最大翼厚比で比べた場合、エアロfoil型はSC翼型より断面係数が大きくなる傾向があり、この翼型を採用する方が有利である。以上の理由から、翼根部をエアロfoil翼型、SC翼型としても所要揚力係数が発生する半径位置までSC翼型とし、その間は滑らかに連続的に翼断面形を変化させて、SCP形状を決める。この接続領域の翼型については、各半径位置で断面係数を求めて、強度上のチェックをする。以上が、最終的に出来上がった新しいSCP設計法である。後述の幾つかの設計例、SRIJ-A、SRIJ-III、SRIJ-IVプロペラ、競艇用プロペラに示す様に、本SCP設計法により従来より格段に

高効率なSCPが設計できる様になった。

#### 4.3 スーパーキャビテーション・プロペラの性能計算法の開発

SCPの設計において、設計の都度、実機試験や模型試験で設計評価を行うと、プロペラや模型の制作費が高くなることになる。これに対して、近年のコンピュータの性能向上が目覚ましいことから、理論に基づくSCPの性能推定及び評価法を用いると、高性能または最適プロペラが効率良く開発できる様になる。本研究では設計法の開発と並行して、SCPの性能計算法を開発した [11, 12]。

SCPの性能計算法の開発は古くから試みられているが、SC翼型の性能計算法と異なり、計算精度が充分でなく、使いものにならないレベルであった。プロペラの性能計算法として、近年、渦格子法 (Vortex Lattice Method) によってキャビテーションが発生していない、又は発生しても性能 (スラスト、トルク) に影響を及ぼさない場合におけるプロペラの性能計算法の開発が盛んに行われ、オフ・デザインも含め信頼性のある計算ができる様になってきた。本研究では、渦系のモデル化の理解がしやすく、サブ・キャビテーション状態のプロペラの性能計算で実績があがってきたことから、渦格子法に基づくSCP性能計算法を開発することとした。

この方法では、プロペラ及びそれに続く後流は各翼

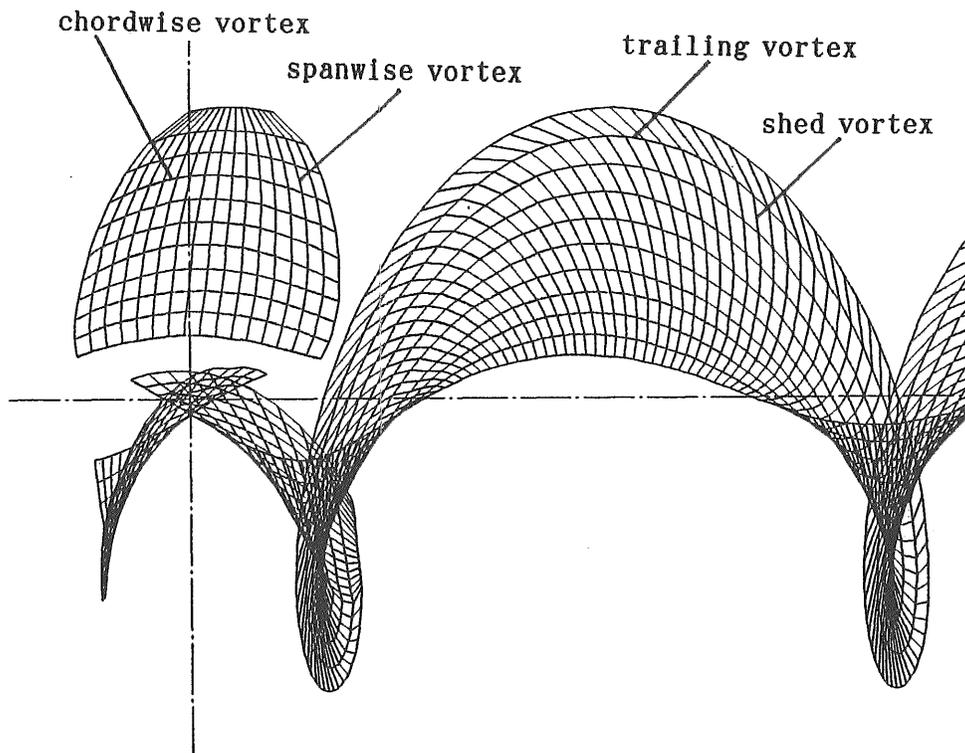


Fig. 34 プロペラ翼と後流渦の渦格子の配置

毎、一枚の厚さのない特異点分布 (渦や吹き出し等) 面という数学モデルで置き換えて、計算を行う。この特異点分布面は揚力面と後流渦面に分けて考え、簡単化のため、Fig. 34 に示す様に格子状に分割し、渦糸や線吹き出して表現する。流れは翼やキャビティに沿って流れ、キャビテーションの発生している領域は蒸気圧になるなどの境界条件を与え、標点において、この境界条件を満たす様に渦糸などの特異点の強さに関する方程式を解くことによって、プロペラまわりの流場やプロペラにかかる力を求めることができる。

本計算法の適用例を示す。

(1) SRIJ-I プロペラ

計算結果と実験値との比較を Fig. 35 及び 36 に示す。Fig. 35 はキャビテーション数  $\sigma_v$  が 0.4 の時のプロペラ性能であり、前進率  $J$  が 1.2 以上を除いて、スラスト及びトルク係数の計算値は実験値より約 7% 小さいが、定性的な傾向は良く一致し、効率については定量

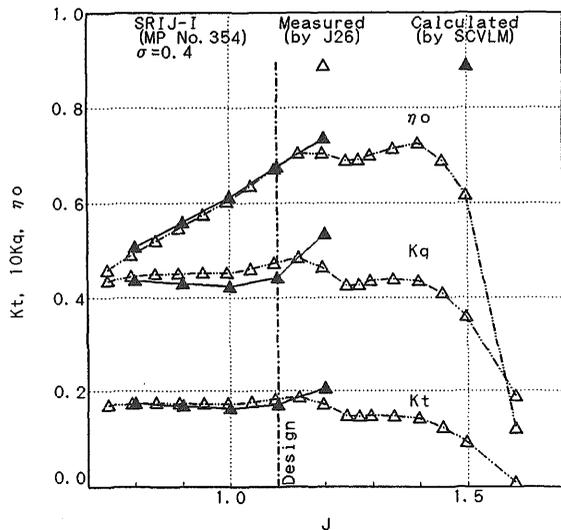


Fig. 35 SRIJ-I SCP のキャビテーション性能計算と計測との比較

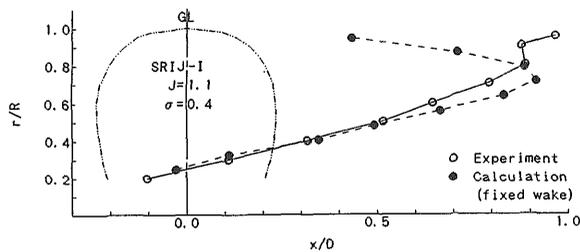


Fig. 36 SRIJ-I SCP のキャビテーション発生範囲の計算と計測との比較

的にも良く合っている。Fig. 36 は設計点でのキャビテーションの発生範囲に関する計算結果と実験値であり、キャビティが最も長い領域から翼端側では若干の差が見られるが、半径内側のボス付近での一致は良い。

(2) SRIJ-II プロペラ

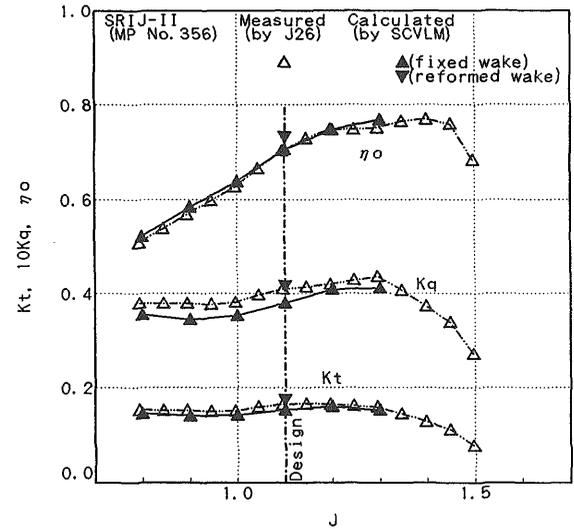


Fig. 37 SRIJ-II SCP のキャビテーション性能計算と計測との比較

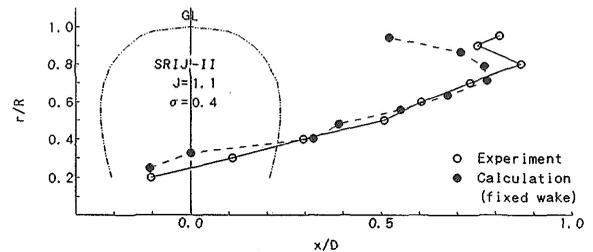


Fig. 38 SRIJ-II SCP のキャビテーション発生範囲の計算と計測との比較 (クラシカル・ウェーク)

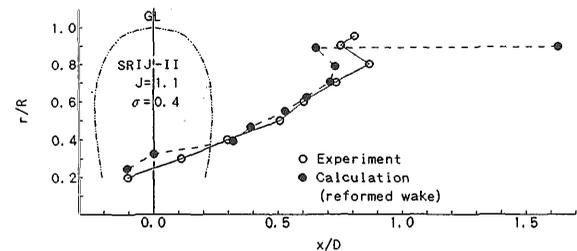


Fig. 39 SRIJ-II SCP のキャビテーション発生範囲の計算と計測との比較 (変形ウェーク)

本計算による計算結果と計測値の比較を Fig. 37～

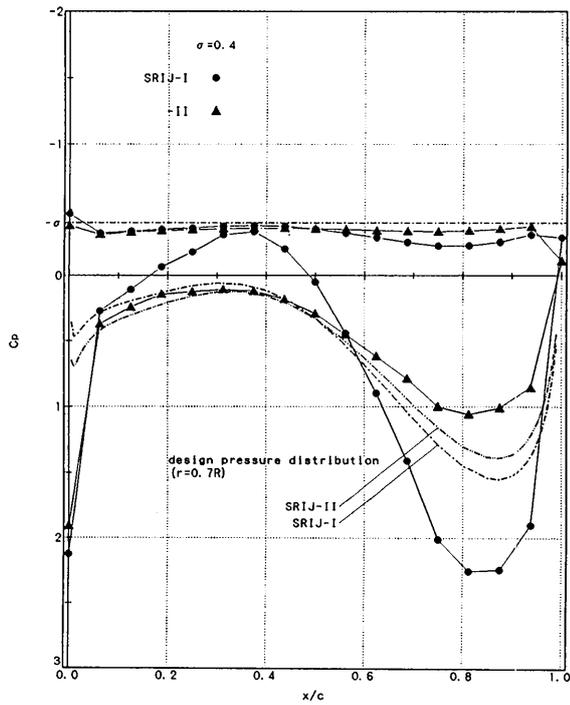


Fig. 40 SRIJ-II SCP の圧力分布に関する設計値と計算値の比較

39 に示す。Fig. 37 での比較では、スラストとトルクの計算値がわずかに小さいが、効率は比較的良く一致する。スラストとトルクに関する計算値が低くなる原因は、キャビティに覆われている部分の圧力の計算値が Fig. 40 に示す様に蒸気圧よりわずかに高くなる傾向による。よって、この領域の圧力を蒸気圧であるとして性能計算すると、スラストが 0.6% 大きく、トルクが 1.5% 小さく、効率が 2.3% 大きくなり、理論と実験とは更に良く一致する。

Fig. 38 のキャビティ長さの比較において、SRIJ-II プロペラの場合は SRIJ-I プロペラの場合と比べて一致は良くなっているが、この計算では後流渦の変形を考慮していないので、翼端側の渦の密度が後流中で変化せず、実験で見られる翼端渦をシミュレーションできない。

Fig. 39 に示す後流渦の変形を考慮した場合の計算では、翼端側でも計算と実験とは定性的にも一致し、翼端渦が形成される。設計点でのキャビテーション・パターンを Fig. 41 に、ほぼ同一の方向から撮った写真を Fig. 33 に示す。後流渦の変形を考慮しているため、翼端側及び翼根側で渦が互いに集まって、より太い渦になって、翼端渦が形成される。翼端渦の節の周期ばかりでなく、長さも計算と実験とは一致している。

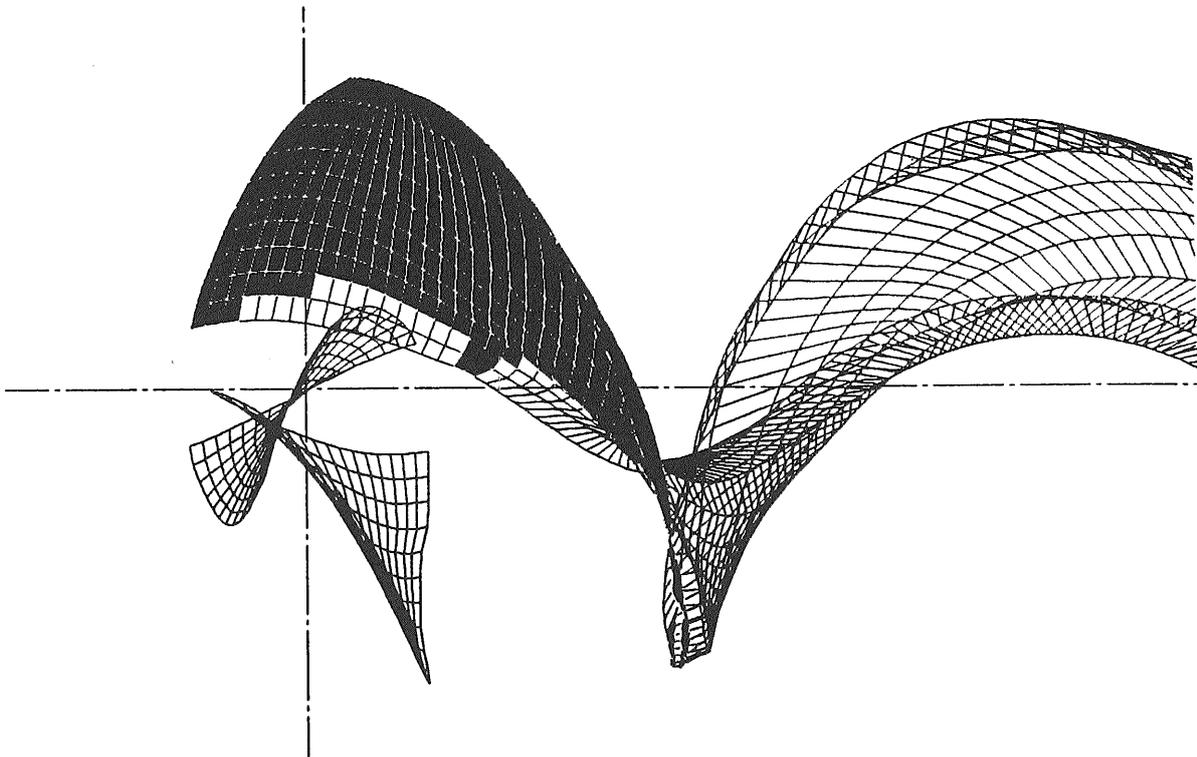


Fig. 41 SRIJ-II SCP のキャビテーション・パターン

他の SCP (SRIJ-III, SRIJ-IV, SSPA, Newton-Rader プロペラ) について計算を行った結果、Table 3 に示す様に数%の精度でスラストとトルクを予測できることを確かめており、信頼性のある計算法が開発されたと言える。

本計算法が十分な精度があることから、設計で得られた SCP について性能予測をすることによって、実験での設計評価の回数を減らすことができ、開発効率を上げ、設計精度向上に専心することができることになる。

#### 4.4 スーパーキャビテーション・プロペラの性能計測

設計された SCP の性能が設計の意図通りに設計されているかを調べる方法は、実機試験で確かめるのが最も良いが、船の姿勢や潮流、波、風、うねりなどの自然現象により複雑な影響を受けるため、合否の単純な判断はできても、結果の因果関係を明確にすることは、殆ど不可能と言える。一方、模型実験は状況が目に見え、かつ、スラスト、トルク、流速、プロペラ回転数、気泡核の多い少ないなどの情報が得やすいため、因果関係の推定が比較的容易である。

SCP は従来のプロペラと異なり、非常に低圧で試験を行うことから、計測精度の確保に注意を払う必要がある。このため、SCP の性能計測では第1計測部

において2つの動力計(主動力計; K&R J26 と斜流動力計; K&R H38)を用い、同じプロペラで計測をした。また、プロペラ回転数や空気含有率を変化させ、それらの計測結果に及ぼす影響を調べたり、これらの量を変化させても同等の結果が得られることを確かめた。また、ノン・キャビテーション状態については、曳航水槽でのプロペラ単独性能試験結果と比較することにより、キャビテーション水槽の動力計の検定をした。

また、SCP の性能計測に際しては、先ず、ダミー・ボスを動力計に取り付け、圧力、流速をパラメータとして変化させ、ダミー・ボスの発生するスラスト及びトルクを計測した。ダミー・ボスによる計測は本計測に先立って行った。次に、プロペラを動力計に取り付け、試験状態でスラスト、トルクを計測し、予めダミー・ボスで計測した値を差し引きし、補正した。

以上の様な手続きを踏んで計測を行い、精度の確保につとめた。詳細は文献 [13] に記述した。

#### 4.5 まとめ

本研究では、新しい信頼性のある SCP の理論設計法を開発し、ここではその開発経過について述べた。既存理論設計法の長所を取り入れ、揚力面補正や SC 翼型に関する従来の理論的誤りを正し、より高精度な手法を取り入れることによって、設計法を作り上げた。

Table 3 SCP の設計条件と予測値、計測値の比較

名称	N-R	DTMB	SSPA	SRIJ-I	SRIJ-II	SRIJ-A	SRIJ-III	SRNJ	SRIJ-IV	
M.P.No.	339	341	345	354	356	365	366	367	369	
設計法	N-Rチャート	DTMB法	SSPAチャート	SC揚力線	SC揚力線	SC揚力面	SC揚力面	SC揚力面	SC揚力面	
設計値	前進率	1.34	0.775	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
	スラスト係数	0.235	0.0928	0.159	0.160	0.160	0.217	0.156	0.164	
	トルク係数	0.0710	0.0162	0.0430	0.0354	0.0360	0.0545	0.0364	0.0373	
	効率	0.690	0.705	0.647	0.786	0.772	0.696	0.750	0.771	
計測値	前進率	1.34	0.775	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
	スラスト係数	0.270	0.125	0.170	0.183	0.165	0.203	0.150	0.160	
	トルク係数	0.0790	0.0225	0.0468	0.0474	0.0420	0.0516	0.0356	0.0378	
	効率	0.728	0.670	0.636	0.676	0.707	0.688	0.738	0.741	
計測値	荷重度	0.334				0.465		0.334		
	前進率	1.41	0.870	1.15	1.17	1.12	1.013	1.05	1.10	
	スラスト係数	0.259	0.099	0.173	0.180	0.166	0.188	0.146	0.160	
	トルク係数	0.0780	0.0198	0.0477	0.0475	0.0412	0.0470	0.0345	0.0379	
	効率	0.744	0.695	0.664	0.703	0.718	0.645	0.709	0.741	
解析値	前進率	1.34	0.775	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
	スラスト係数	0.271	0.092	0.172	0.192	0.162	0.217	0.148	0.164	
	トルク係数	0.0780	0.0163	0.0450	0.0484	0.0391	0.545	0.0347	0.0373	
	効率	0.740	0.692	0.669	0.692	0.726	0.696	0.747	0.771	

揚力面補正法も既存の考え方から大幅に進んだ概念で構成されている。この設計法により、従来より格段に高効率で要求スラストや強度を満足する SCP が設計できるようになった。

また、SCP の性能予測計算法は設計において重要な役割を果たす。設計結果の確認や、オフデザインでの性能把握に極めて有効であり、設計効率を高めるのに役立った。本研究で開発された SCP 性能計算法は実験と数%の誤差で良く合うことから、SCP の設計には不可欠なツールである。

SCP の設計結果を確認するのに模型実験が最も手軽で信頼性があり、また、設計で齟齬があった時などに、情報が得やすいので原因究明を行うのに有効である。SCP 独特の実験を考慮して計測を行い、実験精度の向上を果たすことができた。

以上の3つの研究が総合的に機能して初めて設計法が設計法として意味を成すことを忘れてはならない。

### 5. 設計法の適用例

#### 5.1 50 ノット高荷重超高速船プロペラ

第4章で設計例も含めて SCP の理論設計法について述べたが、設計法が SRIJ-II プロペラの設計で、ほぼ高効率 SCP の設計の目的がつき、更なる効率と設計精度の向上を目指した。4.2.4 で述べた最終的設計法を用い、最適性能を得るため、設計の観点を変化させて設計した例について述べる。

##### (1) SRIJ-III プロペラ ; MP No.366

このプロペラは、SRIJ-I や-II プロペラと異なり、強度の許す範囲で、翼弦長を小さくした。各半径位置での揚力係数を大きくし、キャンパーを大きくして揚抗比を上げることによって、効率向上を狙ったプロペラである。また、効率の向上の観点からアスペクト比

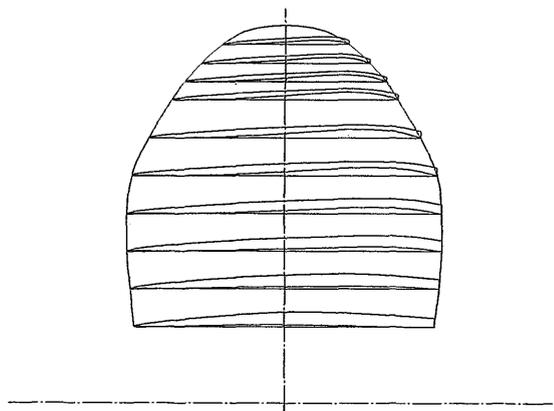


Fig. 42 SRIJ-III SCP の形状

を大きくすることも有効である。

この設計では、揚抗比を上げるために、翼根部を除く各半径位置において初期設計で得られた翼断面形状について、2次元 SC 翼理論で後縁でのキャビティ厚みを計算し、SCP でもその厚みとなるようにピッチを増減させ、SCP 性能予測法で最終ピッチを決定している。この設計では、初期設計プログラム中の理論チャートや揚力線理論等のもつ誤差を是正することになる。設計の最終段階でも、SCP 性能予測計算で所要スラストが発生することを確認した。この計算によると、カスケード効果によると考えられる補正分はピッチ比で 0.05 程度であった。

Fig. 42 に示す SCP の模型を製作し、キャビテーション試験を行い、Fig. 43 に示す性能計測結果を得た。設計前進率の  $J=1.1$  では、設計予測値よりスラストは 4% 小さく、効率は 73.8% と、約 2% 低くなったが、ほぼ狙い通りの SCP が設計できた。実験でスラストが低くなるのは、Fig. 44 の写真に示す様に、模型実験では背面すべてが SC で覆われなかったためである。

##### (2) SRIJ-IV プロペラ ; MP No.365

SRIJ-II プロペラは比較的高効率となり、設計スラストを発生したが、翼強度が実機レベルに対応しないので、実機レベルの翼強度を満たすように設計した。この設計では、翼根部で SC 翼型を用いることは性能ばかりでなく強度上も不利となるので、前章の設計で

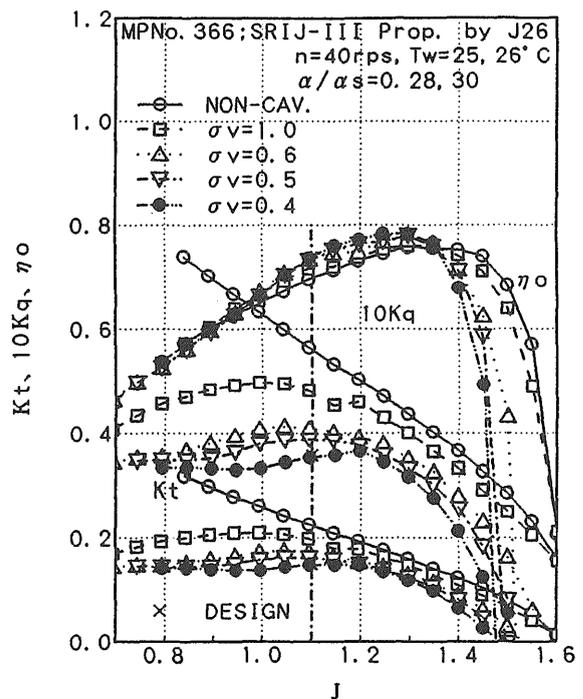


Fig. 43 SRIJ-III SCP のキャビテーション性能曲線

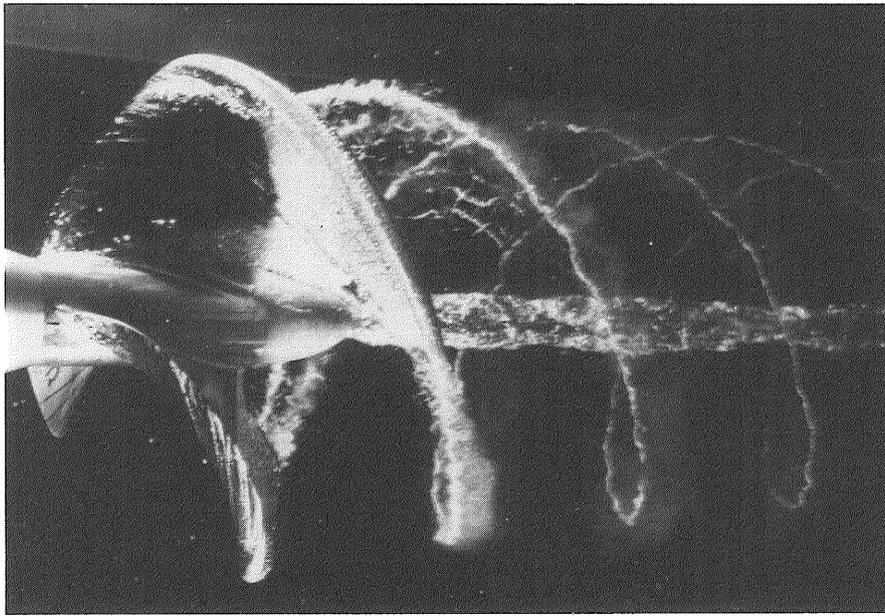


Fig. 44 SRIJ-III SCP のキャビテーション・パターンの写真

述べた様に、翼根部ではエアロfoil翼型 (NACA 16系) を用いるハイブリッド型 SCP とした。SC翼型を 0.6R より翼端側で用い、中間の領域は滑らかにフェアリングして翼断面形状を決めた。得られた SCP を Fig. 45 に示す。SCP 性能に関する実験結果を Fig. 46 に示す。設計点である前進率では、スラストが 4% 大きく、効率は 69.5% で、設計予測より効率が約 4% 低くなった。キャビテーションパターンを Fig. 47 に示す。強度条件を確認するため、有限要素法で流体力による翼応力を計算した結果、8.99kg/mm<sup>2</sup> となり、設計目標値の 8.33kg/mm<sup>2</sup> より若干大きくなったが、この種の高荷重プロペラにおいても、70% 近くの高いプ

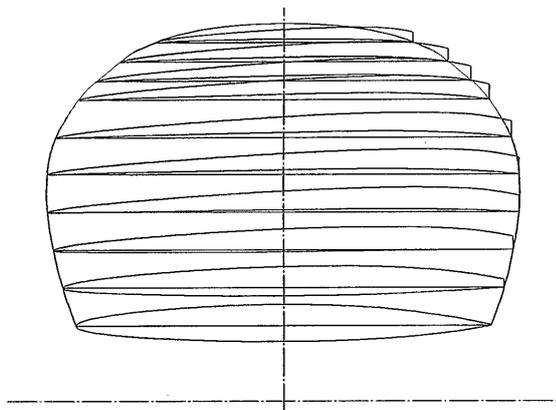


Fig. 45 SRIJ-IV SCP の形状

ロペラ効率が得られることを示すことができた。

### 5.2 60ノット高荷重超高速船プロペラ

前節の SCP より、更に超高速な船への SCP の適用を試みた。設計条件は、船速が 60 ノット、一軸あたりのスラストが 200 トンであり、前進率  $J=1.1$  で、スラスト係数  $C_T=0.465$ 、キャビテーション数  $\sigma_v=$

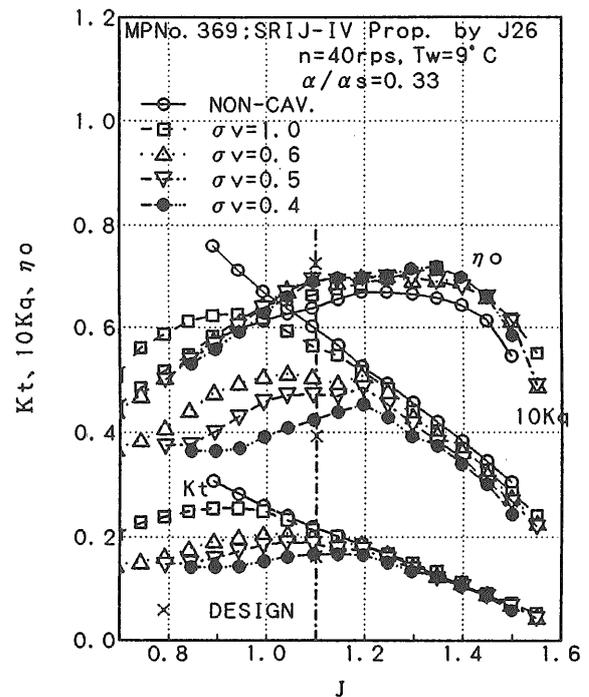


Fig. 46 SRIJ-IV SCP のキャビテーション性能曲線

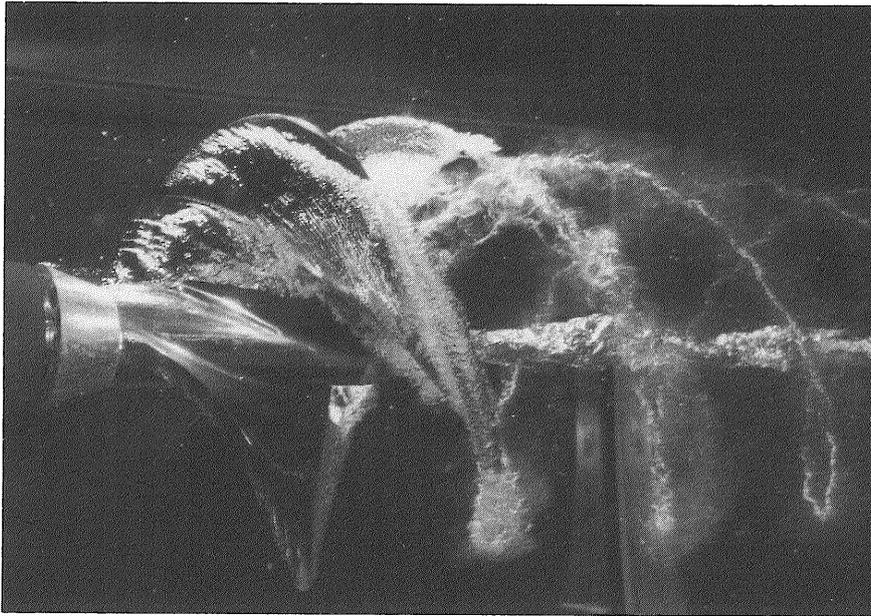


Fig. 47 SRIJ-IV SCP のキャビテーション・パターンの写真

0.3 と、かなり高荷重、低キャビテーション数用の SCP を設計することになった。設計荷重が大きいため、翼展開面積比は 0.825 とかなり大きくなった。Fig. 48 に示す SCP 模型を製作し、キャビテーション水槽で性能計測を行い、Fig. 49 に示す性能曲線を得た。設計予測と比べて、効率は約 69% で約 1% 低くなっただけであったが、スラストの計測値は約 6% 小さくなった。本設計では、開発途中であった性能予測計算において計算に用いた格子数が少なく、後流渦面が短く設定したため、性能を精度良く計算ができなかったことが原因であった。特に、翼根部において、キャビティが設計意図より厚くなったために、スラストが

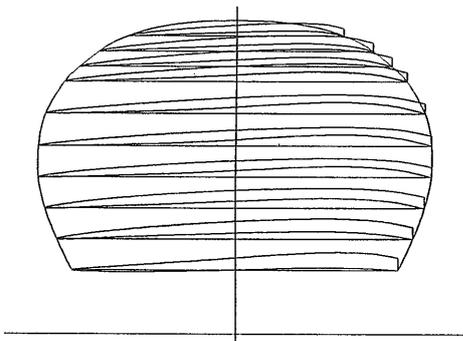


Fig. 48 SRIJ-A SCP の形状

低下したものと分析できる。また、その後開発した SRIJ-IV プロペラと同様にハイブリッド型 SCP を用いる設計手法をとることにより、大幅な効率向上と設計スラストの確保が可能である。

### 5.3 競艇用プロペラ

以上述べた SCP は 50 ノット及び 60 ノットの超高

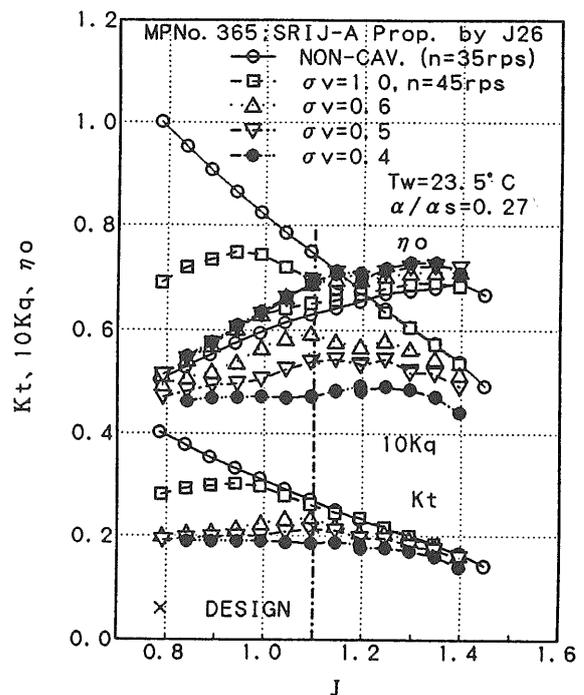


Fig. 49 SRIJ-A SCP のキャビテーション性能曲線

速船用高荷重プロペラであり、設計条件が仮想的なものであり、且つ、設計の確認は模型プロペラによる実験と性能計算法で行った。このため、実機に適用して、実用時においても本設計法の有効性を調べるため、そ

の対象として競艇用プロペラを取り上げた。

競艇で用いられている競走用モーターボートについて、現用ボートをプロトタイプとして、新型エンジンを搭載し、大型化及び高速化（最高速度 100km/h）を目指した新型艇の開発を(株)全国モーターボート競争会連合会（全モ連）が行った。新艇用プロペラの設計の依頼が船研にあり、競艇用プロペラを2ヶ、SCPで設計した。全モ連の研究委員会の長年の研究により作成した設計チャートにより設計したSC-1プロペラをターゲットプロペラとして、本研究で最終的に開発したSCP設計法により、2つのSCPを設計した。

Table 4 競艇用プロペラの設計条件

	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] [kt]	100.0	74.1	92.6
	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] [165mmφ]		0.957	1.197
	1.371		
Torque [kg-m]	6.55	6.86	6.86
$K_Q$ [175mmφ] [165mmφ]		0.0294	0.0294
	0.0376		
$K_T$ [175mmφ] [165mmφ]		Max.	0.111
	0.138		
Thrust [kg]	145	Max.	144.5

(1) SC-2 プロペラ

設計条件をSC-1プロペラと同じとし、Table 4に

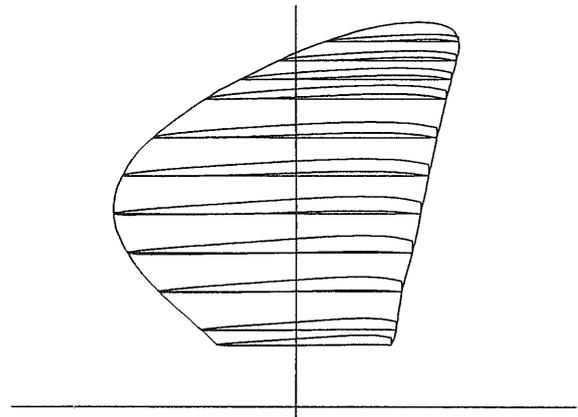


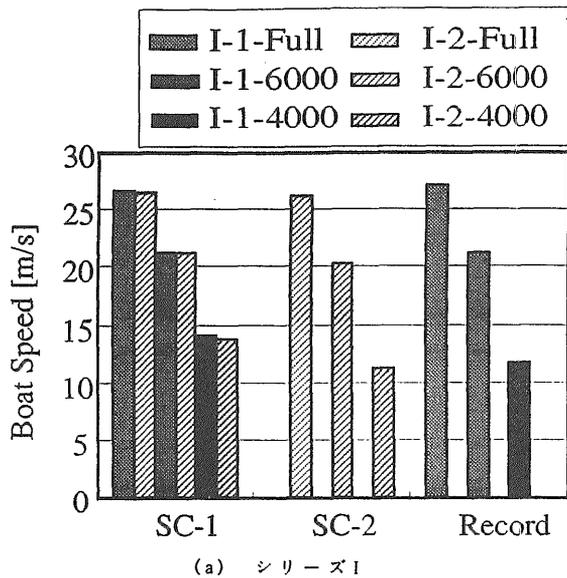
Fig. 50 SC-2 SCP の形状

Table 5 競艇用プロペラの主要目

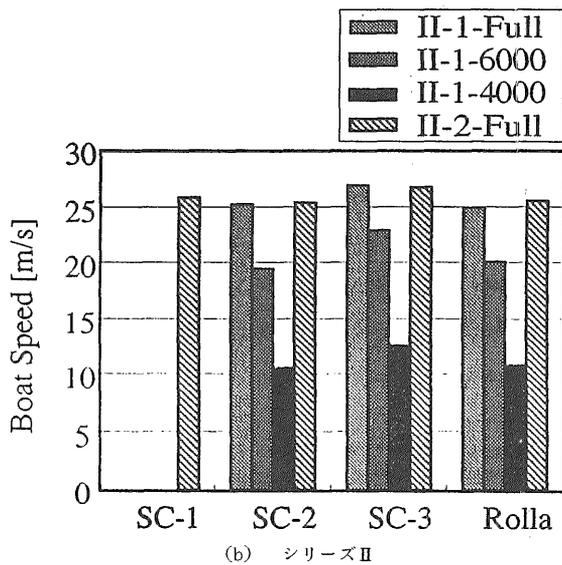
Propeller Name	SC-1	SC-2	SC-3	Record	Rolla
M.P.No.	377	378	388	-	-
Diameter [mm]	165	165	175	166	165
Pitch Ratio (0.7R)	1.65 (Const.)	1.697 (Variable)	1.454 (Variable)	1.731	1.749
Exp. Area Ratio	0.400	0.616	0.475	0.407	-
Boss Ratio	0.1606	0.1606	0.1514	0.1386	-
Rake Angle [deg]	10	10	10	-	-
Skew Angle [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	-	-

示す Cond.I として設計した。時速 100km の最高速巡航時のプロペラ回転数を 7,000rpm、馬力を 64ps とした。伴流係数  $1-w_s$  を 0.95 と仮定した。キャビテーション数  $\sigma_v$  は 0.3 となる。設計スラストは不明であるので、目標プロペラ効率を 0.8 とすると、スラスト係数  $K_T$  は 0.138、スラストは 145kg となる。翼強度条件としては、最大許容応力を 25kg/mm<sup>2</sup> とした。

このプロペラの主要目を Table 5 に示す。翼断面形状は翼根部を含めて SRIJ-II 翼型を採用した。Fig. 50 に示す設計された SC-2 プロペラを船外機に取り付け、桐生の競艇場で性能確認試験を行った。試験はプロペラ回転数を 4,000rpm、6,000rpm、そしてフル・スロットルの 3 状態に変化させて航走させ、艇速と周回時間を計測した。また、300m 離れた 2 つのブイの間を 1 周する周回航走での所要時間を計測した。プロペラ性



(a) シリーズ I



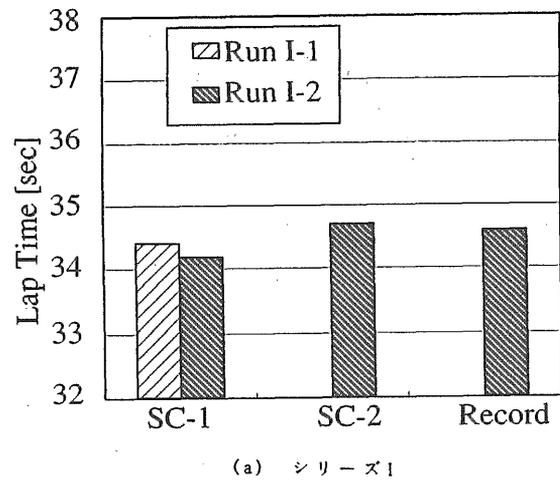
(b) シリーズ II

Fig. 51 速力試験結果

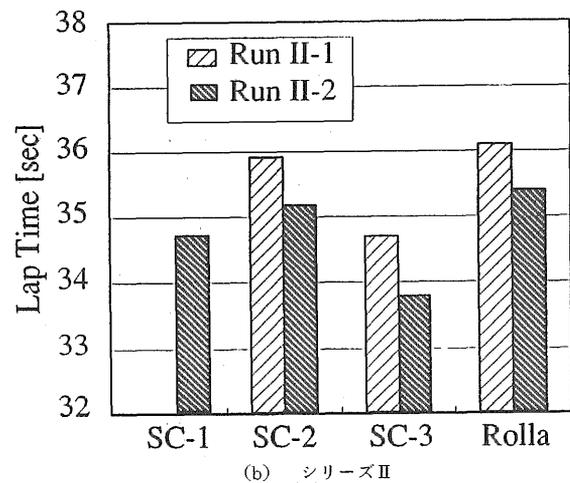
能計測において、比較のために主要目を Table 5 に示す SC-1 プロペラと好家用プロペラであるレコード・プロペラを用いた。性能計測結果を Fig.51 (a)と Fig.52 (a)に示す。SC-2 プロペラを他のプロペラと比較すると、4,000rpm ではレコード・プロペラと、フル・スロットルでは SC-1 プロペラと同等であった。周回時間は SC-1 プロペラよりかかったが、レコードプロペラと同等であった。

このプロペラと SC-1 プロペラについて、キャビテーション水槽で性能計測を行った。計測結果を Fig.53 と 54 に示す。設計点 ( $J=1.371$ ) では、SC-2 プロペラは効率が 72% で、SC-1 プロペラの 70% より高く、SC-2 プロペラは設計値よりスラスト、トルクとも大きく、「重たいプロペラ」となった。

以上に述べた実艇試験及び水槽試験から、SC-2 プロペラが設計の意図と異なった性能となった原因は、設計条件、とりわけ設計前進速度が不適切であったと



(a) シリーズ I



(b) シリーズ II

Fig. 52 周回試験結果

の結論にいたった。

(2) SC-3 プロペラ

設計条件を Table 4 に示す Cond.II へと変更した。まず、プロペラ前進速度を低くした。最適直径を検討し、直径を 165mm から 175mm へと大きくした。次に、0.4R より翼根側の翼断面を SC 翼型から NACA 16 系のエアロfoil型とした。翼強度条件を SC-1 プロペラと同等の断面係数となるように緩め、可能な限り薄い翼型とした。また、翼端側の SC 翼断面は翼弦長を強度上可能な限り短くして揚抗比を最適化し、効率の向上を計った。また、競艇用プロペラは最高巡航時ばかりでなく、加速時の性能もこの設計では考慮した。Table 4 の Cond.II の Acc に対応し、プロペラ回転数 7,000rpm で 38 ノットで最も大きなスラスト

が発生する様にした。

設計されたプロペラを Fig. 55 に示す。競艇場での実艇計測では、SC-3 プロペラ他、SC-1、SC-2 及び市販プロペラとして世界的に高性能で有名な Rolla プロペラを供試した。実艇計測の結果を Fig.51(b) と Fig.52(b) に示す。艇速に関しては、SC-3 プロペラはどのエンジン回転数においても、他のプロペラより格段に速かった。周回計測は 2 回行われたが、艇の重さが異なるので直接比較できない。しかし、艇の重さの影響はプロペラに拘わらず一定であるので、相対比較は可能である。1 回目の周回計測では、SC-3 プロペラは Rolla プロペラより、1.4 秒も速く、1 周で 30m 近い差がつくことになる。2 回目の周回計測でも、周回時間の相対関係は全く変わらない。

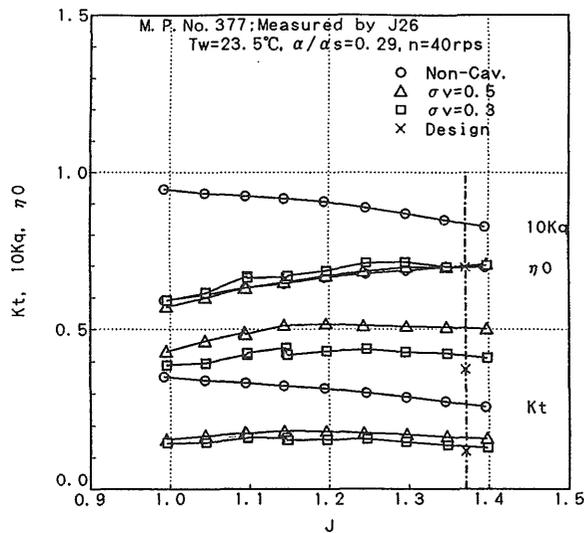


Fig. 53 SC-1 SCP のキャビテーション性能曲線

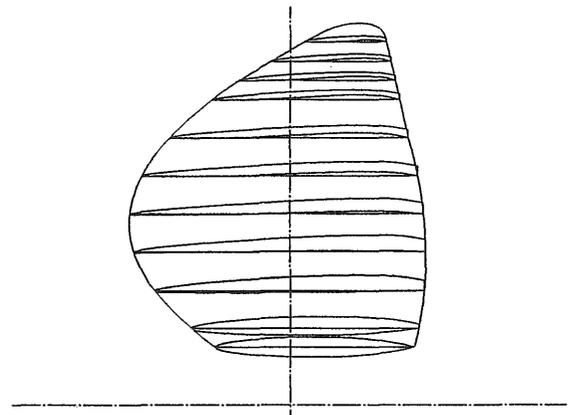


Fig. 55 SC-3 SCP の形状

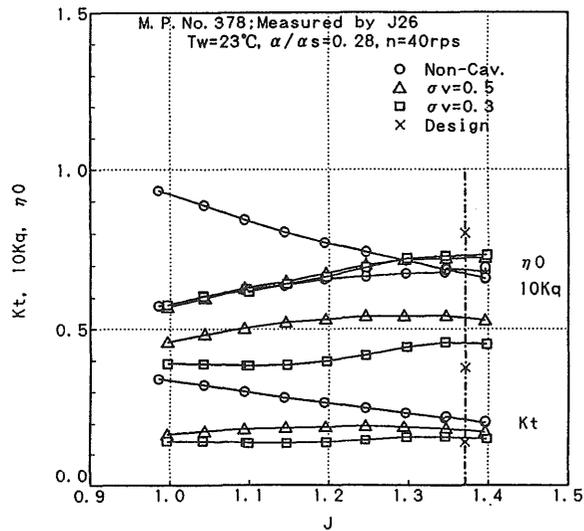


Fig. 54 SC-2 SCP のキャビテーション性能曲線

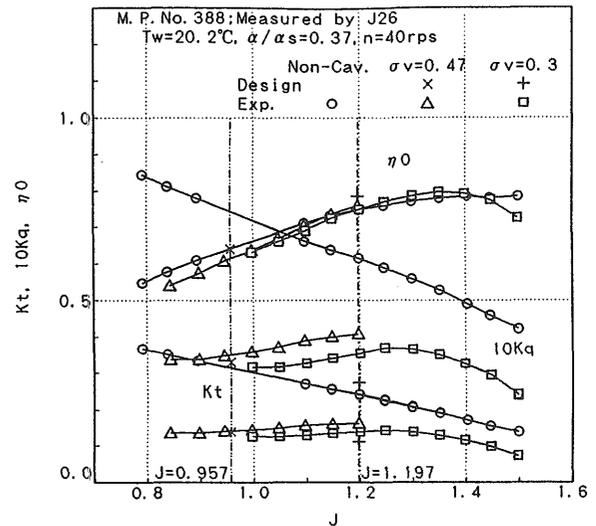


Fig. 56 SC-3 SCP のキャビテーション性能曲線

キャビテーション水槽での計測結果を Fig. 56 に示す。設計点での効率は 75% で、SC-1、SC-2 プロペラよりも良いが、スラスト、トルク係数とも設計予測値より高くなる傾向は変わらなかった。

## 6. まとめ

### 6.1 総合成果

本指定研を行い、以下のような画期的成果を得ることができた。

(1) 高精度 SC 翼型性能計算法を開発した。

(2) 性能計算法を拡張した SC 翼型設計法を開発した。

(3) SCP の翼断面として用いることができる高性能 SC 翼型を開発した。

(4) 信頼性のある SCP の理論設計法を開発した。この設計法により、所要スラストを発揮し、従来の SCP より格段に高効率な SCP を開発できることを示した。

(5) SCP の理論性能計算法を開発した。本計算法は模型実験とは数%の精度で一致し、SCP の設計時の性能予測に使用できる。

(6) 本 SCP 設計法の有効性を模型プロペラばかりでなく、競艇用プロペラという実用プロペラでの試験により、明らかにした。

本研究で設計した SCP のうち、50 ノット級の超高速船用 SCP の効率をスラスト係数  $C_T$  に関して比較したものを Fig. 57 に示す。SRIJ-II プロペラが設計点で一番性能が良いが、SRIJ-III プロペラがスラスト係数の広い範囲で性能が良い。Newton-Rader プロペラはスラスト係数の大きい領域で効率が良いが、激しい振動を起こすので実用的なプロペラと言えない。

一方、本研究において、船研で設計した SCP の効率を他のプロペラの効率と比較するため、Eames の文献中 [2] の船速に対する各種プロペラの効率比較の図にプロットした。これを Fig. 58 に示す。但し、推進器効率比は 0.95 と仮定されている。50 ノット及び 60 ノット SCP とも効率向上が著しい。

以上の 2 つの図から分かるように、本研究で開発した SCP 設計法や性能予測理論により設計された SCP

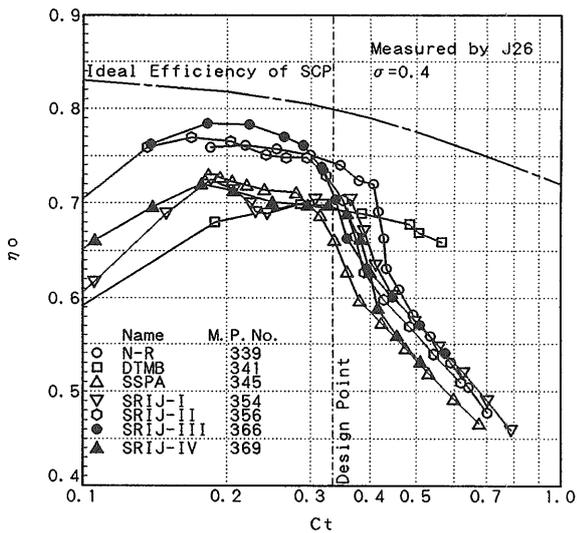


Fig. 57 SCP の効率比較

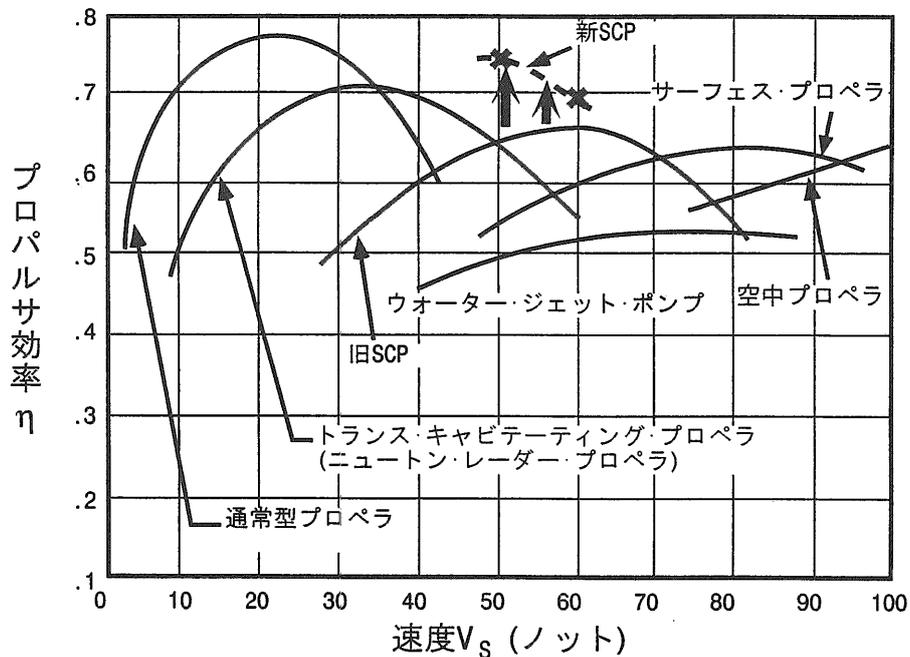


Fig. 58 各種プロペラの効率比較

は、従来の SCP より大幅に効率向上が達成されている。

## 6.2 今後の課題

3年間の精力的な研究にも拘わらず、スーパーキャビテーション・プロペラの設計に関する研究において、幾つかの課題が残った。以下に述べる課題を解決することにより、更により良い超高速船用プロペラが開発できると考える。

- (1) 超減圧下での SC 翼型の抗力の計測法の改良を行う必要がある。また、超減圧下でのキャビテーションの発生パターンの変化のメカニズムを調べることも重要である。
- (2) 最高効率点近傍での性能計算精度の向上を行う必要がある。キャビテーションと粘性の相互干渉が顕著となるので、注意を払う必要がある。
- (3) 本研究では、シャフト・レーキのない場合を主に研究対象とした。しかしながら、この種の高速艇はシャフト・レーキを付けて使用されることが多いので、非定常 SCP 性能計算法を開発し、振動・エロージョン対策の研究をする必要がある。

## 謝辞

本指定研究「SC プロペラの設計に関する研究」を企画及び実施するに当たって、御指導と御支援をいただいた北川弘光前所長(元推進性能部長、現北海道大学教授)及び山口眞裕前推進性能部長に感謝いたします。

本研究の一部は(株)日本造船研究協会との共同研究「スーパーキャビテーション・プロペラの研究」(SR 214 研究部会; 部会長: 加藤洋治東京大学教授、正幹事: 白木東 NKK 船舶海洋本部技術部次長)の一部として行われた。関係者に謝意を表します。

理論計算と実験の両面で活躍した工藤達郎主任研究官及び実験精度に注意を払い献身的な努力をされていた黒部雄三、松田登、鈴木茂(退官)ならびに岡本三千朗主任研究官に感謝いたします。図面作成をいただいた藤沢純一研究官及び竹内マリ殿に感謝いたします。

## 参考文献

1. Tachmindji, A.J., Morgan, W.B.: The Design and Estimated Performance of a Series of Supercavitating Propellers, Proc. of 2nd Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington DC (Aug. 1958), pp.489-532
2. Eames, M.C.: Advances in Naval Architecture for Future Surface Warships, Trans. of RINA, Vol. 123 (1981), pp.93-118

3. Venning, E. & Haberman, W.L.: Supercavitating Propeller Performance, Trans. of SNAME, Vol.70 (1962), pp.354-417
4. Rutgersson, O.: Supercavitating Propeller Performance. Influence of Propeller Geometry and Interaction between Propeller, Rudder and Hull, Publication of SSPA, Nr. 82 (1979)
5. 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)、pp.127-166
6. 黒部雄三他: スーパー・キャビテーション・プロペラの模型試験について、第58回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1991)、pp.71-74
7. 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、西部造船学会報、第86号(1993)、pp.37-46
8. Ukon, Y., Kudo, T., Kurobe, Y., Hoshino, T.: Design and Evaluation of New Supercavitating Propellers, Proc. of Second International Symposium on Cavitation, Cav'94 (1994)
9. 工藤達郎他: 一次渦パネル法により設計された SC 翼型の性能計測、第62回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1993)、pp.68-73
10. 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)、pp.101-111
11. 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)、pp.113-120
12. Kudo, T., Ukon, Y.: Calculation of Supercavitating Propeller Performance Using Vortex Lattice Method, Proc. of Second International Symposium on Cavitation, Cav'94 (1994)
13. 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)、pp.1-61
14. 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)、pp.47-56
15. Ukon, Y., Kudo, T., Kurobe, Y., Matsuda, N., Kato, H.: Design of High Performance Supercavitating Propellers Based on a Vortex Lattice Method, PROPCav'95 (1995)
16. 右近良孝、工藤達郎、黒部雄三、松田登、加藤洋治、佐々木民雄: 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、日本造船学会

- 論文集、第178号(1995)、pp.51-60
17. 右近良孝：新しいプロペラの実現に向けた研究の現状、第62回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1993)、pp.52-63
  18. 右近良孝：フロパルサと舵の研究－運航性能の観点から－、第64回秋季船舶技術研究所研究発表会講演集(1994)、pp.173-178
  19. 工藤達郎他：デルタ翼に発生するキャビテーション、第60回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1992)、pp.159-164
  20. 黒部雄三他：ステップ付二次元翼の実験、第62回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1993)、pp.74-77
  21. 松田登他：斜流SCPのキャビテーション、第64回秋季船舶技術研究所発表会講演集(1994)、pp.183-186
  22. 右近良孝：推進性能の研究動向－プロペラに関する研究－、日本造船学会誌、Vol.788(1995)
  23. Hanaoka, T.: Linearized Theory of Cavity Flow Past a Hydrofoil of Arbitrary Shape, Papers of Ship Research Institute. No.21 (June 1967)
  24. 西山哲男：特異点法による超空洞翼の流れ場の基礎式とその解法、日本機械学会論文集(第2部)、Vol.35、No.277 (Sep.1969)、pp.1859-1902
  25. 右近良孝：プロペラ・キャビテーション発生範囲の推定法、船研報告、Vol.16, No.6(1979)、pp.83-104
  26. Ukon, Y.: Partial Cavitation of Two- and Three-Dimensional Hydrofoils, and Marine Propellers, Proc. of 10th IAHR Symp., Tokyo (1980), pp.195-206
  27. 右近良孝：第4章 プロペラ・キャビテーションの予測、第3回船用プロペラに関するシンポジウム、(1987年7月)、pp.135-182
  28. Waid, R.L. & Lindberg, Z.M.: Experimental and Theoretical Investigations of a Supercavitating Hydrofoil, California Inst. of Tech. Report, No.47-8 (April, 1957)
  29. Johnson, V.E. Jr.: Theoretical and Experimental Investigation of Supercavitating Hydrofoils Operating near the Free Water Surface, NASA Report TR R-93 (1961)
  30. Parikh, B.R.: Experiments on Circular-Arc and Flat-Plate Hydrofoils in Noncavitating and Full Cavity Flows, J. of Ship Research, Vol.1, No.4 (1958), pp.34-57
  31. 右近良孝他：楔型水中翼のキャビテーション特性、SPD Report, No.94-001-1 (1994)
  32. Hummel, D.: Documentation of Separated Flow for Computational Fluid Dynamics Validation, AGARD, CP-437 (1988)