

本調査研究はモーター・ボート競走公益資金による
財日本船舶振興会の補助金を受けて実施したものである

研究資料 No. 403

第214研究部会

スーパー・キャビテーション・プロペラ
に関する研究

成 果 報 告 書

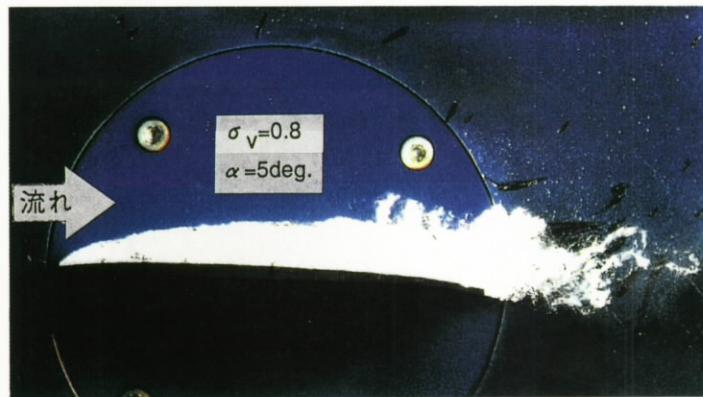
平 成 6 年 3 月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

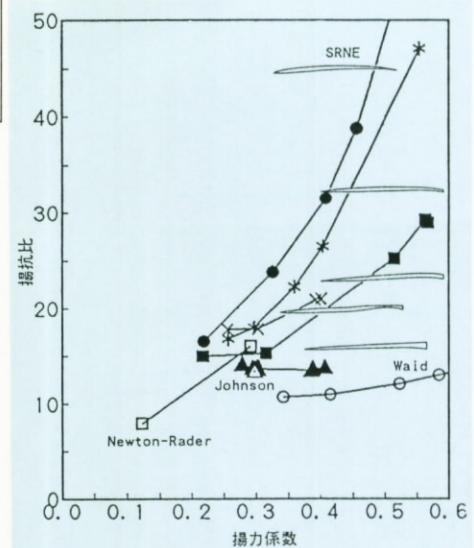
スーパー・キャビテーション・プロペラに関する研究

SCプロペラの翼断面形状に関する研究

揚抗比が既存スーパー・キャビテーション(SC)翼の Waid, Newton-Rader および Johnson 翼型を上回る高性能 SC 翼型を開発した。

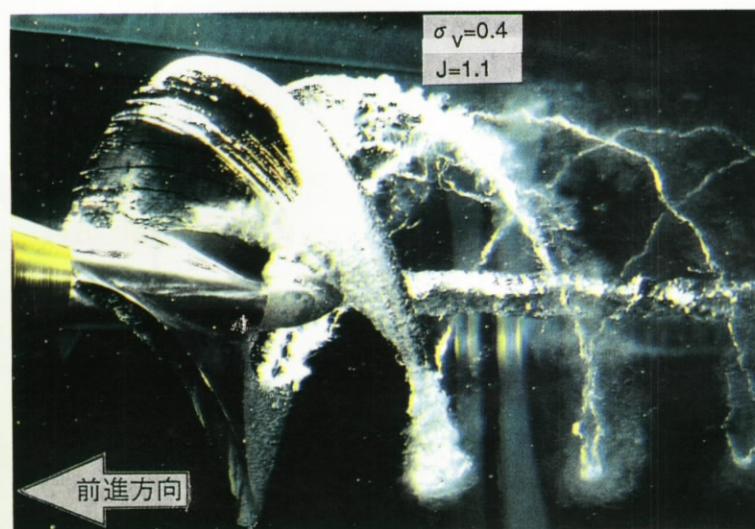


SRJL-II 翼型

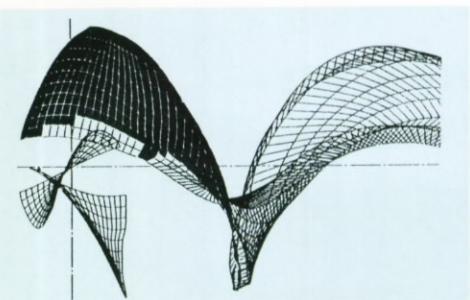
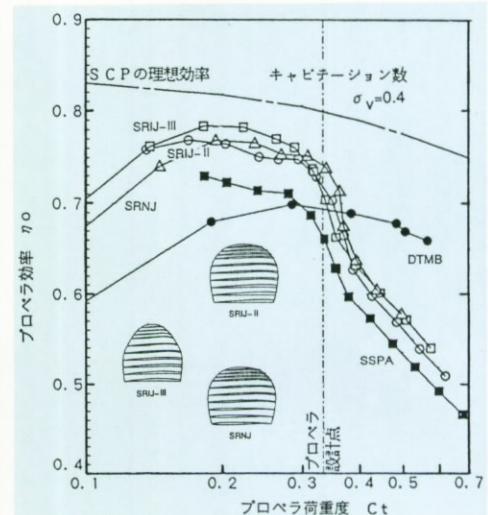


SCプロペラの性能解析法および設計手法に関する研究

- 従来の SC プロペラの SSPA, DTMB 型を上回る高性能 SC プロペラを開発した。
- プロペラ性能解析を目的とした渦格子法 (SC-VLM) による計算結果はキャビテーション試験結果と良く一致した。



SRIJ-II プロペラ



SC - VLM 計算結果

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会平成5年度補助事業として日本造船研究協会第214研究部会において実施した「スーパー・キャビテーション・プロペラに関する研究」の研究成果をとりまとめたものである。

第214研究部会委員会名簿

(敬称略、順不同)

部会長	加藤洋治(東京大学)
代表幹事	白木東(NK)
幹事	山口一(東京大学) 右近良孝(船舶技術研究所) 岡本幸彦(NK) 湯浅鑑(三井造船昭島研究所)
	星野徹二(三菱重工業) 外山聰(石川島播磨重工業)
委員	池畠光尚(横浜国立大学) 中武一明(九州大学) 工藤達郎(船舶技術研究所) 小山鴻一(船舶技術研究所) 上入佐光(三井造船昭島研究所) 佐々木紀幸(住友重機械工業) 佐藤和範(日本造船技術センター) 野沢和男(川崎重工業) 鈴木一芳(日立造船) 久保博尚(ナカシマプロペラ) 武田宗也(かもめプロペラ) 竹田昇(ミカドプロペラ)
オブザーバー	宮武宜史(運輸省海上技術安全局) 西川康士(運輸省海上技術安全局)
討議参加者	前田正二(東京大学) 菊地裕(三井造船昭島研究所) 松葉順(日本造船技術センター) 山崎寿(横浜国立大学) 御沓雅司(住友重機械工業) 船野功(川崎重工業) 岩本三郎(住友重機械工業)

目 次

成 果 概 要

1. 緒 言	1
2. S Cプロペラの現状と本研究の狙い	2
3. 翼型の開発	5
4. S Cプロペラの開発	12
5. 成果のまとめ	25
6. 結 言	28

1. 緒 言

スーパー・キャビテーション・プロペラ（SCプロペラ）は、原理的に高性能のプロペラとなる可能性を持った推進機として古くから注目され、1960年代には数多くの研究がなされている。ところがキャビテーション現象の複雑さから、所定の性能を持つSCプロペラを設計することが困難であり、その使用は簡単にプロペラを交換出来る、小型舟艇にかぎられていた。

近年キャビテーション現象についての研究がすすみ、また高速の計算機の進歩とあいまって、ふたたび高性能SCプロペラ開発の機運が生まれて来た。実際、本研究部会で国内・外のメーカー、ユーザーに対して行ったアンケートにおいても「今後の高速船へのニーズの高まりを考えた時、SCプロペラは高速推進機として期待が持てるが信頼出来る設計方法がないのが不満である。」という意見が多く、高性能SCプロペラへの期待が知れる。

本研究部会は主としてSCプロペラの流力性能について研究している。SCプロペラを実際に設計する際、その強度、船体との干渉等、考慮しなければならない項目は多いが、すぐれた流力性能を持つSCプロペラの開発は、SCプロペラの高速船への装着の最も重要な要因であるので、特に流力性能を中心にして研究を実施した。研究の詳細は次章以下に述べられるが、その内容の概略は次のようである。

(1) SCプロペラの現状の調査

(2) 翼型の開発

高性能SCプロペラの基本であるSC翼型について、その理論解析法を開発し、それにより高性能のSC翼型を開発した。

(3) SCプロペラの開発

SCプロペラの理論解析法を工夫し、計算が容易でありながら精度のよい設計法を開発した。またこれとは別に揚力面理論による高精度のSCプロペラ理論解析法を開発し、両解析法を活用することにより、従来のものより格段に性能の高いSCプロペラを開発した。

以上のように委員各位のご努力と関係各機関のご支援により所要の目的を十分に達したと考えられるので、その総合成果の概要をここに報告する。

2. SCプロペラの現状と本研究の狙い

近年の、高速船に対する社会的なニーズの高まりに伴い、高速船用の優れた推進手段への期待が高まっている。

高速船用の推進手段としては、

- (1) スーパーキャビテーションプロペラ
(SCプロペラ)
- (2) ウォータージェット
- (3) サーフェースプロペラ
- (4) 空中プロペラ

等々がある。

図2-1は、これらの推進効率と作動時の荷重度とを示したものであるが、この図から現在就航している高速旅客船に対しては、SCプロペラが最も良い推進効率を示している。

ところが、SCプロペラの現状を見てみると、1960年代から1970年代に盛んに研究されたものの、当時は商船用としての大きなニーズがなかったという背景もあり、精度の良い設計法や性能評価法は未だ確立されていないのが現状である。

一方、その後の研究環境を見てみると、最近のコンピュータ性能の飛躍的な向上に支えられて、短時間に、しかも精度の高い流体解析のための数値計算が行えるようになり、プロペラやキャビテーションの研究分野においても数値計算による流体解析の進歩が著しい。

このことは、より高精度のSC翼やSCプロペラに関する設計法や性能解析の研究が実施できる環境が整いつつあることを意味している。

また、現在の進んだ計測技術が、理論の検証や設計法の評価のための、より精度の高い実験データを整えることを可能としている。

以上のような、業界のニーズと研究のシーズがタイミング良く一致したのが本研究であり、本研究の狙いを次の様に位置づけた。

- (1) SCプロペラの性能解析法と性能評価法の確立
- (2) 精度の高い設計データの整備
- (3) 高効率SCプロペラの開発

図2-2は、本研究部会発足直後に実施した「SCプロペラについての実態調査」のアンケート結果の一部であるが、この結果から“今後の高速船へのニーズの高まりを考えたとき、SCプロペラは推進手段として期待のもてるもの一つであるが、信頼できる設計法がないのが不満であり、そうかといって自社単独で研究を積極的には推進できない”と言え、本研究の発足意義及びその狙いが正しかったことが証明された次第である。

このような研究の狙いを実現するために、本研究部会において

- (1) SCプロペラのニーズと研究の現状に関する調査
- (2) SCプロペラの翼断面形状に関する研究

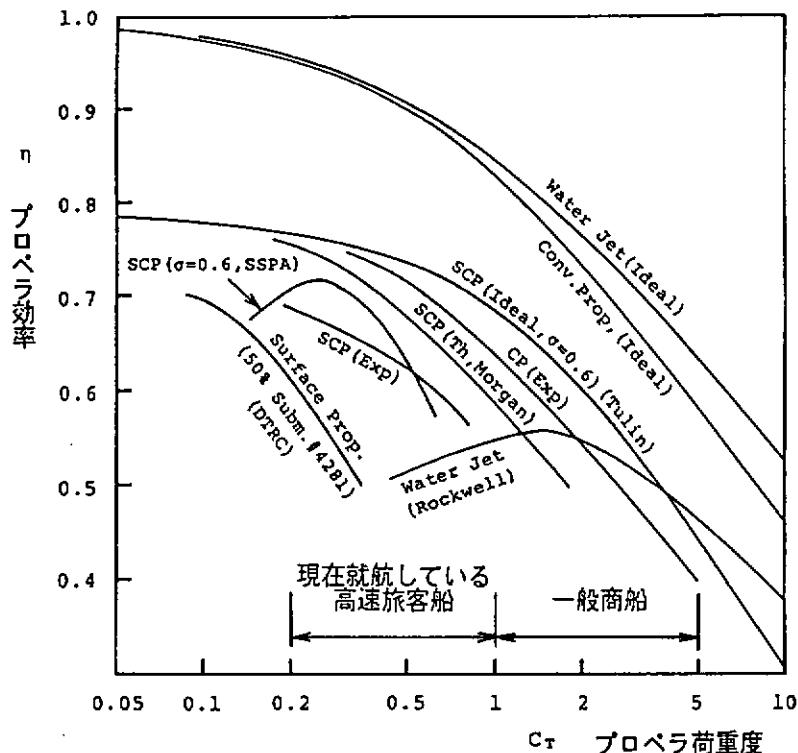


図2-1 各種推進器効率の比較

(3) SCプロペラの性能解析法に関する研究

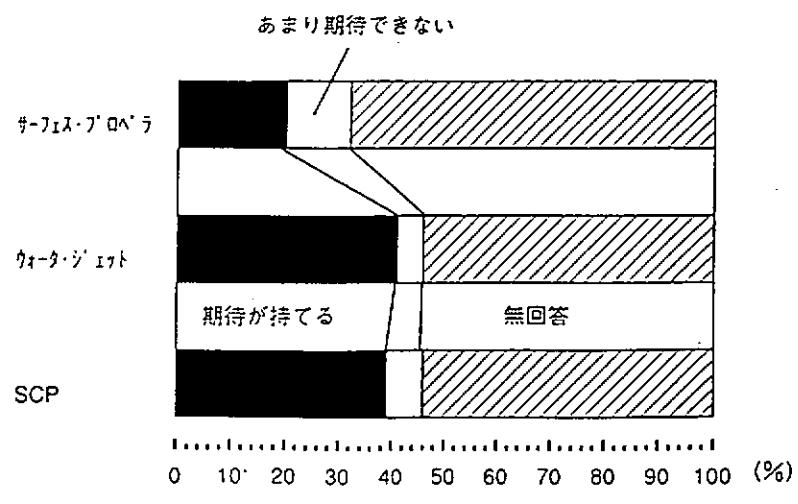
(4) SCプロペラの設計手法に関する研究

を実施することにし、これらの研究成果を総合して、最終的には既存のSCプロペラよりも効率の高いSCプロペラの開発、およびその設計手法の確立を目指すこととした。

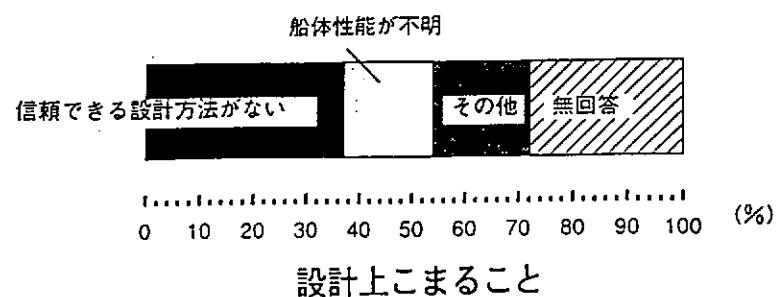
これらの研究の過程では、既存のSC翼型およびSCプロペラの性能や問題点を把握し、これを念頭に置いて新しいSC翼型やSCプロペラの開発を進めることが重要と考えられたので、既存のSC翼型、SCプロペラの性能評価も研究の初期段階に実施することにした。

なお、SCプロペラの斜流中や波浪中の性能、最適な材料の選定や開発などについては本部会の研究課題とはせず、今後の研究課題と考えている。

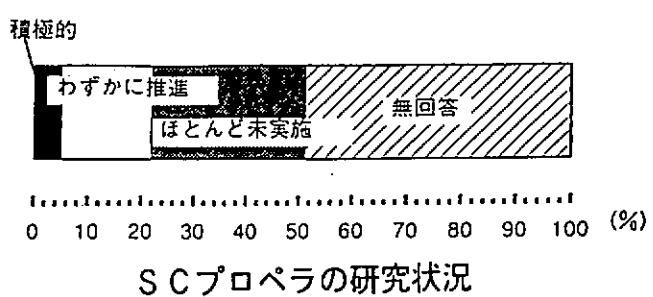
図2-3は本研究の3カ年の全体計画図で、図2-4はこれらを総合的に体系付けた図である。



高速推進器への期待



設計上こまること



SCプロペラの研究状況

図2-2 アンケート調査結果

	平成 3 年度	平成 4 年度	平成 5 年度
① SC プロペラの翼断面形状に関する研究	翼型計測法の開発	翼型性能の改良	最良性能翼型開発研究のとりまとめ
② SC プロペラの性能解析法に関する研究	2 次元翼型の性能計算	小規模 SC プロペラの性能計算	大規模 SC プロペラの性能計算研究のとりまとめ
③ SC プロペラの設計手法に関する研究	既存プロペラシリーズテスト結果の評価	プロペラ幾何形状の影響の検討	高性能 SC プロペラ試設計研究のとりまとめ
④ 現状調査	幅広い分野の文献・資料調査	水槽影響（側壁影響等）の調査	研究のとりまとめ
事務費総額	36,800 千円	50,400 千円	44,000 千円
補助金額	29,400 千円	40,300 千円	35,200 千円

図 2-3 スーパーキャビテーションプロペラに関する研究全体計画図

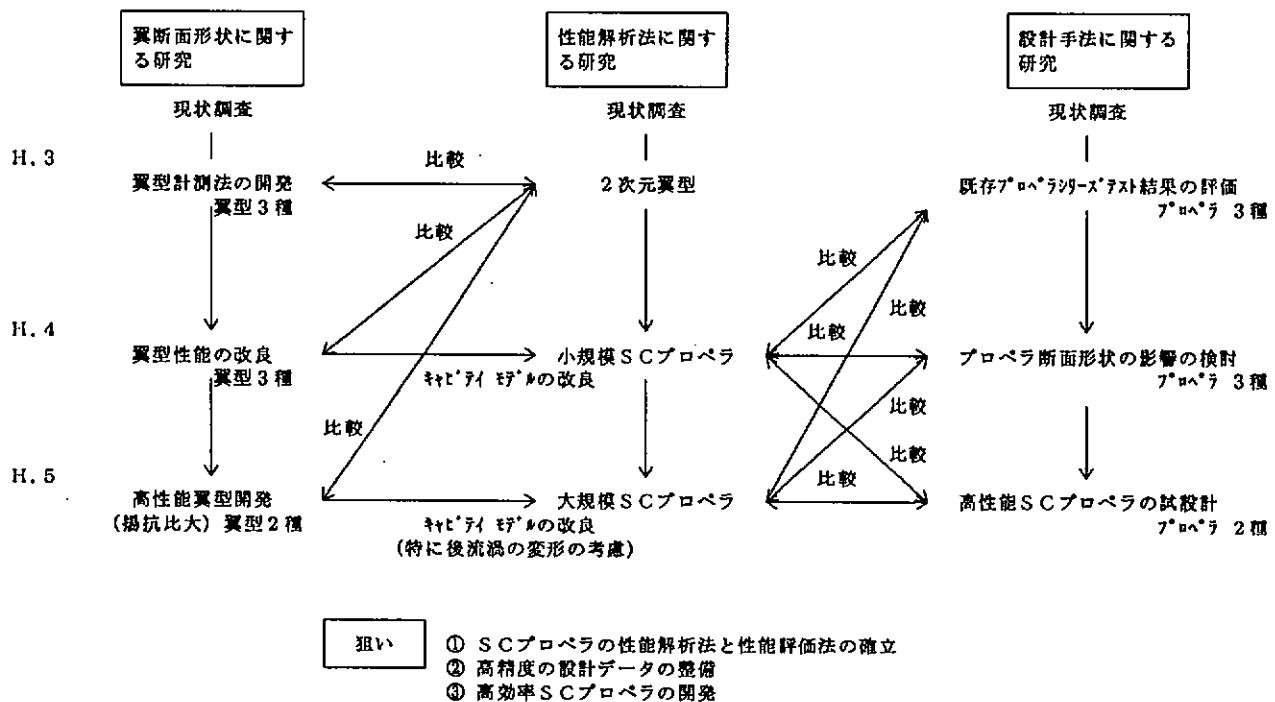


図 2-4 SR 214 SC プロペラに関する研究全体フロー

3. 翼型の開発

3.1 はじめに

プロペラの基本要素である2次元翼について、スーパーキャビテーション(以下、SCと記す)状態の新しい理論を開癡し、それを用いて高性能(揚抗比の高い)のSC翼型を開癡した。

また、初年度3個、第2年度3個、最終年度2個の合計8個の翼型を、東京大学及び船舶技術研究所のキャビテーション水槽で実験し、性能を確認した。SC翼型の実験は、試験装置であるキャビテーション水槽にとって大変厳しいものであるため、装置にもいくつかの工夫をし、計測方法の開癡を平行して行う必要があった。そのため、大変長期にわたる実験が必要であった。

3.2 理論

SC翼型の理論は、古くより種々報告されているが、それらは精度に問題があったり、計算できる翼型の形状が制限されるなどの欠点があり、必ずしも使い良いものではない。そこで本研究では、任意翼型に適用できる高精度な理論を、線形理論(ベルヌイの式を線形化するもの)。非キャビテーション状態の場合には、薄翼理論とも言う。本研究では特異点分布法に依ったので、以後、線形特異点分布法(記す)と非線形理論(ベルヌイの式をそのまま使うもの)。非キャビテーション状態の場合には、厚翼理論とも言う。本研究では一次渦分布を用いたパネル法に依ったので、以後、一次渦パネル法(記す)の2つ開癡し、設計に供した。

線形特異点分布法は、図3-1に示すようなキャビティが翼前縁から発生する場合と、そうでない場合の2種を開癡した。図3-1の翼の部分に働く揚力分布を渦分布 $r(x)$ で、翼とキャビティの排除効果を吹き出し分布 $m(x)$ で表し、それらを図3-2の様に x 軸上に配置する。渦分布、吹き出し分布が誘起する速度が線形化した境界条件を満足するように、それらの強さを求める。ここでは、西山のMode Function法を基本にし、その精度と汎用性を向上した理論を開癡した。渦分布、吹き出し分布は、それぞれ翼前縁およびキャビティ後縁の特異性を考慮した級数で表示する。キャビティが翼前縁から発生する場合とそうでない場合で翼前縁の特異性が異なるので、それらの場合に対して定式化を行った。なお、翼下面の境界条件として翼形状を与えれば「翼形状を与えて翼性能を求める」という解析理論になり、圧力分布を与えれば「圧力分布(すなわち揚力)を与えて翼形状を求める」という設計理論になる。ここでは、両者の計算プログラムを作成し、翼型開癡に用いた。

一次渦パネル法は、翼とキャビティ面を微小な線分に分割し、その上に線形に変化する渦分布を置く。渦分布による誘起速度が境界条件を満足するように、渦分布の強さを決定する。計算精度を向上させるため、キャビティ前縁部には \sqrt{x} の特異性を持った特異渦パネルをおいた。キャビティ模型は閉鎖型とし、キャビティの形状は逐次近似法に

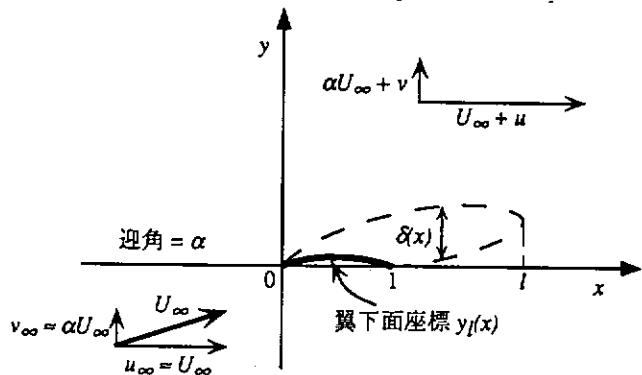


図3-1 線形特異点分布法のSC流場
(キャビティが翼前縁から発生する場合)

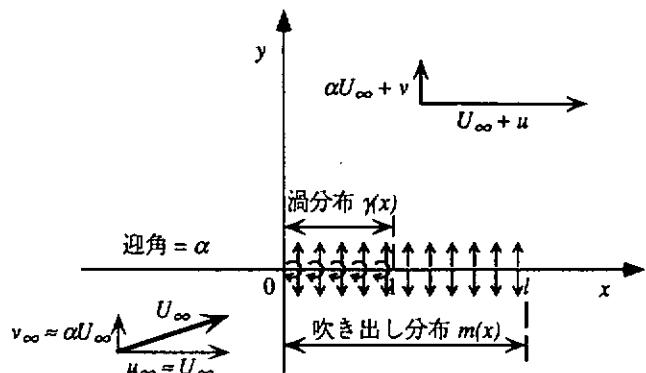


図3-2 線形特異点分布法における、翼とキャビティを表す特異点分布

より求めた。計算のフローチャートを図3-3に示す。この方法は非線形理論であるため、線形特異点分布法のように、キャビティ前縁位置に応じて解法を変更する必要はない。また、翼前縁の特異性もないため、キャビティが翼途中から発生する場合でも、境界層計算を行って、キャビティ前縁を層流剥離点に一致させることにより、キャビティ前縁位置を一意に定めることができる。計算されたキャビティの形状とその回りの速度分布の一例を図3-4に示す。この理論についても、解析プログラムと設計プログラムの両者を作成した。

線形特異点分布法と一次渦パネル法の計算結果の比較例を図3-5に示す。(a)がキャビテーション数に対するキャビティ長さの逆数の変化、(b)が揚・抗力係数の変化を比較したものである。2つの理論の結果はほぼ完全に一致している。この様に、SC状態では、線形特異点分布法でも精度良い解が得られる。しかしながら、翼後縁に極端なカップが付いた場合など、翼形状が急に変化する場合には、両者の差の大きくなることが報告されている。すなわち、線形理論（本研究では線形特異点分布法）はあくまでも第1次近似の理論であることを念頭に置いて、その簡便性を生かした使い方をするべきである。

3.3 実験装置及び結果の比較

実験は、全ての翼について、東京大学と船舶技術研究所の両者のキャビテーション水槽で行った。翼模型は共通とし、翼弦長150mm、スパン幅149mmのステンレス製の翼模型を、検力計取付用のディスクと一緒に製作した。図3-6に、東京大学での試験部（翼型用試験部）を示す。試験部の上下壁間距離は翼の長さの4倍あり、通常の試験状態ではBlockage Effectはほとんどない。しかしながら、側壁に発達する境界層や翼端から発生する渦の影響などが特に翼抗力に対してあり、翼端の隙間、ディスクの出っ張り量など、かなりの試行錯誤を繰り返して、最適なものを見出す必要があった。図3-7に、船舶技術研究所での試験部を示す。船舶技術研究所には翼型用試験部がないため、円形断面の第1計測部にセンタープレートや整流部を取り付けて試験した。キャビティが極端に厚く大きくなるとBlockage Effectが複雑になるが、通常の試験状態では制限水路影響は無視できるほど、広い流路断面を有している。ここでは、センタープレートからのキャビティの発生が当初問題になった。そのため、詳細部においていくつかの改良が必要であった。それによりセンタープレートからのキャビティは抑制されたが、まだキャビティが非常に長い場合の抗力計測に若干問題があるようである。

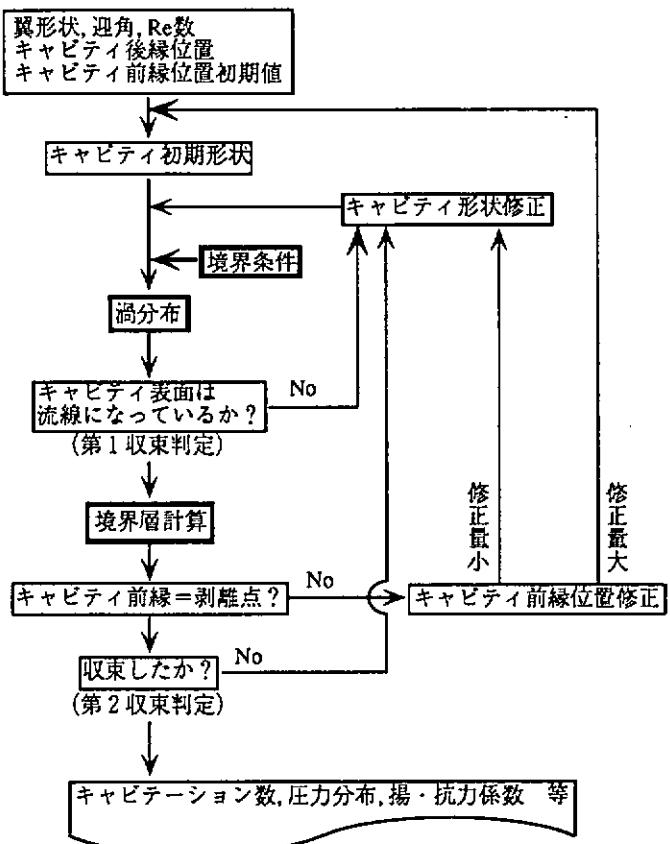


図3-3 一次渦パネル法による計算のフローチャート

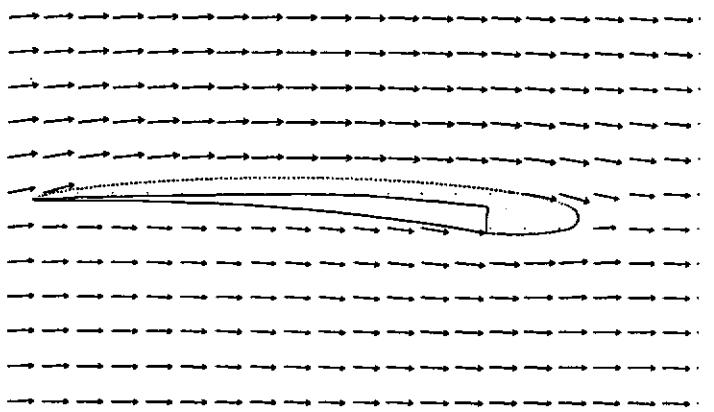
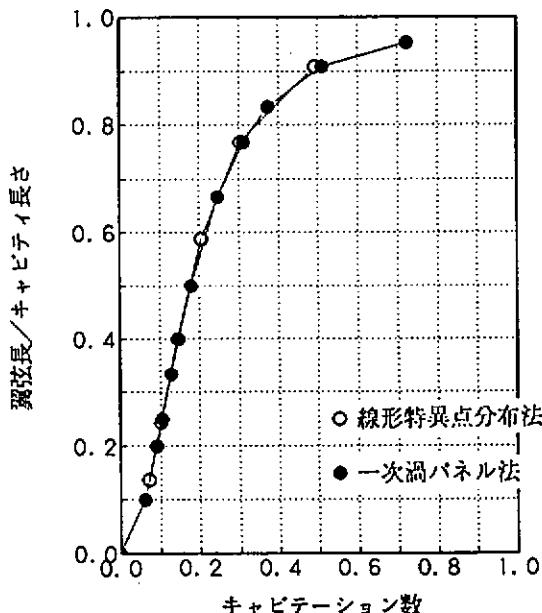
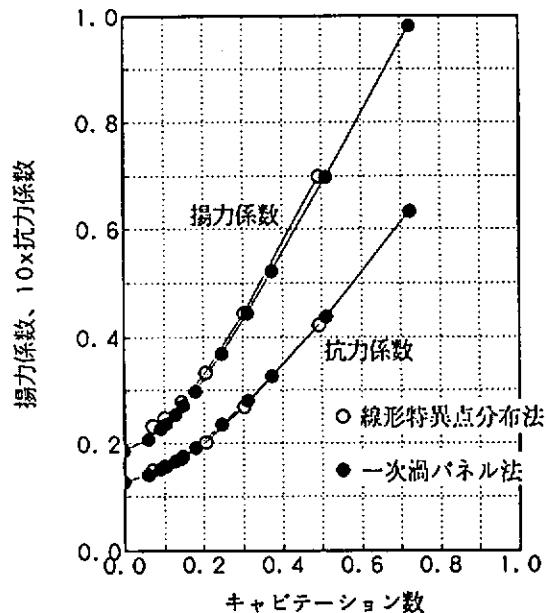


図3-4 一次渦パネル法により計算されたキャビティ形状
と速度分布；Waid翼型、迎角 = 4.0 deg., キャビテーション数 = 0.37



(a) キャビテーション数に対するキャビティ長さの逆数の変化



(b) キャビテーション数に対する揚力係数、抗力係数の変化

図 3-5 線形特異点分布法と一次渦パネル法の計算結果の比較；Wald翼型、迎角 = 4.0 deg

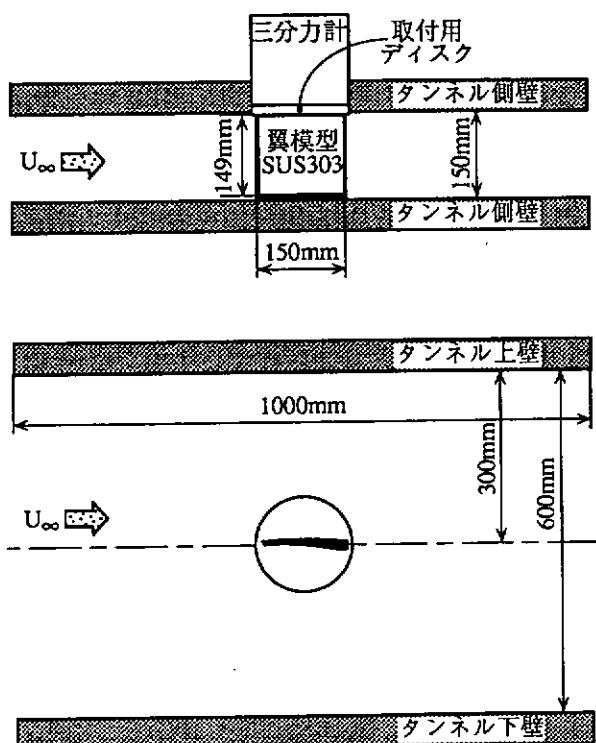


図 3-6 東京大学のキャビテーション水槽試験部と翼模型取付図

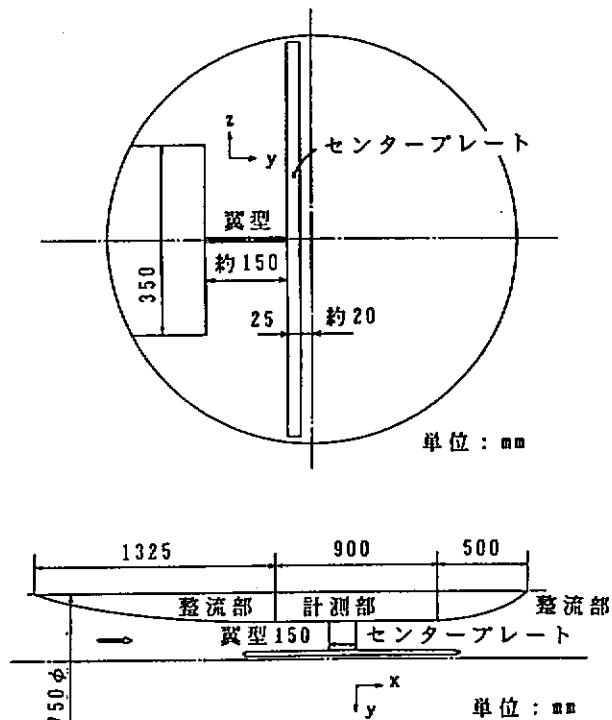


図 3-7 船舶技術研究所のキャビテーション水槽試験部と翼模型取付図

図 3-8 に、2つのキャビテーション水槽間のキャビティ長さの比較を示す。東京大学の方が、キャビテーション数の高い部分キャビテーション状態でキャビティが長く、SC 状態で逆に短いという傾向が見られるが、それほど大きな差ではない。図 3-9 に、揚力係数の比較を、一次渦パネル法による計算値とともに示す。右側の横に並ぶ実験点は部分キャビテーション状態のものであり、理論 (SC 状態) と比較できるのは、斜めに並んだ実験点である。ど

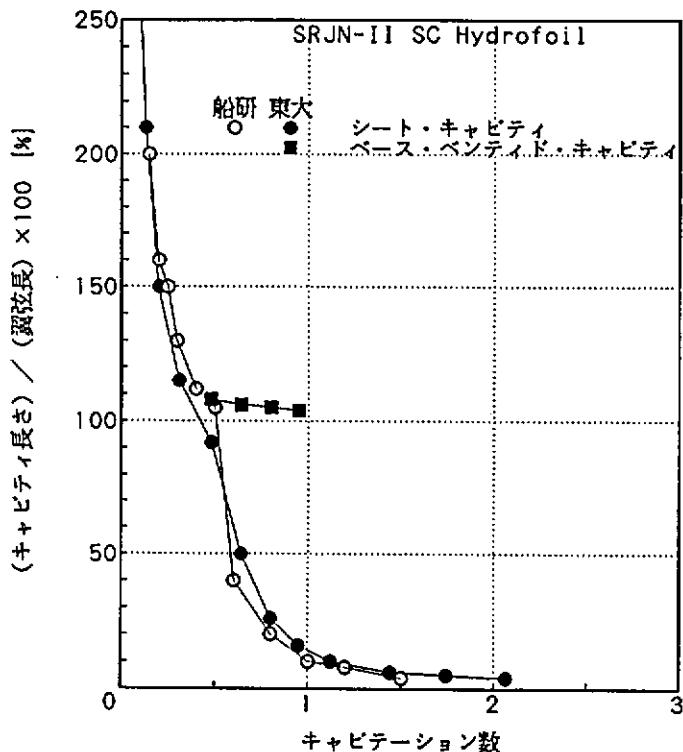


図 3-8 2つのキャビテーション水槽でのキャビティ長さの比較；SRJN-II翼型，迎角=3.0 deg

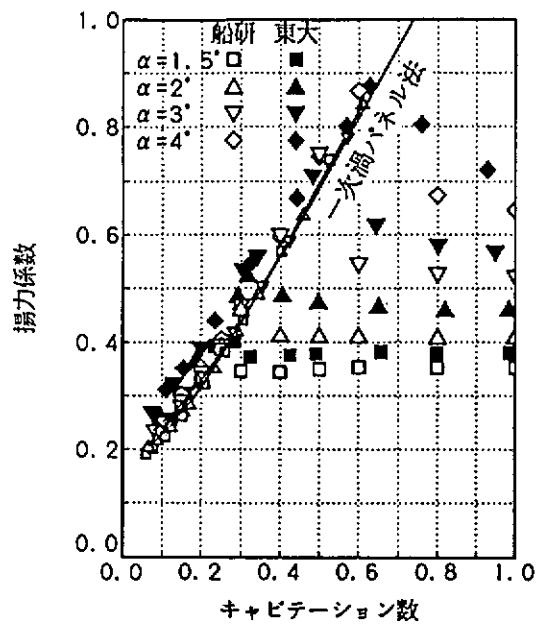


図 3-9 揚力係数のキャビティ水槽間及び一次渦パネル法との比較；SRJN-II翼型

平成3年度	平成4年度	平成5年度
狙い：既存翼型の性能確認 Newton-Rader 翼型	狙い：新しい翼型の開発 SRNE 翼型 圧力分布を与えてEppierの方法により設計 キャビテーションの激しい振動の防止 翼後縁直前の剥離の防止	狙い：平成4年度製作した翼型の改良
Waid 翼型	SRJN-I 翼型 正面形状：Johnson 5 項翼 背面形状：一次渦パネル法により、様々なに 対するキャビティ形状を求めてその 内側包絡線を採用	SRJN-II 翼型 正面形状：圧力分布を与えることにより決定 背面形状：一次渦パネル法によるキャビティ表面 よりも削る 前縁にキャビテータ（くぼみ）を設置
Johnson 翼型	SRJL-I 翼型 正面形状：圧力分布から線形特異点分布法により 決定 背面形状：一次渦パネル法により得られたキャビ ティ長さがコード長さの5倍のときの キャビティ形状	SRJL-II 翼型 正面形状：圧力分布から線形特異点分布法により 決定 背面形状：線形特異点分布法により設計迎角 0.93deg における様々なキャビティ長 さの包絡線として決定 前縁にキャビテータを設置（厚さ付加）

図 3-10 供試翼型一覧

これらの実験結果も理論と良く一致しているが、全般に東京大学の揚力係数の方が高めである。理論には、船舶技術研究所の実験結果の方がよく一致している。抗力係数については、実験の方が概して理論より少し高めになる。しかし、抗力は揚力よりも1桁以上小さい力であるため、理論のみならず、計測技術の方も更なる検討が必要である。

レーザー流速計により翼及びキャビティ後流の速度分布を計測し、その運動量欠損から抗力係数を算出して、それ

を検力計により直接計測した値と比較した。それによると、船舶技術研究所においては、非キャビテーション状態及び短い部分キャビテーション状態では両者は良く一致した。東京大学の場合、計測位置が翼に近いこともあり必ずしも一定の傾向は見られなかったが、全般に両者の抗力係数はほぼ0.01以下の差で一致し、今回の抗力係数の計測精度が0.01程度であることが判った。

3.4 供試翼型と設計条件

本研究で取り上げた翼型8個を図3-10に示す。初年度の3個は既存翼型であり、これを開発のベースとした。Waid翼型とは、Tulin2項翼の強度を増すために厚くしたものであり、CITにてWaidが実験を行っている。Newton-Rader翼型は、本研究で用いたNewton-Raderプロペラの0.5R断面と同じ形状である。Johnson5項翼は、JohnsonがTulinの無限キャビティ長さの理論を使って、翼形状を表す項数を増やして得た高性能理論翼型である。

2年度以降は、上記で得た経験を基に、「揚力係数=0.30、キャビテーション数=0.20、最大揚力係数1.0に耐える断面係数（強度条件）」を設計条件として、理論による翼型開発を行った。SRNE翼型は、初年度に最も高い揚抗比を示したNewton-Rader翼型のキャビティの振動問題（実際、キャビテーション水槽自体が振動を起こす様な極めて激しい振動を起こす）を解決するために、非キャビテーション状態の圧力分布を改善し、Epplerの理論により設計した翼である。この翼の場合、キャビティは、翼前縁からは発生しない。他の翼は全て、翼前縁からキャビティが発生するSC理論を用いて設計した。SRJN-I翼型は、下面をJohnson5項翼で与え、一次渦パネル法を用いて翼前縁の丸みと翼背面形状を調整・決定することにより、翼厚を増して強度を確保したものである。SRJL-I翼型は、線形特異点分布法による設計プログラムを用いて、翼下面の圧力分布をJohnson5項翼から改良することにより求めたものである。しかし、当初設計した翼は強度条件を満たさなかったため、キャビティを長くした一次渦パネル法の計算により、翼背面形状を決定した。最終年度の2つの翼には前縁にキャビテータを取り付け、前縁からの安定なシート・キャ

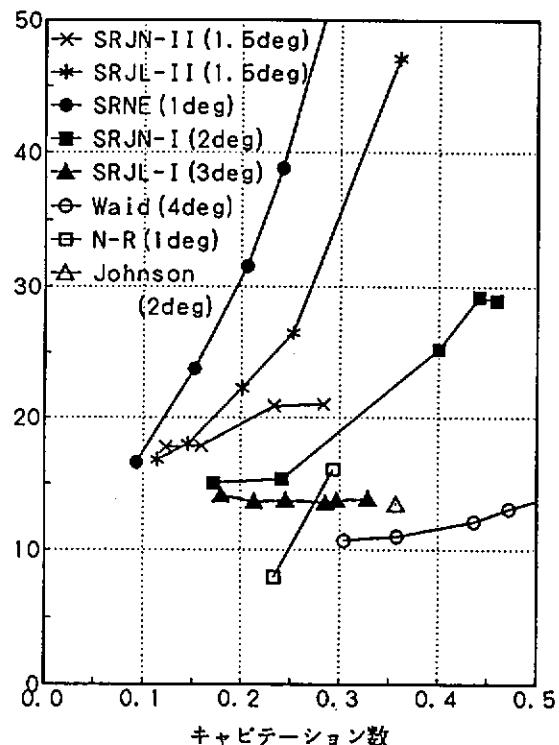


図3-11 実験による各翼型の揚抗比の比較
(キャビテーション数に対する変化)

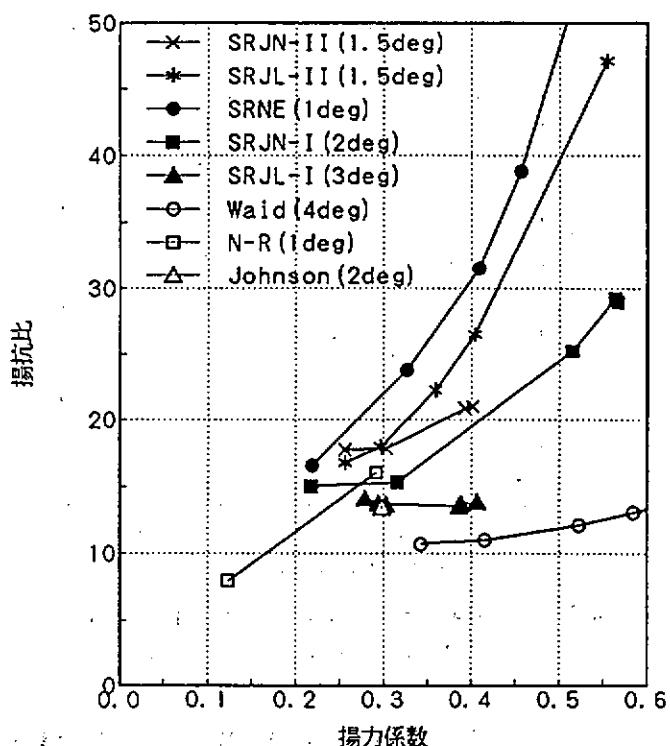


図3-12 実験による各翼型の揚抗比の比較
(揚力係数に対する変化)

ビティの発生を促進した。SRJN-II翼型は、一次渦パネル法の設計プログラムにより、圧力分布を改良して得られた翼型である。SRJL-II翼型は、線形特異点分布法の設計プログラムにより、圧力分布を更に改良して強度条件を満たしたものである。SRNE翼型、SRJN-I翼型は、シリーズ化されて、後出するプロペラの翼断面に適用された。SRJN-II翼型、SRJL-I翼型、SRJL-II翼型は、後述するように、必ずしも性能が悪かったわけではない（むしろ、最終年度に開発したSRJN-II翼型、SRJL-II翼型は、大変優れた翼型である）が、設計のタイミングのズレなどの理由により、プロペラに供されることはなかった。

3.5 翼型性能の評価

図3-11、12に、実験（東京大学）で得られた揚抗比の比較を示す。Newton-Rader翼型、SRNE翼型を除き、前縁からシートキャビティが発生する最低の迎角のものを示している。図3-11が横軸をキャビテーション数にして比較したもので、図3-12は揚力係数を横軸にして比較したものである。

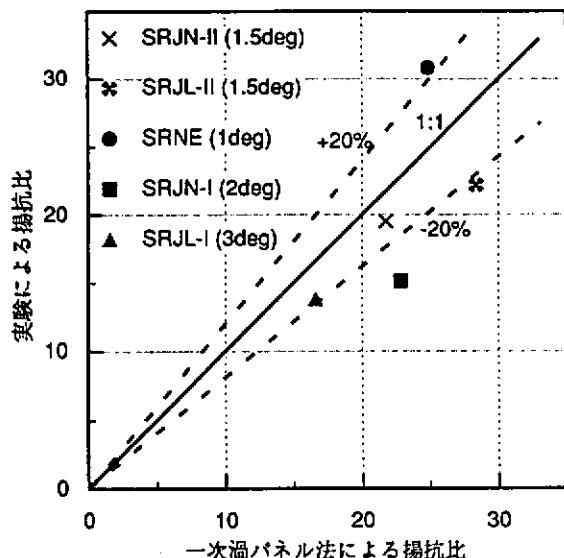


図3-14 キャビテーション数=0.2における実験と一次渦パネル法による揚抗比の比較

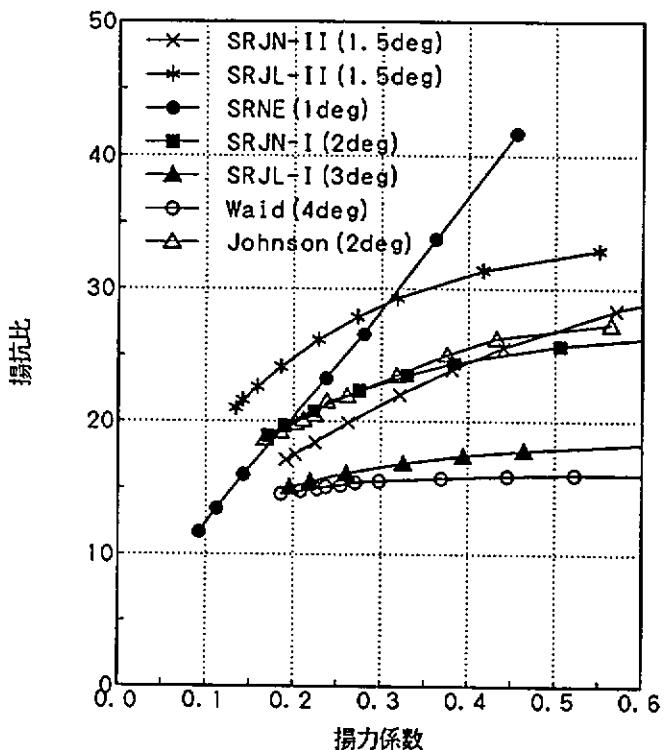


図3-13 一次渦パネル法による各翼型の揚抗比の比較
(揚力係数による変化)

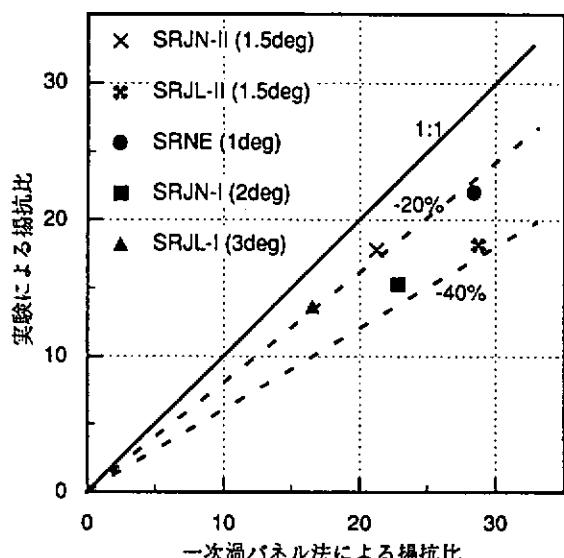


図3-15 揚力係数=0.3における実験と一次渦パネル法の揚抗比の比較

ーション数にして比較したもので、図3-12は同じ実験結果を、揚力係数を横軸にして比較したものである。これを見ると、SRJL-I翼型以外は、全て初年度の既存翼型を上回っており、本研究の成果が良く判る。SRNE翼型の揚抗比が最も高く、Newton-Rader翼型で見られたキャビティの激しい振動も狙い通り抑制された。すなわち、これが最も優れた翼ではあるが、図の曲線の傾きが大きいことから判るように、作動条件の変化に対する性能変化が大きく、設計は難しい翼と言えよう。また、この翼型は、後出する図3-14で述べるように、理論により予測された性能と実験値との対応が他の翼型と異なる傾向を示している。これに対して、前縁からキャビティが発生するSRJ

N-II翼型, SRL-II翼型は、曲線の傾きも小さく、揚抗比も SRNE翼型に次いで高い。SRL-N-II翼型はキャビテーション数、揚力係数とも低いところで優れており、SRL-II翼型は逆にそれらが高いところで優れている。但し、SRL-II翼型はキャビティの軽微な振動が見られたため、後少しの改良が望まれる。

図3-13は、図3-12に対応する一次渦パネル法の計算結果である。Newton-Rader翼型は解が収束しなかったため、図には示されていない。図3-13を見れば、実験結果である図3-12より全て高めの揚抗比が計算されているが、翼型相互の関係はほぼ実験結果に対応しているのが分かる。SRL-II翼型の低キャビテーション数領域での揚抗比の差が大きいが、これは、実験でキャビティの軽微な振動がSC状態直前で起こり、その後ストリーク状のキャビティやバブル・キャビティに移行したため、本当のSC状態が実験では得られなかったからである。

設計キャビテーション数である0.2における揚抗比の、一次渦パネル法による計算値と実験値の対応を図3-14に、設計揚力係数0.3における同様の比較を図3-15に示す。キャビテーション数=0.2の時のSRNE翼型を除いては全て実験の揚抗比の方が低めになっている。現在の理論では、計算された揚抗比を20~30%小さくすれば、実験にはほぼ対応するようである。この修正量は、翼正面の乱流境界層域が計算より実験の方が大きいであろうことを考えると、ある程度は説明できる。しかし、SRNE翼型のように翼前縁からキャビティが発生しないような翼では、理論による予測精度は悪くなるので、更なる検討が必要である。

3.6 まとめ

SC翼型の理論を2種開発し、その精度を検証した。さらに、これらの理論を用いて、高性能SC翼型を開発した。計算による揚抗比は、概して実験によるものより高めになるが、計算値を20~30%小さくすれば実験のものに対応するようになる。しかし、キャビティが翼前縁から発生しない時には、理論による予測精度が悪くなるので、更なる検討が必要である。

既存翼型3個を含む8個の翼型を作成し、キャビテーション水槽で試験した。それにより、キャビテーション水槽にとって非常に厳しい試験条件になるSC翼型の試験法が、開発できた。翼型設計点(キャビテーション数=0.2、揚力係数=0.3)において、キャビティが翼前縁から発生しない翼で、揚抗比が22を越え、しかもキャビティの振動もない高性能の翼型が、開発できた。キャビティが翼前縁から発生する翼でも、揚抗比が20程度になる高性能翼型2種が、開発できた。

4. S C プロペラの開発

4.1 設計条件

S C プロペラは高速船用に装着されるプロパルサとして、比較的広い荷重域の領域で用いることができる。本研究部会では時代の動向にあわせて設計条件を検討した。この際、既存の高速船用プロペラ設計法で具体的に試設計をして設計条件を以下の様に決定した。

また、設計にあたってプロペラ回転数はフリーとした。エンジンの出力は 50,000 PS 前後を目標としたが、このレベルのエンジンが発表予定であったので、問題がないと判断した。

- (1) 船速 $V_s = 50 \text{ kts}$ ($1 - w_s = 1.0$)
(2) 推力係数 $C_T = 0.334$; 全スラスト 300 ton

ここに、

$$C_T = \frac{T}{\frac{\pi}{8} \rho D^2 V_a^2}$$

T ; プロペラのスラスト

D ; プロペラ直径

V_a ; プロペラ前進速度

ρ ; 流体の密度

- (3) 軸数 3 軸 ; 1 軸あたりのスラスト 100 ton

- (4) キャビテーション数 $\sigma_v = 0.4$

ここに、

$$\sigma_v = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_a^2}$$

P_o ; プロペラ位置の静圧

P_v ; 水の蒸気圧

- (5) プロペラ直径 3.318 m (SSPA SCP 設計チャートより)

4.2 設計法

本部会では、シリーズプロペラの実験に基づく設計チャートを作るという従来の方法には依らず、理論に基づく新しい設計法で、上記の設計条件に対して S C プロペラを設計することとした。

先ず、初年度はそれぞれの既存の高速船用プロペラ設計法により、Newton-Rader プロペラ [1]、DTMB プロペラ [2]、SSPA プロペラ [3] の 3 個のプロペラを設計し、それらのプロペラ性能と設計法の評価を行った。Newton-Rader と SSPA プロペラは実験に基づくチャートで、DTMB プロペラは揚力線理論に基づいて設計した。初年度での設計の結果、SSPA プロペラ設計法が最も信頼できると判断し、この SSPA プロペラを次年度以降の設計評価の基準となる標準プロペラとした。この結果、プロペラ回転数は 423 rpm とし、設計点の前進率 J は 1.10、スラスト係数 K_T は、0.159 とした。

2 年度目には DTMB (テラーー水槽、アメリカ) で開発された揚力線理論に基づく S C プロペラ設計法 [2] を大幅に改良した設計法 [4] を開発し、これに基づくプログラム・コードを新たに作成した。各プロペラ半径位置の翼断面の性能は新たに開発された非線型 S C 理論である一次渦パネル法 [5] により計算する。前述の様に、本計算

法は翼型実験との比較から従来より高い精度で揚力や抗力を予測できる。この方法に基づき、各作動状態に対応する翼素の最適設計理論チャートをサブルーチンとして作成し、SCプロペラ設計プログラムに組み込んだ。

次に、プロペラの翼素まわりの流れは“曲がり流れ”となるので、これを考慮してプロペラ揚力面補正を二次元SC理論による設計結果に適用した。一つのSCプロペラに対しては、通常のプロペラに適用する方法で行った。実験の結果、設計条件とのマッチングが良くなかったため、その原因を調べたところ、既存の揚力面補正法をSCプロペラに対して適用すると、キャンバーが過大となり適当でないことが判明した。このため、渦格子法（2年度目は準渦連続分布法、QCM [6]、また3年度目はVLM [7]）に基づくプロペラ揚力面理論を応用した揚力面補正法を開発した。本設計法は与えられた荷重分布をもつSCプロペラのキャンバーと2次元SC翼型のキャンバーを求め、その差を補正量とする新しい概念の揚力面補正法である。

最終年度は揚力線計算をGoldstein理論から、より厳密なLerbs理論に変更し、ボス比の影響も大略考慮した設計法でSCプロペラの設計を行なった。また、更に、この初期設計法で得られたSCプロペラについて、後述の性能解析法(SC-VLM [8])により性能を予測し、与えられた設計条件を満たすピッチ分布を求めた。この様な方法を用いると、実験に基づくチャート方式と異なり、キャビティの排除効果を含むカスケード効果がより厳密に、また定量的に考慮されているので、2年度目に用いたSSPAチャートによるカスケード効果に関するピッチ修正は行なわなかった。

4.3 性能解析法

本研究部会で設計・製作したSCプロペラの性能計算は、主に渦格子法に基づくSCプロペラの性能解析プログラム(SC-VLM)を用いた計算結果で記述する。本プログラムは、船研が開発した非定常のSCプロペラの解析法[9]に基づき、定常状態のSCプロペラ用にコーディングされている。

渦格子法VLMは、プロペラの翼を渦糸を縦横に組んだ渦格子により置き換え、プロペラ周りの流場を計算する手法で、プロペラ揚力面理論に基づく理論計算法の一つである。キャビテーションの発生していないプロペラの性能計算には実用化されており、比較的精度良く性能予測を行うことが出来る。しかし、SC状態のプロペラ性能計算に対して用いられた例は今まで世界的にも殆んどなく、また、既存の渦格子法をそのままSCプロペラの性能計算に用いると性能が全く合わないなどの不都合が生じる。

SCプロペラの性能計算に渦格子法を応用するに当たり、本研究では次の2つの新しい手法を用いた。

- (1) 通常のプロペラ渦格子法ではプロペラ翼に固定される渦格子を、キャビテーションの発生量に応じて変形させることにより、SC状態のプロペラ性能を的確に表現できる渦格子を作る。
- (2) プロペラのスラストおよびトルクを求めるに当たり、非キャビテーション状態のプロペラの場合は通常、渦格子の各渦糸に働く力を合計して算出する。SCプロペラの解析では、キャビテーションの発生による翼断面抗力の増加を正しく評価するために、翼面上に働く圧力を積分することによりプロペラ全体にかかる力を求める。

他にも、渦格子の配置の仕方や後流渦の変形の扱い方などにも通常プロペラとは異なる工夫がなされている。

計算例として、2年度目に設計・製作および模型試験を行ったSCプロペラの一つであるSRIJ-IIプロペラについて示す。また、その性能計算結果を図4-1に示す。スラストおよびトルクに関して、実験値と比較して2%以内の誤差で合う結果を得ることが出来た。効率についても広い作動条件で非常に良くあっていいる。図4-2のキャビテーションの発生範囲の比較では、翼端部で計算結果と実験結果が若干異なるものの、非常に良い精度で予測計算がなされている。図4-3の実験の写真と計算結果の図（黒い部分がキャビテーション）を比較するとそのことは一層明らかで、TVC（ティップ・ヴォルテックス・キャビティ；翼端部から螺旋状の紐の様に繞いているキャビテーション）の位置まで含めて計算は実験と良く一致している。

上記の渦格子法の他に、2つのプロペラ性能解析法で計算が行われた。その1つはプロペラ揚力面理論で計算され

た等価2次元翼に線型キャビテーション理論を適用して、SCプロペラの性能を計算する方法[10]であり、他の1つは表面渦格子法[11]である。

前者の方法では、部分ないしスーパー・キャビテーションを起こしているプロペラの性能を計算するため、準連続渦分布法によって得られた等価2次元翼に対して2次元翼キャビテーション理論の線形解を適用している。この方法に基づき、SCプロペラ性能を算定するプログラムを開発した。この計算法をSSPA・DTM B・Newton-Raderプロペラの他、SRIJ-IIプロペラ（本研究部会で設計されたSCプロペラの一つ）に適用した。実験結果と比較すると、プロペラ性能、キャビティ形状、圧力分布とともに、定量的には少し差はあるが、定性的な傾向は良く一致する結果が得られた。

また、更に揚力体理論の一方法である表面渦格子法を、SCプロペラの性能解析に応用した。本法では渦格子と吹き出しをキャビティ表面にも分布させて、反復解法により、キャビティ形状と渦の循環とを同時に解く。SRIJ-IIに適用して、実験結果と良く合う結果を得た。

4.4 設計の評価

初年度は既存の高速船プロペラ設計法により3個のSCプロペラを具体的に設計した。設計された9つのSCプロペラの主要目と各設計点でのプロペラ性能を表4-1に示す。本報告書での性能評価はすべて船研の大型キャビテーション水槽第1計測部で主動力計（K&R-J26）を用いて計測した結果に基づき行なった。また、模型プロペラ回転数が40rps時の計測結果を最終成績とした。

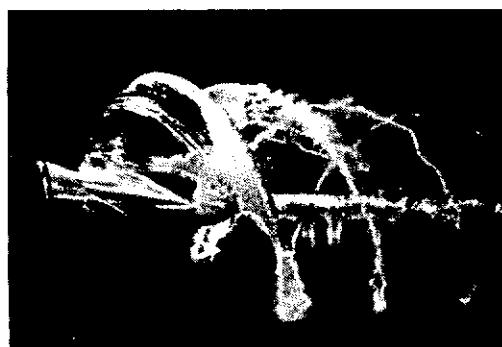


図4-3(a) キャビテーション・パターン写真
(SRIJ-IIプロペラ)

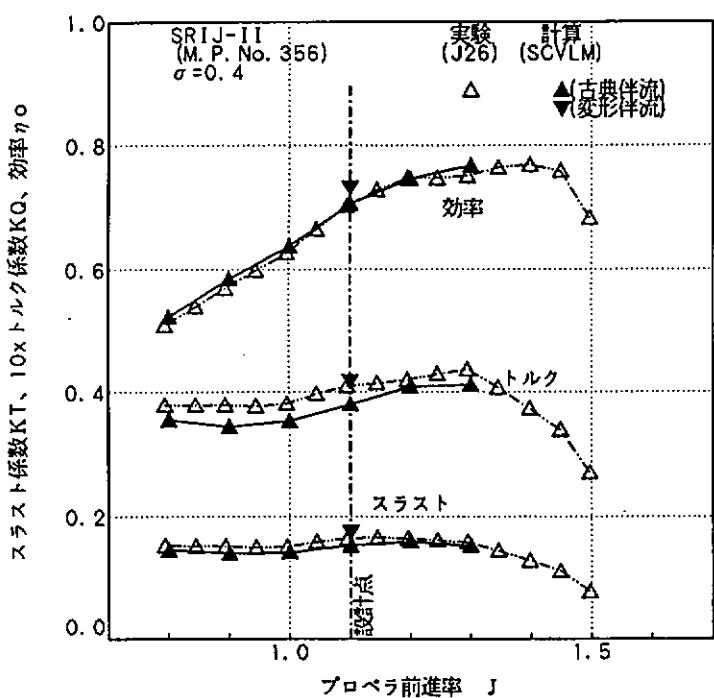


図4-1 SC-VLM性能計算と実験との比較

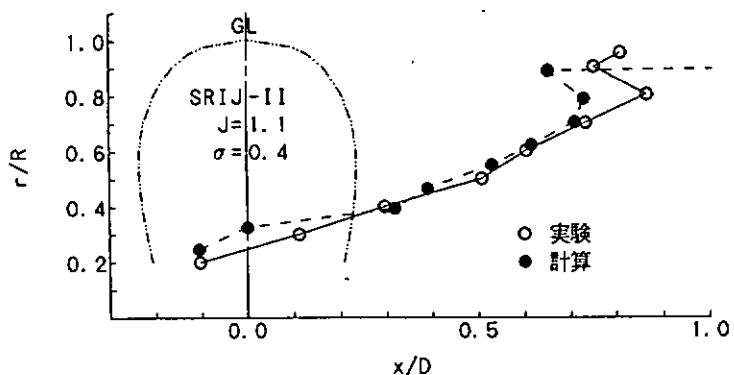


図4-2 キャビテーション発生範囲の比較
(SRIJ-IIプロペラ)

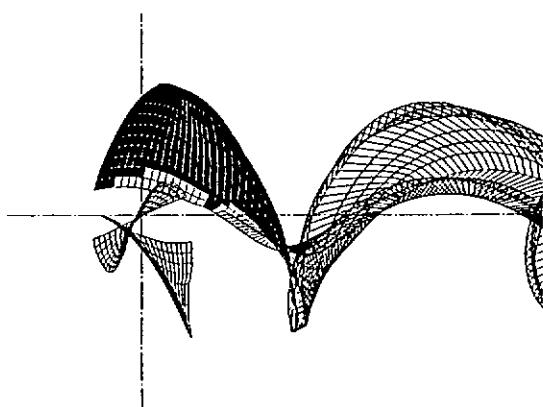


図4-3(b) キャビテーション・パターン計算値
(SRIJ-IIプロペラ)

S S P A プロペラ

既存の高速船用プロペラ設計法で初年度 3 個の S C プロペラを設計した。その一つは図 4-4 に示す S S P A プロペラであり、図 4-5 に示す様に効率は 2 % 低いものの、設計チャートの値に近い値が得られたが、スラストとトルクとも 7 ~ 8 % 前後過大であった。設計点で厚いシートキャビテーションが発生した。

D T M B プロペラ

2 個目の D T M B プロペラは翼断面形状として Tulin 2 項翼を用い、揚力線理論に基づく D T M B 法により設計されたが、設計予測値より 35 % 過大なスラストが発生し、効率も 5 % 低かった。この原因の 1 つは、D T M B 法の設計上の欠点として 15 % 低いスラストが発生する傾向を考慮して設計したことと考えられるが、設計点ではシートキャビテーションが発生せず、バブルキャビテーションしか発生しなかったことも原因として考えられる。

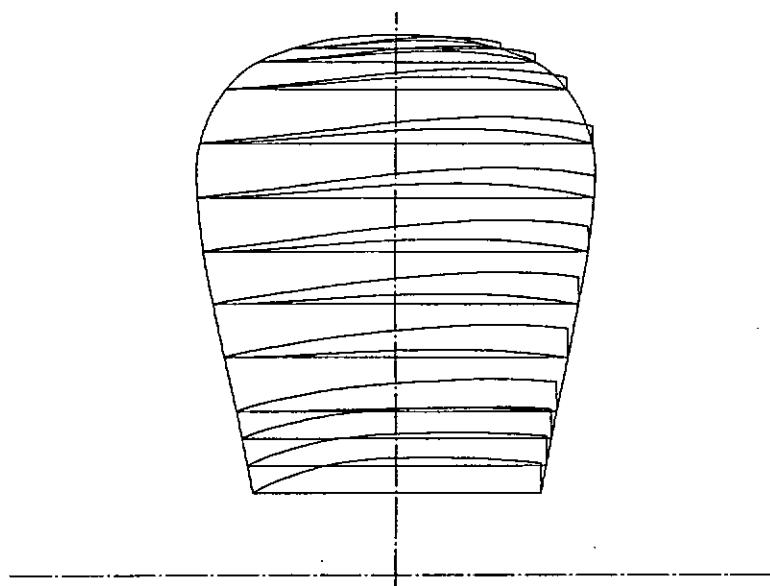


図 4-4 S S P A プロペラの外観図

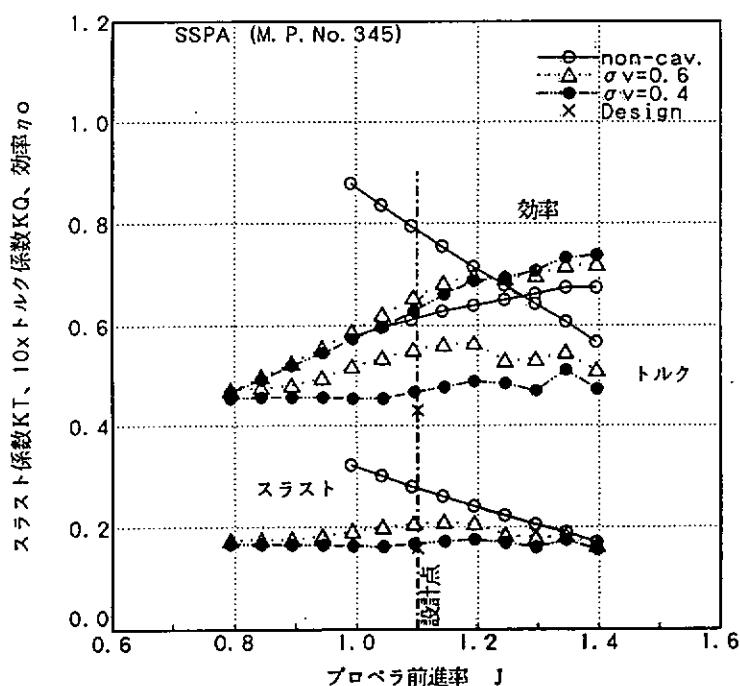


図 4-5 S S P A プロペラの性能

表 4-1 SC プロペラの主要目と性能

名称	N-R	DTMB	SSPA	SRIJ-I	SRAL	SRIJ-II	SRIJ-III	SRNJ	SRIJ-IV
M. P. No.	339	341	345	354	355	356	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	1.600	1.470	1.379	1.370	1.487
展開面積比	0.950	0.512	0.500	0.641	0.500	0.641	0.529	0.641	0.833
ボス比	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 翼根側	N-R	DTMB	SSPA	SRJN	OSUN	SRJN	SRJN SRNE	SRJN 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
設計法	N-Rチャート	DTMB法	SSPAチャート	SC揚力線	既存揚力面	SC揚力線	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	0.156	0.164	0.163
	トルク係数	0.0710	0.0162	0.0430	0.0354	0.0430	0.0360	0.0364	0.0373
	効率	0.690	0.705	0.647	0.786	0.647	0.772	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	0.129	0.165	0.150	0.160
	トルク係数	0.0790	0.0225	0.0468	0.0474	0.0340	0.0420	0.0356	0.0378
	効率	0.728	0.670	0.636	0.676	0.685	0.707	0.738	0.741
計測値	荷重度				0.334				
	前進率	1.41	0.870	1.15	1.17	0.992	1.12	1.05	1.10
	スラスト係数	0.259	0.099	0.173	0.180	0.129	0.166	0.146	0.160
	トルク係数	0.0780	0.0198	0.0477	0.0475	0.0331	0.0412	0.0345	0.0379
解析値	効率	0.744	0.695	0.664	0.703	0.616	0.718	0.709	0.741
	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	0.138	0.162	0.148	0.164
	トルク係数	0.0780	0.0163	0.0450	0.0484	0.0356	0.0391	0.0347	0.0373
	効率	0.740	0.692	0.669	0.692	0.676	0.726	0.747	0.771

Newton-Rader プロペラ

3個目の Newton-Rader プロペラはスラストは15%, 効率は5%程度設計より高かったが、スーパー・キャビテーションになる状態ではプロペラが激しい振動を発生し、実用プロペラとしては使用できない。なお、Newton-Rader プロペラは上記の理由により本研究部会での設計比較の対象から外すこととした。

この3つのSCプロペラの計測結果と前述の性能解析法(SC-VLM)とを比較した結果を表4-1に示す。DTMBプロペラを除き、スラスト、トルク、効率とも数%の精度内で良く一致している。以上の初年度の設計の結果から、SSPAプロペラを標準(ターゲット)プロペラとして、2年度目以降のプロペラを設計評価することとした。

S R I J - I プロペラ

2年度目のS R I J - I プロペラの外形形状を図4-6に示す。本プロペラはS S P A プロペラと輪郭を相似にし、翼断面形状としては初年度で成績の良かったJohnson 5項翼型をベースに、非線型SC理論（一次渦パネル法）を用いて設計迎角2度でSC翼型性能を最適化したS R J N翼型（設計作動迎角2度）を用いた。実験の結果を図4-7に示す。スラストとトルクの計測値とも揚力理論設計値より過大となり、キャンバーの過大が原因と考えられた。これはSCプロペラに対して通常型プロペラに用いられている既存のプロペラ揚力面補正法をDTMB法同様そのまま用いたためであり、翼弦方向の荷重分布が両者で全く異なるために、この様な結果となったと判断した。

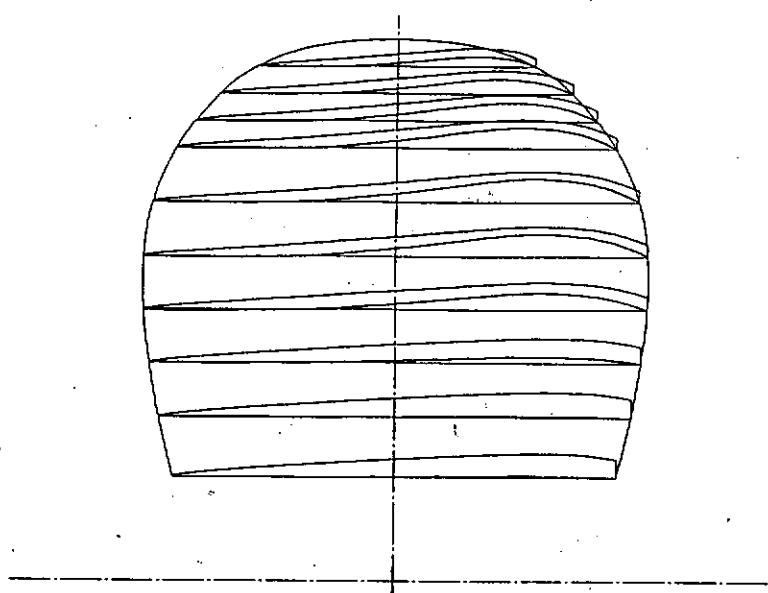


図4-6 S R I J - I プロペラの外形図

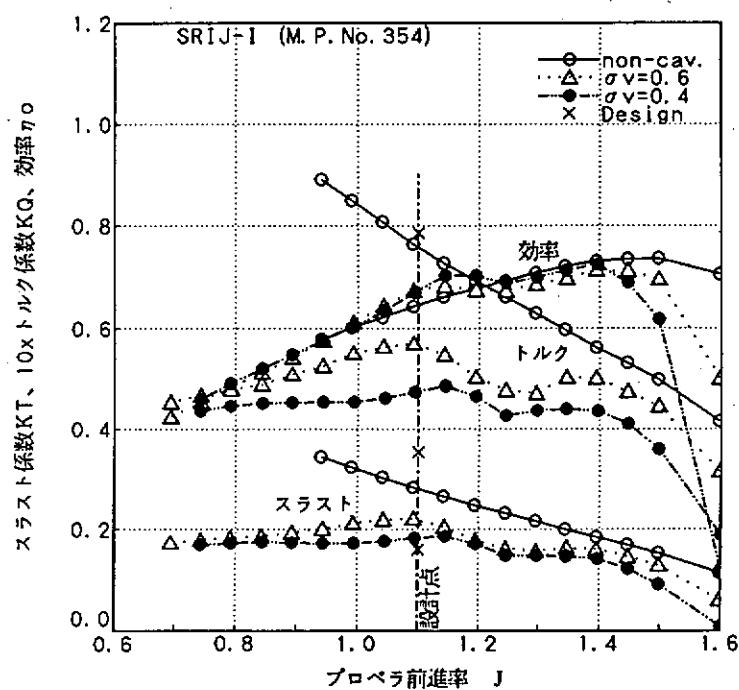
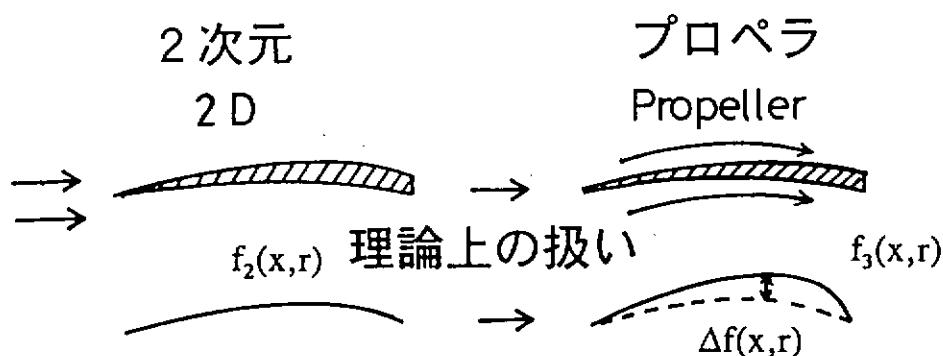


図4-7 S R I J - I プロペラの性能

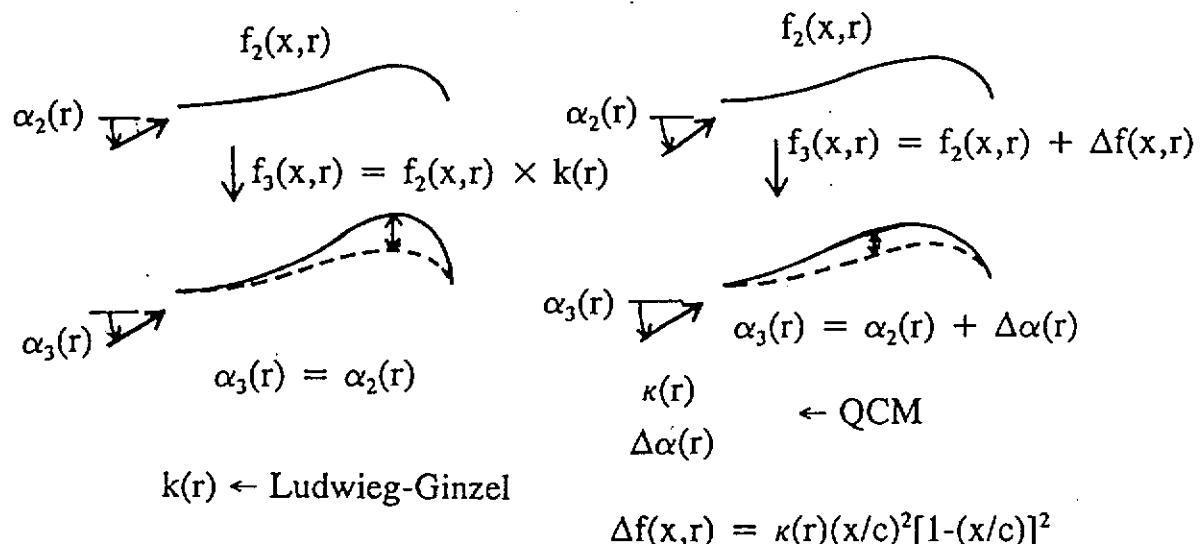
S R I J - II プロペラ

次に、図4-8に示す様な揚力面補正法の改良をして、本プロペラの設計を行った。プロペラは図4-8の上図に示すように、翼素から見ると、流れの方が曲った状態となるので、二次元理論をプロペラに適用する時には揚力面補正が必要となる。S R I J - I プロペラに対して用いた既存の揚力補正法は図4-8の左下に示す様に二次元キャンバーを定数倍する方法を用いていたが、S R I J - II プロペラは図4-8の右下に示す様に三次元キャンバーと二次元キャンバーの差だけ補正する方法としたので、キャンバーラインはなだらかになる。また、設計作動迎角を 2.5°

流体力学上の違い



揚力面補正法の違い



旧揚力面補正法

新揚力面補正法

SRIJ-Iプロペラ

SRIJ-IIプロペラ

図4-8 揚力面補正法の改良概念

としてキャビテーションの発生を安定化させた。本法で設計された S R I J - II プロペラの外形形状を図 4-9 に、プロペラ性能の計測値を図 4-10 に示す。計測の結果、スラストは揚力線理論設計値と比べて 3 % 過大で、効率は 8 % 低かったが、S S P A プロペラより 11 % 効率が向上した。本プロペラは Newton-Rader プロペラの様に激しい振動も起ららず、高性能な S C プロペラと言える。

S R A L プロペラ

この他に、翼正面形状を Newton-Rader プロペラ、翼背面形状を S S P A プロペラと同じにした S R A L プロペラを製作した。実験の結果、最高効率ではそこそこの値が得られたものの、設計スラストが得られなかったため、設計荷重における効率は約 62 % となってしまった。

最終年度は更に性能向上を目指して 2 個の S C プロペラを設計することとし、翼強度を実機ベースで満たす S C プロペラを更に 1 個設計した。

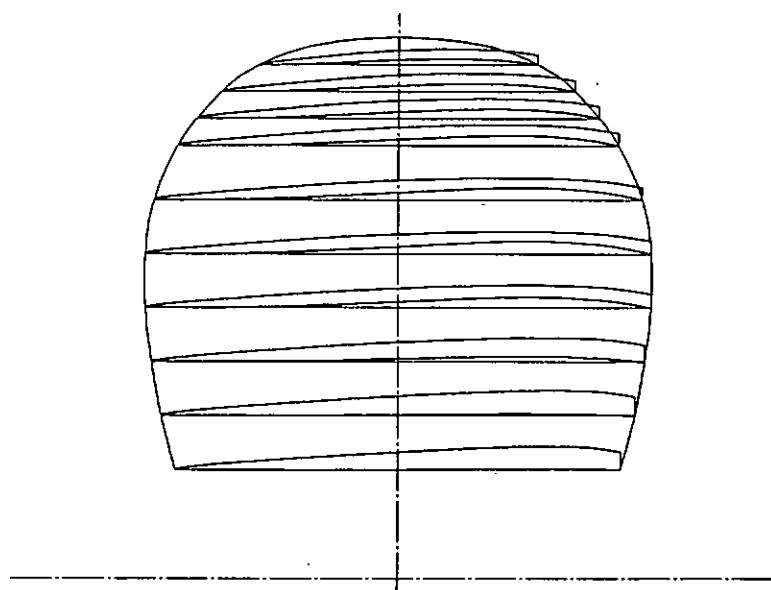


図 4-9 S R I J - II プロペラの外形図

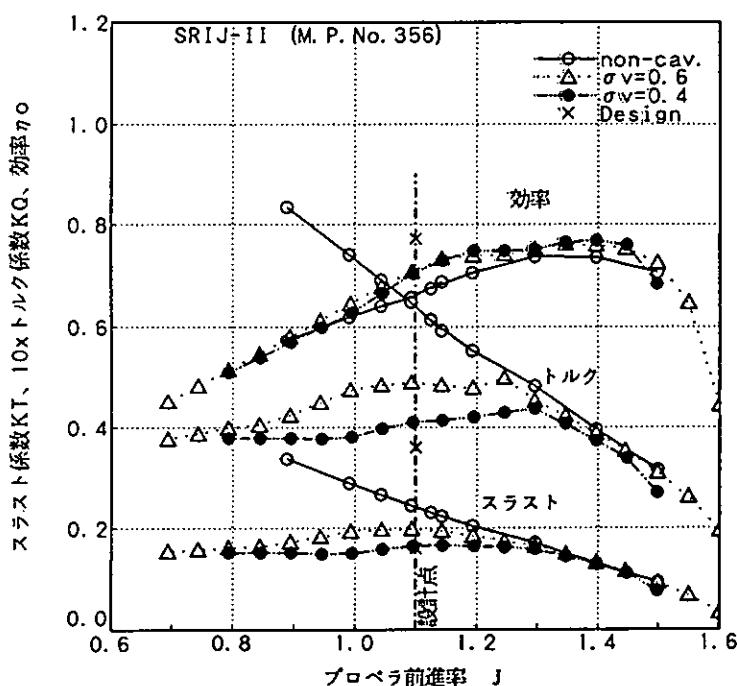


図 4-10 S R I J - II プロペラの性能

S R I J - III プロペラ

先ず、設計の方針として、強度の許す範囲内で、翼弦長を小さくしてアスペクト比を大きくするとともに、揚力係数 C_L を大きくすることによって、キャンバーを大きくして、効率向上を狙った。このプロペラをS R I J - III プロペラと呼ぶ。初期設計で得られた翼断面形状をベースに翼後縁でのキャビティ厚みを二次元SC理論での計算値と一致するようにピッチ分布を変化させて設計した。設計時に、性能解析法(SC-VLM)によりプロペラ性能をチェックし、必要なスラストを発生するSCプロペラとした。カスケード効果の補正分はピッチ比で0.05程度となった。揚力面補正是S R I J - II プロペラとは異なり、SC-VLMのベースとなった渦格子法VLMを用いて計算した。得られたSCプロペラの輪郭を図4-11に、実験結果を図4-12に示す。実験での性能確認の結果、前進率1.1で設計時の予測値(SC-VLMによる)よりスラストは4%小さく、効率は0.738で2%低かったが、SSPAプロペラより、16%効率が高く、最高効率は0.784 ($J = 1.3$)にも達した。このプロペラは、ほぼ狙いどおりのSCプロペラとなつたが、実験で発生するスラストが設計値より小さくなる点に関し改良の余地は残った。

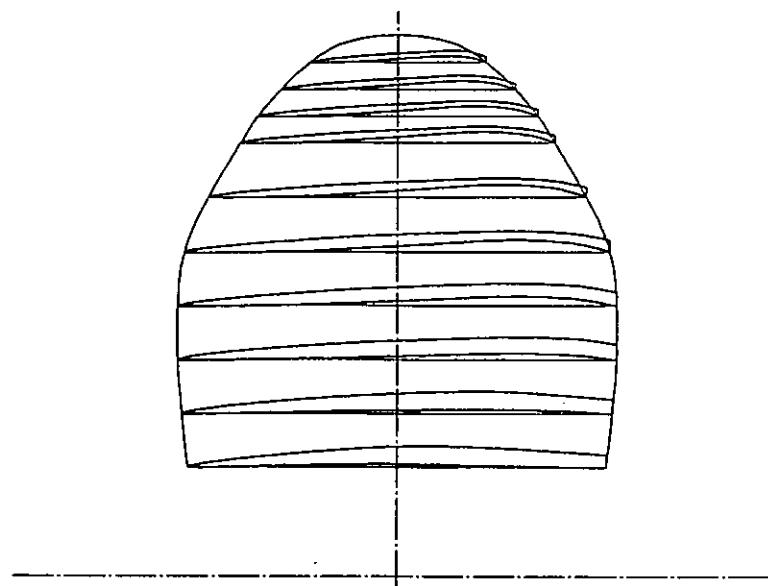


図4-11 S R I J - III プロペラの外形図

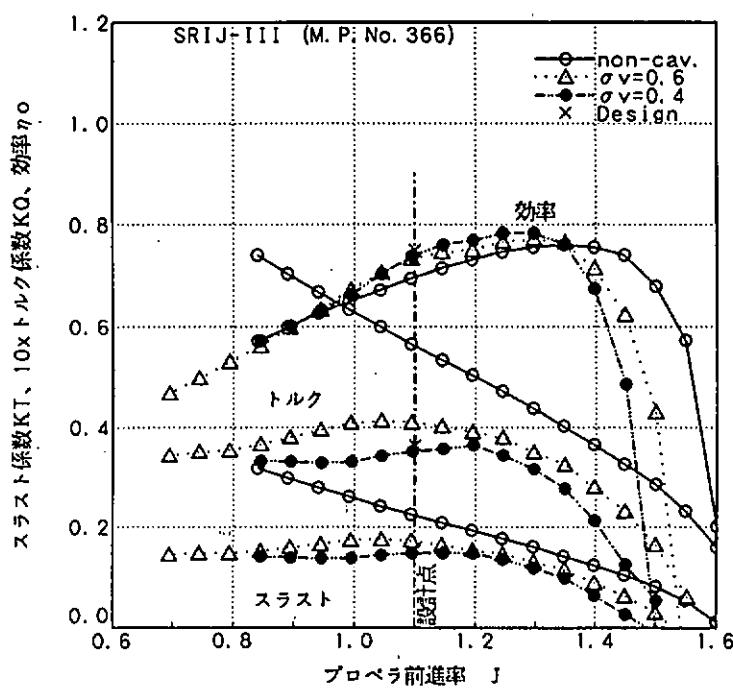


図4-12 S R I J - III プロペラの性能

S R I J - IV プロペラ

次に、2年度目の設計において最も性能の良かったS R I J - II プロペラは翼強度が実機レベルで満たされていないことが判明したので、これを考慮した設計が船研の研究として行われた。今回理論チャートの範囲内のS R J N翼断面を翼根部まで用いると、翼弦長を長くしても強度を満たすことが不可能であったこと、翼根部では局所的キャビテーション数が高いためS C状態とならないことが分かっていたので、翼根部にはN A C A 1 6系の翼断面を用い、0.6Rから翼端側で、S R I J - II プロペラと同様、S R J N翼型（設計作動迎角 2.5° ）を用い、その間はフェアリングにより翼断面形状を決定した。得られた翼形状を図4-13に、キャビテーション水槽で得られた性能曲線を図4-14に示す。設計時での予測値と比べて前進率1.1でスラストは4%大きく、効率は0.695であり、設計予測値より4%効率が低いプロペラとなったが、SSPAプロペラよりは9%効率が高くなっている。また、強度も流体力に関してほぼ実機の条件を満たし、SSPAプロペラより高い強度のプロペラとなっている。

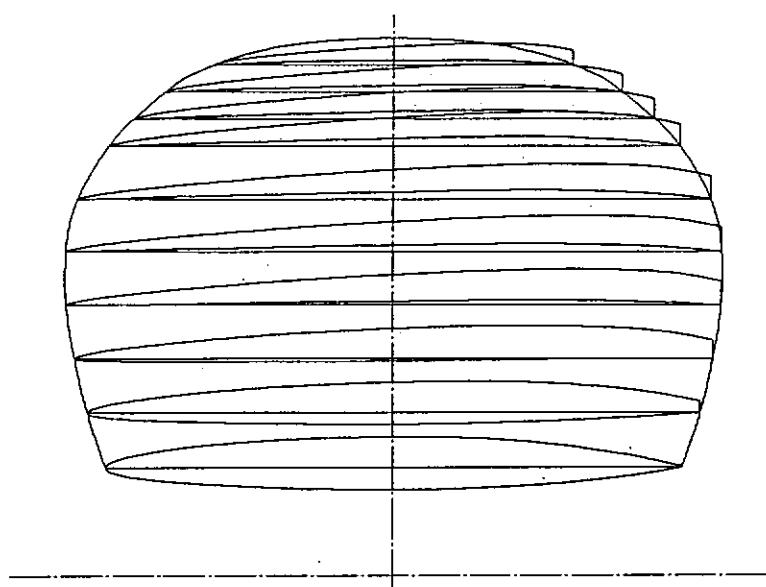


図4-13 S R I J - IV プロペラの外形図

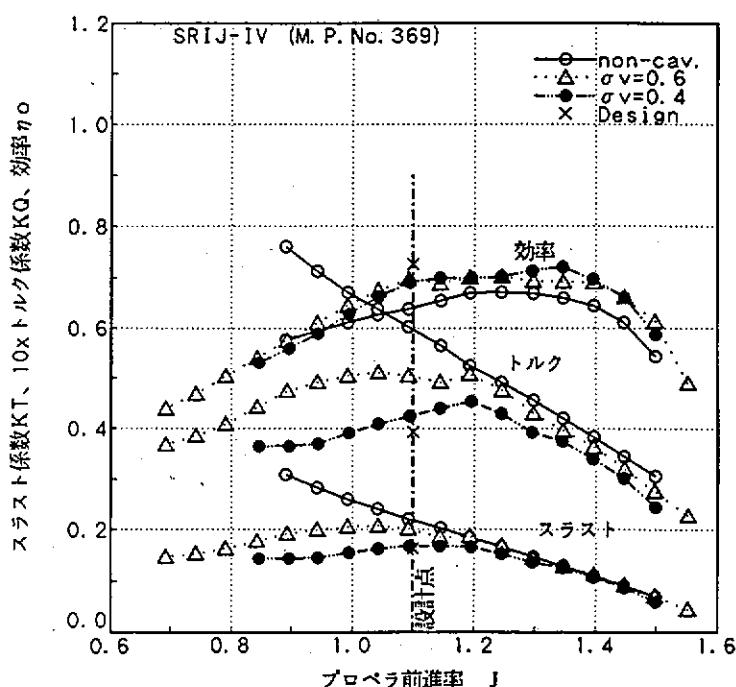


図4-14 S R I J - IV プロペラの性能

S R N J プロペラ

次に、2年度目の翼型開発で最も成績の良かったS R N E翼型をS Cプロペラ翼断面にとり入れることとして、2個目のS Cプロペラを設計・製作した。これをS R N Jプロペラと呼ぶ。当初、この翼型を翼根から翼端までの各半径位置で用いることを検討した結果、キャビテーション数が低い領域では急激に揚力が落ち、適当ではないことが判明した。そこで、キャビテーション数が高い領域では揚抗比が高くなる性格を利用し、0.2～0.4 RではS R N E翼型、0.6 R～TipまではS R J N翼型とし、その間は半径方向にフェアリングをした。ピッチ分布については性能解析法によりチェックし、本プロペラについては、設計上前縁からシートキャビテーションが発生することを強制しないこととした。最終的に得られた翼輪郭を図4-15に、実験結果を図4-16に示す。実験の結果、スラストは設計目標値と一致し、効率は0.741となり、効率の予測値よりは4%低かったが、SSPAプロペラより17%効率が高く、本研究部会では最高の効率を発生するプロペラ設計ができた。最高効率は0.769となり、S R I J-Ⅲプロペラよりは若干低い。

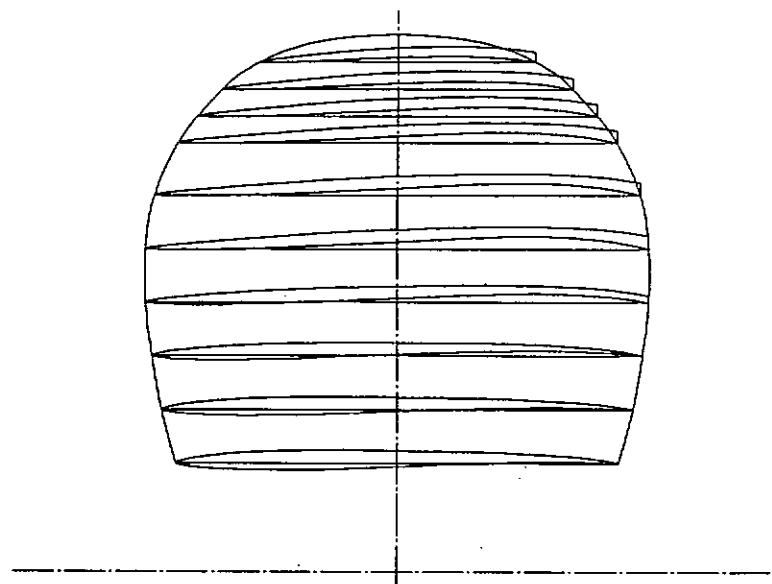


図4-15 S R N J プロペラの外形図

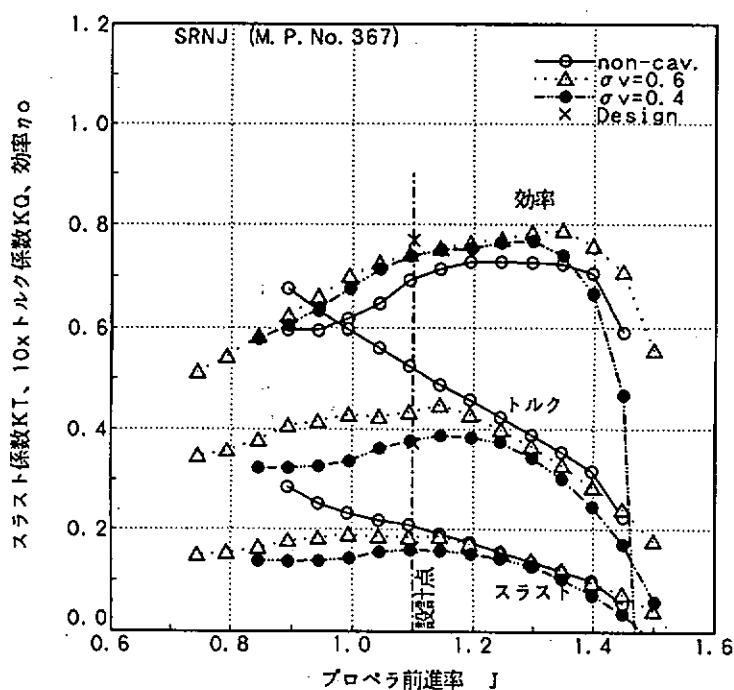


図4-16 S R N J プロペラの性能

最後に、図4-17にプロペラ荷重度を横軸にとり、各SCプロペラの効率を示す。設計点である $C_T = 0.334$ において、SRNJプロペラが約74%という高い効率を示した。より軽荷重の領域における最高効率では、SRIJ-IIプロペラが優れており、本研究部会において開発されたSCプロペラの設計の有用性を示している。

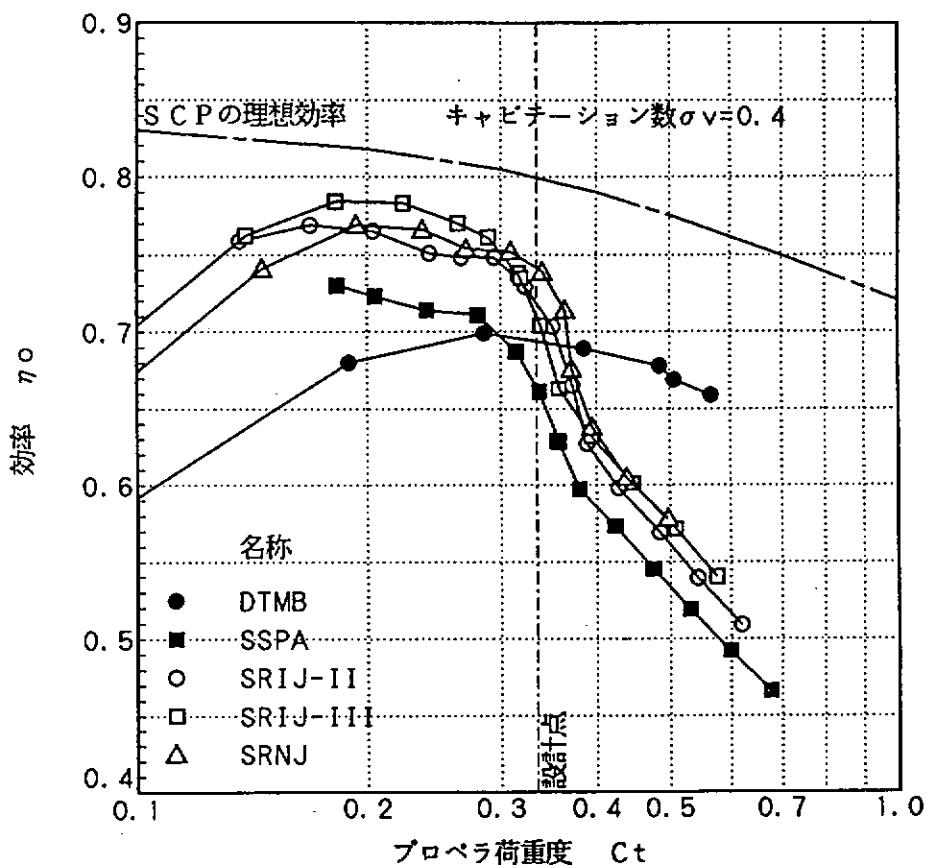


図4-17 本研究部会で開発された主なSCプロペラの効率比較

参考文献

- [1] Newton, R. N. & Rader, H. P. : "Performance Data of Propellers for High-Speed Craft". RINA, Vol.103, No. 2. (1961), pp. 93 - 129
- [2] Venning, E. & Haberman, W. L. : "Supercavitating Propeller Performance". Trans. of SNAME, Vol. 70, (1962). pp. 354 - 417
- [3] Rutgersson, O. : "Supercavitating Propeller Performance. Influence of Propeller Geometry and Interaction between Propeller, Rudder and Hull", Publication of SSPA, No. 82, (1979)
- [4] 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
- [5] 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", 西部造船会々報, 第86号 (1993), pp. 37 - 46
- [6] Hoshino, T. & Nakamura, N. : "Propeller Design and Analysis Based on Numerical Lifting-Surface Calculations", Proc. of the Second Int. Conference on Computer Aid Design, Manufacture and Operation in the Marine and Off-Shore Industries (CADMO'88), Southampton, (1988), pp. 549 - 574
- [7] 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) (発表予定)
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 中武一明, Rogers Paul, 今村誠, 安東潤, "2 次元キャビテーション翼理論を用いた超空洞プロペラ性能の一算算法", (発表予定)
- [11] 山崎寿, 池畠光尚: "表面渦格子法を用いたプロペラ定常特性解析", 日本造船学会論文集, 第172号, (1992)

5. 成果のまとめ

本研究の主要な部分の概要はこれまでに述べたが、本研究部会で実施した3ヶ年間の研究成果を以下に総括する。

(1) SCプロペラの現状調査

SCプロペラの翼断面形状、SCプロペラの性能解析法およびSCプロペラの設計手法に関する、幅広い分野の文献調査を行い各研究の現状を把握するとともに、性能比較の対象とする既存のSC翼断面およびSCプロペラを選定した。また、造船所、エンジン・プロペラメーカー、船主等を対象にSCプロペラの実態を調査し、業界の高効率SCプロペラ開発に対する期待が大きいが信頼できる設計法がないのが問題であることを確認した。

(2) SCプロペラの翼断面形状に関する研究

1) 既存のSCプロペラ翼断面形状の性能把握

既存のSCプロペラの翼断面としてNewton-Rader翼型、Waid翼型およびJohnson 5項翼型を選定し、キャビテーション水槽で性能試験を行った結果、キャビテーションが少ない状態ではNewton-Rader翼型が優れた揚抗比を示すが、キャビテーションの振動が激しくて実用には供せないこと、キャビテーションが多い状態ではWaid翼型、Johnson翼型が揚力が余り変化せずに、抗力が低下する領域があることがわかった。

2) SC翼断面の性能解析法、翼断面形状の設計手法に関する研究

線形理論および非線形理論に基づく2次元SC翼断面の性能解析法および翼断面形状設計法を用いた解析および設計を実施し、翼型設計時の性能解析結果と実験結果とが、ますますの精度で一致することを確認した。

3) 2)の手法を用いて図3-10に示す3種類、5個の翼型を設計し、キャビテーション水槽で試験を行った。各翼型の設計の狙いと、その設計法について以下に示す。

① S R N E 翼型：Newton-Rader型プロペラのキャビテーションの激しい振動と翼後縁近傍の剥離を防止することを狙って、非キャビテーション状態の圧力分布を与えてEpplerの方法により翼断面形状を設計した。

② S R J N 翼型：

<SRJN-I>：翼正面形状はJohnson 5項翼を用い、翼背面形状は、一次渦パネル法で求めた様々なキャビテーション数に対するキャビティ形状の内側包絡線形状とした。

<SRJN-II>：翼正面形状は、圧力分布を与えて一次渦パネル法により決定し、翼背面形状は低迎角時に安定したキャビティを発生させるため、背面の特に前縁直後の部分でキャビティ形状よりも削り落とした翼形状とした。

③ S R J L 翼型：

<SRJL-I>：正面形状は圧力分布を与えて線形特異点分布法により決定し、一次渦パネル法により求めたキャビティ長さがコード長さの5倍のときのキャビティ形状を翼背面形状とした。

<SRJL-II>：正面形状はSRJL-Iと同様の方法で決定し、翼背面形状は線形特異点分布法で迎角0.93deg.におけるキャビティ長さ1.03～1.12の包絡線として決定した。設計迎角は0次吹き出し渦分布法を用いた計算により1.4deg.とした。また前縁から安定したキャビティを出すために前縁にキャビテータを設けた。

これらの翼型のキャビテーション試験を実施した結果、既存翼型よりも大幅に性能の優れたS R N E、S R J N - II、S R J L - IIの3つの翼型を開発できた。S R N E翼型は前縁からキャビティが発生しない翼であり、揚抗比はこれが最も優れている。また、Newton-Rader翼型で見られたキャビティの激しい振動も狙い通り抑制された。しかし、この翼型は作動条件変化に対する性能変化が大きく、理論による性能予測も今一步の状態であるため、設計・使用には注意を要する。S R J N - II翼型、S R J L - II翼型は、前縁からキャビティの発生するSC翼型であり、キ

キャビテーション数と揚力係数の低いところでは S R J N - II 翼型の方が優れており、両者の高いところでは逆に S R J L - II 翼型の方が優れている。

(3) SCプロペラの性能解析法に関する研究

揚力面理論によるSCプロペラ性能解析法(SC-VLM)を開発し、SC状態におけるプロペラのスラスト、トルク、単独効率、キャビティ長さ等が、実測結果と良く一致することを確認した。その結果、この性能解析法が設計されたSCプロペラの性能評価に十分使用できることが確認できた。

(4) SCプロペラ設計手法に関する研究

1) 揚力線理論に基づくDTMBのSCプロペラ設計法を基に、これを大幅に改良した新しい設計法を開発し、(2)で開発した2次元翼断面をプロペラに適用して、下記の5個のSCプロペラを設計した。各プロペラの翼断面、設計法および改良の狙いをまとめると以下のようなになる。また、これらをまとめて図5-1に示す。

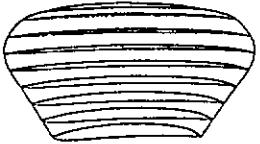
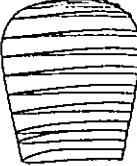
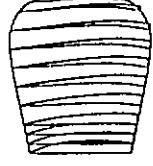
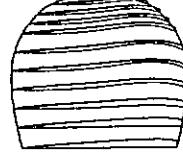
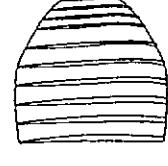
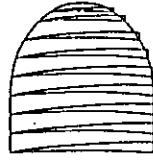
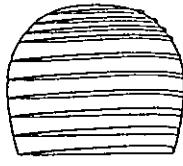
平成3年度	平成4年度	平成5年度
狙い：既存プロペラの性能確認	狙い：新しいプロペラの開発	狙い：平成4年度製作したプロペラの改良
Newton-Rader (MPNo.339)  <設計条件> - $C_T = 0.334$ - $C_V = 0.40$ - 3翼	SRAL (MPNo.355)  <設計条件> SSPAプロペラと同じ Face : Newton-Rader Back : SSPA	SRNJ (MPNo.367)  裁断面 : Tip ~0.6R : SRJN ($\alpha=2.5^\circ$) Root ~0.4R : SRNE Camber修正 : 近似揚力面補正 Pitch修正 : SC-VLM
SSPA (MPNo.345)  <設計条件> - $C_T = 0.334$ - $C_V = 0.40$ - 3翼	SRIJ-I (MPNo.354)  非線形SC理論の応用 <設計条件> SSPAプロペラと同じ 裁断面 : SRJN ($\alpha=2.0^\circ$) Camber修正 : Ludwig & Ginzel Pitch修正 : Cascade 効果補正	SRIJ-III (MPNo.366)  小翼面積比による効率向上 裁断面 : SRJN ($\alpha=2.5^\circ$) 實験部形状 : 變更 Camber修正 : 揚力面計算直接補正 Pitch修正 : SC-VLM
DTMB (MPNo.341)  <設計条件> - $C_T = 0.334$ - $C_V = 0.40$ - 3翼	SRIJ-II (MPNo.356)  揚力面補正法の改良 <設計条件> SSPAプロペラと同じ 裁断面 : SRJN ($\alpha=2.5^\circ$) Camber修正 : 近似揚力面補正 Pitch修正 : Cascade 効果補正	SRIJ-IV (MPNo.369)  實船の翼弦度確保 裁断面 : Tip~0.6R : SRJN ($\alpha=2.5^\circ$) 0.2R : NACA16-109 ($\alpha=0.8^\circ$) Camber修正 : 揚力面計算直接補正 Pitch修正 : SC-VLM

図5-1 供試プロペラ一覧

S R I J - I プロペラ : 翼断面 - S R J N - I

設計法 - DTMB法 (Goldsteinの揚力線理論)

改良点 - Johnson 5項翼より性能の優れた非線形SC理論による翼断面を採用

S R I J - II プロペラ : 翼断面 - S R J N - I

設計法 - 改良DTMB法 (Goldsteinの揚力線理論)

改良点 - 揚力面補正の方法 (近似揚力面Camber補正) の改良

S R I J - III プロペラ : 翼断面 - S R J N - I

設計法 - 改良DTMB法 (Lerbsの揚力線理論), SC-VLMによる揚力面計算直接補正

改良点 - 小翼面積化による効率向上

S R I J - IV プロペラ : 翼断面 - S R J N - I + N A C A 1 6 (Root近傍)

設計法－改良DTMB法（Lerbsの揚力線理論），SC-VLMによる揚力面計算直接補正

改良点－SRIJ-IIプロペラから展開面積30%増加，実船の強度条件を満足

SRNJプロペラ：翼断面－SRJN-I+SRNE

設計法－改良DTMB法（Lerbsの揚力線理論），近似揚力面Camber補正，SC-VLMによるピッチ修正

改良点－ハイブリッド化による効率向上

近似揚力面Camber補正，SC-VLMによるピッチ修正

これらのプロペラの模型をキャビテーション水槽で実験した結果，SRNJプロペラが最も高い効率を示すことがわかった。設計条件とSC-VLMによる性能解析結果および実験結果の比較から本設計法および性能解析法の有効性が確認され，既存のSCプロペラに比べて大幅に効率の高いプロペラを設計することが可能となった。（また，設計条件の翼強度を満足したSCプロペラも開発でき，プロペラ効率をあまり落とすことなく，大型船へ適用できる可能性も確認できた。）

以上述べたように，実験上，理論上の多くの困難を克服してSCプロペラ開発の要素技術であるSCプロペラの翼断面形状の設計・性能解析手法，SCプロペラの性能解析手法およびSCプロペラの設計手法が確立された結果，本研究部会の最終目標として設定した「高効率スーパーキャビテーションプロペラの開発」は達成されたものと考える。

SCプロペラの実船への適用を考えた場合，実船後流中の非定常性，材料強度等の解決しなければならない課題はまだ残されているが，今後，この研究を発展させることにより，これらの問題が解決されることを期待したい。

6. 結 言

本SR214研究部会は平成3年4月より3ヶ年計画で実施され、高性能SCプロペラ設計のツールであるSCプロペラ設計法、SCプロペラ解析法を開発し、それにより設計されたプロペラは予想通りの高性能を示した。

さらにSCプロペラの基本であるSC翼型についても、新たに開発したSC翼型解析法により得られたSC翼型は従来のものより格段に優れた性能を示し、この翼型を使ったSCプロペラは、設計点において最高効率が74%に達した。

もとよりSCプロペラを実際に高速船に装備するには、流力性能以外に考慮すべき点は多いが、本研究部会の成果により、流力的には、ほぼ所要の性能を有するSCプロペラを設計出来るようになったと考えられ、本研究部会の目的は十分に達成されたと云える。