

氏 名	あ べ じゅん へい 阿 部 淳 平
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 11 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 43 年 3 月 東北大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	超高速スーパキャビテーション翼形の性能向上に関する 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 箱森京次郎 東北大学助教授 井小萩利明

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

技術が本質的に目指すものの一つは高速化であり、船舶もその例外ではない。しかし、周知のように、50 ノットを超える船舶の高速化は、永い間キャビテーションの壁により阻まれてきたが、近年になってようやく超高速スーパキャビテーション (SC) プロペラあるいはウォータージェット推進器の開発により、船舶の飛躍の高速化が現実のものになりつつある。

1965 年に、Tulin らが、優れた性能を持つ尖前縁 SC 翼形の存在を理論的に示して以来、研究が活発化した。しかし、この SC 翼形は前縁強度の点で致命的な弱点があり、ほとんど実用には供し得ないものであった。

そこで、前縁の強度的欠陥を補った平頭 SC 翼形の理論的研究が、大場らによって行われてきたが、この理論を実証するための実験的研究は、最近まではほとんど進んでいなかった。それは、測定部上下壁の顕著な影響、試験水槽が必要とする大駆動力、翼形支持円盤の抗力の複雑な挙動など、SC 流れが持つ特異性に起因するものであった。

筆者らは、SC 流れの詳細な観察によって、「サブキャビテーション (Sub. C) 領域、遷移領域に連なる実用的な SC 領域では上下壁の影響が僅少になる」事実を見い出した。さらに、翼形支持円盤の抗力の挙動なども解明し、高精度の SC 翼形試験法を確立し得た。

そこで、本論文では、低抗力平頭 SC 翼形の、定常ならびに非定常特性、激振特性、前後縁微小形状差の影響などを理論的および実験的に詳細に解明することを試みた。もって、超高速モータボ-

ト船外機用高性能 SC プロペラの開発に資することが本研究の目的である。

第 2 章 サブキャビテーション領域における平頭翼形のベースベンテド特性の解析

平頭 SC 翼形の特性について数値シミュレーションを行った。解析の妥当性を検証するとともに、翼形特性への前後縁の微小形状差の影響も解明した。また、この種の解析精度は格子依存性が高いので、好適な格子点分布についても検討した。

2.1 解析方法 前後縁を鋭く切り下げた平頭 SC 翼形 (PSC1), および、前後縁角部をわずかに切り下げた翼形 (PSC1-C) の特性について解析した。PSC1 の翼弦長 $C=70\text{mm}$, 厚み比 3.4%, 翼前縁厚み 0.54mm である (図 2.1 参照)。

これらの翼形まわりの二次元ベースベンテド (BV) 流れを, Sub.C 領域に限定して, キャビテーションを伴わない非圧縮粘性流れとして扱う。

基礎式は質量保存式と二次元非圧縮ナビエ・ストークス方程式である。物理面とデカルト座標 (x, y) から一般曲線座標 (ξ, η) に変換し, 高速流れでは微小となる重力の影響を無視すると, 基礎式は次のようになる。

$$q_t + E_\xi + F_\eta = R_e^{-1} (R_\xi + S_\eta)$$

ここに u, v は流速の x, y 成分, p は圧力, t は時間であり

$$q = J^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \end{pmatrix}, \quad E = J^{-1} \begin{pmatrix} U \\ uU + \xi_x P \\ vU + \xi_y P \end{pmatrix}, \quad F = J^{-1} \begin{pmatrix} V \\ uV + \eta_x P \\ vV + \eta_y P \end{pmatrix}$$

$$R = J^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ g_1 u_\xi + g_2 u_\eta \\ g_1 v_\xi + g_2 v_\eta \end{pmatrix}, \quad S = J^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ g_2 u_\xi + g_3 u_\eta \\ g_2 v_\xi + g_3 v_\eta \end{pmatrix}$$

$$g_1 = \xi_x^2 + \xi_y^2, \quad g_2 = \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y, \quad g_3 = \eta_x^2 + \eta_y^2$$

ここで, 添字 t, ξ, η, x, y はこれらの変数による変微分を示し, また, R_e はレイノルズ数 $(u_e C / \nu)$, J は座標変換のヤコビアン, U および V は反変速度成分, u_e は平均速度, C は翼弦長, ν は水の動粘度である。

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x$$

$$U = \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v$$

対流項の離散化には三次精度の風上差分 (Quick) を利用し, 直接解法 (乱流モデルを用いない) によって解析を行った。実験結果との対比のために, レイノルズ数 $R_e = 5.89 \times 10^5$, 迎え角 $\alpha_i = 0$ rad とした。

計算格子は, 翼表面近傍の格子点を翼面から等距離に配置したもの (Single-exponential), および, 前後縁角部に格子点を集中させ, 格子ひずみが小さいもの (ポアソン型) の二つのタイプを用いた (図 2.2 参照)。格子点数はいずれも, 翼表面に沿う ξ 方向に 400 点, 翼から離れる η 方向に

100点である（表2.1参照）。

2.2 解析結果 前後縁が垂直なPSC1に関する、揚力係数と抗力係数の解析値と実験値には良好な対応が見られ、Quick法に基づく数値シミュレーションの有効性が確認できた（表2.2、2.3参照）。

前後縁角部をわずかに切り下げたPSC1-CはPSC1と同様の特性を示し、前後縁の微小な加工誤差の影響は無視できることもわかった。

時間平均流線には、前縁抗力に対応して負圧側、正圧側に1対の渦流が現れており、ポテンシャル理論の示唆が裏付けられた（図2.3参照）。

第3章 実用的迎え角範囲における平頭翼形特性の数値シミュレーション

前縁形状を種々に変えた平頭SC翼の、揚・抗力特性、前後縁近傍の流れについて数値シミュレーションを行った。

3.1 解析方法 基礎方程式は質量保存式、二次元非圧縮性ナビエ・ストークス方程式で、 $k-\epsilon$ モデルによる定常解析を行った。

解析の対象は、前縁を垂直に切り落とした現用の翼形（PSC1-I）、前縁の背・腹面側角部をそれぞれ長短径比が6:1と3:1の楕円形状とした翼形（PSC1-II）、背面側を垂直な角、腹面側を長短径比3:1の楕円形状とした翼形（PSC1-III）である（図3.1参照）。

格子点数は、翼表面に沿う ξ 方向に450点、翼から離れる η 方向に80点、レイノルズ数 $R_e=6.1 \times 10^5$ 、迎え角 $\alpha_i=0.026 \sim 0.105$ radである。

3.2 解析結果 定常揚・抗力係数の解析結果と実験値の差は、ほぼ10%以内となっており、本解析手法の妥当性が確認された（図3.2参照）。

揚力係数には前縁形状の影響が顕著ではないが、抗力係数は前縁形状に敏感で前縁両側に楕円形状の丸みをつけたPSC1-IIの場合、他に比べて約10%小さくなる（図3.3参照）。

前縁近傍の流線の計算結果では、PSC1-IIのはく離泡の大きさが他の翼形の約半分になっており、この翼形が低抗力を示すことを裏付けている（図3.4参照）。

なお、抗力の主要部は圧力抵抗であることも確かめられた。

第4章 翼形性能に及ぼす前縁微小形状差の著しい影響

平頭SC翼PSC1の前縁形状を種々に変えた翼の性能を知るために、詳細な実験を行った。

4.1 実験方法 実験には、流体科学研究所の回流型単独翼試験水槽を使用した（図4.1参照）。供試翼形は前章と同じ3モデルである。

揚力と抗力は二ゲージ式力天秤により測定し、変動の実効値、変動係数などはデータロガーによって求めた。前縁近傍のキャビテーションの観察には、せん光時間1 μ sのクセノンランプとCCDビデオカメラを使用した。

実験は、キャビテーション数 $\sigma=0.10 \sim 3.78$ （SC状態からキャビテーションなしの状態まで）、迎え角 $\alpha_i=0 \sim 0.105$ radの範囲で行った。

4.2 実験結果 前縁の両側に楕円形状の丸みをつけた PSC 1 - II の平均抗力係数は、擬似 SC および SC 領域において、他より 30% 程度小さいことを確認した (図 4.2 参照)。

平均揚力係数は、前縁形状の影響をあまり受けず、擬似 SC および SC 領域において σ とともに直線的に増大する (図 4.3 参照)。

揚抗比に関しては低抗力の PSC 1 - II が、設計点付近の迎え角 (0.035 rad) や SC 領域において優れている (図 4.4 参照)。

前縁を楕円形状に丸めることにより、前縁に発生するキャビテーションはクラウド型からバブル型に変化する。これに伴いキャビテーションの最大厚みは 50% 程度に減少し、低抗力をもたらすことになる (図 4.5 参照)。

第 5 章 種々の前縁形状の翼形に発生する各種の振動

キャビテーションに伴う激しい振動 (激振) の防止や低減は、機器の寿命・信頼性の向上のために緊急の課題である。

そこで、平頭 SC 翼形の二次元振動特性を、系統的な実験によって解明することを試みた。

5.1 実験方法 供試翼形、実験装置、計測法などは第 4 章と同様である。変動の実効値、パワースペクトルなどは FFT アナライザおよびデータロガーによって求めた。

5.2 実験結果 遷移領域とその近傍の擬似 SC 領域において、気泡脱落に起因する以下の 3 種類の振動が存在することを確認した (図 5.1, 5.2 参照)。

- ・ A 種振動：空洞長さが弦長に接近したとき後縁の特異性と空洞後端の特異性が干渉して発生する。前縁形状差には鈍感で、大きい揚力変動を伴う。
- ・ B 種振動：ミッドコード付近の激しいキャビティブレイクダウンに起因し、A 種よりやや大 σ 側に発生する。前縁形状差には敏感で、大きい抗力変動を伴う。
- ・ C 種振動：前縁付近の付着キャビティ後端の不規則な小脱落に起因し、小迎え角、やや大 σ において発生する。

前縁上部が鋭角の翼形ではクラウドキャビテーションが、楕円とした場合は流動泡キャビテーションが観察された。前縁の形状によって質的に異なるキャビテーションが発生し、抗力変動に影響を及ぼす。

第 6 章 超高速スーパキャビテーション翼形に発生する 3 種の激しい振動

遷移領域における 3 種の振動の詳細を、高速写真、キャビテーション音圧変動波形などによって解明することを試みた。

6.1 実験方法 実験装置、計測法などは第 5 章と同様であるが、供試翼形 (PSC 1 - I) まわりのキャビテーション音圧変動は、回流型試験水槽の観察窓外側のチャンバ中に設置したドロホンにより測定した。また、迎え角は 3 種の振動が発生し易い 0.070 rad とした。

6.2 実験結果 A, B 種振動の発生時には特有の音圧波形 (バースト) が観察されたが、これは大規模な気泡脱落の結果発生する。

気泡脱落の間隔は振動の種類によって異なり、A種振動で50～70ms、B種振動で20～30ms、C種振動で約15msである（図6.1参照）。

第7章 激振に及ぼす前後縁微小形状差の顕著な影響

翼の前縁形状に加えて、後縁形状を変化させた場合も含めて、激振に対する翼形の影響の解明を試みた。

7.1 実験方法 実験装置、計測法などは第5章と同様である。供試翼形は、前後縁を垂直に切り落としたPSC1-I、前縁の背面側と腹面側をそれぞれ長短径比6:1と3:1の楕円形状としたPSC1-II、前縁は垂直、後縁を半円弧状としたPSC1-IVである（図7.1参照）。

7.2 実験結果 前縁を丸めるとキャビティが薄くなり、A種振動を大幅に軽減できる（図7.2参照）。

はく離点の移動が少ないと思われる、前後縁を鋭く切り落とした翼形は激振に移動し易い。その結果としてSC状態への移行も早くなる。

後縁を丸めると、その付近で流れの巻上げが大きくなりB種振動の揚力変動が増加する（図7.3参照）。

第8章 結 論

本研究によって得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 前縁腹背両面を好適形状に丸めることにより、抗力を大幅に低下させ得る。しかし、時間平均的揚力はほとんど変化しない。
前後縁角部をわずか切り下げた影響は認められず、この部分の微小な加工誤差は無視し得る。
- (2) SC翼形の抗力の主要部は圧力抵抗であり、表面摩擦は弦方向にほぼ一様に分布している。
- (3) Quick法に基づく数値解析法によって、垂直に切り下げた前後縁を持つ実用的な平頭SC翼形のSub.C特性を、十分な精度で数値シミュレーションし得る。
- (4) 平頭SC翼形の前縁抗力に対応して、翼形の負圧側と正圧側に、迎え角に敏感な一対の渦流が存在している。
- (5) 揚力の変動は擬似SC領域において特に増大し、SCキャビティが弦長を越えて流れ方向に振動するキャビテーション係数の付近でピークを取り、激振を発生させる。この激振は前縁形状に非常に敏感である。
- (6) 平頭翼形には次の3種の振動が発生するが、A種振動が最も激しい。
 - ・SC空洞の長さが弦長に接近した時のA種振動
 - ・空洞大脱落に対応するB種振動
 - ・小迎え角時の空洞表面の変動に起因するC種振動
- (7) 前縁を好適に丸めると振動を著しく軽減できる。また、後縁を丸めると振動が激しくなる傾向がある。前後縁を鋭く切り落とすと激振が発生し易くなり、その結果としてSC状態への移行も早められる。

表 2.1 種々の計算条件

条 件	格子点数	翼形表面近傍の方向平均格子幅 $\Delta \bar{\eta}$	時間ステップ幅 Δt	クラスタリングタイプ	目 的
1	400×100	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	SINGLE-EXPONENTIAL	
2	400×100	3.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	SINGLE-EXPONENTIAL	格子幅変更
3	400×100	2.64×10^{-4}	5.0×10^{-5}	POISSON EQUATION	クラスタリングタイプ変更
4	400×100	1.0×10^{-4}	2.5×10^{-5}	SINGLE-EXPONENTIAL	時間ステップ幅変更
5	400×100	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	SINGLE-EXPONENTIAL	コーナー部カットの影響

表 2.2 種々の解析条件における揚力係数の解析結果

条 件	\bar{C}_L 時間平均値	C_L の最大値	C_L の最小値	R. M. S. 値	分 散
実 験	0.46	—	—	—	—
1	0.50	0.62	0.38	0.50	0.0041
2	0.50	0.62	0.37	0.50	0.0043
3	0.45	0.59	0.33	0.46	0.0052
4	0.49	0.62	0.39	0.50	0.0043
5	0.49	0.61	0.37	0.49	0.0049

表 2.3 種々の解析条件における抗力係数の解析結果

条 件	\bar{C}_D 時間平均値	C_D の最大値	C_D の最小値	R. M. S. 値	分 散
実 験	0.028	—	—	—	—
1	0.033	0.047	0.020	0.033	0.000025
2	0.032	0.045	0.021	0.033	0.000025
3	0.031	0.045	0.020	0.031	0.000027
4	0.033	0.049	0.022	0.034	0.000027
5	0.033	0.047	0.022	0.033	0.000028

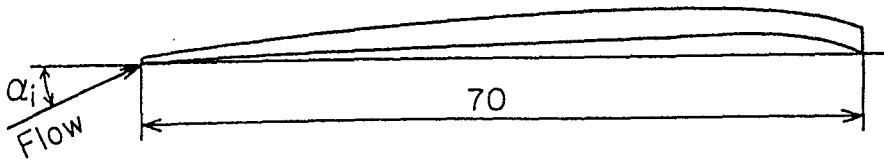


図 2. 1(a) 供試 PSC 1 翼形

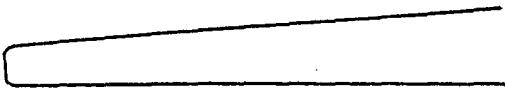
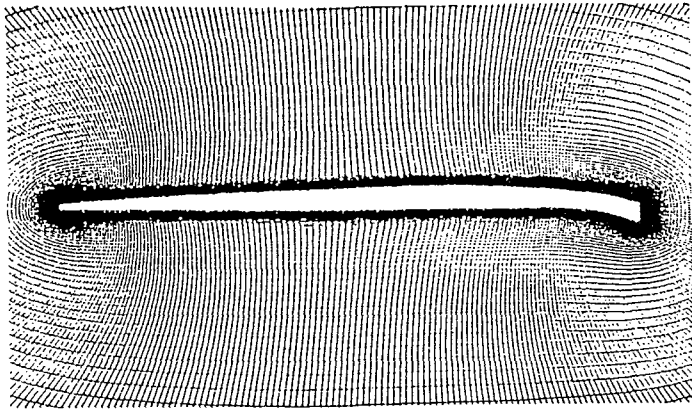
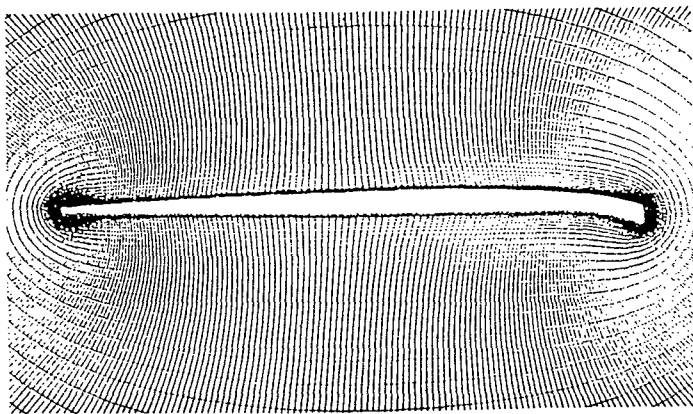


図 2. 1(b) PSC 1-C翼形の前縁形状



(a) 代数式 (SINGLE-EXPONENTIAL) による格子点分布



(b) ポアソン型格子点分布

図 2. 2 計算格子点分布

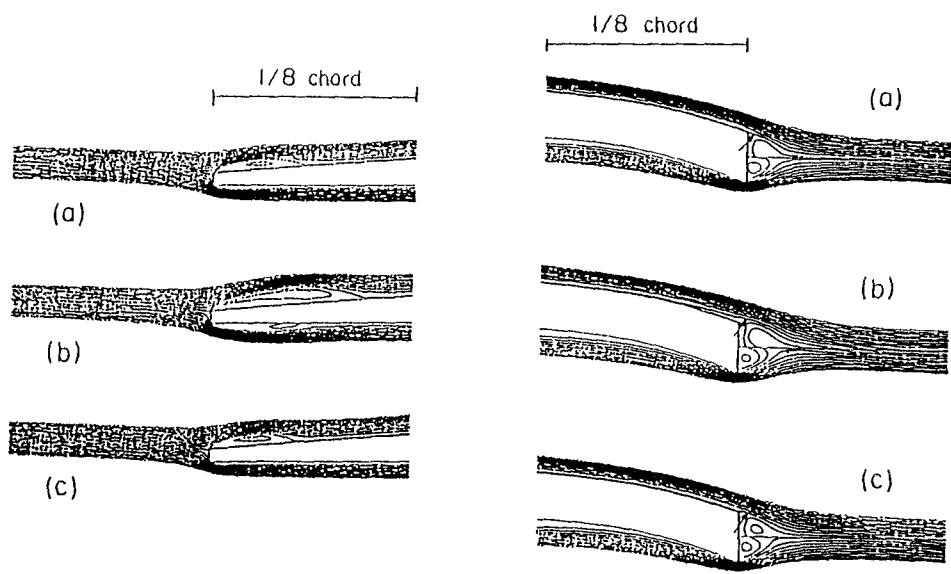


図 2.3 前縁・後縁近傍 1/8 弦長の流线

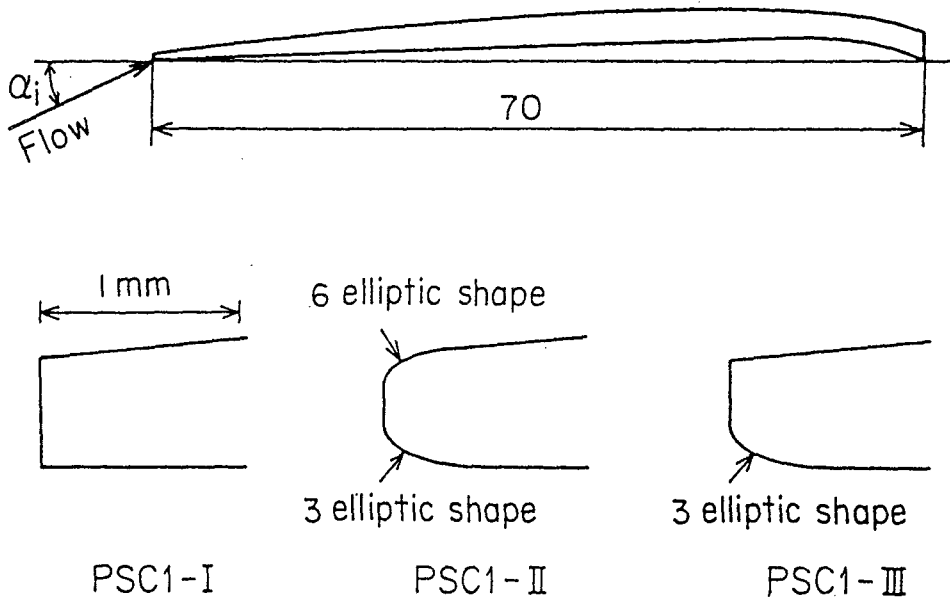


図 3.1 種々の前縁形状の PSC1 翼形

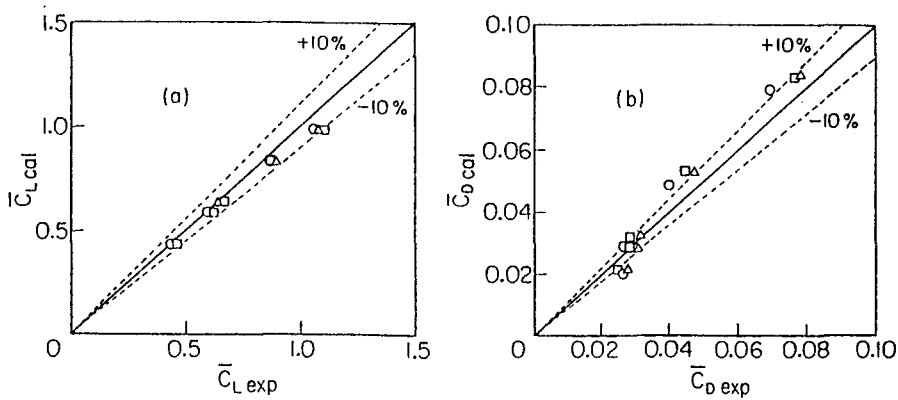


図 3.2 揚力・抗力係数の実験値 $\bar{C}_{L,exp}$, $\bar{C}_{D,exp}$ と計算値 $\bar{C}_{L,cal}$, $\bar{C}_{D,cal}$ の対比
 (△ PSC 1-I, ○ PSC 1-II, □ PSC 1-III)

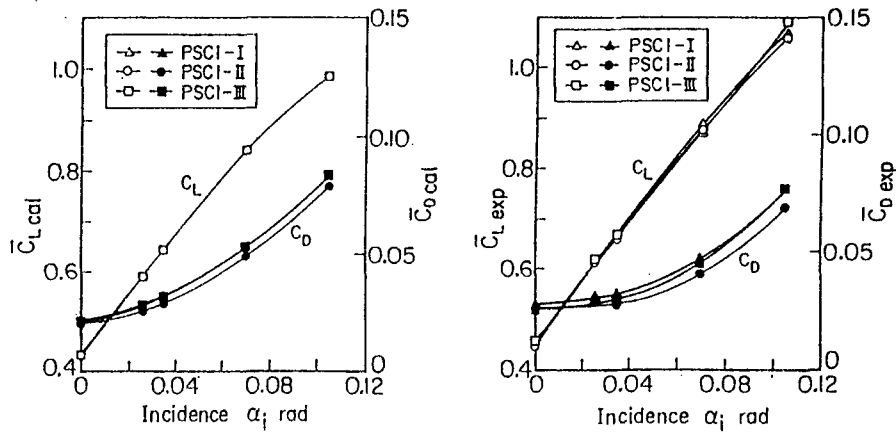


図 3.3 種々の前縁形状の翼形の揚抗力曲線の対比

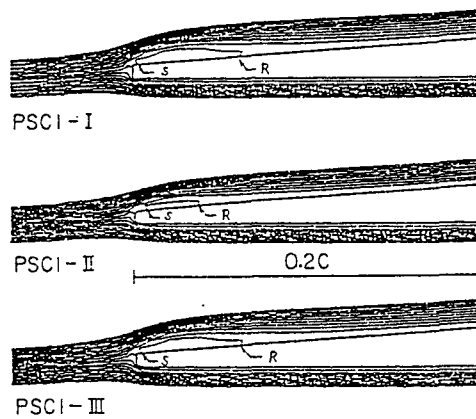


図 3.4 前縁における流線 (S ははく離点, R は再付着点, $\alpha_i = 0.035\text{rad}$)

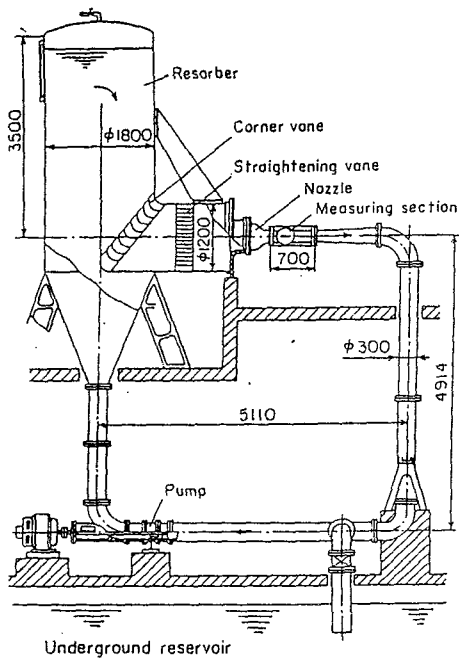


図 4.1 回流形単独翼試験水槽

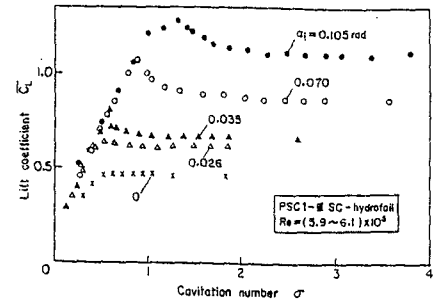
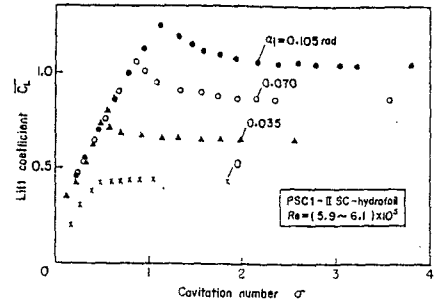
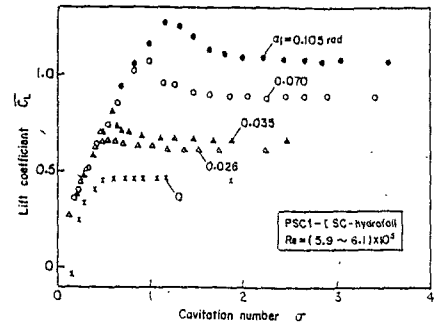


図 4.3 揚力特性

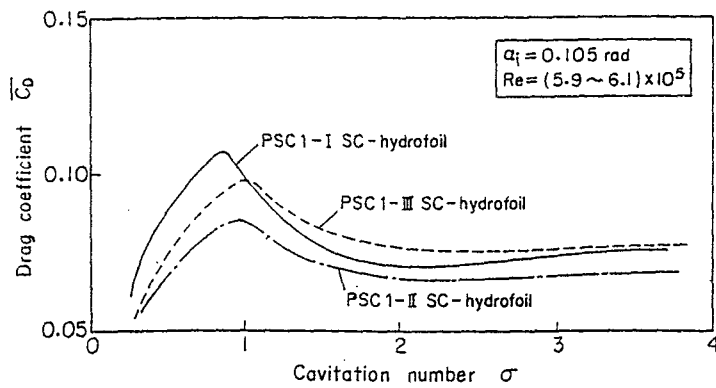


図 4.2 前縁丸みによる抗力特性の変化

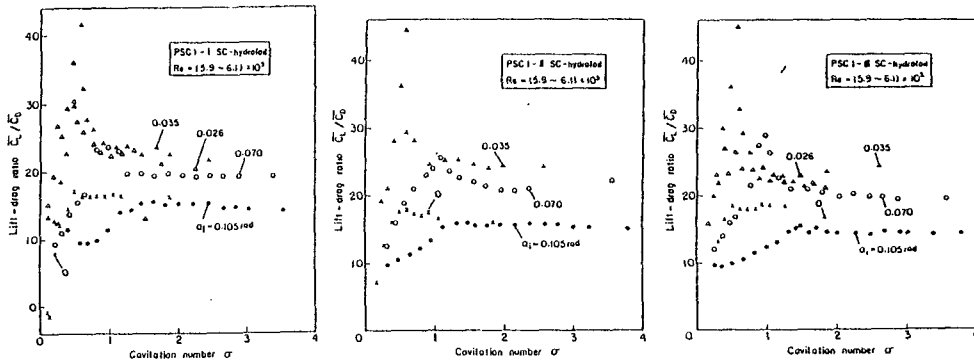


図 4.4 揚抗比特性

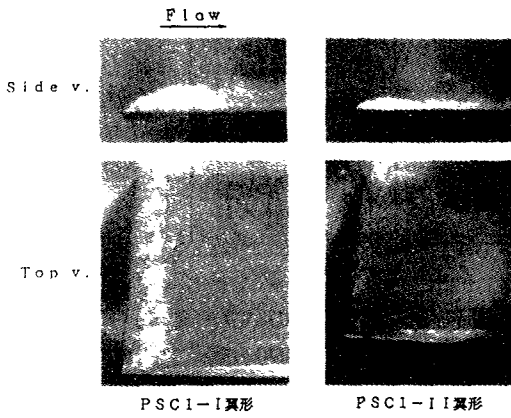


図 4.5 初生キャビテーションの様相
($\alpha_1 = 0.035 \text{ rad}$, $\sigma = 1.30$)

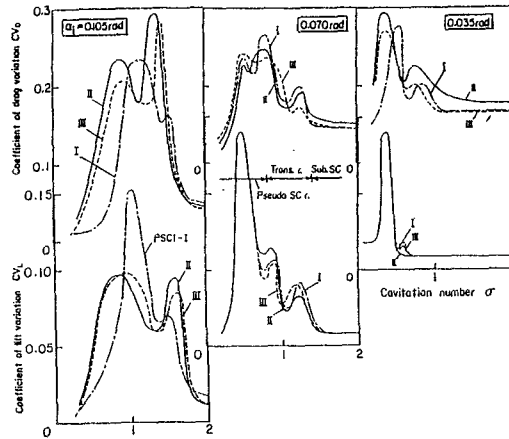


図 5.1 振動実効値 (0.070 rad)

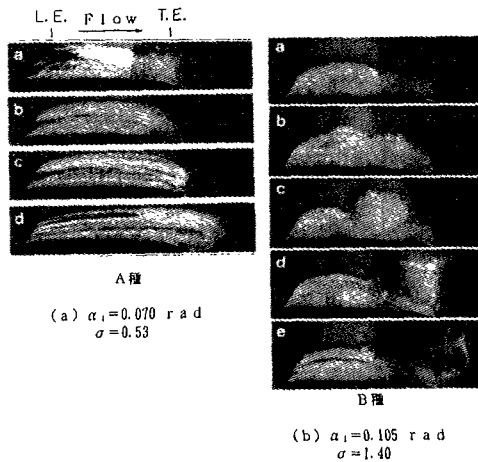


図 5.2 振動発生時のキャビテーションの様相 (A種) (B種)

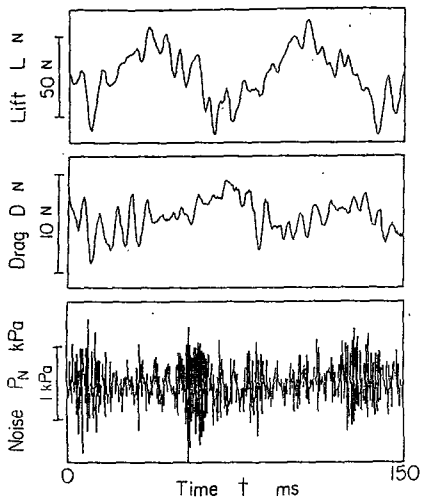


図 6.1 A 種振動の実時間波形
(PSC 1-I, $\sigma = 0.85$, $\sigma_i = 0.070 \text{ rad}$)

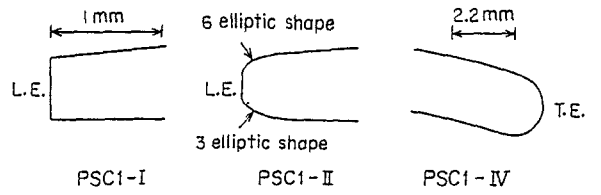


図 7.1 供試 PSC 1 翼形の形状

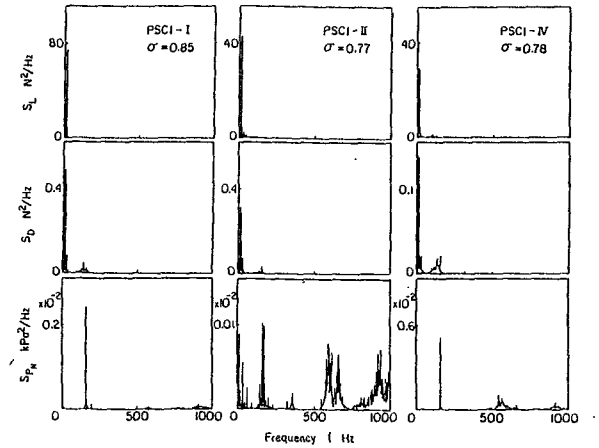


図 7.2 A 種振動のパワースペクトル
($\sigma_i = 0.070 \text{ rad}$)

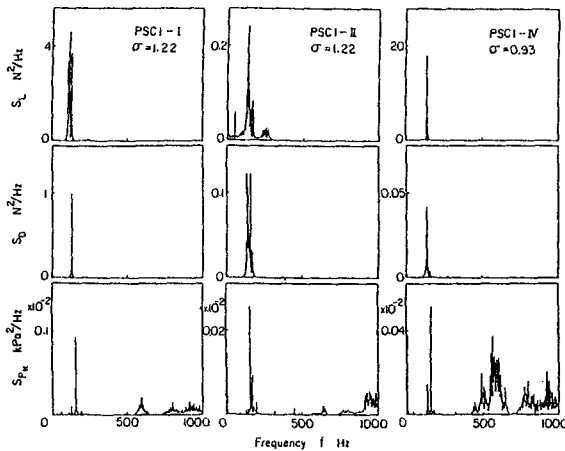


図 7.3 B 種振動のパワースペクトル
($\sigma_i = 0.070 \text{ rad}$)

審査結果の要旨

航空機等による高速輸送に対応し、船舶の飛躍的高速化が図られつつある。本論文は、このような超高速船に用いられる推進器の最重要要素であるスーパーキャビテーション（以下SCという）翼形の性能、特に、垂直に切り下げた平頭前縁を持ち、従来の尖前縁翼形とは異なり、前縁強度の弱点が全くない低抗力平頭SC薄翼形の定常・非定常性能を系統的に理論的、実験的に解明したもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2～3章では、高精度のQuick法に基づく数値解析法により、代表的な低抗力平頭SC薄翼形PSC1およびその前・後縁に微小丸みを付けた翼形群（以下これらをPSC1系翼形という）の定常・非定常性能を詳細な数値シミュレーションを行い、性能に及ぼす前・後縁の微小形状差の著しい影響を明らかにした。また、後縁を丸めると揚力ならびに振動特性が著しく劣化すること、圧力抵抗がSC翼形の抗力の主要部であること、好適に前縁に丸みを付加すれば抗力が著しく低下することなどの工学的に興味ある事実を明らかにした。

第4章では、PSC1系翼形の揚・抗力性能ならびに振動特性の種々の迎え角 α_i 、キャビテーション係数 σ について系統的に実験的に解明し、十分に優秀な性能のSC翼形の存在を確認し得た。また、揚・抗力変動は、擬似SC領域で最も激しく、しばしば前縁丸みに極めて敏感な激振が発生することも示した。これは重要な知見である。

第5～6章では、PSC1系翼形について激振の挙動を種々の迎え角 α_i 、キャビテーション係数 σ について明らかにし、 σ の小さい方からA, B, Cの3種の激振の存在を確認した。すなわち、激振の複雑な構成を明らかにしている。これは重要な知見である。

第7章では、これらの激振に対する前・後縁の微小形状差の顕著な影響を詳細に明らかにした。これは有用な知見である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、低抗力の平頭SC薄翼形の優れた定常・非定常性能を実験的・理論的に明らかにし、翼形性能の向上を図ったもので、流体工学ならびに流体機械学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。