

SRI・B型プロペラの不均一流中キャビテーション性能

門井 弘行*・吉田 三雄*・岡本 三千朗**・鈴木 茂**

Cavitation Characteristics in Non-uniform Flow
of the SRI・B Type Propellers

By

Hiroyuki KADOI, Mitsuo YOSHIDA
Michio OKAMOTO and Shigeru SUZUKI

Abstract

The cavitation problems such as vibration, noise and cavitation erosion have become more and more important. Especially, cavitation erosion must be avoided because it may cause damage on a propeller blade.

This paper deals with an investigation into the effect of the non-uniformity of wake field on cavitation erosion

Cavitation tests by paint technique on twelve propeller models having different geometrical feature were performed in three kinds of wake fields.

As the results of the tests, the effects of the geometrical feature of propellers and steepness of circumferential wake distribution on cavitation erosion were made clear.

Furthermore, using the results of the tests and pressure distribution on the propeller blade calculated by lifting surface theory, a new criterion for the appearance of cavitation erosion was given.

目次

記号表

1. 緒言	2
2. 伴流分布	2
3. 供試プロペラ	3
4. 不均一流中キャビテーション性能	3
4.1 試験状態	3
4.2 キャビテーション発生状況	4
4.3 エロージョン発生状況	10
5. キャビテーション・エロージョン発生判定基準	13
5.1 はじめに	13
5.2 伴流分布の不均一性	13

5.3 プロペラ荷重度	14
5.4 プロペラ翼面上の圧力係数	14
5.5 エロージョン発生状況にたいする圧力係数の影響	18
5.6 キャビテーション・エロージョン発生判定基準	19
5.7 キャンパー比選定基準	19
5.8 設計手順の概略	23
6. 結言	24
謝辞	25
参考文献	25

記号表

- * 氷海技術部
- ** 推進性能部

- A_c ; キャビティ面積
- A_D ; プロペラ翼伸長面積

A_E ; プロペラ翼展開面積
 A_e ; 侵蝕面積
 B_p ; プロペラ翼投影面積
 a_E ; 展開面積比 $A_E / (\pi D^2 / 4)$
 a_p ; 投影面積比 $A_p / (\pi D^2 / 4)$
 B_p ; 出力係数
 C ; 翼弦長
 C_L ; 揚力係数
 C_p ; 翼面上圧力係数 $2(p - p_0) / (\rho W^2)$
 D ; プロペラ直径
 f_E ; 影響係数
 H ; ピッチ
 J ; プロペラ前進係数 $V_A / (nD)$
 K_c ; キャビティ面積比 A_c / A_D
 K_E ; エロージョン指数 (erosion factor)
 K_e ; 侵蝕面積比 $(A_c / A_D) \times 100[\%]$
 K_T ; スラスト係数 $T / (\rho n^2 D^4)$
 K_Q ; トルク係数 $Q / (\rho n^2 D^5)$
 $K_{w(x)}$; 伴流指数 (wake factor)
 l ; 翼幅
 m ; キャンバー比 $m_0 / 1$
 m_0 ; 翼素最大キャンバ
 n ; プロペラ回転数
 P ; ピッチ比 H / D
 p ; プロペラ翼面上圧力
 p_0 ; プロペラ軸心上圧力
 p_v ; 蒸気圧
 Q ; トルク
 R ; プロペラ半径
 r ; 翼素の半径
 T ; スラスト
 t ; 翼素最大翼厚
 t' ; 翼厚さ幅比 $t / 1$
 V_A ; プロペラ前進速度
 $V_{0.7}$; 0.7R の相対流入速度 $[V_A^2 + (0.7\pi n D)^2]^{1/2}$
 W^* ; 翼素の流力的流入速度
 w ; 伴流係数
 x ; 無次元半径 r / R
 Z ; 翼数
 α ; 迎角
 Δw ; 伴流係数の変動値
 θ ; プロペラ翼回転角
 プロペラ直上で $\theta = 0^\circ$, 右舷回りに正
 ρ ; 流体の密度

σ ; キャビテーション数 $2(p_0 - p_v) / (\rho W^2)$
 σ_n ; キャビテーション数 $2(p_0 - p_v) / (\sigma n^2 D^2)$
 $\sigma_{0.7}$; キャビテーション数 $2(p_0 - p_v) / (\rho V_{0.7}^2)$
 σ_v ; キャビテーション数 $2(p_0 - p_v) / (\rho V_A^2)$
 τ ; スラスト荷重度 $2T / (A_p \rho V_{0.7}^2)$

1. 諸言

著者らはキャビテーション性能およびプロペラ効率ともに優れた新しいプロペラとして SRI・B 型プロペラを開発し、5 翼および 6 翼プロペラの設計図表を公表した¹⁾。また、SRI・B 型母型プロペラの幾何形状が変化した場合のプロペラ特性およびキャビテーション性能を調べ、プロペラ効率および船尾水圧変動に直接関連するプロペラ翼面上に発生するキャビティ体積にたいする影響を検討した^{2),3)}。一方、キャビテーションが発生することによる主な弊害の一つとしてキャビテーション・エロージョン(壊食)がある。キャビテーション・エロージョンは、船尾不均一伴流中においてプロペラが作動するときに生ずる非定常キャビテーション(クラウドキャビテーション)が原因^{4),5)}となって発生する。したがって、伴流分布とキャビテーション・エロージョン発生の有無との関連を把握しておくことが最適プロペラの設計にとって重要な課題となる。

今回、3 種類の伴流分布と幾何形状の異なる 12 個の模型プロペラを組み合わせで行った不均一流中キャビテーション試験の結果と揚力面理論に基づく翼面上圧力分布の計算結果より、伴流分布およびプロペラ幾何形状とキャビテーション・エロージョン発生との関係を調べ、これらの資料を基に新しい翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生判定基準および正面キャビテーション発生防止の観点から見た翼素のキャンバー比選定基準を提案した。

2. 伴流分布

キャビテーション試験水槽計測部に、ワイヤメッシュ・スクリーンにより 3 種類の伴流分布を設定した。伴流分布の不均一性を表現するパラメータとして、伴流の peak-peak の値; Δw と、伴流の周方向分布の傾斜部の傾きが考えられる。しかし、ワイヤメッシュ・スクリーンにより; Δw と傾斜部の傾きの両者を系統的に変化させることが技術的に難しいので、ここでは 3 種類の伴流分布のいずれとも、 Δw として通常の伴流分布の平均的な値; $\Delta = 0.60$ 程度とし、傾斜部の傾きのみを変化させた。すなわち、ワイヤメッシュ・スクリーンによ

りプロペラ円内の等伴流線の船幅方向の広がり異なる伴流分布を設定し、その結果、伴流の周方向分布の傾斜部の傾きを系統的に変化させた伴流分布が得られた。

プロペラ円内の伴流分布を Fig.2.1 に、伴流の周方向分布を Fig.2.2 に示す。図中、伴流分布の種類を表す WM の後の数字は、0.7R における伴流の周方向分布の傾斜部を直線で近似した時、 $w=0$ となる θ の値を示す。

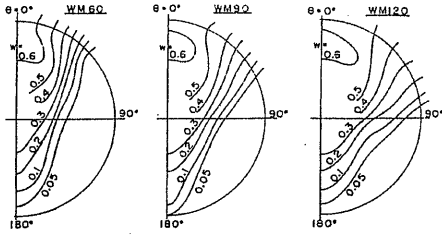


Fig. 2.1 Wake contour

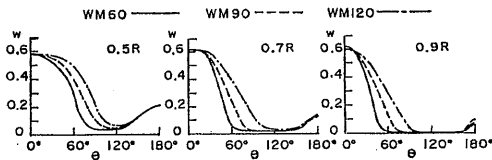


Fig. 2.2 Circumferential wake distribution

3. 供試プロペラ

試験に使用した模型プロペラは、参考文献 2), 3) において使用したプロペラ、すなわち、SRI・B 型、5 翼、展開面積比=0.60、翼厚比=0.050、ピッチ比=1.25 の母型プロペラ (M.P. NO.0193) と、その各翼素の最大翼厚を 20% 増減した 3 個の t-シリーズプロペラ、M.P. NO.0293 と同じ翼厚分布を持ちキャンバー比のみ 50% および 100% 増加させた 2 個の m-シリーズプロペラ、SRI・B 型、5 翼、展開面積比=0.60、翼厚比=0.050、ピッチ比=1.00 の母型プロペラ (M.P. NO.0192) と、その翼数のみを 3 翼、4 翼および 6 翼に変化させた 4 個の Z1-シリーズプロペラ、計 9 個のプロペラに、ピッチ比の影響を調べるため M.P. NO.0192 および M.P. NO.0193 とピッチ比=0.75 以外は同じ幾何形状を持つ M.P. NO.0191 (p-シリーズ) を、さらに展開面積比の影響を調べるため M.P. NO.0191 および M.P. NO.0193 と展開面積比=0.45 以外は同じ主要目を持つ M.P. NO.0186 および M.P. NO.0188 (a_E -シリーズ) を追加して、合計 12 個となる。

プロペラの主要目を Table 3.1 に示す。表中、E.A.R. は展開面積比 (Expanded Area Ratio) の略称を、B.T.R. は翼厚比 (Blade Thickness Ratio) の略称を示す。

Table 3.1 Principal particulars of propellers

M.P.NO	E.A.R.	B.T.R.	P	t'	m	z
Z1-series propellers						
0232	0.600	0.0500	0.980	0.0378	0.0122	3
0233	0.600	0.0500	0.990	0.0503	0.0163	4
0192	0.600	0.0500	1.000	0.0630	0.0204	5
0234	0.600	0.0500	1.010	0.0756	0.0245	6
t-series propellers						
0242	0.600	0.0417	1.270	0.0525	0.0170	5
0193	0.600	0.0500	1.250	0.0630	0.0204	5
0243	0.600	0.0600	1.230	0.0756	0.0245	5
m-series propellers						
0193	0.600	0.0500	1.250	0.0630	0.0204	5
0244	0.600	0.0500	1.193	0.0630	0.0306	5
0245	0.600	0.0500	1.137	0.0630	0.0408	5
p-series propellers						
0191	0.600	0.0500	0.750	0.0630	0.0204	5
0192	0.600	0.0500	1.000	0.0630	0.0204	5
0193	0.600	0.0500	1.250	0.0630	0.0204	5
a-series propellers						
0186	0.450	0.0500	0.750	0.0840	0.0272	5
0191	0.600	0.0500	0.750	0.0630	0.0204	5
0188	0.450	0.0500	1.250	0.0840	0.0272	5
0193	0.600	0.0500	1.250	0.0630	0.0204	5

4. 不均一流中キャビテーション性能

4.1. 試験状態

キャビテーション試験状態は、母型プロペラ (t-シリーズおよび m-シリーズでは M.P. NO.0193, Z1-シリーズでは M.P. NO.0192) の設計点の出力係数; B_p の値を求め、この B_p の値、すなわち K_Q/J^5 の値をシリーズプロペラ間で一定とする条件で、プロペラ単独試験結果から各プロペラの前進係数; J およびスラスト係数; K_T を決定した。次に、母型プロペラのスラスト荷重度; τ を計算し、この τ に対応する Burdill¹⁹⁾ の与えた 2.5% BC 設計線 (2.5% Back Cavitation Line) 上のキャビテーション数; $\sigma_{0.7}$ を読み取り、この値からプロペラの前進速度を基準としたキャビテーション数; σ_v を求め、この σ_v の値をシリーズプロペラ間で一定とする条件で、各プロペラのプロペラ回転数を

基準としたキャビテーション数； σ_n を決定した。M.P. NO.0191, M.P. NO.0186 および M.P. NO.0188 についても同様の手順で試験状態を決定した。

試験状態を Table 4.1 および Fig.4.1 に示す。

なお、Z1 シリーズの場合には、各プロペラのスラスト係数および前進係数が異なるため、3, 4 および 6 翼プロペラの τ および $\sigma_{0.7}$ の値が母型プロペラのそれと異なり、Burrill のキャビテーション判定基準を基にしたキャビテーション条件は、翼数を増すと厳しく、翼数を減ると緩やかになることになる。

キャビテーション試験として、翼面上のキャビテーシ

ョン発生状況の観測およびソフトサーフェス法によるエロージョン模擬試験を行った。ソフトサーフェス法としては、純アルミ箔⁶⁾、プレスケール⁷⁾などを翼面に貼り付ける方法、ステンシルインク⁸⁾、アオタック⁹⁾などのペイント類を翼面に塗布するペイント試験がある。ここでは、取扱いが簡便で、かつ確実性の高いアオタックによるペイント試験を採用し、連続30分間キャビテーション発生状態においた後、ペイントの剥離状態を観察した。

4.2. キャビテーション発生状況

プロペラによって誘起される surface force, あるいはキャビテーション・エロージョンなどは翼背面上に発生したキャビティの体積およびその時間的変動に影響される。しかし、ここではキャビティ厚さを計測していないので、キャビティ体積の代わりにキャビティ面積によってキャビテーション性能に及ぼす伴流分布の影響を検討した。

3種類の伴流分布中でのキャビテーション発生状況の観測結果の代表例として、M.P. NO.0192 の場合を Fig. 4.2 a に、M.P. NO.0234 の場合を Fig.4.2 b に示す。以後、図中に特に断りの無い場合は背面キャビテーションを表すものとし、正面側キャビテーションについては F.C. (Face Cavitation) の記号を付けて識別する。

翼背面については、いずれのプロペラの場合も伴流分布の広がりやの差異に対応して、プロペラ一回転中に、周方向の伴流分布の傾斜部の傾きが小さい場合 (WM120) は広い角度範囲に、傾斜部の傾きが大きい場合 (WM60) には比較的狭い角度範囲にキャビテーションが発生している。また、翼正面については、いずれのプロペラの場合も周方向の伴流分布の傾斜部の傾きが大きい場合に比べて、傾斜部の傾きが小さい場合に正面キャビテーションが発生し易い傾向を示している。なお、正面キャビテーションについては第5章においてさらに詳細に検討する。

キャビテーション・パターンのスケッチ結果から求めたキャビティ面積比； K_c のプロペラ一回転中の変化の代表例を Fig.4.3 に示す。いずれのプロペラの場合もキャビティ面積比が最大になるのはプロペラ翼回転角度位置が 20° 付近であるが、その最大値を Table 4.2 に示す。3種類の伴流分布中でのキャビティ面積比のプロペラ一回転中の変化およびキャビティ面積比最大値の差異はプロペラによって異なる。M.P. NO.0192 の場合のようにキャビティ面積比最大値が約40%以上のプロペラの場合にキャビティ面積比最大値は伴流分布の傾斜部の傾きが小さい場合一番大きく、傾斜部の傾きが大きく

Table 4.1 Test conditions

M.P.NO.	J	K_T	σ_n
0232	0.754	0.124	1.967
0233	0.775	0.141	2.078
0192	0.795	0.156	2.187
0234	0.810	0.168	2.270
0242	0.997	0.187	2.982
0193	0.995	0.185	2.970
0243	0.992	0.184	2.952
0244	1.000	0.190	3.000
0245	0.990	0.183	2.940
0191	0.533	0.148	2.100
0186	0.543	0.151	3.190
*0186'	0.543	0.151	2.180
0188	1.017	0.190	5.690
*0188'	1.017	0.190	3.100

* will be explained in Page 7

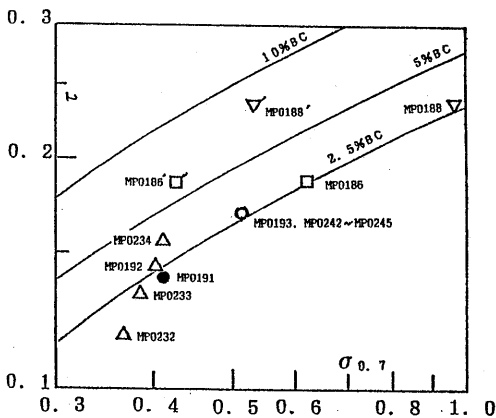


Fig. 4.1 Test conditions

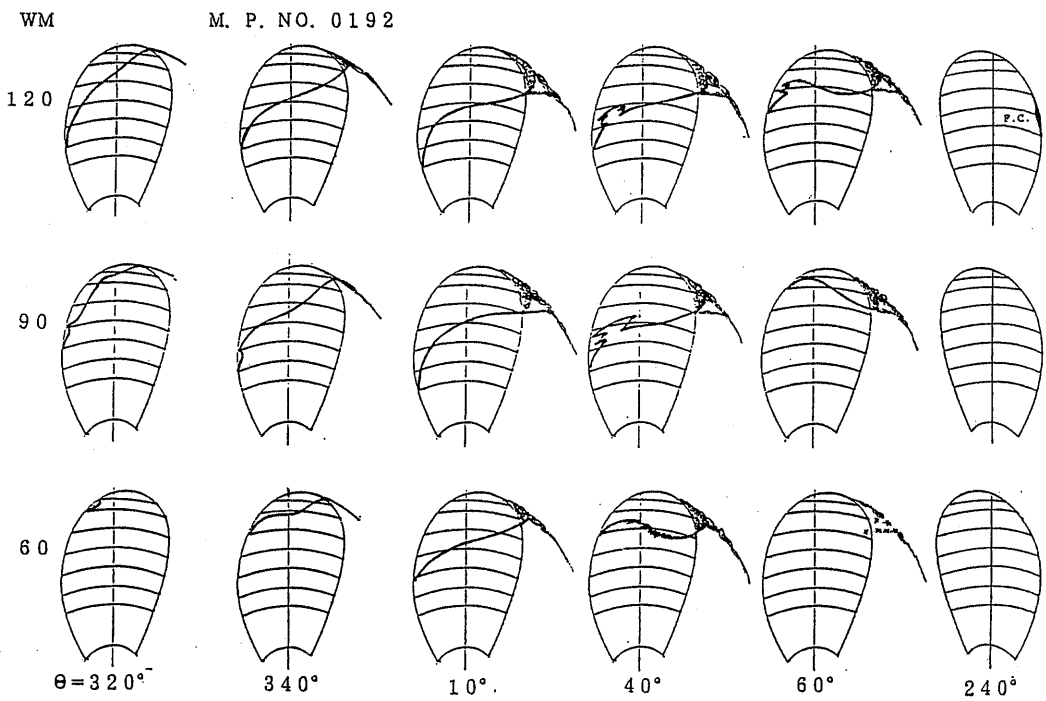


Fig. 4.2a Cavitation pattern (M. P. NO. 0192)

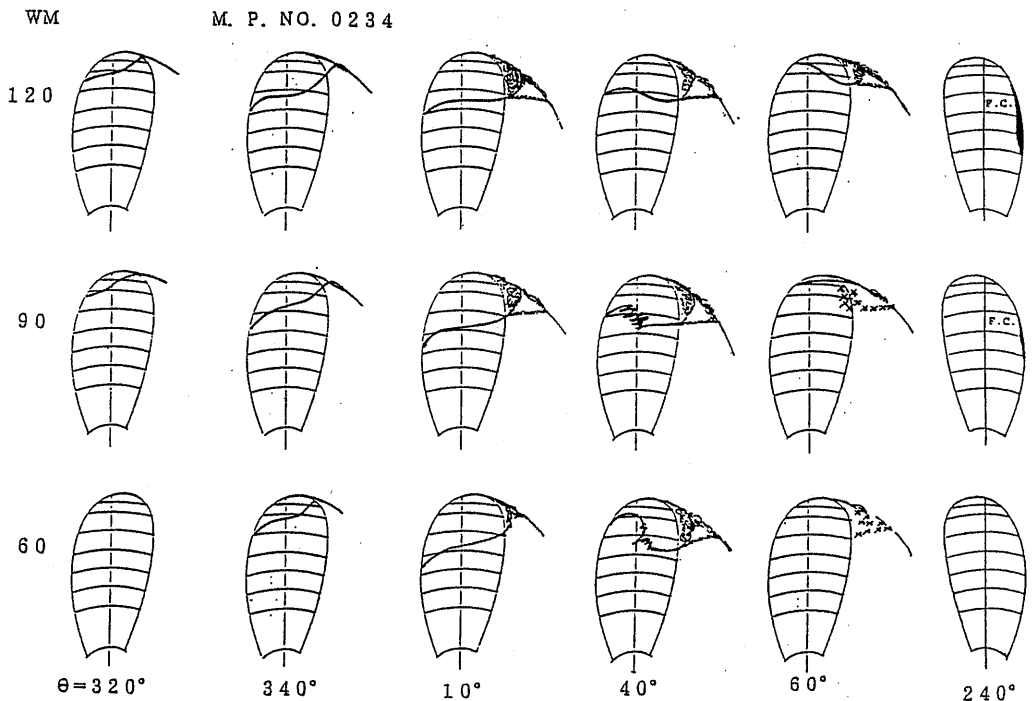


Fig. 4.2b Cavitation pattern (M. P. NO. 0234)

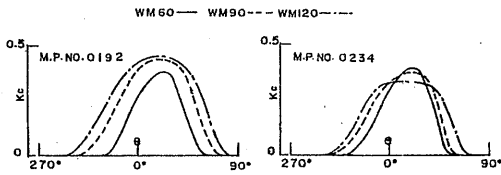


Fig. 4.3 Cavity area ratio

なるに伴って小さくなる。

これにたいして、M.P. NO.0234 の場合のようにキャビティ面積比最大値が約40%以下のプロペラの場合にキャビティ面積比最大値は伴流分布の傾斜部の傾きが小さい場合に一番小さく、傾斜部の傾きが大きくなるに伴って大きくなるか、あるいは3種類の伴流分布中ではほぼ等しい値を示す。

次に、各シリーズとも WM60 の場合を代表例に取り上げて、プロペラ幾何形状の変化による翼背面のキャビテーション発生状況の差異を検討した。

Z1シリーズプロペラの場合を Fig.4.4 に示す。プロペラ一回転中、翼数の少ない翼幅の広いプロペラの場合には翼数の多い翼幅の狭いプロペラの場合より広い角度範囲にキャビテーションが発生している。しかし、翼

Table 4.2 Results of the paint test

M.P. NO.	WM60		WM90		WM120	
	Ke	Kc	Ke	Kc	Ke	Kc
0232	0	0.43	0	0.51	0	0.52
0233	0.13	0.37	0.16	0.44	0	0.47
0192	0.80	0.37	0.05	0.44	0	0.45
0234	6.00	0.39	0.64	0.37	0.40	0.32
0242	0.67	0.48	0.08	0.52	0	0.60
0193	0.80	0.44	0.08	0.46	0	0.47
0243	0.47	0.39	0	0.39	0	0.39
0244	0	0.31	0	0.31	0	0.31
0245	0	0.22	0	0.22	0	0.22
0191	0	0.26	0	0.25	0	0.24
0186	0	0.15	0	0.15	0	0.15
0186'	0	0.34	0	0.32	0	0.30
0188	0	0.22	0	0.22	0	0.22
0188'	9.87	0.57	-	-	-	-

Remarks; $K_c = (A_c/A_D) \times 100[\%]$

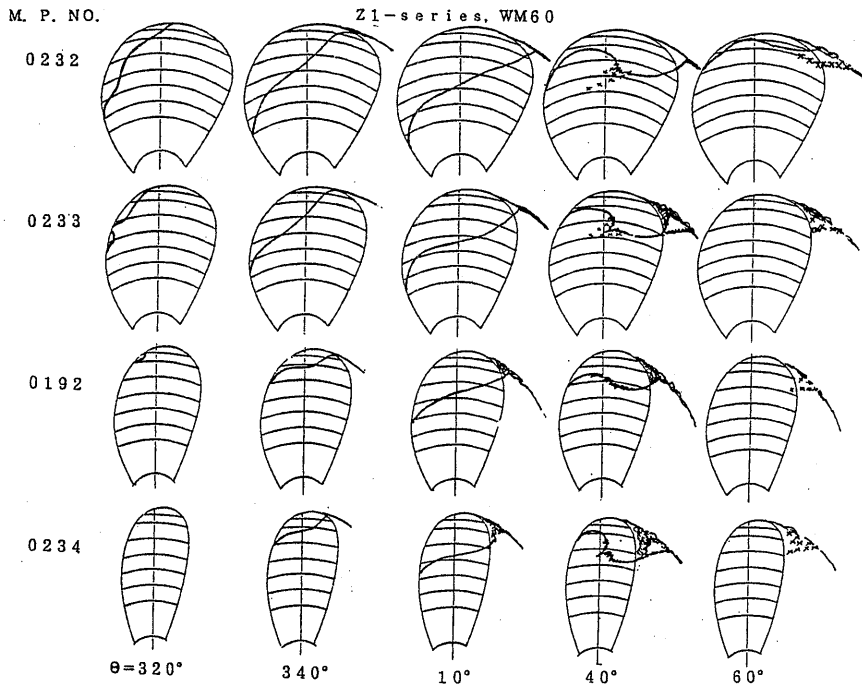


Fig. 4.4 Cavitation pattern (Z1-series)

数の多い翼幅の狭いプロペラの場合（相対的にキャンパー比が大きい）は、翼面上のキャビティが消滅する以前に翼後縁側にキャビティの塊が多く残り、キャビテーション・エロージョンの発生しやすいパターン⁵⁾を示している。キャビティ面積比最大値は翼数の増加に伴い減少するが、その差は小さい。ただし、翼数によるプロペラ直径の差異を考慮すると、キャビティ面積の最大値の差異はかなり大きくなる。

t-シリーズプロペラの場合を Fig.4.5 に、m-シリーズプロペラの場合を Fig.4.6 に示す。プロペラ一回転中、キャビテーションが発生している角度範囲およびキャビティ面積比最大値は、キャンパー比の増加に伴い減少している。しかし、キャンパー比の大きいプロペラの場合は翼面上のキャビティが消滅する以前に翼後縁側にキャビティの塊が残り、キャビテーション・エロージョン防止の観点からは望ましくないパターン⁵⁾を示している。キャンパー比が大きくなると翼背面の翼弦中央付近の負圧の山が高くなり、キャビテーション条件がより厳しいものになるとキャビテーション数と翼弦中央付近の圧力係数の差が小さくなるため、試験結果と逆にキャンパー比の増加に伴いキャビティ体積の増加、キャビテー

ション・エロージョン発生の危険度の増大なども予測される。したがって、キャンパー比の決定にあたってはこの点に留意する必要がある。なお、キャンパー比の選定基準については第5章において詳細に検討する。

p-シリーズプロペラの場合を Fig 4.7 に示す。キャビティ面積比最大値はピッチ比の増加に伴い増加している。これはピッチ比の増加に伴うプロペラ荷重度の増加によるものと考えられる。

α_B -シリーズでピッチ比=0.75のプロペラの場合を Fig. 4.8a に、ピッチ比=1.25のプロペラの場合を Fig. 4.8b に示す。M.P. NO.0191 と M.P. NO.0186、あるいは M.P. NO.0193 と M.P. NO.0188 の場合は、展開面積比の小さいプロペラの方が相対的にキャビテーション数が大きいためキャビティ発生量が少ない。そこで、M.P. NO.0186 および M.P. NO.0188 のキャビテーション数をそれぞれ M.P. No.0191 および M.P. NO.0193 のキャビテーション数と等しくすると（M.P. NO.0186' および M.P. NO.0188'），これは同一作動状態において翼面積を減少させてプロペラのスラスト荷重度を増加させたことにも相当し、また展開面積比の小さいプロペラの方がキャンパー比が大きいためキャビテーシ

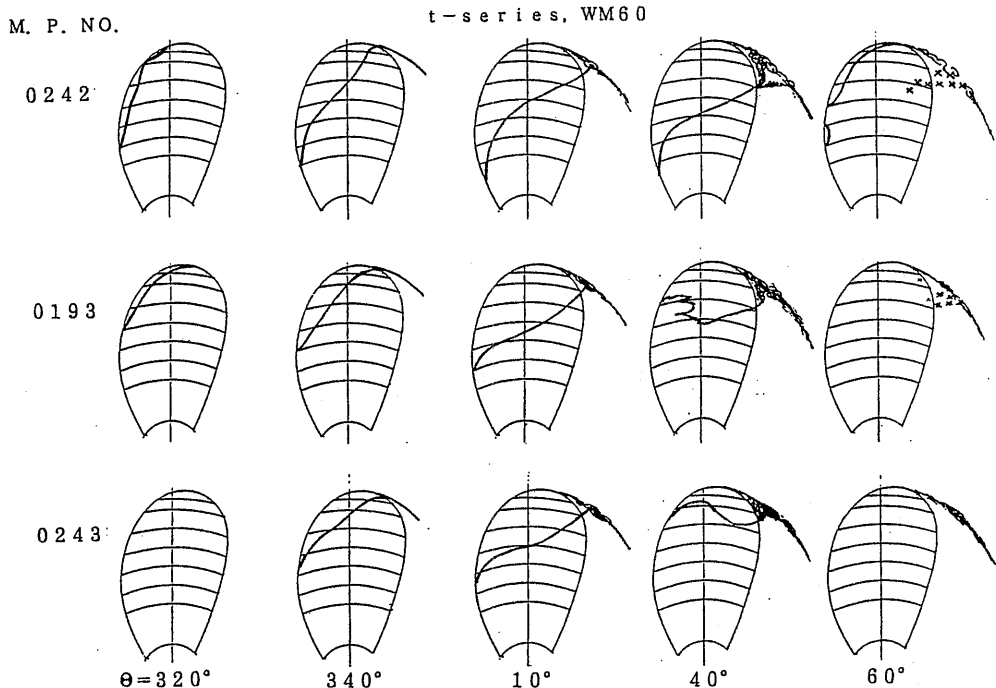


Fig. 4.5 Cavitation pattern (t-series)

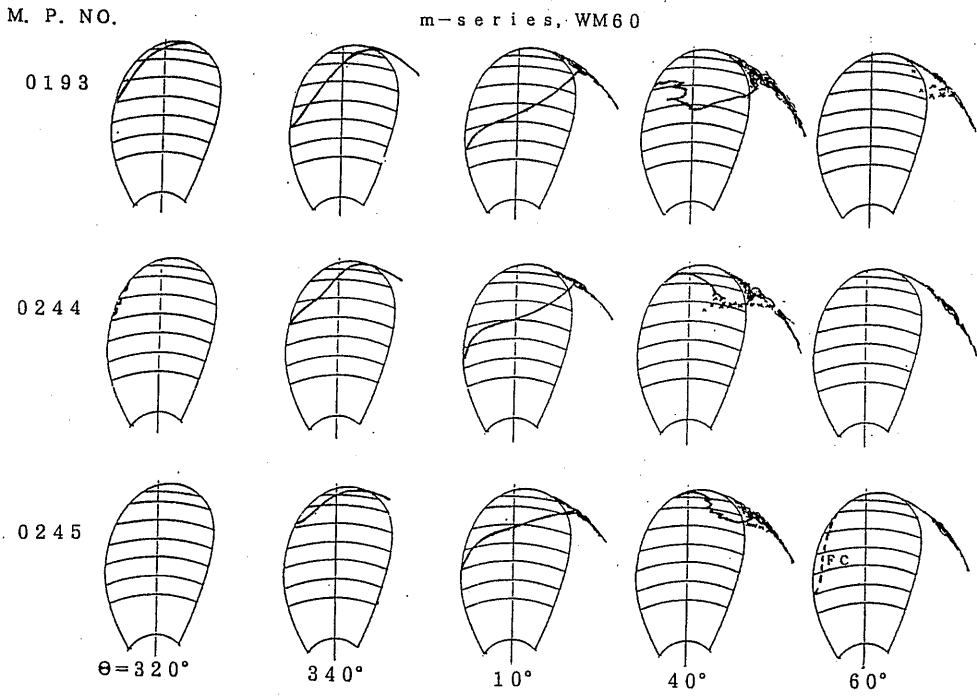


Fig. 4.6 Cavitation pattern (m-series)

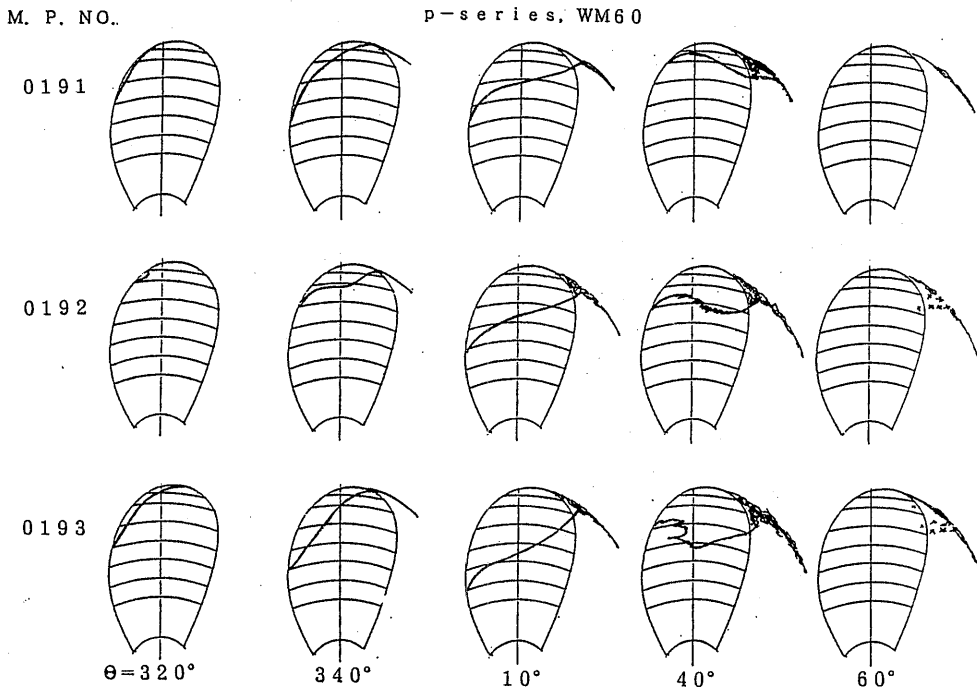


Fig. 4.7 Cavitation pattern (p-series)

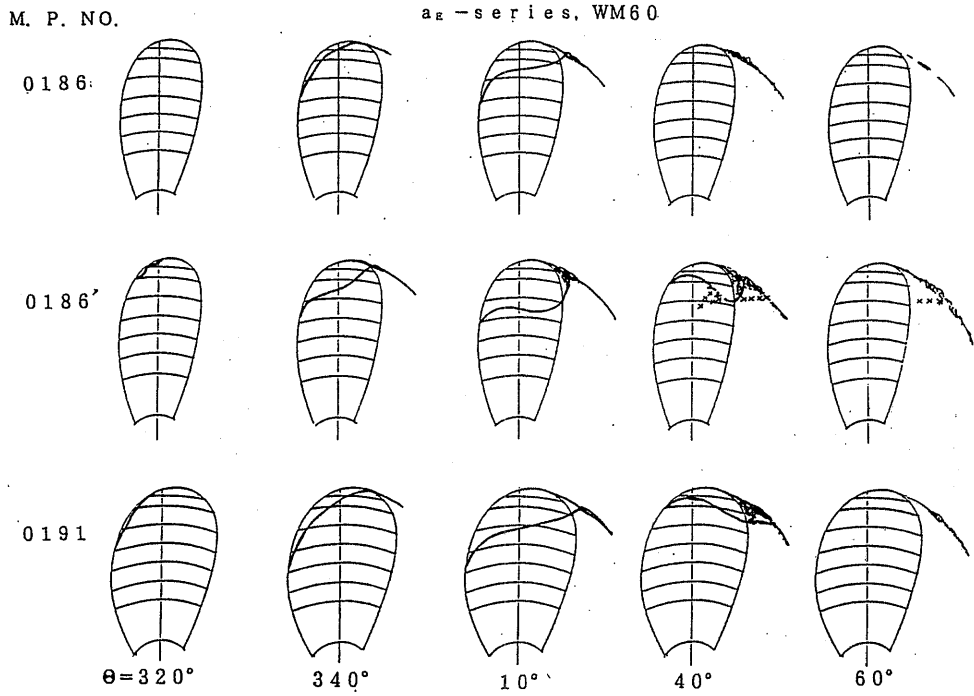


Fig. 4.8a Cavitation pattern (a_E-series)

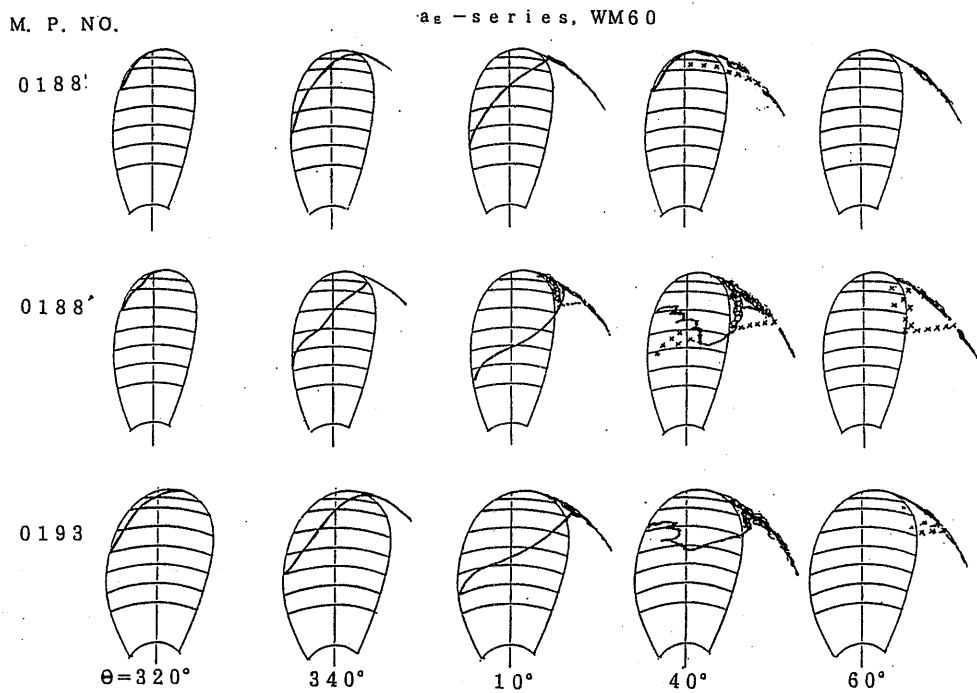


Fig. 4.8b Cavitation pattern (a_E-series)

ン・エロージョンの発生し易いパターンを示すとともに、キャビティ発生量が多くなり、キャビティ面積比最大値は約30%程度大きくなる。しかし、翼面積比の差異を考慮すると、M.P. NO.0191 と M.P. NO.0186'、あるいは M.P. NO.0193 と M.P. NO.0188' のキャビティ面積の最大値はほぼ等しい値となる。

4.3. エロージョン発生状況

プロペラ翼面上のクラウドキャビテーションの発生状況およびペイントの剥離状況の観察により翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生状況に及ぼす伴流分布およびプロペラ幾何形状の影響を検討した。

3種類の伴流分布中のクラウドキャビテーションの発生状況の観測結果および周方向の伴流分布の傾斜部の傾きが一番大きい伴流分布中 (WM60) のエロージョン発生状況の観測結果として、Fig.4.9 に Z1-シリーズの、Fig.4.10 に t-シリーズおよび m-シリーズの、Fig.4.11 に p-シリーズの、さらに Fig.4.12 に a_E-シリーズの場合を示す。また、ペイントの剥離面積と翼伸長面積との比; K_e を百分率で表して、Table 4.2 に示す。

最初に伴流分布の影響を検討した。いずれのシリーズの場合も、伴流分布の傾斜部の傾きが大きくなるに伴っ

てクラウドキャビテーションの発生が激しくなり、ペイントの剥離面積も大きくなる。これは、伴流分布の傾斜部の傾きが大きい場合は傾きが小さい場合に比べて、プロペラ翼が伴流の傾斜部を急速に抜け出すため、キャビティの成長から消滅の過程が早まるためと考えられる。

次にプロペラ幾何形状の影響を検討した。

Z1-シリーズプロペラの場合、いずれの伴流中でも翼数の増加に伴ってクラウドキャビテーションの発生が激しくなり、ペイントの剥離面積も大きくなる。これは、翼数の多い翼幅の狭いプロペラの場合は翼が伴流の傾斜部を急速に抜け出すためキャビティの成長から消滅の過程が早まるためであり、これにたいして翼数の少ない翼幅の広いプロペラの場合は翼が伴流の傾斜部を緩やかに抜け出すため相対的に伴流の非定常性が弱まるためと考えられる。

t-シリーズおよび m-シリーズの場合は、キャンパー比の増加に伴ってクラウドキャビテーションの発生が弱まり、ペイントの剥離面積も小さくなる。前述のように、キャンパー比の大きなプロペラの場合、キャンパー比の小さなプロペラの場合に比べて翼背面の前縁部の負圧の peak が低くなり、翼弦中央付近の負圧の山が高くなる。したがって、今回の試験のようにキャビテーショ

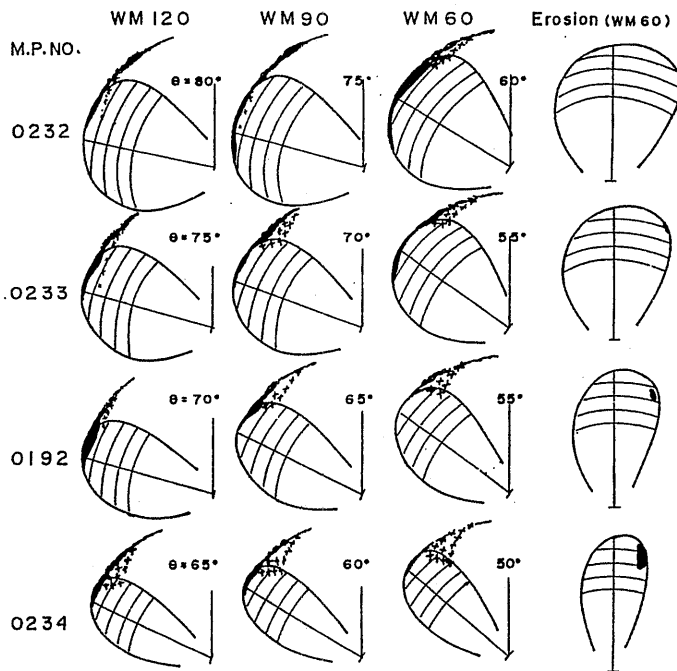


Fig. 4.9 Erosion pattern (Z1-series)

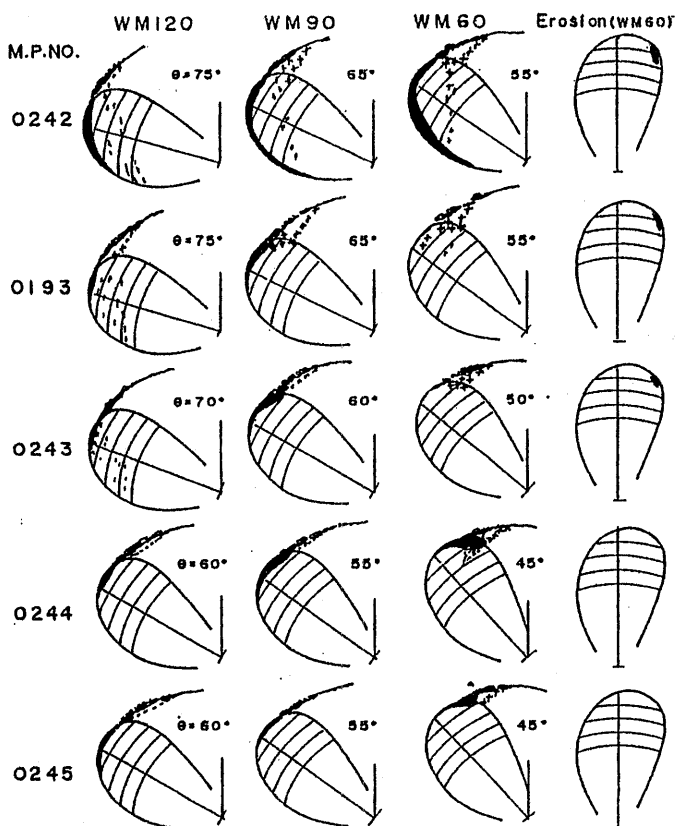


Fig. 4.10 Erosion pattern (t-& m-series)

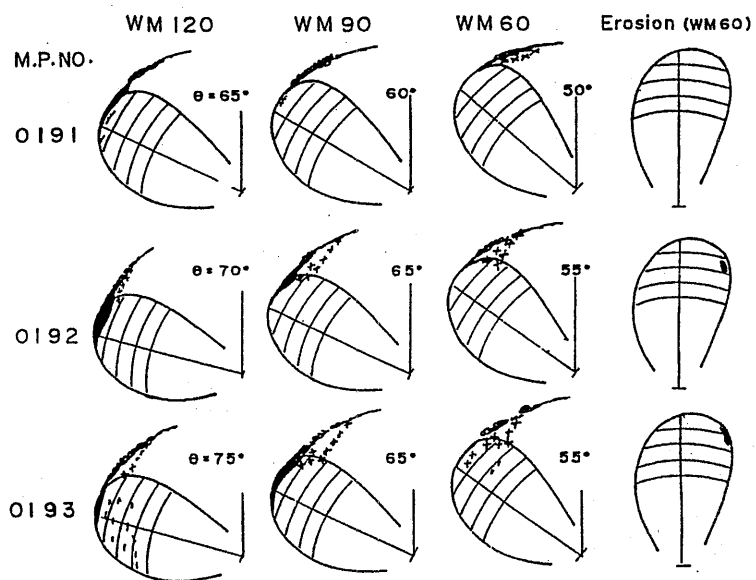


Fig. 4.11 Erosion pattern (p-series)

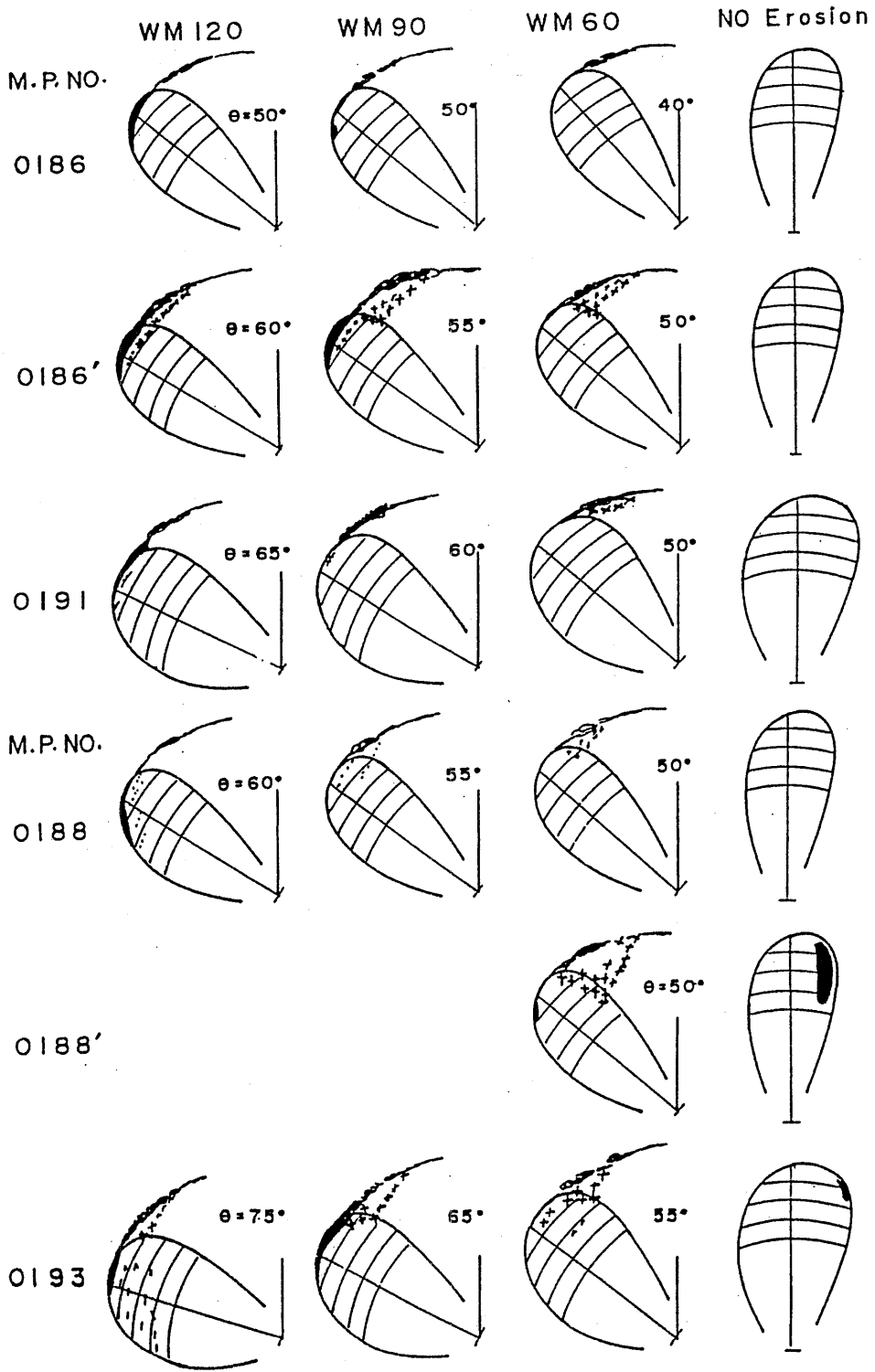


Fig. 4.12 Erosion pattern (a_E -series)

ン条件が緩やかで、翼弦中央付近の圧力係数とキャビテーション数の差が大きい場合は、キャンパー比の増加に伴い翼背面上のキャビティ体積が減少し、エロージョン発生危険性が弱くなる。しかし、キャビテーション条件がより厳しくなり翼弦中央付近の圧力係数とキャビテーション数の差が小さくなると、キャンパー比の増加に伴ってキャビティが消滅する以前に翼後縁部にキャビティの塊が多く残るようになり、これが崩壊することによりエロージョン発生危険性が強くなることも予測される。

p シリーズの場合は、ピッチ比の減少に伴ってクラウドキャビテーションの発生が弱まり、ペイントの剥離面積も小さく、あるいは発生しなくなる。これは、ピッチ比の減少に伴いプロペラ荷重量が減少して、翼背面上のキャビティ体積が減少し、翼が伴流の傾斜部を抜け出す以前にキャビティが小さくなる、あるいは消滅してしまうためと考えられる。

α_E シリーズの場合、キャビテーション数； σ_c を同一（スラスト係数； K_T もほぼ同一）とした試験状態での M.P. NO.0186' と M.P. NO.0191 および M.P. NO.0188' と M.P. NO.0193 の間の関係を見ると、いずれも展開面積比の小さいプロペラの場合にクラウドキャビテーションの発生が強く、M.P. NO.0186' ではペイントの剥離は見られなかったが、M.P. NO. 0188' の場合にはペイントは大きく剥離した。これは展開面積比の大きいプロペラに比べて展開面積比の小さいプロペラの場合には、プロペラのスラスト荷重量が大きいこと、キャンパー比が相対的に大きく翼弦中央付近の圧力係数とキャビテーション数との差が小さいこと、さらに翼幅が小さいために伴流の不均一性の影響を強く受けることなどにより、エロージョン発生危険性が強くなったためと考えられる。

5. キャビテーション・エロージョン発生判定基準

5.1 はじめに

これまでクラウドキャビテーションの発生あるいはキャビテーション・エロージョンの発生の予測、判定基準などに関して、reduced frequency により翼背面あるいは翼正面のクラウドキャビテーションの発生限界値を規定した伊藤の方法¹⁰⁾、伴流分布から求まる shape parameter により翼背面のクラウドキャビテーションの発生領域を示した谷林の方法¹¹⁾、数多くの模型プロペラのペイント試験結果と実船プロペラの実績から、伴流分布の不均一性などを導入した Lindgren¹²⁾、Bjarne¹³⁾ の判定法などがある。そこで、これらの文献で与えられた

基準に今回の試験結果を当てはめてみたが、いずれの基準とも十分な対応が見られなかった。これは、クラウドキャビテーションあるいはキャビテーション・エロージョンの発生機構は複雑であり、これを数少ない要素によって表現し、判定する事が難しいということを示しているものである。このため、従来は個々の基準では十分な結果が得られず、いくつかの基準を併用することにより対症的な答えを求めていたのが実情である。したがってキャビテーション・エロージョン発生に関連する複数の要素を考慮した新しい基準が必要となる。

本章においては、第4章で得られた試験結果とこれに対応した翼面上圧力分布の計算結果を基に、伴流分布の不均一性、プロペラ荷重量、翼素のキャンパー比、翼面上圧力係数、局所キャビテーション数などを考慮して求めた、新しい翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生判定基準および正面キャビテーション発生防止の観点から見たキャンパー比の選定基準について述べるものである。

5.2 伴流分布の不均一性

キャビテーション・エロージョンの発生に影響を与える伴流分布の不均一性を示すパラメータを考える場合、その要素としてプロペラ一回転中の伴流の変動値と周方向の伴流分布の傾斜部の傾きを取り入れる必要がある。

このため、伴流分布をプロペラ前進速度分布に置き換えて Fig.5.1 に示すように表現し、伴流分布の不均一性を示すパラメータとして、伴流指数 (wake factor) :

$$K_{w(x)} = \frac{\Delta(1-w_x) / (1-w_{mean})}{(\theta_b - \theta_a)_x}$$

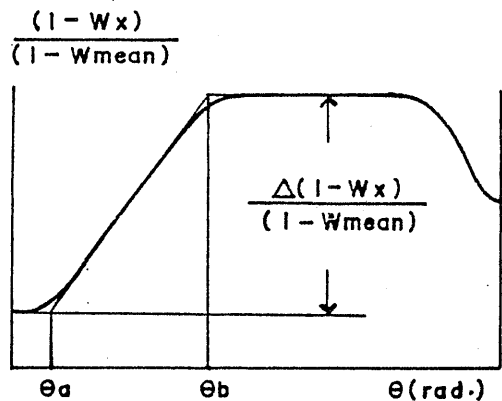


Fig. 5.1 Definition of wake factor

$K_{W(x)}$ を下式のように定義した。

$$K_{W(x)} = \frac{A(1-w_x)/(1-w_{mean})}{(\theta_b - \theta_a)_x} \quad (5.1)$$

ここに、

- x ; 翼素の無次元半径 (= r / R),
- θ ; プロペラ翼回転角 (rad.)
- w_x ; x における θ 位置の伴流係数,
- $A(1-w_x)$; x における伴流係数の変動値
- w_{mean} ; プロペラ円盤内の平均伴流係数,

5.3 プロペラ荷重量

キャビテーション・エロージョンの発生に影響を与える要素として、プロペラ荷重量およびプロペラ翼幅(翼面積)が考えられる。

ここでは、この2要素を含む係数として、通常良く用いられているプロペラ翼単位投影面積当たりのスラストを無次元化したスラスト荷重量; τ を採用した

$$\tau = \frac{2T / A_p}{\rho \cdot V_{0.7R}^2} = \frac{8K_T}{\pi \cdot a_p (J^2 + 0.49\pi^2)} \quad (5.2)$$

しかし、第4章における考察でも明らかのように、プロペラ荷重量といった単一の状態量だけでキャビテーション・エロージョンの発生を判定することは難しい。

翼素の幾何形状の変化に伴う翼背面上のクラウドキャビテーションの発生状況の変化の様子は、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差の大きさに依存する。翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差が大きい場合は、キャビティが消滅する際に後縁側から次第に前縁側に向かって消えて行き、クラウドキャビテーションの発生状況が弱まりエロージョン発生の危険性は少なくなる。しかし、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差が小さい場合は、キャビティが消滅する際に後縁側にキャビティの大きな塊が残り、これが瞬時に崩壊するためエロージョン発生の危険性が增大する。

したがって、翼背面上圧力係数および局所キャビテーション数より定まる影響係数をスラスト荷重量; τ に乗じ、これを翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生を判定するパラメータとして採用することを試みた。

5.4 プロペラ翼面上の圧力係数

プロペラのキャビテーション性能を調べる手段の一つ

として、翼面上圧力分布の計算結果から求める3次元キャビテーションバケット図⁴⁾を用いる方法がある。

そこで、まずプロペラ特性解析法¹⁵⁾により、第4章、Table 4.1 に示す実験状態における3種類の伴流中のプロペラの0.9Rの翼面上圧力分布の計算を行った。そして、本章においても最初に3次元キャビテーションバケット図により、伴流分布の不均一性およびプロペラ幾何形状の変化がキャビテーション性能に及ぼす影響を検討した。

3次元キャビテーションバケット図上、shock free領域の上端から右側の部分で、同一の揚力係数; C_L にたいする最小圧力係数; Cp_{min} の値が右舷側と左舷側で異なるため2本の線が得られる。通常はキャビテーション初生の早いほうの線を与えるが、本章では試験結果との対応を見るため2本の線を引いた。

3種の伴流中の代表例として、M.P. NO.0192 および M.P. NO.0234 の3次元キャビテーションバケット図を Fig.5.2a および Fig.5.2b に示す。いずれのプロペラの場合もバケット図上に現れた伴流分布の不均一性に基づく差異はあまり顕著なものでなく、特に shock free 領域には差が見られない。しかし、shock free 領域の上端から右側の部分の背面の圧力係数に着目すると、最小圧力係数; $-Cp_{Bmin}$ の変動値; $-\Delta Cp_{Bmin}$ は伴流分布の傾斜部の傾きの増加に伴って大きくなる。したがって、翼背面の前縁部から翼弦中央部にわたる圧力の変化が激しくなりクラウドキャビテーションの発生につながるものと考えられる。また、shock free 領域の下端から右側の部分の正面の最小圧力係数; $-Cp_{Fmin}$ の変動値; $-\Delta Cp_{Fmin}$ は伴流分布の傾斜部の傾きの減少

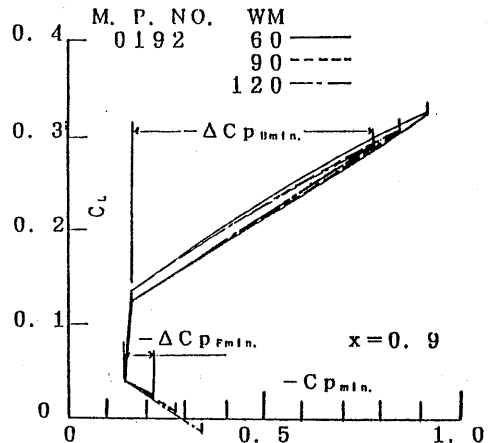


Fig. 5.2a 3-Dcavitation bucket of M. P. NO. 0192

に伴って大きくなり、正面キャビテーションが発生し易くなる。次に、WM60 の場合を例にとり、プロペラ幾何形状の変化がキャビテーション性能に及ぼす影響を3次元キャビテーションバケット図により検討した。

Fig.5.3 に Z1 シリーズプロペラのバケット図を示す。翼数の増加（翼幅は減少）に伴ってキャンパー比も増加するため、shock free 領域は広がるが、 $-ΔCp_{Bmin.}$ および $-ΔCp_{Fmin.}$ ともに大きくなり背面側のクラウドキャビテーションおよび正面キャビテーションとも発生し易くなる。

Fig.5.4 に t および m シリーズプロペラのバケッ

ト図を示す。キャンパー比の増加に伴って shock free 領域は広くなり、 $-ΔCp_{Bmin.}$ も小さくなるので背面側のクラウドキャビテーションは発生し難くなるが、正面キャビテーションは $-ΔCp_{Fmin.}$ が大きくなるため発生し易くなる。

Fig.5.5 に p シリーズプロペラのバケット図を示す。ピッチ比の増加に伴い $-ΔCp_{Bmin.}$ が増加するため背面側のクラウドキャビテーションは発生し易くなる。

また、Fig.5.6 に a_E シリーズプロペラのバケット図を示す。展開面積比の減少（キャンパー比の増加）に伴い shock free 領域は広がるが、 $-ΔCp_{Bmin.}$ およ

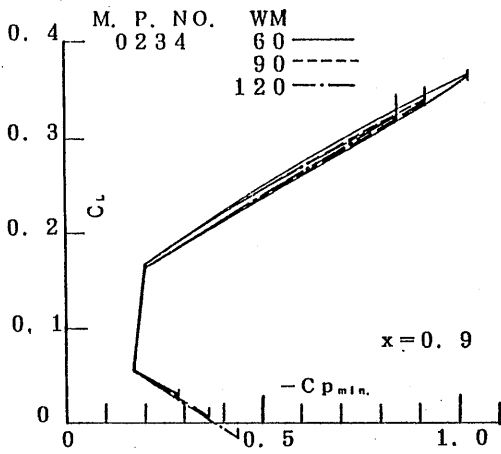


Fig. 5.2b 3-D cavitation bucket chart of M. P. NO. 0234

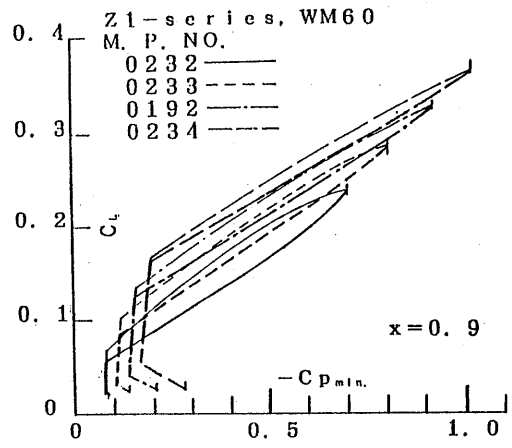


Fig. 5.3 cavitation bucket chart of Z1-series propellers

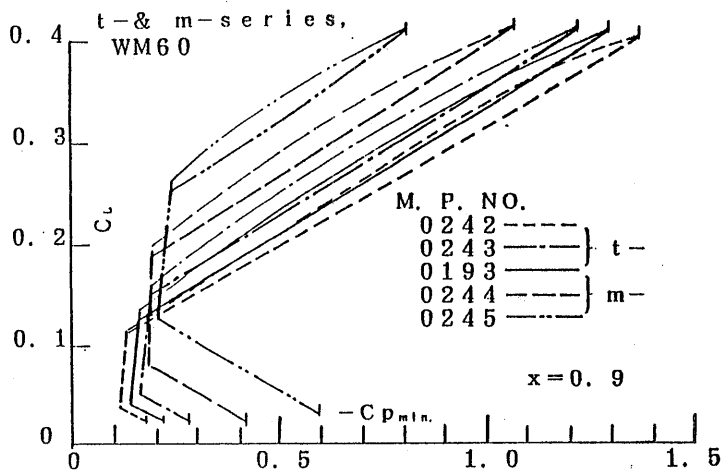


Fig. 5.4 3-D cavitation bucket chart of t- & m-series propellers

び ΔC_p p_{min} . とともに大きくなり背面側のクラウドキャビテーションおよび正面キャビテーションともに発生し易くなる。

以上、3次元キャビテーションバケット図による検討結果から背面側のクラウドキャビテーションおよび正面キャビテーションの発生に及ぼす伴流分布の不均一性およびプロペラ幾何形状の変化の影響の概略の傾向が把握できた。しかし、検討の対象が shock free 領域の上端および下端から右側の部分、すなわち翼前縁部近傍の最

小圧力係数となるため、キャビテーション初生に関する情報は得られるが、翼背面後縁側のクラウドキャビテーションの発生、さらにはキャビテーション・エロージョンの発生に関連する要素を導きだすことが難しい。このため、翼背面については翼弦上の他の部分の圧力係数に着目して検討を進めることにした。

平坦な圧力分布を持つプロペラの場合、クラウドキャビテーション発生判定基準の一要素として平坦部圧力と蒸気圧との差、すなわち平坦部の圧力係数とキャビテー

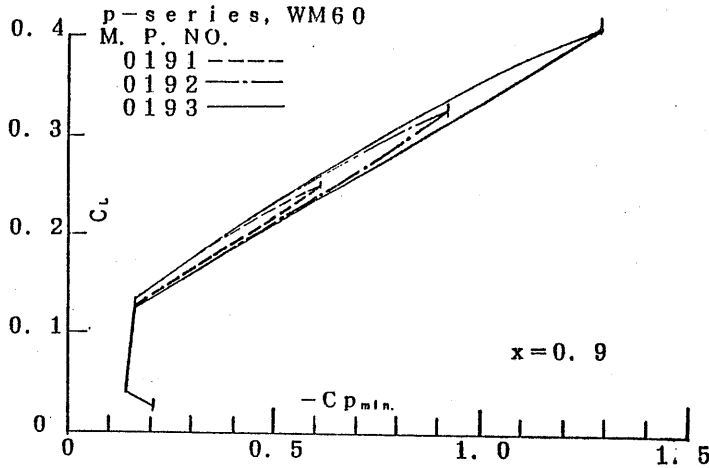


Fig. 5.3 3-D cavitation bucket chart of p-series propellers

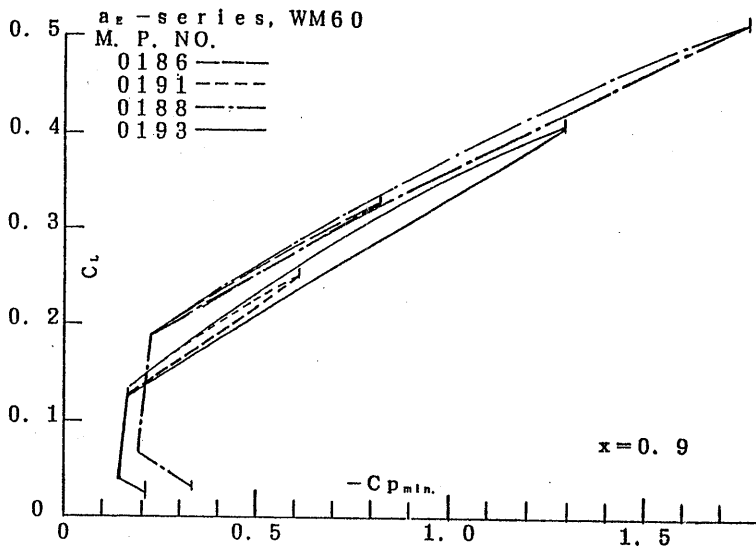


Fig. 5.6 3-D cavitation bucket chart of a_E -series propellers

ション数との差が考えられる¹⁶⁾。また、5.3節でも述べたように、クラウドキャビテーションの発生状況は翼弦中央付近の圧力係数とキャビテーション数との差に依存することが明らかである。したがって以後、平坦部圧力係数の代表値として、翼背面上の50%翼弦長位置の圧力係数； $-Cp_{(0.5c)}$ の値を採り、その挙動について検討することにした。

3種類の伴流中の、0.9Rにおけるプロペラ一回転中の $-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布の代表例として、M.P. NO. 0192の場合を Fig.5.7a に、M.P. NO.0234の場合を Fig.5.7b に示す。いずれのプロペラの場合も、

$-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布形状は伴流の周方向分布形状と同一の傾向の変化を示す。また、 $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値； $-Cp_{max.(0.5c)}$ および最小値； $-Cp_{min.(0.5c)}$ は伴流の傾斜部の傾きの増加に伴って高い値を示すが、 $-Cp_{(0.5c)}$ の一回転中の変動値； $-ΔCp_{(0.5c)}$ および平均値； $-ΔCp_{mean(0.5c)}$ はほぼ等しい値を示す。これらは、3種類の伴流中の0.9Rにおけるプロペラ一回転中の揚力係数； C_L および迎角； $α$ の周方向分布とまったく同一の傾向の変化を示している。

次に WM60 の場合を例にとり、プロペラ幾何形状の変化に対する $-Cp_{(0.5c)}$ の変化を検討した。

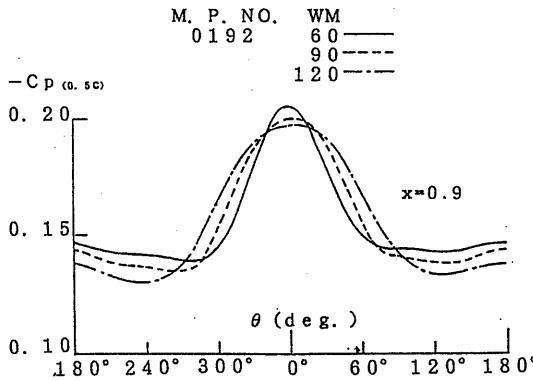


Fig. 5.7a Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of M. P. NO. 0192

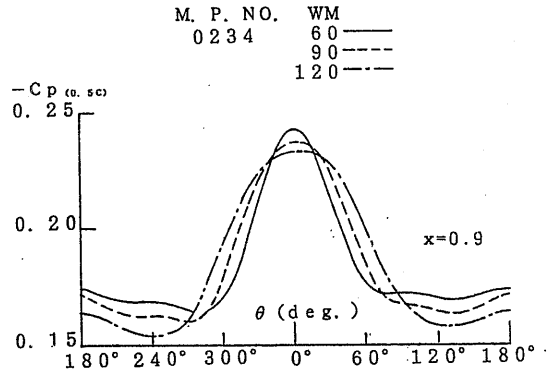


Fig. 5.7b Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of M. P. NO. 0234

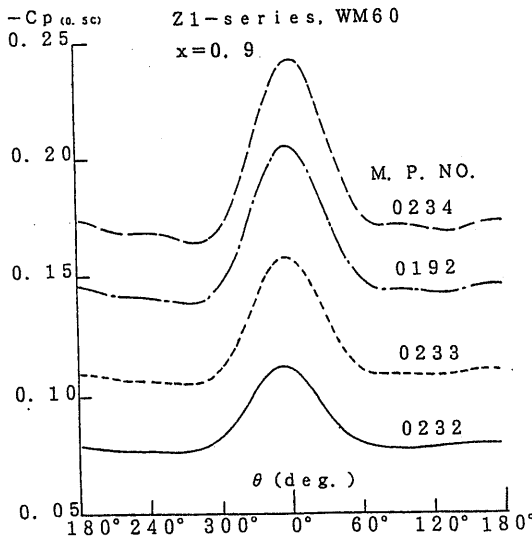


Fig. 5.8 Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of Z1 series propellers

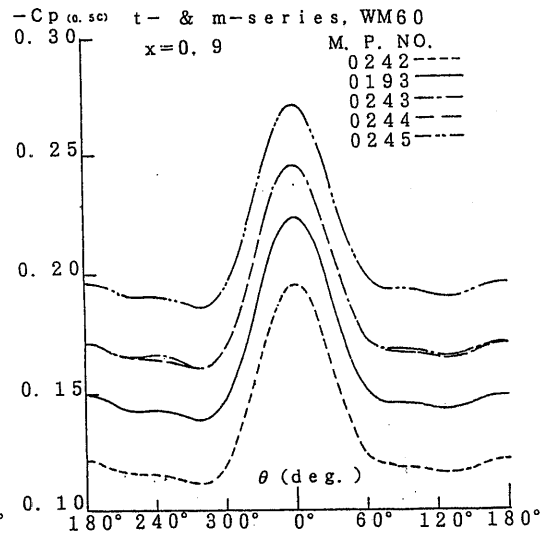


Fig. 5.9 Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of t- m-series propellers

Fig.5.8 にZ1一シリーズプロペラの $-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布を示す。翼数の増加(翼幅の減少に伴いキャンパー比も増加)に伴い、 $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値、最小値、変動値および平均値はいずれも高い値を示す。

Fig.5.9 にt一シリーズおよびm一シリーズプロペラの $-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布を示す。キャンパー比の増加に伴い、 $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値、最小値および平均値はいずれも高い値を示すが、変動値はほぼ等しい値を示す。

Fig.5.10 にp一シリーズプロペラの $-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布を示す。ピッチ比の増加に伴い、 $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値および変動値は高い値を示すが、最小値および平均値に大差は見られない。

Fig.5.11 に a_E 一シリーズプロペラの $-Cp_{(0.5c)}$ の周方向分布を示す。展開面積比の減少(翼幅の減少に伴いキャンパー比は増加)に伴い、 $-Cp_{(0.5c)}$ 最大値、最小値、変動値および平均値はいずれも高い値を示す。

以上の検討結果とベイント試験結果とを参照すると、翼背面のクラウドキャビテーションの発生に強く関係する因子として伴流の傾斜部の傾きおよび $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値、変動値ならびに平均値が考えられる。

5.5 エロージョン発生状況にたいする圧力係数の影響

前述のように、翼背面上のクラウドキャビテーション発生判定基準の一要素として平坦部の圧力係数(ここでは50%翼弦長位置の値; $-Cp_{(0.5c)}$ を採用する)とキャ

ピテーション数の差が考えられるが、本章では圧力係数とキャピテーション数との比; $-Cp/\sigma$ を採用する事とした。

前節の検討結果から、翼背面のクラウドキャビテーションの発生に $-Cp_{(0.5c)}$ の最大値、変動値および平均値が関係することが分かったが、この内のいずれかの値を主因子として選び出す必要がある。このため、第4章の試験結果と5.4節の検討結果からクラウドキャビテーション発生に関連する様々な要素の挙動を整理し、これを考察して主因子を導くことにした。整理結果をTable 5.1に示す。著者らは、最初に $-Cp_{(0.5c)}$ の平均値; $-Cp_{mean(0.5c)}$ に着目し、スラスト荷重度にたいする影響係数; f_E として下式を採用¹⁷⁾した。

Table 5.1 Effect of various parameters on cavi-tation erosion

シ リ ト ズ	エ ロ ー ジ ョ ン	荷 重 度	キ ャ ン パ ー 比	翼 幅	Cp (0.5c)		
					最 大 値	変 動 値	平 均 値
Z1- 翼数増	増	増	増	減	増	増	増
t-&m- キャンパー減	増	一定	減	一定	減	一定	減
p- ピッチ比増	増	増	一定	一定	増	増	一定
a_E - 面積比減	増	増	増	減	増	増	増

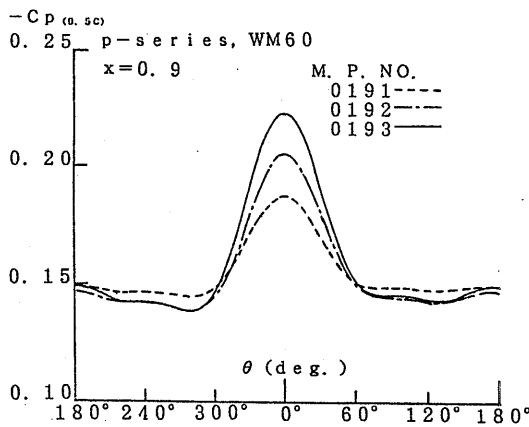


Fig. 5.10 Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of p-series propellers

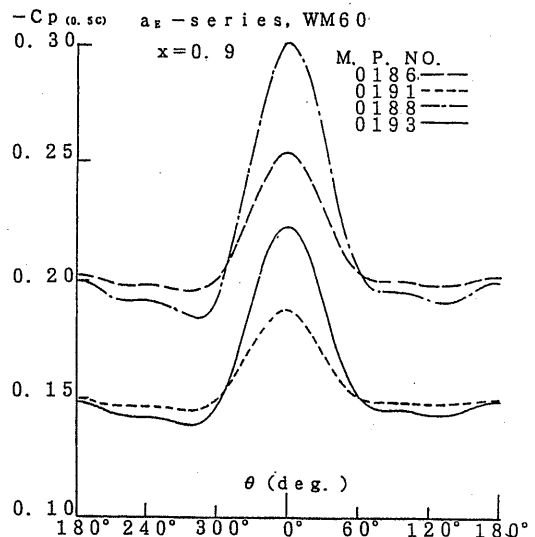


Fig. 5.11 Circumferential distribution of $Cp_{(0.5c)}$ of a_E -series propellers

$$f_E = [-Cp_{mean(0.5C)} / 100(m_0/1)_{0.9R}] / \sigma_{0.9R} \quad (5.3)$$

この式を一見すると、キャンパー比； $(m_0/1)_{0.9R}$ の値を大きくとれば f_E の値が小さくなり、スラスト荷重度にたいするプロペラ周りの圧力状態の影響が弱まるように見える。しかし、実際はキャンパー比が増加すると、 $-Cp_{mean(0.5C)}$ の値も増加するから一概に f_E の値が小さくなるとはいえないが、(5.3) 式はキャンパー比を大きくすれば有利という誤解を与える恐れがある。前述のように、キャビテーション条件が厳しい場合、キャンパー比を過大にとると翼背面のクラウドキャビテーションおよび正面キャビテーションの発生の危険性が増大する。したがって、このような誤解を与えないようにする必要があるのである。

このため、Table 5.1 を見直すことにより、さらに合理的な主因子を導くことにした。

Table 5.1 を見ると Z1 シリーズ、p シリーズおよび a_E シリーズの場合は、 $-Cp_{(0.5C)}$ の最大値； $-Cp_{max(0.5C)}$ 、変動値； $-\Delta Cp_{(0.5C)}$ および平均値； $-Cp_{mean(0.5C)}$ の増加に対応してエロージョンの発生が強くなっている。

これにたいして、t シリーズおよび m シリーズの場合には、 $-Cp_{(0.5C)}$ の変動値； $-\Delta Cp_{(0.5C)}$ はほぼ一定で、最大値； $-Cp_{max(0.5C)}$ および平均値； $-Cp_{mean(0.5C)}$ の減少に対応してエロージョンの発生が強くなっている。しかし、変動値と平均値の比； $(\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)})$ をとると、エロージョンの発生状況はこの値の増加に対応して強くなっている。

また、伴流の変動値； $\Delta(1-w_2)$ がより大きくなった場合を想定すると、プロペラ一回転中の圧力係数の平均値は変化せずに変動値のみがおおきくなり、その比； $(\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)})$ の値が大きくなってエロージョン発生状況が強まることが十分予測される。

以上の考察結果を踏まえて、クラウドキャビテーションの発生に強く影響する主因子として、翼素の50%翼弦長位置の圧力係数のプロペラ一回転中の変動値と平均値の比； $(\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)})$ を採用することに決定した。したがって、スラスト荷重度にたいする影響係数； f_E は下式により与えられる。

$$f_E = (\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)}) / \sigma_{0.9R} \quad (5.4)$$

5.6 新しいキャビテーション・エロージョン発生判定基準

翼背面上のキャビテーション・エロージョンの発生を判定するパラメータとして、エロージョン指数 (erosion

factor)； K_E を下式のように定義した。

$$K_E = f_E \cdot \tau = \frac{\Delta Cp_{(0.5C)}}{Cp_{mean(0.5C)}} \cdot \frac{1}{\sigma_{0.9R}} \cdot \tau \quad (5.5)$$

ここで翼数； Z 、キャンパー比； $(m_0/1)_{0.9R}$ 、ピッチ比； P および展開面積比； a_E を横軸にとり、Fig.5.12 に圧力係数の変動値； $-\Delta Cp_{(0.5C)}$ 、平均値； $-Cp_{mean(0.5C)}$ 、その比； $(\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)})$ および局所キャビテーション数； $\sigma_{0.9R}$ を、Fig.5.13 に影響係数； f_E 、スラスト荷重度； τ およびエロージョン指数； K_E の変化を示す。

これより、Z1 シリーズおよび a_E シリーズプロペラの場合はスラスト荷重度が、t シリーズおよび m シリーズプロペラの場合は影響係数が、p シリーズプロペラの場合は荷重度および影響係数が主にエロージョン指数に影響を与えていることが分かる。

ペイント試験の結果と、これらに対応した翼面上圧力分布の計算結果を基にして、伴流指数； $K_w(0.9R)$ を横軸に、エロージョン指数； K_E を縦軸にとり、Fig.5.14 に示す新しい翼背面上キャビテーション・エロージョン発生判定基準図を作成した。

Fig.5.14 中、黒く塗りつぶした記号はクラウドキャビテーションが激しく発生しペイントが剥離 (エロージョンの発生) した場合を、半分黒く塗りつぶした記号はペイントは剥離しなかったがクラウドキャビテーションが激しく発生しエロージョン発生の危険性が高いと判断した場合を、白抜きの記号はクラウドキャビテーションの発生が弱く、ペイントも剥離 (エロージョンの発生) しなかった場合を示す。

また、斜め右下がりの線を基準線に定め、この線の上側がキャビテーション・エロージョン発生の危険性の高い領域、下側が危険性の低い領域とした。

この図より、伴流の変動値および傾斜部の傾きの増加、荷重度の増加、翼弦中央の圧力変動の増加、さらには局所キャビテーション数の減少に伴って翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生の危険性が増大することが分かる。

5.7 キャンパー比選定基準

キャビテーション条件がより厳しい場合、キャンパー比の大きいプロペラでは翼背面上翼弦中央付近の負圧の山が高いため、翼弦中央の圧力と蒸気圧の差、すなわち圧力係数とキャビテーション数の差が小さくなり、キャビティが翼面上から消滅する際に後縁部にキャビティの

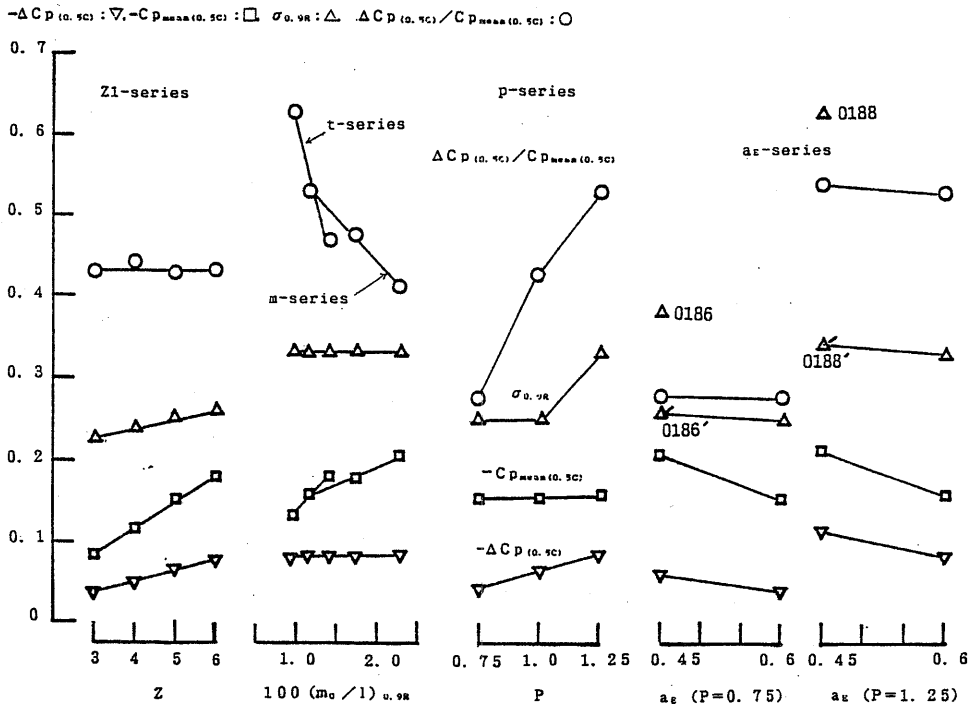


Fig. 5.12 Various factors affecting cavitation criterion

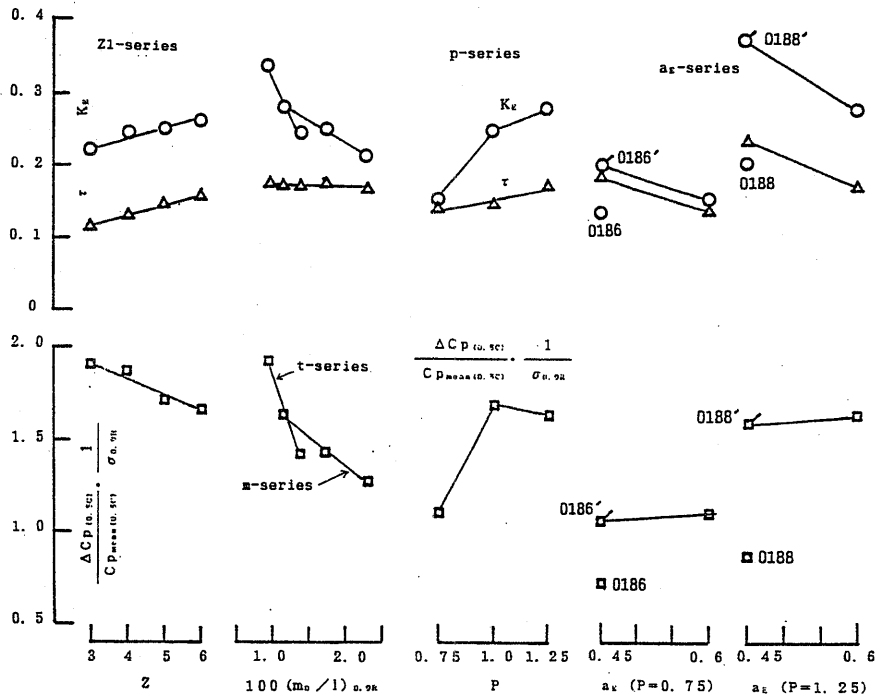


Fig. 5.13 f_E, τ and K_E

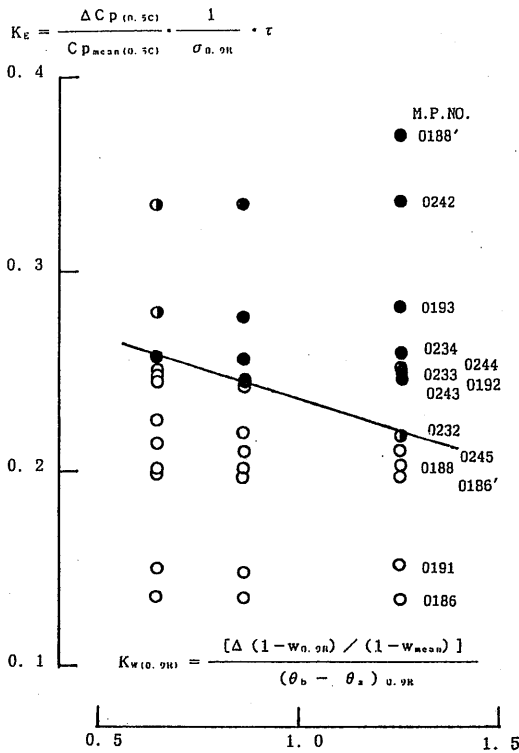


Fig. 5.14 Cavitation erosion criterion

大きな塊が残りに、これが瞬時に崩壊することによりクラウドキャビテーションが発生し、キャビテーション・エロージョン発生危険性が増大する。したがって、翼素のキャンパー比を過大にとることは翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生防止の観点からも望ましくない。

さらに、キャンパー比の増加に伴い翼正面上に正面キャビテーションが発生し易くなる。正面キャビテーションは多くの場合、キャビテーション・エロージョンの発生を伴うので、これを発生を防止しなければならない。このため、正面キャビテーション発生防止の観点からもキャンパー比選定基準を定める必要がある。

通常、正面キャビテーションは 0.5R~0.8R 付近の翼正面前縁部に多く発生するが、その発生機構は、翼背面後縁部に発生するクラウドキャビテーションの発生機構ほど複雑ではない。翼正面上の前縁端部の圧力が蒸気圧以下になると翼正面前縁部に沿ってシートキャビテーションが発生し、さらに圧力が低下するとクラウドキャビテーションを伴いエロージョンの発生に結び付くと考えられる。

そこで、0.7R を代表断面に採り、圧力分布の計算結果を基に翼正面前縁から1.2%翼弦長位置（前縁から一番目の計算評点）の圧力係数； $-C_{pF}$ と局所キャビテーション数； $\sigma_{0.7R}$ との比； $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ のプロペラ一回転中の挙動を調べ、これとキャビテーション試験結果より正面キャビテーション発生防止の観点から見たキャンパー比選定基準の作成を試みた。1.2%翼弦長位置の圧力係数を選んだのは、これより前縁側では計算精度が急激に低下するためである。

Fig.5.15 に Z1 シリーズの、Fig.5.16 に t-および p-シリーズの、Fig.5.17 に m-シリーズの、さらに Fig.5.18 に aE-シリーズの場合の $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ のプロペラ一回転中の変化を示した。

プロペラ一回転中の $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ の最大値は、1) キャンパー比の増加に伴って増加する、2) 伴流の傾斜部の傾きの減少に伴って増加する、3) 右舷側の値より左舷側の値の方が大きい。したがって、左舷側の $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ の最大値の値を用いて以後の検討を進めた。Fig.5.19 にキャンパー比の変化にたいする左舷側の $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ の最大値； $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})^{P_{max}}$ の値を示す。図中、黒く塗り潰した記号は正面キャビテーションの発生した場合を、*印はその時の初生の値； $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})^{P_{incept}}$ を示す。これより、伴流の傾斜

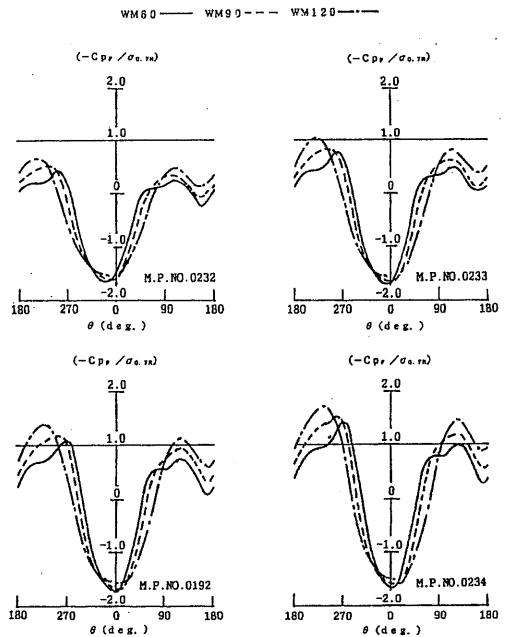


Fig. 5.15 $(-C_{pF} / \sigma_{0.7R})$ of Z1-series propellers

部の傾きの減少に伴い正面キャビテーションが発生し易いこと、キャンパー比が小さい場合は $(-Cp_F / \sigma_{0.7R}) > 1$ でも正面キャビテーションが発生しない場合もあり、 $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})_{incep.} = 1$ を正面キャビテーション発生防止の設計条件とすることは安全側にあることになるが、キャンパー比が大きい場合には $(-Cp_F / \sigma_{0.7R}) < 1$ でも正面キャビテーションが発生する場合もあり、しかも激しいクラウドキャビテーションを伴うので、 $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})_{incep.}$ の設計値をかなり小さく設定する

必要のあることが分かり、Fig.5.19は $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})_{incep.}$ の設計値を選定するための設計図表としても利用できよう。また、正面キャビテーションが発生している場合の $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})$ の最大値（黒く塗り潰した記号）および初生値（*印）を直線で結び、この2直線の交点に対応するキャンパー比を正面キャビテーション発生防止の観点から見て採用し得る最大キャンパー比と定義した。

Fig.5.20に、0.7Rにおける伴流指数； $K_{w(0.7R)}$ を横軸に、キャンパー比を縦軸にとり、正面キャビテーションが発生している場合を●印で識別し、Fig.5.19で定義した正面キャビテーション発生防止の観点から見て採用し得る最大キャンパー比を*印で示し、これを正面キャビテーション発生防止の観点から見たキャンパー比選定基準図とした。図中の基準線の上側に正面キャビテーションの発生していない、M.P. NO.0186とM.P. NO.0188が含まれている。しかし、Fig.5.19を見ると、M.P. NO.0186'のWM120およびWM90の場合は初生線近傍にあり、正面キャビテーション発生限界に近い状態と考えられ、またM.P. NO.0188'のWM60の場合は初生線上にあり、WM120およびWM90の場合（実験は行われていない）には正面キャビテーションが発生したであろうことが十分推測できる。

なお、SRI・B型プロペラで、翼厚さの変化に伴い

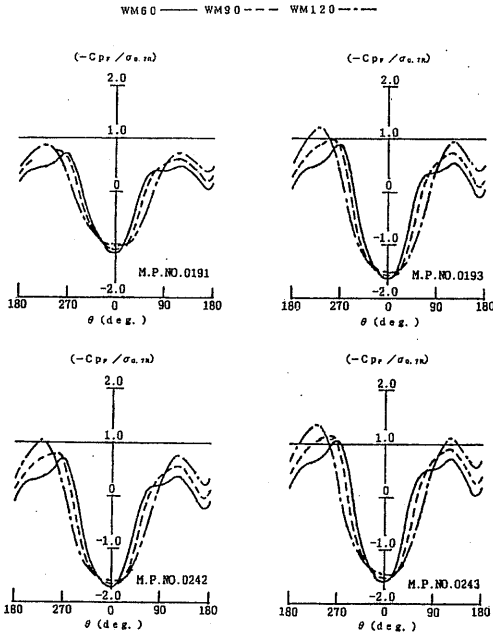


Fig. 5.16 $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})$ of p- and t-series propellers

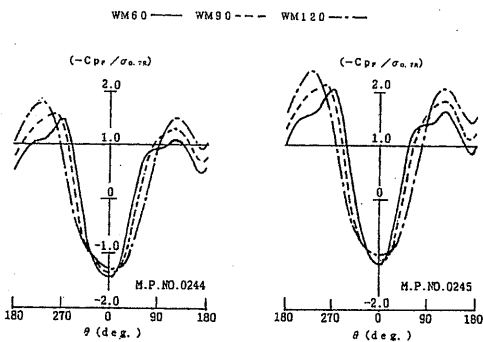


Fig. 5.17 $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})$ of m-series propellers

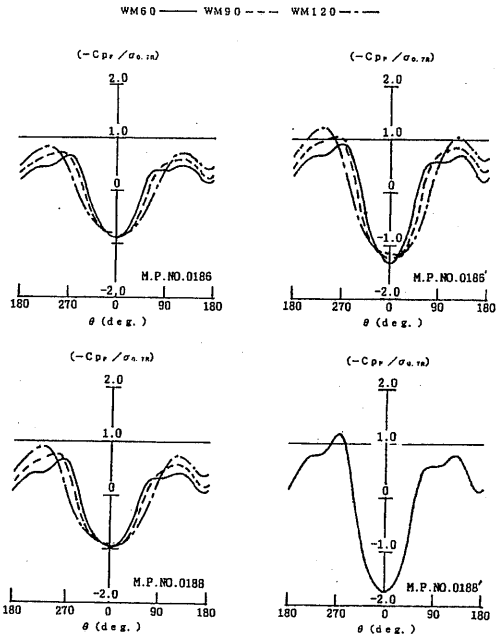


Fig. 5.18 $(-Cp_F / \sigma_{0.7R})$ of a_B -series propellers

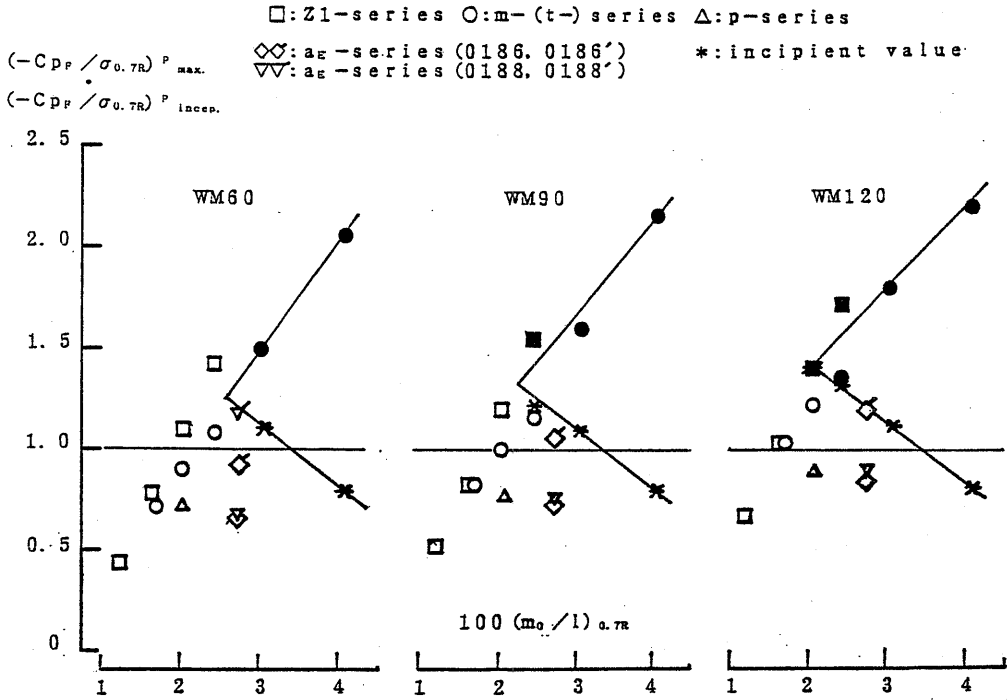


Fig. 5.19 Appearance of face cavitation

キャンバが同時、同率に変化する場合の、 $x = 0.7 \sim 1.0$ における翼厚さ幅比； $(t/l)_x$ とキャンバー比； $(m_0/l)_x$ の関係は下式で与えられる。

$$(t/l)_x = 3.088(m_0/l)_x \quad (5.6)$$

5.8 設計手順の概略

以上により、SRI・B型プロペラの設計資料が整備された。そこで、これらを用いたプロペラ設計の概略手順の一例を以下に述べる。

与えられた設計条件から、

- (1) 振動問題を考慮して、まず翼数を定める。
- (2) SRI・B型プロペラ設計図表を用いて、与えられた船速（あるいはプロペラ前進速度）、伝達馬力、プロペラ回転数を満足させ、船尾形状に適合したプロペラ直径およびピッチ比の第一近似値が求まる。
- (3) 類似船のプロペラの資料などを参照して翼厚比の第一近似値を定め SRI・B型プロペラの標準分布により半径方向の翼素最大翼厚を定める。次に、文献3) で与えられた翼厚さ幅比の推奨値を参考として 0.7R の翼素の翼幅を定めると、SRI・B型プロペラの標準分布により半径方向の翼素の翼幅が

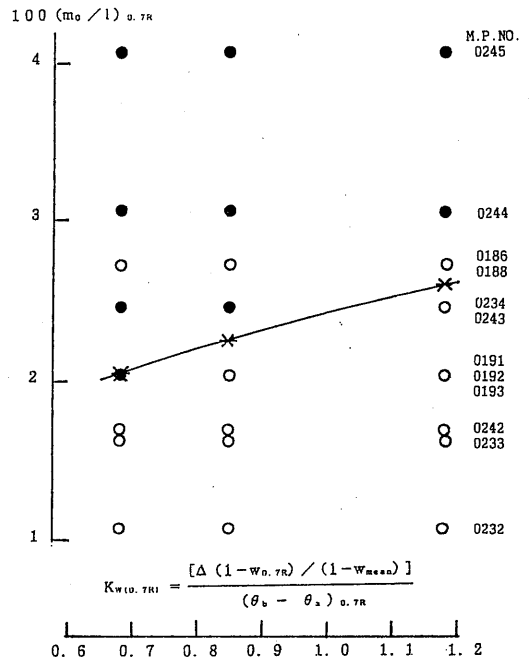


Fig. 5.20 Criterion for choosing camber ratio

定まるから、展開面積比の第一近似値が求まる。

- (4) ここまでに求まった幾何形状の第一近似値を基に翼強度計算を行い、強度条件を満足させるように修正して幾何形状の第二近似値が定まる。
- (5) 幾何形状の第二近似値を用いて翼面上圧力分布の計算を行い、求まった翼面上圧力係数を基に、Fig.5.14の翼背面上キャビテーション・エロージョン発生判定基準図およびFig.5.20のキャンバー比選定基準図よりキャビテーション条件を満足させる幾何形状の第三近似値が定まる。この時、背面キャビテーションおよび正面キャビテーションにたいする二つの基準を同時に満足させるためには、ケースバイケースで異なるものではあろうが、単純には翼面積、すなわち翼幅を変化させることによりエロージョン指数およびキャンバー比を変化させる方法が考えられる。
- (6) (4)~(5)のフローの反復計算を行うことにより、翼強度条件およびキャビテーション条件をともに満足させる幾何形状が決定される。
- (7) 最終的に決定された幾何形状と母型プロペラの幾何形状の差異に基づく修正をピッチ比の第一近似値に施し、すべての設計条件を満足させるプロペラ主要目が決定され、プロペラ設計が終了する。

6. 結 言

本研究においては、周方向の伴流分布の傾斜部の傾きを系統的に変化させた伴流分布中でプロペラ幾何形状の異なるプロペラによるペイント試験を行い、キャビテーション・エロージョンに直接結びつくクラウドキャビテーションの発生状況に及ぼす伴流分布の不均一性およびプロペラ幾何形状の変化の影響を検討した。また、これらの試験結果と、これに対応した翼面上圧力分布の計算結果を基に、伴流分布の不均一性、プロペラ荷重度、翼素のキャンバー比、翼面上圧力係数、局所キャビテーション数などを考慮して、翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生判定基準および正面キャビテーション発生防止の観点から見たキャンバー比選定基準を求めた。その結果、次の事が明らかになった。

- (1) 周方向の伴流分布の傾斜部の傾きが大きくなるに伴い翼背面上のクラウドキャビテーションの発生状況が激しくなり、キャビテーション・エロージョン発生の危険性が増大する。また、伴流分布の傾斜部の傾きが小さくなるに伴い正面キャビテーションが発生し易くなる。したがって、伴流分布の不均一性

を表現するパラメータを考える場合、伴流分布の peak-peak の値と周方向の伴流分布の傾斜部の傾きの両者を考慮する必要がある。

- (2) 翼面積の大きい(翼幅の広い)プロペラに比べ、翼面積の小さい(翼幅の狭い)プロペラの場合には翼が伴流の傾斜部を急速に抜け出すため翼面上圧力の変化が激しくなり、キャビティの成長から消滅の過程が早まるためクラウドキャビテーションの発生状況が激しくなる。また、プロペラ荷重度の増加に伴いクラウドキャビテーションの発生状況が激しくなる。
- (3) 翼素のキャンバー比の変化に伴う翼背面上のクラウドキャビテーションの発生状況の変化の様子は、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差の値の大きさに依存する。すなわち、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差が大きい場合は、キャンバー比の増加に伴いクラウドキャビテーションの発生状況が弱まる。しかし、キャビテーション条件がより厳しくなり、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差が小さくなると、キャンバー比の増加に伴い翼面上のキャビティ体積が増加し、キャビティが消滅する際に翼後縁側にキャビティの大きな塊が残るようになり、これが翼面上で崩壊することによりエロージョン発生の危険性が増大することが予測できる。

また、キャンバー比の増加に伴いクラウドキャビテーションの発生を伴う正面キャビテーションが発生し易くなる。

- (4) 以上の考察により、クラウドキャビテーション発生の有無を判定するパラメータを考える場合、プロペラ荷重度、プロペラ翼面積、翼素のキャンバー比、翼面上翼弦中央付近の圧力係数とキャビテーション数の差の値などを考慮する必要があることが分る。
- (5) 伴流の不均一性を表現するパラメータとして、伴流指数；(wake factor)； $K_{w(x)}$ を (5.1) 式のように定義した。

$$K_{w(x)} = \frac{\Delta(1-w_x)/(1-w_{mean})}{(\theta_b - \theta_a)_x} \quad (5.1)$$

- (6) キャビテーション・エロージョン発生の有無を判定する主要素として、プロペラ翼単位投影面積当たりのスラストを無次元化したスラスト荷重度； τ を採用した。しかし、クラウドキャビテーションの発生機構は複雑であり、スラスト荷重度だけでその

発生の有無を判定することは難しい。

翼背面上のクラウドキャビテーションの発生状況の変化の様子は、翼弦中央付近の圧力係数と局所キャビテーション数の差の値の大きさに依存する。このため、翼面上圧力係数と局所キャビテーション数より定まる影響係数； f_E をスラスト荷重度に乘じ、これをキャビテーション・エロージョン発生の有無を判定する主要素として採用することとした。

- (7) 平坦な圧力分布を持つプロペラの場合、翼背面上のクラウドキャビテーションの発生判定基準の主要素として平坦部圧力係数と局所キャビテーション数の差の値が考えられる。ここで、平坦部圧力係数の代表値として翼背面上、 $0.9R$ の50%翼弦長位置の圧力係数； $Cp_{(0.5C)}$ をとり、これのプロペラ一回転中の変化の挙動を調べ、伴流分布の不均一性およびプロペラ幾何形状の変化がクラウドキャビテーションの発生に及ぼす影響を検討した。その結果、 $-Cp_{(0.5C)}$ のプロペラ一回転中の変動値； $-\Delta Cp_{(0.5C)}$ と、その平均値； $-Cp_{mean(0.5C)}$ との比； $(\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)})$ を主因子として導いた。したがって、スラスト荷重度にたいする影響係数； f_E を(5.4)式のように定義した。

$$f_E = (\Delta Cp_{(0.5C)} / Cp_{mean(0.5C)}) / \sigma_{0.9R} \quad (5.4)$$

- (8) キャビテーション・エロージョン発生の有無を判定するパラメータとして、エロージョン指数 (erosion factor)； K_E を(5.5)式のように定義した。

$$K_E = f_E \cdot \tau = \frac{\Delta Cp_{(0.5C)}}{Cp_{mean(0.5C)}} \cdot \frac{1}{\sigma_{0.9R}} \cdot \tau \quad (5.5)$$

そして、ペイント試験結果と、これに対応した翼面上の圧力分布計算結果を基に伴流指数； $K_{w(0.9R)}$ を横軸に、エロージョン指数； K_E を縦軸にとった設計図表として、新しい翼背面上のキャビテーション・エロージョン発生判定基準図を作成した。

- (9) $0.7R$ の翼正面上圧力分布計算結果および正面キャビテーション観測試験結果を基に、キャンパー比の変化が正面キャビテーション発生に及ぼす影響を調べた。その結果より、伴流指数； $K_{w(0.7R)}$ を横軸に、キャンパー比を縦軸にとった設計図表として、正面キャビテーション発生防止の観点から見たキャンパー比選定基準図を作成した。
- (10) 以上の結論のうち、プロペラの推進性能 (例えばピッチ修正方法、プロペラ効率など) に関する結論は一般的なものとして他の型種のプロペラにたいし

ても適用できるものと考えられる。しかし、キャビテーションはプロペラ翼面上圧力分布、すなわち翼断面形状が関係するから、キャビテーション性能に関する結論については対象をSRI・B型プロペラに限定し、他の型種のプロペラにたいしては参考に止めることが望ましい。

以上述べたように、プロペラ設計の基本的資料であるBp- δ 設計図表より、与えられた設計条件にたいする最適プロペラ直径およびピッチ比の第一近似値が求まり、次に最適翼厚さ幅比あるいは最適キャンパー比の推奨値および新しく提案したキャビテーション・エロージョン発生判定基準図より、プロペラ効率向上、船尾振動低減、さらにはキャビテーション・エロージョン発生防止の観点から見た最適幾何形状が決定されるなど、SRI・B型プロペラの設計手法が確立された。

現在、実船に採用されたSRI・B型プロペラの代表例としては、運輸省航海訓練所所属の練習船“青雲丸”に装備されたhighly skewed pro-peller¹⁸⁾があり、プロペラ効率、キャビテーション性能、プロペラ翼強度などの面で十分な性能を示している。また、著者らの知る限りにおいても、一般商船、カーフェリー、漁船等の各種船舶に約1500本の装備例があり、いずれも良好な実績が得られていると聞く。

今後、これらの船舶の就航実績が、本研究により得られた設計資料にfeed backされることにより、一層実用性の高い設計資料となることを望むとともに、さらに多くの船舶のプロペラ設計に活用されることを期待する。

謝 辞

本論文をとりまとめるに際し、東京大学工学部船舶海洋工学科加藤洋治教授より懇切なご指導と貴重なご意見を賜りました。ここに深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、船舶技術研究所推進性能部北川弘光部長、同部右近良孝キャビテーション研究室長、水海技術部小山鴻一運動性能研究室長をはじめとして、ご協力いただいた推進性能部および水海技術部の関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 門井弘行 他：SRI・B型プロペラの開発およびその諸特性，船研報告，第21巻，第6号(1984)
- 2) 門井弘行 他：プロペラ幾何形状の変化がプロペラ特性及びキャビテーション性能に及ぼす影響 (その1) 一翼厚さ幅比及びキャンパー比の変化一，西

- 部造船会会報, 第78号, (1989)
- 3) 門井弘行 他: プロペラ幾何形状の変化がプロペラ特性及びキャビテーション性能に及ぼす影響(その2) —翼厚比及び翼数の変化—, 西部造船会会報, 第80号, (1990)
 - 4) 伊藤達郎, 門井弘行: 船用プロペラのキャビテーション(その2), 第2回船用プロペラに関するシンポジウム, テキスト, 日本造船学会 (1971)
 - 5) 加藤洋治: キャビテーション, 槇書店 (1979)
 - 6) 中島義雄 他: 新しいキャビテーション侵蝕の試験法とその翼型への応用, 日本造船学会論文集, 第149号 (1981)
 - 7) 武井幸雄 他: 新しいソフトサーフェスによるキャビテーションエロージョン試験, 第34回秋季船研研究発表会講演集 (1979)
 - 8) Kadoi, H. and Sasajima, T.: Cavitation Erosion Prediction Using a "Soft Surface", ISP, Vol. 25, NO.286 (1978)
 - 9) 馬飼野 淳 他: 二次元翼のキャビテーション侵蝕, 日本造船学会論文集, 第146号 (1979)
 - 10) 伊藤達郎: 船用プロペラの非定常キャビテーションに関する研究, 日本造船協会論文集, 第111号 (1962)
 - 11) Tanibayashi, H. and Nakanishi, M.: On the Method of Cavitation Tests for Prediction of Tip Erosion of Propeller, J. of SNAJ, Vol. 133 (1973)
 - 12) Lindgren, H. and Bjarne, E.: Studies of Propeller Cavitation Erosion, Conference on Cavitation, IME (1974)
 - 13) Bjarne, E.: Further Studies of Propeller Cavitation Erosion, Conference on Cavitation, IME (1983)
 - 14) 高橋通雄 他: MAU型プロペラのキャビテーション特性に関する研究, (第1報~第3報), 日本造船学会論文集, 第141号および第143号 (1977, 1978)
 - 15) 小山鴻一: 新しい方法によるプロペラ揚力面の数値的解析, 日本造船学会論文集, 第132号 (1972)
 - 16) 山口 一: キャビテーションを考慮したプロペラ用翼型の設計, 第6回キャビテーションに関するシンポジウム, 日本学術会議 (1989)
 - 17) 門井弘行 他: SRI: B型プロペラの不均一流中キャビテーション性能, 西部造船会会報, 第80号, (1990)
 - 18) 日本造船研究協会第183研究部会: 船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究, 研究資料 NO.358 (1983)
 - 19) Burrill, L.C. and Emerson, A.: Propeller cavitation, Further Test on 16 in. Propeller Models in the King's College Cavitation Tunnel, I.S.P., Vol.10, NO.104 (1963)