

実船プロペラ翼面圧力計測

—通常型プロペラに関する計測—

正員 右 近 良 孝* 正員 工 藤 達 郎*
 正員 黒 部 雄 三* 正員 上 入 佐 光**
 正員 湯 浅 肇** 正員 久 保 博 尚***
 板 谷 芳 樹***

Measurement of Pressure Distribution on a Full Scale Propeller
 —Measurement on a Conventional Propeller—

by Yoshitaka Ukon, *Member* Tatsuro Kudo, *Member*
 Yuzo Kurobe, *Member* Hikaru Kamiirisa, *Member*
 Hajime Yuasa, *Member* Hironao Kubo, *Member*
 Yoshiki Itadani

Summary

This paper describes the first development of sophisticated pressure measurement technique for a full scale propeller and the success of the measurement. First of all, the special pressure pick-ups with Helmholtz chamber were designed. The full scale measurements were carried out on the training ship "SEIUN-MARU". Six pressure pick-ups were equipped at each of four propeller blades. The pressure signals were transmitted from the pressure pick-ups on the propeller blades through slip-rings to FM receivers and analyzed using static pressure calibration data obtained in the dock before the voyage.

This ship was operated so carefully that the working conditions at each propeller revolution rate were kept constant, that is, $K_T=0.210$. Then, the measured non-dimensionalized pressure distributions were similar at each condition, except cavitation regions. Except the lowest revolution rate, sheet cavitation or tip vortex cavitation was observed and the influence of cavitation of other blades on the pressure measurement was found out. The present measurement techniques have the accuracy of ± 0.03 kg/cm². By the pressure coefficient, it amounts to ± 0.3 at 70 RPM and ± 0.07 at 149 RPM, respectively.

The measured pressure distributions were compared with the theoretical ones obtained by the existing lifting surface theory. In this calculation, the estimated nominal wake distribution was employed, including the tangential wake based on the measurement in a towing tank. Excellent agreements with theory were found at most of the measurement points, especially the fore part of the blades. These results clearly demonstrate that the use of this estimated wake and the lifting surface theory with the concept of the equivalent two-dimensional profile is quite reasonable for a conventional propeller principally. Near the angular position of the top, some discrepancies between the measurements and theory were observed probably due to the deformation of the nominal wake and the leading edge separation. The present full scale measurements indicated that there still exist some problems on the lifting-surface theory and the use of nominal wake.

These measurements also confirmed that the measured pressure in the sheet cavitation region was nearly equivalent to the vapor pressure at each working condition.

The present study has provided a number of invaluable standard data to validate the numerical computational techniques on marine propellers at high Reynolds number.

* 船舶技術研究所推進性能部
 ** 三井造船昭島研究所
 *** ナカシマプロペラ

1. 緒 言

近年、プロペラ揚力面理論¹⁾や揚力体理論²⁾などの数値計算技術の発達や数値流体力学(CFD)による試計算³⁾に見られる様にプロペラ性能計算法の進歩が目ざましく、船型設計に役立つ手法が次々に開発されていく傾向にある。このような計算精度の評価には実験値が最も重要な役割をなすが、特に、プロペラ翼面圧力はスラストやトルクと異なり微視的であるので、理論との比較の上では最適である。この圧力分布に関しては圧力計や増幅器を含む計測機器の技術の進歩とともに模型プロペラに関しては不均一流中でも高精度で計測されるようになってきている⁴⁾。

一方、実船プロペラに関する公表された圧力分布計測データは皆無であり、実船プロペラ性能計算においてプロペラ揚力面理論が十分な精度で圧力分布を計算しているかどうかは試運転や実船試験での船速、馬力、翼応力計測等により間接的に確認されるのみであった。

そこで本論文では船舶技術研究所(以下、船研という)の模型プロペラでの翼面圧力計測技術⁴⁾、(株)三井造船昭島研究所の実船翼応力計測技術⁵⁾、及びナカシマプロペラ(株)のプロペラ加工技術のノウハウを結集して、実船プロペラ翼面圧力計測法を開発するとともに、運輸省航海訓練所青雲丸の通常型プロペラに関して計測を行い、興味ある結果が得られたので報告する。又、本計測データを揚力面計算(核関数展開法¹⁾)による計算値と比較した。

2. 計測方法及び計測システム

2.1 実船プロペラ翼面圧力計の選定

翼面圧力計測方法としては模型プロペラでは導管方式、圧力計直貼方式、チャンバー方式⁴⁾など種々の方法が提案されているが、実船プロペラに取り付けられた圧力計は一回転中に大きな水頭変化が加わるばかりでなく、船後不均一流中を作用するので非定常な圧力変動も加わる。更に、常用状態ではキャビテーションの発生は避け難く、キャビティの崩壊圧にさらされる。このため、圧力計としては模型プロペラの場合と異なり、ゼロ点のドリフトが少なく、かつキャビティ崩壊時に生じる衝撃圧の伝ばんに対して耐圧性に格段に優れた歪ゲージ型圧力計(共和電業、PS-5KB又は、2KB)を用いることにした。短所としては出力電圧が小さいことであるが、近年の増幅器の性能が飛躍的に向上していることから、充分計測可能であると判断された。圧力計の仕様をTable 1に示す。又、模型プロペラの場合から圧力計を直接翼に取り付けると翼の歪の影響を圧力計が受けるので、圧力計を内蔵するステンレス鋼製アダプタを設計・製作した。このアダプタ付圧力計をFig. 1に示す。

この圧力計に対して、実船状態を想定した各種の予備試験を行った。厚さ20mmの真鍮板にアダプタ付圧力計を2種類の方法(オーリング・サポート式⁶⁾とFig. 1のプラ

Table 1 Specifications of Pressure-Gauge

	PS-2KB	PS-5KB
Input Parameters		
Pressure Range	0-2kgf/cm ²	0-5kgf/cm ²
Pressure Limits	150% rated Pressure	
Impedance	120Ω	
Maximum Electrical Excitation	3V DC	
Output		
Full Range Output	0.8mV/V ± 25% at 1600μ strain	0.8mV/V ± 20% at 2000μ strain
Natural Frequency	25~40kHz	
Impedance	120Ω	
Non-Linearity	1% FRO	
Hysteresis	1% FRO	
Environmental		
Compensated Temperature Range	0~+50°C	
Operational Temperature Range	-20~+70°C	
Thermal Zero Shift	Within 0.3% FRO/°C	Within 0.2% FRO/°C
Thermal Sensitivity Shift	Within 0.3% FRO/°C	Within 0.2% FRO/°C

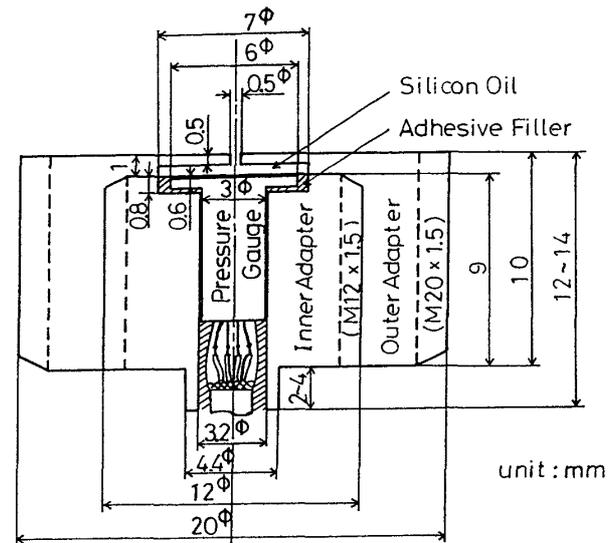


Fig. 1 Pressure Pick-up for Full-scale Measurement

グ・イン方式)で取り付け、圧力計の取り付け位置で最大応力が4.1 kg/mm²即ち最大変形量0.01 mmとなる程度の荷重をかけてキャリブレーションを行ったが、圧力計への歪の影響は全く見られなかった⁶⁾。この結果、アダプタにシール・テープを巻き、ねじ込むため、工作が容易なプラグ・イン方式とした。又、海中での電蝕による圧力計への悪影響を調べるために実船プロペラと同等の母材ニッケル・アルミニウムブロンズにアダプタ付き圧力計とコード及び銅パイプを取り付け、通電状態で海水に84時間浸したが、出力のドリフトもなく、チャンバー内の腐蝕も起きなかった。今回用いた接着剤や充填剤についても海水による剝離等の問題は生じなかった。

今回用いたチャンバー型圧力計の最大周波数応答は模型プロペラと同等の方式であることから約500 Hzと推定される。

2.2 圧力計の取り付け

圧力計はテレメータのチャンネル数の制限から24個とし、船研で行われた模型プロペラでの計測位置⁴⁾を参考にFig. 2及びTable 2に示す様な配置とした。供試プロペラは青雲丸の通常型プロペラであり、第I翼は翼応力計測に用いたので、第IIから第V翼までの各翼面に6ヶつつ圧力

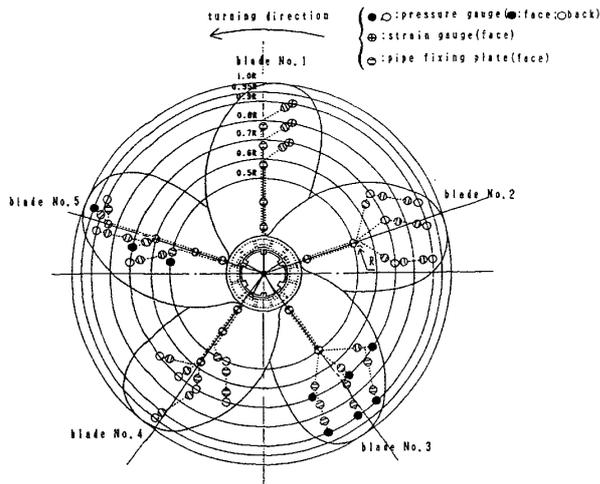


Fig. 2 Arrangement of Pressure Pick-ups and Strain Gauges

Table 2 Arrangement of Pressure Pick-ups

		C P			
		0. 5 R	0. 7 R	0. 9 R	0. 9 5 R
10%	B F		2 & 4 3		
15%	B F			2 3	
25%	B F		5	5	
40%	B F	4 5	2 & 4 3 & 5	2 3	4 5
60%	B F		4	5	
80%	B F		2 & 4 3	2 3	

B: Back Side F: Face Side
Numbers in table indicate blade number

計を取り付けた。24 個の圧力計のうち、計測精度の確認と圧力計の容量の違いの影響を調べるため、4 組の相似な位置に各 2 個重複して圧力計を取り付けた。

圧力計コードは翼歪みの影響を受けない様に銅パイプの中を通して配線し、2 種類の接着剤及び充填剤を用いて、プロペラに加工された溝を埋め、翼面とのフェアリングを行った。

2.3 計測システム

データ伝送方式は費用の観点から 30 ch の有線 FM テレメータ方式⁶⁾とした。このうち、圧力計測には 24 ch を用いた。翼面上に取り付けられた圧力計からの信号は Fig. 3 に示す様にプロペラ・キャップに取り付けられた防水コネクタを介して、プロペラ軸内に配線されたコードを通り、送

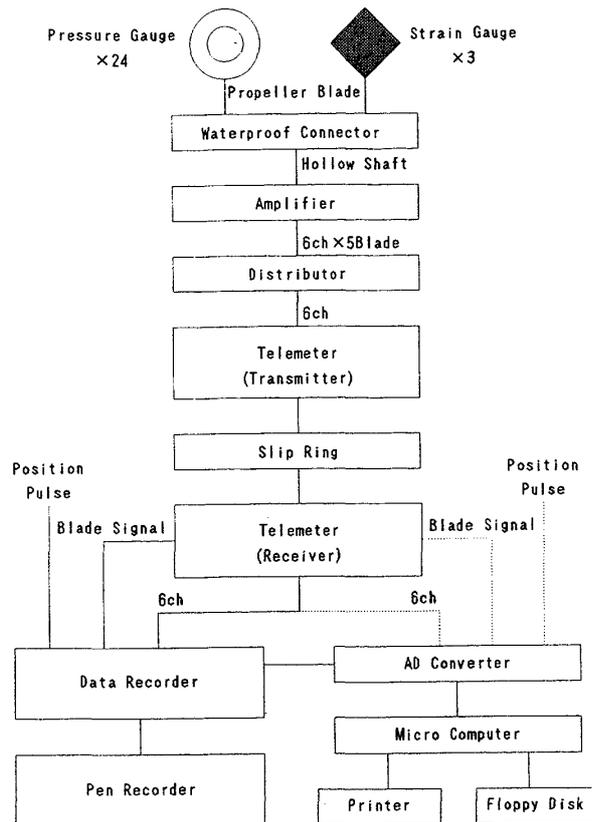


Fig. 3 Flowchart of Measurement

信機に伝送され、増幅された後、スリップリングを介して計測室に設置された受信機に伝送される。受信機には翼数に対応して 5 ブロックのプロペラ翼番号切換えスイッチが付いており、これを切り替えることにより各翼毎、6 ch ずつの同時計測が可能となる。受信機で得られたアナログ信号は一旦データ・レコーダ (共和電業 RTP-670A) に記録し、AD 変換した後、パソコン (NEC PC-9801VX21) によりデータ解析した。送信テレメータ及びスリップ・リングのプロペラシャフト中間軸上への取り付け方法を Fig. 4 に示す。

3. 実船計測

3.1 供試船及び実船状態

実船計測は Fig. 5 に示す運輸省航海訓練所「青雲丸」を供試船として行った。テレメータ送信機は軸室内のプロペラ中間軸に取り付けられ、計測室は上甲板の機関演習室とし、受信機が設置された。本計測では、既存プロペラである通常型プロペラで計測した。供試プロペラの仕様を Table 3 に示す。

本計測は相模湾及び伊豆七島付近で行われ、本船は穏やかな海域を選んで航行された⁶⁾。吃水変化は、燃料消費量からの推定であるが船尾では数 cm 程度であり、殆どなかった。今回の実船実験状態におけるプロペラ回転数に対する船速、スラスト及び馬力の読み値のプロットを Fig. 6 に示

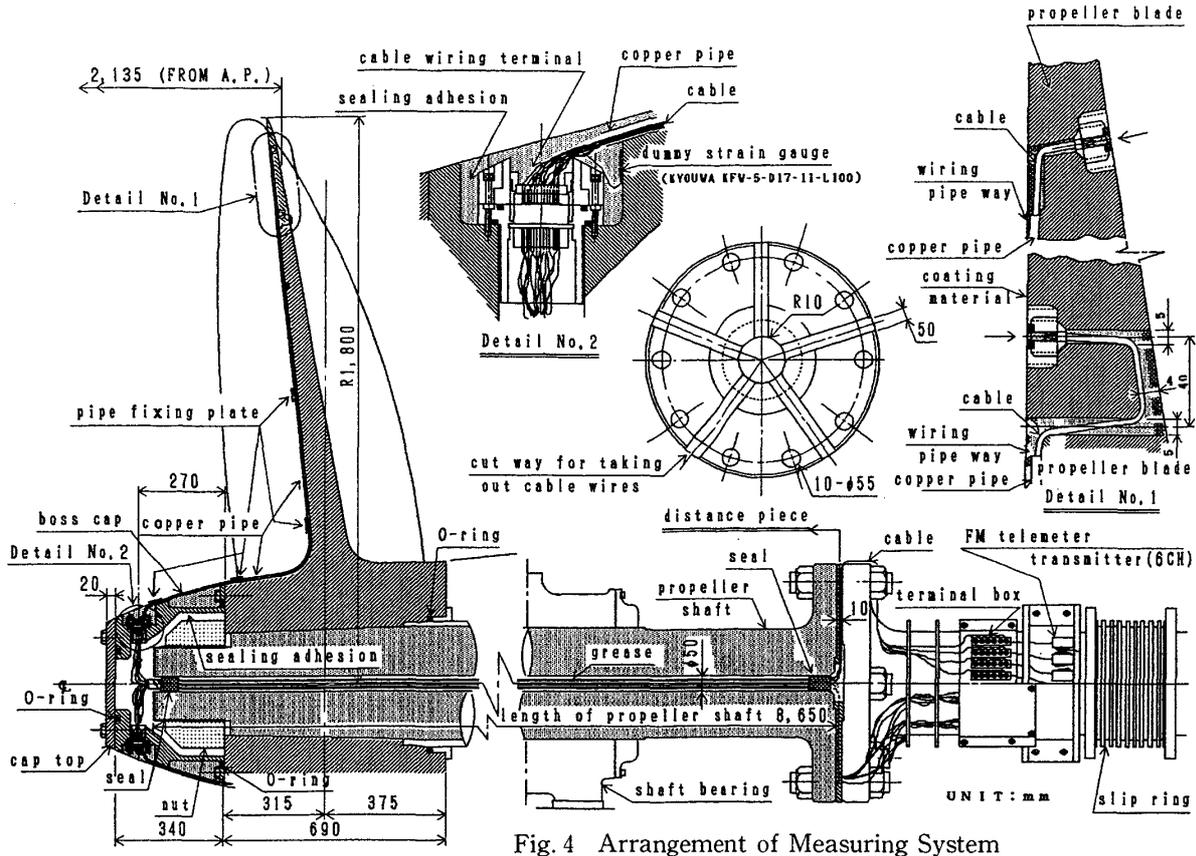


Fig. 4 Arrangement of Measuring System

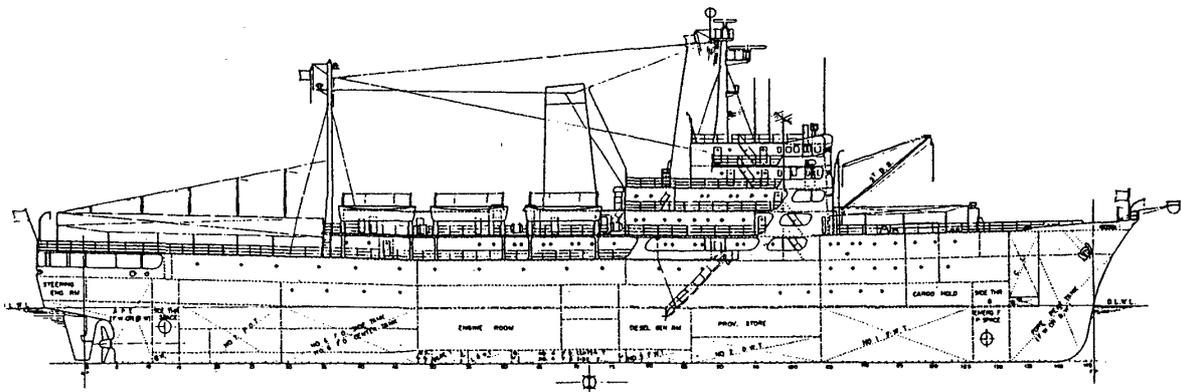


Fig. 5 General Arrangement of SEIUN-MARU

す。回転数と船速は直線関係に、スラストと馬力はそれぞれ回転数の2乗と3乗に比例しており、前進率Jがほぼ一定で実船実験状態が設定されたことが分かる。推力係数 K_T は 0.210, トルク係数 K_Q は 0.0339 と解析された。前進率は船後効率を 1.0 としてプロペラ単独性能曲線より換算すると 0.62 に対応する。

3.2 計測手順と解析方法

翼面圧力計測に先立って、潮流などの影響をできるだけ受けないように、出渠前に圧力計のキャリブレーションを行った。ドック内に注水した後、船体が浮上し、海水の流れがある程度おさまるのを待ってから、キャリブレーション

を行った。翼を 36 度ずつ回しながら 10 点の各位置での圧力計の出力を 60 秒ずつ 20 Hz で取り込み、翼角度位置から幾何学的に算出した静圧との間で回帰計算を行い、キャリブレーション係数を求めた。翼角度位置は、プロペラ軸に直結しているホイールの角度位置を機関室で読み取り、それより求めた。便宜上、静圧は軸心静圧を 0 kg/cm^2 とした。

この時点ですでに No. IV 翼の Ch. 1 (95% 半径位置, 以下 0.95 R の様に表現する, 前縁から 40% 翼弦長位置, 以下 40% C の様に表現する, 背面側) の圧力計が使用不能となっていた。それ以外の圧力計に関しては電圧と圧力との間の

Table 3 Principal Characteristics of SEIUN-MARU

LENGTH	b. p.	105.00 M
BREADTH		16.00 M
DEPTH		8.00 M
DRAFT (DESIGN)		5.80 M
C_B		0.576
DISPLACEMENT		5,781.3 TON
MAIN ENGINE		
DIESEL		5,400 PS × 176 RPM
PROPELLER CENTER FROM BOTTOM		2.01 M
PROPELLER		
DIAMETER		3.600 M
PITCH RATIO		0.950
EXPANDED AREA RATIO		0.650
NUMBER OF BLADES		5
BLADE SECTION		MAU
BLADE THICKNESS RATIO		0.0442
SKEW ANGLE		10.5 DEG
RAKE ANGLE		6.0 DEG
MATERIAL		A1BC3 (Ni-AI-BRONZE)

計測では、まずゼロ点計測を行い、続いて本計測を行った。どちらも、生データをデータレコーダに記録すると共に、一部はその場でも解析を行った。

ゼロ点計測では、プロペラを停止し、船速が0.2 knot 以下になった状態で各翼毎に60秒ずつ20 Hzでデータを取り込み、その平均値に静圧補正を行うことにより、0 Voltの電圧値に対応する圧力値を求めた。静圧補正量は、翼角度位置から幾何学的に算出した。プロペラの回転を停止してから船速が0.2 knot 以下に落ちるまでに、約20分の時間を要した。計測時間は、5翼合わせて約6分であった。

本計測は、プロペラ回転数及び船速が定常に達した状態で行った。現場解析及び一度データ・レコーダに記録したデータを解析する際にも、共に取り込み周波数は1000 Hzとし、プロペラ回転数に関係なく約8.2秒間データの取り込みを行った。5翼を順番に切り替えながら計測するため、同じ翼上の圧力計に関しては同時計測であるが、翼が異なるものに関しては非同時の計測となっている。

このデータはプロペラ・ポジション・パルスを基準として重ね合わせた後、平均した。圧力係数 C_p は

$$C_p = (P - H) / \frac{1}{2} \rho n^2 D^2$$

但し、 P ：計測された翼面圧力（軸心静圧基準）

H ：圧力計位置での静圧（軸心静圧基準）

ρ ：海水の密度

n ：プロペラの回転数

D ：プロペラ直径

プロペラ回転数は本船のメータ表示値の読みではなく、ポジション・パルスの周期から算出した。

4. 計測結果及び考察

4.1 ゼロ点のドリフト

ドック内でのキャリブレーションの時に求めたゼロ点計測値を基準として各計測の前後で計測したゼロ点のドリフトは、壊れた圧力計を除き、実船計測のうち解析の対象となった期間の計測データに関しては最大で約0.1 kg/cm²である。これは、プロペラ回転数が90 RPMのとき、圧力係数 C_p に換算して約0.66に相当する。しかしながら、各計測開始時においてゼロ点計測を分析した結果、本論文で記述する計測については、No. V翼のCh. 1 (0.95 R, 40% C, 正面側) と使用不能となったNo. III翼のCh. 2 (0.9 R, 40% C, 正面側) を除いてドリフトが殆ど無かった。

4.2 一回転中の翼面圧力変化

ゼロ・ドリフトの殆どなかった期間に取得したデータのうち、海象、舵角、プロペラ回転数の安定度などを考慮して解析すべきデータを選定した。プロペラ回転数が70, 90, 110, 149 RPMの時の一回転中の圧力変化の計測値をプロペラ揚力面理論による計算値と共に、Fig. 7(a)~(d)に示す。横軸は翼角度位置であり、縦軸は、上記の圧力係数

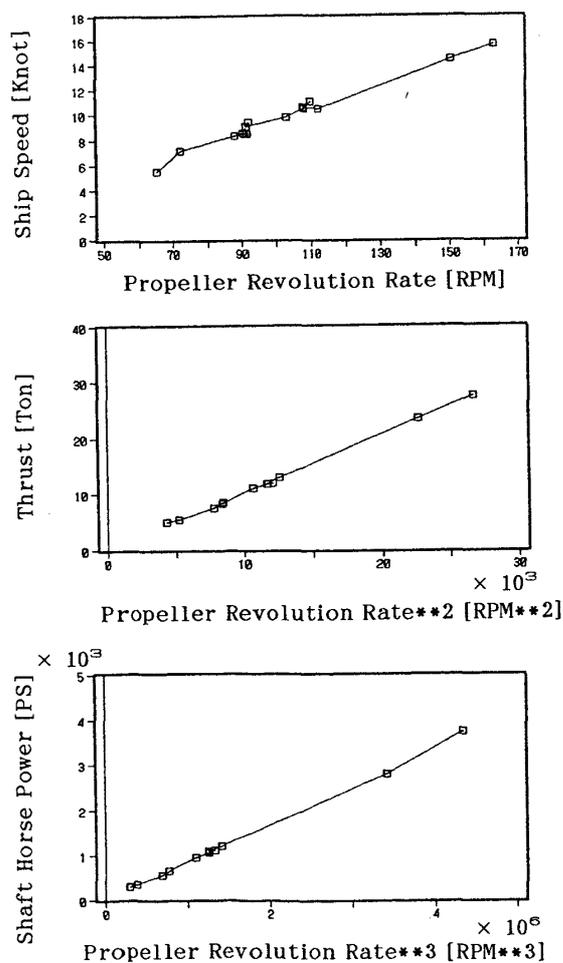


Fig. 6 Experimental Condition Ship Speed, Thrust, Power versus Propeller Revolution Rate.

直線性は良く、相関係数は、No. III翼のCh. 6 (0.7 R, 80% C, 正面側) の0.9993を除いて、全て0.9999以上であった。

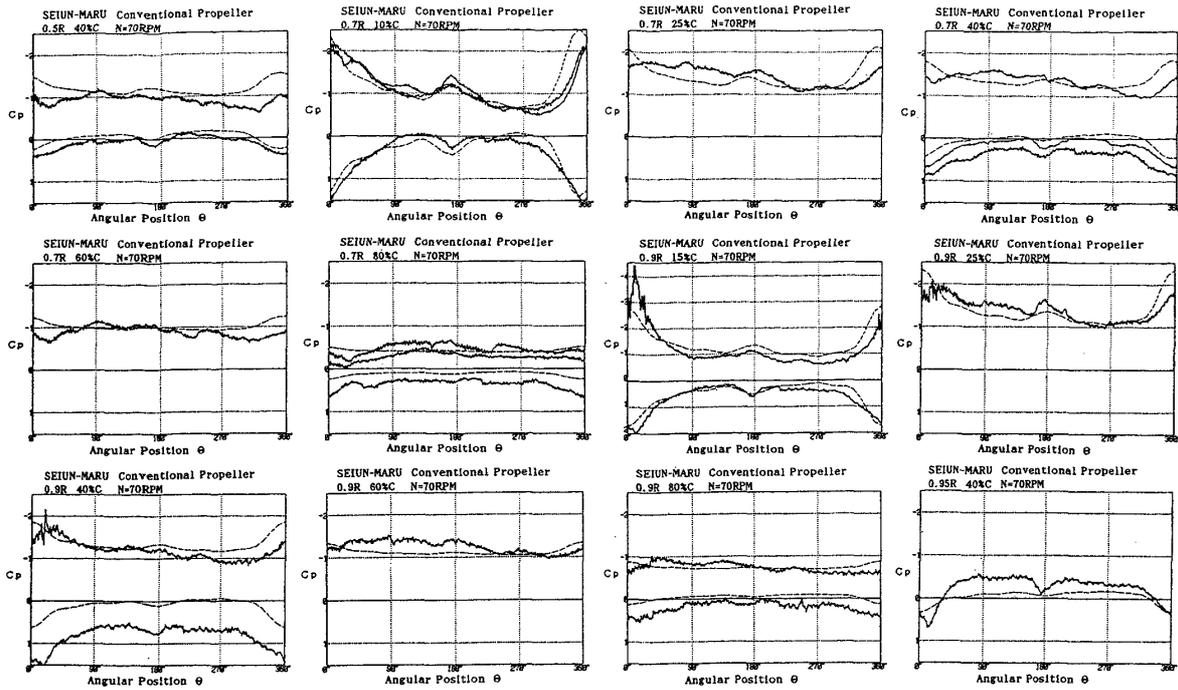


Fig. 7(a) Variation of Averaged Pressure during One Revolution -70RPM-

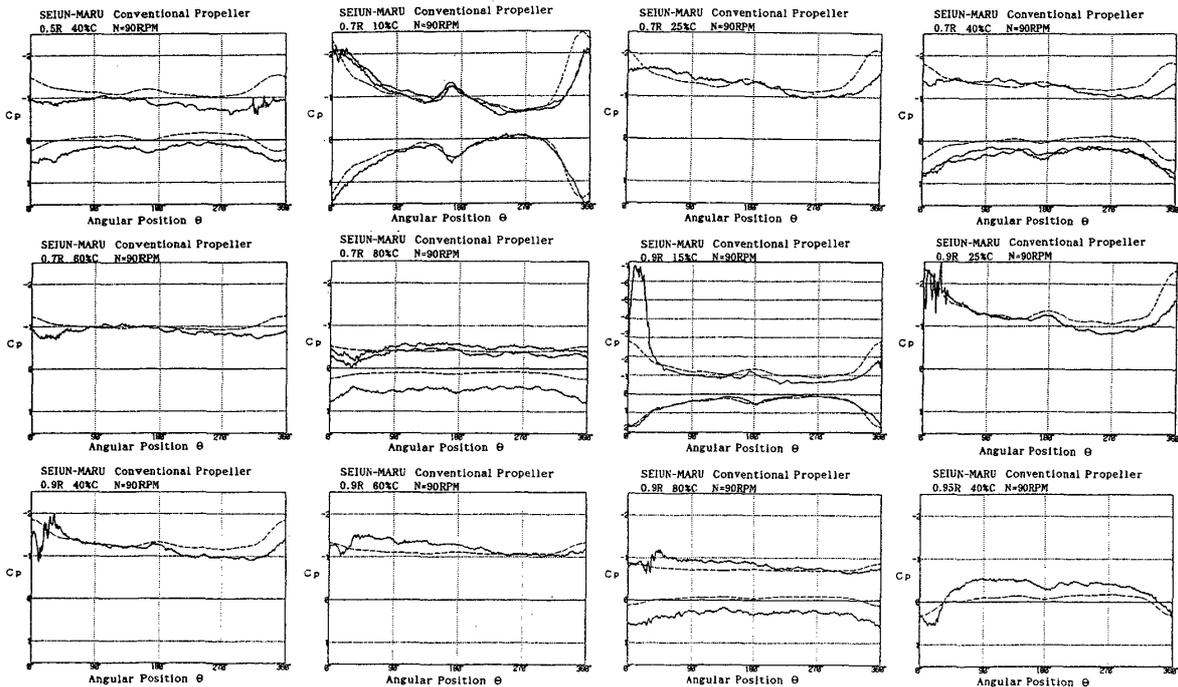


Fig. 7(b) Variation of Averaged Pressure during One Revolution -90RPM-

である。翼角度位置はプロペラのジェネレータ・ラインが鉛直上方に一致した時を0度とし、船尾から見て時計回りに表わしてある。実線は計測値であり、破線はプロペラ揚力面理論による計算値を示す。計算値と実験値との比較については次章で述べる。これらの図中で実船計測途中で壊れた圧力計に関するデータは含まれていない。

Fig. 7の一回転中の圧力変化を示す図のうち、特に翼前縁の圧力計測値が背面側で右下がり、正面側で右上がりのカーブとなる傾向がみられ、円周方向の伴流の影響が捉えられている。この傾向は模型船後方での翼面圧力計測及び圧力分布計算の結果とも定性的に一致する⁷⁾。このことは右舷側でキャビテーションの発生が多いことの説明の一つ

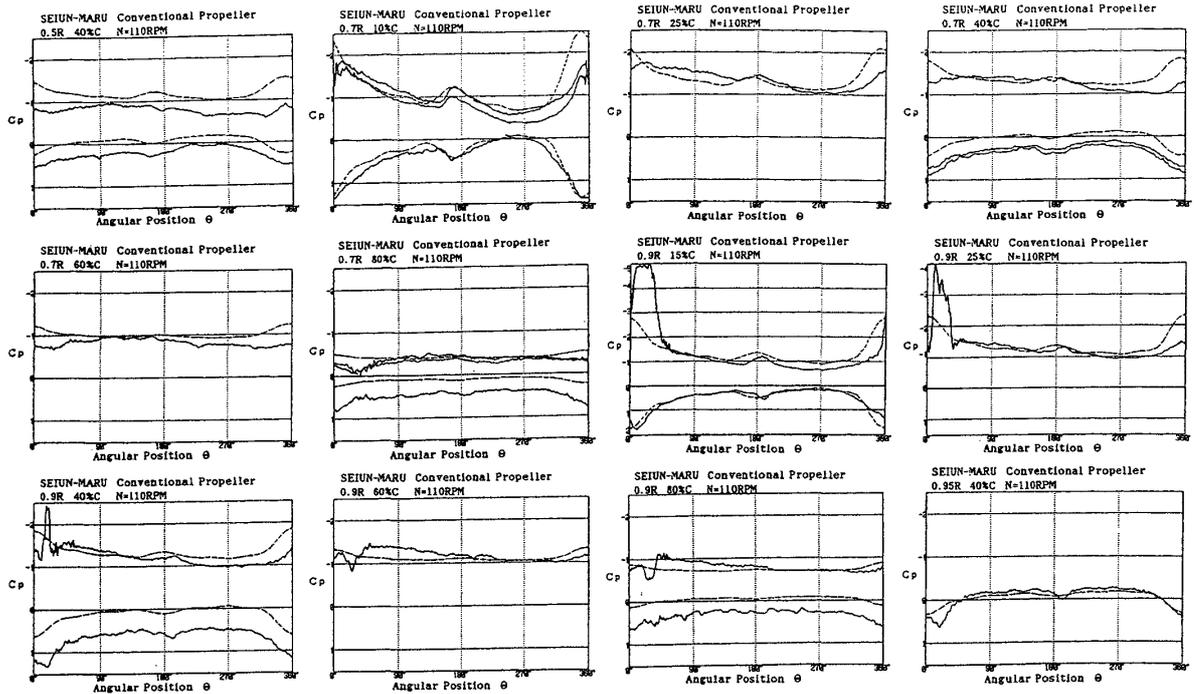


Fig. 7(c) Variation of Averaged Pressure during One Revolution —110RPM—

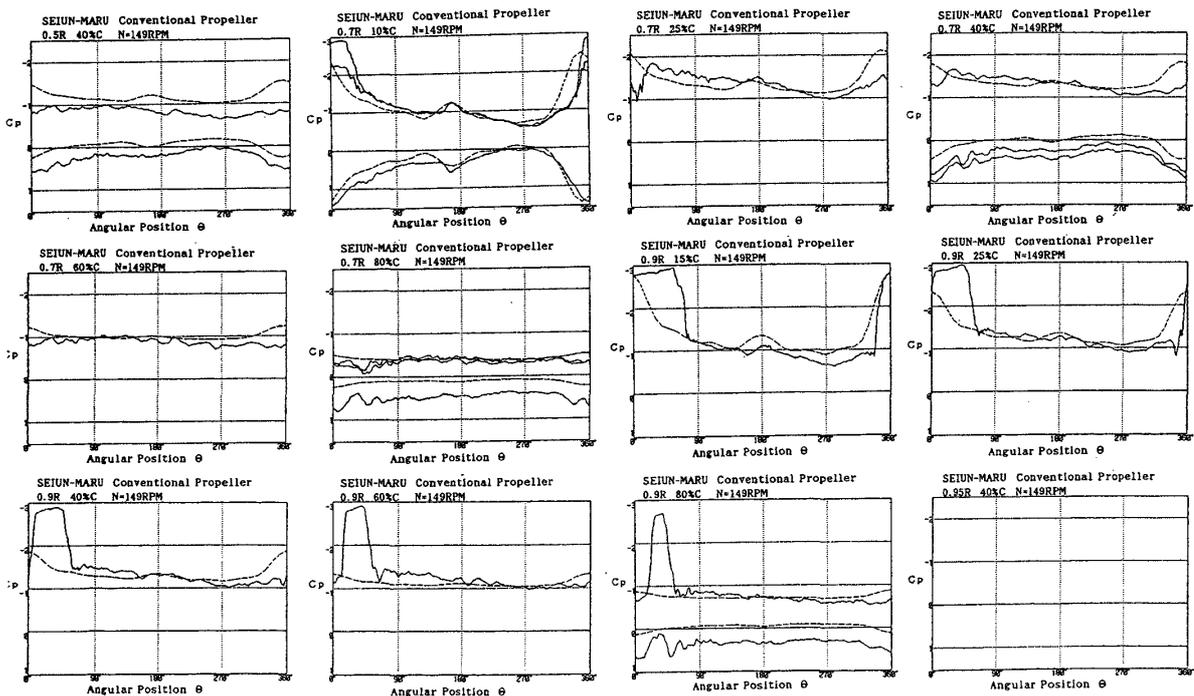


Fig. 7(d) Variation of Averaged Pressure during One Revolution —149RPM—

となるものである。

同じ図において 90 RPM 以上の特に 0.7 R の前縁から 10 % C 位置において圧力変化がほぼ平坦になる部分があり、この圧力孔は、キャビティにより覆われていると考えられる。圧力がわずかに右上りになっているのは、水頭による静圧補正によるものである。キャビティ内の圧力は

$0.03 \pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$ でほぼ蒸気圧 (0.03 kg/cm^2) に近い値となっていた。本計測値は何回転分か (70 RPM で 9 回転, 149 RPM で 20 回転) の平均値であるので、各回転毎に同じようにキャビテーションが一定して発生していることを前提としているが、計測値がほぼ蒸気圧に対応していることから、キャビテーションの発生が極めて周期的であったこと

が分かる。

Fig. 7は平均値であり、データのバラツキをみるため、Fig. 8に計測された平均値化する前の重ね合わせたデータを示す。計測されたデータのバラツキはトップ位置付近を除いては C_p にして約±0.2であった。これは、圧力にすると約±0.03 kg/cm²であり、ほかの回転数でも同程度であった。この圧力は圧力計のカタログ仕様と比べてもかなり小さい。ドック内でのキャリブレーションで得られた圧力計の圧力に対する出力の直線性の良さと、ゼロ点ドリフトの小ささから考えて、このバラツキのほとんどは本船のピッチング運動によるプロペラ位置での静圧の変動によるものと考えられる。約8秒間の計測値を平均した値の持つ誤差は、そのデータ数の平方根に逆比例すると考えて良いから、トップ付近及びキャビテーションの影響を受けている変動の激しいところを除き、圧力での誤差は±0.01 kg/cm²となることが期待され、Fig. 7の各グラフの C_p の誤差は、プロペラ回転数が70 RPMでは0.11, 90 RPMでは0.06, 11 RPMでは0.04, 149 RPMでは0.02と評価することも可能である。しかしながら、キャビテーションが発生する程度の低い圧力の計測は、上記のキャリブレーションからは外挿となり、総合的には本圧力計測の誤差は約±0.03 kg/cm²と考えられる。さらに、系統的な誤差として、本船の航走による船尾トリムの変化に応じたプロペラ軸心静圧の変化によるものが考えられるが、前述のように船尾での喫水変化はほとんど無かったので、無視できるほど小さいと言えよう。

トップ付近はキャビテーションが発生した時としない時で圧力分布が異なり、それぞれの場合では安定した計測値となる。Fig. 9に圧力の時系列変化を示す。この例は90 RPMの時の圧力変化であり、キャビテーションの発生が不安定な場合の計測値を示したものである。圧力計がキャビティに覆われる時とキャビティの外になるときの2回、キャビティの崩壊圧の影響が計測されている。

また、プロペラ回転数が異なる場合でも、同じ圧力計位置での圧力係数は、キャビティに覆われている部分を除いてほぼ一致している。相似則が成り立っていることから判断すると、今回の計測は、絶対圧力計測としても十分信頼できるものであると考えることができる。

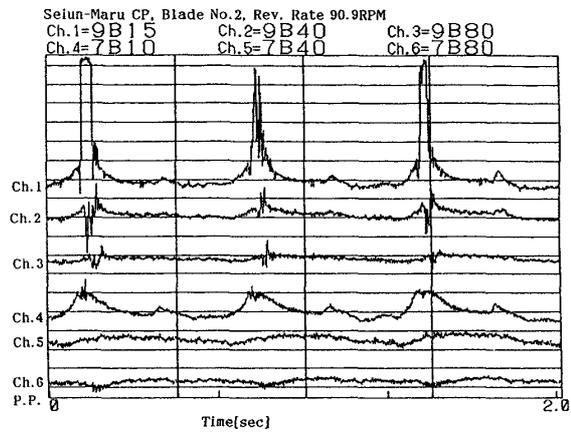


Fig. 9 Pressure Signals before Data Averaging

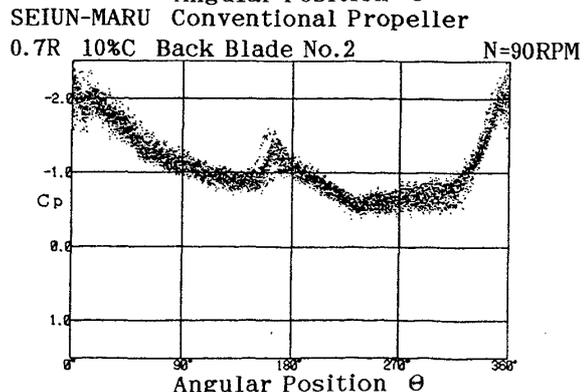
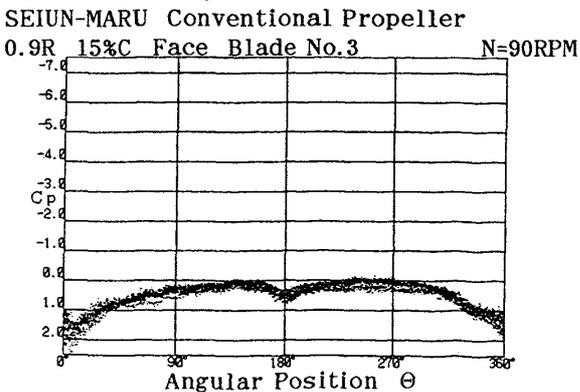
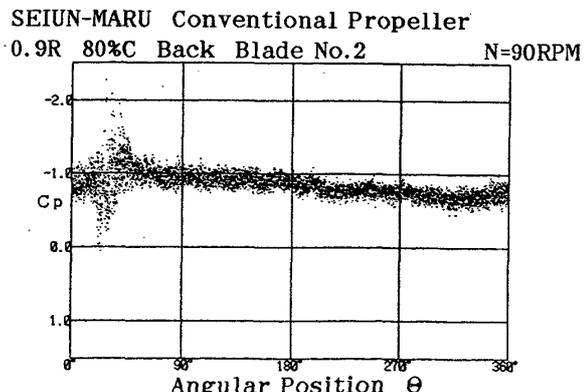
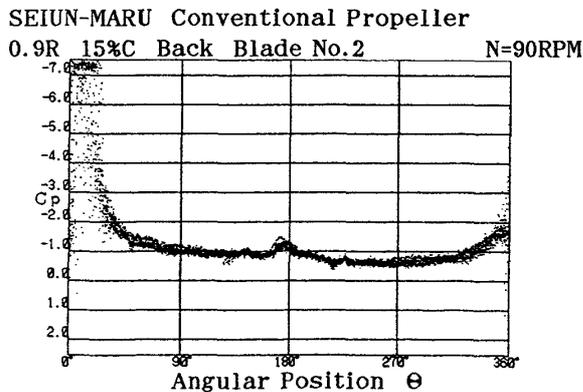


Fig. 8 Scatter of Measured Pressure during Data Acquisition

149 RPM においては 0.7 R の 40% C と 80% C 及び 0.9 R の 80% C のキャビティに覆われていない正面側において翼角度位置 30~40 度付近で圧力が負圧の方向に山を持ち、その後波うっているのが観察された。全ての圧力計位置で、そのピークが生ずるタイミング、即ち、翼角度位置はほぼ一致しており、他の部分に生じているキャビテーションの影響(例えば隣の翼の TVC の Break down⁸⁾)などと考えられる。

4.3 翼弦方向と半径方向の圧力分布

90 RPM の計測時の 0.7 R と 0.9 R における翼弦方向の圧力分布を Fig. 10 に、40% C における半径方向の圧力分布を Fig. 11 に、それぞれ、計算値と共に示す。

Fig. 10 の翼弦方向の圧力分布に関して、70 RPM と 110 RPM の計測値と同様に、翼角度位置 90° 及び 180° の時に 0.9 R の背面側の圧力分布は M 字形の圧力分布となる。これは、ハイリー・スキュード・プロペラの模型試験⁹⁾で計測された 0.7 R の翼弦方向の圧力分布に見られた特徴と類似しており、翼端渦の回り込み¹¹⁾や前縁剝離渦の存在などによる影響と思われ、興味深い現象である。

Fig. 11 では、翼角度によらず 0.95 R の正面側の計測値が 0.5 R 及び 0.7 R のそれに比べて大きく負圧側にジャンプしている。0.9 R の正面側 40% C と 0.95 R の背面側 40% C での圧力計の破壊が惜しまれる。

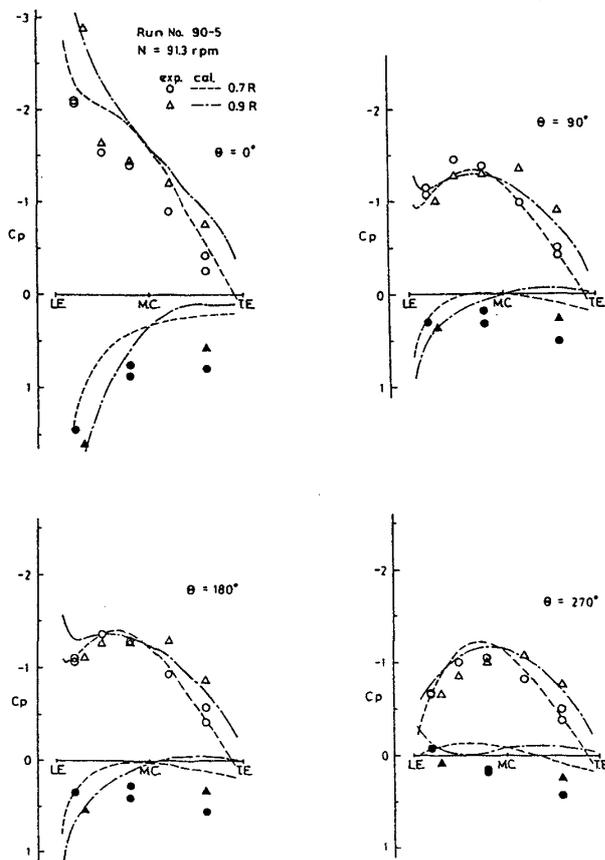


Fig. 10 Chordwise Pressure Distribution at 0.7 R & 0.9 R

5. 計算結果との比較

5.1 実船推定伴流分布

実船計測で得られた圧力計測値とプロペラ揚力面理論による計算値との対応を調べることは計算値ばかりでなく、計測値の信頼性を知る上で重要である。ここでは、核関数展開法¹⁾に基づく非定常プロペラ揚力面計算プログラムを用いた計算値と計測値との比較を示す。入力として用いた伴流分布は SR183 研究部分において HSP の設計に用いた実船推定伴流分布⁹⁾を本計算用に内挿したものである。上記の実船推定伴流分布を Fig. 12 に示す。今回の計算では円周方向の伴流も考慮するため、曳航水槽での計測値をそのまま用いた。作動条件としては青雲丸に備え付けのラスト計による計測値に基づき、 $K_T=0.210$ を採用した。

5.2 一回転中の翼面圧力変化

上記の条件における各プロペラ回転数での一回転中の翼面圧力変化についての計算値と計測値の比較を Fig. 7 (a)~(d) に示す。ここでは実船プロペラ回転数が 90 RPM の場合の比較を考察の対象とした。この理由はキャビテーションの発生が少なく、かつ、回転数が安定し、計測値そのものが比較的大きいことにある。

0.5 R の 40% C 位置での一回転中の圧力分布に関しては正面側及び背面側ともに計算値が実験値より低めである。定性的にはほぼ一致しており、相当二次元翼の採用に基づく翼面上の誘導速度の過大評価が原因と考えられる。

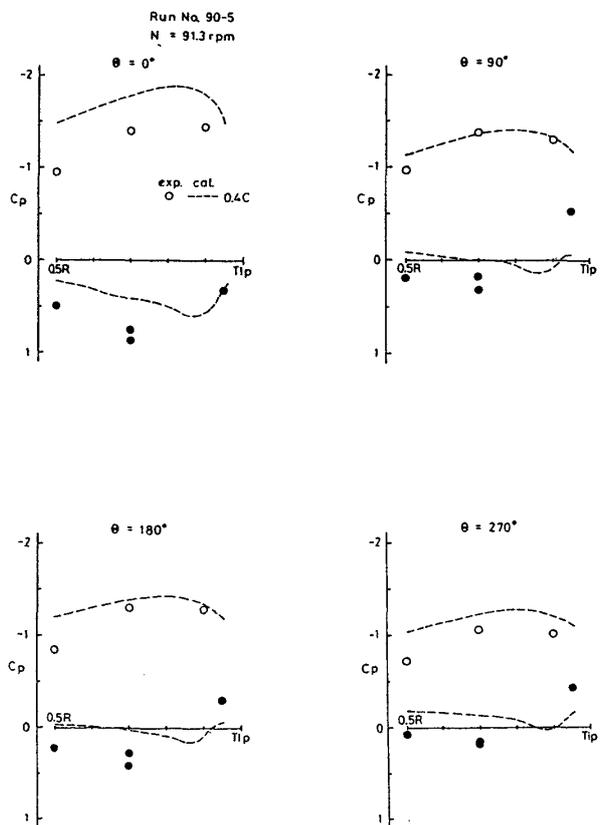


Fig. 11 Radial Pressure Distribution at 40% C

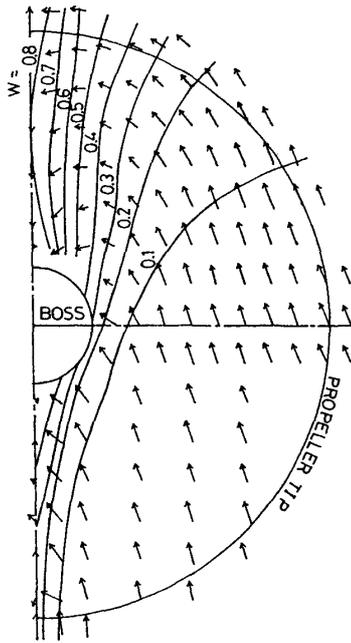


Fig. 12 Axial and Tangential Wake Distribution Estimated by Sasajima & Tanaka's Method

この様な傾向は模型プロペラでの計測値と計算値との比較⁴⁾でも見られた。

0.7 R の 10 % C での圧力分布に関して両者の一致は背面側及び正面側とも非常に良い。背面側の圧力の計測値がトップ付近において計算値よりピークが小さく、位相が遅れているが、この原因としてはプロペラの吸い込み作用、実船推定伴流が狭まったこと並びに翼前縁の剝離とが考えられる。0.7 R の 25 % C, 40 % C, 60 % C 及び 80 % C での背面側での圧力の一致はトップ付近を除き良い。0.7 R の 40 % C 及び 80 % C の正面側での圧力は 0.5 R での傾向と同一である。

0.9 R の 15 % C の背面側で圧力分布に関しては、0°~30°の付近でキャビテーションにおおわれたと考えられる負圧の大きなピークの領域を除き、計測値と実験値との対応は良い。キャビテーションの発生量が少なかったこともあり、プロペラとキャビテーションとの三次元干渉影響¹⁰⁾が少なかったものと考えられる。

0.9 R の正面側での一致は非常に良い。0.9 R の 25 % C, 40 % C, 60 % C 及び 80 % C とも背面側は比較的一致が良い。

一方、翼角度 0°~30° 付近においてキャビティの崩壊圧によると思われる波形の乱れが見られる。十数回転分の平均値であるため、波形のなまりと考える。個々の波形は Fig. 9 に見られるごとくであるが、計測系全体の周波数応答が約 300 Hz と低いことから考えると、この計測波形自身も崩壊圧に関してはやはりなままっていると考えられる。

左舷側での圧力分布に関して、0.9 R の前縁側で計算値が計測値より低めとなっているが、この原因は不明である。

0.9 R の正面側 80 % C での計測値は他の正面側での計測値と計算値との対応と共通しており、模型プロペラでの計測結果と計算値との比較を考慮すると、計算値の精度が不十分であるために生じたものと考えられる。

0.95 R の 40 % C の正面側での計算値は 1 回転分の平均値では計算値と一致しているものの、圧力振幅については計算値の方が小さい。これは核関数展開法を始めとするモード関数法に基づく計算結果で顕著に見られる翼端特異性の存在により、精度が低下したものと考えられる。

全体として、前縁側では背面側及び正面側とも計算値と計測値との一致は非常に良く、背面側全体でも一致は良好と言える。一方、正面側では計算値は計測値より低めであり、上記の計算法が持つ幾つかの欠点が原因と考えられる。

5.3 翼弦方向と半径方向の圧力分布

Fig. 10 での計算と実験との比較から、プロペラ翼角度位置が 0 度の時を除き、背面側では両者は定量的にも定性的にも非常に良く一致する。正面側に関しては、両者は定性的に一致しており、又、この傾向は模型でも見られたことから、今回用いた計算法が抱えている問題点が明らかになったと考えるべきであろう。

Fig. 11 での比較に関しても、同様な傾向がみられる。ここで、0.9 R での計測値が無いので明確には結論できないが、0.95 R の Face 側での計測値が大きく負圧側にジャンプする傾向は計算によっても捉えられている。

6. 結論及び謝辞

以上の研究の結果、次のような結論を得た。

1. 圧力が約±0.03 kg/cm²の精度内で計測が可能な実船翼面圧力計測法を開発した。即ち、本計測では圧力係数で表示すると 70 RPM に対して約±0.3, 149 RPM に対しては約±0.07 の精度範囲で計測がなされたと考えられる。
2. 通常型プロペラに関する今回の計測結果とプロペラ揚力面計算値との比較を行った結果、伴流分布として実船推定伴流を用いると、プロペラ揚力面理論による計算値は前縁側で計測値と一致する妥当な値を与えるが、翼端部、翼根部、後縁側では計算値は低めの圧力係数を与えることが分かった。プロペラ揚力面理論の改良すべき点が明らかにされた。
3. 実船のプロペラに発生するシート・キャビテーション内の圧力はほぼ蒸気圧に等しく、シート・キャビティによるキャビテーション発生域外の圧力分布に及ぼす影響は少ない。

本計測結果は高レイノルズにおけるプロペラ理論評価のための貴重なデータとして活用されることが期待される。

本研究の一部は(社)日本造船研究協会との共同研究「ハイリー・スキュード・プロペラの特異性に関する研究」の一部として行われた。この研究プロジェクトの実現に尽力された運輸省海上技術安全局技術課佐伯誠治元係長に感

謝致します。上記研究会の研究において、貴重な示唆と助言を頂いた東京大学工学部船舶海洋工学科加藤洋治教授 (SR 206 研究部会長) 日本海事協会佐々木康夫部長及び横浜国立大学工学部船舶海洋工学科池畑光尚教授を始めとする委員各位に感謝致します。実船推定伴流分布データは神戸製鋼(株)山崎正三郎博士に提供して頂きました。

この実船実験においてきめ細かいご援助を賜った運輸省航海訓練所研究調査部研究二課木村正次課長、青雲丸望月二郎船長並びに青雲丸三間忠機関長に心から感謝致します。

又、本計測の実施に協力して頂いた三井造船昭島研究所三池敏之氏及びホクト電子研究所斉藤正氏の他、無振動高品質船舶の開発に関する研究プロジェクトのため同時に乗船し、実船実験状態計測に協力をされた三菱重工業(株)谷林英毅博士を始めとする関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小山鴻一：不均一流中のプロペラ揚力面の实用計算法と計算例，日本造船学会論文集，第 137 号 (1975)
- 2) Hoshino, T.: Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method, J. of SNAJ, Vol. 165 (1989)
- 3) 児玉良明：プロペラ周りの流場の NS Solver による計算，第 54 回船舶技術研究所研究発表講演集，(1989)
- 4) 右近良孝：通常型及びハイリースキュードプロペラの翼面圧力計測について，一キャビテーションが発生しない場合一，日本造船学会論文集，第 165 号，(1989)
- 5) 内田誠他：実船可変ピッチプロペラの翼荷重測定，関西造船協会誌；第 211 号，(1989)
- 6) 第 206 研究部会，ハイリー・スキュード・プロペラの特性解明に関する研究，委員会報告書，日本造船研究協会，(1990)
- 7) 高橋通雄，奥正光：MAU 型プロペラのキャビテーション特性に関する研究一第 2 報，不均一流における翼面圧力分布一，日本造船学会論文集，第 143 号，(1978)
- 8) English, J.; Cavitation Induced Hull Surface Pressures Measurements in Water Tunnels, RINA Symp. on Propeller Induced Ship Vibration, London, (1979)
- 9) 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一報告書，研究資料 No. 358，日本造船研究協会，(1983)
- 10) Yuasa, H.; Application of the Vortex Lattice Method to the Three Dimensional Theory of a Cavitating Propeller, J. of SNAJ, Vol. 156, (1984)
- 11) 石井規夫：チップボルテックスのプロペラ性能に及ぼす影響について，日本造船学会，平成 2 年秋季講演会発表予定 (1990)