

コンテナ船用プロペラの高次船尾変動圧力

(その2 換装用プロペラの設計と比較模型実験)

正員 山崎 正三郎* 吉坂 哲昭*
正員 高畑 真一*

Higher Order Pressure Fluctuation of Propeller for Container Ship
Part 2 Design of Propellers Newly Installed and Their Comparative Model Experiments

by Shosaburo Yamasaki, *Member* Tetsuaki Yoshisaka
Shinichi Takahata, *Member*

Summary

Three (3) propellers were newly designed for the container ship on which comparatively large pressure fluctuation of higher order blade frequencies (2nd~5th) was observed. 1) The following concepts were applied in the new propeller design in order to decrease the propeller tip-vortex cavitation, consequently to decrease the pressure fluctuation of higher order blade frequencies, without changing the number of propeller blades.

- ① Tip-unload
- ② Smaller diameter
- ③ Increase of blade area
- ④ Increase of skew

Model experiments were performed in the cavitation tunnel by using these propeller models. These propellers were evaluated after investigating the repeatability of the fluctuating pressure and the effects of the number of propeller revolutions (at the test) and the cavitation number on the fluctuating pressure. The fluctuating pressure of one (1) of these propellers was found to have decreases by about 40 % on average.

1. 緒言

実船(コンテナ船)において比較的大きな高次船尾変動圧力(2次~5次)が確認されたので、そのプロペラを対象としてキャビテーションタンクで模型実験をおこない、キャビテーション写真と変動圧力波形解析から、その原因がチップボルテックスキャビテーションであることを前報¹⁾で報告した。

この高次船尾変動圧力を軽減するための対応策として、
(1) プロペラ流場の改善: WID²⁾, 船体フィン³⁾等の付加物の装着

(2) プロペラ変更: 6翼プロペラ, 新設計4翼プロペラ, 翼面フィン

が考えられたが、装着あるいは換装にともなう振動以外の問題発生、確実性、コスト等から新設計4翼プロペラを進めることにした。

設計は2回にわたり、計3個の4翼プロペラを設計した。それらのプロペラモデルを用いて4回にわたって模型実験を実施し、高次変動圧力の再現性、高次変動圧力へのプロペラ試験回転数、キャビテーション数の影響を調査した上で各プロペラの優劣を判断した。

本報告では、この3個の4翼プロペラ設計の概要および模型実験結果を報告する。

2. プロペラ設計

2.1 設計条件と設計方針

直径、ピッチの設計条件は Full, CSO(常用出力)であり、

* 常石造船(株)設計本部

船速、馬力等を Table 1 に示している。プロペラ起振力、キャビテーション、翼応力は、Full & Ballast, MCO(連続最大出力)(BHP 14240ps×126.7rpm)で検討した。

その他のプロペラ性能上問題なく、高次船尾変動圧力を減少させるために、下記の設計方針でプロペラ設計を進めた。

- (1) 翼数は現装プロペラと同じ、4翼とする。
- (2) 船尾変動圧力の1次翼振動数成分も減るように、スキューを40°とする。
- (3) キャビテーション、とくにチップボルテックスキャビテーションを減少させるために、チップアンロードとする。(遞減ピッチ分布とする)
- (4) チップクリアランスを増やすために、直径を現装プロペラより小さくする。
- (5) キャビテーションを減少させるために、翼面積を増やす。

れた。

- (6) 軸系の振り振動共振の関連で、重量、慣性モーメントを現装プロペラから大きく変化させない。
- (7) プロペラ軸を船内に引き込まずにプロペラを取り外せるように、プロペラアパーチャを考慮してプロペラレーキを決める。
- (8) プロペラボス形状を同一とする。

2.2 設計結果

上述の条件を考慮して、3個のプロペラ(MPNO. 91-02, 91-03, 91-05)を設計した。それらのプロペラ主要目を現装プロペラ(MPNO. 91-01)と比較して Table 2 に示す。モデルと実船との寸法比は1/23.2である。

MPNO. 91-02: 高次変動圧力の軽減をねらって、上記の設計方針にそって設計したプロペラ

MPNO. 91-03: 高次変動圧力の軽減をほとんど考えずに設計したプロペラ

Table 1 Propeller design condition

Brake Horse Power (CS0)	ps	12100.0
Number of Propeller Revolution (CS0)	rpm	120.5
Ship Speed : Vs (CS0)	kt	19.0
1 - ws		0.760
Classification		LR

Table 2 Main particulars of propeller models

Model Propeller Number		MPNO. 91-01	MPNO. 91-02	MPNO. 91-03	MPNO. 91-05
Number of Blades		4			
Diameter (Model Scale)	mm	254.3	241.4	245.5	241.4
(Full Scale)		5900.0	5600.0	5700.0	5600.0
Pitch Ratio		0.907	0.961	0.914	0.964
Expanded Area Ratio		0.549	0.700	0.630	0.700
Boss Ratio		0.161	0.170	0.167	0.170
Skew Angle	deg	31	40	40	40

MPNO. 91-05: MPNO. 91-02の模型実験結果をベースに、翼先端付近のキャビテーションをさらに改善しようと翼幅分布を修正したプロペラ(若干、ピッチ分布も変更している)

ピッチ分布、翼幅分布(実船寸法)をそれぞれ、Figs. 1, 2で比較している。

翼先端付近の性能特性の概要を調べるために、非線形揚力面理論計算⁹⁾による有効迎角と有効キャンバーをそれぞれ、Figs. 3, 4に示している。0.8Rより先端側において、現装プロペラと比較してMPNO. 91-03は有効迎角、有効キャンバーともにやや大きい、MPNO. 91-02, 91-05は小さい。(MPNO. 91-02の有効キャンバーは0.9Rより翼先端側でやや大きい)

3. 模型実験(キャビテーション観察と変動圧力計測)

3.1 試験状態

模型実験は日本造船技術センターのキャビテーションタンクで実施した。

伴流分布、計測配置(プロペラ後方の舵装着等)、計測点、エアークンテント等は前報¹⁾と全く同じである。

標準試験状態を Table 3 に示す。Ballast, MCO 状態であり、これを標準とした。

3.2 再現性とカーボランダムの影響

(1) 概要

船尾変動圧力計測の再現性、特に2次翼振動数以上の高次成分についての報告がほとんどないので、前報¹⁾ではMPNO. 91-01について、前縁へのカーボランダム塗付の影響調査とあわせて3回の計測結果を報告し、再現性はまずまずであることを述べた。

今回は、その再確認をすることとプロペラの差が計測誤差によるものではないことを確認するために、MPNO. 91-02については3回(3回目にカーボランダム塗付)、MPNO. 91-05については2回(2回目にカーボランダム塗付)にわたり、標準状態で変動圧力を計測した。

(2) 結果

計測結果を Fig. 5 と Fig. 6 にまとめた。

Fig. 5 は MPNO. 91-02 の変動圧力振幅(無次元値)の左右舷方向分布を、Fig. 6 は MPNO. 91-05 のそれを示して

いる。MPNO. 91-02, 91-05 とともにデータのバラツキは、前報⁷⁾で報告した MPNO. 91-01 の結果とおおよそ同じであるが、MPNO. 91-05 の 3, 4 次翼振動数成分のバラツキがやや大きい。

3.3 プロペラ試験回転数の影響

(1) 概要

プロペラ試験回転数を変更すれば、変動圧力振幅(無次元値)が変化することが知られている⁵⁾。また、キャピテーシ

ョンタンクや計測装置の共振等は避けねばならない。今回のプロペラ比較については、翼数、プロペラ試験回転数が同一であり、また、日本造船技術センターの標準試験回転数で実験しているので、その影響は小さいと思われる。しかし、プロペラ優劣の判断にできるだけ間違いがないように、MPNO. 91-01, 91-02, 91-05 について許容される限度まで回転数をあげて、プロペラ試験回転数の影響を調査した。

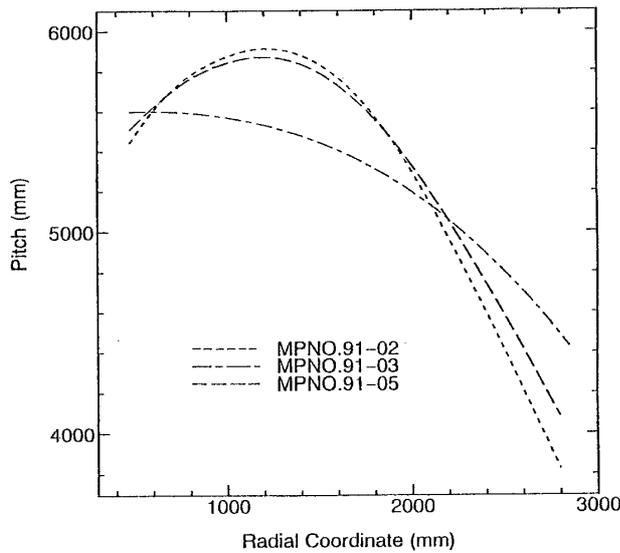


Fig. 1 Pitch distribution

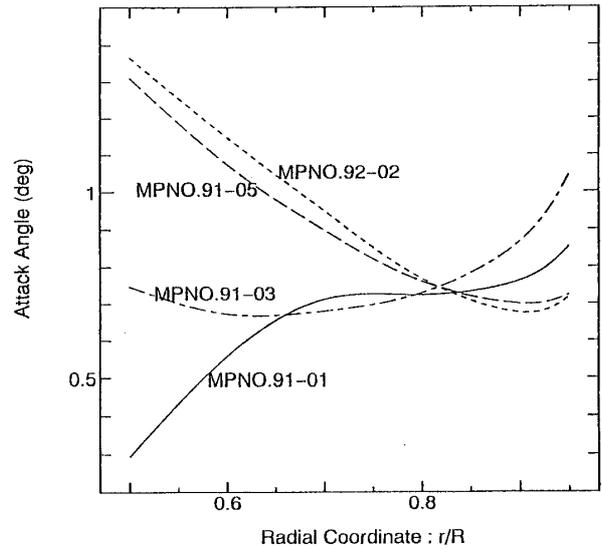


Fig. 3 Effective attack angle

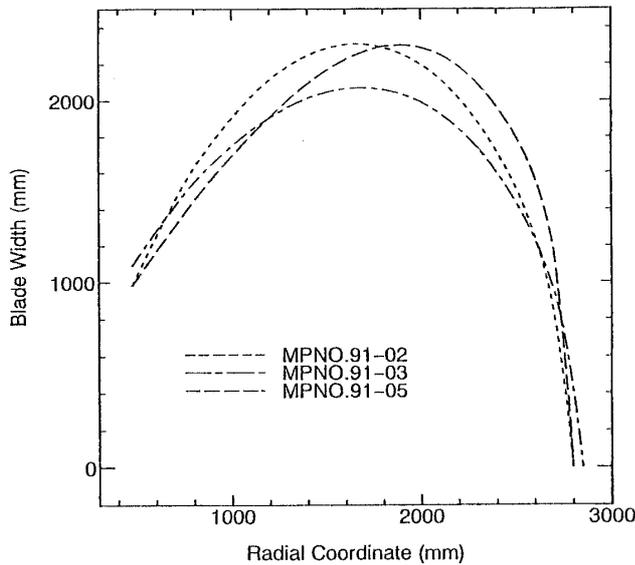


Fig. 2 Blade width distribution

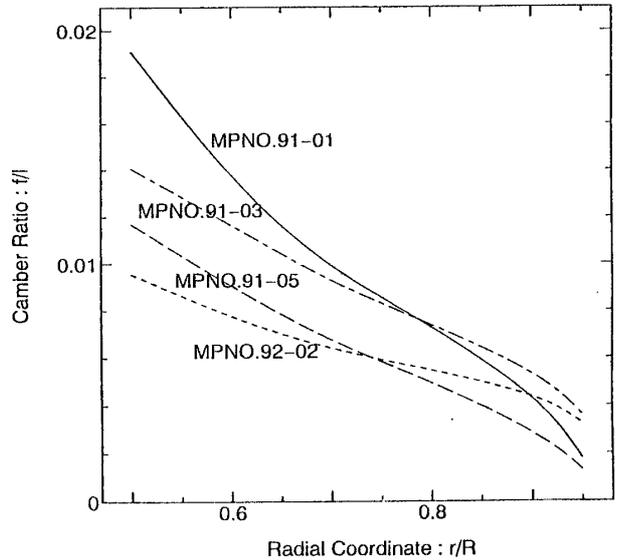


Fig. 4 Effective camber ratio

Table 3 Test condition

Model Propeller Number	MPNO. 91-01	MPNO. 91-02	MPNO. 91-03	MPNO. 91-05
KT	0.168	0.196	0.186	0.200
$\sigma n (= (P - P_v) / \rho (nD)^2 / 2)$	1.70	1.84	1.78	1.89
Flow Field	in Wake Distribution			

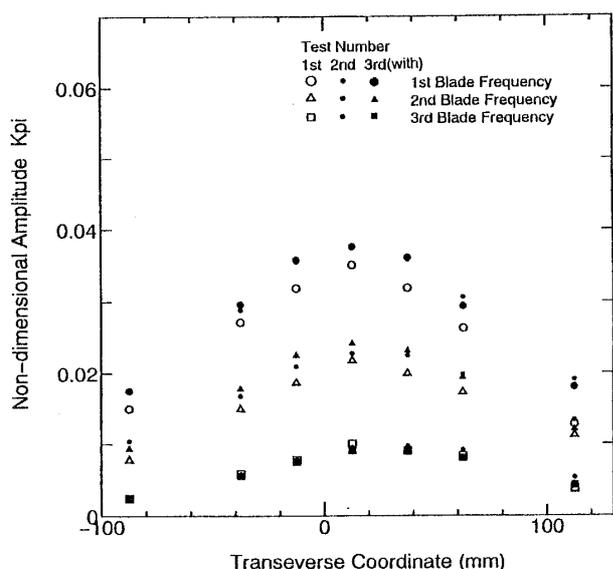


Fig. 5 a Fluctuating pressure of MPNO. 91-02 (1st-3rd) : Effect of repeatability and carborundum

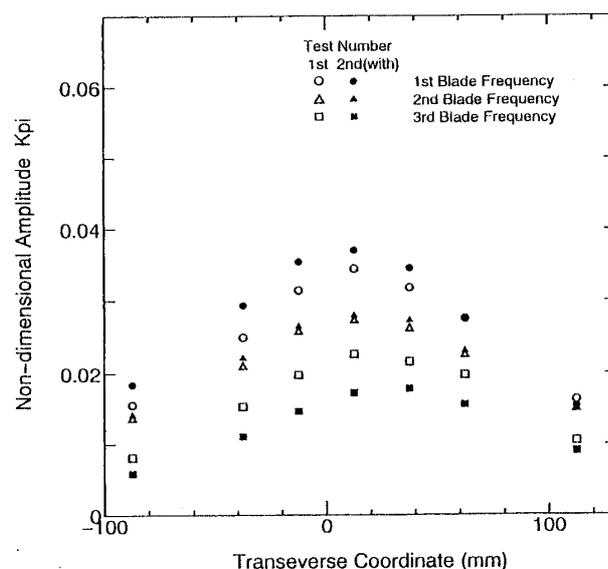


Fig. 6 a Fluctuating pressure of MPNO. 91-05 (1st-3rd) : Effect of repeatability and carborundum

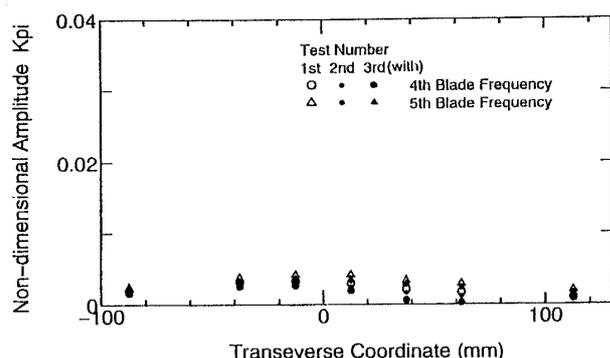


Fig. 5 b Fluctuating pressure of MPNO. 91-02 (4th-5th) : Effect of repeatability and carborundum

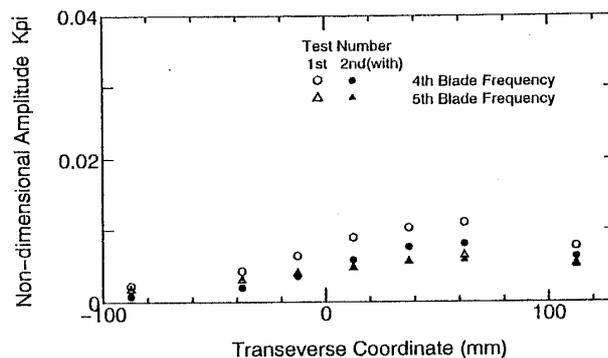


Fig. 6 b Fluctuating pressure of MPNO. 91-05 (4th-5th) : Effect of repeatability and carborundum

(2) 結果

横軸にプロペラ試験回転数 (rpm) をとり、縦軸にプロペラほぼ直上点 (Pick-up P3) の変動圧力振幅 (無次元値) をとって、Fig. 7 に MPNO. 91-01, 91-02, 91-05 の結果をプロットしている。日本造船技術センターの標準試験回転数は $110/Z$ rpm (Z : プロペラ翼数) で決定されるので、4 翼プロペラでは 27.5 rpm が標準である。

図から次のことがいえる。

- ① 1 次～5 次翼振動数のすべての次数成分とも、プロペラ試験回転数によってある程度のバラツキがみられる。
- ② 1 次翼振動数については、プロペラ試験回転数の増加にともない、変動圧力の増加がみられ、2 次についてもややその傾向がみられる。3 次以上ではほぼ一定であるが、値が小さいこともあって、試験回転数の変化にともなう変動圧力振幅のバラツ

キにより、MPNO. 91-01 と MPNO. 91-05 が一部逆転しているところがある。

- ③ 1 次～3 次翼振動数について、MPNO. 91-01, 91-05 と比較して明らかに 26 rpm で小さな谷がみられる。
- ④ 今回実施したプロペラ試験回転数の範囲では、2 次以上の翼振動数について、MPNO. 91-01, 9105 と比較して明らかに MPNO. 91-02 の変動圧力振幅は小さい。

3.4 キャビテーション数の影響

(1) 概要

前報¹⁾では、MPNO. 91-01 について、標準状態でキャビテーション数のみを 1.4 から 3.5 まで変更した変動圧力結果を報告した。今回、MPNO. 91-02 についても同様の計測を実施して MPNO. 91-01 との比較を行った。

(2) 結果

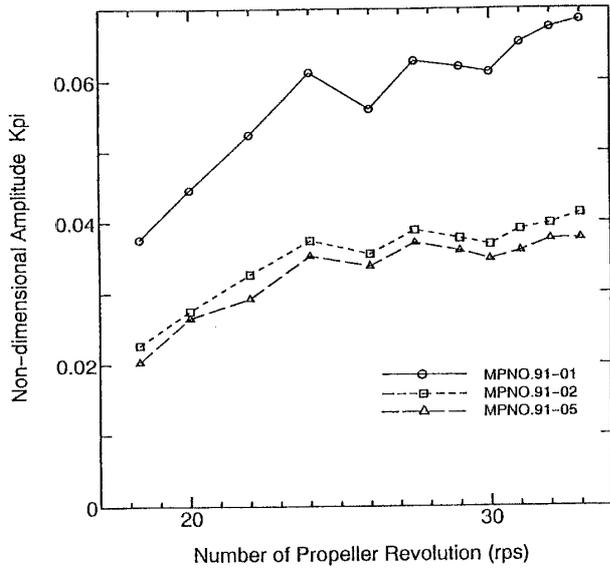


Fig. 7 a Amplitude of fluctuating pressure (1st): Effect of number of propeller revolution

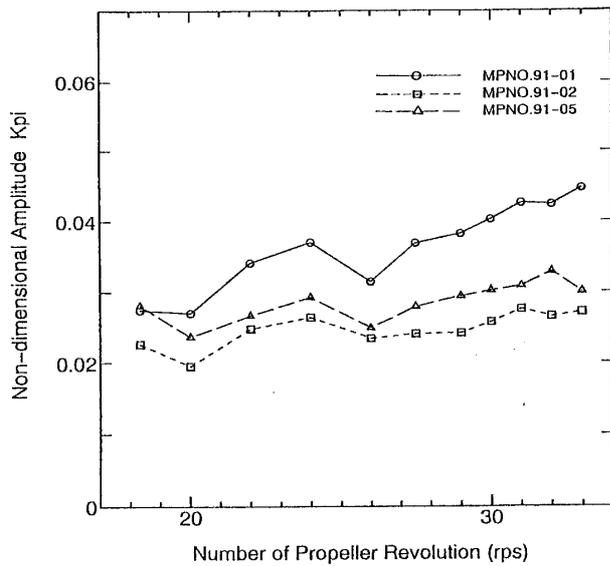


Fig. 7 b Amplitude of fluctuating pressure (2nd): Effect of number of propeller revolution

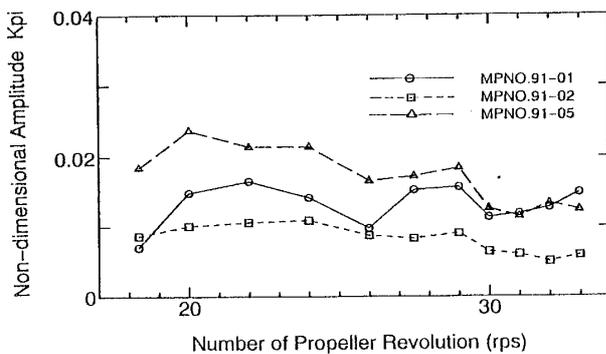


Fig. 7 c Amplitude of fluctuating pressure (3rd): Effect of number of propeller revolution

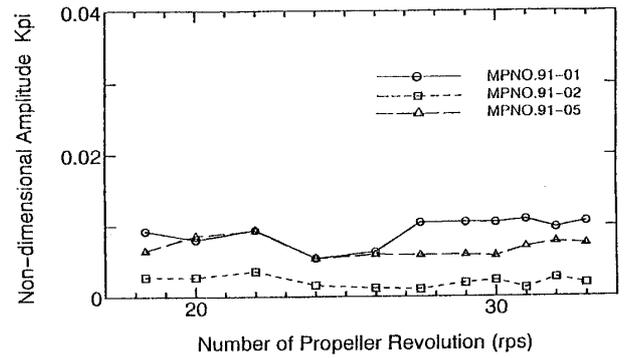


Fig. 7 d Amplitude of fluctuating pressure (4th): Effect of number of propeller revolution

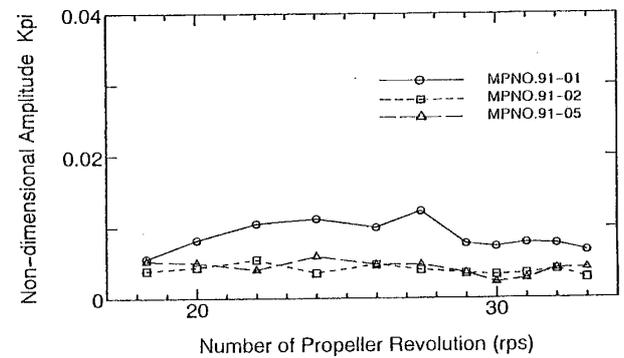


Fig. 7 e Amplitude of fluctuating pressure (5th): Effect of number of propeller revolution

横軸にキャビテーション数, 縦軸に変動圧力振幅(無次元値)をとって, プロペラほぼ直上点の計測結果を Fig. 8 で比較している。(なお, 両プロペラの直径, 回転数が異なるので, 有次元(実船)換算すれば, 差が開く。)

図から次のことがいえる。

- ① 1次～5次翼振動数について, ほとんどすべてのキャビテーション数において MPNO. 91-01 より MPNO. 91-02 のほうが変動圧力振幅が小さい。
- ② キャビテーション数が小さくなれば, 1次翼振動数は急激に増加するが, 2次以上はあるキャビテーション数を越えるとあまり増加しない。

3.5 プロペラの比較

(1) 概要

3.2 から 3.4 の調査をもとにしてプロペラの比較をおこなった。計測は複数回おこなわれたので, すべて最初の試験結果を用いて比較した。従って, すべてカーボランダム無しと比較となる。

(2) 結果

Fig. 9 で変動圧力振幅(実船換算)の左右舷方向分布を, Fig. 10 で変動圧力波形(無次元値)とキャビテーション写真を比較している。Fig. 10 中の Virtual Cavity Volume は前報¹⁾で述べたように, 変動圧力波形を時間で2階積分したものである。

Fig. 9 から、変動圧力について次のことがいえる。

- ① 1次翼振動数については、チップアンロードとスキューの効果によって、MPNO. 91-05, 91-02, 91-03, 91-01 の順で小さくなっている。
- ② 2次以上については、おおよそMPNO. 91-02, 91-03, 91-01 の順で小さくなっている。しかし、MPNO. 91-05 はやや複雑で、2次と4次はMPNO. 91-03 と同程度であるが、3次についてはMPNO. 91-01 よりも大きくなっている。
- ③ 1次~5次翼振動数のすべての成分においてMPNO. 91-02 が最も小さく、MPNO. 91-01 と比較して平均で約40%減少している。

さらに Fig. 10 から次のことが言える。

- ④ 変動圧力の2次翼振動数以上の高次成分は、前報¹⁾で報告したように変動圧力波形の谷(1), すなわち、チップボルテックスキャビテーションが原因と考えられ、その大きさにおおよそ比例して

いる。

- ⑤ キャビテーション観察、写真からでは、すべてのプロペラについて、チップボルテックスキャビテーションを含めてキャビテーションに顕著な差はみられなかった。(ただ、MPNO. 91-01(前報¹⁾参照)がやや多い。)
- ⑥ MPNO. 91-05 は、その他のプロペラと比較して少しチップボルテックスのコアの強さが強いようにみえる。

以上のことから、MPNO. 91-02 を換装プロペラに決定した。

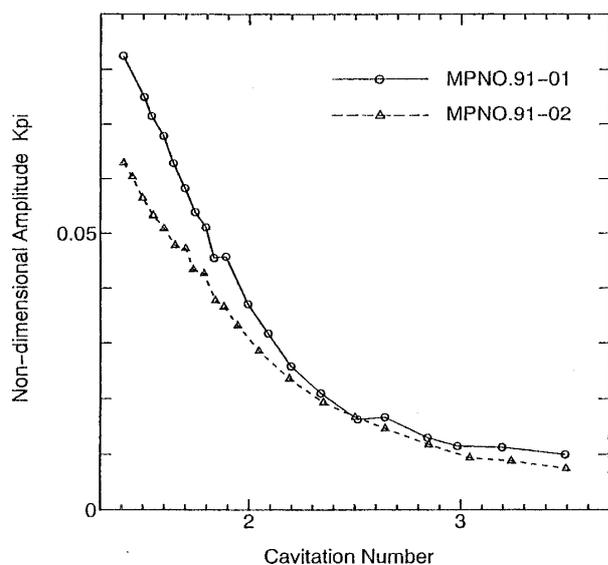


Fig. 8 a Amplitude of fluctuating pressure (1st): Effect of cavitation number

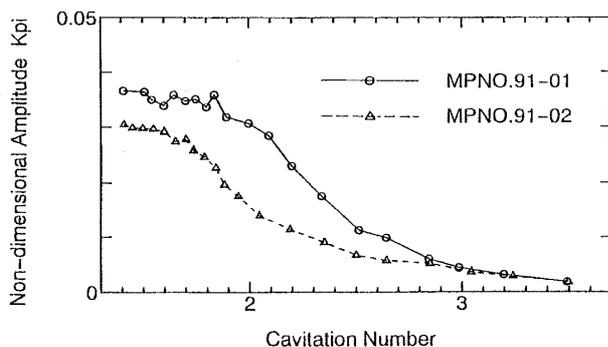


Fig. 8 b Amplitude of fluctuating pressure (2nd): Effect of cavitation number

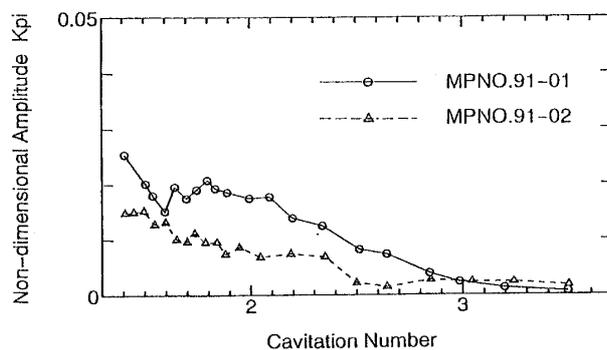


Fig. 8 c Amplitude of fluctuating pressure (3rd): Effect of cavitation number

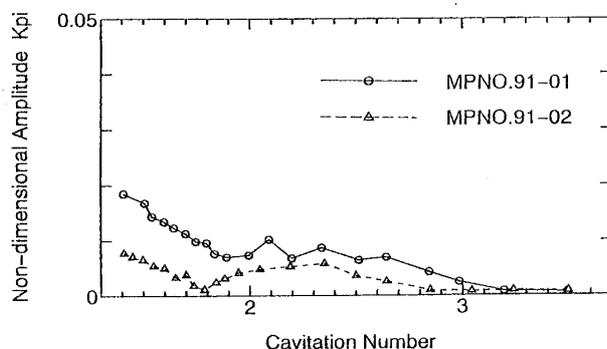


Fig. 8 d Amplitude of fluctuating pressure (4th): Effect of cavitation number

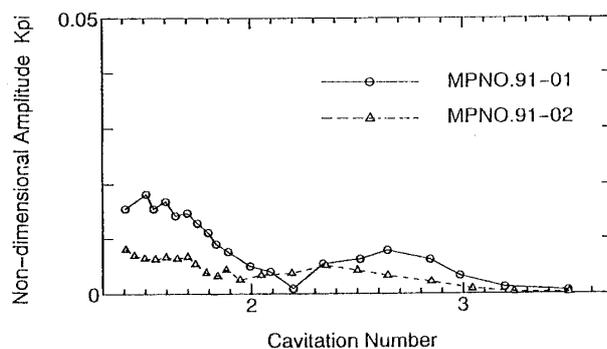


Fig. 8 e Amplitude of fluctuating pressure (5th): Effect of cavitation number

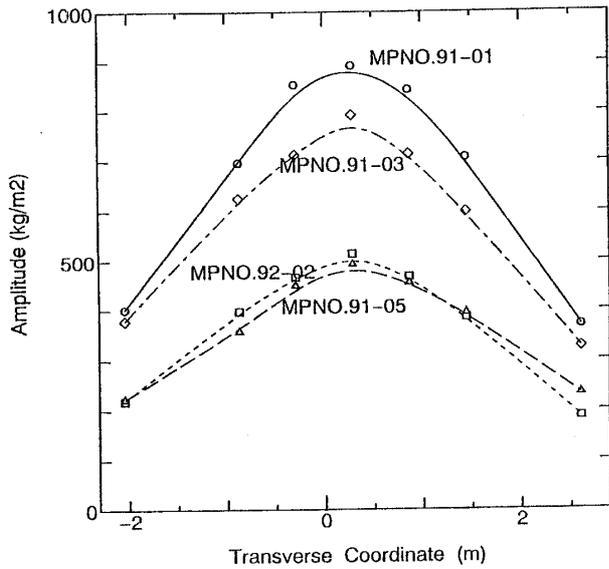


Fig. 9 a Fluctuating pressure distribution in the transverse direction (1st Blade Frequency) : Comparison between propellers

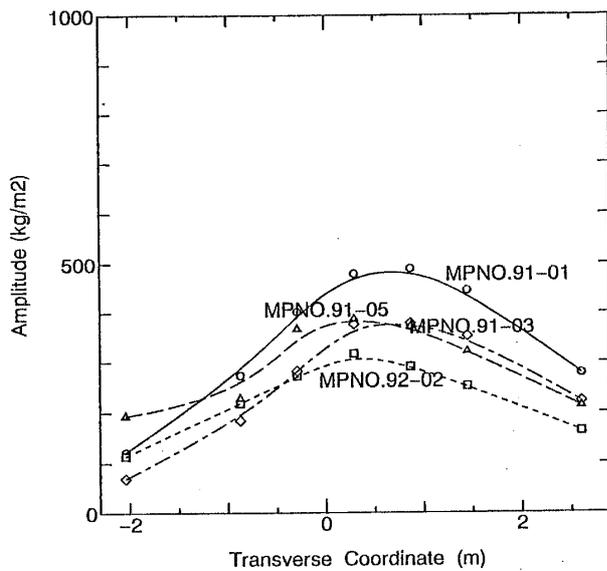


Fig. 9 b Fluctuating pressure distribution in the transverse direction (2nd Blade Frequency) : Comparison between propellers

設計面でみると、MPNO. 91-02 と MPNO. 91-05 の差が興味深い。プロペラ主要目はほとんど同じであり、少し翼幅分布とピッチ分布を変更したのみであるにもかかわらず、2次以上の変動圧力が大きく変化している。スキュー分布は全く同じで、翼厚、キャンパー（キャンパー比は異なる）もほとんど同じである。現状では詳細は不明であるが、チップボルテックスキャビテーションを減らすためには、チップアンロードにすることが第一であり、と同時に翼先端付近のキャンパー比をある程度大きくする、あるいは翼幅を小さくする必要があるように思われる。

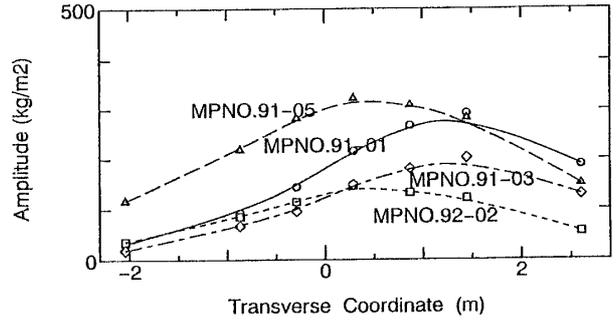


Fig. 9 c Fluctuating pressure distribution in the transverse direction (3rd Blade Frequency) : Comparison between propellers

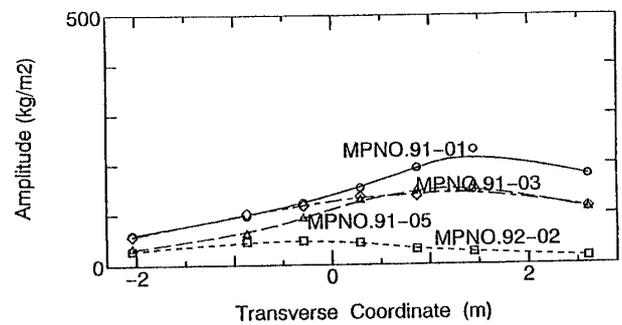


Fig. 9 d Fluctuating pressure distribution in the transverse direction (4th Blade Frequency) : Comparison between propellers

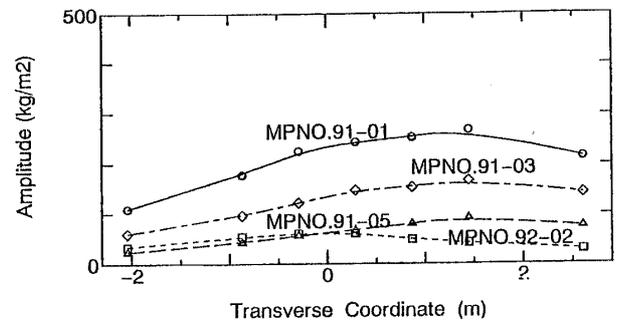


Fig. 9 e Fluctuating pressure distribution in the transverse direction (5th Blade Frequency) : Comparison between propellers

4. 結 言

実船で比較的大きな高次船尾変動圧力が確認されたコンテナ船を対象として、換装用に同翼数(4翼)プロペラを3個設計し、模型実験(キャビテーション観察と変動圧力計測)を行い、次のことを確認した。

- (1) 同じ翼数の条件で、現装プロペラ(MPNO. 91-01)と比較して変動圧力振幅(1次~5次翼振動数成分)を平均約40%減少するプロペラ(MPNO. 91-02)を設計することができた。それはキャビテーシ

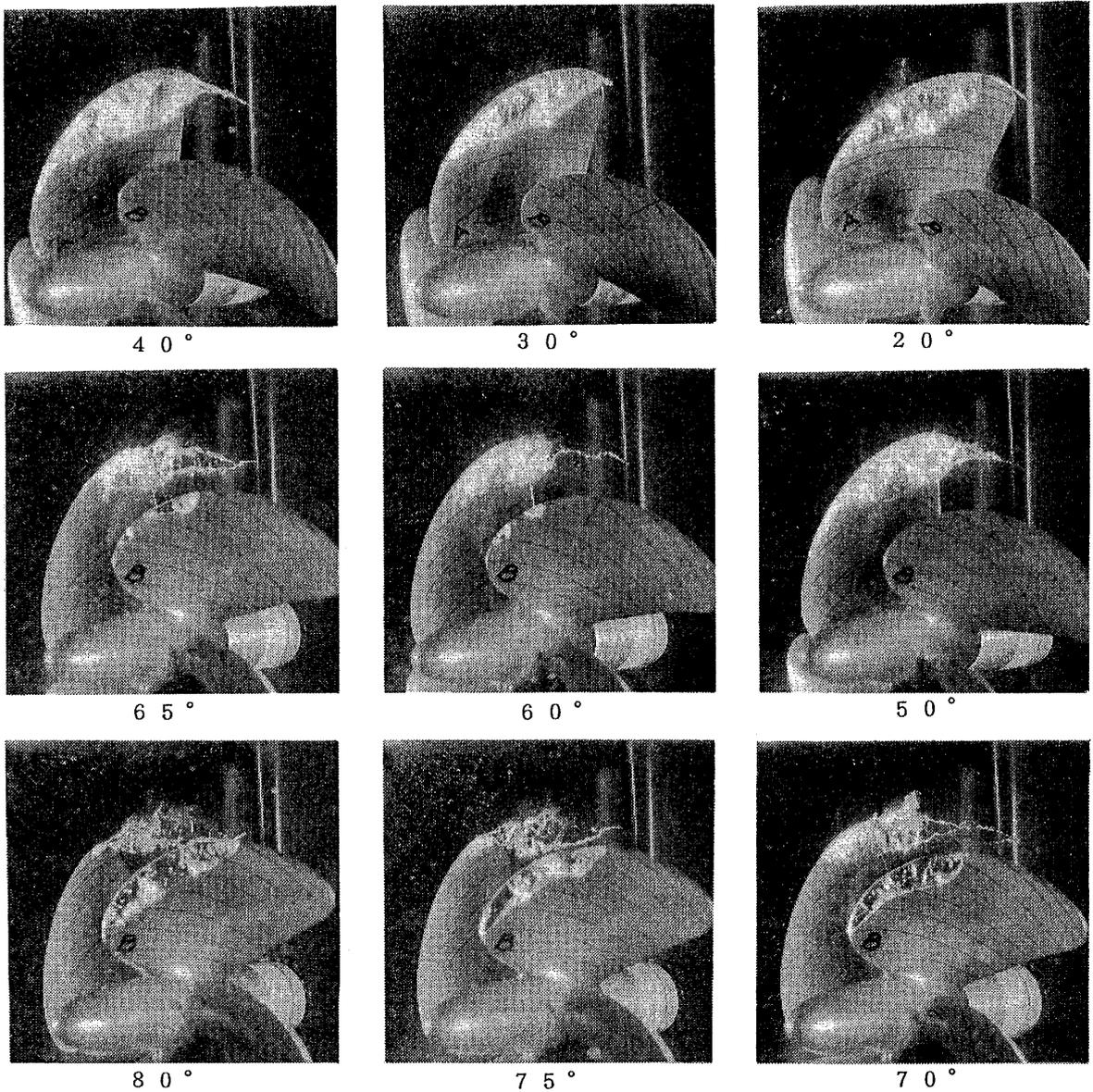
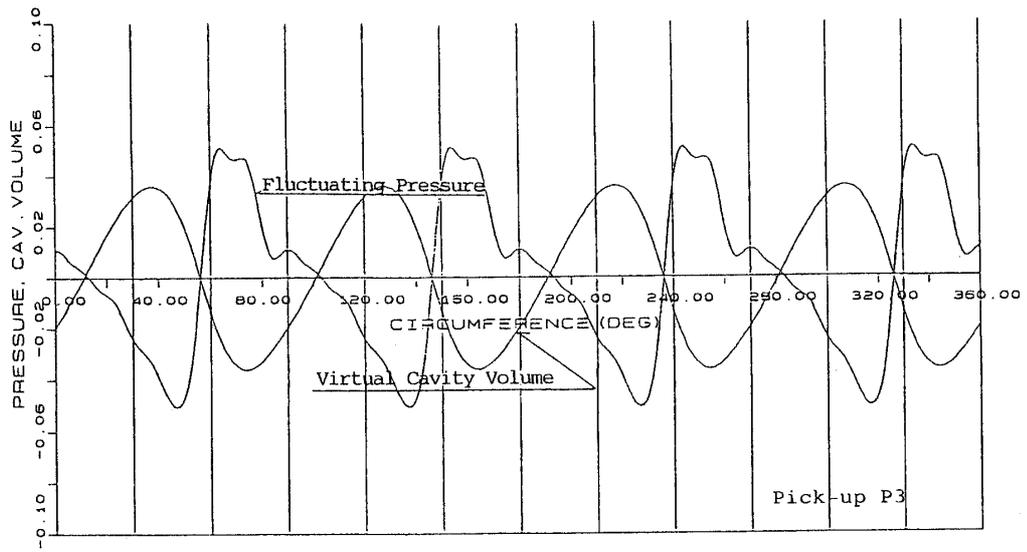


Fig. 10 a Relation between cavitation and pressure fluctuation of MPNO. 91-02

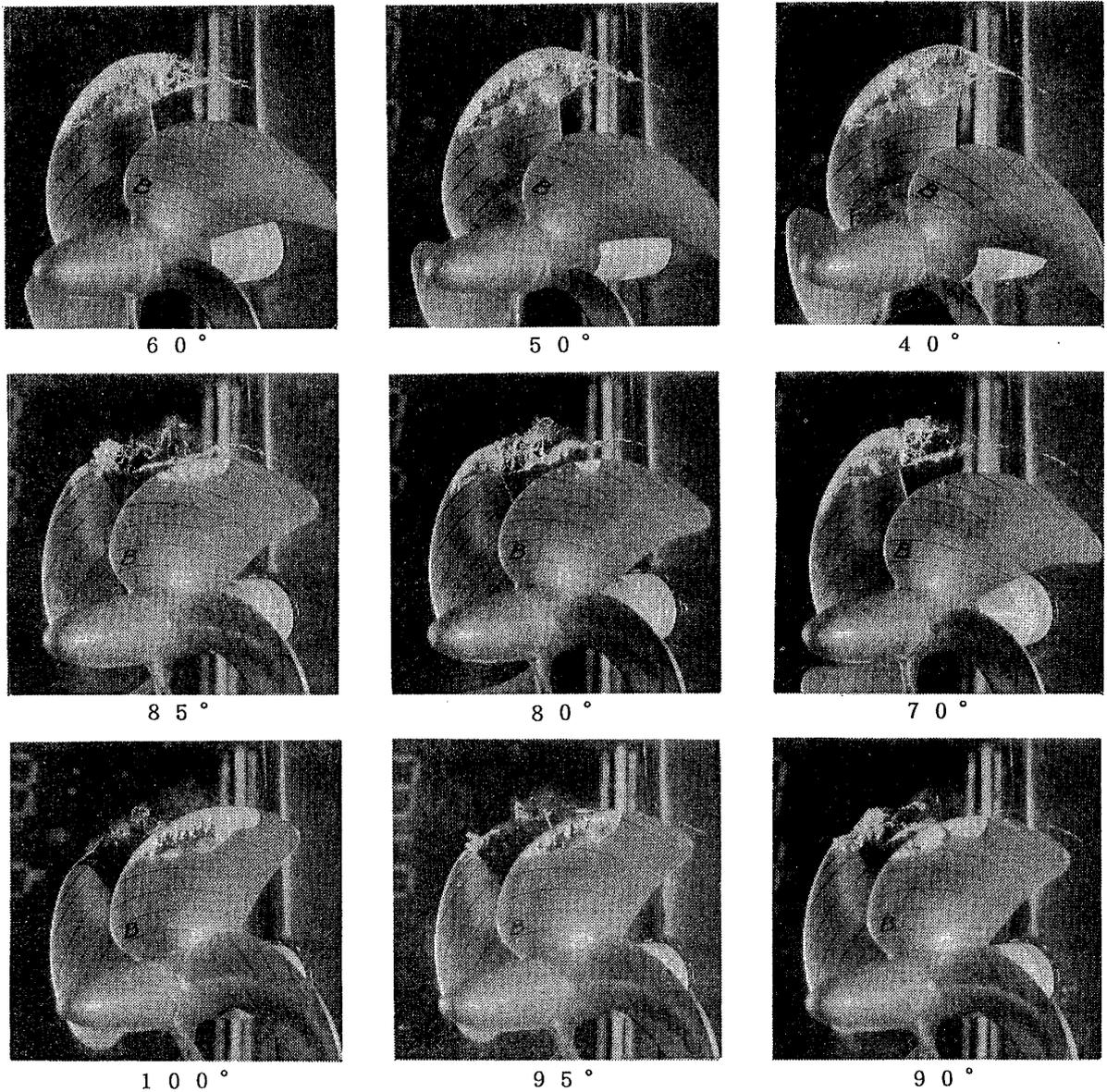
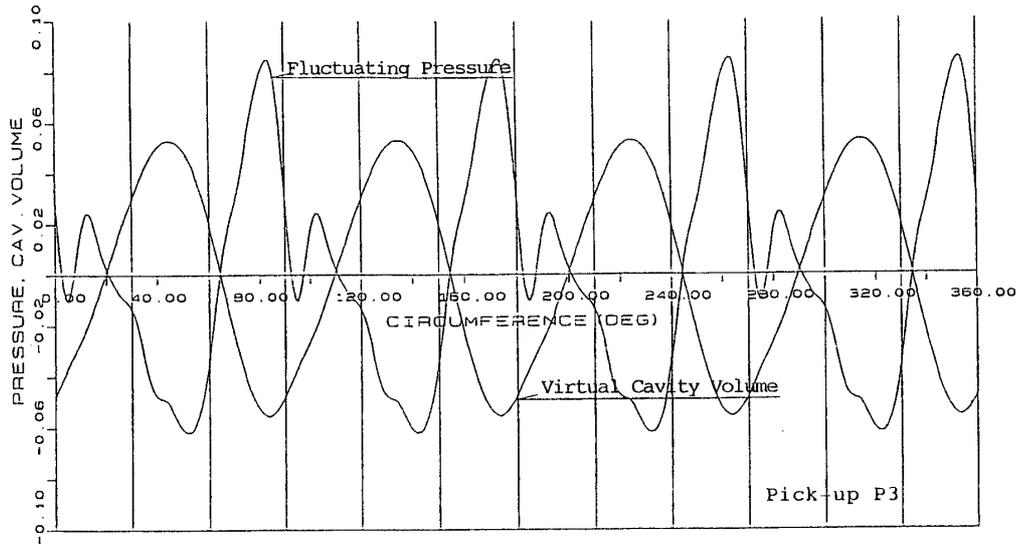


Fig. 10 b Relation between cavitation and pressure fluctuation of MPNO. 91-03

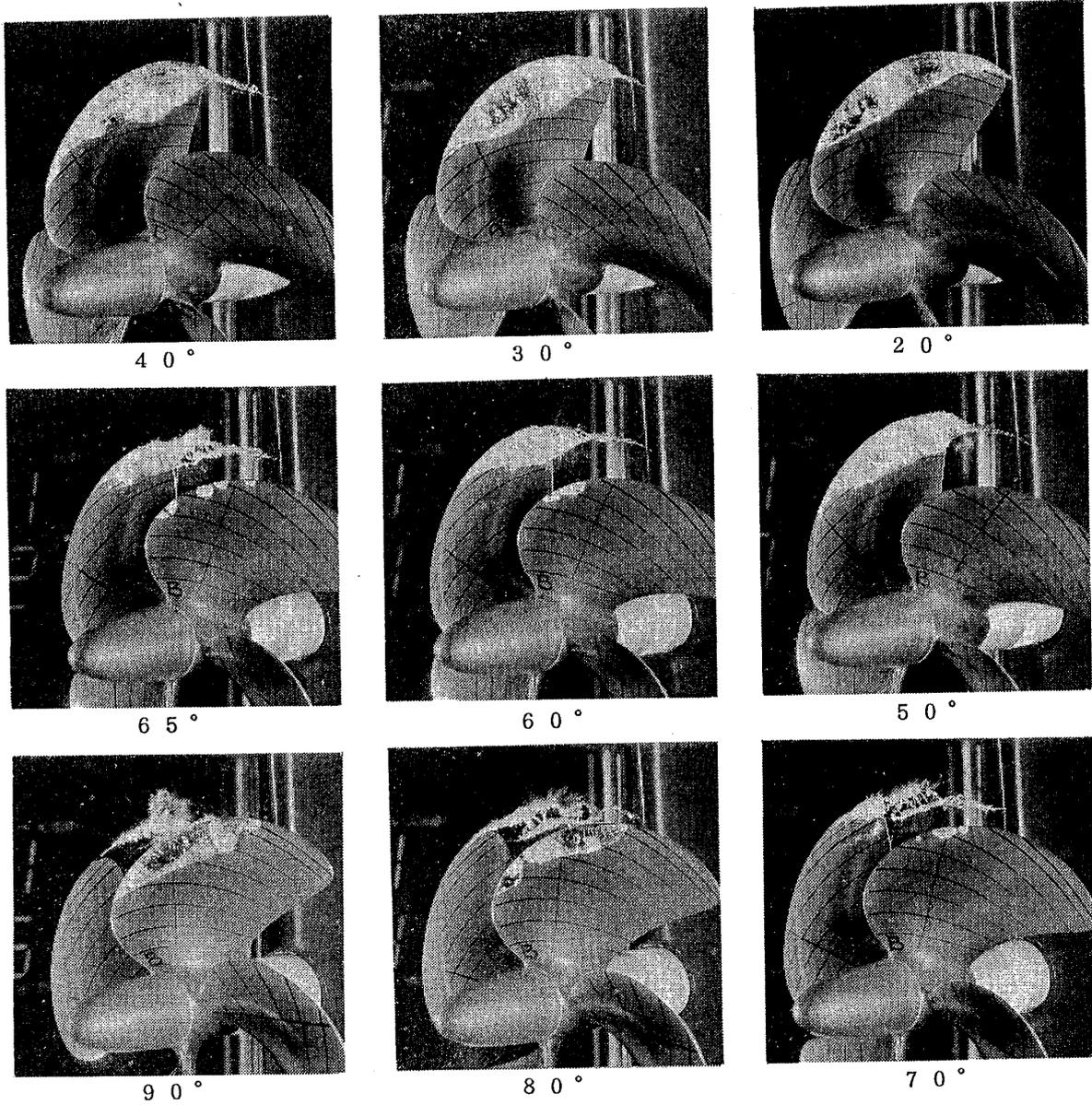
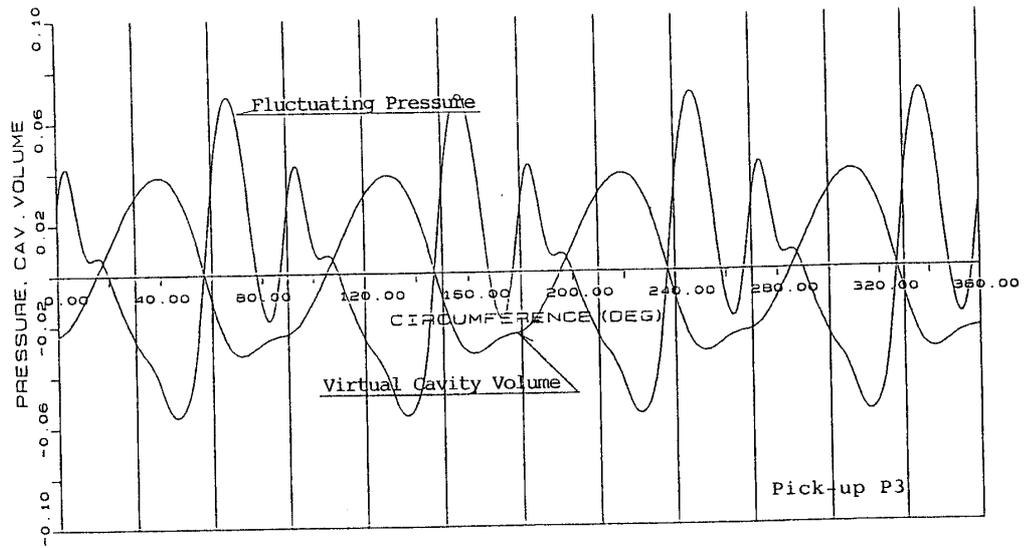


Fig.10 c Relation between cavitation and pressure fluctuation of MPNO. 91-05

ョン数のかなり広い範囲でいえる。

- (2) 現装プロペラ(MPNO. 91-01)と換装プロペラ(MPNO. 91-02)の違いは、
- 逓減ピッチ分布の採用(チップアンロード化)
 - 小直径の採用(チップクリアランスの増加)
 - 翼面積の増加(単位荷重の減少)
- 等であるが、とくにチップアンロード化と翼先端付近でのある程度の高キャンバー比、あるいは短翼幅が効果に寄与したものと思われる。この点の裏付けおよび定量評価には、境界層、CFD計算や詳細なチップボルテックス計測等が必要である。
- (3) 変動圧力の再現性についてMPNO. 91-02, 91-05を用いて、また、変動圧力におよぼすプロペラ試験回転数の影響についてMPNO. 91-01, 91-02, 91-05を用いて調査した。一概にはいえないが、プロペラ比較する場合、高次翼振動数で変動圧力の振幅が小さくなるとそれらの計測のバラツキの範囲にプロペラの差が含まれて評価できない場合が

ある。

なお、本研究を進めるにあたり、東京大学加藤教授より貴重なご助言、ご鞭撻を賜りました。船舶技術研究所上田室長には一部ご助言を、また、日本造船技術センターの関係者各位にはご協力を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 山崎正三郎, 吉坂哲昭, 高畑真一: コンテナ船用プロペラの高次船尾変動圧力 その1 模型実験, 日本造船学会論文集 第173号(1993)
- 2) H. Schneekluth: Die Zustromduse—alte und neue Aspekte—, HANSA (1985)
- 3) K. Takekuma: Effect of Air Bubbles Entrained from Bow on Propeller-induced Pressure Fluctuation, MTB No. 140 (1980)
- 4) 山崎正三郎: 非線形定常プロペラ揚力面の数値解法とその応用例, 西部造船会会報, 第62号(1981)
- 5) 右近良孝: 船尾変動圧力の推定に関する研究, 船舶技術研究所報告, 第28巻, 第4号(1991)