

プロペラ・キャビテーションの  
サーフェス・フォースにおよぼす影響  
——非定常キャビテーションによる変動圧力  
の増加および位相変化に関する一考察——

高橋 肇\*

The Effect of Cavitating Propeller on Surface Force  
—— A Note on an Increase of the Amplitude of the Fluctuating Pressure  
and a Phase Shift of the Fluctuating Pressure ——

By  
Hajime TAKAHASHI

Abstract

It is said that an increase of the amplitude of the fluctuating pressure and a phase shift of the fluctuating pressure are caused by unsteady cavitation dependent on a wake distribution. These effects of unsteady cavitation on fluctuating pressures result in being a great surface force comparing with one in case of steady cavitation or no cavitation.

To make clear "whether the phenomena above mentioned are caused by unsteady cavitation or not", the author has performed the theoretical calculation in replacing a cavity including a blade with bubbles.

As a conclusion, the fact that "unsteady cavitation contributes to a great increase of amplitudes of fluctuating pressures and phase shifts of fluctuating pressures" have been clarified qualitatively.

1. 緒 言

実物プロペラ上方の船尾外板に作用する変動圧力の全振幅  $\Delta p$  およびその場所の位相  $\varphi$  が、キャビテーションが発生していない模型の場合と全く異なっていることは、多くの実船での実測結果からも明らかである<sup>1), 2), 3)</sup>。この現象の一例を Figs. 1, 2 に示す。このような現象が起きる主原因として、実物プロペラが船尾の不均一流中で回転しているために発生・消滅している翼面上のキャビテーション、いわゆる非定常キャビテーションが考えられる。この“非定常キャビテーションによって  $\Delta p$  の増加および  $\varphi$  の変化が起こる”という推論を裏付けるための

若干の計算を行ってみた。

なお計算の対象として用いた供試実船 (Ship A) の主要目などは、次の通りである (詳細については文献<sup>2)</sup> を参照)。

$$L_{PP} = 200.0\text{m}, B = 29.0\text{m}, d = 10.5\text{m}$$

$$C_B = 0.577$$

$$\text{プロペラ翼数 } Z = 5, D = 7.40\text{m},$$

$$H/D_{(0.7R)} = 1.035,$$

$$\text{Tip Clearance Ratio (T. C. R.) } z_t/D = 0.22$$

模型船 (Model A) の  $L_{PP}$  は 5.800m であり、模型と実船とのスケール比  $\alpha$  は、 $\alpha = 5.8/200 = 1/34.5$  である。実船のプロペラ上方の船尾型状および変動圧力計測点を Fig. 3 に示す。

さて、宮田外<sup>4)</sup> は、2次元翼面上にキャビテーションが発生した場合、キャビテーション厚さを観測

\* 推進性能部

原稿受付：昭和51年4月28日

し、このキャビテーション厚さを剛体でおきかえ、この剛体を翼の一部と考え、その表面の圧力分布を計算している。このように一般にキャビテーションを剛体でおきかえることは、キャビテーション領域の内部の圧力が一定というキャビテーションの本質とは矛盾するが、キャビテーション領域は一種の容積を形成し、キャビテーション周辺の流体に displacement effect をおよぼすことは確かである。従って、この displacement effect の影響を調べるために、近似的にプロペラ翼面上に発生する非常定キャビテーションを含めた翼を剛体と考えることとした。

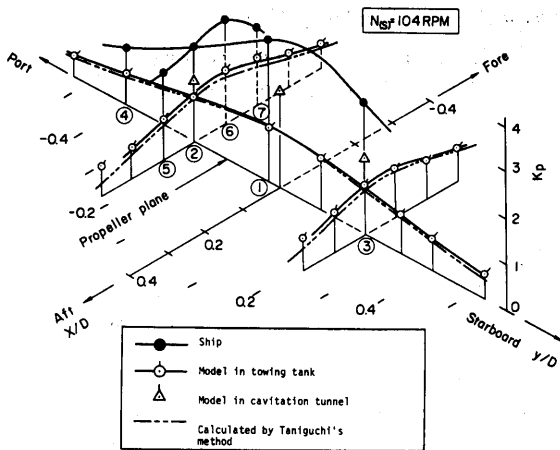


Fig.1 Comparison of amplitude of fluctuating pressures between ship and model (Ship A and Model A)

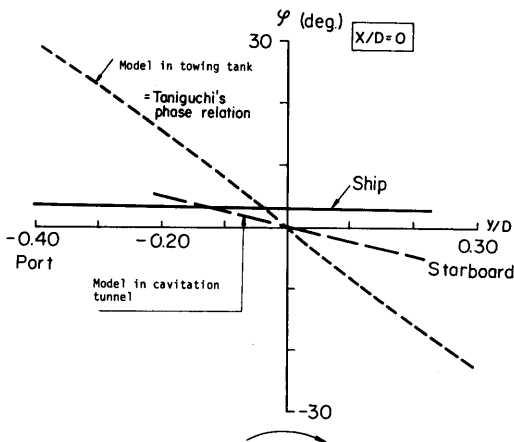


Fig. 2 Comparison of phase of fluctuating pressures between ship and model at  $x/D = 0$  (Ship A and Model A)

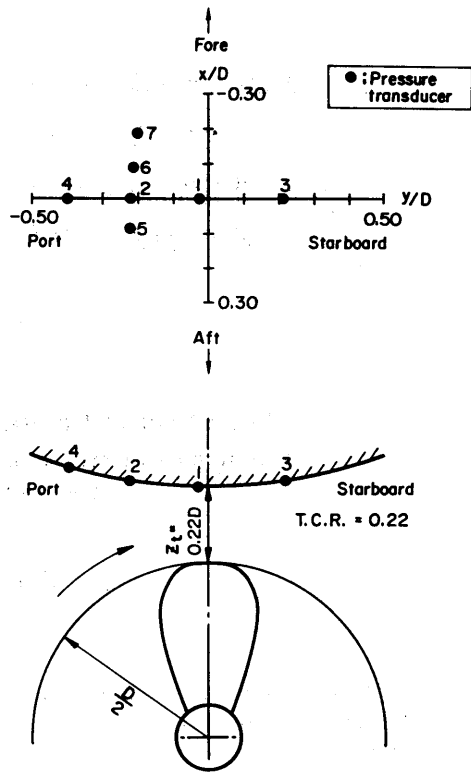


Fig. 3 Stern shape above a propeller and position of pressure transducers (Ship A)

## 2. モデル化および計算式

キャビテーションを剛体でおきかえてその displacement effect を調べるためには、まず実物プロペラの翼面上に発生するキャビテーションの形状が分かっているなければならない。Holden および Sϕndvedt<sup>5)</sup> は、光学的手法を用いて実物のプロペラ翼面上に発生する背面キャビテーションの形状を計測した。その計測結果を Fig. 4 中に点線で示す。著者は、この翼面上のキャビテーションを表すために翼厚と一緒に考えて球でおきかえることにした。プロペラの前進速度は回転による円周速度に比べて小さいとして無視し、さらにプロペラ上方の船尾形状を平板でおきかえ、このようなモデル化を行って平板に働く圧力を求める。

プロペラの翼数、プロペラ中心から球の中心までの距離、プロペラ毎秒回転数をそれぞれ  $Z$ ,  $R$  および  $n$  とおく。いま球の中心の経路を、半径  $R$  の円弧の代わりに近似的に平板に平行とする。このこと

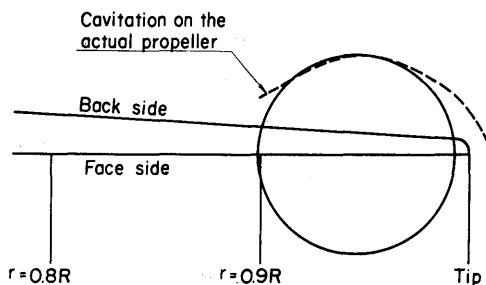


Fig. 4 Thickness of cavity near tip

は、プロペラ翼が外板にごく近い範囲で現象が生じているときに正しい。平板の近傍において次々に生じる球の中心間の路離  $d$  およびその走行速度  $v$  は次のようになる。

$$d = 2\pi R/Z, \quad v = 2\pi n \cdot R \quad (1)$$

直交座標系  $o-xyz$  の  $y$  軸を球の経路に平行に、 $z$  軸をプロペラ中心から鉛直上方にとり、 $k$  番目の球の位置を、

$$x = 0, \quad y = y_k, \quad z = R$$

ただし、 $y_k = v \cdot t + k \cdot d$ ,  $k = -\infty, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty$  とする。この  $k$  番目の球の半径は、その位置により決まるから  $y_k$  の関数となり  $a(y_k)$  で表すと、この球による速度ポテンシャル  $\phi_k$  は、他の球の影響は無視できるほど小さいから次のようになる。

$$\phi_k = -\frac{1}{2} \frac{a^3(y_k) \cdot v \cdot (y - y_k)}{\sqrt{x^2 + (y - y_k)^2 + (z - R)^2}^3} \quad (2)$$

平板を  $z = R + z_t$  の位置におき、球を  $z = R$ ,  $z = R + 2z_t$  の 2 列に配置する。そうすれば、全体の速度ポテンシャル  $\phi$  は、

$$\phi = -\frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{a^3(y_k) \cdot v \cdot (y - y_k)}{\sqrt{x^2 + (y - y_k)^2 + (z - R)^2}^3} + \frac{a^3(y_k) \cdot v \cdot (y - y_k)}{\sqrt{x^2 + (y - y_k)^2 + \{z - (R + 2z_t)\}^2}^3} \right\} \quad (3)$$

となる。

点  $(x, y, z)$  および無限遠点の圧力をそれぞれ  $p$ ,  $p_\infty$  とすると、Bernoulli の式

$$\frac{p - p_\infty}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

が成立するから、これに (3) 式を代入する。ここで、

$a(y_k)$  は  $z_t$  に比べて小さいので高次の項は小さくなり、従ってこれらの項を無視すると、結局平板  $z = R + z_t$  に働く圧力は、圧力係数  $C_p$  を用いて次のように表わされる。

$$C_p = \left[ \frac{p - p_\infty}{\rho v^2} \right]_{z=R+z_t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ 3a^2(y_k) \cdot \frac{da(y_k)}{dy_k} \cdot \frac{y - y_k}{\sqrt{x^2 + z_t^2 + (y - y_k)^2}^3} + a^3(y_k) \left\{ \frac{3(y - y_k)^2}{\sqrt{x^2 + z_t^2 + (y - y_k)^2}^5} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + z_t^2 + (y - y_k)^2}^3} \right\} \right\} \quad (5)$$

次に、 $y_k = v \cdot t + k \cdot d$ ,  $d = \frac{2\pi R}{Z}$

$$y - y_k = -\frac{R}{Z}(2\pi n \cdot Z \cdot t - \frac{Z \cdot y}{R} + 2\pi k)$$

を用いて  $C_p$  を計算する。

簡単のために、 $k$  番目の球の大きさを、

$$a(y_k) = \begin{cases} a_0 + a_2 \cdot (1 + \cos(2\pi s \cdot y_k/d)) & \text{for } -\frac{d}{2s} \leq y_k \leq \frac{d}{2s} \\ a_0 & \text{for } y_k < -\frac{d}{2s}, y_k > \frac{d}{2s} \end{cases} \quad (6)$$

とおくと、

$$\frac{da(y_k)}{dy_k} = \begin{cases} -\frac{2\pi s}{d} \cdot a_2 \cdot \sin(2\pi s \cdot y_k/d) & \text{for } -\frac{d}{2s} \leq y_k \leq \frac{d}{2s} \\ 0 & \text{for } y_k < -\frac{d}{2s}, y_k > \frac{d}{2s} \end{cases} \quad (7)$$

となる。

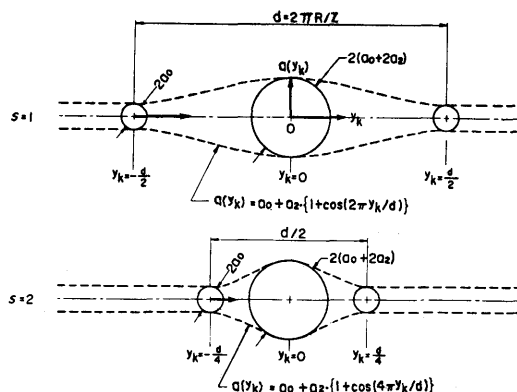


Fig. 5 Modeling of cavity shape in calculating

ここで  $a_0$  は翼の厚さ、 $2a_2$  はキャビテーションの厚さに相当し、また  $d/s$  は  $y_k = 0$  を中心にキャビテーションの存在する範囲を表す。 $s$  が大きくなればキャビテーションの発生領域が狭くなり、換言すれば伴流分布の幅が狭くなり非定常性の強いキャビテーションが発生することを意味している。ここで(6)式を図化して Fig. 5 に示す。

### 3. 計算例

計算例として、Model A の場合を取り上げる。Model A のプロペラまわりの関係寸法を Fig. 6 に示す。同図中 b) に示されるように、ある翼が H から I まで移動する場合に、平板面  $z = R + z_t$  にお

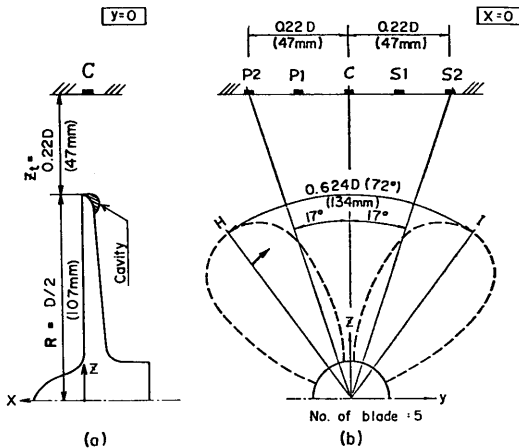


Fig. 6 Condition in calculating in case of Model A

る変動圧力がどのように変化するかを、次に示す状態について計算した。

$$R = 107 \text{ mm}, \quad z_t = 47 \text{ mm}, \quad d = \frac{2\pi R}{Z} = 134 \text{ mm}$$

$$k = -2, -1, 0, 1, 2$$

$$v \cdot t = -\frac{d}{2} \sim \frac{d}{2}$$

とし、計算位置として、

$$x = 0, 20 \text{ mm}, 40 \text{ mm}$$

$$y = -47 \text{ mm}, -23.5 \text{ mm}, 0, 23.5 \text{ mm}, 47 \text{ mm}$$

の組み合わせをとる。ただし、球は次の3種類を選んだ。

$$\textcircled{1} \text{ の場合} : a_0 = 4 \text{ mm}, a_2 = 0$$

$$\textcircled{2} \text{ の場合} : a_0 = 5 \text{ mm}, a_2 = 0$$

$$\textcircled{3} \text{ の場合} : a_0 = 4 \text{ mm}, a_2 = 1.5 \text{ mm}$$

①はキャビテーションが発生していないプロペラが回転する場合、②は定常キャビテーションが発生した場合、また③は非定常キャビテーションが発生した場合をそれぞれ想定したものである。 $s$  は  $s = 1, 1.5, 2$  および  $3$  の4通りとした。

### 4. 計算結果

以上のようなモデル化を行っての計算結果は次の通りである。

Fig. 7 には点  $(x = 0, y = 0, z = 154 \text{ mm})$  における①、②、③の状態の変動圧力係数  $C_p$  が示されており、①、②、③の  $C_p$  の最大値と最小値との差すなわち振幅  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  は、それぞれ  $0.43 \times 10^{-3}$ 、 $0.90 \times 10^{-3}$  および  $3.6 \times 10^{-3}$  となっている。②の場合は①の場合に対して増加しており、また③のそれは①に比べて極めて大きな増加を示している。

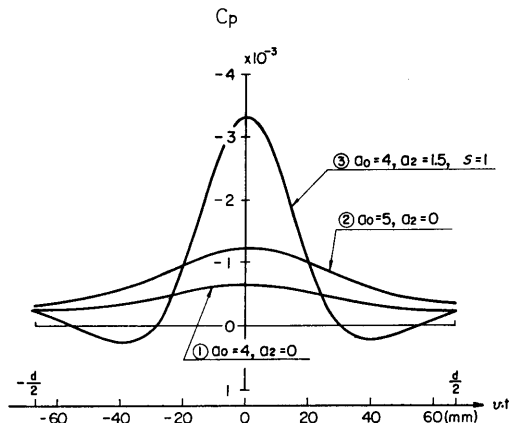


Fig. 7 Fluctuating pressures in cases of ①, ② and ③ at the point  $(0, 0, 154 \text{ mm})$

Fig. 8 には、③の場合に対して  $s$  を増加させた際、点  $(x = 0, y = 0, z = 154 \text{ mm})$  における  $C_p$  の増加の様子を示している。先にも述べたように  $s$  が増加することは非定常性を強くすることを意味するが、 $s = 1$  から  $s = 3$  にすれば  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  はいくぶん増加する。

Fig. 7, 8 から次のことがわかる。Fig. 7 中の③の  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  が①および②と比較して大幅に増加しているのは、非定常キャビテーションの厚みが定常キャビテーションのそれよりも大きいことによるものである。また  $s$  を増加させても

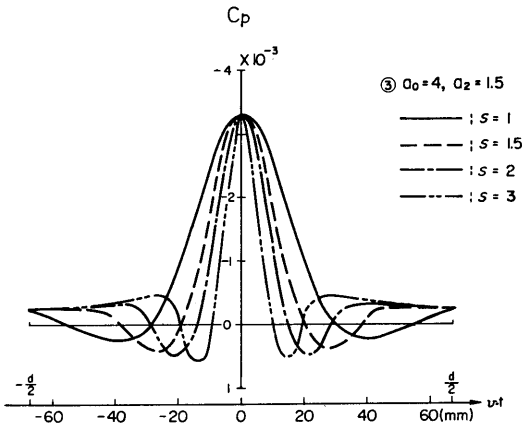


Fig. 8 Fluctuating pressures in cases of  $s = 1, 1.5, 2$  and  $3$  under ③ condition at the point  $(0, 0, 154\text{mm})$

$(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  があまり大きく増加しないのは、 $y_k = 0$  で (5) 式中の右辺の第 1 項が零となり、このために  $s$  の変化による効果が消滅してしまうためである。

次に  $y$  方向の各点における変動圧力係数  $C_p$  の波形を Figs. 9~12 に示す。点  $(x = 0, y = 0, z = 154\text{mm})$  以外の点  $(x = 0, y \neq 0, z = 154\text{mm})$  では、 $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  は  $s$  の増加とともに明らかに急激に増加していることが分かる。次に、また計測点  $(x = 0, y, z = 154\text{mm})$  における  $(C_p)_{\min}$  を与える  $y_{\min}$  は、 $s$  が増加するとともに中心に寄ってゆく。ここで  $y_{\min}$  は変動圧力係数  $C_p$  の位相に相当し、

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{-y_{\min}}{\frac{D}{2} + z_t} \right)$$

とすれば Fig. 2 中の  $\varphi$  と同じ表現となる。計測点  $(x, y = 0, z = 154\text{mm})$  における  $(C_p)_{\min}$  を求め、Fig. 13 に示すと、 $-(C_p)_{\min}$  は明らかに  $x$  の絶対値が増大すると減衰する傾向にある。

上述の一連の計算結果から、振幅  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  に関するものをまとめて Fig. 14 に、位相に関するものをまとめて Fig. 15 に示す。

点  $(x = 0, y = 0, z = 154\text{mm})$  では、先に述べた理由から  $s$  を増加させても振幅  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  はほとんど増加しないが、それ以外の位置では非定常性が強くなるに伴って  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  は増加している。非定常性が強くなるに伴って振幅  $(C_p)_{\max} - (C_p)_{\min}$  が増加することは、実船における変動圧力は、模型船におけるそれに比べて極端に大きく、しかも実船と模型船の  $\Delta p$  の比を  $K_A$  で示せば、この  $K_A$  は

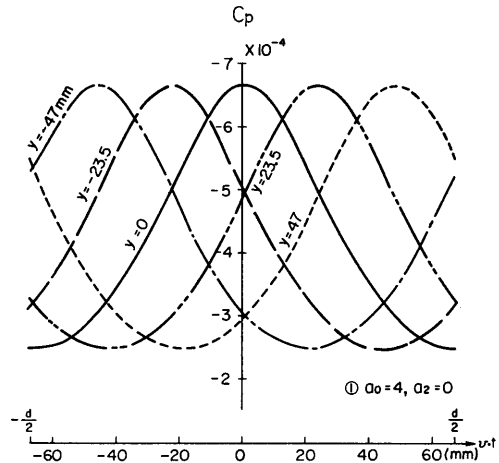


Fig. 9 Fluctuating pressures in case of ① at the points  $(0, y, 154\text{mm})$

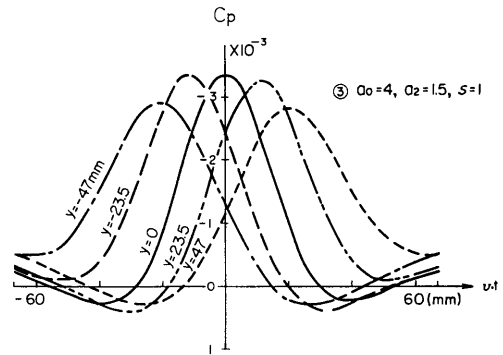


Fig. 10 Fluctuating pressures in case of ③ under  $s = 1$  at the points  $(0, y, 154\text{mm})$

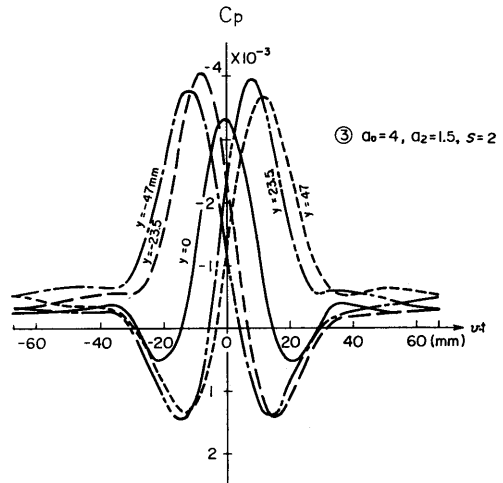


Fig. 11 Fluctuating pressures in case of ③ under  $s = 2$  at the points  $(0, y, 154\text{mm})$

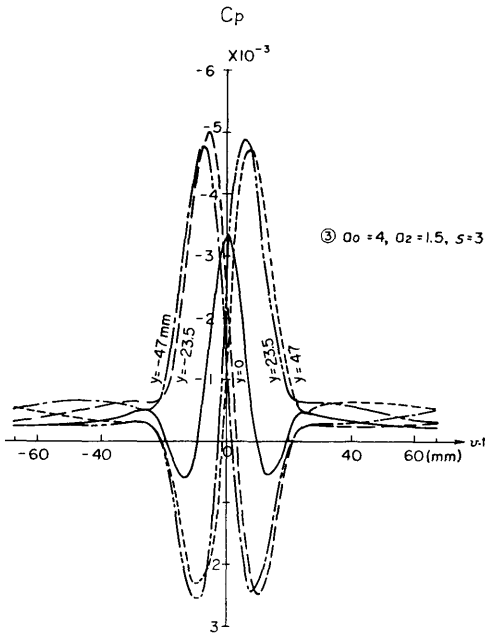


Fig. 12 Fluctuating pressures in case of ③ under  $s = 3$  at the points  $(0, y, 154\text{mm})$

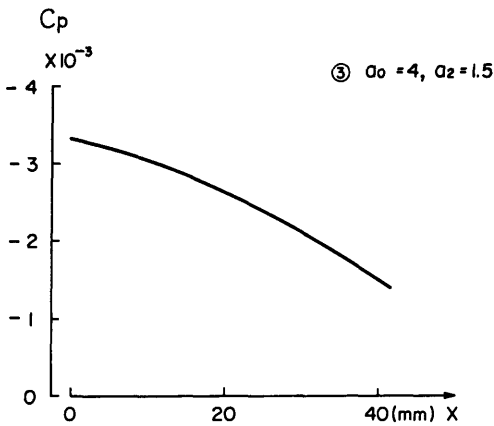


Fig. 13 Maximum negative pressures in case of ③ at the points  $(x, 0, 154\text{mm})$

船型によって異なる。この理由は、船型に依存する伴流分布に左右される非定常キャビテーションの発生状態の相違によるものであろう」との考え方の妥当性を裏付けるものである。

また、位相関係を示す Fig. 15 は、定常の場合には、球が圧力計の真下に来た時に負のピークを生じているが、 $s$  の増加とともに負のピークは中心に寄ってくることを意味しており、言い換えれば非定常性の増加とともに負のピークは同時に発生する可能性のあ

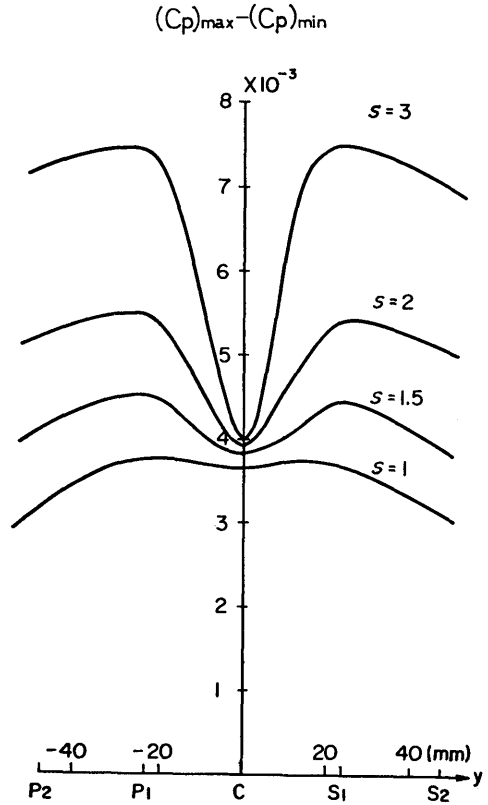


Fig. 14 The effect of  $s$  value on amplitude of fluctuating pressure at the points  $(0, y, 154\text{mm})$

ることを示唆している。さらに Fig. 15 を、Fig. 2 と同じ表現で示せば、Fig. 16 のようになる。この図から、定常の場合には位相曲線の勾配が急であるが、非定常性の増加とともにこの勾配がゆるくなってゆくことを示している。このことは、Fig. 2 からみられる「非定常キャビテーションが発生していないときには谷口の位相関係<sup>6)</sup>

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{-y}{\frac{D}{2} + z_t} \right) \quad (8)$$

が成立するが、非定常キャビテーションが発生すれば  $\varphi = \text{constant}$  となり、もはや谷口の位相関係が成立しなくなる」という試験結果を定性的に説明している。

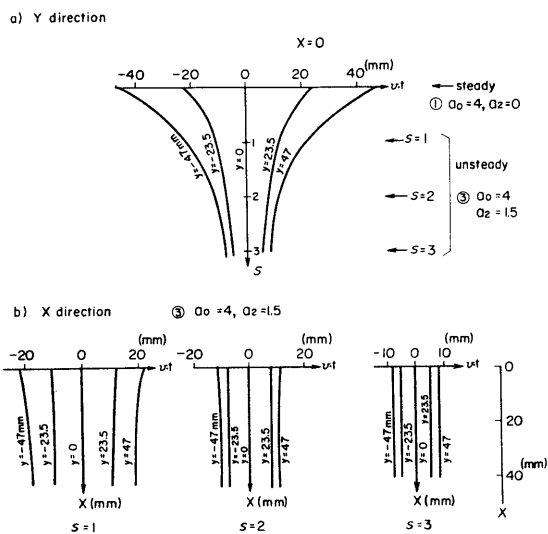


Fig. 15 The effect of  $s$  value on position of  $(C_p)_{min}$

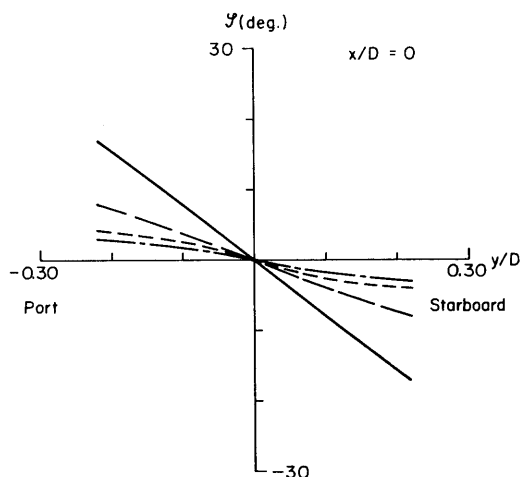


Fig. 16 The effect of  $s$  value on phase shift

5. 結 言

非定常キャビテーションが変動圧力の振幅および位相におよぼす影響を理論的に調べるために、このプロペラ翼および非定常キャビテーション領域を球の半径の変化でおきかえて理論計算を行なった。そ

の結果、単なる球を用いたために変動圧力の振幅のオーダーは計算結果と実際とは異なっており、また点  $(x = 0, y = 0, z = 154\text{mm})$  での変動圧力係数には問題が残されているが、その他の点では、『非定常性が強くなるに従って振幅は増加し、場所による位相差も小さくなる』という性質を示している。この性質は、実船と模型船との間に生じる変動圧力の特性と全く同じである。従って、実船と模型船との変動圧力に差異を生じる原因は、『実物プロペラ翼の背面上に発生する非定常キャビテーションにある』ということが理論的に説明づけられることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 高橋 肇他；“プロペラ起振力に関する研究（第2報）—キャビテーションのサーフェス・フォーースにおよぼす影響—”，船舶技術研究所第12回研究発表会講演概要（1968）  
Takahashi, H. and Ueda, T.; “An Experimental Investigation into the Effect of Cavitation on Fluctuating Pressures around a Marine Propeller”, Proceedings of 12th ITTC, Rome (1969)
- 2) 高橋 肇他；“プロペラ起振力に関する研究（第5報）—起振力に関する模型および実船試験—”，第16回船舶技術研究所研究発表会講演概要（1970）
- 3) 高橋 肇；“プロペラ・キャビテーションのSurface Forceに及ぼす影響に関する一考察”，西部造船会会報，第49号（1975）
- 4) 宮田秀明他；“部分キャビテーション翼の特性”，日本造船学会論文集，第132号（1972）
- 5) Holden, K. and Sjøntvedt, T.; “On Stability and Volume of Marine Propeller Cavitation and Corresponding Spectral Distribution in Hull Pressure Fields”, Symposium on High Powered Propulsion of Large Ships, Publication No. 490, Netherlands Ship Model Basin (1974)
- 6) 谷口 中；“プロペラ近傍の圧力変動”，西部造船会会報，第16号（1958）