

# 船舶の波浪時接岸力に関する研究

若 桑 訥\*・井 上 令 作\*\*  
石井千万太郎\*・山 川 賢 次\*\*

## Berthing Force of Ships in Water Wave

By

Totsu WAKAKUWA, Reisaku INOUE,  
Chimataro ISHII and Kenji YAMAKAWA

### Abstract

In recent years, sea-berth has been constructed gradually off shore to keep the water depth of berth according to the growing size of ships, and then it has become difficult to keep calm in berth. Therefore, the studies of berthing force of ships in water wave have been very important.

One of the authors has studied berthing force of ships in still water and has found the calculating method to estimate the berthing force of ships. This calculating method has been proved by the in situ measurements of berthing force of supertanker on dolphin.

The study of berthing force in water wave is carried out on the basis of the results of those in still water.

In this paper, the authors present the results of the model test and the analysis for the berthing force of ships in beam sea, which consist of two main parts, one is drifting velocity and the other berthing force of ships.

The principal results of this studies are as follows; 1) For convenience, the pressure acting on the side of hull can approximately calculated by use of the theory of clapotis of Airy's wave. 2) The ratio of the wave pressure acting on the forward side of ship to that acting on the opposite side is from 0 to 0.4. 3) The drifting velocity consists of two parts, that is, the constant velocity due to the wave pressure and the wave current, and the cyclic velocity due to the wave. 4) The maximum berthing force may be obtained by the equation  $F_{\max} = K(X_{e\max} + X_{f\max})$ , where,  $K$  is the elastic coefficient of fender,  $X_{e\max}$  and  $X_{f\max}$  are the maximum displacement due to constant velocity and due to cyclic velocity respectively.

### 目 次

- 1. はしがき
- 2. 波浪中における船舶の横漂流
  - 2.1 運動方程式
  - 2.2 実験装置および実験方法
  - 2.3 実験結果

- 2.3.1 波
- 2.3.2 波 圧
- 2.3.3 波圧による横漂流速度
- 2.3.4 漂い速度による横漂流速度
- 2.4 結 言
- 3. 波浪時の接岸力
  - 3.1 運動方程式
  - 3.2 室内実験
    - 3.2.1 実験装置

\* 秋田大学 原稿受付  
\*\* 海洋開発工学部 昭和50年10月31日

## 3.2.2 実験結果

## 3.3 実験結果と理論値

## 4. 結 論

## 主な記号

$c$	波の伝播速度
$d$	喫水
$g$	重力の加速度
$h$	水深
$k$	波数または $K/m$ (バネ常数)
$l$	船長
$m$	船の質量 ( $\equiv \rho Bdl$ )
$n$	$v_i/v_0$
$pa$	波圧
$s$	波圧による船の変位
$\dot{s}$	同上 漂流速度
$s_0$	同上 定常的変位
$\dot{s}_0$	同上 定常的漂流速度
$s_f$	同上 周期的変位
$\dot{s}_f$	同上 周期的漂流速度
$s_u$	$s_0 + u_d' t + s_f$
$s_{f \max}$	船の周期的変位の振幅
$t$	時間
$t'$	$t/T$
$u$	$\dot{s}_0 + u_d' + \dot{s}_f$
$u_0$	$\dot{s}_0$
$u_f$	$\dot{s}_f$
$u_d'$	漂い流れによる船の漂流速度
$v_0$	$u_0 + u_d'$
$v_t$	衝突時における船の周期的速度
$x$	接岸中の船の変位 (防衛工の変位)
$\dot{x}$	同上 速度
$x_0$	同上 定常的変位
$x_f$	同上 周期的変位
$\dot{x}_f$	同上 周期的速度
$x_{c \max}$	$x_c$ の最大値
$x_{f \max}$	$x_f$ の振幅
$B$	船幅
$B_u$	$B_{u_0} + B_{u_f}$
$B_s$	$B_{s_0} + B_{s_f}$
$B_{u_0}$	$1 - \eta \cos \varepsilon$
$B_{u_f}$	$\sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(\sigma t - \theta_1)$
$B_{s_0}$	$\eta \sin \varepsilon + \sigma (1 - \eta \cos \varepsilon) t$
$B_{s_f}$	$\sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(\sigma t - \theta_2)$

$F$	接岸力
$F_{\max}$	最大接岸力
$H$	波高
$K$	防衛工のバネ定数
$L$	波長
$T$	波周期
$X$	$x/v_0$
$\dot{X}$	$\dot{x}/v_0$
$X_c$	$x_c/v_0$
$\dot{X}_c$	$\dot{x}_c/v_0$
$X_f$	$x_f/v_0$
$\dot{X}_f$	$\dot{x}_f/v_0$
$W$	船の重量
$\alpha$	$\rho g d^2 l / m \sqrt{g(d + (h-d)/2)}$
$\varepsilon$	船の両側面に作用する波圧の位相差
$\eta$	船の両側面に作用する波圧の比
$\nu$	衝突時における水圧の位相
$\xi$	$\frac{gH}{kBd} \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\}$
$\xi'$	$\xi/\sigma c$
$\xi_0$	$\xi/v_0$
$\rho$	水の比重
$\sigma$	角速度, $2\pi/T$

## 1. はしがき

現在、船舶が巨大になり、喫水も 17m 以上のものが就役している。港湾の泊地もこれに対応して、水深を増大しなければならない。しかし、増深とその維持には、巨額の工費を必要とする。したがって、水深のある立地条件の優れている地点か、または防波堤などで遮蔽された水面外に、それら巨大船の基地は設けられることになり、そのために多くの場合、泊地の静穏度の保持は困難となる。ここにおいて、波浪時接岸力の把握は、船舶の安全または荷役稼働時間の確認上から重要な事項となる。

筆者の一人は、この波浪中における接岸力の研究に先だち、平水中における船舶の接岸力の研究を行なった<sup>1)~6)</sup>。この平水中の研究においては、船舶に作用する水圧は流動している水と船の速度差によることから、船側に働く水圧を直接計測することを主眼として、接岸力を推定できる計算法を確立した。本論文で述べる波浪中における研究は、平水中における接岸力の研究の実績をもとにして、波浪中の接岸力で最も基本となるところの、横波中における船舶の接岸力に

ついて行なったものである。

以上の観点から研究に着手し、計測用機器などの整備を終えて、昭和 45 年ようやく一連の室内実験を行ない、さらに、研究を続行推進する予定であった。しかし、実験を担当された故丹羽研究室長の急逝などの事情で打ち切られたが、著者らは一部終了した実験結果に基づき解析を行なったのでひとまず報告することにした。

この報告は、2 章と 3 章に大別されていて、2 章においては、波浪中における船舶の横漂流について、3 章においては、その漂流速度による接岸力について述べる。

## 2. 波浪中における船舶の横漂流

本章は、波の進行方向が船側に対し直角な場合について、横漂流の現象を室内実験によって研究した結果を述べたものである。すなわち、2.1 において、接岸力に影響をおよぼす成分として水平方向の運動のみをとり上げ、他の成分は小さいとして無視して導いた一般運動方程式について述べるが、2.3.2 においては、波圧について考察し、実験において計測された波圧は、微小振幅波理論による重複波の波圧に近い値であることを示した。2.2 では実験装置の概要を述べ、2.3 においては、実験結果における波形、波圧と理論値との比較、また、波圧による漂流速度の実験値と理論値の比較を行ない、さらには、波に伴う漂い速度による漂流速度を求め、両者の和が横漂流速度となることを実験値と対照して示した。2.4 は結言で、横漂流速度は定常速度と周期的変動速度からなり、周期に対応して、波圧の比を考慮すれば妥当な値を求めうることを述べたものである。

### 2.1 運動方程式

一般的な船の漂流速度を算定するために、いろいろな式が発表されているが、この章での目的は接岸力を算定するために必要な横漂流速度を把握することであるから、実験にそくした条件で漂流速度に対する運動方程式を考えてみる。まず、船の上下力および回転力の影響は小さいので無視し、水平力だけをとり上げる。また、外力として船に働く波圧と運動によって誘起される波による波圧との比を  $\eta$  とし、その位相差を  $\varepsilon$  とすると、運動方程式は次のように考えられる。

$$\ddot{s} + \eta \xi \sin(\sigma t - \varepsilon) = \xi \sin \sigma t \quad (2.1)$$

(2.1) 式の左辺第 1 項は、船の加速に要する力、第 2

項は、船の進行方向前面の船側に働く水圧による力、右辺は外力として働く波の力にそれぞれ関する項である。

実験においては、船を静止させてから造波を行なったので、(2.1) 式を解く場合、船が静止している状態に、急激に  $\xi \sin \sigma t$  の波圧が作用すると考えると、 $t \geq 0$ ,  $t=0$  で  $\dot{s}=0$ ,  $s=0$  の初期条件での解は次のようになる。

$$\dot{s} = \frac{\xi}{\sigma} \{ (1 - \eta \cos \varepsilon) - \cos \sigma t + \eta \cos(\sigma t - \varepsilon) \} \quad (2.2)$$

$$s = \frac{\xi}{\sigma^2} \{ \sigma(1 - \eta \cos \varepsilon)t + \eta \sin(\sigma t - \varepsilon) - \sin \sigma t + \eta \sin \varepsilon \} \quad (2.3)$$

ここで、 $\xi$  は波圧を表わし、ほぼ、次式で表わされるが、2.3.2 でくわしく考察する。

$$\xi = \frac{gH}{kBd} \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\} \quad (2.4)$$

(2.2) 式ならびに (2.3) 式によって、定常速度  $\dot{s}_0$  および定常速度による変位  $s_0$  は、(2.5) 式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{s}_0 &= \frac{\xi}{\sigma} (1 - \eta \cos \varepsilon) \\ s_0 &= \frac{\xi}{\sigma^2} \{ \sigma(1 - \eta \cos \varepsilon)t + \eta \sin \varepsilon \} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

いま、(2.2), (2.3) 式において、

$$\left. \begin{aligned} B_u &= 1 - \eta \cos \varepsilon - \cos \sigma t + \eta \cos(\sigma t - \varepsilon) \\ B_s &= \sigma(1 - \eta \cos \varepsilon)t + \eta \sin(\sigma t - \varepsilon) - \sin \sigma t + \eta \sin \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

とするならば、(2.2), (2.3) 式は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= \frac{\xi}{\sigma} B_u \\ \frac{\dot{s}T}{L} &= \xi' B_u \\ s &= \frac{\xi}{\sigma^2} B_s \\ \frac{s}{L} &= \frac{\xi'}{2\pi} B_s \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ここに、 $T$  は波周期、 $L$  は波長、 $\xi' = \xi/\sigma c$ ,  $c$  は波の伝播速度である。

次に、周期的な速度ならびに変位について検討してみる。

(2.6) 式の  $B_u, B_s$  を書き改めると次のようになる。

$$B_u = 1 - \eta \cos \varepsilon + \sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_1)$$

$$B_s = \eta \sin \varepsilon + 2\pi(1 - \eta \cos \varepsilon) t' + \sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_2)$$

ここに、

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{1 - \eta \cos \varepsilon}{\eta \sin \varepsilon} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{\eta \sin \varepsilon}{\eta \cos \varepsilon - 1} \right)$$

$$t' = \frac{t}{T}$$

したがって、周期的変動速度  $\dot{s}_f$  および周期的変位  $s_f$  は、次式で表わすことができる。

$$\frac{\dot{s}_f T}{L} = \xi' \sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_1) \quad (2.8)$$

$$\frac{s_f}{L} = \frac{\xi'}{2\pi} \sqrt{1 - 2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_2) \quad (2.9)$$

上式の振幅は、 $\eta$  および  $\varepsilon$  により左右されることは注目しなければならない。また、(2.2) から (2.9) までの式によって、波圧による横漂流速度および変位は、定常的なものと周期的に変動する項に区分しうることがわかる。

次に、一般に波浪に伴って、漂い流れのあることは周知のことである。船舶も、それに伴って漂うものと考えられる。この1波長間平均速度の船の喫水  $d$  間での平均速度  $u'_d$ 、表面の速度  $u'_0$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{u'_d}{c} = \frac{\pi H^2}{4 L d} \left\{ \coth kh - \frac{\sinh 2k(h-d)}{2 \sinh^2 kh} \right\} \quad (2.10)$$

$$\frac{u'_0}{c} = \frac{\pi^2 H^2}{2 L^2} (\coth^2 kh + 1) \quad (2.11)$$

ここで、 $c$  は波の伝播速度、 $H$  は波高、 $L$  は波長、 $h$  は水深、 $k$  は波数をそれぞれ示す。

したがって、船舶の波浪による漂流速度を  $u$  で表わせば、

$$u = \dot{s}_0 + u'_d + \dot{s}_f = u_0 + u'_d + \dot{s}_f \quad (2.12)$$

となり、 $u_0 + u'_d$  は定常的速度を表わす。

変位も同様にして、 $s_u$  で表わせば、

$$s_u = u_0 t + u'_d t + s_f \quad (2.13)$$

となる。 $u_0 t + u'_d t$  は定常的(時間に比例する)変位を表わす。

(120)

船側に働く波圧は、重複波、不完全な重複波、碎波的な波の波圧の形態など、波形によって変わる。また、波圧式も多く研究されている所である。しかし、いまとり上げている目的に対しては、実用的なものが望ましいので、実験値に照して波圧式を定めるものとし、2.3 で検討する。

## 2.2 実験装置および実験方法

基本実験設備は、船舶技術研究所報告、第4巻、第2号<sup>6)</sup>に報告したものを使用した。造波装置として、水槽の一端に、ストローク可変範囲 20 cm のプランジャー式造波板を設置した。造波板の位置は、水槽壁から 50 cm 離してあり、造波板前面に金網式の浪波装置を全幅にわたり設置した。造波板の写真を Photo. 1 に示した。また、造波板を駆動する原動機は、可変速モーター 5 馬力で、その回転数の制御は手動で、回転計の指標によって操作した。用いた回転数は 67, 80, 100, 110, 120 (R. P. M.) で、周期は、0.90, 0.75, 0.60, 0.545, 0.50 秒である。接岸速度計、接岸力計および水圧計も既報<sup>6)</sup>の通りである。接岸力計の写真を Photo. 2 に示す。波高計は抵抗線式で、水位変化

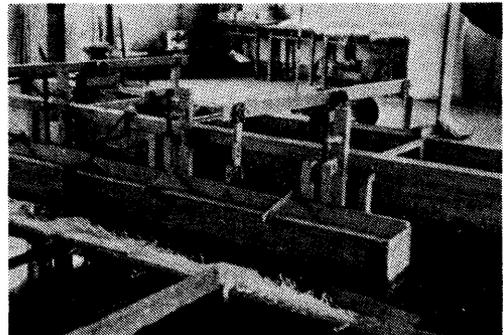


Photo. 1 Wave generator

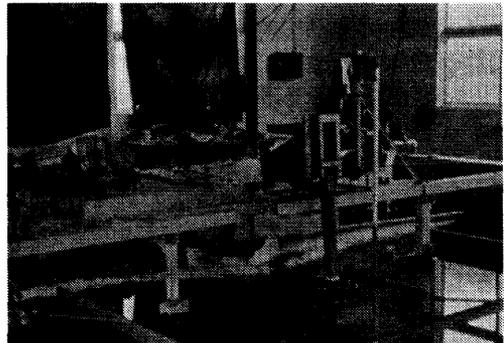


Photo. 2 Equipments measuring berthing velocity and berthing force

による電気抵抗の変化によって水面高をオシログラフに記録させるものである。波形記録の一例を Fig. 1 に示す。また、これらの計測器の検定値を Table 1 に示し、波高計および水圧計の配置を Fig. 2 に示した。実験方法は、まず船を接岸力計の前方約 30 cm の

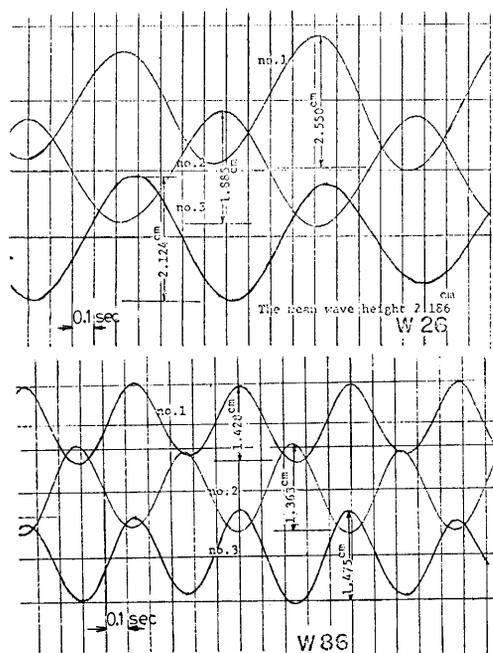


Fig. 1 Records of wave

場所に、波峰線と平行に静止させておく。次に造波し、船を漂流させて、接岸力計に衝突する約 2~3 秒前から計測を開始し、波高、船に作用する波圧、船の変位、および接岸力を計測する。Fig. 3 に記録例を示した。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 波

この研究は、表題の通り、波浪による船舶の挙動に関する研究である。したがって、まず、波の諸要素を把握しておかなければならない。

波高計を Fig. 2 のように設置し、オシログラフによる読みとモーターの回転数による周期を用いて、波の伝播速度と波長を測定した。伝播速度は両端波高計の間隔が 120 cm であるから次式で求められる。

$$c = \frac{120}{t}$$

また、波長は、

$$L = cT$$

で知ることができる。波高は、記録が一定値を示したとき、3個の波高計の記録の各々の上下限の差をとり平均して求めた。Fig. 1 に記録の一例を示し、Table 2 にその値を示した。また、Table 2 には波高の外に波長、波圧および漂流速度の実験値も示し、波長には計算値 ( [ ] 内の値) も併記した。

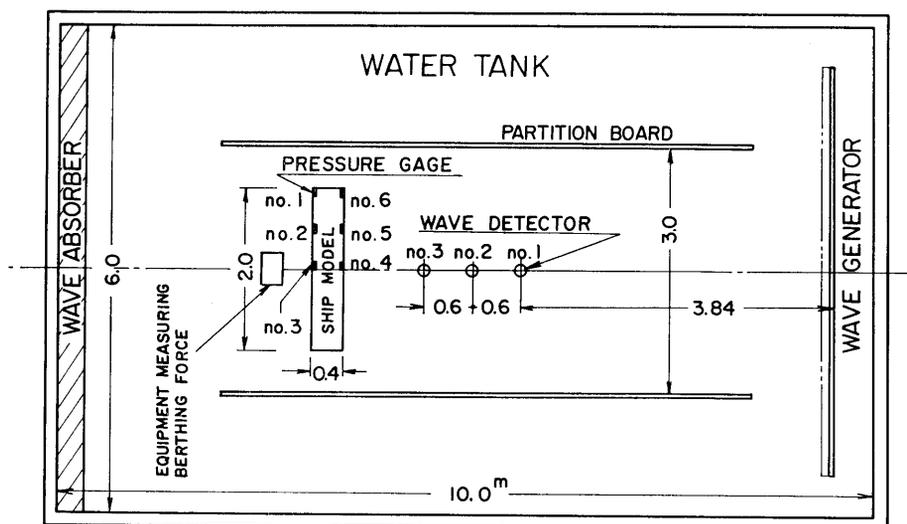


Fig. 2 Arrangement of gages

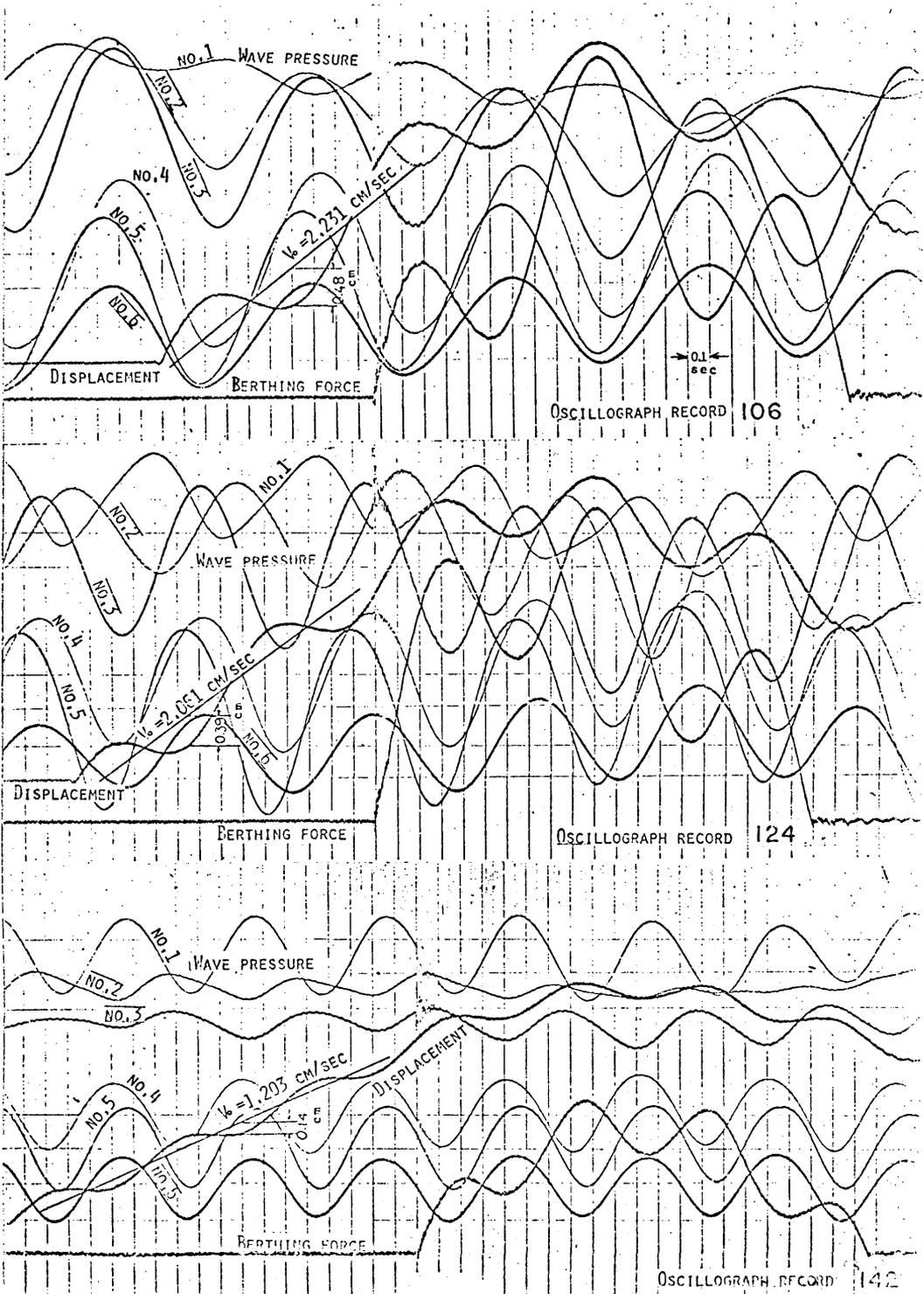


Fig. 3 Records of oscillograph

Table 1 Gradient of calibration curve

	Test number	Grad. of calib. curve					
Displacement	70-8-24 [ 5 ]	0.1689					
	70-8-25 [16]	0.2250					
	70-8-28 [11]	0.5085					
	70-8-28 [29]	0.4100					
Berthing force	70-8-25 [ 1~23 ]	0.37					
	70-8-26 [ 4~ 9 ]	0.34					
	70-8-28 [ 2~10 ]	0.59					
	70-8-28 [13~28]	0.82					
Berthing velocity	70-8-25 [ 1~23 ]	0.48					
	70-8-26 [ 4~ 9 ]	0.47					
	70-8-28 [ 2~10 ]	1.00					
	70-8-28 [13~28]	1.21					
Water pressure	No. of pressure gages	1	2	3	4	5	6
	70-8-25 [ 1~23 ]	0.37	0.36	0.41	0.76	0.72	0.80
	70-8-26 [ 1~ 9 ]	0.37	0.43	0.41	0.73	0.72	0.81
	70-8-27 [ 1~ 9 ]	0.37	0.38	0.41	—	—	—
	70-8-28 [ 2~10 ]	0.81	1.17	1.19	1.23	1.35	1.70
70-8-28 [13~28]	1.03	1.50	1.50	1.46	1.71	2.00	
Water height	No. of wave detector	1		2		3	
	70-8-26, 27	0.67		0.58		0.59	

Table 2 Experimental values

	Period (sec)	Wave length (cm)	Wave height (cm)	Wave pressure (peak to peak) (g/cm <sup>2</sup> )	Drifting velocity (cm/sec)	$u_0 T/L$
Low wave	0.90	120.00 [115.31]	2.186	2.989	2.231	1.6732E-02
				2.568	2.520	1.8900E-02
	0.75	93.75 [ 83.70]	2.048	2.665	2.061	1.6488E-02
				2.950	2.270	1.8160E-02
	0.60	57.60 [ 56.24]	1.857	1.504	1.203	1.0656E-02
				1.499	1.831	1.9073E-02
0.545	48.09 [ 47.15]	1.477	1.481	0.461	5.2245E-03	
			1.285	1.511	1.7124E-02	
0.50	41.67 [ 39.24]	1.422	1.075	0		
			0.914	1.255	1.5059E-02	
High wave	0.90	120.00 [115.31]	3.572	5.593	4.850	3.6375E-02
				5.247	4.743	3.5573E-02
	0.60	60.50 [ 56.24]	3.013	2.416	3.940	3.9074E-02
					3.896	3.8638E-02
0.47	38.11 [ 34.20]	2.132	1.035	2.770		3.4162E-02
				2.057		2.5368E-02

Water depth 28 cm, Draught 17.7 cm  
[ ]; Theoretical wave length

### 2.3.2 波 圧

水圧計を船側にとり付けた位置は、波高の小さい実験では水面下 4 cm, 波高の大きい実験では、水面下 7 cm にそれぞれ受圧面の中央が位置するようにとり付けた。また、受圧面の径は、1.0 cm である。波圧の計測値を Table 3 に示す。この表にみられるように、造波機側の船側に働く波圧と船の進行方向前面の船側に働く波圧の比  $\eta$  は、ほぼ 0.4 である。また、この両面の波圧の位相差は、水圧計のと取り付け位置によって、 $0 \sim \pi$  の間にある。短い波長になるにしたがって、回折波の状態によって不整となり、船長の方向において、同時に正負の波圧を生じ、進行方向前面の波圧の総計は把握困難であり、総体的にみるときは無視できる状況である。したがって  $\eta=0$  となる。Table 3 には  $\epsilon$  の値も併記してある。波長の長い波では  $\epsilon$  を記録から読みとることができるが、波長が短くなると上記のような理由で読みとりが困難となる。しかし、このような状態における計算では  $\eta=0$  とすることができるから、 $\epsilon$  の値は不要となる。

波形勾配が大きくなると、2 倍周波数以上の波圧があらわれるが、本実験においては、これをフーリエ分解し、主として作用するものとして第 1 項を用いた。そのような波は、Table 3 の中に \* 印を付してある。

波圧の理論式としては、例えば、L. Rundgren<sup>7)</sup> によれば、オイラー座標系を用いた第 2 次近似解は、次式に示す通りである。 $p_a$  を圧力とすると、

$$\begin{aligned} \frac{p_a}{\rho g} = & -y + \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \\ & \times \{(1+\chi) \sin \sigma t \sin kx + (1-\chi) \cos \sigma t \cos kx\} \\ & - \frac{kH^2}{16 \sinh kh \cosh kh} [(1+\chi)^2 \cos^2 \sigma t \\ & \times \{\cosh 2k(h+y) + \cos 2kx - 1\} \\ & + (1-\chi)^2 \sin^2 \sigma t \{\cosh 2k(h+y) \\ & - \cos 2kx - 1\} + (1-\chi^2) \sin 2\sigma t \sin 2kx] \\ & + \frac{3kH^2}{16} \frac{\cosh 2k(h+y)}{\sinh^3 kh \cosh kh} \\ & \times \{(1+\chi^2) \cos 2\sigma t \cos 2kx \\ & + (1-\chi^2) \sin 2\sigma t \sin 2kx \\ & + \frac{\chi kH^2}{2} \tanh kh \cos 2\sigma t \end{aligned}$$

ここに、 $x$  は横軸、 $y$  は縦軸、 $\chi$  は反射係数である。もし、反射が完全に行なわれる  $\chi=1$  のときは、Biesel<sup>7)</sup> によって導かれた次式となる。

$$\frac{p_a}{\rho g} = -y + H \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \sin \sigma t \sin kx$$

Table 3 Water pressure and values of  $\eta$

	Number of record	Period T (sec)	Mean water pressure		$\eta$ (a/b)	Means of $\eta$	$\epsilon$
			No. 1, 2, 3 (a) (g/cm <sup>2</sup> )	No. 4, 5, 6 (b) (g/cm <sup>2</sup> )			
Low wave	106	0.9	1.172	2.989	0.392	0.387	26°
	225		0.981	2.568	0.382		28°
	124		1.267	2.665	0.476		24°
	243	0.75	1.097	2.950	0.372	0.424	48°
	142		0.439	1.504	0.292		58°
	264		0.428	1.499	0.286		0.289
	160	0.545	0.249	1.481	0.168	0.225	
	282		0.361	1.284	0.281		
	178		0.242	1.075	0.225		
302	0.50	0.222	0.914	0.243	0.234		
High wave	434	0.9	2.199	5.591	0.393	0.432	30°
	526		2.471	5.247	0.471		38°
	452	0.6	0.654	1.825	0.358	0.388	*
	544		0.919	2.201	0.418		*
	470	0.5	0.602	0.933	0.654	0.501	*
	562		0.305	0.876	0.348		

$$\begin{aligned}
& -\frac{kH^2}{4} \frac{\cos^2 \sigma t}{\sinh kh \cosh kh} \\
& \quad \times \{\cosh 2k(h+y) + \cos 2kx - 1\} \\
& + \frac{3kH^2}{8} \frac{\cosh 2k(h+y)}{\sinh^3 kh \cosh kh} \\
& \quad \times \cos 2\sigma t \cos 2kx \\
& + \frac{kH^2}{2} \tanh kh \cos 2\sigma t
\end{aligned}$$

しかし、波圧を求めるには、式の単純化と実用上から近似的に、上式の右辺第2項のみを用いることとし、その計算値、ならびに実測値と計算値の比較を Table 4 に示す。波圧の実測値で\*印をつけたものは、フーリエ解析を行なった波圧で基本波の値である。

ここで、(2.1) 式の  $\xi$  の形を定めなければならない。以上述べたところにより、動水圧  $p_a$  の近似値は、次式で与えられる。

$$\frac{p_a}{\rho g} = H \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \sin \sigma t$$

したがって、船側に働く波圧の合計、すなわち、波力は、

$$\int_0^l \int_{-d}^0 p_a dl dy = m \xi \sin \sigma t$$

であるから、

$$m \xi = \frac{\rho g H l}{k} \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\}$$

ここで、 $m \doteq \rho B l d$  とおくと、

$$\xi = \frac{gH}{kBd} \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\} \quad (2.14)$$

$$\xi' = \frac{gH}{\sigma^2 B d} \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\} \quad (2.15)$$

(2.14)、(2.15) 式によって、 $\xi$  および  $\xi'$  が定まる。なお、式を整理して列記すれば、次の通りとなる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{s}T}{L} &= \xi' B_u \\ \frac{\dot{s}_f T}{L} &= \xi' B_{u_f} \end{aligned} \right\} (2.7')$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{s}{L} &= \frac{\xi'}{2\pi} B_s \\ \frac{s_f}{L} &= \frac{\xi'}{2\pi} B_{s_f} \end{aligned} \right\} (2.7'')$$

ここに、

$$B_{u_f} = \sqrt{1-2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_1)$$

$$B_{s_f} = \sqrt{1-2\eta \cos \varepsilon + \eta^2} \sin(2\pi t' - \theta_2)$$

### 2.3.3 波圧による横漂流速度

(2.7) および (2.7') 式で理解されるように、波圧による横漂流速度には、定常的な速度  $u_0$  と周期的変動速度  $u_f$  とがある。前者は  $B_u$  の第1項、第2項で規制され、 $B_{u_f}$  が後者の特性を示す。したがって、

$$B_u = B_{u_0} + B_{u_f}$$

また、変位においても同様に、

$$B_s = B_{s_0} + B_{s_f}$$

とに分けられ、 $B_{s_0}$  は時間に比例する変位、 $B_{s_f}$  は周期的変位の特性を表わす。これらは、 $\eta$  および  $\varepsilon$  に

Table 4 Wave pressure  $p_a$

	$T$ (sec)	$L$ (cm)	$H$ (cm)	$y+h$ (cm)	Observed $p_a$ (g/cm <sup>2</sup> )	Theoretical $p_a$ (g/cm <sup>2</sup> )	Observed Theoretical
Low wave	0.90	120.00	2.186	24	1.389	1.8196	0.7635
	0.75	93.75	2.048		1.404	1.5919	0.8818
	0.60	57.60	1.857		0.751	1.2041	0.6233
	0.545	48.09	1.477		0.691	0.8769	0.7886
	0.50	41.67	1.422		0.497	0.7784	0.6388
High wave	0.90	120.00	3.572	21	2.710	2.6113	1.0379
	0.60	60.50	3.013		1.208*	1.4706	0.8215
	0.50	38.11	2.132		0.518*	0.6729	0.7692

$$h = 28 \text{ cm}$$

$$p_a = H \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \sin \sigma t = p \sin \sigma t$$

Table 5 Calculated amplitudes of cyclic displacement  $s_f$ 

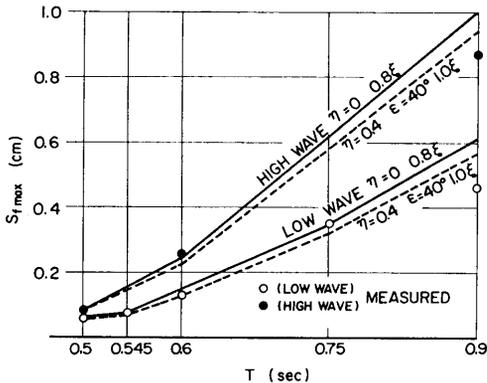
	$T$ (sec)	$\xi'$	$\eta=0$		$\eta=0.4 \quad \epsilon=40^\circ$	
			$s_f \max$ (cm)	$s_f \max \times 0.8$	$s_f \max$ (cm)	$s_f \max \times 0.8$
Low wave	0.90	4.0404 E-02	7.7166 E-01	6.1733 E-01	5.7080 E-01	4.5664 E-01
	0.75	2.9505 E-02	4.4024 E-01	3.5219 E-01	3.2565 E-01	2.6052 E-01
	0.60	2.0302 E-02	1.8611 E-01	1.4889 E-01	1.3767 E-01	1.1013 E-01
	0.545	1.3943 E-02	1.0672 E-01	8.5373 E-02	7.8942 E-02	6.3153 E-02
	0.50	1.1634 E-02	7.7157 E-01	6.1725 E-02	5.7074 E-02	4.5659 E-02
High wave	0.90	6.6022 E-02	1.2609 E-00	1.0087 E-00	9.3270 E-01	7.4616 E-01
	0.60	3.2482 E-02	3.1277 E-01	2.5021 E-01	2.3136 E-01	1.8509 E-01
	0.50	1.7709 E-02	1.0741 E-01	8.5930 E-02	7.9452 E-02	6.3562 E-02

よって変化している。そこで、 $\xi'$  が与えられれば、漂流速度および変位を求めることができる。

まず、周期的変動速度  $\dot{s}_f$  および変位  $s_f$  について、周期は既知であるから、最大振幅（変位）を見いだせば、任意時刻における  $\dot{s}_f$  および  $s_f$  は求められる。 $\eta=0$ ,  $\eta=0.4$ ,  $\epsilon=40^\circ$  の場合の最大振幅の計算値を Table 5 に示した。

実験値に対しては、周期的変位をフーリエ展開し、第2項以下は第1項にくらべて小さいので無視し、第1項の振幅を振幅として表示したのが Table 6 である。

また、波圧の実測値と理論波圧の比が、だいたいにおいて、0.8 であったので、0.8 倍した値も Table 5 に併記した。これらを図示したのが Fig. 4 である。この図でみられるように、周期の大きい波 ( $T=0.9$ ,  $0.75$  sec) の場合は、 $\eta=0.4$ 、また  $\epsilon$  の値はオシログラフによって読まれる  $40^\circ$  のときの値にほとんど一致している。なおまた、波高の大きい波の場合、理論

Fig. 4 Amplitudes of displacement  $s_f$ 

波圧の大きさと実験波圧の比が 1.0 に近いときも観測されているが、この図においても、観測された  $s_f \max$  の値と計算された  $s_f \max$  の値がほとんど等しい値を示している。波高の低い波においては、 $T=0.9$  sec では、 $\eta=0.4$ ,  $\epsilon=40^\circ$  および波圧の比が 0.8 のときに一致している。 $T=0.75$  sec の波についての実測値は、同じく両者に近接している。これに対して、 $T=0.6$  sec 以下の波においては、前にも述べたように、回折波などがあるために、漂流方向前面の船側の波は位相は一致せず、全体として、 $\eta=0$  とみなされるものとしたのであるが、理論値と実測値はよく一致していて、理論式の妥当なことを示している。

次に、波圧による定常的速度  $\dot{s}_0$  の理論値は Table 7 にかかげた。オシログラフが示す定常的速度は、 $\dot{s}_0$  と波浪によって生ずる漂い流れの速度との和であると考えられる。次節ににおいて、この漂い流れの速度を検討する。

### 2.3.4 漂い速度による横漂流速度

波浪によって、水の実質は輸送される。船はこの漂い流れにつれて漂流し、その速度は、漂い流れの速度に等しいと考えられる。この漂い流れは、表面で大きく水底に近づくにしたがって小さくなる。その変化は波形勾配によって異なる。

船の漂流速度は船側の水位が変わらないとすれば、船の底面から喫水線までの平均速度に等しいと考えることができる。その喫水平均速度  $u'_d$  は (2.10) 式で与えられる。また表面の速度  $u'_0$  は (2.11) 式で示される。

昭和 45 年 8 月のこの実験においては、喫水  $d=17.7$  cm、水槽水深  $h=28$  cm であった。 $u_0$ ,  $u'_d$  および  $u_0+u'_d$  の理論値を Table 7 に、Fig. 5 には実測

**Table 6** Measured amplitudes of cyclic displacement  $s_y$

	Run	$T=0.9$ (sec)	Run	$T=0.75$ (sec)	Run	$T=0.6$ (sec)	Run	$T=0.545$ (sec)	Run	$T=0.5$ (sec)
Low wave	no. 100	4.1270E-01	no. 118	3.5696E-01	no. 136	1.4154E-01	no. 154	8.890E-02	no. 172	5.207E-02
	no. 103	4.6480E-01	no. 121	3.6121E-01	no. 139	1.2515E-01	no. 157	5.653E-02	no. 175	9.340E-02*
	no. 219	4.7510E-01	no. 124	3.5263E-01	no. 142	1.3379E-01	no. 160	7.435E-02	no. 178	2.721E-02*
	no. 222	4.1643E-01	no. 237	3.3006E-01	no. 256	1.3527E-01	no. 276	7.420E-02	no. 298	5.536E-02
	no. 225	4.2324E-01	no. 240	3.7561E-01	no. 260	1.3288E-01	no. 279	7.963E-02	no. 302	5.041E-02
			no. 243	3.5308E-01	no. 264	1.5962E-01	no. 282	7.637E-02		
	mean	4.5124E-01	mean	3.5493E-01	mean	1.3804E-01	mean	7.500E-02	mean	5.5690E-02 (5.2613E-02)*
st. devi.	3.7234E-02	st. devi.	1.3531E-02	st. devi.	1.0774E-02	st. devi.	9.650E-03	st. devi.	2.1327E-02 (2.057E-03)*	
High wave	no. 431	8.4486E-01			no. 449	2.3170E-01			no. 464	6.491E-02
	no. 428	8.3334E-01			no. 446	2.0015E-01			no. 470	8.445E-02
	no. 434	9.0556E-01			no. 452	2.2632E-01			no. 556	6.039E-02
	no. 520	8.3471E-01			no. 541	3.1407E-01			no. 559	9.754E-02
	no. 523	8.6756E-01			no. 544	3.0880E-01			no. 562	7.795E-02
	no. 526	9.2379E-01			no. 592	2.7366E-01			no. 577	7.702E-02
	no. 601	8.8775E-01			no. 595	2.6993E-01			no. 574	4.749E-02
					no. 598	3.2314E-01			no. 580	9.025E-02
	mean	8.7108E-01			mean	2.6847E-01			mean	7.500E-02
	st. devi.	3.3149E-02			st. devi.	4.2600E-02			st. devi.	1.547E-02

Table 7 Theoretical values of drifting velocity

	T (sec)	$u_0/c$		$u'_d/c$	$(u_0+u'_d)/c$		$\{(u_0/0.8)+u'_d\}/c$
		$\eta=0$	$\eta=0.4 \ \epsilon=40^\circ$		$\eta=0$	$\eta=0.4, \ \epsilon=40^\circ$	
Low wave	0.90	3.2323 E-02	2.2419 E-02	1.6927 E-03	3.4011 E-02	2.4112 E-02	
	0.75	2.3604 E-02	1.6371 E-02	1.8987 E-03	2.5503 E-02	1.8270 E-02	
	0.60	1.6242 E-02	1.1265 E-02	2.6129 E-03	1.8371 E-02	1.3394 E-02	
	0.545	1.1154 E-02	7.7362 E-03	1.9617 E-03	1.3116 E-02	9.6979 E-03	
	0.50	9.3072 E-03	6.4553 E-03	2.1438 E-03	1.1451 E-02	8.5991 E-03	
High wave	0.90	5.2818 E-02	3.6634 E-02	4.5197 E-03	5.7338 E-02	4.1154 E-02	
	0.60	2.5986 E-02	1.8023 E-02	6.5309 E-03	3.2517 E-02	2.4554 E-02	3.9013 E-02
	0.50	1.4167 E-02	9.8260 E-03	5.2780 E-03	1.9445 E-02	1.5104 E-02	2.2987 E-02

$$u_0/c = \xi' (1 - \eta \cos \epsilon) \times 0.8$$

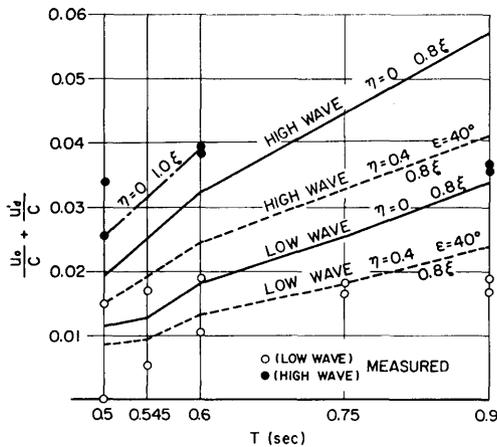


Fig. 5 Drifting velocity

値を併記して図示した。この図においても、周期の大きい場合には、 $\eta=0.4, \epsilon=40^\circ$  の線に近く、周期が小さい場合には、 $\eta=0$  の線の近くに実測値があることがみられる。

#### 2.4 結 言

以上の理論上の考察と実験結果によって、横波による船舶の横漂流速度は、波圧によるものと、漂い流れによるものと和である。波圧による漂流速度は、定常的速度と周期的速度からなると言うことができる。波圧は、重複波の波圧の近似式、

$$\frac{pa}{\rho g} = H \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \sin \sigma t$$

を用いれば、それに係数 1~0.8 を乗じたものが妥当な式である。また、漂い速度は喫水  $d$  間の平均速度

(128)

を用いればよい。

波圧による速度には、船の両側面の波圧の比  $\eta$  と位相差  $\epsilon$  を考慮しなければならない。 $\eta$  は周期が大きく、波長が船長の 1/2 以上の場合には、この実験においては 0.4 程度である。位相差  $\epsilon$  は、ほぼ  $0 \sim 40^\circ$  であった。また、周期の小さい波の場合には、船首および船尾からの回折波が船側に対し直角な波峰線で伝播するなど、複雑な波があり、大局的に  $\eta=0$  とみなされる。

以上の係数を用いて、定常的速度の理論値が求められる。これに波圧の理論値対実測値の比を考慮すれば、係数 1~1.25 を乗じたものが妥当な定常的速度を与える。また、周期的速度もこれと等しい係数を用いて求めることができる。

以上 2 つの速度の和が、横漂流速度を与えることが理解される。

### 3. 波浪時の接岸力

船が波によって横方向に漂流し、弾性構造物に衝突する場合に、その横漂流速度は、2. で述べたように、定常的速度と周期的変動速度との合成された速度と考えることができる。

定常速度による接岸力に対しては、水流をともなうものであるから、既説<sup>1)~6)</sup> の定常速度に関する接岸力算定式を用いる。

周期的変動速度による接岸力は、接岸時における速度、続いて作用する周期的波圧に支配されるものと考えられる。ここで、2. の場合と同じように、船の回転モーメントおよび上下力は無視する。また、接岸時においては、構造物による反力のために、船の速度は

漸減し、船の漂流方向前面の船側に作用する波圧は、反力にくらべて小さいと考えられるゆえに無視する。本文 3. はこの考えに基づき行なった実験研究の結果を述べたものである。

そこで、3.1 において、運動方程式をたて、その解を与え、3.2 においては、実験装置の概要、模型実験について、資料に基づく計算値と実験値とを比較し、計算式の妥当なことを示した。3.3 は結論で、波浪時接岸力の大きさは、定常的速度による接岸力の最大のもとの、周期的速度による接岸力の最大振幅との和が、最大接岸力を与えることを述べたものである。

### 3.1 運動方程式

概説に述べたところにより、接岸時の速度は定常的速度と周期的に変動する速度に分けることができる。

いま、第1項を慣性項、第2項を速度項、第3項を構造物による反力、右辺は波圧を表わすものとし、 $x$  を接岸中における船の変位すなわち防衛工の変位とするならば、次の運動方程式をうる。

$$\ddot{x} + \alpha(\dot{x} - v_0) + kx = \xi \sin(\sigma t + \nu)$$

ここで、 $v_0$  は衝突時における船の定常的速度、 $\alpha = \rho g d^2 l / m \sqrt{g} [d + (h-d)/2]^3$ 、 $k = K/m$ 、 $\xi = (2.14)$  式、 $K$  は防衛工のバネ定数、 $\nu$  は衝突初期における水圧の位相をそれぞれ示す。

この運動方程式は、 $x = v_0 X$  とおいて次のように2つの方程式に分けることができる。

定常的速度に対しては、

$$\ddot{X}_c + \alpha \dot{X}_c + kX_c - \alpha = 0 \quad (3.1)$$

初期条件は、 $t=0$  で、 $X=0$ 、 $\dot{X}=1$

周期的速度に対しては、

$$\ddot{X}_f + \alpha \dot{X}_f + kX_f = \xi_0 \sin(\sigma t + \nu) \quad (3.2)$$

初期条件は、 $t=0$  で、 $X=0$ 、 $\dot{X}=v_i/v_0$

$v_i$  は衝突時における周期的速度を示す。

(3.1) 式の解は判別式  $D = \alpha^2 - 4k \geq 0$  にしたがって、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} X_c &= \frac{\alpha}{k} - \frac{e^{\sigma t}}{k} \left( \frac{\alpha^2 - 2k}{2\phi_+} \sinh \phi_+ t \right. \\ &\quad \left. + \alpha \cosh \phi_+ t \right) \\ X_c &= \frac{2}{\sqrt{k}} - \frac{e^{-\sqrt{k}t}}{\sqrt{k}} (2 + \sqrt{k}t) \\ X_c &= \frac{\alpha}{k} - \frac{e^{\sigma t}}{\phi_-} \sin(\phi_- t + \theta_{20}) \end{aligned} \right\} (3.3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \phi &= -\frac{\alpha}{2} \\ \phi_+ &= \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4k}}{2} \\ \phi_- &= \frac{\sqrt{4k - \alpha^2}}{2} \\ \theta_{20} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{2\alpha\phi_-}{\alpha^2 - 2k} \right\} \end{aligned}$$

(3.2) 式に対する解は  $D \geq 0$  に応じて、次のようになる。

$$\begin{aligned} X_f &= \frac{\xi_0}{\phi_+ (q-r)} [e^{\sigma t} \{ \sqrt{\phi^2 + \sigma^2} \sin(\theta_v + \nu) \} \\ &\quad \times (\sqrt{q} \sinh \phi_+ t - \sqrt{r} \cosh \phi_+ t) \\ &\quad - \phi_+ \sin \nu (\sqrt{q} \cosh \phi_+ t \\ &\quad - \sqrt{r} \sinh \phi_+ t)] \\ &\quad + \sqrt{(\sqrt{r} \phi - \sqrt{q} \phi_+)^2 + r \sigma^2} \sin(\sigma t \\ &\quad + \nu + \theta_{v1}) \\ &\quad + n e^{\sigma t} \left( \cosh \phi_+ t + \frac{\phi}{\phi_+} \sinh \phi_+ t \right) \end{aligned}$$

ここに、 $\theta_v = \tan^{-1}(\sigma/\phi)$

$$\theta_{v1} = \tan^{-1} \{ \sqrt{r} \sigma / (\sqrt{r} \phi - \sqrt{q} \phi_+) \}$$

$$q = (\phi^2 + \phi_+^2 + \sigma^2)^2$$

$$r = 4 \phi^2 \phi_+^2$$

$$\begin{aligned} X_f &= \frac{\xi_0}{\phi^2 + \sigma^2} [e^{\sigma t} \{ t \sqrt{\phi^2 + \sigma^2} \sin(\nu + \theta_v) \\ &\quad - \sin(\nu + \theta_i) \} + \sin(\sigma t + \nu + \theta_i)] \\ &\quad + n e^{\sigma t} t \end{aligned}$$

ここに、

$$\theta_i = \tan^{-1} \{ 2\sigma\phi / (\phi^2 - \sigma^2) \}$$

$$X_f = A \xi_0 \{ B e^{\sigma t} \sin(\phi_- t + \rho_{v2}) \\ + C \sin(\sigma t + \nu + \theta'_{v1}) \}$$

$$+ \frac{n}{\phi_-} e^{\sigma t} \sin \phi_- t$$

ここに、

$$A = 1/\phi_- (q' + r')$$

$$B = \sqrt{q' + r'}$$

$$\times \sqrt{(\phi^2 + \sigma^2) \sin^2(\theta_v + \nu) + \phi_-^2 \sin^2 \nu}$$

$$C = \sqrt{(\sqrt{r'} \phi - \sqrt{q'} \phi_-)^2 + r' \sigma^2}$$

$$\theta_{v2} = \tan^{-1}$$

$$\left\{ \frac{-\sqrt{\phi^2 + \sigma^2} \sqrt{r'} \sin(\theta_v + \nu)}{\sqrt{\phi^2 + \sigma^2} \sqrt{q'} \sin(\theta_v + \nu)} \right.$$

$$\left. \frac{+\phi - \sqrt{q'} \sin \nu}{+\phi - \sqrt{r'} \sin \nu} \right\}$$

$$\theta'_{v1} = \tan^{-1} \{ \sqrt{r'} \sigma / (\sqrt{r'} \phi - \sqrt{q'} \phi_-) \}$$

$$q' = (\phi^2 - \phi_-^2 + \sigma^2)^2$$

$$r' = 4 \phi^2 \phi_-^2$$

以上の諸式によって、波浪時における接岸時の変位  $X$  は、(3.5) 式で与えられる。

$$X = X_0 + X_f \quad (3.5)$$

また、接岸力  $F$  は、(3.6) 式により与えられる。

$$F = KXv_0 \quad (3.6)$$

### 3.2 室内実験

#### 3.2.1 実験装置

実験装置は文献 (6) のものと等しく、受衝バネ装置も同じものを用いた。模型船の寸法等は次の通りである。

船 長	$l=200$ cm
船 幅	$B=40$ cm
喫 水	$d=17.7$ cm
重 量	$W=140$ g
水槽水深	$h=28$ cm

受衝バネ装置のバネ定数  $K$  は、次の通りであり、検定日によって分類して示す。

8-24-[5]	1130 g/cm
8-25-[16]	593 "
8-28-[29]	1000 "
8-28-[11]	557 "

後者の2つは前者の2つに比し、波高を大きくした実験に用いた。

次に、 $\alpha$ ,  $m$ ,  $k$  は次に示す通りであるが、

$$\alpha = \frac{\rho g d^2 l}{m \sqrt{g \left( d + \frac{h-d}{2} \right)}}, \quad m = \frac{W}{g}, \quad k = \frac{K}{m}$$

この  $\alpha$ ,  $k$  および (3.4) 式の  $\phi_-$  の値は Table 8 に示す通りである。この実験は、表によってわかるように、判別式  $D = \alpha^2 - 4k < 0$  の場合であるから、変位  $X$  は、(3.3), (3.4) 式の最後の式による  $X_0$ ,  $X_f$  の和として求めることができる。

Table 8 Values of  $\alpha$ ,  $k$  and  $\phi_-$

Test number	$\alpha$ (sec <sup>-1</sup> )	$k$ (sec <sup>-2</sup> )	$\phi_-$ (sec <sup>-1</sup> )
8-24-[5]	2.9310	7.910	2.4005
8-25-[16]	2.9310	4.151	1.4151
8-28-[29]	2.9310	7.000	2.2028
8-28-[11]	2.9310	3.899	1.3234

#### 3.2.2 実験結果

船が受衝バネに接触する瞬間における船の速度のうち、定常的成分速度は把握できるが、周期的速度は、(3.2) 式の位相  $\nu$  によって定まる。すなわち、2. の (2.8) 式により、

$\eta=0$  の場合

$$\dot{s}_f = \frac{L}{T} \xi' \sin\left(\sigma t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (a)$$

$\eta=0.4$ ,  $\epsilon=40^\circ$  の場合

$$\dot{s}_f = 0.73971 \frac{L}{T} \xi' \sin(\sigma t - 1.2158) \quad (b)$$

前表によって、 $T=0.9 \sim 0.75$  sec に対しては、(b) 式、 $T=0.6 \sim 0.5$  sec に対しては、(a) 式を用いる。実験数値を入れて、以下に例記する。

波高の小さい場合に対しては、

$T=0.9$  sec

$$\dot{s}_f/c = 0.03232 \times 0.7397 \sin(\sigma t - 1.2158) \quad (b)$$

$T=0.75$  sec

$$\dot{s}_f/c = 0.02360 \times 0.7397 \sin(\sigma t - 1.2158) \quad (b)$$

$T=0.6$  sec

$$\dot{s}_f/c = 0.01624 \sin(\sigma t - \pi/2) \quad (a)$$

$T=0.545$  sec

$$\dot{s}_f/c = 0.01115 \sin(\sigma t - \pi/2) \quad (a)$$

Table 9 Values of  $\dot{s}_f/c$

	T \ t	t				Remarks
		0	T/4	T/2	3T/4	
Low wave	0.90	-2.2419 E-02	8.3107 E-03	2.2419 E-02	-8.3107 E-03	(b) 式
	0.75	-1.6371 E-02	6.0689 E-03	1.6371 E-02	-6.0689 E-03	(b) "
	0.60	-1.6242 E-02	0	1.6242 E-02	0	(a) "
	0.545	-1.1154 E-02	0	1.1154 E-02	0	(a) "
	0.50	-9.3072 E-03	0	9.3072 E-03	0	(a) "
High wave	0.90	-3.6634 E-02	1.3580 E-02	3.6634 E-02	-1.3580 E-02	(b) 式
	0.60	-2.5986 E-02	0	2.5986 E-02	0	(a) "
	0.50	-1.4167 E-02	0	1.4167 E-02	0	(a) "

$$T=0.5 \text{ sec}$$

$$\dot{s}_f/c=0.00931 \sin(\sigma t-\pi/2) \quad (a)$$

また、波高の大きい場合に対しては、

$$T=0.9 \text{ sec}$$

$$\dot{s}_f/c=0.05282 \times 0.7397 \sin(\sigma t-1.2158) \quad (b)$$

$$T=0.6 \text{ sec}$$

$$\dot{s}_f/c=0.02599 \sin(\sigma t-\pi/2) \quad (a)$$

$$T=0.5 \text{ sec}$$

$$\dot{s}_f/c=0.01417 \sin(\sigma t-\pi/2) \quad (a)$$

以上による計算結果を Table 9 にかかげた。したがって、 $n=v_i/v_0$  は Table 10 に示す値となる。

以上により、初期条件の数値を知りえたので、(3.4) 式に導入して、 $X_f$  を計算する。まず、その係数 A, B, C を Table 11 に示す。この数値を用い  $X_f$  を求め、また (3.3) 式によって求められる  $X_0$  (Table 12) との和が  $X$  を与える。

計算結果を、Fig. 6 から Fig. 20 に示し、あわせて、Table 13 から Table 16 までにかかげた実験値をプロットして、計算の妥当性を示した。

Table 10 Values of  $n$

t T	Low wave		High wave	
	0 T/2	T/4 3T/4	0 T/2	T/4 3T/4
0.90	$\mp 0.92974$	$\pm 0.34467$	$\mp 0.89017$	$\pm 0.37372$
0.75	$\mp 0.89606$	$\pm 0.33218$		
0.60	$\mp 0.88411$	$\pm 0$	$\mp 0.79915$	$\pm 0$
0.545	$\mp 0.85041$	$\pm 0$		
0.50	$\mp 0.93072$	$\pm 0$	$\mp 0.28570$	$\pm 0$

### 3.3 実験結果と理論値

前項で述べたように、理論値は、波長が長く船長の  $1/2$  以上で、周期の大きい場合には、 $\eta=0.4, 0.8 \xi'$  を用い、波長の短い周期の小さい場合は、 $\eta=0, 0.8 \xi'$  を用いて求めたものであるが、Fig. 6~20 で理解されるように、理論値は実験値と近似し、最大値はほとんど一致していて、理論の妥当なことを示している。

しかし、周期が小さく、波高の小さい波の場合に、少ない例ではあるが、漂流速度が小さく、測定困難な

Table 11 Calculated values of A, B and C

Test No.	T (sec)	A	B ( $\nu=0$ $\nu=\pi$ )	B ( $\nu=\pi/2$ $\nu=3\pi/2$ )	C
8-24-[5]	0.90	1.9973 E-04	318.8366	128.4429	109.6292
	0.75	9.2967 E-05	560.7924	188.2762	160.6893
	0.60	3.6880 E-05	1112.9727	298.8926	255.1268
	0.545	2.4844 E-05	1492.8674	364.1622	310.8392
	0.50	1.7461 E-05	1940.9855	434.4235	370.7795
8-25-[16]	0.90	2.9322 E-04	342.6933	100.0110	69.4742
	0.75	1.4235 E-04	590.2019	143.5513	99.7156
	0.60	5.8512 E-05	1150.7163	223.8553	155.5312
	0.545	3.9868 E-05	1534.7450	271.1929	188.4206
	0.50	2.8261 E-05	1986.8921	322.1507	223.7923
8-28-[29]	0.90	2.1009 E-04	324.5255	122.9852	102.3965
	0.60	3.9539 E-05	1122.0953	283.4741	236.0351
	0.50	1.8812 E-05	1952.0987	411.0055	342.1901
8-28-[11]	0.90	3.1105 E-04	344.0967	97.3222	65.2277
	0.60	6.2305 E-05	1153.2501	217.4247	145.7419
	0.50	3.0132 E-05	1989.4715	312.7029	209.5703

**Table 12** Calculated values of  $X_0$ 

t (sec)	8-24-[ 5 ]	8-25-[16]	8-28-[29]	8-28-[11]
0	0	2.0000E-05	-4.0000E-06	1.5000E-05
0.1	9.8777E-02	9.9310E-02	9.8913E-02	9.9410E-02
0.2	1.9097E-01	1.9514E-01	1.9199E-01	1.9553E-01
0.3	2.7197E-01	2.8494E-01	2.7510E-01	2.8596E-01
0.4	3.3911E-01	3.6703E-01	3.4576E-01	3.6911E-01
0.5	3.9133E-01	4.4042E-01	4.0286E-01	4.4403E-01
0.6	4.2887E-01	5.0469E-01	4.4642E-01	5.1028E-01
0.7	4.5290E-01	5.5985E-01	7.7724E-01	5.6783E-01
0.8	4.6522E-01	6.0625E-01	4.9669E-01	6.1695E-01
0.9	4.6795E-01	6.4443E-01	5.0650E-01	6.5814E-01
1.0	4.6336E-01	6.7513E-01	5.0853E-01	6.9201E-01
1.1	4.5361E-01	6.9914E-01	5.0462E-01	7.1929E-01
1.2	4.4068E-01	7.1730E-01		7.4074E-01
1.3	4.2625E-01	7.3044E-01		7.5710E-01
1.4	4.1170E-01	7.3937E-01		7.6913E-01
1.5		7.4474E-01		7.7751E-01
1.6		7.4753E-01		7.8289E-01
1.7		7.4805E-01		7.8587E-01
1.8		7.4693E-01		7.8693E-01
1.9		7.4464E-01		7.8653E-01
2.0				7.8507E-01

**Table 13** Measured values of berthing force  
8-24-[ 5 ]  $K=1130$  (g/cm)

T	0.9 (sec)			0.75 (sec)			
RUN	100	106		118		124	
t (sec)	$\nu \div \pi/2$	t	$\nu \div \pi$	t	$\nu \div \pi$	t	$\nu \div \pi/2$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.07	1.1190E-01	0.1	2.0439E-01	0.1	1.7743E-01	0.1	2.7026E-01
0.17	3.0096E-01	0.2	2.8014E-01	0.2	3.0090E-01	0.2	4.7938E-01
0.27	4.4476E-01	0.3	2.4966E-01	0.3	3.1446E-01	0.3	5.8612E-01
0.37	4.9965E-01	0.4	1.7391E-01	0.4	2.4752E-01	0.4	5.7351E-01
0.47	4.7541E-01	0.5	1.2102E-01	0.5	1.8751E-01	0.5	4.6288E-01
0.57	3.8525E-01	0.6	1.4343E-01	0.6	2.0752E-01	0.6	3.5825E-01
0.67	2.9187E-01	0.7	2.7252E-01	0.7	3.1762E-01	0.7	3.5825E-01
0.77	2.2737E-01	0.8	4.4688E-01	0.8	4.7168E-01	0.8	4.9151E-01
0.87	2.4661E-01	0.9	6.2842E-01	0.9	5.8535E-01	0.9	6.3901E-01
0.97	3.3393E-01	1.0	7.0417E-01	1.0	6.0396E-01	1.0	7.0888E-01
1.07	4.3942E-01	1.1	6.8534E-01	1.1	5.3504E-01	1.1	6.5163E-01
1.17	4.9964E-01	1.2	5.5267E-01	1.2	3.5485E-01	1.2	4.7647E-01
1.27	4.9073E-01			1.3	3.0095E-01	1.3	2.9112E-01
1.37	3.8239E-01			1.4	2.9109E-01		
1.47	2.1668E-01			1.5	3.6119E-01		

T	0.6 (sec)			0.545 (sec)			
RUN	136	142		154		160	
t	$\nu \div \pi$	t	$\nu \div \pi$	t	$\nu \div \pi/2$	t	$\nu \div 3\pi/2$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.07	1.2318E-01	0.1	1.9618E-01	0.02	4.9112E-01	0.1	1.2798E-01
0.17	2.1277E-01	0.2	2.8096E-01	0.12	2.2000E-01	0.2	5.4229E-01
0.27	2.1277E-01	0.3	2.5935E-01	0.22	3.4941E-01	0.3	0
0.37	2.1277E-01	0.4	2.2444E-01	0.32	3.3765E-01	0.4	0
0.47	2.8387E-01	0.5	2.8096E-01	0.42	2.7765E-01	0.5	1.8221E-01
0.57	4.0202E-01	0.6	4.2810E-01	0.52	3.0824E-01	0.6	3.5575E-01
0.67	5.0112E-01	0.7	5.5445E-01	0.62	4.1765E-01	0.7	3.6659E-01
0.77	5.2068E-01	0.8	5.7523E-01	0.72	5.2706E-01	0.8	2.0174E-01
0.87	4.5409E-01	0.9	4.8462E-01	0.82	5.1412E-01	0.9	9.1106E-02
0.97	3.7346E-01	1.0	3.9318E-01	0.92	4.2706E-01	1.0	1.3232E-01
1.07	3.5162E-01	1.1	3.9318E-01	1.02	3.5765E-01	1.1	2.7549E-01
1.17	3.8962E-01	1.2	4.7714E-01	1.12	3.8706E-01	1.2	3.2972E-01
1.27	4.2385E-01	1.3	5.4780E-01	1.22	4.5647E-01		
1.37	3.8746E-01	1.4	5.0540E-01	1.32	4.4706E-01		
1.47	2.7884E-01	1.5	3.4414E-01	1.42	2.8824E-01		

**Table 14** Measured values of berthing force  
8-25-[16]  $K=593$  (g/cm)

T	0.9 (sec)		0.75 (sec)		0.6 (sec)
RUN	219	225	237	243	256
t (sec)	$\nu \div \pi$	$\nu \div \pi/2$	$\nu \div 3\pi/2$	$\nu \div \pi$	$\nu \div \pi/2$
0	0	0	0	0	0
0.1	1.3926E-01	2.0556E-01	8.4476E-02	1.8855E-01	1.7120E-01
0.2	2.2185E-01	4.1071E-01	7.9611E-02	2.3304E-01	3.3043E-01
0.3	2.2635E-01	5.7143E-01	5.9708E-02	1.9824E-01	4.2826E-01
0.4	1.9857E-01	6.5635E-01	1.1455E-01	1.8062E-01	4.2174E-01
0.5	1.8581E-01	6.3849E-01	2.5387E-01	2.3304E-01	4.2174E-01
0.6	2.3236E-01	5.7579E-01	4.3786E-01	3.8678E-01	4.7717E-01
0.7	3.5060E-01	5.2500E-01	5.9708E-01	5.8978E-01	5.9946E-01
0.8	5.4054E-01	5.0437E-01	6.7669E-01	7.3348E-01	7.0924E-01
0.9	6.9257E-01	5.6479E-01	6.5679E-01	8.0396E-01	7.5815E-01
1.0	8.1081E-01	6.8571E-01	5.7718E-01	7.8326E-01	7.2174E-01
1.1	8.2357E-01	7.7698E-01	5.2941E-01	6.6916E-01	6.7283E-01
1.2	7.6014E-01	8.3492E-01	5.5728E-01	6.1454E-01	6.8261E-01
1.3	6.4189E-01	8.1706E-01	6.4175E-01	6.3436E-01	7.3370E-01
1.4	5.5743E-01	7.1429E-01	7.7134E-01	7.2863E-01	7.8533E-01
1.5	5.3228E-01	5.8056E-01	8.5095E-01	8.4273E-01	7.7065E-01
1.6	5.8296E-01	4.6429E-01	8.2088E-01	8.8238E-01	6.7283E-01
1.7	6.7568E-01	3.9722E-01	7.0146E-01	8.1762E-01	5.6250E-01
1.8	7.6014E-01	3.9722E-01	5.7231E-01	6.8414E-01	5.0163E-01
1.9	7.8566E-01	4.5556E-01	4.9757E-01	5.2555E-01	5.0761E-01
2.0	7.2635E-01		5.0774E-01	4.5110E-01	5.1957E-01
T	0.6 (sec)	0.545 (sec)		0.5 (sec)	
RUN	264	279	282	298	302
t	$\nu \div \pi/2$	$\nu \div 0$	$\nu \div \pi$	$\nu \div \pi/2$	$\nu \div 3\pi/2$
0	0	0	0	0	0
0.1	1.6603E-01	8.3243E-02	1.7141E-01	1.4459E-01	1.0757E-01
0.2	3.4407E-01	2.0185E-01	3.0510E-01	2.5587E-01	1.4343E-01
0.3	4.4238E-01	3.2427E-01	3.5010E-01	3.1491E-01	1.9761E-01
0.4	4.7952E-01	4.3471E-01	4.4805E-01	3.0381E-01	2.9562E-01
0.5	4.8553E-01	4.7116E-01	5.5857E-01	3.6639E-01	4.0319E-01
0.6	5.2867E-01	4.7715E-01	6.6248E-01	4.6026E-01	4.6614E-01
0.7	6.3900E-01	5.2666E-01	6.9226E-01	5.4504E-01	4.5737E-01
0.8	7.7444E-01	6.0011E-01	6.6248E-01	5.7229E-01	4.7490E-01
0.9	8.4817E-01	6.7954E-01	6.4064E-01	5.6245E-01	5.2032E-01
1.0	8.4817E-01	6.9151E-01	6.7042E-01	5.7078E-01	5.7371E-01
1.1	7.9246E-01	6.6104E-01	7.2204E-01	6.1696E-01	5.8247E-01
1.2	7.7771E-01	6.3656E-01	7.4454E-01	6.6768E-01	5.4661E-01
1.3	8.1103E-01	6.5506E-01	6.8498E-01	6.5556E-01	5.2032E-01
1.4	8.7875E-01	6.7954E-01	6.1813E-01	6.1317E-01	5.3625E-01
1.5	8.8476E-01	6.5506E-01	5.8107E-01	5.7078E-01	5.3785E-01
1.6	8.1103E-01	5.6910E-01		5.7229E-01	5.1076E-01
1.7	6.9416E-01	4.8966E-01		5.6548E-01	
1.8	6.2043E-01	4.1676E-01		5.0265E-01	
1.9		4.0424E-01		3.9213E-01	
2.0		3.9173E-01		3.0659E-01	

**Table 15** Measured values of berthing force 8-28-[29]  $K=1000$  (g/cm)

T	0.9 (sec)			0.6 (sec)		0.5 (sec)		
RUN	520	526		538	544	556	562	
t (sec)	$\nu \doteq \pi/2$	t	$\nu \doteq \pi$	$\nu \doteq \pi$	$\nu \doteq 3\pi/2$	$\nu \doteq \pi$	t	$\nu \doteq \pi$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	8.5559E-02	0.1	1.9017E-01	1.7015E-01	5.8008E-02	7.0085E-02	0.1	1.4973E-01
0.15	2.7817E-01	0.2	2.9391E-01	2.4735E-01	1.2218E-01	1.8689E-01	0.2	2.1536E-01
0.25	4.7058E-01	0.3	3.0508E-01	2.3449E-01	2.3255E-01	2.5926E-01	0.3	2.5912E-01
0.35	5.9474E-01	0.4	2.5511E-01	2.4621E-01	3.4831E-01	3.0370E-01	0.4	3.2912E-01
0.45	6.2041E-01	0.5	1.9017E-01	3.0712E-01	4.4841E-01	3.7379E-01	0.5	4.3072E-01
0.55	5.4758E-01	0.6	1.7900E-01	4.1636E-01	4.7767E-01	4.2051E-01	0.6	5.2018E-01
0.65	4.1924E-01	0.7	2.4647E-01	5.1701E-01	4.4507E-01	4.9060E-01	0.7	5.5809E-01
0.75	3.1240E-01	0.8	3.8899E-01	5.6277E-01	4.1581E-01	4.9972E-01	0.8	5.6198E-01
0.85	2.7379E-01	0.9	5.5766E-01	5.1816E-01	4.3686E-01	4.9060E-01	0.9	5.8192E-01
0.95	2.8235E-01	1.0	6.7953E-01	4.6897E-01	4.9153E-01	5.1396E-01	1.0	6.1789E-01
1.05	4.4491E-01	1.1	7.2191E-01	4.5725E-01	5.5262E-01	5.6063E-01	1.1	6.4171E-01
1.15	5.6052E-01	1.2	6.6561E-01	4.9242E-01	5.4723E-01	5.9544E-01	1.2	6.1789E-01
1.25	6.2041E-01	1.3	5.1866E-01	5.3932E-01	4.6946E-01	5.2593E-01	1.3	5.4205E-01
1.35	5.7763E-01	1.4	3.5442E-01	5.3932E-01	3.8937E-01			

**Table 16** Measured values of berthing force 8-28-[11]  $K=557$  (g/cm)

T	0.9 (sec)		0.6 (sec)		0.5 (sec)		
RUN	428	434	446	452	464	RUN	470
t (sec)	$\nu \doteq \pi/2$	$\nu \doteq \pi$	$\nu \doteq \pi/2$	$\nu \doteq \pi$	$\nu \doteq 0$	t	$\nu \doteq 3\pi/2$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1.5732E-01	2.4124E-01	1.6182E-01	1.1751E-01	3.6019E-02	0.1	6.9675E-02
0.2	3.6701E-01	3.7526E-01	3.2515E-01	1.6522E-01	1.2038E-01	0.2	1.2312E-01
0.3	5.6622E-01	4.2454E-01	4.0848E-01	1.7411E-01	2.4123E-01	0.3	2.0181E-01
0.4	6.9732E-01	3.9835E-01	4.2364E-01	2.1294E-01	3.8578E-01	0.4	2.7545E-01
0.5	7.4021E-01	3.4082E-01	4.3455E-01	3.0964E-01	4.7014E-01	0.5	3.4874E-01
0.6	6.7093E-01	3.1567E-01	5.0091E-01	4.2576E-01	5.0616E-01	0.6	3.6606E-01
0.7	5.6619E-01	3.7216E-01	6.1636E-01	5.3553E-01	5.5450E-01	0.7	3.8917E-01
0.8	4.9278E-01	5.0845E-01	7.2424E-01	5.7944E-01	6.0995E-01	0.8	4.3863E-01
0.9	4.8763E-01	6.8680E-01	7.7061E-01	5.6777E-01	6.6256E-01	0.9	5.0469E-01
1.0	5.7670E-01	8.4928E-01	7.3970E-01	5.6015E-01	6.9905E-01	1.0	5.5993E-01
1.1	7.2351E-01	9.4144E-01	7.0879E-01	6.0660E-01	6.9905E-01	1.1	5.7437E-01
1.2	8.7031E-01	9.3320E-01	7.1667E-01	6.7766E-01	6.9905E-01	1.2	5.8014E-01
1.3	9.4680E-01	8.3876E-01	7.7061E-01	7.3832E-01	7.4692E-01	1.3	5.9097E-01
1.4	9.3320E-01	6.8680E-01	8.3212E-01	7.4975E-01	7.7346E-01	1.4	6.1300E-01
1.5	8.1773E-01	5.7134E-01	8.4758E-01	6.9695E-01	7.8341E-01	1.5	6.2238E-01
1.6	6.3753E-01	5.3464E-01	7.8576E-01	6.4670E-01	7.7109E-01	1.6	5.8736E-01
1.7	4.7711E-01	6.0289E-01	7.0879E-01	6.3249E-01	7.4929E-01	1.7	5.4693E-01
1.8	3.9320E-01		6.6273E-01	6.4543E-01	7.4929E-01		
1.9	4.0371E-01		6.6273E-01	6.5812E-01	7.5924E-01		
2.0							

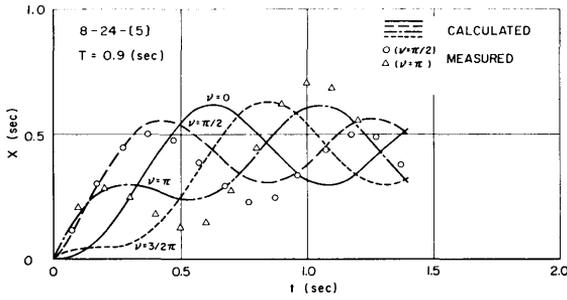


Fig. 6 Comparison between calculated and measured values 8-24-[5]  $T=0.9$  (sec)

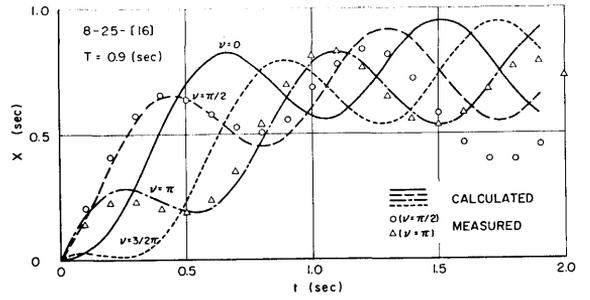


Fig. 10 Comparison between calculated and measured values 8-25-[16]  $T=0.9$  (sec)

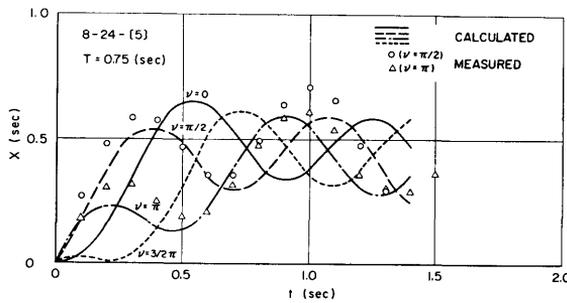


Fig. 7 Comparison between calculated and measured values 8-24-[5]  $T=0.75$  (sec)

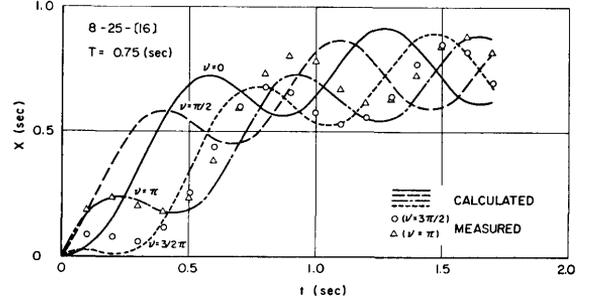


Fig. 11 Comparison between calculated and measured values 8-25-[16]  $T=0.75$  (sec)

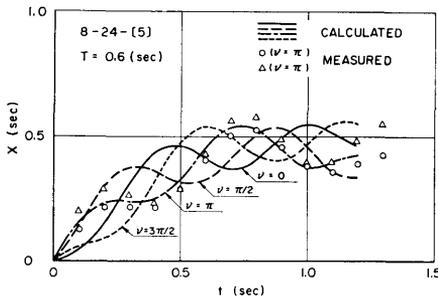


Fig. 8 Comparison between calculated and measured values 8-24-[5]  $T=0.6$  (sec)

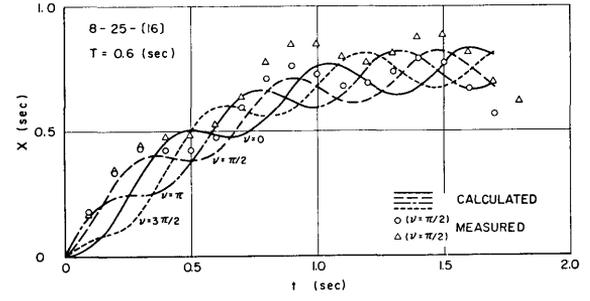


Fig. 12 Comparison between calculated and measured values 8-25-[16]  $T=0.6$  (sec)

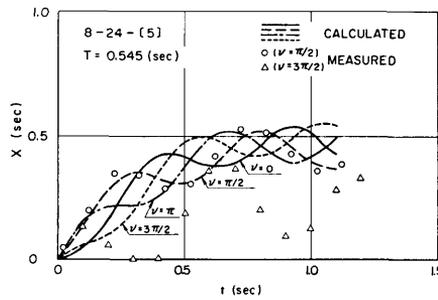


Fig. 9 Comparison between calculated and measured values 8-24-[5]  $T=0.545$  (sec)

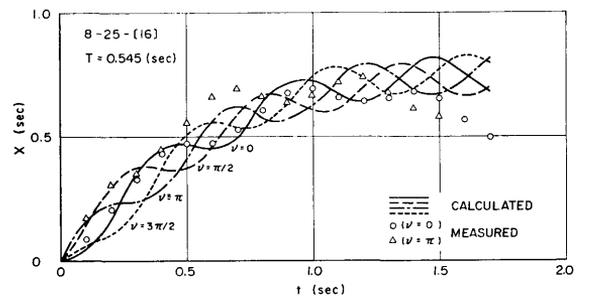


Fig. 13 Comparison between calculated and measured values 8-25-[16]  $T=0.545$  (sec)

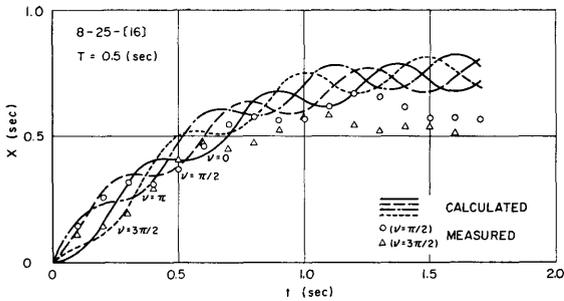


Fig. 14 Comparison between calculated and measured values 8-25-[16]  $T=0.5$  (sec)

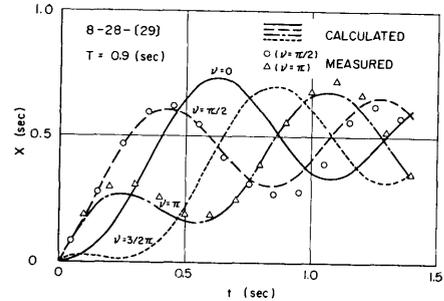


Fig. 18 Comparison between calculated and measured values 8-28-[29]  $T=0.9$  (sec)

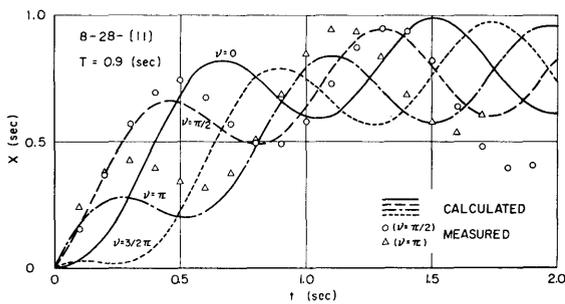


Fig. 15 Comparison between calculated and measured values 8-28-[11]  $T=0.9$  (sec)

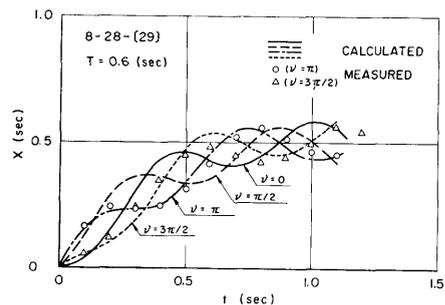


Fig. 19 Comparison between calculated and measured values 8-28-[29]  $T=0.6$  (sec)

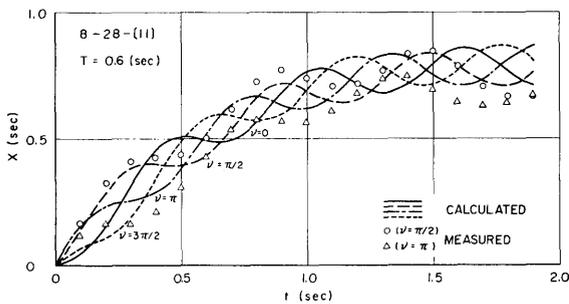


Fig. 16 Comparison between calculated and measured values 8-28-[11]  $T=0.6$  (sec)

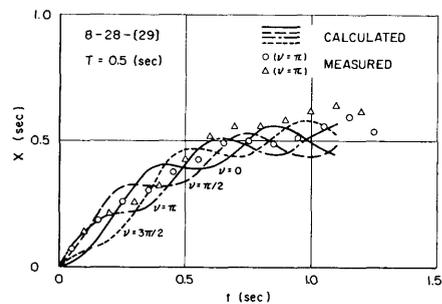


Fig. 20 Comparison between calculated and measured values 8-28-[29]  $T=0.5$  (sec)

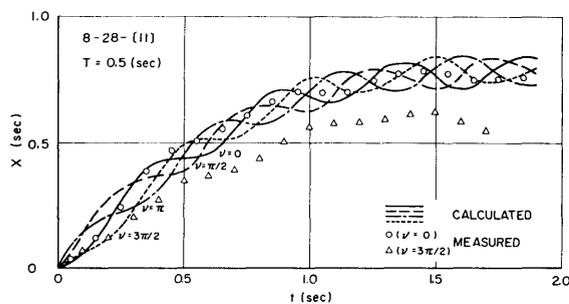


Fig. 17 Comparison between calculated and measured values 8-28-[11]  $T=0.5$  (sec)

場合があった。このような場合には、接岸現象は明らかでなく、保留している船に波が作用しているような状態であって、波浪時横漂流による接岸力の把握を目的とする本論文の特殊な場合と考えられ、別に検討を要するものである。したがって、定常速度を考慮しているこの場合の理論値とは離れている。また RUN 470, RUN 452, RUN 282 などは理論値より小さい値を与えているが、これは接岸により、波による流れの速度の減衰によるものと考えられる。

#### 4. 結 論

2. および 3. で述べた通り，運動方程式の解の中で，判別式  $D < 0$  の場合について，実験値と理論値を比較し，波浪時の接岸力を検討した結果，次のことが言える。

1) 波圧の大きさは，取扱い上，近似的に微小振幅表面波の重複波の波圧を用いてよい。

2) 船の漂流方向前面の船側に作用する波圧と反対側の船側に作用する波圧の大きさの比は，波長が船長の  $1/2$  以下のときは 0，波長の大きいときは 0.4 程度である。

3) 横漂流速度は，定常速度と周期的速度の合成されたものとしてとすることができる。定常的速度は，波力によるものと波の漂い流れによるものと和である。

4) 接岸力は，前項の 2 つの速度による接岸力の合成で，衝突時における周期的速度の位相によって，接岸力の時間的変化は異なるが，最大接岸力は，定常的速度による最大変位と，周期的速度による変位の振幅の和によって求めることができる。すなわち接岸力を  $F$  とすれば，

$$F_{\max} = K (x_{o \max} + x_{f \max})$$

となる。

#### 参 考 文 献

- 1) 若桑 訥：船舶の接岸力について，運輸技術研究所報告，第 11 巻第 10 号，(昭和 36 年 10 月)
- 2) 若桑 訥：船舶の接岸力について（偏心接岸の場合），船舶技術研究所報告，第 1 巻第 1 号，(昭和 39 年 1 月)
- 3) 若桑 訥：船舶の接岸力について（防衝工のバネ常数との関係），船舶技術研究所報告，第 1 巻第 1 号，(昭和 39 年 1 月)
- 4) 若桑 訥：岩国港における 10 万噸船舶用ドルフィン接岸実験，船舶技術研究所報告，第 1 巻第 1 号，(昭和 39 年 1 月)
- 5) 若桑 訥，丹羽 新，栗村康彦：スーパータンカー接岸実験，船舶技術研究所報告，第 1 巻第 6 号，(昭和 39 年 11 月)
- 6) 若桑 訥：柔軟な緩衝工と船舶の接岸力，船舶技術研究所報告，第 4 巻第 2 号，(昭和 42 年 3 月)
- 7) L. Rundgren: Water wave forces, Transactions of Royal Institute of Technology, Stockholm, No. 54, (1958)