

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 173

Dec. 1973

プッシャーバージ連結部に作用する
外力および船体動揺について

平 山 勇

運輸省港湾技術研究所



プッシャーバージ連結部に作用する外力 および船体動揺について

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 模型船の大きさおよび試験条件	5
2.1 模型船の寸法	5
2.2 試験条件	5
3. 実験の方法	7
3.1 外力の測定	7
3.2 船体動揺の計測	8
3.3 加速度, 波高などの計測	9
4. 実験結果およびその考察	11
4.1 外力について	11
4.2 船体の動揺について	19
4.3 加速度について	20
5. あとがき	25
参考文献	26

Wave Force and Ship Motion on the Pusher Barge

Isamu HIRAYAMA *

Synopsis

This paper reports the results of the model test on the external forces acting on the connection of the pusher and the barge generated by wave and also reports the ship motion on the wave.

The barge used for the test has the well part on the center of the stern, where the pusher boat can enter, and the wave force and other forces caused by ship motion occur at the connected area of the pusher and barge. These forces were measured by the strain gauges and the pressure heads. The maximum vertical force on the connection is approx. 33.0 kg (which is approx. 444.0 t in actual ship), and maximum horizontal force is approx. 5.0 kg (which is approx. 67.2 t in actual ship).

The maximum pitching is $\pm 3.0^\circ$ at $\lambda/L = 1.5$ and wave height $H = 18.0$ cm. The maximum heaving is ± 8.0 cm at $\lambda/L = 0.6$ and wave height $H = 18.0$ cm.

* Senior Research Engineer, Machinery Division

プッシャーバージ連結部に作用する外力 および船体動揺について

平山 勇*

要旨

このレポートは、プッシャーとバージの連結部に作用する外力とプッシャーとバージが連結された状態で波浪中における船体の動揺特性について調べたものである。

実験に使用したプッシャーバージは、バージの船尾中央に切欠部を有し、その中にプッシャーをドッキングする構造のもので、プッシャーとバージの連結部には、波力のほかに、バージの動揺によって引きおこされる外力が作用する。これらの力をプッシャーとバージの間に設けた応力測定用金具に貼ったストレンゲージおよびプッシャーの船底に設けた圧力ヘッドによって測定した。ストレンゲージおよび圧力ヘッドにより測定された外力はほぼ等しく、プッシャーを垂直上方に押し上げる力を揚力とすれば、揚力は λ/L （波長/船長）=1.79のときに最大となり、その値は、満載状態において約33.0 Kg（実船で約444トン）、軽荷状態において約31.7 Kg（実船で約426トン）となった。プッシャーを水平方向に押し出す力を水平力とすれば、その最大値は、 $\lambda/L=1.33$ のときに生じ、満載状態で約5.0 Kg（実船で約67.2トン）、軽荷状態で約4.9 Kg（実船で約66.0トン）となった。

船体動揺は、船首、船尾、船中央、船中央側面の4点からポテンショメータによって、ピッチング（縦揺れ）、ヒービング（上下揺れ）およびローリング（横揺れ）の各動揺を計測した。波高=218.0cmを一定にした場合、ピッチングは、 $\lambda/L=1.5$ の付近で最大となりその値は $\pm 3^\circ$ 程度となった。ヒービングは、 $\lambda/L=0.6$ の付近で最大となりその値は $\pm 8.0\text{cm}$ となった。本実験では、波の方向が船に対して向波と追波の二つのケースについて動揺を計測したものであるから、ローリングは理論的には生じない、しかし、水槽壁からの反射波と船体自体の不安定動揺のために若干の横揺れが計測された。その値は、最大 $\pm 1^\circ$ 以内であった。

1. まえがき

プッシャーバージ（Pusher Barge）は、進推機を有するプッシャーとこれによって押航される貨物を保有したバージとから成り、両者は、ワイヤロープ、その他の連結装置によって連結された状態で運航される。プッシャーとバージがワイヤロープ、その他の連結装置によって連結されても、波浪中では、波による力のほかに、プッシャーとバージが独立して動揺するために、両者の動揺モーメントから来る強大な力が連結部に作用するため、ロープの切断、連結装置の破損などの問題を生じ、従来のプッシャーバージの運航は、比較的静穏な海域や河川に限られていた。プッシャーバージは、プッシャーとバージを連結、切断することにより、1台のプッシャーで

複数のバージに適應でき、運航コストも安く、船価も比較的少なくてすむなどの利点があり、大型の外洋航海用のプッシャーバージの要求が高まってきている。この資料のベースとなったプッシャーバージは、運航中には、プッシャーとバージを一体にすることができるので耐波性が高く、外洋航海用としても使用できることが期待される。しかし、このプッシャーバージは、従来のプッシャーバージと異なった形状を有しているため、プッシャーとバージの連結部に作用する外力および船体の動揺性についても未知な点が多い。本実験では、このプッシャーバージを実用化における上記の問題点を解明することを目的とするものである。

*機材部 主任研究官

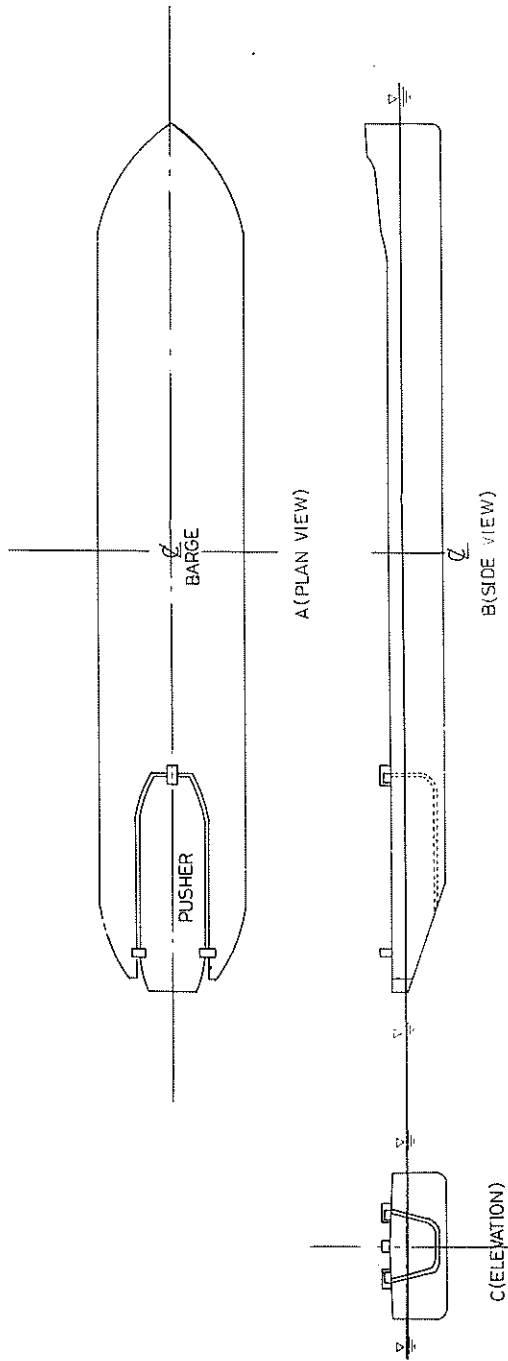


图-1 推船驳

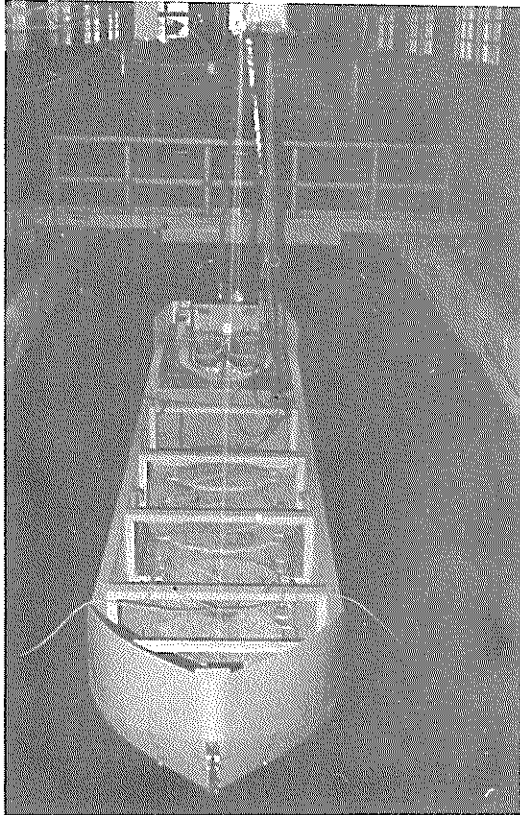


写真 - 1 実験時の模型船

2. 模型船の大きさおよび試験条件

2.1 模型船の寸法

実験に使用した模型船の大きさは表 - 1 のとおりである。

表 - 1 模型船の諸元 (縮尺 1/23.8)

m	L _{pp}	B (mld)	D (mld)	d _r	d _B
Pusher	1.260	0.460	0.252	0.166	0.128
Barge	5.340	0.900	0.336	0.227	0.139

- こゝに、L_{pp} : 模型船の全長
 B (mld) : 船の幅 (中央)
 D (mld) : 船の深 (中央)
 d_r : 吃水 (満載時)
 d_B : 吃水 (軽荷時)

この種の実験を行なう場合、模型船の大きさは、造波

水槽の大きさ、造波能力等を考慮して適当な相似則 (船体動揺の場合は、一般にフルードの相似則) に即って決定されなければならない。しかし、本実験に使用されたプッシャーバージは、船体の流体抵抗の測定用として造られた模型をそのまま流用したもので、縮尺が造波水槽の寸法 (特に水槽幅) からみて若干過大である。造波水槽の幅が 3.0 m しかなく、その中に船幅 0.9 m の模型船を入れた場合、水槽壁の影響を避けることができない。

本実験に使用した模型で、プッシャーとバージを連結して一体とした状態を図 - 1, A, B, C に示す。実験中の模型船を写真 - 1 に示す。

2.2 試験条件

実験に使用した水槽は、当研究所の大型造波水槽 (L × B × D = 105.0 m × 3.0 m × 2.5 m, 最大波高 80 cm, 周期 1.0 ~ 8 秒) で、この水槽のほぼ中央に模型船を設置して波力および動揺の測定を行なった。

実験時の水深は、170 cm で一定とし、使用した波の周期は、1 秒から 4.0 秒までとし、波高は 18.0 cm で一定とした。

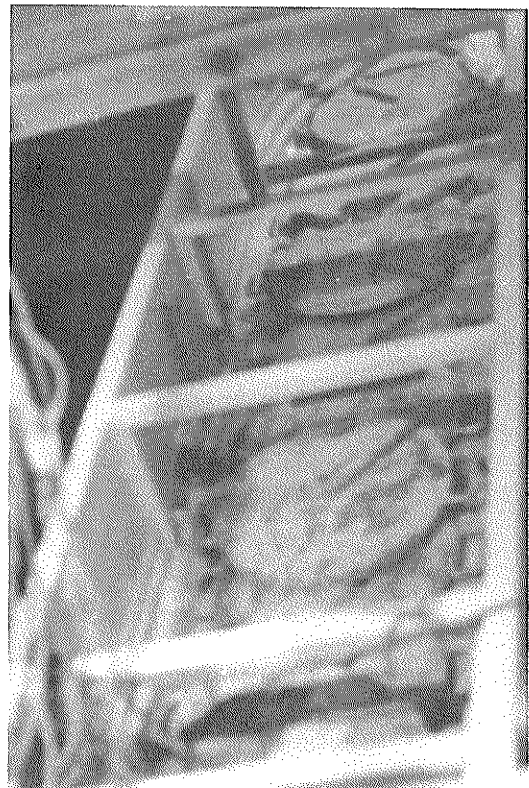


写真 - 2 バラストウエイト

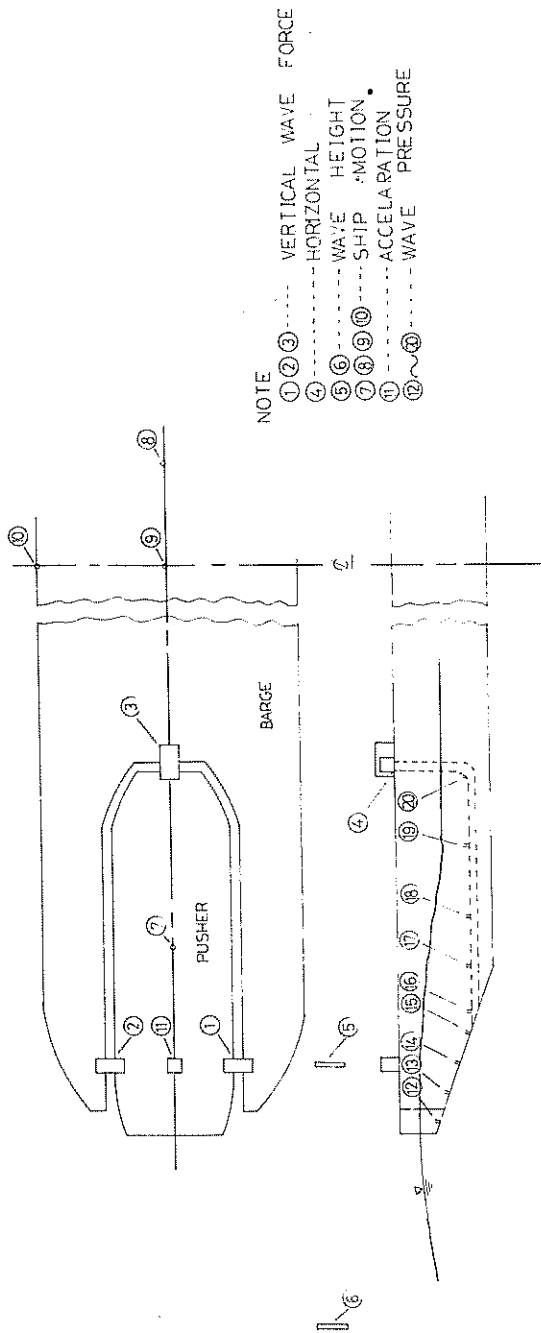


图-2 Measuring Method

実験時の船の状態は、船のコースとの出会い角が 0° の場合（追波…船の後方から波を受ける場合）と出会い角が 180° の場合（向波…船の前方から波を受ける場合）について、満載（Full Load）および軽荷（Ballast Load）状態において波力および船体動揺の測定を行なった。船の吃水の調整は、鋼塊バラストウエイト（写真-2、1個約25Kg程度）によって行なった。船は、実験中、船首、船尾の4点でナイロンロープによって拘束されている。

3. 実験の方法

3.1 外力の測定

プッシャーとバージの連結部に作用する外力は、ストレンゲージと圧力ヘッドの二つの方法によって測定された。プッシャーとバージは、図-2、AおよびBに示すように、プッシャーの船首に一点（L型金具）、船尾に二点（L型金具）、合計三点で結合されていて、プッシャーは、この三点でバージによって吊り下げられた状態となっている。この三点のL型金具にストレンゲージを貼り波力を測定した。連結部の状態を写真-3に示す。プ

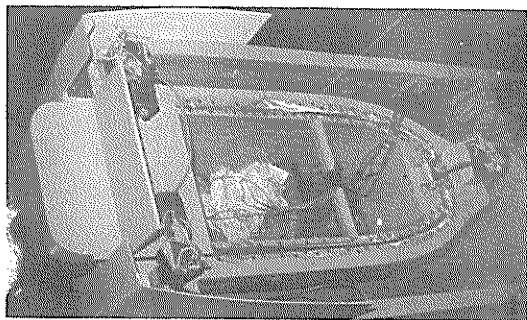


写真-3 プッシャーの連結状態

ッシャーは、上記した三点でピンヒンジになっているため、図-2のストレンゲージ①、②および③によって揚力（プッシャーを垂直上方に押し上げる力）、④によって水平力（プッシャーを前方へ押し出す力）を測定することができる。この場合、測定される揚力および水平力は、波によってプッシャーを垂直方向および水平方向に押し出す力とバージ本体の動揺（主としてピッチング）によって生じるプッシャーの浮力の変化からくる力のほか、船体が動揺する時のプッシャー自身の慣性力も同時に含まれた値となっている。ここでは、これらの合計の力の上向きの分力を揚力、水平方向の分力を水平力として表現した。各ストレンゲージの校正は、バネばかりによって垂直および水平方向から引張って行なった。検定曲線を

図-3に示す。

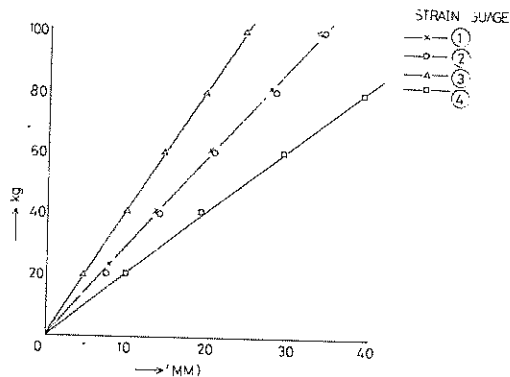


図-3 Calibration of Strain Gauge

圧力ヘッドによる波力の測定は、図-2に示すようにプッシャーの船底に孔を設け、その中に圧力ヘッドを挿入して船底からの波圧を測定した。圧力ヘッドは、船底のカットアップ（Cut up）部に4個（⑫、⑬、⑭、⑮）、船底水平部に5個（⑯、⑰、⑱、⑲、⑳）、合計9個設けた。これらの圧力ヘッドによって、例えば図-4のような船底の単位幅当たりの圧力分布曲線が得られる。図-4の横軸はプッシャーの船尾から船首に至る長さであ

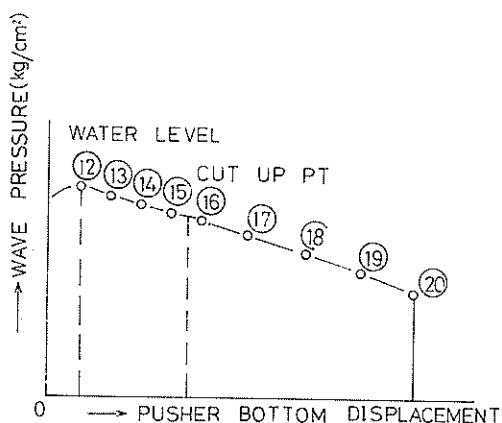


図-4 Pressure Distribution

る。もし船底の波圧分布が幅について同一と仮定すれば、図-4の波圧分布曲線から揚力および水平力を計算することができる。いま、波圧分布曲線を $f(m)$ とすれば、(1)式から揚力または水平力を求めることができる。

$$F = B \int_0^l f(n) \cdot dx \dots\dots\dots (1)$$

こゝに、 f : 揚力または水平力

B : プッシャーの船底幅

l : プッシャーの船底距離

圧力ヘッドによって測定される波圧は、波による動圧と船の動揺による水圧の合計である。波圧は、船底においてのみ測定したが、プッシャーは、その側面が傾斜しているため、船側からも波圧を受けるので、実際の波圧は、(1)式から求めた値よりも大きくなるものと考えられる。圧力ヘッドの校正は、目盛のついたビーカ(直径10.0cm)に水を充し、その中に圧力ヘッドを挿して水柱の高さを読み取って行なった。使用した圧力ヘッドは、500グラムのものである。

波浪中にて動揺しているプッシャーには、揚力、水平力のほかに、モーメントが作用する。モーメントは、プッシャーの船首と船尾に作用する波力の方向が互に逆方向の時に最大となる。こゝでは、最大モーメントの計算も行なった。

3.2 船体動揺の計測

船体の動揺(ピッチ、ヒーブ、ロール)は、前記図-2のように、船首、船尾および中央の4点にコードを結び、これをポテンシオメータに通して直接変位量として測定した。船首、船尾のポテンシオメータによってヒービング量を含んだピッチングが測定され、船中央のポテンシオメータによってヒービング量のみを測定した。また、船側中央部のポテンシオメータによってヒービングの値を含んだローリングを測定した。船のコースと波との出会い角が 0° および 180° の場合の実験であるため、ローリングは生じないはずであるが、本実験では、流用模型を使用したことによる不安定動揺および水槽壁の影響を調べるためにローリングを計測した。この場合のローリングは、ヒービングを含むので、船側で測定されたローリングの値から、船中央で測定されたヒービングの値を差引いてローリングとした。従ってローリングは、横波を受けた場合の値ではなく、出会い角 0° および 180° の場合の横揺である。

上記測定法によれば、船のサージング、ヨーイング、スウェイ等の横移動も同時に測定されることになるが、船の横移動による誤差を出来るだけ小さくするために、ポテンシオメータを十分高い所に設けた。船体とポテンシオメータの距離は、約3.0mで、 ± 30 cmの横移動があった場合のポテンシオメータによる誤差は、 $\pm 1\%$ 以内である。

船首および船尾のポテンシオメータによって測定され

たピッチングはヒービングの値を含んでいるので、これから、真のピッチングとヒービングの各運動を分離する必要があり、これを次に示す。

いま、船が向波を受けて動揺しているとき、船首が動揺し始めの時間を原点にとり、船は中央を中心に縦揺れするものとし、ピッチングおよびヒービングが正弦波であると仮定する。船首のピッチングの半振幅を s_1 、角速度を ω とすると、ヒービングを含んだピッチングの値 y_1 は(オシログラフによって記録された値)(2)式で示される。

$$y_1 = s_1 \sin(\omega t) \dots\dots\dots (2)$$

同様に、船尾の波形は、船尾ピッチングの半振幅を s_2 、船首縦揺れからの位相遅れを θ とすると(3式)によって示される。

$$y_2 = s_2 \sin(\omega t - \theta) \dots\dots\dots (3)$$

(2)式および(3)式は、ピッチングとヒービングを同時に測定したものであるが、ヒービングは上下の移動量であって(2)および(3)式に含まれる値は、同じ符号で同じ量であり、また、ピッチングの量は、船の中央を回轉中心とした回轉運動であって、船首と船尾のピッチングは、符号が逆で、同じ量である。従って、(2)式と(3)式の和を取ることによって真のヒービングの値が得られ、両者の差は真のピッチングを与える。ヒービングおよびピッチングは次のようになる。

ヒービング(H)

$$H = \frac{1}{2} (s_1 \sin \omega t + s_2 \sin(\omega t - \theta))$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + 2s_1 s_2 \cos \theta} \sin(\omega t - c) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{こゝに、} T \text{anc} = \frac{s_2 \cdot \sin \theta}{s_1 + s_2 \cdot \cos \theta}$$

ピッチング(P)

$$P = \frac{1}{2} (s_1 \sin(\omega t) - s_2 \sin(\omega t - \theta))$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 - 2s_1 \cdot s_2 \cdot \cos \theta} \sin(\omega t + c') \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{こゝに、} T \text{anc}' = \frac{s_2 \cdot \sin \theta}{s_1 - s_2 \cdot \cos \theta}$$

(4)および(5)式からわかるように、ヒービングおよびピッチングの最大値は、位相角 θ によって変化する。いま、ヒービングとピッチングの傾向をみるために $s_1 = s_2$ とする(実際には、ヒービングがゼロかまたはピッチングがゼロになる場合以外は $s_1 = s_2$ にならず、通常は $s_1 \neq s_2$ である。) $s_1 = s_2$ とした場合のヒービングお

よびピッチングの最大値は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Hor P} &= \frac{1}{2} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 \pm 2s_1 s_2 \cos \theta} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{2s_1^2 \pm 2s_1^2 \cos \theta} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1 \pm \cos \theta) s_1^2} \\ &= \frac{s_1}{\sqrt{2}} \sqrt{(1 \pm \cos \theta)} \quad (6) \end{aligned}$$

位相角 θ について、ヒービング、ピッチングの最大値を計算した値を表-2 および図-5 に示す。

表-2 位相角とヒーブおよびピッチ

位相角(θ)	Heave	Pitch
0	s_1	0
$\pi/4$	$\sqrt{1+\sqrt{2}} \cdot s_1/2$	$\sqrt{1-\sqrt{2}} \cdot s_1/2$
$\pi/2$	$s_1/\sqrt{2}$	$s_1/\sqrt{2}$
$3\pi/4$	$\sqrt{1-\sqrt{2}} \cdot s_1/2$	$\sqrt{1+\sqrt{2}} \cdot s_1/2$
π	0	s_1

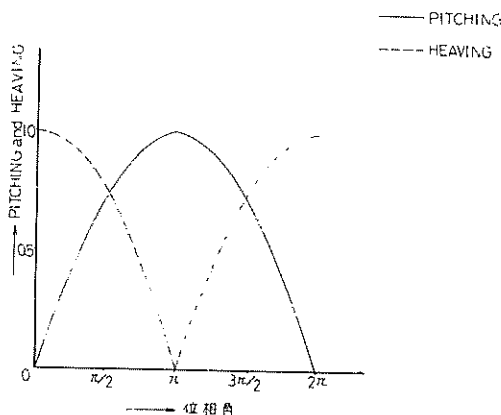


図-5 Pitching and Heaving

表-2 および図-5 から、位相角ゼロの時はヒーブが最大となり、ピッチは最小となる。この時の動揺は、上下運動のみであるから、船首と船尾のピッチングと船中央のヒービングは全部同位相となる。また、位相角 π の時は、ヒーブがゼロでピッチが最大となる。この時の動揺はピッチのみであるから、船首と船尾のピッチ量は等しく山と谷が逆になっている。図-5 から模型船のヒーブおよびピッチの固有周期をも知ることができる。位相角が0となる時、ヒーブの値は最大となるので、この時の動揺周期がヒーブの固有周期である。またピッチングの固有周期は、位相角が π となる時の周期である。模型船

の固有周期を知るもう一つの方法は、これが一般によく行なわれているが、静水中で船体を自由振動させた時の周期を測定する方法である。しかし、この方法では、船の抵抗が大きい場合には、動揺の減衰が大きく周期を測定することが困難となる場合がある。従って、減衰の大きい模型船の場合には、種々の周期の波を縦方向に与えて動揺させ、船首、船尾のヒーブを含んだ連成のピッチングを測定することによって、少くともピッチング、ヒービングの固有周期は求めることができる。同様に、横波を与えローリングを二点で測定すれば、ローリングの固有周期も知ることが可能となる。

3.3 加速度、波高などの計測

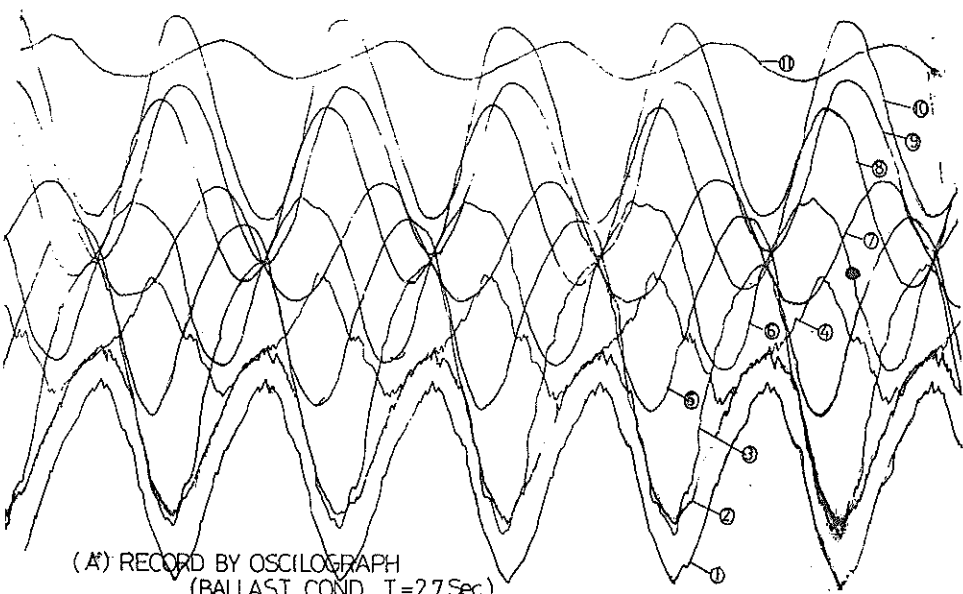
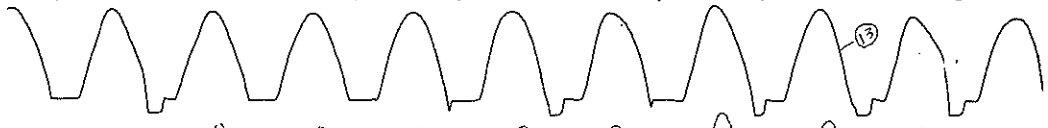
プッシャーとバージが一体となって動揺しているときのプッシャー中央部における上下方向の加速度を測定した。加速度計は2Gのもので、測定位置は、図-2における④がそれである。加速度の測定の目的は、1つは、プッシャーがバージに波浪中にてドッキングする際に、両者が別々に動揺しているためにプッシャーとバージのウエル部が衝突することがあるので、その衝撃荷重がどの程度になるかを知ることと、2つは、加速度を二回積分することによってその点の変位量を知ることから、加速度計による動揺測定に使用する可能性について調べることにある。いま、プッシャーとバージをドッキングする直前に、バージのウエル部における上下方向の加速度を α とすると、バージの動揺(ピッチングおよびヒービング)による上下方向の荷重は、バージの排水量を W とすれば、約 $w/2$ となるから、上下方向に作用する力は $W \cdot \alpha/2$ となる。この力は、プッシャーに対して衝撃荷重として作用するので、これが大きい場合には、ショックアブソーバなどの衝撃緩和装置を考える必要がある。

また加速度から動揺振幅を求める方法は、動揺が正弦波($s=s_0 \sin \omega t$) で表わされるものと仮定すれば、これを2回積分すると、 $d^2 s/dt^2 = s_0 \cdot \omega^2 \sin \omega t = \alpha$ となるから、加速度の最大値を取ることにより、その点の動揺振幅 $s_0 = \alpha/\omega^2 = \alpha T^2/4\pi^2$ となる。

波高と波長は、抵抗式波高計によって測定した。波高計の計測位置は、図-2において⑤および⑥の所である。波高計⑤と⑥の距離は5.0mで、この距離を通過する波の速度から波の波長がわかる。実験中、波高は $H=18.0$ cmに一定となるように努めたが、造波板の偏心の調整が難しく必ずしも18.0cmとはならず、多少の増減があった。この場合は、波力および船体の動揺振幅が、同一周期においては波高に正比例するものと仮定して波高18.0cmに比例配分して換算した。



(B) RECORD BY PEN OSCILO.



(A) RECORD BY OSCILOGRAPH
(BALLAST COND. T=2.7 Sec.)

图-6 Example of Record

4. 実験結果およびその考察

本実験の電磁オシログラフおよびペン書きオシログラフによる記録例（軽載，追波，周期2.7秒）を図-6，(A)，(B)に示す。図-6において，①，②，③および④はストレンゲージによる揚力と水平力の記録例である。⑤および⑥は波高，⑦，⑧はそれぞれ船尾，船首のピッチング，⑨はヒーピング，⑩はローリング，⑪は加速度の記録例である。⑫から⑰までは，圧力計によるプッシャー船底の波圧をペン書きオシロで取ったものである。

4.1 外力について

図-7，図-8は，それぞれ追波および向波について，満載および軽荷状態のときのストレンゲージから得られた揚力である。図-9，図-10は，上記と同様の状態でストレンゲージによって測定された水平力である。揚力は，ストレンゲージ①，②および③（図-2）によって測定された上方向の力の合計値である。図-7および図-8において，揚力の最大値は， $T=2.75$ 秒， $\lambda/L=1.79$ のときに生じ，その値は，追波，満載状態で約33.0Kg（実船について $33.0 \times 23.8^3 = 444$ t），軽荷状態で約3.0Kgとなっている。向波の場合には，満載

軽荷状態においてほぼ等しく，その値は約31.7Kg（実船について426t）となっている。

水平力は，プッシャーを後方から前方へ押す力（サーシングの力）を意味し，その最大値は，追波において $T=2.25$ 秒， $\lambda/L=1.33$ のときに生じ，約5.0Kg（実船について67.2t），軽荷状態の場合は小さく約4.9Kgとなっている。向波の場合は， $T=2.15$ 秒， $\lambda/L=1.22$ のときに最大水平力となり，満載状態のとき4.95Kg，軽荷状態のとき4.75Kgとなっている。

図-11~14は，プッシャーに作用する外力によるモーメントの最大値で，プッシャーの船首，船尾のストレンゲージの測定値に両者の距離（本実験では1.0m）を掛け合わせたものである。前記した揚力は，垂直上方向の力であって，揚力が最大となる場合には，モーメントは小さくなる。一方，モーメントは，プッシャーの船首と船尾に作用する力の方向が逆になる場合に最大となるから，モーメントが最大のときの揚力は小さくなる。モーメントが最大となる場合のその方向は，時計廻りと反時計廻の両方を取ってあるが，追波の場合は，時計方向のモーメントが反時計方向のそれを上まわっている。

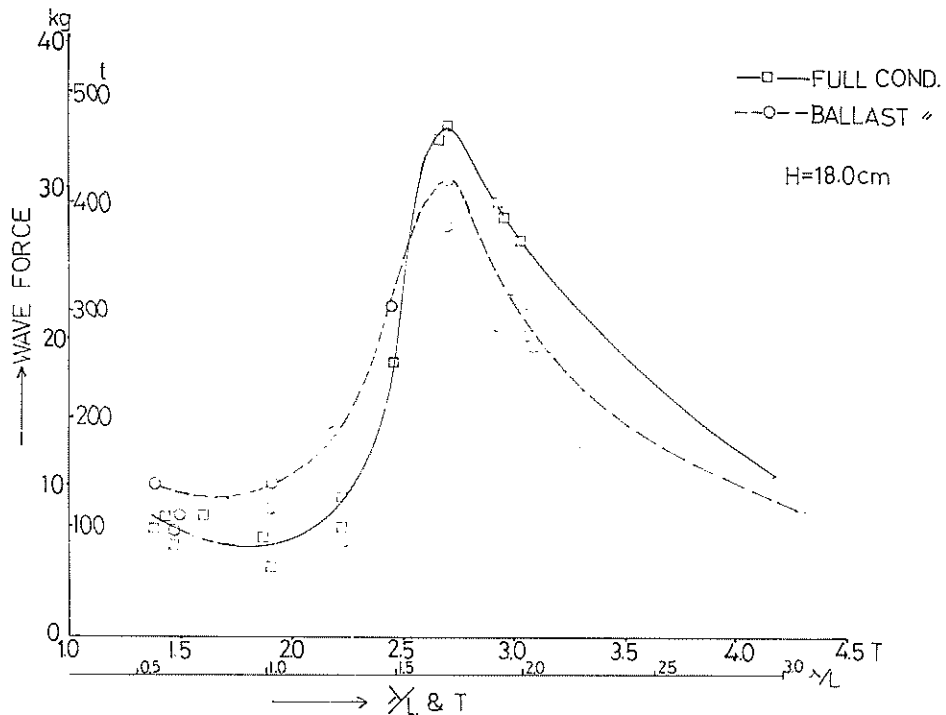


図-7 Vertical Wave Force (追波)

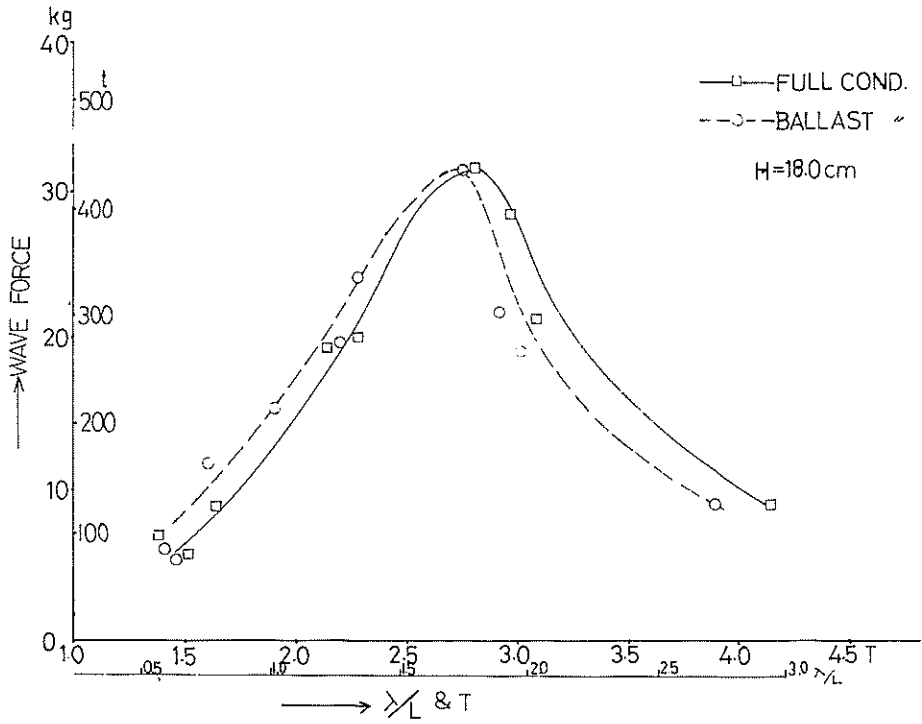


图-8 Vertical Wave Force (向波)

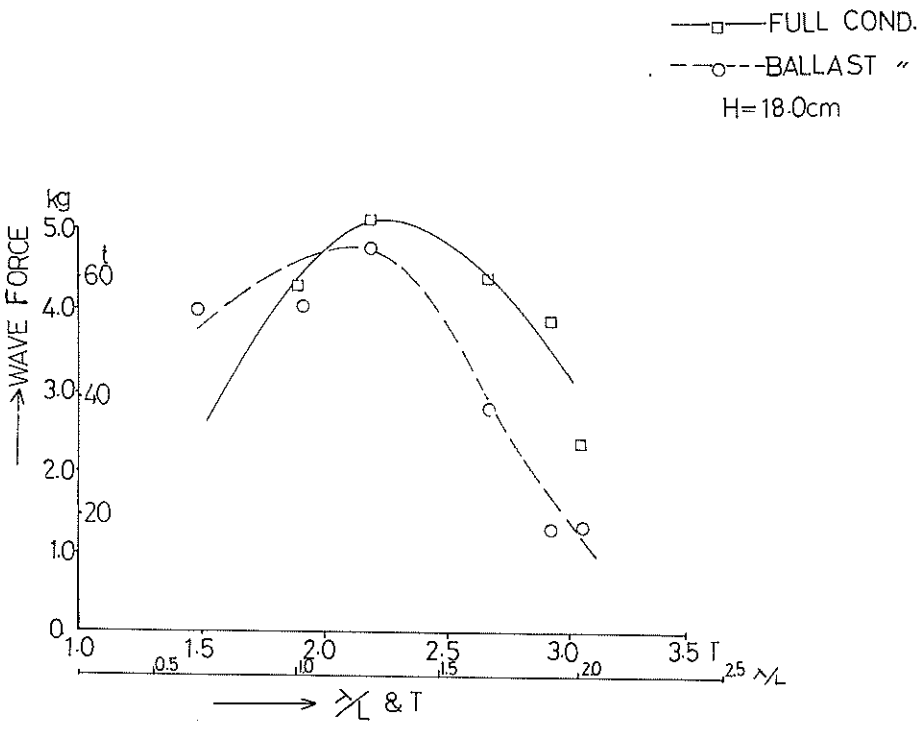


图-9 Horizontal Wave Force (追波)

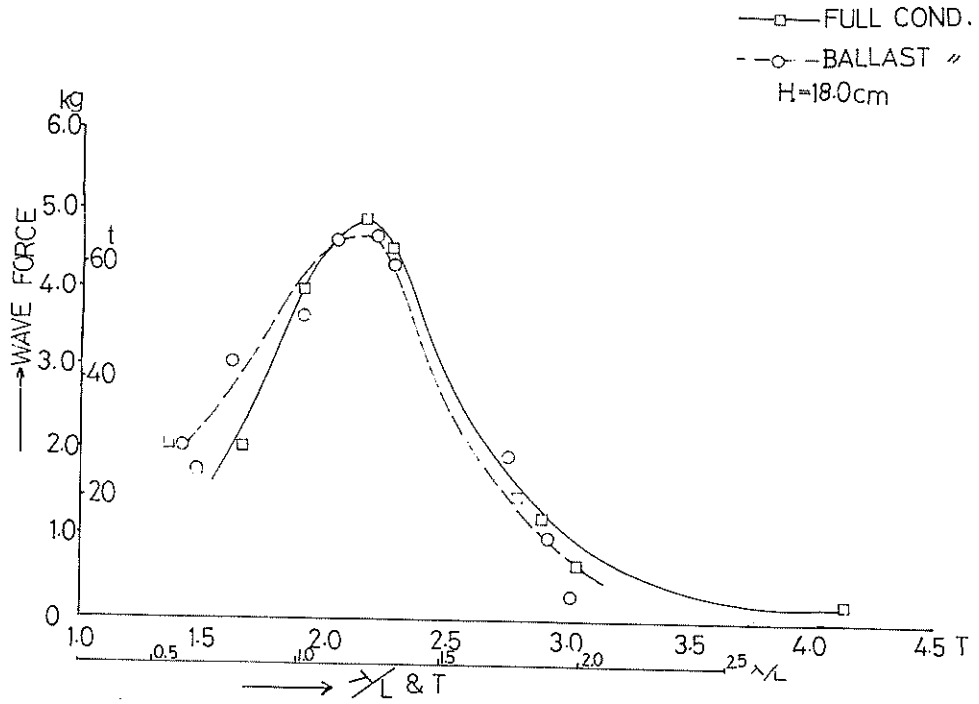


图-10 Horizontal Wave Force (向波)

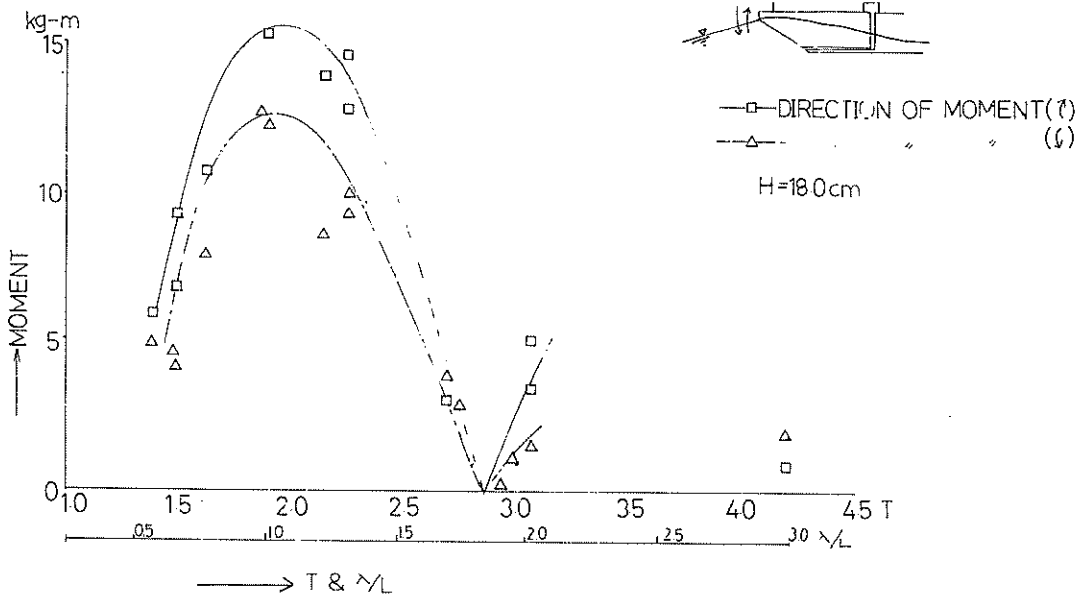


图-11 Moment of Pusher in Full Cond (追波)

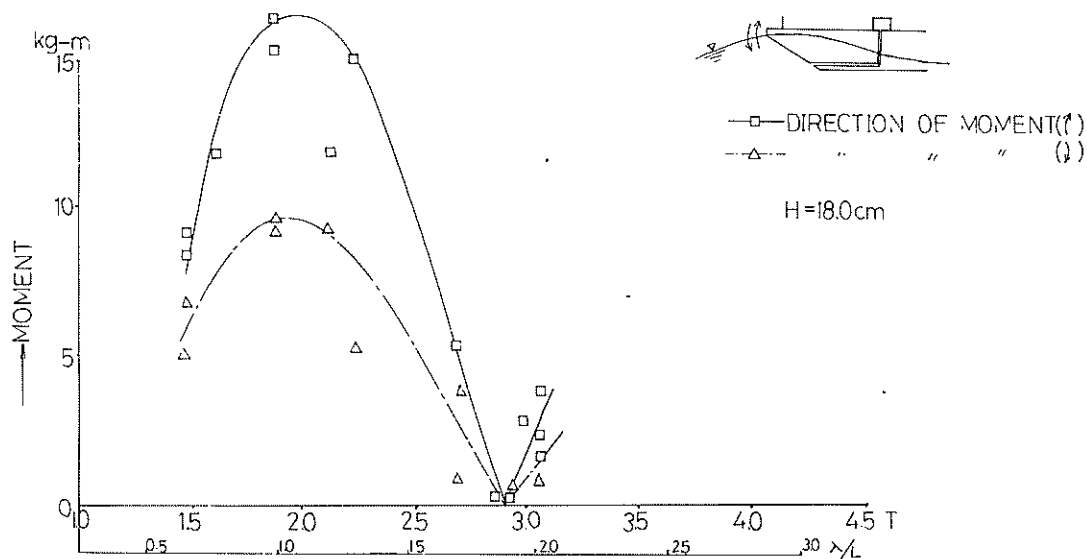


图-12 Moment of Pusher in Ballast Cond (追波)

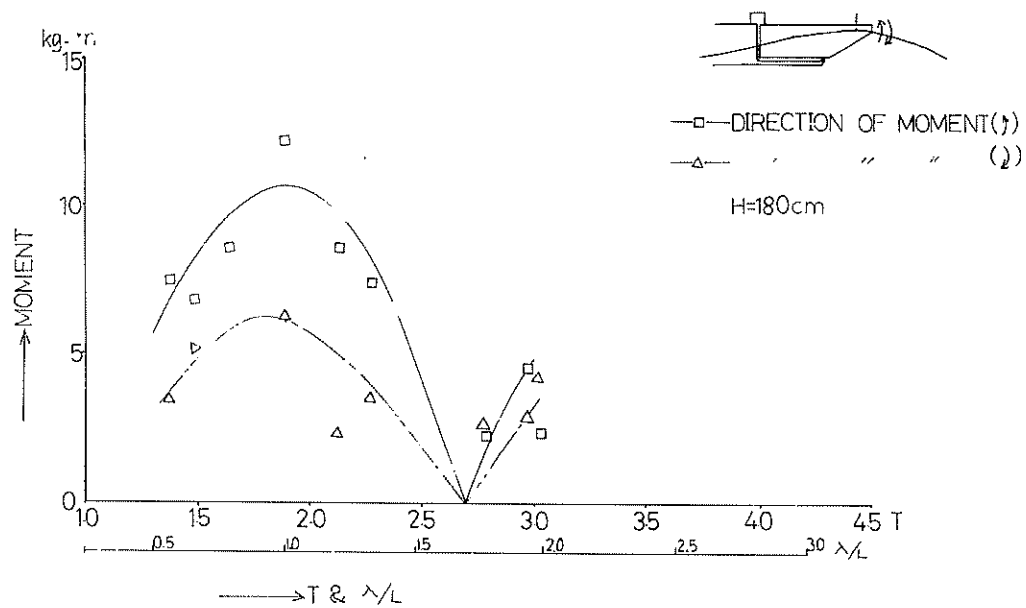


图-13 Moment of Pusher in Full Cond (向波)

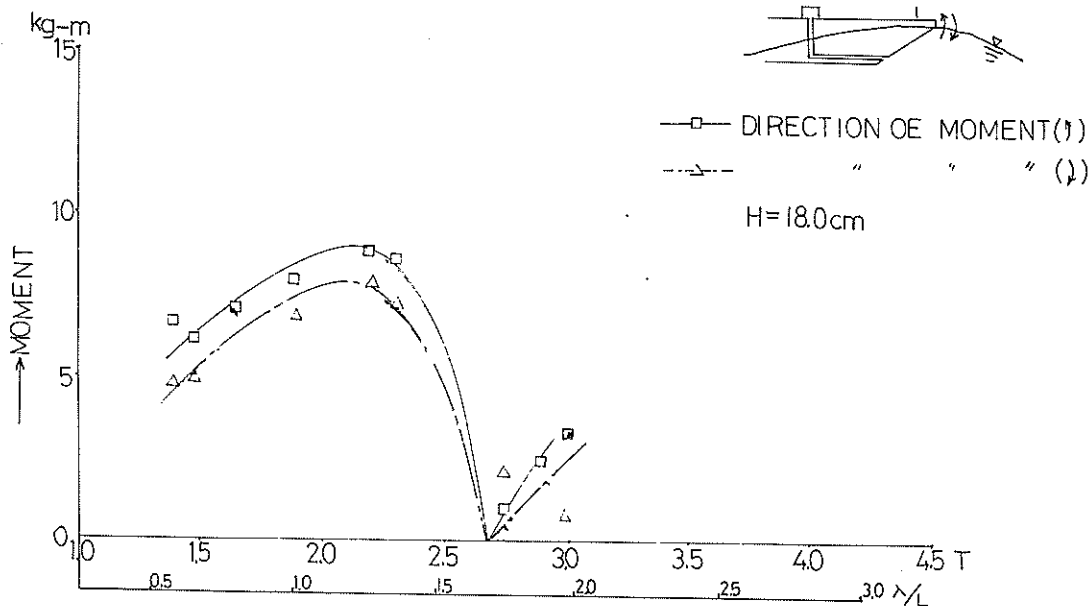


図-14 Moment of Pusher in Ballast Cond (向波)

向波を受ける場合は、逆に反時計方向のモーメントが時計方向のモーメントよりも大きくでている。いずれの場合も、バージ本体が動揺して、船尾が水中に下降する時のモーメントがその逆方向のモーメントを上まわっていることを示している。図-11および図-12から追波を受ける場合の最大モーメントは、満載状態で、 $T = 1.9$ 秒、 $\lambda/L = 1.05$ において 15.5 Kg-m (実船について $15.5 \times (23.8)^4 = 4960 \text{ t-m}$)、軽荷状態で 16.0 Kg-m (実船について 5120 t-m) となっている。向波の場合のモーメントの最大値は、満載状態で、 10.3 Kg-m 、軽荷状態で 9.3 Kg-m となっている。追波を受ける場合のモーメントの最大値は、向波を受ける場合のモーメントの約1.5倍となっている。プッシャーの受けるモーメントは、船体の動揺による力と波力による力によって生起するが、追波の場合は、プッシャー後方から直接波力を受けるので、それだけ大きく出るものと考えられる。

図-15～30までは、圧力ヘッドを用いて、追波と向波を受ける場合のプッシャー船底の波圧分布を λ/L をパラメータとして描いたものである。揚圧力 (Vertical Pressure) は、プッシャーを垂直上方向に押し上げる圧力をプラス、その逆方向をマイナスとした。図-15～20までは、追波の場合の波圧分布曲線で、圧力ヘッドは、プッシャーのカットアップ部に4個、船底水

平部に5個、合計9個となっているが、向波を受ける場合は (図-21～30)、圧力ヘッドは6個だけを使用した。従って、向波の場合は、船底距離 85 cm 以降は推定値を示した。各図の波圧分布は、静水面に設けられている圧力ヘッド (図-2において②) が最大になる時の各ヘッドの圧力を取ったものである。これは、静水面における波圧が最大となる時の各点の波圧の合計圧力が最大となることが知られており、本実験でもこれが実証されたので、これをもって最大の波圧分布曲線を描いた。

追波および向波のいずれの場合も、 λ/L が比較的小さい領域 (本実験では L が一定であるから、波の周期が短い場合) では、モーメントを生じさせるような波圧分布を示すが、 λ/L が大きくなっていくと揚圧力のみが作用する現象を示している。この理由は、明確ではないが、考えられることは、プッシャーの船長に比較して波長が短い場合 (λ/L が小)、波によって生起するプッシャー底部の波圧が、船首と船尾では逆方向に働くが、一方波長が長くなっていくと船首と船尾の波圧が同じ方向に作用することによるものと思われる。

いま、プッシャーの船底の圧力分布が、船底の幅方向に同じ値とすれば、(1)式からプッシャー全体に作用する揚力および水平力を算定することができる。最大の揚力と最大のモーメントについて、波圧分布曲線から求めた値とストレングージにより測定された値を比較してみる。

ここで、プッシャーのカットアップ部の巾を32.4cm、船底部の巾を29.4cmとする。

最大揚力(ストレンゲージによる場合)

図-7から、追波、満載状態の場合の最大揚力は、 $\lambda/L=1.79$ のとき、 $F_1=33.0\text{Kg}$ である。

図-8から、向波、満載状態の場合の最大揚力は、 $\lambda/L=1.79$ のとき、 $F_2=31.7\text{Kg}$ となっている。

最大揚力(圧力ヘッドによる場合)

図-18から、追波、満載状態の場合の最大揚力は、 $\lambda/L=1.75$ のとき、

$$F_1' = 285\text{g/cm} \times 32.4\text{cm} + 615\text{g/cm} \times 29.4\text{cm} \\ = 9230 + 19000 = 28850\text{g} = 28.85\text{Kg}$$

図-27から、向波、満載状態の場合の最大揚力は、 $\lambda/L=1.73$ のとき、

$$F_2' = 285 \times 32.4 + 430 \times 29.4 = 9230 \\ + 12650 = 21980\text{g} = 22\text{Kg}$$

上記の計算結果から、ストレンゲージによる揚力は圧力ヘッドによる揚力よりも大きくでている。これは、プ

ッシャーの側面が傾斜していて、その傾斜部にも波圧が作用するが、本実験では、側面の波圧分布は考慮していないことによるものである。

モーメントの最大値について、ストレンゲージによる値と圧力ヘッドにより求められた値を比較してみる。最大モーメント(ストレンゲージによる場合)

図-11から、追波、満載状態で、モーメントの最大値は $\lambda/L=1.05$ のときに生じ、その値は、

$$M_1 = 15.5\text{Kg-m}$$

図-13から、向波、満載状態で、モーメントの最大値は $\lambda/L=1.05$ のときに生じ、その値は、

$$M_2 = 10.3\text{Kg-m}$$

圧力ヘッドによる最大モーメント

図-17から、追波、満載状態で、モーメントの最大値は、 $\lambda/L=1.0$ のとき、

$$M_1' = (320 + 250\text{g/cm} \times 90\text{cm} \times 30.9\text{cm} (\text{船底平均幅})) \\ = 1580000\text{g-cm} = 15.80\text{Kg-m}$$

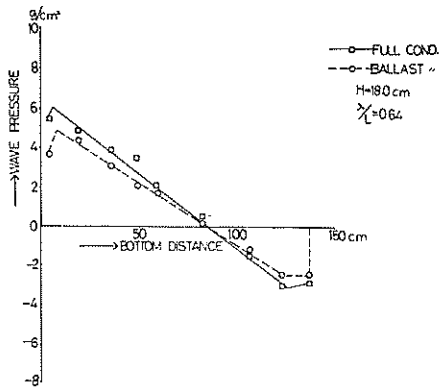


図-15 Wave Pressure (追波)

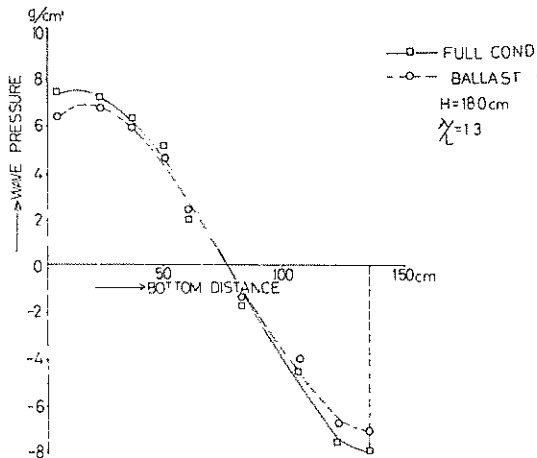


図-16 Wave Pressure (追波)

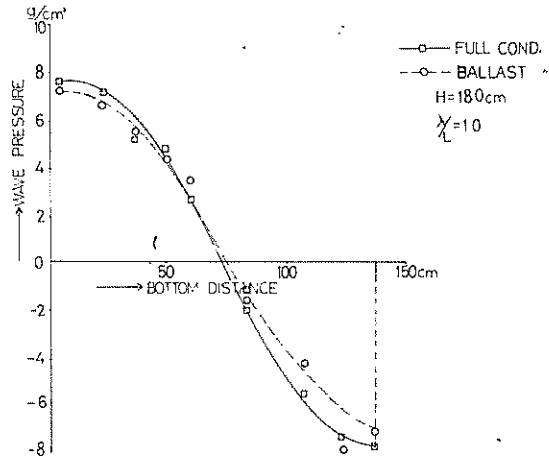


図-17 Wave Pressure (追波)

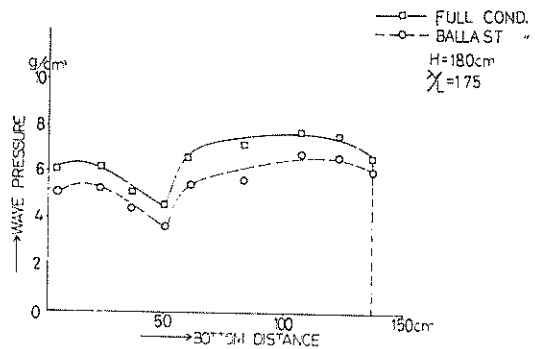


図-18 Wave Pressure (追波)

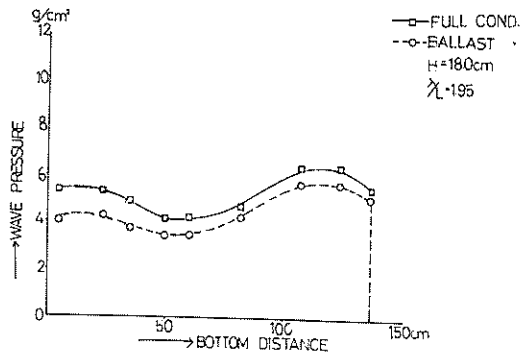


图-19 Wave Pressure (追波)

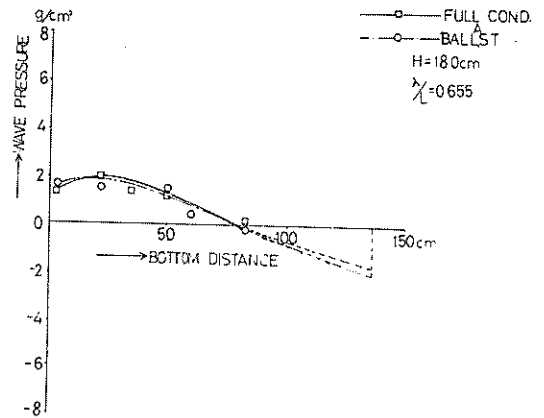


图-22 Wave Pressure (向波)

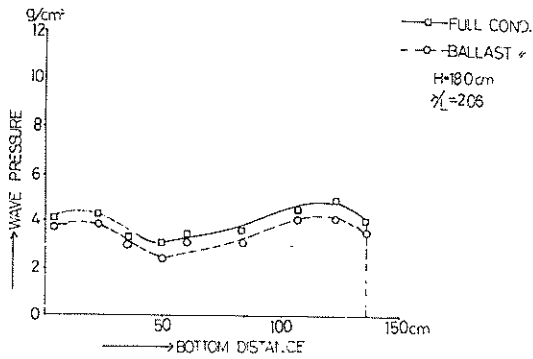


图-20 Wave Pressure (追波)

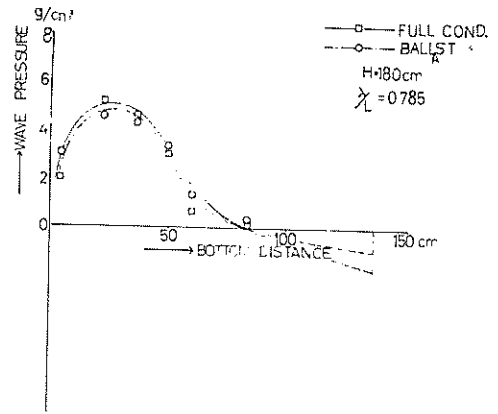


图-23 Wave Pressure (向波)

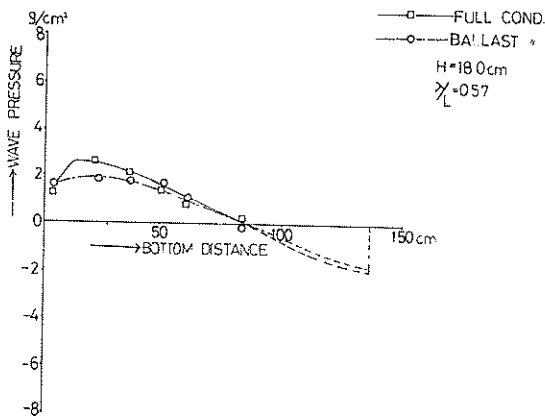


图-21 Wave Pressure (向波)

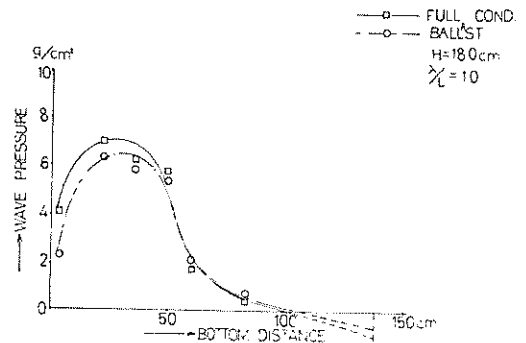


图-24 Wave Pressure (向波)

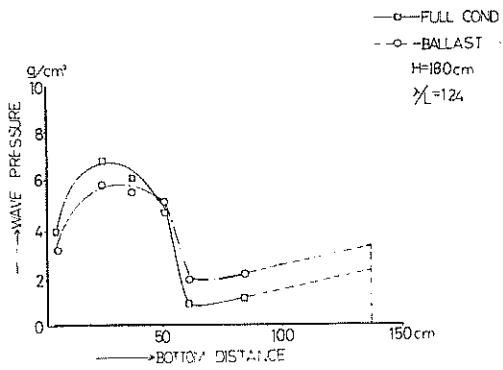


图-25 Wave Pressure (向波)

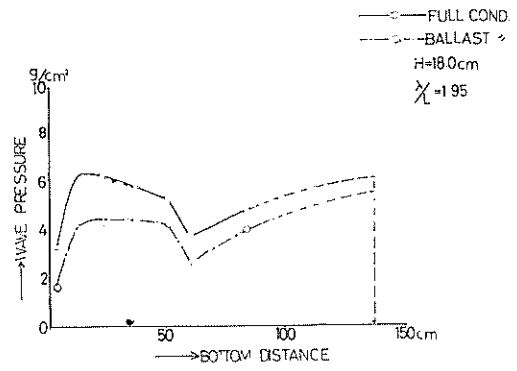


图-28 Wave Pressure (向波)

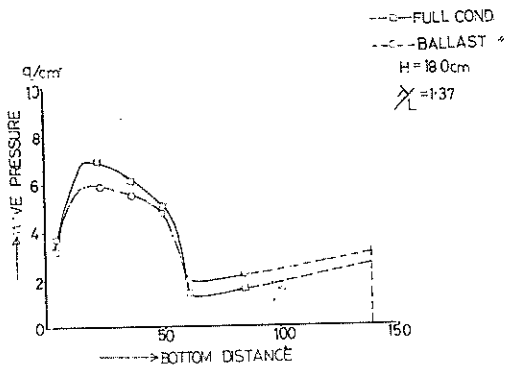


图-26 Wave Pressure (向波)

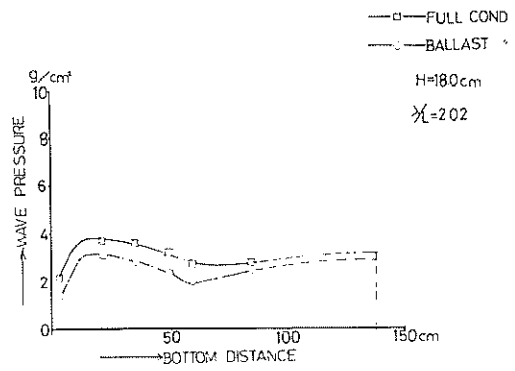


图-29 Wave Pressure (向波)

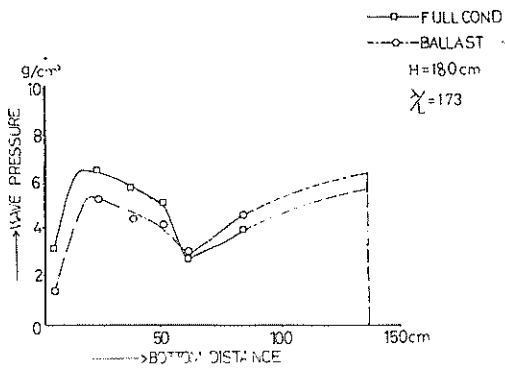


图-27 Wave Pressure (向波)

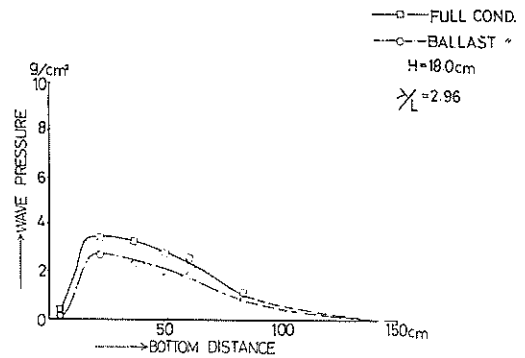


图-30 Wave Pressure (向波)

図-24から、向波、満載状態で、モーメントの最大値は、 $\lambda/L=1.0$ のとき、

$$M_z' = (320 + 30) g/cm \times 90 cm \times 309 cm \\ = 974000 g-cm = 9.74 Kg-m \text{ となる。}$$

モーメントについては、ストレングージによる値と圧力ヘッドによる値はよく一致する。

以上みてきたように、ブッシャーバージの連結部には、揚力、水平力およびモーメントによる外力が作用し、連結装置は、これらの外力に十分耐える構造のものにしなければならない。模型船においては、ブッシャーの船底とバージの切欠部の底辺の間には、20mm程度の隙間があって、波浪中にあるときは、この隙間に入る水によって揚力が大きくなって来る。しかし、実際のブッシャーバージでは、ブッシャーがバージの切欠部に完全にドッキングして、ブッシャーの底部とバージ切欠部とは接触して隙間は生じないので、外力も相当小さくなるものと考えられる。

4.2 船体の動揺について

ブッシャーバージを規則波中で動揺させたときのピッチング、ヒービングおよびローリングの値を図-31~38に示す。これらの図において、振幅は全振幅を意味する。

ピッチングは、船首、船尾の二点でポテンシオメータにより測定されたヒービングとの連成運動から、(5)式によって真のピッチングを計算した値である。ローリングの値は、水槽壁からの反射波および船の不安定動揺から来る横揺れの値を示したものである。図-35~38に示すヒービングの値は、船首、船尾の二点でポテンシオメータにより測定された連成運動から(4)式によって真のヒービングを計算した値と船体の中央のポテンシオメータによって直接測定されたヒービングの値を示したものである。

図-31~34において、ピッチングは、追波および向波、また満載および軽載状態においてほぼ同じ傾向を示し、その最大値は、 $\lambda/L=1.5$ の附近に生じ $\pm 3^\circ$ 程度となっている。ピッチングは、 $\lambda/L=0.6$ 附近においてゼロに近くなる。本船のピッチング固有周期は、船首と船尾のピッチングの位相差が π となる周期であるから、これはオシログラフの記録から、 $T=1.9$ 秒のときであるから、ピッチング固有周期は1.9秒とみてよい。ピッチングの最大値を生ずる波の周期は、ピッチング固有周期のときのピッチングとは一致しない。

図-35~38は、ヒービングの測定値と計算値を示すが、ヒービングの固有周期は、船首、船尾の連成ピッチングの位相差がゼロとなる周期であるから、これはT

=1.4秒となる。これらの図において、ヒービング固有周期($T=1.4$ 秒)の時の値は最大となっている。 $\lambda/L=1.0$ の附近においてヒービングはゼロとなっている。

以上記述したピッチングおよびヒービングの現象は、下記の理論解とよく一致する。

波浪中での船の縦揺れおよび上下揺れは、一般に次の運動方程式によって表わされる。

縦揺れ

$$I_\phi \phi'' + R_\phi \phi' + W \cdot G M_e \cdot \phi = w_0 \cdot r_0 \cdot M_\phi \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T_w} \right) t \dots \dots \dots (7)$$

上下動

$$\left(\frac{W}{g} \right) \cdot \ddot{z} + R_z \cdot \dot{z} + W \cdot A_\omega \cdot z = w \cdot v_0 \cdot B_z \cos \left(\frac{2\pi}{T_w} \right) t \dots \dots \dots (8)$$

- ここに、 I_ϕ : 回転慣性モーメント
- g : 重力の加速度
- R_ϕ および R_z : 抵抗係数
- $G M_e$: 縦のメタセンタ高さ
- A_ω : 水線面積
- W : 船の排水量
- w_0 : 水の単位体積重量
- r_0 : 半波高
- M_ϕ および B_z : λ/L の関数で波による強制外力
- T_w : 波の周期
- t : 時間

いま、(7)式および(8)式の右辺の M_ϕ 、 B の値を求めてみる。船が ϕ だけ縦傾斜し、 z だけ沈んだ状態で、波面で描かれた水面以下の浮力およびこの浮力の重心周りの偶力を、船の側面が吃水線附近まで垂直であるという仮定の下に計算すると次のようになる。ただし、時間の原点は、波の山が船の重心と同一直線上に来る瞬間を取り、船は船首、船尾方向に対照とする。浮力および偶力は、

$$\text{浮力} = w_0 \cdot r_0 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} 2y_0 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{L_w} \right) \cdot x \cdot dx \cdot \sin \frac{2\pi}{T_w} \cdot t \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{偶力} = w_0 \cdot r_0 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} 2y_0 \cdot x \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{L_w} \right) \cdot x \cdot dx \cdot \cos \frac{2\pi}{T_w} \cdot t \dots \dots \dots (10)$$

となる。(9)式および(10)式において、 y_0 は、浮面の x に於ける横距離、 $L/2$ は、浮面における $y-z$ 面から船

首および船尾までの距離、 L_w は波長である。(9)および(10)式は、それぞれ(8)式および(7)式の右辺に相当するから

$$M_\phi = 2 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y_0 \cdot x \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L_w} x\right) \cdot dx$$

$$B_z = 2 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L_w} x\right) \cdot dx$$

となる。

いま、 $x/L = \xi$ 、 $2\phi_0/B = \eta$ 、 $L/L_w = \sigma$ とおくと、 M_ϕ および B_z は次のように書きかえられる。

$$w r_0 M_\phi = W \cdot G M_e \cdot H_w \cdot r_p$$

$$w r_0 B_z = w \cdot A_w \cdot r_0 \cdot r_z$$

$$\text{ただし、 } r_p = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot K_\phi / 2\pi \cdot \sigma \cdot C_b$$

$$r_z = K_z / C_w$$

で、 C_b 、 C_w はそれぞれ方形および浮面肥瘠係数、 $\beta_1 = L/d$ 、 $\beta_2 = L/GM_e$ 、 $H_w = 180 \cdot H/L_w$ (最大波面傾斜) である。 K_ϕ および K_z は次のようになる。

$$K_\phi = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \xi \cdot \eta \sin 2\pi \sigma \xi \cdot d\xi \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$K_z = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \eta \cos 2\pi \sigma \xi \cdot d\xi \quad \dots\dots\dots (12)$$

K_ϕ および K_z の値は、 L_w/L の値および浮面肥瘠係数 C_w によって変化する。

以上から、(7)および(8)式の運動方程式は次のように書きかえられる。

縦揺れ

$$\phi'' + R_\phi \phi' + K_\phi \phi = K_p^2 \cdot r_p \cdot H_w \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

上下動

$$Z'' + R_z \cdot Z' + K_d \cdot Z = K_d^2 \cdot r_z \cdot r_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

この 動方程式を解くと縦揺れおよび上下揺れの大きさが求められる。即ち、

$$\phi = c \cdot e^{-\alpha_p \cdot t} \sin(\sqrt{w_p^2 - \alpha_p^2} \cdot t + \delta)$$

$$+ \left\{ r_p \cdot H_w / \sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_p^2}\right)^2 + 4 \alpha_p^2 \cdot w^2 / w_p^4} \right\}$$

$$\sin\left(\frac{2\pi}{T_w} t - \delta'\right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 α_p は対数減衰率、 w_p は船の固有周期のと

きの角速度、 w は波の角速度である。

(15) 式において第一項は減衰し、定常状態においては第二項のみとなる。ピッチングの最大値は絶対値を取って次のようになる。

$$|\phi| = r_p \cdot H_w \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_p^2}\right)^2 + 4 \alpha_p^2 \cdot w^2 / w_p^4}$$

$$= r_p \cdot H_w \cdot \mu_p \quad \dots\dots\dots (16)$$

(16) 式において μ_p は倍率といわれ、船の抵抗係数によって変化する。

同様にヒービングの最大値は(17)式で表わされる。

$$|Z| = r_z \cdot r_0 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_h^2}\right)^2 + 4 \alpha_h^2 \cdot w^2 / w_h^4}$$

$$= r_z \cdot r_0 \cdot \mu_h \quad \dots\dots\dots (17)$$

(17) 式において、 μ_h は上下動の倍率で、上下動の抵抗係数によって変動する。

(16) 式および(17)式から、船のピッチングおよびヒービングの値は、船の抵抗係数、波の傾斜角、波高がわかれば計算によって求めることができる。本実験の場合、ピッチングおよびヒービングの抵抗係数を求めているないので (μ_p および μ_h が未知である)、理論計算を行なうことができない。これは今後の課題としたい。

4.3 加速度について

プッシャー中央における上方向の加速度を図-39に示す。加速度の最大値は、 $\lambda/L = 0.5$ の附近で生じ、その値は0.4g程度である。この場合の加速度は、ピッチングによる円弧運動の垂直方向速度とヒービングによる加速度の合成された値である。

いま満載状態のプッシャーバージが波高 $H = 18.0 \text{ cm}$ の波浪中に20.4gの加速度で動いている時にプッシャーをドッキングしたときの衝撃力の大きさを求めてみる。模型プッシャーバージの方形肥瘠係数 $C_b = 0.85$ であるから、満載状態での排水量 W はつぎのようになる。

$$W = w_0 \cdot L \times B \times d_r \cdot C_b$$

$$= 1,000 \text{ Kg/m}^3 \times 5.34 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 0.227 \text{ m} \times 0.85$$

$$= 930 \text{ Kg}$$

この排水量の半分がバージ後方に作用するものとすれば、衝撃荷重 F は、

$$F = W \cdot a / 2 = 930 \times 0.4 / 2 = 186 \text{ Kg}$$

となる。この衝撃荷重は、実船では

$$186 \times 23.8^3 = 186 \times 13450 = 2,500,000 \text{ Kg}$$

$$= 2,500 \text{ t}$$

となりきわめて大きな力となる。しかし、実際の船では波高4.3mのように穏びしい海気象の下でのドッキング

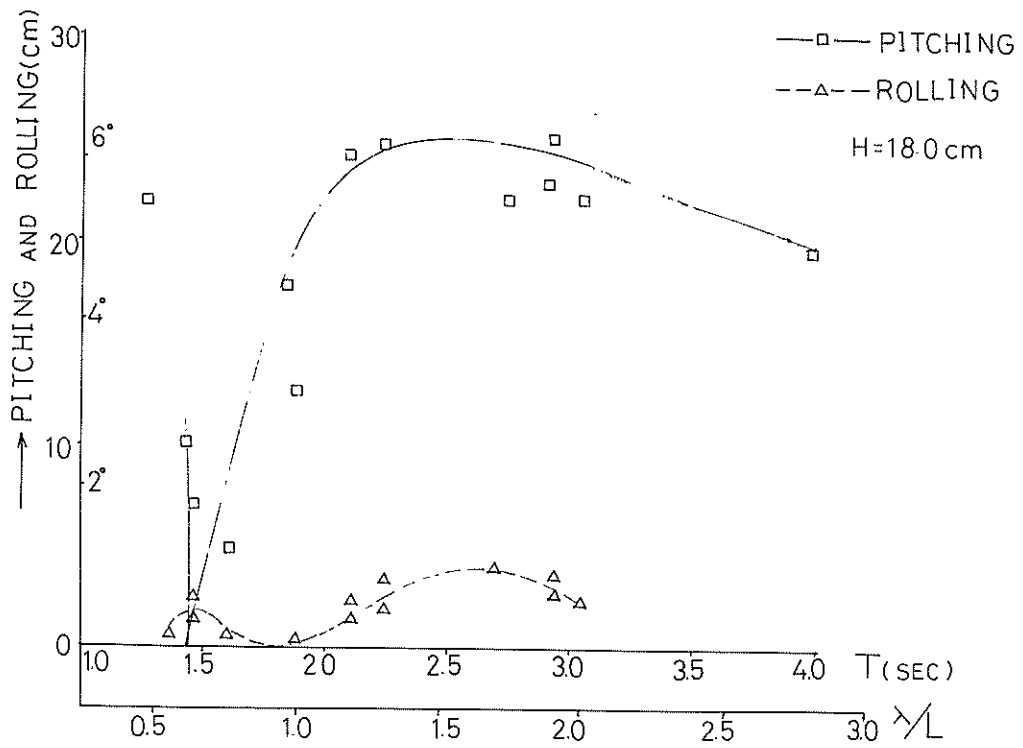


图-31 Pitching and Rolling (Full 追波)

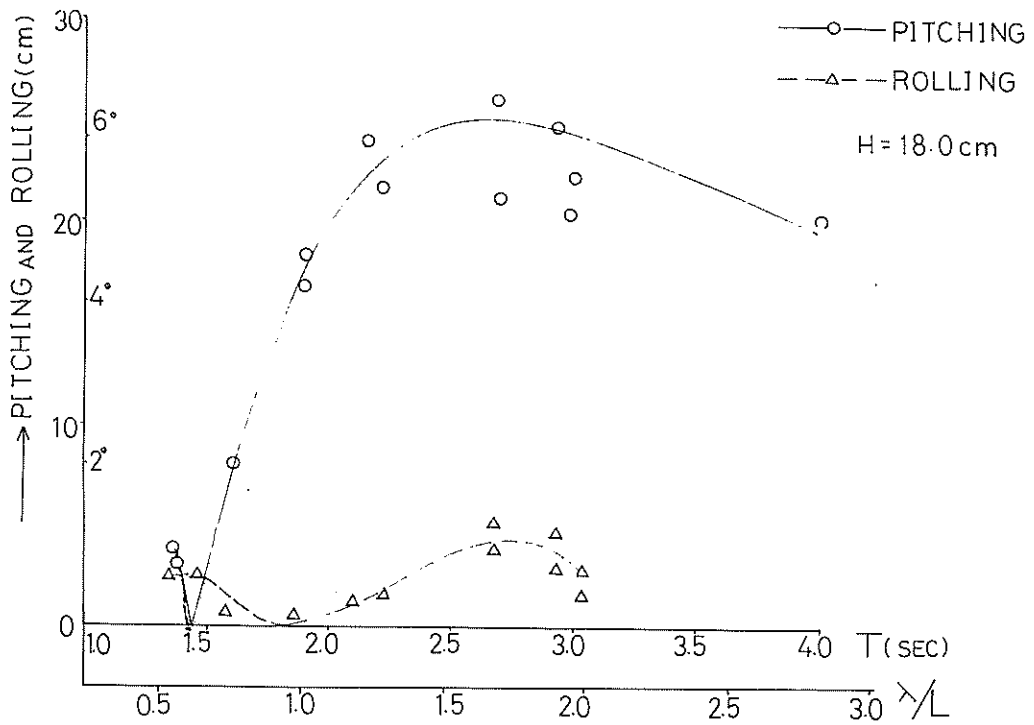


图-32 Pitching and Rolling (Ballast 追波)

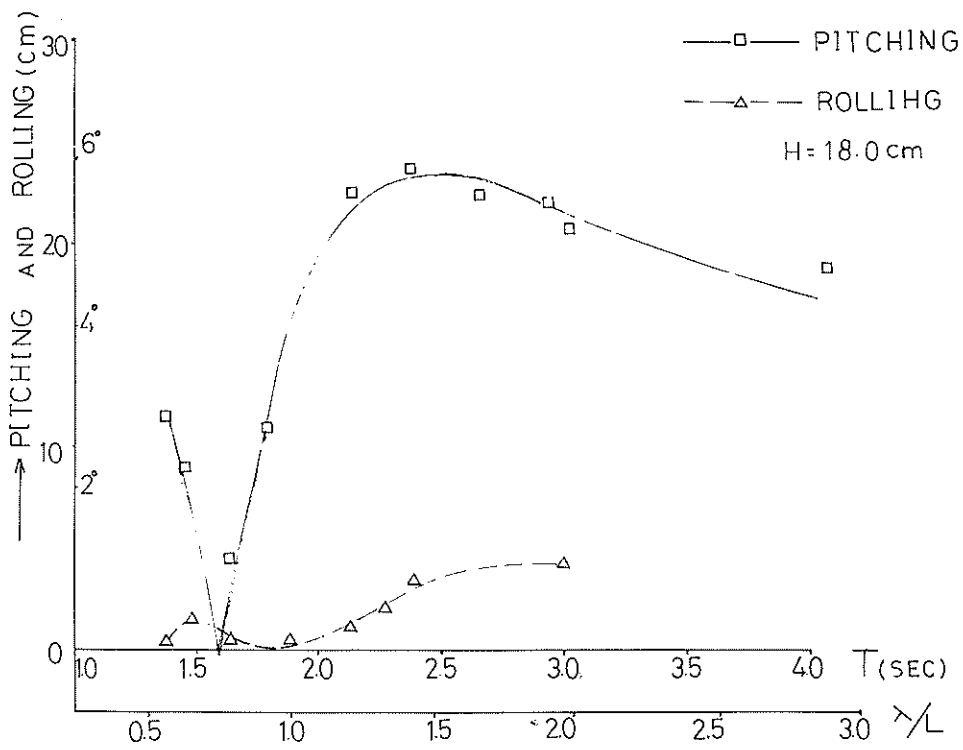


图-33 Pitching and Rolling (Full 向波)

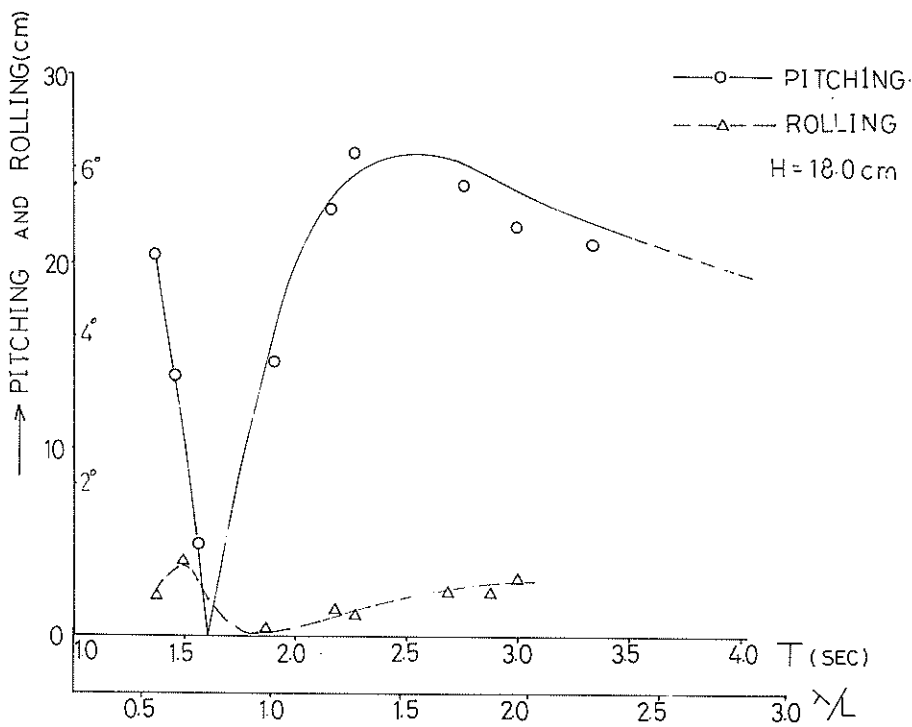


图-34 Pitching and Rolling (Ballast 向波)

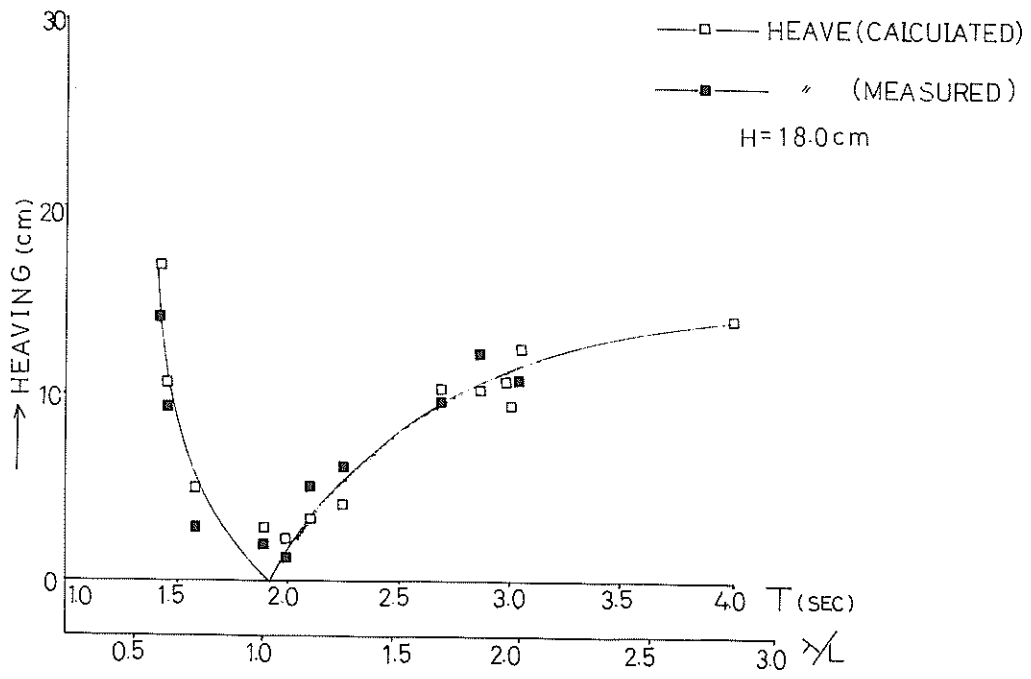


图-35 Heaving (Full 追波)

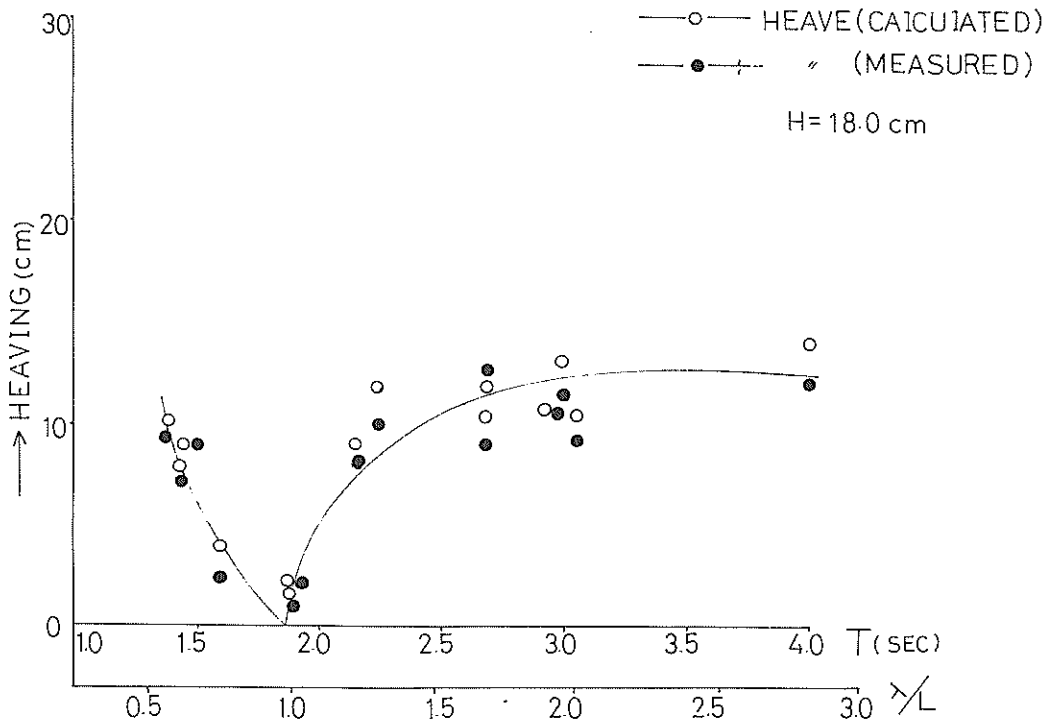


图-36 Heaving (Ballast 追波)

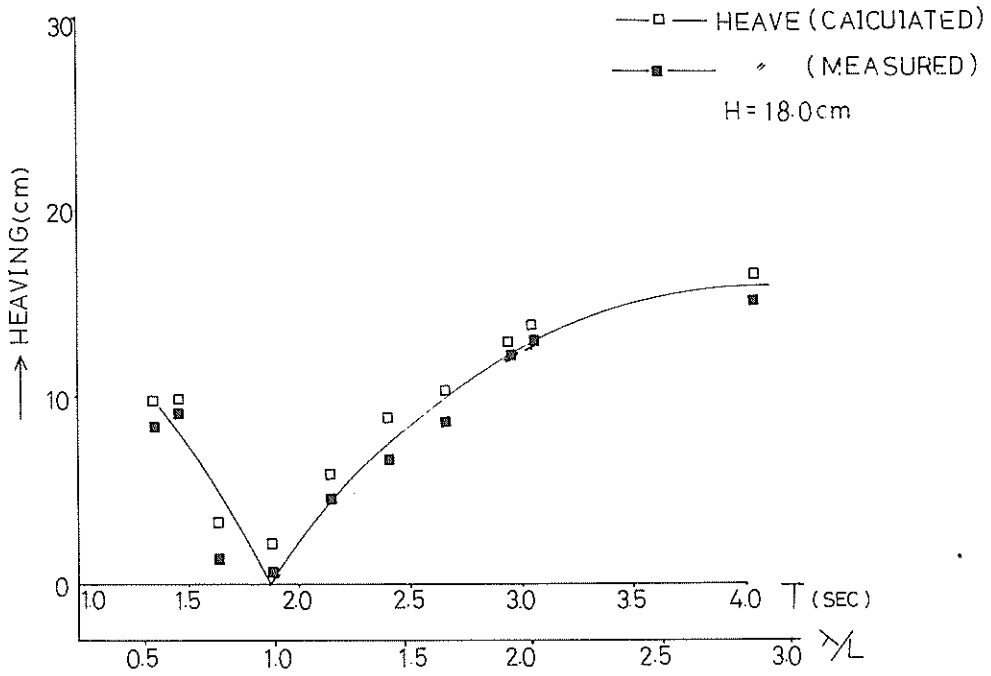


图-37 Heaving (Full 向波)

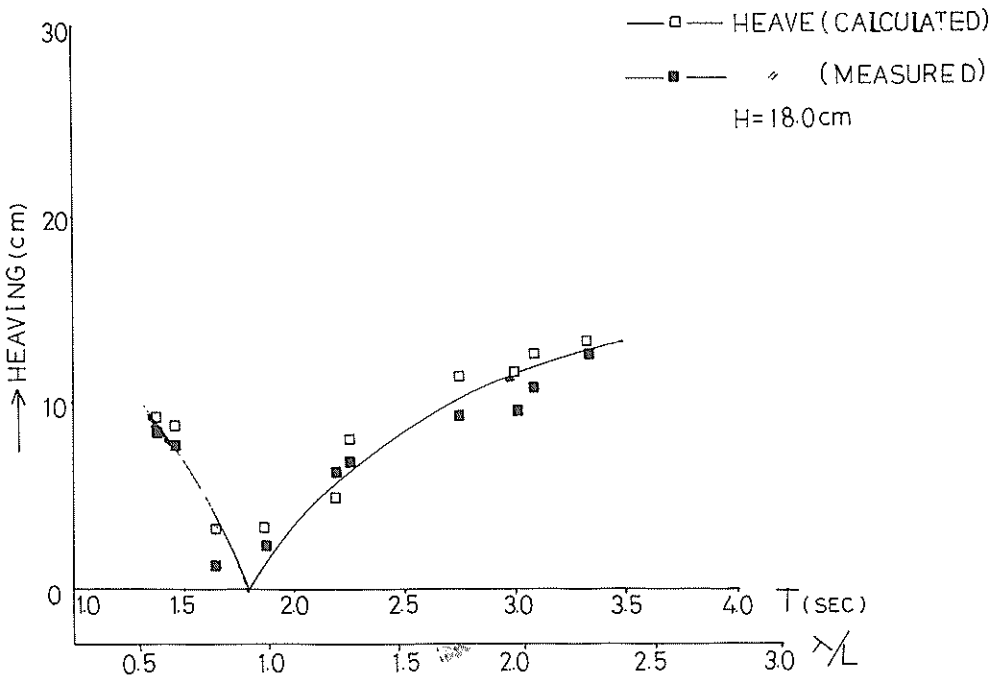


图-38 Heaving (Ballast 向波)

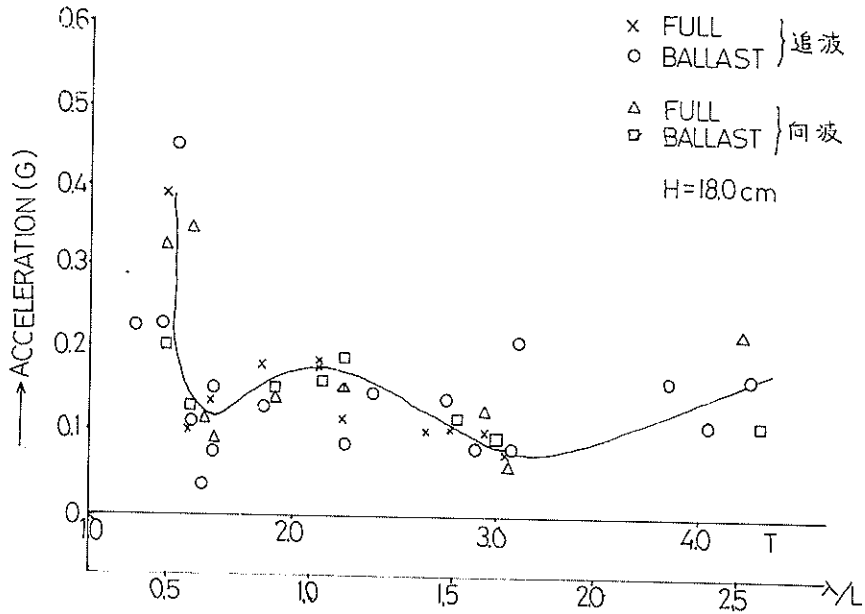


図-39 Acceleration

作業は行なわないし、またドッキング作業は不可能である。プッシャーとバージのドッキング作業は、通常静穏な海域で行なわれるためバージの加速度はかなり小さくなる。それでもドッキング時には、相当な衝撃荷重がプッシャーとバージの接触に作用するので、何らかの衝撃緩和装置を施す必要があるだろう。

次に図-39の加速度と $S_0 = \alpha T^2 / 4\pi^2$ からその点の変位量を求めてみると表-3のようになる。

表-3 加速度計から求めた変位量

T (sec)	α (g)	S_0 (cm)
1.35	0.4	18.3
2.0	0.17	17.0
2.5	0.14	22.0
3.0	0.075	17.0
3.5	0.075	18.6
4.0	0.14	31.7

表-3の S_0 の値は、ピッチングとヒービングの両方を含む動揺の全振幅を示す。加速度から求めた変位量は、動揺周期の短い領域では実測値とよく一致するが、周期が長くなってくると過大な変位量となる。これは動揺周期が長くなるにつれて、加速度の構造上の静的傾斜による影響が大となることによるものである。従って、加速度計を変位測定に使用する場合は、静的傾斜による値を修正すること、船のスウェイ、サージングによる誤差

が小さくかつ船の回転運動を直線運動とみなせる程度の小角度動揺については可能である。

5. あとがき

今回の実験は、特殊な形状を有するプッシャーバージの連結部に作用する外力および船体動揺について解析したもので、これは必ずしも一般的とはいえない。また、船体動揺については、ピッチングおよびヒービングの減衰曲線を得ることができず、これらの動揺の理論的解析を十分行なうことができなかった。これは今後に残された課題としたい。

本プッシャーバージの実験結果から次のことがいえよう。

1) プッシャーに作用する最大揚力は、満載状態の追波および向波において生じ、その値は、約33.0kgで、実船に換算すると約444トンである。

2) 水平波力の最大値は、満載状態の追波および向波において生じ、その値は、約5.0kgで、実船に換算すると67.2トンとなる。

3) プッシャーに働く回転モーメントの最大値は、軽荷状態の追波において生じその値は、約16.0kg-mで実船に換算して5120t-mとなる。

4) プッシャーの底部に設けた圧力ヘッドにより測定された揚力は、ストレンゲージで測定された揚力よりも

少し小さいが大差はなかった。

船底部における波圧は、予想されたよりも大きいので、ブッシャーを上方向へ押し上げる揚力を生じ、ブッシャーとバージの連結部に強大な荷重が作用するのを防止するために、ブッシャーの船底には空隙は作らない方がよい。

5) これは、実験結果には入っていないが、実験の観察から、ブッシャーの側壁とバージの切欠部の間は、ブッシャーをドッキングするために一定の空隙部があるが、追波を受けた場合、この空隙部から海水が噴出するので何らかの方法でこの空隙部を封じる必要があろう。

6) これも実験中の観察によるものであるが、ブッシャーがバージとドッキングした状態で、追波を受けた場合、バージの船体動揺(主としてピッチング)が大きくなるとブッシャーの船尾が水面より浮き上がり、推進機

の空転あるいはキャビテーションを起す危険があるので、ブッシャーの推進機は、Shottle Navigatorなどを設ける必要があるだろう。

おわりに、本実験に多大な協力をしていただいた第二港湾建設局の大平建設専門官に謝意を表する。

(1973年10月1日受付)

参考文献

- 1) 造船協会編, 船舶工学便覧(第2分冊), 1952年 pp. 114~150
- 2) 大串雅信, 理論船舶工学(下巻), 1962年 pp. 1~70
- 3) 平山 勇, 作業船の船体動揺と作業限界, 第16回港湾機械技術研究会資料, 1969年10月

港湾技研資料 No.173

1973・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社