

港 湾 技 研 資 料

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

No. 87 Sept. 1969

プラットフォーム船の波浪による動揺実験

— スパッドを有する箱形船の波浪による動揺
とスパッド着底時の力について —

小 岩 苔 生 ・ 大 平 勝

平 山 勇 ・ 白 鳥 保 夫

運輸省港湾技術研究所



プラットホーム船の波浪による動揺実験
—スパッドを有する箱形船の波浪による動揺と
スパッド着底時の力について—

目 次

要 旨

| | |
|----------------|----|
| 1. ま え が き | 3 |
| 2. 模形船および実験装置 | 4 |
| 2.1 模 形 船 | 4 |
| 2.2 実 験 水 槽 | 5 |
| 2.3 測 定 器 | 5 |
| 3. 静水中の動揺実験 | 5 |
| 3.1 実 験 方 法 | 5 |
| 3.2 固有周期の測定 | 5 |
| 3.3 減衰比の測定 | 6 |
| 3.4 実 験 結 果 | 7 |
| 4. 波浪による動揺実験 | 9 |
| 4.1 実 験 方 法 | 9 |
| 4.2 波高による影響 | 11 |
| 4.3 慣性モーメントの影響 | 11 |
| 4.4 波周期の影響 | 12 |
| 4.5 実 験 結 果 | 19 |
| 5. スパッド着底実験 | 19 |
| 5.1 実験方法および装置 | 19 |
| 5.2 波高による影響 | 20 |
| 5.3 慣性モーメントの影響 | 20 |
| 5.4 波周期の影響 | 22 |
| 5.5 実 験 結 果 | 22 |
| 6. あ と が き | 24 |
| 参 考 文 献 | 25 |
| 記 号 表 | 25 |

プラットフォーム船の波浪による動揺実験 — スパッドを有する箱形船の波浪による動揺と スパッド着底時の力について —

小岩 蒼生*・大平 勝**

平山 勇**・白鳥 保夫**

要 旨

本報告はスパッドを有する箱形船の波による動揺とスパッド着底時にスパッドに作用する力について模形船により実験的に求めたものである。模形船の大きさは次のとおりである。

| | |
|-------|--------------------|
| 船長×船巾 | 969×406mm |
| スパッド | 30.5×30.5×313mm 4本 |
| 船体重量 | 3.63~9.35kg |

船体重量、慣性モーメントおよびスパッドの繰り出し量を変えて、その影響を調べた結果、本実験のように比較的喫水が小さい場合これらの影響は少なかった。この場合船体動揺の固有周期は非減衰固有周期よりもだいぶ大きくなったが、これについては実験式により検討を加えた。波による動揺についてはピッチング、ローリングおよびヒービングを調べたが、波を静的に考えた場合の動揺力による計算値に動倍率を乗じた値とほぼ一致した。この動倍率は入力が大きくなる程その値が小さくなる傾向のものである。波によるピッチング力、ローリング力は船長が波長の0.66の時に最大となるが、船の固有周期等の諸特性により必ずしもこの時に最大の動揺を示すとは限らない。

スパッド着底時にスパッドに作用する軸圧縮力はスパッド1本より2本の場合の方が大きく、その値は運動のエネルギーから求めるのはあまり適当でなく、むしろ波による動揺力との関係が強かった。船体の水平運動がスパッド先端にて制止される時、スパッドに作用する曲げ力はスパッド1本の方が2本の場合よりも大きく、その値は船体の水平運動のエネルギーが船体の傾斜とスパッドの曲げに費されるとして計算した値に近い。

1. ま え が き

近年、港湾工事や海洋開発において、一般の船形とは大部趣を異にした船が多く用いられる傾向が見られる。これらはそれぞれ、新しい分野とか、より厳しい作業条件などの要請のために特殊な船形となったものである。このために、あるものは船としてよりもむしろ大きな海上作業基地としての印象を強く与える。これらの中にはかなり歴史の古いものもあるが、一般にその波浪などの自然条件に対する特性が十分に解明されていない面もあり、一般船形の場合の経験にたよっている所が少なくないのが現状である。しかし今後これらの特殊な形状の船が広く採用される動きがあり、多くの研究が望まれている。

る。

本報告ではこれらの研究の一環として特殊船形の船の中でもスパッドを持った箱形の船の波浪特性を主とした模形実験について述べたものである。この種の船は比較的水深の浅い海域、特に港湾工事などで用いられる事が多い。実験に用いた模形船は一種類だけで、喫水は比較的小さく、スパッドは正方形の断面のもの4本としたが、船体の慣性モーメントおよびスパッドの水抵抗などの影響を調べられる構造のものとした。この種の船はスパッドにより海面から十分に立ち上げれば、波浪の影響を受けずに作業できるのが特徴であるが、立ち上り時には波浪による船体の動揺のため、スパッド接地に際して大きな力がスパッドに作用する。スパッド昇降装置を設計する上でこの力を明らかにする事は重要な点の1つであるので、スパッド着底に相当する実験を合せて行なった。

* 機材部 特殊作業船開発室長

** 機材部 特殊作業船開発室

2. 模形船および実験装置

2.1 模形船

(1) 模形船形状および諸元

模形船の形状は箱形で、正方形断面のスパッド4本を有するものである。大きさは実験水槽などを考慮して下記のような諸元のものとした。錘の数により船体重量を、またその位置により慣性モーメントを変える事ができる。スパッドの上下5は段階に変えられる。模形船の材質はラワン合板でペイント塗装とした。

| | |
|---------|-----------------|
| 船体 | 969×406×94mm |
| スパッド | 30.5×30.5×313mm |
| スパッド間距離 | 813×344mm |
| 船体重量 | 3.63kg |
| 錘 | 0.477kg×12個 |

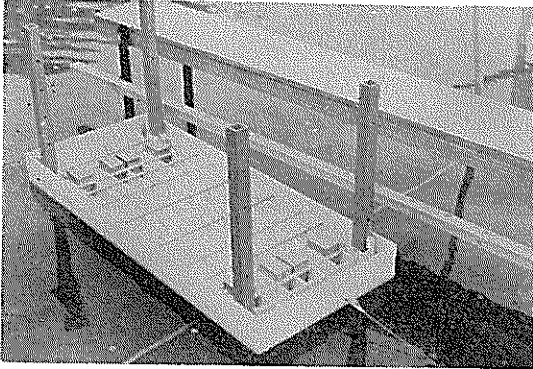


写真-1 模形船

(2) 箱形船のGMについて

図1のようにメタセンターM、重心G、浮心B、船体中心線が喫水線と底線と交わる3点をそれぞれD、Kとし、船体傾斜角 θ 、船幅、喫水を b 、 d とすると箱形船のGMは次のようになる。

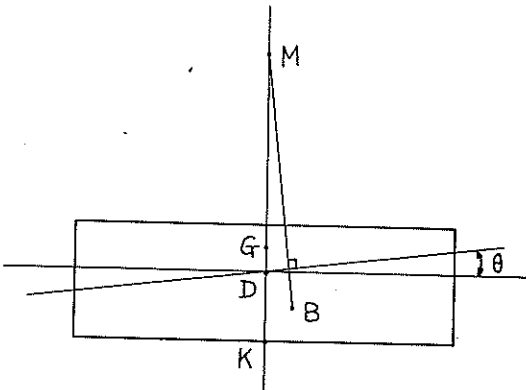


図-1 箱船のGM

$$GM = KM - KG$$

$$= \frac{d}{2} + \frac{b^2}{12d} + \frac{b^2 \tan^2 \theta}{24d} - KG$$

$\frac{d}{b}$ および θ による $\frac{KM}{b}$ の値を表1に示す。

表1 b/d および θ による KM/b の値

| $\frac{d}{b}$ | θ | KM/b | | | |
|---------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0° | 3° | 6° | 12° |
| 0.01 | | 8.338 | | | |
| 0.02 | | 4.177 | | | |
| 0.05 | | 1.692 | 1.694 | | |
| 0.1 | | 0.8830 | 0.8840 | 0.8875 | |
| 0.2 | | 0.5165 | 0.5170 | 0.5185 | 0.5260 |
| 0.4 | | 0.4080 | 0.4085 | 0.4090 | 0.4130 |

(3) 模形船の慣性モーメント

模形船の慣性モーメントは、船体については実験で、また錘による分は計算から求めた。これらは全て喫水点Dに関するものであり、スパッドの中空部に入る水の分を考慮したものである。模形船の重量、喫水、スパッド繰り出し量、慣性モーメントをW、D、S、Mとし、それぞれ添字を付ける。またピッチング、ローリングはそれぞれP、Rで示す。本報告では慣性モーメントの表示は全て重量慣性モーメント表示とする。表4に非減衰固有周期の計算値の一例を示す。

表2 模形船の重量、喫水、スパッド繰り出し量

| | 重量 (kg) | 喫水 (mm) | スパッド繰り出し量 (mm) |
|----|---------|---------|----------------|
| W1 | 3.63 | D1 9.2 | S1 0 |
| W2 | 5.54 | D2 14.1 | S2 156 |
| W3 | 7.44 | D3 18.9 | S3 313 |
| W4 | 9.35 | D4 23.8 | |

表3 模形船の慣性モーメント (kg・m²)

| | M1 | M2 | M3 | M4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| P, S1, W2 | 0.441 | 0.524 | 0.649 | 0.827 |
| P, S1, W3 | 0.444 | 0.610 | 0.861 | 1.217 |
| P, S1, W4 | 0.448 | 0.697 | 1.073 | 1.606 |
| P, S3, W3 | 0.470 | 0.636 | 0.887 | 1.242 |
| P, S5, W3 | 0.336 | 0.497 | 0.747 | 1.103 |
| R, S1, W2 | 0.101 | 0.110 | 0.130 | 0.159 |
| R, S1, W3 | 0.102 | 0.121 | 0.159 | 0.218 |
| R, S1, W4 | 0.103 | 0.132 | 0.189 | 0.277 |

表4 模形船の非減衰固有周期 (sec)

| | M1 | M2 | M3 | M4 |
|-------------|------|------|------|------|
| P, S 1, W 2 | 0.24 | 0.26 | 0.29 | 0.33 |
| P, S 1, W 3 | 0.24 | 0.28 | 0.34 | 0.40 |
| P, S 1, W 4 | 0.24 | 0.30 | 0.38 | 0.46 |
| P, S 3, W 3 | 0.25 | 0.29 | 0.34 | 0.40 |
| P, S 5, W 3 | 0.21 | 0.26 | 0.31 | 0.38 |
| R, S 1, W 2 | 0.28 | 0.29 | 0.32 | 0.35 |
| R, S 1, W 3 | 0.28 | 0.31 | 0.35 | 0.41 |
| R, S 1, W 4 | 0.28 | 0.32 | 0.38 | 0.47 |

2.2 実験水槽

実験に使用した水槽は幅20m, 長さ30m, 深さ1.3mの大きさであり, 巾20mのフラッター形造波機を有し, 波周期は0.5~3.5 sec である。模形船の位置は造波板から12.5m, 側面から5mであり, 反射波の影響を受ける前に実験を終えるようにした。水深を39cmとすると, 周期が0.5~0.7 sec では, 波により波高の差にばらつきがでるが, 0.8~3.0 sec ではほぼ波高の等しい連続した波が得られた。波形は波周期が0.8~1.4 sec では正弦波に近く, その他ではトロコイド波形に近かった。

2.3 測定器

変位計 コイルスプリングをカンチレバーの先端に
 取付, カンチレバーのひずみ量をひずみゲ
 ージにより検出する。

感度 8 μ St/mm 2台
 2 μ St/mm 1台

波高計 線間抵抗式波高計 1台

動ひずみ計 直流ブリッジ式 5台

交流ブリッジ式 2台

記録器 直記式電磁オシログラフ 1台

振動子 固有振動数 2500Hz 7本

1000Hz 1本

3. 静水中の動揺実験

3.1 実験方法

本実験では機械的に動揺力を加える事が困難であったため, やむを得ず次の方法により模形船の固有周期を求めた。すなわち動揺振幅(片振幅)が約2°位になるように交互に手で力を加え, その力が最も近くなるような周期をもって固有周期とした。次に減衰比の測定は約2°の静的傾斜を与えた後に自由振動をさせたが, 減衰の仕方が一般の船に比べて大きく, またバランスよく傾斜させるのはむずかしく, 船体移動してしまうので記録紙上の零点の位置がずれる事などがあったので, 減衰比 α の

算出には peak-to-peak の値の比を採り, 次式により求めた。

$$e^{\frac{\pi\lambda}{\sqrt{1-\lambda^2}}} = \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad i=1, 2, \dots$$

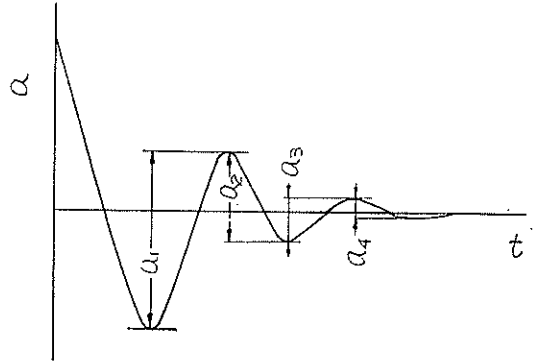


図-2 減衰振幅のとり方

本実験での α の計測は最大4個ぐらいであった。また実験は, 船体重量, 慣性モーメント, スパッドの繰り出し量などの影響を調べるためにそれぞれについて行なった。

3.2 固有周期の測定

本実験では模形船の構造上, 慣性モーメントのみは他に影響をおよぼさずに変える(4段階)事ができる。重量とスパッドの繰り出し量は, 慣性モーメントに影響を与えずに変える事はできないが, 互に重複する部分があるので, これらの影響は推定できる。実験を行なったのは下記の8種類で, ピッチングに対し5種, ローリングに対し3種である。これらの8種に対し慣性モーメントをそれぞれ4段階変化させた。

(1) P, S 1, W 3, M 1~M 4

(2) P, S 3, W 3, M 1~M 4

(3) P, S 5, W 3, M 1~M 4

(4) P, S 1, W 2, M 1~M 4

(5) P, S 1, W 4, M 1~M 4

(6) R, S 1, W 2, M 1~M 4

(7) R, S 1, W 3, M 1~M 4

(8) R, S 1, W 4, M 1~M 4

実験結果の例を図3~図6に示す。船体に初期傾斜を与えて自由振動させた場合の周期は, ここで用いた強制振動の場合の周期より約15%程度大きくなる傾向が見られた。

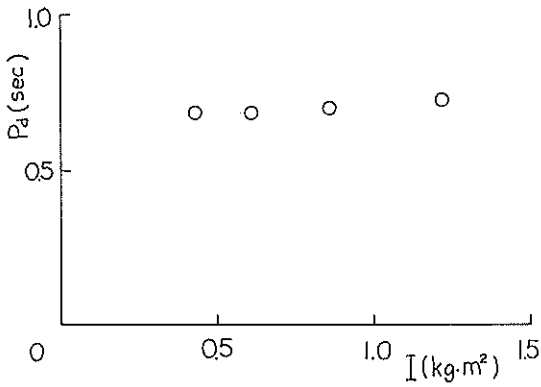


図-3 P, S1, W3, M1~M4

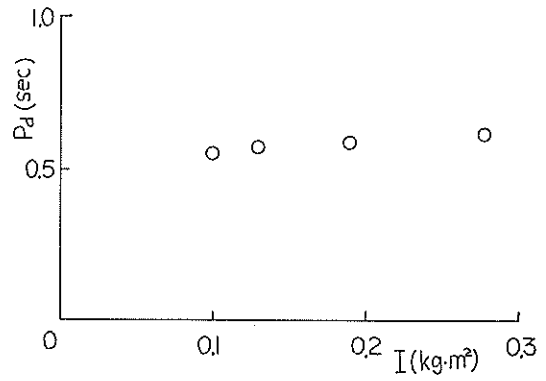


図-6 R, S1, W3, M1~M4

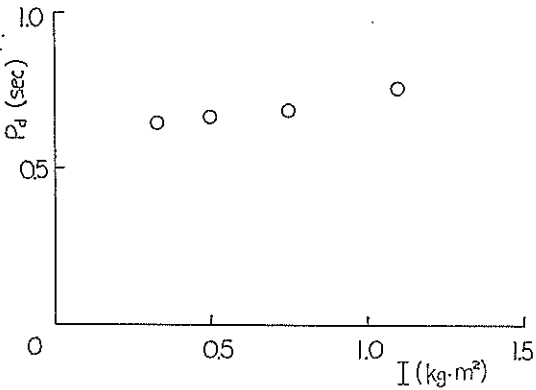


図-4 P, S5, W3, M1~M4

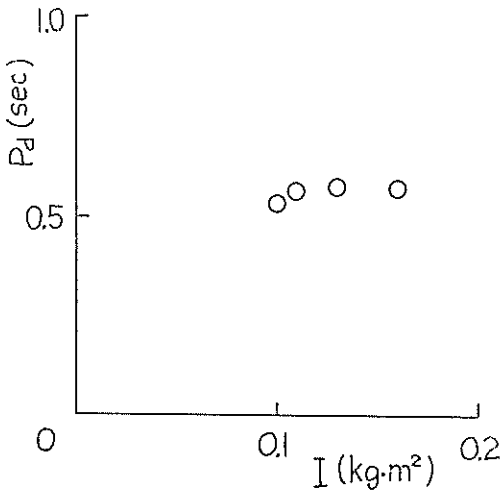


図-5 R, S1, W2, M1~M4

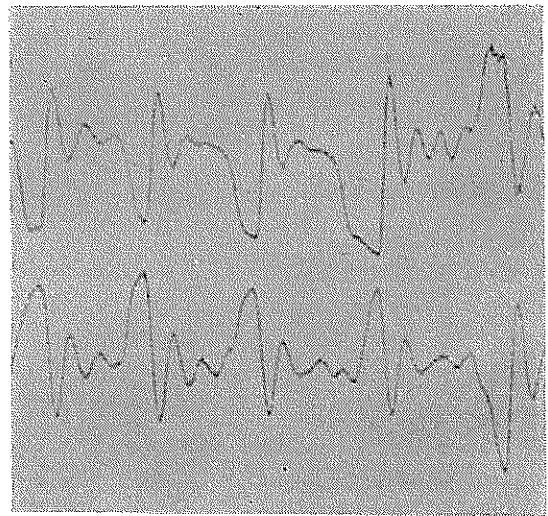


写真-2 減衰オシログラフ ピッチング

3.3 減衰比の測定

本実験は3.2の実験項目ごとに行ない、慣性モーメント、重量、スパッド繰り出し量などの影響について調べた。実験結果の例を図7~図8に示す。グラフの縦軸は減衰比λ、横軸は慣性モーメントであり、一連の折線でつながれた点の中で●印で慣性モーメントを示し、これの小さい方から順にM1, M2, M3, M4となる。左右の○印は●印の慣性モーメントにおける減衰比を表し、それぞれ a_1/a_2 , a_3/a_4 に対するものであり、●印は a_2/a_3 に対するものを示す。

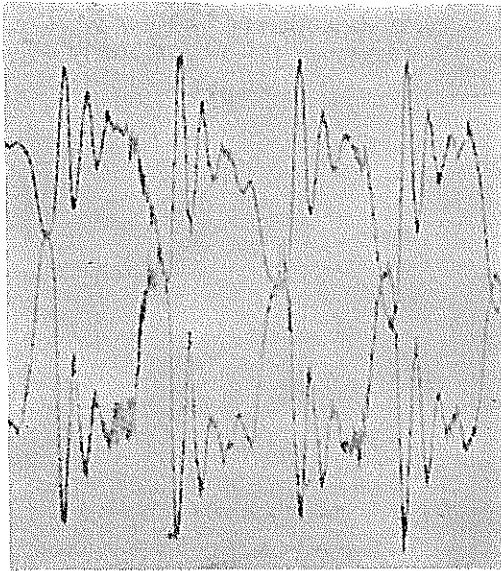


写真-3 減衰オシログラフ ローリング

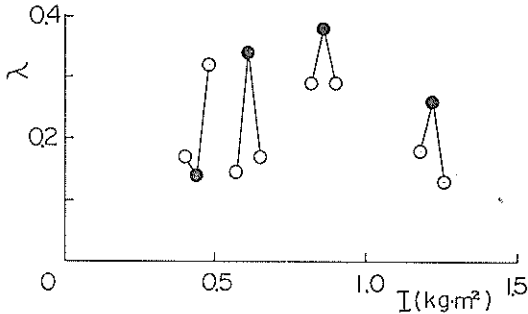


図-7 P, S1, W3, M1~M4

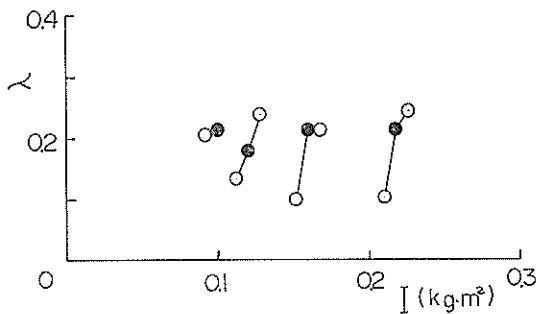


図-8 R, S1, W3, M1~M4

3.4 実験結果

本実験では動揺力を人手によったため、バラツキがかなりあるものと思われたので、同様の実験を数日後に繰り返してみた。その結果バラツキは最大7%、平均3%

程であった。次に慣性モーメントの影響を調べてみると、これが大きくなれば固有周期も長くなる傾向が見られるが、その差は少なく、最大の場合(P, S5, W3 M1~M4)でも0.65~0.76secである。非減衰固有周期の計算によるとこの場合、M1で0.21sec, M4で0.38secである。また実験値と計算値の差の少ない例(R, S1, W4, M1~M4)でも実験値はM1で0.55sec, M4で0.62secであり、計算値はそれぞれ0.28, 0.47secである。この様に固有周期の実測値と非減衰固有周期の計算値とではその差が大きいが、この傾向は船幅に対して喫水が小さい場合、すなわち船の重量が小さい時、また慣性モーメントが小さい時に著しい。この事は非減衰固有周期の計算では水の抵抗による影響を無視しているからで、本実験の場合には慣性力や復元力に対しこれを無視できない。

次にスパッドの繰り出し量の影響は同一の慣性モーメントの値の所で比較すればよいが、一般にはスパッド繰り出し量が大きくなれば水の抵抗が増すので、固有周期は長くなるものと思われたが、実験結果ではその差は小さく、この影響は少なかった。また船体重量の影響もあまり見られなかった。今回の実験で用いた範囲では、固有周期は0.6~0.8secであった。

次に減衰比について見ると、減衰の仕方に傾向的なものは見い出せなかったが、今回の実験範囲では、ピッチングの場合減衰比λは0.15~0.35であり、平均では0.3位であった。またローリングではλは0.1~0.3で、平均では0.2位のものであった。

ここで次式によりこの動揺系を近似してみる。

$$\frac{I_0}{g} \ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T(t) \dots (1) \text{とすると}$$

$$c = 2\lambda \sqrt{\frac{I_0}{g} k}, \quad P_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{kg}}$$

$$P_d = (1 - \lambda^2)^{-\frac{1}{2}} P_n$$

となる。ここで

- I_0 : 慣性モーメント
- k : 復元定数
- T : 動揺力
- c : 減衰定数
- λ : 減衰比
- P_n : 非減衰固有周期
- P_d : 固有周期

ここで慣性モーメント I_0 には船体の慣性モーメントのみではなくて、水による附加慣性モーメントの考えを採り入れた値とする。すなわち

$$I_0 = I + I' \text{とする。}$$

- ただし I : 船体慣性モーメント
- I' : 附加慣性モーメント

ここでピッチングの場合 $\lambda=0.3$, ローリングの場合 $\lambda=0.2$ とし, I' を適当に定めて固有周期の実測値と P_n の計算値をほぼ等しくするためには,

ピッチング $I'=2.5(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$, $I=0.44\sim 1.22\text{kg}\cdot\text{m}^2$

ローリング $I'=0.54(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$, $I=0.10\sim 0.22\text{kg}\cdot\text{m}^2$

とすれば比較的よい結果が得られた。しかし I' の大きさは I の値が大きくなる程小さくしなければならない。また波浪による動特性に対し, (1)式では十分な近似は得られない。

そこで本動揺系では船底が平らなため, 水の抵抗の影響が大きいと思われるので, これを角速度の2乗に比例するとして, 下記の式によりこの動揺系を近似してみた。

ここでは附加慣性モーメントは考えない。

$$\frac{I}{g}\ddot{\theta} + b(\dot{\theta})^2 \text{sgn}(\dot{\theta}) + k\theta = T(t) \dots (2)$$

ただし $\text{sgn}(\dot{\theta}) = \frac{|\dot{\theta}|}{\dot{\theta}}$ とする。

ここで $T(t) = T \sin(\omega t)$, $\theta = A \sin(\omega t + \psi)$ とし $\cos^2(\omega t + \psi) \cdot \text{sgn}(\cos(\omega t + \psi)) \doteq \cos(\omega t + \psi)$

とすれば $v = A^2 = \frac{-M^2 + (M^4 + 4NT^2)^{1/2}}{2N}$

ただし $M = k - \frac{I}{g}\omega^2$, $N = b^2\omega^4$

ここで $I = 0.861\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $b = 3.5\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$
 $k = 7.44 \times 4.11\text{kg}\cdot\text{m}$ とし $\theta = 2^\circ, 4^\circ$ に対して強制周期 P による m の値を図9に示す。

ただし $T = \frac{\pi}{180} k\theta$, $P = \frac{2\pi}{\omega}$, $m = \frac{kA}{T}$ とする

θ : 動揺トルクの静的傾斜角度表示 (deg)

m : 動倍率

この図から判るように $\theta = 2^\circ$ の場合でも $P = 0.5 \sim 0.8\text{sec}$ では m の値の差は約4%である。次に m の値を最大にする P の値を θ に関して示したのが図10である。次に慣性モーメントと固有周期の関係を調べたのが図11, 12である。すなわち m を最大にする P と I の関係を示す。

b の値を実験的に求めたところ, ピッチング, ローリングに対してそれぞれ, 約3.5, 0.6 $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ となった。

係数 b の値が, 船幅 W に比例し, 船長 B の3乗に比例するとすると

$$b = \alpha \cdot W \cdot B^3$$

$$b_P = 3.5 = \alpha_P \times 0.406 \times 0.969^3 = 0.369 \times \alpha_P$$

$$\therefore \alpha_P = 9.49$$

$$b_R = 0.6 = \alpha_R \times 0.969 \times 0.406^3 = 0.0648 \times \alpha_R$$

$$\therefore \alpha_R = 9.26$$

よって $\alpha = 9.3(\text{kg}\cdot\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^2)$ となった。

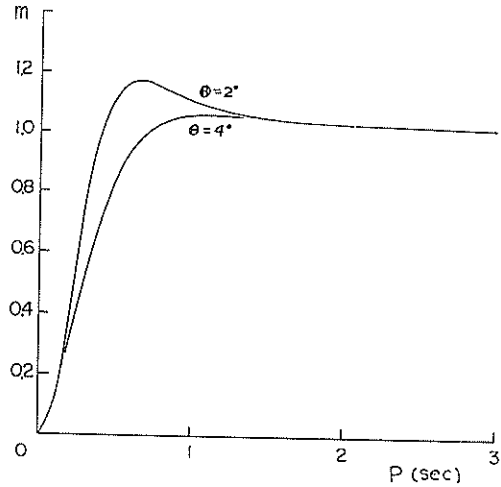


図-9 強制周期 P と動倍率

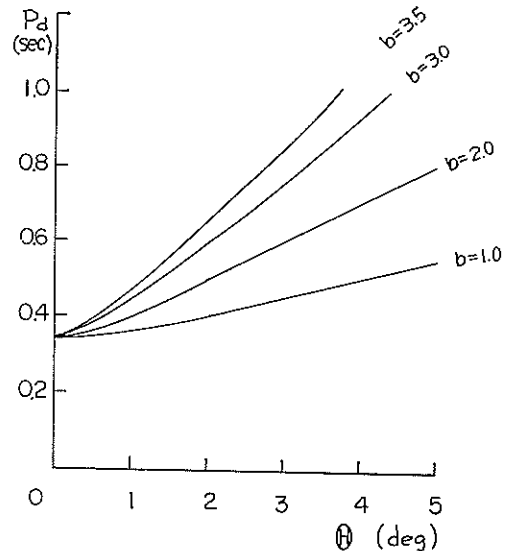


図-10 入力 θ と固有周期 P_d
 慣性モーメントと固有周期

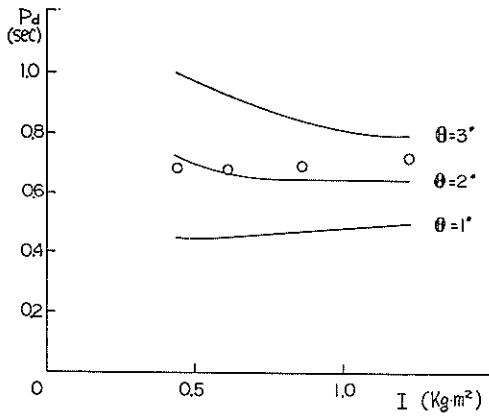


図-11 P, S1, W3, M1~M4, b=3.5

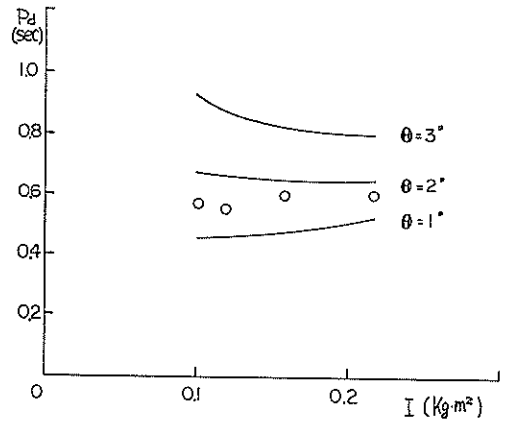


図-12 R, S1, W3, M1~M4, b=0.6

4. 波浪による動揺実験

4.1 実験方法

実験のパラメーターとしては数多くのものがあり、それらを組み合わせると非常に大きな数となる。本実験では先に行なった静水中での実験結果をもとにして次のものについて主に行なった。1)波高による影響, 2)慣性モーメントによる影響, 3)波周期による影響

ローリング, ピッチング, ヒービング, 前後揺の各動揺は先に述べた変位計3台により測定した。すなわち2台の変位計を船体上方4.5mの所に取付け、船体2点の変位を計り、船体後方8mに取付けた変位計により前後揺

を調べ、垂直変位の補正もかねた。これら3点の変位をオッシログラフに記録し、0.06 sec間隔でこれを読みとり、ピッチング, ローリング, ヒービングをそれぞれ算出した。ピッチングとは船体長手方向から波を受ける場合で、ローリングは波を横手より受ける場合とする。

今回の実験では水深が 39 ± 1 cmとし、波周期は0.5~3.0 secの9種類とした。また波高の採り方は単純な平均値とした。なお微小振幅の浅海波の水深-波長、および水深が39 cmの時の波周期-波長の関係を図13, 図14に示す。実験では波高の影響を考慮に入れて、波長には補正した値を用いた。これらはいずれも資料¹⁾によった。

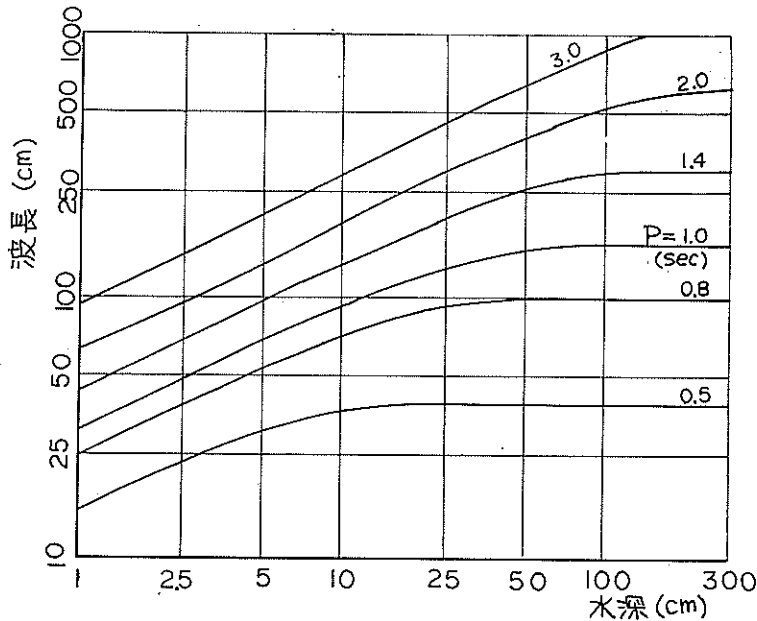


図-13 微小振幅波の水深と波長

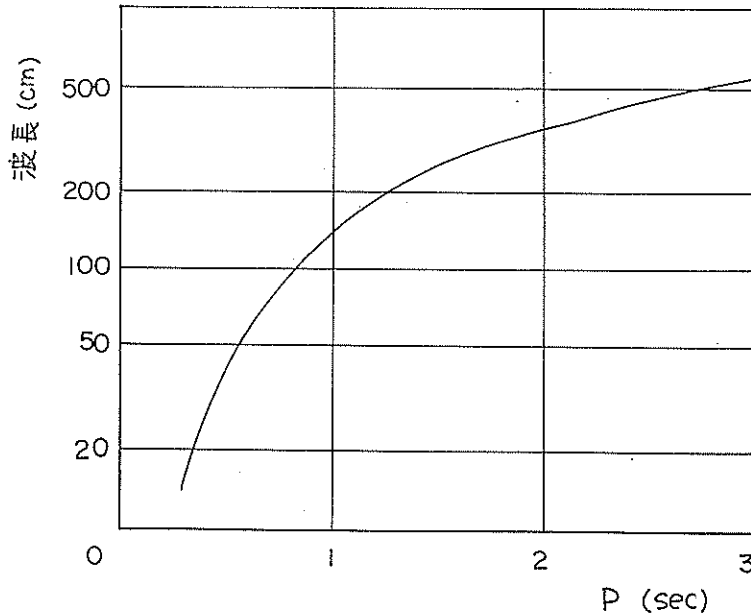


図-14 水深39cmにおける微小振幅波の周期と波長

波による強制力は近似的に次の様にして求めた。すなわち波の波形は便宜上正弦波とし、波圧は波面からの水深に比例するとした場合に、固定された船が受けるピッチング、ローリングおよびヒービング力を次の式より計算した。この値を静的波力と言う事にする。

$$y = \frac{H}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{L} x + \frac{2\pi}{P} t \right)$$

$$F_H = \gamma \cdot W \cdot \int_{-B/2}^{B/2} y dx = \frac{\gamma}{2} \cdot W \cdot H \cdot \frac{L}{\pi} \cdot \sin \pi R$$

$$\times \sin \frac{2\pi}{P} t$$

$$Y = \frac{H \cdot \sin \pi R}{\pi R}$$

$$T = \gamma \cdot W \cdot \int_{-B/2}^{B/2} y \cdot x \cdot dx$$

$$= \frac{\gamma}{2} \cdot W \cdot H \cdot B^2 \cdot \frac{1}{2\pi R} \cdot \left(\frac{\sin \pi R}{\pi R} - \cos \pi R \right)$$

$$\times \cos \frac{2\pi}{P} t$$

$$A = \frac{B \cdot H}{4 \cdot d \cdot GM \cdot \pi R} \cdot \left(\frac{\sin \pi R}{\pi R} - \cos \pi R \right) \cdot \cos \frac{2\pi}{P} t$$

$$\times \frac{180}{\pi}$$

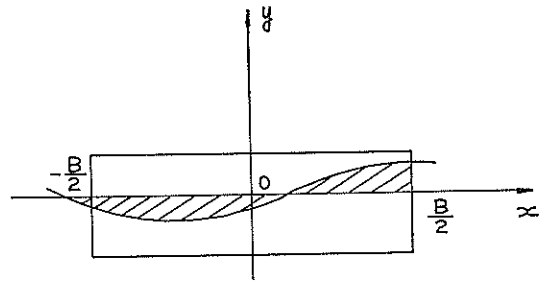


図-15 波による動揺力

y : 波形

t : 時間

H : 波高

L : 波長

P : 波周期

B : 船長

W : 船巾

d : 喫水

γ : 水の比重量

$R = B/L$

GM : 重心メタセンタ

一間の長さ

F_H : ヒービング力

T : 傾斜力

Y : ヒービング量

(全振幅)

A : 傾斜振幅 (deg)

(半振幅)

波浪中の動揺を表わすには、静水中の動揺の式の減衰項を補正して、船体と波面の相対的な角速度を採るのが一般的であるが、ここでは静水中の動揺の式をそのまま用いる事にした。

波周期が短くなると、船が流される現象が顕著に見られ、船体動揺周期が波周期と異なってくるが、これによる慣性力への影響は波自体の影響に比べて小さいと思われるので、出合周期は探らず波周期を採って動的解析を行なう事にする。

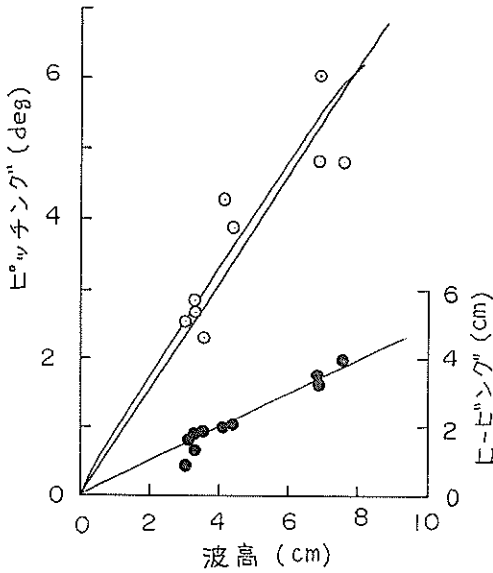


図-16 P, S1, W3, M3

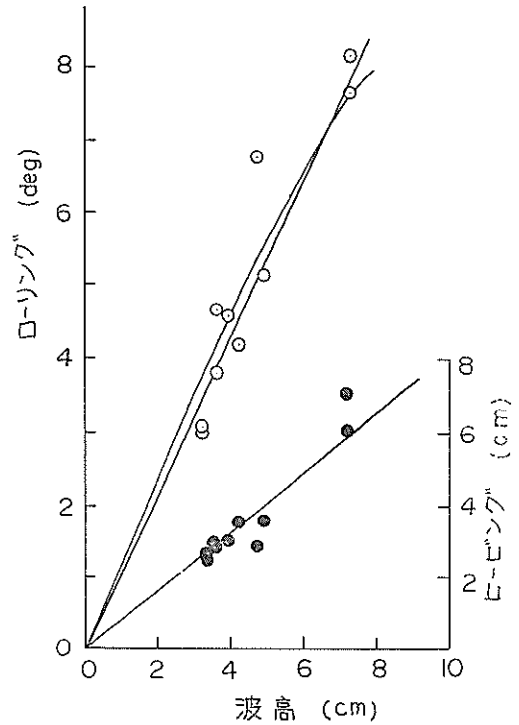


図-18 R, S1, W3, M3

4.2 波高による影響

本実験では波高と動揺の関係を調べるために、波周期を1secとし、ピッチングについてはS1, W3, M3およびS1, W4, M4, ローリングについてS1, W3, M3として実験を行なった。ヒービング量はそのつど求めた。実験結果を図16~18に示す。ピッチング、ローリングについては全動揺角の1/2を採り度数表示とした。ヒービングは全振幅量とした。図中の直線は静的波力を曲線は動倍率を乗じた値を示す。

○：ピッチングまたわローリング ●：ヒービング

4.3 慣性モーメントの影響

ここでは慣性モーメントの影響を調べるために、次の実験を行なった。スパッド上下位置、船の重量はそれぞれS1, W3とし、波周期 0.7, 1.0, 2.0 sec について、慣性モーメントをM1~M4と変化させ、ピッチング、ヒービングの大きさを求めた。実験結果を図19~21に示す。縦軸は波高1cm当たりのピッチング量で、横軸は慣性モーメントである。実験波高は 3.5 ± 0.5 cmとした。

○：ピッチング (deg/cm)

●：ヒービング (cm/cm)

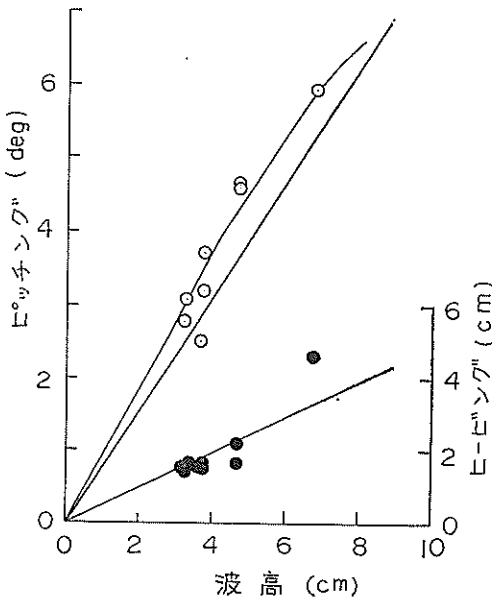


図-17 P, S1, W4, M4

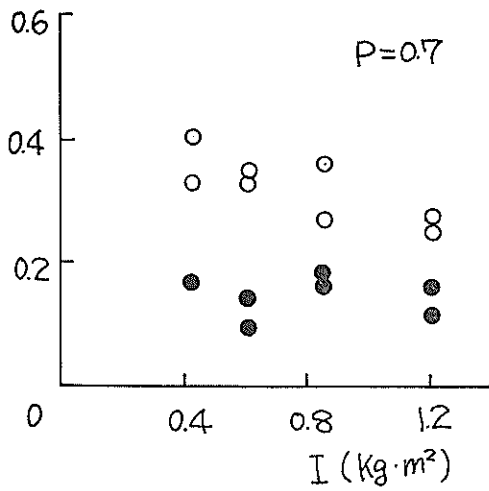


図-19 波周期 (P=0.7 sec)

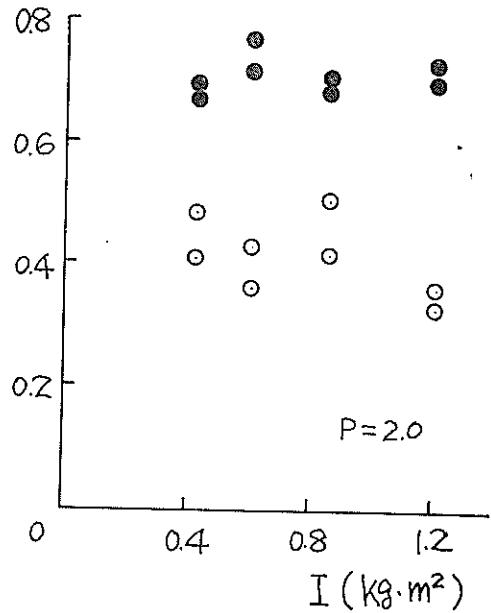


図-21 波周期 (P=2.0 sec)

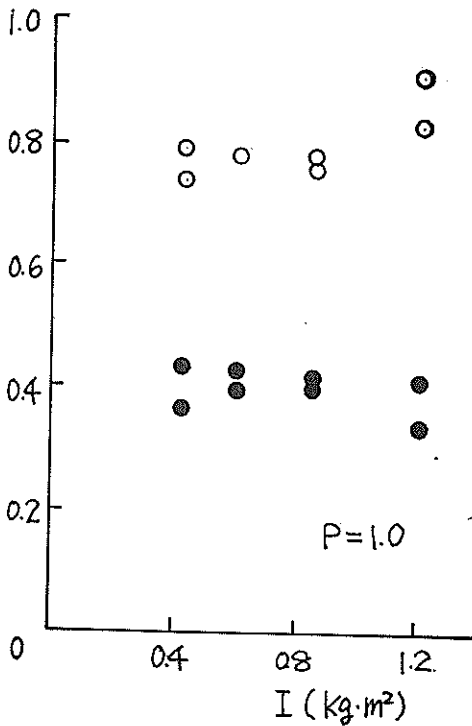
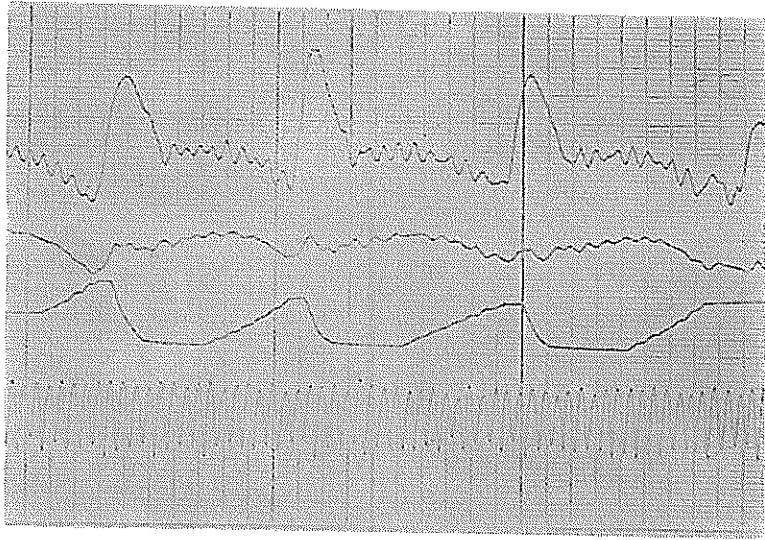


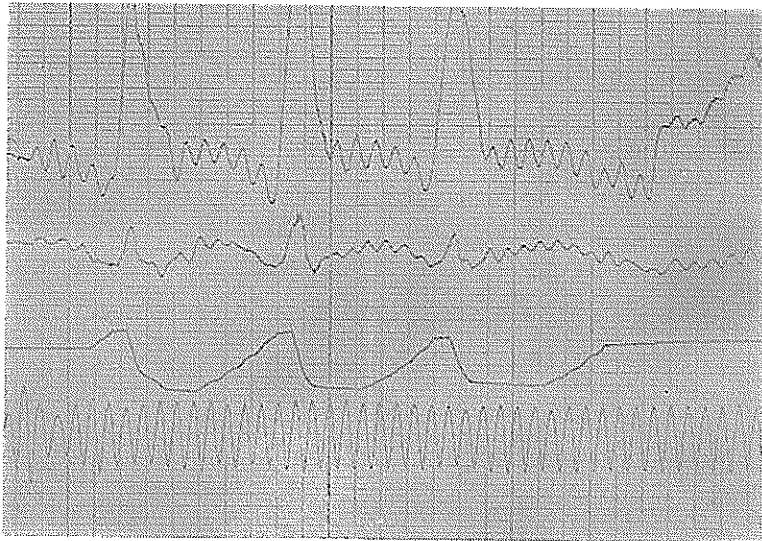
図-20 波周期 (P=1.0 sec)

4.4 波周期の影響

波の周期、波長、水深などには図13に示されるような関係がある。この図からも分かるように、水深の影響が大きいのは水深の小さい範囲であるが、このような水深での実験は困難であり、また重要な意味は持たないと考えられたので本実験では水深を 39 ± 1 cmとした。波周期は0.5~3.0secの9種類、波高は 3.5 ± 0.5 cmとした。ピッチングについてはS1, W3, M3およびS1, W4, M4, ローリングの場合はS1, W3, M3について実験を行なった。ヒービングはそれぞれの場合について求めた。実験結果を図22~33に示す。なお船体の動揺は波高には必ずしも正比例するとは限らないが、便宜上単位波高当たりの動揺値で表示とした。波周期1secの場合は波高が3~7cmのものも含めてグラフ上に示した。なお●印は波高を4cmとした時の、静的波力による計算値に、動倍率を乗じた値である。○印は実験値、曲線は静的波力による値を示す、写真-4~7は船体動揺のオシログラフで上から船首、船尾、前後の各動揺および波高の順



写真—4 波周期 (P=0.5 sec)



写真—5 波周期 (P=0.7 sec)

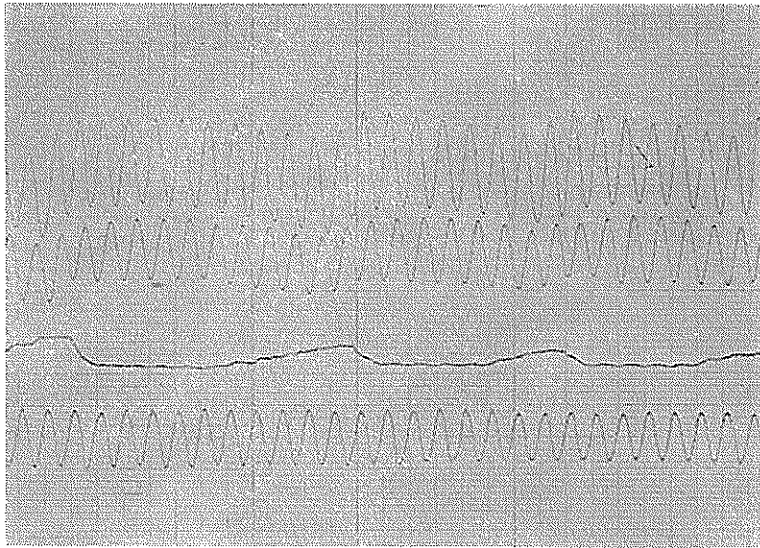


写真-6 波周期 (P=1.0 sec)

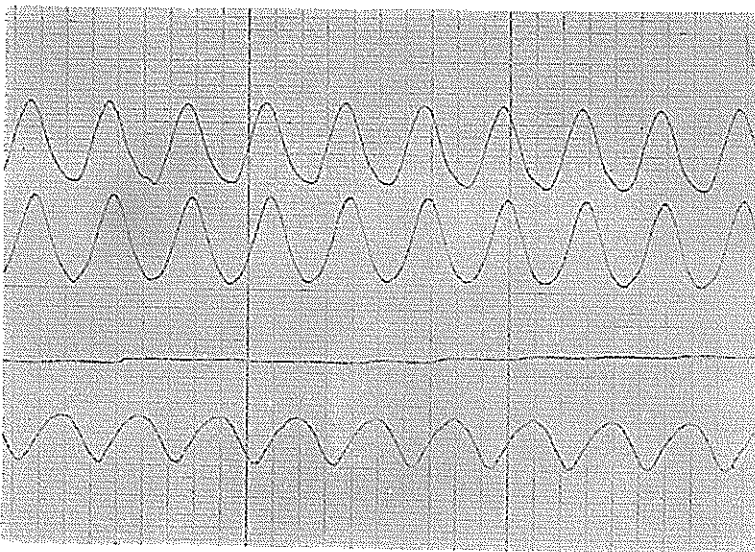
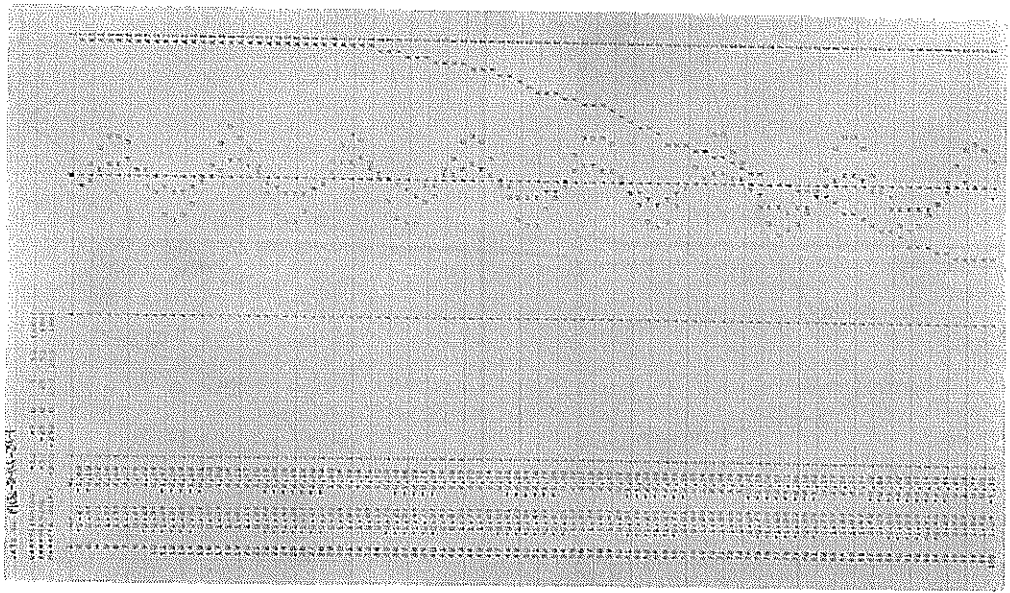
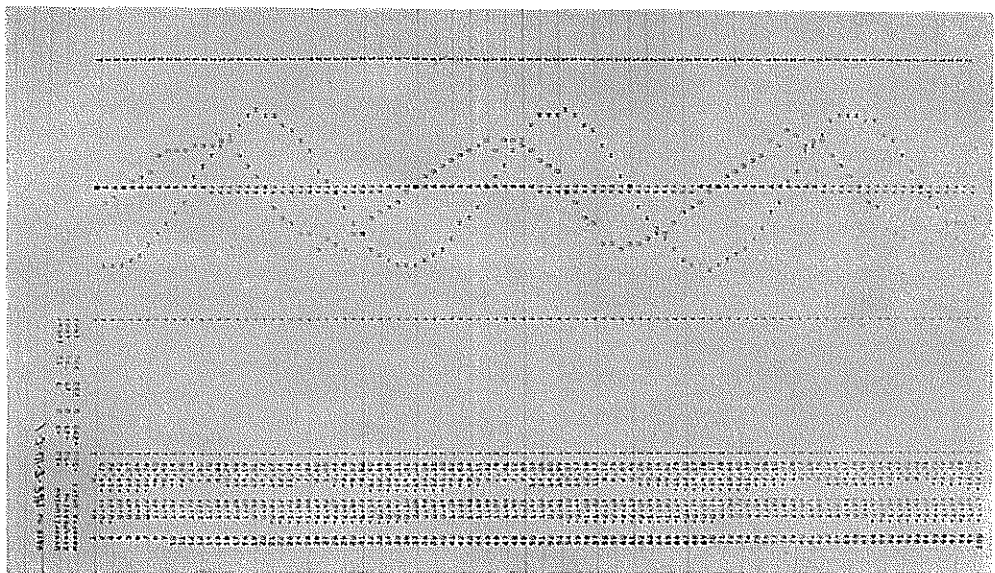


写真-7 波周期 (P=3.0 sec)



写真—8 波周期 (P=0.8 sec)



写真—9 波周期 (P=2.0 sec)

図-22~25 P, S1, W3, M3

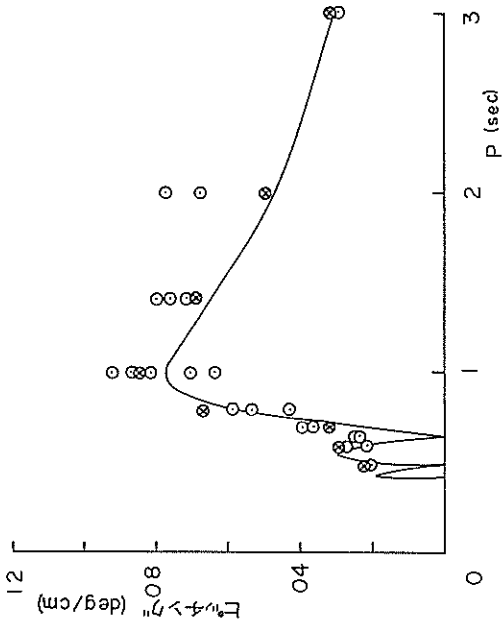


図-22 ピッチング-P (sec)

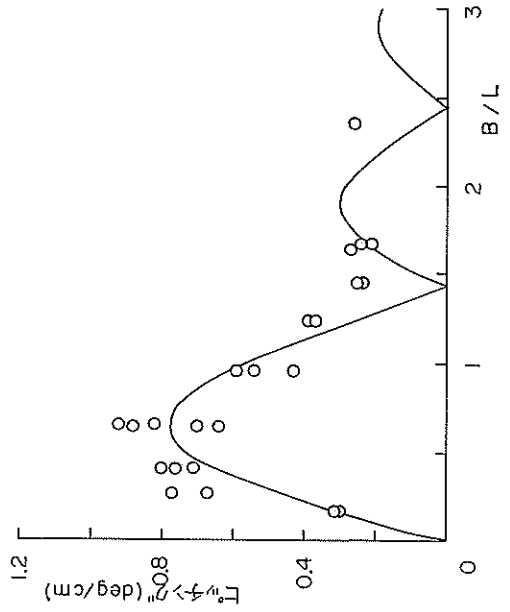


図-23 ピッチング-B/L

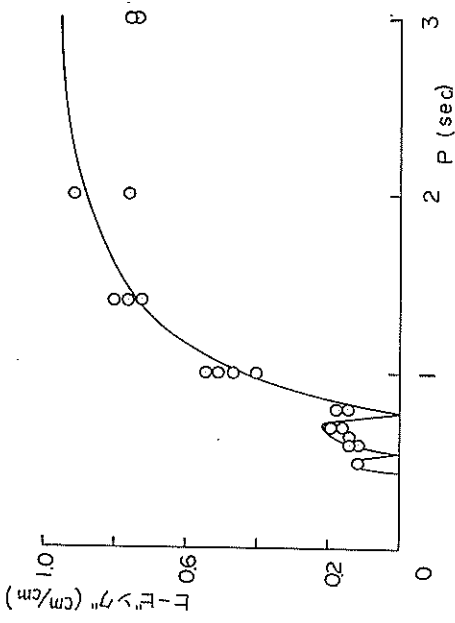


図-24 ヒービング-P (sec)

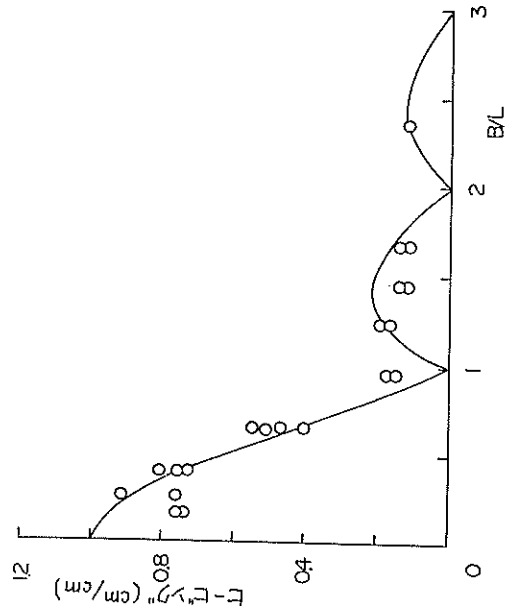


図-25 ヒービング-B/L

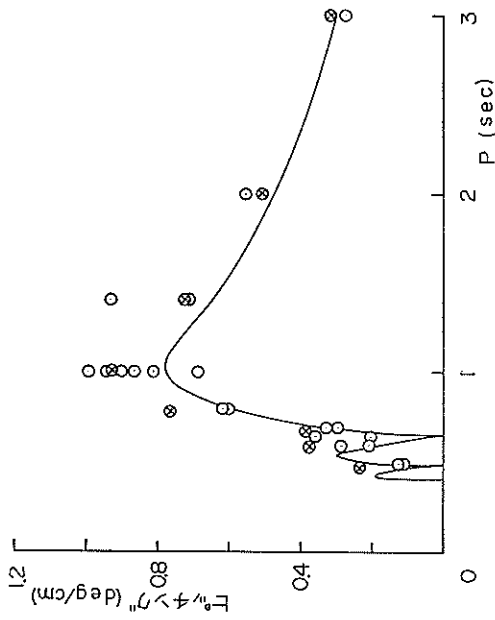


図-26 ピッチング-P (sec)

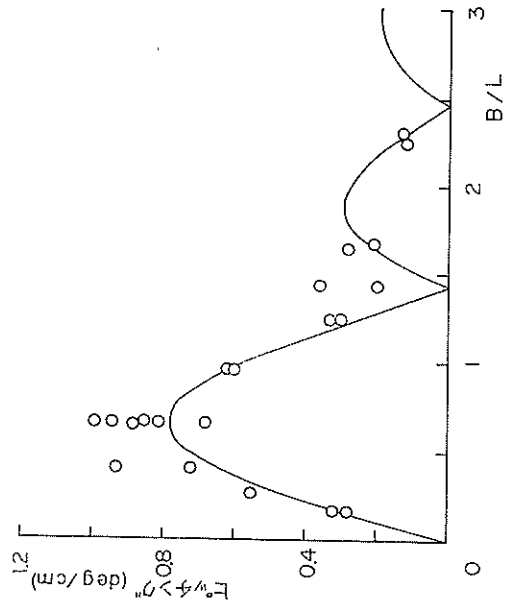


図-27 ピッチングB/L

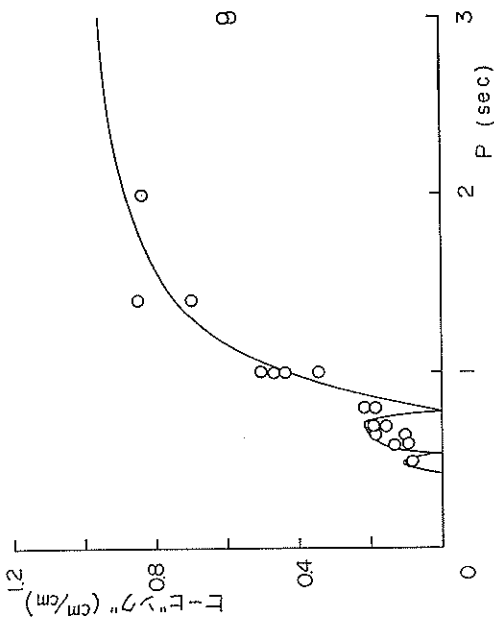


図-28 ヒービング-P (sec)

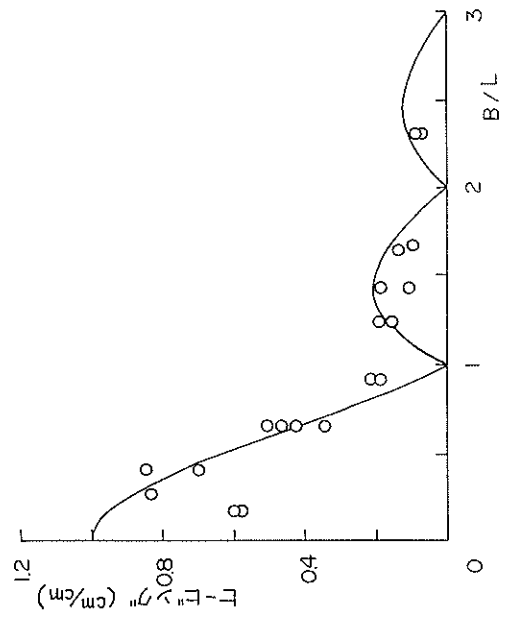


図-29 ヒービング-B/L

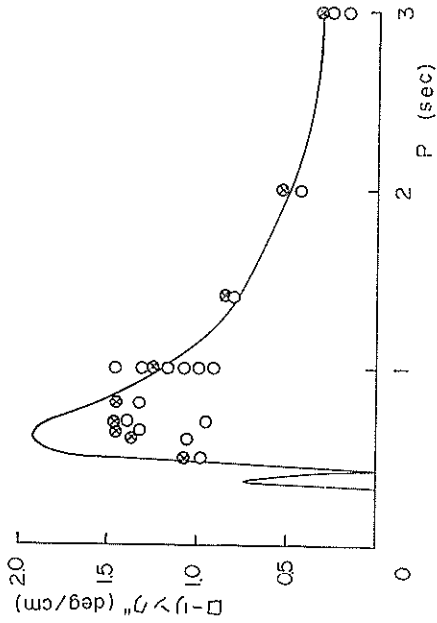


図-30 ローリング-P (sec)

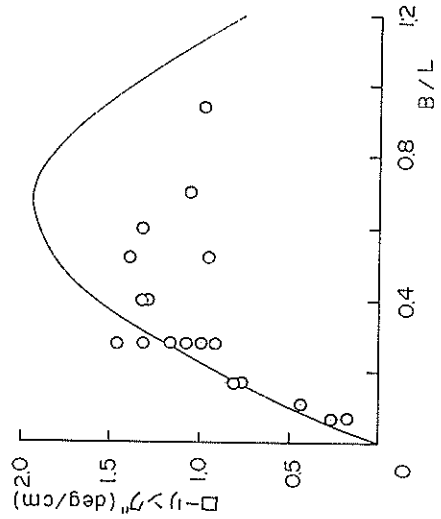


図-31 ローリング-B/L

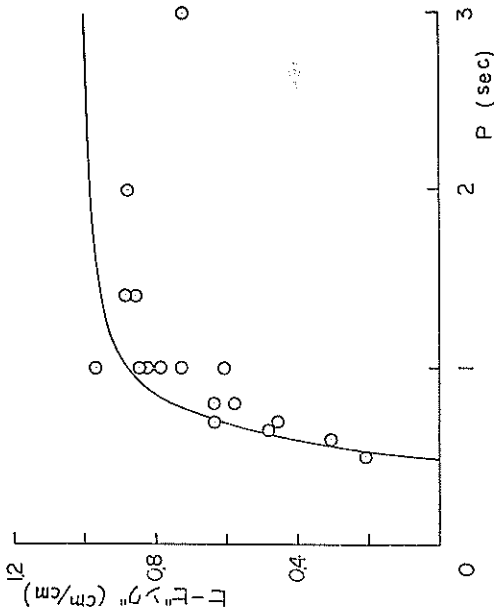


図-32 ヒービング-P (sec)

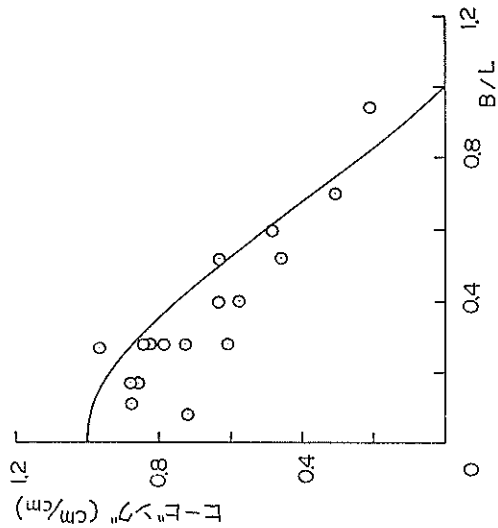


図-33 ヒービング-B/L

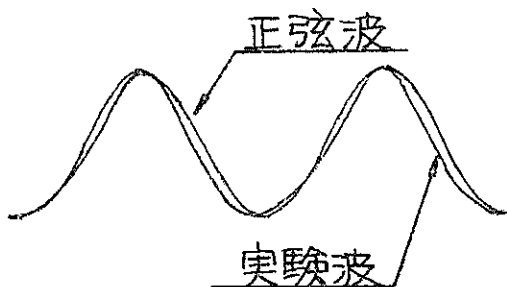
4. 5 実験結果

動揺に対する波高の影響を調べる実験では、波による船の動揺システムの非線形性を調べるのが目的であったが、実験範囲内ではあまり顕著な傾向は見られなかったが、これは波周期が1secでは先の近似式(2)による計算上でもこの様な傾向を示す。

慣性モーメントの影響は、波周期が1.0, 2.0 secのものではあまり見られず、ほぼ計算値と一致している。しかし波周期が0.7secでは慣性モーメントによる差異が見られた。すなわち慣性モーメントが小さい方がピッチングが大きい。これは波との共振というのではなく、波の周期が短くなり、船長/波長が大きくなると、船体後部の波形がくずれられるためと思われる。この様な時には、船体のピッチングは船体中央を中心とした回転とはならず、船首の動きが大きく、船尾の動きは小さくなる傾向を持つ。

波周期を変化させた実験では、ピッチングの場合波周期が1secの近くで最大となっている。また計算値と実測値の比は、波周期が0.65~0.7secで大きくなっているが、これは波周期が0.66secで静的波力による計算値では動揺力が零になってしまう事による。ローリングの場合は波周期が1.0~3.0secではほぼ計算値と一致し、0.8 sec 以下では船の固有周期と波周期に近いにもかかわらず、静的波力による計算値よりだいぶ小さくなるが、これは先の(2)式に示されるように、動揺力が大きいために動揺率が小さくなったためである。

次に船体動揺に対する実験波の波形の影響を考えてみると、図34からも判るように、ピッチング、ローリングに対してはこの影響は小さい。とくに船長/波長が小さくなれば、ピッチング、ローリング力は波の最大傾斜にほぼ比例し、この最大傾斜の大きさは正弦波でも実験波もあまり変らない事から明らかである。しかしヒービング力の場合は波の山における力の減少の割合が、波の谷における力の増大の割合よりも大きいために、全体としてはヒービングは小さくなる傾向にある。波周期が長く



図—34 実験波と正弦波の比較 (P=3.0 sec)

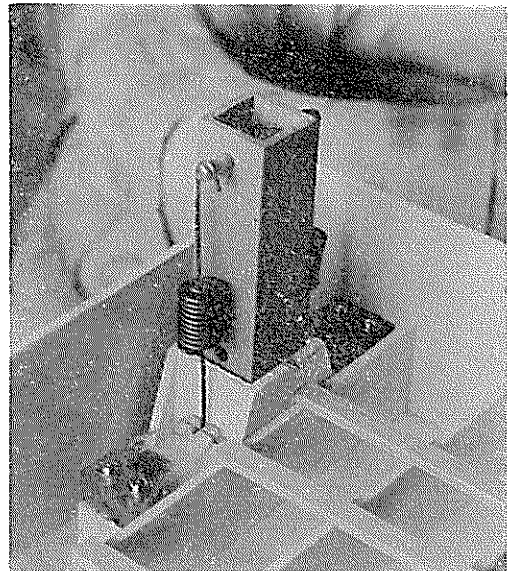
なった場合にヒービングの実験値が小さいのはこのためと思われる。

本実験では波と船の動揺との位相差については測定しなかったが、ピッチングとヒービングの位相差については求められている。これによると波の周期が長ければ*ヒービングのおくれはほぼ1/4周期で、波周期が短くなるに従い同相に近くなる。この事により波周期が長い時、従ってB/Lが小さい時は船体と波面は同一の傾斜をなすと考えられ、また波周期が短くなると船尾よりも船首の動揺の方が大きい事も一致する。

5. スパッド着底実験

5. 1 実験方法および装置

実験は先の波による動揺実験とほぼ同様であるが、測定用スパッド1本はアクリル製でストレインゲージを接着したものとした。スパッドに作用する曲げ力はこのストレインゲージにより測定したが、スパッドの軸方向の圧縮力はこの方法では誤差が大きいので、写真10に示すように、スプリングコイルとストレインゲージを接着したカンチレバーから成る緩衝系より測定した。なおこの緩衝系の特性を図35に示すが、船体の動揺量に比べてかなり剛いもので、またバネ作用をもつものである。スパッドに作用する力の測定には、固有振動数2500Hz、感度一様範囲0~1000Hz、減衰比約0.7の振動子を用いた。



写真—10 緩衝機構

* 1.0~3.0 sec

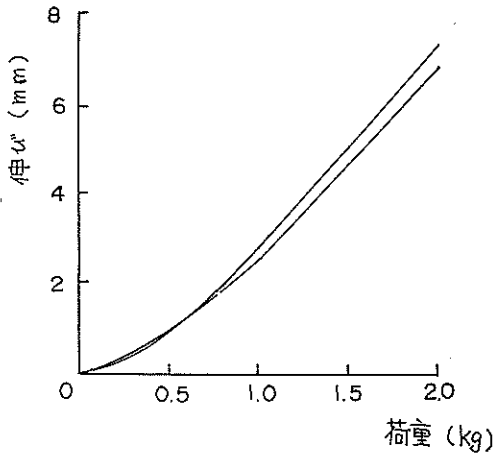


図-35 緩衝コイルの荷重—伸び特性

スパッド着底とは水槽に $45 \times 30 \times 6$ cm のコンクリートブロックを置き、これにスパッドが上方から衝突する事で、スパッドは出しきった状態 (S 5) とし、静水時にスパッド下端がブロックの上面に接するよう水面の

調整を若干行なった。またこのブロックの後方に $45 \times 15 \times 10$ cm のコンクリートブロックを置き、海底障害物との水平衝突によりスパッドが受ける力について調べた。これをスパッド水平衝突という事にする。またこれらの場合、スパッドが1本の場合と本の場合の比較も行なった。

船体のピッチング、ヒービングについては共に行なった実験から求めた値を用いた。

5. 2 波高による影響

スパッドに作用する力の波高による影響を調べるための実験を行なった。実験は2通り有り、ともにピッチングについてのものであるが、1つは S 5, W 3, M 3, 他は S 5 W 4, M 4 であり、船体とブロックの衝突の仕方、および実験結果を図 36, 37 にそれぞれ示す。図中 ●, ○印は着底実験のスパッド軸圧縮力で、それぞれスパッド1本, 2本の場合のもの。▼, ▽印はスパッド水平衝突実験の曲げ力で、それぞれスパッド1本, 2本に対するものを表わす。この力はスパッド先端に作用するとした時の値である。

5. 3 慣性モーメントの影響

ここでは慣性モーメントがスパッドに作用する力に対してどの程度影響があるかを調べたもので、波周期は 0.7, 1.0, 2.0 sec の3種とし、スパッド繰り出し状態お

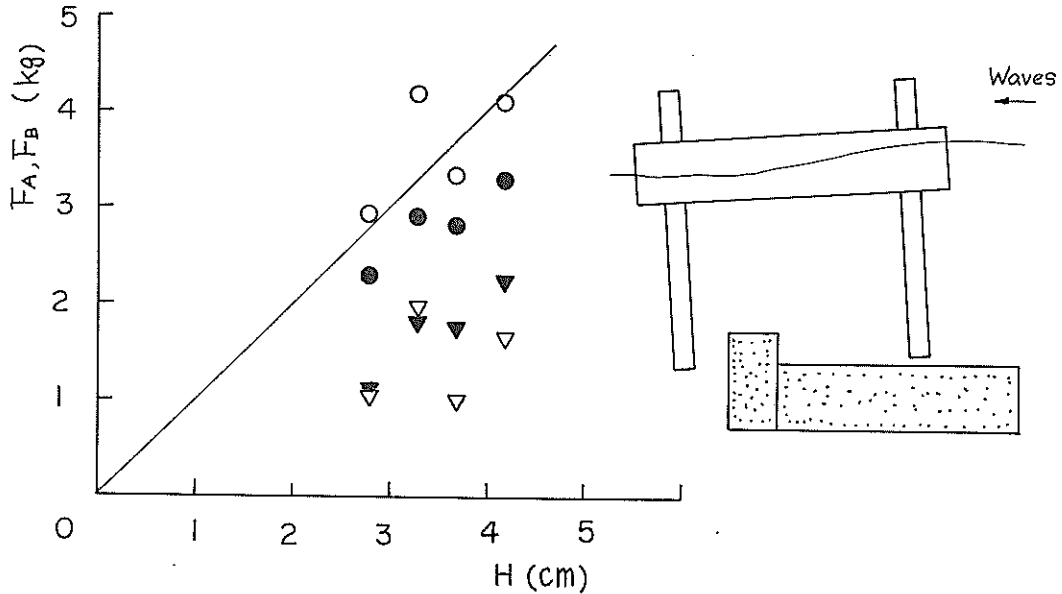


図-36 P, S 5, W 3, M 3 (P=1.0 sec)

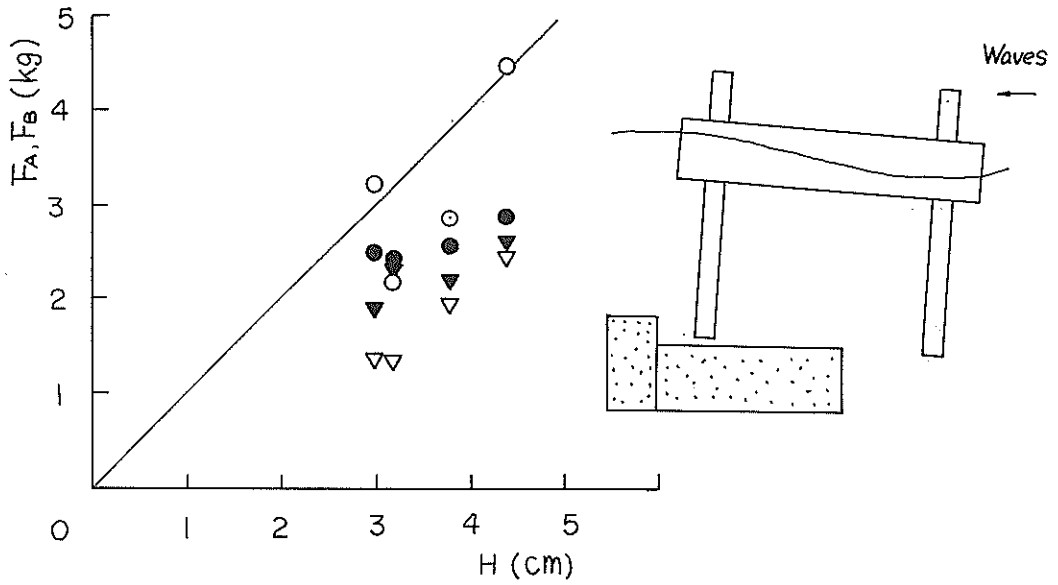


図-37 P, S 5, W 4, M 4 (P=1.0 sec)

よび船体重量はそれぞれS 5, W 3とし、慣性モーメントをM 1~M 4の4通りに変えて実験を行なった。船験とブロックの関係は図36と同じである。これらの結果を図38~40に示す。

○軸圧縮力スバット 1本 △曲げ力 1本
● " 2本 ▼ " 2本

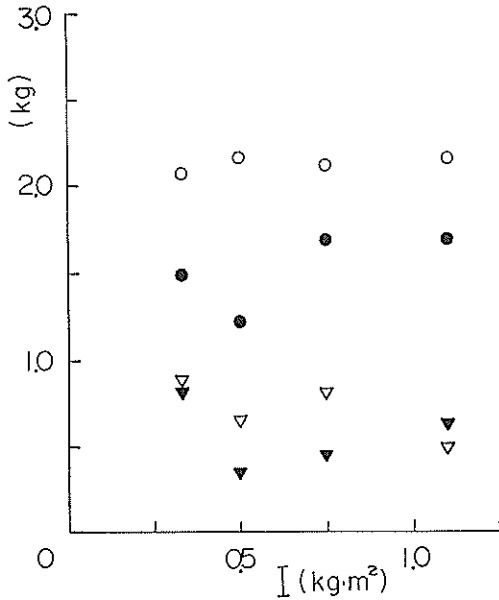


図-38 P=0.7 sec H=3.6 cm

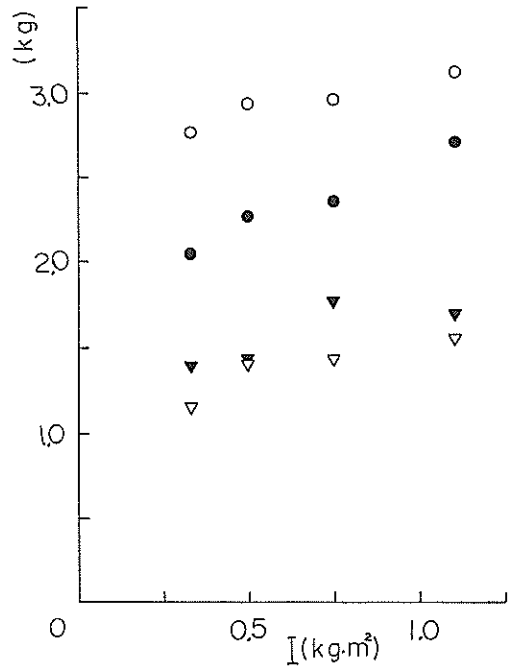


図-39 P=1.0 sec H=4.1 cm

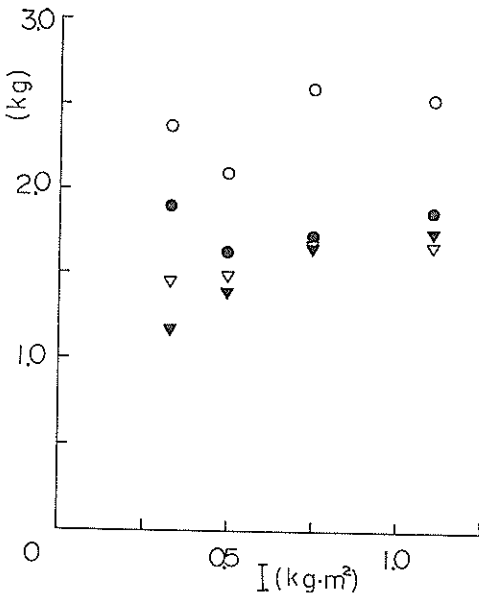


図-40 $P=2.0 \text{ sec}$ $H=4.1 \text{ cm}$

5. 4 波周期の影響

先に行なった動揺実験と同様に9種類の波について実験を行なった。船体重量、慣性モーメント、ブロックとの衝突の状態などは全て波高による影響を調べた実験とそれぞれ同じであるが、着底用ブロックを取り除いた実験を加えた。これは波周期が短い場合にはスパッドが着底するために船の漂流速度が小さくなるので、この影響を調べるためのものである。波高は $3.5 \pm 0.5 \text{ cm}$ とした。実験結果を図41~43に示す。

5. 5 実験結果

本実験ではスパッド着底、およびスパッド先端が障害物と水平に衝突する事に相当する実験を行なった。着底実験ではスパッドにかかる軸方向の圧縮力は、スパッド1本より2本で着底する方が一般的に大きい。これはスパッドが1本の場合は船体がローリングしてスパッドにかかる力を減じるためである。しかし障害物と水平衝突する場合はスパッド1本の時のの方が大きくなる傾向がある。これは船体長手方向から波を受ける実験のため、水面上でのスパッドを支点とした回転運動が少ない事による。このためにスパッド2本を同時に水平衝突させる事は実際には難かしく、また実験値は数回行なったもの内で大きい値のものを探ったので、スパッド1本の場合

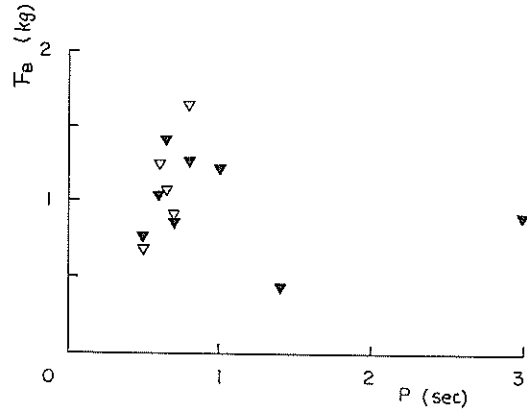


図-41 波周期とスパッド曲げ力

$P, W 3, M 3$ $H=3.5 \pm 0.5 \text{ cm}$

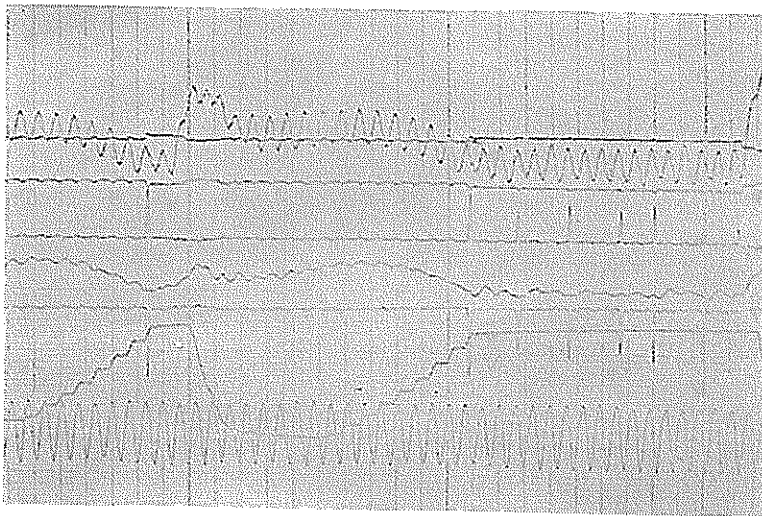


写真-11 波周期 (0.7 sec, 着底ブロックなし)

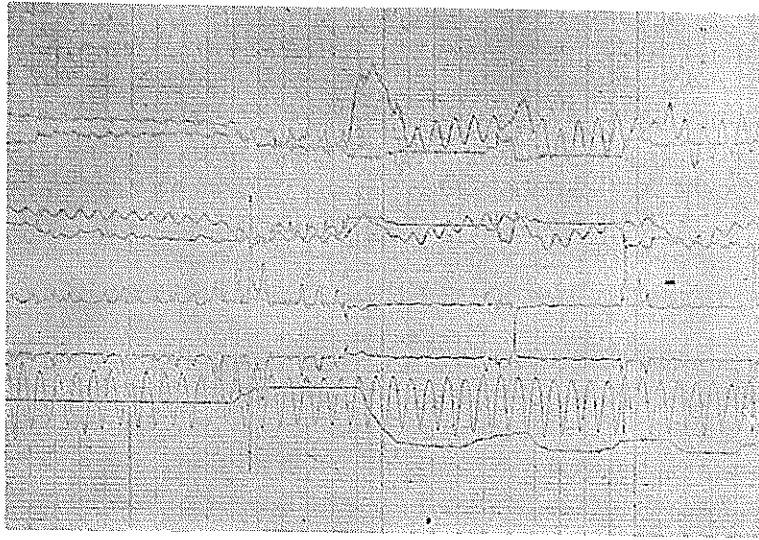


写真-12 波周期 (0.7 sec)

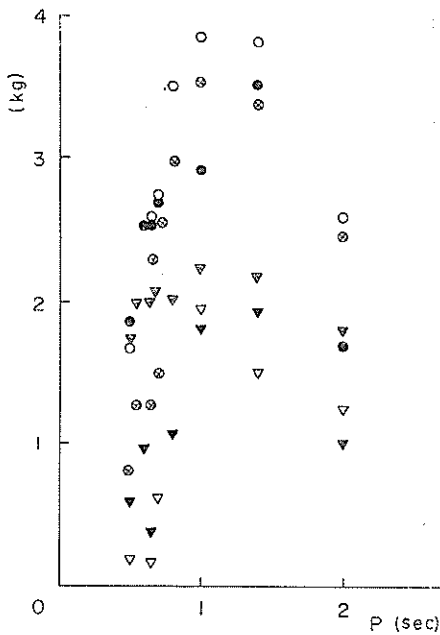


図-42 P, W3, M3 H=3.5±0.5cm

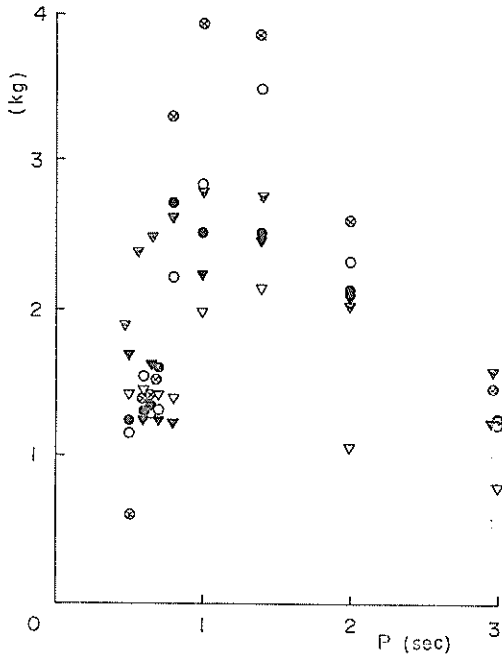


図-43 P, W4, M4 H=3.5±0.5cm

とあまり変わらないものとなってしまった。

スパッドの水平衝突 (1本および2本の場合) とスパッド1本の着底の場合は、慣性モーメントの増大にともないスパッドの受ける力も増大する傾向が多少見られるが、スパッド2本の着底の場合はこの傾向はより小さい。

波高を変えた実験でスパッド軸圧縮力を見ると波高に対しほぼ直線的な関係がうかがえる。またスパッド1本による水平衝突の場合もこの関係が見られる。

波の周期を変えた実験では着底および水平衝突時にスパッドに作用する力は、波周期とピッチングとの関係に似た傾向を示した。これらの力を計算より求めるには遅

動のエネルギーを基にするのが一般的であるが、着底実験にこれを適用した場合は必ずしも良い結果は得られない。これは慣性モーメントを変えた実験からも明らかであるが、次の仮定を設けて、運動のエネルギーから軸圧縮力を計算してみた。

1. 船の動揺は海底に衝突用のブロックが無い場合と同じとする。
2. 運動のエネルギーはピッチングおよびヒービングによる運動のエネルギーのそれぞれの最大値の和とする。
3. 運動のエネルギーは緩衝機構を有する測定用スパッドのみで吸収されるものとする。

以上3つの仮定によると実際よりも大きな運動のエネルギーの値となるから、これより算出したスパッドの軸圧縮力は実験値よりも大きくなるはずである。しかし計算値が実験値とはほぼ等しいか、大きくなるのはS5, W4, M4とした時の波周期0.5~1.0secの範囲だけで、その他の実験では計算値は実験値の約半分ほどである。これらの点より、運動のエネルギーからスパッド着底時の軸圧縮力の計算をする事は不都合な点があるので次の様に考えた。

スパッドが着底（1本または2本）すると、ヒービングはスパッド先端を支点とした回転運動となるため、スパッドに作用する力は小さいと思われるので考慮しない。そこでピッチングのみを考えて、スパッド先端の軸方向の力により波浪中のピッチングが制止されるとして、この力を次式により算出してみた。

$$F_A = \frac{k \cdot \theta}{l}$$

F_A = スパッド軸圧縮力

k : 単位ピッチング当たりの傾斜力

θ : ピッチング角

l : スパッド間距離の $1/2$

これによる結果を⊗にてそれぞれ図中に示す。S5, W4, M4の場合はスパッドの位置が船尾側のため、波周期が1sec以下の時の実験値はS5, W3, M3の場合よりも軸圧縮力は小さくなった。これは波周期が小さくなると船尾の動揺が船首に比べて小さくなるためと思われる。

次にスパッドが海底障害物と衝突した時のスパッドの曲げ力について見る。着底用のブロックがあると船の前後揺が多少制約されるのでこの影響を調べたところ、波周期が0.7sec以下ではこの影響が見られたが、これ以上の周期の長い所ではあまりこの差がなかった。

船の前後揺を量的に正確につかむ事は本実験ではでき

なかったが、若干のデータを参考とすると、波周期が1sec以下だと波によって船体が流される速度はほぼ同じで、波周期による差異もあまり見られなかった。しかし波周期が長くなり船体が前後の往復運動をする場合は、差異が認められた。

ここでは次のようにしてスパッド曲げ力を計算した。すなわち、運動のエネルギーは船体の水平運動とピッチングによるものだけとし、このエネルギーによりスパッドのたわみと船体の中央を中心とした傾斜を生ずるものとする。これによる結果を図中に▽印で示す。これによると波周期が0.8sec以下では実験値は小さい値を示した。次に船体立上り時に作用する波力によるスパッド曲げ力とスパッド水平衝突時に作用するスパッド曲げ力についての比較であるが、前者については、²⁾波高が一定の場合には船長/波長=0.5の時に最大となり、その値は近似的に次式で表わされる。

$$F_{W} = e \cdot \gamma \cdot d \cdot W \cdot H$$

F_W : 波力

e : 波力係数

γ : 水の比重量

d : 喫水

W : 船幅

H : 波高

これはトロコイド波について求められたものであるが、正弦波形についても同様の近似式が得られる。 e の値は実船では1~1.2、模形では1~1.5³⁾である。またこの値は船が動揺している場合でもあまり変わらない。²⁾

ここで $e=1$ とし、 $d=0.0189m$ 、 $W=0.406m$ 、 $H=0.04m$ とすると、 $F_W=0.307kg$ となり実測値の約 $1/2$ である。この事からスパッドの曲げ強度を計算する場合は、船の使用条件により船体の水平方向の運動のエネルギーを考慮する必要がある。

6. あとがき

本実験では模形を小さくしたため、実験値にバラツキが大きく、また装置の不備のため十分な解析を得るためのデータが得られなかった面もあるが、次の事柄が明らかになったものと思われる。

船の動揺の固有周期は計算値（慣性力と復元力のみによる値で非減衰固有周期）よりも大きくなる傾向がある。これは船体重量が小さく、また慣性モーメントの小さい程、すなわち計算値が小さいもの程著しい。また実験および計算からも、本系の固有周期はするどいピーク値を持つものではなく、またその動倍率もあまり大きくないものであるために、とらえにくいものである。

船の動揺の減衰比は本実験では、ピッチングに対しては約0.3、ローリングで0.2で、減衰項を角速度に比例するとした場合は共振現象が見られる値であり、本実験では近似不十分であった。

本動揺系の減衰項を角速度の2乗に比例するとし、近似解を求めたところ、減衰定数を $b = \alpha \cdot W \cdot B^3$ とし、 $\alpha = 9.3 \text{ (kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2)$ とすると比較的よい近似が得られた。

船のピッチングまたはローリングを生じさせる力は静止波形（波圧を波面からの深さに比例するとし、波の動的な要素を考えない）より求めた静的波力は、同一波高に対し、船長が波長の0.66の時最大となる。

船体のヒービングは船長に比べて波長が大きくなる程大きくなり、その大きさはほぼ波高に等しくなり、ピッチングまたはローリングより4周期の位相おくれとなる。

船長に比べて波長が小さくなるに従い、船首（波に面する側）の動揺の方が船尾のそれよりも大きくなり、ピッチングまたはローリングとヒービングはほぼ同位相となる。

スパッド着底時にスパッドに作用する力はスパッド軸圧縮力が大きく、その時は曲げ力はほとんど見られなかった。（スパッドの長さは海底面までとし、スパッド先端には特別なスパイクなどのストップは無い）

スパッド着底時のスパッド軸圧縮力は2本で着底する方が1本の場合よりも大きく、双方のスパッドに等しい力が作用するとした場合、スパッド軸圧縮力の和は、波浪中のピッチング角度だけ静水中で傾斜させる力のほぼ2倍に等しく、動揺エネルギーより算出した値は実験値よりも小さくなる傾向がある。これは船体の慣性モーメントが小さい場合、また動揺周期が長い場合に著しい。

スパッドに作用する曲げ力は水平運動が制止される時に大きく、それはスパッド1本の場合の方が2本の場合よりも大きく、その値は水平運動のエネルギーとピッチングエネルギーが、船体傾斜とスパッドのたわみに費せられるとしたものとはほぼ一致する。

以上の点が今回の実験より得られた点であるが、本実験では喫水が小さく、従って重心の位置の影響が少ない場合についてのみ行なったが、喫水が大きく、また重心の位置を高くして、船の動揺の固有周期を長くした場合も興味のある問題である。また本実験では装置の不備のため船体の前後揺については詳しくは調べられなかったが、現在はほぼ満足できる装置を得た。

謝辞 本実験については当研究所水工部、構造部お

よび計算室の方々に多くの助言を頂いた事を感謝するとともに、これらを十分に活せなかった点を反省し、今後の実験にそなえたい。なお当開発室の助手の鈴木章君の実験に対する協力に感謝を表したい。

参考文献

1. 合田良実 他 海の波の波長および波速の計算表
技研資料 No.12, 1964年6月
2. 運輸省港湾局 港湾構造物設計基準 1968年
3. 小岩苔生 他 スパッドを有する作業船の船体に作用する波力について
4. 元良誠三 船体運動力学 共立出版株式会社
1967年
5. 古川英一 振動および衝撃測定 誠文堂新光社
1966年
6. SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK
VOL. 1 McGRAW-HILL BOOK COMPANY

記号表

- A : 傾斜振幅 (半振幅)
 a_t : peak-to-peak 振幅
 B : 船長
 : 浮心
 b : 船幅
 b : 減衰定数 (2次)
 c : 減衰定数 (1次)
 D : 喫水点
 d : 喫水
 e : 自然対数の底
 : 波力係数
 F_A : スパッド軸圧縮力
 F_B : スパッド曲げ力
 F_H : ヒービング力
 F_W : 波力
 G : 重心
 g : 重力定数
 GM : メタセンター長さ
 H : 波高
 I : 船体慣性モーメント
 I_0 : 慣性モーメント
 I' : 附加慣性モーメント
 K : 底点
 k : 復元定数
 KM : 底点—メタセンター間距離
 KG : 底点—重心間距離

L : 波長
 l : スパッド間距離の $1/2$
 M : メタセンター
 m : 動倍率
 P : ピッチング
 : 波周期
 P_d : 船体動揺固有周期
 P_n : 非減衰固有周期
 R : ローリング
 : B/L 比
 T : 動揺力 (ピッチング, ローリング)

t : 時間
 W : 船幅
 Y : ヒービング量 (全振幅)
 y : 波形
 α : 減衰定数係数
 γ : 水の比重量
 \odot : 動揺トルク (動揺角度表示)
 θ : 船体傾斜角
 λ : 減衰比
 ψ : 入出力位相差
 ω : 角速度

(1969.7.4 受付)

港湾技研資料 No. 87

1969・9

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 桂山印刷株式会社
台東区東上野5丁目1番8号

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.