

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

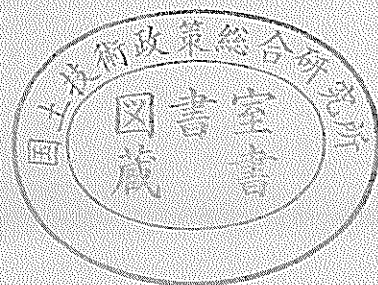
---

VOL. 19

NO. 3

SEPT. 1980

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第19巻 第3号 (Vol. 19, No. 3), 1980年9月 (Sept. 1980)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Oxygen Uptake by Resuspended Sediments  
…Kiyoshi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Tsuyoshi HORIE…… 3  
(再浮遊した底泥の酸素消費実験……細川恭史・三好英一・堀江 毅)
2. 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討  
……合田良実……37  
(Examination of the Resolution of Incident and Reflected Wave by  
Means of Directional Spectra with a Wave Gauge Array……Yoshimi GODA)
3. 大型く(矩)形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第1報)  
—模型実験による検討—……高山知司・永井紀彦・菊地 治・諸石一幸……71  
(Motions and Mooring Forces of a Rectangular Floating Body in  
Wave (1st report)……Tomotsuka TAKAYAMA, Toshihiko NAGAI  
Osamu KIKUCHI and Kazuyuki MOROISHI)
4. 大型く(矩)型浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報)  
—数値シミュレーション手法について—……上田 茂・白石 悟… 105  
(Motions and Mooring Forces of a Rectangular Floating Body in  
Wave (2nd report)……Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI)
5. 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートばりの疲労強度(第2報)  
……上田 茂・小島 晃… 145  
(Study on Fatigue of Reinforced Concrete Beams  
……Shigeru UEDA and Akira KOZIMA)
6. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究……松並仁茂… 191  
(Studies on the Design Method of Flexible Anchorages of the  
Quaywall……Hitoshige MATSUNAMI)

### 3. 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究 (第1報)

—模型実験による検討—

高山知司\*・永井紀彦\*\*・菊地 治\*\*・諸石一幸\*\*

#### 要 旨

係留時の大型矩形浮体の動揺および係留系に働く力の推定法として、数値計算による方法が注目されている。しかし、現在のところ数値計算は新しい手法であり、その妥当性および精度については、まだ十分な検討がなされていない。このため、運輸省港湾技術研究所内の25m不規則波造波水槽で、大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する模型実験を実施し、その結果と、同所が保有している数値計算プログラムを用いて計算した結果とを比較検討した。

検討対象とした浮体は、390m×97m×26mの大型石油備蓄船を想定し、模型縮尺は1/50とした。浮体の動揺は六自由度運動測定装置を用いて測定し、防舷材に作用する力は荷重変換器を用いて測定した。波向は、浮体長軸から90°と60°の入射角を持つ2通りを検討し、喫水としては、バラスト時と半載時を検討した。実験波は、規則波と不規則波を作用させた。データの解析は、規則波の実験ではペン書きオシロに書かれた結果を読みとり、不規則波の実験では、データレコーダに記録したデータをA/D変換した後に統計計算をおこなった。

実験結果と数値シミュレーション結果とを比較検討した結果では、理論的に求まる流体力係数を用いると、数値計算では浮体の運動と係留力を過大に見積ることになるので、流体力係数に修正を施した。この修正により、断面分割法による数値計算プログラムで、大型矩形浮体の動揺と係留力が推定でき、設計に応用できることが明らかになった。しかし、SURGINGとSURGINGによって生ずる防舷材反力の推定に関しては、本プログラムの適用が困難であることも明らかになった。

\* 海洋水理部 波浪研究室長  
\*\* 海洋水理部 波浪研究室

### 3. Motions and Mooring Forces of a Rectangular Floating Body in waves (1st report) —Investigation by Model Experiment—

Tomotsuka TAKAYAMA\*

Toshihiko NAGAI\*\*

Osamu KIKUCHI\*\*

Kazuyuki MOROISHI\*\*

#### Synopsis

The movement of a floating body and the forces acting upon its mooring facilities can be estimated by a hydraulic model test or a numerical simulation. The latter, however, is a recently developed new method. Accordingly, its applicability and accuracy has not been sufficiently investigated.

In order to verify the numerical simulation, hydraulic model tests on the movement of a floating rectangular body and forces acting on it are carried out in the irregular wave tank. The model scale is determined to be 1/50 by imaging the floating oil storage tank of 390m long, 97m wide, and 26m high as a proto-type floating body. In the experiments, regular and irregular waves are exerted upon the body in their approaching angle of 60° and 90°.

In the comparison of the experimental results to the simulated ones, it is clarified that the simulation overestimates the movements and the forces without modifying the theoretically obtained added mass and damping coefficients. Then, the coefficients are modified as the simulation reproduce the experimental movements in the case of the normal approaching angle.

In the result of the modification, the simulation shows relatively good agreement to the experiments except the surging and its related force.

---

\* Chief of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

## 目 次

要 旨	71
1. ま え が き	75
2. 断面分割法による数値計算プログラム	75
3. 模型実験	77
3.1 実験施設および装置	77
3.2 実験方法および実験条件	79
4. 実験結果とその考察	83
4.1 実験値との比較による流体力係数の修正	83
4.2 固有周期に関する検討	83
4.3 直角入射規則波実験	84
4.4 斜め入射規則波実験	87
4.5 不規則波実験	92
5. 結 論	101
6. あ と が き	102
参考文献	102
主要記号表	103

## 1. ま え が き

全石油消費量のほぼ99.8%を輸入に頼らざるを得ない我が国では、石油の長期確保が重要な課題となっている。このため、近年、石油備蓄基地の建設がクローズアップされてきた。

石油備蓄にはさまざまな方法があるが、国土が狭く地震の多い我国に適している方法の一つとして、海上にタンク船を浮かせて石油を備蓄する方法が注目を集めている。しかし、タンク船による海上備蓄は我国ではまだ実施された例がないため、波浪および風、潮流などの自然条件の中に係留される大型浮体がどのような挙動を示し、係留施設にはどの程度の力が働くかを十分に検討しておく必要がある<sup>1),2)</sup>。

係留時の浮体動揺と係留系に働く力の推定法として、数値計算による方法<sup>3)</sup>と水理模型実験による方法<sup>4)</sup>がある。数値計算によって、浮体動揺や係留系に働く力が十分な精度で推定できれば、あらゆる条件に関する検討が容易にでき、非常に強力な武器となりうる。しかし、現在のところ数値計算は新しい手法であり、その妥当性と精度については十分な検討がなされているとはいえない。

一方、水理模型実験による方法では、現地の状況をすべて含んだ広領域の検討をおこなうためには、施設の制約などにより小縮尺の模型実験にならざるを得ない。このため、計測が非常に難しくなり測定結果の信頼性が低下してしまう。また、水理模型実験では、検討できるケースの数がある程度限られてしまうという制約もある。したがって、大型浮体の運動と係留力を正しく評価するためには、両方の方法で相互の欠点を補いながら検討を進めなければならない。

本研究は、運輸省港湾技術研究所内の25m不規則波造波水槽内で実施した、大型矩形浮体に関する波浪中の水理模型実験について述べ、その結果について考察するとともに、同所が保有している数値計算プログラムで計算した結果と比較、検討したものである。なお、本研究では波浪のみを外力として扱っている。

## 2. 断面分割法による数値計算プログラム

### (1) 断面分割法と特異点分布法

直方体形状の浮体(以下では三次元矩形浮体と称する)の波浪中の運動解析理論としては、特異点分布法<sup>5),6)</sup>と断面分割法<sup>7)</sup>とがある。特異点分布法とは、浮体の没水全表面上に source や doublet を分布させ、それらと Green 関数の積を没水全表面について積分した値で流

体の速度ポテンシャルをあらわし、その速度ポテンシャルを用いて浮体の運動を解析する方法である。

三次元矩形浮体の場合、領域分割法と組みあわせて用いられるため、source や doublet は没水全表面ではなく、浮体の断面形の境界線上に分布される。この特異点分布法は、理論的には厳密解となるため非常に有効な手段ではあるが、波長に比して矩形浮体が多い場合には source の数が非常に多くなるため、計算するのに大容量の計算機を必要とすることや、浮体の係留系が非線型パネになっている場合や不規則波を作用させた場合に適用が困難になることなどの問題がある。

一方、断面分割法の場合、近似計算ではあるが非線型な係留系や不規則波に対しても適用でき、その計算精度もかなり高いと言われている。そこで、ここでは断面分割法に関して概説する。

### (2) 断面分割法の理論

断面分割法とは、二次元的に求めた流体力を長さ方向に積分して、三次元の流体力を求める方法である。すなわち、断面分割法においては、浮体の幅と喫水が浮体の長さに対して十分小さいと考え、浮体のある断面に作用する流体力には浮体の他の断面の影響がないと仮定している。

この場合、浮体断面に働く力は、二次元的に計算されるものを用い、これを浮体全長にわたって積分することになる。波が斜めから入射する場合には、水平力と鉛直力の位相が断面によって異なるため、浮体の重心を通る鉛直軸回りの回転(YAWING)と浮体の短軸回りの回転(PITCHING)が生じる。そのため、短軸方向の水平運動(SWAYING)、鉛直運動(HEAVING)、長軸回りの回転運動(ROLLING)の他に、前述のYAWINGとPITCHINGに関する5つの運動方程式が求まる。

図-1は、三次元浮体の6成分の運動の名称を示したものである。断面分割法では、長軸方向の水平運動(SUR

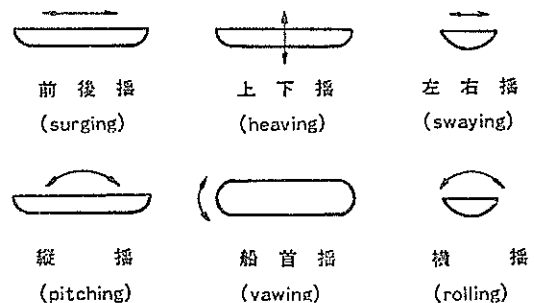


図-1 浮体の運動形式

GING) の解析ができないため, SURGING を求めるためには, さらに別の仮定を設けて, SURGING に関する運動方程式を決定しなければならない。

また, 以上の断面分割法の説明からわかるように, 断面分割法は三次元浮体の運動を二次元の流体力を用いて解析しているので, 三次元的な波の変形効果があらわれない。この意味において, 断面分割法は近似解法である。

(3) 断面分割法による三次元浮体の運動方程式

一般に, 運動方程式は各運動成分に関して,

[質量(または慣性モーメント)]×[加速度]=[外力]として記述することができる。係留浮体に作用する外力は,

- (i) 固定浮体に作用する力
- (ii) 造波抵抗力
- (iii) 静水圧的復元力
- (iv) 係留系から受ける力

に分けて考えることができる<sup>9)</sup>。この他にも, 波浪漂流力などによる定常外力が作用するが, 波浪漂流力は, (i)~(iv)の力に比べて小さいので, ここでは考慮しないこととする。

(i)は浮体が固定された状態での入射波による波力である。(i)はさらに,

(i-a) 入射波による力 (Froude-Kriloff の力)

(i-b) 散乱波による力 (Diffraction Force)

に分けられる。(i-a)とは, 浮体が存在しないときの入射波の場における, 流体圧力の全没水面における積分値である。入射波による流体圧力  $P_F$  は,

$$P_F = -\rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t}$$

の形で与えられることになる。ここで,  $\rho$  は水の密度,  $\phi_i$  は入射波の速度ポテンシャルである。

(i-b)とは, 固定浮体が存在していることによって生ずる散乱波による力である。この力は, 浮体没水部分が静水中で入射波の水粒子の Orbital Velocity をもって運動しているときの速度ポテンシャルに散乱波の速度ポテンシャルが等しい, と考えて近似的に求めることができる。横方向の Diffraction Force を求めるための代表的な Orbital Velocity としては, 浮力の中心点の値を採用し, 上下方向の Diffraction Force を求めるための代表的な Orbital Velocity としては, 浮体底面の中心点の値を採用している。

(ii)は, 静水中で浮体を強制的に振動させると浮体の周囲に波が発生するが, このとき浮体にその反作用として作用する力のことである。この力としては,

(ii-a) 浮体加速度に比例する力

(ii-b) 浮体速度に比例する力

の2つがあらわれる。(ii-a)の抵抗力の係数は付加質量と呼ばれる。これは, 浮体の運動に伴い周囲の水塊も同様な運動をするため, 見掛け上の浮体の質量が増加することを意味している。(ii-b)は造波減衰力と呼ばれている。

(iii)は, 静的に浮体を変位させたときに働く復元力であり, HEAVING, ROLLING, PITCHING に関して存在する。

(iv)は, 係留系から受ける力であり, 変位量によって決定される。ここでは, SWAYING, ROLLING, YAWING, PITCHING, SURGING に関して係留系から変位に応じた力を受けると考える。

以上のことをまとめると, 運動方程式は, 矩形浮体の場合 SWAYING( $x$ ), HEAVING( $z$ ), ROLLING( $y_\theta$ ), PITCHING( $x_\theta$ ), YAWING( $z_\theta$ ), SURGING( $y$ )の順に, (1)式~(6)式ようになる。

$$L(M+M_S)\ddot{x} + LN_S\dot{x} + LM_{SN}\dot{y}_\theta + LN_{SN}\dot{y}_\theta + R(x, y_\theta, z_\theta) = F_x^d + F_x^{F.K} \quad (1)$$

$$L(M+M_H)\ddot{z} + LN_H\dot{z} - 2\rho gbLz = F_z^d + F_z^{F.K} \quad (2)$$

$$L(I+I_R)\ddot{y}_\theta + LN_R\dot{y}_\theta + LM_{SN}\ddot{x} + LN_{SN}\dot{x} + 2\rho gb dL\overline{GM}y_\theta + M(x, y_\theta, z_\theta) = M_{y_\theta}^d + M_{y_\theta}^{F.K} \quad (3)$$

$$\frac{L^3}{12}(M+M_H)\ddot{x}_\theta + \frac{L^3}{12}N_H\dot{x}_\theta + 2\rho gb\frac{L^3}{12}x_\theta + M(x_\theta, y) = M_{x_\theta}^d + M_{x_\theta}^{F.K} \quad (4)$$

$$\frac{L^3}{12}(M+M_S)\ddot{z}_\theta + \frac{L^3}{12}N_S\dot{z}_\theta + M(x, y_\theta, z_\theta) = M_{z_\theta}^d + M_{z_\theta}^{F.K} \quad (5)$$

$$L(M+M_L)\ddot{y} + LN_L\dot{y} + R(x_\theta, y) = F_y^d + F_y^{F.K} \quad (6)$$

式(1)~(6)においては, (i)のみを外力として右辺に示し, (ii) (iii) (iv)の力は左辺に移項している。右辺の添字 F.K はフルードクリロフの力を示し, 添字は  $d$  散乱波による力を示している。

図-2は式(1)~(6)に対応する記号を示したものである。 $L$ は浮体の全長,  $M$ と $I$ はそれぞれ単位長さあたりの浮体の質量と ROLLING の慣性モーメントを意味している。右辺の,  $R(x, y_\theta, z_\theta)$ ,  $M(x, y_\theta, z_\theta)$ ,  $M(x_\theta, y)$ ,  $M(x, y_\theta, z_\theta)$ ,  $R(x_\theta, y)$ は各運動を拘束する係留系から受ける力であり (iv)の力にあたる。式(2)の  $-2\rho gbLz$ , 式(3)の  $2\rho gb dL\overline{GM}y_\theta$ , 式(4)の  $(2\rho gbL^3/12)x_\theta$ は, (iii)の力にあたる静水圧復元力である。ここで,  $\overline{GM}$ は, メタセンター高である。

残りの項が, (ii)の力にあたる造波抵抗であり, 加速

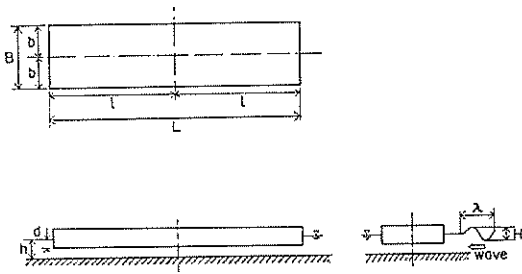


図-2 浮体諸元の記号

度に比例する力  $M$  と速度に比例する力  $N$  があらわれている。ここで、添字の S, H, R はそれぞれ SWAYING, HEAVING, ROLLING を意味している。

SURGING に関しては、断面分割法によっては本来計算できないため、長軸方向の断面を短軸方向に積分した断面分割法を用いて運動方程式をたてている。

#### (4) 計算プログラム

断面分割法による三次元矩形浮体の不規則波中の運動解析プログラムは、当所構造部海洋構造研究室が開発したもので入射波の諸元、またはスペクトル形をもとに不規則波をシミュレートし、時系列を追ひ、前述の運動方程式を解くものである。係留系から受ける反力は、バネが線形であっても非線形であってもよい。このプログラムは、2つの部分から成り立っており、1つは流体力係数を計算するものであり、他の1つは不規則波をシミュレートし運動方程式を時系列を追って解くものである。

前者の入力データには、速度ポテンシャルの級数項の計算次数、水深、浮体重心の鉛直座標、メタセンター高、計算する入射波の周期と波向、浮体の長さとは幅と喫水が必要である。後者の入力データには、タイムステップとタイムステップのくりかえし数、水深、浮体の長さとは幅と喫水、浮体重心の鉛直座標、ROLLING, PITCHING, YAWING の慣性モーメント、係留バネの特性、および入射波の条件が必要である。

### 3. 模型実験

#### 3.1 実験施設および装置

##### (1) 実験水槽

水槽は、運輸省港湾技術研究所内に製作した、図-3に示す、25m×15m×1mの造波水槽を用いた。この水槽の両端には消波砕石を設置した。造波機背後の消波砕石は波が水槽外へ越波するのを防ぐためのものであり、先端の消波砕石は反射波が生じるのを防ぐためのものである。

水槽の両端に置いた消波工は、模型浮体による散乱波

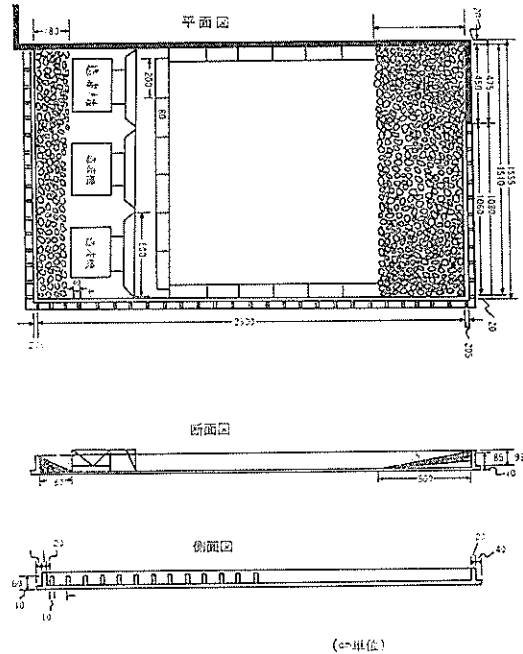


図-3 実験水槽

が側壁によって反射されるのを防ぐために設置した。造波板の前面に設置したフィルターは、模型浮体によって反射された波が造波板で再度反射され、造波機でおこした波と重って模型浮体への入射波高を増大させるのを極力おさえるために設置したものである。

##### (2) 造波機

水路幅15mの水槽に、造波板幅5mを有する造波機3台を設置した。この造波機はピストンタイプの造波機で入力電圧に従ってミナーシャモータが回転し、このミナーシャモータの回転はボールネジを通して、造波板を前後に運動させるようになっている。

この造波機に、ピストンタイプの造波板の造波特性を考慮して不規則波信号を入力すれば、所要のスペクトルを有する不規則波を発生させることができる<sup>9),10)</sup>。

##### (3) 六自由度運動計測装置

模型浮体の重心の変位量と重心まわりの回転量の六成分を計測するために、図-4に示す六自由度運動計測装置を模型浮体に取り付けている。変位量と回転量はポテンショメータで計測する。

##### (4) 荷重計と変位計

係留系に働く力を測定するために、図-5に示す係留装置に50kg用荷重変換器を取り付けた。

この荷重変換器は、浮体が直接接する変位可動の円筒の位置にあるのではなく、水面下に没して水が変換器



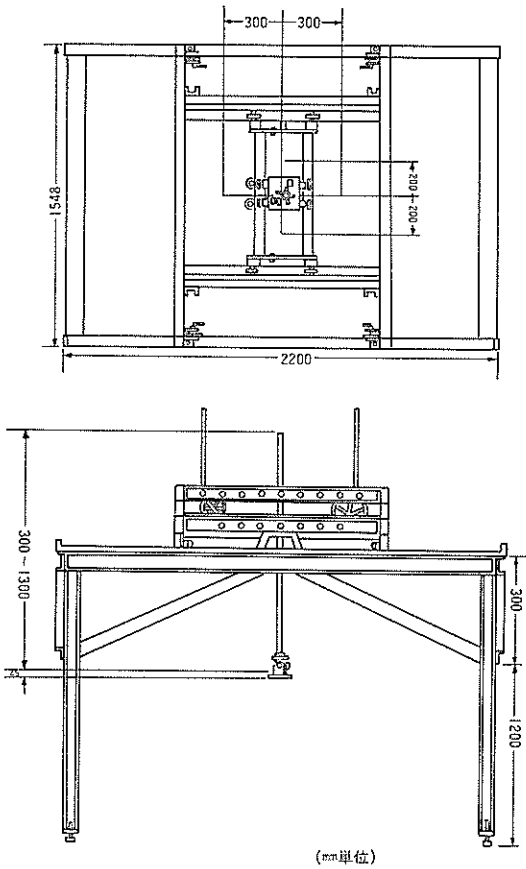


図-4 六自由度運動計測装置

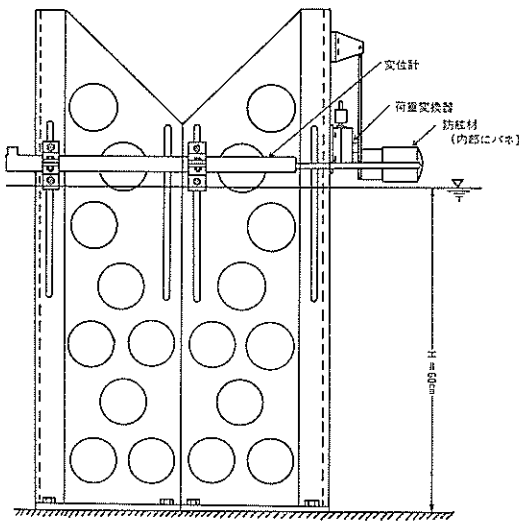


図-5 波力および変位計測装置

内に浸透しないように少し上部に取り付けてある。このため、この荷重交換器に働く力は係留装置に働く力そのものをあらわしているのではなく、円筒設置板の上部回転中心から荷重計の設置位置までの距離に対する、上部回転中心から円筒中心までの距離の比だけ大きくなっている。その倍率は1.4倍程度である。

実際の船体係留には防舷材を用いることになるが、本実験では円筒を用いた。この円筒は2つの円筒から成っていて、船体が外側の円筒に接すると、この外側円筒は内側の円筒に沿って、作用する力に対応した変位をするようになっている。この外側円筒の移動範囲は4cmで、模型縮尺を1/50とすると現地の2mに対応する。この円筒内に適切なバネ定数を持つバネを入れることによって、現地の防舷材に近い状態で係留ができる。

この円筒の先端の位置と同じ高さのすぐ横側で、変位計の変位測定棒の先端が模型船に接触するように、変位計を係留装置に取り付けた。これによって、円筒の模型防舷材の変位が直接測定できる。このような変位計を用いなくても、六自由度運動計測装置から求まる変位量と回転量から計算して防舷材の変位を推定することができるが、この方法では防舷材の変位が実験終了後でないとわからないなどの不便な面があるので、モニター用として変位計を設置したものである。この変位計の測定範囲は最大±10cmである。

#### (5) 波高計

浮体模型前面に20cm間隔に2台、背後に1台容量式波高計を設置し波高を測定した。

前面2台の波高計は、入射波と反射波を分離計算<sup>11)</sup>により求め、正確な入射波高を知るために用いた。入射波の推定法としては、模型浮体を設置する以前に波高を測定しておくことも考えられるが、このためには造波機前面に設置したフィルターによって模型浮体からの反射波が完全に消えることが前提になる。しかし、後述する図-6で述べるようなフィルターの特性からして、周期の長い波は透過率が高いため、どうしても模型浮体と造波機の間でわずかな多重反射が生ずる。そこで上述した分離計算による方法で入射波を求めることにした。背後の波高計は模型浮体通過波を測定するのに用いた。

これら3台の波高計としては最大10cmの波高まで測定できるものを用いた。波高計の検定は、自動昇降装置によりリモートでおこなった。

#### (6) 模型浮体

模型浮体はアクリル樹脂の板によって製作した。表-1は模型浮体の諸元を示したものである。これからわかるように、模型浮体は7.8m×1.94m×0.52mと非常に大

大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第1報）

表-1 模型浮体の諸元

		模 型	現 地 換 算
船 長	$B$	7.80m	390m
幅	$L$	1.94m	97m
高 さ	$H_c$	0.52m	26m
重 量 $W$	バラスト	13720N (1.4tf)	$1.72 \times 10^9 \text{N} (1.75 \times 10^8 \text{tf})$
	半 載	42140N (4.3tf)	$5.24 \times 10^9 \text{N} (5.35 \times 10^8 \text{tf})$
喫 水 $d$	バラスト	9.0cm	4.5m
	半 載	28.3cm	14.2m
重 心 高 $Z_0$ (水面を基準)	バラスト	21.5cm	10.8m
	半 載	-11.7cm	- 5.9m
ROLLINGの慣 性モーメント $I$	バラスト	520kgm <sup>2</sup>	$1.63 \times 10^{11} \text{kgm}^2$
	半 載	1450kgm <sup>2</sup>	$4.59 \times 10^{11} \text{kgm}^2$

きな模型であり運搬が非常に困難となる。そこで、模型浮体を9個の矩形に分割して製作した。計画されている備蓄矩形船でも、内部の流体が大きな運動をしないよう、内壁によって教室に区切られている。各矩形はボルトとナットで一体化し、水密性を保つためにボルト穴の部分にパッキンを取り付けた。

模型浮体の喫水と重心高は、バラスト状態ではアクリル板の厚さの調整によって、計画されている備蓄船と一致するようにした。半載状態では浮体内に水を入れることによって喫水をあわせた。

(7) フィルターと消波工

フィルターと消波工は、構造的には同じものであるが、その用途によって名称を区分している。これは、80cm×80cm×200cmのステンレス製のフレームの中に同質の径0.6mm、2.5mmメッシュの網を50枚組み込んだものである。

消波工は、これを水槽の両端に置いたもので、模型からの反射で側壁との間に発生する散乱波を極力防ぐために設置した。また、これを造波板の前面に設置し、模型と造波板との間の多重反射を防ぎ、波峯をそろえるために用いたものをフィルターと呼ぶ。

図-6は、波高4cm程度に保ち周期のみを変化させて、フィルターの波の透過率を調べたものである。これによると、フィルターは低周波数帯( $f < 1.0\text{Hz}$ )で透過率が0.5以上となり、周波数が1.0Hz以上では0.5以下となる。すなわち、周期1秒程度の波であれば波高が半分程度に低下することがわかる。模型浮体からの反射波はこ

透過率

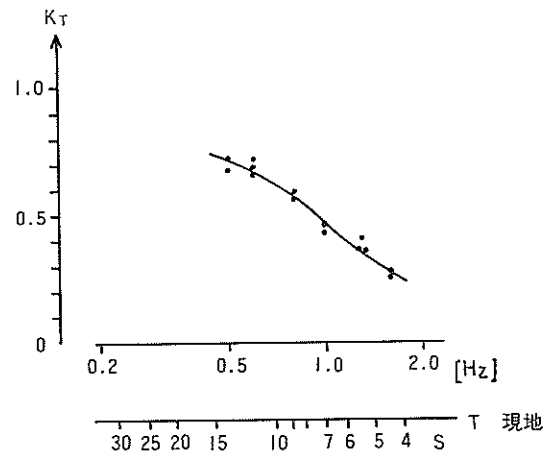


図-6 フィルターの透過率

のフィルターを2回通過して再度入射波として模型船に到達する。このため、フィルターの透過率が0.7となる周期2秒程度の入射波を作用させれば、再入射する波の波高は、 $0.7 \times 0.7 = 0.49$ 倍となる。

写真-1と写真-2は、実験状況を示したものである。

3.2 実験方法および実験条件

(1) 実験場配置

図-7は、実験水槽内の配置を示したものである。この水槽には、図に示されているように送風器もセットされていて、風を発生させることも可能であるが、本実験に

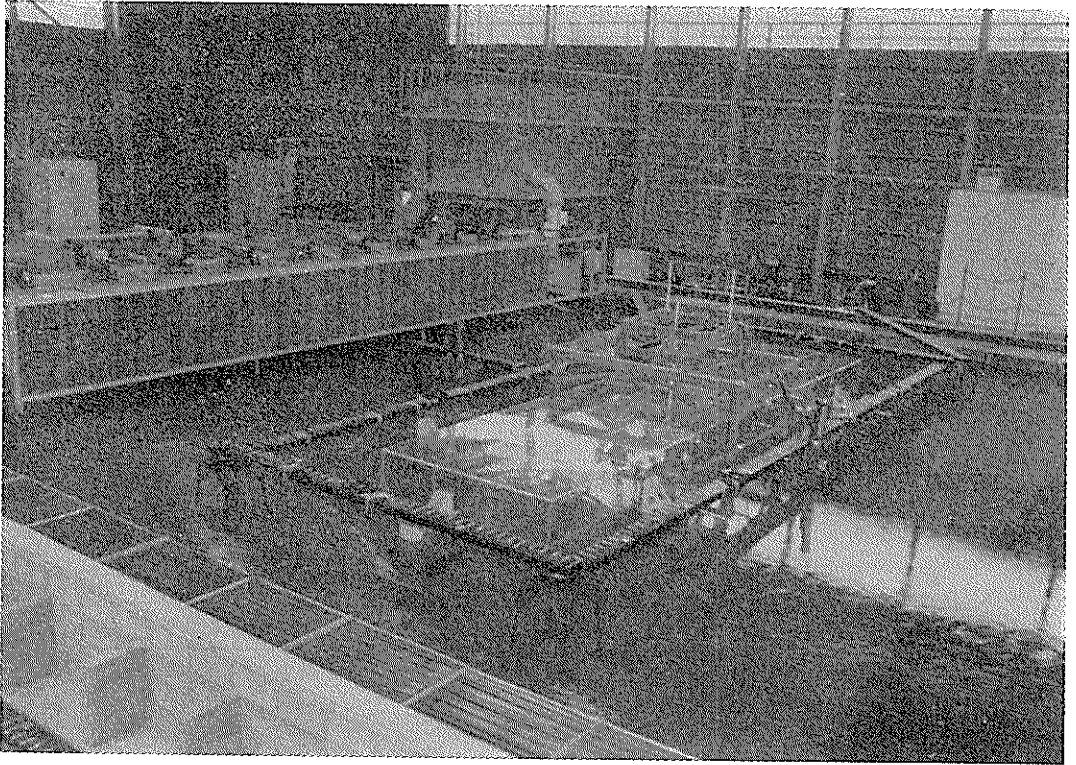


写真-1 実験状況（その1）

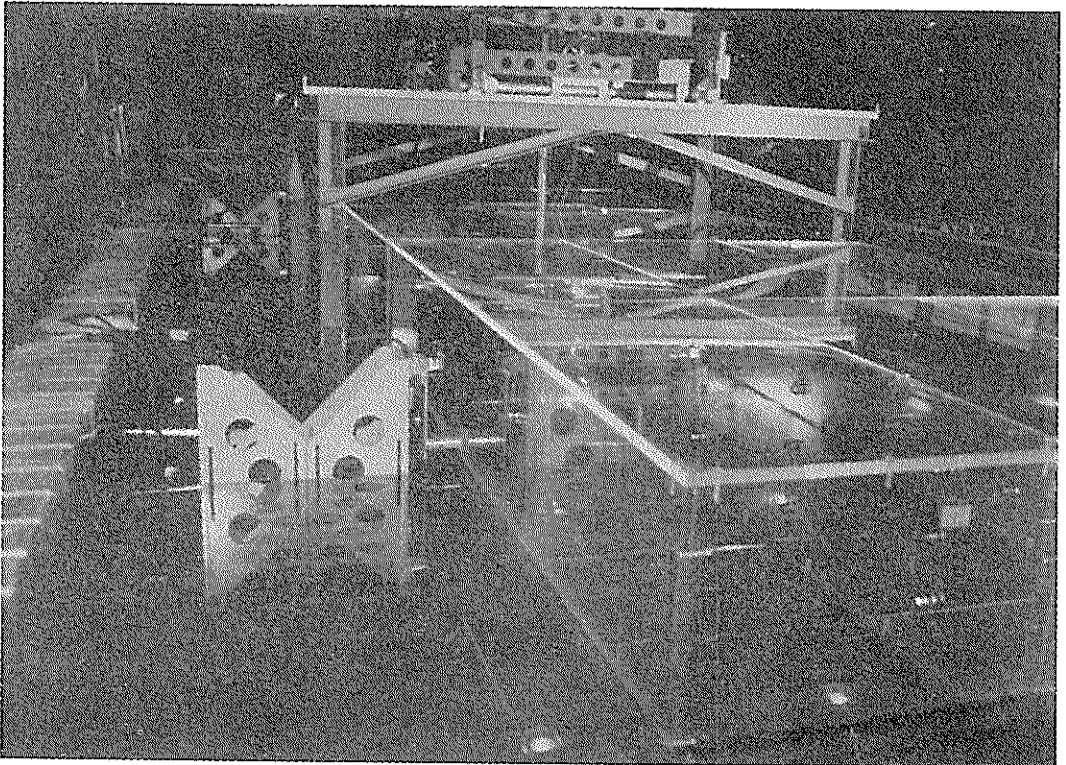


写真-2 実験状況（その2）

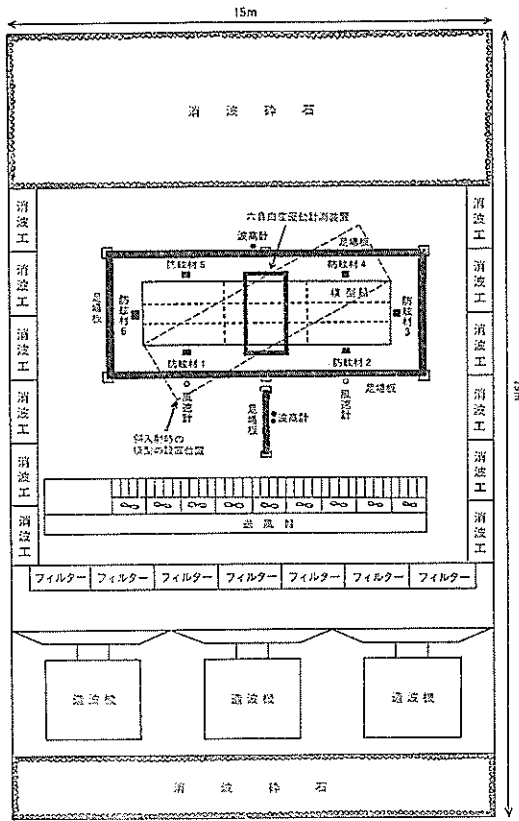


図-7 実験場配置図

おいては波のみを外力とした。波が斜め入射するときの実験は、図-7の点線で示すように模型浮体の設置位置を変えておこなった。

(2) 模型縮尺

模型実験において模型の縮尺をどの程度まで大きくするかは、測定する計器の精度、模型製作費、水槽の規模、造波機の特長など多くの要素がからんでくる。一般には、模型の規模は、条件が許す限り大きい方がよい。

本実験のような波浪による浮体の運動では、重力が重要な要素になるので、フルードの相似則が用いられる。これによると、模型の長さの縮尺を現地の $1/S$ にすると、時間縮尺 $1/S_2$ および力の縮尺 $1/S_f$ は、フルード数を一定に保つことによって

$$S_2 = \sqrt{S}$$

$$S_f = S^3$$

で与えられる。これからわかるように、模型上での力は現地の $1/S^3$ になるため、現地で大きな力が働いても模型では非常に小さくなる。たとえば、現地で2,000tfの力が働いているとして、 $S=1/100$ の模型で実験すると

2kgfの力になる。また、 $S_f=1/50$ の模型を用いると16kgfになる。このように、模型縮尺を2倍にすることにより力は8倍になる。

模型実験において力を測定するとき、測定する力が小さすぎると測定が非常に困難となり、誤差も入りやすくなる。通常、最も実験に使いやすい荷重変換器は5kgf以上のものであることを考えれば、模型縮尺をあまり小さくすることは好ましくない。

浮体の運動では、フルードの相似則に従う力以外に、水の粘性や渦によって生ずる力も作用する。この力は、浮体の運動が小さい場合には浮体運動に大きな影響は与えないが、運動が大きくなると無視できないほどに増大する。このような力を相似させるためには、レイノルズ数 $Re=v \cdot d/\nu$ を模型と現地で一致させる必要がある。ここで、 $v$ は水粒子速度、 $d$ は浮体の代表長さ、 $\nu$ は水の動粘性係数である。しかし、フルード数とレイノルズ数を同時に満足させることはできないため、フルードの相似則を用いるとレイノルズ数が現地と模型で異なり、粘性や渦の相似が成り立たなくなる。

現地のレイノルズ数を $Re_r$ 、模型のレイノルズ数を $Re_m$ とすると、フルードの相似則を用いた場合

$$Re_m = Re_r / S \sqrt{S}$$

となり、現地よりも小さいレイノルズ数で実験をおこなうことになる。模型縮尺が $1/100$ なら $Re_m = Re_r / 1000$ となり、模型縮尺が $1/50$ なら $Re_m = Re_r / 350$ となる。この意味からも、模型縮尺は大きいほどよい。

さらに、造波特性と波の変形を考えると、波の周期が0.5秒以下では水面のよごれによって波高が減少する<sup>12)</sup>ことが考えられるので、波の周期は0.6秒以上になるような模型縮尺にすることが望ましい。

一方、水槽の規模による制約や、模型縮尺が大きすぎる大規模な実験は実施が非常に困難であることも考えなければならない。このような種々の条件を考慮して、最も適切な模型縮尺を $1/50$ と決定した。

(3) 実験波

実験波としては、規則波と不規則波を用いた。規則波は、現地換算波高が1mとなるように波高2cmと一定にし、周期は、1.0~3.0秒の間を0.1秒ごとに覚えて、21種類の波を作用させた。直角入射時の実験で作用させた不規則波は、有義波高2.0cm 有義波周期1.90秒の諸元を持つ①の波と、有義波高2.5cm 有義波周期1.64秒の諸元を持つ②の波である。斜め入射時の実験においては、①の波と②の波の有義波高をどちらも2.0cmとした。表-2は、実験波の諸元をまとめたものである。

図-8は、直角入射時の実験波のスペクトルを示したも

表-2 実験波の諸元

入射角	波	周期(秒)	波高(cm)	備考
直角	規則波	1.0~3.0	2.0	0.1秒間隔
	不規則波	$T_{1/3}$ 1.90 1.64	$H_{1/3}$ 2.0 2.5	①の波 ②の波
斜め	規則波	1.0~3.0	2.0	0.1秒間隔
	不規則波	$T_{1/3}$ 1.90 1.64	$H_{1/3}$ 2.0 2.0	①の波 ②の波

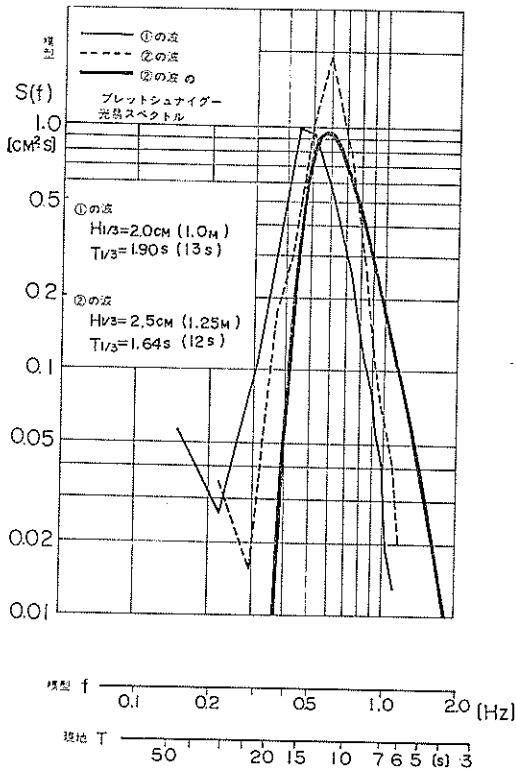


図-8 入射波のスペクトル

のである。あわせて、②の波と同じ有義波高と有義波周期をもつブレットシュナイダー型のスペクトルも示している<sup>13)</sup>。②の波に関して、実験波のスペクトルとブレットシュナイダー型のスペクトルを比較すると、有義波高が等しいのでエネルギーの積分値は両者ほぼ等しくなっているが、実験波のスペクトルはピーク周波数付近の0.7Hzより低周波側でブレットシュナイダー型のスペクトルより大きく、高周波側では小さくなっている。これは、主としてフィルターの影響により、高周波の波ほど大きく減衰するためであるが、低周波側については入・反射波の分離計算結果にときおり見られるみかけのスペ

クトル密度の増大の影響をやや受けている。

(4) 実験ケース

実験は、船体の長軸から90°の波向で波が入射する直角入射時と、60°の波向で波が入射する斜め入射時の2通りの波向についておこなった。喫水は、表-1で前述したように、模型浮体内を空にしたバラスト時と、模型浮体内に半分程度水を入れた半載時の2通りを検討した。拘束条件としては、静止時の模型浮体壁面から防舷材接点までの距離として定義されるクリアランスを0とした、線形バネによる拘束のみを考慮したが、直角入射時の規則波実験においては拘束のない自由浮体の動揺実験もおこなった。実験波については、(3)で述べた通りである。線形バネのバネ定数は98N/cm(10kgf/cm)であり、図-7の説明で述べたように6ヶ所で浮体を拘束している。このバネ定数は現地換算すると $2.45 \times 10^6$ N/cm(25tf/cm)であり、大型防舷材を2基ならべ、防舷材の変位があまり大きくないときのバネ定数に対応する。

(5) 測定法と解析法

測定は、各ケースそれぞれ、波高3点、模型浮体の運動6成分、防舷材に作用する力6点についておこなった。これらの測定に関しては、3.1で前述したとおりである。変位計による測定は、モニターとしての役割をもたせ、実際の解析には用いなかった。

規則波を作用させた実験では、これらのデータをペンレコーダに記録したものを読み取って解析した。この際解析に用いた波は水槽端での反射波が模型に返ってくる前のものを用いるようにした。

不規則波を作用させた実験では、データを一度アナログデータレコーダに収録した後に、A/D変換機によりデジタル量に変換して、電子計算機により解析し、統計量を求めた。このときのサンプリング周期は1/7.5秒とし、データ数を3,072個としたため、約400秒間のデータを解析したことになる。①の波に関しては平均周期が約1.7秒なので、200波以上のデータを解析に用いたことになる。

波形と浮体の運動の解析は、通常の波の解析と同様にゼロアップクロス法で定義される最高波、有義波、平均波を求めるのと同時に、FFT法<sup>14)</sup>により周波数スペクトルも求めた。さらに、入射波を解析するために、模型前面に設置した波高計2台による波の同時記録から入・反射波の分離計算をおこなった<sup>15)</sup>。

防舷材に働く力は記録に雑音が入っているためそのままでは解析できないので、図-9に示すように解析をおこなった。すなわち、防舷材には間接的に力が発生し、

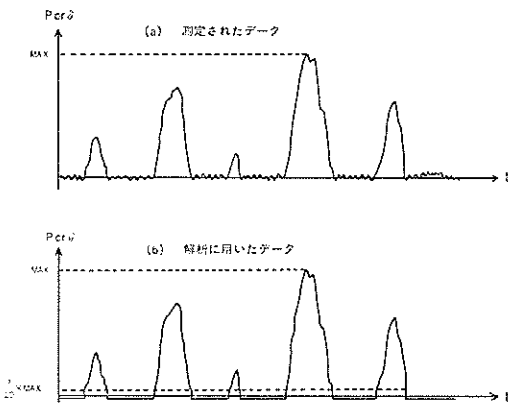


図-9 防舷材に働く力の解析法

また、記録上の力の零線には細い雑音が入っているのでこの雑音も除去しなければならない。そこで、記録上の力の最大値の1/20以下の力はこの雑音によって生じたものと考えて、解析に用いないことにし、この間の値を絶対値が小さい負の値とすることによって、ゼロアップク

ロス法で力の最大値と1/3最大値、力の発生回数を求めることにした。

#### 4. 実験結果とその考察

##### 4.1 実験値との比較による流体力係数の修正

本研究で用いた数値計算プログラムは、2. で述べたように断面分割法によるものである。しかし、理論から求まる流体力係数を用いて計算すると、実験値と計算値が一致しない領域があらわれる。このため、このプログラムでは、理論から求まる流体力係数を一部修正したものをを用いている。

修正は、直角入射時の矩形浮体の動揺量に関して、実験値と計算値が一致するように付加質量係数と減衰定数を調整する方法によった。付加質量係数と減衰定数の修正方法については、第2報に<sup>10)</sup>詳細に述べられているとおりで、その結果が表-3である。表中の数値は、理論的に得られる付加質量係数と減衰定数の修正倍率を示している。

一方、自由浮体の場合は、付加質量係数の修正倍率は

表-3 流体力係数の修正

修正する係数	自由浮体		拘束浮体	
	バラスト	半載	バラスト	半載
SWAYING 付加質量係数	×3	×1	×3	×1
SWAYING 減衰係数	×1	×1	×3	×1.5
ROLLING 付加慣性モーメント	×1	×1	×1	×1
ROLLING 減衰係数	×1.25	×1.25	×1.5	×1.5

拘束浮体の場合と同じであるが、減衰定数は拘束浮体の場合よりも小さくなっている。これは、自由浮体の場合、波に乗って浮体が運動するため、水粒子と浮体との相対速度は小さくなるためにおこるものと思われる。

##### 4.2 固有周期に関する検討

波浪中の浮体の応答を考察するためには、各運動成分に対する固有周期を検討しておくことが重要となる。

HEAVING の固有周期を、数値計算で求まる付加質量を考慮して求めると、バラスト状態では、模型で1.81s（現地12.8s）半載状態では2.62s（現地18.6s）となる。もっとも、HEAVING については減衰力が大きいために<sup>11)</sup>共振現象はほとんどあらわれないし、また、表-1で述べたように浮体模型は非常に重かったため、ROLLING のように初期変位を与え自由減衰実験をおこなうことはできなかった。

表-4は、ROLLING の自由減衰実験の結果を示したものである。この実験は、0.5°程度のROLLINGの初期変位を与え、ROLLINGの自由減衰の状況を調べたもの

表-4 ROLLING 自由減衰実験結果

	バラスト	半載	
固有周期 (s)	1.44	1.83	実験値 計算値
	1.38	1.71	
一周期間の減衰比	0.239	0.413	実験値 計算値
	0.220	0.303	
付加慣性モーメント係数 ( $I_n/I$ )	3.33	1.66	実験値 計算値
	3.03	1.37	
減衰定数 ( $N_n/\sigma I$ )	2.04	0.75	実験値 計算値
	1.94	0.90	

である。実験は、バラスト、半載それぞれについて4回ずつおこなった。表中の実験値は、4回の平均値を示したものである。この実験で得られる固有周期と一周期間の減衰比をもとに、表-1の浮体の諸元から付加慣性モーメント ( $I_N/I$ ) と減衰定数 ( $N_H/\sigma I$ ) を実験的に求めることができる。表中にあわせて示した計算値とは、4.1で述べた流体力係数の修正をおこなった数値計算プログラムで求めた値を示している。バラスト時の実験値と計算値を比較すると、計算値の付加慣性モーメントが実験値より1割程度小さくなっているため、固有周期も0.06秒だけ計算値の方が小さく、一方、半載時においては、計算値の付加慣性モーメントが実験値より2割程度小さくなっているため、固有周期も0.12秒計算値の方が小さくなっている。

SWAYING に関しては、自由状態では拘束バネが存在しないため、固有周期は存在しない。しかし、外部からのバネにより拘束を受ける場合には、バネ定数に応じた固有周期が存在することになる。

#### 4.3 直角入射規則波実験

##### (1) 自由浮体

自由浮体に関する検討は、直角入射の規則波についてのみおこなった。これは不規則波実験では、波を長時間作用させなければならないため、波漂流力によって船体が漂流してしまうことと、斜め入射実験では浮体はすぐに回転してしまうためである。

##### a) ROLLING

図-10は、ROLLING の周期応答を示したものである。横軸には、浮体の全幅  $2b$  を入射波の波長  $\lambda$  で除した無次元化した入射波の周期を示し、あわせて実験波の周期とそれを現地換算した値も示している<sup>10)</sup>。縦軸には、ROLLING の運動の両振幅  $2Y_0$  (ラジアン) に浮体の全幅  $2b$  を乗じた値を入射波高  $H$  で除して、無次元化した値を示している。すなわち、縦軸の値は、浮体の両端  $x=b$  と  $x=-b$  における隅角部の鉛直座標の差を波高で除した値となる。図中の白丸はバラスト時、黒丸は半載時の実験結果を示したものであり、実線および点線はそれぞれバラスト時と半載時の計算結果を示したものである。

表-3に示したような流体力係数の修正をおこなったため、極大値の値と極大値のおこる周期に関しては、バラスト半載とも実験値と計算値はよく一致している。しかし、極大値から離れた周期における ROLLING の応答は、バラストおよび半載とも計算値が実験値より大きくなっている。バラスト時の極大値が発生する周期は1.5~1.6秒であるが、この値は表-4で述べた ROLLING の固有周期よりも、0.1~0.2秒長くなっている。半載時の

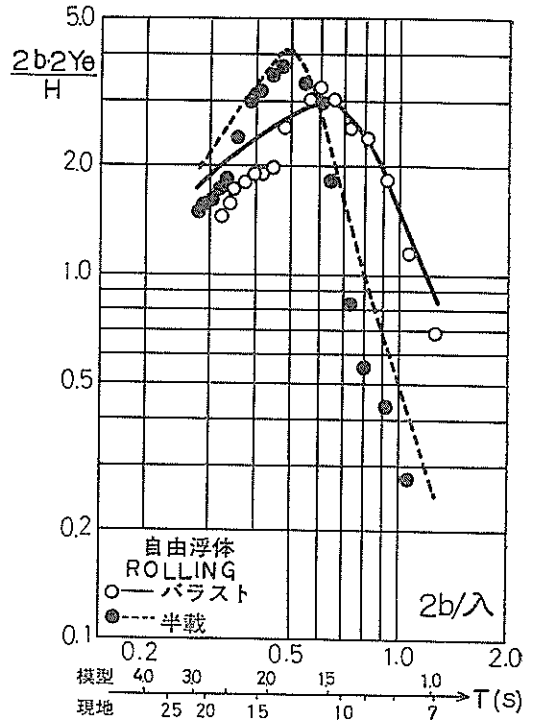


図-10 自由浮体における ROLLING

極大値が発生する周期は、1.8~1.9秒であるが、この値は自由減衰実験から求めた固有周期に一致し、計算から求めた固有周期より0.1秒程度長くなっている。

##### b) SWAYING

図-11は SWAYING の周期応答を示したものである。横軸および図中の記号は図-10と共通であり、縦軸には、SWAYING の両振幅を波高で除し無次元化した値を取っている。図中の一点鎖線は、浮体が存在しないときの表面における水粒子の水平運動の両振幅を波高で除した値を、各周期ごとに求めたものである。

実験値と計算値を比較すると、バラストおよび半載とも、 $2b/\lambda < 0.45$  の長周期側の応答の大きい領域で、両者はよく一致しているが、 $2b/\lambda > 0.5$  の短周期側の応答の小さい領域では両者の一致はあまりよくない。バラスト時の実験値で  $2b/\lambda = 0.6 \sim 0.7$ 、計算値では  $2b/\lambda = 0.52$  で、半載では実験値および計算値ともに  $2b/\lambda = 0.7 \sim 0.8$  で、SWAYING の応答が非常に小さくなっているが、この周期は、図-10の ROLLING の応答の極大値を示す周期にほぼ一致している。これは、ROLLING の共振周期においては透過率が1.0となるため、SWAYING が発生しなくなるためである。

SWAYING と、表面の水粒子の水平運動を比較する

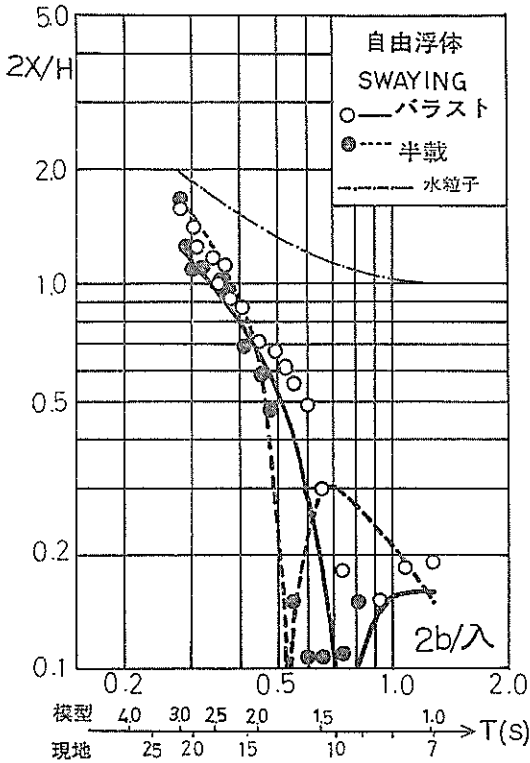


図-11 自由浮体における SWAYING

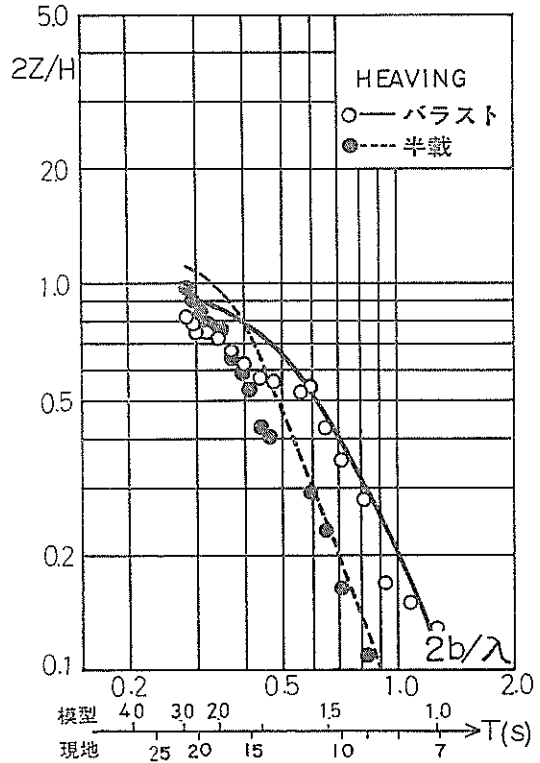


図-12 自由浮体における HEAVING

と、SWAYING は、検討対象とした周期帯全域で水粒子の水平運動よりも小さくなっていることがわかる。すなわち、浮体の幅が波長に比して無視できない大きさを占めているため、浮体はその全幅にわたって水粒子の運動を平均したような動きをすすると考えられる。また、自由浮体の SWAYING については復元力がないために共振現象がおきないことも、SWAYING の振幅が小さい一つの理由である。なお、周期の増加とともに、 $2b/\lambda < 0.5$  では、しだいに SWAYING は水粒子の運動に近づいていく。

c) HEAVING

図-12は HEAVING の周期応答を示したものであり、縦軸には HEAVING の両振幅  $2z$  を入射波高  $H$  で除した無次元値を示している。

パラスト時の計算値と実験値を比較すると、全体的に実験値が計算値より小さく、この傾向は  $2b/\lambda < 0.5$  で顕著になるが、どちらも応答は周期の増加に伴い単調に増加し、 $2z/H$  は 1.0 に漸近する。半載時においても、やはり、実験値は計算値より小さくなっているが、計算値において  $2b/\lambda < 0.3$  で  $2z/H > 1.0$  となる弱い共振が見ら

れる。これは、4.2 で述べた半載時の固有周期 2.62 秒に対応しているものである。HEAVING においては、ROLLING や SWAYING に比して実験値と計算値の差は小さかったため、ここでは流体力係数の修正は行っていない。

(2) 線型拘束浮体

ここでは、線型バネで拘束したときの直角入射波に対する規則波中の応答について述べるが、HEAVING に関しては省略する。これは、数値計算上、HEAVING は SWAYING や ROLLING と連成がないため自由浮体の HEAVING と同じ応答を示すことや、実験値においても、自由浮体と線型拘束浮体との間には HEAVING の差があらわれなかったことによる。

a) ROLLING

図-13は、線型拘束をしたときの ROLLING の周期応答を示している。

パラスト時の実験値を見ると、 $2b/\lambda = 0.3$  付近と 0.7 付近の 2 箇所に極大値があらわれており、その中間にあたる  $2b/\lambda = 0.48$  付近で応答が非常に小さくなっている。この傾向は、自由浮体のときの応答を示した図-10とは



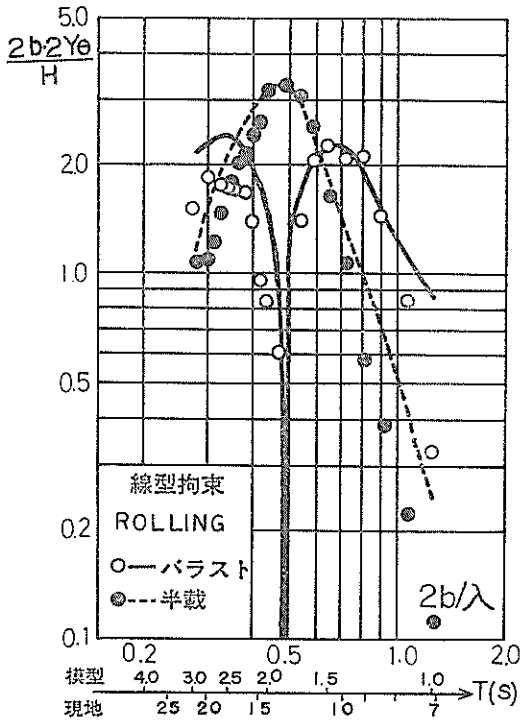


図-13 線型拘束における ROLLING

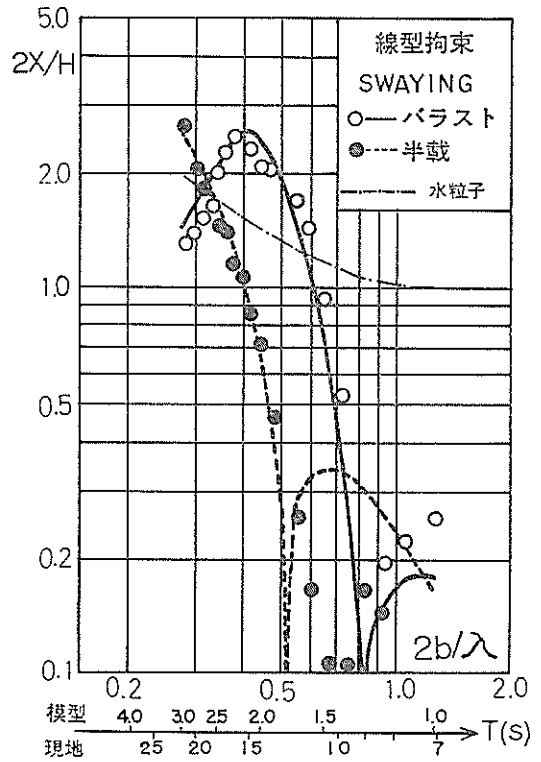


図-14 線型拘束における SWAYING

大きく異っており、拘束バネが ROLLING に大きく影響を与えていることがわかる。すなわち、 $2b/\lambda=0.7$  付近の極大値は、図-10でも見られる極大値であり、浮体自身の ROLLING の固有周期によって発生する極大値と考えられるが、 $2b/\lambda=0.3$  付近の極大値は図-10では見られないので、拘束バネの影響、つまり SWAYING との連成によるものであると考えられる。実験値を計算値と比較すると  $2b/\lambda=0.7$  の極大値付近では両者はよく一致しているが、 $2b/\lambda < 0.5$  では計算値は実験値の 1.2~1.3倍の値となっている。

一方、半載時においては、実験周期帯内には極大値が  $2b/\lambda=0.5$  付近のみであらわれている。この極大値周期は、自由浮体の図-10で見られた値に一致している。また、自由浮体と比較して線型拘束の ROLLING の振幅は若干減少している。図-13の実験値と計算値を比較すると、極大値付近では両者はよく一致しているが、それからはずれたところでは、計算値は実験値より大きい値となっている。

b) SWAYING

図-14は、SWAYING の周期応答を示したもので、縦軸、横軸および図中の記号は、すべて図-11と共通であ

る。

実験値と計算値を比較すると、バラストでは  $2b/\lambda < 0.7$  および半載では  $2b/\lambda < 0.5$  の長周期側の応答値が大きいところでは、両者は比較的良好に一致しているが、短周期側の応答が小さい領域では一致はあまりよくない。バラスト時の  $2b/\lambda=0.8$ 、半載時の計算値では  $2b/\lambda=0.5$ 、実験値では  $2b/\lambda=0.6\sim 0.8$  で、SWAYING の応答が非常に小さくなる傾向は、自由浮体の図-11に共通している。

しかし、水粒子の水平運動と比較をおこなうと、図-11ではあらわれなかった SWAYING が水粒子運動より大きくなる周期帯が、バラストでは  $0.3 < 2b/\lambda < 0.6$  で、半載では  $2b/\lambda > 0.3$  であらわれている。これは、拘束バネによってあらわれる固有周期によって発生する共振であると考えられる。すなわちバネ定数と付加質量を考慮して拘束浮体の固有周期を求めると、バラスト時で 2.01 秒、半載時で 3.5 秒となり、この共振周期とよく一致している。

ここであらわれた SWAYING の共振の現象は、実際の設計においても注意を要する問題である。もし、バラ

スト時の極大値となる周期15秒程度の長周期の波が来襲するような場合には、 $2X/H \approx 2.5$  となり、SWAYINGの両振幅は波高の2.5倍にも達する。また半載時においても、もし周期15秒以上の長周期波が来襲する場合には、SWAYINGの両振幅は波高より大きくなる。したがって、長周期の波の来襲の可能性について綿密に検討しておく必要がある。

c) 防舷材反力

防舷材反力  $2P$  は、浮体の動揺により防舷材が受ける力の振幅の2倍、すなわち両振幅を示す。前述したように、船体は6箇所防舷材で係留されているが、直角入射時において漂流力を無視すれば、波向方向の浮体運動を拘束する防舷材1, 2, 4, 5にはそれぞれ等しい力が働くことになる。実験値においても、この4箇所防舷材にはほぼ等しい力が働いたので、防舷材反力としては4箇所の平均値で示した。

図-15は、周期に対する防舷材反力の変化を示したものである。縦軸には、防舷材反力  $2P$  を、水の単位体積重量  $\rho g$  と入射波高  $H$ 、船体の半長  $l$ 、船体の喫水  $d$  で除した無次元値を示している。この図からパラスト時と半

載時を比較するためには、縦軸の無次元化にあたって、喫水  $d$  が分母に入っていることに注目しなければならない。すなわち、表-1で前述したように、パラスト時の喫水は9.0cmであるのに対して半載時は28.3cmとなっているため、 $2P/\rho g H l d$  がパラスト時と半載時で等しい場合、半載時の防舷材反力はパラスト時の3倍以上になる。

直角入射時における防舷材反力は、SWAYINGによって主として決定されることが、図-14と図-15を比較することによってわかる。すなわち、図-14のパラスト時の実験値の極大値は、 $2b/\lambda \approx 0.4$  で  $2X/H \approx 2.5$  となっている。このSWAYINGによって生ずる防舷材反力は、バネ定数が  $98\text{N/cm}$  ( $10\text{kgf/cm}$ ) であり、浮体半幅である  $l$  が  $390\text{cm}$  喫水  $d$  が  $9\text{cm}$  であることを考慮すると、 $2P/\rho g H l d \approx 7.1$  となる。一方、図-15におけるパラスト時の実験値の極大値は、 $2b/\lambda \approx 0.4$  で  $2P/\rho g H l d \approx 6.1$  となって、図-14と図-15の対応は非常によいことがわかる。

ただし、半載の実験値と計算値が図-14でよく一致したにもかかわらず、図-15では実験値が計算値より小さくなっている。これは、実験に使用したバネの初期条件の問題によるものであろう。すなわち、初期の変位が数mmと小さいときはバネの設定条件のためバネが比較的やわらかく、ある程度変位が大きくなってから線型になるのではないかと考えられる。これは、浮体を設置するとき、バネの先端と浮体側壁間のクリアランスを完全に0にすることはむずかしく、数mmの誤差があったことを意味している。このように考えれば、バネの変位が比較的小さい場合、実測されるバネ反力は変位から計算されるバネ反力より小さくなることがよく説明できる。半載時の  $2b/\lambda > 0.5$  において、周期特性は実験値と計算値でよく一致しているにもかかわらず、実験値が計算値よりかなり小さい値になっているのも、バネの設定条件のためであると考えられる。

4.4 斜め入射規則波実験

ここでは、図-7で示したように模型浮体を直角入射時から  $30^\circ$  傾けて設置し、規則波を作用させた実験結果に関して述べる。斜め入射時の数値計算では、直角入射に関して求められた流体力係数の修正値をそのまま用いた。

a) ROLLING

図-16はROLLINGの応答を示したものである。パラスト時では、 $2b/\lambda < 0.4$  の長周期側で実験値が計算値より小さく、 $2b/\lambda = 0.3$  付近では実験値は計算値の約6割の値であるが、 $2b/\lambda > 0.4$  の短周期側では、実験値と計算値は比較的良好一致している。 $2b/\lambda \approx 0.7$  での極大

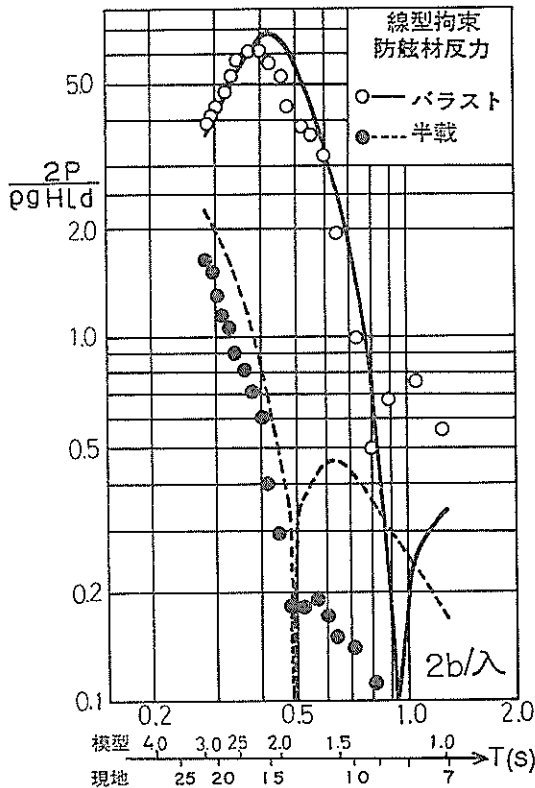


図-15 線型拘束における防舷材反力

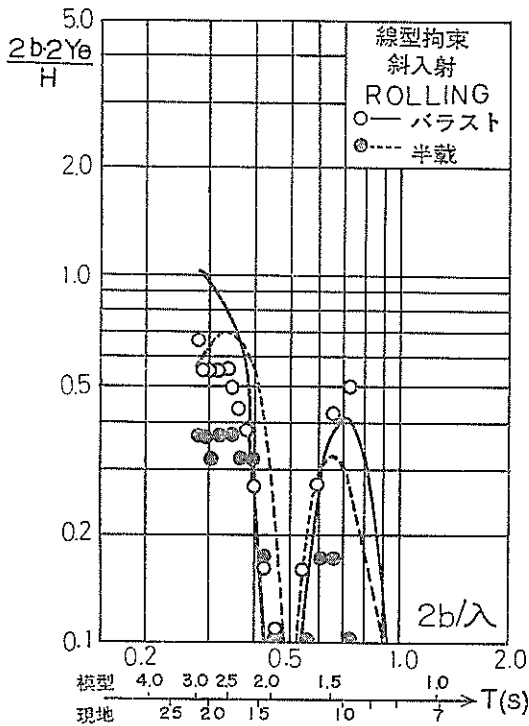


図-16 斜め入射における ROLLING

値は ROLLING の固有周期に対応するものであり、直角入射時の図-10および図-13でもほぼ同じ周期に極大値があらわれている。本計算範囲には現われていないが、 $2b/\lambda$  の小さい長周期側でも極大値を持つ傾向を示しているが、これは SWAYING との連成でおこるものである。

半載時には全体的に実験値が計算値より小さくなっているが、 $2b/\lambda \approx 0.32$  および  $2b/\lambda \approx 0.65$  で極大値を持つ傾向はよく一致している。

図-16を直角入射時の図-13と比較すると、実験値においても計算値においても ROLLING の振幅が小さくなっているのがわかる。計算値のピークの値は、図-16ではバラスト時と半載時でそれぞれ  $2b2Y_0/H$  が 2.4 と 3.2 になっているのに対し、図-16ではどちらも 1.0 以下になっている。斜め入射時に ROLLING の振幅が小さくなったのは、斜め入射時においては、浮体前面に到達する波の位相がずれるため、ROLLING を発生させる波力モーメントが浮体全長の積分値としては小さくなるためである。

バラストおよび半載の実験値と計算値に共通して、 $2b/\lambda = 0.5$  で ROLLING の応答が非常に小さくなっているのも、前面位相のずれによる。浮体の全長  $2l$  は全幅

$2b$  の約 4 倍であり、波の入射角が短軸方向から  $30^\circ$  傾いているため、 $y=l$  の隅角部と  $y=-l$  の隅角部では、 $2l/2 \approx 4b$  の長さだけ波の到達に差があらわれる。ここで  $2b/\lambda = 0.5$  であれば、ちょうど一波長だけ  $x=l$  と  $x=-l$  の隅角部に到達する波の位相差があらわれることになる。すなわち  $2b/\lambda = 0.5$  では、前面の位相が一波長にわたってずれるため、ROLLING を発生させる波力の積分値は、微小振幅波を仮定するとともに矩形浮体が有限長であるため前面波高がばらつくことを考慮しなければ 0 になる。同様なことが、図-16の  $2b/\lambda = 1.0$  の計算値でもあらわれているようだが、これも、前面の波長が二波長にわたってずれるためである。

b) SWAYING

図-17は SWAYING の応答を示したものであるが、ここでも直角入射時の図-17にくらべて、ROLLING と同様な値が小さくなっている。この原因も、前述した ROLLING と同様、入射波の船体前面の位相のずれによる。 $2b/\lambda = 0.5$  でバラスト時の計算値が非常に小さくなっているのも、ROLLING と同様、前面の位相差がちょうど一波長になるためであると思われる。実験値と計算値を比較すると、バラスト時は  $2b/\lambda > 0.5$  で実験値

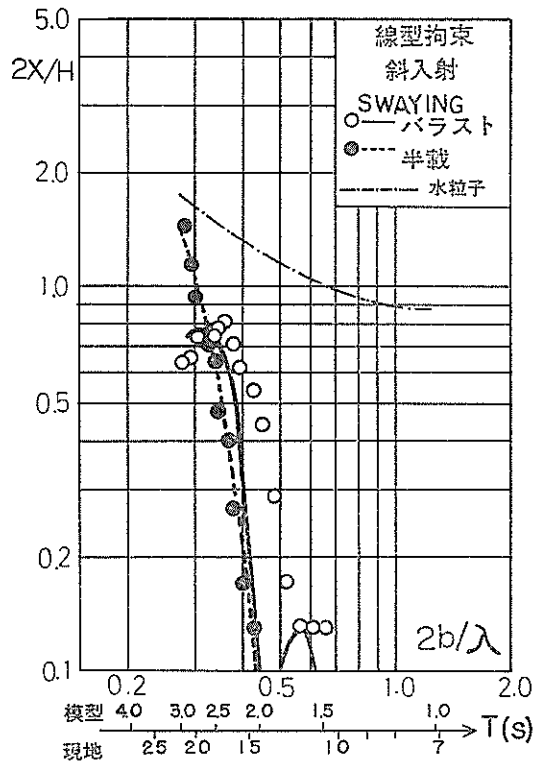


図-17 斜め入射における SWAYING

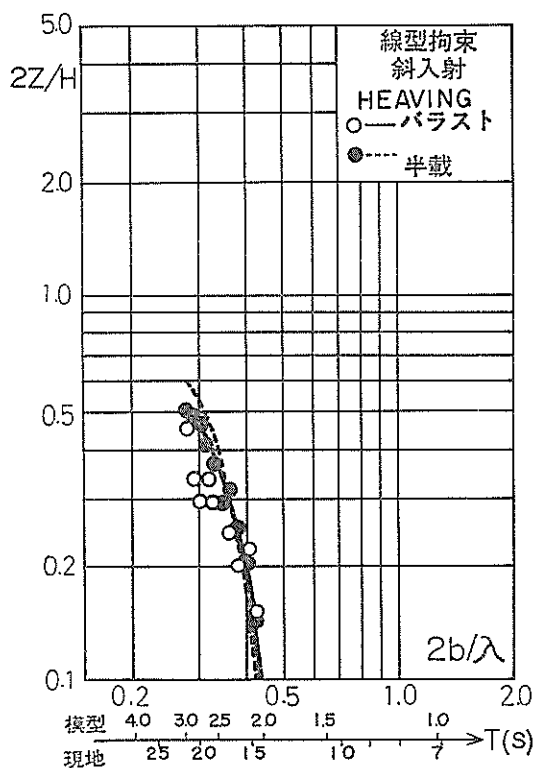


図-18 斜め入射における HEAVING

が計算値よりかなり大きくなっているのに対し、半載時では両者はよく一致している。また、パラスト時の実験値の変化傾向は、計値算よりも高周波側に、 $2b/\lambda$ にして0.1程度ずれている。このことから、斜入射の場合、付加質量係数が直角入射の場合より小さくなっているのではないかと推定されるが、この原因については究明できなかった。

c) HEAVING

図-18は HEAVING の応答を示したものであるが、他の運動と連成がないので、実験値と計算値は比較的よく一致している。ここでも、図-12にくらべて入射波の位相のずれのため値が小さくなっている。特に  $2b/\lambda > 0.4$  となる波に対しては、入射波高の1割以下の HEAVING しかおこさない。これは現地換算すると周期14秒以下の波に対応する。周期14秒以上の長周期波は、計画されている地点ではほとんど来襲しないため、斜入射時の HEAVING はきわめて小さいと考えられる。

d) PITCHING

図-19は PITCHING の応答を示したものである。縦軸には、PITCHING の両振幅  $2X_\theta$  (ラジアン) に模型

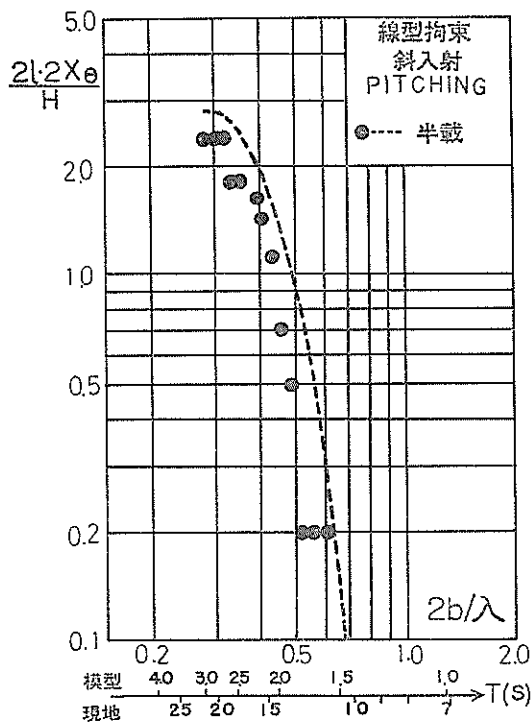


図-19 斜め入射における PITCHING

の全長  $2l$  を乗じて、それを波高  $H$  で除し無次元化した値を示している。

PITCHING の変位量のごく小さい角度であるため、パラスト時では実験データがうまく取れなかった。半載時ではかろうじて記録紙からデータを読みとれたが、PITCHING 運動は非常に小さいので読み取り誤差が大きく含まれていると考えられる。長周期側で実験値と計算値の一致が比較的よくなっているのは、この部分では PITCHING がある程度大きく、実験値の読み取り誤差が相対的に小さくなっているためである。 $l \approx 4b$  であるから、PITCHING の縦軸を  $2b2x_\theta/H$  に直すと、最大値約2.0は0.5となる。このように縦軸を変えてみると、実験における半載時の PITCHING は、ほぼ半載時の ROLLING と等しい角度で回転していることがわかる。

e) YAWING

図-20は YAWING の応答を示したものであるが、軸の取り方は図-19と同じである。YAWING の変位量も PITCHING と同じオーダーでありきわめて小さいため、PITCHING と同様、パラスト時のデータはうまく計測できなかった。

実験値においても計算値においても、 $2b/\lambda < 0.4$  の長周期側では、周期の増加とともに YAWING の応答は単

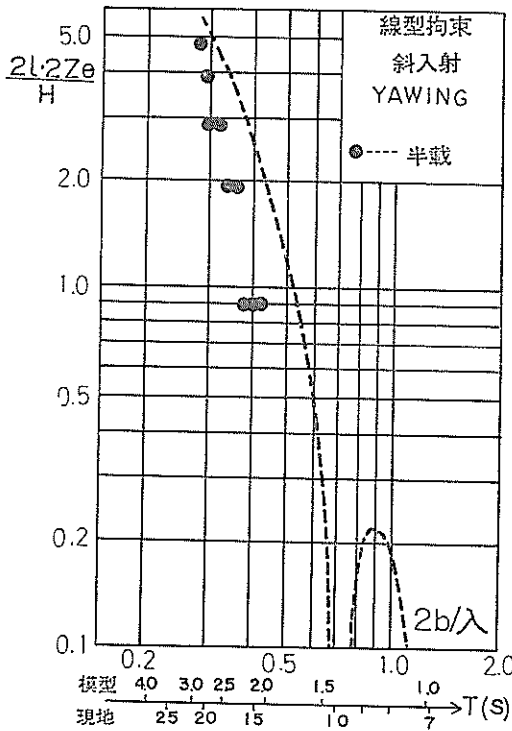


図-20 斜め入射における YAWING

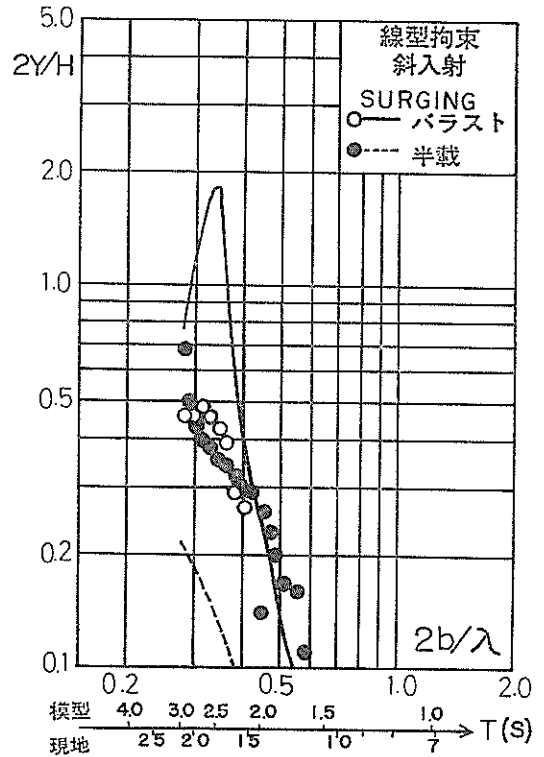


図-21 斜め入射における SURGING

調に増加している。 $2b/\lambda=0.3$  では、実験値で  $2l2Z_e/H=4.0$ 、計算値では  $5.0$  となっている。これは図-6に示す 1, 2, 4, 5 の各防舷材に  $2P/\rho g H l d$  にして  $1.0$  程度の防舷材反力を発生させることになる。後述する図-22 および図-23 を見てわかるように、斜入射の防舷材反力には YAWING の影響が大きいがわかる。

f) SURGING

図-21 は、SURGING の周期応答を示したものである。縦軸には、SURGING の両振幅  $2Y$  を入射高  $H$  で除し無次元化した値を示している。2. で述べたように、断面分割法では本来 SURGING は計算できない。そこで、SURGING の計算にあたっては、浮体を短軸方向から見て、 $90^\circ$  回転させた断面分割法を用いたが、ここでは表-3 のような流体力係数の修正はおこなっていない。しかし、図-21 に示されるように、実験値と計算値は大きくかけ離れており、SURGING の変化傾向そのものも異なっている。このことは、SURGING の計算に当たっては、新しい計算手法を開発する必要があることを示している。

g) 防舷材反力

図-22 と図-23 は、それぞれ防舷材 1, 5 と 2, 4 の平均防

舷材反力を示したものである。防舷材の位置は図-7 で示したとおりである。

直角入射時の防舷材反力が主として SWAYING によって決定されることは、4.2 で述べたとおりであるが、斜入射時では、図-22 や図-23 と図-17 は必ずしもよく対応していない。バラスト時の SWAYING は  $2b/\lambda=0.5$  付近ではほとんど発生しないが、防舷材反力は計算値でも実験値でも極大値に近い値の力が発生している。これは、斜入射時における防舷材反力には YAWING が大きく影響していることを意味している。しかし、YAWING だけでは、図-22 の  $\bar{P}_1\bar{P}_2$  と図-23 の  $\bar{P}_2\bar{P}_4$  の間では差は生じないことになるので、SWAYING の影響も無視できないと考えられる。

図-22 と図-23 に共通して、半載時の実験値は計算値より少し大きいけれども、比較的よく一致している。

$\bar{P}_1\bar{P}_2$  と  $\bar{P}_2\bar{P}_4$  を比較すると、半載時の場合  $\bar{P}_2\bar{P}_4 > \bar{P}_1\bar{P}_2$  になっている。これは、防舷材反力に強い影響を及ぼす YAWING と SWAYING の位相がずれているためであり、以下のように説明できる。浮体が長軸方向に大きく変化しないとすると、浮体の重心からの防舷材位置は変化しないので、その距離を  $y_i$  とする。また YAWING の

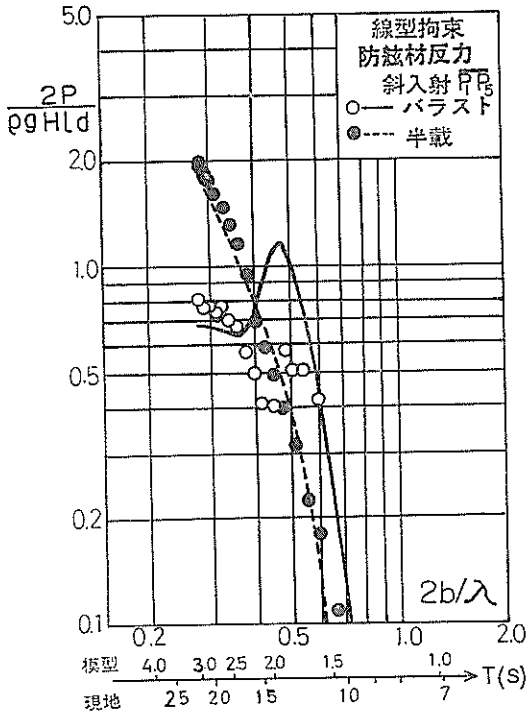


図-22 斜め入射防舷材反力  $\overline{P_1P_3}$

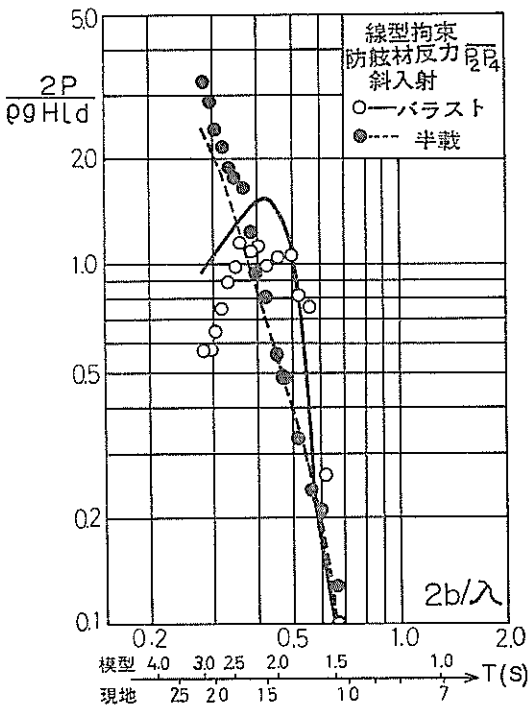


図-23 斜め入射防舷材反力  $\overline{P_2P_4}$

振幅を  $y_0$ , SWAYING の振幅を  $x$ , YAWING と SWAYING の位相のずれを  $\varepsilon$  とすると,  $\overline{P_2P_4}$  の変動は

$$\overline{P_2P_4} = k \{ y_1 y_0 \sin \sigma t + x \sin (\sigma t - \varepsilon) \} \quad (7)$$

で与えられ,  $\overline{P_1P_3}$  の変化は

$$\overline{P_1P_3} = k \{ -y_1 y_0 \sin \sigma t + x \sin (\sigma t - \varepsilon) \} \quad (8)$$

となる。ここに,  $k$  はバネ定数,  $\sigma$  は波の角周波数である。この結果, 各力の絶対値つまり振幅は

$$|\overline{P_2P_4}| = k \sqrt{(y_1 y_0)^2 + x^2 + 2 y_1 y_0 x \cos \varepsilon} \quad (9)$$

$$|\overline{P_1P_3}| = k \sqrt{(y_1 y_0)^2 + x^2 - 2 y_1 y_0 x \cos \varepsilon} \quad (10)$$

となる。 $-\pi/2 < \varepsilon < \pi/2$  では  $\overline{P_2P_4} > \overline{P_1P_3}$  となり,  $-\pi < \varepsilon < -\pi/2$  と,  $\pi/2 < \varepsilon < \pi$  では,  $\overline{P_2P_4} < \overline{P_1P_3}$  となる。このように考えると, 半載時の場合はこの実験範囲では常に  $-\pi/2 < \varepsilon < \pi/2$  となっているものと思われる。

一方, バラスト時には,  $\overline{P_1P_3}$  の場合, 計算値は  $2b/l \approx 0.48$  で最大値を示しているのに対して, 実験値はこの付近で極大値を示しているものの最大値にはなっておらず, 最大値は周期の長い  $2b/l = 0.3$  付近にある。その結果,  $2b/l < 0.35$  では実験値は比較的良好に計算値と一致するが,  $0.35 < 2b/l < 0.55$  の範囲では計算値よりかなり小さく約半分程度の値を示す。

また,  $\overline{P_2P_4}$  の場合, 実験値と計算値のピークはどちらも  $2b/l = 0.4$  付近に現われていてよい一致を示すが, 実験値は  $2b/l < 0.5$  の長周期波では計算値より小さくなっている。バラスト時では,  $\overline{P_1P_3} > \overline{P_2P_4}$  と  $\overline{P_1P_3} < \overline{P_2P_4}$  となる場合が生じ, YAWING と SWAYING の位相のずれが  $-\pi \sim \pi$  の広い範囲にあり, 入射波の周期によって大きく変化することが考えられる。

図-22, 図-23にあらわれる防舷材反力の大きさを直角入射時の図-15と比較すると, バラスト時においては, 実験値および計算値とも全周期帯で直角入射時より小さい値になっている。バラスト時の実験による防舷材反力の最大値は,  $\overline{P_2P_4}$  では  $2b/l = 0.35 \sim 0.4$  で  $2P/\rho g H l d = 1.2$  程度の値になっている一方, 直角入射の図-15では, 同じ周期で  $2P/\rho g H l d = 6.0$  と約5倍の値になっている。

半載においても,  $2b/l > 0.4$  では, 直角入射の方が大きい防舷材反力を示すが,  $2b/l < 0.4$  の長周期側ではむしろ斜め入射が大きくなっていることは注目に値する。たとえば,  $2b/l = 0.28$  における  $\overline{P_1P_3}$  は実験, 計算ともに  $2P/\rho g H l d = 2.0$ ,  $\overline{P_2P_4}$  は実験では 3.2, 計算では 2.4 となっているのに対し, 同じ周期における直角入射の場合は, 実験で 1.7, 計算で 2.5 となっている。このように, 半載の実験値において, 非常に長周期の波が作用するとき, 斜め入射の方が直角入射よりも大きい防舷材反力

表-5 直角入射不規則波実験（運動振幅に関する検討）

喫水 (cm)	バネ定数 (kgf/cm)		クリアランス (cm)		波種	入射波		SWAYING		HEAVING		ROLLING		防舷材反力		実験 計算		
	[N/cm]	[kgf/cm]	[cm]	[cm]		$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$2X_{max}$ (cm)	$2X_{1/3}$ (cm)	$2Z_{max}$ (cm)	$2Z_{1/3}$ (cm)	$2Y_{\sigma max}$ (deg)	$2Y_{\sigma 1/3}$ (deg)	$P_{max}$			$P_{1/3}$	
														(kgf)	(N)		(kgf)	(N)
9 パラスト	10	98	0.3	0.3	①	2.0 1.97	7.63 5.05	4.59 3.39	1.94 2.40	1.33 1.46	1.96 1.93	1.21 1.11	29.7 27.0	291 265	19.5 17.1	191 168	実験 計算	
9 パラスト	10	98	0.3	0.3	②	2.5 2.35	5.56 4.76	3.07 3.33	2.18 2.48	1.36 1.51	2.78 2.29	1.81 1.43	21.8 26.1	214 256	13.7 17.7	134 173	実験 計算	
28.3 半載	10	98	0.3	0.3	①	2.0 1.97	3.44 2.87	2.29 1.98	— 2.27	— 1.52	3.29 2.48	2.24 1.60	12.7 14.7	124 144	8.5 9.8	83 96	実験 計算	
28.8 半載	10	98	0.3	0.3	②	2.5 2.35	2.20 2.21	1.44 1.46	— 2.09	— 1.24	3.85 2.75	2.42 1.95	9.4 12.4	92 122	6.2 7.8	61 76	実験 計算	

をおこなうことは、比較的小さい諸元の浮体の保留を考慮する時には注意を要するといえる。

$\overline{P_0P_0}$  に関する図はここでは示していないが、 $\overline{P_0P_0}$  は SURGING によって決まる防舷材反力であり、SURGING の図である図-21 とほぼ同じ傾向を示し、実験値と計算値の一致は悪かった。

4.5 不規則波実験

4.5.1 直角入射不規則波実験

(1) 運動振幅と防舷材反力に関する検討

表-5は、実験結果と数値計算結果を示したものである。実験は、3.2で述べたようにパラスト時と半載時にそれぞれ2種類の不規則波を作用させておこなった。浮体は線型バネによって拘束されているが、防舷材設置時の誤差により±3mmのクリアランス（模型壁面と防舷材接面との間隔）が生じたため、非線型的な効果もあらわれている。そこで、計算でもクリアランスの効果を考えて浮体の運動を算定している。

数値計算における入射波は、図-8で示した実験波のスペクトルをそのまま入力した。このスペクトルを用いてプログラム内で入射波をシミュレートしたため、入射波の統計量である有義波高と有義波周期に、実験値と計算値の間に若干の差が生じている。数値計算におけるタイムステップは0.075秒とし、450秒間6,000ステップにわたり計算をおこなった。ただし、この結果から各運動成分と防舷材反力を求めるときは、2回に1回だけデータを用い、0.15秒のタイムステップで3,000データを用いた。また、流体力係数は表-3の修正値を用いている。

a) HEAVING

パラスト時の HEAVING の実験値は計算値の9割程度の値を持ち比較的よく一致している。これも図-12とよく対応しており、規則波においても不規則波においても HEAVING は数値計算で比較的よい精度で推定できることを意味している。なお半載時の実験データは計測上のミスにより取得できなかった。

b) ROLLING

ROLLING についても、1/3最大両振幅を実験値と計算値と比較すると、各ケースに関して比較的両者はよく一致しているが、全ケースにおいて、計算値は実験値より10~30%程度小さい値を示している。この原因としては、数値計算でシミュレートした波高が実験波高より1割程度小さくなっていることが挙げられる。しかし、これだけでは、半載時の①の波を作用させたケースにおいて、実験値が2.24°であるのに対し計算値が1.6°と30%ほど小さくなっている原因を説明できない。前述した図-13においても、計算値が実験値よりも小さい値を示す

周期帯はなく、このケースの実験値と計算値のずれに関しては、原因を明らかにすることができなかった。

c) SWAYING と防舷材反力

SWAYING についても同様に表-5で実験値と計算値を比較すると、やはり、実験値と計算値は比較的良好一致しているが、バラスト時の①の波に対する応答では、実験値は計算値の1.5倍程度の値になっている。

一方、防舷材反力について比較すると、バラスト時の①の波に対するケースを除いては、実験値は計算値より

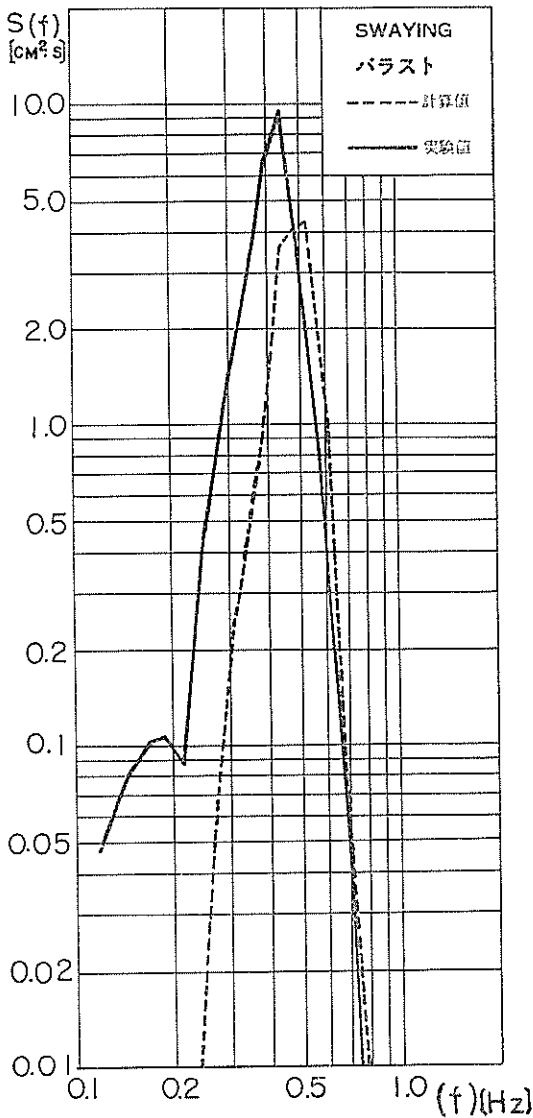


図-24 バラスト時の SWAYING の①波に対するスペクトル

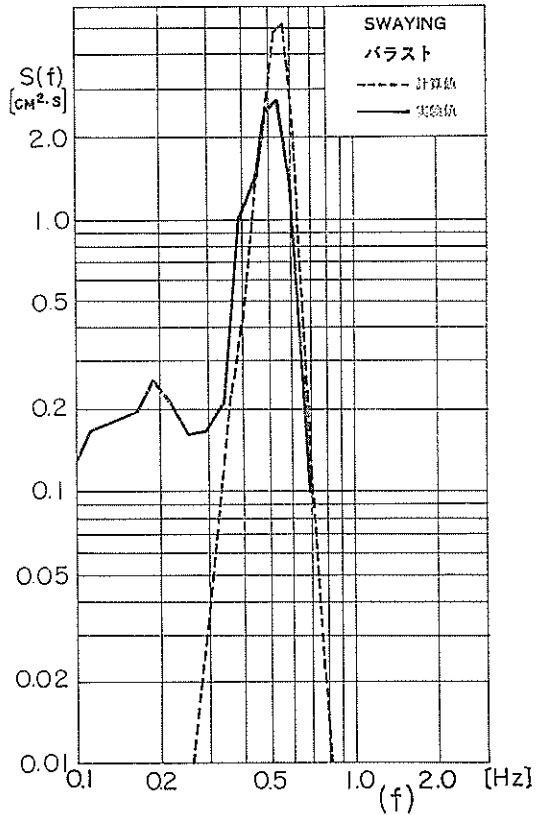


図-25 バラスト時の SWAYING の②波に対するスペクトル

2~3割程度小さくなっている。このことを、SWAYINGの結果とあわせて考えると、実験においては、バネ定数を98N/cm(10kgf/cm)と考え SWAYING から求まる大きさの防舷材反力があらわれていないことを意味している。この原因としては、やはり、4.3.c)で述べたバネの初期条件の設定の問題が考えられる。

図-24、図-25は、それぞれ①の波と②の波に対するバラスト時の SWAYING のスペクトルを示したものである。横軸には、模型実験の周波数を示しており、縦軸にはスペクトル密度を示している。図中の実線は実験値であり点線は数値シミュレーションによる計算値である。

実験値と計算値を比較すると、どちらの図面においても  $f > 0.5\text{Hz}$  では計算値が実験値より大きいスペクトル密度を示しているが、 $f < 0.5\text{Hz}$  では小さくなっている。図-24においては、 $f < 0.5\text{Hz}$ の周波数帯における実験値の運動が大きいため、表-5であらわれたように①の波における実験値は計算値の1.5倍程度の運動振幅になったが、図-25においては、 $f > 0.5\text{Hz}$ の周波数帯の運動が



表-6 直角入射不規則波実験 (運動周期に関する検討)

検討したケース				SWAYING		HEAVING		ROLLING		
喫水 (cm)	波種	入射波		$T_{1/3}(s)$	$\bar{T}(s)$	$T_{1/3}(s)$	$\bar{T}(s)$	$T_{1/3}(s)$	$\bar{T}(s)$	
		$H_{1/3}(cm)$	$T_{1/3}(s)$							
9 バラスト	①	2.0	1.90	2.19	2.17	2.08	1.72	1.79	1.55	実験 計算
		1.97	1.97	2.04	2.17	2.25	2.15	1.89	1.83	
9 バラスト	②	2.5	1.64	2.01	1.91	1.81	1.58	1.62	1.55	実験 計算
		2.35	1.67	1.86	1.96	1.87	1.84	1.61	1.59	
28.3 半載	①	2.0	1.90	3.88	2.79	—	—	1.94	1.85	実験 計算
		1.97	1.97	2.67	2.66	2.40	2.30	1.96	1.91	
28.3 半載	②	2.5	1.64	3.31	2.27	—	—	1.79	1.72	実験 計算
		2.35	1.67	2.56	2.38	2.19	2.08	1.80	1.82	

$f < 0.5\text{Hz}$  の周波数帯の運動とほぼ等しいために、表-5  
であられたように②の波における実験値は計算値とほ  
ぼ一致したと考えられる。

(2) 運動周期に関する検討

表-6は、入射波および各運動の1/3最大周期と平均周  
期を示したものであり、上段には実験結果を、下段には  
計算結果を示している。

各運動の1/3最大周期を入射波の有義周期と比較する  
と、SWAYING と HEAVING に関しては、全ケー  
スで運動の周期より長くなっている。これは、規則波実験  
の図-14 と図-12 に対応しており、SWAYING の極大値  
はバラストで約2.2秒、半載では3秒以上のところにあ  
らわれ、HEAVING は、バラスト半載とも周期の増加と  
ともに応答は単調に増加している。したがって、入射波  
の周期より長周期の運動が、SWAYING と HEAVING  
では支配的になることになり、表の結果とよく対応して  
いる。

バラスト時の②の波に対する ROLLING の1/3最大周  
期は、入射波とほぼ一致しているが、①の波に対す1/3  
最大周期は入射波より短くなっている。これも規則波実験  
の図-13 に対応しており、バラスト時の ROLLING  
の極大値のおこる周期は約1.5秒になっているためであ  
る。半載時では逆に①の波に対しては周期が一致してい  
るが、②の波に対して入射波より長くなっているのも、  
図-13における ROLLING の極大値が半載時では約2秒  
になっていることによる。

次に実験値と計算値を比較すると、全体的によく一致  
してはいるものの、半載時の SWAYING の1/3最大周  
期、バラスト時の HEAVING の平均周期、バラスト時  
の ROLLING の①の波に対する平均周期において、両

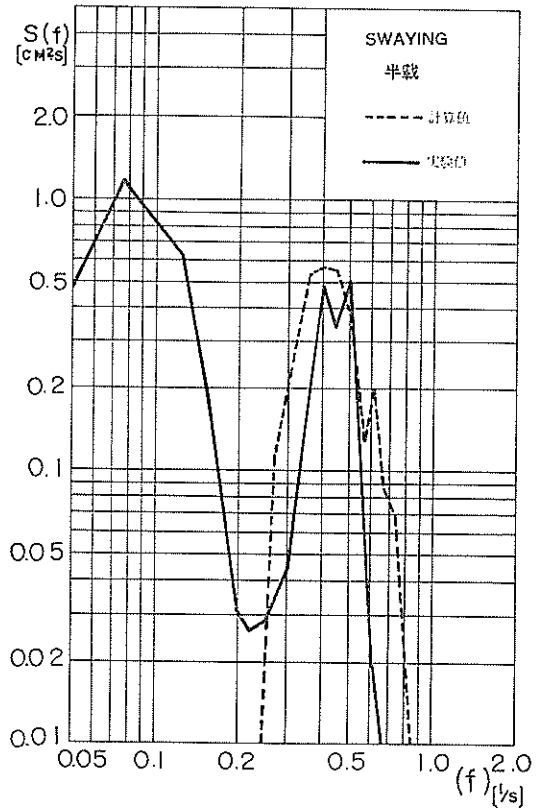


図-26 半載時 SWAYING の①の波に対するス  
ペクトル

者の一致はあまりよくない。この原因について考察する  
と以下のようになる。

図-26は、半載時 SWAYING の①の波に対する運動

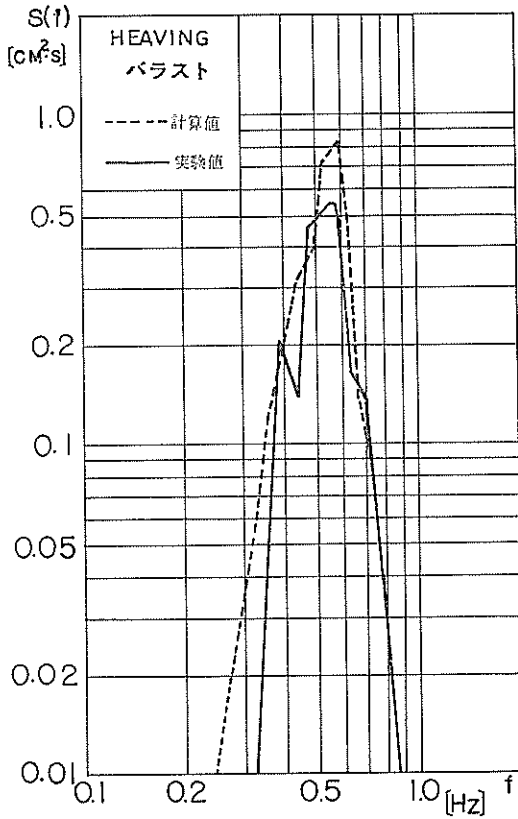


図-27 バラスト時 HEAVING の②の波に対するスペクトル

スペクトルを示したものであり、実線が実験値、点線が計算値を示している。実験値において、0.075Hz 付近の非常に長周期のスペクトルの極大値があらわれている。この極大値のため、表-6に見られたように実験値の有義波周期は非常に長くなったと考えられる。

この極大値の発生原因は、水槽の固有周期によると思われる。この水槽は、図-7に示したように、造波板から反対側の汀線までの水平距離が水深60cmの場合約17mとなる。長周期波の波速は水深のみで決まるので、この水槽の固有周期は約14秒(0.07Hz)となるので図-26のスペクトルの極大値周期にはほぼ一致している。

図-27は、バラスト時 HEAVING の②の波に対するスペクトルを示したものである。図-27において実験値と計算値を比較すると、ほぼ全域で計算値のスペクトル密度が大きくなっているが、これは表-5の運動振幅でも計算値が大きくなっているのに対応している。表-6の計算値の平均周期が実験値より長くなっている原因は、 $f < 0.4\text{Hz}$  の長周期側における計算値のスペクトルが実

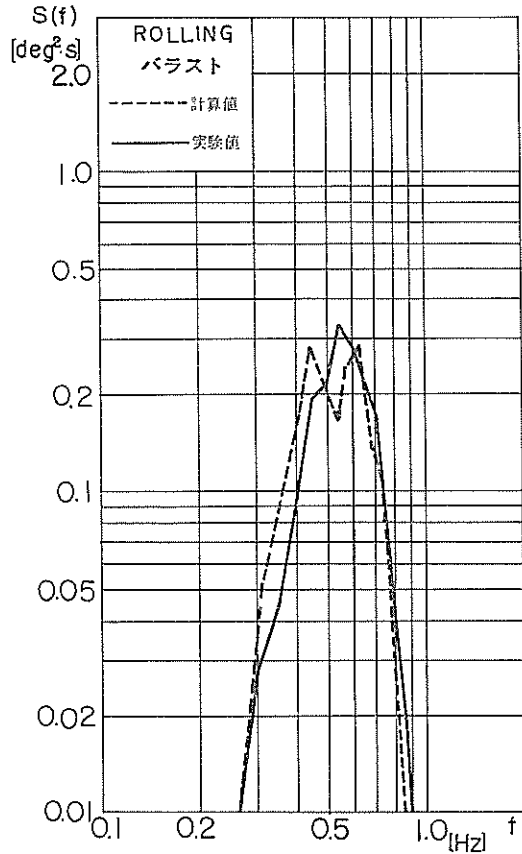


図-28 バラスト時 ROLLING の①の波に対するスペクトル

験値よりかなり大きくなっていることによる。このことは規則波実験の図-12にも対応しており、 $f < 0.5$  の長周期側では実験値の応答は計算値より2割程度小さくなっている。

図-28はバラスト時 ROLLING の①の波に対するスペクトルを示したものである。表-6において、平均周期が実験値より計算値の方が0.3秒程度長くなっているのは、図-28の  $f=0.45\text{Hz}$  における計算値の極大値によるものであることがわかる。 $f=0.45\text{Hz}$  において、実験値では顕著な極大値があらわれていないのは、次のような原因による。バラスト時の線型拘束の ROLLING においては、2箇所極大値があらわれるが、実験値における長周期側の極大値は、計算値より2割程度応答が低くなっている。このため、不規則波実験においても、長周期側の極大値の影響は計算ほどにはあらわれない。

図-29は半載時 ROLLING の②の波に対するスペクトルを示したものである。半載時の ROLLING の運動周期は、表-6で示したように実験値と計算値の一致がよか

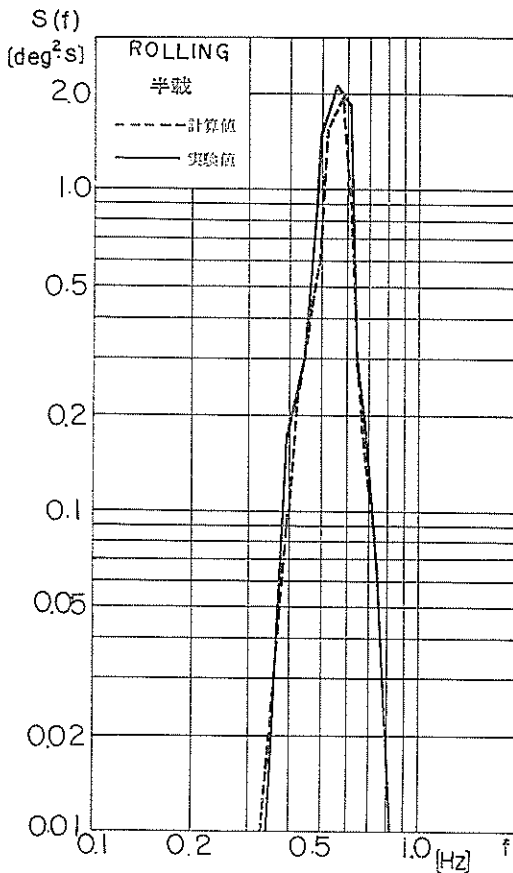


図-29 半載時 ROLLING の②の波に対するスペクトル

ったが、スペクトルにおいても両者はよく一致していることがわかる。

(3) 運動振幅、防舷材反力および運動周期の分布

表-7は、運動振幅と防舷材反力の分布に関するデータを示したものであり、各ケース毎に、最大値と1/3最大値との比、1/10最大値と1/3最大値の比、1/3最大値と平均値の比を求めたものである。表中には、レーリー分布を仮定した場合の理論分布値も示している。上段は実験値、下段は計算値による比を示している。

実験値のこれらの比を見ると、各ケースに関して全運動でレーリー分布に近い分布を示しているが、計算値においては、1/3最大値と平均値の比がすべてレーリー分布から予想される1.6以下の値になっている。このことは、計算値においては、運動および防舷材反力の分布の幅が狭くなっていることを意味している。

表-8は、表-7と同様に、各運動の周期に関して、最大

周期と1/3最大周期、1/10最大周期と1/3最大周期、1/3最大周期と平均周期の比を取ったものである。実験値と計算値を比較すると、全般的に計算値の方が比が小さくなっている。特に、1/3最大値と平均値の比では、全ケース、全運動に関して計算値の方が小さい。このことは、計算値の周期の分布の幅が実験値より狭くなっていることを意味している。

表-5の運動振幅および表-6の運動周期では、実験値と計算値は比較的良好一致を示したにもかかわらず、表-7と表-8では計算値の方が分布幅が狭くなっているのは、シミュレーションにおいては、振幅および周期ともに小さい運動が脱落する傾向にあることを意味している。

4.5.2 斜入射不規則波実験

(1) 運動振幅と防舷材反力に関する検討

表-9は、斜入射不規則波実験の運動振幅の実験値を示したものであり、あわせて数値計算の結果も示している。YAWINGの実験値が欠けているのは、YAWINGの振幅が0.5°未満であったのに対し、測定に用いた六自由度運動解析装置の測定範囲が±45°と広く、測定値とノイズとを識別できなかったことによる。

a) SURGING

SURGINGは図-21でも示したように規則波の場合でも計算値と実験値は非常に異なっている。不規則波の実験でも、バラスト時は実験値が計算値の2～5割であるのに対し、半載時には計算値の3～5倍の値になっている。この原因としては、断面分割法ではSURGINGの計算が本来できないにもかかわらず、無理に計算しているためである。今後は、SURGINGに対しても計算できる計算法の開発が望まれる。

b) SWAYING

バラスト状態の①の波および半載状態の②'の波に対しては実験値と計算値はよく一致したが、バラスト状態の②'の波と半載状態の①の波に対しては、両者は若干異なった値を示した。これは、図-17に示しているように、規則波で実験値と計算値がよく一致する周期付近では、不規則波における一致もよいが、規則波実験でずれている部分では、両者の差が不規則波実験でも大きくなっていることを示している。直角入射の表-5と比較すると、表-5ではSWAYINGがかなり小さくなっているが、これも規則波実験とよく対応している。

c) HEAVING と ROLLING

HEAVING と ROLLING の実験値と計算値を比較すると、比較的良好一致しているケースもあるが、両者の値が2倍程度異なっているケースもある。これは、図-18および図-16と比較してわかるように、不規則波実験で

大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究 (第1報)

表-7 直角入射不規則波実験 (レーリー分布との比較)

喫水 cm	波種	項 目	入射波高	SWAYING	HEAVING	ROLLING	防舷材反力	レーリー分布
9 バラスト	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	1.60 1.49	1.46 1.65	1.62 1.73	1.57 1.57	* 1.60
		(1/10)/(1/3)	1.20 1.30	1.25 1.22	1.21 1.31	1.27 1.29	1.25 1.23	1.27
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.60 1.44	1.61 1.48	1.63 1.56	1.56 1.50	1.60
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	1.81 1.43	1.62 1.64	1.54 1.60	1.71 1.48	* 1.60
		(1/10)/(1/3)	1.22 1.33	1.28 1.24	1.21 1.28	1.25 1.31	1.28 1.23	1.27
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.65 1.50	1.60 1.51	1.56 1.59	1.61 1.54	1.60
28.3 半 載	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	1.51 1.45	— 1.49	1.47 1.55	1.51 1.51	* 1.60
		(1/10)/(1/3)	1.20 1.30	1.26 1.27	— 1.28	1.25 1.22	1.23 1.27	1.27
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.59 1.41	— 1.51	1.60 1.53	1.60 1.46	1.60
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	1.54 1.52	— 1.62	1.49 1.41	1.64 1.59	* 1.60
		(1/10)/(1/3)	1.22 1.33	1.23 1.30	— 1.32	1.22 1.20	1.31 1.33	1.27
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.62 1.53	— 1.51	1.54 1.53	1.67 1.60	1.60

(上段は実験値, 下段は計算値を示す (\* 最多値を示す))

表-8 直角入射不規則波実験 (周期分布)

喫水 cm	波種	項 目	入射波周期	SWAYING 周 期	HEAVING 周 期	ROLLING 周 期
9 バラスト	①	(MAX)/(1/3)	1.03 0.95	1.03 1.06	1.07 0.91	0.96 1.00
		(1/10)/(1/3)	1.02 0.96	0.98 0.99	0.99 0.97	0.96 0.99
		(1/3)/(MEAN)	1.14 1.11	1.03 0.94	1.21 1.05	1.15 1.03
	②	(MAX)/(1/3)	0.96 1.04	0.89 1.01	1.00 0.09	1.03 1.04
		(1/10)/(1/3)	0.96 0.99	1.07 1.00	0.98 1.02	0.99 0.98
		(1/3)/(MEAN)	1.12 1.08	1.23 0.95	1.15 1.02	1.05 1.01
28.3 半 載	①	(MAX)/(1/3)	1.03 0.95	1.85 0.93	— 0.89	1.03 1.02
		(1/10)/(1/3)	1.02 0.96	1.32 0.95	— 0.98	1.00 0.99
		(1/3)/(MEAN)	1.14 1.11	1.39 1.00	— 1.04	1.05 1.02
	②	(MAX)/(1/3)	0.96 1.04	1.66 0.81	— 0.91	1.00 1.02
		(1/10)/(1/3)	0.96 0.99	1.13 0.92	— 1.00	1.01 1.00
		(1/3)/(MEAN)	1.12 1.08	1.46 1.08	— 1.05	1.04 0.99

(上段は実験値, 下段は計算値を示す)

表-9 斜め入射不規則波実験 (運動振幅に関する検討)

検討したケース		SURGING		SWAYING		HEAVING		ROLLING		PITCHING		YAWING		
喫水 (cm)	バネ定数 (kgf/cm)	クリップ ランス波種 (cm)	入射波		2Y <sub>max</sub> (cm)	2Y <sub>1/3</sub> (cm)	2Z <sub>max</sub> (cm)	2Z <sub>1/3</sub> (cm)	2Y <sub>max</sub> (deg)	2Y <sub>0/13</sub> (deg)	2X <sub>max</sub> (deg)	2X <sub>0/13</sub> (deg)	2Z <sub>max</sub> (deg)	2Z <sub>0/13</sub> (deg)
			H <sub>1/3</sub> (cm)	T <sub>1/3</sub> (s)										
9 パラスト	10	0	2.0	1.90	0.47	0.24	0.42	0.24	0.31	0.19	0.27	0.13	—	—
			1.99	1.96	1.36	0.96	0.61	0.44	0.63	0.44	0.65	0.43	0.92	0.65
9 パラスト	10	0	2.0	1.64	0.49	0.24	0.39	0.20	0.34	0.22	0.24	0.14	—	—
			1.97	1.66	0.79	0.52	0.36	0.27	0.51	0.33	0.47	0.31	0.66	0.52
28.3 半載	10	0	2.0	1.90	1.14	0.63	0.65	0.36	0.34	0.20	0.20	0.11	—	—
			1.99	1.96	0.31	0.20	0.77	0.55	0.65	0.46	0.69	0.48	0.89	0.59
28.3 半載	10	0	2.0	1.64	1.16	0.64	0.48	0.27	0.34	0.22	0.20	0.11	—	—
			1.97	1.66	0.20	0.13	0.40	0.31	0.52	0.33	0.45	0.31	0.57	0.37

表-10 斜め入射不規則波実験 (防蔽材反力に関する検討)

検討したケース		防蔽材反力 $\bar{P}_3\bar{P}_0$				防蔽材反力 $\bar{P}_2\bar{P}_0$				防蔽材反力 $\bar{P}_1\bar{P}_0$					
喫水 (cm)	波種	入射波		$P_{1/3}$		$P_{max}$		$P_{1/3}$		$P_{max}$		$P_{1/3}$		$P_{max}$	
		H <sub>1/3</sub> (cm)	T <sub>1/3</sub> (s)	(kgf)	(N)	(kgf)	(N)	(kgf)	(N)	(kgf)	(N)	(kgf)	(N)	(kgf)	(N)
9 パラスト	①	2.0	1.90	5.28	51	2.94	29	7.95	78	4.42	43	3.27	32	1.99	20
		1.99	1.96	14.6	143	9.85	96	10.3	101	7.29	71	7.44	73	5.0	49
9 パラスト	②'	2.0	1.64	8.63	85	4.12	40	11.05	108	6.15	60	3.63	36	1.57	15
		1.97	1.66	9.67	95	7.09	69	8.5	83	6.58	64	4.54	44	2.81	28
28.3 半載	①	2.0	1.90	5.88	58	3.22	32	8.87	87	3.91	38	7.03	69	5.15	50
		1.99	1.96	13.5	132	9.24	91	10.8	106	7.53	74	1.29	13	0.80	8
28.3 半載	②'	2.0	1.64	4.93	48	3.43	34	5.42	53	2.86	28	7.71	76	5.70	56
		1.97	1.66	8.72	81	5.39	53	6.87	67	4.66	46	0.94	9	0.56	6

与えた入射波の周期は、応答の極大値から離れた周期であり、この周期付近では応答値がきわめて小さくなっており、実験値と計算値の一致に関してもよくわからないことに起因すると考えられる。表-9の値と直角入射の表-5の値を比較すると、HEAVING および ROLLING の値は、1/5程度に小さくなっているのがわかる。

d) PITCHING

PITCHING に関しても、実験値と計算値が2倍以上異なっているケースがある。この原因も他の運動と同じように考えることができる。すなわち、規則波実験の図-19を見ると、ここで作用させた不規則波の周期付近では、実験値および計算値とも応答が小さく、両者の一致についても明確ではない。実験値も、全ケースに関して1°未満となっている。

e) 防舷材反力

表-10は、表-9と同様にして防舷材反力の実験結果をまとめ計算値と比較したものである。 $\bar{P}_1P_3$ 、 $\bar{P}_2P_4$ 、 $\bar{P}_3P_5$ の意味は4.4で述べたとおり、各防舷材反力の平均値を意味している。

$\bar{P}_3P_5$ は、SURGING により発生する防舷材反力なので、実験値と計算値は大きく異なっている。 $\bar{P}_1P_3$ と $\bar{P}_2P_4$ は $\bar{P}_3P_5$ ほどの著しい両者の差は示さないものの、全ケースにおいて実験値は計算値より小さい値を示し、9~3割程度の値になっている。この原因としては、 $\bar{P}_1P_3$ と $\bar{P}_2P_4$ を発生させる YAWING と SWAYING に関して表-9に関して述べたように計算値は実験値と必ずしもよく一致していないことと、4.3c)で述べたようにバネ変位が比較的小さい領域ではバネ定数が小さくなっていることが考えられる。

表-10を、直角入射時の表-5と比較すると、 $\bar{P}_1P_3$ と $\bar{P}_2P_4$ の実験値および計算値ともに表-5の防舷材反力より小さくなっており、1/3最大値ですべて1/2以下となっている。このことは、4.4で図-22と図-23に関して述べたことに対応しており、ここで作用させた周期帯の不規則波に関しては、斜入射の方が直角入射より防舷材反力が小さくなる。

(2) 運動周期に関する検討

表-11は、表-6と同様に各運動周期を示したものである。計算値における運動周期は全ケースにおいて入射波より大きくなっているのは、図-16~図-21に示した周期特性により、各運動で入射波周期より長周期側の応答が大きくなっているためである。しかし、実験値の各運動の周期は、入射波に比較しても計算値に比較しても小さくなっている。この原因としては、表-9の説明でも述べたように、各運動とも応答値が小さいため、ノイズと実

表-11 斜め入射不規則波実験 (運動周期に関する検討)

喫水 (cm)	波種	入射波		SURGING		SWAYING		HEAVING		ROLLING		PITCHING		YAWING		実験 計算	
		$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)		
9 パラスト	①	2.0	1.90	1.64	0.93	2.23	1.60	1.67	0.99	1.61	1.01	1.42	0.88	—	—	—	実験 計算
		1.99	1.96	2.45	2.55	2.37	2.42	2.76	2.75	2.49	2.48	2.30	2.23	2.01	2.04		
9 パラスト	②'	2.0	1.64	1.75	1.03	2.05	1.46	1.53	0.96	1.48	1.03	1.42	0.90	—	—	—	実験 計算
		1.97	1.66	2.38	2.31	2.20	2.06	2.51	2.55	1.75	1.73	2.02	2.09	1.88	1.83		
28.3 半載	①	2.0	1.90	2.15	1.38	2.14	1.23	1.88	1.10	1.98	1.45	1.96	1.32	—	—	—	実験 計算
		1.99	1.96	2.88	2.61	3.01	2.76	2.80	2.75	2.33	2.26	2.38	2.41	2.47	2.47		
28.3 半載	②'	2.0	1.64	1.84	1.23	1.87	1.09	1.56	0.97	1.55	1.12	1.36	0.85	—	—	—	実験 計算
		1.97	1.66	2.30	2.15	2.80	2.76	2.60	2.75	2.03	1.85	2.27	2.24	2.18	2.24		

表-12 斜め入射不規則波実験 (レーリー分布との比較)

喫水cm	波種	項 目	入射波高	SURGING	SWAY-ING	HEAVING	ROLLING	PITCH-ING	YAWING	レーリー分布
9 バラスト	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	2.03 1.42	1.62 1.43	1.75 1.37	1.68 1.45	2.05 1.52	— 1.42	*1.60
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.86 1.52	1.76 1.53	1.50 1.41	1.97 1.52	1.67 1.51	— 1.51	1.60
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	2.04 1.53	1.74 1.47	1.89 1.30	1.52 1.56	1.73 1.53	— 1.28	*1.60
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.79 1.53	1.77 1.63	1.65 1.48	1.56 1.65	1.66 1.50	— 1.55	1.60
28.3 半 載	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	1.75 1.52	2.28 1.33	1.81 1.39	1.36 1.43	1.61 1.46	— 1.51	*1.60
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.77 1.45	1.79 1.45	1.74 1.39	1.54 1.56	1.71 1.50	— 1.45	1.60
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	1.84 1.58	1.81 1.30	1.77 1.30	1.60 1.60	1.95 1.46	— 1.53	*1.60
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.75 1.50	1.62 1.33	1.63 1.35	1.57 1.60	1.63 1.51	— 1.49	1.60

(上段は実験値, 下段は計算値を示す) (\* 最多値を示す)

表-13 斜め入射不規則波実験 (防舷材反力の分布)

喫水 cm	波種	項 目	入射波高	$\bar{P}_1\bar{P}_3$	$\bar{P}_2\bar{P}_4$	$\bar{P}_3\bar{P}_6$	レーリー分布
9 バラスト	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	1.80 1.48	1.74 1.41	1.68 1.49	*1.6
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.64 1.54	1.85 1.53	1.74 1.57	1.6
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	2.10 1.36	1.80 1.29	2.37 1.61	*1.6
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.89 1.58	1.80 1.58	1.78 1.48	1.6
28.3 半 載	①	(MAX)/(1/3)	1.34 1.74	1.84 1.46	2.30 1.43	1.46 1.62	*1.6
		(1/3)/(MEAN)	1.54 1.53	1.63 1.43	1.72 1.48	1.45 1.58	1.6
	②	(MAX)/(1/3)	1.41 1.69	1.50 1.53	1.92 1.47	1.45 1.71	*1.6
		(1/3)/(MEAN)	1.55 1.53	1.58 1.54	1.79 1.54	1.44 1.57	1.6

(上段は実験値, 下段は計算値を示す) (\* 最多値を示す)

大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第1報）

表-14 斜め入射不規則波実験（周期分布）

喫水 (cm)	波種	項目	入射波周期	SURGING 周 期	SWAYING 周 期	HEAVING 周 期	ROLLING 周 期	PITCHING 周 期	YAWING 周 期
9 バラスト	①	(MAX)/(1/3)	1.03 0.95	1.50 1.00	1.01 0.97	1.45 0.93	1.54 0.86	0.79 0.99	— 1.04
		(1/3)/(MEAN)	1.14 1.11	1.76 0.96	1.39 0.98	1.31 1.00	1.60 1.00	1.60 1.03	— 0.99
	②	(MAX)/(1/3)	0.96 1.04	1.29 0.92	0.99 0.94	1.43 0.91	0.99 0.99	1.38 1.01	— 1.06
		(1/3)/(MEAN)	1.12 1.08	1.70 1.03	1.41 1.07	1.61 0.98	1.44 1.01	1.58 0.97	— 1.00
28.3 半 載	①	(MAX)/(1/3)	1.03 0.95	1.84 0.89	0.91 0.97	1.39 0.99	1.08 0.90	1.00 1.01	— 0.94
		(1/3)/(MEAN)	1.14 1.11	1.55 1.10	1.73 1.09	1.70 1.02	1.37 1.03	1.50 0.99	— 1.00
	②	(MAX)/(1/3)	0.96 1.04	1.12 0.90	1.82 1.03	1.46 1.02	0.99 0.92	1.41 0.98	— 0.98
		(1/3)/(MEAN)	1.12 1.08	1.50 1.07	1.73 1.01	1.61 0.95	1.38 1.10	1.59 1.01	— 0.97

（上段は実験値，下段は計算値を示す）

実験値の識別が不完全であったことが考えられる。このノイズを消去するには、 $f > 1.0\text{Hz}$  となる高周波成分を取り除くフィルターをかけ、再びエネルギーレベルを調整して統計量を求める必要があると考えられるが、ここではこのような処理はおこなわれなかった。

(3) 運動振幅，防舷材反力，運動周期の分布

表-12と表-13は、それぞれ各運動振幅と防舷材反力の分布に関するデータを、表-7と同様に整理したものである。計算値とレーリー分布とを比較すると、表-12におけるバラスト時の②の波に対する SWAYING と ROLLING の (1/3)/(MEAN) を除いてすべて、表中の比はレーリー分布による1.6より小さくなっている。これは、表-7と同様に、計算値はレーリー分布より分布の幅が狭いことを意味している。一方、実験値の表中の比は、大部分の場合計算値や、レーリー分布の1.6より大きい値となっている。このことは、実験値の分布幅が広いことを意味する。

表-14は表-8と同様に周期の分布を示したものである。ここでも、計算値の比は0.86~1.11の間に分布しており、計算値の分布の幅が狭くなっている。しかし、実験値の比は全体的に計算値より大きくなっており、1.5を越えるものも多い。

以上のことをまとめると、実験値および計算値の分布特性を以下のようには握ることができる。計算値の分布においては、運動振幅に関しても周期に関しても小さい値が脱落しているため、分布の幅が狭くなっている。実験値の分布の幅が広がっているのは、(2)で述べたようにノイズが混入しているためと考えられる。最大値と1/3最大値の比もかなりレーリー分布より大きくなっていることから考えて、ノイズの影響は1/3最大値の算定にも強く影響しているようである。このため、斜入射不規則波実験で得られた運動と防舷材反力の1/3最大値は、実際よりも小さい値になっている可能性が大きい。したがって、ここで得られた実験値は、割増して考える必要があることになる。

5. 結 論

本研究で得られた成果をまとめると以下のようになる。なお、以下で述べる数値計算とは4.1で述べたように上田・白石による第2報に示された流体力係数の修正をおこなったものである。

(1) 浮体の周期応立について

a) ROLLING の自由減衰実験で求めた固有周期は、数値計算値よりバラスト時で0.06秒、半載時で0.12秒長



くなる。

b) 直角入射時の SWAYING と ROLLING の周期応答を実験値と計算値と比較したところ、応答の極大値付近では両者は比較的良好に一致するが、極大値からはずれた応答値の比較的小さい周期ではよい一致を示している。

HEAVING の周期応答では、両者は  $2b/\lambda > 0.5$  で比較的良好に一致するが、 $2b/\lambda < 0.5$  の長周期波に対する応答では、バラストおよび半載で計算値が実験値より2割程度大きくなる。

c) SWAYING および ROLLING, HEAVING の応答値は、直角入射の場合より斜め入射の場合が小さい。これは、浮体前面における波力の位相が長軸方向にずれるためである。

d) 斜め入射の場合、直角入射では発生しなかった YAWING および PITCHING, SURGING が発生し、長軸方向から  $60^\circ$  傾いた方向から波を入射させた場合、ROLLING および YAWING, PITCHING の各回転角はほぼ同じオーダーになる。

#### (2) 浮体拘束の影響について

a) 浮体は拘束することによって、直角入射時の ROLLING の周期応答曲線に、実験値および計算値で、固有周期付近の他に SWAYING との連成によってもう一つの極大値が長周期側にあらわれる。

b) 直角入射時の SWAYING には、拘束バネによっておこる共振のため、表面の水粒子の水平運動より大きい振幅の運動をおこす周期帯があらわれる。

c) 浮体拘束は、HEAVING 運動にはほとんど影響を与えない。

#### (3) 防舷材反力について

a) 直角入射時の防舷材反力は、主として SWAYING によって決まり、周期応答曲線の形状は SWAYING の曲線とよく一致している。

b) 斜め入射時の防舷材反力は、その大部分が YAWING によっておこる。しかし、 $\bar{P}_2 \bar{P}_4 \approx \bar{P}_1 \bar{P}_3$  になったのは、SWAYING と YAWING の位相がずれているためである。

c) 斜め入射時の防舷材反力は、全体的には直角入射時に比して小さいが、半載時の  $2b/\lambda < 0.4$  の長周期側では斜入射時の防舷材反力が大きくなる。

#### (4) 不規則波実験の結果について

a) 直角入射実験では、規則波実験と同様に、各運動の実験値と計算値は比較的良好に一致している。各運動の周波数スペクトル特性も、規則波実験の結果によって説明できる。

b) 斜め入射実験においては、各運動の応答値が小さかったため、ノイズを完全に除去できなかった。このため、実験値は計算値より全般的に小さい値を示している。

c) 不規則波に対する計算結果においては、レーリー分布に比較して振幅と周期の小さい運動が欠如しているため、振幅と周期の分布の幅が狭くなっている。

#### (5) 数値計算の適用性について

a) SURGING と SURGING により生ずる防舷材反力に関しては、実験値と計算値は大きく異なる値を示しており、SURGING の計算に当っては、新しい計算手法を開発することが必要となる。

b) SURGING を除く各運動と防舷材反力に関しては、流体力係数を修正することにより、直角入射の場合に計算値と実験値は比較的良好に一致し、斜め入射の場合でもある程度の差はあるけれども、断面分割法によるプログラムである程度推定でき、設計に適用できることが明らかになった。

## 6. あとがき

本研究は、当所の合田良実水工部長の御指導によるところが大きいです。また、当所構造部海洋構造研究室の上田茂室長および白石悟研究官には、数値計算プログラムの内容および入力データの作成法について、いろいろ御教示いただいた。さらに、実験の実施にあたっては、当所海洋水理部波浪研究室の西田一彦研究員に御協力いただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

本研究は、高山の全般的指導の下におこなわれたものである。実験は、永井、菊地、諸石が実施し、そのデータ整理は、菊地が諸石の協力の下におこなった。数値計算は永井と菊地が実施した。とりまとめは永井によった。  
(1980年6月30日受付)

## 参 考 文 献

- 1) 豊田昭三・岩井和男・岡部利正・島田博之・花野敏夫・珠久正憲：浅海タンク船式貯油システムの基本構想について、日本造船学会論文集 Vol. 146, 1979年, pp. 365~374.
- 2) 運輸省港湾局・運輸省港湾技術研究所：大型船舶係留避泊地整備計画調査報告書, 昭和54年3月, pp. 44~70.
- 3) 上田 茂・白石 悟：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報 数値計算による検討) 港湾技術研究所報告第19巻3号, 1980年, pp. 105~143
- 4) 高山知司・永井紀彦・菊地 治・諸石一幸：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する模型実験, 第27回海岸工学講演会論文集, 1980年, pp. 302~306.

大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究 (第1報)

- 5) 井島武士: 有限水深域の構造物および浮体による波の変形, 水工学シリーズ 74-B-3, 土木学会水理委員会, 1974年7月, 32p.
- 6) 井島武士・吉田明德・湯村やす: 有限水深域の波による楕円および矩形浮体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集第244号, 1975年12月, pp. 91~105
- 7) 前出1)の pp. 27~43.
- 8) 鈴木康正・合田良実: 波浪中の浮体動揺と係留力の推定について, 昭和54年度港湾技術研究所講演会講演集, 運輸省港湾技術研究所, 1979年12月, pp. 29~70.
- 9) 合田良実・鈴木康正・岸良安治: 不規則波浪実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 昭和49年11月, pp. 237~242.
- 10) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 昭和52年10月, pp. 141~153.
- 11) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料 No. 248, 1976年12月, 24p.
- 12) 合田良実: 波浪に関する水理模型実験, 運輸省港湾技術研究所専門技術者研修テキスト水工課程, 昭和46年6月
- 13) 前出9)の p. 19.
- 14) 桑島 進・永井康平: 任意個数資料のFFT算法とそのスペクトル解析への応用, 港湾技研資料 No. 155, 1973年3月, 33p.
- 15) 前出9)の pp. 197~228.
- 16) 前出3).
- 17) 前出3)の付図34~36.
- 18) 合田良実・竹田英章: 海の波長および波速の計算表, 港湾技研資料 No. 12, 昭和39年6月, 57p.

主要記号表

$b$ : 浮体半巾 ( $=B/2$ )	(cm)
$d$ : 喫水	(cm)
$\overline{GM}$ : メタセンター高	(cm)
$g$ : 重力加速	(cm/s <sup>2</sup> )
$H$ : 入射波の波高	(cm)
$l$ : 浮体半長 ( $=L/2$ )	(cm)
$P$ : 防舷材に働く反力	(kgf) —— (N)
$T$ : 入射波の周期	(s)
$X$ : SWAYING の振幅	(cm)
$X_\theta$ : PITCHING の振幅	(rad) または (deg)
$Y$ : SURGING の振幅	(cm)
$Y_\theta$ : ROLLING の振幅	(rad) または (deg)
$Z$ : HEAVING の振幅	(cm)
$Z_\theta$ : YAWING の振幅	(rad) または (deg)
$\rho$ : 水の密度	(g/cm <sup>3</sup> )
$\lambda$ : 入射波の波長	(cm)