

# 港湾技研資料

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

No. 597      Sept. 1987

箱型浮体に作用する波漂流力の実験的考察

上   田   茂  
板   生   考   司

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 係留浮体の長周期動揺に関する既往の研究	4
3. 模型実験	5
3.1 実験装置および実験ケース	5
3.2 実験結果	7
4. 動揺計算および実験値との比較	10
4.1 動揺計算の方法	10
4.2 実験値と計算値との比較	14
5. 結 論	21
6. あ と が き	23
参 考 文 献	23
記 号 表	24

# Experiment and Computation of Wave Drift Force Subjected to Rectangular Floating Body

Shigeru UEDA\*  
Takashi ITAO \*\*

## Synopsis

In this Paper, description is made on long period oscillation of floating body when it is moored relatively such soft mooring systems consist of chains, anchors, sinkers and mooring ropes, in accordance with model experiments and computations.

Followings are major conclusions of this paper.

1) Wave drift force is assumed constant in regular wave, and practically, Maruo's theory may be applicable to calculate wave drift force in regular wave.

2) When a floating body is moored to the weighted mooring system, it begins to drift when drift force exceeds the weight and continues to drift as far as this condition maintains. And, when a floating body is moored to the linear mooring system, it drifts as far as drift force is subjected and it stops at the point where restraining force is equal to drift force. In any case motions caused by first order wave force is less than that caused by second order wave force.

3) In irregular waves, a floating body makes a long period motions in accordance to slowly varying wave height of successive wave. Some difference observed between weighted mooring system and linear mooring system. Then computation program is established with this principle.

4) According to computations varying the spring constant, it is said to be possible to select optimum mooring system to reduce the long period oscillation.

5) Good agreement was obtained between results of both model experiments and computations.

---

\* Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structures Division

\*\* Member of the Offshore Structures Laboratory, Structures Division

# 箱型浮体に作用する波漂流力の実験的考察

上 田 茂\*

板 生 考 司\*\*

## 要 旨

本論文では、浮体がチェーンとアンカーまたはシンカー、係留索などによって弛緩係留されているときの長周期動揺について、実験を行った結果を取りまとめるとともに、浮体が長周期動揺を起こす原因として、変動波漂流力および係留系の変位復元力特性を取り上げ、変動波漂流力の計算法を示し、これを浮体の動揺解析プログラムに組み込み、計算を行って実験結果と比較検討した結果を示す。

本論文における主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 規則波中の浮体に作用する波漂流力は一定であり、波漂流力の計算に丸尾の理論を適用できる。
- 2) 重錘係留系の場合には重錘の重量が波漂流力より小さいときには浮体が漂流し続けるが、ばね係留系の場合には浮体は波漂流力に見合うだけ漂流してそこで停止している。ただし、いずれの場合も波強制力による浮体の一次オーダーの動揺量は波漂流力による動揺量に比べて著しく小さい。
- 3) 不規則波中においては、波高の増大に伴い浮体は波の進行方向に漂流し、波高の減少に伴って、重錘係留系では重錘の重量に見合う張力、また、ばね係留系ではコイルスプリングの張力によって、浮体は実験開始前の位置に戻される。しかし、波高が再び増大すると浮体は波の進行方向に漂流するので、浮体が実験開始前の位置を越えて波の進行方向と反対側に大きく移動することはない。これらのことから、波漂流力を各一波ごとに定常力とみなし、それらの波高および周期の変化に対応するように計算してよいと考える。
- 4) ばね係留系においては、ばね定数を変えて種々の系に対して計算を行ったが、ある程度の硬さの係留系を用いることにより長周期動揺を避けることができることがわかった。
- 5) 浮体が長周期動揺するときの減衰係数を推定した。
- 6) 動揺計算結果は実験結果と良い対応を示した。

## 1. ま え が き

浮体がチェーンまたは係留ロープなどで弛緩係留されている場合には、浮体が波周期の数倍の周期のサージングまたはスウェィングをすることがあり、条件によっては、この周期成分の動揺が卓越する。この現象は浮体の長周期動揺現象またはスロードリフトオシレーションとして知られていて、不規則波中の浮体の長周期動揺を予測するための計算法がいままでにいくつか提案されている。それらを大別すると、浮体の長周期動揺は、浮体に作用する長周期の変動波漂流力に起因すると考えるも

のと、不規則波中の長周期成分波のうち、係留システムの固有周期と一致する周期の成分波による共振現象であると考えられるものである。係留浮体の長周期動揺に関しては、これらの要因のいずれもが極めて重要な意味を持つ。

筆者らは、近年、実海域において計測された箱型の浮防波堤のスウェィングの動揺記録を解析するに当たり、スウェィングの動揺に波周期の約10倍の周期の動揺成分が卓越していて、かつ、この長周期動揺が規則的であることに注目し、この現象を解明するために水理模型実験を行い、浮体に作用する波漂流力を求め、かつ、この波漂流力と浮体の係留系の剛性との関係から長周期動揺が

\* 構造部 海洋構造研究室長

\*\* 構造部 海洋構造研究室

生ずることを確認し、動揺を予測するための計算法について考察した。

## 2. 係留浮体の長周期動揺に関する既往の研究成果

船舶工学の分野において、浮体に作用する波漂流力に関する研究が数多くなされてきている。末広<sup>1)</sup>は、横波中の動揺実験において、横揺の固有周期近くの波周期で波漂流力が最大になることを示した。渡辺<sup>2)</sup>は、この実験に対して、波漂流力はFroud-kriloff力が船体運動との間に位相差を持つために生ずるものであるとして理論的裏付けを行った。これらは、固定された浮体に作用する波漂流力に対する実験および理論的考察であるが、船舶工学においては、波浪中を航行する船舶に対する抵抗増加が重要である。Havelock は渡辺の波漂流力理論に従い、向波中を進行する船舶の抵抗増加量を、Froud-kriloff力による横揺強制力および上下揺強制力と、それらと船体運動との間の位相差を用いて計算する式を示した。花岡<sup>4)</sup>は渡辺—Havelockの理論による波漂流力にさらに強制動揺による非定常造波抵抗力の和として波漂流力を表し、これらの理論をさらに発展させた。

丸尾<sup>5)</sup>は、運動量理論を用いて、完全流体中における波漂流力、あるいは抵抗増加を求める理論式を導くとともに、2nd order forceをすべて考慮するときのみエネルギー保存則が満足されることを示した。丸尾の理論によれば、二次元波漂流力係数は波の反射率の二乗に等しい。しかし、丸尾が行った円柱に対する近似計算においては、波漂流力係数が1.0を超えることがあり、理論に反する。

田才<sup>6)</sup>は、丸尾の数値計算において反射波の速度ポテンシャルが近似計算値であることがこの原因であると指摘し、別所の理論によりこれを厳密に計算し、反射波係数が1.0以下であること、また、運動の同調時におけるピーク値もそれほど大きくないことを示した。しかし、波漂流力に関する実験結果の中には、波漂流力係数が1.0よりも大きくなる例もあることから、野尻<sup>7)</sup>らは、丸尾の理論に浅海影響を加味した理論式を求めるとともに、この理論による計算値が実験値とよく一致することを示した。

以上は二次元物体に対する波漂流力に関する研究であるが、三次元物体に対し、安藤<sup>8)</sup>は、箱型浮体、半没浮体および双胴浮体などについて、三次元状態で横波による波漂流力を計測したが、 $L/B$  (浮体長/浮体幅) が小さいほど大きな波漂流力が生じ、計算との一致が良くないことを示した。また、日本船用機器開発協会の浮消

波堤に関する研究<sup>9)</sup>において実施された実験結果は、 $L/B$ が大きかったので丸尾の理論によって推定した計算値と良く一致した。

Faltinsen<sup>10)</sup>は厳密な計算を行っている。また、小川<sup>11)</sup>、細田<sup>12)</sup>はそれぞれ斜波中の波漂流力と抵抗増加を求めている。ただし、いずれも計算には労力を要するようである。

船舶の係留問題において、長周期動揺問題は港湾における荷役の可否に直接関係するので、これに関連して多くの研究がなされてきている。Wilson<sup>13)</sup>はケープタウン港のダンカンベイソンにおける船舶の動揺と水面変動の時系列を測定し、水面変動は両振幅で15cmと小さいが、周期が1min前後であることを、Cバースに係留されていた6,400GT、およびDバースに係留されていた13,400GTの船舶の動揺が、サージングで50cmまたは75cm、スウェイングで100cmまたは50cmであることを示し、この動揺が、長周期波の侵入による港内の副振動に起因することを示した。VanoniとCarr<sup>14)</sup>はロスアンゼルス港における船舶の長周期動揺を測定し、港内に係留していた船舶のサージングが1.8~3.2m、また、スウェイングが2.2~2.3m、最大の動揺周期がそれぞれ、250sおよび550sであったことを報告している。この場合も長周期波の侵入による港内の副振動が原因であるとされている。KiethとMurphy<sup>15)</sup>はペルーのサンニコラス湾のマルコナビアーに係留する150,000dwtの鉱石船が動揺周期が1~3sの長周期動揺をすることを観測した。当初このような動揺は、前二例と同様に副振動が原因であると考えられたが、周期20sの長周期波が直接の原因ではないかとの考えもあったので実験を行った結果、周期16~20sもの長周期波が存在し、かつ、防舷材と係留索とから構成される係留系の変位復元力特性が非対称であるときには、このような長周期動揺が発生することがあることを示している。

筆者の一人は、鹿島港において係留中の200,000dwt級の原油タンカーの動揺を観測し、サージングおよびスウェイングの100~200sもの長周期動揺を観測したが、スウェイングについては係留系の非対称性が、また、サージングについては風の変動性および変動波漂流力がその原因であることを示唆した<sup>16)</sup>。変動波漂流力が係留船舶の長周期動揺を引き起こすことを示す例として、一点係留ブイに係留された大型タンカーの長周期動揺が挙げられる<sup>17)</sup>。一点係留ブイにおいては、船舶はホーサーによって係留されるが、船舶の質量に比べて係留索の変位復元力特性が極めて柔らかく、したがって、みかけの固有周期が長くなるので、変動波漂流力の周期が固有周期に

一致すると係留船舶の動揺が著しく大きくなる。HsuとBlenkarn<sup>18)</sup>は長周期波が係留船舶の動揺に重要な影響を及ぼすことを初めて指摘した。彼らは、不規則波を半波長ごとに周期および波高の変化する規則波の連なりとみなし、半波長ごとに波漂流力を求め、その時間的変化から長周期成分を求めて長周期変動力とした。また、長周期動揺の現象を考慮すると、最適係留系は適切な初期張力を持つ必要があり、むやみに柔らかい係留系はかえって大きな動揺の原因となることを示した。RemeryとHermans<sup>19)</sup>は箱型の浮体を線形ばねで係留し、規則波中、振幅変調波および不規則波中で実験し、浮体の運動および変動波漂流力などが実験値とよく一致することを示した。また、係留力は潮流および波による漂流の成分に、波による強制動揺の成分が重畳されるものと考えて、係留系の設計法を示した。ただし、変動漂流力に関しては、波による変動漂流力のみならず、風による変動漂流力にも注意する必要があることを指摘した。

狭帯域の不規則波中の変動波漂流力に対して、Zarnickら<sup>20)</sup>はVerhagenら<sup>21)</sup>の解析にならって、また、Pinkstar<sup>22)</sup>はHsuにならって、それぞれ独立に変動波漂流力の周波数スペクトルを求めた。また、Newman<sup>23)</sup>は入射波の二次オーダーの圧力を数学モデルとして選び、数値シミュレーションによって、前二者の提案する周波数スペクトルの妥当性を検証している。Bowers<sup>24)</sup>も同様の検討を行っている。

Ryeら<sup>25)</sup>は、波漂流力の計算において浮体による反射率が重要であるところから、実験によって反射率を測定し、長周期動揺の数値計算結果と実験結果とを比較し、よい一致をみた。SeidlとLee<sup>26)</sup>はシーバースに係留される船舶の長周期動揺を数値シミュレーションおよび実験によって解析している。

波浪中の船舶に対して漂流力は抵抗増加として取り扱われていることはさきに述べたとおりであるが、WichersとSluijs<sup>27)</sup>は、船舶が長周期動揺する場合の減衰力は波浪の影響を大きく受けるであろうと考え、係留船舶のサージングの動揺について実験を行い、波浪中の減衰係数の値は平水中の値よりも大きいことを示し、その増加分をWave dampingと呼んだ。一方、加藤および木下<sup>28)</sup>は波浪中の長周期動揺の減衰が早まることに着目し、動揺速度の二乗に比例する減衰項を含む振動系では、外乱による強制振動があると自由振動の振幅は外乱がない場合に比較して早く減衰することを摂動法ならびに数値積分によって示した。また、斎藤および高木ら<sup>29)</sup>は、長周期動揺する半円形断面の柱体に働く減衰力を水槽実験よ

り求め、Wichers説および加藤・木下説と比較し、かつ、波浪中の減衰力の解析的推定法を試みている。

実機における計測例として、運輸省第四港湾建設局が熊本新港の建設海域に浮防波堤の実験堤を設置し、実証観測を行ったものがある<sup>30)</sup>。この観測記録にはスウェーイングの動揺に30s~40sの長周期成分が卓越しているが、変動波漂流力による長周期動揺の事例として注目に値する。

以上が、係留浮体の長周期動揺に関する現在までの主要な研究成果の概略である。これらの研究の経緯および成果から係留浮体の長周期動揺に関する研究課題を分類すると以下ようになる。

#### ① 波漂流力に関する課題 (課題1)

規則波中の波漂流力、  
不規則波中の波漂流力、  
反射率

#### ② 長周期動揺の減衰係数に関する課題 (課題2)

平水中の減衰係数  
波浪中の減衰係数 (Wave damping)

#### ③ 係留系の変位復元力特性と長周期動揺との関連に関する課題 (課題3)

対称係留系  
非対称係留系

となる。

本論文においては、課題1については水理模型実験を行い、波漂流力の性質を調べ、規則波中および不規則波中の波漂流力の計算法を提示する。波漂流力の計算法については丸尾の理論の適用性を検討するが、このとき、波漂流力の算定において、浮体による波の反射率としては、自由浮体または固定浮体に対して伊藤による近似理論によって求めたもの<sup>31)</sup>を用いる。実験結果と計算結果とを比較するに当たって、係留浮体の付加質量および減衰係数は、領域分割法<sup>32)</sup>により求めた値を用いるが、計算結果と実験結果とが著しく異なる場合には減衰係数を修正して数値計算を行い、波浪中の減衰係数の値を推定する。なお、本研究においては、係留系の変位復元力特性は後述するように非線形非対称となる。

### 3. 模型実験

#### 3.1 実験装置および実験ケース

##### (1) 実験水槽および実験装置

縦50cm、横250cm、型深20cm、喫水5cmの亚克力製の箱型の模型浮体 (以下浮体という) を用いて、港湾技術研究所の平面水槽 (20m×20m×1m) において動揺実験を行った。図-1は実験における模型および計測装

置の配置を、図-2は重錘係留系およびばね係留系の場合の波漂流力および張力の測定装置の概略を示したものである。

(2) 係留系

実験においては、浮体の長軸が波の進行方向に一致する場合（以下縦係留系という）と、浮体の長軸が波の進行方向と直角になる場合（以下横係留系という）の二つの配置について、浮体を十分な剛性をもつワイヤロープと重錘とからなる係留系（以下重錘係留系という）および極めて柔らかいばね係留系（以下ばね係留系という）の二つの係留系について、それぞれ、規則波中および不規則波中における浮体の動揺量および係留力を計測した。

重錘係留系の実験の目的は浮体に作用する波漂流力の性質とその大きさを明らかにすることで、主として規則波中において、重錘の重量を徐々に増加しながら繰り返し、浮体が漂流しなくなったときの重錘の重量をもって波漂流力とした。このようにして、波周期および波高

を変えて数ケースの実験を行った。波漂流力の値は波周期および波高によって異なるが、この実験の範囲では200~400gfと推定された。

つぎに、得られた波漂流力の値に基づいて、ばね係留系の実験に用いるばね定数として、先に求めた波漂流力を受けて浮体が有意な漂流をするように、適当な値をいくつか定め、これらのばね定数をもつコイルスプリングを用いたばね係留系について、規則波中および不規則波中での動揺実験を行った。有意な漂流とは、六自由度計で測定できる範囲の動揺量であり、本研究で用いた六自由度計の場合には30cm程度を目安とした。したがって、ばね定数10~50gf/cmとなり、模型浮体はきわめて柔らかい変位復元力特性を有する係留系に係留されていることになる。ただし、図-3 a) b) に示すように、コイルスプリングの変位復元力特性はコイルスプリングの変形がある程度大きくなるとほぼ所定のばね定数となるが、変形がごく小さい間はばね定数がこれよりやや大きくそ

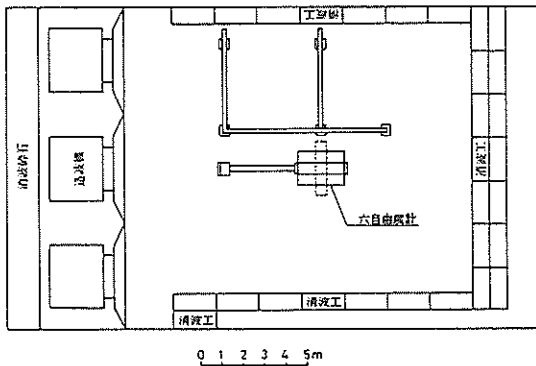


図-1 模型および計測装置の配置

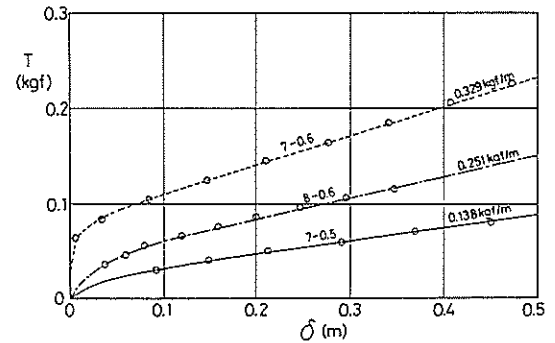


図-3 a) コイルスプリングの変位復元力特性

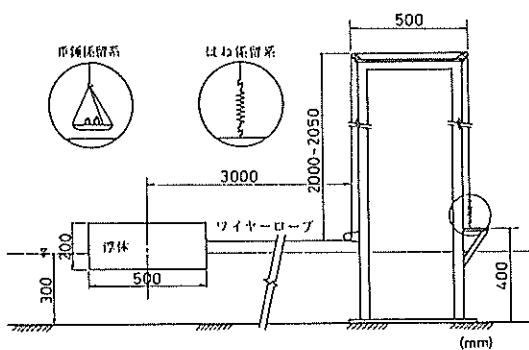


図-2 重錘係留系およびばね係留系の場合の波漂流力および張力の測定装置

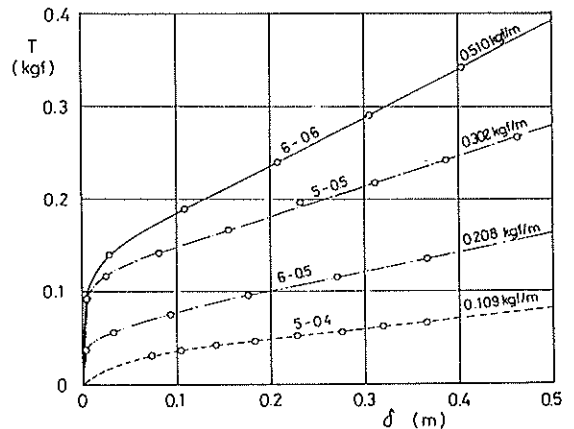


図-3 b) コイルスプリングの変位復元力特性

の意味では非線形である。とくに、図-3a)の7-0.6, 図-3b)の6-0.6, 6-0.5, 5-0.5などではこの特徴が顕著に現れている。また、8-0.6もやや顕著である。なお、図-3において、7-0.5などと表記しているが、7はコイルスプリングの直径、0.5は素線の直径で単位はいずれもmmである。

また、この実験においては、ばね係留系といえども、浮体が実験開始前の位置から波の進行方向に対して反対側に移動する場合には、係留系の拘束力が働かないいわゆる非対称な変位復元力特性を有する係留系である。したがって、実験結果の解析および計算においては、係留系のこのような性質を十分に考慮して、非線形非対称な係留系として取り扱うものとする。ちなみに、重錘係留系はきわめて非対称性が強い係留系であるといえる。のちに、実験および計算結果を解析するに際し、このような係留系の非対称性の強弱が長周期動揺に及ぼす影響について検討する。

ばね係留系の規則波中における実験の目的は、重錘係留系の実験と同様に浮体に作用する波漂流力の性質とその大きさを明らかにすることである。また、不規則波中の実験においては、規則波中の実験結果に加えて、さらに、不規則波中の変動波漂流力の計算法および浮体の動揺計算法の確立のために必要な情報を得ることを目的とした。

### (3) 計測

動揺実験においては、浮体の動揺量を六自由度変位測定装置で、また、ばねの張力をひずみゲージ式張力計によって測定した。これらの測定値はデータレコーダーによって記録し、AD変換のち港湾技術研究所の大型電子計算機ACOS1000によって処理した。

### (4) 実験ケース

以上に述べた実験ケースを表-1に取りまとめて示す。なお、この他にも数ケースの実験を行っているが、動揺量が大きく六自由度計の測定範囲を超えたものや、ヨウイングが大きくなって係留索の張力に及ぼす影響が大きいと判断したものなどは省略している。

### 3.2 実験結果

#### (1) 規則波中の実験結果

重錘係留系の実験においては、上述したように各実験ケースにおいて重錘の重量を徐々に増加して、浮体が漂流をしなくなったときの重錘の重量をもって波漂流力とした。たとえば、縦係留系で、波周期 $T=0.92s$ 、波高 $H=6cm$ のときには、重錘の重量が $W=75gf$ では浮体は漂流しないが、重錘の重量が $W=70gf$ では浮体は次第に漂流する。浮体は2本のワイヤーロープで係留されているので、波漂流力は $F_D=140\sim 150gf$ と推定される。重錘係留系の場合には、波漂流力はこのようにして求めたが、重錘の重量を5gfずつ増加したので波漂流力の推定値の誤差は各実験ケースの最大波漂流力に対し縦係留系については5~6%、横係留系については2~3%となる。

つぎに、ばね係留系の実験においては、浮体が漂流しかつその位置で停止していたので、浮体に作用している波漂流力とコイルスプリングの張力ががつり合っているものとみなし、この張力の値を波漂流力とした。

図-4は横係留系について、規則波中および不規則波中の重錘係留系とばね係留系の浮体の動揺の時刻歴を比較して示したものである。重錘係留系では波漂流力が重錘の重量を超えたときに浮体は漂流を始める。図においては最初の100~150sの間はほとんど静止しているようにみえるが、いったん、漂流し始めると波漂流力と重錘

表-1 実験ケースの一覧

波周期 (s)	縦 係 留 系			横 係 留 系				
	1.5	0.92	0.73	2.72	1.5	0.92	0.73	0.62
重錘係留系	○ ◎	○ ◎	○		◎	○ ◎	○	
ばね係留系								
8-0.6				◎	◎	○ ◎		
7-0.6	○ ◎	○ ◎	◎		◎	◎ ◎		
7-0.5					○	◎ ◎ ◎	○ ◎	◎
6-0.6					◎	◎ ◎		
6-0.5	○ ◎	○ ◎	◎	◎	○ ◎	○		
5-0.5	○ ◎	○ ◎	◎	◎	◎	○		
5-0.4	○ ◎	○ ◎	◎		○		○	

○ : 規則波    ◎ : 不規則波



の重量との差が定常力として作用し続けるため、浮体は徐々に波の進行方向に漂流していく。これに対し、ばね係留系では浮体は波漂流力に等しいばね張力に対応する変位をしてそこで停止する。なお、ここで用いた、六自由度系の測定範囲が±30cmであるので、いずれの係留系を用いた場合にも、30~40cm程度の動揺をすると計測を停止している。ただし、記録上は浮体がそこで静止しているようにみえる。

以上の重錘係留系およびばね係留系の規則波中の実験結果から判断して、波漂流力は規則波中では一定であると考えられる。この結果は、丸尾が指摘したところと一致する。波漂流力の値は波周期によって当然異なるが、この実験における波周期の範囲では、波漂流力は、縦係留系では130~150gf、また、横係留系では300~500gfであった。なお、実験においては、規則波中および不規則波中のいずれについても、造波開始から数波の間は浮体を固定しておいて、しかるのちに解放して動揺量および張力の測定を行った。これは、造波初期の波の非線形性の影響を除去するためであるが、その結果、井上<sup>33)</sup>が長周期動揺の原因として指摘した、過渡現象によるものは見られなかった。

以上の結果、波漂流力を丸尾の理論に従って計算することの妥当性が確認されたので、実験結果を波漂流力係

数として整理し取りまとめる。図-5は、伊藤<sup>31)</sup>によって提示されたく(矩)形断面浮体の動揺に関する近似理論を用いて波の透過率を求め、この透過率の値を丸尾<sup>5)</sup>の理論によって与えられる波漂流力係数の計算式に代入して求めた結果と、実験で得られた波漂流力から求めた波漂流力係数とを比較して示したものである。これを見ると、横係留系については波漂流力係数の計算値と実験値とはよく合っている。しかし、縦係留系の場合には計算値と実験値との対応がよくない。これは、縦係留系の場合には、波の進行方向に対する浮体の幅が250cm、長さが50cm、すなわち、 $L/B=0.25$ となるので、二次元理論に基づく計算値は実験値に対して過大になると予測されたが、実験値と計算値とを比較した結果、必ずしも計算値が実験値より大きいとはいえないが、計算値と実験値との差が大きかった。このことは安藤<sup>8)</sup>が行った実験でもみられた。したがって、縦係留系の場合には、二次元理論に基づいて計算した波の透過率を用いて計算した波漂流力係数を用いるのは適当ではないといえる。

#### 2) 不規則波中の実験結果

重錘係留系およびばね係留系について不規則波中の動揺実験を行った。ただし、実験の多くはばね係留系におけるものである。すでに図-4に示したように不規則波中の浮体の動揺は重錘係留系およびばね係留系のいずれ

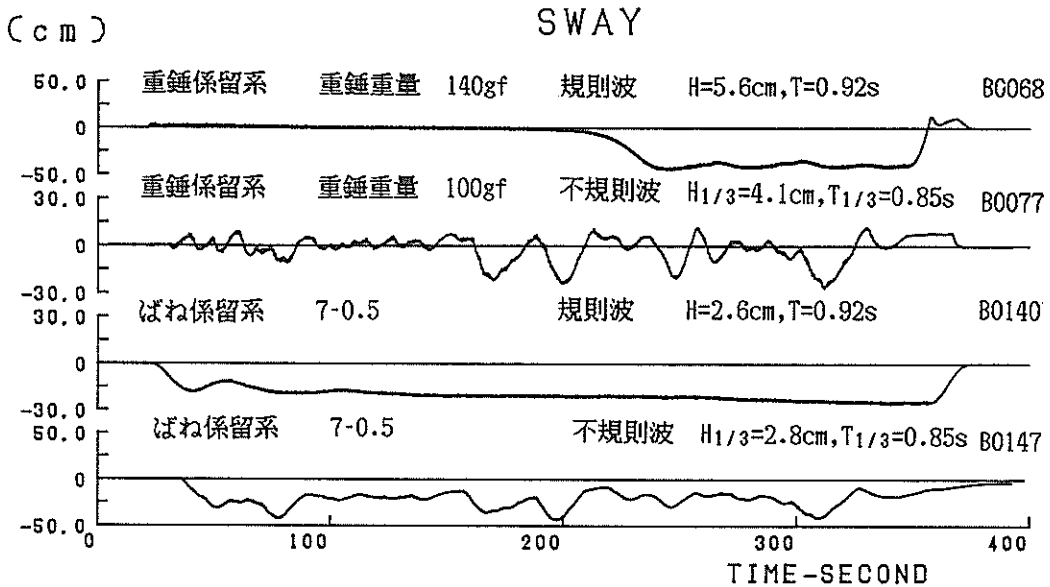


図-4 浮体の動揺の時刻歴(規則波中、不規則波中、重錘係留系、ばね係留系)

の場合にも規則波中の場合とは異って、浮体は20s前後の周期で動揺をしているが、これは波周期の20倍前後の長い周期である。

不規則波中における重錘係留系とばね係留系の動揺の時刻歴にはやや相違点が見られる。すなわち、重錘係留系においては波漂流力が重錘の重量を超えたときに初めて浮体が動揺を始めるのに対し、ばね係留系では波が作用すると同時に浮体が動揺を始める。図-6は二つの係留系の力の作用状況の相違を模式的に示したものである。ばね係留系においては浮体は波漂流力に等しいばね張力に対応する変位をするが、重錘係留系の場合においては、 $\{(波漂流力) - (重錘の重量)\}$ の正負によって浮体の動揺が決まる。このことは、重錘係留系においては、重錘の重量が波漂流力より大きく、かつ、重錘を係留するワイヤ索などの係留索の変位復元力特性が十分に硬ければ、波漂流力による長周期動揺が生じないことを意味する。ただし、係留索の変位復元力特性の程度によっては、波強制力による一次オーダーの動揺が生じることがある。

図-7a)およびb)は有義波周期がそれぞれおよそ0.85sおよび1.25sの不規則波中の浮体の動揺の時刻歴を、重錘係留系およびばね係留系について比較して示したものである。図中、ばね係留系については種々のばね定数のばねを用いた場合の結果を比較して示している。図-7a)においては、ばね係留系の変位復元力特性は図の上から下に順に柔らかくなっている。

これらの、実験ケースにおける浮体の動揺の性質を詳細に検討するために、図-7に示した不規則波中の浮体の動揺の時刻歴のうち5例について、図-8~12に示すように係留浮体の動揺の周波数スペクトルを、波の周波数スペクトルと対比して求めた。ただし、波高は実験ケースごとに異なっている。図-8~12において縦軸はフーリエ級数の係数の二乗値を有義波高の二乗で除したものである。なお、図-8~12には、のちに示す動揺計算結果から求めた周波数スペクトルも併記している。動揺の周波数スペクトルには長周期領域に大きなピークがあって、波の周波数スペクトルと性質が異なっていることがわかる。また、後述するように、この計算値は、減衰係数として有義波周期に対する造波減衰係数の値を用いているが、計算値の周波数スペクトルの長周期成分に対する値は、実験値のそれより小さいことがわかる。この点についてはのちに検討する。

さて、図-6の動揺の模式図と図-7の動揺の時刻歴とから、波漂流力の作用による浮体の動揺特性に影響を及ぼす要因は、波周期と浮体の形状(すなわち、波漂流

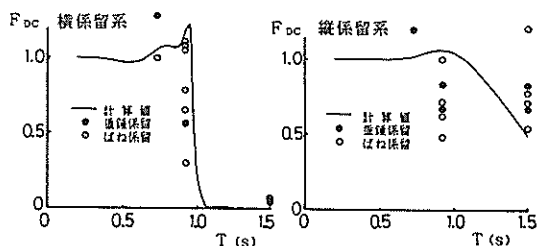


図-5 波漂流力係数の実験値と計算値との比較

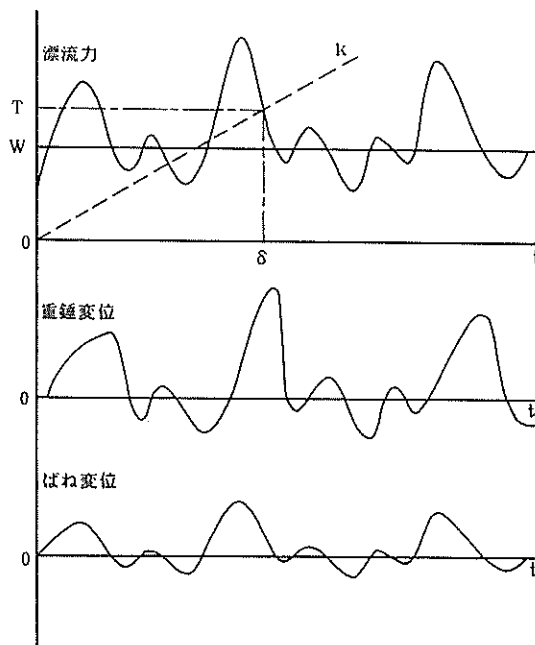


図-6 重錘係留系とばね係留系の動揺の模式図

力係数はこれらの要因によって一義的に決まる), およびこれに加えて、重錘係留系では重錘係留系の重量と波高, また、ばね係留系ではばね定数および波高であることがわかる。ただし、ここで用いたばねがかなり柔らかいので、ばね定数が動揺に及ぼす影響はほとんどない。しかし、ばね定数がこの実験で用いたものの数十倍にもなるとその影響が一次オーダーの波強制力に対する動揺に現れてくる。この点については、のちに計算を行って検討する。

なお、このほかに浮体の動揺に伴う造波減衰係数が浮体の長周期動揺の特性に大きな影響を及ぼすことがのちに計算を行った結果明らかになっている。

ばね係留系においては係留系のばね定数を変えて、実験を行っている。ただし、ここで用いたコイルスプリングは先に述べたように非線形形であるので、波漂流力が小さい場合には係留ばねの非線形性の影響が大きいものと

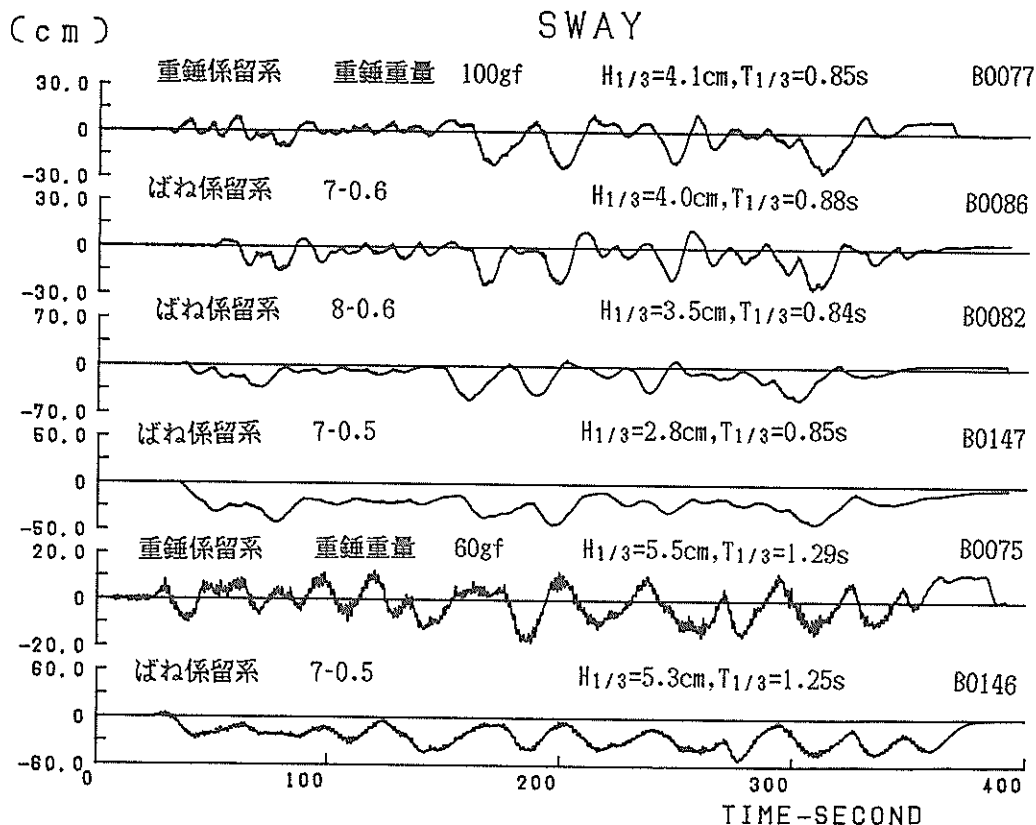


図-7 不規則波中の浮体の動揺の時刻歴 (重錘係留系, ばね係留系,  $T_{1/3}=0.85\text{s}$ ,  $1.25\text{s}$ )

考えられるので, そのような条件のものについてはのちに行う解析に当たって注意した。

#### 4. 動揺計算および実験値との比較

##### 4.1 動揺計算の方法

すでに述べたように, 規則波中の浮体は波漂流力の作用を受けて漂流するが, ばね係留系の実験結果から判断して, 規則波中においては波漂流力はほぼ一定と考えられる。したがって, Hsu<sup>18)</sup>の仮定が適用できるので 不規則波中においては, ゼロアップクロス法で求めた個々の波を単一の規則波とみなし, 不規則波をこれらの規則波の連なりと考え, 個々の波が浮体に作用している間は一定の波漂流力が作用するものと考えて不規則波中の変動波漂流力を算定することとした。Hsuはゼロアップクロス法で求めた個々の波を半波長ごとに単一の規則波とみなしたが, 丸尾<sup>5)</sup>の理論に従えば, 一波長の波を単一の規則波に置き換えるのが妥当であると考えられる。この変動波漂流力の時刻歴をあらかじめ計算しておいて, すでに港湾技術研究所において開発した係留浮体の動揺の数

値シミュレーション手法<sup>32)</sup>の運動方程式の数値積分の各ステップに強制力として与えた。個々の波に対する波漂流力は, まず, 伊藤<sup>31)</sup>による矩形断面浮体の動揺に関する近似理論によって波の透過率を求め, この値を丸尾<sup>5)</sup>の理論の漂流力係数に代入して計算した。その場合, ここで検討の対象とする係留系のばね定数は, 係留系の固有周期が20~30sとなるような, かなり柔らかいものであるから, 波の透過率は自由浮体に対して計算しても, ばね係留系として計算した結果とほとんど変わらない。

自由浮体に対する波の透過率を $K_T$ とすれば, 丸尾の波漂流力の式に代入して, 式(1)を得る。

$$F_D = 0.5 \rho g a_i (1 - K_T^2) \times (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) L \quad (1)$$

ここに,  $F_D$ : 波漂流力 (kgf),  $\rho$ : 海水の密度 ( $= 105.1 \text{ kgfs}^2/\text{m}^4$ ),  $g$ : 重力の加速度 ( $= 9.8 \text{ m/s}^2$ ),  $a_i$ : 入射波の振幅,  $K_T$ : 波の透過率,  $k$ : 波数 ( $= 2\pi/\lambda$ ),  $h$ : 水深 (m),  $L$ : 浮体の長さ (m) である。

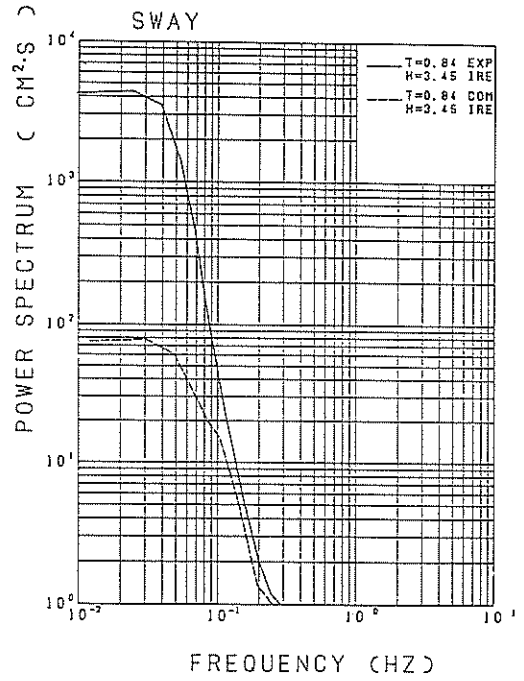
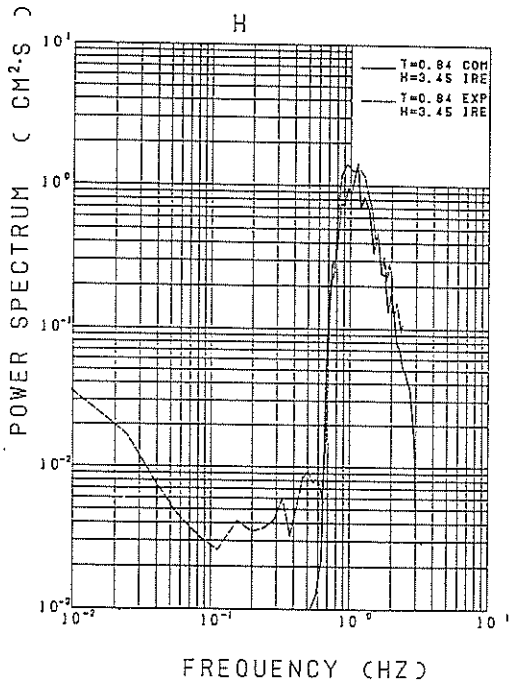


図-8 係留浮体の動揺の周波数スペクトル (B0082)

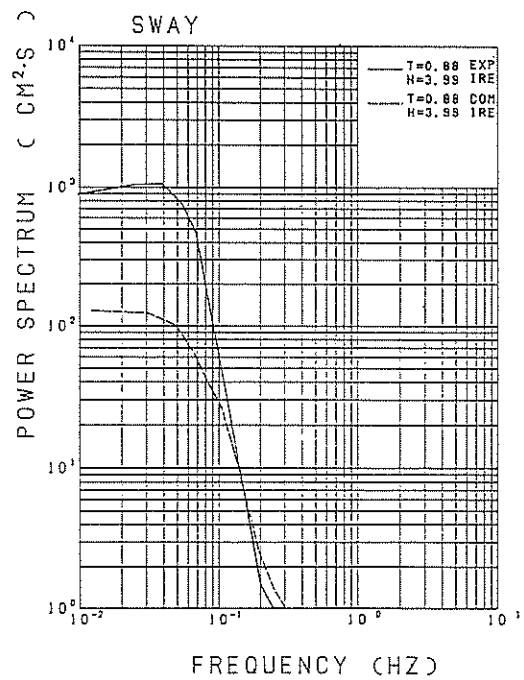
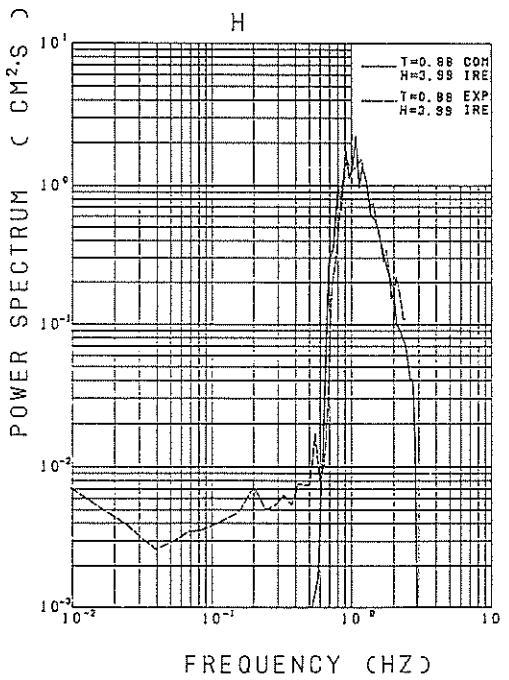


図-9 係留浮体の動揺の周波数スペクトル (B0086)

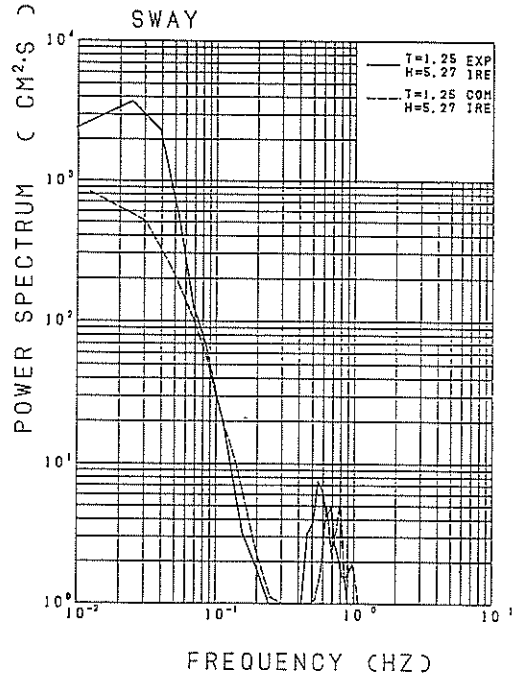
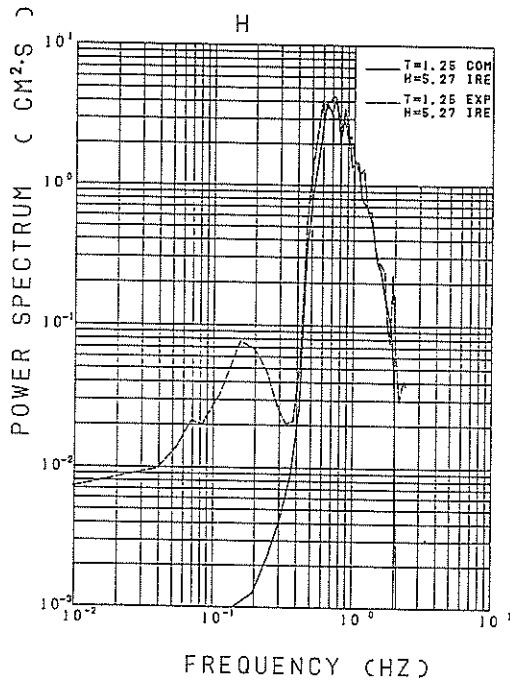


図-10 係留浮体の動揺の周波数スペクトル (B0146)

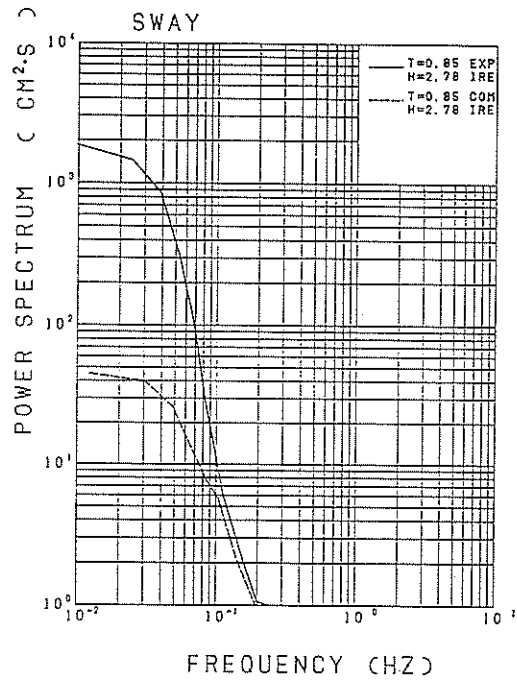
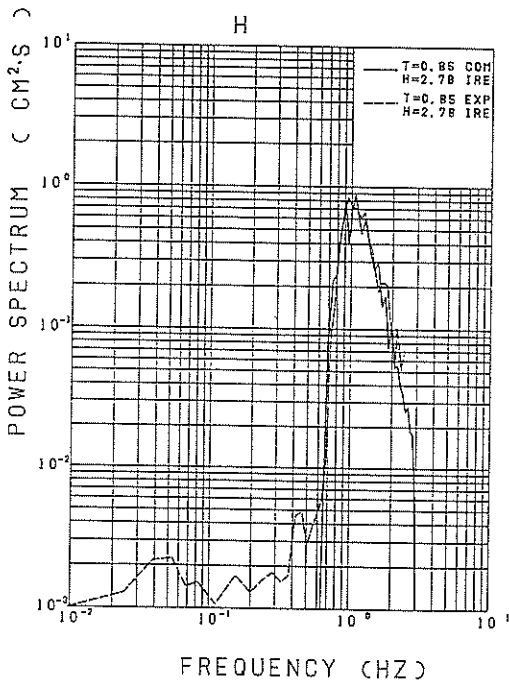


図-11 係留浮体の動揺の周波数スペクトル (B0147)

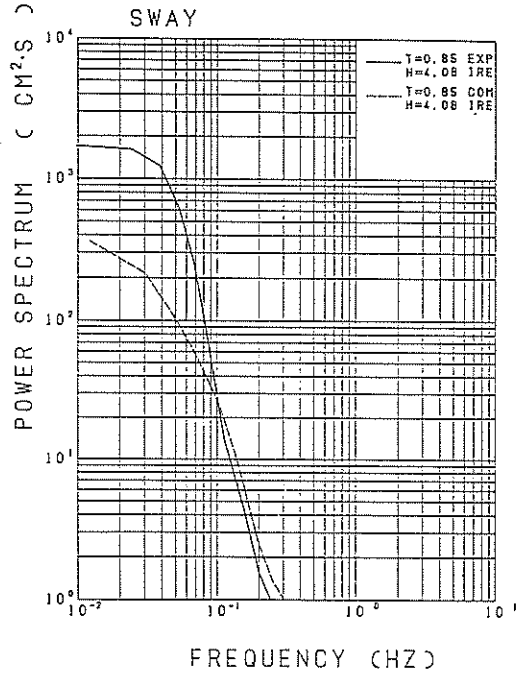
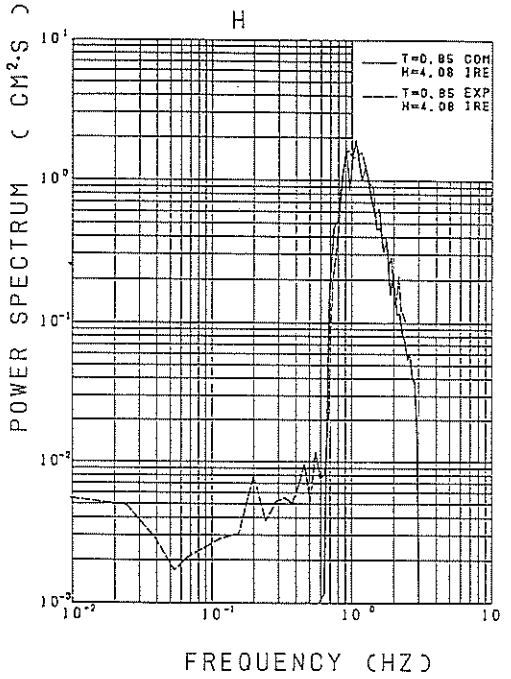


図-12 係留浮体の動揺の周波数スペクトル (B0077)

いま、不規則波の時系列が図-13 a) に示すように与えられたとすると、ゼロアップクロス法で求めた個々の波を単一の規則波として、その波が浮体に作用する間は、一定の波漂流力が作用するのであるから、波漂流力の時系列は図-13 b) に示すように階段状に不連続に与えられることになる。

隣り合う波の間の波漂流力の差はさほど大きくはないが、数値シミュレーションを行うに当たって、このような不連続な荷重作用があると不連続点において波漂流力の差に起因する自由振動の影響を残すことになるので、ゼロアップクロス点において波漂流力が滑らかに変化するように、式 (2) の漸化式を導入した。

$$g(t) = \exp(1 - \alpha t) \quad (2)$$

式 (2) において  $\alpha$  は当該規則波の  $1/4$  の波長に相当するタイムステップで式 (2) が  $1.0$  に漸近するよう自動的に設定するようにした。

図-13 c) は当該規則波の  $1/2$  波長の時刻における波漂流力の値を包絡して描いた波漂流力の模式図である。波漂流力は有義波周期の数倍の周期で緩やかに変動する。

すでに、2. で波漂流力に対しては係留系をむやみに柔らかくすることはかえって大きな動揺を招き、必ずしも良い結果を与えないことが Hsu<sup>18)</sup> らによって指摘され

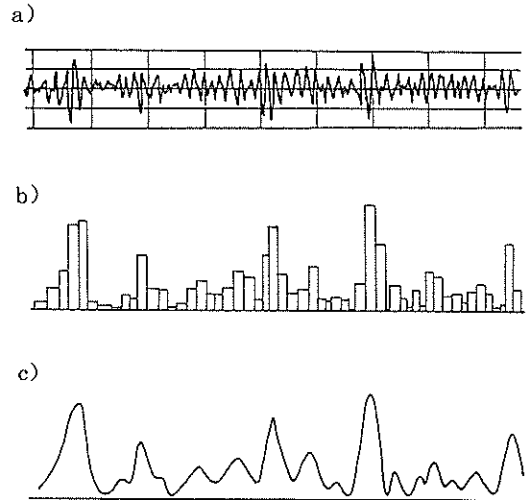


図-13 不規則波中の変動波漂流力の模式図

ていると述べた。本実験における結果からも、この指摘が適切であり、また、係留系の設計において十分に留意しておかなければならない事項であることがわかる。すなわち、係留浮体が非常に柔らかい係留系に係留されているとすると、わずかな波漂流力が作用したとしても浮体は漂流し続けるはずである。波漂流力が変化しないも

のとすれば、波漂流力に等しい係留系の復元力に対応する移動をして停止する。このとき、浮体が定常力の作用によって漂流するときに慣性力を持つので、平衡点付近で若干の振動をする。しかし、波漂流力が変化するときには、浮体の質量、係留系の変位復元力特性 および波漂流力の大きさと変動周期を要因として、係留浮体は複雑な動揺をすることになる。このことは、筆者らが行った重錘係留系の実験結果をみると一層明りょうである。

#### 4.2 実験値と計算値との比較

##### (1) 概要

以下に実験結果と計算結果とを比較して検討を行う。ただし、先に述べたように、縦係留系については $L/B=0.25$ であるために、二次元理論に基づく規則波中における波漂流力係数の実験値が計算値とかなり相違していたので、ここでは横係留系についてのみ実験結果と計算結果とを比較することにする。また、規則波中の計算結果は上の仮定から実験結果と一致することが明らかであるので省略する。

ここでは、上記の仮定によって計算した変動波漂流力を与え、また同時に一次の波強制力が浮体に作用するものとして、上記の浮体の動揺の数値シミュレーション手法を用いて浮体の動揺を計算した。その結果、運動方程式の中の減衰係数が浮体の長周期動揺に及ぼす影響が非常に大きいことがわかったので、のちに減衰係数を変更して計算を行い動揺計算に用いる減衰係数について検討した。また、ばね定数を変えて計算を行い浮体の動揺に及ぼす係留系のばね定数の影響を調べた。ここでは、まず、不規則波中の浮体の動揺による造波減衰係数として有義波周期を周期とし有義波高を波高とする規則波に対する計算値を用いて動揺計算を行った結果を示す。なお、計算結果の一覧を表-2および表-4に示すので、以下の図-14~24の説明において参照されたい。これらの表において、振幅および周期は、記録の最初から30%までおよび80%から最後までを棄却し、残りをゼロアップクロス法によって処理して求めた値である。

##### (2) 動揺に及ぼす減衰係数の影響

図-14は上記の条件で計算した浮体の動揺量の時刻歴と実験のそれとを比較して示したものである。これらを比較すると、動揺量および動揺周期のいずれについても計算値が実験値に比べてかなり小さいことがわかる。

この原因を検討した結果、浮体の動揺の運動方程式の中の減衰係数が実験における値よりもかなり大きいことがわかった。すなわち、図-14に示した動揺計算においては造波減衰係数として有義波周期に対する値を用いるが、実際に浮体は一次の波強制力に対してはほとんど動

揺せず、むしろ、この周期の20倍もの周期の動揺をしているわけであるから、有義波周期に対する造波減衰係数を用いるのは必ずしも適当とはいえない。図-15は領域分割法<sup>32)</sup>によって求めた造波減衰係数を示したものである。たとえば、周期1.0sと3.0sに対する造波減衰係数を比較すると、後者は前者の約15分の1である。

斎藤ら<sup>29)</sup>は静水中および規則波中において、長さ約1.5m、半径0.16mの半円形断面を有する浮体の自由振動実験および強制動揺実験を行って、波浪中においては抵抗増加があるために、長周期動揺に対する減衰係数は静水中のそれに比べて大きいことを指摘している。また、Wichers<sup>27)</sup>説および加藤・木下<sup>28)</sup>説に基づいて減衰係数を計算している。ただし、実験値は $\lambda/B$  ( $\lambda$ =波長/浮体幅)との相関があり、かつ、ばらつきがあって、0.25~1.0kgfs/mの範囲にある。斎藤らが用いた浮体は半円形断面のもので本論文で用いた、く(矩)形断面浮体とは異なるが、喫水と長さはほぼ同一である。

以上のことを考えると、浮体の動揺周期に対する造波減衰係数に波浪中の抵抗増加による減衰係数を加えた値を減衰係数として用いるのが適当と考えられる。そこで、実験値と計算値とが良い対応を示すときの減衰係数の値を、動揺両振幅の1/3最大平均値を指標として調べることとし、B0082, B0086, B0146, B0147, B0077について、造波減衰係数の値を有義波周期に対して求めた値の1/3および1/5として動揺計算を行った。その結果は表-2および図-16に示すとおりであるが、有義波周期が約0.85sの場合には、造波減衰係数をこの周期に対する値の1/3または1/5としてもなおかつ実験値が計算値より大きく、また動揺周期についても実験値が計算値より大きく、しかも周期特性が異なっている。しかし、有義波周期が約1.25sの場合には、同じく1/3とした場合の計算値は実験値とよく合っている。造波減衰係数の値そのものは、有義波周期約0.85sに対しては9.47kgfs/mであるのに対し、同じく約1.25sに対しては5.04kgfs/mであるから、これらの値の1/3および1/5はそれぞれ3.13~1.89kgfs/mまたは1.66~1.01kgfs/mになる。表-2において、ケースB0077は重錘係留系の実験結果であるが、この場合には減衰係数として有義波周期に対する値を用いた場合の計算値は実験値とよく一致しているが、減衰係数を小さくして計算した結果は実験値に比べてかなり大きくなる。このような結果は後述するケースでもみられるが、重錘係留系およびばね係留系であってばねの初期変位に対する張力増加の勾配が大きい係留系の場合には減衰係数を上記に従って低減しても良い結果が得られない。したがって、上記の減衰係数に対

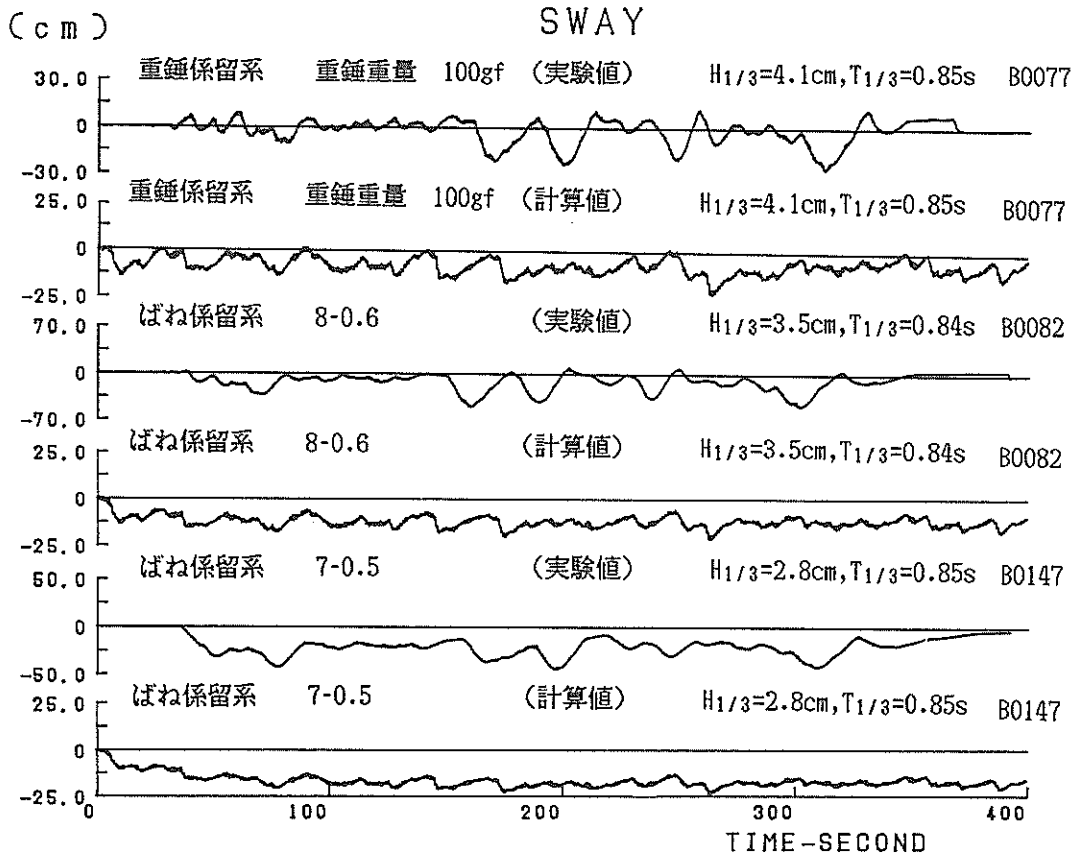


図-14 実験結果と計算結果との比較 (動揺量の時刻歴)

する考察は、ばねの変位復元力特性が十分に軟らかくかつ比較的線形性が確保されている場合、または、張力が変形に対して漸増する場合などに適用することができるものとする。

つぎに、B0146 (7-0.5,  $T_{1/3} = 1.25s$ ,  $H_{1/3} = 5.25cm$ ) およびB0147 (7-0.5,  $T_{1/3} = 0.85s$ ,  $H_{1/3} = 2.78cm$ ) の実験ケースに対し、減衰係数を0.7~2.5kgf/s/mの間で変化させて動揺計算を行った。その結果は表-3および図-17 a) d) に示すとおりである。表-3には単に動揺の最大値と最小値を示している、有義値は計算していない。いずれの場合にも、減衰係数がおよそ1.2kgfs/m以下の値に対しては動揺量が大きく、しかも、B0147の場合には、減衰係数として1.2kgfs/m以上の値を用いたときの数倍以上の動揺量となる。これらのケースについて計算値と実験値とを比較してみると、有義波周期1.25sの場合には動揺周期の最大値と最小値は減衰係数が1.2kgfs/m程度あればほぼ一致するといえる。

表-2のスウェイングの動揺の実験値と計算値とを比

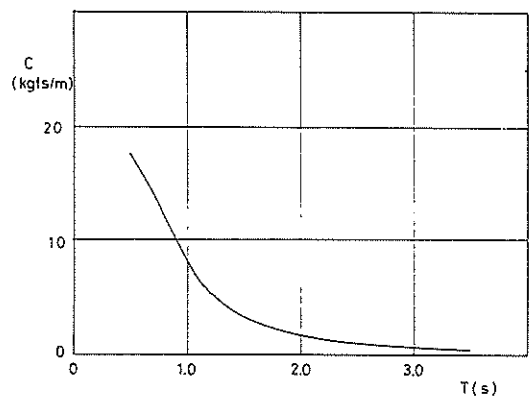


図-15 造波減衰係数 (領域分割法)

較すると、減衰係数を小さくした場合、両者の有義波周期がほぼ等しくなっていることがわかる。図-18 a) b) c) は、それぞれ、B0146, B0147, B0077に対して減衰係数を変えて ( $C=0.33$ ,  $C=0.20$ などと記述してい



表-2 実験結果および計算結果

ケース 番号	スプリング	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)		スウエイング									ばね張 力最大 (gf)	減衰 係数 (kgfs/m)
					動揺量 (cm)			振幅 (cm)			周期 (s)				
					最大	最小	平均	最大	$A_{s1/3}$	平均	最大	$T_{1/3}$	平均		
B0082	8-0.6	3.45 3.29 " "	0.84 0.29 " "	実験値 計算値 " "	49.64	-9.79	14.92	45.88	45.88	40.28	46.73	46.73	34.94	186	—
					21.18	5.66	12.30	9.16	4.95	2.76	13.19	8.98	4.12	95	9.47
					29.53	0.14	12.77	26.91	18.64	8.96	32.08	24.25	11.32	111	3.13
					37.02	-4.30	13.66	38.65	29.92	16.22	29.29	22.41	14.95	131	1.89
B0086	7-0.6	3.99 3.80 " "	0.88 0.92 " "	実験値 計算値 " "	25.38	-12.08	5.02	27.10	24.77	16.03	30.55	27.63	16.75	230	—
					17.88	-1.34	5.64	12.24	6.40	3.31	20.74	10.08	4.03	133	9.47
					28.66	-5.11	7.61	29.77	19.63	9.25	27.71	19.81	8.93	175	3.13
					40.94	-11.94	8.60	37.37	30.79	16.58	18.72	14.77	11.94	205	1.89
B0146	7-0.5	5.27 5.02 " "	1.25 1.25 " "	実験値 計算値 " "	52.14	2.23	25.71	36.38	35.31	17.31	38.33	36.49	16.63	101	—
					48.62	17.73	30.58	14.61	9.31	5.16	17.19	10.54	4.31	87	5.04
					56.88	6.85	31.12	39.37	28.86	12.47	32.18	23.82	10.13	98	1.66
					63.00	-2.02	31.60	65.93	57.37	28.53	27.63	34.11	18.68	107	1.01
B0147	7-0.5	2.78 2.65 " "	0.85 0.92 " "	実験値 計算値 " "	43.24	8.07	22.66	24.06	24.06	15.45	21.92	21.92	22.67	98	—
					23.78	12.94	17.91	5.86	2.92	1.71	13.02	7.03	3.15	53	9.47
					31.30	7.14	17.95	18.18	10.81	4.58	32.33	19.71	8.11	63	3.13
					36.21	4.15	18.13	27.31	21.67	10.26	32.34	25.84	14.98	69	1.89
B0077	100gf	4.08 3.89 " "	0.85 0.92 " "	実験値 計算値 " "	26.36	-11.79	3.47	30.73	30.65	14.27	45.39	35.54	13.13	—	—
					22.06	-1.43	7.83	14.42	7.58	3.88	23.88	12.95	5.19	—	9.47
					59.89	-4.36	22.49	37.41	24.63	9.92	45.82	27.70	10.56	—	3.18
					92.52	-7.30	40.33	61.72	58.66	25.23	51.23	46.46	21.88	—	1.89

表-3 計算結果 (減衰係数変化)

	減衰 係数 (kgfs/m)	B0147 7-0.5 $H_{1/3}=2.78\text{cm}$ $T_{1/3}=0.85\text{s}$			B0146 7-0.5 $H_{1/3}=5.27\text{cm}$ $T_{1/3}=1.25\text{s}$		
		スウエイング (cm)			スウエイング (cm)		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
実験値	—	43.24	8.07	22.66	52.14	2.23	25.71
計算値	0.7	57.27	-16.13	20.16	72.47	-11.46	32.16
	0.8	54.34	-12.15	20.01	69.11	-7.67	31.93
	0.9	51.54	-9.42	19.76	66.27	-4.71	31.68
	1.0	48.98	-7.25	19.50	64.03	-3.94	31.49
	1.1	46.43	-5.47	19.28	62.27	-3.86	31.33
	1.2	44.13	-4.09	19.09	60.81	-3.79	31.19
	1.3	42.32	-2.86	18.93	59.56	-3.72	31.09
	1.4	40.83	-1.87	18.79	58.47	-3.65	31.00
	1.5	39.50	-1.02	18.67	57.50	-3.59	30.92
	1.6	38.33	-0.29	18.57	57.04	-3.52	30.85
	1.7	37.38	0.41	18.48	56.75	-3.46	30.79
	1.8	36.77	1.09	18.40	56.44	-3.40	30.72
	1.9	36.19	1.49	18.34	56.11	-3.35	30.67
	2.0	35.66	1.47	18.28	55.77	-3.30	30.61
	2.1	35.16	1.45	18.23	55.41	-3.24	30.55
	2.2	34.69	1.44	18.19	55.04	-3.19	30.49
	2.3	34.24	1.42	18.15	54.73	-3.15	30.44
	2.4	33.82	1.41	18.11	54.62	-3.10	30.38
	2.5	33.42	1.39	18.08	54.48	-3.06	30.33

る) 計算した結果から求めた動揺量の周波数スペクトルである。減衰係数の値を小さくして計算した周波数スペクトルは実験値の周波数スペクトルとよく一致している。

以上に示した減衰係数の値を、斎藤ら<sup>29)</sup>が求めた値と比較すると、1.0~1.2kgfs/m程度の値が適当であると考えられる。なお、斎藤らの実験で用いた浮体は半円形断面ではあるが、大きさが著者らの実験で用いた浮体とほぼ同じであるから、造波減衰係数としてはほぼ同程度の値を得たが、浮体の大きさおよび形状が異なる場合には、当然、造波減衰係数の値は異なることになるので、実験により確認する必要がある。

なお、浮体の長周期動揺に影響を及ぼす要因の一つに、造波減衰係数の他に付加質量があるが、図-19に示すように、付加質量は長周期波に対しては増加するもののその変化は大きくないので、動揺に及ぼす影響は造波減衰係数ほど大きくない。

さて、ここで、実験を行ったケースのうち有意な記録が得られているものについて、減衰係数を有義波周期に対する値および1.2kgfs/mとして計算を行い、実験値と比較して表-4に示す。これらを見ると、先に、図-3 a) b) で示した変位復元力特性の非線形性が強いばね係留系、すなわち、7-0.6, 6-0.6, 6-0.5, 5-0.5の全部、および、8-0.6の一部、ならびに重錘係留系のケースについては、有義波周期に対する造波減衰係数を用いた計

表-4 実験結果および計算結果

ケース 番号	スプリング	H <sub>1/2</sub> (cm)	T <sub>1/2</sub> (s)		ス ウ ェ イ ン グ									ばね張 力最大 (gf)	減衰 係数 (kgf/s/m)
					動 揺 量 (cm)			振 幅 (cm)			周 期 (s)				
					最 大	最 小	平 均	最 大	A <sub>1/2</sub>	平 均	最 大	T <sub>1/2</sub>	平 均		
B0074	150gf	7.55 7.10 "	1.29 1.21 "	実験値 計算値 "	34.87	-11.69	2.77	45.40	24.30	12.49	18.98	13.73	7.07	—	—
					42.76	-7.74	7.06	26.92	19.44	12.46	15.19	11.92	7.39	—	5.8
					99.61	-19.93	20.92	114.24	80.25	39.51	41.60	30.15	17.78	—	1.2
B0075	60gf	5.51 5.20 "	1.29 1.02 "	実験値 計算値 "	17.89	-11.98	2.81	25.34	18.84	9.51	40.44	21.00	10.68	—	—
					49.71	-2.94	22.28	17.36	15.97	9.36	40.77	29.29	13.20	—	7.8
					136.18	-3.96	67.04	47.49	43.21	16.36	75.83	56.83	19.46	—	1.2
B0077	100gf	4.08 3.90 "	0.85 0.85 "	実験値 計算値 "	26.36	-11.79	3.47	30.73	30.65	14.27	45.39	35.54	17.13	—	—
					22.13	-1.42	7.57	19.76	8.08	4.18	52.02	14.74	6.12	—	11.2
					131.63	-12.12	50.97	74.08	74.08	43.27	48.29	48.29	28.78	—	1.2
B0082	8-0.6	3.45 3.30 "	0.84 0.85 "	実験値 計算値 "	49.64	-9.79	14.92	45.88	45.88	40.28	46.73	46.73	34.94	176	—
					21.25	0.95	12.13	9.11	5.04	2.80	13.21	9.56	4.53	96	11.2
					51.42	-12.17	15.29	49.57	35.33	15.89	28.28	21.49	11.15	154	1.2
B0084	7-0.6	7.76 7.30 "	1.24 1.16 "	実験値 計算値 "	48.00	-10.79	11.19	38.32	31.25	16.24	28.52	18.67	9.79	355	—
					55.90	-3.68	19.68	25.46	21.40	12.19	12.37	13.10	6.50	254	6.3
					98.32	-30.24	23.26	100.74	96.81	61.91	21.79	24.11	19.59	383	1.2
B0085	7-0.6	6.28 6.00 "	0.84 0.79 "	実験値 計算値 "	52.12	-8.26	19.47	50.50	45.41	20.75	41.19	27.80	14.29	383	—
					82.87	2.46	56.37	32.91	18.64	6.39	20.40	15.74	6.58	334	12.4
					161.84	-52.00	58.92	199.17	176.99	96.10	20.28	23.37	19.86	626	1.2
B0086	7-0.6	3.99 3.80 "	0.88 0.85 "	実験値 計算値 "	25.38	-12.08	5.02	27.10	24.77	16.03	30.55	27.63	16.75	217	—
					17.92	-1.31	5.83	16.29	6.77	3.51	33.46	11.32	4.65	135	11.2
					49.37	-21.94	9.54	53.44	40.65	24.80	19.53	15.11	14.95	230	1.2
B0087	7-0.6	4.37 4.00 "	0.70 0.66 "	実験値 計算値 "	37.61	-12.06	5.75	43.62	23.19	11.33	14.68	9.89	5.37	557	—
					24.54	0.13	16.63	13.42	8.66	3.42	21.03	20.19	7.27	157	14.8
					73.40	-35.53	20.23	99.07	66.37	29.62	20.68	20.78	12.87	305	1.2
B0100	6-0.6	7.62 7.20 "	1.27 1.19 "	実験値 計算値 "	37.50	-12.14	5.62	43.60	23.21	11.32	14.68	9.89	5.37	599	—
					35.62	-8.06	4.91	31.76	18.46	10.26	23.46	9.24	5.25	320	6.0
					74.57	-66.06	3.98	92.19	66.18	35.80	23.72	17.91	10.45	553	1.2
B0101	6-0.6	5.95 5.60 "	0.87 0.82 "	実験値 計算値 "	29.22	-11.32	8.61	33.89	30.89	19.99	20.11	22.95	15.07	544	—
					36.64	0.01	16.73	25.67	21.80	11.46	27.10	22.26	11.19	328	11.7
					96.32	-40.20	18.80	113.34	97.88	65.21	13.62	15.99	18.12	661	1.2
B0110	6-0.5	7.18 5.80 "	2.16 1.81 "	実験値 計算値 "	51.50	-12.09	9.37	63.59	31.68	17.76	21.91	14.74	7.68	284	—
					175.45	-86.68	28.38	262.18	224.67	105.57	27.77	29.67	21.36	422	2.1
					184.28	-106.02	26.60	290.30	248.03	132.87	28.62	30.44	24.46	440	1.2
B0111	6-0.5	7.44 7.00 "	1.22 1.15 "	実験値 計算値 "	52.11	-6.38	23.90	43.04	36.38	19.56	29.18	24.11	12.18	285	—
					74.41	-3.29	36.74	34.06	26.76	12.57	25.52	19.50	7.53	216	6.4
					135.39	-25.97	40.82	109.94	97.49	59.15	23.80	23.80	18.26	342	1.2
B0112	6-0.5	5.62 5.30 "	1.18 1.09 "	実験値 計算値 "	29.35	-7.06	8.85	30.39	21.13	10.60	21.74	19.21	10.90	174	—
					37.45	-0.76	15.24	22.43	15.13	7.48	28.71	17.12	6.47	137	7.1
					75.99	-22.24	19.54	66.79	53.99	25.11	27.91	23.32	11.70	219	1.2
B0121	5-0.5	7.23 5.80 "	2.20 1.83 "	実験値 計算値 "	30.74	-12.42	1.95	43.13	21.98	13.90	13.89	8.20	4.99	332	—
					141.22	-139.82	1.23	281.05	195.19	68.59	29.57	29.21	13.99	551	2.0
					141.30	-151.85	-0.84	293.15	201.68	84.67	32.53	30.48	16.75	551	1.2
B0122	5-0.5	7.32 6.90 "	1.24 1.16 "	実験値 計算値 "	41.58	-10.35	9.56	43.72	25.09	12.14	19.91	17.46	8.12	375	—
					40.95	-5.58	8.20	32.19	22.38	11.78	23.33	16.95	7.38	251	6.3
					83.32	-43.18	10.71	103.43	73.65	36.38	24.43	17.19	12.25	381	1.2
B0123	5-0.5	5.57 5.20 "	1.24 1.16 "	実験値 計算値 "	17.76	-10.80	3.26	16.06	9.23	5.23	8.32	6.46	3.47	240	—
					17.78	-5.82	1.57	20.09	9.82	5.86	12.60	6.39	3.27	175	6.3
					43.22	-34.52	1.27	56.00	26.91	12.01	24.13	12.46	5.55	257	1.2

ケース番号	スプリング	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)		スウェーピング									ばね張力最大 (gD)	減衰係数 (kgfs/m)
					動揺量 (cm)			振幅 (cm)			周期 (s)				
					最大	最小	平均	最大	$A_{3/3}$	平均	最大	$T_{1/3}$	平均		
B0128	5-0.4	2.77 2.60 "	0.87 0.82 "	実験値	42.61	7.91	19.07	23.78	23.78	8.68	24.87	24.87	16.39	58	—
				計算値	25.28	0.59	18.80	5.12	3.71	2.04	13.01	14.15	5.85	53	11.7
				"	44.20	0.93	21.57	35.05	32.62	19.68	28.70	29.18	20.21	73	1.2
B0129	5-0.4	2.70 2.40 "	0.66 0.62 "	実験値	46.26	11.33	21.55	30.98	30.98	24.40	59.47	59.47	46.42	71	—
				計算値	24.63	0.43	19.18	4.90	1.93	1.02	19.12	9.92	3.96	52	15.6
				"	44.29	-1.65	23.09	30.94	30.94	26.80	50.07	50.07	35.77	73	1.2
B0134	8-0.6	7.13 5.80 "	2.15 1.79 "	実験値	47.02	-12.11	9.15	58.94	32.44	17.91	21.81	13.55	8.18	202	—
				計算値	176.01	-81.74	31.14	259.76	219.99	119.99	27.68	29.25	24.41	458	2.1
				"	185.13	-106.43	28.94	291.56	244.61	113.78	28.23	30.03	24.41	481	1.2
B0135	8-0.6	5.42 5.10 "	1.26 1.19 "	実験値	30.47	-5.13	10.15	30.67	23.26	11.97	20.74	26.39	13.80	133	—
				計算値	29.40	-2.65	11.04	13.95	9.35	5.83	12.48	9.08	4.24	106	5.8
				"	50.32	-12.06	13.68	48.55	38.31	21.49	22.21	24.51	13.58	151	1.2
B0146	7-0.5	5.27 5.00 "	1.25 1.18 "	実験値	52.14	2.23	25.71	36.38	35.31	17.31	38.33	36.49	16.63	98	—
				計算値	49.12	-2.50	29.31	14.97	9.59	5.18	15.40	10.57	4.31	87	5.9
				"	60.81	-3.79	31.19	49.61	34.51	15.52	33.39	22.46	10.21	103	1.2
B0147	7-0.5	2.78 2.70 "	0.85 0.85 "	実験値	43.24	8.07	22.66	24.06	24.06	15.45	21.92	21.92	22.67	104	—
				計算値	23.86	0.67	16.90	6.00	3.11	1.75	11.93	7.95	3.37	53	11.1
				"	44.13	-4.09	19.69	38.28	32.09	18.31	32.19	29.97	20.14	80	1.2
B0148	7-0.5	2.53 2.30 "	0.67 0.63 "	実験値	43.68	3.28	20.97	30.50	30.50	19.80	57.76	57.76	44.24	80	—
				計算値	19.88	0.59	15.69	2.73	1.64	0.89	10.69	9.21	3.74	48	15.4
				"	37.35	-1.09	18.28	31.98	29.01	12.60	19.77	25.56	16.37	71	1.2
B0149	7-0.5	2.51 2.20 "	0.61 0.58 "	実験値	47.34	13.01	24.76	34.34	34.34	18.04	73.03	73.03	40.43	93	—
				計算値	17.11	0.47	13.68	3.02	1.60	0.87	11.70	9.71	3.97	44	20.6
				"	35.20	-0.09	15.95	32.43	27.77	15.78	20.35	24.20	21.58	68	1.2

算値と実験値との対応が良いが、減衰係数を1.2kgfs/mとして行った計算結果は実験値よりかなり大きい。非対称性が強い係留系においてみられる長周期動揺はいわゆるサブハーモニックモーションであって、その動揺の有義周期は10~20sである。このような運動の場合には、有義波周期に対する造波減衰係数を用いて計算した結果が実験値とよく合っている。これに対し、7-0.5、5-0.4の全部、および、8-0.6の一部については、減衰係数を1.2kgfs/mとして行った計算結果と実験値との対応が良い。これらのケースにおいては、係留系の非対称性が弱いので、漂流力の変動に対する30~40sの長周期動揺が生じている。このような場合には、減衰係数を有義波周期に対する造波減衰係数に比較してそうとう小さな値をとる必要があることを意味し、計算値と実験値とを比較した結果、減衰係数として1.2kgfs/m程度の値を用いるのが妥当と考える。

以上述べたように、計算における減衰係数の値は係留系の特性を考慮して適切に選定しなければならないことが明らかになった。

### (3) 浮体の動揺と不規則波の性質との関係

ここでは、浮体の長周期動揺と不規則波の周期および

波高との関係について述べる。図-20は減衰係数を0.7、1.2、1.5、有義波高 $H_{1/3}=2.78$ cm、有義波周期 $T_{1/3}=0.7\sim 1.5$ として動揺計算を行った結果を示したものである。動揺量は波周期が長くなるに従って減少している。これは、長周期波に対しては波漂流力係数が小さいためである。また、減衰係数が動揺に及ぼす影響は、短周期波については大きい、長周期波に対してはほとんどない。

つぎに、図-21は同じくB0147に対して減衰係数を1.2kgfs/mとして波周期を1.25sおよび0.85sとして、有義波高を $H_{1/3}=1.0\sim 5.0$ cmの間で変化させて計算を行った結果を示している。図-22の縦軸は動揺量の最大値を波高の二乗で除したものである。波漂流力は波高の二乗に比例するので、この比は一定でなければならない。しかし、有義波周期 $T_{1/3}=0.85$ sの場合には有義波高 $H_{1/3}=1.0\sim 4.0$ cmの間でこの比が漸増し、その後一定になる。この原因はここで用いたばね係留系の非線形性であると考えられる。すなわち、有義波周期 $T_{1/3}=1.25$ sの場合には漂流力が小さいために動揺量が小さくこの波高の範囲では係留ばねの変位復元力特性の立上りの比較的硬い部分の領域の特性が発揮されているためである。有義波周期 $T_{1/3}=0.85$ sの場合には、漂流力が大きいので

(cm)

# SWAY

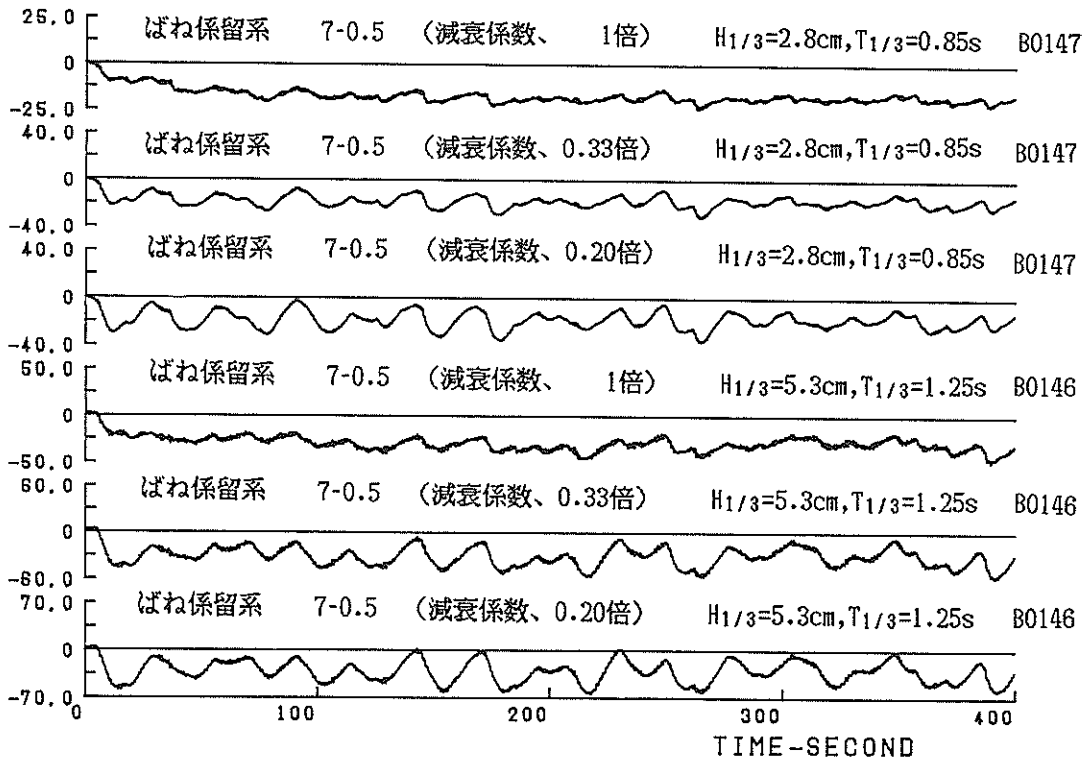


図-16 浮体の動揺の時刻歴 (減衰係数変化,  $T_{1/3}=0.85\text{s}$ ,  $T_{1/3}=1.25\text{s}$ )

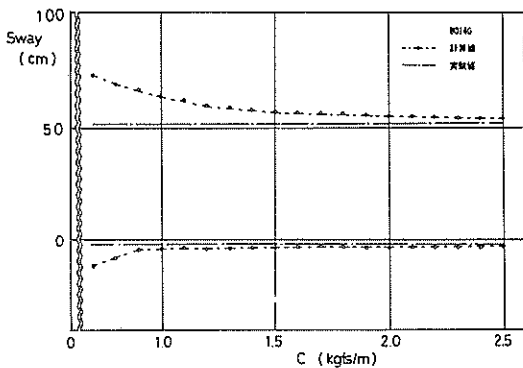


図-17 a) 実験結果と計算結果との比較  
(減衰係数変化) (B0146)

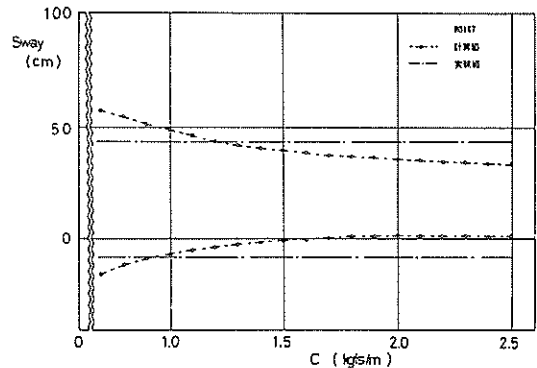


図-17 b) 実験結果と計算結果との比較  
(減衰係数変化) (B0147)

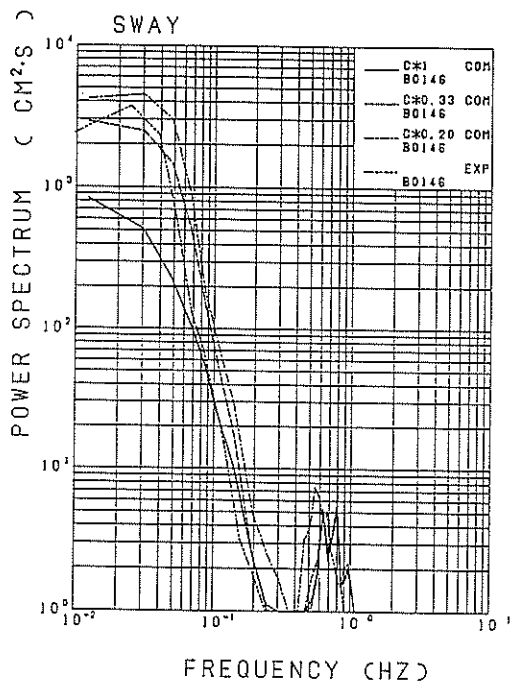


図-18 a) 浮体動揺の周波数スペクトル (B0146)

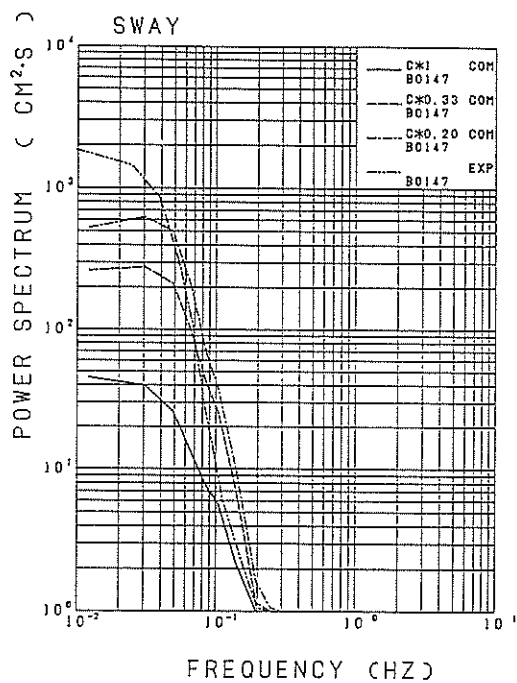


図-18 b) 浮体動揺の周波数スペクトル (B0147)

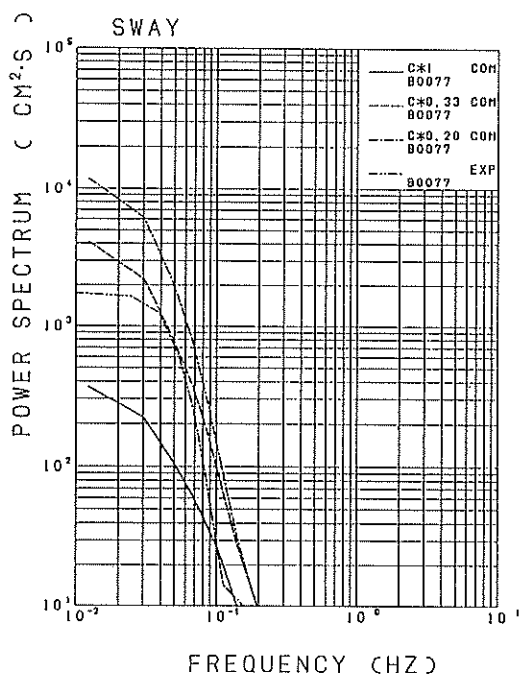


図-18 c) 浮体動揺の周波数スペクトル (B0077)

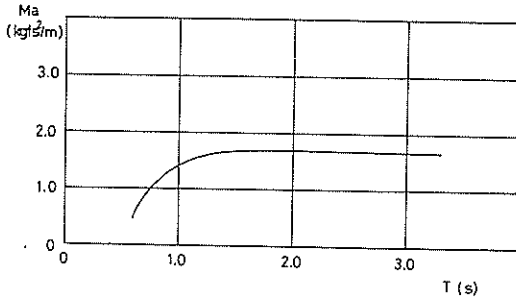


図-19 付加質量係数 (領域分割法)

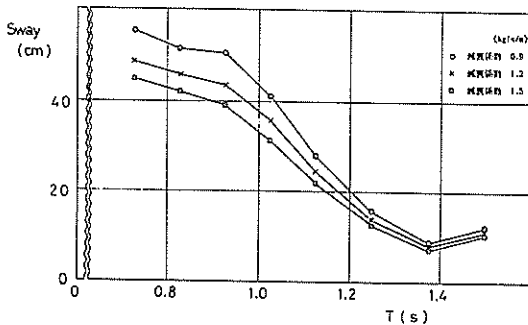


図-20 浮体の動揺計算結果 (周期依存性)

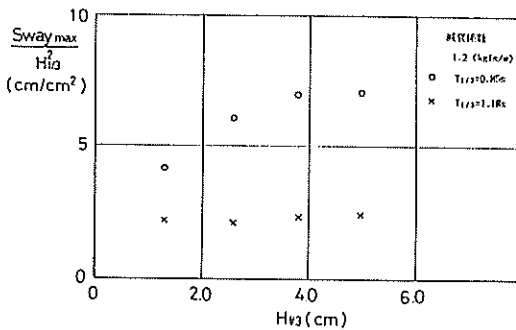


図-21 浮体の動揺計算結果 (波高依存性)

で、波高の増加とともに係留ばねの変位復元力特性の比較的柔らかい部分の領域の特性が発揮されているためと考える。

#### (4) 動揺に及ぼすばね定数の影響

つぎに、浮体の動揺に及ぼすばね定数の影響を調べた。ばね定数としては、浮体が一次の波強制力に同調しやすいようなものを選んだ。ただし、ここでの計算では減衰係数として有義波周期に対する値の1/3を用いている。

図-22はその結果得られた浮体の動揺の時刻歴を示したものである。ばね定数が大きくなると、漂流力による

浮体の動揺が消滅して、一次の波強制力に応答する動揺が卓越してくる。しかしながら 係留系のばね定数があまりに大きくなって、ここで用いた係留系が、浮体が実験開始前の位置を超えて波の進行方向とは反対の方向に動揺する場合には、係留系のばね定数が零であるので、いわゆるサブハーモニックモーションが生じる。図-23および24はこれらの計算結果の周波数スペクトルである。ばね定数を大きくした (SP \* 55, SP \* 3000などと記述している) 計算結果の周波数スペクトルにも長周期動揺成分の値が大きく現われているが、これはサブハーモニックモーションによるものである。以上のことから、長周期動揺を避けるためにある程度の硬さの係留系を用いることが効果的であることが推測される。

## 5. 結論

本研究の主要な成果は以下のとおりである。

- (1) 規則波中の浮体に作用する波漂流力は一定であり、波漂流力の計算に丸尾の理論を適用できる。
- (2) 重錘係留系の場合には重錘の重量が波漂流力より小さいときには浮体が漂流し続けるが、ばね係留系の場合には浮体は波漂流力に見合うだけ漂流してそこで停止している。ただし、いずれの場合も波強制力による浮体の一次オーダーの動揺量は波漂流力による動揺量に比べて著しく小さい。
- (3) 不規則波中においては、波高の増大に伴い浮体は波の進行方向に漂流し、波高の減少に伴って、重錘係留系では重錘の重量に見合う張力、また、ばね係留系ではコイルスプリングの張力によって、浮体は実験開始前の位置に戻される。しかし、波高が再び増大すると浮体は波の進行方向に漂流するので、浮体は実験開始前の位置を超えて波の進行方向と反対側に大きく移動することはない。これらのことから、波漂流力を各一波ごとに定常力とみなし、それらの波高および周期の変化に対応するように計算してよいと考える。

(4) ばね係留系においては、ばね定数を変えて種々の系に対して計算を行ったが、ある程度の硬さの係留系を用いることにより長周期動揺を避けることができることがわかった。

(5) 浮体が長周期動揺するときの減衰係数を、実験結果と減衰係数を変えて行った計算結果とを比較して推定したところ、この浮体に対しては、係留系の非対称性が弱いときは減衰係数の値として1.0~1.2kgf/m程度の値が適当であると考えた。しかし、係留系の非対称性が強いときには有義波周期に対する造波減衰係数の値を用いて計算するのが適当であると考えた。

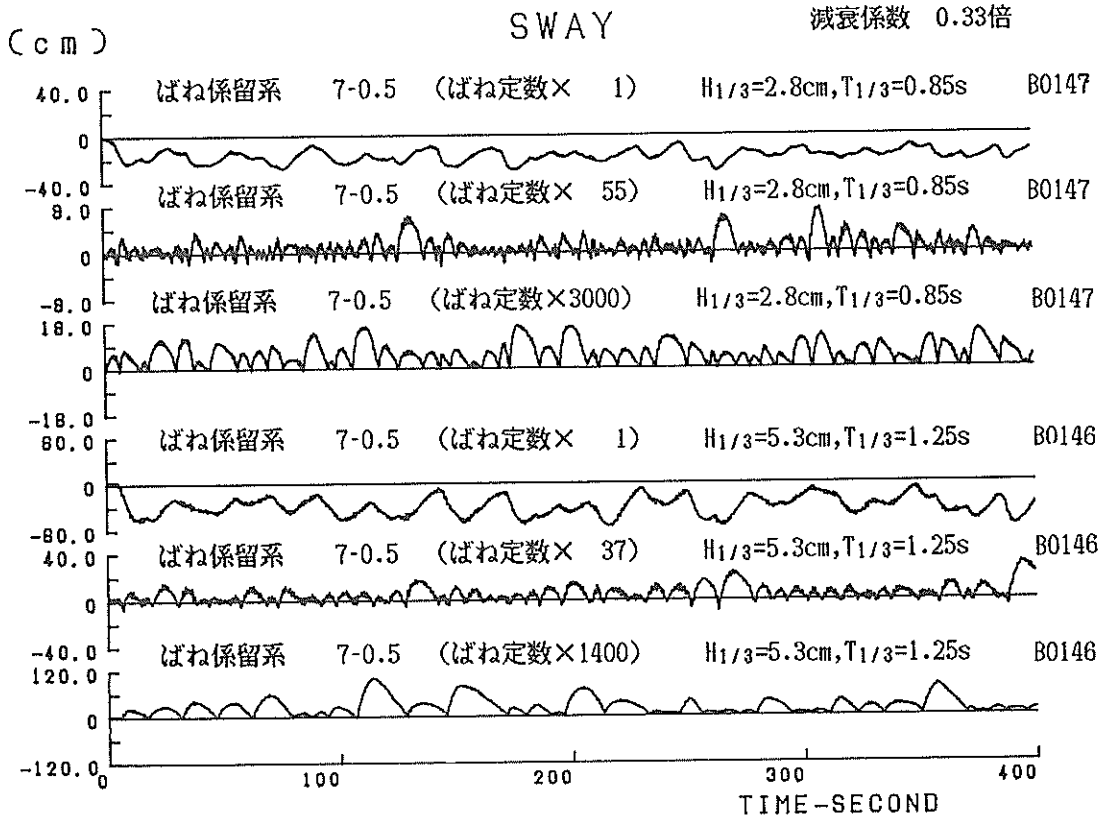


図-22 浮体の動揺の時刻歴 (ばね定数変化)

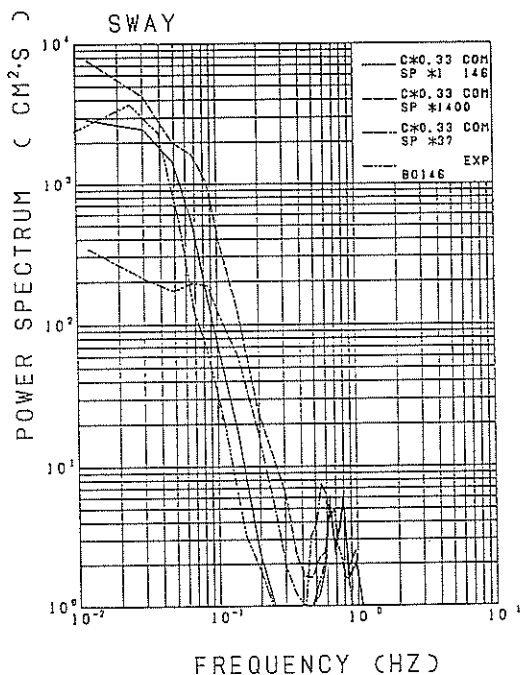


図-23 浮体の動揺の周波数スペクトル (B0146)

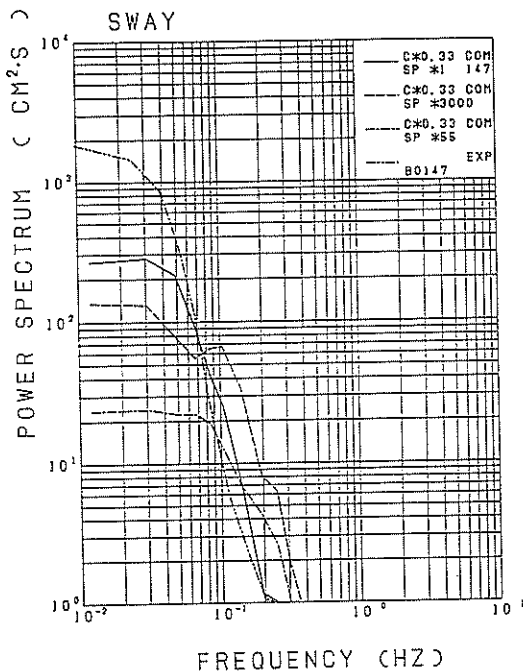


図-24 浮体の動揺の周波数スペクトル (B0147)

(6) 動揺計算結果は実験結果と良い対応を示した。

## 6. あとがき

弛緩係留系における浮体の長周期動揺の模型実験および数値計算を行った結果、不規則波中においては浮体が長周期動揺をすることを確認した。長周期動揺は変動波漂流力の作用によって引き起こされるが、係留系の変位復元力特性が変動波漂流力に対して十分に剛であれば、長周期動揺は生じない。また、浮体の長周期動揺計算に用いる造波減衰係数について、実験値と計算値とを比較検討して適切な値を求めることができた。今後、計算法の改善を行うとともに、長周期動揺する浮体の減衰係数について系統的な実験および解析を行う予定である。

(1987年6月30日受付)

## 謝辞

本研究を実施するに当たっては、運輸省第四港湾建設局から、浮防波堤の実証実験に係わる貴重なデータの提供を戴くとともに、模型実験に対しての協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

また、本研究における模型実験の、実験計画の策定、模型の製作、実験の実施およびデータ解析は小熊康文技官(現運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所)が担当したが、研究の途中で転勤されたため、以降は著者の一人が引き継いで行った。小熊技官の本研究に対する熱意と努力に対し、敬意と感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Suehiro, K. : On the Drift of Ships Caused by Rolling among Waves, *Trans. I.N.A.*, Vol.66, 1924.
- 2) Watanabe, Y. : Some Contributions to the Theory of Rolling, *Trans. INA*, Vol.80, 1938,
- 3) Havelock, T.H. : The Drifting Force on a Ship among Waves, *Philosophical Magazine*, Vol.33, 1942,
- 4) 花岡達郎 : 波浪中の船の運動と造波抵抗理論, 造船協会論文集, 第98号, 1965, pp.1~5.
- 5) Maruo, H. : The Drift of a Body Floating on Waves, *Journal of Ship Research*, Vol.4, No.3, 1960, pp.1~10.
- 6) 田才福造 : 規則波中の二次元物体に働く漂流力について, 関西造船会誌, 第152号, 1975, pp.69~77.
- 7) 野尻信弘, 村山敬一 : 規則波中の二次元物体に働く漂流力に関する研究, 西部造船会会報, 第51号, 1966, pp.131~143.
- 8) 安藤定雄 : 規則波中における漂流力について, 西部造船会会報, 第52号, 1967, pp.45~58.
- 9) 日本船用機器開発協会 : 大型浮遊構造物の調査事業報告書, 1976.
- 10) Faltinsen, O.M. and Michelsen, F.C. : Motions of Large Structures in Zero Froude Number, *International Symposium on the Dynamics of Marine Vhicles and Structures, in Waves*, 1974, pp.91~106.
- 11) Ogawa, A. : The Drifting Force and Moment on a Ship in Oblique Regular Waves, *I.S.P.*, Vol.14, No.149, 1967, pp.34~40.
- 12) 細田龍介 : 斜波中における船体抵抗増加に関する研究, 日本造船協会論文集, 第133号, 1975, pp.7~22.
- 13) Wilson, B.W. : Full Scale Observation of the Behavior of Moored Ships, *Proc. of Nato Advanced Study Institution on Analytical Treatment of Problems of Berthig and Mooring Ships*, July, 1965. pp.117~129.
- 14) Vanoni, V.A. and J.H.Carr : Harbour Surging, *Proc. of the 1st Conference on Coastal Engineering*, 1950, pp.60~68.
- 15) Keith, J.M. and E.J.Murphy : Harbour Study for San Nicholas Bay, Peru, *Proc. of ASCE, WW2*, May, 1970, pp.215~273.
- 16) 上田 茂ほか : 超大型タンカーの係留時動揺特性, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp.602~606.
- 17) 合田良実ほか : 波による係留船舶の運動および係留力に関する実験, 第24回海岸工学講演会論文集, 1977, pp.418~422.
- 18) Hsu F.H., and K.A.Blenkarn : Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas, *2nd OTC*, 1970, #1159, pp.I-135~I-146
- 19) Remery, G.F.M and A.J.Hermans : The Slow Drift Oscillation of Moored Object in Ramdom Seas *3rd OTC*, 1971, #1500, pp.II-829~II-838.
- 20) Zarnick, E.E. and Casarella M.J. : The Dynamics of a Ship Moored by a Cable System Under Sea State Excitation, *Institute of Ocean Science and Engineering School*



- of Engineering and Architecture, The Catholic University of America, Report 72-5, 1972.
- 21) Verhagen, J.H.G. and Slujs M.F. : The Low Frequency Drifting Force on a Floating Body in Waves, *I.S.P.*, Vol. 17, 1970.
- 22) Pinkstar, J.A. : Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures, *Publication No.650, Netherlands Ship Model Basin*, 1980, 204p.
- 23) Newman, J.N. : Second Order Slowly Varying Forces on Vessels in Irregular Waves, *International Symposium on the Dynamics of Marine Vhicles and Structures in Waves*, 1974.
- 24) Bowers, E.C. : Long Period Oscillations of Moored Ships Subject to Short Wave Seas, *The Royal Institution of Naval Architects, London*, No.113, 1971.
- 25) Rye, H. et al : On the Slow Drift Oscillations of Moored Structures, *7th OTC*, 1975, #2366, pp.299~310.
- 26) Seidl, L.H. and T.T.Lee : Correlation between Theoretical and Experimental Values of Motions of Ships Moored at a Sea Berth, *No. B-5005*, 1975, pp.619~627.
- 27) Wichers, J.E.W. : The Influence of Waves on the Low Frequency Hydrodynamic Coefficients of Moored Vessels. *11th OCT*, 1979, #3625, pp.2313~2324.
- 28) 加藤俊司, 木下 健 : 速度の自乗に比例する減衰を有する振動系の自由振動および強制振動の及ぼす外乱の影響, 第56回海洋工学委員会性能性分科会資料, OH 36-12 1983.
- 29) 斎藤公男ほか : 長周期動揺する係留浮体に働く減衰力について, 関西造船協会誌, 第195号, 1974, pp.51~59.
- 30) 大隈正登ほか : 浮防波堤の動揺特性と消波性能に関する現地実験, 第32回海岸工学講演会論文集, 1985, pp.520~524.
- 31) 伊藤喜行ほか : 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻第2号, 1972, pp.141~166.
- 32) 上田 茂ほか : 大型く(矩)形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻第3号, pp.105~143.
- 33) 井上義行 : 横波中における係留浮体の長周期運動(その2), 日本造船学会論文集, 第144号, pp.145~154.

記号表

$a_1$	: 入射波の振幅
$B$	: 浮体の幅
$C$	: 減衰係数
$F_D$	: 波漂流力
$g$	: 重力の加速度 (=9.8m/s <sup>2</sup> )
$H$	: 波高
$H_{1/3}$	: 有義波高
$h$	: 水深
$K_T$	: 自由浮体に対する波の透過率
$k$	: 波数 ( $2\pi/\lambda$ )
$L$	: 浮体の長さ
SP	: ばね定数
$T$	: 波周期
$T_{1/3}$	: 有義波周期
$W$	: 重錘の重量
$\alpha$	: 当該規則波の1/4の波長に対するタイムステップ
$\lambda$	: 波長
$\rho$	: 海水の密度 (=105.1kgfs <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )

港湾技研資料 No.597

1987・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 永保堂社 つばさ印刷センター

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