

表層型・表中層複合型浮魚礁の係留法

水産工学研究所 漁場施設研究室
高木儀昌・明田定満

1. はじめに

200海里時代における漁業生産の維持増大を目標に、新しい技術の開発として、浮魚礁研究が1978年より水産庁を中心に行われてきた。その後、水産工学研究所をはじめとして、マリノフォーラム21等において実用化にむけての研究が行われ、実海域での実証試験の結果を取り入れた概略の設計法がとりまとめられている。また、魚類の蟄集効果および漁獲効果についても、関係水産試験場等により明らかにされ、成果がとりまとめられつつある。このような情勢において、事業化の要請が益々強くなってきている。

しかしながら、マリノフォーラム21の実海域実験では、多くの浮魚礁モデルが流出し、2～3年の実験期間でも沖合いの海象条件の厳しい海域に定位させることの困難さを知ることができる。したがって、浮魚礁の耐用年数が決定され、これに対して設計が行われるわけであるが、耐用年数を満足できるか、また耐用年数後の処理はどうするのかといった問題に対して明確な回答は無く、事業化には不安材料が多々存在している状況である。

2. 研究目的

浮魚礁は、海底からロープ、ワイヤー、チェーン等の係留索によって位置を保持し、浮魚類の蟄集・滞留・誘導を目的に設置される浮き施設である。また浮魚礁は設置水深、礁体の形式により表層型、中層型および複合型に別られ、係留方法も中層型では緊張係留、表層型、複合型では弛緩係留となり、係留方法によって設計法も異なる。

従来から、パヤオといわれる簡易型の表・中層型浮魚礁については漁業者が漁具として利用しており、経験から耐久性においては中層型が有利であることが言われている。したがって、研究としても緊張係留された中層型についてのものが多く、表層型、表中層型についての研究はわずかである。しかしながら、流出し易い表層付近に設置される浮魚礁に要望が多く、早急の問題点の解決が求められている。

そこで、表層型、表中層型浮魚礁の波に対する応答、係留索に作用する張力

に関する水理実験および現地調査を行い、実際の設計に適用可能な設計法を確立することを目的とした。なお、研究期間や実験施設の関係から、係留浮体に作用する波力、波圧、および係留索に作用する張力に関する研究を中心に行った。

3. 係留法の選定

浮体式水産施設には、養殖用小割生簀、カキやホタテ貝等の垂下筏をはじめとして、浮消波堤、音響給餌ブイ、海域環境モニタリングブイ、などの多くの施設が使用されている。これらの施設の係留方法は、施設の重要度、使用用途、使い易さ、経済性等さまざまな理由によって、使い分けられている。

ここでは、現状使用されている水産施設の係留方法に関して実験を行い、波浪中における浮体の動揺量、係留索張力を比較することによって、浮魚礁に適合する係留方法を検討する。

3.1 実験概要

実験は、増養殖水理実験棟内の深水不規則波水槽（長さ100m, 幅1m, 水深2m）を用いて行った。供試模型は円柱（直径B:14cm, 長さL:90cm）を用いて、Fig. 1に示すような実験システムにより実験を行った。また、係留方法はFig. 2に示す4種類（緊張係留、弛緩係留、中間シンカー付き弛緩係留、中間浮子付き弛緩係留）を用い、初期係留索張力、中間シンカーの形状、中間浮子の位置等を変化させることによって9種類の係留系の実験となった。なお、この実験では、係留方式の違いによる浮体動揺、係留索張力の変化を検討することを主目的としたため、浮力体の形状（円柱）および喫水（ $d=14\text{cm}$ ）を一定とした。

実験に使用した波は規則波とし、周期は（ $T_w=1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.4, 2.6, 3.0, 3.4\text{sec}$ ）8ケース、波高は（ $H=3, 6\text{cm}$ ）2ケースとした。ただし、周期1.8, 2.2secでは、波高変化（ $H=3, 6, 9, 15, 20, 30\text{cm}$ ）を行った。また、定常外力として潮流力等が作用した場合を想定した実験も行った。なお、模型の縮尺は、1/25とした。

それぞれの実験において、模型の動揺は加速度計、係留索張力はリングゲージ、波高は容量式波高計を用いて計測した。

3.2 結果および考察

Fig. 3~Fig. 5は、波浪中における模型の上下方向加速度を示し、Fig. 6~Fig. 9は係留索に作用した変動張力の結果を示す。それぞれの結果の無次元化および記号の説明は、Table 1のとおりである。

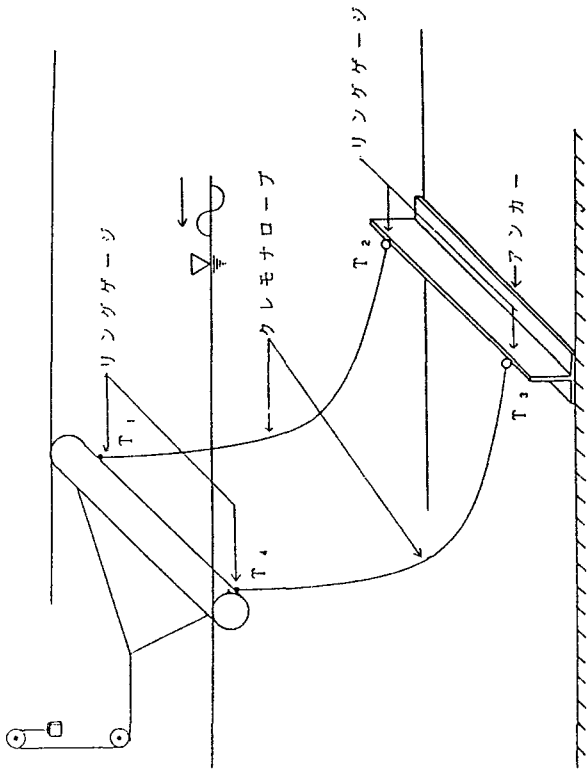


Fig. 1 浮魚礁の係留実験システム

Table 1 無次元化および記号

無次元表示
$A/2a; \omega^2$
$T/\rho g 2a; 8L$
λ/B
$2a; /B$

A : 加速度
 a_i : 入射波の振幅
 ω : 円周波数
 T_f : 変動張力
 ρ : 水の質量密度
 g : 重力加速度
 B : 円柱の直径
 L : 円柱の長さ
 λ : 波長

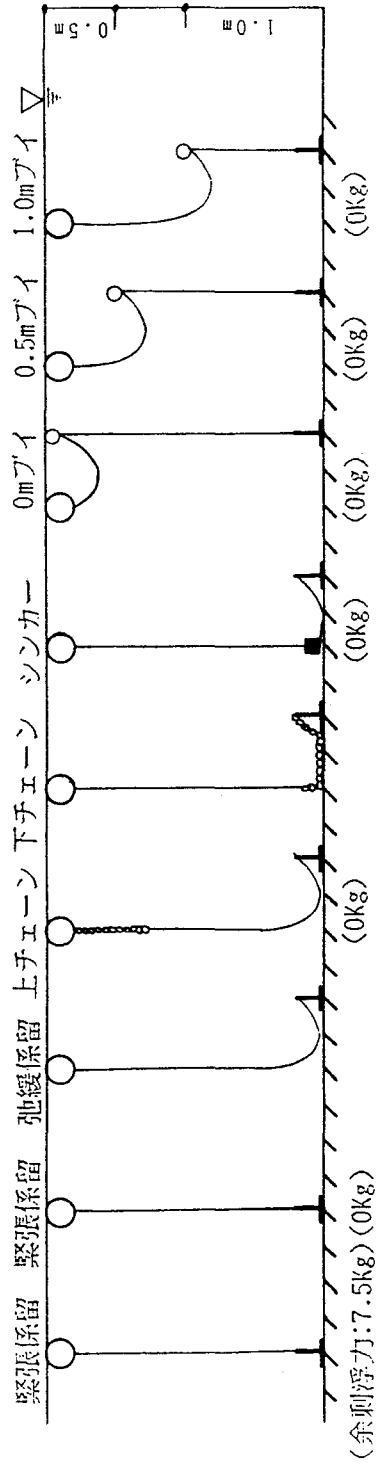


Fig. 2 実験に使用した各種係留方法

Fig. 3 から、定常外力が作用しない状態では、波長変化に対する上下方向の応答加速度量はほぼ一定で変化は少なく、係留方式の違いによつての差として緊張係留と弛緩係留の差が現れた。すなわち緊張係留方式の場合、弛緩係留に比べて応答加速度が大きく、同じ緊張係留方式でも余剰浮力の大小によつて応答量が異なることが判つた。


Fig. 4 は、定常外力が作用した場合についての上下方向加速度の応答量を示しており、係留方式は緊張係留方式を除くすべての係留方式の結果である。この結果より、水深の1.25倍の係留索長で単純に1本のクレモナロープで係留した弛緩係留（以下単純弛緩係留という、)を除き、潮流の影響は少なく、加速度応答量は波長変化に対してほぼ一定であつた。単純弛緩係留に関しては、波長が長くなるにしたがつて応答量が大きくなり、最大では中間シンカー付き係留等に比べて10倍程度大きな値となつた。

Fig. 5 は、周期1.8sec、定常外力無しにおける波高変化に対する加速度応答の結果を示している。この結果から波高変化に対する加速度応答はほぼ一定の値を示し、緊張係留方式と弛緩係留方式に差が見られ、緊張係留方式では弛緩係留方式の2倍から5倍の応答値であつた。

Fig. 6 は、定常外力が作用しない状態での波長変化に対する係留索張力の結果を示し、緊張係留方式と弛緩係留方式による結果を比較したグラフである。結果から、係留方式による差が明確となり、緊張係留は弛緩係留に比べて200倍から400倍の変動張力が作用した。

Fig. 7 は、定常外力が作用した状態における係留索張力の結果であり、弛緩係留方式のみの結果を比較したものである。この結果から、波長変化に対して単純弛緩係留、中間シンカー、および下チェーン方式に関しては、係留索に作用する変動張力が変化し、波長が長くなるにつれて大きくなる傾向を示した。

Fig. 8 は、定常外力が作用しない状態における波高変化に対する係留索張力の結果を示している。この結果より、緊張係留と係留索の中間にブイを入れる中間ブイ方式では、100倍以上の差が有り、中間ブイ係留以外の弛緩係留方式との比較においても20倍以上の係留索張力が作用した。また、中間ブイ方式以外の係留方式で作用した係留索張力は、波高変化に対してほぼ一定の値を示し、波高に比例して増加することが確認された。中間ブイ方式については、 $2a_i/B=1.0$ までは緩やかに低下し、以降波高が高くなるにしたがつて増加する結果となつた。

Fig. 9 は、定常外力が作用した状態における波高変化に対する係留索張力の結果を示しており、弛緩係留方式のみの比較を示した。結果より、単純弛緩方式および下チェーン方式に関しては、波高の増加に対して作用する係留索張力

は減少傾向にある。それ以外の係留方式に関しては、波高の増加に伴い緩やかな増加傾向を示した。結果として、小さな波高に対して、係留方式による作用索張力の差が100倍近くあったものが、大波高時には10倍程度まで差が縮小することが確認できた。

3.3 まとめ

以上の実験結果から、係留方式および定常外力の有無によって、係留浮体の動揺および係留索張力は大きく変化し、以下に示す特性を確認することができた。

- 1) 上下方向加速度応答量は、緊張係留と弛緩係留の差はあるものの大きな差は無く、波長および波高変化に対してほぼ一定の大きさであった。ただし、定常外力が作用する状態における単純弛緩係留については、波長が長くなるにつれて応答量は増加する傾向にあった。
- 2) 係留索張力に関しては、係留方式により大きな差があり、特に緊張係留と弛緩係留では最大400倍の差が生じた。また、定常外力の作用時における係留索張力では、弛緩係留方式間でも最大100倍程度の差が確認され、単純弛緩係留方式は定常外力作用時には緊張係留と同様の傾向であった。
- 3) 浮体動揺および係留索張力を抑える係留方式は、中間シンカー方式、上チェーン方式が好ましく、浮体動揺のみを抑えるためには中間ブイ方式が有利である。
- 4) 緊張係留および単純弛緩係留を適用する場合は、海域特性や使用用途との整合を図る必要がある。

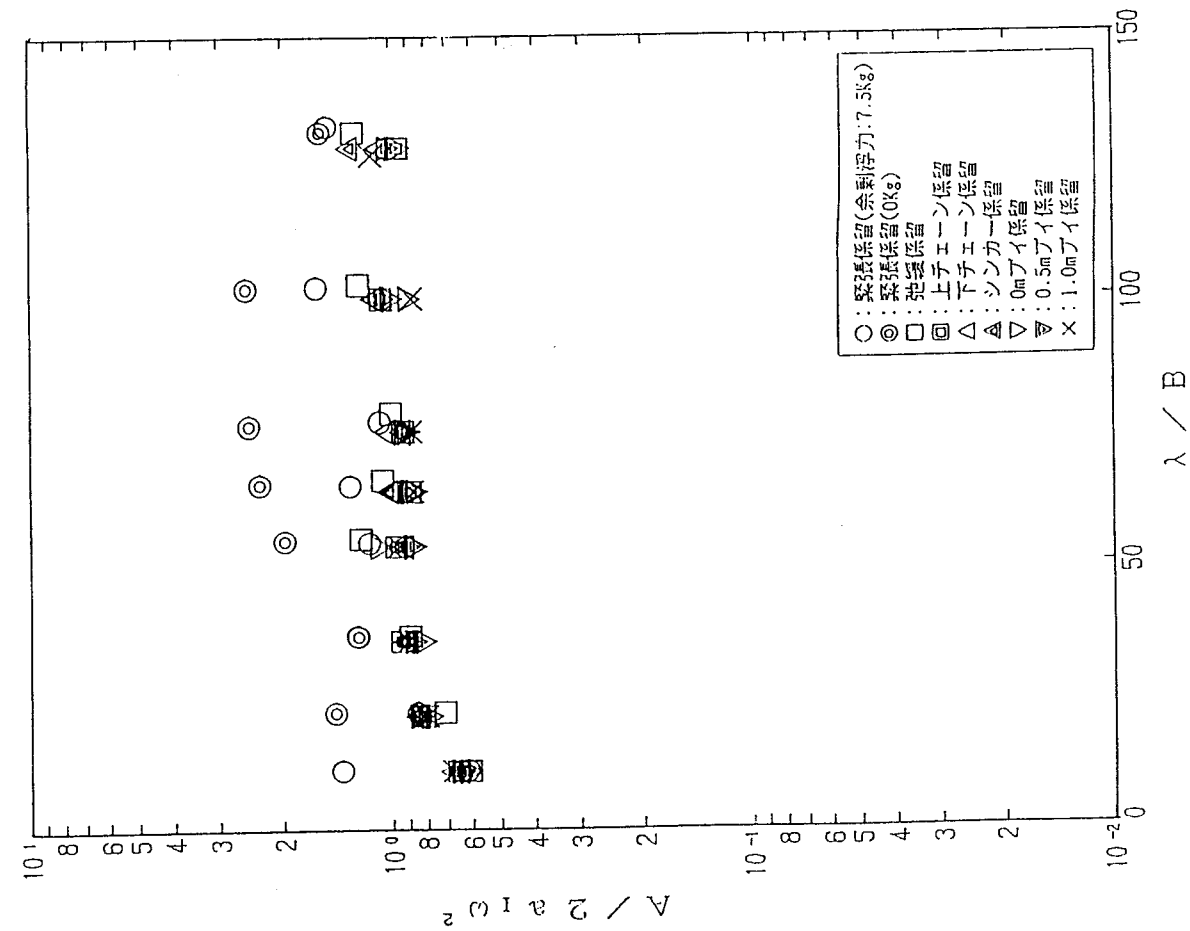


Fig. 3 波長変化に対する上下方向加速度
(H=6cm, 定常外力無し)

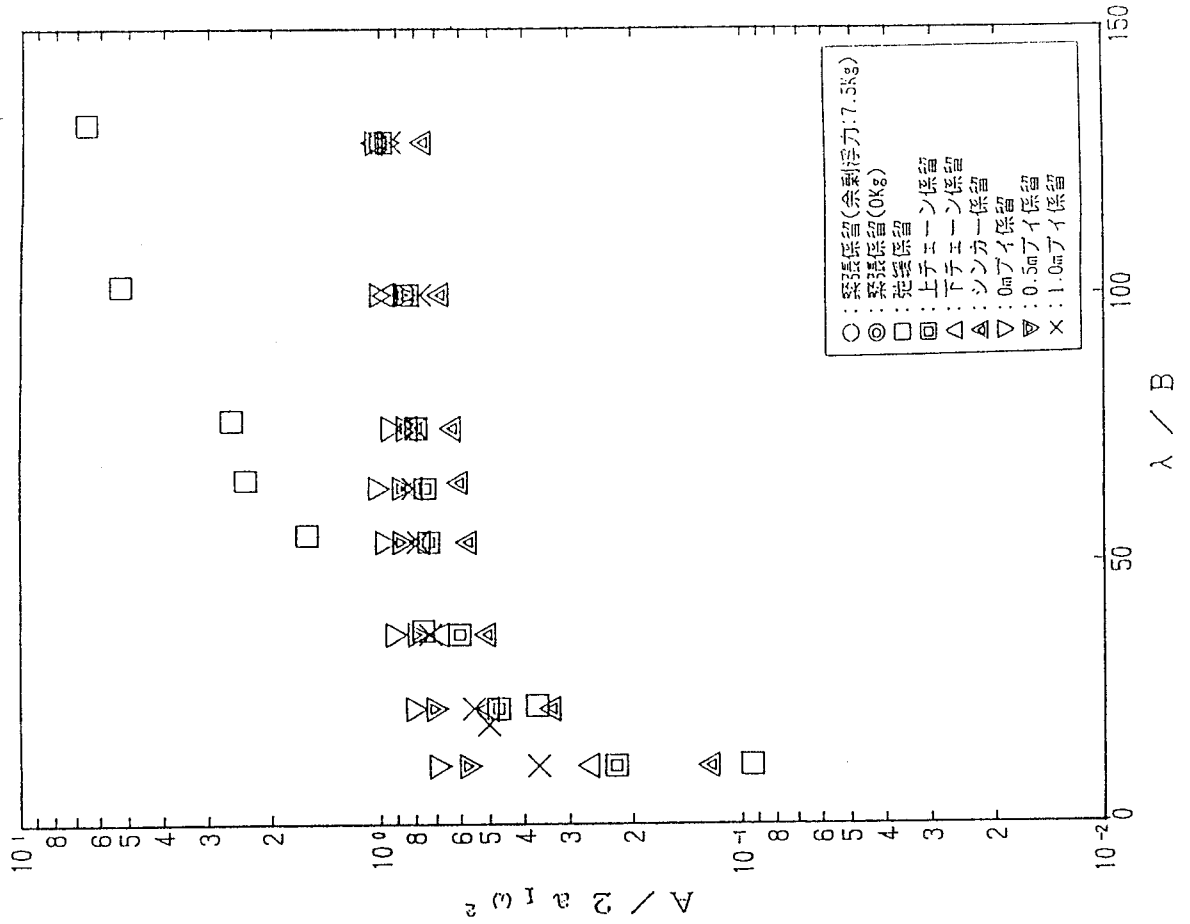


Fig. 4 波長変化に対する上下方向加速度
(H=6cm, 定常外力有り)

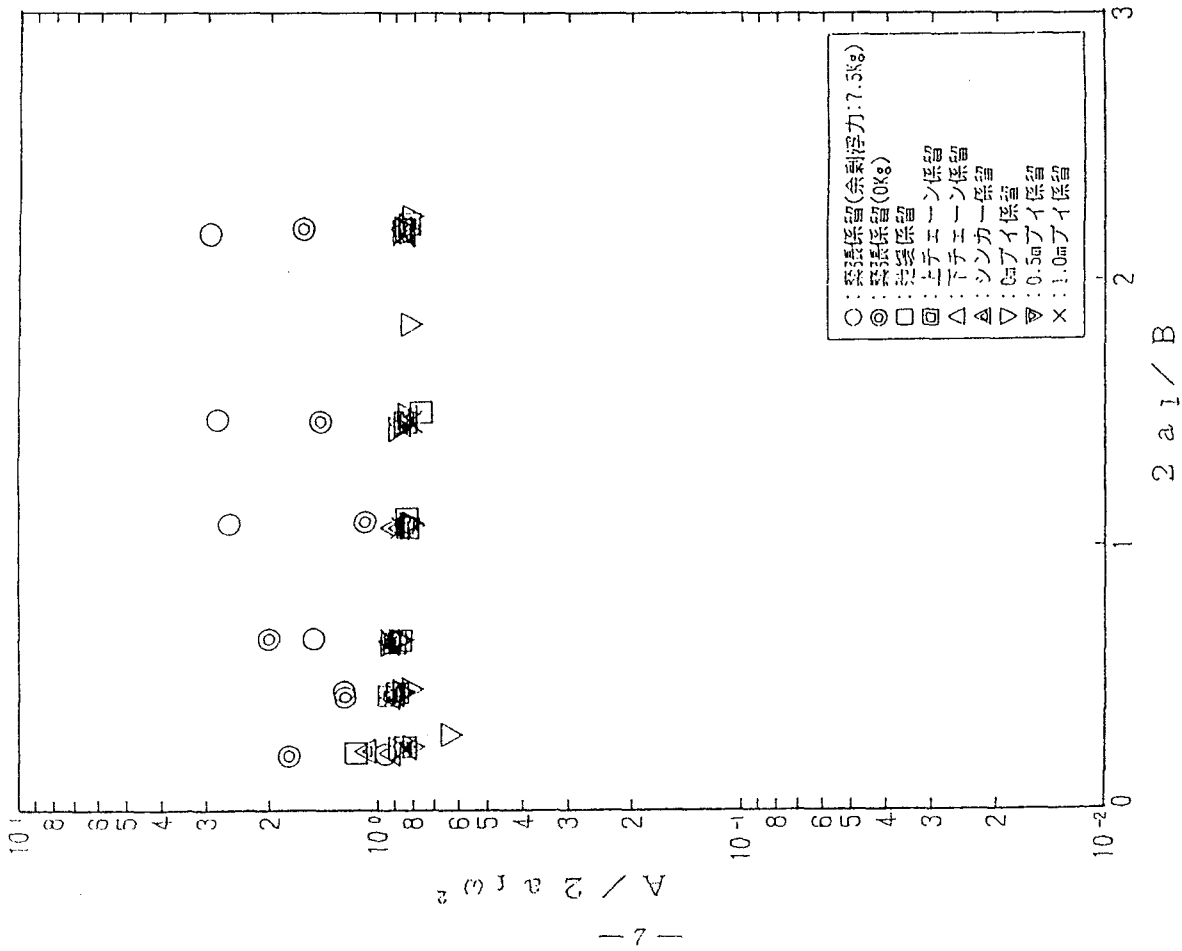


Fig. 5 波高変化に対する上下方向加速度
($T=1.8$ sec, 定常外力無し)

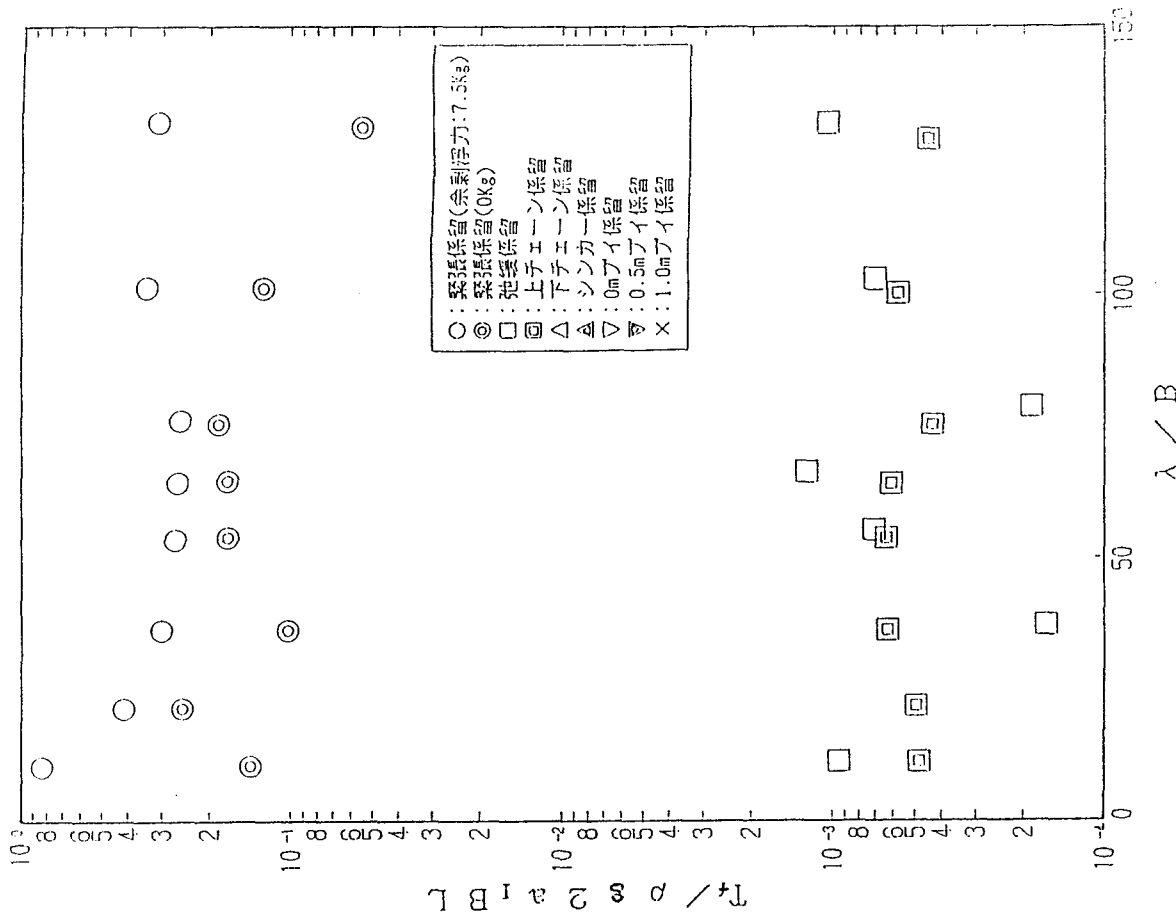


Fig. 6 波長変化に対する係留索張力
($H=6$ cm, 定常外力無し)

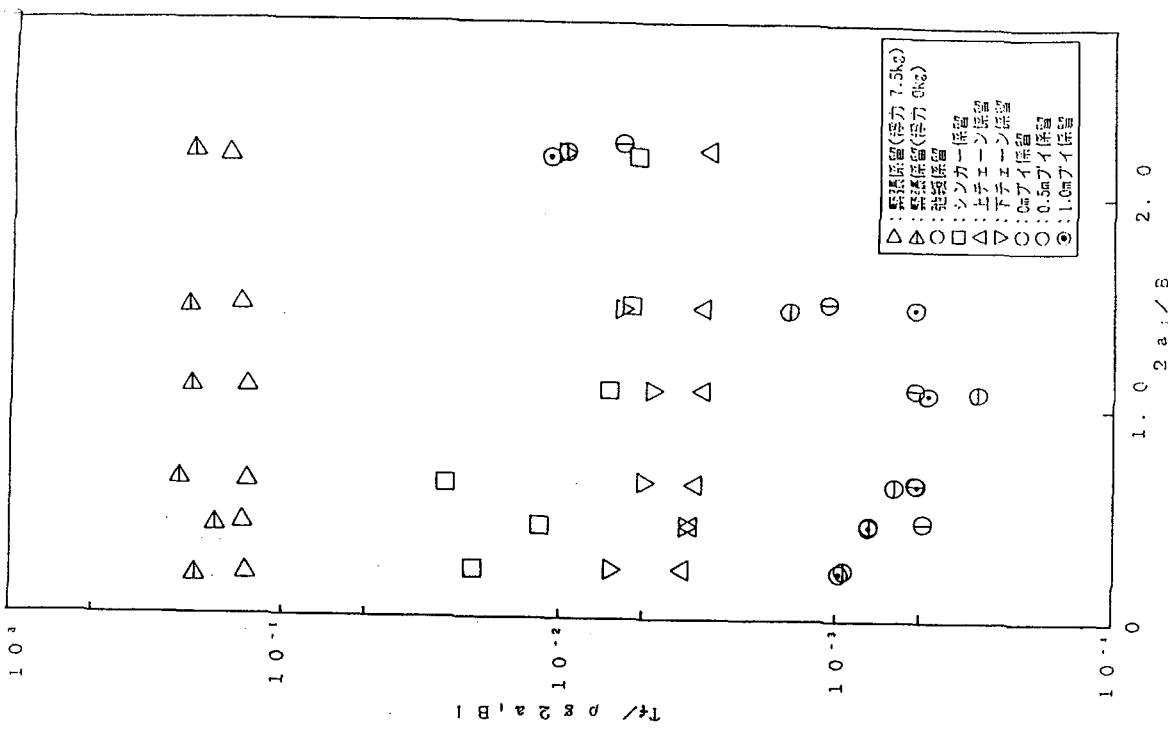


Fig. 7 波長変化に対する係留索張力
(H=6cm, 定常外力有り)

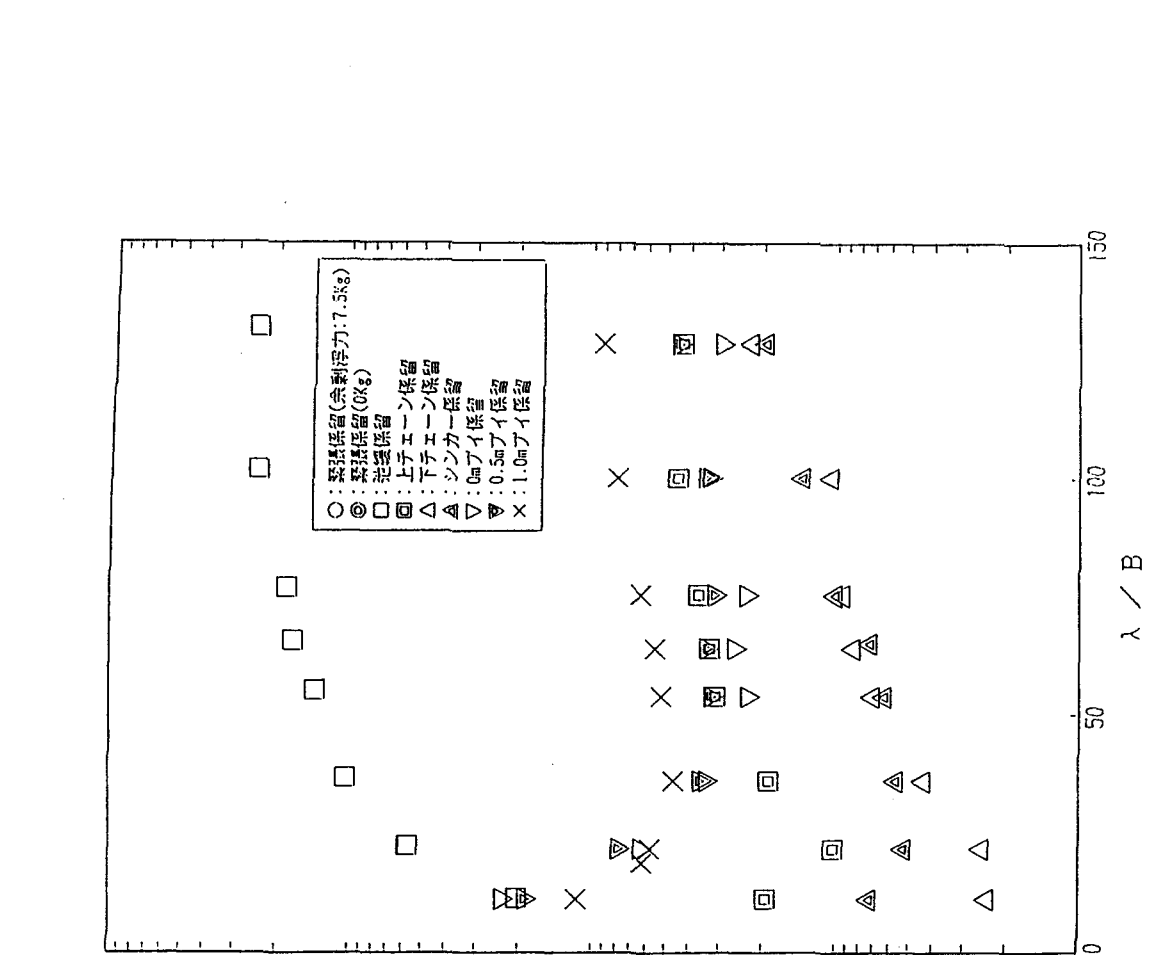


Fig. 8 波高変化に対する係留索張力
(T=1.8sec, 定常外力無し)

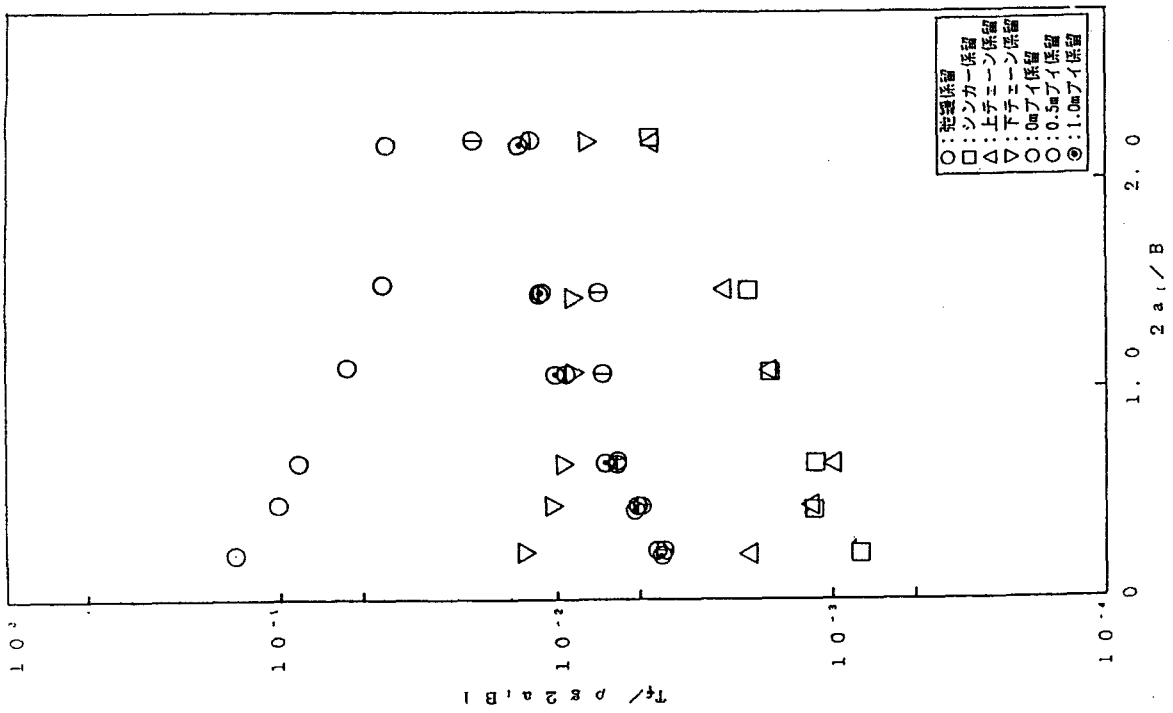


Fig. 9 波高変化に対する係留索張力
($T=1.8\text{sec}$, 定常外力有り)

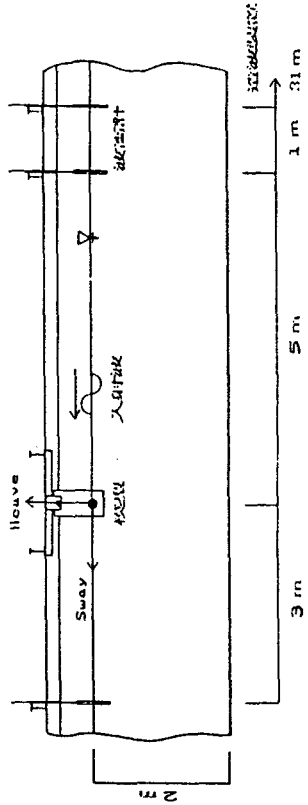


Fig. 10 模型および計測器の配置状況

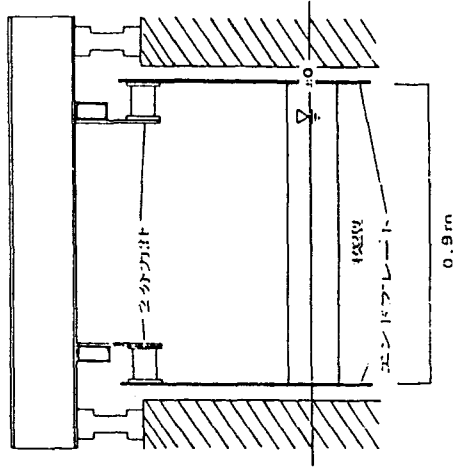


Fig. 11 波力計測システム

4. 波力および波圧

係留された浮魚礁の波浪中の動揺、係留索に作用する変動張力を算定するためには、波浪中において作用する波力を算定する必要がある。しかし、浮魚礁のように、水面近傍に保持され、浮力体が小さい、作用する波高が相対的に大波高となる浮体に作用する波力を理論的に求めることは困難である。このため実用的な算定方法を提案するため、基礎的な実験を行うこととした。

また、浮体の構造強度を決定するための波圧に関しても、係留方式によって浮体動揺が大振幅となった場合、浮体動揺の影響を受ける可能性があるため、波圧に関する実験も行った。

4.1 実験概要

実験は、係留実験と同様の深水不規則波水槽を使用した。波力実験に使用した模型は、直径14cmおよび8cm、長さ90cmの円柱を用いて、Fig.10に示す状態で水中に設置した。模型設置位置は、静水面から模型中心までの距離を、直径14cmの円柱で、0、+2.33、+7.0、+10cm（鉛直下向きを+とする）、直径8.5cmで、0、+4.25、+10cm（順にA、B、C、D、E、F、G Typeとする）とした。

実験データの取得方法は、波力については防水型2分力計(10Kg)2台を用いて、Fig.11に示すシステムで力の水平成分 E_x 、鉛直成分 E_y を得た。波高は、容量式波高計を模型の前方および後方に設置し、入射波高および透過波高を求めた。力および波高のデータは、ペンレコーダーに書き出すとともに、データレコーダーに収録した。なお、入反射波の波高については、合田らの反射波分離法を用いて求めた。

波圧実験については、使用水槽は波力実験と同様で、模型は直径14cmの円柱を使用した。模型は、均一素材からなる係留索を用いてFig.12に示すように、係留索長を水深の1.2倍から0.6倍として、水槽内に定位させた。圧力は、模型中央の側面(水平方向圧力 P_h)と底面中央(上下方向圧力 P_v)に圧力センサーを設置し、測定した。波は規則波とし、周期は1.2、1.4、1.6、1.8secの4種類、波高は3、9、15、20、30、40cmから4種類を選択して、実験を行った。

Table 2 無次元化および記号

無次元表示		
$E/\rho g a_1 B L$	E : 波力	k : 波数
$k B/2$	E_x : 水平波力	E_y : 上下波力
$E_x/\rho g a_1 B L$		
$E_y/\rho g a_1 B L$		
$2 a_1/B$		

4.2 結果および考察

Fig. 13～Fig. 16は、ポテンシャル理論および実験から求めた波力の結果を示したもので、無次元化および記号はTable 2 に示したとおりである。

Fig. 13、14は、2次元特異点分布法により得られた計算結果と模型の直径と比較して相対的に小さな波高に関する波力を比較したものである。Fig. 13、およびFig. 14ともに良い一致を示しており、実験方法および解析方法については、問題が無いことを確認できた。なお、設置水深はFig. 13がA Typeで、模型の直径の1/2が静水面となるケース、Fig. 14がB Typeで、模型の直径の2/3が没水の状態のケースである。

Fig. 15、16は、周期1.8secにおける波高変化に対する波力の結果を示したものである。Fig. 15に示した水平方向波力については、直径8.5 cmの場合の傾向は、 $2a_1/B$ が2までの範囲では僅かにばらつきが認められるものの、2以降ではほぼ一定の値を示した。この傾向は直径14cmの模型についても同様に確認できた。Fig. 16の上下方向波力については、模型の一部が静水面上に出ている場合、 $2a_1/B$ が2までは徐々に単位波高当たりの波力は減少し、その後ほぼ一定の値となり、ピークの1/2ないし1/3程度の値であった。これに対して、完全没水となるC, D, F, G Typeでは、 $2a_1/B$ が2まで徐々に単位波高当たりの波力は増加し、その後はほぼ一定の値となり、小波高時の2倍程度の値を示した。なお、周期1.2, 1.5, 2.2secにおける結果についても、単位波高当たりの波力の大きさについては、多少の違いは認められたものの、Fig. 15およびFig. 16と同様の傾向であることが確認された。

以上の結果から、浮魚礁の浮体部分が水面付近に位置し、入射波の振幅が浮体の寸法より大きくなった場合では、浮体に作用する波力は浮体の喫水に関係なくほぼ同様の値となる。また、線形理論計算による結果とは大きな差異を生じ、浮魚礁の設計波高に対する波力に関しては、これまでの推定法とは異なる新たな推定法の必要性を感じた。

圧力に関する結果をFig. 17～24に示した。Fig. 17～20は水平方向圧力、Fig. 21～24は上下方向圧力である。横軸および縦軸は、無次元の周期および圧力を示し、無次元化はTable 3 のとおりである。また、図中の記号は波高別の圧力の結果を示しており、○、△、□、●の順で波高が高く、●は各周期における最大波高を示している。

Fig. 17～20の水平方向圧力の結果より、Fig. 17の単純弛緩係留を示す係留索長さ1.2hの場合は、周期が短くなるにつれて、また波高が高くなるにしたがって、作用圧力は大きくなる傾向を示し、最大圧力は0.46 w_0H であった。Fig. 18

～20の結果は、周期が短くなるにつれて圧力は低くなる傾向を示し、波高に対してはFig.18の0.9hの場合を除き、ほぼ一定の値であった。最大圧力は浮体位置が水面に一番近い0.9hの場合に発生し、 $0.88 w_0 H$ であった。この場合より浮体部の位置が深い0.8h, 0.6hになるにしたがって、圧力は低くなり、緊張係留の場合でも浮体水深が深ければ作用圧力を低減できることが確認された。

また、水平方向圧力全体の結果から、水面付近に浮体部がある場合に作用圧力は最大となり、水面上に浮体部がある場合は作用圧力の結果より、緊張係留方式より単純弛緩係留のほうが作用圧力は小さく、安全であることが確認された。

Fig.21～24の上下方向圧力の結果からも、水平方向圧力と同様の傾向が確認された。また、各ケースにおける最大圧力に関しても、1.2hの場合が0.44、0.9hの場合が0.86、0.8hの場合が0.52、0.6hの場合が0.3と、水平方向波圧とほぼ同様の値を示し、波高に比べて浮体寸法が小さい場合には方向に関係なく作用する圧力は一定となることが推察できる。

4.3 まとめ

波力および圧力に関する実験結果より、以下のことが確認された。

- 1) 水面付近に定位する浮体に作用する波力は、浮体寸法に比べて入射波の波高が相対的に小さい場合には、理論計算の結果と良い一致を示し、浮体位置の多少の差が波力にも影響する。
- 2) 相対的に大きな波が作用した場合は、非線形性が強く、既存の算定手法では推定が困難である。ただし、大波高になるにしたがい、浮体位置の多少の差は、波力に影響せず、一定値に近づく傾向が認められた。
- 3) 係留された模型に作用する波圧の測定結果より、水面付近に浮体が定位する場合に作用する圧力は最大となり、浮体の設置水深が深くなるにしたがって作用する波圧は減少する。
- 4) 緊張係留と弛緩係留では、浮体が定位する水深が同一であれば、緊張係留のほうが大きな圧力が作用し、浮体および係留索の安全性の上で不利である。
- 5) 浮体に作用する波圧は、浮体が入射波の波高に比べて小さい場合、浮体の部位や方向に関係なく、一定の圧力が作用する。

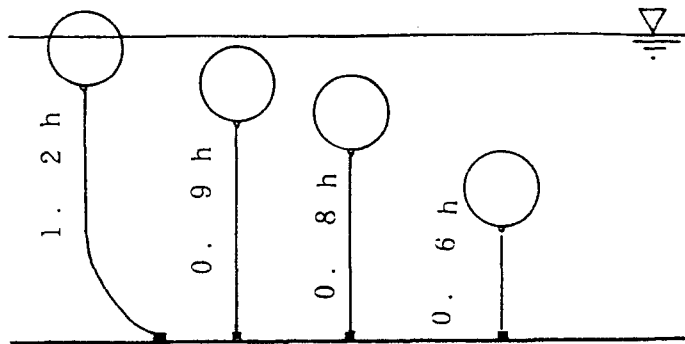
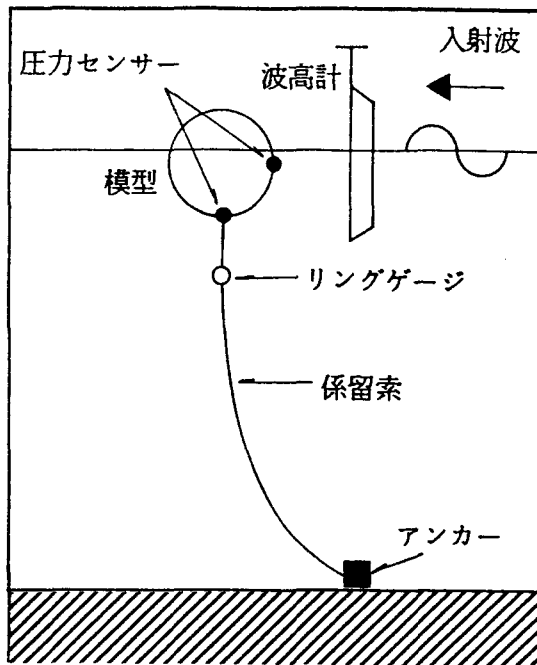


Fig. 12 圧力計測システム

Table 3 無次元化および記号

無次元表示
$Ph / w_0 H$
$Pv / w_0 H$
$\omega^2 B / g$

Ph : 水平方向圧力
 Pv : 上下方向圧力
 w_0 : 水の単位体積重量
 H : 波高
 ω : 円周波数 ($=2\pi/T$)
 T : 波周期

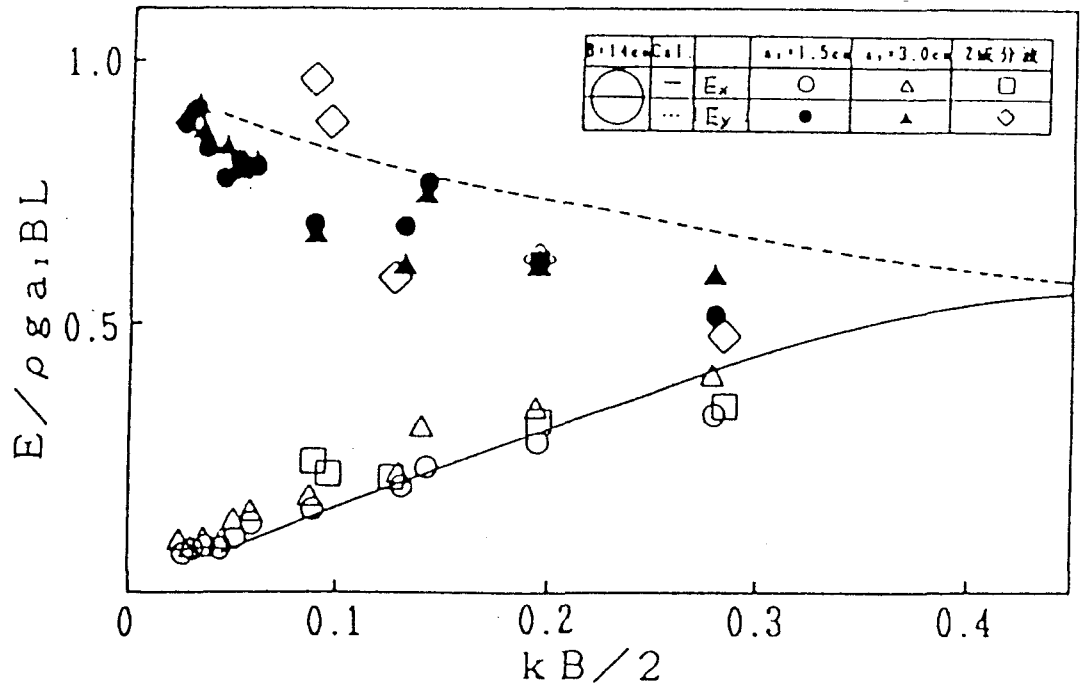


Fig. 13 水平および上下波力に関する実験結果と計算結果の比較

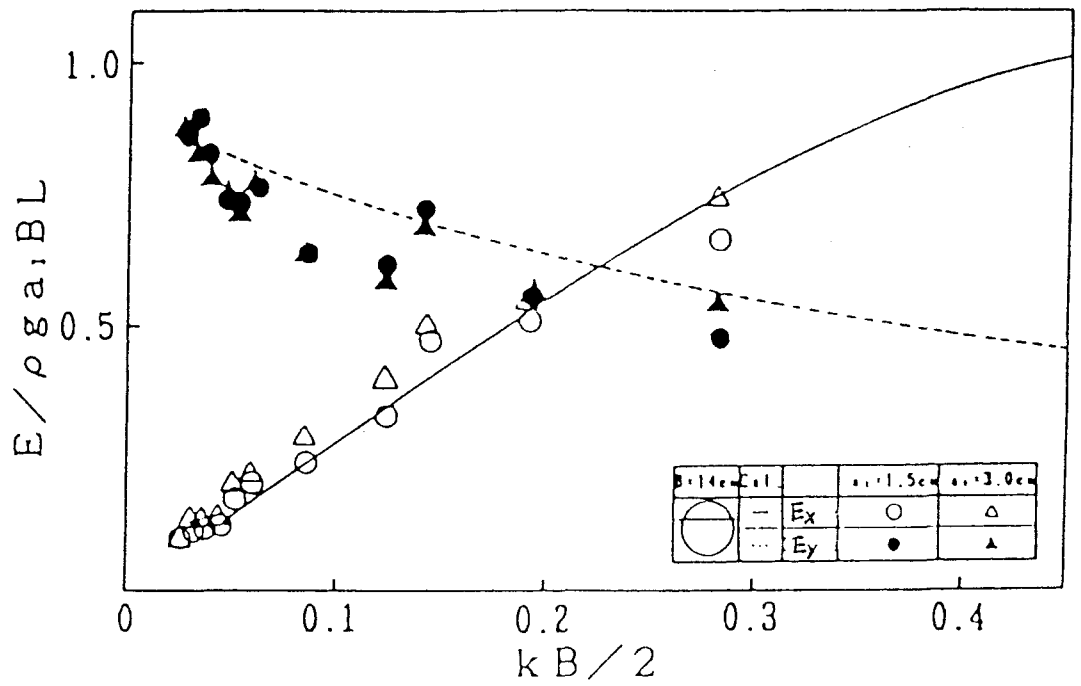


Fig. 14 水平および上下波力に関する実験結果と計算結果の比較

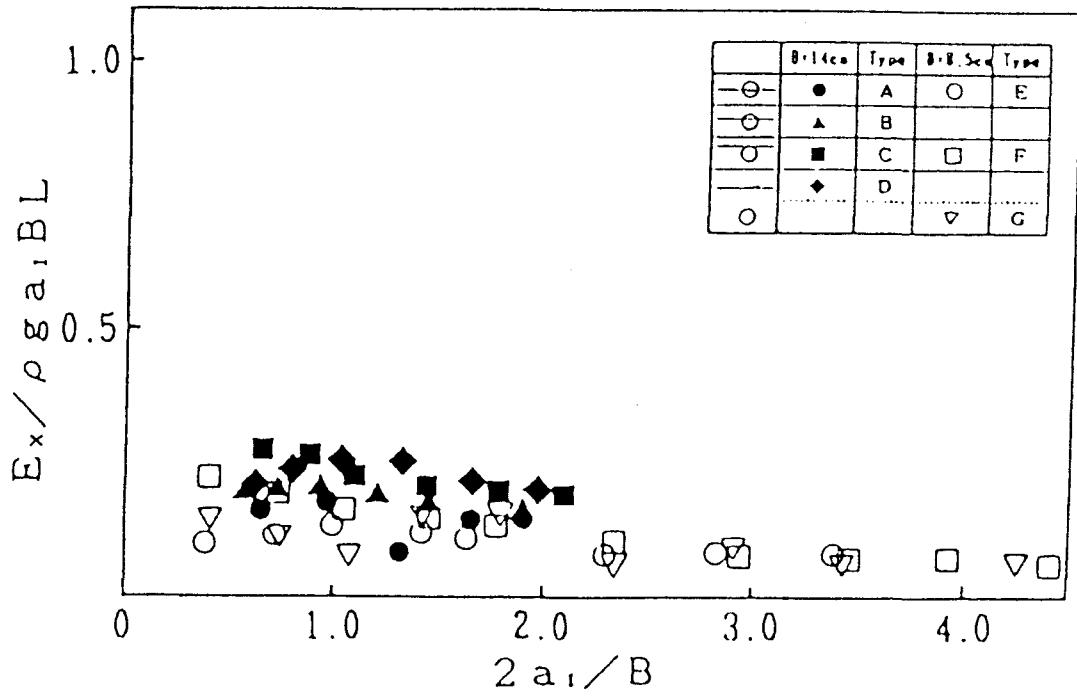


Fig. 15 波高変化に対する水平波力 (T=1.8sec)

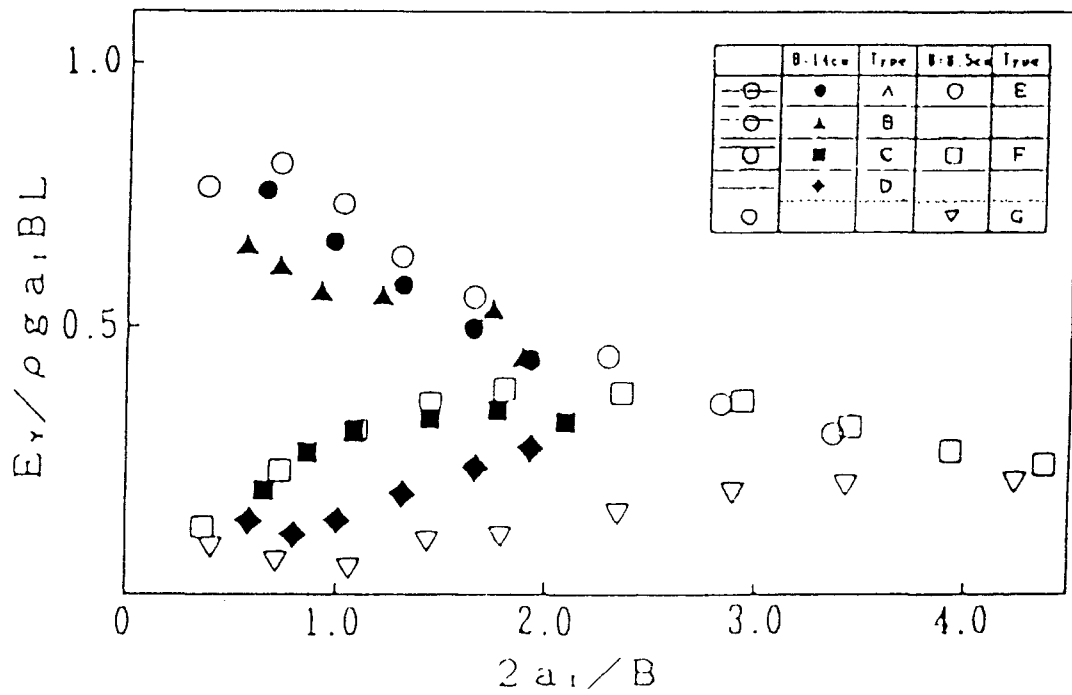


Fig. 16 波高変化に対する上下波力 (T=1.8sec)

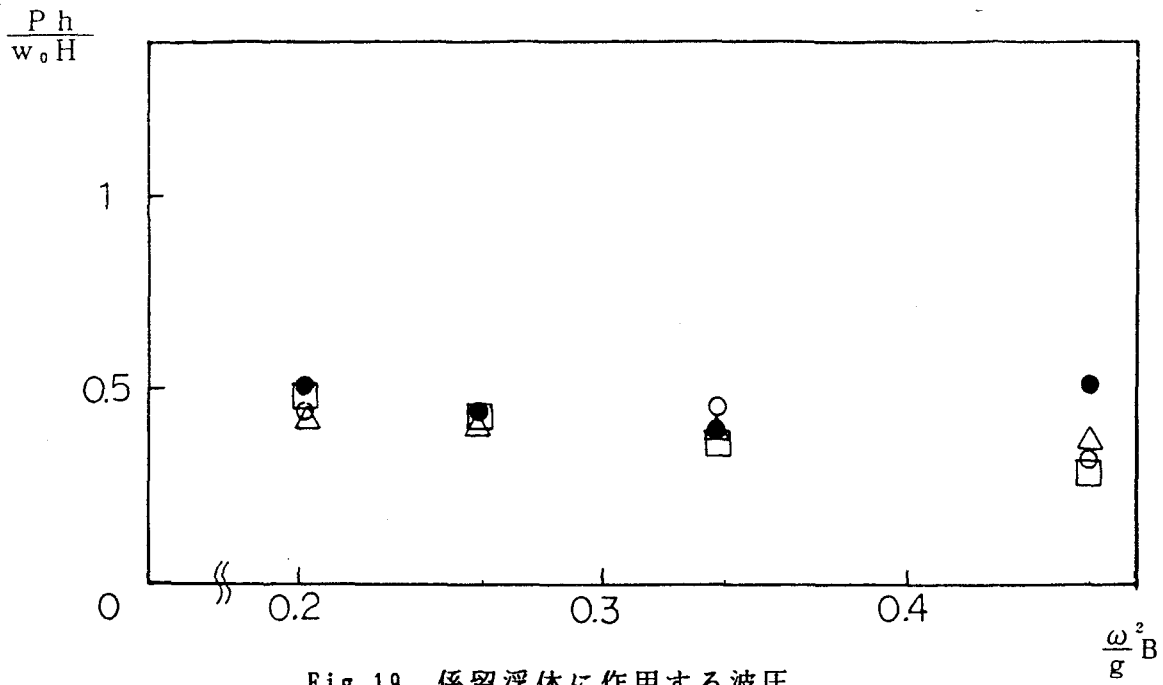


Fig. 19 係留浮体に作用する波圧
(水平方向圧力、係留索長0.8h)

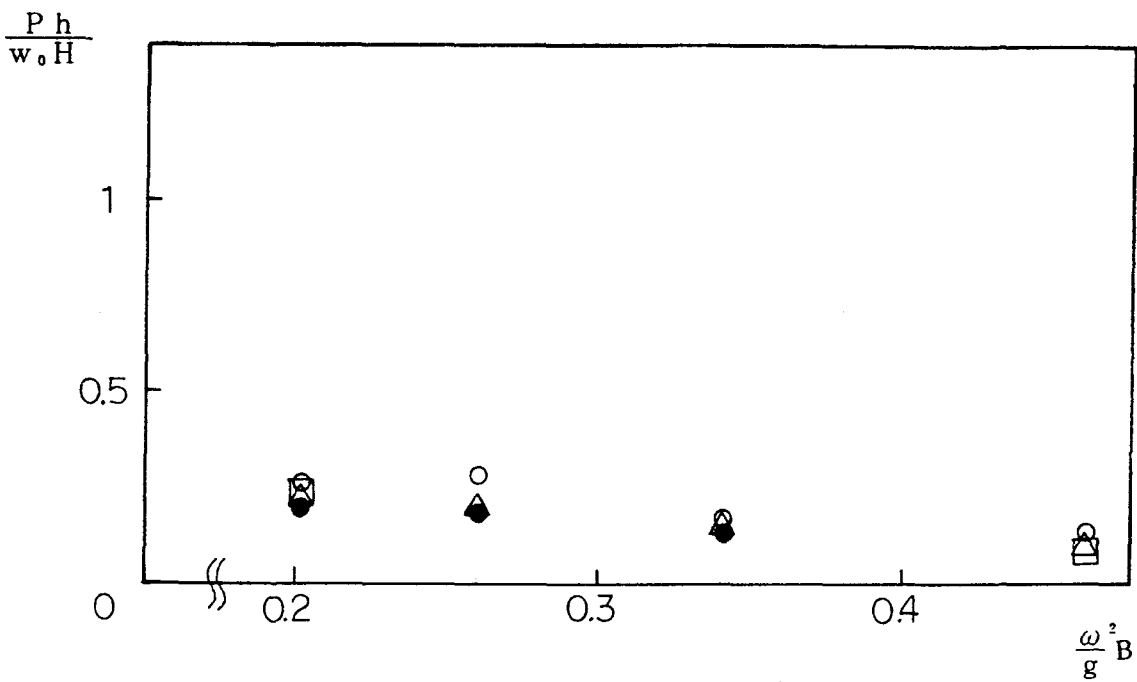


Fig. 20 係留浮体に作用する波圧
(水平方向圧力、係留索長0.6h)

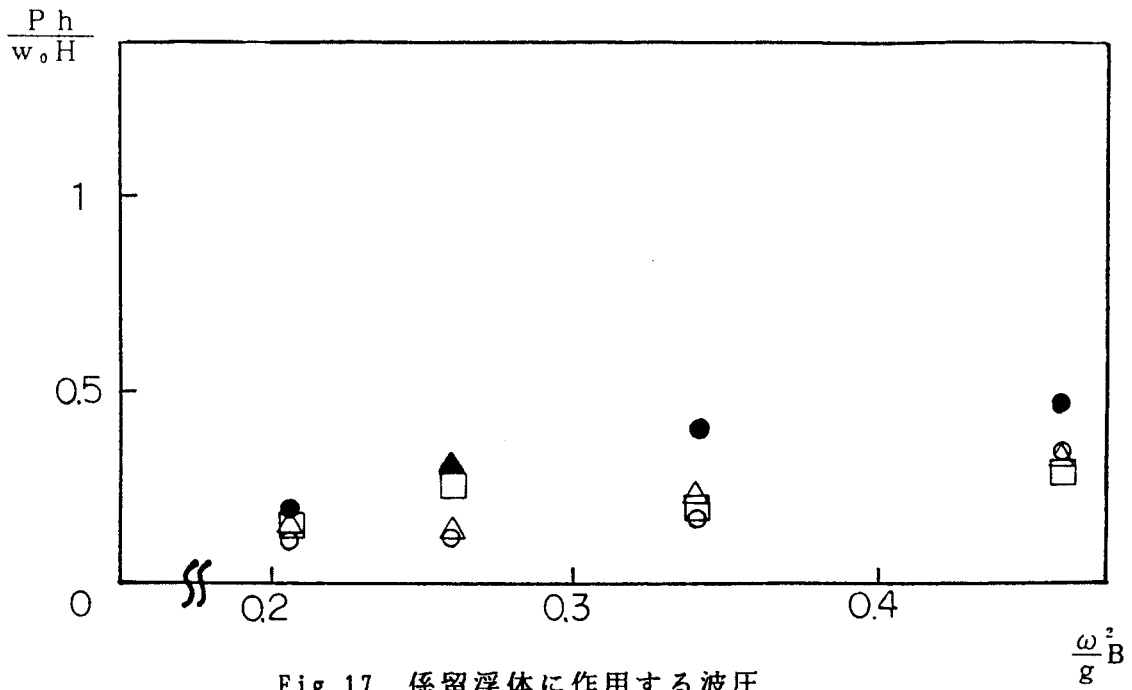


Fig. 17 係留浮体に作用する波圧
(水平方向圧力、係留索長1.2h)

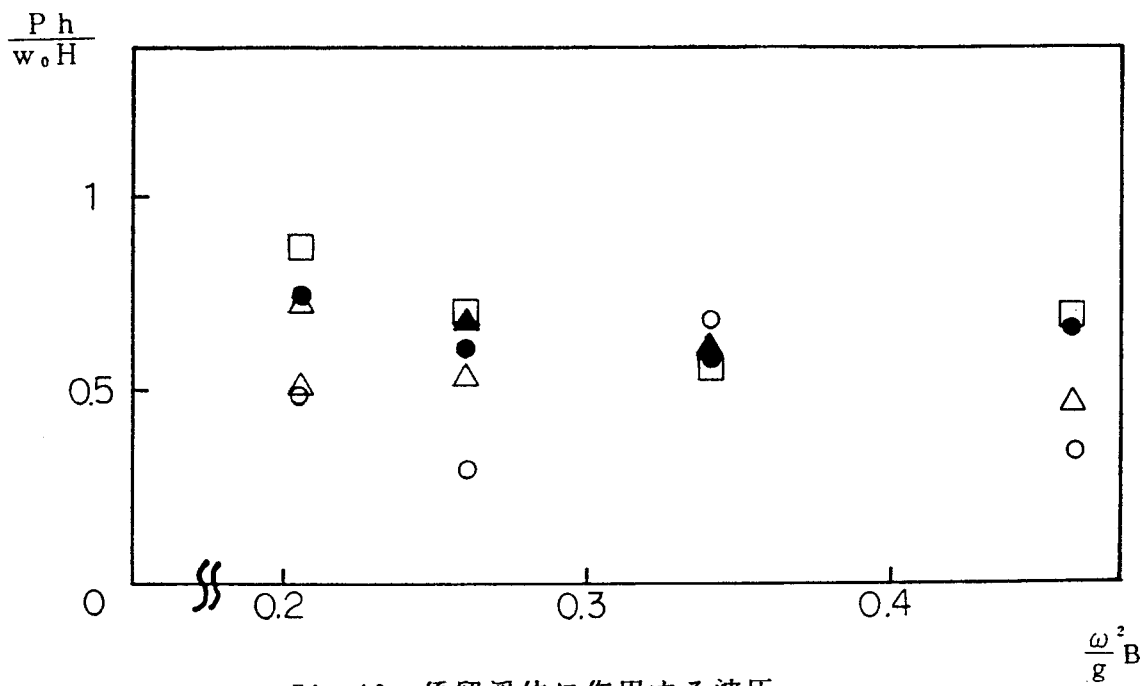


Fig. 18 係留浮体に作用する波圧
(水平方向圧力、係留索長0.9h)

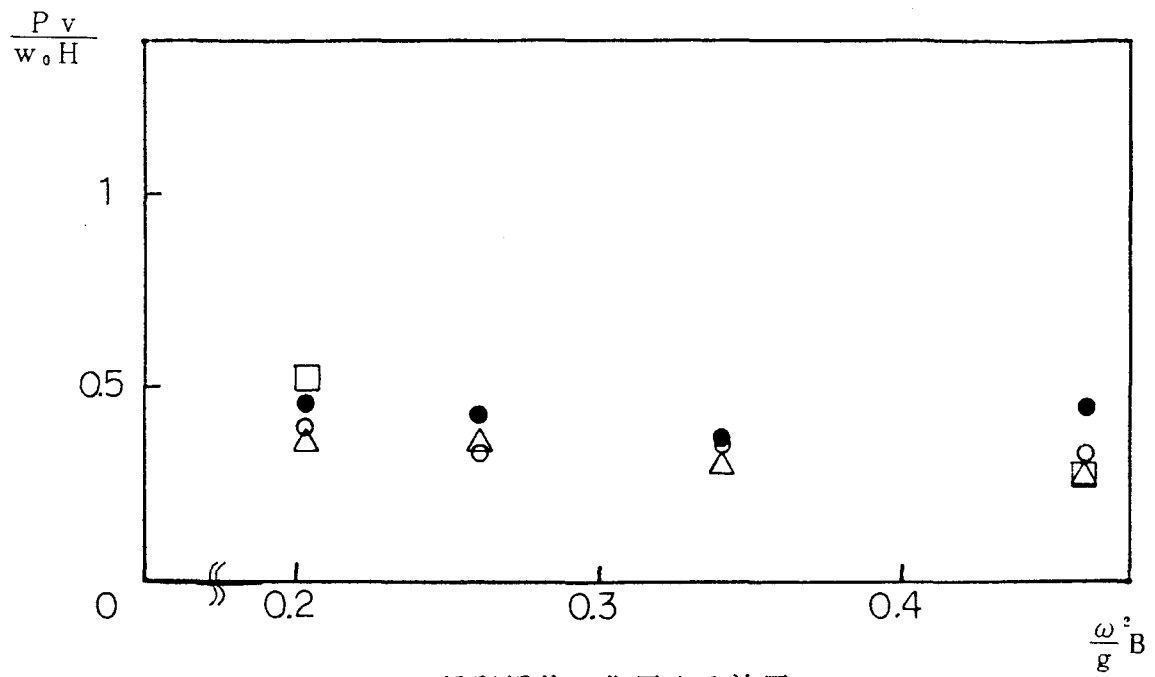


Fig. 23 係留浮体に作用する波圧
(上下方向圧力、係留索長0.8h)

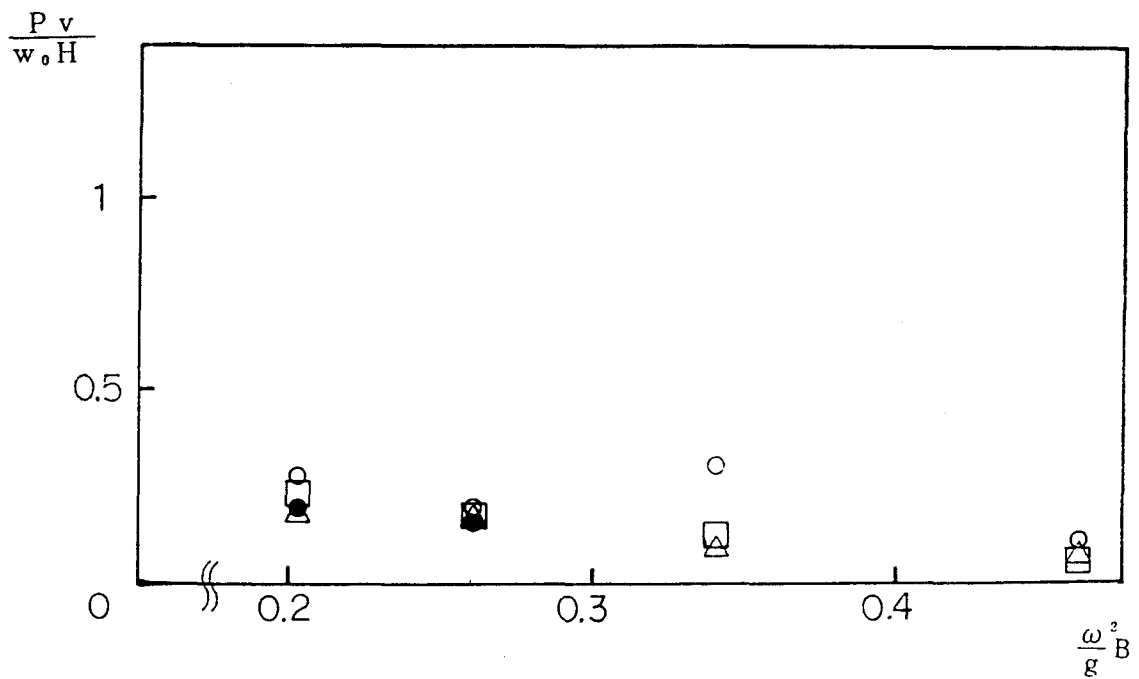


Fig. 24 係留浮体に作用する波圧
(上下方向圧力、係留索長0.6h)

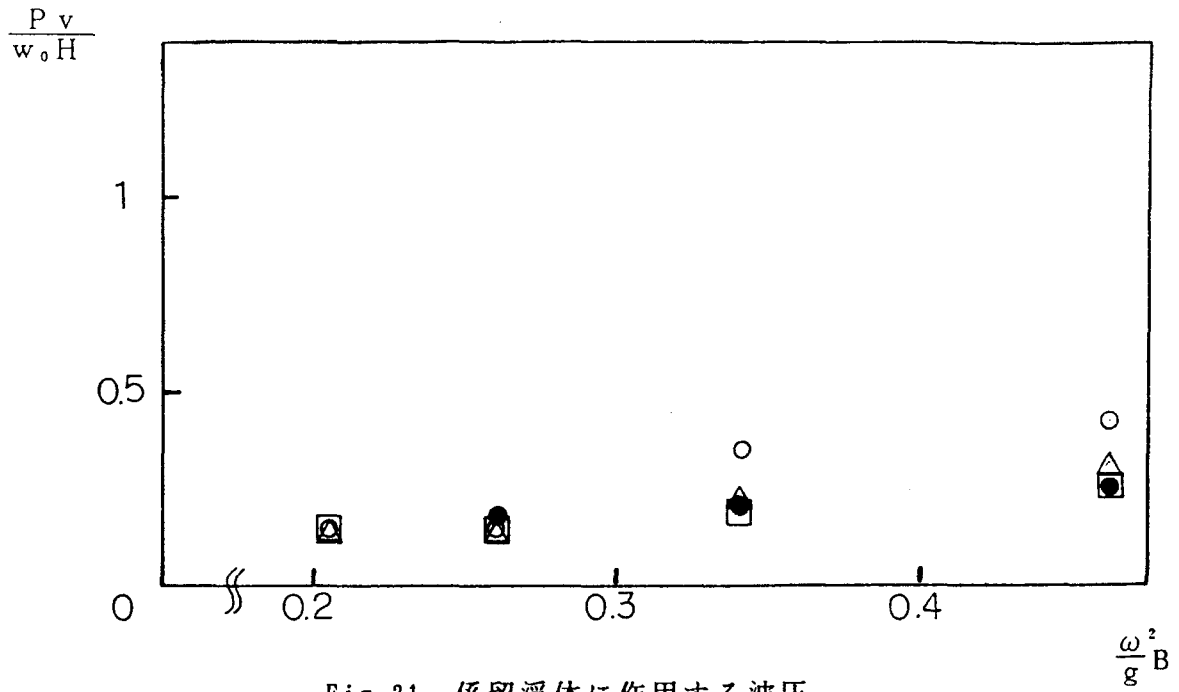


Fig. 21 係留浮体に作用する波圧
(上下方向圧力、係留索長1.2h)

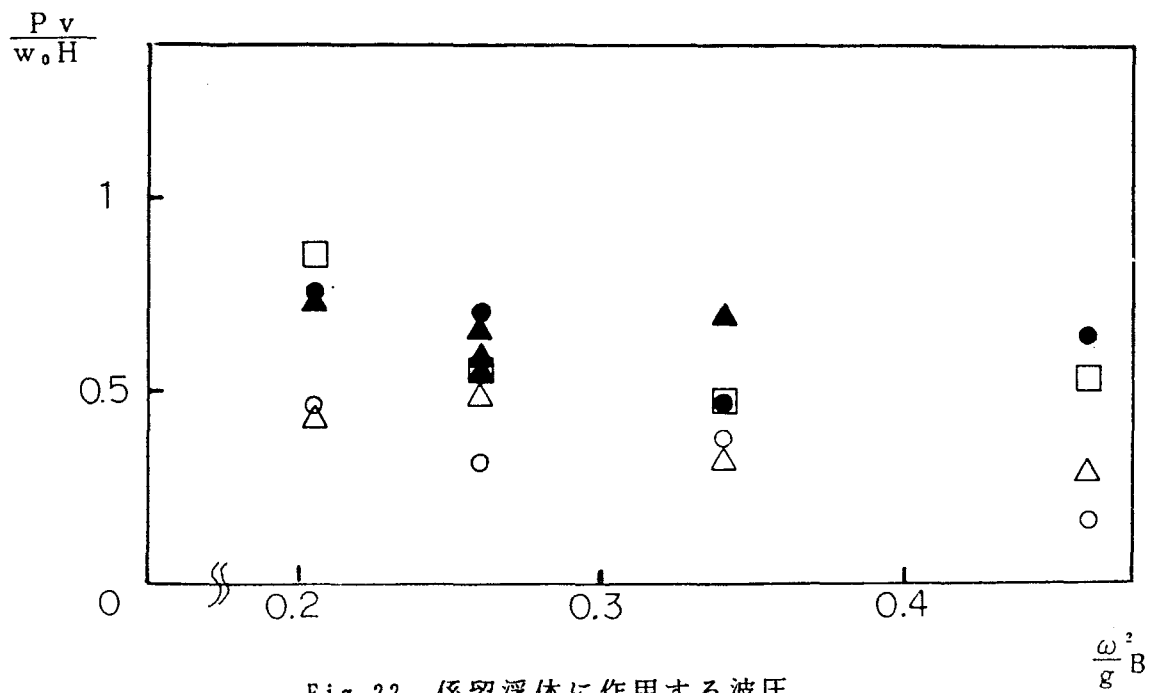


Fig. 22 係留浮体に作用する波圧
(上下方向圧力、係留索長0.9h)

5. 結言

本研究より、以下のような結果を得ることができた。

- 1) 係留方式の違いにより、浮体施設の動揺および係留索に作用する変動張力に大きな差が生じる。特に、緊張係留と弛緩係留の差は大きく、浮魚礁の係留については弛緩係留とすることが望ましい。
- 2) 水面付近に定位する浮体に作用する波力は、浮体が入射する波高に対して相対的に小さい場合には、ポテンシャル理論等の線形計算とは異なる値となる。また、波高が大きくなるにしたがって定位する位置の違いが少なくなり、一定の値に近づく。
- 3) 浮体に作用する波圧は、浮体が水面付近に定位するか否かによって大きく変化し、係留方式によっても異なる。特に、水面付近に緊張係留された場合に大きな圧力が作用する。
- 4) 浮体寸法が入射波高に比べて小さい場合、作用する圧力は浮体の部位に関係なく一定の値となる。

これまでの研究は室内実験を中心とし、実際の浮魚礁とは異なるモデルによるもので、基礎的な問題を検討した。結果としては、設計上の問題点が明確となり、沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針の改訂において、解決案を提示することができた。

今後は、実海域に浮魚礁を公共事業として設置する場合の問題点について検討する予定である。特に、化学繊維素材を主体とする簡易型浮魚礁の耐久性に関する研究は急務であり、緊急課題として取り組む必要がある。

6. 参考文献

- 1) 木村晴保：波によって生ずる浮魚礁の係留索張力、第25回海岸工学講演会論文集、1978
- 2) 中村充、上北征男：係留浮体の衝撃力緩和に関する研究、第23回海岸工学講演会論文集、1976
- 3) 合田良実、鈴木康正、岸良安治、菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技術研究所報告、1976