

低動揺型浮体を用いた浮魚礁

石川島播磨重工業（株）技術研究所

同 上

同 上

開発事業プロジェクト部

同 上

正会員

山下 誠也

正会員

櫻井 清一

正会員

土屋 達

1. まえがき

近年、浮魚礁として、沖合の大水深域に設置する比較的大型の浮魚礁が検討されるようになってきている。すでに、実験的に実海域に設置した浮魚礁も数例ある¹⁾。第3次沿岸漁場整備計画²⁾では、このような浮魚礁に対して、浮魚礁の本来もつ集魚機能のほかに魚群の蠕集状況や海域の気象・海象の情報を陸上へ伝送する機能、つまり漁業ステーションとしての機能を持たせることになるであろう。これからの浮魚礁は、付加機能に必要な魚群誘導装置、海洋環境測定装置、通信装置、動力源などが搭載されるため、益々大型化する傾向にあるといえることができる。

海面に設置する浮魚礁は、海中設置式の浮魚礁と異なり海面の波浪の影響を、直接、受ける。浮魚礁が波浪中で頻りに動揺すると、浮魚礁を係留している索の摩耗や劣化が早くなり、また魚群の蠕集にとっても好ましくなれないように思う。さらに、荒天時に浮魚礁が大きく動揺すると、係留索に過大な張力が発生し係留索の破断につながる可能性がある。沖縄県近海で使用されている浮魚礁は非常に小規模のものであるが、浮魚礁の主な損失原因は海面付近の係留索の破断である。浮魚礁の波浪中動揺性能は、このように係留索および魚の蠕集との関連から重要な検討課題であると考えている。

以上の背景のもとに、大型の海面設置式の浮魚礁として、波浪中での動揺とくに上下方向の運動である Heaving が小さく、かつ、集魚機能を増すため魚礁のかさ容積の増大を図った浮魚礁を検討した。本報告では、この低動揺型浮魚礁の特徴、および水槽で波浪中動揺試験を行って求めた動揺特性、係留力特性の概要を示す。

2. 低動揺型浮魚礁の特徴

2.1 新しい浮体形状の適用

実海域の不規則な波の中で浮体の動揺が小さいというのは、浮体を設置する海域の発現頻度の高い波周期領域で動揺が小さいことである。発現頻度の高い波周期領域はふつうかなり広い幅をもっている。したがって、浮体の動揺を小さくするためには、波浪中応答が広範囲の波周期で小さい浮体形状、言いかえると、広範囲の波周期に対して波力の小さい形状を選ぶ必要がある。

今回、低動揺型浮魚礁の浮体形状として、浮体に働く上下方向の波力が広範囲の波周期で小さい形状^{3) 4)}を用いることにした。その形状は、水面下にふくらんだ部分とくびれた部分をもっている。従来、ある特定の波周期で上下方向の波力を受けない形状として、水面下にふくらんだ部分のある形状が知られている。ここで用いた新しい浮体形状はくびれた部分をもつ点が従来の形状と異なり、従来の形状が一つの波周期で上下方向の波力を受けないのに対して、2種類の波周期で上下方向の波力を受けない。つまりくびれた部分をつくと、波周期の短い領域ではくびれより上の部分に作用する波力が浮体全体に働く上下方向の波力を小さくするように働き、二つ目の波力を受けない波周期が現れる。波力を受けない波周期がふえるため、従来の形状より広範囲の波周期で上下方向の波力が小さくなる。

浮魚礁に用いた浮体の一つは、このような新しい形状をもつ軸対称浮体である。この浮魚礁を単一型 (single column type) と呼ぶ。浮体形状を図1 (a) に示

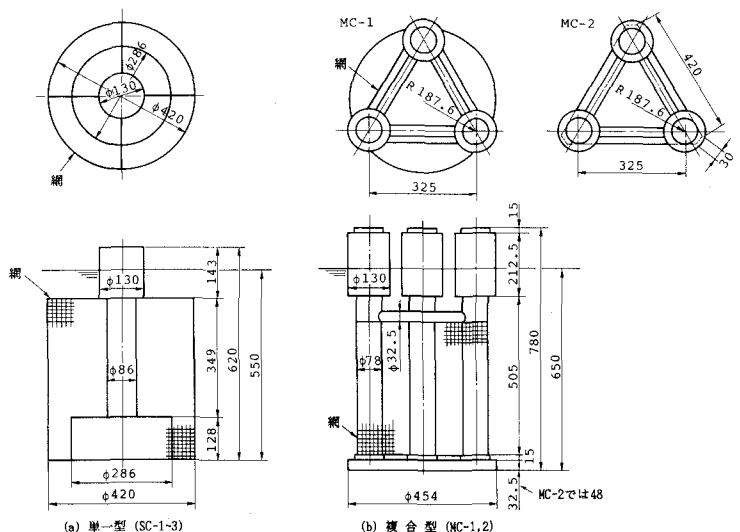


図1 浮魚礁模型

すが、水面下のふくらんだ部分と水面との間の直径の小さい部分がくびれに相当している。

この浮体を対象に、2種類の波周期で上下方向の波力を受けない浮体の波浪中での Heaving の応答特性について略述する。図2は Heaving と入射波の振幅との比 z_A/H_A を波周期 T に対して示した図である。図中の実線がいまの軸対称浮体に対する Heaving の計算結果を表す。応答がゼロとなる $T = 2.03\text{ s}$ は波力がゼロとなる周期の一つであり、もう一つの波力がゼロとなる周期は $T = 0.75\text{ s}$ 付近にある。両者の波周期の間で応答は非常に小さい。比較のため、図2には Buoy のような単なる円筒の応答を1点鎖線で示す。これは上述の軸対称浮体と排水容積および最大直径が等しい浮体であるが、両者の応答には大きい差があるのが明らかである。なお、以上の応答計算には浮体の軸対称性を考慮に入れた特異点分布法⁴⁾を用いている。

浮魚礁に用いたもう一つの浮体形状は、図1(b)に示すように、くびれをもつ3本のコラムで構成される複合型 (multi column type) である。この形状は単一の軸対称浮体のふくらんだ部分を結合したものであり、結合部の大きさを適切に選ぶことによって、単一の軸対称浮体と同様の Heaving の応答特性が得られる。

2.2 付加物の装備

今回の浮魚礁の二つ目の大きな特徴は、浮体の周囲に網を用いた付加物を装備していることである。単一型では図1(a)に示すように浮体を取り巻いてリング状の構造部材を配置し、それに網を巻きつけている。一方、複合型では、構造部材は設けず3本のコラムの周りに、直接、網を巻きつけている。

このような網状の付加物を装備すると、浮魚礁のかさ容積の増大を図ることができ、浮体が比較的小さくとも魚群に対する大きな蜻集効果を期待できる。また、大きい面積の網の部分に藻が発生し成長すれば、沖合に藻場が出現することになって、魚群の蜻集効果はさらに高くなると予想される。実機の網としては、付着生物が発生し易い漁網を使用する。

浮魚礁の波浪中での動揺の面から言うと、この付加物は同調時の動揺を抑える効果をもつ。Heaving や回転運動である Pitching はもちろん、係留された浮体の場合は水平方向の運動である Surging でも同調運動が起こりうる。網状の付加物は浮魚礁に働く減衰力を増大させるため、それらの同調時の動揺は顕著に現れないようになる。

3. 波浪中動揺試験結果

3.1 試験の概要

単一型 (single column type) および複合型 (multi column type) 浮魚礁の模型について波浪中動揺試験を実施し、浮魚礁の動揺および係留索に作用する張力を測定した。供試模型の形と寸法を図1に、重量 W 、重心高さ KG 、メタセンタ高さ GM を表1に示す。単一型では、浮体の上部と底部の2個所に浮体を取り巻くリング状の支柱を配置し、それに網を巻きつけている。試験で用いた網は合成繊維製である。網目の大きさは2種類と

表1 模型諸元

	SC-1~3	MC-1	MC-2
W (kg)	11.2	17.3	17.3
KG (m)	0.120	0.232	0.229
GM (m)	0.027	0.095	0.098

し、細かい網目と粗い網目である。さらに、浮体の周囲にビニールを張り付けた場合の実験を行った。これは、実海域では網に生物が付着して完全に網目が詰まった状態になりうることを想定したものである。以下、単一型模型の各状態を次のように表す。

SC-1：細かい網目 (格子 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 糸の径 0.3 mm)

SC-2：粗い網目 (格子 $4.5\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$, 糸の径 1 mm)

SC-3：目詰まり状態 (ビニール張り付け)

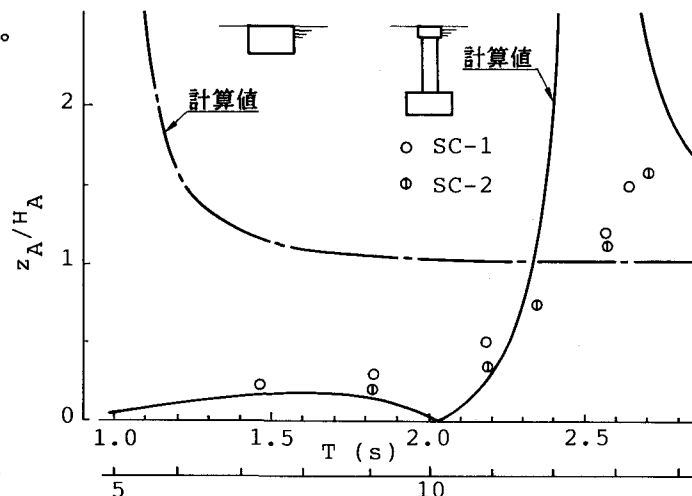


図2 Heaving の応答

複合型に対しては、3本のコラムの結合部が円形の場合と三角形の場合の実験を行った。網は3本のコラムの周りに巻きつけられている。複合型模型の各状態を次のように表す。

MC-1：細かい網目，結合部円形

MC-2：細かい網目，結合部三角形

これらの模型の下端中央を係留点とし、1本の係留鎖で模型を係留した。静水中では係留鎖は水底まで垂れ下がった状態にある。係留鎖の全体の長さは4.9m，単位長さ当たりの空中および水中重量はそれぞれ0.224および0.195kg/mである。係留鎖の上端部にロードセルを取り付け張力を測定している。

各模型状態について、Bretschneider-光易型波スペクトルをもつ不規則波を入射波とした。実験時の有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$ を図3に示す。図中の曲線は波周期の範囲を表す一つの基準⁵⁾ $\sqrt{1.3H_{1/3}} < T_p < \sqrt{3.0H_{1/3}}$ と、 $T_p = 1.05T_{1/3}$ から求めた、波周期と波高との関係を表す。ここで T_p は波スペクトルのピークの周期である。単一型に対しては不規則波中試験のほか規則波中試験も行っている。実験に使用した水槽は石川島播磨重工業(株) 技術研究所水理実験場第1水路(長さ×幅×水深 = 44m×2.5m×1.5m)であり、浮魚礁の動揺の測定には、発光ダイオードを用いた非接触型動揺計測装置を使用した。

3.2 単一型の動揺特性

不規則波中で測定した動揺を統計解析して動揺の有義値(1/3 最大値)を求めた。図4に単一型に対する結果を示す。図中の $z_{1/3}$, $x_{1/3}$ および $\theta_{1/3}(\text{deg.})$ はそれぞれ Heaving, Surging および Pitching の有義値(全振幅)である。以下、細かい網目の場合(SC-1)の結果を中心に述べる。

(1) Heaving

最初に Heaving についてみると、動揺の有義値は有義波高に対して20%程度以下であり、Heaving は小さい。実海域の有義波高を仮に6mとしてもHeavingの有義値は1.2m程度である。単一型では浮体の周囲に大きい網状の付加物があるため、そのHeavingの特性は浮体単独のときとかなり異なるのではないかと予想した。しかし、浮体が本来もっているHeavingが小さいという特徴は、そのような付加物があってもほとんど変わらない。

これと同様の結果は規則波中試験から求めたHeavingの応答にもみられる。図2の中に、SC-1およびSC-2に対するHeavingの応答の実験値を示すが、波力がゼロとなる周期 $T=2.03\text{ s}$ より短い波周期の範囲で応答は小さく、実験値は図中に示す浮体単独の場合の計算値にほぼ対応している。後者の結果からは、付加物を装備した単一型浮魚礁の特性を、大略、浮体単独の計算によって推定できることがわかる。

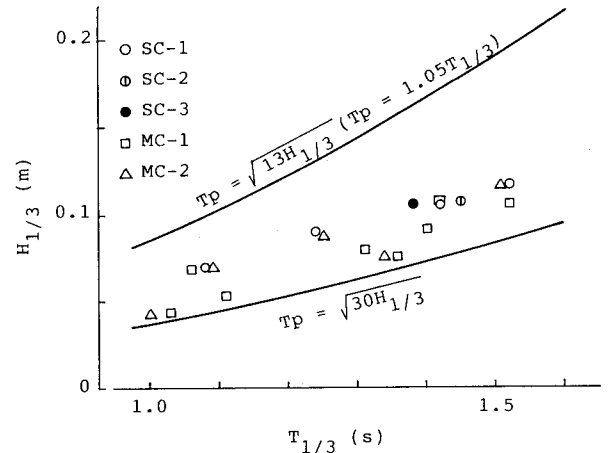


図3 実験時の波周期，波高

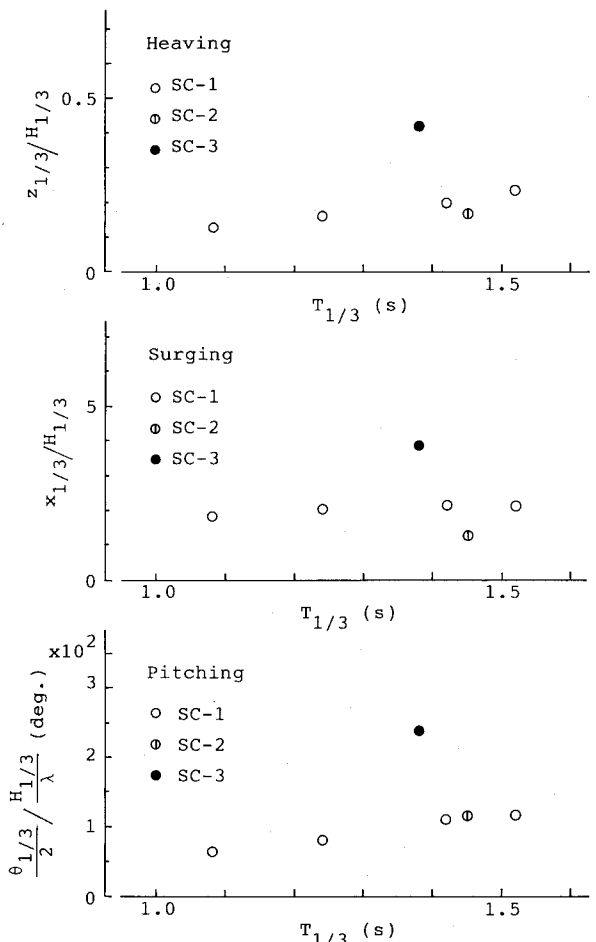


図4 単一型の波浪中動揺

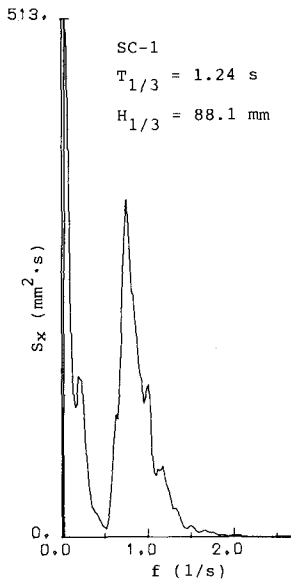


図5 Surgingのスペクトル

また図から明らかなように、Heaving の同調点は、浮体単独のときの固有周期 $T = 2.51\text{ s}$ よりもかなり長周期側へずれる。この結果、応答の急激な立ち上がりが緩和される。これは減衰力の大きい網状の付加物があるために、Heaving の同調運動が顕著に現れなくなったことに起因している。

(2) Surging

次に Surging の結果をみる。Surging の有義値と有義波高との比は波周期に対してほとんど変化せず2程度である。これは規則波中試験から求めた Surging の応答の2倍位となる。一般に、係留された浮体の不規則波中の Surging には長周期の変動成分が現れ、いまの有義値もそのような長周期成分を含んでいる。 $x_{1/3}/H_{1/3}$ の値が1を大きく超えるのはこのためである。図5に Surging に対するスペクトルの一例を示すが、低周波数側のピークに対応する周波数が長周期運動の卓越周波数を表す。係留された浮魚礁の Surging の検討にあたっては、このように長周期運動の影響を考慮に入れる必要がある。しかし、Surging そのものが大きくても周期が長いので運動は緩やかであり、係留索に及ぼす影響の点から言うと、係留索の張力に急激な変化は起こらない。

(3) Pitching

図4の Pitching の有義値は波形勾配 $H_{1/3}/\lambda$ を用いて無次元化している。 λ は $\lambda = (g/2\pi)T_{1/3}^2$ で計算した波長を表す。図からわかるように、Pitching の無次元値は波周期に対して増大する傾向を示す。この Pitching の値は Surging との連成運動に伴う長周期の変動成分を含んだものである。

ところで、前述の波周期の範囲を表す基準から波形勾配の範囲を求めると $1/18.4 > H_{1/3}/\lambda > 1/42.4$ となる。いま上限値 $H_{1/3}/\lambda = 1/18.4$ をとった場合、図4に示す Pitching の縦軸の $1(\times 10^2)$ の値は $\theta_{1/3}/2 = 5.4^\circ$ に相当する。今回の浮魚礁の Pitching はほぼこの位の値になり、動揺角は小さい。

(4) 網目の影響

ここで、動揺に及ぼす網目の影響について述べる。

図4には、付加物の網目が粗い場合 (SC-2) および完全に目詰まりした状態 (SC-3) の実験値も示している。細かい網目と粗い網目とではっきりとした差が現れるのは Surging である。網目の大ききで水平方向の波力がかかなり異なるため、Surging に対する網目の影響が比較的大きく現れる。一方、目詰まり状態の結果をみると、Heaving, Surging, Pitching とも細かい網目のときに比べておよそ2倍位の大ききとなっている。目詰まり状態では、網の部分には剛体と同様の大ききな波力が働くから動揺は大きくなる。

実際に網を選定するにあたっては、細かい網目のものを選ぶと目詰まり状態を起こし易く、動揺性能上不利である。当初から生物付着を考慮に入れて粗い網目のものを選ぶ必要がある。生物が付着した状態で SC-1 の網目ぐらいの空隙があれば、低動揺型浮魚礁として十分の動揺性能を確保できると考える。

3.3 複合型の動揺特性

複合型の波浪中動揺を図6に示す。水面下の結合部が円形 (MC-1) と三角形 (MC-2) の場合の実験値を併記している。

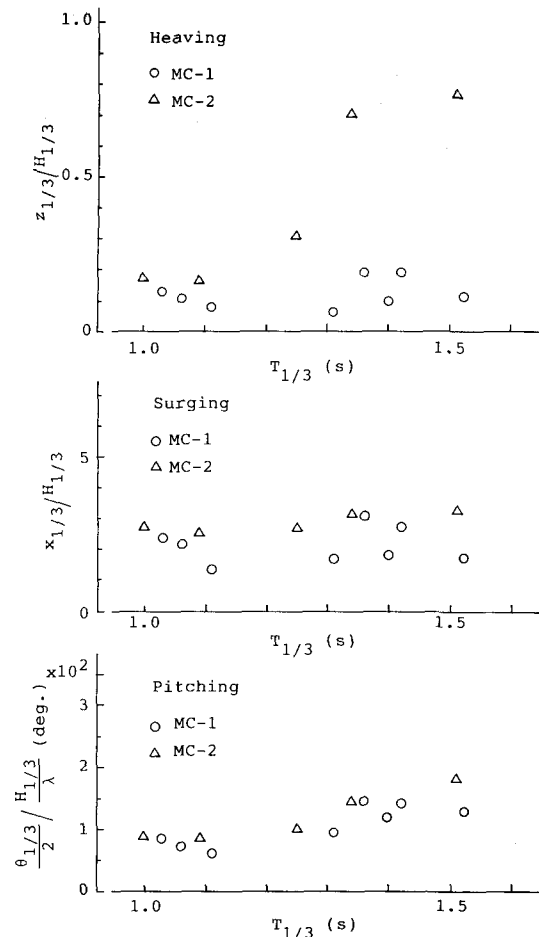


図6 複合型の波浪中動揺

Heaving は、MC-1では単一型と同様小さいのに対し、MC-2ではかなり大きくなっている。この差異は結合部の形状および鉛直方向の投影面積の違いに起因しており、とくに、投影面積の違いの影響が大きい。MC-2の Heaving を小さくするためには、いまよりも結合部の投影面積を大きくすればよい。結合部の形によってこのように Heaving の特性が大きく変わるから、形状の選定にあたっては、予め、形状と付加質量などの流体力との関係をつかんでおく必要がある。

Surging および Pitching は、結合部の形によって明確な差は現れない。Surging, Pitching とも、単一型と同様長周期の変動成分を含んでいる。両者とも単一型に比べて大き目であるものの大差はない。

3.4 係留力特性

最初に、不規則波中の浮魚礁に働く波漂流力 F_D を浮魚礁の漂流量から求める。Surging の時間変動の平均値は、浮魚礁の水平方向の定常的な変位つまり平均的な漂流量を与える。係留索がカタナリを形成するとき

$$\frac{h}{S_0 - X_0} = \frac{\cosh Pc - 1}{\sinh Pc - Pc}$$

$$F_D = w'h / (\cosh Pc - 1)$$

$$Pc = w'X / F_D$$

が成り立つから、漂流量から波漂流力を算定できる。ここに、 h および X_0 はそれぞれ浮体の係留点から固定着鎖点までの垂直および水平距離、 X は浮体の係留点から係留索の接地点までの水平距離、また、 S_0 および w' はそれぞれ係留索の長さおよび単位長さ当たりの水中重量である。 X_0 は漂流量がわかれば求まる。

この方法で求めた単一型浮魚礁の波漂流力を、無次元値 $\hat{F}_D = F_D / (\rho g H_{1/3}^2 D / 8)$ の形で図7に示す。ただし、 D は水面での浮体の直径とする。波漂流力の無次元値 $\hat{F}_D$ は波周期が長くなるにしたがって減少する傾向がある。また、波漂流力に対する網目の影響は著しいことが明らかである。細かい網目の場合に比べて、粗い網目のときの波漂流力は半分程度、一方、目詰まり状態の波漂流力はおよそ3倍位となっている。

図7には、浮魚礁の動揺に伴って生じる係留索の変動張力の有義値も、無次元値 $\hat{F}_{1/3} = F_{1/3} / \rho g H_{1/3} D^2$ の形で示す。いまの波周期領域では変動張力は波周期によってほとんど変化していない。網目の影響については、細かい網目と粗い網目とで差はないが、目詰まり状態では変動張力はかなり大きくなる。目詰まり状態でないならば、浮魚礁の Heaving が小さいことから変動張力も小さい。

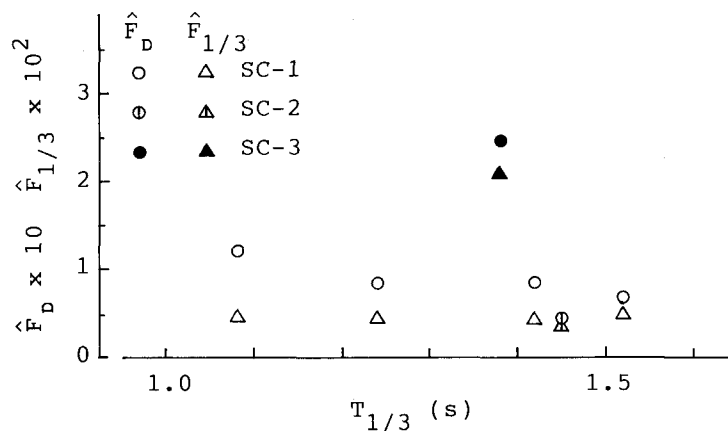


図7 波漂流力, 変動張力

4. 想定実機

浮魚礁を使用目的に応じて大別すると次の2種類になる。

- i) ブリ, イカ類など沿岸域の魚類を主な対象とし、水深200m程度の海域に設置するもの
 - ii) カツオ, マグロ類などの大型魚類を対象とし、1000m以上の大水深域に設置するもの
- ここではi)を沿岸型, ii)を外洋型とする。

沿岸型の浮魚礁を設置する海域の波条件が $T_{1/3} = 9 \text{ s}$, $H_{1/3} = 6 \text{ m}$ であるとして、低動揺型浮魚礁の実機の寸法を試算してみる。図2に示した単一型(SC-1)の Heaving の応答に $T_{1/3} = 1.8 \text{ s}$ の場合の波スペクトルを重ね合わせて、この波周期をもつ波の中の $z_{1/3}/H_{1/3}$ の値を求める。結果は $z_{1/3}/H_{1/3} = 0.38$ となり、Heaving は十分に小さい。そこで今回の模型に対する波周期 $T_{1/3} = 1.8 \text{ s}$ を実海域の波周期 $T_{1/3} = 9 \text{ s}$ に対応させると、浮魚礁の実機の寸法は模型の寸法の25倍となる。これは実用に供しうる規模であると思う。有義波高6m に対する Heaving は $z_{1/3}/2 = 1.1 \text{ m}$ 、また、Surging および Pitching は図4の結果を用いて求めると、それぞれ $x_{1/3}/2 = 6 \text{ m}$ ($x_{1/3}/H_{1/3} = 2$) および $\theta_{1/3}/2 = 8^\circ$ ($(\theta_{1/3}/2)/(H_{1/3}/\lambda) = 1.70 \times 10^2$) である。今回の実験範囲の波周期 $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}$ を $T_{1/3} = 9 \text{ s}$ に対応させると実機の動揺性能はさらに向上するが、規模がやや大きくなる。

5. む す び

波浪中での動揺が小さく、かつ、かさ容積の大きい浮魚礁として、Heaving の小さい浮体の周囲に網状の付加物を装備した浮魚礁を提示した。その模型を用いた波浪中動揺試験により、波浪中での Heaving の小さいことを確認するとともに、動揺に及ぼす網目の影響の大きさ、係留力が比較的小さいことなどを示した。

今後実用化を進めるにあたり、さらに大波高時の動揺および係留索の張力、潜り込み現象等の潮流の影響、係留索の配置など、検討すべき課題が残されている。引き続き実験的検討を重ねていくことにしている。

終わりに、貴重なご助言をいただいた石川島播磨重工業(株)技術研究所 梶田悦司副所長に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 広沢国昭, 岡村秀夫 : 高知沖浮魚礁—土佐黒潮牧場1号, スチールデザイン (1985/4)
- 2) 全国沿岸漁業振興開発協会 : 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 (1985)
- 3) 山下誠也 : 上下揺れの波強制力を受けない形状についての一考察, 日本造船学会論文集, 第150号 (1981)
- 4) 山下誠也 : コラム・フーティング型海洋構造物の形状と波浪中性能, 石川島播磨技報, 第24巻, 第2号 (1984)
- 5) Environmental Conditions Committee Report of 7th ISSC Paris (1979)