

冷水取水管をとりつけた円盤型海洋温度差発電複合浮体の 波浪運動特性と波漂流力について

長 崎 作 治*・小 林 浩**

1. はじめに

海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion) は暖かい表面海水でアンモニアやフロンのような低沸点作動流体を蒸発させ、タービンをまわし冷たい深層海水でこれを凝縮する循環過程をくりかえすタービン発電システムの一つである。海洋に設置される海洋温度差発電 (OTEC) プラントは発電システム、浮遊式構造体 (プラットフォーム)、深層水を汲み上げるための取水管、位置保持または係留装置、電力輸送用のケーブルなどのコンポーネントからなる。

OTEC は高低熱源間の温度差が 20°C 前後であるから効率はかなり低い。したがって出力に対する処理熱量すなわち取水量は、10万 kW プラントで表面高温水、深層冷却水の各々について1時間あたり100万屯にも達し、水深 600 m 以深に及ぶ直径 10 m 以上の冷水取水管がまず問題となる。さらに、海洋温度差発電を日本近海で実用化しようとする場合、台風時の海象、気象条件に抵抗できる冷水取水管をとりつけた構造体、そして送電ケーブルの浮体への取付等から運動のすくない構造体が必要条件となる。

アメリカ合衆国ではすでに直径 102 m のコンクリート製円盤型プラットフォームに直径 12 m、長さ 1200 m のファイバー強化プラスチック (FRP) 製冷水取水管をつけた複合浮体を温度差発電プラントの排水ジェット流によるダイナミックポジショニングで定位置に保持する考え方や、鏡筒の形をした直径 18 m、長さ 450 m のコンクリート製冷水取水管と4基のパワーモジュールから構成された円筒 (スパー) 型構造体を直径 0.36 m~1.78 m の重量を軽くした中空円筒鋼リンク (H.C.L.) による1点係留ラインと、直径 28 m、高さ 4.8 m、水中重量 800 屯のアンカーによって定位置に保持する考え方などが発表されている。

わが国でも海洋温度差発電のフィージビリティスタディは昭和 49 年度からサンシャイン計画の一環として始まり、設置場所として内湾と外洋それぞれ代表的1海域

を想定し、冷水取水管をとりつけた浮遊構造体の検討を行っている。一つの案は長さ 230 m、幅 60 m、深さ 27 m、吃水 13 m、排水量 14.5 万屯の船型構造体で、もう一つの案は直径 110 m、高さ 37 m、吃水 27 m、排水量 27 万屯の円盤型構造体であり、これに直径 12.7 m、長さ 473 m の冷水取水管をとりつけたユニークな複合浮体である。

設置場所は陸から 20 km 以内、水深 600 m 前後の海域で、構造体はチェーンとアンカーにより係留し、発電電力は海底ケーブルで陸まで送電するという計画である。

プラットフォームの検討では暴風時および通常運転時における冷水取水管をつけた複合浮体の動揺特性と波漂流力を知ることが必要である。船型構造体については冷水取水管を分離して考えれば船体の運動特性や作用波力は大深度石油掘削船等の例から算定できるが、円盤型構造体については現段階では模型実験から波浪に対する運動特性、係留に対する漂流力を求めることが第一歩と思われる。

このような考え方にに基づき、本研究は冷水取水管の性状の相違が円盤型構造体の動揺および複合浮体に作用する漂流力にどのような影響を与えるかを模型実験から求め比較検討したものである。

2. 実験の概要

複合浮体模型に一方から規則波を作用させ、構造体の上下ゆれ (heaving)、縦ゆれ (pitching)、前後ゆれ (surging) の動揺と漂流力 (drift force) を測定し、構造体と冷水取水管との取付部の剛性および取水管自体の剛性に基づく相違を検討した。漂流力については、Havelock の近似式で無次元化し、漂流力係数 $F_D \left/ \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{1}{2} H \right)^2 D \right.$ を求めて比較した。ここで、 F_D : 波漂流力、 H : 作用波高、 D : 構造体の直径である。

2.1 複合浮体模型

(1) 全体構成

複合浮体模型の全体図を図-1に示す。模型の縮尺は 1:200 である。なお、冷水取水管を重模型としたため、その模型重量を縮尺より大きくとり、重心位置を実機と

* 正会員 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

** 正会員 清水建設(株)研究所主席研究員 海洋研究部

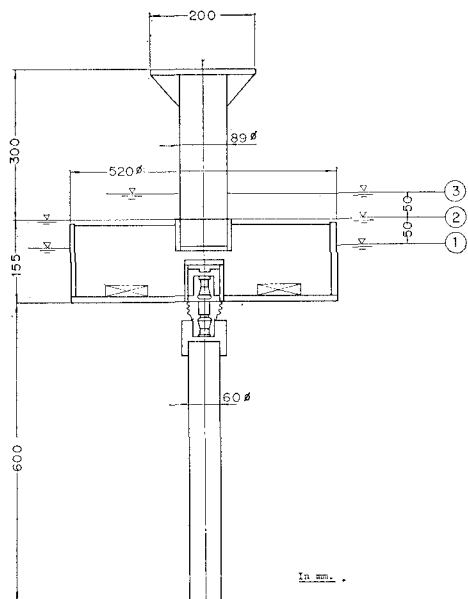


図-1 複合浮体模型

表-1 模型各部重量

模 型 各 部	重量 (kg)
上部円筒部	4.7
発電本体円盤部	14.1
取水管取付部 (U)	2.7
取水管取付部 (S ₁ , S ₂)	2.5
取水管部 (R)	13.8
取水管部 (F ₁)	0.5
取水管部 (F ₂)	0.4

合わせた。模型各部の重量は表-1に示す通りである。

(2) 冷水取水管取付部

円盤型構造体と冷水取水管との取付方式は (i) 剛結合 (記号 R で表示), (ii) 振れ運動のみできるユニバーサルジョイント (記号 U で表示, 図-2), (iii) 上下運動のみできるスリーブジョイント (取水管保持パネの違いにより記号 S₁ および S₂ で表示, パネ常数はそれぞれ, 5.0 kg/cm² および 16.8 kg/cm² である, 図-3) とした。

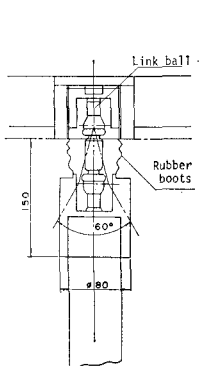
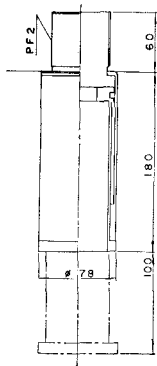


図-2 U タイプ結合

図-3 S₁, S₂ タイプ結合

(3) 冷水取水管

冷水取水管は (i) 鋼製の剛構造管 (記号 R で表示), (ii) 塩化ビニール管をゴムの短管で連結した柔構造管 (記号 F₁ で表示, 図-4) および (iii) ゴム管を鋼製のリングで連結した柔構造管 (記号 F₂ で表示, 図-5) とした。

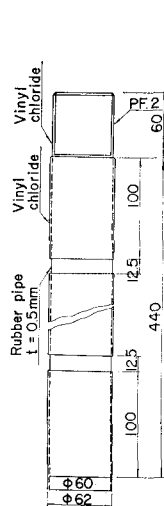


図-4 短管連結構造取水管

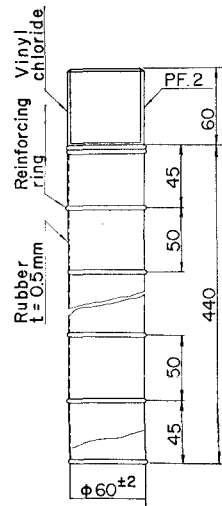


図-5 補強リング構造取水管

2.2 実験装置および方法

(1) 実験水槽

実験水槽は幅 4.35 m, 長さ 10.75 m, 深さ 1.05 m の大きさでプランジャー型の造波装置, なぎさ型の消波装置を備えている。

(2) 動揺試験

波高および波周期は容量式波高計で, 模型の動揺は 3 成分運動測定装置で上下ゆれ, 前後ゆれおよび縦ゆれを同時に計測し, ペン書きオシログラフにて記録した。なお, 前後ゆれは動揺中心での計測ではないので, 縦ゆれの影響を計算により除去した。模型固有の諸特性 ($\bar{GM}$, 上下ゆれおよび縦ゆれの固有周期) は傾斜試験, 自由減衰試験から求めた。

(3) 漂流力試験

図-6 に示すように, 模型の上下ゆれ, 縦ゆれ, 前後

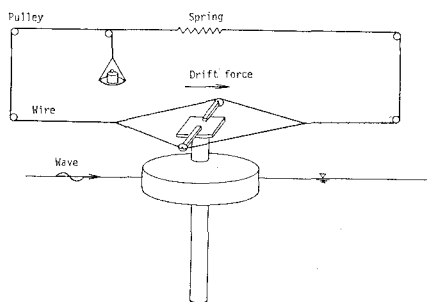


図-6 漂流力測定装置

表-2 模 型 実 験 条 件

呼 称	取水管取付部	取 水 管	乾 舷 cm	重 量* kg	重心位置** cm	GM cm	動揺固有周期	
							上下ゆれ	縦ゆれ
R ①	剛	剛 管	5	30.6	28	43.1	1.00	1.20
R ②	〃	〃	0	35.0	25	16.5	0.96	1.48
R ③	〃	〃	-5	36.2	25	13.0	9.00	1.90
U ①	ユニバーサル	〃	5	30.6	28	33.8	1.05	0.68
U ②	〃	〃	0	35.0	25	6.9	1.03	0.70
U ③	〃	〃	-5	36.2	25	4.7	9.32	2.12
S ₁ ①	スライド 1	〃	5	30.4	28	43.4	1.05	1.34
S ₁ ②	〃	〃	0	34.8	25	16.5	1.18	1.40
S ₁ ③	〃	〃	-5	36.0	25	13.1	9.20	1.65
S ₂ ①	スライド 2	〃	5	30.4	28	43.4	1.01	1.34
F ₁ ①	剛	塩化ビニール製短管+ゴム	5	17.3	12	23.3	0.96	0.89
F ₂ ①	〃	ゴム + 鋼製リング	5	17.3	13	23.4	1.00	0.95

ゆれが自由となるようにワイヤーで保持し、波浪中で模型が波の進行方向に漂流しようとする力にバランスさせるようにウエイトをかける。模型がある点を中心として動揺するようになったときのウエイト重量を漂流力とした。

2.3 実験条件

(1) 実験ケース

実験を行った複合浮体の種類と吃水条件を表-2 に示す。なお吃水条件 ①, ②, ③ は図-1 に示す通り①浮上状態, ②構造体上面が水面に一致した浮遊状態, ③潜水状態である。

(2) 波浪条件

代表的設置海域の波浪条件を参考に実験条件をきめ、最大波高 8cm (実機 16m)、波周期 0.4~1.7 秒 (実機約 6~24 秒) の範囲の正弦波とした。なお、波浪条件は実験 1 ケースにつき約 35 種変化させた。

(3) 記 号

文中あるいは図中に用いた記号は次の通りである。

- L_0 : 波長 ($= (g/2\pi)T^2$)
- T : 波周期
- H : 入射波高
- D : 構造体直径
- ζ : 上下ゆれ幅 (振幅の 2 倍)
- ξ : 前後ゆれ幅 (振幅の 2 倍, 模型円盤部上面で測定)
- ξ' : 前後ゆれ幅 (振幅の 2 倍, 模型円筒部上面で測定)
- θ : 縦ゆれ角 (振幅の 2 倍)
- ϕ : 波傾斜角係数 ($\pi \cdot H/L_0$)
- F_D : 漂流力
- ρ : 流体密度
- g : 重力加速度

3. 結果および考察

3.1 動揺特性

(1) 上下ゆれ

図-7 に示すように取水管を剛結合とした R タイプの

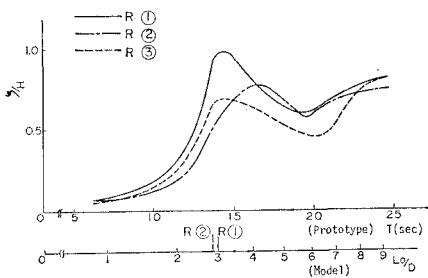


図-7 R タイプの上下ゆれ特性 (矢印は模型の固有周期に対応する L_0/D の値。R ③ では 9 より大となる。)

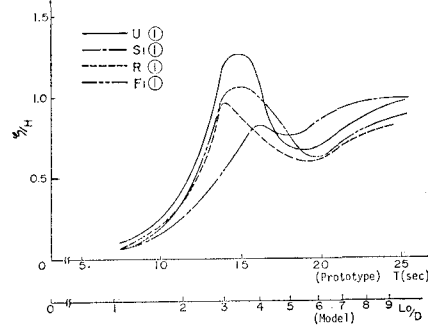


図-8 上下ゆれ特性の比較

①浮上状態では共振時に大きい上下ゆれを起こし、長周期で $\zeta/H=1$ 、つまり波に乗るようになる。乾舷が少なく②, ③になるにつれて上下ゆれも小さくなる。この減少は固有周期が長くなることにもよるが、円盤部上面が水面上に浮かび上がる時、水面下に没する時に生ずる渦や波などによる減衰力の影響も考えられる。

取水管取付部が回転運動する U タイプの上下ゆれは R タイプに比べかなり大きい。上下ゆれと縦ゆれとの連成振動によるものであろう。取水管取付部が上下運動のみ可能な S タイプは R タイプに近い応答曲線を示している。取水管を可撓性とした F_1 , F_2 タイプはパイプが軽いため他のモードの運動との連成作用は小さく、パイプ

のない場合の構造体の応答と同様である。

各タイプの比較を図-8に示すと、ほぼ同様の応答特性を示していることが分かる。

(2) 縦ゆれ

Rタイプは共振周期付近で大きな縦ゆれを示した。Uタイプでは①、②の吃水状態の固有周期はかなり短いのにそれより長周期について激しく動揺した。これは構造体と取水管との一体運動によるためであろう。

S₁, S₂タイプのスプリング機構は縦ゆれには影響しないのでRタイプと類似した曲線を示した。F₁, F₂タイプの応答は小さく共振点付近でも $\theta/2\theta=2$ を越えることがなく長周期では1近くに収束している。

各タイプを図-9で比較すると F₁, F₂タイプでは縦ゆれは広範囲の波周期において小さい。

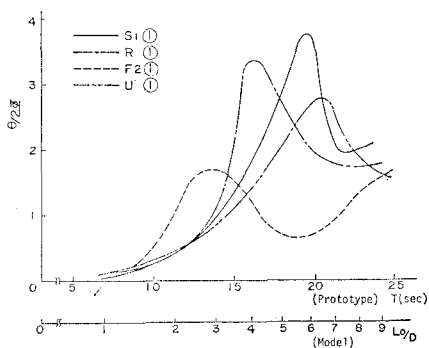


図-9 縦ゆれ特性の比較

(3) 前後ゆれ

運動測定装置は①の浮上状態では円盤部上面に、②の状態では上部円筒部上面に固定した。このため前後ゆれは計測される水平変位から縦ゆれによる増分を差引いて求めた。

実験ケース R①では $L_0/D=3$ で一度ピークがあり6付近でおち込み、長周期で $\xi/H=1$ となった。R②, R③と応答は小さくなる。S₁, S₂はほぼ Rタイプに近い曲線を示した。F₁, F₂は他のタイプに比べ応答は小さい。

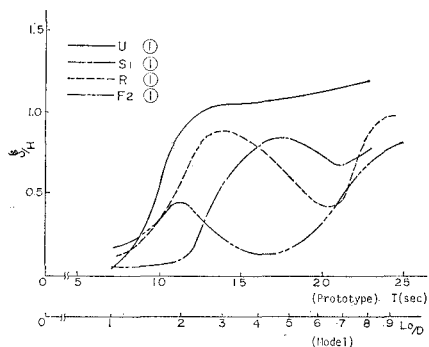


図-10 前後ゆれ特性の比較

図-10に吃水条件①の状態での各タイプの比較を示す。

3.2 漂流力特性

実験ケース R①では漂流力は長周期で0に近づくが、短周期では0.5付近でバラツキが大きい。これは円盤上面への波の打ち込みによるものと思われる。吃水条件②, ③では①に比べ漂流力が小さくなり、潜水状態が有利なことが判かる。

Uタイプはすべて $L_0/D=2$ で大きな漂流力を示した。これは円盤部の上下ゆれと縦ゆれの位相差によるものと思われる。SタイプはRタイプと同一傾向を示した。FタイプはF₁, F₂とも $L_0/D>4$ の周期では漂流力は殆んど発生せず、短周期でも他のタイプよりかなり小さい。このことは上下ゆれが他のタイプと同程度の応答をするのに縦ゆれ、前後ゆれが小さいことなどから位相差、重心位置などの影響によるためと思われる。

各タイプを図-11で比較すると、Fタイプは広範囲の波周期にわたって漂流力は小さく、Uタイプはかなり大きな漂流力を受けることが分る。

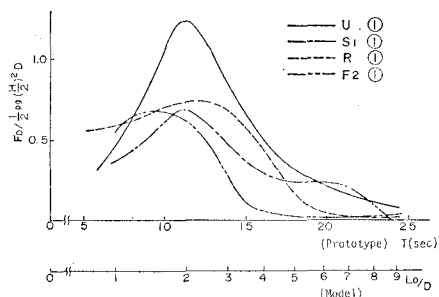


図-11 漂流力特性の比較

4. 結 論

冷水取水管取付部がユニバーサルジョイントの場合の複合浮体の動揺および漂流力が最も大きく、スリーブジョイント、剛結合の順に小さくなっている。取水管を軽量の柔構造パイプとした場合の複合浮体の動揺・漂流力がもっとも少なかった。このため、今後の詳細検討は柔構造冷水取水管を取付けた複合浮体からはじまるのが望ましいと考えられる。また、ユニバーサルジョイント等冷水取水管取付部を可動とした結合方式については、構造体が具体的になった時点で、構造、係留上の要因も含めて、更に、実機に近い縮尺で再検討する必要があると考える。

謝辞

本実験は工業技術院サンシャイン計画の一環として省エネルギーセンターで実施した海洋温度差発電システムの研究の一部であり、本研究に御指導・御協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。