(昭和 58 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

海洋温度差発電プラントの動的挙動

正員	安	川		度*	正員	Л	上		肇*
正員	大	西 登	喜	夫*	正員	Щ	上	順	雄*
正員	根	間		清*	正員	池	淵	哲	朗*

Dynamic Analysis of Ocean Thermal Energy Conversion Power Plant

by	Wataru Yasuka	wa, Member	Hajime	Kawakami,	Member
	Tokio Ohnishi,	Member	Yoshio	Yamagami,	Member
	Kiyoshi Nema,	Member	Tetsuro	Ikebuchi,	Member

Summary

Three type of offshore structure on which an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) power plant will be constructed are now available; that is, land based (on shore) type, bottom mounted (offshore) type and floating type. Among them, the floating type offshore structure is popular and examined extensively in Japan. As one of the typical and practical applications of the "SUNSHINE PROJECT", "Study of the Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Power Generation System" has been commenced.

In studying this system, actually using a floating type pilot plant provided with a water intaking device, various experiments are scheduled to conduct. Since the power plant site is often a sea area where might be well visited by a typhoon.

In order to protect such offshore structures from the above disasters, it is required to provide the structure with sufficient strength that is bearable against severe sea conditions (such as wave, wind etc.) after analyzing the dynamic response.

So, we have studied the calculation method of a fluid force acting on the floating platforms and Cold Water Pipe (CWP), and a formulation of the mathematical models for the coupled platforms and CWP systems, as well as the equivalent linealized treatment of nonlinear fluid force. Then we have carried out the tank test by using 1/50 scale model of the OTEC plant which was designed in the "SUNSHINE PROJECT" for the experiment at sea, and compared the experimental results with the theoretical calculation, there by a reasonable agreement of both has been confirmed.

This work was supported by Agency of Industrial Science and Technology under the contract of the "SUNSHINE PROJECT".

1緒 言

海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, 略して OTEC)の海洋構造物としては陸上設置型,海底 着地型,浮遊型の3種が考えられるが,陸上設置型は大 規模プラントには不適であり,海底着地型は適当な陸棚 のあることが条件となるので我が国では主として浮遊型 が検討されてきている。サンシャイン計画の一つとして 実施されている海洋温度差発電システムの研究^{1),2)}にお いて実験が計画されている取水実験プラントの設置予定 海域は台風の頻繁に来襲する海域であり,本プラントは

*(財)エンジニアリング振興協会研究員

その厳しい海洋条件に耐える必要がある。しかも浮体と 長大な冷水取水管(Cold Water Pipe,以下 CWP と略 す)とを組み合わせたこのような構造物の経験は我が国 にはなく,諸外国でもまだ研究が緒についたばかりであ る。特に CWP の維持が困難と考えられ,現在までに実 験が行われた MINI OTEC や OTEC-1においても CWP は数か月間保持されたにすぎないようである。このた め、CWP の強度検討を行うため浮体と CWP を連成系 として動的応答解析法の研究が多く行われている^{3)~5)}。 本実験プラントについても予め動的応答計算を実施して 厳しい海洋条件に耐える構造とすることが必要である。 本研究では、浮遊型海洋温度差発電プラントの動的挙

229

日本造船学会論文集 第154号

動解析法を確立することを目的とし,浮体と長大な CWP の連成系について有限要素法を用いた解析法,浮体に作 用する流体力の特異点分布法による計算法,CWP に作 用する非線形流体力の線形化の方法等を検討するととも に,昭和 55 年度サンシャイン計画海洋温度差発電シス テムの研究¹⁾において試設計された取水実験プラントの 縮尺 1/50 の模型を用いた水槽実験を実施し,解析法の 妥当性を検討した。さらに,取水実験プラントについて 動的応答解析を行い,100 年暴風時および稼動限界時の 浮体の運動および CWP の挙動を調査した。

2 解 析 法

2.1 解析法の概要

浮遊型 OTEC プラントとして Fig.1 に示すものを考 え,浮体は軸対称のブイ型とし索鎖等により係留されて いるとする。CWP は浮体下部で吊るされているパイプ 状構造物とし,自在継手のようなピン結合がある場合も 考慮する。浮体および CWP に作用する外力としては波 浪,潮流および風を考え,動的計算では浮体に対しては 波浪のみを,CWP に対しては波浪と潮流を考える。

浮体は剛体として取り扱い6自由度をもつ1質点ばね 系にモデル化する。係留索鎖は非線形ばねとなるが,動 的係留力は小さく浮体の運動に与える影響も小さいと考 えられるのでここでは平衡位置での接線剛性をもつ線形 ばねに置換した。CWP は弾性体とし梁構造にモデル化 する。ピン結合も取り扱い可能とし,曲げに対してピン 結,捩りに対して剛結のように自由度を選択することが できる。ピン結合がある場合には CWP には重力による 復原力が作用して剛体振子のような振動が生じる。そこ でこのような振動を取り扱えるようにするため,梁の曲 げ剛性,軸剛性のほかに重力による復原力も考慮してい る。







Fig. 2 Co-ordinate system

解析は次の手順により行う。まず動的応答解析の平衡 位置を求めるため静解析を行って潮流, 波漂流力等によ る浮体の移動および CWP の変形を求める。このとき浮 体は直立したままとする。次に動的応答解析を行って, 浮体の運動, CWP の挙動等を求める。動的応答は周波 数応答解析と時刻歴応答解析の両方が可能なプログラム を開発した。解析は有限要素法により行い,計算時間短 縮のためノーマルモード法を利用した。使用した座標系 を Fig.2 に示す。

なお,本論文では動的応答については周波数応答解析 についてのみ示す。

2.2 流体力

2.2.1 浮体に作用する流体力

浮体に作用する流体力は線形 hydrostatic force,線形 hydrodynamic force および粘性力の和とする。これらの計算法を以下に示す。

(1) 線形 hydrostatic force

微小運動を仮定すると浮体に作用する hydrostatic force の変動成分は次の線形復原力によって表わせる。

$$f = Kr \tag{2.1}$$

ここに, **r**: 浮体の運動振幅, **f**:線形復原力, **K**: 復原力係数

軸対称体の場合は上下揺, 横揺および縦揺の場合に復原 力が生じ, 復原力係数はそれぞれ次のようになる。

上下 揺:
$$K_{33} = \rho g S$$
 (2.2)

橫摇, 縦揺: $K_{44} = K_{55} = W \cdot GM$ (2.3)

ここに, ρ:流体密度, g:重力加速度, S:水線面 積, W:排水量, GM:メタセンター高さ

(2) 線形 hydrodynamic force

線形 hydrodynamic force は浮体の運動により生じる流体反力 (radiation force) F_r と入射波から受ける流体力すなわち波強制力 (wave exciting force) F_W の和である。 F_r および F_W はそれぞれ次式で与えられ

海洋温度差発電プラントの動的挙動

る。

$$F_r = M_a \dot{\vec{r}} + N \dot{\vec{r}} \qquad (2.4)$$

$$F_W = \rho q \zeta \vec{F} \qquad (2.5)$$

ここに, M_a :付加質量, N:造波減衰係数, \bar{F} :波 強制力係数, ζ :入射波振幅, \cdot :時間微分 なお M_a, N, \bar{F} は特異点分布法により求めた²⁾。

(3) 粘性力

浮体運動は(1),(2)で述べた線形流体力のみを用 いることにより,特定の周波数領域を除き推定可能であ る。しかし横揺,縦揺の同調点の近傍において,浮体形 状によっては線形流体力よりも粘性力の方が卓越し,適 当な粘性修正を加える必要がある。粘性力は浮体と流体 粒子の相対速度の2乗に比例すると考えられるが,上述 の横揺等の同調点では浮体運動の速度が大きくなると考 えられることから,本報では流体粒子速度を無視し,横 揺および縦揺のみについて次のような粘性減衰力を考え た。

$$f = C_p |\dot{r}| \dot{r} \tag{2.6}$$

ここに、f: 横揺または縦揺の粘性減衰力、 C_p : 横揺または縦揺の粘性減衰力係数、r: 横揺角または縦揺角である。

2.2.2 CWP に作用する流体力

CWP に作用する流体力を発生させる 要因としては海 流, CWP の運動, 波浪, 後流渦等が考えられる。本研 究では, 運動推定に大きな影響を与えると思われる海流 による力, CWP の運動による 流体力および波強制力を 考慮することにする。波長に比べて CWP 直径は小さい ので次の Morison 式により CWP に作用する流体力 *f* を表わすことができる。

$$f = (C_M - 1)\rho \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{r} + C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}_W + C_D \rho \frac{D}{2} |\dot{v}| \dot{v}$$
(2.7)

ここに, C_M :質量係数, C_D :抗力係数, D:CWP の直径, \ddot{U}_W :波粒子加速度, \ddot{r} :CWP 運動加速度, \dot{v} :CWP と流体との相対速度

これらはいずれも CWP 軸との直交成分を考える。また C_M , C_D はレイノルズ数,表面粗度, Keulegan-Carpeter 数の影響を受ける量である。

2.3 周波数応答解析

2.3.1 運動方程式

波強制力を受ける浮体の運動方程式は(2.1),(2.4), (2.5) および(2.6) 式を考慮すると次式となる。

 $(M+M_a)\ddot{r}+N\dot{r}+C_p|\dot{r}|\dot{r}+Kr=F_W$ (2.8) ここで, M は浮体の質量である。(2.8)式の左辺第3 項は, (2.6)式で与えられる速度の2乗に比例した抵抗 であり,縦揺および横揺以外の項は0である。不規則波 応答の場合,この項をBorgman, Malhotraらの方法^{7)~9)} にならって以下のように等価線形化を行う。非線形項を 次式のようにおく。

$$C_p |\dot{r}| \dot{r} = \bar{C}_p \dot{r} + E \qquad (2.9)$$

ここに、E=誤差ベクトルである。 C_p は対角成分だけ であるから各項ごとに誤差の2乗の時間平均を最小とす るように \overline{C}_p を定めると、次式が得られる。

$$\bar{C}_{pjj} = \frac{\langle |\dot{r}_j| \dot{r}_j^2 \rangle}{\langle \dot{r}_j^2 \rangle} C_{pjj} \qquad (2.10)$$

ここで、〈 〉は時間平均を示す。 \hat{r}_j の確率密度関数が平均値0,分散値 m_0 のガウス分布となるとすると \bar{C}_{pjj} は(2.11)式で与えられる。

$$\bar{C}_{pjj} = \sqrt{\frac{8}{\pi} m_0} C_{pjj}$$
 (2.11)

なお m_0 は応答解析の結果として求まる浮体の速度スペ クトル $S_{ii}(\omega)$ を用いて次式により計算できる。

$$m_0 = \int_0^\infty S_{rr}(\omega) d\omega \qquad (2.12)$$

また規則波応答の場合(2.9)式の各項の誤差の2乗 の一周期分の時間平均を最小にするように \bar{C}_{pjj} を定め ると浮体の速度振幅を \bar{i} とすれば、田才¹⁰⁾が示している ような次式が得られる。

$$\bar{C}_{pjj} = \frac{8}{3\pi} \bar{r} C_{pjj} \qquad (2.13)$$

よって線形化された浮体の運動方程式は次のようになる。

 $(M+M_a)\ddot{r}+(N+\bar{C}_p)\dot{r}+Kr=F_W$ (2.14) 次に CWP について考える。海流および波力を受ける CWP の運動方程式は次式となる^{3)~5),11)}。

 $(M+M_a)\ddot{r}+C_s\dot{r}+Kr=M_W\ddot{U}+C_D|\dot{v}|\dot{v}$ (2.15) ここで, M=CWP の質量, r=CWP の変位, $M_a=$ CWP の付加質量, K=剛性行列, $C_s=$ 構造減衰係数, $M_W=C_M\cdot L$, $\dot{U}=\dot{U}_W+\dot{U}_c$, $C_M=$ 質量係数, $\dot{U}_W=$ 波 粒子速度, $C_D=$ 抗力係数, $\dot{U}_c=$ 海流速度, $\dot{v}=L(\dot{U}-\dot{r})$ L=座標変換行列

なお、煩わしさを避けるため M 等は浮体と同じ記号 を用いた。(2.15)式の右辺第2項の非線形力を線形化す ることを考える。浮体の場合と同様に非線形項を次のよ うにおく。

$$\boldsymbol{C}_{D}|\boldsymbol{v}|\boldsymbol{v} = \bar{\boldsymbol{C}}_{D}\boldsymbol{v} + E \qquad (2.16)$$

ここに、iは CWP と流体の相対速度の CWP 軸との直 交成分を表わす。誤差Eの2乗の時間平均を最小とする ように \overline{C}_D を定めると次式を得る。

$$\bar{C}_D = \frac{\langle |\dot{v}|\dot{v}^2 \rangle}{\langle \dot{v}^2 \rangle} C_D \qquad (2.17)$$

(2.17) 式の計算は、 \dot{v} の平均値が0でないため浮体の 場合に比べてやや複雑となる。不規則波応答の場合、最 終的に(2.17) 式の分子および分母は次のようになる。 $\langle |\dot{v}|\dot{v}^2 \rangle = \{1 + E_r(-a)\}(3\sigma_{\dot{v}}^2 + \overline{v})\overline{\dot{v}}$

日本造船学会論文集 第154号

$$\begin{aligned} +\varphi(-a)\sigma_{\tilde{v}}^{*}\left\{2\sigma_{\tilde{v}}^{*2}(a^{2}+2)+3\sigma_{\tilde{v}}^{*}\bar{v}a-3\bar{v}^{2}\right\} & (2.18)\\ \langle \tilde{v}^{2}\rangle =\bar{\tilde{v}}^{2}+\sigma_{\tilde{v}}^{*2} & (2.19)\\ \zeta \subset i\zeta, \quad a=\bar{v}/\sigma_{\tilde{v}} \end{aligned}$$

$$E_{\tau}(\dot{v}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\dot{v}} \exp\left(-\frac{z^{2}}{2}\right) dz$$
$$\varphi(\dot{v}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\dot{v}^{2}}{2}\right)$$
$$\vec{v}: \dot{v} \quad \text{の平均値}$$
$$\sigma_{\dot{v}}: \dot{v} \quad \text{の標準偏差}$$

なお σ_i は相対速度 i のスペクトル $S_{ii}(\omega)$ を用いて求められる。

また,規則波応答の場合,浮体と同様な考え方で等価 線形を行った。CWP の場合は海流も考えているので, 流速の平均値は0とならず, \overline{C}_D は次のようになる。海 流の流速を u_c , CWP の運動速度の振幅または CWP と 波粒子速度との相対速度の振幅を \overline{r} とすると,

(1) $u_c > \overline{\dot{r}}$ の場合

1

$$\bar{C}_{D} = \frac{u_{c} \left(u_{c}^{2} + \frac{3}{2} \bar{\dot{r}}^{2} \right)}{u_{c}^{2} + \frac{\dot{\dot{r}}^{2}}{2}}$$
(2.20)

(2) $u_c \leq \overline{\dot{r}}$ の場合

$$\bar{C}_D = \frac{B}{A} C_D \qquad (2.21)$$

$$\begin{array}{l} \boldsymbol{\mathcal{L}} \in \mathcal{K}, \quad A = 2\pi \left(u_c^2 + \frac{\bar{r}^2}{2} \right) \\ B = 4 u_c^3 (\alpha_1 - \pi) + 12 u_c^2 \bar{r} \sin \alpha_1 \\ \quad + 3 u_c \bar{r}^2 (2 \alpha_1 - \pi + \sin 2 \alpha_1) \\ \quad + \bar{r}^3 \left(\frac{1}{3} \sin 3 \alpha_1 + 3 \sin \alpha_1 \right) \\ \alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{-u_c}{\bar{r}} \right) \end{array}$$

なお, u_c=0 の場合, (2.21) 式は, (2.13) 式と同じ形 となる。(2.14) 式または (2.20)~(2.21) 式を用いると (2.15) 式は次式となる。

$$(\boldsymbol{M}+\boldsymbol{M}_{a})\ddot{\boldsymbol{r}}+(\boldsymbol{C}_{S}+\boldsymbol{\bar{C}}_{D})\dot{\boldsymbol{r}}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{r}=\boldsymbol{M}_{W}\boldsymbol{U}+\boldsymbol{\bar{C}}_{D}\dot{\boldsymbol{U}}$$

$$(2.22)$$

ここに、 $\bar{C}_D = \bar{C}_D L$ である。さて、動的解析時には予め 静解析を行い、海流による変形を求めてから解析を行 う。したがって海流による静的荷重を (2.22) 式から引 いておく。また、海流の時間的変化はないものとする と、 $\ddot{U}_c=0$ なので $\ddot{U}=\ddot{U}_W$ となる。これらより (2.22) 式は (2.23) 式となる。

$$(\boldsymbol{M}+\boldsymbol{M}_{a})\ddot{\boldsymbol{r}}+(\boldsymbol{C}_{S}+\boldsymbol{\bar{C}}_{D})\dot{\boldsymbol{r}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{r}=\boldsymbol{M}_{W}\boldsymbol{U}_{W}+\boldsymbol{\bar{C}}_{D}\boldsymbol{U}$$

(2.23) 浮体および CWP 全体の運動方程式は(2.14)式および (2.23)式より(2.24)となる。

$$(M+M_a)\ddot{r}+C\dot{r}+K=P \qquad (2.24)$$

ここにCおよびPは浮体と CWP によって異なり次式 で与えられる。

浮体:
$$C=N+\bar{C}_{p}, P=F_{W}$$

CWP: $C=C_{S}+\bar{C}_{D}, P=M_{W}\ddot{U}_{W}+\bar{C}_{D}\dot{U}$ } (2.25)
2.3.2 周波数応答解析

ノーマルモード法を利用するため、まず固有振動数解 析を行う。このとき付加質量 M_a は円振動数 ω の関数 であるが代表周波数による一定値を用いて固有円振動数 ω_n および固有振動モード ϕ_n を求める。 今、変位 r を 次のように s 個の固有モード ϕ で表わす。

$$r=\phi\xi$$
 (2.26)

ここに,6:一般化座標

(2.26) 式を (2.24) 式に代入し左から **φ**^T をかけると

$$M^* \xi + C^* \xi + K^* \xi = P^*$$
 (2.27)

ここに、
$$M^* = \phi^T (M + M_a) \phi$$
, $C^* = \phi^T C \phi$,
 $K^* = \phi^T K \phi$, $P^* = \phi^T P$

(2.27)式は自由度 s の方程式になっており (2.24) 式を 直接解くより計算時間が短くなる。

モード化された運動方程式 (2.27) 式を周波数域に変換すると (2.28) 式となる。

$$(K^*+i\omega C^*-\omega^2 M^*)$$
 (iw) = $P^*(i\omega)$ (2.28)
(2.28) 式の解は

 $\xi(i\omega) = H_{\xi}(i\omega)P^{*}(i\omega)$ (2.29) であり、 $H_{\xi}(i\omega)$ は次のようになる。

$$H_{\xi}(i\omega) = A(\omega) + iB(\omega) \qquad (2.30)$$

$$\begin{aligned} z \in \mathcal{K}, \quad A(\omega) &= -(\omega C^*)^{-1} Z(\omega) B(\omega) \\ B(\omega) &= -(Z(\omega)(\omega C^*)^{-1} Z(\omega) + (\omega C^*))^{-1} \\ Z(\omega) &= K^* - \omega^2 M^* \end{aligned}$$

以上の手順で求まった $H_{\epsilon}(i\omega)$ を用いてモーダル応答ス ペクトル $S_{\epsilon\epsilon}$ およびグローバル応答スペクトル S_{rr} が求 まる。すなわち

$$S_{\xi\xi} = \overline{H_{\xi}(i\omega)} S_{P^*P^*}(i\omega) H_{\xi}^T(i\omega) \qquad (2.31)$$
$$S_{rr} = \phi S_{\xi\xi} \phi^T \qquad (2.32)$$

ここに、
$$S_{P^*P^*}(i\omega) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \overline{H_{P^*}(i\omega)} S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta)$$

 $\times H_{P^*}^T(i\omega) d\theta$
 $H_{P^*}(i\omega) = \phi^T \begin{cases} H_F(i\omega) \\ H_P(i\omega) \end{cases}$
 $S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta) : 波スペクトル$
 $H_F(i\omega) : 浮体に作用する外力の応答関数$
 $H_P(i\omega) : (i\omega M_W + \overline{C}_D) H_{U_W}(i\omega)$

H_{Uw}(iw):波粒子速度の応答関数

なお, 浮体および CWP に作用する粘性抵抗の等価線形 化に必要なスペクトル S;; および S;; は次式により求め られる。

$$S_{rr} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \overline{H_r(i\omega)} S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta) H_r^T(i\omega) d\theta \quad (2.33)$$

$$S_{\dot{v}\dot{v}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \overline{H_{\dot{v}}(i\omega)} S_{\zeta\zeta}(\omega,\theta) H_{\dot{v}}^{T}(i\omega) d\theta \quad (2.34)$$

$$\Xi \subset \mathcal{K}, \quad H_{\dot{v}}(i\omega) = L(H_{\dot{U}_{W}}(i\omega) - H_{\dot{\tau}}(i\omega))$$

(2.33) 式および (2.34) 式からわかるように, これらの 計算には応答が求まっていなければならず, 繰り返しを 含んだ収束計算が必要となる。

3 実験結果と解析結果の比較

3.1 実験の概要

実験は海洋環境技術研究所回流水槽(長さ×幅×水深 = $60 \text{ m} \times 3.8 \text{ m} \times 4.3 \text{ m}$)にて実施した。模型は、55年度 サンシャイン計画海洋温度差発電システムの研究におい て概略設計された取水実験プラントの縮尺 1/50 のもの を想定している。実機では CWP は約 10 本の管を自在 継手で結合した構造を考えているが、模型では水槽の水 深の制限から CWP は 3 本の管を結合したものとし、下 端に重量調整用の重錘を取り付けた。模型配置図を Fig. 3 に示す。浮体の外殻は木材で、底板はアルミ材を用い ている。CWP はアクリル製 であり、自在継手(アルミ 材)で結合されている。模型の主要目を、Table 1 に示 す。浮体形状として没水型(spar type)と浮上型(disc



Fig. 3 Model of OTEC plant

Table 1 Principal particulars of platform

Item)	Spar type	Disc type
Diameter	(mm)	800	800
Draft	(mm)	680	208
Freeboad	(mm)	300	352
Weight	(kg)	203	102
KG	(mm)	191	154
GM	(mm)	26	150
Radius of gyration	(mm)	261	238

type) の2種類を考えた。

実験は、海流中試験、波強制力試験、規則波試験およ び不規則波試験について行った。波浪中試験では、一様 海流と波浪が混在する場合についても実験を行った。計 測は、浮体の Surge, Heave および Pitch 運動, CWP のピンに生じる回転角、CWP のパイプ中央に生じる歪 について行った。計測値はすべてアナログデータレコー ダに収録し、計測終了と同時にマイクロコンピュータを 使用して必要な解析を行った。なお、浮体の流体力係数 の実験値と計算値は良好な一致を示したが、紙面の関係 で別の機会に報告するとし⁶,本報では応答の実験結果 ならびに計算値との比較について述べる。

3.2 実験値と計算値の比較

(1) 計算モデル

2章で述べた計算法の考え方に従って、実験模型に対 する計算モデルを考えた。これを Fig.4に示すが、節点 数は 17、要素数は 16 である。CWP はアクリル製のパ イプとアルミ製の自在継手部(ピン)からなるが、計算 ではそれぞれを別の要素としてモデル化した。



rig.4 Calculation model

Table 2 Strain of CWP

(x10⁻⁶)

Velocity	0. 195	m/s	0.312 m/s				
	experiment	calculation	experiment	calculation			
No.1 CWP	15.4	13.2	37.4	33. 8			
No.2 CWP	23.4	13_4	43.0	34.3			
No.3 CWP	18.5	11, 9	38.8	30.4			

日本造船学会論文集 第154号



(2) 海流中の取水管の変形および歪

一様海流 uc を受ける場合の, CWP の変形および曲 げ歪について実験値と計算値を比較して Fig.5 および Table 2 に示す。実験結果と計算結果は概ね良好な対応 を示しているが全般に実験結果の方がやや高めである。 この理由として計算では C_D の 値として 1.0 を採用し たが、実験ではレイノルズ数が異なることや、 vortex shedding の影響等により C_D の値が 1.0 より大きかっ たことが考えられる。

(3) 固有振動数

浮体の運動の固有振動数を計算する場合、浮体の質 量,付加水および復原力を推定する必要があるが浮体の 質量および復原力は計算で精度良く推定できるので、付 加水の精度が問題と考えられる。

浮体単独の場合の固有振動数の計算値と実験値を比較 すると Table 3 のようになる。同表より、実験値と計算 値は良く一致しているので,浮体の付加水の計算(特異 点分布法による)は精度が高いことがわかる。浮体と CWP の連成系の固有振動数について 計算値と実験値を 比較して、Table 4 に示す。実験値は規則波試験および 不規則波試験の結果より推定したものである。浮体の運

Table 3 Natural frequency (without CWP)

					(rad/sec)
Platfrom	mode No.	calculation W cal.	experiment ω exp.	<u>ω cal.</u> ω exp.	note
spar type	1	0.212	0.209	1.01	surge
	2	0.865	0.896	0.97	heave
	3	1.883	2.067	0.91	pitch
,·	1	0.296	0.314	0.94	surge
disc type	2	4.384	4.553	0.96	pitch
	3	4.910	5.236	0.94	heave

Table 4 Natural frequency (with CWP)

(rad/coc)

					144/360
Platform	mode No.	calculation ω cal.	experiment W exp.	<u>u/cal.</u> u/exp.	note
	1	0. 208			surge
	2	0.856	0.90 *	0.95	heave
spar	3	1. 219			CWP
type	4	1. 946	2.10 *	0. 93	pitch
	5	3.565	3.50 *	1. 02	CWP
	6	5. 932	5.85 *	1. 01	CWP
	1	0. 285			surge
	2	1. 256	•		CWP
disc	3	3. 511			CWP
type	4	4.540	4.76 **	0.95	pitch
	5	4.815	5.02 **	0. 96	heave
	6	5. 954			CWP

* assumed from irregular wave test

** assumed from regular wave test

動については、上下揺および縦揺の固有振動数の実験値

CWP の振動については没水状態の場合しか計測され ていないが、計算値と実験値は良く一致しており CWP



Fig. 6 Mode shape

は計算値とかなり良く一致している。

NII-Electronic Library Service

の付加水(Morison 式の慣性項)および重力による復原 力の取扱いは妥当であると考えられる。浮体の運動およ び CWP の振動の固有振動数の計算値と実験値が良く一 致していることから、2章で述べた浮体と CWP の連成 系のモデルも妥当であると考えられる。なお、実験では 共振時の振動モードは計測されていないが、参考のため に計算による固有振動モードを Fig.6に示す。モード1, 2,4 が浮体の運動によるもので各々、前後揺、上下揺、 縦揺に相当する。モード3,5,6は CWP の振り子とし ての振動によるものである。モード7,8 は CWP の弾 性変形の入ったモードであり、固有振動数はモード6に 比べて極めて高くなる。

(4) 規則波中の応答

入射波は水槽の能力の関係から波長 10 m を上限とし, 波高は設定波岨度 (2 ζ_W/λ)の標準値を 1/50 とし,一部 1/25 の実験も行った。ここに $\zeta_W =$ 波振幅, $\lambda =$ 波長で ある。没水型の実験結果を Fig.7~9 に計算値と比較し







Fig. 7 Response function of OTEC plant (spar type)

て示す。縦揺の計算では自由動揺試験から求めた粘性減 衰を用い,等価線形化して計算を行っている。また計算 の波岨度はすべて 1/50 である。ここで図中に使用して いる記号の意味を以下に示しておく。

○:波岨度 1/50 の結果	△:波岨度 1/25 の結果
<i>k</i> :波数	α:自在継手の回転角
l :CWP の長さ	ε:ひずみ
d : CWP の直径	B:浮体の直径
u _c :海流速度	T_{s} :実機換算の周期

浮体の運動については,計算値と実験値は比較的良く 一致している。また,浮体運動に与える波岨度の影響は 小さいが,CWPの挙動については波高が高い方が単位 波高に対する応答が小さく,非線形の影響が現われてい る。ピン相対角については全体的には良い対応を示す が,長波長側で計算値が高めとなっている。ピン 2,3 の実験結果では,低波長側にピークが現われているが, 計算でも同様な傾向を示している。CWP に生じる歪に







日本造船学会論文集 第154号



ついても計測量が小さいにもかかわらず実験値と計算値 は良い対応を示している。

浮上型の実験結果を計算値と比較して Fig. 10~12 に 示す。紙面の都合で一部のみを示すが,実験結果と計算 値は良い対応を示している。浮上型は没水型に比べて浮 体運動,ピン相対角, CWP に生じる 歪ともに大きくな る。試験範囲の波長では,動揺特性からみると,没水型 の方がまさっている。

次に,没水型の場合について取水管の運動モードを浮体およびピン相対角の実験値を用いて推定した結果と計算値を比較したものを Fig. 13 に示す。ただし, T_W は波周期である。入射波の波頂が静止座標系の原点にきたとき,1/4 波周期,1/2 波周期経過したときの3状態について形状を示してある。実験と計算は部分的には差異も見られるが,全体的には計算は実験の運動の模様を良く表わしている。

流れと波が共存する複合外力下での規則波中動揺試験



Fig. 10 Response function of OTEC plant (disc type)







を行った。流れと波は同一方向であり,設定流速は 0.2 m/sとした。海流試験では流場均一用の整流格子を使用 しているが,波を起こす場合にこれが使えないので,多 少の流場の乱れがあると考えられる。浮体については, 静止水面での釣合状態に対して,沈下とトリムが見られ た。没水型の場合で,沈下量約5mm,トリム角1.2°程 度であるが浮体の運動に与える影響は小さいと考えて計 算では無視した。没水型の試験結果を Fig.7~9 中に, 浮上型の結果を Fig.10~12 に示す。浮体運動について は、実際の波周期と出会波周期との違いに相当する応答 のずれが見られるが,流れの影響による浮体運動の量的 変化は小さいようである。ピンの相対角および CWP の 歪は流れの影響により小さくなる傾向にあるが,計算で もこの傾向は出ており,海流がある場合の等価線形化の 方法の妥当性がうかがえる。

(5) 不規則波中の応答

海洋温度差発電プラントの動的挙動



Fig. 13 Motion of OTEC plant (spar type)

不規則波として、55年度サンシャイン計画海洋温度差 発電システムの研究において設定した100年暴風時およ び稼動限界時に相当する2種の波スペクトルを考えた。 それぞれ、長波長側および短波長側に大きいエネルギー 分布を有しており、以下前者をL-Type、後者をS-Type

Condition	operating cond	maximum lition	survival condition			
Item	Actual ship	model ship	Actual ship	model ship		
maximum wave height (m)	15.0	0.3	24.0	0.48		
signifficant wave height (m)	7.5	0.15	12.0	0.24		
mean wave period (sec)	8.0	1.13	15.0	2.12		
velocity (m/s)	1.54	0.218	1.54	0.218		

Table 5 Wave spectrum and current

と称することにする。Table 5 にこの波スペクトルの実 機海象条件と、模型対応値を示す。

入射波スペクトルの例を Fig. 14 に示す。応答計算に は,同じ標準偏差と波周期を有する ISSC スペクトルを 用いたが,これを Fig. 14 中に示すが,近似度は良好で ある。

応答スペクトルの例として没水型の heave の応答ス ペクトル S_{zz} および歪の応答スペクトル S_{zz} を, Fig. 15, Fig. 16 に示す。図中の横軸には実機換算の周期 T_s に ついても示してある。浮体の上下揺の場合,長波長側で 波のエネルギーが認められないにもかかわらず,応答が 大きくなるいわゆる長周期運動の発生がみられる。長周 期運動を除くと実験値と計算値は良い対応を示してい る。CWPの歪については長周期運動の影響はみられず, CWP の強度の面からは長周期運動は問題がないと考え られる。CWP の歪の計算値は実験値を定性的には良く 説明しているが定量的には差がみ**ら**れる。



Fig. 14 Spectrum of incident wave



Fig. 15 Spectrum of heave (spar type)



Fig. 16 Spectrum of strain (spar type)

	wave	L -	type	S - 1	
		experiment	calculation	experiment	calculation
wave height (cm)		4.59	4.59	4.04	4.04
surge (cm)		3.11	4.04	2.04 (1.24)**	1.61
heave (cm)		3.09	2.48	2.35 (1.29)	1.41
{	oitch deg.)	0.70	1.22	0.82 (0.33)	0.21
deg.)	No.1 Ų.J.	1. 90	2.41	2.08 (1.83)	1.79
tion(No2UJ	1.72	2.56	1.59	2.00
rota	Na 3UJ	1.88	2.13	2.33	2.50
(₉₋ 0	No.1CWP	8.1	9.5	8.0	7.7
in (x)	No.2CWP	12.6	14.1	13.1	12.0
stra	No3CWP	4.4	4.2	4.6	4.0

Table 6 Response of OTEC plant model (standard deviation)

* U.J.= Universal joint

Table 6 に没水型の場合の浮体と取水管の応答の標準 偏差の実験値を計算値と比較して示す。S-Typeの応答 には前述のように,長周期運動の影響が入っているの で,これを分離除去した場合の値を参考として()内に 示した。L-Typeのピン相対角の標準偏差等に多少の差 が見られるが,全体的には,実験値と計算値は良い対応 を示している。

4 取水実験プラントの挙動

取水実験プラントの挙動について、2章で述べた解析 法を用いて動的応答計算を行い、潮流、波方向および CWP に設ける自在継手の数の影響を調べるとともに、 浮体を没水型と浮上型とした場合の差を検討した。解析 対象の取水実験プラントの構造、寸法を Fig.17 に示す。 浮体が没水型 (spar type) でピンが 10 個のモデルを S-10 と呼ぶ。Sは spar type を示し、10 はピンの数を 示す。計算は Table 5 に示した稼動限界時および 100 年 暴風時に対する波スペクトルに対して行った。



Fig. 17 Geometry of OTEC plant

Table 7 Motion of platform(standard deviation)

	1	1		1	T	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	r				
model	case	plat-	NI T	Uc	xo	cond-	surge	sway	heave	roll	pitch
	No.	form	1N.J.	(kt)	(deg)	ition	(m)	(m)	(m)	(deg)	(deg)
	1	1		3	0	0.C.	0.59	0.34	0.53	0.09	0.13
	2		10			S.C.	1.86	1.07	1.71	2,20	242
S-10	3	į –		0	0	0.C.	0.59	0.34	0.53	0.08	0.13
5	4			<u> </u>	0	S.C.	1.85	1.07	1.71	2.15	2.31
	5	1		2	90	0.C.	0.34	0.59	0.53	0.15	0.08
	6 spar	spar				S.C.	1.07	1.86	1.72	3.29	1.55
5-1	7	•	1	2	0	0.C.	0.60	0.34	0.53	0.09	0.13
	8					SC	1.85	1.01	1.71	2.23	2,49
5-3	9		3	2	0	0.C.	0.60	0.34	0.53	0.09	0.14
55	10		5	3	•	S.C.	1.85	1.01	1.71	2.22	2.54
5-5	11		5	3	0	0.C.	0.60	0.34	0.53	0.08	0.15
<u> </u>	12		3	3	0	S.C.	1.85	1.07	1.71	1.79	2.48
D - 10	13	disc	10	3	0	0.C.	0.86	0.50	2.15	3,12	4.92
0 10 1	14	alse	10	3		S.C.	2.19	1.27	3.16	3.06	5.20

N.J. = numbers of universal joint Uc = velocity of current to = wave direction O.C. = operating maximum condition S.C. = survival condition

計算結果のうち浮体の運動の標準偏差を Table 7 に, ピンの回転角および CWP に生じる曲げモーメントの標 準偏差を Table 8 に示す。なお,表中には標準偏差の 3 倍として求めた回転角の最大値も示す。また Table 9 に は,上で得られた曲げモーメントによる応力に,海流に よる曲げモーメントおよび自重による応力を加えたもの を求めて示した。海流は表面で 3kt,深さ 500 m で 0 と なる線形分布のものを考えた。これらの表から次のこと がいえる。

(1) 浮体が浮上型の場合運動が大きくなり,特に
 heave が大きくなる。また CWP に生じる応力やピンの
 回転角も大きくなる。

(2) ピンの数は一般に多い程 CWP に生じる応力は 小さくなるが,最適配置により比較的少ないピンで応力 を小さくすることも可能と考えられる。浮体が没水型の 場合ピンに生じる最大回転角はピンの数にあまり関係な くほぼ一定で,本計算例の場合 12~13°である。

Table 8 Rotation angle of universal joint and
bending moment of CWP

model	case	plat-	NI	Uc	χo	condi-	rota	rotation (deg)			B.M.**(t-m)		
	No.	form		(kt)	(deg)	tion	S.D. *	MAX.	node.No.	My	Mx		
	1	1		2	0	0.C.	1.2	3.6	4	52	39		
	2			Ľ		S.C.	4.1	12.2	2	101	77		
S-10	3	Į	10	0	0 0	0.C.	1.5	4,5	4	64	49		
	4			Ľ		S.C.	3.8	11.4	2	102	84		
	5			3	3 90	0.C.	1.0	3.0	4	28	68		
	6	spar				<u>S.C.</u>	4.3	12.8	2	55	134		
S-1	7		1	3	3 0	0.C.	0.7	2,0	2	149	74		
	8			<u> </u>		S.C.	3.8	11.5	2	301	124		
S-3	9		3	3	0	0.C.	0.9	2.8	8	153	76		
	10					S.C.	3.9	11.7	2	325	136		
S-5			5	3	0	0.C.	1.1	3.3	6	180	77		
	12					S.C.	3.6	10.9	6	266	119		
D-10	13	disc	10	3	0	0.C.	6.3	18,9	2	139	98		
	14			-		SC	82	245	2	186	13/		

* S.D. = standard deviation ** B.M. = bending moment

Table 9 Stress of CWP

·										(Ng	7	/		
model	case	plat-	MI	Uc	χο	condi-	64	5	is 🛛	Sd ·	• Ss			
	No.	from		(kt)	(deg)	tion	50	Ssb	Ssa	max.	min.	ean,		
	1			3	0	0.C.	3.6	1.3	6.6	11.4	1.8	3		
	2			3	<u> </u>	S.C.	8.3	1.0	7.3	16.6	-2.0	5		
S-10	3		10	0	0	0.C.	4.4	-	6.6	11.0	2.2	3		
4		10	0	U	S.C.	8.3	-	7.3	15.6	-1.0	5			
	5					3	90	0.C.	5.5	1.0	7.3	13.8	0.8	5
	6	spar				<u>S.C.</u>	10.8	1.0	7.3	19.2	-4.5	5		
S-1	7		1	3	0	0.C.	11.9	3.2	7.3	22.4	7.8	5		
	8			Ľ		S.C.	24.1	3.2	7.3	34.7	-20.0	5		
5-3	9		3	3	0	0.C.	12.2	3.1	7.3	22.6	-7.9	5		
	10		Ŭ	3		S.C.	26.0	3.1	7.3	36.4	-21.8	5		
S-5	11		5	3	0	0.C.	12.3	2.4	6.6	21.2	- 8.0	3		
	12			, in the second		S. C.	18.3	2.4	6.6	27, 2	-14.0	3		
ח-10	13	dier	10	3	0	0.C.	18.3	1.3	6.6	26.2	-13.0	3		
	14	uise			0	S. C.	25.9	1.3	6.6	34.0	-20.6	3		
Sd = dv	/namic	stre	55	Ssh	- zsia	tic be	ndin		200					

5d = dynamic stress Ssb = static bending stress Ss = static stress Ssa = static axial stress

(3) 海流の動的応答に及ぼす影響は小さいが, 波方向と潮流のなす角が 90°になると CWP に生じる曲げモ ーメントや応力は約 20% 増加する。

(4) 以上を総合すると、取水実験プラントとしては 運動および発生応力の観点からモデル S-10 すなわち浮 体は没水型とし CWP にはピンを 10 個所程度配置する 構造が望ましい。

5 結 言

以上,浮遊式海洋温度差発電プラントのような海洋構 造物の挙動の解析法を検討するとともに,模型実験を実 施して計算法の妥当性を検討した。さらに取水実験プラ ントに対する解析を実施した。得られた結果をまとめる と次のようになる。

(1) 実験結果と計算結果は全体的に良好な対応を示しており本解析法の有効性が確認できたと考える。

(2) 浮体の流体力については特異点分布法, CWP については Morison 式を用いて計算したが, これらの 精度は実用上充分である。

(3) 浮体運動に与える波岨度の影響は小さいが, ピン相対角や CWP の歪の単位波高に対する応答は波高が 高くなる程小さくなり, 非線形の影響があることを示し 日本造船学会論文集 第154号

240 ている。

(4) 海流等の一様流があると, 浮体の応答はそれ程 変化しないが, CWP の応答は小さくなる。一様流があ る場合の抗力の等価線形化についても本報で示した方法 で取り扱えると考えられる。

(5) ピンの数は一般に多い程 CWP に生じる応力は 小さくなる。浮体が没水型の場合,ピンに生じる最大回 転角はほぼ一定で,本計算例の場合 12~13°である。

(6) 浮体形状は動揺特性, CWP に生じる応力およびピンに生じる回転角から考えて, 没水型がまさっていると考えられる。

不規則波試験の場合に,長周期運動によると思われる 応答が生じた。また一様流の場合に,後流渦によると思 われる横振動が生じた。これらの理論的な取り扱いは今 後の検討課題である。

最後に本研究は,工業技術院のサンシャイン計画の一 つである海洋温度差発電システムの研究の一部として, 著者らがエンジニアリング振興協会の研究員として実施 したものであり,種々有益な御討論を賜った同研究委員 会委員長 森 康弘電気通信大教授,海洋構造物専門分 科会主査 加藤洋治東大教授はじめ,委員の方々に厚く 御礼申し上げます。

参考文献

 エンジニアリング振興協会:海洋温度差発電シス テムの研究,昭和 55 年度サンシャイン計画成果 報告書(昭和 56 年 3 月).

- エンジニアリング振興協会:海洋温度差発電シス テムの研究,昭和 56 年度サンシャイン計画成果 報告書(昭和 57 年 3 月).
- Barr, R. A., Murphy, P., Ankudinov, V.: Theoretical Evaluation of the Seakeeping Behavior of Large OTEC Plant Platforms and Cold Water Pipe Configurations, Hydronautics, Inc. (1978).
- Chou, D. Y., Minner, W. F., Ragusa, L., Ho, R. T.: Dynamic Analysis of Coupled OTEC Platform-Cold Water Pipe System, OTC 3338 (1978)
- 5) Pauling, J. R.: Frequency-Domain Analysis of OTEC CW Pipe and Platform Dynamics, OTC 3543 (1979).
- 6) 根間清,山上順雄,清水穂高,大西登喜夫:軸対 称物体に働く流体力の計算法について,関西造船 協会,昭和58年度秋季造船三学会にて発表(1983).
- Foster, E. T.: Model for Nonlinear Dynamics of Offshore Towers, Jour. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 96, No. EM 1 (1970).
- Malhotora, A. K., Penzien, J.: Non Deterministic Analysis of Offshore Structures, Jour. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 96, No. EM1 (1970).
- 9) 南 真和, 沢柳政弘, 福岡哲二, 遠山泰美: 波浪
 による海洋構造物の不規則振動解析, 三井造船技
 報, 第96号(昭和51年10月).
- 10) 田才福造:波浪に対する浮遊構造物の動的応答, 造学第1回海洋工学シンポジウム (1974).
- Zienkiewiz, O. C., Lewis, R. W., Stagg, K. G.: Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley & Sons (1978).