

《昭和 55 年度海洋構造物委員会報告》

プレストレストコンクリートによる浮上式海上空港を構成する
1 ユニットケーソン (300×60×12 m) の運動特性と波漂流力お
よび底板にかかる波圧について (模型実験報告)

長 崎 作 治*

1. 要 旨

プレストレストコンクリートによる長さ 5 000 m, 幅 870 m の浮上式海上空港を構成する 1 ユニットケーソン (300 m×60 m×12 m, 240 基) について各種波浪による波漂流力, 運動特性 (ヒービング, サージング, ピッチング) およびケーソン底板にかかる波圧をモデル実験から測定したのでここに報告する。

実験は表一1 の縮尺 1 : 150 のモデルを用い, 図一3 の要領で規則波による波漂流力の実験値, 理論計算値を求め比較検討した。

最大波漂流力 607.5 ton は波高 8.7 m, 周期 9.3 sec に生じた。

運動の最大測定値は, サージング 1.0 m (波高 3.6 m, 周期 18.1 sec), ヒービング 1.6 m (波高 4.7 m, 周期 15.4 sec), ピッチング 2° 31' 41" (波高 4.7 m, 周期 15.4 sec) であった。

また底板の波圧測定は, モデル底板に波圧計を 5 か所 図一6 に示される位置に取り付け, その波圧分布を求めた。最大波圧 3.48 t/m² は波高 9.05 m, 周期 9.43 sec に生じた。

実験結果を考察すると波漂流力は実験値の方が理論計算値より少し少なかったが, 各波浪ともほぼ同じ傾向を示している。

浮体の運動は各モードの最大ゆれ波浪周期とモデルの固有振動周期とは必ずしも一致しなかった。

底板にかかる波圧は, 船首方向からの作用波浪の場合は前底から後底にかけて最大値は少なくなり, 横波の場合は 5 か所とも同一波圧が測定された。

2. 構造概要

浮上式海上空港は, プレストレストコンクリート Vol.

21, No. 6, Dec. 1979, “浮上式プレストレストコンクリート製海上空港に対する構想” (海洋構造物委員会報告) に示されるように陸地から約 5 km, 水深約 20 m の海域に建設することを想定し, 施工の技術的可能性および安全性をもとに計画された。

設計波浪条件は, 通常時 有義波高 ($H_{1/3}$) 2.3 m, 周期 ($T_{1/3}$) 6.2 sec, 荒天時 有義波高 4.6 m, 周期 9.6 sec である。

海上空港の本体はプレストレストコンクリート構造であり, 施工性等を考慮して大型のプレストレストコンクリート函体 (300×60×12 m) に分割し, ドライドックで製作して空港建設地点まで曳航し, 海上接合により一体化をはかって空港を構成しようとするものである。今回実験モデルとした大型プレストレストコンクリート函体の構造・寸法を図一1 に示す。

3. 波漂流力

漂流力の算定式としては, 波の反射を考慮した丸尾教授の理論式と, ヒービング (上下ゆれ) とサージング (前後ゆれ) との位相差を考察した田才教授の理論式がある (付録 1 参照のこと)。

3.1 反射波より求める方法

規則波による単位幅あたり漂流力 $4F_D$ は次式で示される。

$$4F_D = n\rho g \bar{A}^2 \dots\dots\dots(3.1)$$

いま, 反射波の方向が入射波の方向と正反対で, 側面における分散が無い場合, 反射波の振幅は

$$\bar{A} = \zeta_a \cdot R \dots\dots\dots(3.2)$$

本式は深海において有限の喫水をもつ単位幅あたり垂直壁に用いることができる。

式 (3.1) に式 (3.2) を代入すると

$$4F_D = n\rho g [\zeta_a R]^2 \dots\dots\dots(3.3)$$

3.2 動揺位相差より求める方法

反射波の振幅 \bar{A} は, 物体を拘束 (固定) したときの

* 東海大学海洋学部海洋土木工学科教授, (社) プレストレストコンクリート技術協会海洋構造物委員会委員

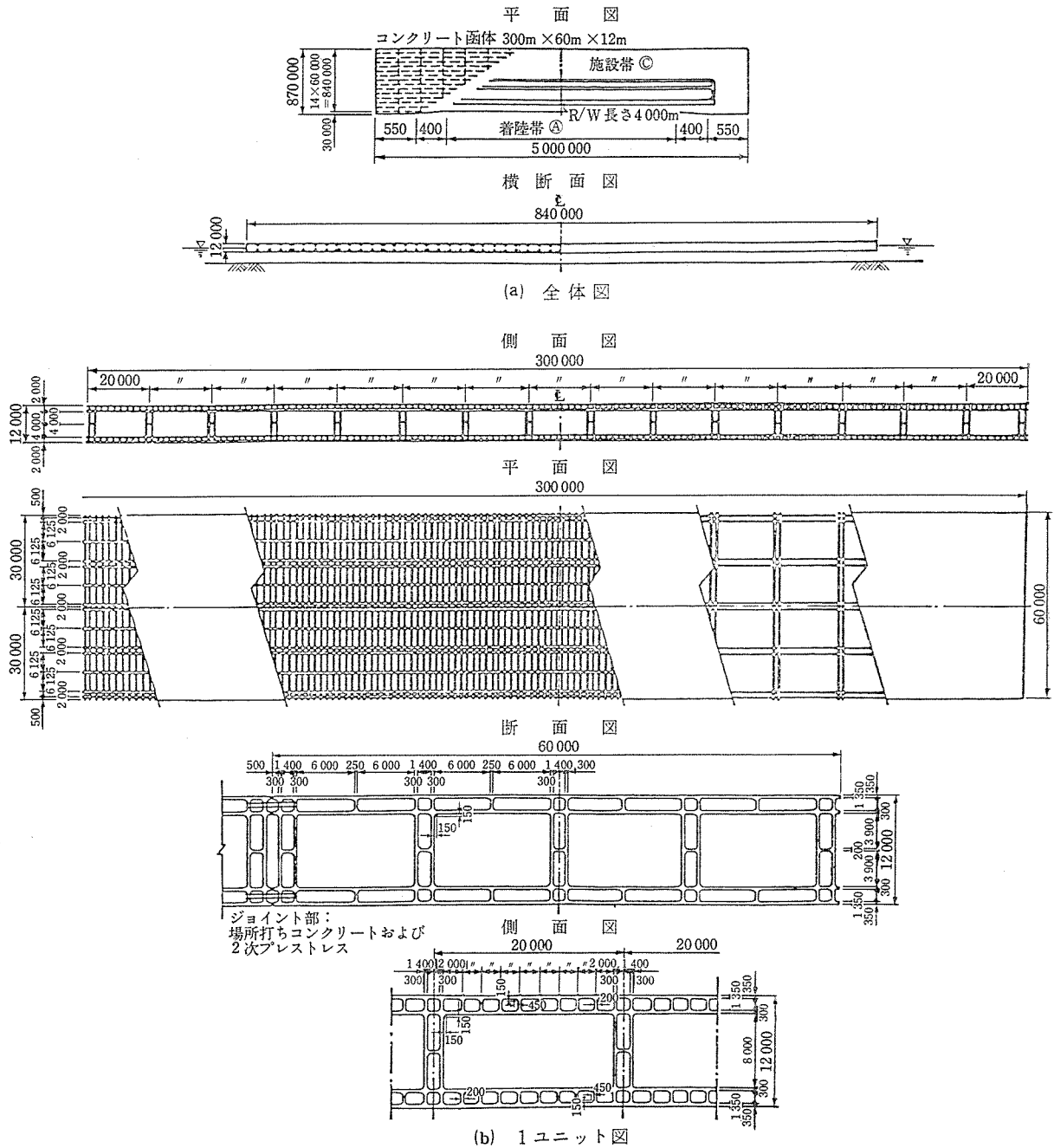


図-1 浮上式海上空港と1ユニットプレストレストコンクリート函体

反射波と物体を浮かしたときの反射波との合計で示すことができる。

ピッチング（縦ゆれ）が無視でき、上下ゆれと前後ゆれのみ浮体が行うとき、幅（受圧） l の浮体が受ける漂流力 F_D は

$$F_D = n\rho g [\zeta_a^2 \cos^2(\epsilon_y - \epsilon_x)] l \dots\dots\dots(3.4)$$

または

$$F_D = n\rho g \zeta_a^2 C_s l \dots\dots\dots(3.5)$$

3.3 浅海における波漂流力

浅海における単位幅あたり漂流力 $4F_D$ は

$$4F_D = n\rho g |\bar{A}|^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

ここで n は浅海係数で

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2\kappa h}{\sinh 2\kappa h} \right) \dots\dots\dots(3.7)$$

水深 h が無限大になると上述の係数は $\frac{1}{2}$ となる。

ここで、

ρ : 海水の密度 (w/g)

w : 海水の単位体積重量

g : 重力の加速度

ζ_a : 入波射の振幅 (入射波高の 1/2)

ϵ_y : 入射波と上下ゆれ運動との位相差

ϵ_x : 入射波と前後ゆれ運動との位相差

C_s : 上下ゆれと前後ゆれとの位相差 ϵ による漂流力

係数。 $C_s = \cos^2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) = \cos^2 \varepsilon$

- κ : 波数 ($\kappa = 2\pi/L$)
- L : 波長
- h : 水深

4. 実験と解析

図-2 に示される縮尺 1:150 のモデル (200×40×8 cm) の規則波 (波高 1.1~6.4 cm, 周期 0.5~2.0 sec) による波漂流力, 運動特性, 底板作用波圧の測定は三次元水槽 (長さ 10.8 m, 深さ 1.25 m, 幅 4.35 m, プランジャータイプ造波機付) で図-3 の要領で実施した。モデルの実験条件を表-1 に, 縮尺 1:150 の浮体モデルの測定固有振動周期を表-2 に示す。なおモデルに作用する波浪の方向は船首方向 (head sea) と横方向 (beam sea) の二方向である。

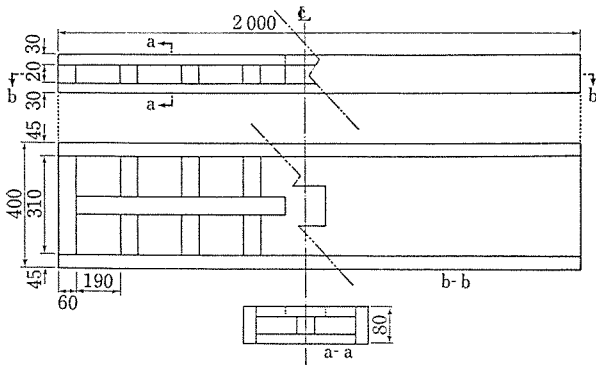


図-2 1 ユニットプレストレストコンクリート函体のモデル (縮尺 1:150) 単位: mm

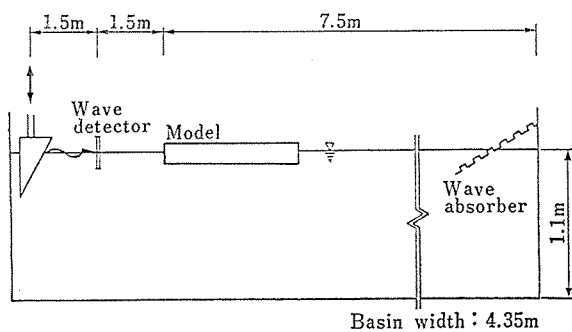


図-3 実験要領

4.1 波漂流力のカウンタウエイトによる測定

波浪進行方向における波漂流力は図-4 に示されるように反対方向においたカウンターウエイト (W) で, 作用力 (波漂流力) を釣合わせることによって測定できる。ウエイトによる測定漂流力 F_D を次式に代入すると漂流力係数 C_D が求まる。

$$C_D = F_D / n \rho g \left(\frac{H_i}{2} \right)^2 l \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで

H_i : 入射波高

l : 入射波の作用する浮体の受圧幅

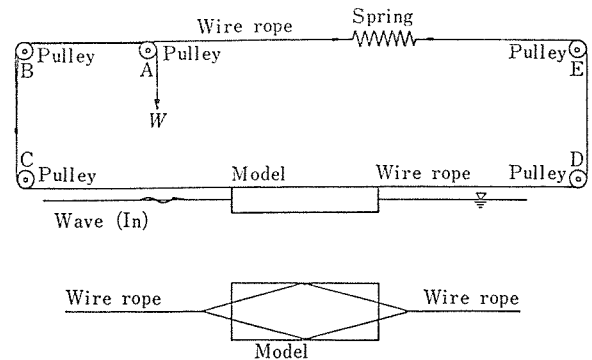


図-4 波漂流力測定装置

表-1 モデルの実験条件

変 数	現 場	モ デ ル
水 深	165 m	110 cm
入 射 波 高	1.65 m~9.60 m	1.1 cm~6.4 cm
周 期	6.1 sec~24.5 sec	0.5 sec~2.0 sec
全 長	300 m	200 cm
全 幅	60 m	40 cm
全 高	12 m	8 cm
吃 水	7.3 m	4.9 cm
浮 体 自 重	119 105 ton	35.30 kg
水バラストおよび施設重量	16 272 ton	4.8 kg
合 計 重 量	135 377 ton	40.1 kg
浮 体 重 心 高	6.00 m	4.0 cm
水バラスト重心高	0.65 m	4.3 cm
施設部重心高	12.10 m	8.1 cm
ユニット全体の重心高	5.97 m	4.0 cm
浮 心 高	3.65 m	2.4 cm
メタセンター半径	41.10 m	27.4 cm
メタセンター高	38.78 m	25.9 cm

注) 寸法縮尺.....1/150
重量縮尺.....1/150³
周期縮尺.....1/√150

表-2 浮体の固有振動周期

	モ デ ル				現 場			
	Heaving		Pitching		Heaving		Pitching	
	固有振動周期	周波数係数(κa)	固有振動周期	周波数係数(κa)	固有振動周期	周波数係数(κa)	固有振動周期	周波数係数(κa)
HEAD SEA	0.89 sec	5.14	0.85 sec	5.58	10.9 sec	5.14	10.4 sec	5.58
BEAM SEA	0.85 sec	1.12	0.72 sec	1.55	10.4 sec	1.12	8.8 sec	1.55

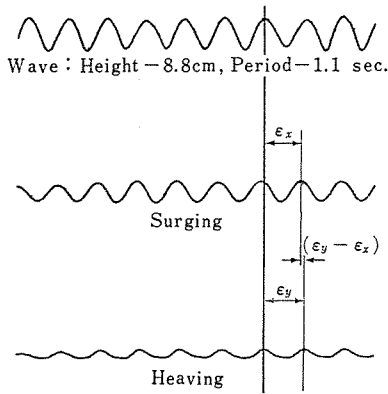


図-5 上下ゆれと前後ゆれとの位相差
 $\varepsilon = \varepsilon_y - \varepsilon_x$

4.2 上下ゆれと前後ゆれとの位相差 ε の測定と ε による計算漂流力 F_s

上下ゆれと前後ゆれとの測定は、モデルの重心位置に三成分（ヒービング、サージング、ピッチング）運動計測器を取り付け、作用波浪とともにオシログラフに記録させて求める。

上下ゆれと前後ゆれとの位相差は、記録された波形のずれを数波について図-5の要領で読み取り、平均値をチャートスピードで割り ε_1 を求め、次式から算出する。

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{T} \cdot \varepsilon_1 \dots\dots\dots(4.2)$$

これより位相差による漂流力係数 C_s は

$$C_s = \cos^2 \varepsilon \dots\dots\dots(4.3)$$

位相差より求めた漂流力係数 C_s から漂流力 F_s が算出できる。

$$F_s = n\rho g C_s \left(\frac{H_i}{2}\right)^2 l \dots\dots\dots(4.4)$$

4.3 底板にかかる波圧

図-6に示される底板5か所に圧力センサー（圧力変換器）を取り付け（写真-1のように）、モデル函体を水槽中央に浮かべ、圧力センサーを増幅器を通してビジュグラフ（電磁オシログラフ）に接続し、入射波高と作用波圧を記録する。作用圧の波形の最大振幅を読み取り、キャリブレーションから求めた補正式に代入し各点波圧

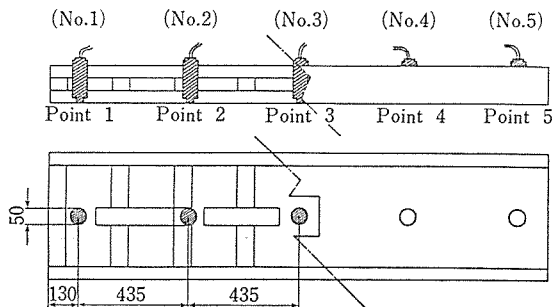


図-6 底板波圧計取付け位置 単位：mm

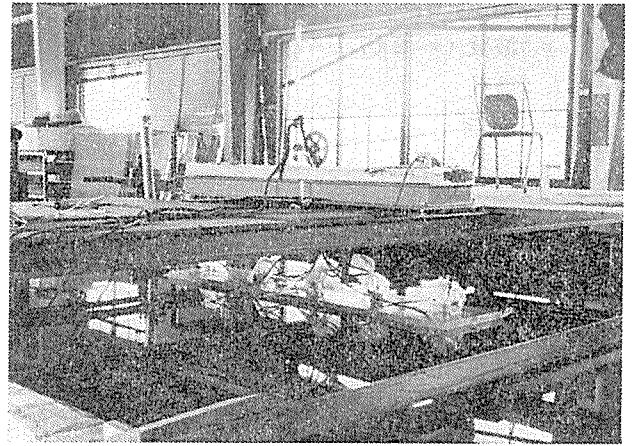


写真-1 底板波圧測定

を求める。

5. 規則波による2次元浮体の運動理論

浮体に $\zeta = \phi_A e^{i(\omega t + \varepsilon x)}$ の規則波が作用する場合を考えてみる。

5.1 浮体の上下ゆれ運動

上下ゆれの運動方程式は

$$\begin{aligned} \rho \bar{V} l (1 + m_H) \ddot{y} + \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_H^2 l \dot{y} + \rho g B l y \\ = \frac{i \rho g}{\kappa} \zeta_A e^{i(\omega t + \varepsilon_H)} \dots\dots\dots(5.1) \end{aligned}$$

ここで

\bar{A}_H : 上下ゆれ運動をするときに生ずる発散波の振幅

l : 浮体の長さ

B : 水線の幅 (2b)

\bar{V} : 水面下断面積 $Bd\sigma$

d : 吃水

σ : 面積係数

m_H : 付加質量

上下ゆれの運動を

$$y = y_A e^{i(\omega t + \varepsilon_y)} \dots\dots\dots(5.2)$$

とおけば、式(5.1)に式(5.2)を代入すると

$$\begin{aligned} y_A \left[\left\{ \rho g B - \rho \bar{V} (1 + m_H) \omega^2 \right\} + i \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_H^2 \omega \right] \\ e^{i\varepsilon_y} = \frac{i \rho g \zeta_A \bar{A}_H}{\kappa} e^{i\varepsilon_H} \dots\dots\dots(5.3) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho g B - \rho \bar{V} (1 + m_H) \omega^2 &= S \\ \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_H^2 &= N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.4)$$

とおき式(5.3)に代入し、真部数と虚部数に分けると

$$y_A / \zeta_A (S \cos \varepsilon_y - N \omega \sin \varepsilon_y) = \frac{-\rho g \bar{A}_H}{\kappa} \sin \varepsilon_H \dots\dots\dots(5.5)$$

$$y_A/\zeta_A(S \cos \varepsilon_y - N\omega \cos \varepsilon_y) = \frac{\rho g \bar{A}_H}{\kappa} \cos \varepsilon_H \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

$$y_A/\zeta_A = \nu_y \text{ とおく} \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

$$\nu_y = y_A/\varphi_A = \frac{\rho g \bar{A}_H}{\kappa \sqrt{S^2 + N^2 \omega^2}} \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

また

$$\frac{\tan \varepsilon_y - S/N\omega}{1 + \frac{S}{N\omega} \tan \varepsilon_y} = \tan \varepsilon_H \quad \dots\dots\dots(5.9)$$

よって

$$\frac{S}{N\omega} = \tan \alpha \text{ とおけば}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{S}{N\omega}$$

$$\tan(\varepsilon_y - \alpha) = \tan \varepsilon_H \quad \dots\dots\dots(5.10)$$

これより

$$\alpha = \varepsilon_y - \varepsilon_H$$

あるいは

$$\varepsilon_y = \varepsilon_H + \alpha = \varepsilon_H + \tan^{-1} \frac{S}{N\omega} \quad \dots\dots\dots(5.11)$$

5.2 浮体の前後ゆれ運動

前後ゆれの運動方程式は

$$\rho \nu l (1 + m_s) \ddot{x} + \frac{\rho g^2}{\omega^3} \bar{A}_s^2 l \dot{x} = \frac{i \rho g}{\kappa} \zeta_A \bar{A}_s l e^{i(\omega t + \varepsilon_s)} \quad \dots\dots\dots(5.12)$$

$$x = x_A e^{i(\omega t + \varepsilon_x)} \quad \dots\dots\dots(5.13)$$

とおいて、とくと

$$x_A/\zeta_A = \nu_x = \frac{\rho g \bar{A}_s}{\kappa \sqrt{S_s^2 + N_s^2 \omega^2}} \quad \dots\dots\dots(5.14)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} S_s &= -\rho \nu (+m_s) \omega^2 \\ N_s &= \frac{\rho g^2}{\omega^2} \bar{A}_s^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5.15)$$

また

$$\tan \beta = \frac{S_s}{N_s \omega} \quad \dots\dots\dots(5.16)$$

を用いると

$$\varepsilon_x = \varepsilon_s + \beta = \varepsilon_s + \tan^{-1} \left(\frac{S_s}{N_s \omega} \right) \quad \dots\dots\dots(5.17)$$

6. 領域分割法による流体力の計算法

6.1 基礎方程式

理論計算をするため次のような仮定を前提に基礎方程式を求める。

- ① 流体は非粘性、非圧縮性であり、渦なしの運動を行うものとする。
- ② 流体および浮体の運動は微小であって、その2次

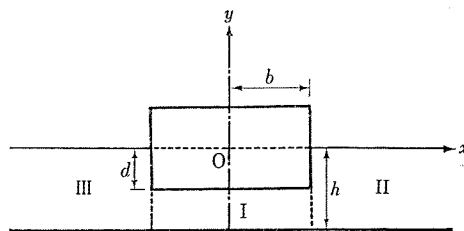


図-7 領域分割

項以上の微小量は無視する。

図-7 に示すごとく、静止水面に原点0を有し、x軸を静止水面に一致させ、鉛直上方向にy軸をもつ直交座標系をとる。またy軸は浮体の中心を通り、hは流体領域の水深を表わす。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi = 0 \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\omega^2}{y} \phi \quad y=0 \quad \dots\dots\dots(6.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad y=-h \quad \dots\dots\dots(6.3)$$

ただし

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{角周波数})$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2 \quad (\text{重力加速度})$$

速度ポテンシャル $\phi(x, y, t)$ は x, y , および時間 t の関数であるが満足すべき条件式として、まずラプラス (Laplace) の方程式 (6.1) と水面および水底の境界条件式 (6.2), (6.3) がある。

ただし、流体は前進速度のない周期運動を行っているものである。

次に浮体が

$$X_j = R_e [X_{j0} e^{-i\omega t}] \quad j=1, 2 \quad \dots\dots\dots(6.4)$$

ただし

R_e : [] 内の実数

X_{j0} : 運動の実振幅

i : 虚数

で表わされる周期運動を行う場合には、浮体表面において次のような運動学的境界条件を満足しなければならない。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \bar{V}_x \quad \left\{ \begin{aligned} x &= \pm b \\ 0 &> y > -d \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots(6.5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \bar{V}_y \quad \left\{ \begin{aligned} b &> x > -b \\ y &= -d \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots(6.6)$$

ここで j は下に示すような浮体の運動モードを表わす。

(j)

- 1. サージング (Surging) 前後ゆれ
- 2. ヒービング (Heaving) 上下ゆれ

3. ピッチング (Pitching) 縦ゆれ

また ϕ より時間部分を除いたものを ϕ で表わすと式 (6.4) は

$$\phi(x, y, t) = R_e[\phi(x, y) e^{-i\omega t}] \dots\dots\dots (6.4')$$

となる。

式 (6.5) (6.6) の \bar{V}_x, \bar{V}_y は各運動モードに対し、表-3 に示すとおりである。

表-3 x, y 軸の運動

j	\bar{V}_x	\bar{V}_y
1	$-i\omega X_{10}$	0
2	0	$-i\omega X_{20}$
3	$-i\omega X_{30}(y-y_0)$	$i\omega X_{30}x$

ただし表中の y_0 は浮体の前後ゆれ中心で、 x の正側が下に向く回転方向を正とする。

6.2 領域の分割と速度ポテンシャル

図-7 に示すごとく浮体側面 ($x = \pm b$) に接する点線を仮想境界面として流体領域を I, II, III に分割する。これらの領域における速度ポテンシャルをそれぞれ $\phi^I, \phi^{II}, \phi^{III}$ とする。

$$\left. \begin{aligned} \phi^I(x, y, t) &= R_e[\phi^I(x, y) e^{-i\omega t}] \\ \phi^{II}(x, y, t) &= R_e[\phi^{II}(x, y) e^{-i\omega t}] \\ \phi^{III}(x, y, t) &= R_e[\phi^{III}(x, y) e^{-i\omega t}] \end{aligned} \right\} \dots\dots (6.7)$$

(1) 速度ポテンシャル $\phi^I(x, y)$

ϕ^I は式 (6.1), (6.3), (6.6) を満足しなければならないので、次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \phi^I(x, y) &= \left(A_0 + B_0 \frac{x}{b} \right) + \sum_{r=1}^{\infty} \left\{ A_r \frac{\cosh Rx}{\cosh Rb} \right. \\ &\quad \left. + B_r \frac{\sinh Rx}{\sinh Rb} \right\} \times \cos R(y+h) \\ &\quad + G^I(x, y) \dots\dots\dots (6.8) \end{aligned}$$

ここで、

$$R = \frac{\pi r}{h-d} \quad r=0, 1, 2 \dots\dots \infty \quad \dots (6.9)$$

ただし

- h : 流体領域の水深
- d : 吃水深
- A_r, B_r : 複素未定係数

$G^I(x, y)$: 式 (6.1), (6.3), (6.6) を満足する特解

ϕ : 流れの関数

式 (6.8) より $G^I(x, y)$ を除くと、それは式 (6.1), (6.3) および (6.6) の右辺 \bar{V}_y を 0 とした条件式を満足する一般解である。

$G^I(x, y)$ を求めるため式 (6.6) の \bar{V}_y をその定義域 ($-b < x < b$) でフーリエ (Fourier) 級数に展開すれば、表-3 から

$$\begin{aligned} \bar{V}_y &= -i\omega(X_{20} - X_{30}x) \\ &= -i\omega \left\{ X_{20} \cdot \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\mu^s} \cos \mu_s x \right. \\ &\quad \left. - X_{30} \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\mu^s} \sin \mu_s x \right\} \dots (6.10) \end{aligned}$$

ただし

$$\mu_s = \frac{(2S+1)\pi}{2b} \dots\dots\dots (6.11)$$

ただし式 (6.10) や、これからの計算式において、 j モードの運動を考える場合

$$X_i = 0 \quad i \neq j \dots\dots\dots (6.12)$$

特解 $G^I(x, y)$ は式 (6.10) と未知関数 $g_s^I(y)$ との各項別との積で与えられるとすれば、

$$\begin{aligned} G^I(x, y) &= -i\omega \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\mu^s} X_{20} \cos \mu_s x \\ &\quad - X_{30} \frac{\sin \mu_s x}{\mu_s} g_s^I(y) \dots\dots\dots (6.13) \end{aligned}$$

式 (6.13) を (6.1), (6.3), (6.6) に代入すると $g_s^I(y)$ を決定する条件式が得られる。

$$\begin{aligned} g_s^I(y) - \mu_s^2 g_s^I(y) &= 0 \\ g_s^I(-h) &= 0 \quad -h < y < -(h-d) \\ g_s^I(-d) &= 0 \end{aligned}$$

上式を解くと、 g_s^I が求まる。

$$g_s^I(y) = \frac{1}{\mu_s} \frac{\cosh \mu_s(y+h)}{\cosh \mu_s(h-d)} \dots\dots\dots (6.14)$$

(2) 速度ポテンシャル ϕ^{II}, ϕ^{III}

ϕ^{II}, ϕ^{III} の一般解として次式を仮定する。

$$\begin{aligned} \phi^{II} \\ \phi^{III}(x, y) &= C_0^\pm e^{\pm i\kappa_0(x \mp b)} \cdot \frac{\cosh \kappa_0(y+b)}{\cosh \kappa_0 b} \\ &\quad + \sum_{m=1}^{\infty} C_m^\pm e^{\mp \kappa_m(x \mp b)} \cdot \frac{\cos \kappa_m(y+h)}{\cos \kappa_m h} \\ &\quad \dots\dots\dots (6.15) \end{aligned}$$

ただし

C_m^\pm : 複素未定係数

注. ϕ^{II} をとるときは上の符号を

ϕ^{III} をとるときは下の符号を使用

ϕ^{II} と ϕ^{III} は式 (6.1), (6.3) を満足する。

式 (6.2) に代入すると

$$\kappa_m \tan \kappa_m h + \frac{\omega^2}{g} = 0 \quad m=0, 1, 2 \dots \infty \quad (6.16)$$

これより κ_m が求まる。

ただし、 $m=0$ のときには $\kappa_m = -i\kappa_0$ で置き換える。 κ_0 は進行波の波数である。

6.3 複素未定係数

各領域のポテンシャルに含まれる複素未定係数には、上下ゆれはその流体運動が浮体の左右で対称であり、また前後ゆれ、縦ゆれは反対称であるから表-4 に示すよ

表-4 複素未定係数と運動

j=1 前後ゆれ	j=2 上下ゆれ	j=3 縦ゆれ
$A_r=0$	$B_r=0$	$A_r=0$
$C_m^+ = -C_m^-$	$C_m^+ = C_m^-$	$C_m^+ = -C_m^-$

うな関係がある。

したがって、 $x=b$ の仮想境界面についてのみ、ポテンシャルおよび水平流速の連続条件を適用して、複素未定係数 A_r, B_r, C_m^+ を決定すればよい。

仮想境界面を横切るポテンシャルと水平流速の連続条件は

$$\phi^{II} = \phi^I \quad x=b, \quad -d > y > -h \quad \dots\dots(6.17)$$

$$\frac{\partial \phi^{II}}{\partial x} = \bar{V}_x \quad x=b, \quad 0 > y > -d$$

$$= \frac{\partial \phi^I}{\partial x} \quad x=b, \quad -d > y > -h \quad \dots\dots(6.18)$$

式 (6.17), (6.18) の ϕ^I, ϕ^{II} に式 (6.9), (6.15) を代入すると

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m^+ \frac{\cos \kappa_m(y+h)}{\cos \kappa_m h} = (A_0 + B_0)$$

$$+ \sum_{r=1}^{\infty} (A_r + B_r) \times \cos R(y+h) + G^I(b, y)$$

$$-d > y > -h \quad \dots\dots(6.19)$$

$$- \sum_{m=0}^{\infty} \kappa_m C_m^+ \frac{\cos \kappa_m(y+h)}{\cos \kappa_m h} = \bar{V}_x$$

$$0 > y > -d \quad \dots\dots(6.20)$$

$$\bar{V}_x = \frac{B_0}{b} + \sum_{r=1}^{\infty} R(A_r \tanh Rb + B_r \coth Rb)$$

$$\times \cos R(y+h) + \frac{\partial G^I(b, y)}{\partial x}$$

$$-d > y > -h \quad \dots\dots(6.21)$$

となるが、 $\cos \kappa_m(y+h), (m=0, 1, 2, \dots\dots)$ は $0 > y > -h$ と $\cos R(y+h), (r=0, 1, 2, \dots)$ は $0 > y > -h$ でそれぞれ完全直交関数系をなす。

式 (6.19) の両辺に $\cos \hat{R}(y+h) (\hat{r}=0, 1, 2, \dots\dots)$ を乗じて $(-d > y > -h)$ で積分し、式 (6.20), (6.21) の両辺に $\cos \kappa_{\hat{m}}(y+h) (\hat{m}=0, 1, 2, \dots\dots)$ を乗じて、それぞれの区間で積分すれば次式が得られる。

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m^+ \frac{L \hat{r} m}{\cos \kappa_m h} = (A_{\hat{r}} + B_{\hat{r}}) \frac{h-d}{\varepsilon_{\hat{r}}} + G_{\hat{r}}$$

$$\hat{r}=0, 1, 2, \dots\dots \quad \dots\dots(6.22)$$

$$- \kappa_{\hat{m}} C_{\hat{m}}^+ \frac{N_{\hat{m}} h}{2 \cos \kappa_{\hat{m}} h} = \frac{B_0}{b} L_{0\hat{m}}$$

$$+ \sum_{r=1}^{\infty} R \{A_r \tanh Rb + B_r \coth Rb\} L_{r\hat{m}} + H_{\hat{m}}$$

$$\hat{m}=0, 1, 2, \dots\dots \quad \dots\dots(6.23)$$

ここで

$$\varepsilon_{\hat{r}} = 2 \quad \hat{r} > 1$$

$$1 \quad \hat{r} = 0$$

$$N_m = \frac{2}{h} \int_{-h}^0 \cos^2 \kappa_m(y+h) dy$$

$$= 1 + \frac{\sin 2 \kappa_m h}{2 \kappa_m h} \quad m \geq 1$$

$$= 1 + \frac{\sinh 2 \kappa_0 h}{2 \kappa_0 h} \quad \hat{m} = 0 \quad \dots\dots(6.24)$$

$$L_{rm} = \int_{-h}^{-d} \cos \kappa_m(y+h) \cos R(y+h) dy$$

$$= \frac{(-1)^r \kappa_m \sin \kappa_m(h-d)}{\kappa_m^2 - R^2} \quad m \geq 1$$

$$= \frac{(-)^r \kappa_0 \sinh \kappa_0(h-d)}{\kappa_0^2 + R^2} \quad m = 0$$

$$\dots\dots(6.25)$$

$$G_{\hat{r}} = \int_{-h}^{-d} G^I(b, y) \cos R(y+h) dy$$

$$= i \omega X_{30} \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{\mu_s^2 (\mu_s^2 + R^2)} \dots\dots(6.26)$$

$$\hat{r} = 0, 1, 2, \dots\dots$$

$$H_m = \int_{-d}^0 \bar{V}_x \cos \kappa_m(y+h) dy$$

$$+ \int_{-h}^{-d} \frac{\partial G^I(b, y)}{\partial x} \cos \kappa_m(y+h) dy$$

$$= i \omega \left\{ P_m + X_{20} \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} Q_{sm} \right\} \dots\dots(6.27)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots\dots$$

$$P_m = \int_{-d}^0 \{(y-y_0) X_{30} + X_{10}\} \cos \kappa_m(y+h) dy$$

$$= \frac{X_{30}}{\kappa_m^2} \{ \cos \kappa_m h - \cos \kappa_m(h-d) + \kappa_m(d+y_0) \}$$

$$\times \sin \kappa_m(h-d) - \kappa_m y_0 \sin \kappa_m h \}$$

$$+ \frac{X_{10}}{\kappa_m} \{ \sin \kappa_m h - \sin \kappa_m(h-d) \} \quad (6.28)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots\dots$$

$$Q_{sm} = \frac{1}{\mu_s} \int_{-h}^{-d} \frac{\cosh \mu_s(y+h)}{\sin \mu_s(h-d)} \cos \kappa_m(y+h) dy$$

$$= \frac{\mu_s \cos \kappa_m(h-d) + \kappa_m \coth \mu_s(h-d) \sin \kappa_m(h-d)}{\mu_s (\mu_s^2 + \kappa_m^2)}$$

$$S = 0, 1, 2, \dots\dots$$

$$m = 0, 1, 2, \dots\dots \quad \dots\dots(6.29)$$

式 (6.21) は運動モードが $j=2$ (上下ゆれ) ならば $B_r=0$ 。 $j=1$ (前後ゆれ) または $j=3$ (縦ゆれ) ならば $A_r=0$ となる。これより A_r, B_r を求め、複素未定係数 C_m^+ についての連立方程式を導くと

$$j=2$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m^* \left\{ \frac{2}{h-d} \sum_{r=1}^{\infty} R \tanh Rb L_{r\hat{m}} L_{rm} \right.$$

$$+\kappa_m N_m \frac{h}{2} \delta_{m\hat{m}} \Big\} = i H_{\hat{m}}^* \dots \dots \dots (6.30)$$

$\hat{m}=0, 1, 2, \dots$

$j=1, 3$

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m^* \left\{ \frac{\alpha_{m\hat{m}}}{h-d} + \kappa_{\hat{m}} N_{\hat{m}} \frac{h}{2} \delta_{m\hat{m}} \right\}$$

$$= i \left\{ P_{\hat{m}}^* + \frac{\beta_{\hat{m}}}{h-d} \right\} \dots \dots \dots (6.31)$$

ここで

$$\omega X_{j0} C_m^* = \frac{C_m^*}{\cos \kappa_m h}$$

$j=1, 2$

$$\delta_{m\hat{m}} = 0 \quad m \neq \hat{m} \dots \dots \dots (6.32)$$

$1 \quad m = \hat{m}$

$$H_m^* = -\frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} Q_{sm} \dots \dots \dots (6.33)$$

$$\alpha_{m\hat{m}} = \frac{L_{0\hat{m}} L_{0m}}{b} + 2 \sum_{r=1}^{\infty} R L_{r\hat{m}} L_{rm} \coth Rb$$

$\dots \dots \dots (6.34)$

$$P_m^* = \frac{P_m}{i\omega X_{j0}}$$

$j=1, 3$

$$\beta_m = 0 \quad j=1$$

$$\beta_m = \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{1}{\mu_s^2} \left\{ \frac{L_{0m}}{\mu_s^2 b} + 2 \sum_{r=1}^{\infty} R L_{rm} \right.$$

$$\left. \times \coth Rb \frac{(-1)^r}{\mu_s^2 + R^2} \right\} \dots \dots \dots (6.35)$$

$j=3$

連立方程式 (6.30), (6.31) を解いて, 未定係数 C_m^* を求め, 式 (6.22) より未定係数 A_r, B_r が求まる。

6.4 流体力学諸係数と波強制力

発散ポテンシャルを用いて浮体表面にわたって圧力積分をすれば発散力が求まる。そして, これを浮体の動揺速度あるいは加速度に比例する成分に分ければ, 付加質量係数, 減衰係数, 連成係数が求まる。

(1) 前後ゆれによる発散力

前後ゆれによる発散力は浮体の側面 ($x = \pm b, 0 > y > -d$) に作用する変動圧力を積分すれば求まる。表-3 の関係から一方の側面について圧力積分すればよい。

流体中の変数圧力 $P(x, y, t)$ は流体密度を ρ とすると

$$P(x, y, t) = -\rho \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial t}$$

$$= R_e [i \rho \omega \phi(x, y) e^{-i\omega t}] \dots \dots \dots (6.36)$$

したがって, 前後ゆれ力は

$$f_{j1} = -2i\rho\omega \int_{-d}^0 [\phi^{II}]_{x=b} dy$$

$$= 2\rho\omega^2 X_{j0} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} (i C_{mc}^* - C_{ms}^*) t_m \right\}$$

$$= 2\rho\omega^2 X_{j0} (f_{j1}^c + f_{j1}^s) \dots \dots \dots (6.37)$$

C_{mc}^*, C_{ms}^* は C_m^* の実部, 虚部を表わし, また t_m, f_{j1}^c, f_{j1}^s は実数で次式に示す。

$$t_m = \frac{\sin \kappa_m h - \sin \kappa_m (h-d)}{\kappa_m} \dots \dots \dots (6.38)$$

$$f_{j1}^c = \sum_{m=0}^{\infty} C_{ms}^* t_m \dots \dots \dots (6.39)$$

$$f_{j1}^s = - \sum_{m=0}^{\infty} C_{mc}^* t_m \dots \dots \dots (6.40)$$

(2) 上下ゆれによる発散力

上下ゆれによる発散力は $x = \pm b, y = -d$ 面の変動圧力を積分すれば求まる。

$$f_{j2} = 2i\rho\omega \int_0^b [\phi^I]_{y=-d} dy$$

$$= 2\rho\omega^2 X_{20} (f_{22}^c + f_{22}^s) \dots \dots \dots (6.41)$$

ここで

$$f_{22}^c = -\frac{1}{h-d} \sum_{m=0}^{\infty} C_{ms}^* \left[L_{0m} b \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r L_{rm} \times \frac{\tanh Rb}{R} \right]$$

$$+ \frac{2}{b} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{\coth \mu_s h (h-d)}{\mu_s^3}$$

$$f_{22}^s = \frac{1}{h-d} \sum_{m=0}^{\infty} C_{mc}^* \left[L_{0m} b \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r \times L_{rm} \frac{\tanh Rb}{R} \right] \dots \dots \dots (6.42)$$

(3) 波強制力

x の正方向から入射する規則波の速度ポテンシャルは

$$\phi^i(x, y, t) = R_e [\phi^i(x, y) e^{-i\omega t}] \dots \dots \dots (6.43)$$

$$\phi^i(x, y) = -i \frac{g}{\omega} \varphi_a e^{-i\kappa_0 x} \frac{\cosh \kappa_0 (h+y)}{\cosh \kappa_0 h}$$

$\dots \dots \dots (6.44)$

波強制力は Haskind の関係から

$$f_{jj}^E = R_e \left[\frac{\rho}{X_{j0}} e^{-i\omega t} \int_{-h}^0 \left\{ \left(\phi^i \frac{\partial \phi^{II}}{\partial x} - \phi^{II} \frac{\partial \phi^i}{\partial x} \right)_{x=+\infty} \right. \right.$$

$$\left. \left. - \left(\phi^i \frac{\partial \phi^{III}}{\partial x} - \phi^{III} \frac{\partial \phi^i}{\partial x} \right)_{x=-\infty} \right\} dy \right]$$

$\dots \dots \dots (6.45)$

$$= \rho g \varphi_a \frac{\kappa_0 h N_0 |C_0^*|}{\cos \kappa_0 h} \cos(\omega t - \varepsilon_j) \dots (6.46)$$

ただし

$$\varepsilon_j = -\kappa_0 b + \tan^{-1} \frac{C_{0s}^*}{C_{0c}^*} \quad j=1, 2 \dots (6.47)$$

6.5 付加質量係数, 減衰係数, 波強制力係数

付加質量係数 (added mass coefficients) k_{jj} , 減衰係数 (damping coefficients) N_{jj} , 波強制力係数 (non-dimensional wave force) e_{jj} を無次元化した式を次に示

表一5 漂流力係数 C_T

(1) HEAD SEA

κA	ω	k_{22}	N_{22}	ϵ_H	ϵ_y	C_T
0.2	1.400	12.484	92.653	-0.200	-1.434	0.017
0.4	1.980	12.529	46.712	-0.403	-1.886	0.095
0.6	2.425	12.600	31.544	-0.609	-2.140	0.259
0.8	2.800	12.693	24.044	-0.819	-2.363	0.412
1.0	3.131	12.800	19.588	-1.034	-2.590	0.540
1.2	3.429	12.918	16.636	-1.252	-2.813	0.643
1.4	3.704	13.044	14.527	-1.473	-3.036	0.722
1.6	3.960	13.172	12.940	-1.694	-3.259	0.782
1.8	4.200	13.301	11.688	-1.915	-3.481	0.827
2.0	4.427	13.429	10.671	-2.134	-3.701	0.862
2.2	4.643	13.556	9.822	-2.352	-3.919	0.889
2.4	4.850	13.680	9.098	-2.567	-4.135	0.909
2.6	5.048	13.801	8.467	-2.780	-4.348	0.925
2.8	5.238	13.919	7.912	-2.990	-4.559	0.938
3.0	5.422	14.034	7.418	-3.199	-4.768	0.948
3.2	5.600	14.178	6.974	-3.405	-4.975	0.956
3.4	5.772	14.257	6.571	-3.611	-5.180	0.963
3.6	5.940	14.364	6.204	-3.815	-5.384	0.968
3.8	6.102	14.468	5.867	-4.017	-5.587	0.973
4.0	6.261	14.570	5.557	-4.219	-5.789	0.977
4.2	6.416	14.668	5.270	-4.420	-5.990	0.980
4.4	6.567	14.765	5.004	-4.630	-6.190	0.982
4.6	6.714	14.860	4.756	-4.820	-6.390	0.984
4.8	6.859	14.952	4.525	-5.020	-6.590	0.986
5.0	7.000	15.043	4.309	-5.219	-6.789	0.988

(2) HEAD SEA

κA	ω	k_{11}	N_{11}	ϵ_s	ϵ_x
0.2	1.400	0.101	0.011	1.578	0.008
0.4	1.980	0.099	0.020	1.569	-0.001
0.6	2.425	0.095	0.028	1.535	-0.036
0.8	2.800	0.091	0.034	1.470	-0.100
1.0	3.131	0.088	0.039	1.377	-0.194
1.2	3.429	0.084	0.043	1.258	-0.312
1.4	3.704	0.081	0.046	1.120	-0.450
1.6	3.960	0.078	0.049	0.967	-0.604
1.8	4.200	0.075	0.051	0.803	-0.768
2.0	4.427	0.073	0.053	0.630	-0.940
2.2	4.643	0.070	0.055	0.453	-1.118
2.4	4.850	0.068	0.056	0.271	-1.299
2.6	5.048	0.066	0.057	0.087	-1.483
2.8	5.238	0.064	0.058	-0.098	-1.669
3.0	5.422	0.061	0.059	-0.285	-1.856
3.2	5.600	0.060	0.060	-0.473	-2.044
3.4	5.772	0.058	0.060	-0.662	-2.232
3.6	5.940	0.056	0.061	-0.851	-2.421
3.8	6.102	0.054	0.061	-1.040	-2.611
4.0	6.261	0.052	0.061	-1.231	-2.801
4.2	6.416	0.051	0.062	-1.421	-2.992
4.4	6.567	0.049	0.062	-1.612	-3.183
4.6	6.714	0.048	0.062	-1.803	-3.374
4.8	6.859	0.046	0.062	-1.995	-3.565
5.0	7.000	0.045	0.062	-2.186	-3.757

す。

$$k_{jj} = \frac{2f_{jj}^c}{V} \dots \dots \dots (6.48)$$

$$N_{jj} = \frac{2f_{jj}^s}{V} \dots \dots \dots (6.49)$$

(3) BEAM SEA

κA	ω	k_{22}	N_{22}	ϵ_H	ϵ_y	C_T
0.2	6.261	3.657	4.734	-0.225	-1.783	0.052
0.4	8.854	3.297	3.413	-0.503	-2.069	0.265
0.6	10.844	2.973	2.816	-0.755	-2.322	0.516
0.8	12.522	2.776	2.349	-0.974	-2.543	0.670
1.0	14.000	2.674	1.968	-1.178	-2.748	0.866
1.2	15.336	2.629	1.655	-1.374	-2.944	0.889
1.4	16.565	2.622	1.395	-1.566	-3.137	0.932
1.6	17.709	2.638	1.177	-1.756	-3.327	0.958
1.8	18.783	2.670	0.994	-1.945	-3.515	0.973
2.0	19.799	2.712	0.841	-2.133	-3.704	0.983
2.2	20.765	2.760	0.711	-2.321	-3.892	0.989
2.4	21.689	2.811	0.601	-2.510	-4.081	0.993
2.6	22.574	2.864	0.509	-2.699	-4.270	0.995
2.8	23.426	2.916	0.431	-2.889	-4.459	0.997
3.0	24.249	2.967	0.366	-3.079	-4.649	0.998
3.2	25.050	3.016	0.310	-3.271	-4.841	0.999
3.4	25.815	3.063	0.263	-3.463	-5.033	0.999
3.6	26.563	3.108	0.224	-3.656	-5.226	0.999
3.8	27.291	3.150	0.190	-3.849	-5.420	1.000
4.0	28.000	3.190	0.162	-4.043	-5.614	1.000
4.2	28.691	3.228	0.138	-4.238	-5.809	1.000
4.4	29.367	3.263	0.118	-4.434	-6.004	1.000
4.6	30.027	3.295	0.101	-4.630	-6.200	1.000
4.8	30.672	3.326	0.086	-4.826	-6.397	1.000
5.0	31.305	3.354	0.074	-5.023	-6.594	1.000

(4) BEAM SEA

κA	ω	k_{11}	N_{11}	ϵ_s	ϵ_x
0.2	6.261	0.343	0.026	1.587	0.017
0.4	8.854	0.394	0.026	1.614	0.043
0.6	10.844	0.393	0.099	1.620	0.050
0.8	12.522	0.366	0.186	1.589	0.019
1.0	14.000	0.309	0.251	1.522	0.019
1.2	15.336	0.262	0.291	1.428	-0.143
1.4	16.565	0.220	0.311	1.311	-0.259
1.6	17.709	0.184	0.319	1.178	-0.392
1.8	18.783	0.153	0.318	1.033	-0.538
2.0	19.799	0.128	0.313	0.878	-0.692
2.2	20.765	0.107	0.305	0.716	-0.855
2.4	21.689	0.090	0.295	0.548	-1.023
2.6	22.574	0.075	0.284	0.375	-1.196
2.8	23.426	0.063	0.273	0.197	-1.373
3.0	24.249	0.053	0.262	0.017	-1.553
3.2	25.044	0.044	0.252	-0.166	-1.737
3.4	25.815	0.037	0.241	-0.352	-1.922
3.6	26.563	0.031	0.231	-0.539	-2.110
3.8	27.291	0.026	0.221	-0.728	-2.299
4.0	28.000	0.022	0.212	-0.919	-2.490
4.2	28.691	0.018	0.203	-1.111	-2.682
4.4	29.367	0.015	0.194	-1.304	-2.875
4.6	30.027	0.012	0.186	-1.498	-3.069
4.8	30.672	0.010	0.179	-1.693	-3.264
5.0	31.305	0.009	0.172	-1.888	-3.459

$$e_{jj} = \frac{f_{jj}^E}{Q_{jj}} \dots \dots \dots (6.50)$$

ここに

- k_{11}, k_{22} : 前後ゆれ, 上下ゆれの付加質量係数
- N_{11}, N_{22} : " " の減衰係数
- e_{11}, e_{22} : " " の浮強制力係数

報 告

f_{j1}^c, f_{j2}^c : " " の付加質量力
 f_{j1}^s, f_{j2}^s : " " の減衰力
 f_{j1}^E, f_{j2}^E : " " の波強制力

V : 単位長さあたりの排水容積 = $2bd$

Q_1, Q_2 : 前後ゆれ, 上下ゆれ時の $\rho g \varphi_a 2b$

6.6 領域分割法 (理論) による波漂流力係数 (C_T)

領域分割法から, 入射波と上下ゆれ運動との位相差 ε_y , 入射波と前後ゆれ運動との位相差 ε_x が求まる。

$\varepsilon = \varepsilon_y - \varepsilon_x$ から波漂流力係数 (理論) C_T が式 (6.51) から求まる。

$$C_T = \cos^2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) = \cos^2 \varepsilon \dots\dots\dots (6.51)$$

表-5 に理論より導いた漂流力係数 C_T を HEAD SEA, BEAM SEA について示す。

なお, 係数の算定式を表-6 に示す。

表-6 係数と算定式

記号	係 数	関 係 式
κA	$\frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{B}{2}$ B : 入射方向における浮体の長さ $(2b)$ $A = \frac{B}{2}$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ T : 入射波の周期	
k_{11}	前後ゆれ付加質量係数 f_{jj}^c C_{ms}^* t_m	(6.48) (6.39) (6.31)~(6.35) (6.38)
k_{22}	上下ゆれ付加質量係数 f_{jj}^s C_{mc}^*	(6.48) (6.40) (6.30), (6.32)~(6.35)
N_{11}	前後ゆれ減衰係数 C_{ms}^*	(6.49), (6.40) (6.31)~(6.35)
N_{22}	上下ゆれ減衰係数 C_{mc}^*	(6.49), (6.42) (6.30), (6.32)~(6.35)
e_{11}	前後ゆれ波強制力係数	(6.50), (6.46), (6.24)
e_{22}	上下ゆれ波強制力係数	(6.47)
\bar{A}_S	浮体前後ゆれ運動による発散波の振幅	(5.15)
\bar{A}_H	浮体上下ゆれ運動による発散波の振幅	(5.4)
ε_S	入射波と前後ゆれ強制力との位相差	(6.47), (6.31)~(6.35)
ε_H	入射波と上下ゆれ強制力との位相差	(6.47), (6.30), (6.31)~(6.35)
ε_x	入射波と前後ゆれ運動との位相差	(5.17), (5.15), (5.16)
ε_y	入射波と上下ゆれ運動との位相差	(5.11), (5.4)

7. 実験結果と考察

7.1 浮体の運動

(1) 作用波浪, 船首方向 (縦波) HEAD SEA

縦波による浮体の上下ゆれ, 前後ゆれ, ピッチングは 図-8, 9, 10 に示されるとおりである。

周波数係数 κA が小さくなると (モデル周期 1.07 sec, 現場周期 13.1 sec) ゆれが大きくなり, $\kappa A=3.5$ 以下で急激に大きくなる。 $\kappa A=4$ 付近からゆれは小さくなり, $\kappa A=10$ (モデル周期 0.63 sec, 現場周期 7.7 sec 以下) 以上では一定のゆれを示す。

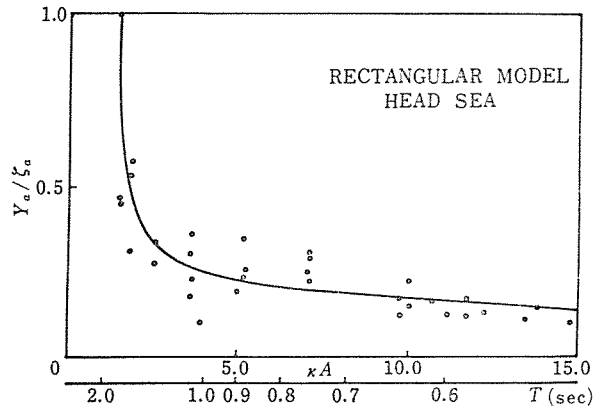


図-8 Relation between Y_a/ζ_a and κA and wave period T

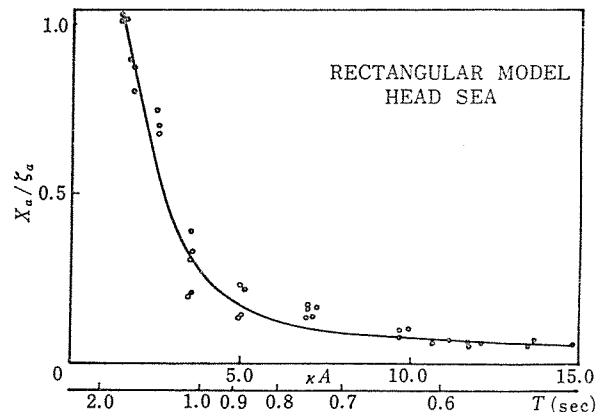


図-9 Relation between X_a/ζ_a and κA and wave period T

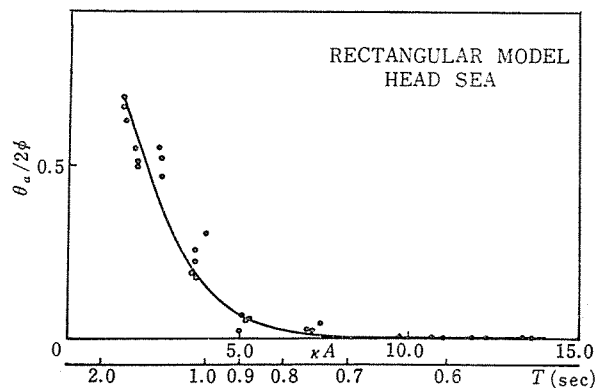


図-10 Relation between $\theta_a/2\phi$ and κA and wave period T

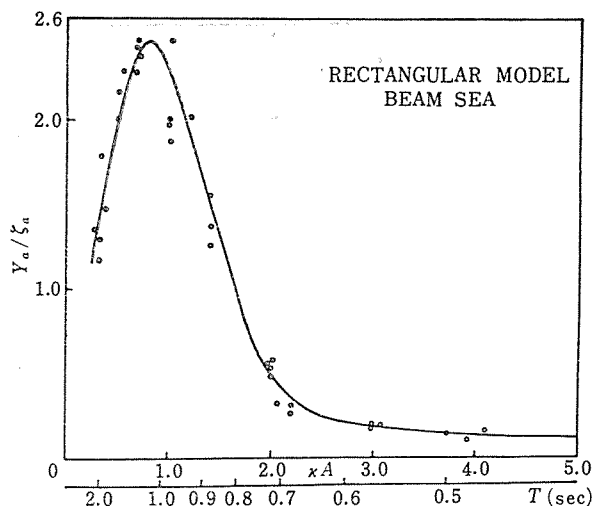


図-11 Relation between Y_a/ξ_a and κA and wave period T

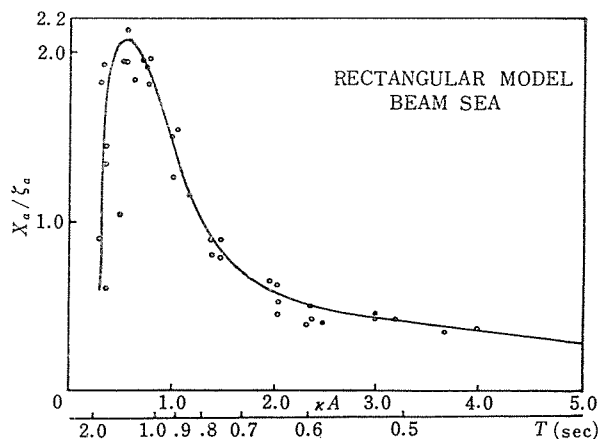


図-12 Relation between X_a/ξ_a and κA and wave period T

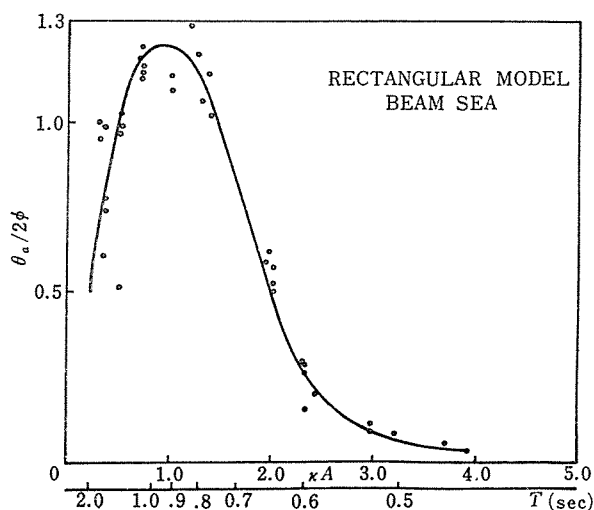


図-13 Relation between $\theta_a/2\phi$ and κA and wave period T

ピッチングについては $\kappa A=11.5$ (現場周期 7.3 sec) 以下ではゆれが殆んどない。

(2) 作用波浪, 横方向 (横波) BEAM SEA

横波による浮体の運動は図-11, 12, 13 に示されるとおりである。

上下ゆれとピッチングの最大は $\kappa A=1.0$ (現場周期 11.0 sec) でこれより κA が大きくなると (現場周期が小さくなると) ゆれは急激に小さくなる。 $\kappa A=2.5$ (現場周期 6.95 sec) からは一定のゆれを示す。縦波, 横波とも浮体の奥行き長さ B と等しい波長のとき各モードとも最大のゆれを示し, 必ずしも固有振動周期と同一波長では共振しないことがわかった (表-2 浮体の固有振動周期参照)。

7.2 漂 流 力

(1) 作用波浪, 船首方向 (縦波) HEAD SEA

(4.1) 式のカウンターウェイトによる実測漂流力より導いた漂流力係数 C_D , (4.3) 式の上下ゆれと前後ゆれの位相差 (実験値) ϵ より導いた漂流力係数 C_s , そして領域分割法による理論計算流体力より導いた漂流力係数 C_T , と周波数係数 κA との関係を図-14, 15, 16 に示す。

C_D, C_s は $\kappa A=0.7$ 以下 (モデル周期 2.4 sec, 現場周期 29.8 sec 以上) では 0 に近似する。漂流力は無視できる。

C_D は $\kappa A=1.0$ から急増し, 9.0 (モデル周期 0.67 sec, 現場周期 8.2 sec) 付近で最大値 $C_D=1.14$ を示し, κA がそれ以上になる (周期が小さくなる) と急に減小する。

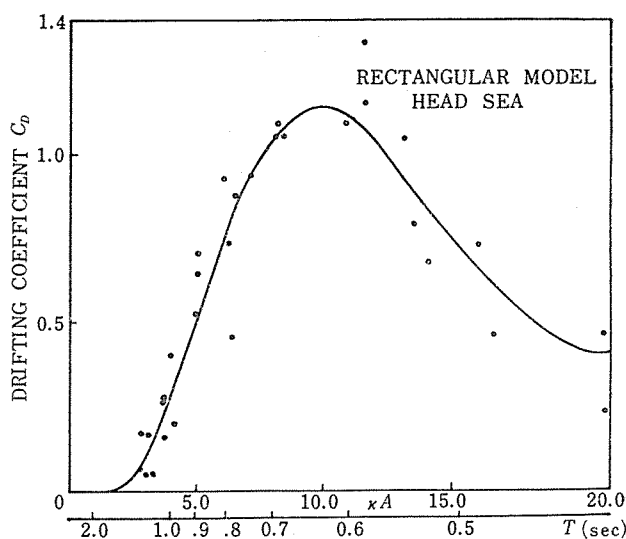


図-14 Relation between drifting coefficient based on actual measurement and κA and wave period T

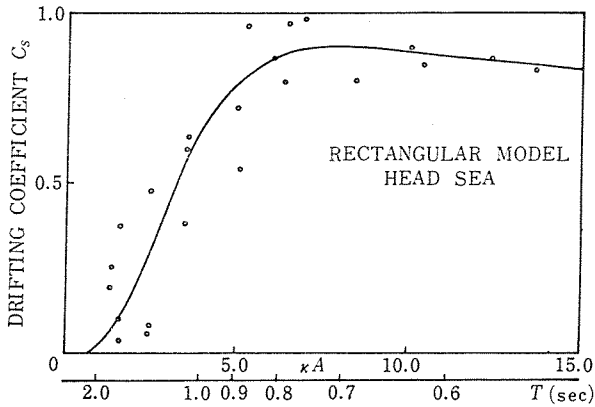


図-15 Relation between drifting coefficient based on phase differences and κA and wave period T

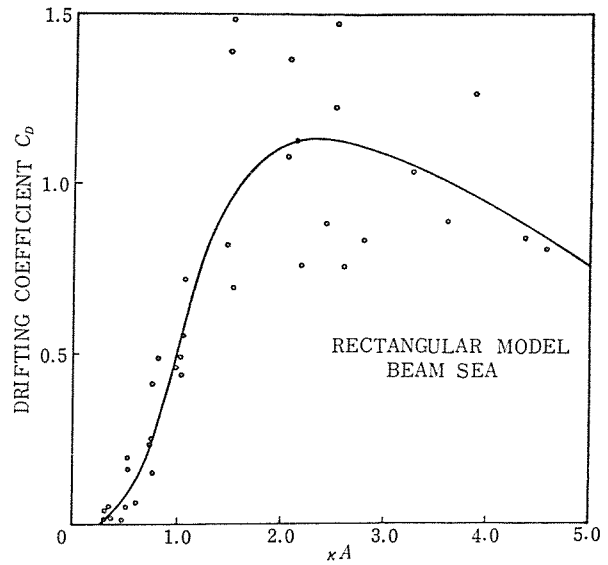


図-17 Relation between drifting coefficient based on actual measurement and κA

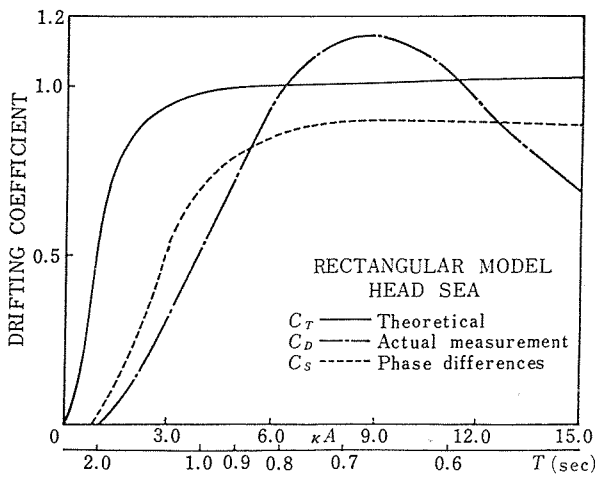


図-16 Comparison of drifting coefficients from direct measurement and phase differences with theoretical values

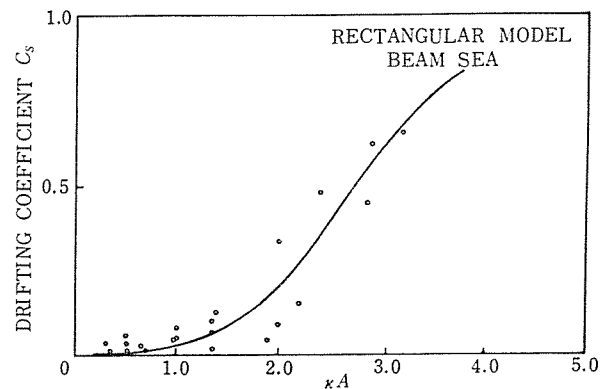


図-18 Relation between drifting coefficient based on phase differences and the ratio κA

C_s も $\kappa A=9$ (モデル周期 $T=0.67$ sec, 現場周期 8.2 sec) 付近まで増加し, $C_s=0.8$ の最大値となるが, κA が増加しても 0.8 の一定値を保つ。

C_T は C_D, C_s にくらべ, $\kappa A=3.8$ (モデル周期 0.46 sec, 現場周期 5.63 sec) で $C_T=1.0$ に収束する傾向を示す。

(2) 作用波浪, 横方向(横波) BEAM SEA

漂流力係数 C_D, C_s, C_T と周波数係数 κA との関係を図-17, 18, 19 に示す。

C_D, C_s は $\kappa A=0.3$ 以下 (モデル周期 1.64 sec, 現場周期 20.1 sec 以上) では 0 に近似し, 漂流力は 0 である。

データのプロット点が散らばり, はっきり傾向の曲線が描けないが, C_D は $\kappa A=1.5$ (モデル周期 0.73 sec, 現場周期 9.0 sec) までは増加し, 最大値で $C_D=1.1$ となった。

C_s は $\kappa A=4.0$ までゆるやかに増加する。

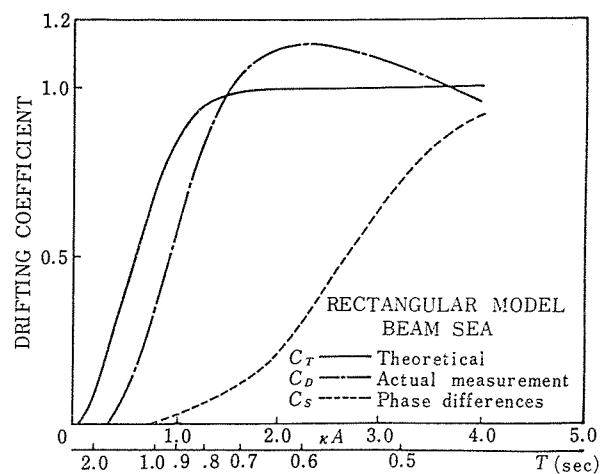


図-19 Comparison of drifting coefficients from actual measurement and phase differences with theoretical values

C_T は急激に増加し、 $\kappa A=1.0$ (モデル周期 0.9 sec, 現場周期 11.0 sec) で $C_T=1.0$ に収束する。

(3) ステープネス H/L と C_D, C_s

波高 H と波長 L との比, ステープネスについて C_D と C_s をそれぞれ図-20 と 21 に示す。

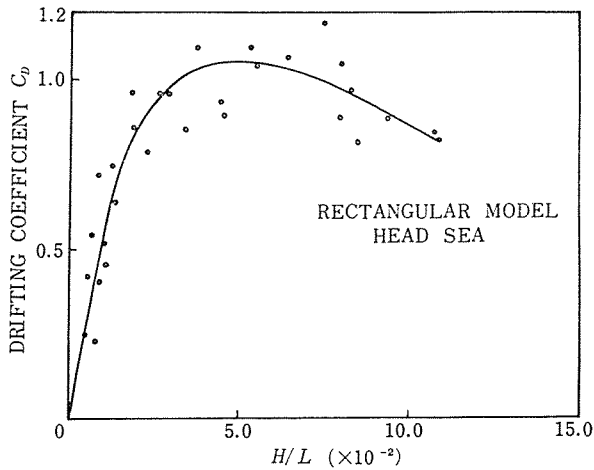


図-20 Relation between drifting coefficient based on actual measurement and wave steepness H/L

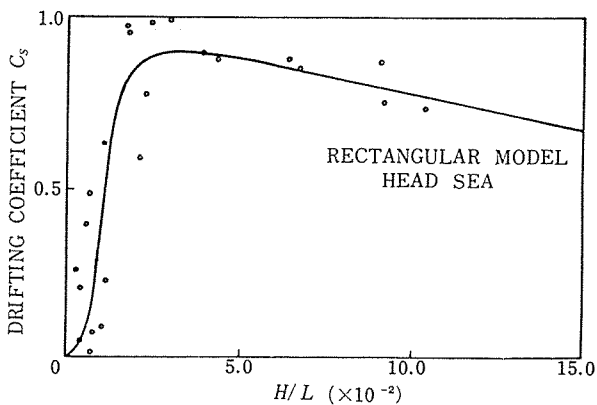


図-21 Relation between drifting coefficient based on phase differences and wave steepness H/L

これより $H/L=0.03\sim 0.04$ で漂流力は最大となる。

7.3 底板にかかる波圧

(1) 作用波浪, 船首方向(縦波) HEAD SEA

奥行き長さ 2m の底板にかかる波圧は表-7 に示されるように前底部分から後底部分に次第に小さくなる傾向を示した。表は各種作用波浪中, 前底に最大波圧が作用したときの後方 4 点波圧の同時測定値である。

なお前底ポイント 1 における各種作用波浪と測定波圧との関係を図-22 に示す。

(2) 作用波浪, 横方向(横波) BEAM SEA

奥行き長さ 0.4m の底板にかかる波圧は, 表-7 に示されるように波圧計位置が作用波浪に対し, 等位置であ

表-7 底板にかかる波圧

HEAD SEA						
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	
モデル (g/cm ²)	2.32	0.99	0.77	0.46	0.29	波高: 6.03 cm 周期: 0.77 sec
現場 (ton/m ²)	3.48	1.49	1.16	0.69	0.44	波高: 9.05 m 周期: 9.43 sec

BEAM SEA						
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	
モデル (g/cm ²)	1.83	2.17	2.05	1.77	1.53	波高: 4.54 cm 周期: 0.65 sec
現場 (ton/m ²)	2.75	3.26	3.08	2.66	2.30	波高: 6.81 m 周期: 7.96 sec

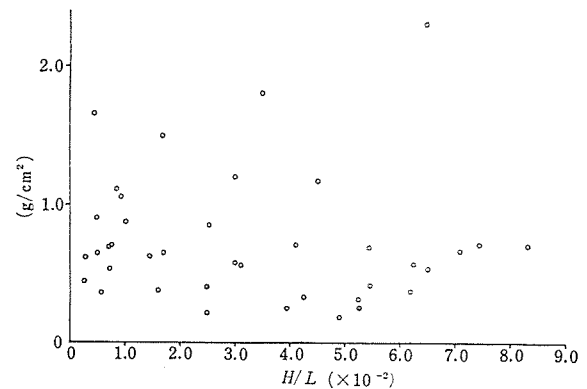


図-22 Point 1 における測定波圧と H/L (Head)

るから, ほぼ同一波圧を示している。

なお表は各点の最大測定値を示したものである。

7.4 運動と漂流力の測定最大値

HEAD SEA, BEAM SEA の各種作用波浪による運動とカウンターウェイトからの測定漂流力の最大値を表-8 に示す。

表-8 運動と漂流力の最大値

HEAD SEA			
	最大値	波 高	周 期
漂 流 力	607.5 ton (180 g)	8.7 m (5.83 cm)	9.3 sec (0.76 sec)
サージング	1.0 m (6.91 mm)	3.6 m (2.39 cm)	18.1 sec (1.48 sec)
ヒーピング	1.6 m (10.85 mm)	4.7 m (3.12 cm)	15.4 sec (1.26 sec)
ピッチング	2°31'41''	4.7 m (3.12 cm)	15.4 sec (1.26 sec)

BEAM SEA			
	最大値	波 高	周 期
漂 流 力	1957.5 ton (580 g)	8.7 m (5.81 cm)	9.0 sec (0.73 sec)
サージング	5.3 m (35.22 mm)	5.5 m (3.64 cm)	12.9 sec (1.05 sec)
ヒーピング	7.2 m (48.0 mm)	7.6 m (5.07 cm)	11.0 sec (0.9 sec)
ピッチング	21°31'13''	8.0 m (5.31 cm)	9.4 sec (0.77 sec)

なお, BEAM SEA は現実的には考えられないので HEAD SEA の状態が最大値となる。

付録 1. 規則波による波漂流力

A.1 反射波にもとづく波漂流力 (丸尾教授の理論式)

静水面を x 軸, 上向きを $+y$ 軸とする座標を考える。流体は非圧縮, 非回転とすると, 速度ポテンシャル ϕ は次式を満足する。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad y=0 \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad y=-h \dots\dots\dots (A.3)$$

$+x$ 軸方向に振幅 ζ , 角周波数 ω の進行波が作用するものとすれば, 速度ポテンシャル ϕ は

$$\begin{aligned} \phi &= -\frac{\zeta g}{\omega} \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \sin(\kappa x - \omega t) \\ &= -\frac{\zeta \omega}{\kappa} \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \sin(\kappa x - \omega t) \end{aligned} \dots\dots\dots (A.4)$$

ここで

$$\omega^2 = g\kappa \tanh \kappa h \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\kappa = \frac{2\pi}{L} \quad L = \text{波長} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$T = \text{周期} \quad g : \text{重力加速度}$

垂直面を横切る進行波の運動エネルギーの単位時間あたりの波浪パワー W は波圧 P と x 軸方向の速度 u ($= -\frac{\partial \phi}{\partial x}$) を用いて次式で示すことができる。

$$W = \int_{-h}^0 P u dy \dots\dots\dots (A.6)$$

圧力 P は Bernoulli の式から

$$\frac{P}{\rho} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (A.7)$$

2次項を無視すると

$$P = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho g \zeta \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \cos \alpha \dots\dots\dots (A.8)$$

ここで

$$\alpha = \kappa x - \omega t$$

x 方向の速場成分 u は

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \zeta \omega \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\sinh \kappa h} \cos \alpha \dots\dots\dots (A.9)$$

式 (A.8) と (A.9) を式 (A.6) に代入すると

$$W = \rho g \zeta^2 C_g \cos^2 \alpha$$

$$\doteq \frac{1}{2} \rho g \zeta^2 C_g (1 + \cos 2\alpha) \dots\dots\dots (A.10)$$

ここで

$$C_g = \frac{1}{2} C \left(1 + \frac{2\kappa h}{\sinh 2\kappa h} \right) \dots\dots\dots (A.11)$$

$$C = \frac{\omega}{\kappa}$$

式 (A.10) は波の運動エネルギーの輸送速度を示し, $1 + \cos 2\alpha$ で変化し, 平均値が群速度である。

式 (A.8) を用い, 波浪中におかれた物体に作用する波力によるパワーが導かれる。

$x = -\infty$ 方向から x 軸の $+$ 方向に進行する入射波の振幅 ζ_A が $x=0$ の位置におかれた物体に作用すると, $x = -\infty$ 方向に作用波浪の一部が, 反射振幅 ζ_R が反射し, のこりが $x = \infty$ 方向に透過振幅 ζ_T で物体を通過する。入射, 反射, 透過波の相関速度ポテンシャル ϕ_A, ϕ_R, ϕ_T は

$$\phi_A = \frac{\zeta_A g}{\omega} \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \sin(\kappa x_- - \omega t + \varepsilon_A) \dots\dots\dots (A.12)$$

$$\phi_R = -\frac{\zeta_R g}{\omega} \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \sin(\kappa x_- + \omega t + \varepsilon_R) \dots\dots\dots (A.13)$$

$$\phi_T = \frac{\zeta_T g}{\omega} \frac{\cosh \kappa(h+y)}{\cosh \kappa h} \sin(\kappa x_+ - \omega t + \varepsilon_T) \dots\dots\dots (A.14)$$

ここで

ε : 位相のずれ

式 (A.12), (A.13), (A.14) の波浪パワー式は式 (A.10) から

$$W_A = \rho g \zeta_A^2 C_g \cos^2(\kappa x_- - \omega t + \varepsilon_A) \dots\dots (A.15)$$

$$W_R = \rho g \zeta_R^2 C_g \cos^2(\kappa x_- + \omega t + \varepsilon_R) \dots\dots (A.16)$$

$$W_T = \rho g \zeta_T^2 C_g \cos^2(\kappa x_+ - \omega t + \varepsilon_T) \dots\dots (A.17)$$

ここで

x_- : 入射波側のエネルギー検査位置

x_+ : 透過波側の " "

$x=0$ におかれた物体に作用するパワーを求めてみる。入射波側 x_- の波浪パワーは $(W_A + W_R)$, 透過波側 x_+ の波浪パワーは W_T であるから, 単位時間あたり物体に作用する波浪パワーは $W_T - W_R - W_A$ となる。位相速度 C で波浪が物体に作用するときの作用力 $F(t)$ のパワーを $F(t)C$ とすると, 波浪パワーと作用力パワーは等しい。

$$F(t)C = W_A + W_R + W_T \dots\dots\dots (A.18)$$

入射波エネルギーは反射波エネルギーと透過波エネルギー法則から次式が成立する。

$$\zeta_A^2 = \zeta_R^2 + \zeta_T^2 \dots\dots\dots (A.19)$$

式 (A.15) に式 (A.19) を代入し, 式 (A.18) に式 (A.15), (A.16), (A.17) を代入し, 整理すると

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho g n \zeta_R^2 [1 + \cos \varepsilon_{AR} \cos (2 \omega t + \varepsilon_{AR})] \dots\dots\dots (A.20)$$

ここで

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2 \kappa h}{\sinh 2 \kappa h} \right) \dots\dots\dots (A.21)$$

$\varepsilon_{AR} = \varepsilon_R - \varepsilon_A$ (入射波との位相差)

式 (A.20) で 2 次項を無視すると

$$F_d = \frac{1}{2} \rho g n \zeta_R^2 \dots\dots\dots (A.22)$$

水深 h が無限に近づくと

$$F_d = \frac{1}{2} \rho g \zeta_R^2 \dots\dots\dots (A.23)$$

A.2 入射波と浮体の上下ゆれ, 前後ゆれとの位相差 にもとづく波漂流力係数 (田才教授の理論式)

水深が波長に比べて十分大きい場合, 入射波を微小振幅の深海波で示すと

$$\zeta = \zeta_A e^{i(\omega t + \kappa x)} \dots\dots\dots (A.24)$$

物体が固定されているとき, 反射波の振幅は

$$\zeta_R = \zeta_A i H^+(\kappa) e^{i(\omega t - \kappa x)} \dots\dots\dots (A.25)$$

$iH^+(\kappa)$ は Kochin 関数で

$$iH^+(\kappa) = -\frac{1}{2} \{ (\cos 2 \varepsilon_s - \cos 2 \varepsilon_H) + i(\sin 2 \varepsilon_s + \sin 2 \varepsilon_H) \} \dots\dots\dots (A.26)$$

式 (A.25) に式 (A.26) を代入し, 真数式を求めると

$$\zeta_R = -\zeta_A \cos (\varepsilon_s - \varepsilon_H) \cos (\omega t - \kappa x + \varepsilon_s + \varepsilon_H) \dots\dots\dots (A.27)$$

浮体の上下ゆれ, 前後ゆれ運動によって $-x$ 軸に生ずる発散波は

$$\text{上下ゆれ運動 } \zeta_A \cos (\varepsilon_y - \varepsilon_H) e^{i(\omega t - \kappa x + \varepsilon_y + \varepsilon_H)} \dots\dots\dots (A.28)$$

$$\text{前後ゆれ運動 } \zeta_A \cos (\varepsilon_x - \varepsilon_s) e^{i(\omega t - \kappa x + \varepsilon_x + \varepsilon_s)}$$

$$\dots\dots\dots (A.29)$$

反射波の振幅は式 (A.27) と, 式 (A.28) に式 (A.29) の実部を加えた式 (A.30) となる。したがって浮体の場合の反射式は式 (A.27) に式 (A.28) と式 (A.29) を加えた真数式となる。

$$\begin{aligned} \zeta_R = & -\zeta_A \cos (\varepsilon_s - \varepsilon_H) \cos (\omega t - \kappa x + \varepsilon_s + \varepsilon_H) \\ & + \zeta_A \cos (\varepsilon_y - \varepsilon_H) \cos (\omega t - \kappa x + \varepsilon_y + \varepsilon_H) \\ & + \zeta_A \cos (\varepsilon_x - \varepsilon_s) \cos (\omega t - \kappa x + \varepsilon_x + \varepsilon_s) \end{aligned} \dots\dots\dots (A.30)$$

よって

$$(\varphi_R / \varphi_A)^2 = \cos^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \dots\dots\dots (A.31)$$

同様に透過波について $(\varphi_T / \varphi_A)^2$ を求めると

$$(\varphi_T / \varphi_A)^2 = \sin^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \dots\dots\dots (A.32)$$

$$\begin{aligned} (\varphi_R / \varphi_A)^2 + (\varphi_T / \varphi_A)^2 = & \cos^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \\ & + \sin^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_x) = 1 \end{aligned} \dots\dots\dots (A.33)$$

これより漂流力の無次元値, 漂流力係数

$$F_D / n \rho g \zeta_A^2 = (\varphi_R / \zeta_A)^2 = \cos^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_x)$$

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 田才福造: 規則波中における 2 次元浮体に働く流体力
- 3) 丸尾 孟: The Drift of a Body Floating on Waves, Journal of Ship Research, Vol. 4, No. 3
- 4) 前田久明: 任意船型に及ぼす波の強制力について, 日本造船協会論文集, 第 126 号
- 5) Havelock, T.H.: The Drifting Force on a Ship among Waves, Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 33.
- 6) P.S. Renukaradhya, 長崎作治: The Effect of Shallow Water on Wave Drift Force on a Floating Structure, Proc. 5th Conf. on Ocean Engineering in Republic of China.
- 7) 久野琢也: 領域分割法による流体力の計算法について, 東海大学昭和 53 年度修士論文

【昭和 57 年 2 月 1 日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

穴あき PC 板設計施工指針・同解説

体 裁: B 5 判 128 頁 ビニール製の表紙で現場持ち歩きに便利
 定 価: 1 800 円 (会員特価: 1 600 円) 送 料: 450 円
 内 容: 1. 総則 2. 材料および許容応力度 3. 部材の設計 4. 構造設計
 5. 接合部の設計 6. 施工 (含取付・補修等)
 お申込みは代金を添えて, (社) プレストレストコンクリート技術協会へ