

沖合浮体式波力装置の波浪中特性の推定法について

堀田 平^{*1}

沖合浮体式波力装置 FOWAD は、沖合の波のエネルギーを効率良く吸収して他のエネルギーに変換すると同時に、装置の後方海域の波を静め有効に利用できる海域を広める機能を有している。著者らは、これまでに幾種類もの FOWAD 縮尺モデルを用いて水槽実験を実施し、これらの機能の把握に努めてきた。しかし、実海域における実機の諸性能を推定するための汎用的な手法については確立されていなかった。

本報においては、FOWAD の波浪中運動および波エネルギー吸収特性について定量的に推定する手法の開発を試み、以前に実施した縮尺モデルを用いた実験結果と比較した。この手法は、ストリップ法による運動の推定と熱力波動法による波エネルギー吸収性能の推定改良を施して組み合わせたものである。その結果、本手法による計算結果は、概ね実験結果と合っており、よって本手法が FOWAD の諸機能の推定に有効なことが確認された。

キーワード：海洋エネルギー，汲エネルギー，波力発電，波力装置

A Method for Estimating the Performance of a Floating Offshore Wave Power Device (FOWAD) in Short Crested Waves

Hitoshi HOTTA^{*2}

The Floating Offshore Wave power Device (FOWAD) is a floating terminator Oscillating Water Column (OWC) wave power device which is installed some distance offshore. So far, several tests using a scale model in a wave tank have been carried out. These tests have confirmed that FOWAD performs well in absorbing wave energy and it appears suitable for practical applications in the future. The method used to estimate the efficiency of wave energy absorption and predict device motions was described in an earlier paper and the validity of the methodology was also confirmed.

*1 海洋開発研究部

*2 Marine Research and Development Department

In this paper, the method used to estimate the efficiency of wave energy absorption of FOWAD in the short-crested seas in which it will operate is described. This method calculates the efficiency by linear multiplication of power spectrum and the efficiency characteristics in the frequency domain, developed in the earlier paper.

Using this method, the calculated performance agreed very closely with the measured performance of the model. Consequently it was determined that this method is valid for estimating the performance of a full scale device in the sea.

Development of this method of estimating the performance simplifies the estimation of performance of FOWAD in case studies and basic design work.

Key word : Ocean energy, Wave energy, Wave power, Wave power device

1 はじめに

海洋の波からエネルギーを吸収し、他の有効なエネルギーに変換すると同時に、後方の海域の波を静める、いわゆる多目的な波力装置として、著者らはターミネーター型と呼ばれるタイプの浮体式の波力装置について研究を進めてきた^{1)~6)}。その結果、FOWAD (Floating Offshore Wave Power Device) と称する形式の装置が比較的良好な性能を発揮することが概略的な推定と模型実験から明らかになってきた⁵⁾。しかし、これまでのところ、理論的にその性能を裏付け、数値計算によりそれを求める手法は確立しておらず、定性的な性能の把握にとどまっていた。

FOWAD に関する研究は、実用化への各種の検討を含め、より詳細に実施する必要がある、したがって性能の推定を定量的に行うための手法の構築は不可欠と考えられる。そこで、著者らは、従来より船舶の波浪中動揺応答計算に用いられているストリップ法と固定式波力装置の空気出力・波エネルギー吸収計算に用いられている“熱力波動法”をもとに FOWAD 独自の機能を取り込めるようにした計算プログラムを開発した。本報においては、その紹介ならびに、それによる計算結果と模型実験結果を比較、考察する。

2 波浪中 FOWAD 性能推定法

2.1 FOWAD の構造

FOWAD は図 1 に示すように、その長手方向に複雑な形状となっている。しかも、波エネルギーを吸収する区画である空気室は、図 2 にその断

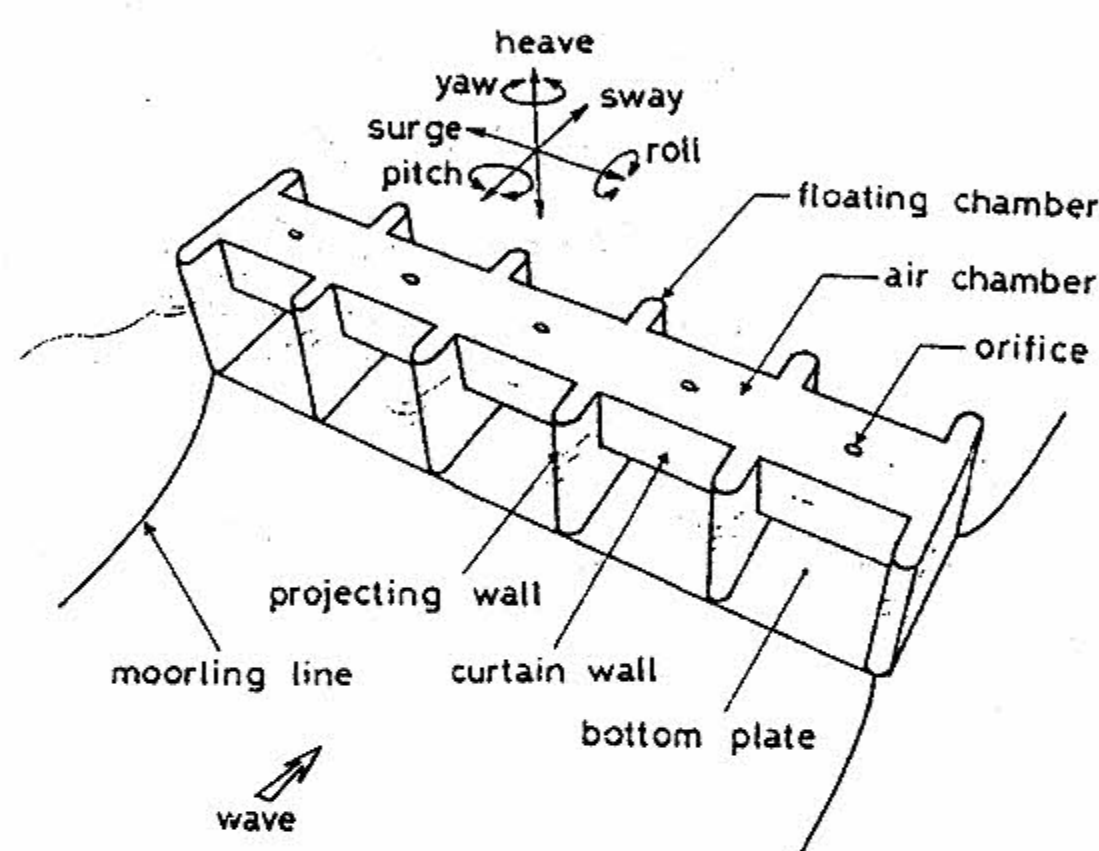


図 1 FOWAD 概略図と座標系

Fig.1 Scheme of the FOWAD and coordinate system

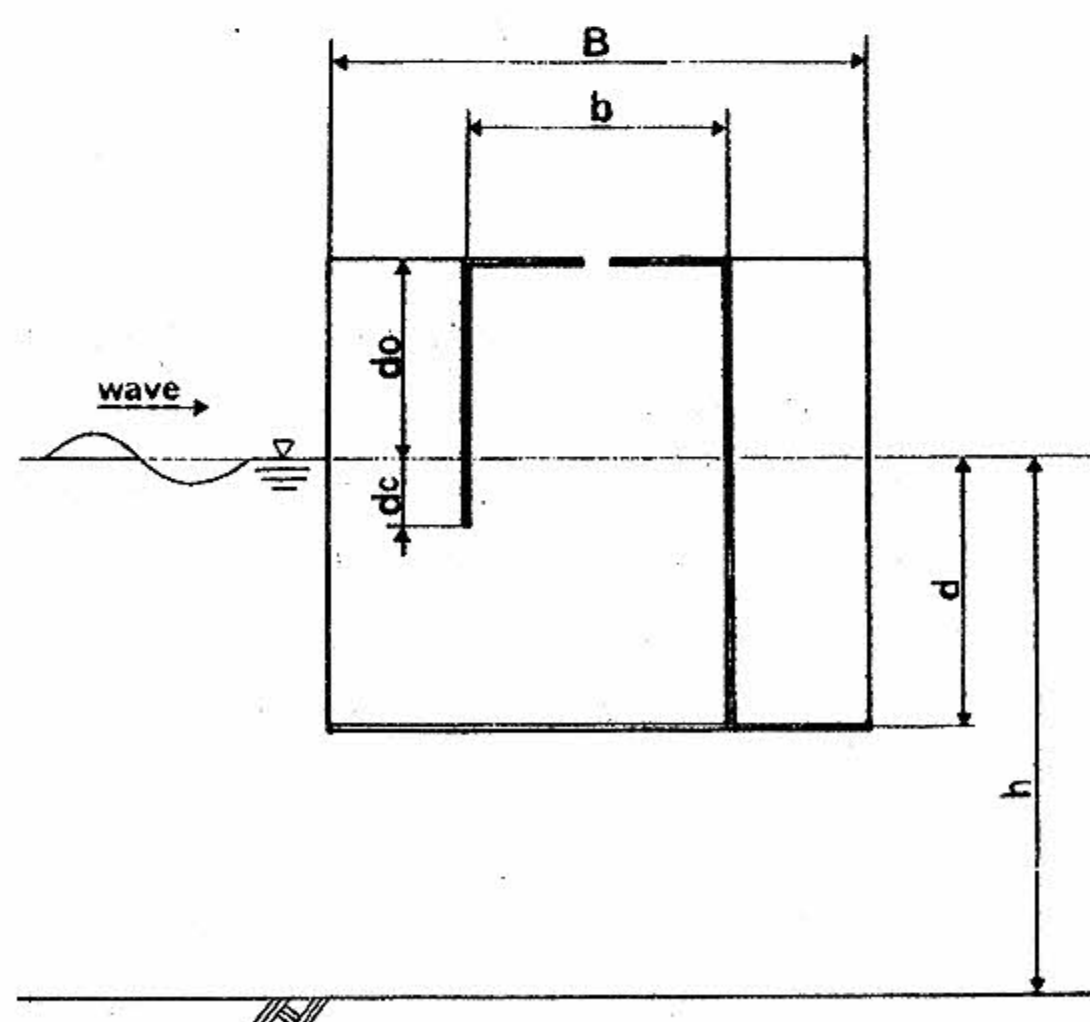


図 2 空気室断面図

Fig. 2. Scheme of sectional plan of the air chamber

面形状を示すように薄“船殻”の中は振動水中 (Oscillating Water Column; OWC) が入射波により“揺れ”かつ上甲板には開孔のある構造になっている。しかし、その前後には Projecting walls (兼浮力室) に囲まれたハーバーと、底板と浮力室に囲まれた区画がある。

このような空気室をはさんで、全体を波浪中に安定させ、所定の喫水とするための浮力室が取り付けられている。そして、そのような空気室と浮力室の区画が幾つか長手方向に連なり、全体で剛な構造として安定して浮遊することを特徴としているが FOWAD である。通常は、これは長手方向を波の主方向に直角に、つまり浮消波堤のように側面からとりわけ断面に示す開口部の方向から波を浮けるように設置される。なお、この設置には索鎖などによって係留される方式を採用することが多い。

2.2 波浪中動揺応答

2.2.1 空気室による減衰力、復元力

FOWAD のような浮体式の波力装置は、浮体自体が波浪中で動揺することに加えて、各空気室内の OWC また各々が振動するというメカニズムになっている。しかも、OWC は空気室という“区画”内で自由表面を持つ以外に、その質量が波浪中で時間変動するという厄介な挙動をする。しかし、実用的な計算法としては、宮嶋ら⁷⁾が行ったように空気室を“付加ダンピング”と“付加復元力”として、浮体運動の運動方程式が線形であることを維持できるように、すなわち各々が速度および変位に比例する項に定数として付加できるようにする。

ただし、本報において空気室が鉛直方向に運動を行ったときにのみ上述した、付加ダンピング及び付加復元力として働くとする。つまり、heave と pitch の連成運動方程式にのみこれが関与するとして、次式で示すような運動方程式で表される。

$$\begin{aligned} M_{zz} \cdot \ddot{Z} + (N_{zz} + N_{owc, zz}) \dot{Z} \\ + (C_{zz} + C_{owc, zz}) Z + M_{pz} \cdot \ddot{\theta} \\ + (N_{pz} + N_{owc, pz}) \dot{\theta} \\ + (C_{pz} + C_{owc, pz}) \theta = F_z \dots\dots(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{zp} \cdot \ddot{Z} + (N_{zp} + N_{owc, zp}) \dot{Z} \\ + (C_{zp} + C_{owc, zp}) Z + M_{pp} \cdot \ddot{\theta} \\ + (N_{pp} + N_{owc, pp}) \dot{\theta} \\ + (C_{pp} + C_{owc, pp}) \theta = F_p \dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで、 M ；浮体の質量および慣性モーメント
 N ；減衰力（ダンピング）係数
 C ；復元力（バネ）係数
 F ；波浪強制力および波浪強制モーメント

添字 z ；Heave 成分

“ p ”；Pitch 成分

“ owc ”；OWC の寄与する成分

(1) 付加ダンピング

OWC の寄与する成分である付加ダンピング係数は以下により求められる。まず、空気室内の OWC の水表面が常に外の水表面と同じレベルにある、つまり OWC が入射波に対して振幅比 1、位相 0° で応答運動しているとする。これは恰も静水中で空気室を鉛直方向に動揺させている状態と同じであるから、空気室による付加ダンピングは、空気室内の圧力の変動より求められる。

付加ダンピング $D (= N_{owc} \cdot \dot{Z})$ は、空気室内の圧力（大気圧との差圧）を ΔP 、空気室の水線面積を A_w とすると

$$D = \Delta P \cdot A_w \dots\dots\dots(3)$$

で表される。 ΔP はノズルもしくはタービンの差圧であり、これが、そこを通過する空気流速 V_a に比例するとして

$$\Delta P = da \cdot v_a \dots\dots\dots(4)$$

とする。なお、ノズルを OWC の運動に対する負荷とした時には、厳密には、 ΔP は V_a の 2 乗に比例する。しかし、ウェルズタービンを負荷とした時には ΔP はほぼ V_a に比例することを考慮し、また V_a の変動がさほど大きくないとして、(4) 式に表すような線形負荷とする。ところで、 V_a は OWC の上下方向動揺速度 $\dot{Z}$ を用い次式で得られる。

$$V_a = (A_w / S_N \cdot C_N) \dot{\zeta} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 S_N はノズル面積、 C_N はノズルの縮流係数である。一方、前述したように静水面で空気室のみ上下動するなら、そしてOWCの水表面が外の水面と同一レベルを保つなら、OWC上下速度 $\dot{\zeta}$ は空気室上下速度 $\dot{z}$ に置き換えることができる。つまり、

$$\dot{\zeta} = \dot{z} \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。(4)(5)(6)を(3)に代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} D &= d_a \cdot A_w^2 (S_N \cdot C_N) \dot{z} \\ &= d_a \cdot A_w^2 / (\epsilon_N \cdot C_N) \dot{z} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 ϵ_N はノズル比である。

さて、(4)式を得るにあたり線形化を行ったが、この係数 d_a は以下の手法で求める。

ベルヌーイの定理により δP と v_a の間には、空気密度を ρ_a として

$$\Delta P = 1/2 \rho_a v_a^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係がある。(4)式をこれに代入して d_a を求めると

$$d_a = 1/2 \rho_a \cdot v_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。 v_a は(5)式で得られ、また、 $\dot{\zeta}$ は入射波の周波数を ω とすると

$$\dot{\zeta} = \omega \zeta(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表される。 ζ のピーク値つまり ζ の変動振幅 ζ_a における値と0の間を直線近似して線形化すると、(10)式の $\dot{\zeta}$ は

$$\dot{\zeta} = \omega \zeta_a \quad \dots\dots\dots (11)$$

となり、(5)式および(11)式を(9)式に代入して、以下のように d_a を得る。

$$d_a = 1/2 \rho_a (A_w / S_N \cdot C_N) \omega \zeta_a \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで ζ_a は、厳密には入射波と空気室の相対変位の振幅値を採用すべきであるが、本報では、計算の簡便化のため、入射波振幅 h_a を ζ_a とする。

(1)式中に示す N_{owc} は n 個の空気室を有する

FOWADについて、各々の空気室による d_a を加えた値であり、(1)式および(2)の各項は以下で表される。

$$\left. \begin{aligned} N_{owc, zz} &= \sum_{i=1}^n d_{a, i} \\ N_{owc, pz} &= \sum_{i=1}^n d_{a, i} \cdot x_i \\ N_{owc, zp} &= N_{owc, pz} \\ N_{owc, pp} &= \sum_{i=1}^n d_{a, i} \cdot x_i^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 x_i はFOWADの重心から各空気室の中心までの距離である。

(2) 付加復原力

付加復原力については、空気室は恰もOWCが剛な“積載物”としてこの区画に固定されているとみなして扱う。つまり、空気室を構成する“船殻”の断面積を S_{hull} とすると、ノズルが開放されていれば、各空気室の復原力 C_z は、厳密には次式で与えられるのみの値である。

$$C_z = \rho_w g S_{hull} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

これに、前述したような“剛な”OWCによる復原力を加える。OWCの水線面積 S_{owc} を S_{hull} に加え、 C_z を以下のように求める。

$$C_z = \rho_w g (S_{hull} + S_{owc}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

これを用い(1)式および(2)式中の復原力 C の各項は次式で得られる。

$$\left. \begin{aligned} C_{zz} &= \sum_{i=1}^n C_z \cdot x_i \\ C_{pz} &= \sum_{i=1}^n C_z \cdot x_i \\ C_{zp} &= C_{pz} \\ C_{pp} &= \sum_{i=1}^n C_z \cdot x_i^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

2.2.2 運動方程式と各係数

FOWADは、長手方向に一様な構造をしておらず、また空気室・浮室等の長手方向の配置の効果について容易に調べられるようにすることが本

推定法の目的であることから、容易にそれら各種のデータを入力することが可能なストリップ法⁸⁾による流体力等の推定をここでは採用する。

一方、FOWADはその長手方向を波の主方向と直角に設置されることを特徴とするため、また、全体長さは幅に比べ十分に長いことから、6成分の運動間の全ての連成運動を考慮することはせずに、細長型である一般的な船舶の波浪中動揺と同様に以下の運動方程式の組合せとする。

なお、FOWADの各運動モードは、図1に示すように、長手方向に直角な y 軸（sway方向の軸）まわりの回転運動をpitch、長手方向の x 軸（surge方向の軸）まわりの回転運動をrollとする。

(1) heaveおよびpitch

$$A_{11} \ddot{\zeta} + A_{12} \dot{\zeta} + A_{13} \zeta + A_{14} \ddot{\theta} + A_{15} \dot{\theta} + A_{16} \theta = F_{\zeta} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$A_{21} \ddot{\zeta} + A_{22} \dot{\zeta} + A_{23} \zeta + A_{24} \ddot{\theta} + A_{25} \dot{\theta} + A_{26} \theta = M_{\zeta} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 ζ ; heave 変位

θ ; Pitch 角度

$$A_{11} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_z + \frac{w_{owc}}{g} \right) dx \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 w ; ストリップ各部の浮体（船殻等）重量

m_z ; ストリップ各部の上下方向加付質量

w_{owc} ; 各空気室部 OWC（振動水柱）の質量

$$w_{owc} = \rho_w (S_w + S_b) d$$

S_w ; OWCの水線面積

S_b ; 空気室前後の底板部面積

d ; 底板没水深さ（喫水）

$$A_{12} = \int \rho_w N_z dx + N_{owc, zz} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 N_z ; ストリップ各部の上下方向造波減衰力係数

$$A_{13} = \int \rho_w g B dx + \sum_{i=1}^n C_{zi} + C_{owc, zz} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 B ; ストリップ各部の幅

C_{zi} ; 係留力の上下方向バネ定数

$$A_{14} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_z + \frac{w_{owc}}{g} \right) x_o dx \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$A_{15} = \int \rho_w N_z x_o dx + N_{owc, pz} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$A_{16} = \int \rho_w g B x_o dx + \sum_{i=1}^n C_{zi} \cdot x_{oi} + C_{owc, pz} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 x_o ; 各ストリップ中心までの重心からの距離

$$A_{21} = A_{14} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$A_{22} = A_{15} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$A_{23} = A_{16} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$A_{24} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_z + \frac{w_{owc}}{g} \right) x_o dx \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$A_{25} = \int \rho_w N_z x_o dx + N_{owc, pp} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$A_{26} = \int \rho_w g B x_o^2 dx + \sum_{i=1}^n C_{zi} \cdot x_{oi}^2 + C_{owc, pp} \quad \dots\dots\dots (30)$$

波浪強制力 F_{ζ} および波浪強制モーメント M_{θ} は以下により求める。

$$F_{\zeta} = F_{\zeta c} \cos \omega t + F_{\zeta s} \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$M_{\theta} = M_{\theta c} \cos \omega t + M_{\theta s} \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (32)$$

ここで、 ω ; 波の角周波数 ($= 2\pi/T_w$)

T_w ; 波周期

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_{\zeta c} \\ F_{\zeta s} \end{pmatrix} &= \rho_w g h_a \int c_1 c_2 B \begin{pmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{pmatrix} dx \\ &\quad - h_a \omega^2 \int \rho_w m_z c_1 c_2 \begin{pmatrix} -\cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{pmatrix} dx \\ &\quad + h \cdot \omega \int \rho_w N_z c_1 c_2 \begin{pmatrix} -\sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{pmatrix} dx \quad \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} M_{\theta_c} \\ M_{\theta_s} \end{pmatrix} = \rho_w g h_a \int c_1 c_a B x_0 \begin{pmatrix} -\cos k^* x \\ -\sin k^* x \end{pmatrix} dx - h_a \omega^2 \int \rho_w m_z c_1 c_2 x_0 \begin{pmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{pmatrix} dx + h_a \omega \int \rho_w N_z c_1 c_2 x_0 \begin{pmatrix} -\sin k^* x \\ \cos k^* x \end{pmatrix} dx \quad \dots\dots\dots (34)$$

ここで, h_a ; 入射波振幅 ($= H_w/2$)

H_w ; 波高

$$C_1 = \sin(kb \sin x / kb \sin x ; x \neq n\pi) = 1.0 ; x = n\pi, n = 0, 1, 2 \dots$$

$$C_2 = e^{-kfd}$$

k ; 波数 ($= \omega^2/g$)

b ; 半幅

x ; 波入射角 ($x=90^\circ$ でTerminator状態)

ρ ; 断面係数 ($= S_a/B \cdot d$)

S_a ; ストリップ断面

k^* ; $k \cos x$

(2) sway, yaw および roll

$$a_{11} \ddot{\eta} + a_{12} \dot{\eta} + a_{13} \eta + a_{14} \ddot{\phi} + a_{15} \dot{\phi} + a_{16} \phi + a_{17} \ddot{\phi} + a_{18} \dot{\phi} + a_{19} \phi = F_\eta \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$a_{21} \ddot{\eta} + a_{22} \dot{\eta} + a_{23} \eta + a_{24} \ddot{\phi} + a_{25} \dot{\phi} + a_{26} \phi + a_{27} \ddot{\phi} + a_{28} \dot{\phi} + a_{29} \phi = M_\phi \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$a_{31} \ddot{\eta} + a_{32} \dot{\eta} + a_{33} \eta + a_{34} \ddot{\phi} + a_{35} \dot{\phi} + a_{36} \phi + a_{37} \ddot{\phi} + a_{38} \dot{\phi} + a_{39} \phi = M_\phi \quad \dots\dots\dots (37)$$

ここで, η ; sway 変位

ϕ ; yaw 角度

ϕ ; roll 角

$$a_{11} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_y \frac{w_{owc}}{g} \right) dx \quad \dots\dots\dots (38)$$

m_y ; ストリップ各部の水平方向 (sway 方向) 付加質量

$$a_{12} = \rho_w N_y dx \quad \dots\dots\dots (39)$$

N_y ; ストリップ各部の水平方向 (sway 方向) 造波減衰力係数

$$a_{13} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} \quad \dots\dots\dots (40)$$

$C_{y,i}$; 係留力の水平方向 (sway 方向) バネ定数

$$a_{14} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_y + \frac{w_{owc}}{g} \right) dx \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$a_{15} = \int \rho_w N_y x_0 dx \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$a_{16} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} x_0 \quad \dots\dots\dots (43)$$

$$a_{17} = \int \rho_w m_y l'_{\eta} dx \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$a_{18} = \int \rho_w N_y l'_{\omega} dx \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$a_{19} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} \cdot l'_{m,i} \quad \dots\dots\dots (46)$$

$$l'_{\eta} = \overline{ZG} - l_{\eta}$$

$$l'_{\omega} = \overline{ZG} - l_{\omega}$$

$$l'_{m,i} = \overline{ZG} - l_{m,i}$$

$\overline{ZG}$; 座標原点 (水線面) と重心間の鉛直方向距離

l'_{η} ; 座標原点まわりの水平方向 (sway 付加質量着点レバー

l'_{ω} ; 座標原点まわりの水平方向 (sway 方向) 造波減衰力点レバー

l'_{m} ; 座標原点まわりの水平方向 (sway 方向) 係留力点レバー

$$a_{21} = a_{14} \quad \dots\dots\dots (47)$$

$$a_{22} = a_{15} \dots\dots\dots (48)$$

$$a_{23} = a_{16} \dots\dots\dots (49)$$

$$a_{24} = \int \left(\frac{w}{g} + \rho_w m_y + \frac{w_{owc}}{g} \right) x_o dx \dots\dots (50)$$

$$a_{25} = \int \rho_w N_y x_o^2 dx \dots\dots\dots (51)$$

$$a_{26} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} \cdot x_{oi}^2 \dots\dots\dots (52)$$

$$a_{27} = \int \rho_w m_y l' \eta x_o dx \dots\dots (53)$$

$$a_{28} = \int \rho_w N_y l' \omega x_o dx \dots\dots (54)$$

$$a_{29} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} \cdot l' m_{m,i} x_{oi} \dots\dots (55)$$

$$a_{31} = a_{17} \dots\dots (56)$$

$$a_{32} = a_{18} \dots\dots (57)$$

$$a_{33} = a_{19} \dots\dots (58)$$

$$a_{34} = a_{27} \dots\dots (59)$$

$$a_{35} = a_{28} \dots\dots (60)$$

$$a_{36} = a_{29} \dots\dots (61)$$

$$a_{37} = Ixx + \int \rho_w m_y l'^2 \eta dx \dots\dots (62)$$

$$a_{38} = \int \rho_w N_y l' \omega dx + \int \rho_w N_R dx \dots\dots (63)$$

$$a_{39} = W \cdot \overline{GM} + \sum_{i=1}^n C_{y,i} \cdot l_{R,i} \dots\dots (64)$$

Ixx ; FOWADの重心まわり慣性モーメント

N_R ; ストリップ各部の roll 造波減衰力係数

$$W = \int \left(\frac{w}{g} + \frac{w_{owc}}{g} \right) dx$$

$\overline{GM}$; FOWADの重心とメタセンタ間距離

l_R ; 係留点と重心間距離

波浪強制力 $F\eta$ および波浪強制モーメント $M\phi$ および $M\phi$ は以下により求める。

$$F\eta = F\eta \cos \omega t + F\eta_s \sin \omega t \dots\dots (65)$$

$$M\phi = M\phi \cos \omega t + M\phi_s \sin \omega t \dots\dots (66)$$

$$M\phi = M\phi \cos \omega t + M\phi_s \sin \omega t \dots\dots (67)$$

ここで,

$$\begin{pmatrix} F_{\eta c} \\ F_{\eta s} \end{pmatrix} = 2 \rho_w g h_a \iint e^{-kz} \sin(ky \cdot \sin x) dz$$

$$\begin{pmatrix} \text{sink}^* x \\ -\text{cosk}^* x \end{pmatrix} dx + h_a \omega^2 \int C_3 \rho_w S_y$$

$$\begin{pmatrix} \text{sink}^* x \\ -\text{cosk}^* x \end{pmatrix} dx$$

$$+ h_a \omega \int C_3 \rho_w N_y \begin{pmatrix} \text{cosk}^* x \\ \text{sink}^* x \end{pmatrix} dx \dots\dots\dots (68)$$

$$\begin{pmatrix} M_{\phi c} \\ M_{\phi s} \end{pmatrix} = \overline{xG} \begin{pmatrix} -F_{\eta c} \\ F_{\eta s} \end{pmatrix}$$

$$+ 2 \rho_w g h_a \iint e^{-kz} x \sin(ky \cdot \sin x) dz$$

$$\begin{pmatrix} \text{sink}^* x \\ -\text{cosk}^* x \end{pmatrix} dx + h_a \omega^2 \int C_3 \rho_w S_y x$$

$$\begin{pmatrix} \text{sink}^* x \\ -\text{cosk}^* x \end{pmatrix} dx + h_a \omega \int C_3 \rho_w N_y x$$

$$\begin{pmatrix} \text{cosk}^* x \\ \text{sink}^* x \end{pmatrix} dx \dots\dots\dots (69)$$

$$\begin{pmatrix} M_{\phi c} \\ M_{\phi s} \end{pmatrix} = \overline{ZG} \begin{pmatrix} F_{\eta c} \\ -F_{\eta s} \end{pmatrix}$$

$$+ 2 \rho_w g h_a \iint e^{-kz} \sin(ky \cdot \sin x)$$

$$(-z dz + y dy) (-\text{sink}^* x) dx$$

$$+ h_a \omega^2 \int C_3 \rho_w S_y l_\eta \begin{pmatrix} \text{sink}^* x \\ \text{cosk}^* x \end{pmatrix} dx$$

$$+ h_a \omega \int C_3 \rho_w N_y l_w \begin{pmatrix} \text{cosk}^* x \\ \text{sink}^* x \end{pmatrix} dx \dots\dots (70)$$

$\overline{xG}$; 座標原点と重心間の水平(長手)方向距離

$$C_3 = \sin x \cdot e^{-kd/2}$$

(3) surge

surgeは他のモードの運動と連成しないとして、次の運動方程式を解く。

$$A_{31} \ddot{\xi} + A_{32} \dot{\xi} + A_{33} \xi = F_\xi \dots\dots\dots (71)$$

ここで, ξ ; surge変位

$$A_{31} = \int \left(\frac{w}{g} + \frac{w_{owc}}{g} \right) dx \dots\dots\dots (72)$$

$$A_{32} = 0 \dots\dots\dots (73)$$

$$A_{33} = \sum_{i=1}^n C_{y,i} \quad \dots\dots\dots (74)$$

C_x ; 係留力の前後 (surge) 方向バネ定数

$$F_{\xi} = F_{\xi c} \cos \omega t + F_{\xi s} \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (75)$$

$$\begin{pmatrix} F_{\xi c} \\ F_{\xi s} \end{pmatrix} = \rho_w g h_a k^* e^{-kd/2}$$

$$\iint_0^d \left(\frac{\sin(ky \sin x)}{ky \sin x} \right) dz \cdot \begin{pmatrix} \sin k^* x \\ \cos k^* x \end{pmatrix} dx \quad \dots\dots (76)$$

2.3 波エネルギー吸収効率

FOWAD の各空気室は harbour 部を有するいわゆる底板空気室であり, これによる波エネルギー吸収効率の計算には, OWC の波浪に対する応答を解く等価浮体法より高橋らの提唱する“熱力波動法”⁹⁾ のほうが計算の簡便さからも使い易い。そこで本報では, 熱力波動法をもとに波浪中で, FOWAD つまり空気室が動揺することを考慮できるように, また空気の圧縮性をより適確に把握できるように改良した。

熱力波動法の詳細については高橋らの論文⁹⁾ に記述されているので, 本報では計算プログラムの作成に必要な部分および改良点について述べる。

高橋らによれば, 図 2 示す断面を持つ空気室が波浪中で固定されているとき, 入射振幅 h_a と空気室内平均水位の変動振幅 (OWC 動揺振幅) h_{owc} および位相 ϕ_{owc} の間には次の関係があるとしている。

$$h_a = 1/2 h_{owc} \left[\{ \alpha_o f(kh, kd_c) \sin \omega \tau \cdot \cos \omega \tau + kb \}^2 + \{ \alpha_o f(kh, kd_c) \cos^2 \omega \tau + kb / \tan(kb) \}^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (77)$$

$$\phi_{owc} = -\tan^{-1}$$

$$\left\{ -\frac{\alpha_o f(kh, kd_c) \sin \omega \tau \cdot \cos \omega \tau + kb}{\alpha_o f(kh, kd_c) \cos^2 \omega \tau + kb / \tan(kb)} \right\} \quad \dots\dots\dots (78)$$

ここで,

$$f(kh, kd_c)$$

$$= \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_c)}{\cosh k(h-d_c) \sinh k(h-d_c) + k(h-d_c)}$$

$$\omega \tau = \cos^{-1} (\sqrt{1 + \beta^2 - \beta})$$

$$\beta = (C_N \cdot C_V \cdot \epsilon_N)^2 (\kappa - 1) \frac{C_P \cdot T_o}{(\omega d_o)^2} \cdot \frac{d_o}{h_a}$$

k ; 波数

h ; 水深

b ; 空気室幅 [波進行方向長さ (; 奥行)]

d_c ; カーテンウォール没深度

$\alpha_o = \kappa P_o / G I_{IP} ; d_o$

$\kappa = C_P / C_V$

C_P ; 定圧比熱 (空気 ; 1005 J/kg)

C_V ; 定容比熱 (空気 ; 717.1 J/kg)

P_o ; 大気圧 (標準値 ; 10130 kg/m²)

ρ_w ; 水の密度

g ; 重力加速度

d_o ; 空気室の静水面上高さ

C_N ; ノズル通過空気流の縮流係数

C_V ; 速度係数

ϵ_N ; ノズル比 (ノズル面積 / 空気室面積)

T_o ; 大気の絶対温

この計算において, β に h_a の項が含まれているため, (77) 式を解くには, iteration による手法を採用した。

一方, 波エネルギー吸収効率 η'_{wave} は, 次式で求まるとしている。

$$\eta'_{wave} = \frac{\kappa P_o}{\rho_w g d_o} \frac{b \omega}{C_g} \left(\frac{h_{owc}}{h_a} \right)^2 \sin \omega \pi \cdot \cos \omega \pi \quad \dots\dots\dots (79)$$

ここで, C_g ; 波の群速度

(深海波 ; $C_g = 1/2 g / 2\pi T_w$)

T_w ; 波周期

さて, 以上の計算式は底板が水底に着いた固定空気室についてのものであり, 空気室の動揺, 底板以深の波エネルギーの通過および空気の圧縮性

の速度係数へ及ぼす影響を考慮し、それぞれ以下のように改良した。

(1) 相対入射波高

FOWADは波浪中に動揺するので、各空気室の中心における入射波と空気室との相対的な変位は、2.2で求めたFOWADの挙動計算値を用いて求めなければならない。ただし、本報では各空気室の上下変位についてこれを求めるのみにとどめる。rollによる波エネルギー吸収へ及ぼす影響については考慮しないこととする。

今、FOWADが図3に示すような平面状態で波浪中に係留されているとすると、FOWADの重心Gから距離 l_i だけ離れた i 番目の空気室の中心位置 g_i における鉛直方向変位および水平（ x および y ）方向変位は、各運動成分を2.2と同じ記号で記述すると次の各式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \text{鉛直方向変位;} Z_i &= \zeta + l_i \sin \theta \\ y \text{ " } &; y_i = \eta - l_i \sin \varphi \\ x \text{ " } &; x_i = \xi \end{aligned} \right\} \dots (80)$$

一方、入射角 x の波の G_i における波形 h_{gi} は次式で表される。

$$h_{gi} = h_a \cos \{ \omega t - l_i + x_i \} k \cos x - y_i k \sin x \}$$

したがって、 g_i における入射波と空気室（中

心）の相対水位 h_{ri} は

$$h_{ri} = h_{gi} - z_i$$

となる。この h_{ri} が一周期の間に変動し、そのピーク値が相対水位変動の振幅つまり i 番相の空気室における相対入射波振幅であり、これを(77)式中の h_a とする。

(2) 底板以深の波エネルギーの通過

FOWADは浮体式の波力装置であるから、どうしても装置の没水部最下部（底板）以深の波エネルギーを吸収できない。そこで、本報では底板以深を通過するエネルギーを入射波の全波エネルギーから減じて、波エネルギー吸収効率を求める。

今、入射波のエネルギー E_w 、底板以深を通過するエネルギーを E_r とすると、FOWADに入射するエネルギー E_F の E_w に対する比率 C_e は、

$$\begin{aligned} C_e &= E_F / E_w \\ &= (E_w - E_r) / E_w \\ &= 1 - E_r / E_w \end{aligned} \dots\dots\dots (81)$$

である。波エネルギーは ω^2 の2乗に比例し、また水粒子運動は e^{-kd} で減衰することにより、(81)式は次のように表される。

$$C_e = 1 - (e^{-kd})^2 \dots\dots\dots (82)$$

この C_e と(79)式で得られた η'_{wave} を用い、

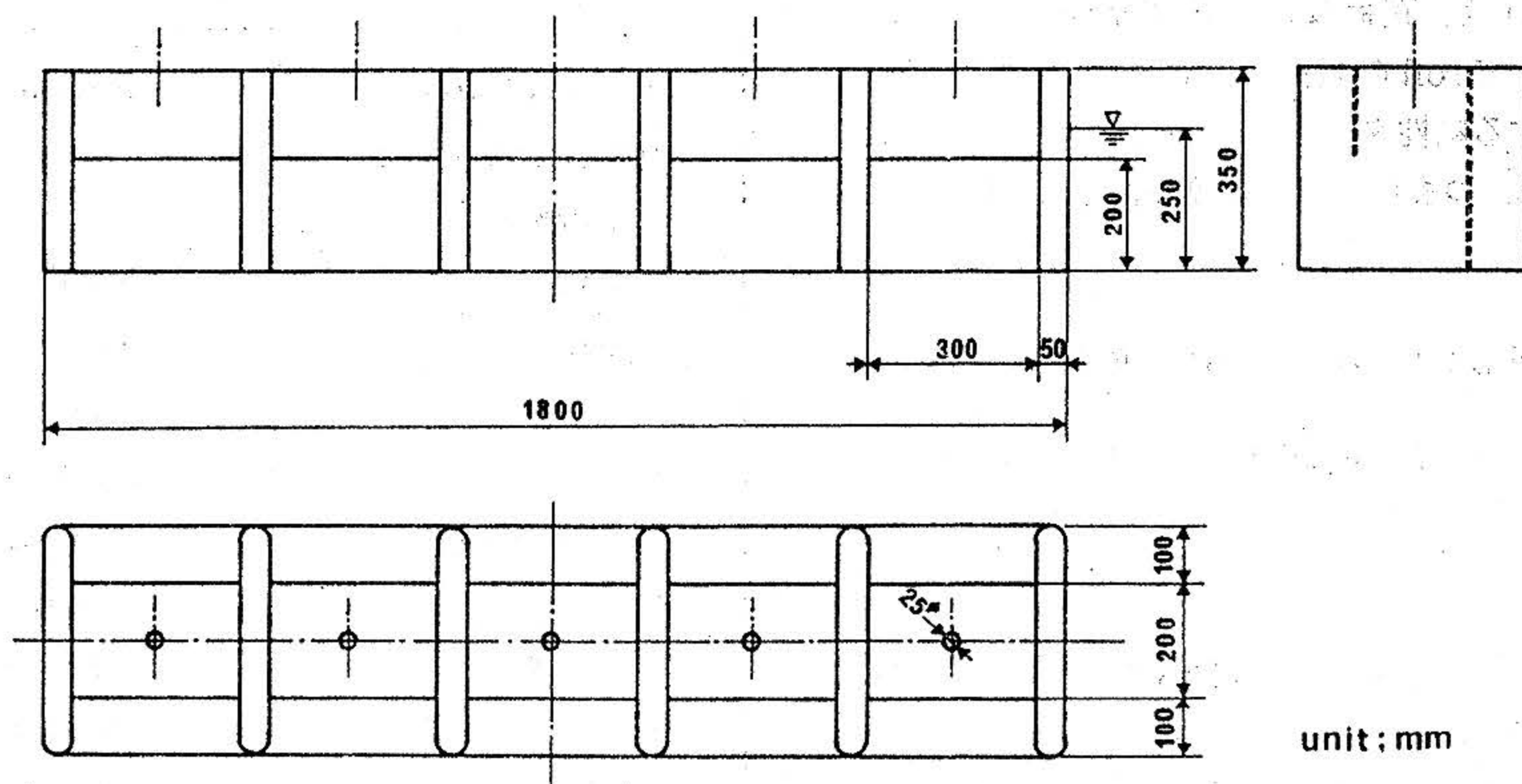


図3. 計算に使用したFOWADモデル
Fig. 3 Plans of the FOWAD model

FOWADの各空気室の波エネルギー吸収効率 η'_{wave} が次式で求められる。

$$\eta_{wave} = C_e \cdot \eta'_{wave} \quad \dots\dots\dots (83)$$

(3) 速度係数

圧力 P_1 、密度 ρ の気体がノズルを通過して圧力 P'_2 の中に流出するとき、ノズル出口での圧力を P_2 とすれば、ベルヌーイの式から、出口における速度 v_2 は、

$$v_2 = \left[2 \frac{P_1}{\rho} \frac{\kappa}{\kappa-1} \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (84)$$

である¹⁰⁾。一方、熱力波動法では、

$$v_2 = \phi \sqrt{2(P_2 - P_1)/\rho}$$

とされている。したがって、圧縮性を考慮するための項が速度係数 ϕ と等値であるとして、 ϕ を次式で表す。

$$\phi = \sqrt{\frac{P_{owc}}{\Delta p} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \left\{ 1 - \left(\frac{P_o}{P_{owc}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\}} \quad \dots\dots\dots (85)$$

ここで、 P_o ; 大気圧

ΔP ; ノズル前後の差圧

P_{owc} ; $P_o + \Delta P$

2.4 計算方法

FOWADは、底板など鋭角でかつ突出した部分が多いのでrollの減衰力としてroll角速度の2乗に比例する粘性ダンピングの項を加えることが必要である。つまり(35)式は次式に置き換えられる。

$$\begin{aligned} & a_{31}\eta + a_{32}\eta + a_{33}\eta + a_{34}\phi + a_{35}\phi + a_{35}\phi \\ & + a_{36}\phi + a_{37}\phi + a_{38}\phi + b_r |\phi| \phi + a_{39}\phi \\ & = M_\phi (35)' \end{aligned}$$

ここで、 b_r ; rollによる粘性ダンピング係数 (Appendix 参照)

(35)' 式は非線型な運動方程式であり、解析的に解けない。あわせて、2.3(1)に示したように相対波高を求めるにあたっては、運動方程式を時々刻

々解き、つまり各モード運動の時系列変化を求めておくほうが容易である。そこで、本報においては、時間積分法の一つであるNewmark- β 法¹¹⁾を用いてこれを解くこととする。

なお、計算結果として、時系列データより振幅値を読み取った。

3 計算結果

3.1 計算モデル

計算に用いたモデルは著者らが即ち報告した水槽実験に使用したモデルであり⁵⁾、波浪条件等もこの水槽実験に準ずるようにした。モデルの概略図を図3に、主要諸元を表1に示す。なお、各空気室のノズル比は全て0.0082である。

実験においては、FOWADは4本のチェーン(水中重量0.053kg/m)でスラックに係留されていたが⁵⁾、本計算においてはFOWADの動揺振幅は波振幅程度であるとして、係留ライン1本あたりのバネ定数を以下の値とした。

$$C_z = 0.01 \text{ (kg/m)}$$

$$C_y = 1.10 \text{ (kg/m)}$$

$$C_x = 0.01 \text{ (kg/m)}$$

表1 FOWADモデル諸元

Table 1 Principal particulars of FOWAD model

全長(波峰方向長さ)	1,800mm
奥行き(波進行方向長さ)	
空気室部	200mm
浮力部	400mm
底板部	400mm
高さ	350mm
喫水	250mm
カーテンウォール没水深さ	50mm
空気室数	5室
ノズル直径	25mm
重量	30.0Kg
KG	87mm
Roll固有周期	約2.1sec

3.2 動揺

3.2.1 周波数応答関数

FOWADの稼動状態である入射波の入射角 α が 90° つまり FOWADの長手方向が波の峰と一致する状態における規則波周期に対する heave および sway および Roll ($\alpha=90^\circ$ および前後対称なので pitch, yaw および surge は省略する。)の各々の振幅の波振幅 h_a に対する周波数応答特性を図4, 図5および図6に示す。いずれも、波高5cmのときの特性である。図中の ζ_a, η_a, ϕ_a は heave, sway および roll の各運動振幅であり、図6の縦軸中の k は波数である。なお, sway は重心上の静水面位置での水平 (sway) 方向変位振幅である。

また、図4に示す heave の周波数応答特性において 2.2.1 (1) に述べた空気室による付加ダンピング d_a を考慮した場合の計算結果を実線で、考慮しない場合を破線で示してある。また、各図中のプロットは著者らが行った実験によって得られた値である⁵⁾。これらより、以下の事項が考慮される。

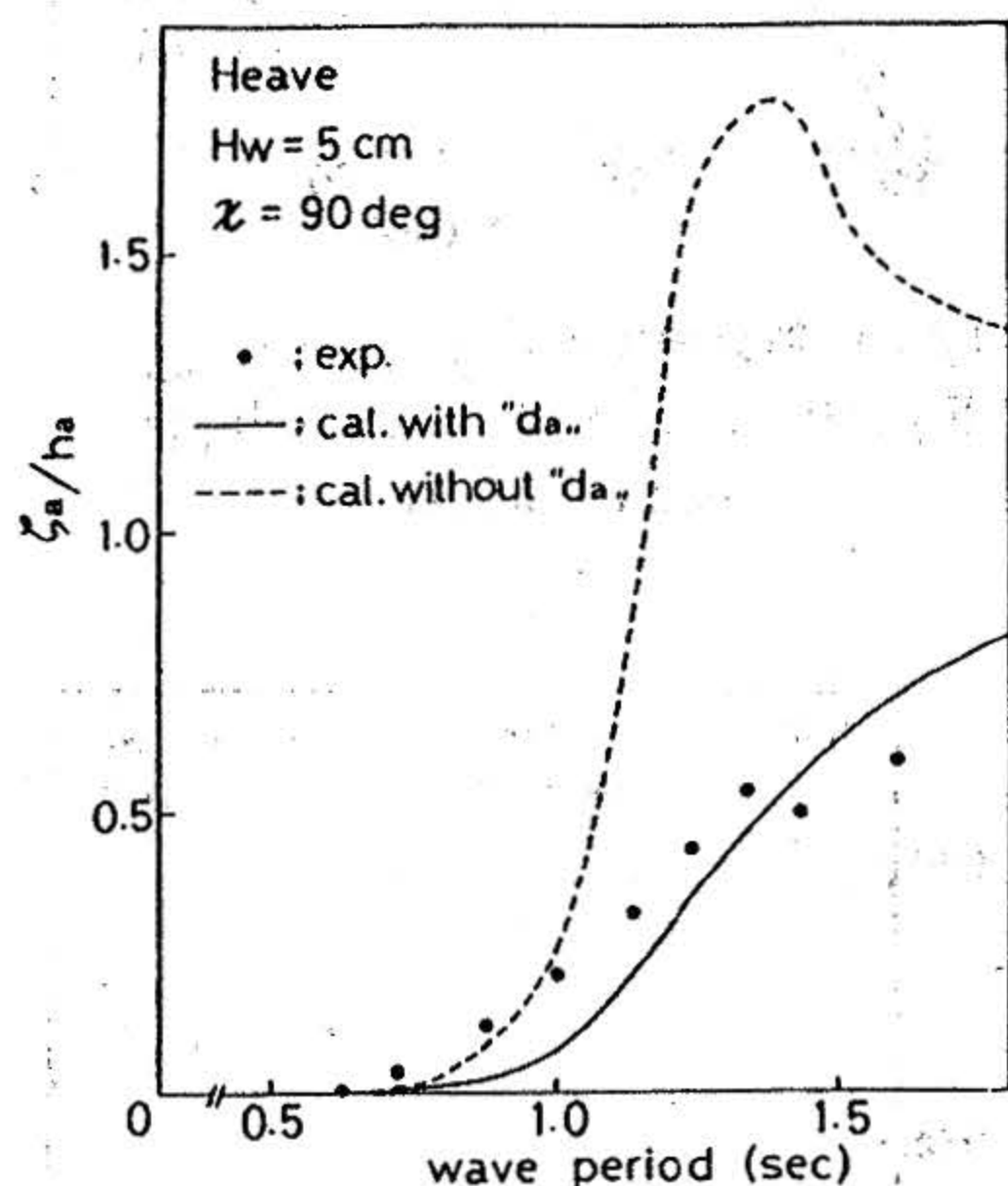


図4 規則波中における heave の計算値と実験値の比較

Fig. 4 Comparison of results by the model test and calculation of heave motion in regular waves

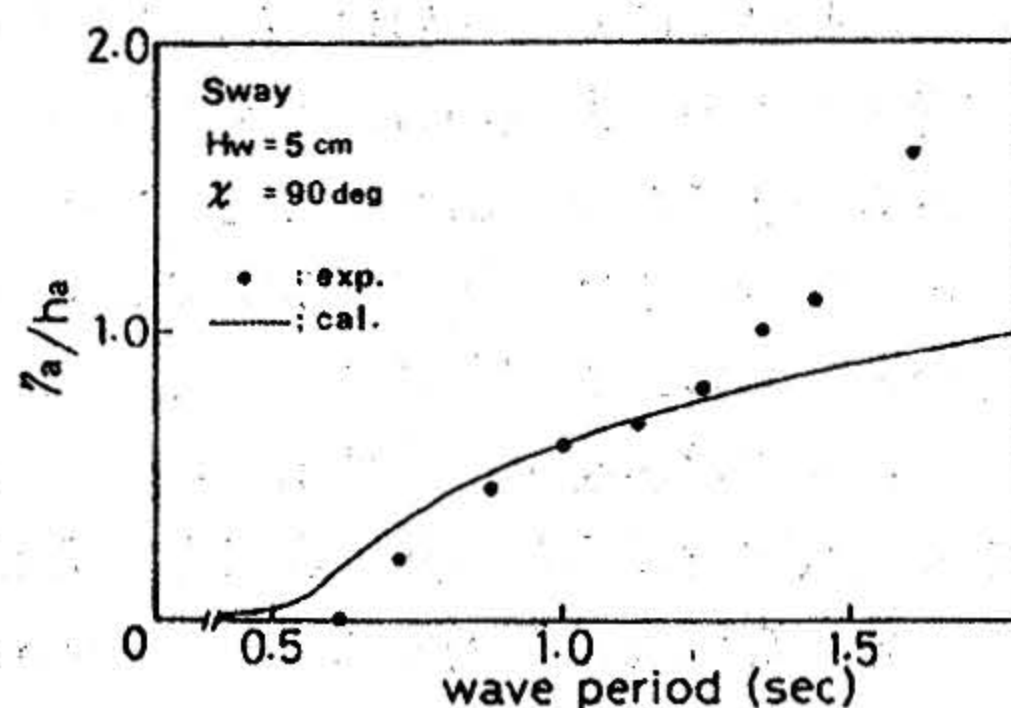


図5 規則波中における sway の計算値と実験値の比較

Fig. 5 Comparison of results by the model test and calculation of sway motion in regular waves

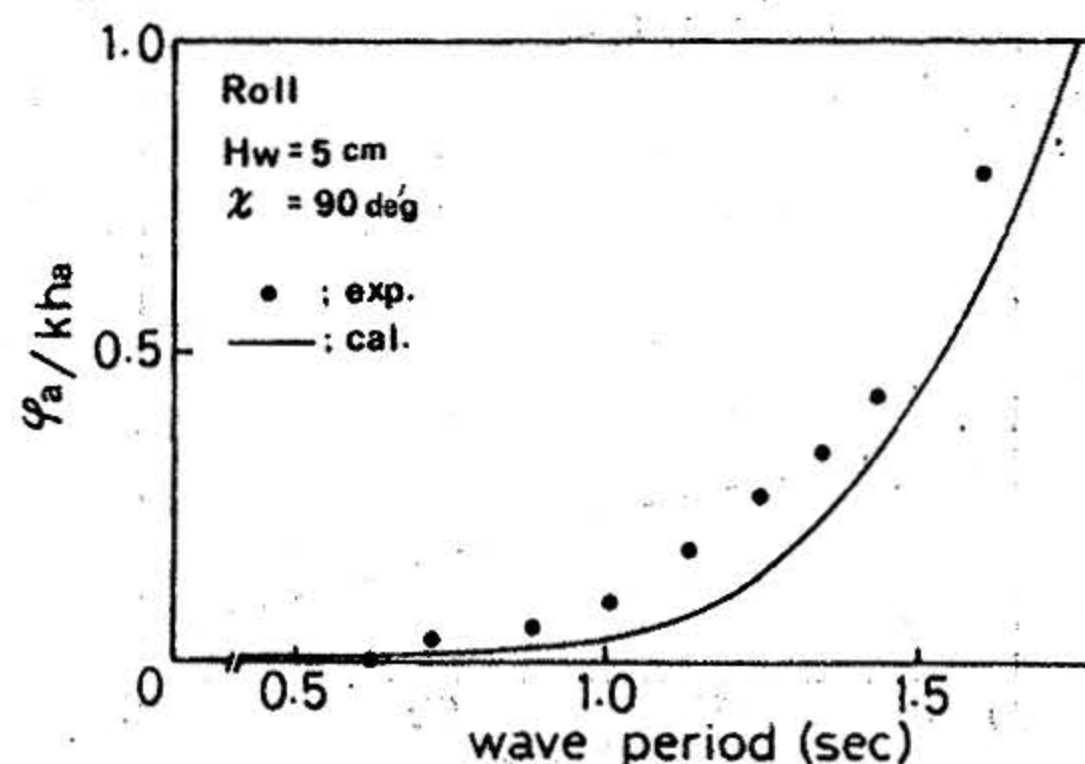


図6 規則波中における roll の計算値と実験値の比較

Fig. 6 Comparison of results by the model test and calculation of roll motion in regular waves

まず, heave については, 空気室による付加ダンピングを考慮することによってはじめて現象を把握できるということが明らかになった。そして, 本報で示した計算法による計算結果は, 実験値と厳密には一致しないものの, 定性的, 定量的にはばあっていることが確認された。

一方, sway については $T < 1.3$ sec の範囲では計算値は実験値と良く一致しているものの, それより長周期で計算値は実験値より, かなり下回ってしまった。これは, OWCの空気室内での挙動, sway 方向の係数反力の値, sway 流体力の差違などが要因であろうと考えられる。しかし, 波

エネルギー吸収効率のピーク値は $T_w = 1.0$ sec の付近で発生するのであるから、本報の目的に対しては、本計算法で有効であると考えられる。

また、roll については、計算値が実験値をやや下回っているものの、これもほぼ合っているといえる。計算値が実験値を下回る理由として、roll 流体力の差違など考えられるが、実用上さほど差支えなく、本計算法は、有効であることが判った。

3.2.2 斜め波中特性

波入射角度 χ に対する各モードの動揺の応答関数を図7～図12に示す。いずれも波高5cm, 波周期1.0secの規則波中における特性であり、横軸に示す入射角度 χ は、90°でFOWADの長

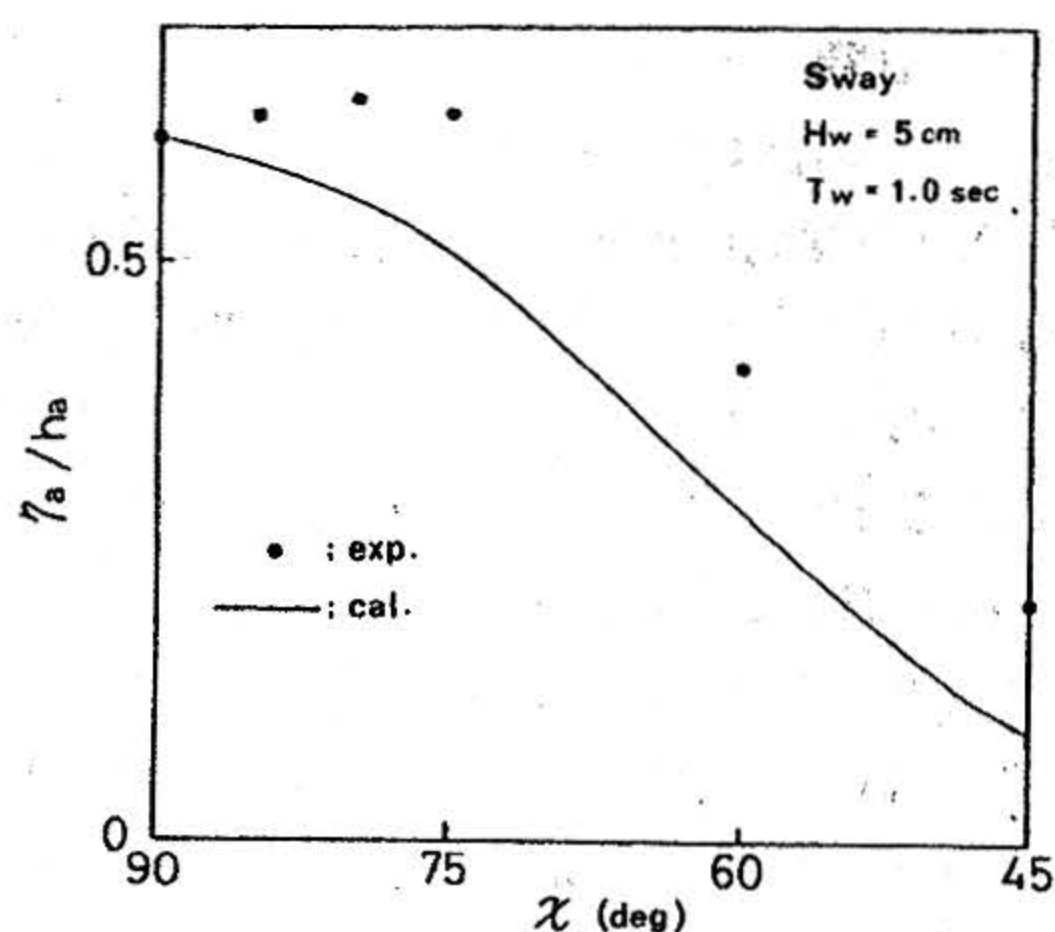


図9 斜め規則波中 sway 応答

Fig.9 Sway motion in oblique regular waves

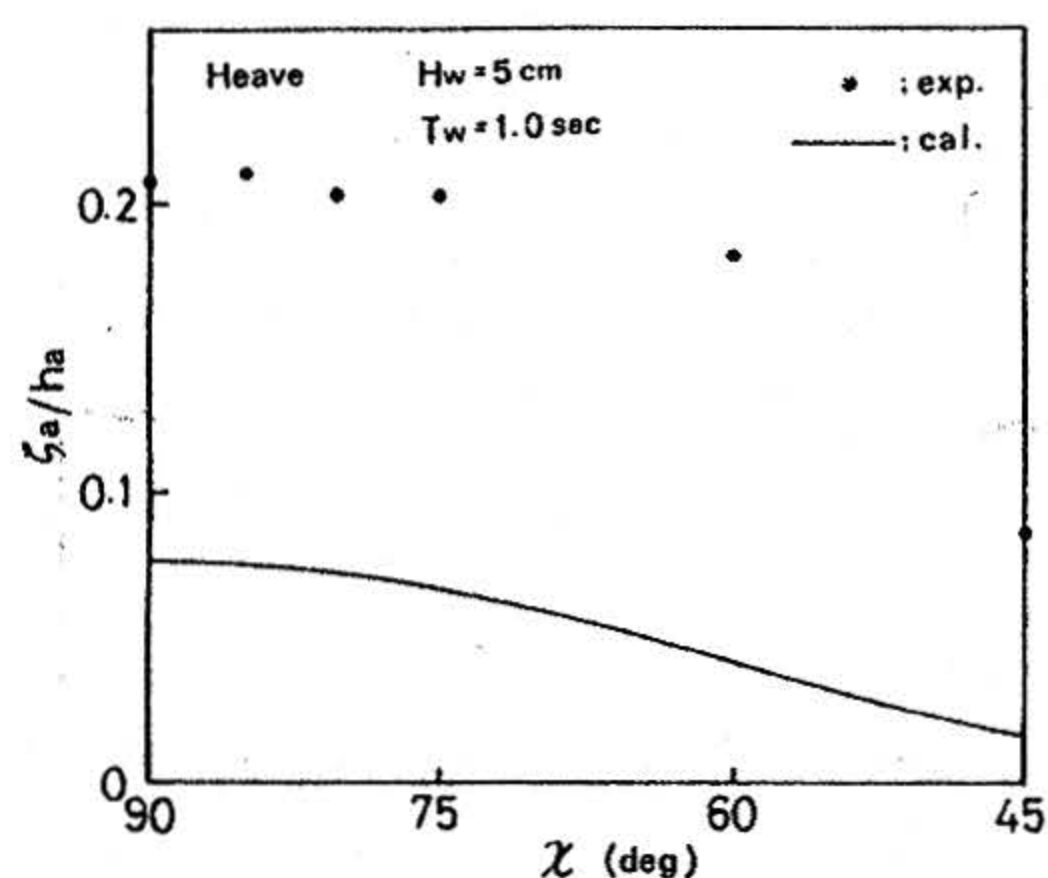


図7 斜め規則波中 heave 応答

Fig. 7 Heave motion in oblique regular waves

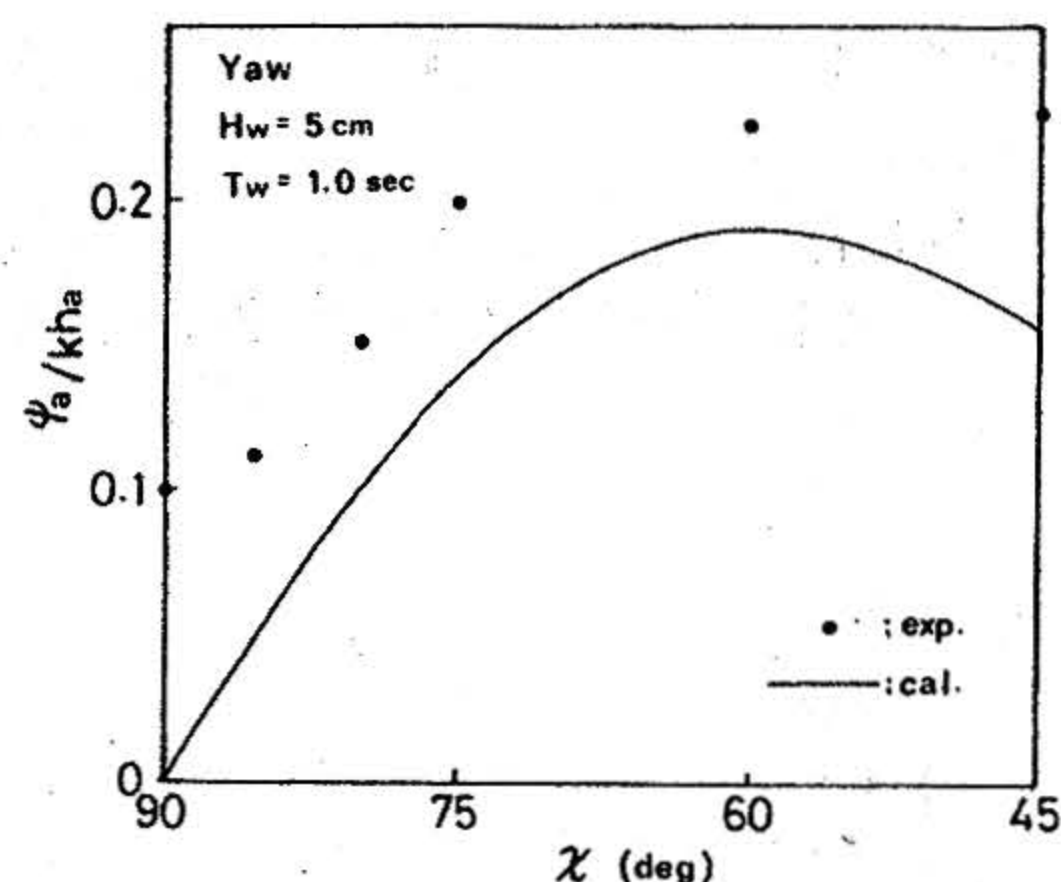


図10 斜め規則波中 yaw 応答

Fig.10 Yaw motion in oblique regular waves

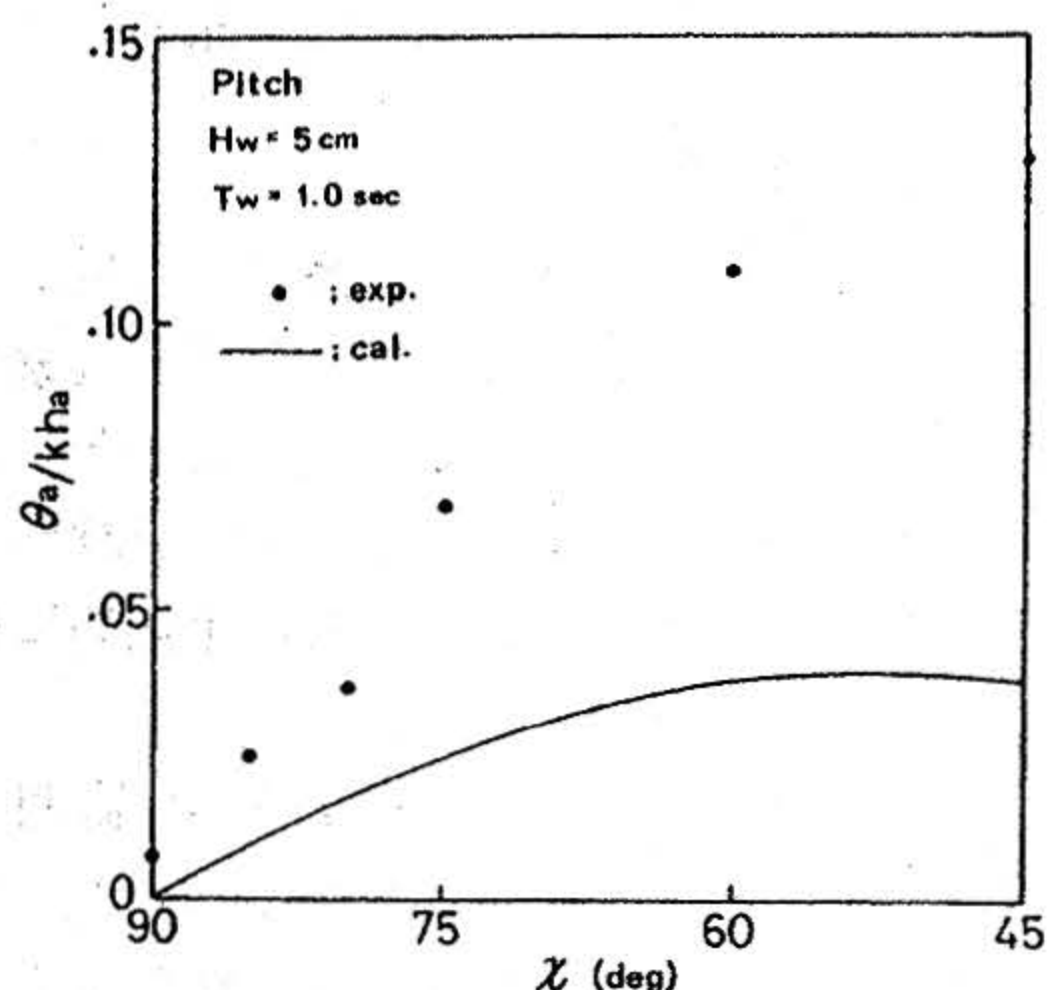


図8 斜め規則波中 pitch 運動

Fig.8 Pitch motion in oblique regular waves

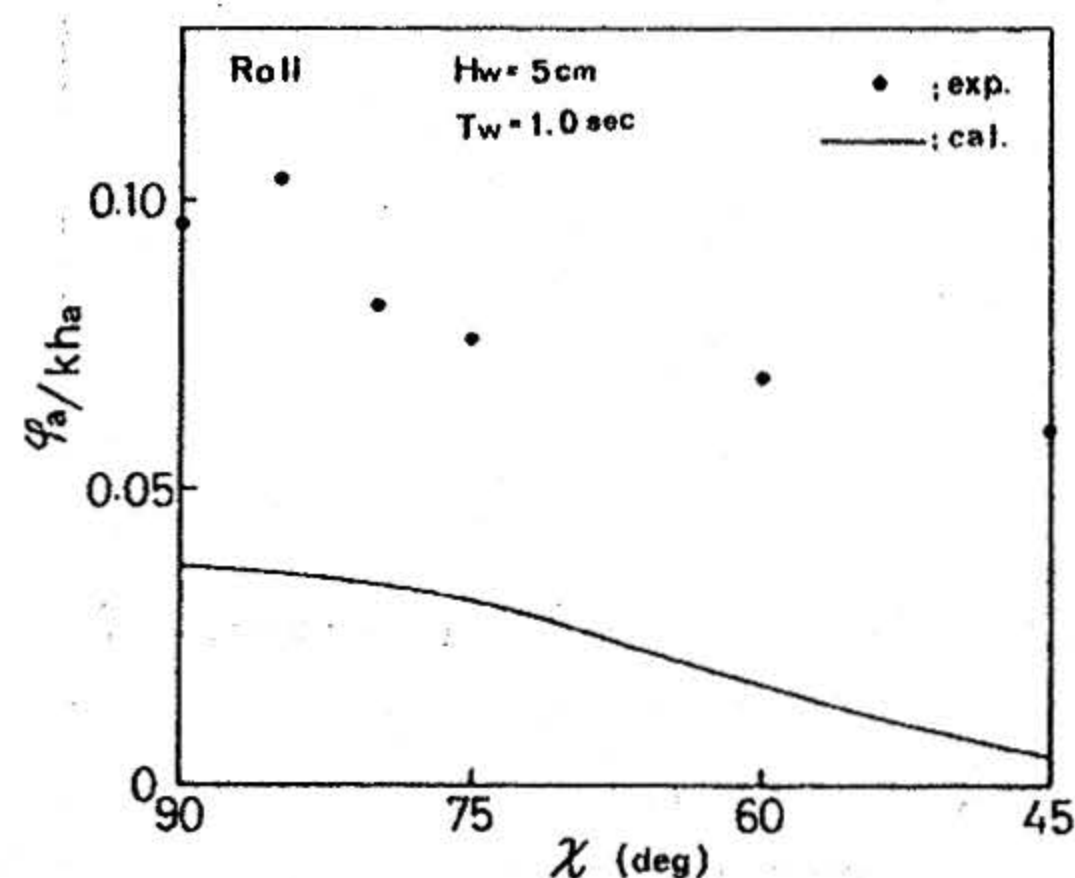


図11 斜め規則波中 roll 応答

Fig.11 Roll motion in oblique regular waves

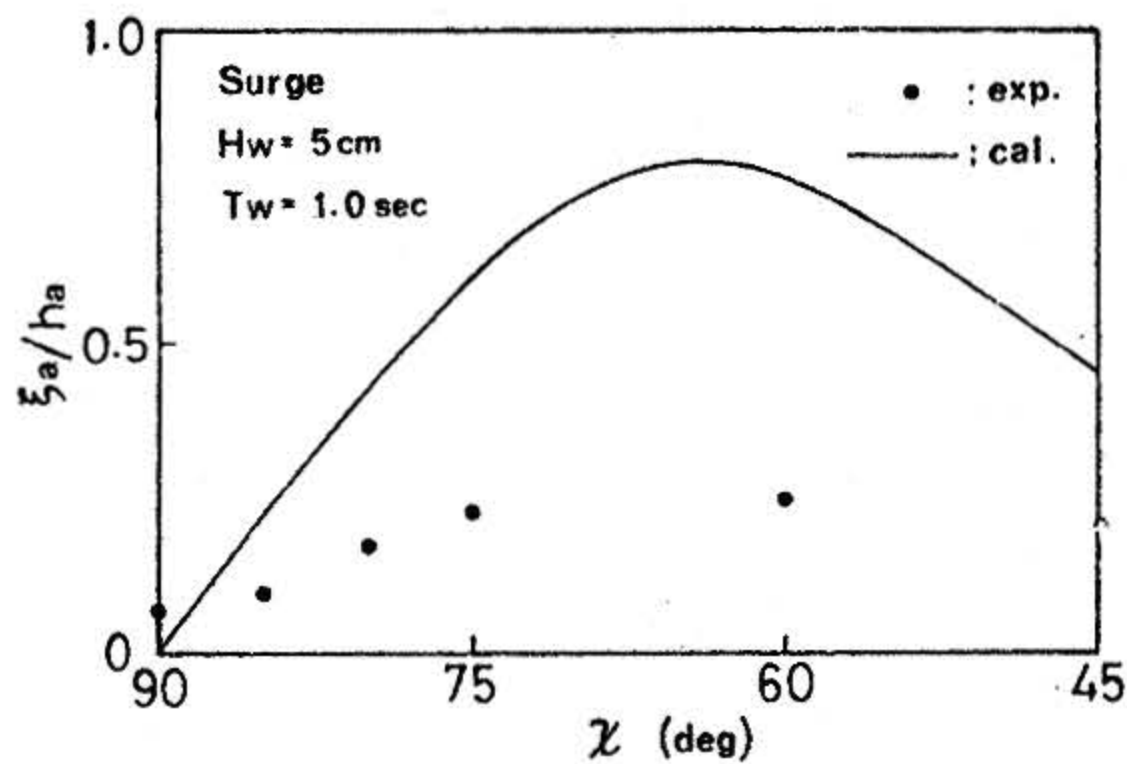


図12 斜め規則波中 surge 応答

Fig.12 Surge motion in oblique regular waves

手方向に直角すなわち Beam Sea 状態であり, χ が小さくなるにつれて波の入射方向が時計まわりに長手方向に近づく。また, 縦軸は各運動の振幅を波振幅 h_a (pitch, yaw および roll は h_a に波数 k を乗じた値) で除して無次元化した値である。これより以下の考察が得られた。

波向き特性について, 実験値は波周期 1.0 sec における値のみ得られているだけであり, この波周期条件下でのみ計算値と比較を行った。図4～6の各図中において波周期 1.0 sec における実験値と計算値を比較しても明らかなように, sway 以外は定量的にはそれらは一致していない。いきおい, 同じ波周期条件下で斜め波中の特性についても同様な比率の値が計算値として得られる訳であるから, 定量的には一致しない(各図の縦軸のスケールにより, それが一層目立つかも知れない)。これは, 他のいまだ少し両者が一致する波周期条件下で比較してみればより良いと考えられる。

しかしながら, いずれのモードの運動についても計算値は定性的には傾向を良く表しており, 流体力等について詳細なチェックを行い改良すれば, 本プログラムは十分有効であると考えられる。

3.3 波エネルギー吸収特性

3.3.1 波周期に対する特性

本計算および水槽実験によって得られた FOWAD の波エネルギー吸収効率 η_{wave} の波周期に対する特性を図13に示す。図の縦軸に示す効率は空気室一室の長さに相当する長さの波の持つエネルギーで一つの空気室の空気出力を除いた値であ

る。これは, 波の入射角度には依存せず, いわゆる capture ratio と呼ばれることもある。なお, 波高は全て 5 cm の時の値である。また, 実験値としてプロットした値は, この実験の報告⁵⁾に示すように, 長手方向に並べられた3基のユニットの各々の中央の空気室で得られた効率の平均値である。なお, 模型の縮尺は 1/40 を想定しており, したがって横軸に示す波周期を実機スケールに換算するには, $\sqrt{40}$ を乗じれば良い。

さて, 計算結果を実験結果と比較すると, 完全に一致はしないものの, 定性的にも実用上十分有効な範囲で計算値は実験値を推定できることが判った。 $T_w = 0.7$ sec 付近の実験値のピークは, 空気室前の harbour 内で発生する harbour resonance 現象によって発生するのであり, 本計算にはこの現象について考慮していないため計算値はこれを推定できていない。一方, 長周期側で計算値が高めにでるが, これはこの付近の波周期では heave の計算値と実験値との差が広がってきてしまっていることに加えて, 実験ではカーテンウォール先端部などでの造渦によるエネルギーのロスなどが発生していることが要因であると考えられる。

しかし, 前述したように計算値は実用上十分に使用できる値となっており, これより本計算は,

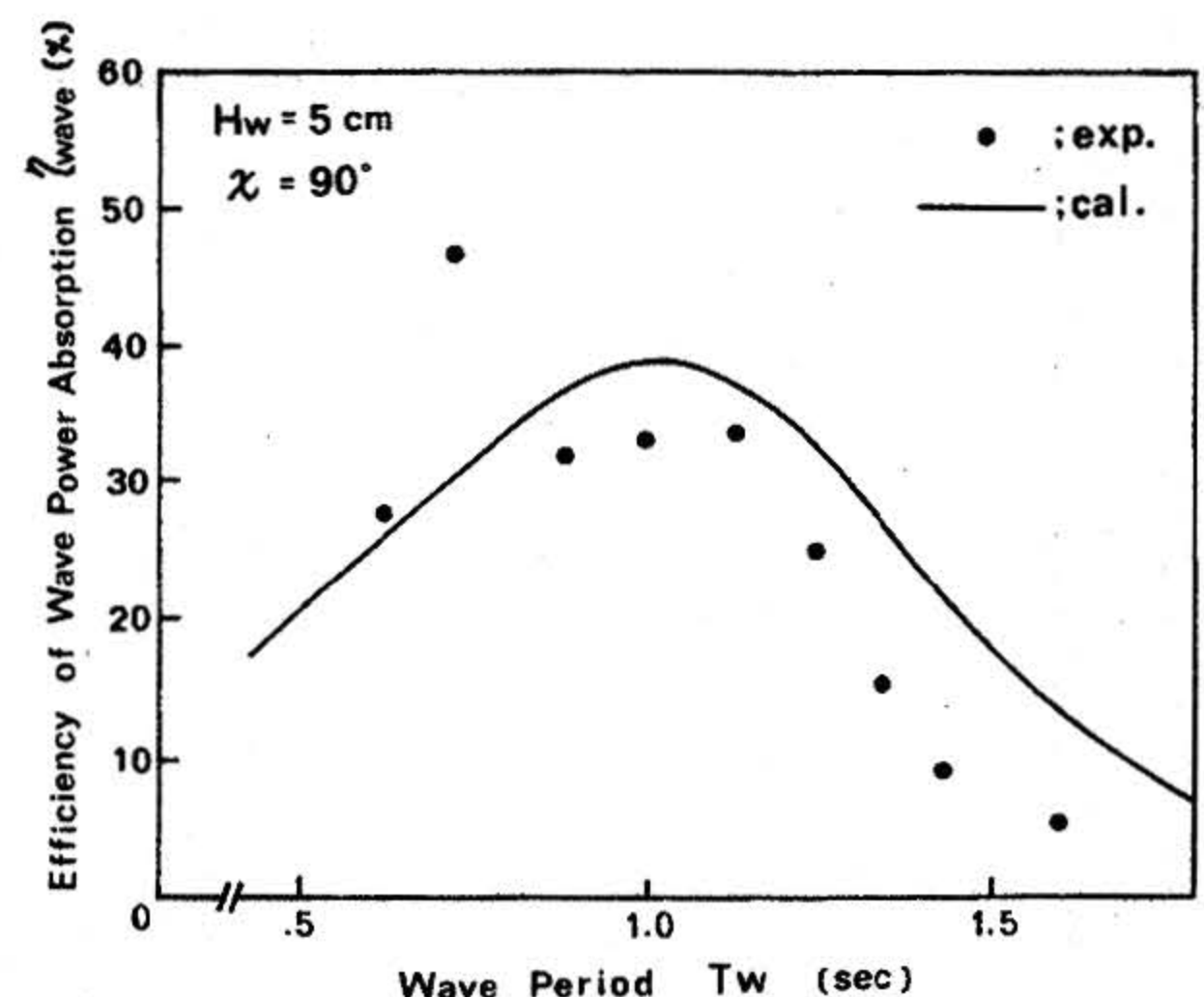


図13 規則波中における波エネルギー吸収効率の実験値と計算値の比較

Fig.13 Comparison of the performance of wave power absorption by the test and the calculation in regular waves

Beam Sea ($\alpha = 90^\circ$) 状態における FOWAD の波エネルギー吸収効率を推定するにあたって十分有効な計算法であることが確認された。

3.3.2 波入射角度に対する特性

波入射角度 α に対する FOWAD の波エネルギー吸収効率 η_{wave} の特性の一例として波高 5 cm, 波周期 1.0 sec の波条件下において実験値と計算値を比較したものを図 14 に示す。

実験値は波入射角が小さくなる, つまり FOWAD の空気室に対し次第に入射波が斜めになるほど波エネルギー吸収効率は増大しているが, 計算値では全ての入射波条件下ではほぼ等しい値であった。これは, 計算においては, 各空気室への入射波高である相対入射波は入射波と各空気室の鉛直方向運動によってのみ決まるとしている。つまり FOWAD の heave および pitch のみが相対入射波高に寄与しているためであり, その他の運動成分および斜め波中における空気室内の OWC の挙動については無視していることが起因していると考えられる。

斜め波中で波エネルギー吸収効率が向上することは非常に興味深い現象であり, 今後この解明と効率の推定法の開発が望まれる。

なお, 斜め波中においては, 5 つの空気室の波エネルギー吸収効率は FOWAD の pitch 運動のため少々ことなる。一例として, 図 14 と同じ波条

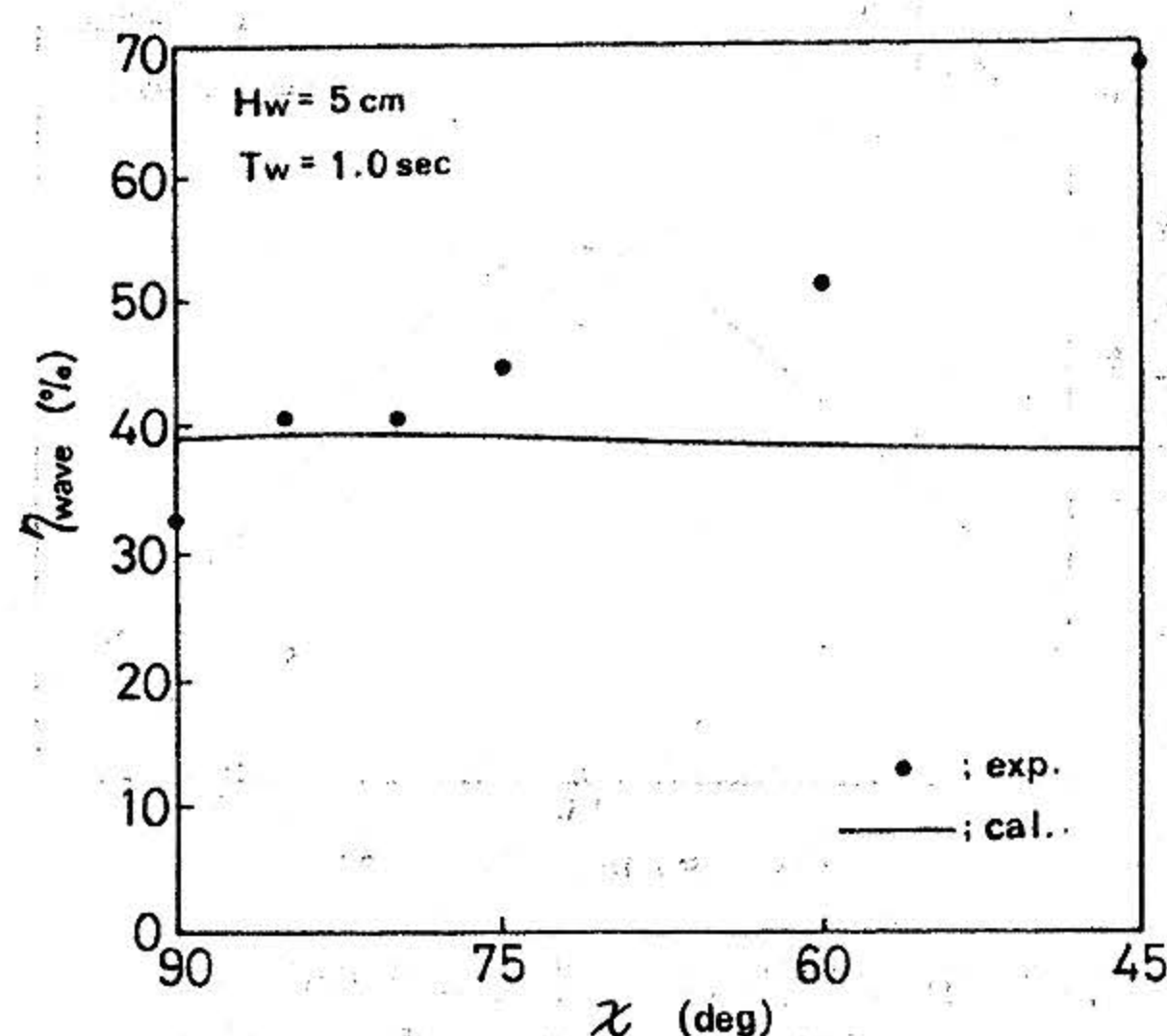


図 14 斜め規則波中波エネルギー吸収効率

Fig.14 Performance of wave power absorption in the oblique regular waves

件下における入射波角度 $\alpha = 75^\circ$, 60° および 45° のときの効率分布を図 15 に示す。

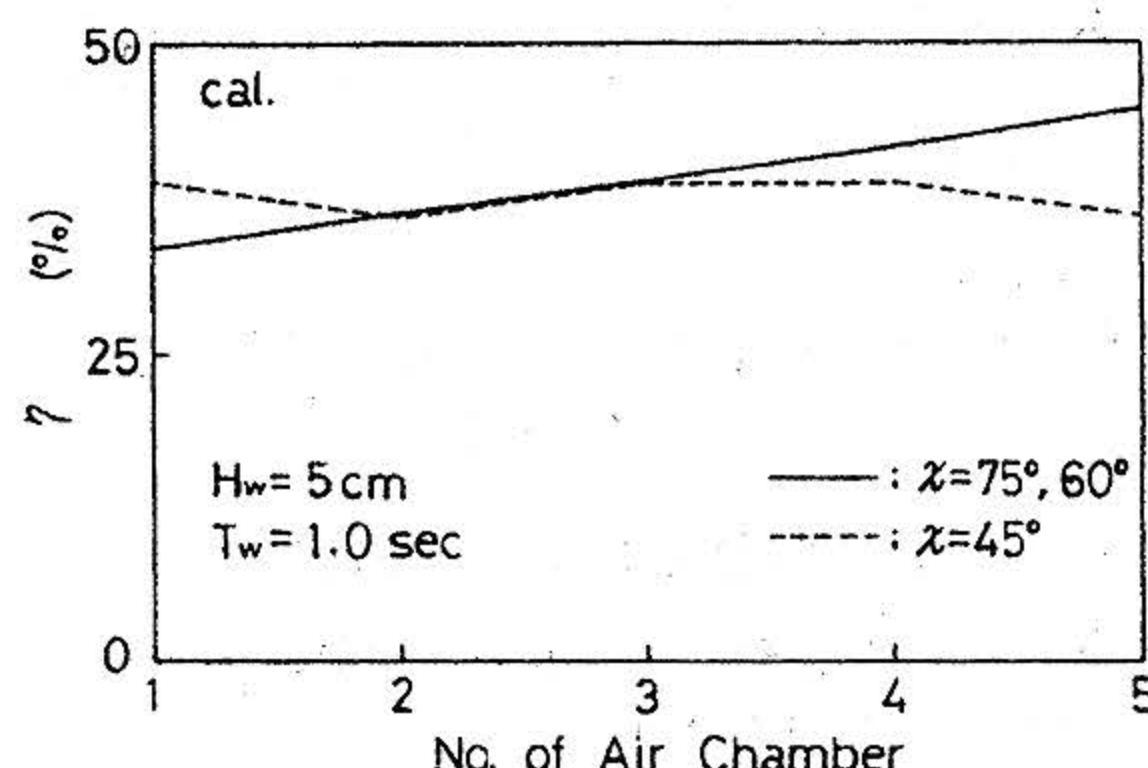


図 15 斜め規則波中波エネルギー吸収効率分布 (計算値)

Fig.15 Distribution of efficiency of wave power absorption in the oblique regular waves by calculation

4 結 言

沖合浮体式波力装置 FOWAD の波浪中における動揺特性および波エネルギー吸収特性を推定するための計算法を開発し, それによる計算結果を著者らが以前実施した縮尺モデルによる水槽実験結果と比較した。その結果, 以下のような結論を得た。

(1) FOWAD の波浪中運動を推定するには, 空気室による付加ダンピングおよび付加復元力を考慮したストリップ法による計算法で十分有効である。

(2) FOWAD の波エネルギー吸収効率を推定するには, 底板以深の波エネルギーの透過を考慮しまた各空気室における相対入射波高を求め, これを用いて固定式波力装置に対する計算法である熱力波動法を解く手法が有効である。

(3) 斜め波中における FOWAD の波エネルギー吸収メカニズムは, 単に入射波と空気室の上下変位のみから把握できる性質のものではなく, より詳細な検討が必要である。

5 おわりに

沖合浮体式波力装置 FOWAD は波のエネルギーを効率良く吸収する装置として「ポスト海明」を担う有力な装置として著者らはこれまで幾種かのモデルについて実験を実施してきた。しかし、汎用的な性能推定法については確立しておらず、海明プロジェクトで培われてきた“カン”と経験に頼って進めてきた一面もある。

しかし、ようやくその推定のための“デバイス”が完成しつつある。まだ、不十分な部分も多く、「完成した」とは言えないが、とにかく概略的な推定は十分遂行できるようになったことは明言できる。つまり、今後のより“大きな”プロジェクトに対する準備は整った訳である。望むべきは、その成果を海に展開できる日が来ることである。

最後に、本報を執筆するにあたり助言下さったノルウェー海洋技術研究所 (MARINTEK) の Dr. C. T. Stansberg および Dr. V. Aanesland 実験および本プロジェクトを共に遂行した海洋開発研究部・宮崎武晃研究主幹および鷺尾幸久研究員に感謝致します。

なお、本研究を実施するにあたり、一部をスキャンジナビア日本笹川基金よりご援助頂いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 堀田 平, 宮崎武晃, 鷺尾幸久, 田中 浩: ターミネーター型波エネルギー利用装置の研究, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, p.1-p.10, (1987)
- 2) 鷺尾幸久, 堀田 平, 宮崎武晃: ターミネーター型波浪エネルギー利用装置に関する研究, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第20号, p.31-p.44, (1988)
- 3) Hitosi Hotta, Yukihiisa Washio, Takeaki Miyazaki; A Study on the Performance of the Floating Terminator Type Wave Power Device, Proceedings of Techno Ocean'88, Volume 1, p.81-p.86, (1988)
- 4) 堀田 平, 鷺尾幸久, 宮崎武晃: 沖合浮体式波力装置の多方向波浪特性について, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第21号, p.69-p.98, (1989)

- 5) 堀田 平, 鷺尾幸久, 宮崎武晃: 沖合浮体式波力装置 FOWAD の実海域中諸特性の予測について, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第23号, p.141-p.175, (1990)
- 6) Hitosi Hotta, Yukihiisa Washio, Takeaki Miyazaki: On the Fundamental Performance of the Floating Offshore Wave Power Device (FOWAD), Proceedings of 9th Int. Conf. of OMAE, Volume 1; Part A, p.263-p.270, (1990)
- 7) 宮嶋省吾, 増田光一: OWC型発電装置を伴ったバージ型海洋構造物の諸特性に関する研究, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, 海洋科学技術センター, p.329-p.336, (1987)
- 8) 高石敬史, 黒井昌明: 波浪中船体運動の実用計算法, 第2回耐航性に関するシンポジウム 日本造船学会, p.109-p.134, (1977)
- 9) 高橋重雄: 波力発電防波堤の開発, 昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.57, (1985)
- 10) 日本機械学会編: 機械工学便覧, 第8編水力学および流体力学, p.61, (1972)
- 11) 戸川隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンス社 (1980)
- 12) 坂田隆司: 箱型浮体い働く流体とその運動について (第3報), 関西造船協会誌, 183号, p.11-p.18, (1981)
- 13) 坂田隆司: 箱型浮体い働く流体とその運動について (第2報), 関西造船協会誌, 178号, p.53-p.60, (1980)

(原稿受理: 1990年4月24日)

Appendix

Rollによる粘性ダンピング係数について¹²⁾

箱型浮体の横揺れ減衰係数 $B\dot{\phi}(\phi)$ は、造波成分とから成り立っているとして、

$$\begin{aligned} B\dot{\phi}(\phi) &= B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| \\ &= (B_1 + \frac{8}{3\pi}\omega\phi_A \cdot B_2)\dot{\phi} \dots\dots (86) \end{aligned}$$

ここで、 ϕ ; rolling 角度

ϕ_A ; rolling 振幅

B_1 ; 造波減衰係数 (ポテンシャル論より)

B_2 ; 造渦減衰係数

として表わす。

この造波減衰係数はキルヒホフの死水モデルを用いて得られる二次元造波減衰係数 B_2 に浮体側板没水部のアスペクト比 B/d と抗力係数 G_D の関係を使って三次元修正を行い、更に浮体幅 B と海底との間隔の比 $B/(H-d)$ (H ; 水深) から実験的に求めた修正係数 G_{sw} を用いて求める。つまり、

$$B_2 = 1.2784 \times \frac{Ld^2}{3} \rho \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 + KG^2 \right\} \left\{ \hat{P}_B \left(\frac{B}{2d} \right)^2 + \hat{P}_S \left(1 - \frac{3}{2} \frac{OG}{d} \right) \right\}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \hat{P}_B &= \frac{4\pi \sin \alpha_B}{4 + \pi \sin \alpha_B}, & \alpha_B &= \tan^{-1} \frac{B/2}{KG}; \text{ at bottom} \\ \hat{P}_S &= \frac{4\pi \sin \alpha_S}{4 + \pi \sin \alpha_S}, & \alpha_S &= \tan^{-1} \frac{KG}{B/2}; \text{ at side wall} \end{aligned}$$

尚、 OG は下向きを正とする。

従って、造渦減衰係数の推定式は次式のようになる。

$$B_2 = 1.2784 \times \frac{Ld^2}{3} \rho \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 + KG^2 \right\} \left\{ C_B \cdot P_B \left(\frac{B}{2d} \right)^2 + C_S \hat{P}_S \left(1 - \frac{3}{2} \frac{OG}{d} \right) \right\} C_{sw} \dots\dots (88)$$

$$C_B = \frac{C_D(L/d)}{C_{D\infty}}; \text{ at bottom} \dots\dots\dots (89)$$

$$C_B = \frac{C_D(2L/B)}{C_{D\infty}}; \text{ at side wall} \dots\dots\dots (90)$$

C_{sw} については参考文献¹³⁾を参照されたい。