

(昭和52年5月西部造船会第54回例会において講演)

## 浅海域における船体運動について (その3)

—波浪中の船体運動の実験と計算の比較—

正員 高木 幹 雄

## On the Ship Motions in Shallow Water (Part 3)

—Comparison of the Experimental Results with  
the Calculated Results of Ship Motions in Waves—

By Mikio TAKAKI

## Summary

It has been becoming a great important problem to predict the hydrodynamic forces and ship motions in water of finite depth, because of increasing dimensions of ships. The studies of ship motions in water of finite depth, however, have been limited comparing with those in water of infinite depth. It is therefore desired that the correlation works between theoretical and experimental investigation should be performed and extended to oblique waves on water depths smaller than twice the draft of the ship.

In this paper, author measures the amplitudes of motions of tanker ship model with various heading angles in waves at a shallow water tank. The experimental results are compared with the results of theoretical calculation obtained by so-called "New Strip Method". It becomes clear from the above comparisons that the theoretical calculations according to New Strip Method agree approximately with the experimental results in oblique waves, and especially the theoretical and the experimental results with zero-advancing speed agree very well in beam sea condition.

## 1. 緒 言

浅海域における船舶の耐航性能に関する研究は、無限水深の場合と比較して、非常に少ない。その理論的研究方法を大別すると、次の三方法に分けることが出来る。

- (a) ストリップ理論による方法
- (b) 細長体理論による方法
- (c) 特異点分布による三次元計算法

まず(a)のストリップ法に関しては、C. H. Kim が向い波中のタンカー船型の縦運動の計算を行っている<sup>1)</sup>。Hooft は  $C_B=0.8$  の Series-60 の模型船を用いて浅水中で種々の実験を行い、貴重な資料を得ているが、理論計算は無限水深の場合の流体力を修正し、近似的に浅水域での運動を求めているのにすぎず、正確な流体力の計算は行っていない<sup>2)</sup>。

- (b) の細長体理論では、Tuck は船速が零の場合の6自由度の運動方程式を求めている<sup>3)</sup>。更に Beck & Tuck

\* 九州大学応用力学研究所

は先の運動方程式について、横揺を除く5種類のモードの運動について数値計算を行つている<sup>9)</sup>が、実験的検証を行つておらず、その実用性は明らかでない。

(c) の三次元計算法では、最近、Oortmerssen は前進速度が零の場合の6自由度の運動振幅ならびに各流体力を求めると共に、実験も行い浅水域では三次元影響が非常に大きいとのべている<sup>5)</sup>。

(a) の方法を除く(b), (c) の方法は数値計算が非常に煩雑である。特に(c)の方法は前進速度がある場合の計算は現時点では不可能であり、前進速度のある場合の耐航性の推定には用いられない現状である。他方無限水深の場合、耐航性能の推定に有効とされている(a)の方法も、有限水深の場合の実験例に乏しいために、その実用性は明らかでなく、斜め波状態まで含めた幅広い実験ならびに理論的研究が望まれている<sup>6)</sup>。

本論文は浅水水槽において斜め波中での船体運動応答の計測を行つた。更に著者が前報までに求めた、浅水域における二次元流体力<sup>7)</sup>を用いて、ストリップ法により先の実験状態の船体運動応答関数を求め、その実験結果との比較から、浅水域におけるストリップ法の有効性を検討したものである。

## 2. 船体運動方程式

Fig. 1 に示すように空間固定座標系を  $O'-X_1Y_1Z_1$  とし、規則波は  $X_1$  の正方向から負方向に進むものとする。船の平均進行方向は  $O'X_1$  と角度  $\alpha$  をなす  $O'X$  方向をとるものとし、新たに空間固定座標系  $O'-XYZ$  を定める。船体固定座標系を  $o-x_0y_0z_0$  とし、 $o$  は水線面の船体中心線上 midship にとる。また、船体の平均進行方向に等速で移動する座標を  $o_0-xyz$  とする。

船は進行波に対して角度  $\mu$  の方向に一定速度  $V$  を保ち、規則波中を動揺しながら航行しているものと仮定する。この時の船体縦運動および船体横運動方程式は次のように書くことができる<sup>9)10)</sup>。

縦運動方程式

$$\left. \begin{aligned} (M+A_{33})\ddot{Z}+B_{33}\dot{Z}+C_{33}Z+A_{35}\ddot{\theta}+B_{35}\dot{\theta}+C_{35}\theta &= F_{ze} \\ (J_{55}+A_{55})\ddot{\theta}+B_{55}\dot{\theta}+C_{55}\theta+A_{53}\ddot{Z}+B_{53}\dot{Z}+C_{53}Z &= M_{\theta e} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

横運動方程式

$$\left. \begin{aligned} (M+A_{22})\ddot{y}+B_{22}\dot{y}+A_{26}\ddot{\psi}+B_{26}\dot{\psi}+A_{24}\ddot{\phi}+B_{24}\dot{\phi} &= F_{ye} \\ (J_{44}+A_{44})\ddot{\phi}+B_{44}\dot{\phi}+C_{44}\phi+A_{42}\ddot{y}+B_{42}\dot{y}+A_{46}\ddot{\psi}+B_{46}\dot{\psi} &= M_{\phi e} \\ (J_{66}+A_{66})\ddot{\psi}+B_{26}\dot{\psi}+A_{64}\ddot{\phi}+B_{64}\dot{\phi}+A_{62}\ddot{y}+B_{62}\dot{y} &= M_{\psi e} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

係数  $A_{jk}$ ,  $B_{jk}$ ,  $C_{jk}$  はそれぞれ、慣性項、減衰項および復原項を表わす。また、 $j=2$ : 左右揺、 $j=3$ : 上下揺、 $j=4$ : 横揺、 $j=5$ : 縦揺、 $j=6$ : 船首揺を表示している。方程式(2.1), (2.2)の左辺の諸係数  $A_{jk}$ ,  $B_{jk}$ ,  $C_{jk}$  ( $j, k=2, 3, \dots, 6$ ) は無限水深の場合の表示<sup>9)10)</sup>と全く同じであるから省略する。

### 2.1 波強制力およびモーメント

(2.1) および (2.2) 式の右辺の波強制力およびモーメントを

$$\left. \begin{aligned} F_{ze} &= F_{zc} \cos \omega_e t - F_{zs} \sin \omega_e t \\ M_{\theta e} &= M_{\theta c} \cos \omega_e t - M_{\theta s} \sin \omega_e t \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{ye} &= F_{yc} \cos \omega_e t - F_{ys} \sin \omega_e t \\ M_{\phi e} &= M_{\phi c} \cos \omega_e t - M_{\phi s} \sin \omega_e t \\ M_{\psi e} &= M_{\psi c} \cos \omega_e t - M_{\psi s} \sin \omega_e t \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

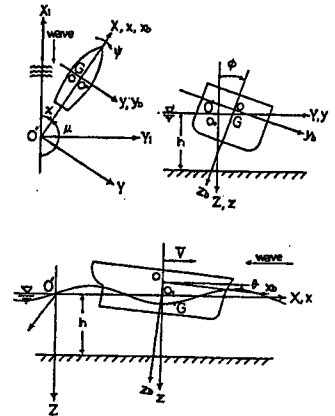


Fig. 1 System of coordinates

とおくと、それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} F_{zc} \\ F_{zs} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} 2\rho g \zeta_a \int_L \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) \int_0^b \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} \cos(m_0 y_s \sin \mu) dy_s dx_b \\
 &\quad \begin{bmatrix} + \\ - \end{bmatrix} \zeta_a \int_L \frac{\sinh m_0(h-T_m)}{\sinh m_0 h} \cdot \omega \omega_e M_H \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b \\
 &\quad - \zeta_a \int_L \frac{\sinh m_0(h-T_m)}{\sinh m_0 h} \cdot \omega N_H \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b, \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} M_{\theta c} \\ M_{\theta s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} 2\rho g \zeta_a \int_L x_b \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) \int_0^b \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} \cos(m_0 y_s \sin \mu) dy_s dx_b \\
 &\quad \begin{bmatrix} + \\ - \end{bmatrix} \zeta_a \int_L \frac{\sinh m_0(h-T_m)}{\sinh m_0 h} \left( \omega \omega_e M_H x_b - \frac{\omega}{\omega_e} V N_H \right) \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b \\
 &\quad - \zeta_a \int_L \frac{\sinh m_0(h-T_m)}{\sinh m_0 h} (\omega N_H x_b + \omega V M_H) \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b, \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} F_{yc} \\ F_{ys} \end{bmatrix} &= -2\rho g \zeta_a \int_L \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) \int_0^T \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} \sin(m_0 y_s \sin \mu) dz_s dx_b \\
 &\quad - \zeta_a \sin \mu \int_L \omega \omega_e M_s \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b \\
 &\quad \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} \zeta_a \sin \mu \int_L \omega N_s \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b, \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} M_{\theta c} \\ M_{\theta s} \end{bmatrix} &= \overline{OG} \cdot \begin{bmatrix} F_{yc} \\ F_{ys} \end{bmatrix} - 2\rho g \zeta_a \int_L \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) \left\{ \int_0^b \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} y_s \sin(m_0 y_s \sin \mu) dy_s \right. \\
 &\quad \left. - \int_0^T \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} z_s \sin(m_0 y_s \sin \mu) dz_s \right\} dx_b \\
 &\quad - \zeta_a \sin \mu \int_L \omega \omega_e M_{s,rs} \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b \\
 &\quad \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} \zeta_a \sin \mu \int_L \omega N_{s,rs} \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b, \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} M_{\psi c} \\ M_{\psi s} \end{bmatrix} &= -2\rho g \zeta_a \int_L x_b \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) \int_0^T \frac{\cosh m_0(h-z_s)}{\cosh m_0 h} \sin(m_0 y_s \sin \mu) dz_s dx_b \\
 &\quad - \zeta_a \sin \mu \int_L \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} \left( \omega \omega_e M_s x_b - \frac{\omega}{\omega_e} V N_s \right) \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b \\
 &\quad \begin{bmatrix} - \\ + \end{bmatrix} \zeta_a \sin \mu \int_L \frac{\cosh m_0(h-T/2)}{\sinh m_0 h} (\omega N_s x_b + \omega V M_s) \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \end{bmatrix} (m_0 x_b \cos \mu) dx_b, \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

但し、船体固定座標系の原点は船体重心と一致しているとする。

$$\begin{aligned}
 m_0 &: \frac{\omega^2}{g} = m_0 \tanh m_0 h \text{ の実根,} & \omega_e &: \text{出合い周波数 } (= \omega - m_0 V \cos \mu), \\
 h &: \text{水深,} & T &: \text{吃水,} \\
 \zeta_a &: \text{波振幅,} & T_m &: \text{平均吃水 } (= S_z/B_z), \\
 \rho &: \text{流体密度,} & g &: \text{重力の加速度,}
 \end{aligned}$$

$M_H, M_s$ : 断面の付加質量,  $N_H, N_s$ : 断面の減衰力係数,  
 $l_{sR}$ : 付加質量モーメントレバー,  $l_w$ : 減衰モーメントレバー.

次に,  $\mu=90^\circ$  すなわち横波状態において, 船速が零の場合, Haskind-Newman-別所の関係<sup>11)</sup> から波強制力およびモーメントは次式によつて正確に求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F_{ze} &= \int_L \frac{-i\rho g \zeta_a \widehat{A}_H}{K \cdot F(m_0 h)} \cdot e^{i(\varepsilon_H + \omega t)} dx_b, \\ M_{\theta e} &= \int_L \frac{-i\rho g \zeta_a \widehat{A}_H}{K \cdot F(m_0 h)} \cdot x_b e^{i(\varepsilon_H + \omega t)} dx_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{ye} &= \int_L \frac{-i\rho g \zeta_a \widehat{A}_s}{K \cdot F(m_0 h)} \cdot e^{i(\varepsilon_s + \omega t)} dx_b, \\ M_{\phi e} &= \overline{OG} \cdot F_{ye} + \int_L \frac{-i\rho g \zeta_a \widehat{A}_R}{K \cdot F(m_0 h)} T \cdot e^{i(\varepsilon_R + \omega t)} dx_b, \\ M_{\psi e} &= \int_L \frac{-i\rho g \zeta_a \widehat{A}_s}{K \cdot F(m_0 h)} x_b \cdot e^{i(\varepsilon_s + \omega t)} dx_b. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

$$\text{ただし, } F(m_0 h) = \frac{2 \cosh^2 m_0 h}{2m_0 h + \sinh 2m_0 h}, \quad K = \frac{\omega^2}{g},$$

$\widehat{A}_H, \widehat{A}_s, \widehat{A}_R$ : 断面の発散波振幅比,

$\varepsilon_H, \varepsilon_s, \varepsilon_R$ : 発散波の位相差.

## 2.2 流体力係数に対する水深の影響

(2.1) および (2.2) 式の左辺の各係数  $A_{jk}, B_{jk}$  ( $j, k=2, 3, \dots, 6$ ) は二次元流体力を船長方向に積分する, いわゆるストリップ法によつて求めることができる。この基本となる二次元流体力は, ビルジキール等の付加物がある場合の横揺の付加慣性モーメント および横揺-左右揺の連成項を除いて, 理論計算により精度よく求められることが確認されている<sup>7)8)</sup>。ここでは船体の上下揺, 左右揺および横揺の慣性項ならびに減衰項に対する水深影響の計算結果を Fig. 2~Fig. 6 に示す。各係数の無次元化方法は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \text{上下揺: } \widehat{M} + \widehat{A}_{33} &= (M + A_{33}) / \rho L^3, & \widehat{B}_{33} &= B_{33} \sqrt{L/g} / \rho L^3, \\ \text{左右揺: } \widehat{M} + \widehat{A}_{22} &= (M + A_{22}) / \rho d, & \widehat{B}_{22} &= B_{22} \sqrt{B/2g} / \rho d, \\ \text{横揺: } \widehat{J}_{44} + \widehat{A}_{44} &= (J_{44} + A_{44}) / \rho d B^2, & \widehat{B}_{44} &= B_{44} \sqrt{B/2g} / \rho d B^2. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

但し,  $L$ : 船長,  $B$ : 船幅,  $d$ : 排水量.

### (i) 上下揺の主要項

$\widehat{A}_{33}$ : 上下揺の付加質量係数

$\widehat{A}_{33}$  は水深が浅くなると全周波数にわたつて増加している。動揺周波数が零に近づくとき無限水深の  $\widehat{A}_{33}$  は無限大になるのに対し, 有限水深の  $\widehat{A}_{33}$  はそれぞれの一定値になっている (Fig. 2)。

$\widehat{B}_{33}$ : 上下揺の減衰係数

$\widehat{B}_{33}$  は水深が浅くなるほど大きくなっている。動揺周波数が零に近づくにつれて,  $\widehat{B}_{33}$  は零に近づいていない (Fig. 3)。これは二次元の場合, 発散波の振幅比  $\widehat{A}_H$  は, 水深が浅くなるほど, 周波数零近くで大きくなっているためである<sup>7)</sup>。この点が三次元計算で求めた値<sup>5)</sup> と大きく異なる特徴である。

縦揺の主要項  $\widehat{A}_{55}, \widehat{B}_{55}$  に対する水深の影響は上下揺の主要項の傾向と全く同じである。減衰項  $\widehat{B}_{55}$  は前進速度があるとわずかに増加する。

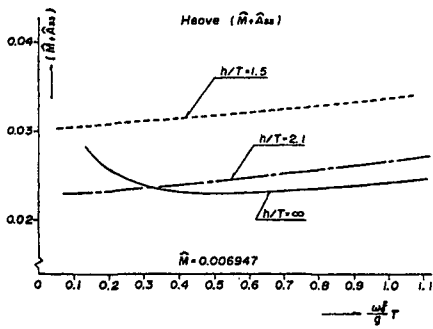


Fig. 2  $\hat{M} + \hat{A}_{33}$ : Virtual mass coeff. for heave

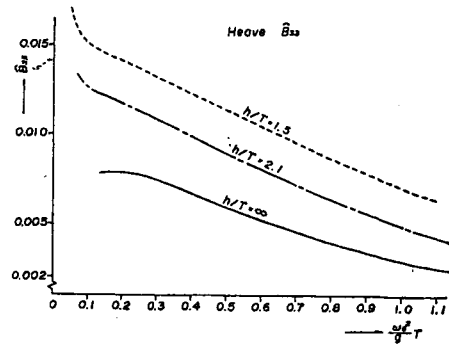


Fig. 3  $\hat{B}_{33}$ : Damping coeff. for heave

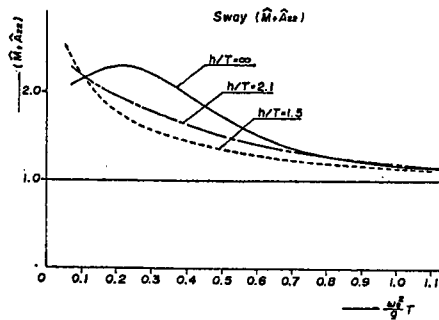


Fig. 4  $\hat{M} + \hat{A}_{22}$ : Virtual mass coeff. for sway

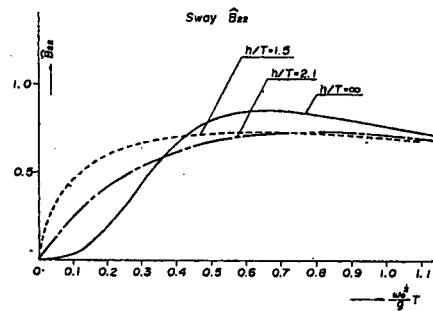


Fig. 5  $\hat{B}_{22}$ : Damping coeff. for sway

(ii) 左右揺の主要項

$\hat{A}_{22}$ : 左右揺の付加質量係数

$\hat{A}_{22}$  は極く低周波数領域を除いて、水深が浅くなるほど小さくなっている (Fig. 4)。

$\hat{B}_{22}$ : 左右揺の減衰係数

$\hat{B}_{22}$  は低周波数領域では水深が浅くなるほど大きくなっている。しかし、高周波数領域では逆に水深が浅くなるほど  $\hat{B}_{22}$  は小さくなっている (Fig. 5)。

船首揺の主要項  $\hat{A}_{66}$ ,  $\hat{B}_{66}$  に対する水深の影響は左右揺のそれらと全く同じである。) )

(iii) 横揺の主要項

$\hat{A}_{44}$ : 付加慣性モーメント係数

$\hat{A}_{44}$  は水深が非常に浅くなっても、全動揺周波数にわたって、その変化は小さい (Fig. 6)。

$\hat{B}_{44}$ : 横揺減衰係数

ポテンシャル理論で求まる  $\hat{B}_{44}$  は全て造波減衰によるものである。実際には粘性等の非線型効果が大きいため、ポテンシャル理論では実際の現象を正確にとらえることができない。そこで横揺減衰係数  $\hat{B}_{44}$  は静水中での自由横揺の実験から次の如く求めた。

船体重心  $G$  の回りの自由横揺運動方程式を次の如くおく、

$$(J_{44} + A_{44})\ddot{\phi} + B_1\dot{\phi} + B_2\phi|\dot{\phi}| + C_{44}\phi = 0, \quad (2.13)$$

$$\text{但し, } C_{44} = W \cdot \overline{GM}.$$

また,

$$2\alpha = \frac{B_1}{J_{44} + A_{44}}, \quad \beta = \frac{B_2}{J_{44} + A_{44}}. \quad (2.14)$$

とおく。一方、自由横揺試験より求めた減減曲線を

$$\Delta\phi_n = a\phi_m + b\phi_m^2. \quad (2.15)$$

とおくと、自由横揺の一揺れになす仕事とエネルギーの関係から

$$\Delta\phi_n = \frac{B_1\pi^2}{W \cdot GM \cdot T_\phi} \phi_m + \frac{16B_2\pi^2}{3T_\phi^2 \cdot W \cdot GM} \phi_m^2, \quad (2.16)$$

但し、 $T_\phi$ : 横揺固有周期

$$\phi_m = (\phi_n + \phi_{n+1})/2, \quad \Delta\phi_n = \phi_{n+1} - \phi_n \quad (\text{degree}).$$

となり、次の関係式を得ることができる。

$$a = \frac{T_\phi}{2} \alpha, \quad b = \frac{4}{3} \beta, \quad B_1 = \frac{2W \cdot GM}{\pi\omega} a, \quad B_2 = \frac{3W \cdot GM}{4\omega^2} \frac{180}{\pi} b, \quad (2.17)$$

但し、 $\omega = 2\pi/T_\phi$ .

(2.13) 式の減衰項を等価線型におきかえると

$$\begin{aligned} B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| &\doteq \left( B_1 + \frac{8}{3\pi} \omega\phi_A \cdot B_2 \right) \dot{\phi} \\ &= B_{44}\dot{\phi}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

( $\phi_A$ : radian)

となる。

無限水深の場合、強制動揺試験によつて求めた横揺減衰係数の値は(2.18)式の型でうまく表示されることがわかっている<sup>12)</sup>。そこで有限水深の場合でも、この表示式で表わされると仮定して、減減曲線より求めた係数  $a, b$  を用いて横揺減衰係数  $\widehat{B}_{44}$  を求めた。

Fig. 7 に前進速度零 ( $F_n=0$ ) の場合、 $\phi_n=3^\circ, 5^\circ$  の時の値を用いて決定した係数  $a, b$  の値を  $h/T$  ( $h$ : 水深,  $T$ : 吃水) を横軸にして示し、その平均値を曲線で示す。また Table-1 に次式で無次元化した  $\widehat{B}_1, \widehat{B}_2$  の値をそれぞれ示している。

$$\widehat{B}_1 = B_1 \sqrt{B/2g/\rho\Delta B^2}, \quad \widehat{B}_2 = B_2/\rho\Delta B^2 \quad (2.19)$$

Table 1 Damping coeff of roll at  $F_n=0$

	$h/T$	$a$	$b$	$\widehat{B}_1$	$\widehat{B}_2$	$T_\phi$ (sec)
S. R.-154 タンカー模型 ( $C_b=0.820$ )	1.5	0.099	0.014	0.00533	0.08455	1.666
	2.1	0.054	0.015	0.00282	0.08480	1.614
	$\infty$	0.024	0.0118	0.00121	0.06245	1.560
笠木山丸* ( $C_b=0.8243$ )	$\infty$	—	—	0.00193	0.05667	1.405

\*  $h/T=\infty$  で強制動揺試験より求めた値。

参考のために無限水深の場合、強制動揺試験で求めた笠木山丸 ( $C_b=0.8243$ ) の値を示している。前進速度がある場合 ( $F_n=0.05$ ) の実験値も船速零の場合の値とほとんど差異が認められなかつた。自由横揺の固有周期は水深が浅くなると共に大きくなっている (Fig. 8)。

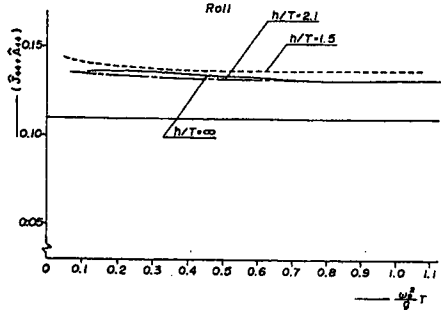


Fig. 6  $\hat{J}_{44} + \hat{A}_{44}$ : Virtual mass moment of inertia coeff. for roll

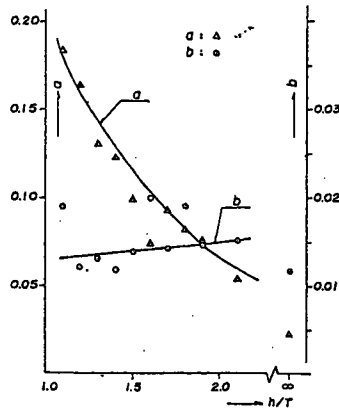


Fig. 7 Coeff. of extinction curves at  $Fn=0$

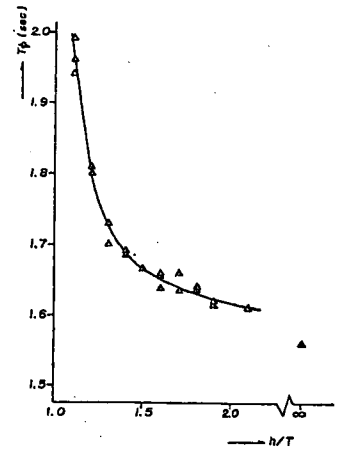


Fig. 8 Rolling natural periods at  $Fn=0$

Table 2 Principal dimensions of ship model

船 長	$L_{pp} = 2.5 \text{ m}$	縦環動半径	$K_t = 0.239 L_{pp}$
船 幅	$B = 0.5 \text{ m}$	横環動半径	$K_r = 0.3316 B$
深 さ	$D = 0.281 \text{ m}$	メタセンター高さ	$\overline{GM} = 0.051 \text{ m}$
吃 水	$T = 0.183 \text{ m}$	重 心 位 置	$\overline{OG} = 0.0242 \text{ m}$
排 水 量	$\Delta = 187.58 \text{ Kg}$		$\overline{\overline{OG}} = 0.0775 \text{ m}$
Block coeff.	$C_B = 0.820$	浮 心 位 置	$\overline{KB} = 0.1012 \text{ m}$
ビルジキール	$b_{B.K.} = 10 \text{ mm}$	プロペラ :	有
	$l_{B.K.} = 0.25 L_{pp}$	舵 :	有

### 3. 実験と理論計算

#### 3.1 実験

実験は九州大学工学部造船教室の運動性能水槽で行った。

本実験に用いた模型船は長さ 2.5 m の S.R.-154

タンカー模型船で、その主要目をTable 2 に示す。

実験状態は Table 3 に示す如く、水深を二種類、船速を二種類、船の針路方向を 4 種類変化させて行なった。

計測は上下揺、縦揺、左右揺、船首揺および横揺の 5 種類の変位で、上下揺は歪みゲージ型加速度計、左右揺はシンクロ型加速度計、縦揺および横揺はパーティカルジャイロ、船首揺はヨーレイトジャイロで計測した。これらの計測機器は全て模型船に積み込まれ、

計測機器の作動は無線の指令で行った。また、船速設定は水槽内に設定した一定間隔の標識間を船が通過するのに要する時間から行っている。しかしながら横波中の航走試験は模型船の漂流がはげしく、針路が非常に不安定であったために、この状態における実験は断念した。

#### 3.2 実験結果と理論計算の比較

前節で求めた横揺減衰係数  $\hat{B}_{44}$  (Fig. 7 の平均線) を用いて (2.1) および (2.2) 式の運動方程式を解き、横

Table 3 Experimental conditions

	水深 ( $h/T$ )	船 速 ( $F_n$ )	波 周 期
向い波状態 ( $\mu=180^\circ$ )	1.5 2.1	0, 0.05	$T_w =$ 0.8~1.9 (sec)
斜め波状態 ( $\mu=135^\circ$ )	1.5 2.1	0, 0.05	
横波状態 ( $\mu=90^\circ$ )	1.5 2.1	0	
追い波状態 ( $\mu=0^\circ$ )	1.5 2.1	0, 0.05 0	

軸に無次元動揺周波数を取り、それぞれの実験結果との比較を行った。尚、参考のために無限水深の場合の運動振幅の計算結果も示している。

(i) 向い波状態 ( $\mu=180^\circ$ )

低周波数領域において、水深が浅くなると、上下揺および縦揺の振幅が共に小さくなる傾向は実験値にもあらわれている。特に縦揺の理論計算値は実験結果とよく合っている。また高周波数領域では、上下揺および縦揺の振幅は共に理論計算値と実験値がよく合っている (Fig. 9~12)。一方、低周波数領域において上下揺振幅の理論計算と実験結果が合わないのは、実験において高周波数領域で発生できる波高が非常に小さかったこと、また上下揺変位は上下方向の加速度の計測値から求めているので、これらによる誤差が大きいためと思われる。Beck & Tuck は細長体理論を用いて計算した結果と Kim のストリップ法による結果との比較から、高周波数領域ではストリップ法による推定が合理的である (低周波数領域では細長体理論による推定値がストリップ法による推定値より大きくなる) とのべている<sup>4)</sup>。確かに上下揺の実験結果を見るかぎりにおいて、その傾向をみるることができる。しかし、上下揺との連成運動である縦揺の実験結果は低周波数領域においても理論計算値とよく一致している。

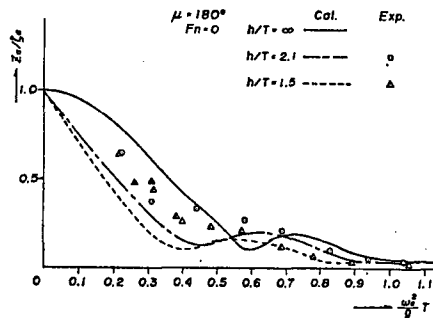


Fig. 9 Heaving amplitudes in head sea condition at  $F_n=0$

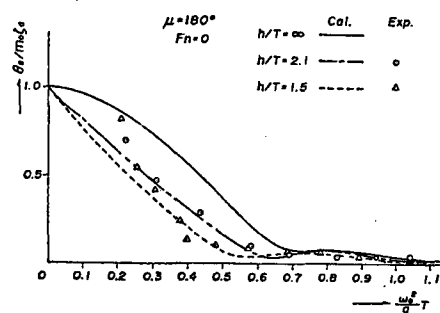


Fig. 10 Pitching amplitudes in head sea condition at  $F_n=0$

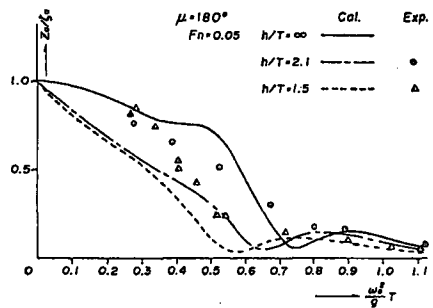


Fig. 11 Heaving amplitudes in head sea condition at  $F_n=0.05$

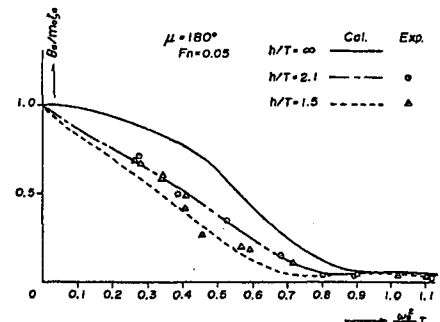


Fig. 12 Pitching amplitudes in head sea condition at  $F_n=0.05$

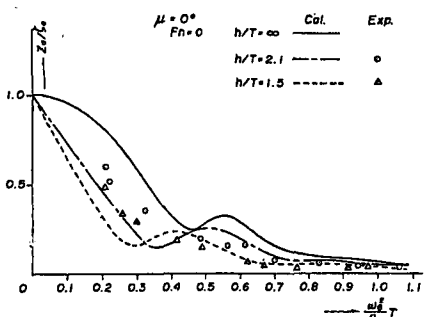


Fig. 13 Heaving amplitudes in following sea condition at  $F_n=0$

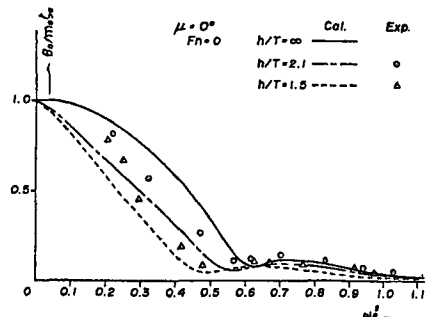


Fig. 14 Pitching amplitudes in following sea condition at  $F_n=0$



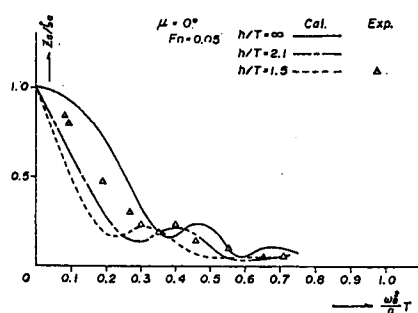


Fig. 15 Heaving amplitudes in following sea condition at  $Fn=0.05$

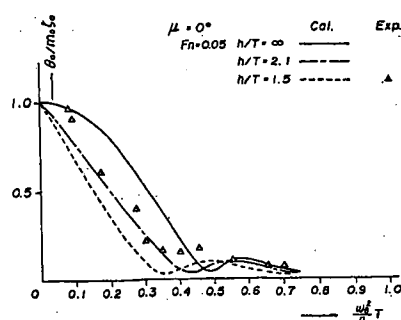


Fig. 16 Pitching amplitudes in following sea condition at  $Fn=0.05$

(ii) 追い波状態 ( $\mu=0^\circ$ )

運動振幅の傾向は先の向い波状態と全く同じで、水深が浅くなるにつれて、上下揺および縦揺の運動振幅は共に低周波数領域で小さくなっている (Fig. 16)。

(iii) 横波状態 ( $\mu=90^\circ$ )

理論計算はどの運動モードにおいても実験結果とよく一致していて、先の向い波および追い波状態よりも理論計算による推定がうまく出来ている。これは Haskind-Newman-別所の関係<sup>11)</sup> により、横波状態の波強制力が (2.10) および (2.11) 式により正確に推定できたことによるものと思われる。

上下揺は横波状態で同調ピークがあらわれて、運動振幅は波振幅の約 1.5 倍ぐらいである。また水深が浅くなるほど上下揺および縦揺の同調点は低周波数側に大きくなる (Fig. 17, 18)。これは上下方向の運動に対して水深の影響が非常に大きいことを示している (Fig. 2, 3)。これに対して横揺の同調点は水深によってあまり大きく変化していない (Fig. 20)。これは Fig. 8 に示す如く、付加慣性モーメント  $A_{44}$  に対する水深の影響は  $h/T=1.4$  以下の水深では非常に大きくなっているのに対し、 $h/T=1.5$  位まではそれ程大きくなっていない。したがって付加慣性モーメント  $A_{44}$  に対して、船体の慣性モーメント  $J_{44}$  が大きく、 $(J_{44}+A_{44})$  の値が本実験の状態ではあまりかわらないからである (Fig. 6)。

左右揺振幅は水深が浅くなるほど大きくなっており、低周波数領域では波振幅よりも非常に大きくなっている (Fig. 19)。これは浅水域における水粒子の運動は垂直方向よりも水平方向で非常に大きいためである。左右揺は船の繋留の場合、最も大きな影響をおよぼすので注意を要する。

船首揺は横波状態では船型の前後非対称性のため生じる。タンカー船型の場合、前後非対称性は小さいので、その振幅は非常に小さい。また、横揺との連成運動で横揺の同調時に船首揺振幅も大きくなっている (Fig. 21)。

(iv) 斜め波状態 ( $\mu=135^\circ$ )

上下揺および縦揺振幅に対する水深影響は向い波状態の場合と同じで、水深が浅くなるほど運動振幅は共に小さくなっている (Fig. 22~25)。理論計算と実験結果との一致は縦揺振幅において大略満足されているのに対し、上下揺振幅は低周波数領域において、実験値が計算値よりも大きくなっている。

左右揺および横揺振幅に対する水深の影響は上下揺および縦揺の縦運動ほど顕著ではない。その傾向は横波状態における横方向の運動のそれと非常によく似ている。左右揺振幅は低周波数領域では水

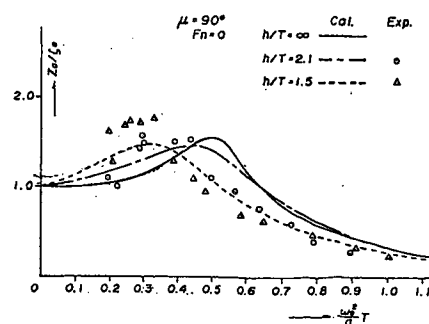


Fig. 17 Heaving amplitudes in beam sea condition at  $Fn=0$

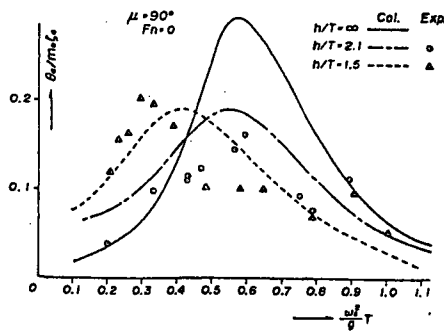


Fig. 18 Pitching amplitudes in beam sea condition at  $F_n=0$

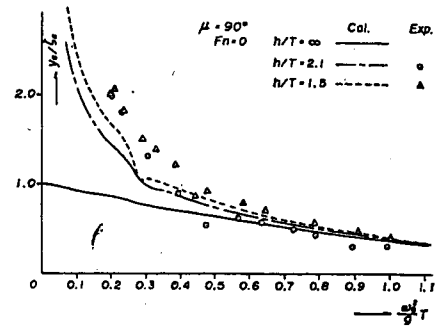


Fig. 19 Swaying amplitudes in beam sea condition at  $F_n=0$

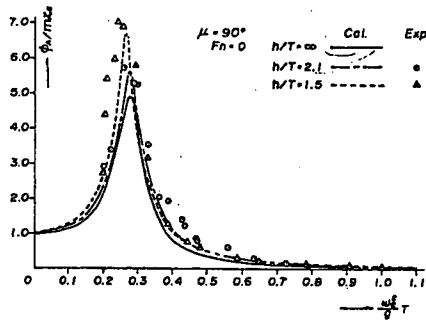


Fig. 20 Rolling amplitudes in beam sea condition at  $F_n=0$

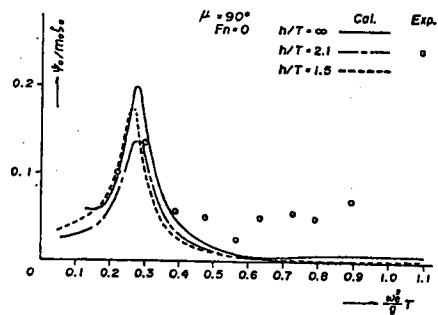


Fig. 21 Yawing amplitudes in beam sea condition at  $F_n=0$

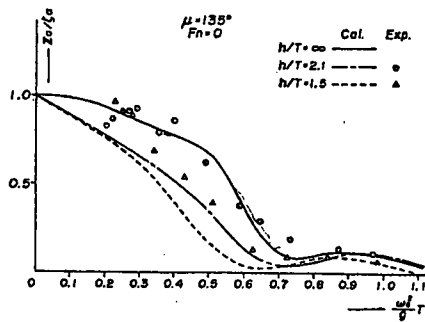


Fig. 22 Heaving amplitudes in bow sea condition at  $F_n=0$

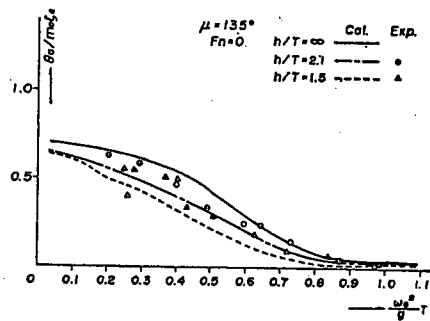


Fig. 23 Pitching amplitudes in bow sea condition at  $F_n=0$

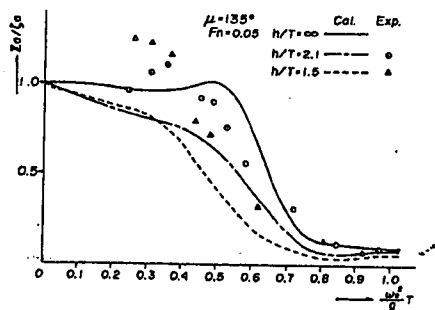


Fig. 24 Heaving amplitudes in bow sea condition at  $F_n=0.05$

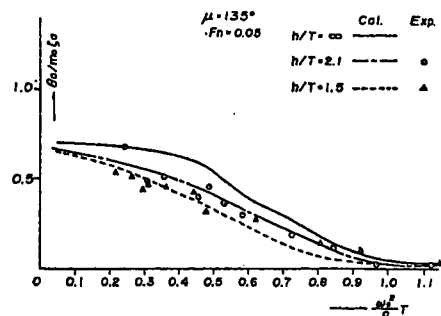


Fig. 25 Pitching amplitudes in bow sea condition at  $F_n=0.05$

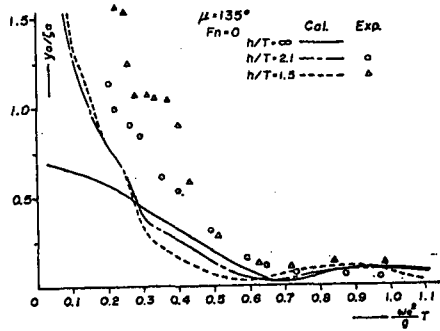


Fig. 26 Swaying amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0$

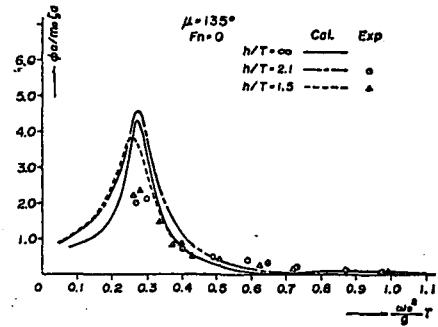


Fig. 27 Rolling amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0$

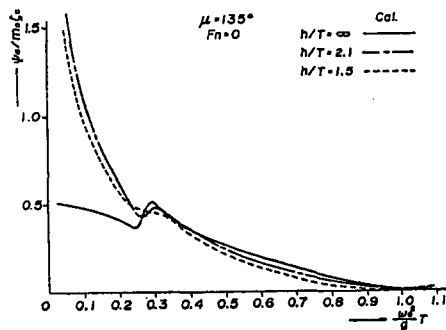


Fig. 28 Yawing amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0$

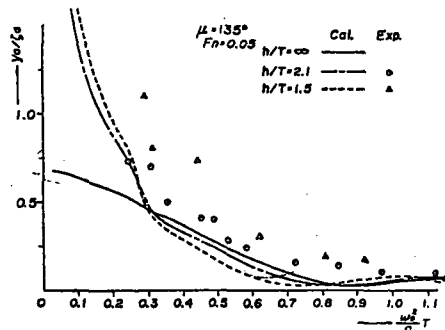


Fig. 29 Swaying amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0.05$

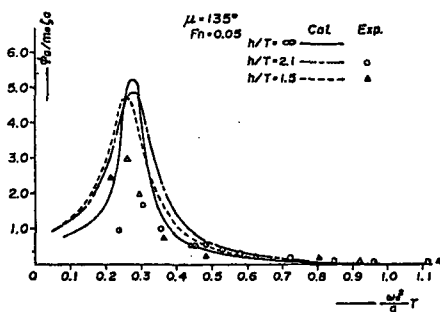


Fig. 30 Rolling amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0.05$

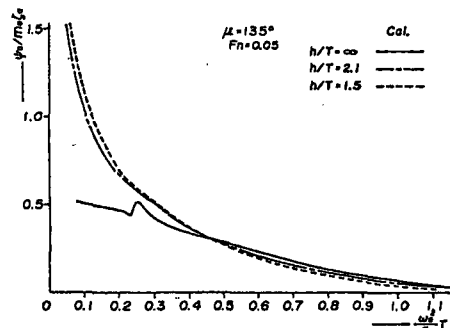


Fig. 31 Yawing amplitudes in bow sea condition at  $Fn=0.05$

深が浅くなるほど大きくなり、中間の周波数  $(0.3 < \frac{\omega_d^2}{g} T < 0.6)$  では逆に水深が浅くなるほど運動振幅は小さくなっている。実験結果は理論計算値よりも大きい値となっている (Fig. 26, 29)。

横揺振幅は同調周波数において、計算値の方が実験値より大きくなっている。他の周波数領域では理論計算値と実験結果はよく合っている (Fig. 27, 30)。

船首揺振幅は実験中、計測器に波をかぶり計測できなかつたので計算結果だけを示しておく。左右揺振幅と同様に低周波数領域において、水深が浅くなるほど運動振幅は大きくなり、最大波傾斜角よりも大きい値となっている (Fig. 28, 31)。

#### 4. 結 言

浅水域における運動振幅について、実験結果とストリップ法による理論計算結果とを比較して、次の事項が言える。

- (1) 浅水域における船体運動はストリップ法によつて大略推定することができる。
  - (2) 向い波、追い波および斜め波状態における運動振幅の推定精度は横波状態のそれよりも悪い。この原因は船体に働く流体力の三次元影響が大きいためではないかと思われる。
  - (3) 横波状態の左右振幅、斜め波状態の左右揺振幅および船首揺振幅は水深が浅くなるにしたがつて非常に大きくなっている。このことは繋船の場合等注意を要する問題である。
  - (4) 横揺減衰係数は水深の影響を大きく受けるので、その正確な推定法の研究が必要である。
- 尚、今後船体に働く流体力の三次元影響を含めて、波強制力および流体力係数の推定精度向上の検討が必要であらう。

最後に本研究の遂行にあたり、実験施設ならびに貴重な計測機器を快くお貸し頂いた九州大学工学部、井上正祐教授、貴島勝郎助教授をはじめ運動性能水槽各位に心から感謝の意を表します。さらに、ご指導、ご鞭撻を頂いた九州大学応用力学研究所、田才福造教授、大楠丹助教授に厚く御礼申し上げます。また、計測装置の製作ならびに実験に尽力下さった稲田勝技官、実験ならびに図面作製に御協力頂いた江頭正章研究生(当時)、北条万寿代嬢、横林晴美嬢に深く感謝致します。

本研究の一部は S.R.-154 研究部会との共同研究として実施されたことを付記し、関係各位に深く感謝致します。

尚、流体力ならびに船体運動の計算には九州大学大型計算機センターの FACOM 230-75 ならびに九州大学応用力学研究所電算機室の FACOM 230-48 を使用した。

#### 参 考 文 献

- 1) Kim, C. H. : The Influence of Water Depth on the Heaving and Pitching of a Ship Moving in Longitudinal Regular Head Waves, Chalmers Univ. of Tech., Dep. of Naval Architecture and Marine Eng., Division of Ship Hydrodynamics Rep. No. 44, Jun., 1968.
- 2) Hooft, J. P. : The Behaviour of a Ship in Head Waves at Restricted Water Depths, Netherlands Ship Research Center TNO, Rep. No. I88S, 1974.
- 3) Tuck, E. O. : Ship Motions in Shallow Water, J. of Ship Research, Vol. 14, 1970.
- 4) Beck, R. F. and Tuck, E. O. : Computation of Shallow Water Ship Motions, 9th Symposium on Naval Hydrodynamics, Paris, August 1972.
- 5) Oortmerssen, G. V. : The motions of ship in shallow water, S.N.A.M.E., 1975.
- 6) Sluijs, M. F. and Gie, T. S. : The Effect of Water Depth on Ship Motions, 14th International Towing Tank Conference, Rep. of Seakeeping Committee, Appendix 7, 1975.
- 7) 高木幹雄：浅海域における船体運動について(その1)、西部造船会会報、第50号、1975。
- 8) 高木幹雄：浅海域における船体運動について(その2)—左右揺れおよび横揺れの二次元流体力—、西部造船会会報、第52号、1976。
- 9) 田才福造、高木又男：規則波中の応答理論および計算法、耐航性に関するシンポジウム、1969。
- 10) 田才福造：Short Crested Wave 中における Sway, Yaw および Roll の運動について、西部造船会会報、第42号、1971。
- 11) 別所正利：波の中の船の船の横揺れ運動の理論について、防衛大学校理工学研究報告、第3巻、第1号、1965。
- 12) 高木幹雄、田才福造：横運動方程式の流体力について、西部造船会会報、第46号、1973。