(昭和 60 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究

(第 2 報)

正員 藤 野 正 隆* 正員 尹 範 相**

A Study on Wave Loads

Acting on a Ship in Large Amplitude Waves (2nd Report)

by Masataka Fujino, *Member* Bum Sang Yoon, *Member*

Summary

In the previous paper, the authors presented a method of predicting wave loads acting on a ship fixed in large amplitude waves, and verified its validity in computing the peak values of wave loads as well as in clarifying their time dependent nonlinear behavior.

In this paper, 2nd report, prediction of ship motion and wave loads acting on a ship freely floating in large amplitude waves are performed using the method in its extensioned form. All the results computed by the present method, in which time-variation of the submerged portion of ship's hull and coupling effect between vertical and horizontal hydrodynamic forces are taken into account, shows quite good agreement with experimental ones.

As a result, it is found that time-varying relative vertical displacement of a ship's body does a dominant role in nonlinear behaviors of wave loads, and that torsional moment can be affected by the coupling phenomena between vertical and horizontal hydrodynamic forces to a greater extent in relatively short waves of beam-sea condition.

1 緒 言

前報¹⁾では大波高波浪中において、船速 0 で運動が拘束された船体に働く波浪荷重を、Ordinary Strip Method の手法に若干の修正を施す程度の実用的な方法を用いて推定し、その結果と実験結果を比較した。その結果、垂直剪断力および垂直曲げモーメントの縦波浪荷重は、大波高において線形性を有し、波浪荷重はほぼ波高に比例するのに対し、水平剪断力、水平曲げモーメント、振りモーメントの横波浪荷重には顕著な非線形性が現われ、線形計算では推定できないが本計算法による計算結果はその非線形性も含め実験結果とよく一致することを示した。

本計算法の特徴は断面流体力の計算において、水面下断面形状が時々刻々変化することおよび diffraction force の評価に波傾斜の時間変化を考慮に入れることであった。ただし、波傾斜の時間変化による影響は振りモーメントを除く他の波浪荷重にはほとんどないことがわかった。

本報では前報の計算法を拡張し、船速 0 で船体運動を自由にした場合の船体運動と波浪荷重を取り扱う。このように船体運動を許した場合、喫水の時間的変化だけではなく、横揺れにより水面下船体形状が著しく左右非対称となることから、縦・横流体力の連成効果が無視できなくなる可能性があることは、傾斜した船体に働く波浪強制力や波浪中での傾斜船体の動揺に関する研究からも予想される²⁻⁴⁾。すなわち、縦・横運動の間の連成はもちろん、縦運動の横波浪荷重への影響および横運動の縦波浪荷重への影響の程度を検討することが、本報の主な目的のひとつである。

船体運動を許した大波高波浪中での実験結果によれば、垂直剪断力と垂直曲げモーメントの縦波浪荷重に時刻歴の非線形性および波高の増加に伴う peak 値の非線形性が顕著に現われるのに対し、水平剪断力、水平曲げモーメント、振りモーメントの横波浪荷重には時刻歴の非線形性はほとんどなく、波高の増加による peak 値の非線形性も縦波浪荷重に比べ大きくない。このような傾向は前報に述べた船体運動拘束時の傾向と逆である。

本計算法による計算結果と実験結果との一致度は全般的によく、波浪荷重の時刻歴の非線形挙動や peak 値の

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

Fig. 1 Coordinate System

推定についても、かなり良い対応を示している。以下に、本計算法の概要および計算結果と実験結果の比較の結果を紹介する。

2 波浪荷重の計算

Fig. 1 に示すように、波長 λ 、波振幅 a (=波高の 1/2) の規則波を X の方向より受けつつ平均船速 u (本報では 0 としている) で前進する船が上下揺 Z_0 、縦揺 θ_0 、左右揺 Y_0 、船首揺 ϕ_0 、横揺 ψ_0 の運動する際の波浪荷重を以下のように計算する。ただしこれらの船体運動は towing carriage に設置した運動計測装置と模型との連結点である o 点でのものを意味する (Fig. 4 を参照)。

2.1 断面に働く力

船長方向 $x=x$ の位置に存在する単位長さの断面に働く力は次式で与えられる。

$$\frac{dF_i}{dx} = \frac{dF_{M_i}}{dx} + \frac{dF_{H_i}}{dx} + \frac{dF_{S_i}}{dx} \quad (1)$$

$i=1$: 垂直力 (下向きが+)

2 : 水平力 (右向きが+)

3 : 回転モーメント (o 点まわり, $y \rightarrow z$ が+)

ここで $\frac{dF_{M_i}}{dx}$: 断面の慣性力

$\frac{dF_{H_i}}{dx}$: 断面に働く hydrodynamic force

$\frac{dF_{S_i}}{dx}$: 断面に働く static force

また hydrodynamic force $\frac{dF_{H_i}}{dx}$ は radiation による成分 $\frac{dF_{H_i,R}}{dx}$ と diffraction による成分 $\frac{dF_{H_i,D}}{dx}$ に分けて考える。

$$\frac{dF_{H_i}}{dx} = \frac{dF_{H_i,R}}{dx} + \frac{dF_{H_i,D}}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{dF_{H_i,R}}{dx} = -\frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^3 m_{ij} \frac{ds_j'}{dt} \right) - \sum_{j=1}^3 N_{ij} \frac{ds_j'}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dF_{H_i,D}}{dx} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^3 m_{ij} \frac{dw_j}{dt} \right) + \sum_{j=1}^3 N_{ij} \frac{dw_j}{dt} \quad (4)$$

ここで, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} - u \frac{\partial}{\partial x}$

s_j' : 断面上 o' 点の運動変位, ただし s_3' は o 点まわりの横揺角 ϕ_0 である。

m_{ij} : j 方向運動による i 方向付加質量

N_{ij} : j 方向運動による i 方向減衰係数

$\overline{dw_j}/dt$: 波粒子運動速度の断面代表値, w_3 は波傾斜を意味する。

また static force (dF_{S_i}/dx) は次のように与えられる。

$$\frac{dF_{S1}}{dx} = w - \int_{c'} p dy' \quad (5)$$

$$\frac{dF_{S2}}{dx} = \int_{c'} p dz' \quad (6)$$

$$\frac{dF_{S3}}{dx} = \int_{c'} p (-y dy' - z dz') + w(z_0' - z_g') \sin \phi_0 \quad (7)$$

ただし, w : 断面での単位長さ当り重量

p : 入射波内部圧力

c' : 断面の没水部分

(y, z) : o 点から船体表面までの vector

z_0' : o 点の z' 座標

z_g' : 断面重心 g の z' 座標

2.2 流体力係数の計算

2.1 で用いられた m_{ij} , N_{ij} , $\overline{dw_j}/dt$, p などの求め方および表現式について簡単に記述する。Fig. 2 のようにある時刻 $t=t$ での水面下断面形状に対する流体力係数 m_{ij} , N_{ij} は断面内の平均波面変位を表す点線以下の形状に対し close-fit 法⁵⁾で計算した。これら m_{ij} , N_{ij} の中で m_{13} , N_{13} は o 点まわりのものを用いなければならないため o' 点まわりの流体力係数から次のような変換を行っている。

$$\left. \begin{aligned} m_{13} &= m_{31} = m_{HRO} = m_{HRO'} + o_s \cdot m_{HH} + o_c \cdot m_{SH} \\ m_{23} &= m_{32} = m_{SRO} = m_{SRO'} + o_s \cdot m_{HS} + o_c \cdot m_{SS} \\ m_{33} &= m_{RRO} \cong m_{RRO'} + o_s (m_{HRO} + m_{HRO'}) \\ &\quad + o_c (m_{SRO} + m_{SRO'}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} o_c &= z_0' \cdot \cos \phi_0 \\ o_s &= z_0' \cdot \sin \phi_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Fig. 2 Ship Section Configuration

式(8)の m_{33} には付加項が存在するが、無視できるほど微小であるためそれを無視した。 m_{HH} は heave による heave 方向付加質量、 m_{SH} は heave による sway 方向付加質量などであり添字 o は 0 点まわり、 o' 点は $0'$ 点まわりのものを表す。また減衰係数についても同様の交換が必要である。

断面の平均波面変位 ζ 、波粒子の運動速度の断面代表値などは次のように求める。

$$\text{波面の式} \quad \zeta = a \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t) \quad (10)$$

副波面の式

$$\zeta_e = ae^{-Kz'} \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t) \quad (11)$$

を用い、

$$\begin{aligned} \bar{\zeta} &= \int \zeta dy' / (y_B' - y_A') \\ &= -a \{ \sin Q_B - \sin Q_A \} / K \sin \chi \cdot (y_B' - y_A') \quad (12) \end{aligned}$$

とする。同様に

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dt} &= \frac{d\bar{\zeta}_e}{dt} \\ &= a\omega e^{-Kd_1} \{ \cos Q_B - \cos Q_A \} / K \sin \chi \cdot (y_B' - y_A') \quad (13) \end{aligned}$$

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{d\bar{\eta}_e}{dt} = -a\omega e^{-Kd_2} \{ \sin Q_B - \sin Q_A \} / K (y_B' - y_A') \quad (14)$$

$$\frac{dw_3}{dt} = \frac{d\bar{\gamma}_e}{dt} = a\omega e^{-Kd_2} \{ \sin Q_B - \sin Q_A \} / (y_B' - y_A') \quad (15)$$

η_e, γ_e はそれぞれ入射波粒子の水平方向運動変位、内部波面の傾斜を表す。 Q_A, Q_B は

$$\left. \begin{aligned} Q_A &= K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y_A' - \omega_e t \\ Q_B &= K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y_B' - \omega_e t \end{aligned} \right\} \quad (16 \sim 1, 2)$$

であり、断面の代表喫水としての d_1, d_2 は

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= s / (y_B' - y_A') + \bar{\zeta} \\ d_2 &= s / 2 (y_B' - y_A') + \bar{\zeta} \end{aligned} \right\} \quad (17 \sim 1, 2)$$

を用いる。ただし s : 没水部分の面積

また、入射波内部圧力 p は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} p &= \rho g(z' - \zeta) - \rho \left(\frac{\partial \phi_w}{\partial t} - \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right]_{\zeta} \right) \\ &\quad - \frac{1}{2} \rho (\nabla \phi_w)^2 - \nabla \phi_w \cdot \zeta \quad (18) \end{aligned}$$

ここで入射波 potential ϕ_w は

$$\phi_w = -\frac{ga}{\omega} e^{-Kz'} \sin(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t) \quad (19)$$

である。

2.3 運動方程式

断面に働く力の式(1)を用い、船尾から船首まで力およびモーメントを積分することによって、運動方程式

が次のように求まる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \text{heave} &: - \int_{A.P}^{F.P} \frac{dF_1}{dx} dx = 0 \\ \text{pitch} &: - \int_{A.P}^{F.P} \frac{dF_1}{dx} (-x) dx = 0 \\ \text{sway} &: - \int_{A.P}^{F.P} \frac{dF_2}{dx} dx = 0 \\ \text{yaw} &: - \int_{A.P}^{F.P} \frac{dF_2}{dx} \cdot x dx = 0 \\ \text{roll} &: - \int_{A.P}^{F.P} \frac{dF_3}{dx} dx = 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

となり、運動による項以外の項は右辺に移項すると

$$[A]\{\ddot{R}\} + [B]\{\dot{R}\} + [C]\{R\} = \{E\} \quad (21)$$

$$\{R\} = [Z_0 \ \theta_0 \ Y_0 \ \phi_0 \ \phi_0]^T \quad (22)$$

の heave-pitch-sway-yaw-roll 連成運動方程式が求められる。この運動方程式の係数 A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} および波浪強制力 E_i を Appendix に示す。

2.4 断面に働く波浪荷重

断面に働く波浪荷重の正方向を Fig. 3 のように定義すれば、 $x = x_1$ での波浪荷重は次のように求められる。まず、断面に働く入射波による力 e_i および船体運動による力 g_i の $A.P$ から x_1 までの積分でそれぞれ E_i', G_i' を定義する。

$$E_i' = \int_{A.P}^{x_1} e_i dx \quad (23)$$

$$G_i' = \int_{A.P}^{x_1} g_i dx \quad (24)$$

一方、 $x = x_1$ での波浪荷重は e_i, g_i より次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \text{垂直剪断力} \quad F_V'(x_1) &= \int_{A.P}^{x_1} (e_1 - g_1) dx \\ \text{垂直曲げモーメント} \quad M_V'(x_1) &= \int_{A.P}^{x_1} (x_1 - x)(e_1 - g_1) dx \\ \text{水平剪断力} \quad F_H'(x_1) &= \int_{A.P}^{x_1} (e_3 - g_3) dx \\ \text{水平曲げモーメント} \quad N_H'(x_1) &= \int_{A.P}^{x_1} (x - x_1)(e_3 - g_3) dx \\ \text{ox 軸まわりの振りモーメント} \quad M_T'(x_1) &= \int_{A.P}^{x_1} (e_5 - g_5) dx \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Fig. 3 Positive Direction of the Wave Loads

ここで $e_2 = -xe_1$, $e_4 = xe_3$, $g_2 = -xg_1$, $g_4 = xg_3$ の関係を考慮すれば (25) 式は E'_i, G'_i を用いてそれぞれ次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} F_V'(x_1) &= E_1' - G_1' \\ M_V'(x_1) &= x_1 \cdot F_V'(x_1) + E_2' - G_2' \\ F_H'(x_1) &= E_3' - G_3' \\ M_H'(x_1) &= -x_1 \cdot F_H'(x_1) + E_4' - G_4' \\ M_T'(x_1) &= E_5' - G_5' \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

ただし, E'_i, G'_i の値は Appendix に示した運動方程式の諸係数および波浪強制力の計算において積分を A, P から x_1 まで行ったもので与えられる。すなわち, A, P から x_1 までの積分による運動方程式の係数を $A_{ij}', B_{ij}', C_{ij}'$ とすれば G'_i は次式のようにも書ける。

$$G'_i = \sum_{j=1}^5 (A_{ij}' \cdot \ddot{R}_j + B_{ij}' \cdot \dot{R}_j + C_{ij}' \cdot R_j) \quad (27)$$

さらに式 (26) は $o-xyz$ の空間固定座標系での波浪荷重の式であるため, 横揺を考慮に入れ船体固定座標系への変換を行う。水平剪断力および水平曲げモーメントには静水中垂直剪断力の横揺による成分を加えることによって⁶⁾,

垂直剪断力:

$$F_V(x_1) = F_V'(x_1) \cos \phi_0 - F_H'(x_1) \cdot \sin \phi_0$$

垂直曲げモーメント:

$$M_V(x_1) = M_V'(x_1) \cos \phi_0 - M_H'(x_1) \cdot \sin \phi_0$$

水平剪断力:

$$F_H(x_1) = F_H'(x_1) \cos \phi_0 + F_V'(x_1) \sin \phi_0 + \int_{A.P}^{x_1} (w - \rho g S_0) dx \cdot \sin \phi_0$$

水平曲げモーメント:

$$M_H(x_1) = M_H'(x_1) \cos \phi_0 + M_V'(x_1) \cdot \sin \phi_0 + \int_{A.P}^{x_1} (x - x_1) (w - \rho g S_0) dx \cdot \sin \phi_0$$

振りモーメント $M_T(x_1) = M_T'(x_1)$

(28)

ここで, S_0 : 静水中での横断面積

3 実験と計算条件

3.1 模型実験

大波高波浪中での船体運動および波浪荷重の測定実験に用いた運動計測装置, 模型の重量分布および主要寸法, 実験状態をそれぞれ Fig. 4, 5, Table 1, 2 に示す。実験に際しては heave rod の重量を減少させるため heave rod ballancing weight を, yaw drift 防止のため yaw drift ballancing spring を装着し実験を行った⁷⁾。実験で用いた波の波高は水槽の造波能力内で極力大波高を得ることとし $\omega\sqrt{L/g} < 2.0$ では約 12cm, $2.0 \leq \omega\sqrt{L/g} \leq 2.6$ では約 8cm, $\omega\sqrt{L/g} > 2.6$ では約 6cm とした。計測は 5 自由度の船体運動と船体中央での $F_V, M_V, F_H,$

Fig. 4 Model Ship Configuration

Fig. 5 Weight Distribution of the Model

Table 1. Principal particulars of the Model

Length (LBP)	= 2.500 m
Breadth (B)	= 0.3629 m
Draft (d)	= 0.1357 m
Depth (D)	= 0.2357 m
Displacement (W)	= 70.604 kgf
Trim	= 0.0
KM	= 0.1495 m
KG	= 0.1209 m
GM	= 0.0286 m
Gyradius in Roll	= 0.3064 B
Gyradius in Yaw (about Σ)	= 0.2216 LBP
Rolling Period	= 1.45 sec
LCG	= 0.0373 m aft Σ
x_o'	= -0.292 m
y_o'	= 0.000 m
z_o'	= 0.0135 m (KO = 0.1222 m)
W_H (heave rod, ballancing weight)	= 5.27 kgf
W_S (weight of sway subcarriage)	= 15.63 kgf (= 0.2214 W)
K_o (yaw ballancing spring const.)	= 3.352 kgf-m/rad.
Z_B (block gage axis above ox axis)	= 0.0144 m

M_H, M_T の 5 つの波浪荷重, S.S. $7^{1/2}$ における F_V, M_V の 2 つの波浪荷重に対し行った。本報では紙面関係上, 船体運動と船体中央での波浪荷重のみを示す。

3.2 計算条件

運動計測装置, すなわち heave rod と heave rod ballancing weight, yaw drift ballancing spring, そ

Table 2. Test Conditions

$\chi = 0^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 300^\circ, 330^\circ$
 $F_n = 0.0$
 $\omega\sqrt{L/g} = 1.2, 1.5, 1.8, 2.0, 2.3, (2.44), 2.6, (2.73),$
 $3.0, (3.24), 3.5, (3.73), 4.0$
 Wave Height : 12cm ; $\omega\sqrt{L/g} < 2.0$
 8cm ; $2.0 \leq \omega\sqrt{L/g} \leq 2.6$
 6cm ; $2.6 < \omega\sqrt{L/g}$
 ただし, () 内の $\omega\sqrt{L/g}$ については一部の χ
 に対してのみ実施

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Fig.6 Motion Responses

の他 sway subcarriageなどの影響を考慮に入れ計算を行った。また、大角度横揺時の横揺減衰係数 B_{55} を得るため、別途強制横揺実験を行い計算にはその結果を用いた。また、非線形波浪荷重の計算には船体断面の喫水変化のみを考慮し、縦および横運動の連成は考慮しない非線形計算法 (NON 1) と断面の喫水変化および縦・横運動の連成をも考慮した非線形計算法 (NON 2) とを用いた。このほか、断面の横揺れ減衰力の船長方向分布 $b_{55}(x)$, 断面重心高さ $Kg(x)$, 断面 2 次モーメントの分布 $i_{xx}(x)$ は次のような仮定に従うこととした⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} b_{55}(x) &\propto S_0(x) \\ Kg(x) &= KG \\ i_{xx}(x) &\propto w(x)^2 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

ここで KG は船全体の重心高さである。また、船体運動および波浪荷重の計算に用いた時間間隔は $T_e/32$ (T_e は出会周期) であり、断面流体力係数は喫水方向は $d/13.5$ (d は喫水) の間隔でキールから甲板まで、船体傾斜角は 0° から 3° 間隔で最大 30° までのそれぞれの場合に対して周波数別 (9 種) に求めた流体力係数の Table か

ら内挿法により推定した。

4 実験結果と計算結果との比較および考察

4.1 船体運動

先にも述べたように船体運動の実験および計算結果は全て○点でのものである。ここでは $\chi=120^\circ$ の結果のみを Fig. 6 に示す。Heave, pitch, roll は +peak, -peak 値を区別して示すが, sway, yaw は実験, 計算においてともに drift が生じるため運動の平均振幅だけを示す。Heave, pitch には, 僅かではあるが, +peak と -peak の差が現われた非線形計算 (NON 1, NON 2) はその現象を定性的にも定量的にもよく説明している。線形計算 (O. S. M) も長波長領域では非線形計算による +peak, -peak の間の値を示し, heave における短波長領域での小さな差を除けば実験値との一致度は良いとい

える。一方, sway, yaw の場合には線形計算, NON 1, NON 2 の間の差も小さくなく, いずれも実験結果と良好対応をしている。roll も固有周期付近を除けば線形計算でも十分推定できるが, NON 1 と NON 2 はともに短波長領域での +, -peak 値の差 (steady heeling) をよく説明している。全般的には roll 固有周期付近を除けば NON 1 と NON 2 との差はほとんどなく線形計算でも大波高波浪中での船体運動の推定が十分できるといってよいであろう。

4.2 縦波浪荷重

$\chi=300^\circ, 120^\circ$ の船体中央の F_V, M_V の +peak と -peak 値に対する比較結果を Fig. 7, 8 に示す。 $\hat{F}_V, \hat{M}_V$ はそれぞれ $\rho g L B a, \rho g L^2 B a$ (L =船長, B =船幅) で無次元化した値を表わす。全波長領域にわたって+と-peak 値の顕著な差が見られる。NON 2 と実験結果は非

Fig. 7 Vertical Shear Forces

Fig. 8 Vertical Bending Moments

Fig. 9 Horizontal Shear Forces

Fig. 10 Horizontal Bending Moments

(a)

(b)

(c)

Fig. 11 Torsional Moments

常に良い一致度を示し、roll 固有周期付近で NON 1 と NON 2 とに若干の差があることを除けば、NON 1 も比較的良い対応をしている。このことから縦波浪荷重の+、-peak 値の差は喫水の時間的変化を考慮することによって説明できるというてよい。全般的に線形計算は非線形計算による +peak と -peak の間にあるが、 $\hat{F}_V$ では $\chi=120^\circ$ の場合波長が短くなると実験値との一致度は極端に悪くなる。

4.3 横波浪荷重

Fig. 9~11 には $\chi=300^\circ, 150^\circ, 120^\circ$ での船体中央の F_H, M_H, M_T を示す。 $\hat{F}_H$ は $\rho g L B a$, $\hat{M}_H$ と $\hat{M}_T$ は $\rho g L^2 B a$ で無次元化した値を表わす。 F_H の場合、NON 2 と実験結果との一致度は非常に良い。Roll 固有周期付近を除けば NON 1 と NON 2 との差はほとんどない。一方、線形計算は +peak と -peak の定量的な相違を推定できないが、定性的には F_H の変化の傾向はよく説明している。しかし $\chi=120^\circ$ の短波長域では、線形計算は F_H を過大に評価している。

M_H に対しても F_H とほとんど同様のことがいえる。線形計算、NON 1、NON 2 とともに横波に近くなると ($\chi=300^\circ, 120^\circ$) 短波長域でその対応がすこし悪くなることを除けば、roll 固有周期付近を含め NON 2 と実験結果との一致度はよい。roll 固有周期付近を除けば NON 1 と NON 2 との差はほとんどないことから F_H, M_H とともに縦および横流体力の連成の効果は大きくないと判断できる。

M_T の場合、線形計算は roll 固有周期付近で実験結果との顕著な差があるが、線形計算では正確な roll の推定ができないためであると考えられる。一方、 $\chi=300^\circ, 120^\circ$ で波長の短い領域での NON 1 の推定精度が悪い。NON 1 と NON 2 の変化の傾向はほぼ同様であるが短波長領域では大きな差があり実験値は NON 2 に近いことから、 M_T は喫水変化だけではなく横揺による縦・横流体力の連成が非線形性の他の重要な原因であることがわかる。

4.4 波浪荷重の時刻歴

波浪荷重の非線形性の原因を調べるため、その時刻歴を比較したのが Fig. 12 である。入射波による成分 (添字 E)、船体運動による成分 (添字 R) に分けて比較するとともにそれらの和である波浪荷重の時刻歴を実験結果と比較した。 F_V と M_V の各成分において、NON 1 および NON 2 と線形計算との間にはかなりの位相差があるが、それらの和である波浪荷重自体はかなり似た位相を持つことがわかる。 F_V, M_V とともに強い非線形挙動をし、NON 1 と NON 2 は実験値とのよい対応を示している。roll が大きい場合であるにもかかわらず、NON 1 と NON 2 との差が僅かであることから非線形性の主要

原因は喫水の変化であると思われる。

F_H, M_H の場合には、各成分および全体の波浪荷重も非線形性が強くない。一方、非線形計算と線形計算による各成分間の相違は位相差も含めそれほど顕著でないにもかかわらず、全体の波浪荷重では顕著な位相差が生じることが興味ある事実である。

M_T の各成分は計算法により大きな位相差を有する

が、 M_T 自体の位相差はそれほど大きくない。NON2 と実験結果との一致度はよく、roll 固有周期付近ではむしろ NON1 と NON2 との差がほとんどないことがわかる。

4.5 波浪荷重の波高依存度

波浪荷重の波高依存度を調べるため、 $X=300^\circ, \omega\sqrt{L/g}=3.0$ での波浪荷重の船長方向分布を非線形計算(NON

Fig. 12 Time History of Wave Loads

(a)

(b)

Fig. 13 Distribution of Wave Loads vs. Wave Heights

2) によって求めた結果を Fig. 13 に示した。

波高の変化による $\hat{F}_V$ の変化は大きく、船首部側と船尾部側の変化の傾向が逆となる。 $\hat{M}_V$ の場合にも大きな波高依存性を示し大波高になると sagging moment は増加し、hogging moment は減少する。

$\hat{F}_H$, $\hat{M}_H$ の波高依存度は大きくないが、 $\hat{M}_T$ の波高依存度は小さくない。 $H_w/\lambda=1/44$ と $H_w/\lambda=1/22$ との比較から、ある程度波高が大きくなると一側の変化はほとんどなく十側のみに変化が起こることがわかる。

5 結 論

以上の実験結果と計算結果との比較検討により次のよ

うな結論を得た。

- (1) 船体運動は大波高においてもほぼ線形性を有し、roll の固有周期付近および heave, pitch における +, -peak などの推定を除けば実用的な観点から見る限り線形計算で十分推定できる。
 - (2) F_V, M_V の縦波浪荷重は大波高になると +peak と -peak との差が大きく、非常に強い非線形挙動を示す。非線形性の主な原因は時間的な喫水変化で本計算法による結果と実験値の一致度はよい。
 - (3) F_H, M_H の場合は大波高においてもほぼ線形性を有し線形計算でもある程度推定できるが、+, -peak 値を含みより正確な推定をするためには非線形計算が必要となり本計算法が有効である。
 - (4) M_T の非線形性には喫水の時間的な変化よりも縦・横流体力の連成効果がより顕著な影響を及ぼし、特に波長が短くかつ横波に近くなるほどこうした傾向が強い。また本計算法 (NON 2) による計算値は実験値をよく説明している。
- 以上の結論を総合すると次のようにいえる。
- (5) 大波高波浪中での波浪荷重のより正確な推定のためには非線形計算を行う必要があり、Ordinary Strip Method に若干の修正を施す程度の実用的な本計算法でも十分有効であると思われる。

終りに臨み、実験に協力いただいた小柳雅志郎助手、和田孝、川村武男技官その他運動性能研究室の諸氏、および本研究の実験を卒業論文の一環として実施された田中人、前田和宏の両氏の方々に心から感謝いたします。なお、計算には東京大学大型計算機センターの HITAC M 280 H, S 810 を使用したこと、また本研究は昭和 60 年度科学研究費の総合研究の一環として行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 藤野正隆, 尹 範相, 河田 潤, 吉野亥三郎: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究 (第 1 報), 日本造船学会論文集, 第 156 号 (1984).
- 2) 小林正典: 船体傾斜時の波浪中の運動について, 西部造船会々報, 第 51 号 (1975).
- 3) 慎 燦益: 傾斜船の上下揺と横揺れの連成作用について, 西部造船会々報, 第 62 号 (1981).
- 4) 藤野正隆, 桜井和之: ストリップ法による横揺れ波浪強制力の推定について, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (1983).
- 5) Frank, W. and Salvesen, N: "The Frank Close-Fit Ship-Motion Computer Program", NSRDC Report (1970).
- 6) 新開明二, 福田淳一: 波浪中の船体に誘起される水平方向剪断力と曲げモーメントの計算法について, 九州大学工学集報, 第 55 巻, 第 2 号 (1982).
- 7) 竹沢誠二, 小林顕太郎, 小保方準: 斜波中曳航船体運動および波浪荷重試験, 日本造船学会論文集, 第 149 号 (1981).
- 8) 日本造船研究協会: 波浪荷重推定法の比較検討に関する調査研究, 造研報告, 第 98 号 (1983).

Appendix: 運動方程式の係数及び波浪強制力

以下には前進速度のある一般的な場合について示すが、本文中の計算では $u=0$ としている。また積分および end term の下限, 上限がそれぞれ A, P, F, P であるが、その記述を省略する。

$$A_{11} = \int \frac{w}{g} dx + \int m_{HH} dx + m_H$$

$$A_{12} = - \int \frac{w}{g} x dx - \int m_{HH} \cdot x dx$$

$$A_{13} = \int m_{HS} dx$$

$$A_{14} = \int m_{HS} \cdot x dx$$

$$A_{15} = \phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx + \int m_{HRO} dx$$

$$A_{21} = - \int \frac{w}{g} x dx - \int m_{HH} \cdot x dx = A_{12}$$

$$A_{22} = \int \frac{w}{g} x^2 dx + \int m_{HH} \cdot x^2 dx$$

$$A_{23} = - \int m_{HS} \cdot x dx = -A_{14}$$

$$A_{24} = - \int m_{HS} \cdot x^2 dx$$

$$A_{25} = -\phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') x dx - \int m_{HRO} \cdot x dx$$

$$A_{31} = \int m_{SH} dx = A_{13}$$

$$A_{32} = - \int m_{SH} \cdot x dx = A_{23}$$

$$A_{33} = \int \frac{w}{g} dx + \int m_{SS} dx + m_S$$

$$A_{34} = \int \frac{w}{g} x dx + \int m_{SS} \cdot x dx$$

$$A_{35} = \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \phi_0^2\right) + \int m_{SRO} dx$$

$$A_{41} = \int m_{SH} \cdot x dx = A_{14}$$

$$A_{42} = - \int m_{SH} \cdot x^2 dx = A_{24}$$

$$A_{43} = \int \frac{w}{g} x dx + \int m_{SS} \cdot x dx = A_{34}$$

$$A_{44} = \int \frac{w}{g} x^2 dx + \int m_{SS} x^2 dx$$

$$A_{45} = \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') x dx \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \phi_0^2\right) + \int m_{SRO} \cdot x dx$$

$$A_{51} = \phi_0 \cdot \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx + \int m_{HRO} dx = A_{15}$$

$$A_{52} = -\phi_0 \cdot \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') x dx - \int m_{HRO} \cdot x dx = A_{25}$$

$$A_{53} = \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx + \int m_{SRO} dx$$

$$\begin{aligned}
A_{54} &= \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') x dx + \int m_{SRO} \cdot x dx \\
A_{55} &= \int i_{xxg} dx + \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g')^2 dx + \int m_{RRO} dx \\
&= \int i_{xxg} dx + (z_0' - z_g')^2 \int \frac{w}{g} dx + \int m_{RRO} dx \\
B_{11} &= \int N_{HH} dx - u[m_{HH}] \\
B_{12} &= - \int N_{HH} x dx + u[m_{HH} \cdot x] + u \int m_{HH} dx \\
B_{13} &= \int N_{HS} dx - u[m_{HS}] \\
B_{14} &= \int N_{HS} \cdot x dx - u[m_{HS} \cdot x] - u \int m_{HS} dx \\
B_{15} &= \int N_{HRO} dx - u[m_{HRO}] + \phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx \\
B_{21} &= - \int N_{HH} \cdot x dx + u[m_{HH} \cdot x] - u \int m_{HH} dx \\
B_{22} &= \int N_{HH} \cdot x^2 dx - u[m_{HH} \cdot x^2] \\
B_{23} &= - \int N_{HS} \cdot x dx + u[m_{HS} \cdot x] - u \int m_{HS} dx \\
B_{24} &= - \int N_{HS} \cdot x^2 dx + u[m_{HS} \cdot x^2] \\
B_{25} &= - \int N_{HRO} \cdot x dx + u[m_{HRO} \cdot x] \\
&\quad - \phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') x dx - u \int m_{HRO} dx \\
B_{31} &= \int N_{SH} dx - u[m_{SH}] = B_{13} \\
B_{32} &= - \int N_{SH} \cdot x dx + u[m_{SH} \cdot x] + u \int m_{SH} dx = -B_{14} \\
B_{33} &= \int N_{SS} dx - u[m_{SS}] \\
B_{34} &= \int N_{SS} x dx - u[m_{SS} \cdot x] - u \int m_{SS} dx \\
B_{35} &= \int N_{SRO} dx - u[m_{SRO}] \\
B_{41} &= \int N_{SH} \cdot x dx - u[m_{SH} \cdot x] + u \int m_{SH} dx = -B_{23} \\
B_{42} &= - \int N_{SH} \cdot x^2 dx + u[m_{SH} \cdot x^2] = B_{24} \\
B_{43} &= \int N_{SS} \cdot x dx - u[m_{SS} \cdot x] + u \int m_{SS} dx \\
B_{44} &= \int N_{SS} \cdot x^2 dx - u[m_{SS} \cdot x^2] \\
B_{45} &= \int N_{SRO} \cdot x dx - u[m_{SRO} \cdot x] + u \int m_{SRO} dx \\
B_{51} &= \phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx \\
&\quad + \int N_{HRO} dx - u[m_{HRO}] = B_{15} \\
B_{52} &= - \phi_0 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') \cdot x dx \\
&\quad - \int N_{HRO} \cdot x dx + u[m_{HRO} \cdot x] + u \int m_{HRO} dx \\
B_{53} &= \int N_{SRO} dx - u[m_{SRO}] = B_{35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{54} &= \int N_{SRO} \cdot x dx - u[m_{SRO} \cdot x] - u \int m_{SRO} dx \\
B_{55} &= \int N_{RRO} dx - u[m_{RRO}] \Rightarrow A|\phi_0| + B \text{ from EXP.} \\
C_{11} &= 0 \\
C_{12} &= u \int N_{HH} dx - u^2[m_{HH}] \\
C_{13} &= 0 \\
C_{14} &= -u \int N_{HS} dx + u^2[m_{HS}] \\
C_{15} &= 0 \\
C_{21} &= 0 \\
C_{22} &= -u \int N_{HH} \cdot x dx + u^2[m_{HH} \cdot x] - u^2 \int m_{HH} dx \\
C_{23} &= 0 \\
C_{24} &= u \int N_{HS} \cdot x dx - u^2[m_{HS} \cdot x] + u^2 \int m_{HS} dx \\
C_{25} &= 0 \\
C_{31} &= 0 \\
C_{32} &= u \int N_{SH} dx - u^2[m_{SH}] = -C_{14} \\
C_{33} &= 0 \\
C_{34} &= -u \int N_{SS} dx + u^2[m_{SS}] \\
C_{35} &= -\phi_0^2 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') dx \\
C_{41} &= 0 \\
C_{42} &= u \int N_{SH} \cdot x dx - u^2[m_{SH} \cdot x] + u^2 \int m_{SH} dx = C_{24} \\
C_{43} &= 0 \\
C_{44} &= -u \int N_{SS} \cdot x dx + u^2[m_{SS} \cdot x] \\
&\quad - u^2 \int m_{SS} \cdot dx + K_0 \\
C_{45} &= -\phi_0^2 \int \frac{w}{g} (z_0' - z_g') \cdot x dx \\
C_{51} &= 0 \\
C_{52} &= u \int N_{HRO} dx - u^2[m_{HRO}] \\
C_{53} &= 0 \\
C_{54} &= -u \int N_{SRO} dx + u^2[m_{SRO}] \\
C_{55} &= 0 \tag{A-1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_1 &= \int \rho g S_0 dx + \rho g \iint_{C'} \{ -z' + a(1 + e^{-Kz'} - e^{-K\zeta}) \\
&\quad \times \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t) \} dy' dx \\
&\quad + \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 \iint_{C'} \{ e^{-2Kz'} - e^{2K\zeta} \} dy' dx \\
&\quad + \int \left\{ m_{HH} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\zeta_e}{dt} \right) + m_{HS} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\eta_e}{dt} \right) \right. \\
&\quad \left. + m_{HRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\gamma_e}{dt} \right) \right\} dx \\
&\quad + \int \left\{ N_{HH} \frac{d\zeta_e}{dt} + N_{HS} \cdot \frac{d\eta_e}{dt} + N_{HRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} dx \\
&\quad - u \left[m_{HH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{HS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{HRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right] \tag{A-2}
\end{aligned}$$

$$E_2 = \int \rho g S_0 (-x) dx$$

$$\begin{aligned}
& + \rho g \iint_{C'} \{-z' + a(1 + e^{-Kz'} - e^{-K\zeta}) \\
& \times \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t)\} (-x) dy' dx \\
& + \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 \iint_{C'} \{e^{-2Kz'} - e^{-2K\zeta}\} (-x) dy' dx \\
& + \int \left\{ m_{HH} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\zeta_e}{dt} \right) + m_{HS} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\eta_e}{dt} \right) \right. \\
& \left. + m_{HRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\gamma_e}{dt} \right) \right\} (-x) dx \\
& + \int \left\{ N_{HH} \frac{d\zeta_e}{dt} + N_{HS} \frac{d\eta_e}{dt} + N_{HRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} (-x) dx \\
& + u \left[\left(m_{HH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{HS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{HRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right) \cdot (-x) \right] \\
& - u \int \left\{ m_{HH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{HS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{HRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} dx
\end{aligned} \quad (A-3)$$

$$\begin{aligned}
E_3 = & \rho g \iint_{C'} \{z' - a(1 + e^{-Kz'} - e^{-K\zeta}) \\
& \times \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t)\} dz' \cdot dx \\
& - \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 \iint_{C'} \{e^{-2Kz'} - e^{-2K\zeta}\} dz' dx \\
& + \int \left\{ m_{SH} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\zeta_e}{dt} \right) + m_{SS} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\eta_e}{dt} \right) \right. \\
& \left. + m_{SRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\gamma_e}{dt} \right) \right\} dx \\
& + \int \left\{ N_{SH} \frac{d\zeta_e}{dt} + N_{SS} \frac{d\eta_e}{dt} + N_{SRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} dx \\
& - u \left[m_{SH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{SS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{SRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right] \quad (A-4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_4 = & \rho g \iint_{C'} \{z' - a(1 + e^{-Kz'} - e^{-K\zeta}) \\
& \cdot \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t)\} x dz' dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 \iint_{C'} \{e^{-2Kz'} - e^{-2K\zeta}\} x dz' dx \\
& + \int \left\{ m_{SH} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\zeta_e}{dt} \right) + m_{SS} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\eta_e}{dt} \right) \right. \\
& \left. + m_{SRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\gamma_e}{dt} \right) \right\} x dx \\
& + \int \left\{ N_{SH} \frac{d\zeta_e}{dt} + N_{SS} \frac{d\eta_e}{dt} + N_{SRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} x dx \\
& - u \left[\left(m_{SH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{SS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{SRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right) x \right] \\
& + u \int \left\{ m_{SH} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{SS} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{SRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} dx
\end{aligned} \quad (A-5)$$

$$\begin{aligned}
E_5 = & \rho g \iint_{C'} \{-z' + a(1 + e^{-Kz'} - e^{-K\zeta}) \\
& \times \cos(K \cos \chi \cdot x' - K \sin \chi \cdot y' - \omega_e t)\} (y dy' + z dz') dx \\
& + \frac{1}{2} \rho a^2 \omega^2 \iint_{C'} \{e^{-2Kz'} - e^{-2K\zeta}\} (y dy' + z dz') dx \\
& + \int w(z_0' - z_g') dx \cdot \sin \phi_0 \\
& + \int \left\{ m_{HRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\zeta_e}{dt} \right) + m_{SRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\eta_e}{dt} \right) \right. \\
& \left. + m_{RRO} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{d\gamma_e}{dt} \right) \right\} dx \\
& + \left\{ N_{HRO} \frac{d\zeta_e}{dt} + N_{SRO} \frac{d\eta_e}{dt} + N_{RRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right\} dx \\
& - u \left[m_{HRO} \frac{d\zeta_e}{dt} + m_{SRO} \frac{d\eta_e}{dt} + m_{RRO} \frac{d\gamma_e}{dt} \right] \quad (A-6)
\end{aligned}$$

ただし, m_H : heave rod と ballancing weight の質量
 m_S : sway subcarriage の質量
 K_O : yaw drift ballancing spring constant