(昭和 46 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

一軸高速コンテナ船の斜め波中における動揺特性

正員 高石 敬史* 正員 吉野 泰平*
正員 高木 又男** 正員 斎藤 公男***

On the Motions of a High-Speed Container ship with a
Single Screw in Oblique Waves

by Yoshifumi Takaishi, *Member* Taihei Yoshino, *Member*
Matao Takagi, *Member* Kimio Saito, *Member*

Summary

This paper deals with the motions of a high-speed container ship at sea, which is chosen as the prototype of the ships recently built in Japan.

The model experiments in regular and irregular oblique waves were performed in order to compare their results with those obtained by the theoretical calculations based on the "strip method", not only as to longitudinal motions but also lateral motions.

The agreements between calculated and measured amplitudes of motions are very good for pitching, fairly good for vertical and lateral accelerations, good for rolling, while the difference is considerable in yawing.

The results of the theoretical calculations covering wide range of sea conditions are also represented as the contour maps of the amplitude, by which the effects of ship speed, encounter angle to wave and wave period on severe motions of the ship are discussed. As the results, for example, the cause of the large rolling motion which has been frequently experienced at such high-speed vessels in quartering sea is shown.

1 緒 言

船舶の耐航性に対する関心は最近にわかに高まった感がある。波浪外力を推定する、シーマージンを適確に把握する、あるいは、合理的なウェザールーチングの方法を開発するなど今後解決すべき問題が数多くあるが、実際海面における船体運動を推定する手法を確立することが当面の緊急な課題と思われる。

正面向い波中の船の動揺の推定については、すでに多くの理論的実験的研究がおこなわれ、ストリップ法を中心とする線形理論の有効性が確認されつつある。これに対し、横揺れを含む斜め波中の船の動揺の推定に関し、理論と実験とを比較した例はあまり見られないので、横動揺に対してストリップ法を適用することの有用性には未だ解答が与えられていない。そこで本研究では、これを解明する一段階として、渡辺の方法¹⁾を拡張して、福田²⁾および田才³⁾が導いた運動方程式を解いて得られる結果を、斜め波中の模型実験結果と比較した。その際、一番推定の難かしい横揺れの減衰力については、静水中の自由横揺れ試験から実験的に求めた値を、運動方程式に代入した。

本研究で使用した船型は、現在北太平洋航路に就航している一軸高速コンテナ船の平均的なものであるが、こ

* 船舶技術研究所

** 日立造船(株)技術研究所

*** 大阪大学工学部

これらの設計に必要な資料を提供するとともに、波浪中におけるはげしい動揺を回避するための操船の効果について参考資料とすることも本研究の一つの目的である。

2 供 試 船

研究の対象に選んだ船型は、1969年現在我が国で就航しているコンテナ船のうちのほぼ同型である5隻の船型の平均的なものである。これは、日本造船研究協会 SR 108 研究部会が作成したもので、実船の線図を Fig. 1 に、実船と模型船の要目を Table 1 にそれぞれ示した。理論計算、模型実験とも対象コンテナ船の運航の実情を考慮し、計画満載状態でなく、常用状態とも言うべき載荷状態についておこなわれた。

Fig. 1 Body Plan and Bow and Stern Profile of the Ship

Table 1 Principal Dimensions of the Ship and the Model

Items			Ship	Model
Length betw. P. P.	L	(m)	175.000	4.500
Breadth Mld.	B_0	(m)	25.400	0.653
Depth Mld.	D	(m)	15.400	0.396
Draft Designed (Tested Condition)	d_0	(m)	9.500	0.244
Draft fore	d_f	(m)	8.000	0.2057
Draft aft	d_a	(m)	9.000	0.2314
Draft mean	d_m	(m)	8.500	0.2186
Trim by the Stern	t	(m)	1.000	0.0257
Block Coefficient	C_B		0.562	0.562
Displacement Volume	∇	(m ³)	21,222	0.3608
Position of C. G.	lcb	(m)	3.164	0.0813
Height of C. G.	$\overline{KG}$	(m)	9.39	0.2414
Metacentric Height	$\overline{GM}$	(m)	1.00	0.0257
Radius of Gyration	κ			0.24
Rolling Period	T_φ	(sec)	18	2.886
Rudder Area	A_R	(m ²)	26.69	176.3 cm ²
Propeller Diameter	D_p	(m)	6.500	0.1672
Bilge	Depth	(m)	0.45	0.0116
	Total Length		0.25 L	0.25 L
Keel	Length fore	(m)	19.688	0.506
	Length aft	(m)	24.063	0.619

3 理論計算の方法

3.1 座 標 系

Fig. 2 に示すように、鉛直上向きを正とする z 軸を用いた右手系による空間固定の座標系 $O-XYZ$ および、船体固定の座標系 $O'-xyz$ を定める。波は X の負の方向から正の方向に進み、船はその波に対して χ の角度で斜行するものとする。すなわち、 $\chi=0^\circ$ が追い波、 $\chi=180^\circ$ が向い波状態に対応する。

Fig. 2 Co-ordinate System of Ship Motions

3.2 規則波中における動揺

3.2.1 対称運動 対称運動の運動方程式として、福田²⁾が渡辺の正面規則波中での理論¹⁾を斜め波中に拡張したものをを用いる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} a\ddot{z}_G + b\dot{z}_G + cz_G - d\ddot{\theta} - e\dot{\theta} - g\theta &= F_{ze} \\ A\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta - D\ddot{z}_G - E\dot{z}_G + Gz_G &= M_{\theta e} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $a \sim g, A \sim G$: 運動方程式の係数

$F_{ze} = F_{zc} \cos \omega_e t - F_{zs} \sin \omega_e t$: 上下揺れ強制力

$M_{\theta e} = M_{\theta s} \sin \omega_e t - M_{\theta c} \cos \omega_e t$: 縦揺れ強制モーメント

z_G, θ : 重心の上下揺れおよび縦揺れ

船体断面を Lewis Form で近似した場合の附加質量および減衰係数は、田才⁴⁾の方法で田才・高木⁵⁾が計算した値を使用する。

3.2.2 非対称運動 非対称運動の運動方程式としては、田才³⁾が導いた左右揺れ、船首揺れおよび横揺れの連成方程式を用いる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} a\ddot{y}_G + b\dot{y}_G + c\ddot{\psi} + d'\dot{\psi} - e\ddot{\phi} - f\dot{\phi} &= F_{ye} \\ A\ddot{\psi} + B\dot{\psi} - p\ddot{\phi} - q\dot{\phi} + c\ddot{y}_G + d\dot{y}_G &= M_{\psi e} \\ E\ddot{\phi} + F\dot{\phi} + G\phi - e\ddot{y}_G - f\dot{y}_G - p\ddot{\psi} - q\dot{\psi} &= M_{\phi e} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $a \sim f, A \sim G, p \sim q$: 運動方程式の係数

$F_{ye} = F_{yc} \cos \omega_e t - F_{ys} \sin \omega_e t$: 左右揺れの強制力

$M_{\psi e} = M_{\psi c} \cos \omega_e t - M_{\psi s} \sin \omega_e t$: 船首揺れの強制モーメント

$M_{\phi e} = M_{\phi s} \sin \omega_e t - M_{\phi c} \cos \omega_e t$: 横揺れの強制モーメント

y_G, ψ, ϕ : 重心の左右揺れ、船首揺れ、横揺れ

またこの計算において、

(1) 横揺れの見掛けの慣性モーメント $I_x + J_x$ は、その固有周期 T_ϕ から求める。すなわち、

$$T_\phi = 2\pi \sqrt{(I_x + J_x) / (W \cdot \overline{GM})} \quad \text{から} \quad I_x + J_x = W \cdot \overline{GM} T_\phi^2 / (4\pi)$$

あるいはこれを無次元化して、

$$\frac{I_x + J_x}{\rho L^5} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{W}{L^3} \cdot \frac{\overline{GM}}{L} \cdot \left(T_\phi \cdot \sqrt{\frac{g}{L}} \right)^2 \quad (3)$$

(2) 横揺れの減衰係数 $2\bar{N}_{\phi e}$ は、静水中の自由横揺れの実験から得られる κ_ϕ を使つて表わす。すなわち、その無次元化減衰係数は次式で与えられる。

$$\frac{2\bar{N}_{\phi e}}{\rho L^4 \sqrt{gL}} = \frac{I_x + J_x}{\rho L^5} \left(\omega_\phi \sqrt{\frac{L}{g}} \right) \kappa_\phi \quad (4)$$

ここで $\omega_\phi = 2\pi/T_\phi$

(3) 左右揺れ、船首揺れの減衰係数は造波減衰だけを考えている。また左右揺れ、船首揺れの前進速度による連成減衰項としては、左右揺れの方程式に対してのみ $\frac{W}{g} V \cdot \dot{\psi}$ を加えることとした³⁾。

3.3 規則波中の船体代表点における加速度

3.3.1 上下方向の加速度 任意断面位置 x における上下方向の変位は

$$Z = Z_c \cos \omega_e t - Z_s \sin \omega_e t = Z_0 \cos (\omega_e t + \varepsilon_z)$$

$$Z_c = z_{Gc} - (x - x_G) \theta_c$$

$$Z_s = z_{Gs} - (x - x_G) \theta_s$$

ただし, z_{Gc}, z_{Gs} : 上下揺れ z_G の $\cos$ 項および $\sin$ 項

θ_c, θ_s : 縦揺れ θ の $\cos$ 項および $\sin$ 項

x_G : 船長方向の重心位置

したがって, 上下方向の加速度は, 次式で表わされる。

$$\ddot{Z} = \ddot{Z}_c \cos \omega_e t - \ddot{Z}_s \sin \omega_e t = \ddot{Z}_0 \cos (\omega_e t + \varepsilon_z) \quad (5)$$

$$\ddot{Z}_c = -\omega_e^2 Z_c, \quad \ddot{Z}_s = -\omega_e^2 Z_s$$

3.3.2 横(船幅)方向の加速度 Fig. 3 に示すように, 任意の点 P に置かれた質量 m に加わる横向きの力を考えると

$$f = m\ddot{G}P - mg\varphi - m\ddot{y}$$

である。山内ほか⁶⁾による方法にしたがつて, f/m をもつて合成された横方向加速度とすると,

$$\ddot{Y} = \ddot{G}P - g\varphi - \{\ddot{y}_G + (x - x_G)\ddot{\psi}\} \quad (6)$$

すなわち,

$$\ddot{Y} = \ddot{Y}_c \cos \omega_e t - \ddot{Y}_s \sin \omega_e t = \ddot{Y}_0 \cos (\omega_e t + \varepsilon_Y)$$

$$\ddot{Y}_c = -\omega_e^2 \ddot{G}P_c - g\varphi_c + \omega_e^2 y_{Gc} + \omega_e^2 (x - x_G)\psi_c$$

$$\ddot{Y}_s = -\omega_e^2 \ddot{G}P_s - g\varphi_s + \omega_e^2 y_{Gs} + \omega_e^2 (x - x_G)\psi_s$$

ただし, y_{Gc}, y_{Gs} : 左右揺れ y_G の $\cos$ 項及び $\sin$ 項

ψ_c, ψ_s : 船首揺れ ψ の $\cos$ 項及び $\sin$ 項

φ_c, φ_s : 横揺れ φ の $\cos$ 項および $\sin$ 項

3.4 不規則波中の応答

不規則波中の応答のスペクトラムは線形重畳の方法で次式によつて求める。

$$S_{YY}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{ww}(\omega) \quad (7)$$

ただし, $S_{YY}(\omega)$: ある応答のスペクトラム密度関数

$S_{ww}(\omega)$: 不規則波のスペクトラム密度関数

$H(\omega)$: ある応答の規則波中応答関数

船が前進速度を有する場合は, ω の角周波数の波に対し船は ω_e の出会角周波数で運動するから, 船の応答の記録から得られるスペクトラムは $S_{YY}'(\omega_e)$ である。従つて実験より得られたスペクトラム密度と計算のそれとを比較するには, $S_{YY}(\omega)$ に $d\omega/d\omega_e$ を乗じて, ω_e 変数に変換する必要がある。本研究では, スペクトラム密度の比較はおこなわず, スペクトラム曲線の巨視的指標として分散の平方根を有義波高で割つた値をとつて比較する。分散 σ^2 は, 次式によつて, スペクトラムの面積として与えられる。

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S_{YY}(\omega) d\omega \quad (8)$$

以上の理論計算の数値計算は, 日立造船(株) HITAC 8500 および京都大学計算センター FACOM 230-60 によつておこなわれた。

4 模型実験の方法

模型実験は, 船舶技術研究所第三第一船舶試験水槽(角水槽)で, 無線操縦による自航模型船(長さ 4.5 m)

Fig. 4 Positions Where the Vertical and Lateral Accelerations Are Measured

を用いておこなわれた。実験装置は文献⁶⁾に示すものとはほぼ同じである。動揺に関する測定項目は, 縦揺れ角, 横揺れ角, 船首揺れ角速度, 重心の上下および横加速度, および Fig. 4 に示すような Sq. St. 8 における甲板上コンテナ位置の上下および横加速度の 7 点である。実験は, (1) Transient Water Wave 中の自由横揺れ試験, (2) 規則波中の試験, (3) 不規則波中の試験の 3 つに区別される。

4.1 Transient Water Wave 中の自由横揺れ試験

造波装置の運転を一定時間内で、波長が短波長から長波長まで連続的に変化するように運転すると、水槽の中の一定の場所においてすべての波が同時に重なり合う。このような波を Transient Water Wave と呼び、その波高記録を示すと Fig. 5 のようになる。そこで水槽のこの場所で模型船を波頂線

Fig. 5 A Record of Transient Water Wave Generated in the Tank

に平行に航走させると、波によつて船が一時的に横動揺を与えられ、波が過ぎ去つたあとは静水中を自由横揺れをしながら、航走する。その横揺れの記録を解析することにより減衰係数が求められる*。ここで求められた線形減衰係数 κ_ϕ は、(4) 式に代入され、理論計算に用いられる。前進速度に対する κ_ϕ の変化を示す実験結果は Fig. 6 のようになる。同じ図中に、Series 60, $C_B=0.6$ に対する Yamanouchi の実験値を併記した。

4.2 規則波中の試験

規則波中における試験は、 $\lambda/L=0.5\sim 2.87$ の間の 8 種類の波の中で、 $\chi=30^\circ\sim 180^\circ$ 間を 30° 間隔で、それぞれ船速を数点とりおこなわれた。波高は波長の $1/50$ 一定としたが、 $\lambda/L>2.5$ では $1/80$ とした。実験結果は、各状態ごとに、船速ベースに整理されそれらの点を結ぶ曲線が、一定の船速、たとえば $F_n=0.2$ または 0.3 を切る値を、その船速に対する実験値とし、計算結果との比較に用いた。船首揺れの実験値は、レートジャイロで測定した船首揺れ角速度の振幅 $\dot{\psi}_0$ を

$$\psi_0 = \dot{\psi}_0 / \omega_e \quad (9)$$

により、船首揺れの振幅 ψ_0 に換算したものである。

4.3 不規則波中の試験

水槽に発生させた不規則波は、I. S. S. C. による (10) 式で表現される Moskowitz-Pierson 型のスペクトラムを有する二次元（長波頂）不規則波である。

$$[r(\omega)]^2 = 0.11 H_0^2 \frac{T_v}{2\pi} \left(\frac{T_v \omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_v \omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \quad (10)$$

ここで、有義波高 H_0 および平均波周期 T_v は、風力の Beaufort Scale で 6, 7, 8, 9 および 10 に対応するものとして、Fig. 8 に示すような値をとつた。これは風力階級の平均風速を用い、第 12 回 I. T. T. C. の勧

Fig. 6 Damping Coefficient of Rolling

Fig. 7 Photograph of the Model Test in Oblique Waves

* その後の実験で、横揺れの固有周期と同じ波を 2~3 周期発生させた中の実験が、このような目的の試験に好都合であることを知つた。また、曳船台車を有する一般の試験水槽においては、曳航中の模型船に 1 時的に外力を機械的に加え自由横揺れを起こす方法が用いられる。両者は、重心点を拘束するか否かの違いがあり、(2) 式に代入する値としては、重心を拘束した後者の方法が合理的ではないかという考えもある。

Fig. 8 Energy Spectrum of the Irregular Waves

Fig. 9 Observed Wave Height and Period in a Area in the North Pacific Ocean⁸⁾

1.25 あたりで実験値が低く出ている。これは、田才らの実験⁹⁾でも見られるところである。この傾向は、St.8より重心の方で著しい。

5.1.2 横揺れ、横加速度 横揺れについては、計算と実験とは、同調点附近のはかにはかなり一致している。斜め追波中で、特に高速になるほど λ/L の広い範囲で

Fig. 10 Examples of Wave Spectra Generated in the Tank

告⁷⁾に示される風速と有義波高の関係、波高と周期の関係式などをあてはめて求めた値である。これを北太平洋の一海域で観測された値⁸⁾と比較すると Fig.9 のようになるので、かなり平均的な海象と考えてよさそうである。水槽に発生した不規則波のスペクトラムの1例を Fig.10 に示すが、横揺れ、横加速度の測定を主とした斜め追波中の実験では、縦揺れ、上下加速度の測定に重点をおいた向波、斜め向波中の実験に用いた Nominal Wave Height より低い波高を用いた。そして前者の実験では、 F_n が 0.28 附近の船速で、3 回別々の不規則波の中を航走させ、その平均値をとつたのに対し、後者の実験では F_n が 0.2~0.3 の間で船速を 3 種類変え、一定の不規則波の中をそれぞれ 1 回づつ航走させ、その結果の挿間から $F_n=0.25$ に対する値を求めた。

5 計算および実験結果の比較

5.1 規則波中の応答

規則波中における船の動揺の振幅応答を、 λ/L をベースに、 χ をパラメータにして、 $F_n=0.2$ および 0.3 について図示した。計算値を実線で、実験値を点で示す。それぞれの応答を示す図のリストは Table 2 に示す通りである。

5.1.1 上下揺れ、縦揺れ、上下加速度 縦揺れについては計算と実験とはよく一致している。上下加速度の場合は、縦揺れほどよく一致していない。とくに向波で $\lambda/L=1\sim$

Table 2 List of the Figures Representing Amplitude Response of Ship Motions

Motion	Speed	
	$F_n=0.2$	0.3
Heave	Fig. 11	12
Pitch	Fig. 13	14
Z-Acc at C.G.	Fig. 15	16
Z-Acc at St. 8	Fig. 17	18
Roll	Fig. 19	20
Y-Acc at C.G.	Fig. 21	22
Y-Acc at St. 8	Fig. 23	24
Sway	Fig. 25	26
Yaw	Fig. 27	28

Fig. 11 Heaving Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.2$

Fig. 12 Heaving Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.3$

Fig. 13 Pitching Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.2$

Fig. 14 Pitching Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.3$

Fig. 15 Amplitude of Vertical Acceleration at C.G. in Regular Waves, $F_n=0.2$

Fig. 16 Amplitude of Vertical Acceleration at C.G. in Regular Waves, $F_n=0.3$

Fig. 17 Amplitude of Vertical Acceleration at St. 8 in Regular Waves, $F_n=0.2$ Fig. 18 Amplitude of Vertical Acceleration at St. 8 in Regular Waves, $F_n=0.3$ Fig. 19 Rolling Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.2$ Fig. 20 Rolling Amplitude in Regular Waves, $F_n=0.3$ Fig. 21 Amplitude of Lateral Acceleration at C.G. in Regular Waves, $F_n=0.2$ Fig. 22 Amplitude of Lateral Acceleration at C.G. in Regular Waves, $F_n=0.3$ Fig. 23 Amplitude of Lateral Acceleration at St. 8 in Regular Waves, $F_n=0.2$ Fig. 24 Amplitude of Lateral Acceleration at St. 8 in Regular Waves, $F_n=0.3$

Fig. 25 Swaying Amplitude in Regular Waves, $Fn=0.2$ Fig. 26 Swaying Amplitude in Regular Waves, $Fn=0.3$ Fig. 27 Yawing Amplitude in Regular Waves, $Fn=0.2$ Fig. 28 Yawing Amplitude in Regular Waves, $Fn=0.3$

Fig. 29 Standard Deviation of Pitching in Irregular Waves

Fig. 30 Standard Deviation of Vertical Acceleration at C.G. in Irregular Waves

Fig. 31 Standard Deviation of Rolling in Irregular Waves

Fig. 32 Standard Deviation of Lateral Acceleration at C.G. in Irregular Waves

大きい横揺れを示すことが注目される。

横加速度については、局所的な違いは見られるが、全般としては良く一致している。

5.1.3 左右揺れ、船首揺れ 船首揺れの場合、計算と実験との間にかかなりの差が見られる。計算では、船速が大なるとき、横波中でも大きな船首揺れを生じる。

左右揺れは、計算では、船速が大なるとき斜め追波中で大きくなる。

5.2 不規則波中の応答

不規則波中における応答の標準偏差 σ をそのときの有義波高で割った値を、波の平均周期 T_0 を横軸に、 χ をパラメーターとして図示する。

5.2.1 縦揺れ、重心の上下加速度 Fig. 29 に縦揺れ、Fig. 30 に重心の上下加速度を示す。縦揺れでは、規則波中と同様に、実験値と計算値が非常によく一致している。これに対し、重心の上下加速度は、実験値が計算値より低く出ている。これらの結果から、次のようなことがわかる。

- (1) 縦揺れは速度によってあまり変化しないが、重心の上下加速度は、速度とともに増加の傾向にある。
- (2) 縦揺れは、風力が大となるに従って増大するが、重心の上下加速度はあまり増加しない。
- (3) 縦揺れは向波中で最大であるが、重心の上下加速度は、横波に近づく程大きくなる。

5.2.2 横揺れ、重心の横加速度 Fig. 31 に横揺れ、Fig. 32 に重心の横加速度を示す。両者とも、横波のほかは、実験値と計算値の一致はあまりよくない。これは後述するように、斜め追波中の実験では、船と波との出会数が少ないため、発生した波のスペクトラムと船が出会う波のスペクトラムとが対応しにくいと考えられる。これらの結果から、斜め追波中($\chi=60^\circ$)では、いずれの海象においても、横揺れが最大となることがわかる。

6 考 察

6.1 動 揺 特 性

6.1.1 船速の影響 縦揺れ、上下揺れの、いわゆる対称動揺に対する船速の影響は顕著でない。しかし、上下加速度は出会周波数の影響で速度の増加とともに増大する。従って減速の効果は、縦揺れなどの変位に利かず、加速度に利いてくる。

一方、横揺れ、船首揺れ、左右揺れ、横加速度などの非対称動揺に及ぼす船速の影響は著しい。例えば、横揺れ、横加速度の場合、船速を変えると動揺が大きくなる出会角が変化するから波浪の状況によつては船速を減らすことはこれらの運動軽減に有効であろう。高速のため特に目立つ現象には次のようなものが見られる。

- (1) 斜め追波中でかなり広い λ/L にわたって大きい横揺れ角を生じる。これは波との同調出会周波数が広い λ/L の値にわたるためである。
- (2) 横波中でも大きい船首揺れを生じることが計算結果では示されている。これは、波の orbital motion が、船体に対する cross flow の役割りをして不安定モーメントを生じ、これが波の強制力を生じることによる。
- (3) 計算では、左右揺れは斜め追波で大きい。

6.1.2 出会角の影響 船に対する波の状態が動揺に及ぼす影響を概観するため、それぞれの応答の振幅を、 $\lambda/L-\chi$ 平面上の等高線図にえがいた。これが Fig. 33~Fig. 41 である。また不規則波中の動揺を同じく等高線

Fig. 33 Contour Map of Heaving Amplitude in Regular Waves

Fig. 34 Contour Map of Pitching Amplitude in Regular Waves

Fig. 35 Contour Map of Amplitude of Vertical Acceleration at C.G. in Regular Waves

Fig. 36 Contour Map of Amplitude of Vertical Acceleration at St. 8 in Regular Waves

Fig. 37 Contour Map of Rolling in Regular Waves

Fig. 38 Contour Map of Amplitude of Lateral Acceleration at C.G. in Regular Waves

Fig. 39 Contour Map of Amplitude of Lateral Acceleration at St. 8 in Regular Waves

Fig. 40 Contour Map of Swaying Amplitude in Regular Waves

Fig. 41 Contour Map of Yawing Amplitude in Regular Waves

図として、 $T_0-\chi$ 平面にえがいたのが Fig. 42~Fig. 45 である。これらの図から、対称動揺では向波から斜め向波の広い出会角において、非対称動揺では、横波に近い斜め追波の比較的狭い出会角で、それぞれ大きな応答を生じることがわかる。なかでも、Fig. 44 に見られるように、不規則波中において、横揺れが斜め追波中で顕著になることは、これら実船でも屢々経験されること¹¹⁾を証明するもので、興味深い。これらの結果から、動揺が大となる領域と、比較的小さくなる領域とを表示すると Table 3 のようになる。

6.2 運動方程式について

本研究では、非対称の運動に関する運動方程式として田才によるものを用いたが、速度の影響による項の取扱いは種々問題がある。(2)式では、左右揺れ、船首揺れの前進速度による連成項として左右揺れ方程式に対してのみ、 $\frac{W}{g} \cdot V\dot{\phi}$ を加えているが、これに対応する項は船首揺れの方程式に対しても考慮すべきであり、また船の質量ではなく附加質量を取るのが合理的であると考えられる。船首揺れに関しては、しかしながら、前進速度がある場合には船体まわりの循環の問題がからまってくるので、慎重な取扱いが必要である。今回の計算では、上記その他の理由で、船首揺れの場合が、計算と実験の一致度は最も悪くなっており今後改善すべき問題である。

次に、追波の場合 ω_e が非常に小さい値を持つ場合が出てくる。ストリップ法で、船体断面の附加質量を求める場合、 $\omega_e \rightarrow 0$ のとき K_4 などが対数的に無限大となり、その結果、計算結果に異常さがでてくる。従つてこの場合についての適当な修正を行なつておかないと、不規則波中の短期分布の計算などに相当の誤差が混入する恐れがある。これも今後の問題点である。

6.3 追波状態における不規則波中の実験について

斜め追波中の実験では、船と波との出会周波数が小さくなり、出会数が少ないため、いわゆるスペクトラム解析によつて統計的処理を行なうにはデータ数が不足するほか、波の計測を水槽の一固定点で行なつた場合、その記録から得られた波のスペクトラムと、船が実際に出会う波のスペクトラムとは対応しにくいと考えられる。このことを調らべるため、規則波中の実験から求めた応答関数 (Response Amplitude Operator) と、一定点で測定した不規則波のスペクトラムとを掛け合わせた不規則波中の応答のスペクトラムを出会周波数に対するスペクトラムに変換したものと、直接不規則波中で測定した応答のスペクトラムとを、種々の出会角について比較してみた。斜め向波中の縦揺れについて示したのが Fig. 46 であり、横波と斜め追波中の横揺れについて示したのが Fig. 47 である。これらの図で見られるように、斜め向波中では両者のスペクトラムはほぼ一致しているのに対し、 $\chi=30^\circ$ の斜め追波中では対応性が悪くなっている。斜め追波中では、変換スペクトラムは、或る critical な ω_e の値において無限大となりそれより高い ω_e では一般に応答がほとんどないという性質を示す¹⁰⁾のであるが、実験で測定した応答のスペクトラムでは、追波に近い場合ほど ($\chi=30^\circ$)、critical の ω_e より高い範囲でも応答があるのが見られる。不規則波中の応答の計算値と実験値

Fig. 46 Spectrum of Pitching in Irregular Waves

Fig. 47 Spectrum of Rolling in Irregular Waves

が斜め追波中で一致度が悪い理由のひとつであろう。

また、それならば出会波を計測すればよいのではないかと考えられるが、しかし追波の場合はそれにも不都合がある。一般に追波状態では上記の critical な ω_e^* より小さい領域では、ある ω_e を与える3つの ω が存在する。これを $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ とし、それぞれの波振幅を h_1, h_2, h_3 、波数を k_1, k_2, k_3 、そして位相差を $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ とすれば、定点の測定による波は、

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^3 h_i \cos(\omega_i t + k_i x + \varepsilon_i) \quad (11)$$

となり、出会波として測定すれば、

$$\zeta'(t) = \sum_{i=1}^3 h_i \cos(\omega_e t + k_i^* x + \varepsilon_i) \quad (12)$$

となる。ただし、 $k_i^* = k_i \cos \chi$ である。(11) 式から $\zeta(t)$ の二乗平均を求めると

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{\zeta(t)\}^2 dt = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 h_i^2 \quad (13)$$

なるのに対して、(12) 式より計算すると、

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{\zeta'(t)\}^2 dt = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 h_i^2 + h_1 h_2 \cos\{(k_1^* - k_2^*)x + \varepsilon_1 - \varepsilon_2\} \\ & + h_2 h_3 \cos\{(k_2^* - k_3^*)x + \varepsilon_2 - \varepsilon_3\} + h_3 h_1 \cos\{(k_3^* - k_1^*)x + \varepsilon_3 - \varepsilon_1\} \end{aligned} \quad (14)$$

となるので、(13) 式と (14) 式とは一致しない。

以上のような問題点があるので、斜め追波中の応答を不規則波中の模型実験で調らべるにはなお検討を必要とする。

7 結 言

斜め波中における船の対称および非対称動揺について、ストリップ法による理論計算と模型実験との比較を中心に、一軸高速コンテナ船の動揺特性を調べた。その結果次のような点が明らかとなった。

(1) 計算と実験とが良く一致するのは、縦揺れであり、比較的良好合うのは上下および横加速度と横揺れであり、船首揺れはあまりよく合わない。

(2) 動揺に対する船速の影響は上下揺れ、縦揺れではあまり大きくなく、上下加速度では影響があり、横揺れなどの非対称動揺に対しては影響が大きい。

(3) 波との出会角の影響は、対称動揺では向波から斜め向波の広い範囲で大きい応答を示すに対し、非対称動揺では $\chi = 60^\circ$ の斜め追波附近の出会角の狭い範囲で大きい応答を示す。

また今後検討を要する問題点には次の点が挙げられる。

(1) 非対称動揺の運動方程式に、船速の影響をとり入れる場合、船の附加質量を左右揺れ、船首揺れの連成項に用いる必要があると考える。これらの計算法を種々比較検討するとともに、船首揺れなどの精度高い測定をおこなうことが望まれる。

(2) 横揺れの減衰係数に、平水中の自由動揺の実験値を用いているが、その実験方法にも問題がありそうである。さらに検討を加え、長水槽でもできる合理的な実験方法を確立する一方、理論的に減衰力を推定する方法の研究がいつそう望まれる。

(3) 不規則波中の実験を行なう場合、斜め追波、追波中で得られた応答の解釈について種々問題がありそうである。波の計測も含めて実験・解析方法を検討する必要がある。

謝 辞

本研究は、日本造船研究協会部会 SR 108「高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究」の一環として

* 船と波との出会周波数は $\omega_e = \omega \left(1 - \frac{\omega}{g} v \cos \chi\right)$ で与えられる。critical な ω_e というのは、 ω_e の最大値を与える ω 、すなわち

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 - \frac{2\omega}{g} v \cos \chi = 0, \quad \text{ここで } v: \text{船速}$$

を満足する ω に対応する ω_e の値である¹²⁾。

実施されたものである。研究遂行上において、種々有益なご討論をしていただいた同部会委員長元良誠三教授はじめ委員の方々に感謝いたします。

模型実験は、船舶技術研究所の猿田俊彦技官が主になって担当され、日立造船(株)雁野昌明氏には計算について種々ご協力をいただいた。両氏に対し深く謝意を表わしたい。

参 考 文 献

- 1) 渡辺恵弘：船の上下動及び縦揺れの理論について，九大工学集報第 31 巻第 1 号 (1958)
 - 2) 福田淳一：電子計算機による規則波中の波浪曲げモーメント応答関数の計算，西部造船会会報第 32 号 (1966)
 - 3) 田才福造：斜波の中の Sway, Yaw, Roll の運動について，西部造船会会報第 32 号 (1966)
 - 4) 田才福造：船の上下動揺並びに縦動揺における減衰力および付加質量について，造船協会論文集第 105 号 (1959)
 - 5) 田才福造，高木又男：耐航性に関するシンポジウムテキスト附録(I),(II)，日本造船学会 (1969)
 - 6) 山内保文，大井 浩，高石敬史，木原弘毅，吉野泰平，飯塚正文：原子力第一船の波浪中動揺と加速度について，造船協会論文集第 123 号 (1968)
 - 7) Proceedings of the 12th ITTC (International Towing Tank Conference), Rome, (1969)
 - 8) Y. Yamanouchi, A. Ogawa : Statistical Diagrams on the Winds and Waves on the North Pacific Ocean, Papers of Ship Research Institute, Supplement No. 2 (1970) p.37
 - 9) 田才福造，高木又男，雁野昌明，荒川広行，栗原真人：一軸高速コンテナ船の縦波中の耐航性能に関する研究，西部造船会会報第 41 号 (掲載予定) (1971)
 - 10) S. Kastner : Das Kentern von Schiffen in unregelmäßiger längslaufender See, Schiffstechnik 84. Heft, 16 Band (1969)
 - 11) 日本造船研究協会第 108 研究部会：高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究，研究資料 No. 110, (1970)
 - 12) M. St. Denis, W. J. Pierson : On the Motions of Ships in Confused Seas, SNAME Vol. 61 (1953)
-