(昭和 49 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

2 方向波中の船体運動に関する一実験

正員 北 川 弘 光* 正員 大 松 重 雄*

Some Experiments on the Behaviour of an Ore-carrier Model
in Short-crested Regular Waves

by Hiromitsu Kitagawa, *Member* Shigeo Ohmatsu, *Member*

Summary

The second wave-maker of plunger type has been set up at a right angle to the first one in the No.1 Ship Model Basin of the Ship Research Institute to generate short-crested waves from two directions, as a part of a co-ordinated programme of long term research based on the view that it is reasonable to expect a fairly complete description of various hydrodynamic forces acting on ships in waves in relation to ship motions to be achieved eventually, and that this will provide a tool capable of solving most structural design problems.

Model tests in short-crested regular cross waves were carried out and analyzed with special emphasis on the roll and pitch motions of an ore-carrier at the full load condition.

The ship responses in long-crested regular waves were simply superposed, and the results were compared with those measured in short-crested regular waves. The validity of the linear superposition principle was examined to the prediction of ship motions at various headings to the waves.

1 緒 言

船舶が航行する実海面で観測される波浪は、一般の波浪中の水槽実験に見られるような 1 方向波でなく、いわゆる多方向波 multi-directional waves であることは周知のことである。この海洋波の方向性については、Marks¹⁾、Longuet-Higgins²⁾ 等の海洋波の方向スペクトルに関する研究などにより海洋学的な検討が重ねられ、また、近年においては、多方向波の線型理論を越えた研究も進められている³⁾。

一方、船舶の多方向波中の応答に関する研究は少なく、海洋波の方向スペクトルの計測上必要となった自由浮遊ブイの挙動を検討した Barber⁴⁾ 等の研究、短波頂波 short-crested waves 中での運動を論じた田才⁵⁾ の報告など数例に留まる。船舶の耐航性の研究にあって、1 方向波中の模型実験と実海面における実船の多方向波中の応答とのギャップが、統計論的な検討⁶⁾ こそあれ、解析的な立場で検討されたことのないのは、その重要性は認識されつつも、主としてそのための実験施設を持たなかったことによるものと思われる。このことは、多方向波そのものの研究についても同様であって、ごく基本的な直交 2 方向規則波の問題など多方向波の基礎問題に対する実験的検証例の乏しさに驚かされる。

2 方向波中の船体運動に関する研究には、大別して 2 つの立場が考えられる。1 つは、より実海面に近く、より即物的な実験を目差す、いわばシミュレーションの立場である。

他の立場は、多方向波中の船体応答の基礎課題として取扱うものである。すなわち、多方向波も基本的には直交 2 成分波系に分解できるものとすれば、直交 2 成分波系中の船体応答の解明が多方向波中の問題検討の前提となることは容易に理解できる。したがって、この立場では、実海面での航海状況のシミュレーションの問題を離れて、単に、2 方向波中の船体応答が、1 方向波中のものに比してどのように異なり、どのような問題があるかを吟味することになる。

ここでは、後者の立場に立ち、大型鉱石専用船の自由航走模型を用いて直交 2 方向規則波中の実験を行い、船

* 船舶技術研究所

体運動の特性を巨視的な観点から検討した。

一般に、このような2方向波中の船体運動は6自由度の運動となるが、今回はそれらの中、1方向波中での検討が十分行われているものの中から縦揺および横揺を選び、この2つの運動成分について、線型重ね合わせの原理の検証を中心に検討を行った。また併せて、直交2方向規則波の基本的特性を調査した。

2 2 方 向 波

2.1 2方向波の発生と計測

船舶技術研究所三鷹第1船舶試験水槽(80m 角水槽)東面にプランジャ型造波装置が搬入仮設され、水槽南面に既設のフラップ型造波装置と連動させ2方向波の発生が可能となった。フラップ型は水槽南面80mの全面に、プランジャ型は全長54m、一体が2.25mの24分割方式の、いわゆる snake-type の造波装置である。プランジャ断面は2:1の楔形の端部を多少修正した形状となっている。プランジャ相互間の上下動位相を電気的に変えることにより、水槽東面の基線に対して $\pm 30^\circ$ 程度の傾きを有する斜行波を発生させることもできる。

水槽内に発生された2方向波は、通常の1方向波の計測のような水槽側壁での計測が不可能である。このため、波高計として、計測精度は多少劣るが、水槽中央部での計測が可能な水没型超音波式を採用した⁷⁾。波高計の検出素子は7個で、その配置は、不規則波中の実験も考慮し共分散函数の性質などから Mills の十字架と呼ばれる形に近いものとした⁸⁾。その概要を Fig.1 および 2 に示す。また、波高計設置位置等を Fig.3 に示す。

2.2 直交2方向規則波の特性

Fig.1 Wave Recorder

Fig.2 Probe Arrangement

座標軸を Fig.3 に示すように採り、フラップ型造波装置により発生され x 軸の正方向に伝播する波 ζ_x と、プランジャ型造波装置により発生され y 軸の正方向に伝播する波 ζ_y との合成波 ζ_{xy} を考える。造波装置およびその対辺消波装置の特性を考慮して、以後、 ζ_x を swell, ζ_y を sea と呼ぶこととする。各波系をそれぞれ

$$\zeta_x = \zeta_{x0} \sin(k_x x - \sigma_x t) \quad (1)$$

$$\zeta_y = \zeta_{y0} \sin(k_y y - \sigma_y t + \epsilon) \quad (2)$$

で表わす。ここに、 ζ_{x0}, ζ_{y0} は半波高、 k_x, k_y は波数、 $k_x = 2\pi/\lambda_x$, $k_y = 2\pi/\lambda_y$ であり、 σ_x, σ_y はそれぞれ振動数である。 ϵ は造波機起動時の時間遅れを表わす位相差である。

合成波 ζ_{xy} は (1), (2) 式から

Fig.3 Definitions

$$\begin{aligned}\zeta_{xy} &= \zeta_x + \zeta_y \\ &= (\zeta_{x0} + \zeta_{y0}) \cos(p_2 - \sigma_2 t) \sin(p_1 - \sigma_1 t) \\ &\quad + (\zeta_{x0} - \zeta_{y0}) \sin(p_2 - \sigma_2 t) \cos(p_1 - \sigma_1 t)\end{aligned}\quad (3)$$

$$= (\zeta_{x0} + \zeta_{y0}) \left\{ 1 - \frac{4\zeta_{x0}\zeta_{y0}}{(\zeta_{x0} + \zeta_{y0})^2} \sin^2(p_2 - \sigma_2 t) \right\}^{1/2} \sin\{p_1 - \sigma_1 t + \delta(t)\} \quad (4)$$

となる。

ただし

$$\left. \begin{aligned} 2p_1 &= k_x x + k_y y + \epsilon \\ 2p_2 &= k_x x - k_y y - \epsilon \\ 2\sigma_1 &= \sigma_x + \sigma_y \\ 2\sigma_2 &= \sigma_x - \sigma_y \\ \delta(t) &= \arctan \left\{ \frac{\zeta_{x0} - \zeta_{y0}}{\zeta_{x0} + \zeta_{y0}} \tan(p_2 - \sigma_2 t) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。

定置式波高計の記録のように、水面波形の空間固定点での時間経過を考える際には(4)式の表現が都合良く、船の応答を検討する場合には(3)式の表現が判り易い。合成波は(4)式からも明らかなように一種の振幅変調波であって、ビートが現われ、波は群としての挙動を示すことになる。その詳細は付録に示す。

2.3 パターン移動角

直交2方向波は、素成波が規則波であれば、水槽内に美しい市松模様を作り出す。このパターンの移動する方向は、Fig.4 に示すように、素成波の位相速度をそれぞれ C_x, C_y とすれば

$$\theta_p = \arctan \frac{C_y}{C_x} = \arctan \sqrt{\frac{\lambda_y}{\lambda_x}} \quad (6)$$

なる角度の方向となる。今

$$\theta_0 = \arctan \frac{\lambda_y}{\lambda_x} \quad (7)$$

なる角度をパターン角と呼ぶこととすれば、同波長の2方向波では

$$\theta_p = \theta_0 = \frac{\pi}{4}$$

である。また、パターン移動速度は

$$C_p = (C_x^2 + C_y^2)^{1/2} = \left(\frac{g}{2\pi} \right)^{1/2} (\lambda_x + \lambda_y)^{1/2} \quad (8)$$

となる。

3 実験法

3.1 模型船と計測法

実験に用いた模型船は、波浪変動水圧に関する実験⁹⁾に用いたと同一船の大型鉱石専用船「笠木山丸」4.5m 模型である。その主要目を Table 1 に示す。横環動半径、GM 等は、前回の値にできる限り近づけるよう努力したが船内搭載計器類の配置等の制約から、前回に比して環動半径は大きめ、横揺固有周期は長めとなっている。

船体運動の計測方法は従来通りのジャイロ式で、模型船の航跡、速度、方位角等の計測方法は前回の実験と変るところはない¹⁰⁾。また、波の計測は、前述のように7素子の水没型超音波式波高計の5素子を用いて検出し、これをデータレコーダに収録した。モニタとしてはレクタグラフを併用した。

Table 1 Principal Particulars

Items	Ship	Model
Length betw. P.P. (Lpp)	247.000m	4.5000m
Breadth Mid. (B)	40.600m	0.7397m
Depth Mid. (D)	23.000m	0.4190m
Draft Mid. (d)	16.000m	0.2915m
Displacement (W)	135,950ton	0.8013ton
Block Coefficient (Cb)	0.8243	0.8243
Midship Coefficient (Cm)	0.9975	0.9975
C.G. from Midship (G _M)	fore 7.301m	fore 0.1330m
C.G. from Keel (KG)	12.280m	0.239m
Metacentric Radius (GM)	4.130m	0.069m
Longi. Gyradius (KL)	0.2362Lpp	0.238Lpp
Trans. Gyradius (Kt)	0.2200B	0.360B
Rolling Period (Tr)	11.04sec.	2.01sec.
Rudder Area (Ar)	58.731m ²	0.0196m ²
Rudder Area Ratio (Ar/dLpp)	0.0149	0.0149
Bilge Keel Breadth	0.425m	0.0077m
Length	62.320m	1.1353m
from Σ fore	38.320m	0.6981m
from Σ aft.	24.000m	0.4372m

3.2 実験状態

実験は船舶技術研究所三鷹第1船舶試験水槽において行った。一般に、長さ4.5m程度の模型船では、波高として10cm前後の値が常用でもあり、また前回の変動水圧に関する実験では波高を $L/20$ に採ったことも勘案して、各素成波の波高を $L/40$ とした (L は船長)。これは、模型船に対しては11.25cm、実船に対しては約6.2mの波高に相当する。

波浪中の模型実験法としては、模型船速度を一定値としてプロペラ回転数を変化させる、プロペラ回転数、馬力、あるいはトルク等を一定に保って自航させる等、いくつかの方法が考えられる。模型船速度を一定値とするよう制御する方法は、主として長水槽における波浪中実験においては最も正統的な方法として多用されている。しかし、2方向波中においては、ビート状に変化する波高の影響を受けて、船速は、素成波波長の組み合わせ、出会角の変化などによって複雑に変化することが考えられ、このためプロペラ回転制御系あるいは船速制御系が充分なものでなければ、この制御系の特性の影響が、船速、ひいては船体運動に影響を及ぼすことが懸念される。このような理由から、さしあたり今回の実験では、実験の主眼が船体運動における線型重ね合わせの原理の検証にあることもあって、このような制御系の試作は行わず、模型船は前回同様、自動操舵機構により方位角を一定に保ちながら、プロペラ駆動電動機の電圧を一定値に保って航走させた。このため模型船の速力は、それぞれの出会波に従って自然のままに低下するようになっている。

波長の組み合わせは、プランジヤ型造波装置(sea相当)対辺の可動式消波装置の消波効率を考慮して、swell(フラップ型造波装置)の波長・船長比 λ/L を1.50, 1.25, 1.00, 0.75 および 0.50 として、seaのそれを、それぞれswellの λ/L から0.50まで変化させた組み合わせとした。これは、これらの組み合わせにより、直交2方向規則波中の船体運動の概要が把握しうるものと判断したからである。

模型船航走の方位角あるいは出会角 χ は、1方向波中の実験に比してかなり広範囲にわたる必要がある。swellとseaとが同波長であれば、出会角 χ に対して 135° を中心に対称のパターンが船体運動等について得られるはずであるが、船速低下および漂流角の差違、あるいは風などその他の原因で対称とならないものと思われたの

Fig.4 Cross Wave Pattern

Table 2 χ_p and Marks

KEY	λ/L	SWELL					
		1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	
SEA	1.50	135.0°					
	1.25	137.4°	135.0°				
	1.00	140.8°	138.2°	135.0°			
	0.75	144.7°	142.3°	139.1°	135.0°		
	0.50	150.0°	147.7°	144.7°	140.8°	135.0°	

で、この場合も含めてswellに対する出会角としては、パターン移動方向に真向となる角度 $\chi = \chi_p$ ($\chi_p = 180^\circ - \theta_p$) 付近を重点に 45° から 270° までとした。これらの決定には、目視観測とはいえ、船舶技術研究所で実施している主

として北太平洋航路の実船試験結果を参考とした。なお、それぞれの波長の組み合わせに対する χ_p の値と、実験結果等の表示に用いた記号とを併せて Table 2 に示す。

4 実験結果とその検討

4.1 船速低下と漂流

本実験では、模型船のプロペラ駆動用直流電動機の電圧を一定値に保って模型船を航走させる実験法を採用しているため、波浪中での船速は静水中の速力に比べ低下する。実船との対応を厳密に考える場合には、駆動系等のシミュレーションが必要となるが、一方、駆動電動機電圧を一定に保つことは、プロペラトルクをほぼ一定に保つことになり、また、プロペラ回転数の変化も比較的少なく、実船が荒海中で人為的に回転数を落さない限り、模型実験より求められる波浪中の船速低下は、実船が相当海面を航行する際の船速低下の概要を表わすものと考えてもよい。なお、駆動系のシミュレーション・システム、定速航走システムなどは現在検討中である。

駆動電動機電圧は、静水中速力が実船航海速力14.8ktsに相当する模型船速力1.028m/sとなるように設定した。この電圧を一定値に保ち、2方向波中で模型船を自由航走させた際の船速 V_w を、静水中の速力 V_0 ($=1.028$ m/s) で除した速度比 V_w/V_0 の形で表わしたものが Figs.5~9 である。船速としては、1ビート周期以上の平均値を採り、出会角 χ はswell(フラップ型造波装置)に対するものを採っている。なお、以降、特に明

Fig.5 Speed Loss in Waves

Fig.6 Speed Loss in Waves

Fig.7 Speed Loss in Waves

Fig.8 Speed Loss in Waves

Fig.9 Speed Loss in Waves

低下も波高の自乗の函数と考えられよう。素成波の波高が swell, sea 共に $L/40$ であり、一方、1方向波中の実験では、船体運動の比較を第一義に考え、波高を $L/40$ としていることから、本実験での2方向波中の船速低下が1方向波中の実験値に比して一見、格段に激しいものとなっていることは理解できよう。直接の比較は難しいが、波高 $L/20$ で行った同一模型船による実験結果⁹⁾と比べると、追波の範囲は除き、その値は2方向波中の船速低下の下限に近いものとなる。したがって、swell, sea 共に向波の状態では、素成波波高の和に等しい波高を有する1方向規則波中の船速低下は、そのような2方向波中のものに比して大きいと言える。船体運動と共に、推力増加など耐航性一般にわたって2方向波中の模型実験を考える場合には、この辺に煩雑さがある。

Fig.10 Drift Angle in Waves

記しない限り、出会角 χ は swell に対するものとする。したがって、波を大きく向波と追波とに2分すれば、swell および sea が共に模型船に対して向波となるのは、 $\chi=90^\circ\sim 180^\circ$ であり、swell は向波、sea は追波の状態は $\chi=180^\circ\sim 270^\circ$ 、また swell が追波、sea が向波となるのは $\chi=0^\circ\sim 90^\circ$ となる。

これらの図から、2方向波中の船速低下は swell 相当の素成波の影響が大きいことが判る。波浪中での推力増加等が波高の自乗に比例するものとすれば、船速低下の下限に近いものとなる。したがって、swell, sea 共に向波の状態では、素成波波高の和に等しい波高を有する1方向規則波中の船速低下は、そのような2方向波中のものに比して大きいと言える。船体運動と共に、推力増加など耐航性一般にわたって2方向波中の模型実験を考える場合には、この辺に煩雑さがある。

2方向波中で船速低下が大きくなるのは、2方向波のパターン移動角と真向になる出会角 $\chi=\chi_p$ の付近であり、ここでは後述のように船体運動は縦揺が激しく横揺は鞍部となって低く、船速低下に及ぼす縦運動の影響が顕著であることが判る。ただし、swell 相当素成波が $\lambda/L=0.50$ の場合には、素成波中の応答特性の影響で、逆に $\chi=\chi_p$ 付近で船速低下は少なくなる。

2方向波中の漂流角 χ_d ($\chi_d = \chi_c - \chi$, χ_c : コース角) を Fig. 10 に示す。漂流角は1方向波中とは異なり, 1方向波中で最も漂流の大きい $\chi = 135^\circ$ 付近では素成波の漂流力が相殺して少なく, 出会角が増し両者の均衡がくずれるにつれ漂流角が増大する。出会角がさらに増して, sea に対して追波の状態となると漂流角は次第に減少する。2方向波中の漂流角は, 1方向波中とは異なり運動振幅の大きさの変化とは必ずしも対応せず, また, 漂流角の大きい所では1方向波中の漂流のベクトルの加算とはならない。

なお, 模型船の波との相対的な出会は, 本実験では特殊な例を除き再現性は良好であり, また模型船の航跡は平均的にはほぼ直線となっている。しかし, この点については, 船首揺あるいは自動操舵系の特性の影響なども含めて, 詳細な検討が必要と思われる。

4.2 船体運動

1方向波中の縦揺および横揺振幅を, ストリップ法 (Ordinary Strip Method; O.S.M.) による計算値と共に Fig. 11 および 12 に示す。これらの値は, いずれもそれぞれの波, 出会角に応じて船速が変化しており, 一定速度での値でないことに留意されたい。これは2方向波中の船体運動についても同様である。ストリップ法による計算は, このような船速低下を考慮したものとなっている。また, 横揺に対しては抵抗の2次の項までを考慮した実験値を導入し非線型な取扱いを行っている。

Fig. 11 Pitching

Fig. 12 Rolling

Fig. 13 Records of Ship Motions

Fig. 14 Mean Amplitude of Pitch in Short-crested Waves

Fig. 15 Mean Amplitude of Pitch in Short-crested Waves

2 方向波中の運動記録例を Fig. 13 に、縦揺および横揺の平均振幅をそれぞれ Figs. 14~18 および Figs. 19~23 に示す。平均値としては、基本的には最大値、最小値の平均を採っているが、運動の実測波形が必ずしも理論で予測されるような振幅変調波となっていない場合もあり、この場合には連続 20 周期程度の振幅平均を採った。

縦揺および横揺の最大振幅をそれぞれ Figs. 24~26 および Figs. 27~29 に示す。この最大振幅は運動記録に比較的規則正しく現われる最大値の平均を採っている。なお、最小値については、ばらつきが多く、実験誤差が少なくないことが判った。平均振幅は、1 方向波中の運動との等価的な比較のため、また、最大振幅は、合成波を表わす(3)式からも明らかなように、素成波中の運動を単純に加算合成した場合の比較に好都合なものである。なお、縦軸は、縦揺振幅 θ_0 あるいは横揺振幅 ϕ_0 をとり、最大波傾斜 $h\zeta_0$ による無次元表示はしていない。これは、

Fig. 16 Mean Amplitude of Pitch in Short-crested Waves

Fig. 17 Mean Amplitude of Pitch in Short-crested Waves

Fig. 18 Mean Amplitude of Pitch in Short-crested Waves

Fig. 19 Mean Amplitude of Roll in Short-crested Waves

Fig. 20 Mean Amplitude of Roll in Short-crested Waves

Fig. 21 Mean Amplitude of Roll in Short-crested Waves

Fig. 22 Mean Amplitude of Roll in Short-crested Waves

Fig. 23 Mean Amplitude of Roll in Short-crested Waves

Fig. 24 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Pitch

Fig. 25 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Pitch

Fig. 26 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Pitch

Fig. 27 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Roll

Fig. 28 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Roll

Fig. 29 Measured Max. Amplitude and Composed Amplitude of Roll

比較検討の便のためであり、したがって、2方向波中の運動振幅についても、 $\theta_0/(k_x^2 + k_y^2)^{1/2} \zeta_0$, $\phi_0/(k_x^2 + k_y^2)^{1/2} \zeta_0$ のような無次元表示はあえて採らなかった。

まず、縦揺振幅についてみると、その最大値、平均値は同一の傾向を持ち、波長が船長に比してかなり短い場合を除いて、swell に対する出会角 χ が 90° および 180° で極小となり、 $\chi = \chi_p$ で極大値をとる。また、swell, sea が同一であれば、出会角に対しては 135° を中心にほぼ対称となり、swell に対して sea が短くなるにつれ、sea 相当素成波に対する縦揺特性の影響が次第に現われて非対称の度合が増していく。

一方、横揺については、その振幅の平均値と最大値との出会角に対する変化の傾向は縦揺同様よく一致するが、波の特性と素成波に対する応答の特性とから、縦揺とは逆に、振幅は $\chi = \chi_p$ で極小となる。 $\chi = 90^\circ$ 付近では、sea の波長に無関係に swell の波長・船長比で横揺角が決定されることが判る。これは、素成波に対する横揺応答が出会角に対して鋭敏であり、この付近では swell 相当の素成波による横揺振幅が支配的であるからで、 χ が 90° を越え次第に大きくなると sea 相当素成波の波長の影響が現われてくる。

Figs. 24~29 には、1方向波中の運動振幅の実測値 (Figs. 11 および 12) を用いて単純な加算合成により求めたものを併記してある。ただし、速度をパラメータとする実験を行っていないので、運動振幅に対する船速影響の妥当な修正が行えず、それぞれの波、出会角における1方向波中の船速に対する運動振幅となっている。しかし、当該速度範囲では、低速域のため船速の運動振幅に及ぼす影響は少ない。

船速に多少の不整合があるにしても、このような素成波中の運動振幅の単純な加算合成によって、2方向波中の運動振幅をかなりよく近似することができることが判る。しかし、詳細に見ると、縦揺については、一般に船長に比して長波長の素成波の組み合わせによる2方向波中では、その振幅は素成波の応答の重ね合わせとほぼ一致するが、短波長の波の組み合わせでは、出会角に対する振幅の変化も複雑で一致も悪い。これは、短波長の波の中では1方向波中の応答も複雑であり、かつまた重ね合わせの際の位相的問題や船体による到来波の攪乱の影響が大きくなるためと思われる。

横揺については、素成波に対する応答を合成したものは、傾向をよく説明することはできるが、定量的には最大振幅より低く平均振幅にほぼ等しい。船速の差違や漂流あるいは位相の問題があるといえよう。

Fig. 30 Composed Calculation of Pitch in Comparison with Equivalent Wave Approximation

Fig. 31 Composed Calculation of Pitch in Comparison with Equivalent Wave Approximation

Fig. 32 Composed Calculation of Pitch in Comparison with Equivalent Wave Approximation

Fig. 33 Composed Calculation of Roll in Comparison with Equivalent Wave Approximation

Fig. 34 Composed Calculation of Roll in Comparison with Equivalent Wave Approximation

Fig. 35 Composed Calculation of Roll in Comparison with Equivalent Wave Approximation

同様に、縦揺および横揺のストリップ法による計算値を合成したものを Figs. 30～35 に示す。ただし、船速としては2方向波中の実測値を用いてある。

また、図中には参考として、船を質点と考え2方向波を等価1方向波に置換えた場合の計算値が併記してある。この場合、合成波としては(A-5)式を考えればよいが、定速 V で直進する質点に対する出会合成波は、船が点 $P(x_0, y_0)$ から出発するものとして(A-5)式の x, y を、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + Vt \cos \chi \\ y &= y_0 - Vt \sin \chi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

で置換えればよく

$$\begin{aligned} \zeta_{xy} &= 2\zeta_0 \cos \left\{ \frac{k_x x_0 - k_y y_0 - \epsilon}{2} + \frac{V(k_x \cos \chi + k_y \sin \chi) - (\sigma_x - \sigma_y)}{2} t \right\} \\ &\quad \times \sin \left\{ \frac{k_x x_0 + k_y y_0 + \epsilon}{2} + \frac{V(k_x \cos \chi - k_y \sin \chi) - (\sigma_x + \sigma_y)}{2} t \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。したがって等価1方向波の波長 λ_e は

$$\lambda_e = \frac{2\pi g}{\sigma_e^2} \quad (10)$$

ここに

$$\sigma_e = \frac{1}{2} \left\{ \left(\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_x}} + \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_y}} \right) - V \left(\frac{2\pi}{\lambda_x} \cos \chi - \frac{2\pi}{\lambda_y} \sin \chi \right) \right\} \quad (11)$$

である。

このような出会波に対する応答を計算したものが図中の細線である。なお、波の進行方向は θ_p の方向とした。ストリップ法による計算をもとにした合成振幅は、1方向波中の応答に対する計算値・実験値の差が現われているが、本質的には、1方向波中の実験値の合成と差はなく、前述の事柄がそのままあてはまる。

等価1方向波の考え方は、もともと船長に比して波長が充分長く、出会波に対して船が質点として近似できる場合に有効なものであり、このような簡易計算でどの程度2方向波中の運動特性の傾向が説明できるか興味のあるところであったが、 $\lambda/L \sim 1.5$ 程度では、このような簡便法では出会角に対する運動振幅の傾向をほとんど表わすことができないことが判る。

一般に模型船がswell相当素成波に対して追波の状態では、素成波中の応答の単純な加算合成による推定値と、2方向波中の実験値との一致は実験値による合成、計算値による合成、いずれの場合にも悪い。1方向波中においても、追波状態における船体運動については、充分な研究が重ねられていないのが現状であり、一方、2方向波中においては、いずれかの素成波に対して船が追波（斜め追波）となるのは全出会角の3/4を占める範囲であり、追波中の船の挙動を充分把握しておくことが必要である。

運動記録例からも明らかなように、船体運動に著しいビートが現われるのは $\chi = \chi_p$ 付近であり、この場合には縦揺および横揺振幅の極大、極小はほとんど逆位相であって、それぞれの動揺周期はほぼ等しい。 $\chi = 90^\circ$ あるいは 180° の近傍では、船の縦揺および横揺の動揺周期は、ほぼそれぞれの素成波に対する動揺周期となり、運動振幅の変化はほとんど見られない。出会角に対する運動振幅の変化が急激な部分では、動揺周期および運動相互の位相関係はかなり複雑で、一般には実験の再現性はよいが、素成波の組み合わせによっては、全く再現性のない場合もあり、この付近では、素成波の波高、船速、あるいは自動操舵系の特性などが微妙な影響を及ぼすものと考えられる。swellあるいはseaに対して追波（斜め追波）となる場合には、横揺波形の歪みが大きく、左右両舷への片揺周期が異なる場合もある。また、 $\chi = \chi_p$ では、素成波が船長に対して長波長であれば、船は横揺をほとんど行わず、縦揺、船首揺をある一定周期で交互に繰返す場合もあり、運動の位相面の解析と共に、横揺、船首揺の連成、gyroscopicな連成影響、非線型復原力あるいは復原項の係数が時間関数である場合などについて運動方程式上の検討などを行う必要がある。

5 結 言

2方向波中の船体運動の特性を明らかにするため、大型鉦石専用船模型による直交2方向規則波中の水槽実験を行い、2方向波中の船速低下、漂流角、縦揺および横揺について、その概要を把握することができた。その結果

- 1) 2方向波中の縦揺振幅を1方向波中の運動振幅の単純な加算合成により、一般には、ほぼ推定することができる。すなわち、縦揺振幅については、2方向波中においても、短波長域を除き、ほぼ線型重ね合わせの原理が成立つ。
- 2) 2方向波中の横揺については、このような加算合成によって定性的な説明はできるが、定量的には2方向波中での振幅が合成値より大きく、単純な加算合成にはやや無理がある。すなわち、2方向波中の横揺につ

いては、線型重ね合わせの原理は無条件には成立たない。

- 3) いずれかの素成波に対して追波（斜め追波）となる場合には、1 方向波中の応答の単純な加算合成では不満足である。
- 4) プロベラトルクをほぼ一定に保った場合の 2 方向波中の船速低下は、2 方向波の最大波高と等しい波高の 1 方向波中の船速低下より少ない。
- 5) 2 方向波中の漂流は、必ずしも 1 方向波中の漂流のベクトルの加算とはならない。

などの結論を得た。

なお、今後、2 方向波中での変動水圧など圧力場での検討、あるいは、船首揺などの運動、推力増加の問題など逐次検討し、2 方向波中の船の挙動の概要を順次明らかにして行く計画である。

本実験は一部、日本造船研究協会受託試験によることを付記する。

なお、本論文中の計算は、船研共用計算機 FACOM 270-20 によった。

参 考 文 献

- 1) W. Marks : The use of a filter to sort out directions in a short-crested Gaussian sea surface, Tr. Am. Geophys. Union, (1954).
- 2) M. S. Longuet-Higgins, D. E. Cartwright and N. D. Smith : Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of floating buoy, Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, Inc., (1961).
- 3) 例えば
K. Hasselmann : On the nonlinear energy transfer in a wave spectrum, ibid.
- 4) N. F. Barber : Measurements of sea conditions by the motion of a floating buoy, Admiralty Research Laboratory, Note A. R. L./10.3.40/N.2/W., (1946).
- 5) 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).
- 6) E. V. Lewis : Developments at Stevens on behaviour in irregular seas, Proc. Sym. on the Behaviour of Ships in a Seaway, (1957).
- 7) 松元尚義, 菅井和夫, 北川弘光 : 複合波の計測例, 第 22 回船舶技術研究所研究発表会, (1973).
- 8) B. Kinsman : Wind Waves, Prentice-Hall Inc., (1965).
- 9) 菅井和夫, 郷田国夫, 北川弘光 外 : 斜め波中の船体に働く波浪変動水圧に関する模型実験, 日本造船学会論文集第 133 号, (1973).
- 10) 高石敬史, 菅井和夫, 小川陽弘 : 角水槽における最近の波浪中模型実験法, 日本造船学会誌第 525 号, 第 526 号, (1973).

付録 2 方向波とその特性

- (1) 同波長同波高の波 ($k_x = k_y = k$, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $\zeta_{x0} = \zeta_{y0} = \zeta_0$)

$$\zeta_{xy} = 2\zeta_0 \cos \frac{1}{2}(kx - ky - \epsilon) \times \sin \left\{ \frac{1}{2}(kx + ky + \epsilon) - \sigma t \right\} \quad (A-1)$$

定点での時間経過は定振幅波形となる。その振幅は、

$$y = x - (2n\pi + \epsilon)/k; n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (A-2)$$

なる直線上で最大値 $2\zeta_0$ を、また、

$$y = x - \{(2n+1)\pi + \epsilon\}/k; n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (A-3)$$

なる直線上で最小値をとり、振幅は 0 となる。この場合の波形記録例を Fig. 36(i) に示す。

- (2) 同波長異波高の波 ($k_x = k_y = k$, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$)

$$\zeta_{xy} = (\zeta_{x0} + \zeta_{y0}) \left\{ 1 - \frac{4\zeta_{x0}\zeta_{y0}}{(\zeta_{x0} + \zeta_{y0})^2} \times \sin^2 \frac{1}{2}(kx - ky - \epsilon) \right\}^{1/2}$$

Fig. 36(i) Records of Short-crested Wave

$$\times \sin \left\{ \frac{1}{2} (kx + ky + \epsilon) - \sigma t + \sigma \right\} \quad (A-4)$$

$$\delta = \arctan \left\{ \frac{\zeta_{x0} - \zeta_{y0}}{\zeta_{x0} + \zeta_{y0}} \tan \frac{1}{2} (kx - ky - \epsilon) \right\}$$

(1)の場合と同様、定点での時間経過は定振幅波形となり、直線(A-2)式上で最大振幅 $(\zeta_{x0} + \zeta_{y0})$ を、直線(A-3)式上で最小振幅 $|\zeta_{x0} - \zeta_{y0}|$ をとる。

(3) 異波長同波高の波 ($\zeta_{x0} = \zeta_{y0} = \zeta_0$)

$$\zeta_{xy} = 2\zeta_0 \cos \left\{ \frac{1}{2} (k_x x - k_y y - \epsilon) - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) t \right\} \sin \left\{ \frac{1}{2} (k_x x + k_y y + \epsilon) - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) t \right\} \quad (A-5)$$

定点での時間経過は一種の振幅変調波で、ビート周期は $2\pi/|\sigma_x - \sigma_y|$ 、最大振幅は $2\zeta_0$ 、最小振幅は0である。波形記録例を Fig.36(ii) に示す。

(4) 異波長異波高の波

本文(4)となる。この場合には、周期 $4\pi/(\sigma_x + \sigma_y)$ の振動波形で、ビート周期としては $2\pi/|\sigma_x - \sigma_y|$ 、【および $\delta(t)$ の項の影響で $4\pi/|\sigma_x - \sigma_y|$ の2種類を有する複雑なものとなる。最大振幅は $(\zeta_{x0} + \zeta_{y0})$ 、最小振幅は $|\zeta_{x0} - \zeta_{y0}|$ である。波形記録例を Fig.36(iii) に示す。

Fig.36(ii) Records of Short-crested Wave

Fig.36(iii) Records of Short-crested Wave