斜航する船の波浪動揺と定常波力に関する水槽実験

正員 安川 宏 紀* ファイズル アムリ アドナン**

Experimental Study on Wave-Induced Motions and Steady Drift Forces of an Obliquely Moving Ship

by Hironori Yasukawa, *Member* Faizul Amri Adnan

Summary

Lateral drift occurs due to the effects of wind forces and/or wave drifting forces in ships sailing in actual seas. It is important therefore to investigate the influence of lateral drift on seakeeping performance to attain a rational design for ships. This paper describes the experimental results with respect to ship motions in regular waves and steady drifting forces for an obliquely moving ship. The experiments were carried out for SR108, container ship at seakeeping and maneuvering basin, Nagasaki R & D Center, MHI. Due to the effect of the hull drift, the lateral motions such as sway, roll and yaw are induced even in pure heading waves, which never appear in case without hull drift. Their amplitudes become larger with increase of absolute value of the drift angle. In beam waves, also, amplitudes of sway, roll and yaw become larger with increase of the drift angle. On the other hands, the influence of the hull drift on the motions of surge, heave and pitch is not remarkable. The influence of the hull drift on wave drifting lateral force and yawing moment is considerable large. The lateral drifting force acts on the hull so as to damp the lateral motion. The influence of the hull drift on the added resistance is small.

1. 緒 言

波浪中を航行する船は、風や波漂流力の影響により、わずかながらも斜航しながら航行していると考えられる¹⁾。より実態に即した形で船舶の耐航性能を把握し、船舶設計に活かすためには、波浪動揺特性や定常波力に及ぼす船体斜航の影響がどの程度あるのか把握しておく必要があるように思われる。

池田等は、横揺減衰特性や横揺れ強制力に及ぼす横漂流運動の影響について検討を加え、その影響は無視できないことを示している²⁾。上野等は、船体運動の小さな短波長域において、斜航時ならびに旋回時の模型船に作用する波漂流力の計測を行った³⁾。この計測結果は、波浪中における操縦運動を議論する上で興味深いものであるが、前進速度がある場合には、斜航角とともに、波方向が変化した状態での計測となっている。従って、斜航と波方向の影響を分離して議論することが難しい。

本研究では、Fig.1に示すように、模型船を強制的に斜航させ、それに規則波を当て、そのときの船体動揺と船体に作用する流体力を計測した。このような方法を採用することにより、波方向一定の条件下で斜航角を系統的に変化させた計測が可能となる。本

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

論文では、水槽試験の概要とその計測結果について報告する。

2. 水槽試験の概要

規則波中を斜航する船の動揺およびそのとき船体に作用する波漂流力を把握するため、三菱重工業 長崎研究所耐航性能水槽（長さ×幅×水深=160m × 30m × 3.5m）において水槽試験を実施した。

* 広島大学大学院工学研究科

** 広島大学大学院工学研究科博士後期課程

原稿受理 平成 18 年 2 月 13 日

Fig. 3 Arrangement of measuring equipment and dynamometer

Fig. 2 Body plan of SR108 container ship

供試船として、SR108 コンテナ船を選んだ。Fig.2に SR108 のボディプランを示す。Table 1に水槽試験に用いた模型船とその実船における主要目を示す。模型船の縮尺比は 1/50 である。表中、 L_{pp} は垂線間長、 B は幅、 d は喫水、 ∇ は排水量、 x_G は浮心位置を表す。プロペラは装備せず、ボスキャップ状態とした。本船の試験状態を把握するために、 $\overline{GM}$ 、船体横揺れ周期 T_ϕ 、縦慣動半径 k_{yy} を計測した。Table 1にはその計測結果も示している。

Fig.3に模型船の試験配置図を示す。試験は、規則波中において船体を斜航状態で曳航し、そのときに発生する運動及び流体力を計測した。波高計測位置は船体重心位置より前方 4.4m、右舷側 0.72m に設置した。曳航は模型船の前後および左右をコイルばねで半拘束して行われた。すなわち、中央に配置した全量型抵抗動力計と船首尾に配置した 2 台の波漂流力計測装置で前後、左右を半拘束する状態となる。

Table 1 Principal dimensions of SR108 and experimental conditions

	Model	Ship
L_{pp}	3.500m	175.0m
B	0.508m	25.40m
d	0.190m	9.50m
∇	193.6kgf	24,800ton
x_G	-0.0509m	-2.55m
KM	0.21m	10.5m
$\overline{GM}$	0.025m	1.25m
T_ϕ	2.43s	17.2s
k_{yy}/L_{pp}	0.272	—

左右揺を除く船体運動の 5 成分は全量型抵抗動力計に付属しているポテンシオメータを用いて計測した。また、船体抵抗は全量型抵抗動力計（ロードセル）を用いて計測した。船体運動の左右揺については、船上に搭載したジャイロで計測した。横方向の力 (Fig.4における Y_1, Y_2 成分) は船首及び船尾に配置した漂流力計測装置（ロードセル）を用いて計測した。 Y_1 と Y_2 の和が船体に作用する横力 Y_H 、 Y_1 と Y_2 の差にレバーを乗じたものが重心周りの回頭モーメント N_H となる。

波は規則波とし、波高および曳航速度一定で波方向、斜航角、波長を変更して試験を行った。試験における波高 H_W は 70mm ($H_W/L_{pp} = 0.02$) を目標とした。曳航速度 U^* は 0.879m/s (船長ベースのフルード数で 0.15 相当) とした。波方向 χ は 0deg(正面向波)、90deg(横波) の 2 パターンとした。斜航角 β_0 は -10、-5、0、5deg と変更した。なお、斜航角の定義は、Fig.4に示す通りである。波長 λ は λ/L_{pp} で 0.5、0.7、1.0、1.2、1.5 と変化させた。規則波中試験に先立ちベースとなる平水中斜航試験を実施した。

前述の通り、本計測法では、模型船をコイルばねで半拘束している。具体的には、前後方向にばね定数 0.054kgf/mm のコイルばねを、左右方向にばね定数 0.032kgf/mm のコイルばねを前部と後部それぞれに取り付けた。このような計測装置を用いて波浪中を斜航させると、船に作用する外力によって、所定の斜航角 (β_0) がシフトする可能性がある。Fig.5は、水槽試験で得られた横波中における斜航角シフト量の平均値 ($\Delta\beta_0$) を、波長・船長比 (λ/L_{pp}) をベースに図示したものである。 $\Delta\beta_0$ は、 β_0 の絶対値が大きくなるにつれて大きくなり、最大で 1.3deg 程度となる。この値は大きなものではないので、特に調整等は行わないものとした。

3. 船体動揺の計測結果

船体運動については振幅・位相解析を行った。得られた船体運動の振幅 $|\xi_j|$ ($j = 1, 2, \dots, 6$) は次のように無次元化した。なお、 $j = 1$ から 6 は、前後揺、左右揺、上下揺、横揺、縦揺、船首揺を意味する。

$$|\xi'_j| = \frac{|\xi_j|}{A} \quad (j = 1, 2, 3), \quad |\xi'_j| = \frac{|\xi_j|}{\nu A} \quad (j = 4, 5, 6)$$

ここで、 ν は入射波の波数、 A は波振幅である。

Fig.6に正面向波中における船体動揺の振幅の計測結果を示す。前後揺、縦揺は、斜航角が付き、それが大きくなっても、あまり

Fig. 6 Effect of hull drift angle on ship motions in regular head waves

Fig. 4 Definition of hull drift angle and drift force components in the measurement system

Fig. 5 Averaged drift angle change in case of regular beam waves

変化しない。上下揺は、波長・船長比が 1.0 を越えたところで、斜航角絶対値の増加とともにその振幅が小さくなる傾向があるが、顕著なものではない。

左右揺、横揺、船首揺といった横運動は、斜航角が 0 のとき、理論的には運動が現れない。試験結果を見ると、それらの振幅は非常に小さいことが確認できる。斜航角が付くと、左右揺、横揺、船首揺の運動が現れ、斜航角の絶対値が大きくなるにつれて、それらの振幅も大きくなる。これは、斜航角が付いたことにより、横運動を発生させる波強制力が船体に作用したことを意味する。準定常的に考えると、船体に作用する横運動に関するフルードクリロフ力は 0 である。従って、これ以外のいわゆる反射波成分による波強制力が船体に作用したことが分かる。

Fig. 7 に横波中における船体動揺の振幅の計測結果を示す。前後揺、上下揺、縦揺については、斜航角が大きくなるほど、運動振幅が小さくなるようであるが、明確なものではない。横運動である左右揺、横揺、船首揺については、斜航角が大きくなるほど、運動振幅が大きくなる傾向がある。全般的に、左右揺、横揺、船首揺のような横運動において、船体斜航の影響が大きい。

4. 定常流体力の計測結果

規則波中において、斜航角を変化させながら計測された定常流体力は、次の 2 つの見地から解析を行うことができる。1 つは波漂流力に及ぼす船体斜航の影響、もう 1 つは船体に作用する斜航流体力すなわち操縦流体力微係数に及ぼす波浪の影響というものである。それぞれについて行った解析結果を以下に報告する。

4.1 波漂流力に及ぼす船体斜航の影響

計測された船体抵抗、横力、回頭モーメントは平均値解析を行い、波浪中における値から平水中の値を差し引いて波漂流力とした。得られた波漂流力 X_R, Y_D, M_Z は次のように無次元化した。

$$X'_R, Y'_D = \frac{X_R, Y_D}{\rho g A^2 (B^2 / L_{pp})}, \quad M'_Z = \frac{M_Z}{\rho g A^2 B^2}$$

Fig. 7 Effect of hull drift angle on ship motions in regular beam waves

Fig. 8 Effect of hull drift angle on wave drift forces in regular head waves

Fig. 9 Effect of hull drift angle on wave drift forces in regular beam waves

Fig. 10 Steady lateral force and yawing moment acting on ship hull in regular head waves versus drift angle

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

Fig.8に正面向波中における波浪中抵抗増加、波漂流横力、波漂流回頭モーメントの計測結果を示す。波浪中抵抗増加は、斜航角によって大きな変化は見られない。正面向波中では、斜航角が0のとき、波漂流横力と波漂流回頭モーメントは理論的に0であり、試験結果を見ると、それらはほとんど0となっている。斜航角が付くと、波漂流横力と波漂流回頭モーメントが船体に作用し、斜航角の絶対値が大きくなるにつれて、波漂流横力と波漂流回頭モーメントの絶対値も大きくなる。 $\lambda/L_{pp} = 1.0$ 付近で最大となる。

Fig.9に横波中における波浪中抵抗増加、波漂流横力、波漂流回頭モーメントの計測結果を示す。波浪中抵抗増加には、斜航角に対する明確な傾向の変化は見られない。波浪中抵抗増加に及ぼす船体斜航の影響は小さいようである。波漂流横力、波漂流回頭モーメントは、斜航角の増加とともに大きくなる傾向があり、特に、短波長域における漂流横力において顕著である。

4.2 操縦流体力微係数に及ぼす波浪の影響

次に、横力と回頭モーメントに関する操縦流体力微係数に及ぼす波浪の影響として考える。計測された横力、回頭モーメントの平均値 (Y_H, N_H) を次のように無次元化する。これには波浪定常力とは無関係な船体に作用する斜航流体力成分が含まれていることに注意が必要である。

$$Y'_H = \frac{Y_H}{(1/2)\rho L_{pp} d U^2}, \quad N'_H = \frac{N_H}{(1/2)\rho L_{pp}^2 d U^2}$$

先述の通り、模型船をばねで半拘束した状態で斜航させるので、設定値に対し、斜航角がわずかに変化する。まず実際の斜航角 β を求め、この β を横軸に取り、平水中における船体に作用する横力、回頭モーメントを図示したのが Figs.10, 11である。図中、平水中ならびに規則波中 $\lambda/L_{pp} = 0.5, 1.0, 1.5$ 計4つの結果を示している。正面向波中では Y'_H や N'_H の β に対する傾斜が変化していることが分かる。横波中では、 β が0のときにも

Fig. 11 Steady lateral force and yawing moment acting on ship hull in regular beam waves versus drift angle

波漂流力が作用するため、原点がシフトしたような結果となる。

この Y'_H と N'_H を β に対する1次+3次のべき多項式に当てはめ、その線形項 Y'_β, N'_β を、 λ/L_{pp} ベースに図示したのが Fig.12である。規則波中における Y'_β は平水中における値よりも大きくなっており、正面向波中では λ/L_{pp} が1.0、横波中では λ/L_{pp} が0.5という波漂流力の大きなところで最大となる。これは横運動に対する減衰が増加したことを意味する。 N'_β は、横波中では平水中とほぼ同じ、正面向波中では λ/L_{pp} が1.0付近で増加する結果となっている。

これらの結果から、斜航による横力の着力点 N'_β/Y'_β を計算し、Fig.13に図示する。波浪中での着力点は、平水中におけるそれよりも減少していることが分かる。着力点が小さいほど、針路安定であることを意味するので、波浪中では針路安定性が増す方向にあると言える。正面向波中では波長が長いほど、横波中では波長が短いほど、着力点が減少しており、針路安定性が改善されることが分かる。なお、波浪中における針路安定性を正しく議論するには、旋回モードに関する着力点を議論する必要があるが、これについては今のところ不明である。

5. 結 言

規則波中を斜航する船舶の動揺および波漂流力特性を水槽試験によって調査した。その結果、次のような知見を得た。

- (1) 正面向波では本来現れることのない左右揺、横揺、船首揺といった横運動が、斜航角が付くことにより現れ、それらの振幅は、斜航角の絶対値とともに大きくなる。横波中において、左右揺、横揺、船首揺の振幅は、斜航角とともに増大する傾向がある。一方、前後揺、上下揺、縦揺に及ぼす船体斜航の影響は小さい。
- (2) 波浪中抵抗増加に及ぼす船体斜航の影響は小さい。一方、波漂流横力、波漂流回頭モーメントに及ぼす船体斜航の影

Fig. 12 Linear hydrodynamic derivatives in regular waves

Fig. 13 Acting position of lateral force in regular waves

響は無視できない大きさとなる。波浪中を航行する船は、波漂流力の影響により、平水中よりも針路安定性が改善される方向となる。

今後は、このような現象が発生するメカニズムの考察が必要であり、特に、理論的な検討が望まれる。斜航する船体の波浪動揺については、著者等がストリップ法⁴⁾をベースに検討を行う予定としている。漂流力に及ぼす船体斜航の影響については、高次の漂流力として知られている波漂流力減衰 (wave-drift damping) 成分⁵⁾⁶⁾が関与しているように思われる。更なる検討が必要である。

謝 辞

水槽試験の実施に御協力いただいた三菱重工長崎研究所耐航性能水槽の方々に深くお礼申し上げます。また、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 (B)16360438) ならびに造船学術研究推進機構より交付金を受けたことを記し関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 田中良和：第2章 船の経済運航とライフサイクルバリュー，実海域における船舶性能に関するシンポジウム（試験水槽委員会シンポジウム），日本造船学会（2003），pp.10-19.
- 2) 池田良穂，Baharuddin Ali：横波中の船体運動に及ぼす横漂流の影響，関西造船協会論文集 第241号（2004），pp.143-149.
- 3) 上野道雄，二村 正，宮崎英樹，野中晃二：短波長波中を操縦運動する船に働く定常波力について，日本造船学会論文集 第188号（2000），pp.163-172.
- 4) Faizul A. A. and Yasukawa, H.: A Strip Method for a Laterally Drifting Ship in Waves (Part I: Motion Equations), J. Marine Science and Technology (2006), (to be published).
- 5) Winchers, J. E. W. and Huijsmans, R. H. M.: On the Low Frequency Hydrodynamic Damping Force Acting on Offshore Moored Vessel, Offshore Technology Conference, Houston (1984), Paper 4813.
- 6) Newman, J. N.: Wave-Drift Damping of Floating Bodies, J. Fluid Mech., Vol.249 (1993), pp.241-259.