(昭和 41 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

非対称横揺れの性質について (その2)

正員 田 宮 真

On the Characteristics of Unsymmetrical
Rolling of Ships (No. 2)By Shin Tamiya, *Member*

Summary

Experimental results on unsymmetrical rolling of two ship models, a fishing boat and a cargo ship, are presented.

The model was supported freely, except yawing, in an experimental tank under the action of beam seas, beam wind or both.

The heel angle, the amplitude of rolling and the velocity of drifting were obtained.

In the fisher-boat experiment, observation of unsymmetrical rolling in regular waves due to shipping water was the main subject, while, in the cargo ship experiment, the wave characteristics were kept constant and the wind velocity was changed from zero to 8 metres per second so as to obtain the informations on the combined action of wind and waves.

Unsymmetrical rolling due to shipping water with weatherside heel took place under wave action alone when freeboard was too small or/and effective area of freeing port was insufficient.

It is noticeable that the principle of superposition seems to fail sometimes as to motions of ships under combined action of wind and waves. In other words, these experiments revealed that the rolling amplitude varied with increasing wind speed, the heel angle due to the same wind velocity increased more or less under the additive action of waves and the velocity of drifting was independent of the existence of waves except in case of very low wind speed.

ま え が き

非対称横揺れをおこす要因として風、海水打込み、積荷の重心移動が考えられる。本報告において、これらの因子をとりあげて2隻の小型船模型実験を行なった結果をのべる。風と海水打込みについては特に波浪特性との組み合わせがいろいろ考えられ、不規則波中の実験まで行なわないと十分でないが、基礎的な資料を求める意味で小範囲の実験のみを実施した。また本報文中では非対称横揺れの特性という統一の見地から現象を観察することに主眼をおき、たとえば海水打込みの機構や、過渡状態についてはふれないことをこたわつておく。

1 規則波上における非対称横揺れ

適当な乾舷と GM を有する船舶は規則波上においてほぼ対称横揺れを行なうが、乾舷が過小となり、甲板上に滞水する時間が大きい場合や、なんらかの原因で大量の海水打込みがおこつたとき、一時的にあるいは定常的に非対称横揺れ、すなわちある平均傾斜角を中心とする横揺れをおこす。まえがきにのべたように、ここでは定常的な非対称横揺れを対象として行なった漁船模型による実験結果を記す。

使用した模型船要目は表1に、試験状態は表2に示した。

原稿受付 昭和 41 年 7 月 8 日

* 東京大学生産技術研究所

表 1 漁 船 模 型 要 目

船 種	99 屯型以西底曳網漁船			放 水 口 の 数	
	長×幅×深	1200×229×113 (mm)		平 均 喫 水	110.5
副 部	甲板室, 長×幅	559×103 (および 143)		排 水 容 積	21.48×10³
	舵, パーキール, ビルジキール付き			KG	92.9
玄 塙 高 さ	26.0	36.5	47.0	GM	23.1
	放水口, 高さ×幅	12×22	17×22	22×22	20.7
				横 揺 周 期	1.06
				縮 尺	1/23.25

表 2 漁船模型試験状態

載 荷	過 載	満 載
玄 塙 高	低 中 高	低 中 高
甲板室幅	基準, 広幅	基 準
放 水 口	開	閉
初期傾斜	風 上, 直 立, 風 下	
波高波長比	約 1/25	

1.1 試 験 方 法

模型船は水槽内に横におかれ、船首揺れのみを拘束されていて、横波、横風をうける。上甲板、甲板室、倉口蓋、防波板等が設けられて全体として水密となつている。波をおこすまえに上甲板左上または右舷に重錘をのせて玄塙頂部が没水する程度に初期傾斜をあたえ、波の数山が通過するまでまつてから注意深く重錘をとりのぞく。これによつて大量の海水が打込んだ後の船の挙動を知ることができると考えた。表の初期傾斜は、この意味である。台車は船の漂流速度にはほぼ一致するよう駆動し、この速度から漂流速度を求めた。

一般に模型船は重錘の除去と、台車の初期加速走行にともなつて非定常過渡現象を示すが、最大 20 揺れのうちに定常動揺に入り、この状態で平均傾斜と横揺れ片振幅を求めた。

なお本実験本来の目的は海水打込みと玄塙高さ、甲板室幅の関係を知ることであつて、甲板室幅を実船より 40% 増の場合を実測した。このとき排水量、重心高さは不変と考えた。

1.2 実 験 結 果

図 1 に過載状態、図 2 に満載状態の平均傾斜および振幅 θ_0/h_w を会周期ベースに示した。

直立状態から出発すると低い玄塙と、小さい乾舷の場合、風上側に打込水が滞留して非対称横揺れをおこす。通常許される乾舷をもつときは対称横揺れとなる。滞水は波周期の短いときにおこる。これは船体の上下、左右揺れと関係するであろう。

初期傾斜をあたえた場合、放水口が開いて

h_w = 波高, H_B = 玄塙高さ, 初期傾斜, Δ 風下, $\circ$ 直立, $\square$ 風上

図 1. 過載時の傾斜と振幅

いると一般に玄塙が高くなるほど対称横揺れに近づく。しかし過載状態で風上側（波のくる側）に傾斜すると玄塙の高いほど $|\theta_0|$ が大きく、この場合も波周期の小さいときに非対称が著しい。満載の場合は低玄塙、短周期の波で風上、風下側とも大きな $|\theta_0|$ を示していて、この値は放水口を閉じたときより大きいのは特異な現象である。このことはおそらく次のように説明されるであろう。すなわち乾舷が大きいためかなり傾斜しても水面が玄塙頂部をこす時間は短く、このため打込んだ水に対して玄塙高さはあまり影響しないのに、放水口面積(高さ)は玄塙高さに比例しているので排水作用は低玄塙ほど悪く、甲板水の滞留が生ずるものと推察される。

放水口をとじたときの傾向は過載時満載時とも似たものであり、玄塙の高いほど、波の短いほど非対称性はつよい。

$|\theta_0|$ が大きくなると横揺れ抵抗が著増し、 θ_1 が減少することもこれらの図からあきらかである。図 3 は載荷状態のみに着目して、 θ_0 と θ_1 の関係をまとめたものである。

図 4 に甲板室の幅をました場合を示す。ほとんど非対称横揺れはおこつていない。

図 2. 満載時の傾斜と振幅
(記号は図 1 と同じ)

図 4. 過載時の傾斜と振幅
(広幅甲板室, 記号は図 1 と同じ)

$$GM' = \frac{d(GZ)}{d\theta} \text{ (cm/rad)}$$

を併示した。

以上の結果を概括すると、甲板面（水平面）が没水することによって動力学的な傾斜モーメントが発生するとともに、玄壇は巨大な制揺装置として作用すると考えることができるようである。

2 重心移動による非対称横揺れ

船内のバラストを水平に移動して静水中で 3.0 度および 5.0 度初期傾斜（風下側）をもつようにし、規則波中で横揺実験を行なった。これは風圧相当モーメントをあたえて、風と波の作用をうける船の実験と考えることもできるが、実際に風を作用させると漂流速度が異なる点で、実質的に差がある。満載、甲板室幅標準、玄壇高さ中、放水口は開および閉とした。この実験では造波機の偏心を一定としたので波高は短周期の波ほど高い。図 7 に θ_0 , θ_1 を示す。このときの波周期と出会周期波高の関係は図 8 に示される。初期傾斜は波高に無関係であるから図 7 では θ_0 をそのまま示した。満載ではこの程度の初期傾斜があつても甲板没水はそれほど著しくないため非対称横揺れとして特別な兆候はみえない。初期傾斜 3 度、放水口閉で短周期の θ_0 が著増しているが、漂流速

図 3. 傾斜と振幅
($T_e > 0.9 \text{ sec}$)

図 5 に参考のため、静復原モーメントの実測結果を示す。また図 6 は波周期と出会周期、波高との平均的な関係を示してある。漂流速度の計測精度は不十分であつたが、 θ_0 , θ_1 , 等による変化はあまりなく、出会周期の値も図示のもので代表される。

図 5 に

図 5. 復原モーメント GM'

図 6 波周期、出会周期波高の平均的な関係

図 7. 重心移動による傾斜と振幅
(満載初期傾斜 ○●3度 △▲5度)

図 8. 図 7 における波周期と出会周期, 波高

図 9. 傾 斜 水 線

度も他の計測値にくらべて過大と判定せられるので、多少疑問があり、放水口閉と同様な傾口になるのかもしれない。

放水口の開、閉にしたがつて、 θ_0 の増加の模様が、初期傾斜のわずかな差で逆転しているのは図 2 におけると同様の理由ではないと思われる。

波浪中の運動であるが、簡単に静水中での船体傾斜と玄壙没水の模様を知るために図 9 を掲げる。この図は単に船体中心と直立時の水面との交点から傾

斜水面をかいているから、排水量は一定に保たれないが、概念をあたえるためには十分であろう。

3 風があるときの波浪中非対称横揺れ

3.1 漁船模型による実験

この実験を行なったときは、水槽横方向（模型の長さ方向）の風速分布は中心部 60 cm が低く、両端が高く、かつ左右対称性も不十分で、中心部の平均風速と両端近くとの比は約 0.8 であったから、十分広い水面に一樣な風がある状態とは異なるが、本論ではこれに対してなんら修正を行なっていない。模型の試験状態は表 3 に示す。

実験の手数を省くため、造波機の偏心を一定とした。図 10 に波周期と波高、出会周期の関係を示す。また図 11 に放水口開の場合の結果を示す。図中 3.6 度等あるのは、波なしで風のみときの定常傾斜で、いずれも波の併存する時より小さくなっている。過載の場合、風速の低い

表 3 漁船模型試験状態
(風波併存)

載 荷	満 載, 過 載
甲板室幅	基 準
玄 壙 高	中
放 水 口	開, 閉
初期傾斜	直 立
風 速	4.9 m/s および 6.5 m/s (水面上 5~20 cm の平均)

図 10. 風波併存時の波高と出会周期

図 11. 風のある場合の傾斜と振幅
(記号は図 10 に同じ)

(4.9 m/s) ときのみ示したが、風速を 6.4 m/s にあげるとほとんど横転する大角度傾斜となり、記録ができなかった。

図 5 を参照すると風速 4.9 m/s における定常傾斜モーメントは 4~5 kg·cm, 6.4 m/s では 7 kg·cm の程度で、ほぼ風速の 2 乗に比例している。風のみによるモーメントは同じ図から約 2.8 kg·cm, 4.2 kg·cm となる。図 1, 2 では波による傾斜はほとんどないが、あつても風上側であつたから、図 11 はこの場合、風の作用と波の作用とは単純に重畳できないことを示している。図 1 で T_e の 0.95 sec 以下で風下側に約 6 度までの傾斜があるが、図 11 の場合 T_e はほとんど 0.95 sec 以上であつて、このことだけでは説明がつかない。

つぎに図 7 にくらべると θ_0 の変化の傾向はにているが定量的にはかなりの差がある。図 11 では θ_0 の最大となる T_w と θ_1/h_w の最大となる T_w とがほぼ一致しているのに、図 7 ではそうでないことも差の一つである。図 11 で風速の大きいとき、 θ_0 大、 θ_1 小となるのに、図 7 ではこのことも顕著でない。

図 11 で満載時に θ_0 と θ_1 の T_w に対する傾向が相似であることは第 1 章に概括した推論をうらずけるように思われる。すなわちある限度までは θ_1 の大きいことが、 θ_0 を大きくしているように推察されるのである。

3.2 小型貨物船模型による実験

前節にのべたように、風と波とが併存するとき、その各々の作用が重畳されるにとどまらない場合があると考えられたので、小型貨物船模型について風の作用に主眼をおいて実験を行なつた。模型船要目は表 4 に示した。ほぼ全通の放水口は開放のまま実験した。

水槽内の風速分布は、風路を模型の上流約 2 m でしぼることによりかなり改善された。

試験の種類と条件は表 5 に示される。本実験においても、幅 1.80 m の水槽に全長 1.24 m の模型を横置したことによる側壁影響等は一切修正しなかつた。

表 5 にある E3 は E2 の状態の船のキールの部分に長さ 600 mm、深さ 21 mm、厚さ 0.8 mm のバーキール（中心間距離 15 mm で直径 10 mm お

表 4 小型貨物船模型要目

船 型	499 GT, 1 貨物艀, 船首楼, 長船尾楼つき貨物船
長×幅×深	1125×210×109.1 (mm)
玄 弧	FP 31.5 AP 15.8
船 楼	船首楼 158 (長)×46.3 船尾楼 414×50.0
玄 壁 高	22.5, 放水口高 4.0
倉 口	555.8×120×22.5/27.5 (倉口蓋は船体中心線で高くなっている)
ビルジキール	340×4.5
縮 尺	1/40

表 5 貨 物 船 模 型 試 験 状 態

番 号	平 均 水 喫 (cm)	船尾トリム (cm)	排水量 ¹⁾ (kg)	KG (cm)	GM (cm)	横 揺 れ 期 周 (sec)	波周期 ²⁾ (sec)	備 考
E1	9.90	0.30	17.33	8.29	0.96	1.75	1.59	満 載 状 態
E2	6.71	1.88	10.96	9.87	0.73	2.03	1.58	半 載 状 態
E3	6.71	1.88	10.96	9.70	0.90	1.90	1.58	Vertical Fin つき ³⁾
E4	6.71	1.88	10.97	9.61	0.99	1.81	1.59	Horizontal Fin つき ³⁾

1) 清水中

2) このほかすべての場合に波なしが加わり、E1, E2 では 0.75 sec の波でも実験した。波粗度はすべて 1/30

3) 本文参照

よび 8 mm の孔を交互にあけてある) を設け、これに厚さ 1 mm の柔軟ゴム板を平行に接して吊下げたもので、実験にあつてはゴム板が風下にくるようにした。また E4 ではこのバーキールの長さを 470 mm に減じたものだけを風下側船側に水平 Fin として取付け、風上玄には釣合用に真鍮板を取付けた。この状況は図 12 に示される。これらは横揺れ抵抗が 1 周期中に非対称に変化することが 3.1 のべた風波併存時の傾斜の増大に影響するのではないかと予測にもとづいて行なわれた実験で、図 12, E3 の配置は船の角速度によつてバーキールの孔がゴム板のため開閉されて非対称抵抗を生ずるものである。

実験結果はすべて風速を横軸に、縦軸に θ_0 , θ_1 および漂流速度 v をとつて図 13 に示される。

まず θ_0 に着目すると、E1, E4 では波の有無によつて明らかに差があるが、E2, E3 ではほとんど差がないといつてよい。E3 の程度の抵抗モーメントの差はきかないとすると水面近くの水平面の運動がこの差を生じ

図 12. Fin とゴム板の配置

図 13. 貨物船模型試験結果
(○△波あり ●▲波なし)

図 14. 傾斜水線 (貨物船)

たものとするのが妥当である。E1 は乾舷が小さいため容易に上甲板が没水するし、E4 は非対称に水平フィンが設けられている。船体の上下揺れとの連成効果を考える必要がありそうであるが、それは後にのべる。

つぎに漂流速度についてはいずれも約 3 m/sec 以上の風速では波の有無が差をもたらない。風速零すなわち波だけのときの漂流速度は 2~5 cm/sec で小さいけれども、ともかくこの速度が風による速度に加重されているとはこの図からはいえず、ここでも重畳の原理は成立たない。

さらに θ_1 についても、風速増加に伴って著しい増大がみられる。単純に風は定常傾斜をおこし、波は横揺れをおこすとする従来のとりあつかいは甲板縁没水が著しくない E2 に対しても適用できない。

なお図示しなかつたが、E1, E2 では周期 0.75sec の波についても同様の計測を行なつた。

短い波では θ_0 における波の有無の影響が E1 についても小さく、E2 ではないとみてよい。 θ_1 はもちろんきわめて小さい。

図 14 は図 9 にならつて傾斜水面を示したものである。

図 15. 小型貨物船復原モーメントと GM'

図 15 に E1, E2 に対応する静復原モーメントを示す。図 5 にならい GM' もかいておいた。

以上の結果を要約すると次のようになる。

- 1) 風の作用と波の作用とを別個に考えて単に加え合わせるだけでは、風、波併存時の船の挙動を説明するに不十分な場合がある。
- 2) 前記重畳則のなりたたなくなる原因は主として、水面付近の水平船体表面 (甲板面) の運動に基因するように推察される。
- 3) 玄壇の没水は横揺れ抵抗を著しく増大するが、これが θ_0 をます主因とは考えられない。
- 4) 規則波上における風速変動は波とおなじ周期をもつから、いわゆる同調周期の近傍で、波が高いときはこの要素を考えにいれる必要がある。(静水面上 15 cm の高さで風速変動を

図 16. 風速変動

測定した結果を図 16 に示す。説明は後出.)

4 考 察

再度のべたように海水打込みの過渡現象は考えないこととし、非対称周期的横揺れについて、前述の実験結果を考慮して、運動を数式表示するため若干の考察をのべる。

船は定常風と、規則波とを真横からうけて、平均傾斜 θ_0 、片振幅 θ_1 で非対称横揺れを行ないつつ、平均漂流速度 v で風下に移動しているものとする。直角座標 $O-x, y, z$ をとり、 xy 面を静水面におき、 y の正は風下向きにとり、 z 鉛は直上方を正にする。この座標系は v の速度で風下にうごき、重心は O_z の左右に sway するものとする。

波面の式は静止座標 ($O'-x', y', z'$) について

$$\zeta = a \cos(ky' - \omega t)$$

とすると、 $O-x, y, z$ 系について

$$\zeta = a \cos(ky - \omega_e t) \quad (1)$$

ただし

$$\omega_e = 2\pi/T_e = 2\pi(c-v)/\lambda \quad (2)$$

λ は波長、 $T_w = 2\pi/\omega$ は波周期、 c は波速である。

波傾斜は時計まわりにはかるものとする、 $y=0$ において

$$\theta_w = \left(-\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)_{y=0} = -ka \sin \omega_e t \quad (3)$$

定常風のみ作用で傾斜して漂流しているときの重心位置は $O-z$ 上にあり、この平衡位置からの変位を y_G, z_G とする。また風のみによる傾斜角を θ_{00} とする。

まず風のみときのモーメントのつりあい

$$W \cdot GZ(\theta_{00}) = \frac{\rho_a}{2} (U_0 - v)^2 A_a \cdot c_a \cdot h + \frac{\rho}{2} v^2 A c_w \cdot l \quad (4)$$

右辺第1項は水平力によるモーメント、第2項は垂直力によるモーメントで A_a, A はそれぞれ空中、水中側面積を代表し、 h, l はモーメントの挺長、 c_a, c_w は無次元の係数である。 $v \propto U_0$ と考えて左辺を $\rho_a U_0^2$ に比例する単一項におくこともできる。 ρ_a, ρ は空気、水の密度である。

つぎにこれに波が加わった場合を考えると重心のまわりのモーメントのつりあい式を次のようにかくことができる。このとき、通常取扱いに準じて $\omega_e, \theta_w, \zeta$ 等は小さいものとする。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{I}{g} (1 + k_{xx}) \ddot{\phi} + N_\phi \dot{\phi} + W \cdot GM' \cdot \phi + W \cdot GZ(\theta_0) \right] \\ & + \left[\frac{W}{g} k_y \cdot \ddot{y}_G \cdot h_{2y} + N_y \cdot \dot{y}_G \cdot h_{1y} \right] \\ & + \left[\frac{W}{g} k_z \cdot \ddot{z}_G \cdot l_{2z} + N_z \cdot \dot{z}_G \cdot l_{1z} + r A z_G \cdot l_{0z} \right] \\ & = \left[\frac{\rho_a}{2} (U - v - \dot{y}_G - h_a \dot{\phi})^2 A_a h_0 c_M \right] \\ & + \left[r_{2z} \left(\frac{W}{g} \right) k_z l_{2z} \cdot \ddot{\zeta} + r_{1z} N_z l_{1z} \cdot \dot{\zeta} + r_{0z} (r A l_{0z}) \zeta \right. \\ & \quad \left. - \left\{ r_{2y} \left(\frac{W}{g} \right) k_y l_{2y} / \kappa \right\} \ddot{\theta}_w - (r_{1y} N_y h_{1y} / \kappa) \dot{\theta}_w + r_\phi W G M' \cdot \theta_w \right] + C \quad (5) \\ & \phi = \theta - \theta_0. \end{aligned}$$

k_{xx} 等は見掛け慣性モーメントおよび質量係数、 h_{2y}, h_{1y} は G から鉛直上方に、 l_{2z} 等は G から左方にはかつたモーメントの挺長、 N_ϕ 等は抵抗の係数、 $r_{22} \sim r_\phi$ は波動の有効係数であり、 r は水の比重量である。以下この式の各項について説明する。全体の思想は静水中で非対称横揺れを行なうために生ずるモーメント (左辺) と、波、風のあたえるモーメント (右辺) とがつりあうとするものである。

図 17. 坐 標 軸 等

4.1 左辺第1項 (大括弧内, 以下同様)

k_{xx} , GM' , GZ は近似的に θ_0 (未知) の関数であり, 甲板縁没水前後で変化が著しい。 N_ϕ は θ_0 と ω_e によつて変化する。これらについては第1報で若干報告した。矩形船型についての計算が都合で完了しなかつたので, 具体的な記述は将来に残される。

4.2 左辺第2項

静水中で sway するときのモーメントで, 重心の高さによつて h_{2y} , h_{1y} は符号を変ずることがありうる。傾斜して甲板縁没が水するときは負となることが多いと思われる。また θ_0 がますと急激に大きくなる。

4.3 左辺第3項

$\theta_0 \neq 0$ すなわち非対称横揺れのときにのみあらわれる。この項も甲板縁没水によつて急に増大するが, θ_0 がさらにますと変化が緩和されるであろう。はぼ水平な甲板面が傾斜のために I_{2z} 等を減ずると考えられるからである。

以上の左辺の各項は静水中における強制動揺試験によつて原理的には実測ができる。このさい漂流速度の影響をとりいれることも可能である。第1, 3項については計画をもっているが, 第2項はまだ具体的に考えていない。

4.4 右辺第1項

風によるモーメントで, 単一項であらわした。波の上での風速は近似的に速度 c で移動する剛体壁にそつて風が流れるものとする

$$\begin{aligned} U &= U_0 + \kappa(U_0 - c)\zeta_{y=0} \quad (z \ll \lambda) \\ &= U_0 + (U_0 - c)\kappa \cos \omega_e t \equiv U_0 + u \\ (U - v - \dot{y}_G - h_a \dot{\phi})^2 &\doteq U_0^2 + 2U_0(u - v - \dot{y}_G - h_a \dot{\phi}) \end{aligned} \quad (7)$$

となり, 風があると横揺れ抵抗が増大する。ただし h_a は水面上の風圧モーメント中心と G との鉛直距離をあらわす。なお実験では波のないときにも気流自身の乱れ u' があつたから

$$U = U_0 + u + u' \quad (8)$$

となり, 図16から $\text{ampl.}|u'| \doteq U_0/13$ と推定され, これをもとに同じく実測値から $\text{ampl.}|u| = (U_0 - c)\kappa_a$ を求めると κ_a が約16%となる。これは波の寸法から算出した $(\pi/30)$ より大きい, order としてはあつている。(7)式からあきらかなように $U_0 = c$ (この場合約2.5 m/s) で $u = 0$ となり, 風がないときは

$$U = -\kappa c_a \cos \omega_e t \quad (9)$$

これは波動による orbital velocity の成分で, 水のうごきとは逆になつている。このことは波の上に紙テープをたらし観察することができる。

4.5 右辺第2項

ζ および θ_w に比例する項は Froude-Krilov のモーメントである。orbital velocity の y, z 成分は

$$\begin{aligned} v_y &= -\dot{\theta}_w / \kappa & v_z &= -\dot{\theta}_w / \kappa \\ v_2 &= \dot{\zeta}, & \dot{v}_2 &= \ddot{\zeta} \end{aligned}$$

とあらわせるから他の項は抵抗および見かけ質量効果を示している。これらについては, θ_0 , v をいろいろかえてモーメントを測定することを一部始めている。

4.6 右辺第3項— C

(5)式は y_G, z_G を含むから, y, z 方向のつりあい式を連立させて始めてとくことができる。しかし $\dot{y}_G, z_G, \phi$ が正弦的变化をするとすると, 未知の常数 θ_0 を定める方程式には結局各方程式の常数項のみが残り, 定常風の作用だけがあるときに帰してしまう。実験結果はこのことを否定している。 C はこの点を解決するために加えた一項で, いまのところその函数形を表示することは困難であるが, 得られた実験結果の範囲内で考えると

$$C = f\{\theta_0, \theta_1; \theta_D\}$$

と推定される。ここで θ_D は甲板縁の没水角で θ_0 が θ_D をこえると C は無視できない大きさになるとしてよいであろう。また θ_1 が小さければ C は小さいと考えられる。このような項の生ずる主因は θ_0 のため, 一方の舷の上甲板のみが多く没水し, この甲板が上下, 左右および回転運動をするとき, 甲板面付近の流れのもようが, 一周期で非対称となり, 平均的に有限な値をもつからであると推測される。この場合 θ_1 のほかに $\dot{y}_G$ の振幅については, ω_e の大きいとき $\dot{y}_G$ も θ_1 もごく小さく, ω_e が小さくなると $\dot{y}_G$ は大きくなるが, 船と波とははぼ

一体となつてうごくためこれを主因子にとりあげなかつた。 $\dot{z}_G$ はその振幅が大きいとき、 θ_1 が小さく、 θ_1 の大きいとき $\dot{z}_G$ は無視できると考えた。もつとも海水打込は波周期が小さく、しかも岨度の大きい波の場合に起こり易いようであるから、非定常(非周期的)運動を考えるとときは $\dot{z}_G$ を無視することはできないであろう。

4.7 抵抗係数等

(5) 式で sway, heave の影響を無視し、また右边第1項の $\dot{y}_G, \dot{\phi}$ による影響や、波の破壊も小さいものとしてすると、左边第1項と右边第1項、第2項中の最終項およびCがのこる。

$$\phi = -\theta_1 \sin(\omega_e t - \delta)$$

とおいてとくと

$$W \cdot GZ(\theta_0) = \frac{\rho_a}{2} U_0^2 A_a h c_M + C = W \cdot GZ(\theta_{00}) + C \quad (10)$$

$$\theta_1 = \frac{r_\phi \Theta}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_e^2}{\omega_s^2}\right)^2 + \left(k \frac{\omega_e}{\omega_s}\right)^2}} \cdot \sqrt{1 + \left\{ \frac{2u_0}{U_0} \frac{GZ(\theta_{00})}{r_\phi \Theta \cdot GM'(\theta_0)} \right\}^2} \quad (11)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{k \omega_s \omega_e + \beta (\omega_s^2 - \omega_e^2)}{\omega_s^2 - \omega_e^2 - \beta k \omega_s \omega_e} \right\} : \beta = \frac{2u_0}{U_0} \frac{GZ(\theta_{00})}{r_\phi \Theta \cdot GM'(\theta_0)} \quad (12)$$

ここで

$$\Theta = \kappa a ; \omega_s^2 = W \cdot GM'(\theta_0) \left/ \left[\frac{I}{g} (1 + k_{xx}) \right] \right. ;$$

$$k = N_\phi \left/ \left[\frac{I}{g} (1 + k_{xx}) \right] \right. \cdot \omega_s \quad (\text{対数減衰})$$

$$u_0 = (U_0 - c) \kappa a$$

(10) は実験からCの近似値を求めるのに利用できる。(11) をみると u_0/U_0 , $GZ(\theta_{00})$ が大きいほど、また Θ , $GM'(\theta_0)$ が小さいほど、風速変動の影響の大きいことがわかる。また $\omega_e \doteq \omega_s$ のとき θ_1 は k に逆比例する。図13で満載のときの θ_1 が約12度で $k \doteq 0.5$ というのは、対称動揺でも甲板縁が出没して抵抗がふえていることを示すが θ_0 がますと、(U_0 増大) GM' が減じて β がふえても、 k の増大によつて結局 θ_1 が減少すると考えられ、実測にあわせるように k をきめると1以上になる。

あ と が き

波および風の中の横揺れ実験によつて甲板縁の没するような非対称動揺では、重畳の原則が適用しがたいことがわかつた。本報では船体運動の観測結果から推測できることしかのべられなかつたが、次回には船体に作用する力、モーメントの計測結果と、理論計算結果とを加えて、これまでの推測がどこまで正しいかを検証して報告したいと考える。

最後にかなり手数のかかる実験を寒暑をいわず逐行した研究室の諸君に感謝の意を表する。

この実験の一部は文部省総合研究補助金によつたことを付記する。