非線形な復原力曲線を持つ船舶の 向波中横揺れ特性に関する基礎的研究

正会員 片 山 徹* 学生会員 宮 本 修 吾*
正会員 橋 本 博 公** 正会員 田 井 祥 史***

A Study on Characteristics of Rolling in Head Waves of a Vessel with Nonlinear GZ-curve

by Toru Katayama, *Member* Shugo Miyamoto, *Student Member*
Hirotada Hashimoto, *Member* Yoshifumi Tai, *Member*

Summary

In this study, the characteristics of rolling in head waves for a vessel with nonlinear GZ-curve, which includes parametric rolling, are investigated. Rolling is measured for systematically changed wave length and height under the same forward speed, which is service speed in heavy weather. As the results, the range of T_e/T_ϕ (T_e and T_ϕ are encounter wave period and roll natural period), when periodic rolling occurs, is wider than one of previous results by Taguchi et al¹⁾, and the range spreads out wider range of $T_e/T_\phi > 0.5$. Especially, in the range of $T_e/T_\phi > 0.5$, roll amplitude becomes large, and a periodic rolling occurs at large wave height. It is supposed that the result is caused by the effects of roll amplitude on roll natural period. Then, numerical simulations²⁾ are carried out for some variation of GZ-curves to confirm the measured results. Additionally, roll measurements in superposed waves of two different wave periods and in the irregular wave with Pierson-Moskowitz spectrum are also carried out.

1. 緒 言

近年、バラスト水排水の環境影響が問題となっており、ノンバラスト船やバラスト水をほとんど積まない船型の研究・開発が進んでいる。このような船型の一つに、軽荷状態での復原性確保を目指した、幅広浅喫水船がある。

この船型では、復原力曲線が横傾斜角の増加に伴い線形復原力に比べて小さくなる非線形性を持つことがあり、そのため横揺れ振幅角の増加に伴い横揺れ固有周期が長くなり、従来の船舶とは異なった横揺れ特性を持つ可能性がある。このような背景のもと、これまでに同研究グループでは前述の復原力特性を持つ同船型の規則横波中横揺れ特性について調査・検討し、非線形な復原力曲線を持つ船舶に特有の同調曲線の跳躍現象の発生を確認している³⁾。

本研究では、同船³⁾を対象に向波航行時のパラメトリック横揺れを含む横揺れの発生条件とその特徴について調査した。まず、規則向波中で横揺れを計測し、その発生状態を調

査した。さらに、不規則向波中および2周波数合成波中での横揺れを計測し、その発生状態について調査した。最後に、数値計算により、前述の復原力曲線の非線形性によってパラメトリック横揺れが発生することを確認するとともに、同非線形性がパラメトリック横揺れの発生条件に与える影響について検討した。

2. 供試船

供試船の正面線図および主要目を Fig.1 と Table 1 に示す。また、横復原力曲線の計算結果を Fig.2 に示す。同図には線形復原力も示している。なお、復原力の計算では、横傾斜角毎にまず上下およびトリム方向のつり合い姿勢を求め、この姿勢に対して復原力を計算した。同船の復原力曲線は、横傾斜角5度付近で線形復原力に対して2割程度小さくなる非線形性を示す。この非線形性は、同船型が大きなビルジ半径と底勾配を持つ幅広浅喫水船であるため、比較的小さな横傾斜角からビルジ部を露出するために生じる。

Fig.3 に、自由横揺れ減衰試験結果から求めた横揺れ固有周期と横揺れ振幅角の関係を示す。同図から、横揺れ振幅角の増加に伴い、横揺れ固有周期が長くなることがわかる。これは、Fig.2 に示す横傾斜角の増加に伴い復原力が線形復原力に比べて小さくなる復原力曲線の非線形性によるものである。

* 大阪府立大学大学院 工学研究科

** 大阪大学大学院 工学研究科

*** 今治造船株式会社

Fig. 1 Body plan of the model.

Table 1 Principal particulars of the model.

	real scale	model scale
L_{pp} [m]	192	2.0
B [m]	32.26	0.336
draft: d [m]	9.0	0.0938
KG [m]	17.0	0.177
GM [m]	1.81	0.0189
roll natural period: T_ϕ [sec]	18.42	1.88
breadth of bilge-keels	0.7	0.0073
position of bilge-keels	s.s. 3.34-s.s. 5.59

Fig. 2 GZ-curve of the model in real scale.

Fig. 3 Measured roll natural period.

3. 横揺れ計測法

Fig.4 に、実験状態図を示す。供試船の船首部に、横揺れが自由となるように転がり軸受を取り付け、この軸に二本の弾性ロープを繋ぎ曳航する。横揺れ軸は重心高さとし、曳航時に弾性ロープが水平となるように調整する。運動は、重心位置に設置した慣性計測機器(CROSSBOW NAV440)で計測する。また、波高は曳引台車上に設置したサーボ式波高計で計測する。

造波機で波を発生させた後、模型船停止位置まで波が到達するのを待ち、曳航を開始する。運動の計測は、模型船が静止している状態から始め、水槽の造波機と反対側の消波ビーチからの反射波が模型船に追いつく前に終了する。

Fig. 4 Schematic view of experiment.

4. 規則波中横揺れ計測

出会い波周期 T_e と微小振幅時横揺れ固有周期 T_ϕ の比 T_e/T_ϕ が 0.5 付近で、横揺れ計測を行った。船速は一定とし、荒天中を航行していると考えて実船で 7kt ($Fn=0.083$, 模型スケールで 0.370m/sec) とした。入射波の波長を系統的に変化させ、出会い波周期が供試船の微小振幅時横揺れ固有周期の 1/2 を含む 0.8~1.35sec となるようにした。また、波高を 0.01~0.05m の範囲で系統的に変化させた。Table 2 に実験状態を示す。

Table 2 Experimental condition.

Fn	0.083
wave period: T_w [sec]	0.99~1.55
T_e/T_ϕ	0.42~0.71
wave height: H_w [m]	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05

T_e : encounter wave period [sec]

T_ϕ : natural roll period [sec]

Fig.5 に、横揺れ計測結果の一例を示す。同図上段は外乱を与えても周期的な横揺れが生じない場合 (Case 1)、中段は外乱が無くても周期的な横揺れが生じる場合 (Case 2)、下段はある程度以上の大きさの外乱を与えたときに周期的な横揺れが生じる場合 (Case 3) である。本研究では、同図中段および下段の様な結果を、周期的な横揺れが生じる場合とした。以下では、これら結果は区別できるように示す。

Fig.6 に、実験で計測された周期的な横揺れの振幅角を示す。縦軸は無次元横揺れ振幅角 (横揺れ振幅角を入射波の波数と波高で割った)、横軸は T_e/T_ϕ (出会い波周期と微小振幅時横揺れ固有周期との比) である。 $T_e/T_\phi=0.5$ では波高の大小にかかわらず横揺れが生じ、それ以外では波高が小さいと横揺れが生じない結果となった。同じ波高での横揺れ振幅角は、 $T_e/T_\phi<0.5$ では $T_e/T_\phi=0.5$ の結果に比べて小さく、 $T_e/T_\phi>0.5$ では一旦小さくなったあと大きくなる傾向が見られる。なお、振幅角が再び大きくなる周波数域での横揺れは、Fig.5 中 Case 3 (ある程度以上の外乱を与えられて周期的な横揺れが生じる場合) であった。

Fig.7 に、田口らによる一般的なポストマナマックスコンテナ船 (正面線図と GZ 曲線は付録 A1 参照) を用いたパラメトリック横揺れの計測結果¹⁾を示す。この結果では、周期的な横揺れは $0.4<T_e/T_\phi<0.6$ で生じ、振幅角は $T_e/T_\phi=0.5$ 付近で最大で、 T_e/T_ϕ の増減に伴い減少する。田口らの結果と本研究の結果 Fig.6 を比べると、 $T_e/T_\phi<0.5$ では同様の傾向が得られているが、 $T_e/T_\phi>0.5$ では田口らの結果より横揺れ振幅角が大きい。 $T_e/T_\phi>0.5$ で、田口らと異なる結果が得られたのは、供試船の復原力曲線が横傾斜角の増加に伴い線形復原力に比べて小さくなる非線形性を有し、横揺れ振幅角の増加に伴い横揺れ固有周期が長くなったためだと考えられる。

次に、入射波の波長を一定とし、系統的に速度を変化させて横揺れを計測した。Table 3 に実験状態を示す。波長船長比を $\lambda/L_{pp}=1.0$ とし、 $T_e/T_\phi=0.5$ となる船速 0.340m/sec . ($Fn=0.077$, 実船で 6.5kt) から系統的に速度を下げて実験を行った。なお、前進速度が遅いほど波との出会い周期は長くなる。実験結果を Fig.8 に示す。前進速度が遅いほど波との出会い周期が長くなるにもかかわらず、出会い周期の 2 倍周期の横揺れが発生し、その振幅角は増加する結果が得られた。

Table 3 Experimental condition.

Fn	0.000	0.032	0.077
T_e/T_ϕ	0.60	0.55	0.5

この原因を確かめるため、まず前進速度と横揺れ減衰力の関係を調査した。Fig.9 に、池田らの方法⁵⁾による横揺れ減衰力推定結果を示す。横揺れ減衰力は、前進速度の減少にほぼ比例して減少することが確認できる。これは、前進速度によって生じる揚力成分が減少するためである。このことから前進速度が遅いほど横揺れ振幅角が大きくなる可能性があ

ることがわかる。

さらに、この横揺れがパラメトリック横揺れであると考え、(1)式のパラメトリック横揺れの振幅角簡易計算法⁴⁾ (付録 A2 参照) による計算を行った。計算結果を Fig.10 に示す。

$$B_{44}(\phi_a) = \frac{W \Delta GM}{2 \omega_e} \quad (1)$$

ここで、 B_{44} は横揺れ減衰力係数、 ϕ_a は横揺れ振幅角[deg]、 W は排水量[kgf]、 ΔGM は復原力変動量、 ω_e は出会い波円周波数[rad/sec]である。なお、復原力変動量は船速によって変わらないと仮定して、Fig.6 中 $Fn=0.032$, $H_w=0.05\text{m}$ での横揺れ振幅角計測結果をもとに求めた。また、横揺れ減衰力は池田らの方法で推定した。横揺れ振幅角の計算結果は、同図中に示す実験結果 ($H_w=0.05\text{m}$) と定性的に一致することが確認できる。

以上の結果から、系統的に速度を下げた実験で見られた横揺れ振幅角の増加は、速度が遅いほど横揺れ減衰力が減少して横揺れ振幅角が増加する一方、供試船の横揺れ固有周期が振幅角の増加に伴って長くなりパラメトリック横揺れが発生したと考えられる。

Fig.5 Time histories of measured roll motions in regular wave. (○: disturbance)

Fig. 6 Measured roll amplitude in regular head waves at $Fn=0.083$. (Case 3: $T_e/T_\phi=0.53, 0.55, 0.58$ at $H_w=0.02m$ and $T_e/T_\phi=0.61$ at $H_w=0.03m$ and $T_e/T_\phi=0.63$ at $H_w=0.04m$)

Fig. 7 Measured roll amplitude in regular head waves at $H_w=0.11m$. (citation from Fig.6 in reference 1)

Fig. 8 Measured roll amplitude.

Fig. 9 Estimated roll damping coefficient by Ikeda's method.

Fig.10 Estimated results of roll amplitude by Eq(1).

5. 不規則波中横揺れ計測

(2)式の有義波高 $H_{1/3}$ をパラメータとし、有義波高の増加に伴い平均波周期は長くなる特徴を持つ Pierson-Moskowitz spectrum を円周波数 1~15 rad/sec の範囲で 1000 等分し、それぞれの周波数の正弦波を重ね合わせて不規則波を作成する。なお、各周波数成分波の位相差は乱数を発生させて決定する。

$$S(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} \times g^2}{\omega^2} \exp\left(-\frac{3.11/H_{1/3}^2}{\omega^4}\right) \quad (2)$$

ここで、 $S(\omega)$ はパワースペクトラム [m^2]、 ω は波の円周波数 [rad/sec] である。

実験では、有義波高の異なる 3 種類の不規則波を発生させ、そのピーク周波数の波との出会い周期が、供試船の微小振幅時横揺れ固有周期の 2 分の 1 前後となるように、有義波高を 0.04, 0.05, 0.06m とした。Fig.11 に発生させた不規則波を計測しパワースペクトラムを算出した結果を示すとともに、造波に用いた理論値を造波に使用した周波数範囲とともに示す。実験結果では理論値にないピークがみられるが、有義波高の増加に伴って平均波周期が長くなる特徴は確認できたのでそのまま実験を行うこととした。

不規則波中での運動計測時間は、水槽の長さの制約上 40 秒とし、運動計測回数 (= 不規則波の作成個数) を 20 回とした。なお、この回数は各計測データの分散の平均値の収束性より決定した (付録 A3 参照)。

Fig.12 に、横揺れ振幅角の発生確率を有義波高毎に示す。なお、今回の実験では有義波高 0.04m では、10 度を超える横揺れは発生しなかった。同図より、有義波高が高い方が、大きな横揺れが発生する確率が高いことがわかる。

Fig.13, 14 に、有義波高 0.06m での波高と横揺れの計測例を示す、Fig.14 に発生しない場合の計測例を示す。それぞれの図に、区間 t_1, t_2 での波との平均出会い周期の $\bar{T}_e$ と微小振幅時横揺れ固有周期 T_ϕ との比を示す。Fig.13 中区間 t_1 の波群の平均出会い波周期は 0.5 より小さく、このような波群と遭遇しても横揺れは生じない。一方、Fig.14 中区間 t_2 の波群の平均波周期は 0.5 より長く、このような波群と遭遇すると一揺れごとに出会い波周期の 2 倍周期の横揺れが生じる。

(2)式の Pierson-Moskowitz spectrum では、有義波高の増加に伴い平均波周期は長くなり、 $T_e/T_\phi > 0.5$ の成分を含む波群の発生頻度も高くなる。一方で供試船の場合、復原力曲線の非線形性のため、波高の増加により横揺れ振幅角が増加すると横揺れ固有周期が長くなる。以上の結果、有義波高が増加した場合、波高の増加に伴い横揺れ振幅角も増加した結果横揺れ固有周期が長くなり、パラメトリック横揺れが発生したと考えられる。

Fig.11 Measured power spectrum of wave height. (significant wave height = 0.04, 0.05, 0.06m)

Fig.12 Probability distribution of roll amplitude. (significant wave height = 0.05, 0.06m)

Fig.13 Time history of measured wave height and roll motion in irregular wave at $H_{1/3} = 0.06\text{m}$ when periodic rolling does not occur.

Fig.14 Time history of measured wave height and roll motion in irregular wave at $H_{1/3} = 0.06\text{m}$ when periodic rolling occurs.

6. 二周波数成分を重ね合わせた波中横揺れ計測

不規則波中の実験からは、主要な周波数成分が $T_e/T_\phi > 0.5$ の波群に出会うと横揺れが生じる結果が得られた。この横揺れは、波群の中の $T_e/T_\phi > 0.5$ である波との同調現象だと考え、これを確かめるために、波高と波周期が異なる二つの正弦波を重ねた波の中での横揺れ計測実験を行った。

二つの異なる周期の波のうち、一方は出会い周期が微小振幅時横揺れ固有周期の半分 ($T_e/T_\phi = 0.5$) となるようにし、もう一方はその前後となるようにした。また、二つの波の波高は異なる。供試船の船速は 0.370m/sec ($Fn=0.083$, 実船で 7kt) とした。

Table 4 に実験結果を示す。同表には、横揺れが生じた場合、その振幅角を示している。縦に波高が高い波の T_e/T_ϕ 、横に波高が低い波の T_e/T_ϕ を示している。一方の波が $T_e/T_\phi < 0.5$ で、その波高が高い場合、横揺れは生じていない。また、一方の波が $T_e/T_\phi > 0.61$ で、その波高が高い場合も横揺れは生じていない。周期的な横揺れが生じた場合、その周期は二つの波の成分のうち波高の高い波との出会い周期の 2 倍であり、 T_e/T_ϕ が大きいほど横揺れ振幅角は大きい。規則波中の実験では、表中の色つきの状態で周期的な横揺れが生じたことを考慮すると、表中の太枠で示す範囲で周期的な横揺れが生じる可能性があると予測される。

以上の結果から、不規則波においても $T_e/T_\phi = 0.5 \sim 0.61$ の出会い波成分が主となる波群では、横揺れが波群中の $T_e/T_\phi = 0.5 \sim 0.61$ の波成分の 2 倍周期でパラメトリック横揺れが発生したと考えられる。

Table 4 Measured results.

		$T_e/T_\phi (H_w = 0.01 \text{ m})$						
$T_e/T_\phi (H_w = 0.04 \text{ m})$		0.39	0.45	0.50	0.55	0.61	0.66	0.71
	0.39			×				
	0.45		×	×				
	0.50	10.4	14.1		18.4	15.4	18.3	16.8
	0.55			8.3				
	0.61			16.0				
	0.66			×			×	
	0.71			×				×

number with color: amplitude of periodic rolling [deg.]

Colored w/o number: periodic rolling occurs in regular wave

7. 数値シミュレーション

ここでは、供試船において出会い波周期が $T_e/T_\phi > 0.5$ の範囲で周期的な横揺れが発生したこと、および $T_e/T_\phi = 0.5$ となる速度で周期的横揺れを起こしている状態から系統的に速度を下げるとさらに横揺れ振幅角が大きくなった原因が、復原力曲線の非線形性によるものであることを、縦波中のパラメトリック横揺れ予測のために構築された数値シミュレーション²⁾を用いて確認する。なお、計算に用いている横揺れ減衰力の範囲を横揺れ振幅角 30 度までとしたので、横揺れ振幅角が 30 度を超える計算結果は省くこととした。

供試船を基本船型として、排水量が等しくなるように幅喫水比 B/d を変更して復原力曲線を変化させた。Fig.15 に B/d を変えた船型の正面線図を示し、Fig.16 にこれらの復原力曲線を示す。なお、4 船型とも GM が等しくなるように、重心高さ KG を決め、その線形復原力 $GM\phi$ も同図に示している。さらに、波浪中での GM 変化の傾向を見るため、平均的な水面位置の上下変化に伴う水線面 2 次モーメントを利用した波浪中 GM 変化量 (ΔGM) の簡易計算法⁹⁾による結果を Fig.17 に示す。Fig.16 から、 B/d が小さくなると、横傾斜角の小さい範囲での復原力曲線の非線形性が、弱くなることがわかる。一方 Fig.17 の GM は、 B/d が小さくなると喫水に対し同じ割合の水面変位に対し、 ΔGM が小さくなる傾向がある。

Fig.18 に基本船型を対象として、船速一定のもと、入射波の波長を系統的に変化させた (Fig.6 の実験結果と同条件) 計算結果を示す。計算においても、波高が低い場合は横揺れがほとんど生じず、波高が高くなると横揺れ振幅角が増加する。また、 $T_e/T_\phi > 0.5$ では大振幅の横揺れが生じ、この横揺れはある程度大きな初期外乱を与えた場合にのみ生じた。これらの傾向は、Fig.6 の実験結果と定性的に一致する。

Fig.19~21 に、Fig.18 と同条件で、 B/d を変化させた船型の計算結果を示す。なお、波高 4.5m の計算では横揺れ振幅角が 30 度を越えたため、これらの波高での計算結果は省いた。概ね横傾斜角が 30 度以下で復原力曲線に非線形性が見

られない $B/d=2.5$ では、 $T_e/T_\phi=0.5$ 付近を横揺れ振幅角のピークとし T_e/T_ϕ の増減に伴い振幅角が減少している。そして、 B/d が次第に大きくなり復原力曲線の非線形性が強くなると、横揺れ振幅角のピーク周波数は T_e/T_ϕ の大きい方へ移動し、 $T_e/T_\phi > 0.5$ で横揺れが生じることが確認できる。

Fig.22 に基本船型を対象として、入射波長一定のもと、系統的に船速を変化させた (Fig.8 の実験結果と同条件) 計算結果を示す。基本船型に対する計算結果は、Fig.8 の実験結果と同様に、前進速度が遅くなることにより横揺れ振幅角は増加し、船速が低下するとともに長くなる出会い周期の 2 倍周期の横揺れが発生する結果が得られた。

Fig.23 に、基本船型と Fig.15 に示す $B/d=3.0$ および 2.5 の船型に対して、入射波長および波高一定のもと、系統的に船速を変化させた計算結果の比較を示す。なお同図縦軸は、それぞれの船型に対し $T_e/T_\phi=0.5$ となる速度 $Fn=0.077$ での横揺れ振幅角 $\phi_{Fn=0.077}$ で割った値を示している。基本船型に対し B/d を若干小さくし復原力曲線の非線形性を弱めた $B/d=3.0$ では、船速が遅くなると横揺れ振幅角は一旦大きくなった後減少する。さらに、 B/d を若干小さくし概ね横傾斜角が 30 度以下で復原力曲線に非線形性が見られない $B/d=2.5$ では、船速が遅くなると横揺れ振幅角は小さくなることを確認できる。

Fig.15 Body plan in real scale. ($B/d=3.2, 3.0, 2.5$) Fig.16 GZ-curves of the models with same GM in real scale. ($B/d=3.584, 3.2, 3.0, 2.5, GM=1.81\text{m}$)

Fig.17 Variation of GM caused by change of water surface of the models in real scale. ($B/d= 3.584, 3.2, 3.0, 2.5$)

Fig.18 Calculated roll amplitude in regular head waves at $Fn=0.083$ in real scale. ($B/d=3.584$)

Fig.19 Calculated roll amplitude in regular head waves at $Fn=0.083$ in real scale. ($B/d=3.2$)

Fig.20 Calculated roll amplitude in regular head waves at $Fn=0.083$ in real scale. ($B/d=3.0$)

Fig.21 Calculated roll amplitude in regular head waves at $Fn=0.083$ in real scale. ($B/d=2.5$)

Fig.22 Calculated roll amplitude in regular head waves at $\lambda/L=1.0$. ($B/d=3.584$)

Fig.23 Calculated roll amplitude in regular head waves at $\lambda/L=1.0$ and $H_w=2.8m$ in real scale ($B/d=3.584, 3.0, 2.5$)

8. 結 言

本研究では、横傾斜角の増加に伴い線形復原力に比べて小さくなる非線形な復原力曲線を持つために横揺れ固有周期に振幅依存性がある船型を対象として、縦波中横揺れ計測実験を行い、その発生条件と特性について調査した。また、その発生原因解明のために数値シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

1. 供試船では、規則波向波中において、一般的な船型に比べて $T_e/T_\phi > 0.5$ の広い範囲で出会い周期の2倍周期の横揺れが生じた。この範囲での横揺れ振幅角は、 $T_e/T_\phi = 0.5$ の値に比べて大きく、この横揺れはある程度以上の波高と外乱が与えられた場合に生じた。

2. 数値シミュレーションを用いて, 供試船を原型として幅喫水比を変更し, 横傾斜角の増加に伴い線形復原力に比べて小さくなる復原力曲線の非線形性を弱めた場合の横揺れ発生条件の調査を行った. その結果, 復原力曲線の非線形性が強くなるにしたがって $T_e/T_\phi > 0.5$ の広い範囲で横揺れが生じる結果が得られた. このことから, 供試船の復原力曲線の非線形性により, 横揺れ振幅角の増加に伴い横揺れ固有周期が長くなり, 一般的な船型に比べて $T_e/T_\phi > 0.5$ の広い範囲でパラメトリック横揺れが生じることが確認できた.
3. 供試船において, 波長船長比 $\lambda/L_{pp}=1.0$ の向波中を $T_e/T_\phi=0.5$ となる速度から停止まで, 系統的に速度を変化させた結果, どの速度でも出会い周期の2倍周期の横揺れが発生した. また, その振幅角は速度が遅いほど大きくなった.
4. この横揺れ振幅角の増加は, 前進速度が遅いほど横揺れ減衰力が減少したためであることを, パラメトリック横揺れの振幅角簡易計算法⁴⁾により確認した.
5. さらに, 数値シミュレーションにより供試船を原型として幅喫水比を変更した船型に対して横揺れ発生条件の調査を行い, 復原力曲線の非線形性が弱くなると, 前進速度が遅くなれば横揺れ振幅角が小さくなることを確認した.
6. 供試船では, 出会い周期が $T_e/T_\phi=0.5$ となる波ともう一つ異なる周期の波を異なる波高で重ね合わせた向波中では, 波高の高い波の周期が $0.5 \leq T_e/T_\phi \leq 0.61$ の場合, その出会い周期の2倍周期の横揺れが生じ, その振幅角は T_e/T_ϕ が大きい方が大きい. このことから, 供試船においては, 波高の大きな波の成分が $T_e/T_\phi=0.5 \sim 0.61$ のときに, パラメトリック横揺れが生じる.
7. 本供試船で, (2)式の Pierson-Moskowitz spectrum を用いて作成した不規則向波中では, ピーク周波数が $T_e/T_\phi \geq 0.5$ となる場合, 周期的な横揺れが生じ, 有義波高が高い方が, 大きな横揺れが発生する確率が高くなった. これは, (2)式の Pierson-Moskowitz spectrum が有義波高の増加に伴い平均波周期は長くなる一方で, 供試船の場合, 復原力曲線の非線形性のため, 波高の増加により横揺れ振幅角が増加すると横揺れ固有周期が長くなり, 有義波高が増加した場合もパラメトリック横揺れが生じたためである.
8. 復原力曲線が横傾斜角の増加に伴い線形復原力に比べて小さくなる非線形性を持つ船型では, 横揺れ固有周期が横揺れ振幅角の増加に伴い長くなるために, 波高の増加に伴い広範囲の出会い周期でパラメトリック横揺れが生じる可能性がある. さらに幅広浅喫水化により波浪中での GM 変動量が大きくなる傾向がある. このような場合, パラメトリック横揺れの発生を抑えるためにも横揺れ減衰力の大きさについて十分に検討する必要がある.

参考文献

- 1) Harukuni Taguchi, Shigesuke Ishida, Hiroshi Sawada and Makiko Minami: Model Experiment on Parametric Rolling of a Post-Panamax Containership in Head Waves, Proceedings of the Ninth International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2006.
- 2) Hashimoto, H. and Umeda, N.: A Study on Quantitative Prediction of Parametric Roll in Regular Waves, Proceedings of the 11th International Ship Stability Workshop, Stability Workshop pp.295-301, 2010.
- 3) 田井祥史, 大橋岳尋, 片山徹, 池田良穂: 浅喫水船の波浪中復原性に関する基礎的研究—復原力の非線形性とウェザークライテリア—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, 2011, pp.47-54.
- 4) 片山徹, 谷口友基, 梅田直哉: 高速三胴船の向波中パラメトリック横揺れに関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第10号, 2009, pp.57-63.
- 5) Yoshiho Ikeda: Prediction Methods of Roll Damping of Ships and Their Application to Determine Optimum Stabilization Devices, Marine Technology, Vol. 41, pp. 89-93, 2004.
- 6) Hirotada Hashimoto, Naoya Umeda, Akihiko Matsuda: Estimation of Parametric Roll in Random Seaways, Parametric Resonance in Dynamical Systems, pp.45-52.
- 7) 池田良穂, 片山徹: Windows版船舶用CADシステム, 船と港編集室, 2001.
- 8) 梅田直哉, 田口晴邦: パラメトリック横揺れ, 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), 2003, pp.217-235.
- 9) 久保巧, 梅田直哉: クルーズ客船・フェリーの復原性評価について, 日本クルーズ&フェリー学会, 第2号, 2012, pp.29-36.
- 10) 中川憲治, 室津義定, 岩壺卓三: 工業振動学 (第二版), 森北出版株式会社, 1986.
- 11) Kerwin, J. E. : Notes on Rolling in Longitudinal Waves, International Shipbuilding Progress, Vol.2, No.16, 1955, pp.597-614.

付 録

A1. GZ 曲線

Fig.A1, A2 に、田口ら¹⁾が用いたポストパナマックス船の GZ 曲線と正面線図を、参考文献より再掲する。

Fig.A1 GZ-curve of the model in real scale (GM = 1.08 m).
(citation from Fig.2 in reference 1)

Fig.A2 Body plan. (citation from Fig.1 in reference 1)

A2. パラメトリック横揺れの振幅簡易計算式について

参考文献 4)中 5.1 節の簡易振幅計算法についての説明文を以下に再掲する。

パラメトリック横揺れ発生時の横揺れを $\phi = \phi_a \cos(2\omega_e t)$ とし、この横揺れを

$$(I_{44} + a_{44})\ddot{\phi} + B_{44\phi_a}\dot{\phi} + W(GM_{\phi_a} - \Delta GM_{\phi_a} \cos(\omega_e t - \varepsilon))\phi = 0 \quad (\text{A2-1})$$

の 1 自由度運動方程式で表す。(A2-1)式中の I_{44} , a_{44} はそれぞれ横揺れ慣性モーメントと付加慣性モーメント、 $B_{44\phi_a}$ は等価線形化された横揺れ減衰モーメント係数、 ω_e は波との出会い周波数、 WGM_{ϕ_a} は復原モーメント係数の定常成分、 $W\Delta GM_{\phi_a}$ は波浪中での復原モーメントの変動成分である。なお、同式中各項の下付の ϕ_a は、横傾斜角 ϕ_a での値であることを示す。

(A2-1)式を横揺れ一周期間にわたりエネルギー積分する

と、減衰モーメントによるエネルギー散逸は、

$$\int_0^{T_n} (B_{44\phi_a} \dot{\phi}) \dot{\phi} dt = \pi B_{44\phi_a} \phi_a^2 \omega_n \quad (\text{A2-2})$$

となる。ここで、 ω_n は横揺れ固有円周波数である。一方、復原モーメント変動によるエネルギー吸収は、

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_n} \{W(GM_{\phi_a} - \Delta GM_{\phi_a} \cos(2\omega_n t - \varepsilon))\} \dot{\phi} dt \\ &= \int_0^{T_n} \left[W \{GM_{\phi_a} - \Delta GM_{\phi_a} \cos(2\omega_n t - \varepsilon)\} \right. \\ & \quad \left. \times \phi_a \cos(\omega_n t) \{-\phi_a \omega_n \sin(\omega_n t)\} \right] dt \\ &= \frac{W\Delta GM_{\phi_a} \phi_a^2 \omega_n}{2} \sin \varepsilon \int_0^{T_n} \sin^2(2\omega_n t) dt \\ &= \frac{W\Delta GM_{\phi_a} \phi_a^2 \pi}{2} \sin \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{A2-3})$$

となる。ここで、この項には ε が残るが、共振状態の一種であるパラメトリック横揺れ発生時は、エネルギーの吸収効率が最大の位相差 ($\varepsilon = \pi/2$)¹⁰⁾ となる。

(A2-2)式と(A2-3)式を用いた

$$B_{44\phi_a} < \frac{W\Delta GM_{\phi_a}}{2\omega_n} \quad (\text{A2-4})$$

の不等式を満たすときパラメトリック横揺れが発生する。なお、 $B_{44\phi_a}$ および ΔGM_{ϕ_a} は横揺れ振幅角に依存して変化する。そのため、(A2-4)式の両辺が等しくなる横揺れの振幅角は、パラメトリック横揺れの振幅を表す¹¹⁾。

A3. 不規則波の作成個数

波高、縦揺れ、横揺れの時刻歴データから、各データの分散を求め、

$$\sigma^2(t) = \sum_{j=1}^{n_s} \frac{(X_j(t_j) - \overline{X}(t))^2}{n-1} \quad (\text{A3-1})$$

その集合平均

$$\sigma_{\text{erg}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \frac{(X_i(t_j) - \overline{X}_i)^2}{n-1}}{N} \quad (\text{A3-2})$$

を求めた⁶⁾。(A1)(A2)式中、 $\sigma(t)$ は標準偏差、 σ_{erg} はその集合平均、 n_s は計測時間 t までのデータ数、 $\overline{X}$ は計測データの平均値である。

Fig.A3～A5 に、各データの分散の収束の様子を示す。横は時間、縦は標準偏差をその集合平均で割ったものである。波高と縦揺れについては総標本数 20 本、横揺れは 30 本から求めた。(標本 1 本当りでの計測時間は 40 秒)

同図から、標本数が 5 より多くなると、波高および縦揺れは収束し、分散はほぼ収束することがわかる。一方横揺れは、標本数が 15 を超えても、波高や縦揺れのように安定しない。これは、横揺れは固有周期の半分の周期の群波に遭遇した場合に生じ、この群波が発生する確率が低いため、かなりの標本数が必要となることを示している。そこで、本実験では標本数 20 程度を用いることとした。

Fig.A3 Standard deviation of wave elevation. (significant wave height = 0.04, 0.05, 0.06m)

Fig.A5 Standard deviation of roll motion. (significant wave height = 0.04, 0.05, 0.06m)

Fig.A4 Standard deviation of pitch motion. (significant wave height = 0.04, 0.05, 0.06m)