斜め追波中におけるコンテナ船の転覆と 波の多方向性との関係

世良 亘*・梅田 直哉**

Effect of Short-crestedness of Waves on Capsize of a Container Ship in Quartering Seas

Wataru SERA and Naoya UMEDA

Abstract

In order to investigate capsizing in quartering and following seas, numerical simulations of the rolling motion were systematically carried out for a container ship sailing in short-crested irregular waves, e.g., directional spectrum waves. The obtained results are summarized as follows:

- (1) Low cycle resonance occurs for a container ship even in short-crested irregular waves.
- (2) The heading angle from the wave principal direction reduces danger of ship capsizing.
- (3) The short-crestedness of waves also reduces danger.

1. はじめに

厳しい追波状態で航行している船と波との相対運動の特徴は波と船との出会い周波数が船の上下揺及び縦揺の固有周波数に比べてかなり低いことであり、その結果船体は波面に沿って波と相対運動しながら没水部形状が静水中に比べてゆっくりと大幅に変動することが模型実験等により明らかとなっている。そして、没水部形状の変化により水線面形状が変化するのに伴い、復原力も大幅に変動する事となる。この場合、波高、波長、船体形状、速力及び波と船との出会い角に関係して、船の復原性に及ぼす具体的影響は極めて多様となる。

このような波と船との間には船の転覆を誘発する原因となる危険な関係があり、そのときに起きる諸現象は固有の名称で呼ばれている。特に、波との出会い周期による復原力の変動によって横揺れが動的に発達するパラメータ励振横揺現象のうち、横揺れ周期が波との出会い周期の 2 倍となるものは低周波横揺 (Low Cycle Resonance) と呼ばれている。この現象は水槽内での規則波中では発生しても不規則な自然界の海洋波の中では発生しないと従来言われ

てきたが、近年不規則波中、特に多方向不規則波においてすら発生する事が模型実験等により明らかにされてきた^{(1)~(4)}。模型実験では、さらに波の多方向性を考慮すると船の転覆はしにくくなることが確認されている。一方、自然界の海洋波は一般に多方向不規則波であるが、その中での転覆など船舶の極限的運動については未解明な点も多く、数値シミュレーション等による解析も未だ行われてはならず、上記の実験的結論も定説となるには至っていない。

そこで、本論文では模型実験により得られた結論を理論モデルによっても確認することを目的に、多方向の斜め追波中の船体運動の特徴を考慮した運動方程式を導き、これを用いたシミュレーション計算を系統的に実施して転覆現象に対する検討を行った。

2. 不規則波中の船体運動方程式

追波中を航行している船舶の転覆に至るまでの運動は、船体 3 軸方向の並進運動とその軸まわりの回転運動を合わせた 6 自由度の連成運動となるが、この連成運動を取り扱うためには流体力の記述に現在なお不明な点があり、困難である。そこで、実用的

* 正会員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

観点から追波中では出会い周期が長くなるため上下及び縦揺は動的影響が小さいとして静的な釣り合いによって定め、また操縦運動との連成は無視できるものとして横揺運動にのみ焦点を絞って取り扱うこととする。

2.1 短波頂不規則波

海洋波を模擬した方向スペクトル波は、周波数と方向角を変化させたランダム位相の規則波を線形重ね合わせすることにより表現でき、短波頂不規則波と呼ばれる。このとき、位置的定常性を理論的に保証する造波方法がSingle-Summation法として知られ、実験において一般的に用いられている^{(5)~(8)}。この方法では、不規則波を構成する多数の成分波のうち、ある周波数をもつ成分波は一方向のみに進むとモデル化するが、ある方向に進む成分波は一つの周波数の波だけによって構成されているとは限らない。Single-Summation法は、図1の空間固定座標系 $(O-\xi, \eta, \zeta)$ を用いて以下の式で表現される。

図1 座標系

$$\zeta(\xi, \eta, t) = \sum_{n=1}^N C_n \cos \left[\frac{\omega_n^2}{g} (\xi \cos \Theta_n + \eta \sin \Theta_n) - \omega_n t + \epsilon_n \right] \quad (1)$$

ここで、 N は分割数、 g は重力加速度、 t は時間である。また、 C_n , ω_n , Θ_n , ϵ_n は成分波の振幅、角周波数、方向角、位相で次式に示す2次元スペクトラムによって与えられる。

$$C_n = \sqrt{2S(\omega_n, \Theta_n) \Delta \omega_n \Delta \Theta_n} \quad (2)$$

$$S(\omega_n, \Theta_n) = S(\omega_n) D(\Theta_n) \quad (3)$$

$S(\omega_n)$ は1次元の周波数スペクトル、 $D(\Theta_n)$ は方向分布関数である。

2.2 不規則波中の横揺運動方程式

船が波との出会い角 χ をもって不規則波中を一定速度 U で直進しているとき、初期位置を ξ_0, η_0 とすると船体上の点 x, y とは

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 + Ut \cos \chi + x \cos \chi - y \sin \chi \\ \eta &= \eta_0 + Ut \sin \chi + x \sin \chi + y \cos \chi \end{aligned} \quad (4)$$

の関係があるので(1)式に代入すると時刻 t の点 x, y での波形 ζ_w は、次式のように表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \zeta_w &= \sum_{n=1}^N C_n \cos \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t + \epsilon_n \right] \end{aligned} \quad (5)$$

このとき、船体没水部表面に働くこの不規則波による圧力をフルードクリロフの仮説⁽⁹⁾に基づいて求めると、次の横揺運動方程式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &+ 2 \left(\frac{2a_e}{T_\phi} \right) \dot{\phi} + \left(\frac{2\pi}{T_\phi} \right)^2 \left[\frac{GZ(\phi)}{GM} \right] \\ &= \left(\frac{2\pi}{T_\phi} \right)^2 \sum_{n=1}^N \left[A_n \cos \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t \right. \\ &\quad \left. - B_n \sin \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t \right] \sin \chi \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 ϕ は横揺れ角、 a_e は等価減衰係数、 T_ϕ は横揺れ固有周期、 GM はメタセンタ高さである。 $GZ(\phi)$ は復原挺で以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} GZ(\phi) &= \frac{1}{m} \int_L \left[y_B(x, \zeta_G, \theta, t) \cos \phi - \right. \\ &\quad \left. z_B(x, \zeta_G, \theta, t) \sin \phi \right] A(x, \zeta_G, \theta, t) dx \end{aligned} \quad (7)$$

また、 A_n 及び B_n は n 成分波のフルードクリロフ力の

係数⁽⁴⁾、 $F_n(x, \zeta_G, \theta, t)$ は n 成分波の圧力勾配でそれぞれ浮心の座標 $y_B(x, \zeta_G, \theta, t)$ 、 $z_B(x, \zeta_G, \theta, t)$ を用いて次式で与えられる。

$$A_n = \frac{1}{m \cdot GM} \int_L \left[z_B(x, \zeta_G, \theta, t) \cos \phi + y_B(x, \zeta_G, \theta, t) \sin \phi \right] A(x, \zeta_G, \theta, t) \times F_n(x, \zeta_G, \theta, t) \cos \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx \quad (8)$$

$$B_n = \frac{1}{m \cdot GM} \int_L \left[z_B(x, \zeta_G, \theta, t) \cos \phi + y_B(x, \zeta_G, \theta, t) \sin \phi \right] A(x, \zeta_G, \theta, t) \times F_n(x, \zeta_G, \theta, t) \sin \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx$$

$$F_n(x, \zeta_G, \theta, t) = C_n \frac{\omega_n^2}{g} \exp \left[-\frac{\omega_n^2}{g} d \right] \times \frac{\sin \left[\frac{\omega_n^2}{g} B(x, \zeta_G, \theta, t) \sin(\chi - \Theta_n) \right]}{\frac{\omega_n^2}{g} B(x, \zeta_G, \theta, t) \sin(\chi - \Theta_n)} \quad (9)$$

また、船体没水部断面の面積 $A(x, \zeta_G, \theta, t)$ を定める静的釣り合いの式は次式で与えられる。

$$\rho g \int_L A(x, \zeta_G, \theta, t) dx + \sum_{n=1}^N \left[H_n \cos \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t + I_n \sin \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t \right] = mg$$

$$\rho g \int_L x A(x, \zeta_G, \theta, t) dx + \sum_{n=1}^N \left[J_n \cos \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t + K_n \sin \left\{ \omega_n - \frac{\omega_n^2}{g} U (\cos \chi \cos \Theta_n + \sin \chi \sin \Theta_n) \right\} t \right] = 0 \quad (10)$$

ここで、各成分波のフルードクリロフ力の係数 H_n 、 I_n 、 J_n 、 K_n は次式で与えられる。

$$H_n = \rho g \int_L F_n(x, \zeta_G, \theta, t) A(x, \zeta_G, \theta, t) \times \cos \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx$$

$$I_n = \rho g \int_L F_n(x, \zeta_G, \theta, t) A(x, \zeta_G, \theta, t) \times \sin \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx$$

$$J_n = \rho g \int_L x F_n(x, \zeta_G, \theta, t) A(x, \zeta_G, \theta, t) \times \cos \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx \quad (11)$$

$$K_n = \rho g \int_L x F_n(x, \zeta_G, \theta, t) A(x, \zeta_G, \theta, t) \times \sin \left[\frac{\omega_n^2}{g} \left\{ (\xi_0 + x \cos \chi - y \sin \chi) \cos \Theta_n + (\eta_0 + x \sin \chi + y \cos \chi) \sin \Theta_n \right\} + \varepsilon_n \right] dx$$

3. シミュレーション結果と考察

2章の運動方程式を用いて、図2に示すような15000GT型コンテナ船のシミュレーション計算を行った。このコンテナ船の主要目を表1に示す。計算に使用したコンテナ船は、角水槽での自由航走模型試験において、多方向性をもたない長波頂不規則波中で低周波横揺による転覆が確認され、短波頂不規則波中でも転覆には至らないものの低周波横揺を起こしている⁽¹⁾。

まず初めに、静水中の自由横揺試験結果を用いて等価減減係数 a_e を同定し、その値を用いてシミュ

図2 コンテナ船の船体線図と縦波中の復原力曲線

表1 コンテナ船の主要目

Items		Ship	Model
Length	L(m)	150.0	2.5
Breadth	B(m)	27.2	0.453
Depth	D(m)	13.5	0.225
Draft	d_f (m)	8.50	0.142
	d_a (m)	8.50	0.142
Block Coef.	C_b	0.667	0.667
Metacentric height	GM(m)	0.15	0.0025
Natural roll period	T_ϕ (sec)	43.37	5.59
Model Scale	—	—	1/60

図3 横揺れ減衰試験結果 (模型船スケール)

レーションを行った。静水中の自由横揺試験とシミュレーションの結果を図3に示す。等価線形化された横揺れ減衰のモデルによる同定結果は実験結果とよく一致しており、今後本論文ではこのようにして得られた係数 $a_e=0.05647$ をシミュレーションに用いることとする。

次に、自由航走模型試験において低周波横揺れが顕著に観測された $Fn=0.15$ において波と船との出会い角を0、5、15、30、45度の5通りに変化させ、長波頂及び短波頂不規則波中でのシミュレーションを行った。不規則波の計算は、実験時の条件に合わせて実船スケールで長波頂波の平均波周期10.9秒、短波頂波の平均波周期11.5秒とし、周波数スペクトル及び方向分布関数はInternational Towing Tank Conference (ITTC): 国際試験水槽会議 (1978) の推薦に従い、次のように与えた⁽¹⁰⁾。

$$S_w(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left[-\frac{B}{\omega^4}\right] \quad (12)$$

$$A = 172.75 \frac{H_{1/3}^2}{T_w^4}, \quad B = \frac{691}{T_w^4}$$

$$D(\theta) = \frac{8}{3\pi} \cos^4 \theta \quad (13)$$

ここで、短波頂不規則波の方向分布関数 $D(\theta)$ には海洋波に近いといわれているコサイン4乗分布を方向

図4 限界波高前後の時系列

角 $-70 \sim 70$ 度で使用した。各成分波の位相は $[-\pi \sim \pi]$ の一様乱数によって与えられている。

コンテナ船が転覆を引き起こす波高の限界を調べるため、上記の設定でそれぞれの出会い角において0.1m刻みで有義波高を変えてシミュレーションを行い、300秒間航走させたときに転覆する最小の有義波高を限界波高と定義する。初期条件は横揺れ角及び角速度ともに0度とした。ただし、長波頂不規則波の出会い角0度の場合に限っては、その初期条件では左右対称性から横揺れが発生しないため、横揺れ角の初期条件を5度とした。波との出会い角0.45度での横揺れ角と船体中央部における波高の時系列を、限界波高前後の1例を取り出し図4に示す。波と船との出会い角が0度の場合は波の多方向性を有する短波頂不規則波においても、出会い波2周期に対し船体の横揺れ固有周期とほぼ等しい1周期で揺れる典型的な低周波横揺を起こしているが45度の場合は出会い波の周期で横揺れしていることがわかる。このフルード数におけるシミュレーションでは、波との出会い角が30度まで低周波横揺の発生が確認できた。

これらのシミュレーションを長波頂及び短波頂不規則波について、各成分波の位相を決める一様乱数の種を15種類変化させて行い、それぞれの限界波高を求めた。その結果を、横軸に限界波高となる有義波高を取った累積分布のグラフで示す。図中の点は、確率分布関数の標本値を表しており、縦軸の値は最

図5 出合い角ごとの限界波高の累積分布
(長波頂、 $F_n=0.15$)

大値が1となるように正規化されている。図5に長波頂不規則波、図6に短波頂不規則波を示す。長波頂不規則波の各出合い角毎の分布を比較すると、0～30度では大きな違いではないが出合い角が大きいほどグラフが右にシフトし大きな波高まで転覆しない傾向がみられる。また、45度では大きく右にシフトしており、他の角度に比べて大きな波高まで転覆しないということが分かる。これは、波との出合い角が45度になると、船側波形による復原力の変動が小さくなり、低周波横揺れが発生しないためだと考えられる。短波頂不規則波の場合は、長波頂不規則波の場合ほど明確ではないが、やはり船と波との出合い角が大きくなるほど限界波高は大きくなる傾向が見られる。これは、波の多方向性により出合い角以外の角度の波も存在するため、出合い角度の影響が顕著でなくなるためと考えられる。

また、図5と図6を比較すると、波との出合い角が30度以下では明らかに図6のグラフの方が同じ出合い角では右にシフトしており、波の多方向性により限界波高が大きくなっていることが分かる。このことは、多方向波は一方向波よりも転覆しにくいということを表しており、模型実験の結果とも一致する。従来、模型実験や計算シミュレーションでは波の多方向性を考慮することは少なく、その結果が自然界の海面にそのまま適用できるかどうかが不明確であったが、本研究とそれに先立つ実験的研究により一方向波で得られた結果は安全側の評価を与えるということができる。

4. まとめ

本論文では、斜め追波中を航行する船舶に発生する転覆現象を解明するために、多方向性を有する短波頂不規則波を用いた横揺れ運動方程式を導き、

図6 出合い角ごとの限界波高の累積分布
(短波頂、 $F_n=0.15$)

15000GT型のコンテナ船についてのシミュレーション計算によって以下のことを確認した。

- (1) 多方向性を有する不規則波においても、GMの小さなコンテナ船においては復原力変動による低周波横揺れが発生する。
- (2) 船と波との出合い角が大きくなるにつれて船の転覆は発生しにくくなる。
- (3) 波の多方向性を考慮すると、船の転覆は発生しにくくなる。

以上の結果に対し、今後確率論的検討を明確に厳密に行うとともに、他の船舶についても本論文のような数値的調査が望まれる。また、現在制定されている操船ガイダンス等の各種規則は波の多方向性を考慮せずに定められているが、上述の結論からこれが安全側の規定となっていることが明らかとなった。

終わりにのぞみ、本研究に対して神戸商船大学井上欣三副学長より御高配を受けたこと、本研究の一部は文部省科学研究補助金（課題番号12450400：研究代表者 大阪大学 長谷川和彦教授）によることを記し、関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) Umeda, N., Hamamoto, M., Takaishi, Y., Chiba, Y., Matsuda, A., Sera, W., Suzuki, S., Spyrou, K., Watanabe, K., : Model Experiments of Ship Capsize in Astern Seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.177, pp.207-217, 1995.
- (2) Hamamoto, M., Umeda, N., Matsuda, A., Sera, W., : Analyses on Low Cycle Resonance of Ship in Astern Seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.177, pp.

- 197-206, 1995.
- (3) Hamamoto,M., Sera,W., Panjaitan,J.P., : Analyses on Low Cycle Resonance of Ship in Irregular Astern Seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.178, pp. 137-145, 1995.
- (4) Hamamoto,M., Enomoto,T., Sera,W., Panjaitan,J.P., Ito, H., Takaishi,Y., Kan,M., Haraguchi,T., Fujiwara,T., : Model Experiments of Ship Capsize in Astern Seas - Second Report, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.179, pp.77-87, 1996.
- (5) 笠原昭夫・前田久明・増田光一・吉野博之：2次元人工不規則水波の発生法と解析法（第3報），関西造船協会誌，216，pp.93-99，1991.
- (6) 梅田直哉・山越康行：側壁反射を用いて角水槽内に発生させた方向スペクトル波の特性，日本造船学会論文集，174，pp.297-307，1993.
- (7) 御手洗哲司・梅田直哉：側壁反射を用いて角水槽内に発生させた方向スペクトル波の位置的特性，関西造船協会誌，229，pp.205-210，1998.
- (8) 世良 亘・梅田直哉：側壁反射を用いて発生させた方向スペクトル波の位置的定常性，日本造船学会論文集，188，pp.251-256，2000.
- (9) Froude, W. : On the Rolling of Ships, Transactions of The Institution of Naval Architects, Vol.2, pp.180-229, 1861.

- (10) 日根野元裕・山内保文：海洋波のスペクトル，日本造船学会誌，609，pp.160-180，1980.

質 疑 応 答

天下井清(北海道大学)：出会い角が大きくなるにつれて船の転覆が発生しにくくなるということですが、さらに大きくして横波状態での転覆の可能性について教えて下さい。

世良 亘：横波になりますと復原力の変動量は小さくなるため、低周波同調や復原力損失による転覆はさらに発生しにくくなります。

定兼廣行(神戸商船大学)：転覆という非線形現象に対して、これまでの長波頂波ではなく実海域波浪に近い短波頂波を用いて波の方向スペクトルの影響を具体的計算で出されたことに大きな意味があると思います。今後の展開に向けて、実海域の方向スペクトルを対象とする必要があると思いますが、現在このような方向スペクトルに標準的なものがあるのでしょうか。

世良 亘：方向スペクトルについてはITTC (1978)によりコサインの2n乗型分布式が推薦されており、これが標準的なものに当たると思います。今回の計算ではn=2となるコサインの4乗分布を使用しましたが、実海域を想定するのであれば各海域にあわせて変更する必要があるかと考えます。