

斜め追波中の船の転覆について

(第1報 転覆機構に関する模型実験)

正員 菅 信* 正員 猿田俊彦*
正員 田口晴邦* 安野三樹雄*

Capsizing of a Ship in Quatering Seas

(Part 1. Model Experiments on Mechanism of Capsizing)

by Makoto Kan, *Member*

Toshihiko Saruta, *Member*

Harukuni Taguchi, *Member*

Mikio Yasuno

Summary

Model tests on capsizing of a container ship running in quatering seas were performed using a radio-controlled model. The model tests were carried out for the one P-M type irregular wave and various regular waves in the 80 m square tank of the Ship Research Institute. The parameters of the experiment were the GM value, the model speed and the encounter angle with the wave for the irregular wave, and also the model speed, the encounter angle, the wave length and the wave height for the regular waves. The encounter angle was varied precisely every 10 degrees from 0° (following wave) to 90° (beam wave) by using the auto-pilot steering system in order to specify the dangerous range. The Froude number of the model speed was varied every 0.01 to clarify the critical speed for the capsizing. The wave length and wave height of the regular wave were also varied in a fine intervals to examine the tendency of the capsizing for the various waves. Among 763 runs in the irregular and regular waves, 225 capsizings were observed. From these results three characteristic features were clarified. Firstly, most capsizings occurred in the range of the encounter angle of 20° to 40°, and the range was spread to 0° to 50° as ship speed increased. Secondly, as ship speed decreased, the capsizing decreased, and there existed a critical ship speed below which the capsizing never occurred. Thirdly the direction of the capsizing was always to the leeside.

On the basis of the above results, a hypothesis is presented that such capsizing may be explained fundamentally as a simple static one which occurs because the capsizing moment of the wave exceeds statically the restoring moment decreased in the quatering wave in the above dangerous range of the encounter angle. The reason why the capsizing occurs only in the high speed range and only to the leeside direction is also explained in connection with the surf-riding motion or asymmetric nonlinear surging motion with a large amplitude.

The capsizing due to the parametric oscillation, which had been regarded as one of the typical mode of the dynamical capsizing, was never observed in the present experiment. Instead, a number of the new mode of the dynamical capsizing accompanied with the phenomenon of the period doubling bifurcation which was regarded as the foreboding of the chaos were observed.

1. 緒 言

船の転覆の要因はさまざまである。船内浸水、打込み水の甲板上への滞留、過載、着氷、揚網、荷崩れ、操舵、風、人の移動、揚網時の魚群運動等による乾舷減少、重心上昇、自由水影響、定傾斜の発生等が転覆要因として考えられる¹⁾。しかし船の転覆現象の中で最も基本となるのは、上のよう

な要因をすべて除外し、完全な状態の船が波の中を航行中に発生する転覆である。そのような転覆を考えた場合、真の追波を含む斜め追波中を高速で航行するときに危険であることが従来から指摘されているものの、転覆のメカニズムについては十分に解明されているとはいえない^{2)~4)}。

著者等も先に、完全自航のコンテナ船模型を使った転覆実験により、真の追波や横波中では転覆は発生せず、転覆が発生するのは斜め追波中に限られ、また中低速では転覆が発生しなくなるという結果を得た⁵⁾。しかしその実験で

* 船舶技術研究所

は模型船の寸法の制限からオートパイロット装置を搭載できず目標方位の保持を手動操舵で行なわざるを得なかった。このため方位に関する精度の信頼性は低く、単に斜め追波中で転覆が発生しやすいということが判ったにとどまり、どの出会角度が最も危険なのかということまでは把握できなかった。

今回著者等が行なった約 770 航走に及ぶ実験では、転覆に影響を与えないような甲板上の高い位置に設置した水密箱の中に方位ジャイロを積んでオートパイロット装置を搭載することができたため、方位に関する実験精度が格段に上がり危険な出会角範囲を $20^\circ \sim 40^\circ$ 程度と特定することができた。また速度を細かく変えた実験により転覆に対する限界速度の存在も把握することができた。更に転覆が 100% 波下側に発生することなども判り、斜め追波中の転覆現象がかなり詳細に把握でき、転覆のメカニズムを説明する手掛りが得られた。

次にこの転覆のメカニズムを考察し、基本的には波による転覆モーメントが追波中で減少した復原力より大きくなる単純な静的転覆として説明できる可能性があること、あるいはそこまで単純ではないまでも両者が非常に接近した状態での動的な転覆として説明できる可能性があることを示した。また高速で波下側に転覆が発生することについても、波乗り現象との関連で説明ができることを示した。更に転覆の形態として、カオスの前段現象である周期分岐現象を伴う転覆という新しい形態の転覆現象がありうることを横揺れの実験データとともに若干の考察によって示した。

2. 模型船と実験方法

2.1 模型船

実験に使用した模型船は、追波中の復原力減少が少なくなるような船型としてハンプルグ水槽で設計されたコンテナ船の 1/38.57 模型である。正面線図と船首尾形状を Fig. 1 に、主要寸法等を Table 1 に示す。また実験状態における復原力曲線を Fig. 2 に示す。模型船は完全水密構造であり、上甲板上に水密ハッチや船尾付近に操舵機等格納のための上部構造物があるが、復原力計算ではそれらを省略している。 $GM=1.98\text{ cm}$ のときの C 係数は海水流入角を復原力消失角に等しいとしたときの計算値で約 2.2 である。上甲板上の高い位置に水密箱を設置しその中に方位ジャイ

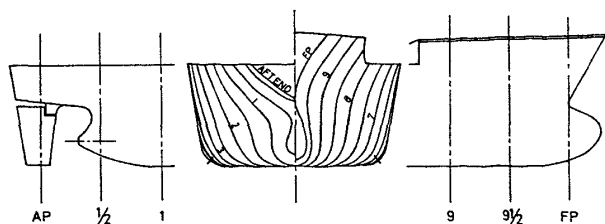


Fig. 1 Body plan and shapes of bow and stern

Table 1 Principal particulars

Item	Ship	Model
Length Lpp(m)	135.0	3.50
Breadth B (m)	24.3	0.630
Depth D (m)	11.5	0.298
Draft dm(m)	8.37	0.217
Block Coeff. C_b	0.570	0.570
Disp. Vol. ∇ (m ³)	15652	0.273

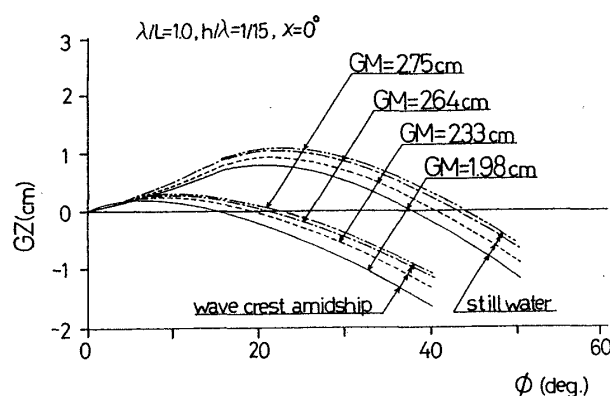


Fig. 2 Stability curves

ロを搭載して、オートパイロット装置のセンサーとして使っている。この水密箱は転覆にはほとんど影響を与えない程度の高い位置にあるが、一旦転覆した後は船を波に対して横向きにすることにより、波を受けて自動的に復原する装置として働く。

2.2 実験方法

実験は模型船と波との出会角を $\chi=0^\circ$ (真の追波) $\sim 90^\circ$ (横波) まで 10° 毎に変化させ、またプロペラ回転数 N を 1 rps づつ細かく変化させて行ない、出会角と船速に関する転覆限界を把握できるようにした。模型船の方位角とプロペラ回転数は設定した値に保たれるようにオートパイロット装置ならびにモータ速度制御装置により自動制御されている。オートパイロット装置の係数の設定は、船首揺れ角度 1° に対する応答舵角が 1.25° となるようにし、また船首揺れ角速度に対する舵角応答の係数は零とした。転覆の判定は、船が横転し航行不能になった状態とした。ただし、一旦横転とみなせる状態になった後で次に続く波が方位ジャイロ格納箱に作用してひとりでに起き上がって航行を続けてしまうケースも極く少数例ながら認められたが、これは転覆と判定している。計測項目は、横揺れ、縦揺れ、船首揺れ、船首揺れ角速度、舵角、プロペラ回転数および航跡(船速、針路角)である。

不規則波中の実験では、同一条件の航走を最大 20 回程度繰り返し航走回数に対する転覆割合を求めて、転覆しやすいかどうかの目安とした。ただし模型船の走り始めるタイミングは発生させた波に対してランダムではなく、どの航走でも大体において同じ波群に遭遇するようにして行なっ

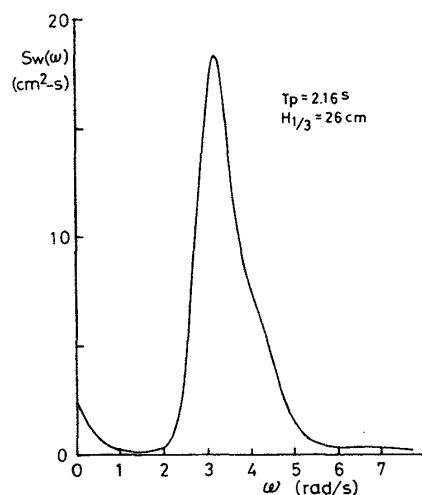


Fig. 3 Spectrum of irregular wave

た。使用した波は P-M 型の 1 種類 (Fig. 3) であるが、この波に対する GM の転覆限界を把握できるように GM を 4 種類に変化させた。プロペラ回転数一定とすると波浪中の船速が出会角により多少変化するため、船速がほぼ一定となるように出会角ごとにプロペラ回転数を最大 1 rps 変えて行なった。

規則波中の実験では、同一条件での航走は 1 回のみを原則としたが、転覆限界付近の微妙なところでは 2 回航走させた場合もある。波長 λ 、波高 h は、 $\lambda/L=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25$, $h/\lambda=1/20, 1/15, 1/12, 1/10$ の組み合わせの中で必要と判断したものについて行なった。ただし船体条件については $GM=1.98\text{ cm}$ の 1 種類のみである。またプロペラ回転数の設定は不規則波の場合と違い、出会角ごとには変えず平水中船速の値に固定した。

3. 実験結果

3.1 不規則波中の転覆

Fig. 4 は不規則波中のすべての実験点をまとめて出会角

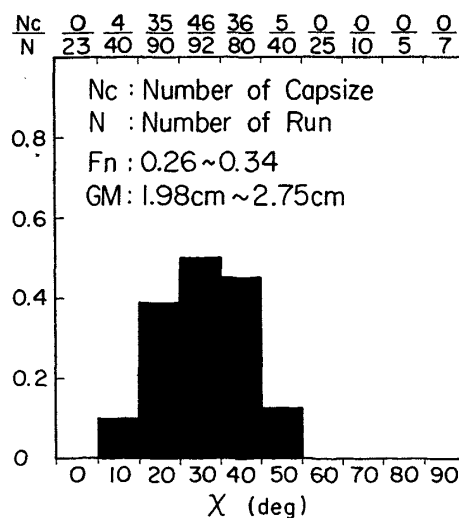


Fig. 4 Total rate of capsizing in irregular wave

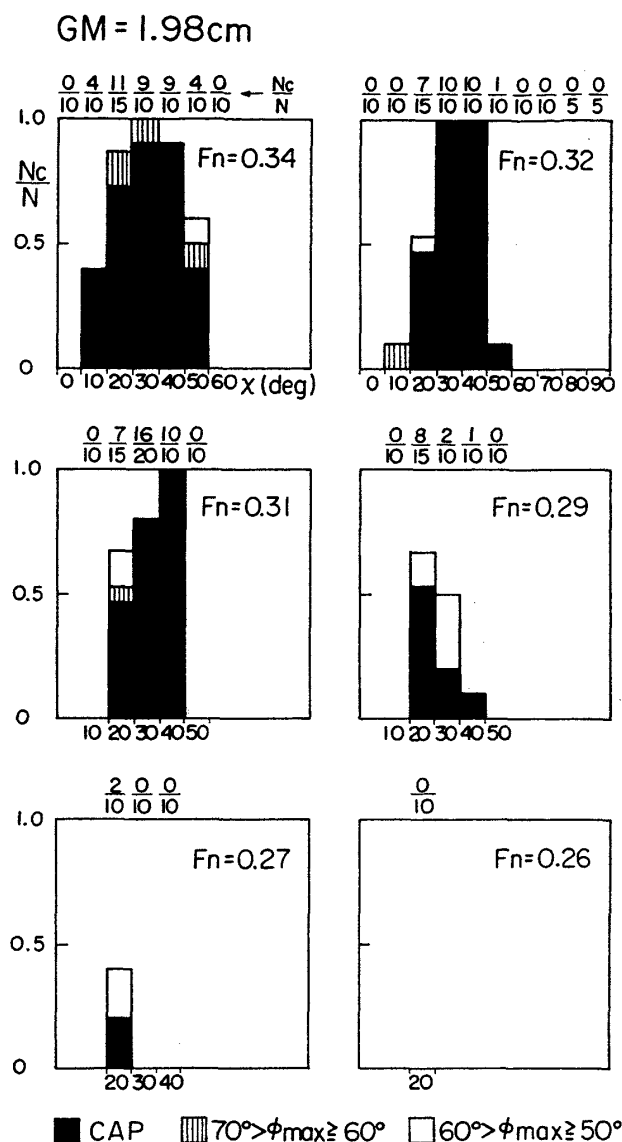
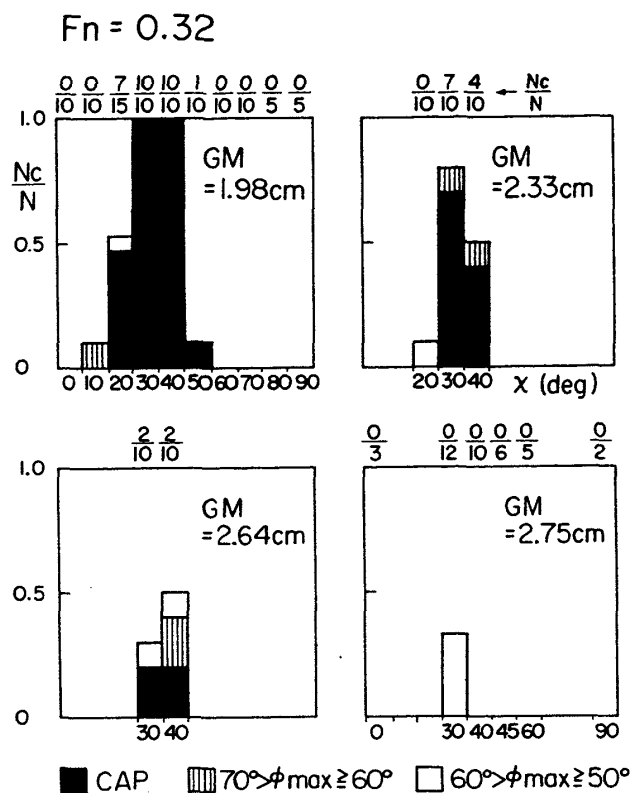


Fig. 5 Effect of speed on capsizing rate

に対する転覆割合として示したものである。転覆の発生が $\chi=10^\circ \sim 50^\circ$ に限定されており、とくに $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度が危険であることが判る。 $\chi=0^\circ$ および $\chi \geq 60^\circ$ では転覆の発生はない。横波では航走回数も少ないが、これは何回走っても絶対に転覆はしないことを確信したためである。Fig. 5 は出会角ごとの転覆割合が船速によってどのように変化するかを $GM=1.98\text{ cm}$ について示したものである。 $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度が危険であること、高速では危険な出会角範囲が $\chi=10^\circ \sim 50^\circ$ 程度まで拡がること、またフルード数 $Fn=0.26$ 程度以下の中低速では転覆が発生しなくなることなどが判る。なお図には転覆はしなかったが最大横揺れ角が 50° を越えたものについてもその割合を示してある。また、今回使用したパーティカルジャイロによる横揺れ角の測定可能範囲は 70° であった。Fig. 6 は GM によって転覆割合の変る様子を示している。この実験で使用した波は実船スケールで、有義波高 10.0 m 、ピーク周期 13.4 s

Fig. 6 Effect of GM on capsizing rate

であるが、この波に対する転覆限界の船体条件は $GM=2.7$ cm (実船 1.04 m) 程度であることが判る。不規則波中では全航走数 418 航走のうち 126 件の転覆が発生しているが、そのすべてが波下側への転覆であり、波上側へ転覆した例は一件もない。また $\chi = -20^\circ$ の出会角すなわち左舷後方から波を受ける形で 20 航走の実験を行なったが、 $\chi = 20^\circ$ の場合との差は全く認められず、プロペラ回転方向等による左右非対称性の影響で左舷側へ転覆しやすいのではないことを確認してある。

3.2 規則波中の転覆

転覆に対して危険な条件は、不規則波中の実験でかなり明確になってきたが、これを更に詳細に把握するために規則波中で行なった転覆実験の結果を一覧表にして示したものが Table 2.1~2.8 である。○印は転覆しなかったもの、×印は転覆したもの、△印は転覆はしなかったが最大横揺れ角が 40° を越えたものであることを表す。

$\lambda/L=0.5$ (Table 2.1) のような短波長の波では波高が高

Table 2.1 Results in regular wave ($\lambda/L=0.5$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0.5	$1/10$	0.31										
		0.32										
		0.34										
		0.36	○	○	○	○	△P	○	○	○	○	○
		0.37				○	OP	○	○			

○: Non Capsize
△: $\phi_{\max} > 40^\circ$
×: Capsize

L: Pure Loss
P: Period Bifurcation
B: Broaching
BT: Broaching Tendency

くても転覆は発生していない。短波長の波が横波による転覆に対して危険であることを述べた文献^{6),7)}の結果と一致しないが、これは本船の上甲板にブルワークがなく横波の激しい打込みを受けるものの、それが甲板上に滞留しないことによるものと考えてよいであろう。しかし $\chi=40^\circ$ のときに他の出会角では見られない大きな横揺れ (周期 5.0 秒) が波下側に発生しており、これは横揺れ同調 (固有周期 3.4 秒) によるものではなく、あとで述べる他の波長の場合と同じようにこの出会角が危険であることを示しているものと判断される。

$\lambda/L=0.75$ (Table 2.2) の場合は、 $\chi=30^\circ \sim 40^\circ$ 程度が危険であり、波高が高くなってもその危険範囲は広がっていない。また船速が低くなれば転覆の発生はなくなるが、船速が高くなっても危険な出会角範囲が広がるようには見えない。

$\lambda/L=1.0$ (Table 2.3) の場合は、危険な出会角範囲が平均的には $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度とみなしてよいと思われるが、波高が高くなるにつれ χ の小さい方へ移動しているようにみえる。高速かつ高波高のときには、不規則波中では発生しなかった $\chi=0^\circ$ での転覆が発生している。これは舵効が悪くなって直進できず、結果として斜め追波を受ける

Table 2.2 Results in regular wave ($\lambda/L=0.75$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0.75	$1/20$	0.36			○	○	△P	○				
		0.37			○	○	XL	○				
		0.31			○	△P	○	○				
		0.32			○	XL	OP	○				
		0.34			○	XL	XL	○				
		0.36	○	○	○	XL	XL	△	○			
	$1/15$	0.37	○	OB	OB	XL	XL	○				
		0.31		○	○	○	○	○				
		0.32		○	○	XP	○	○				
		0.34	○	○	○	XP	XP	○				
		0.36	○	OB	○	XL	XL	○	○			
		0.37	○	OB	OB	XL	XL	○	○			
	$1/10$	0.29				OP	OP					
		0.36		○	○	XP	XP	OP				

Table 2.3 Results in regular wave ($\lambda/L=1.0$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1.0	$1/20$	0.32										
		0.34										
		0.36			○	○	△P	○				
		0.37			○	○	XL	○				
		0.38			OB	△	○	○				
	$1/15$	0.31		○	△P	○	○	○				
		0.32		○	○	XP	○	○				
		0.34		○	XL	XL	XP	○				
		0.36		OB	XB	XP	XP	△P				
		0.37		OB	XB	XL	XL	○				
	$1/10$	0.31	○	○	○	○	OP	○				
		0.32	○	△	XP	OP	△	○				
		0.34	○	○	XL	XL	○	○				
		0.36	○	○	XB	XL	XP	△	○	○	○	○
		0.37	XB	XB	XB	XL	XP	XP	△P			

Table 2.4 Results in regular wave ($\lambda/L=1.25$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1.25	1/20	0.31										GM=1.98 cm
		0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
	1/15	0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
	1/12	0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
		0.34										

Table 2.5 Results in regular wave ($\lambda/L=1.5$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1.50	1/20	0.31										GM=1.98 cm
		0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
	1/15	0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
	1/12	0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
		0.34										

形で、かつブローチングも発生している形で波下側に転覆したものである。転覆が起こらなくなる限界の船速があることは前と同じであるが、船速が高くなると危険な出会角範囲が広がる傾向が高波高 ($h/\lambda=1/12$) の場合に認められる。

$\lambda/L=1.25$ (Table 2.4) の場合は、転覆に対して危険な波長といわれている $\lambda/L=1.0$ と同等程度またはそれ以上の転覆例が認められる。危険な出会角範囲は平均的には $\chi=10^\circ \sim 30^\circ$ 程度とみなしてよいと思われる。 $\lambda/L=0.75$, 1.0 に比べ $\chi=40^\circ$ での転覆は減っており危険範囲が 10° 程度小さい方へ移っているように見える。

$\lambda/L=1.5$ (Table 2.5) の場合も、 $\lambda/L=1.25$ と同等程度の転覆例が認められる。危険な出会角範囲が $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度に戻っているようにみえる。 $h/\lambda=1/20$ の場合は転覆の発生がばらついてはいるが、転覆限界付近では僅かな初期条件等の違いが制限された水槽内での転覆発生の有無に影響を与えているかもしれない。

$\lambda/L=1.75$ (Table 2.6), $\lambda/L=2.0$ (Table 2.7) の場合は、造波機能力の制限により波傾斜の高いところの実験はできないが、 $h/\lambda=1/20$ の結果を見るかぎりでは転覆の発生が $\lambda/L=1.25$ や 1.5 に比べて減っているようには見えない。

$\lambda/L=2.25$ (Table 2.8) の場合には転覆の発生がやや減ってきているように見え、長波長では転覆が発生しにくく

Table 2.6 Results in regular wave ($\lambda/L=1.75$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1.75	1/20	0.31										GM=1.98 cm
		0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
	1/15	0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
	1/12	0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
		0.34										

O: Non Capsize
 Δ : $\phi_{max} > 40^\circ$
X: Capsize
L: Pure Loss
P: Period Bifurcation
B: Broaching
BT: Broaching Tendency

Table 2.7 Results in regular wave ($\lambda/L=2.0$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2.0	1/20	0.31										GM=1.98 cm
		0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
	1/15	0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
	1/12	0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
		0.34										

O: Non Capsize
 Δ : $\phi_{max} > 40^\circ$
X: Capsize
L: Pure Loss
P: Period Bifurcation
B: Broaching
BT: Broaching Tendency

Table 2.8 Results in regular wave ($\lambda/L=2.25$)

λ/L	h/λ	F_n	χ (deg)									
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2.25	1/20	0.31										GM=1.98 cm
		0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
	1/15	0.32										
		0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
	1/12	0.34										
		0.36										
		0.37										
		0.31										
		0.32										
		0.34										

なることのきざしではないかと思われる。

追波中の転覆の形態は通常次の3つに分類されることが多い^{2),8)}。

Pure loss of intact stability

Parametric oscillation or low cycle resonance

Broaching-to

今回実施した規則波中の実験結果を全体的に見てみると、転覆の大半は追波中の復原力減少 (pure loss of intact stability) によるものと判断される。これは、所定の船速と出会角をもって規則波に遭遇して極く初期の段階で容易に転覆してしまう場合であり、横揺れ等のデータ記録例を Fig. 7 に示す。Broaching-to による転覆は $\chi=0^\circ \sim 20^\circ$ 程度のところで少数例ながら観測されており、Fig. 8 はそのデータ記録例である。このタイプの転覆は、broaching-to による回頭運動に基づく外方傾斜の影響が一般的には無視出来ないが、本船の場合この外方傾斜がほとんど発生しないことが判っており⁹⁾、むしろ舵が効かずに危険な斜め追波になってしまうことが主たる原因ではないかと推測され、基本的にはやはり pure loss of intact stability による転覆なのではないかと考えている。Parametric oscillation or low cycle resonance と分類されるものは、出会周期の2倍の周期の同調横揺れが発達して転覆にいたるものと定義すると、厳密には一件も観測されていない。これは、Paul-

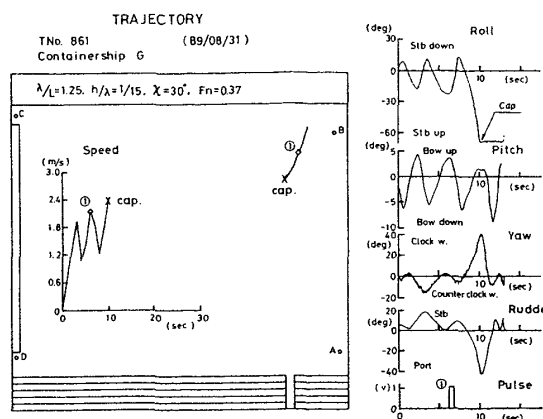


Fig. 7 Example of record (pure loss of intact stability)

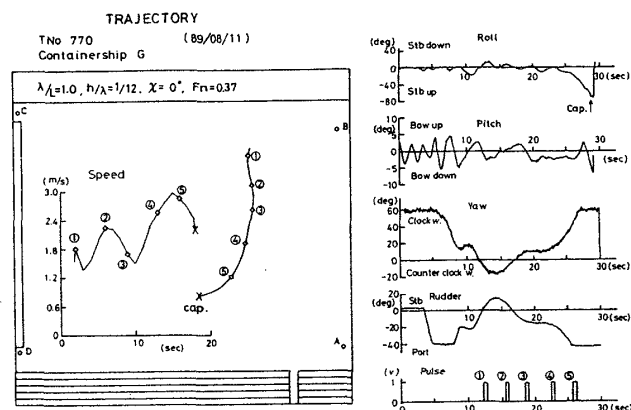


Fig. 8 Example of record (broaching-to)

ling 等²⁾により行なわれたサンフランシスコ湾におけるコンテナ船模型で一例が観測されただけという実験結果と同じ傾向である。しかし、所定の船速と出会角をもって規則波に遭遇してもすぐには転覆せず、大振幅の揺れと小振幅の揺れを交互に繰り返すような挙動を示し、大振幅の揺れの時に転覆に至るといったパターンが比較的多かったように見受けられた。Fig. 9 にそのデータ記録例を示してある。こ

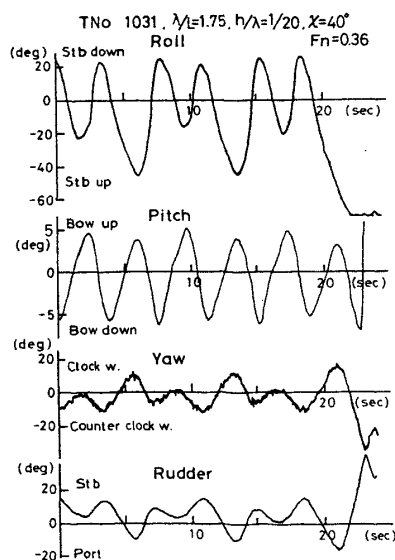


Fig. 9 Example of record (period bifurcation)

れは、parametric oscillation というよりもカオスの前段現象として、出会周期の2倍周期等の成分が現れる周期倍分岐現象 (period multiplying bifurcation) の可能性があるのではないかと考えている¹⁰⁾。このタイプの転覆も基本的には、pure loss of intact stability によるものであって、転覆限界に近いときに一挙には転覆せずこのような不安定な挙動をとるのではないかと推測している。Table 2 にはどのタイプの転覆と見なしたかを、それぞれ次の略号を用いて記入してある。

Pure loss of intact stability (略号 L)

Period bifurcation (略号 P)

Broaching-to (略号 B), Broaching-to の傾向 (略号 BT)

また転覆に至らなかった場合でも、period bifurcation あるいは broaching-to が起こっていると見なせるものにはその略号を記入してある。規則波中では結局、全航走数345件に対し99件の転覆が発生したが、出会角ごとの転覆割合の分布と、各転覆がどの転覆形態に分類されるかを示したものが Fig. 10 である。これによると規則波中での全転覆のうち pure loss of intact stability は64%, period bifurcation は26%, broaching-to は10%である。ただしこの分類はあまり厳密なものではなく、特に period bifurcation としたものは Fig. 9 のようなきれいな2周期分岐が観察されるものの他に4周期分岐と2周期分岐が交互に現れるように見えるものや、明確な周期分岐と断定できるかどうか判らないものも多少含んでいる。

転覆の方向は不規則波中と同様99%波下側に発生している。一例だけ ($\lambda/L=2.25$, $h/\lambda=1/20$, $\chi=30^\circ$, $F_n=0.37$) 波上側に転覆したケースがあるが、これは波下側に殆ど転覆したと見えるくらいに大傾斜 (傾斜角 50°) したあと反対側へ揺れ戻して波上側に転覆した極く珍しい例である。

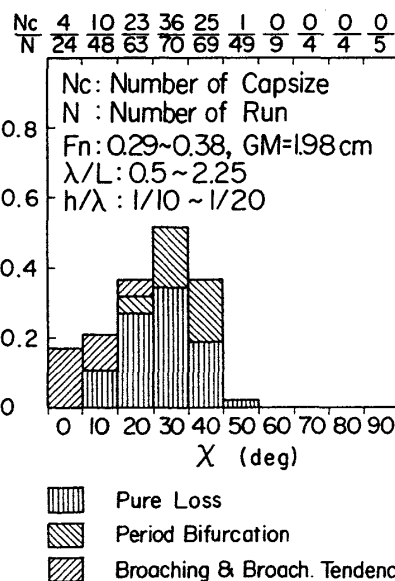


Fig. 10 Total rate of capsizing in regular waves

4. 転覆のメカニズムに関する考察

以上の実験結果から、斜め追波中を航走する非損傷船の転覆現象に関しては、次の3点の特徴的な性質が明らかになったと考えてよいであろう。すなわち

- $\chi = 20^\circ \sim 40^\circ$ 程度の出会角で転覆が多い。
- 中低速になると転覆が起こりにくくなる。
- 転覆は必ず波下側に発生する。

現象として明らかになったこれら3つの特徴について、その理由を実証的に説明する必要があり以下にそれを試みる。

4.1 転覆に対する出会角の影響

上述の模型実験においては転覆形態の分類として、大半は pure loss of intact stability といういわば静的な転覆形態に分類されるものであった。Broaching-to や period bifurcation のような動的な形態に分類されたものも、あくまでも転覆形態の分類であって転覆要因の分類ではない。転覆要因は基本的には、波浪による転覆モーメント（横揺れモーメント）が pure loss of intact stability により減少した復原モーメントを越えてしまう単純な静的な転覆ではないかというのが著者等の現時点での考えである。或いは波浪による転覆モーメントが復原モーメントを越えないまでも、極めて接近しているような場合に動復原力が不足し、或いは時として周期分岐のような動的な不安定現象も発生するなどして、転覆が発生するのではないかと考えている。従ってここでは、波浪による転覆モーメントと波浪中で減少した復原モーメントとの単純な静的な比較によって、転覆に対する出会角の影響を説明することを試みる。

まず横揺れモーメントについて考える。Fig. 11 のような座標系を使う。ここに、 ξ' は波の進行方向に波の谷から測った船体中心の変位である。谷より進んでいけば正、遅れていけば負である。横揺れモーメント M_r は、船が右舷後方から χ の角度で波を受けるとき、左舷側へ傾斜させようとする方向を正と定義すると

$$M_r = \iint p \{ (z - z_g) m - y n \} ds \quad (1)$$

と表せる。但し、 m, n は内向法線方向余弦である。また

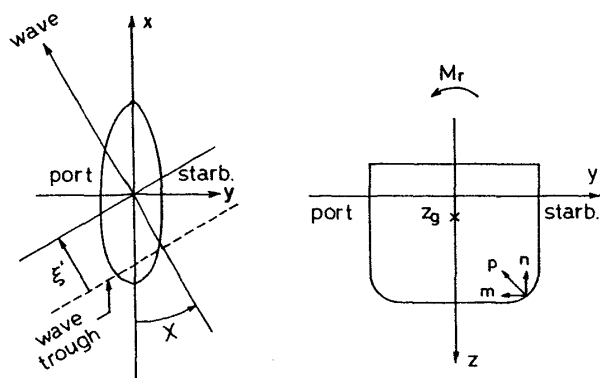


Fig. 11 Coordinate system

動的影響を無視し、Froude-Krylov 力だけを考えるものとし

$$p = -\rho g \zeta_a \cdot \exp(-kz) \cdot \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi + k\xi') \quad (2)$$

である。(2)式を(1)式に代入して次の表示式が得られる。

$$M_r = \bar{M}_r \cos(k\xi' + \epsilon) \quad (3)$$

$$\bar{M}_r = (M_c^2 + M_s^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\epsilon = \tan^{-1}(M_s/M_c) \quad (5)$$

$$M_c = -\rho g \zeta_a \iint \exp(-kz) \cdot \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi) \cdot \{ (z - z_g) m - y n \} ds \quad (6)$$

$$M_s = -\rho g \zeta_a \iint \exp(-kz) \cdot \sin(kx \cos \chi - ky \sin \chi) \cdot \{ (z - z_g) m - y n \} ds \quad (7)$$

いま、定性的な見通しを良くするために前後対称船を仮定すると

$$M_c = 0 \quad (8)$$

であり、また通常の船について波長の長いところを考えると

$$M_s > 0 \quad (9)$$

である。従って

$$\epsilon = \pi/2 \quad (10)$$

となり (Fig. 12 参照), (3)式から

$$M_r = -\bar{M}_r \cdot \sin k\xi' \quad (11)$$

が得られる。

(11)式は、波の谷に対する船の相対位置と横揺れモーメントの符号の関係を表している。これを図示したのが Fig. 13 である。右舷後方から波を受けたとき、船が波の下り斜面にあるときは左舷側すなわち波下側へ傾斜させようとする正のモーメントとなり上り斜面にあるときは波上側へ傾斜させようとする負のモーメントとなる。それぞれ最大になるのは谷から 1/4 波長のところの最大波傾斜の場所である。復原力減少の著しい波の山では零となる。以上は前後対称船について云えることであるが、一般船型の場合もこれと大きく異なることはないと考えて良いであろう。Fig. 14 に Froude-Krylov の仮定による横揺れモーメントの振幅 $\bar{M}_r$ を出会角 χ をパラメータにして、波長 λ に対して示してある。

次に斜め追波中の復原モーメント減少については、浜本^{11),12)}の研究がある。その計算プログラムにより、模型実験に使用したコンテナ船について復原モーメントを計算し、横

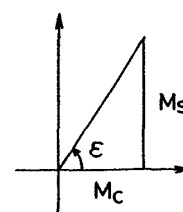


Fig. 12 Phase angle of capsizing moment

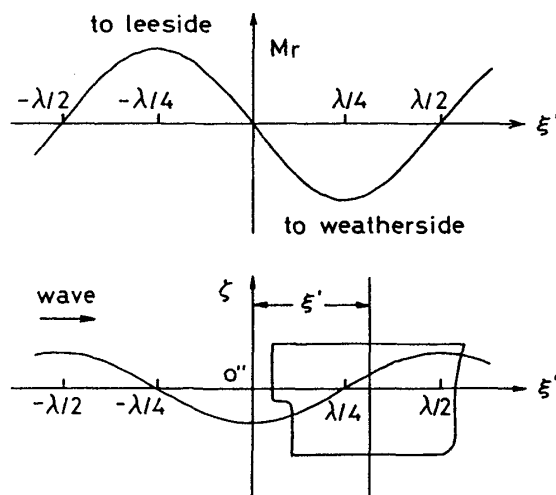


Fig. 13 Relation between capsizing moment by wave and ship position

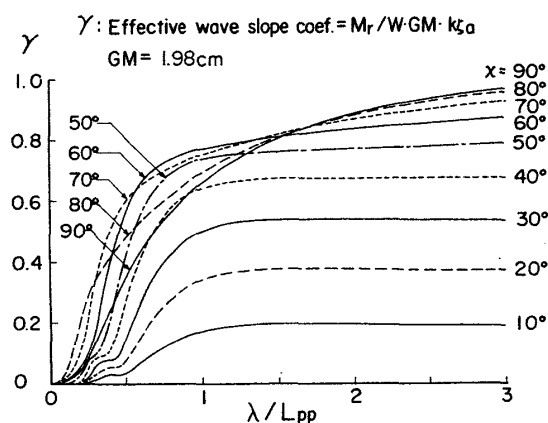


Fig. 14 Amplitude of capsizing moment by wave

揺れモーメントと比較してみる。波の山が船体中央付近に来ると復原モーメントの減少は最大となり、その点からは危険であるが一方で波による横揺れモーメントは小さくなるわけであるから、最も危険な位置は波の山とは限らず、前後対称船なら波の山から前後に1/4波長の範囲内にあると考えるのが自然である。それがどこにあるかは ξ' をパラメータにして計算した復原モーメントと横揺れモーメントを比較することにより見出される筈であるが、いまのところ ξ' を波の斜面にしたときの復原モーメント計算に一部不都合があり、ここでは復原モーメントについては復原モーメントの減少が最大となる波の山($\xi'/\lambda = -0.5$)での値を、横揺れモーメントについてはそれが最大となる、最大波傾斜位置($\xi'/\lambda = -0.25$)での値、すなわち横揺れモーメントの振幅を比較することとする。このような比較は厳密さを欠くが、最悪の場合を考えた安全側の評価となることから復原性基準や安全運航基準を考える場合にはひとつの考え方として成り立ちうるものであろう。Fig. 15は $\lambda/L = 1.0$ の場合についてその比較を行なった例である。上述のような制限はあるが、 $\chi = 20^\circ \sim 50^\circ$ 程度で横揺れモーメント

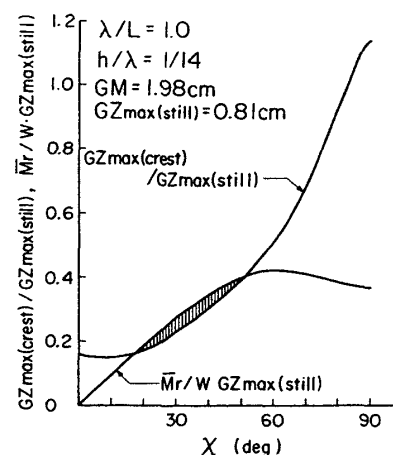


Fig. 15 Comparison of capsizing moment and restoring moment

が復原モーメントを上まわっており、 $\chi = 20^\circ \sim 40^\circ$ 程度の範囲で転覆が多く発生することを定性的には説明していると思なして良いのではないかと考えている。ただし、これは $h/\lambda = 1/14$ の場合の例であり、 $h/\lambda = 1/15$ とすると両者は極く接近はするが交わらなくなり、また $h/\lambda = 1/13$ では交差する範囲が増えるなどのことがあるので、このような図で横揺れモーメントが復原モーメントを上まわるときに転覆が発生すると単純には云えないが、危険な出会角範囲がこの付近に存在することの一応の説明にはなるであろう。もっと厳密には ξ'/λ を合わせた比較をする必要があるが現在はまだその計算ができておらず今後の課題としたい。

4.2 転覆に対する速度の影響

上で $\chi = 20^\circ \sim 50^\circ$ 程度の出会角のときに、転覆モーメントが復原モーメントより大きくなってしまふこと、あるいは両者が接近することが、この出会角範囲で転覆の発生が多いことを説明していると思なしてよいとした。しかし、これだけでは転覆のメカニズムを説明できないことは明らかである。何故ならば、前後対称船では全く同じことが斜め迎え波、すなわち $\chi = 130^\circ \sim 160^\circ$ 程度の出会角で起こるわけであるが、海水打ち込みを考えない場合の非損傷船の斜め迎え波での転覆は発生しないというのは常識である。また模型実験で明らかになったように一般に高速になるほど転覆が発生しやすく、中低速で転覆が発生しなくなる限界の速度が存在するらしいことについて何も説明できないからである。

高速で転覆が発生する理由を定性的に説明すると次のようなことであろうと考えられる。船速が高くなり波速に近づくと波乗りや長周期大振幅の非対称前後揺れが発生するようになり、波の下り斜面に長時間とどまることとなる¹³⁾(Fig. 16参照)。転覆モーメントが復原モーメントを静的に上回るような危険状態が波の下り斜面で、ある一定時間以上継続すると静的な転覆が発生するが、危険状態の継続時

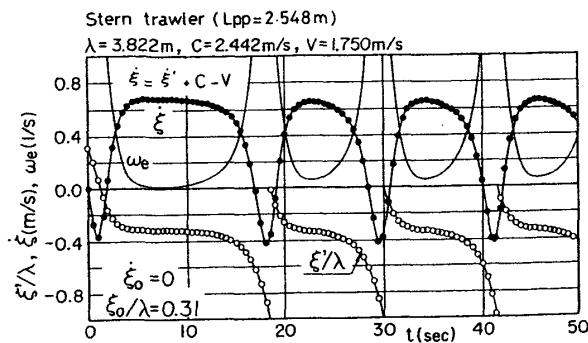


Fig. 16 Example of asymmetric surge motion in following wave¹³⁾

間が一定時間以下であれば転覆は発生しないと考えることができる。あるいは転覆モーメントが復原モーメントを静的に上回るようなことはないが、かなり接近しているときには、波上側から波下側へのひと揺れの間の仕事が動復原力を上回り動的な転覆が発生すると考えることができる。また周期分岐のような動的不安定現象等もこのような時に発生するのではないかと推測される。このような動的な転覆の場合も波下側への揺れが一定時間以上継続しないと転覆には至らないと考える方が自然である。この一定時間というものが転覆時定数のような形で明確に定義できれば、斜め追波中の前後揺れの非線形運動方程式¹³⁾を解いて危険状態の継続時間を求めることによって、ある船体条件が与えられたときの危険な航走条件（出会角と船速）と波浪条件を決定することができる筈である。復原性基準や安全運航基準を考える場合には、前後揺れの運動方程式として通常の線形方程式を使えば簡単なうえに安全側の評価となるであろう。一定時間として何を取るべきかについては今後の課題としたい。

上で Fig. 15 の結果から $\chi = 20^\circ \sim 50^\circ$ 程度の出会角のときに危険であるとしたが、実際には $\chi \leq 40^\circ$ での転覆にとどまっている。これは出会角が大きくなるにつれて波乗りや長周期の前後揺れが発生しにくくなることから、復原性上は不利な範囲に入っている危険状態の持続時間が短くなることにより転覆も発生しにくくなると解釈できると考えている。

以上の考察を波速より高速で走る超高速船に対して適用すると、その場合には超高速では転覆は発生せず、速度をある程度落として波速に近づいた時に転覆が発生しやすくなることが推察できる。これは転覆に対して危険な状態が長時間続くこととなる波乗り、または一定時間以上続くこととなる長周期の非対称前後揺れは、船の速度が波速に近づいた時に発生するためである。

4.3 転覆の方向

今回の模型実験では転覆はほとんど 100% 波下側に発生しているが、これは次のように説明できると考えている。転覆に対して危険な状態が長時間続くこととなる波乗りは

波の下り斜面で起こる。また危険な状態が一定時間以上続くこととなる長周期の前後揺れでは、船は正弦運動をするのではなく非対称な前後揺れ運動をしており¹³⁾、波の下り斜面にいる時間は波とともに走るため長時間続くが、上り斜面にいる時間は船速が落ちるためすぐ波に追い越されて短時間で経過してしまう (Fig. 16 参照)。いずれにしても危険状態が続くのは波の下り斜面 ($-0.5 < \xi'/\lambda < 0$) においてである。このとき (11) 式から M_r の符号が正、すなわち転覆モーメントは波下側へ転覆させようとする方向に働くことになる。これが波下側転覆の起こる理由と考えられる。

以上から通常の船の場合には、必ず波下側への転覆となることが説明できると考えているが、これを波速より高速で走る超高速船に対して適用すると、その場合には逆に必ず波上側への転覆となることが推察される。その理由はこの場合には、波乗りは波の上り斜面で発生するし、あるいは長周期の非対称前後揺れにおいても波とともに長時間走り危険状態が続くのは波の上り斜面においてであり、転覆モーメント M_r の符号が負、すなわち波上側へ転覆させようとする方向になるからである。

4.4 周期倍分岐とカオス

本船型の場合には、転覆の形態として通常よく言われる parametric oscillation のかわりに周期分岐という新しい転覆形態が存在する可能性について上で述べた。横揺れの運動方程式は、他の運動モードとの連成を考えない 1 自由度の簡単なものであっても、復原力項に負係数の 3 次の非線形項を取り入れた次の形でかなり一般的に表すことができる。

$$I \cdot d^2\phi/dt^2 + N \cdot d\phi/dt + W \cdot GM \cdot \phi \{1 - (\phi/\phi_0)^2\} = \bar{M}_r \cos \omega t \quad (12)$$

ここに ϕ は横揺れ角、 ϕ_0 は復原力消失角、 I は横揺れ慣性モーメント、 N は減衰力係数、 $\bar{M}_r$ は強制力係数、 W は排水重量、 ω は出会円周波数、 t は時間を表す。

横揺れ固有周波数 $\omega_0 = (W \cdot GM/I)^{1/2}$ と表し、時間を $s = \omega_0 t$ で無次元時間 s に変換し、また横揺れ角を $\psi = \phi/\phi_0$ で ϕ に変換すると、(12) 式は次のように変換される。

$$d^2\psi/ds^2 + \kappa \cdot d\psi/ds + \psi - \psi^3 = B \cos \Omega s \quad (13)$$

ただし $\kappa = N/I\omega_0$, $B = \bar{M}_r/I\omega_0^2\phi_0$, $\Omega = \omega/\omega_0$ である。これはいわゆる軟化スプリング系の強制 Duffing 方程式であり、各項の係数の組み合わせによっては、また強制力の周波数によってはカオスにいたる一連の周期倍分岐現象が出現する典型的な非線形常微分方程式である¹⁰⁾。(13) 式で ψ の項を落とし ψ^3 の符号を正とし、かつ $\Omega = 1$ とした場合については $\kappa - B$ 平面上でカオスや周期分岐の現れる領域が上田教授により詳しく調べられているが¹⁰⁾、(13) 式そのものについてはそのような詳しい調査はなされていないようであり、今後の課題として残されているものと思われる。更にそれらが明らかになったとしても、周期分岐やカオスと転覆との関係については現時点では何も判っておらず、や

はりこれらを解明することは今後の課題である。なお斜め追波中の 1 自由度の横揺れ運動方程式としては(13)式の左辺の復原力項に復原力変動を表す $1+e \cdot \sin(\Omega s + \epsilon)$ の形の係数を掛けて Mathieu 型にしておいた方が実際に近いと考えられるし、減衰力項の非線形性も考慮すべき場合もありうるが第一段階としては(13)式そのものを調べる必要があると考えており機会を改めて報告したい。

5. 結 言

斜め追波中を航走するコンテナ船の完全自航模型船を用いて転覆模型実験を実施しその特徴を調べた。またそれらの結果をもとに転覆のメカニズムを考察した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 転覆は出会角 $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度のときに多発した。高速ではこれが $\chi=0^\circ \sim 50^\circ$ 程度に広がる傾向にあった。

(2) 転覆は高速になるほど発生しやすく、中低速で転覆が発生しなくなる限界の船速が存在するようにみえる。

(3) 転覆はほとんど 100% 波下側に起こった。

(4) 転覆の形態としては、pure loss of intact stability に分類されるものが大半を占め(64%)、broaching-to に分類されるものは少なかった(10%)。parametric oscillation に分類されるものは 1 件もなく、新たな分類として取り上げた period bifurcation (周期分岐) と考えられるものが少なからず観察された (26%)。

(5) 斜め追波中の転覆の基本的な要因は、波による横揺れモーメントが波浪中で減少した復原モーメントより大きくなる、あるいは両者が接近することによるものであると考え、この状態が出会角 $\chi=20^\circ \sim 50^\circ$ 程度で起きやすいことを示した。

(6) 転覆が発生するためには、(5)の状態が一定時間継続することが必要であるが、船速が波速に近付くと波乗りまたは非対称な長周期前後揺れが発生し、波の下り斜面で危険状態が長時間継続することが高速で転覆が発生しやすいことの理由と考えられる。

(7) 転覆が必ず波下側に起こることは、危険状態が長時間継続する波の下り斜面では波による横揺れモーメントが波下側への転覆モーメントになることで説明できる。

(8) 波速より高速で走る超高速船では、船速を落として波速に近づいた時が危険であり、転覆の方向は波上側になると推測される。

今回実施した模型実験ならびに若干の考察により、非損傷船の波浪のみによる転覆については、その特徴とメカニズムの基本的なところはかなり明確になってきたのではないかと考えている。しかし $\chi=20^\circ \sim 40^\circ$ 程度が危険であることや parametric rolling がほとんど発生せず周期分岐が発生すること等を一般的に云って良いかどうかは、更に別の船型についての実験により確認することが必要である

う。更に周期分岐やカオスの発生の条件や、これらと転覆との関連を明確にすることも今後の課題として残されている。

本研究は、科学技術振興調整費による個別国際共同研究制度に基づく日独共同研究の一環として行なわれたものであり、種々の御指導、御便宜をいただいたハンブルグ造船研究所前所長の O. Krappinger 教授、運動性能部長の P. Blume 博士ならびに船舶技術研究所前所長の菅井和夫博士、次長の高石敬史博士に深甚な謝意を表明します。また斜め波中の復原力計算の計算プログラムを使用させていただき数々の御指導をいただいた大阪大学の浜本剛実教授に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 菅 信, 山越康行: 船舶の横波中の転覆, 船舶と海洋構造物の安全性と復原性シンポジウム, 日本造船学会, 1986.10, p.95
- 2) Paulling, J. R., Oakley, O. H. and Wood, P. D.: Ship Capsizing in Heavy Seas, Proceedings of the International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, 1975.3
- 3) Yamakoshi, Y., Takaishi, Y., Kan, M., Yoshino, T. and Tsuchiya, T.: Model Experiment on Capsize of Fishing Boats in Waves, Proceedings of the International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, 1982.10, p.199
- 4) 高石敬史: 船舶の復原性研究の現状と課題, 日本造船学会誌, 第 594 号, 1978.12, p.1
- 5) 菅 信, 猿田俊彦, 石田茂資, 安野三樹雄: 斜め追波中の転覆模型実験, 第 52 回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1988.12, p.82
- 6) 田宮 真, 宮田秀明, 宮沢 徹: 箱型船の転覆限界, 日本造船学会論文集, 第 128 号, 1970.12, p.205
- 7) 慎燦益, 大楠丹: 横波中の船の安定性に及ぼす海水打込みの影響について, 日本造船学会論文集, 第 161 号, 1986.6, p.111
- 8) 浜本剛実, 藤野正隆: 船舶の縦波中の転覆, 船舶と海洋構造物の安全性と復原性シンポジウム, 日本造船学会, 1986.10, p.125
- 9) 菅 信, 猿田俊彦, 田口晴邦, 安野三樹雄: 斜め追波中の転覆模型実験 (第 2 報), 第 54 回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1989.11, p.121
- 10) 武者利光監訳: 非線形力学とカオス, 第 1 版, オーム社, 1988.7, p.127, p.98, p.12
- 11) M. Hamamoto: Transverse Stability of Ships in a Quartering Sea, 3rd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Gdansk, 1986.9, p.7(Vol.1).
- 12) 浜本剛実, 秋吉泰三: 斜め追波中の復原力変動の推定法, 関西造船協会誌, 第 205 号, 1987.6, p.11
- 13) 菅 信, 猿田俊彦, 安野三樹雄: 追波中の船の大振幅前後揺れと波乗り現象 (その 2 シミュレーションによる検討), 日本造船学会論文集, 第 165 号, 1989.6, p.111