

Fig.2.12 Frequency Responses in Regular Waves

は、3)の連成力だけである。

実験データの数が十分ではないが、Fig.2.12の横揺振幅の実験結果は上記の考察から説明することができる。センターケーシングがない場合の ω_{max}/ω_r は1よりも大きい側に、センターケーシングがある場合のそれは逆側におおむねずれている。センターケーシングがない場合はある場合に比べて滞留水量が小さいため、甲板上の水の移動幅が大きい。また、水の移動を妨げるセンターケーシングが存在しない。そのため連成運動の影響の方が大きくなり、高周波数側にずれたものと考えられる。センターケーシングがある場合はその逆である。

これらの規則波中の実験結果と考察から、損傷時のRO-RO客船の横波中の運動では、①横揺減衰力は大きい滞留水量などに対する横揺同調の影響は無視できないこと、②横揺振幅の同調点が tuning factor = 1 からずれる場合があること、がわかった。

なお、規則横波中の振る舞いについては、第4章でさらに詳しく検討する。

2.4 定常状態を決定する因子と転覆発生の条件

本報告で扱っている問題では、車両甲板上の滞留水量が損傷口からの海水流入と流出のバランスによって決定されることが重要な特徴である。流入と流出の速度は、車両搭載区画の容積に比べて小さいので、2~3波中での横揺は、滞留水量を一定とした復原力曲線 (Fig.2.4) によって支配される。船はこの曲線に沿って横揺しながら徐々に滞留水量を増加し、次の滞留水量の曲線に移っていく。そして、横揺のエネルギーが正の復原力範囲を超えるようになれば転覆し、途中で定常状態になれば転覆しないと考えることができる。

ここでは、復原力曲線など静的な量を用いて定常状態を決定する因子について検討し、転覆した実験状態を把握する。また、最終状態に至る過程について検討するとともに、転覆危険性の判別法を提案する。

2.4.1 定常状態の決定因子と転覆

まず、定常状態における傾斜角と滞留水量から、船がどのような状態で釣り合っているか検討する。実験値をFig.2.13に記号で示す。ただし、転覆した場合には転覆直前の値を用いた。また、1点を除いて初期傾斜は0である。図中の実線は、滞留水量一定時の復原力 (Fig.2.4) が負から正になる平衡点 (主平衡点) である。また、波浪強制力の非線形成分や滞留水の運動などによる定常傾斜偶力の存在を考慮して、復原力曲線が $GZ = \pm 0.0624m$ (基準状態の GM_d の2%) の線と交わる点を、副平衡点として破線で示している。以下で

は、破線で囲まれた領域を平衡範囲と呼ぶことにする。

Fig.2.13から、転覆しないケースでは平衡範囲付近で定常状態となっていることがわかる。一方、転覆したケースでは大量の滞留水によって平衡範囲からはずれている。Fig.2.4の復原力曲線からもわかるように、この状態 ($GM_d = 1.27m$, $w/W \approx 25\%$) では正の復原力範囲を持たないので、転覆につながっている。

船は平衡範囲のどの点で定常状態になるのだろうか。また、転覆したケースでは、なぜ平衡範囲からはずれるのだろうか。海水の流入と流出を規定する尺度として、車両甲板内の平均水面高さと船外の静止水面との

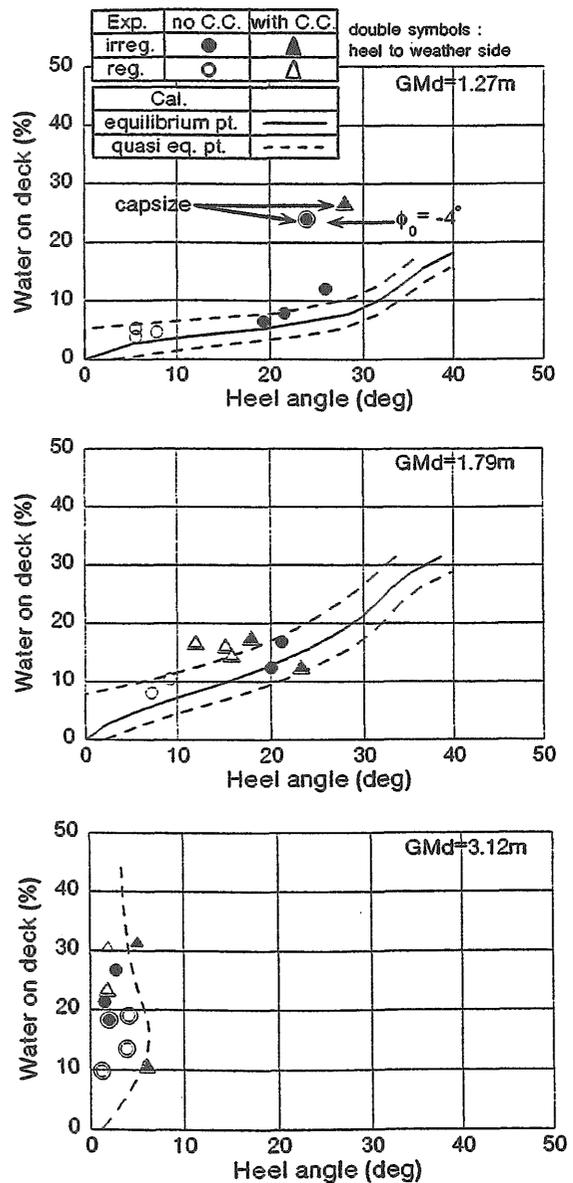


Fig.2.13 Amount of Water on Deck w , Heel Angle ϕ_0 and Equilibrium Range

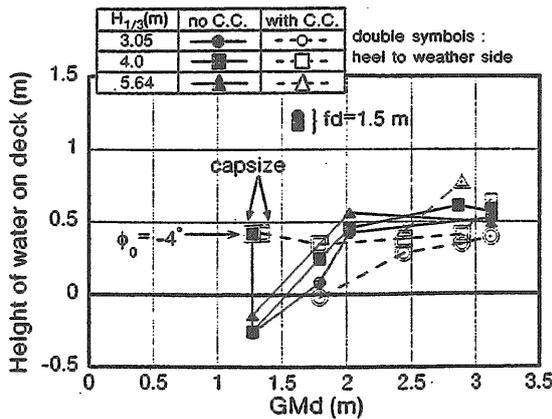


Fig.2.14 Experimental Results of Height of Water on Deck H_d

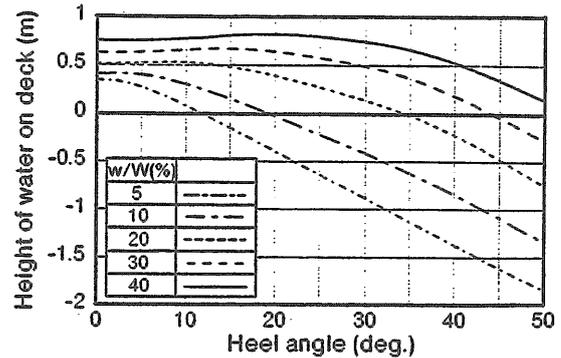


Fig.2.15 Height of Water on Deck H_d in Calm Water

差 (以後水位差 H_d と呼ぶ) を考えてみる。一般的に考えて、 H_d が非常に高くなれば、損傷口からの流出量が流入量を上回る。また、 H_d が非常に低くなれば、逆に流入量が上回る。従って、 H_d はある一定の範囲内でバランスする筈である。

定常状態における傾斜角と滞留水量から H_d を計算したものをFig.2.14に示す。ここで、 $H_d > 0$ は外水面よりも滞留水面が高いことを意味している。この図から、乾舷が標準状態 (0.33m) の場合、 H_d は実船で-0.26~0.78m、模型船で-1.1~3.3cm の狭い範囲に限られ、この水位差でバランスすることがわかる。ただし、乾舷を高くした場合 (1.50m) には、高い位置にある車両甲板に水が滞留するので、標準状態に比べ滞留水量は少ないものの、 H_d はさらに大きい値となる。このように、水位差が高い位置でバランスすることは、滞留水量の増加と復原力の低下に直結するので非常に重要である。その原因としては、波の非線形成分や波と船体運動との位相差などが考えられる。Fig.2.3の損傷時の復原力曲線は $H_d = 0$ という条件下の計算なので、RO-RO客船の安全性を評価する場合には、これに $+\alpha$ の滞留水影響を考慮する必要がある。

実験結果の検討を進める前に、傾斜角や滞留水量によって H_d がどのように変化するか検討しておく。平水中で一定量の滞留水を車両甲板に乗せたときの H_d と傾斜角との関係をFig.2.15に示す。傾斜角が小さい場合には、滞留水が車両甲板に平均して広がるため、滞留水量による H_d の変化はわずかである。一方傾斜角が大きくなると、滞留水が車両甲板端部に集中するので、特に滞留水量が小さいときには H_d が傾斜角によって大きく変化することがわかる。 GM_d が小さい状態では、定常傾斜角が大きくなり、また滞留水による復原力の

悪化が著しい。従って、 H_d が大きくなると大量の水が浸水、滞留し、転覆することになる。

Fig.2.14にもどり、乾舷が標準状態の場合について検討を進める。まずセンターケーシング無の場合を見ると、 GM_d が大きい範囲では H_d はほぼ一定値を保つが、 GM_d が小さくなると急激に H_d が小さくなる傾向にある。これは、すでに述べたように、少量の滞留水でも波下側に傾くため損傷口が高い位置になり、実験開始後短時間で海水流入がほとんどなくなるからである。ただし、波上側に4度の初期傾斜をつけた場合には、損傷口が低い位置に留まるので、 GM_d が大きい場合と同程度の H_d 値を示している。そのため、大量の滞留水により復原力曲線が悪化し、転覆する結果になっている。一方センターケーシング付の場合には、ほとんど波上側に傾斜する。波高が低いとセンターケーシング無の場合と同様に右上がりの傾向を示すが、波高が大きくなると GM_d によらずほぼ一定の H_d 値を保つようになる。そして、 GM_d が最も小さい状態において転覆している。2.1.4節で述べたように、この状態は SOLAS 規則を満足しないので、より条件の厳しい甲板浸水を伴う場合に転覆することは、ある意味で当然の結果である。

まとめると、波高が大きい波の中では、短時間で波下側に大傾斜する場合を除いて、 $H_d = 0.4 \sim 0.8m$ でバランスする。このことは、傾斜角にかかわらず大量に浸水することを意味する。重心が低い状態では、大量に浸水しても平衡範囲付近で釣り合うので転覆には至らない。しかし、重心が高い状態では滞留水による復原力曲線の悪化が著しいので、 $GZ > 0$ の領域がなくなるか、または、横揺のエネルギーが正の復原力範囲を超えるようになり、転覆するものと考えられる。

なお、以上の検討から、傾斜方向（損傷口高さ）が転覆の有無に重要であることが明らかとなった。実験結果では、センターケーシング付の場合、ほとんど波上側に傾斜している。これは、浸水がまず波上側の部分に滞留することから説明でき、一般的な性質と思われるので、センターケーシング付の船は転覆の危険性が高いと言える。一方、センターケーシング無の場合には、重りの移動によって初期傾斜をつけない限り波下側に傾斜した。試みに、実験途中で大量に浸水した時点で波上側に傾けてみたが、2～3波で波下傾斜にもどるのが観察された。この性質は船体運動と滞留水の運動との位相差などが関係していると考えられるので、車両区画幅が異なる場合など一般的な傾向を述べるには、動的影響を含めた検討が必要と思われる。

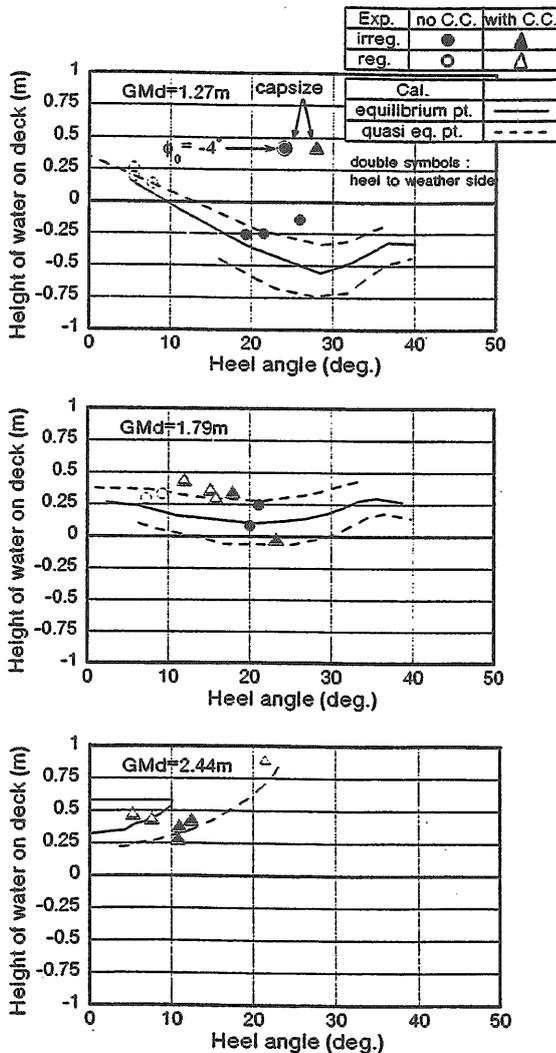


Fig.2.16 Height of Water on Deck H_d , Heel Angle ϕ_0 and Equilibrium Range

2.4.2 最終状態に至る過程と転覆危険性の判定法

ここでは、損傷直後から最終状態に至るまでの変化の過程を考察し、転覆危険性の判定法などについて検討する。

H_d が重要なパラメータとなるので、Fig.2.13の縦軸を H_d に代えたものをFig.2.16に示す。ただし、説明を容易にするため一部異なった GM_d を用いている。この図から、 GM_d が大きくなるに従って、平衡範囲が右下がりから右上がりへと変化することがわかる。ここには示していないが、最も重心の低い $GM_d = 3.12m$ では、滞留水量にかかわらず直立状態が主平衡点になるので、図中の実線は縦軸に一致する。

Fig.2.16と、Fig.2.17の概念図を用いて、時間変化の様子を検討する。損傷直後にごく少量の水が甲板上に打ち込んだ状態を考えると、平均傾斜角はほぼゼロの筈である。また、 H_d は乾舷高さ（0.33m）にはほぼ等しい。従って、 $\phi = 0^\circ$ 、 $H_d = 0.33m$ がすべての状態のスタート点になる。Fig.2.16に示した GM_d では少量の滞留水で初期復原力が負となるので、船は短時間で傾斜するようになる。波高が高く波上側に傾斜していく場合を考えると、先に述べたように H_d ほぼ一定の値（0.4～0.8m）をとるので、点はスタート点から右に動いていくことになる。Fig.2.15からわかるように、滞留水量一定ならば傾斜とともに H_d が低下し、浸水しやすくなる。また、滞留水量が増加すると傾斜が増大する。従って船は、

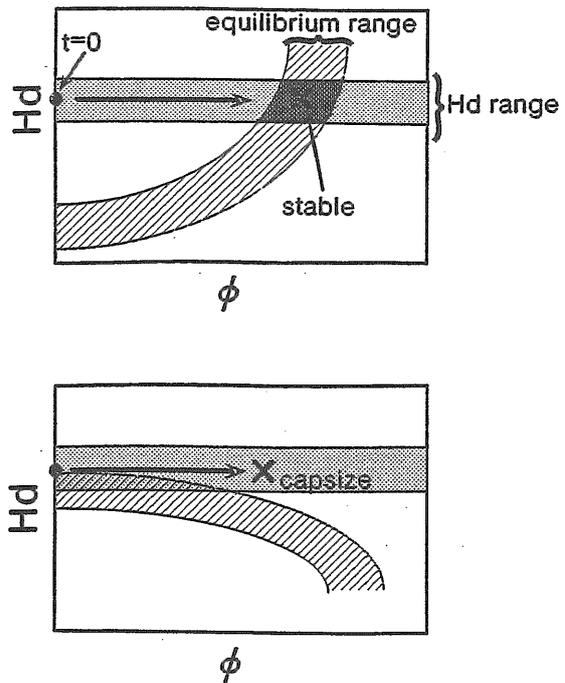


Fig.2.17 Stability and Instability in H_d - ϕ Diagram

「傾斜」-「 H_d の低下」-「浸水」-「 H_d の回復」という過程を繰り返しながら、Fig.2.4の復原力曲線のうち滞留水量の多いものへと移動して行くことになる。

そして、 $GM_d = 2.44\text{m}$ のように平衡範囲が右上がりの場合には、平衡範囲付近で変化がとまり定常状態になる。また、 $GM_d = 1.79\text{m}$ のように平衡範囲が横軸に平行な場合には、適当なバランス位置で定常状態になる。ただし、平衡範囲内のどの状態でバランスするかは、先に述べた同調現象とも関連する複雑な問題なので、今後の検討課題としたい。最後に、最も重心の高い $GM_d = 1.27\text{m}$ では、 $H_d = 0.4\text{m}$ 付近に平衡範囲が存在しない。また、もし存在しても、平衡範囲が右下がりならば不安定釣合状態にしかならないので、変化は止まらない。従って、この重心高さでは、時間が経過するにつれて平衡範囲から離れ、滞留水量の増加とともに復原力曲線が悪化し、最後に転覆する結果となる。転覆を防ぐには、大傾斜、大量浸水時の復原力を大きくし、平衡範囲の傾きを右上がりにする必要がある。

波浪中で H_d がどの程度の値になるかがわかれば、それに対応する滞留水量を計算し、Fig.2.4の復原力曲線から転覆危険性を知ることができる。しかし、 H_d は乾舷高さや相対水位変動で変化すると思われ、また、滞留水の動的影響にも影響されるので、これを推定することは容易でない。しかし、上に示した平衡範囲による判定手法は、静的な計算だけで行うことができるので、転覆危険性の判定に有用なものと思われる。本実験の対象船では、平衡範囲が右下がりにならないという条件から、安全に必要な値として $GM_d \geq 1.79\text{m}$ がひとつの目安となりそうである。

2.5 第2章のまとめ

RO-RO客船模型にSOLAS規則に規定された船側損傷を与え、横波中における運動や滞留水量などを計測した。また、滞留水を一定とした復原力曲線と、車両甲板内の平均水面高さや船外の静止水面との差 H_d を用いて実験結果を解析した結果、次のような知見を得た。

- (1) 実船換算で約30分間の実験を行ったが、転覆した場合を除いて定常状態になった。 GM_d が大きいほど定常傾斜角は小さく、滞留水量は大きい傾向にある。 GM_d が大きければ、大量に浸水しても転覆しない。
- (2) センターケーシング付の場合は、ほとんど波上側に傾斜する。センターケーシング無の場合は、逆に波下側に傾斜する。大きく傾斜した状態では、センターケーシング付の方が浸水しやすい。
- (3) 規則波中の実験を行った結果、横揺れ振幅だけでな

く定常状態における傾斜角や滞留水量などにも同調の影響が見られた。また、減衰力、滞留水、滞留水と船体との連成運動などの影響により、横揺れの同調点がずれることがわかった。

- (4) 車両甲板内の平均水面高さは、一般に外の静止水面よりも高い位置でバランスすることがわかった。このことは、滞留水量の増加と復原力の低下に大きな影響を与える。
- (5) 波高がある程度高く、また波上側に傾斜していく状態では、 H_d はほぼ一定の正の範囲内にある。船はこの条件下で徐々に傾斜と滞留水量を増加させていく。最終的に復原力曲線の正の範囲が小さくなり、横揺れのエネルギーがこれを越えるようになると転覆するものと考えられる。
- (6) 滞留水量一定時の復原力曲線群を計算し、 $H_d-\phi$ (傾斜角)線図上の平衡範囲を求めことによって、静的な計算だけで転覆危険性をある程度判断することができる。

3 IMOに提案された損傷時復原性基準改正案の検討

第2章に述べた模型実験は、IMOにおけるSOLAS条約改正の動きに早急に対応するため、時間的な制約の中で実施された。内航RO-RO船の既存の木製模型船を改造して使用したが、板厚が厚いためサイドケーシング付のRO-RO客船を模擬したものとなっていた。また、構造上の問題から、完全に転覆するまでの運動を計測することができなかった。しかし、その後の基準改正の動きに対応し、基準の妥当性を検討するためには、国際航路に就航している船型を使用し、車両甲板の板厚等もより実際の船に近いものとするのが重要である。また、実際に転覆するまで実験を行うことが望ましい。そこで、これらの条件を満足する模型を新たに製作して水槽実験を行い、英国を中心にIMOに提案された改正案の検討を行った。

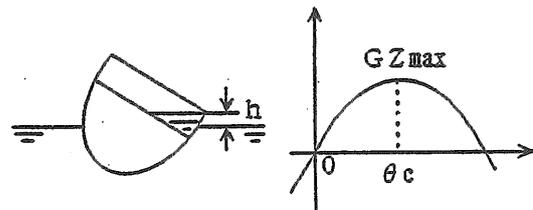


Fig.3.1 Definition of Height of Water Surface on Car Deck from Mean Sea Surface

3.1 車両甲板への浸水を考慮した復原性能

英国を中心として、IMOの復原性満載喫水線漁船安全小委員会(SLF40)に、RO-RO船に対する新たな基準案が提案された。これは、車両甲板上への浸水を考慮した時に必要な復原性能と航行限界の波浪条件の関係を表す次式を基礎としている。

$$hc=0.085 Hsc^{1.3} \quad (3.1)$$

ここに、記号 h は 2.4 節で H_d と呼んだものと同一であって、Fig.3.1 に示すように、車両甲板内部の滞留水面と海水面との差を表している。波浪中においては、平均的な意味で（上下揺れと波面の上下を無視して）定義される。波浪影響によって、この滞留水面高さがゼロでないこと、またこの量が復原性に重要な意味を持つことは、2.4 節で述べたとおりである。

(3.1)式の hc は、損傷時の復原てこ(GZ)が最大値(GZmax)となる傾斜角(θ_c)に船を固定し、復原てこがゼロになるまで車両甲板に海水を積んだ（この際、内外水面はつながっていない）時の滞留水面高さ（限界滞留水面高さ）を表している。また、 Hsc はこの限界滞留水面高さを生じさせる有義波高（限界有義波高）である。この式は、RO-RO客船が航走する海域の有義波高に応じて必要な復原性能を定めるものである。

3.2 模型実験方法

3.2.1 模型船および実験状態

模型船は、日本の代表的な外航の RO-RO 客船として設計されたものを縮尺比 1/48.6 で製作した。この模型船の主要目を Table 3.1 に、body plan を Fig.3.2 に示す。この船を北西ヨーロッパのプロジェクトで使用された模型¹⁰と比較したものを Table 3.2 に示す。この表からわかるように、今回の対象船は $L/B=6.8$ 、 $B/d=3.79$ で、欧州の船と比べて L/B は大きく B/d は小さい、すなわち船の長さが長く幅および喫水がやや狭く深い船型になっている。模型船の損傷口の寸法、浸水区画（中央部の濃く塗った所）および甲板上の水位計の配置を Fig.3.3 に示す。この船は上甲板に 2 層の車両甲板を有しており、模型船の高さはこの上層側の車両甲板の天井高さまで製作している。この 2 層の車両甲板のうち、波浪による浸水が問題となるのは主に下層側なので、下層側の車両甲板には実船に対応する天井を設け、デッキサイドも薄く（板厚約 8mm）製作した。さらにこの甲板上の滞留水量を計測できるように、櫛形の水位計を 7 台配置した。また、損傷区画の外板の板厚も車両甲板同様できるだけ実船に近づけるため、模型船は FRP で製作している。損傷区画は SOLAS'90 の損傷時復原性基準に従い船体中央の 2 区画とし対称浸水とした。さらに、下層側の車両甲板の船尾側にはビデオ

Table3.1 Principal Particulars in Intact and Damaged Conditions

	Ship		Model (scale ratio:1/48.6)	
	Intact	Damaged	Intact	Damaged
LPP(m)	170.00		3.500	
Bmid(m)	25.00		0.515	
Dmid(m)	9.50		0.196	
Draft Mean(m)	6.60	8.2	0.136	0.17
Trim(m)	0.00	-1.3	0.000	-0.0259
Condition	Full Load Departure Condition			
Δ (ton)	15020		0.128	
KG_0 (m)	10.96		0.224	
G_0M (m)	1.41	2.8	0.029	0.057
Fbd(midship)(m) (Designed DK HT)	2.90	1.3	0.060	0.027
Fbd(midship)(m) (Lower DK HT)	2.20	0.6	0.045	0.012
Tr(sec)	17.90	13.4	2.570	1.93

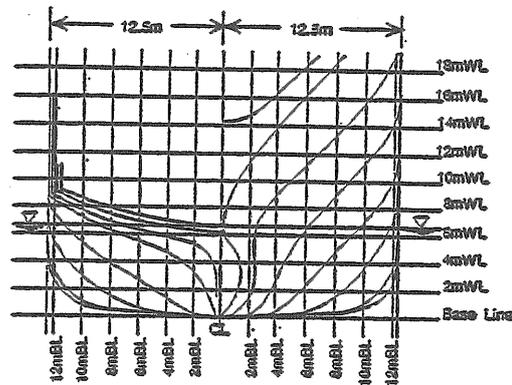


Fig.3.2 Body Plan

Table3.2 Comparison of Present Model with Joint North West European Project

	SHIP1[5]	SHIP2[5]	PRESENT SHIP
Model Scale	42.05	34.66	48.57
Length/Beam (L/B)	5.04	5.10	6.80
Beam/draught (B/d)	4.25	4.44	3.79
Displacement (Δ) (tons)	12,400.0	12,000.0	15,020.0
Block Coefficient (C_B)	0.582	0.612	0.522
Intact Freeboard (F)	1.68	2.60	2.90

カメラを設置し、滞留水の運動を観察した。

この車両甲板の高さを設計時のもの（以後、設計デッキ高さと呼ぶ）と、天井を含む車両甲板全体をそれより

0.7m下げたもの(以後、低デッキ高さと呼ぶ)の2状態で実験を行った。この時、両状態でGMの値は同じとした。さらに初期傾斜がない状態に加え、荷崩れや非対称浸水を想定し、波上側に初期傾斜を2°、4°と加えたものについても実験を行った。

これらの実験状態における、SOLAS'90の損傷時の復原性基準要件との適合性を示したものをTable 3.3に示す。低デッキ高さで初期傾斜がある場合は、GZの正の範囲がわずかに足りずにSOLAS'90を満足できていないが、SOLAS'90を満足するかどうかのボーダーライン付近の復原性能と言える。この状態以外のものはSOLAS'90を十分に満足している。

3.2.2 実験方法

実験の概観図をFig.3.4に示す。実験は動揺水槽(L×B×D=50m×8m×4.5m)で行い、模型船は損傷口がある舷に横波が当たるように設置した。また、模型船の向きが変わらないように、張り糸でヨーイングを拘束した。計測時間は、実船換算で30分間となるようにした¹⁾。模型船をできるだけ自由に漂流させるため台車で追従するようにしたが、計測時間を確保できない場合はやむを得ず、張り糸を操作して模型船の漂流速度

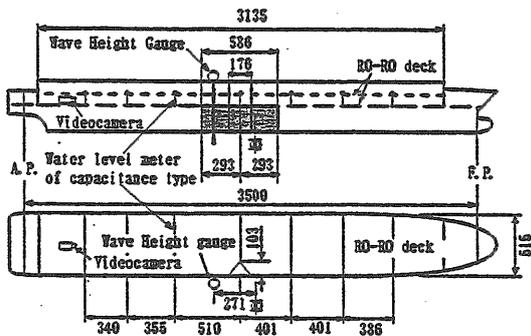


Fig.3.3 Damaged RO-RO Ship Model

を若干調整している。

3.2.3 入射波

実験は全て不規則波中で行い、そのスペクトラムはJONSWAP型のものを使用した。その1例をFig.3.5に示す。また、波周期の影響を調べるため、ピーク周期は損傷時の横揺れ固有周期から順次短い周期、即ち13.7sec、11.6sec、9.5sec、7.4secの4種類を使用した。また、波高波長比はそれぞれの周期に対して、最大で1/25、1/15、1/12、1/12とした。これらが本水槽で造波できるほぼ限界の波高である。今回の実験に使用した波の有義波高をTable 3.4に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 初期傾斜の影響

1) 初期傾斜がない場合

Table 3.4では、○印は転覆しなかったもの、×印は転覆したものを表している。この表に示されるように、今回の実験では初期傾斜がない場合は転覆が起こらず、初期傾斜がある場合にのみ転覆が起きている。初期傾斜がない場合、車両甲板の高さに関係なくいずれも浸水すると波下側に傾斜した。その結果、損傷側(波上

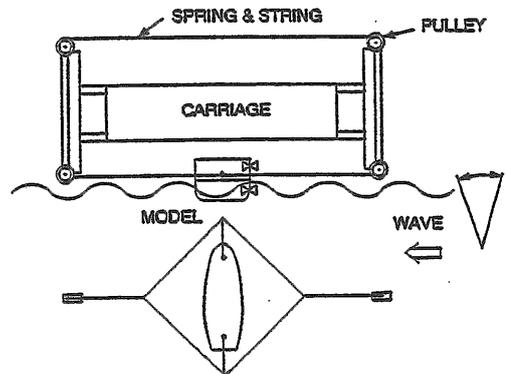


Fig.3.4 Experimental Apparatus

Table3.3 Model Condition for Experiment and Compliance with SOLAS'90

Deck Height	Initial Heel Angle (deg)	SOLAS'90 requirement		
		0.1mGZ	0.015m-radians	15degree range
Designed Deck	0°	0.4○	0.1179○	27○
	2°	0.32○	0.0809○	23○
	4°	0.24○	0.0508○	19○
Lower Deck	0°	0.24○	0.0478○	18○
	2°	0.14○	0.0205○	13×

(○:Compliant ×:Non-compliant)

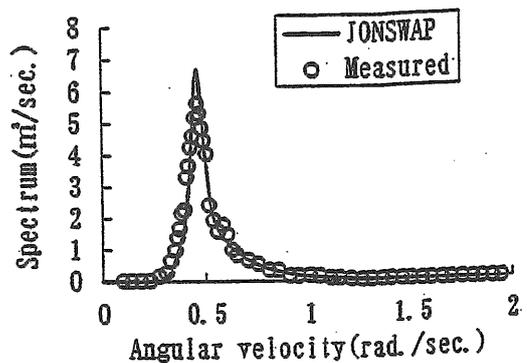


Fig.3.5 Incident Wave Spectrum(Tp=13sec)

側)のデッキエッジの高さが平均海面からさらに高くなり、その後車両甲板への浸水が止まり転覆することがなかった。これは第2章に述べたことと同様である。

Fig.3.6 に設計デッキ高さと同低デッキ高さの場合のGZカーブをそれぞれ示す。正が波上側傾斜であり、負が波下側傾斜を表している。波下側の舷側は、2層目の車両甲板最上部まで開口部がないため、損傷のある波上側に比べて波下側の復原性能ははるかに優れており、波下側へ転覆しないのは当然の結果といえる。このことから、今回の模型船のように波下側に開口部がない場合、波下側へ傾斜させ、浸水を止める方が有利であることがわかる。

船舶技術研究所でとりまとめた波浪統計¹²⁾によれば、日本周辺海域では、波高波長比で1/20程度が最大波高であり、今回の使用した波高が周期13秒のものを除いてこれ以上の波高波長比を使用していることから、この船の場合今回のGMでは日本周辺海域では初期傾斜がないと転覆しにくいと考えられる。また、IMOのcircular letter¹¹⁾によると定常横傾斜角が20°を越した場合転覆したと見なす条項がある。今回の実験結果では低デッキ高さの1点を除いて全て傾斜角20°以下であり、この意味でも転覆しにくいといえる。

2) 初期傾斜がある場合

一方、初期傾斜がある場合、波上側に傾斜し波上側に転覆を起こした。これは初期傾斜により車両甲板に浸入した水が損傷側に滞留し易くなり、さらに傾斜を増しデッキエッジが没水してさらに浸水が進行し転覆に至ったものである。初期傾斜による復原性能の減少を除けば、第2章で述べたセンターケーシングがある場合の影響と同様の現象である。このことは、車両甲板に浸入した水が損傷側に滞留すると危険であることを示している。

またTable 3.4 から、初期傾斜角が大きくなるにつれて、またデッキ高さが低くなるにつれて転覆する波高が小さくなっていることがわかる。これは、Fig.3.6 からわかるように、初期傾斜角が増すにつれて、またデッキ高さが下がるにつれて復原性能が劣るためである。

低デッキ高さで初期傾斜が2°の場合、有義波高が2m(波高波長比1/35)程度で転覆しているが、3.2.1項で述べたようにこの状態はSOLAS'90の損傷時復原性基準をわずかに満足できない復原力であり、転覆してもやむを得ないといえる。しかし、設計デッキ高さで初期傾斜が4°の場合、SOLAS'90の基準を十分に満足しているにもかかわらず有義波高が3.5m(波高波長比1/22)で転覆が起きている。このように損傷のある波上側に初期傾斜がある状態は転覆の危険性が非常に

Table3.4 Experimental Condition vs Significant Wave Height and Occurrence of Capsize

Deck Height (m)	Initial Heel Angle (deg)	Peak Period of Wave Spectrum(sec)			
		13.65	11.55	9.45	7.35
Designed Deck Height	0°	10.55○	12.58○	10.53○	6.37○
	2°	10.55×	9.44×	6.32×	5.10×
	2°	9.76○	8.58×	5.74○	4.50×
	2°	8.79○	7.55○	5.05○	3.82○
	4°	7.53×	7.55×	5.74×	3.82×
	4°	7.13×	6.29×	5.49×	3.47×
Lower Deck Height	0°	10.55○	12.58○	10.53○	6.37○
	0°	8.79○	9.44○	8.42○	5.10○
	2°	5.27×	4.72×	3.16×	2.55×
	2°	4.79×	4.19×	2.81×	2.18×
	2°	4.63×	4.02×	2.69×	1.91○
	2°	4.39○	3.78○	2.53○	1.53○

(○:Non-capsize ×:Capsize)

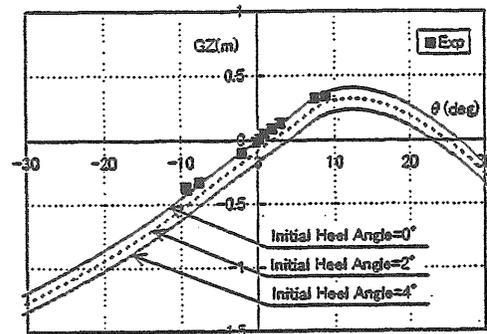


Fig.3.6(a) GZ Curves(Designed Deck Height)

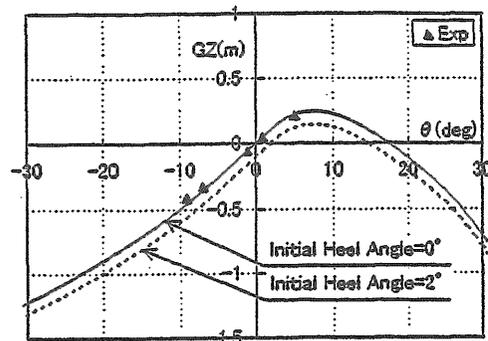


Fig.3.6(b) GZ Curves(Lower Deck Height)

高いと言える。

3.3.2 限界滞留水面高さ と 限界有義波高

1) 解析方法

以下では、3.1節で定義した滞留水面高さ h_c を中心に実験結果を整理する。

滞留水面高さは、転覆しなかった実験においては Fig.3.7(a) に示すように、運動が定常になった時の滞留水量の時間平均値および傾斜角の時間平均値 (定常傾斜角) を用いて平水中での静的な計算から求めた。また、転覆した実験においては Fig.3.7(b) に示すように、傾斜角が損傷口側 (波上側) に大きくなり転覆運動に入る (この時滞留水量は傾斜角の増加とともに増加する) 直前の、比較的横揺れ運動が小さくなる時の滞留水量および傾斜角それぞれの時間平均値を用いて同様に求めた。さらに、限界滞留水面高さ ($h_{c\text{critical}}$) は、同じ波周期の波で波高の異なる実験で、転覆した場合としない場合の滞留水面高さの平均値とした。同様に両実験の有義波高の平均値を限界有義波高 ($H_{s\text{-critical}}$) とし、傾斜角の平均値を転覆限界角 (θ_{critical}) とした。今後、添字 *critical* はこのように実験値から求めた限界値を表すものとする。

また、Fig.3.6 の GZ カーブから損傷側の GZ の値が最大値 (GZ_{max}) になる傾斜角 (θ_c) において、GZ が 0 となるまで車両甲板に注水し、滞留水量の水面高さ (h_c) を求め、(3.1)式を用いて限界有義波高 (H_{sc}) を求めた。今後、添字 *c* はこの方法で求めた値を表すものとする。

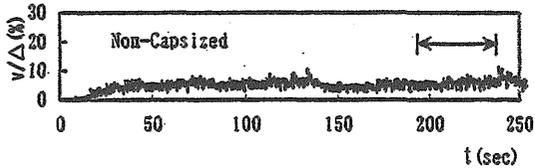


Fig.3.7(a) Time History of Amount of Water on Car Deck (No Capsize)
(v : Amount of Water on Deck, Δ : Displacement)

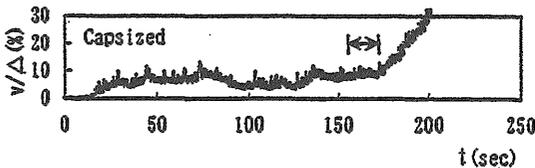


Fig.3.7(b) Time History of Amount of Water on Car Deck (Capsize)
(v : Amount of Water on Deck, Δ : Displacement)

2) 解析結果

(i) 限界滞留水面高さ

Fig.3.8 に限界滞留水面高さ と 限界有義波高の関係を示す。Fig.3.8(a) は設計デッキ高さの場合であり、Fig.3.8(b) は低デッキ高さの場合である。図中の塗りつぶしたマークは、限界滞留水面高さを表している。同図の白抜きのマークは、初期傾斜がない場合の滞留水面高さを有義波高に対して示したもので、この場合は転覆しなかったため、限界値ではないが比較のため載せている。また、図中の点は異なる波周期の実験値を合わせて示している。

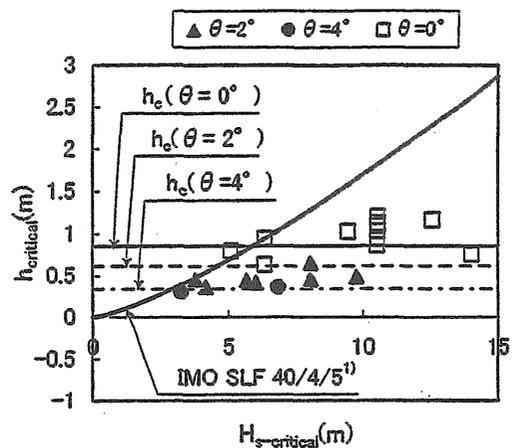


Fig.3.8(a) Critical Height of Water on Car Deck (Designed Deck Height)
(θ : Initial Heel Angle)

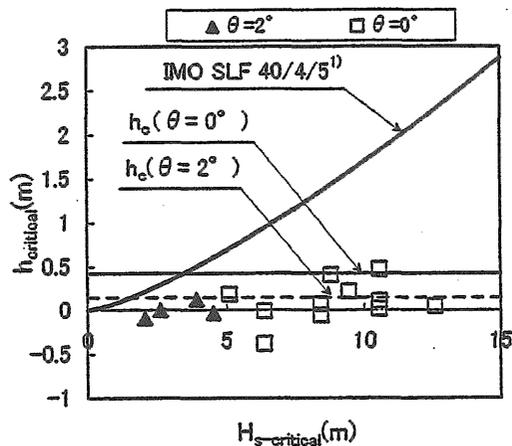


Fig.3.8(b) Critical Height of Water on Car Deck (Lower Deck Height)
(θ : Initial Heel Angle)

Fig.3.8(a)は設計デッキ高さの場合であるが、これを見ると車両甲板上の $h_{critical}$ は、GZ カーブから決まる h_c より同程度か小さい値であり、有義波高によってはほぼ一定かやや右上がりとなっている。Fig.3.9 に $h_{critical}$ と h_c との比を示す。この値は 0.5~1.0 の間に分布しており、特に初期傾斜角が 2° の時 h_c より小さい値で転覆が起きている。後述する様に、転覆限界角の比 ($\theta_{critical}/\theta_c$) は 1 より大きくなっており、また滞留水面高さは Fig.3.10 に示すように傾斜角が増加するにつれて減少する傾向があることから、転覆限界角の比が 1 に近づけば、限界滞留水面高さも 1 に近づくと考えられる。従って、 h_c で限界滞留水面高さを大きめだが、推定できることが解る。

また、Fig.3.8(a)では初期傾斜がない時の滞留水面高さも同様の傾向を示しているが、 h_c より大きな値も見られる。これは、初期傾斜がある時と異なり、損傷のない波下側への傾斜になるため、大きな復原力を持ち多量の滞留水に耐えられるためである。

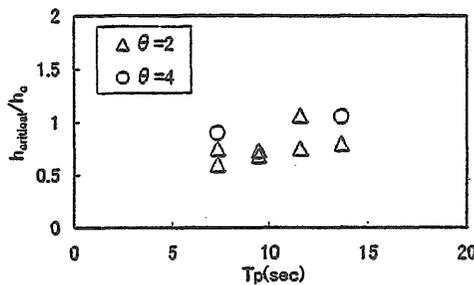


Fig.3.9 Critical Height Ratio of Water on Car Deck (Designed Deck Height) (θ : Initial Heel Angle, T_p : Peak Period of Wave Spectrum)

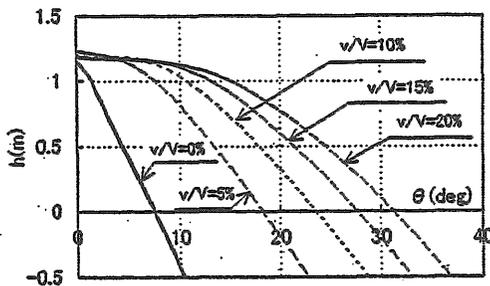


Fig.3.10 Relation between Height of Water on Car Deck and Heel Angle (v : Volume of Water on Deck, V : Volume of Car Deck)

一方、低デッキ高さの Fig.3.8(b)を見ると、初期傾斜がある場合は設計デッキ高さの時と同様の傾向が見られる。一部 h_c が負になる点もあるが、これは浸水が続いて転覆することを意味する。しかし、この状態は復原性能が小さく h_c も小さいため、設計デッキ高さに比べて少ない浸水量で転覆している。従って、ゼロ付近のバラツキとなっており、実験誤差の範囲内と考える。初期傾斜がない場合は、設計デッキ高さ同様、損傷のない波下側傾斜であり、最終的には水の出入りもないため浸水量に応じて滞留水面高さ h が大きく変化している。

(ii) 限界有義波高への波スペクトラムのピーク周期の影響

IMO SLF40 で提案された関係式(3.1)を実線で Fig.3.8 に示す。また、Fig.3.8(a)の設計デッキ高さの場合を、波スペクトラムのピーク周期毎にプロットしたものを Fig.3.11 に示す。これらの図からピーク周期が 7 秒の時に限界有義波高 ($H_{s-critical}$) が最も小さく(3.1)式とほぼ一致していて、ピーク周期がさらに大きくなると限界有義波高も大きくなり(3.1)式よりはずれていくことがわかる。 $H_{s-critical}$ と(3.1)式の関係から求められる H_{sc} との比を設計デッキ高さの場合について Fig.3.12 に示す。横軸は波スペクトラムのピーク周期である。波スペクトラムのピーク周期が大きくなるにつれてこの比も大きくなっており、Table 3.4 の傾向と一致している。限界有義波高は、波周期が 13 秒のもので H_{sc} の 2 倍以上になる。

低デッキ高さの場合、Fig.3.8(b)を見ると設計デッキ高さの場合と比べて $H_{s-critical}$ の値の変化は小さい。しかし、初期傾斜がある時の H_{sc} との比は波周期が 13 秒のもので H_{sc} の約 3 倍になる。このことから波スペクトラムのピーク周期によっては同じ船でも限界有義波高は大きく異なることがわかる。

(iii) 転覆限界角

転覆限界角 ($\theta_{critical}$) と GZ が最大値となる傾斜角 (θ_c) との比を設計デッキ高さについて Fig.3.13 に示す。これを見るといずれのデッキ高さでも全て 1 より大きくなっており、傾斜角が θ_c を過ぎてから転覆していることがわかる。これは滞留水により定常傾斜角が増大し、その角度が GZ カーブの最大値を越えた後、すなわち滞留水による静的な転覆モーメントが損傷時の復原モーメントを打ち消した後に転覆が起きることを意味している。従って、転覆限界角は静的には θ_c でおおよそ推定できると考えられるが、 $\theta_{critical}$ が θ_c より大きくなる原因については、滞留水および主船体