

## 浸水時船舶の波浪中安全性に関する研究

石田 茂資\*、原口 富博\*、渡辺 巖\*、小川 剛孝\*、藤原 敏文\*、村重 淳\*\*

### Study on the Safety of Flooded Ships in Waves

by

Shigesuke ISHIDA, Tomihiro HARAGUCHI, Iwao WATANABE,  
Yoshitaka GAWA, Toshifumi FUJIWARA and Sunao MURASHIGE

### Abstract

Motivated by the disaster of ESTONIA in 1994, the safety standard for RO-RO passenger vessels was deliberated in IMO. One of the major parts of the discussion was the damage stability because wide non-separated car decks of this type of ships reduce the stability drastically once free flooded water through a damage opening is piled up on them. In order to contribute to the discussion, Ship Research Institute conducted the research project of "Study on the Safety of Flooded Ships in Waves" from 1995 to 1997.

By model tests in beam waves, the motion of ship, the amount of accumulated water on deck and the occurrence of capsizing in various test parameters were investigated. As the result, the effects of GM, initial heel angle, center casing, wave period and so on were clarified. It was characteristic that the time-averaged height of water on deck above the calm sea surface was within a narrow range in various model conditions and was confirmed that this quantity is the key index of the danger of capsizing. With these results the scope of the proposal by United Kingdom for IMO was also discussed.

In addition, the coupling motion of the ship and the water on deck was examined by experiments and numerical simulations. It was found that two kinds of roll motion with different amplitudes and periods coexist in some conditions even in regular waves with moderate heights, and that some of these complicated roll motions have typical properties of low-dimensional deterministic chaos.

---

\*運動性能部 \*\*東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻

原稿受付 平成12年 5月22日

審査済 平成12年12月13日

## 目次

- 1 はじめに
- 2 損傷した RO-RO 客船の横波中転覆現象
  - 2.1 模型実験方法
  - 2.2 不規則波中の実験結果
  - 2.3 横揺れ同調の影響
  - 2.4 定常状態を決定する因子と転覆発生の条件
  - 2.5 第 2 章のまとめ
- 3 IMO に提案された損傷時復原性基準改正案の検討
  - 3.1 車両甲板への浸水を考慮した復原性能
  - 3.2 模型実験方法
  - 3.3 実験結果
  - 3.4 車両甲板への浸水を考慮した復原性能の検討
  - 3.5 第 3 章のまとめ
- 4 浸水した船舶の規則波中における非線形横揺れ運動
  - 4.1 波浪中の非線形横揺れ運動について
  - 4.2 三次元模型船の実験結果
  - 4.3 箱船の模型を用いた実験
  - 4.4 カオス的な横揺れ運動について
  - 4.5 波浪中で浸水した船の横揺れの数学モデル
  - 4.6 船の数学モデルの分岐解析
  - 4.7 第 4 章のまとめ
- 5 まとめ
- 参考文献

## 1 はじめに

1994 年秋に RO-RO 客船エストニア号の転覆海難事故が発生した。900 名という失われた人命の多さと、同種の事故が過去にも発生していたことから、西欧を中心に大きな社会問題となり、1994 年から 1995 年にかけて、国際海事機関 (IMO) において RO-RO 客船に関する安全対策の検討が行われた。専門家パネルの審議には、著者の一人も参加した。そして、1995 年 11 月に RO-RO 客船に関する復原性、構造、運航等の安全向上策を盛り込んだ SOLAS 条約の改正が行われ、一応の決着を見た。しかしながら、復原性に関する問題は複雑であることから、この後も英国を中心に提案がなされ、IMO で検討が行われたり。現在では、なお研究の余地があるとして直接 IMO での審議は行われていないが、各国での研究は依然として活発である。

RO-RO 客船は、自動車を効率的に積載するために、

区画されていない閉鎖された車両甲板を船内に持っている。ここに浸水が起これば、大量の水が甲板全体に滞留する可能性があり、それによる傾斜モーメントによって転覆する危険性がある。車両甲板に海水が大量に滞留するには、大きく分けて二通りの事故シナリオが考えられる。一つはエストニア号<sup>2)</sup>あるいはそれに先立つヘラルドオブフリーエンタープライズ号の事故<sup>3)</sup>がそうであったように、波浪中を航行中に船首扉が破損するなどして、船首から車両甲板に短時間に大量の海水が流入する場合である。一方、現在の復原性規則の考え方では、衝突による船側損傷とそれに伴う船内への海水流入が最悪の事故として想定されている。規則には、静水中ならば隔壁甲板が常に水面上にあり、車両甲板には浸水しないよう規定されているが、波が荒くなれば甲板上に浸水することが起りうる。これがもう一つの事故シナリオで、このシナリオの特別な場合が前者のシナリオであるとの認識から、IMO の検討は後者のシナリオを巡って進められた。

波浪中の海水流入および滞留は、波と船体との相対変動に加えて滞留水の挙動も関与する極めて複雑な現象である。この問題は本研究の開始までほとんど解明されておらず、Bird 等<sup>4)</sup>、Velschou 等<sup>5)</sup>、Dand<sup>6)</sup>あるいは Vassalos<sup>7)</sup>による研究がある程度であった。そこで当所では、指定研究「浸水時船舶の波浪中安全性に関する研究」(平成 7~9 年度)を行い、車両甲板への海水流入とその結果発生する転覆のメカニズム、各種パラメータの影響評価、船内滞留水と横揺れとの非線形な連成運動等について研究を実施したので、ここに総合報告として取りまとめる。

本報告は、次の 3 つの章から構成されている。

第 2 章では、船側に破口を生じた RO-RO 客船が横波を受ける場合について、現象の概要と転覆のメカニズム、そしてこの現象を理解する上でキーとなる滞留水面高さの検討結果を述べる。

第 3 章では、IMO での損傷時復原性基準の改正の動きに関連し、これを我国周辺の海象および我国の RO-RO 客船に適用した場合の検討結果について述べる。

第 4 章では、将来的な課題として船内滞留水と横揺れとの非線形な連成運動について検討し、それがカオスと呼ばれる複雑な振る舞いを示すことを述べる。

## 2 損傷した RO-RO 客船の横波中転覆現象

船側に破口を生じた RO-RO 客船が横波を受ける場合には、破口からの海水の流入・流出、および平水中ならば水面上にある車両甲板への海水の滞留が起こる。

Table 2.1 Principal Particulars

	Ship		Model (scale ratio:1/23.5)	
	Intact	Damaged	Intact	Damaged
Length $L_{pp}$	101.0m		4.3m	
Breadth $B$	16.0m		0.681m	
Depth $D$	5.7m		0.236m	
Draft $d$	4.37m	5.22m	0.186m	0.222m
Freeboard $f$	1.17m	0.33m	0.050m	0.014m
Ro-Ro deck height	4.84m		0.206m	
Displacement $W$	3821.15t		272.69kg	
Height of center of gravity $KG$	5.87m		0.25m	
Metacentric height $GM$	1.62m	3.12m	0.069m	0.133m
Natural period of roll motion $T_r$	9.40sec.	8.43sec.	1.94sec.	1.74sec.

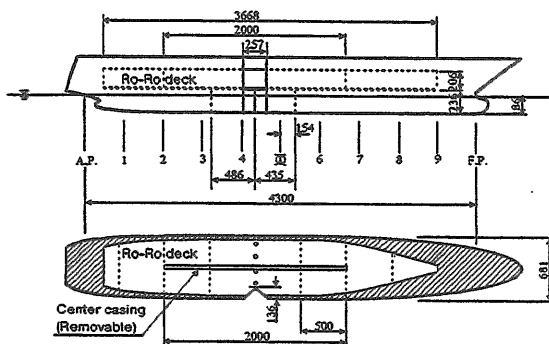


Fig.2.1 Ro-Ro Model and Damage Opening for Experiment

(unit:mm, Broken lines and circles on deck in the lower figure show locations of water level meter of capacitance type and wave height gauge, respectively.)

そして船体運動はそれらと相互に関連するため、極めて複雑な現象となる。そこで、模型実験によってまず現象を把握するとともに、各種パラメータの影響を評価し、さらにこの現象を理解する上でキーとなる滞留水面高さに着目しながら転覆のメカニズムを検討した。

## 2.1 模型実験方法

### 2.1.1 模型船と損傷範囲

供試模型船とその損傷部の概要をTable 2.1とFig.2.1に示す。前に述べたようにIMOでの審議に早急に対応する必要から、既存の内航RO-RO客船模型を改造して

用い、車両搭載区画を独立に製作して主船体にはめ込む構造とした。このため、車両搭載区画と主船体の間には隙間が生じている。RO-RO客船では、階段、エレベータ、煙突を含む配管等を通すスペースを車両搭載区画に設けるのが一般的である。この目的で中央に配置されたスペースをセンターケーシング、船側に配置されたスペースをサイドケーシングと呼んでいる。本模型船はサイドケーシング付きの実船に相当し、自由水影響が若干小さいことに注意する必要がある。

以降、第2章と第3章では、実船スケールの数値を用いて説明する。船体の損傷範囲は、SOLAS規則8.4に基づき前後方向  $(3.0 + L_{WL} \times 3/100) = 6.03\text{m}$ 、幅方向  $B/5 = 3.2\text{m}$ 、垂直方向は型基線上全部として、船体中央の2区画が浸水するように損傷口を開けた。車両甲板は上下移動が可能であり、乾舷(喫水線から車両甲板までの高さ)を変えることができる。また、車両甲板上の中央部には、着脱可能なセンターケーシングが設置されている。

なお、この船の標準状態で比較すると、非損傷時で  $GM = 1.62\text{m}$ 、損傷時で  $GM_d = 3.12\text{m}$  ( $GM_d$ : 損傷時の初期メタセンタ高さ) となっているが、これは甲板下の区画浸水によって船が沈下し、水線面の2次モーメントが増加したためで、フレアの大きいRO-RO客船が損傷した場合に特徴的な性質と考えられる。重心高さは  $GM_d = 3.12\text{m}$  (標準状態) から  $1.27\text{m}$  まで5通りに変化させた。

### 2.1.2 計測項目

実験は、当所の動揺水槽( $L \times B \times D = 50 \times 8 \times 4.5\text{m}$ )で行った。模型船は造波機から  $18.75\text{m}$  の位置に、横波

中で損傷部が波上側になるように配置した。車両甲板上の滞留水量は、船長方向に 50cm 毎に設置された 1 線式容量型水位計<sup>9)</sup>を用いて計測した(Fig.2.1参照)。この水位計により各断面の平均水位がわかるので、これを船長方向に積分することにより車両甲板上の滞留水量を求めることができる。さらに、実験終了後車両甲板上の水をポンプで吸い上げ、滞留水量を直接計測したが、水位計による計測値と良く合っていた。また、車両区画内に水中ビデオカメラを設置し、甲板上的水の運動を観察した。

船体運動は、傾斜計により横揺と縦揺を、加速度計により上下揺と左右揺を計測した。また、2 台のビデオカメラにより船体の運動を観察した。復原力曲線は、三分力計を利用して二村等<sup>9)</sup>と同様な方法で計測した。

2.1.3 入射波

JONSWAP 型スペクトルで有義波高  $H_{1/3} = 4.0m$ 、ピーク周期  $T_p = 8sec$  の不規則波を入射波として用いた。Fig.2.2は、この入射波スペクトルの計算値と実験値を比較している。また、波傾斜が一定となるように、 $T_p[sec] = 4\sqrt{H_{1/3}} [m]$  の条件のもとで波高と波列を変えた実験も行った。さらに、同調現象について調べるために、規則波中の実験も行っている。

2.1.4 復原力曲線

静的復原性を調べるために、計算と実験により復原力曲線を求めた。結果をFig.2.3に示す。損傷側に傾斜した時を正としている。本模型船は、損傷側と非損傷側で左右非対称になっているなど複雑な形状をしている。計算プログラムはこれをやや簡略化して扱っているが、転覆現象の検討に重要な 40 度付近まで実験値とよく合っているため、今後はこのプログラムを用いて

検討を行うこととする。

SOLAS 規則 8.2.3 は、損傷時の復原力曲線が満足すべき条件として、①平衡角度から 15 度以上の正の復原力範囲を有すること、②直立状態から 27 度の範囲内において復原力曲線下の面積が  $0.015m \cdot rad$  以上であること、を規定している。本模型船に適用すると、①の条件は  $GM_d > 1.60m$ 、②の条件は  $GM_d > 1.67m$  となるので、最も重心を高くして意図的に不安定にした実験状態 ( $GM_d = 1.27m$ ) を除いては、この規定を満足している。

ところで、船が損傷側に傾斜すれば車両甲板に浸水する。本模型船は残存乾舷が低いので、約 4 度から浸水が始まる。Fig.2.3には、車両甲板上的滞留水量  $w$  を船体の排水量  $W$  で無次元化した値も示している。 $w/W = 10\%$  は約 39cm の滞留水の深さ (船体直立時) に相当する。車両甲板上的損傷口 (以下、単に損傷口と呼ぶ) は車両区画の底面積に比べ狭いので、後に示すように浸水速度はあまり大きくない。従って、横揺中の滞留水量はFig.2.3の値に一致しないので、船はこの曲線に沿って横揺しないことに注意する必要がある。短時間の現象を対象とする場合には、むしろ滞留水量を一定として扱う方が適当である。そこで、車両甲板を非損傷とし、一定量の滞留水を乗せた状態の復原力曲線を計算した。結果をFig.2.4に示す。 $w/W = 0\%$  と  $5\%$  では傾斜角ゼロにおける傾きに大きな差が出ていることから、少量の滞留水によっても  $GM$  が小さくなり、重心が高いと容易に  $GM < 0$  となることがわかる。これは、わずかの傾斜でも滞留水が車両甲板の端に集中するためである。また、滞留水量が増えると、小傾斜角の  $GZ$  はあまり変わらないが、大傾斜角において復原力が小さくなることがわかる。

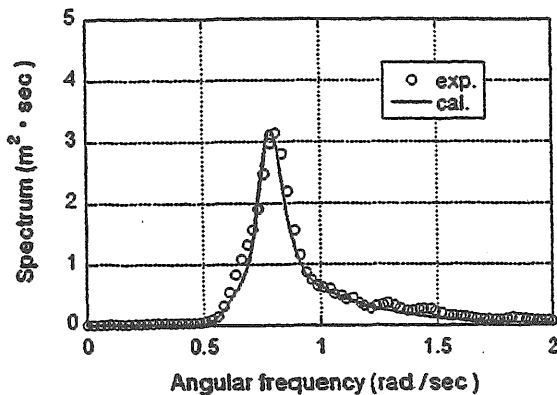


Fig.2.2 Incident Wave Spectrum

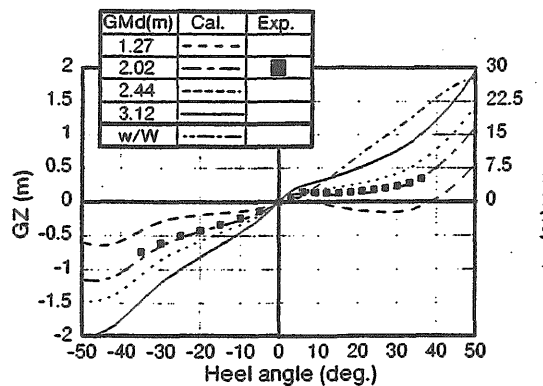


Fig.2.3 GZ Curves and Amount of Water on Deck in Damaged Condition

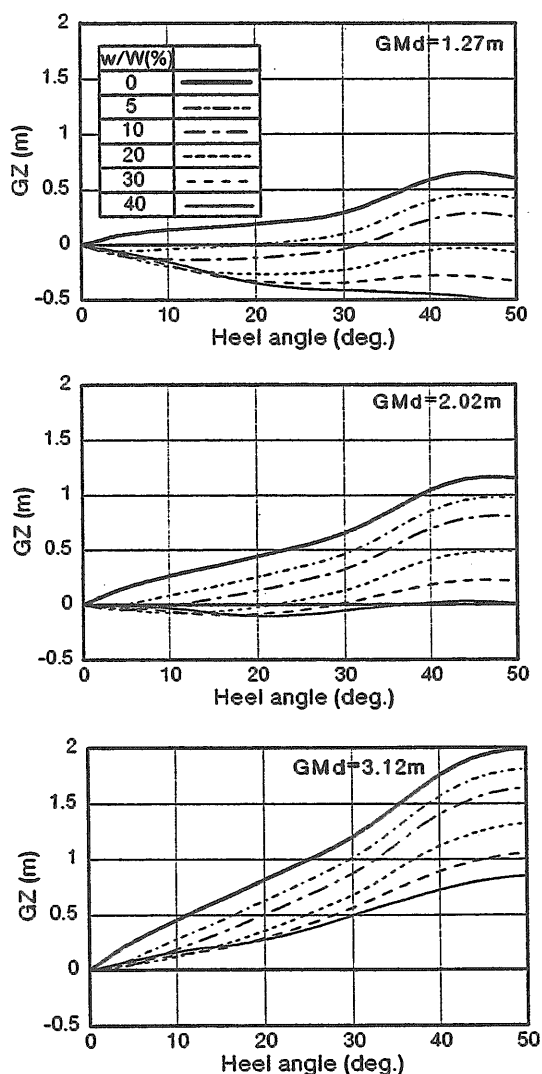


Fig.2.4 GZ Curves with Constant Amount of Water on Deck

## 2.2 不規則波中の実験結果

この実験の目的は、波浪および甲板上浸水と転覆の関係調べることである。そこで、特に船体の横揺角と滞留水量の実験結果に注目した。横揺角と滞留水量の時系列の例をFig.2.5とFig.2.6に示す。前者はセンターケーシング無の場合、後者はセンターケーシング付の場合である。横揺角は波下側を正としている。

この結果から、傾斜角と滞留水量の平均値は、実験終了時(開始から約30分後)にはほぼ定常状態に落ち着くことがわかる。また、実験開始後約5分間の滞留水量は直線的に増加している。その傾き(浸水速度  $v$  と呼ぶ)は、定常状態に至る浸水のプロセスを定量的に表していると考えられる。そこで、本章では定常状態の傾斜角  $\phi_0$ 、最終的な滞留水量  $w$ 、浸水速度  $v$  の3つの量を転覆と甲板上浸水に対する指標とし、それら

に対する重心高さ、センターケーシングの有無、乾舷高さ、初期傾斜の影響をまとめた。

### 2.2.1 重心高さの影響

Fig.2.7はセンターケーシングがない場合の、損傷時のメタセンタ高さ  $GM_d$  の影響を示している。波傾斜一定の条件下で有義波高を変えた結果もプロットした。これらより、標準状態の  $GM_d = 3.12m$  では、かなりの滞留水があっても転覆しないことがわかる。また、船体は波下側(非損傷側)に傾斜し、 $GM_d$  が大きいほど定常傾斜角は小さくなる。一方、滞留水量と浸水速度は  $GM_d$  とともに大きくなる。このことは次のように説明できる。重心が高いと初期復原力が小さいので、船体は波下側に大きく傾斜する。その結果、損傷口の位置が高くなり、浸水しにくくなる。一方、重心が低いと初期復原力が大きいので、船体はほとんど傾かない。そのため、損傷口は水面に近い位置を保ち、浸水しやすくなる。

### 2.2.2 センターケーシングの影響

Fig.2.8は、センターケーシングがある場合の実験結果である。センターケーシングは車両甲板内の水の船幅方向の移動を妨げ、浸水は損傷側に多く滞留するので、船体はセンターケーシングがない場合と反対の波上側(損傷側)に傾斜する。 $GM_d$  が約2m以下で、滞留水量と浸水速度がセンターケーシングがない場合と比べて大きいのは、波上側に大きく傾斜するので浸水しやすくなるからである。 $GM_d$  が小さいほど大きく傾く傾向は、センターケーシングがない場合と同じである。また、標準状態( $GM_d = 3.12m$ )では、センターケーシングがない場合と同様に、大量の滞留水があったが転覆はしなかった。したがって、センターケーシングの有無にかかわらず、初期復原力が十分であれば転覆しないことがわかる。

### 2.2.3 乾舷の影響

Fig.2.9では、乾舷が標準状態の場合と高い場合を比較する。ただし、センターケーシングがない場合である。横軸は有義波高である。この2つの図から、乾舷を大きくすると滞留水量が減少し、定常傾斜角も小さくなることがわかる。ただし、今回の実験のように、乾舷を大きくするために車両甲板を上げると、重心が上昇し  $GM_d$  が小さくなるので注意しなければならない。

なお、Fig.2.7~Fig.2.9では、有義波高の影響はあまり顕著に現れていない。これは、2.1.3節で述べたように波傾斜一定の条件で波高を変化させたことが主な原因と考えられる。波高だけを変化させた結果について

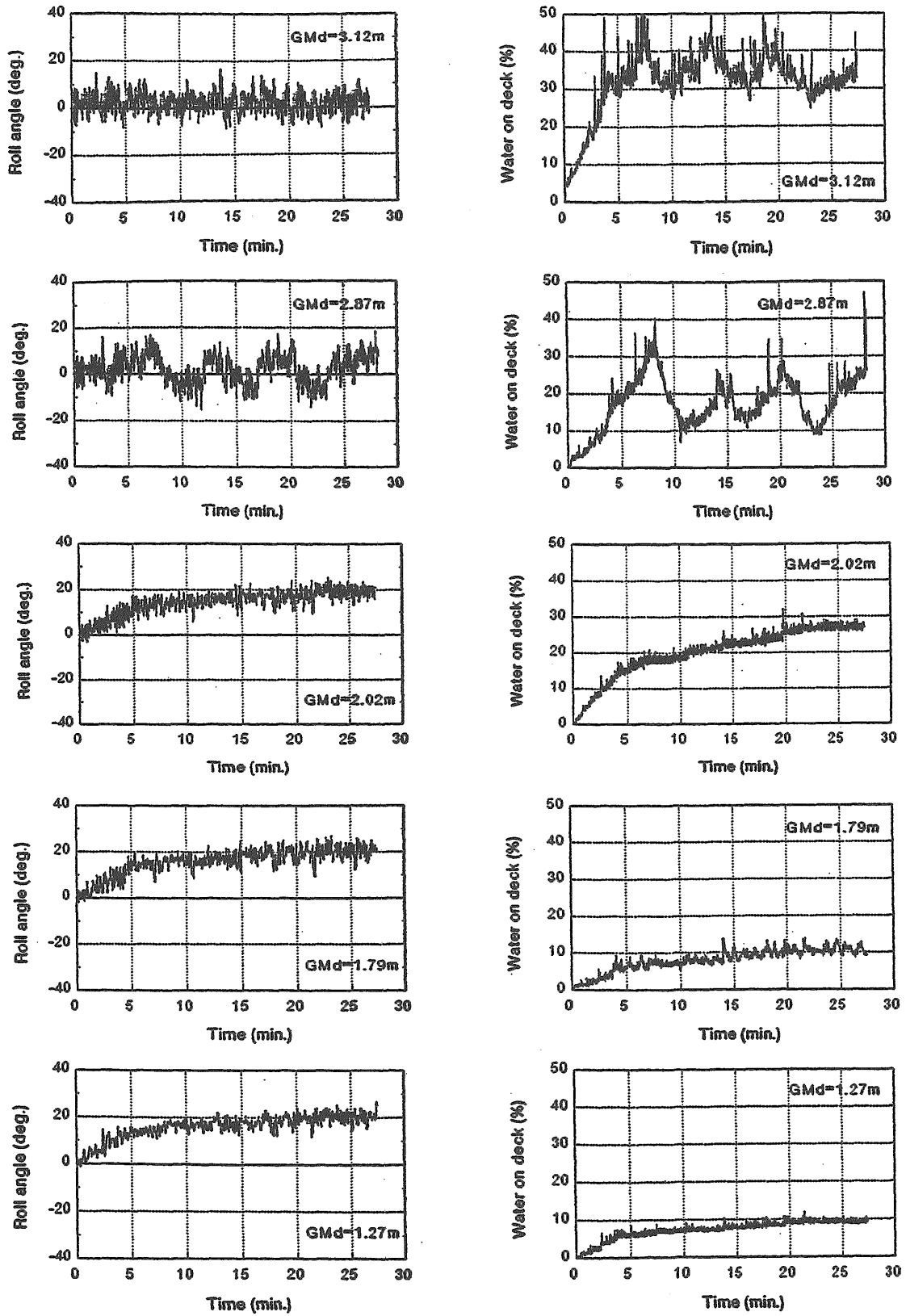


Fig.2.5 Time Evolutions of Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$   
(Without Center Casing)

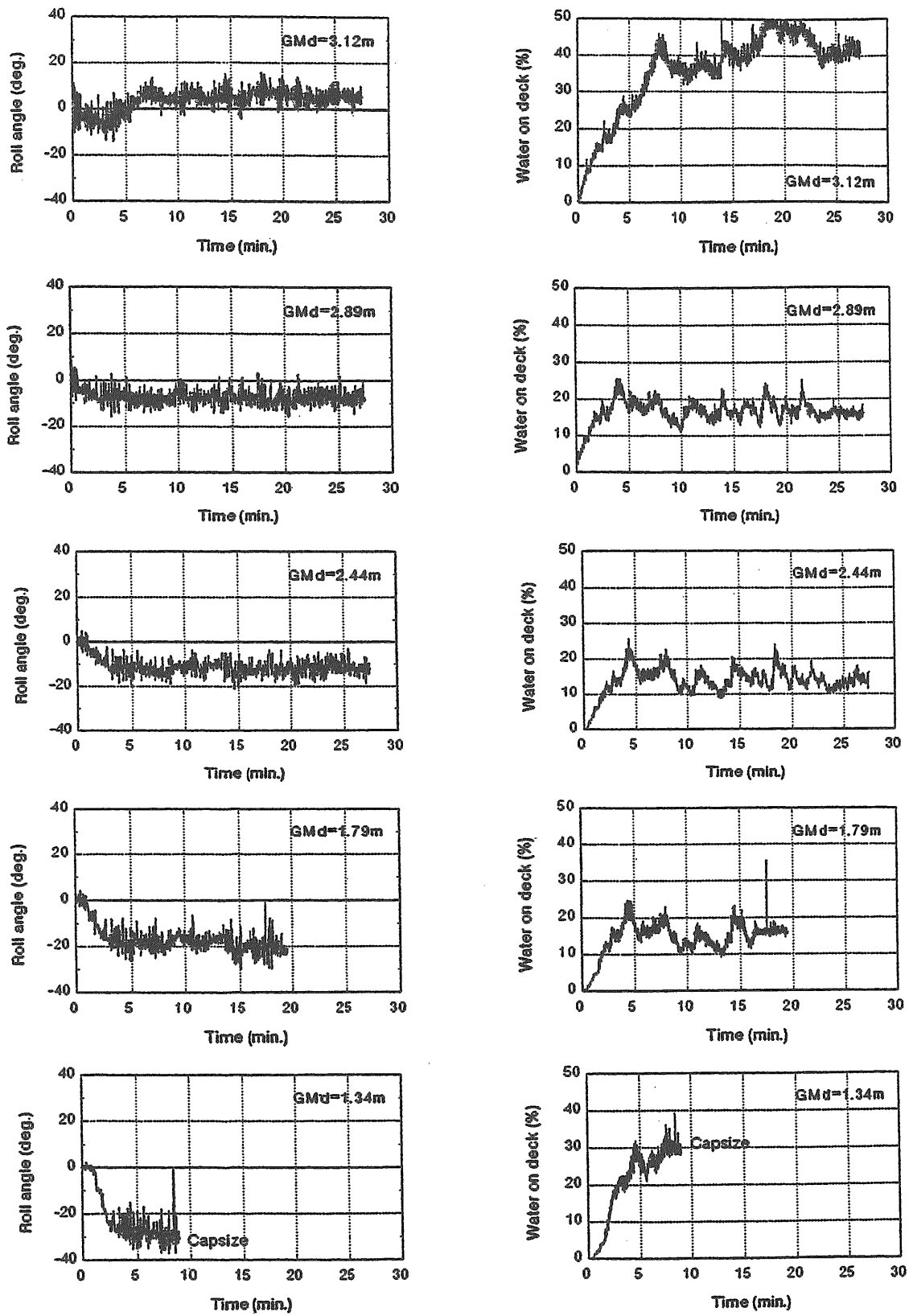


Fig.2.6 Time Evolutions of Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$   
(With Center Casing)

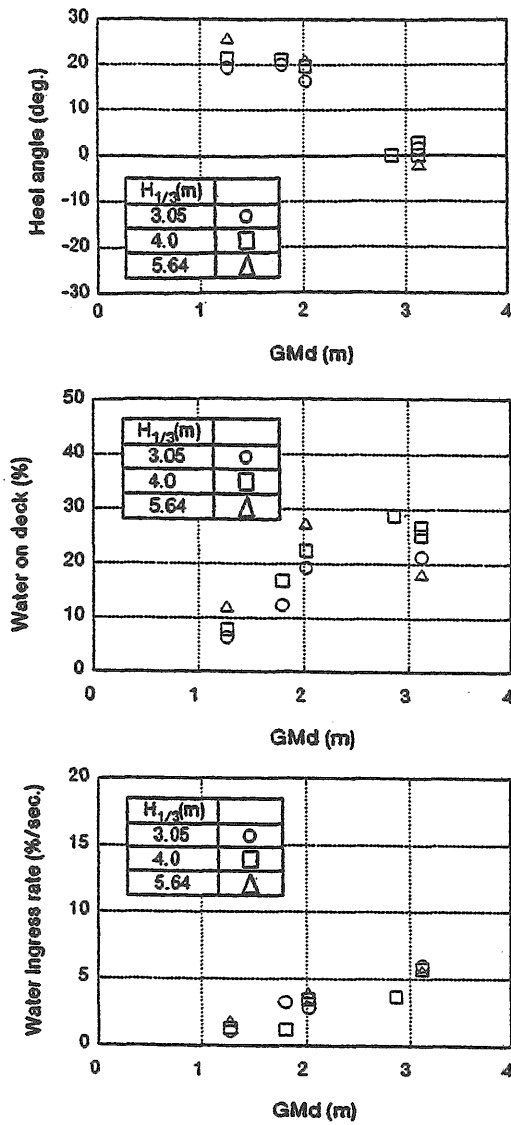


Fig.2.7 Experimental Results in Irregular Waves (Without Center Casing)

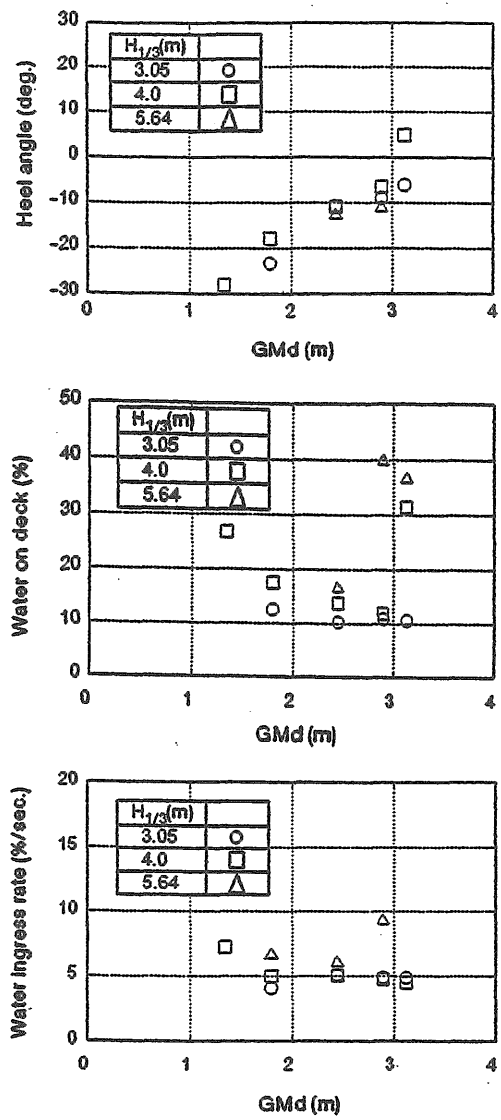


Fig.2.8 Experimental Results in Irregular Waves (With Center Casing)

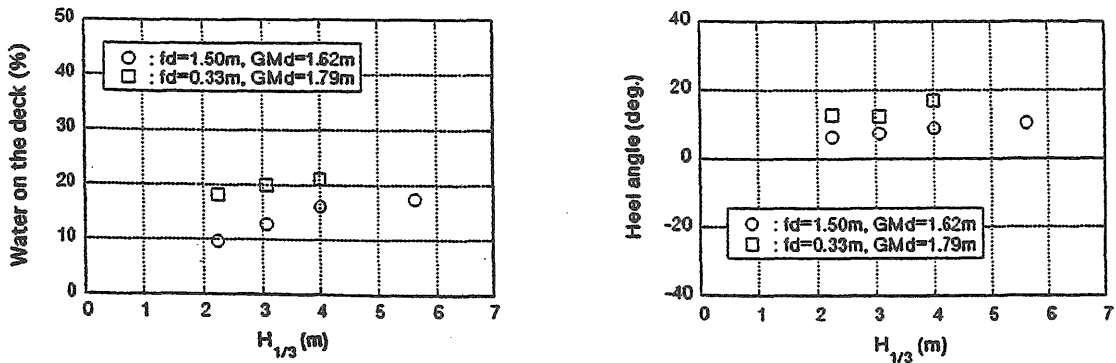


Fig.2.9 Effects of Freeboard on Heel Angle  $\phi_0$  and Amount of Water on Deck  $w$



は、第3章で詳しく述べる。

### 2.2.4 初期傾斜の影響

荷崩れ等による傾斜の影響を調べるため、船内の重りを移動して初期傾斜(損傷側4度)を与えた実験を行った(センターケーシング無し)。結果をFig.2.10に示す。初期傾斜のないFig.2.5と比較すると、初期傾斜をつけた損傷側に船体は傾き、浸水しやすくなるのがわかる。特に、 $GM_d = 1.27m$  の場合は、約3分ほどで転覆した。このことから、わずかな初期傾斜が転覆の原因になる可能性があることがわかる。

なお、本実験では、時間の制約から限定的な条件でのみ乾舷と初期傾斜の影響を調査したが、第3章ではより広範なパラメータでの検討結果を述べる。

### 2.3 横揺れ同調の影響

一般に、横波中において最も転覆の危険性が高いと言われているのは横揺れ同調状態であり、船舶復原性規則にもこの考え方が反映されている。しかし、船内に自由水がある場合の従来の研究は、タンク内の自由水の同調(スロッシング)に注目したものが多く、また、一般に車両甲板内の滞留水の同調周期はRO-RO客船の横揺れ固有周期と離れているため、RO-RO客船の横揺れ同調時の現象については十分にわかっていない。本実験における横揺れ固有周期は、標準状態( $GM_d = 3.12m$ )

で  $T_r = 8.43sec$  であり、入射波のピーク周期  $T_p = 8.0sec$  に近いので、横揺れ同調の影響があるものと思われる。本節では、横揺れ振幅や滞留水量などの諸量と横揺れ同調との関係を、規則波中の実験結果から考察する。

#### 2.3.1 横揺れ固有周期と減衰率

Fig.2.11に、自由横揺れ試験から求めた船体の横揺れ固有周期  $T_r$  と横揺れ振幅10度における等価線形減衰係数  $B_{e10}$  を示す。非損傷時と損傷時について計測しているが、損傷時においても甲板下の損傷口は閉じたままとしたので、甲板下のみ浸水している状態の結果である。

$T_r$  と  $GM_d$  の関係は、 $T_r = 2\pi\kappa / \sqrt{g \cdot GM_d}$  ( $\kappa$ :慣動半径) で与えられる。 $T_r$  の図中の実線は、 $\kappa$  が  $GM_d$  によらず一定として最小二乗法により求めた近似線である( $\kappa = 7.42m$ )。  $T_r$  の変化はおおむねこの式で説明されることがわかる。なお、非損傷時の  $T_r$  は  $GM = 1.62m$  についてのみ計測されているが、これを損傷させた場合( $GM_d = 3.12m$ )と比較しやすくなるため、 $GM_d = 3.12m$  の位置に結果がプロットされている。Fig.2.11左図では非損傷時の  $T_r$  も曲線上にのっているが、これは車両甲板下の区画浸水による  $\kappa$  の増加と沈下による  $GM$  の増加とが相殺したと思われる。

一方減衰率は、 $GM_d < 2.5m$  ではほとんど変わらないが、 $GM_d > 2.5m$  では  $GM_d$  とともに大きくなる傾向である。また、損傷することにより、減衰係数が非損傷時

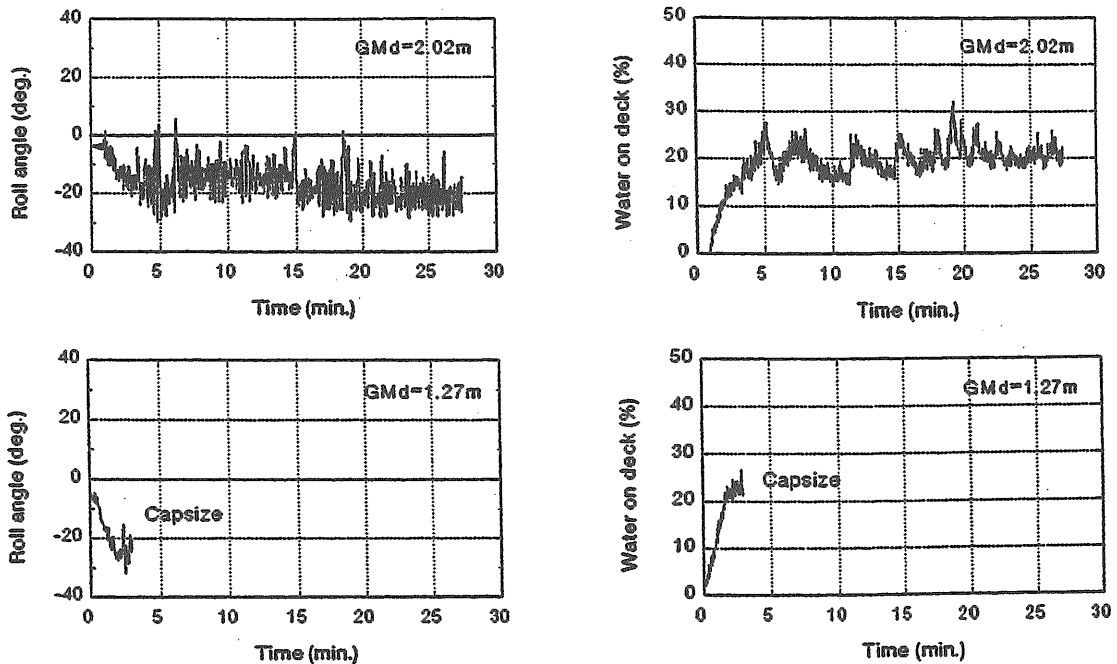


Fig.2.10 Effects of Initial Heel on Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$

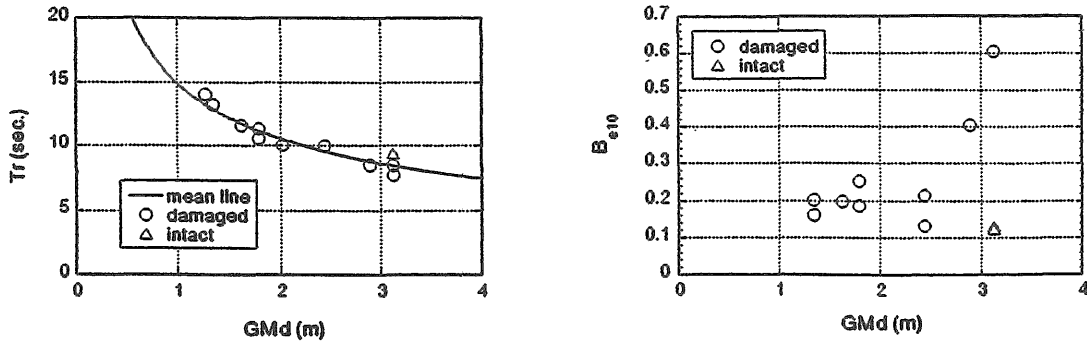


Fig.2.11 Natural Period  $T_r$  and Damping Coefficient  $B_{e10}$  of Roll Motion

の約5倍になることがわかる。

### 2.3.2 規則波中の実験結果

規則波中の実験結果をFig.2.12に示す。入射波の波高波長比は1/25で一定としている。横軸は tuning factor =  $\omega/\omega_r$  で、入射波の角周波数  $\omega$  とFig.2.11から計算した各  $GM_d$  における横揺固有角周波数  $\omega_r$  との比をとっている。これらの図を見ると、特にセンターケーシング付の場合、横揺振幅と相対水位振幅だけではなく滞留水量も tuning factor = 1 付近でピークを示している。また、その付近で定常傾斜角が波下側に大きくなる実験点が見られるなど、同調点付近で現象に変化が生ずることがわかる。従って、RO-RO客船の損傷時の安全性について実験する場合にも、横揺同調を起こす入射波を設定することが必要である。

次に、横揺振幅が最大となる周波数  $\omega_{max}$  について考察する。Fig.2.12を見ると、 $\omega_{max}/\omega_r$  が1からはずれているものが見られる。その理由としては、損傷時RO-RO客船に特有のものとして、以下の3つが考えられる。

#### 1) 減衰力の影響

甲板上に滞留水がない場合でも、減衰力が大きい場合には、 $\omega_{max}/\omega_r$  は1にならない。すなわち、1自由度の横揺運動方程式

$$\ddot{\phi} + 2k\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = Fe^{i\omega_1 t}$$

を考える。ここに、 $\phi$  は横揺角、 $k$  は減衰係数、 $\omega_0$  は減衰がない場合の固有周波数、 $F$  は強制力の複素振幅、 $i$  は虚数単位、 $\omega_1$  は強制力の周波数、 $t$  は時間である。よく知られているように、自由横揺する場合 ( $F = 0$ ) の周波数  $\omega_r$  は、 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - k^2}$  である。一方、強制横揺する場合 ( $F \neq 0$ ) に振幅が最大となる周波数は、 $\omega_{max} = \sqrt{\omega_0^2 - 2k^2}$  となり、 $\omega_r$  よりも小さい。従って、減衰係数  $k$  が大きくなると、 $\omega_{max}$  は tuning factor が1よりも小さい側 (Fig.2.12では

左側)にずれることになる。Fig.2.11に示したように、特に  $GM_d$  が大きい場合には、損傷状態の減衰力は非常に大きい。従って、減衰力の効果によりFig.2.12のピークは左側にずれると考えられる。

#### 2) 甲板上滞留水の静的な影響

甲板上の滞留水が増えることは、動的な影響を除いて3つの効果がある。すなわち、①滞留水を含んだ船全体としての横揺慣性モーメントの増加、②沈下による水線面2次モーメントの増加 (復原力の増加)、③自由水影響による復原力の減少、である。このうち、②と③はFig.2.4の復原力曲線に反映されている。GZが負から正になる平衡点で船が横揺するものと仮定すれば、平衡点における曲線の傾きから復原力を評価することができる。Fig.2.4からそれを計算すると、程度の差はあるが滞留水がない時よりも復原力は減少し、Fig.2.12の  $\omega_{max}$  を左側にずらす方向に作用する。①の慣性モーメントの増加も同じ方向に作用する。従って、滞留水量が増えるとその静的な効果から、 $\omega_{max}$  は左側にずれると考えられる。

#### 3) 甲板上滞留水と船体の連成運動の影響

一般に、運動振幅が最大となる周波数は、連成運動により変化することが知られている。ここでは、滞留水表面が平らであると仮定し、また減衰力を考慮しない簡易計算法 (第4章参照) を用いて、滞留水と船体の連成運動の影響を評価してみた。その計算によれば、滞留水量が増えるに従って  $\omega_{max}$  は高周波数側 (右側) にずれると考えられる。

この他に、滞留水には減衰力としての効果がある言われており、これも  $\omega_{max}$  を左側にずらす方向に作用する。従って、 $\omega_{max}$  を高周波数側にずらす効果を持つ