

## 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.

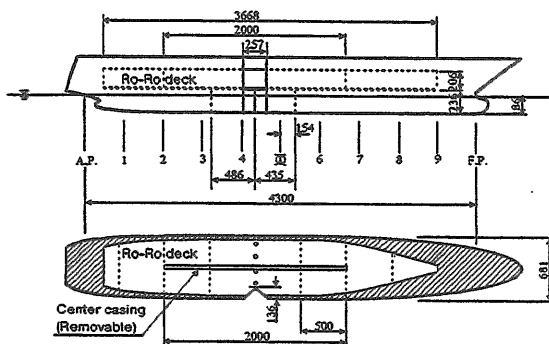


Fig.2.1 Ro-Ro Model and Damage Opening for Experiment

(unit:mm, Broken lines and circles on 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  $H_{1/3} = 4.0\text{m}$ 、ピーク周期  $T_p = 8\text{sec}$  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、 $T_p[\text{sec}] = 4\sqrt{H_{1/3}[\text{m}]}$ 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  $0.015\text{m}\cdot\text{rad}$  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  $GM_d > 1.60\text{m}$ 、②の条件は  $GM_d > 1.67\text{m}$  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 ( $GM_d = 1.27\text{m}$ ) 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、車両甲板上的の滞留水量  $w$  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。車両甲板上的の損傷口 (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。

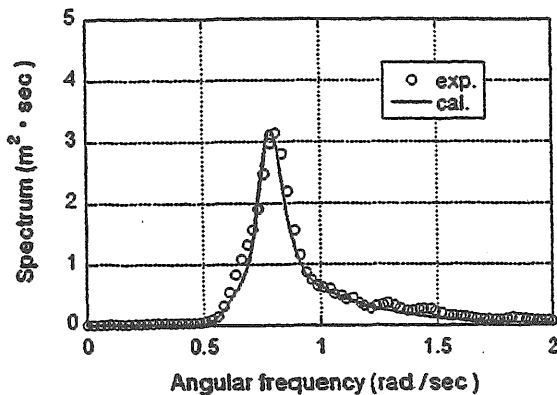


Fig.2.2 Incident Wave Spectrum

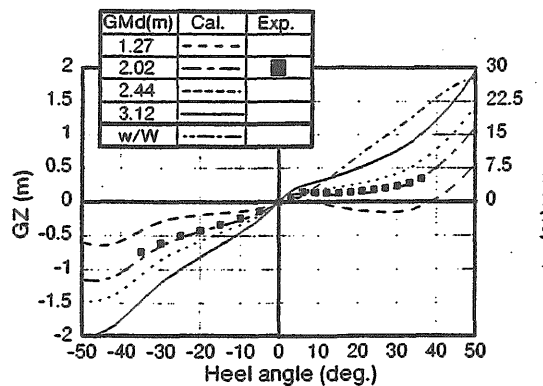


Fig.2.3 GZ Curves and Amount of Water on Deck in Damaged Condition

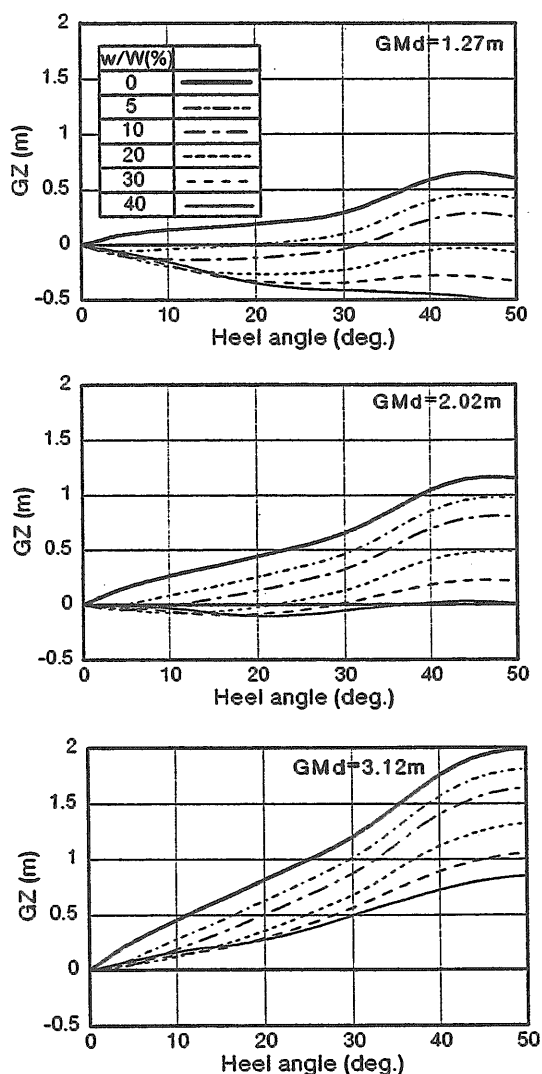


Fig.2.4 GZ Curves with Constant Amount of Water on Deck

## 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

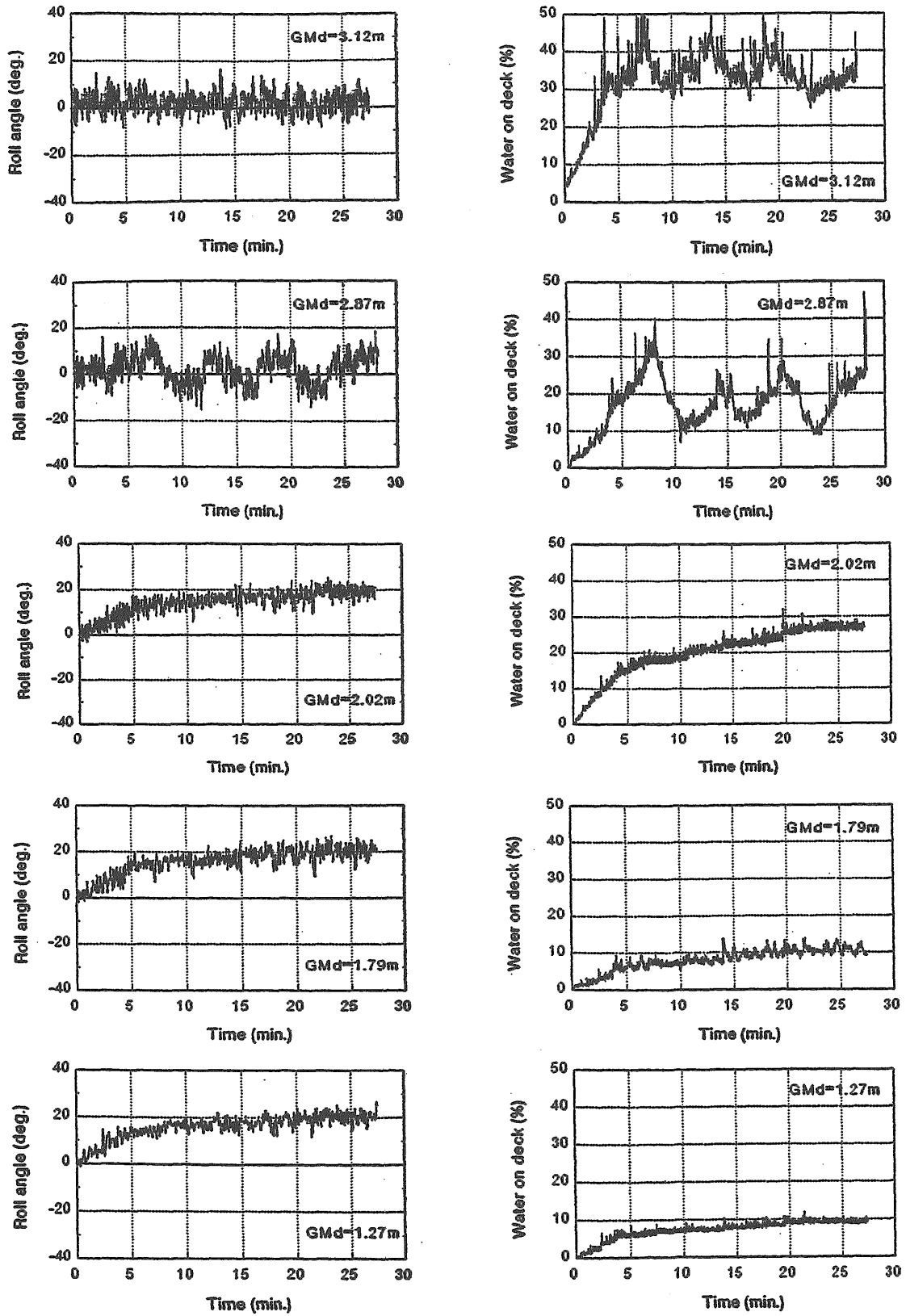


Fig.2.5 Time Evolutions of Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$   
(Without Center Casing)

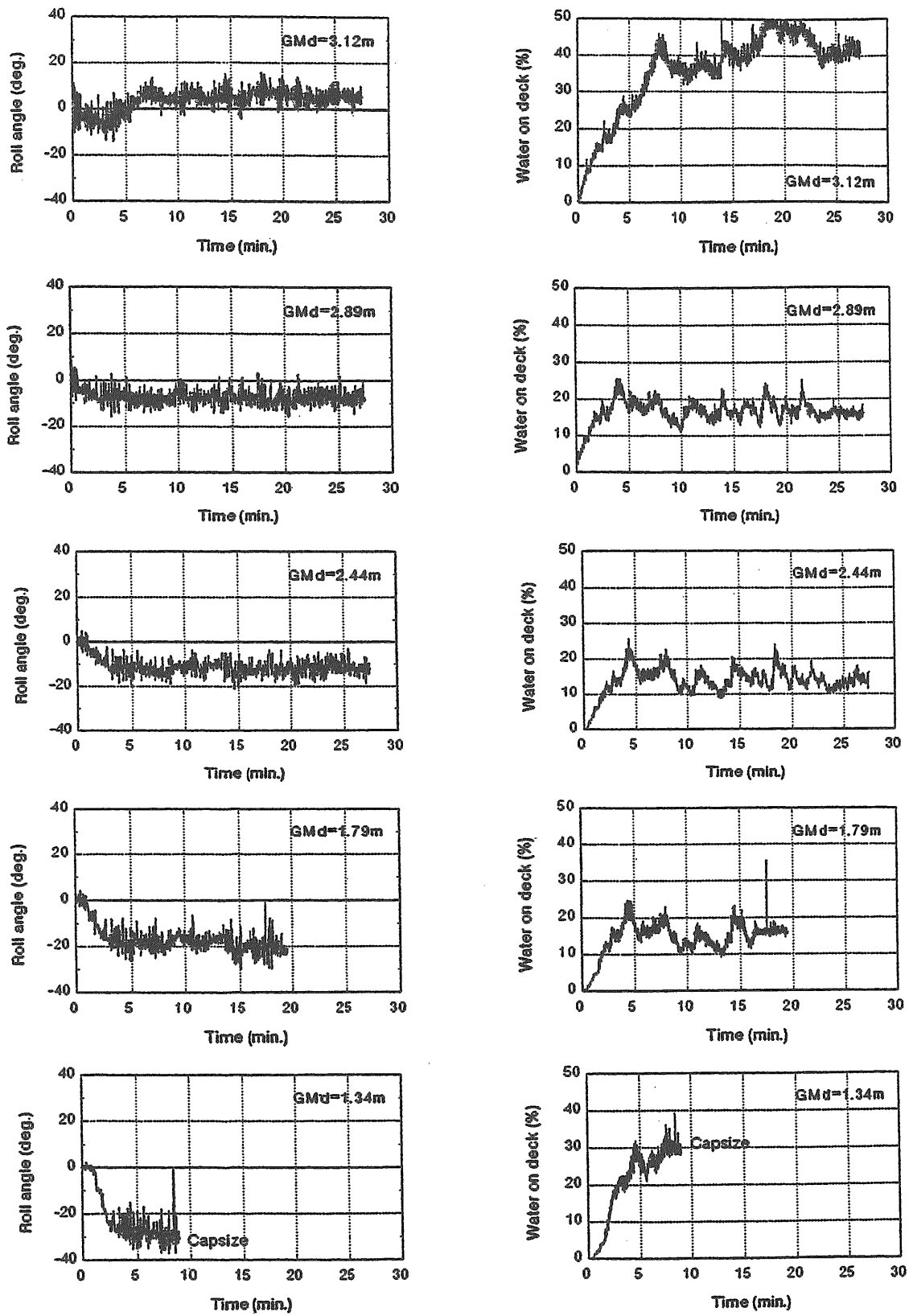


Fig.2.6 Time Evolutions of Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$   
(With Center Casing)

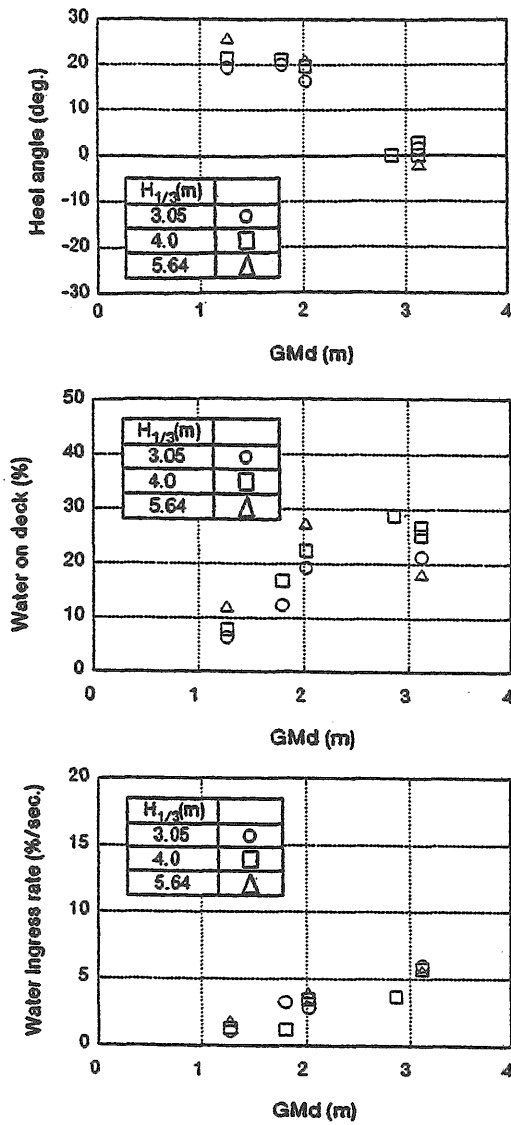


Fig.2.7 Experimental Results in Irregular Waves (Without Center Casing)

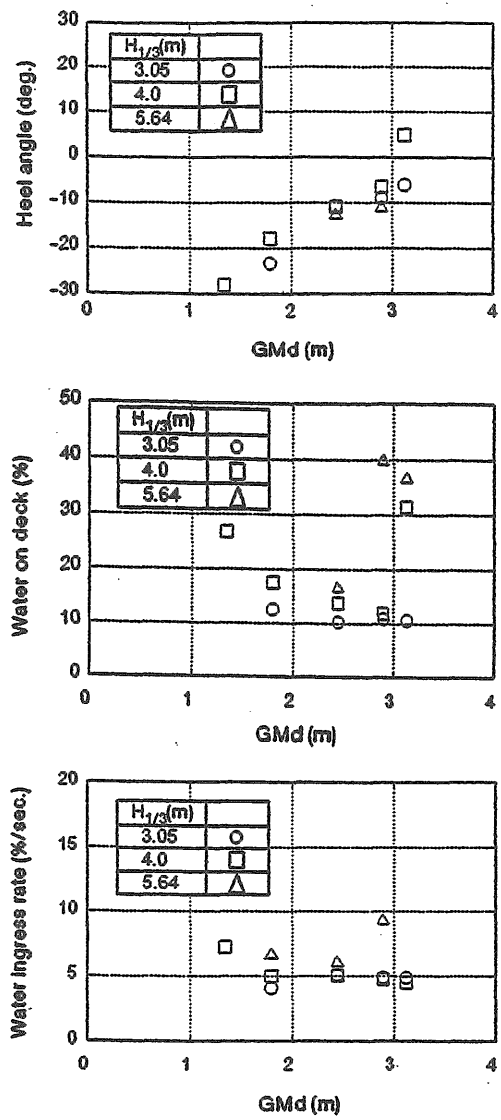


Fig.2.8 Experimental Results in Irregular Waves (With Center Casing)

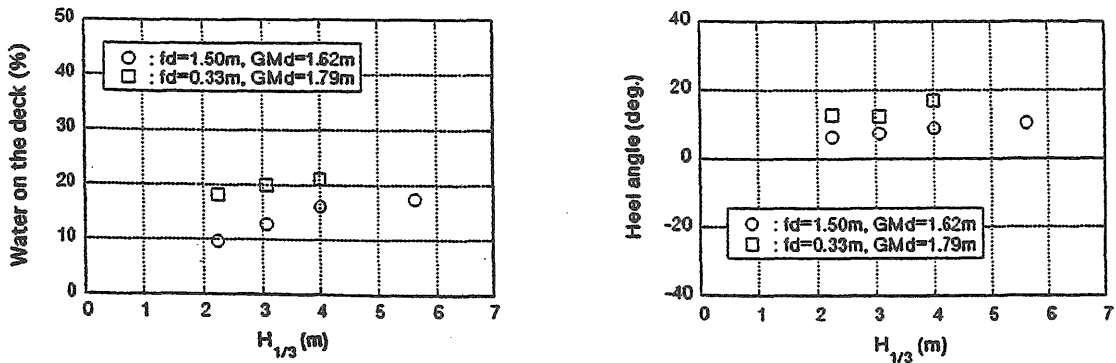


Fig.2.9 Effects of Freeboard on Heel Angle  $\phi_0$  and Amount of Water on Deck  $w$



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

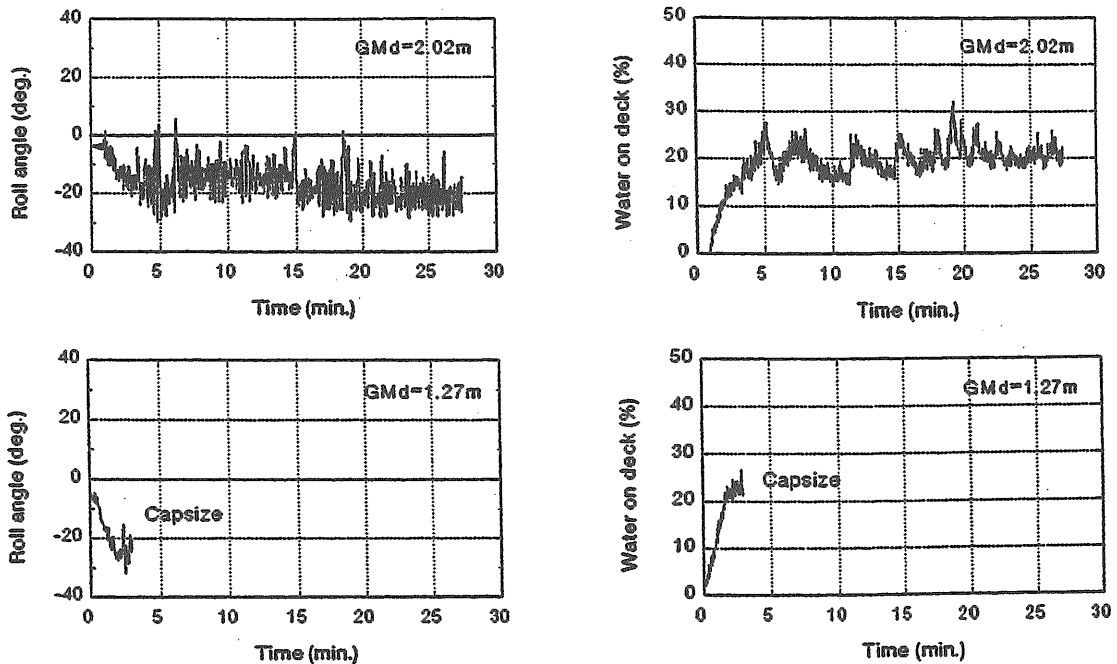


Fig.2.10 Effects of Initial Heel on Roll Angle  $\phi$  and Amount of Water on Deck  $w$

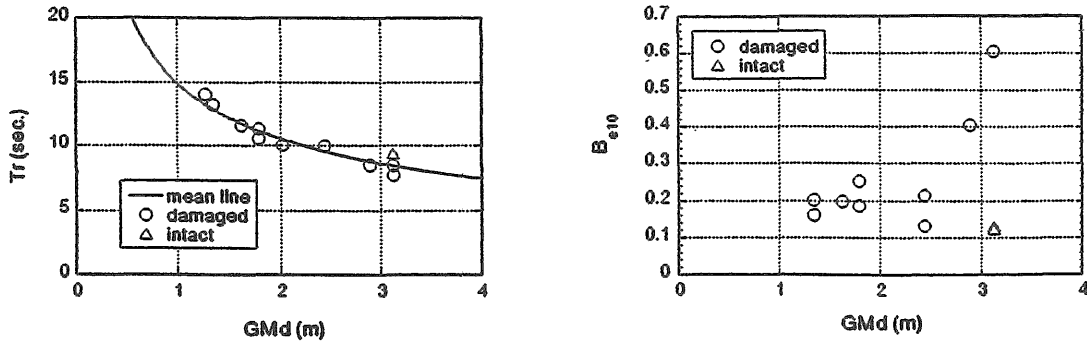


Fig.2.11 Natural Period  $T_r$  and Damping Coefficient  $B_{e10}$  of Roll Motion

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

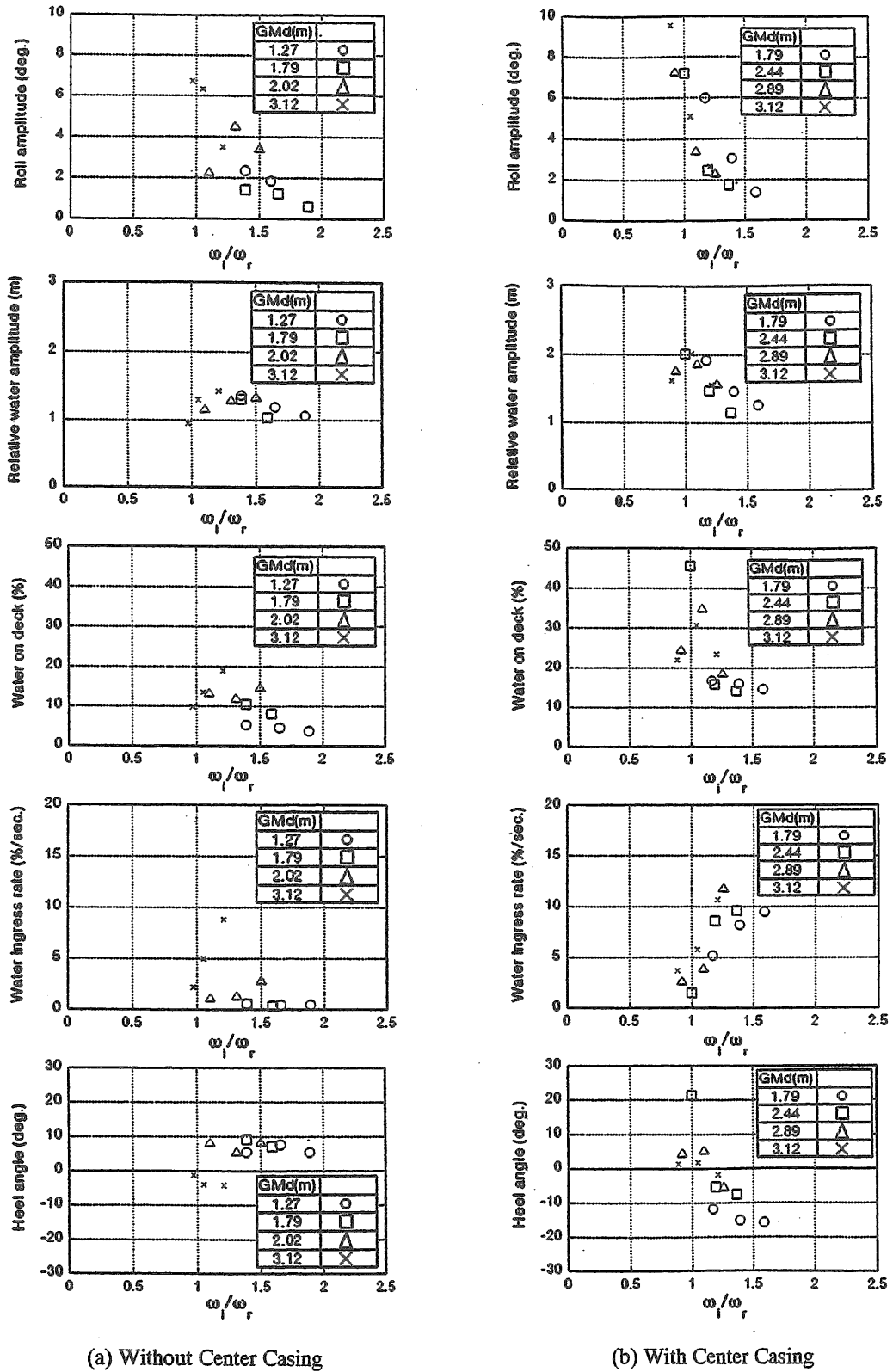


Fig.2.12 Frequency Responses in Regular Waves

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 $\omega_{max}/\omega_r$ 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

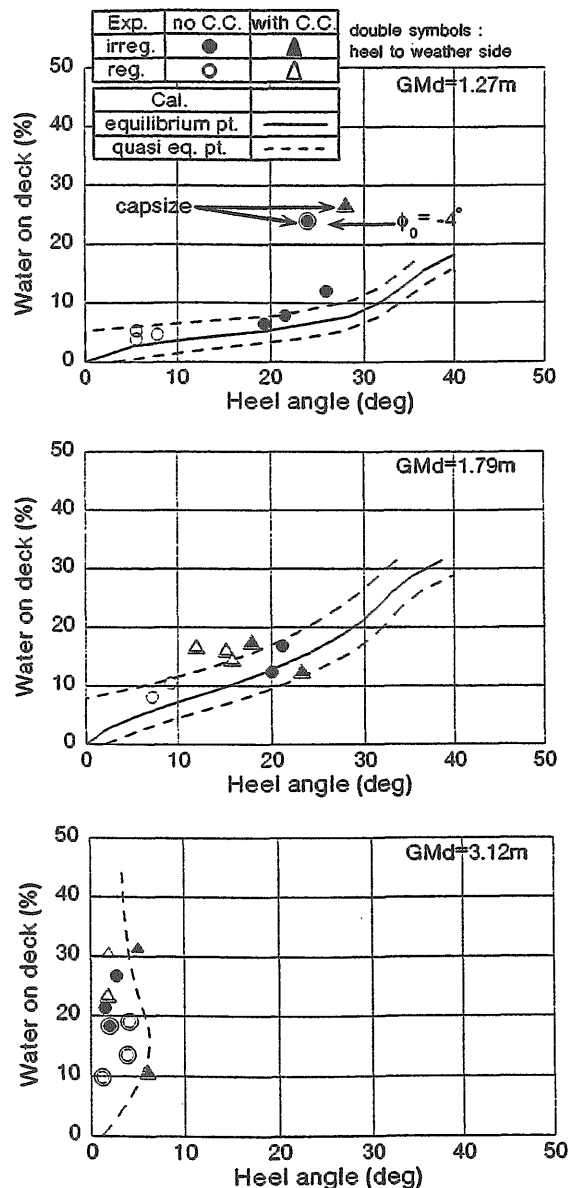


Fig.2.13 Amount of Water on Deck  $w$ , Heel Angle  $\phi_0$  and Equilibrium Range

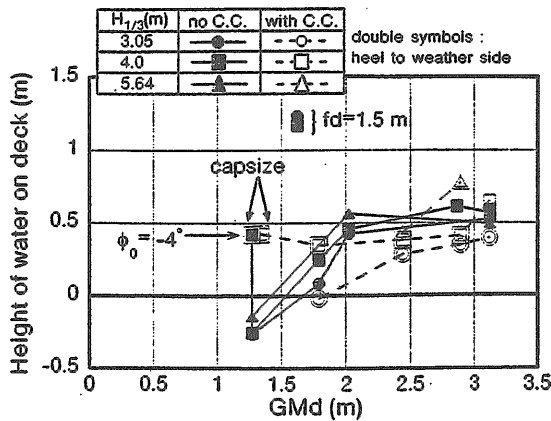


Fig.2.14 Experimental Results of Height of Water on Deck  $H_d$

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

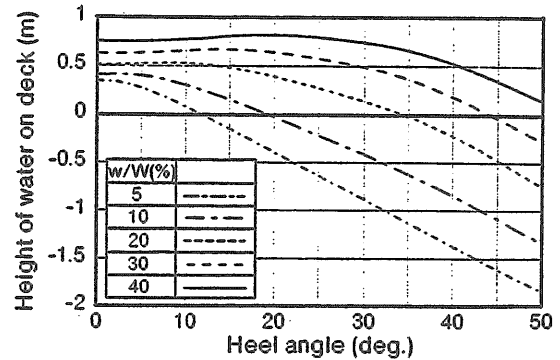


Fig.2.15 Height of Water on Deck  $H_d$  in Calm Water

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。

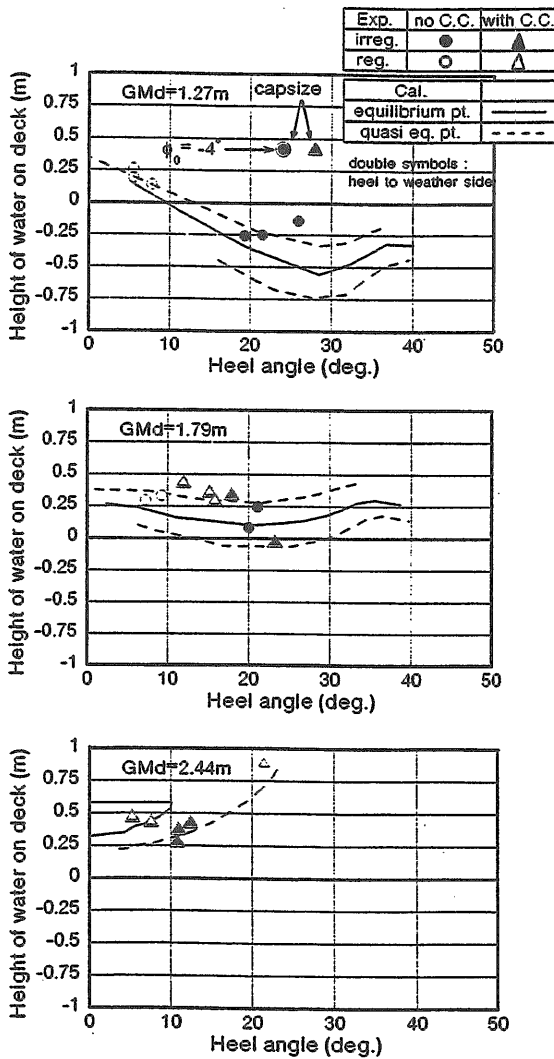


Fig.2.16 Height of Water on Deck  $H_d$ , Heel Angle  $\phi_0$  and Equilibrium Range

### 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、

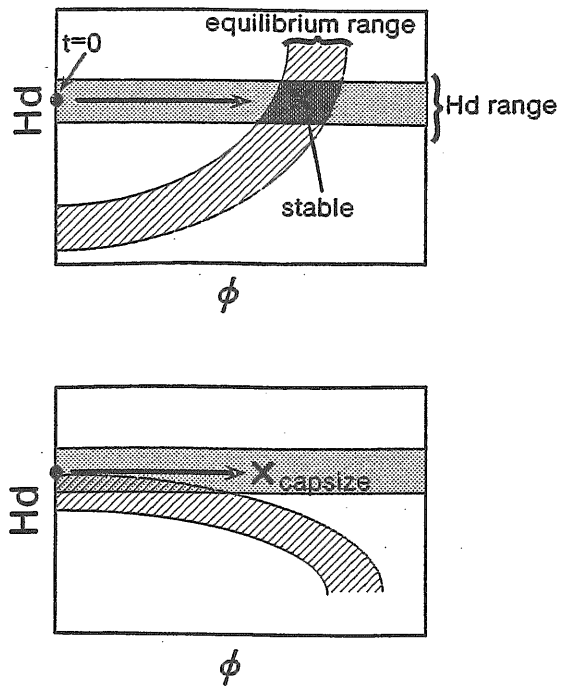


Fig.2.17 Stability and Instability in  $H_d$ - $\phi$  Diagram

「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、 $GM_d = 2.44m$ 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、 $GM_d = 1.79m$ 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 $GM_d = 1.27m$ では、 $H_d = 0.4m$ 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 $GM_d \geq 1.79m$ 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) 規則波中で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。

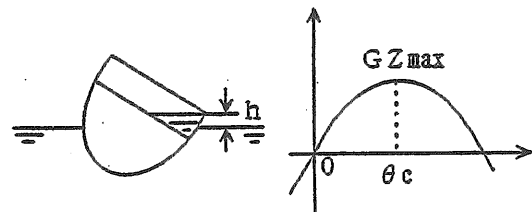


Fig.3.1 Definition of Height of Water Surface on Car Deck from Mean Sea Surface

### 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( $\theta_c$ )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<sup>10)</sup>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）および甲板上的水位計の配置を 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。さらにこの甲板上的滞留水量を計測できるように、櫛形的水位計を 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			
$\Delta$ (ton)	15020		0.128	
$KG_0$ (m)	10.96		0.224	
$G_M$ (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

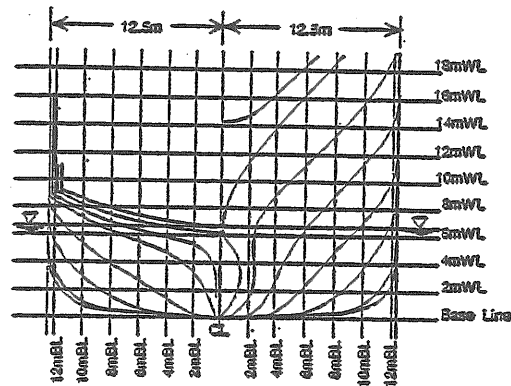


Fig.3.2 Body Plan

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 ( $\Delta$ ) (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<sup>1)</sup>。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

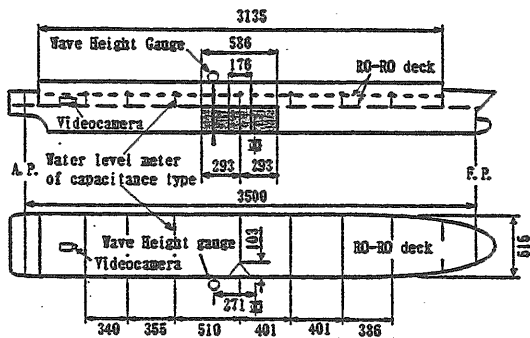


Fig.3.3 Damaged RO-RO Ship Model

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

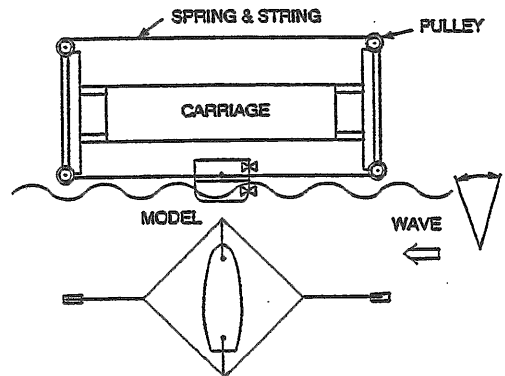


Fig.3.4 Experimental Apparatus

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)

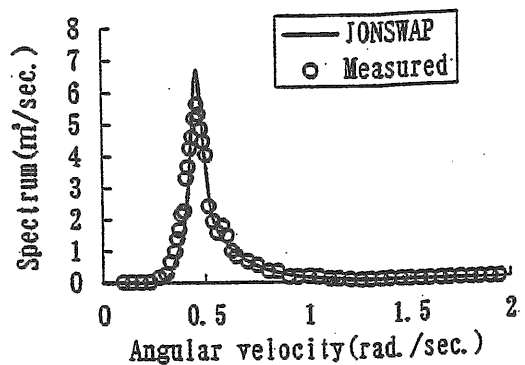


Fig.3.5 Incident Wave Spectrum(Tp=13sec)

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 に設計デッキ高さで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<sup>12)</sup>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 letter<sup>11)</sup>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×
	4°	6.59○	5.39○	5.05○	3.06○
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)

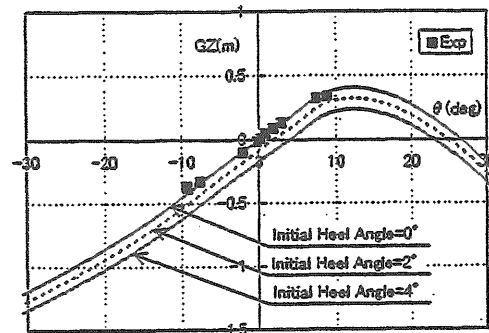


Fig.3.6(a) GZ Curves(Designed Deck Height)

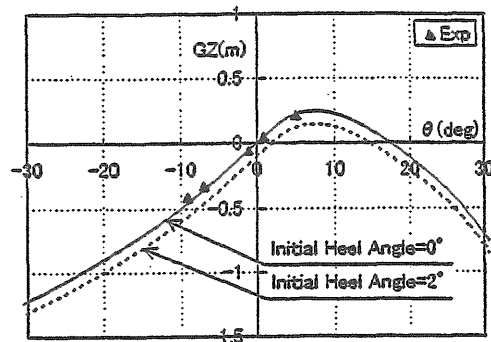


Fig.3.6(b) GZ Curves(Lower Deck Height)

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 ( $\theta_{\text{critical}}$ ) 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 ( $GZ_{\text{max}}$ ) になる傾斜角 ( $\theta_c$ ) 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。

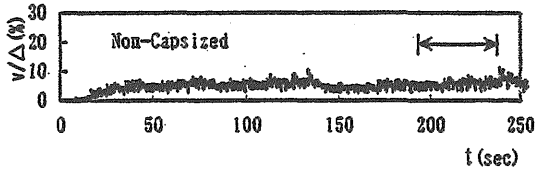


Fig.3.7(a) Time History of Amount of Water on Car Deck (No Capsize)  
( $v$  : Amount of Water on Deck,  $\Delta$  : Displacement)

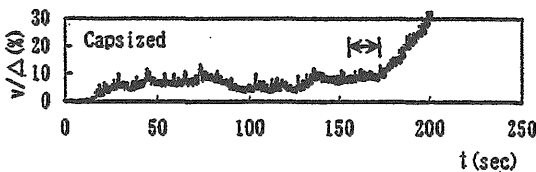


Fig.3.7(b) Time History of Amount of Water on Car Deck (Capsize)  
( $v$  : Amount of Water on Deck,  $\Delta$  : Displacement)

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。

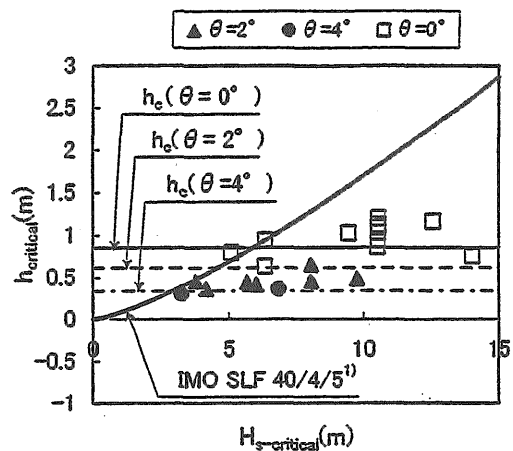


Fig.3.8(a) Critical Height of Water on Car Deck (Designed Deck Height)  
( $\theta$  : Initial Heel Angle)

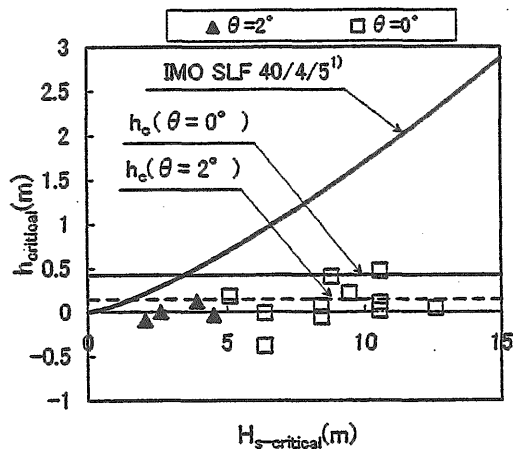


Fig.3.8(b) Critical Height of Water on Car Deck (Lower Deck Height)  
( $\theta$  : Initial Heel Angle)

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  $2^\circ$  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。

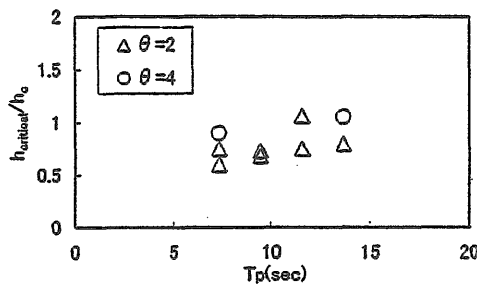


Fig.3.9 Critical Height Ratio of Water on Car Deck (Designed Deck Height) ( $\theta$  : Initial Heel Angle,  $T_p$  : Peak Period of Wave Spectrum)

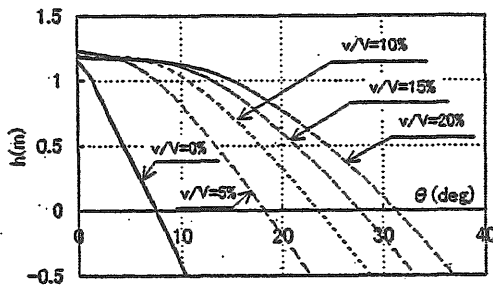


Fig.3.10 Relation between Height of Water on Car Deck and Heel Angle ( $v$  : Volume of Water on Deck,  $V$  : Volume of Car Deck)

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 ( $\theta_c$ ) 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  $\theta_c$  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  $\theta_c$  でおおよそ推定できると考えられるが、 $\theta_{critical}$  が  $\theta_c$  より大きくなる原因については、滞留水および主船体

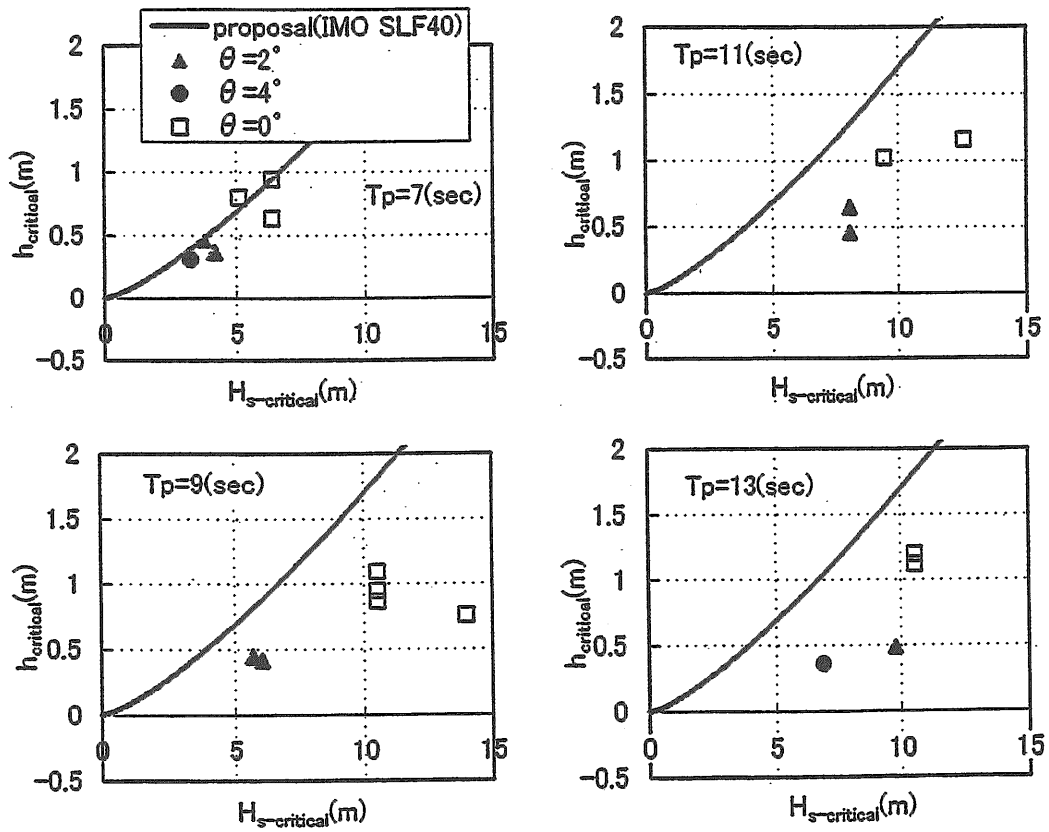


Fig.3.11 Effect of Peak Period of Wave Spectrum to Critical Significant Wave Height (Designed Deck Height)  
 ( $\theta$  : Initial Heel Angle,  $T_p$  : Peak Period of Wave Spectrum)

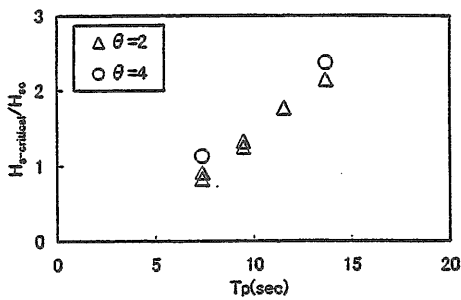


Fig.3.12 Ratio of Critical Significant Wave Height (Designed Deck Height)  
 ( $\theta$  : Initial Heel Angle,  $T_p$  : Peak Period of Wave Spectrum)

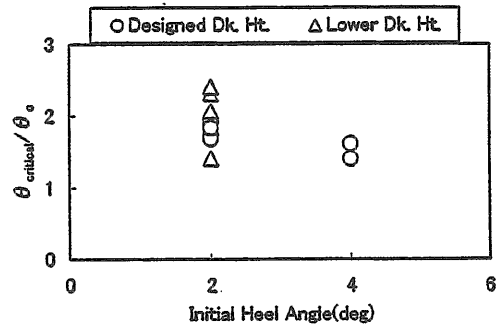


Fig.3.13 Ratio of Critical Heel Angle

の運動の影響も考慮し転覆現象を明らかにする必要がある。転覆メカニズムの解明については今後の課題と考える。

### 3.4 車両甲板への浸水を考慮した復原性能の検討

前節で述べたように、車両甲板上への浸水を考慮した時に必要な復原性能を求める(3.1)式は、実験値と必ずしも合致しない。ここでは、その問題点を整理するとともに、別の指標について提案を行う。

#### 3.4.1 波スペクトルのピーク周期の影響

Fig.3.8 および Fig.3.11 から解るように、IMO SLF40 で提案された関係式(3.1)を表す実線に対して、波周期が長い場合の  $h_{critical}$  は小さくなっており、(3.1)式は転覆の有無に関係なく多めに浸水量を与えていることになる。このことは、実際に必要な復原性能より大きな安全側の復原性能を要求していることになる。

また、(ii)で述べたように、限界有義波高への波スペクトラムのピーク周期の影響は  $H_{sc}$  との比で見ると大きいものは2~3倍になっており、波スペクトラムのピーク周波数によっては限界有義波高を過小に評価している。すなわち、波スペクトラムのピーク周波数によって限界波高が変化することを(3.1)式は表現できていないことを示している。

$\theta_{critical}$  と  $\theta_c$  の比が1に近づけば  $h_{critical}$  と  $h_c$  の比も1に近づくこと考慮すると、(3.1)式はピーク周期7秒と9秒の実験値の間を通る。従って、(3.1)式はピーク周期が7秒と9秒の限界滞留水面高さの実験値とはほぼ一致し、ピーク周期が11秒、13秒と長くなるにつれて外れていく。(3.1)式は多くのシミュレーション計算や実験値から求められている。しかし、その実験で用いられたスペクトラムは今回の実験と同じ JONSWAP 型だが、ピーク周期は4~9秒であり有義波高は1~8mと比較的短い波周期および波高で行われている<sup>10)</sup>。従って、 $T_p=9$ 秒までの実験値とはほぼ一致するのも頷ける。逆にそれ以上大きなピーク周期には適用できないと言える。

今後広範囲な海域に適用するには、ピーク周期の違いによる限界有義波高の違いを考慮する必要がある。日本近海の波浪データベース<sup>12)</sup>を見ると、特に太平洋側において9秒以上の波の発現頻度は無視できないレベルにあり、より広い範囲の波周期に適用可能な式が望まれる。

#### 3.4.2 復原力曲線の正の面積と限界有義波高

(3.1)式の  $h_c$  は復原性能を表している。これに変えて、SOLAS の損傷時復原性基準や我が国の乙基準で用い

られる GZ 曲線の正の面積を用いて復原性能を表し、限界有義波高との関係を示したのが Fig.3.14(a)である。転覆を起こした初期傾斜がある場合の実験結果をここに示している。限界有義波高と GZ 曲線の正の面積との間には顕著な相関が見られる。前項で述べた波スペクトラムのピーク周期の影響についても、この図では明確にその違いが解る。Fig.3.14(b)には限界滞留水面高さとの関係を示す。右上がりの傾向は同じであるが、ピーク周期の違いに対しては明確な差は見られない。

Fig.3.15 に限界有義波高と車両甲板に浸水し滞留した水の量との関係を示す。この結果から限界有義波高が増加するにつれて車両甲板の滞留水の量が増加していることが解る。このことから、GZ 曲線の正の面積と滞留水量の間にも明確な関係があることになるから、GZ 曲線の正の面積は滞留水が船を傾けようとした仕事量、即ち転覆モーメントのなす仕事量を表していると考えられる。従って、車両甲板へ浸水した時の復原性能を評価する指標として GZ 曲線の正の面積を検討してみる価値があると考えられる。

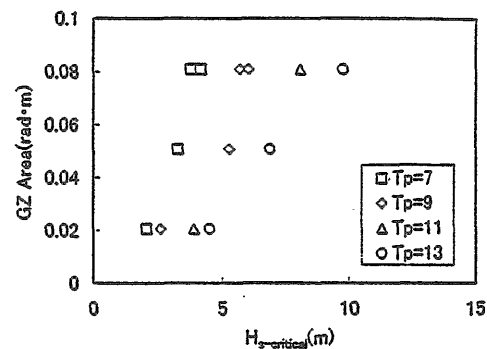


Fig.3.14(a) Critical Significant Wave Height vs Positive Area of GZ curve

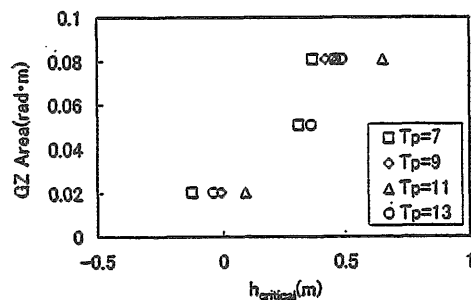


Fig.3.14(b) Critical Height of Water on Car Deck vs Positive Area of GZ curve

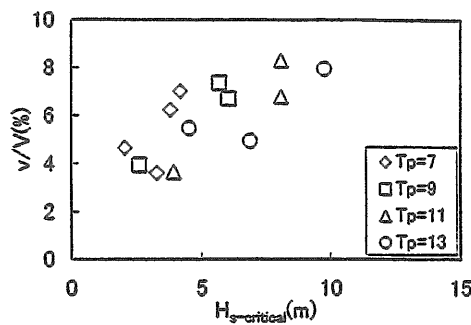


Fig.3.15 Critical Volume of Water on Car Deck vs Critical Significant Wave Height  
( $v$  : Volume of Water on Car Deck,  $V$  : Volume of Car Deck)

### 3.5 第3章のまとめ

外航のRO-RO旅客船の模型を製作し、横波中で波上側に損傷口がある場合の転覆実験を行った。その結果をまとめると、次の様になる。

- (1) SOLAS'90の損傷時復原性基準を満足し初期傾斜が無い場合には、転覆は起きなかった。
- (2) 初期傾斜がある場合には損傷口のある波上側に傾斜し、有義波高が高くなり車両甲板への浸水量が大きくなると転覆する。即ち、転覆を起こすには、初期傾斜があり損傷口のある舷側に滞留水が滞留し易くなる必要がある。
- (3) 初期傾斜があり転覆する場合、車両甲板上の限界滞留水面高さは、波スペクトラムのピーク周期が7~9秒の時には、英国提案の(3.1)式とほぼ一致するが、ピーク周期がそれより長くなると一致しない。
- (4) 初期傾斜があり転覆する場合、限界有義波高には、波スペクトラムのピーク周波数の影響があり、周期が長くなるにつれて限界有義波高は大きくなる。
- (5) 初期傾斜があり転覆する場合、限界有義波高とGZカーブの正の面積には顕著な関係がある。

## 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

波浪中の船の動揺は、その変位に関して非線形な復原力と減衰力、波による強制力、多自由度の連成影響を含む運動方程式で記述される。その非線形影響は船の動揺の振幅が大きくなると顕著になる。したがって、

転覆にいたるような危険な揺れでは、その非線形性が重要な働きをしていると考えられる<sup>13)~17)</sup>。

浸水した船舶の波浪中の運動については、過去にくつか研究が行なわれている<sup>18)~20)</sup>。RO-RO客船の車両甲板のように、仕切りのない広い空間に浸水し溜った海水は自由に動き回れるので、その船体運動に与える動的影響は重要であると考えられる。閉じた空間に溜った流体の自由表面の運動は、古くから調べられてきた<sup>21)~26)</sup>。しかし、船と船内水の非線形連成運動はほとんど検討されていない。

第2.3.2節では、車両甲板上に滞留水を生じたRO-RO客船の規則波中の特徴を簡単に述べたが、これをより詳細に検討した結果、波はおだやかで規則的でも、(1)船の横揺れはかなり大振幅でかつ不規則になる場合がある、(2)複数の揺れ方が共存する場合がある、ことがわかった。これらは、非線形運動の特徴である。また、船体と船内水の連成運動を詳しく調べるために、箱船の模型船を用いて現象を簡略化した実験を行なった。その結果、三次元模型の実験と同じような複雑な横揺れが観察され、それらはカオスであることがわかった。波浪中の船の横揺れ運動でカオスが発生することは、理論と数値計算で指摘されているが<sup>27)~36)</sup>、実験で示された例はほとんど無い。本研究ではさらに、浸水した船の波浪中の運動をモデル化した方程式を考えて、実験で観察された複雑な非線形運動が発生するメカニズムを分岐理論の観点から調べた。

### 4.2 三次元模型船の実験結果

ここでは、第2章で用いたRO-RO客船模型の損傷口を閉鎖し、車両甲板内に一定量の滞留水を付加した場合の規則波中の運動について、特徴的な例を示す。

Fig.4.1(a)は、船内に船の排水量  $W$  の20%の水を入れた場合の、横揺れ角  $\phi$  の時系列データの一例を表す。波の高さ  $H$ 、周波数  $f$  はそれぞれ  $H=13.0\text{cm}$ 、 $f=0.69\text{Hz}$  である。実験は模型船を波下側の静的な釣合点(傾斜角  $\phi(t=0)=19.0\text{deg}$ )に静止させてから開始した。また、船体運動に外乱を与えるために、 $t=65\text{sec}$ で模型船の船側部を軽く突いた。このグラフから(1)  $t<約65\text{sec}$ では、横揺れの両振幅は約  $5\text{deg}$  で平均周期は入射波の周期と同じである、(2)  $t=65\text{sec}$ で模型船の船側部を軽く突いたあと、横揺れの両振幅は約  $20\text{deg}$  で平均周期は入射波の周期の2倍になった、(3)波(入力)は規則的であるのに対し、横揺れ(出力)は不規則で複雑な挙動をしている、ということがわかる。したがって、船内に滞留水が存在すると、わずかな外乱により船体の横揺れが約4倍になる可能性がある。また、同じ入力(波)に対して複数の出力(横揺れ)が共存すること

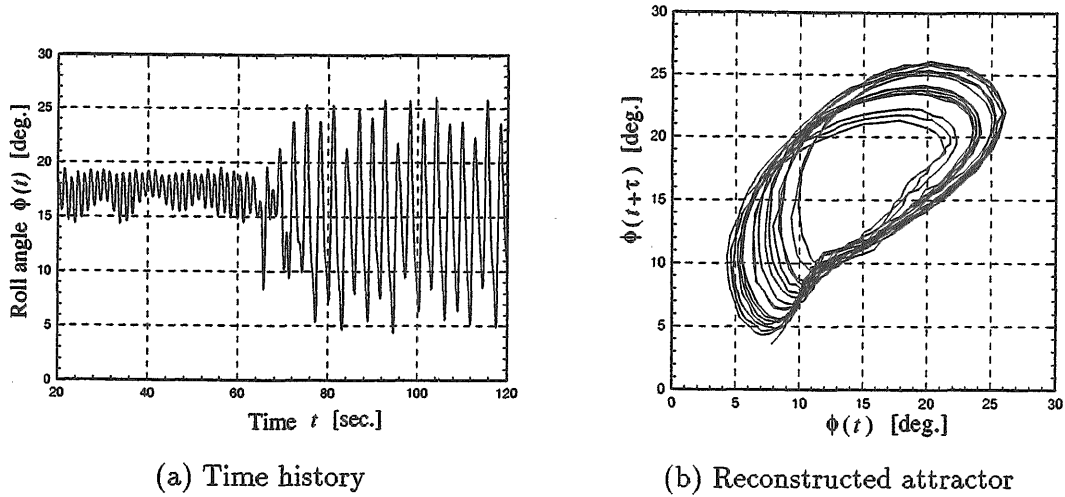


Fig.4.1 Measured Roll Angle  $\phi(t)$  of the Ferry Model

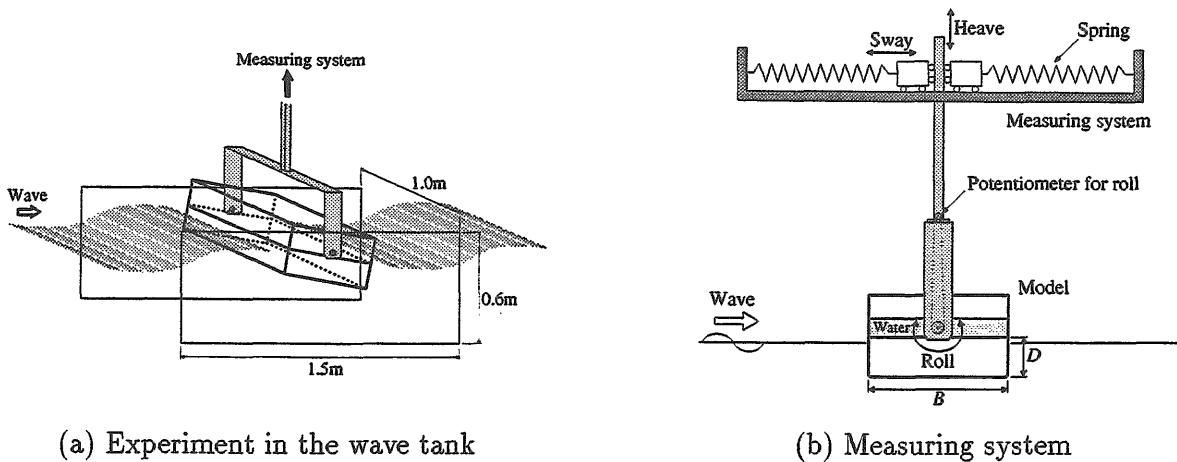


Fig.4.2 Simplified Two-dimensional Motion of a Box-shaped Ship in Beam Sea

は非線形運動の特徴のひとつである。

Fig.4.1(b)は、振幅の大きい方の揺れ ( $t > 約 65sec$ ) の時系列データを、時間遅れ座標 ( $\phi(t), \phi(t+\tau)$ )を用いて 2 次元の擬状態空間に再構成したアトラクターを表す<sup>37)</sup>。この軌道はストレンジ・アトラクターのように見えるので、この揺れは単純な分数調波振動ではないことが予想される。もしカオスであるならば、これは不安定なモードを内在する大振幅運動であるので、船の安全性を考える上で非常に重要な現象である。

実験の観察により、この問題では船の横揺れと船内の水の連成運動が支配的であると考えられる。そこで、本研究ではその連成運動による非線形現象を詳しく調

べることにした。

### 4.3 箱船の模型を用いた実験

#### 4.3.1 実験方法

船の横揺れと船内の水の連成運動を調べるために、箱船を用いて現象を簡略化した実験を行なった。箱船模型と計測装置の概要を Fig.4.2 に示す。模型は上部と下部の二つからなり、上部模型は車両甲板を想定している。実験は上部模型に適当な量の水を入れて行なった。模型の主要目等は  $L=0.92m, B=0.45m, D=0.13m$ , 喫水  $d=0.11m$ , 乾舷  $f_t=0.02m$ , 排水量  $W=45.54kg$ ,  $KG=0.158m, GM=0.050m$ , 横揺れ固有周期  $T_{rr}=1.54sec$



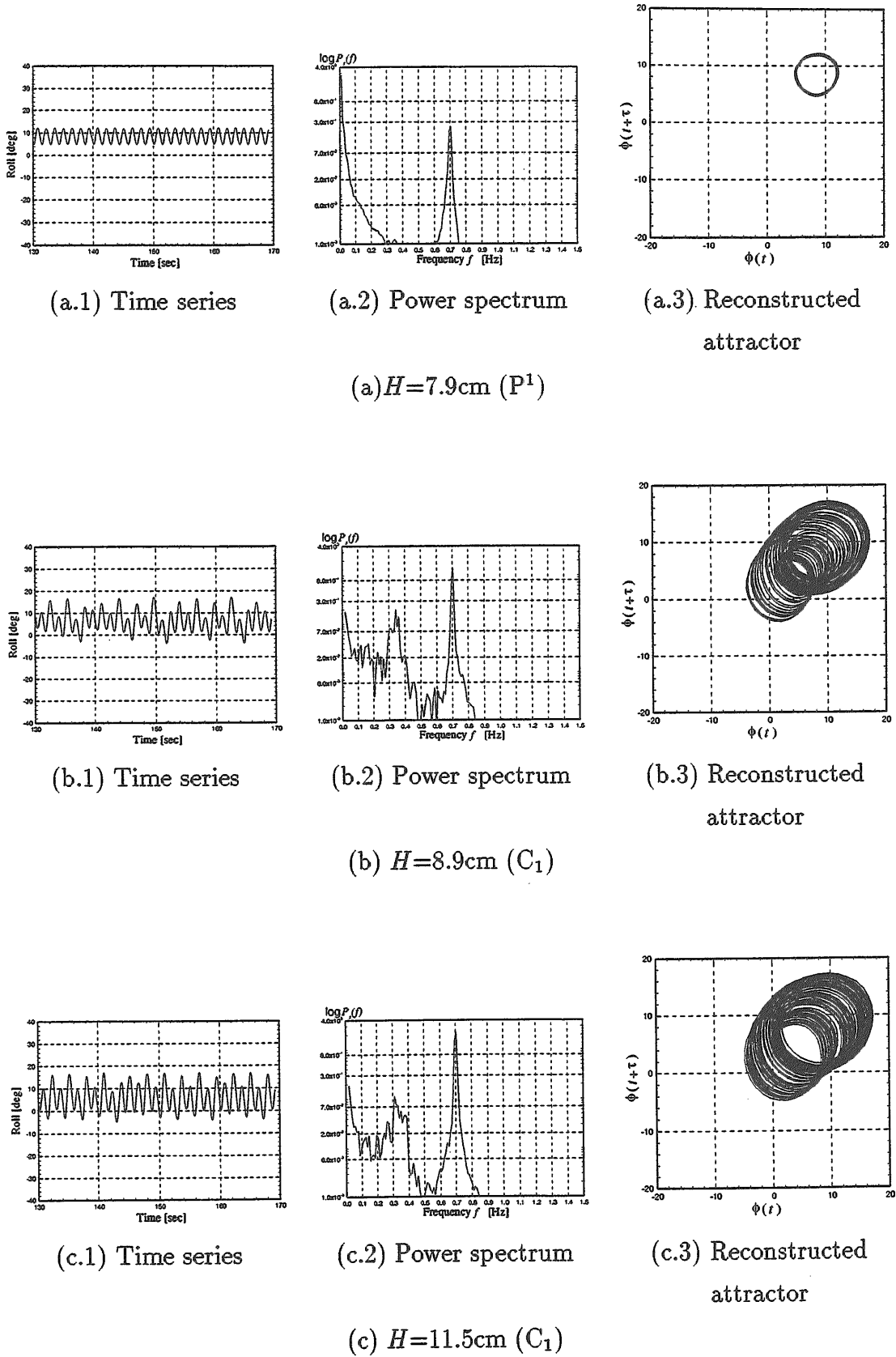
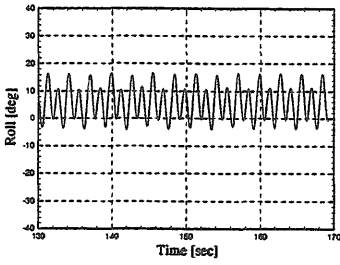
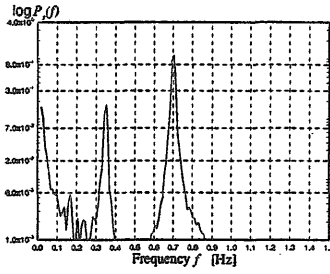


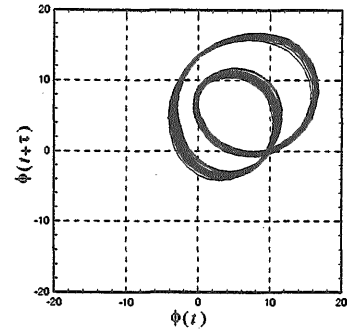
Fig.4.3 Measured Roll Motion of the Box-shaped Model



(d.1) Time series

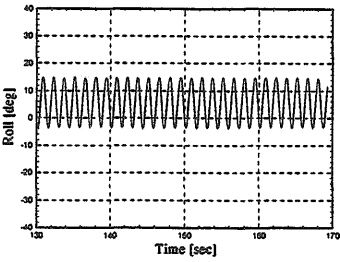


(d.2) Power spectrum

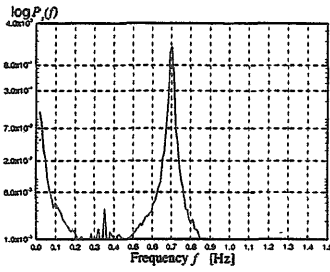


(d.3) Reconstructed attractor

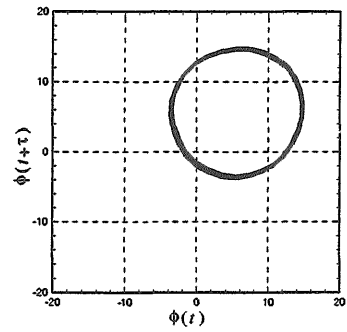
(d)  $H=12.0\text{cm} (P^2)$



(e.1) Time series



(e.2) Power spectrum



(e.3) Reconstructed attractor

(e)  $H=14.0\text{cm} (P^1)$

Fig.4.3 Continued

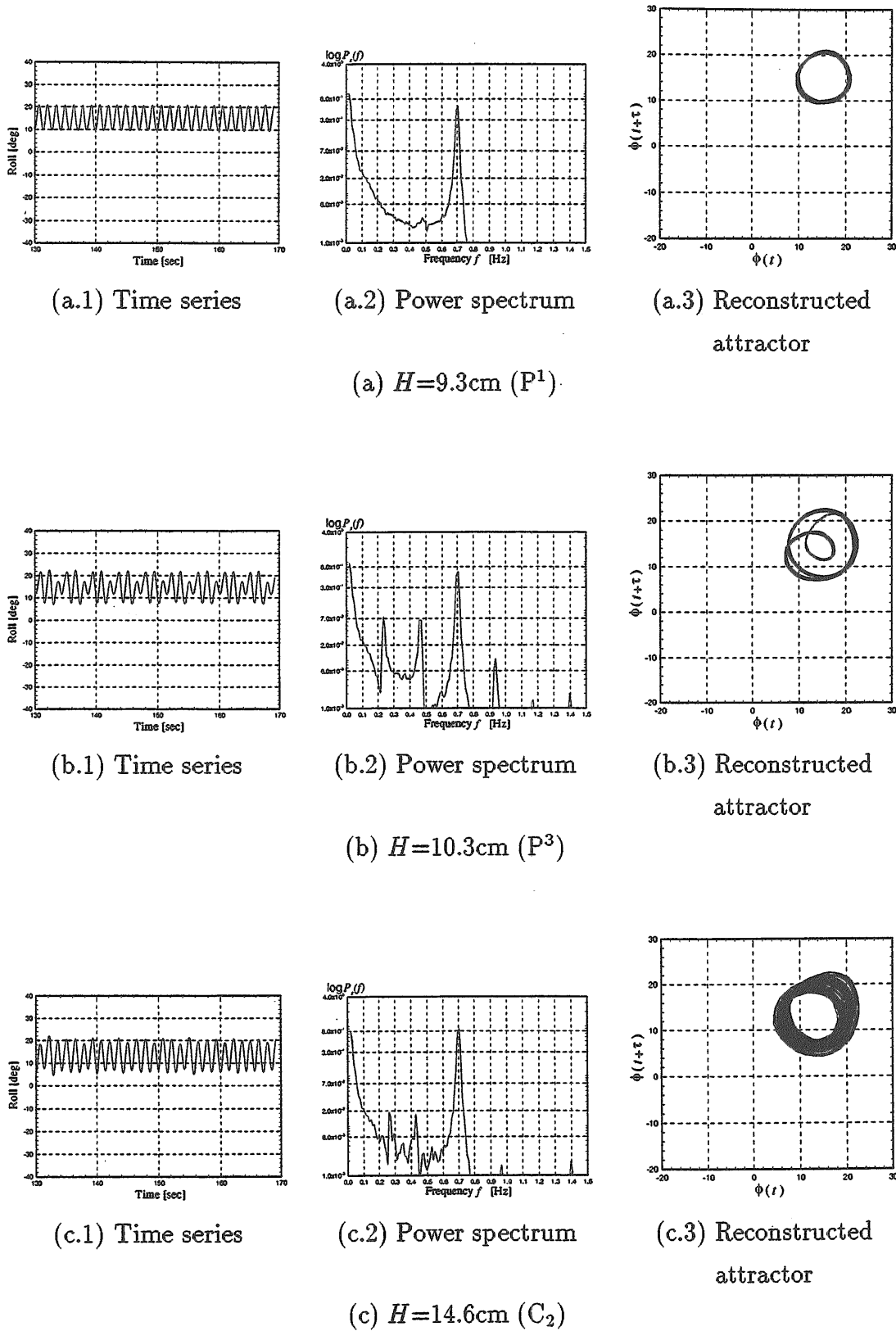
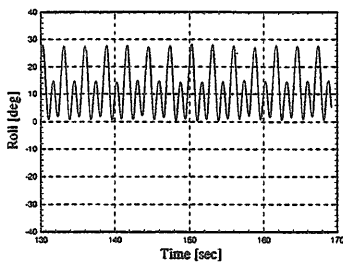
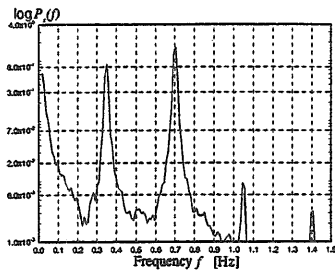


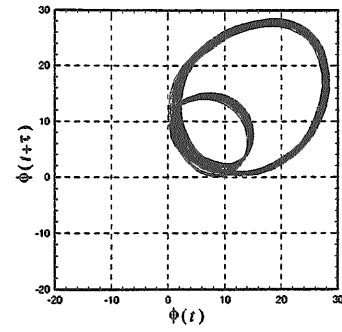
Fig.4.4 Measured Roll Motion of the Box-shaped Model



(d.1) Time series

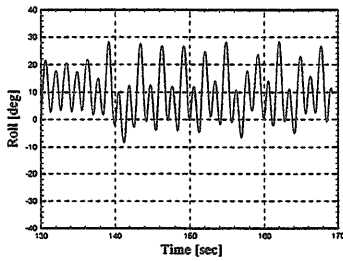


(d.2) Power spectrum

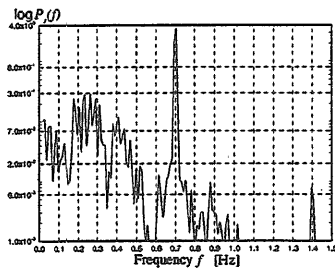


(d.3) Reconstructed attractor

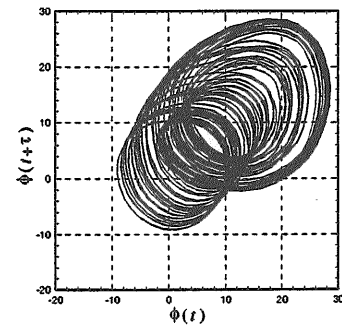
(d)  $H=15.1\text{cm}$  ( $P^2$ )



(e.1) Time series

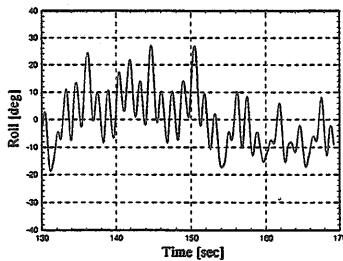


(e.2) Power spectrum

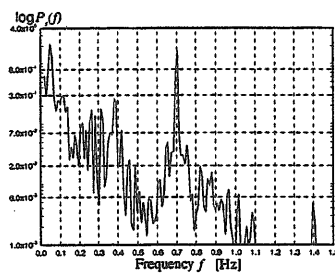


(e.3) Reconstructed attractor

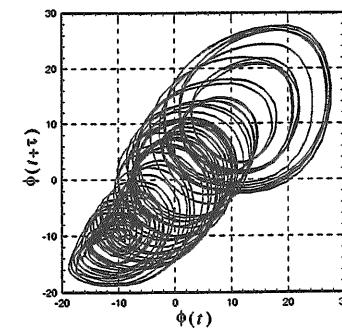
(e)  $H=18.2\text{cm}$  ( $C_1$ )



(f.1) Time series



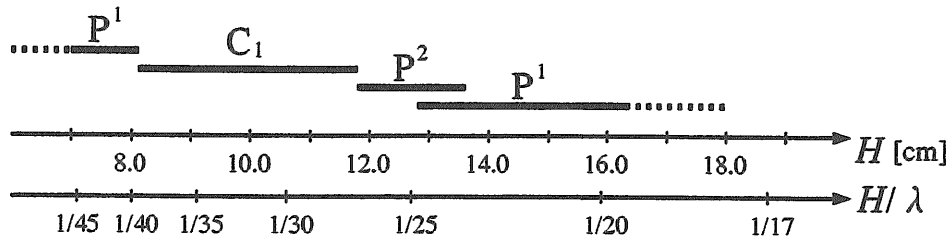
(f.2) Power spectrum



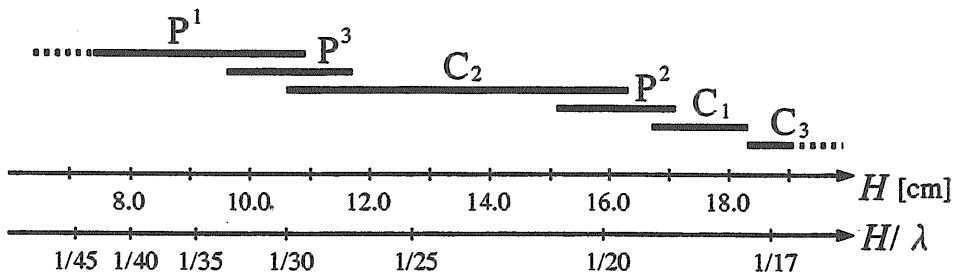
(f.3) Reconstructed attractor

(f)  $H=18.6\text{cm}$  ( $C_3$ )

Fig.4.4 Continued



(a)  $w=3\text{kg}$



(b)  $w=5\text{kg}$

Fig.4.5 Variation of Roll Motion of the Box-shaped Model with Wave Height

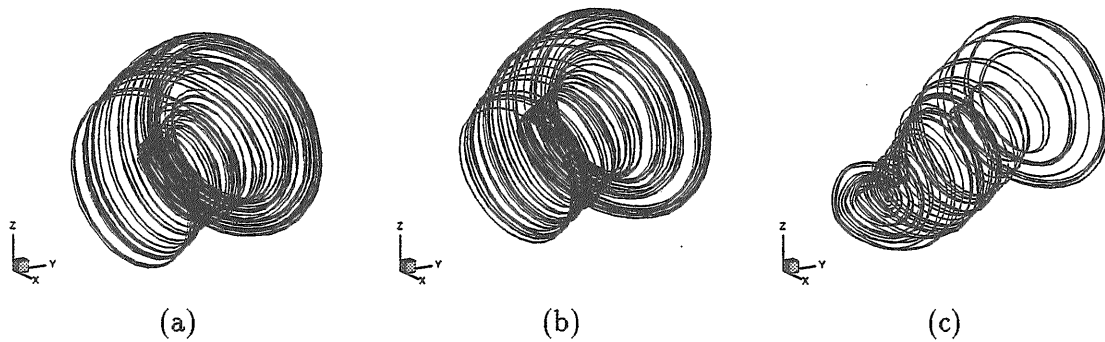


Fig.4.6 Reconstructed Attractors of Chaotic Motion

Table 4.1 Liapunov Exponents  $\mu_i$

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$
$w=3\text{kg}, H=8.9\text{cm}$	$0.203 \pm 0.009$	$-0.006 \pm 0.012$	$-0.831 \pm 0.018$	$-2.470 \pm 0.059$	$-12.023 \pm 0.255$
$w=5\text{kg}, H=18.2\text{cm}$	$0.224 \pm 0.012$	$-0.053 \pm 0.016$	$-0.764 \pm 0.023$	$-1.651 \pm 0.025$	$-3.191 \pm 0.037$
$w=5\text{kg}, H=18.6\text{cm}$	$0.330 \pm 0.018$	$0.013 \pm 0.006$	$-0.767 \pm 0.012$	$-1.159 \pm 0.023$	$-2.782 \pm 0.070$

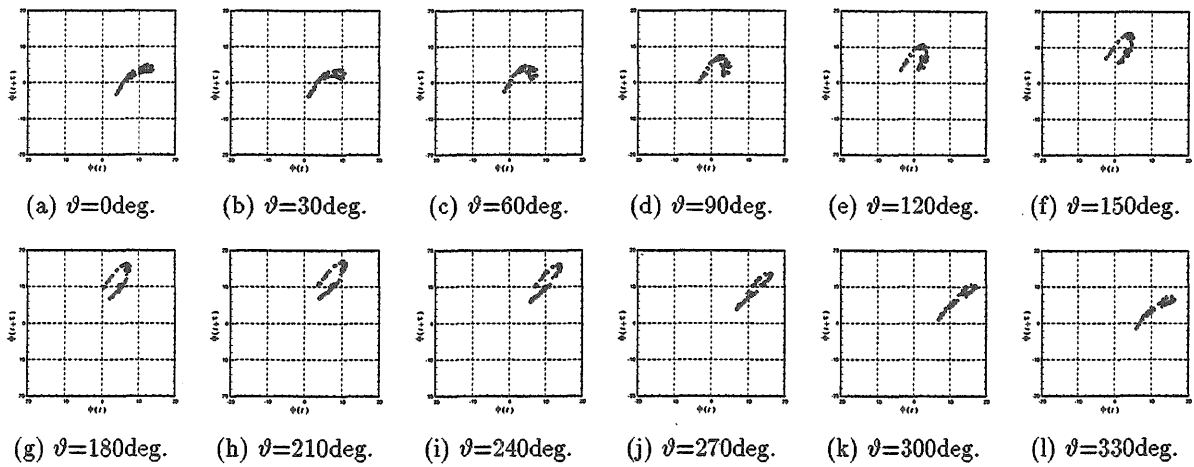


Fig.4.7 Stroboscopic Plots

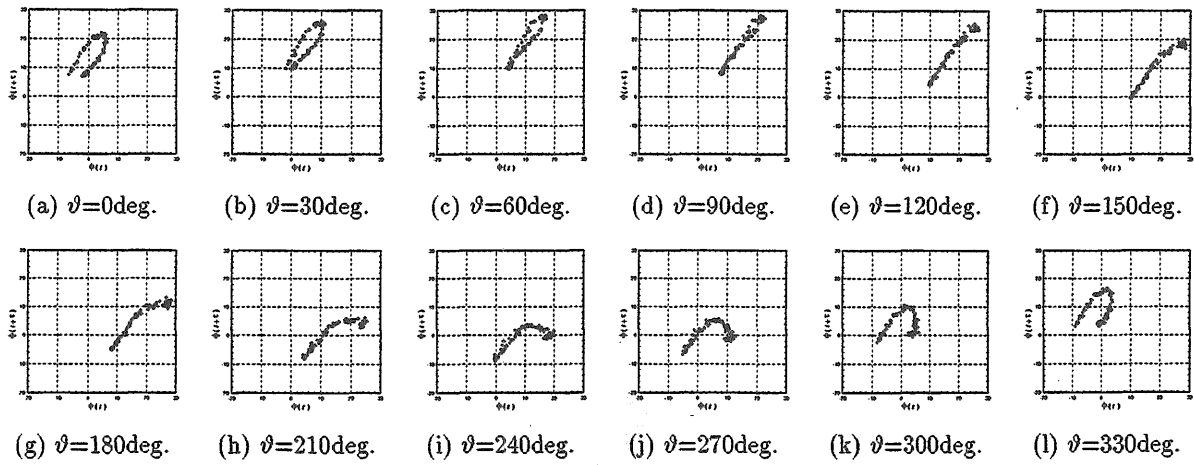


Fig.4.8 Stroboscopic Plots

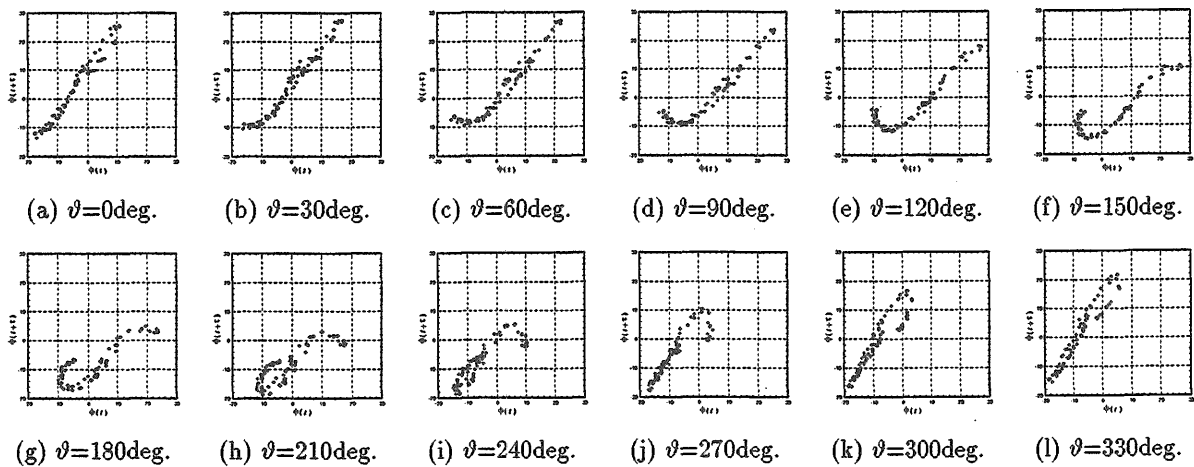


Fig.4.9 Stroboscopic Plots

である。流場が波の進行方向の鉛直断面内で二次元的になるように、模型を二枚の板 (0.6m × 1.5m) で挟まれた領域に配置した (Fig.4.2(a))。この実験装置では、模型は横揺れ(roll), 左右揺 (sway), 上下揺 (heave) 運動のみが可能であり、それぞれポテンシオメーターを利用して計測した。また、装置の計測範囲の制約上、模型が波下側へ漂流しないようにするために弱いバネ (バネ定数  $k=3.92\text{N/m}$ ) で左右揺 (sway) 方向の運動を拘束している (Fig.4.2(b)を参照)。

4.3.2 実験結果

波は規則波を用いた。波周波数を  $f=0.7\text{Hz}$  に固定し、波高の増減に伴う横揺れの変化を検討した。計測時間は約4分で、定常状態のみを考察する。

Fig.4.3 と Fig.4.4 は、模型内の水の量がそれぞれ  $w=3\text{kg}$  と  $w=5\text{kg}$  の場合の、代表的な横揺れ角の時系列、パワースペクトル、および二次元の擬状態空間 ( $\phi(t)$ ,  $\phi(t+\tau)$ ) に再構成されたアトラクターを表す。Fig.4.5 は、波高の変化にともなう横揺れのパターンの変化をまとめた図である。図中、横軸は波高  $H$  と波傾斜  $H/\lambda$  ( $\lambda$ : 波長) で、 $P^1$ : 横揺れの周期が波周期と同じ、 $P^2$ : 横揺れの周期に波周期の 2, 4, ... 倍の成分が現れる、 $P^3$ : 横揺れの周期に波周期の 3 倍の成分が現れる、 $C_1, C_2, C_3$ : 横揺れがカオス的である (タイプ 1, 2, 3)、ことを表す。領域が重なっているところでは、同じ波の条件でも複数の揺れ方が存在している。

4.4 カオス的な横揺れ運動について

複雑な揺れの実験結果をさらに詳しく調べた。ここでは、(a)  $w=3\text{kg}$ ,  $H=8.9\text{cm}$ 、(b)  $w=5\text{kg}$ ,  $H=18.2\text{cm}$ 、(c)  $w=5\text{kg}$ ,  $H=18.6\text{cm}$ 、の三つのデータを解析した結果をまとめる。Fig.4.6 は三次元の擬状態空間に再構成された

アトラクター、Table 4.1 はリアプノフ指数<sup>39)</sup>  $\mu_i$  ( $i=1 \sim n$ ,  $n=5$ )、Fig.4.7~Fig.4.9 はストロボ・プロット ( $\phi(t)$ ,  $\phi(t+\tau)$ ) at  $\theta=2\pi \times j/12$  ( $j=0 \sim 11$ ,  $\theta$ : 波の位相)、をそれぞれ表す。これらより、(1)リアプノフ指数の最大値は正である、(2) アトラクターが位相とともに引き伸ばされ、次に折り畳まれ、最終的に縮んで元の形にもどる過程が見られる、というカオスの特徴づける性質がはっきり表れていることがわかる。

4.5 波浪中で浸水した船の横揺れの数学モデル

Fig.4.10 のような箱船の横揺れと船内の水の連成運動に注目したモデル方程式を考える。そのために次のような5つの仮定をした。(1)横揺れ(roll)と中の水の連成運動が支配的で、左右揺(sway)と上下揺(heave)との干渉は無視できる。(2)中の水の表面は平ら (傾き  $\chi$ ) である。(3)中の水の運動はその重心とともに動く質量  $w$  の質点の運動に置き換えられる。(4)横揺れの強制モーメントは波と同じ周期で正弦的に変化する。(5)横揺れと中の水の減衰力はそれぞれ  $\dot{\phi}$  と  $\dot{\chi}$  ( $\dot{\phantom{x}} = d/dt$ ) に関して線形である。

座標系、船の代表寸法等は Fig.4.10 のように定義する。そのとき、船の横揺れと中の水、それぞれの系の運動エネルギー  $K$ 、ポテンシャル・エネルギー  $P$ 、エネルギーの散逸率  $D$  は次式で与えられる。

$$K_s = \frac{1}{2}(I + \delta I)\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2}M_K \dot{\phi}^2$$

$$K_w = \frac{1}{2}m(\dot{x}_{Gw}^2 + \dot{y}_{Gw}^2)$$

$$P_s = -\rho V g y_{Bs} = -(M + m)g y_{Bs}, \quad P_w = m g y_{Gw}$$

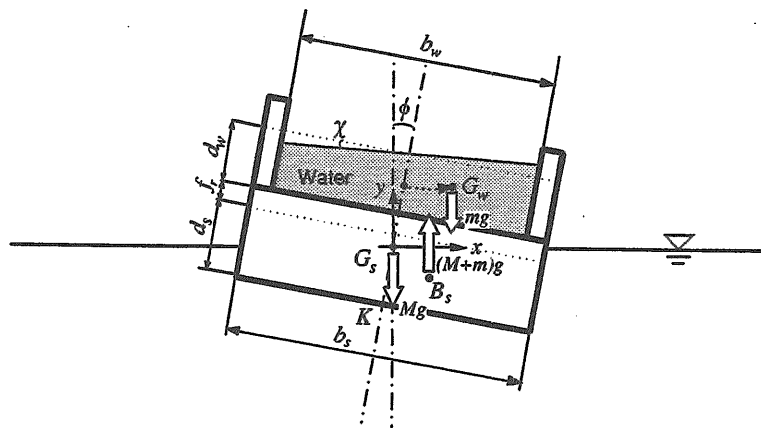


Fig.4.10 Illustration of Two-dimensional Motion of a Flooded Box-shaped Ship in Regular Waves

$$P_e(\phi, t) = -\phi\{A_0 + A_1 \sin(\Omega t + \Psi)\}$$

$$D = \frac{1}{2}v_s \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}v_w \dot{\chi}^2 \quad (4.1)$$

ここで、下付きの  $s, w, e$  は船、船内の水、強制モーメントを、 $I$  と  $\delta I$  は横揺れの回転中心まわりの慣性モーメントと付加慣性モーメントを、 $M$  と  $m$  は船と船内の水の質量を、 $V$  は船の水面下の体積を、 $\tilde{x}_{Gw} = (x_{Gw}, y_{Gw})$  は船内の水の重心位置を、 $\tilde{x}_{Bs} = (x_{Bs}, y_{Bs})$  は船の浮心（水面下の体積中心）の位置を、 $A_0 + A_1 \sin(\Omega t + \Psi)$  は横揺れの強制モーメントを、 $\Omega$  は波の角周波数を、 $\nu$  は減衰係数を、それぞれ表す。モデル方程式はこれらを以下のようなラグランジュの運動方程式に代入することにより得られる。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\phi}} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\chi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \chi} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\chi}} = 0 \quad (4.2)$$

ここで、 $L = K - P$  はラグランジアンで、 $K = K_s + K_w$ 、 $P = P_s + P_w + P_e$  である。したがって、 $\tilde{x}_{Gw}$  と  $\tilde{x}_{Bs}$  がわかればモデル方程式が決定する。それらは上記の仮定のもとで次式のように表される。

$$\tilde{x}_{Bs} = \begin{pmatrix} x_B(\phi) \\ y_B(\phi) \end{pmatrix}$$

$$\tilde{x}_{Gw} = \begin{pmatrix} x_G(\phi, \chi) \\ y_G(\phi, \chi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_G(\chi) \\ \eta_G(\chi) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、

$$y_B = \begin{cases} -\frac{1}{2} \overline{B_s M_s} \tan \phi \sin \phi + \left( \frac{d_s}{2} - \overline{KG_s} \right) \cos \phi & \text{for } |\phi| < \phi^* \\ -\text{sgn}(\phi) \frac{b_s}{2} \sin \phi + \frac{2}{3} \sqrt{b_s d_s} \sqrt{\sin 2|\phi|} & \text{for } |\phi| > \phi^* \\ -\overline{KG_s} \cos \phi & \text{for } |\phi| > \phi^* \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\xi_G = \begin{cases} \overline{G_w M_w} \tan \chi & \text{for } |\chi| < \chi^* \\ \text{sgn}(\chi) \frac{b_w}{2} - \text{sgn}(\chi) \frac{2}{3} \sqrt{b_w d_w} \frac{\cos \chi}{\sqrt{\sin 2|\chi|}} & \text{for } |\chi| > \chi^* \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\eta_G = \begin{cases} \frac{1}{2} \overline{G_w M_w} \tan^2 \chi + d_s + f_r + \frac{d_w}{2} - \overline{KG_s} & \text{for } |\chi| < \chi^* \\ \text{sgn}(\chi) \frac{2}{3} \sqrt{b_w d_w} \frac{\sin \chi}{\sqrt{\sin 2|\chi|}} + d_s + f_r - \overline{KG_s} & \text{for } |\chi| > \chi^* \end{cases} \quad (4.6)$$

ここで、 $(\xi, \eta)$  は船体に固定した座標（原点は船の中心）、 $M_s$  は船の横揺れの回転中心（メタセンター）、 $M_w$  は中の水の重心の回転中心を表し、 $B_s M_s = b_s^2 / (12d_s)$ 、 $B_w M_w = b_w^2 / (12d_w)$ 、 $\tan \phi^* = 2d_s / b_s$ 、 $\tan \chi^* = 2d_w / b_w$  である（Fig.4.10 を参照）。箱船の水面下と中の水、それぞれの断面形状が  $|\phi| < \phi^*$ 、 $|\chi| < \chi^*$  に対しては台形、 $|\phi| > \phi^*$ 、 $|\chi| > \chi^*$  に対しては三角形であるので、それに応じて場合分けしている。これを Fig.4.11 に示す。

(4.3)式を(4.1)式に代入し、さらに(4.2)式に代入すると、船の横揺れと船内水の連成運動に対する数学モデルが得られる。船内水の運動エネルギー  $K_w$  は(4.3)、(4.4)式より次のように表すことができる。

$$K_w = \frac{1}{2} m (\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2)$$

$$= \frac{1}{2} m (Q_1 \dot{\phi}^2 + 2Q_2 \dot{\phi} \dot{\chi} + Q_3 \dot{\chi}^2) \quad (4.7)$$

ここで、

$$Q_1(\chi) = \xi_G^2 + \eta_G^2$$

$$Q_2(\chi) = \xi_G \eta_G - \xi_G \dot{\eta}_G$$

$$Q_3(\chi) = \xi_G^2 + \eta_G^2 \quad (4.8)$$

である。ここで、上付きのプライムは  $\partial / \partial x$  を表す。このようにまとめると、船の数学モデルは次のように表せる。



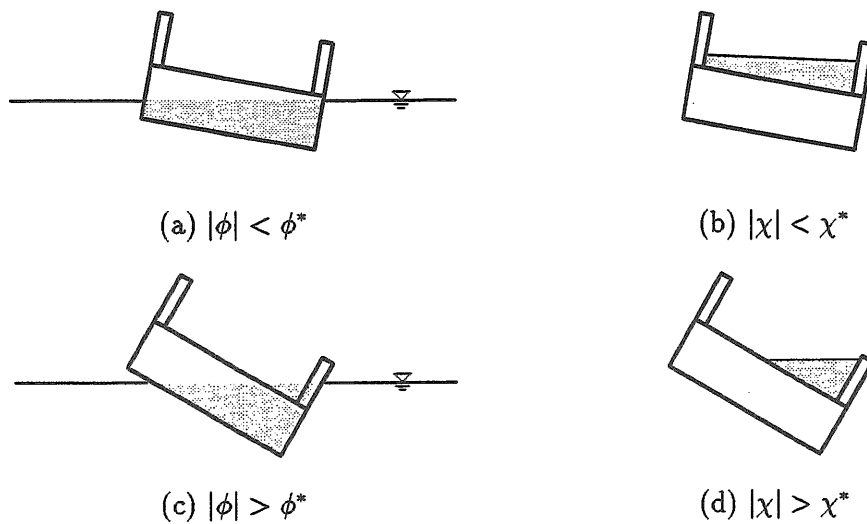


Fig.4.11 Sectional Shapes of the Flooded Ship and the Flooded Water

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} M\kappa^2 + mQ_1, & mQ_2 \\ mQ_2, & mQ_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\chi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_s & 0 \\ 0 & v_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \end{pmatrix} \\
 & + \begin{pmatrix} m(Q_1\dot{\phi}\dot{\chi} + Q_2\dot{\chi}^2) \\ \frac{1}{2}m(-Q_1\dot{\phi}^2 + Q_3\dot{\chi}^2) \end{pmatrix} \\
 & + \begin{pmatrix} -(M+m)g\frac{\partial y_B}{\partial \phi} - mg(\cos\phi \cdot \xi_G + \sin\phi \cdot \eta_G) \\ mg(-\sin\phi \cdot \xi_G + \cos\phi \cdot \eta_G) \end{pmatrix} \\
 & = \begin{pmatrix} A_0 + A_1 \sin(\Omega t + \Psi) \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

左辺第一項は慣性項、左辺第二項は減衰項、左辺第三項は復原項、右辺は強制項である。数値計算や分岐解析には、この式と等価な1階の常微分方程式  $d\bar{x}/dt = \bar{F}(t, \bar{x}, \tilde{\lambda})$  (ここで、 $\bar{x} = (\phi, \dot{\phi}, \chi, \dot{\chi})$ ,  $\tilde{\lambda}$ : パラメーター) の形を利用するのが便利である。

Fig.4.12 と Fig.4.13 は、船の数学モデル(4.9)式を4次の Runge-Kutta 法により数値計算した結果の例である。各パラメーターは三次元模型の実験に近い値にセットしている。いずれも(a), (b), (c) は初期条件だけが異なる。したがって、この計算結果は (a), (b), (c) 三種類の解が共存していることを表している。複数の揺れが共存し、二倍周期成分が卓越した大振幅運動が存在するという結果は、実験結果と良く合っている。また、Fig.4.12(c)の複雑な揺れのリアプノフ指数<sup>39)</sup>の最大値は正であるので、カオス的な解も含まれている。

#### 4.6 船の数学モデルの分岐解析

実験では、波の高さを変えると船の横揺れも複雑に変化した。そのような非線形運動が発生するメカニズムを調べるために、前節で導いた数学モデルを利用してその分岐現象を調べた。

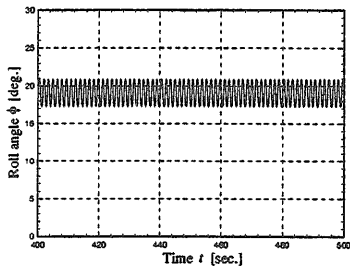
数学モデル(4.9)式の解の安定性や分岐構造を調べるためには、それと等価な4次元の1階常微分方程式  $d\bar{x}/dt = \bar{F}(t, \bar{x})$  を用いるのが便利である。この方程式で、初期値が  $\bar{x}(t_0) = \bar{x}_0$  のときの解を次式で表す。

$$\bar{x} = \varphi(t, \bar{x}_0, \tilde{\lambda}) \tag{4.10}$$

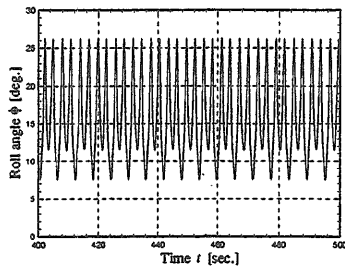
ここで、 $\tilde{\lambda}$  はパラメーターを表す。N-周期解の安定性を考えるために、次のような Poincare 写像を考える。

$$T: \bar{x}_0 \mapsto T(\bar{x}_0) = \varphi\left(t = t_0 + \frac{2\pi}{\Omega}, \bar{x}_0, \tilde{\lambda}\right) \tag{4.11}$$

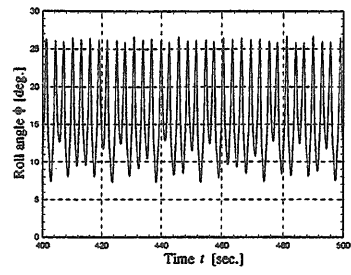
ここで、 $\Omega$  は波の角周波数である。N-周期解は不動点の条件  $\bar{x}_0 = T^N(\bar{x}_0, \tilde{\lambda})$  を満足する。したがって、その安定性は  $\partial T^N / \partial \bar{x}_0$  の固有値  $\mu_i$  ( $i=1 \sim 4$ ) を用いて調べることができる。ここで、この系のベクトル場  $\bar{F}$  は、 $|\phi| = \phi^*$ ,  $|\chi| = \chi^*$  で滑らかでなく、ヤコビ行列  $\partial \bar{F} / \partial \bar{x}$  はそこで不連続になることに注意しなければならない。このような系の固有システム解析法を説明するために、解  $\bar{x} = \varphi(t, \bar{x}_0, \lambda)$  は、 $|\phi| = \phi^*$  あるいは  $|\chi| = \chi^*$  を時間  $t = t_K$  ( $K=1, 2, \dots, M-1$ ,  $t_0 < t_K = t_0 + N \cdot 2\pi / \Omega$ ) で通過するとする。そのとき、 $\partial T^N / \partial \bar{x}_0$  は次のように表すことができる。



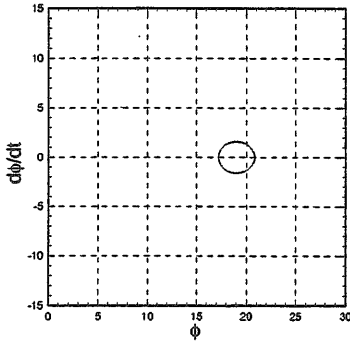
(a.1) Time history of  $\phi$



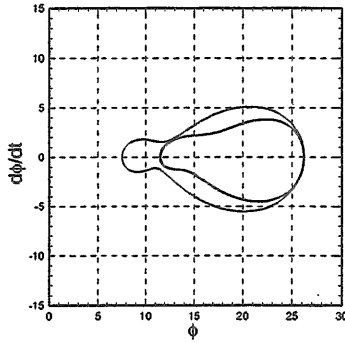
(b.1) Time history of  $\phi$



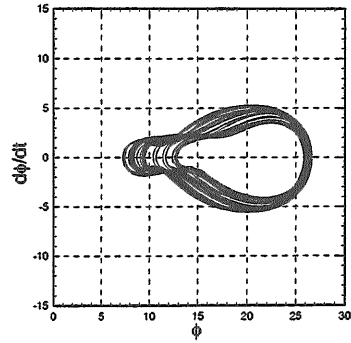
(c.1) Time history of  $\phi$



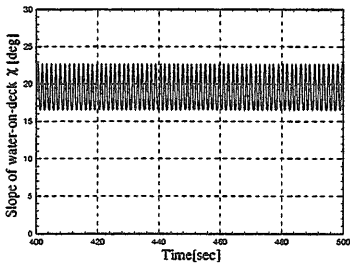
(a.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



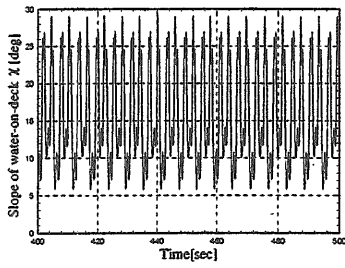
(b.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



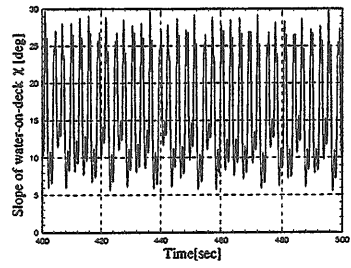
(c.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



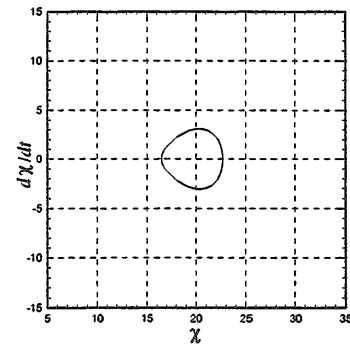
(a.3) Time history of  $\chi$



(b.3) Time history of  $\chi$

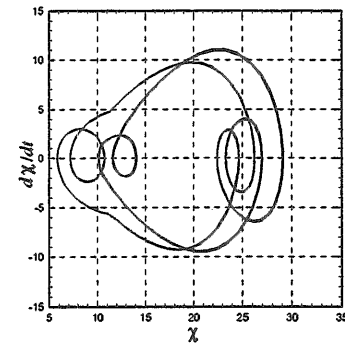


(c.3) Time history of  $\chi$



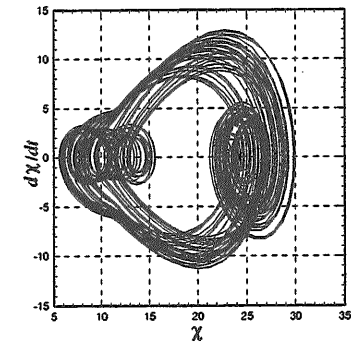
(a.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

(a)  $\phi(0)=\chi(0)=27.0$



(b.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

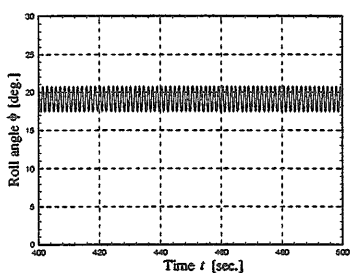
(b)  $\phi(0)=\chi(0)=28.1$



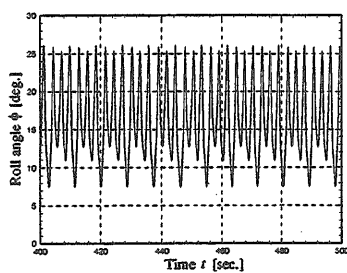
(c.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

(c)  $\phi(0)=\chi(0)=28.9$

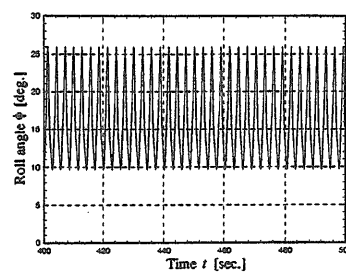
Fig.4.12 Computed Results of Model Equations



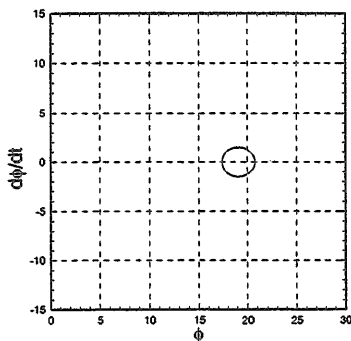
(a.1) Time history of  $\phi$



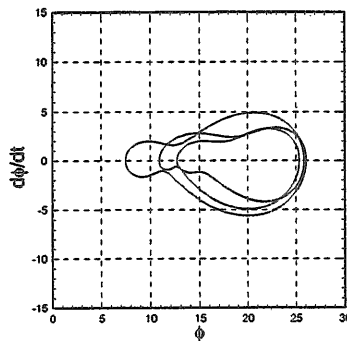
(b.1) Time history of  $\phi$



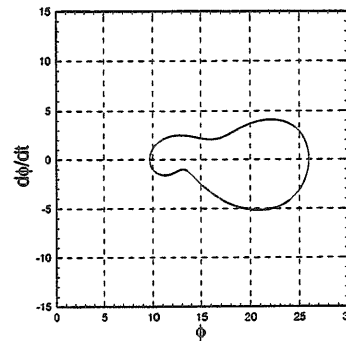
(c.1) Time history of  $\phi$



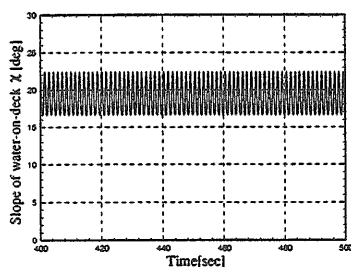
(a.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



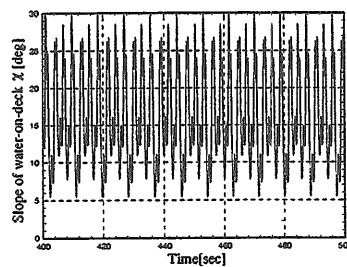
(b.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



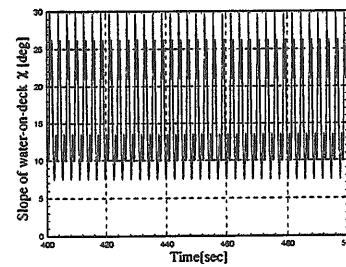
(c.2) Phase portrait ( $\phi, d\phi/dt$ )



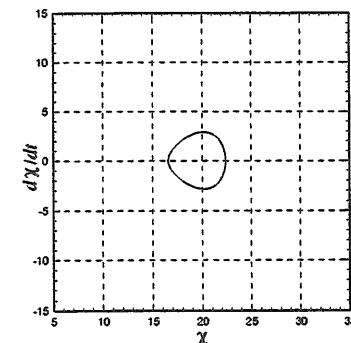
(a.3) Time history of  $\chi$



(b.3) Time history of  $\chi$

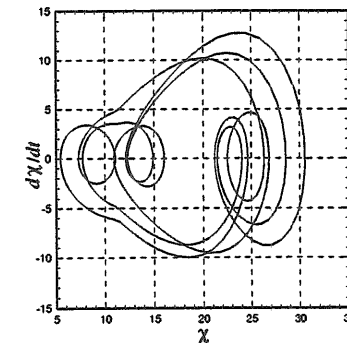


(c.3) Time history of  $\chi$



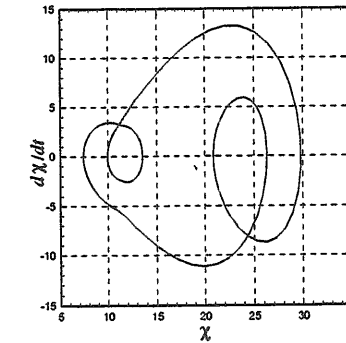
(a.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

(a)  $\phi(0)=\chi(0)=24.0$



(b.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

(b)  $\phi(0)=\chi(0)=28.8$



(c.4) Phase portrait ( $\chi, d\chi/dt$ )

(c)  $\phi(0)=\chi(0)=28.9$

Fig.4.13 Computed Results of Model Equations

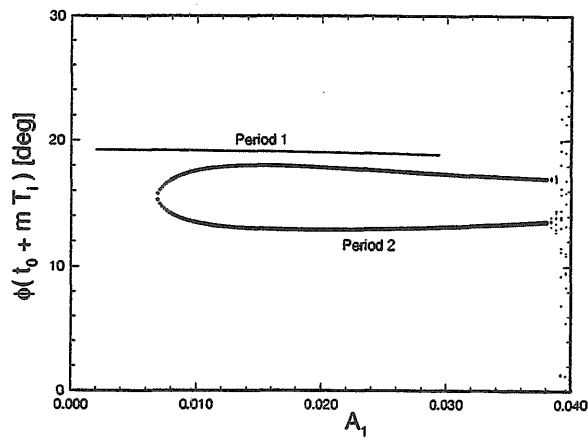
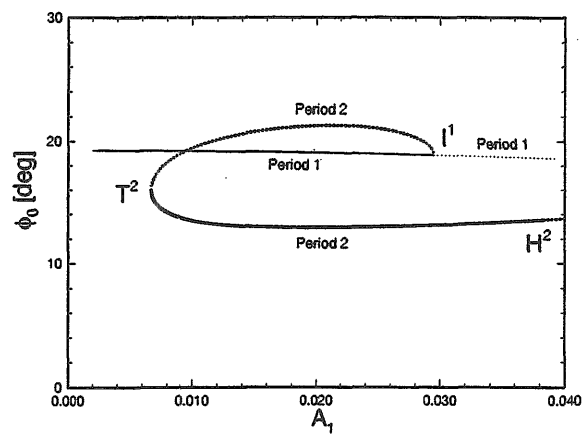
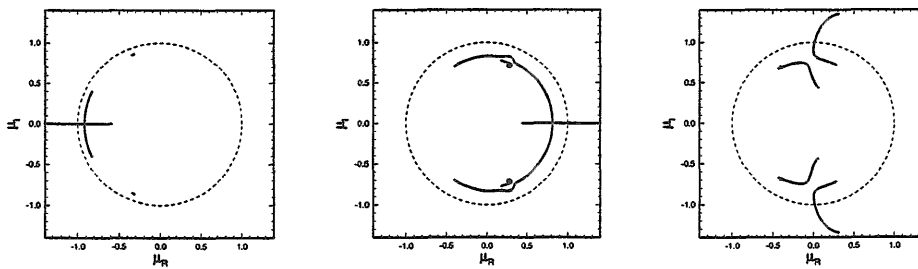


Fig.4.14 Variation of Strobbed Values of  $\phi$  with  $A_1$  ( $T_i=6.98, m=1,2,\dots,30$ )



(a) Variation of the fixed point  $x_0 = T^N(x_0, \lambda)$  with  $A_1$   
(solid line: stable ( $|\mu|_{max} < 1$ ), dotted line: unstable ( $|\mu|_{max} > 1$ ))



(b.1) Period 1 near  $I^1$       (b.2) Period 2 near  $T^2$       (b.3) Period 2 near  $H^2$

(b) Variation of eigenvalues  $\mu_i$  ( $i=1\sim 4$ ) with  $A_1$  in  $(\mu_R, \mu_I)$   
( $\mu_R$  and  $\mu_I$  denote the real and the imaginary parts of  $\mu$ , respectively.)

Fig.4.15 Bifurcation of the  $N$ -periodic Solutions with  $A_1$  ( $N=1$  and  $2$ )

$$\frac{\partial T^N}{\partial \tilde{x}_0} = \frac{\partial T_{M-1}}{\partial \tilde{x}_{M-1}} \cdot \frac{\partial T_{M-2}}{\partial \tilde{x}_{M-2}} \cdots \frac{\partial T_0}{\partial \tilde{x}_0} \quad (4.12)$$

ここで、 $T_i$  ( $i = 0, 2, \dots, M-1$ ) は  $t = t_i$  から  $t = t_{i+1}$  への次のような写像を表す。

$$T_i: \tilde{x}_i \mapsto \tilde{x}_{i+1} = \varphi_i(t_{i+1}(\tilde{x}_i, \tilde{\lambda}), \tilde{x}_i, \tilde{\lambda}) \quad \text{for } i = 0, 2, \dots, M-1 \quad (4.13)$$

ここで、 $t_m(N, \Omega)$  は  $\tilde{x}_{M-1}$  に依らない。滑らかでない点は次式で表される。

$$G(\tilde{x}) = (|\phi| - \phi^*)(|\chi| - \chi^*) = 0 \quad (4.14)$$

そのとき、 $\partial T_k / \partial \tilde{x}_k$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_k}{\partial \tilde{x}_k} &= \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_k} \varphi_k(t_{k+1}(\tilde{x}_k, \tilde{\lambda}), \tilde{x}_k, \tilde{\lambda}) \\ &= \left( I - \frac{1}{\frac{\partial G}{\partial \tilde{x}}} \tilde{F} \frac{\partial G}{\partial \tilde{x}} \right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

ここで、 $I$  は  $4 \times 4$  の単位行列である。

分岐解析の一例を以下に示す。まず、Fig.4.13 の(a) 1 周期解 (Period 1) と(b) 2 周期解 (Period 2) が強制力の振幅  $A_1$  を変えるとどのように変化するかを調べた。Fig.4.14 はその結果を表し、縦軸は横揺れ角  $\phi$  の波の 1 周期おきの値、すなわちストロボプロット  $\phi(t_0 + m \cdot 2\pi/\Omega)$  を表す。この図より、 $0.0067 < A_1 < 0.0294$  で二つの周期解が共存していることが分かる。

次に、不動点の条件とニュートン法を用いて、Fig.4.14 の 1 周期解と 2 周期解を追跡し、その固有システムを調べて分岐点を求め、その位相的分類を行った<sup>40)</sup>。Fig.4.15 はその結果を表す。周期解はその固有値の最大値が 1 となるパラメータ値で分岐する。Fig.4.15(a) は実線と点線が  $|\mu|_{\max} < 1$  と  $|\mu|_{\max} > 1$ 、すなわち安定解と不安定解を表し、(b) は分岐点付近の固有値の変化、すなわち根軌跡を表す。これらより、1 周期解の周期倍分岐が  $I^1$  ( $A_1=0.0294$ ) で、2 周期解の接線分岐が  $T^2$  ( $A_1=0.0067$ ) で、2 周期解のホップ分岐が  $H^2$  ( $A_1=0.0383$ ) で起きていることがわかる。 $H^2$  では 2 周期解が  $A_1$  の増加とともに準周期解に変わっている。

#### 4.7 第4章のまとめ

浸水した船の横波中の船体運動を、模型実験と数学モデルの解析により調べた。その結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 船内に滞留水があると、かなり大きな振幅の非線形横揺れが発生する場合がある。
- (2) この非線形運動では、船体の横揺れと船内の水の連成運動が支配的である。
- (3) 波高や浸水量が変わると、横揺れのパターンはかなり大きく変化し、かつ複雑である。
- (4) カオス的な複雑な横揺れが見られる場合がある。リアプノフ指数とストロボ・プロットによりカオスの特徴が明瞭に示された。
- (5) 横揺れと船内の水の連成運動をモデル化した方程式を考えた。このモデル方程式の解は、実際の現象と定性的には良く合っている。
- (6) モデル方程式の分岐構造を調べることにより、複雑な現象が発生するメカニズムが明らかになった。

#### 5 まとめ

本報告は、車両の搭載を容易にするための広い区画を有する RO-RO 客船が波浪中で破口を生じた場合の安全性について、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)の内容をとりまとめたものである。

このような場合には、破口からの海水の流入・流出、およびそれらのアンバランスから生じる船内滞留水、さらには滞留水と船体運動との連成運動が生じるため、それらが相互に関連する極めて複雑な現象となる。本研究では、まず各種パラメータの影響評価を行うとともに、この問題の本質となる量を見極めることに勤め、船内滞留水と外水面の高さの差が平均的には一定の範囲内にあることや、この内外水面差が転覆にとって極めて重要であることを定量的に明らかにした。次に、IMO における国際的な損傷時復原性基準改正の動きに適切に対応するため、我国周辺の海象および我国の RO-RO 客船の船型を念頭に置きながら検討を行い、提案されている英国案の適用限界等を論じた。最後に、船内滞留水と横揺れとの連成運動について詳しく検討し、非線形力学系理論の観点からカオス的な複雑な横揺れが現れることを述べた。

本研究によって得られた知見の一部は IMO に報告され<sup>41)</sup>、IMO 専門家パネルの審議(著者の一人が参加)および SOLAS 条約の改正作業に役立つとともに、その後も引き続いた IMO での損傷時復原性基準の検討に当

たつての我国の資料となった。また、発表論文リストに示すように多くの論文発表が行われ、学問的な貢献も大きかったものと考えられる。

しかしながら、たとえば滞留水面高さが外水面よりも平均的に高くなることの理論的かつ定量的な説明など解明すべき点も残っており、様々な船型・海象にも適用可能な損傷時復原性基準を定めるためには、さらに研究を続けることが必要と考えられる。

最後に、本研究の一部は社団法人日本造船研究協会第71基準研究部会との共同研究として行われたことを付記し、熱心な討論を頂いた部会長の藤野正隆東京大学教授、同損傷時復原性ワーキンググループ主査池田良穂大阪府立大学教授をはじめとする関係各位に深く謝意を表します。

### 参考文献

- 1) SLF 40/4/5, HARMONIZATION OF DAMAGE STABILITY PROVISION IN IMO INSTRUMENTS, A Proposal on New Damage Stability Framework for RO-RO Vessels based upon Joint North West European R & D Project "Safety of Passenger/RO-RO Vessels" Submitted by Denmark, Finland, Norway, Sweden and the United Kingdom (1996)
- 2) The Joint Accident Investigation Commission of Estonia, Finland and Sweden : Part-Report Covering Technical Issues on the Capsizing on 28 September 1994 in the Baltic Sea of the RO-RO Passenger Vessel MV ESTONIA (1995)
- 3) Dand, I.W. : Hydrodynamic Aspects of the Sinking of the Ferry 'Herald of Free Enterprise', Trans. of R.I.N.A. (1988)
- 4) Browne, R.P. and Bird, H. : Damage Stability Model Experiments, Trans. of R.I.N.A. (1973)
- 5) Schindler, M. and Velschou, S. : RO-RO Passenger Ferry Damage Stability Studies - A Continuation of Model Tests for a Typical Ferry, Symp. on RO-RO Ships' Survivability (1994)
- 6) Dand, I.W. : Factors Affecting the Capsize of Damaged RO-RO Vessels in Waves, Symp. on RO-RO Ships' Survivability (1994)
- 7) Vassalos, D. : Capsizal Resistance Prediction of a Damaged Ship in a Random Sea, Symp. on RO-RO Ships' Survivability (1994)
- 8) 村重淳、石田茂資、渡辺巖、小川剛孝 : Ro-Ro 船車両甲板の浸水と波浪の関係についての模型実験、船研発表会講演集 (1995)
- 9) 二村正、石田茂資、渡辺巖 : 外洋ヨットの転覆現象に及ぼす船型等の影響について、日本造船学会論文集、第 175 号 (1994)
- 10) Vassalos, D., Pawlowski, M. and Turan, O. : Joint North West European Project, Safety of Passenger RO-RO Vessels - Task 5, A Theoretical Investigation on the Capsizal Resistance of Passenger RO-RO Vessels and Proposal of Survival Criteria, University of Strathclyde Marine Technology Centre (1996)
- 11) AGREEMENT CONCERNING SPECIFIC STABILITY REQUIREMENTS FOR RO-RO PASSENGER SHIPS UNDERTAKING REGULAR SCHEDULED INTERNATIONAL VOYAGES BETWEEN OR TO OR FROM DESIGNATED PORTS IN NORTH WEST EUROPE AND THE BALTIC SEA, ANNEX 1 "Significant wave heights", Appendix MODEL TEST METHOD, IMO Circular letter No.1891, 29 (1996)
- 12) 渡辺巖、富田宏、谷澤克治 : 北太平洋の波と風 (1974 ~1988)、船舶技術研究所報告別冊第 14 号 (1992)
- 13) Paulling, J.R. and Rosenberg, R.M. : On Unstable Ship Motions Resulting from Nonlinear Coupling, J. Ship Res., Vol.3 (1959)
- 14) Nayfeh, A.H., Mook, D.T. and Marshall, L.R. : Nonlinear Coupling of Pitch and Roll Modes in Ship Motions, J. Hydronautics, Vol.7 (1973)
- 15) Wright, J.H.G. and Marshfield W.B. : Ship Roll Response and Capsize Behaviour in Beam Seas, Trans. R.I.N.A., (1980)
- 16) Nayfeh, A.H. : On the Undesirable Roll Characteristics of Ships in Regular Seas, J. Ship Research, Vol.32 (1988)
- 17) Francescutto, A., Contento, G. and Penna, R. : Experimental Evidence of Strong Nonlinear Effects in the Rolling Motion of a Destroyer in Beam Sea, In Proc. 5th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Vol.1 (1994).
- 18) Vasta, J., Giddings, A.J., Taplin, A. and Stilwell, J.J. : Roll Stabilization by means of Passive Tanks, Soc. Naval Arch. and Marine Eng., Vol.69 (1961)
- 19) Dillingham, J. : Motion Studies of a Vessel with Water on Deck., Marine Technology, Vol.18 (1981)
- 20) Caglayan, I. and Storch, R.L. : Stability of Fishing Vessels with Water on Deck, J. Ship Res., Vol.26 (1982)
- 21) Verhagen, J.H.G. and van Wijngaarden, L. : Non-linear

- Oscillations of Fluid in a Container, *J. Fluid Mech.*, Vol.22 (1965)
- 22) Chester, W. : Resonant Oscillations of Water Waves, *Proc. Roy. Soc. A.*, Vol.306 (1968)
- 23) Ockendon, J.W. and Ockendon, J.W. : Resonant Surface Waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.59 (1973)
- 24) Miles, J.W. : Nonlinear Surface Waves in Closed Basins, *J. Fluid Mech.*, Vol.75 (1976)
- 25) Miles, J.W. : Nonlinear Faraday Resonance, *J. Fluid Mech.*, Vol.146 (1984)
- 26) Miles, J.W. and Henderson, D. : Parametrically Forced Surface Waves, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.22 (1990)
- 27) Virgin, L.N. : The Nonlinear Rolling Response of a Vessel including Chaotic Motions leading to Capsize in Regular Seas, *Applied Ocean Research*, Vol.9, No.2 (1987)
- 28) 菅信、田口晴邦 : 斜め追い波中の船の転覆について (第2報 転覆現象におけるカオスとフラクタル), *日本造船学会論文集*, Vol.168 (1990)
- 29) Rainey, R.C.T. and Thompson, J.M.T. : The Transient Capsize Diagram--a New Method of Quantifying Stability in Waves, *J. Ship Res.*, Vol.35 (1991)
- 30) Soliman, M.S. and Thompson, J.M.T. : Transient and Steady State Analysis of Capsize Phenomena, *Applied Ocean Research*, Vol.13 (1991)
- 31) Thompson, J.M.T., Rainey, R.C.T. and Soliman, M.S. : Mechanics of Ship Capsize under Direct and Parametric Wave Excitation, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol.338 (1992)
- 32) Falzarno, J.M., Shaw, S.W. and Troesch, A.W. : Application of Global Methods for Analyzing Dynamical Systems to Ship Rolling Motion and Capsizing, *Intl. J. Bifurcation and Chaos*, Vol.2 (1992)
- 33) MacMaster, A.G. and Thompson, J.M.T. : Wave Tank Testing and the Capsizability of Hulls, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, Vol.446 (1994)
- 34) Kan, H. and Taguchi, H. : Ship Capsizing and Chaos, in *Nonlinearity and Chaos in Engineering Dynamics*, (Thompson, J.M.T. and Bishop, S.R. eds), Wiley, Chichester (1994)
- 35) Thompson, J.M.T. and de Souza, J.R. : Suppression of Escape by Resonant Modal Interactions: in *Shell Vibration and Heave-Roll capsizes*, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, Vol.452 (1996)
- 36) Thompson, J.M.T. : Designing against Capsize in Beam Seas: Recent Advances and New Insights, *Appl. Mech. Rev.*, Vol.50 (1997)
- 37) Sauer, T., Yorke, J.A. and Casdagli, M. : *Embedology*, *J. Statistical Physics*, Vol.65 (1991)
- 38) Sano, M. and Sawada, Y. : Measurement of the Lyapunov Spectrum from a Chaotic Time Series, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.55 (1985)
- 39) Shimada, I. and Nagashima, T. : A Numerical Approach to Ergodic Problem of Dissipative Dynamical Systems, *Progress of Theoretical Physics*, Vol.61 (1979)
- 40) Kawakami, H. : Bifurcation of Periodic Responses in Forced Dynamic Nonlinear Circuits: Computation of Bifurcation Values of the System Parameters, *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Vol.CAS-31 (1984)
- 41) IMO RORO/ISWG/1/3/5, Some Results of Model Test, (1995)