

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/λ (λ : 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³⁹⁾ μ_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 $\theta=2\pi \times j/12$ ($j=0 \sim 11$, θ : 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 χ) 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 $\dot{\chi}$ ($\dot{} = d/dt$) 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。

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

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

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

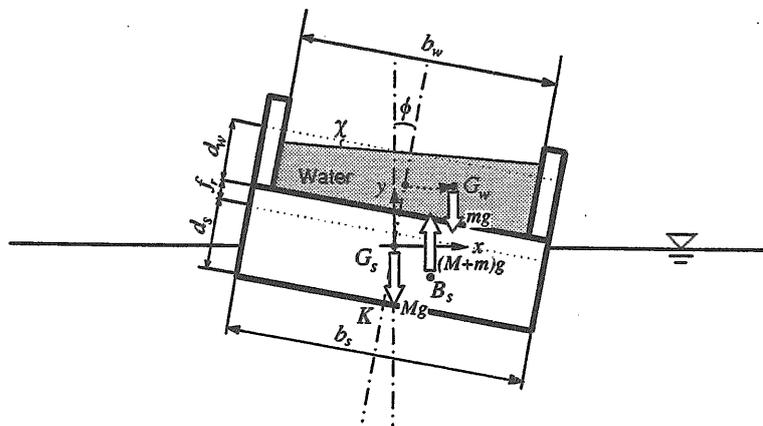


Fig.4.10 Illustration of Two-dimensional Motion of a Flooded Box-shaped Ship in Regular Waves

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

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

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 δI 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、 Ω は波の角周波数を、 ν 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、 (ξ, η) 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。

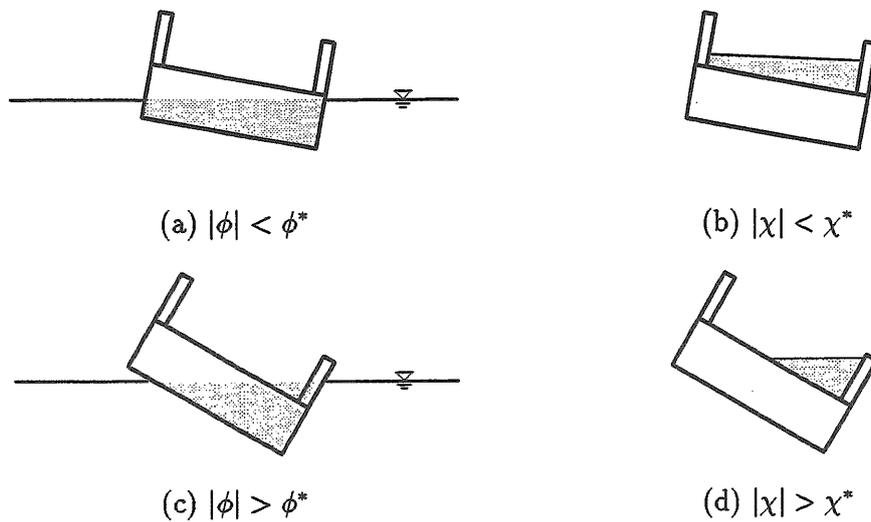


Fig.4.11 Sectional Shapes of the Flooded Ship and the Flooded Water

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

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³⁹⁾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。

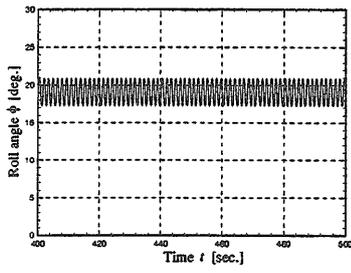
数学モデル(4.9)式の解の安定性や分岐構造を調べるためには、それと等価な4次元の1階常微分方程式 $d\bar{x}/dt = \bar{F}(t, \bar{x})$ を用いるのが便利である。この方程式で、初期値が $\bar{x}(t_0) = \bar{x}_0$ のときの解を次式で表す。

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

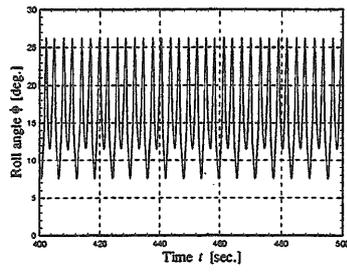
ここで、 $\tilde{\lambda}$ はパラメーターを表す。N-周期解の安定性を考えるために、次のような Poincare 写像を考える。

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

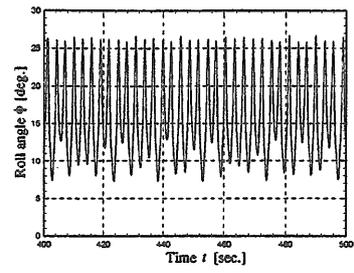
ここで、 Ω は波の角周波数である。N-周期解は不動点の条件 $\bar{x}_0 = T^N(\bar{x}_0, \tilde{\lambda})$ を満足する。したがって、その安定性は $\partial T^N / \partial \bar{x}_0$ の固有値 μ_i ($i=1 \sim 4$) を用いて調べることができる。ここで、この系のベクトル場 \bar{F} は、 $|\phi| = \phi^*$, $|\chi| = \chi^*$ で滑らかでなく、ヤコビ行列 $\partial \bar{F} / \partial \bar{x}$ はそこで不連続になることに注意しなければならない。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。



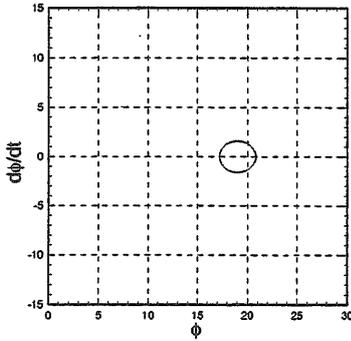
(a.1) Time history of ϕ



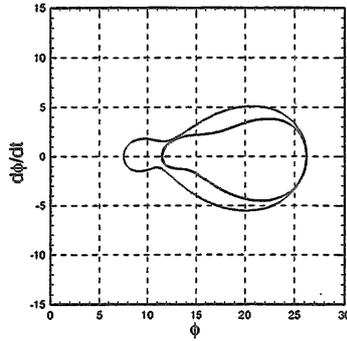
(b.1) Time history of ϕ



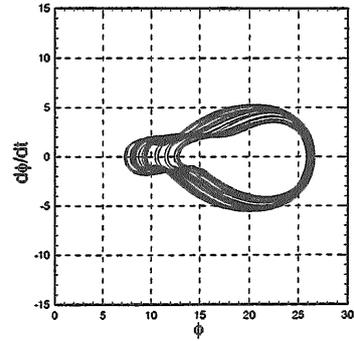
(c.1) Time history of ϕ



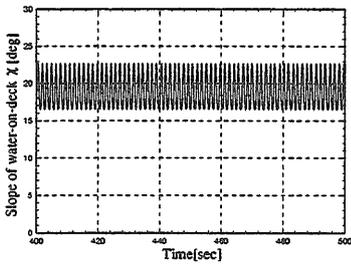
(a.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



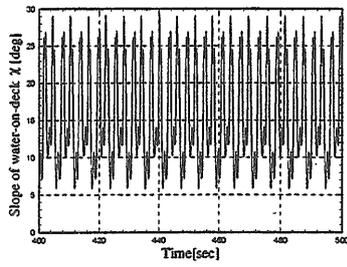
(b.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



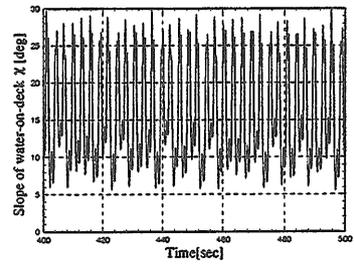
(c.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



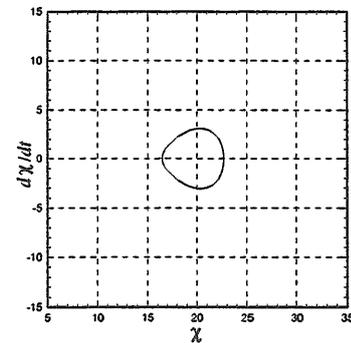
(a.3) Time history of χ



(b.3) Time history of χ

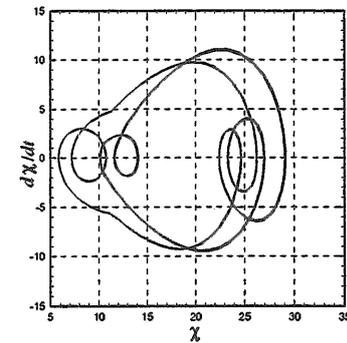


(c.3) Time history of χ



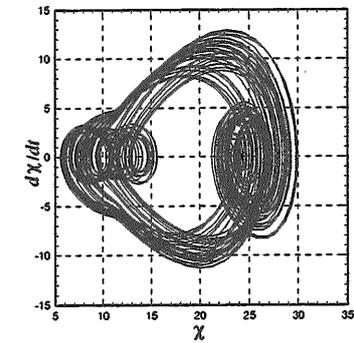
(a.4) Phase portrait ($\chi, d\chi/dt$)

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



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

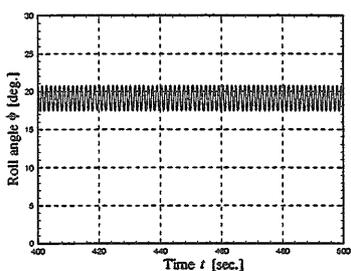
(b) $\phi(0)=\chi(0)=28.1$



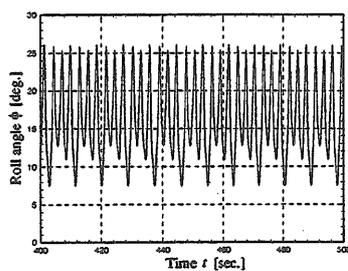
(c.4) Phase portrait ($\chi, d\chi/dt$)

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

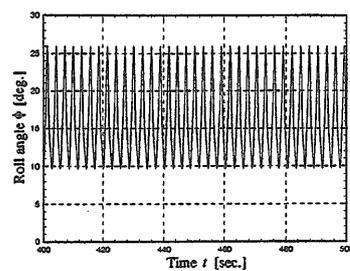
Fig.4.12 Computed Results of Model Equations



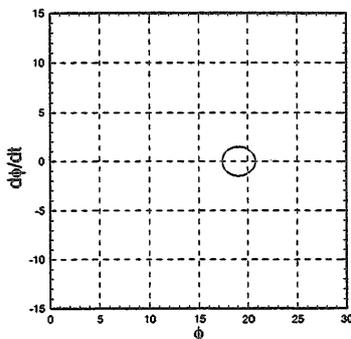
(a.1) Time history of ϕ



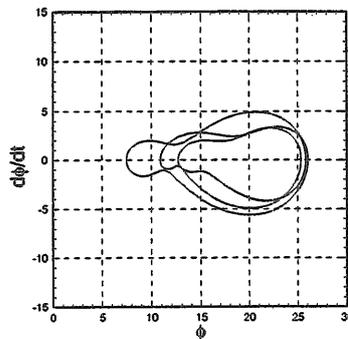
(b.1) Time history of ϕ



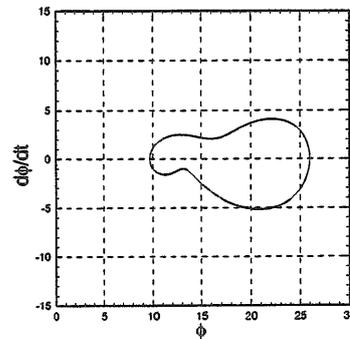
(c.1) Time history of ϕ



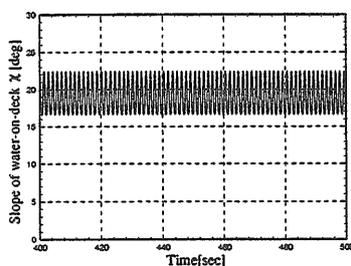
(a.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



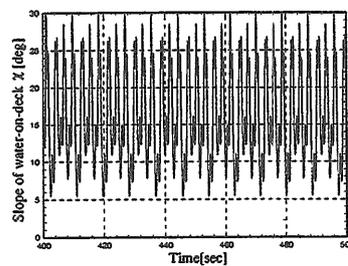
(b.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



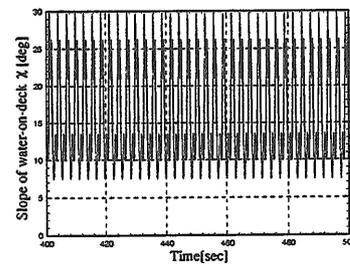
(c.2) Phase portrait ($\phi, d\phi/dt$)



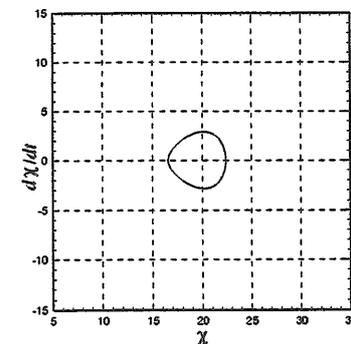
(a.3) Time history of χ



(b.3) Time history of χ

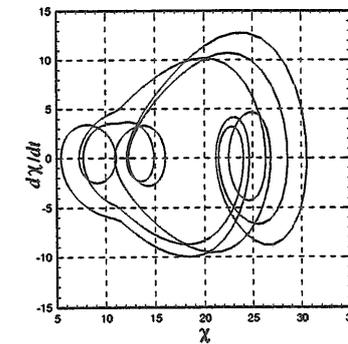


(c.3) Time history of χ



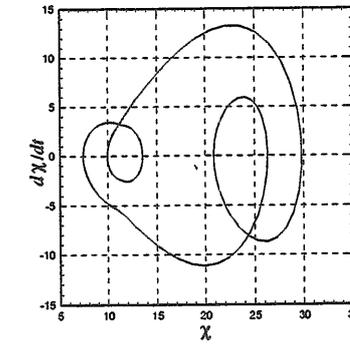
(a.4) Phase portrait ($\chi, d\chi/dt$)

(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

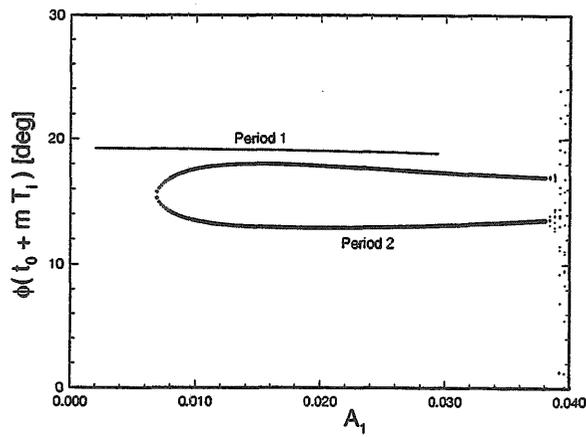
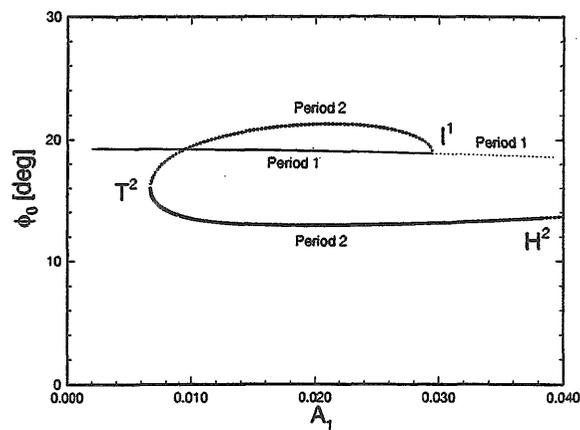
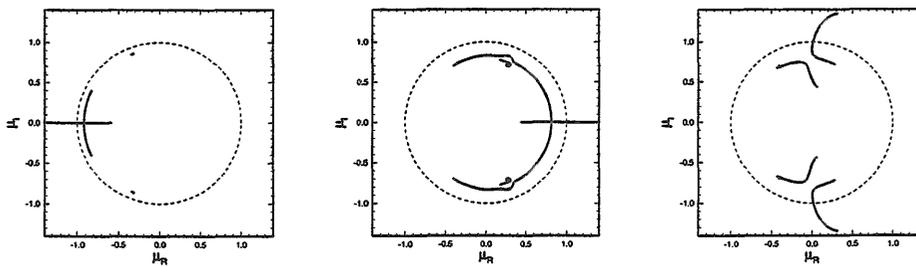


Fig.4.14 Variation of Strobbed Values of ϕ with A_1 ($T_i=6.98, m=1,2,\dots,30$)



(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 μ_i ($i=1\sim 4$) with A_1 in (μ_R, μ_I)
 (μ_R and μ_I denote the real and the imaginary parts of μ , 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。

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

ここで、 I は 4×4 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 ϕ 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⁴⁰⁾。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⁴¹⁾、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 Capsizes 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)