

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

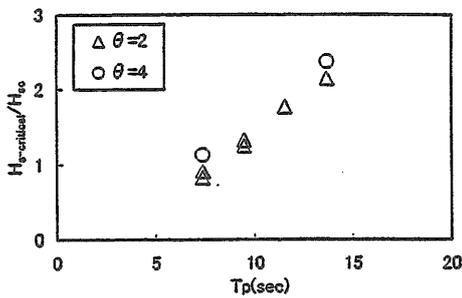


Fig.3.12 Ratio of Critical Significant Wave Height (Designed Deck Height)
 (θ : Initial Heel Angle, T_p : Peak Period of Wave Spectrum)

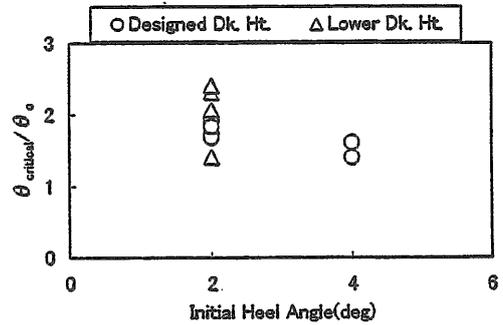


Fig.3.13 Ratio of Critical Heel Angle

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 θ_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¹⁰⁾。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¹²⁾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 カーブ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 カーブ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 $h_{critical}$ と GZ カーブの正の面積との関係を示す。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 カーブ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 カーブ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 カーブの正の面積を検討してみる価値があると思われる。

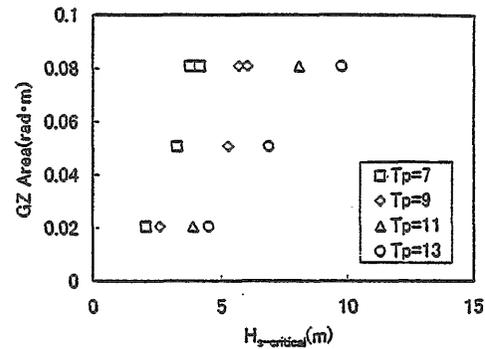


Fig.3.14(a) Critical Significant Wave Height vs Positive Area of GZ curve

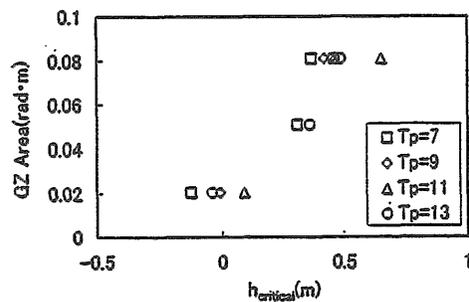


Fig.3.14(b) Critical Height of Water on Car Deck vs Positive Area of GZ curve

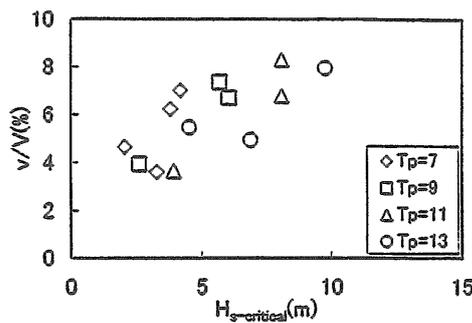


Fig.3.15 Critical Volume of Water on Car Deck vs Critical Significant Wave Height
(v : Volume of Water on Car Deck, V : Volume of Car Deck)

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^{13)~17)}。

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^{18)~20)}。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^{21)~26)}。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^{27)~36)}、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 ϕ 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65secでは、横揺れの両振幅は約5deg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20deg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

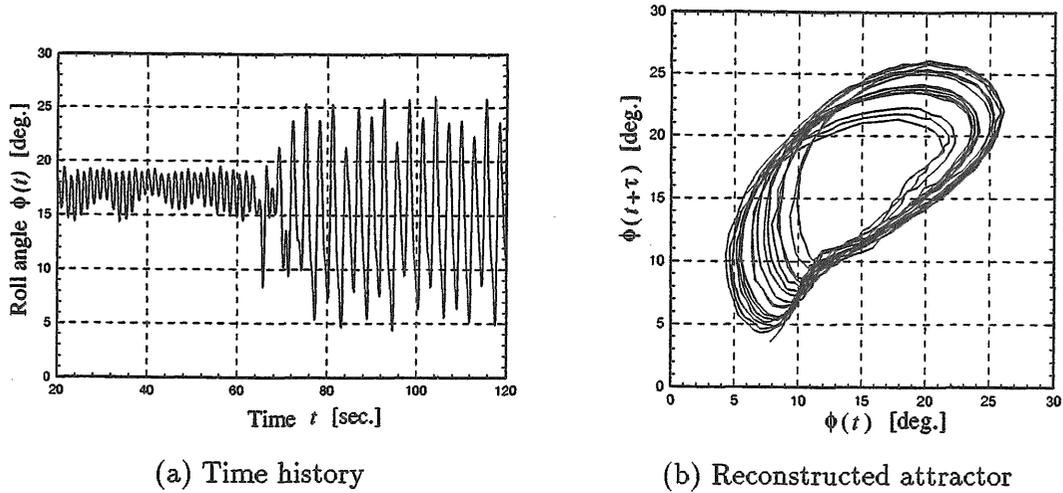


Fig.4.1 Measured Roll Angle $\phi(t)$ of the Ferry Model

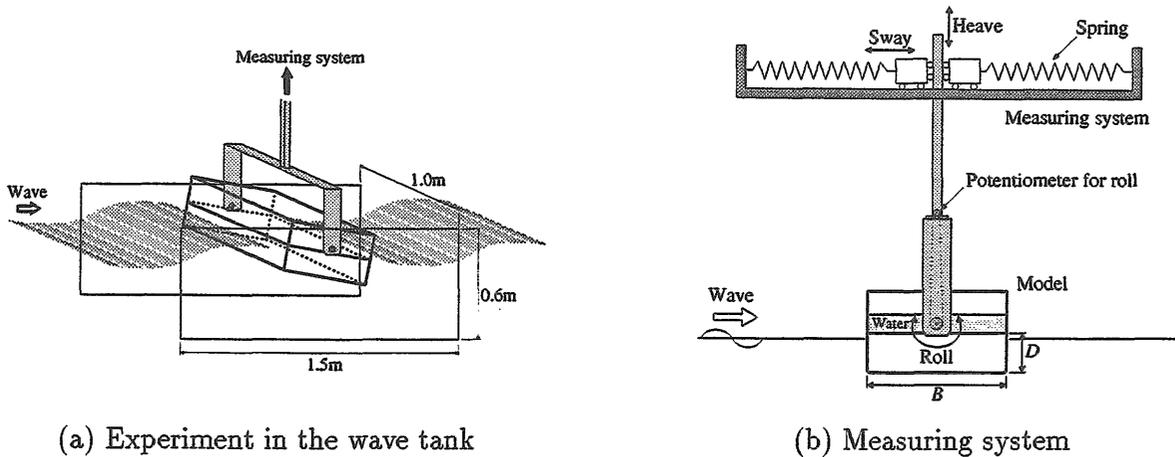


Fig.4.2 Simplified Two-dimensional Motion of a Box-shaped Ship in Beam Sea

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 ($t \approx 65\text{sec}$) 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³⁷⁾。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 $L=0.92\text{m}$, $B=0.45\text{m}$, $D=0.13\text{m}$, 喫水 $d=0.11\text{m}$, 乾舷 $f_t=0.02\text{m}$, 排水量 $W=45.54\text{kg}$, $KG=0.158\text{m}$, $GM=0.050\text{m}$, 横揺れ固有周期 $T_{rr}=1.54\text{sec}$

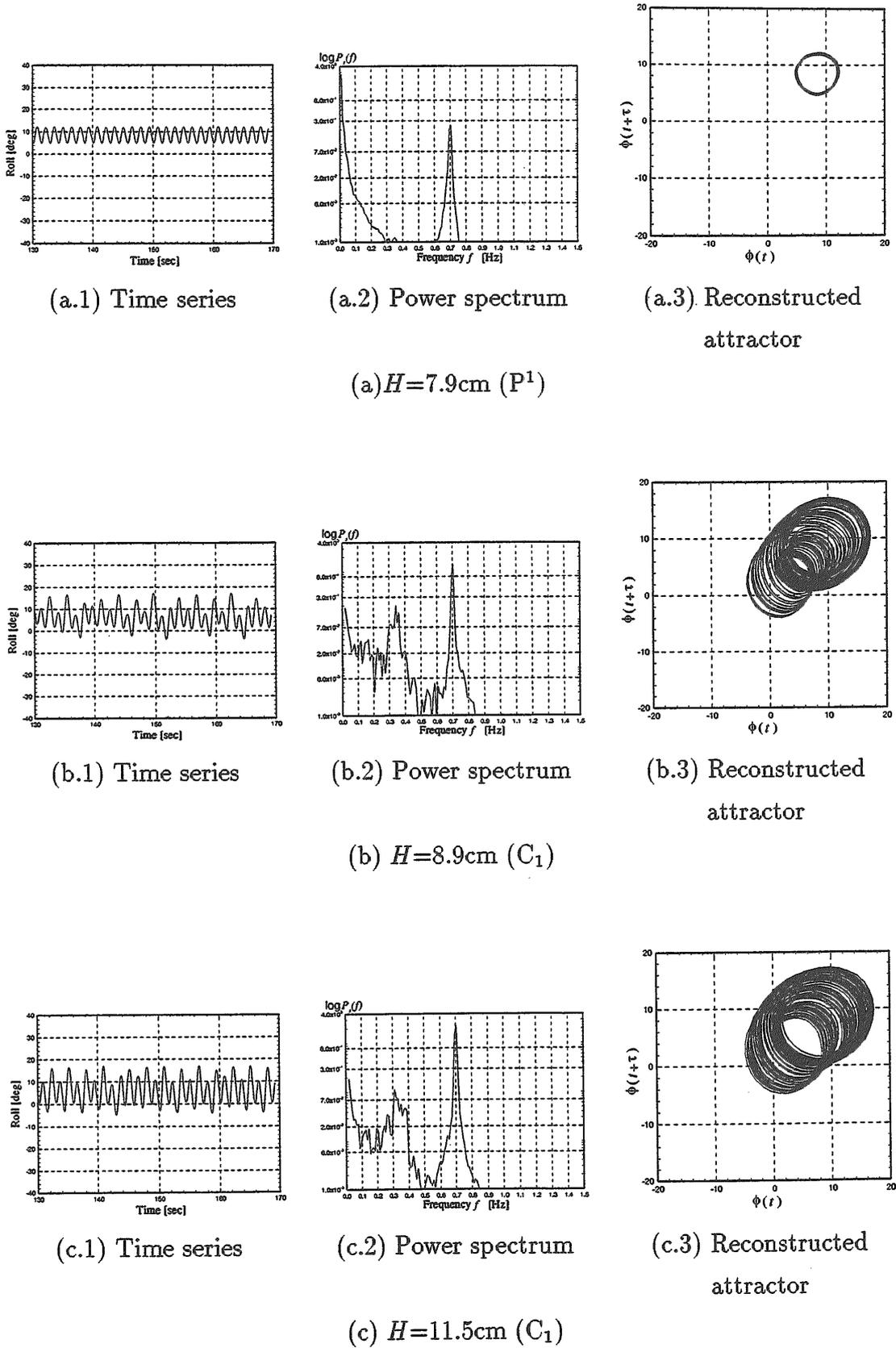
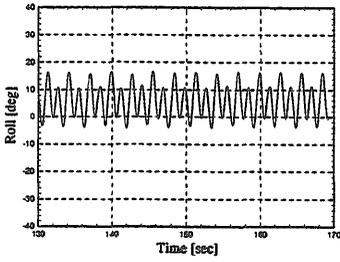
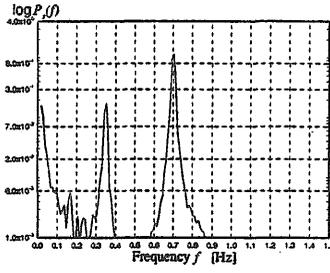


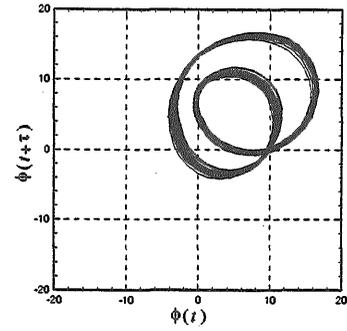
Fig.4.3 Measured Roll Motion of the Box-shaped Model



(d.1) Time series

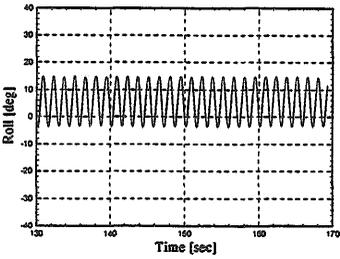


(d.2) Power spectrum

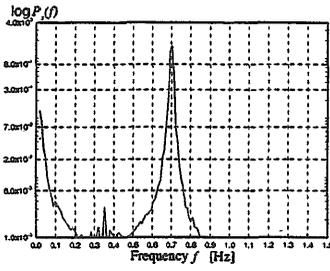


(d.3) Reconstructed attractor

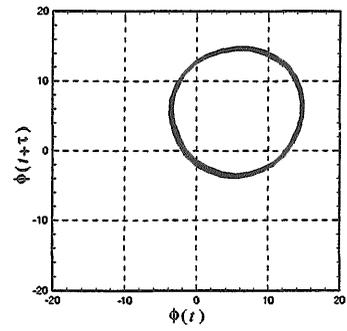
(d) $H=12.0\text{cm} (P^2)$



(e.1) Time series



(e.2) Power spectrum



(e.3) Reconstructed attractor

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

Fig.4.3 Continued

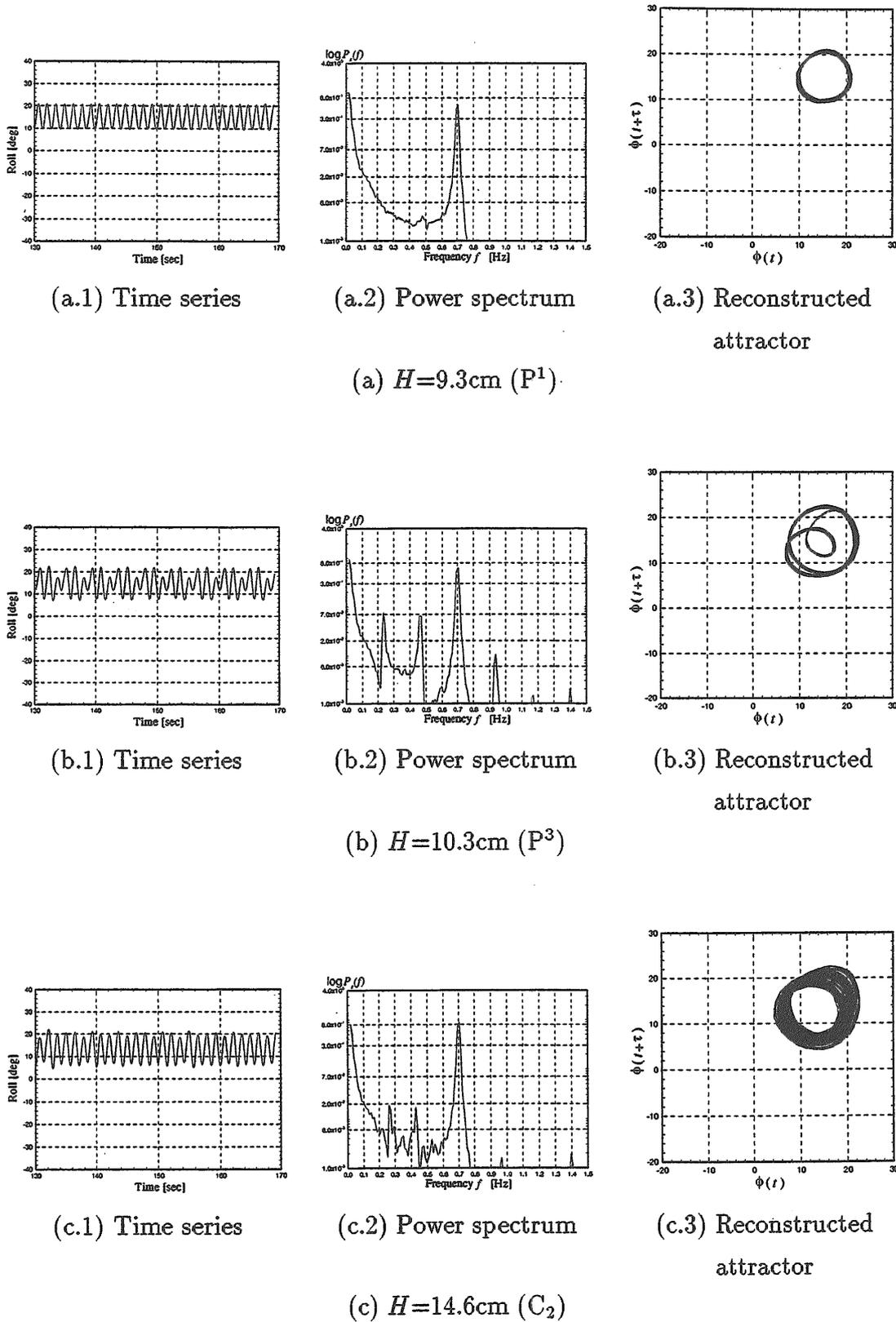
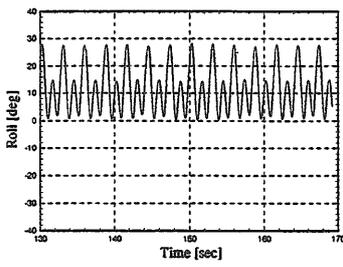
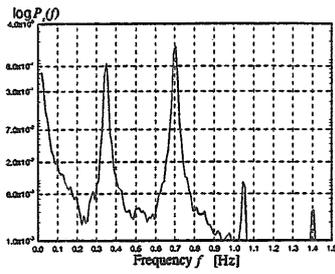


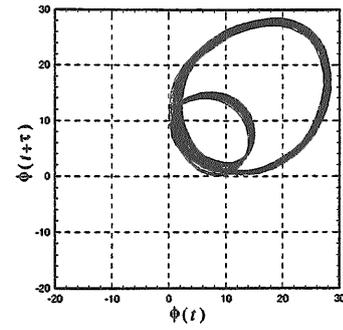
Fig.4.4 Measured Roll Motion of the Box-shaped Model



(d.1) Time series

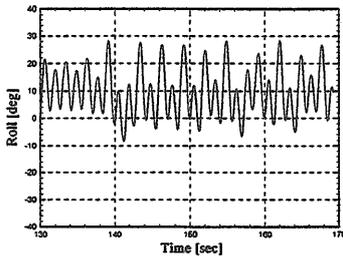


(d.2) Power spectrum

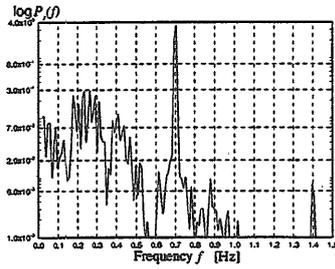


(d.3) Reconstructed attractor

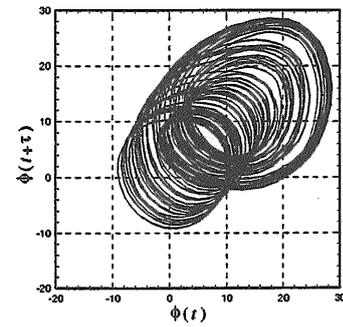
(d) $H=15.1\text{cm}$ (P^2)



(e.1) Time series

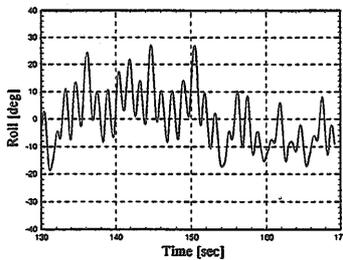


(e.2) Power spectrum

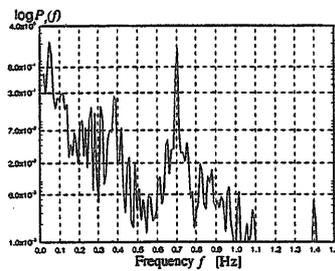


(e.3) Reconstructed attractor

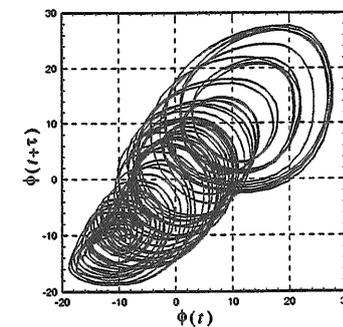
(e) $H=18.2\text{cm}$ (C_1)



(f.1) Time series



(f.2) Power spectrum



(f.3) Reconstructed attractor

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

Fig.4.4 Continued

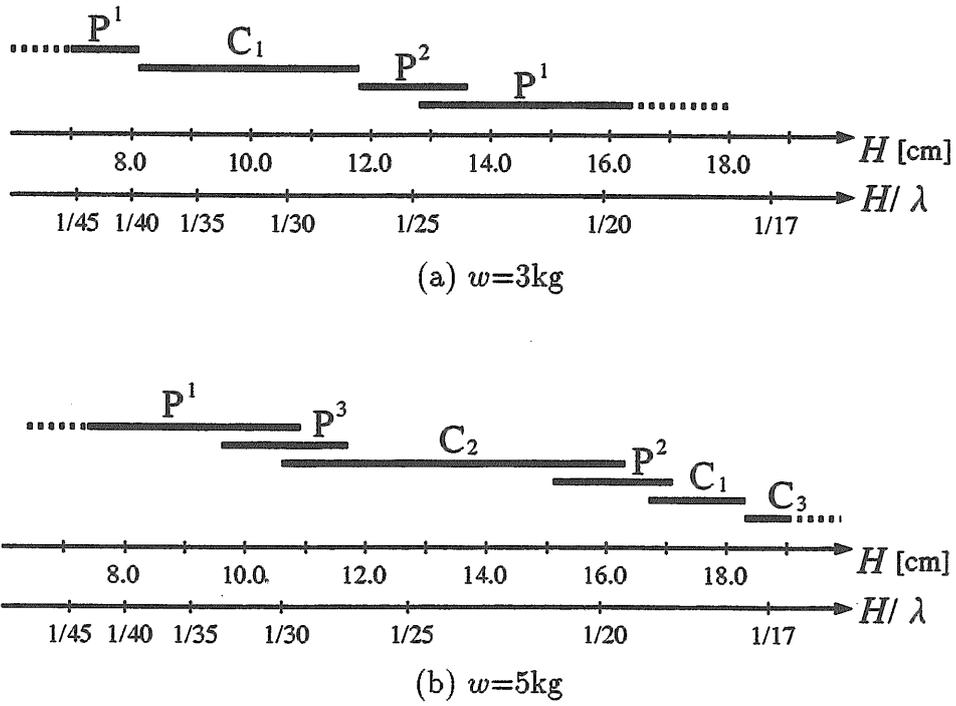


Fig.4.5 Variation of Roll Motion of the Box-shaped Model with Wave Height

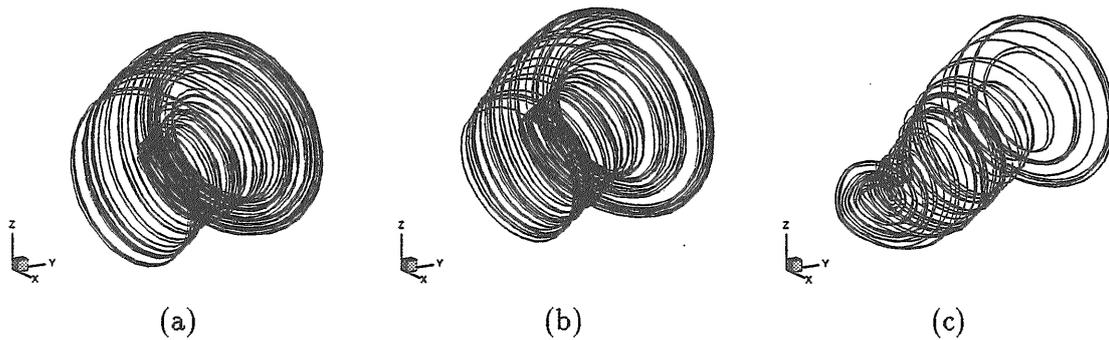


Fig.4.6 Reconstructed Attractors of Chaotic Motion

Table 4.1 Liapunov Exponents μ_i

	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
$w=3\text{kg}, H=8.9\text{cm}$	0.203 ± 0.009	-0.006 ± 0.012	-0.831 ± 0.018	-2.470 ± 0.059	-12.023 ± 0.255
$w=5\text{kg}, H=18.2\text{cm}$	0.224 ± 0.012	-0.053 ± 0.016	-0.764 ± 0.023	-1.651 ± 0.025	-3.191 ± 0.037
$w=5\text{kg}, H=18.6\text{cm}$	0.330 ± 0.018	0.013 ± 0.006	-0.767 ± 0.012	-1.159 ± 0.023	-2.782 ± 0.070

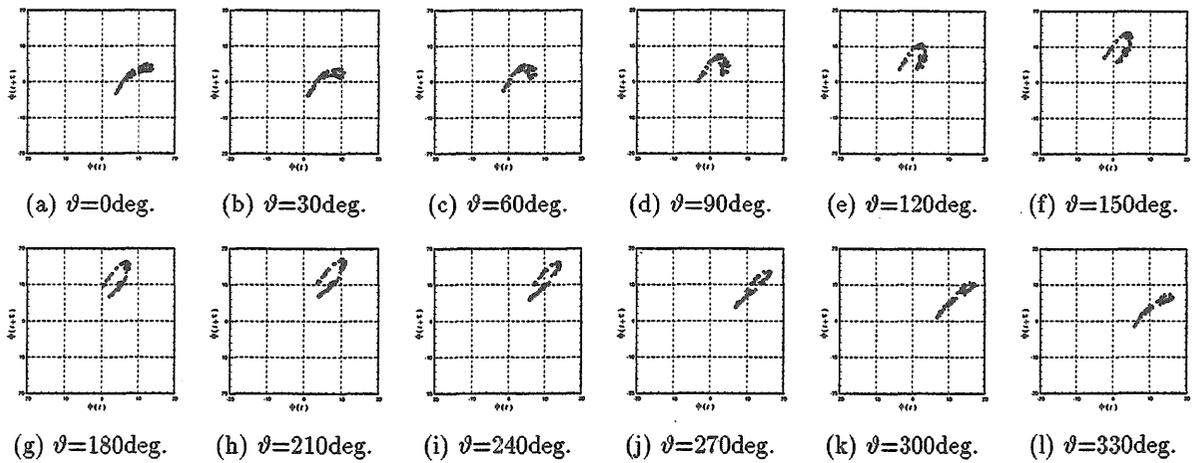


Fig.4.7 Stroboscopic Plots

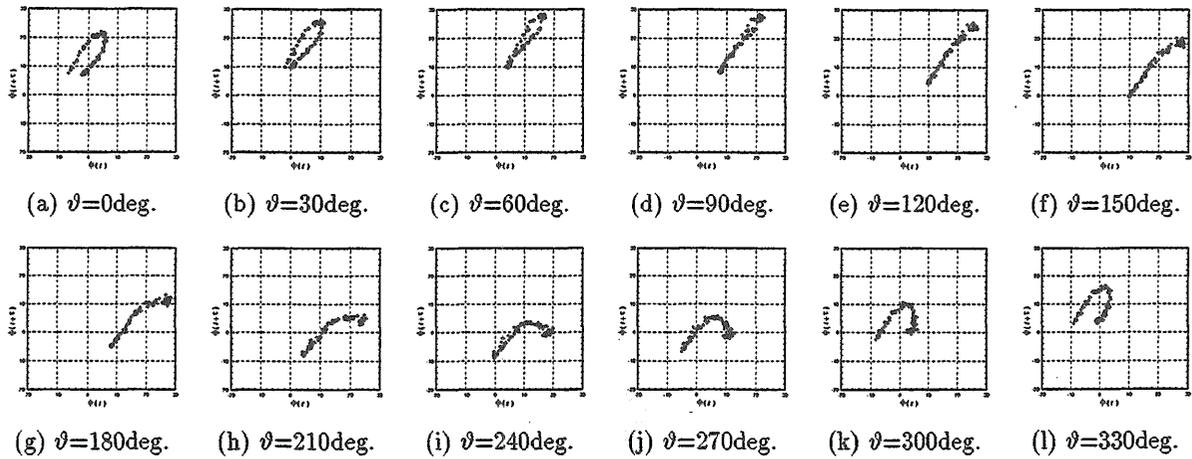


Fig.4.8 Stroboscopic Plots

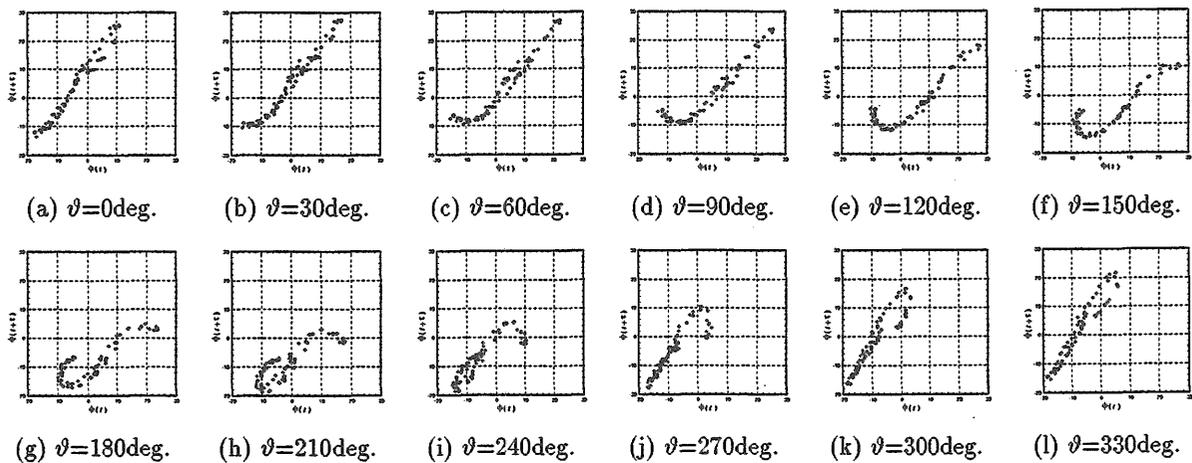


Fig.4.9 Stroboscopic Plots