

第IV章 船型要素の違いが転覆運動に及ぼす影響

本章では、前章で流体力を計測した二次元模型船のうち、船底勾配角 20 度の模型船にハードチェーン材およびスケグを着脱し、これら船型要素による運動の違いを検討した結果について述べる。三次元模型船の場合と同様に砕波（集中性過渡水波）中での転覆実験とシミュレーション計算を行い、転覆限界波高、波高や船型による転覆運動の違い、転覆運動のメカニズムを検討した。また、そのために必要な砕波による衝撃モーメントについても、実験により評価した。

さらに、規則波中の運動計測によって横揺れ応答関数等の基本的な性質を把握するとともに、本研究で用いるシミュレーション計算手法の適用限界についても検討した。

IV-1 船型要素による運動の違い

IV-1-1 実験方法

1) 模型船の外形

まず、模型船の外形を図IV-1に示す。これは第 III 章で流体力の計測に使用した船底勾配角 20 度の二次元模型船をベースに、甲板を張って打込み水が滞留しないようにし、また甲板上にハウスを設けたものである。この船底勾配角の模型船を用いたのは、左右揺れ減衰力の着点の非線形性・非対称性が大きく（図III-14）その影響評価をしやすいこと、第 II 章で用いた三次元模型船の場合（図 II -23）にその流体力が近いこと、またスケグを付けることによりその性質を容易に取り除けること、が理由である。

ただし、ハウスには天井がなく、また波下側の壁がほとんど取り付けられていないので、その復原力は無視しても差し支えない。ハウスを設けたのは、砕波中の予備実験において乾舷を越えた打込み水が甲板上を高速に通過する現象が高い波高の波で見られたからである。ハウスの有無で転覆限界にある程度差が見られたことから、波高が高い場合には、砕波による衝撃力を受け止める部分としてハウスの存在が無視できないようである。

2) 模型船の主要目、復原力曲線等

模型船の主要目を表IV-1に示す。喫水線上の重心高さ OG は、10.8cm と 9.8cm の 2

種類を基本とした。ただし、転覆限界波高を求める場合などは必要に応じて中間の値も用いている。これらの数字は、複数の小型船の復原力曲線を参考にし、実態に比較して不自然にならない範囲で変化させたものである。

このような船では、ブルワークトップが水没するとほとんど復原力を持たない場合が多いが、図IV-2に示す復原力曲線もそのような傾向を示している。重心は甲板よりやや下で水面上の高い位置にあるが、全状態でGMは12cm以上あり、このような小型船では不自然な値ではない。後に述べるように、重心が最も高いOG=10.8cmの場合は、C係数基準を満足しないぎりぎりの状態である。

なお、表IV-1中でハードチェーンの有無だけ(M20とM20C)でGMに1.5cmもの差が生じているのは一見不自然であるが、これはチェーン部が喫水線付近にあるため水線面2次モーメントが変化したためであって、復原力曲線全体としてはほとんど差がないと言える。両船型は甲板縁の没水する53度付近から復原力の低下が大きくなっているが、スケグ付のM20CSではスケグが水面上に出て浮力を失いその重量が復原力となるために、復原力消失角は他の2船型よりやや大きくなっている。

横揺れ減衰係数は、II-1-1節と同様に自由横揺れ試験より線形成分(κ)と角速度の自乗に比例する成分(β)を求めたが、表IV-1の数字から後者の非線形成分の方が支配的なことがわかる。船舶復原性規則では、後者を Bertin の N 係数の形で用い、常に一定値($N = 0.02 \text{ deg}^{-1}$)として採用している。N 係数は(II-2)式のように横揺れ振幅 $\bar{\phi}$ の関数である。同規則で想定している $\bar{\phi} = 20^\circ$ の場合について本模型船のN係数を計算すると、M20CとM20CSが $N = 0.021 \sim 0.027$ となり規則の値に近いが、ラウンドチェーン船型のM20だけは粘性減衰力が小さいため、 $N = 0.007 \sim 0.008$ とかなり低い値になっている。

3) 実験配置等

実験配置は図II-5(三次元模型船)と同様である。ガイド装置の影響を避けるため模型船は完全自由とし、模型船が水槽の幅方向を向いて静止した状態で波を当てた。模型船の鉛直面内の運動(横揺れ、左右揺れ、上下揺れ)は、光学式運動計測装置により非接触で計測した。ただしこの実験では、三次元模型船の場合よりも新しい運動計測装置を使用したため、分解能はカメラの画角に対し2560 x 2400(カタログ値)である。これは、本実験の設定では縦横約1mmに相当するが、実際にはカメラレンズ周辺部の歪み等の誤差要因があるので、カタログ値ほどの精度は期待できない。サンプリング周波数は、三次元模型船の場合と同じく60Hzである。

IV-1-2 規則波中の横揺れ

集中性過渡水波中での転覆実験を行う前に、基礎的な性質としてスケグなどの船型要素が横揺れ応答関数に与える影響を調べるため、規則波中での運動計測を行った。波高は 7cm（喫水と同一）、14cm、21cm の 3 種類を用い、また波周波数は横揺れ固有周波数を中心に変化させ、0.5Hz～1.2Hz とした。

また同時に、ストリップ法および本研究のシミュレーション法によって横揺れ応答関数を計算し、それらの推定精度を確認した。ストリップ法としては、横断面形状を Lewis Form で近似した NSM (New Strip Method) と厳密に表現した STFM (Salvesen-Tuck-Faltinsen Method) の 2 つを用いた。STFM の流体力の計算には、第 III 章で用いた Combined Integral Equation Method (CIEM) が組み込まれている。両ストリップ法とも、横揺れ減衰力として角速度に比例する成分の他、角速度の自乗に比例する非線形成分を考慮できるようになっている。また、縦運動と横運動は独立しているため、横波状態では左右揺れと横揺れの 2 自由度の運動方程式を解いていることになる。(縦運動と船首揺れの振幅はすべてゼロになっていることを確認した。)

本研究のシミュレーション法については、II.2.1.3 節「本研究で用いるシミュレーション法」(p34) で述べたとおりであるが、確認のためここで概要を述べておく。この方法は、次の運動方程式を用いている。

$$\begin{aligned} I\ddot{\phi} + A_{\phi}\ddot{\phi}_a + (B_{\phi 1} + B_{\phi 2}|\dot{\phi}_a|)\dot{\phi}_a + C_{\phi}(\phi_a) & \dots \text{(II-7)、再掲} \\ + A_y I_{Ay} \dot{v}_a + (B_{y1} + B_{y2}|v_a|) I_{By} v_a & = IM(t) \end{aligned}$$

ここで、 ϕ は横揺れ、 y は左右揺れであり、添字 a は流体粒子または波面に対する相対運動を表す。 A 、 B および I はそれぞれ添字を付けた運動モードの付加慣性力、減衰力およびそれらの連成モーメントのレバーである。 $v_a = \dot{y} - v_w$ は、流体の水平速度 v_w に対する相対水平速度である。また、 $IM(t)$ は衝撃モーメントを表す。この式の特徴は、相対運動をベースとしていることと、左右揺れ速度の自乗に比例する成分を含めていることである。

シミュレーションに使用した諸係数はすべて実験値を用いており、復原力 C_{ϕ} と左右揺れに関連する A_y 、 I_{Ay} 、 B_{y1} 、 B_{y2} 、 I_{By} は相対傾斜角 ϕ_a の関数として扱っている。また、横揺れによる流体力を表す A_{ϕ} 、 $B_{\phi 1}$ 、 $B_{\phi 2}$ には横揺れ固有周期の値を、左右揺れによる連成流体力を表す A_y 、 I_{Ay} 、 B_{y1} 、 B_{y2} 、 I_{By} には横揺れ固有周期に近い周期で実施した強制左右揺れ試験の値（前章参照）を用いたため、波長によらず一定値となつて

いる。さらに、流体の水平速度 v_w だけでなく、左右揺れ y にも実験値を用いた。この理由は、後述するように大波高中での水平運動を求めること自体が容易でないため、 y を未知数とすると v_w に誤差を生じ、ひいては横揺れ運動の推定に支障をきたす可能性が大きいからである。従って、(II-7)式では ϕ_w のみを未知数としている。

なお、以下に実験結果および計算結果を示すが、重心高さを変化させても傾向に大きな変化は見られなかったため、最も重心の高い $OG=10.8\text{cm}$ の結果だけを述べる。

IV. 1. 2. 1. 横揺れ応答関数の振幅と位相

実験で得られた横揺れ波形の基本周波数成分を Fourier 解析によって抽出し、その振幅を波傾斜の振幅で無次元化した結果を、三種類の模型船それぞれについて図IV-3～図IV-5に示す。また、入射波に対する位相についても同様に図IV-6～図IV-8に示す。これらの図には、2つのストリップ法および第II章で述べたシミュレーション計算法の結果も示している。

1) 振幅

図IV-3～図IV-5から応答関数の振幅の実験値を見ると、復原力の増加率が傾斜とともに減少する「軟化スプリング系」の特徴を示し、すべて低周波数側に倒れたような形になっていることがわかる。小型船のように喫水線付近の形状変化が大きい船型では、図IV-2に示したように復原力の非線形性が小傾斜角から現れるので、このような特徴がある程度現れるのは当然のことと言える。ただし、波高が最も小さい 7cm においてもストリップ法との一致度が極めて低いことは、復原力の非線形性だけでは説明できない。後に述べるように、シミュレーション計算による結果が実験値とよく一致することから、第III章で示した左右揺れ－横揺れ連成力の複雑な変化も重要なことがわかる。

また、波高による変化を見ると、実験値は波高が高くなるにつれてピークが顕著に低くなり、ピーク周波数が低周波数側に若干ずれる傾向である。この非線形な振る舞いは、両ストリップ法とも同様の傾向を示している。両ストリップ法で考慮されている非線形性は横揺れ減衰力のみであるから、このような性質には角速度の自乗に比例する減衰力成分が関係しているものと思われる。

最後に船型の影響であるが、上に述べた傾向は 3 つの船型に共通であり、また応答関数の振幅の絶対値を比較しても 3 船型に大きな差は見られない。従って、この程度の船型の差では（図IV-1参照）、規則波中の横揺れ振幅への影響は小さいと言える。

2) 位相

次に、応答関数の位相について検討する。ここで述べる位相は、水面の盛り上がり
を正、波下側への傾斜を正とした時の、出会波に対する横揺れの位相遅れとして定義さ
れている。参考のため、位相による波面上の揺れ方の違いを図IV-9に示す。この図では
1周期を4分割しており、横揺れ角がゼロ、最大、最小となる位置を波の空間波形に対
して示している。時間的には $1/4 \rightarrow 4/4$ という方向に変化していく。

図IV-6～図IV-8から実験値を見ると、振幅と同じように非線形影響による同調点付近
の変化が極めて大きいこと、また他の部分では周波数依存性が小さいことがわかる。計
算値では、ストリップ法が同調点付近の急激な変化を評価できないのに対し、シミュレ
ーション計算は実験値をよく説明している。

同調周波数よりも低周波数側（波長/船幅が約 10 よりも大きい領域に相当）の実験値
を見ると、3 船型とも位相がほぼ -90° であり、また振幅もほぼ 1 となっているので、
図IV-9の上図に示すように、波面の傾斜に沿って船が揺れていることがわかる。一方、
同調周波数より高周波数側では、M20 が 70° 程度、M20C と M20CS が 45° 程度の位相遅
れとなっている。この状態は図IV-9の下図と同じであって、波の昇り斜面で波上側に傾
斜し（図の $1/4$ ）、波の下り斜面で波下側に傾斜する（図の $3/4$ ）ことを表している。
横揺れ減衰力の小さい M20 の方が位相遅れが大きい傾向は、同調点より高周波数側に
おいて、線形、非線形を問わず強制振動の一般的な性質と一致している³⁾。

3) まとめ

1)と2)で比較したように、全体的な傾向としては、チェーン、スケグといった付加物
による応答関数の差はあまり大きくないと言える。しかしながら、後に示す砕波中の転
覆限界波高は付加物によってかなり異なる場合があるので、このような応答関数だけ
では小型船の耐転覆性能を評価することはむずかしい。

以下では、計算結果についてさらに検討を加える。

IV. 1. 2. 2. ストリップ法の計算結果

本節では、まず 2 つのストリップ法の違いについて、特に同調周波数に着目して述
べる。次に、小型船に対するストリップ法の適用限界について述べる。

1) 同調周波数

NSM と STFМ の結果を比較すると、図IV-3と図IV-4において同調周波数の違いが顕

著であるが、これは横揺れ付加慣性モーメントの計算法が一因と考えられる。NSM は Lewis Form 近似による推定精度の悪化を避けるため、横揺れ固有周期 T_ϕ (実験値) を用いて、次式により付加慣性モーメント ΔI を評価するようプログラムされている。

$$I + \Delta I = W \cdot GM \cdot \left(\frac{T_\phi}{2\pi} \right)^2 \quad \cdots (IV-1)$$

I : 慣性モーメント、 ΔI : 付加慣性モーメント、 W : 排水量

従って、自由横揺れ試験の試験状態が反映されている。すなわち、図IV-2に示したように復原力曲線は小傾斜角から非線形性を持っているため、プログラムが $W \cdot GM \cdot \phi$ で評価している復原力は実効値に比べて過大であるが、その誤差は付加慣性モーメント ΔI に反映されるためある程度相殺された形になっている。一方、STFM は各断面の流体力を長手方向に積分して付加慣性モーメントを求めており、自由横揺れ試験の結果は何ら考慮されていない。そのため、過大に評価された復原力によって同調周波数が高周波数側に現れたものと考えられる。

一方、図IV-5に示したスケグ付の M20CS では、STFM の同調周波数は NSM と同程度になっている。その原因は明らかでないが、図 III-9 に示したようにこの船型の C_D (左右揺れの非線形成分=速度の自乗に比例する成分) が極めて大きいため、それによる左右揺れ-横揺れ連成力の推定誤差と復原力の実効値の誤差とが相殺したことなどが考えられる。

2) ストリップ法の適用限界

結局のところ、ストリップ法の推定値が実験値と良い一致を示すのは、振幅、位相とも横揺れ振幅の小さい周波数範囲に限定されている。同調点付近の振幅や位相の急激な変化は、STFM でも推定することができない。このことは、断面形状を正確に表現すれば浅喫水浮体の流体力を精度良く推定できると言われていること⁷⁸⁾が、小型船には当てはまらないことを示している。池田等³⁴⁾もハードチェーン艇の流体力を計測した結果として同様の結論を得ている。これを改良するためには、たとえば横揺れ減衰力と同様に復原力を横揺れ振幅の関数として扱うことが考えられる。しかし、後に述べるように実験では出会周波数成分の左右揺れとともに大きな横流れが見られ、第三章に述べたようにそれによる横揺れ連成力が傾斜角の関数であることを考えれば、ストリップ法の改良効果には自ずと限界があろう。

IV. 1. 2. 3. シミュレーション計算結果

最後に、シミュレーション計算の結果について述べ、特にその安定性の問題について考察を加える。

1) 全般的な一致度

図IV-3～図IV-8を見ると、シミュレーション計算の結果は振幅、位相とも実験値をよく説明しており、小型船の横揺れの計算にはこの方法が有用なことがわかる。一部で同じ周波数にふたつの計算値が見られるが、これは初期条件の微妙な違いによって複数の解が存在するという、非線形系に特有の現象が見られたからである。

このシミュレーションで用いている流体力係数は、周波数 0.8Hz の強制左右揺れ試験や自由横揺れ試験（周波数＝横揺れ固有周波数）で得られた実験値であり、これを全ての規則波に採用している。その理由は、このシミュレーションを集中性過渡水波中での転覆実験に用いる予定であり、そのままの形での有効性（適用可能範囲）を確認したかったからである。上記の比較から、本シミュレーションが広い周波数範囲で有用であることが確認できた。

ただし、高周波数領域の一部にはシミュレーション結果を示していない部分がある。これは、定常状態に達する前に横揺れが発達して転覆したため、Fourier 解析によって出会波周波数成分を抽出できなかつたからである。このような部分は、波高が高いほど、また M20C の船型において範囲が広い傾向である。以下では、この不安定性について考察を加える。

2) 計算の不安定について

入射波と異なる周波数の流体力を用いれば、計算結果にある程度の誤差を生じるのは当然である。しかし、このことは3船型とも共通であり、M20 と M20CS ではほとんどの周波数で良い結果を与えている。従って、M20C 船型に特有の要因を検討する必要があるため、以下では3船型を比較しながら検討を進める。

2)-1 応答関数の比較

3船型の横揺れ応答関数には、前に述べたように大きな違いは見られない。確認のため3船型の応答関数の実験値を直接比較したものが図IV-10である。この図でも M20 の位相が他の2船型と若干異なる程度であって、M20C に特徴的なものは特に見られないようである。

2)-2 横流れ速度の比較

繰り返し述べたように、小型船で留意すべき特徴のひとつは、軽量浅喫水なため波によって流される量が大きいためということである。本実験の規則波中でも、波の昇り斜面から波の山にかけて大きく横流れする様子が観察された。そこで一例として、波高が最大（21cm）で波周波数が 1.0Hz の場合の水平運動を比較したものを図IV-11に示す。これを見ると、他の 2 船型に比べて M20C の横流れが特に大きいことがわかる。図IV-1に示したような小さなハードチェーン部材の存在によって、横流れ量が大きく変化するわけである。

次に、定常状態になった時の平均的な横流れ速度を整理したものを図IV-12に示す。すべての波高において、また波周波数が高くなるほど、M20C の横流れ速度が大きいことがわかる。この図を図IV-3～図IV-8と比較すると、横流れ速度 0.2m/s が閾値となっており、これより大きい速度でシミュレーション計算が発散している。

第 V 章「横風と横流れによる傾斜」では、横風によって横流れするときの傾斜角を評価するため、速度一定の強制横流れ試験を実施している。その結果得られた着地点を図V-7に示しているが、これを図III-14と比較するとわかるように、横流れ速度が一定の場合と周期的左右揺れの場合とでは、減衰力の着地点が異なっている。一般に、剥離を伴う流場とそれによる流体力（減衰力）は KC 数の関数である。従って、強制左右揺れ試験を行った範囲で着地点の振幅依存性が小さいことは図III-13に示したとおりである（この場合 $KC = V_{MAX}T/2b = \pi\bar{y}/b = 0.9\sim 2.2$ 、 V_{MAX} ：最大速度、 T ：周期、 b ：半幅）が、この結果と速度一定の横流れの結果（ $KC = \infty$ ）とで定量的な差が出ることは当然と言える。

図IV-11に示したように、規則波中の水平運動は定常的な横流れと周期的な左右揺れとが重なったものである。従って、そのときの流体力は、シミュレーションで用いている周期的左右揺れのものとは異なることが考えられる。非線形な量であるから、その定量的な評価は実験によらなければならないが、現象面から見る限り、平均的な横流れ速度が 0.2m/s 以上になるとその差が大きくなるものと考えられる。ただし、この閾値は規則波中で定常状態になった場合のものであり、転覆実験のような過渡水波中の過渡運動に対しては、また別の閾値になる可能性が高い。

2)-3 横流れ速度に差が生じる原因

最後に、M20C の横流れ速度が大きい原因について考える。M20C 船型をラウンドチ

ヤイン船型の M20 と比較してみると、付加質量（図Ⅲ-4）、減衰力（図Ⅲ-9および図Ⅲ-10）、速度一定の横流れ時の抗力係数（図Ⅴ-6）ともほとんど同一である。一方、図Ⅳ-12を見ると、横揺れ同調点よりも高周波数側で船型による横流れの差が顕著になっている。図Ⅳ-10に示したように、そのときの横揺れの位相は M20C と M20 で 30° 前後のずれがある。約 45° の位相遅れを持つ M20C の運動は図Ⅳ-9下図に示すとおりであるが、 90° 近くの位相遅れを持つ M20 の運動はこの図で船を右側にシフトしたものになり、波の山でほぼ水平（若干の波下傾斜）となる。

簡単のため最も水平流速の大きい波の山での姿勢を考えると、M20C の方が波下傾斜が大きい。傾斜角による抗力係数の変化を調べると、周期的左右揺れ（図Ⅲ-9）では傾斜するほど抗力が大きくなる傾向である。また、速度一定の横流れ（図Ⅴ-6）では流れと逆側（この場合波下側）に傾斜する方が抗力が大きい。従って、波の山ではどちらの抗力も M20C の方が大きく、その分横流れ速度が早くなったものと考えられる。

上に述べた 2 つの船型は、横揺れの位相以外の要素がほとんど同一なので比較が容易であった。M20C とこれにスケグを取り付けた M20CS の比較では、横揺れは振幅、位相ともほぼ同じであるが、質量、付加質量および抗力は M20CS の方が大きく、横流れは M20C の方が大きいという結果である。また、M20 と M20CS の比較では、上で述べた諸量のうち運動振幅以外はすべてが異なっているにもかかわらず、横流れ速度はほぼ等しい。従って、これらの船型の比較は単純には行えず、シミュレーション等による詳しい検討が必要であるが、本研究の主題からは離れるので別の機会に行うこととした。

3) 規則波中で転覆が発生しにくい原因

試験水槽で横波中の動揺実験を行う時、甲板上に多量の打込み水が滞留する場合などを除き、規則波中では極めて転覆しにくいことが知られている。ここでは、横揺れの位相および横流れ速度からこの原因を考察してみる。

まず位相であるが、第 II 章「砕波による転覆過程の検討」では、転覆する一波に模型船が遭遇する時に、横揺れモーメントと横揺れ角速度が同位相になることが転覆につながることを述べた。線形系の強制振動では、系の固有周期と外力の周期が一致する同調時にこのような位相関係になることが知られている³⁾。ここで、簡単のため波傾斜によるモーメントが支配的と考え、そのような同調状態に相当するのは波の上り斜面中央で船が直立する場合であって、その時ここで定義する位相はゼロになる（図Ⅳ-9の中央図参照）。また、第 II 章の図Ⅱ-16に示した位相平面では C 点がそれに当たる。

図IV-6～図IV-8から規則波中の実験値の位相を見ると、波周期と横揺れ固有周期が一致する付近で位相が急激に変化し、波高が高い場合にマイナスからプラスへ不連続に大きく変化するため、位相ゼロの状態は現れないことがわかる。特に M20 船型ではこの性質が顕著である。つまり、このような船型では線形系のような同調現象が現れにくいと言え、このことが規則波中での転覆を妨げる大きな要因と考えられる。

一方、横流れ速度については、規則波中における時系列の例を図IV-11に示した。また、集中性過渡水波中については、第2波の山における横流れ速度の波高による変化を図VI-6（後出）に示した。両図には同一波高のデータが含まれていないので、図IV-11の波高である 21cm に換算してみると、規則波中、集中性過渡水波中とも波の山での横流れ速度は 0.5m/sec 程度となる。しかし、図IV-11は波周波数 1.0Hz のものであり、集中性過渡水波のピーク周波数である 0.7Hz における規則波中の横流れ速度はこれよりも小さい。左右揺れ減衰力からの連成モーメントは相対速度の自乗に比例することから、連成モーメントは規則波中の方がかなり小さいことになる。従って、横流れ速度から考えても、同一波高・波周期で比較すれば、規則波中の方が転覆しにくいと言える。

IV-1-3 集中性過渡水波中の運動

次に、第 II 章に述べた三次元模型船の場合と同様に、二次元模型船に真横から集中性過渡水波を当て、転覆限界波高や転覆に至る運動の特徴、さらに転覆のメカニズムについて調べた結果を述べる。

IV. 1. 3. 1. 実験方法

実験方法のうち、規則波と共通する部分はIV-1-1節で述べたとおりであるので、ここでは集中性過渡水波中の実験に特徴的なものを述べる。

1) 実験配置

実験配置は、三次元模型船の場合と同様である（図 II -5参照）。ただし、波高のさらに高い集中性過渡水波を使用したため、模型船が流される下流までの波の波形を把握する必要から、波高計を 11 本に増やし集中点付近から 30cm 間隔で設置した。以下では、造波機に近い方から WG1～WG11 の記号で表す。WG1 の位置は造波機から 3.0m である。そして、三次元模型船の場合と同様に、波高計の前で模型船を静止させた状態で真横から波を当てることとした。その初期位置は WG3 の波高計の位置を基本とした。この位置を選んだのは集中度が高く波高が大きいことのほか、解析やシミュレーションを

行う都合上、船の左右にある波の時間・空間波形、特に船が流されて行く側のそれが必要だからである。

2) 集中性過渡水波

第 II 章で述べた三次元模型船の場合には、主に波の基本周期の影響を調べるために 4 とおりの波を使用し、またその大きさは実験領域に入ってから初めて崩れるよう設定した。そのため、砕波は比較的小規模なものになっている。ここでは転覆限界波高を調べることに主眼を置き、造波機に与える信号波形は一定とし、そのストロークを変化させることとした。

使用した信号は、二村等⁸²⁾が外洋ヨットの転覆実験において同様の目的で用いたものである。計測された波の時間波形を図 IV-13 に示す。図の(a)が本実験で用いた最小の波、(d)が最大の波である。ストロークが大きくなるに従って、特に第 1 波の山が高くなっていることがわかる。波崩れの一般的な定義は必ずしも明確でないが、計測域で模型船が白波に叩かれる限界を基準とすれば、波高（最大値と最小値の差で定義）約 32cm が砕波限界である。本実験では最大 44cm までの波高を用いており、最大波高付近では波の前面が切り立った巻き波に近い波形となっている。

図 IV-13 に示した 4 種類のストロークにおける周波数スペクトルを、3 つの波高計位置について図 IV-14 に示す。スペクトルのピーク周波数は約 0.7Hz で、模型船の横揺れ固有周波数（表 IV-1 参照）に近い値となっている。また、波高計の位置で比較すると、波高 44.0cm の波のスペクトルが WG5 の位置で減衰しており、大規模な砕波によってエネルギーが失われたことがわかる。

3) 実験パラメータ

主要な実験パラメータは、船型、重心高さ、および波高である。船型は、規則波と同じ 3 種類（M20、M20C、M20CS）を用いた。重心高さも、規則波と同じ 2 種類（9.8cm、10.8cm）を基本とし、一部その中間の値も用いた。この船型を選んだ理由は、IV-1-1 節 1) で説明したとおりである。小型船の転覆現象にとって重要な減衰力の着重点で考えれば、図 III-14 に示したように、この 3 船型だけで第 III 章で用いた 9 船型すべての特性を網羅している。

初期傾斜については、小型船が乗員の移動等によって傾斜しやすいことを考慮し、ウェイトの移動により波下側 3° を行っている。この角度は、三次元模型船の実船で考えると 1.5 人が片舷に寄った時の傾斜角に相当するので、十分に考えられる値である。

なお、三次元模型船では波上側傾斜の実験も行っているが、乗員は本能的に波を避けようと波下側に寄る傾向があること、風と波は同一方向から来襲することが多いため風による傾斜も波下側になること、三次元模型船では波下側傾斜の方が転覆危険性が高かったことを考慮して、ここでは波上側傾斜の実験は省略した。

波高 H_w は、図 IV-13 に示した (a) ($H_w=18.7\text{cm}$) を最小、(d) ($H_w=44.0\text{cm}$) を最大とし、転覆限界付近を集中的に行った。模型船の初期位置は大部分が WG3 であるが、一部の試験条件では WG1~6 の位置でも行っている。

4) 計測項目

計測したのは、光学式運動計測装置による鉛直面内の二次元の船体運動（横揺れ、左右揺れ、上下揺れ）のみである。三次元模型船の場合のように水圧分布および加速度の計測が望ましいことは言うまでもないが、本実験の方が最大波高が大きく船の横流れが速いため、信号線および電源線によって船体運動が影響を受ける可能性が大きく、非接触な方法による運動計測のみとした。

IV. 1. 3. 2. 実験結果

実験条件による転覆の有無と転覆の方向を表 IV-2 に示す。造波機のストロークは等間隔に変化させているが、波崩れの影響によって線形性が成り立たなくなるので、表中の波高の間隔は波高が高くなるほど若干小さくなる傾向にある。●が波下側への転覆を、▲が波上側への転覆をそれぞれ表す。また、記号に下線を付けないものは第 1 波（砕波）中での転覆を、下線を付けたものは第 2 波中での転覆をそれぞれ表す。さらにこの表を整理し、白丸（転覆せず）と黒塗り記号（転覆）の境界から転覆限界波高を求めたものを図 IV-15 に示す。

1) 転覆限界波高のレベル

この図から全体的な転覆限界波高の大きさを見ると、一般的に言われているように、船幅（35cm）程度の波高が目安になっていることがわかる。特に重心が最も低い $OG=9.8\text{cm}$ では、船型および初期傾斜によらずほとんど一定値となっている。重心はこの状態から最大で 1cm 上げているが、GM の変化率にすると 8% 前後なので、その程度の変化では全般的に転覆限界波高の差は小さいと言える。しかし中には、本実験の最大波高でも転覆しなかった 1 状態（模型船：M20、 $OG=10.13\text{cm}$ 、欄外になるように表示）があり、また逆に、M20C 船型では $OG=10.8\text{cm}$ で急に転覆しやすくなるなど、重心高

さのわずかな違いによって転覆限界波高が変化する場合も見られる。

2) 船型要素の影響

船型要素の影響を見ると、重心高さや初期傾斜によって優劣があるが、全般的にはハードチェーンおよびスケグ付きの M20CS の転覆限界波高が比較的大きいレベルで安定している。M20 は直立状態では最も転覆しにくい船型と言えるが、初期傾斜のある状態では M20CS よりも転覆しやすくなる。ハードチェーンの付いた M20C は、重心の低い OG=9.8cm では M20CS と同程度であるが、重心が高くなると転覆しやすくなる傾向にある。特に OG=10.8cm で片荷状態になると転覆限界波高が極端に小さくなるので、安全性確保のためには、このような状態について詳細に検討する必要がある。

3) 初期傾斜の影響

初期傾斜の影響を見ると、波下側に傾斜した場合（図中の白抜き記号）は傾斜のない場合に比べてすべての状態で転覆しやすくなっている。その差は重心が高くなり船が不安定になるほど大きくなるようである。また転覆の方向であるが、表 IV-2 からわかるように、一部の例外を除いて波下側への転覆になっている。これらのことは、第 II 章で述べた三次元模型船と同様の傾向と言える。

4) 砕波の影響

第 II 章に述べたように、直立状態の三次元模型船では、砕波による衝撃力を受けることが転覆の必要条件であった。前節で述べたようにこの波の砕波限界波高は約 32cm であり、図 IV-15 で黒塗り記号がすべてこの波高以上に位置していることから、この必要条件はいろいろな船型で成立するものと考えられる。

逆に、三次元模型船で波下側に大きな初期傾斜（7.5°）を付けた場合には、砕波を受けないことが転覆の必要条件であった。しかし、ここでは大部分の転覆が砕波中で発生していることから、波下側に片荷状態のとき砕波の作用が転覆を妨げるとは必ずしも言えない。前に述べたように「転覆する一波に遭遇する条件」が重要であるから、その意味で砕波が安全側に作用することもあると考えるべきであろう。

5) 波高による転覆パターンの違い

図 IV-16 に示したのは波高が高いとき（42.8cm）の運動の例であるが、この場合には砕波の中で短時間に転覆している。一方、同一条件で波高のみを低くしたとき（31.9cm）

の運動の例を図IV-17に示す。これは、小規模な碎波中で見られた三次元模型船の運動（たとえば図II-7）に類似したパターンであって、碎波に引き続く第2波の中で横揺れが発達し、第2波が通り過ぎたところで転覆している。このように、同じ転覆でも波高によって転覆の様子が異なることに注意する必要がある。

そして、波高が高い場合の短時間の転覆では船型影響が小さく、転覆限界波高が40cm付近に集中しているのに対し、波高が低いときの転覆では船型影響が比較的大きい。図III-14に示した左右揺れ減衰力の着力点高さを確認すると、M20CSは着力点が高い位置で安定し横流れ時の傾斜モーメントが小さいが、M20Cは波下側傾斜時に着力点が低下するため大きな傾斜モーメントが作用する。M20Cが低い波高でも転覆する場合は、この着力点の傾向と合致している。このような傾向が現れる原因については、シミュレーション計算の結果をもとにIV-3節で詳しく検討する。

なお、M20船型の重心が高い場合については特徴的な性質があるので、次節に詳しく述べる。

IV. 1. 3. 3. M20船型の転覆限界波高と運動の特徴

本節では、M20船型の転覆限界波高と運動の特徴について述べる。

図III-14を見ると、この船型の左右揺れ減衰力の着力点はM20Cに近い変化を示している。何度か述べたように、横流れする方向に傾くほど着力点が低くなる傾向は、不安定なモーメントが作用することを意味する。すなわち、傾斜した方向に横流れする時には着力点が下がり、逆の場合には着力点が上がるので、水線回りで考えるとモーメントは傾斜を助長する方向に常に作用する。特に前者の場合は、小型船の重心位置が高いため、レバーが大きくなって傾斜が大きくなりやすい。しかし、図IV-15に示したM20の転覆限界波高はむしろM20CSに近く、条件によっては（M20、OG=10.47cm、初期傾斜なし、図IV-15で欄外になるように表示）極めて転覆しにくい場合も見られる。この原因は、以下に述べるように、横流れ時の傾斜角によって説明することができる。

1) M20船型の傾斜の特徴

図IV-18に示したのは、図IV-16（模型船：M20C、OG=10.8cm、波高：42.8cm）と同一条件で船型のみをM20に変えた場合の運動である。これらの例のように、M20は重心が高くなると、碎波に遭遇した直後に波上側に傾斜しながら横流れする性質が観察された。従って、波上側傾斜から波下側転覆に至るまでには大きな仕事量を要すること、また上に述べたように波上側傾斜しながら横流れすると左右揺れ連成モーメントが小

さくなること、この2つが転覆を妨げたものと考えられる。

ただし、波下側へ 3° の初期傾斜のある場合や重心が最も低い場合（OG=9.8cm）には、このような波上側傾斜は発生せず、転覆に至る運動は他の2船型と大きな差はなかった。また、IV-2節では砕波による衝撃力を3船型で比較しているが、M20が受ける衝撃モーメントに特徴的なものは認められない。M20が他の2船型と大きく異なるのは、チェーン部が丸いため横揺れ減衰力が $1/3$ 以下（表IV-1参照）なことだけである。従って、M20が波上側傾斜になる原因としては横揺れ減衰力が小さいこと、すなわち横揺れが発達しやすいことが一因としてあげられる。特に重心が高い場合には、船が静的に傾斜しやすいこと、また衝撃力の作用中心と重心の上下関係から、砕波との遭遇時に波上側にモーメントが作用したこと、が原因として考えられる。

2) 横流れ速度の違い

次に、横流れ速度について述べる。比較のため図IV-16（M20C）および図IV-18（M20）と同一条件下でのM20CSの運動を図IV-19に示す。なお、光学式運動計測装置が最後までターゲットを捕捉できなかったため、この図では転覆の瞬間までは描くことができなかった。

これら3つの図を比較すると、特にM20（図IV-18）の横流れが大きいことが特徴的であり、規則波中でM20Cの横流れ速度が大きかったこと（図IV-11参照）と異なった傾向を示している。図II-9に示した強制左右揺れ試験の結果では、M20の抗力係数が特に小さいわけではなく、また傾斜角依存性も小さいので、M20が波上側傾斜することからは大きな横流れを説明できない。さらに、図V-6（後出）には速度一定で横流れさせたときの抗力係数を示しているが、波上側傾斜の場合にはむしろ抗力が大きくなる傾向である。

残された原因としては、波上側に傾きチェーンが空中に露出した状態で滑走することで、船底が上方に迎角を持った翼のように作用し、一時的に模型船の喫水を浅くしたこと、それにより抵抗が減少したことが考えられる。このことは、実験精度上の問題から計測データでは確認しにくかったが、目視ではそのような傾向が観察された。図IV-18に示した2つの例で横軸-1.5m付近を比較しても、波下側に傾斜する下図よりもそうでない上図の方が横流れが大きい傾向である。ただし、傾斜量および継続時間については、同一の条件で観測されたこの2例でも違いが見られるように、砕波に当たる瞬間の微妙な姿勢あるいは位置の違いに影響されるようである。

3) 波上側への転覆運動

最後に、希に見られた波上側への転覆運動について触れておく。図IV-18の状態から波高を高くしたときに、M20 が転覆する様子を図IV-20に示す。この場合には、砕波を受けた直後から波上側傾斜が急激に大きくなり、高速に横流れしながら転覆している。すでに述べたように、M20 が波上側に傾斜する性質は波下側へ転覆を防ぐ効果があるが、この例のように波上側への転覆につながる場合もある。

IV. 1. 3. 4. まとめ

以上に述べた集中性過渡水波中の実験結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 一般的に言われているように、転覆限界波高はおおむね船幅に近い値である。ただし、船型によってはそれよりも小さい波高で転覆する場合があります、注意が必要である。
- (2) 波下側に初期傾斜があると転覆しやすくなる。
- (3) ラウンドチェーン船型の M20、ハードチェーン船型の M20C、それにスケグの付いた M20CS を比較すると、M20CS の転覆限界波高が安定して大きいのに対し、他の 2 船型は重心高さや初期傾斜によって転覆限界波高が変動する。特に、M20C は低い波高で転覆する場合がある。
- (4) 波高が高いときの転覆は砕波中で短時間に発生し、船型による差は比較的小さい。一方、波高が低いときの転覆は砕波に続く波の中で発生し、船型、重心高さ、および初期傾斜によって転覆する場合としない場合とがある。
- (5) M20 船型は、重心が高い場合、砕波を受けた後に波上側に傾斜する傾向がある。この性質により、M20 はかなりの大波高でも転覆しない場合がある反面、波上側に転覆することもある。
- (6) 砕波中の横流れは、M20 が特に大きい。その原因は、波上側傾斜しながら滑走することによって、喫水が浅くなるためと考えられる。

IV-2 砕波による衝撃力

前節の実験で計測された模型船の運動のメカニズムを説明するためには、砕波による衝撃力を知る必要がある。砕波との遭遇時に作用する衝撃的な傾斜モーメントは、第 II 章の三次元模型船を用いた検討では、船を一挙に大傾斜させるほど大きなものではなかった。その理由は、船の重心が高いため重心回りの傾斜モーメントレバーが短いこと

である。また、第 II 章の場合には、主に波の基本周期の影響を調べるために 4 とおりの波を使用した。その大きさは実験領域に入ってから初めて崩れるよう設定したため、砕波が比較的小規模になっていたことも理由のひとつと考えられる。一方本章では、転覆限界波高を求めるために波高を広い範囲で変化させているので、砕波による衝撃力の一般的な性質を調べるのにも好都合である。そこで、前節で運動計測を行った模型船と波を用いて衝撃力の評価を行った。

IV-2-1 実験方法

1) 模型船と波

使用した模型船および集中性過渡水波は、前節で運動計測に使用したものと同一である。ただし、波が全く崩れない波高 25cm 未満の波は省略した。また、軽量に作製した模型船やガイド装置が衝撃力によって損傷を受ける可能性があったため、波高 43cm 以上の波も省略している。

2) 実験装置

実験装置の概要を図 IV-21 に示す。波浪強制力を計測する場合には模型船を完全に固定することが一般的であるが、本実験では波高が最大で喫水の 6 倍以上にもなり、模型船を固定すると現実とかけ離れた状態となるため、模型船の上下揺れのみを自由とした。そのためのロッドおよび模型船の傾斜角を調整するための治具はできるだけ軽量に製作したが、その重量を加えると模型船の排水量を超過するため、その分をバランスウェイトでキャンセルしている。その重量は 1.5kg 程度であるが、排水量の余裕の大きい M20CS では若干小さく、逆の M20 では若干大きくなっている。計測位置は、運動計測で主に初期位置とした WG3 の波高計の位置である。入射波はロッドの真横数 m に設置した容量式波高計により計測した。

3) 衝撃力の計測方法

衝撃力の計測には三分力計を用いる予定であったが、予備実験を行ったところ容量が十分なものは重量が大きく、上下揺れの質量が過大になることがわかったので、水圧分布を表面積分して衝撃力を概算することとした。水圧計の配置を図 IV-22 に示すが、これは強制左右揺れ試験（第 III 章）の配置に、波上側の水面上 3 点（PW6～PW8）を加えたものである。水によって急冷される際のレベルシフトを小さくするため、水面上に配置した水圧計は温度衝撃の少ない半導体式のものを用いた。サンプリング周波数は

1kHzである。

IV-2-2 実験結果

IV. 2. 2. 1. 上下揺れ

1) 波面の上下動と上下揺れの比較

まず、上下揺れの時間波形を波と比較した例を図IV-23に示す。模型船重量の超過およびカウンターウェイトによって上下揺れの質量は模型船単体よりも20~30%増加しているため、第1波による波面の急上昇に対する応答は小さい傾向にある。逆に一旦運動を始めると、波面の上下よりもやや大きい運動となっている。砕波に対する応答が小さいことは、模型船の高い位置まで波が達することを意味するので、横力および傾斜モーメントは実際よりも波下側に大きく計測されることになるが、運動の時間遅れが小さいので、これによる誤差は限定的なものと考えられる。

第1波による上下揺れの最大値を、水面変位の最大値で無次元化した結果を図IV-24に示す。これは傾斜角がない場合の結果であるが、波高が高くなるにつれて上下揺れの無次元値が徐々に小さくなる傾向や、船型要素による差が小さいことがわかる。図中には、波が船によって変形しないと仮定した場合に、波がブルワークを越える限界線も示している。波がブルワークを越えてハウスに当たるためには、この限界線よりも上下揺れが小さくしなければならないが、その条件を満足するケースは限られている。従って、後に示すハウス側面の衝撃水圧は、局所的な水面の盛り上がりに関係していることがわかる。ただし、模型船の横流れが自由になっている状態では、その盛り上がりとハウスへの衝撃は、本実験の計測値よりも若干小さくなるものと考えられる。

2) 傾斜角の影響

次に、傾斜角による上下揺れの変化を調べたものを図IV-25に示す。波高が低い(a)では傾斜角の影響がほとんど見られないのに対し、波高の高い(b)では傾斜角が大きくなるほど、すなわち波上側に傾斜するほど上下揺れの最大値が小さくなり、船体上部に波が当たりやすくなることがわかる。この理由としては、入射波による水平流に対する波上側の船底の迎角が波下側に傾斜するほど大きくなることの影響が考えられる。

IV. 2. 2. 2. 水圧分布

計測された水圧分布の例を図IV-26~図IV-30に示す。横軸は時間で、水面変位が約2秒で最大になるように表示している。水圧の縦軸は、ゼロレベルを適宜シフトさせてい

るが、表示範囲のスケールは PW8 を除いて同一である。ハウス側面の PW8 は、継続時間は短いが高いピークが発生するため、他の水圧の 2 倍のスケールにしてある。

1) 波高の影響

同一条件で波高の異なる図 IV-26 と図 IV-27 を比較すると、波高の違いは水面下の深い位置や波下側船底にある水圧計にはあまり見られないが、波上側の高い位置になるほど顕著に現れることがわかる。なお、ハウスへの衝撃は、波高の低い図 IV-26 では発生していないが、これよりも波高が高くなるとはっきりと現れるようになる。

2) 傾斜角の影響

次に、同一条件で傾斜角の異なる図 IV-27 と図 IV-28 を比較する。高い位置の水圧 (PW5 ~ PW8) を見ると、波上側に 10° 傾斜した図 IV-27 の方が波下側に 10° 傾斜した図 IV-28 よりもピークが低く、逆に継続時間が長い傾向である。この理由ははっきりしないが、一因としては、この瞬間に船が上方への運動速度を持っているため、水との相対速度が波下側傾斜の方が大きいことがあげられる。また、船底中央の水圧 (PW1、PL1、PL2) にも傾斜角の影響が現れ、波下側傾斜 (図 IV-28) の方が変動が大きい。

3) 船型要素の影響

最後に、同一条件で船型要素の異なる図 IV-27、図 IV-29、図 IV-30 を比較すると、スケグの付いた M20CS (図 IV-30) の船底中央の水圧 (PW1、PL1) の変動が大きいのは当然と言えるが、他の計測位置ではばらつき程度の差しかなく、有意な差は見られないようである。

IV. 2. 2. 3. 横力と傾斜モーメント

上に述べた水圧を表面積分することにより、模型船に作用する衝撃力 (横力と傾斜モーメント) を概算した。表面積分に当たって、水圧は船の長手方向に一様に分布すると仮定した。また、図 IV-22 に示したように、主船体上の計測点の密度は十分と思われるので、主船体のガース方向には各計測点の間を直線分布とした。一方、ハウス上にはチャンネル数の都合から水圧計を 1 点しか設置できなかったため、その側面上の水圧分布を仮定しておく必要があるが、説明の都合上まずハウス上の水圧が一様分布と仮定した結果を示す。

1) 一次解析結果（ハウス上の水圧が一様分布とした場合）

図IV-26～図IV-30に示した5ケースについて、水圧を積分して求めた横力の時系列を図IV-31に示す。また、水線面回りの傾斜モーメントの時系列を図IV-32に示す。5ケースを比較すると、第1波に当たる2秒付近での違いが顕著である。その後もある程度の差は現れているが、第1波付近の差に比べて目立たなくなっており、砕波による衝撃の大きさがわかる。

船体運動にとっては、このような衝撃力成分のピーク値ではなく力積が重要である。また、衝撃実験では、水圧は実験毎にかなりばらつくが、力積は比較的安定することが一般に知られている。そこで、圧力を衝撃力の作用時間にわたって時間積分し、模型船側面に作用する力積の鉛直方向の分布形状を調べた。ここでは、この量を力積と区別するために「圧力積」と呼ぶことにする。時間積分に当たっては、図IV-31および図IV-32で時間波形が急激に立ち上がる点が判別できるので、この点を積分開始点とした。また、衝撃力の終了時点は必ずしも明確でないが、ここでは衝撃発生後に時間波形がゼロになる点を積分終了点とした。圧力積の鉛直分布の例を図IV-33に示す。この図から、鉛直方向の変化が比較的緩やかであることや、波高が大きくなるにつれてピーク位置が高くなる傾向が読みとれる。

2) 砕波による衝撃水圧の鉛直分布とその作用限界高さ

以下では、砕波の作用する限界高さや鉛直方向の水圧分布について考察し、ハウス側面に作用する衝撃力の精度向上を試みる。

2)-1 衝撃水圧の鉛直分布形状

砕波による衝撃力に関しては、港湾構造物を中心に多くの研究があるが、水深、波崩れの程度、圧力の計測位置などが様々であり、水圧分布に関しここで利用できるような一般的な結論が得られているわけではない。しかし、砕波によって構造物の側面に作用する衝撃力は、深水波の場合でも岸壁等と同様の性質を示すと言われているので^{4), 7)}、それらの研究成果を利用することは可能である。防波堤の鉛直部に作用する砕波力については、伊藤、Minikin、合田などの代表的な設計式があり^{14), 27)}、伊藤の式は全面にわたって一様な水圧分布を、他の2つは静水面でピークを持つ分布形状を採用している。

一方、Chan et al.⁴⁾は、鉛直壁に29個の水圧計を配置して巻き波による水圧を詳細に計測しており、その結果では水圧のピーク位置は砕波頂の90%程度の高さにあり、それより上方にほぼ直線上に減少する形状となっている。しかし、これを圧力積に直すと、

上方の圧力の作用時間が短いことを反映し、分布形状はあまり変わらないがピーク位置は静水面となり（図IV-34）、上記の防波堤の設計式（Minikin および合田）と同様である。従って、静水面付近に関しては小型船の喫水が小さいため参考にならないが、高い位置に作用する圧力積にはこれらの研究成果を適用し、上方に向かって直線上に減少する形状を仮定することが適当と考えられる。

2)-2 衝撃水圧が作用する限界高さ

次に、砕波による衝撃力が作用する高さの限界、すなわち直線上に変化する衝撃力がゼロとなる高さであるが、これは実験条件によってばらつきがあり、榎木等⁹⁰⁾は巻き波に近い波の方が限界高さが低いことを報告している。また、上述の設計式では、小規模な砕波を想定した合田の式は波高の1.5倍、巻き波を想定したMinikinの式は波高の0.5倍、その中間のChan et al.の実験では砕波頂の高さの約1.5倍となっている。本実験のビデオをスロー再生した結果と比較すると、波高の1.5倍は明らかに過大評価、波高の0.5倍は明らかに過小評価であり、Chan et al.の結果がほぼ当てはまる。

従って、ここでは、ハウス上の水圧の時間積分値が砕波頂の1.5倍まで直線上に変化すると仮定して、上で求めた力積を補正して用いることとした。ただし、その補正量を計算したところ、一様分布と仮定した場合に比べ横力で最大2%、モーメントで最大6%程度に留まっており、分布形状の仮定に誤差があったとしても全体的な結果に与える影響は小さいと言える。

なお、衝撃力としては、物体に作用する力全体を扱った研究が大部分であるが、榎木等⁹⁰⁾は静水圧成分を $\rho g \eta$ で評価（ ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 η ：水面の盛り上がり）し、その成分が衝撃力全体に占める割合は小さいとしながらも、その成分を除いた形で衝撃力の評価を行っている。本節では、砕波に遭遇した瞬間に作用する全体的な力を評価する観点から、そのような分離を行わない結果について述べる。

3) 波高の影響

波高による衝撃力の変化を図IV-35に示す。図の(a)は横力の力積、(b)は喫水線まわりの傾斜モーメントの力積である。これらの図から、横力、モーメントとも波高約25cmを閾値とし、その後は直線上に増加していること、および船型の差がほとんど見られないことがわかる。

また、モーメントと横力の力積の比をとることにより、衝撃力が作用している時間の平均的な着力点高さを求め、喫水で無次元化したものを(c)に示す。波高が低い場合

(25.9cm) には、ハウスに力が作用しないため着力点が若干低くなっているが、これを除くと、着力点高さは喫水の 1.2~1.6 倍 (水面上 8.4cm~11cm) のレベルにあり、波高による変化はあまり大きくない。これは、図IV-33に示した例に限らず圧力の鉛直分布が波高によってあまり変化しないことを意味しており、水面上の低い位置に存在する小型船のひとつの特徴と言える。

4) 傾斜角の影響

次に、傾斜角による衝撃力の変化を図IV-36に示す。正の傾斜角は、模型船が波上側に傾斜した状態を示している。波上側に傾斜した方が横力、傾斜モーメント、着力点高さとも大きくなる傾向であるが、その差はあまり顕著ではない。また、船型要素による差を見ると、図IV-35(c)と同様に M20CS の着力点が他の 2 船型に比べて低い傾向が見られ、スケグの左右に作用する圧力差 (図IV-30参照) によって着力点に差が生じることがわかる。

5) 衝撃力が運動に及ぼす影響

最後に、最大波高 (42.8cm) の場合を例にとり、力積の大きさについて考察する。

この波高における横力の力積は約 $6\text{kg}\cdot\text{sec}$ であり、模型船の重量を 10kg、付加質量係数を 0.5 として運動量保存の法則を適用すると、衝撃力による波下側への横流れ速度の増加は 3.9m/s になる。また、図IV-31から衝撃力の継続時間を 0.25 秒とし、その間に一様に力が掛かるとすると、衝撃力を受けた後の模型船の横移動距離は 0.49m (船幅の 1.4 倍) となるので、かなり大きな力積が作用したと言える。

一方、傾斜モーメントについて考えると、着力点高さは喫水の 1.5 倍程度になっているので、模型船の重心を水面上 10cm とすれば、重心まわりのモーメントのレバーは 0.5cm ほどにしかならない。その結果、傾斜モーメントの力積は、波下側に $0.03\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ ほどである。模型船の慣動半径は、自由横揺れ試験の結果から、付加慣性モーメントを含めて $0.6B$ (B は船幅) 程度である。これから衝撃力による波下側への角速度の増加を計算すると 38deg/s となる。また、横移動距離と同様に衝撃後の傾斜角を計算すると、0.25 秒の間に 4.8° 傾くことになる。このように、衝撃力の作用時間が短いので傾斜角そのものは小さいが、角速度はレバーが短いにもかかわらず大きな値となった。

ただし、実際には減衰力が作用するため、横流れ速度は上記の値よりもかなり小さいと考えられる。たとえば三次元模型船の場合 (II-1-3節)、図 II -8 に示した水圧の記録では、やはり 70cmAq 程度の水圧が主船体側面で計測され、作用範囲が狭いことから

力積は上記の値の数分の一と考えられる。しかし、横加速度からの概算では $0.3\text{kg}\cdot\text{sec}$ となっており、上記の値の $1/20$ にしかならない。また、横揺れの場合は、減衰力とともに復原力が運動を押さえる方向に作用し、さらに横流れからの連成モーメントが作用する。衝撃力が作用する瞬間には波面に対する傾斜角は波上側になっていることから、このときの連成モーメントも波上側、すなわち衝撃モーメントをうち消す方向に作用する可能性が高い。

以上の検討から、砕波による衝撃力は模型船の慣性力に比較してかなり大きいと言えるが、それと転覆との関係については、シミュレーション計算によって他の流体力も含めて総合的に評価することが必要である。

IV-3 転覆運動の力学的メカニズムの検討

IV-1節では、転覆限界波高に対する船型要素の影響を検討し、小型船に特徴的な性質を示す横流れ時の抗力の着点高さを中心にその説明を試みた。本節では、前節で大きさを概算した砕波による衝撃力と、第III章で計測した左右揺れ時の流体力等を用いてシミュレーション計算を行い、転覆限界波高と船型要素との関係や砕波による衝撃力の働きについて検討を行う。

IV-3-1 波高が高い場合の短時間の転覆

まず、波高が高い場合の短時間の転覆について、3船型のシミュレーション結果の比較を行う。転覆限界波高をやや上回る波高 41.7cm 、 $\text{OG} = 9.8\text{cm}$ 、初期傾斜ゼロの場合について比較した。

1) 力積モーメント

シミュレーション計算を行うのに必要な力積モーメントは、前章に述べた計測結果を用いた。衝撃力の力積は図IV-35(a)から3船型とも $4.3\text{kg}\cdot\text{sec}$ とした。また水面上の着点の高さは、同図(c)から M20 と M20C が喫水の 1.45 倍、M20CS が 1.3 倍である。これを重心回りの力積モーメントに換算すると、M20 と M20C が $0.015\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ (波下側)、M20CS が $-0.030\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ (波上側) となり、モーメントレバーが小さいため比較的小さい値である。

2) 横揺れの計算結果

シミュレーション結果を図IV-37～図IV-39に示す。3船型とも実験と同様な時系列をもって波下側に転覆しているが、M20の横揺れは実験との差が比較的大きい。この一因としては、横流れ速度が2m/s以上にも達するため、チェーン部に角がなく剥離点が移動しやすいM20船型において、シミュレーションに用いた強制左右揺れ時の流体力と差が生じたことが考えられる。従って、定量的な正確さには若干の問題があるが、定性的に転覆メカニズムを検討することは可能である。

3) 流体力の比較

図IV-37～図IV-39から3船型に作用する流体力を比較すると、波の谷(4.7秒付近)から上り斜面にかけて同程度の波下側の復原力(図(f))が作用し、これによって船が波下側に傾斜し始めることが共通している。しかし、その後作用する流体力の大小関係は3者3様である。

M20Cでは左右揺れ減衰力からの連成モーメント(図(h))が非常に大きく、これがマイナス方向に作用する他の流体力(衝撃モーメントを除く)を上回って転覆している。一方M20CSでは、その連成モーメントは支配的という程ではなく、また衝撃モーメントは逆にマイナス側(復原する方向)となっている(図(i))。しかし逆方向(転覆する方向)のモーメントとして、左右揺れ加速度に比例する成分の着地点が他の2船型よりも低いため(図III-5参照)連成モーメントがプラスとなっており(図(g))、さらに付加慣性モーメントが小さいために波傾斜 ϕ_w の角加速度に比例する成分(マイナス方向)が小さくなっている(図(d))。このように各流体力は複雑な変化をするが、波の上り斜面から山にかけてM20CSの横揺れが直線上に発達していることから、(d)～(i)に示す流体力がほとんど釣り合っていることがわかる。

最後にM20であるが、この船型が他と大きく異なるのは、チェーン部が丸いため横揺れ減衰力が1/3以下(表IV-1参照)なことである。M20Cと比較すると各流体力はほとんど同じであるが、横揺れ減衰力(図(e)、マイナス方向)と左右揺れ減衰力からの連成モーメント(図(h)、プラス方向)がともに小さくなっていることがわかる。そしてこの両者の減少量が同程度なため、やはり横揺れが直線上に発達して転覆する結果となっている。

4) まとめ

以上の検討結果をまとめると、転覆方向の角加速度が大きくなるのは3船型とも波の谷から上り斜面にかけてであり、その原因となるのは復原力である。すなわち、波の

谷付近で波上側に傾斜することによって波下側のモーメントが大きくなり、波下側への横揺れ運動が始まる。そして、その後は各流体力がバランスするため横揺れはほぼ直線上に発達するが、その構成比は3者3様と言える。傾斜を大きくする方向の特徴的な点を述べると、M20C は左右揺れ減衰力からの連成モーメントが極めて大きく、M20CS はそれが小さい代わりに左右揺れ加速度に比例する連成モーメントが転覆方向になり、M20 は横揺れ減衰力が極めて小さい。そして、砕波による衝撃モーメントは、このような大波高中であっても支配的なものではない。

5) 転覆しにくい船型に関する考察

以上に述べた船底勾配角 20° の3船型の検討結果から大波高中でも転覆しにくい船型を考えると、その実現がなかなか容易でないことがわかる。なぜならば、耐転覆性能（あるいは一般的な意味での耐航性能）を高めるためには横揺れ減衰力を大きくすることが基本的に必要であるが、ハードチェーン船型にすると左右揺れ減衰力からの連成モーメントが大きくなる。それを防ぐためにスゲグを取り付けると、今度は左右揺れ加速度に比例する連成モーメントが転覆方向になってしまうからである。また、重心を下げて復原力を大きくすることは、波の谷付近で作用する波下側のモーメントを大きくすると同時に、砕波による衝撃モーメントのレバーをも大きくするからである。

左右揺れからの2つの連成力の着力点をまとめた図（図Ⅲ-5および図Ⅲ-14）を比較すると、船底勾配角の大きいM30やM30C（両図(c)）ではどちらの着力点も比較的高い位置にあり、重心回りのレバーが小さく安全側の性質を示すことがわかる。しかし、このようなV字型の船型を船尾近くまで保つような設計は、その目的に特化した救命艇などを除き実際的でない。

I-3-3節では平山等²³⁾のまとめを紹介し、ヨットや円盤形の洋上ブイ、あるいは復原力消失角が 180° 近くまである自己復原型救命艇を含めて転覆限界波高が一定値（船幅の1.1倍程度）になることを述べた。その原因は、ここで検討したような船型と流体力との関係、すなわちひとつの流体力が改善されれば他の流体力が転覆にとって不利になること、からかなりの部分が説明されよう。

IV-3-2 波高が低い場合の転覆

次に、わずかな初期傾斜（波下側 3° ）がある場合にM20C船型が低い波高でも転覆する原因を調べるため、前節と同様にシミュレーション計算を行った。すでに述べたように、波高が低い場合に発生する転覆は安全上重要な問題である。ここでは、波高

25.9cm、OG = 10.8cm の同一条件で 3 船型の比較を行った結果について述べる。

1) 力積モーメント

シミュレーション計算を行うのに必要な力積モーメントは、前章に述べた計測結果を用いた。衝撃力の力積は図IV-35(a)から 3 船型とも $0.5\text{kg}\cdot\text{sec}$ とした。また水面上の着力点の高さは、同図(c)から M20 と M20C が喫水の 1.04 倍、M20CS が 0.91 倍である。これを重心回りの力積モーメントに換算すると、M20 と M20C が $-0.013\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ 、M20CS が $-0.017\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ となる。前節に示した波高が高い場合とあまり大きさが変わらないのは、力積が小さいことと、重心回りのレバーが大きいこと（着力点の低下による）とが相殺したからである。なお、この波高では、着力点の低下によって衝撃モーメントはすべて波上側に作用している。

2) 運動の時間波形

計測された運動（横揺れ、左右揺れ、上下揺れ）と合わせて横揺れのシミュレーション結果を図IV-40～図IV-42に示す。これらの場合も、シミュレートされた横揺れの時間波形は実験値とおおむね一致している。

3 船型の横揺れの特徴をそれぞれ述べると、M20 船型は 2 つの波によって揺れた後、自由横揺れに移行していることがわかる。一方 M20C 船型は、第 2 波中で横揺れが発達して転覆している。最後に M20CS 船型は、第 2 波の下り斜面でも復原せず、第 2 波が通り過ぎるまで長時間一定の傾斜角を保ち、最後に復原して自由横揺れに移行している。ここで、大傾斜角が持続している間は不安定な状態のように見えるが、図IV-2(a)に示したように復原力が正の範囲は約 64° までであるので、転覆寸前というほどではない。

この 3 船型の運動を、上下揺れ－横揺れの位相平面で比較したものを図IV-43に示す。(a)は第 1 波中の運動、(b)は第 2 波中の運動であり、第 1 波と第 2 波の間の谷 ($z = -1.3\text{m}$ 付近) を重複させている。第 2 波が通過した後に自由横揺れに移る部分は省略した。前段に述べたように、転覆しやすさ（最大傾斜角）は M20C、M20CS、M20 の順になっているが、このことと図IV-43を比較すると、次のことがわかる。

- (1) 第 1 波と第 2 波の間の谷での波上側傾斜は、転覆しやすさの順に大きくなっている。（図IV-43(a)）
- (2) 谷を過ぎた時点（図IV-43(b)の $z = -0.06\text{m}$ 付近）では、3 本の軌跡は横軸上で交差する。すなわち、船型による傾斜角の差はなく、3 船型ともほぼ直立する。
- (3) 第 2 波の上り斜面（図IV-43(b)の $z = 0\text{m}$ 付近）では、傾斜角、角速度とも転覆

しやすさの順になっている。

(4) 第 2 波の山での傾斜角も、この順になっている。

このように、波高が低い場合には、船型のわずかな違いによって横揺れ運動の様子が大きく異なる結果となった。以下では、この運動の特徴と各流体力成分とを比較しながら、転覆メカニズムの検討を行う。

3) 流体力の全般的な大きさ

図IV-40～図IV-42から 3 船型に作用する流体力を見ると、波高が小さいことを反映して全般的に前節の結果（図IV-37～図IV-39）よりも小さいことがわかる。しかし、復原力（図(f)）の大きさは前節と同じレベルにある。このことは、小型船の復原力の特徴から説明される。すなわち、図IV-2(a)に示したように、幅広浅喫水な小型船では復原力の最大値が比較的小さな傾斜角で生じ、この 3 船型ではわずか 18° 付近で最大となる。従って、相対傾斜角 ϕ_{rel} がこの角度を超える場合には、波高や運動の大きさにかかわらず、復原力の時系列中の最大値（および最小値）は一定となる。別の言い方をすれば、このような小型船では、波高が低くなるほど復原力の寄与が相対的に大きくなる傾向にある。

ここに示した 3 船型では、波下側の初期傾斜があるため復原力の波形は非対称となっているが、プラス側マイナス側とも復原力曲線の最大値・最小値に近い値となっている。

4) 3 船型の流体力の比較

次に 3 船型の流体力の比較から、波高が低い場合の転覆メカニズムの検討を行う。その際に注目すべきは、繰り返し述べてきた左右揺れによる連成モーメントであり、また他の流体力に比べて大きな値を示す復原力についても注意を払う必要がある。

4)-1 左右揺れによる連成モーメント

まず、左右揺れからの連成モーメントに着目する。

実験およびシミュレーション結果は M20C が転覆、M20CS が長時間の大傾斜、M20 が安定した横揺れとなっているが、図IV-40～図IV-42において第 2 波の山（7.7 秒付近）付近を比較すると明らかなように、連成モーメント（図(g)および(h)）も M20C、M20CS、M20 の順で大きくなっており、特に M20C と M20CS においては、転覆方向に作用するモーメントの大部分がこれによって占められている。従って、これらのケースでも、左右揺れ連成モーメントの大きさが転覆しやすさの重要なバロメータと言える。連成モー

メントのうち、左右揺れ加速度に比例する成分(図(g))は、これが有意な大きくなるのは M20C の転覆運動の最終段階だけであるから、特に、左右揺れ減衰力による成分(図(h))に注意する必要がある。

わかりやすい例として M20C と M20CS を比較すると、7.6 秒付近での横揺れ角は同様に約 30°であり、両者とも傾斜がさらに発達する過程にあるので、その後の連成モーメントの大小が転覆/非転覆に大きな影響を与えたことが明らかである。そして、その差は図 II-9 に示した抗力係数と図 III-14 に示した傾斜角による着点の変化から説明されよう。第 2 波の山にある 7.7 秒付近では、船は波下側に大傾斜しながら波下側に横流れしているが、その際の抗力は M20CS の方が大きい(図 II-9)ものの、着点の低下は M20C の方が大きい(図 III-14)。そして、重心まわりのモーメントレバーの違いが抗力の違いを上回った結果として、M20C の連成モーメントが M20CS よりも大きくなったものと考えられる。ただし、後にも述べるように、連成モーメントが作用する時点での角速度も M20C の方が大きいことに注意しておく必要がある。なぜならば、力学の教科書にあるように、仕事率は力と速度の積であるから、同じモーメントが作用しても、角運動エネルギーの増加は角速度に比例するからである。

なお、図 II-9 と図 III-14 を見ると、M20 船型の抗力係数は M20C とほとんど差がなく、また着点の傾向も似ているが、図 IV-40 と図 IV-41 の(h)には大きな差がある。これは、7.4~8.0 秒にかけての横流れ速度(同図(b))に差があるためであって、やはり波下側の方向である流体速度との差をとった場合に、相対速度に 2 倍程度の開きが生じたためである。

4)-2 復原力

次に、波の谷から第 2 波の上り斜面(6.8~7.5 秒付近)にかけて作用する復原力(図 IV-40~図 IV-42 の(f))の山に着目すると、連成モーメントの場合と同様に M20C が最大で以下 M20CS、M20 の順に大きく、やはり転覆しやすさの順になっていることがわかる。この原因は、図 IV-43 から述べたように、波の谷での傾斜角がこの順に波上側となっているからである。そして、この時点での他の流体力が比較的小さいことから、第 2 波上り斜面での横揺れの発達は主に復原力の作用によるものと言え、M20C の横揺れ速度が最も大きいという結果につながっている。

波の谷における傾斜角には、第 1 波中の運動の履歴が関係してくる。しかし、第 1 波中では特に卓越した流体力は見られない。たとえば M20(図 IV-40)と M20C(図 IV-41)の 7 秒付近までを比較すると、付加慣性モーメントによる成分(図(d))、横揺れ

減衰力（図(e)）、復原力（図(f)）にそれぞれ違いが見られる。また、第 2 波中とは逆に横流れ速度は M20 の方が若干大きいため、上下揺れに微妙な時間差が生じており（図(c)）、第 1 波に乗っている時間は M20 の方がやや長いことがわかる。さらに図IV-43(a)から、第 1 波の山での傾斜角は M20 が最も大きいことがわかる。このように、波の谷での傾斜角の差は横流れ特性を含めた各種流体力のバランスの結果であり、これを船型に関連付けて説明することは容易ではない。

試みに、第 1 波との遭遇時に作用する衝撃モーメントの 1.5 倍のモーメントを適当なタイミングで M20 に作用させ、波の谷での傾斜角を M20C 相当にした数値実験の結果を図IV-44に示す。復原力の山の大きさおよび作用時間が M20C に近くなった結果横揺れが大きくなり、M20CS に近い波形で第 2 波が通り過ぎるまで傾斜したままとなるが、やはり転覆には至らない。このように、第 2 波との遭遇時に大きな波下側モーメント（復原力による）が作用しても、第 2 波の山で左右揺れ連成モーメントが大きくならなければ、最終的にはなかなか転覆しないようである。

5) 転覆発生の条件とメカニズム

以上の検討結果から転覆発生の条件をまとめると、次の 3 条件となる。

①船型と重心高さ：

横流れ時に進行方向に傾斜する連成モーメントを受ける船型であること

②波と出会う条件：

波の谷で波上側に大きく傾斜すること

③水平運動：

波の山付近において、大きな横流れ速度を持つこと

第 2 波との遭遇時に卓越する流体力は復原力である。波の谷付近で復原力が大きくなると、次の昇り斜面で大きな横揺れ角速度を生じる。そのためには、②の条件が必要である。また、転覆直前に転覆方向に作用するモーメントの主要部分は左右揺れ減衰力からの連成モーメントであり、第 2 波の山付近で作用するこの連成力の大小が転覆／非転覆を分ける。これが大きくなるためには、①と③の条件が必要である。また、それが横揺れの角運動エネルギーを十分に増加させるためには、すでに角速度がある程度大きくなっている必要があり、その意味で②の条件も必要である。

II.1.3.5項では転覆運動の特徴として、 $\phi - d\phi/dt$ の位相面において横揺れが渦巻き状に発達すること、すなわち波下側の傾斜モーメントが作用し続けることを述べた。本節で検討した結果から、その傾斜モーメントの主要部分は上記復原力と連成モーメントで

あり、この2つが連続して作用することが転覆の主原因と結論することができる。

6) 船型によって転覆／非転覆が分かれる原因

ハードチェーン船型の M20C は、上記①～③の条件をすべて満足しているため転覆したものと考えられる。

M20C にスケグを付加した M20CS は、第2波の山付近までは M20C に近い横揺れ運動をするが、大傾斜を長時間保つのみで転覆には至らない。その原因は、上記連成モーメントと、その連成力が作用する時点の横揺れ角速度とが、ともに M20C より若干小さいためである。すなわち、条件①と②が十分に満足されていないものと考えられる。連成モーメントについては、III-3節で調べた減衰力着力点の傾斜角依存性が関係しており、船型による非線形流体力の特徴から説明することができる。

最後に、ラウンドチェーン船型の M20 は、上記連成モーメントと復原力とがともに最も小さいため、安定した横揺れをする結果となっている。すなわち、条件②と③が満足されていないことが転覆しなかった原因である。連成モーメントが小さいのは、横流れ速度が小さいことが主な原因と考えられる。

横流れ速度をさらに検討するため、図IV-40～図IV-42の(b)を拡大し、3船型の水平運動を比較したものを図IV-45に示す。M20C の横流れ速度は第1、2波中とも M20CS をやや上回っているが、この傾向は規則波中の定常状態の結果(図IV-11)と一致している。一方、M20 の横流れ速度は、第1波中では3船型の中で最も大きく第2波中では最も小さくなっており、規則波中とは異なった傾向である。図IV-40～図IV-42の(a)を見ると、M20 の横揺れの計測波形が他の2船型よりも大きくなっているが、その大きさは第1、2波中ともに同程度であるから、抗力等の傾斜角依存性から M20 の横流れの特徴を説明することはできない。一方、前節(IV-3-1「波高が高い場合の短時間の転覆」)では、M20 の横流れがかなり大きくなる場合があることを示した。このように、M20 船型の横流れ速度は種々の条件によって複雑な変化を示すようである。その原因としては、角のない船型であるため剥離点や剥離領域の大きさが変化しやすいことが考えられるが、詳しい検証は今後の課題としたい。

7) まとめ

以上検討したように、波下側にわずかな初期傾斜(3°)を持つ小型船が低い波高で転覆する場合には、波の山付近で作用する左右揺れ減衰力からの連成モーメントが重要である。また同時に、波の谷付近で作用する復原力も、横揺れ角を大きくするという直接

的な意味と、連成力作用時の角速度を大きくするという間接的な意味で無視できない。このような知見は、三次元模型船を用いた検討（第 II 章）において、波下側に転覆する 2 つのパターン（パターン A および B）について述べたことと同様である。

上に指摘した角速度について振り返ると、第 II 章に述べたパターン A（初期傾斜：ゼロ、第 1 波：砕波）では、砕波の作用が第 2 波と遭遇する時の大きな角速度につながる。逆にパターン B（初期傾斜：波下側、第 1 波：非砕波）では砕波が作用しないことが同様の結果につながることを述べたところである。このように、転覆する一波に遭遇する時の角速度はそれまでの運動や外力の履歴によって決定される。本研究では、模型船が静止した状態に集中性過渡水波を当てる実験を行ったが、実海域においては船が不規則な波に晒されるとともに様々な外乱が想定されるため、大波に遭遇する角速度は種々に変化することが想定される。このことは、横流れ速度についても同様である。従って、これらを船型と直接関係付けるのは実際的でない。「船型と安全性」という問題にテーマを絞れば、従来注目されなかったものとして、左右揺れ減衰力の着点の傾斜角依存性に注意を払うことが重要と考えられる。

IV-3-3 まとめ

以上、本節（IV-3節）では、シミュレーション計算の結果から各流体力成分の働きを調べることにより、転覆に至る力学的メカニズムを考察した。その際には、ラウンドチェーン船型の M20、ハードチェーン船型の M20C、ハードチェーン+スケグ船型の M20CS を比較検討することにより、船型要素と転覆との関係（別の見方では流体力と転覆との関係）の評価を試みた。その結果をまとめると、次のようになる。

まず、波高が高い場合の転覆については、

- (1) 波高 41.7cm（船幅の約 1.2 倍）の集中性過渡水波を当てた結果、3 船型の船体運動に大きな違いは見られず、いずれも第 1 波中で短時間に転覆した。横揺れが発達し始めるのは、波の谷から上り斜面にかけて作用する復原力による。その後は各種流体力がバランスする結果、直線状に横揺れが発達して転覆する。
- (2) しかし、その流体力のバランスは船型によっては 3 者 3 様である。転覆する方向に作用する流体力について述べると、M20C は左右揺れ減衰力からの連成モーメントが極めて大きく、M20CS はそれが小さい代わりに左右揺れ加速度に比例する連成モーメントが転覆方向に作用し、M20 は横揺れ減衰力が極めて小さいことが特徴的な点である。そして、砕波による衝撃モーメントは、このような大波高中であって

も支配的なものではない。

- (3) 船型を変化させてもこれらの流体力すべてを同時に小さくすることむずかしいため、大波高中でも転覆しにくい船型の実現は容易でないものと考えられる。

次に、波高が低い場合の転覆については、

- (4) 波高 25.9cm (船幅の 0.74 倍) の集中性過渡水波を、波下側に 3° の初期傾斜を付けた模型船に当てた結果を比較したところ、M20C は第 2 波の下り斜面で転覆、M20CS は転覆しないものの長時間の大傾斜、M20 は安定した規則的な横揺れという結果になった。
- (5) 全体的な流体力の構成比を見ると、波高が高い場合に比べ復原力の割合が大きい。これは、小さな傾斜角で復原力が最大値を取るという幅広浅喫水船の特徴が原因である。
- (6) 波高が高い場合と同様に、横揺れが発達するきっかけとなるのは波の谷付近で作用する復原力である。また、引き続く波の山付近で転覆方向に作用する流体力は左右揺れ減衰力からの連成モーメントが主である。これら 2 つの流体力の大きさによって、(4) で述べた転覆しやすさが決定される。
- (7) 上記連成モーメントは M20C が最も大きな値を取り、これが転覆につながっている。M20CS がやや小さい原因は、左右揺れ減衰力の着点の傾斜角依存性から説明することができる。また、M20 のそれが小さい原因は、横流れ速度が小さいことによる。
- (8) 波の谷付近で作用する復原力や横流れ速度の傾向は、船型の違いから直接説明することが難しく、また遭遇する海象によって様々に変化することが考えられる。従って、船型と関連して安全性を考える上では、左右揺れ減衰力の着点の傾斜角依存性に注意を払うことが重要と考えられる。

IV-4 第IV章のまとめ

第 II 章では、三次元模型船を用いて小型船の転覆パターンや転覆メカニズムについて検討したが、小型船の船型はバリエーションに富むことから、そこで得られた知見の汎用性を確認する必要がある。そこで第 III 章では、小型船に特徴的な性質を示す左右揺れ時の流体力について、9 種類の二次元模型船を用いた計測を行った。

本章では、流体力の特徴から対象を船底勾配角 20 度の 3 船型 (ラウンドチェーン船

型 M20、ハードチェーン船型 M20C、ハードチェーン+スケグ船型 M20CS) に絞り、これら船型要素による運動の違いを検討した。三次元模型船の場合と同様に砕波(集中性過渡水波)中での転覆運動を調べたほか、規則波中の運動計測によって横揺れ応答関数等の基本的な性質を検討し、併せて本シミュレーション法の適用限界を調べた。また、砕波による衝撃モーメントについても実験により評価し、そのデータを用いたシミュレーション計算によって転覆運動のメカニズムを検討した。

その結果を要約すると、以下ようになる。

まず、規則波中の横揺れについては、

- (1) 横揺れ応答関数には非線形性が顕著に現れる。振幅は、波高の増加とともに小さくなり、また低周波数側に倒れたような形状となる。位相は、波高影響は小さいが、同調周波数付近で急激に変化する。
- (2) 応答関数の振幅、位相とも、船型による違いは比較的小さい。後に述べるように、転覆限界波高は船型によって大きく異なる場合があるので、規則波中の応答関数から安全性を評価することは必ずしも適当でない。
- (3) ストリップ法 (NSM および STFM) では上記応答関数の性質を計算できないが、本研究で用いるシミュレーション法の結果は、一部を除き実験値と良く一致する。
- (4) 本シミュレーション法は、横揺れ固有周期に近い動揺周期で行った強制左右揺れ試験の実験値を用いているが、そこから離れた広い波長範囲に適用可能である。
- (5) 規則波中で転覆が発生しにくいのは、波周期と横揺れ固有周期が一致する付近で位相が不連続に変化し、横揺れ角速度とモーメントが同位相にならないことが原因と考えられる。

次に、集中性過渡水波中の運動については、

- (6) 一般的に言われているように、転覆限界波高はおおむね船幅を少し上回る値である。ただし、船型によってはそれよりも小さい波高で転覆する場合がある。特に、波下側に初期傾斜があると転覆しやすくなる。
- (7) 3 船型を比較すると、M20CS の転覆限界波高が安定して大きいのに対し、他の 2 船型は重心高さや初期傾斜によって転覆限界波高が変動する。特に、M20C は低い波高で転覆する場合がある。
- (8) 波高が高いときの転覆は砕波中で短時間に発生し、船型による差は比較的小さい。一方、波高が低いときの転覆は砕波に続く波の中で発生し、船型、重心高さ、お

よび初期傾斜によって転覆する場合としない場合とがある。

- (9) 横揺れ減衰係数の小さい M20 船型は、重心が高い場合、砕波を受けた直後に波上側に傾斜する傾向がある。この性質を原因として、非常に波高が高くても転覆しないケースや、波上側に転覆するケースが生じる。

砕波による衝撃力については、

- (10) 船体中央横断面の 12 点（スケグ付きの場合は 14 点）の水圧を計測した結果、水線上の高い位置では波高影響が顕著に現れる。また、スケグ付きの M20CS では船底中央部の水圧変動が大きい。
- (11) これを表面積分して計算した力積および力積モーメントは、ともに波高約 25cm を閾値として波高とともに直線上に増加する。しかし、船型の影響は比較的小さい。また、それらの比として得られる着力点は、M20CS がやや低い傾向であるが、波高影響は小さい。
- (12) 力積、力積モーメントおよび着力点は、すべて傾斜角の影響は小さい。

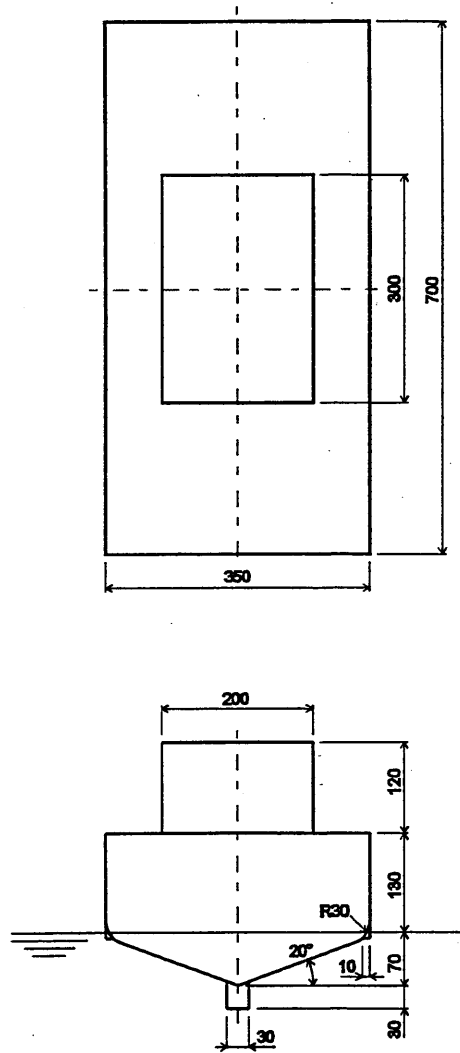
波高が高い場合の転覆については、

- (13) 3 船型の船体運動に大きな違いは見られず、いずれも第 1 波中で短時間に転覆する。横揺れが発達し始めるのは、波の谷から上り斜面にかけて作用する復原力による。その後は各種流体力がバランスする結果、直線状に横揺れが発達して転覆するが、流体力の寄与の度合いは 3 者 3 様である。。
- (14) 船型を変化させても、これらの流体力すべてを同時に小さくすることはむずかしいため、大波高中でも転覆しにくい船型の実現は容易でないものと考えられる。

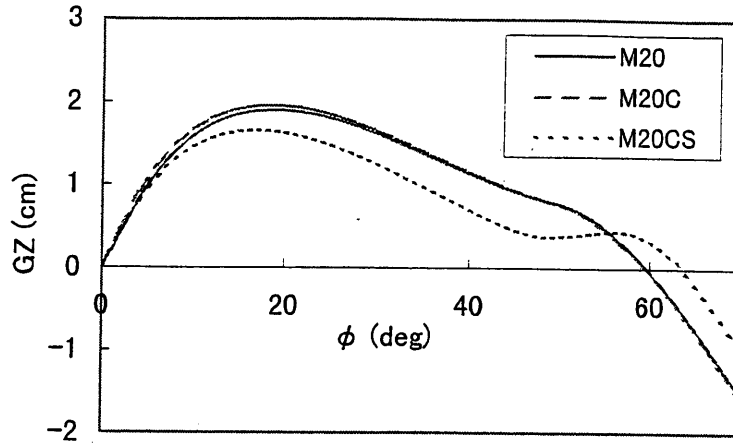
最後に、安全上最も重要と考えられる、波下側に 3° の初期傾斜が付いた模型船に低い波高の波が当たる場合については、

- (15) M20C は第 2 波の下り斜面で転覆、M20CS は転覆しないものの長時間の大傾斜、M20 は安定した規則的な横揺れというように、船型の影響が顕著になる。
- (16) 波高が高い場合と同様に、横揺れが発達するきっかけとなるのは波の谷付近で作用する復原力である。また、引き続く波の山付近で転覆方向に作用する流体力は左右揺れ減衰力からの連成モーメントが主である。これら 2 つの流体力の大きさによって、転覆しやすさが決定される。

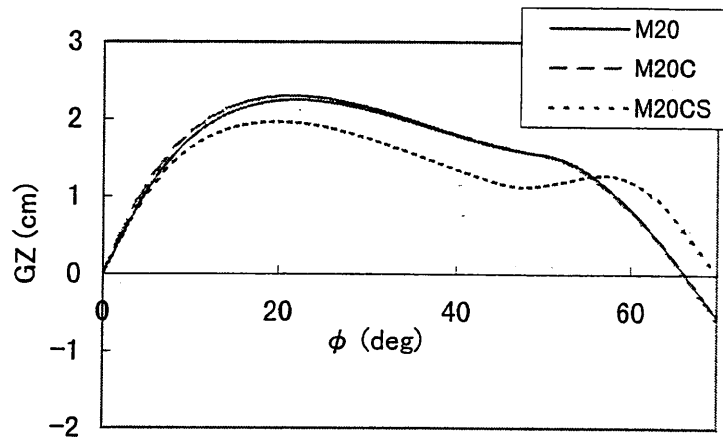
- (17) 転覆発生条件は、①横流れ時に進行方向に傾斜する連成モーメントを受ける船型であること、②波の谷で波上側に大きく傾斜すること、③波の山付近において大きな横流れ速度を持つこと、の 3 つにまとめられる。実海域で条件②と③が様々に変化する可能性を考えれば、船型と関連して安全性を考える上で、左右揺れ減衰力の着重点（条件①）に注意を払うことが重要と考えられる。



图IV-1 模型船



(a) OG = 10.8 cm



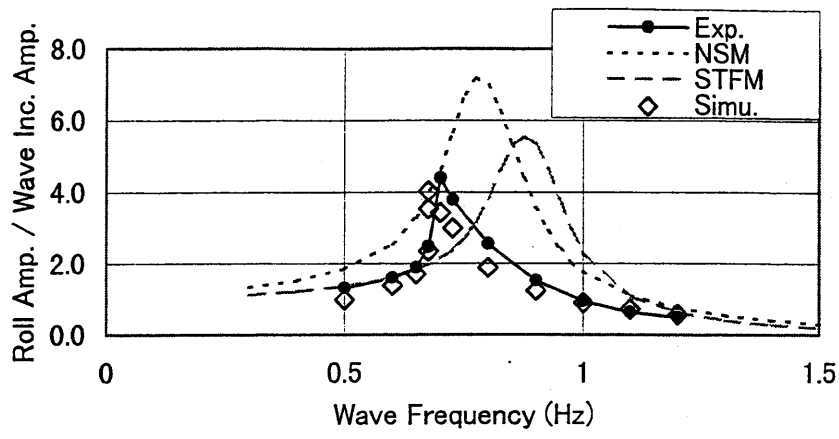
(b) OG = 9.8 cm

図IV-2 復原力曲線

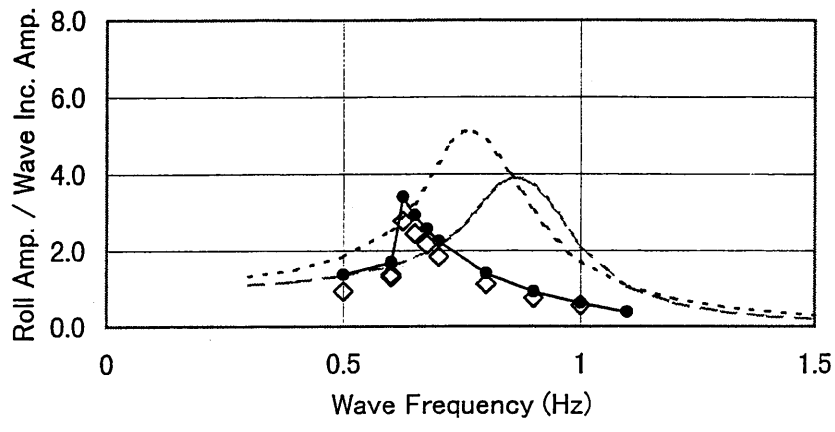
表IV-1 主要目

	M20	M20C	M20CS
L (m)	0.70		
B (m)	0.35		
D (m)	0.20		
d (m)	0.07		
∇ ($\times 10^{-3}$ m ³)	9.24	9.35	10.03
GM (m)	0.121-0.131	0.136-0.146	0.120-0.130
OG (m)	0.108-0.098		
Tr (sec)	1.272-1.085	1.124-1.003	1.117-1.010
κ_a (-)	0.001-0.015	0.010-0.027	0.012-0.040
β (-)	0.309-0.275	1.126-1.066	0.993-0.898
θ_v (deg)	59.7-66.3	59.4-66.1	63.6-70.0

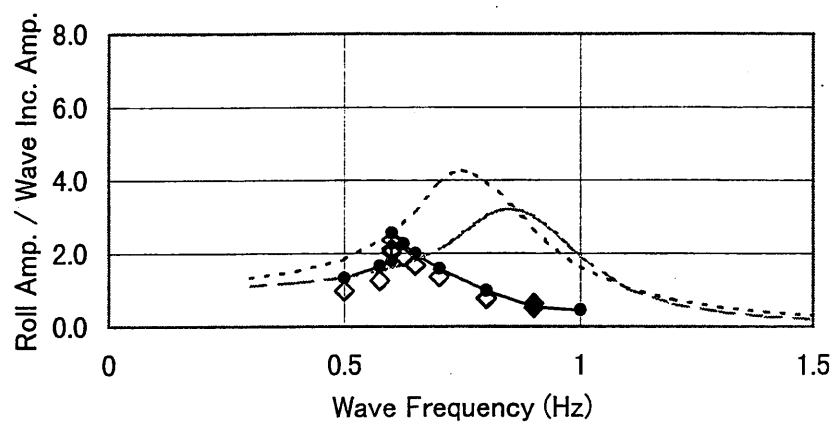
注) GM、横揺れ固有周期(T_r)、横揺れ減衰係数(κ_a 、 β)および復原力消失角(θ_v)は、左側がOG=0.108m、右側がOG=0.098mのときの値である



(a) 波高 7 cm

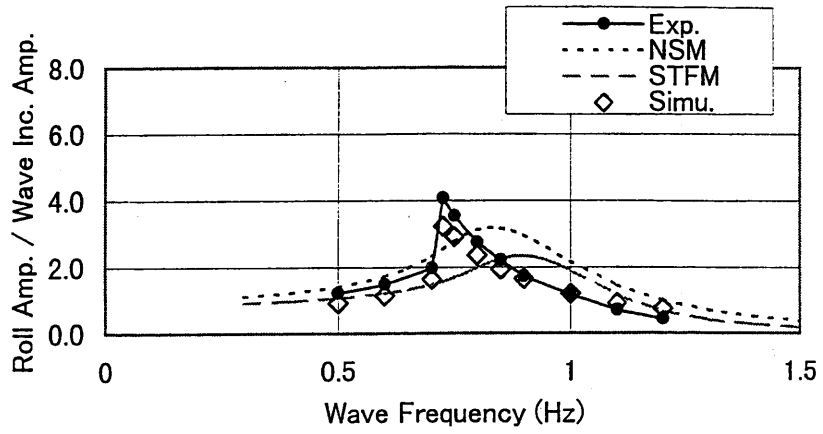


(b) 波高 14 cm

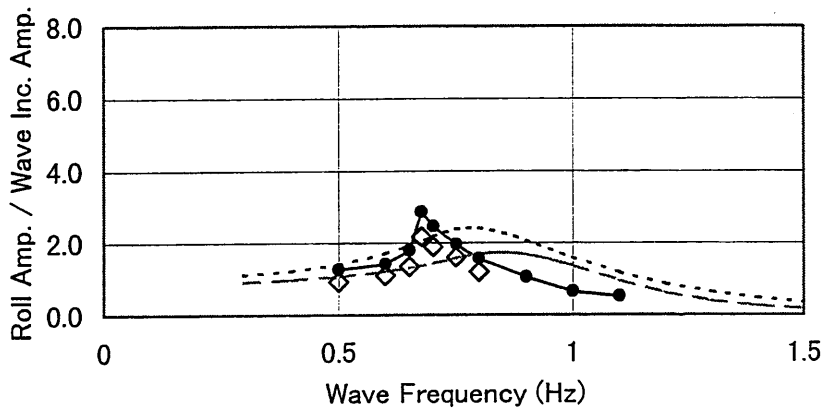


(c) 波高 21 cm

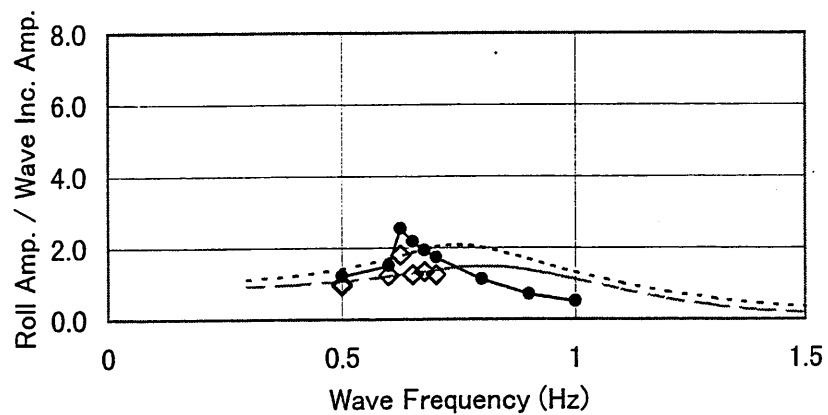
図IV-3 横揺れ応答関数の振幅
(模型船: M20、OG=10.8cm)



(a) 波高 7 cm

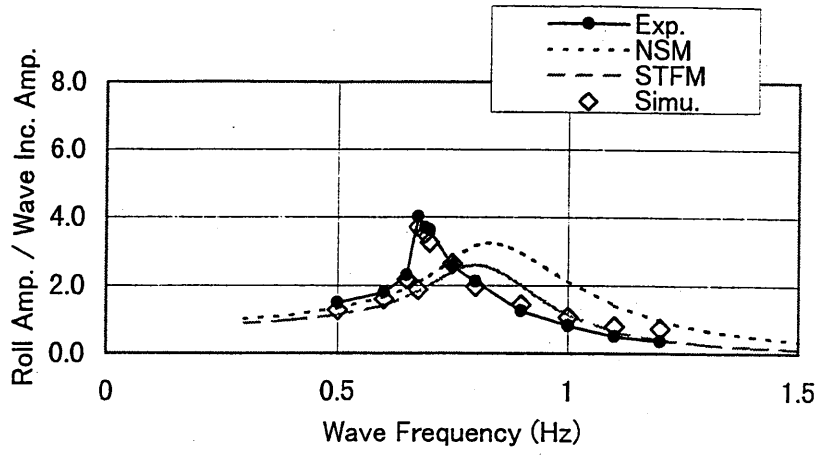


(b) 波高 14 cm

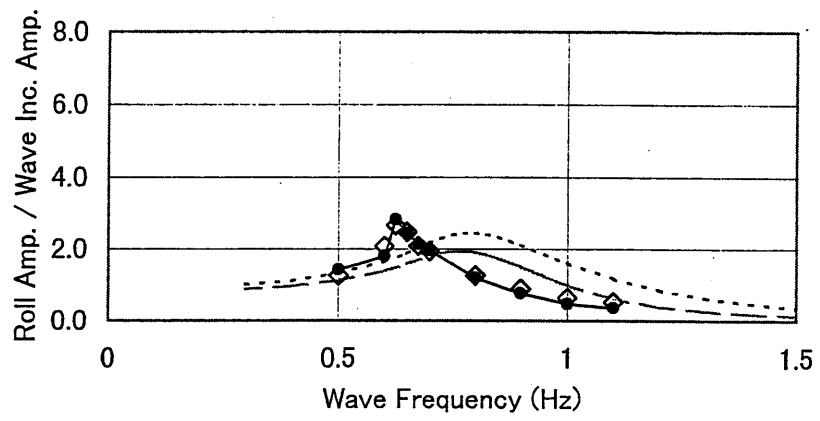


(c) 波高 21 cm

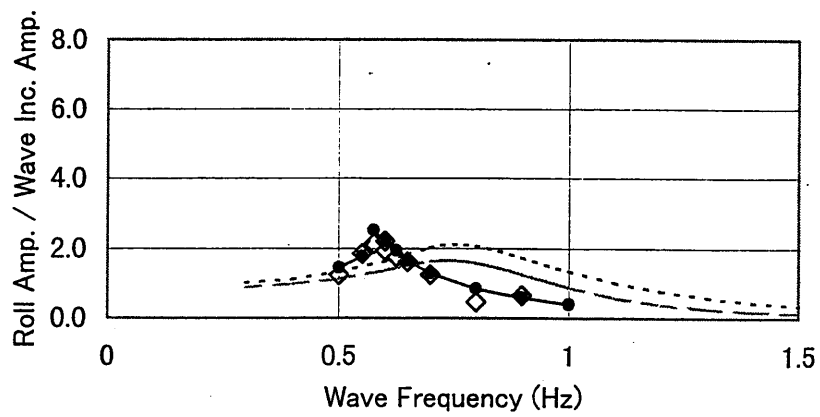
図IV-4 横揺れ応答関数の振幅
(模型船: M20C、OG=10.8cm)



(a) 波高 7 cm

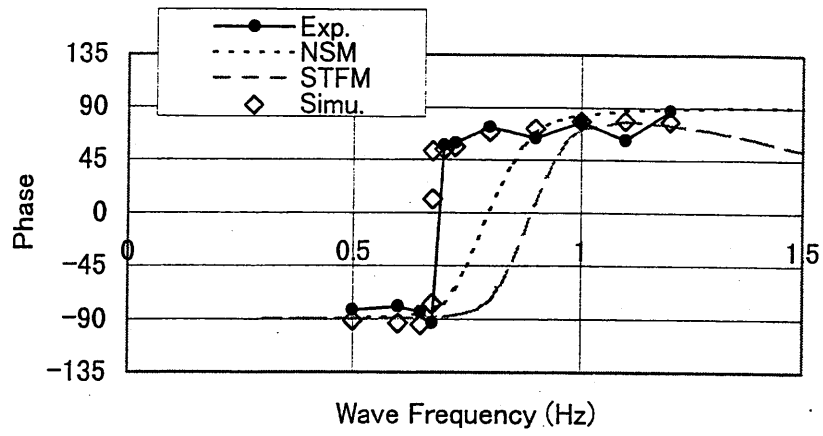


(b) 波高 14 cm

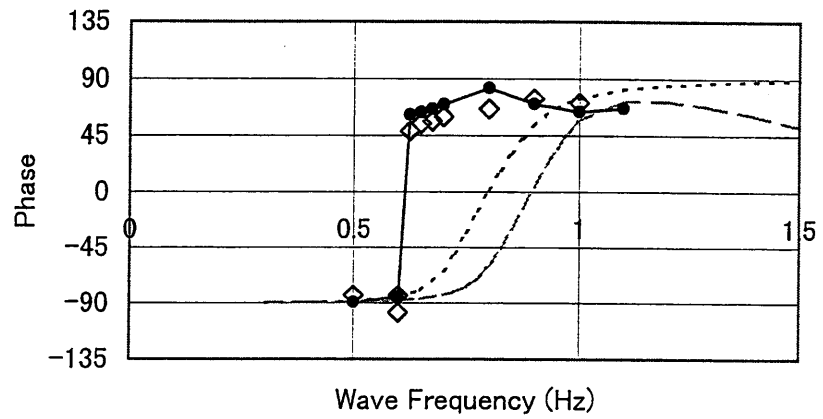


(c) 波高 21 cm

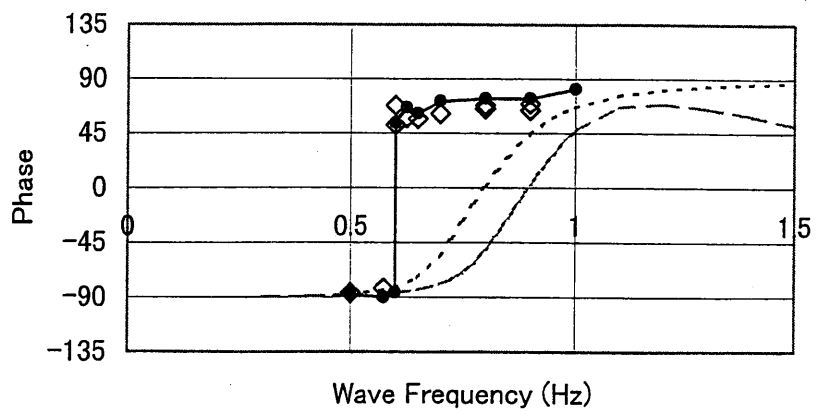
図IV-5 横揺れ応答関数の振幅
(模型船: M20CS、OG=10.8cm)



(a) 波高 7 cm

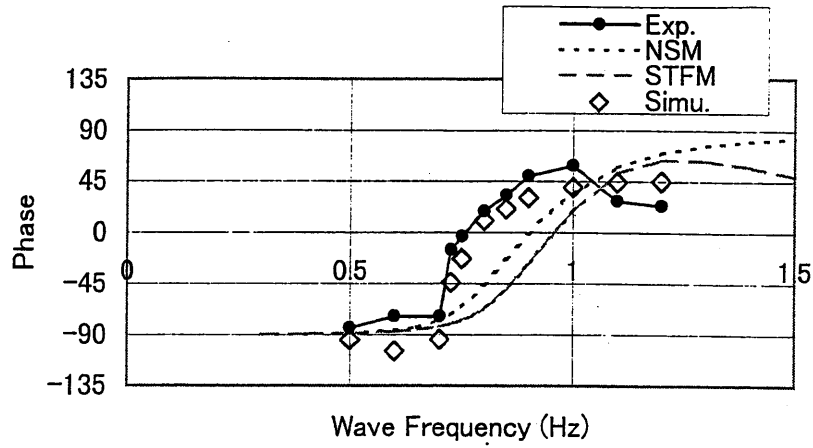


(b) 波高 14 cm

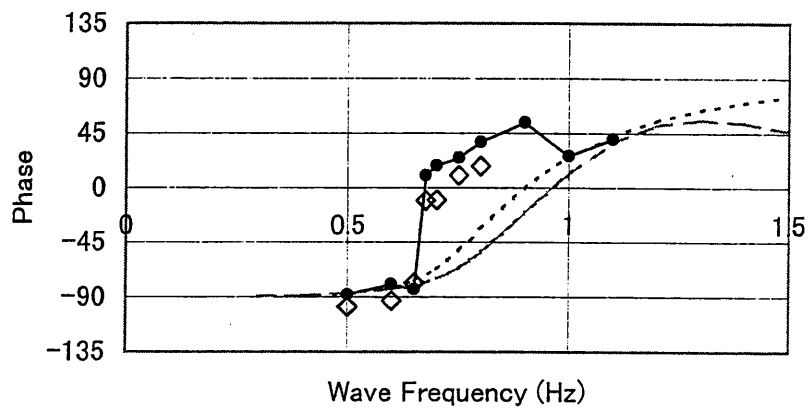


(c) 波高 21 cm

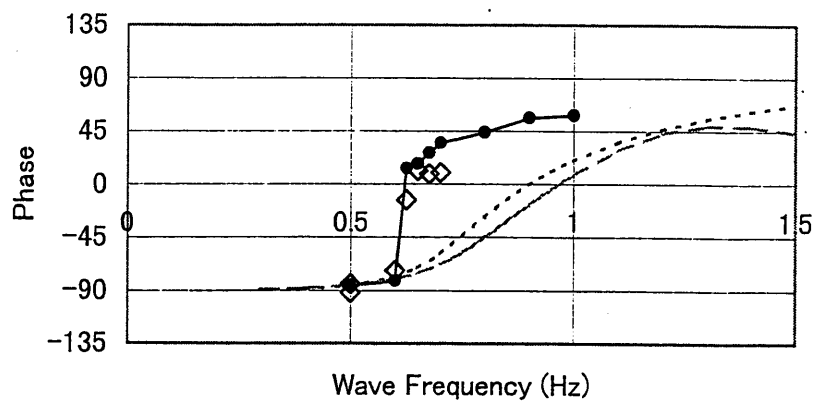
図IV-6 横揺れ応答関数の位相
(模型船: M20、OG=10.8cm)



(a) 波高 7 cm

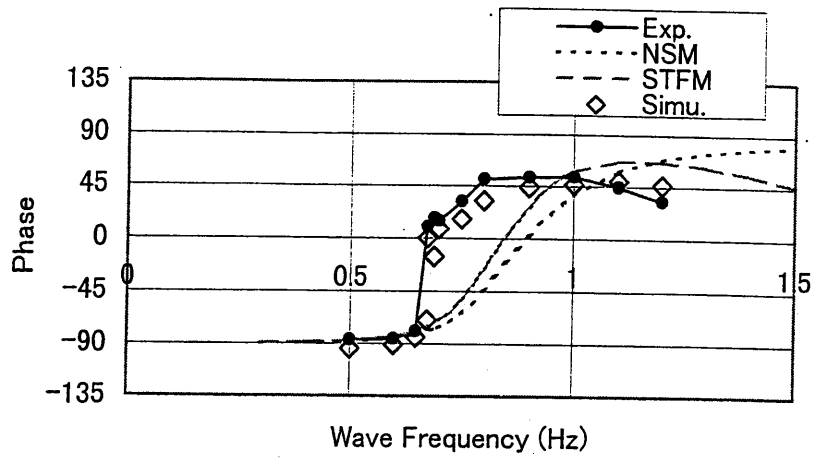


(b) 波高 14 cm

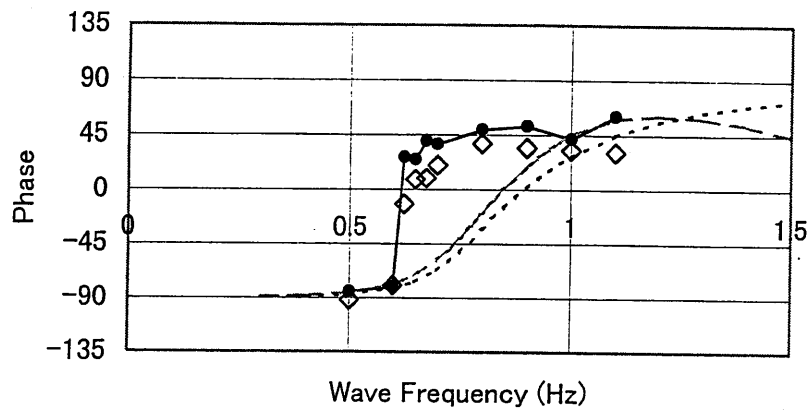


(c) 波高 21 cm

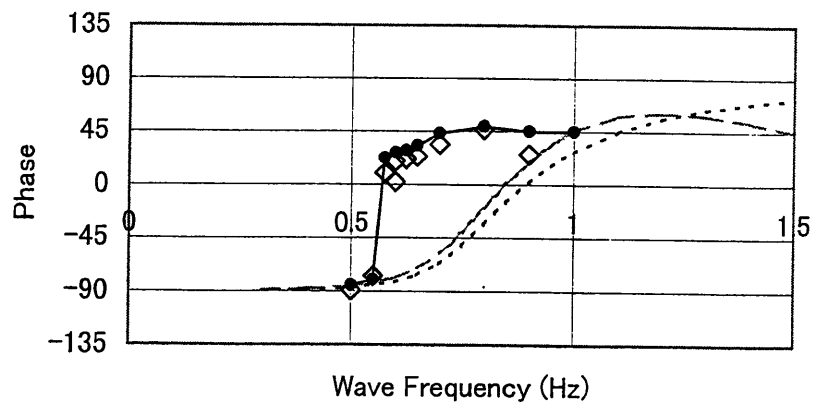
図IV-7 横揺れ応答関数の位相
(模型船: M20C、OG=10.8cm)



(a) 波高 7 cm

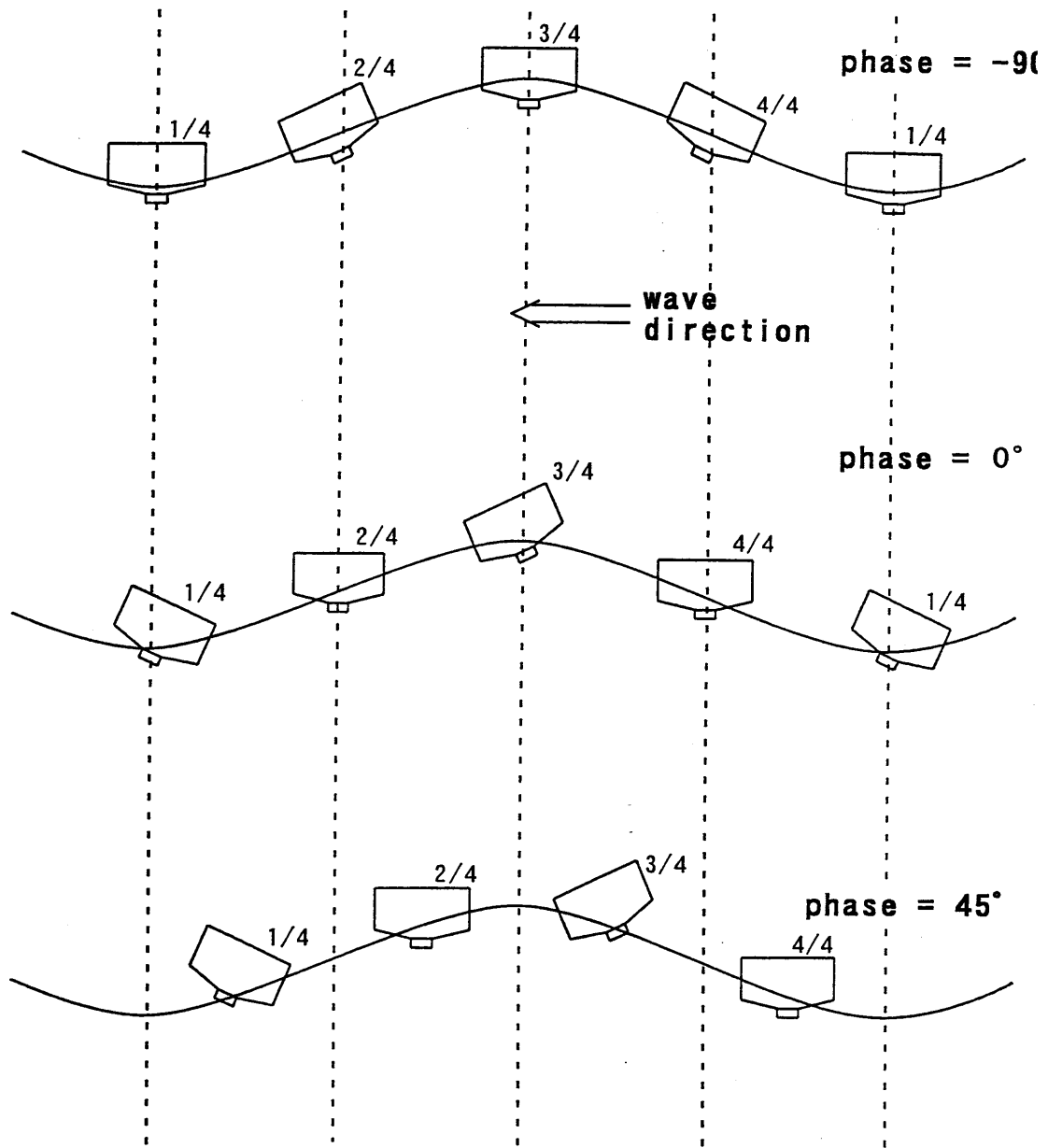


(b) 波高 14 cm

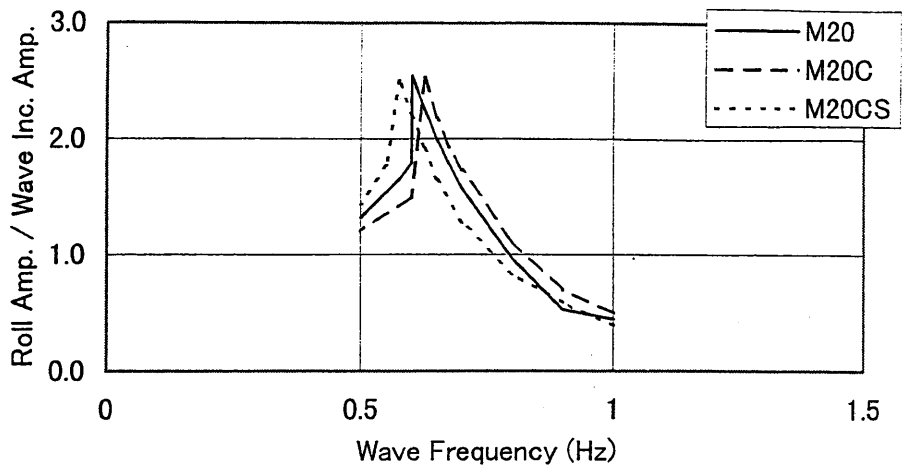


(c) 波高 21 cm

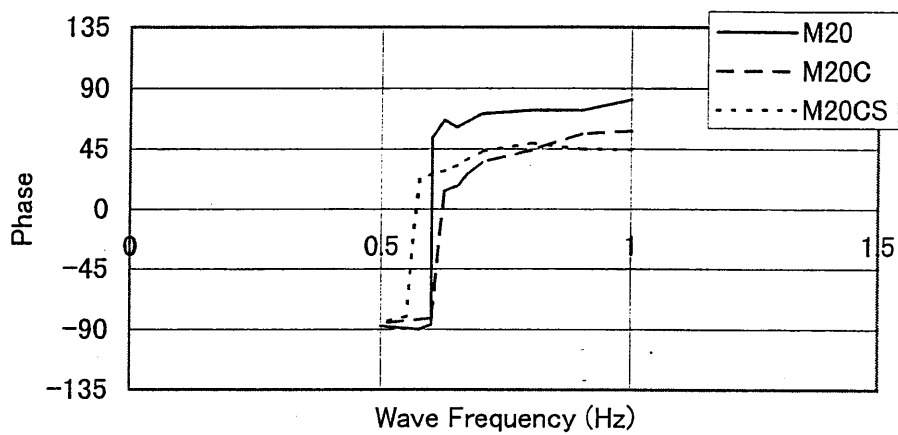
図IV-8 横揺れ応答関数の位相
(模型船: M20CS、OG=10.8cm)



図IV-9 横揺れの位相による波面上の揺れ方の変化

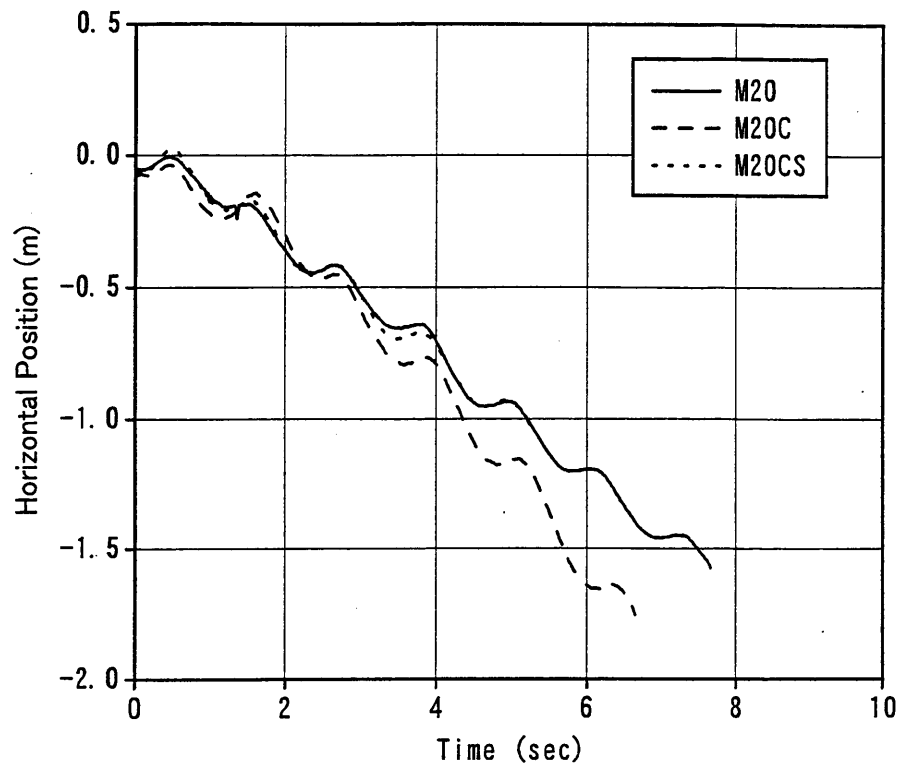


(a) 振幅

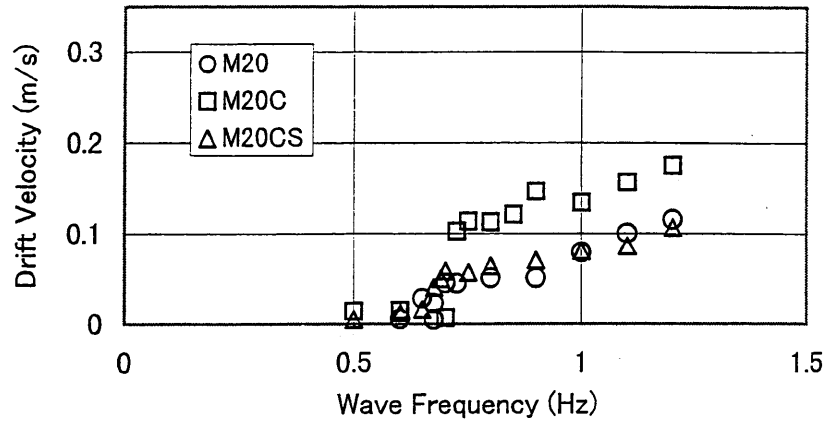


(b) 位相

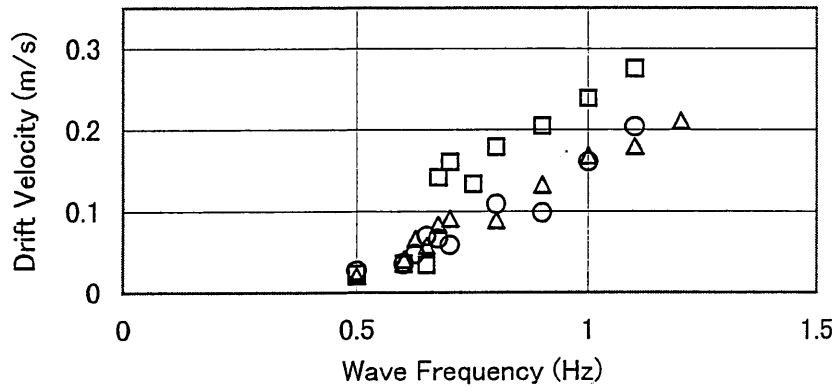
図IV-10 船型による応答関数の比較 (OG=10.8cm、波高: 21cm)



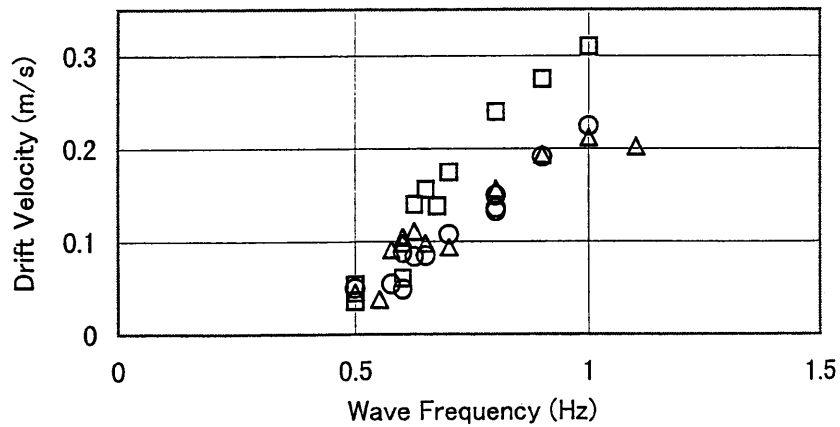
図IV-11 船型による水平運動の比較 (OG=10.8cm、波高：21cm、波周波数：1.0Hz)



(a) 波高 7 cm

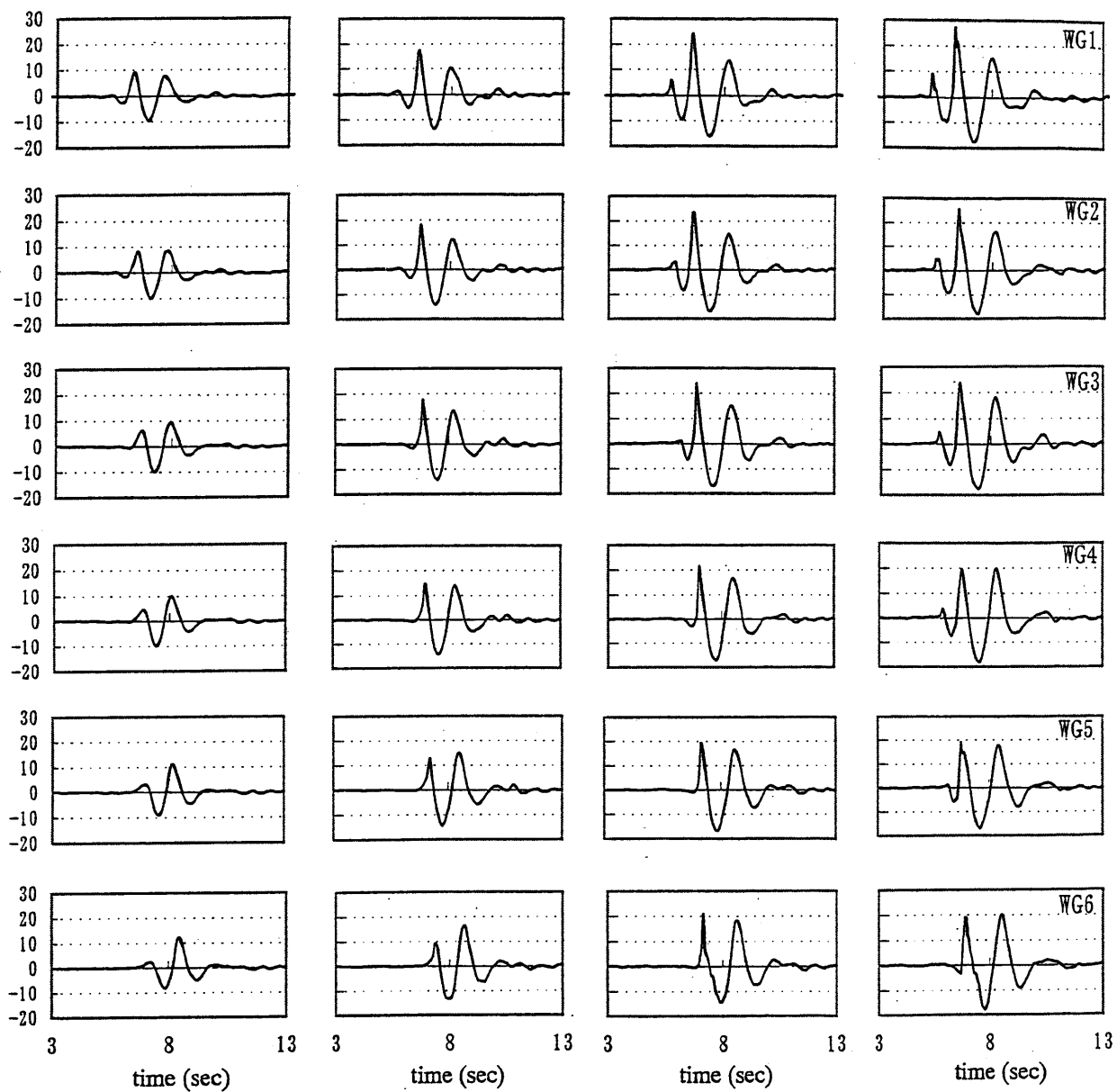


(b) 波高 14 cm



(c) 波高 21 cm

図IV-12 定常状態の横流れ速度 (OG=10.8cm)



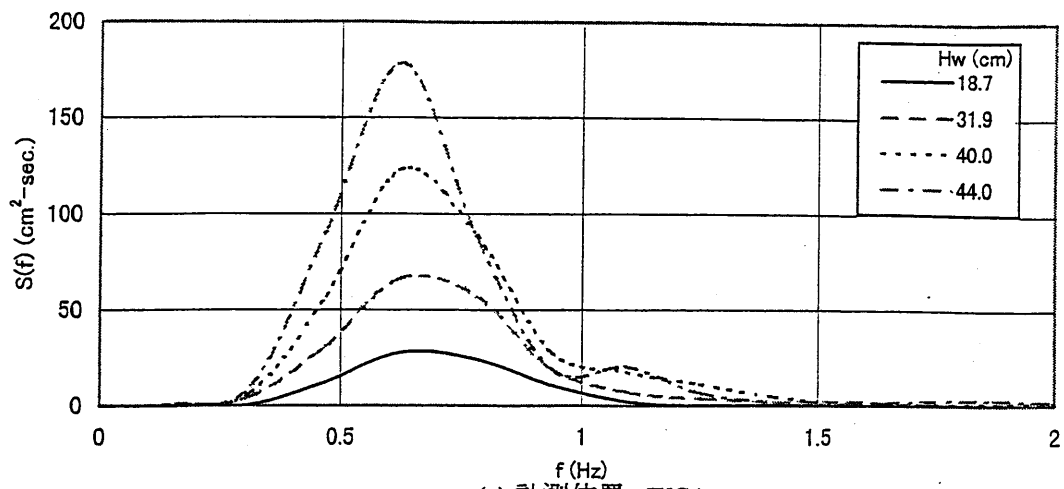
(a) 波高 : 18.7cm

(b) 波高 : 31.9cm

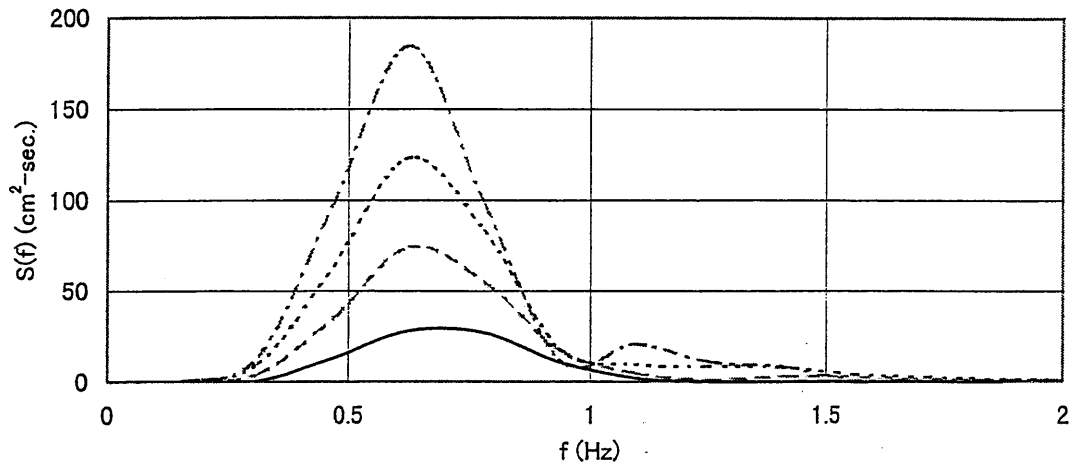
(c) 波高 : 40.4cm

(d) 波高 : 44.0cm

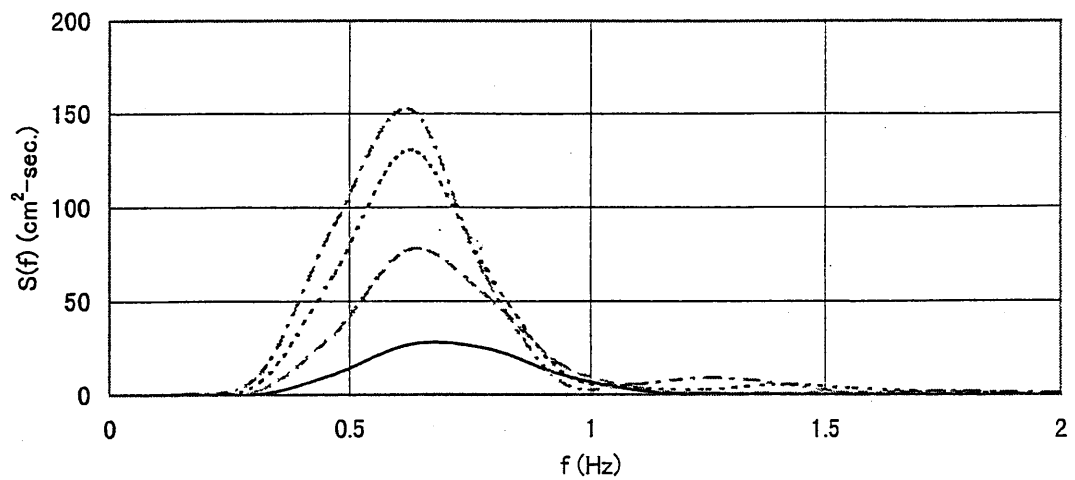
図IV-13 集中性過渡水波の時間波形



(a) 計測位置 : WG1



(b) 計測位置 : WG3



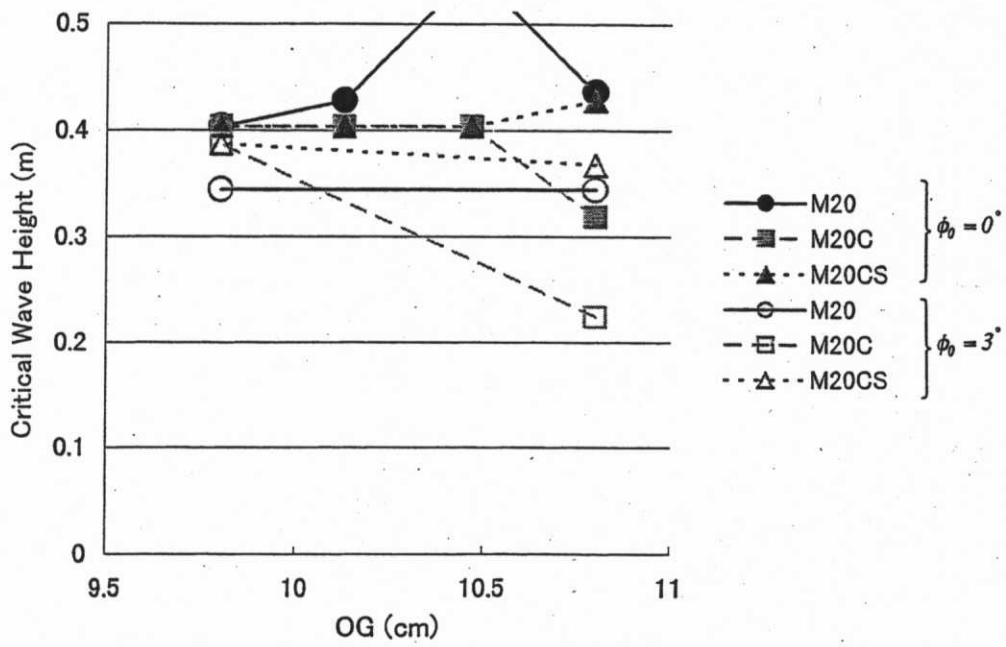
(c) 計測位置 : WG5

図IV-14 集中性過渡水波のスペクトル

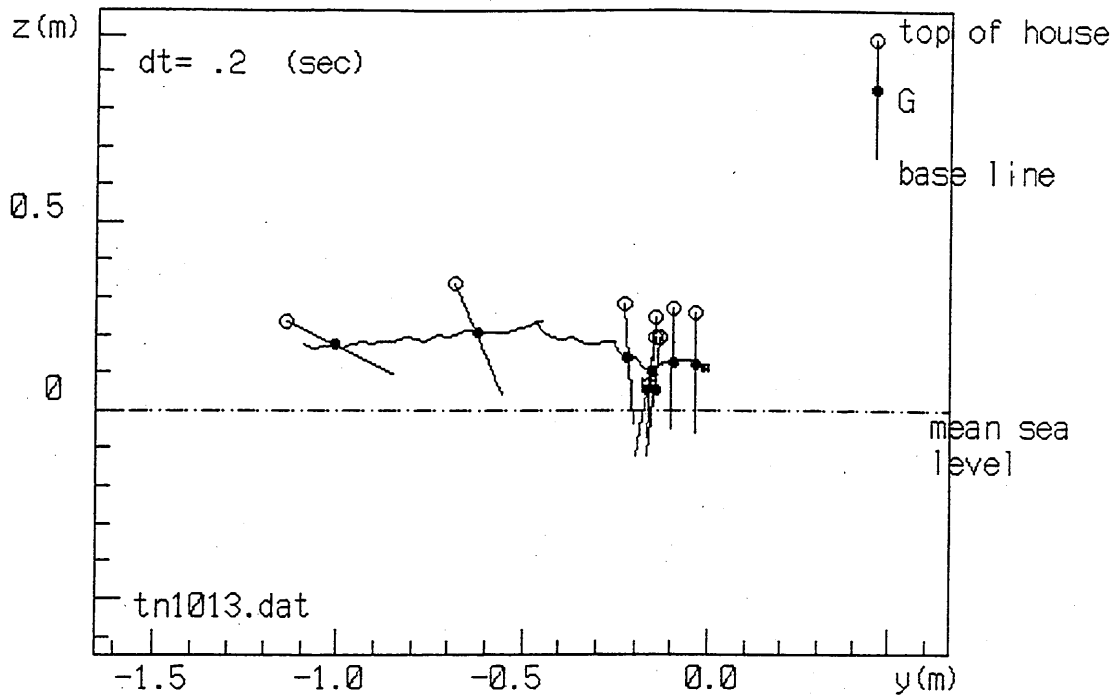
表IV-2 実験条件と転覆の有無

	OG(cm) Hw(m)	Upright				3 deg heel to lee side			
		9.8	10.13	10.47	10.8	9.8	10.13	10.47	10.8
Model : M20	0.440			○	●				
	0.435		●	○	▲▲				
	0.428	●●●●	●●●○	▲○○○	○○				
	0.417	○○●	○	○	○	●			●●
	0.404	●●							
	0.387	○○				●			●
	0.367								
	0.345					●●			●
	0.319					○○			○○
	0.291								○
	0.259								○
	0.224								
	0.187								
Model : M20C	0.440								
	0.435								
	0.428				●				
	0.417	●	●	●	●	●			●
	0.404	●●●●	●●	●	○○●				
	0.387	○○	○	○○	●	●●			●●○
	0.367	○			●▲	○○●			●
	0.345					○○			●
	0.319				●●				●
	0.291				○○○				●
	0.259				○○				●
	0.224								●
	0.187								○
Model : M20CS	0.440								
	0.435								
	0.428				●●				
	0.417	●	●	●	○○●	●			●
	0.404	●●	●	●	○○●				
	0.387	○○○	○	○○	○○	●●			
	0.367					○○			●
	0.345								○
	0.319								
	0.291								○
	0.259								○
	0.224								
	0.187								

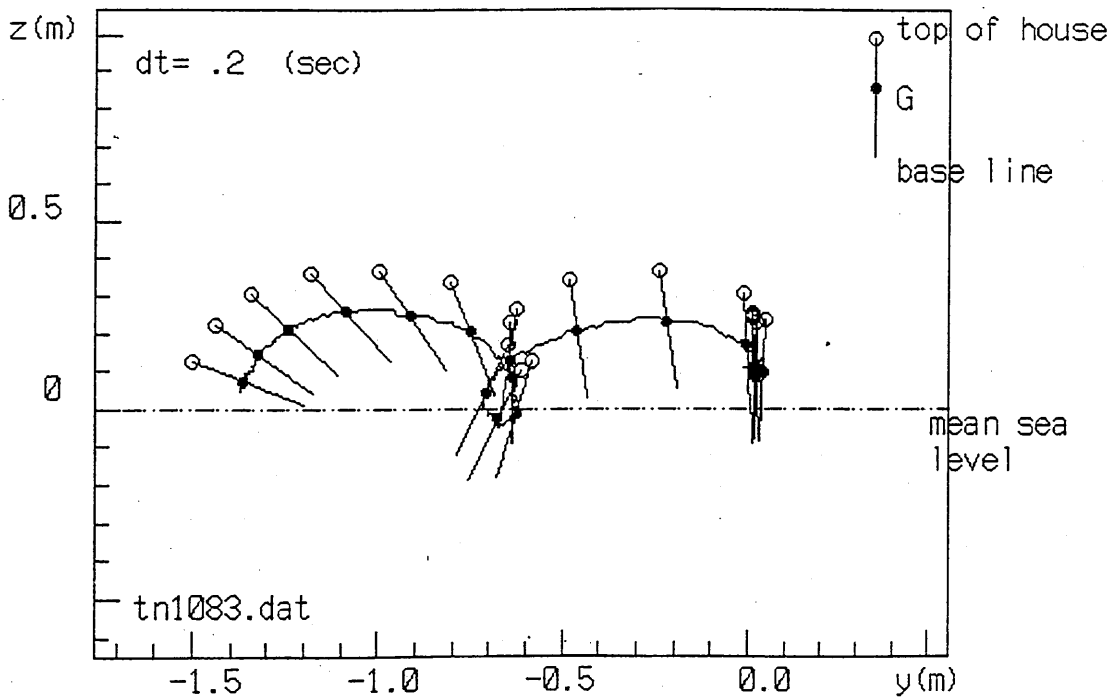
○:No Capsize ●:Capsize (Lee Side) by breaking wave ●:Capsize in the 2nd wave
 ▲:Capsize (Weather Side) by breaking wave ▲:Capsize in the 2nd wave



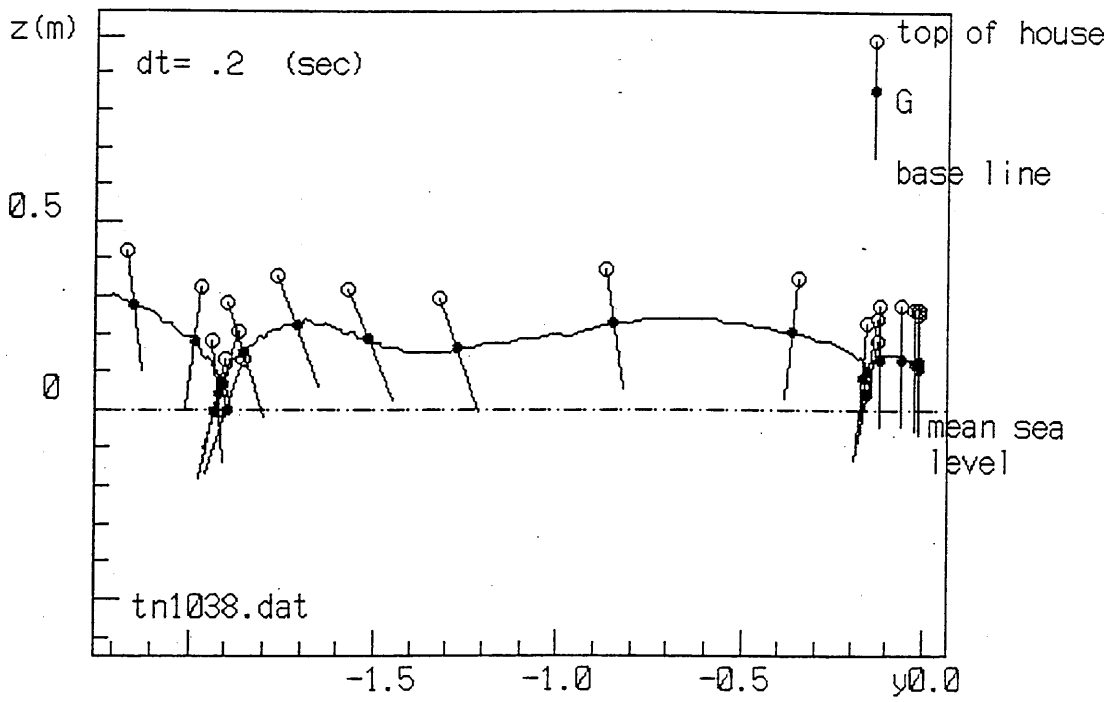
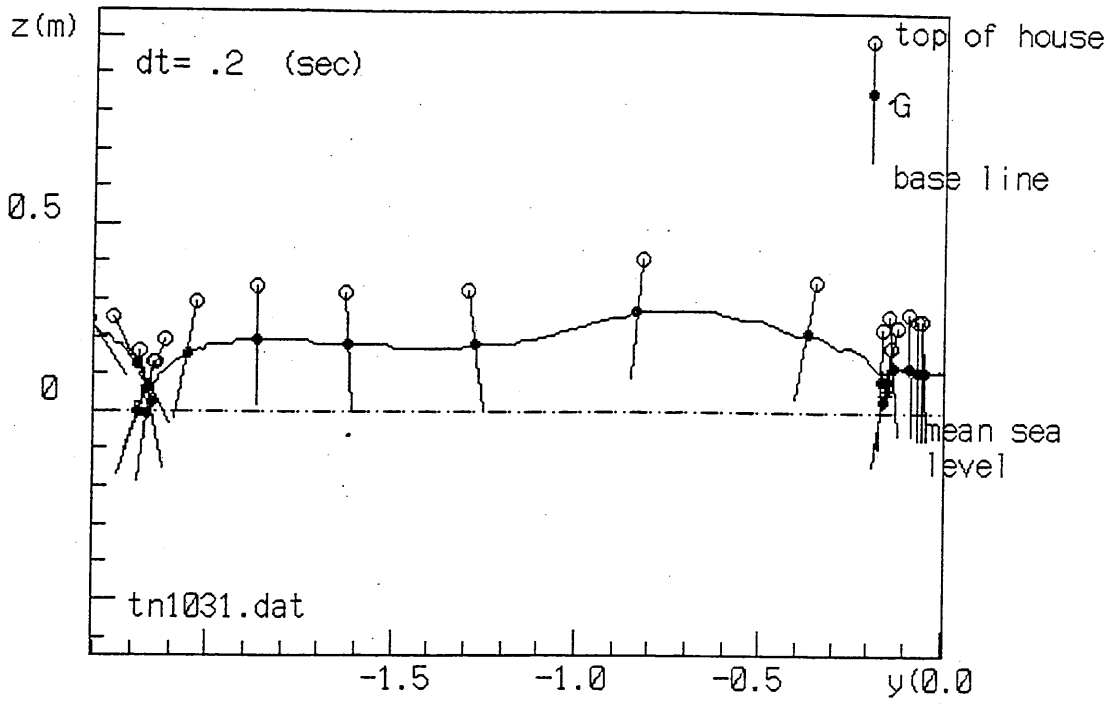
図IV-15 転覆限界波高



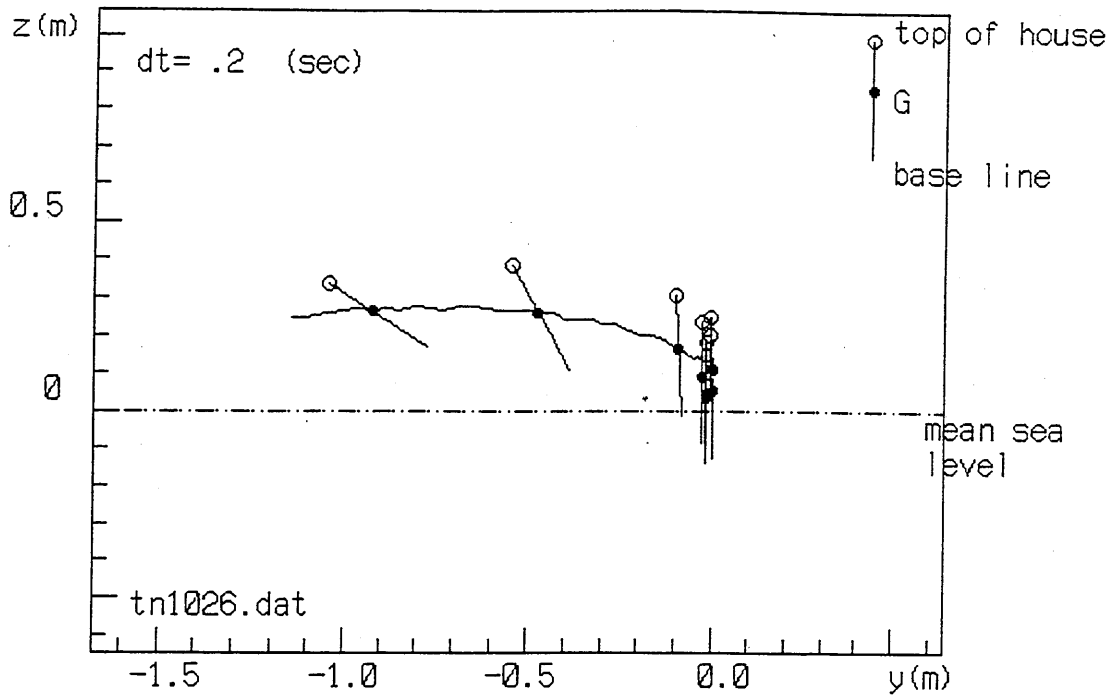
図IV-16 波高が高い場合の転覆運動の計測値
 (模型船 : M20C、OG : 10.8cm、波高 : 42.8cm)



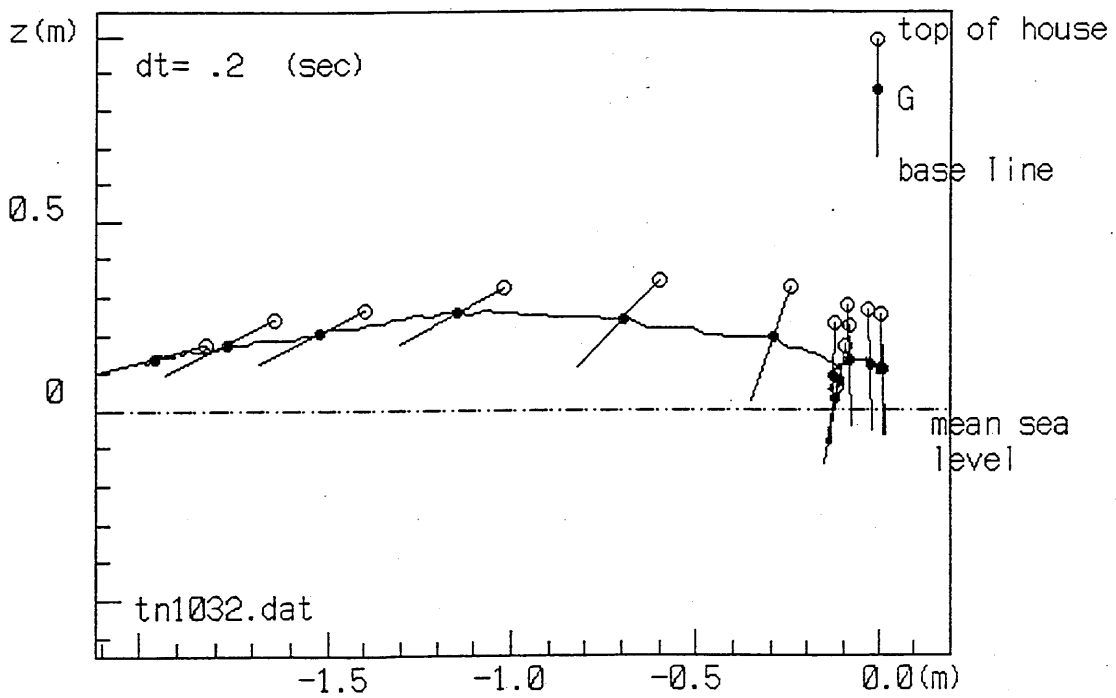
図IV-17 波高が低い場合の転覆運動の計測値
 (模型船 : M20C、OG : 10.8cm、波高 : 31.9cm)



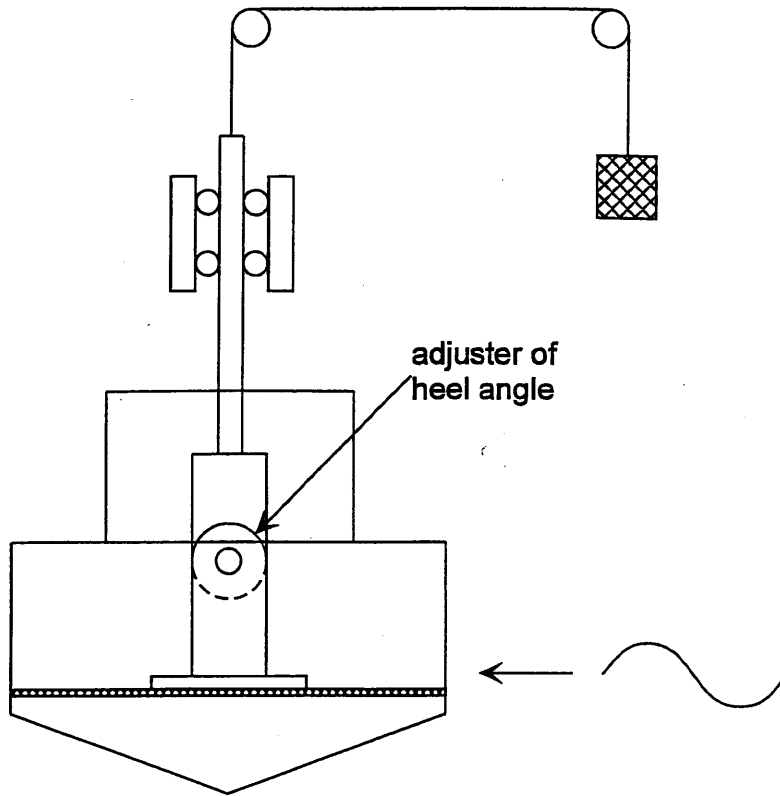
図IV-18 M20 船型の運動の例 (計測値、OG : 10.8cm、波高 : 42.8cm)



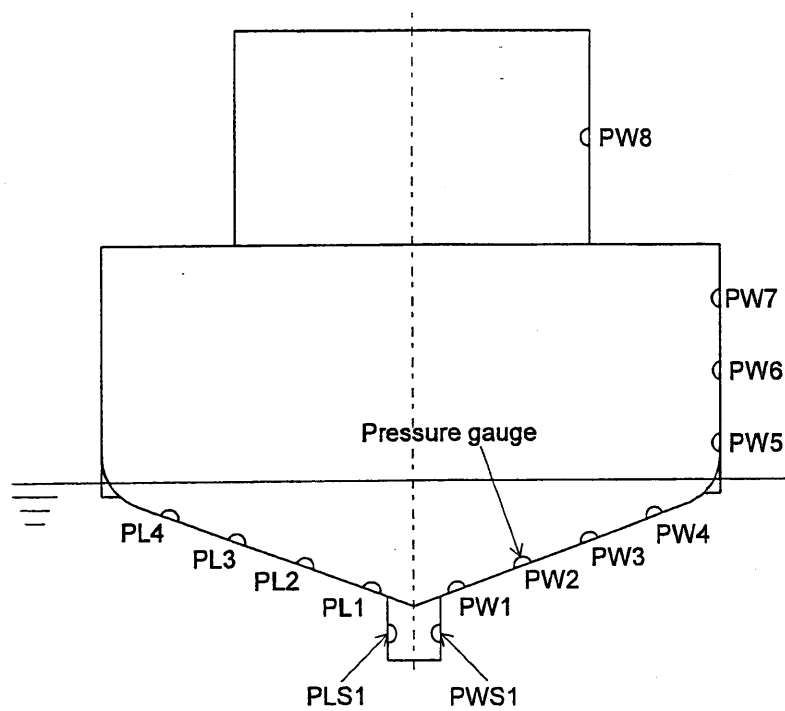
図IV-19 M20CS 船型の運動の例 (計測値、OG : 10.8cm、波高 : 42.8cm)



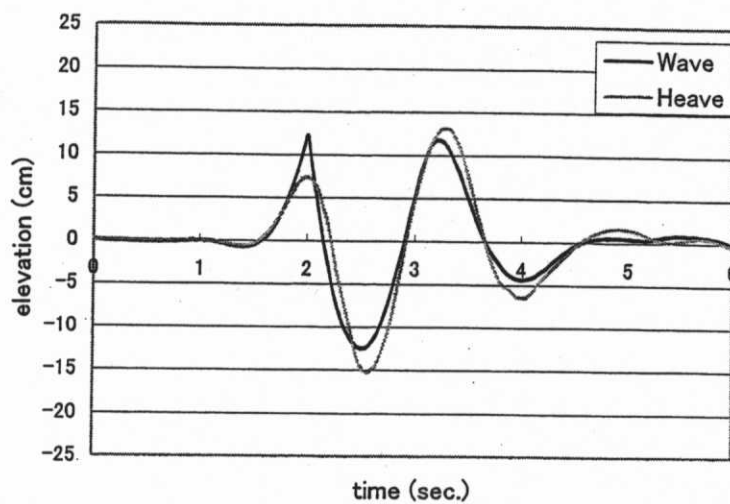
図IV-20 波上側へ転覆する場合の運動
(計測値、模型船 : M20、OG : 10.8cm、波高 : 43.5cm)



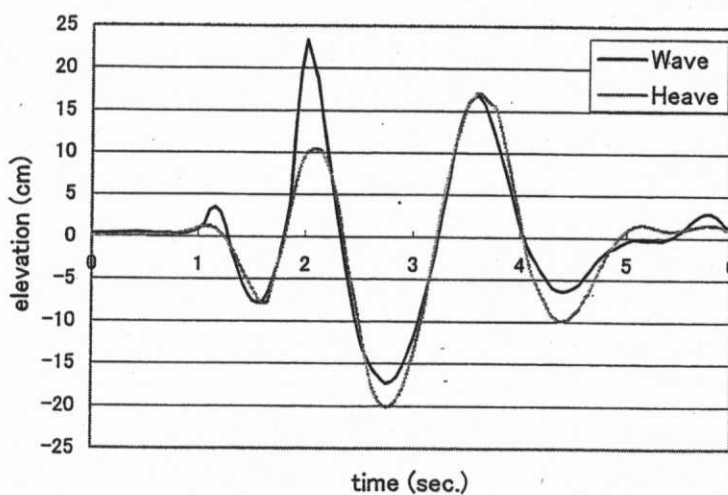
図IV-21 衝撃力の計測方法



図IV-22 水圧計の配置

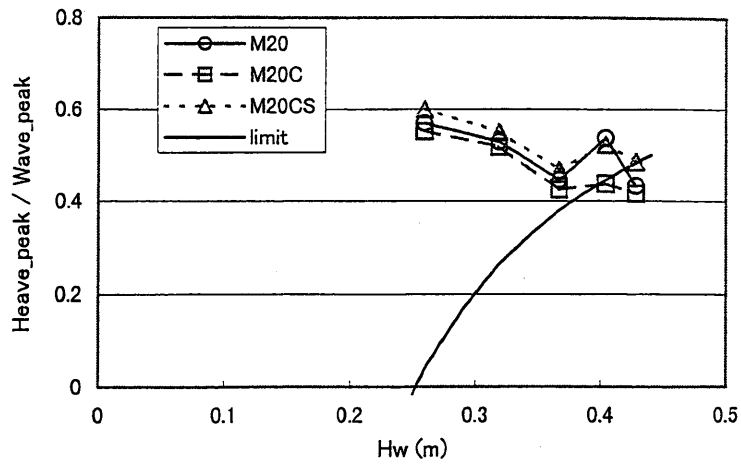


(a) 波高25.9cm

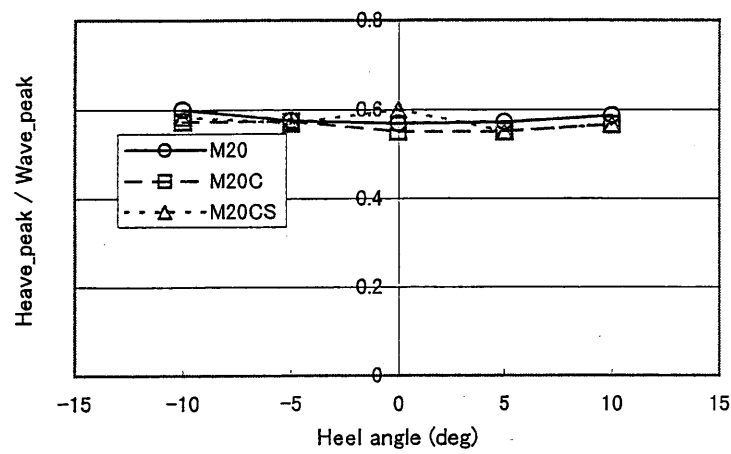


(b) 波高42.8cm

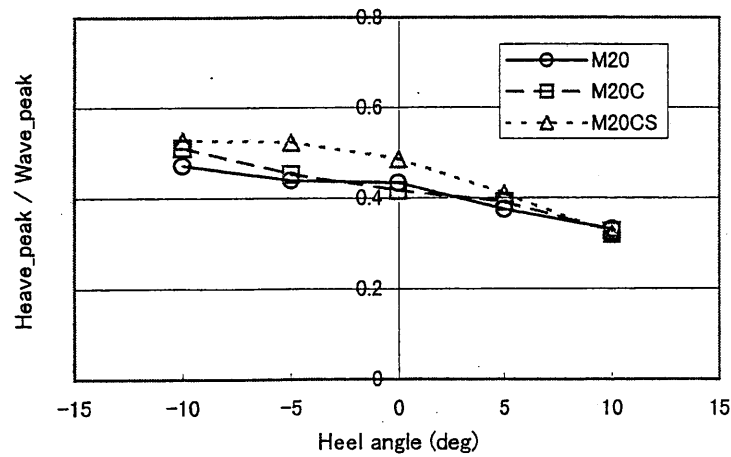
図IV-23 波面と上下揺れの時系列の計測値 (模型船: M20C、傾斜角: 0)



図IV-24 第1波による上下揺れの最大値 (傾斜角: 0)

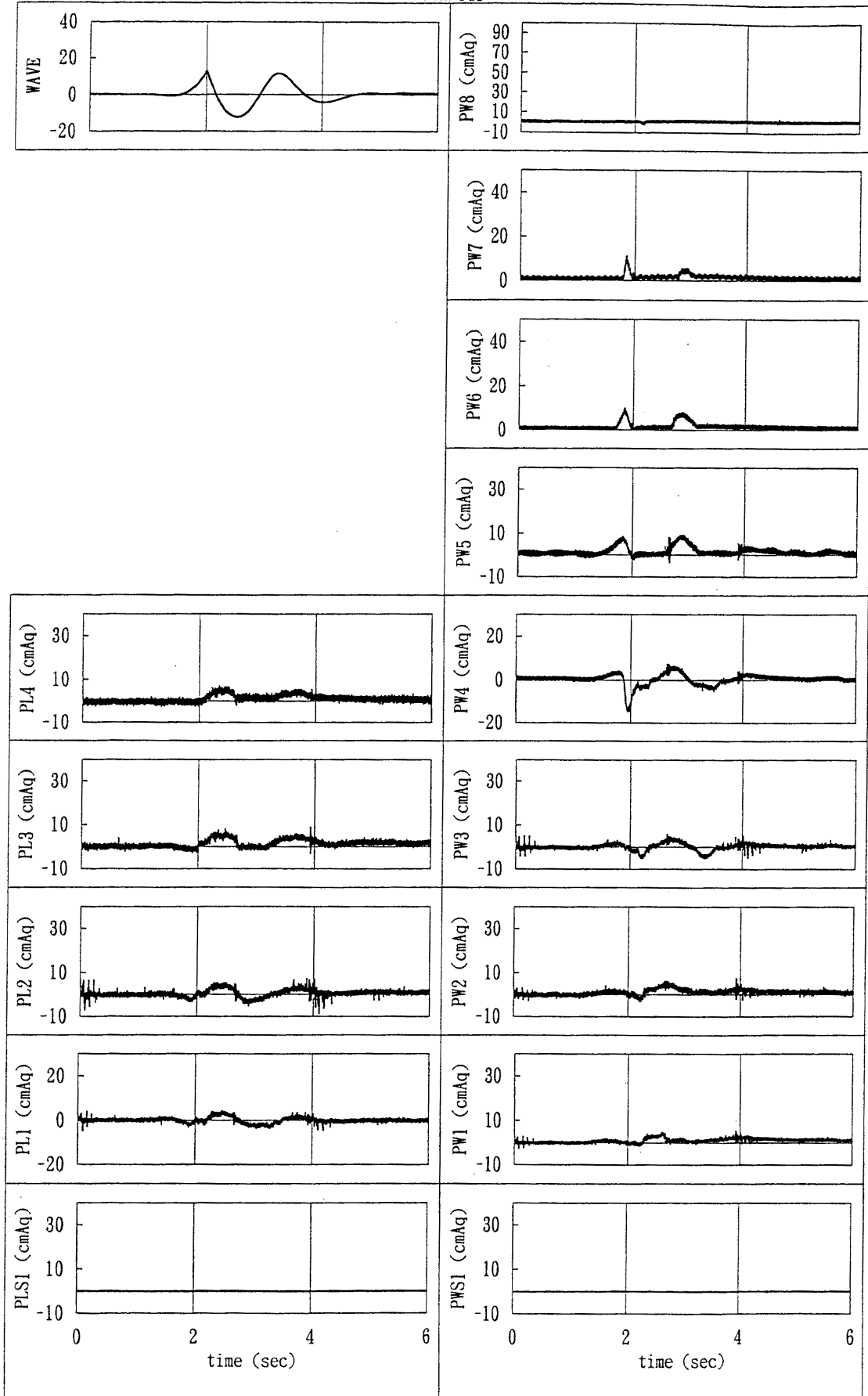


(a) 波高: 25.9cm

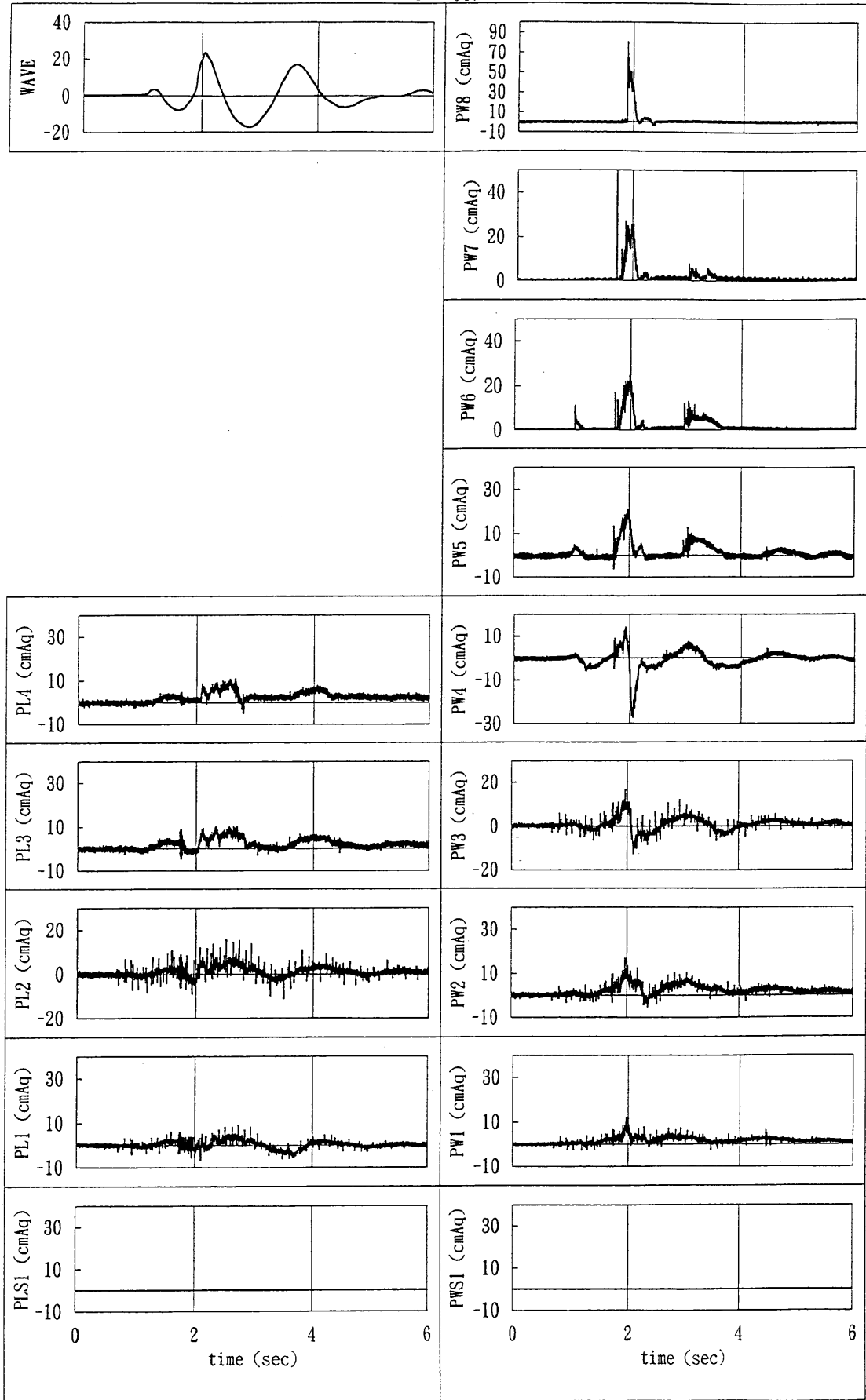


(b) 波高: 42.8cm

図IV-25 第1波による上下揺れの最大値の傾斜角依存性

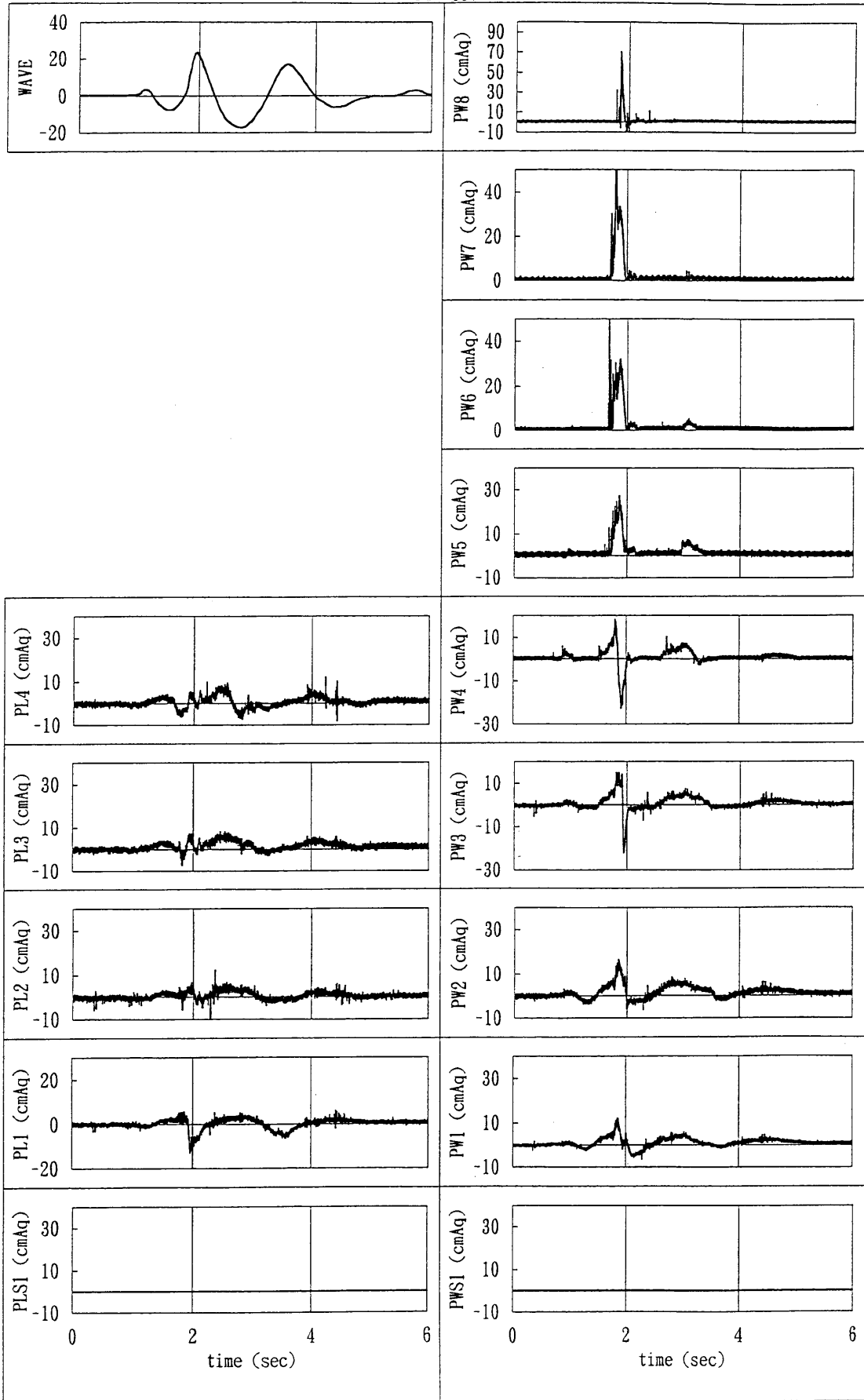


図IV-26 水圧分布 (模型船 : M20C、波高 : 25.9cm、傾斜角 : 10°)



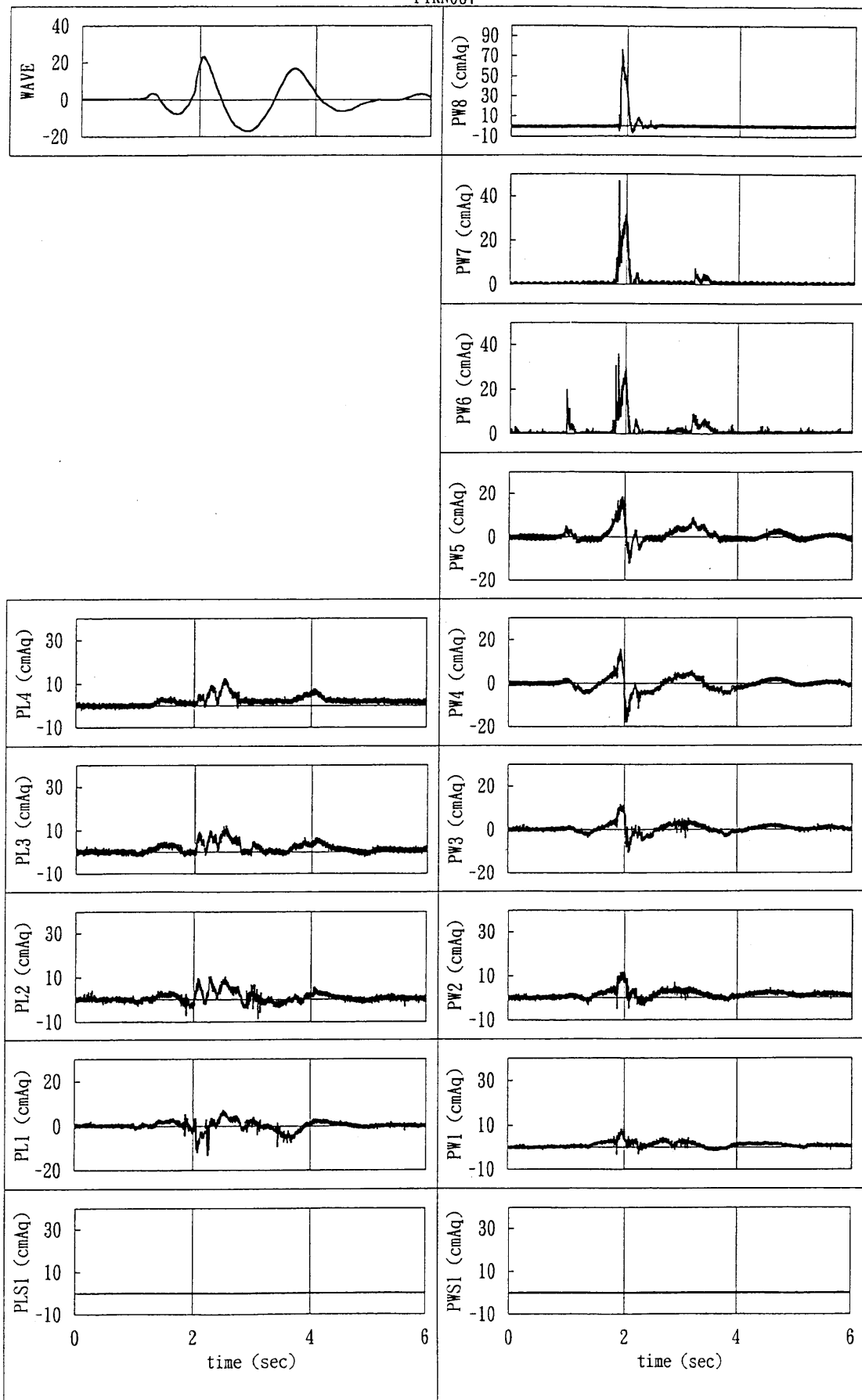
図IV-27 水圧分布 (模型船 : M20C、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°)

FTRN057



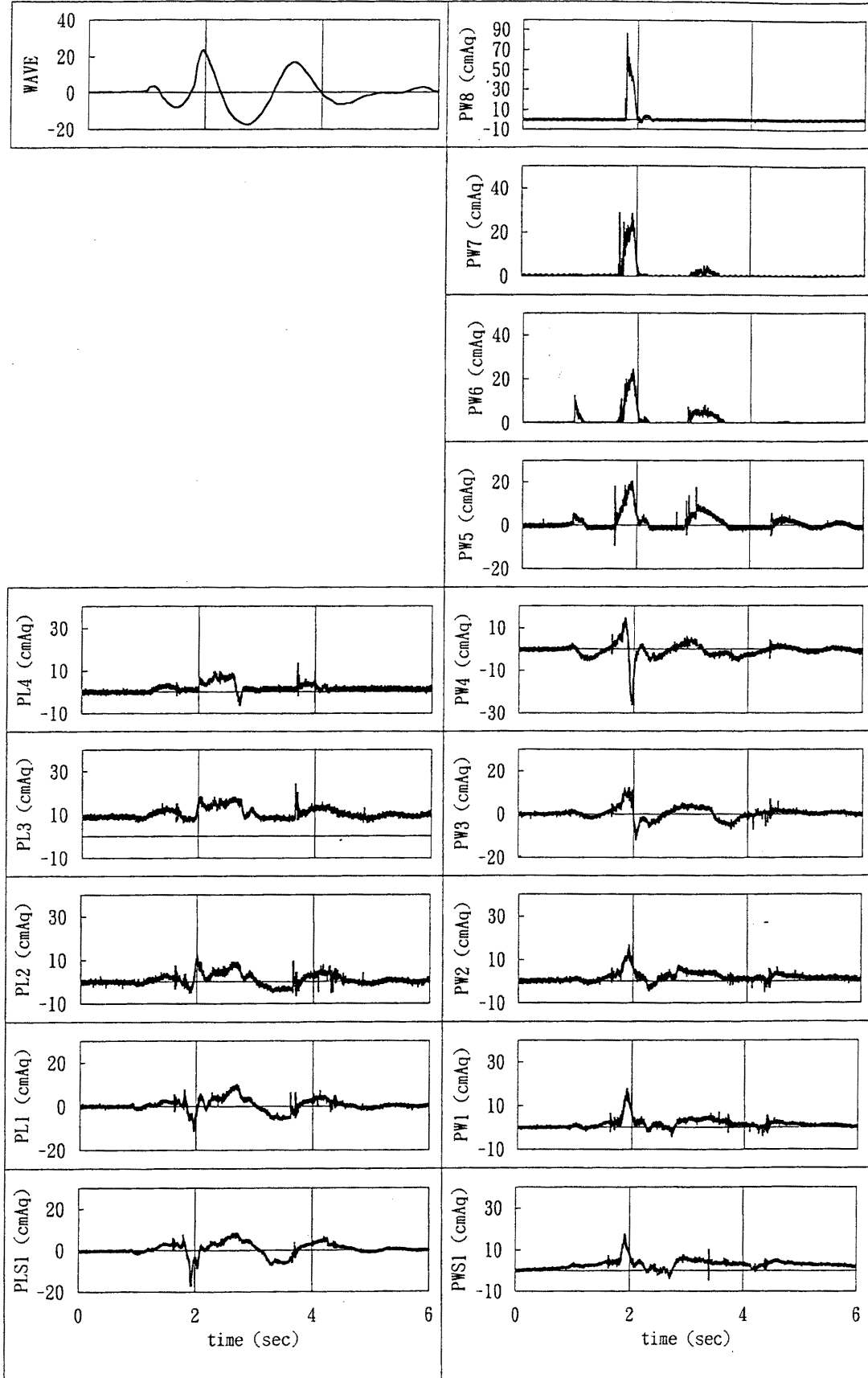
図IV-28 水圧分布 (模型船: M20C、波高: 42.8cm、傾斜角: -10°)

FTRN087

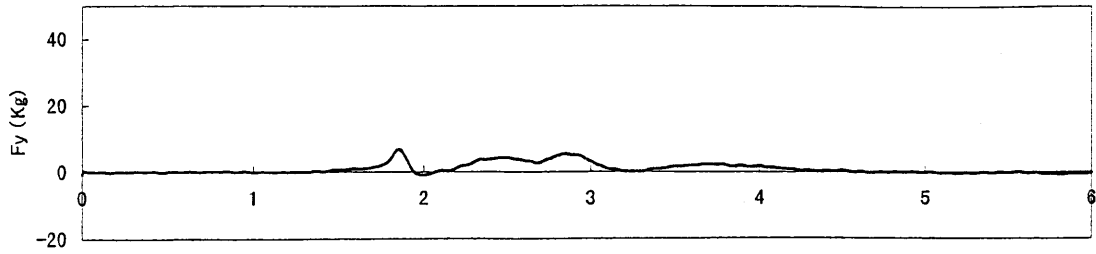


図IV-29 水圧分布 (模型船: M20、波高: 42.8cm、傾斜角: 10°)

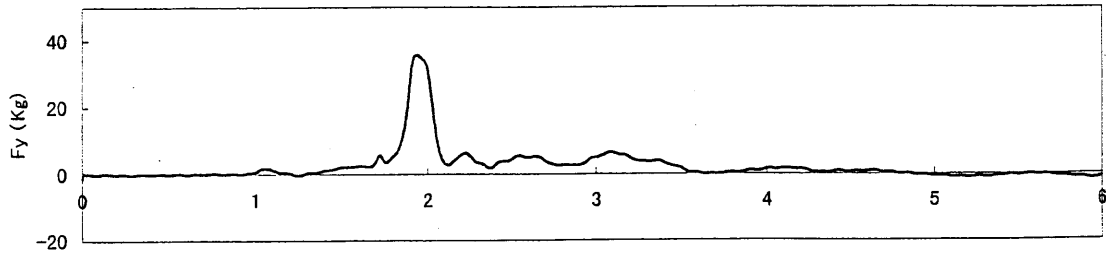
FTRN032



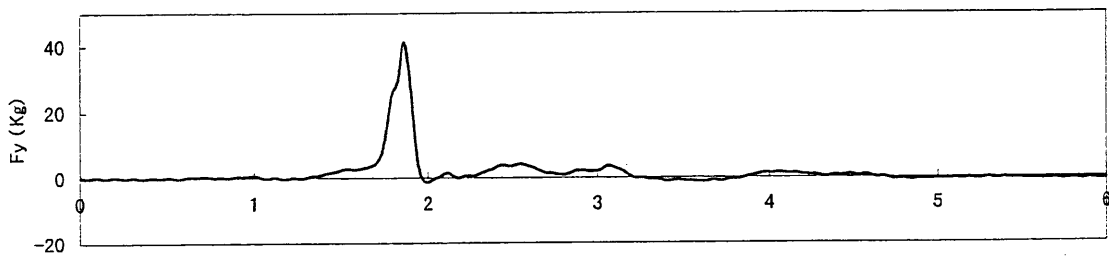
図IV-30 水圧分布 (模型船 : M20CS、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°)



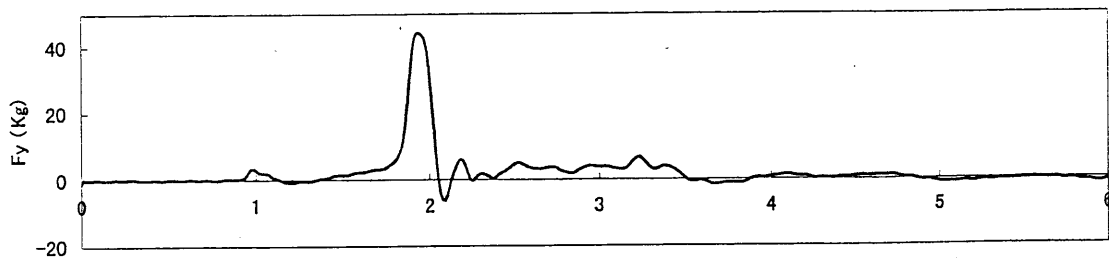
(a) 模型船：M20C、波高：25.9cm、傾斜角：10°



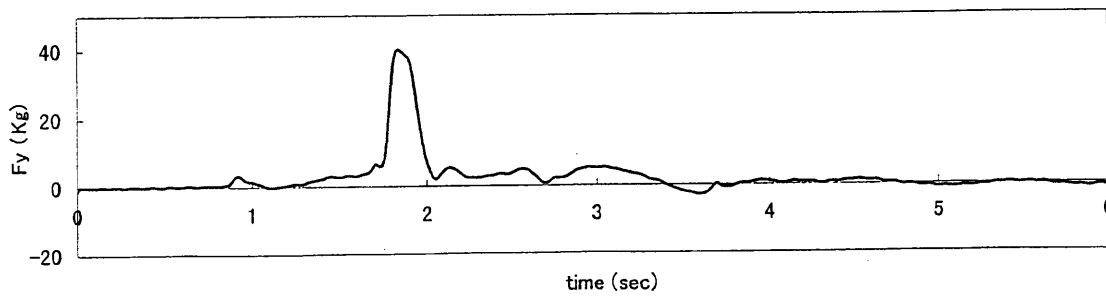
(b) 模型船：M20C、波高：42.8cm、傾斜角：10°



(c) 模型船：M20C、波高：42.8cm、傾斜角：-10°

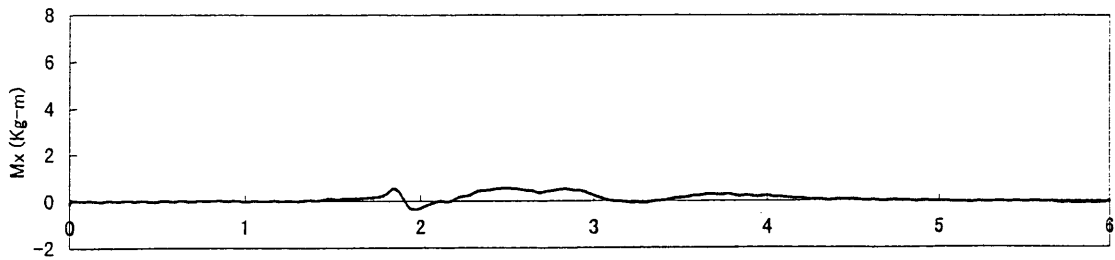


(d) 模型船：M20、波高：42.8cm、傾斜角：10°

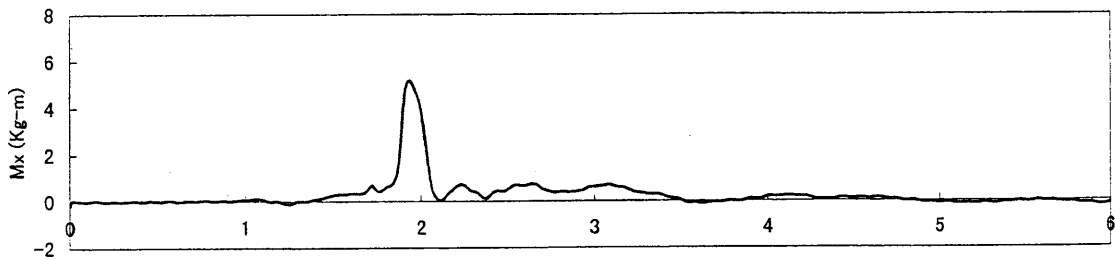


(e) 模型船：M20CS、波高：42.8cm、傾斜角：10°

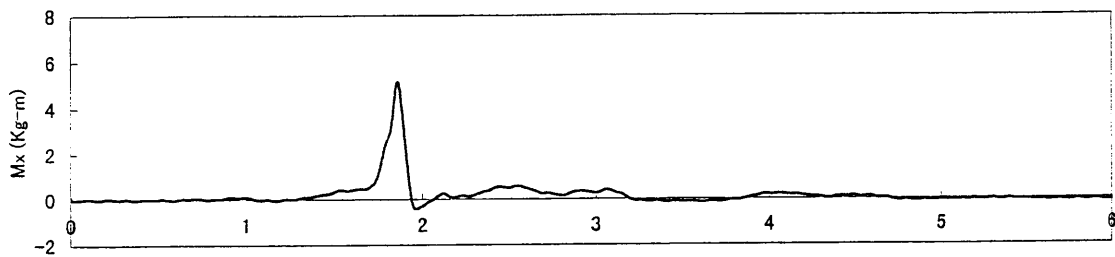
図IV-31 横力の時系列



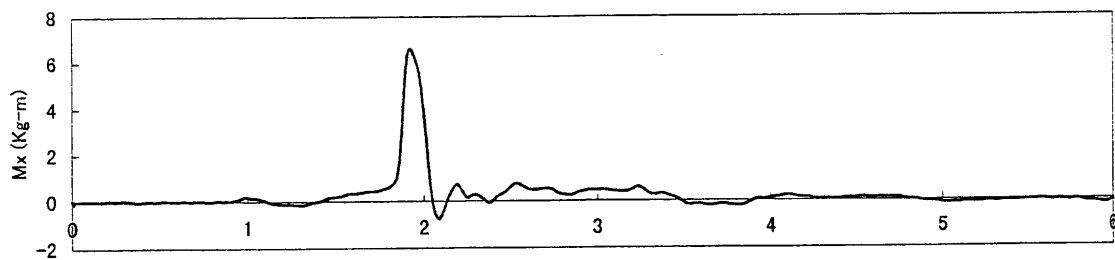
(a) 模型船 : M20C、波高 : 25.9cm、傾斜角 : 10°



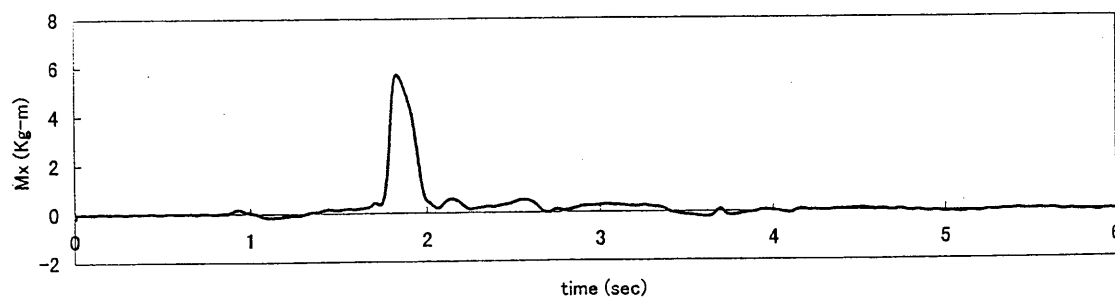
(b) 模型船 : M20C、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°



(c) 模型船 : M20C、波高 : 42.8cm、傾斜角 : -10°

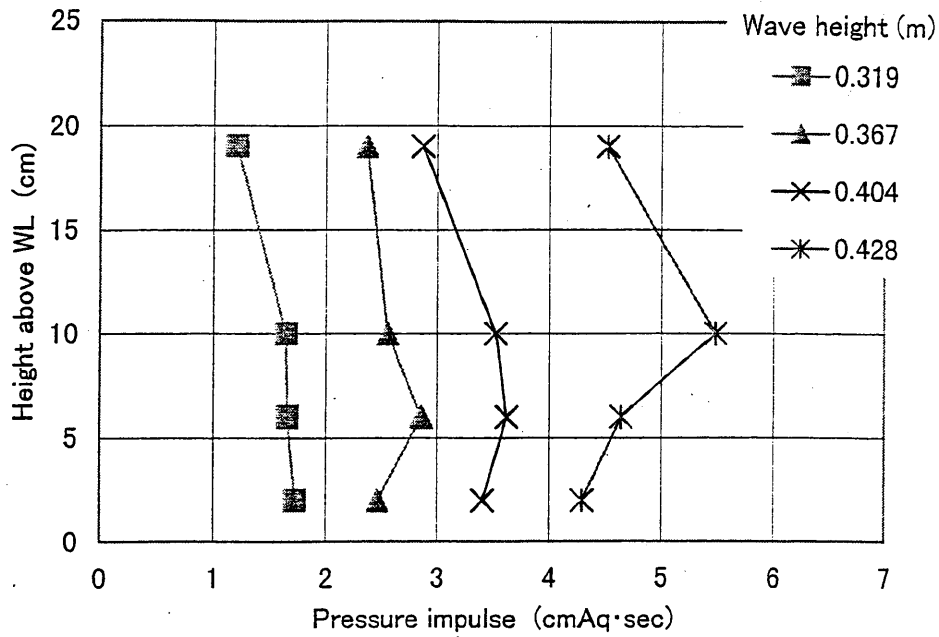


(d) 模型船 : M20、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°

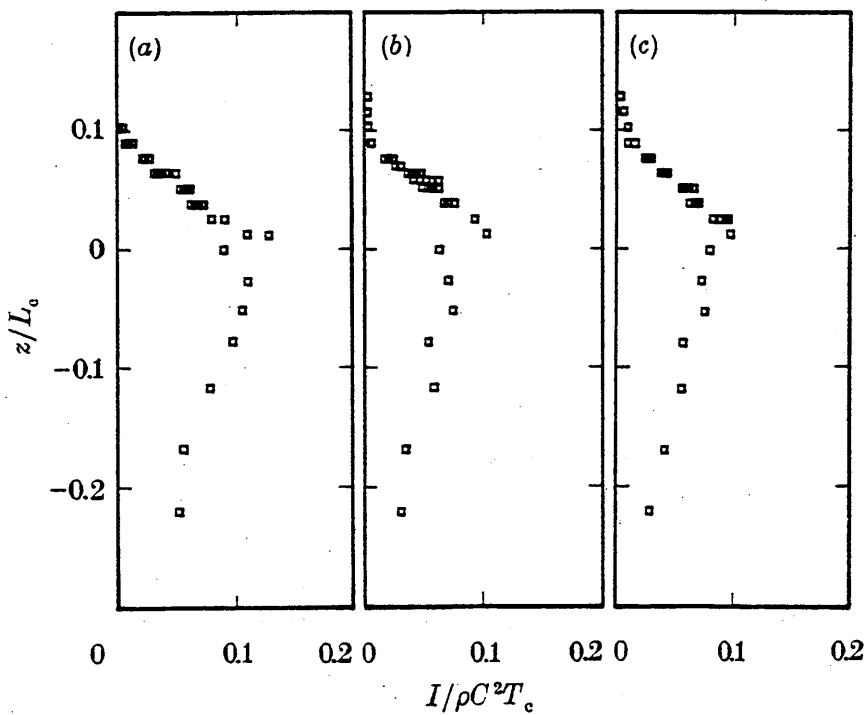


(e) 模型船 : M20CS、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°

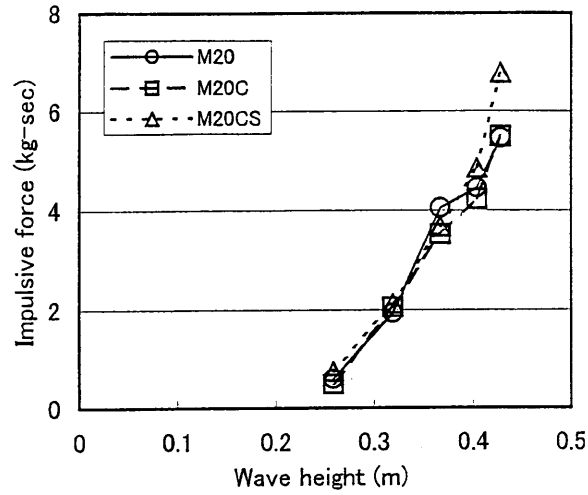
図IV-32 傾斜モーメントの時系列



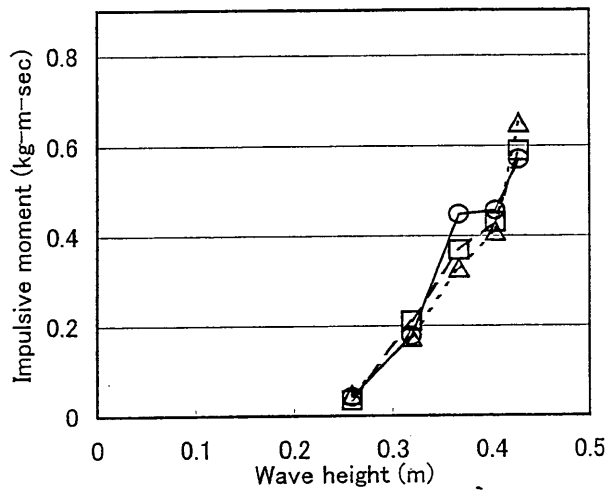
図IV-33 時間積分した衝撃水圧の鉛直分布の例 (模型船：M20CS、傾斜角：0)



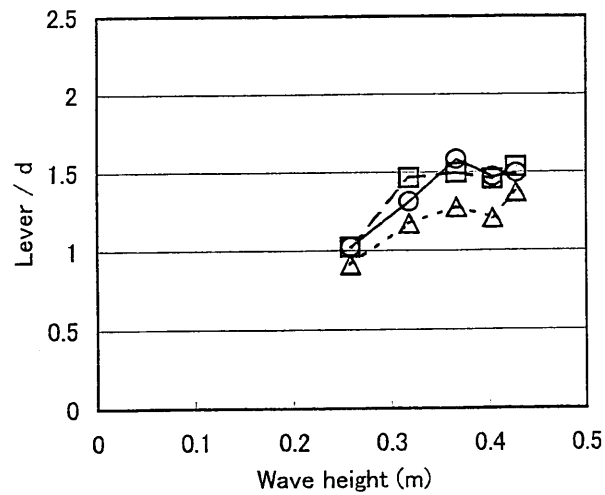
図IV-34 時間積分した衝撃水圧の鉛直分布 (Chan, E.S., Melville, W. K. 1988)
 (横軸：水圧の時間積分の無次元値、縦軸：静水面からの水圧計高さの無次元値、
 (a) $x/L_c=3.618$ 、(b) $x/L_c=3.643$ 、(c) $x/L_c=3.699$ 、
 x ：造波機からの距離、 L_c ：代表波長)



(a) 横力の力積

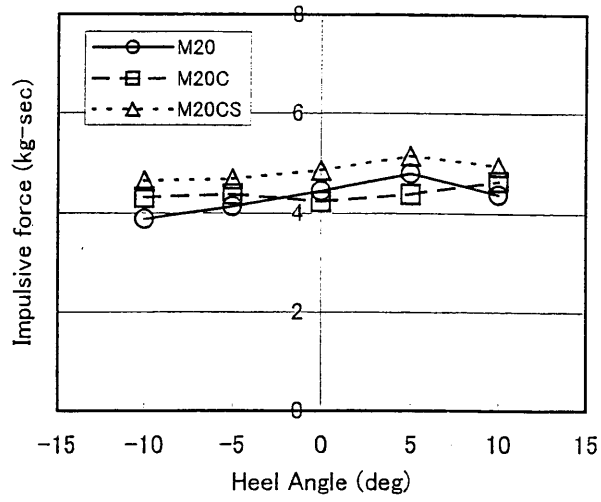


(b) モーメントの力積

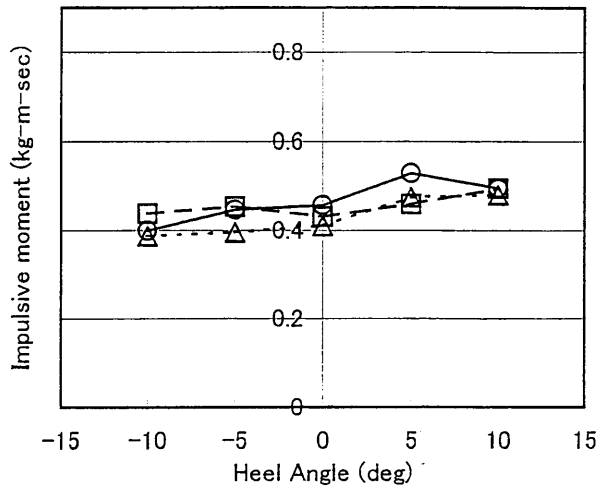


(c) 着点高さ

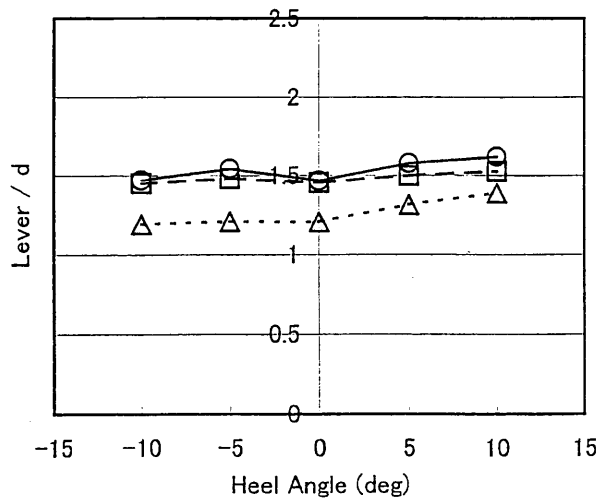
図IV-35 波高による衝撃力の変化 (傾斜角：ゼロ)



(a) 横力の力積

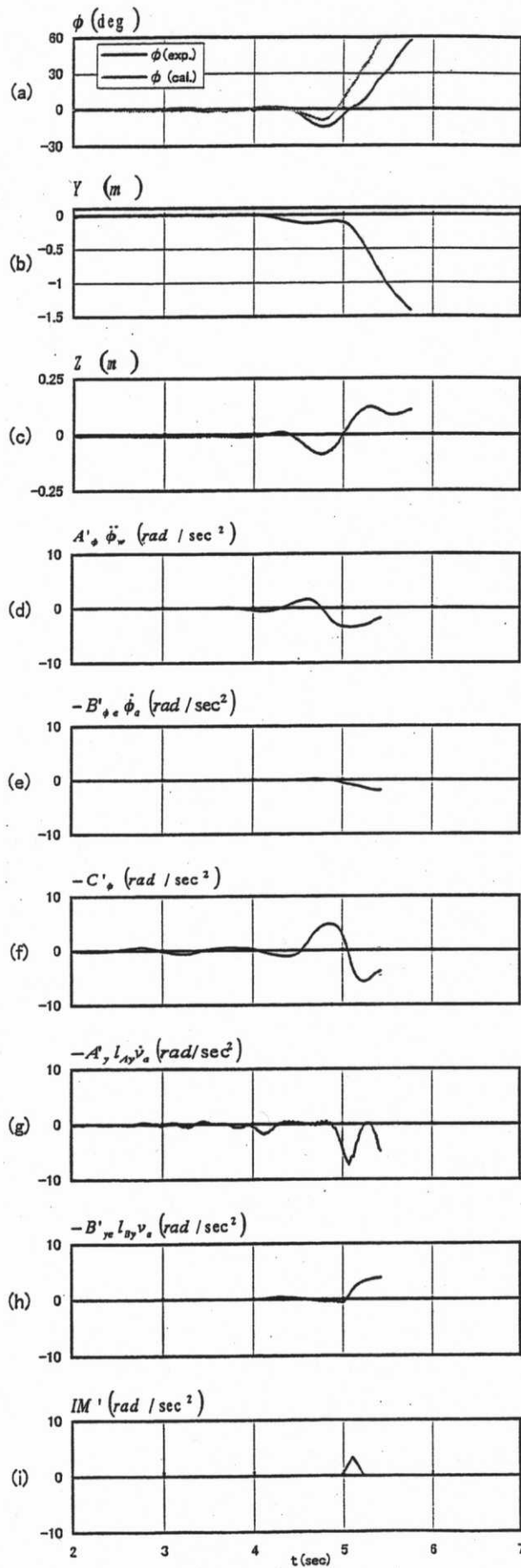


(b) モーメントの力積

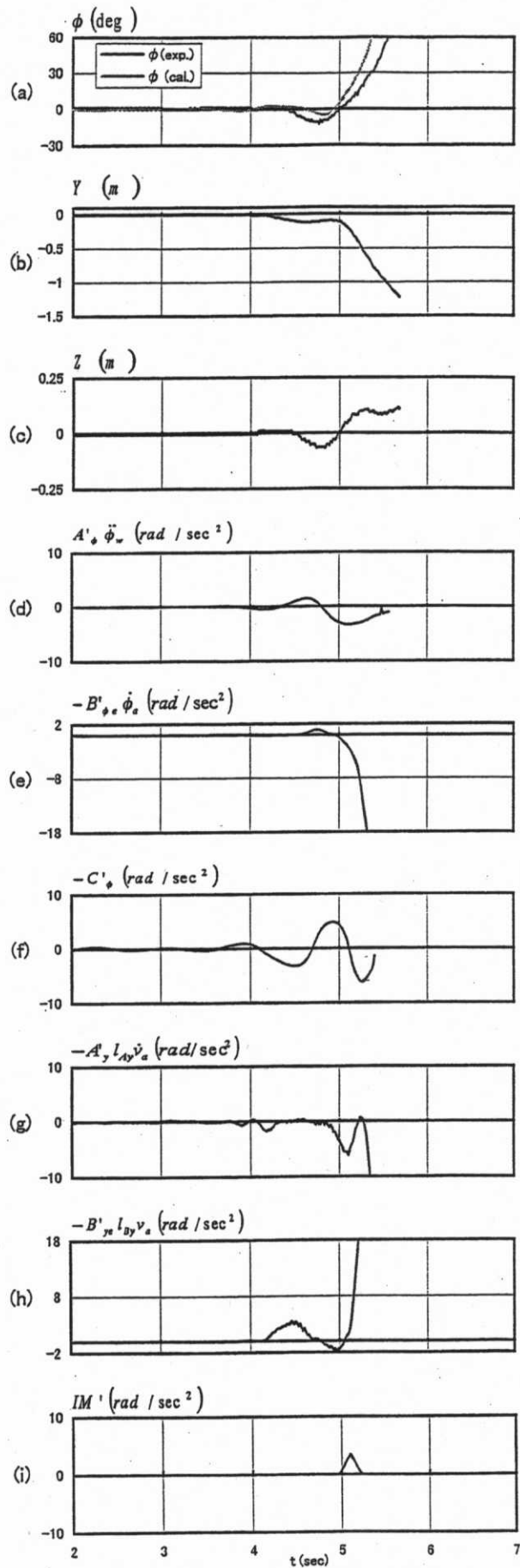


(c) 着点高さ

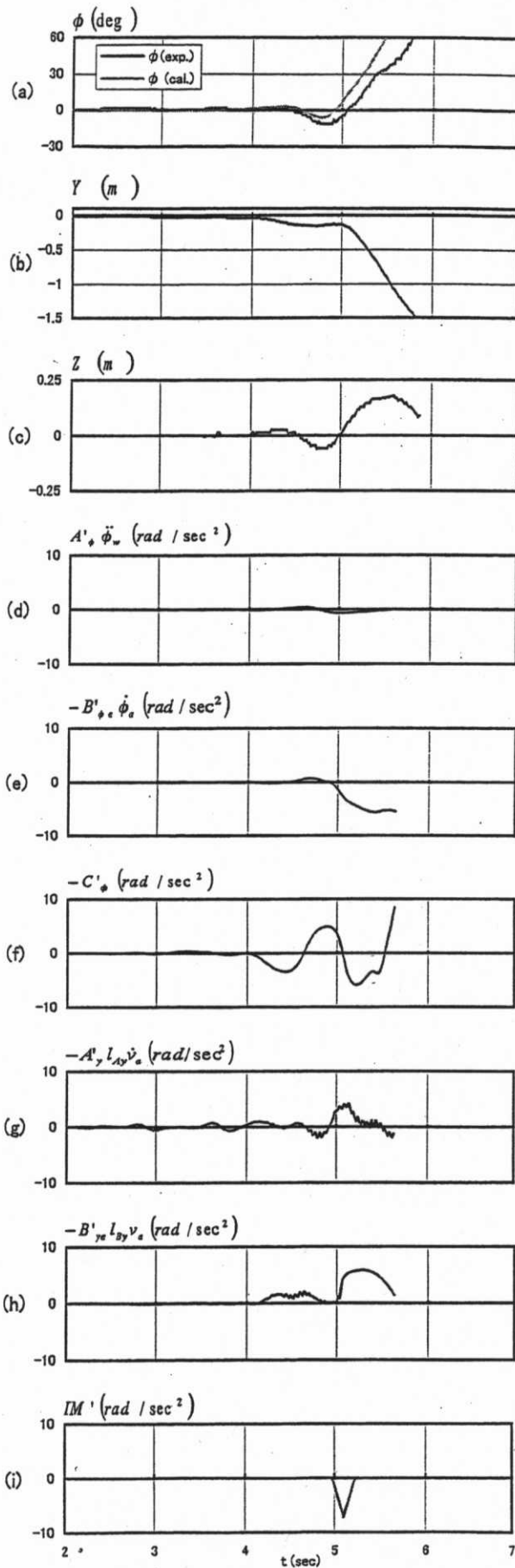
図IV-36 傾斜角による衝撃力の変化 (波高: 40.4cm)



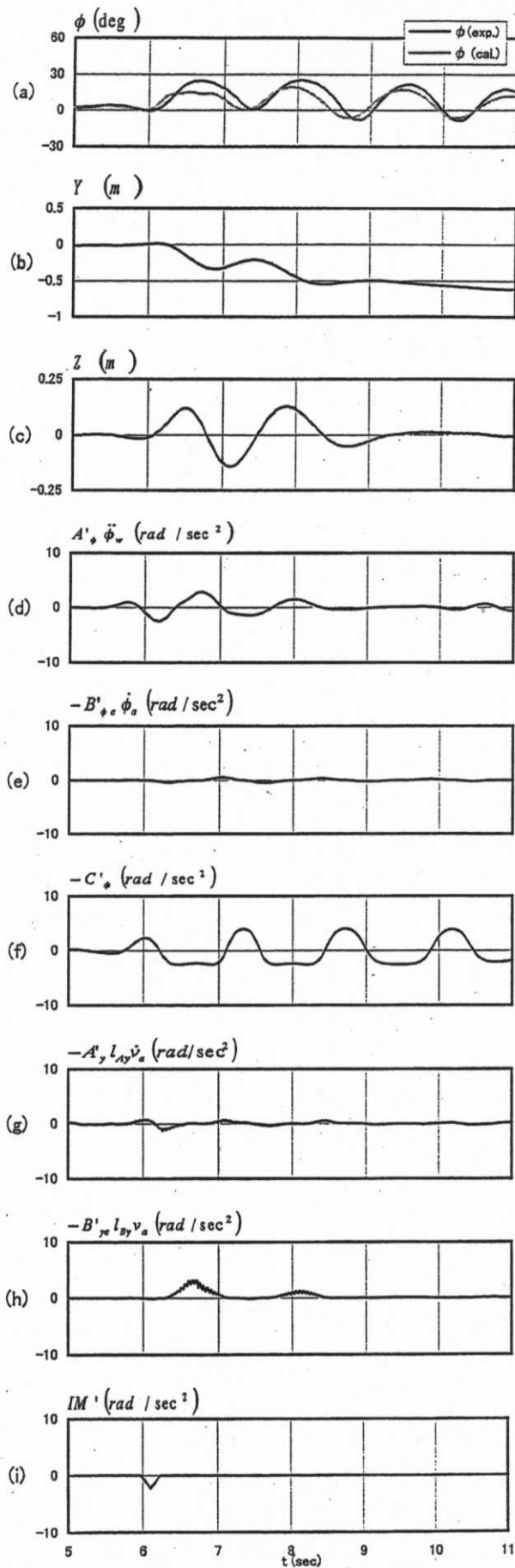
図IV-37 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船：M20、OG：9.8cm、波高：41.7cm)



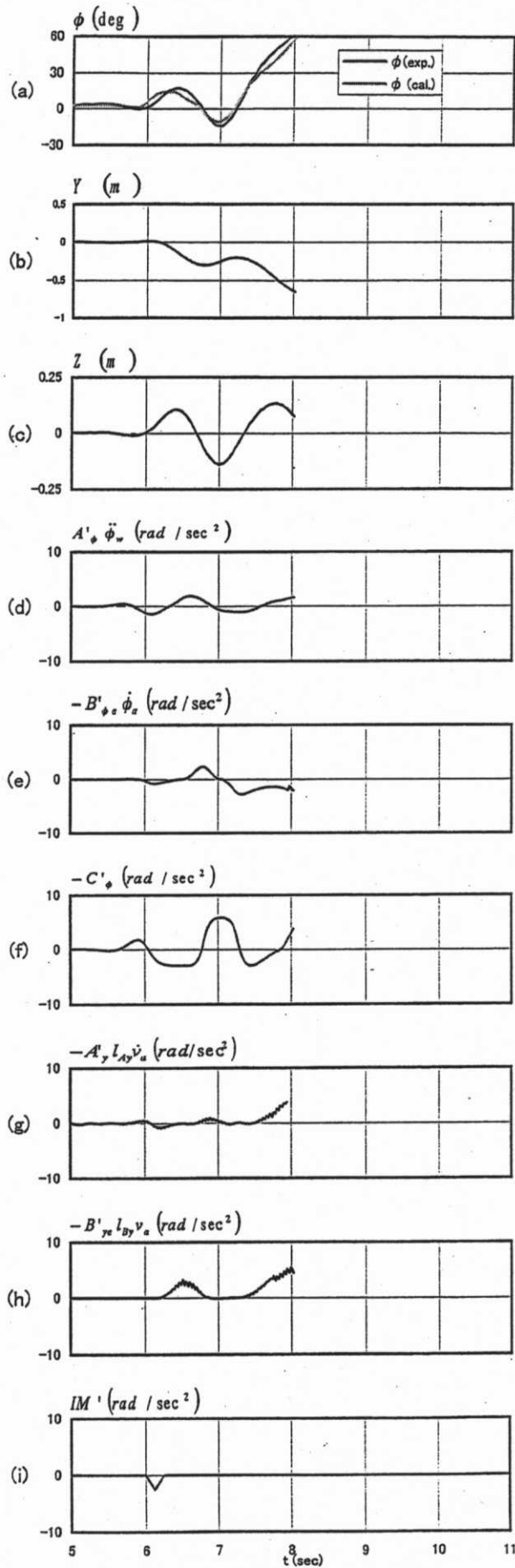
図IV-38 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船：M20C、OG：9.8cm、波高：41.7cm)



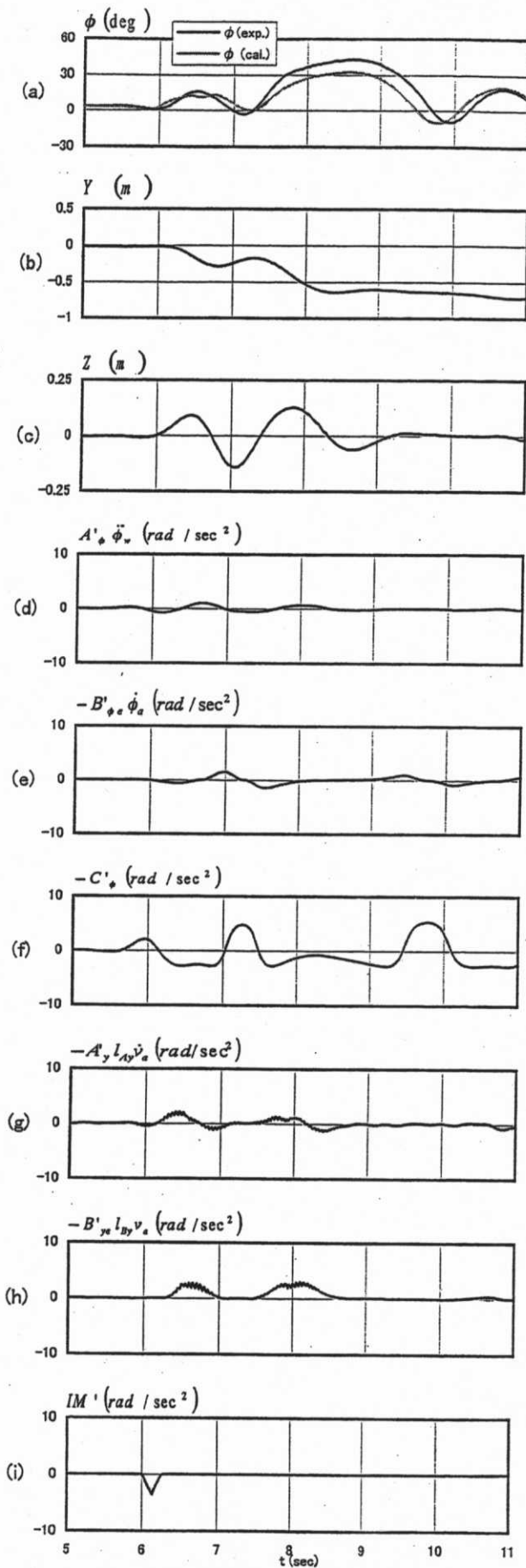
図IV-39 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船：M20CS、OG：9.8cm、波高：41.7cm)



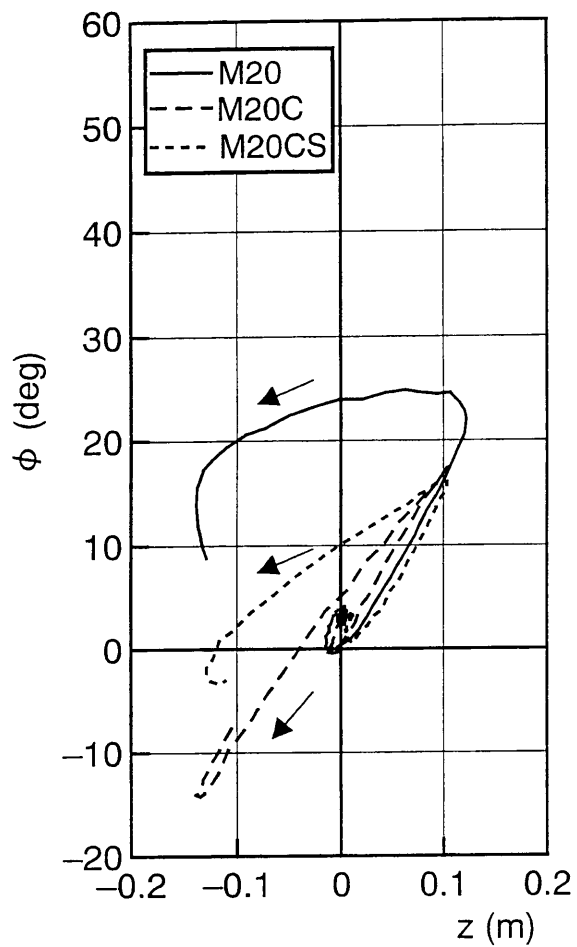
図IV-40 波高が低い時のシミュレーション結果
 (模型船：M20、OG：10.8cm、波高：25.9cm、初期傾斜：3°波下側)



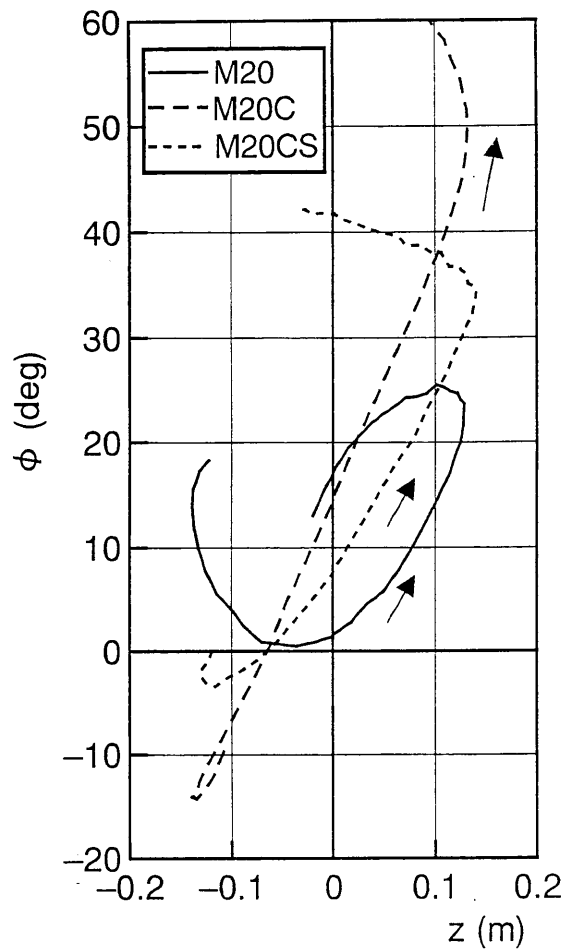
図IV-41 波高が低い時のシミュレーション結果
 (模型船：M20C、OG：10.8cm、波高：25.9cm、初期傾斜：3°波下側)



図IV-42 波高が低い時のシミュレーション結果
 (模型船：M20CS、OG：10.8cm、波高：25.9cm、初期傾斜：3°波下側)

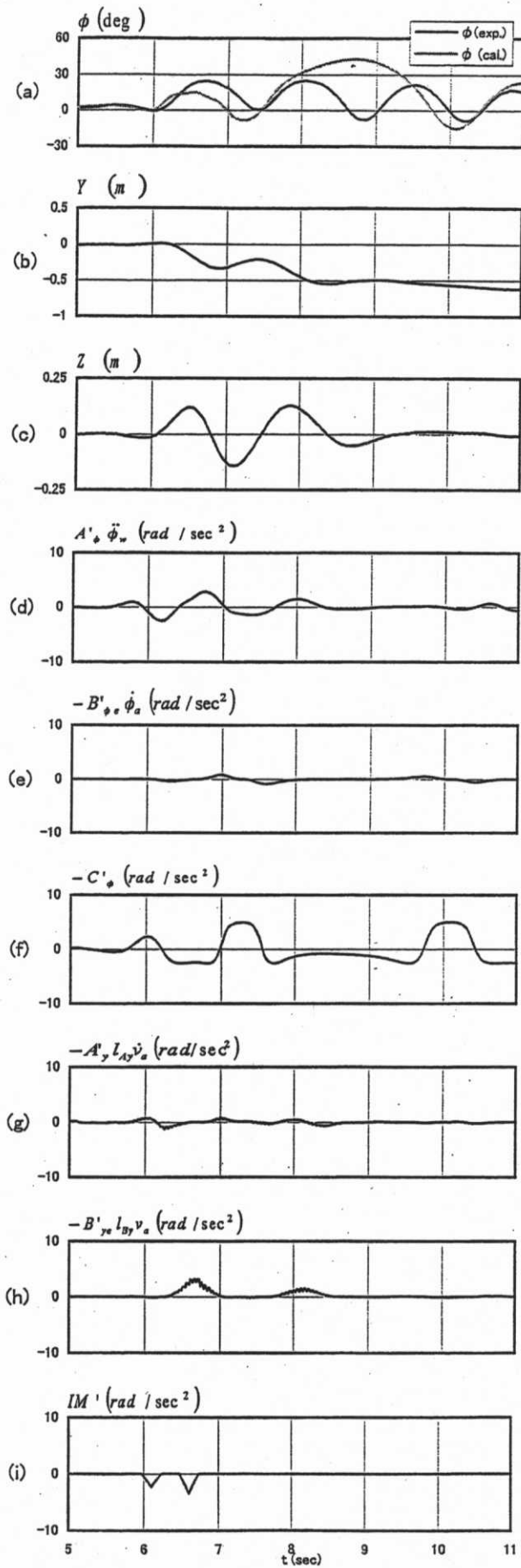


(a) 第1波中の運動

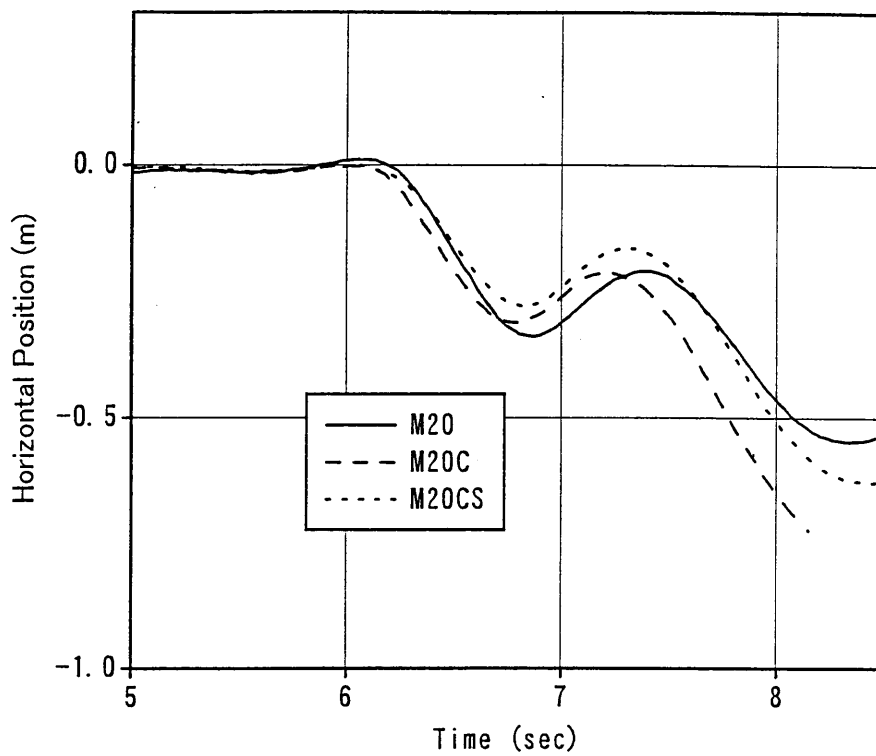


(b) 第2波中の運動

図IV-43 波高が低い時の運動の比較 (上下揺れ-横揺れの実験値)



図IV-44 波の谷における M20 の傾斜角を人工的に M20C 相当にした場合



図IV-45 船型による水平運動の比較
 (OG=10.8cm、波高：25.9cm、初期傾斜：3°波下側)

第V章 横風と横流れによる傾斜

実船が転覆に至るような海象では、出会波周期成分の横揺れとともに風による傾斜が存在するということがC係数基準の前提である。すでに検討したように、横風による傾斜モーメントを過大評価することは転覆海難の実態に合わないが、波下側に初期傾斜がある場合に転覆限界波高が低くなることがわかっているため、風による傾斜角にも注意を払っておく必要がある。しかし、現在まで小型船の風による傾斜特性はほとんど調べられていない。そこで、第II章で転覆実験に使用した三次元模型船の風圧力計測を行い、横風による抗力と傾斜モーメントの性質を調べた。

また、風によって横流れする時の傾斜角を知るためには、速度一定で横流れする時の流体力の性質も把握する必要がある。周期的な左右揺れ時の流体力については先に詳しく調べたが、没水した角柱等を用いた実験では、振動流中と一様流中で流体力にかなり差があることが知られている³²⁾。そこで、三次元模型船と船型要素を変化させた二次元模型船を用いて、速度一定の強制横流れ試験を行い、横流れによる抗力と傾斜モーメントについて調べた。

また、三次元模型船を用いて横風による自由横流れ試験を行い、上記流体力と小型船の傾斜特性との関係について評価を行った。

V-1 横流れによる抗力とモーメント

1) 実験方法

第II章で転覆実験に使用した三次元模型船を真横に曳航し、三分力計で抗力と傾斜モーメントを計測した。実験パラメータは、曳航速度と傾斜角である。実験は、船舶技術研究所の動揺水槽（ $L \times B \times d = 50 \times 8 \times 4.5\text{m}$ ）で行った。

一般に、浮体が低速で水平運動をする場合には沈下力が働き、船底に作用する圧力分布によって傾斜モーメントが発生する。特に幅が広い小型船はその影響が大きい。ここではその影響を避けるため、上下揺れを自由として平水中を曳航し、上下揺れ方向の力が微小であることを三分力計でモニターしながら実験を行った。

なお、二次元模型船を用いて船型の影響を調べた結果については、V-4節「横流れ時の流体力に対する船型要素の影響」で述べる

2) 実験結果

抗力係数と水面上着点高さについて、傾斜角ゼロの状態における曳航速度の影響を図V-1に示す。また、曳航速度 $V = 0.4\text{m/s}$ を例にとって傾斜角の影響を図V-2に示す。抗力係数は速度および傾斜角による変化が小さく、II-2-1節で述べた強制左右揺れ試験（図II-23参照）よりも小さい $C_D = 0.7$ でほぼ一定していることがわかる。

一方、着点の水面上の高さ l_D は、速度と傾斜角によって大きく変化している。速度依存性が大きいことは、周期的左右揺れにおいて振幅依存性が小さかったこと（図II-18）と異なった性質である。また、たとえば直立時の場合、強制左右揺れでは着点の船底付近にあったのに対し、この速度一定の横流れでは、速度があまり大きくない限り水面上の高い位置にある。着点が高いことは、風圧力の作用中心からの距離が小さい、すなわちモーメントレバーが小さいことになるので、安全側の性質と言える。しかし、傾斜角による変化を見ると、船がプラス側（＝横流れ方向＝風下側）に傾斜した場合に着点の下がる傾向は左右揺れ時（図II-23）と同様である。このことは、傾斜するほど傾斜角を助長する方向にモーメントが働くことを意味するので、小型船にとって危険側の性質と言える。

なお、この性質の発生メカニズムや流場に関する考察については、船型要素の影響を調べたV-4節で詳しく述べる。

V-2 横風による抗力とモーメント

小型船の水面上の形状は、大きなブルワークや張り出し部を持つこと、相対的に表面が滑らかであること、 L/B （ L ：船長、 B ：船幅）が小さいこと等の特徴を有するが、風がこのような形状に及ぼす力のデータは十分でないのが現状である。そこで、上記と同じ三次元模型船に作用する風圧力およびモーメントを計測した。なお、この模型船は主船体とハウスのみから構成されており、手摺やアンテナ等の細かい付加物は付いていない。

1) 実験方法

一般に、風圧力およびモーメントを精度良く計測するためには、二重模型やエンドプレートを用いた風洞実験が行われる。また、圧縮性が問題とならない場合には、水の動粘性係数（ ν ）が空気の $1/10$ 以下であること（Reynolds 数を高くしやすいこと）を

利用して、水槽で実験されることもある。しかし、本実験では模型船の傾斜角が重要な実験パラメータであり、傾斜角毎に模型を製作することができなかつたため、前節の実験装置に対し模型船の横約 2m の位置に送風機を付加して実験を行った。送風口は幅 3m、高さ 0.45m であり、模型船に対して十分な大きさである。送風機は上下可動となっているが、これを水面ぎりぎりまで低くして実験を行った。

模型船がない場合に計測した鉛直方向の風速分布を図 V-3 に示す。自由表面が存在し、また開放型の送風機を使用しているが、風速分布はハウス頂部から水面付近までほぼ一樣なので、風洞実験に比べて大きな誤差は生じないと考えられる。

風速 U の選択に当たっては、風による波の発生が小さい範囲で Reynolds 数 ($= UL/\nu$) が最大となるように考慮し、 $U = 4.94\text{m/s}$ の一通りを採用した。模型船の縮尺比 (1/6.054) から実船に換算した風速は 12.2m/s であり、Reynolds 数は 4.03×10^5 である。この Reynolds 数は実船で想定される値に比べてやや小さいが、過去の多くの実験^{21), 75), 76), 84), 105)}でもこの程度の値が含まれており、大きな問題はないと思われる。ただし、円柱や角が丸みを帯びた柱体では臨界 Reynolds 数が $10^5 \sim 10^6$ の間にあり、層流剥離から乱流剥離に移ることによって、抗力係数が大きく変化することが知られている^{26), 100)}。模型船のハウスは丸みを帯びているため (図 V-3)、この部分での剥離が層流剥離となり、実船よりも大きい抗力を生じる可能性がある。しかし、Hoerner²⁶⁾は、使用する風洞の流れの乱れが大きいと臨界 Reynolds 数が低下することを示している。ここで使用した送風機は簡易型のものであるため、本格的な風洞に比べて乱れはかなり大きいので、臨界 Reynolds 数は越えているものと判断される。

2) 直立時の抗力係数と着点高さ

まず、模型船が直立している場合の抗力係数と着点高さについて、概要を述べる。

上記風速で計測された抗力係数 $C_d (= F/0.5 \rho_a U^2 A_a)$ 、 F は抗力、 ρ_a は空気の密度、 A_a は水面上横投影面積) は $C_d = 0.716$ で、一般に言われている 1.0 程度あるいはそれ以上の値に比較して小さい。模型船に手摺等の付加物が付いていないことが原因のひとつとして考えられるが、幅 5cm、 $C_d = 1.5$ の手摺が船長の 2 倍の長さに付いており、それがすべて外部一様流に晒されていたと仮定しても $C_d = 0.784$ にしかならない。従って、 C_d が小さい主原因は、 L/B が小さく相対的に表面の凹凸が少ない (角部の曲率が大きい) 等の小型船の形状そのものにあると考えられる。

また、水面上着点高さ l_w は $l_w/b = 0.647$ (b は半幅) で、水線上横投影面積の中心に比較して 10%程度高い位置となっているが、この点については他の実験^{たとえば83)}と同様

である。その結果、風圧力とレバーの積であるモーメントは中大型船に比べて小さ目のレベルに留まっている。

3) 傾斜角の影響

模型船に傾斜をつけた場合の計測結果を図V-4に示す。模型船が傾斜しても検力計は傾斜しないので、抗力係数は空間固定座標での値である。模型船ガイド装置のロッドにハウスが接触するため $\pm 15^\circ$ までしか計測していないが、この範囲では抗力係数、着点とも概略一定値として扱っても差し支えないようである。ただし、中型船を対象とした過去の研究例^{75), 83)}では、船が傾斜するにつれてモーメントが急速に小さくなるものも見られた。

その違いの主な原因は、横投影面積およびその中心高さと傾斜角との関係にあると考えられる。本模型船のようにブルワークが張り出して幅が広い船型では、傾斜とともに片舷のブルワークが上昇する。同時に、反対舷のブルワークが没水して浮力が生じることにより、船全体が浮き上がる。その結果、横投影面積（およびその中心高さ）が大きくなるので、抗力とモーメントが大きくなるか、少なくともその減少が抑えられる訳である。従って、小型船の傾斜による風圧モーメントの減少は、中大型船に比較して小さい傾向にあると考えられる。

船舶復原性規則では直立時の風圧モーメントが傾斜時も減少しないとしているが、これは中大型船にとって安全側であり、打込み水や積荷の移動等に対するマージンを陰に含んでいると考えれば合理的であろう。しかし、本実験のように大角度までモーメントが減少しない船が小型船に多いとすれば、上記マージンを別の形で考慮する必要があるかもしれない。

なお、膨張式救命筏を用いた長田等の実験⁶⁰⁾では、 5° 程度の傾斜によって抗力係数と着点点はかなり変化することが示されている。風による天幕の変形を主因とする特殊な例であるが、救命艇等の安全性を検討する場合には注意しておく必要がある。

V-3 横風による自由横流れによる傾斜

1) 実験方法

横風による定傾斜を確認するため、上記の模型船を完全自由の状態にして横風を当て、傾斜角と横流れ速度を計測した。送風機はV-2で説明したものをを用いた。ガイド装置の影響を防ぐため、転覆実験と同様に運動計測には非接触の光学式計測装置を用いた。

送風機を載せた台車を模型船の横流れ速度に合わせて移動させたため、送風機から模型船までの距離はほぼ一定に保たれている。

2) 実験結果

風速 U を変化させた場合の横流れ速度 V および傾斜角 ϕ の計測値を図 V-5 に示す。同図には、上に示した水面下および水面上の流体力を用いて計算した傾斜角も合わせて示している。横流れ速度 V は風速 U にほぼ比例しているが、これは、空気と水による抗力のバランス

$$\frac{1}{2}\rho_a(U-V)^2A_aC_d = \frac{1}{2}\rho_wV^2A_wC_D \quad \dots (V-1)$$

において、密度と投影面積だけでなく 2 つの抗力係数も一定値である（速度と傾斜角に依存しない）ことに対応している。

一方、傾斜角 ϕ は風速の増加とともに急激に大きくなっているが、これは着力点の速度および傾斜角依存性によるものである。傾斜偶力のレバーが一定ならば、抗力は風速の自乗に比例するので、復原力が線形な範囲では傾斜角も風速の自乗に比例する。しかし、本模型船は速度と傾斜角の増加によって横流れによる着力点が直線状に低下するため、傾斜角は風速のおおむね 3 乗に比例するという結果になっている。

このように傾斜角の変化率が大きい性質は、船の安全性にとって望ましいものではない。しかし、変化率でなく絶対値で考えると傾斜角は非常に小さいと言え、本実験の最大風速 8m/s（実船換算で約 20m/s）においても傾斜角は 3 度にしかならない。これは、基準で想定する喫水の中央よりも横流れ時の着力点がかなり上方に位置するためである。

V-4 横流れ時の流体力に対する船型要素の影響

V-1 節では、三次元模型が速度一定で横流れする場合の流体力を調べた。本節では、そのような流体力に対する船底勾配角および付加物の影響について述べる。

第 III 章で使用した 3 種類の二次元模型（付加物の組み合わせにより 9 種類の船型）を用い、これらを一定速度で真横に曳航して流体力の計測を行った。この場合も第 III 章と同様に、模型船に近接して設置したエンドプレートによって流れの二次元性を保っており、また上下運動を自由に行っている。実験した横流れ速度 V は、造波成分を押さえるため $V = 0.1 \sim 0.4$ m/s とした。

なお、III-3節「減衰力と着力点」では、水圧分布の計測値から船型要素と左右揺れ速度による流体力の関係を考察している。しかし、本研究では水圧計の容量（1気圧）の1%未満の量を計測しているため、水の攪拌による温度ドリフトの影響を取り除くことができず、水圧の直流成分は信頼できないものであった。III-3節で水圧の振幅のみを議論したのはそのためである。同じ理由から、本実験では水圧の計測を行っていない。しかし、一定速度で横流れする場合も、剥離層や渦が十分に発達することを除けば、左右揺れ試験で把握された剥離の発生状況が基本的に成立するものと考えられる。また以下に示すように、そう仮定することで実験結果を合理的に説明することができる。

V-4-1 抗力係数

1) 全体的な傾向

横流れ速度 V による水平力 Y の変化を最小自乗法で評価し、抗力係数 C_D ($= Y/0.5 \rho_w V^2 A_w$) を計算した。結果を図 V-6 に示す。このうち M10（船底勾配角 10° 、付加物なし）と M10C（船底勾配角 10° 、ハードチェーン付）は、後述するように他とは異なった傾向を持っているので、他の7つの船型についてまず述べることにする。

全般的に次のようなことが言える。

- (1) 傾斜方向と逆の方向に横流れする場合 ($\phi < 0^\circ$) は、船型や付加物の有無にかかわらず $C_D = 0.85$ 付近で安定している。
- (2) 傾斜方向に横流れする場合 ($\phi \geq 0^\circ$) は、 ϕ の増加につれて C_D が小さくなる傾向にある。また、スケグの影響が無視できなくなる。
- (3) チェーン形状の影響はほとんど見られない。

2) 船体周りの流場からの考察

III-1節に示した左右揺れ試験の結果を考慮に入れながら流場を考えることにする。まず、スケグの影響が小さいことは左右揺れとの大きな違いであり、スケグが無くとも船底中心で流れが安定して大規模に剥離していることを示唆している。左右揺れの場合、スケグなしの M20 と M20C の剥離領域は限られていたが（図 III-7 (a)、(b) 参照）、横流れの時は剥離領域が十分に発達するので、スケグ付とほとんど差がなくなったと考えられる。船側から剥離点までの距離を用いた Reynolds 数 R_c ($= Vb/\nu$) が $R_c = 3.2 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ であること、自由表面の影響で流れが乱されることを考えると、臨界 Reynolds 数を越えて乱流剥離が生じているものと思われる。また、チェーン形状の影響が小さいことは左右揺れの場合と同様であって、ハードチェーンからの剥離が小規模

であることを示している。

上の(2)に述べたことは、スケグ付の模型の左右揺れにも見られた現象である(図Ⅲ-9参照)。台形などを用いた実験^{20), 26)}では、剥離点が下流側に移ることによって低圧の渦の巻き込みが模型から離れることにより、 C_D が小さくなることが報告されている。本実験の場合も、傾斜角が大きくなると船底中央(=剥離点)が下流側に移るので、台形と同様な現象が主原因と考えられる。また、鷲尾等¹⁵⁾によれば、横風が強くなって傾斜が大きくなると高速艇は横流れを起こしやすくなるが、図V-6はその傾向を裏付けている。

3) M10 と M10C 船型の特徴

なお、M10Cの $\phi \leq 5^\circ$ とM10では抗力係数が非常に小さくなっているが、これは、左右揺れ実験でも見られたように、キール部の頂角が大きい(鈍い)ため剥離がほとんど起こらないためと考えられる。しかも、M10の $\phi \geq 0^\circ$ では水平力Yが必ずしも V^2 に比例せず、また実験の再現性も十分でなかったため、剥離の位置や大きさが不安定であることがわかる。傾斜角 ϕ が 10° 以上になるとM10Cの C_D だけが急激に大きくなるが、これは左右揺れの場合と同様に(図Ⅲ-9(a)参照)、鋭角のチェーン部から大きく剥離し始めるものと解釈できる。

V-4-2 着力点

1) 全体的な傾向

横流れ速度 $V = 0.4\text{m/s}$ の時の着力点高さの無次元値 l_D/d を図V-7に示す。ただし、同図(a)の縦軸が(b)、(c)よりも大きいことに注意されたい。

全般的な傾向としては次に列挙することが言えるが、その内(1)についてはチェーン没水角 ϕ_c (横流れの前面のチェーン部が十分に没水する傾斜角)が重要な要素となる。図Ⅲ-2に示したように、チェーン没水角は、船底勾配角 $\alpha = 10^\circ$ で $\phi_c = -5^\circ$ 、 $\alpha = 20^\circ$ で $\phi_c = 5^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ で $\phi_c = 15^\circ$ である。

- (1) チェーン没水角を境として着力点の傾向が変化する。 $\phi < \phi_c$ (進行方向と逆向きに傾斜)では着力点は水面上にあり、傾斜角による変動や船型による差が小さい。 $\phi > \phi_c$ (進行方向に傾斜)では、 ϕ が大きくなるほど着力点が低くなる傾向にあり、また、チェーン形状による差が見られるようになる。
- (2) 船底勾配角の小さい船型の方が変動が大きい。
- (3) スケグ付の模型は、スケグなしのものに比較して着力点が水線近傍にあり、傾

斜角による変化が少ない。

なお、横流れ速度の影響は M10 と M10C の場合に大きかったが、これは前に述べたように、不安定な剥離状況が速度によって変化するためであろう。他の 7 種類の船型では、速度の影響は小さかった。

2) 船体周りの流場からの考察

上に述べた(1)の性質は、図 V-7にはっきりと現れている。 $\phi < \phi_c$ (進行方向と逆向きに傾斜) のときに着力点が安定していることは、圧力分布形状が相似であることを意味しており、前節で指摘した「安定した剥離」を裏付けている。速度依存性が小さいこともあり、流れは船底中央で剥離し、その背面側は剥離層に覆われていると考えられる。

また、 $\phi > \phi_c$ (進行方向に傾斜) では、傾斜角が大きくなるほど着力点が低くなる。剥離を伴うハードチェーン船型の場合は、船側に作用する正圧とチェーン近傍の船底に作用する負圧が、ともに大きくなるものと思われる。一方、ラウンドチェーン船型も同様の傾向を示す。これは、船側に作用する正圧の影響と考えられるが、ラウンドチェーンからも小規模な剥離が生じる可能性があるため、さらに検討が必要である。

なお、M10C のモデルは他と異なる傾向を持っており、着力点は低くなった後で再び高くなる。これは、前節で述べたように、流れと底面のなす角が大きくなるので、ハードチェーンから剥離が発生するためである。スケグ付の船型の値に近づくことから、大規模な剥離が発生すると考えることができる。日本造船研究協会の SR17 では数種類の船型についての同様の実験を行っている⁷⁵⁾。その報告によれば着力点は $\phi = 0^\circ \sim 10^\circ$ で最も低く、さらに傾斜すると急激に上昇しており、本実験の M10C の傾向によく合っている。SR17 が対象とした中大型船の船型では、箱形でビルジキールの付いた断面形状が船体の主要部分を占めるので、M10C と同様の傾向を示したものと考えられる。

(3)に述べたスケグの効果は、左右揺れ(III-3-4節)で述べたことと同様である。すなわち、スケグ前面と背面の圧力差による傾斜方向のモーメントと、スケグ近傍の底面に作用する逆方向のモーメントが存在するが、幅広浅喫水船の特徴から後者の影響の方がより大きくなったものと考えられる。

なお、M10 および M10C で着力点が極端に低くなるのは、着力点を(傾斜モーメント) / (横力) で評価するに当たって、分母の横力が小さくなる影響が大きい。流場が大きく変化することを示しているが、傾斜モーメント自体が急激に変化するわけではないことを付記しておく。

3) まとめ

以上検討したように、速度一定で横流れする場合でも、M20 や M20C のように傾斜により着力点が非常に低くなる船型が見られた。図V-6と図V-7を比較するとわかるように、着力点が低くなる状態では抗力係数が小さい場合が多いが、傾斜モーメントとしては無視できない量である。従って、このような船型が横風を受けて漂流するような場合には、それによる傾斜角について注意が必要である。

V-4-3 風と波を同時に受ける場合についての考察

本章でこれまで検討してきたのは、横風だけを受け、しかもそれによる横流れが定常状態に達した場合である。しかし、実際の転覆海難を考えるためには、波と風が共存することを想定しなければならない。

横風と規則横波が重畳した場合については、小型漁船を対象にした原口等¹⁸⁾の研究がある。そこでは、横風による漂流実験、横波中動揺実験、および風波併存時の動揺実験の結果を比較し、風波併存時の平均傾斜角は横風によるものと横波によるものの和に等しいという結果を得ている。しかし、上に述べたように傾斜モーメントレバーの変化は剥離による非線形な現象に起因するので、周期的左右揺れと定常横流れの重ね合わせが常に成立する保証はない。一方、横風と同時に集中性過渡水波を受ける場合の研究は少ないが、救命筏を用いた実験⁷⁷⁾では、風波併存時と波だけを受けた場合とで最大傾斜角にほとんど差がないという結果を得ており、この原因は大波が風を遮ることとされている。

本研究で対象とする転覆モードでは、風を完全に遮蔽するほど高い波を受けるわけではない。しかし、波頂の高さは主船体を越えるため、風はかなり遮られると考えられる。また、横流れの減衰力は大きいので、転覆する一波に当たる直前に遭遇風が弱まれば、風による横流れ速度も小さくなり、抗力とレバーの積で与えられる傾斜モーメントも小さくなる。従って、風による傾斜モーメントは限定的なものであり、C 係数基準のように復原力曲線全体にわたってこれを考慮する必要は考えられない。

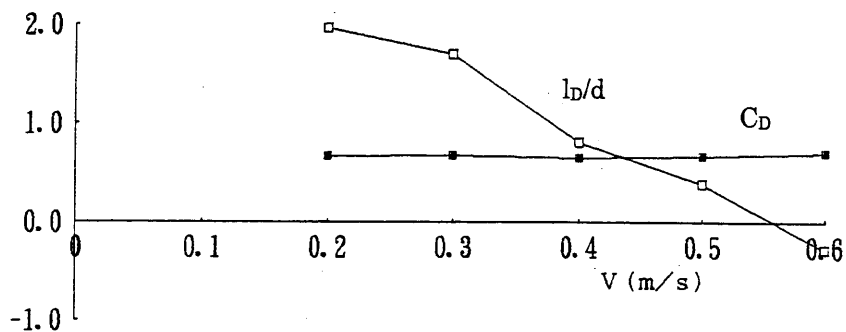
ただし、上に述べたように、横流れ時の着力点がかなり低くなる船型があることから、これが波の山に上がった瞬間には、横流れ速度が未発達であるとしても、ある程度の傾斜モーメントが作用する可能性がある。また、左右揺れからの連成モーメントは傾斜角の関数であるから、風による傾斜がこの連成モーメントを若干大きくすることも考えられる。しかし、このような場合の流場は、定常横流れに達する前の過渡的な流場に周期的左右揺れによる流場が重なったものと考えられるので、その評価は簡単ではな

い。これについては、今後の検討課題としたい。

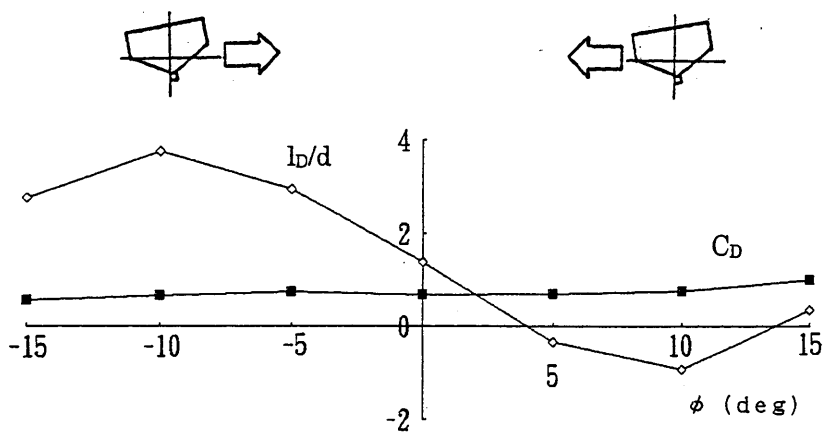
V-5 第V章のまとめ

実船が転覆に至るような海象では風も強い可能性が大きく、第II章および第IV章で述べた転覆実験では波下側に初期傾斜がある時に転覆が多く見られたことから、横風による傾斜特性を把握することを目的として、横風および横流れによる抗力と傾斜モーメントの性質を調べた。また、横流れ時の流体力に対する船型要素の影響についても検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

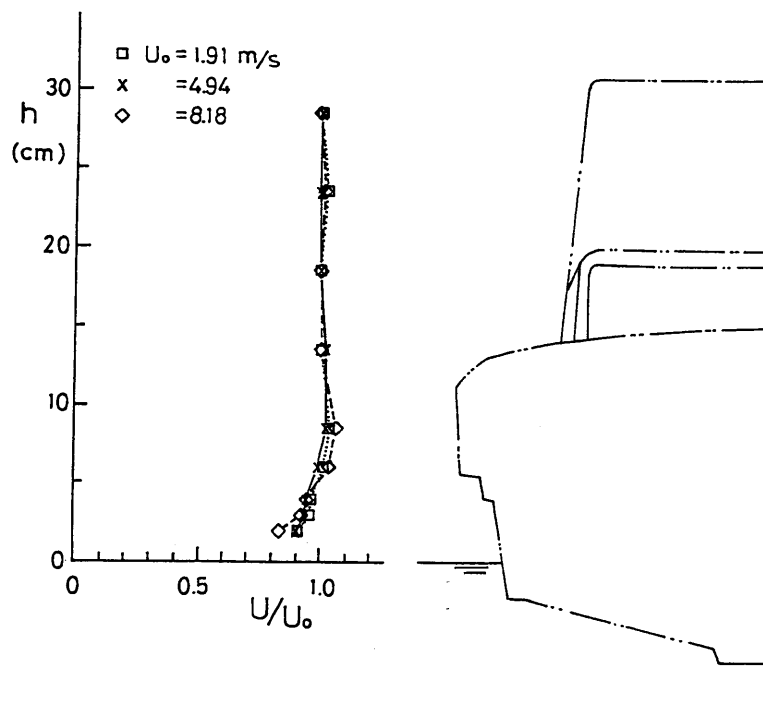
- (1) 横風による抗力係数は中大型船に比較してやや低いレベルにある。この原因は、 L/B が小さく相対的に角部の曲率が大きい等の小型船の形状そのものにあると考えられる。また、着力点は横投影面積の中心よりもやや高い位置にある。抗力係数、着力点とも傾斜角による変化は小さい。
- (2) 横流れによる抗力係数は、模型船の傾斜と逆の方向に横流れする場合には安定した値を示すが、傾斜方向に横流れする場合には傾斜とともに小さくなる傾向が多く見られる。
- (3) 横流れによる抗力の着力点は、チェーン没水角 ϕ_c を境として傾向が変化する。 $\phi < \phi_c$ では着力点は水面上にあり、傾斜角や船型による差が小さい。一方、チェーンが没水する $\phi > \phi_c$ では、風下側に傾斜するほど着力点が低くなる船型が多い。
- (4) 着力点の低下は、チェーン近傍の剥離に伴う船底圧力の低下および船側水圧の増加に関係している。スケグ付の船型や船底勾配角が大きい船型など、大規模な剥離を伴う場合には着力点は安定している。
- (5) 風と大波を同時に受ける場合には、波が風を遮るため、風による傾斜モーメントの影響は基本的に小さいものと考えられる。ただし、横流れ時の着力点が低くなる船型を持つ船が波の山に上がった時については、さらに検討が必要である。



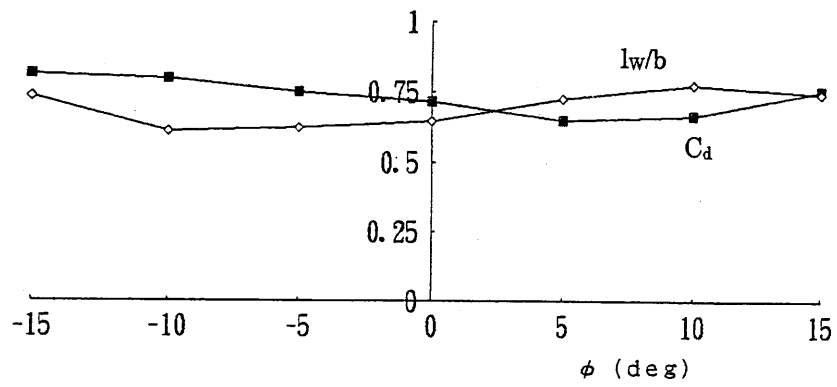
図V-1 横流れ時の抗力係数と着点高さ (三次元模型船、傾斜角ゼロ)



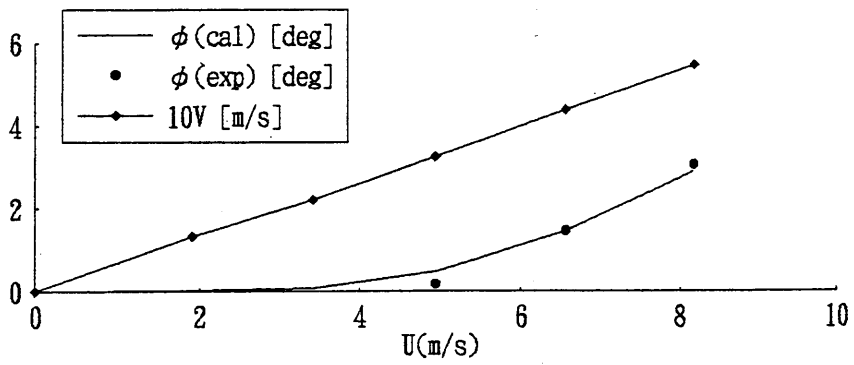
図V-2 横流れ時の抗力係数と着点高さ (三次元模型船、 $V=0.4\text{m/s}$)



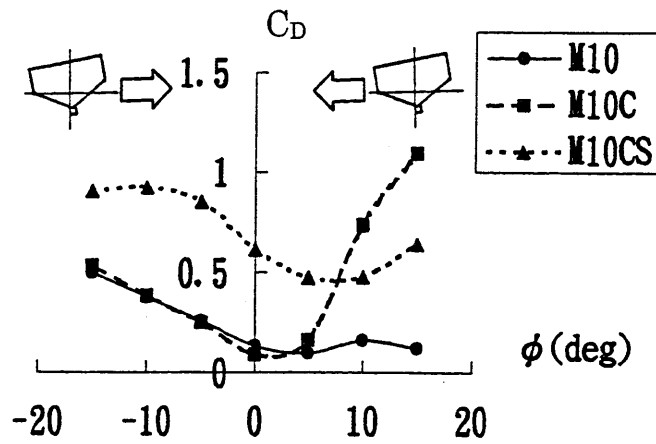
図V-3 風速の鉛直分布



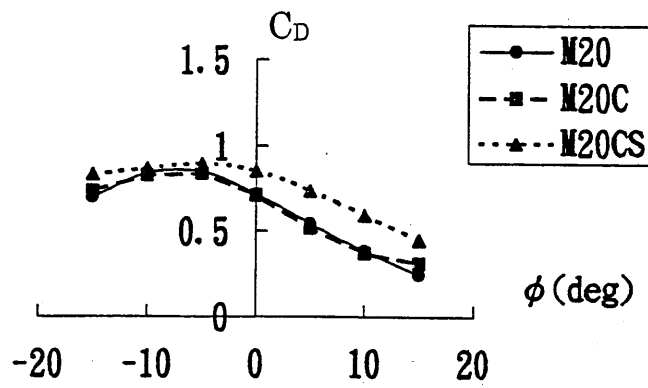
図V-4 横風による抗力係数と着力点高さ (風速: 4.94m/s)



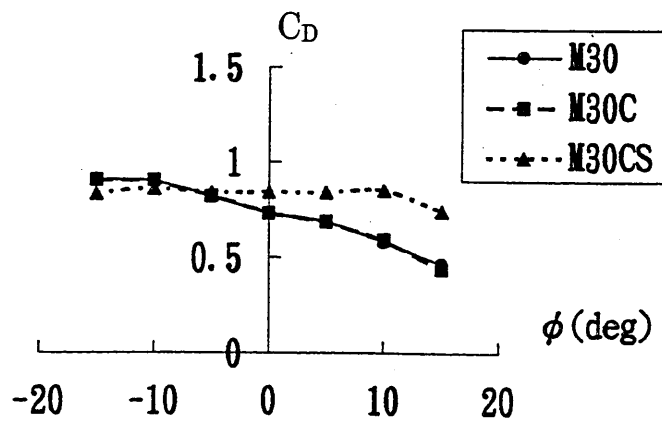
図V-5 横風による自由漂流試験結果



(a) Models of $\alpha=10^\circ$

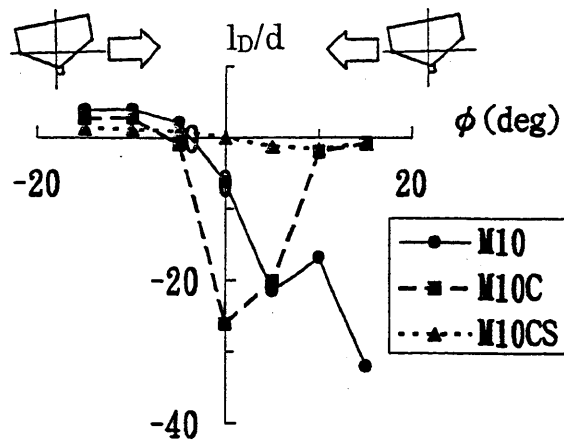


(b) Models of $\alpha=20^\circ$

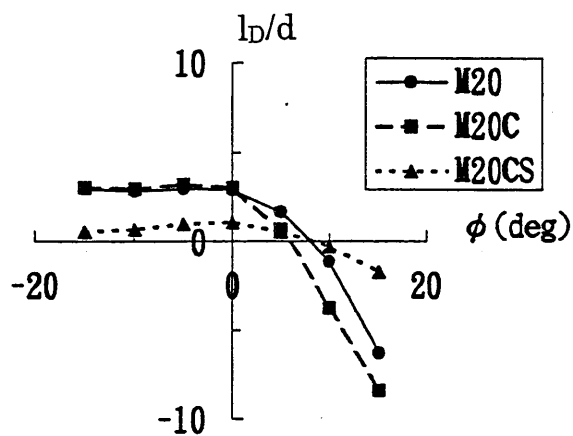


(c) Models of $\alpha=30^\circ$

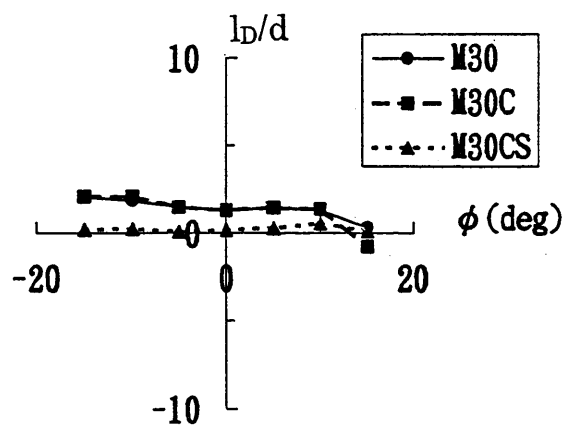
図V-6 横流れ時の抗力係数 (二次元模型船)



(a) Models of $\alpha = 10^\circ$



(b) Models of $\alpha = 20^\circ$



(c) Models of $\alpha = 30^\circ$

図V-7 横流れ時の抗力の着力点高さ (二次元模型船、 $V = 0.4\text{m/s}$)

第VI章 復原性基準への応用

本章では、第 V 章までに明らかにした小型船の転覆メカニズムや流体力の特徴を受け、これらを踏まえた復原性基準のあり方について検討した結果を述べる。

まず、復原性基準の現状を理解するため、我国における小型船の復原性基準と、国際的な基準制定の動向について概説する。次に、代表的な基準である C 係数基準にスポットを当て、これを小型船に適用した場合の問題点を明らかにするとともに、小型船の特徴を取り入れた改良方法についてコンセプトの提案を行う。最後に、本研究で用いた模型船を現行の C 係数基準とその改良案に適用した結果について述べ、その有用性を検証する。

VI-1 小型船の復原性基準の現状および動向

本節では、我国における小型船の復原性基準である小型船舶安全規則の内容を述べるとともに、ISO（国際標準化機構）において検討されている国際的な復原性基準の動向について概説する。両基準の具体的な内容に入る前に、まずそれらの基本的な考え方を以下に示しておく。

- (A) 乗員の片舷への集中や横風等による傾斜が過度にならないこと。
- (B) 乾舷やブルワークを越えて波浪が打ち込まないこと。
- (C) 十分な動的復原力（復原力曲線の面積）を持つこと。
- (D) 多量の海水が船内に滞留した時や転覆した状態でも安定して浮いていること。

これらのうち、(D)は海難に遭遇した後の乗員の生存率を上げることを目的としており、主に ISO 基準案で重視されている。

VI-1-1 我国の小型船の復原性基準—小型船舶安全規則—

我国では、総トン数 20 トン未満の小型船が満足すべき復原性について、「小型船舶安全規則」（1974、略称：小安則）に規定されている。その内容は、航行区域等によって次の 3 条に分かれている。

1) 小安則第 101 条

総トン数 5 ト以上の旅客船または近海区域以上を航行する小型船を対象とする規定である。

多くの人命が関係する旅客船、および波浪条件が厳しく且つ避航・救助に時間がかかる近海以上を航行する船舶を対象とすることから、中大型の船舶を対象とした「船舶復原性規則」を準用することが定められている。その内容を簡単に述べると、以下のようになる。

- ①乗員の片舷への集中および横風による傾斜モーメントが重なっても、ある限界角以上に傾斜しないこと。また、GM が正であること。（甲基準）
- ②横風による定傾斜に横波による同調横揺れが重なった場合を想定し、そこに最悪のタイミングで突風を受けた場合に、十分な動的復原力（復原力曲線の面積）を持つこと。（乙基準 = C 係数基準）
- ③GZ の最大値が、打込み水の滞留、重量物の移動、旋回による傾斜モーメントなどを考慮したある値以上であること。（丙基準）

2) 小安則第 102 条

沿海区域（我国の海岸からおおむね 20 海里以内）を航行する小型船を対象とする規定である。ただし、総トン数 5 ト以上の旅客船は第 101 条に従う。

ここでは、最大搭載人員を定める 3 つの式を満足することが要求されている。それぞれの式の内容は以下のとおりである。

- ①乗員が片舷へ集中し傾斜しても、舷端を越えて浸水しないこと。
- ②縦波中または横揺れによる相対水位の上昇を、それぞれ船長および船幅に比例すると仮定し、その上昇量が最小乾舷を越えないこと。
- ③乗員の移動による船尾トリムの増加および縦波による相対水位の上昇によっても、船尾の最小乾舷を越えて浸水しないこと。

3) 小安則第 103 条

平水区域および限定沿海区域（沿海区域の一部、その船が平水区域に到達するのに要する時間などによりいくつかの定義がある¹⁾）を航行する小型船を対象とする規定である。ただし、総トン数 5 ト以上の旅客船は第 101 条に従う。

要求内容は、第 102 条の①および③と同一である。海象の穏やかな航行区域を対象

とすることから、波浪影響を考慮した第 102 条の②は省略されている。

VI-1-2 国際的な小型船の復原性基準の動向—ISO における新基準案—

VI. 1. 2. 1. ISO 基準案の動向

第 I 章で触れたように、現在 ISO では全長 24m 以下の舟艇を安全性の面から 4 つの
カテゴリーに分類することが検討されている。我国では、他の ISO 規格と同様に（財）
日本船舶標準協会が国内の取りまとめを行っているが、復原性については JCIO の中に
「小型船舶の復原性基準検討委員会」を設け、2000 年 3 月まで技術的な検討を行った
ところである⁷³⁾。筆者も一委員としてこの検討に参加した。この新しい復原性基準は、
2001 年前半に発効することを目指して作業が行われている。ここでは DIS（Draft
International Standard：国際規格案）の内容を紹介するが、この段階では技術的な検討は
おおむね終了しており、今後大幅な変更はないものと思われる。

なお、本論文では紛らわしさを避けるため、固有名詞を除いて「規則」および「規
格」も「基準」という表現で統一している。しかし、この復原性基準は ISO の他の規
格（たとえば「ISO ネジ」として知られるネジの規格）と同様であって、あくまで船の
ひとつの性能を定めるものであり、厳密な意味で基準とは言えない。従って、船舶復原
性規則のような強制力のある基準の中にどのような形で取り入れるか、また従来から各
国で行われている航行区域により安全を確保する考え方とどのように調整するかは、各
国の主官庁に委ねられることになる。たとえば、夏季の日本海の海象は非常に穏やかな
ことが多いと言われているが、次に述べる Category-C の船に日本海全域の航行を許可
するかどうかは、日本政府が判断する事項である。

VI. 1. 2. 2. ISO 基準案の内容

ISO 基準案の内容に入ると、まず復原性カテゴリー（design category）は、以下の 4
段階とされている。

Category-A : Ocean	(有義波高 7m 以下、Beaufort 風力階級 10 以下)
Category-B : Offshore	(同 4m 以下、同 8 以下)
Category-C : Inshore	(同 2m 以下、同 6 以下)
Category-D : Sheltered Waters	(同 0.3m 以下、同 4 以下)

上に示したのは運航が想定される「設計海象」であり、Category-A についてはさらに厳
しい海象下でも遭難しないこととなっている。また、Category-D にも要求基準があるの
で、それを満足しない場合には Category なしとなる。

また、この基準案は、帆船と非帆船では要求すべき内容が異なること、船長に応じた適切な基準を定める必要があることから、次の3つのパートに分かれている。

Part-1：全長 6m を越える非帆船

Part-2：全長 6m を越える帆船

Part-3：全長 6m 以下の舟艇（帆船と非帆船を含む）

以下ではパート毎に内容を解説する。なお、この基準案では、デッキの大きさ等により複数のオプションが用意されていることがひとつの特徴である。すなわち、同一のカテゴリを取得する場合でも、設計者・製造者はいくつかのオプションの中から課される要件を選択することができる。しかし、それを正確に述べることは極めて煩雑であるため、ここでは概略のみの解説にとどめる。

1) Part-1：全長 6m を越える非帆船³⁸⁾

Part-1 は、全長 6m を越える非帆船を対象にしたものである。基準の主な要件は、冠水していない状態において、

- ① 海水流入高さ（乾舷）
- ② 海水流入角
- ③ 片荷状態における傾斜角
- ⑤a 風波への横揺れ耐力（Category-A と B のみ）
- ⑤b 定常風による傾斜角（Category-C と D のみ）

また、冠水状態において、

- ⑥ Level Floatation（あまり傾斜しないで浮いていること）

と多岐にわたっている。なお、⑥の要件は、オプションにより課されない場合もある。

2) Part-2：全長 6m を越える帆船³⁹⁾

Part-2 は帆船の基準であり本研究の対象ではないが、特徴的な点だけを簡単に紹介する。

ここで新たに提案されているのは、要件のひとつとして安全性を総合的に評価する指標を用いることである。その指標は STIX（Stability Index）と呼ばれ、次の式で計算される。

$$\text{STIX} = (14 + 0.16L_{\text{BS}}^2) (\text{FDS} \cdot \text{FIR} \cdot \text{FKR} \cdot \text{FDL} \cdot \text{FBD} \cdot \text{FWM} \cdot \text{FDF})^{0.5} + \delta \quad \text{when } L_{\text{BS}} < 10$$

$$STIX = (8 + 0.2L_{BS}) (FDS \cdot FIR \cdot FKR \cdot FDL \cdot FBD \cdot FWM \cdot FDF)^{0.5} + \delta \quad \text{when } L_{BS} \geq 10$$

… (VI-1)

ここで、 L_{BS} は船長の代表値 (m) であり、第 2 括弧内の 7 つの要素は、FDS : Dynamic Stability Factor (動的復原力、復原力曲線の面積から計算)、FIR : Inversion Recovery Factor (倒立状態からの復原性、復原力消失角などから計算)、などである。また、 δ は完全に浸水した状態での不沈性等により決定される。

Part-2 では、STIX を用いることの代償として他の要件が緩和されており、たとえば復原力消失角は Category-A においても 95° を下回らないことが最低条件になっている。しかし、我国の検討結果^{37), 72), 82)}によれば、小型ヨットの安全性に最も寄与するのは復原力消失角であり、他の国からもこのような低い要求値に対する疑問が投げかけられている。

3) Part-3 : 全長 6m 以下の舟艇⁴⁰⁾

Part-3 は全長 6m 以下の小型の舟艇を対象にしているので、ここで付与されるカテゴリは原則として Category-C と D のみである。ただし、6m 未満の船でもいくつかの条件を満足し、さらに Part-1 または Part-2 に定める要件に適合していれば、上位のカテゴリを取得することも可能となっている。

帆船と非帆船に関する規定が含まれているが、非帆船の要件について説明すると、冠水していない状態において、

- ① 海水流入高さ
- ② 片荷状態における乾舷

また、冠水状態において、

- ③ Level Floatation (あまり傾斜しないで浮いていること)
- ④ Basic Floatation (不沈性)
- ⑤ Capsize Recovery (転覆状態から自力で直立状態に戻せること)

となっており、Part-1 に比べて簡略化された内容となっている。なお、②～⑤の要件はオプションによって課されない場合もある。

VI-1-3 国内基準と国際基準案の比較と考察

1) 小型船舶安全規則の特徴

小型船舶安全規則と ISO 基準案を比較すると、小安則は実績・経験に基づき簡易化

を図った基準と言える。小安則第 102 条および第 103 条の要件は乾舷を越えて海水が浸入しないことを主に規定したものであるが、すべて主要寸法（L、B、D）および乾舷と最大搭載人員との関係式として与えられ、形式上 GM（あるいは復原力曲線）は無関係である。この理由は、基準制定当時すべての小型船に傾斜試験や重心計算を課すことが實際上困難と考えられ、簡易な基準が必要とされたからである。その考慮の内には、中小メーカーに対する配慮も含まれていたと想像される。GM の影響は多くの船の実績から主要寸法と関連づけられ、係数（一定値）の中に陰に含まれている。また、特殊な形状の小型船舶については、これらの簡易化された式を適用することが不適切なことから、別途 JCIO の運用規程に基づく基準式が設けられている。

2) ISO 基準案の特徴

一方、ISO 基準案は小安則に比較して要件が多く、用いられる評価式には多くの要素が含まれ、また試験法等の手続きが細かく定められている。これは、国際基準として広く用いられること、JCIO のような検査機関を持たない国も多いことから、当然のことと言えよう。

また、この基準のひとつの特徴は、乗員の生存率を上げるため冠水または転覆状態の安定性を重視していることである。安定して浮いていることは、遭難者の体力および精神力の消耗を防ぐとともに、救助活動の際の目印になる効果が大いと言われている⁶⁹⁾。これに関係する要件は、非帆船ではいくつかのオプションに対して課され、また帆船ではほとんどのオプションに課されている。これは、非帆船ではまず冠水・転覆しないことが重要であること、帆船ではそれがしばしば発生することを反映したものと考えられる。なお、不沈性の問題については我国でも JCIO の委員会で検討が行われた⁶⁹⁾が、現在のところ小型帆船特殊基準（JCIO）の中に簡単な規定があるのみである。

3) 運用面からの安全確保

第 I 章で述べたように、船舶の安全運航を確保し人命・環境の損失を防ぐためには、基準の整備だけでなく、適切な運用、気象・海象情報の充実、保守・検査の確実な履行、救命装置の開発・装備等が必要である。特に小型船の場合には、いかなる荒天にも耐えるような基準にすることは非現実的であり、また転覆発生までの時間が短く、救命装置の装備にも限界があることから、適切な運用によって転覆を防ぐことが重要である。

このような視点から、ISO 基準案においては各カテゴリーの設定海象が明示され、それを owner's manual に記載することを求めている。運航者、船長が船の限界性能を把握

し適切な運用する上で、このような措置は非常に有効と思われる。なお、owner's manual には危険な状況を記載して操船者に注意喚起することとなっているが、その内容は高速航行時の復原力減少と横から碎波を受けることであって、国際的にも碎波による転覆現象が重視されていることがわかる。

ただし、従来から行われている航行区域による規制では、海象以外の要素として天候が急変した場合の避難に要する時間や、遭難信号発信から救助活動開始までの時間も暗に考慮されている。従って、ISO 基準案を実際の規制に適用する場合には、そのような点も含めた総合的な検討をしておく必要がある。

また、運用面から安全性を確保する方法としては、出港規制を行うことも考えられる。現在のところ、我国では統一的な出港規制のガイドラインは存在しないようであるが、(社)日本マリーナ・ビーチ協会の調査⁷⁴⁾によれば、公共、民間とも約 70%のマリーナが出港禁止基準を設けている。その基準値は地域的な海象の特性等によってばらつきが見られるが、平均的には風速 10m/s、波高 2m 程度を目安としてハーバースターが総合的に判断しているようである。

VI-2 小型船の特徴を反映した復原性基準

前節に述べたように、比較的穏やかな海象下で使用される小型船については、小安則、ISO 基準案とも、乗員の移動等によって過度に傾斜しないことや海水が打込まないことを重視した内容となっている。小型船にとって過度の傾斜や多量の浸水はただちに転覆・沈没の危険につながるため、このことは当然と言える。

これらの要件は、主に準静的な考察から定められているが、より厳しい海象下で使用される船（小安則では 5 総トンの以上の旅客船を含む）については、風浪中で転覆に至るシナリオが想定され、それを防ぐための要件が課されている。小安則では第 101 条の C 係数基準（船舶復原性規則を準用）がそれに当たる。また、ISO 基準案では Part-1⑤a の中に同じ考え方の規定がある。C 係数基準は他の要件に比較して厳しいものと言われており、JCIO の「小型船舶の復原性の諸問題に関する調査研究委員会」⁷¹⁾においてもこの基準を中心に検討が行われた。転覆過程を陽に表現している唯一のものであることと併せて、この基準は復原性基準の代表的なものと言える。

そこで本節では、C 係数基準の問題点について述べるとともに、小型船の特徴を考慮した改良案を提示する。次に、この基準に対する供試模型船の適合性について確認し、最後に改良案を供試模型船に適用した結果について述べる。

VI-2-1 C 係数基準の問題点

C 係数基準の詳しい内容は、森田⁶²⁾の解説をもとに付録に示したとおりである。その考え方の概略を図 VI-1 に示す。ここで、 D_w は定常風による傾斜偶力であり、 ϕ_0 はそれによる定常傾斜角、 ϕ_1 は横波による同調横揺れの振幅、 ϕ_f は海水流入角である。定常風を受けながら同調横揺れしている船は、F 点を中心に横揺れし、波上側に最大傾斜した時に E 点に達する。横揺れが最も発達するのは、この瞬間に突風を受ける場合である。C 係数基準では、突風の傾斜偶力 D_w を定常風の 1.5 倍と仮定し、転覆しない条件として面積 $ABC >$ 面積 BDE となることを要求している。

しかしながら、このようなメカニズムによる転覆事故はほとんど見られないのが実態である。JCIO による転覆事故原因の調査⁷⁰⁾を見ても、転覆を引き起こす急激な外力の原因は大部分が波であって突風は希である。基準の想定するシナリオが実際に発生する事故に完全に対応している必要はないが、設計パラメータと安全性との関係は適切に表現される必要がある。

以下では、C 係数を決定する量として、定常風による傾斜偶力 D_w と、同調横揺れの振幅 ϕ_1 について、その問題点を述べる。

1) 定常風による傾斜偶力 D_w

まず、定常風による傾斜偶力 D_w について述べる。ただし、C 係数の計算に当たっては、復原力曲線を積分する際の基準位置を定める $1.5D_w$ (突風に相当) の影響が大きい。

D_w は次式により計算される。

$$D_w = \frac{kAH}{W} \quad \dots \text{(VI-2)}$$

ここに、 A は直立時の風圧側面積、 H は喫水の中央位置から風圧側面積の重心までの垂直距離、 W は排水量である。また、 k は航行区域によって定まる定数である。

一般に喫水の小さい小型船では、風圧側面積の 1 次モーメントは AH に近い値となり、この基準の合否に直結する量となる。しかし、上に述べたようにこのことには疑問の余地がある。たとえば、この基準に適合した船のハウスを上方に延長する場合を考える。復原力曲線および排水量の変化が微小と仮定すれば、 D_w が増加した分だけ基準に合格することが難しくなるが、横風が転覆の主原因でないとすればそれは不合理なことと言える。

ハウスには砕波による衝撃力を受け止める受圧部としての働きもある。しかし、IV-2節「砕波による衝撃力」で述べたように、高い位置に作用する力積は限定的なものである。これは軽量な小型船のひとつの特徴と言える。後に述べるように比較的小規模な砕波による転覆が安全上重要と考えれば、水面上の形状の影響、特に高い部分の影響を過大評価することは適当でないと考えられる。

また、すでに検討したように、周期的な左右揺れをする場合（第 III 章）でも、速度一定で横流れする場合（第 V 章）でも、着力点は喫水の中央位置とはかなり異なっている。従って、これを喫水の中央位置と仮定することは小型船の実態に合わないと言える。

2) 同調横揺れの振幅 ϕ_1

同調横揺れの振幅 ϕ_1 （度）は、有効波傾斜係数 γ の関数として、

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{138\gamma s}{N}} \quad \dots \text{(VI-3)}$$

で与えられている。ここに、 s は波の岨度（波高/波長）であり航行区域と横揺れ固有周期によって変化するが、小型船の場合には基準で上限値とされている 1/10（規則波の波傾斜振幅：18°）で一定と考えて差し支えない（付録参照）。また、 N は角速度の自乗に比例する Bertin の横揺れ減衰係数で、常に一定値（ $N = 0.02 \text{ deg}^{-1}$ ）が用いられる。

最後に有効波傾斜係数 γ であるが、これは

$$\gamma = 0.73 + 0.6 \frac{OG}{d} \quad \dots \text{(VI-4)}$$

で与えられるので、実質上 OG/d （ OG ：水面上重心高さ、 d ：喫水）が ϕ_1 を決定する唯一のパラメータとなる。この式は当時の多くの船舶から求めた近似式であり、その平均値は 0.8 程度と言われている⁷¹⁾。しかし、浅喫水で重心の高い小型船にこの式を適用すると $\gamma = 1.8$ を越える過大な値を生ずる場合もあるので、小型船の実態に合った評価式とは言えない。JCIO の検討委員会で $\gamma = 1.0$ を上限とすることが提案された⁷¹⁾のも、そのような考察がベースとなっている。

3) ISO 基準案との比較

以上、我国の C 係数基準について、定常風による定傾斜を表す D_w （または突風による $1.5 D_w$ ）と、積分範囲の下限となる傾斜角を規定する横揺れ振幅 ϕ_1 の問題点を述べた。一方、ISO 基準案は、「Rolling in beam waves and wind」という条文の中でほぼ同じ

内容の要件を課している。C 係数基準との主な相違点を以下にあげる。

- ①突風のみを考慮する。(図VI-1の F 点を B 点に一致させる)
- ②想定する風速がやや小さい。
- ③横揺れ振幅は、排水量の関数とする。
- ④積分範囲は、傾斜角 50° を上限とする。

3)-1 突風のみを考慮することの影響

①の違いは、横揺れの中心傾斜角 ϕ_0 を変化させ、 $\phi_0 - \phi_1$ で与えられる積分範囲の下限を変化させる。しかし、一般に小型船は初期復原力が大きく、復原力曲線の立ち上がりが大きいため、その変化量はあまり大きくないと言える。

3)-2 想定する風速の影響

②の風速について、最も海象の厳しい状態で比較すると、C 係数基準は定常風速 26m/sec (近海以上)、ISO 基準案は突風の風速 28m/sec (Category-A) としている。前者を突風に変換すれば $26 \times \sqrt{15} = 31.8 \text{ m/s}$ となるので、C 係数基準の方が厳しい要求値になっている。

3)-3 横揺れ振幅の評価式の影響

③に述べた横揺れ振幅 ϕ_1 は、排水量 ∇ (m^3) の関数として次式で与えられている。

$$\phi_1 = a + \frac{b}{\nabla} \quad \dots \text{(VI-5)}$$

ただし、 $(a, b) = (24, 10)$ for Category-A

$(a, b) = (19, 15)$ for Category-B

C 係数基準では重心が低いほど揺れにくいとしている ((VI-3)式および(VI-4))のに対し、この式では重い船ほど揺れにくいとしているが、この要件は船長 6m 以上の船に課されるので、第 2 項による修正量はあまり大きくない。従って、Category-A と B それぞれに対し横揺れ振幅は 24 度強、19 度強と仮定されている訳である。

ある程度の復原性は基準の他の要件によって担保されていると仮定すれば、横揺れ振幅は一定値以内におさまると考えるのが自然であり、このように直接概算値を与えてしまう方法も考えられる。C 係数基準の(VI-3)式において $s = 0.1$ (基準の上限値)、 $\gamma = 1.0$ (JCIO 検討委員会提案の上限値) とすると $\phi_1 = 26.3^\circ$ となり、(VI-5)式の Category-A にほぼ近い値となることは興味深い。しかし、この概算値の妥当性については、後に述べ

るように検討の余地がある。

3)-4 積分範囲の上限の影響

④に述べた積分範囲の上限傾斜角は、荷崩れの発生等を考慮したものと考えられる。積分を 50° で打ち切ることは、C 係数基準よりも厳しい要求である。

3)-5 まとめ

このように、両基準の計算方式にはいくつかの違いがあるが、本質的な部分で大きな差はないと言え、特に傾斜偶力にて D_w が風力のみ起因するとして扱われている以上、C 係数基準について指摘したことと同様の問題が内在している。

なお、JCIO の検討委員会で行われた試算によれば、ISO 基準案よりも C 係数基準の方が一般的にやや厳しい結果を与えるようである。

VI-2-2 C 係数基準の改良案

VI. 2. 2. 1. 想定する転覆のシナリオ

繰り返し述べたように、C 係数基準が想定する転覆のシナリオは、定常風による定傾斜と横波による同調横揺れが重なった時に、最悪のタイミングで（波上側に最大傾斜した瞬間に）突風に襲われることである。一方本研究では、実際に多く発生している海難事故として、横からの砕波による転覆メカニズムを調べてきた。これを転覆限界波高の面から整理した結果は IV.1.3.2 節に示したが、模型船の幅をやや上回る波高 40cm 程度の砕波によって一挙に転覆するパターンと、比較的小規模な砕波とそれに続く第 2 波によって転覆するパターンの 2 つが見られた。

以下では、それぞれの転覆パターンと安全基準との関係について考察する。なお、後者の転覆パターンは、簡単のため「連続波による転覆」と呼ぶことにする。

1) 大規模な砕波による転覆

前に述べたように、転覆を引き起こす砕波の波高については平山等²³⁾が過去の主な実験結果をまとめているが、ヨットや円盤形ブイなどを含め、船幅（ブイでは直径）をやや上回る程度の波高が閾値となるようである。このことは非常に重要であって、標準的に設計された浮体構造物がそのような砕波に直撃された場合、実際上転覆が避け難いことを示していると考えられる。

砕波による衝撃力を計測した結果（IV-2 節）では、重量約 10kg の模型船に対し力積

が最大で 6kg-sec (波高 42.8cm の場合) にも達しており、激しい横流れとそれに伴う運動が避けられない。また、衝撃力の中心高さと重心高さの差が大きい場合には、衝撃的な傾斜モーメントを主原因とする瞬時の転覆も考えられる。従って、このような状況下での安全性を基準により確保することは容易でない。また、仮に実現できたとしても、作業性などを著しく損なうことになっては、船の機能を十分に果たせないことになるのであまり意味がないと言えよう。

Dahle et al.⁶⁾は、真横からの碎波を用いた転覆実験の結果として、波高が高い場合には GM を変化させても最大傾斜角はあまり変わらないことを指摘し、十分な安全性を確保するためには傾斜しても転覆しないこと、すなわち復原力消失角を 80°~90° にすることが必要であると結論付けている。これを受けてノルウェーでは、小型漁船の復原力消失角を 80° とする規制を実施したが、その前提となるデッキ上構造物の水密措置等が必ずしも運航現場で遵守されないため、転覆海難は引き続いて発生しているようである⁹⁾。

従って、大規模な碎波の直撃に耐えるだけの復原力を期待することは実際的でないと考え、これは安全基準の問題というよりも、荒天を避けるという運用上の問題と位置付けることが適当である。

2) 連続波による転覆 (比較的小規模な碎波とそれに続く波による転覆)

一方、本研究で見られた比較的小規模な碎波とそれに続く波による転覆は、より穏やかな海象で発生すること、その意味で操船者が予測しにくいことを考えれば、適切な安全基準によって防ぐべきものである。また、JCIO の転覆事故の調査⁷⁰⁾でも第二波によって転覆という記述がしばしば見られることから、発生頻度の高い転覆パターンと考えられる。後に述べるように、本研究で用いた二次元模型船は C 係数基準を満足する付近の復原力を持っていることから、実際上は基準を満足する船でも転覆の可能性は十分に考えられるところである。

以上の検討から、以下では安全基準が想定すべき転覆のシナリオとして、このような比較的低い波高で発生する転覆パターンに対象を絞り、現行 C 係数基準の改良方法について検討する。

VI. 2. 2. 2. C 係数基準の改良案のコンセプト

復原性基準に限らず、基準は簡明であることが要求される。その意味では、従来のものと同様に復原力曲線に対して要求値を定めることが実際的である。ここでは、C 係

数基準の枠組みをできるだけ残しつつ、そこに盛り込まれる内容を小型船の実態に合ったものにするを考える。

1) 連続波による転覆の性質

本研究で調べてきた横波による転覆のうち、連続波による転覆に関する主な知見を要約すると次のようになる。

- ① 砕波による衝撃的な傾斜モーメントは必ずしも大きくないので、それだけで転覆現象を説明することはできない。
- ② 小型船は軽量浅喫水であるため、砕波およびそれに続く波の山での横流れが大きい。横流れ時には剥離流に起因する非線形流体力（左右揺れ減衰力からの連成モーメント）が作用する。
- ③ 船型によってはその連成流体力が傾斜角の関数となり、傾斜するほどまた横流れするほど傾斜を大きくする方向にモーメントが作用する。転覆現象にはこの性質を考慮する必要がある。
- ④ スケグの有無など船型の微妙な違いによって転覆限界波高が異なる場合があるが、この傾向は横流れ時に発生する傾斜モーメントの性質によっておおむね説明できる。
- ⑤ 不安定モーメントが発生する船型では、片荷などによって波下側に定傾斜した場合に転覆限界波高がかなり低くなる場合がある。
- ⑥ 流体力のバランスを見ると、転覆運動を通して最も大きいのは明らかに復原力である。また、転覆直前に転覆方向に作用するのは左右揺れ減衰力からの連成モーメントが主要成分である。

2) 傾斜偶力での直流分

2)-1 傾斜偶力での置き換え

上に述べたことから、小型船に特徴的で且つ転覆にとって重要な要素として、左右揺れ時に作用する非対称な傾斜モーメントが重要であることがわかる。従って、この連成流体力による傾斜角を何らかの形で基準に含めることが必要である。具体的には、現行基準で想定している突風による傾斜偶力 $1.5D_w$ （復原力曲線の積分基準位置を規定）を、この傾斜モーメントに置き換えることが考えられる。

これに付加するものとしては、乗員の移動および横風による傾斜モーメントがあげられるが、前者については他の要件で別途考慮されていることから、ここに含める必然

性は低いと考えられる。また、後者については、第 V 章で比較的小さいことが明らかになった。従って、傾斜偶力での直流分としては、上記連成モーメントのみを採用すれば基本的に十分であろう。この改良案を実際の基準としてルール化するに当たっては、現在の小型船の実態に合わせて調整することが必要となろうから、必要に応じて横風の影響を加えればよいと思われる。

ただし、C 係数基準では、船が波上側に最大傾斜してから転覆するまで、突風による一定値の傾斜モーメントが作用し続けると仮定している。しかし、ここで注目する連成モーメントは、傾斜角、左右揺れの方向、および左右揺れ速度の関数であるから、C 係数基準のように復原力曲線全体に対しての直流分として扱うことは適当でない。このような複雑な連成モーメントを正確に基準に取り入れることは困難であるが、単純化して考えれば、このモーメントが転覆方向に大きくなるのは、第 2 波中で船が波下側に傾斜しつつ同方向に水平運動する場合である。従って、これをモデル化する一案としては、図 VI-2 に示すように傾斜角が正の範囲でのみこのモーメントを考慮し、C 係数として、

$$C = \frac{\Delta ABC}{\Delta ODE} \quad \dots \text{(VI-6)}$$

とすることが考えられる。

2)-2 傾斜偶力での評価方法

この傾斜モーメントを正確に評価するためには、強制左右揺れ試験を行うことが不可欠であるが、これを一般の舟艇製造者に課すことは実際的でない。これに代わる方法としては、図 VI-3 に示すように実船または模型船を真横に曳航して傾斜角の変化を調べることが考えられる。

強制左右揺れ試験（図 III-14）と速度一定の横流れ試験（図 V-7）の結果を比較すると、着力点の低下量は必ずしも同一とは言えず、またそれが発生する傾斜角もある程度異なっている。しかし、傾向としては似通っているので、多くのデータを蓄積することにより不安定モーメントが発生しやすい船型か否かを判別すること、またそれを定量的に概算することは可能になると思われる。また、速度一定であれば現在の CFD でも傾斜モーメントを計算可能と考えられるので、基準のオプションとして CFD 計算を認めることも考えられる。

この試験の結果、傾斜角により着力点が変わらない船型では、横力が曳航速度の自乗に比例しレバーは一定であるから、復原力が線形な範囲において傾斜角は曳航速度の自乗に比例する。しかし、不安定モーメントが発生しやすい船型では、傾斜角がそれ以

上に変化する筈である。また、初期傾斜をつけた場合を考えると、傾斜した方向に曳航する場合の方が逆方向の場合に比べて傾斜角の変化が明らかに大きい筈である。

3) 復原力曲線の積分範囲

次に、動的復原力を計算するに当たっての復原力曲線の積分範囲を決めることが必要である。これに関しては、横揺れ同調状態を想定する現行 C 係数基準の考え方でも基本的には良いと思われる。なぜならば、横揺れ応答関数は波の周波数に対して鋭く尖った形状をしているため、不規則波中であっても固有周期成分の横揺れが卓越することが知られているからである。また、すでに述べたように、連続波による転覆運動でも最後の一波に出会う時の横揺れの位相は同調時のものに近いからである。

ただし、横揺れ振幅の絶対値は、C 係数基準では小型船の実態に合わない有効波傾斜係数 (VI-4式) によって評価されている。また、ISO 基準案では Category-A でも 24° 強となっている (VI-5式) が、C 係数基準の上限値となっている波の相度 (波高/波長 = 1/10、規則波の波傾斜振幅: 18°) を考えた場合、この角度は波傾斜の 1.3 倍強に過ぎないので、砕波を受けた後の運動の過渡的な性質を考慮しても、過小評価となっている可能性がある。従って、同調横揺れ振幅 ϕ_1 については、小型船の特徴や連続波による転覆の実態を踏まえた見直しが必要であろう。

4) C 係数基準改良案のコンセプトのまとめ

以上の検討を要約すると、現行の C 係数基準で定めている突風による傾斜偶力を左右揺れからの連成モーメントに置き換え、それを復原力曲線の一部 (たとえば傾斜角が正の範囲) でのみ考慮することで、より実際に即した復原性基準になるものと考えられる。また、横揺れ振幅については、小型船の特徴や連続波による転覆の実態を反映した修正を施すことが必要である。

VI-2-3 C 係数基準の改良案の試適用

VI. 2. 3. 1. 供試模型船の C 係数基準への適合性

本節では、供試模型船の復原性のレベルを確認し、またここで提示した改良案と比較検討を行うため、現行の C 係数基準への適合性を調べる。

1) 検討対象とする模型船

本研究では三次元模型船と二次元模型船を用いているが、三次元模型船のもととな

った実船は定員数の関係から旅客船の分類に入らないため、C 係数基準（小安則第 101 条）は適用されていない。この船は、同第 102 条に適合した、いわゆる「乾舷でかせぐタイプ」である。試みに計算を行ったところ、実験状態においても、またそれよりも重心の低い標準状態においても、C 係数は 1.0 をかなり下回っていた。従って、基準との比較検討は二次元模型船のデータを用いて行うこととし、転覆実験を行った船底勾配角 20° の模型船をスケールアップして C 係数を計算する。

この模型船は船体中央部付近を模擬したものなので、適当に仮定した船首尾部を付加した状態で計算することも考えられるが、実験結果と対応させる意味で、この形状のままスケールアップすることを考える。

2) 相似比と基準適合性

まず、スケールアップの相似比が基準適合性にどのように影響するかを検討しておく。前節で述べたように、また付録に示したように、C 係数基準で重要な量は、①横風による傾斜偶力 D_w 、②同調横揺れ振幅 ϕ_1 の 2 つであり、これらと復原力曲線との関係から基準適合性が決定される。これらのうち D_w (VI-2 式) は相似比によらず一定である。また、 ϕ_1 を求める (VI-3 式) のうち、相似比によって変化するのは波の岨度を表す s だけで、横揺れ固有周期 T の関数として $s = p - qT$ (p と q は航行区域による定数) で計算される。しかし、定数項 p が大きく小型船の T が小さいことから、相似比を多少変化させても s に大きな変化はなく、基準の上限値である $s = 0.1$ で一定として差し支えない。

結局相似比の影響は、復原力曲線（相似比に比例と仮定）に対する D_w （相似比によらず一定値）の相対的な大きさの変化として現れるものが支配的であり、当然のことながら船が大きくなると C 係数も大きくなる。ここでは、単位船長当たりの排水量をスケールアップの基準とし、日本小型船舶検査機構の委員会⁷¹⁾で復原性基準の検討のために使用された代表的な舟艇（船長 12m クラス）の平均値から、二次元模型船を 9.96 倍して計算を行った。

3) 計算結果

以上の仮定のもとに計算された C 係数を表 VI-1 に示す。この表から、有効波傾斜係数 γ がかなり大きいことや、そのため同調横揺れ振幅 ϕ_1 が 30° 以上になることがわかる。また、微妙に船型の異なる 3 船型（M20、M20C、M20CS）を比較すると、復原力曲線（図 IV-2）に大きな差がないため C 係数の差も小さく、図 IV-15 に示した転覆限界波高

の違いを説明できないことがわかる。

C 係数の値としては、3 船型とも重心が 2 番目に低い $OG=10.13\text{cm}$ が基準を満足する境界となっている。ただし、以上の計算結果は相似比の取り方やハウスの大きさを変えると変化するので、これらの実験状態は C 係数 1.0 付近にあることを理解すれば十分と考えられる。

VI. 2. 3. 2. C 係数基準の改良案の試適用

本節では、前節に述べた新しい復原性基準案について具体的な数値を設定し、その有効性を確認する。ただし、ここに示すのはあくまでコンセプトの段階であるから、実際の基準を定めるに当たっては、データの蓄積によって要求値をより実際に合ったものにし、またそれを航行区域やカテゴリーによって適切に変化させることが必要である。

1) 新しい基準案の骨子

ここで提案する基準案の骨子を、以下に再確認する。

- ① 転覆のシナリオとしては、前に述べた「連続波による転覆」を想定し、波頂が崩れていない第 2 波中の運動を念頭におく。
- ② 現行の C 係数基準の枠組みをできるだけ維持し、復原力（復原てこ）曲線を用いて安全性を評価する。
- ③ 定傾斜モーメントは、強制左右揺れ時の減衰力による連成モーメントから評価する。すなわち、これを排水量で除した傾斜偶力てこ D_s によって C 係数基準の $1.5D_w$ を置き換える。ただし、この定傾斜モーメントは、復原力曲線全体ではなく、連成モーメントが大きく作用する範囲でのみ考慮する。
- ④ 横揺れ振幅についても、適正化をはかる。

C 係数改良案を実際に計算するには、③に関連して、抗力係数、その着点、および左右揺れ速度（流体粒子との相対速度）の 3 つを定めるとともに、連成モーメントが大きくなる条件を復原力曲線上の範囲として整理する必要がある。また、④に関連して、第 2 波に出会う直前の波上側の傾斜角を整理する必要がある。

2) 定傾斜モーメントを考慮する範囲

上に述べた諸量の評価を行うため、まず「連続波による転覆」における運動と流体力をもう一度確認しておく。

最も転覆しやすかった M20C 船型で初期傾斜がない場合のシミュレーション結果を

図VI-4に示す。また、図VI-5はその時の波に対する相対運動を調べたものである。図VI-5の(b)は、左右揺れ速度と模型船位置における水面上の流体粒子の速度（水面変位より換算）である。また同図の(c)は左右揺れの相対速度であり、シミュレーションに採用した有効波傾斜係数0.7を流体粒子の速度に掛けて左右揺れ速度から引いたものである。さらに(d)と(e)は、横揺れについて同様に調べた結果である。

繰り返し述べたように、左右揺れ減衰力による連成モーメントは、直接転覆を引き起こす第2波上（7.6～8.6秒）で大きくなる。そして、その直前の波の谷では非常に小さい。このことは、図VI-4だけでなく、以前に述べた三次元模型船（図II-25、図II-28）や、二次元模型船に初期傾斜がある場合（図IV-41、図IV-42）でも同様である。この連成モーメントを図VI-5と比較すると、正の値が作用するタイミングは、横揺れ角（絶対、相対）および相対左右揺れ速度とよく一致していることがわかる。従って、定傾斜モーメントを考慮する範囲は、図VI-2に示したように傾斜角が正の部分とすることが適当と考えられる。

3) 定傾斜モーメントの要求値

次に定傾斜モーメントの要求値であるが、これには抗力係数、その着力点、および左右揺れ速度（流体粒子との相対速度）が関係している。

3)-1 抗力係数と着力点

抗力係数および着力点として、ここでは強制左右揺れ試験の結果（図III-9、図III-14）を用いることとする。これらの値は傾斜角の関数であり、転覆運動を考える立場からは復原力消失角までの値が必要であるが、実験値は15°または20°までしか得られていない。しかし、この傾斜角以上では変化しないと仮定したシミュレーションが良い結果を与えているので、以下では実験データが得られている最大傾斜角での値を用いることとする。

3)-2 左右揺れの相対速度

左右揺れの速度は、前に検討したように同一の波高でも船型によって微妙な差がある。しかし、差を生じるメカニズムは複雑であり、基準の適用に当たってこれを細かく規定することは困難であるから、ここでは転覆限界波高が最も小さかった M20C 船型の値を代表値として以下のように用いる。

図VI-6に示したのは、左右揺れ速度と有効波傾斜係数を掛けた流体粒子の速度、およ

びそれらの差として得られる相対左右揺れ速度の波高による変化である。第 2 波中での最大値を用いているので、第 1 波中で転覆したケースは含まれていない。この図から、これら 3 つの水平速度が波高に対して直線状に変化することがわかる。なお、集中性過渡水波のスペクトルのピーク周波数に相当する規則波の群速度は約 1.3m/s であり、模型船の左右揺れ速度よりも大きい。従って、模型船は流体の速度よりも大きく群速度よりも小さい速度で横流れすると言える。

図 VI-6 を用いて相対左右揺れ速度を定めるが、その際の問題は基準としてどの程度の波高を想定するかである。最も転覆しやすかった M20C 船型 (OG=10.8cm) の転覆限界波高を図 IV-15 から振り返ると、初期傾斜角ゼロの場合で 31.9cm、初期傾斜角 3° の場合で 22.4cm であった。また、「連続波による転覆」は波高 38.7cm 以下で発生している。ここでは、試みにこれらの値の中間として 31.9cm を用い、この波高に相当する相対左右揺れ速度 0.37m/s をスケールアップして用いることとする。実際に基準を定める場合には、航行区域と設計波の問題として調整することが必要となろう。

4) 横揺れ振幅の評価

最後に横揺れ振幅を設定するため、第 2 波直前の谷付近で発生する波上傾斜の最大値を、波高の関数として図 VI-7 に示す。波の谷付近では波面の傾斜が小さいので、横揺れ角の計測値をそのまま用いている。左右揺れ速度と同様に、波上側横揺れ角も波高によって直線状に変化することがわかる。この場合も、波高 31.9cm に相当する傾斜角 28.6° を用いて、以下の試算を行う。

なお、横揺れ角は C 係数基準が仮定しているように、重心高さ OG によっても変化することが考えられる。ただし、第 IV 章に述べた実験では、転覆限界波高を調べることを主目的にしていたため、これに明確な結論を与えるだけのデータは得られていない。第 1 波中で転覆が発生しない場合として、波高 38.7cm のときの OG の影響を図 VI-8 に示す。同一重心高さで 2 回の再現実験を行った場合は、その平均値を●で示し、個々のデータはエラーバーの端点として表示している。重心が高いほど傾斜角が大きくなるように見えるが、その傾向は必ずしも明確ではない。また、重心が最も低い場合には再現性がないが、その原因は砕波との出会い方の微妙な差にあるものと思われる。安全基準としては危険側の数値を採用される場合が多いこと、重心が最も低い時の 1 ケースと重心が最も高い時 (図 VI-8 と同一) とでほぼ同じ値が計測されたことから、前段に述べた傾斜角を ϕ_1 として用いることとする。

5) 新しい基準案の試適用結果

以上の数値を適用して新しい基準案を適用した結果を表VI-2に示す。ここで船型によって差が生じるのは、①復原力曲線、②排水量 W 、の他に左右揺れ時における、③抗力係数 C_D 、④減衰力の着力点高さ l_d 、の 4 つである。しかし、①と②には大きな違いがないので、船型による差を生む主要な要素は③と④である。

表VI-2からまず気が付くのは、ステグ付きの M20CS 船型の改良 C 係数が大きいことである。この船型は抗力係数が他の船型の 2 倍程度となっているが、着力点が高い位置にあるため重心回りのレバーが小さいことから、抗力×レバー／排水量として得られる傾斜偶力矩 D_s が他の 2 船型の 1/2 ほどであり、このことが改良 C 係数の大きさにつながっている。第 IV 章で詳しく調べたように、M20CS 船型の転覆限界波高は安定して大きいのに対し、M20C 船型は条件により低い波高でも転覆が発生する。改良 C 係数はこの差を定量的に表しているの、安全性の評価指標として望ましいものと言える。

一方、M20 船型の転覆限界波高も大きい、改良 C 係数は現行 C 係数と同様に M20C と M20 の差を表現できていない。転覆発生条件については、IV-3-2節 5)でまとめをした。すなわち、①横流れ時に進行方向に傾斜する連成モーメントを受ける船型であること、②波の谷で波上側に大きく傾斜すること、③波の山付近において大きな横流れ速度を持つこと、の 3 条件である。改良 C 係数は条件①に着目したものであり、すでに述べたように両船型の流体力に顕著な差が見られないことから、両船型の安全性評価がほぼ同一となったものである。

本実験で M20 が M20C より転覆しにくかった理由は、条件②と③が満足されないからであるが、碎波を受けた直後の傾斜角や左右揺れ速度の変化は複雑な要素に起因するため、M20 船型が様々な条件下でも安定して転覆しにくいとは結論できない。また、M20 は横揺れ減衰力が小さいため、一般的な意味で安全性が高いとは言えない。従って、改良 C 係数がこの点で不十分かどうか、別の言い方をすれば両船型の安全性に本質的な差があるかどうかは、異なった時系列の波の中で実験を行うなど、さらに検討が必要である。

次に、重心高さ OG の影響であるが、改良 C 係数と現行 C 係数の比を見るとわかるように、改良 C 係数の方が OG による変化がやや大きい。復原力曲線自体の変化を除くと、現行 C 係数では OG の変化は有効波傾斜係数に反映される。そして、最終的には横揺れ振幅の変化として現れるが、表VI-1に示したようにその変化量はかなり限定的である。一方、改良案では OG の変化が抗力のレバーの変化として直接的に作用するため、改良 C 係数の変化が大きくなるわけである。

ここでは、現在の知見から最適と思われる値を採用して改良 C 係数を計算したが、現行 C 係数との比は 0.85~1.30 の範囲にあり、格段に異なった安全評価とはなっていない。従って、実際の基準を定める場合には、横揺れ振幅や想定する波高などを航行区域（または設計カテゴリー）あるいは用途（旅客船か否か）等によって変化させ、実態に即したものにすることが十分に可能と考えられる。

VI-3 第VI章のまとめ

本章では、まず小型船を対象とした復原性基準として、我国の小型船舶安全規則と審議が終盤に差し掛かった ISO 基準案の内容を概説するとともに、両者を比較検討してその特徴を明らかにした。次に、代表的な基準要件である C 係数基準にスポットを当て、小型船に適用した場合の問題点を整理した後に、小型船の転覆メカニズムを反映した改良案のコンセプトを提示した。最後に、本研究で用いた模型船を現行の基準と改良案に適用した結果について比較し、その有用性を検証した。

その結果を要約すると、以下のようなになる。

まず、小型船の復原性基準の現状と動向については、

- (1) 我国の小型船舶安全規則は、全般的には実績に基づき簡易化を図った基準と言えるが、近海区域以上を航行する船または 5 トン以上の旅客船については、中大型船と同様の厳しい基準が適用される。
- (2) 2001 年に制定される予定の ISO 基準案は、カテゴリー毎の設計海象が明示されていること、規定が細かくまた具体的なこと、冠水または転覆状態での安定性が重視されていること、多くのオプションが用意されていること、などの特徴を持っている。ISO 基準案においても、風波中の転覆シナリオを想定しているのは、C 係数基準に類似の要件のみである。

次に、C 係数基準については、

- (3) C 係数は復原力曲線の面積から計算されるが、その主要パラメータは、積分の基準位置を定める突風による傾斜偶力 $\tau < 1.5D_w$ と、積分範囲の下限を定める横揺れ振幅 ϕ_1 である。前者は定傾斜の発生原因として風のみを考えており、また後者は中大型船の実績に基づく有効波傾斜係数の算定式を用いており、ともに小型船の実態に合わない。

- (4) 横からの集中性過渡水波を用いた転覆実験では、波高の高い砕波による短時間の転覆と、小規模な砕波とそれに続く波による転覆の 2 つが見られた。前者を防ぐことは主に運用上の問題と考えられ、安全基準は後者の力学的メカニズムを念頭に置くべきである。
- (5) C 係数基準の改良を考えると、定傾斜偶力として左右揺れ減衰力からの連成モーメントを用い、それを傾斜角が正の範囲でのみ考慮することが適当と考えられる。
- (6) 改良 C 係数の計算に必要な相対左右揺れ速度と横揺れ振幅は、ともに波高によって直線状に変化する。従って、実際の基準において要求値を定める場合には、航行区域と設計波の問題として関係付ける必要がある。

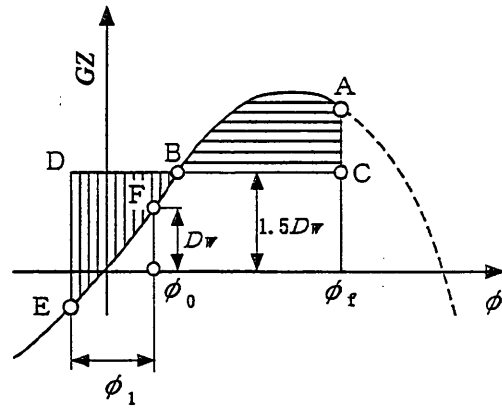
最後に、第 V 章までの結果から計算に必要な具体的数値を検討し、これを用いて 3 船型 (M20、M20C、M20CS) を対象に改良 C 係数の試適用を行ったところ、

- (7) 現行の C 係数は上記 3 船型ともほぼ同一であるが、改良 C 係数は、転覆限界波高が安定して大きい M20CS について高い値を示す。従って、改良 C 係数の方が転覆に対する安全性を正しく評価できる。
- (8) M20C と M20 を比較すると、改良 C 係数を用いても両者の安全性は同等の評価になる。しかし、本実験では、条件により M20C の方が転覆しやすい傾向であった。この原因は横流れ速度の違いにあるが、両者の流体力係数にほとんど差がないため、その普遍性、ひいては安全性の差を即断することはできない。この点についてはさらに検討が必要である。
- (9) 改良 C 係数の値は、現行 C 係数の 0.85~1.30 倍の範囲にあり、格段に異なった安全評価とはなっていない。従って、データを蓄積して計算に用いる数値を調整することにより、現在の小型船の実態に即した基準にすることが可能と考えられる。

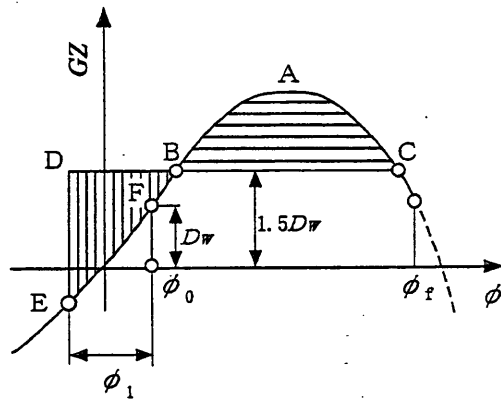
表VI-1 スケールアップした二次元模型船のC係数（船底勾配角20度）

Scale Ratio = 9.96

Model	M20				M20C				M20CS			
重心高さ (模型船) OG (m)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)
定常風の 傾斜偶力矩 Dw (m)	0.0278				0.0275				0.0275			
突風の 傾斜偶力矩 1.5Dw (m)	0.0417				0.0412				0.0412			
有効波傾斜 係数 γ	1.656	1.627	1.599	1.570	1.656	1.627	1.599	1.570	1.378	1.358	1.338	1.318
定常風による 傾斜角 ϕ_0 (deg)	1.33	1.30	1.26	1.23	1.16	1.13	1.11	1.08	1.31	1.27	1.24	1.21
同調横揺れ 振幅 ϕ_1 (deg)	33.80	33.51	33.21	32.91	33.80	33.51	33.21	32.91	30.84	30.61	30.38	30.16
C係数	0.778	0.888	0.975	1.091	0.791	0.891	0.999	1.122	0.702	0.867	1.027	1.190

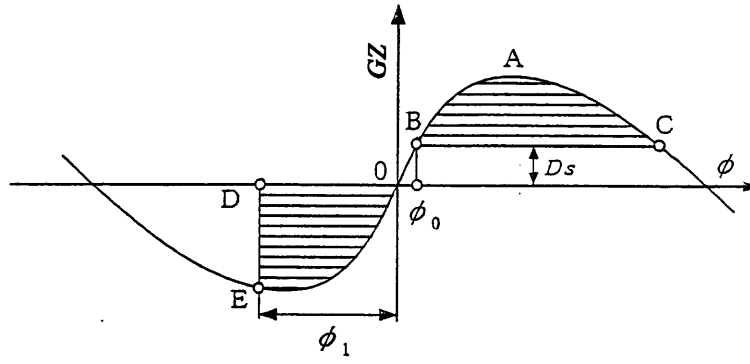


(a) $GZ(\phi_f) > 1.5Dw$

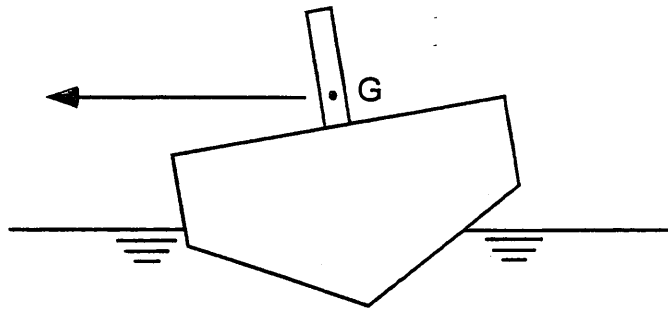


(b) $GZ(\phi_f) < 1.5Dw$

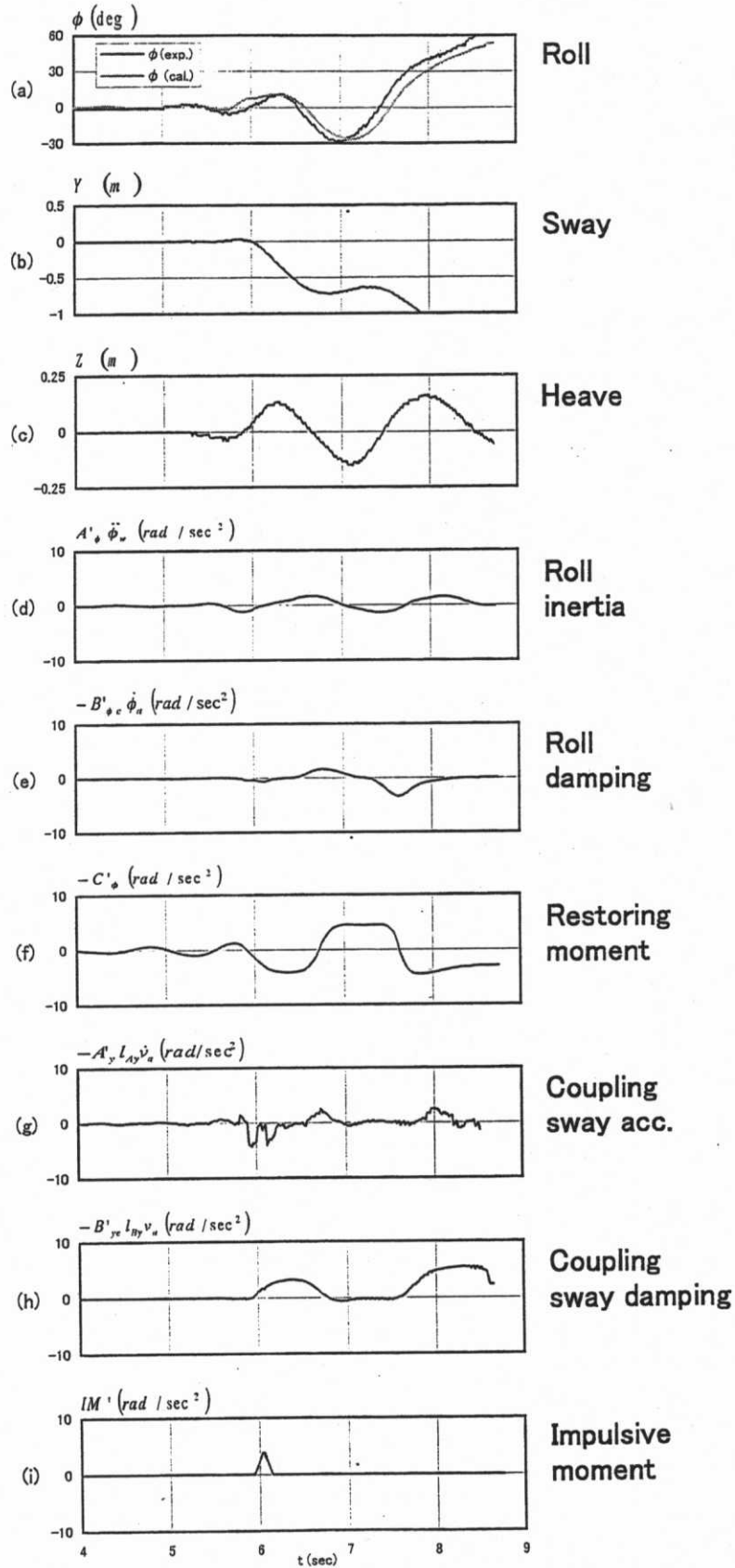
图VI-1 C系数基准



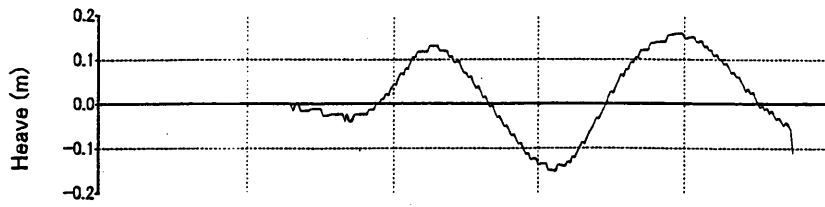
図VI-2 C係数基準の改良案



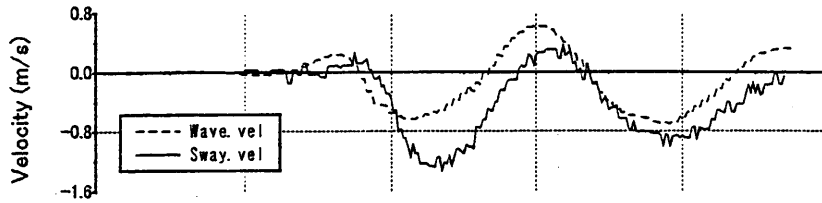
図VI-3 横流れによる傾斜モーメントの試験法



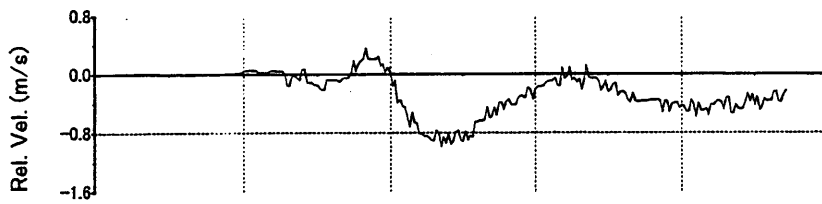
図VI-4 連続波による転覆のシミュレーション結果
 (模型船：M20C、OG=10.8cm、波高：31.9cm、初期傾斜：0)



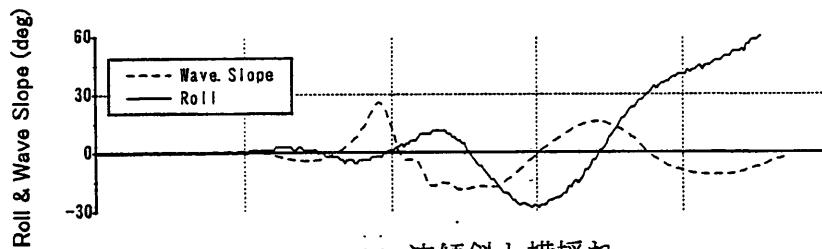
(a) 上下揺れ



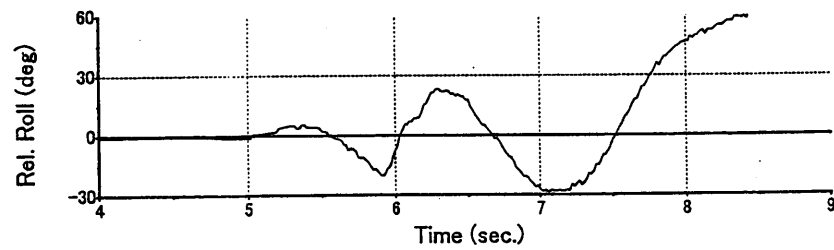
(b) 波粒子と模型船の水平運動速度



(c) 左右揺れの相対速度



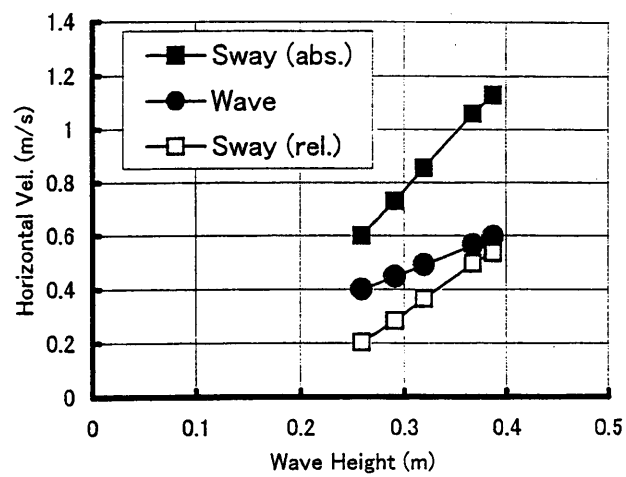
(d) 波傾斜と横揺れ



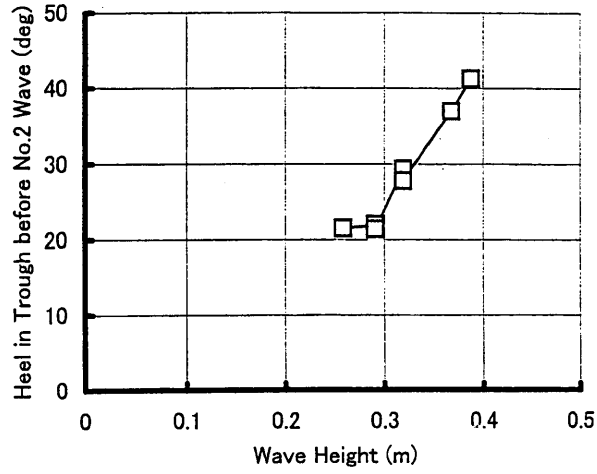
(e) 相対横揺れ

図VI-5 模型船の相対運動

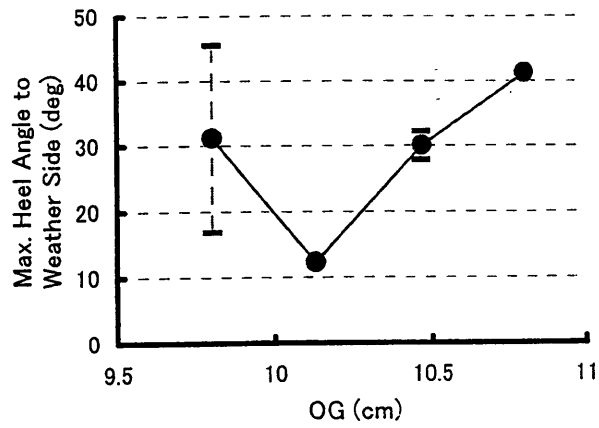
(模型船：M20C、OG=10.8cm、波高：31.9cm、初期傾斜：0)



図VI-6 左右揺れの相対速度の波高による変化
 (模型船：M20C、OG=10.8cm、初期傾斜：0)



図VI-7 第2波直前の波上側傾斜角の最大値
(模型船：M20C、OG=10.8cm、初期傾斜：0)



図VI-8 波上側傾斜角の最大値の波高による変化
(模型船：M20C、波高：38.7cm、初期傾斜：0)

表VI-2 C係数基準の改良案の試適用結果（二次元模型船、船底勾配角20度）

Scale Ratio = 9.96

Model	M20				M20C				M20CS			
重心高さ (模型船) OG (m)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)	1.076 (0.1080)	1.042 (0.1047)	1.009 (0.1013)	0.976 (0.0980)
排水量 W (kg)	9126				9235				9907			
相対左右揺れ 速度 v_a (m/s)	1.17											
抗力係数 C_D	1.77				1.51				3.19			
水面上 着力点高さ l_d (m)	-1.16				-1.09				-0.09			
左右揺による 傾斜偶力矩 D_s (m)	0.083	0.082	0.080	0.079	0.079	0.078	0.077	0.076	0.040	0.039	0.038	0.036
D_s による 傾斜角 ϕ_0 (deg)	3.94	3.78	3.62	3.48	3.36	3.22	3.10	2.98	1.91	1.80	1.70	1.61
同調横揺れ 振幅 ϕ_1 (deg)	28.6											
改良C係数	0.662	0.796	0.954	1.109	0.720	0.851	0.992	1.136	0.914	1.123	1.329	1.550
改良C係数 / 現行C係数	0.85	0.90	0.98	1.02	0.91	0.95	0.99	1.01	1.30	1.29	1.29	1.30

第VII章 結言

転覆海難は、その多くが小型船に発生しているのが現状である。また、その典型的なパターンとしては、1、2 発の急峻な横波を受ける場合と、追波中を比較的高速に航行している場合の2つがあげられる。しかしながら、転覆現象に関する近年の研究を見ると、追波中を対象としたものに偏っており、また小型船の特性を考慮していない場合が大部分を占める。横波による転覆は歴史が古いため、十分な知見が蓄積されていると考える傾向があるが、小型船に関しての検討は必ずしも十分でなく、たとえば strip 法の適用限界といった基礎的な点についても共通認識は得られていない。

本研究は、横からの碎波による小型船の転覆を対象として、そのメカニズムを解明し、転覆海難の防止と安全性の向上、そして安全基準の合理化に役立てようとするものである。

本研究によって得られた主な結論を、各章毎に以下にまとめて示す。

第 I 章「緒論」

第 I 章では、まず海難統計を分析し、転覆海難の件数は少ないが、人命喪失はかなりの割合にのぼることを示した。次に、転覆に対する安全基準の概要と歴史的経緯をまとめ、小型船の現在の復原性基準、あるいは ISO で審議中の新しい基準において、風波中の動的転覆過程を対象にした中核的な規定が転覆の実態を正しく反映していないことを指摘した。最後に、転覆に対する過去の研究を振り返り、特に小型船の碎波中の転覆に対するこれまでの知見をまとめながら、本研究で解明すべき課題について述べた。

第 II 章「碎波による転覆過程の検討」

第 II 章では、まず転覆発生条件や転覆運動の特徴を把握するため、三次元模型船に4種類の集中性過渡水波を当てた結果について述べた。また、小型船の転覆運動をシミュレートする手法を提案し、力学的メカニズムの解明を試みた。その際、小型船に特徴的な運動として、波の山で傾斜しながら横流れする場合の流体力を知る必要があったことから、傾斜角をパラメータとした大振幅の強制左右揺れ試験の結果についても述べた。

以上の検討から明らかになった主な内容は以下のとおりである。

- ①急峻な第 1 波ではなく、それに続く第 2 波（非碎波）中での転覆が多い。
- ②多く見られた転覆パターンでは、第 2 波との遭遇時に波強制力と横揺れ速度が同位相となり、波からエネルギーを吸収しやすい一種の同調状態となる。
- ③碎波（第 1 波）による衝撃的な傾斜モーメントは必ずしも大きくないが、その後の運動に影響を与えて転覆／非転覆を分けるという意味で重要である。
- ④左右揺れによる減衰力は、速度の自乗に比例する抗力成分が主要部分を占める。左右揺れ減衰力から横揺れへの連成モーメントは傾斜角の関数であり、傾斜するほど着点が高くなる（傾斜方向にモーメントが働く）という不安定な傾向を示す。
- ⑤上記連成モーメントは、第 2 波の山で波下側に作用する主要な流体力であり、転覆を引き起こす引き金となるため、小型船の転覆運動にはこれを考慮することが不可欠である。

第 III 章「左右揺れ流体力に対する船型要素の影響」

小型船の転覆にとって波の山で横流れする時の流体力が特徴的かつ重要であること、また小型船の船型がバリエーションに富むことに鑑み、第 III 章では、大振幅左右揺れ時の流体力に対する船型要素（船底勾配角、チェーンの形状、スケグの有無）の影響について検討した。その際には、船体表面の水圧分布の計測結果から、この流体力の非線形な振る舞いや傾斜角依存性のメカニズムについても検討した。

以上の検討から明らかになった主な内容は以下のとおりである。

- ①左右揺れの運動加速度に比例する流体力は、線形ポテンシャル理論でおおむね評価でき、また傾斜角依存性は大きくない。
- ②左右揺れ減衰力は、本実験で使用したすべての船型で抗力成分が卓越している。抗力係数は、船底勾配角およびスケグの有無によってかなり変化するが、傾斜角の影響は比較的小さい。
- ③左右揺れ減衰力の着点、一般に水面上の高い位置にある。しかし、スケグがなく且つ船底勾配角が小さい（V 字型が深くない）船型は上記の傾斜角依存性を示し、傾斜方向に横運動するときに着点が低下する。
- ④この性質は、チェーン近傍に発生する局所的な剥離と、船底中心から発生する大規模な剥離によって説明できる。

第 IV 章「船型要素の違いが転覆運動に及ぼす影響」

第IV章では、第III章で用いた二次元模型船の中から船底勾配角 20° の3船型（M20：ラウンドチェーン船型、M20C：ハードチェーン船型、M20CS：ハードチェーン＋ステグ船型）を選び、船型による運動の違いを調べた。規則波中実験により、基本的な性質として横揺れの周波数応答関数を把握するとともに、集中性過渡水波中の転覆実験によって、転覆限界波高や転覆運動に与える船型の影響を検討した。また、砕波による衝撃力を調べた後、シミュレーション計算によって転覆のメカニズムを検討した。

以上の検討から明らかになった主な内容は以下のとおりである。

- ①横揺れ応答関数は、振幅が低周波数側に倒れたような形状をしており、また同調点付近での位相のジャンプなど、非線形性が顕著に現れる。この実験結果と比較すると、ストリップ法の計算結果はかなり異なるが、本研究で用いたシミュレーションの結果は、広い周波数範囲でよく合っている。
- ②集中性過渡水波中の転覆限界波高は、船幅をやや上回る場合が多いが、前記の不安定モーメントが作用する M20C 船型は、特に波下側に初期傾斜がある場合、より低い波高でも転覆が発生する。
- ③船幅を超える高い波高の波では、転覆は第1波中で発生し、船型による運動の差は小さい。一方、比較的低い波高の波では、転覆は第2波中で発生し、船型によって運動に大きな差が生じる。前者は、復原性の改良によって避けることが困難であり、運用上の問題と位置づけることが適当である。後者は、復原性基準によって避けるべきものと考えられる。
- ④砕波による衝撃力・モーメントは、波高の増加とともに直線状に大きくなるが、小型船は波に乗りやすいため、その作用中心高さは波高による変化が小さい。
- ⑤上に述べた比較的低い波高での転覆では、波の谷付近で作用する復原力と、引き続く波の山付近で作用する左右揺れ減衰力からの連成モーメントが重要である。
- ⑥転覆発生の条件は、①横流れ時に進行方向に傾斜する連成モーメントを受ける船型であること、②波の谷で波上側に大きく傾斜すること、③波の山付近において大きな横流れ速度を持つこと、の3つにまとめられる。船型に関連して安全性を考える上で、また小型船に特徴的な流体力として、左右揺れ減衰力からの非線形な連成モーメントを考慮する必要がある。

第V章「横風と横流れによる傾斜」

実船が転覆に至るような海象では風も強い可能性が大きく、第II章～第IV章で初期傾斜角の重要性が明らかになったことから、第V章では、横風による傾斜特性を把握す

ることを目的として、横風および横流れによる三次元模型船の抗力と傾斜モーメントの性質を調べた。また、二次元模型船を用いて横流れ時の流体力に対する船型要素の影響についても検討した。

以上の検討から明らかになった主な内容は以下のとおりである。

- ①中大型船と比較すると、横風による抗力係数はやや小さく、着力点高さは同程度である。両者とも、傾斜角による変化は小さい。
- ②横流れによる抗力係数は、船の傾斜と逆の方向に横流れする場合には安定した値を示すが、傾斜方向に横流れする場合には傾斜とともに小さくなる傾向が多くの船型で見られる。
- ③横流れによる抗力の着力点は、チェーン没水角 ϕ_c を境として傾向が変化する。 $\phi < \phi_c$ では着力点は水面上にあり、傾斜角や船型による差が小さい。一方、チェーンが没水する $\phi > \phi_c$ では、風下側に傾斜するほど着力点が低くなる船型が多い。
- ④風と大波を同時に受ける場合には、波が風を遮るため、風による傾斜モーメントの影響は基本的に小さいものと考えられる。ただし、横流れ時の着力点が低くなる船型を持つ船が波の山に上がった時については、さらに検討が必要である。

第 VI 章「復原性基準への応用」

第 VI 章では、まず我国における小型船の復原性基準と、現在審議が行われている国際的な復原性基準案について比較検討した。次に、代表的な基準要件であり、また風波中での転覆シナリオを陽に扱った C 係数基準について、これを小型船に適用した場合の問題点を指摘し、その改良案を提案し、これを本研究で用いた模型船に適用した場合について検証した。

以上の検討から明らかになった主な内容は以下のとおりである。

- ①我国の小型船舶安全規則は、全般的に実績に基づき簡易化を図った基準と言える。一方 ISO 基準案は、カテゴリー毎の設計海象が明示されていること、規定が細かくまた具体的なこと、などの特徴を持っている。ISO 基準案においても、風波中の転覆シナリオを想定しているのは、C 係数基準に類似の要件のみである。
- ②C 係数を計算する際には、突風による傾斜偶力とこと同調横揺れ振幅が主要パラメータとなるが、前者は風のみを考えており、後者は中大型船の実績に基づく近似式を用いているため、小型船の転覆の実態を反映していない。
- ③C 係数基準の改良案としては、定傾斜偶力とこに左右揺れ減衰力からの連成モーメントを用いることが適当と考えられる。ただし、このモーメントは傾斜角が正の

範囲でのみ考慮すべきである。

- ④本実験で用いた3種類の模型船（M20、M20C、M20CS）を対象に検討したところ、現行 C 係数は3船型ともほぼ同一であるが、改良 C 係数は、転覆限界波高が安定して大きい船型（M20CS）について高い値を示す。また、低い波高でも転覆が見られた船型（M20C）では低い値を示す。従って、改良 C 係数の方が転覆に対する安全性を正しく評価できる。

結局のところ、本研究によって得られた新しい知見は次の2点に集約されよう。

- ①小型船に特有な非線形流体力として左右揺れ減衰力に注目すべきであること
②その着力点（連成モーメント）は傾斜角の関数であり、傾斜角を大きくする方向に作用する場合があること

この性質を考慮に入れた復原性基準の改良案については、前章にその方向性を示したとおりである。今後これをより具体的に社会に受け入れられるものとするためには、さらに様々な船型に作用する非線形流体力の調査が必要である。また、大波高中における横流れ速度の推定精度の向上、船が波の山にある時の横風の影響評価も必要となろう。その方法としては水槽実験が直接的な手段であるが、CFD による耐航性研究を進めることにより、近い将来には数値計算が有用な手段になるものと考えられる。すでに述べたように、小型船の設計・製造業者の規模は必ずしも大きくないので、水槽実験または数値計算によるシリーズテストを実施し、主要目等と関連付けた設計段階でも使用できる簡易推定式を求めることが必要と思われる。また、実船を用いた検証実験もできるだけ多くの船型について実施することが望まれる。さらに、センターキールを装着する等、耐転覆性能を向上させる方法についても研究が必要である。

現在までの動向を見ると、基準改正の動きは腰が重いのが現状である。たとえば、JCIO に設けられた「小型船舶の復原性の諸問題に関する調査研究委員会」⁷¹⁾では、3年間にわたる検討結果として、有効波傾斜係数に上限値を設けるべきとの提言を1992年にまとめたが、いまだに基準改正にはつながっていない。基準改正は社会的な影響が大きいと慎重を期する必要があることは言うまでもなく、また頻繁な改正は現場に混乱を招くことも無視できない事実である。しかし、物理的に正しい方向に舵を切ることも躊躇してはならない。

本論文に述べた知見が実態に合った基準の制定に役立つことを望むとともに、運輸省の一端に連なる者として、海難事故による犠牲者が1名でも少なくなるよう努力して行きたいと考えている。

謝 辞

本研究をまとめるにあたっては、東京大学大学院工学系研究科藤野正隆教授に、適切かつ温かいご指導を長期間にわたり賜った。ここに深甚の謝意を表する次第である。

足達宏之船舶技術研究所長（研究当時：運動性能部長）には、著者が日々の業務に追われる中、本論文の執筆を開始するきっかけを作っていただいた。また、渡辺巖運動性能部長（当時：耐航性研究室長）には、本研究の中心となる左右揺れ－横揺れ連成モーメントの取り扱いについてご教示いただいた。

実験の実施およびデータ解析については、運動性能部藤原敏文研究官、同二村正主任研究官、安野三樹雄氏（当時：船舶技術研究所運動性能部）、三井造船昭島研究所の久本隆之、和田保弘、田倉進各氏に多大なご協力をいただいた。また、実験データの整理や図表の作成には、桜井鈴子氏をはじめとする非常勤職員の方々に負うところが大きい。さらに、運動性能部耐航性研究室に所属する沢田博史主任研究官、田口晴邦主任研究官、辻本勝研究官には、全般にわたりご協力をいただいた。各氏に対し、心から御礼申し上げる。

また、本研究は、小型船舶検査機構のもとに設けられた「小型船舶の耐航性に関する調査研究委員会」（1986～1988）に著者が委員として参加し、また同機構との共同研究として水槽実験を実施したことが端緒となった。同機構には、「小型船舶の復原性の諸問題に関する調査研究委員会」（1988～1992）、「小型船舶の復原性に関する調査研究委員会」（1994～2000）にも委員として参加させていただき、小型船の転覆現象に関する調査研究を継続させていただいた。各委員会の委員長を務められた菅井和夫船舶技術研究所長（当時）、藤野正隆東京大学教授、高石敬史日本大学教授をはじめ、各委員会委員ならびに小型船舶検査機構の関係者各位に対し、深い謝意を表する次第である。

付録 C 係数基準

C 係数基準は、船舶の復原性基準の代表的なものとして多くの解説があるが、ここでは森田の解説⁶²⁾をもとに説明する。

この基準は、真横から定常風を受けながら横揺れしている船が、突風を受けても転覆しない条件を定めたものである。その条件は、図 A-1 (図 VI-1 の再掲) の復原力曲線において、次式により表される。

$$\text{面積 ABC} > \text{面積 BDE} \quad \dots (A-1)$$

ここで、 D_w は定常風による傾斜偶力てこ、 ϕ_0 は定常風による静的傾斜角、 ϕ_1 は不規則波中で横波と同調したときの横揺れ振幅である。また、DBC の水平線は突風による傾斜偶力てこであり、復原力曲線は海水流入角 ϕ_f までを有効とする。

図 A-1 の DE が風上側へ揺れ切った傾斜位置であり、そこから反対の方向へ突風が吹くとき、面積 BDE は「正味の傾斜モーメント = $W(1.5D_w - GZ)$ 」がした仕事量に相当する。また、面積 ABC は、「正味の復原モーメント = $W(GZ - 1.5D_w)$ 」がする仕事量に相当する。ただし、 W は船の排水量である。横揺れが最も発達するのは、このように風上側へ揺れ切った瞬間に反対方向へ突風を受ける場合であるから、不等式 (A-1) が成立すれば、船は ϕ_f または C 点まで傾かず安全であることがわかる。

$$C = \frac{\text{面積ABC}}{\text{面積BDE}} \quad \dots (A-2)$$

とおけば、C 係数基準は C が 1 より大きいことを要求していることになり、この面積比を C 係数と呼んでいる。

以下では、C 係数を主に規定する 2 つの要素の評価法を説明する。

1) 定常風による傾斜偶力てこ D_w

定常風による傾斜偶力てこ D_w は次式で計算される。

$$D_w = \frac{kAH}{W} \text{ (m)} \quad \dots (A-3)$$

ここに、 A は直立時の風圧側面積、 H は喫水の中央位置から風圧側面積の重心までの垂直距離である。また、 k は表 A-1 に示す係数で、近海区域以上の船については風速 26m/sec、

沿海区域の船については 19m/sec、限定沿海の船については 15 m/sec の定常風を考えたものになる。突風の大きさは、多くの風速記録を調査して、傾斜偶力にて定常風の 1.5 倍になるとされた。

2) 同調横揺れ振幅 ϕ_1

同調横揺れ振幅 ϕ_1 は、次式によって評価される。

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{138\gamma s}{N}} \text{ (deg)} \quad \dots \text{ (A-4)}$$

ここに、 γ は有効波傾斜傾数、 s は波の岨度（波高／波長）、 N は Bertin の横揺れ減衰係数である。この式は、有義波高に等しい波高を持つ規則波中での同調横揺れ振幅を評価するものである。ただし、不規則波中の横揺れは過渡的な運動であることから、その振幅は規則波中の 0.7 倍とされた。

有効波傾斜傾数 γ は、次式により計算される。

$$\gamma = 0.73 + 0.6 \frac{OG}{d} \quad \dots \text{ (A-5)}$$

ここに、 OG は直立状態における水線面からの船の重心高さであり、上方を正とする。また、 d は平均喫水であり、鋼船ではキールの上端から、木船ではラベットの下端から測った値である。

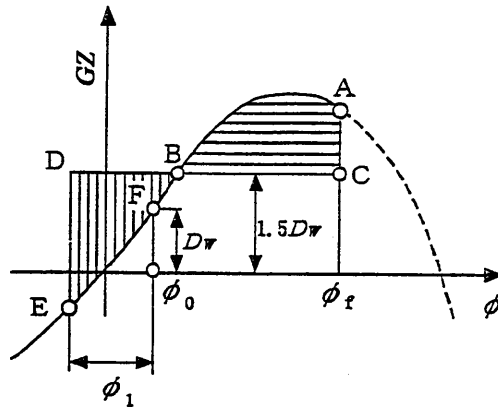
また、波の岨度 s は、

$$s = p - qT \quad \dots \text{ (A-6)}$$

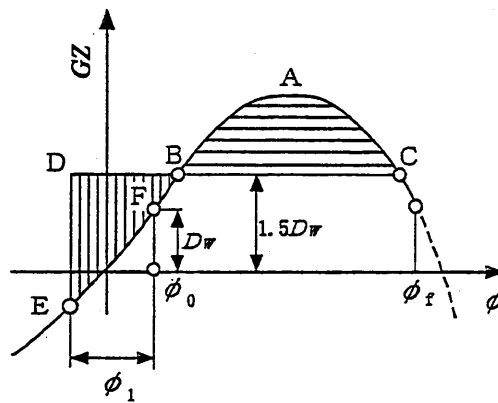
によって評価される。ここに、 p と q は表 A-1 に示す係数であり、 T は船の固有横揺れ周期 (sec) である。この式は、不規則波海面の有義波の周期が T に等しい場合の波傾斜を求める近似式である。ただし、上式の計算結果が次式の範囲を越えても、 s の値は次式の上限または下限の値とする

$$0.035 \leq s \leq 0.1 \quad \dots \text{ (A-7)}$$

また、Bertin の横揺れ減衰係数 N は、横揺れ減衰力がすべて横揺れ速度の自乗に比例すると近似した場合（いわば等価非線形化した場合）の比例係数に相当する。しかし、線形成分の寄与によって N 係数は横揺れ振幅の関数であるため、通常は、また C 係数基準においても、振幅 20° の値が用いられる。 C 係数基準では、多くの船の代表的な値として $N = 0.02 \text{ (deg}^{-1}\text{)}$ とされた。日本小型船舶検査機構の調査⁷¹⁾によれば、この数値は多くの小型船にも当てはまるようである。



(a) $GZ(\phi_f) > 1.5Dw$



(b) $GZ(\phi_f) < 1.5Dw$

図A-1 C係数基準

表A-1 C係数基準におけるk、p、qの値

航行区域	k	p	q
近海区域以上	0.0514	0.151	0.0072
沿海区域	0.0274	0.153	0.0100
限定沿海	0.0171	0.155	0.0130

参考文献

A

- 1) 有馬光孝、上村宰、工藤博正：船舶安全法の解説－法と船舶検査の制度－改訂版、成山堂、1996
- 2) 有馬俊朗：IMOの規則作成過程用FSAの開発について、日本造船学会誌、第847号、2000
- 3) 有山正孝：振動・波動、基礎物理学選書8、裳華房、1975

C

- 4) Chan, E.S., Melville, W. K. : Deep-water Plunging Wave Pressure on a Vertical Plane Wall, Proc. Royal Soc. London, A417, 1988
- 5) Clauss, G. F. : Tailor-made Transient Wave Groups for Capsizing Tests, 7th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2000

D

- 6) Dahle, E. A., Kjaerland, O. : The Capsizing of M/S HELLAND HANSEN, Trans. RINA, No.2, 1980
- 7) Dahle, E. A., Nedrelid, T. : Stability Criteria for Vessels Operating in a Seaway, 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1982
- 8) Dahle, E. A., Myrhaug, D., Dahl, S. J. : The Effect of Wind on Small Vessels, Proc. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1990
- 9) Dahle, E. A., Myrhaug, D. : Capsize Risk of Fishing Vessels, Schiffstechnik, Bd.43, 1996

F

- 10) Faltinsen, O. M. : On Seakeeping of Conventional and High-Speed Vessels, Journal of Ship Research, Vol.37, No.2, 1993
- 11) 藤野正隆他：大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究（第1報、第2報）、日本造船学会論文集、第156号(1984)、第157号(1985)
- 12) Fujino, M., Fujii, I., Hamamoto, M., Ikeda, Y., Ishida, S., Morita, T., Tanai, K., Umeda, N. : Examination of Roll Damping Coefficients and Effective Wave Slope Coefficient for Small Passenger Crafts, Proc. U.S. Coast Guard Vessel Stability Symposium, 1993
- 13) 藤原敏文、池田良穂、梅田直哉：転覆確率を用いた船舶の復原性評価に関する研究、関西造船協会誌、第221号、1994

G

- 14) 合田良實：港湾構造物の耐波設計（増補改訂版）、鹿島出版会、1997

H

- 15) Haddara, M.R., Kastner, S., Magel, L.F., Paulling, J.R., Perez, L., Wood, P.D. : Capsizing Experiments with a Model of a Fast Cargo Liner in San Francisco Bay, Project 723411, Department of Naval Architecture, University of California, 1972
- 16) 浜本剛実、藤野正隆：船舶の縦波中の転覆、運動性能研究委員会第3回シンポジウム「船舶と海洋構造物の安全性と復原性」、1986
- 17) 浜本剛実、金潤洙、松田秋彦、小谷博之：斜め追波中の船の転覆とその原因の分析、日本造船学会論文集、第173号、1993
- 18) 原口富博、猿田俊彦：風波併存時における漁船の横揺特性と海水打込みについて、船舶技術研究所報告、第19巻、第5号、1982
- 19) 原口富博、大松重雄：水面と直交しない浮体の動揺問題の解法と Irregular Frequency の簡易な除去法、西部造船会会報、第66号、1983
- 20) 林正徳、麻生茂：剥離を伴う物体の抗力について、第1回推進性能研究委員会シンポジウム「物体に働く流体抗力」、1985
- 21) 菱田敏男、富武満：規則波上の風圧モーメント、造船協会論文集、第108号、1960
- 22) 平山次清、山下禎文：砕波による漁船の転覆過程について、関西造船協会誌、第196号、1985
- 23) 平山次清、定兼廣行：船舶の砕波中及び不規則波中の転覆、運動性能研究委員会第3回シンポジウム「船舶と海洋構造物の安全性と復原性」、1986
- 24) Hirayama, T., Takezawa, S. : Transient and Irregular Experiments for Predicting the Large Rolling in Beam Irregular Waves, Proc. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1992
- 25) 平山次清、西村浩二、福島正朗：向かい波中の漁船の転覆プロセスと数値シミュレーション、日本造船学会論文集、第181号、1997
- 26) Hoerner, S.F. : Fluid-Dynamic Drag (published by the author), 1958
- 27) 堀川清司：新編海岸工学、東京大学出版会、1991
- 28) 星野邦弘：浮体式海洋構造物に働く粘性流体力の推定法に関する研究、九州大学博士論文、1997
- 29) Hwang, P. A. : Breaking of Wind-Generated Waves, J. Fluid Mechanics, No.202, 1989

I

- 30) 池田良穂、藤原利弘、姫野洋司、田中紀男：横揺れ時の船体近傍の流場について、

関西造船協会誌、第 171 号、1978

- 31) 池田良穂、三木寛人：横揺れ・左右揺れする船体に働く粘性流体力、関西造船協会誌、第 187 号、1982
 - 32) 池田良穂：海洋構造物の要素部材に働く波力－剥離に基づく粘性抗力と揚力－、第 189 回 KFR 資料、1986
 - 33) 池田良穂、梅田直哉、田中紀男：小型高速艇の横揺れ減衰力の前進速度影響、関西造船協会誌、第 208 号、1988
 - 34) 池田良穂、河原由紀恵、横溝幸治：小型ハードチェーン艇の横揺れ特性に関する研究、関西造船協会誌、第 218 号、1992
 - 35) 池田良穂、片山徹、長谷川祐司、瀬川正行：高速瘦せ型船の横揺れ減衰力について、関西造船協会誌、第 222 号、1994
 - 36) 石田茂資、村重淳、渡辺巖、小川剛孝、藤原敏文：波浪中における RO-RO 客船の甲板上浸水と損傷時復原性に関する研究、日本造船学会論文集、第 179 号、1996
 - 37) Ishida, S., Nimura, T., Watanabe, I. : Capsizing and Re-righting Characteristics of Sailing Yachts, Proc. 7th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2000
 - 38) ISO/TC188/WG22 N-259 : Small craft - Stability and buoyancy assessment and categorization - Part1 : Non-sailing boats of 6 meters length of hull and over, 1998
 - 39) ISO/TC188/WG22 N-260a : do - Part2 : Sailing boats of 6 meters length of hull and over, 1999
 - 40) ISO/TC188/WG22 N-250 : do - Part3 : Boats up to 6 meters length of hull, 1998
- K**
- 41) 影本浩：耐航性能に関する CFD の現状、日本造船学会誌、第 835 号、1999
 - 42) 海上保安庁：海上保安の現況（平成 8 年度版）、1996
 - 43) 科学技術庁研究調整局：マリアナ海難に関連する漁船安全対策特別研究、1965
 - 44) 海難審判庁：レジャー船の海難の実態、1993
 - 45) 海難審判庁：海難審判の現況（平成 8 年度版）、1996
 - 46) 菅信、田口晴邦、他：斜め追波中の船の転覆について（第 1 報～第 5 報）、日本造船学会論文集、第 167 号(1990)、第 168 号(1990)、第 169 号(1991)、第 171 号(1992)、第 173 号(1993)
 - 47) 菅信、山越康行：船舶の横波中の転覆、運動性能研究委員会第 3 回シンポジウム「船舶と海洋構造物の安全性と復原性」、日本造船学会、1986

- 48) 関西造船協会編：造船設計便覧（第4版）、海文堂、1983
- 49) 片山徹、池田良穂：高速滑走艇の横不安定現象に関する実験的研究、関西造船協会誌、第224号、1995
- 50) 加藤弘：小型航洋船の復原性能について、造船協会論文集、第83号、1951
- 51) 加藤弘：船の安全性の簡易判定法、造船協会論文集、第99号、1956
- 52) King, B. K. : A Fast Numerical Solver for Large Amplitude Ship Motions Simulations, 4th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1990
- 53) Kjeldsen, S. O. : 2- and 3-dimensional deterministic freak waves, R-149.83, Publication of Norwegian Hydrodynamic Laboratories, 1983
- 54) 小林正典：船体傾斜時の波浪中の運動について、西部造船会々報、第51号、1975

L

- 55) Lin, W.M., Yue, D. : Numerical Solutions for Large-amplitude Ship Motions in the Time Domain, 18th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1990

M

- 56) 宮田修、長田修：膨張式救命筏の転覆実験、船研発表会講演集、第40回、1982
- 57) 水野俊明：船体の横揺れ運動における有効波傾斜係数について、日本造船学会論文集、第134号、1974、第2報、同第137号、1975
- 58) Matora, S., Shimamoto, S., Fujino, M. : Capsizing Experiment on a Totally Enclosed Life Boat, Proc. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1982
- 59) 元良誠三：船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて—その3 左右動に対する付加質量—、造船協会論文集、第106号、1959
- 60) 元良誠三（監修）、小山健夫、藤野正隆、前田久明：船体と海洋構造物の運動学、成山堂、1982
- 61) 元良誠三、山越康行：船舶の安全性と非損傷時復原性規則の動向、運動性能研究委員会第3回シンポジウム「船舶と海洋構造物の安全性と復原性」、1986
- 62) 森田知治：船舶復原論-基礎と応用-、海文堂、1985
- 63) Murashige, S., Aihara, K., Yamada, T. : Nonlinear Roll Motion of a Ship with Water-on-Deck in Regular Waves, Proc. Second Workshop on Stability and Operational Safety of Ships, 1996

N

- 64) 永井壮七郎、角野昇八：洋上ブイの波浪および風に対する安定性について、海岸工学講演会論文集、第22回、1975

- 65) 永井壮七郎、角野昇八：洋上ブイの砕波浪に対する安定性に関する理論的考察、海岸工学講演会論文集、第24回、1977
- 66) Nagata, O., Tsuchiya, M., Miyata, O. : Experimental Studies on the Stability of Inflatable Life Raft, Papers of Ship Research Institute, No.56, 1979
- 67) 内藤林、荒井誠、谷澤克治：非線形問題への挑戦、運動性能研究委員会第13回シンポジウム「船体運動およびその制御と海象」、1997
- 68) 日本海洋レジャー安全・振興協会：平成8年度におけるプレジャーボート等の海難事例（平成4年～平成8年におけるプレジャーボート等の海難発生状況）、1996
- 69) 日本小型船舶検査機構：小型船舶の不沈性能に関する調査研究報告書、1985
- 70) 日本小型船舶検査機構：小型船舶の耐航性に関する調査研究報告書、1989
- 71) 日本小型船舶検査機構：小型船舶の復原性の諸問題に関する調査研究委員会報告書、1992
- 72) 日本小型船舶検査機構：小型ヨット安全基準検討委員会報告書、1994
- 73) 日本小型船舶検査機構：小型船舶の復原性に関する調査研究報告書、2000
- 74) 日本マリーナ・ビーチ協会：マリーナにおける安全管理指針案〈マリーナ利用者の安全対策に係る実態調査編〉（平成5年度マリーナ安全管理研究委員会報告書）、1994
- 75) 日本造船研究協会：船舶の波浪中における復原性に関する研究、SR17 報告書、1959
- 76) 日本造船研究協会：海難船舶の調査および転覆機構の解明に関する研究、1963
- 77) 日本造船研究協会：第7基準研究部会 国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書、1982
- 78) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会：沿岸海域の自然環境と構造物—沿岸海域における海洋構造物設計上の諸問題—、第Ⅱ編 第1章 構造物に働く波力、流体力と運動、1992
- 79) 日本造船学会 海洋工学委員会 性能部会：超大型浮体構造物、成山堂書店、1995
- 80) 日本造船学会 運動性能研究委員会：非線形問題専門委員会成果報告書、1997
- 81) 日本造船学会 運動性能研究委員会、海洋工学委員会性能部会：船舶海洋工学における波浪情報の諸問題（波浪評価検討専門委員会 成果報告書）、1998
- 82) 二村正、石田茂資、渡辺巖：外洋ヨットの転覆・起き上がり特性、船舶技術研究所報告、第32巻第5・6合併号、1995
- O**
- 83) 及川清：船舶遭難時の人命安全に関する調査研究—遭遇する海難とその救命作業時

間一、日本航海学会論文集、第 65 号、1981

- 84) 岡田正次郎：小型船舶に対する風圧に因る傾斜モーメントについて、造船協会論文集、第 92 号、1952
- 85) Ohmatsu, S., Saruta, T. : A Simple Method to Generate Arbitrary Waves in Model Basin, Papers of Ship Research Institute, No.65, 1981

S

- 86) 定兼廣行：大浪中の横揺れ（続報）（続々報）、関西造船協会誌、第 169 号(1978)、第 173 号（1979）、第 180 号（1981）
- 87) 定兼廣行、山本邦弘：船の横波中転覆条件の一検討、関西造船協会誌、第 194 号、1984
- 88) 定兼廣行：船舶の横波中大角度横揺れと転覆に関する運動学的研究、大阪府立大学博士論文、1987
- 89) Salsich, J. O., Zselezky, J. J. : Experimental Studies of Capsizing in Breaking Waves, Marine Technology, Vol.25, No.2, 1988
- 90) 榎木享、後野正雄、岩橋哲哉：浅海域における円柱構造物の碎波局部衝撃波力特性と全体波力について、海岸工学講演会論文集、第 30 回、1983
- 91) 関根隆、田中清隆、酒田伸一郎、木村敏通：乾貨物船の浸水計算について、日本造船学会誌、第 746 号、1991
- 92) 慎燦益：傾斜船の横波中の運動について、西部造船会々報、第 63 号、1982
- 93) SLF-Sub-Committee/IMO : Guideline to the Master for Avoiding Dangerous Situation in Following and Quartering Seas, SLF39/18, Draft MSC Circular, 1995

T

- 94) 高木又男、新井信一：船舶・海洋構造物の耐波理論、成山堂、1996
- 95) 高石敬史、猿田俊彦、吉野良枝：船体に働く横揺れ減衰力について（第 1 報）－自由横揺れ試験結果－、船舶技術研究所報告、第 16 巻第 5 号、1979
- 96) Takaishi, Y. : Dangerous Encounter Wave Conditions for Ships Navigating in Following and Quartering Seas, Proc. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, 1994
- 97) Takezawa, S., Hirayama, T. : Advanced Experiment Technique for Testing Ship Models in Transient Water Waves, 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1976
- 98) 田中紀男、池田良穂、西野公夫：振動する各種二次元柱体に働く粘性流体力、第 6 回海洋工学シンポジウム、1982

- 99) 田中紀男他：小型漁船の横揺れ特性に関する研究、(1)横揺れ減衰力の計測結果、(2)非線形横運動方程式の一解法、(3)張り出し甲板の影響、(4)横揺れ減衰力に及ぼすステグ、ハードチェーンの影響、関西造船協会誌、第187号(1982)、第189号(1983)、第194号(1984)、第196号(1985)
- 100) 谷一郎：流れ学（第3版）、岩波全書、1976
- 101) 谷澤克治：加速度ポテンシャルによる波浪中浮体運動の非線形理論と数値解法の研究、大阪大学博士論文、1997
- 102) 田才福造：船の横揺れの運動方程式について、九州大学応用力学研究所所報、第25号、1965
- 103) 田才福造、高木幹雄：規則波中の応答理論および計算法、5.4 横波中の船体運動の計算と実験の比較、第1回耐航性に関するシンポジウム、1969
- 104) 富田宏、沢田博史、大松重雄、吉元博文：海洋における砕波の力学的ならびに確率論的研究、船舶技術研究所報告、第34巻第6号、1997
- 105) 辻豊治、高石敬史、菅信、佐藤辰二：船体に働く風圧力に関する模型実験、船研報告、第7巻第5号、1970
- 106) 土屋正之、沢田博史、長田修：模型ラフトの転覆実験、船研発表会講演集、第36回、1980
- 107) 土屋孟、有路実、山越康行：小型漁船の横復原性能と乾舷について、漁船研究技報、第27巻、1974
- 108) 土屋孟、有路実：各地の15ト型底ひき網漁船の横復原性能の実態と解析、漁船研究技報、第27巻、1974
- 109) 遠山敏和：漁船の安全に関する規則の動向、日本造船学会誌、第765号、1993

U

- 110) 梅田直哉：追波中を航行する船の復原性に関する研究、大阪大学博士論文、1991
- 111) 梅田直哉、藤原敏文、池田良穂：転覆確率を用いた小型ハードチェーン艇に対する復原性規則の評価に関する研究、関西造船協会誌、第219号、1993
- 112) Umeda, N., Vassalos, D. : Non-Linear Periodic Motions of a Ship Running in Following and Quartering Seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.179, 1996
- 113) 運輸省海上技術安全局監修、海事法令研究会編著：船舶六法（平成9年度版）、成山堂、1997

V

- 114) Vassalos, D. : Capsizal Resistance Prediction of a Damaged Ship in a Random Sea,

Symposium on RO-RO Ships' Survivability, 1994

W

- 115) 鷺尾祐秀、土井明：高速艇船型の復原性に関する一考察、西部造船会々報、第 82 号、1991
- 116) 鷺尾祐秀、茨木洋、貴島勝郎：高速船の横不安定現象に関する研究（続報）、西部造船会々報、第 94 号、1997
- 117) 渡辺巖、田口晴邦、芳村康男：安全性に関する国際規則と船体運動研究、運動性能研究委員会第 13 回シンポジウム「船体運動およびその制御と海象」、1997
- 118) 渡辺恵弘：横動揺に於ける船の重心の運動と波の有効傾斜に就いて、造船協会会報、第 49 号、1932
- 119) 渡辺恵弘：船舶復原性より見たる安全示数、造船協会会報、第 79 号、1948

Y

- 120) 山越康行：船舶の安全性と非損傷時復原性規則の最近の動向、水産工学研究所技報「漁船工学」、第 12 号、1992

図表一覧

第 I 章

- 表 I-1 非損傷時復原性に関する主な規則等
- 図 I-1 海難発生状況
- 図 I-2 全損海難の種類と遭難時間
- 図 I-3 急峻な碎波の観測例

第 II 章

- 表 II-1 模型船の主要目
- 表 II-2 実験した模型船の状態
- 表 II-3 実験条件と転覆の有無
- 表 II-4 転覆パターンの分類
- 図 II-1 Body Plan
- 図 II-2 センサーと可動ウェイトの配置
- 図 II-3 復原力の計測方法
- 図 II-4 復原力曲線
- 図 II-5 実験配置
- 図 II-6 集中性過渡水波の時間波形
- 図 II-7 転覆パターン A の船体運動
(波：W2、模型船状態：C7、初期位置：WG2)
- 図 II-8 水圧と横加速度
(パターン A、波：W2、模型船状態：C7、初期位置：WG2)
- 図 II-9 転覆パターン B の船体運動
(波：W2S、模型船状態：CL、初期位置：WG2)
- 図 II-10 船体運動 (パターン B から波を W2 に変えた場合)
- 図 II-11 水圧と横加速度 (模型船状態：CL、初期位置：WG2)
- 図 II-12 転覆パターン C の船体運動
(波：W1.5、模型船状態：CW、初期位置：WG3)
- 図 II-13 水圧と横加速度
(パターン C、波：W1.5、模型船状態：CW、初期位置：WG3)
- 図 II-14 転覆パターン D の船体運動
(波：W2S、模型船状態：CW、初期位置：WG5)

- 図Ⅱ-15 水圧と横加速度
(パターン D、波：W2S、模型船状態：CW、初期位置：WG5)
- 図Ⅱ-16 位相平面
(パターン A、波：W2、模型船状態：C7、初期位置：WG2)
- 図Ⅱ-17 位相平面 (パターン A から波を W2S に変えた場合)
- 図Ⅱ-18 左右揺れの減衰係数と着力点 (直立時)
- 図Ⅱ-19 左右揺れ時の付加質量係数と着力点 (直立時)
- 図Ⅱ-20 左右揺れ時の流体力の時系列の例 ($\bar{y}/b=0.58$ 、傾斜角：10°)
- 図Ⅱ-21 左右揺れ減衰力の着力点の非対称性
- 図Ⅱ-22 左右揺れ—横揺れ連成モーメント
の 0 次成分 (直流分 a_0) と 2 次成分 (a_2) の比較 (傾斜角：15°)
- 図Ⅱ-23 左右揺れの抗力係数とその着力点
- 図Ⅱ-24 左右揺れ時の付加質量係数とその着力点
- 図Ⅱ-25 転覆パターン A のシミュレーション結果
(波：W2、模型船状態：C7、初期位置：WG2)
- 図Ⅱ-26 転覆パターン A のシミュレーション結果 ($C_D=0$)
- 図Ⅱ-27 転覆パターン A のシミュレーション結果 (IM=0)
- 図Ⅱ-28 転覆パターン B のシミュレーション結果
(波：W2S、模型船状態：CL、初期位置：WG2)
- 図Ⅱ-29 転覆パターン B のシミュレーション結果 ($C_D=0$)
- 図Ⅱ-30 転覆パターン C のシミュレーション結果
(波：W1.5、模型船状態：CW、初期位置：WG3)
- 図Ⅱ-31 転覆パターン C のシミュレーション結果
(波：W1.5、模型船状態：CW、初期位置：WG3、IM=0)
- 図Ⅱ-32 転覆パターン D のシミュレーション結果
(波：W2S、模型船状態：CW、初期位置：WG5)

第Ⅲ章

- 図Ⅲ-1 模型船の形状と水圧計の配置
- 図Ⅲ-2 傾斜時の水線
- 図Ⅲ-3 強制左右揺れ試験の配置
- 図Ⅲ-4 付加質量係数
- 図Ⅲ-5 加速度成分の着力点高さ
- 図Ⅲ-6 加速度成分の水圧分布 (傾斜角：10°)
- 図Ⅲ-7 減衰力成分の水圧分布 (傾斜角：10°)

- 図Ⅲ-8 減衰力の運動振幅依存性（傾斜角：10°）
- 図Ⅲ-9 抗力係数
- 図Ⅲ-10 減衰力の線形成分
- 図Ⅲ-11 減衰力の運動振幅依存性
（模型船：M20CS、傾斜角：0度、周波数：0.43Hz）
- 図Ⅲ-12 減衰力の運動振幅依存性
（模型船：M10 および M10C、傾斜角：5度、周波数：0.43Hz）
- 図Ⅲ-13 減衰力成分の着力点に対する運動振幅の影響（模型船：M20C）
- 図Ⅲ-14 減衰力の着力点高さの傾斜角依存性（振幅： $\bar{y}/b=0.6$ ）

第Ⅳ章

- 表Ⅳ-1 主要目
- 表Ⅳ-2 実験条件と転覆の有無（初期位置：WG3）
- 図Ⅳ-1 模型船
- 図Ⅳ-2 復原力曲線
- 図Ⅳ-3 横揺れ応答関数の振幅（模型船：M20、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-4 横揺れ応答関数の振幅（模型船：M20C、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-5 横揺れ応答関数の振幅（模型船：M20CS、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-6 横揺れ応答関数の位相（模型船：M20、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-7 横揺れ応答関数の位相（模型船：M20C、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-8 横揺れ応答関数の位相（模型船：M20CS、OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-9 横揺れの位相による波面上の揺れ方の変化
- 図Ⅳ-10 船型による応答関数の比較（OG=10.8cm、波高：21cm）
- 図Ⅳ-11 船型による水平運動の比較（OG=10.8cm、波高：21cm、波周波数：1.0Hz）
- 図Ⅳ-12 定常状態の横流れ速度（OG=10.8cm）
- 図Ⅳ-13 集中性過渡水波の時間波形
- 図Ⅳ-14 集中性過渡水波のスペクトル
- 図Ⅳ-15 転覆限界波高
- 図Ⅳ-16 波高が高い場合の転覆運動の計測値
（模型船：M20C、OG：10.8cm、波高：42.8cm）
- 図Ⅳ-17 波高が低い場合の転覆運動の計測値
（模型船：M20C、OG：10.8cm、波高：31.9cm）
- 図Ⅳ-18 M20 船型の運動の例（計測値、OG：10.8cm、波高：42.8cm）

- 図IV-19 M20CS 船型の運動の例 (計測値、OG : 10.8cm、波高 : 42.8cm)
- 図IV-20 波上側へ転覆する場合の運動
(計測値、模型船 : M20、OG : 10.8cm、波高 : 43.5cm)
- 図IV-21 衝撃力の計測方法
- 図IV-22 水圧計の配置
- 図IV-23 波面と上下揺れの時系列の計測値 (模型船 : M20C、傾斜角 : 0)
- 図IV-24 第 1 波による上下揺れの最大値 (傾斜角 : 0)
- 図IV-25 第 1 波による上下揺れの最大値の傾斜角依存性
- 図IV-26 水圧分布 (模型船 : M20C、波高 : 25.9cm、傾斜角 : 10°)
- 図IV-27 水圧分布 (模型船 : M20C、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°)
- 図IV-28 水圧分布 (模型船 : M20C、波高 : 42.8cm、傾斜角 : -10°)
- 図IV-29 水圧分布 (模型船 : M20、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°)
- 図IV-30 水圧分布 (模型船 : M20CS、波高 : 42.8cm、傾斜角 : 10°)
- 図IV-31 横力の時系列
- 図IV-32 傾斜モーメントの時系列
- 図IV-33 時間積分した衝撃水圧の鉛直分布の例 (模型船 : M20CS、傾斜角 : 0)
- 図IV-34 時間積分した衝撃水圧の鉛直分布
- 図IV-35 波高による衝撃力の変化 (傾斜角 : ゼロ)
- 図IV-36 傾斜角による衝撃力の変化 (波高 : 40.4cm)
- 図IV-37 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20、OG : 9.8cm、波高 : 41.7cm)
- 図IV-38 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20C、OG : 9.8cm、波高 : 41.7cm)
- 図IV-39 波高が高い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20CS、OG : 9.8cm、波高 : 41.7cm)
- 図IV-40 波高が低い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20、OG : 10.8cm、波高 : 25.9cm、初期傾斜 : 3° 波下側)
- 図IV-41 波高が低い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20C、OG : 10.8cm、波高 : 25.9cm、初期傾斜 : 3° 波下側)
- 図IV-42 波高が低い時のシミュレーション結果
(模型船 : M20CS、OG : 10.8cm、波高 : 25.9cm、初期傾斜 : 3° 波下側)
- 図IV-43 波高が低い時の運動の比較 (上下揺れ—横揺れの実験値)
- 図IV-44 波の谷における M20 の傾斜角を人工的に M20C 相当にした場合
- 図IV-45 船型による水平運動の比較 (OG=10.8cm、波高 : 25.9cm、初期傾斜 : 3° 波下側)

第V章

- 図V-1 横流れ時の抗力係数と着力点高さ（三次元模型船、傾斜角ゼロ）
- 図V-2 横流れ時の抗力係数と着力点高さ（三次元模型船、 $V=0.4\text{m/s}$ ）
- 図V-3 風速の鉛直分布
- 図V-4 横風による抗力係数と着力点高さ（風速： 4.94m/s ）
- 図V-5 横風による自由漂流試験結果
- 図V-6 横流れ時の抗力係数（二次元模型船）
- 図V-7 横流れ時の抗力の着力点高さ（二次元模型船、 $V = 0.4\text{m/s}$ ）

第VI章

- 表VI-1 スケールアップした二次元模型船のC係数（船底勾配角 20度）
- 表VI-2 C係数基準の改良案の試適用結果（二次元模型船、船底勾配角 20度）
- 図VI-1 C係数基準
- 図VI-2 C係数基準の改良案
- 図VI-3 横流れによる傾斜モーメントの試験法
- 図VI-4 連続波による転覆のシミュレーション結果
（模型船：M20C、OG=10.8cm、波高：31.9cm、初期傾斜：0）
- 図VI-5 模型船の相対運動（模型船：M20C、OG=10.8cm、波高：31.9cm、初期傾斜：0）
- 図VI-6 左右揺れの相対速度の波高による変化
（模型船：M20C、OG=10.8cm、初期傾斜：0）
- 図VI-7 第2波直前の波上側傾斜角の最大値
（模型船：M20C、OG=10.8cm、初期傾斜：0）
- 図VI-8 波上側傾斜角の最大値の波高による変化
（模型船：M20C、波高：38.7cm、初期傾斜：0）

付録

- 表A-1 C係数基準におけるk、p、qの値
- 図A-1 C係数基準