

# 碎波による小型船の転覆機構に関する研究

平成12年12月

石田 茂資

# 目次

第 I 章 緒論.....	1
I-1 転覆海難の特徴と重要性.....	1
I-2 転覆に対する安全基準の概要および歴史的経緯.....	2
I-3 転覆に関する過去の研究.....	5
I-3-1 転覆全般に関する研究の概要.....	5
I-3-2 小型船の特徴.....	7
I-3-3 小型船の横波中転覆に関する研究の概要.....	8
I-4 本論文の研究内容と構成.....	12
第 II 章 砕波による転覆過程の検討.....	19
II-1 水槽実験による転覆過程の把握.....	19
II-1-1 実験方法.....	19
II-1-2 転覆発生の条件.....	22
II-1-3 転覆パターンの分類と転覆過程の考察.....	25
II-2 シミュレーションによる転覆機構の検討.....	30
II-2-1 シミュレーション計算の方法.....	30
II-2-2 左右揺れによる流体力.....	37
II-2-3 転覆運動の力学的メカニズム.....	42
II-3 第 II 章のまとめ.....	47
第 III 章 左右揺れ流体力に対する船型要素の影響.....	76
III-1 実験方法.....	76
III-2 付加質量と着力点.....	77
III-2-1 付加質量係数.....	77
III-2-2 水圧分布.....	78
III-3 減衰力と着力点.....	79
III-3-1 水圧分布.....	79
III-3-2 減衰力.....	80
III-3-3 線形理論による造波減衰力と実験値との比較.....	81
III-3-4 減衰力の着力点.....	82
III-3-5 考察.....	83
III-4 第 III 章のまとめ.....	84
第 IV 章 船型要素の違いが転覆運動に及ぼす影響.....	97
IV-1 船型要素による運動の違い.....	97
IV-1-1 実験方法.....	97

IV-1-2 規則波中の横揺れ .....	99
IV-1-3 集中性過渡水波中の運動 .....	106
IV-2 砕波による衝撃力 .....	112
IV-2-1 実験方法 .....	113
IV-2-2 実験結果 .....	114
IV-3 転覆運動の力学的メカニズムの検討 .....	119
IV-3-1 波高が高い場合の短時間の転覆 .....	119
IV-3-2 波高が低い場合の転覆 .....	121
IV-3-3 まとめ .....	127
IV-4 第IV章のまとめ .....	128
第V章 横風と横流れによる傾斜 .....	174
V-1 横流れによる抗力とモーメント .....	174
V-2 横風による抗力とモーメント .....	175
V-3 横風による自由横流れによる傾斜 .....	177
V-4 横流れ時の流体力に対する船型要素の影響 .....	178
V-4-1 抗力係数 .....	179
V-4-2 着力点 .....	180
V-4-3 風と波を同時に受ける場合についての考察 .....	182
V-5 第V章のまとめ .....	183
第VI章 復原性基準への応用 .....	189
VI-1 小型船の復原性基準の現状および動向 .....	189
VI-1-1 我国の小型船の復原性基準－小型船舶安全規則－ .....	189
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－ .....	191
VI-1-3 国内基準と国際基準案の比較と考察 .....	193
VI-2 小型船の特徴を反映した復原性基準 .....	195
VI-2-1 C係数基準の問題点 .....	196
VI-2-2 C係数基準の改良案 .....	199
VI-2-3 C係数基準の改良案の試適用 .....	203
VI-3 第VI章のまとめ .....	209
第VII章 結言 .....	219
謝 辞 .....	224
付録 C係数基準 .....	225
参考文献 .....	228
図表一覧 .....	236

## 第 I 章 緒論

### I-1 転覆海難の特徴と重要性

#### 1) 転覆海難の発生頻度と人命損失

海難事故の実態、特に小型船の事例をまとめた資料には、「海上保安の現況」<sup>42)</sup>、「レジャー船の海難の実態」<sup>44)</sup>、「海難審判の現況」<sup>45)</sup>、「平成 8 年度におけるプレジャーボート等の海難事例」<sup>68)</sup>等があり、それぞれの視点から分析が行われている。これらの資料のうち、「海難審判の現況」<sup>45)</sup>の一部を図 I-1 に示す。これによれば、1 年間の海難事故 8,499 件のうち「転覆」はわずかに 59 件 (0.7%) に過ぎない。しかし、死亡・行方不明者数で見ると、全事故 210 人の内「転覆」が 37 人 (18%) を占めている。この統計では、事故原因をひとつに特定できない複合海難や原因不明なものとして「遭難」、「死傷等」、「行方不明」という分類があるが、それら除いた比率では「転覆」は 38% にもなる。また、「沈没」や「行方不明」のかなりの部分が転覆事故に起因するものと考えれば、この数字はさらに大きくなる。従って、事故原因が特定できるものの中では、「転覆」は「衝突」と並んで人命の損失が最も大きいものと言うことができる。

#### 2) 転覆海難の性質

このように、転覆事故は衝突や乗揚など頻繁に発生する事故に比較して、1 件当たりの人命損失が極めて多いのが特徴である。これはひとつには、転覆が船舶の全損を直接意味するからである。また、比較的短時間に起こるため退船する余裕が少ないことも重要な理由である。

及川<sup>83)</sup>は、海上保安庁の全損船舶の海難調査票を海難種類別に図 I-2 のようにまとめているが、「転覆」の遭難時間が最も短く、20 分以内に 80% の船が転覆することがわかる。しかも、衝突相手船という目撃者が存在する「衝突」とは異なり、極めて短時間に転覆するような場合は、生存者が救助されない限りこの統計には含まれない。あらゆる転覆事故の遭難時間を整理することができれば、転覆事故の遭難時間の期待値はさらに短いと考えるのが自然であろう。

従って、海難による人命の損失を減少させるためには転覆事故対策がひとつの柱であり、事故後の対応策もさることながら事故そのものを起こさないことが第一義的に重要であることがわかる。

なお、図 I -1に示したのは小型船から大型船まですべてを含んだ統計であるが、転覆海難の大半は 20 ト未満の小型船に発生している。海洋レジャーの発展に伴って、全海難に占めるプレジャーボートの比率が増加している<sup>44)</sup>ことから、今後小型船の転覆事故対策が急がれるところである。

## I-2 転覆に対する安全基準の概要および歴史的経緯

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、実海域において適切な運用を行うとともに、気象・海象情報、運航者に対する啓蒙活動、保守・検査体制、救命装置、救助体制等を充実することが必要である。そのような認識のもとに、新しい動きとして、PSC (Port State Control)、ISM コード (International Safety Management Code)、GMDSS (The Global Maritime Distress and Safety System) 等が実施・強制化されていることは周知のとおりである。しかし、安全基準を適切に満足した設計が安全確保の中核を占めることは、現在も関係者の共通した認識と言えよう。そこで本論文では、復原性基準を中心に議論を進める。

転覆海難防止を目的とする復原性基準の概要および歴史的な経緯については、元良等<sup>61)</sup>、山越<sup>120)</sup>によって詳しく解説されている。また、近年の動向については渡辺等<sup>117)</sup>、漁船については遠山<sup>109)</sup>によってまとめられている。表 I -1 は山越<sup>120)</sup>の表を中心に、最近の動向を加えてまとめたものであるが、非常の多くの規則等が存在するため、ここでは主要なものについて概説する。

### 1) 一般船舶の復原性基準

我国で復原性基準を制定する動きが始まったのは 1950 年代からで、渡辺<sup>110)</sup>、加藤等<sup>50), 51)</sup>の研究をもとに「船舶復原性規則」<sup>113)</sup> (運輸省令、1956)が制定され現在に至っている。また国際的には、10 年ほど遅れて IMCO (政府間海事協議機構: Inter-governmental Maritime Consultative Organization) の決議 A.167 (船長 24m~100m、1968)が採択された。しかし、これは外航船としては小型の船の経験則に基づくものであり大型船への適用に問題があったことから、これを補完するものとして IMO (国際海事機関: International Maritime Organization) の決議 A.562 (Weather Criterion、船長 24m 以上、1985)が採択された。

我国の「船舶復原性規則」の中核をなすのは第 11~17 条に定められた旅客船に対する基準で、いわゆる甲基準、乙基準、丙基準の 3 つから成り立っている。甲基準は横風

と旅客の移動による傾斜モーメントに耐える復原てこ（以下 GZ と略す）を、丙基準は復原力曲線の最大値が海水打込みや重量物の移動等に耐えることを、それぞれ静的な考察から規定したものである。乙基準（C 係数基準）は、最も危険な状態として機関故障等により漂流しながら横波と横風を受ける状態を想定したものであり、不規則波中の 1 波と横揺れ同調した時に突風を受けた場合について、必要な動的復原てこを運動学的な考察から規定している。この考え方は国際的にも受け入れられ A.562 にも採用されている。また、A.167 は、経験則にもとづいて重心上横メタセンタ高さ（以下 GM と略す）や、復原力曲線の面積および形状などについて定めたものである。

## 2) 漁船の復原性基準

以上は旅客船などの一般船舶を対象にした基準である。転覆海難は漁船においても多く発生しているが、漁船は船型、操業方法、載荷状態が多様であることなどの理由から、一般船舶とは別に規定されている。我国では、20 ト以上の漁船について「船舶復原性規則」に GM 基準、操業時の横傾斜基準、C 係数基準（風圧側面積が大きい船のみ）が規定されるとともに、「動力漁船の性能の基準」（20 ト以上、1964）にもほぼ同様の規定がある。国際的には、A.167 とほとんど同じ内容の A.168（IMO 決議、航洋漁船、1968）およびトレモリノス漁船安全条約（船長 24m 以上、1993 発効）があり、また Weather Criterion (A.562) は船長 45m 以上の漁船にも適用されることとなっている。これら漁船の基準は、一般船舶の基準をベースに、揚網時に作用する傾斜モーメントなど漁船独特の要素を取り入れたものと言うことができる。

## 3) 小型船の復原性基準

このように、ある程度の大きさを持つ船舶の安全性に関しては、ここ 50 年ほどの間に種々の検討が加えられている。しかし、プレジャーボートのような極く小型の船（以下では単に小型船と呼ぶ）に関しては、事故件数が多いにもかかわらず十分な検討がなされているとは言いがたい面がある。その理由としては、大型船に比べて事故 1 件当たりの損害と社会的な反響が小さいこと、小型船の船型や運航形態などの多様性から統一的な基準の制定が困難だったこと、運航方法や操船者の技量の比重が大きいこと、などがあげられる。

現在のところ、我国では「小型船舶安全規則」<sup>113)</sup>（20 ト未満、運輸省令、1974）が制定され、5 ト以上の旅客船または近海以上を航行する小型船に「船舶復原性規則」を準用することが定められている。また、それ以外の小型船には、最大搭載人員を主要目お

よび乾舷から規定する簡易な基準が適用されている（後述）。一方、小型漁船については「小型漁船安全基準」（3～20ト、1972）によって GM および操業時の横傾斜角が規定されている。しかし、近年の JCIO（日本小型船舶検査機構：Japan Craft Inspection Organization）<sup>71)</sup>や藤野等<sup>12)</sup>の検討では、「船舶復原性規則」の C 係数基準を小型船に用いると有効波傾斜係数が過大（極端な場合には 1.8 以上）になるなど、小型船の実態に必ずしも合わないことが指摘されている。小型船は I-3-2 節に述べるような特徴を持っているので、これはある程度予想された結果と言える。

国際的には、小型船の安全基準が十分に整備されていない国が多く、先進諸国も一部を除いてその例外ではなかった。そこで、ISO（国際標準化機構：The International Organization for Standardization）において、全長 24m 以下の舟艇を安全性に係る設計要件から 4 段階に分類することが検討されており、復原性についてもその一部として 1990 年から検討が行われている（後述）。この ISO 基準はそのまま EU（European Union）の基準として採用される予定であり、国際化の観点から我国の基準にも反映されることが考えられる。しかし、提案されている基準案はいくつかの国の統計に基づく経験式的なものをベースとしている。特に動的な転覆過程については、C 係数基準の考え方が踏襲されており、小型船特有の性質を考慮したものとは必ずしもなっていない。

結局のところ、現在までの基準は経験則に基づく部分が多くを占めており、しかも小型船を対象にした検討はやっと本格化した段階と言える。経験則は運航実績に基づいてあらゆる転覆要因を陰に考慮しているわけであるから、これを軽視することはできない。しかし、船型等が多様な小型船や新しい船型に適用する場合に限界があることは否定できない。従って、いくつかの典型的な転覆シナリオに対する物理モデルを構築し、これと経験則を組み合わせることが必要である。

#### 4) 小型船の転覆と C 係数基準

現在、風波中における明確な転覆シナリオを想定しているのは「船舶復原性規則」の C 係数基準と、ほとんど同じ内容の IMO の「Weather Criterion」のみである。前者は「小型船舶安全規則」によって小型船にも準用されることとなっており、後者は ISO 基準に取り入れられる予定である。従って、これらの基準で想定されている「同調横揺れ＋定常風＋突風」という状態が、小型船から大型客船に至るまで典型的な転覆海難の形態として扱われている訳である。

しかしながら、実際にはこのようなメカニズムによる小型船の転覆事故はほとんど見られない。JCIO による転覆事故原因の調査<sup>70)</sup>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。無論、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。その意味で、風圧による傾斜モーメントをかなり重視する（水面上の形状を重視する）点など、現在の基準は見直す余地があるように思われる。

なお、Dahle et al.<sup>8)</sup>は、ノルウェーのフィヨルドを吹き降りる fall wind と呼ばれる強風に突然襲われ、平穏な海面でも風の力のみによって転覆する事例があることを報告している。しかしながら、時として Beaufort 12 相当になると言われるこのような突風に遭遇することは、非常に特殊なケースと考えるべきであろう。

また、C 係数基準等の小型漁船への適用可能性については、土屋等<sup>107),108)</sup>の研究がある。これらの研究では、小型漁船はシーマンシップによってぎりぎり安全な状態で運航されているとの立場から、運航実態の調査結果が安全限界に等しいと仮定し、風速などのパラメータを適当に修正すれば C 係数基準はその実績値に合うと結論している。しかし同時に、「5 トン程度の小型漁船に対しても、大型船に準じた横復原性能の評価基準をそのまま使いうるどうかに疑問が持たれる」と述べられており、砕波等による転覆現象の解明が待たれることを指摘している。近年では海洋レジャーの普及に伴って小型のプレジャーボートが増加しているが、その操船者は漁船の操船者ほどその船の荒天中の挙動に熟知しているわけではない。従って、この経験則に基づく結論が一般の小型船にも適用できる保証はなく、これらの船舶の転覆メカニズムを物理的に解明し、復原性基準および安全対策をより合理的なものにしていくことが必要となっている。

なお、経験則に基づく基準は新しい船型への適用に限界があること、逐条的な基準は設計の自由度を狭めることから、最近では、基準が担保しようとする安全性を計算によって直接評価する手法（Design by Analysis）が適用され始めている。しかしながら、小型船の製造業者は世界的に中小規模のものが多く、その設計能力には限界があるため、このような高度な評価手法の導入は、かなり先のことになると思われる。

## I-3 転覆に関する過去の研究

### I-3-1 転覆全般に関する研究の概要

転覆の研究全般については、日本造船学会運動性能研究委員会の第 3 回シンポジウム(1986)において、横波中（菅、山越<sup>47)</sup>）、縦波中（浜本、藤野<sup>16)</sup>）、砕波および不規則波中（平山、定兼<sup>23)</sup>）、に分けて詳しく述べられている。その中で菅等がまとめている



るように転覆のメカニズムや要因には様々のものがあり、海象に限っても横波、追波、横風、強潮流などがある。また、例は少ないが向波中のものも報告されている<sup>25)</sup>。特に近年では、IMO において追波中の操船ガイダンス<sup>93)</sup>が制定されるなど追波中の危険性に対する認識が高まり、我国でも最近に至るまで浜本等<sup>17)</sup>、菅等<sup>46)</sup>、梅田等<sup>110)</sup>、<sup>112)</sup>、高石<sup>96)</sup>などによって精力的に研究が行われている。

しかし、海難統計に横波という記述が多く見られるように、横から大波を受けることの危険性もまた明らかであって、その典型例として漂流中に真横から波を受ける状態を想定して古くから研究が行われてきたわけである。

### 1) 横波中の転覆

横波中における転覆全般については菅等<sup>47)</sup>が総括しており、転覆の要因を波浪外力、打込み水、風、荷崩れ、動的不安定現象（非対称横揺れ、跳躍横揺れ、Ultra/Sub-harmonic Resonance、Parametric Oscillation）など広範にリストアップし解説している。また、風速 70m/sec にも及ぶ台風によって 150～230 トンの漁船 7 隻が沈没したいわゆるマリアナ海難（1965）に関する研究<sup>43)</sup>では、種々の転覆実験を行って、横から三角波を受けた場合と長波頂波を受けた場合とで最大横揺れ角に有意な差がないこと等の有益な知見を得たほか、荒天下の操縦性（船を波に立てる性能）、構造、運航方法、遭難信号発信器、救命胴衣、膨張式救命いかだ等について総合的・多角的検討が行われている。さらに最近では、RO-RO 客船エストニア号の転覆事故（1994）を契機として、水面上に広範な区画を有する船の損傷時復原性、特に波浪中における横揺れ・転覆の問題に注目が集まった<sup>たとえば36)、114)</sup>。

しかし、小型船に限って見ると、転覆事故の調査結果<sup>70)</sup>に「高波（異常波）による瞬時の転覆」という記述が非常に多く見られることから、砕波を含む 1、2 波の大波による短時間の転覆現象が重要であることがわかる。また、Dahle et al.<sup>7)</sup>は、海象が厳しいため古くから行われているノルウェーの転覆の研究を総括しており、その中で「Most capsizing in rough weather refer to breaking waves in beam seas as the cause of the accident」と述べている。さらに、先に述べた ISO 基準案では、砕波を受けることの危険性を owner's manual に記載して操船者に注意喚起することが特に定められているが、これは議論の過程で多くの国から寄せられた意見を反映したものである。そこで本論文においても、横からの大波による転覆現象に対象を絞ることにし、次節以降でその分野の研究の概要を述べる。

## 2) 研究の手法

研究の手法では、古くから行われている決定論的手法の他に、近年では確率論や非線形力学を用いる手法が行われている。

確率論的手法は、すでに SOLAS 条約において乾貨物船の損傷時復原性基準に取り入れられており<sup>91)</sup>、個々の区画への浸水を別個に取り扱うのではなく、各区画が損傷する確率を考慮して船全体としてのリスクを一定限度内に押さえるよう規定されている。また IMO では、確率論を用いた総合的リスク評価手法によって基準を作成・評価する FSA (Formal Safety Assessment) の適用が検討されているところである<sup>2)</sup>。さらに、梅田等<sup>11)</sup>、藤原等<sup>13)</sup>などは、船が長時間にわたって不規則横波を受け続けると仮定して、転覆確率と C 係数基準とを比較検討している。このような確率論的手法による安全評価は今後重要性を増すものと思われるが、まずその素過程としての転覆機構を明らかにする必要がある。本論文では、そのような立場から決定論的なアプローチを採用する。

また、非線形力学を用いる手法は、追波中<sup>たとえば46)</sup>や RO-RO 客船の損傷時の問題<sup>63)</sup>などに適用され、波との出会位置や自由水影響に起因する復原力の非線形性によって、規則波中においてもカオス的な大振幅横揺れが起こる可能性のあることなど、興味深い結果が得られている。しかし、この手法は天文学における軌道計算の研究から発達したことでわかるように、ある程度長時間の間に起こる不安定現象を対象にしたものであり、短時間に発生する過渡的な現象については transient chaos という言葉が使われ出した段階である。従って、現在のところ本研究で取り扱うような転覆現象には適用できない。

### I-3-2 小型船の特徴

本研究では、事故件数の多いものとして、JCIO や ISO が対象とするようなごく小型の船を取り扱う。このような小型船は以下のような特徴を持っている。

- ① 自船のスケールに比較して荒れた海象に遭遇することが多い。
- ② 水面下の形状は喫水が小さく幅広の船型である。
- ③ スケグやハードチェーンなど角のある複雑な形状を持つ。
- ④ KG (OG) が大きい。また、GM も大きいがブルワークトップが没水すると復原力は急に減少する。
- ⑤ 人の移動や荷崩れによる傾斜が大きい。
- ⑥ 十分な専門知識を持つ乗員によって運航されない場合がある。

従って、風波がある程度大きくなれば大振幅の船体運動を生じるが(①、②)、その振

る舞いは中大型船とやや異なったものとなる。たとえば、静的に考えても大角度で傾斜すれば水面下の形状が大きく変化するし(②, ③)、動的に考えれば砕波等の外力によって大きな横流れを生じ(②)それが剥離を伴う複雑な流場につながる(③)。またこの他に、横風による定傾斜が小さい(④)、横揺れの回転中心が高い位置にある(④)、定傾斜を生じた時の流体力や運動特性が重要になる(⑤)、などの性質がある。このような特徴は近年増加している高速船型にも共通する部分が多く、これを踏まえた上で安全性を検討しておくことが必要である。

なお、小型船がある程度以上のリセス(打込み水が滞留し容易に排出されない凹んだ部分)を持つ場合には、打込み水による復原性の低下を考慮する必要があり、ISOにおける検討でも復原性のカテゴリー分けをする上でリセスの大きさが重要な指標になっている。しかし、1、2波の大波による転覆を考える上では打込み水のない状態からの横揺れ運動の発達が主要な問題となるので、本研究では打込み水の影響、特に動的な影響には立ち入らない。

### I-3-3 小型船の横波中転覆に関する研究の概要

#### 1) 小型船に作用する流体力

小型船の転覆メカニズムを理解するには、まず大振幅運動時の流体力の特性を知る必要がある。小型船は、上に述べたように角のある部分からの剥離や傾斜による水面下形状の変化が大きいため、その流体力は強い非線形性を示す。特に、前者の粘性に関連する問題は理論的な取り扱いが困難なことから、実験を中心にした研究が行われてきた。

この問題については田中等<sup>99)</sup>、池田等<sup>31), 34)</sup>による精力的な研究が代表的なものであり、横揺れ減衰力や左右揺れ-横揺れ連成減衰力だけでなく、左右揺れの減衰力にも粘性影響による非線形性が現れること、それらが船型要素や重心高さによって極めて複雑に変化すること、その原因が角のある部分からの局所的な剥離によって説明できること、造渦減衰力は運動振幅にほぼ比例すること、など重要な知見が得られている。しかし、著者自身が述べているように、船型がバラエティに富む小型船の流体力を十分な精度で求める手法は見出されていないのが現状であり、最近の動向を影本<sup>41)</sup>がまとめているように、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)を用いた研究もこの分野では緒に付いたばかりである。また、実験データについても、特に転覆に至るような大振幅運動時の蓄積は十分でない。さらに、船が傾斜した場合については、上記の研究で一部触れられている他に線形理論に基づく慎の一連の研究<sup>たとえば92)</sup>、小林<sup>54)</sup>、原口等<sup>18)</sup>の研

究などがあるものの、小型船についてはほとんど明らかになっていないのが現状である。

## 2) 転覆を引き起こす波

転覆を引き起こす波については、同調横揺れの場合でも規則波中での転覆は希であると言われている。模型船を用いた水槽実験でも、甲板上に滞留水を生じるような場合を除き、人工的に重心をかなり高くするか初期傾斜を大きく付けない限り、あるいは砕波を用いない限りなかなか模型船を転覆させることはできないようである。すでに述べたように、1、2波の大波による転覆が多く報告されていることから、集中性過渡水波などによりこれを模擬した水槽実験が、Dahle等<sup>6)</sup>、宮田等<sup>56), 77)</sup>、平山等<sup>22)</sup>、元良等<sup>58)</sup>、定兼等<sup>86), 87)</sup>などによって行われた。

また、転覆を引き起こす砕波の波高については平山等<sup>23)</sup>が主な実験結果をまとめているが、一般に言われているように、船の幅と同程度か若干大きい波高が閾値となるようである。そのまとめには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の結果も含まれているが、それらも同程度の閾値を持つことは興味深い結果である。

なお、そのような急峻な波としては、台風のような荒天中を除けば、浅水域で発生するいわゆる磯波と呼ばれるような波が主に考えられてきた。しかし、最近では、深海域で発生するfreak波あるいはrogue波と呼ばれる波の存在が知られ、ここ20年ほどの間に研究が行われている。この波の特徴は、rogue(群を離れた野生の象)という言葉からもわかるように、有義波高の2倍以上の大波がほとんど孤立して発生することであり、その発生を予測しがたいため船舶にとって危険であるが、その発生メカニズムや発生条件はよくわかっていない<sup>81)</sup>。

## 3) 砕波による転覆

### 3)-1 前進速度影響

以下に、砕波(集中性過渡水波)を用いた代表的な研究について述べる。これらはすべて停船時を対象としているが、その理由は荒天時の前進速度が一般に小さく、停船時と流体力に大きな差がないと考えられたからであろう。JCIOの調査結果<sup>70)</sup>でも、横波による小型船の転覆事故は低速時に発生したものが多いためである。また、一般的な船型では横揺れ減衰力が前進速度とともに大きくなるため、これらの研究では最も危険な状態として停船時を想定したものと考えられる。

小型船の横揺れ減衰力については池田等<sup>33), 35)</sup>の研究があり、造渦成分等には速度に

よる減少が見られるが、横揺れ減衰力全体は船速が大きくなるにつれて増加することが示されている。また、高速艇は船底の動的圧力分布等によって復原力が低下し、場合によっては GM が負になることが知られており、我国では片山等<sup>49)</sup>、鷺尾等<sup>116)</sup>などの研究がある。しかし、この現象は滑走状態（両研究では Froude 数 0.9 以上）で発生するため、本研究では対象外としてよいと思われる。

以上の理由から、本研究では停船時に対象を絞って検討を行うこととする。

### 3)-2 大規模な砕波による転覆

Dahle 等<sup>6)</sup>は水槽の幅を狭くすることによって大波を起こし、調査船 Helland-Hansen（船長 34.7m）が砕波により船体上部に強い力を受けて、波下側に瞬時に転覆する過程を再現した。しかし、運動学的な詳しい検討は報告されていない。また、先に述べたマリアナ海難に関連し、宮田等<sup>56), 77)</sup>は集中性過渡水波による膨張式救命いかだ（船長 2.54m）の転覆実験を行い、スカートの有効性や乗員による荷重の影響等について調べたが、転覆メカニズムについての考察は行っていない。一方、平山等<sup>22)</sup>は漁船（船長 42m）が波下に瞬時に転覆する状況を水槽実験とシミュレーションにより検討した。その際、両舷に設置された加速度計（上下方向）のうち波上側のものに大きな値が生じたことから、砕波による衝撃力は傾斜した瞬間の船底に働き、むしろ船体を突き上げるように作用したと説明している。また、永井等<sup>64), 65)</sup>は円盤形の洋上ブイを対象に同様の検討を行い、やはり傾斜した底部に砕波の多量の水塊を受けたことが転覆の原因であるとしている。

これらの実験では、船全体が一瞬覆い隠されて見えなくなるほどの砕波を用いているが、砕波による衝撃力が作用する中心位置によって 2 つ転覆パターンが見られる。すなわち、船体上部に衝撃力を受けるパターンと、船底付近に衝撃力を受けるパターンである。小型船の場合は喫水が浅く、いわゆる「たらい船」のような状態にあるので、波面がよほど急激に盛り上がらない限り船体が波に乗ってしまう。また、一般的に重心は水面上の高い位置にある。従って、砕波による衝撃力の中心が重心よりも高い位置になる頻度はかなり低いと考えられる。図 I -3 に示すような極めて急峻な砕波の観測例もあるが、このような砕波に直接襲われることは希と考えるとよいであろう。従って、平山や永井の実験で観測されたパターンの方が、小型船によく発生する転覆に近いものと考えられる。

これらは、大規模な砕波による衝撃的なモーメントが支配的な例と言える。しかしながら、そのような衝撃的なモーメントが模型船に作用するには砕波に「タイミング良

く」遭遇することが必要条件となるので、水槽実験でも模型船の微妙な初期位置の変化で転覆が発生しなくなる。実海域においては、このような「大波の発生」と「タイミングの良い出会い」が同時に発生する確率は限られたものと思われるし、小型船の海難事故の調査結果<sup>70)</sup>でもそのような内容の記述はあまり多くないようである。従って、これ以外の第 3 の転覆パターンを考える必要があるだろう。

### 3)-3 大規模でない砕波による転覆

一方、元良等<sup>58)</sup>は密閉式救命艇（船長 8m）の転覆を実験的に研究し、波との出会い位置等によりいくつかの転覆パターンが現れることを指摘している。特に、復原力消失角が比較的小さい場合（60°）には、砕波は主に横流れを引き起こし、転覆は波が通過した後に発生するパターンが多いことを示している。また定兼等<sup>86), 87)</sup>は、転覆現象を過渡横揺れの面から検討するとともに、砕波等による衝撃モーメントが転覆に与える影響について詳細な検討を行っている。

これらの転覆パターンでは、砕波による衝撃力およびモーメントは直接転覆を引き起こしておらず、むしろ次の大波に遭遇する条件を変化させることにより、横揺れを発生させる「引き金」の役割を果たしたものと考えられることができる。このような転覆パターンは、3)-2 に述べたほど希な波との遭遇状況を必ずしも必要としないので、実海域において発生頻度がより高いものと考えられる。

平山等<sup>24)</sup>は、横揺れと同調する規則波に遭遇する場合の初期条件（傾斜角と横揺れ角速度）を種々変化させて計算を行っており、初期条件を変えても同調時の横揺れ角をほとんど越えないという結論を得ているが、1 船型のみでの計算でありそれが一般に成り立つかどうかは確認されていない。一方、定兼等<sup>86), 87)</sup>の研究では、「転覆を起こす 1 波に遭遇する初期条件」によって最大傾斜角が変化することが示され、それが転覆に結びつくことが指摘されている。

このことは、小型船の転覆にとっても重要である。なぜならば、小型船はブルワーク頂部が没水すると急激に復原力が小さくなるので、初期条件による最大傾斜角の増加が大幅なものでもなくとも、それが転覆に与える影響が大きいからである。ブルワークの没水による甲板上滞留水は、その発生が転覆運動の最終段階であるならば単に復原力の低下として扱って良いが、その後船が一度復原した場合には、次の遭遇波による転覆につながる可能性もある。

また、小型船の特徴として、横揺れ減衰力や復原力の面からの検討は行われてきたが、すでに述べたように、軽量浅喫水なため大波に遭遇したときに大きな横流れを生じ

るということも忘れてはならない。このことは剥離を伴う複雑な流場を生じ、それが傾斜モーメントにつながる。従って、このような小型船の性質を踏まえた上で、転覆メカニズムを解明することが必要である。

## I-4 本論文の研究内容と構成

本研究は、上に述べたような視点から砕波による衝撃力とモーメントを評価し、砕波とそれに引き続く大波の中での横揺れの発達過程を明らかにすることにより、小型船が転覆に至る運動のメカニズムを解明し、転覆事故の防止と安全性の向上、ひいては安全基準の合理化に役立てようとするものである。

第II章「砕波による転覆過程の検討」では、転覆発生条件や転覆に至る運動の特徴について述べる。水槽実験により、真横からの集中性過渡水波によって小型船が転覆する限界 GM 値や初期傾斜角、また中心波周期の影響等について整理するとともに、横揺れ運動の発達の様子から転覆パターンを分類しその特徴を検討する。また、時間領域のシミュレーション計算を行い、転覆運動にとって重要な流体力成分や砕波の働きについて考察する。その際、模型船の横流れ速度が非常に大きいことから、強制左右揺れ試験によって計測された左右揺れ-横揺れ連成力の特徴についても述べる。

第III章「左右揺れ流体力に対する船型要素の影響」では、第II章の検討結果から波の山で横流れする時の流体力が重要であること、また小型船の船型がバリエーションに富むことに鑑み、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を行う。その際、左右揺れ-横揺れ連成減衰力に着目し、特にその傾斜角依存性について詳しい検討を行う。また、船体表面の水圧分布の計測結果から、流体力の非線形な振る舞いや、傾斜角によって傾斜モーメントが大きく変化するメカニズムを検討する。

第IV章「船型要素の違いが転覆運動に及ぼす影響」では、第III章で流体力の検討に用いた模型船を集中性過渡水波で動揺させた結果をもとに、チェーン形状やスケグの有無による流体力の違いが、転覆限界波高や船体運動に与える影響について述べる。また、規則波中の動揺特性の違いについても検討する。さらに、砕波による衝撃力の力積およびその着点を評価するために行った実験結果についても述べる。そして、第III章で得

られた流体力等を用いたシミュレーション計算を行い、船型要素の影響を含む小型船の流体力の特徴と転覆に至る運動との関係を明らかにする。

第 V 章「横風と横流れによる傾斜」では、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を受けて、三次元模型船の風圧力計測結果から、横風による抗力と傾斜モーメントの性質について述べる。また、横風によって漂流する時の傾斜角と、波の山で高速に横流れする時の流体力を調べる目的で、模型船を速度一定で強制横流れさせた結果について述べる。その際には、船型要素の影響についても検討を行う。最後に、三次元模型船を用いた横風による自由横流れ試験結果から、上記流体力と小型船の傾斜特性との関係について評価する。

第 VI 章「復原性基準への応用」では、まず現在の我国の小型船舶安全規則および ISO で検討されている新たな復原性基準について概説し、その内容を比較検討する。次に、代表的な基準であり、また風波中での転覆シナリオを陽に扱った唯一の基準である 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、その改良案について述べる。最後に、本研究で用いた模型船に改良案を適用した場合を検証し、その有用性を確認する。

なお、本研究で扱う現象は非線形の強いものである。特に、粘性影響に基づく非線形性については適当な推定法がなく、CFD もこの分野での実績が乏しいことから、多くの実験によって現象の解明を行った。本研究の全体を理解しやすくするため、以下に実験のリストをあげておく。

(1) 三次元模型船を用いた実験

- ① 碎波中転覆実験 (第 II 章)
- ② 周期的左右揺れ時の流体力計測 (第 II 章)
- ③ 横流れ時 (速度一定) の流体力計測 (第 V 章)
- ④ 横風による抗力と傾斜モーメントの計測 (第 V 章)
- ⑤ 横風による自由横流れ実験 (第 V 章)

(2) 二次元模型船を用いた実験

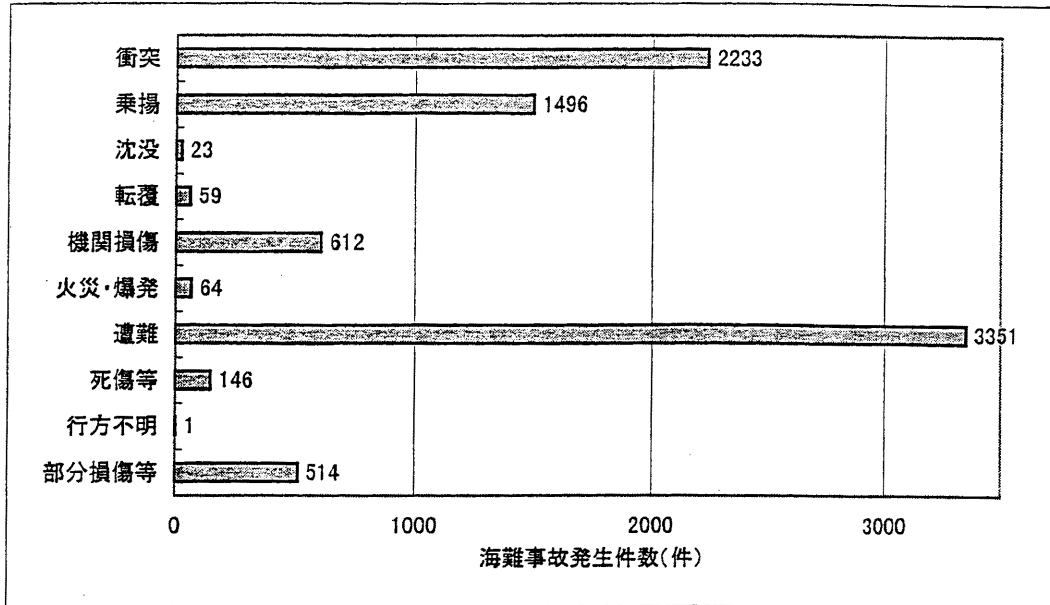
- ⑥ 周期的左右揺れ時の流体力計測 (第 III 章)
- ⑦ 規則横波中の運動計測 (第 IV 章)
- ⑧ 碎波中転覆実験 (第 IV 章)



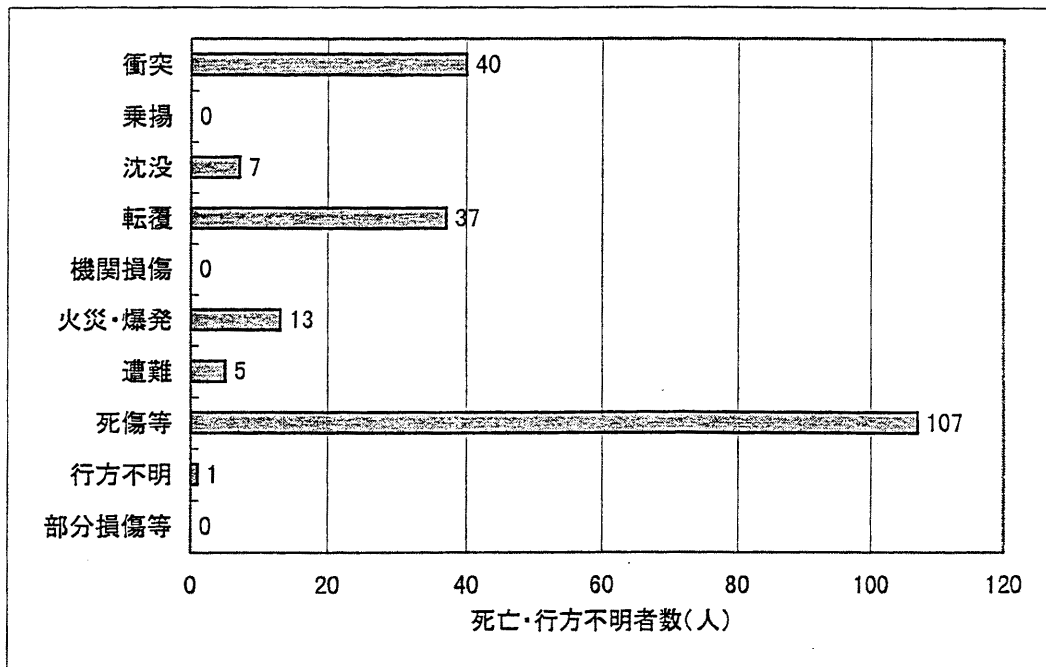
- ⑨ 碎波による衝撃力計測 (第IV章)
- ⑩ 横流れ時(速度一定)の流体力計測 (第V章)

このうち、三次元模型船を用いた実験は、転覆メカニズムの解明を目的とした JCIO の委員会<sup>70)</sup>を契機として始めたものである。標準的な小型船が碎波中で転覆する様子や GM 等のパラメータの影響を調べることを目的に、①碎波中転覆実験を行った。また、転覆メカニズムに対する考察を深めるために、②周期的左右揺れ時の流体力計測を独自に実施した。さらに、③～⑤の実験は風の影響評価を目的としたもので、小型船の復原性を総合的に検討した JCIO の別の委員会<sup>71)</sup>に対応したものである。

二次元模型船を用いた実験は、すべて著者等が独自に行ったもので、小型船の船型がバリエーションに富むことから、その影響評価を試みたものである。船型要素として、船底勾配角、チェーン形状およびスケグの有無に着目し、特に後 2 者の影響評価を行った。また、詳細な水圧分布の計測を行い、転覆メカニズムを検討するための資料とした。



(a) 海難事故発生件数



(b) 死亡・行方不明者数

注) 「転覆」とは、転覆または横転して浮遊している状態をいう。沈んだ場合は「沈没」に分類される。  
「遭難」とは、海難の原因、態様が複合している場合、または他の分類に該当しない場合をいう。  
「死傷等」とは、船舶の構造、設備または運用に関連し、乗員に死傷または行方不明を生じた場合をいう。  
ただし、他の分類に起因する場合を除く。(例：釣客を岩場に降ろす際の転落事故)  
「部分損傷等」とは、「属具損傷」、「運航阻害」など主船体に損傷がない分類をまとめたものである。

図 I-1 海難発生状況

表 I - 1 非損傷時復原性に関する主な規則等

年	日本		IMO (IMCO)	
	貨物船・旅客船	漁船	貨物船・旅客船	漁船
1956 (昭 31)	「船舶復原性規則」			
1964 (昭 39)	「穀類その他の特殊貨物船舶運送規則」	「動力漁船の性能の基準」		
1966 (昭 41)		「漁船載荷基準」		
1967 (昭 42)		「船舶復原性規則」に漁船の復原性要件導入		
1968 (昭 43)			Res.A.167(ES IV)	Res.A.168(ES IV)
1971 (昭 46)	巡視船の復原性基準		Res.A.206(ES VII)	Res.A.207(ES VII) Res.A.208(ES VII)
1972 (昭 47)	防衛庁艦艇の復原性基準	「小型漁船安全基準」		
1973 (昭 48)	カーフェリーの安全対策の強化に関する通達		Res.A.287(ES VIII)	Res.A.267(ES VIII) Res.A.268(ES VIII) Res.A.269(ES VIII)
1974 (昭 49)	「小型船舶安全規則」	「小型漁船安全規則」		
1977 (昭 52)			Res.A.373(X)	トレモリノス漁船安全条約採択
1981 (昭 56)	海底資源屈削船等特殊基準			
1983 (昭 58)			Res.A.534(13)	
1985 (昭 60)			Res.A.562(14)	
1987 (昭 62)	海査 7 号および海査 14 号			
1991 (平 3)				Res.A.685(17)
1993 (平 5)			Res.A.749(18)	
				トレモリノス漁船安全条約発効
1995 (平 7)			MSC / Circ.707	

注1) 本表は、山越の表をもとに追加・修正したものである。

注2) IMO決議番号と表題

- A.167(ES IV) Recommendation on Intact Stability for Passenger and Cargo Ships under 100 meters in Length  
(長さ 100m 以下の旅客船及び貨物船の非損傷時復原性に関する勧告)
- A.168(ES IV) Recommendation on Intact Stability on Fishing Vessels  
(漁船の非損傷時復原性に関する勧告)
- A.206(ES VII) Amendments to the Recommendation on Intact Stability for Passenger and Cargo Ships under 100 meters in Length (Resolution A.167(ES IV)) with respect to Ships Carrying Deck Cargoes  
(甲板貨物を運ぶ船舶に関して長さ 100m 以下の旅客船及び貨物船の非損傷時復原性に関する勧告)
- A.207(ES VII) Recommendation for an Interim Simplified Stability Criterion for Decked Fishing Vessels under 30 meters in Length  
(長さ 30m 以下の甲板付漁船の暫定復原性基準の勧告)
- A.208(ES VII) Recommendation on Construction of Fishing Vessels Affecting the Vessel's Stability and Crew Safety  
(復原性及び船員の安全に影響を及ぼす漁船の構造に関する勧告)
- A.267(ES VIII) Code of Practice Concerning the Accuracy of Stability Information for Fishing Vessels  
(漁船の復原性資料の正確性に関する勧告)
- A.268(ES VIII) Amendments to Recommendation on Intact Stability of Fishing Vessels Appendix V - Recommended Practice on Portable Fish-Hold Division (Resolution A.168(ES IV))  
(漁船の非損傷時復原性に関する勧告 (付録 V 簡易魚倉の仕切りの方法) に対する修正)
- A.269(ES VIII) Recommendation for Skippers of Fishing Vessels on Ensuring a Vessel's Endurance in Conditions of Ice Formation  
(結氷状態における船舶の耐久性の確保に関する漁船の船長のための勧告)
- A.287(ES VIII) Code of Safe Practice for Ships Carrying Timber Deck Cargoes  
(甲板積み木材運搬船に関する安全実施基準)
- A.373(X) Code of Safety for Dynamically Supported Craft  
(動的支持力を有する艇の安全要件)
- A.534(13) Code of Safety for Special Purpose Ships  
(特殊目的船の安全コード)
- A.562(14) Recommendation on Severe Wind and Rolling Criterion (Weather Criterion) for the Intact Stability of Passenger and Cargo Ships of 24 meters in Length and over  
(長さ 24m 以上の旅客船及び貨物船の非損傷時復原性のための激しい横風及び横波の基準 (Weather Criterion) )
- A.685(17) Recommendation on Severe Wind and Rolling Criterion (Weather Criterion) for the Intact Stability of Fishing Vessels of 24 meters in Length and over  
(長さ 24m 以上の漁船の非損傷時復原性のための激しい横風及び横波の基準 (Weather Criterion) )
- A.749(18) Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments  
(通称全船コード)
- MSC/Circ.707 Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situation in Following and Quartering Seas  
(追波および斜め追波中の危険な状況を回避するための船長へのガイダンス)

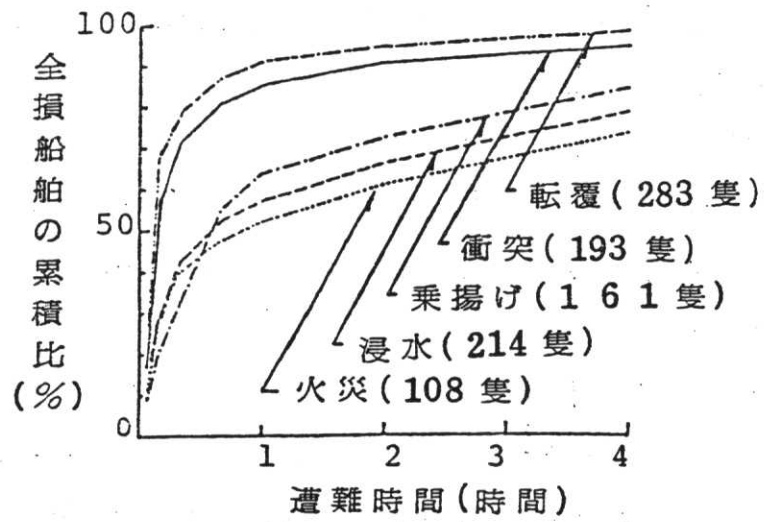


図 I-2 全損海難の種類と遭難時間 (及川、1981)  
 (遭難時間：事故発生から船が完全に沈没・転覆するまでの時間)

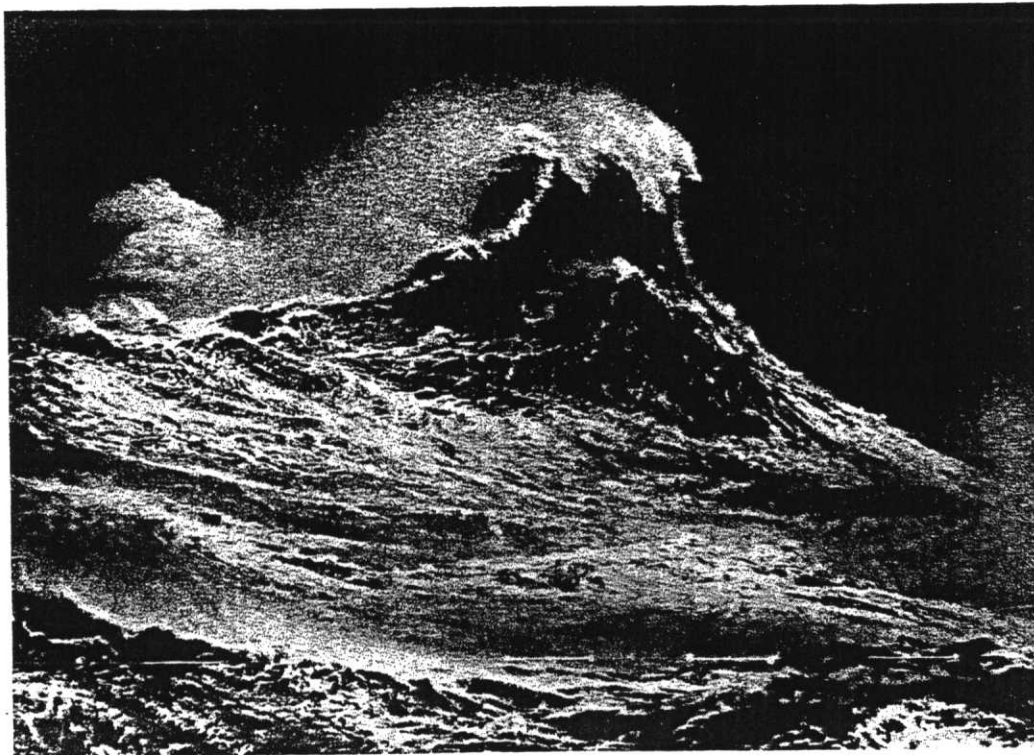


図 I-3 急峻な砕波の観測例 (Kjeldsen, S. O., 1983)

## 第II章 砕波による転覆過程の検討

本章では、転覆発生の条件や転覆に至る運動の特徴について述べる。まず、真横からの集中性過渡水波による転覆実験の結果を整理し、転覆の発生する GM 等の条件を把握するとともに、横揺れ運動の発達の様子から転覆パターンを分類しその特徴を検討する。次に、模型船の横流れ速度が非常に大きいことから、強制左右揺れ試験を実施して左右揺れ-横揺れ連成力の特徴を把握する。そして、得られた流体力を用いて時間領域のシミュレーション計算を行い、転覆運動にとって重要な流体力成分や砕波の働きについて考察する。

### II-1 水槽実験による転覆過程の把握

#### II-1-1 実験方法

##### II. 1. 1. 1. 模型船

転覆実験に使用したのは小型プレジャーボートの約 1/6 の縮尺模型で、日本小型船舶検査機構の委員会<sup>70)</sup>で標準的な船型として選ばれたものである。主要目を表 II -1に、Body Plan を図 II -1に、それぞれ示す。模型船は上部構造も概略再現している。軽量化を図るため、材料には発泡ウレタンを用いた。

#### 1) 実験状態

図 II -2に示すように上下に移動可能な 0.5kg のウェイトを 8 個搭載（船尾は左右両舷に配置）し、表 II -2に示す 10 状態で実験を行った。多くの転覆を観測するため、実船の標準状態に比べ GM は小さくしている。表のうち、C1 から C8 までは重心高さの影響を調べるため徐々に重心を上げたものであるが、C5 と C6 は慣動半径だけを変えている。CL と CW は、定常風や片荷の影響を模擬するため 7.5 度の初期傾斜をそれぞれ波下側、波上側につけた状態で、GM は C1 とほぼ等しい。この傾斜角は、現実に十分起こり得るものとして、標準の GM (0.69m) を持つ実船において定員の 1/4 (75kg/人) が片舷に寄った場合の値を用いた。

#### 2) 横揺れ減衰係数

表中の横揺れ減衰係数は、自由横揺れ試験から得られる減減曲線を 2 次式で近似する方法<sup>95)</sup>により求めた。近似曲線の振幅に比例する係数 (a) と振幅の自乗に比例する係数 (b (deg<sup>-1</sup>)) は、表中の線形成分 ( $\kappa$ ) と角速度の自乗に比例する成分 ( $\beta$ ) との間に次の関係がある。

$$\kappa = \frac{2}{\pi}a, \quad \beta = \frac{3180}{4\pi}b \quad \cdots \text{(II-1)}$$

ただし、水面付近の形状が複雑な船でしばしば見られるように、この模型船では多くの状態で  $a < 0$  となった。しかし、造波減衰成分である a が負の値になることは不合理なので、強制的に  $a = 0$  として解析を行った。

船舶復原性規則では、横揺れ減衰係数として Bertin の N 係数を用い、常に一定値 ( $N = 0.02 \text{ deg}^{-1}$ ) として採用している。N 係数は、次式のように横揺れ振幅  $\bar{\phi}$  の関数として計算される。

$$N = \frac{1}{\bar{\phi}}a + b \quad \cdots \text{(II-2)}$$

JCIO で多くの小型船を調査した結果<sup>71)</sup>では、同規則で想定する 20° の N 係数は平均的には 0.02 に近いこと、ただし船型や GM によるばらつきが大きく 0.05 程度の値も見られること、が指摘されている。本模型船では線形減衰力を無視しているため N 係数は振幅  $\bar{\phi}$  によらず一定であるが、その値は  $N = 0.046 \sim 0.084$  となり、JCIO の結果よりもさらに大き目となっている。

### 3) 復原力曲線

復原力曲線は、計測と計算の両方により求めた。計測には図 II-3 に示す装置を用い、糸が常に鉛直方向を向くようにプーリーの位置を調整しながら傾斜偶力をかけた。浅喫水船では傾斜とともに船体が浮き上がるが、この計測法ではその浮き上がりとトリム変化がともに自由となっている。ただし、この方法は復原力が正の範囲にしか適用できないため、復原力の大きい C1 の状態でのみ計測を行い、他の状態はその結果から換算した。また計算は、各傾斜角における浮力と重量およびトリムモーメントがバランスするよう、船体の浮き上がりとトリムの量を繰り返し計算により求め、その平衡状態における浮心と重心の水平距離を計算したものである。

各状態の復原力曲線の計測値と計算値を図 II-4 に示す。これは、甲板上に設けられている放水口を無視した結果であるが、短時間の間に起こる転覆現象を扱う上ではむしろ

現実に近いと言える。傾斜角  $39^\circ$  付近ではブルワークトップが没水して浮力を失うため、ほとんどの状態で復原力は負となることがわかる。この部分で計測値と計算値に差が見られるが、これは両者の間で傾斜による浮上量やトリム量の変化、あるいはブルワーク形状に若干の差があったためと考えられる。

### II. 1. 1. 2. 計測項目および計測方法

センサー配置は図 II-2 に示したとおりである。ガイド装置の影響を避けるため、運動は非接触の光学式運動計測装置で計測したが、そのマーカとして豆電球をマスト上の 2 個所に配置した。加速度計はほぼ重心位置にあり、上下と左右方向の加速度を計測している。相対水位計は波上側の舷側とハウス側面に取り付けた。水圧計はハウス側面 (P1、P2)、ブルワーク (P3)、その下の船側 (P4、P5)、船底 (P6) のそれぞれ波上側である。また、ビデオ撮影と、一部の実験について連続写真撮影を行っている。

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。実験配置を図 II-5 に示す。ガイド装置の影響を避けるため模型船は自由とし、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。なお、模型船単体に波を当てても方位が大きく変わることはなかったが、これに信号線を付けたところ、線が水面に浮かぶようにしても方位の変化が見られた。そこで、実験者が信号線の端部を適当に横移動させ横波状態を保つようにしたが、模型船の運動に大きな影響はなかったものと思われる。

先に述べた光学式運動計測装置により、模型船の運動（横揺れ、左右揺れ、上下揺れ）を計測した。分解能はカメラの全画面に対し  $256 \times 192$  ドットで、本実験の設定では縦横約  $1\text{cm}$  に相当する。サンプリング周波数は  $60\text{Hz}$  である。波高計は  $30\text{cm}$  間隔で 9 本を設置した。造波機に近い方から WG1～WG9 の番号で表す。模型船の初期位置は 5 通りで、WG2～WG6 の波高計の位置とした。

### II. 1. 1. 3. 集中性過渡水波

集中性過渡水波を用いた水槽実験には、I-3-3 節に述べたものの他にも Clauss 等による一連の研究<sup>たとえは<sup>5)</sup></sup>や竹沢等<sup>97)</sup>の研究があり、転覆現象の解明だけでなく極限波中の船舶・海洋構造物の応答・波浪荷重、あるいは船体運動等の応答関数を効率的に計測する方法が調べられている。また、砕波の性質等については、最近の研究として富田等<sup>104)</sup>のものが詳しい。この研究では、集中性過渡水波による砕波の流場が PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速計) やレーザー・ドップラー流速計等によって調べられ、巻き波的砕波の頂部で水平流速が卓越する様子などが示されている。



上記 Clauss 等や富田等の研究では、波高による波の伝播速度の非線形性を考慮して集中度を上げる方法等が示されているが、ここでは大松の方法<sup>85)</sup>による集中性過渡水波を用いた。この方法は、発生したい波の時間波形をあらかじめ与えられることが特徴で、線形性が成り立つ範囲では良い結果を与えている。本実験では、集中点での波の時間波形が継続時間  $T$  の三角形状になるように造波信号を作成した（図 II-6 参照）。 $T$  は横揺れ固有周期と波高を考慮し 1.5 秒、2.0 秒、2.5 秒の 3 通りとした。非線形影響をできるだけ避けるため、実験領域に入ったところで初めて波崩れを起こすように造波機ストロークを設定した。その波をそれぞれ  $W1.5$ 、 $W2$ 、 $W2.5$  と呼ぶことにする。 $W1.5$  は横揺れ固有周期に近いが、波が崩れるために波高は最も小さい。逆に  $W2.5$  は最も波高が高いが、造波能力の限界から波崩れは起きない。 $W2$  はその中間である。また、 $W2$  については砕波の働きを調べるため、ストロークを約 9 割にして波崩れが起きないぎりぎりの場合も行っている。これを  $W2S$  と呼ぶことにする。すべて集中点が  $WG5$  となるように造波信号を作製した。

図 II-6(a)~(d)に  $WG2$ ~ $WG6$  の時間波形を示す。 $W1.5$  の  $WG2$ ~ $WG6$  と  $W2$  の  $WG2$ ~ $WG3$  で最初の山が鋭く尖っているが、この部分で波崩れが起きている。全体的に意図した三角波形とは言えないが、これは波高が大きいため非線形影響が出ているものと思われる。波が崩れていない  $W2S$  や  $W2.5$  の集中点付近 ( $WG5$ 、 $WG6$ ) では両側に凹部が付いているもののほぼ意図した波になっている。

最大波高は、 $W1.5$  が 30cm、 $W2$  が 43cm、 $W2S$  が 40cm、 $W2.5$  が 48.5cm である。これまで多くの同種実験で転覆発生の限界と言われている船幅と同程度の波高になっている。ここでは  $W2$  の波を基本として実験を行い、その他の波については転覆しやすいと思われる場合だけを行った。

### II-1-2 転覆発生の条件

波の種類、模型船状態および船の初期位置を変え、予備実験的なものも含めて 170 回ほどの転覆実験を行った。そのうちの主な結果をまとめ、転覆の有無を一覧表にしたものが表 II-3 である。ただし、表外の模型船状態は転覆する気配がなかったので省略した。表では、転覆しない場合を○、波下側の転覆を●、波上側の転覆を▲で表す。また、舷側の相対水位がブルワークを越えた場合、記号にアンダーラインをつけている。印が複数なのは、critical な条件で確認実験をしたことを表しているが、再現性はおおむね良好と言える。

なお、相対水位計の記録がブルワークを越えた場合でもスプレーの成分が大部分で

あり、転覆に影響する程の打ち込み水の滞留は見られなかった。表中にアンダーラインをつけたのは打ち込みの判別のためではなく、波が船側に衝突した状態、すなわち衝撃力が作用した可能性の高い状態を区別するためである。

### 1) 初期傾斜のない場合

はじめに、初期傾斜のない C5～C8 の状態を検討する。表 II-3を見ると、大部分の転覆が発生しているのは W2 の波に当たった時であり、限界 GM は 6.40cm (C5 および C6 の状態) となっている。横揺れ固有周期に近く、また波傾斜の大きい (ただし波高はやや小さい) W1.5 の中でも転覆しているが、重心が最も高い C8 の状態に限られる。また逆に、波高が最も高いが波傾斜はやや小さい W2.5 の中でも転覆は発生していない。従って、転覆しやすい波の条件は、①波高が高いこと、②波傾斜が大きいこと、の 2 つと言える。

波との出会位置を見ると、転覆の発生は波高計 WG2 と WG3 の位置に限られていることがわかる。図 II-6から波の時系列を見ると、このとき第 1 波は砕れており、またそれに続く第 2 波も大きい。後に詳述するように、船が転覆するのは第 2 波の上か第 2 波が通り過ぎた直後である。しかし、W2 よりも第 1 波だけが小さい W2S で転覆しないことを考えると、ここで観測された転覆には砕波が関係していること、また単独の波だけでは説明できないことがわかる。

### 2) 初期傾斜のある場合

次に、初期傾斜のついた場合を考える。波下側に 7.5 度の初期傾斜のついた CL の状態を見ると、4 種類すべての波の中で転覆しており、しかも W2S では波との出会位置が広い範囲に及んでいる。CL 状態の GM が大きいことを合わせて考えれば、荷崩れなどによって波下側に傾斜した状態が極めて転覆危険性の高いことがわかる。一方、波上側に 7.5 度の初期傾斜のついた CW の状態を見ると転覆するケースは限られており、波下側ほどの転覆危険性はないと言える。

### 3) 転覆の方向

また、転覆の方向を調べると、表 II-3中には●印が多いことから、波下側への転覆が大部分であることがわかる。波上側への転覆を示す▲印も一部に見られるが、それは波上側に傾斜した状態および重心が非常に高い C8 の状態に限定されている。▲印には必ずアンダーラインが付いていることから、波上側への転覆にも衝撃力が深く関係してい

るようである。

#### 4) 砕波の影響 (W2 と W2S の比較)

最後に、第 1 波が大きい波 (W2) とやや小さい波 (W2S) の中での結果を比較する。前に述べたように、これら 2 つの波の第 2 波には大きな差は見られない。

W2 の第 1 波が崩れる初期位置 (WG2 と WG3) を見ると、初期傾斜がない状態では、波高の高い W2 でのみ転覆するという常識的な結果となっている。しかし、波下側に初期傾斜が付いた状態 (CL) では、逆に波高の低い W2S でのみ転覆している。また、波の崩れない初期位置 (WG4~WG6) を見ると、波上側に初期傾斜が付いた状態 (CW) では、やはり W2S でのみ転覆が発生している。

これらの転覆ケースでも、上に述べたように転覆に直接関係するのは第 2 波であることから、第 2 波に出会うまでの履歴が重要であることがわかる。

#### 5) まとめ

上で述べたことを含め、表 II-3 から導かれる重要なポイントをまとめると、次のようになる。

- (1) 重心が高いほど初期位置に対する転覆範囲が広がる。
- (2) 初期傾斜がない状態では、波高と波傾斜がともに大きいことが転覆の必要条件である。
- (3) 初期傾斜なしで転覆したのは WG2 と WG3 の初期位置だけである。このことは、衝撃力なしでは直立した船が転覆しにくいことを示している。
- (4) 初期傾斜があると転覆しやすくなる。特に波下側傾斜のときに転覆しやすい。波上側に傾斜したときの転覆危険性は、波下側よりもかなり小さい。
- (5) 転覆の方向は波下側が大部分である。
- (6) 砕波を伴う波 (W2) と伴わない波 (W2S) を比較すると、直接転覆を引き起こす第 2 波の波形がほとんど同じであるにもかかわらず、初期傾斜等によって転覆の有無が分かれる。このことは、第 2 波に出会うまでの履歴が重要なことを示している。

なお、Salsich et al.<sup>89)</sup>は、砕波によるヨットの転覆現象を実験的に調べた結果として、転覆限界波高に対する支配的なパラメータは横揺れ慣性モーメントであり、重心高さや横揺れ減衰係数の影響は小さいと結論している。本実験では、表 II-2 に示したように重

心が高くなると慣動半径も大きくなるが、そのために転覆しにくくなる現象は見られなかった（上記(1)）。ヨットにはマストとセンターボードがあるため設計による慣性モーメントの変化が大きいが、非帆船では限定されている。本実験の結果を見る限り、非帆船においては慣性モーメントの影響は小さいと言える。

### II-1-3 転覆パターンの分類と転覆過程の考察

転覆に至る模型船の運動を観察すると、初期傾斜、転覆方向および砕波を受けるか否かによって 4 つのパターンに分類できるようである。これを整理したものを表 II-4 に示す。

以下では、パターン毎に運動と水圧および横加速度の記録を合わせて転覆過程を考察する。以下に示す記号は、 $\phi$  が横揺れ、 $y$  が左右揺れ、 $z$  が上下揺れであり、それぞれ波下側傾斜、波上側、鉛直上方を正としている。なお、横加速度は傾斜による重力の成分を除去していないが、衝撃が作用したごく短時間の現象を調べる上では特に問題とはならない。

#### II. 1. 3. 1. 初期傾斜ゼロで波下側に転覆する場合（パターン A）

##### 1) 運動の特徴

本実験でもっとも多く見られた転覆パターンとして、波が W2、模型船状態が C7、初期位置が WG2 の例を図 II-7(a)~(c) に示す。(a) では模型船をハウス頂部（白丸）からベースラインまでの直線で表し、S 点（スタート）から E 点（エンド）まで 1/3 秒毎に描いている。重心は黒丸で示している。曲線は重心の軌跡である。波は図の右から来ている。(a) の下段のグラフはマストに取り付けた 2 つのマーカの運動から換算した重心位置の上下揺れと横揺れである。また、(b) は波の空間波形と合成して波との位置関係を示したものである。(c) は横揺れ角と横揺れ角速度をそれぞれ横軸と縦軸にとった位相面上の軌跡である。波は図 II-6(b) に示すように 2 つの連続した波になっており、この出会い位置では第 1 波が崩れている。転覆の様子を追って行くと、

- (1) 砕波に当たった模型船はほとんど傾斜せずにドリフトする。
- (2) 谷にはいって波上側に傾斜したところで第 2 波に当たる。
- (3) 波下側傾斜に移り、
- (4) 第 2 波に乗って大きくドリフトしながら徐々に傾斜を増し、波の山から落ちたところで転覆する。

転覆する瞬間に波はほとんど残っておらず、外力はほぼゼロである。また、転覆直前の傾斜角は復原力消失角とほぼ一致している。従って、衝撃による大きなモーメントが作用したのではなく、過去の運動の結果として復原力消失角を越えたために転覆したと言える。図 II-7(c)の軌跡からも、横揺れが徐々に発達していく様子がわかる。この点で、大きな衝撃モーメントによって瞬時に転覆した Dahle 等<sup>9)</sup>や平山等<sup>22)</sup>の実験とは別の転覆パターンになっている。元良等の研究<sup>58)</sup>には「砕波によってドリフトし、その波が通りすぎたところで転覆した」という記述があるが、本実験もそれに似たパターンと考えられる。

この例に限らず、初期傾斜のない時の波下側の転覆は全て上記のようなパターンであり、そのひとつの特徴は砕波が転覆の発生に必要なことである。

## 2) 水圧と横加速度

この場合の水圧および横加速度を図 II-8に示す。横加速度が激しく振動しているのが第 1 波（砕波）に当たった時で、水圧も高いピークを示している。P3、P4 でマイナス側にシフトしている部分があるが、これは水面上にあった水圧計が水で急冷された温度衝撃のためである。加速度には高周波数の振動波形が重畳しているが、これは加速度計が剛性の低い発泡ウレタン製の模型船に取り付けられているためと考えられ、模型船の運動とは無関係なので本論文では無視することにする。

一般に衝撃現象は、水面と構造物がある角度をもって衝突する傾斜衝撃（いわゆる Wagner 型）と、極めて小さい角度で衝突する正面衝撃（同 Bagnold 型）とに大別される。前者は、極めて短時間に高い水圧が作用することや、衝撃水圧のピークが接水点の移動とともに移動することが特徴である。一方後者は、空気巻き込みを伴う結果として衝撃水圧のピーク値がやや低いことや、広い範囲に同時に衝撃水圧が発生することが特徴である。図 II-8で衝撃水圧の時間関係を見てみると、P4 のピークが P5 よりやや遅れている。また、横加速度の急激な立ち上がりが無いことから、衝撃圧が下から上へ走った傾斜衝撃と考えられる。

加速度計が重心付近にあるので横揺れ角加速度の寄与は小さいと仮定して、横加速度から砕波による力積を大まかに評価してみる。まず横加速度は、図 II-8で高周波数の振動成分を除いた mean line の盛上がり、底辺 200 msec、高さ 0.2g の三角形とみなして計算する。次に、模型船の左右揺れの付加質量については、簡単のため元良チャート<sup>59)</sup>を用いることにする。この船は方形係数が 0.47、船長/船幅が 3.8、喫水/船幅が 0.15 である。これは元良チャートの範囲外であるが、外挿すると付加質量係数は 0.5 程度と

なる。以上の数値と模型船の重量 (11.2kg) を合わせると、衝撃による力積は約  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{sec}$  である。この値は水圧のピーク値と比較してかなり小さく、やはり傾斜衝撃を示唆するものと考えられる。

詳しい水圧分布がわからないので衝撃モーメントは正確に評価できないが、力積のオーダーから考えてあまり大きな値ではない。しかし、波崩れがない以外ほぼ同じ波形を持つ W2S で転覆が見られないことは興味深い。定兼等<sup>86),87)</sup>が指摘しているように「転覆するひと揺れの初期条件」が重要であり、第 1 波 (砕波) による衝撃力が第 2 波に出会う条件を微妙に変えたと考えられる。この点については後に詳しく検討する。

### II. 1. 3. 2. 波下側に初期傾斜し波下側に転覆する場合 (パターン B)

#### 1) 運動の特徴

波下側に 7.5 度の初期傾斜のついた模型船 (状態 CL) が、WG2 の位置で波崩れの無い W2S の波に当たって転覆した例を図 II-9(a)~(c) に示す。(a) に示す重心の軌跡はパターン A の後半の部分と似ている。また、(c) の位相面上の軌跡は、一度角速度がゼロとなり、不安定な釣合状態になっているものの基本的にパターン A と同様である。従って、パターン B は第 2 波に遭遇した後パターン A と同様な過程をたどって転覆したことがわかる。しかし、パターン A と対照的なのは、波下側に初期傾斜がついた状態ではすべて第 1 波によるドリフトが小さい場合に転覆していることである。表 II-3 を見ると、すべての位置で波が崩れている W1.5 中でも状態 CL は転覆しているが、その時の横流れはやはり小さい。つまり、初期傾斜の有無によって転覆過程に入るための条件が異なっているわけである。

比較のため、図 II-9(a) から波だけを W2 に変えた場合を図 II-10 に示す。砕波の有無による模型船の運動を両図で比較してみると、第 1 波中のドリフトが大きく異なっていることがわかる。その後、第 2 波による運動はわずかな違いしかないように見えるが、このわずかな差のため復原力消失角を越えるかどうか分かれ、波高が小さい方の波で転覆する結果になっている。場合により、砕波が転覆を押さえる効果を持つことは興味深い。

#### 2) 水圧および横加速度

図 II-9 と図 II-10 に対応する衝撃水圧および横加速度を図 II-11 の (a) と (b) で比較してみる。砕波を受けた (b) では第 1 波との遭遇時 (図中の W1) にパターン A と同様な衝撃波形が出ており、これが図 II-10 に見られるような第 1 波中のドリフトを引き起こし、

後の運動を微妙に変えた一因と考えられる。また、第 2 波（非砕波）による衝撃の大きさも(a)と(b)で異なっている（図中の W2）。転覆した(a)の場合でも大きな力積とは考えられないが、第 2 波との出会い方の違い示すとともに、その後の運動に影響を与えた可能性も考えられる。

### II. 1. 3. 3. 砕波に当たり波上側に転覆する場合（パターン C）

#### 1) 運動の特徴

図 II -12(a)~(c)は W1.5 の波の中で波上側へ転覆した例で、初期位置は WG3 である。波上側に 7.5 度の初期傾斜がついている（状態 CW）が、初期傾斜ゼロの場合（たとえば、波：W1.5、状態：C8、初期位置：WG2）も同様の転覆パターンである。

模型船は、パターン A と同様に第 1 波（砕波）に当たった後に直立したままドリフトし、次の谷で波上側へ傾斜する。ただし、この時はブルワーク頂部がほとんど没水しており、第 2 波にあおられるように波の頂きで転覆している。パターン A と B では第 2 波から波下側のモーメントを受けたが、パターン C ではすでに波上側に大傾斜しているため逆方向の転覆になっている。(c)の位相面上の軌跡はパターン A、B と異なり、第 1 波からすぐに横揺れが発達している。

#### 2) 水圧および横加速度

この時の水圧と横加速度を図 II -13 に示す。衝撃が 2 回発生しているが、1 回目は第 1 波（砕波）に当たった時、2 回目は非砕波であるが第 2 波に当たった時である。1 回目の衝撃では衝撃水圧が船底（P6）からブルワーク（P3）まで同時に発生していることから、水と船体が広い範囲で同時に衝突する正面衝撃が発生したものと考えられる。パターン A と同様に横加速度から衝撃力を推定すると、作用時間はパターン A の 1/2 程度（100msec）、ピーク高さは 2 倍程度（0.4g）であるから、力積としてはパターン A と同程度と考えられ、やはり一挙に転覆させるほどのモーメントではない。衝撃モーメントは、図 II -12(c) で見たように横揺れを急激に発達させるなど、後の運動に影響を与えるものと考えべきであろう。

### II. 1. 3. 4. 砕波なしで波上側に転覆する場合（パターン D）

波上側の転覆は大部分パターン C に分類できるが、図 II -14 に示すような転覆パターンも何例か観測された。これは砕波を伴わない W2S の波の中で波上側へ転覆した例で、模型船状態は波上側に初期傾斜の付いた CW、初期位置は WG5 である。図 II -6(c) に示

したように、WG5 の位置では第 1 波が小さく、第 2 波が大きい。

図 II -15 に水圧と横加速度を示す。第 2 波との遭遇時にはハウス中央の水圧計 (P1) に小さな衝撃圧が発生しているが、他の水圧計に大きな変化が見られないことから、これは飛沫によるものと思われる。また、横加速度に見られる衝撃波形は、模型船が波の谷に落ちた時のものである。

目視によると、砕波でないにもかかわらず第 2 波によって船が大きく加速されている。そのため船は波の山に乗り、大きくドリフトしながら波上側に姿勢を変え、谷に落ちたところで転覆している。位相面上の軌跡を見ると、同じ波上側に転覆したパターン C (図 II -12(c)) とは異なっており、パターン B (図 II -9(c)) とちょうど左右対称で、横揺れが徐々に発達したことを示している。

### II. 1. 3. 5. 衝撃モーメントの評価と転覆機構の考察

以上、転覆に至る運動の特徴、第 2 波との出会い方の重要性、衝撃力の影響等を考察した。本節では、もっとも多く見られたパターン A について、位相面を用いて転覆機構を詳しく検討するとともに、衝撃モーメントの働きを考察してみる。

図 II -7 (波 : W2、模型船状態 : C7、初期位置 : WG2) の運動を、 $z-\phi$  と  $\phi-d\phi/dt$  の 2 つの位相面を用いて図 II -16 に示す。また、波だけを W2S に変えた時の運動を図 II -17 に示し、砕波の有無による運動の違いを比較する。

初期傾斜ゼロであるからどの軌跡も原点から出発し、転覆した場合は  $\phi$  のプラス方向 (波下側) へ発散する。図では時間の経過順に A~D の記号を付けている。第 1 波の山が A、次の谷が B、第 2 波に乗りかかった  $z=0$  の点が C、第 2 波の山が D である。なお、この模型船は軽量浅喫水なので、船の上下揺れ  $z$  は波面の上下動をほぼ表すと考えてよい。

両図を比較してまず気がつくのは、図 II -16(b) において横揺れが渦巻き状に発達することである。このことは、横揺れの運動エネルギーが増加し続けること、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意味している。本研究の最も重要な課題は、どのようなメカニズムによってそのような状態になるかを解明することである。

細かく見て行くと、まず原点から B 点に至る  $z-\phi$  平面の軌跡の違いがわかる。転覆した図 II -16 では横揺れと上下揺れ (横揺れと水面の上下) の間の位相差によって軌跡は楕円を描いている。そのため、第 2 波と出会う B 点で既に波下側の角速度を持っている。一方、図 II -17 では位相差が非常に小さいため、軌跡は直線状になっている。その結果、B 点での角速度はほとんどない。この違いをもたらすものが砕波による衝撃力



と考えられる。

C点での傾斜角と角速度を見てみると、図 II-16では傾斜角ゼロ、角速度最大である。この時波傾斜もほぼ最大であるから外力としての傾斜モーメントが大きい。このような状態は運動が最も発達する条件下にある。一般的な1自由度の強制振動でも、同調点(外力の周期 = 固有周期)では変位との位相差が $90^\circ$ になり、外力と運動速度が同位相になることが知られている<sup>3)</sup>。つまり、C点では一種の同調状態になっているわけであり、このことがその後の傾斜の増加につながったものと考えられる。

一方、図 II-17を見てみると、C点では波上側に傾き相対波傾斜が大きいいため、波から受ける波下側モーメントそのものは図 II-16よりも大きいと考えられる。その後角速度が増加し続けていることはその傍証である。しかし、C点での角速度が小さいため横揺れは十分に発達せず、転覆に至っていない。

このように、砕波による衝撃は次の波に当たる時の条件、位相を調節するという意味で重要な働きをされると考えられる。

## II-2 シミュレーションによる転覆機構の検討

船が転覆に至るメカニズムをさらに深く理解するとともに、復原力、慣性力等の諸量と安全性との関係を把握するためには、シミュレーション計算による検討が必要である。本節では、まず横波中の小型船の転覆現象に適したシミュレーション手法について検討し、次に、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述べる。最後に、運動方程式を構成する各流体力成分が転覆運動に及ぼす影響を時間領域のシミュレーション等により評価し、前節の実験で見られた転覆現象について、その力学的メカニズムを検討する。

### II-2-1 シミュレーション計算の方法

#### II. 2. 1. 1. 船体運動計算法の転覆現象への適用性

まず、現在使われている船体運動計算法について、小型船の転覆運動をシミュレートするという目的に照らして、簡単なまとめを行う。その際留意すべきことは、大振幅運動による非線形影響の扱い方である。非線形影響のひとつは、軽量浅喫水な小型船の水面下形状が傾斜によって容易に変化することである。またもうひとつは、波浪中の横流れが大きいことに関連し、大振幅左右揺れ時の振る舞いである。これについては、左右揺れ-横揺れ連成減衰力が粘性による強い非線形性を持つことが、田中等<sup>99)</sup>によって

指摘されている。

### 1) ストリップ法

船の運動を計算する手法としては、ストリップ法あるいはそれに準ずる定式化がまず考えられる。ストリップ法は微小波高および微小運動の仮定に基づいているが、一般的な船型ではある程度大振幅の運動に対しても比較的良い推定値を与えるとされている。しかし、I-3-3節で述べたように転覆に必要な波高は船幅程度とされており、小型船の中には  $B/d = 9$  ( $B$  は全幅、 $d$  は喫水) を越えるものがあるという現状を考えれば、喫水は波高よりかなり小さい。従って、ストリップ法の仮定は成立しないし、第 IV 章に示す規則波中の横揺れ振幅の計算例では、ストリップ法の推定精度はかなり低いものとなっている。

### 2) 浅喫水浮体の運動計算法

相対的に喫水の小さい浮体である海洋構造物（箱形浮体）やバージ、重量物運搬船についての計算法も種々検討されている<sup>78)</sup>が、浮体の形状表現の正確さ、浅水影響、三次元影響についての改良が主な内容であり、基本的に上に述べたストリップ法の枠組みを越えるものではない。転覆に至るような大振幅の運動を扱うためには、水面下形状の時間変化等による非線形性を扱うことのできる計算法が必要である。

### 3) 時間領域の非線形数値計算法

波高が高い場合に生ずる船体運動や波浪荷重の非線形性は、水面下形状の変化に基づくものが第一義的に重要な場合が多いことから、ストリップ法を改良した実用的な計算法として、時々刻々の水面下形状に対する線形流体力（radiation、diffraction 力）を用い、あるいは Froude-Krylov 力を厳密に計算するような方法が、たとえば藤野等<sup>11)</sup>、King<sup>52)</sup>によって研究されている。また、過渡運動については、メモリー影響関数をたみ込み積分する形の運動方程式において、やはり瞬時瞬時の水面下形状に対する流体力を用いる方法がある<sup>94)、55)</sup>。しかし、上に述べたような強い粘性影響を評価する場合には、特に減衰力について radiation 流体力と diffraction 流体力という分離の合理性に疑問があり、むしろ水との相対運動による定式化が必要となる。

また最近では、強非線形な現象にも適用可能な時間領域の数値計算法が盛んに研究されている。それらは、Navier-Stokes の方程式を解く CFD と、それ以外の方法に大別されよう。

CFD 以外の方法についての解説は、日本造船学会<sup>80)</sup>や内藤等<sup>67)</sup>によるまとめが新しい。その代表的なものは full nonlinear な手法と呼ばれるものであり、自由表面条件や物体表面条件等をほぼ厳密に取り扱うことができる。しかしながら、非粘性・非回転というポテンシャル流の仮定から出発しているため粘性影響を考慮できず、その意味で「full nonlinear ; 完全非線形」と称することには疑問が残る。たとえば谷澤<sup>101)</sup>は、上記条件の線形近似を用いずに流体運動と浮体の運動を連立させて解いているが、粘性流体力を考慮できないため本研究に用いることはできない。

一方 CFD については、耐航性能に関する最近の動向を影本<sup>41)</sup>がまとめているが、上記の非線形性に加えて粘性流場を扱うことが可能なため、将来有望な方法と思われる。しかし、小型船のように角のある物体の大波高中の運動を精度良く推定する段階には至っていない。

また、これらの方法に共通する問題点のひとつとして、砕波領域における計算の不安定性があげられる。波が崩れるということは、実際の流れ場が不安定であることを意味しているため、数値計算上で解が発散することは当然とも言える。これを防ぐために人工的な減衰力を設ける等の工夫が試みられているところであるが、実際の物理現象との対応など明確にすべき課題が残っている。さらに、これらのような圧力をタイムステップ毎に積分する方法は、付加質量、減衰力、連成力などの流体力成分毎に判断することが難しいため、転覆メカニズムを検討しにくいという欠点がある。

### II. 2. 1. 2. 横波中の転覆現象に用いられる船体運動計算法

以上のような問題から、転覆を引き起こす横波の船幅／波長が小さいことを考慮して、流体に対する相対運動によって運動方程式を記述する方法がたとえば平山等<sup>22), 23)</sup>、定兼<sup>88)</sup>などによって用いられ、転覆現象の研究に成果をあげてきた。

#### 1) 平山等の方法

平山等は、計算の簡易化を図る目的から、主に復原力消失角までの復原力曲線を対象船に一致させた等価二次元浮体に対して次の運動方程式を用いた。

$$[A]\{\ddot{X}\} = -[\Delta A]\{\ddot{X}_{RE}\} - [B]\{\dot{X}_{RE}\} + \{F\} \quad \cdots \text{(II-3)}$$

これは、左右揺れ、上下揺れ、横揺れの連立方程式であり、[A]および[ΔA]は質量および付加質量を表す行列、[B]は減衰力を表す行列、{X}は 3 つの運動成分を表すベクトルである。添字 RE は、流体に対する重心の相対運動を表す。また、{F}は Froude-Krylov

力、静水圧による力および砕波衝撃力の和として表される流体力ベクトルで、水面下の船体表面に作用する圧力の積分として時々刻々計算されている。ただし、衝撃力は既知の力積として別に評価されている。

(II-3)式から横揺れの部分を取り出すと、次のようになる。

$$A_{\phi}\ddot{\phi} = -\Delta A_{\phi}\ddot{\phi}_{RE} - (B_{\phi 1} + B_{\phi 2}|\dot{\phi}_{RE}|)\dot{\phi}_{RE} - \Delta A_{\phi x}\ddot{x}_{RE} - B_{\phi x}\dot{x}_{RE} + M_{\phi} \quad \cdots \text{(II-4)}$$

ここで、 $\phi$ は横揺れ、 $x$ は左右揺れである。また、 $A$ 、 $\Delta A$  および  $B$  は、それぞれ行列  $[A]$ 、 $[\Delta A]$  および  $[B]$  のうちの横揺れに関連する部分で、 $M_{\phi}$  はベクトル  $\{F\}$  の 1 要素としての横揺れ強制力である。(II-4)式では上下揺れからの連成影響は陽には入っていないが、 $M_{\phi}$  を計算する過程でその瞬間の水面下形状が反映されることから、静的な部分は含まれるようになっている。

## 2) 定兼の方法

また定兼は、簡略化された次のような 1 自由度の運動方程式を用いている。すなわち、

$$I\ddot{\phi} + 2k_e\dot{\phi}_a + W \cdot GM \cdot f(\phi_a) = IM \quad \cdots \text{(II-5)}$$

$I$  : 横揺れ慣性モーメント、 $k_e$  : 等価線形減衰力、 $W$  : 排水量、

$IM$  : 砕波によるモーメント

ここで  $\phi_a$  は波面に対する相対横揺れ角、 $\phi$  は絶対横揺れ角で、有効波傾斜角  $\phi_w$  との間に、 $\phi = \phi_a + \phi_w$  という関係がある。この式は、流体粒子に作用する遠心力と重力加速度とを合わせた合加速度が波面に垂直に作用するため、自由表面近傍では波面に沿って等圧力面が形成されることを利用したものである。浮体が十分に小さければ、すなわち浮体近傍での流場の空間変化が小さければ、自由表面とともに移動する座標系から見ると、波浪中の横揺れは自由横揺れと同等に扱えることを表している。付加慣性モーメントが含まれていない等若干の問題はあるが、船幅/波長 $\ll 1$ 、喫水/波高 $\ll 1$  の極限においてはほぼ正しい式と考えられる。1 自由度の運動方程式としては、渡辺の有効波傾斜係数  $\gamma$  を用いた方程式<sup>118)</sup>、

$$(I + \Delta I)\ddot{\phi} + 2k_e\dot{\phi} + W \cdot GM \cdot \phi = W \cdot GM \cdot \gamma \bar{\phi}_w \sin \omega t \quad \cdots \text{(II-6)}$$

$\Delta I$  : 付加慣性モーメント、 $\bar{\phi}_w$  : 波の振幅

がよく知られており、流体に対する相対的な左右揺れが小さい範囲において良い結果を与えることが田才<sup>102)</sup>、<sup>103)</sup>によって確かめられている。(II-5)式は、(II-6)式右辺の波強制

力 (Froude-Krylov 力) を左辺第 3 項に含め、復原力に非線形性が現れる大振幅横揺れに拡張したものと解釈することもできる。

(II-4)式および(II-5)式は、基本となる波長が船幅よりも長いという仮定から、radiation 流体力と diffraction 流体力を併せて相対運動により評価している。特に後者は、船をいわゆる floating molecule としてモデル化する簡便な方法なので、汎用性には限界がある。しかし、横波中の転覆メカニズムの解明という点に特化して考えれば、このようなモデル化は有用なものと考えられる。

### II. 2. 1. 3. 本研究で用いるシミュレーション法

#### 1) 計算上の仮定

以上の検討から、本研究では平山、定兼と同様のアプローチをベースに、小型船の特徴を加味した運動方程式を採用する。計算上の仮定および方針をまとめると、

- (1) 船幅は波長に比べて、また喫水は波高に比べて十分に小さい。
- (2) 運動方程式は、流体粒子に対する相対運動で記述する。砕波による衝撃力は外力として別に加える。
- (3) 左右揺れ－横揺れ連成力を運動方程式に含める。その減衰力には、横揺れと同様に相対速度の 2 乗の項を含める。その理由は、角のある物体が大振幅で左右揺れするときには剥離の影響が想定されるからである。
- (4) 幅広浅喫水な小型船が傾斜した場合には水面下の形状が大きく変化するため、流体力係数は相対傾斜角の関数として扱う。
- (5) 小型船は軽量で波面の上下によく追従するため、波面に対する相対上下揺れは小さいと考えられるので、上下揺れ－横揺れ連成力は考慮しない。

#### 2) 運動方程式

上記検討の結果、本研究では次の運動方程式を用いることとした。

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

ここで、

$$\phi = \phi_a + \phi_w$$

$\phi$  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。座標系は、 $y$  軸を静止水面に一致させ  $z$  軸を鉛直上方にとった空間固定座標系を用いた。空間固定の横揺れ角 ( $\phi$ ,  $\phi_a$ ) を用いると、縦揺れおよび船首揺れをした場合にジャイロモーメントを生じるが、その影響は小さいものとして無視した。

この方程式を平山等の方法 (II-4式) と比較すると、まず左右揺れ速度の自乗に比例する連成モーメントを考慮していることが異なっている。また、 $M_\phi$  (II-4式) の Froude-Krylov 力と衝撃モーメントを分離し、前者を相対横揺れに対する復原力  $C_\phi$  の形で簡略化しているが、これは復原力曲線と転覆との関係を直接評価するためである。さらに、平山等の方法では横揺れと左右揺れを連立させて解いているが、本研究では左右揺れ  $y$ 、水粒子の速度  $v_w$  にも実験で得られた時系列を用いている。従って、左右揺れからの連成力は実質的に外力として扱っており、(II-7)式は波面に対する相対横揺れ角  $\phi_a$  だけを未知数とした運動方程式である。

連立方程式としなかった理由は、後に述べるように左右揺れ速度が横揺れにとって極めて重要な役割を果たしているからである。特に、砕波による衝撃力が作用した直後のように急激な運動をする場合の左右揺れを正確に計算することは容易でなく、その推定誤差によって横揺れ運動の推定が影響されることは、転覆のメカニズムを解明するという本研究の主旨から考えて適当ではないからである。この運動方程式を、Runge-Kutta-Gill 法を用いて時間領域で解くこととした。

### 3) 運動方程式に用いた諸係数等

計算に当たって、必要な諸係数はすべて実験値を用いることとした。慣性モーメント  $I$  は、模型船をブランコ状の台に乗せ剛体振り子としての固有周期から求めた。また、付加慣性モーメント  $A_\phi$  と横揺れ減衰係数  $B_{\phi 1}$  および  $B_{\phi 2}$  は自由横揺れ試験から求め、復原力  $C_\phi$  は図 II-4 に示した平水中の値を用いた。なお、横揺れ減衰係数と表 II-2 に示した係数との関係は、次のようになる。

$$B_{\phi 1} = \omega_\phi I k, \quad B_{\phi 2} = I \beta \quad \dots \text{(II-8)}$$

ここに、 $\omega_\phi$  は横揺れ固有角周波数である。

(II-7)式左辺の残りの 2 項は、相対左右揺れ  $v_a$  からの連成モーメントである。これらのうち特に減衰力に関する係数 ( $B_{y1}$ ,  $B_{y2}$ ,  $I_{By}$ ) は、剥離等による非線形な振る舞いが予想されたため、II-2-1節に述べる強制左右揺れ試験を行ってその実験値を用い、す

べて  $\phi_w$  の関数として扱っている。右辺の衝撃モーメント  $IM(t)$  の値は、先に述べた水圧分布から推定した。また、波傾斜  $\phi_w$  にも実験で得られた時系列を用いた。

波傾斜  $\phi_w$  の計算に当たっては、波高計が 30cm 間隔で密に配置されていることから、模型船前後の波高計位置の水面変位を 2 次曲線で近似して空間波形を求め、それを内挿して評価した。また、水粒子の速度  $v_w$  の計算に当たっては、Hilbert 変換を用いる方法<sup>29)</sup>によって水面の変位から線形理論で推定した。簡単に述べると、1 方向へ伝播する波のある点での水面変位を  $\zeta(t)$  とする。これに対し拡張された複素変位を

$$\eta(t) = \zeta(t) + i \cdot \xi(t) \quad \dots (II-9)$$

と定義すると、 $\xi$  は  $\zeta$  の Hilbert 変換

$$\xi(t) = \frac{1}{\pi} \cdot P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad \dots (II-10)$$

で与えられ、流速の水平成分  $v_w$  は、

$$v_w = \frac{d\xi(t)}{dt} \quad \dots (II-11)$$

で計算できる。なお、記号 P は主値を表す。

#### 4) 有効波傾斜係数

運動方程式 ((II-7)式) には明示していないが、上に述べたように本シミュレーションでは波傾斜  $\phi_w$  と波粒子速度  $v_w$  を波の表面で評価しているので、計算に当たってはこれに有効波傾斜係数  $\gamma$  を乗じている。

有効波傾斜係数は、船が波から受ける強制横揺れモーメントを考える場合に、平均値として波の表面よりもやや内部にある sub-surface を基準にする必要があるとの考えから、その修正係数として考案されたものである。渡辺<sup>118)</sup>は、トロコイド波による Froude-Krylov 力を 1 自由度の横揺れ運動方程式 ((II-6)式) の右辺に等しいと置いて  $\gamma$  (以後  $\gamma_w$  と呼ぶ) を評価しており、この方法によって横揺れ振幅がよく説明できることを示している。また水野<sup>57)</sup>は、左右揺れと横揺れの線形連立方程式から出発し、周期解を仮定して左右揺れの影響を含んだ 1 自由度の横揺れ運動方程式を導き、その強制力から  $\gamma$  (以後  $\gamma_0$  と呼ぶ) を評価している。水野はまた、3 種類の Lewis Form 断面について  $\gamma$  を計算し、船型によっては  $\gamma_w$  と  $\gamma_0$  に大きな差があることを示している。

小型船の有効波傾斜係数に関しては池田等の実験<sup>34)</sup>があり、模型の横揺れのみを拘束した波浪強制力試験の結果として、ハードチェーン艇の有効波傾斜係数 ( $\gamma_0$ ) が 0.2

～0.6 となることを報告している。これは、一般商船について言われている 0.7～0.8 と比較して小さい値であり、波の影響を受けやすい水面付近に小型船があることを考えればむしろ逆の傾向である。この原因としては、著者自身も述べているように、横揺れに対する粘性影響や左右揺れ－横揺れ連成流体力の粘性影響等が考えられ、その定量的な説明は容易でない。本研究では、有効波傾斜係数を変化させて比較検討した結果として実験値と最も誤差の少ない値を選び、本章で用いた三次元模型船には  $\gamma = 0.9$  を、また後に述べる二次元模型船には  $\gamma = 0.7$  を採用した。厳密に考えれば、 $\phi_w$  と  $v_w$  に同じ係数を用いることには詳細な検討が必要であるが、同じ sub-surface 上で船が運動していると仮定して、同一の係数を用いることとした。

### II-2-2 左右揺れによる流体力

横揺れ運動方程式を構成する各流体力の内、粘性影響により理論的な推定が困難なもの代表例は横揺れ減衰力であるが、これは自由横揺れ試験によって評価することができる。横揺れの周波数応答関数はその同調周波数付近で鋭いピークを持つことから、自由横揺れ試験による減衰力を広い周波数範囲に使用しても、計算された運動振幅および位相は良い推定値を示すことが知られている。

この他には、小型船の左右揺れ－横揺れ連成減衰力が粘性による強い非線形性を示すことが、田中等<sup>99)</sup>によって指摘されている。先に見たように、転覆に至る模型船の運動では水平方向の運動速度が大きいので、この非線形性を無視することはできないと考えられる。特に、小型船はハードチェーンやスケグなどの角部から剥離流が生じやすく、また傾斜による水面下形状の変化が大きいため、詳細な検討が必要である。そこで、強制左右揺れ試験を行い、左右揺れによる流体力を計測した。

実験は、転覆実験と同じく船舶技術研究所の動揺水槽で行った。調和振動の周期は 2.36 秒とした。この周期は、 $\hat{\omega} = \omega \sqrt{B/2g} = 0.353$  であり、転覆実験時の波周期よりもやや長く、通常左右揺れの造波減衰が小さい範囲であるが、実験当時使用可能だった強制動揺装置の性能上、最も短い周期を選択したものである。振幅は最大 12cm で、転覆実験時の左右揺れ運動をほぼカバーしている。また、この時の KC 数 (Keulegan Carpenter 数、 $KC = V_{MAX}T/2b = \pi \bar{y}/b$ 、 $V_{MAX}$  : 最大速度、 $T$  : 周期、 $b$  : 半幅) は最大 2.20 である。計測項目は、模型船と強制動揺装置との連結部に取り付けられたは三分力計の出力 (横力、上下力、傾斜モーメント) および左右揺れ運動である。



### II. 2. 2. 1. 模型船が直立した場合

#### 1) 解析方法

三分力計から得られた横力および傾斜モーメントを Fourier 解析し、その基本周波数成分を左右揺れ加速度と同位相（運動と逆位相）の成分および左右揺れ速度と同位相の成分に分離して整理した。また、傾斜モーメントは着力点高さの形で整理した。

ここで言う着力点高さとは、減衰力と同位相の傾斜モーメントの振幅を減衰力の振幅で割ったものである。モーメントを決定する量としては、船体側面に作用する合力とその中心位置、底面に作用する合力とその中心位置の 4 つがあるが、計測可能なのは 2 方向の合力とトータルなモーメントの 3 つだけなので、4 つの量すべてを知ることはできない。このような幅広船では側面よりも底面の圧力分布の方がモーメントへの寄与が大きいので、モーメントを代表するレバーを船の幅方向に設定することも考えられるが、重心と着力点の上下関係から傾斜モーメントの方向を理解しやすいので、本論文ではすべて着力点高さの形で整理する。

#### 2) 左右揺れ速度による成分

図 II-18 に示すのは、初期傾斜がない場合の左右揺れ速度と同位相の成分（以下、減衰力成分と呼ぶ）であり、減衰力係数  $\hat{B}_y = B_y / \rho \nabla \cdot \sqrt{B/2g}$  および水面上着力点高さ  $l_{By}$  を喫水  $d$  で無次元化したものをプロットしている。この図から、 $\hat{B}_y$  は振幅  $\bar{y}$  について強い非線形性を示すことがわかる。ほぼ直線状になっていることから、減衰力  $B_y$  は運動方程式（II-7）式）で仮定したように、

$$B_y = B_{y1}\dot{y} + B_{y2}|\dot{y}|\dot{y} = B_{y1}\dot{y} + \frac{1}{2}C_D\rho A|\dot{y}|\dot{y} \quad \dots \text{(II-12)}$$

の形になると考えられる。ただし、 $C_D$  は抗力係数、 $A$  は水面下横投影面積である。

この式の第 2 項を Fourier 級数展開して基本周波数成分の振幅だけを取り出せば、

$$\bar{B}_{y-1} = B_{y1} + \frac{8}{3}C_D\rho A\bar{y}f \quad \dots \text{(II-13)}$$

（ $f$  は動揺周波数）となり、 $B_y$  の基本周波数成分の振幅  $\bar{B}_{y-1}$  は運動振幅  $\bar{y}$  の一次関数となる。従って、実験値を近似した直線の傾きから  $C_D$  を計算することができる。その結果、 $C_D = 0.998$  となった。田中等<sup>98)</sup>は、いろいろな縦横比を持つ二次元四角柱を振動させたときの抗力係数について報告しているが、この  $C_D$  は運動方向に長辺を持つ縦横比 0.3~0.5 の四角柱の抗力係数に近い値となっている。ちなみに、本模型船の没水部分の喫水／幅は約 0.19 である。

図II-18の  $y$  切片がほとんどゼロであることからわかるように、 $B_y$  は主に(II-12)式および(II-13)式の第2項（速度の自乗項）によって占められており、線形減衰力の占める割合は最小振幅 ( $\bar{y}/B = 0.05$ ) でも39%、最大振幅 ( $\bar{y}/B = 0.29$ ) ではわずか9%であった。また、着力点はほぼ船底の位置にあり、振幅による非線形性は比較的小さいと言える。

### 3) 左右揺れ加速度に比例する成分

このときの付加質量係数  $\hat{A}_y = A_y / \rho \nabla$  と、モーメントと横力の比として求められる喫水線上の着力点  $l_{Ay}$  を図II-19に示す。船幅/喫水の大きい船型で一般に見られるように  $\hat{A}_y$  は0.4~0.5と小さく、また着力点は水面上の非常に高い位置になっている。着力点が水面上にあることは一見奇異であるが、これは幅広浅喫水船の特徴として船底の圧力分布の寄与が大きい結果である。このような傾向は、線形計算の結果として Lewis Form のチャートたとえば<sup>48)</sup>、<sup>60)</sup>からも容易に見いだすことができる。振幅による非線形性は  $\hat{A}_y$ 、 $l_{Ay}$  とともに小さく、実用上一定値として扱っても差し支えないと考えられる。

## II. 2. 2. 2. 傾斜角の影響

### 1) 横力と傾斜モーメントの時系列

模型船に傾斜角をつけた場合についても直立時と同様に実験を行った。その際の時系列の例を図II-20に示す。この図の太線はすべて計測値そのものであるため、横力と傾斜モーメントには模型船自身の慣性力が含まれ、また傾斜モーメントは喫水線上9.6cmに取り付けられた三分力計回りの値である。横力を表す(b)図中の流体力は、実験値を Fourier 解析して得た基本周波数成分を加速度および減衰力成分に分離したものであり、前者についてはさらに模型船の慣性力を除いている。(a)図と(b)図の実験値はほぼ同位相なので横力には加速度成分が支配的なように見えるが、(b)図の流体力の比較から、この場合両成分の大きさは同じオーダーであることがわかる。なお、(c)図の流体力および(d)図については、後に説明する。

図II-20からわかるように、横力の波形はほぼプラスマイナス対称な正弦波であるが、傾斜モーメントはプラス側（傾斜角を大きくする側）が大きくなっており、著しく非対称である。傾斜モーメントが最大となるのは、左右揺れ速度が最小値をとる付近（船が傾斜した方向に運動）であること、また Fourier 解析をした場合の位相関係から、この非対称性は減衰力に起因するものであることがわかった。この原因としては、船が傾斜した方向に運動する場合と逆の場合とで、減衰力の着力点（モーメントのレバー）が異

なると考えることが自然である。なぜならば、水面下の船体形状、特に剥離を起こしやすいチャイン部の没水状況が左右非対称であるため、運動方向により船底の圧力分布が異なると予想されるからである。なお、この点については、第 III 章「左右揺れ流体力に対する船型要素の影響」で、水圧分布の計測値に基づき詳しく考察する。

## 2) 解析方法

そこで、図 II-21 に示すように、船が傾斜した方向（プラス側）に横流れする場合と逆の場合とで着力点（モーメントのレバー）が異なると仮定し、それぞれの着力点を  $l_{By+}$ 、 $l_{By-}$  と別々に表記すると、調和振動する減衰力  $F_{yd}$  に対するモーメントの同位相成分  $M_{xd}$  は、

$$F_{yd} = \bar{Y}_d \cos(\omega t)$$

$$M_{xd} = \begin{cases} \bar{Y}_d \cdot l_{By+} \cos(\omega t), & \cos(\omega t) \geq 0 \\ \bar{Y}_d \cdot l_{By-} \cos(\omega t), & \cos(\omega t) \leq 0 \end{cases} \quad \dots \text{(II-14)}$$

と表せる。この  $M_{xd}$  を Fourier 級数展開し、

$$M_{xd} / \bar{Y}_d = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) \quad \dots \text{(II-15)}$$

とすると、直流分  $a_0$ 、基本周波数成分の振幅  $a_1$ 、2 倍周波数成分の振幅  $a_2$ 、3 倍周波数成分の振幅  $a_3$  は、それぞれ次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} a_0 &= 1/\pi \cdot (l_{By+} - l_{By-}) \\ a_1 &= 1/2 \cdot (l_{By+} + l_{By-}) \\ a_2 &= 2/3 \pi \cdot (l_{By+} - l_{By-}) \\ a_3 &= 0 \end{aligned} \quad \dots \text{(II-16)}$$

上式から基本周期成分と 2 倍周波数成分の間の関係を導くと、

$$\pi a_0 = 3 \pi / 2 \cdot a_2 \quad \dots \text{(II-17)}$$

となる。図 II-22 に示す例のように  $a_0$  と  $a_2$  は運動振幅にほぼ比例し、その比は上式をほぼ満足しているので、着力点が左右非対称になるという上記の仮定はおおむね妥当であることがわかる。

この解析方法によって減衰力の着力点を求め、また加速度成分の着力点については基本周波数成分から評価し、図 II-20(b) の 2 つの流体力成分にそれぞれ掛けて傾斜モー

メントを計算したものが同図の(c)と(d)である。(c)図から、減衰力成分のモーメントが運動方向により大きく変化することがわかる。なお、加速度成分によるモーメントが極めて小さいが、これは後に示すように着力点が高い位置にあるため、三分力計に対するレバーが小さいことが理由である。一方(d)図は、実験値と直接比較するため、流体力に模型船の慣性力によるモーメントを加えた結果を示している。この(d)図からも、この解析法がおおむね妥当であることがわかる。

### 3) 解析結果

上記の解析方法によって得られた各流体力と傾斜角との関係を、図 II-23 と図 II-24 に示す。ただし、左右揺れの線形減衰係数は前節で述べたように値が小さく、また傾斜角にほとんど依存しないことから省略した。図 II-23 では、運動方向による着力点の非対称性を傾斜角  $\phi$  の符号に置き換えて表示している。すなわち、傾斜した方向に模型船が運動する場合を  $\phi > 0$ 、逆方向に運動する場合を  $\phi < 0$  として整理した。なお、図 II-23 では抗力係数も正負の  $\phi$  について表示しているが、これは同一の値を対称に表示して見やすくしたものである。

これら 2 つの図では各流体力とも傾斜角に対する依存性が認められるが、特に抗力成分の着力点  $l_{By}$  の変化が著しい。 $l_{By}$  が傾斜角に対して右下がりの曲線になっていることは、水線面回りのモーメントで考えた場合、船が左右どちらに運動しても傾斜を大きくする方向に連成モーメントが作用することを示している。特に傾斜角が小さい範囲では曲線の傾きが大きいため、傾斜するほどモーメントが大きくなるという不安定な性質が顕著になる。小型船は一般に重心が水面上の比較的高い位置にある。従って、特に傾斜した方向に横流れするときには、大きな傾斜モーメントが作用することになり、注意が必要である。

II-1-2 「転覆発生の条件」では、波下側に初期傾斜がある場合に転覆危険性が高いことを述べたが、それは復原力消失角までの余裕と動的復原力（復原力曲線の面積）が小さいからだけでなく、このような流体力の性質（不安定モーメント）が関連している可能性が考えられる。

### II. 2. 2. 3. まとめ

以上述べたように、本 II-2-2 節では、小型船に特徴的な性質を示す流体力として、左右揺れ時に作用する流体力の計測を行った。この実験の大きな特徴は、模型船の傾斜角をパラメータとしてその影響を調べたことである。その結果、次のことが明らかになっ

た。

- (1) 左右揺れの減衰力には振幅による強い非線形性が存在し、減衰力の主要部分は速度の自乗に比例する抗力成分によって占められる。
- (2) 傾斜した船が左右揺れする場合、傾斜モーメントの時系列は正負非対称になる。この現象は、減衰力の着点位置が運動方向によって異なるものと解釈することができる。
- (3) 減衰力の着点位置は、傾斜した方向に船が進む場合に低くなり、逆の場合に高くなる傾向である。このことは、水線回りで考えた場合、ほとんど常に傾斜を大きくする方向に不安定なモーメントが作用することを意味する。
- (4) 加速度に比例する成分については、水面下の形状が幅広浅喫水であることを反映し、付加質量係数は 0.5 程度と小さく、着点位置は水面上の高い位置（喫水の 2 倍程度）にあった。
- (5) 抗力係数、付加質量係数およびその着点位置も傾斜角によって変化するが、その変化率は減衰力成分に比較して小さい。

なお、上に述べたような性質は、船型要素の微妙な違いによって変化する可能性があるため、これが一般的に成り立つ保証はない。そこで、第 III 章「左右揺れ流体力に対する船型要素の影響」では、船底勾配角、チェーン形状およびスケグの有無の影響について述べるとともに、水圧分布の計測結果からこれらの性質の発生メカニズムを考察する。

### II-2-3 転覆運動の力学的メカニズム

本節では、II-2-1節で提案したシミュレーション手法をII-1-3節で示した4つの転覆パターンに当てはめて、その有効性を検証するとともに、転覆メカニズムのより詳しい説明を試みる。その際、左右揺れ-横揺れ連成力は、速度成分、加速度成分とも前節で述べた実験結果を用い、相対横揺れ角  $\phi_a$  の関数として取り扱っている。

(II-7)式を変形し、

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} = & A_{\phi} \ddot{\phi}_w - (B_{\phi 1} + B_{\phi 2} |\dot{\phi}_a|) \dot{\phi}_a - C_{\phi}(\phi_a) \\ & - A_y I_{Ay} \dot{v}_a - (B_{y1} + B_{y2} |v_a|) I_{By} v_a + IM'(t) \end{aligned} \quad \dots (II-18)$$

として、右辺各項の寄与を調べた。なお、右辺の各係数に「 $\cdot$ 」がついているのは見掛け慣性モーメント  $I + A_{\phi}$  で除したことを表す。

### II. 2. 3. 1. 初期傾斜ゼロで波下側に転覆する場合 (パターン A)

図 II -25は水槽実験でもっとも多く見られたパターン A の例で、初期傾斜ゼロの模型船が砕波と非砕波を連続して受けて波下側に転覆した図 II -7に相当するものである。図 II -25 (a)には横揺角  $\phi$  の計測値と計算値を比較して示した。また、(b)および(c)は、それぞれ左右揺れおよび上下揺れの計測値である。(d)~(i)は、(II-18)式の各項によって生じた角加速度 (モーメント) を示している。ただし、横揺れ減衰力 ((II-18)式の右辺第 2 項) と、左右揺れ減衰力による連成モーメント (同第 5 項) については、線形成分と非線形成分をまとめて  $e$  の添字をつけて表現した。なお、本船は水面変位によく追随するので、(b)は出会波の時系列と考えることもできる。また、図中の S と E の記号は、図 II -7(b)の S (スタート点) と E (エンド点) に対応するものである。

砕波による衝撃モーメントについては、水圧および横加速度の記録から概算した。II.1.3.1節では横加速度から力積を  $0.3\text{kg}\cdot\text{sec}$  と概算したが、その力積の着力点は、水圧の記録 (図 II -8) から水線付近にあると考えられる。そこで、重心の水面上高さをレバーとして、砕波に当たった瞬間に  $-0.05\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$  (波上側) の力積モーメントを作用させた。

図 II -25を見ると、横揺れ  $\phi$  の計算値は、波の谷に入ってから計測値に比べて若干の時間差を持つようになるが、おおむね転覆に至る運動を説明している。転覆直前に模型船が第 2 波に乗って大きく横流れしているが、そのときには模型船の速度が波粒子の速度を上まわっており ( $v_{\phi} < 0$ )、また、模型船が進行方向に傾斜していることから着力点が低くなるため、(h)に示すように抗力成分による大きなモーメントが作用していることが特徴的である。試みに  $C_D = 0$  として計算したものを図 II -26に示すが、第 2 波の上で復原し転覆には至っていない。以上の検討から、左右揺れの抗力成分によるモーメントが無視できず、転覆に大きく寄与していたことが明らかとなった。

また、砕波の影響を調べるために  $IM = 0$  として計算したものを図 II -27に示す。砕波によるモーメントは波上側に傾斜させる方向なので、これがないと第 1 波上での傾斜はむしろ大きくなるが、その分第 2 波に遭遇する際の横揺れの位相が遅れ、やはり転覆しないという結果になった。

以上の検討結果から、II.1.3.5節で位相面を用いて検討した結果と合わせ、パターン A の転覆機構は次のように考えることができる。すなわち、第 1 波 (砕波) による衝撃力を受けた船の運動は、波との位相差等の点で衝撃力を受けない時と微妙な違いを生ずる。そのため、次の波からエネルギーを吸収しやすい、一種の同調状態 (外力と運動速度が同位相になる状態) になる条件で第 2 波と出会う。また、第 2 波の山の付近では波下に

傾斜しながら横流れするため、着地点が低下して波下側の連成モーメントを受ける。その結果横揺れが発達し続け、復原力消失角を越えて転覆したものと推定される。

### II. 2. 3. 2. 波下側に初期傾斜し波下側に転覆する場合 (パターン B)

次に、図 II-28 に示したのは、片荷状態にして波下側に 7.5 度の初期傾斜をつけた模型船 (状態 CL) が連続した非砕波 (W2S) を受けて波下側に転覆した場合であり、前出の図 II-9 に相当する。II-1-3 節でパターン B と呼んだもので、これもかなり多く見られた転覆パターンである。

図 II-28 (a) を見ると、転覆に至る横揺れ運動の計算値と計測値はおおむね良い一致を示していることがわかる。また、転覆に至る過程については、II.1.3.2 節で重心の軌跡と位相面上の軌跡を比較し、パターン A (図 II-7) とパターン B (図 II-9) が似ていることを述べた。図 II-28 の (d)~(h) に示した各流体力成分を図 II-25 (パターン A) と比較しても、やはり似た波形になっていることがわかる。たとえば、図(e)に示した横揺れ減衰力は、第 2 波の昇り斜面 (図 II-25 では 6.2 秒、図 II-28 では 4.6 秒) でともに極小値になっているし、図(f)に示した復原力は、第 1 波と第 2 波の間の谷を過ぎた時点 (図 II-25 では 5.7 秒、図 II-28 では 4.2 秒) でともに極大値を持っている。また、左右揺れ減衰力による連成モーメントは、両パターンとも横揺れ減衰力が最小値を取る時点で大きくなり、横揺れ減衰力による模型船の復原を打ち消すように作用している。第 2 波に遭遇した後のこのような類似性から考えて、両パターンは同様な横揺れの発達過程を経て転覆したことがわかる。

パターン A と同様に  $C_D = 0$  として計算したものが図 II-29 であるが、やはり転覆に至っておらず、パターン B でも左右揺れの抗力成分によるモーメントが重要であることがわかる。

なお、図 II-28 の 5 秒付近では横揺れ角速度がほぼゼロとなっているが、この時点で模型船は波の山にあるため波面の傾斜角はほぼゼロであり、船の傾斜角 (約 40° 程度) が復原力消失角と一致していることから、ごく短時間不安定な釣り合い状態になっていたものと思われる。

### II. 2. 3. 3. 砕波に当たり波上側に転覆する場合 (パターン C)

図 II-30 に示したのは、波上側に 7.5 度の初期傾斜をつけた模型船 (状態 CW) が周期の最も短い W1.5 の波の中で波上側へ転覆した例である。II-1-3 節でパターン C と呼んだもので、運動および位相平面は図 II-12 に示したとおりである。模型船の初期位置は

WG3 で、この位置では第 1 波の岨度が大きく波頂が崩れている。

図 II -30(i)に示した砕波による衝撃モーメントは、パターン A の場合と同様に、水圧および横加速度の記録から概算したものを使用した。II.1.3.3節で検討したように、第 1 波に出会う時の力積はパターン A と同程度と考えられる。また、その着力点は、衝撃水圧の分布状況（図 II -13）から、やはりパターン A と同様に水線付近と考えられる。そこで、パターン A と同じ  $-0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}$ （波上側）の力積モーメントを作用させることとした。ただし、作用時間は 100msec で、パターン A の 1/2 である。また、第 2 波に出会う時に発生する 2 回目の衝撃は、同様に横加速度の mean line の盛り上がりの面積から、1 回目の 1/2 の力積を持つものと仮定した。

図 II -30で特徴的なのは、(e)~(h)に示した流体力（横揺れ減衰力、復原力、左右揺れからの連成モーメント）が、パターン A および B に比べて小さいことである。流体力が小さいことは、流体に対する相対運動が小さい結果と考えるのが一般的であるが、横揺れ減衰力を除く(f)~(h)に関しては、もう少し解釈を加える必要がある。

復原力（図(f)）および左右揺れ減衰力からの連成モーメント（図(h)）が小さいのは、模型船が波面に対して波下側にほとんど傾斜しなかったことが理由と考えられる。図 II -4に示したように、初期傾斜を持つ場合の復原力曲線は極めて非対称性が強いため、状態 CW の模型船が波上側に大傾斜しても大きな復原力は発生しない。また、傾斜と逆方向に横流れする場合には減衰力の着力点が高くなり、重心回りのモーメントレバーが小さくなるので、やはり大きな連成モーメントは発生しない。さらに、左右揺れ加速度に比例する成分（図(g)）は、傾斜角によらず常に着力点が水面上にあるため、連成モーメントが大きくなりにくい流体力である。従って、これら流体力が小さいことには、小型船の特徴的な性質が含まれていると言える。もし、左右揺れ減衰力の着力点が傾斜角によらず常に水面下にあったとすれば、模型船を復原させる方向の連成モーメントが発生した筈である。

砕波による衝撃力の影響を比較検討するため、IM=0 として計算した結果を図 II -31に示す。この場合には、波の山（3 秒付近）で船がほぼ直立しているため、左右揺れ減衰力による連成モーメント（図(h)）がプラス側に作用しているが、同時に逆方向の復原力（図(f)）が作用するため、船はやはり波上側に傾斜していく。しかし、横揺れ減衰力（図(e)）が図 II -30より大きいこともあり、その速度はゆるやかである。そして、3.3 秒以降を見ると、継続して復原力が作用するため転覆には至っていない。

以上の検討からパターン C の転覆の原因をまとめると、直接的なものとしては、片荷状態のため復原力の余裕が小さいことと、第 2 波に出会う時に作用する衝撃モーメン



トがあげられる。また、間接的には、砕波による衝撃力によって、復原力や左右揺れからの連成力が発生しにくい状態になったことが原因と言える。

#### II. 2. 3. 4. 砕波なしで波上側に転覆する場合（パターン D）

最後に図 II-32 に示したのは、波上側に 7.5 度の初期傾斜をつけた模型船（状態 CW）が砕波を伴わない W2S の波の中で波上側へ転覆した例である。II-1-3 節でパターン D と呼んだもので、運動および位相平面は図 II-14 に示したとおりである。模型船の初期位置は WG5 で、図 II-6(c) に示したように、この位置では第 1 波が小さく、第 2 波が大きい。

第 2 波の山に遭遇する 3.3 秒以降について図 II-32 から流体力を調べると、転覆する方向、すなわちマイナス側に作用する有意なモーメントは復原力だけである。波の山では模型船が波下側に傾いているため、復原力はマイナス側の大きな値となっている。その後下り斜面にかけては、波傾斜の角加速度成分（図(d)）や横揺れ減衰力成分（図(e)）がプラス側に作用しているが、模型船の傾斜角の増加を止めるには至っていない。波の谷（6.2 秒付近）では一旦運動が小さくなっているが、すでに復原力消失角を越えているため、マイナスの復原力が働いて転覆する結果となっている。

従って、パターン D の転覆では、第 2 波の山で船が波下側に傾斜することにより波上側の大きな復原力が作用し、その時に発達した横揺れ角速度によって復原力消失角を越えたものと考えられる。

#### II. 2. 3. 5. まとめ

以上、本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、4 つの転覆パターン毎に転覆に至る力学的メカニズムを考察した。その結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 波下側に転覆するパターンには、第 1 波が崩れているパターン A（初期傾斜なし）と崩れていないパターン B（初期傾斜：波下側）とがあるが、直接転覆を引き起こす第 2 波に遭遇した後は同じような過程を経て転覆する。

すなわち、第 1 波中の運動の履歴から、波からエネルギーを吸収しやすい、一種の同調状態（外力と運動速度が同位相になる状態）になる条件で第 2 波と出会う。また、第 2 波の山の付近では波下に傾斜しながら横流れするため、左右揺れ減衰力の着地点が低下して波下側の連成モーメントを受ける。その結果横揺れが発達し続け、復原力消失角を越えて転覆したものと推定される。

- (2) 砕波を受けて波上側に転覆するパターン C（初期傾斜：波上側  $7.5^\circ$ ）では、流体と船との相対運動によって作用する 4 つの流体力がすべてかなり小さいのが特徴である。4 つの流体力とは、①横揺れ減衰力、②復原力、③左右揺れ加速度成分からの連成モーメント、および④左右揺れ減衰力からの連成モーメント、である。このうち、③と④が小さいのは小型船の特性から来るものである。また、②と④が小さいのは船がほとんど常に波上側に傾斜していたためで、これには砕波による衝撃モーメントの影響がある。

第 1 波との遭遇時に衝撃モーメントを受けた模型船は、このような流体力を受けにくい状態に陥って横揺れが発達し、最後に第 2 波に出会う時に 2 回目の衝撃モーメントを受けて転覆したものと考えられる。

- (3) 砕波を受けずに波上側に転覆するパターン D（初期傾斜：波上側）では、第 2 波の山で船が波下側に傾斜して、大きな波上側の復原力が作用することが特徴である。その時に発達した横揺れ角速度によって一挙に復原力消失角まで傾き、転覆したものと考えられる。

### II-3 第 II 章のまとめ

本章では、転覆発生の条件や転覆に至る運動の特徴を把握するために行った水槽実験結果について述べた。転覆事故の多い小型船の代表として全長 7.87m のプレジャーボートの模型を選び、波、重心高さ、初期傾斜および初期位置をパラメータとして横波中転覆実験を行った。また、模型船の横流れ速度が非常に大きいことから、強制左右揺れ試験を実施して左右揺れ-横揺れ連成力の特徴を調べた。そして、得られた流体力を用いて時間領域のシミュレーション計算を行い、転覆運動にとって重要な流体力成分や砕波の働きについて考察した。その結果、次のことが明らかになった。

転覆が発生する条件については、

- (1) 船の幅と同じ程度の最大波高を持つ連続した波の中で多くの転覆が発生した。重心が高いほど転覆しやすい傾向であり、それに伴う慣動半径の変化の影響は小さい。
- (2) 初期傾斜がない場合、いわゆる一発大波に近い波形よりも連続した 2 つの大波の方が転覆しやすい。転覆した時は必ず砕波に当たっており、衝撃力が作用することが必要条件になっている。

- (3) 初期傾斜があると転覆しやすくなる。つまり、定常風を受けた時や片荷の時には GM が大きくても転覆の危険性がある。特に波下側傾斜の時に転覆しやすい。その理由としては、復原力消失角までの余裕が少なくなることがまず考えられるが、特に波下側傾斜の場合には、以下の(6)~(8)に述べる流体力の性質も関係する。
- (4) 波下側への転覆が大部分であるが、波上側へ初期傾斜がある場合や重心が高い場合には波上側に転覆することもある。
- (5) 初期傾斜のついた時には、波高がやや低く砕波のない波の方が転覆を起こしやすい場合がある。

大振幅左右揺れ時に作用する流体力については、

- (6) 左右揺れの減衰力には振幅による強い非線形性が存在し、減衰力の主要部分は速度の自乗に比例する非線形成分（抗力成分）によって占められる。
- (7) 左右揺れの減衰力の着点力は、傾斜角によって大きく変化する。傾斜した方向に船が進む時には着点力が水面下の低い位置になり、逆方向に進む時には着点力が水面上の高い位置になる。高い位置にある小型船の重心との関係から、前者の場合には傾斜を助長する方向に大きな連成モーメントが作用する。また、後者の場合には、モーメントはかなり小さくなる。
- (8) 特に傾斜角が小さい場合、この連成モーメントは、船が傾斜するほど傾斜を増大する方向に働くという不安定な性質を示す。
- (9) 他の流体力係数にも傾斜角に対する依存性が見られるが、左右揺れ減衰力の着点ほど大きな変化はない。

また、転覆パターンと転覆機構およびシミュレーション手法については、

- (10) 転覆に至る模型船の運動から、初期傾斜、転覆方向および砕波を受けるか否かによって4つのパターンに分類することができる。 $\phi - d\phi/dt$  の位相面上で比較すると、徐々に横揺れが発達するパターン A、B、D のグループと、急激に横揺れが発達するパターン C に大別できる。
- (11) パターン A（初期傾斜なし、波下側に転覆、第1波：砕波）

最も多く観測されたパターンである。波崩れを伴う第1波中の運動の履歴によって、波からエネルギーを吸収しやすい一種の同調状態になる条件で第2波と出会うことにより、発達した傾斜角が復原力消失角を越えて転覆する。また、第2波の山の付近では波下に傾斜しながら横流れするため、左右揺れ減衰力の連成モ

ーメントが波下側に作用して、横揺の発達に大きく寄与する。

(12) パターン B (初期傾斜：波下側、波下側に転覆、第 1 波：非砕波)

第 1 波が崩れていないため衝撃力を受けないが、第 2 波に遭遇した後はパターン A と同様な過程によって転覆する。この場合、砕波を作用させると、第 2 波に遭遇する条件が変化して転覆しなくなる。

(13) パターン C (初期傾斜：波上側、波上側に転覆、第 1 波：砕波)

第 1 波との遭遇時に衝撃モーメントを受けることにより、流体と船との相対運動による流体力を受けにくい状態に陥って横揺れが発達し、第 2 波に出会う時に 2 回目の衝撃モーメントを受けて転覆する。上記流体力が小さいことには、小型船の流体力の特徴が関係している。

(14) パターン D (初期傾斜：波上側、波上側に転覆、第 1 波：非砕波)

このパターンでは、第 2 波の山で船が波下側に傾斜して、大きな波上側の復原力が作用することが特徴である。その時に発達した横揺れ角速度によって一挙に復原力消失角まで傾き転覆する。

(15) 本論文で提案したシミュレーション手法により、集中性過渡水波中の小型船の転覆運動をおおむね評価することができる。衝撃力が作用する際には、横加速度から力積を概算し、その着力点を水線付近と仮定することにより、合理的な結果を得ることができた。

(16) 前項の概算から、衝撃モーメントはすべて波上側に作用すると評価しているが、波下側の転覆はもとより、波上側の転覆でも、衝撃モーメントによる瞬時の転覆は見られない。転覆の原因は、連続した波により大振幅の横揺れが励起された結果、傾斜角が復原力消失角を越えたことである。

(17) 直接転覆を引き起こすのは第 2 波であるが、その波と出会う時の船の状態の微妙な差が転覆を左右する。その意味で、第 1 波中の運動も転覆に大きな役割を果たしている。従来の研究は主に転覆を引き起こす 1 波に着目しているが、転覆現象を複数の波の連なりの中でとらえることも必要と思われる。

(18) 砕波による衝撃モーメントは船の動的復原力に比べて大きなものではないが、その後の運動に影響を与えるという意味で重要である。また、衝撃力によって横揺れが誘起される効果も無視できない。砕波による衝撃は「転覆する 1 波」に遭遇する前であっても船を転覆させる誘因になり、また時には転覆を押さえる働きをすることもある。

表Ⅱ-1 模型船の主要目

	SHIP	MODEL (1/6.054)
$L_{oa}$ (m)	7.87	1.300
B (m)	2.47	0.408
D (m)	1.17	0.193
d (m)	0.27	0.053
W (kg)	2500	11.20
GM (m)	0.69	0.082~0.055
$T_{\phi}$ (sec)	3.41	1.28~1.74

$T_{\phi}$  : Rolling period

表Ⅱ-2 実験した模型船の状態

Condition	GM(cm)	heel(deg)	$T_{\phi}$ (sec)	$k_{xx}/B$	$\kappa$	$\beta$	$\phi_v$ (deg)
C1	8.19	0	1.28	0.401	0	3.44	39.8
C2	7.74	0	1.31	0.408	0	2.75	38.9
C3	7.30	0	1.34	0.413	0	2.84	38.6
C4	6.85	0	1.38	0.417	0	3.18	38.4
C5	6.40	0	1.44	0.416	0	3.61	38.1
C6	6.40	0	1.46	0.434	0	2.66	38.1
C7	5.96	0	1.53	0.433	0	3.01	35.3
C8	5.51	0	1.74	0.448	0	3.03	31.6
CL	8.07	7.5 l. side	1.41	0.400	0	1.99	38.3
CW	8.07	7.5 w. side	1.41	0.400	0	1.99	38.3

$T_{\phi}$  : Rolling period,  $\phi_v$  : Stability vanishing angle (calculated)

表 II-3 実験条件と転覆の有無

Wave		W1.5				W2				W2S				W2.5					
Condition		C7	C8	CL	CW	C5	C6	C7	C8	CL	CW	C7	C8	CL	CW	C7	C8	CL	CW
Initial Position	WG2	○	▲	○		●	●	●	●	○		○	○	●		○	○	●	
	WG3	○	▲	○	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
	WG4	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	▲	○	○	○	○
	WG5	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●	▲	○	○	○	○
	WG6	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○

○ : No Capsize

● : Capsize (Lee Side)

▲ : Capsize (Weather Side)

○ ● ▲ : Water over Bulwark

表 II-4 転覆パターンの分類

		Breaking		Non breaking	
		●	▲	●	▲
Initial heel	7.5° L	—	—	B	—
	0	A	C	—	—
	7.5° W	—	C	—	D

● : Capsize to Lee Side

▲ : Capsize to Weather Side

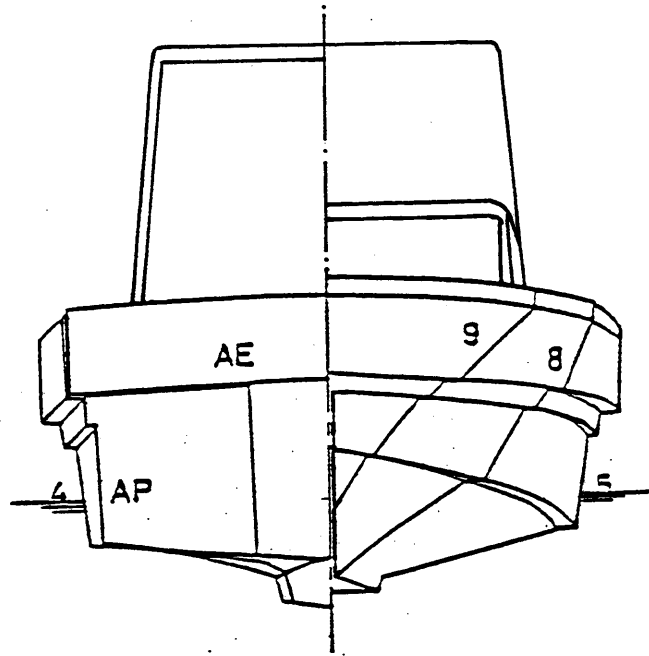


図 II-1 Body Plan

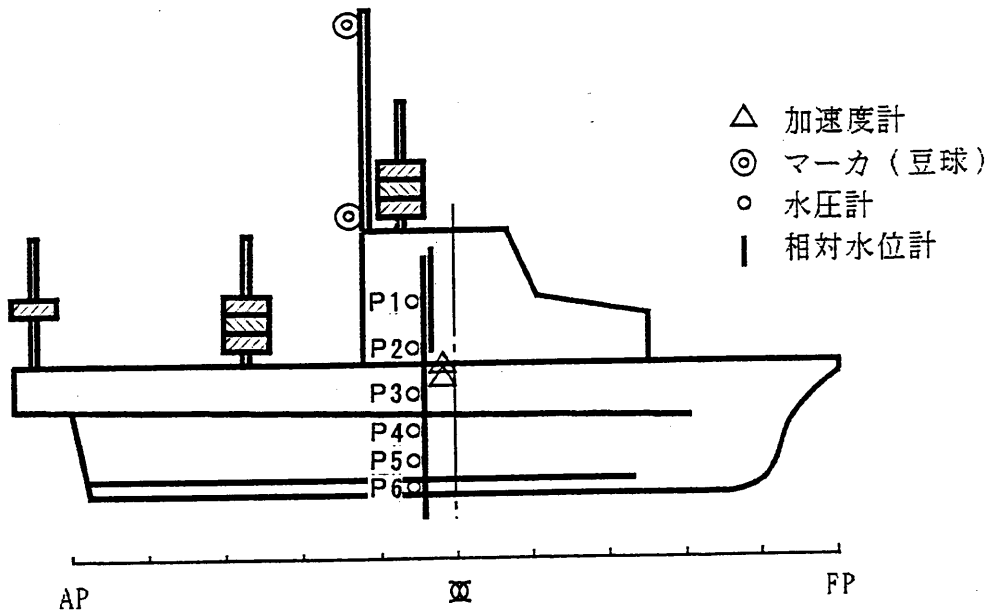


図 II-2 センサーと可動ウェイトの配置  
 (船尾のウェイトは左右舷に各 1 個を配置)

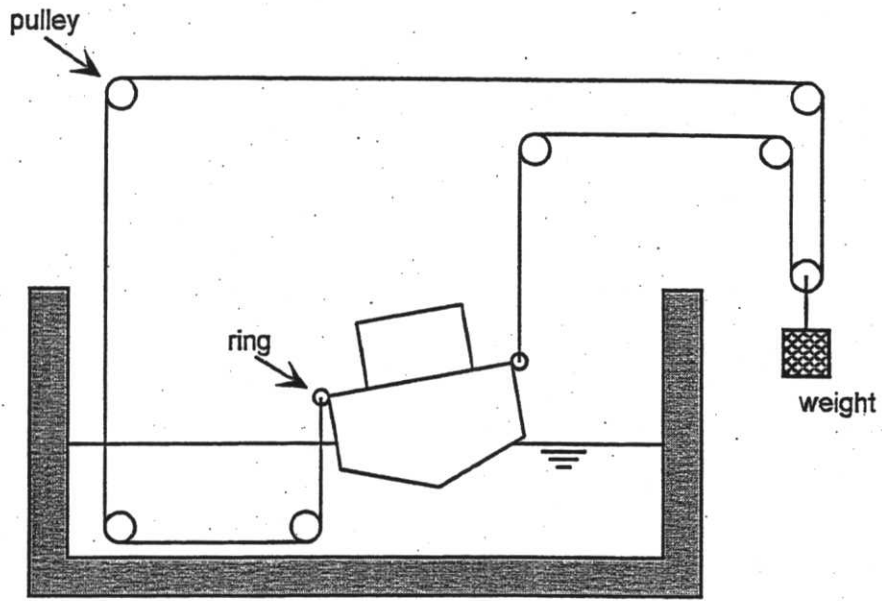


図 II-3 復原力の計測方法

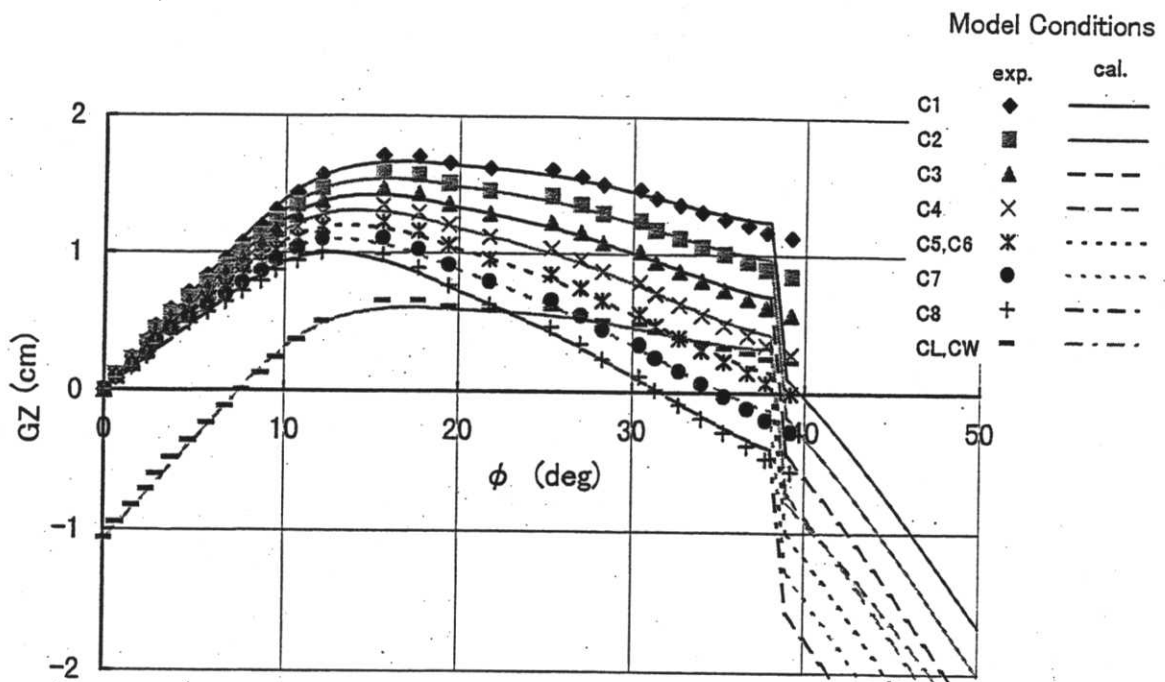


図 II-4 復原力曲線



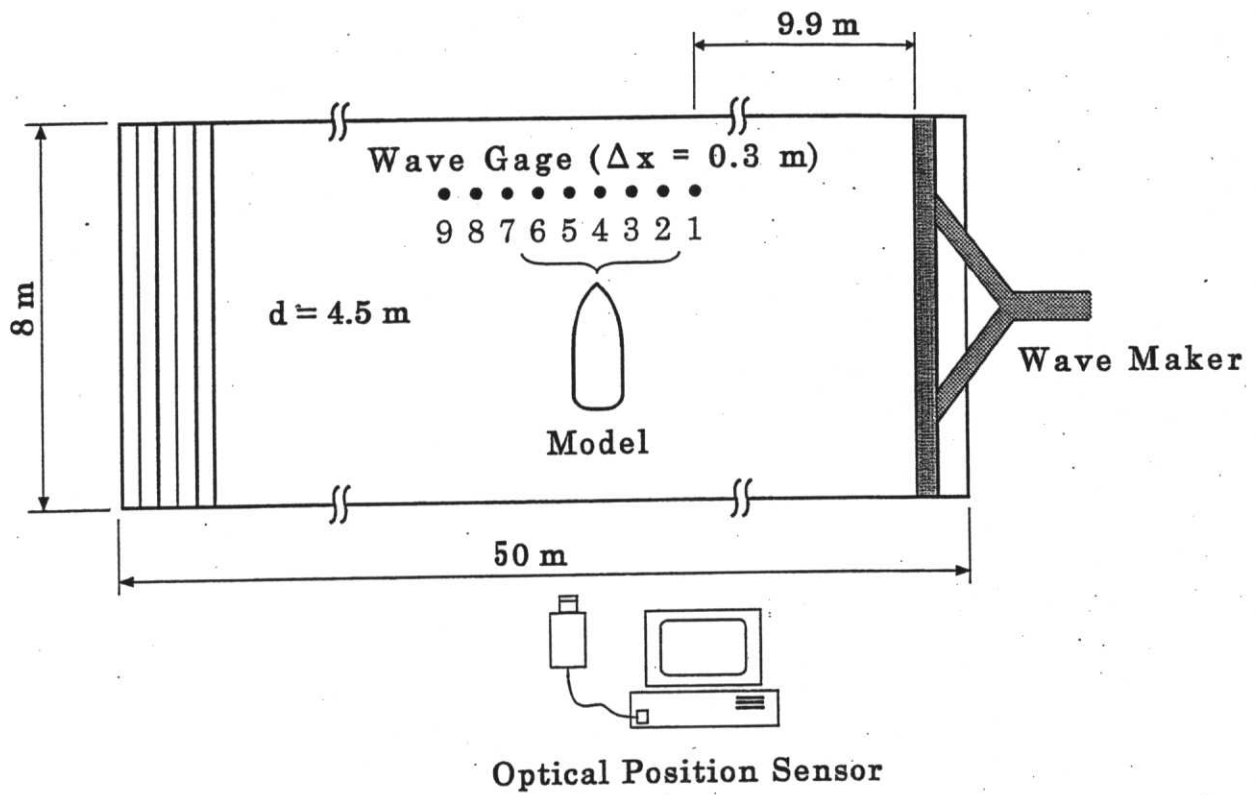
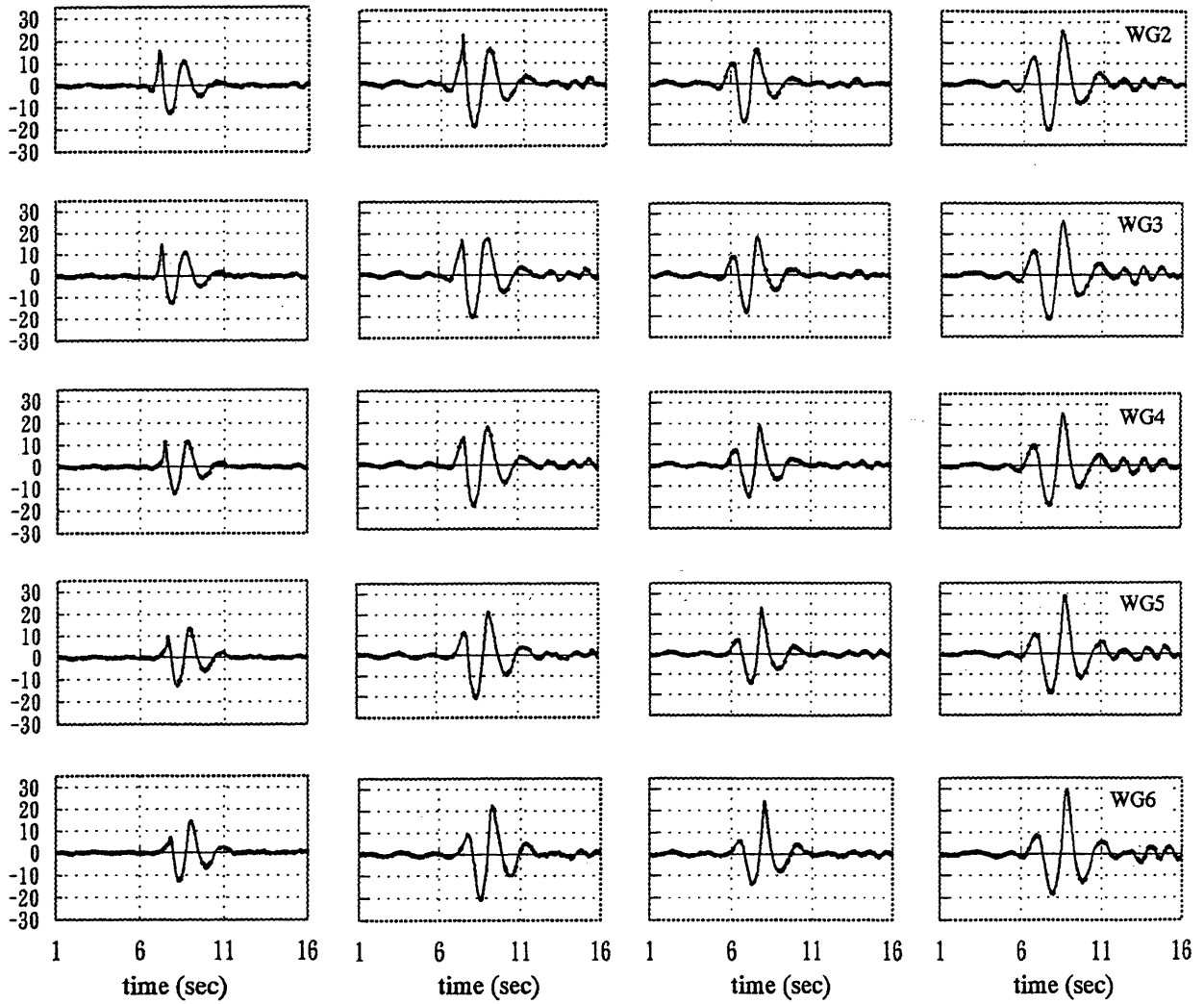
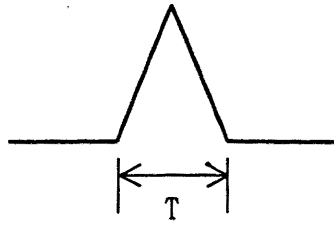


図 II-5 実験配置



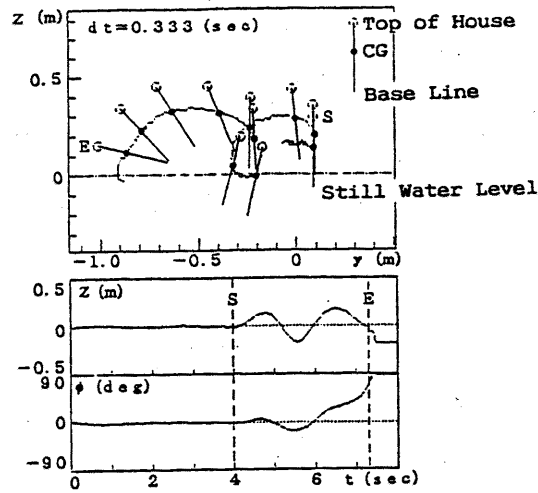
(a) W1.5 (T=1.5 sec)

(b) W2 (T=2.0 sec)

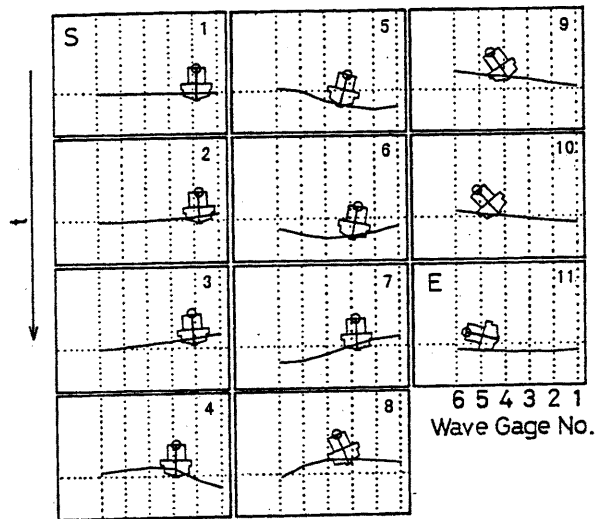
(c) W2S (T=2.0 sec)

(d) W2.5 (T=2.5 sec)

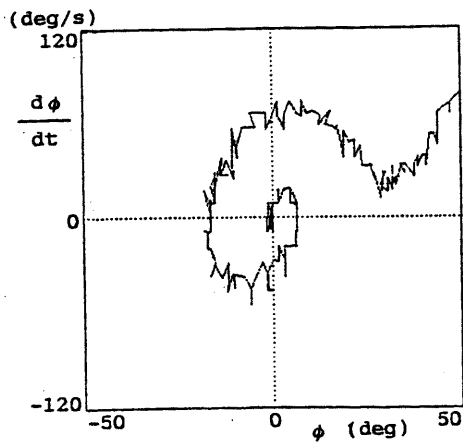
図 II - 6 集中性過渡水波の時系列



(a) 運動の概要と上下揺れ、横揺れ

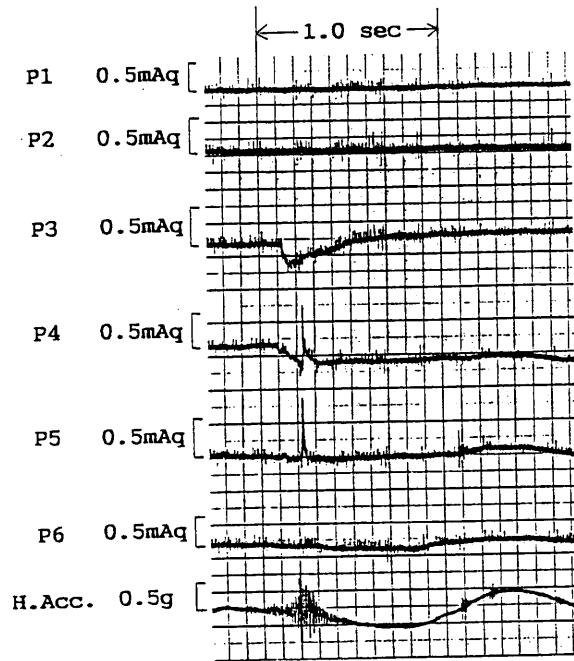


(b) 波との合成

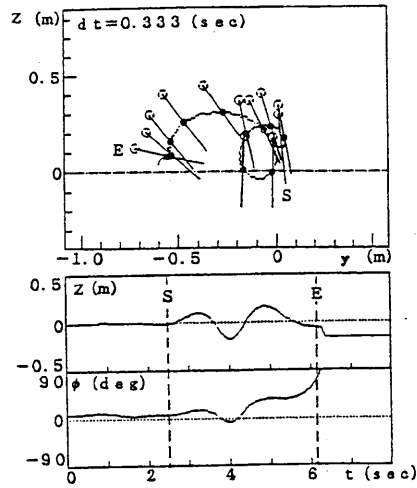


(c) 位相平面 ( $\phi - d\phi/dt$ )

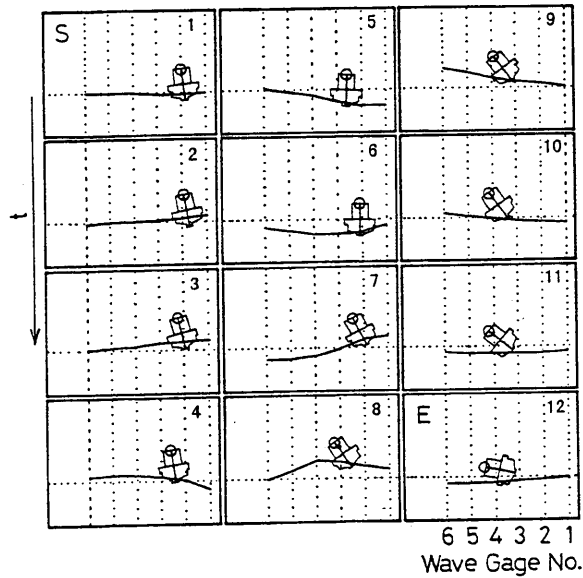
図II-7 転覆パターンAの船体運動  
(波: W2、模型船状態: C7、初期位置: WG2)



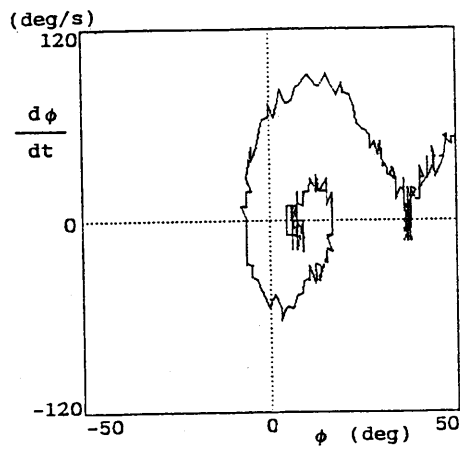
図Ⅱ-8 水圧と横加速度 (パターンA、  
波：W2、模型船状態：C7、初期位置：WG2)



(a) 運動の概要と上下揺れ、横揺れ



(b) 波との合成



(c) 位相平面 ( $\phi - d\phi/dt$ )

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)

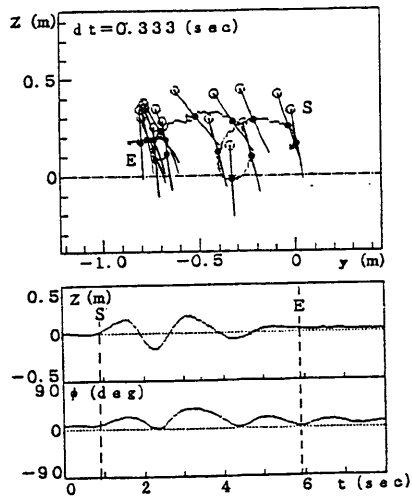


図 II-10 船体運動  
(パターン B から波を W2 に変えた場合)

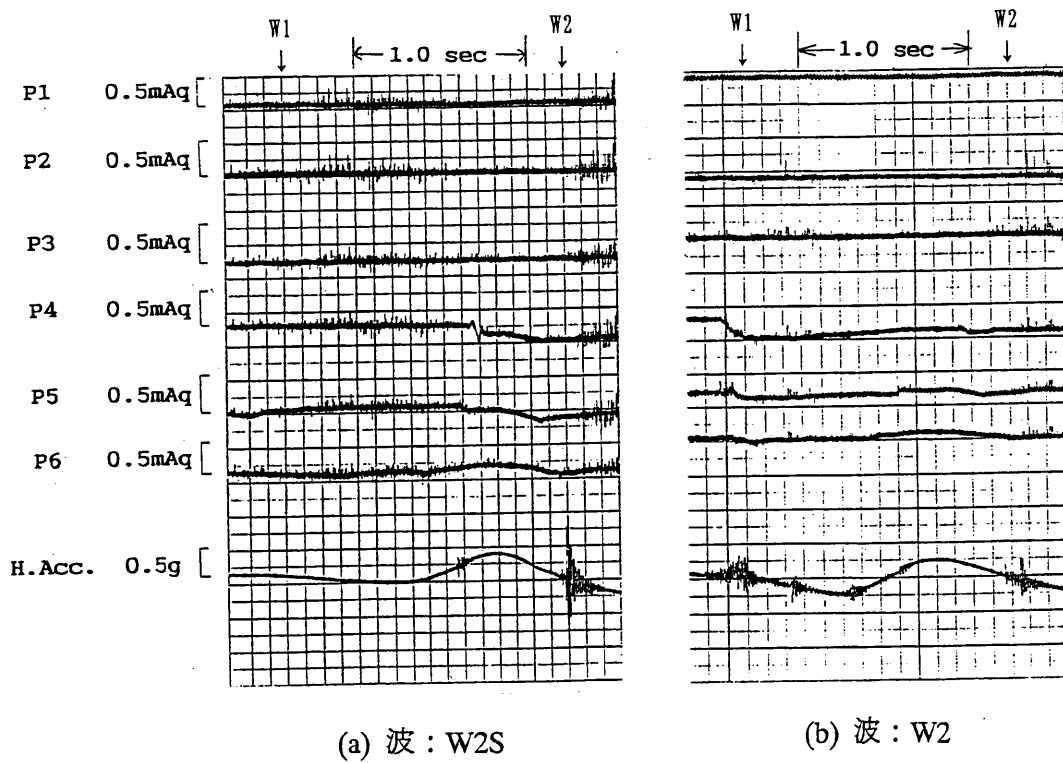
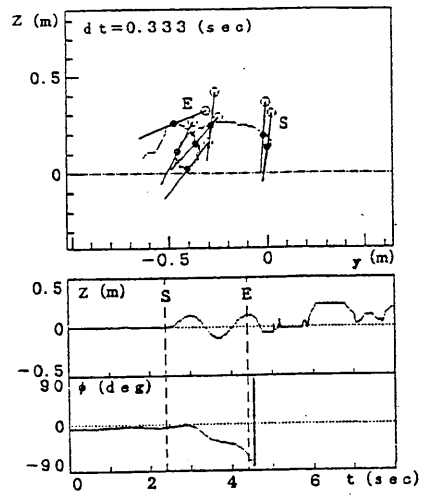
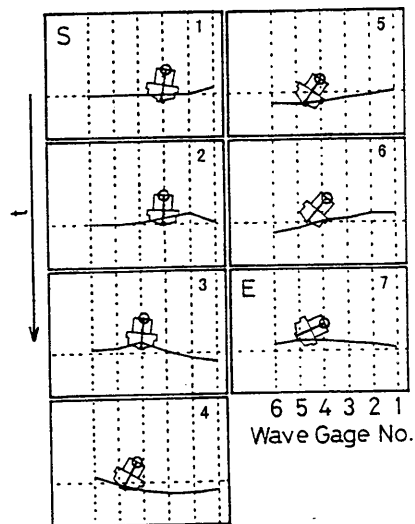


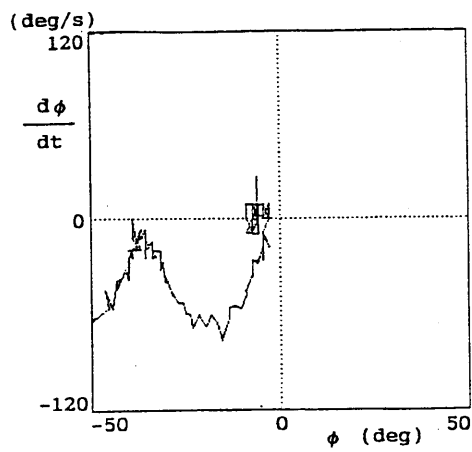
図 II-11 水圧と横加速度  
(模型船状態 : CL、初期位置 : WG2)



(a) 運動の概要と上下揺れ、横揺れ



(b) 波との合成



(c) 位相平面 ( $\phi - d\phi/dt$ )

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)

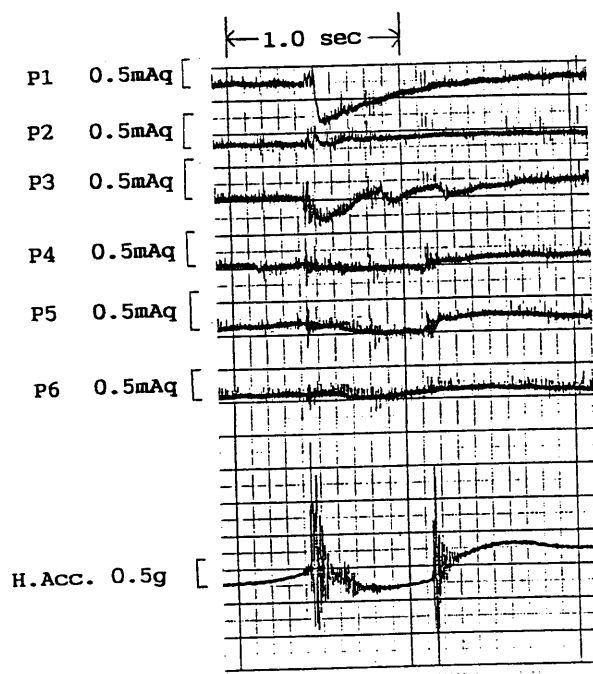
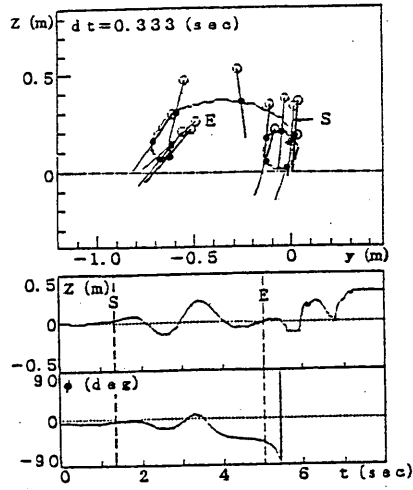
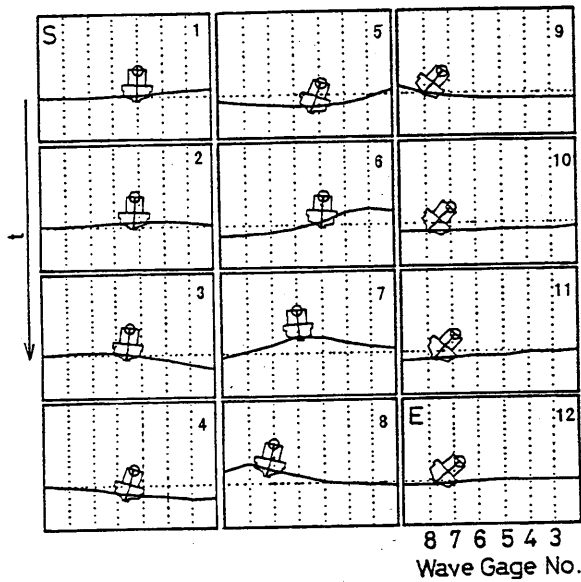


図 II-13 水圧と横加速度 (パターン C、  
波 : W1.5、模型船状態 : CW、初期位置 : WG3)

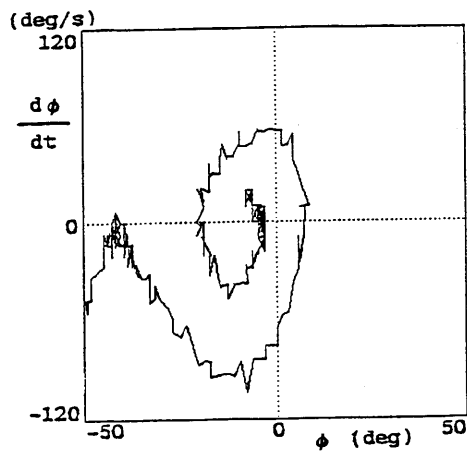




(a) 運動の概要と上下揺れ、横揺れ

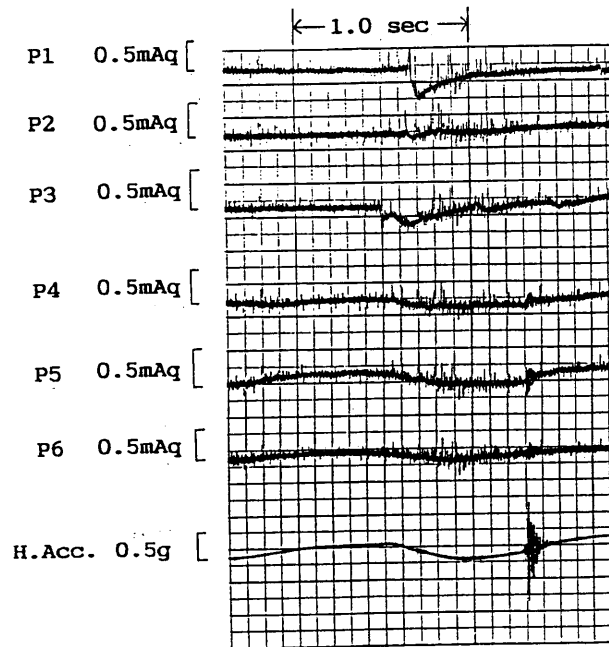


(b) 波との合成

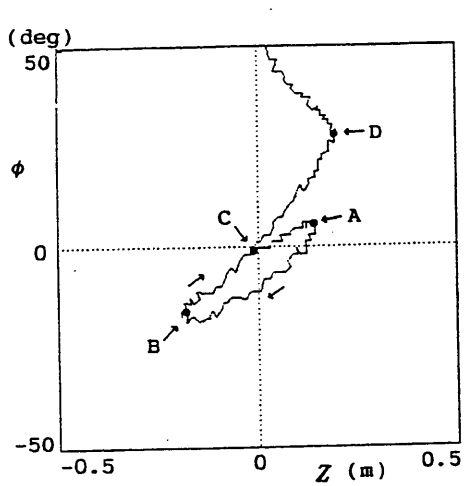


(c) 位相平面 ( $\phi - d\phi/dt$ )

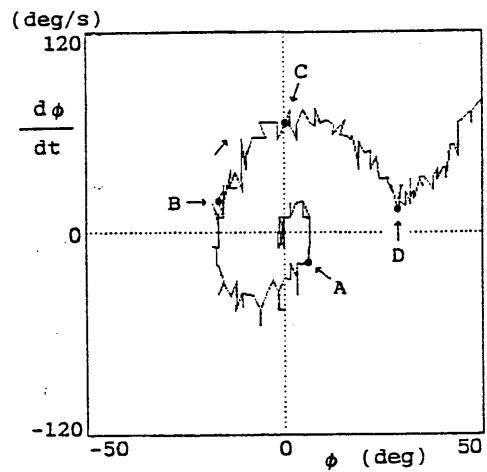
図 II-14 転覆パターン D の船体運動  
(波: W2S、模型船状態: CW、初期位置: WG5)



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)

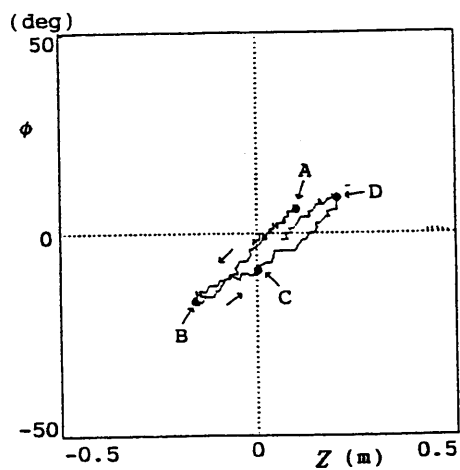


(a)  $Z-\phi$  plane

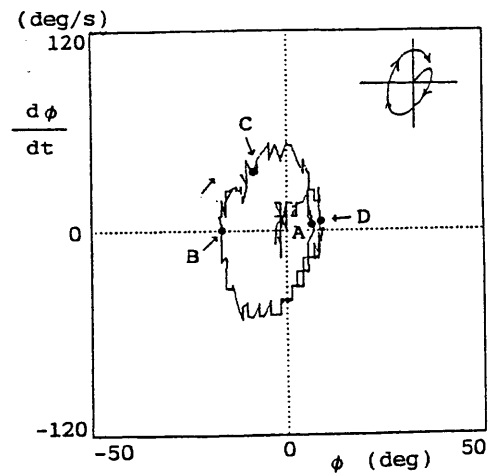


(b)  $\phi-d\phi/dt$  plane

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)



(a)  $Z-\phi$  plane



(b)  $\phi-d\phi/dt$  plane

図II-17 位相平面  
(パターンAから波をW2Sに変えた場合)

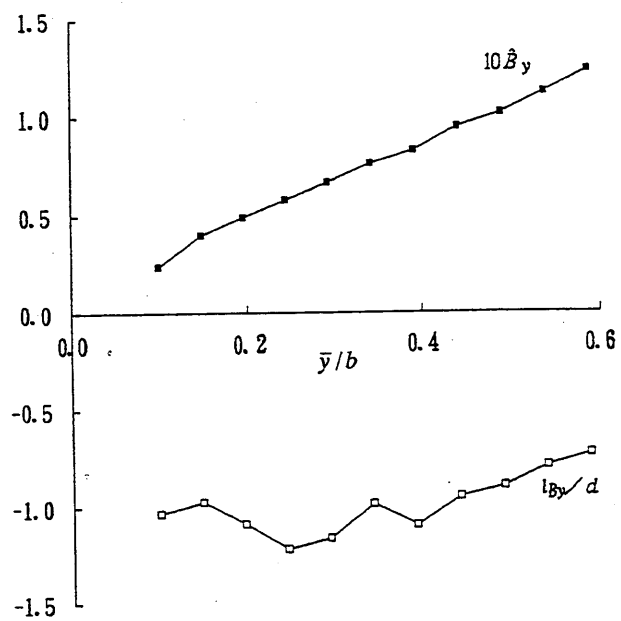


図 II-18 左右揺れの減衰係数と着力点 (直立時)

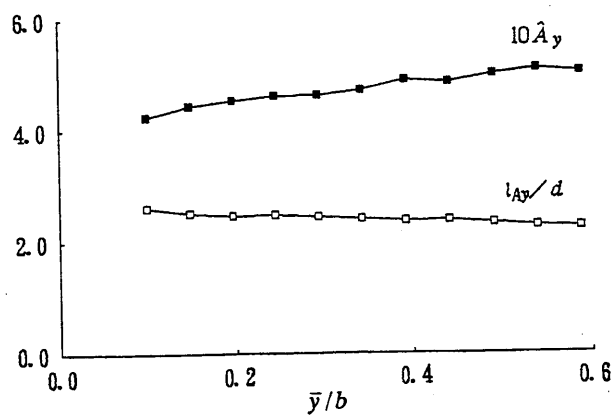
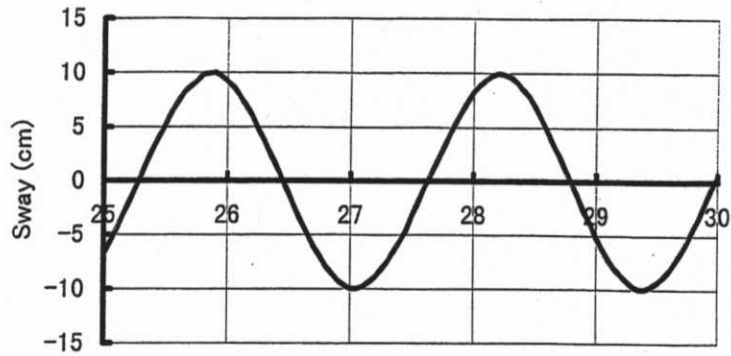
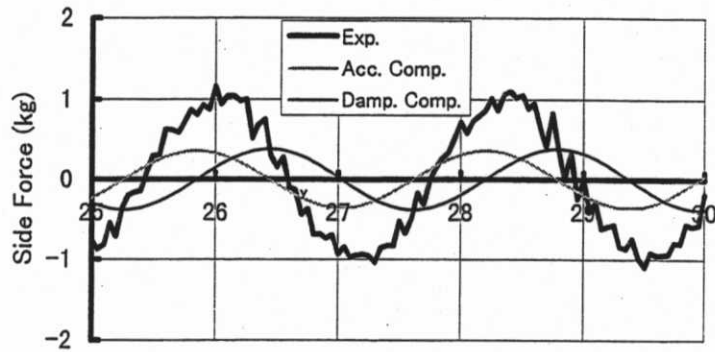


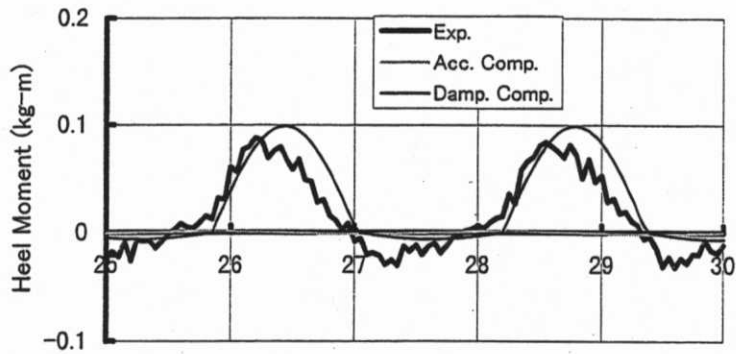
図 II-19 左右揺れ時の付加質量係数と着力点 (直立時)



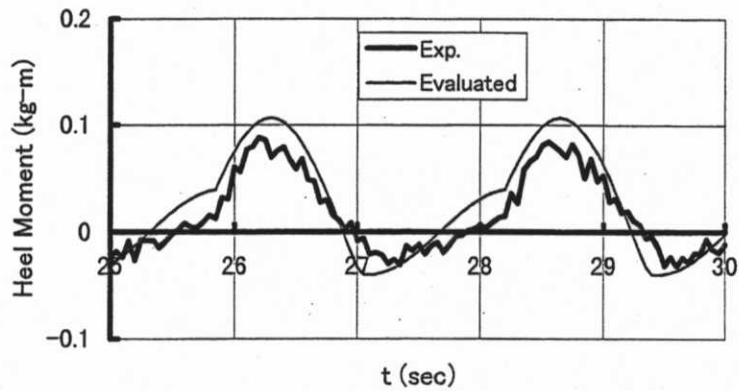
(a) 左右揺れ (実験値)



(b) 横力 (実験値と流体力)



(c) 傾斜モーメント (実験値と流体力)



(d) 傾斜モーメント (実験値と本モデルによる評価)

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 :  $10^\circ$ )

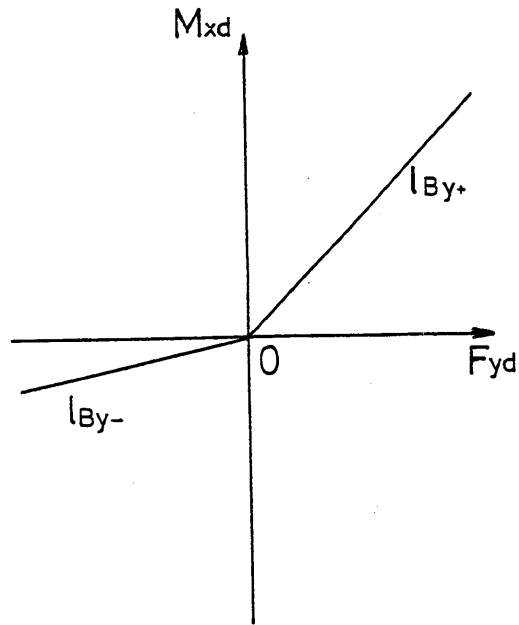


図 II-21 左右揺れ減衰力の着力点の非対称性

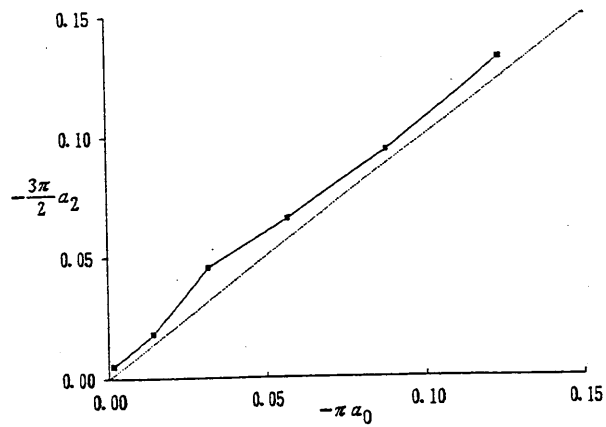


図 II-22 左右揺れ-横揺れ連成モーメントの  
0次成分(直流分  $a_0$ )と2次成分( $a_2$ )の比較(傾斜角:  $15^\circ$ )

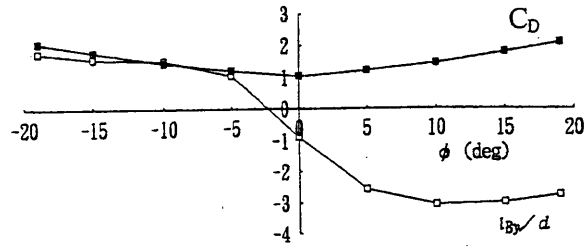


図 II-23 左右揺れの抗力係数とその着力点

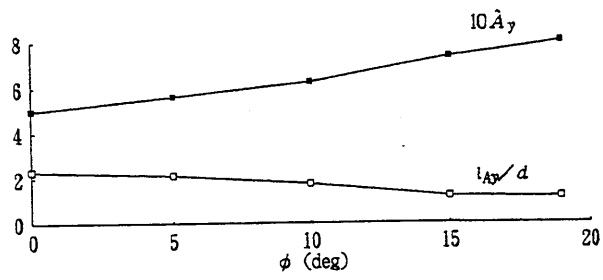
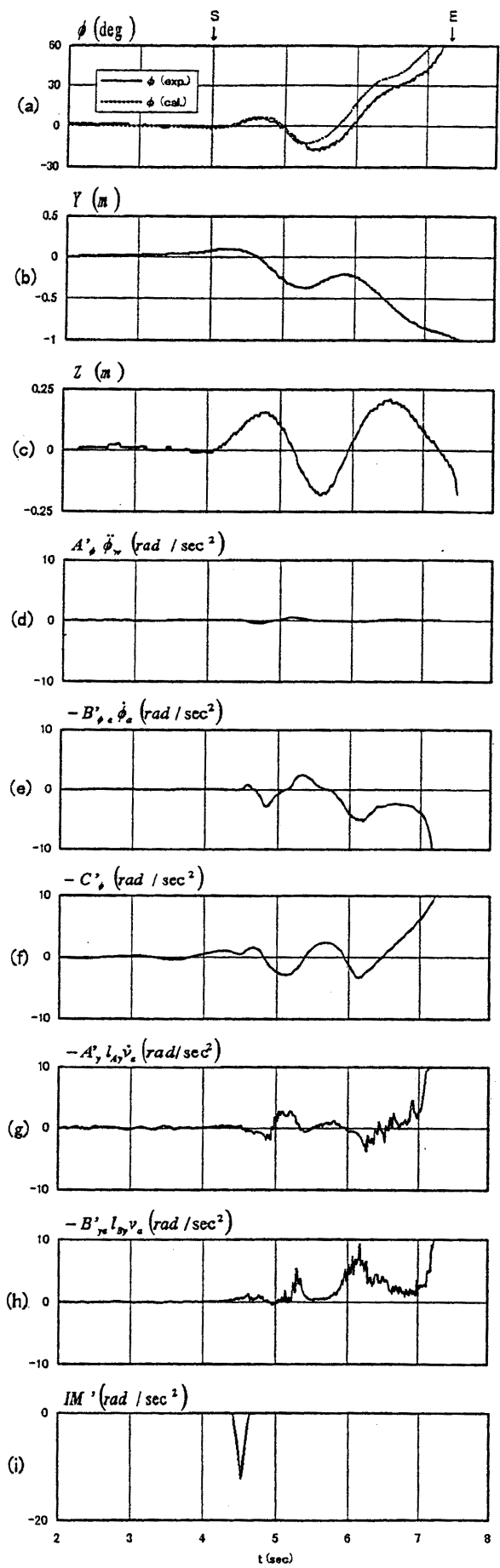


図 II-24 左右揺れ時の付加質量係数とその着力点



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)



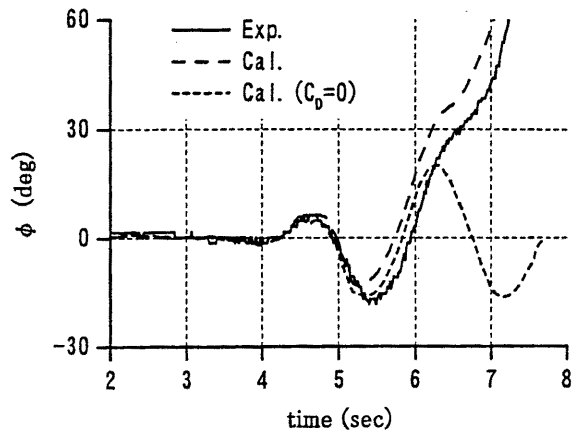


図 II-26 転覆パターン A のシミュレーション結果  
( $C_D=0$ )

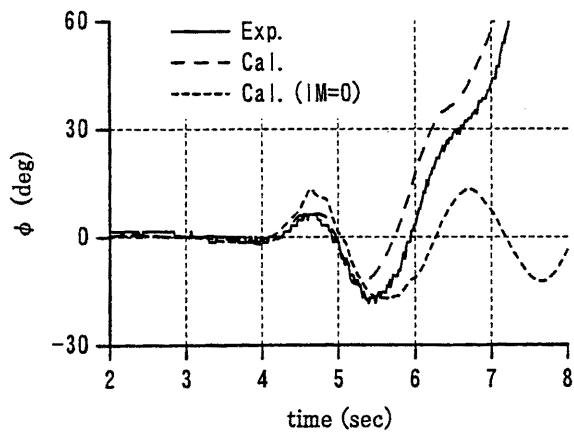


図 II-27 転覆パターン A のシミュレーション結果  
( $IM=0$ )

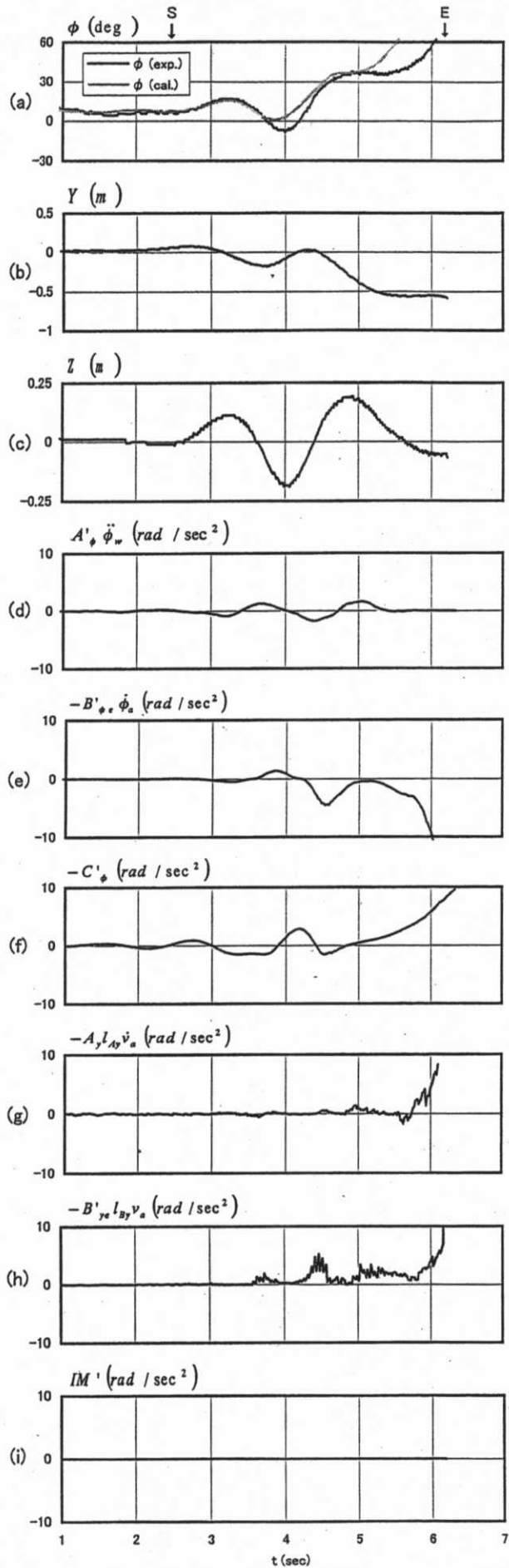


図 II-28 転覆パターン B のシミュレーション結果  
 (波: W2S、模型船状態: CL、初期位置: WG2)

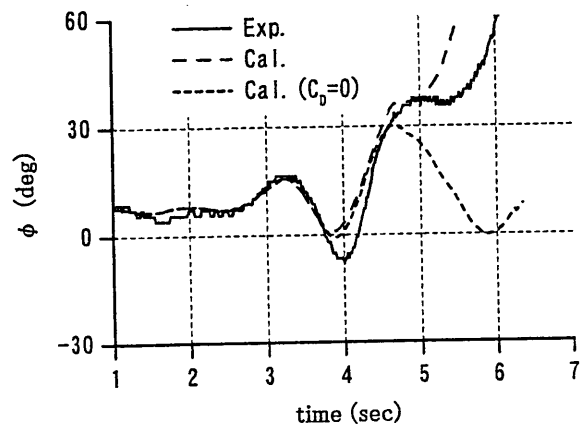


図 II-29 転覆パターン B のシミュレーション結果  
( $C_D=0$ )

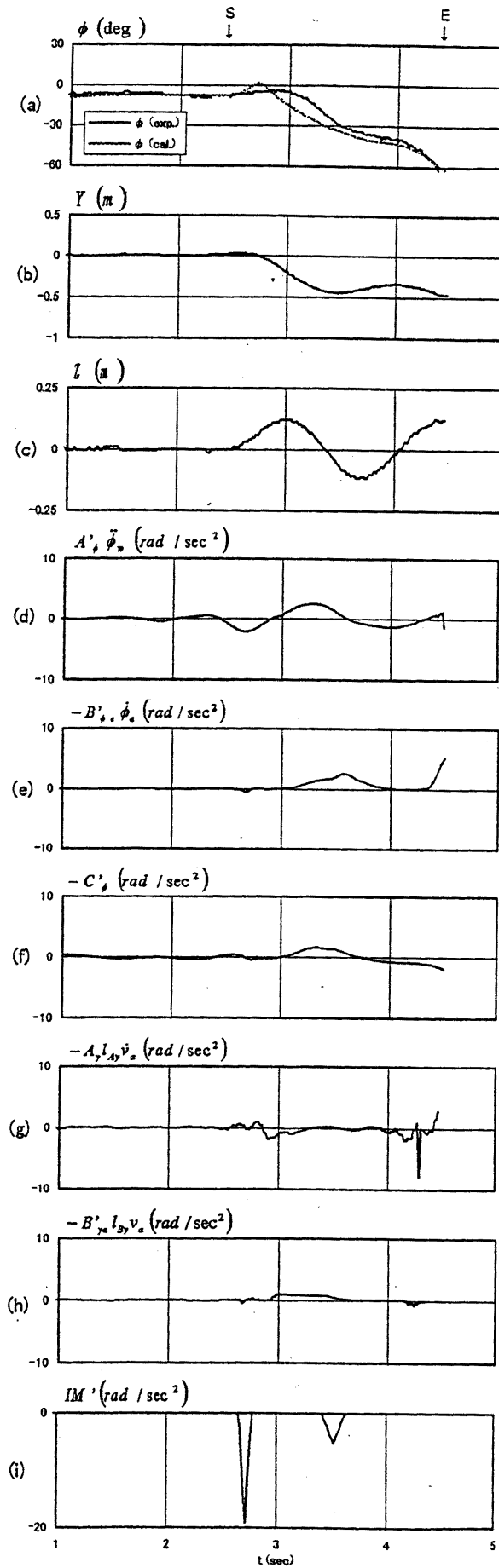


図 II-30 転覆パターン C のシミュレーション結果  
 (波 : W1.5、模型船状態 : CW、初期位置 : WG3)

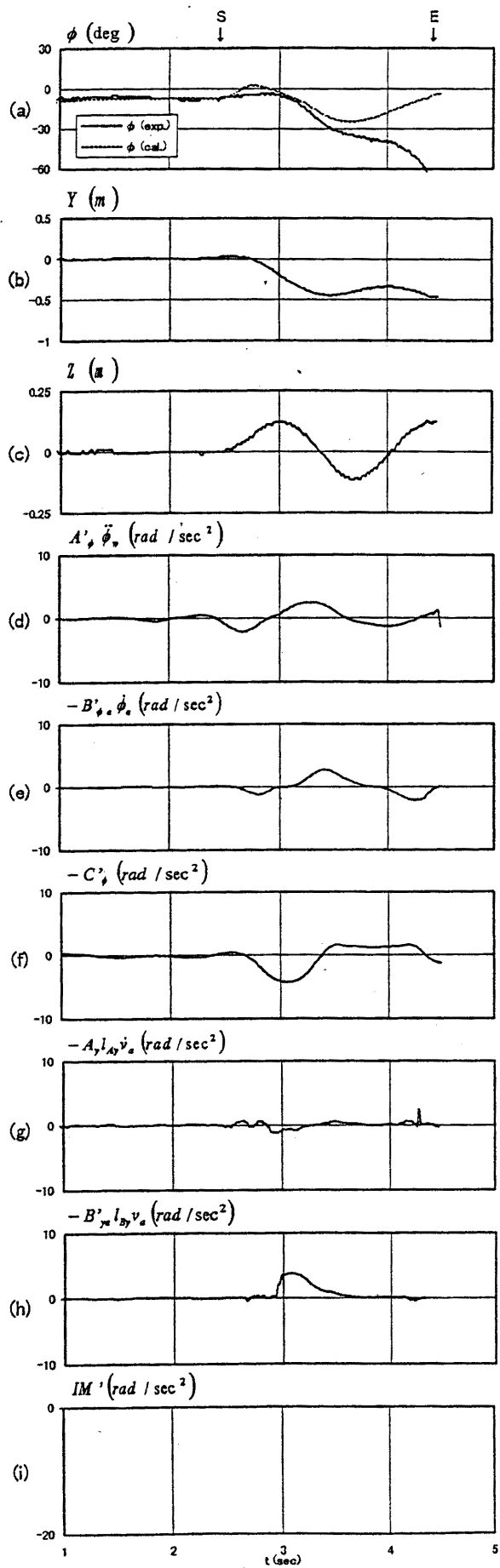


図 II-31 転覆パターン C のシミュレーション結果  
 (波 : W1.5、模型船状態 : CW、初期位置 : WG3、IM=0)

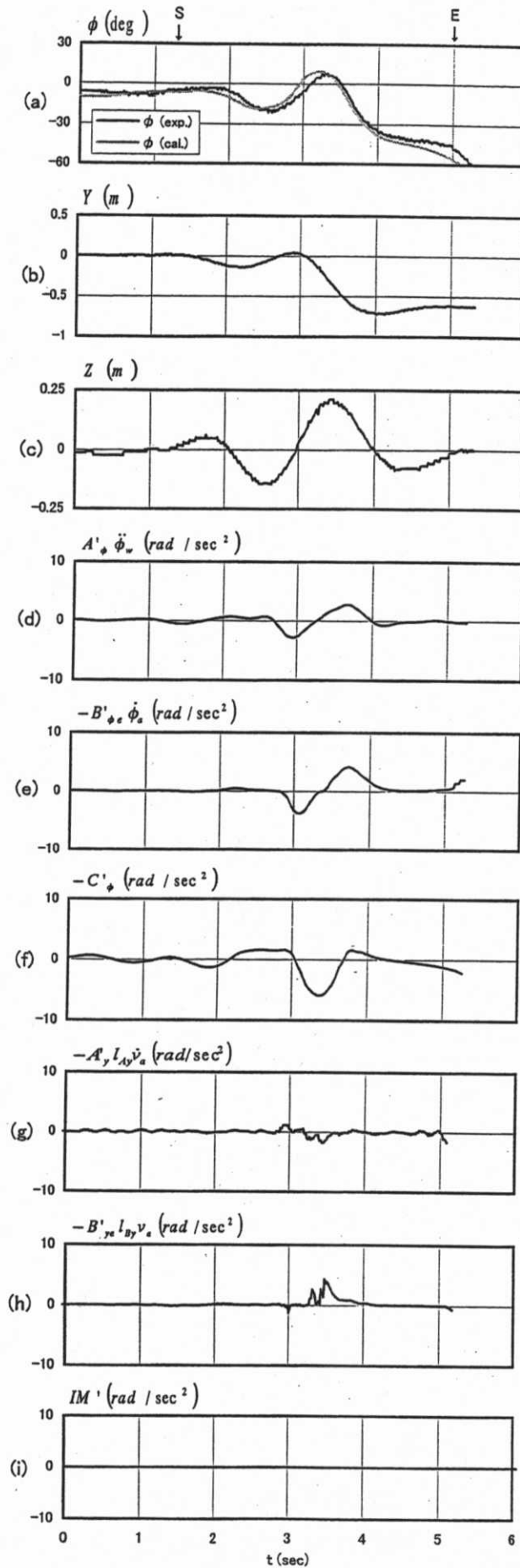


図 II-32 転覆パターン D のシミュレーション結果  
(波: W2S、模型船状態: CW、初期位置: WG5)

## 第III章 左右揺れ流体力に対する船型要素の影響

小型船の一般的な特徴をI-3-2節で述べたが、もうひとつの重要な点は船型がバリエーションに富むということである。従って、前章に述べたような転覆メカニズムの一般性を確認するためには、多数の船型に対してデータを蓄積することが望まれる。しかし、個々の船型について実験を繰り返すことは困難かつ非効率である。そこで、小型船を特徴づける船型要素を選び出し、その影響評価を行うこととした。その内容は、流体力の計測と波浪中運動の計測に大別されるが、前者については本章で、後者については次章で述べる。

前章ではシミュレーション計算等によって転覆メカニズムを調べたが、小型船に独特の性質を示すものとして、左右揺れから横揺れへの連成流体力、特にその減衰力成分が転覆に重要な役割を果たすことが明らかとなった。この流体力は極めて非線形性の強いものであるため、水槽実験による計測が不可欠である。そこで本章では、左右揺れ流体力に対する船型要素の影響を調べるために行った、二次元模型船を用いた強制左右揺れ試験の結果について述べる。船型要素としては、船底勾配角、チャインの形状、スケグの有無について検討を行った。また同時に、船体表面の水圧分布を細かく計測し、流体力の非線形な振る舞いの原因を検討した。

一方、他の流体力については基本的に一般的な方法を用いればよく、たとえば横揺れ減衰係数は自由横揺れ試験の結果を用いることにより、転覆運動をシミュレートすることができた。ただし、砕波による衝撃力は模型船と波との衝突角度等に影響されるため、簡単な推定方法は存在しない。そこでこれについても水槽実験を行ったが、模型船や使用した波など転覆実験と共通する部分が多いため、運動計測結果と合わせて次章で述べることとする。

### III-1 実験方法

#### 1) 模型船

大振幅の左右揺れによる流体力を計測するため、模型船を水平方向に正弦運動させた。使用した3種類の二次元模型船の形状および水圧計の位置を図III-1に示す。小型船の船尾部、中央部および船首部を想定し、船底勾配角 $\alpha$ をそれぞれ $\alpha=10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$

とした 3 隻の模型を用いた。主船体はラウンドチェーン船型で、これにハードチェーン部材とステグを着脱した。船底勾配角を模型船名に付し、何も付けない状態 (M10、M20、M30)、チェーンだけを付けた状態 (M10C、M20C、M30C)、チェーンとステグを付けた状態 (M10CS、M20CS、M30CS) の 9 種類の船型について実験を行った。模型船の長さはずべて 70cm である。傾斜によるチェーン部の没水状況などを把握するために、模型と水面との関係を図 III-2 に示しておく。なお、あまり実船が存在しないと考えられるラウンドチェーン船型を用いたのは、比較によりハードチェーンの効果を確認するためである。

## 2) 実験配置、パラメータ等

実験配置図を図 III-3 に示す。エンドプレート (長さ x 深さ = 150 x 60cm) の間を運動させることにより流れの二次元性を確保した。計測項目は、上記の水圧の他に三分力計による水平方向の力 Y、鉛直方向の力 Z、横揺モーメント M である。実験は船舶技術研究所の動揺水槽および中水槽 (L x B x D = 150 x 7.5 x 3.5m) で行った。

実験パラメータは、左右揺れ振幅  $\bar{y}$ 、周波数  $f$  および傾斜角  $\phi$  である。振幅は  $\bar{y}/b = 0.2 \sim 1.0$  ( $b$  は半幅) としたが、三分力計の容量の制約から 1.0 未満のものが多い。周波数は、第 II 章に述べた三次元模型船の横揺固有周期を参考に  $f = 0.8\text{Hz}$  を中心とした。また、この周波数は次章に述べる波浪中転覆実験における模型船の横揺れ固有周波数に近い値でもある。以下本章に示す実験結果は、特に断らない限りすべて  $f = 0.8\text{Hz}$  のものである。傾斜角  $\phi$  は、 $\phi = 0^\circ \sim 15^\circ$  まで  $5^\circ$  間隔で変化させたが、一部  $\phi = 20^\circ$  の実験も行っている。

## III-2 付加質量と着力点

### III-2-1 付加質量係数

#### 1) 解析方法

計測された水平方向の力 Y を Fourier 解析し、基本周波数成分の流体力のうち運動の単位加速度に比例する成分  $Y_{a1}$  を求め、付加質量係数  $\Delta m' = Y_{a1} / \rho \nabla$  を計算した。ただし、 $\rho$  は水の密度、 $\nabla$  は排水容積である。また、添字の a は加速度に比例する成分を、1 は基本周波数成分をそれぞれ表す。傾斜モーメントについても同様に  $M_{a1}$  を求め、水面上の着力点高さの無次元値  $l_w/d (= M_{a1} / (d \cdot Y_{a1}))$  ( $d$  は喫水) に置き換えた形で整理した。このような幅広船型では、傾斜モーメントに対して水平力 Y よりもむしろ底面



の圧力分布の寄与が大きい、一般的な表記として鉛直方向の着力点の形で整理した。

## 2) 解析結果

計測された付加質量係数を図 III-4 に、着力点高さを図 III-5 にそれぞれ示す。振幅の小さいもの ( $\bar{y}/b = 0.3$ ) と大きいもの ( $\bar{y}/b = 0.6$ ) の結果を示した。図中の「Hull」は主船体だけのラウンドチェーン船型、「+C」はハードチェーンだけを付けた船型、「+CS」はスケグ付のハードチェーン船型を表す。また、図中の線は、原口等<sup>19)</sup>による Combined Integral Equation Method (以下 CIEM と略す) によって計算したものである。この計算法は線形の積分方程式法であるが、側壁と水面が直交しない場合の精度向上が図られている。なお、図 III-5 の着力点高さは鉛直上方を正としている。

両図を見ると、次のような傾向がわかる。

- (1) 幅広浅喫水な船型なので、スケグなしの場合付加質量係数が小さく、また着力点が高いが、スケグを付けるとこれらの特徴はかなり緩和される。
- (2) スケグ付の場合、船底勾配角の大きい(船底中央の尖った)模型の方が付加質量係数が大きくなるが、スケグなしの場合は、船底勾配角によらずほぼ一定(0.5程度)である。
- (3) 一部の船型を除き、傾斜角による付加質量と着力点の変化は小さい。また、チェーン形状の影響は小さい。
- (4) スケグ付の場合を除き、振幅に対する依存性は小さく、線形計算値との一致度はよい。

### III-2-2 水圧分布

水圧のうち、左右揺れ加速度に比例する成分についても  $Y_{ai}$  と同様に基本周波数成分を抽出し、その振幅  $P_{ai}$  を運動振幅の水頭  $\rho g \bar{y}$  で無次元化した。例として、船底勾配角が  $20^\circ$  の模型の結果を水圧分布の形で図 III-6 に示す。横軸の  $\theta$  は物体固定の角度で、船底中央が  $\theta = 0^\circ$ 、直立時の船側と水面の交点が  $\pm 90^\circ$  である。図 III-6 は  $10^\circ$  傾斜した場合なので、CIEM による計算値は没水している  $\theta = -100^\circ \sim 80^\circ$  の範囲について示している。

M20 と M20C の水圧分布を見ると、船底中央付近 ( $\theta = \pm 23^\circ$ ) で実験値とのずれが見られ、また、そのずれは運動振幅に依存しているので、船底中央の角部で剥離しているものと考えられる(後述)。また、没水しているチェーン付近 ( $\theta \approx -90^\circ$ ) でも同様のずれが見られる。一方スケグ付の M20CS の場合は、中央部よりも船底全体において

一致度が悪くなっている。しかし、以上のずれの量はあまり大きなものではないので、(4)で述べたように圧力の積分値としての付加質量係数および着力点高さは、一部を除き計算値とおおむねよい一致を示している。従って、運動加速度による流場に関しては、浅喫水船が大振幅左右揺れをする場合でも、線形計算が有効であることがわかる。また、(3)で述べたように傾斜角の影響は比較的小さいので、直立時の流体力係数を用いても実用上の問題は小さいようである。

### III-3 減衰力と着力点

#### III-3-1 水圧分布

ここでは、説明の都合からまず水圧分布について調べ、流場の様子を検討する。

##### 1) 全体的な傾向

左右揺れ速度に比例する成分  $P_{d1}$  の無次元値の例として、図 III-7 の(a)~(c)に船底勾配角  $\alpha = 20^\circ$  の模型の計測結果を、また、同図の(d)と(e)に  $\alpha = 10^\circ$  と  $30^\circ$  のハードチェーン船型の計測結果をそれぞれ示す。すべて傾斜角  $\phi = 10^\circ$  の場合である。ただし、添字の d は運動速度に比例する成分を表す。また、図には CIEM による計算値も併せて示している。

図 III-7 (a)、(b)を見ると、図 III-6 に示した  $P_{a1}$  (加速度成分) と同様の傾向を示すことがわかる。すなわち、船底中央部で水圧が正負に変動し、また振幅依存性が見られるので、その位置で剥離が発生しているものと考えられる。また、剥離領域は局所的であって、他の部分は線形理論に近い値を示している。ただし、 $P_{a1}$  よりも  $P_{d1}$  の方が変動は大きい。また、M20C では、ハードチェーンに近い船底 ( $\theta = -83^\circ$ ) の  $P_{d1}$  が負の値になっているので、この部分も剥離していると考えてよいであろう。チェーン近傍で局所的な剥離が発生することは、横揺れ運動について池田等<sup>30)</sup>も計測しているところである。一方図 III-7 (c)を見ると、スケグ付の M20CS では圧力変動が激しく、スケグからの剥離が底面全体に及んでいることがわかる。

##### 2) 船型要素による違い

このような水圧分布の傾向はすべての模型に共通しているが、水圧変動の大きさや剥離の規模は船底勾配角  $\alpha$  に強く依存している。たとえば、スケグのない状態の船底中央の剥離であるが、図 III-7 (d)に示した M10C ではほとんど圧力変動が見られないのに対

し、図 III-7 (e) に示した M30C では圧力変動が大きくまた広範囲であり、スケグ付の M20CS と似た分布になっている。また、ここには示していないが、スケグによる剥離も船底勾配角が大きいほど規模が大きいという結果になっている。

一方、チェーン部の剥離は逆の傾向であって、図 III-7 の (b)、(d)、(e) を比較すると、 $\alpha$  の小さい（船側と船底のなす角が鋭い）M10C の方が、M20C や M30C に比べて大きな剥離を起こしていることがわかる。剥離領域はどれもチェーン近傍の局所的なものであるが、レバーが大きい部分なので、後に述べるようにモーメントへの寄与は無視できないものである。

### III-3-2 減衰力

#### 1) 左右揺れによる減衰力の特徴

次に減衰力について述べる。付加質量の場合と同様に運動速度に比例する基本周波数成分の振幅  $Y_{d1}$  を求め、減衰力係数の無次元値  $Y'_d (= Y_{d1} / \rho \nabla \cdot \sqrt{b/g})$  を計算した。傾斜角  $\phi = 10^\circ$  の例を、運動振幅を横軸にして図 III-8 に示す。図中には、実験値を最小自乗法で近似した直線を一点鎖線で示している。また、CIEM による造波減衰係数も示している。

三次元模型船の場合と同様に  $Y'_d$  は振幅に対して直線的に増加しているので、(II-12) 式および (II-13) 式（ともに II-2-2 節）と同様に解析を行い、実験値を近似した直線の傾きから抗力係数  $C_D$  を計算した。結果を図 III-9 に示す。

図 III-7 ~ 図 III-9 から、次のようなことがわかる。

- (1) 左右揺れの減衰力は抗力による成分が無視できない。特に、振幅が大きくなるとその成分が顕著になる。
- (2) 抗力係数は、大規模な剥離の発生する  $\alpha = 30^\circ$  の模型およびスケグ付の模型で大きくなる。
- (3) ハードチェーンからの剥離は小さいため、チェーン形状の影響は小さい。ただし、傾斜角が十分に大きくなると、剥離が強くなって抗力係数が増大する場合がある（図 III-9 (a) の  $\phi = 15^\circ$ ）。
- (4) 抗力係数は傾斜角によって変化するが、変化量は比較的小さい。

#### 2) 抗力係数に対する考察

ここで、 $C_D$  の値について過去の研究と比較してみる。田中等<sup>99)</sup>は、スケグ付の二次元円柱を強制動揺させてスケグの  $C_D$  を評価しており、 $C_D = 3 \sim 6$  という値を得ているが、

本実験のスケグ付の模型でも同程度の値となっている。このことは、図 III-7 の水圧分布でスケグからの剥離が支配的であったことと符合する。また田中等<sup>98)</sup>は、無限流体中で二次元四角柱を強制左右揺れさせて流体力を計測している。それによれば、運動方向に長辺を持つ 1:2 の長方形では、低 KC 数において  $C_D \approx 2$  という値になっており、スケグなしの本実験の値に近いものとなっている。さらに、同じ四角柱について角の丸みと迎角（運動方向と長辺のなす角）の影響を検討しており、角を丸くするにつれて  $C_D$  が小さくなること、迎角の増大につれて  $C_D$  が大きくなることを報告しているが、この点に関しては本実験の傾向は異なったものとなっている。その原因としては、剥離点が流れ前面の角（チェーン部）と船底中央の 2 力所にあることと、傾斜によって水面下の形状が変化することが考えられる。

なお、傾斜時には水面下の形状が左右非対称になるので、後に述べる横流れ試験と同様に、左右揺れ時の抗力係数も非対称になる可能性があるが、本実験では非対称が顕著に現れなかった。その原因としては、KC 数が小さい ( $KC = V_{MAX}T/2b = \pi\bar{y}/b = 0.6 \sim 3.1$ 、 $V_{MAX}$ ：最大速度、 $T$ ：周期) ために放出された渦が模型付近に留り、その複雑な流場が非対称性を緩和したことなどが考えられる。後に述べるシミュレーション計算では、 $C_D$  は運動方向によらず一定として取り扱った。

### III-3-3 線形理論による造波減衰力と実験値との比較

最後に、減衰力の線形成分について検討する。(II-13)式より、実験値の近似直線の  $y$  切片が  $B_y$  に等しいとして、線形減衰係数の無次元値  $B'_y (= B_y / \rho V \cdot \sqrt{b/g})$  を計算した。CIEM による造波減衰係数の計算値と併せて、結果を図 III-10 に示す。

これを見ると、 $B'_y$  の実験値は計算値とかなり異なっている。また、しばしば負の値になることは不合理である。さらに、チェーン形状による違いを見ると、実験値はラウンドチェーン船型よりもハードチェーン船型の方がかなり大きい。目視によると、前者よりも後者の方が船側の相対水位変動が明らかに大きいので、造波減衰力の増加は事実のようである。しかし、計算値ではほとんど差が出ないので、線形理論では説明がつかない。

この問題を調べるため、いくつかの船型について振幅を細かく変化させた追加実験を行った。線形減衰力成分がマイナスになる例を図 III-11 に、チェーン形状を比較した例を図 III-12 に示す。ただし、実験装置の都合から、動揺周波数  $f$  は 0.43Hz である。これらの図を見ると、 $\bar{y}/b=0.2$  ( $KC=0.63$ ) 付近を境として実験点の傾向が異なっていることがわかる。大振幅側では直線上になっているが、振幅が小さくなるにつれて近似直線

からはずれようになり、線形造波減衰力成分の計算値に近づく。従って、このような船型の左右揺れでは、線形理論によって減衰力を推定できる振幅の範囲がかなり限られるようである。

境界となる  $\bar{y}/b=0.2$  は、剥離の発生や渦の放出に関するひとつのしきい値とも考えられるが、詳しくは流れの可視化を行って流場の構造を把握する必要がある。小型船の左右揺れ減衰力の評価法を確立するには、その他に自由表面近傍の渦の挙動など解決すべき課題が多く、今後の課題としたい。

### III-3-4 減衰力の着力点

#### 1) 左右揺れによる減衰力の着力点の特徴

付加質量の場合と同様に、左右揺れ速度と同位相の水平力  $Y_{d1}$  とモーメント  $M_{d1}$  から、減衰力の水面上の着力点  $l_d$  を計算した。ただし、モーメントには船型の非対称性の影響が大きく現れており、傾斜した模型で計測される時間波形は必ずしもプラスマイナス対称ではない。これについては、II-2-2節で検討したように減衰力のレバー（着力点）の非対称性として整理することとし、その結果を傾斜角  $\phi$  の符号に置き換えた。すなわち、傾斜した方向に運動する場合の  $l_d$  を  $\phi > 0$ 、逆方向に運動する場合のそれを  $\phi < 0$  として整理した。

着力点に対する運動振幅の影響を調べた例を図 III-13 に示す。この図からわかるように振幅依存性は大きなものではなかったため、ここでは比較的振幅の大きい  $\bar{y}/b = 0.6$  を選び、9 船型の結果を図 III-14 に比較する。

この図から次のことが言える。

- (1) 減衰力の着力点は、傾斜と逆の方向に運動するときにはすべての船型で水面より上方にあるが、傾斜方向に運動するときには、船型によりかなり変化する場合がある。
- (2) 着力点の傾斜角による変化は、大規模な剥離が発生しない船型 ( $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$ , スケグなし) において大きい。その場合には、傾斜した方向に運動するときに着力点が低くなり、傾斜を大きくする方向にモーメントが作用する。

小型船は一般に重心が水面上の比較的高い位置にある。従って、傾斜した方向に横流れする瞬間に着力点が下がる船型では、レバーが大きくなって大きな傾斜モーメントが作用することになる。しかも、図 III-14 で原点付近を中心に着力点が右下がりの直線状になっていることは、傾斜が大きくなるにつれてそれを助長する方向のモーメントも大きくなるという不安定な性質を意味している。また、このような船型が傾斜と逆方向

に横流れする瞬間には着力点が上昇するが、これが重心高さを超えるとやはり傾斜角を大きくする方向にモーメントが作用するので、ますます不安定性が増して転覆の危険性が大きくなることになる。

## 2) 圧力分布による考察

上に述べた船型による違いを、圧力分布の面から検討してみる。図 III-7 に示した  $P_{d1}$  は、傾斜した方向への運動速度が最大になる瞬間の圧力分布と見なすこともできるので、この図から船型の比較を行う。

チェーン形状の影響を調べるため M20 と M20C を比較すると、M20C の方が船側 ( $\theta = -97^\circ$ ) の圧力が高く、また、チェーン近傍の船底 ( $\theta = -83^\circ$ ) に負圧が発生している。両方とも傾斜を大きくする方向であり、またモーメントレバーが大きいため、図 III-14 (b) に示すような差が生じたと考えられる。一方 M20CS では、スケグの側面 ( $\theta = \pm 10^\circ$ ) の圧力差が傾斜を大きくする方向に作用するが、底面の圧力はその逆方向に作用する。ここで使用したような幅広浅喫水船では、後者の寄与の方が大きくはたらき、着力点を高い位置にさせたものと考えられる。

### III-3-5 考察

以上、左右揺れによる減衰力成分の検討結果から、小型船の横運動を考える際には抗力成分が無視できず、特にその連成モーメントの非線形性、非対称性が重要であることがわかる。角のある物体の剥離点および抗力係数には、剥離流の再付着が生じない場合 Reynolds 数の影響が小さいと言われている<sup>32)</sup>。この模型の 10 倍程度までの実船を考えると、Reynolds 数の増加は高々 1 桁強であり、また KC 数は変わらないので、本実験の傾向はおおむね成立するものと考えてよいであろう。

小型船の重心位置は、一般に水面上の高い位置にある。従って、着力点が高い位置にあれば安全側である。しかし、本実験で見られたように、傾斜した方向に運動するときに着力点が下がることは、傾斜偶力のレバーが大きくなって、ますます傾斜を助長することになる。着力点高さは、規則では通常喫水の中央位置に仮定される。また、幅広浅喫水物体の左右揺れ時の線形計算では、付加質量成分、造波減衰力成分とも水面より上方にあるのが一般的である。合理的な復原性基準を考えるためには、着力点がこれらの値よりもかなり低くなり得ることを考慮に入れる必要がある。

スケグ付の船型や船底勾配角が  $30^\circ$  の（いわゆるディープ V 型の）船型では、船底中央からの剥離が大きくなるため、着力点の低下はほとんど見られない。従って、スケ

グを取り付けることが、横波による転覆を防ぐ上で有効と考えられる。このような付加物は高速域の推進性能を低下させるため、プレジャーボートにはほとんど用いられないが、漁船などに見られるパーキールと呼ばれるフィン状のものを装着するだけでも、剥離の促進という意味で効果があるのではないかと考えられる。

### III-4 第 III 章のまとめ

本章では、船型がバリエーションに富む小型船の大振幅左右揺れ時の流体力について、その一般的性質を把握することを目的に、強制左右揺れ試験を実施した。模型船としては、船底勾配角の異なる 3 種類の二次元断面模型にハードチェーン部材とスケグを着脱し、合計 9 種類の船型を使用した。また、同時に船体表面の水圧分布を細かく計測し、特に減衰力の非線形性と傾斜角による着力点の非対称性について、そのメカニズムを考察した。その結果判明したことをまとめると、次のようになる。

まず、左右揺れの運動加速度に比例する成分については、

- (1) 付加質量係数はスケグなしの船型では小さく、船底勾配角やチェーン形状の影響は小さい。一方、スケグ付の船型では、船底勾配角が大きいほど付加質量係数も大きい。
- (2) 着力点は水面上の高い位置にあり、特にスケグなしの船型で顕著である。
- (3) 傾斜角の影響は、一部の船型を除きあまり大きくない。また、チェーン形状の影響は小さい。
- (4) 付加質量および着力点は、線形の積分方程式法でおおむね評価できる。

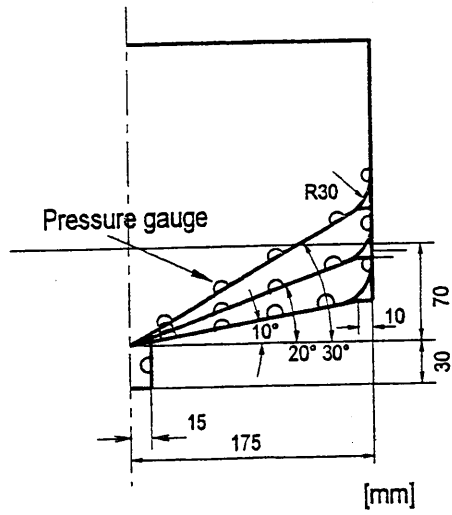
次に、左右揺れの運動速度による成分については、

- (5) 減衰力には振幅による強い非線形性が存在し、抗力成分（速度の自乗に比例する成分）が大きな割合を占める。
- (6) 抗力係数は、船底勾配角  $30^\circ$  の船型で大きい。また、スケグが付くと非常に大きくなる。抗力係数に対するチェーン形状の影響は、一般的に小さい。
- (7) 抗力係数の傾斜角による変化は、あまり大きくない。
- (8) 着力点は、傾斜と逆の方向に運動するときにはすべての船型で水面より上方にあるが、傾斜方向に運動するときには、船型により着力点がかなり低くなる場合がある。

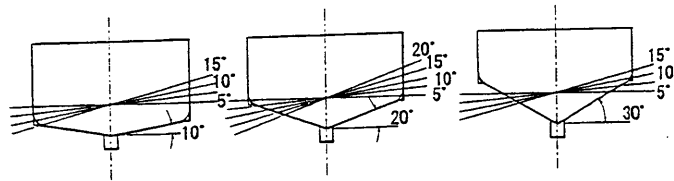
- (9) 横流れする方向に傾くほど着地点が下がる傾向は、船の傾斜をますます大きくする不安定な連成モーメントを発生させる。また、傾斜と逆方向に運動する場合でも、着地点が重心より高くなれば、やはり傾斜を増大させるモーメントになる。
- (10) 着地点の低下は、チェーン近傍の剥離に伴う船底圧力の低下および船側水圧の増加に関係している。スケグ付の船型や船底勾配角が大きい（V字型の）船型など、大規模な剥離を伴う場合には現れない。

ここでは、左右揺による流体力の非線形性、非対称性を剥離現象によって説明したが、角のある船型では縦運動においても剥離の影響が無視できないという指摘<sup>10)</sup>もある。従って、このような問題は、高速船型が増加するにつれてさらに重要になるものと思われる。

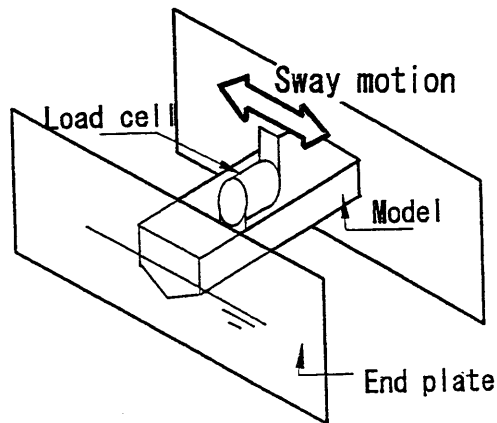




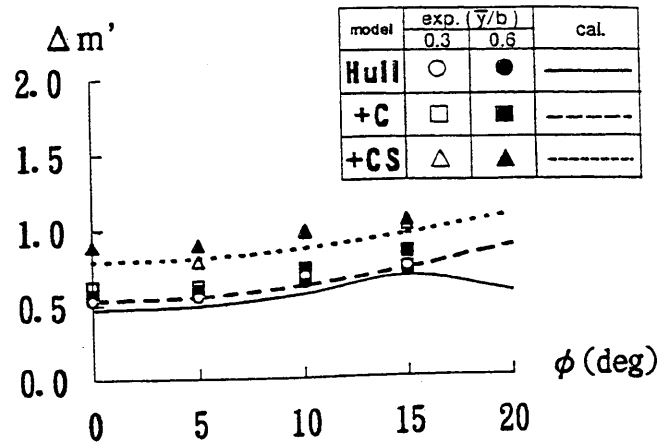
図Ⅲ-1 模型船の形状と水圧計の配置



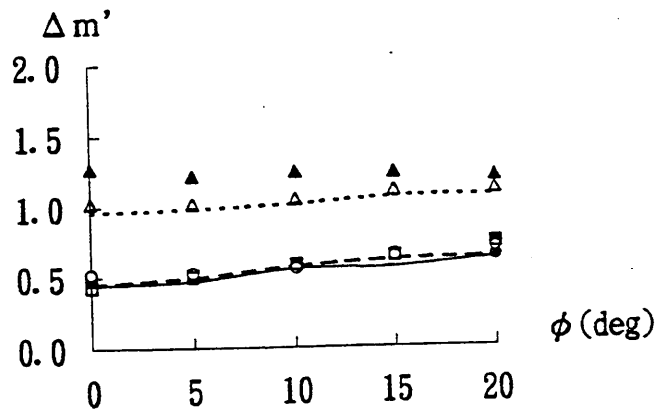
図Ⅲ-2 傾斜時の水線



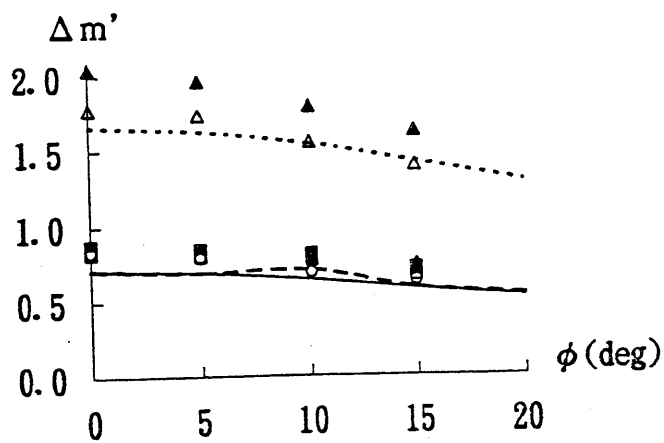
図Ⅲ-3 強制左右揺れ試験の配置



(a) 船底勾配角 10°

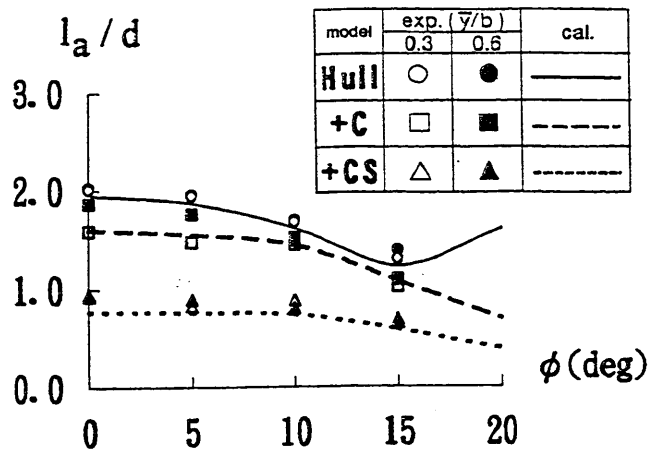


(b) 船底勾配角 20°

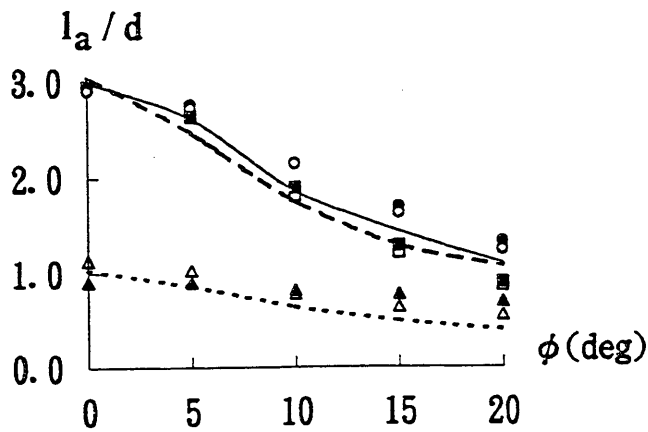


(c) 船底勾配角 30°

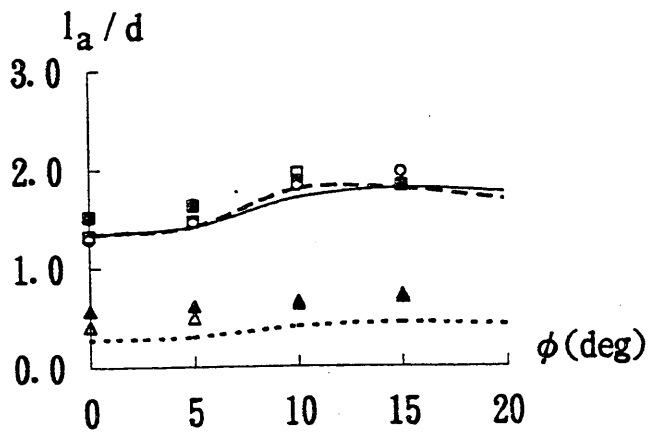
図 III-4 付加質量係数



(a) 船底勾配角 10°

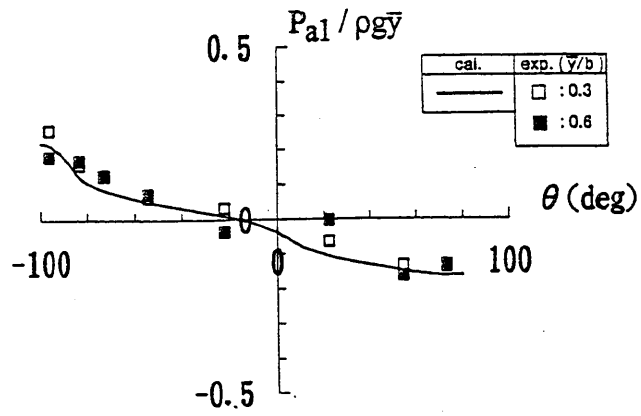


(b) 船底勾配角 20°

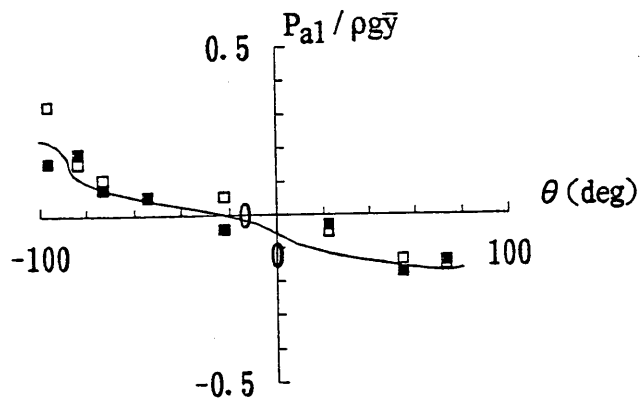


(c) 船底勾配角 30°

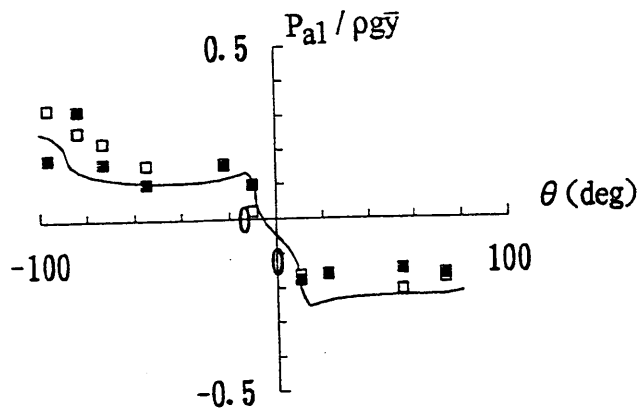
図Ⅲ-5 加速度成分の着点高さ



(a) M 20 Model

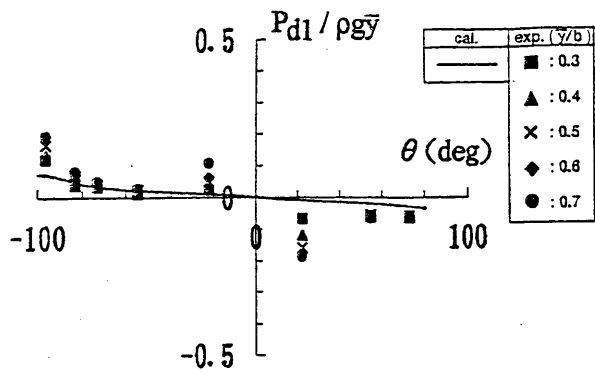


(b) M 20 C Model

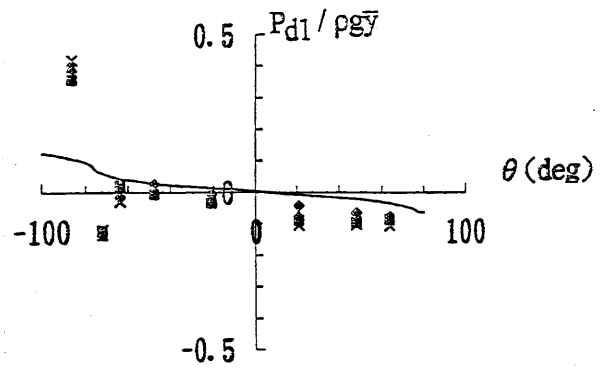


(c) M 20 CS Model

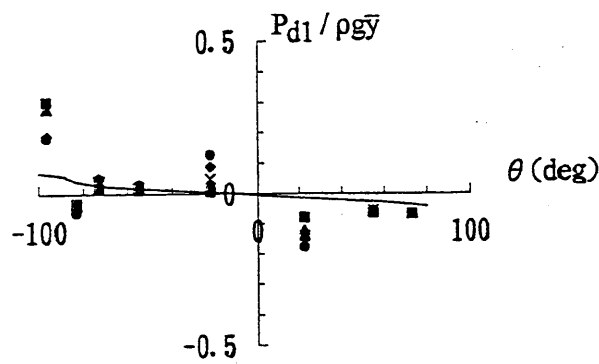
図 III-6 加速度成分の水圧分布 (傾斜角:  $10^\circ$ )



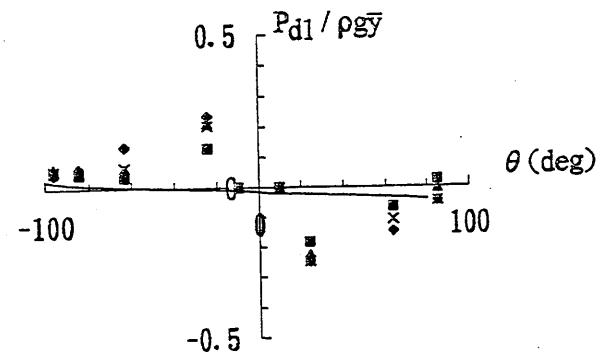
(a) M 20 Model



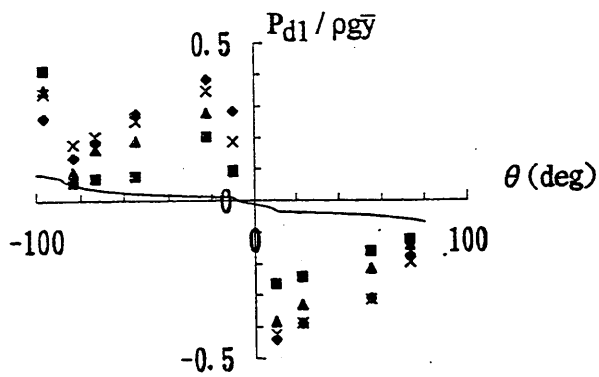
(d) M 10 C Model



(b) M 20 C Model

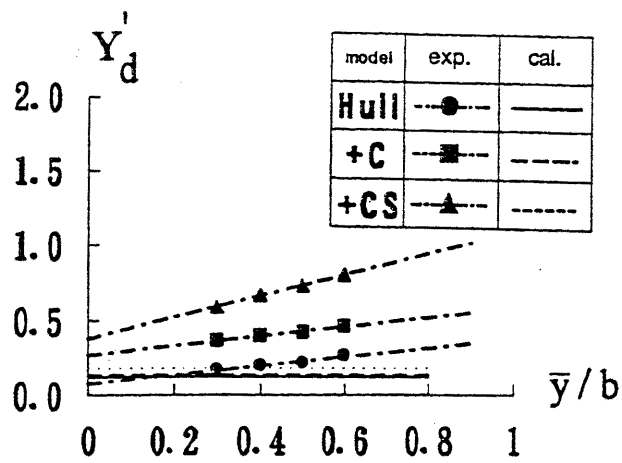


(e) M 30 C Model

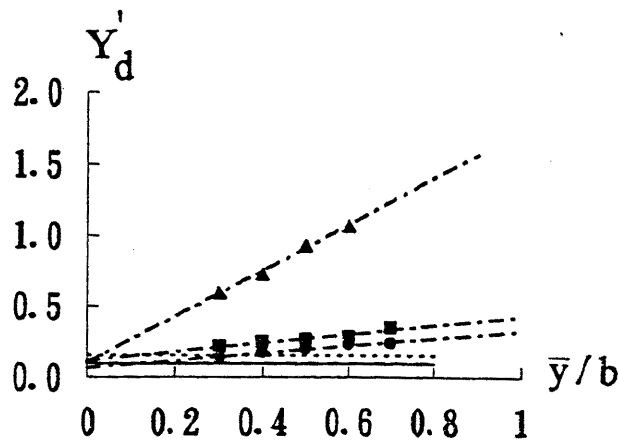


(c) M 20 CS Model

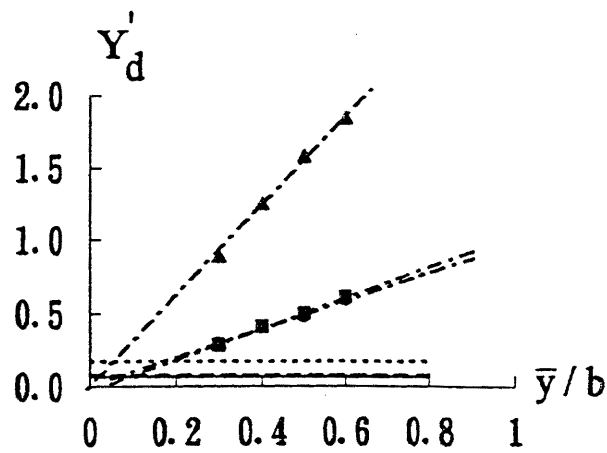
図III-7 減衰力成分の水圧分布 (傾斜角: 10°)



(a) 船底勾配角 10°

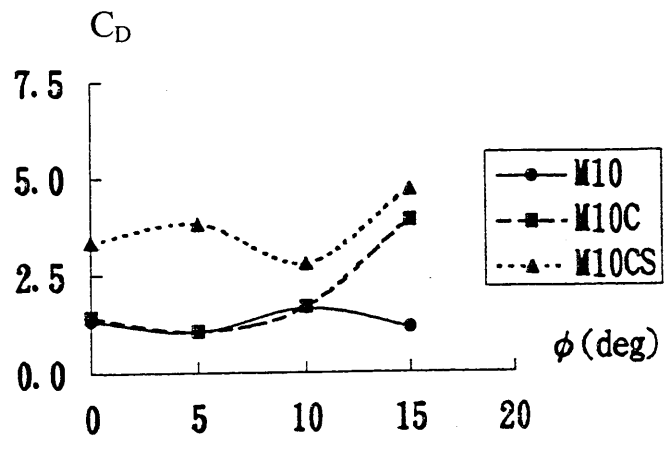


(b) 船底勾配角 20°

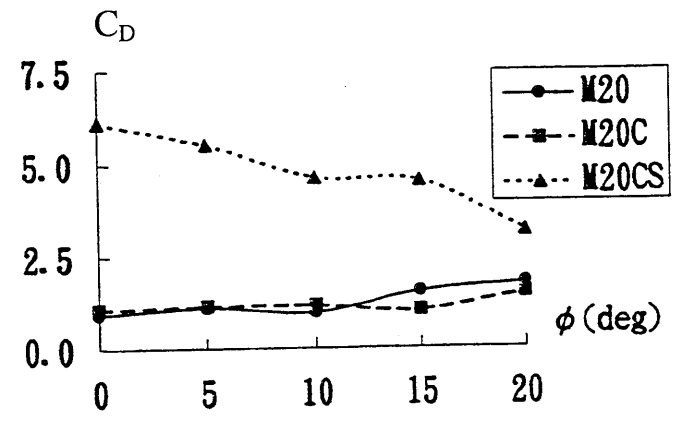


(c) 船底勾配角 30°

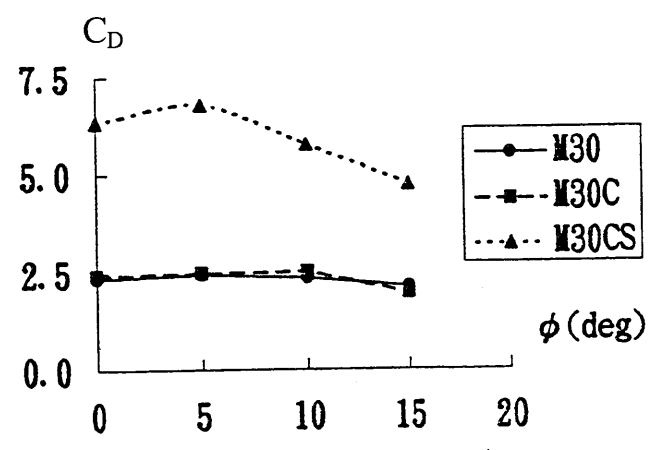
図III-8 減衰力の運動振幅依存性 (傾斜角: 10°)



(a) 船底勾配角 10°

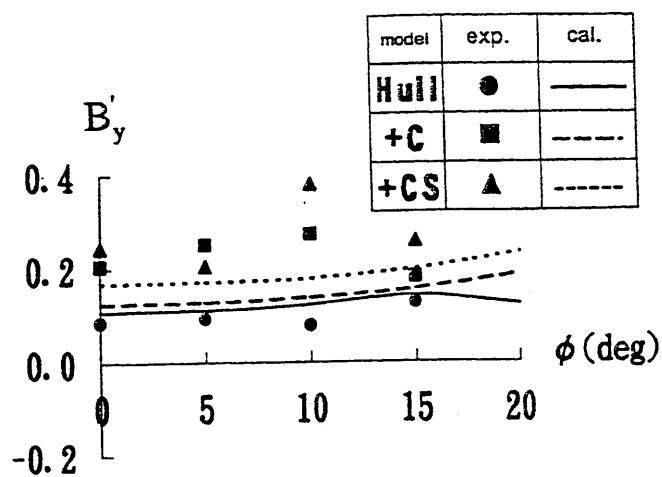


(b) 船底勾配角 20°

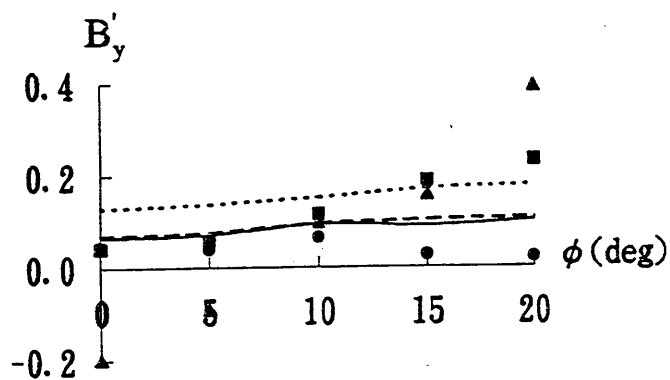


(c) 船底勾配角 30°

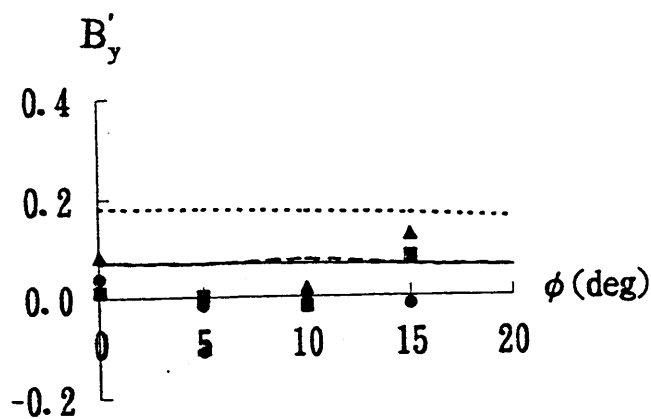
图 III-9 抗力系数



(a) 船底勾配角  $10^\circ$



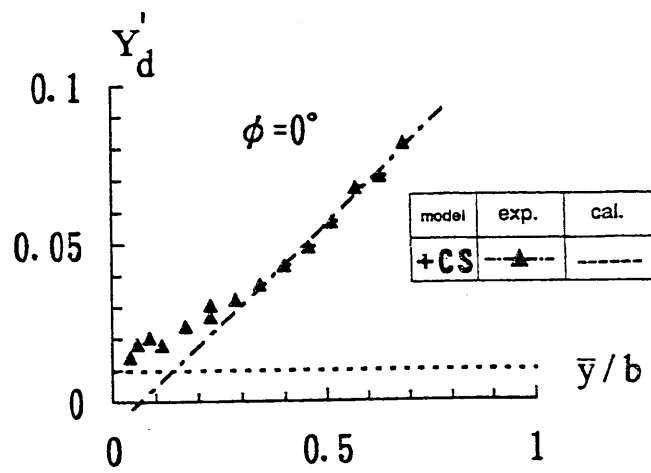
(b) 船底勾配角  $20^\circ$



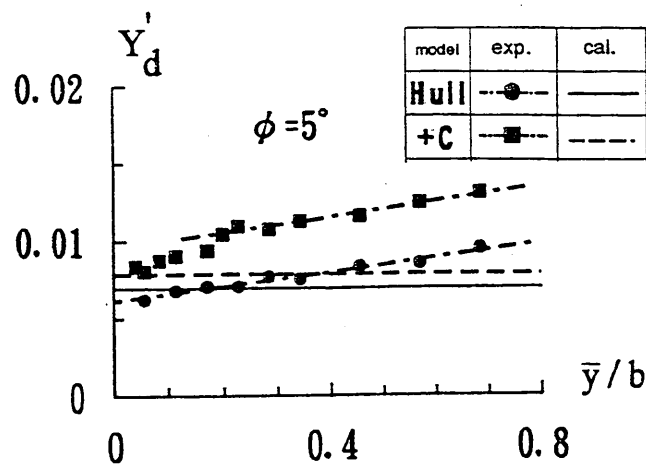
(c) 船底勾配角  $30^\circ$

図 III-10 減衰力の線形成分

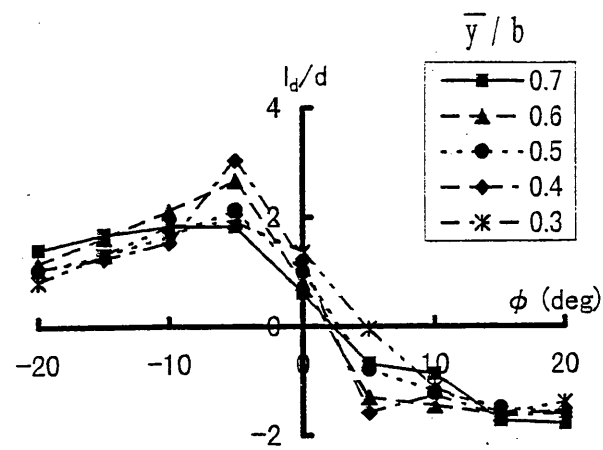




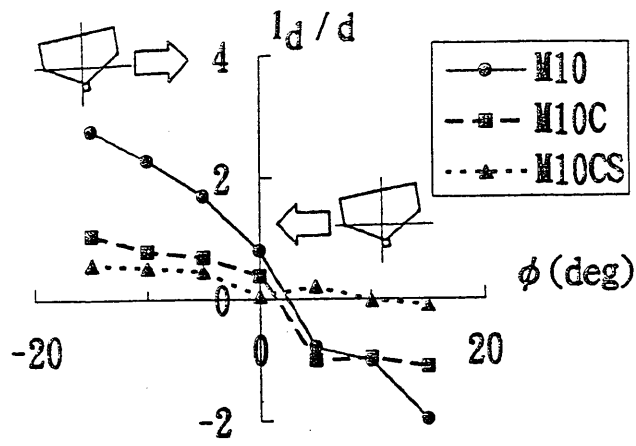
図Ⅲ-11 減衰力の運動振幅依存性  
 (模型船：M20CS、傾斜角：0度、周波数：0.43Hz)



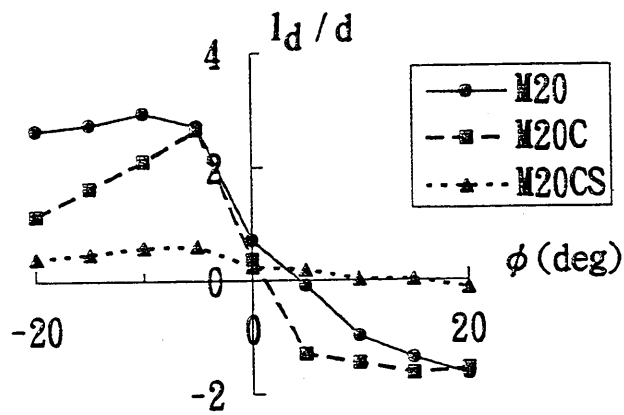
図Ⅲ-12 減衰力の運動振幅依存性  
 (模型船：M10 および M10C、傾斜角：5度、周波数：0.43Hz)



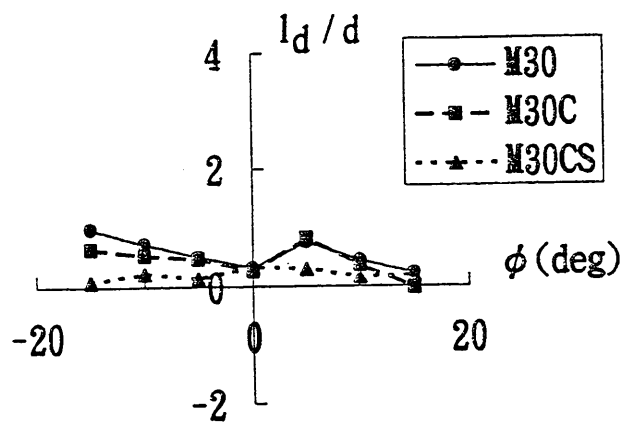
図Ⅲ-13 減衰力成分の着力点に対する  
運動振幅の影響(模型船：M20C)



(a) 船底勾配角 10°



(b) 船底勾配角 20°



(c) 船底勾配角 30°

図Ⅲ-14 減衰力の着力点高さの傾斜角依存性  
(振幅:  $\bar{y}/b=0.6$ )