

# 半潜水型石油掘削船の復原性について (その1:静的復原性)

高井 隆三\*・影本 浩\*・足達 宏之\*\*

## On the Stability of Semisubmersible Oil Drilling Rigs (Part 1 : Static Stability)

By

Ryuzo TAKAI, Hiroshi KAGEMOTO, Hiroyuki ADACHI

### Abstract

In order to study the static stability of semisubmersible oil drilling rigs under intact and damaged conditions, the authors conducted the following research themes, that is the design of experiment equipments, the development of measurement techniques, the model test and the theoretical calculation.

This paper describes in detail of these experimental equipments, the measurement techniques, the comparison of the model test and the theoretical calculation results.

Moreover, using the results of parametric theoretical calculations, the characteristics of static stability of semisubmersible oil drilling rigs are examined.

### 目 次

1. 緒言 .....	2	4. 実験結果と理論計算との比較及び考察 .....	9
2. セミサブリグの復原性に関する研究の動向 .....	2	4.1 静的復原性評価プログラム .....	9
3. 模型実験 .....	5	4.2 非損傷時の静的復原性実験 .....	9
3.1 供試模型 .....	5	4.2.1 小角度傾斜実験 .....	9
3.2 実験装置 .....	7	4.2.2 大角度傾斜実験 .....	12
3.2.1 模型重心・慣動半径計測装置 .....	7	4.3 損傷時及び荷崩れ時の準静的復原性 実験 .....	12
3.2.2 過渡衝撃力発生装置 .....	7	4.3.1 係留ライン破断実験 .....	13
3.2.3 転覆力付加装置 .....	7	4.3.2 区画浸水実験 .....	14
3.2.4 転覆記録装置 .....	8	4.3.3 荷崩れ実験 .....	15
3.3 実験方法及び計測方法 .....	8	5. セミサブリグの静的・準静的復原性に及ぼす 各種要因の影響 .....	16
3.3.1 実験方法 .....	8	5.1 重心位置及びGM値の影響 .....	16
3.3.2 計測方法 .....	9	5.2 排水量あるいは喫水の影響 .....	18
		5.3 コラム本数の影響 .....	18
		5.4 バラスト水移動の影響 .....	19
		5.5 区画浸水の影響 .....	20
		6. 結言 .....	21

\* 海洋開発工学部

\*\* 研究当時, 海洋開発工学部, 現在 世界海事大学  
原稿受付: 昭和62年3月3日

参考文献	21
付録Ⅰ 浮体に固定した4本の水位計を用いて、 浮体の平均沈下量と水面に対する傾きを 求める手法	23
付録Ⅱ 3種類の傾斜計の性能比較	26
付録Ⅲ 3隻のセミサブリグの復原性に関する シリーズ計算結果	27

## 1. 緒 言

半潜水型石油掘削船（セミサブリグ）の安全性に関する規準として、1979年に国際海事機関（International Maritime Organization, IMO）の場で採択された移動式海底資源掘削船構造設備規準（MODU CODE）がある。

各国の政府機関や船級協会もほぼこれと同等かそれに準拠した規則を適用してきている。そして、このコードの第3章には、セミサブリグの復原性が規定されている。

しかしながら、1980年に Alexander L. Kielland 号、1982年に Ocean Ranger 号などセミサブリグが相ついで荒天による沈没や転覆事故を起こしたので、これを契機として各国政府や船級協会は、現行の規則の見直し、または、改正すべきか否かの検討を迫られており、すでに DnV など一部の船級協会では規則の改正を行っている。

国際的には、IMO の場においても現行の MODU CODE の一部見直し作業が行われているが、そのため各国がセミサブリグの復原性に関する調査、研究を行いその成果を持ち寄って改正作業に役立てるべく努力がなされている。<sup>1)</sup>

船舶技術研究所においても、このような情勢のなかで、特定研究「浮遊式海洋構造物の係留システムの評価法に関する研究」の一環として、昭和58年度より4ヶ年間計画でセミサブリグの復原性の評価法に関する研究を行った。<sup>2) 3) 4)</sup>

研究は、風圧力等の外力と静的復原性に関するものと、風・波中の動的復原性に関するものから成り立っているが、本報告ではこのうち主として系統的な模型実験および損傷時（荷崩れ、区画浸水や係留ライン破断など）の静的および準静的な復原性を調べた結果について報告する。

なお、動的復原性に関する問題は、第2報：「動的復原性について」で報告することとする。

## 2. セミサブリグの復原性に関する研究の動向

本論に入る前に世界におけるセミサブリグの復原性研究の経緯あるいは動向を概観することとする。

セミサブリグの復原性に関する規準の最初のものは1968年のアメリカ船級協会（American Bureau of Shipbuilding, ABS）の規則<sup>5)</sup>である。

この規則は、米国海軍艦艇の復原性規則の考え方に準拠して作成されたものであり、その要点は、Fig. 2. 1 に示すように非損傷時については復原力曲線の囲む

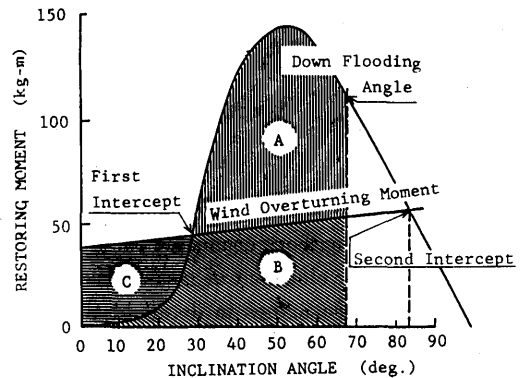


Fig. 2.1 Current rule for the stability of semisubmersibles

面積で表されるポテンシャルエネルギー（A+B）と、一定風速の風による転倒モーメントのなす仕事（B+C）の間に

$$A + B \geq 1.3 (B + C) \quad (2.1)$$

なる関係が成り立ちことを規程するものである。

(2.1) 式の右辺の定数1.3という値は、風以外の波や潮流の影響等の不確定要素に対して30%の余裕が見積もられているという見方が今日では有力である。

IMO の MODU CODE もこの ABS の規則にならったものとなっている。

しかし、規則の発表後もこの規則に対して様々な問題があることが指摘されてきた。その主なものは、

- (1) 風荷重の算定では、wind gust（変動風）や風の揚力等も考慮されるべきである、
- (2) 現行規則のマージン1.3の値は必要以上に厳しく、もっと緩和しても安全である、
- (3) 海水流入角（down flooding angle）を故意に小さくすることによって、規則を満足するようになり

る場合があるので問題である。などというものである。

これらの意見をふまえて、1972年にABS規則の改訂が検討されたが、実際にはデータ不足であるとして規則の変更は、ほとんどなされなかった。

これらの経緯をへて、科学的データ、研究に立脚した合理的な規則を作るための海洋構造物の復原性に関する研究の必要性が認識された。

まず、アメリカ造船造機学会 (SNAME) に、1973年8月より3ヶ年計画で復原性に関するプロジェクト研究<sup>6) 7) 8)</sup>が発足した。

研究の対象としては、Fig. 2. 2に示す4フーティング型および2ローハル6コラム型の2種類が当時の代表的なセミサブリグとして選ばれた。

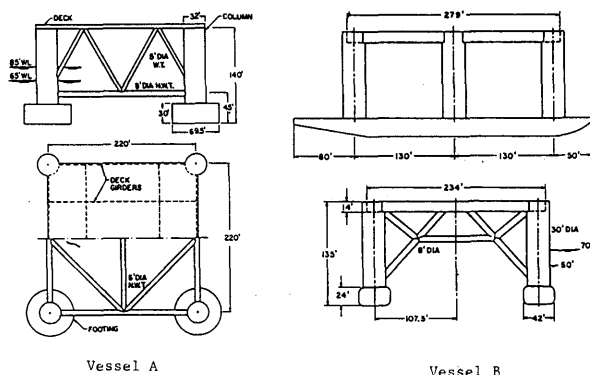


Fig. 2.2 Semisubmersible oil drilling rig model

研究開始当初の計画では、外力、係留、載荷条件 (GM) などを変化させて、転覆を引き起す可能性を実験的に解明する (impose maximum environmental forces on a minimum stability condition) というものであった。

しかし、その研究成果ではセミサブリグは波下側の甲板エッジが水没する場合があるものの、転覆を引き起こすような組み合わせを見出すことはできなかった。

したがって、セミサブリグの転覆現象は規則に規定されているエネルギーの大小関係のほかにも、上甲板と水面との距離を復原性、安全性規準の一つとすべきであるとの認識から研究計画が変更され、転覆の可能性を追求することを中止し、上甲板と水面との相対距離に関する研究を行うこととなった。

その結果、

(1) 風による初期傾斜は、波浪中における動揺にはあまり影響を与えない、

(2) 不規則波中における上甲板と水面との相対距離は、規則波中の周波数応答特性から計算したものより常に小さい、即ち、危険側である。その主な原因としては、波力の長周期成分や衝撃的な波力による長周期横揺れが考えられる、

(3) ローハルに働く定常的な鉛直成分波力による定常傾斜の現象が見られる、

(4) 規則に従って風抗力、モーメントを計算すると風洞実験値より大きい値を与える、

(5) 規則では考慮されていない風揚力のモーメントへの寄与が無視できない、等のことが判明した。

この研究以降、波浪による定常傾斜をはじめとして復原性に関する研究<sup>9) 10)</sup>が行われるようになったが、規則自体はこの研究によって何ら変更されることがなかった。

しかしながら、A. L. Kielland号やO. Ranger号の転覆事故が発生し、セミサブリグの復原性に対する関心がにわかに世界的に高まってきた。

我が国でも、これらの事故と相前後して、セミサブリグの復原性に関する研究が開始されるようになった。

日根野ら<sup>11)</sup>は、長周期の横揺れ運動が甲板と水面との相対距離に及ぼす影響について計算を行い、宝田ら<sup>12) 13) 14) 15)</sup>は、セミサブリグの波浪中の大傾斜による転覆などの転覆機構について一連の研究を行っている。

このうち、宝田らは大波中で大傾斜し甲板が靑波に洗われるような状況になることを転覆の危険として捉え、外力として風抗力によるモーメントに加えて、以下の諸点を考慮すべきであるとしている。

(1) 係留力、潮流力、波漂流力 (特に上下方向) による転倒モーメント、

(2) 係留点高さの転倒モーメントに及ぼす影響、

(3) 打ち込み海水、着氷による重心の上昇、海水の偏圧による傾斜、

(4) 初期傾斜の違いによる波浪中の釣り合い角度の変化。

また、1982年より日本造船研究協会第192研究部会 (SR192) においても、セミサブリグの復原性に関する研究が4ヶ年計画で実施された。

SR192の研究は、セミサブリグ模型を用い風、波、潮流の複合外力下において大傾斜あるいは係留ライン

切断に到るような大きい張力の発生する条件を観測すると共に、セミサブリグやジャッキアップリグに働く風、波、潮流による外力、流体力、大傾斜時の動揺特性等の推定、精密化を行うことを目的としている。

これらの研究成果は、部会の一連の報告書<sup>16)</sup>あるいは、これらに関連する研究論文に述べられているのでここでは省略する。

セミサブリグの復原性規則に取り入れられる唯一の外力である風荷重については復原性に関連させた研究<sup>17)~20)</sup>がさかんに行われたが最近の成果として、次のことがほぼ一般的に認識されている。

即ち、傾斜させたセミサブリグ模型の風洞実験によると現行のルールによって推定された風圧力、転倒モーメントは、直立状態ではほぼ妥当な値を与えるが大傾斜状態では大きく推定し過ぎる傾向となる。

また、潮流力については、水圧の着力点は水面下投影面積の中心による方法が規則の計算で用いられているが、これらの当否については前田ら<sup>29) 30) 31)</sup>の実験的研究があり、直立状態では過小な値を与えることや傾斜角への依存性も実験データとして示されている。

その結果、風圧力中心の過大評価と水圧中心の過小評価とが重なる結果、現行の風圧転倒モーメントレバールの推定は、直立状態についてはほぼ妥当な値を示すことが示された。<sup>32)</sup>

一方、北海油田において多数のセミサブリグを稼働させているノルウェーでは、A. L. Kielland号の事故を契機として、ノルウェー政府のNorwegian Maritime Directorate (NMD)を中心として、セミサブリグの安全性に関するいくつかの研究プロジェクトを発足させた。そのうちの 하나가MOPPSプロジェクト(The Mobile Platform Stability Project)と呼ばれるものである。<sup>33) 34)</sup>

MOPPSプロジェクトにおける研究項目は、1) 着氷、2) 動揺特性、3) 模型実験、4) 教育・訓練、5) 損傷状態の評価、6) 静的復原性評価、7) プロジェクトの総合、と広範囲に亘っている。

その研究成果として過酷な海象条件下におけるセミサブリグの安定性について以下のことが指摘されている。

(1) 通常の船舶と異なって、損傷を受けないセミサブリグが(通常のGMをもっていれば)一発の大波で転覆するような事態は起こりえない、

(2) 実験によれば、損傷を受けていないセミサブリグが水密デッキを有していれば、初期状態として負の

GMをもった場合でも転覆は起こらない、

(3) 損傷を受けて大傾斜した状態では、波力の正確な推定や転覆過程に対する詳細な影響の推定を理論的に行うことはむずかしく実験によらざるを得ない。

また、損傷時の条件としては、自然環境条件下における損傷や浸水の他に、人為的なバラストシステムの操作ミスなど様々の原因が考えられるため、大傾斜(5~15°)状態で喫水を数通りに変化させて波浪中の実験を行っている。その実験においては、コラムやデッキハウスの開口部からの浸水も自由に行われるようにし、また、係留ラインを緊張、弛緩状態及び破断させた状態について調べているが、いずれも転覆には至らなかった。結局、ポンツーンやコラムに浸水させて、15~35°の傾斜をさせた状態で波浪中の実験を行った時だけにセミサブリグの転覆が起こっている。

更に、現在の復原性規則に欠けているものとして以下の4項目を指摘している。

(1) 損傷状態における静的復原性の計算が精度よくできない、

(2) 風による抗力、揚力の推定精度が不十分である、

(3) 復原性に対する係留システムの影響が考慮されていない、

(4) 波の影響、風による動的影響が考慮されていない。

そして、規準の将来の方向としてrisk analysisによる信頼性評価を行う必要性を示唆している。

カナダ政府もO. Ranger号の事故原因調査のため同船の模型を用いた広範な実験を行い、その結果を公表している。<sup>35)</sup>

アメリカ船級協会(ABS)も1983年にセミサブリグの復原性に関する研究プロジェクトを発足させ、その第I期(Phase I)の研究結果が1986年のIMO設計設備小委員会に提出された。<sup>36)</sup>

この研究の内容は、下記の諸点から成り立っている。

(1) 種々のセミサブリグの船型(2ローハルで、4本、6本、8本コラム)についての静的復原性の計算、

(2) セミサブリグの波浪中運動の計算、

これは、周波数領域での線形計算と時間領域での非線形計算とから成るが、後者の計算法が最もよく用いられた、

(3) 外力条件や船型について系統的計算を行い、動

的復原性に及ぼす風（定常及び非定常）、波（規則波、不規則波、ブループ波）、潮流、GM値、係留ラインのフェアリーダー高さ、外力の方向などの影響を調べると、

発表された研究成果では下記の点が強調されている。

- (1) 運動の計算と実験がよく合う、
- (2) 復原力曲線上に定義されるいわゆる面積比の1.3の値については、このうち0.3は現行規定では定量化されていない波浪の影響などのunknownの動的要因を考慮したものと解釈できる。しかし、この値が形状の違うセミサブブリグの間で等しいマージンを与えるとはかぎらない、
- (3) 復原性曲線と傾斜角との関係はセミサブブリグの運動を理解するうえで重要であり、この形は喫水の値により大きい影響を受ける。GM値を適切に決めることがオペレーションにとっても必要である、
- (4) 風と波のうえに同方向の潮流が加わるとセミサブブリグを安定化する方向に働く、
- (5) 風圧力やモーメントの影響は静的、動的ともに大きい。風圧力の非定常性を考慮する方法を開発すべきである。

そして、ひきつづいて行われる予定のPhase IIの研究課題として次のような項目を挙げている。

- (1) 包括的な系統的船型により、喫水、カラム高さ、海水流入角、復原力曲線の形状の影響を調べると共に、代表的なモデルを用い大波浪中の模型実験を行い、GM値が非常に小さいか零の場合の運動の計算と比較する、
  - (2) 実機でのテストも行い模型実験のスケール効果を明らかにする、
  - (3) 実際の海象を表わす風、波のスペクトラムを定めて、セミサブブリグの設計時の外力条件とする。そして、そのような中でセミサブブリグの復原性評価を行う。
- そのために、複合外力下のセミサブブリグの運動の時間領域でのシミュレーション計算を行うと共に対応する模型実験も行う。
- (4) これらの成果に基づき現行の復原性規準を見直す、
  - (5) 非損傷時のみならず、損傷時の場合についても解析を進める、
  - (6) 十分な根拠が得られれば、現行規準に代り得る復原性規準を提案する。

このABSのPhase IIの研究結果も近い将来IMO等で発表されることとなっている。

我が国においては、前述のSR192のほか、IMOへの対応を行うため、日本造船研究協会の基準研究会にRR743分科会が設けられ、前述の船舶技術研究所における研究と協同研究にて、主として復原性の評価、損傷時の復原性の研究が実施された。

SR192やRR743による我が国の研究成果は、IMO設計設備小委員会に資料として提出されたところである。<sup>37)</sup>

これら各国の研究成果は、1988年を目標として実施されているIMOにおけるMODU CODE改正作業の中で比較検討され、合理的な復原性の規準を作るのに役立つものと思われる。

上記の国際的なプロジェクトを概説してみると下記のようになる。

- (1) 傾斜時を含め、セミサブブリグの波浪中における動揺は通常線形計算が実験値とよく合う、
  - (2) 風圧傾斜モーメントは、傾斜角が増えた場合の現行ルールに基づく計算値は実験より大き目に推定する、
  - (3) 非損傷時に外力のため転覆するような状況はあり得ないが海水打込みや浸水を起こす大傾斜が安全上問題となり、これはセミサブブリグの形状、喫水などに支配される静的復原性の問題として取り扱うことができる、
  - (4) 変動風や波浪などの外力の動的影響は時間領域のシミュレーション計算で推定することができる。ただし、これを復原性規準に結びつける方法は未だ確立されていない。
- 本論文では、セミサブブリグの復原性の基本となる静的復原性を系統的に調べたものであり、規準を検討するうえで基礎的なデータを与えるものといえる。

### 3. 模型実験

#### 3.1 供試模型

実験および理論計算などに用いた供試模型は、セミサブブリグの代表的な形状と考えられる2ローハル型の8本コラム（以下M1模型）及び4本コラム（以下M3模型）を有する模型である。また、模型は製作しなかったが、理論計算の対象としては、2ローハル型6本コラム（以下M2模型）のセミサブブリグも用いた。なお、これらの模型は想定実機の1/50の縮尺であるとした。

M1, M2およびM3模型の主要寸法及び概要図を Fig. 3.1, Fig. 3.2および Fig. 3.3にそれぞれ示す。

今回実験に使用した模型の特徴は以下の通りである。

(1) 模型の各主要構成部分は分解可能である。即ち、上部デッキ、ローハル (コラムを含む) およびブレーシングとに分解することができる。従って、必要に応じて各部材単独での実験が可能であり、風、波および潮流によって各部材に加わる力、モーメント等の計測ができる、

(2) 模型の2つのローハル内部は、各々が10ヶ所の小区画に分かれている。なお、後述するようにM1模型用に、片側4本のコラムを16の小区画に分割したのも用意した。これらの小区画には、パイプを通して水の注排水ができ、損傷時の浸水及びバラスト水の移動などを模擬することができる、

(3) 模型は透明なアクリル樹脂製であるため、区画への浸水やバラスト水移動時の様子を目視で観測することができる、

(4) 各々のコラム内には、合計20kgの重錘を上げ下げできる重心調整用機構を有している。このため、模型の重心高さを任意に設定することができる。

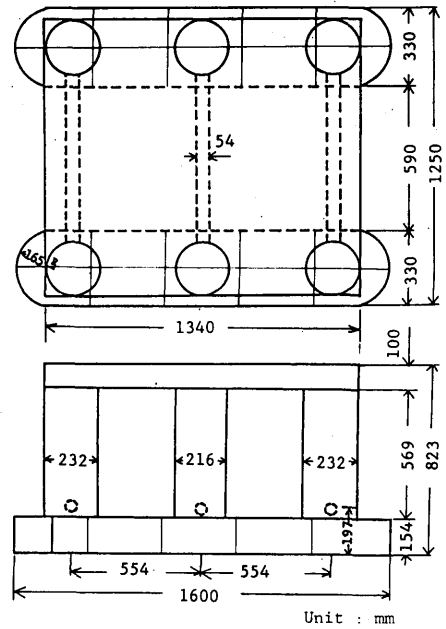


Fig. 3.2 General view of the M-2 Type model used for the calculations

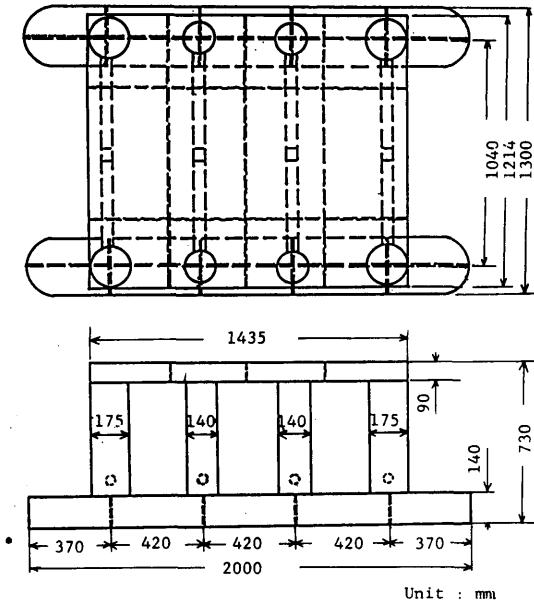


Fig. 3.1 General view of the M-1 Type model used for the experiments and calculations

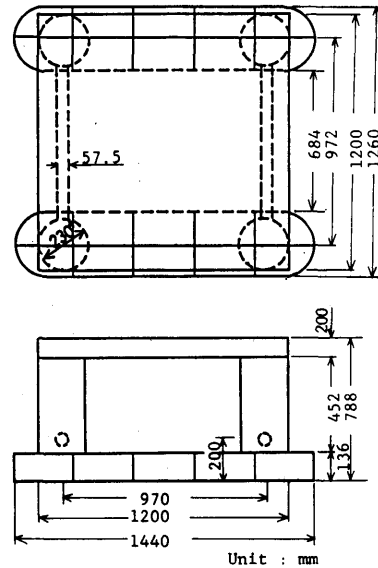


Fig. 3.3 General view of the M-3 Type model used for the experiments and calculations

### 3.2 実験装置

本研究においては、セミサブブリグの非損傷時および損傷時の状態を模擬するため、下記に述べるような各種の実験装置やデータ収録装置を製作した。

#### 3.2.1 模型重心・慣動半径計測装置

模型の重心や慣動半径を測定するため、Fig. 3.4に示すようなブランコ式の動揺装置を製作した。

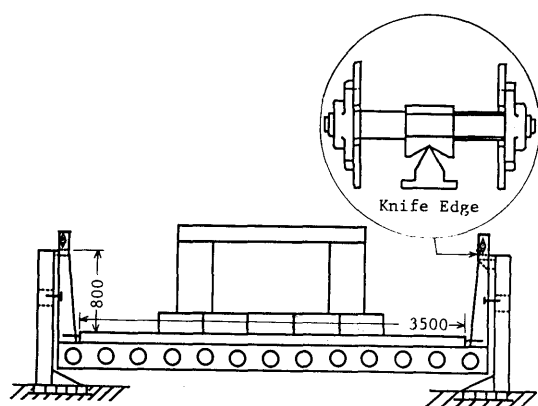


Fig. 3.4 Equipments used for the measurements of the inertia and the center of gravity of models

搭載可能な模型幅は最大3mまで、搭載荷重は最大500kgまでである。

また、ブランコの振動周期は、公称分解能が0.0001秒のビームセンサー、傾斜角度は公称分解能が0.001度を有する高精度の傾斜計を用いて計測を行っている。なお、ブランコの主要目を同図中に示す。

#### 3.2.2 過渡衝撃力発生装置

Fig. 3.5に示す実験装置を製作しセミサブブリグの転覆や沈没の要因となる荷崩れ、コラム等の一部損傷による浸水、バラスト水の移動および係留ラインの破断の状態を模擬し、損傷に基づく過渡的な現象に対する応答を調べることができるようにした。

この装置は、荷崩れを再現する2台の機構部、係留ラインの破断を再現する機構部、区画内への浸水を模擬する10台の電磁弁および1台の揚水ポンプとこれらを駆動させる制御部より構成されている。

荷崩れを再現する機構部は、図に示すようにデッキ上の移動ウェイト(0.68kg)をステッピングモータとボールネジを組合わせて移動させる。

移動速度は6.5mm/秒~66.0mm/秒の間を10段階に、

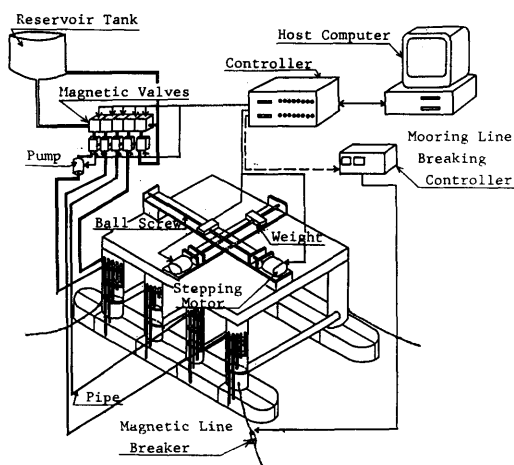


Fig. 3.5 Test arrangements for the simulation of flooding, breaking of a mooring line and moving of a load

移動距離は最大80cmまで任意に設定することができる。

係留ライン破断機構部は、係留ラインの途中に取り付けたマグネットとそれを制御する制御部から構成されていて、マグネットへの負荷電圧を遮断することにより係留ライン破断の模擬を行う。

なお、マグネット吸着力の制御は電圧値を変化させて行い、その最大吸着力は4kg程度まで任意に設定することができる。

区画への注水機構部は、台車上に設置した水溜タンクとセミサブブリグの区画室とを継ぐパイプの途中に設けた電磁弁と揚水ポンプとの組み合わせから成り、区画内への浸水現象や区画間のバラスト水の移動を模擬することができる。なお、各々の電磁弁の開閉順序、開閉の持続時間や揚水ポンプの始動、停止などは任意に設定することができる。

以上の機構部の制御は、コントローラ部を通してパソコンからの指示により、集中的に行われる。

#### 3.2.3 転覆力付加装置

Fig. 3.6に示す転覆力付加装置は、自然環境外力および各種損傷や荷崩れなどによってセミサブブリグに生ずる転倒モーメントを模擬してセミサブブリグに与えることができる。

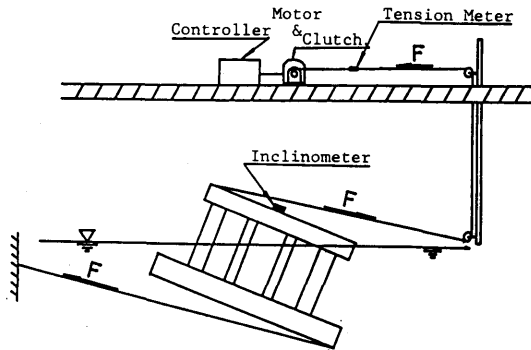


Fig. 3.6 Test arrangement for overturning of models

この装置は、トルクモータと電磁クラッチおよびそれらを制御する制御部と張力や傾斜角を計測する計測部とから構成されており設定した転倒モーメントを模型に与える。

#### 3.2.4 転覆記録装置

Fig. 3.7 に示す転覆記録装置は、従来のポテンショ型の運動測定装置や発光体とカメラを組み合わせた無接触光学式の計測装置では計測が困難である大角度傾斜時や転覆時の運動などを計測、記録するためのものである。

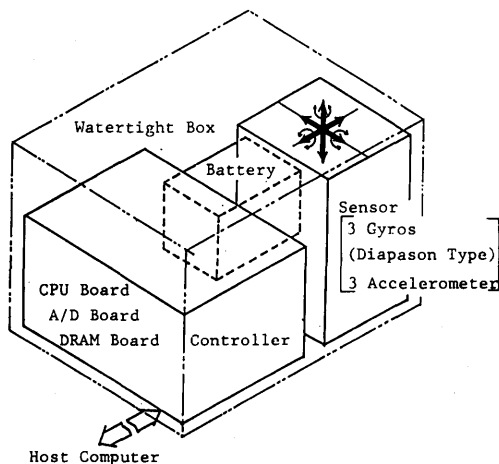


Fig. 3.7 Equipments used for the measurements of the six-degrees-of-freedom of motions in the capsizing or the large inclination of the model

この装置は、3台の音叉式ジャイロとサーボ式加速度計3台で六成分の変位を検出する検出部、その検出部からの出力電圧をA/D変換した後にメモリーに収録する収録部、更にパソコンヘデータを出力させる制御部およびこれらの機構を動作させる蓄電池の電源部より構成されている。装置全体は、完全防水を施したアルミ製の箱に格納して模型に搭載する。

また、計測時には必要な設定項目をパソコンから入力させた後、陸上とは完全に分離させた状態にして模型に搭載し、所定の入力データを自動計測および収録することができる。

### 3.3 実験方法および計測方法

#### 3.3.1 実験方法

(1) 傾斜試験では、デッキ上に置いた一定荷重の重錘を等距離間隔で移動させ、その時の模型の傾斜角を計測した。この方法を用いた場合には、小角度傾斜(約10度程度)での静的復原性特性を調べることができる。また、実験では上記の方法とは原理的に同じであるが、Fig. 3.5 に示す荷崩れ再現機構を用いて低速度で重錘が移動する場合での傾斜を計測する方法も用いた。

(2) 大角度の傾斜試験においては、上記のようにデッキ上の重錘を移動させる方法では大きな転倒モーメントを与えることが困難であるために、3.2.3において述べた転覆力付加装置を用い、模型が転倒する程度までの大きなモーメントを加え模型の傾斜角を計測した。

(3) 区画浸水実験では、セミサブリグの水面下の一区画が損傷を受けて区画浸水した現象を模擬するために3.2.2において述べた区画浸水再現機構を用いて一区画への注水を行い、その時の傾斜角および沈下量を計測した。また、この実験では浸水時の動的影響の有無を調べる目的で連続的に浸水させた場合と計量した水を段階的に注水した場合とで姿勢を計測し、その両者を比較した。

(4) 荷崩れ実験では、3.2.2において述べた荷崩れ再現機構を用いて荷崩れにより発生する転倒モーメントを模擬し、その時の模型の姿勢変化を計測した。この実験においても荷崩れ再現機構を用いて荷重が一定速度で移動する動的な場合について実験し、静的な場合との比較を行った。

(5) 係留ライン破断実験では、3.2.2において述べた係留ライン破断装置を用いて模型を係留している4条の係留ラインのうち一条を破断させて破断時の模



型の姿勢変化を計測した。

### 3.3.2 計測方法

前項で述べた実験において用いた各種の計測方法について述べる。

静的復原性実験では、模型に加えた転倒モーメントによって生じる模型の姿勢を精度よく計測する必要がある。今回の場合は、以下に示す4つの方法を用いて姿勢変化を計測した。

(1) 傾斜計 (Inclinometer) やポテンシオメータを用いた六成分運動測定装置にて計測する方法。

(2) 直交する3つの軸上に配置した3個のLED(発光体)の光を2台のカメラで検出し、演算にて3次元位置解析を行う無接触型運動計測装置 (Sel Spot) にて計測する方法。

(3) 付録Ⅰで示すように、模型の四隅に設置した4台の水位計によって計測される水位から模型の姿勢を計算する方法。

(4) ビデオ画像を利用し、その画像から模型の姿勢を直読する方法。

付録Ⅱで述べるように、(1)~(3)に示した計測方法を比較した結果から、通常の傾斜実験においては(1)で示した計測方法を用いた。

## 4. 実験結果と理論計算との比較および考察

### 4.1 静的復原性評価プログラム

本研究においては、これまで述べてきた実験手法と共にセミサブリグの静的復原性評価プログラムの開発も行った。

このプログラムは、下記の6つの機能を有している。

#### (1) 幾何学的形状データの作成

幾何学的形状データとは、入力した構造物の要素データを用いて容積等の幾何学量の計算を実行可能にするもので、入力形式および使用目的より次の通りに分類される。

- (ア) 点列形状データ：通常の外殻形状データ、
- (イ) 簡易形状データ：(ア)と同様に外殻を表わすデータであるが、外殻が円柱や角柱などの場合に入力を簡単にしたデータ、
- (ウ) マップ形状データ：タンク等の内部区画を表わすデータ。

#### (2) 幾何学量計算

構造物と水面の関係より、水面下の容積および水線面の面積とこれらのモーメント量を計算する。

#### (3) Hydrostatic 計算

構造物の任意の姿勢に対して、船舶の標準形式に準拠した、浮心、排水量、水線面積、浮面心、メタセンター、浸水面積、毎種排水トンの項目について計算する。

#### (4) 平衡状態の計算

非損傷時および損傷時の平衡状態における構造物の姿勢、水面下の幾何学量を計算する。

#### (5) 復原力の計算

非損傷時および損傷時の復原力 (GZ) 曲線の値を計算する。

#### (6) グラフィックディスプレイ

計算後のセミサブリグの姿勢や水面を切る状態などを立体的に見示するためのグラフィック表示を行う。その出力図の1例を Fig. 4. 1 に示す。

### 4.2 非損傷時の静的復原性実験

セミサブリグには、風、潮流などの自然環境外力やその他の要因によって転倒モーメントが働く。

本研究では、セミサブリグに働く静的転倒モーメントと変位、傾斜の関係を調べることににより、これらの各種要因によるセミサブリグの変位や傾斜を推定できると考えて、広範な傾斜実験を行った。そして、静水中におけるセミサブリグのもつ基本的な特性を調べるための小角度の傾斜実験と転覆時を想定した大角度の傾斜実験とを行った。

#### 4.2.1 小角度傾斜実験

小角度の傾斜実験は、Table 4. 1 のSTAT-1 に示すようにM1模型(無係留状態)を用いて、稼働時の喫水 ( $d=0.424\text{m}$ ) についてはGM値を1種類、暴風時の喫水 ( $d=0.245\text{m}$ ) についてはGM値を2種類の合計3通りの場合について行った。

実験方法は、デッキの縦あるいは横の中心線から一定距離  $d$  だけ離れた位置から、これらの中心線に平行な直線上で重量  $w$  の重錘を移動させる方式であり、移動距離  $l=0\sim 60\text{cm}$  の間を6通りに変化させて行った。

それらの実験において計測した転倒モーメント ( $w \times l$ ) に対する傾斜角を Fig. 4. 2 ~ Fig. 4. 7 に示す。

なお、図中の黒印および実線や破線等は実験値、日丸印は初期モーメントが零の場合に対する理論計算値であり、図の縦軸からの矢印は、単純にトリムまたはヒールさせた際にロワール部が水線面から露出する最小傾斜角度である。

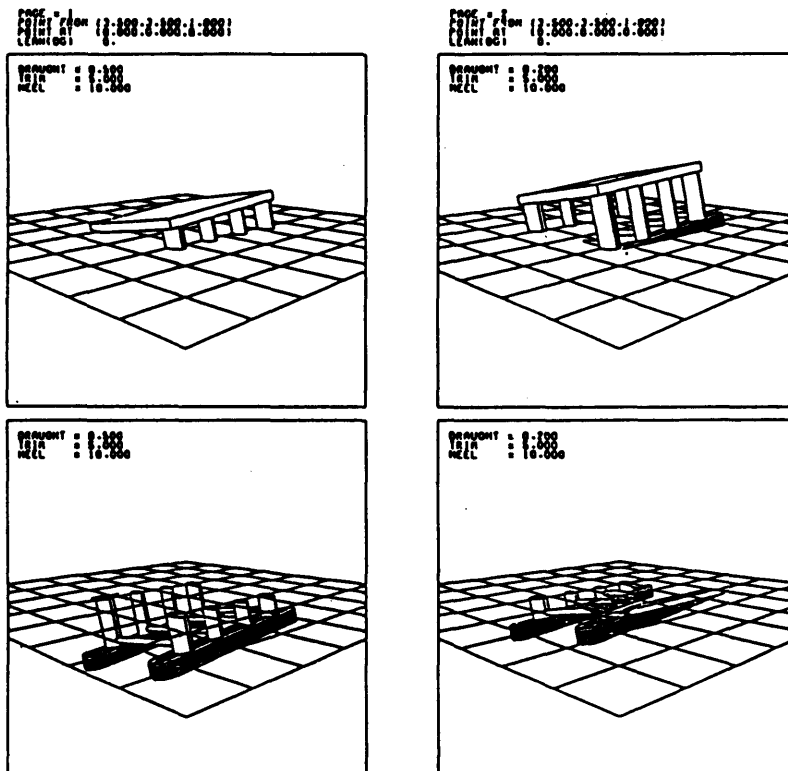


Fig. 4.1 Examples of graphic display of listed condition of semisubmersible model

Table 4.1 Conditions of the intact static stability experiments

Model Name	STAT - 1			STAT - 2				STAT-3	
	M-1			M-1				M-1	
Displacement (kg)	165.9	165.9	191.7	163.9	163.9	186.5	186.5	186.5	
Draft (m)	0.245*	0.245*	0.424*	0.240	0.240	0.385	0.385	0.385	
GM <sub>1</sub> (m)	without mooring	0.105	0.001	0.039*	0.0167	—	0.005	—	0.017
	with mooring	—	—	—	0.0248	—	0.011	—	—
GM <sub>t</sub> (m)	without mooring	0.087*	0.000*	0.039*	—	0.013	—	0.013	0.026
	with mooring	—	—	—	—	0.025	—	0.019	—
Line weight (kg-m)	in air	—	—	—	0.115	0.115	0.115	0.115	—
	in water	—	—	—	0.100	0.100	0.100	0.100	—
Initial tension (kg)	horizontal	—	—	—	0.345	0.363	0.253	0.240	—
	vertical	—	—	—	0.352	0.368	0.300	0.295	—

\* : calculated value

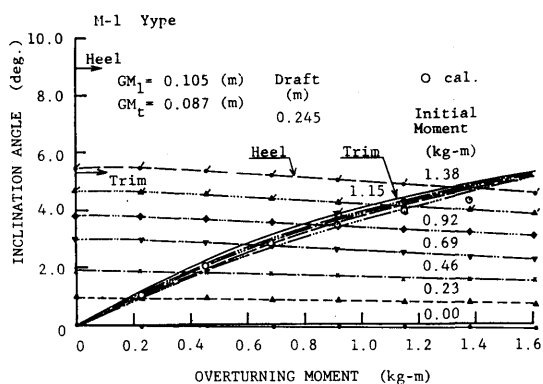


Fig. 4.2 Results of the small angle inclination test (survival condition,  $d=0.245m$ )

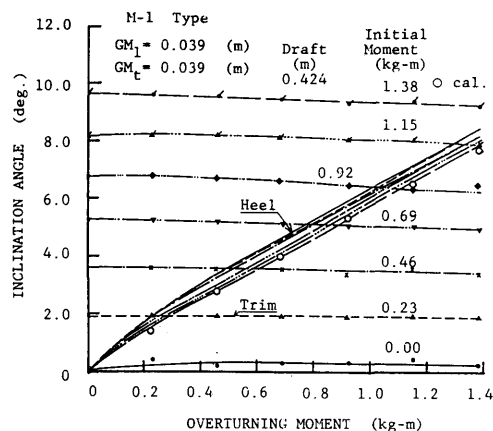


Fig. 4.5 Results of the small angle inclination test (operation condition,  $d=0.424m$ )

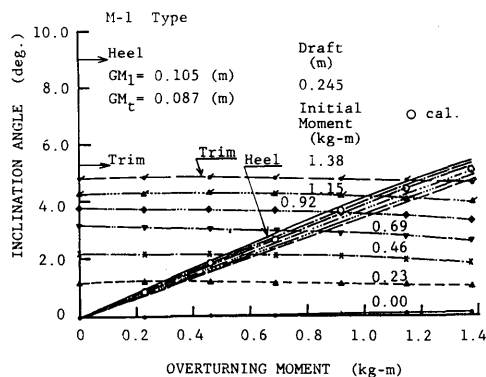


Fig. 4.3 Results of the small angle inclination test (survival condition,  $d=0.245m$ )

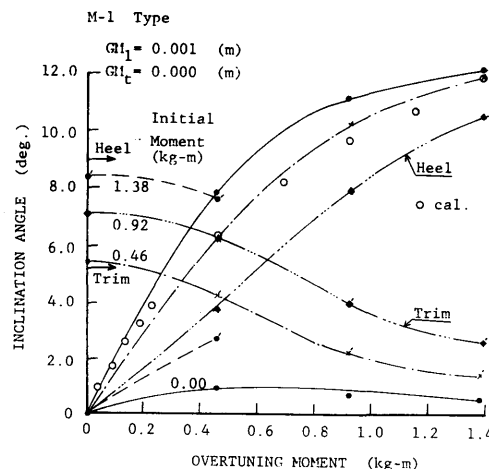


Fig. 4.6 Results of the small angle inclination test (survival condition,  $d=0.245m, GM\sim 0$ )

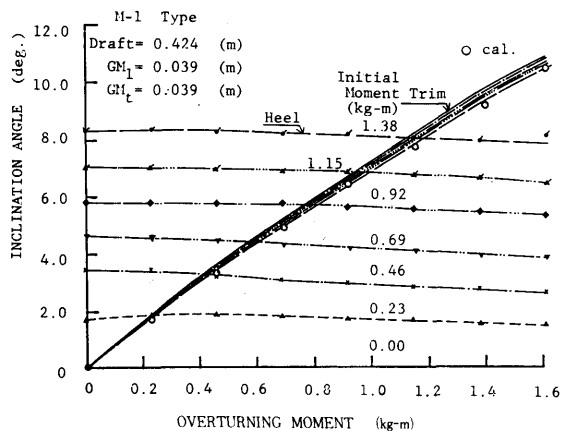


Fig. 4.4 Results of the small angle inclination test (operation condition,  $d=0.424m$ )

まず、暴風時を想定した場合の Fig. 4.2 および Fig. 4.3 から初期モーメントによるヒール角 (Fig. 4.2) またはトリム角 (Fig. 4.3) は、転倒モーメントが大きくなるに伴い順次、僅かに減少する傾向を示す。初期モーメントを大きくさせてトリムまたはヒールを増加させると転倒モーメントによるヒール角またはトリム角が僅かに減少する傾向を示す。これらの傾向は、模型が傾斜することによってコラムの水線面積が僅かに増加するためである。

一方、静的復原性評価プログラムにて求めた理論計

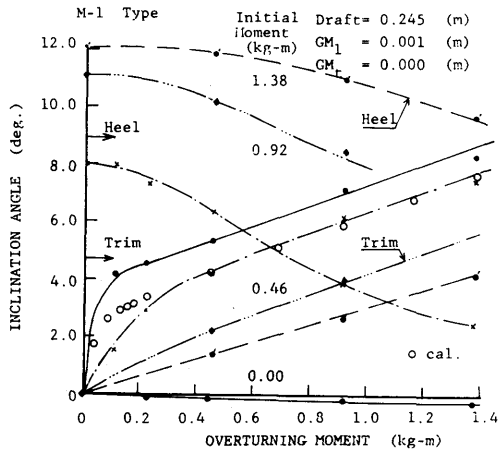


Fig. 4.7 Results of the small angle inclination test (survival condition,  $d=0.245m$ ,  $GM\sim 0$ )

算値は、全般的に対応する実験値（実線）よりやや低い値を示すが、数パーセントの誤差範囲内で実験値を推定できる。

次に、稼働時を想定した場合の実験結果を Fig. 4.4 及び Fig. 4.5 に示すが、今回実験した範囲ではローハル部が水面上に露出せず、また、GM値も暴風時より小さいために傾斜角がトリム、ヒールともに大きくなる傾向を示している。

なお、この状態では、ローハル部が水線面から露出する最小傾斜角がトリム方向で $16^\circ$ 、ヒール方向で $22.5^\circ$ である。

最後に Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 は、暴風時の喫水でGM値が零に近い場合の結果を示すものである。この図から、GM値がほぼ零の時は、ローハル部が水線面から露出するまでは僅かな転倒モーメントにより急激に模型は傾斜する。しかしながら、いったんローハル部が水面上に露出しはじめると水線面積が大きくなり、初期GMにかかわらず傾斜しにくくなる。また、静的復原性評価プログラムによる理論計算値は、実験値と傾向が似ているが、やや低い値を示している。その原因は、このようにGMがほとんど零に近いと考えられる場合に正確なGMの値を実験あるいは計算にて推定することが困難であり、しかもGM値のわずかな差が傾斜角に大きく影響をあたえるためであると考えられる。

#### 4.2.2 大角度傾斜実験

セミサブリグの復原性を検討する際には、面積比の他に復原力曲線において復原挺と風荷重による転倒モーメント挺との1次叉角（NMD等の規則では $15^\circ$ 以下と規定している）および第2交叉角または海水流入角（DNV等では $30^\circ\sim 35^\circ$ 以上と規定している）が重要な項目の1つになる。

そこで、無係留状態のM1型模型を用いて稼働状態において大角度傾斜実験を行った。その実験にて求めた復原力曲線を Fig. 4.8 に示す。なお、図中の白丸

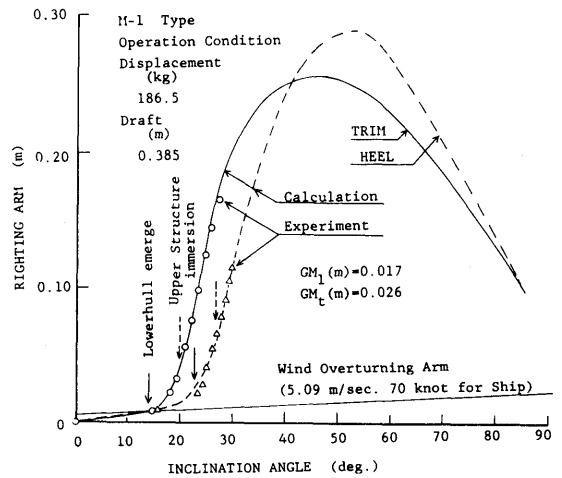


Fig. 4.8 Results of the large angle inclination test

印、白三角印は実験値であり、実線および破線は静的復原性評価プログラムによる理論計算値である。また、実線矢印はローハル部が水線面から露出する最少傾斜角であり破線矢印は、上部構造部が水線面に着水する最少傾斜角である。

この図から、理論計算値は、今回実施した大角度傾斜実験値と極めて良く一致することが分かる。なお、図中の風速が $5.09m/sec$ （実機換算 $36m/sec, 70knots$ ）の風荷重による転倒モーメント挺の曲線は、文献16のSR192セミサブリグ（2ローハル8コラム）に対するABS規則による計算値を適用したものである。

#### 4.3 損傷時および荷崩れ時の準静的復原性実験

セミサブリグの損傷時および荷崩れ時を代表する事例として係留ラインの一条の破断、一区画浸水または

Table 4.2 Conditions of the damaged static stability experiments

Model Name	STAT-4		STAT-5		STAT-6				
	M-1		M-1		M-1				
Displacement (kg)	163.9	186.5	179.8	186.5	136.3	136.3	157.9	157.9	
Draft (m)	0.240	0.385	0.340	0.385	0.290	0.290	0.410	0.410	
GM <sub>1</sub> (m)	without mooring	—	—	0.007	0.013	0.022	—	0.026	—
	with mooring	0.025	0.011	—	—	—	0.032	—	—
GM <sub>t</sub> (m)	without mooring	—	—	0.017	0.022	0.020	—	0.026	—
	with mooring	0.025	0.019	—	—	—	0.033	—	0.028
Line weight (kg/m)	in air	—	—	—	—	—	—	—	—
	in water	0.15	0.15	—	—	0.100	0.100	0.100	0.100
Initial tension (kg)	horizontal	0.354	0.249	—	—	0.393	0.393	0.294	0.294
	vertical	0.346	0.273	—	—	0.356	0.356	0.298	0.298

上甲板上の荷崩れ等を再現し、その際にセミサブリグが発生する過渡運動および最終的な姿勢を実験的に調べた。その模型実験時の状態を一括して Table 4.2 に示す。

4.3.1 係留ライン破断実験

係留ラインが破断した場合にセミサブリグの復原性上で問題となる点は、破断直後における過渡運動時の傾斜角、あるいは他の係留ライン張力の最大値および一定時間が経過した後における最終的な姿勢と係留ライン張力とである。

係留ラインの破断実験では、M1 模型を Fig. 4.9 に示すように 4 条の係留ライン（一般には 8 条係留が多いが、ここでは、2 条を 1 条に置き換えている）にて係留ラインの 1 条を破断させた。その際に計測した模型の 6 成分の運動の時系列の事例を Fig. 4.10 に、セミサブリグの復原性を検討する際に最も重要なトリム角およびヒール角の時系列の事例を Fig. 4.11 に示す。

これらの図から、係留ラインの 1 条が破断すると模型は、いったん大きく傾いたのち定常傾斜後の自由動揺試験と同様に過渡的な減衰振動を起こした。最終的

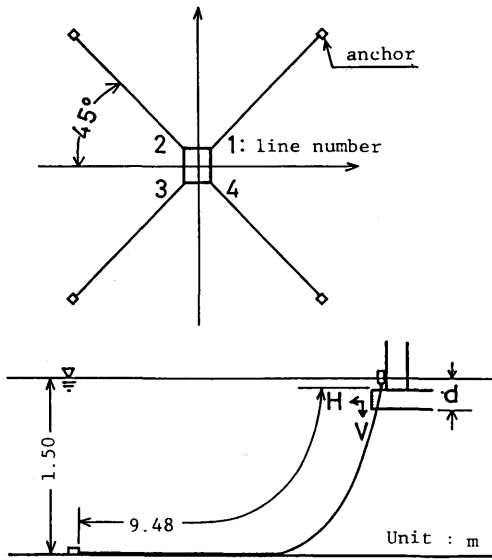


Fig. 4.9 Arrangements of the mooring lines

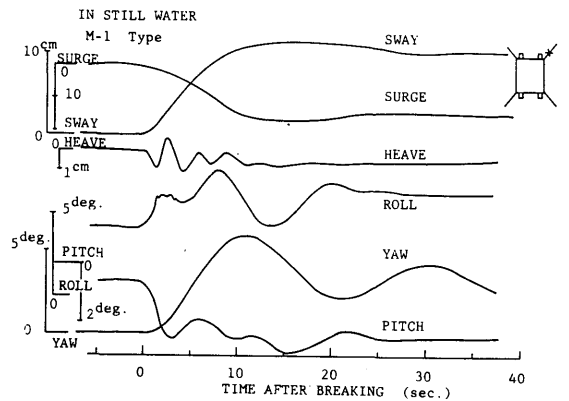


Fig. 4.10 Typical variation with time of the displacements after the breaking of a mooring line

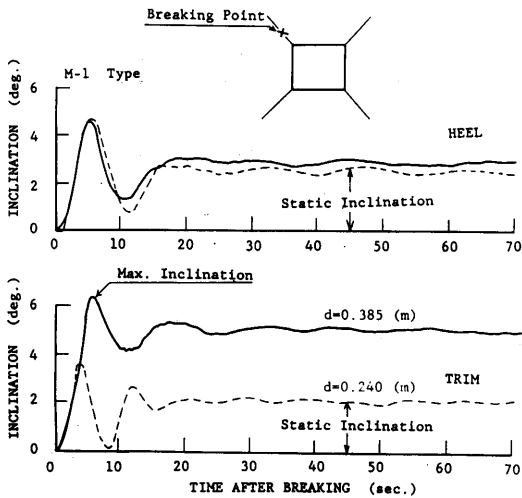


Fig. 4.11 Transient behaviour after breaking of a mooring line

には残った係留ラインの張力で釣り合う姿勢に落ち着くことが分かる。そのような過渡運動の過程におけるヒール方向の最大傾斜角は、喫水に関係なく係留ラインの破断後に最初に現れ最終的なヒール角の2倍以下である。

一方、トリム方向の最大傾斜角および最終的なトリム角は、GM値が大きく異なるためにヒールの傾向と相当差異が生じている。しかし、最大傾斜角は、ヒール方向と同様に係留ラインの破断後の最初の最大傾斜角に現れている。

係留ラインが破断して静止した後における最終的な姿勢角を求めるため、係留状態の模型に転倒モーメントを作用させて模型の傾斜角を求める実験を行った。

その結果を Fig. 4.12 に示す。なお、喫水及びGM値は Fig. 4.11 の状態である。この図から、Fig. 4.11 に示す係留ライン破断時における最終的な傾斜角に相当する転倒モーメントを求めると約0.2kg-mであり、これは初期張力と重心から係留ライン取り付け部との距離から算出されるモーメントとほぼ同程度である。

4.3.2 区画浸水実験

セミサブリグの一区画が浸水した際に復原性上で問題となる点は、区画浸水によるGM値および排水量の連続的な変化、浸水速度による動的影響および浸水後

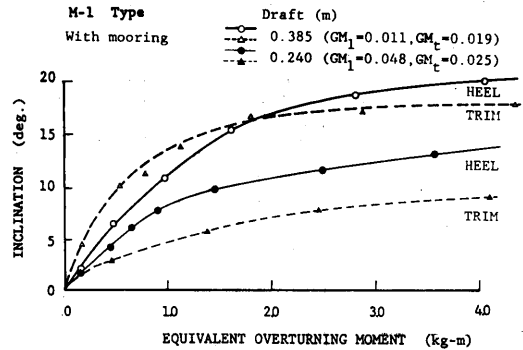


Fig. 4.12 Results of the inclination tests under moored condition

における最終的な姿勢である。そこで、M1模型を用い、平水中においてコラム部、又はローハル部の一區画に連続浸水させる実験を行った。浸水區画は、Fig. 4.13の斜線で示す部分である。計測した模型のトリム角とヒール角、浸水量および沈下量の時系列の事例を Fig. 4.14 及び Fig. 4.15 に示す。

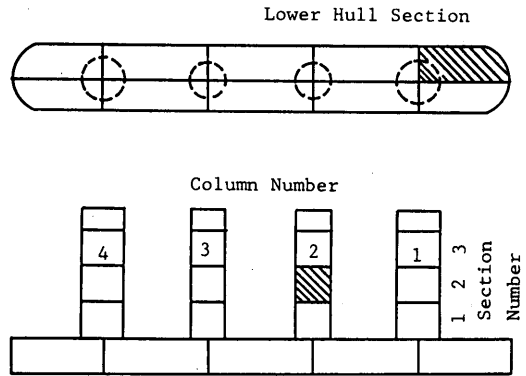


Fig. 4.13 Arrangements of floodable compartments

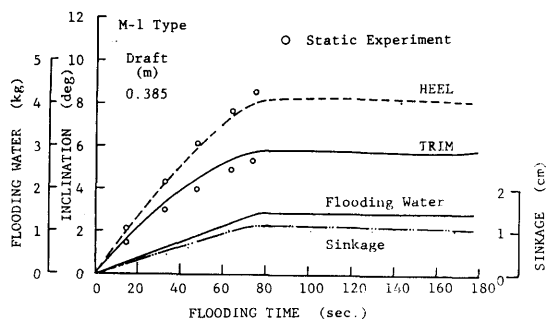


Fig. 4.14 Inclinations during flooding into the column in still water

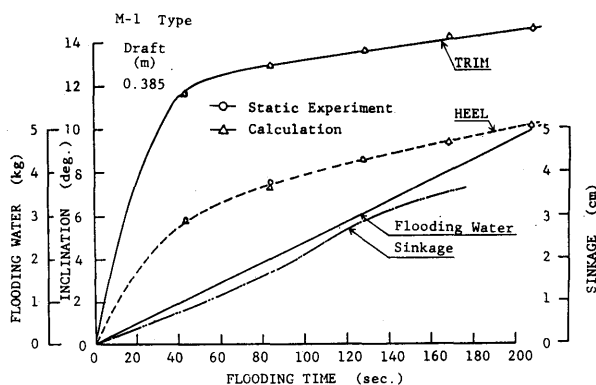


Fig. 4.15 Inclinations during flooding into the lower hull in still water

なお、図中の丸印は、一定量の水を浸水区画に注入し、模型が静止した時点での静的釣合い傾斜角であり、Fig. 4.15の三角印は、浸水量に相当する荷重を浸水位置に段階的に付加したとして静的復原性評価プログラムを用いて求めた理論計算値である。

これらの図から、今回実施した毎分1.0リットル程度（実機換算毎分約18m<sup>3</sup>）の連続区画浸水の場合には、浸水による動的影響はほとんど見受けられず、浸水量と同じ重量の固定荷重を静的に順次搭載した場合と同じ現象であり、浸水時の復原性は、静的問題とし

て取り扱うことができるといえる。したがって、動的影響を無視した理論計算値と連続浸水の場合の実験値との相関は、極めて良好である。

### 4.3.3 荷崩れ実験

セミサブリグの上甲板上に搭載してある掘削関連のパイプ等が荷崩れした際に復原性上で問題となる点は、荷重の移動量および移動速度の相違による動的影響および荷重の移動に伴う最終的な姿勢角である。今回実施した荷崩れ実験では係留状態および無係留状態でのM3模型を用いて、1.68kg（実機換算210tons）の荷重を前後方向に0.50m（実機換算25m）の距離を0.013m/sec（実機換算0.092m/sec）および0.066m/sec（実機換算0.467m/sec）の一定速度で移動させた。その際に計測した模型の縦揺れ、前後揺れ及び上下揺れの時系列の例をFig. 4.16に、係留ラインの水平方向張力の時系列の事例をFig. 4.17に示す。

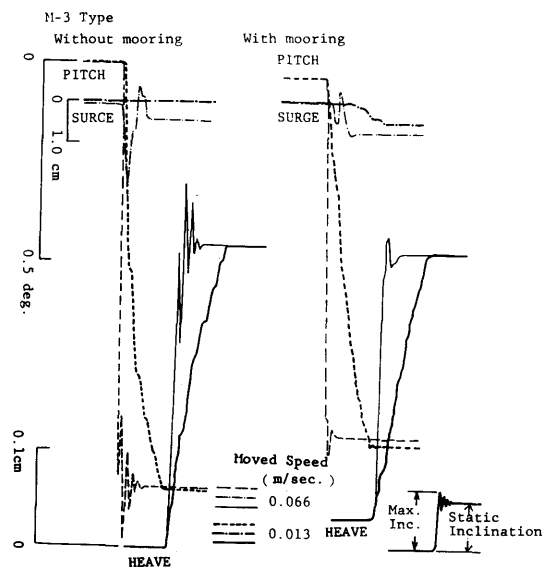


Fig. 4.16 Transient behaviours after the transfer of a load on a deck

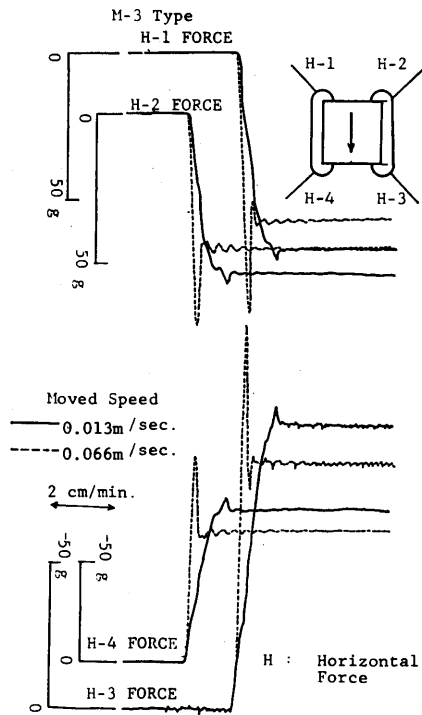


Fig. 4.17 Transient behaviours of the mooring line tensions after the transfer of a load on a deck

これらの図から、1.68kgの荷重が0.013m/sec程度の移動速度で移動しても動揺角及び係留ラインの張力には、荷重の移動による動的影響がほとんど見受けられず、ほぼ静的問題として取り扱うことができるといえる。

しかしながら、荷重の移動速度を0.066m/secに上げると、荷重の移動による動的影響が現れ、動揺角及び係留ラインの張力ともに過渡現象が現れる。

そこで、荷重の移動速度を0.031~0.066m/secの範囲内で変化させた場合について無係留状態及び係留状態で縦揺れ及び上下揺れの最大値と最終的に落ち着いた時の値との比を実験的に求めた結果をFig. 4.18に示す。

この図から、荷重の移動速度が大きくなると動的影響が顕著となり、係留することによって過渡的な現象を軽減することもできることが分かる。しかし、この程度の荷重移動では、傾斜角、張力変動とも小さい。

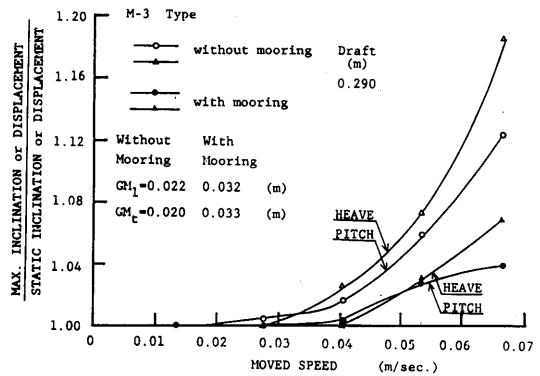


Fig. 4.18 Effects of the moved speed of loads on maximum inclinations/displacements after the transfer of the loads

### 5. セミサブリグの静的・準静的復原性及ばす各種要因の影響

前章においては、模型実験等にてセミサブリグの静的・準静的復原性及ばす各種要因を調べると共に、静的復原性評価プログラムによる理論計算値と模型実験値との比較を行った。

本章では、模型実験にて検証された静的復原性評価プログラムを用いてセミサブリグの静的復原性に関する一連の系統的な計算を行い、各種要因がセミサブリグの復原性及ばす影響を調べた結果を示す。

計算の対象としたセミサブリグ模型は、Fig. 3.1~Fig. 3.3に示す3隻のセミサブリグ模型M1, M2及びM3である。

#### 5.1 重心位置及びGM値の影響

セミサブリグの重心位置の影響を調べるため、一般的なセミサブリグの稼働時、暴風時及び曳航時の3状態について系統的にKG値即ちGM値を変化させ、横方向傾斜時の復原力曲線を求めた。その事例として無係留状態でのM1模型の結果をFig. 5.1~5.3に示す。なお、図中には各状態における規則上の最大風速(稼働時5.09m/sec, 実機換算36m/sec及び暴風時7.28m/sec, 実機換算51.5m/sec)に対する転倒モーメント挺を示す。矢印は模型がヒールしてローバル部が水線面から露出する最大傾斜角度である。



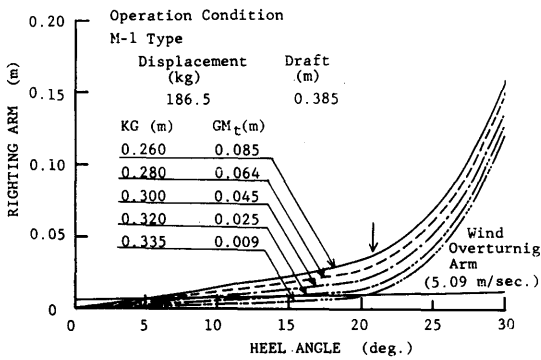


Fig. 5.1 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation) (operation condition, d=0.385m)

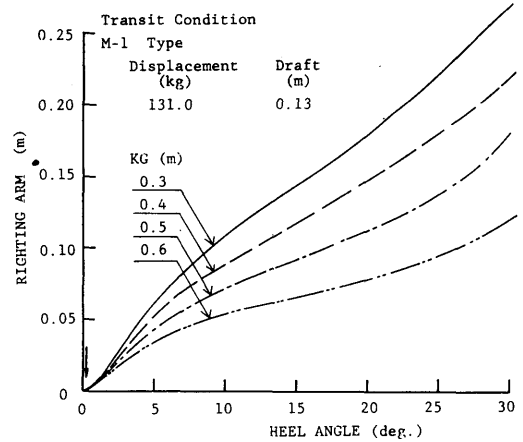


Fig. 5.3 Effects of the variation of KG values on righting arm curves (calculation)

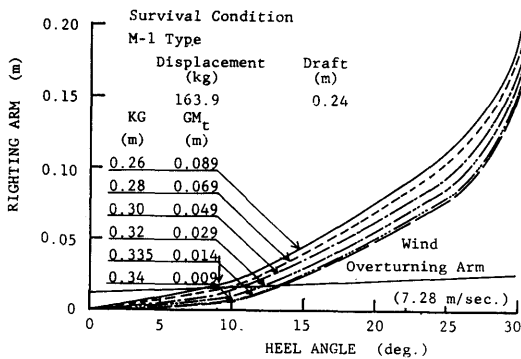


Fig. 5.2 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation) (survival condition, d=0.240m)

これらの図から、風荷重による転倒モーメント挺と復原力曲線との1次交叉角が15°以下を満足させるためには、稼動状態では、KGを0.32m(実機換算16m, GMを1.25m)以下にすることが必要である。一方、暴風状態では、ヒール角が約9°でローハル部が水線面から露出するため、今回行った計算の範囲では、すべての状態で一次交叉角が15°以下である条件を満足する。

曳航時は、ローハルが常に露出した状態であるので初期復原力は大きい。

次に、M1模型の稼動状態でGM値が0.035m(実機換算1.75m)と-0.001m(実機換算-0.05m)の場合について横方向傾斜時の復原力曲線を比較した結果をFig. 5.4に示す。

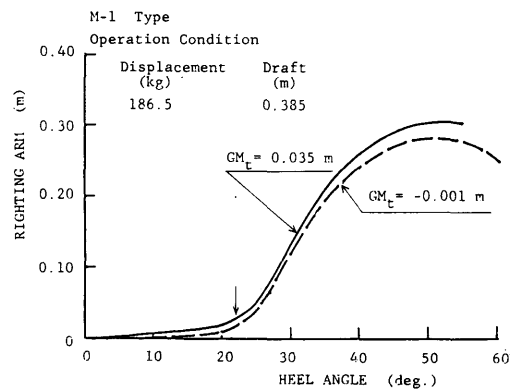


Fig. 5.4 Effects of GM values on righting arm curves (calculation)

この図から、排水量あるいは喫水が同じであれば、GM値が正または負であっても大角度傾斜時の復原力曲線は余り変化しないことが分かる。しかし、ローハル部が水線面から露出する22°までは復原挺に相当の差があり、GM値が負の場合には小さな転倒モーメント

ントが作用すると簡単に20°程度傾斜するともいえる。  
 なお、3種類のセミサブリグ模型の稼働時、暴風時及び曳航時についてGM値を系統的に変化させた場合における縦方向及び横方向の復原力曲線を付録Ⅲに示す。

**5.2 排水量あるいは喫水の影響**

無係留状態でのM1模型について稼働時、暴風時及び曳航時の3状態における標準的な排水量、喫水及びGM値に対して縦及び横方向傾斜時の復原力曲線を求めた結果を Fig. 5.5 及び Fig. 5.6 に示す。

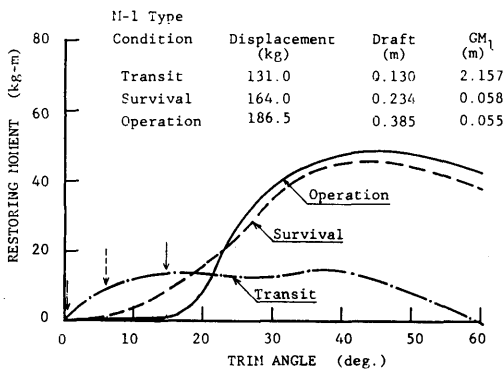


Fig. 5.5 Comparisons of righting arm curves under operation condition, survival condition and transit condition (calculation)

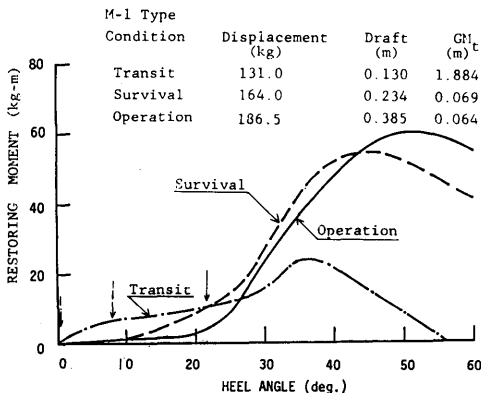


Fig. 5.6 Comparisons of righting arm curves under operation condition, survival condition and transit condition (calculation)

これらの図から、通常暴風が来襲すると想定される場合、一般にセミサブリグは、稼働時より喫水を浅くする機会が多いが、そのような措置は、風荷重による1次交叉角を小角度に移動させると共に、復原モーメントを大きくする効果があり、その結果として復原性を向上させることになることが分かる。また、曳航状態の喫水は、ローハルの上部が水線面とほぼ同じ位置であるため、小角度の傾斜角に対しては復原モーメントが大きい、傾斜角が増加しても一部のローハルがすべて空気中に露出する、あるいはデッキが着水する傾斜角が大きいなどの理由で復原モーメントが傾斜角10°をこえても余り増加しないため、これ以上傾斜モーメントが加わると大傾斜から転覆に至る危険があるので曳航時の復原性には十分注意を払うことが大切であることも分かる。

**5.3 コラム本数の影響**

現在、稼働しているセミサブリグの代表的な形状は、2ローハル型でコラム本数が8本、6本及び4本の半潜水船型が多い。そこで、これら3種類の模型について代表的な排水量、喫水及びGM値で稼働および暴風時における横方向傾斜時の復原力曲線を比較した結果を Fig. 5.7 及び Fig. 5.8 に示す。また、図中の矢印は、模型がヒールしてローハル部が水線面から露出する最小傾斜角である。

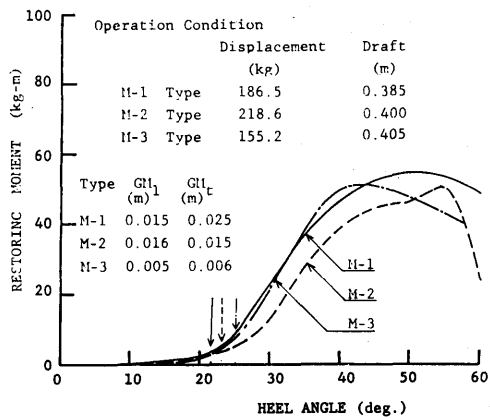


Fig. 5.7 Comparisons of righting arm curves for three types of models (operation condition, calculation)

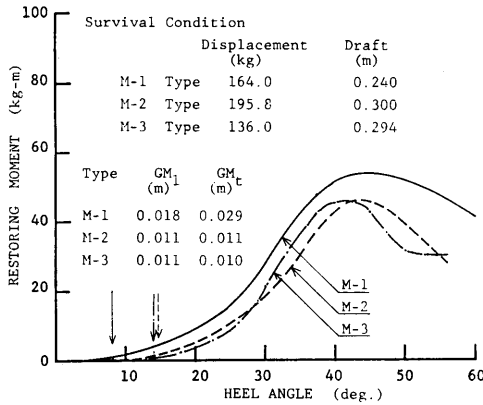


Fig. 5.8 Comparisons of righting arm curves for three types of models (survival condition, calculation)

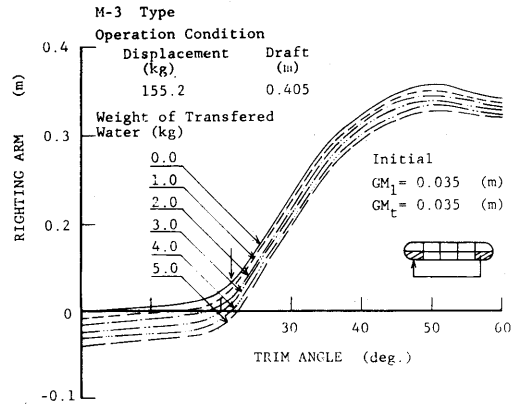


Fig. 5.9 Effect of ballast water transfer on righting arm curves

これらの図から3種類の模型では、形状、主要寸法、排水量及び重心位置などが異なるために復原性特性を一概に比較することはできないが、今回計算した範囲内では、稼動状態においては、8本コラムと4本コラムとの場合、ヒール角が40°程度まで復原力曲線がほぼ同じであり、6本コラムの場合には、ヒール角が25°以上で復原力曲線が相当低下することが分かる。暴風状態においては、8本コラムの場合が最も復原力曲線が優れていて、6本及び4本の場合には、ほぼ同程度の復原力曲線の傾向を示すことが分かる。

このようにM1模型の8本コラムの場合が最も復原性特性を良くさせた主要因は、図の矢印からも分かるように模型がヒールしてローハル部が水線面から露出する最小傾斜角が最も小さいためであろう。

5.4 バラスト水移動の影響

バラスト水の移動のモードは、種々考えられるが、ここでは、トリム角に最も厳しい場合として無係留状態で稼動時のセミサブリグのローハル（区画を左右対称で前後方向に5分割した）の最前部の区画から最後部の区画にバラスト水が移動した場合について3種類の模型でバラスト水の移動量を変化させて復原性特性を計算した。その結果は付録Ⅲに示すがそのうち、4本コラムのM3模型でバラスト水を0.0kg~5.0kg（実機換算0~625tons）の範囲で移動させた場合の復原力曲線を Fig. 5.9 に示す。なお、図中の矢印は、模型がトリムしてローハル部が水線面から露出する最小傾斜角である。

これらの図から、バラスト水の移動が復原力曲線に及ぼす影響は、バラスト水の移動によって生ずる転倒モーメントと排水量とから求まる復原値だけ下方に平行移動するだけでほぼ説明される。また、バラスト水を移動せると模型が傾斜してGM値が変化する。そこでM3模型について移動距離を一定としてバラスト水の移動重量に対してバラスト水の移動後におけるGM値の変化量を示した図が Fig. 5.10である。

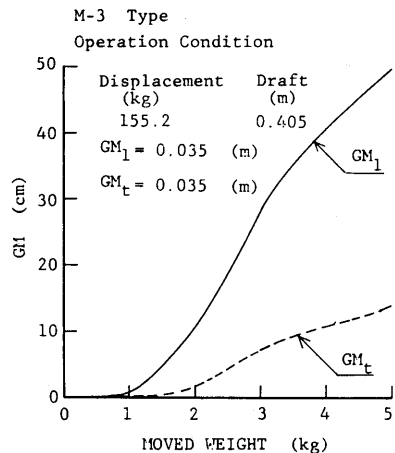


Fig. 5.10 Variations of GM values due to the transfer of ballast water (calculation)

この図から、バラスト水の重量が1.5kg（実機換算187.5tons）程度になると傾斜によりローハルが露出しはじめるため、GM値が急激に増加することが分かる。

5.5 区画浸水の影響

区画浸水としては、種々な区画浸水が考えられるが、ここでは、ヒール角に最も厳しい場合として無係留で稼動状態のセミサブリグのローハル（区画を左右対称で前後方向に5分割）の最前部右の一区画への浸水を考えて3種類の模型で区画浸水量を変化させて復原性特性を計算した。その結果を付録Ⅲに示す。

このうち、無係留状態で稼動時におけるM1模型でFig. 4.13に斜線で示すローハル部への一区画浸水の重量を0.0kg～5.0kg（実機換算0～625tons）または前述のFig. 4.13の第1コラムの第2セクションの浸水箇所へ、浸水重量を0.0kg～3.36kg（実機換算0～420tons）の範囲で変化させたときの復原力曲線をFig. 5.11及びFig. 5.12に示す。

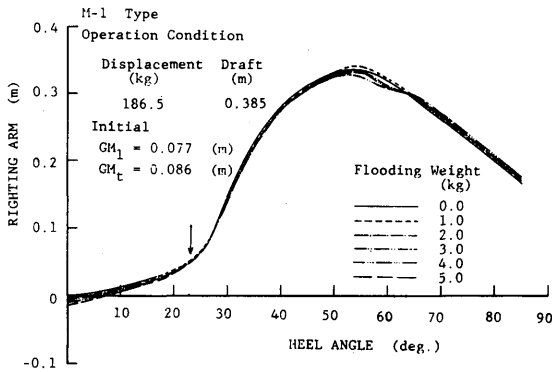


Fig. 5.11 Variations of righting arm curves due to flooding into the compartment of a lower hull (calculation)

なお、図中の矢印は模型がヒールしてローハル部が水線面から露出する最小傾斜角である。

Fig. 5.11から、今回実施した排水量の約2.7%程度の区画浸水量が復原力曲線に及ぼす影響は、小角度のヒール角に対して復原挺値が区画浸水量の増加と共に低下するが、大角度のヒール角に対しては、復原力曲線が区画浸水量によってほとんど変化しないことが分かる。しかし、区画浸水によるGM値及び沈下量が問

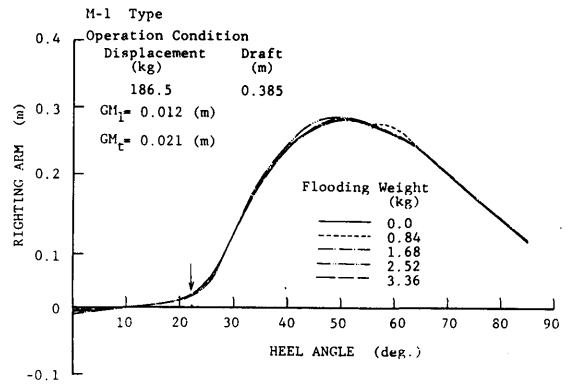


Fig. 5.12 Variations of GM values due to the flooding into a column (calculation)

題であるので、無係留状態で稼動時のM1模型について、ローハル一区画浸水量の変化に対するGM値及び模型中央における沈下量の変化を計算した結果をFig. 5.13に示す。

この図から、GM値は区画浸水量が4.5kg（実機換算562.5tons）程度までは浸水量が増加すると共にわずかに増加し、浸水量が5.0kg（実機換算625tons）を越えると急激に増加する。一方、沈下量は、区画浸水量にほぼ比例して増加し、浸水量が5kgを越える

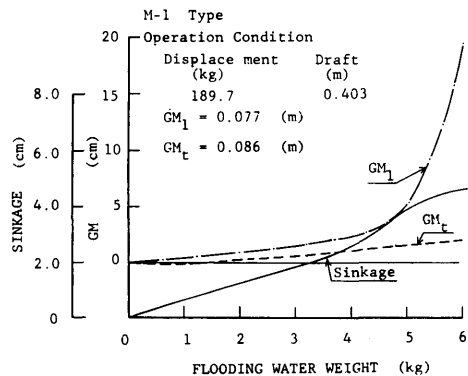


Fig. 5.13 Variations of righting arm curves due to the flooding into the compartment of a lower hull (calculation)

と沈下量が鈍くなることが分かる。その主要因は、区画浸水によって生ずる転倒モーメントにより模型が傾斜してローハル部が水線面から露出するためである。

Fig. 5.12から、水線面付近のコラム一区画が浸水した場合の浸水量が復原性曲線に及ぼす影響は、傾斜角が10度程度までの小角度のヒール角に対して復原値は区画浸水量の増加と共に低下するが、大角度のヒール角に対しては、これらの浸水量の範囲ではほとんど変化しないことが分かる。

また、コラム部の浸水についても、区画浸水によるGM値及び沈下量が問題となるので、上記と同様の条件で、コラム一区画浸水量の変化に対するGM値及び沈下量の変化を計算した結果、縦GM値は浸水量が0.4kg（実機換算2.5tons）程度から急激に増加し浸水区画満水時では、損傷前と比較して20cm程度増加する。

横GM値も同様に、0.4kg程度から急激に増加し浸水区画満水時では、損傷前と比較して10cm程度増加する。

これらの原因も、前途のローハル一区画浸水時の場合と同様の理由によるものと考えられる。

## 6. 結 言

以上、半潜水船型石油掘削船の静的および準静的復原性特性を模型実験にて調べるため、各種実験装置および計測手法を開発し、それらを使用して系統的な模型実験を実施し、静的復原性評価プログラムによる理論計算値と比較検討した。そして、検証された静的復原性計算プログラムを用いて2ローハル型式の8本、6本および4本コラムの3種類のセミサブブリグについて稼動時、暴風時および曳航時につき重心位置、GM値、排水量、バラスト水の移動ならびに区画浸水等が静的復原性特性に及ぼす影響を系統的に求めて提示した。

それらを総括して本研究において得られた結果の主な項目をまとめると以下に示す通りである。

(1) 本研究において各種の実験装置、計測手法及び実験手法等を開発し、セミサブブリグの広範囲に亘る静的および準静的復原性特性を調べるための一連の模型実験技術が確立できた。これらは第2報で述べるセミサブブリグの動的復原性に関する研究にも応用された。

また、各種要因が復原性特性に及ぼす影響を精度よく計算できる静的復原性評価プログラムを完成した。

(2) セミサブブリグは、稼動時及び暴風時などの喫水

位置によって復原力曲線は相違するが、わずかな姿勢変化によってローハル部が水線面から露出して断面2次モーメントが急激に大きくなる特徴がある。したがって、相当厳しい自然環境条件下又は損傷や荷崩れ等が発生してもセミサブブリグの復原性特性は、あまり悪化しないといえる。また、GM値が零または負であってもセミサブブリグの海水流入に対して十分なる配慮を施せばセミサブブリグは、簡単に転覆に至ることが少ないといえる。しかし、曳航状態においては、復原性特性を相当厳密に検討しておくことが大切であるといえる。

(3) 一方、ローハルが水面上に露出するまでは、外力によって簡単に傾斜しやすく、GM値が過小であるとエヤーギップの保持など安全確保上に問題があることも分かった。

(4) 今回、模型実験値と理論計算値とを比較検討した結果、自然環境条件、バラスト水の移動、損傷による区画浸水及び荷崩れ等によって生ずる転倒モーメントを単純に等価な転倒モーメントに置き換えてセミサブブリグの復原性特性を計算しても相当精度よく予測できるといえる。

なお、本研究において開発したセミサブブリグの静的復原性評価プログラムは、日本造船協会の第7基準研究部会第4分科会第3小委員会との共同研究にて開発し、(株)数理計画にプログラム作成を委託したものである。また、計算は船舶技術研究所の中央電子計算機を使用して行ったことを付記する。

最後に、本研究の遂行にあたり、終始激励と助言を惜しまれなかった運動性能部 高石敬史部長（前海洋開発工学部長）ならびに模型実験や理論計算等に援助を惜しまれなかった海洋開発工学部の方々に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 荒井宏範, 高石敬史; 海洋構造物の安全性と復原性の動向, 日本造船学会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テキスト, (1986), PP.187-216
- 2) 足達宏之, 高井隆三; 石油掘削リグの復原性について(その1), 船舶技術研究所第44回研究発表講演集, (1984), PP.18-21
- 3) 高井隆三, 足達宏之; 石油掘削リグの復原性について(その2, 損傷時の準静的復原性), 船舶技術研究所第46回研究発表講演集, (1985), PP.17-20

- 4) 影本浩, 足達宏之; 石油掘削リグの復原性について(その3, 損傷時の動的復原性), 船舶技術研究所第46回研究発表会講演集, (1985), PP.21-24
- 5) American Bureau of Shipping; Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units, (1968)
- 6) Numata, E. and Michel, W. H. ; Experimental Study of Stability Limits for Semisubmersible Drilling Platforms, OTC, paper No. 2032, (1974), PP. 915-923
- 7) Numata, E. and McClure, A. C. ; Experimental Study of Stability Limits for Semisubmersible Drilling Platforms, OTC, paper NO. 2285, (1975), PP. 383-389
- 8) Numata, E. , Michel, W. H. and McClure, A. C ; Assessment of Stability Requirements for Semisubmersible Units, Trans. SNAME, Vol. 84, (1976), PP. 56-74
- 9) Kuo, C. et al. ; Semisubmersible Intact Stability -Static and Dynamic Assessment and Steady Tilt in Waves, OTC paper No. 2976, (1977)
- 10) Martin, J. and Kuo, C. ; Calculations for the Steady Tilt of Semisubmersibles in Regular waves, Proc. RINA, Vol.1 (1978), PP. 87-101
- 11) Hineno, H. et al. ; The Effect of low Frequency Roll Motion on Under-deck clearance of a Semisubmersible Platform, Proc. of 2nd Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles, TOKYO, (1982), PP. 29-40
- 12) Takarada, n. et al. ; The Stability on Semisubmersible Platform in Waves, Proc. of 2nd Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles, TOKYO, (1982), PP. 49-61
- 13) 宝田直之助ほか; 半潜水式プラットフォームの係留状態における安定性について, 日本造船学会, 第6回海洋工学シンポジウム論文集, (1982), PP. 107-115
- 14) 中島俊一, 井上隆一; 傾斜角を考慮したセミサブの運動について, 日本造船学会海洋工学委員会, 第36回性能分科会資料, (1983)
- 15) 宝田直之助, 中島俊一, 井上隆一; 半潜水式海洋構造物の転覆機構に関する一考察(第1-3報), 日本造船学会論文集第155号(1984) PP. 139-150, 第156号(1984) PP. 236-244, 第157号(1985) PP. 180-191
- 16) S R 192報告書; 海洋構造物の設計外力および復原性に関する研究, 日本造船研究協会, 研究資料 No. 366 (1983), No. 373 (1984), No. 379 (1985), No. 385 (1986)
- 17) Remery, F. M and Ortmeressen, G. Van; The Mean Wave, Wind and Current Forces on Offshore Structures and Their Role in the Design of Mooring Systems, OTC paper No. 1741, (1973)
- 18) Bjerregaard, E. T. D. , Velshon, S. and Clinton, J. S.; Wind Overturning Effect on a Semisubmersible, OTC paper No. 3063, (1978), PP. 147-154
- 19) Norton, D. J. and Walf, C. V. ; Mobile Offshore Platform wind Loads, OTC paper No. 4123, (1981), PP. 77-88
- 20) Bjerregaard, E. T. D. and Sorensen, E. G. ; Wind Overturning Effects Obtained from Wind Tunnel Tests with Various Semisubmersible Models, OTC paper No. 4124, (1981), PP. 89-97
- 21) Littleburg, K. H. ; Wind Tunnel Model Testing Techniques for Offshore Gas/Oil production Platforms, OTC paper No. 4125, (1981), PP. 99-103
- 22) Lundgren, J. and Berg, A. ; Wind-Induced Motions on a Four-Column Semisubmersible Obtained from Model Tests, OTC paper No. 4230, (1982), PP. 759-777
- 23) Boonstra, H. and Leynse, C. ; Wind-Tunnel Tests on a Model of a Semisubmersible Platform and Comparison of the Results with Full-scale Data, OTC paper No. 4245, (1982), PP. 177-192
- 24) Rofsman, H. and Bjerregaard, E. T. D ; Wind Forces on a Semisubmersible Equipped with Alternative Drilling Derricks, OTC paper No. 4531, (1983), PP. 167-177
- 25) Troesch, A. W. , Vargunst, R. W. and Lee, S. ; Wind Loads on a 1:115 Model of a Semisubmersible, Maritime Technology, Vol. 20, No. 3, (1983), PP. 283-289
- 26) 松本光一郎, 北川貴一; 海洋構造物の風洞試験法について, 海洋工学委員会, 第37回性能分科会資料, (1983)
- 27) Macha, J. M. and Reid, D. F. ; Semisubmersible

Wind Loads and Wind Effects, Trans. SNAME, Vol. 92, (1984), PP. 85-124

- 28) 足達宏之, 影本浩; 海洋構造物の抗力特性—へん平箱型形状の抗力特性, 第1回推進性能研究委員会シンポジウム論文集, 日本造船学会, (1985), PP. 173-180
- 29) Nishimoto, K., Maeda, H. and Eguchi, S.; Wind and Current Loads on Semisubmersibles, 第1回推進性能研究委員会シンポジウム論文集, 日本造船学会, (1985), PP. 181-189
- 30) 前田久明, 西本和生, 江口純弘; セミサブ型リグに作用する風荷重, 潮流力の推定精密化に関する研究, 日本造船学会論文集, (1984), 第156号
- 31) 関川常雄ほか; セミサブ型石油掘削リグ 'BIN-GO 4000M' の運動性能, 日本鋼管技報, No. 95, (1982)
- 32) 前田久明, 池上国宏; 海洋構造物の安全性におよぼす, 潮流の影響, 船舶と海洋構造物の安全性と復原性, 日本造船学会運動性能研究委員会, 第3回シンポジウム, (1986), PP. 295-330
- 33) Dahle, E. A.; Mobile Platform Stability: Project Synthesis with Recommendations for New Philosophies for Stability Regulations, OTC paper No. 4988, (1985)
- 34) Final Reports of MOPS Project Synthesis, MOPS Report No. 20-23, Norwegian Marine Technology Research Institute (MARINTEK), (1985),
- 35) Royal Commission on the Ocean Ranger Marine Disaster; Report one, The Loss of the Semisubmersible Drill Rig Ocean Ranger and its Crew, (1984)
- 36) ABS; Stability Study for Mobile Offshore Drilling Units (Phase 1), ABS RD Division, Technical Report RD-85014, (1985), submitted to IMO DE
- 37) IMO DE 30/INF. 8; Report of Research Project on the Stability of Semisubmersible MODUs, submitted by Japan, (1987)

## 付録 I 浮体に固定した4本の水位計を用いて, 浮体の平均沈下量と水面に対する傾きを求める手法

浮体の4隅に取り付けた4本の水位計にて同時計測した相対水位から浮体の平均沈下量および水面に対する傾きを求める手法について述べる。

その計算を行う際の条件は, 以下の通りである。

- 1) 平水面  $\pi_w$  に静止座標系  $O-xyz$  を設定する。  
また, 上甲板  $\pi_a$  に物体固定座標  $O'-x'y'z'$  を設定する。
- 2)  $OO'$  は  $Oz$  軸と一致し,  $O'x'$  軸の  $\pi_w$  への射影は,  $Ox$  軸と一致するものとする。  
これらの状態を示したものが, Fig. A-1 である。

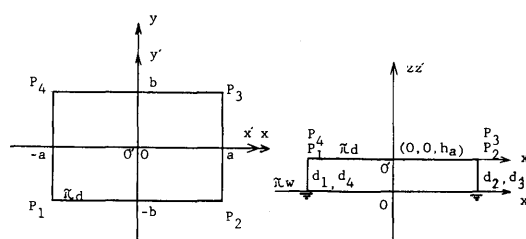


Fig. A-1 A coordinate used to express in the standard coordinate at the calculation

その解析手法は, 以下に従って求めることができる。

- I) 静止座標系,  $O-xyz$  において点  $O'(0, 0, h_a)$  を通る  $\pi_a$  上の法線  $l_a$  は次式で表わされる。

$$l_a : \frac{x}{L_z} = \frac{y}{M_z} = \frac{z-h_a}{N_z} \quad (1)$$

ここで, ベクトル  $\vec{n} = (L_z, M_z, N_z)$  は  $l_a$  の傾きを表わす。したがって, ここでの問題は, 平均沈下量  $h_a$  およびベクトル  $\vec{n}$  を計測量  $d_1, d_2, d_3$  及び  $d_4$  から求めることである。

そこで, 条件2)を満足するように,  $O-xyz$  と  $O'-x'y'z'$  との変換条件を設定する。そのためには, i)  $O-xyz$  から平行移動  $(0, 0, h_a)$  を行い, ii)  $O'x'$  軸まわりに  $\theta$  の回転をし, それを新たに  $O'-x'y'z'$  とし, iii) さらに  $O'y'$  軸のまわりに  $\phi$  の回転を行なう。

この時,  $O'z$  軸は直線  $l_a$  と一致する。

この変換を行うと、次の関係が得られる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta \sin \phi & \cos \theta & \sin \theta \cos \phi & 0 \\ \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta & \cos \theta \cos \phi & h_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

これより

$$\left. \begin{aligned} L_z &= -\lambda \sin \phi \\ M_z &= \lambda \sin \theta \sin \phi \\ N_z &= \lambda \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

であることが判る。以後、 $\lambda = 1$  とし、単位ベクトルを考える。

$$\left. \begin{aligned} P_1: & x_1 = -a \cos \phi, \quad y_1 = -a \sin \theta \cos \phi - b \cos \theta \\ & z_1 = -a \cos \theta \sin \phi + b \sin \theta + h_A \\ P_2: & x_2 = a \cos \theta, \quad y_2 = a \sin \theta \cos \phi - b \cos \theta \\ & z_2 = a \cos \theta \sin \phi + b \sin \theta + h_A \\ P_3: & x_3 = a \cos \phi, \quad y_3 = a \sin \theta \cos \phi + b \cos \theta \\ & z_3 = a \cos \theta \sin \phi - b \sin \theta + h_A \\ P_4: & x_4 = -a \cos \phi, \quad y_4 = -a \sin \theta \cos \phi + b \cos \theta \\ & z_4 = -a \cos \theta \sin \phi - b \sin \theta + h_A \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

点  $P_n(x_n, y_n, z_n)$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ) を通り、 $O'z'$  と平行な直線  $l_n$  は

$$l_n: \frac{x-x_n}{L_z} = \frac{y-y_n}{M_z} = \frac{z-z_n}{N_z} \quad (5)$$

であり、また、 $\frac{z_n}{N_z} = d_n$  であるから  $l_n$  と水面  $\pi_w$  との交点  $Q_n$  は次式で与えられる。

$$Q_n = (x_n + d_n \sin \phi, y_n - d_n \sin \theta \cos \phi, 0) \quad (6)$$

この式に(4)式を代入すると

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= (-a \cos \phi + d_1 \sin \phi, -a \sin \theta \sin \phi \\ &\quad - b \cos \theta - d_1 \sin \theta \cos \phi, 0) \\ Q_2 &= (a \cos \phi + d_2 \sin \phi, a \sin \theta \sin \phi - b \cos \theta \\ &\quad - d_2 \sin \theta \cos \phi, 0) \\ Q_3 &= (a \cos \phi + d_3 \sin \phi, a \sin \theta \sin \phi + b \cos \theta \\ &\quad - d_3 \sin \theta \cos \phi, 0) \\ Q_4 &= (-a \cos \phi + d_4 \sin \phi, -a \sin \theta \sin \phi \\ &\quad + b \cos \theta - d_4 \sin \theta \cos \phi, 0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。したがって、平均沈下量  $h_A$  は、

$$h_A = \frac{1}{4} N_z (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)$$

(504)

$$= \frac{1}{4} \cos \theta \cos \phi (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \quad (8)$$

と書くことができる。

II) 次にFig. A-2に示すように  $\overrightarrow{Q_1 Q_2}$ ,  $\overrightarrow{Q_3 Q_4}$  が  $Ox$  軸となす角  $\psi_1, \psi_3$  及び  $\overrightarrow{Q_2 Q_3}$ ,  $\overrightarrow{Q_4 Q_1}$  が  $Oy$  軸となす角  $\psi_2, \psi_4$  を定義する。

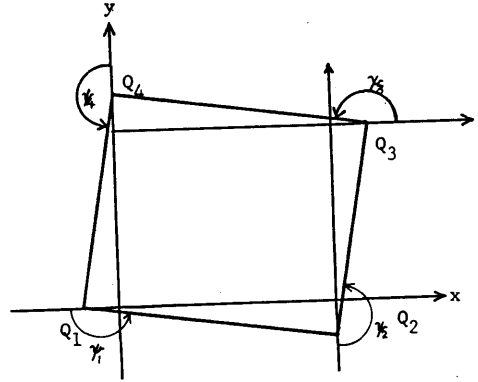


Fig. A-2 Coordinates of angle variation between the bonds

$$\left. \begin{aligned} \tan \psi_1 &= \frac{2a \sin \phi - D_1 \cos \phi}{2a \cos \phi + D_1 \sin \phi} \sin \theta \\ \tan \psi_3 &= \frac{-2a \sin \phi - D_3 \cos \phi}{-2a \cos \phi + D_3 \sin \phi} \sin \theta \\ \tan \psi_2 &= \frac{D_2 \sin \phi}{2b \cos \theta - D_2 \sin \theta \cos \phi} \\ \tan \psi_4 &= \frac{D_4 \sin \phi}{-2b \cos \theta - \sin \theta \cos \phi} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 $D_1 = d_2 - d_1$ ,  $D_2 = d_3 - d_2$ ,  $D_3 = d_4 - d_3$ ,  $D_4 = d_1 - d_4$  また、 $D_1 = -D_3$ ,  $D_2 = -D_4$  の関係より  $\psi_1 = \psi_3 - \pi$ ,  $\psi_2 = \psi_4 - \pi$  となっている。

次に、Fig. A-3に示すように、 $\pi_w$ 上で  $Q_n$  を原点とし、 $\overrightarrow{Q_n Q_{n-1}}$  を  $x''$  軸とする座標系を考える。この時、 $\overrightarrow{Q_n}, \overrightarrow{Q_{n+1}}, \overrightarrow{P_n}, \overrightarrow{P_{n+1}}$  を端点とする平面について考察する。

i)  $Q_1 - x''y''z''$

$\overrightarrow{Q_1 Q_2 P_2 P_1}$  は  $\pi_a$  の端面と  $\pi_w$  とで区切られる一つの平面を構成する。 $\overrightarrow{Q_1 Q_2}$  と  $\overrightarrow{Q_1 P_1}$  のなす角を  $\alpha_1$  とすると

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{2a}{-D_1} \quad (10)$$



である。 $\overline{Q_1 P_1}$  の  $\pi_w$  への射影および  $Q_1 x$  軸  $Q_1 x''$  軸への投影の関係から  $\alpha_1, \beta_1$  及び  $\gamma$  との関係を求める。

$\beta_1$  は  $\overline{Q_1 P}$  が  $Q_1 x$  軸となす角,  $\gamma$  は  $\overline{Q_1 P}$  と  $Q_1 z$  軸のなす角である。

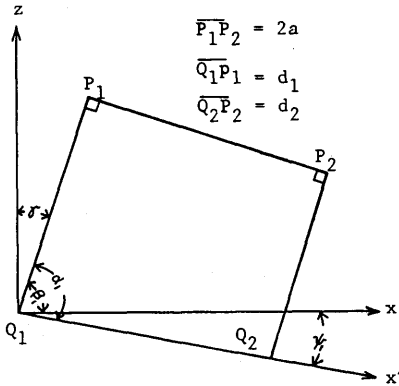


Fig. A-3 Coordinates of angle variation between the bonds

$$\pm \cos \beta_1 = \frac{\sin \gamma}{\sqrt{1 + \left( \cot \psi_1 - \frac{\cos \alpha_1}{\cos \beta_1 \sin \psi_1} \right)^2}} \quad (11)$$

$$+ : \beta_1 < \frac{\pi}{2}, \quad - : \beta_1 > \frac{\pi}{2}$$

(3)式より

$$\sin \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos \phi}$$

$$\cos \beta_1 = -\sin \phi$$

であるので, (11)式を変形して

$$\sin \phi \cos \psi_1 + \cos \alpha_1 = \pm \cos \phi \sin \theta \sin \psi_1$$

が得られる。

$\psi_1$  も  $\phi, \theta$  の関数であるので, 上式より  $\phi, \theta$  を変数とする関数  $f(\phi, \theta)$  を定義する。

$$f(\phi, \theta) = \sin \phi \cos \psi_1 + \cos \phi \sin \theta \sin \psi_1 + \cos \alpha_1 \quad (12)$$

$f(\phi, \theta) = 0$  が求める条件である。

ii)  $Q_2 - x''y''z''$

$$\text{この時, } \cos \alpha_2 = \tan^{-1} \frac{2b}{-D_2} \quad (13)$$

$\gamma, \alpha_2, \beta$  の関係は, Fig. A-4 に示すように,

i) の場合と同じく求められ

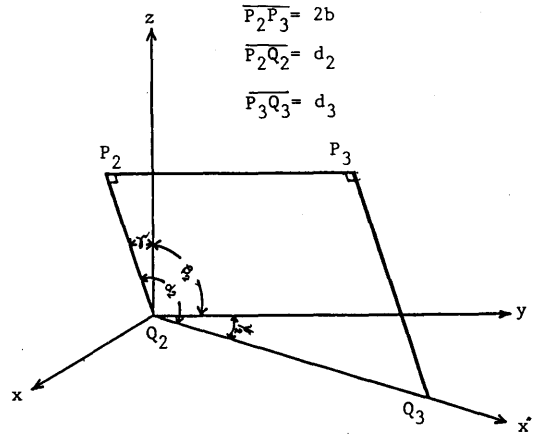


Fig. A-4 Coordinates of angle variation between the bonds

$$\pm \cos \beta_2 = \frac{\sin \gamma}{\sqrt{1 + \left( \cot \psi_2 - \frac{\cos \alpha_2}{\cos \beta_2 \sin \psi_2} \right)^2}} \quad (14)$$

である。(3)式より,  $\cos \beta_2 = \sin \theta \cos \phi$  であり, これを使って(14)式を変形すると

$$\sin \theta \cos \phi \cos \psi_1 + \cos \alpha_2 = \pm \sin \phi \sin \psi_2$$

が得られる。

これより, 関数  $g(\phi, \theta)$  を次式で定義する。

$$g(\phi, \theta) = \sin \theta \cos \phi \cos \psi_2 + \sin \phi \sin \psi_2 + \cos \alpha_2 \quad (15)$$

III)

$$f(\phi, \theta) = 0, \quad g(\phi, \theta) = 0 \quad (16)$$

の非線形連立方程式を解くことにより, 求める角  $\phi$  及び  $\theta$  が求められる。

そして,  $\phi$  と  $\theta$  が求まると, (8)式を用いて  $h_A$  を求めることができ, 縦方向傾斜角, 横方向傾斜角および沈下量が求まる。

なお,  $\phi$  と  $\theta$  を求める(16)式の解法例として以下に Newton-Raphson 法を利用した事例を示す。

初期値  $\phi_0, \theta_0$  とし

$$\phi = \phi_0 + \Delta \phi, \quad \theta = \theta_0 + \Delta \theta \quad (17)$$

とし, (17)式が(16)式を満足するように修正量  $\Delta \phi$  および  $\Delta \theta$  を次式で求める。

$$\Delta \phi = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} -f(\phi_0, \theta_0) & f_{\theta}(\phi_0, \theta_0) \\ -g(\phi_0, \theta_0) & g_{\theta}(\phi_0, \theta_0) \end{vmatrix} \quad (18)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} f_{\phi}(\phi_0, \theta_0) - f(\phi_0, \theta_0) \\ g_{\phi}(\phi_0, \theta_0) - g(\phi_0, \theta_0) \end{vmatrix} \quad (19)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} f_{\phi}(\phi_0, \theta_0) & f_{\theta}(\phi_0, \theta_0) \\ g_{\phi}(\phi_0, \theta_0) & g_{\theta}(\phi_0, \theta_0) \end{vmatrix} \quad (20)$$

ここで、

$$f_{\phi} = \frac{\partial f}{\partial \phi}, \quad f_{\theta} = \frac{\partial f}{\partial \theta}, \quad g_{\phi} = \frac{\partial g}{\partial \phi}, \quad g_{\theta} = \frac{\partial g}{\partial \theta} \text{ である。}$$

$$\left. \begin{aligned} f_{\phi} &= \cos\phi \cos\psi_1 - \sin\phi \sin\theta \sin\psi_1 \\ &\quad - (\sin\phi \sin\psi_1 - \cos\phi \sin\theta \cos\psi_1) \frac{\partial\psi_1}{\partial\phi} \\ f_{\theta} &= \cos\phi \cos\theta \sin\psi_1 - (\sin\phi \sin\psi_1 \\ &\quad - \cos\phi \sin\theta \cos\psi_1) \frac{\partial\psi_1}{\partial\theta} \\ g_{\phi} &= -\sin\theta \sin\phi \cos\psi_2 + \cos\phi \sin\psi_2 \\ &\quad - (\sin\theta \cos\phi \sin\psi_2 - \sin\phi \cos\psi_2) \frac{\partial\psi_2}{\partial\phi} \\ g_{\theta} &= \cos\theta \cos\phi \cos\psi_2 - (\sin\theta \cos\phi \sin\psi_2 \\ &\quad - \sin\phi \cos\psi_2) \frac{\partial\psi_2}{\partial\theta} \end{aligned} \right\} (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial\psi_1}{\partial\phi} &= \frac{4a^2 + D_1^2}{(2a \cos\phi + D_1 \sin\phi)^2} \sin\theta \cos^2\psi_1 \\ \frac{\partial\psi_1}{\partial\theta} &= \frac{2a \sin\phi - D_1 \cos\phi}{(2a \cos\phi + D_1 \sin\phi)^2} \cos\theta \cos^2\psi_1 \\ \frac{\partial\psi_2}{\partial\phi} &= \frac{2b \cos\theta \cos\phi - D_2 \sin\theta}{(2b \cos\phi - D_2 \sin\theta \cos\phi)^2} D_2 \cos^2\psi_2 \\ \frac{\partial\psi_2}{\partial\theta} &= \frac{2b \sin\theta + D_2 \cos\theta \cos\phi}{(2b \cos\phi - D_2 \sin\theta \cos\phi)^2} D_2 \sin\phi \cos^2\psi_2 \end{aligned}$$

である。

角度の符号の取り方は、Fig. A-5に示すように決めておく。

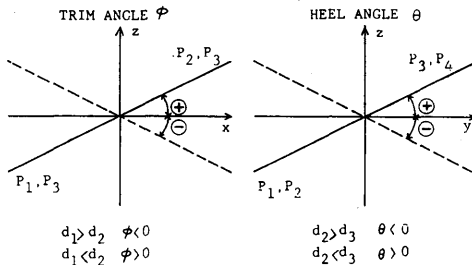


Fig. A-5 A plane used to express in the two-dementionnal standard coordinates

i)  $D_1 < 0, D_2 < 0; \phi < 0, \theta < 0, \theta < \alpha_1 < \frac{\pi}{2},$

$0 < \alpha_2 < \frac{\pi}{2}, 0 < \beta_1 < \frac{\pi}{2}, 0 < \beta_2 < \frac{\pi}{2},$

$\psi_1 > 0, \psi_2 > 0$

ii)  $D_1 < 0, D_2 > 0; \phi < 0, \theta > 0, \theta < \alpha_1 < \frac{\pi}{2},$

$\frac{\pi}{2} < \alpha_2 < \pi, 0 < \beta_1 < \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \beta_2 < \pi,$

$\psi_1 < 0, \psi_2 < 0$

iii)  $D_1 > 0, D_2 < 0; \phi > 0, \theta < 0, \frac{\pi}{2} < \alpha_1 < \pi,$

$0 < \alpha_2 < \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \beta_1 < \pi, 0 < \beta_2 < \frac{\pi}{2},$

$\psi_1 > 0, \psi_2 < 0$

iv)  $D_1 > 0, D_2 > 0; \phi > 0, \theta > 0, \frac{\pi}{2} < \alpha_1 < \pi,$

$\frac{\pi}{2} < \alpha_2 < \pi, \frac{\pi}{2} < \beta_1 < \pi, \frac{\pi}{2} < \beta_2 < \pi,$

$\psi_1 < 0, \psi_2 > 0$

となる。

### 付録Ⅱ 3種類の傾斜計の性能比較

3.3.2で述べた(1)~(3)の計測方法の精度を比較した結果について述べる。

Fig. A-6は、横軸に基準傾斜角をとり、傾斜計 (Inclinometer) と無接触型運動測定装置 (Sel Spot) により計測した傾斜角を縦軸にとって示した図である。

なお、この場合の基準傾斜としては、陸上で上記の計測装置を載せた平板を傾斜させた時に、ハイトゲージにて直読した値を用いて幾何学的に計算した値を用いた。

この図から、ハイトゲージで直接計測した傾斜角が最も真の値に近いと考えられるから、傾斜計による計測方法が Sel-Spot 方式よりも良い精度で傾斜角を計測できることが判る。

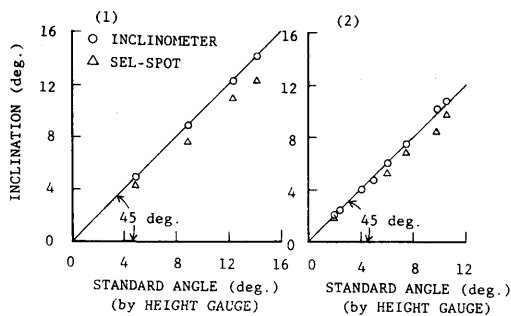


Fig. A-6 Comparisons of the results of inclinations measured by the height gauge. the inclinometer and the optical system

Fig. A-7 及び Fig. A-8 は、水槽において、セミサブリグ模型を用いて、(1)~(3)の計測方法を比較した結果である。なお、図中の横軸は、上部デッキ上中央(原点)に置いた移動ウェイトを中央から船体の軸上にそって移動させた移動距離を示し、その移動距離に対する傾斜角を縦軸にとって示す。

これらの図より、上記の(2)及び(3)で示した計測方法は(1)の傾斜計を用いて計測した場合に比べて、傾斜角を小さく出力する傾向がある。

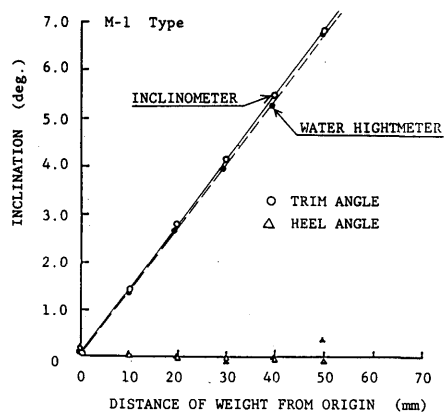


Fig. A-7 Comparisons of the results measured by the inclinometer and the water heightmeter

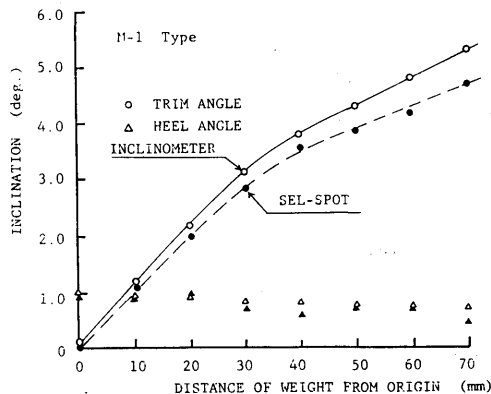


Fig. A-8 Comparisons of the results measured by the inclinometer and the optical system

### 付録Ⅲ 3隻のセミサブリグの復原性に関するシリーズ計算結果

セミサブリグの非損傷時及び損傷時の復原性特性を調べるために、今回実験に用いた3隻の模型について静的復原性評価プログラムを用いた系統的な計算を行った。

#### (1) 重心位置およびGM値の影響

セミサブリグの稼働時、荒天時 (survival) および曳航時の想定喫水に対し、重心位置を数種類変化させて計算した。

結果をM1模型についてはFig. A-9~Fig. A-14に、M2模型についてはFig. A-15~Fig. A-18に、M3模型についてはFig. A-19~Fig. A-24にそれぞれ示す。

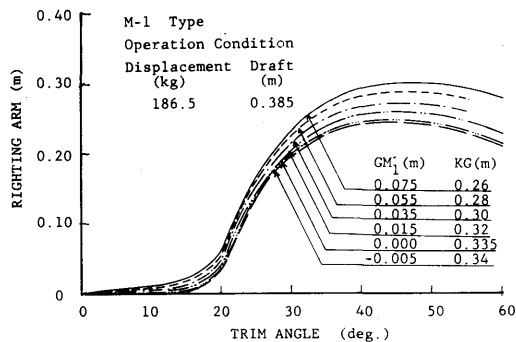


Fig. A-9 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

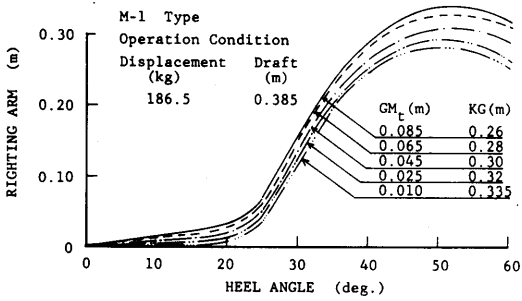


Fig. A-10 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

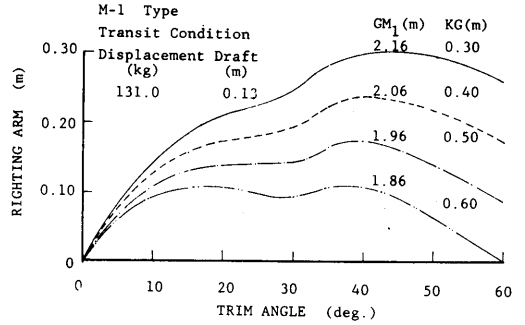


Fig. A-13 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

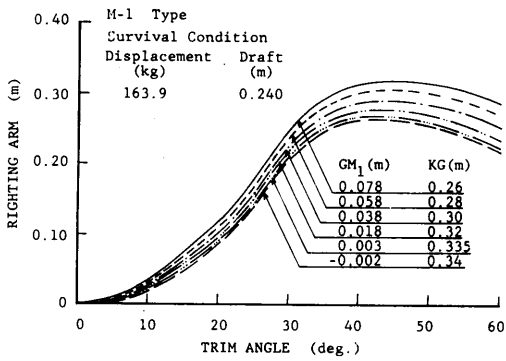


Fig. A-11 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

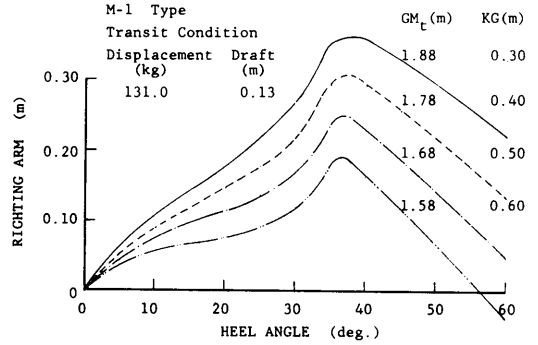


Fig. A-14 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

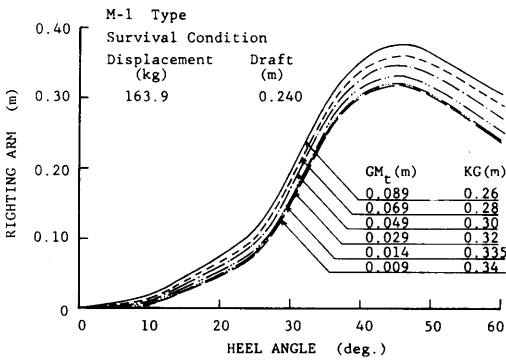


Fig. A-12 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

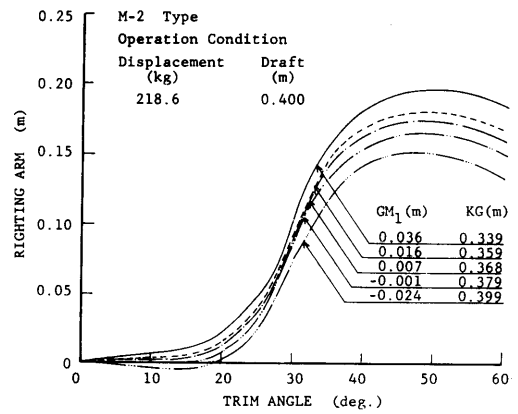


Fig. A-15 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

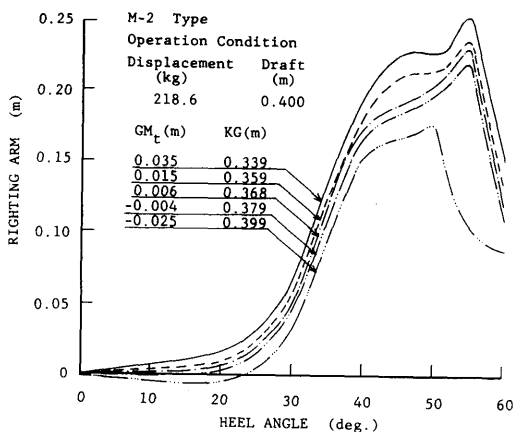


Fig. A-16 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

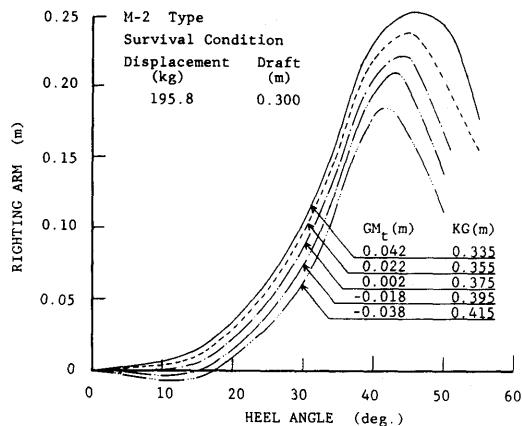


Fig. A-18 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

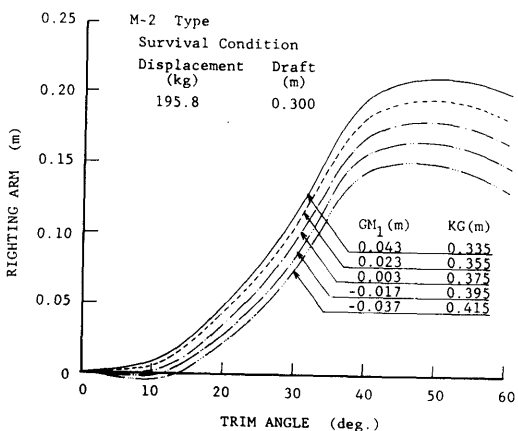


Fig. A-17 Effects of the variation of GM values on righting arm (calculation)

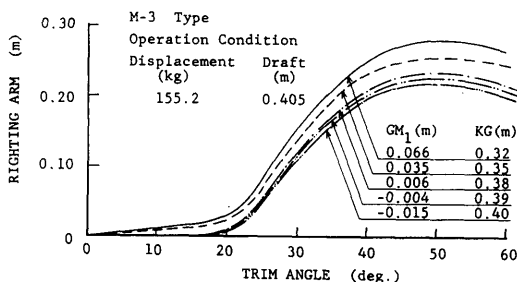


Fig. A-19 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

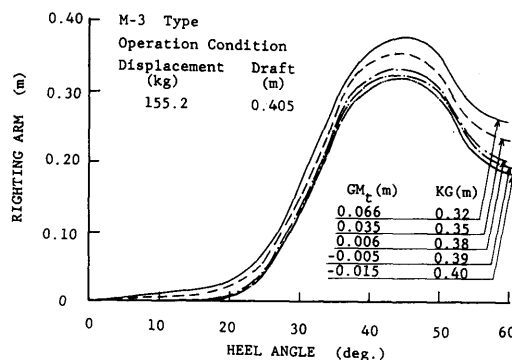


Fig. A-20 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

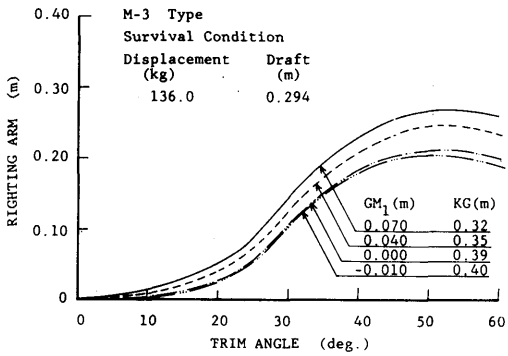


Fig. A-21 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

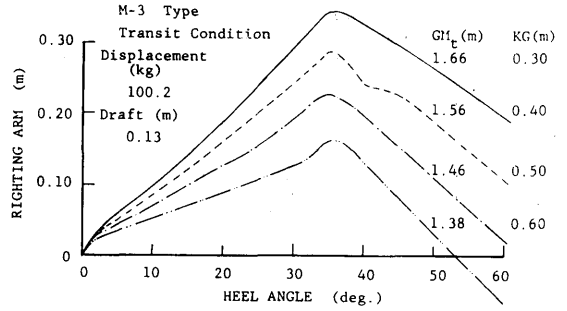


Fig. A-24 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

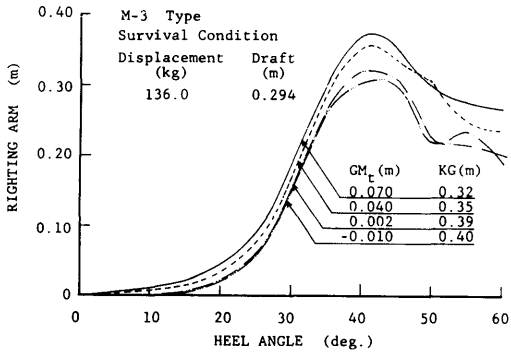


Fig. A-22 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

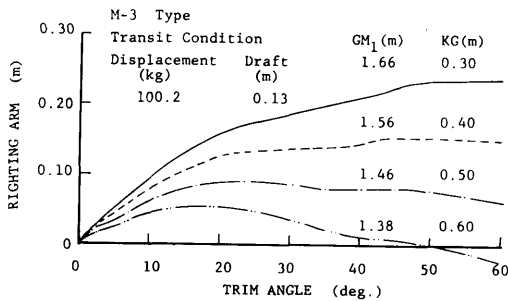


Fig. A-23 Effects of the variation of GM values on righting arm curves (calculation)

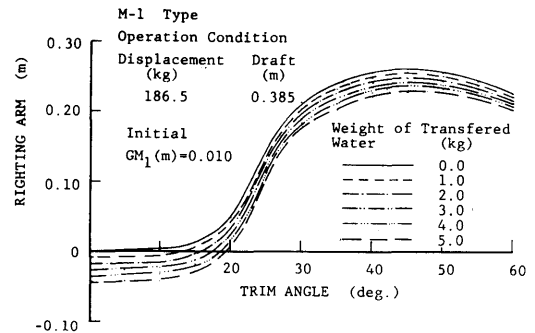


Fig. A-25 Effects of ballast water transfer on righting arm curves (calculation)

(2) バラスト水移動の影響

セミサブリグの稼働時の想定喫水に対し、ローハル一区画にあるバラスト水と同量の荷重を他のローハル一区画への移動させた時の復原力曲線の変化を計算した。なお、計算時にはバラスト水を平衡状態から、M 1 模型で 1.6 m、M 2 模型で 1.28 m および M 3 模型で 1.258 m (各々実機換算で 80 m、64 m および 62.9 m) 離れた位置へ模型の長さ方向に平行移動させた。結果を M 1 模型については Fig. A-25、A-26 に M 2 模型については Fig. A-27、A-28 に M 3 模型については Fig. A-29 にそれぞれ示す。