

半潜水型石油掘削船の復原性について (その2 : 動的復原性)

影本 浩*・高井 隆三*・足達 宏之**

On the Stability of Semisubmersible Oil Rigs (Part 2 : Dynamic Stability)

By

Hiroshi KAGEMOTO, Ryuzo TAKAI, Hiroyuki ADACHI

Abstract

The dynamic behaviours of semisubmersible oil rigs in severe environmental conditions as well as after damages are investigated with the focus on the survivability of the rigs.

The behaviours of the rigs are first examined experimentally to observe the dynamic effects qualitatively. Theoretical simulation computer programs are developed for the quantitative evaluation of the dynamic behaviours. Parametric studies are also carried out in order to extract the dominant parameters that affect the dynamic motions.

It is shown that the dynamic behaviours have only secondary effects compared to static ones as far as a capsizing is concerned. The maximum excursions or inclinations, however, after certain damages can be magnified significantly due to the dynamic effects and thus can not be neglected in the estimation of the behaviours of semisubmersibles after such damages.

目 次

1. 緒言	36	2. 2. 5 静水中における自由動揺実験	76
2. 実験	36	3. 動的復原性のパラメトリックスタディ	78
2. 1 実験の概要	36	3. 1 パラメトリックスタディの目的	78
2. 2 実験結果及び考察	40	3. 2 力のモデル化	78
2. 2. 1 非損傷時の規則波中応答特性実験	40	3. 3 初期条件のモデル化	78
2. 2. 2 傾斜時の規則波中応答特性実験	56	3. 4 運動方程式	79
2. 2. 3 係留ライン破断実験	59	3. 5 パラメトリックスタディ	79
2. 2. 4 内部区画への浸水実験	75	3. 6 波の影響	86
		3. 7 過渡運動に影響を与えるその他の要因	87
		3. 7. 1 非線形性	87
		3. 7. 2 連成運動	87
		3. 7. 3 同調現象	87
		4. 動的現象のシミュレーション計算及び実験との比較	88

* 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

5. 転覆のシナリオ	91
6. 結言	94
参考文献	95
Appendix-1 動的現象のシミュレーション計算法	98

1. 緒言

本論文は、動的復原性、即ち加速度や速度に比例した力（慣性力、減衰力）の影響を考慮した場合の半潜水型石油掘削船（以下セミサブリグとよぶ）の復原性能について検討したものである。

現在のセミサブリグに対する各国の復原性規則は第一報で述べたように、静的な復原力曲線の特性を主として規定するものである。即ち、このルールは従来の船舶に対するルールに準拠して作成されたもの¹⁾であり、その要点は復原力曲線の囲む面積で表わされるポテンシャルエネルギーと、風による転倒モーメントのなす仕事の間に、

$$A + B \geq 1.3(B + C) \quad (1.1)$$

なる関係が成り立つことを要求している。ここで、 $A + B$ 、 $B + C$ はFig. 1.1に示すように海水流入角までの復原力曲線の囲む面積、風による転倒モーメントのなす仕事をそれぞれ表わす。

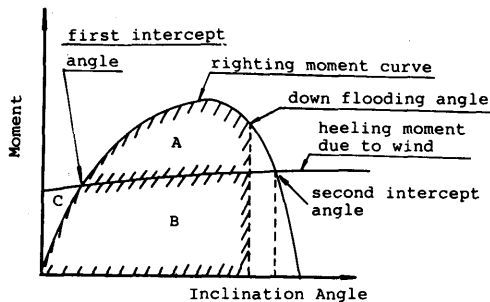


Fig. 1.1 Current rule for the stability of semisubmersibles

また損傷時復原性としては、水線面付近の区画への浸水のみを考慮しており、浸水以外の要因については何も規定されていない。(1.1)式の面積比1.3はコラム安定船に対する値であるが、この30%の-marginの中に各種の unknown な要因も考慮されているという考え方もされているようであるが、その根拠はあいまいである。

(516)

セミサブリグの事故は過去の事例 2) 3) 4) からみて、静穏な海域でおこることはまれで、通常は厳しい風浪条件下において発生している場合が多い。従って、風、波、潮流などの複合外力下におけるセミサブリグの挙動を検討することは重要である。しかしながら、このような厳しい気象、海象条件下における挙動の他に、セミサブリグの場合には係留ライン破断や荷くずれ或はバラスト水の不注意な移動など、力、モーメントのバランスが急激に変化するような損傷がおこった後の過渡運動時にも大きな変位、傾斜を生ずる可能性がある。

従って、本論文では復原性能に影響を及ぼす可能性のある種々の動的要因に対するセミサブリグの応答を実験、理論両面から考察を行う。

本論文の構成は次の通りである。まず、第2章において、本研究で行った非損傷時及び損傷時の応答に関するシミュレーション実験の結果を示し、セミサブリグの挙動に対する動的影響について定性的な考察を行う。第3章では、各種パラメータの動的復原性に及ぼす影響について理論的な考察を行い、さらに第4章では時間領域のシミュレーションによる計算例と実験との比較を示す。第5章では、セミサブリグに静的及び動的に力が働いたときに、どのような場合に転覆に至る可能性があるかを検討し、セミサブリグの安全性に対する考え方の一例を示す。

2. 実験

2.1 実験の概要

動的復原性に関連して実施した実験は次の5項目である。

- (1) 非損傷時の規則波中応答特性実験
- (2) 傾斜時の規則波中応答特性実験
- (3) 係留ライン破断実験
- (4) 内部区画への浸水実験
- (5) 静水中における自由動揺試験

これらのうち実験(1)は、喫水（排水量）、GMの値などを変化させて、動揺振幅、定常変位、定常傾斜の周波数応答特性、波高変化に対する線形性を調べる目的で行った。

実験(2)は傾斜による流体力、波力、復原力係数などの変化による動揺応答特性の変化を調べることを目的とした。なお不規則波中、あるいは潮流、風などの複合外力下における挙動に関してはシミュレーション計算によって検討することとし、実験は行っていない。

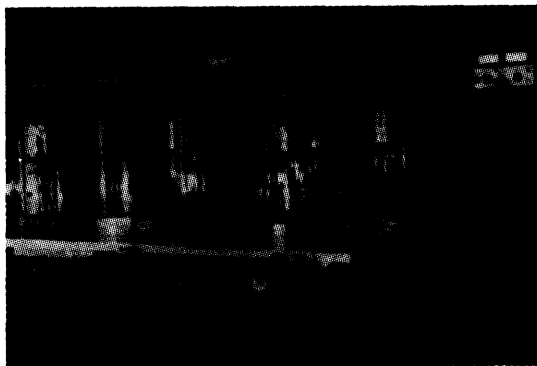
ただし、風、潮流中における抗力、揚力、転倒モーメントについては別途詳細に実験、及びその推定法の検討5)を行っており、その結果をシミュレーション計算に適用することができるようになっている。

実験(3)及び(4)は主として損傷時のセミサブリグの過渡的な挙動を測定することを目的として行った。

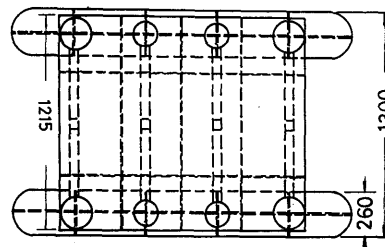
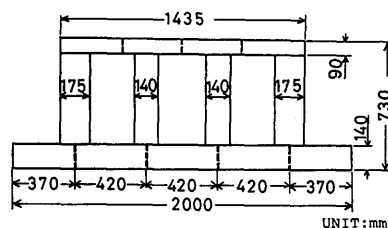
(5)の自由動揺試験は、動揺時の造渦減衰力を実験的に求めるために行った。セミサブリグの動揺振幅、特に同調時における動揺振幅の推定のためには造渦に基づく減衰力を正しく評価することが必要不可欠である。また、損傷後の過渡運動は各動揺モードの固有周期で長周期の運動をするため(セミサブリグの固有周期は通常長い)、この場合も減衰力の推定は重要である。しかしながら、現段階でセミサブリグのような要素部材の複雑に組み合わせられた浮体の動揺時の造渦減衰力を理論的に推定することは非常に困難であり、各種パラメータを変化させた系統的な自由動揺試験を行い実験データを蓄積することとした。

実験は4ヶ年に亘るプロジェクト実施期間の間に十数回にわたって行ったが、各実験における主要な実験状態のパラメータを一括してTable 2.1に示す。以後、この表の各実験状態の最上欄につけた番号(ID No.)にて各実験を識別する。

供試模型としては、第一報「半潜水型石油掘削船の復原性について(その1)」で示したM-1模型(代表的な半潜水型石油掘削リグの型式である2ローハル8コラムより構成されるもの)を使用した。なお、想定実機は存在しないが、模型の縮尺は1/50であると考えた。供試模型の写真、概要図を各々Fig. 2.1(a),



(a)



(b)

Fig. 2.1 General view of a model used in the experiments

(b)に示す、各コラムは上、中、下の3区画に、各ローハルは10区画に分割されており、各区画には電磁弁を通じて水の注排水が可能で、浸水現象をシミュレートできる。上部デッキは水密となっている。また、係留ライン破断のシミュレーションは、ラインの途中に設けた一対の電磁石に流れる電流を切ることにより行える。

運動の計測は、デッキ中央部にとりつけた6成分運動測定装置、及び無接触型の光学式トラッカー装置により行い、傾斜時の運動についてはFig. 2.2に示すように供試模型に偶力による転倒モーメントをかけた状態で規則波中の運動を測定した。

係留ライン破断実験及び浸水実験時の実験装置の概要及び係留状態図は第一報に示す通りである。係留ラインは計4本で1本ずつを4隅のコラムにとりつけている。実機では通常各4隅に2本ずつのラインがとりつけられている事例が多いが、本実験の目的は即物的な実験を行うのではなく、損傷後の挙動に及ぼす各種パラメータの影響を調べることにあるため、各隅の係留ラインをすべて1本にて代表させた。実験は静水中及び波浪中(規則波)において行い、係留ライン破断後の6自由度の運動、係留ライン張力の時刻歴を計測した。

Table 2.1 Experiment conditions

ID NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Code Name	DYNA-1 (s. 59.11)				DYNA-2 (s. 60.2)				
Date	condition-1		condition-2		condition-1		condition-2		condition-3
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	90°
Water Depth (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Displacement (kg)	197.0	197.0	197.0	197.0	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
Draft (m)	0.44	0.44	0.44	0.44	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
GM _i (m)	0.037								
	0.044		0.020		0.038		0.042		
GM _t (m)									
		0.051		0.024		0.019		0.019	0.003
KB (m)	0.129*	0.129*	0.129*	0.129*	0.088*	0.088*	0.088*	0.088*	0.088*
BM (m)	0.210*	0.210*	0.210*	0.210*	0.250*	0.250*	0.250*	0.250*	0.250*
	0.219*	0.219*	0.219*	0.219*	0.262*	0.262*	0.262*	0.262*	0.262*
KG (m)	0.295	0.295	0.321	0.321			0.308		
KO (m)	0.770	0.770	0.770	0.770	0.770	0.770	0.770	0.770	0.770
KF (m)	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
κ_{xx} (m)									
κ_{yy} (m)							0.568		
κ_{zz} (m)									
T surge (sec)	16.1		18.6		13.76		15.4		
T sway (sec)		19.9		24.1		17.32		18.36	12.8
T heave (sec)	3.34	3.36	3.32	3.33	3.28	3.29	3.21	3.21	3.22
T roll (sec)		6.98		9.72		11.74		11.70	24.48
T pitch (sec)	7.01		9.00		8.80		7.38		
T yaw (sec)									
α surge (sec ⁻¹)					0.0906		0.0950		
α sway (sec ⁻¹)						0.0803			0.132
α heave (sec ⁻¹)	0.0335	0.0645	0.0526	0.0504	0.0447	0.0616	0.0544	0.0610	0.0608
α roll (sec ⁻¹)		0.0780		0.0419		0.162		0.307	
α pitch (sec ⁻¹)	0.130		0.0621		0.0684		0.136		
α yaw (sec ⁻¹)									
line weight (in air) (kg/m)					0.1725	0.1725	0.1725	0.1725	0.1725
line weight (in water) (kg/m)					0.1480	0.1480	0.1480	0.1480	0.1480
initial tension (kg)	0.329	0.202			0.467	0.488			
	0.405	0.396			0.646	0.491			

GM	without mooring
	with mooring
BM	BM _i
	BM _t
initial tension	horizontal
	vertical

* : calculated value

T : natural period

 α : damping coefficient

(from free oscillation test)

 κ : radius of gyration (around G)

KO : keel to motion measured point

Table 2.1 Experiment conditions

ID NO.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Code Name	DYNA-3		DYNA-4				CAPS-1		CAPS-2
Date	(S.60.6)		(S.60.9)				(S.61.5)		(S.61.9)
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	
Water Depth (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5			
Displacement (kg)	185.0		166.5	166.5	189.0	189.0	179.1	179.1	189.0
Draft (m)	0.370		0.240	0.240	0.385	0.385	0.323	0.323	0.385
GM ₁ (m)	0.010		0.017		0.005		0.011		
	0.021		0.025		0.011				
GM ₂ (m)		0.019		0.013		0.013		0.019	
		0.031		0.025		0.019			
KB (m)			0.088*	0.088*	0.115*	0.115*			
BM (m)			0.250*	0.250*	0.220*	0.220*			
			0.262*	0.262*	0.229*	0.229*			
KG (m)			0.324	0.324	0.338	0.338	0.347 (0.308)	0.344 (0.305)	0.319
KO (m)			0.770	0.770	0.770	0.770			
KF (m)			0.240	0.240	0.240	0.240			
κ_{yy} (m)								0.563 (0.529)	0.566
κ_{yy} (m)							0.542 (0.508)		0.549
κ_{zz} (m)									0.693
T surge (sec)									
T sway (sec)									
T heave (sec)					3.24				
T roll (sec)					16.8				
T pitch (sec)					21.1				
T yaw (sec)					19.7				
α surge (sec ⁻¹)									
α sway (sec ⁻¹)									
α heave (sec ⁻¹)									
α roll (sec ⁻¹)									
α pitch (sec ⁻¹)									
α yaw (sec ⁻¹)									
line weight (in air) (kg/m)			0.1154	0.1154	0.1154	0.1154			
line weight (in water) (kg/m)			0.1000	0.1000	0.1000	0.1000			0.100
initial tension (kg)	0.428	0.436	0.345	0.363	0.253	0.240			
	0.498	0.498	0.352	0.368	0.300	0.295			

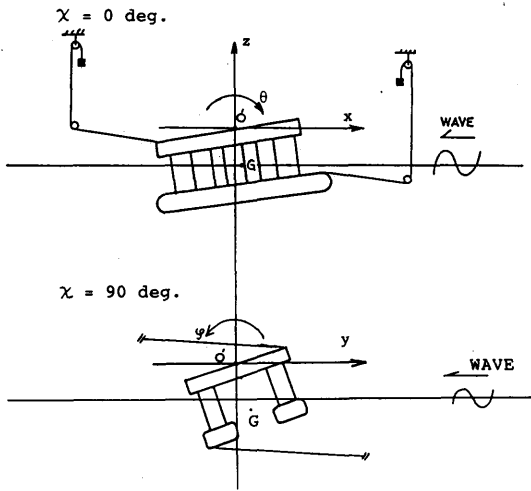


Fig. 2.2 Co-ordinate system and test arrangement in regular wave under inclined condition

浸水実験は、架台上に設置された水溜タンクと浸水区画を結ぶビニール管の途中に設けられた電磁弁を開閉することにより指定された区画に浸水させた。模型に設けられた浸水区画の詳細図を Fig. 2.3 に示す。各区画室には、空気抜きのためのパイプもとりつけられており、各区画室は完全に満水にできる。また、単位時間あたりの浸水量（浸水率）もほぼ一定である。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 非損傷時の規則波中応答特性

非損傷時の規則波中応答特性実験は計5種類の実験状態について行った。模型は4本のラインで係留した状態で実験を行った。変化させたパラメータは喫水

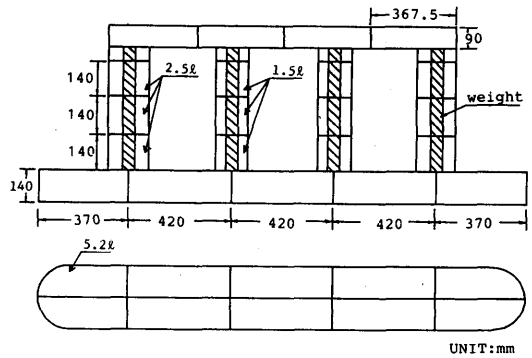


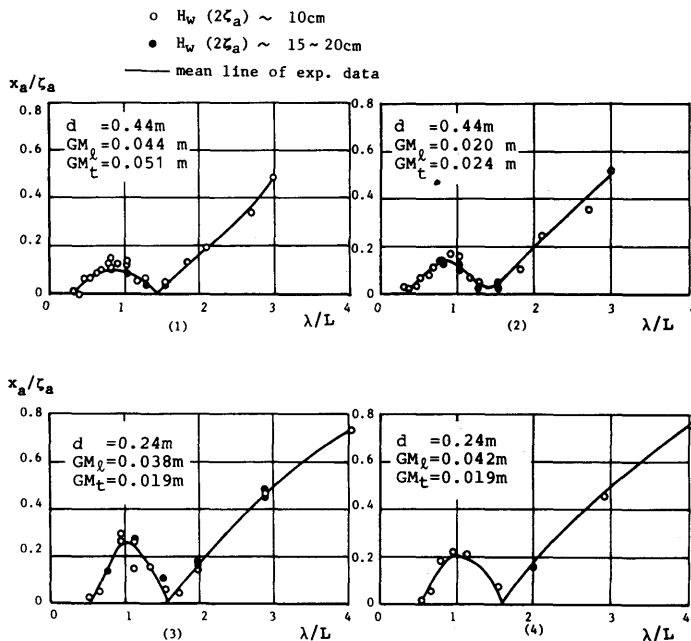
Fig. 2.3 Arrangements of the floodable compartments

(排水量) 及びGMであり、各実験状態における値をまとめて Table 2.2 に示す。

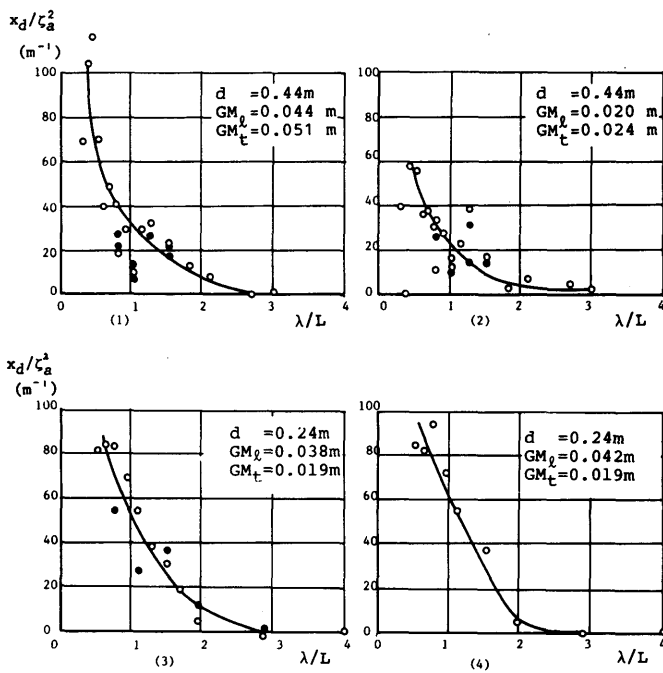
Fig. 2.4(a)-(l)に縦波、横波中における各運動モードの周波数応答特性を比較して示す。図中に示した運動振幅は、Fig. 2.2 に示す座標系に従って、運動計測点即ち上部デッキ中央部を原点にとった場合の値であり、重心点の surge, sway でないことに注意されたい。白丸印は波高10cm程度の波に対する結果であり、黒丸印は波高15~20cmの波に対する結果である。また、図中の実線は実験点をなめらかに結んだもので、計算値ではない。横軸は波長(λ)とローワーハル長さ(L:2m)との比を示し、縦軸は動揺振幅については波振幅(ξ_a)あるいは波傾斜(kξ_a)で無次元化したものを示す。また、定常変位、定常傾斜については波高の2乗に比例するものと仮定して波高の2乗で割った値を示しているが、無次元量にはなっていない。なお、定常変位の方向は、surge, sway については波の進行方向、heave については沈下する方向を正とし、定常傾斜については波上側が持ち上がる状態を正としている。

Table 2.2 Particulars of the experiments in regular waves

ID No.	index	condition			
		displacement	draft	GM _l =0.0441m (longitudinal)	GM _t =0.0515m (transverse)
1,2	(1)	197.0Kg	44.0cm	0.020m	0.024m
3,4	(2)	197.0Kg	44.0cm	0.038m	0.019m
5,6	(3)	166.0Kg	24.0cm	0.042m	0.019m
7,8	(4)	166.0Kg	24.0cm		
9	(5)	166.0Kg	24.0cm		0.003m

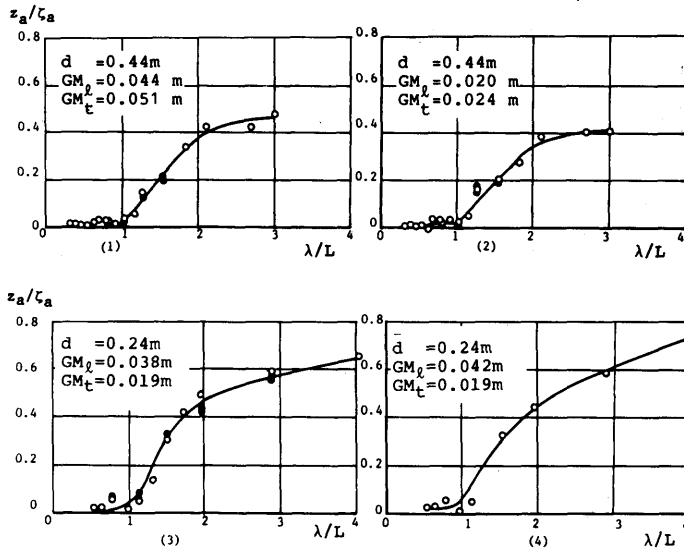


(a) Surge (in head seas)

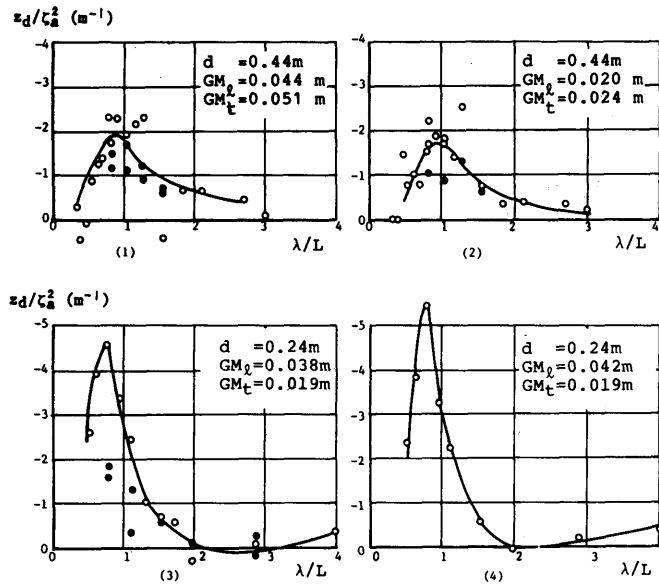


(b) Steady drift displacement in surge direction (in head seas)

Fig. 2.4 Motions in regular waves

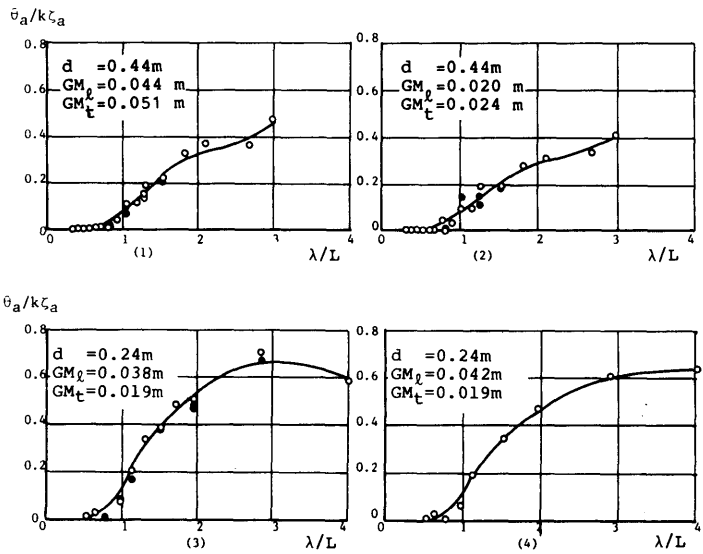


(c) Heave (in head seas)

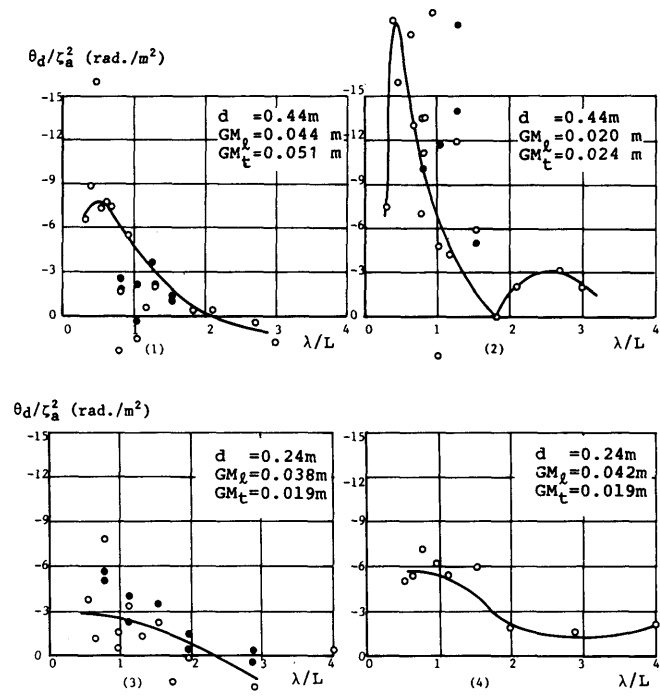


(d) Steady drift displacement in heave direction (in head seas)

Fig. 2.4 Motions in regular waves.

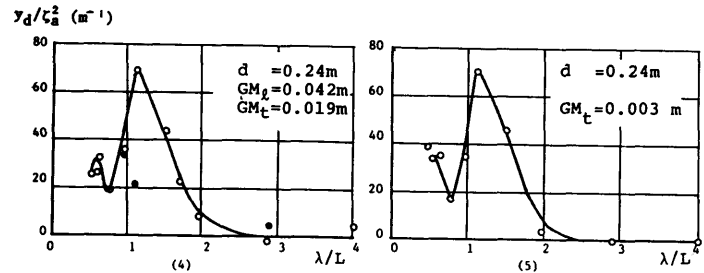
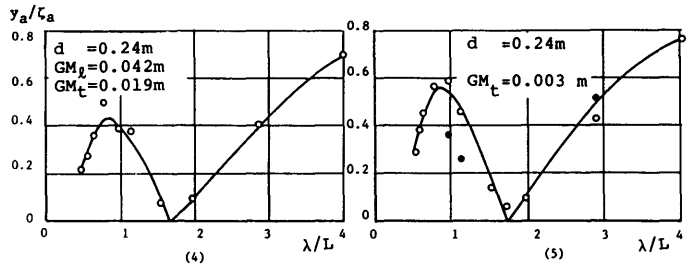
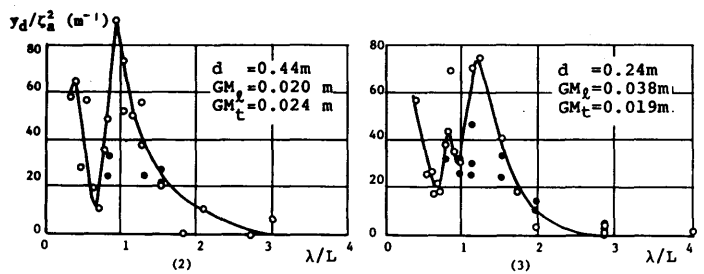
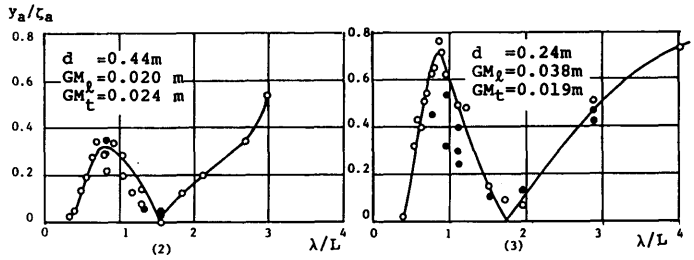
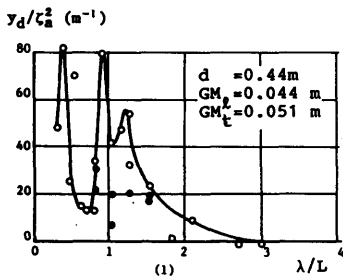
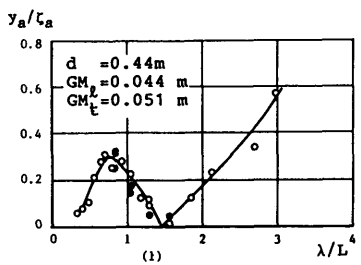


(e) Pitch (in head seas)



(f) Steady tilt in pitch direction (in head seas)

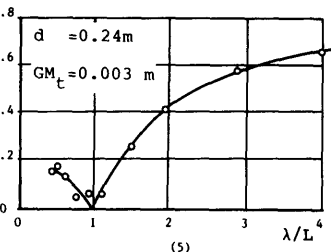
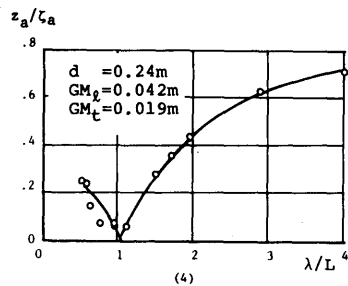
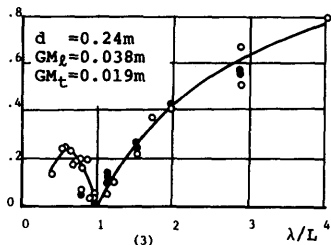
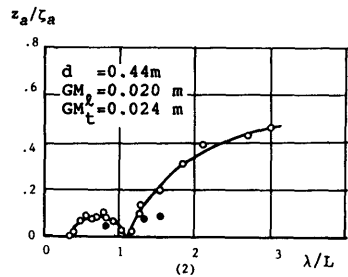
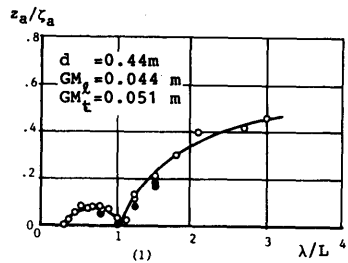
Fig. 2.4 Motions in regular waves



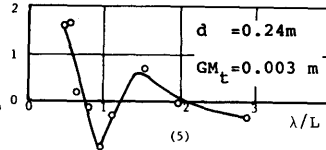
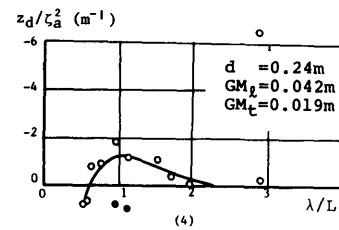
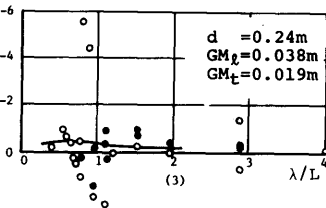
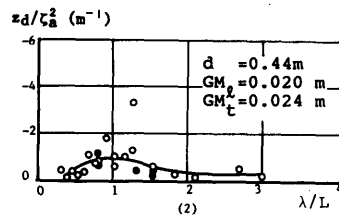
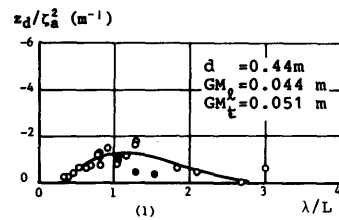
(g) Sway (in beam seas)

(h) Steady drift displacement in sway direction (in beam seas)

Fig. 2.4 Motions in regular waves

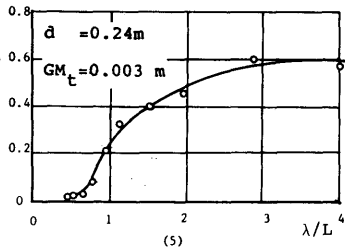
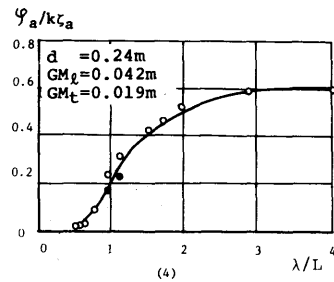
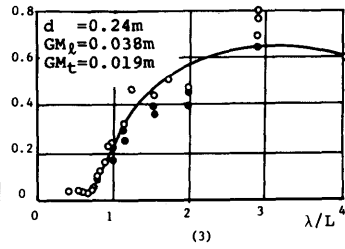
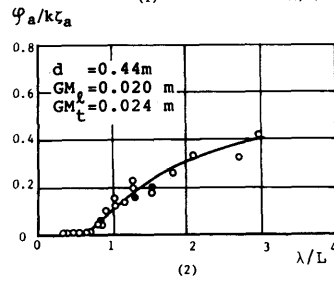
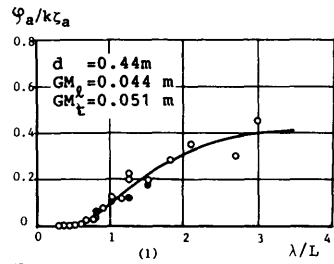


(i) Heave (in beam seas)

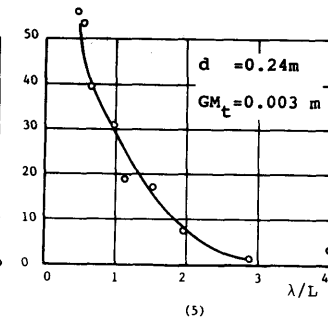
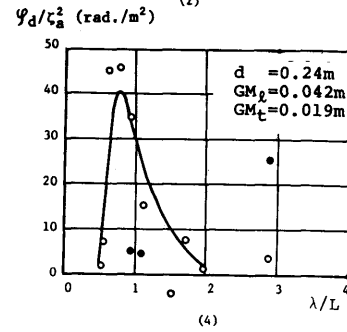
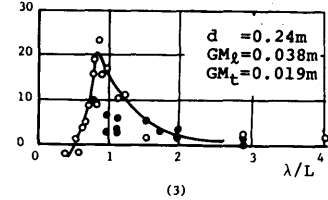
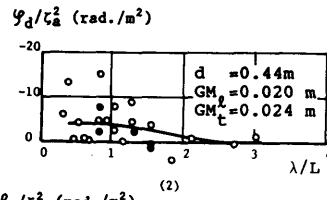
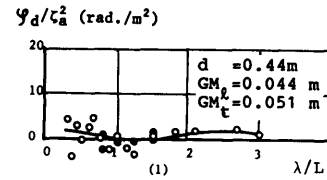


(j) Steady drift displacement in heave direction (in beam seas)

Fig. 2.4 Motions in regular waves



(k) Roll (in beam seas)



(1) Steady tilt in roll direction (in beam seas)

Fig. 2.4 Motions in regular waves

動揺振幅

動揺振幅については、喫水が浅くなると各運動モード共にその応答が顕著に大きくなるが、GM変化の影響は明らかでなく、GMが小さくても動揺振幅はあまり変化しない。

今回行った実験に用いた波の周期は実機換算(1/50スケールとして)で16秒以下のものであるが、実海において通常おこりうる波の周期をほぼカバーしていると考えられる。復原性能に関して問題となる運動は主として上下揺れ、縦揺れ、横揺れであるが、これらの運動モードの応答特性は(波振幅あるいは波傾斜で無次元化した係数で)いずれもこの波周期の範囲では0.8以下である。

本実験に用いた模型の上下揺れ、縦揺れ、横揺れの固有周期は各々実機換算で23秒、50~60秒、50~85秒程度である。セミサブリグの縦揺れ、横揺れの固有周期は長いため、縦揺れ、横揺れの波との同調による大振幅運動はあまり問題とならないにしても、上下揺れの固有周期(20~25秒)に近い周期をもつ波による大振幅上下揺れの可能性は一応検討しておく必要がある⁶⁾。今回の実験においては、造波機の能力の制限からそのような長波長の波の中における応答特性は計測していないが、過去の実験、実機計測例などによれば、上下揺れの同調点における応答特性は波振幅の高々1.5倍程度である⁶⁾。

定常傾斜

実験で示したように、縦揺れ、横揺れの運動モードには規則波中において定常的な傾斜を生じ、この傾斜が波と同じ周期で振動する運動に重畳されることになる。上下方向にも定常変位を生ずるが、これらは動揺振幅に比して小さく問題とならない。縦揺れ、横揺れの定常傾斜は定常力の大きくなる短波長の波に対して大きくなり、本実験の結果では縦波中においては波下側が、横波中においては波上側がもちあがる方向に傾斜する傾向がある。また定常傾斜の大きさは喫水(ローハルの没水深さ)、GMによって大きく変化する。傾斜モーメントの大きさが波高の2乗に比例すると考えられる場合でも、対応する傾斜角は復原力特性の非線形性のため一般に波高の2乗に比例しない。ちなみに本実験での最大定常傾斜は波高10cm(実機5m)で、縦波中2.9度、横波中7.2度であった。

定常傾斜の推定法についてはNumata⁷⁾がその可能性を指摘して以来盛んに行われているが、実験との一致度は未だに満足すべきものとはいえない。その原因

は、定常傾斜を生ずる原因の主たるものとして指摘されているローハルに働く上下方向定常力以外に、水平方向の定常力による転倒モーメントの寄与、運動の影響⁸⁾、係留点位置の影響も大きいためであると考えられる。これらを考慮して定常傾斜を推定するためにはセミサブリグに働く2次オーダーまでの圧力分布を精度よく計算する必要があり、既存の特異点分布法や有限要素法などによって原理的には可能であるが、実際問題としてはポテンシャルと、その微分値までを精度よく求めることは数値計算上困難な点が多い。

これらの定常傾斜が動揺に重畳されるわけであるが、定常傾斜は波による定常力の大きくなる短波長側で大きくなり、逆に波周期と同じ周期の動揺振幅は一般に長波長の波に対して大きくなるため、規則波中の最大変位、傾斜は最大定常傾斜と最大動揺振幅の単純な和とはならない。

長周期運動

定常傾斜は単一周期の規則波中において観察される現象であり、実海面では波面は不規則的に変動し定常的な傾斜はおこりえない。しかしながら、不規則波を周期、波高、進行方向の異なる規則波の集合とみなすと、規則波中の定常傾斜と同様の原因により不規則波を構成する各規則波に対応する定常力が生じ、これはあたかも波群の高さの変動と同じ長周期の変動を行う。これは要素波の周波数の差の周波数で変動する⁹⁾。この力は一般に小さいため高周波数成分は運動を誘起する可能性は小さいが、低周波数成分はセミサブリグの固有周期が長いため、前後揺れ、左右揺れ、縦揺れ、横揺れなどの固有振動を誘起する可能性がある。水槽試験ではこのような原因に基づくと思われる長周期の動揺が観察されているが、実海域において計測された例はあまり知られていない。この長周期運動は波と同じ変動周期で変動する動揺成分と単純和の形で重畳されるため復原性、安全性にとって検討を要する項目である。この長周期運動による最大変位、傾斜がどの位になるかを推定するためには、時間領域の運動シミュレーション計算が行われるのが普通であるが、長周期運動が同調現象であるため減衰力、特に渦による減衰力の評価が重要となる。水平方向の長周期運動に関しては、係留力の最大値の推定のために復原性とは別の分野で盛んに研究が行われてきており¹⁰⁾¹¹⁾、減衰力についてもいくつかの研究があるが、未だその推定法が確立していないのが現状である。復原性に関係ある縦揺れ、横揺れの長周期運動に関してはその研究も

少なくとも12, 今後の課題である。

波高影響

波高影響については白丸印 (波高10cm程度), 黒丸印 (波高15~20cm) で示された実験値を比較すると, 係留されているため漂流量の大きくなる短波長域においては, 係留ラインの拘束が強くなり, 波高の高い場合 (黒丸印) には, 単位波高あたりの縦波中の水平, 上下方向の定常変位, 横波中の左右揺れ振幅が小さくなる傾向がみられる。

動揺時の係留ライン張力

セミサブブリグの安全性にとっては, 波浪中における動揺振幅, 定常傾斜と共に動揺に伴って係留ラインに生ずる張力も重要である。現在稼働中の大型のセミサブブリグは各4隅にとりつけた2条あるいは3条のチェーンで係留されることが多いが, その公称破断荷重は (APL規格: $2\frac{3}{4}''\sim 3'\phi$ として) 1条あたり350~400t程度である。係留ラインの破断の可能性としては, 破断荷重以上の荷重が加わる場合の他に, 疲労, 摩耗による破断なども考えられる。また係留ラインが破断しなくても, アンカーが走錨をはじめるとセミサブブリグにとっては係留ライン破断と同様の危険性を生じる¹³⁾。

今回実施した波浪中応答特性試験における係留関係の主要目等をまとめて Table 2.3 に示す。係留ラインの水中重量は0.148kg/m (実機換算370kg/m) であり, また初期張力は排水量の1/250~1/400である。初期張力は現実的な値であるが, ラインの単位長さあたりの水中重量は実機に用いられる係留鎖 (100~150

kg/m) に比して大きい, 実機では各4隅を2~3本のラインで係留されることを考えれば非現実的な値ではない。Table 2.2 に示した各実験状態で規則波中動揺時に波上側の係留ライン1本に働く水平, 鉛直方向の張力を計測した結果をまとめて Fig. 2.5 (a)~(h) に示す。定常張力, 変動張力は Fig. 2.6 に示す様に定義する。係留ラインに働く張力の周波数応答特性は動揺振幅の応答特性ほど明らかな傾向を示さず, データにばらつきがみられるが, 変動張力は喫水の浅い方が明らかに大きく, 定常張力も縦波中においては喫水の浅い方が大きい。また, 横波中においては定常張力は喫水によってはあまり変化しない。定常張力の最大値は変動張力の最大値の20倍以上であり, 大荷重による破断を問題とする場合には定常張力が重要である。定常張力の最大値は今回の実験では波高10cm (実機5m) で1本あたり0.7kg程度となる。これに初期張力を加えると約1.2kgで, 単純にスケール比 (1/50) で実機換算すると150tとなる。定常張力の最大値は λ/L 1.0以下で生じ, それより波長が長くなると張力は急激に小さくなる。

理論値との比較

Fig. 2.7 (a)~(e) には動揺振幅, 変動張力の理論値を実験値と比較して示す。計算はローハル1本 (コラム4本を含む) に働く波強制力, 付加質量, 造波減衰力の特異点分布法により計算し, それらを位相を考慮して加えあわせたものを用いるという方法によった。セミサブブリグの動揺については同調点を除いてこ

Table 2.3 Mooring characteristics of the experiments in regular waves

ID No	Index	Condition		
		line length	line weight in water	initial tension
1, 2	(1)	9.480m	0.148kg/m	in head seas 0.329/0.405
3, 4	(2)	9.480m	0.148kg/m	in beam seas 0.202/0.396
5, 6	(3)	9.480m	0.148kg/m	in head seas
7, 8	(4)	9.480m	0.148kg/m	0.467/0.464
9	(5)	9.480m	0.148kg/m	in beam seas 0.488/0.491
				horizontal vertical

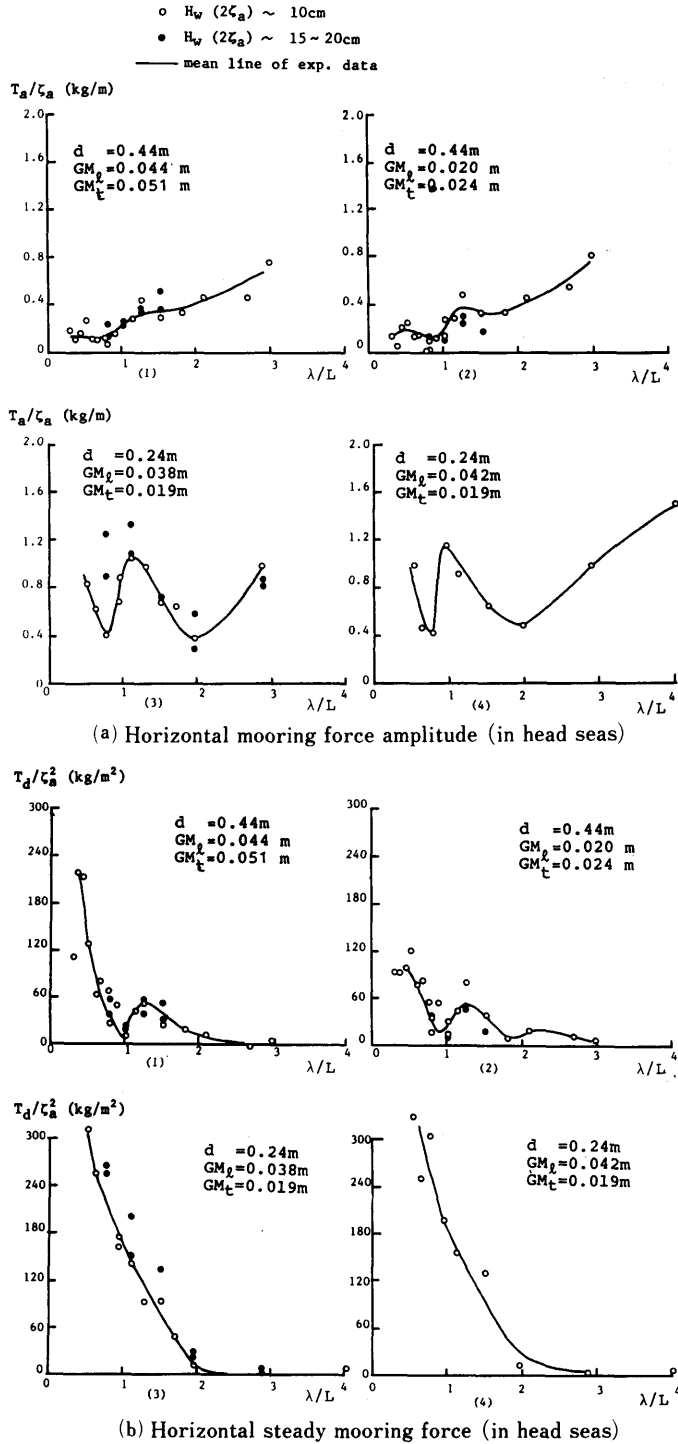
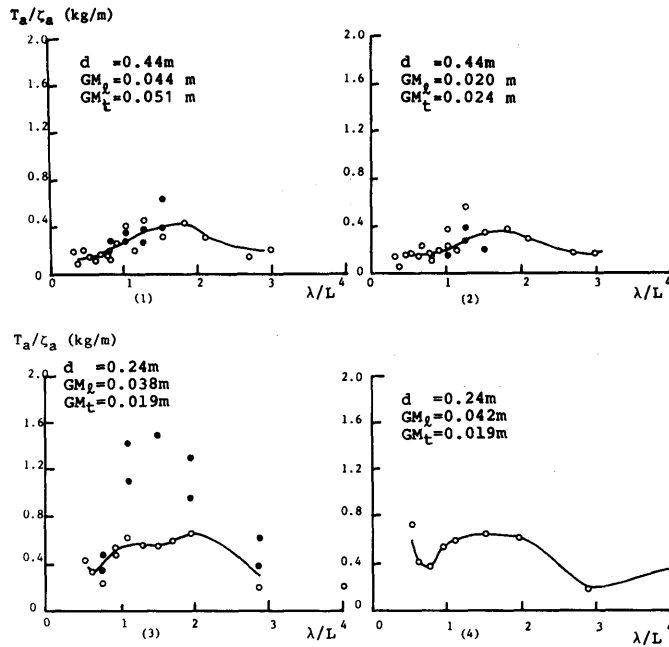
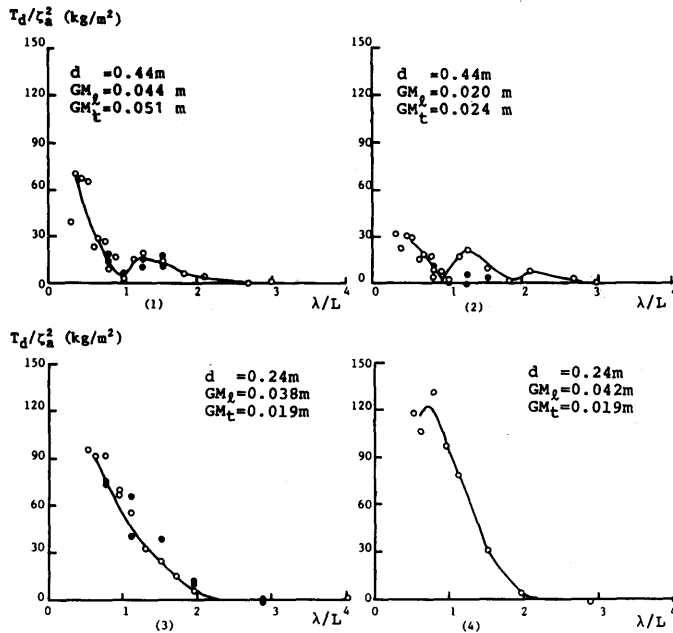


Fig. 2.5 Mooring forces in regular waves

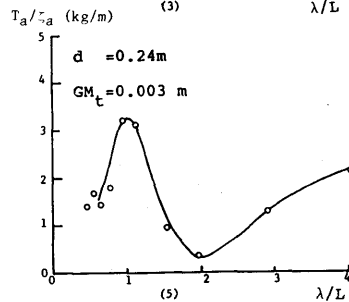
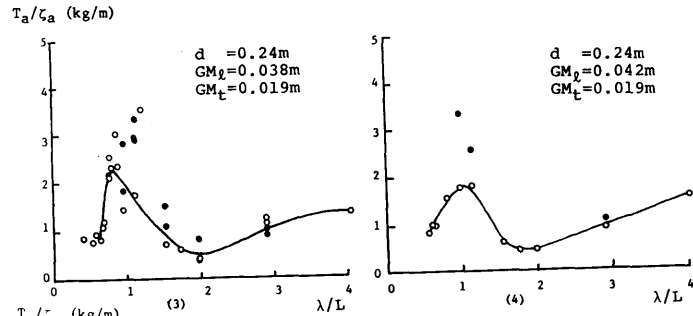
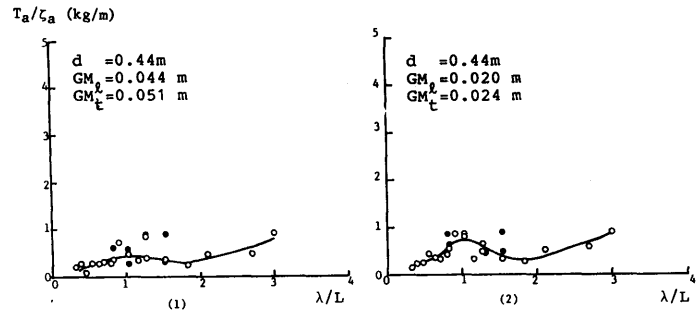


(c) Vertical mooring force amplitude (in head seas)

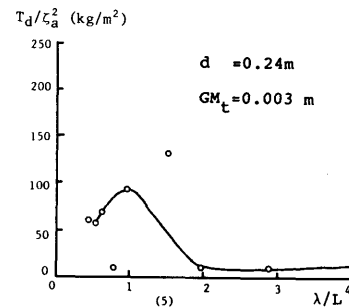
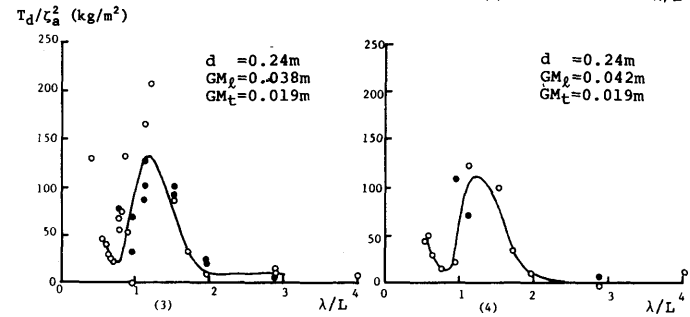
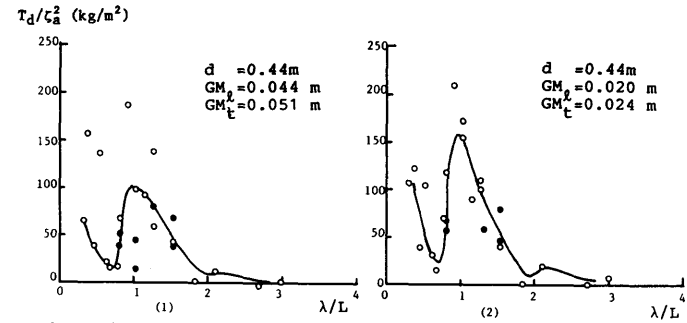


(d) Vertical steady mooring force (in head seas)

Fig2.5 Mooring forces in regular waves

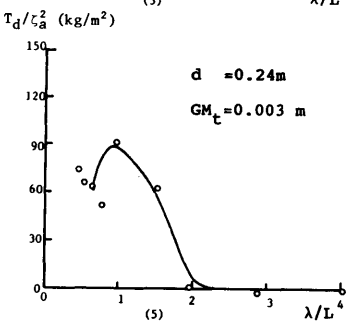
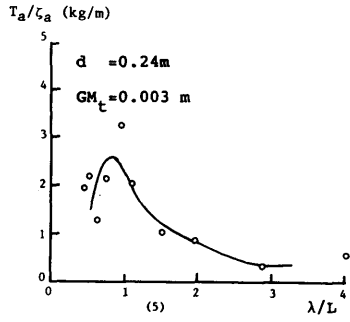
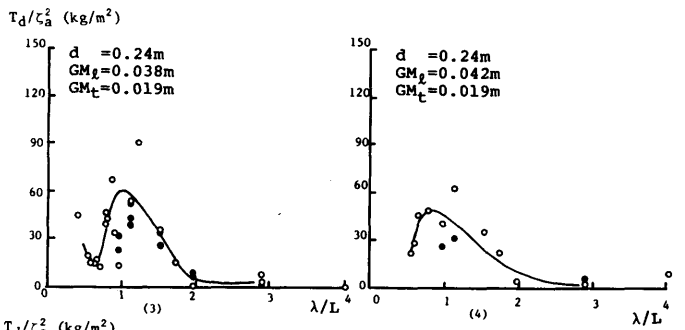
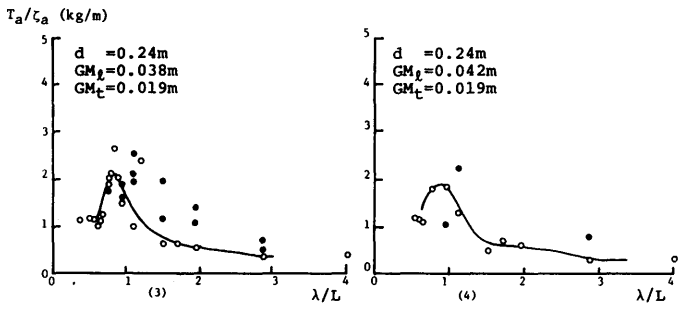
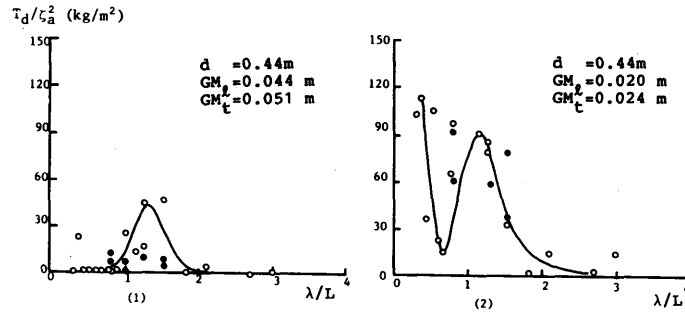
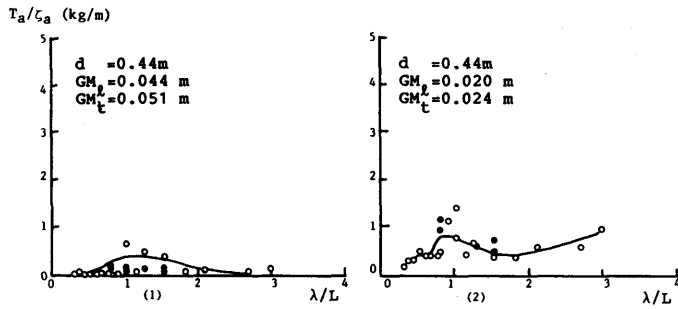


(e) Horizontal mooring force amplitude (in beam seas)



(f) Horizontal steady mooring force (in beam seas)

Fig2.5 Mooring forces in regular waves



(g) Vertical mooring force amplitude (in beam seas)

(h) Vertical steady mooring force (in beam seas)

Fig2.5 Mooring forces in regular waves

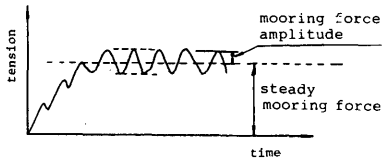
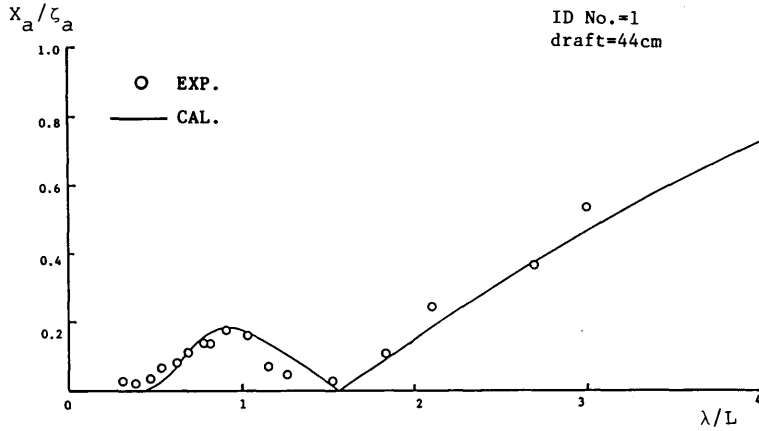


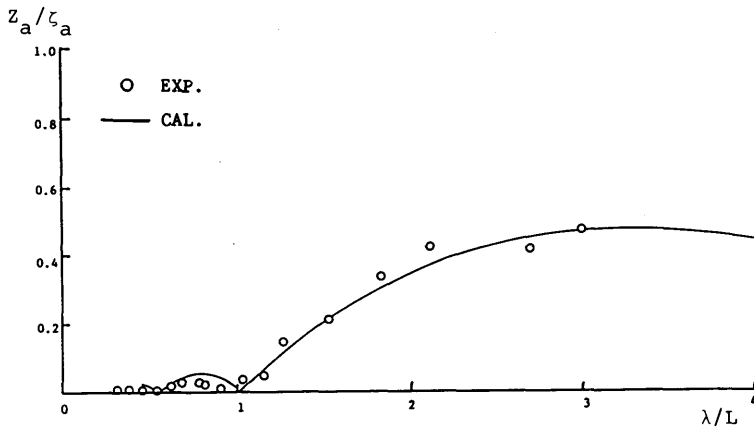
Fig. 2.6 Definition of mooring forces

のような Hooft 法的な考え方¹⁰で実験とよく一致する結果が得られることがわかっているが、今回の計算でも実験値との一致はよい。しかし、前にも述べたよ

うにセミサブリグの安全性にとっては同調点付近の大振幅運動が問題となるので、同調点における運動推定の精度向上、精密な実験値の取得が必要である。特に、Hooft 法では部材間の流体力学的相互干渉を考慮していないので Fig. 2.8 (a), (b) に示すように流体力の推定が不十分で、同調周期の推定値が実験とあわないという不都合を生じる。(図中、with interaction；特異点分布法によりセミサブリグ全体をパネルに分割して流体力を計算したもの、without interaction；特異点分布法により片側のローハルをパネルに分割して流体力を計算し、単純に2倍してセミサブリグの流体力としたもの。)

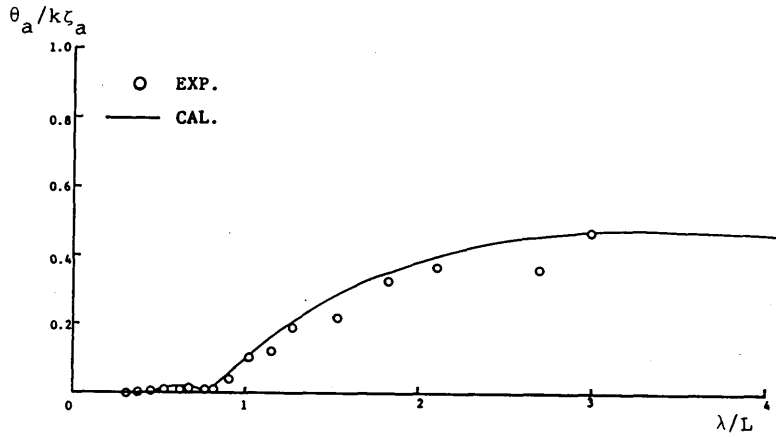


(a) Surge (in head seas)

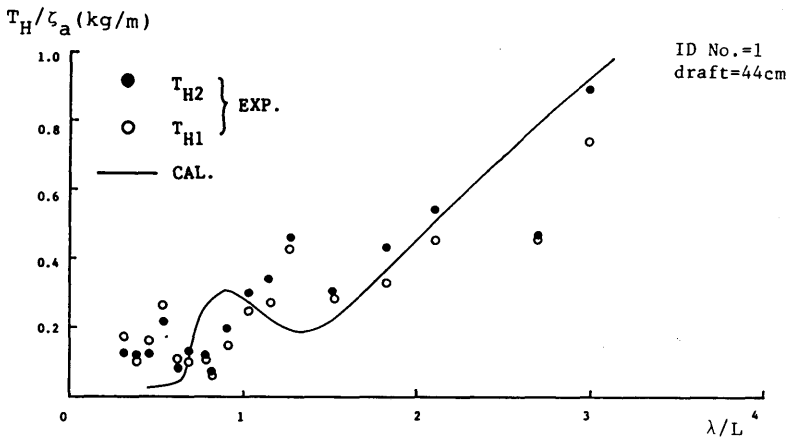


(b) Heave (in head seas)

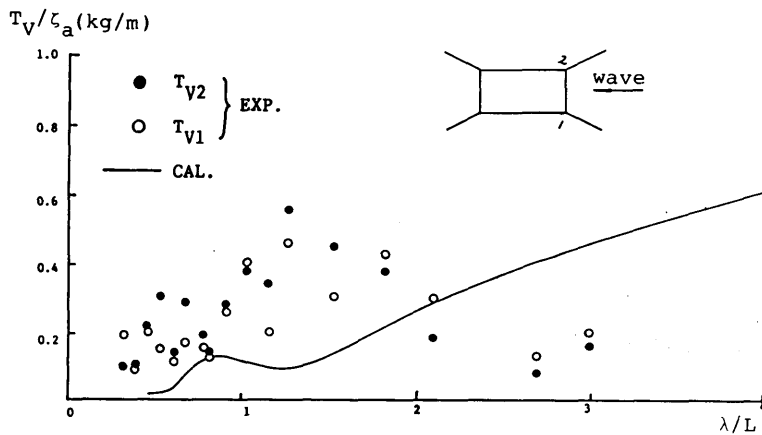
Fig. 2.7 Comparisons of theoretical estimations with experimental results of motions in regular waves



(c) Pitch (in head seas)



(d) Horizontal mooring force amplitude (in head seas)



(e) Vertical mooring force amplitude (in head seas)

Fig. 2.7 Comparisons of theoretical estimations with experimental results of motions in regular waves

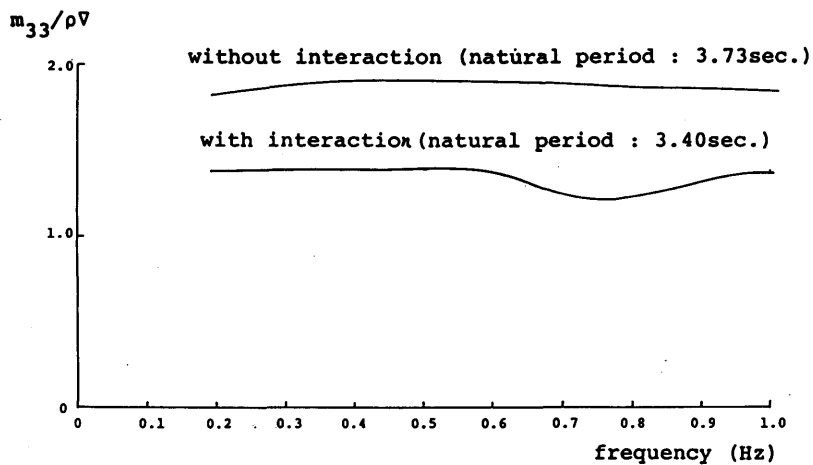


Fig. 2.8 (a) Added mass in heave (calculation)

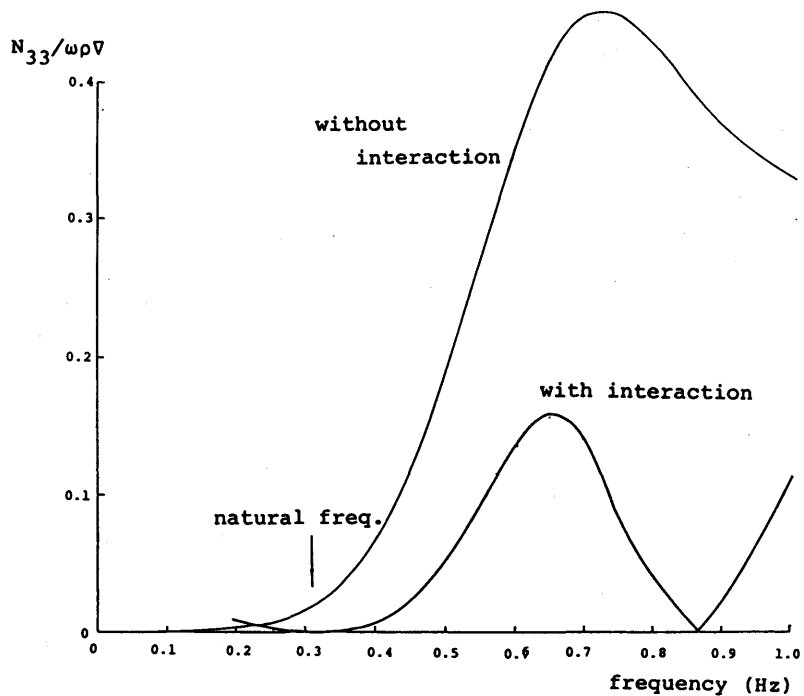


Fig. 2.8 (b) Damping in heave (calculation)

係留ラインに働く変動張力についても理論計算を行い実験と比較した。その推定精度は動揺振幅ほど良好ではない。この原因の大きなものとしては、計算においては係留反力を無視して動揺を計算した後にカタナリ理論により動的張力を無視して張力を計算しているため及び定常変位による係留系のバネ係数の変化を考慮にいれていないためであると考えられる。係留ラインの動的張力の動揺振幅に及ぼす影響は小さいが、動揺に伴う動的張力のライン張力に占める割合は無視できない大きくなることは従来より指摘されているところである¹⁰⁾。

2.2.2 傾斜時の規則波中応答特性実験

セミサブリグに何らかの原因により転倒モーメントが働いて傾斜した場合に、波浪中の応答特性が通常の直立状態の場合と比して大きく異なるかを究明することが本項目の研究対象である。

傾斜時の応答特性に関して中嶋¹⁶⁾らは傾斜したセミサブリグの横波中の運動を計測し、ローハルの水面からの露出などの現象がおきなければその応答特性は直立時の場合と大差ないと述べている。一方、前田¹⁷⁾は、大傾斜(～20度)時のセミサブリグの運動を傾斜による流体力の変化を考慮して計算し、縦揺れについては傾斜によってその応答振幅が著しく高くなる場合のあることを示している。また Huang¹⁸⁾は変位の2乗に比例した復原力を有するバネ系の強制振動について数値的に検討し、動揺のスペクトラムにおいて傾斜時には動揺の固有周期のところに鋭いピークをもつことを示している。更に、Huangら¹⁹⁾、Naess²⁰⁾は縦波中における surge, heave, pitch を2次元ストリップ理論で計算し、ローハルが水面に近づいた時や貫通している場合には、正負の傾斜角に対して運動応答が異なり、波下側に傾斜(nose-up)している方が動揺が大きいなどの結果を示しているが、実験との一致は十分とはいえない。また、梶田ら¹⁴⁾は、大傾斜(±15度)したセミサブリグの規則波中動揺試験を行い、傾斜によってロールやピッチの固有周期が顕著に変化し(短くなる)、また波浪中の動揺性能も直立状態に比して長周期の波浪中で横揺れなどの応答が大きく変化することを示している。

Fig. 2.9 (a),(b)は本実験において、セミサブリグに偶力による転倒モーメントを負荷した状態で、規則波中の応答特性を代表的な波周波数3点について調べたものである。実験時の転倒モーメントによる最大傾斜は縦波中(Trim)11度、横波中(Heel)7度程度で、

この範囲ではまだローハルは完全に没水したままである。この図から上下揺れ、前後揺れ、及び左右揺れは傾斜による応答特性の変化はほとんど認められないが、横波中の横揺れ、縦波中の縦揺れは周波数の小さな長波長の波に対する応答が傾斜の増大に伴って大きくなる傾向が認められる。

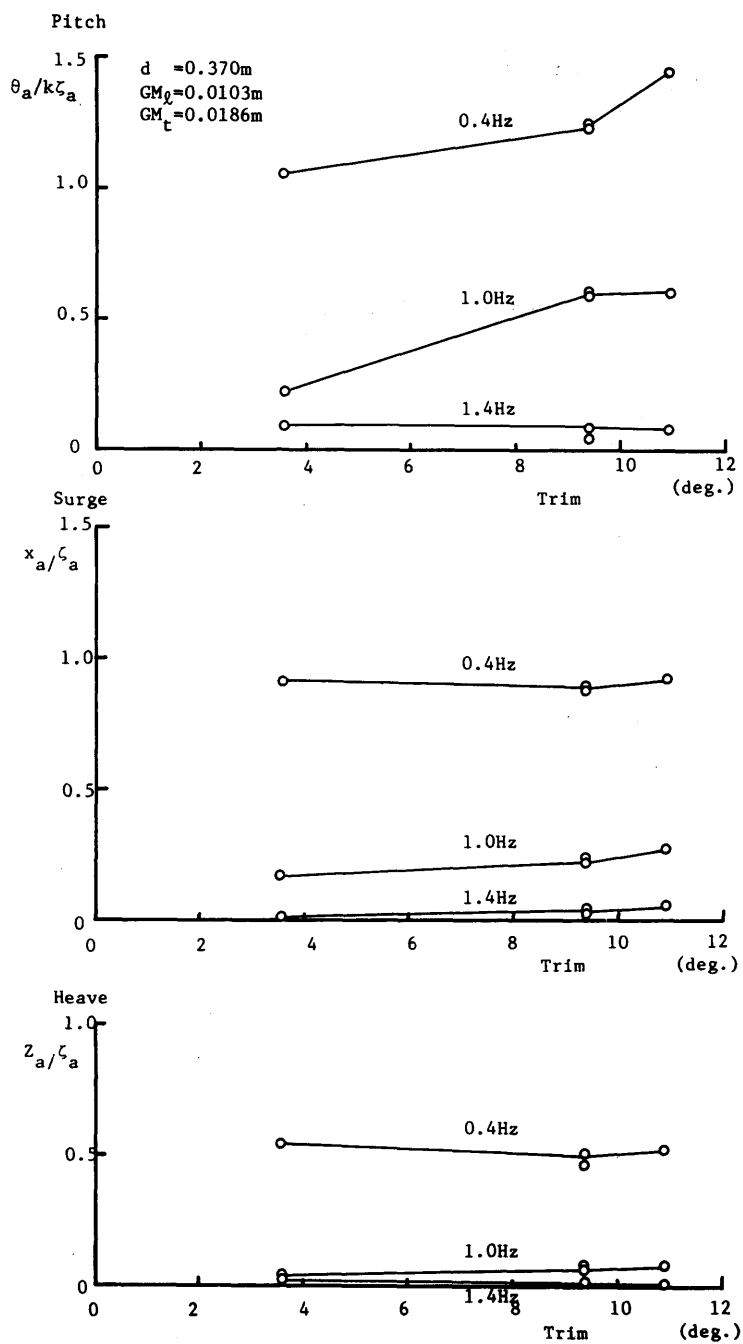
第一報でのべた静的復原性評価プログラムを用いて、計算によって各傾斜状態における復原力係数を求めて固有周期を推算した例をFig. 2.10に示す。

Fig. 2.10は傾斜による復原力係数の変化のみを考慮して傾斜時の固有周期(T)と直立時の縦揺れの固有周期(T_0)の比を描いたものである。さらにFig. 2.11には流体力の変化は無視して復原力係数の変化だけを考慮して、傾斜時と直立時の縦揺れ振幅の比を計算したものである。これらの図から傾斜により縦揺れ、横揺れの固有周期が短くなること、及び長波長の波に対して応答振幅が傾斜により大きくなる現象が復原力係数の変化によりある程度説明できることがわかる。しかしながら、復原力係数の変化だけでは正負の初期傾斜に対して動揺応答が異なるという実験的事実が説明できないが、この応答の違いは傾斜による流体力の変化に起因するものと考えられる。

傾斜による運動への影響としては、固有周期や運動振幅の変化と共に運動モード間の連成が考えられる。即ち、直立状態で幾何学的に前後、左右対称なセミサブリグでは前後揺れと縦揺れ、左右揺れと横揺れのみが主として連成運動を行うが、傾斜に伴って上下揺れと縦揺れ、横揺れも連成をすることとなる。更に、斜めに傾斜する場合には6自由度の運動モードすべてが連成する。従って、縦波中においても連成により横揺れ、左右揺れなどが誘起され、横波中においても縦揺れ、前後揺れが誘起される。Fig. 2.12には、片側ローハルの1区画に浸水をさせたため、斜め軸方向に傾斜することとなり、上下揺れとの連成運動によって、横波中で縦揺れが誘起されたと考えられる計測例を示す。

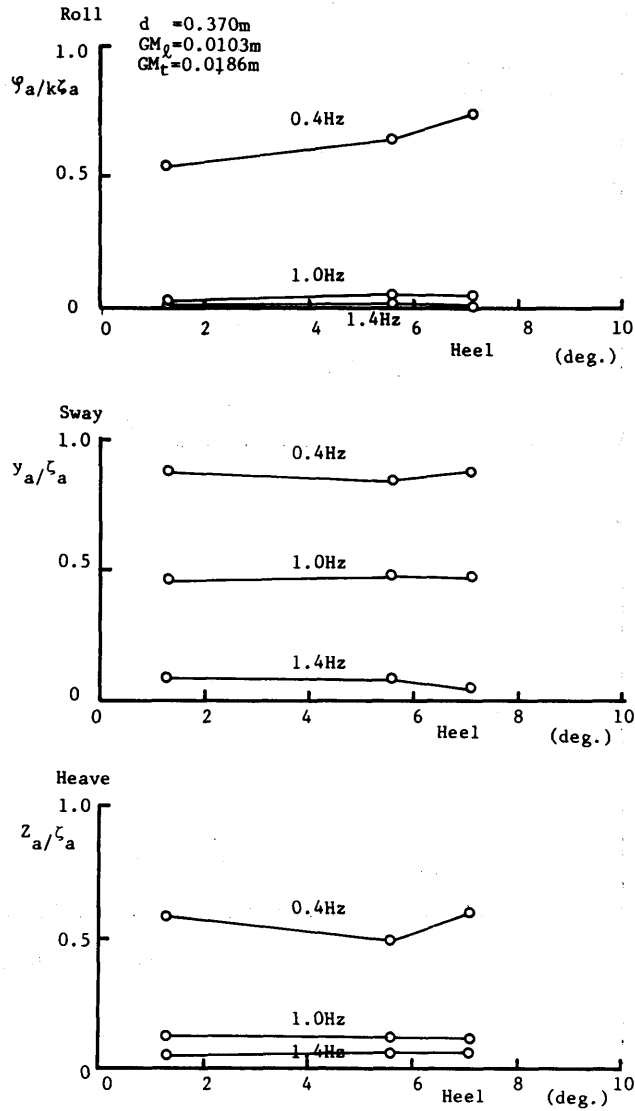
以上、既存の研究及び本研究の結果から、傾斜したセミサブリグの波浪中運動と直立時の波浪中運動との違いとして次の事項が挙げられる。

- (1) 縦揺れ、横揺れ以外の運動応答は傾斜によりあまり変化しない。
- (2) 縦揺れ、横揺れは傾斜による流体力、あるいは復原力の変化によって大きく影響を受ける場合があり、一般に直立時の運動応答に比べて大きくなる。
- (3) 傾斜による流体力(付加質量)、復原力係数の



(a) in head seas, nose-up, experiment

Fig. 2.9 Motions in regular waves under inclined conditions



(b) in beam seas, w. s. -up, experiment

Fig. 2.9 Motions in regular waves under inclined conditions

変化によって、縦揺れ、横揺れの固有周期が短くなり、通常頻繁におこりうる波周期の範囲内にはいつて同調による大振幅運動をおこす可能性がある。

ではおこりにくい縦波中の横揺れ、横波中の縦揺れなどが誘起される可能性がある。

(4) 傾斜による運動モード間の連成により、直立時

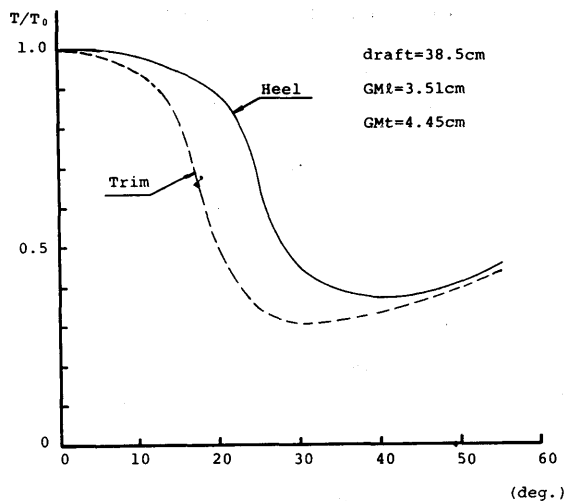


Fig. 2.10 Variations of the pitch natural frequency due to inclinations (calculation)

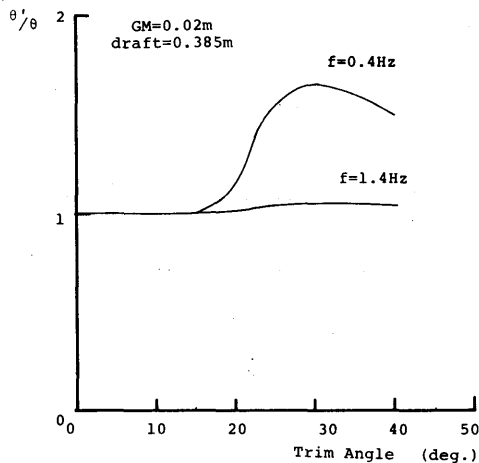


Fig. 2.11 Magnification factor for pitch due to inclinations (calculation)

2.2.3 係留ライン破断実験

静水中及び波浪中において、模型にとりつけられた4本の係留ラインのうちの1本を破断した後の6自由度の運動を計測した例を Fig. 2.13 (a)~(h) に示す。図中の零点は破断前の平均的位置(すなわち、波浪中では漂流力により定常変位した位置)である。係留ラインが破断すると、力、モーメントのバランスがくずれて新たな釣合い位置に向かって浮体は移動するが、Fig. 2.13 にみられるようにその過渡運動時に大変位や大傾斜を伴う長周期の運動を行う。運動の周期は、各運動モードの固有周期に対応するが、6自由度の過渡運動は復原力、モーメントの起源によって(1) surge, sway, yaw (2) heave (3) pitch, roll の3つに大別できる。即ち、surge, sway, yaw に対する復原力は係留ラインからの反力によるものであるのに対して、heave に対する復原力はその大部分が流体からの静水圧に基づくものである。変位、傾斜に対する係留ラインからの反力による復原力、モーメントは、同じ変位、傾斜に対する静水圧による復原力、モーメントと比べて、通常のスラック係留の場合非常に小さい。従ってその結果として surge, sway, yaw の過渡運動時の運動周期は heave の運動周期に比べて非常に長くなる。一方、roll, pitch に対する復原モーメントは係留ラインからの反力に起因する成分と流体からの静水圧に基づく成分の両方があり、流体からの静水圧

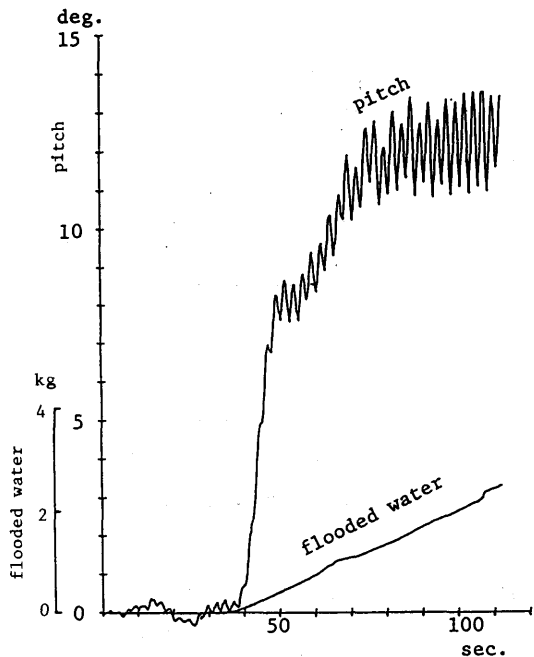
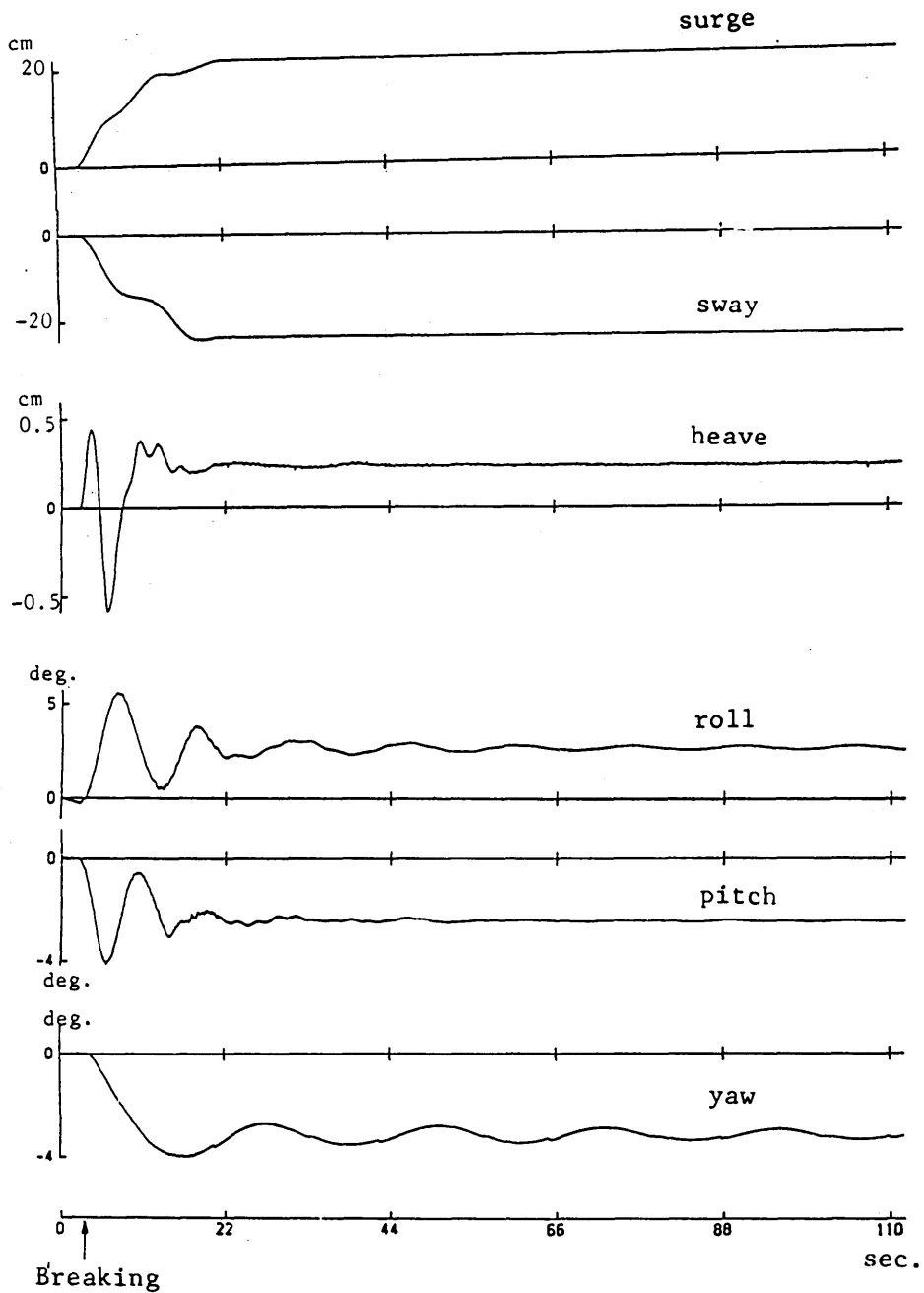


Fig. 2.12 Pitch motions during flooding in beam seas (wave period: 2.5sec)

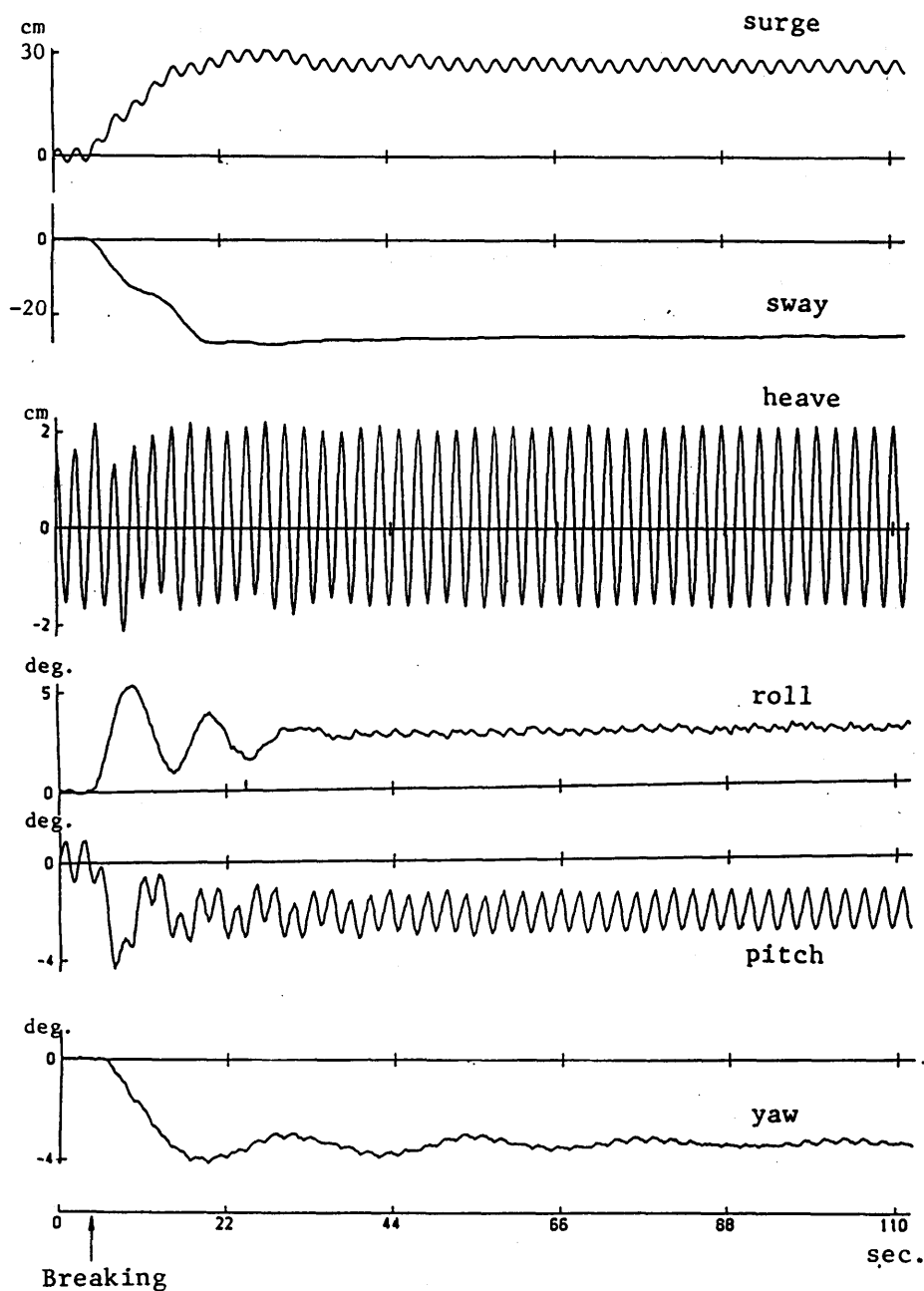
ID No.=12, draft=24cm, in still water



(a)

Fig. 2.13 (a)~(h) Transient motions after a breaking of a mooring line

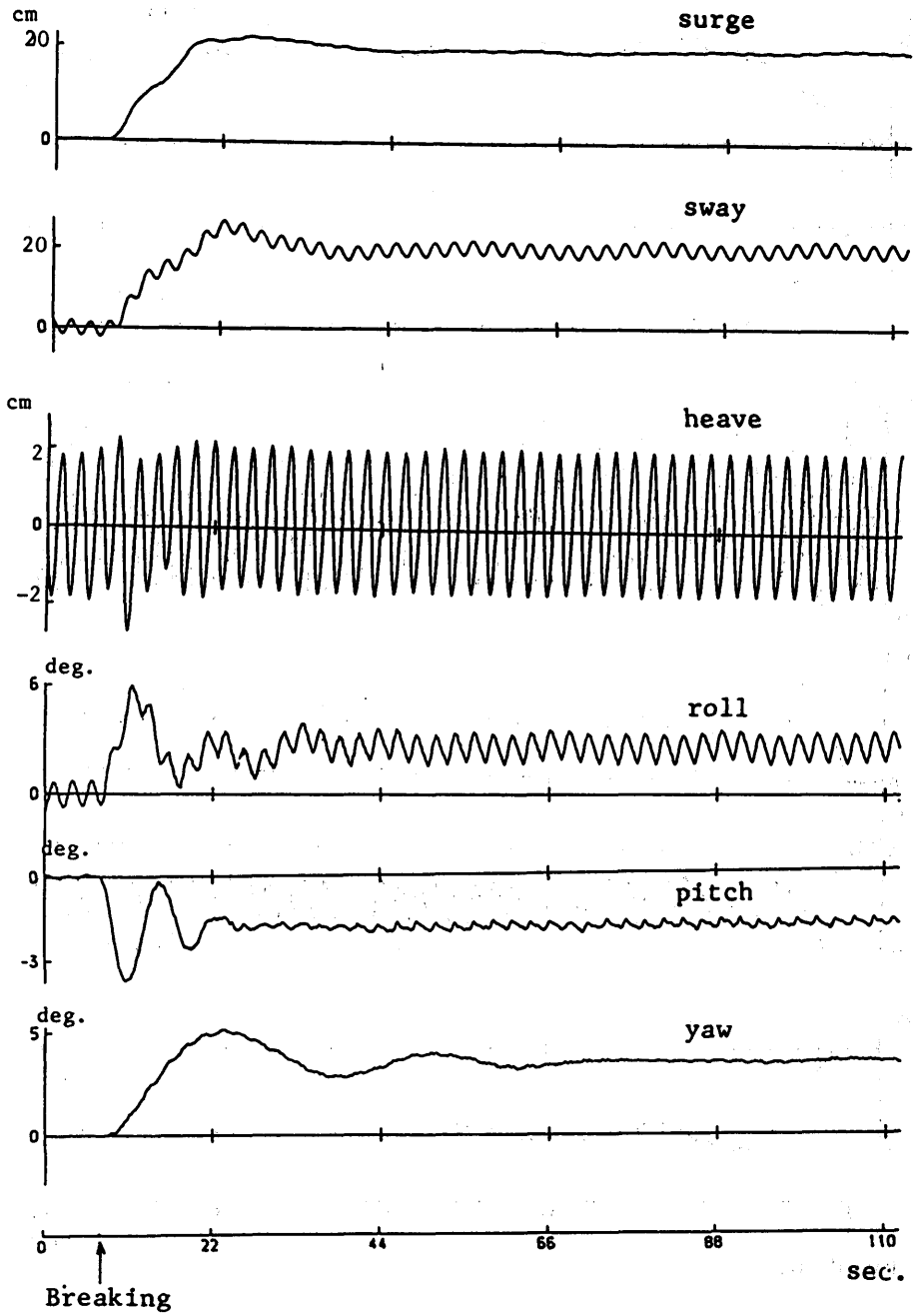
ID No.=12, draft=24cm, in head seas(0.4Hz)



(b)

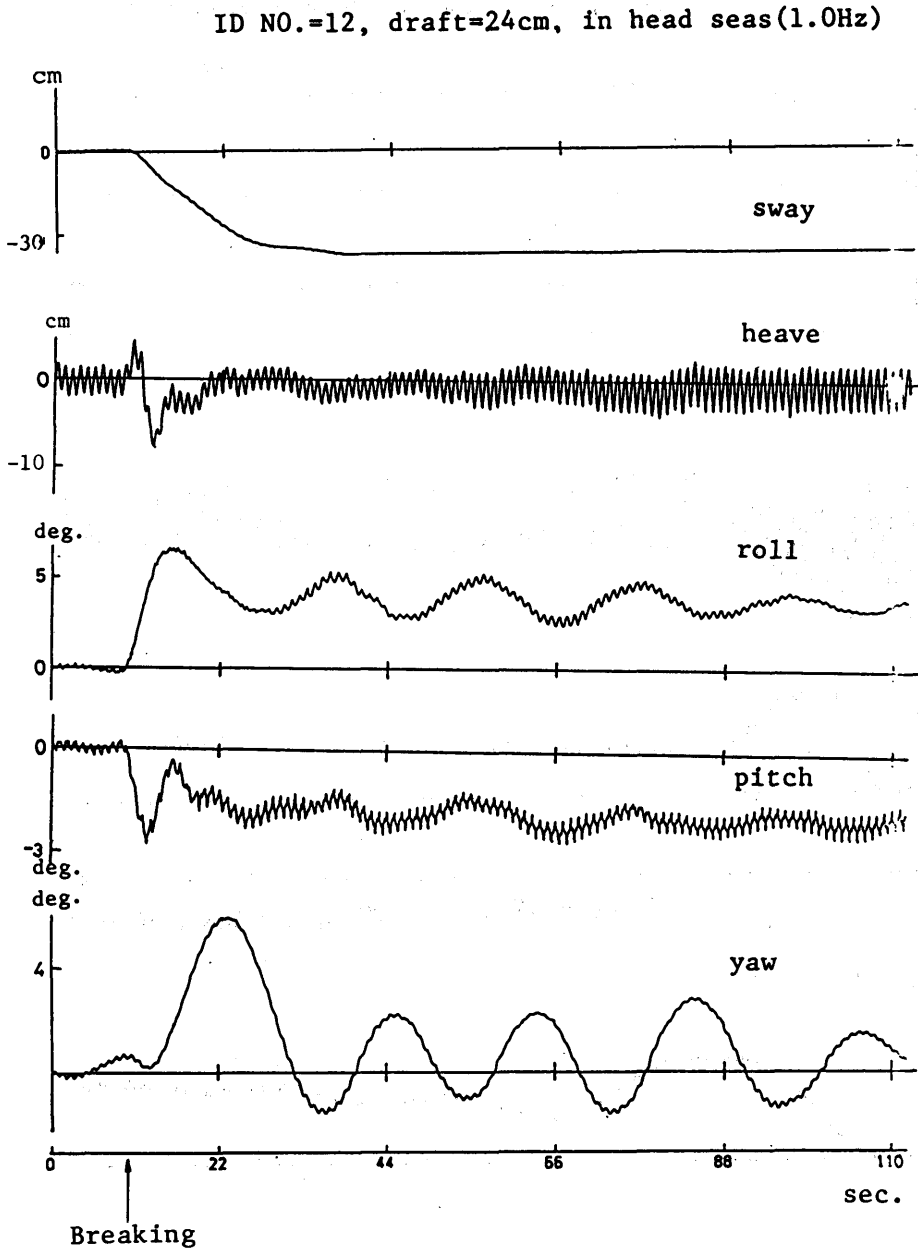
Fig. 2.13 (a)~(h) Transient motions after a breaking of a mooring line

ID No.=13, draft=24cm, in beam seas(0.4Hz)



(c)

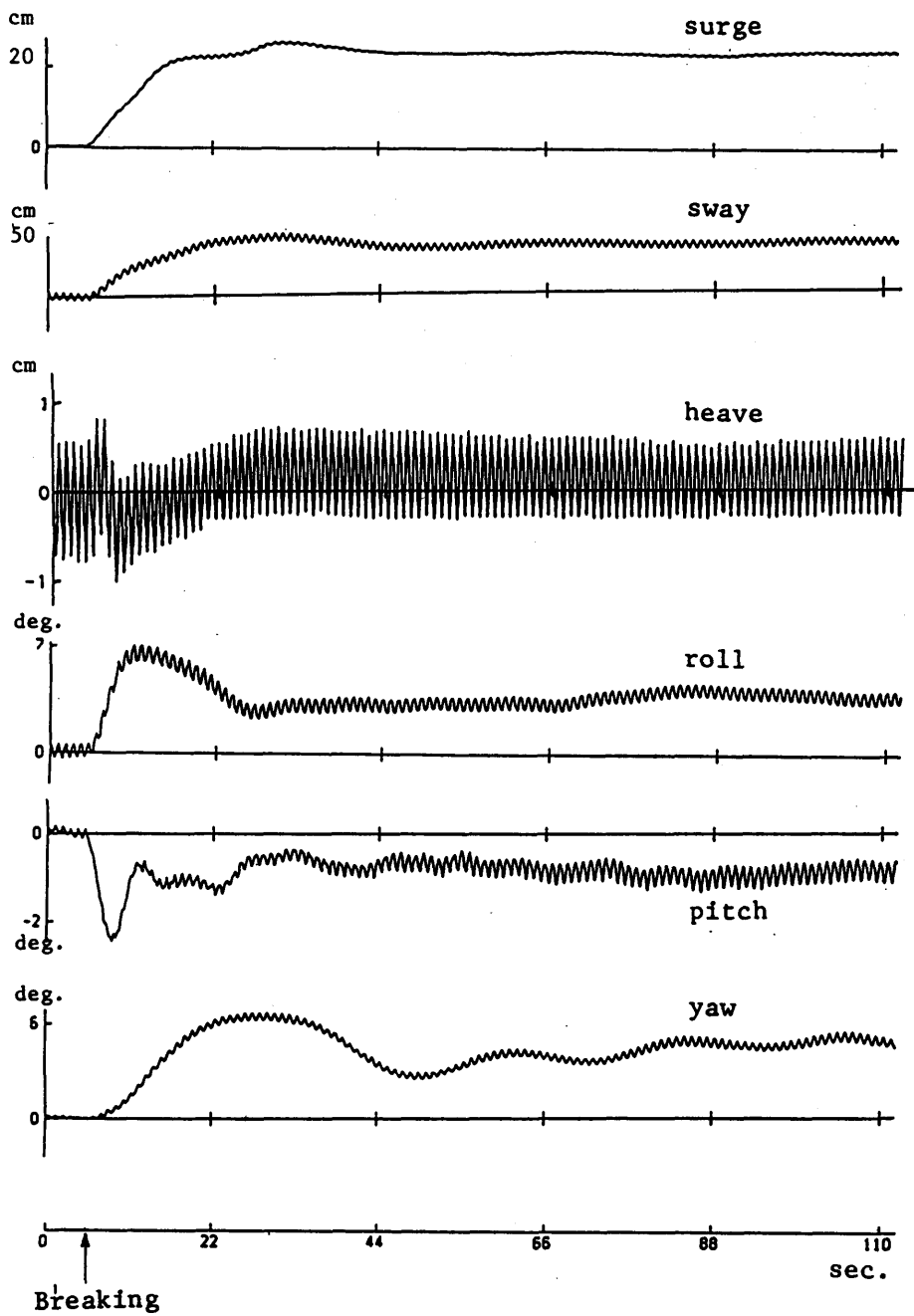
Fig. 2.13 (a)~(h) Transient motions after a breaking of a mooring line



(d)

Fig. 2.13 (a)~(h) Transient motions after a breaking of a mooring line

ID No.=13, d=24.0cm, in beam seas (1.0Hz)



(e)

Fig. 2.13 (a)~(h) Transient motions after a breaking of a mooring line