

## 5. 消波発電装置の係留に関する水槽実験

宮崎 武晃<sup>\*1</sup> 益田 善雄<sup>\*1</sup> 安藤 定雄<sup>\*2</sup>

消波発電装置“海明”の安全な係留を計るため、船舶技術研究所に依頼し、その大陸棚水槽を用い、海明の $\frac{1}{10}$ と $\frac{1}{20}$ 模型でテストを行った。

その結果、海明の波による運動特性は船とよく似ており、係留力は規則波中では、波高6mで約100t、不規則波では、360tに増大すると予想された。

### Study on the Secure Mooring of “KAIMEI”, a Floating Apparatus to Generate Electricity Utilizing the Power of Wave Motion

Takeaki Miyazaki<sup>\*3</sup>, Yoshio Masuda<sup>\*3</sup>, Sadao Ando<sup>\*4</sup>

To test the power of mooring of the “KAIMEI”, an experiment in the continental-shelf water tank at the Technical Institute for Shipping\* was carried out using the models of the “KAIMEI” on the scales of one tenth and one twentieth.

The results obtained are as follows:

1. Characteristics of motion of the “KAIMEI” in wave are quite similar to those of ship.
2. Mooring force of the “KAIMEI” is estimated as about 100 t (at the height of wave 6 m) in the regular waves, and about 300 t in the irregular waves.

#### 1. まえがき

海洋開発の一つのプロジェクトとして、海洋科学技術センターでは、昭和51(1976)年度から4箇年計画で、“海洋空間エネルギー総合利用技術開発”に着手している。

この技術開発の目的は、海洋エネルギーの中でも大容量で、クリーンなエネルギーの取得が可能な波のエネルギーを空気圧に変換し、発電に利用すると同時に、消波して防波堤の効果を持たせた併用型の海洋有効利用である。

日本近海の通常の家象で、最も出現頻度の高い海洋波浪は、波長40~80m、波高1.0~3.0で、消波発電装置はこのような家象において、最も発電効率および消波効果がよいように設計されてい

る。

- (1) 消波発電装置本体：  
全長；80.0m、幅；12.0m、高さ；3.8~7.5m、平均喫水；1.98m、重量；743t
- (2) 発電能力：  
最大出力目標；2,000kw、空気室；22個、発電機；200kw×11台、ブラシレス同期発電
- (3) 係留ライン：鎖による Slack 係留、高把駐錨を使用、船首が4条、船尾が1条の係留ライン
- (4) 消波能力：25~75mの波の波高を $\frac{1}{3}$ に減衰既に、昭和51年度、消波発電装置本体が完成し、

\*1 海洋利用技術部

\*2 運輸省船舶技術研究所

\*3 Marine Utilization Technology Department

\*4 Ship Research Institute, Ministry of Transportation

昭和52年度、発電関係の設計および製作を行い、昭和53年度には、本体に200kw発電機3台を艀装し、海上試験を実施する。

ここで紹介する内容は、運輸省船舶技術研究所に依頼し、消波発電装置を実際海面に鎖で係留した状態で装置の動揺および係留ラインに働く張力を大型模型で実験的に究明した結果である。

## 2. 模型による水槽試験の目的

消波発電装置の縮尺模型を用い、実機が中型の低気圧に遭遇した状態を現出させ、装置本体の動揺、係留ラインに働く張力、発電能力に関する空気室の圧力などを計測し、昭和53年度に実施する実機の海上試験を検討し、同時に、設計された装置の動揺応答、係留方式、アンカーの把駐力、係留治具の安全性などについて、最終確認を行なうための資料を得る水槽試験である。

## 3. 試供模型

今回の水槽試験に使用した消波発電装置の模型は、実機の1/9.62に縮尺した模型（以後大型模型という）と1/19.23のもの（以後小型模型という）との2種類である。これらの模型は鋼板で製作されている。

表1はこれらの模型の主要目、を示す。

項目 item	実機 real thing	大型模型 large model	小型模型 small model
全長 length L (m)	80.00	8.320	4.160
幅 width B (m)	12.00	1.222	0.610
高さ height D (m)	5.30	0.533	0.275
喫水 draft d <sub>f</sub> (m)	1.77	0.200	0.090
船首 prow d <sub>p</sub> (m)	2.18	0.225	0.120
船尾 stem d <sub>s</sub> (m)	1.98	0.213	0.105
平均 ave. d <sub>m</sub> (m)			
重量 weight (t)	743.000	0.851	0.09128
縮尺 scale	1/1.00	1/9.62	1/19.23

表1 消波発電装置の主要目

### Main dimensions of the breakwater and wave-power plant

図1は大型模型の概要図を示す。この図で斜線の部分が消波発電装置の浮力となるフロート室で、それ以外の部分は22個の空気室となるため船底がない。この空気室の上部は発電タービンを駆動さ

せるための空気ノズルになっている。

係留ラインは計画初期の案を採用し、船首および船底から各1条のスタッドなしの鉄鎖で係留する。鉄鎖は市販されているもので、大型模型用鎖模型は空気中重量が1.436 kg/mのものである。

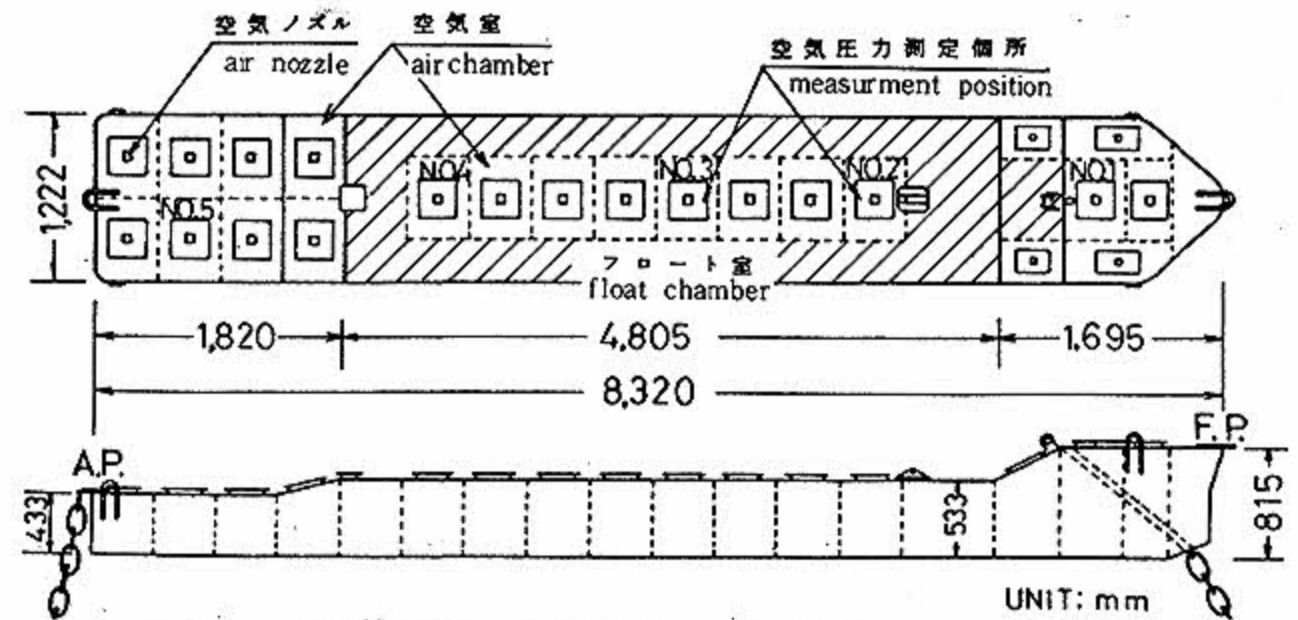


図1 消波発電装置の大型模型の概要図

### Large size model of the breakwater and wave-power plant

## 4. 水槽試験方法

模型試験施設は、運輸省船舶技術研究所の大陸棚再現水槽（長さ40m、幅28m、水深0~2.0m、フラップ式造波装置、ビーチ式可動消波装置）である。消波発電装置は一部分だけが浮体で、残りの部分が発電用空気室であるため、船底がないという、一般船舶とは構造様式の極端に異なるものである。

水槽試験は静水中で傾斜試験および自由動揺試験を行ない、模型の重心からメタセンターまでの距離および縦揺れ、横揺れならびに上下揺れの固有周波数と減衰係数を求め、さらに規則波および不規則波中の動揺試験を行なった。

模型の係留は表2に示すような8種類の係留状態である。なお、孫アンカーは船首部の係留ラインの接地点に取り付けられた鉛製5.0kgの重錘であり、中間ブイは船首部の係留ラインの模型から

係留状態 mooring	模型 model	一索の長さ length of a chain (m)	船首部の係留ライン		船尾部の係留ライン		空気室のノズル air nozzle	備考			
			船首部 (m)	船尾部 (m)	船首部 (m)	船尾部 (m)					
A	大型 large	10.0	4.10	5.90	7.12	4.91	4.20	5.80	6.55	1/180	孫アンカー付 中間ブイ付
B		3.63	3.37	3.97	4.31	3.94	6.06	5.99	-		
C		7.0	4.50	2.50	8.35	6.13	5.37	1.63	9.95	-	
D		-	-	-	-	-	-	-	-	1/100	
E		-	-	-	-	-	-	-	-	1/50	
F	小型 small	5.0	3.70	1.20	1.20	0.74	3.96	1.04	1.25	1/180	
G		5.00	0.00	2.00	1.54	5.00	0.00	2.05	-		
H		-	-	-	-	-	-	-	-	-	

表2 水槽試験時の係留状態

0.39mの位置に取り付けられた合成樹脂製の球状ブイ（直径0.30m、容積0.0143m<sup>3</sup>、重量2.2kg）である。また、空気室のノズルは空気室の断面図とノズルの面積の比で表中に示す。

今回の模型試験時に計測した項目は下記の通りである。

- (1) 浮体の運動：縦揺れ、上下揺れおよび前後揺れ
- (2) 係留ラインの張力：船首部の係留ラインの浮体部、アンカー部における張力、船尾部の係留ラインの浮体部における張力
- (3) 波：入力波および浮体後部（浮体の中央より後方に6.50mの場所）と浮体斜め後部（浮体の中心線から5.10m離れて浮体の中央から後方に5.10mの位置）における波
- (4) 空気室の圧力変動：図1のNo.1からNo.5の空気室内の圧力

模型試験時に発生させた規則波および不規則波は、つぎのように選定した。

消波発電装置の海上試験海域は台風に遭遇する確率が低く、発電効率の高い波が一定して発生する海域で、海象資料の整っている日本海の東北海域を仮定した。その海域は運輸省港湾局の波浪観測の拠点となり、港湾技術研究所資料として公表されている酒田港を代表的な場所と仮定した。

この資料によれば、年間を通じて97%までは波高5.0m以下、波周期10.0sec以下である。

水槽に発生させた規則波は、120mの波までは波高-波長比を1/20とし、120m以上では造波装置の関係で順次、波高-波長比を減少させた。

図2は酒田港海域を低気圧が通過している場合

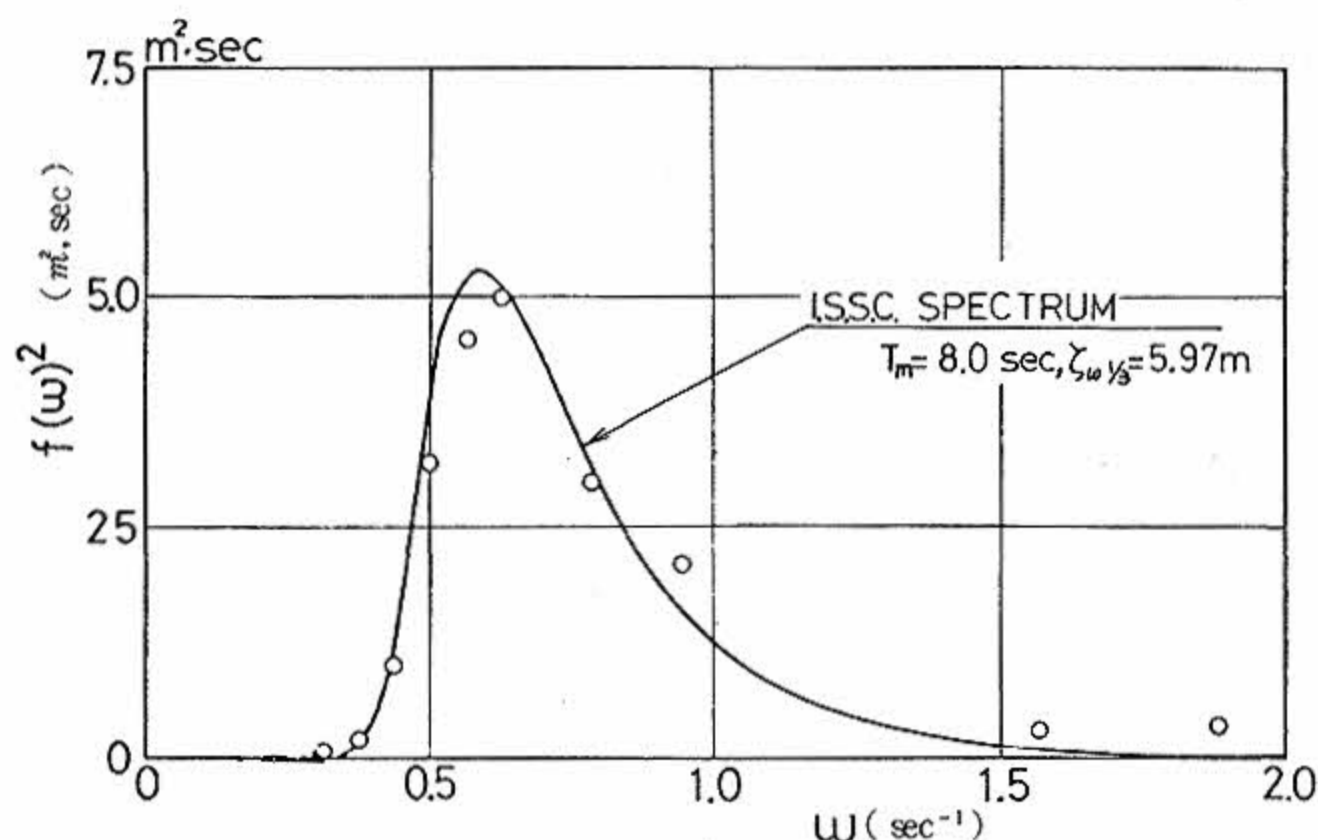


図2 低気圧通過時の平均波スペクトラム

の波スペクトラムの平均と I. S. S. C. 標準スペクトラムとの不規則波の比較を示す。この図に示すように両者はよく一致するため、これを実際海面の波スペクトラムとした。

図3は水槽に発生させた不規則波のスペクトラム分布を示す。有義波高だけを変化させた。

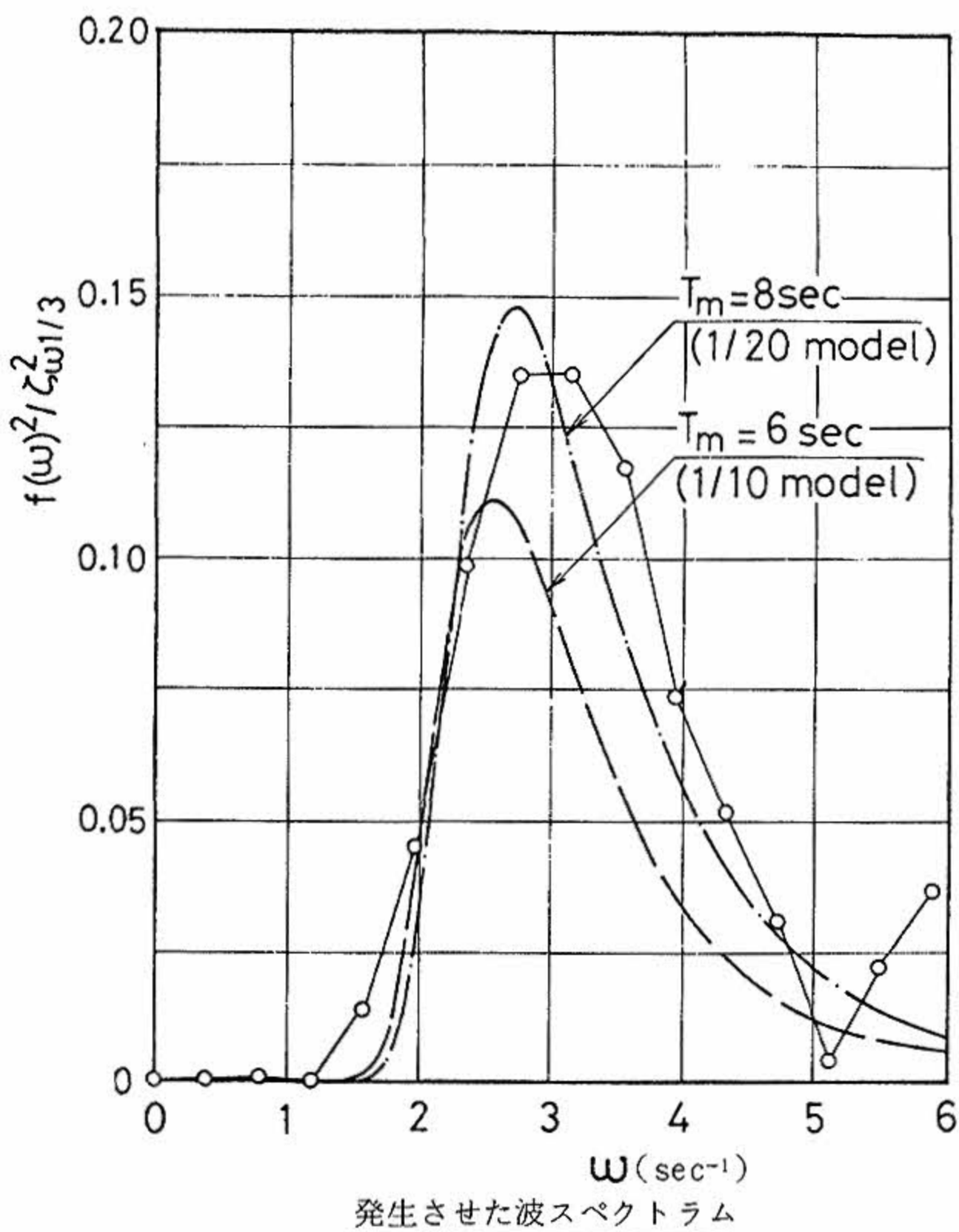


図3 発生させた波のスペクトラム  
I.S.S.C wave spectrum

## 5. 試験結果および考察

### 5.1. 静水中の傾斜および自由動揺試験

前述の消波発電装置は、一般船舶と構造様式が相違しているため、模型の特性を調査した。その結果、重心とメタセンターとの距離は当然なことながら、計算値とよく一致する。

図4は無係留状態における大型模型の自由動揺試験結果を示す。この図によれば縦揺れ、横揺れおよび上下揺れは線型運動方程式と仮定した計算値とよく一致している。したがって、空気室が浮体の運動に悪影響を及ぼさないことがわかった。

表3はアナログ計算時の各揺れの固有周波数、無次元減衰係数および同調する波長を示す。

### 5.2. 規則波中における応答

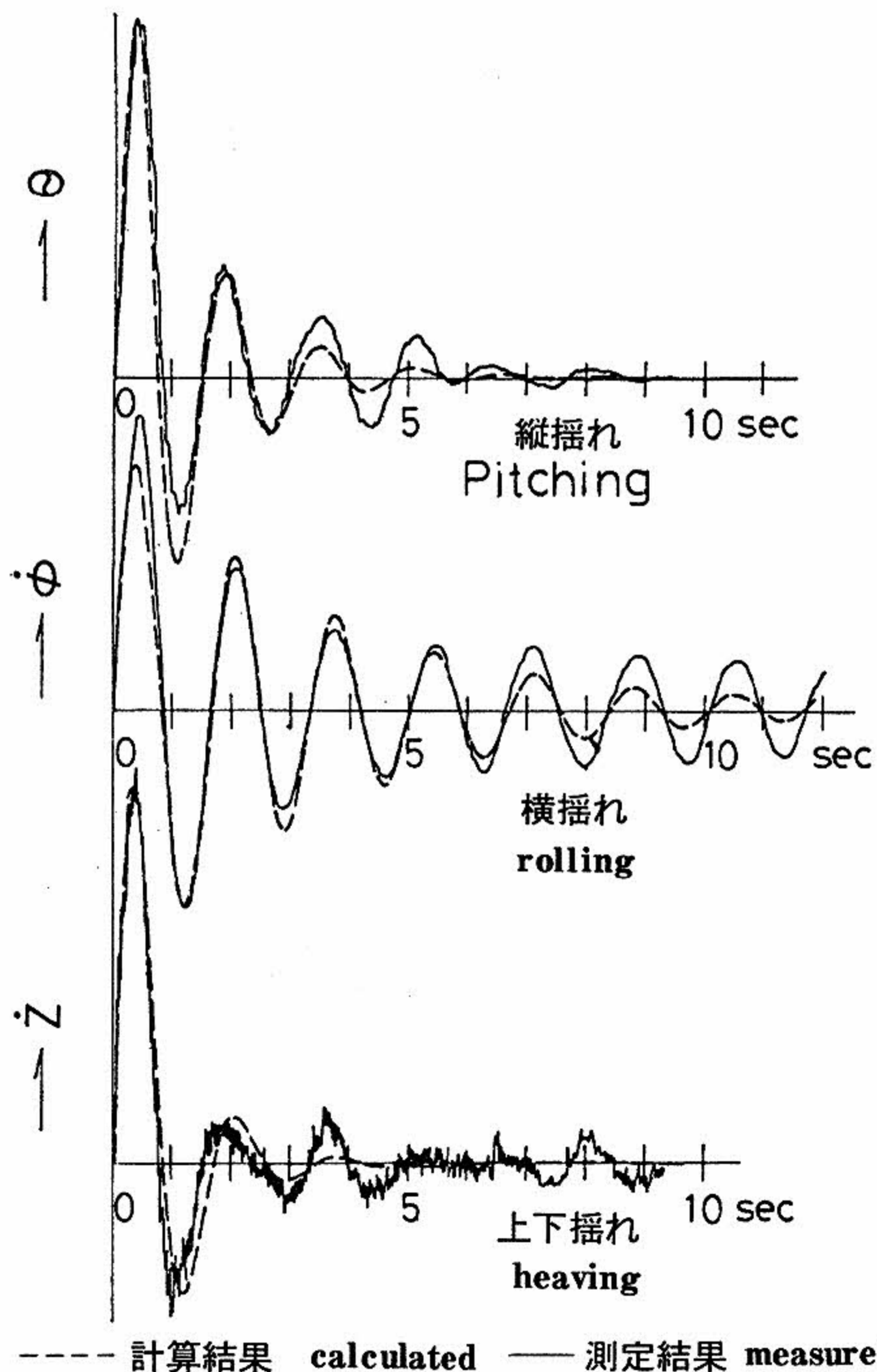


図4 大型模型の自由動揺試験結果

揺れ swaying		大型模型 large model	小型模型 small model
縦揺れ pitching	$w$ (sec <sup>-1</sup> )	4.26	6.33
	$\kappa = \alpha / w$	0.133	0.180
	$\lambda$ (m)	3.39	1.58
横揺れ rolling	$w$ (sec <sup>-1</sup> )	3.93	4.99
	$\kappa$	0.059	0.044
	$\lambda$ (m)	3.99	2.47
上下揺れ heaving	$w_z$ (sec <sup>-1</sup> )	4.06	6.79
	$\kappa_z$	0.244	0.326
	$\lambda_z$ (m)	3.74	1.34

表3 各種揺れの固有周波数, 無次元減衰係数, 固有調する波長

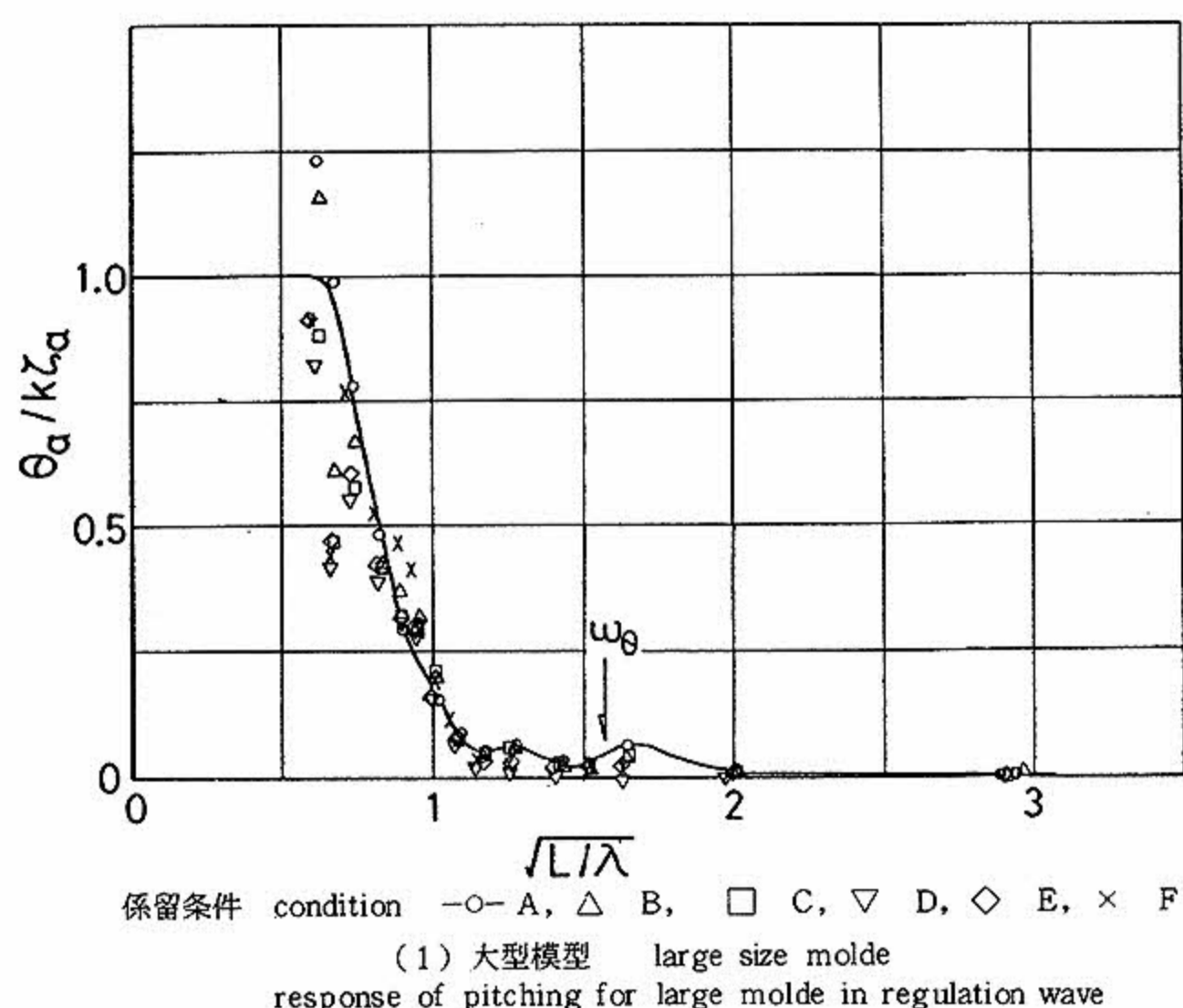
規則波中における動揺試験は, 縦波で行なった。それは消波発電装置の係留方式がある程度波に立てることが可能であるためである。

(1) 縦揺れ

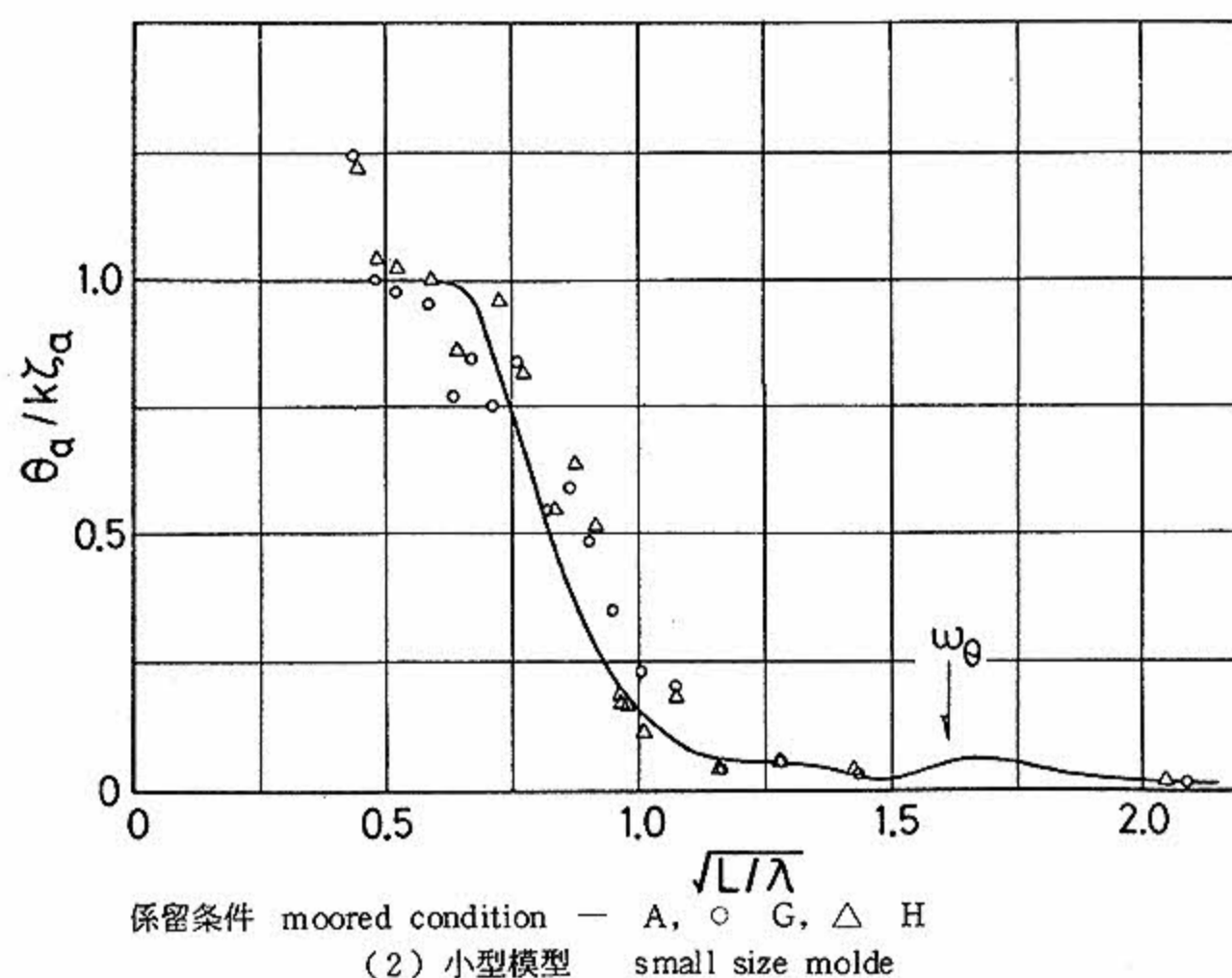
係留状態および模型の縮尺が変化しても, 図5からわかるように, 縦揺れに影響していない。また, 縦揺れの応答は一般船舶の場合と異なり, 相当低い周波数(模型の長さの約2倍の波長)にならないと応答が1.0に近づかないことがわかった。なお, 図中の矢印は縦揺れの同調周波数である。

(2) 上下揺れ, 前後揺れ

水深が変化しない限り, 今回の係留状態では図6に示すように, 上下揺れおよび前後揺れはほとんど影響を受けていない。しかし,

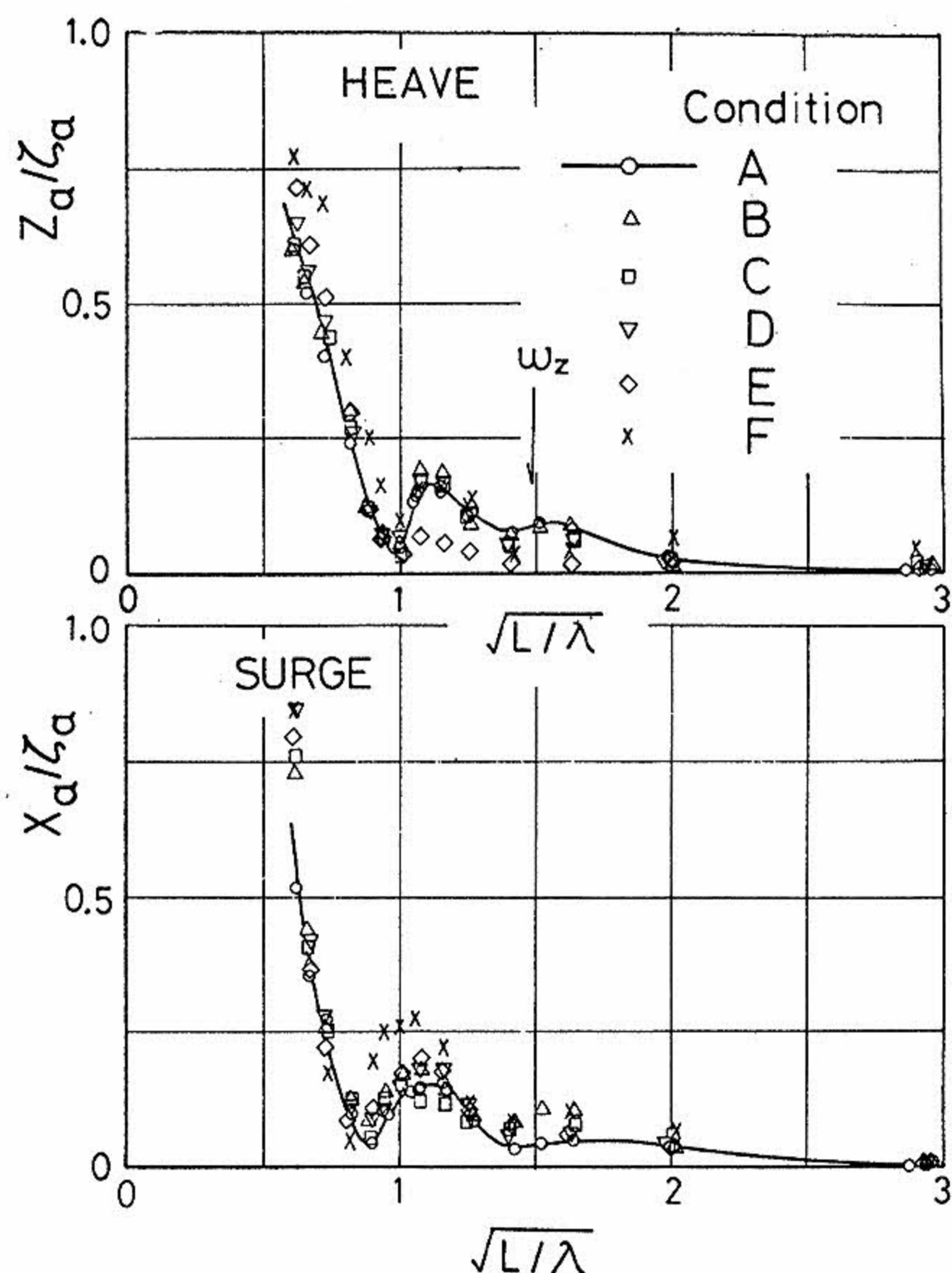


係留条件 condition -○- A, △ B, □ C, ▽ D, ◇ E, × F  
(1) 大型模型 large size model  
response of pitching for large model in regulation wave

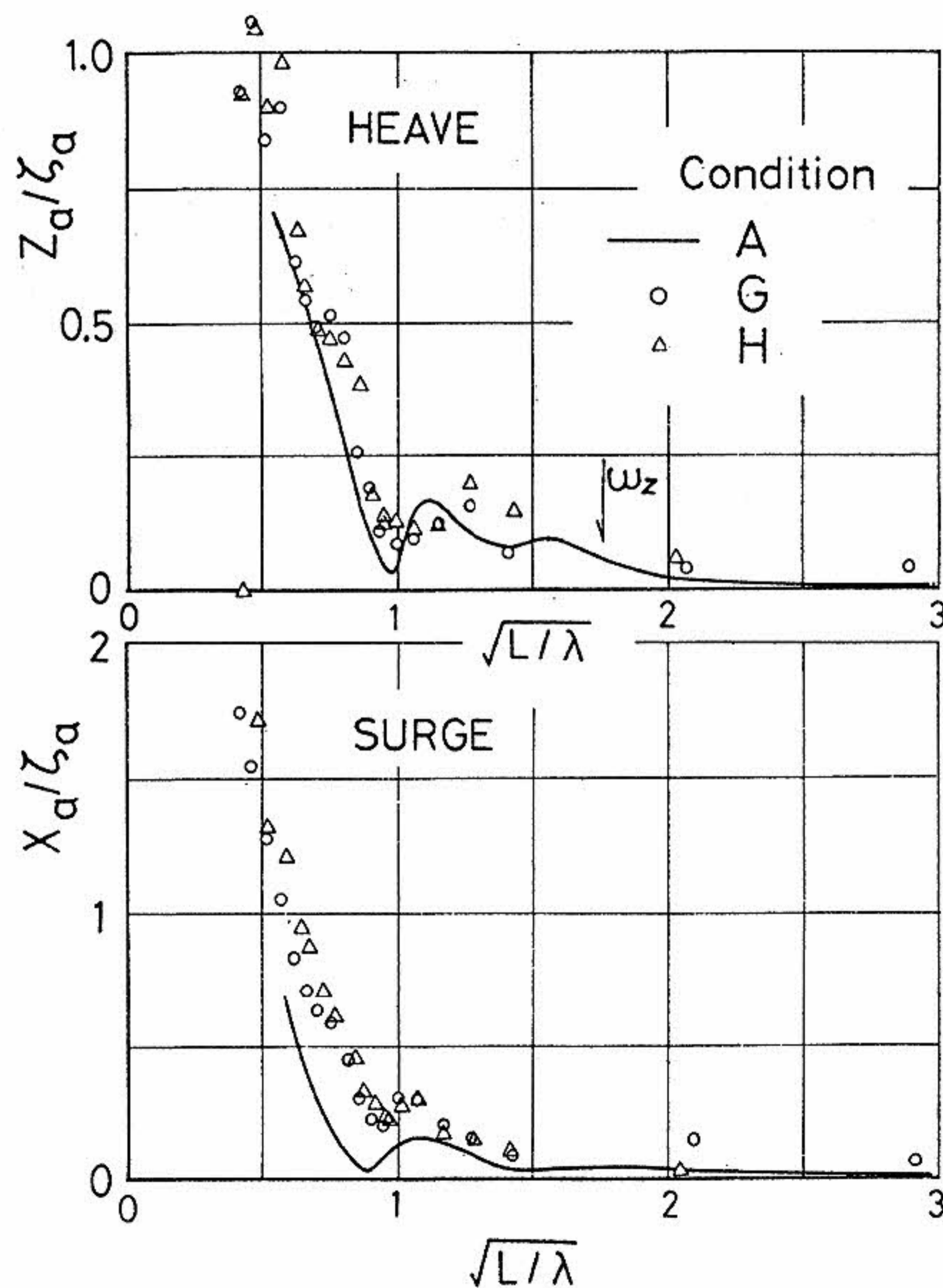


係留条件 moored condition - A, ○ G, △ H  
(2) 小型模型 small size model

図5 規則波中の模型の縦揺れの応答



(1) 大型模型 large size model



(2) 小型模型 small size model

図6 規則波中の模型の上下揺れ, および前後揺れの応答  
Response of pitching model in regulation wave

喫水 - 水深比は大型模型と小型模型とでは 1 : 2 となるため, 係留ラインのバネ定数が変わり, 図6の(2)の下図に示すように, 低い周波数で小型模型の前後揺れの応答が約2倍になっている。なお, 図中の矢印は上下揺れの同調周波数を示す。また, 係留ラインによる前後揺れの同調周波数は今回の試験範囲内に入らない程低周波数である。

模型の沈下は最大値で浮体の高さの約10%以下であり, 模型の前後方向の片寄りも最大値で浮体の長さの約5%以下であるため, 消波発電装置としてあまり問題にならない程度であった。

(3) 係留力

係留ラインに働く張力, すなわち係留力は規則波中でも図7に示すように, 複雑に変化する。またこの図に示すようにアンカー部, 船首部および船尾部の係留力の平均, 最大および変動を区別して求めた。

係留力は波高の2乗, 縮尺の3乗に比例するとして, 実際海面において波長120mまでは波高 - 波長比を1/20とし, それ以上の波

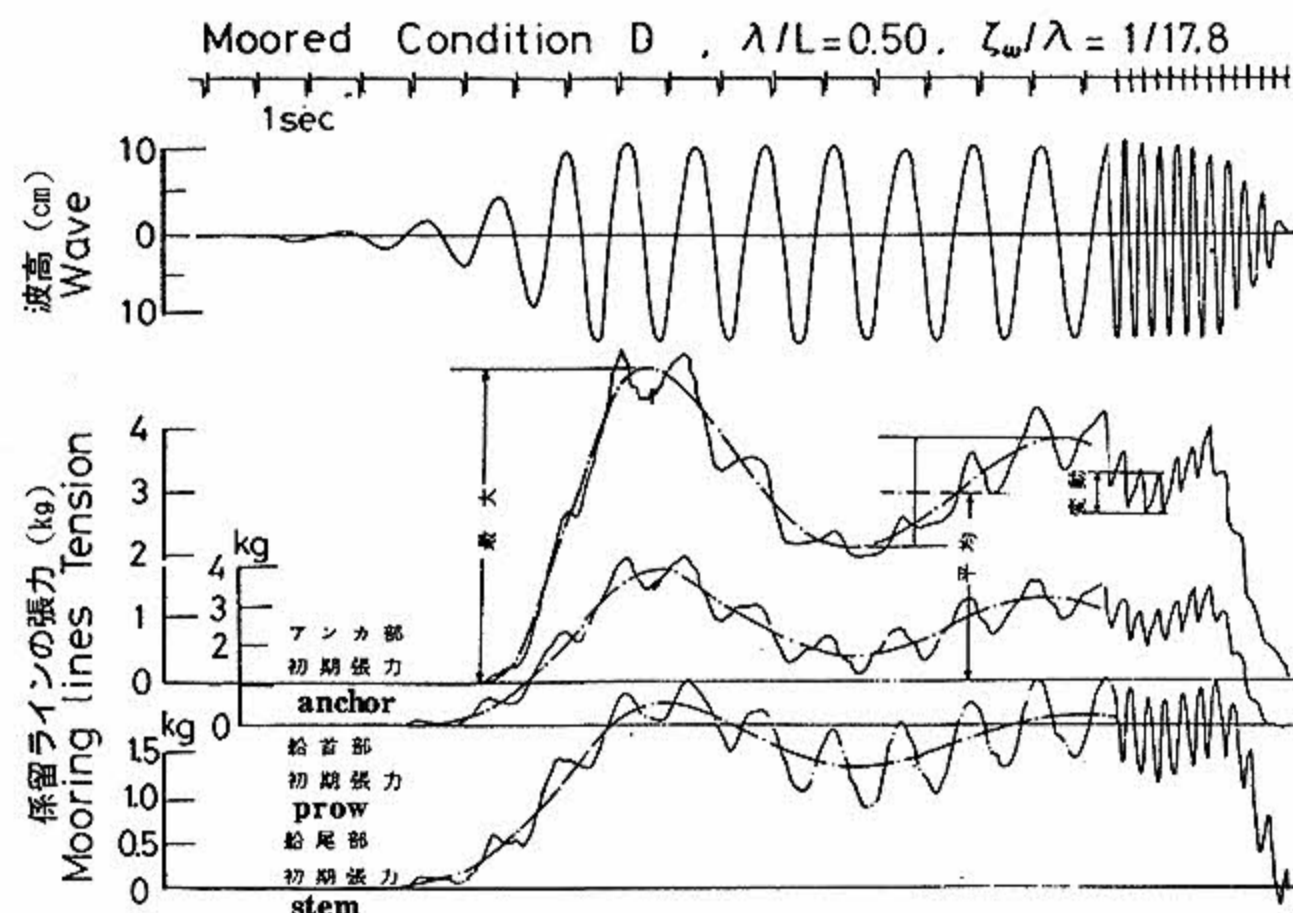


図7 大型模型の規則波中における係留ラインの張力の記録例

Mooring lines tension of large size model in regulation wave

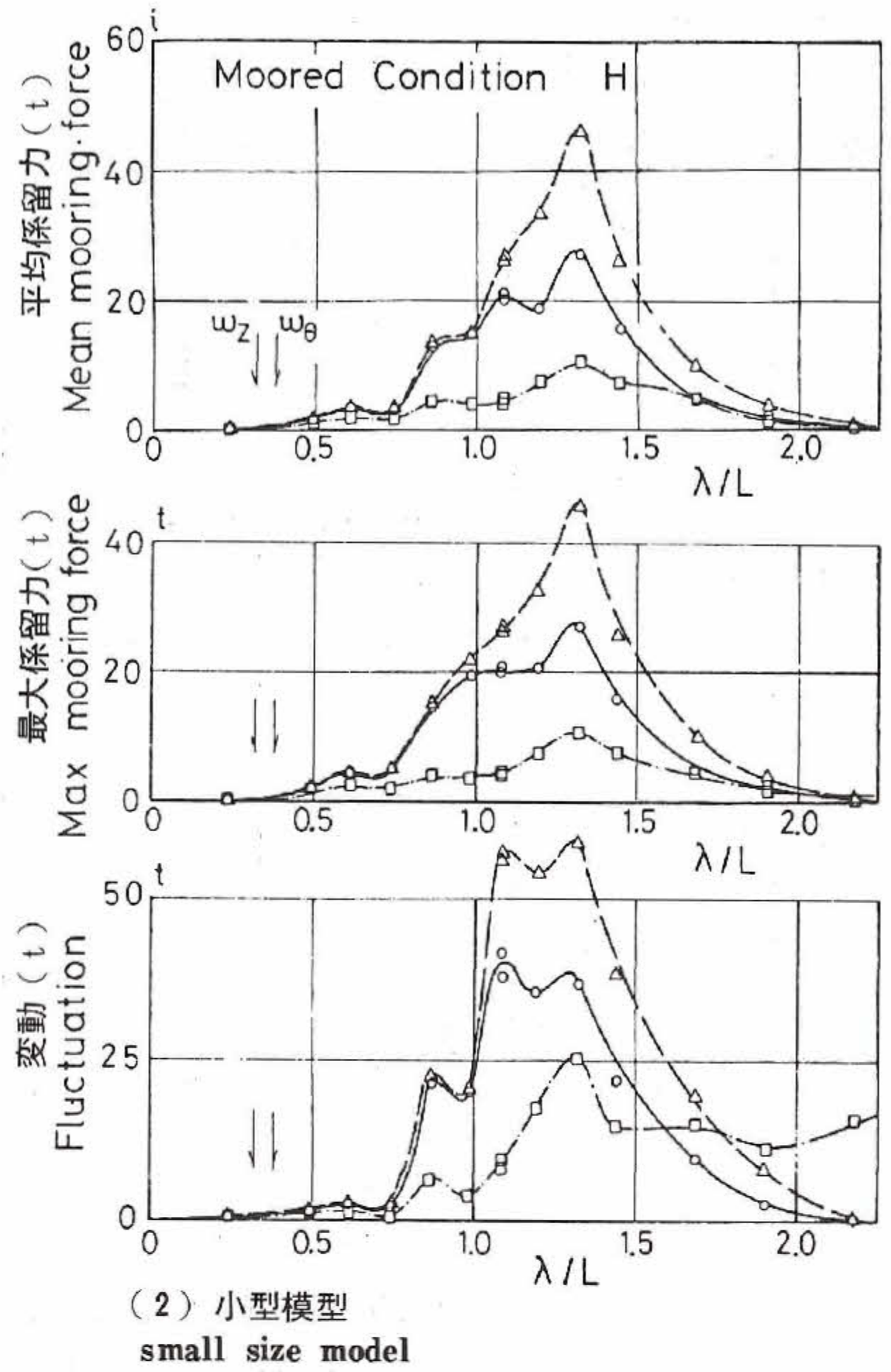
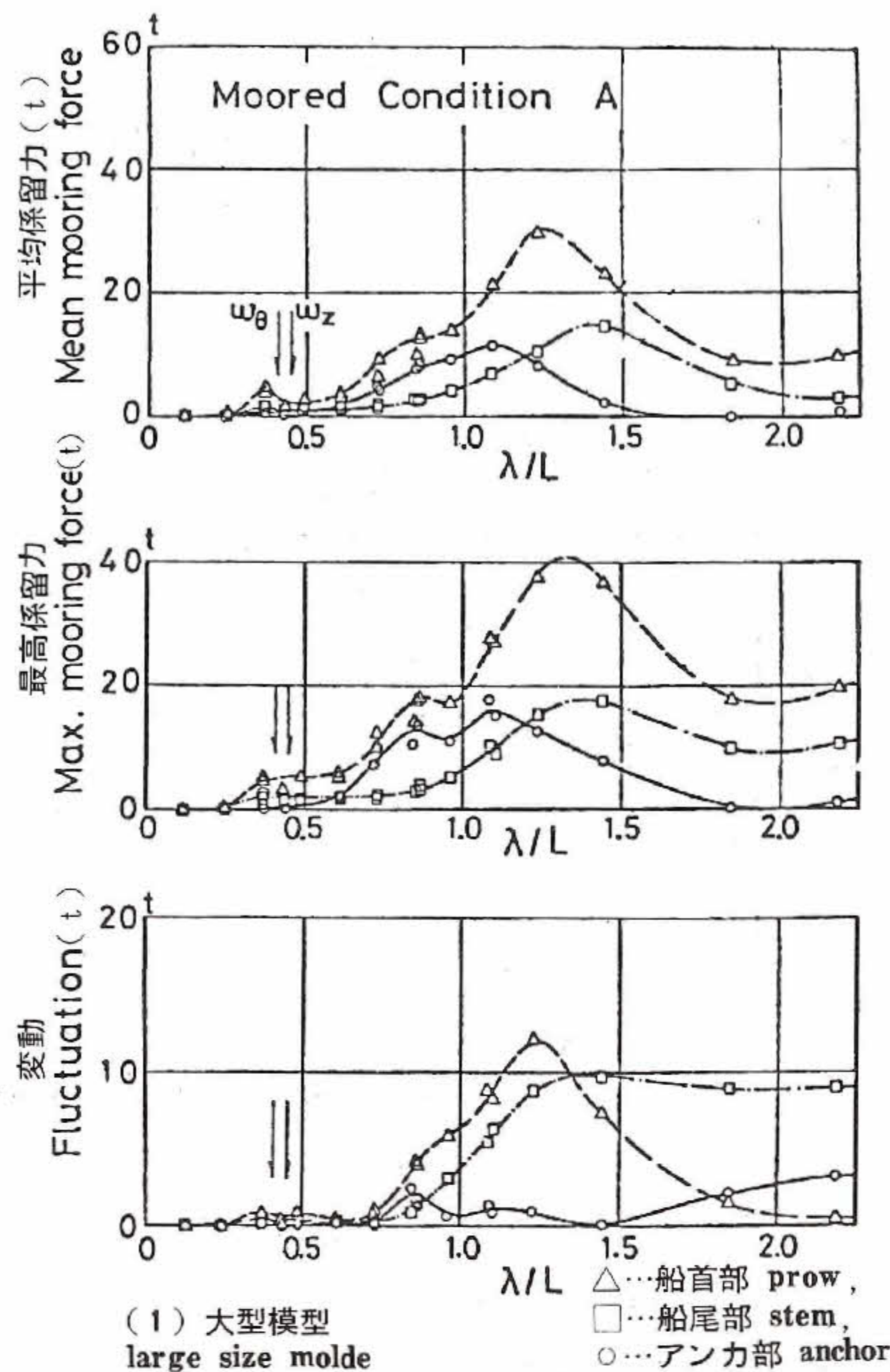


図8 規則波中における係留の応答  
Mooring force in regulation wave

長では波高 6.0 m として実機の係留力に換算した。

図8は係留力の応答例として大型模型のA係留状態と小型模型のH係留状態を示す。

図9は係留状態による係留力を比較するため、初期張力に最大係留力を加え、その値において変動していると仮定し、アンカー部、船首部および船尾部の全係留力をすべての係留状態について比較した結果を示す。

この図から、係留状態による係留力に関してつぎの事項が説明された。

- (i) 係留ラインが一番 Slack であるA係留は、他の係留状態よりも全係留力が小さい。
- (ii) 孫アンカー付B係留状態の全係留力は、長波長で孫アンカーの効果が現れ、係留力が小さくなるが、 $\lambda/L = 1.0$ 付近では逆に大きくなる。

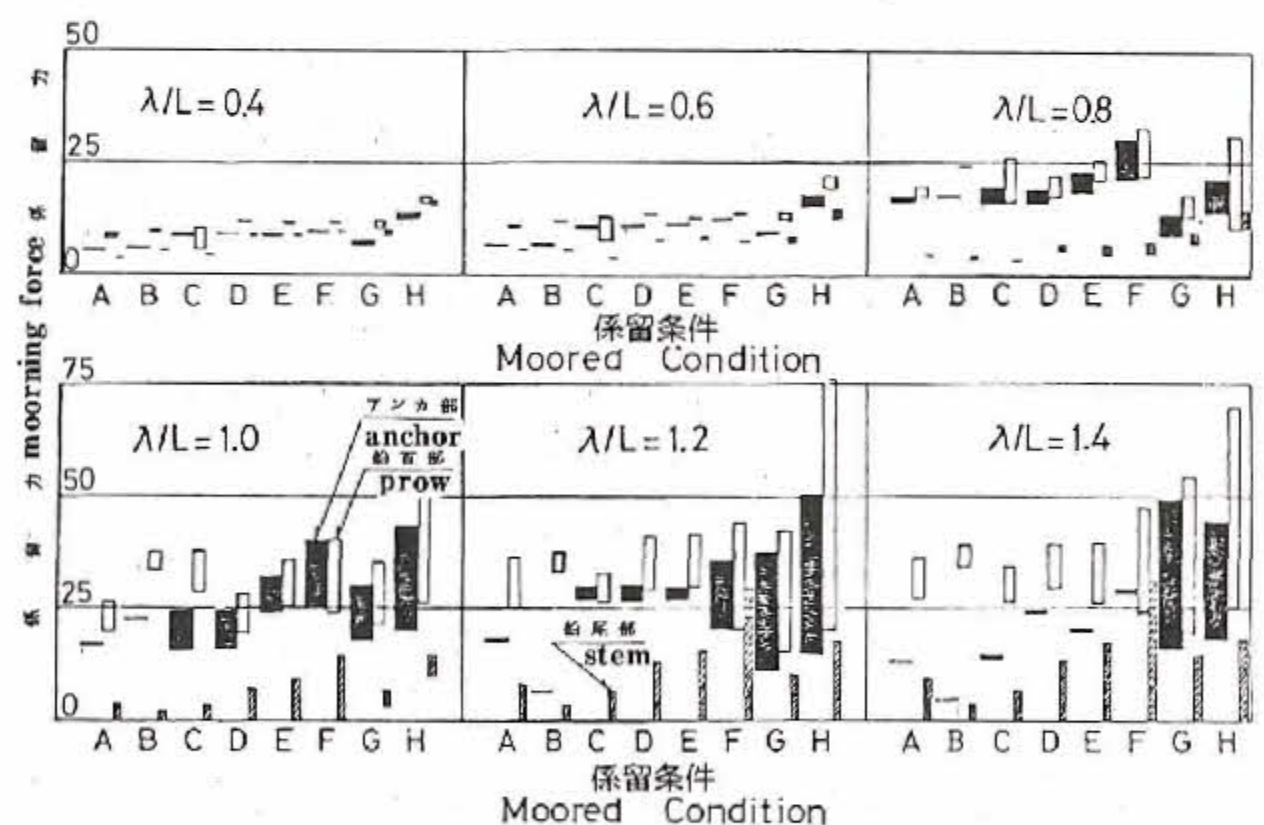
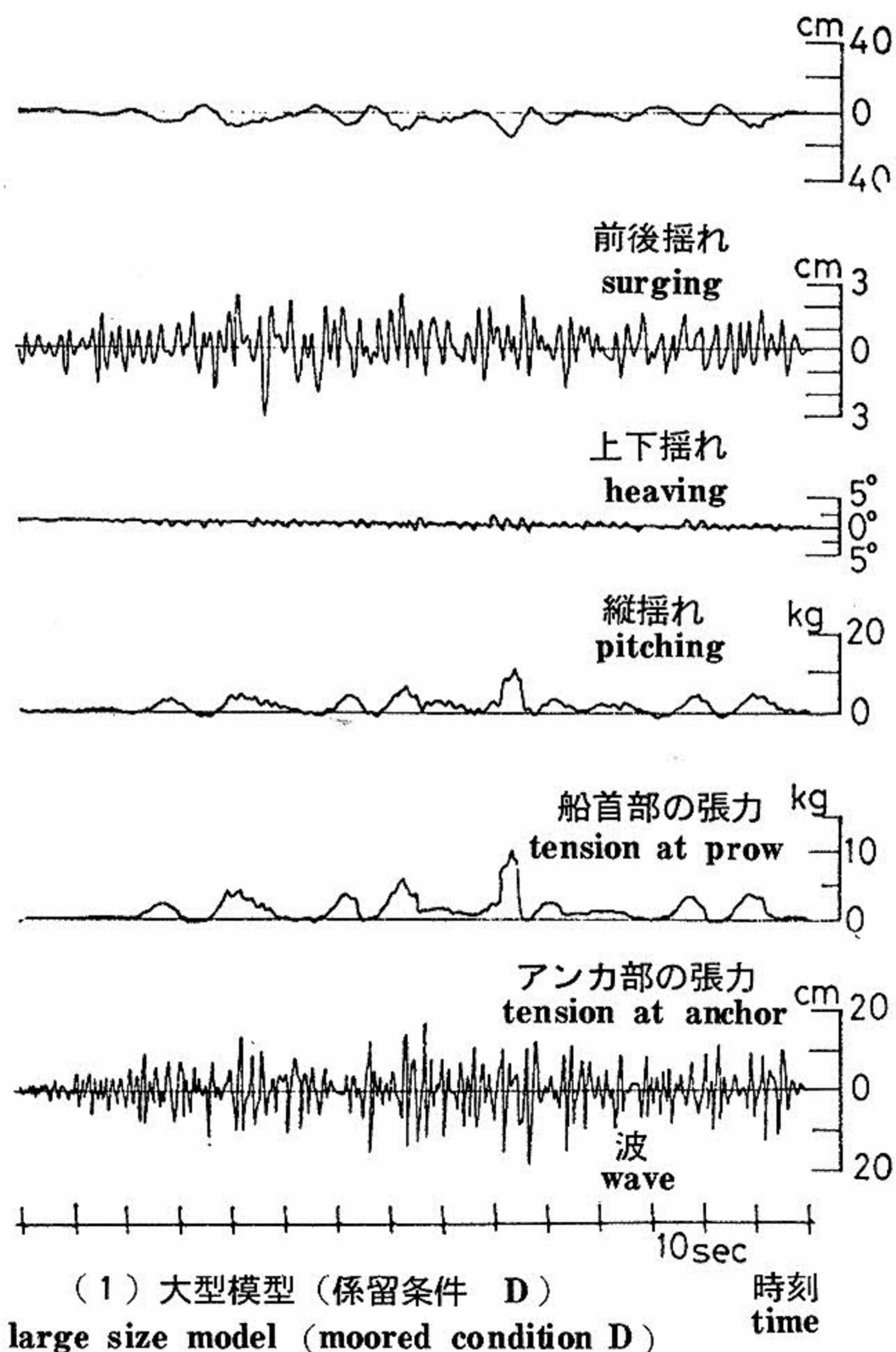
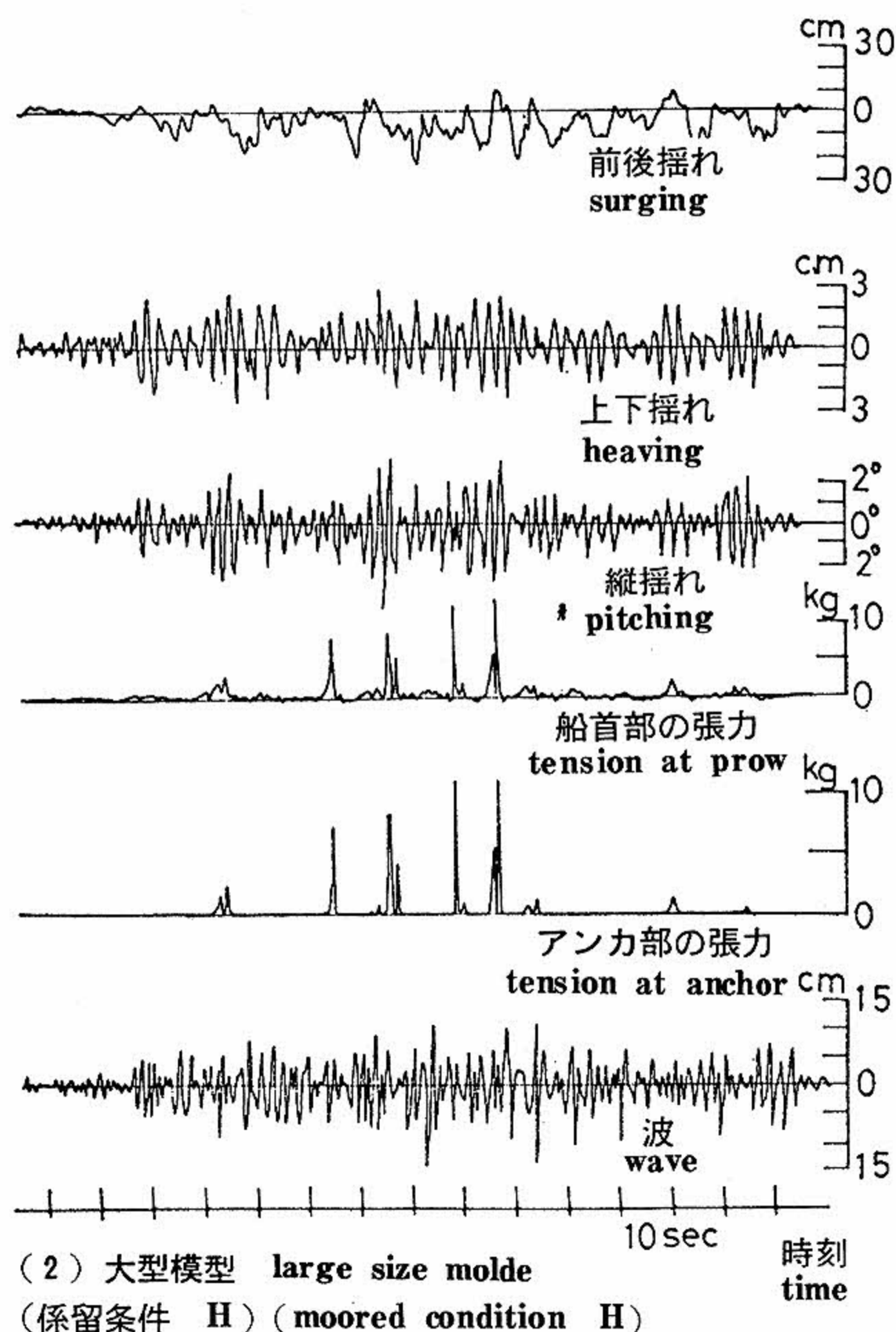


図9 規則波中における係留状態変化  
に対する全係留の比較  
Comparison with mooring force for moored  
conditions in regulation wave

- (iii) 中間ブイ付のC係留状態の全係留力は、今回使用した程度 of 中間ブイになると、中間ブイの挙動が、比較的短かい波長から係



(1) 大型模型 (係留条件 D)  
large size model (moored condition D) 時刻 time



(2) 大型模型 large size model  
(係留条件 H) (moored condition H) 時刻 time

図11 不規則波中の応答記録

Large size model (moored condition D)

留力に悪い影響を及ぼし、係留力が大きくなる。

(iv) D, E および F 係留状態は、A 係留状態よりも係留ラインが Slack でないため、各部の係留力が大きくなる。また、空気室のノズル面積が増加するに伴い、各部の係留力は増加する。

(v) G および H 係留状態は小型模型であり、G 係留状態は A 係留状態に近いので、大略類似している。前後揺れが長波長において約2倍になることによって各部の係留力の変動が大きくなる。G 係留状態と H 係留状態とは、同じ Slack 状態であるが、鎖の接地距離の有無である。この接地距離の有無は各部の係留力に大きな影響を与えることが図9からもわかる。

(vi) 各部の係留力の傾向として、係留ラインが Slack であっても、浮体の運動が大きくなる  $\lambda / L = 1.0$  以上の長波長では、係留

力も急激に増大する。

(vii) 今回の試験範囲から消波発電装置を Slack に係留すれば、中型の低気圧の規則波中における最大の係留力はアンカー部で 50 t 程度、船首部で 75 t 程度、船尾部で 30 t 程度である。したがって、最大係留力は

Moored Condition A,  $\lambda/L = 0.73$ ,  $\zeta_w/\lambda = 1/18.8$

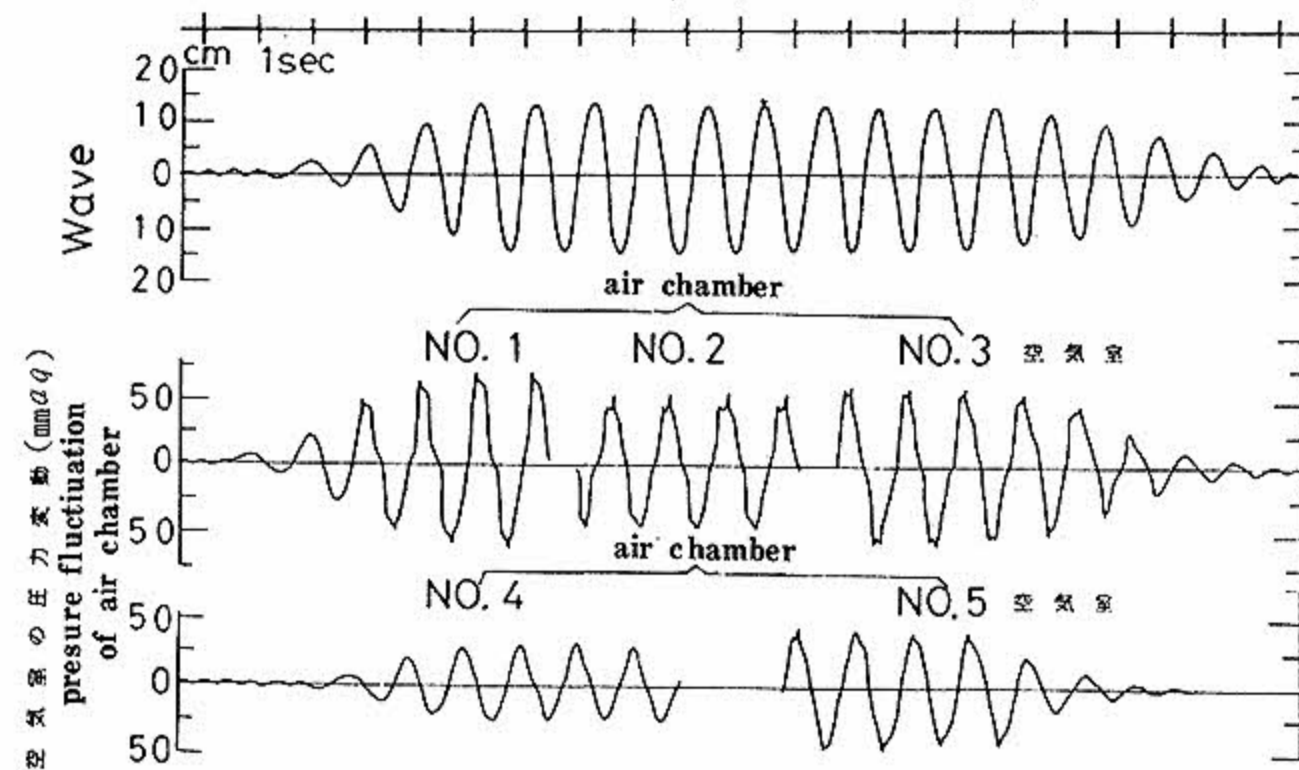
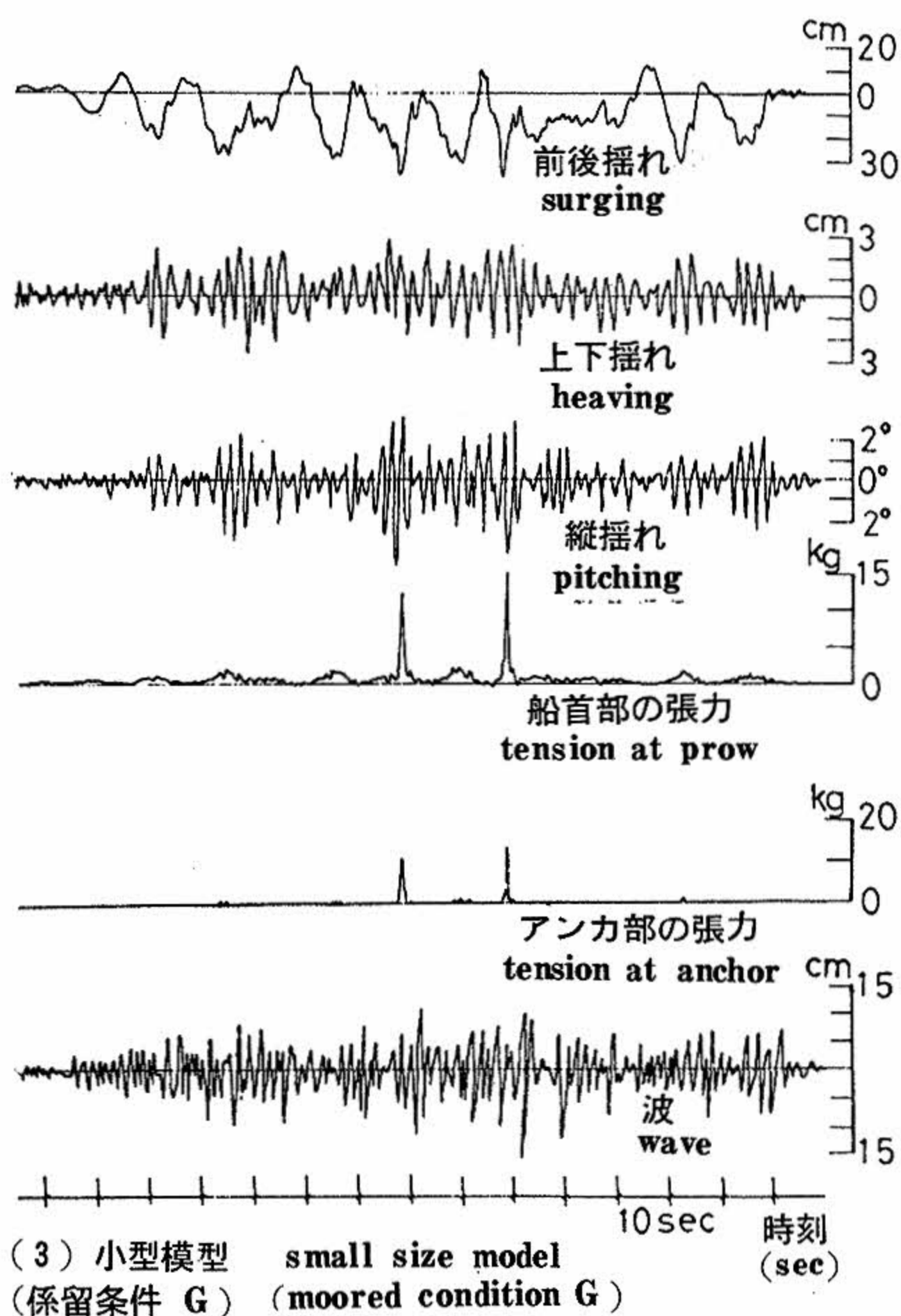


図10. 大型模型の規則波中における空気室内の圧力の記録例

Pressure in air chamber of large size model in regulation wave



100t 以下であるといえる。なお、前後揺れを多少許してもよい場合には、鎖が海底をはう距離を長くすることがよいことがわかった。

#### (4) 空気室内の圧力

図10は今回の試験で予備的に計測した各空気室内の圧力の記録例を示す。この図によれば、船首部のNo. 1 空気室の圧力変動が他の部分の空気室より大きく、No. 2, No. 3 および No. 5 の空気室の圧力変動は同程度で、No. 4 の空気室の圧力変動が一番少ない。

この傾向はすべての波長に対して言えた。なお、空気室の圧力変動が大きくなる波長は、40~100 m の範囲であることが確認された。

発電関係について、小型発電装置を模型に取り付け、継続して試験を海洋科学技術センターで実施する計画である。

### 5.3. 不規則波中の応答

不規則波中の水槽試験は、表2に示す大型模型ではD係留状態、小型模型ではGおよびH係留状態について図3の波スペクトルで実施した。

図11には水槽試験時にデータレコーダーに記録された例を示す。

#### (1) 縦揺れ

大型模型では図10によれば、模型が大きいいため、水槽施設の関係で縦揺れの応答が高くなる範囲の波が発生しない。したがって、縦揺れはきわめて小さい。

小型模型では規則波中の試験範囲となるため、統計処理が可能となったので、図12に示す縦揺れの応答を求めた。

この図によれば、不規則波と規則波中における縦揺れがよく一致していることから、通常、一般船舶で適用している線型積み重ねが成り立っている。したがって、設置海域の波スペクトラムを選定すれば、相当高い精度で縦揺れの応答を予測できる。

#### (2) 上下揺れ

図13は大型模型および小型模型の不規則波中の上下揺れの応答を示す。

大型模型と小型模型は規則波中の応答がよく一致していると同時に、有義波高の変化に対しても影響を受けないことが明かとなった。縦揺れと同様に設置海域における上下揺れを高精度に予測可能である。

#### (3) 前後揺れ

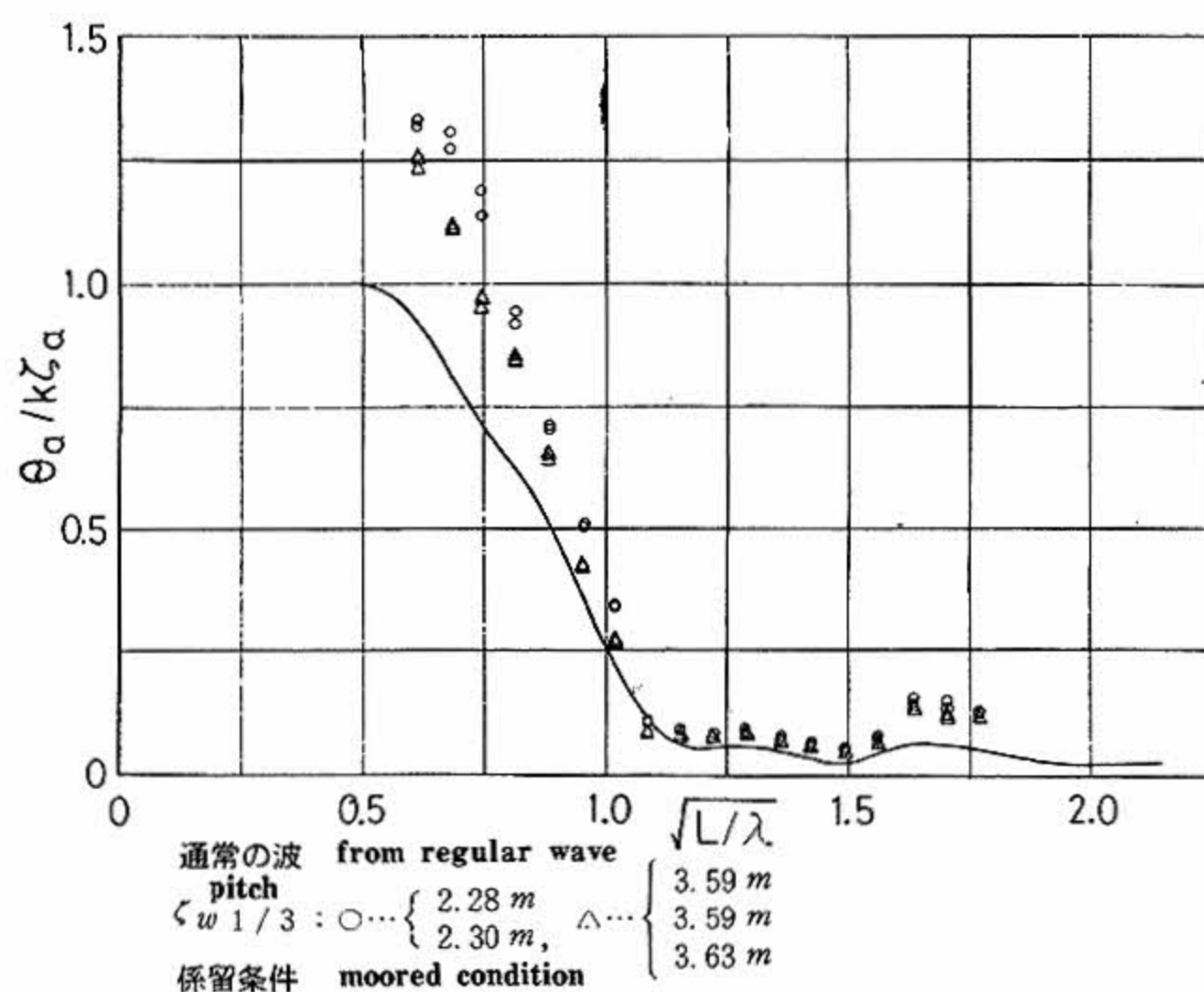


図12 小型模型の規則波と不規則波とによる縦揺れの応答の比較

Comparison with pitchings of regulation wave and irregularity wave by a small size model

図11によれば、前後揺れは波にも応答して揺れるが、静水中で係留ラインの復元力によって生ずる前後揺れの固有周波数で浮体の長さの約5%程度の非常に大きな揺れが起こる。この現象を最近 Slow drift と呼んでいる。

なお、前後揺れが5%程度あっても、消波発電装置では十分な許容範囲である。

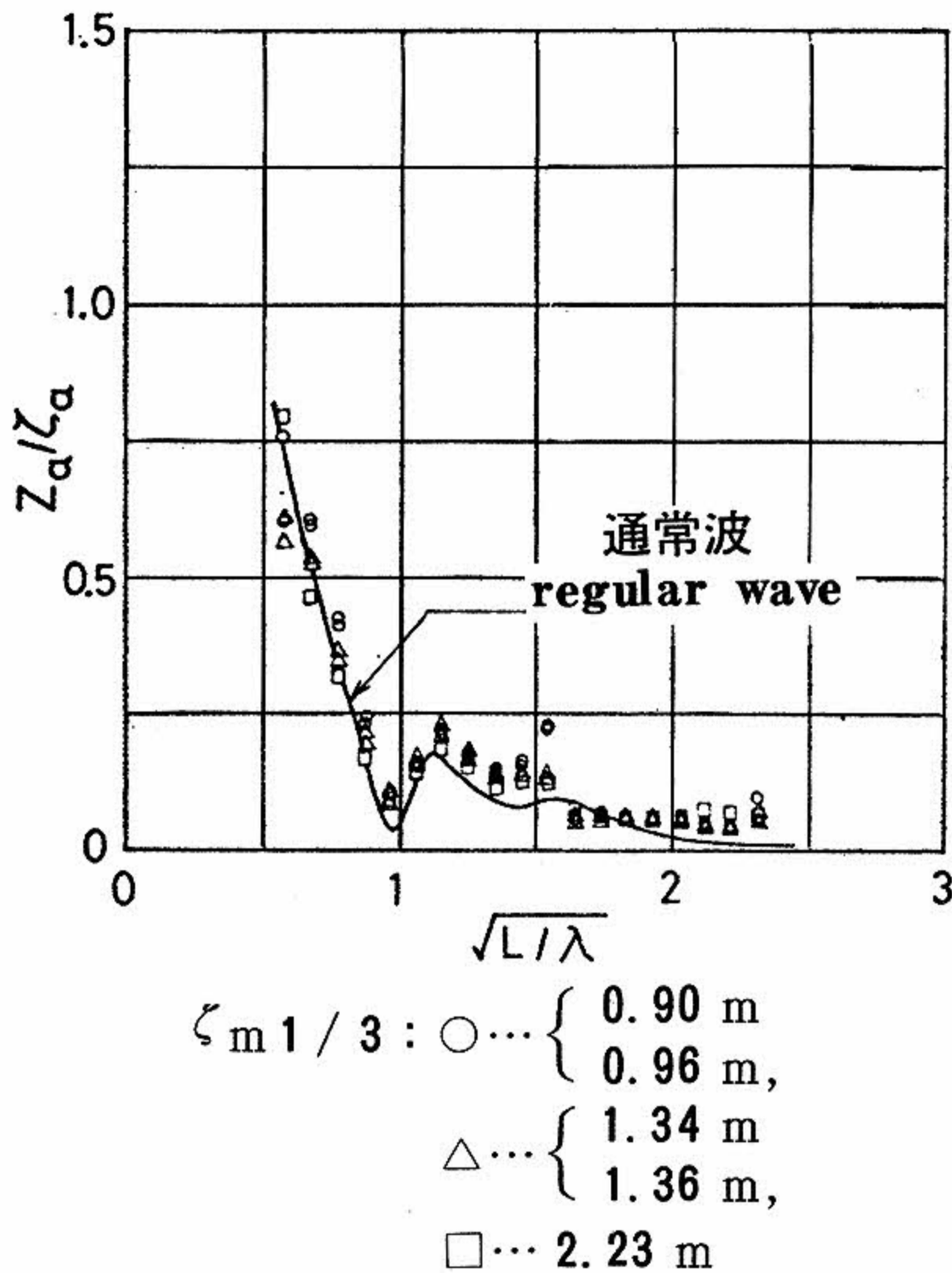
図13は不規則波中で前後揺れの応答の結果例を示す。前後揺れの応答は縦揺れおよび上下揺れと同様に規則波中の応答とよく一致すると同時に、有義波高の影響がないため、設置海域で前後揺れを高精度に予測ができる。

#### (4) 係留力

係留力については水槽試験の記録例の図11からもわかるように、前後揺れと同様に入力波に対する応答成分が小さい。したがって係留鎖の強度およびアンカーの把駐力に関する最大係留力が重要となる。

そこで試験記録に基づいて実際海面で実機の係留力を推定することにした。

まず、大型模型のD係留状態で、有義波高を0.92m、1.35mおよび2.23mと変化させた



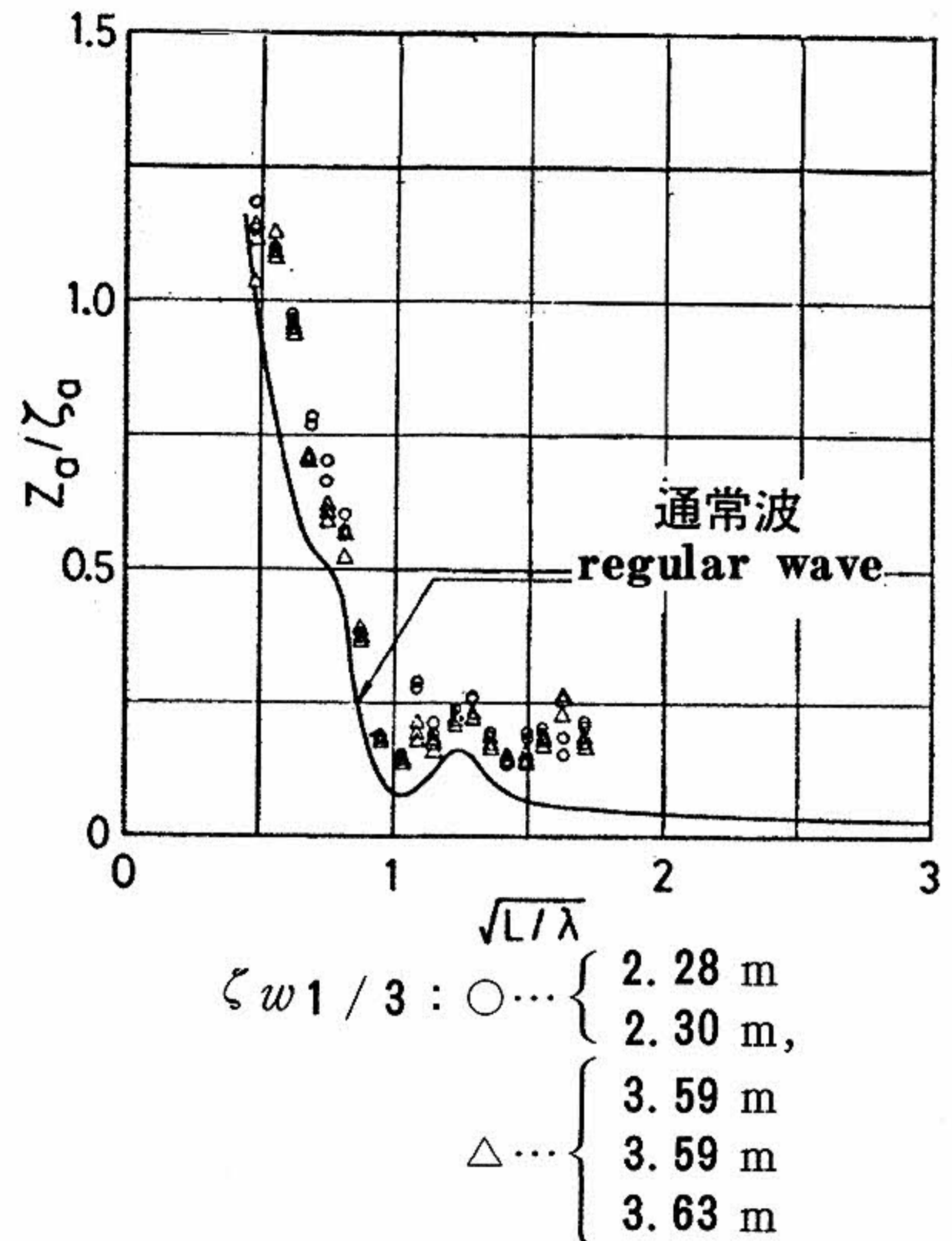
場合の係留ラインのアンカー部に働く全張力はそれぞれ最大7.05(t)、10.08(t)、15.79(t)となった。この値から、有義波高6.0mとすれば、最大の張力は大略115t程度と予想される。

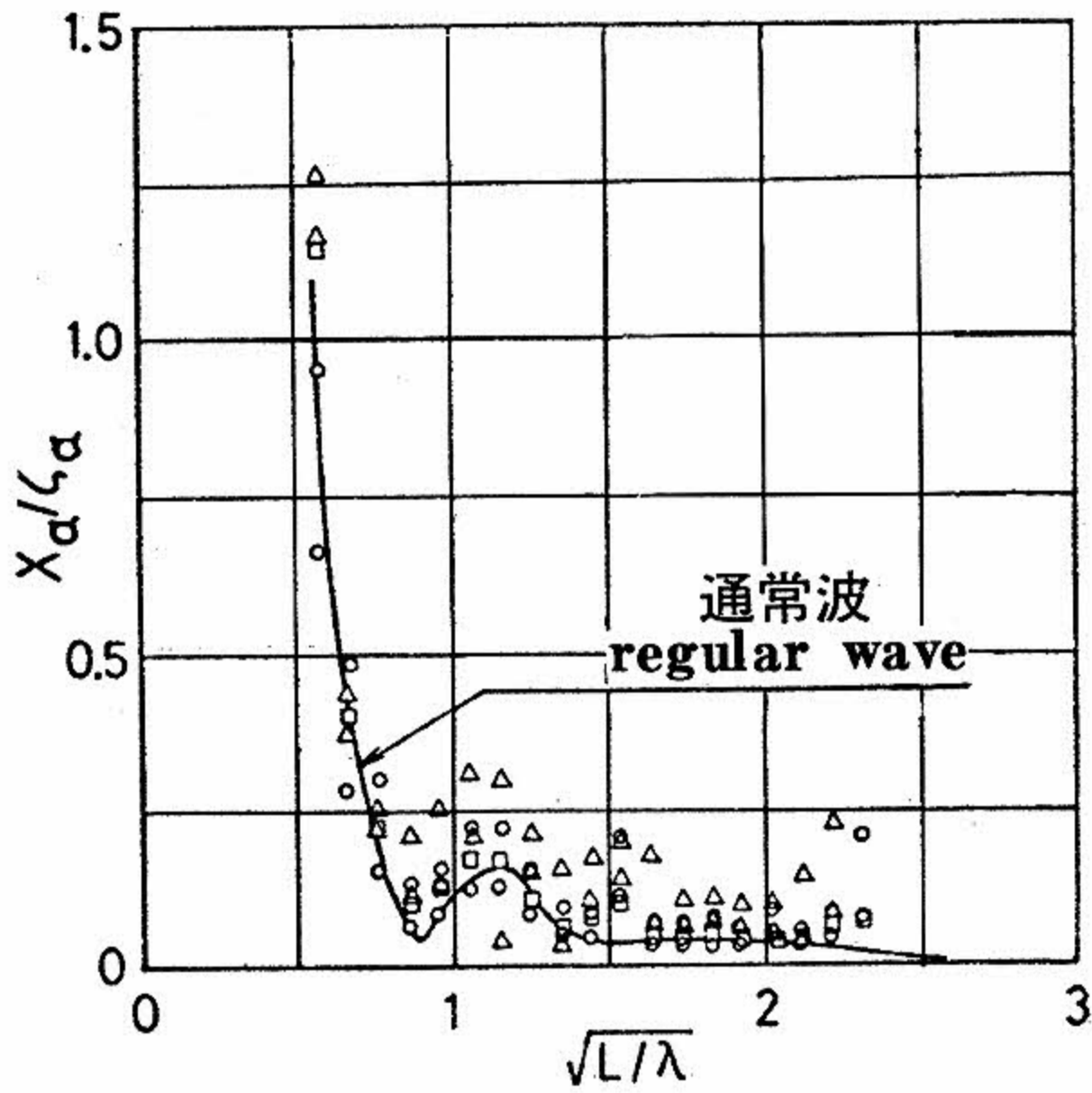
一方、図11の(2)と(3)に示すように、小型模型のGおよびH係留状態では、係留ラインに衝撃的な張力が作用する。また係留ラインの接地距離が小さくなるに伴い、係留ラインに働く衝撃的な張力が作用する回数が増加することもわかった。

表4はそのときの係留ラインに働く全張力を示す。この値から有義波高6.0mとすれば、最大の張力は大略360t程度と予測される。

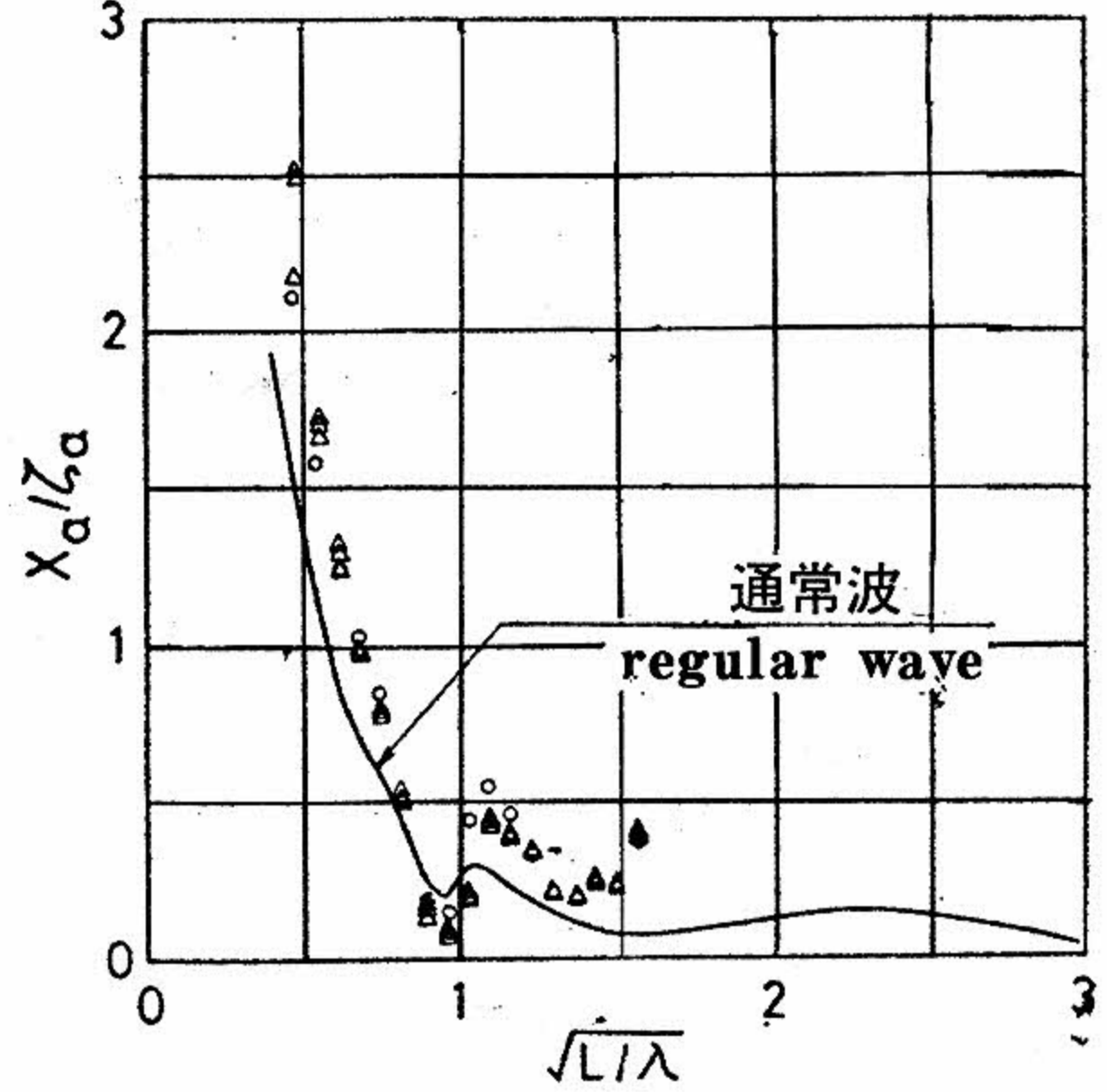
以上の結果からアンカーの把駐力は最低400t程度必要となる。

なお、不規則波中のアンカー部の最大張力は規則波中のアンカー部の最大張力の約7倍になっている。これは図11の記録例でも明らかのように、浮体が前後揺れの固有周波数で大振幅の揺れを起こしていることに起因する。





$\zeta w_{1/3}$  ; ○... { 0.90 m  
                                   0.96 m,  
                                   △... { 1.34 m  
   1.36 m,  
                                   □... 2.23 m



$\zeta w_{1/3}$  ; ○... { 2.28 m  
                                   2.30 m,  
                                   △... { 3.59 m  
   3.59 m  
   3.63 m

図13 規則波と不規則波による前後揺れ  
 Surging by regulation wave and irregularity wave

係留状態 mooring	有義波高 effective wave height (m)	船首係留ラインのアンカ部の全張力 (t) Total tension of anchor position		
		最大 max.	2番目 2ed	3番目 3rd
G	2.29	18.14	13.38	12.34
	3.60	120.80	108.44	14.07
H	2.39	36.90	30.44	23.56
	3.43	117.95	117.50	105.46

## 6. むすび

消波発電装置に関する今回の水槽試験で解明できたことは、つぎのとおりである。

- (1) 今回の係留状態の範囲では浮体の運動は変化しないので、係留ラインによって浮体の運動を軽減させるには相当引き締めた係留にする必要がある。
- (2) 今回の模型の縮尺範囲内では浮体の運動は縮尺の影響を受けない。
- (3) 船体運動では不規則波と規則波とで線型積み重ねが成り立つ。
- (4) 不規則波中の前後揺れは、静水中の前後揺れの固有周波数および減衰係数を調べておく必要がある。
- (5) 係留ラインの鎖の強度およびアンカーの把駐力の面から判断すると、前後揺れに制約がない場合には、鎖の安全およびアンカーの軽減を計るため、係留ラインをできる限りゆるやか (Slack) な係留とし、同時に、鎖が海底をはう距離を長くすべきである。

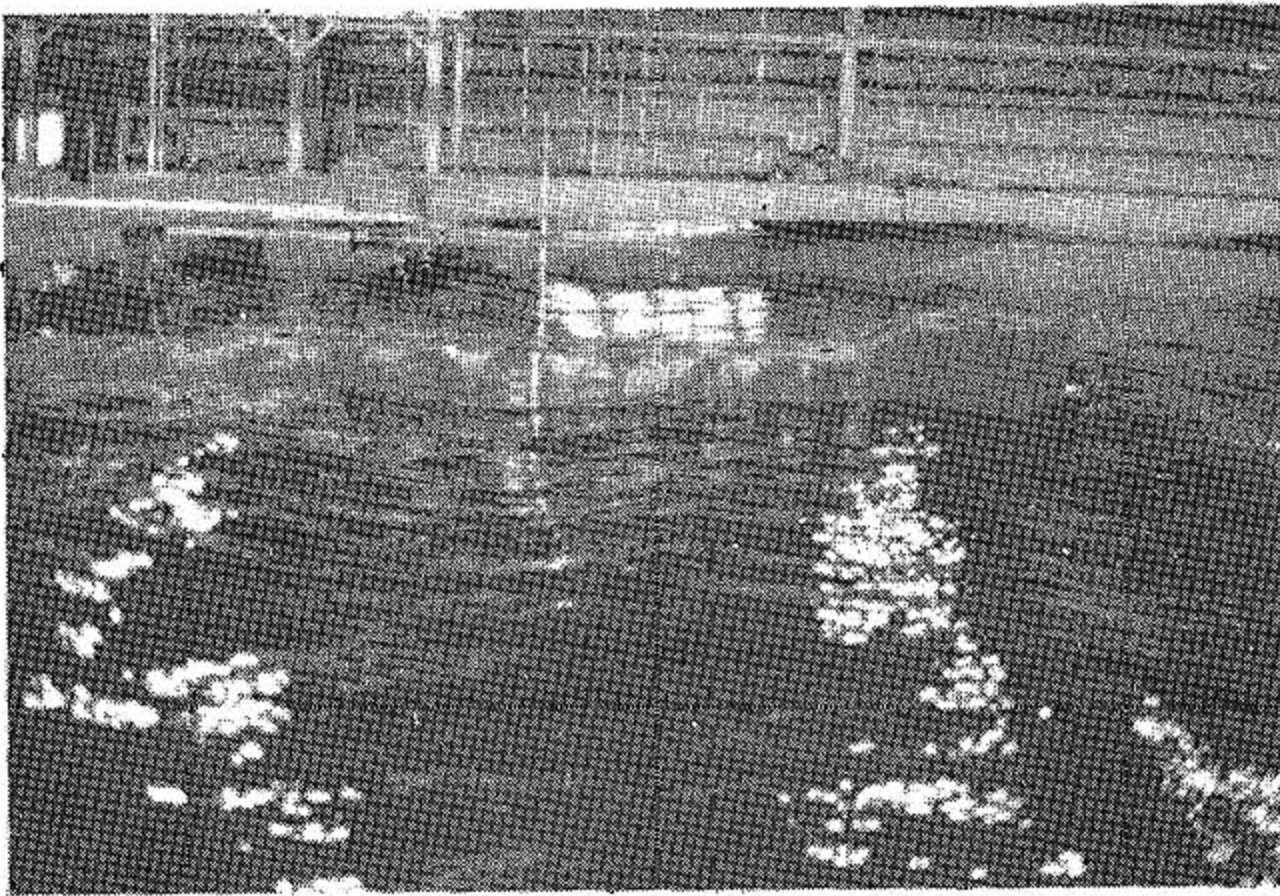


写真1 大型模型の実験風景  
 View of test by a large size model