

波力発電装置“海明”の出力向上に関する模型実験 — 底板による効果 —

宮崎武晃*¹ 横溝宏典*¹ 鷲尾幸久*¹

波力発電装置“海明”の波力から空気出力のエネルギー変換率の向上を目的とし、1/20 模型を用いて、底板付船体の水槽実験を実施した。底板の深さは構造の異なる2種類を用い、“海明”型と比較し、空気出力、運動および係留力特性を解明し、また相互の関連を把握した。

実験の結果、深底板付模型 (Model C) は、長波長側で海明型の2～3倍の出力向上が得られた。また、一方、底板は取付け場所によって、出力向上の妨げとなることがわかったと同時に、係留力が大幅に増加する欠点についても明らかになった。

Model Test on the Increase in Output of the Wave Power Generator, “KAIMEI”. The Effect of the Bottom Plate

Takeaki Miyazaki*², Hiromichi Yokomizo*², Yukihiisa Washio*²

The purpose of this investigation was to uncover a new system of increasing the air output of the wave power generator, “KAIMEI”. Two new bottom plates were fitted alternately to the 1/20 scale model of the “KAIMEI” and water tank tests were conducted. This was done to understand not only the individual characteristics of air output, model motion and mooring tension but also the relationships between each characteristic.

The results showed that air output increases approximately two or three-fold in the bottom-plated model which has a longer wave length than the length of the model. This clarified that the defeats of the bottom plate located at the stern section prevented air output from increasing and resulted in a sharp increase in mooring force.

*¹ 海洋利用技術部

*² Marine Exploitation Technology Department

1. 緒 言

波エネルギーを大規模に電気エネルギーに変換し取出すことを目的とした、空気タービン方式による波力発電“海明”の研究開発を実施した。特に昭和53(1978)年6月から55(1980)年8月の間、山形県由良港沖約3kmの海域において、2度にわたる海域実験を実施し、多くの成果を得た。

本海域実験において得た成果のうち、特に発電装置の成果は、次のようなものである。

- (1) 大規模波力発電の実証
- (2) 空気タービン方式の有効性の実証
- (3) 係留を含めた装置全体の安全性の確認
- (4) 波力発電機と陸上系統の接続と送電の実証

しかし、これらの成果と同時に、さらに高性能な波力発電装置を完成するには、次の点について改良すべきことが明白となった。

- (a) 波力から空気出力へのエネルギー変換率の向上
- (b) 空気タービンおよび発電機システムの簡素化
- (c) 発電出力の平滑化と集約化および電力の質の向上

以上、3点が改良すべき主項目として上げられており、そのため、現在、これらの点につき、理論解析と水槽実験の両面から検討している。

本報告では、上記(a)の“波力から空気出力へのエネルギー変換率の向上”について模型実験を通して検討した結果について述べる。

2. 模型実験の目的

波力から空気出力へのエネルギー変換率を向上させる方法の一つとして、“底板付空気室”が英国で提唱”された。

底板付とは、“海明”で使用した底開き空気室の下部に取付けた横壁と底板を用い、船体の前方、または横方向に開口部を形成して、波エネルギーが入出する方式である。

この開口部を波の進行方向に対して向けると大幅な性能向上が得られる点については当センターで確認されている。

そこで、“海明”の $1/20$ 縮尺模型を用いた水槽実験で、“海明”の船体に底板を取付けることによって、どの程度の空気出力の向上が可能である

かを明らかにする。さらに開口部の形状と空気出力特性、運動特性、係留力特性の関係、およびこれら相互の関連を明らかにする。これらの一連の模型実験によって、底板付空気室を用いたときのAttenuator方式の空気タービン波力発電装置の最適計算法を確立するための資料を得ることを目的とした。

3. 供試模型

水槽実験に使用した模型は3種類である。すなわち、

- (1) “海明”実機の $1/19.23$ 縮尺模型（以後 $1/20$ 底開き模型と呼び、Model Aで表わす）
- (2) Model Aに深さ150mmの浅い底板を取付けた模型（以後、浅底板模型と呼び、Model Bで表わす）
- (3) Model Aに深さ200mmの深い底板を取付けた模型（以後、深底板模型と呼び、Model Cで表わす）

これらの模型はすべて鋼板で製作し、浮力室は発泡スチロールを充填した。

表1および図1は模型の主要目と概要図を示す。

図中の斜線部は浮力室を示し、他は波エネルギーを空気エネルギーへ変換する空気室である。

Model Aは21室すべて底開き空気室である。

Model Bは開口部の高さが150mmになるような底板を取付け、No.1, No.2およびNo.3の空気室は開口部が前向きで、No.4およびNo.5の空気室はそれぞれ左右、横向きの開口、No.6~No.13の空気室は左舷側の開口、No.14~No.20の空気室は左舷側空気室が左向きの開口、右舷側が右向きの開口とした。これら底板の取付け以外は海明と同型である。

Model Cは開口部の高さが200mmになるように、底板が取付けられ、かつModel Bに比べて中央部のNo.6~No.13の空気室は図1で示されるようになっている。

実際の波力発電装置では、空気室の上部に空気タービン発電機を搭載し、空気室内で発生した空気流によってタービンを回わし発電するが、模型ではタービン発電機の代わりに正方形のノズルを取付け負荷として代用し実験した。

4. 実験方法

実験に使用した施設は、運輸省船舶技術研究所の海用構造物試験水槽（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。

波力発電装置は、構造様式が一般船舶と大きく異なり、特に空気室は海水が常に出入する構造であるため、水槽実験では静水中での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、上下揺れの固有振動を求め、さらに規則波および不規則波中の動揺、および発電に最も重要な空気出力特性を求め、同時に船体の安定性および係留力の安全性についても検討した。

模型の係留は、図2に示すように、“海明”実機の係留状態とほぼ相似の方式とし、水槽の中央部で、船首部に3点、船尾部には中間ブイ（浮力700g）を持つ1点の係留とし、係留ラインの長さは水槽の水深（1.9m）の6倍の11.4mで、スラックな係留方式とした。また、係留用鎖模型は、

スタットのない市販の鉄鎖を用い、“海明”で使
用した95mm直径の鎖と相似の鎖を使用した。

空気室上部のノズル面積と各空気室喫水断面（以後空気室面積）の比をノズル比と呼ぶ。本実験ではノズル比 $1/70$ を基本として、 $1/110$ および $1/140$ について実験を試みた。

なお、これらのノズルを選んだ理由は、“海明”実機のタービンノズルが約 $1/110$ に相当することと、最近、各種水槽実験で $1/60 \sim 1/70$ ノズルが“海明”型には適しているとの報告に基づくものである。

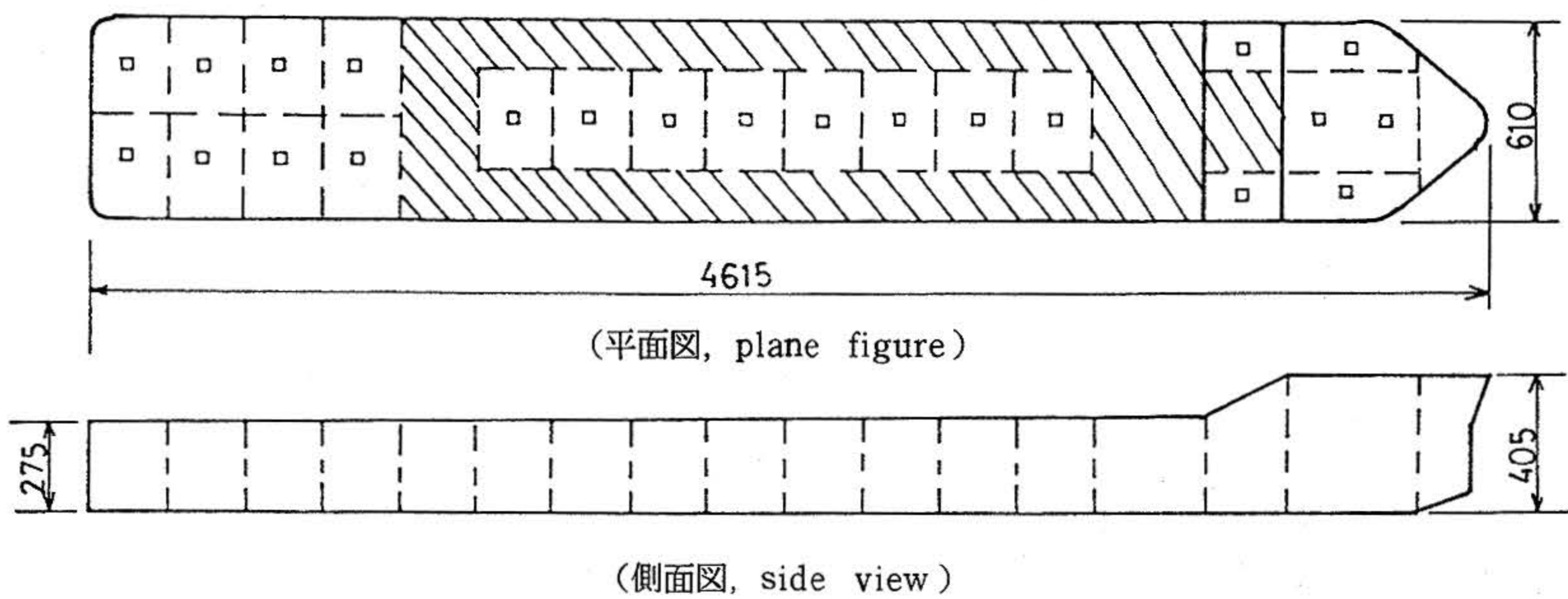
$1/70$ ノズルではタービン寸法が大きくなるため、タービンの小型化をねらった $1/140$ ノズルについて比較実験した。

今回の模型実験時、計測した項目を下記に示す。

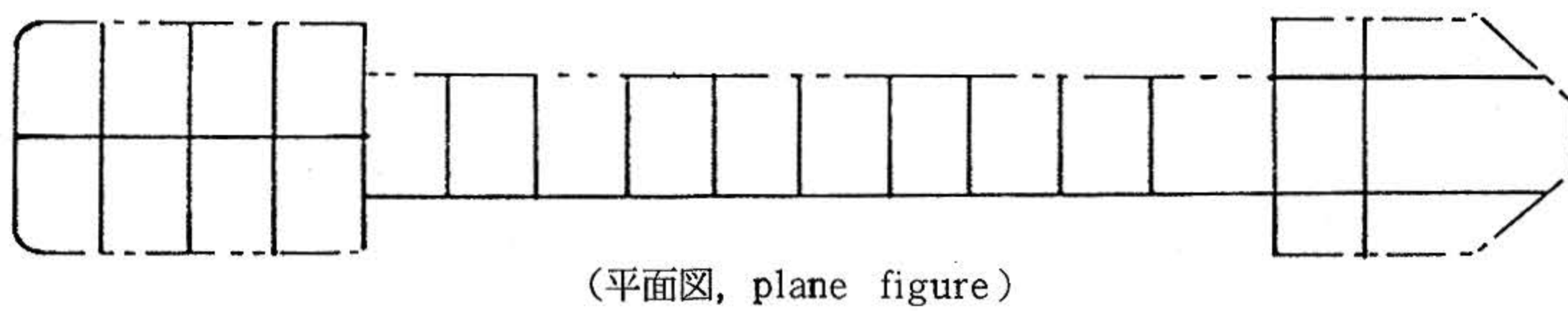
- (1) 波
入力波は船首左（60°）前方15mで1点。
- (2) 船体運動
縦揺れ、上下揺れおよび前後揺れの3点。
- (3) 係留ライン張力
船首部係留ラインの浮体部3点、および船尾

表1 模型の主要目
Specifications of model ships

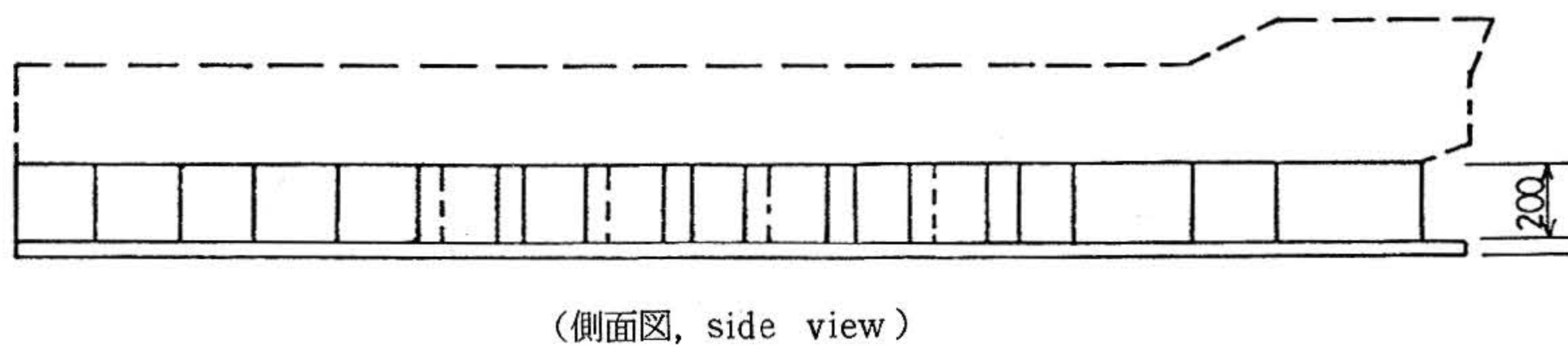
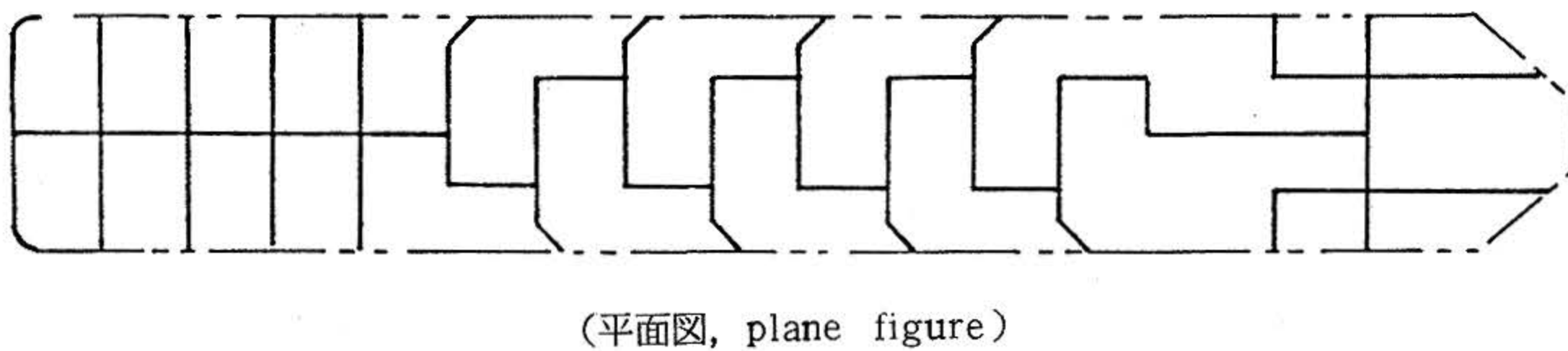
項目 item	実機 actual ship	Model A	Model B	Model C
全長 [L] length (m)	80.0	4.160	4.160	4.160
幅 [B] width (m)	12.0	0.610	0.610	0.610
高さ [D] height	5.3	0.275	0.275	0.275
重量 weight (kg)	813×10^3	115.65	181.98	188.07
底板の深さ(m) depth of bottom plate	なし nothing	なし nothing	0.10	0.20
縮尺 reduced scale	$1/1.00$	$1/19.23$	$1/19.23$	$1/19.23$



(1) Model A (海明模型, KAIMEI's model)



(2) Model B (浅底板, 深さ 150 mm,
sallow bottom plate, depth 150 mm)



(3) Model C (深底板, 深さ 200 mm,
deep bottom plate, depth 200 mm)

図1 模型の概要図

Outline of model ships for wave energy generator

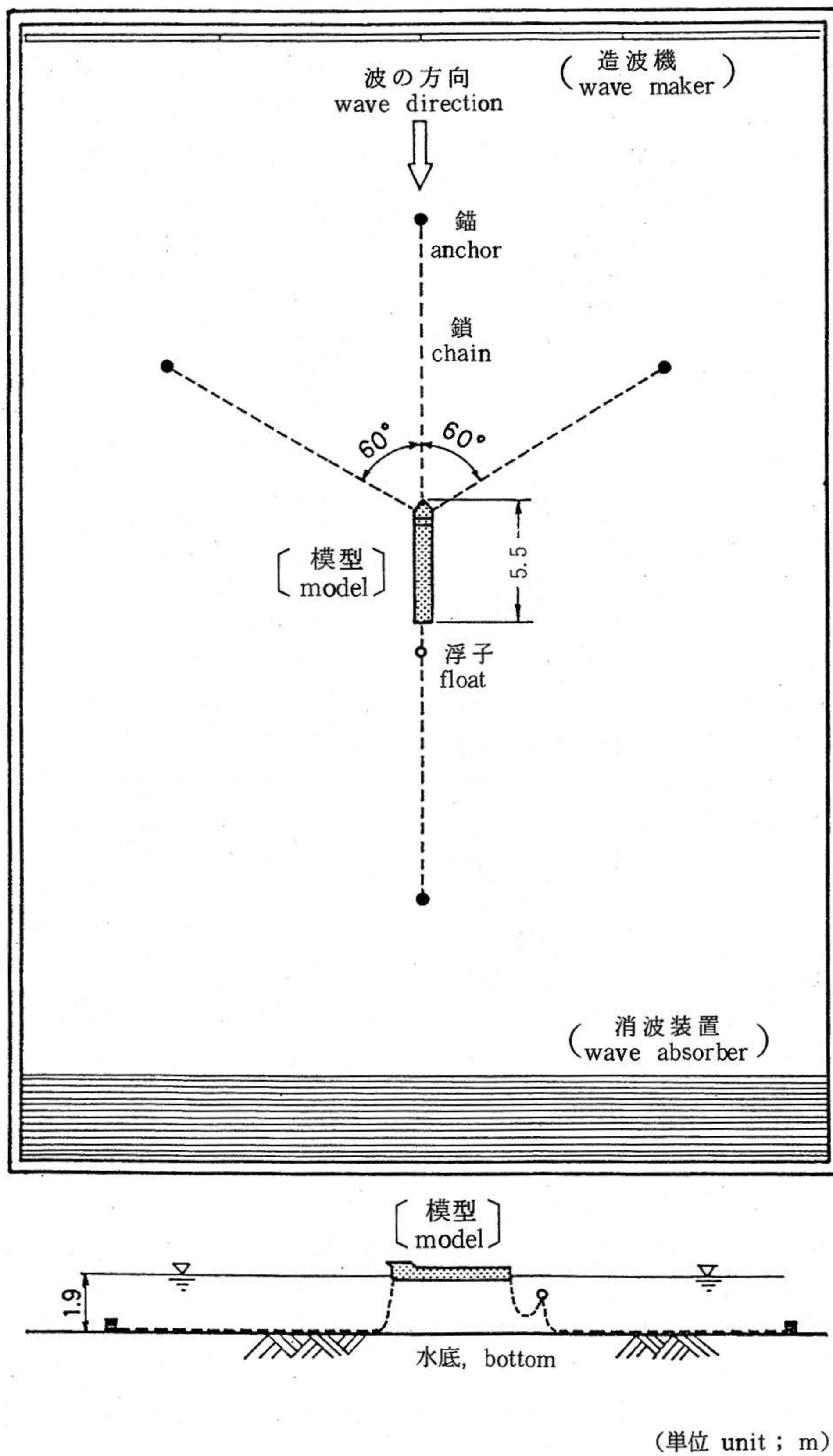


図2 実験の状態
Experimental conditions

部係留ラインの浮体部1点の合計4点。

(4) 空気室圧力

代表空気室15室の圧力(空気室No. 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, および21合計15点)。

波計測は容量式波高計を用い、船体運動は3成分用運動計測装置を使い、変位はポテンシオメーターで計測した。係留ライン張力はリングゲージ式張力計(防水式)を船体と係留ライン間に入れて測定した。また、空気室の圧力は各空気室からビニールチューブで計測台車上の歪ゲージ式圧力計に導き計測した。この際、ビニールチューブが船体運動に影響を与えないように充分注意を払った。

記録は5台のペンレコーダ(6チャンネル 4台と4チャンネル 3台)と2台のデータレコーダ(13チャンネル 1台と7チャンネル 1台)を用いて行った。ペンレコーダではすべての項目を同時に記録したが、データレコーダはチャンネル数の関係から代表的な項目についてのみの記録となった。

規則波中の解析は、主にペンレコーダの記録を用い、不規則波中の解析は、データレコーダと計算機を結び、FFT法を用いたスペクトル解析を主に実施し、各項目の応答特性を求めた。

模型実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。

規則波は、波長1.0～6.0 mでは波高/波長の比(波傾斜)の値を $1/25$ とし、6.0 mよりも長い波長では造波装置の関係から順次、波高/波長の比の値を減少させた。また、波長4.0 mと6.0 mの2点(船長とほぼ等しい波長および船長の約1.5倍の波長)で、波高による影響を観察するため、波高を4～5条件変化させた。

不規則波では、“海明”の海域実験で観測した大風通過時の波スペクトル(1979年10月19日21:40～22:00)を用い、 $1/20$ 縮尺し水槽波とした。

大風通過時のスペクトルを選定した理由は、これまでの各種の実験結果²⁾から、規則波中の特性が精度よくえられれば、不規則波中の特性がほぼ推定できるが、係留力は不規則波では大きく異なるため、本実験では特に係留の安全性の検討を含めたため、大風時のスペクトルを用いた。

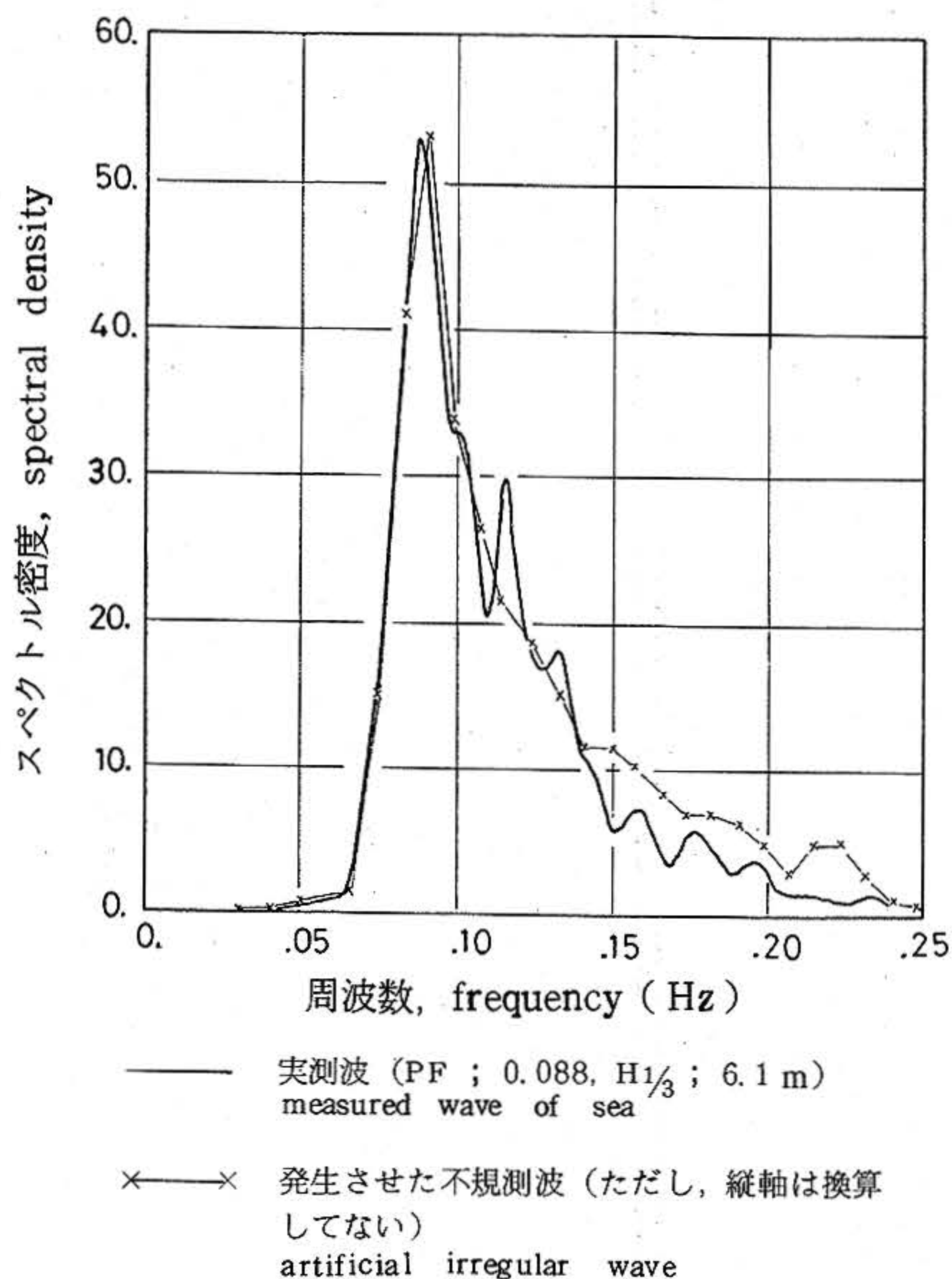
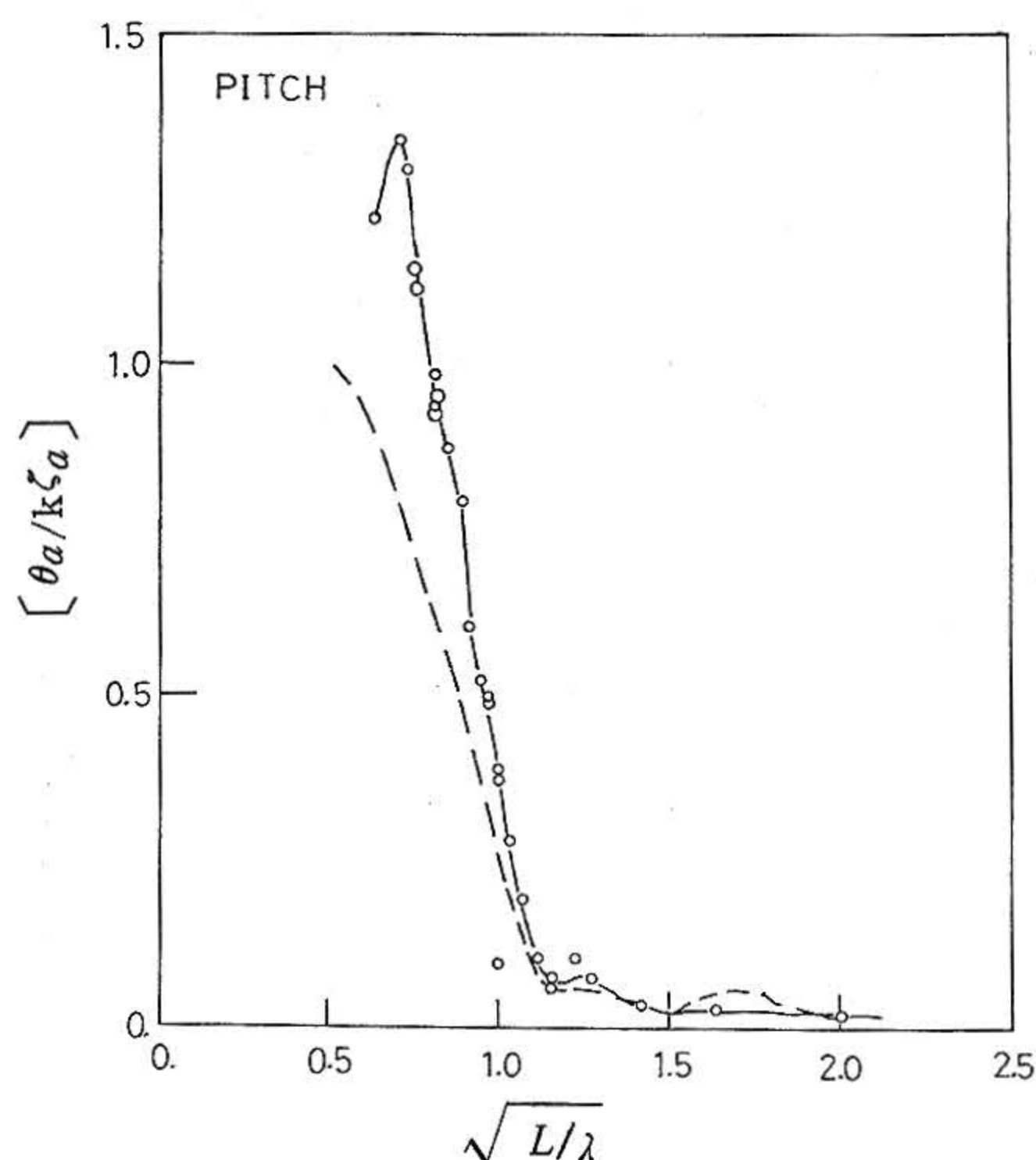


図3 実測波スペクトルと水槽波スペクトル
Wave spectra of measured wave on the sea and in the test tank

図3には台風(10月19日)の実測波スペクトルと水槽で発生させた不規則波のスペクトル分布を示す。

図中の両スペクトル共に傾向はよく一致している。ただし、高周波数領域で若干ずれているのは、他に比べ、波エネルギーの小さいところであり、模型実験への影響はほとんど無視できる。

不規則波実験では、波高影響をみるため、有義波高だけを変化させ、各項目の特性を求めた。



— 今回の実験
experiment of this time

--- 前回の実験,
previous experiment

L 船 長, length of model ship
 λ 波 長, wave length
 θ_a 縦揺れ振幅角, pitching angle
 k 波 数, wave number
 ζ_a 波振幅, wave amplitude

図4 Model Aの縦揺れ
Pitching of Model A, model-ship

5. 実験結果および考察

5.1. 静水中の傾斜試験

波力発電装置は、一般船舶と構造が異なり、特に底板付船体の構造は大きく異なるため、安全性の点から模型の傾斜特性を調査した。表2には傾斜特性結果を示す。

ここで船舶の復元性を示す一つの基準として、 $\overline{GM}$ (重心GとメタセンターM間の距離)を用い、横および縦方向に分け、それぞれ $\overline{GMt}$, $\overline{GMl}$ で表わす。

船舶が復元力を有するか否かは、 $\overline{GM}$ の正負で左右される。すなわち、 $\overline{GM} > 0$ なら安定、 $\overline{GM} < 0$ なら不安定となる。

ここで、表2から Model C の深底板は、他の模型に比べ、 $\overline{GMt}$, $\overline{GMl}$ のいずれも小さく、復元力が最も小さいことがわかる。

波力発電装置は一般船舶と異なり、荒天または台風等を避ける手段は全くないため、装置自身を充分安定に製作する必要がある。この点を考えると、Model Cは安定性の面で不安が残る。

Model C が他に比べて復元力が小さい原因は、底板の取付けによる重量増加分を底板自身に浮力室を設けることによってキャンセルするため、 $\overline{GM}$ 値が減少したものである。もし $\overline{GM}$ 値を大きくするためには空気室を減らし、それを浮力室にする必要があるが、これでは総合空気出力が減少してしまい、初期の目的に反する。

今後、底板付船体については $\overline{GM}$ 値について充分考慮を払う必要がある。

5.2. 規則波中における実験

規則波中における動揺試験は、すべて縦波で行なった。これは波力発電装置“海明”が風波の作用力の強い方向に船首を向ける係留方式であり、今後も、この方式を押進める計画である。

5.2.1. 縦揺れ応答

図4は“海明” $1/20$ 模型, Model A の縦揺れ応答の実測値を前回の実験²⁾と比較して示す。

前回の実験とは“海明”海域実験以前に実施した $1/20$ 縮尺模型による実験であり、船体模型は今回の Model A とほぼ等しいが、係留系が異なり、船首1本、船尾1本の2点係留方式である。また使用した鎖は今回の実験よりも軽く、 $300g/m$ (空气中)で、かつ長さは短かく、水深2.0mの2.5倍の5.0mであった。

図4では横軸は船長 L を波長 λ で、無次元化し平方根値で示し、また縦軸は縦揺れ振幅角 θ_a を波数 k と波振幅 ζ_a で無次元化して表わした。

波長短い場合は縦揺れはほとんどないが、 $\sqrt{L/\lambda}$ が1.1以下の長波長側になると、縦揺れは大きくなり、 $\sqrt{L/\lambda}$ が0.8で、 $\theta_a/k\zeta_a$ が1に達した。これは縦揺れ角が波傾斜角と等しくなったことを示している。また $\sqrt{L/\lambda}$ が0.7 (波長が模型船長の約2倍)で最大値を示し、これよりも長波長では

表 2 模型の傾斜特性

Results of inclining experiment on model ships

項 目 item	Model A	Model B	Model C
本 体 重 量 (kg) weight of actual model ship	115.65	181.98	188.07
傾斜試験時重量 (kg) weight of model ship before the experiment	119.33	185.79	191.88
移動ウェイト (kg) a weight for forced transfur	2.49	2.62	2.62
ロール方向の移動距離 ℓ_t (m) transfur distance in the rolling direction	0.501	0.556	0.556
ピッチ方向の移動距離 ℓ_ℓ (m) transfur distance in the piching direction	3.256	3.256	3.256
ロール方向 $[\tan \theta_t]$ rolling direction	0.05869	0.07392	0.08737
ピッチ方向 $[\tan \theta_\ell]$ piching direction	0.01254	0.01344	0.0157
ロール角度 θ_t rolling angle (deg)	3.36	4.23	4.99
ピッチ角度 θ_ℓ piching angle (deg)	0.717	0.770	0.893
— GM の横方向距離 GM t (m)	0.178	0.1061	0.0869
— GM の縦方向距離 GM ℓ (m)	5.41	3.416	2.83

減少する（理論的には1に近づく）傾向を示している。

前回の実験と比較すると、全体にやや高い値を示しているが、この原因は係留系が異なるために発生したものと考えられる。

図5には3種類の模型の縦揺れ応答特性の結果を比較して示す。

Model Bおよび Model C の底板付模型の特性曲線は、両者ともほぼ等しい傾向を示している。また、Model A の底開きと比較すると、底板付は底開きに比べて縦揺れしにくいことがわかる。

ここで縦揺れの程度を比較するため、Model C の特性カーブを右側（短波長側）へ0.04 だけ平行移動させると、Model A の特性カーブに完全に重なる結果を得た。

このことから、縦揺れに関して底板の効果は、次の2点が考えられる。

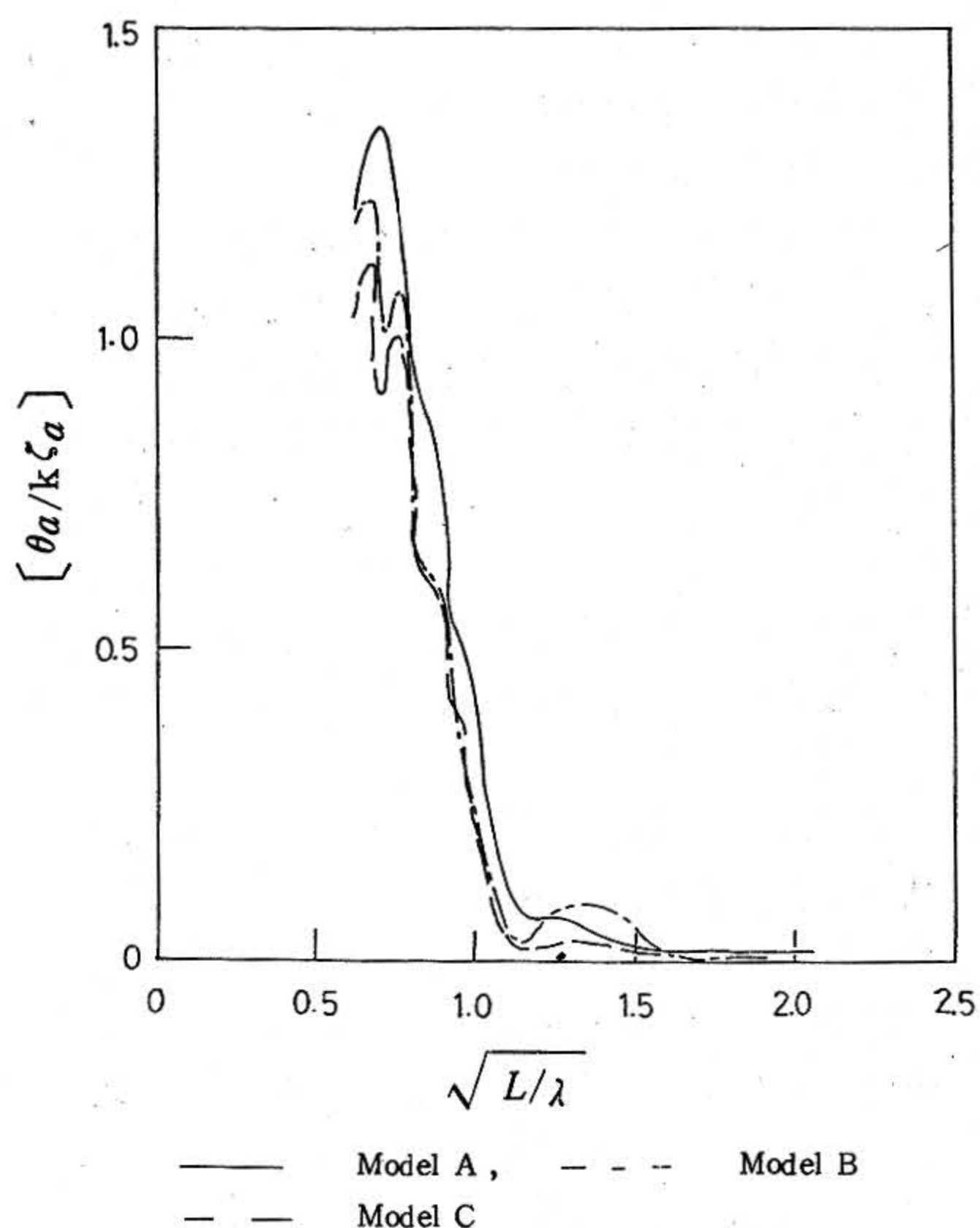


図5 3種類の模型の縦揺れ特性の比較
Comparison of pitching among 3 model-ships

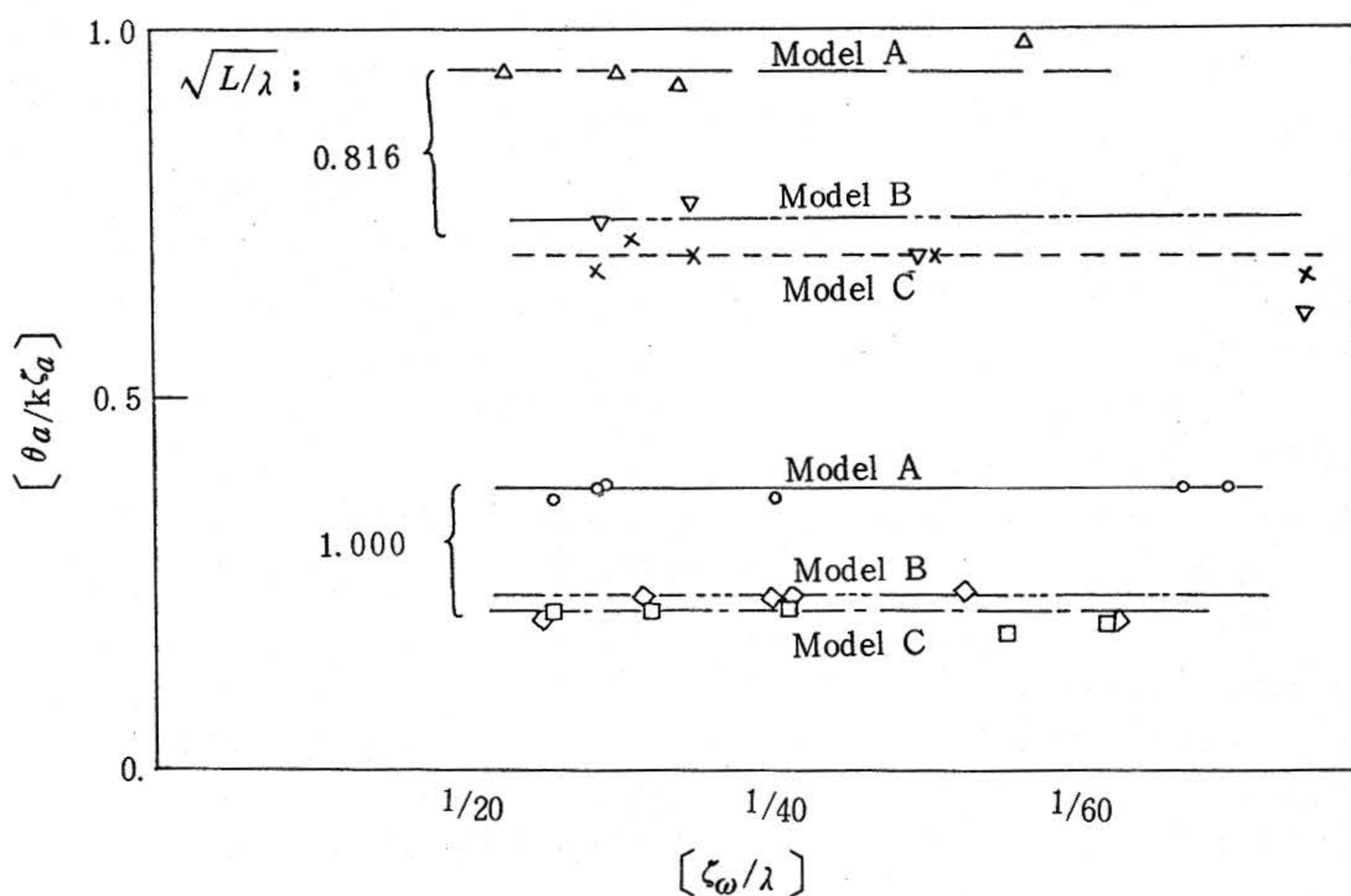


図6 3種類の模型の縦揺れに対する波高の影響
Effects of wave height on pitching of 3 model-ships

(1) 縦揺れを抑制する一すなわち、船体の喫水面積が等しければ全体の Mass が大きければ、それだけ縦揺れしにくい。

(2) 同じ縦揺れ量ならば、Model C は Model A に比べて船長を約10%短かくできる。

次に波長一定で波高だけを変化させたとき、(すなわち波傾斜を変化させる)、縦揺れ特性に与える影響を調べる。

図6は $\sqrt{L/\lambda}$ が1.000と0.816の2種類の波長における波高を変化させたときの結果を示す。横軸は波高(ζ_0)/波長(λ)、[波傾斜]を取り、縦軸は図5と同様に $\theta_a/k\zeta_a$ で表わした。

結果は、波傾斜が極端に小さい領域を除いて、波高を変えても、縦揺れ応答に与える影響は特に認められず、一定値を示した。このことによって、縦揺れは波高に比例して、一次で増加することが確認され、波高と波長がわかれば縦揺れは推定できることを意味している。

5.2.2. 上下揺れ応答

図7は Model A, B および C それぞれの上下揺れ応答特性を示す。縦軸は上下揺れ振幅 Z_a を波振幅 ζ_a で除し無次元化する。

全体の傾向を比較すると、Model B および Model C が底開きの Model A よりも上下揺れが小さい値を示しているが、縦揺れに見られるほど、その差は顕著ではない。

上下揺れ応答の波高影響結果を図8に示す。縦揺れ同様に、ほぼ一定値を示すことから、波長が一定の場合、上下揺れ振幅は波振幅に比例して増加し、特別に変った運動は発生しないことが確認された。

5.2.3. 前後揺れ応答

図9は Model A, B および C の前後揺れ応答特性を示す。縦軸は前後揺れ X_a を波振幅 ζ_a で除し無次元化して示す。

Model A の底開き模型は、他の底板付模型に比べ、実験した全波長領域にわたり、最も変動量が大きい。底板付の Model B と C を比較すると長波長側で Model C の深底板が小さい値を示すが他の領域では同じ特性を示す。

前後揺れの応答は、模型が係留状態にあるため、

係留ラインのカテナリーと深い関係がある。

Model A の底開きは波を受ける面積が、他の模型に比べ、小さいにもかかわらず変動量が大きい。これは係留ラインのばね定数が小さいところで前後揺れしているため、変動量が大きく、逆に Model C の深底板付では、ばね定数の大きいところで前後揺れするため、変動量が小さくおさえられている結果である。この点を、さらに明確に説明しているのは図10の結果である。

図10は Model A, B および C の各種波条件における前後揺れ変位量の大きさを示す。

波がないとき、前後の係留ラインがバランスして模型が静止している点を0とし、波を発生させると、模型は後退する。模型の後退に伴い、前方の係留ラインは海底から順次持ち上げられ、係留ラインのばね定数を増加し、バランス点に近づく。模型の後退は慣性があるためバランス点を越えて大きく後退する。

この後退する最大変位量を $X_{\max}$ とする。模型は波を受けてバランス点付近で前後揺れする。この変動量は図9に示す X である。O点から変動 X の中心までの変位量を X_{mean} として表わした。

図10中で Model C の深底板付の結果が他の Model に比べ、最大変化量 $X_{\max}$ 、平均変位量 X_{mean} ともに大きく、特に長周期ではその傾向が顕著である。このことは前に示したように、Model C は、係留ラインのばね定数の大きいところで、前後揺れしていることを明確に説明している。

Model C の深底板付は、他の模型よりも Mass が大きいため、短波長での影響は小さいと予想したが、これに反して、短波長から変位量は大きく、特に長波長では、Model A の底開きと比較すると、その差はきわめて大きい。

前後揺れの波高影響については、一定波長ならば、縦揺れ、上下揺れ同様に、波高に比例して増加する。

5.2.4. 係留力

波力発電装置は大時化に遭遇する確立は高く、大波の海象において、安全に係留されることが必要条件である。

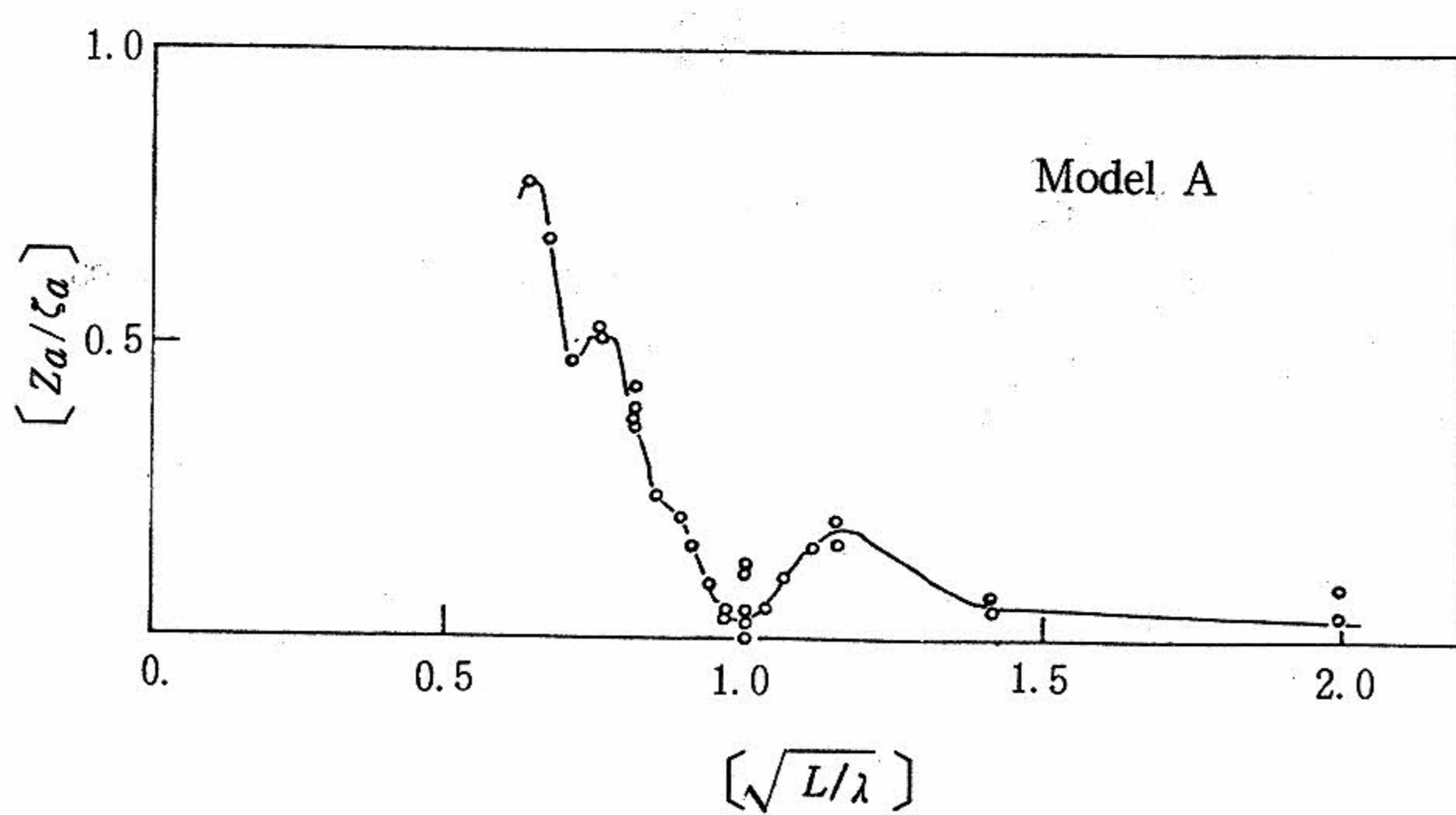
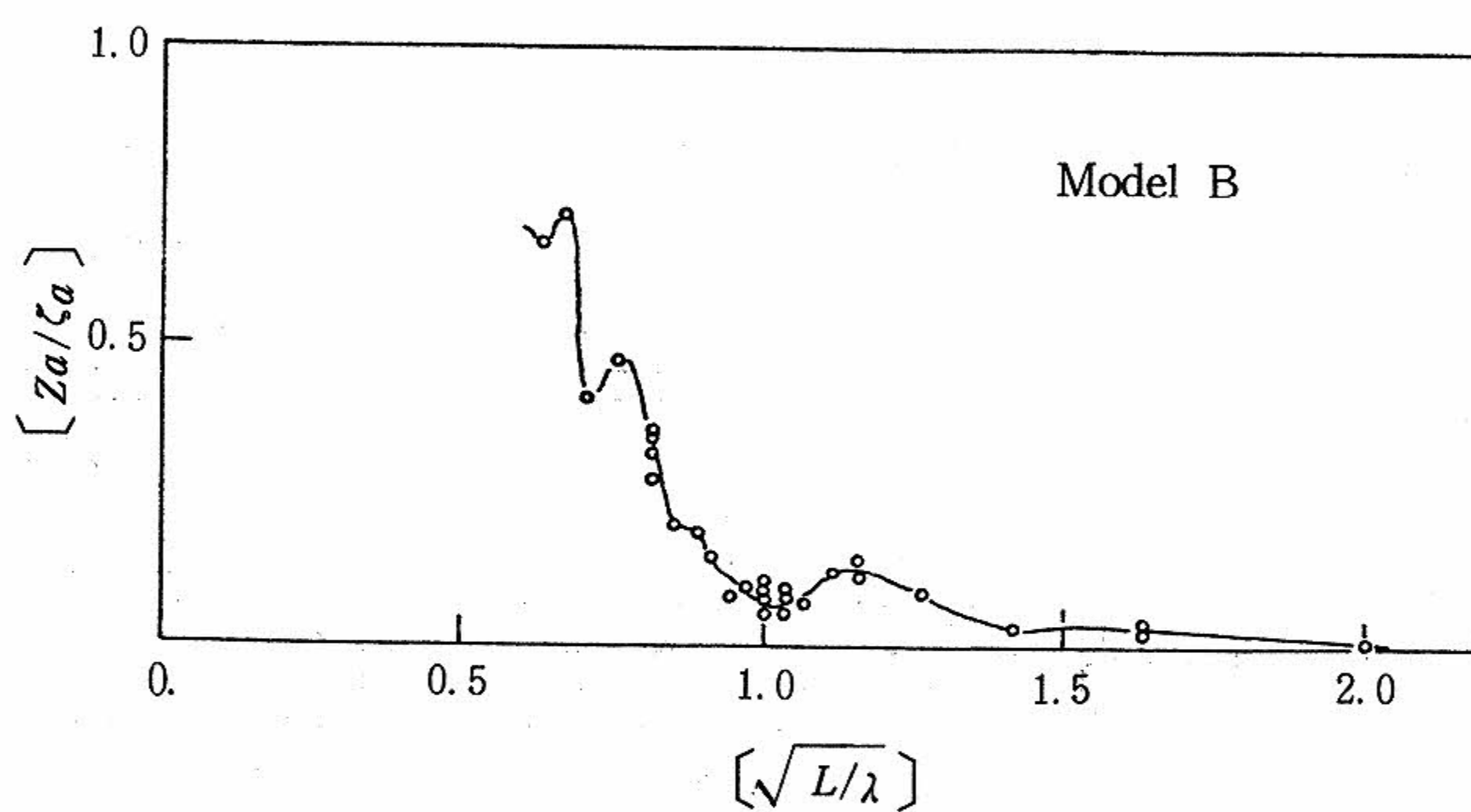
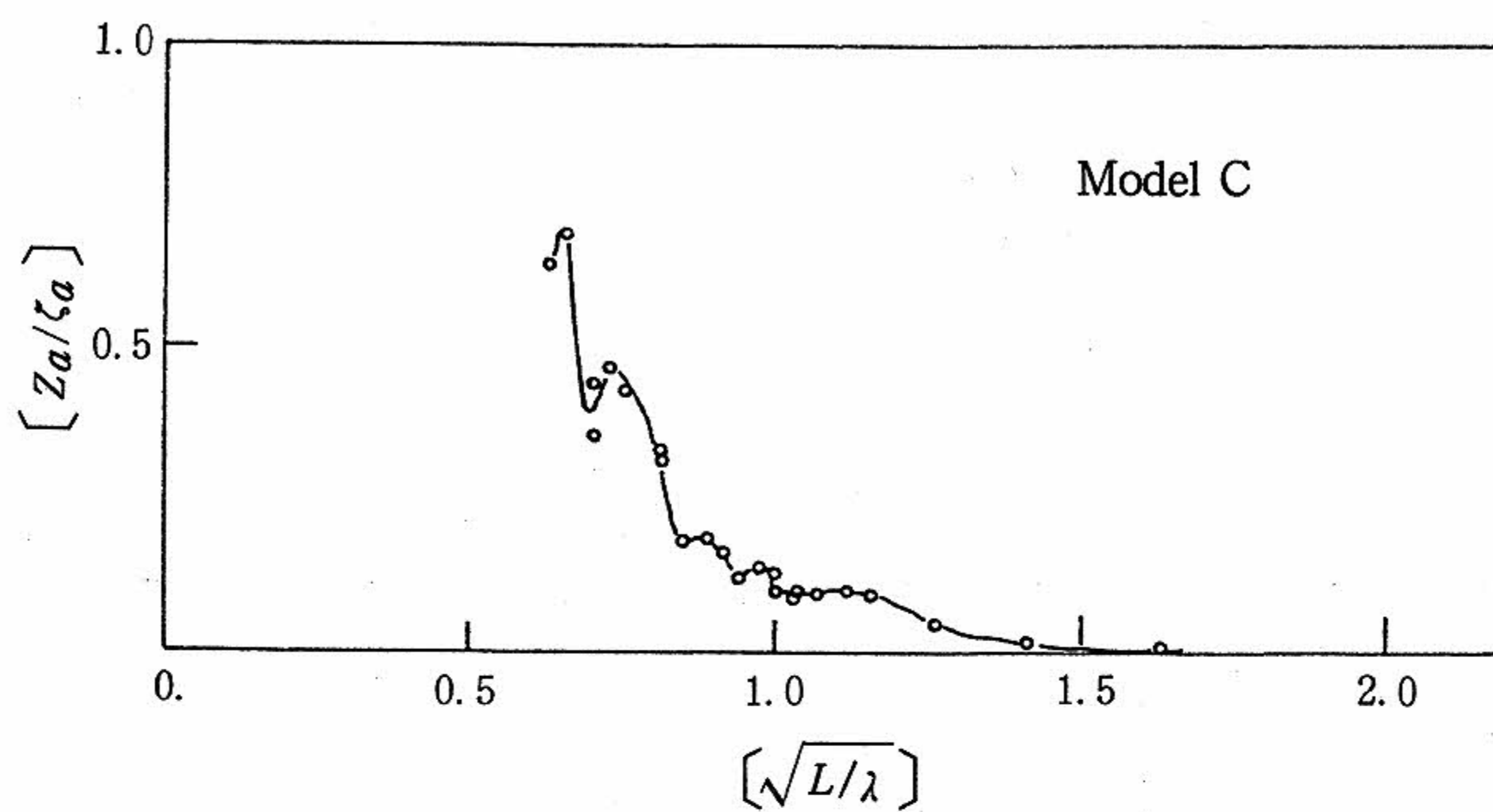


図7 3種類の模型の上下揺れ
Heaving of 3 model-ships

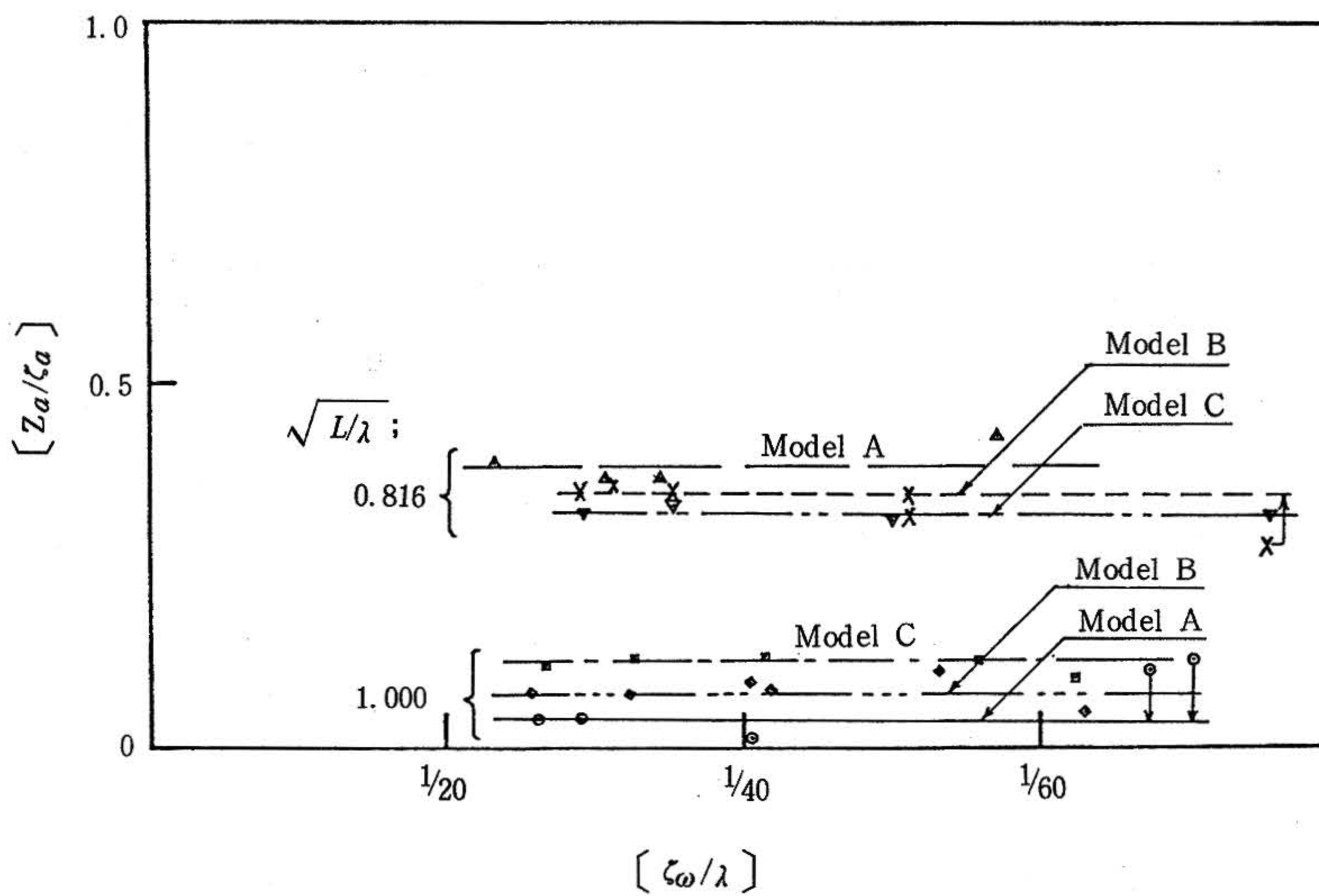


図8 3種類の模型の上下揺れに対する波高の影響
Effects of wave-height on heaving of 3 model-ships

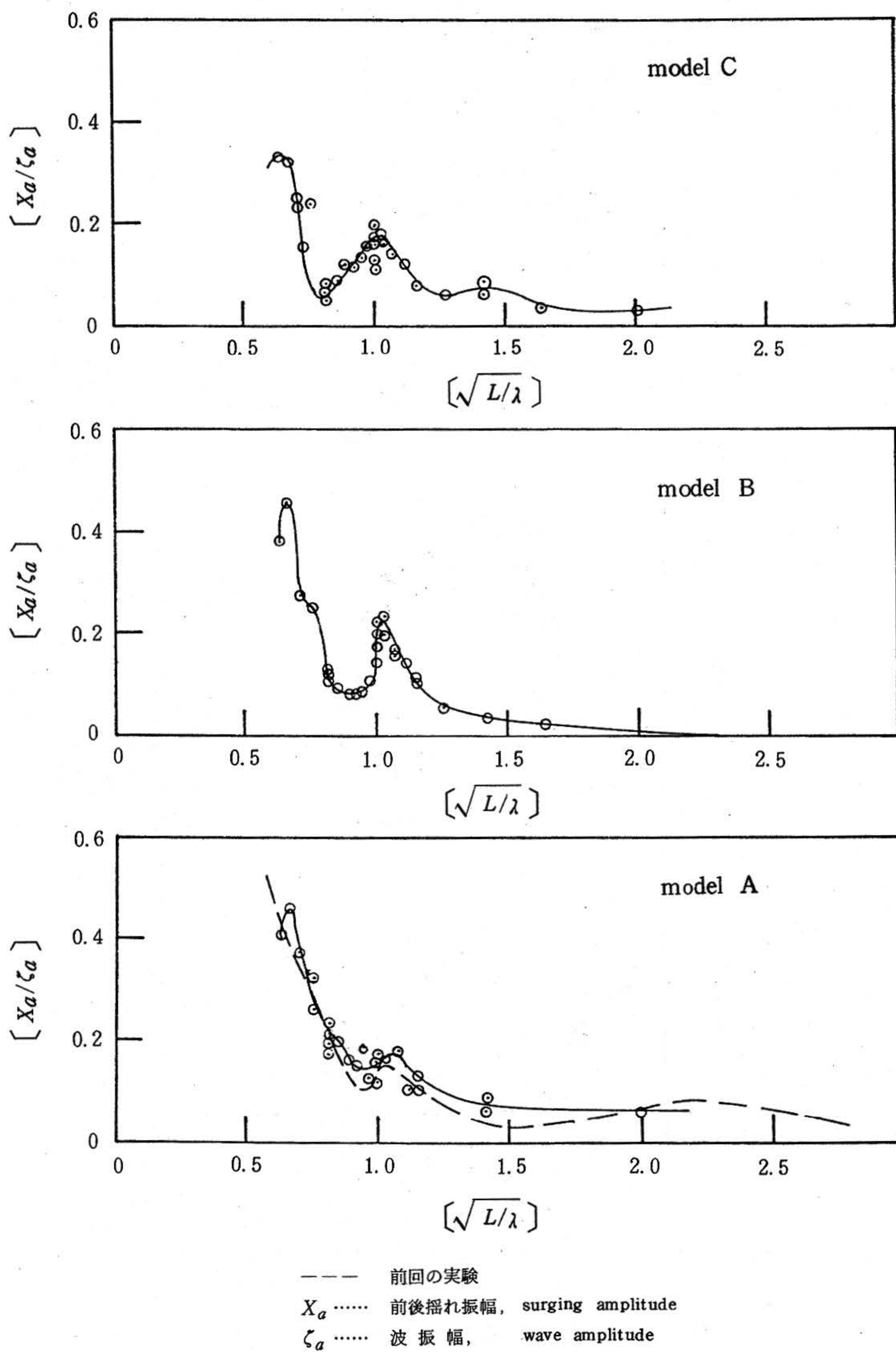


図9 3種類の模型の前後揺れ
 Surging of 3 model-ships

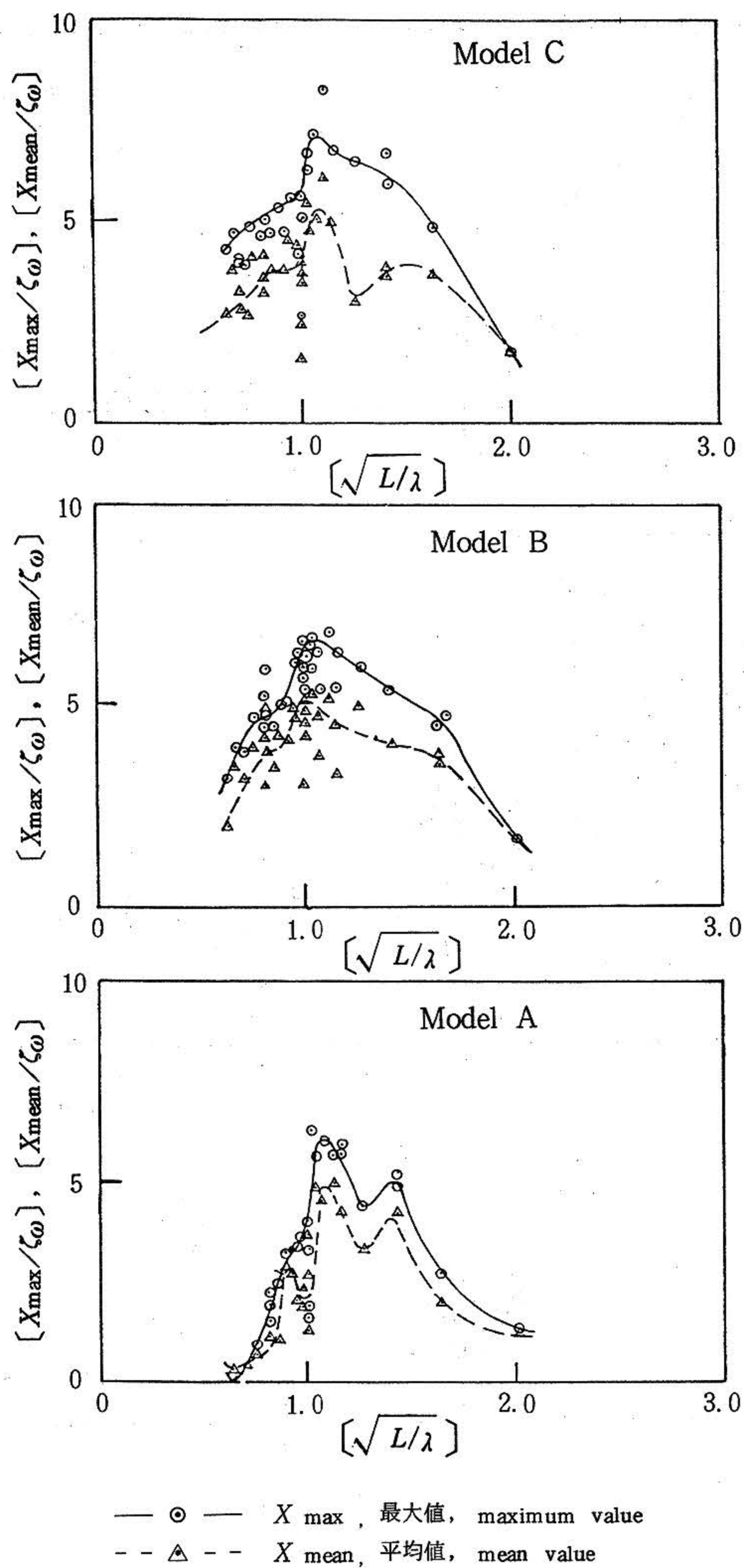


図10 3種類の模型の前後揺れの最大値と
 平均値の比較
 Comparison of maximum and mean
 value of surging among 3 model-ships

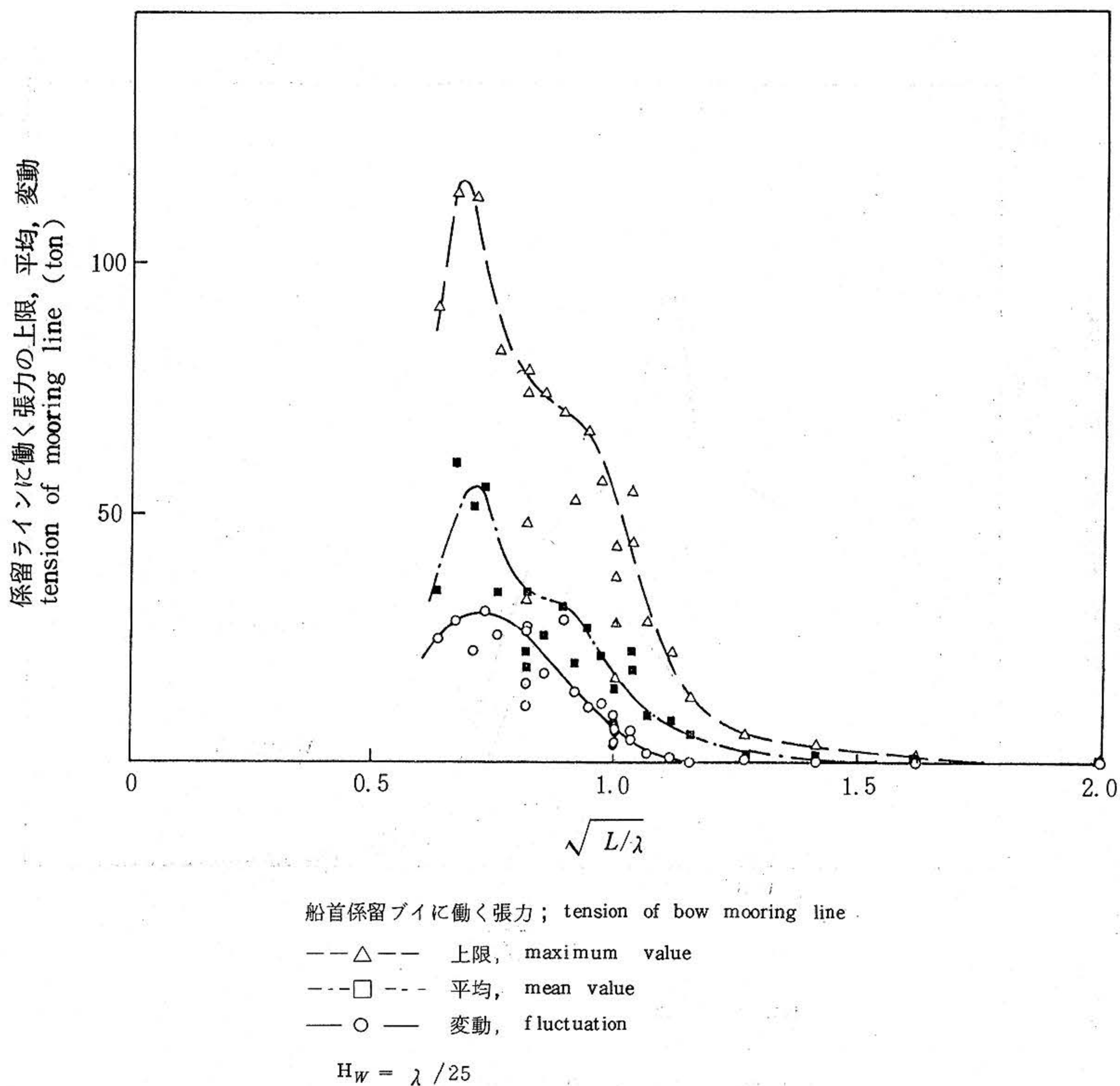


図11 Model C の船首係留ラインに働く張力の上限, 平均, 変動
 Tension of bow mooring line (maximum value, mean value and fluctuation)

図11は Model C の船首係留ラインに働く張力, すなわち, 係留力を示す。

係留力は複雑に変化するため, 解析するにあたり, 上限, 平均, 変動の3種類に区別し, 図に表わした。ここで係留力は, 波高の2乗, 縮尺の3乗に比例するとして計算した。

図12は3種類の Model A, B およびC船首係留

ラインに働く係留力の上限値を比較して示す。

Model Aの底開きに比べ, 底板付き Model B とCの上限値の上昇は極端に高く, 特に Model C では $\sqrt{L/\lambda}$ が0.68で, 最大値を記録した。

0.68の値から実海域の波周期を求めるため, 船長 L を海明と同様に80 mとすると, 波長 λ は173 mとなる。今波を深海波と仮定すると, $\lambda = 1.56T^2$

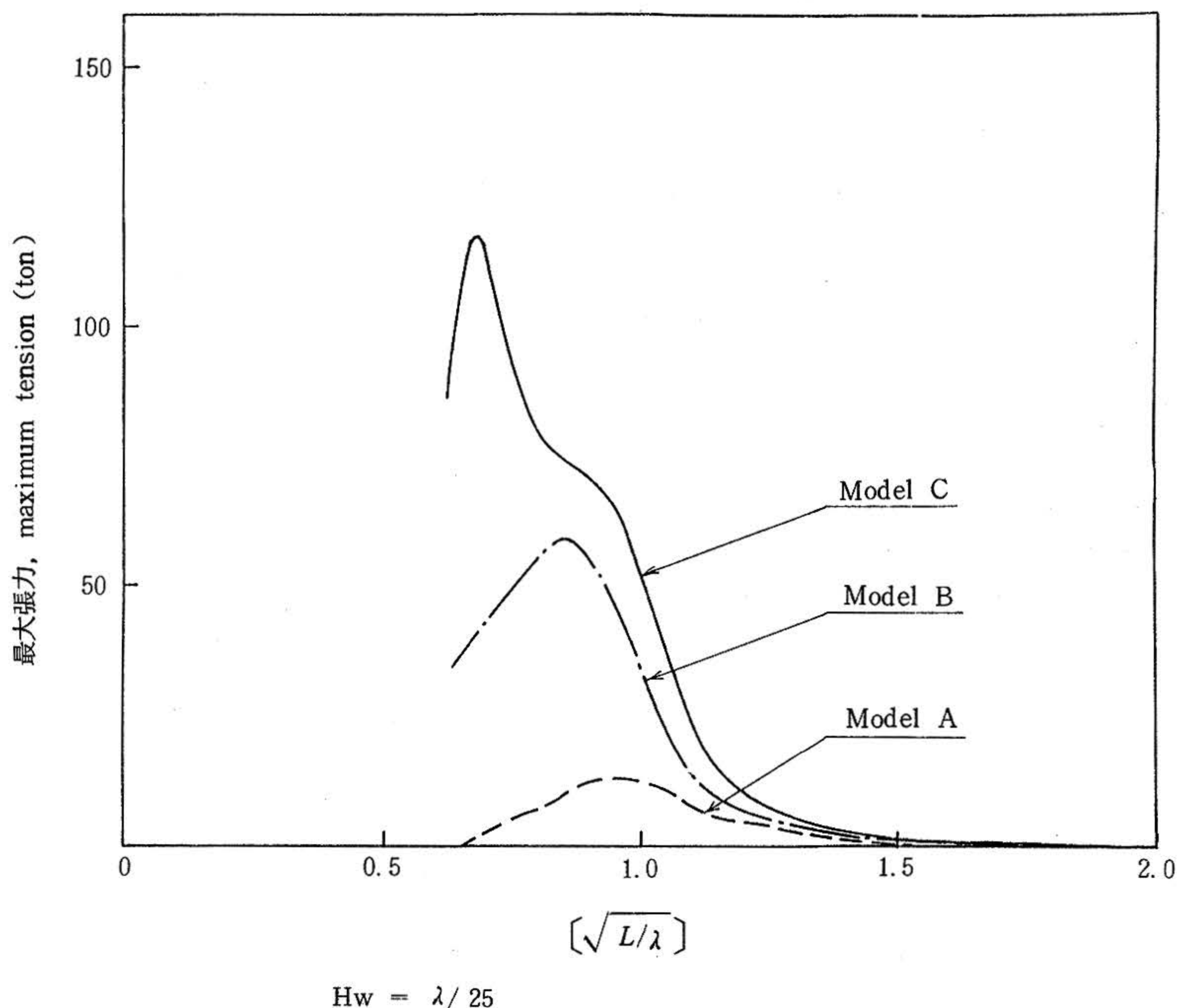


図12 船首係留ラインに働く張力（規制波中）
Maximum tension of bow mooring line on regular wave

の関係から、波周期 T は 10.5 sec が得られる。図 8 中の波傾斜 H_w/λ は $1/25$ であるが、前述の $\sqrt{L/\lambda} = 0.8$ よりも小さいところでは、造波機の関係から波傾斜は小さくなり、0.68では波傾斜が $1/35$ であった。このことから実海域の波高を推定すると、 H_w は 4.9 m となる。

波周期 10.5 sec, 波高 4.9 m は、日本海における

中型低気圧通過時、しばしば発生する波浪と言え、また波高はさらに高くなることもありえる。

以上の点を考え、係留力に関しては Model C の深底板付形状の場合は、現状の係留系を使用すると、日本海の波とマッチングし、大きな係留力が加わる。今後は底板構造の検討のみならず、底板と係留系とを合わせて検討する必要がある。

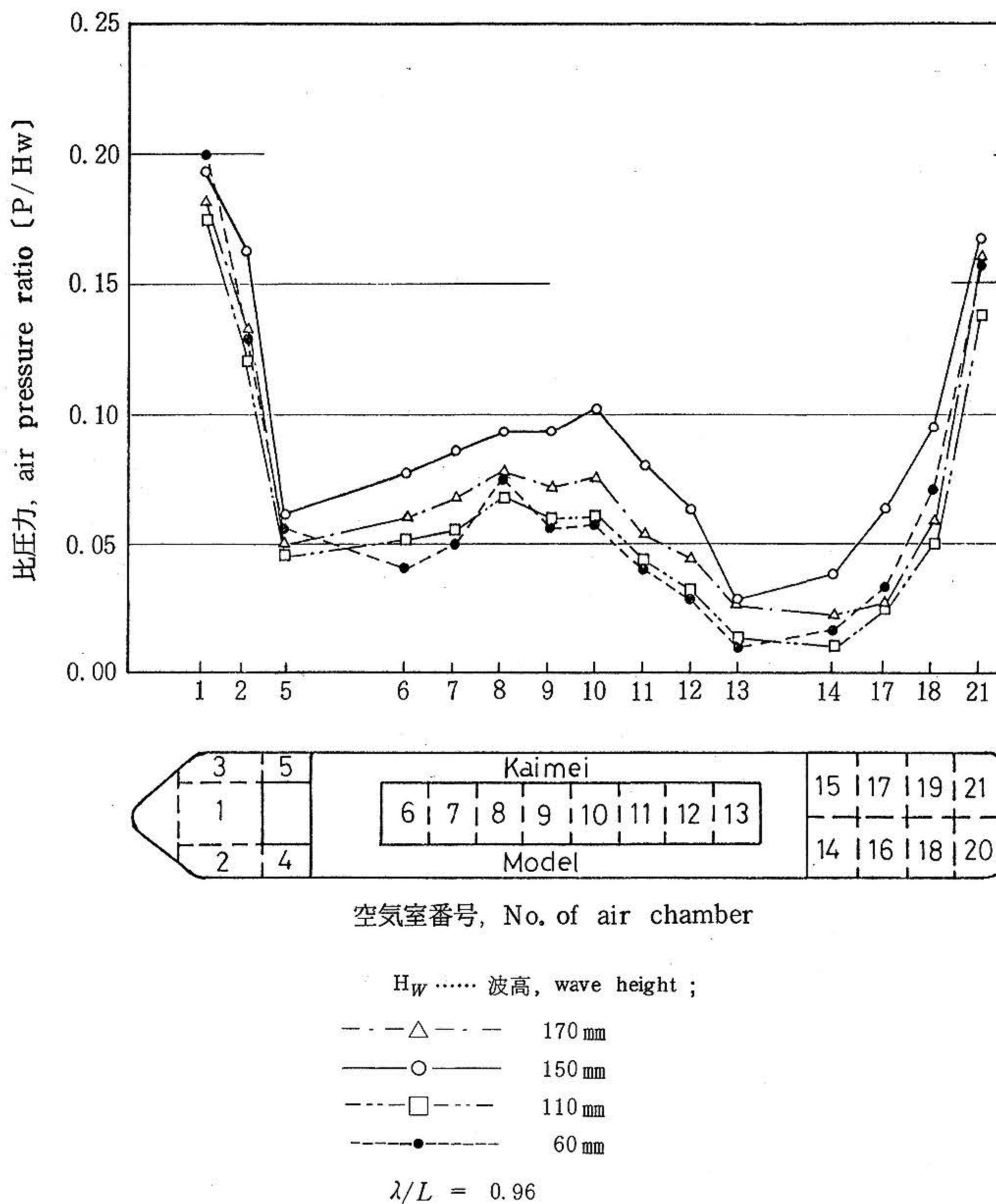


図13 Model Aの圧力分布特性

Distribution of air pressure of Model A-model ship

5.2.5. 空気出力

3種類の供試模型は、図1でわかるように、空気室の配置はすべて等しく、船首から船尾へ多数の空気室が配置されている。各空気室内の空気圧力は波および船体運動によって、それぞれ差が生じる。

一例として、図13には Model Aの圧力分布特

性を示す。このときの波条件は $\lambda/L = 0.96$ ，すなわち、ほぼ波長が船長と等しいときで、縦揺れ、上下揺れが小さい状態にあたる。横軸は空気室番号、縦軸は各空気室の圧力変動の振幅を水頭値で表わし、これを波高で除して無次元化するが、この値をここでは比圧力と呼ぶ。また、この図中では波長一定とし、波高だけを4種類変化させた波

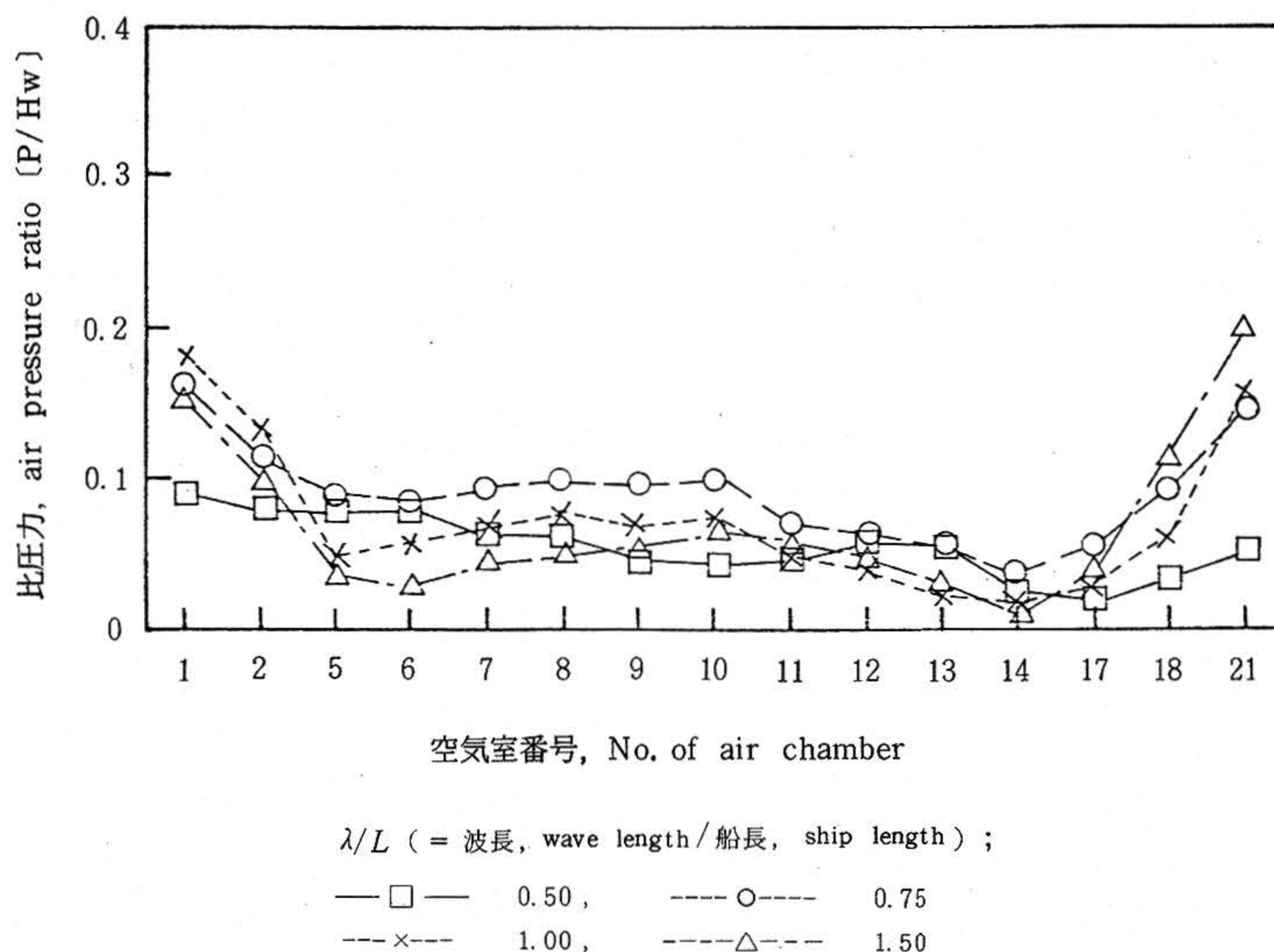


図14 Model Aの波長による比圧力分布の変化
Distribution of air pressure of Model A-model ship
on the wave length

高影響についても示す。

波条件が $\lambda/L = 0.96$ の場合、波高の大小にかかわらず、比圧力が高いのは船首部で、続いて船首部、中央部の順であり、空気室No.13および14付近が最も低い値を示した。波高を変化させると、前述したように、比圧力分布は変化しないが、比圧力の値が変化することがわかった。波高 150 mm (波傾斜 $1/21$) のとき、すべての空気室において、他の波高よりも比圧力が高かった。この原因については、いろいろ推定はされ、解析を試みたが、まだ解明されていない。

図14は Model Aの波長を変えたときの各空気室の圧力分布の変化の状況を示す。波長は λ/L で表わし、0.50, 0.75, 1.00 および 1.50 の4種類である。

0.5, すなわち、波長が船長の半分のとき、圧力分布は他に比べ、フラットな特性であり、船首部の比圧力が最も高いが全体に低い値を示している。さらに 1.00 に近づくと、すなわち、波長と船長が等しいとき、圧力分布はW文字型の分布を呈し、船首部に続いて船尾部の比圧力が高くなる。次に波長が長くなり、船長の 1.5 倍になると、圧力分布はW文字型分布を示すが、船首部よりむしろ船尾部の比圧力が高くなる。この傾向は波長が長くなればなるほど、顕著に表われてくることから、この原因は船体運動が主たる要因と考えられ、船体運動を加味した理論解析から空気圧力分布を求めると、図14に示した圧力分布が得られることが確認できた。

図15は Model C, 深底板付の波長による各空気

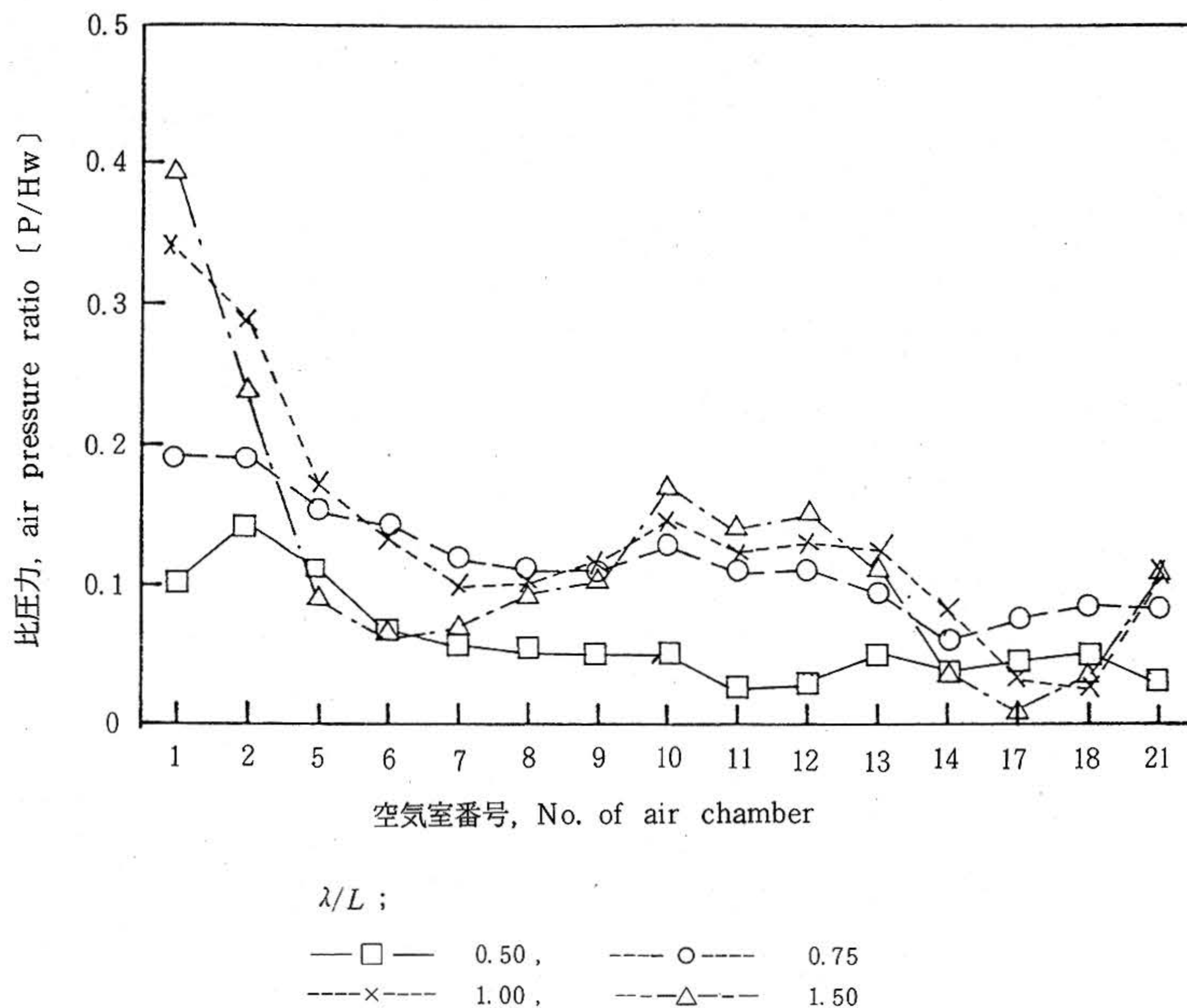


図15 Model C の波長による比圧力分布の変化
Distribution of air pressure of Model C-model ship on the wave length

室の圧力分布特性を示す。

λ/L が 0.50 の場合は, No.1 空気室よりも No.2 空気室の圧力が高く, No.5 以下はフラットな圧力分布を呈する。0.75 では船首部から順次圧力が減少しており, 1.00 では W 文字型分布が若干現われてくる。その傾向は Model A の底開きに比べて小さい。 λ/L が 1.50 に達すると, 船首部の圧力上昇は著しいが, 一方, No.14, 17, および 18 空気室では圧力は 0 に近づき, 空気出力はほとんど得られず, 発電に寄与しない空気室を持つことになる。

以上のように, Model A の底開きと Model C の

深底板付では, 圧力分布特性が大きく異なるため, 個々の模型の特性と, その原因を十分に把握する必要がある。

図16は3種類の模型の波エネルギーから空気エネルギーへの変換率の特性を比較して示す。横軸は無次元波長 λ/L で表わし, 縦軸は波エネルギーを入力し, 空気エネルギーを出力としたときの変換率として示す。

今, 単位幅あたりの入力波エネルギーは(1)式で与えられるが, ここで入力波エネルギーの幅を船長 L で規定し, (2)式を入力波エネルギーと定義する。

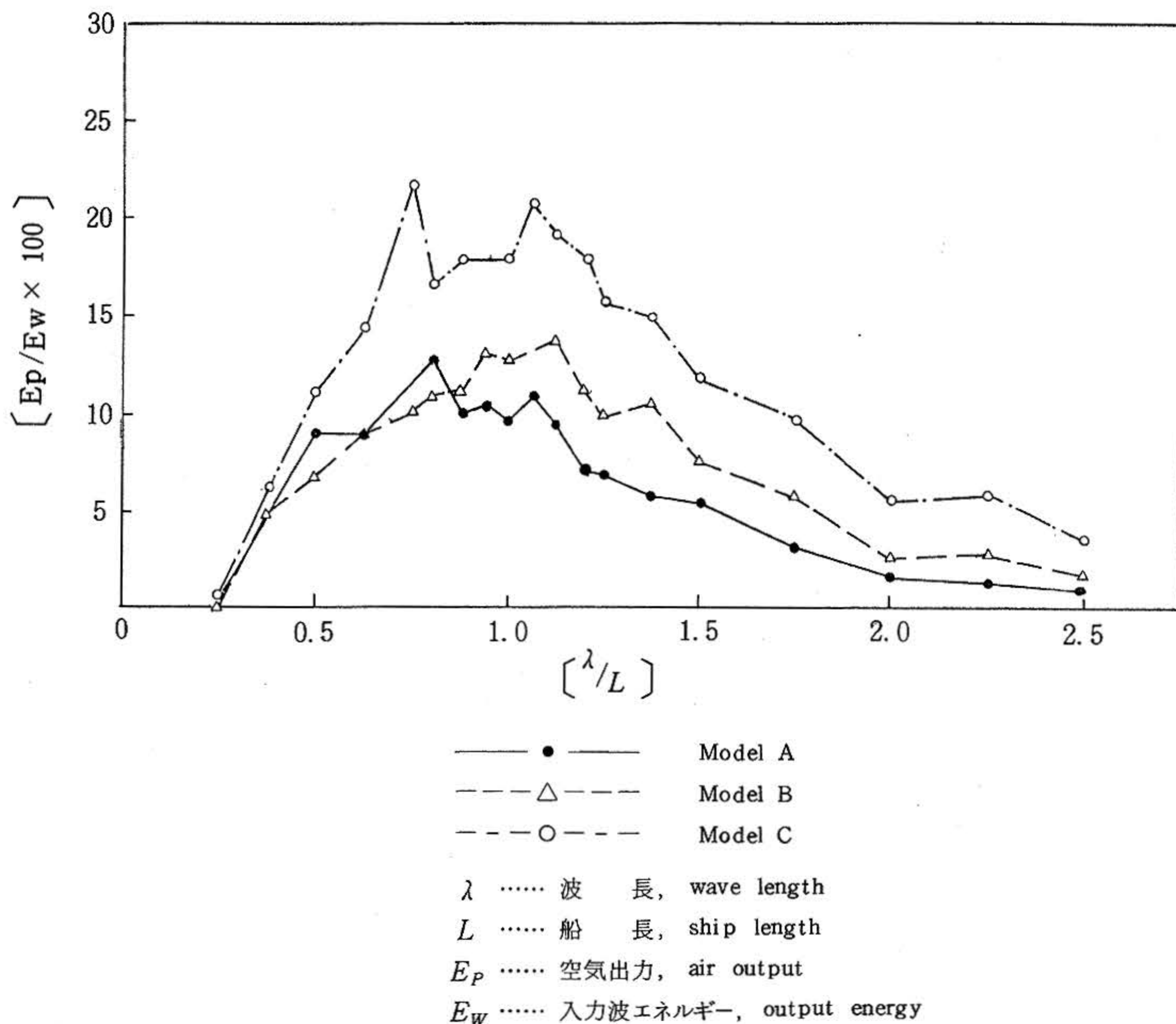


図16 3種類の模型の変換率特性の比較
Comparison of air output among 3 model-ship

すなわち,

$$E_{w0} \doteq H_w^2 T \text{ [kW/m]} \quad \text{.....(1)}$$

H_w ; 波高 (m)

T ; 波周期 (sec)

$$E_w \doteq H^2 T \cdot L \text{ [kW]} \quad \text{.....(2)}$$

L ; 船長 (m)

船長 L と同じ幅を通過する波エネルギーを入力と考え、本報告においては今後はすべて、この方式で変換率を取扱っていく。

空気出力 E_p は、(3)式で示すように、各空気室

のノズルを通過する空気エネルギーの平均値を合計した値であり、各空気室の出力は空気室内の圧力 P_n と ノズル面積 S を用いて(4)式から求まる。

$$E_p = \sum_n E_{p_n} \quad \text{.....(3)}$$

$$E_{p_n} = \frac{1}{102} \alpha S \sqrt{\frac{1}{\zeta_a}} p_n^{\frac{3}{2}} \text{ [kW]} \quad \text{.....(4)}$$

ζ_a ; 空気密度

ここで α はノズルの縮流係数であり、本実験では角穴ノズルを用いており、縮流係数 0.7 を用いて計算した。

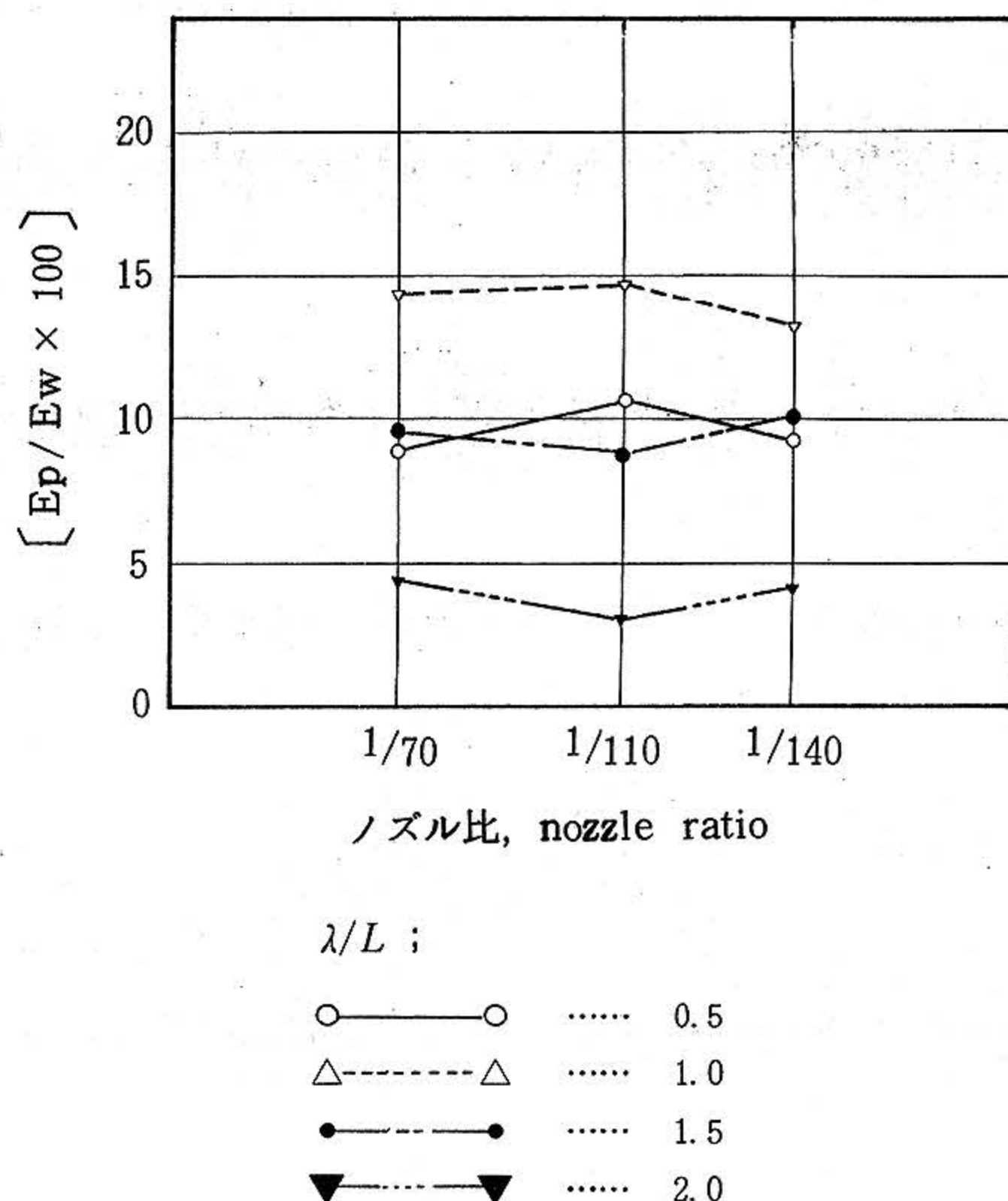


図17 Model Cのノズル比による変換率の影響
Effects of air output on nozzle ratio
of Model C-model ship

p_n は n 番目の空気室のエネルギー平均圧力であるが、実験では空気圧は正、負にサイン状に変化するため、エネルギー平均圧力として、振幅の 0.4 として使用した。

図16中の3種類の模型の変換率特性によると、Model Aの底開き（“海明”型）は最大値 12.8% を $\lambda/L = 0.8$ で得た。

Model Bの浅底板付は λ/L 0.85 以下の短波長側では、Model Aの変換率より小さいが、長波長側では高い値を示す。Model Cの深底板付はすべての波長領域において、Model A および Model B の変換率特性より大きく、特に Model Aの底開きと比較して、 λ/L が 1.0 以上の長波長側で変換率は 2～3 倍に上昇している。しかし λ/L が 0.5 以下の短波長側では、変換率の差はほとんど認められない。

以上のことから、底板付の場合は、長波長側で変換率が大幅に上昇することから、海象とマッチングさせれば、きわめて利用価値が高い。底板付の効果は、前述したように、船体運動を抑制し、変換率向上に貢献しているが、変換率向上の程度から考え、運動の抑制による変換率向上以外に、他の要素、すなわち、空気室の固有振動数が長波長側に移行した等が推定される。

図17は Model Cにおいて、空気室上部のノズルを取換えたときの変換率への影響について示す。

ノズルは3種類で、それぞれ $1/70$ 、 $1/110$ 、 $1/140$ のノズル比であり、図中には代表的な波長4種類について示す。

結果は実際に使用した $1/70 \sim 1/140$ の範囲のノズル比では変換率に及ぼす影響はほとんどないと結論できる。しかし、実際に、このデータをタービ

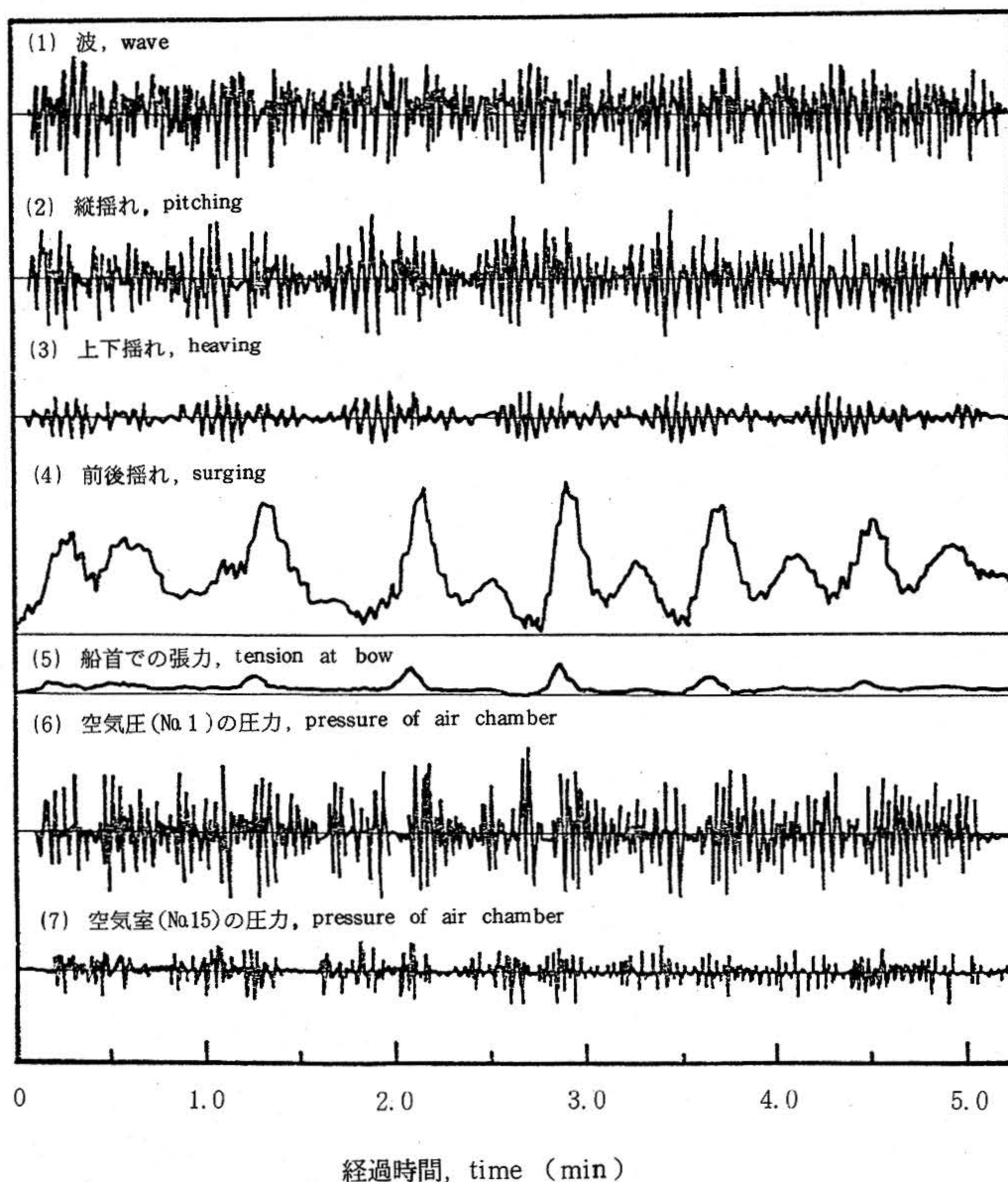


図18 Model Cの不規則波中における応答記録例

An example of measured data of Model C-model ship
from irregular wave

ンへ応用する場合には、 $1/140$ ノズル比を使用すべきである。それは $1/70$ に比べて $1/140$ は、空気流量面積が小さいことを意味しており、タービンを小型化できる優位性を有している理由による。

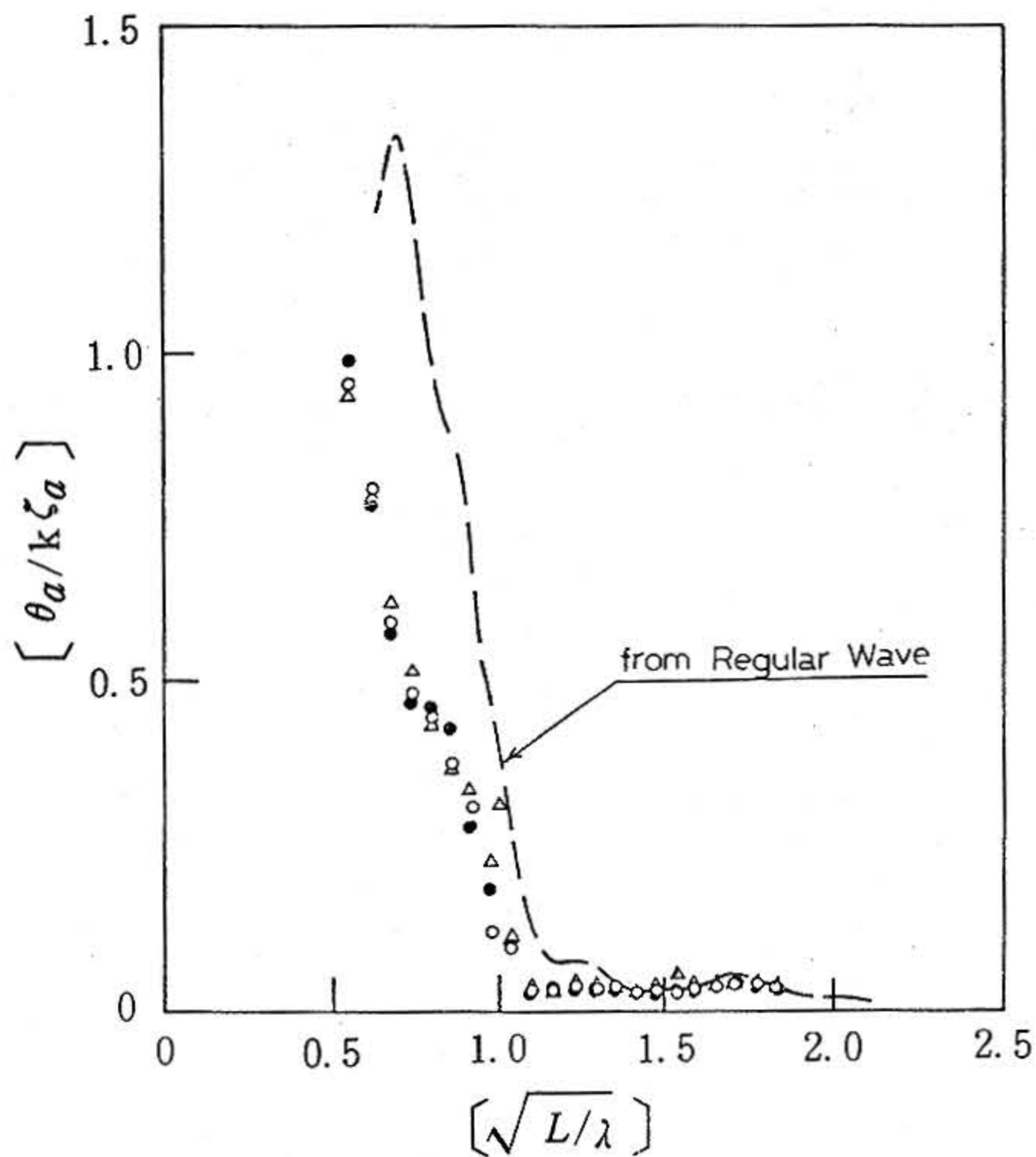
5.3. 不規則波中における実験

不規則波中の実験は規則波中の実験と同様の係留条件で、3種類の模型について実施した。

水槽で発生させた波は、図3に示すような波スペクトルであり、有義波高値を変化させて実験した。図18は水槽実験時のデータレコーダに記録された例を示す。

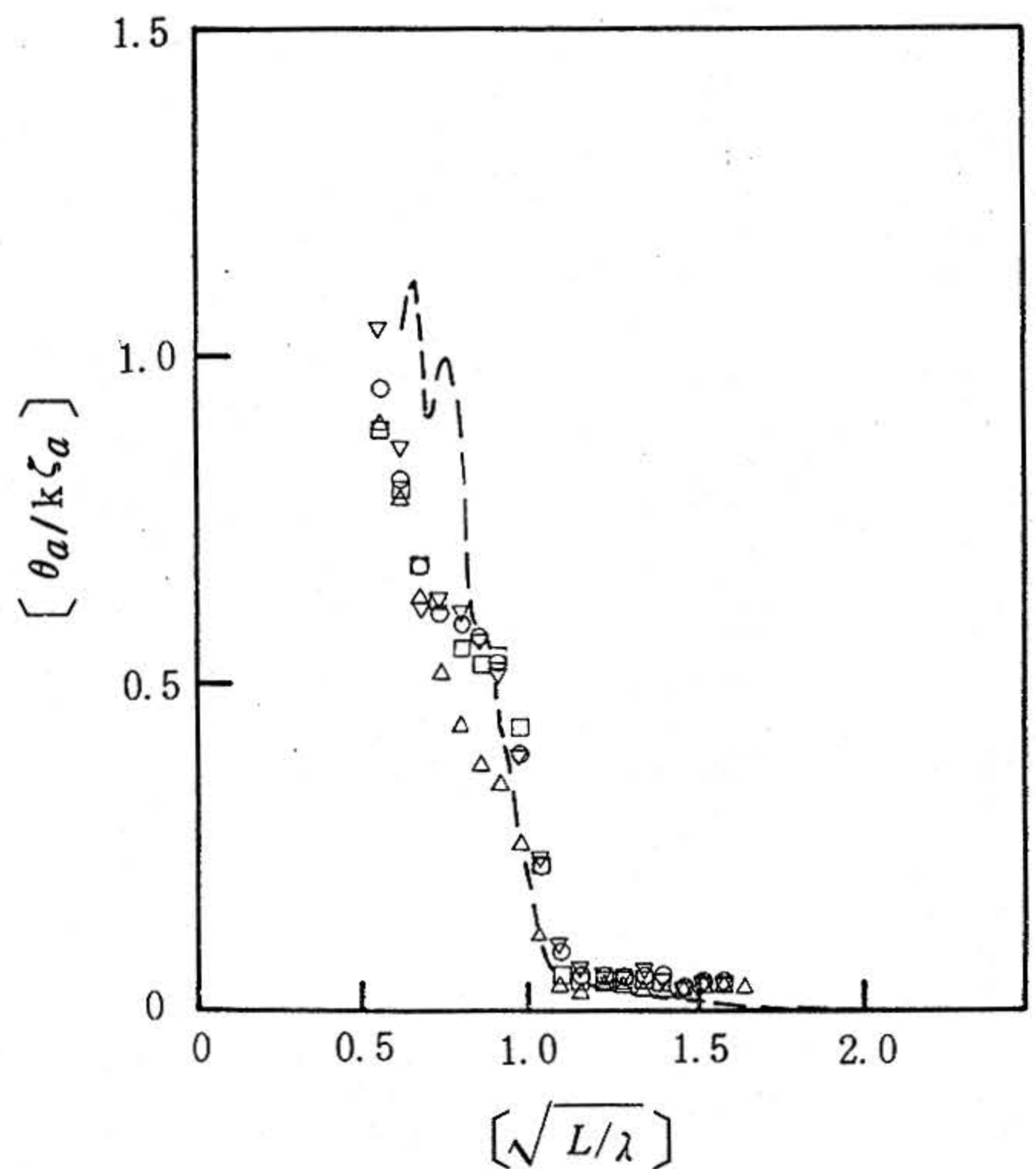
5.3.1. 縦揺れ応答

図19は Model A 底開きの不規則波中の縦揺れ応答を統計処理して求め、規則波中の応答と比較



$\zeta \omega^{1/3}$;
 $\triangle$ 4.02 m, $\circ$ 3.22 m
 $\bullet$ 2.38 m

図19 Model Aの規則波と不規則波による
縦揺れ応答特性例
Comparison of pitching of Model A-
model ship between regular and
irregular wave



$\zeta \omega^{1/3}$;
 $\triangle$ 4.00 m, $\square$ 3.26 m
 $\circ$ 2.64 m, ∇ 2.06 m
 ----- 規則波, regular wave

図20 Model Cの規則波と不規則波による
縦揺れ応答特性の比較
Comparison of pitching of
Model C-model ship between
regular and irregular wave

して示す。また、図20は Model C 深底板付の縦揺れ応答特性を示す。

いずれの実験も、有義波高値を3～4点変化させて実施した。

図19および図20では、不規則波と規則波中における縦揺れがよく一致しており、また有義波高値を変えても、その特性は大きく変化することがないことから考え、通常、一般船舶で適用してい

る線型積重ねが成立つと考えることができる。

図21によって、有義波高値に対する縦揺れ角の有義値を調べてみると、縦揺れ角は Model A, B, Cの順に小さくなり、さらに、それぞれ原点を通る直線上に乗ることから、縦揺れ角は有義波高値に比例して増大することがわかる。

5.3.2. 上下揺れ応答

図22および図23は Model A 底開きおよび

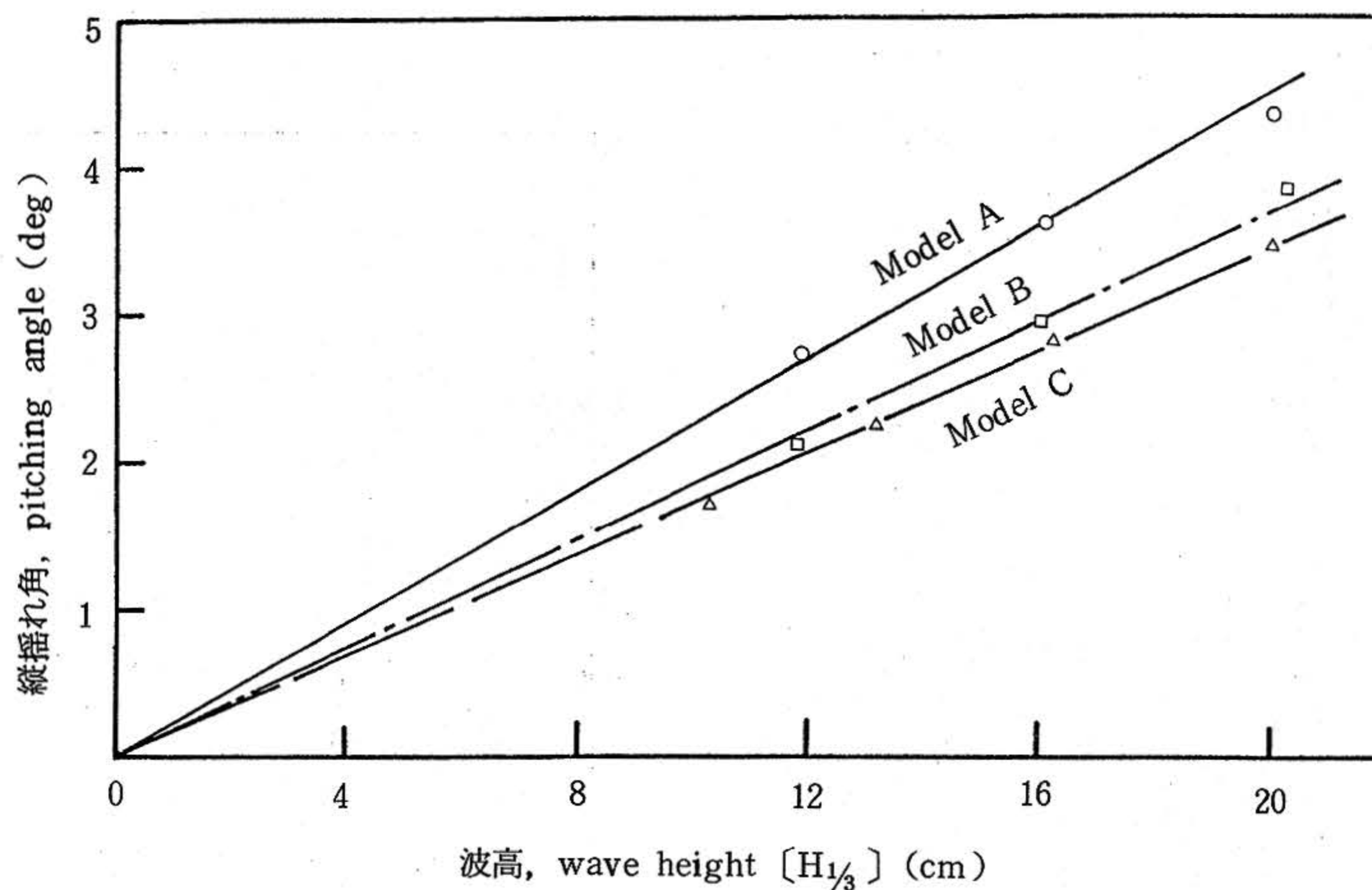
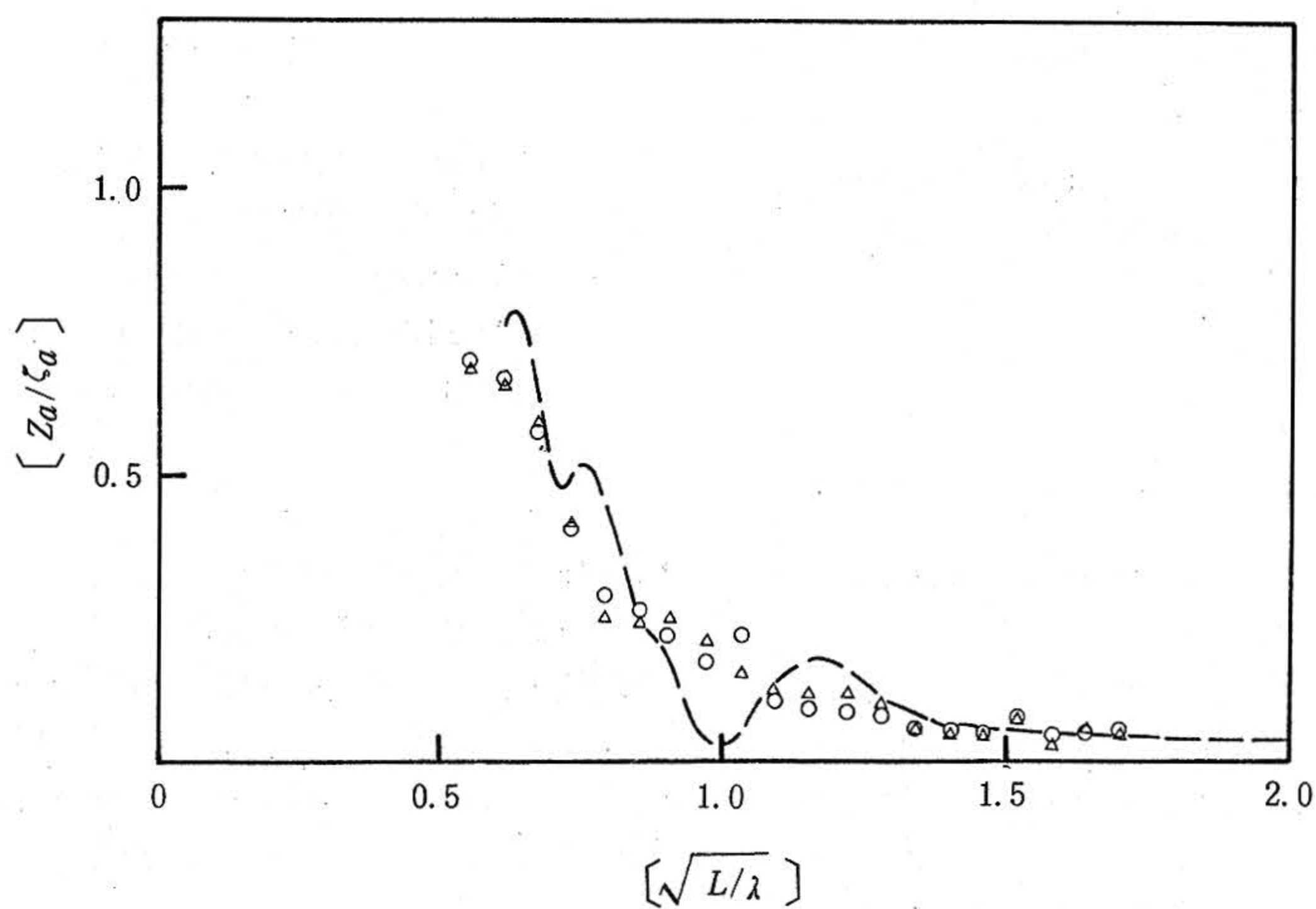


図21 3種類の模型の不規則波の縦揺れ角の比較

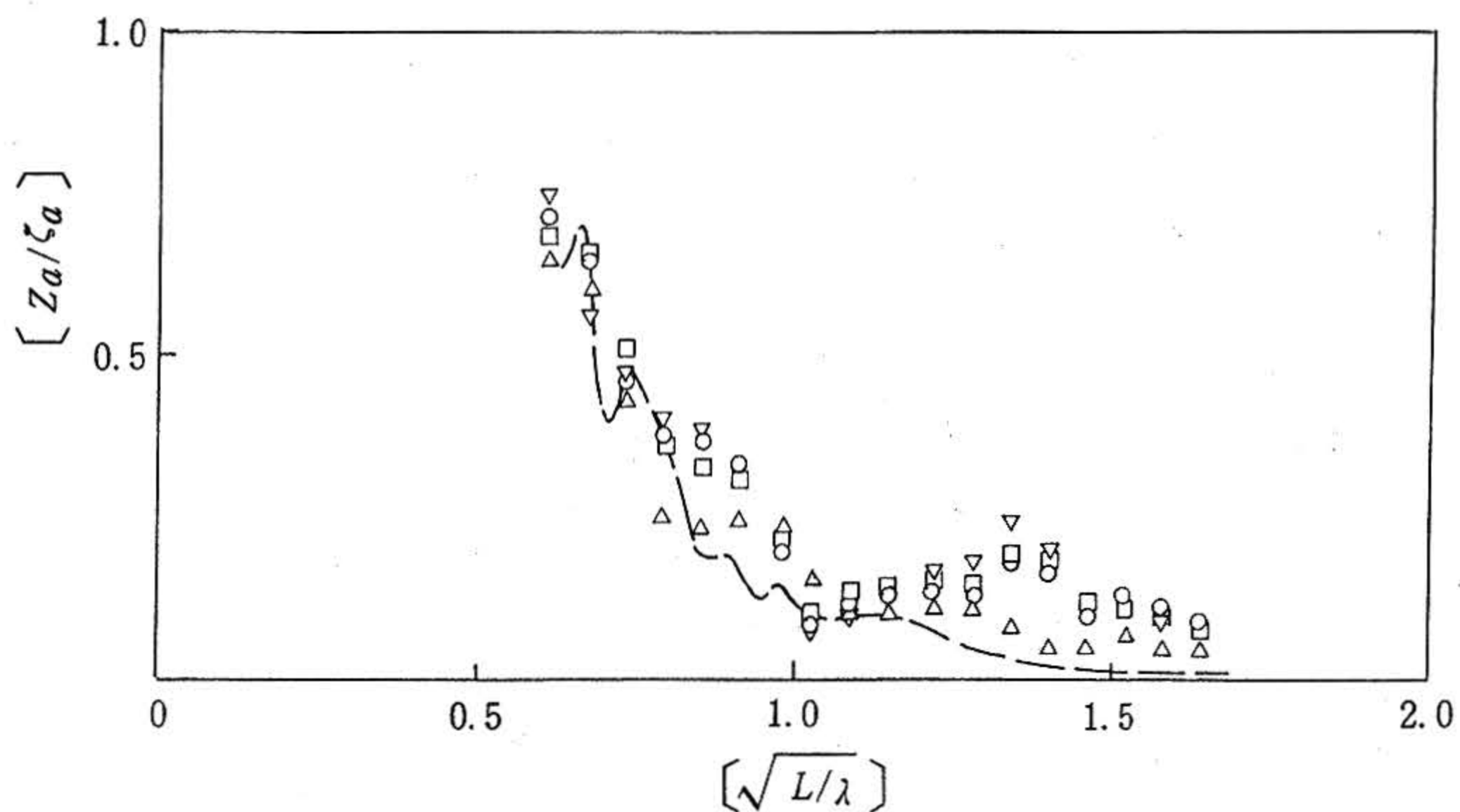
Comparison of pitching angle of 3 model ships from irregular wave



$\zeta \omega_{1/3}$; $\triangle$ 4.02 m $\circ$ 3.22 m - - - - 規則波, regular wave

図22 Model Aの不規則波中の上下揺れ応答特性

Heaving of Model A-model ship from irregular wave



$\zeta\omega^{1/3}$;

△ 4.00 m, □ 3.26 m, ○ 2.64 m, ▽ 2.06 m

----- 規則波, regular wave

Model C 海明 1/20 スケール 新底板付模型

1/20 scale model-ship of "KAIMEI" with bottom plate

図23 Model C の不規則波中の上下揺れ応答特性

Heaving of Model C-model ship from irregular wave

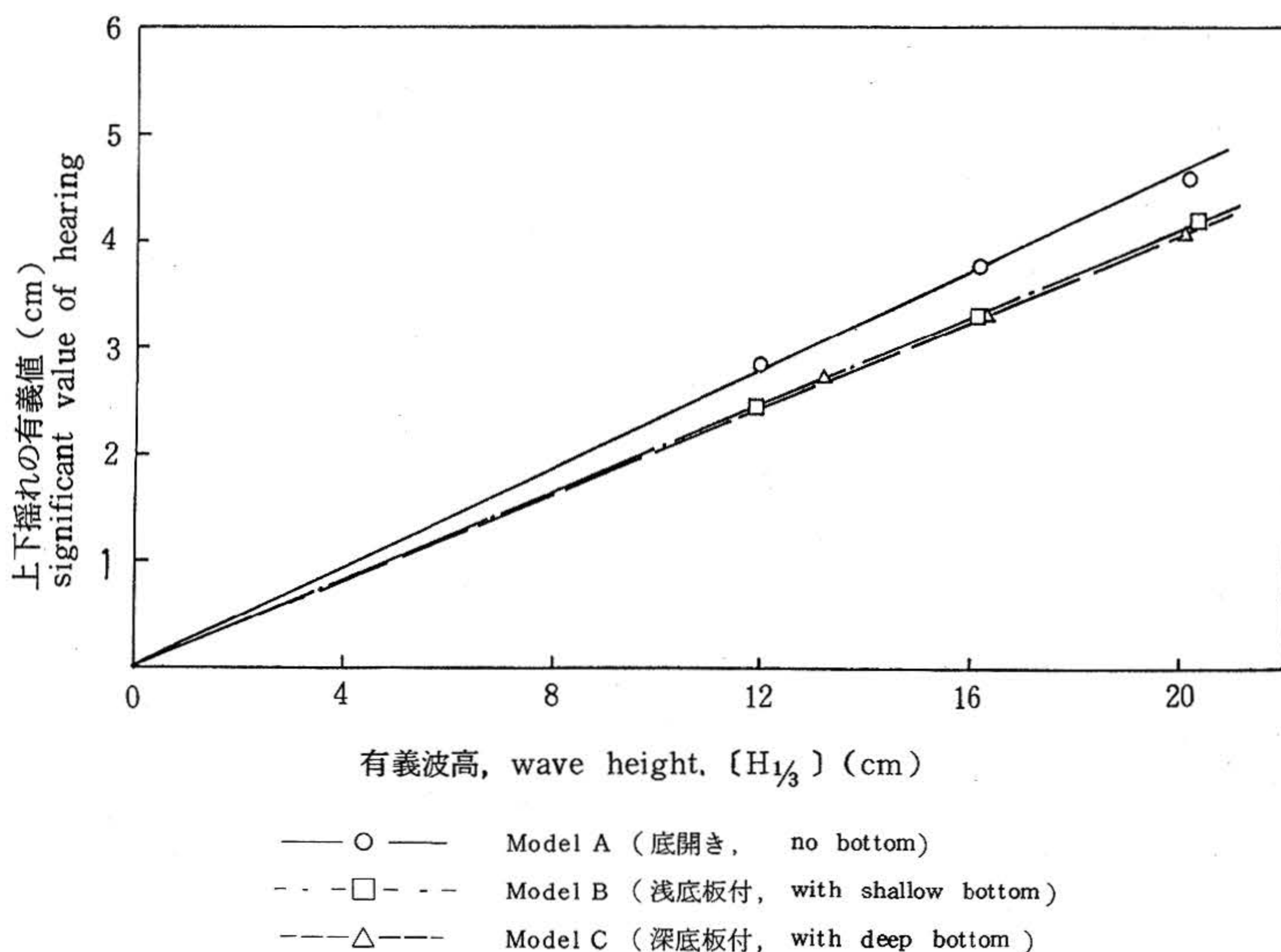


図24 3種類の模型の不規則波中の上下揺れの比較

Comparison of heaving among 3 model ships from irregular wave

Model C 深底板付の不規則波中の上下揺れ応答を示す。

図23は、Model C の特性を示し、 $\sqrt{L/\lambda}$ が1.3以上になると、有義波高値がバラッキ、規則波特性との差が生じている。

これを図3の波スペクトルを見ると、 $\sqrt{L/\lambda}$ が1.3に相当するところから短周期側では、波エネルギー密度が他に比べ小さいため、誤差を多く含んでしまうため生ずるバラッキと思われる。

この点を考慮すると、Model A, Model B 共に、規則波中と不規則波中の上下揺れ応答は一致していると結論できる。

図24では有義波高値に対する上下揺れの有義値を取り、3模型の比較をすると、Model B およびCの底板付の傾向はほぼ一致し、Model A の底開きよりも小さい値を示す。また、いずれの模型の特性も、原点を通る直線で表わすことができることから、上下揺れは縦揺れ同様に波高に比例して増加する。この性質は規則波中でも同じ傾向を示すことはさきに述べたとおりである。

5.3.3. 前後揺れ応答

不規則波中の前後揺れは、図18の記録例でわかるように、波に応答して揺れる細かい周期波と係留ラインの復元力の関係で大きく前後揺れする長い周期とが一般に含まれる。

図25は不規則波中の前後揺れ周期を実機に換算して示す。

この図によれば3種類の模型のすべてに82.5 sec と180.0 sec 付近に固有な周期が存在することが確認された。このほか、有義波高値が小さいときにのみ解析に表われる約10min の周期があるようだが、本実験の精度から考え、あまり信頼性がない。

図26は前後揺れの挙動量を有義波高別に示す。

縦軸は挙動量を船長で無次元化してある。この図の表示方式では、前後揺れの平均値を基準に平均変動と最大変位を重ねて表わした。

前後挙動量の最も大きい模型はModel C の深底板付で、有義波高が4.0 m のとき、船長の25%に達している。

実海域の有義波高は大時代時6.0 m以上に達することから考え、底板付船体の場合、前後揺れによって送電線等への影響は相当大きいものと予想され、今後の検討項目に含める必要がある。

5.3.4. 係留力

図27は不規則波中における船首係留ラインに働く張力、すなわち、係留力を示す。

係留力は規則波中における変化よりも、さらに複雑に変化するため、最大値、最小値、平均変動に区別して求めた。これらの値の中で、最も重要な値は最大値であり、最大値に対して係留用鎖の強度および錨の把駐力に関係がある。

Model A 底開きは、有義波高が2.0, 3.0, 4.0 m と高くなるにつれ、最大値は所々に増す。Model C 深底板付では、最大値の増加は他に比べ大きく、特にModel A と比較すると、増加量は極端であり、安全上、再考すべきである。

5.3.5. 空気出力

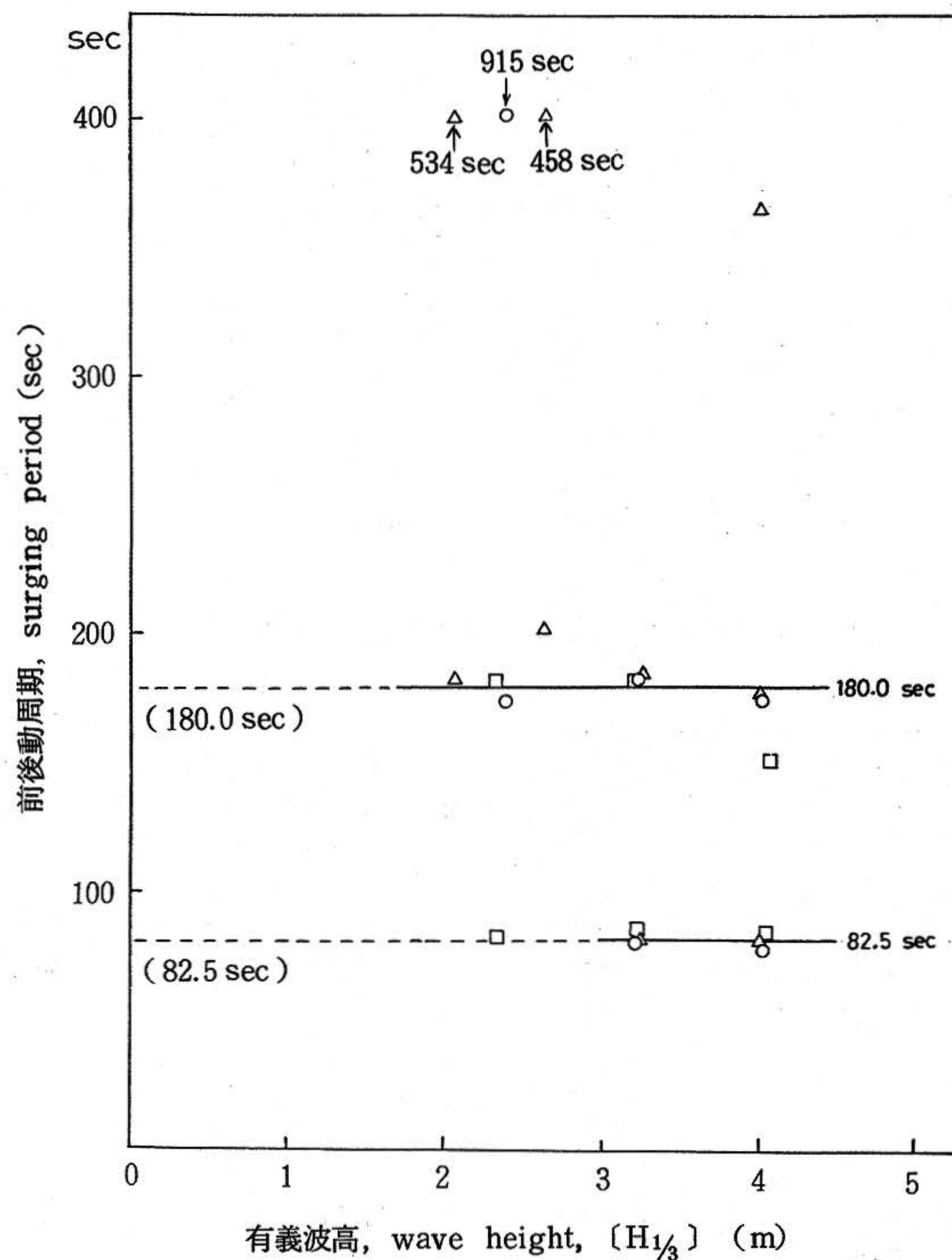
不規則波中の空気出力は、複雑に変化し、解析に多くの時間が必要なため、ここでは、船首部No.1 と船尾部No.21の空気室の統計処理によって、特性を明らかにする。

図28および図29にはNo.1 およびNo.21の空気室の有義波高に対する有義空気圧力の特性を3種類の模型を比較して示す。

図28によれば、船首部の空気室で、有義空気圧の高い順番はModel C, B, A の順である。また、図29の船尾部の空気室では、逆にModel A, B, C の順となり、底開き構造が最も良い結果を得た。それぞれの測定点を結んだ直線はNo.1 室では横軸の2.5および4.0を切り、一方、No.21 室では3.0と6.0となった。

船尾部の空気室は、波高がある程度高くなるまで空気圧の発生がなく、また、底板は空気圧発生を阻害していると言える。同じ結果が、前述の規則波中の実験によって得られているので、規則波中の実験は不規則波中の特性をよく表わしていると結論できる。

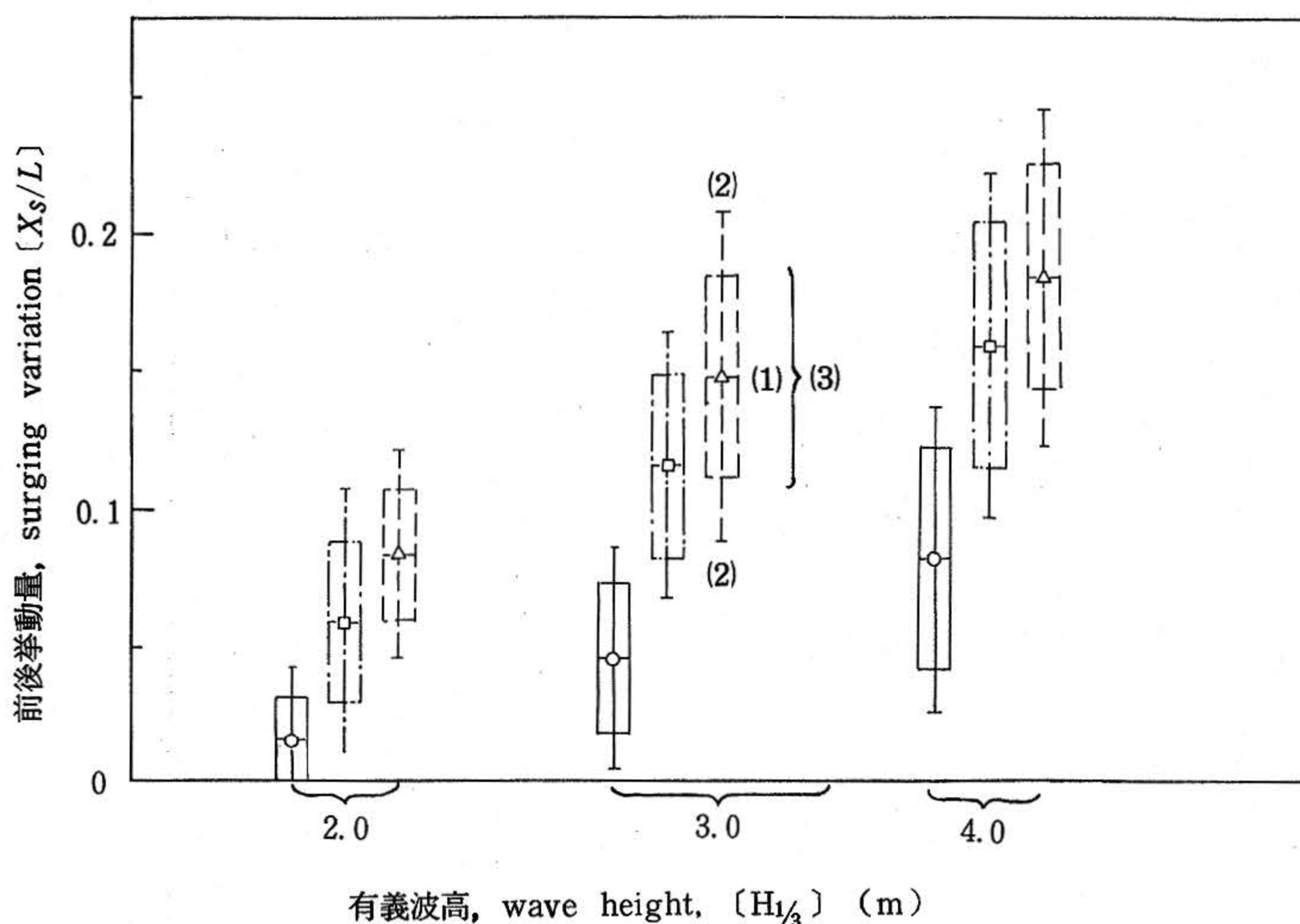
また特に注意しなければならない問題として、有義波高の増加に対して、有義空気圧力の増加が



- Model A (底開き, no bottom)
- △ Model B (浅底板付, with shallow bottom)
- Model C (深底板付, with deep bottom)

図25 不規則波中の前後動周期

Comparison of surging period of
3 model-ships from irregular wave



- Model A (底開き, no bottom) (1) 平均値, average value
 □ Model B (浅底板付, with shallow bottom) (2) 平均変動, mean variation
 △ Model C (深底板付, with deep bottom) (3) 最大変位, maximum deviation

図26 3種類の模型の不規則波中の前後動
 Comparison of surging variation among 3 model ships from irregular wave

一次式の関係にある点で、今、(1)式および(4)式から、波エネルギーは波高の2乗に比例して増加するが、空気エネルギーは空気圧の3/2乗に比例する点である。もし波エネルギーから空気エネルギーへの変換率が、ある波スペクトルのもとで一定であるならば、有義波高と有義空気圧力の関係は一次式にはなり得ない。

以上の点で図28および図29の結果に対するデータ解析を、今後も充分注意深く続ける必要がある。

6. 結 言

底板による空気出力向上に関する模型実験で解明した点を列挙する。

(1) 静水中の傾斜試験の結果、Model C 深底

板付は Model A の海明型に比べて安定性がきわめて悪い。

そのため、実海域実験では不安があるため、浮力室の配置の検討が必要である。

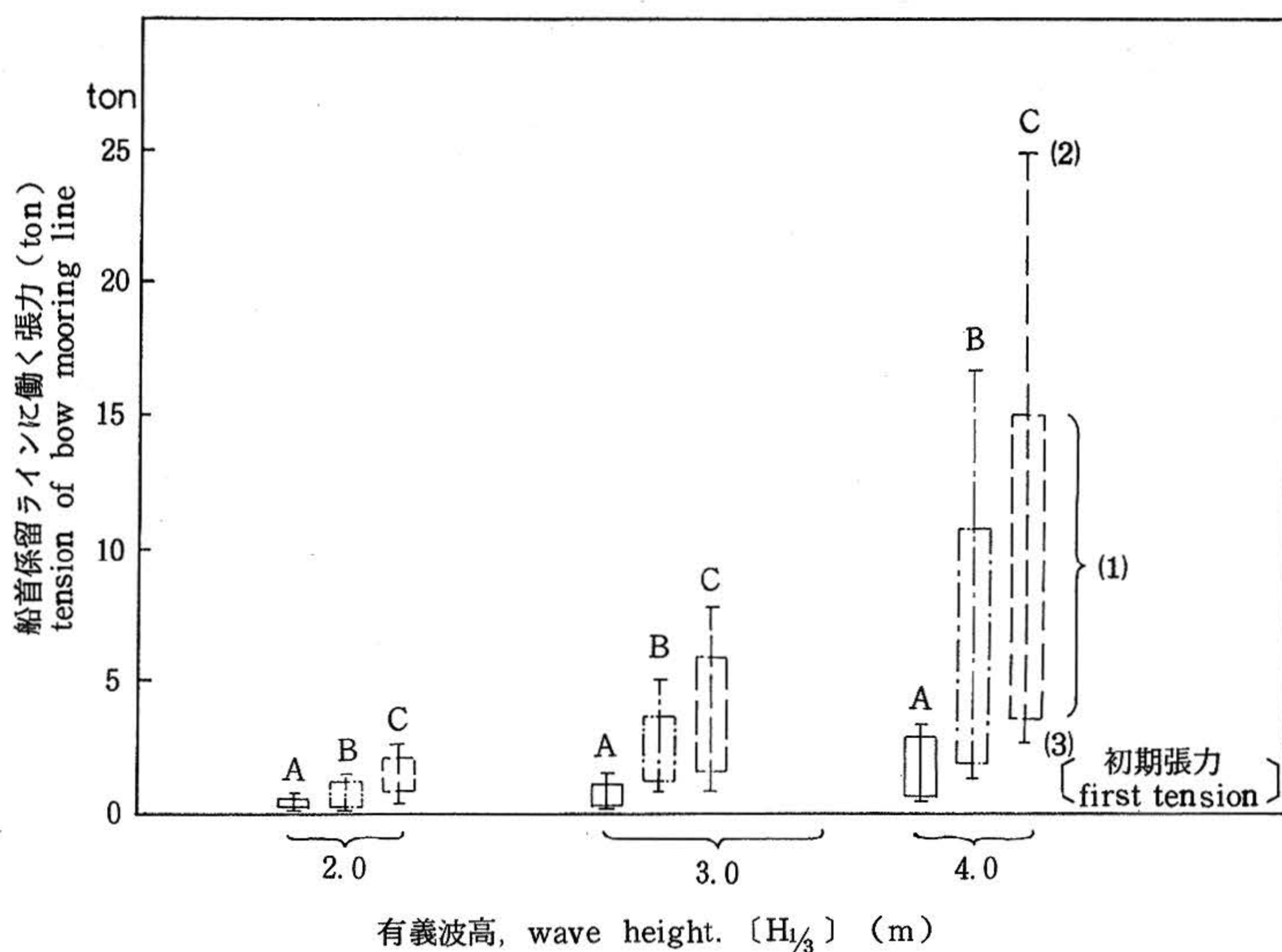
(2) 底板が縦揺れに及ぼす影響は、船体の縦揺れを抑制する。

抑制の程度は底開き（海明型）に比べて船長を約10%短くしたときの揺れと一致する。

(3) 上下揺れに関し、底板は抑制する効果はあるが、その差はあまり顕著に表われてない。

(4) 縦揺れ、上下揺れ共に、同じ波長の場合には波高に比例して増加し、その比は一定である。

(5) 前後揺れに関して、Model A（“海明”型）は他に比べて変動量が最も大きい。



- A Model A (底開き, no bottom) (1) 平均変動, mean variation
 B Model B (浅底板付, with shallow bottom) (2) 最大値, maximum deviation
 C Model C (深底板付, with deep bottom) (3) 最小値, minimum deviation

図27 不規則波中で船首係留ラインに働く張力

Comparison of tension of bow mooring-line on irregular wave among 3 model ships

これは係留ラインのばね定数が小さいところで運動していることに原因がある。

(6) 係留力に関して、底板付の模型は全般に大きい。

特に Model C 深底板付の最大係留力は極端に大きく、“海明”用係留鎖および錨を使用しても安全とは断言できない。

(7) 底板付模型は底開きに比べて波エネルギー変換率は大きく向上し、特に Model C は Model A に比べて長波長側で2～3倍向上できた。

(8) 各空気室圧力を波高で除した比圧力は、同じ波長でも、波傾斜によって異なるため、比圧力で性能の比較する場合は注意が必要である。

(9) 模型の構造によって、各空気室の圧力分布

特性は大きく異なるため、模型個々の圧力分布特性を十分に把握する必要がある。

(10) 比圧力（発電出力）の最も高い空気室は、底開き（“海明”型）の場合には、波長が短いときは船首空気室であり、長波長では船尾空気室に移る。しかし、底板付の場合は常に船首空気室が最高値を呈する。

(11) Model C のノズル比を $1/70 \sim 1/140$ の範囲で変化させたが、エネルギー変換率の差は特に認められなかった。

(12) 不規則波中の縦揺れ、上下揺れ応答は、規則波中の値とよく一致しており、線型積重ねがなりたつ。

(13) 不規則波中の Model C の前後挙動量は大き

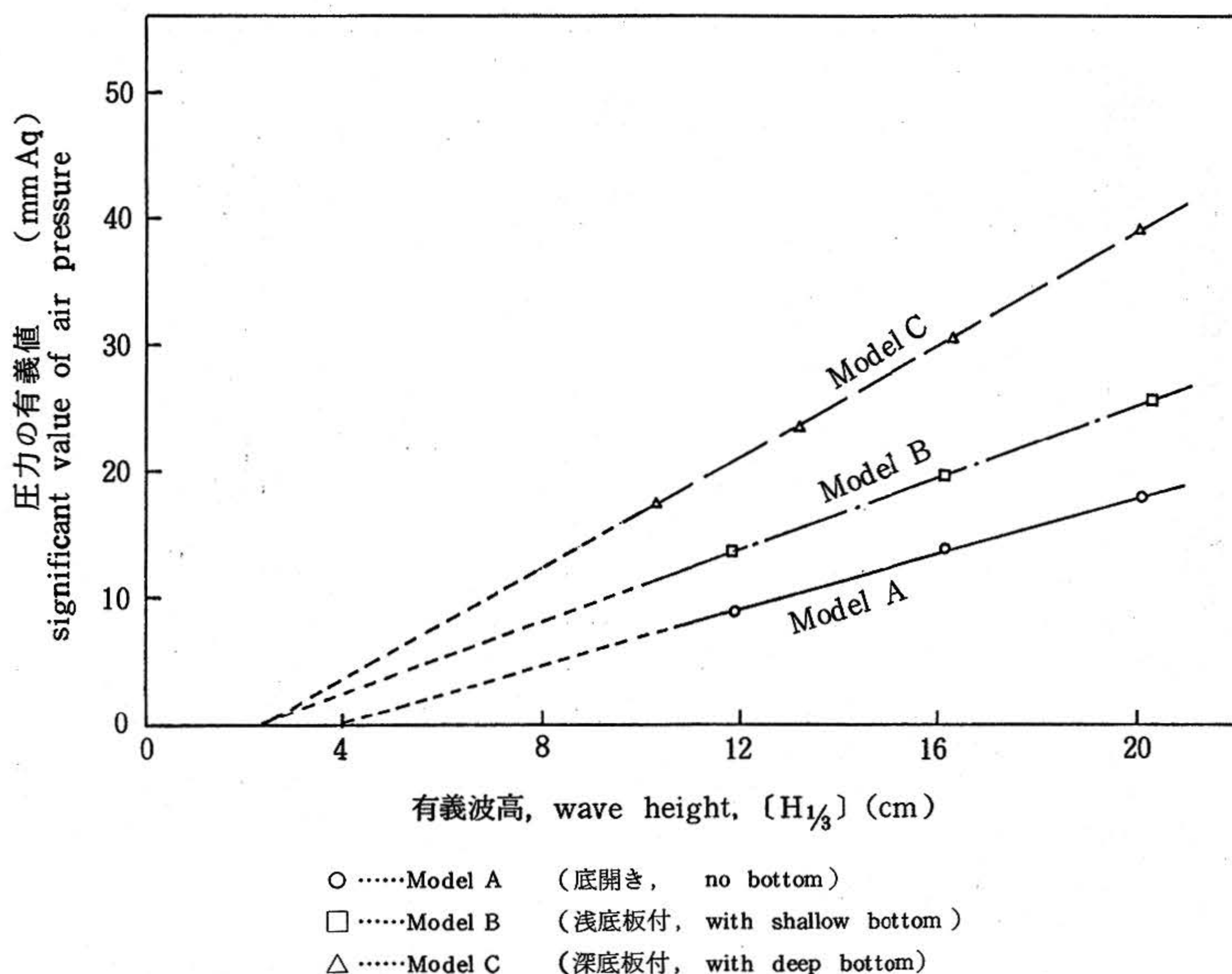


図28 No. 1 室内の空気圧力の有義値の比較

Comparison of significant value of air pressure in No. 1 air chamber among 3 model ships

く、船長の25%にまで達した。

また、前後動の固有周期は82.5secと180.0secに存在し、これが一般に呼ぶスロードリフト周期であり、係留力に大きな影響を与えるであろう。

(14) 不規則波中の係留力に関し、Model Cの有義波高に対する最大値の増加は極端に大きく、安全性上、問題が残る。

今後、係留力の増加の少ない底板構造を検討すべきである。

(15) 不規則波中の空気圧力特性は、規則波中の特性とよく一致する。

(16) 本実験では有義波高の増加に対して空気圧力の増加が一次式の関係にあった。

理論と差が生じている点は検討する必要がある。

以上のように底板付模型の出力向上は、予想通り達成することができた。しかし、出力向上に大

きく貢献したのは船首部のNo. 1 およびNo. 2 の空気室であり、逆に船尾部では波長が船長よりも長くなると、底板の効果は全く認められず、むしろ、出力向上の妨げとなっている。さらに、現状の底板構造では、係留力の増加を伴うため、できるだけ係留力の増加しない底板構造、例えば、底板の深さ、大きさ、配置、船体一部だけ底板構造等、係留系と合せて検討する必要がある。

本論文をまとめるにあたり、水槽実験からデータ解析まで幅広くご指導いただいた船舶技術研究所、安藤定雄室長、貴重な助言をいただいた海洋科学技術センター益田善雄研究主幹および水槽実験に協力いただいた続辰之介研究員に感謝の意を表します。

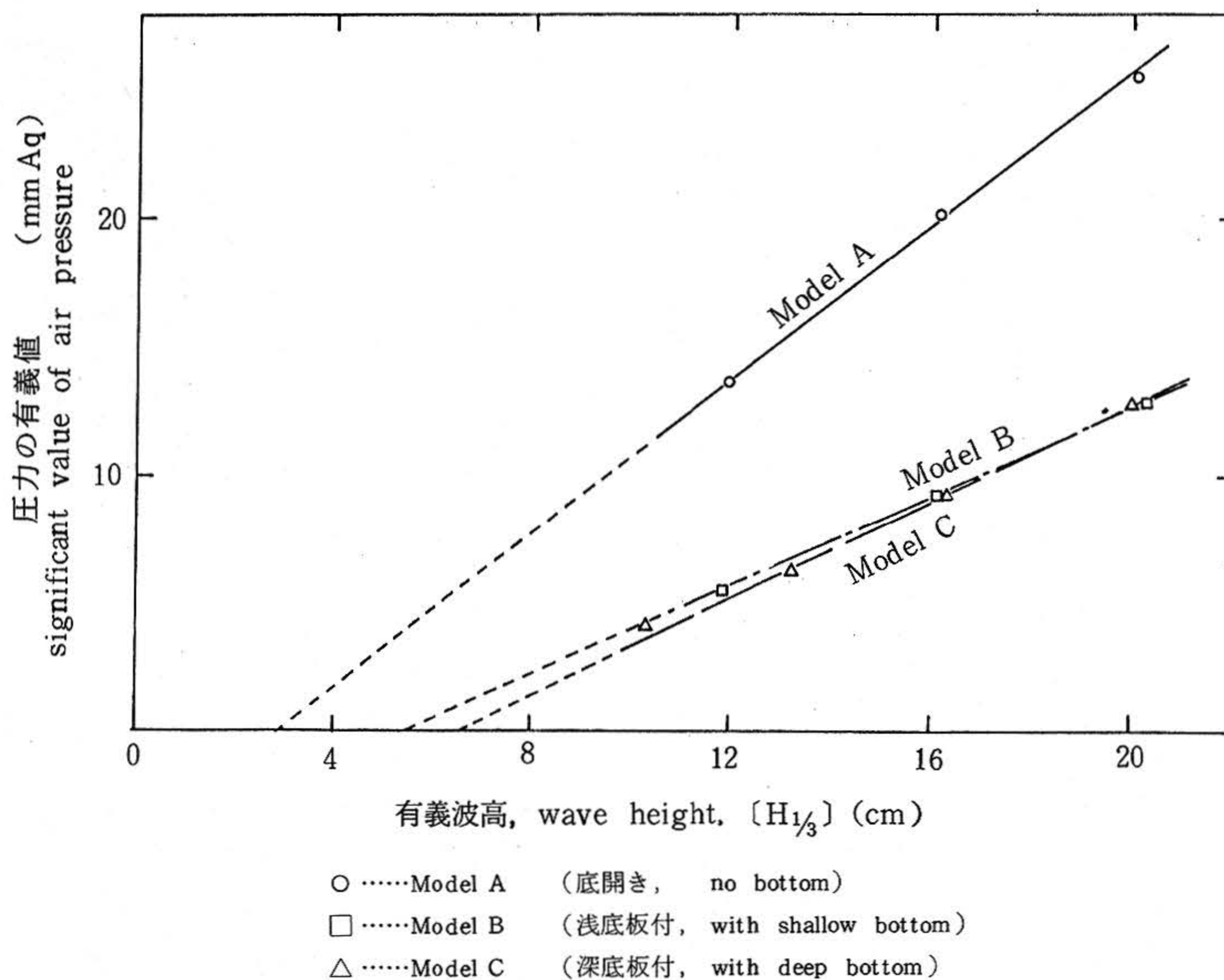


図29 No.21空気室の空気圧力の有義値の比較

Comparison of significant value of air pressure of No.21 air chamber among 3 model ships

文献

- 1) Meir, R. "The development of the oscillating water column", Wave Energy Conference (1978), p. 35-44 Heathrow, London.
- 2) 宮崎武晃, 益田善雄, 安藤定雄, 1978, "消波発電装置の係留に関する水槽実験"

JAMSTECTR (2), 35-44

- 3) Miyazaki, T., Masuda, Y., "Test on the Wave Power Generator Kaimei OTC 3689 (1980) p.101-112
- 4) "波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告" (1981), 海洋科学技術センター