

ターミネーター型波浪エネルギー 利用装置に関する研究

鷺尾 幸久^{*1} 堀田 平^{*1} 宮崎 武晃^{*1}

波浪エネルギーを利用するためには、波浪エネルギーをまず何等かの物体の力学的エネルギーに変換しなくてはならない。海洋科学技術センターでは、振動水柱型波浪エネルギー利用装置の研究開発を行っており、これまでの研究より、浮体式のターミネーター型装置がエネルギー吸収及び利用の両面から将来実用化する上で最も優れた装置になるものと期待している。しかし、三次元的に不規則性を呈する実海域の波浪中で、その特性を発揮できるかどうかこれまで明白にされていない。このため、実海域波浪を再現した多方向不規則波浪中における特性について検討することとし、その第一段階として、三次元効果を期待できる平面水槽において、一方向波浪中における波入射角度の影響に関する実験を実施した。

その結果

- 1) この装置は、一方向波浪中において、最適空気室間隔が存在する。
- 2) 制振ひれを付けることにより、波浪エネルギー吸収効率は、向上する。
- 3) 装置の周囲が開放された状態であると、三次元効果により波浪エネルギー吸収効率は、向上する。
- 4) 一方向斜め波中での波浪エネルギー吸収効率は、向い波中に比べ向上することなどが確認された。

キーワード：波力発電装置

A Study on the Floating Terminator Type Wave Power Device

Yukihisa WASHIO^{*2} Hitoshi HOTTA^{*2} Takeaki MIYAZAKI^{*2}

Wave energy is natural and very large quantity energy which we can utilize at isolated islands or in the ocean. So, if we can utilize it easily and at a low cost, the ocean development will progress more rapidly and widely.

This study intends to make clear the fundamental behavior by the floating terminator type wave power device which has high efficiency of absorption of wave energy and better performance than the floating breakwater.

The model of the floating terminator type wave power device was made and tested in the regular and irregular, head and oblique wave condition, and effi-

*1 海洋開発研究部

*2 Marine Research and Development Department

iciency of absorption wave energy, mooring force and motion were measured. As the results of this test, the performance of this type device was made clear as follows.

- (1) The floating terminator type wave power device has the optimum distance of the air chambers in head sea.
- (2) The anti-motions fin improve the efficiency of wave power absorption.
- (3) The efficiency of wave power absorption is improved by three-dimensional effect when the device surrounding is opening.
- (4) The efficiency of wave power absorption in oblique waves is better than in head sea.

Key word: WAVE POWER DEVICE

1. はじめに

国土の狭小な我が国は、1億2千万人の人口を擁しながら、近代産業国家として国際的社会・経済活動により世界をリードするとともに国家の繁栄を維持してきた。しかし、今後とも安定した発展を続けるためには、まず第一に鉱物資源及びエネルギーの資源の安定した確保と、さらに海洋を含めた空間の有効利用が必要とされている。これに対し、我が国は、総延長約5,200kmにも及ぶ海岸線を有し、また沿岸域のうち水深50m以浅の総面積は、約8万km²であり、これは、国土面積の約22%に相当している。このような海域には、水産資源は勿論のこと、有効利用が可能な空間並びに海洋の自然エネルギーが豊富に存在している。そこで、このようなごく身近にあり、豊かで、しかも開発がほとんど行われていない沿岸海域を自然環境を変えことなく効果的に開発することが、今後の我が国の安定した発展にとって緊急かつ重要な課題となることが予想される。

このような状況のもとで、海洋科学技術センターでは、密度は低い海洋に無限に存在する波のエネルギーを効果的に電気等の他のエネルギーに変換する装置、つまり波力変換装置について、実機スケールモデルを用いた実海域実験を実施して研究開発を行った。これにより、電力系統からの電力供給が困難な地域において、より低コストでそれを行うことの可能性を明らかにした。しかし、これまで研究を行ってきた型式では、波浪エネルギー吸収効率の点で課題が残されており、発電コ

ストが割高になってしまうきらいがあった。

一方、波の持つエネルギーを吸収してしまうということは、波を静めるということであり、波浪エネルギー吸収装置は、消波装置としても機能することに外ならない。

この二つの機能をより効率良く発揮できるタイプの装置として、最近著者らは装置の長手方向を波の進行方向に直角に向けた「ターミネーター型波浪エネルギー利用装置」の研究開発を昭和60年度より実施している。その結果、振動水柱型波力変換装置において、空気室を波峰方向に複数個連ねて係留した浮遊式の装置、すなわち浮遊式ターミネーター型波浪エネルギー利用装置の基本特性として次のことが明らかになった。

①ターミネーター型装置は、波の進行方向にその長手方向に向けたアテニュエーター型に比べて波浪エネルギー吸収効率が高い。

②ターミネーター型装置の複数の空気室を適当な間隔で並べることにより一つの空気室当りの波浪エネルギー吸収効率を向上できる。

③空気室の形状によっては、消波性能を発揮できる。

④係留力は、従来研究してきた形式の装置に係留する鎖と同程度もしくは、それ以下で十分係留できる¹⁾。

等である。

これらにより、ターミネーター型装置が波浪エネルギー吸収効率及び消波特性ともに優れているということが明らかになった。しかしいずれも定

性的な把握の段階であり、一方向規則波中における結果からのみの推定であるため、実海域における定量的な推定には至らず、コスト試算のための資料としては、満足されたものではなかった。

このため、本研究では、実海域波浪を再現した多方向不規則波中における特性を検討することとし、その第一段階として、二次元水槽並びに、三次元効果を期待できる平面水槽において、一方向波浪中における波入射角度の影響に関する実験を実施した。

その結果、この装置は、一方向不規則波中において、以下のような特性を持つことが確認された。

- ①波浪エネルギー吸収効率が向上する最適空気室間隔が存在する。
- ②装置の動揺を抑える制振ひれを取り付けることにより波浪エネルギー吸収効率は、向上する。
- ③装置の周囲が開放された状態であると、三次元効果により波浪エネルギー吸収効率は、向上する。
- ④波浪エネルギー吸収効率に関し、一方向波浪中における装置の設置は、波に対し最適設置角度が存在する。
- ⑤装置の運動が波浪エネルギー吸収効率に影響を与える。

2. 波浪エネルギーの吸収

規則波（深海波）中に波の進行方向に直角に設置されたN個の波浪エネルギー吸収ユニットを有する波浪エネルギー吸収装置の単位長さ当りの波浪エネルギー吸収量 E_w は、

$$E_w = \frac{1}{T} \int_0^T W dt \cdot \bar{\eta} = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot n \cdot H^2 \cdot C_g \cdot \bar{\eta}$$

$$= \frac{\rho g}{32} \cdot H^2 \cdot T \cdot \bar{\eta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T ；波周期、 W ；単位長さ当りの入射波浪エネルギー、 $\bar{\eta}$ ；装置の平均波浪エネルギー吸収効率（ $= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i(f)$ ）、 ρ ；水の密度、 n ； $\frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L} \right)$ 、 L ；波長、 h ；水深、 H ；波高であり、各ユニットの波周波数に対する波浪エネルギー吸収効率特性さえ把握できれば

E_w を求めることができる。
一方、不規則波中（一方向）における波浪エネルギー吸収量は、

$$E_{wi} = \rho \cdot g \int_0^\infty S(f) \cdot C_g(f) \cdot \bar{\eta}(f) df \quad \dots (2)$$

で表される。ここで、 $S(f)$ ；波周波数スペクトラム、 $C_g(f)$ ；波群速度である。

ところで、多方向波中における波浪エネルギー吸収効率 $\bar{\eta}$ は、入射波の入射角によって異なる。高橋らは、固定式装置模型を用いた実験結果より、固定式の装置について装置長手方向の長さ当りの入射波のエネルギー密度が疎になることのみに起因しているとしている。つまり、入射角 θ_i の入射波中における波浪エネルギー吸収量 $E_{\theta-\theta_i}$ は、

$$E_{\theta-\theta_i} = \rho \cdot g \int_0^\infty S(f) \cdot G(f; \theta_i) \cdot C_g(f) \cdot \cos \theta_i \cdot \bar{\eta}(f) df \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $G(f; \theta_i)$ ；方向分散係数であり、従って多方向波中においては、

$$\bar{E}_w = \rho \cdot g \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^\infty S(f) \cdot G(f; \theta_i) \cdot C_g(f) \cdot \cos(\theta_m + \theta) \cdot \bar{\eta}(f) df d\theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

として得られる²⁾。しかし、浮体式装置においては、装置が動揺するため、各ユニットの波との相対運動が異なるため次のように取り扱わなければならない。

ターミネーター型装置の斜め波中における波浪エネルギー吸収は、(4)式中の $\cos(\theta_m + \theta)$ の項の導入に加えて、装置自体の波浪中動揺と入射波の方向分散性を考慮し、それらを組み合わせた波浪エネルギー吸収効率特性を用いなければならない。つまり、 $\bar{\eta}$ は、 f と θ に依存する特性として取り扱われ、

$$\bar{E}_w = \rho \cdot g \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^\infty S(f) \cdot G(f; \theta) \cdot C_g(f) \cdot \bar{\eta}(f; \theta) \cdot df d\theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

3. 実 験

実験は、昭和61年度までの研究成果より設計した最適形状の模型を用いて、海洋科学技術センターの波動水槽および運輸省船舶技術研究所の海洋構造物試験水槽において実施し、空気室間隔、制振ひれの長さ、波の入射角等の条件を変えて、空気室内圧力、透過波高比、係留力、装置の運動を測定した⁴⁾。

3.1 供 試 模 型

実験に使用した供試模型を、図1および写真1に示す。幅 $B = 43\text{cm}$ 、奥行き $A = 40\text{cm}$ の空気室を幅方向に九つ連ねたものの前後に浮力室を配置し、さらに底板（高さ $H_b = 40\text{cm}$ 、長さ $A_b = 52\text{cm}$ ）、ハーバー（長さ $L_h = 20\text{cm}$ ）、制振ひれ（長さ $l = 25\text{cm}$ ）を取り付けた。この供試模型は実機の $1/20$ 縮尺と想定する。なお、空気室上面には、ノズル比 $1/100$ の開孔が設けられている。

3.2 二次元水槽における実験

実験は、海洋科学技術センターの波動水槽（長さ 40m 、幅 4m 、水深 2m ）において、浮遊する模型を弛緩係留状態で係留し、波高約 5cm 、波

周期 $0.8\text{秒} \sim 3.0\text{秒}$ の波を造波、入射波高、透過波高、各空気室内圧力変動、係留力について計測を行った。なお、各ノズルの開閉状態を表1に示すとおりとし、空気室間隔による影響も調べた。

3.3 平面水槽における実験

実験は、運輸省船舶技術研究所の海洋構造物試験水槽（長さ 40m 、幅 28m 、水深 1.8m ）において、波高 5cm 、波周期 $1.0\text{秒} \sim 3.0\text{秒}$ の規則波、3種類の不規則波（ISSC スペクトラム）を造波し、

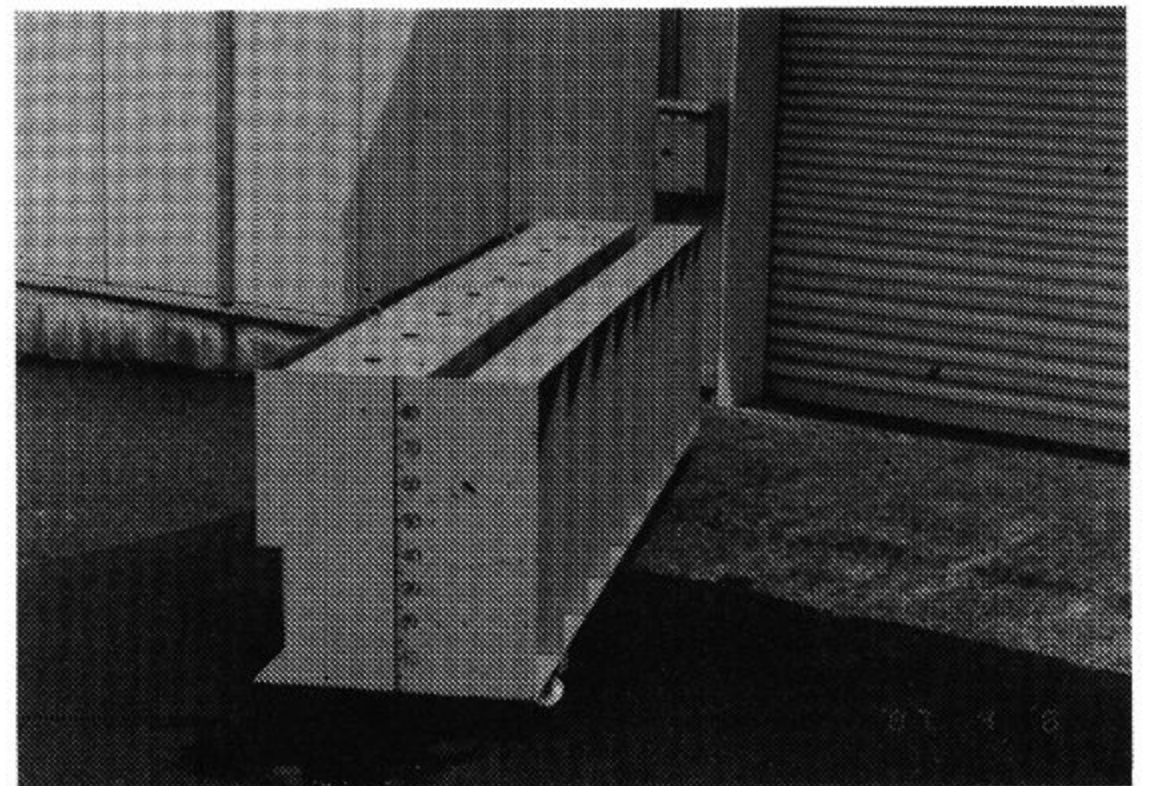


写真1 供試模型

Photo 1 Experimental model

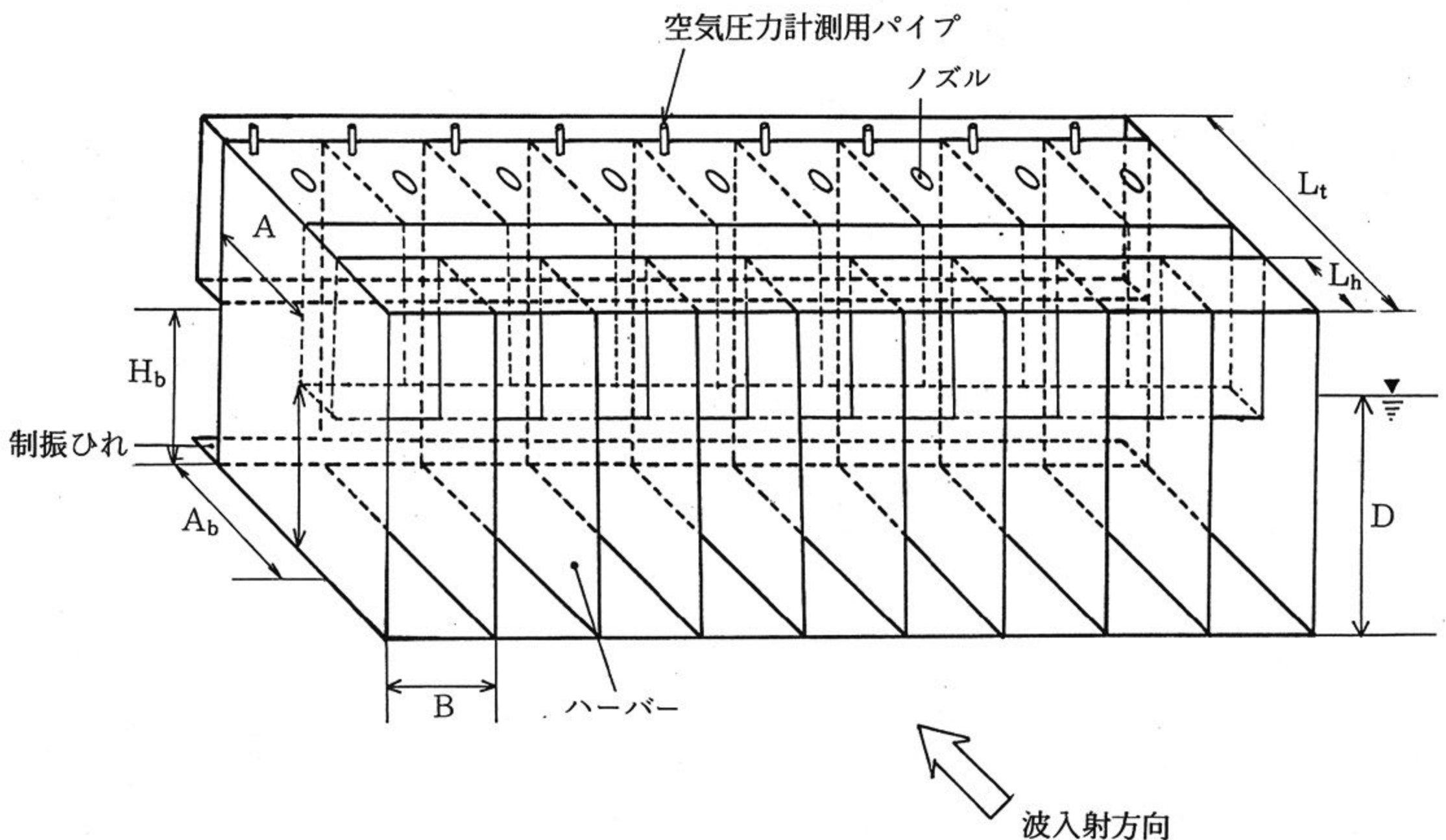


図1 供試模型

Fig.1 Experimental model

表1 ノズル開閉状態
Table 1 Condition of pararell arrangement

空気室 番号 condition	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	○	○	○	○	○	○	○	○	○
B	×	○	×	×	○	×	×	○	×
C	○	×	○	×	○	×	○	×	○

(○；開放，×；閉鎖)

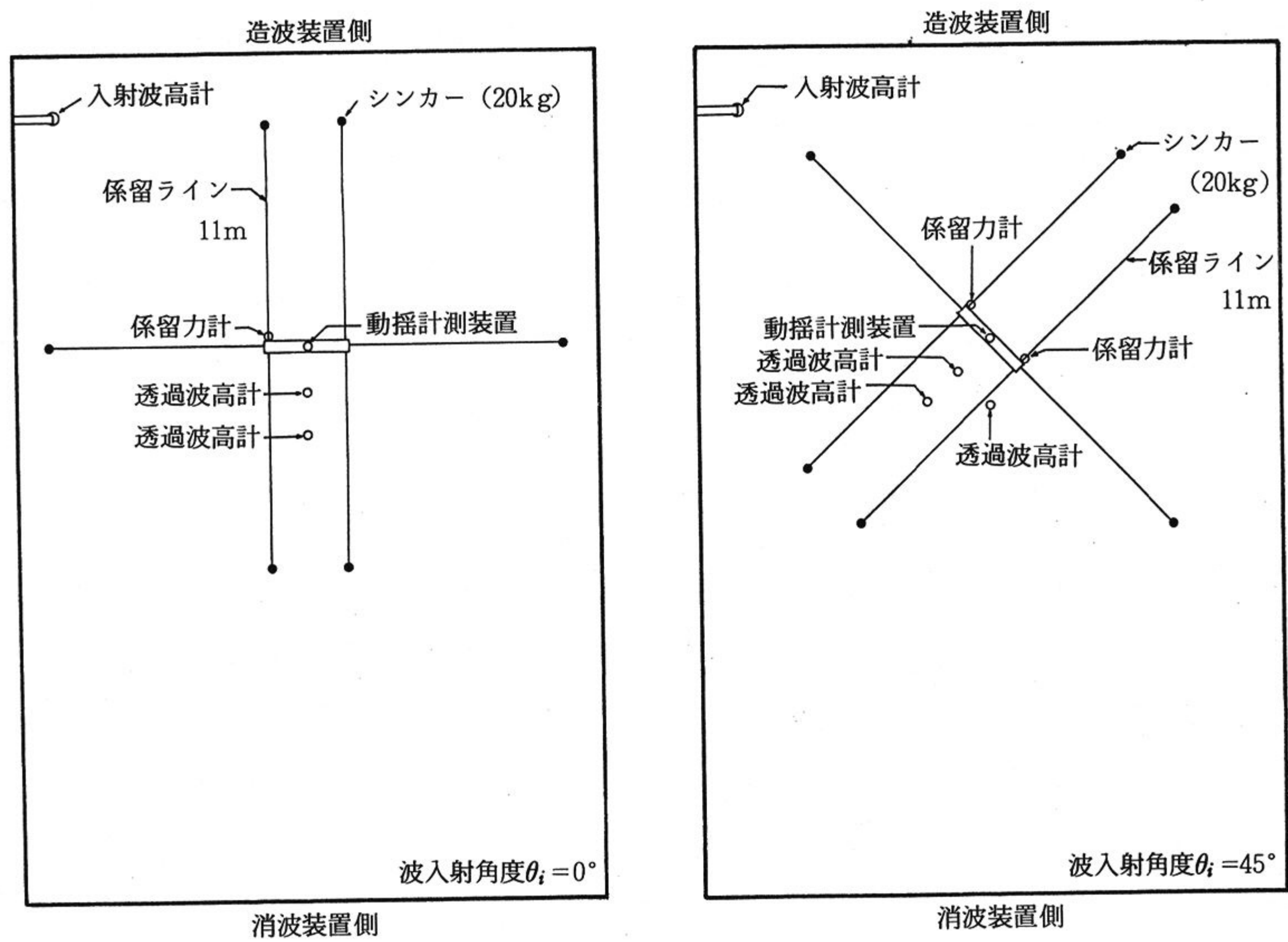


図2 実験配置図
Fig.2 Experimental condition

表1 に示す各ノズル開閉状態について，図2 に示す配置により波入射角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ における実

験を行った。計測項目は，入射波高，透過波高，各空気室内圧力変動，係留力，浮体運動である。

3.4 データ解析

3.4.1 規則波中実験

規則波中実験のデータ解析として、まず空気出力 E_a については、次式で求めた。

$$E_a = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2/\rho_a} \cdot S \cdot C \cdot P_a^{3/2} |\sin^3 \omega t| dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ρ_a ; 空気の密度、 S ; ノズル面積、 C ; 縮流係数、 P_a ; 空気室内圧力変動振幅である。

一方、入射波の単位長さ当りのエネルギー W は、

$$W = \frac{\rho \cdot g}{32 \pi} \cdot H^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots (7)$$

であるから、波浪エネルギー吸収効率 η は、空気室の幅を B とすると次式で得られる。

$$\eta = \frac{E_a}{W \cdot B} \quad \dots\dots\dots (8)$$

次に、透過波係数については、単純に入射波高に対する比をとったものであり、

$$\nu = \frac{H_t}{H_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

により得られる。

最大係留力係数 F_m については、波浪外力 F_w に対する比であり、計測時間内に生じた最大係留力を T_m とすると

$$F_w = \frac{\rho \cdot g \cdot 9 B}{2} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表されるので、

$$F_m = \frac{T_m}{F_w} \quad \dots\dots\dots (11)$$

により得られる。

浮体運動は、計測装置の都合上、縦揺れ、上下揺れ、前後揺れ、左右揺れ、船首揺れの5つが計測され、波浪幅により無次元化を行い、各応答値とした。なお、ここでの浮体運動の定義は、図3に示すとおりとする。

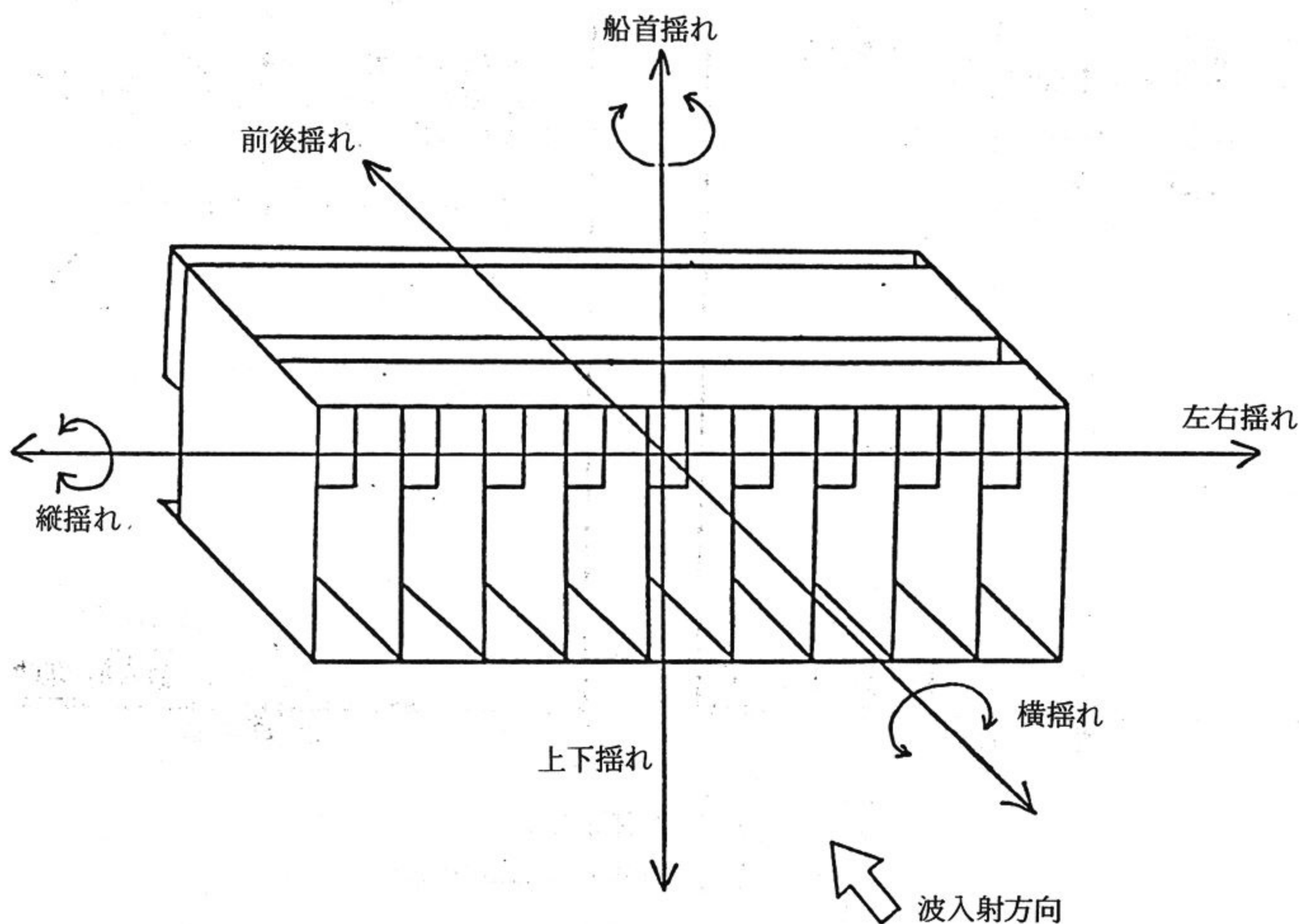


図3 動揺の定義

Fig.3 Definition of the motions

3.4.2 不規則波中実験

不規則波中実験のデータ解析として、空気出力、入射波浪エネルギーについては、時刻歴に対して積分し、それぞれのエネルギー量を算出した。また、入射波、透過波、係留力、浮体運動等に関しては、FFT法により、それぞれスペクトラム解析を行った。

4. 結果および考察

4.1 空気室間隔による効果

図4および図5には、平面水槽における波入射角度 $=0^\circ$ 場合の波浪エネルギー吸収効率を示す。ノズルを開放して波浪エネルギー吸収を行う空気室を適当な距離を隔てて配置したB状態では、空気室一つ当たりの波浪エネルギー吸収効率が向上し、装置中央の空気室については、その最大効率は、90%に達することが確認された。

また、全ての空気室で波浪エネルギーを吸収するA状態では、最大50%を呈している。開放してあるノズルは、波浪エネルギー利用装置における負荷装置であり、実機では、タービン・発電機等に相当する。したがって、必要とされるエネルギー

量に応じて適当な基数のタービン・発電機を据え付ければ良く、コスト等を考慮して最適な状態を選択することになる。

4.2 三次元影響

図6には、ノズルB状態、波入射角度 $=0^\circ$ における二次元水槽と平面水槽での波浪エネルギー吸収効率を示す。図から明らかなように、波浪エネルギー吸収効率については、三次元影響がさほど見られず、これまでの二次元水槽実験データは、ほぼ三次元水槽実験へ適用できることが明らかになった。

一方、消波特性については、図7に示すように、二次元状況下では、 $\frac{\text{入射波波長}}{\text{装置幅}} < 3$ の範囲では、浮消波堤の消波性能の1つの目安である透過波係数0.5以下を示しているが、三次元状況下では、装置後方へ波が回折していくためであり、複数の装置を適切な間隔で設置することにより、二次元状況下での性能に近づくことが推定される。今後これに関し、理論的にまた大型平面水槽を用いたより定量的な研究が必要である。

図8には、ノズルB状態、波入射角度 $=0^\circ$ に

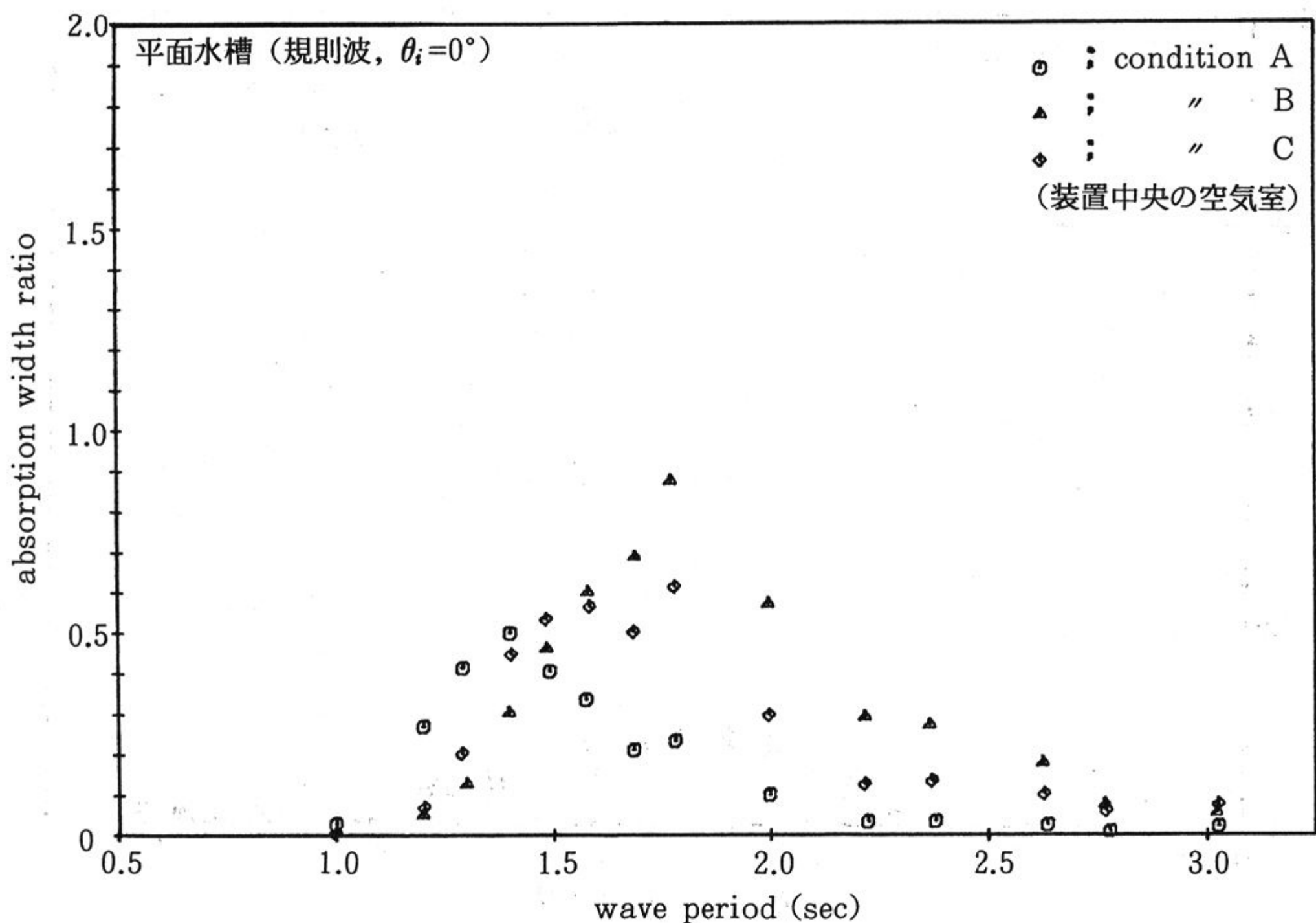


図4 波浪エネルギー吸収効率

Fig.4 Efficiency of wave energy absorption

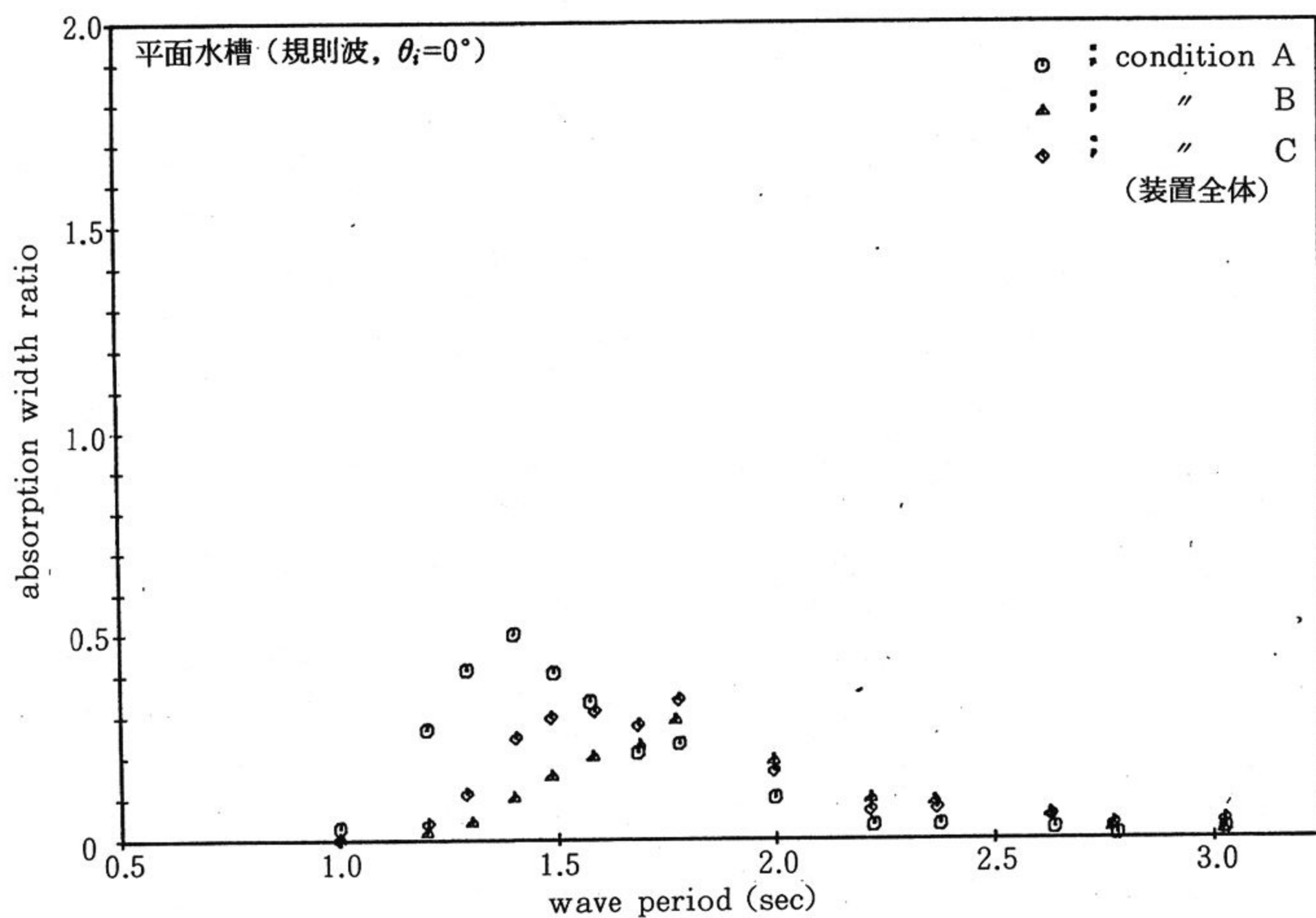


図5 波浪エネルギー吸収効率
Fig.5 Efficiency of wave energy absorption

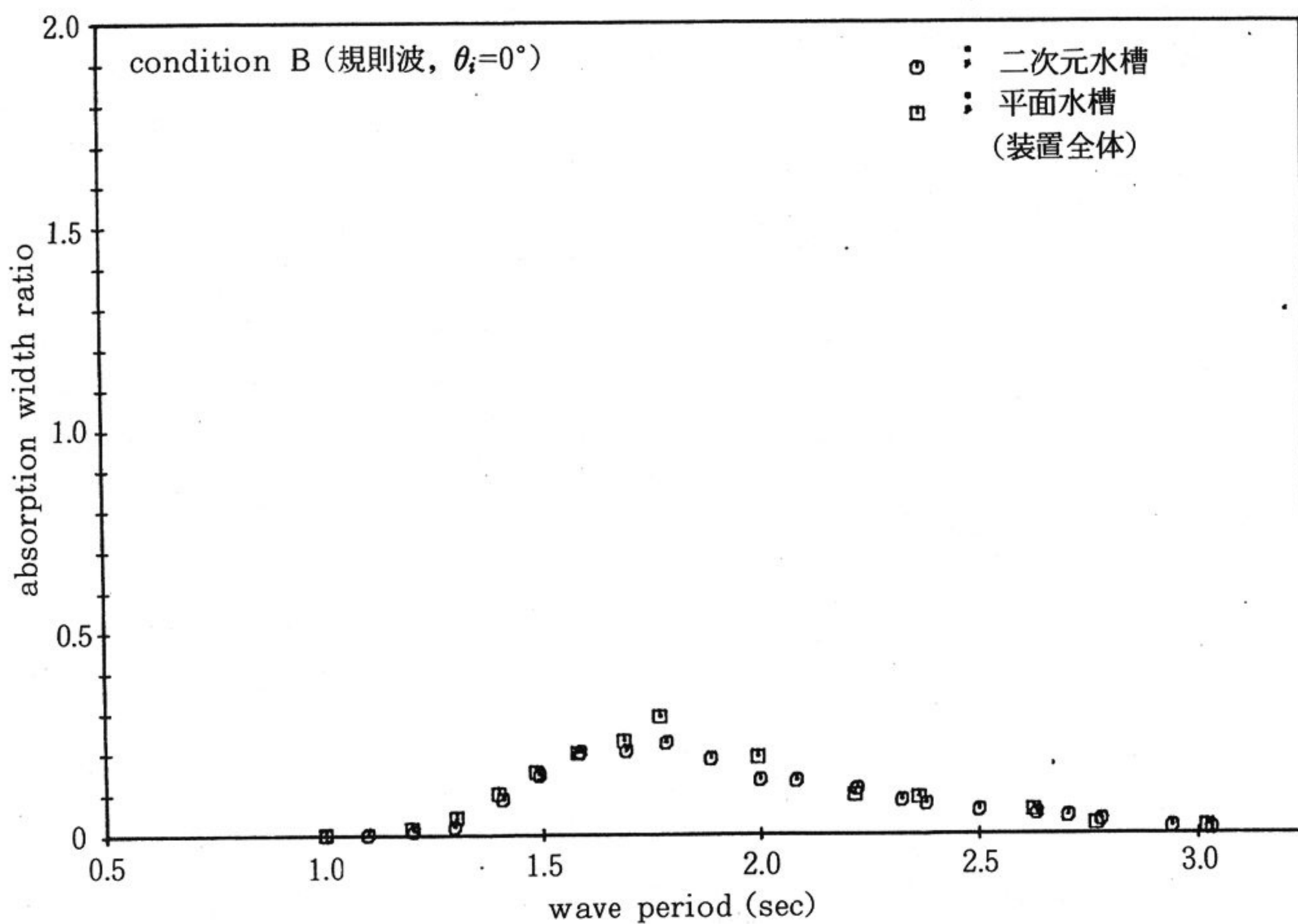


図6 波浪エネルギー吸収効率
Fig.6 Efficiency of wave energy absorption

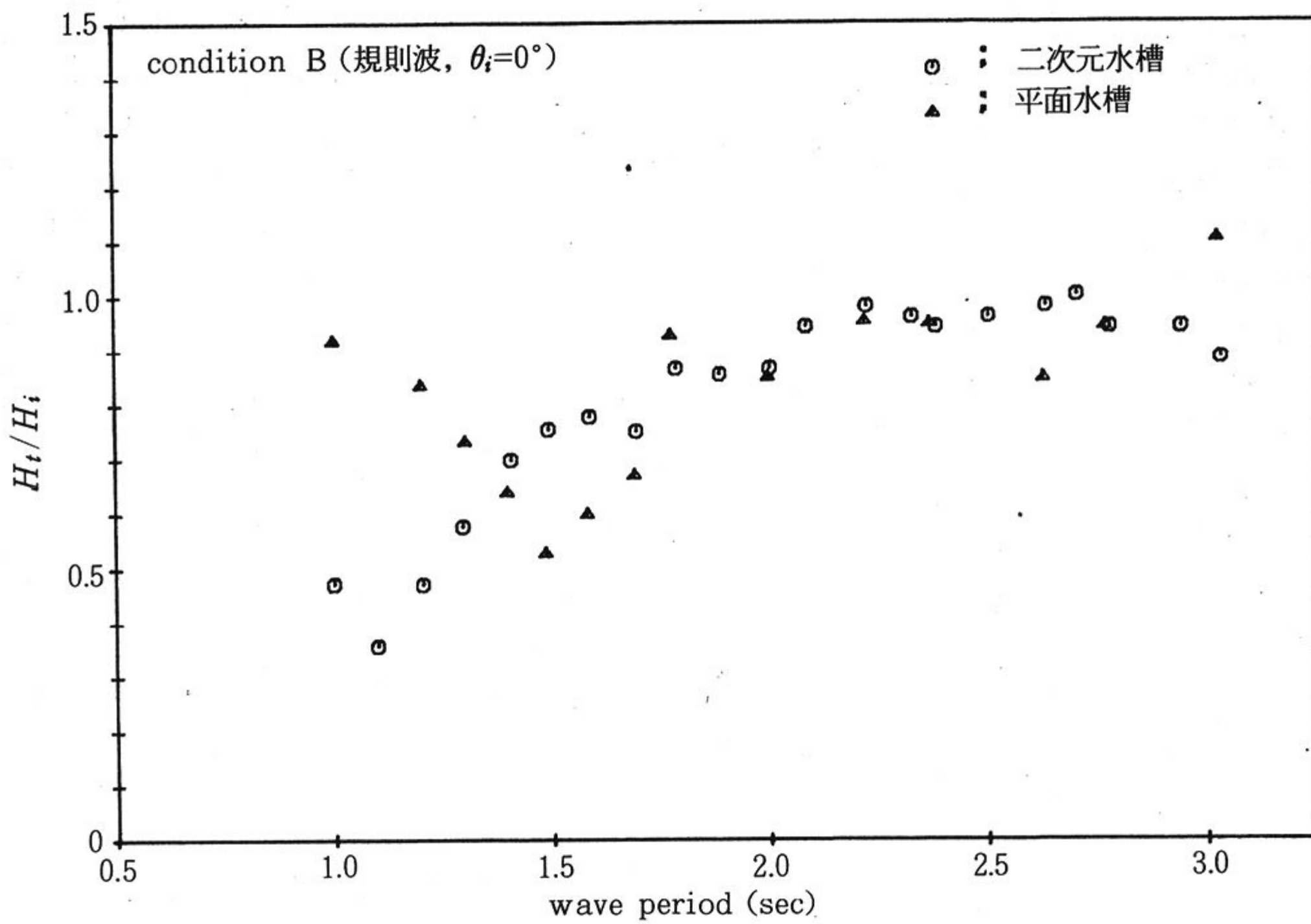


図7 消波特性
Fig.7 Transmission coefficient

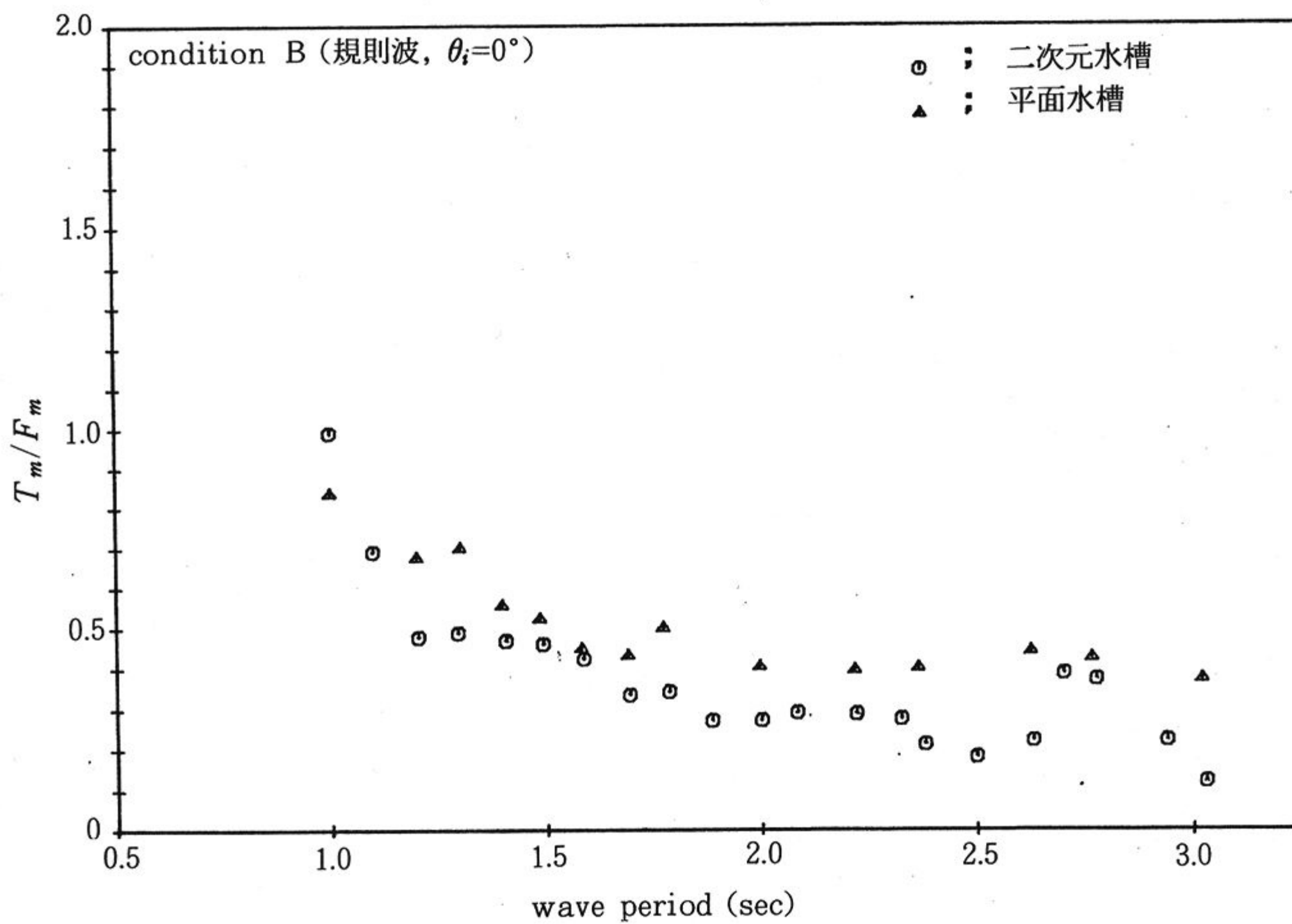


図8 最大係留力特性
Fig.8 Maximum mooring coefficients

おける二次元水槽と平面水槽での係留特性を示し、平面水槽における係留力が少々増大していることが分かる。これは、平面水槽中において模型が二次元的な運動のみを行っておらず、三次元的な影響による船首揺れも行っていたためであると推定される。実海域においては、波は多方向成分を有しており、船首揺れは、必ず発生するのであるから、今後これについても詳細な研究が必要である。

4.3 波入射角による影響

図9に示すように、装置正面から波が入射する状態 ($\theta = 0^\circ$) に比べ、斜め方向 ($\theta = 45^\circ$) から入射する状態のほうが波浪エネルギー吸収効率が高い。

これは、まず装置の波との出会い周期による効果が現れたためである。つまり、波長 L で考えるなら、 $\theta = 0^\circ$ のときは、 L はそのまま出会い波長となるが、 $\theta = 45^\circ$ においては、出会い波長は $L / \cos \theta$ となり、波長に関する応答関数は、 $\theta = 0^\circ$ のときに比べて $1 / \cos \theta$ だけ短波長側に移る。

これは、波周期に対しては、 $1 / \sqrt{\cos \theta}$ に相当し、図9において、波周期 1.8 秒以下ではこの現象が現れている。

動揺応答の中でとりわけ縦揺れについては、この現象は明らかであり、図10に示すとおりである。また、上下揺れについても縦揺れと連成するため、波入射角による応答関数の変化が、図11に示すように現れている。

ところで、空気室 1 つだけに着目してみれば、入射波周期は、入射角度には何ら影響されないにもかかわらず、波浪エネルギー吸収効率が波入射角度により変動するのは、空気室の運動すなわち装置の動揺が空気出力に大きく影響するからであり、とりわけ縦揺れによる影響が大きいことが明らかになった。つまり、縦揺れが小さければ、本装置の波浪エネルギー吸収効率は、向上することになる。したがって、装置に縦揺れを拘束するもの、例えば、制振ひれなどを取り付けることにより効率が向上する。

波周期 1.8 秒以上においても、斜め波中におけ

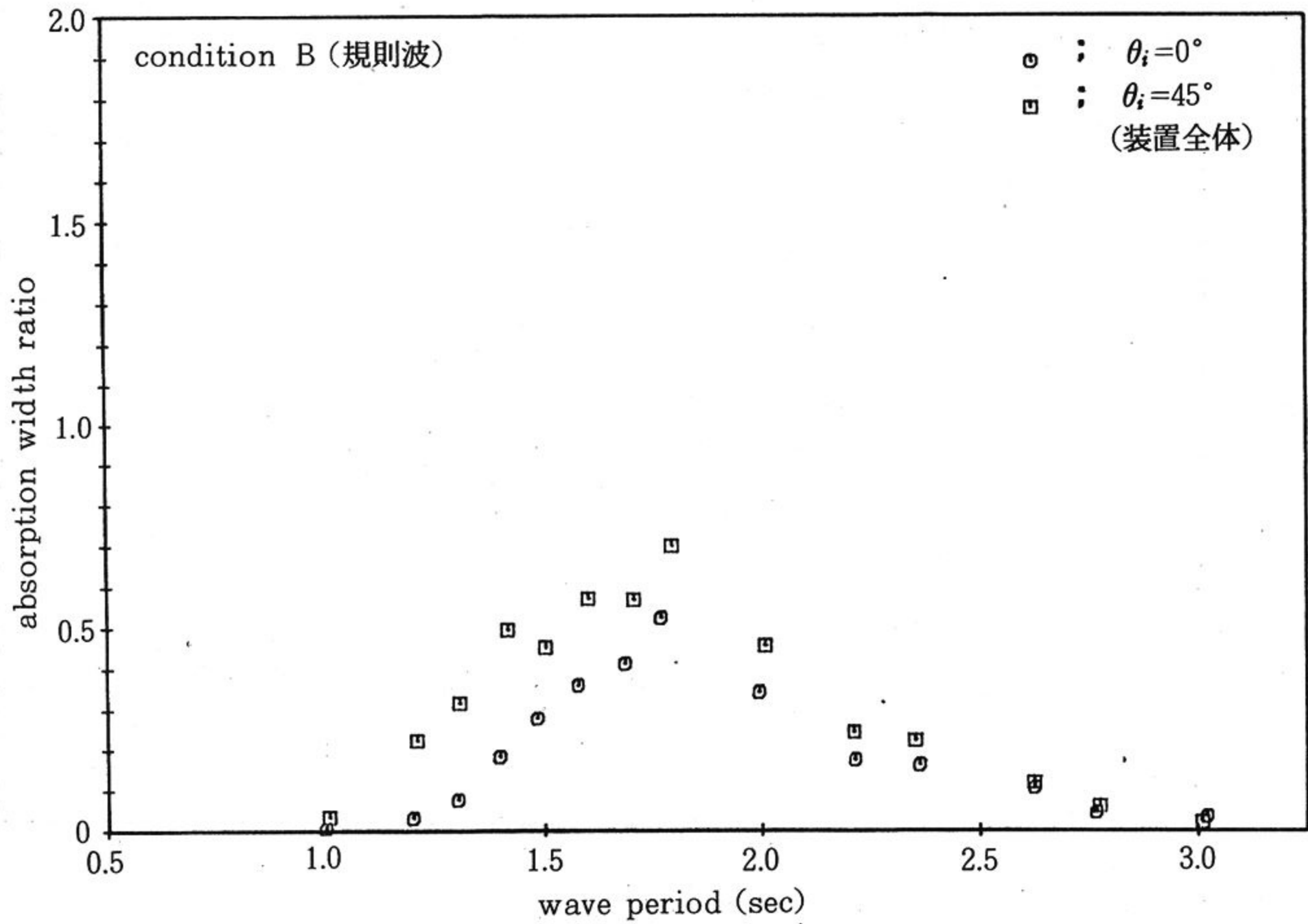


図9 波浪エネルギー吸収効率
Fig.9 Efficiency of wave energy absorption

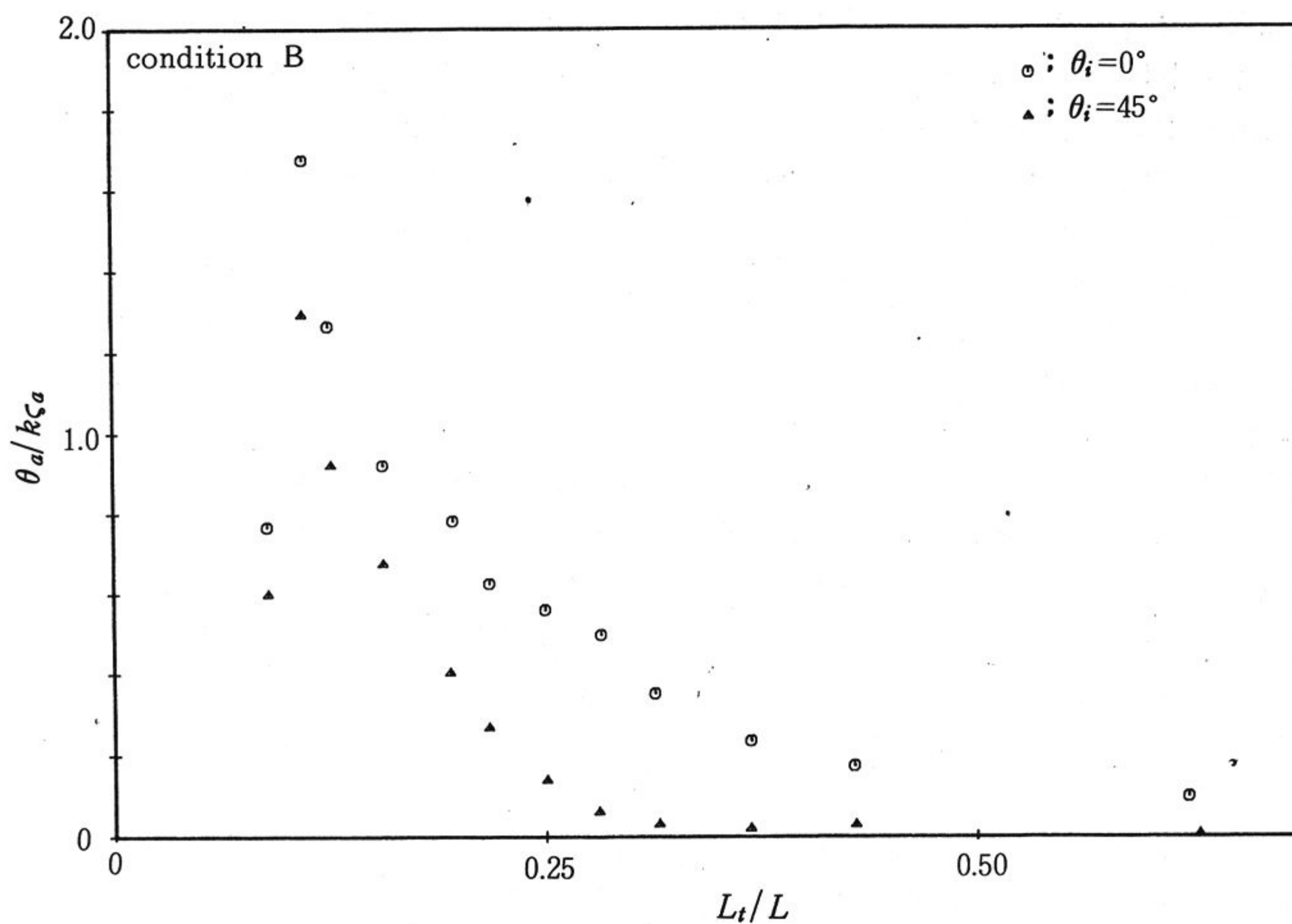


図 10 縦揺れ応答特性
 Fig.10 Pitching coefficients

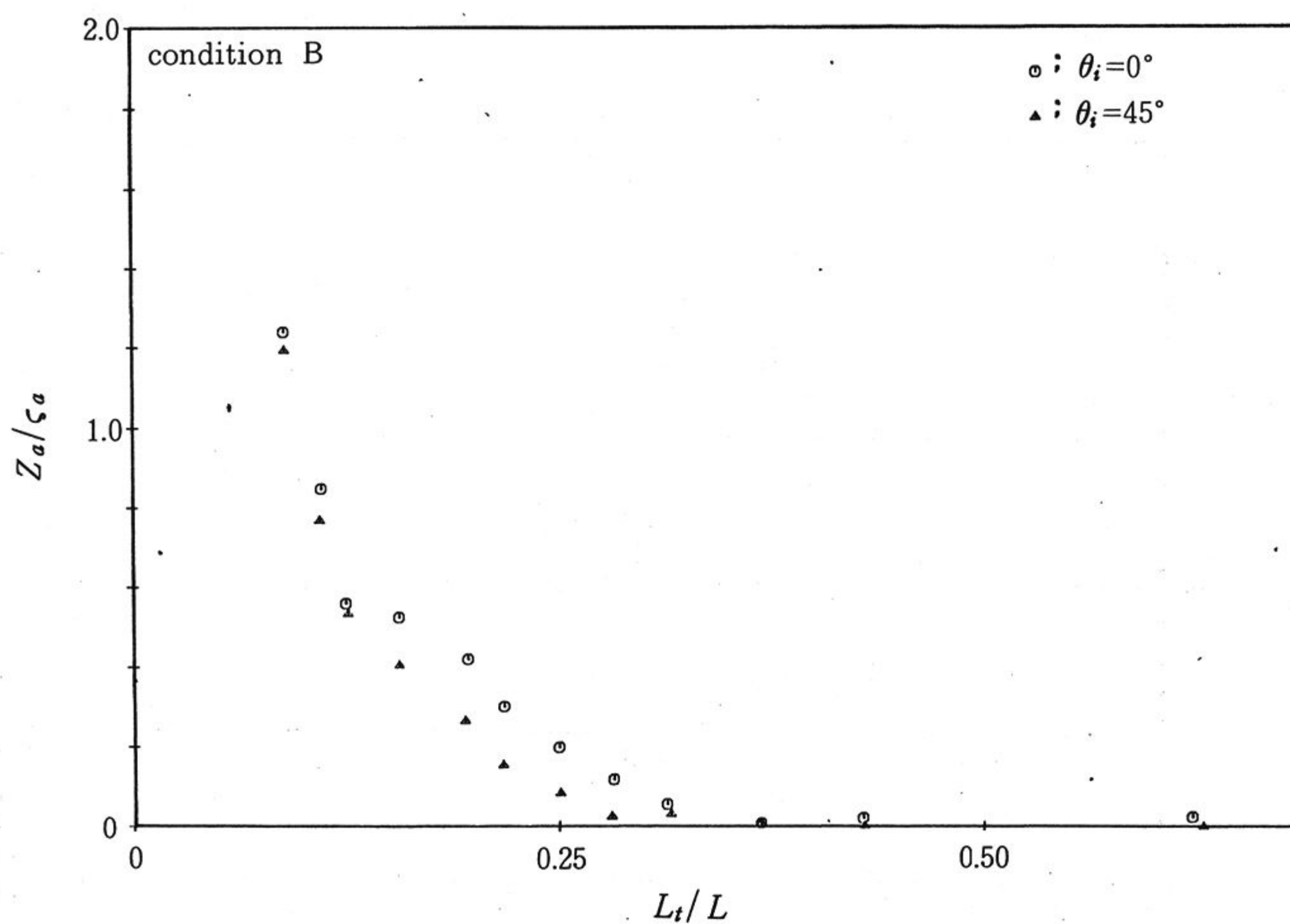


図 11 上下揺れ応答特性
 Fig.11 Heaving coefficients

る効率が正面波中の効率よりもわずかではあるが、高いのは、これが起因しているものと考えられる。長周期の波浪中においても縦揺れ運動を抑えることができるなら、波浪エネルギーを効率良く吸収することができ、これを行うための工夫について研究することが必要である。

4.4 不規則波中特性

図13に示すように、不規則波中においても波入射角による影響は、4.3に述べたことと全く同様のことがいえ、やはり斜め波中における波浪エネルギー吸収効率は、正面波中の効率に比べてかなり増大している。

これより、波浪エネルギー吸収効率に着目するのであれば、入射波に対し斜めに係留することにより、装置寸法を大きくすることなく効率を向上させることができることが確認された。

なお、上下揺れについて図12に示す入射波のパワースペクトラムに、規則波中上下揺れ応答関数を重ね合わせた線型重ね合わせによる不規則波中応答スペクトラムの予測値は、図14に示すように、実測値と比べ上下揺れの固有周期付近で異なっている外は、ほぼ一致している。上下揺れ固有

周期付近では、浮体式振動水柱型装置は、効率良く波浪エネルギーを吸収することから、固有周期付近での差が生じるものと考えられる。

5. おわりに

ここ十数年間における世界のエネルギー情勢は、人類史上かつてないほどの変遷を遂げ、また今後も恐らく安定しないであろうことが予測されており、我が国においては、エネルギー自給もしくは、極めて安定した供給体制の確立を目標とし施策を講じることが望まれている。

本論文で紹介したターミネーター型波浪エネルギー利用装置は、まだ研究開発が始まって日は浅く、必ずしも最適なものになっていない。この装置が高い効率を発揮し、実用化されるようになれば、微力ではあるが、エネルギー自給の一助となることと確信し、研究開発並びにそれを支える施策を推進させたい。

最後に、本研究を行うにあたり、水槽および計測機器類の使用に便宜を図って下さいました運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部の皆様、並びに実験、解析及びとりまとめに多大な協力をいただいた浅野淳一氏（研究当時、東海大学海洋学部海

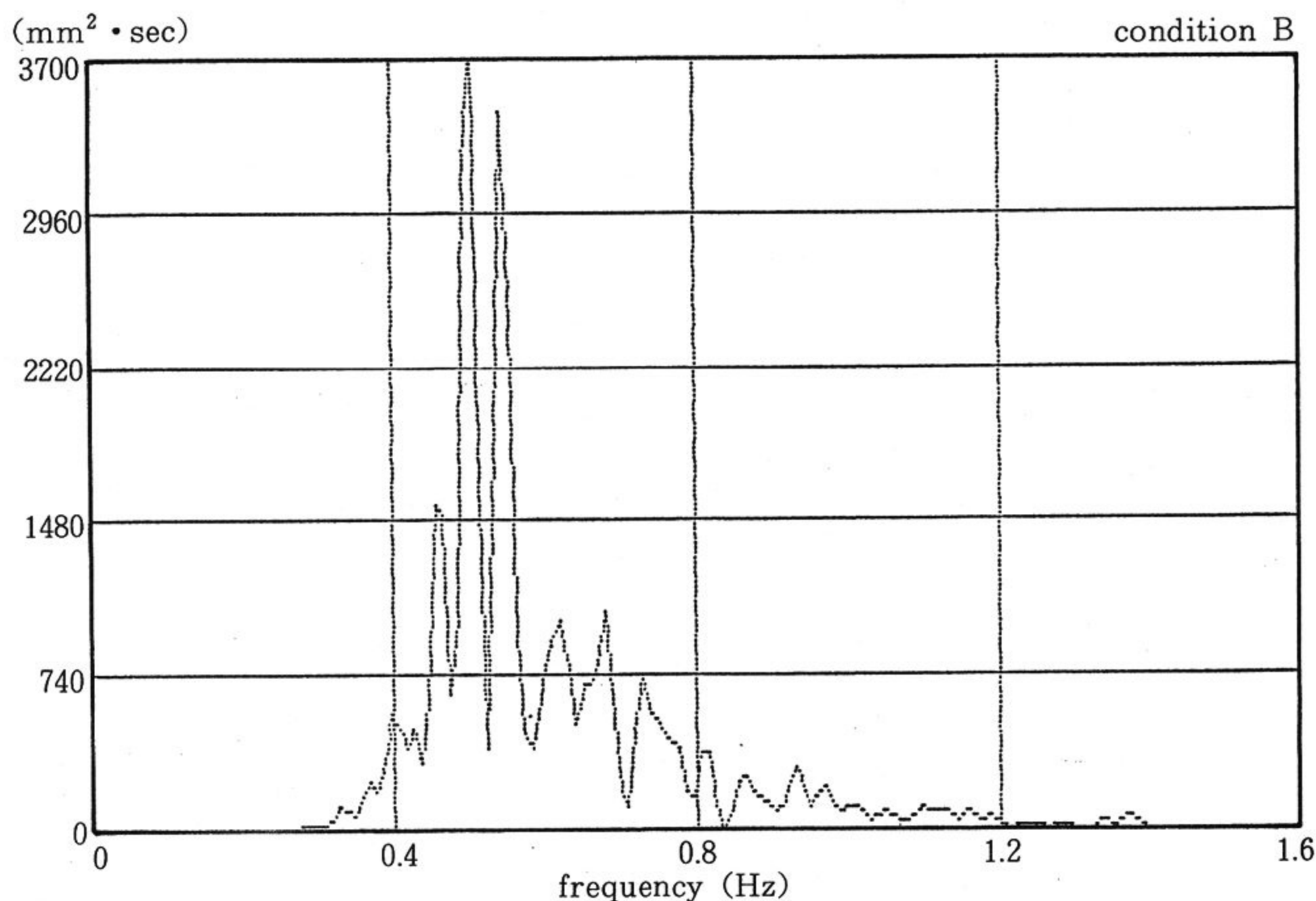


図12 入射波パワースペクトラム

Fig.12 Power spectrum of incident wave

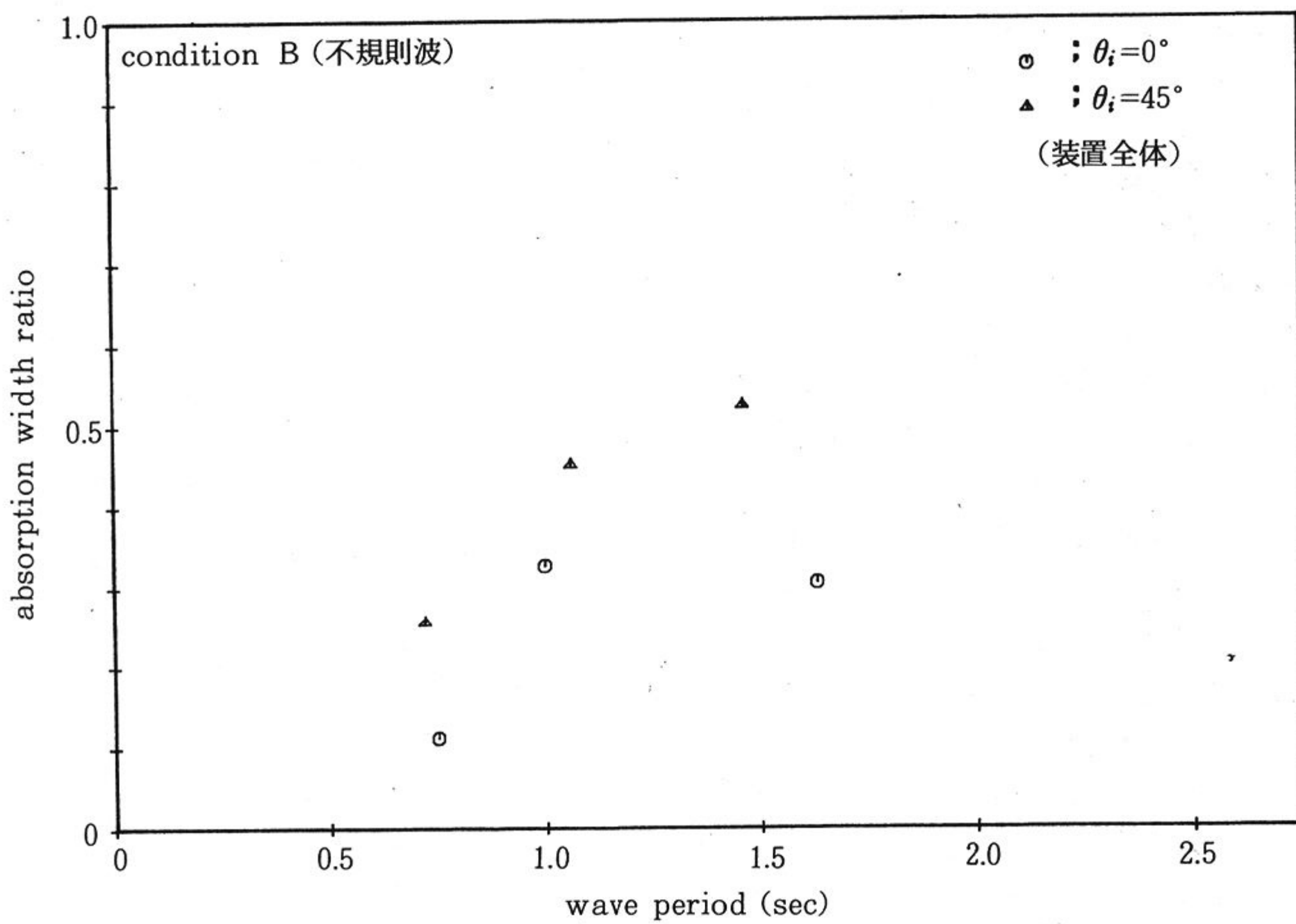


図 13 波浪エネルギー吸収効率
 Fig.13 Efficiency of wave energy absorption

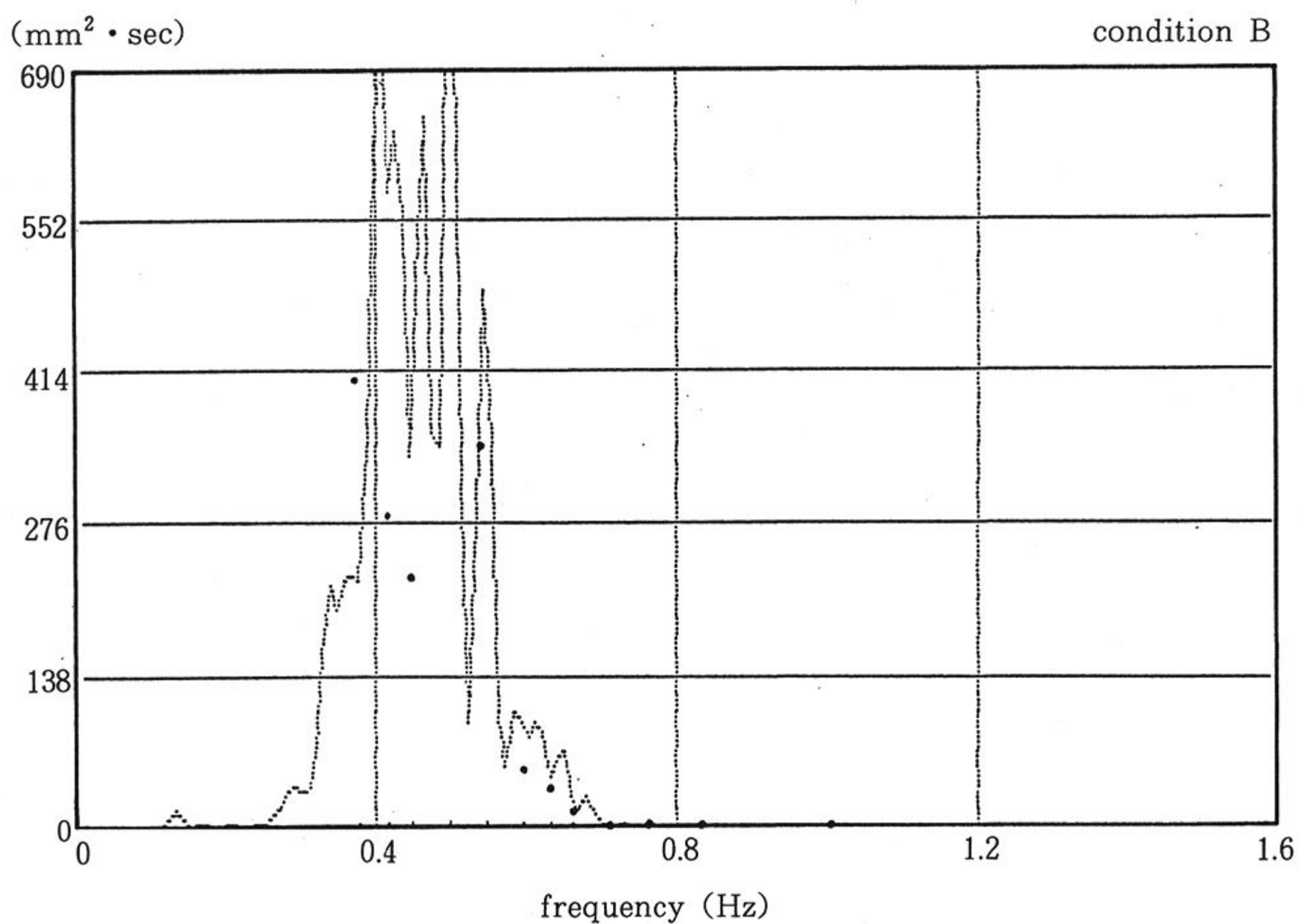


図 14 上下揺れパワースペクトラム
 Fig.14 Power spectrum of heaving

洋資源学科4年)に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 堀田平・宮崎武晃・鷺尾幸久・田中浩：ターミネーター型波エネルギー利用装置の研究，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センター，p.1～p.10，(1987)
- 2) Takahashi, S., Myose, K., Yoshimoto, Y. and Tanaka, S. : Variation of Wave Power Extraction due to Incident Angle and Directional Wave Spreading -A Study on Development of Wave Power (5th Report)-, Report of The Port and Harbour Research Institute Vol.26, No.1, (1987)
- 3) 堀田平：多方向不規則波中におけるエネルギー利用装置の特性について，昭和62年度（第13回）研究報告会要旨集，海洋科学技術センター，p.58～p.60，(1987)
- 4) 浅野淳一：浮遊式ターミネーター型波浪エネルギー吸収装置に関する研究，昭和62年度東海大学海洋学部海洋資源学科卒業論文，(1988)