

振動水柱型波力発電装置の 空気出力に関する基礎的研究

— projecting wall 付き固定空気室 —

堀田 平 *¹ 宮崎武晃 *¹ 鷲尾幸久 *¹
竹内俊介 *²

空気タービン型沿岸固定式波力発電装置の空気出力を向上させる方法の一つとして、波の入射して来る開口部前方の両側に projecting wall と呼ばれる鉛直壁を取り付けるというものがある。

本報では、そのような装置の基本的特性を調べるため、空気出力の発生メカニズムを単純なモデルを用いた水槽試験により明らかにし、一方、その定性的・定量的な推定を、空気室内の水柱を projecting wall 先端までの彎曲した形状として波浪に対する運動応答を解く簡便な計算法を用いて行った。それらより、projecting wall がとりわけ長周期の波浪に対し有効であることがわかり、一方、空気出力の向上についても定性的に、またほぼ定量的に行うことができ、その簡便さからも今後このような装置の検討に際して有用な手法が提案できた。

また、この装置を堤防内に組み込むことにより、さらに出力向上を図れる可能性も示した。

FUNDAMENTAL STUDY ON THE AIR POWER OF THE O.W.C. TYPE WAVE POWER GENERATOR —FIXED AIR CHAMBER WITH PROJECTING WALL—

Hitoshi Hotta *³ Takeaki Miyazaki *³
Yukihisa Washio *³ Shunsuke Takeuchi *⁴

*¹ 海洋利用技術部

*² 室蘭工業大学土木工学科

*³ Marine Exploitation Technology Department

*⁴ Muroran Industrial College

In this paper, the characteristics of air power by the fixed air chamber with projecting walls in the deep sea are described, and a simple method for estimating air power is proposed

The mechanism of the Oscillating Water Column becomes clear by way of the following methods. They are: 1) the water in the chamber (to the extreme point of the projecting wall) is regarded as a bent water column; and 2) wave exciting force acts on "harbour" which is the area surrounded by tow walls and the air-chamber.

The values (inner wave height ratio, air pressure ratio and efficiency) obtained by the experiments which were performed in a water tank and by calculation coincide qualitatively and agree with each other quantitatively.

Also, the air-chamber included in the brake water was also subject to experiments, and the possibility of improved air power has been confirmed.

1. 概 要

沿岸に打ち寄せる波のエネルギーを利用する発電システムのなかで、振動水柱型空気タービン方式の波力発電装置が、メカニズムの簡便さなどから近年実用化へ向けて着目されてきている。とりわけ、昭和58年(1983)9月に山形県鶴岡市三瀬立岩地区の岩礁に設置された沿岸固定式波力発電装置は、この型式の実機大装置として運転されており、実用化への期待が高まっている。

この装置のメカニズムは、空気室内の海水(水柱)が、入射して来る波により振動を励起され、これにより空気室内の空気が空気室上面に設けられた開孔から流入・流出し、開孔上の空気タービンを回転させて発電するというものである。¹⁾

振動水柱型沿岸固定式波力発電装置に関しては、海洋産業研究会²⁾ および東大生研³⁾ などで研究が行われているが、これらは水底を考慮した空気室の二次元問題として取り扱っており、一方、Ambli,⁴⁾ Evans⁵⁾ らは空気室前面に発生する定在波に着目して空気室の前方両面に鉛直壁(projecting wall)を取り付けた時の現象について、主に理論的に検討している。

そこで本報告においては、projecting wall 付き固定空気室がかなり広い範囲の周期の波に対し

て波エネルギー吸収効率が高いことに着目し、そのメカニズムを明らかにし、また実海域に設置する空気室の最適設計を念頭に置いて、波エネルギー吸収効率の推定を行う簡易手法を提案し、定性的・定量的検討を行う。

なお、本報告では、入射波を深海波の規則波とし、したがって固定空気室の底面と水底面との距離は十分にあるとする。

2. projecting wall 付き固定空気室

2.1 装置の概要

図1に projecting wall 付き固定空気室の概要を示す。図中、空気室(air chamber)は深さ d だけ没水した底の無い箱であり、上面に開孔がある。また底板(bottom plate)は開口高さ h だけ波入射方向に開口している。

一方、projecting wall は空気室の両側面前方に突き出た鉛直壁であり、この高さは $(h + d)$ より十分高く、空気室前面に生じる定在波がこれを越えて側方に流出しないとする。

この様な空気室が堤防に組み込まれる際には、図2に示すように空気室間にある一定間隔において、Projecting wall 先端より、それに直角に堤防前面壁があるようにする。

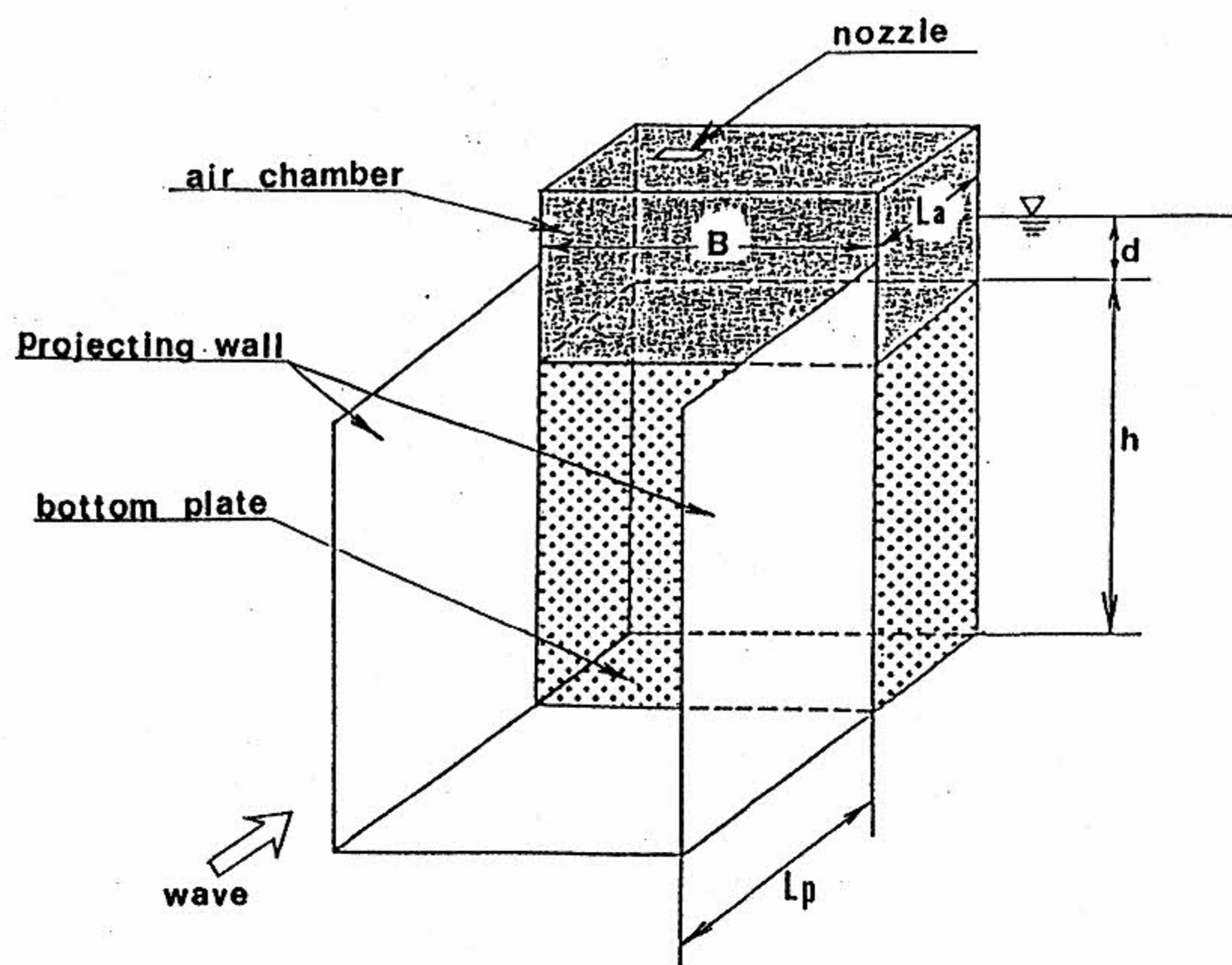


図2 防波堤組込型空気室
Air chamber in the levee

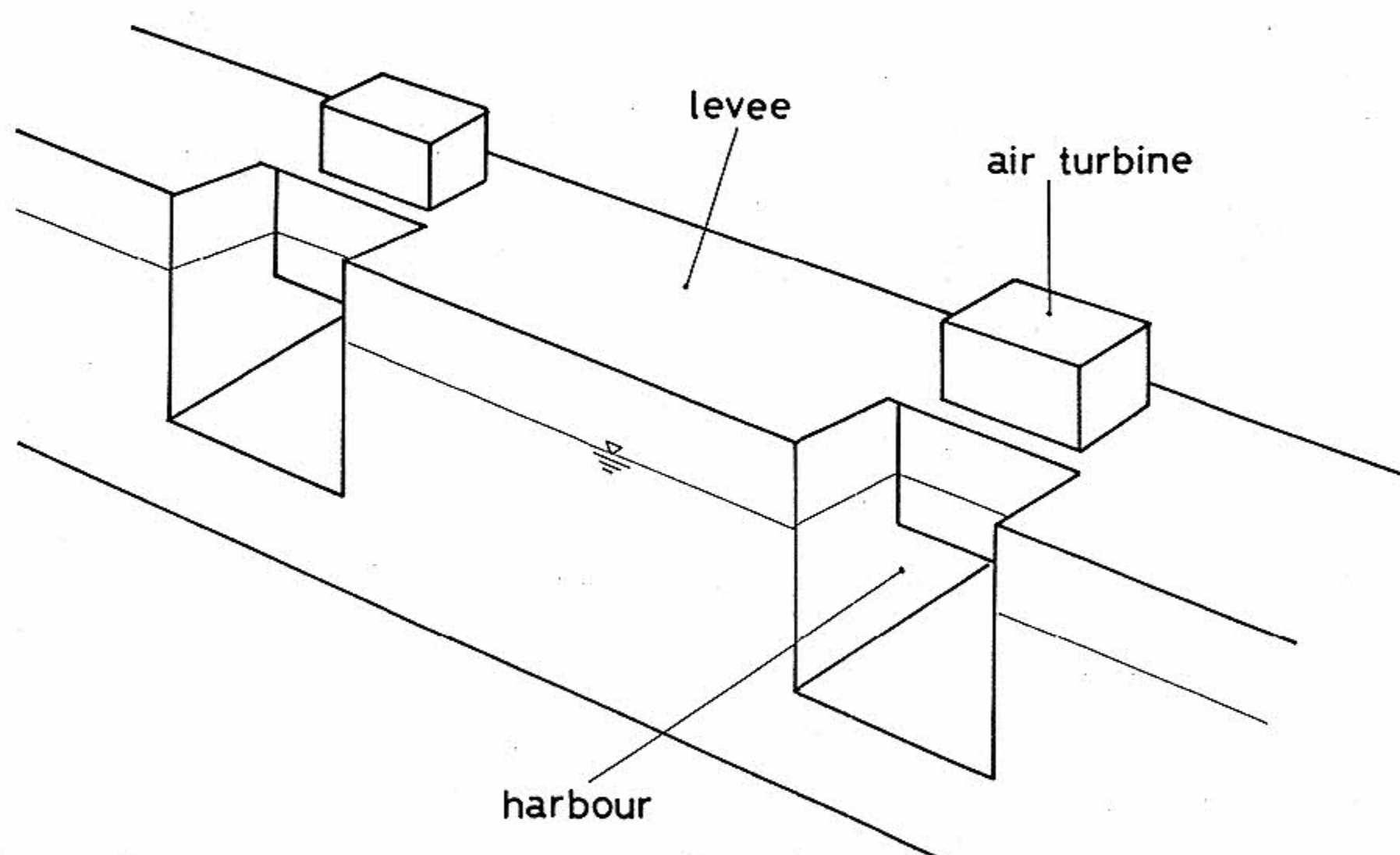


図1 Projeting wall 付き 固定空気室
Fixed air chamber with projecting wall

なお, projecting wall と空気室前面で囲まれた部分を harbour とも称する。

2.2 水柱の運動

高井ら⁶⁾によれば, 波浪中において越波しない程度に没水した平行な2平板間の水は, 平板間距離が没水深さに比べて小さいとき, この部分を水柱とみなして等価浮体と称し, 浮体の波浪中挙動と同様に解くことができるとしている。一方, 底板が付いた状態についても, 波浪の無透過型(非対称型)空気室において, 池淵⁷⁾は同様な取り扱いができるとしている。したがって, 本報においても, 空気室内水面から projecting wall 先端ま

での水を, 図3に示す様な曲がった水柱として, この運動を解く。

いま空気室内水柱の上下運動に着目し, 座標系を図4の様にとると, 水柱の運動方程式は次式で表わされる。

$$(M+m)\ddot{z} + N\dot{z} + Dz|z| + \rho g A_w z = F_w \quad \dots(1)$$

ここで, M ; 水柱質量
 m ; 付加質量
 N ; 造波減衰力係数
 D ; ノズル負荷係数

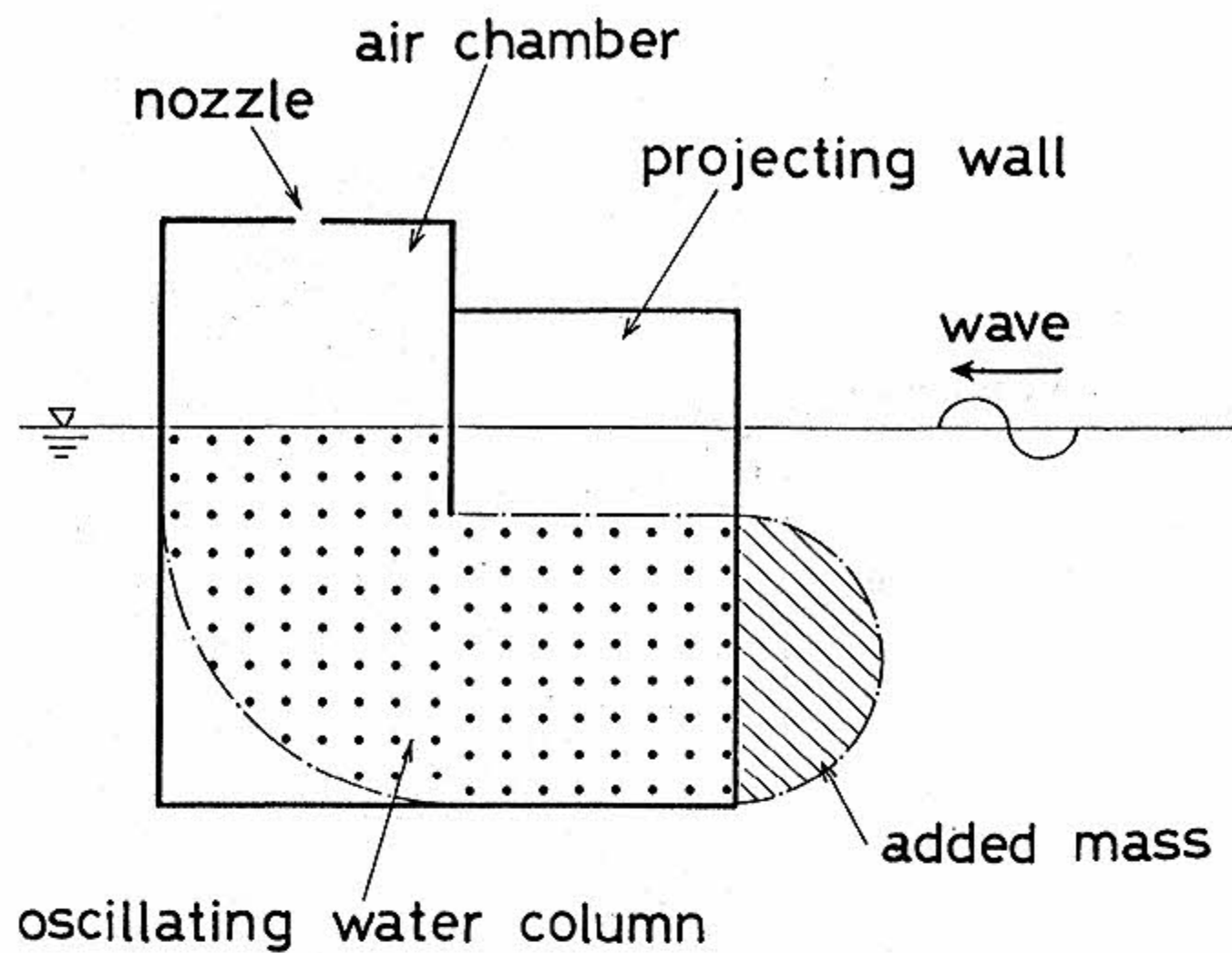


図3 固定空気室内振動水柱

Oscillating water column in a fixed air chamber

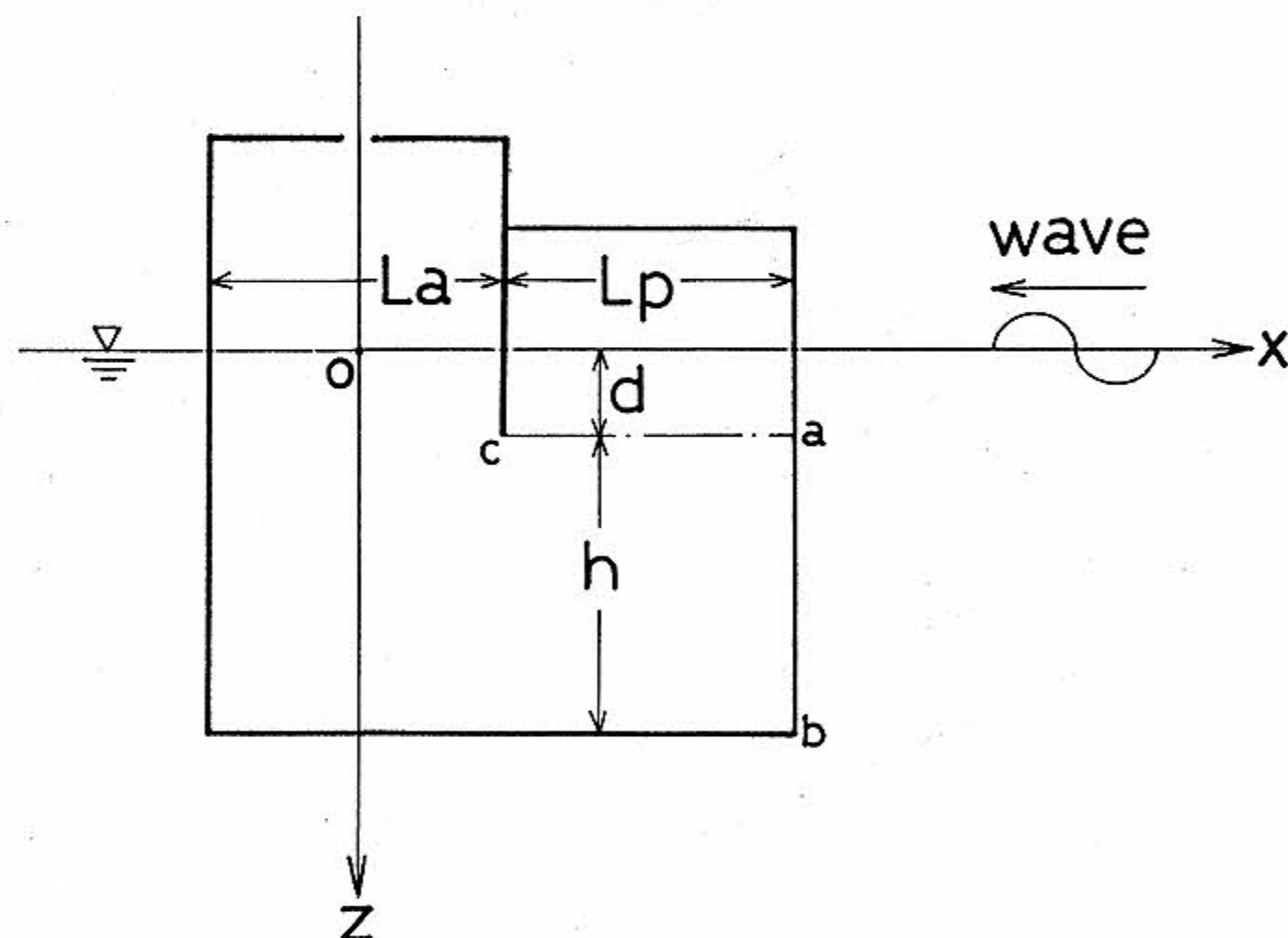


図4 固定空気室の記号および座標系

Signs and co-ordinate system about the fixed air chamber

ρ ;水の密度

g ;重力加速度

A_w ;空気室内水線面積

F_w ;波強制力

B ;空気室幅

d ;空気室没水

L_a ;底板開口高さ

L_p ; projecting wall 長さ

M , m , N および F_w の各項は、本報の目的の1つである空気室の簡易設計を考慮して、次の様に取り扱う。

1) 水柱質量 M ; 図3中の点打部とする。すなわち水柱質量を

$$M = \rho B [L_a d + \pi/4 \{ (L_a + h)/2 \}^2 + h L_p] \quad \dots(2)$$

とする。ここで、

2) 付加質量 m ; 水柱と共に振動する水の質量、すなわち付加質量は厳密には周波数に依存する値ではあるが、ここでは計算の簡易化のため次式の値で一定として扱う。

$$m = \rho B \pi/2 (h/2)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

3) 造波減衰力 N ; これも領域分割法などによって求めるべきであるが、造渦・粘性による影響も含めて、底板無し空気室について得られる値⁸⁾を

用いる。

4) ノズル負荷係数D; 実機においては、タービン・発電機による負荷であるが、本報ではノズルによる負荷として、水柱振動速度の二乗に比例する値、すなわち非線形負荷⁹⁾とする。

5) 波強制力F_w; 振動水柱が受ける波力は、図4においてa-b面に水平に及ぼす成分と、a-c面に鉛直に及ぼす成分を考慮する。いま、振幅h_aの正弦波が空気室に入射するとしたとき、波強制力F_wを

$$F_w = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad \dots\dots\dots(4)$$

とする。F₁, F₂, F₃はa-b面に及ぼす波力の慣性項、減衰項、静圧項であり、F₄はa-c面に及ぼす静圧項である。ここで各項は次式にて表される。

$$F_1 = -\rho h_a B \omega^2 m c_1 \cos(\omega t + k x_p - \pi/2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 ω ; 角周波数

k; 波数 ($=\omega^2/g$)

$$c_1 = e^{-k(d+h/2)}$$

$$x_p = L_a/2 + L_p$$

$$F_2 = -\rho h_a B \omega N c_1 \sin(\omega t + k x_p - \pi/2) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$F_3 = \rho g h_a \int_d^{d+h} e^{-kz} \cos(\omega t + k x_p - \pi/2) dz \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$F_4 = \rho g h_a L_h B \cos(\omega t + k x_h) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $x_h = (L_a + L_p)/2$

以上で得られた各値を用いて(1)式を解く。ただし(1)式は非線形微分方程式であるため、本報では数値積分法(Newmark- β 法)を用いて解く。

2.2 空気室前面での定在波

図5に示す様に空気室前面のprojecting wall長さの4倍になる時に“harbour resonant”と呼ばれる空気室内水柱の共振現象が顕著となる。

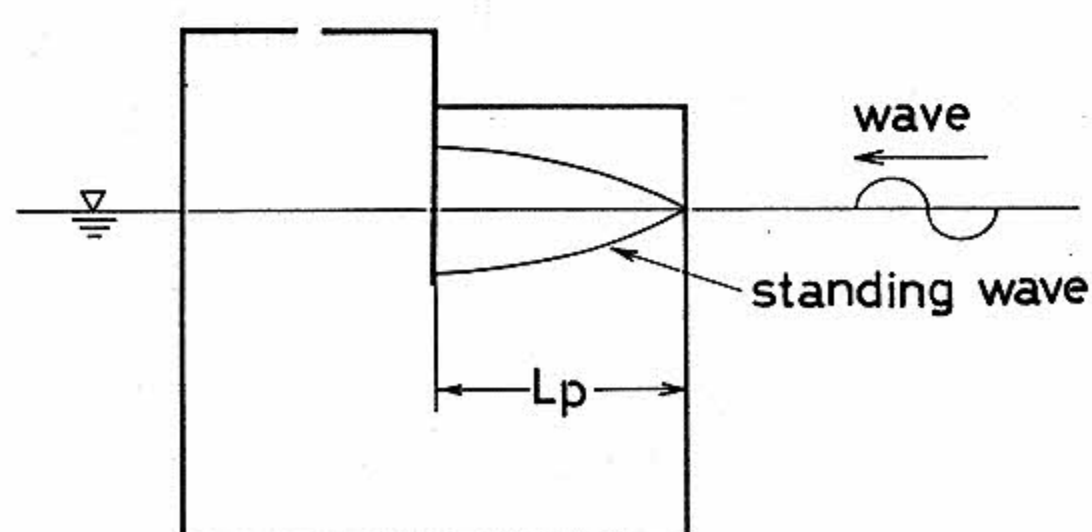


図5 ハーバー共鳴現象
Harbour resonant

つまり、周期T_w波長 λ の正弦波が入射するとき、harbour resonantは、

$$L_p = \lambda/4 = g/2\pi \cdot T_w^2/4 \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる時にpeakを呈し、従って、この時の周期T_Hは、

$$T_H = \sqrt{8\pi/g \cdot L_p} \quad \dots\dots\dots(10)$$

として表される。

3. 実験および計算結果

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)の中央部に、L_a=40cm, B=40cmの固定空気室に、h=40cmの底板およびL_p=40cmのprojecting wallを取り付け、開口方向から波高5cm, 波周期0.8~3秒の規則波を入射させ、入射波高H_w, 空気室内水位変動両振幅H_iおよび空気室内圧力変動p_iを計測した。

一方、この空気室が堤防内に組み込まれた際の出力特性を調べるため、図6に示すように、projecting wallの先端から垂直に長さL_wの鉛直壁を設け、同様の計測を行った。

なお、空気室の上面には円孔(ノズル)が設けてあり、本報においてはノズル比[SC/A_w(S;ノズル面積, C;縮流係数)]が1/80および1/6の場合について述べる。

解析は次の項目について行った。

a) 空気室内波高比; H_i/H_w

b) 空気室内比圧力; 2p_a/H_w

P_a; 空気室内圧力変動片振幅

c) 波エネルギー吸収効率; η

$$\eta = 100 (P_w/E_w) \quad (\%)$$

$$P_w = \sqrt{2/\rho} \operatorname{sc} \sum_{i=1}^n |p_i|^{3/2}/n$$

$$n = T_w/\Delta t \quad (\Delta t; \text{計算刻み時間})$$

$$E_w = \rho g^2/32\pi \cdot H_w^2 \cdot T_w \cdot B$$

なお、数値計算には海洋科学技術センターのVAX/VMSを用いた。

3.1 底板付固定空気室

projecting wallの存在による影響を調べるため、図1に示した空気室からprojecting wall部を取り外した空気室について実験および計算を行った。図7に底板の有無による内部波高比への影響を示す。図中に示す計算値は、底板付きのとき

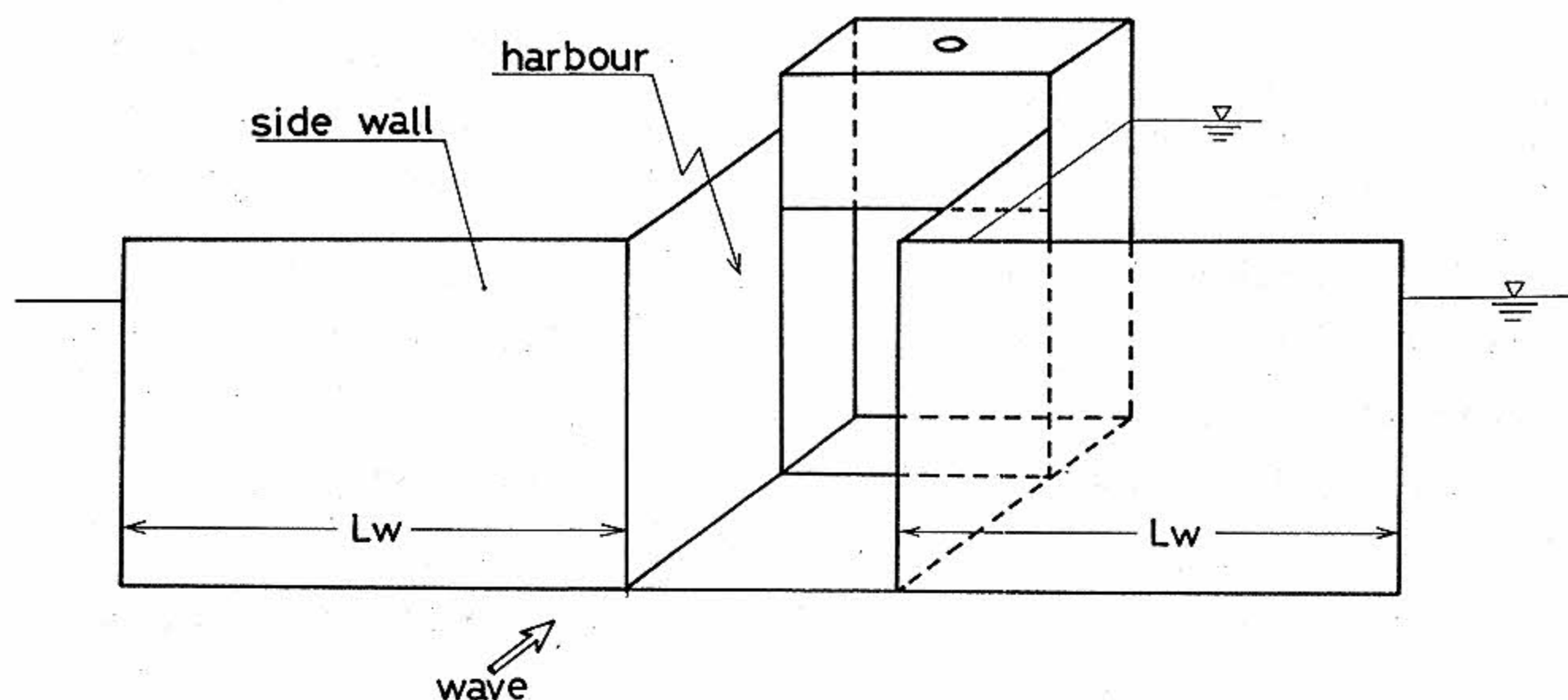


図6 防波堤組込

Air chamber model in the levee

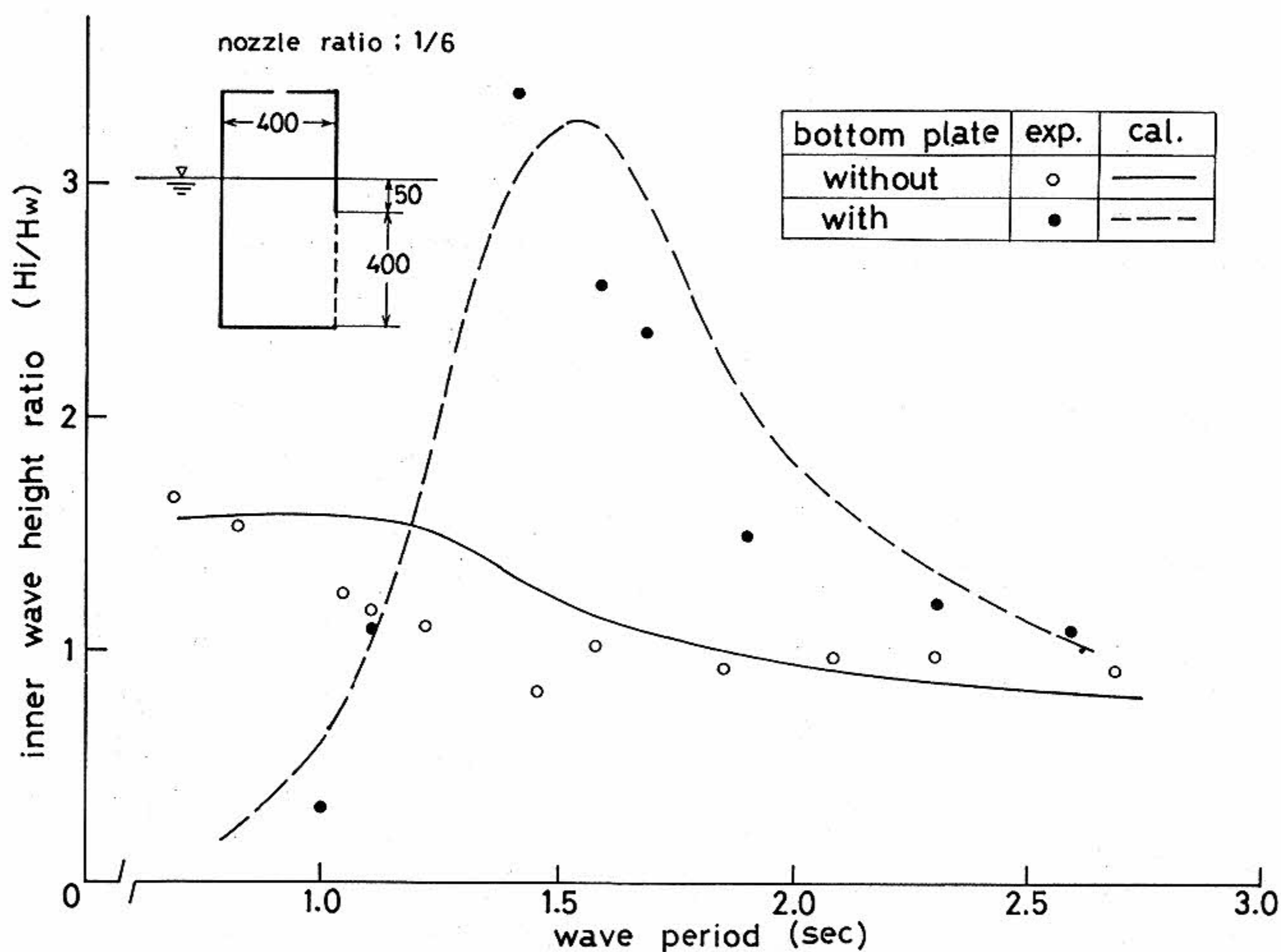


図7 底板付き固定空気室内波高特性

Characteristics of inner wave height of the the fixed air chamber with bottom plate

$L_p = 0$, 一方, 底板なしのときには,
 $M = \rho g B L_a d$ (11)

として求めた値である。

空気室の没水深さ d および底板の開口高さ h の空気室内比圧力へ与える影響を図8および図9に示す。

3. 2 projecting wall 付固定空気室

3. 2. 1 projecting wall 内 水平 cover 付き

projecting wall を取り付けしたことによる水柱長さの増大のみによる影響を調べため projecting-wall 内の没水深さ d の水深に空気室前板から wall 先端まで水平板を設けた状態で実験および計算を行った。これによって harbour resonant は発生せず, 水柱は明らかに図2に示した形状となる。

なお, 波強制力は cover なしの状態とは当然異なり, したがって数値計算においては(4)式中の F_4 を0とする。

内部波高比特性を図10に、空気室没水深さの空気室内比圧力へ与える影響を図11に示す。

3.2.2 projecting wall 内 水平 cover なし

図1に示した projecting wall 付き固定空気室の本来の形状のモデルについて、空気室内比圧力特性を図12に、波エネルギー吸収効率特性を図13に示す。なお、各図中の T_H は(10)式にて求めた harbour resonant の周期である。

図14に固定空気室に底板を、さらに projecting wall を取り付けた実験での波エネルギー吸

収効率特性を示す。図中の曲線は実験値をフェアリングした線である。

3.3 堤防組込型空気室

図6に示した projecting wall 先端の両側方に鉛直壁を付けた状態において $L_w = 1.45\text{m}$ のときの比圧力特性を図15に示す。

4. 考 察

4.1 底板付き固定空気室

底板の付いていない固定空気室まで含めて、空気室内部波高比および比圧力の計算値は実験値にほぼ定性的、定量的に合っており、本報告で提案

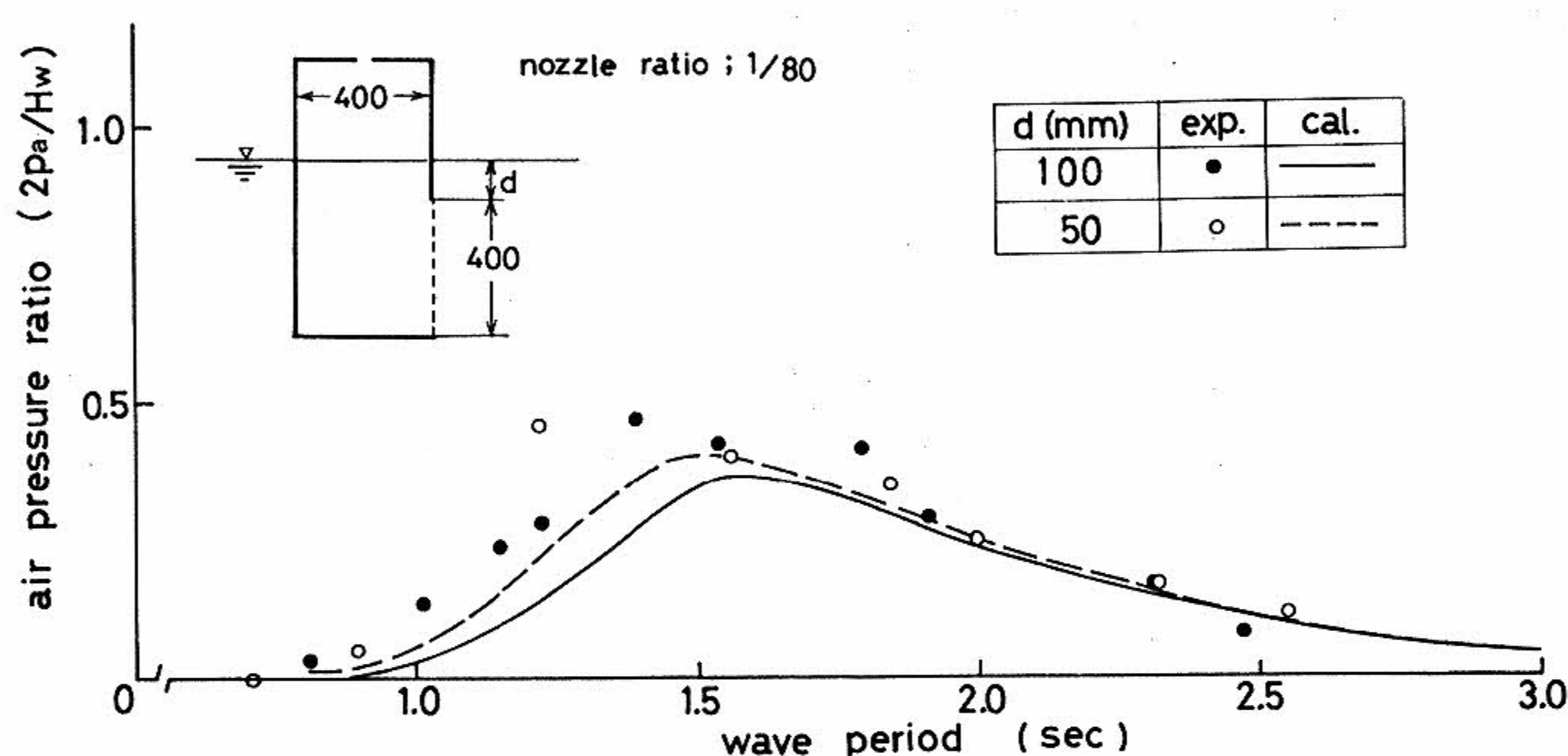


図9 底板付き固定空気室開口高影響

Effect by the height of the entrance of the fixed air chamber with bottom plate

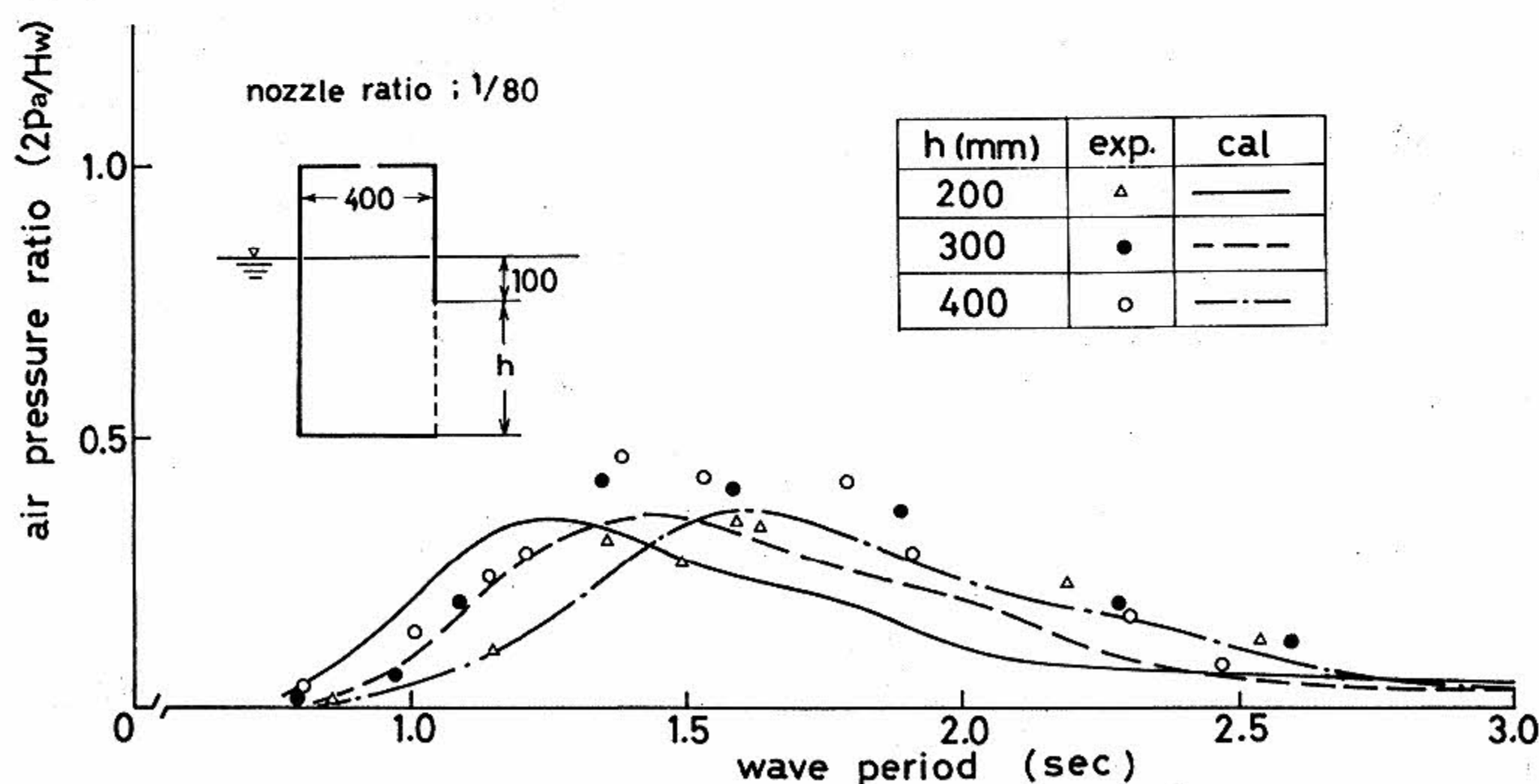


図8 底板付き固定空気室没水深度影響

Effect by depth of the fixed air chamber with bottom plate

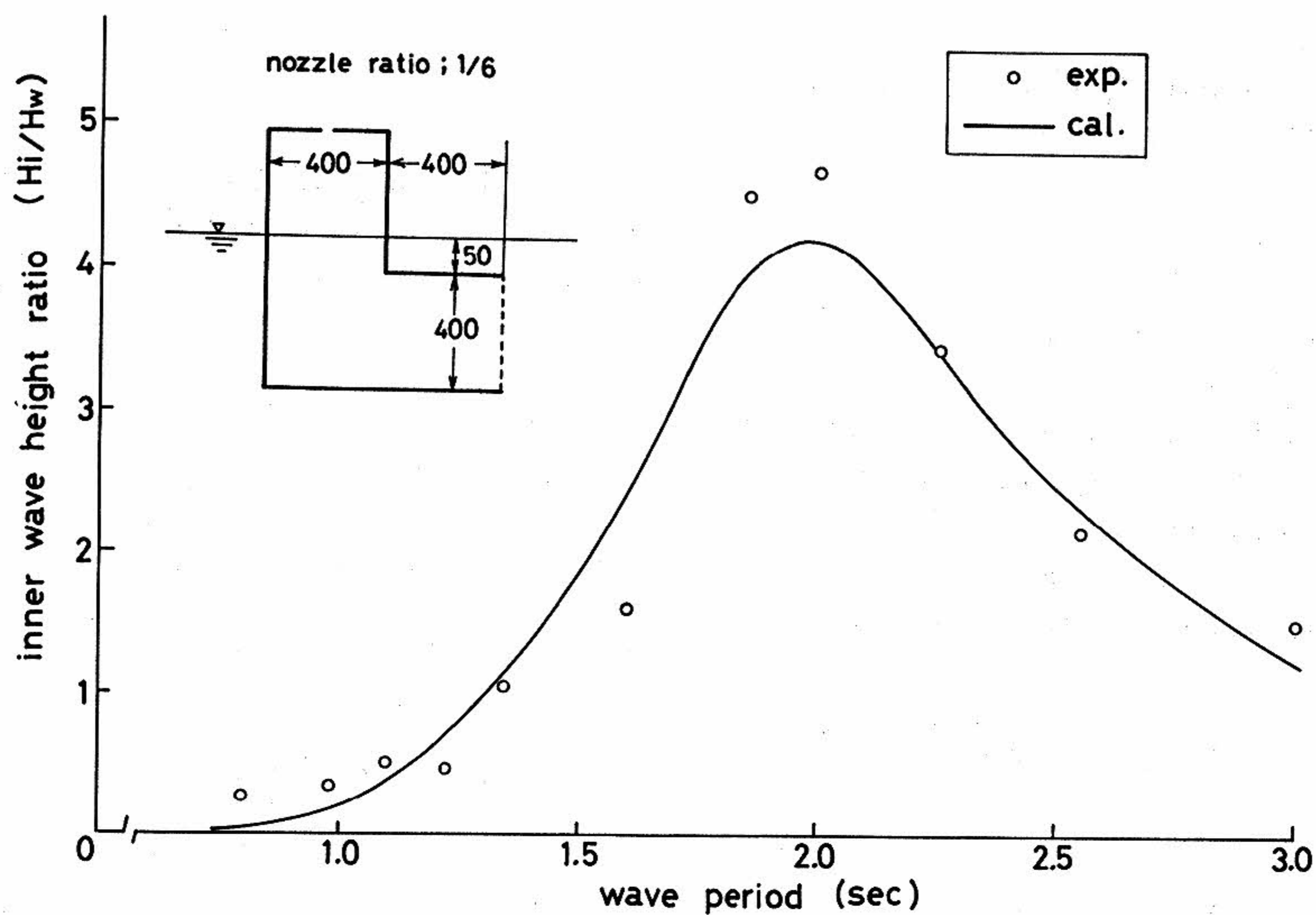


図11 没水深度影響（水平板付き）

Effect by depth of the fixed air chamber (with horizontal cover plate)

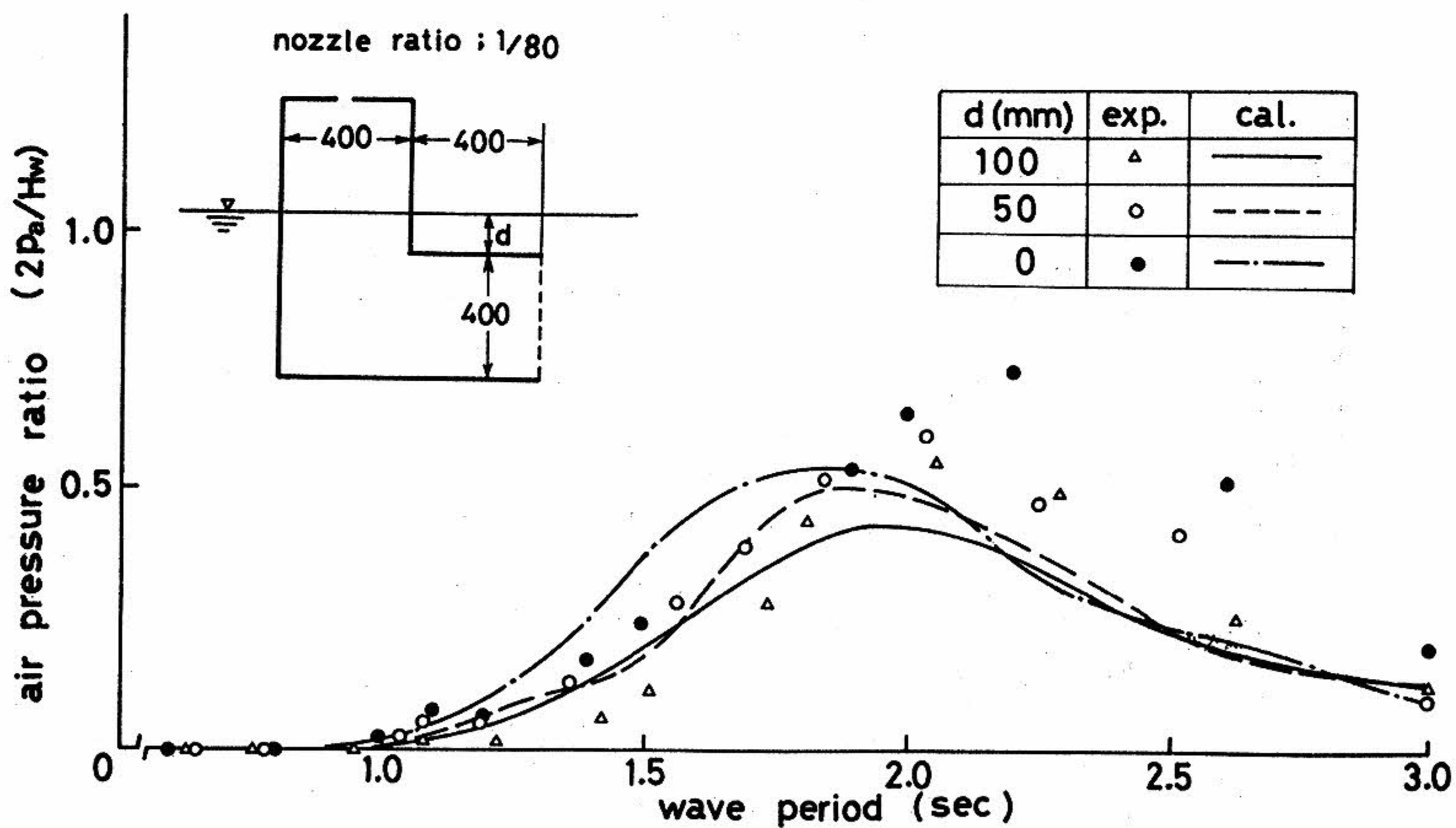


図10 空気室内波高特性（水平板付き）

Characteristics of inner wave height (with horizontal cover plate)

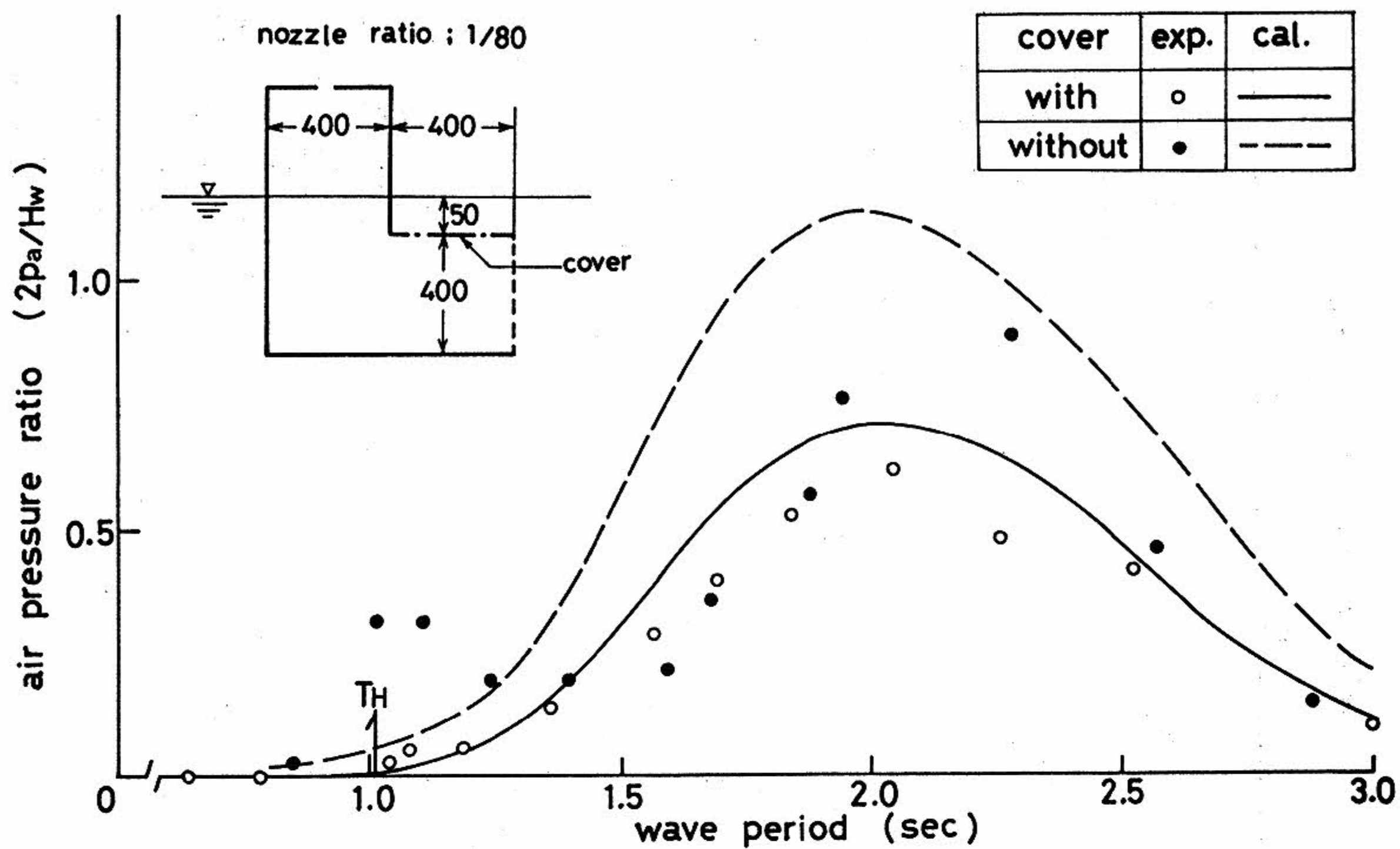


図12 比圧力特性

Characteristics of inner pressure ratio

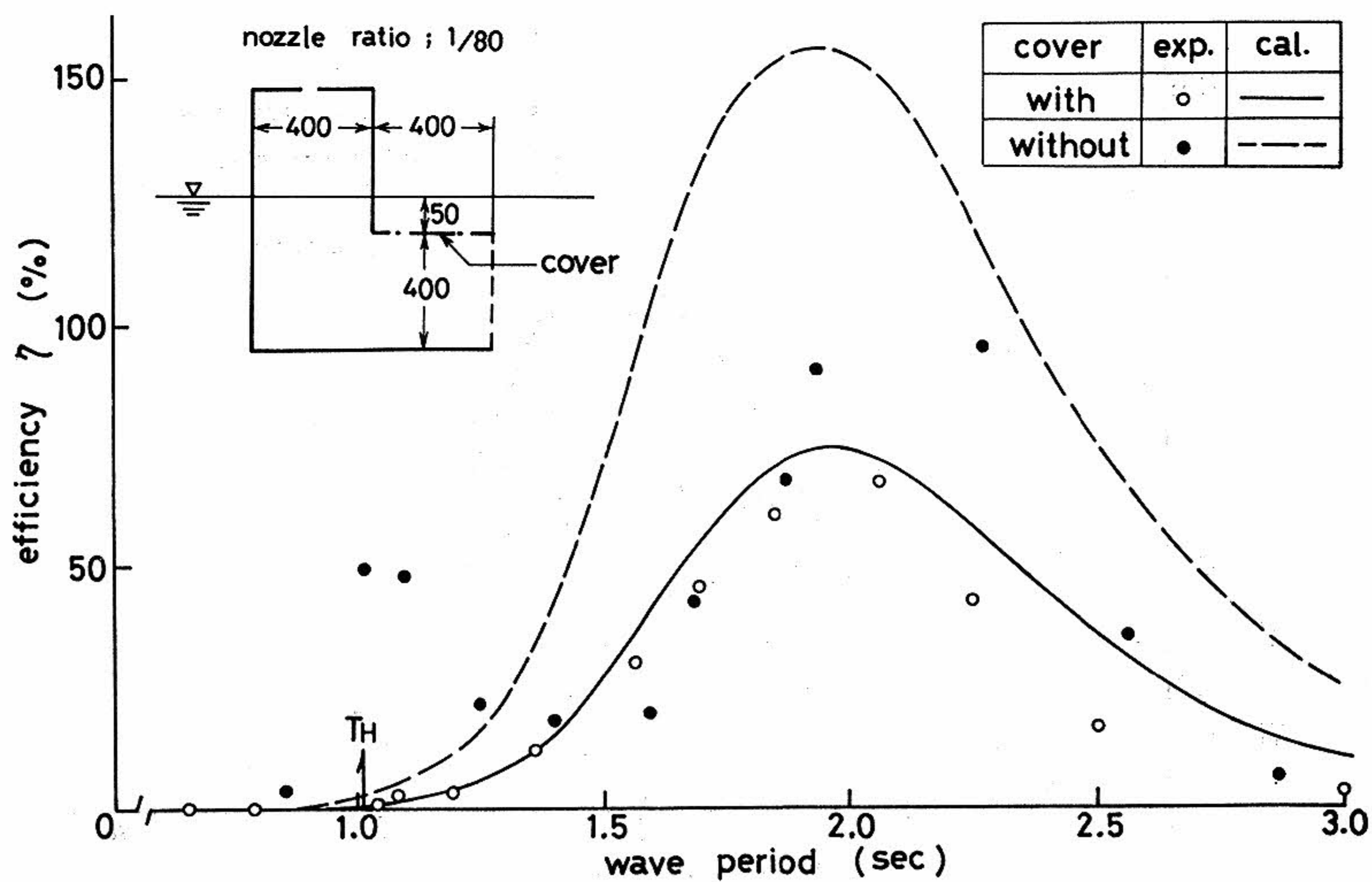


図13 波エネルギー吸収効率性

Efficiency of wave energy absorption

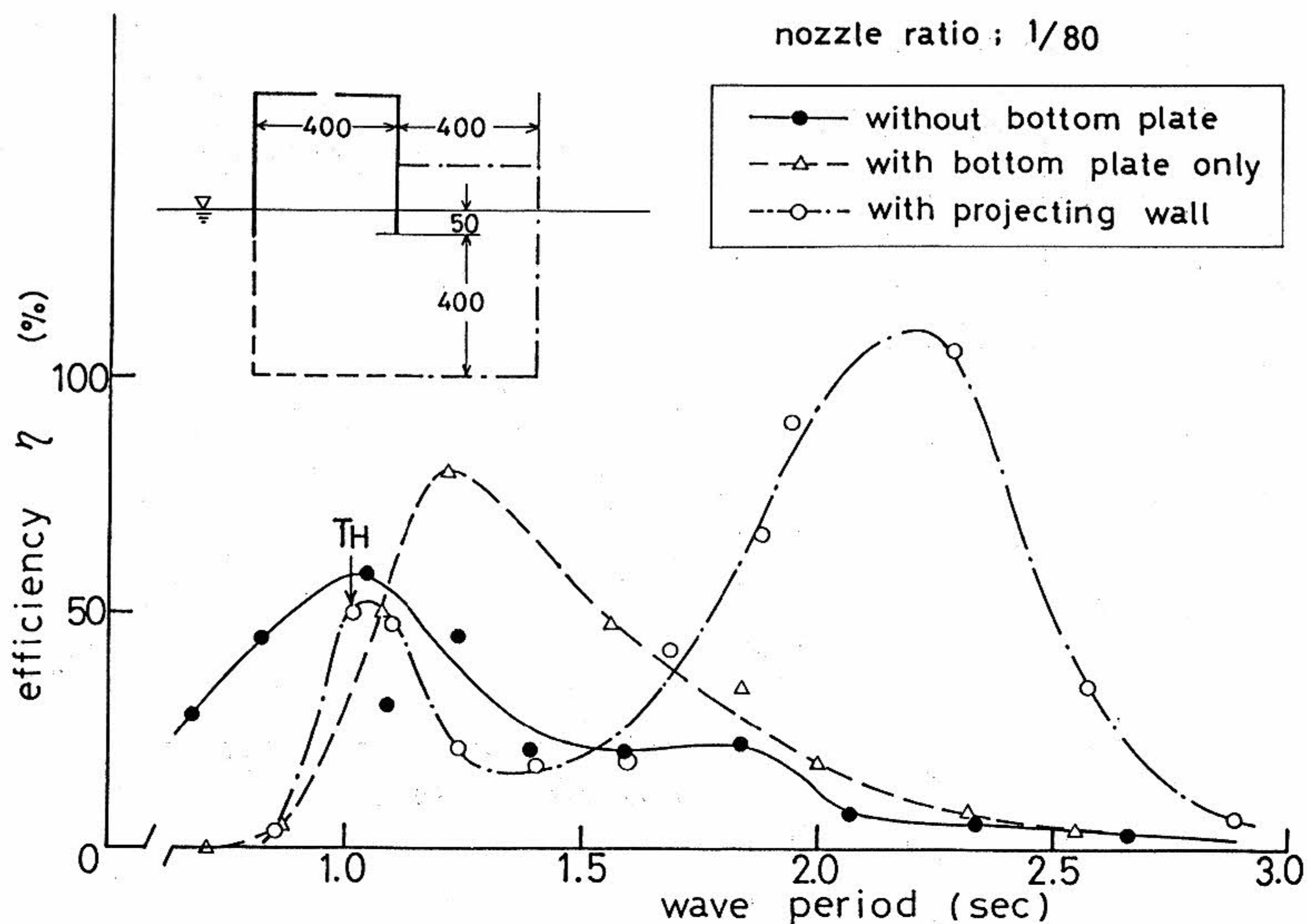


図14 固定空気室の波エネルギー吸収効率 (実験値)

Efficiency of wave energy absorption by the fixed air chamber (experiment)

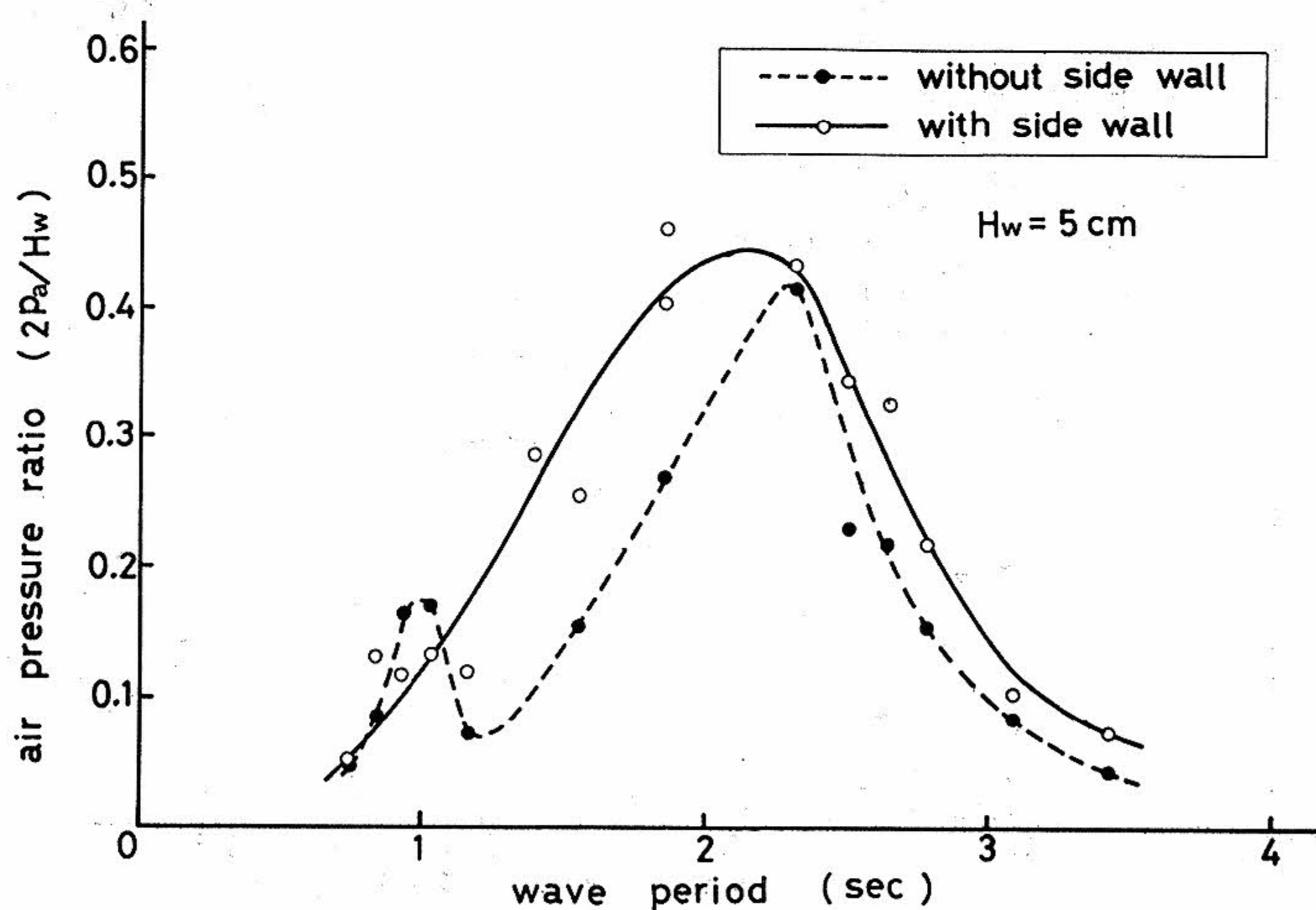


図15 防波堤組込型空気室の比圧力特性

Characteristics of inner pressure ratio of the fixed air chamber in the levee

した簡易計算法, すなわち, 水柱の簡便な見積りが, projecting wall 長さを0としたこの形状にも十分有効であった。

しかし, 図9において, 底板の開口高さによる出力への影響の傾向が計算結果の傾向とは必ずしも合っておらず, 今後の検討課題である。

4.2 projecting wall 付き固定空気室

projecting wall 内に水平 cover を取付けて水柱の形状を明確にし, また harbour resonant を消した状態では, 空気室内部波高比, 比圧力ともに計算値は実験値に良く合っており, 水柱運動のメカニズムが明らかにされた。しかしながら水平 cover の無い, すなわち本来の projecting wall 付き固定空気室については, 出力の peak 周期がほぼ合っており, 半定量的には推定できるとは言え, 計算値は実験値に比べてかなり大きくなっている。これは, 空気室前板下部で生じる渦の影響および水柱に及ぼす波強制力の推定誤差などによると考えられる。

一方, harbour resonant については, その出現周期は容易に求められ, 実験値とも一致した。

総じて, projecting wall 付き固定空気室の波エネルギー吸収効率については定性的にはほぼ明らかにされ, 各部寸法等諸元の算定が容易となったが, 定量的推定については今後の課題として残されている。

4.3 防波堤組み込み型空気室

projecting wall 先端から両側方に鉛直壁を設けることにより, harbour resonant の周期と, projecting wall を含めた水柱の共振周期の間の空気出力を向上させることができ, 実用化に対して有効な方法であることが示された。このメカニズムとして, 空気室前方の領域における波形と鉛直壁前方における波形の違いから, 波エネルギーが後者から前者へ流入していると考えられるが, この現象の解明のためには, さらに詳細な実験および検討を進める必要がある。

5. 結 言

振動水柱型波力発電装置の固定空気室前方に projecting wall を取り付けた際の波エネルギー吸収効率について, 底板なし, 底板付き, 水平 cover 付きとも比較して実験を行い, 両者の結果

を比較した。主な結言としては,

- (1) projecting wall を取り付けることにより従来の底板空気室より空気出力の peak 値を向上させ, またその出現周期を長周期側にする。
- (2) この型式の空気室における水柱形状が把握でき, その振動メカニズムがほぼ解明された。
- (3) 振動水柱および水柱に及ぼす波強制力の簡易な推定の手法が得られ, また, harbour resonant による peak 値の出現周期も容易に求められ, 空気室設計のための一つの提案が行えた。
- (4) この空気室を堤防内に組み込むことにより, さらに空気出力の向上の可能性が明らかになった。

6. 文 献

- 1) 堀田 平ほか. “固定空気室による波浪発電の出力向上の研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要, P. II-103, (1983).
- 2) 海洋産業研究会. 沿岸波エネルギー利用システム開発報告書, 東京, 1981.
- 3) 前田久明ほか. “波浪発電に関する基礎的研究(その5)”. 日本造船学会論文集(152) P. 250-255. (1983)
- 4) Ambli, N. et al. “The Kvaerner Multi resonant OWC”, Proc. 2nd Int. Sympo. on Wave Energy Utilization. Trondheim, 1982-06, Tapir, 1982, p.275-297.
- 5) Evans, D.V. “Wave-power Absorption with in a resonant harbour”. Proc. 2nd Int. Sympo. on Wave Energy Utilization. Trondheim, 1982-06, Tapir, 1982, p.371-378.
- 6) 高井忠夫ほか. “2枚の垂直板の運動と透過波について”. 関西造船協会誌(164) P. 43-49 (1977).
- 7) 池淵哲郎. “空気式波浪発電装置のエネルギー吸収効率について”. 日本造船学会第6回海洋工学シンポジウムテキスト. 東京, 1982-12, P. 153-161.
- 8) 田才福三. “規波中の応答理論および計算法”. 日本造船学会第1回耐航性に関するシンポジウムテキスト. 神戸, 1969-07, P. 1-52.
- 9) 宮崎武晃ほか. “波浪発電出力向上のための

空気流位相制御の基礎的研究（その１）”．

関西造船協会誌（188）P. 1 ～ 8 （1983）．

- 10) 竹内俊介．“波浪発電装置の空気出力向上に関する基礎研究”．東海大学海洋学部，1983．卒業論文．