

空気タービン波浪発電用波速度検出位相制御法 に関する研究

宮崎 武晃^{*1}

空気タービン方式波浪発電装置の波浪エネルギー吸収率は一般に空気室内水柱の固有振動周期と同じ周期の波浪において高く、他の周期の波浪に対して低い傾向である。そこで水柱の固有振動周期より長周期の波浪においてエネルギー吸収率の向上策とし位相制御法がある。

位相制御の有効なことは、理論および実験で証明されているが、位相制御を実際の波浪装置に適用するには、波の予測が必要でありノルウエーのBudalらはKalman filter法を用いて未来の波を予測する方式を提案している。本報では上記の間接的に波を知る方式に対し、空気室前方にて入射波の伝播速度を直接計測する“波速度検出法”を用い、制御が難しい空気室内水柱運動の位相制御実験を実施した。

結果は波速度検出法により空気室出力の位相制御は可能であったが、空気室からの反射波の影響と位相制御弁閉鎖時に発生する水柱の振動により弁の誤動作が発生した。

A Study of the Wave Propagation Detection Method in Phase Control for Oscillating Water Column

Takeaki Miyazaki^{*2}

The concept of the phase control, proposed by Budal et al., in relation to the performance of a wave energy device can be considerably improved by the control the motion of the device. The phase controlling aspect of the OWC device consists of two parts. One is to predict an incoming wave a certain time in advance and the other is to open the valve on water column at the proper time, so that maximum velocity of the water column occurs at the moment of local wave peaks and troughs. In this paper, “the wave propagation detection method” was used to predict the open valve timing of OWC and some experimental results with OWC model are presented. The technical advantage of this method is measured by looking at each real wave peak, and comparing this with other wave peak prediction methods. The phase control of OWC was possible in both regular and irregular waves but some valve opening and closing timing errors occurred due to reflection waves from OWC.

*1 海洋利用技術部

*2 Marine Exploitation Technology Department

1. 緒 言

波浪発電装置には多くの種類があるが、空気タービン方式は、波浪エネルギーをいったん空気室において空気エネルギーに変換し、空気タービンを用いて発電する方式である。このため波浪発電装置の中でも、実用化が最も期待されている。しかし波浪エネルギーの吸収率は、空気室内水柱の固有振動周期と同じ周期の波の場合だけ高く、他の周期では低い特性を示す。このため、各種の周期を含む実海域波浪に対して、かならずしも吸収率は高いとは言えない。そこで実用化への必要不可欠な条件として、空気室の固有振動周期以外の周期において、波浪エネルギーの吸収率の向上、すなわち吸収率の高いバンド幅の拡張があげられる。

波浪発電装置のエネルギー吸収バンド幅の拡張を目的とす位相制御法がBuda1らにより示され、理論および水槽実験により、その有効性が明らかになりつつある。位相制御とは波浪中で運動している波浪発電装置の可動部（空気室の場合は空気室内水柱）を適当なタイミングで拘束、解放を繰り返すことにより、可動部を常に共振状態のように運動させる方法である。

位相制御を実際の海域で実施する波浪装置に適用するためには、波の予測が必要であり、Buda1らはKalman Filter法を用いて、過去、現在の波情報から必要な未来の波を予測する方法を用い、一方、益田らは不規則波も短期的にはある程度規則性を有していると仮定し、移動平均周期を用いて波を予測するゼロクロス法を試みている。両方式ともに、波浪装置の横又は真下に波高検出器を設置するため、位相制御時の発散波が入力波信号へ与える影響は大きい。

本報では上記方法と異なり、波浪装置の前方にて入射波の伝播速度を直接計測して波の到着時刻を予測する“波速度検出法”を用い、制御が比較的難しい空気室の位相制御実験を実施し、空気室の波エネルギー吸収特性の向上を検討する。

2. 原 理

2.1 位相制御の基本原理解

波浪装置の可動部が ζ 方向の1モード運動する場合に、負荷系が、可動部の変位と運動速度、そ

して速度の2乗に比例する減衰力を及ぼすものと仮定すると、可動部の運動方程式は次式で表わされる。

$$(M+m)\ddot{\zeta} + N\dot{\zeta} + C\zeta + D(\zeta, \dot{\zeta}, \dot{\zeta}^2, \dots) = F_w \quad \dots\dots(1)$$

ここで、M；可動部の質量

m； “ 付加質量

N； “ 造波減衰力係数

C； “ 復原力係数

D；負荷系の減衰力

F_w ；波浪外力

である。流体力 F_h は式(2)で与えられる。したがって可動部が受ける力 F_e は式(3)となる

$$F_h = F_w - m\ddot{\zeta} - N\dot{\zeta} \quad \dots\dots(2)$$

$$F_e = M\ddot{\zeta} + C\zeta + D(\zeta, \dot{\zeta}, \dot{\zeta}^2, \dots) \quad \dots\dots(3)$$

可動部が吸収するパワーの一周期あたりの平均値 $\bar{E}$ は、この F_e および $\dot{\zeta}$ を用いて

$$\bar{E} = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} \text{Re}[F_e] \cdot \text{Re}[\dot{\zeta}] dt \quad \dots\dots(4)$$

として求められる。ここで T_w は入射波周期、 $\text{Re}[\]$ は実部を取ることを示す。

ここで負荷Dは ζ および $\dot{\zeta}$ に比例する項のみであり、 $D = d_c\zeta + d_N\dot{\zeta}$ とすると、(1)式は次の線型運動方程式となる。

$$(M+m)\ddot{\zeta} + (N+d_N)\dot{\zeta} + (C+d_c)\zeta = F_w \quad \dots\dots(5)$$

同様に式(3)は次式で表わされる。

$$F_e = M\ddot{\zeta} + d_N\dot{\zeta} + (C+d_c)\zeta \quad \dots\dots(6)$$

今、可動部が $\zeta = \xi e^{i\omega t}$ で表わされる正弦運動とすると式(6)を式(4)に代入し積分すると、式(6)の第1項と第3項は一周期の間にエネルギー吸収に寄与しないため、第2項のみ考慮する。また式(5)から ξ を求め式(4)に代入すると式(7)が得られる。

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \omega^2 d_N \frac{|F_w|^2}{\{(C+d_c) - \omega^2(M+m)\}^2 + \omega^2(N+d_N)^2} \quad \dots\dots(7)$$

吸収パワーを向上させる方法として式(7)の分母第1項を小さくする。すなわち

$$C + d_c = \omega^2 (M + m)$$

のとき $\bar{E}$ は最大となり、可動部の運動は共振状態にある。ここで共振状態が現われる条件は ω による。ここでC、 d_c 、M、mを変えずに、 ω を常

に可動部の運動の固有振動周波数 ω_N にすると吸収パワーの向上が図れる。これが位相制御の基本原理であり、実際には入射波周波数 ω_W が ω_N より小さい時に、波浪が $0 \sim \pi$ の間に、方向運動の固有周期 t_n の半周期 $t_n/2$ の間、また $\pi \sim 2\pi$ の間で $t_n/2$ 間だけ作動させ、それ以外の時間は拘束しておく。

最適位相制御は波浪装置の可動部に及ぼす上下方向波浪外力のピーク値出現時刻に、可動部の運動速度最大を同位相にすることである。この状況を達成するには可動部（例えば空気室）の固有振動周期 t_n を用い、波浪外力のピーク値出現時刻 t_p に対し $t_n/4$ だけ以前の時刻に可動部を拘束状態から解放して運動させ、再び t_p より $t_n/4$ 後に拘束することである。

2.2 波速度検出法

最適位相制御を実行するには、入射波ピークの予測が必要であり、宮崎らにより提案された“波速度検出法”は波浪装置の前方に2台の波高計を適当な距離をおいて設置し、これらで入射波ピークの伝播速度を求め、このピークが波浪装置に到達する時間を予測する方法である。本方式についてはヒービング・ブイ波浪装置の水槽実験により、最適位相制御に有効であることが得られた。

本報においては、波速度検出法を比較的反射波が高い空気室を用いた波浪発電装置に適用した場合、波ピーク検出にどの程度影響を与えるか、またその時、位相制御による空気出力特性について水槽実験を実施した結果について述べる。

波速度検出法を単独固定空気室に用いる場合の概念図を図1に示す。

空気室の前方 l および $l+L$ の距離に2台の波高計を設置し、入射波の上下ピーク通過時刻をおのこの波高計で検出する。入射波ピークは波高計1、波高計2、を通過し空気室に到達するが、波ピークが波高計1から2まで伝播する時間 Δt を測定することにより式(8)から伝播速度 V が求まる。この波ピークが空気室の中心部に達する時間 t_p は式(9)から求まる。

$$\Delta t = L/V \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$t_p = l/V = l \cdot \Delta t / L \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで L は2台の波高計間の距離、 l は波高計2から空気室中央までの距離で、いずれも一定値で

あるため容易に t_p が求まる。

空気室を用いた波浪装置では、空気室内水柱の固有振動周期 t_n より長周期の波に対して波ピーク値出現時刻 t_p と空気室内水柱の運動速度最大を同位相にするため、 t_p 時刻以前、すなわち水柱の固有振動周期の $1/4$ 時間前に水柱を運動させることにより目的は達せられる。式(10)が最適制御時刻 T_{opt} を与える。

$$T_{opt} = t_p - t_n/4 = l/L \cdot \Delta t - t_n/4 \quad \dots\dots(10)$$

空気室内水柱の運動を制御するためには、空気室内空気が出入するノズル部に空気を遮断する空気流開閉弁を取り付け、これをできるだけ短時間で作動させる。弁が開放時は水柱は運動し、弁を閉鎖すると閉めた時の水柱の状態が保たれる。

波速度検出法の位相制御領域は波高計2台の設置距離 l および L によつて決まる。今、位相制御を実施したい波周期を T_1 から T_2 ($T_1 > T_2$)とすると波高計の設置距離 l および $l+L$ は式(11)(12)で与えられる。

$$l > t_n/4 \cdot V = t_n/4 \cdot g/2\pi \cdot T_1 \quad \dots\dots(11)$$

$$l+L < (T_2/2 - t_n/4) \cdot V \\ = (T_2/2 - t_n/4) \cdot g/2\pi \cdot T_2 \quad \dots\dots(12)$$

また、 L の距離は波高計の波ピーク検出精度に依存するが、これまでの経験では波長の $1/50$ で Δt の検出は可能であるので、式(13)の条件を付ける。

$$L \geq 1/50 \cdot g/2\pi \cdot T_1^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

3. 実験

3.1 実験装置

実験は図2に示す長さ10m、幅0.3m、水深0.6mの小型水槽を用い、反射波吸収型造波装置で造波し、水槽中央部に位相制御する空気室を固定し規則波および不規則波による実験を実施した。実験に用いた空気室模型はA、Bの2種類で、模型Aは図3に示す、長さ150mm、幅100mm、高さ54.7mmのアクリル製で、空気室下部の開口部は空気室内水柱振動によるロスを少なくするため丸みをつけている。模型Bは図4に示すように長さ458mm、幅297mm、高さ150mm、後部300mmは浮力室構造である。しかし今回の実験ではすべて固定して実施した。これらの空気室上部に、空気室内水柱運動を制御するための空気遮

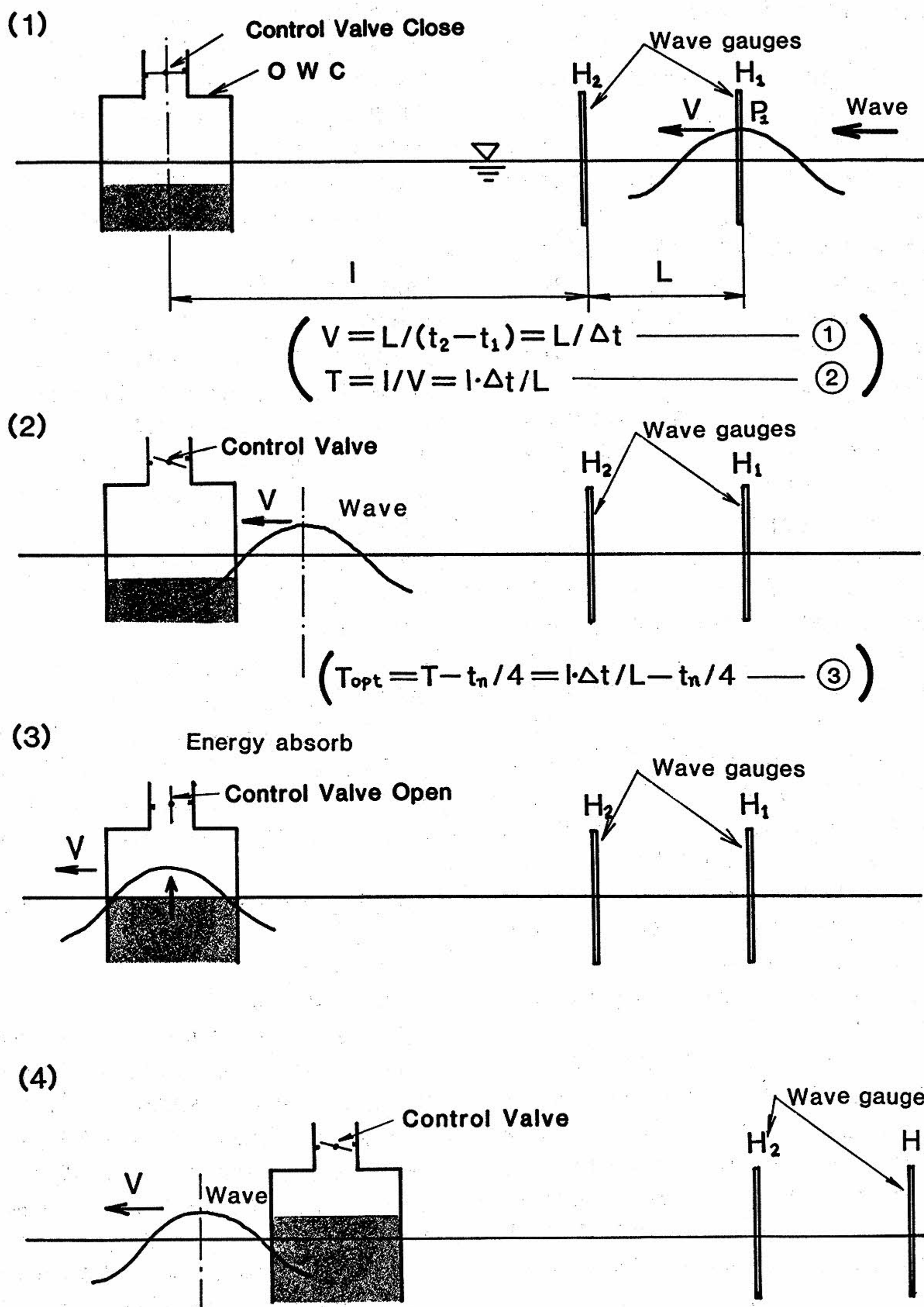


図1. 波速度検出位相制御法概念図

Wave propagation detection phase control method

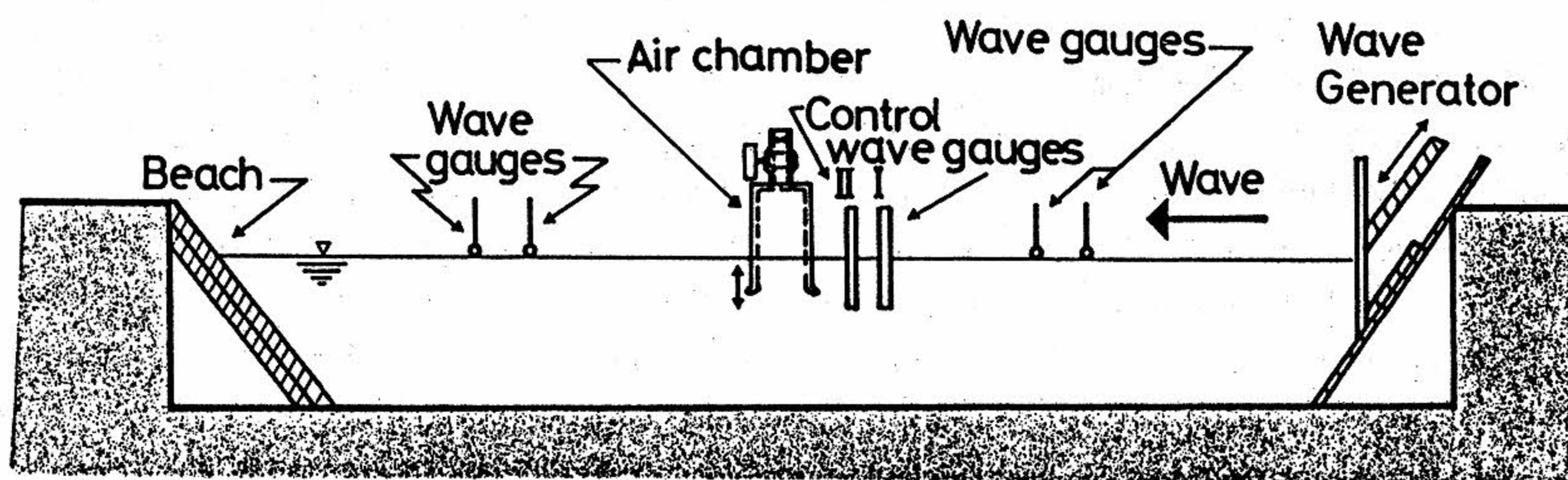


図 2. 実験装置配置図

Experimental set up in wave tank

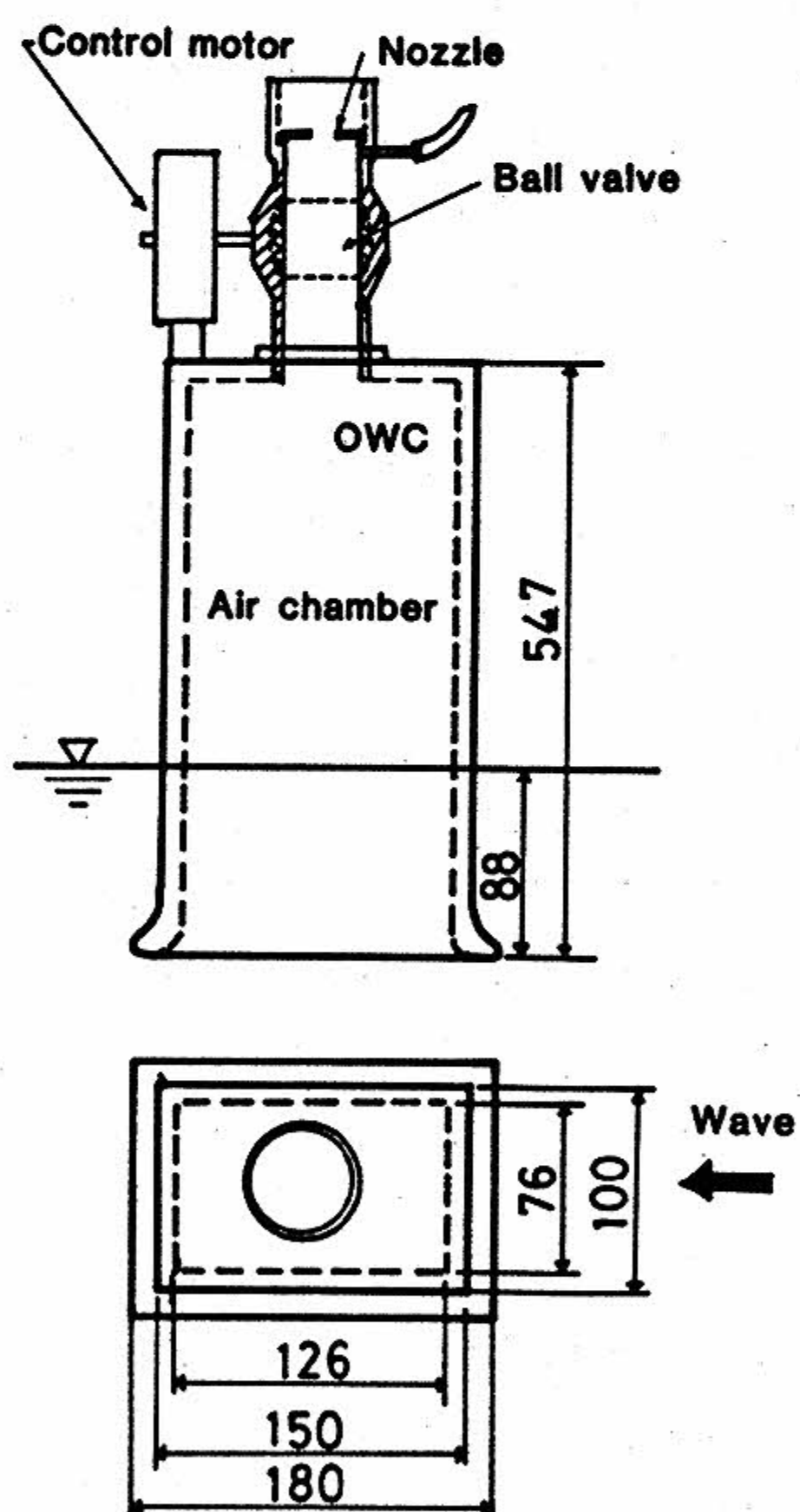


図 3. 模型 A
Model A

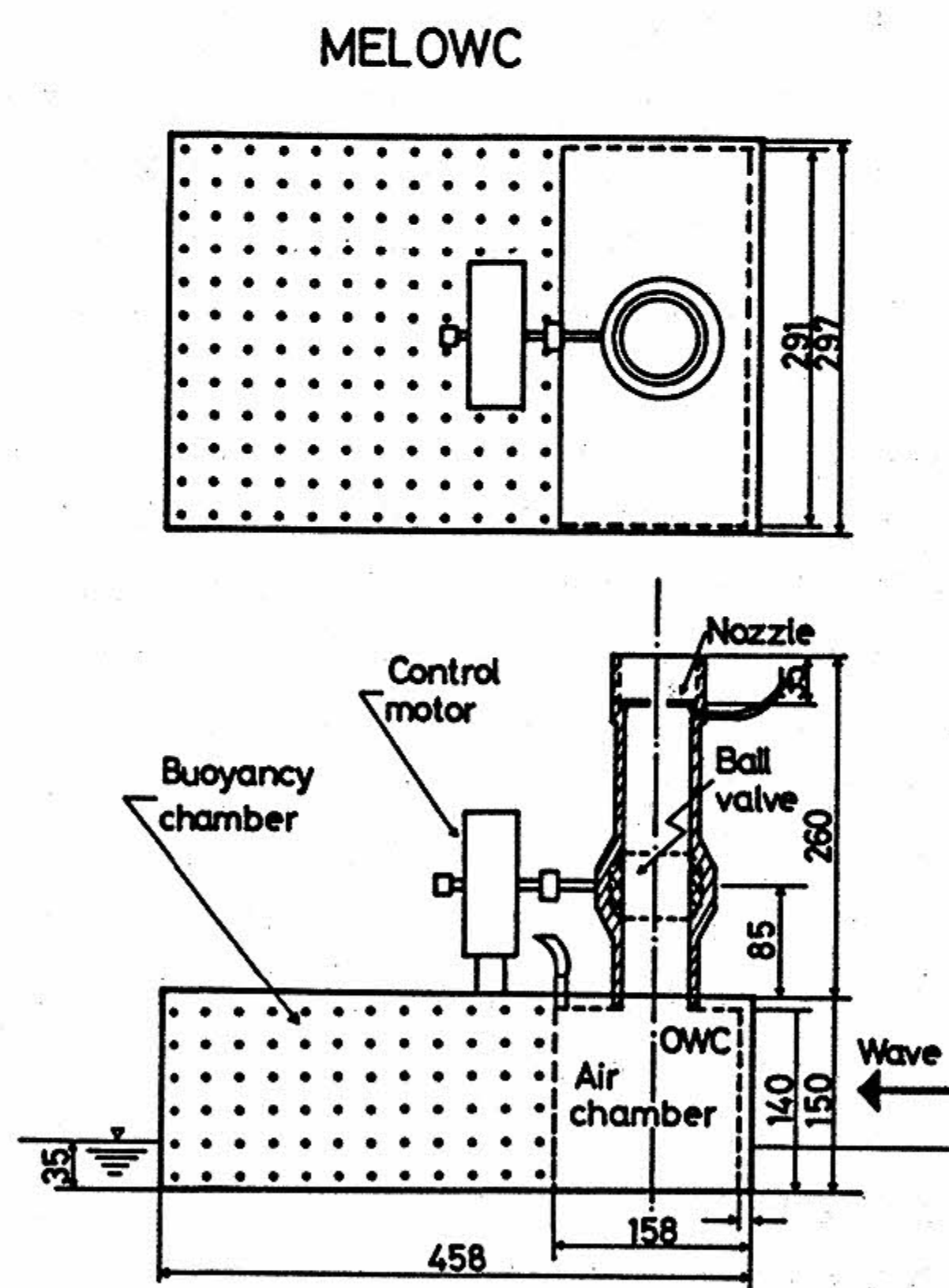


図 4. 模型 B
Model B

断用開閉弁を取り付け制御する。

3.2 計測方法

空気室の前方に波速度検出用波高計 2 台，入射波および反射波計測用波高計 2 台，空気室の後方に透過波および消波装置からの反射波計測用波高計 2 台，計 6 台，空気室上部開閉弁の外気側に取り付けたノズル前後の差圧力の計測用 1 台，空気室内の圧力計測用 1 台，計 2 台の圧力計を用いた。これらによる計測から，空気室からの反射エネルギー，空気室の吸収エネルギー，透過エネルギー，消波装置からの反射エネルギーを算出し，入射エネルギーより差し引き，残りを Unaccounted エネルギー（説明できないエネルギー）として求めた。この Unaccounted エネルギーが大きい場合は実験を中止し，原因を追求した。Unaccounted エネルギーには渦ロス等が含まれる。計測時間は 50 秒間とし各実験値を求めた。

4. 結果

4.1 空気室模型 A

位相制御の特徴は空気室内水柱の運動を入力波浪に無関係に水柱の固有振動周期で常に作動させることで，正確な固有振動周期を知る必要がある。最初，固有振動周期付近の波を造波し，空気室のエネルギー吸収効率を求める。図 5 は横軸に波周波数，縦軸にエネルギー効率をとり結果を示す。この時のノズル比（ノズル面積／空気室面積）は $1/20$ である。空気室の吸収エネルギー最大は 1.43 Hz で 49% ，反射エネルギーは 16% ，透過エネルギーは 34% ，消波装置からの反射はすべて 1% 以下であったので Unaccounted エネルギーに含めて表わす。ここで入射エネルギーは水槽全幅 0.3 m に存在するエネルギーとして扱う。比較のため吸収エネルギーを模型幅に存在する波エネルギーの比で表わすと， 1.43 Hz で 1.47 倍の値となる。

波速度検出用波高計 1 および 2 は空気室の前方 3.8 cm および 3.1 cm に設置した（ $l = 3.1$ ， $L = 7$ ）。図 6 は規則波（ $0.85 \text{ Hz} \sim 1.10 \text{ Hz}$ ）中において，波速度検出法により空気流を位相制御した結果を示す。波高計 1 および 2 の波信号はミニコンに導かれ，おのこの波ピークを検出し，その時刻の差 Δt を求め，式(10)より最適制御時刻

T_{opt} を計算する。ここで l/L および $t_n/4$ は定数であるから， Δt の精度により T_{opt} の値は影響を受ける。 T_{opt} が求めれば実際の時刻が T_{opt} で求めた時刻に達した時，空気室上に取り付けた開閉弁へ開放指令信号を出力し，弁を動作させる。弁の開鎖信号は空気室内圧力が 0 に達した時に出させる。実験結果は 1.0 Hz で位相制御有りは約 32% ，位相制御無しは 2% と差が大きい。しかしこの場合，位相制御無しに対してはノズル面積が大きいいため吸収率は低く，最適ノズルを使用すれば吸収率は上る。また位相制御有りの結果が，低周波数値で効率が急激に低下する傾向を示しているが，理想的にはフラットに近くなる。また結果はバラツキが多く実験精度が低いことを示している。この原因を検討するため，例として 1.0 Hz の効率 27.9% のデータを検討する。この場合 Unaccounted エネルギーは入力エネルギーの 8.6% と大きい。一方，空気室による反射エネルギーは入力エネルギーの 4.7% と低く，これを波高に換算し比較すると反射波高は入射波高の $1/4.6$ であり，この反射波が波ピーク検出にどの程度影響を与えているか確認していない。また位相制御に影響を与える他の要素としては，開閉弁閉鎖時に発生する空気室内圧力の振動が考えられる。実験中，空気室内圧力の細かな振動により，開閉弁がばたつく場合がしばしば観察された。特に模型 A は空気室の高さが高く，空気内水柱に比べ空気柱は 5 倍と高いため，空気の圧縮性の影響により圧力の振動が発生したためと考えられる。

図 7 は 0.9 Hz 波浪中における位相制御弁開放信号出力時刻を式(10)から求める最適時刻から前後に移動した時の吸収効率の変化を示す。出力信号時刻の移動は式(10)の $t_n/4$ の定数を強制的に変化させて行う。計算上 $t_n/4 = 1.42 \text{ mS}$ が最適値であり，値が小さいと制御が遅れ，大きいと制御が早いことを意味する。ヒービング・ブイの実験結果によると，最適時刻に対し制御が遅れると効率が急激に減少するが，早い場合それほど変化しない結果であった。しかし本実験結果は制御時刻を最適制御時刻から前後させたが，特に効率に変化がなかった。これは位相制御が良くできていない結果によるものと考えられる。

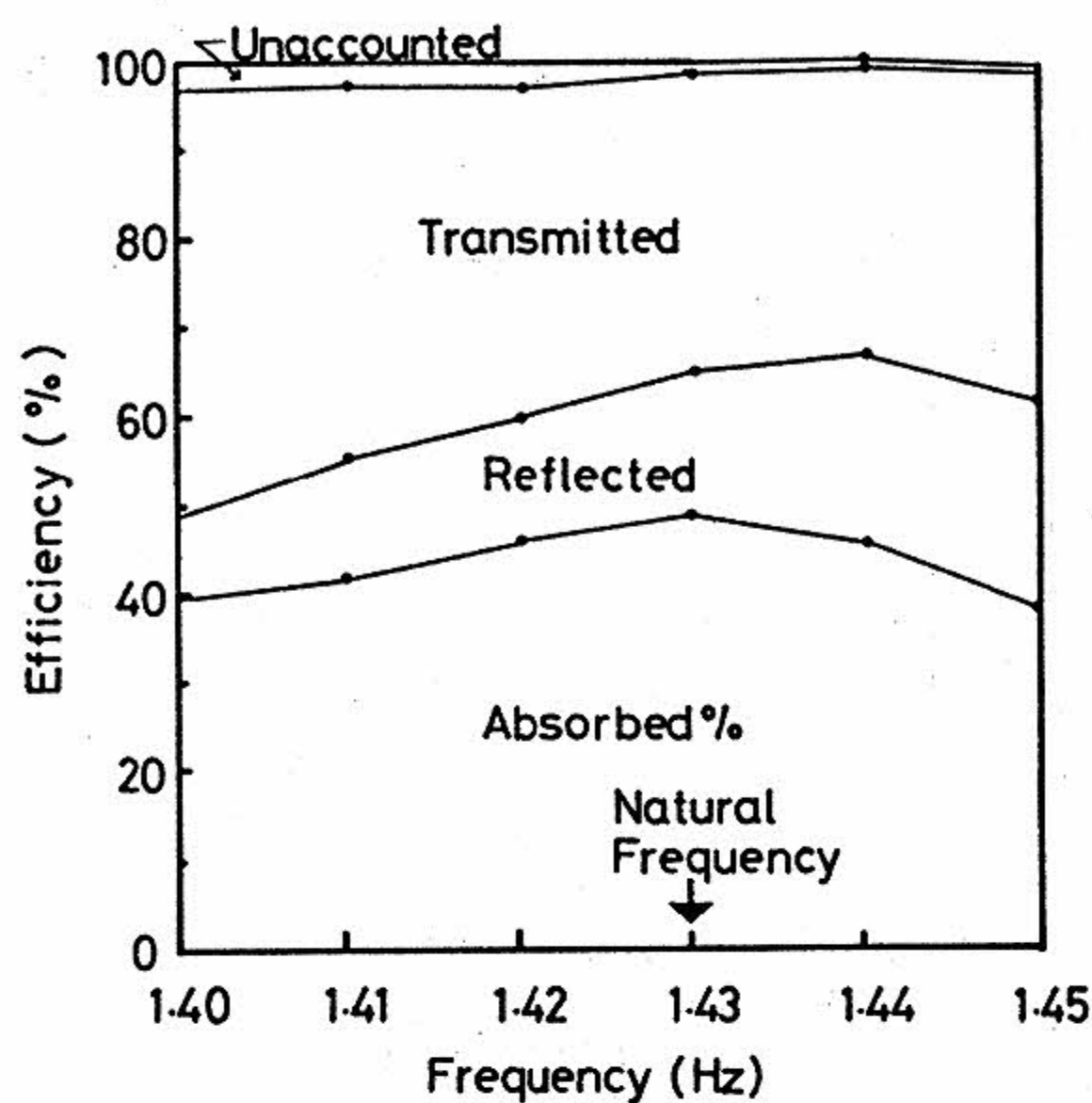


図 5. 模型 A の固有振動数付近の特性
A Natural frequency of the Model A
(Plate No,6 Ratio 1/19.5)

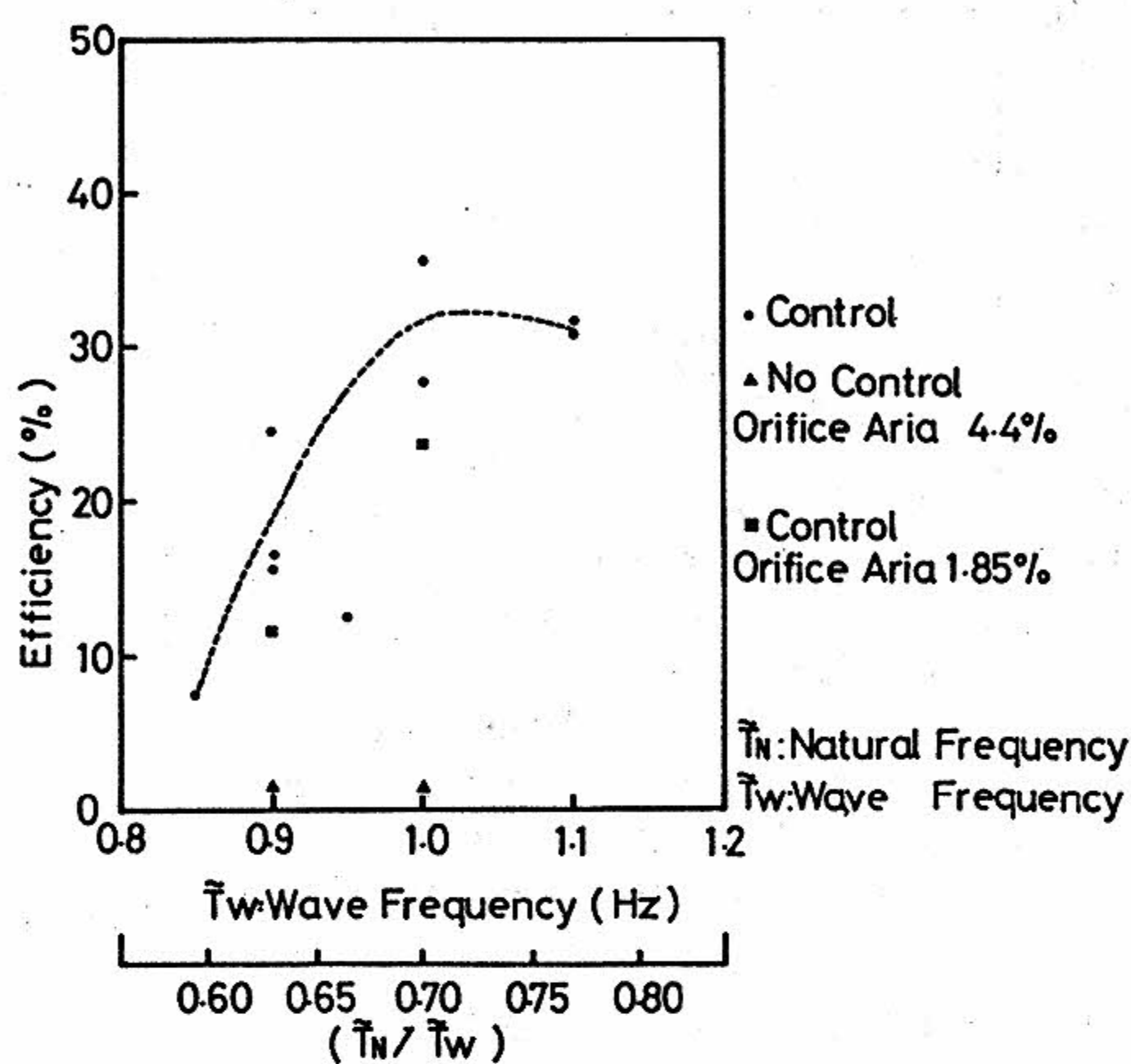


図 6. 規則波中の位相制御結果
Phase control in regular waves

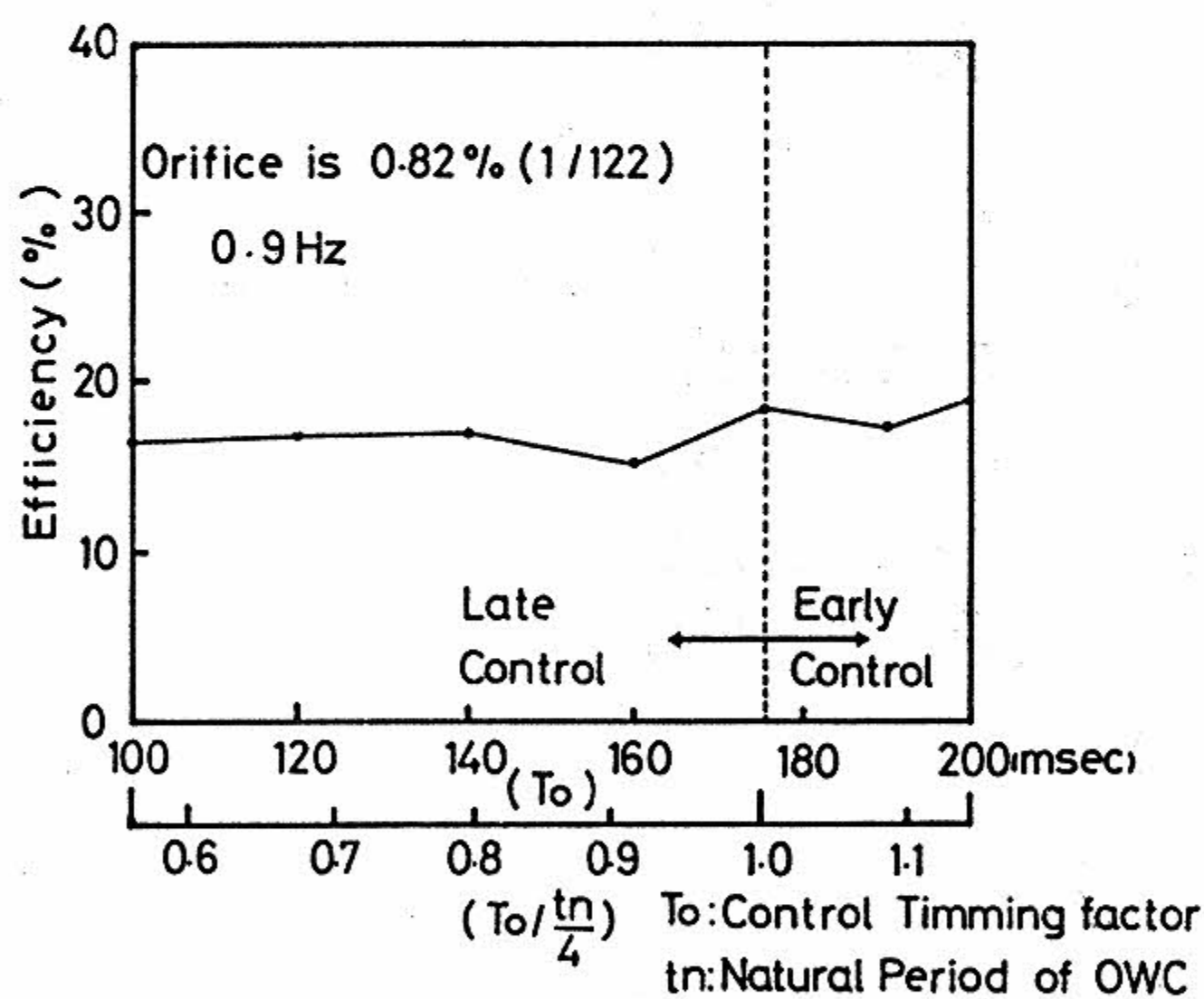


図 7. 制御時刻 T_o を変えた時の特性
Changing T_o in regular wave phase control

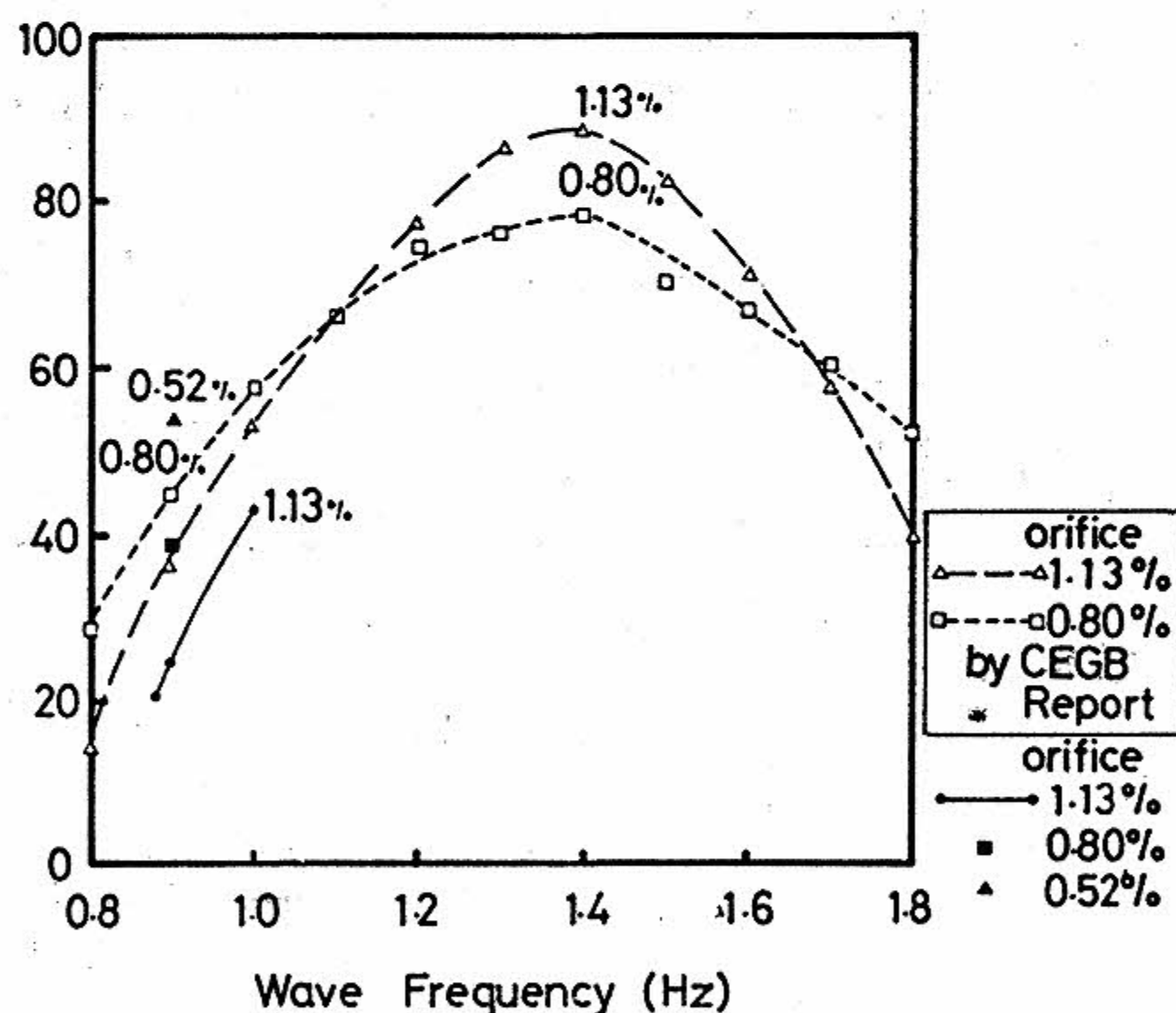


図 8. MEL OWC 結果との比較
Comparison of the results with MEL OWC results

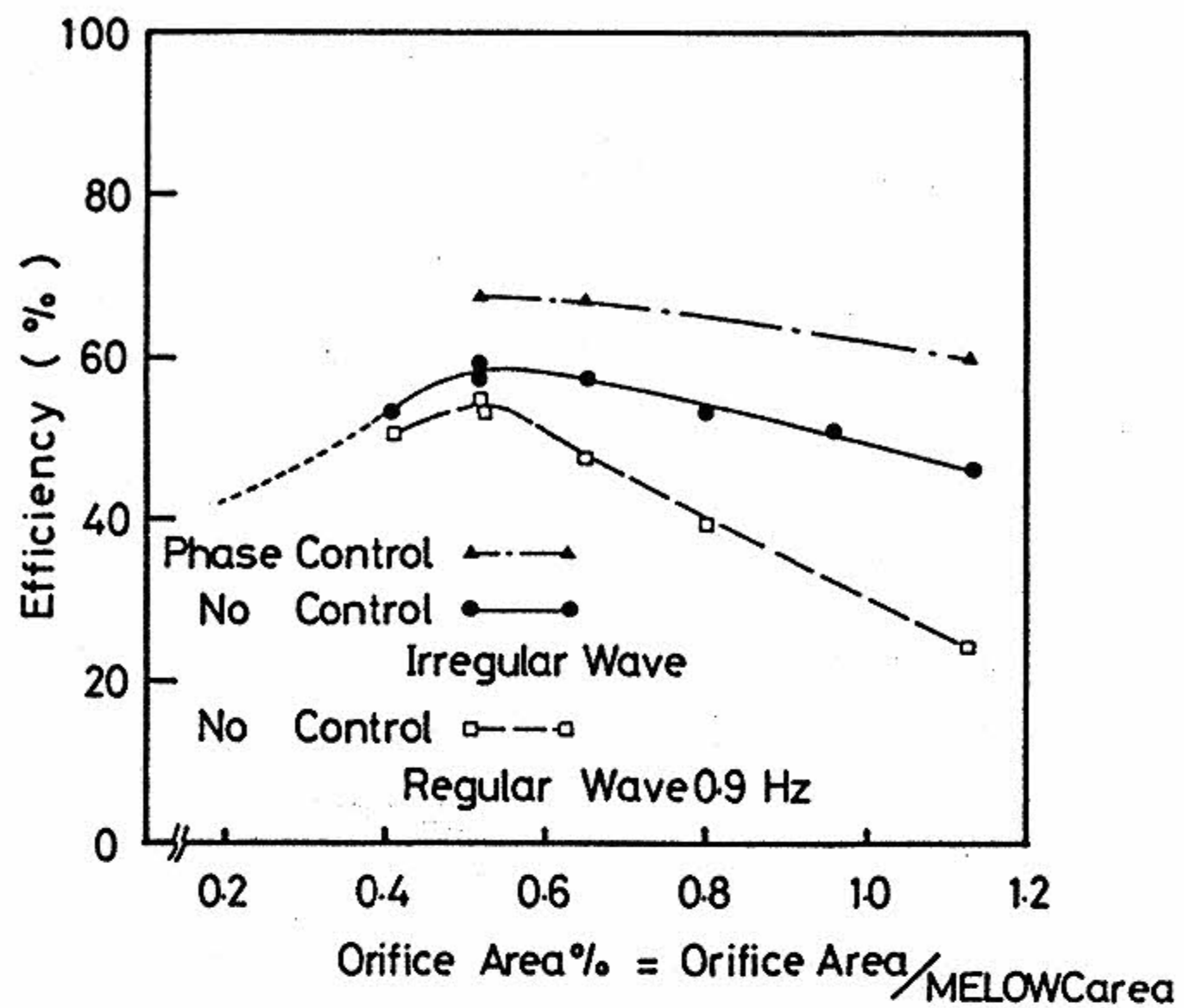


図 9. 模型 B のノズル面積と吸収特性
Model B characteristics of efficiency depend on orifice

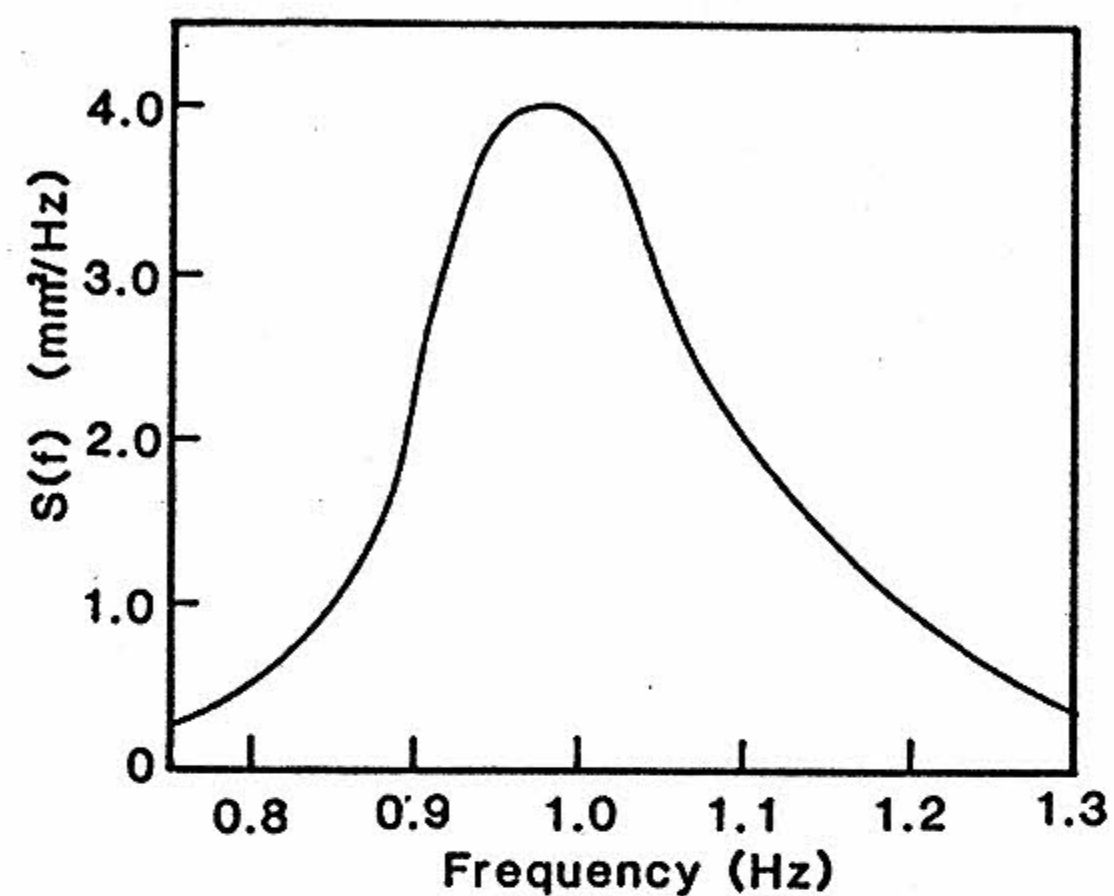


図 10. 実験に用いた波スペクトル
Waves spectrum

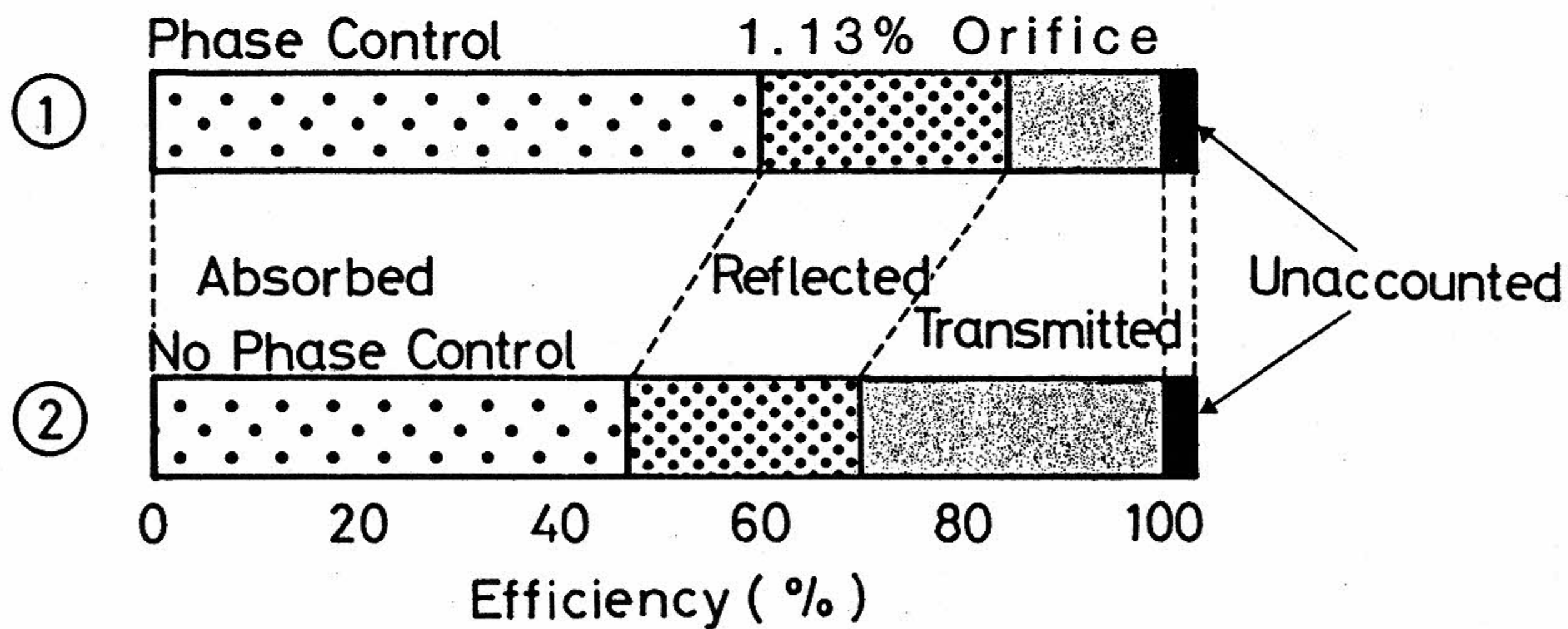


図 11. 不規則波実験のエネルギー分布特性
Energy distribution in irregular wave

4.2 空気室模型 B

模型 B は図 3 に示す空気室と浮力室が一体となった模型で水槽幅と模型幅がほぼ等しく、反射波が高く、波速度検出に大きく影響を与えるものと考えて選定した。この模型の基本型は MEL OWC^{*} 型と称し、CEGB^{**} が各種の波浪発電装置を検討した結果生まれた型で、浮体方式では最も出力特性が優れた構造として発表した。水槽実験では喫水 35mm で水槽に固定した。

図 8 に MEL OWC のオリジナルエネルギー吸収特性を示す。ここで入力エネルギー幅と模型の幅は等しいため、最大効率 1.4 Hz で 89% を示し、この時のオリフィスの面積は空気室面積の $1/88.5$ (0.8%) である。基本特性は優れているが空気室の固有振動周期からずれるとエネルギー吸収特性は低下する。そこで位相制御により、特に長周期側のエネルギー吸収特性の向上を図る。

図 9 はノズル面積を変化させた時、 0.9 Hz の規則波中の波エネルギー吸収特性および 1.0 Hz 付近にスペクトルピークを持つ不規則波中において、波速度検出法による位相制御の有無による特性を比較して示す。結果は規則波、不規則波にかかわらず $1/192$ (0.52%) ノズルが最も吸収率が高く約 55% となった。

不規則波中の実験結果も規則波と同じ傾向を示したことは、発生させた波エネルギー分布も図 10 に示したように 1.0 Hz にピークを持つためである。位相制御を実施すると、ノズル面積に対しては位相制御無しの特性和同様な特性を示した。また位相制御によるエネルギー吸収率の向上は $10 \sim 14\%$ と低く、現在の波速度検出法ではまだ完全な位相制御が実施されていない。もし理想的に制御されれば共振点で得た 89% とほぼ近い値に達するはずであるが、現状は 68% であり約 21% の減少である。

図 11 に不規則波中における波速度検出法による位相制御実施の有無による吸収、反射、透過エネルギーの割合を入力エネルギー 100 として%

で表わす。不規則波中の位相制御によるエネルギー吸収率の向上は 14% である。反射波のエネルギーに着目すると入力エネルギーの約 25% と大きく、単純に波高に換算すると、反射波高は入射波高の $1/2$ と高く、波速度検出法のピーク検出に影響を与えていることは確実である。

5. 結 言

本報は“波速度検出位相制御法”を初めて空気室模型に適用し反射波の影響を検討した。

位相制御を実施するには波ピーク 1 個に対して 2 回の制御信号を出力する。最初は弁の開放信号であり、この信号の精度は空気室前方に設置した 2 台の波高計による波ピーク検知精度による。今回の場合波ピーク検知は水面の上下運動速度 0 をピークとした。このため、小さな波高でも反射波でも全て検知してしまった。今後は波高を連続的に測ることにより波の形を検知、そのピークを求める方式に制御方式を改良する。2 番目の信号は弁の閉鎖信号であり、本実験では空気室内圧力 0 を検知し出力したが、弁を閉鎖すると空気の圧縮性から空気室内圧が細かく振動し、弁の誤動作を導いた。このため現在は最初の弁開放信号より $t_n/2$ 時刻後に第 2 の弁閉鎖信号を出力する方式へと改良する。しかし反射波が扇状に発散するポイントアブソーバーの波浪装置には、現状の機構で十分に位相制御は可能である。

謝 辞

本研究は英国の Central Electricity Generating Board Marchwood Engineering Laboratories (CEGB MEL) の施設を使用した。また研究遂行にあたり、Dr. B. Count および Mr. J. Haske II の助力を得たことを記し感謝の意を表する。

文 献

- 1) Budal, K. et al., "Experiments with Point Absorbers", Proc. 1st Sympo. on Wave Energy Utilization, Gothenburg, 1979—11, 253—282.
- 2) Budal, K. et al., "Model Experiment with a Phase-controlled Point Absorber",

* Marchwood Engineering Laboratories Oscillating Water Column

** Central Electricity Generating Board UK

- 2nd Int'l Sympo. on Wave and Tidal Energy, Cambridge, 1981-9, BHRA, 191-206
- 3) Budal, K. et al., "The Norwegian Wave-power Buoy Project, Proc. 2nd Int'l. Sympo. on Wave Energy Utilization, Trondheim 1982-6, TAPIR, 323-344
 - 4) Onus, T, "Optimal Phase Control of Power-Buoy, SINTEF Report STF48 F79038 (1979)
 - 5) 宮崎武晃ほか, 1983, "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), 1-8
 - 6) 堀田 平ほか, 1984, "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2)", 関西造船協会誌, (194), 15-24
 - 7) 鷲尾幸久, "空気流位相制御装置の小型モデルの試作と試験結果について(第1報)", 波力発電装置「海明」研究成果報告書(その3), 海洋科学技術センター, (1983), 115-131
 - 8) 宮崎武晃, Count, B., "波速度検出法による位相制御の研究", 第1回波浪エネルギー利用シンポジウムテキスト, 東京, 1984-11 海洋科学技術センター, 319-326
 - 9) 堀田 平ほか, "位相制御による波エネルギー吸収効率の向上", 第1回波浪エネルギー利用シンポジウムテキスト, 東京, 1984-11, 海洋科学技術センター, 105-120
 - 10) Count, B, et al., "The MEL Oscillating Water Columu", CEGB RD/M/1157 N 81 (1981)

(原稿受理: 1984年9月14日)