

5. 大型波力発電機に関する模型実験

益 田 善 雄^{*1} 宮 崎 武 晃^{*1}

波エネルギーの利用は100年ほど前から試みられてきたが、その利用は小規模ながら灯標ブイとして成功しているだけである。

大規模に波エネルギーを電気エネルギーへ効率よく変換することを目的とし、ブイ方式による数種の模型を製作し水槽実験を行った。全ての模型についてエネルギー変換効率、消波効果、係留力を測定し検討した結果、模型の形状がリングブイ型からA型、そして船型へと移行していった。これは波エネルギー利用の立場から考えると、利用する波の巾が狭くなるように思えるが、空気出力の減少はほとんどなく、利用できる波エネルギーの巾について略1波長に等しいとの新しい考え方が生まれ、また係留力も小さい。

水槽テストでは、昭和51年度から試作する消波発電装置の1/10模型による水槽試験を行い十分満足する結果を得た。

Model Test of Large Scale Sea Wave Electric Generator

Yoshio MASUDA^{*2}, Takeaki MIYAZAKI^{*2}

The utilization of wave energy has been studied for more than one hundred years. However, so far the actual application of wave energy is to a light buoy only.

In order to convert wave energy into electricity with good efficiency and on a large scale, JAMSTEC has made a test in the water tank using various kinds of models. The ship type buoy seemed to be the best compared with a ring buoy and A-type buoy with respect to energy conversion efficiency, breakwater effect and drag force.

It was considered that the energy absorption width of the ship type buoy was smaller than that of the A-type buoy and ring buoy, because the width of the ship type buoy is smaller than that of the A-type. However, the water tank test result showed no difference between them.

This introduced a new idea of wave energy absorption width, i.e. that it is almost one wave length in width, and that the drag force of the ship type buoy is smaller than that of the others.

In the water tank, a 1/10 scale model of a sea wave electric generator was tested in preparation for the sea test, with acceptable results.

^{*1} 海洋開発技術部

^{*2} Marine Development Technology Department

1. ま え が き

波は海上を吹く風によって起され、その成長の程度は風の3つの状態、(1)風速、(2)吹走距離、(3)連吹時間により、ほぼ波高、波長が決まる。このように波は正に風の他の型であり、海面は巨大なエネルギーを波のエネルギーとして貯えている。

波エネルギーの総量は潮汐エネルギーの数千倍ともいわれており、日本の海岸におしよせてくる波の総エネルギー量は、年間約 4.35×10^{19} ジュール、すなわち年平均13億8000万kwと報告されておりきわめて膨大であり、しかも清潔で永久に枯渇することがない天然エネルギーである。

わが国は石油等のエネルギー資源に恵まれず、そのほとんどを海外から輸入し経済を支えてきたが、石油危機に当面し、エネルギー問題に対する認識が新たにされ、エネルギーの確保が強く認められてきた。

海洋科学技術センターでは昭和48年度より海洋の持つエネルギーについて研究を開始し、主に波エネルギーの利用に着目し、ブイ方式による大型波力発電装置の研究開発に取り組んできた。

2. 波力発電の現状

波のエネルギーを利用し発電する試みは、100年前から多くの人々により研究されてきたが、小規模であるが、実用化に初めて成功したのはわが国であり灯標ブイの電源として小型波力発電機を開発した。図1がその装置であり、中央パイプ式波力発電ブイと呼ばれ、海面下の海水が静止している性質を利用したもので、浮体の中央に長いパイプを付け海水中に垂直に立てると、波により浮体は上下するが、パイプ内の水面はほぼ静止しているので、パイプ内の空気の容積が変化し、その空気室を出入りする空気によって空気タービンを回し発電機を駆動する方式である。この波力発電機は試作後14年間無事故で運転されており、現在までに約350台が生産され、わが国の沿岸のみならず、海外にも輸出され使用されている。

このほかに実用化されているのは、同じ空気タービン方式であるが、空気室であるパイプを直接海岸に固定する海岸固定式波力発電機で、灯台用電源として使用されている。

3. 大型波力発電装置の原理

図2で示すように、数多くの空気室とノズルをも

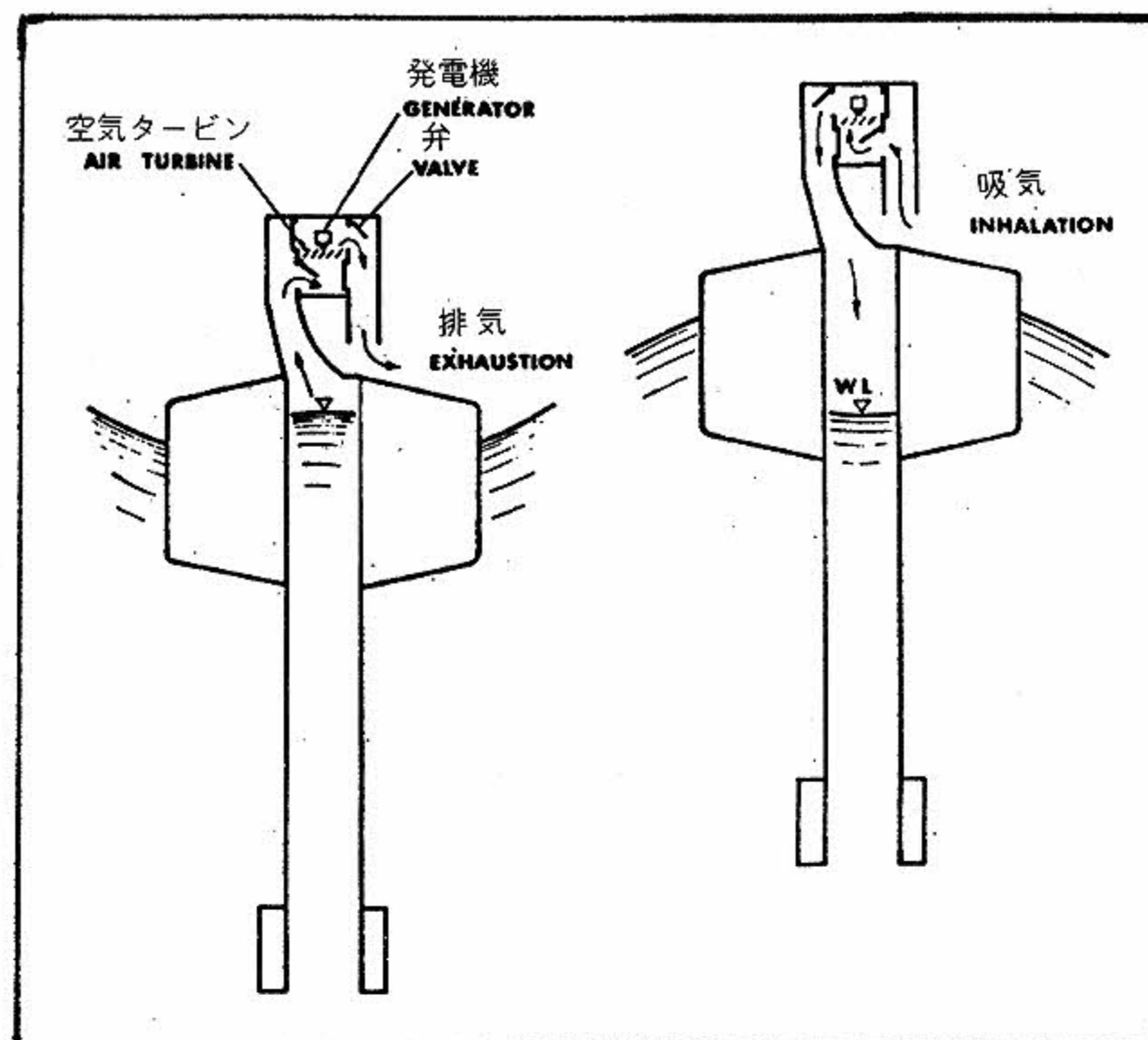


図1 中央パイプ式波力発電ブイ
(Central pipe wave activated generator buoy)

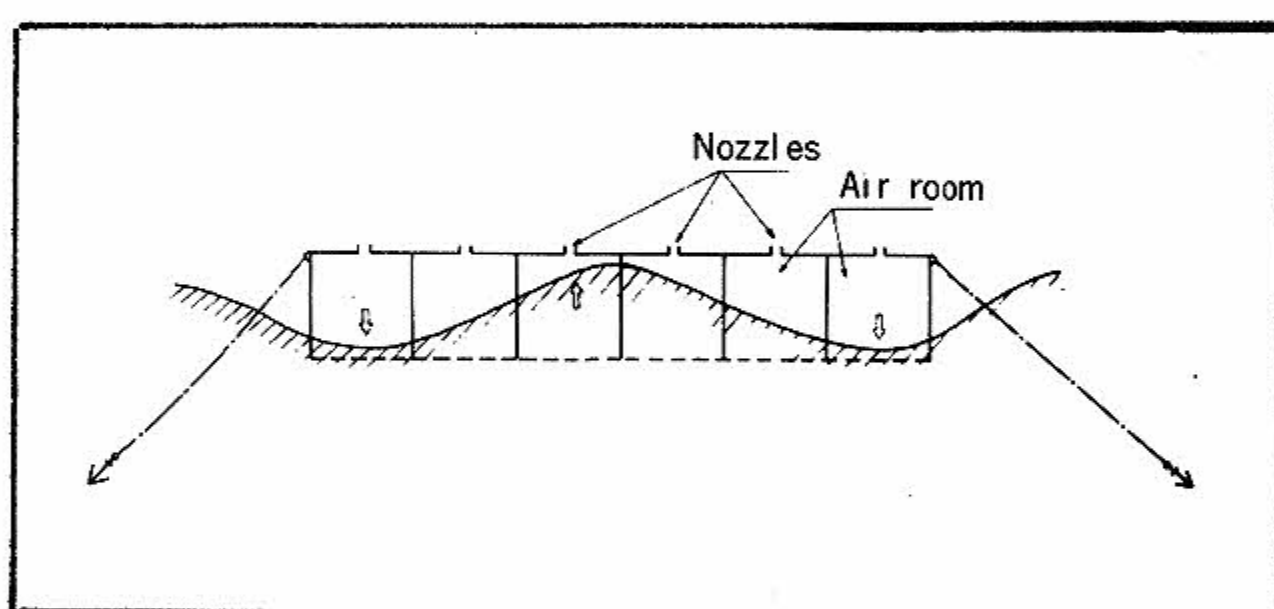


図2 大型波力発電装置の原理
Principle of long sea wave electric generator

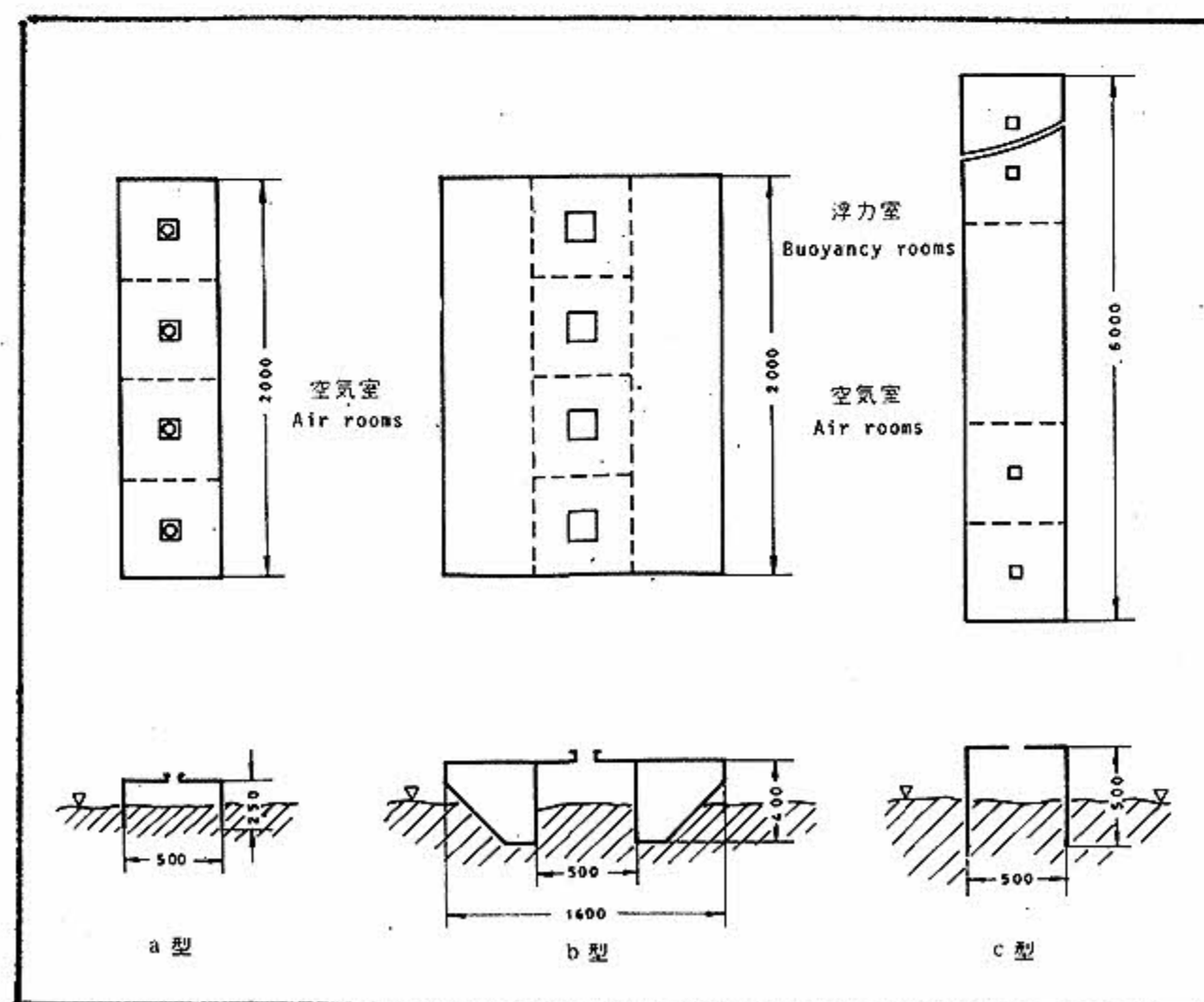


図3 模型の種類
Models

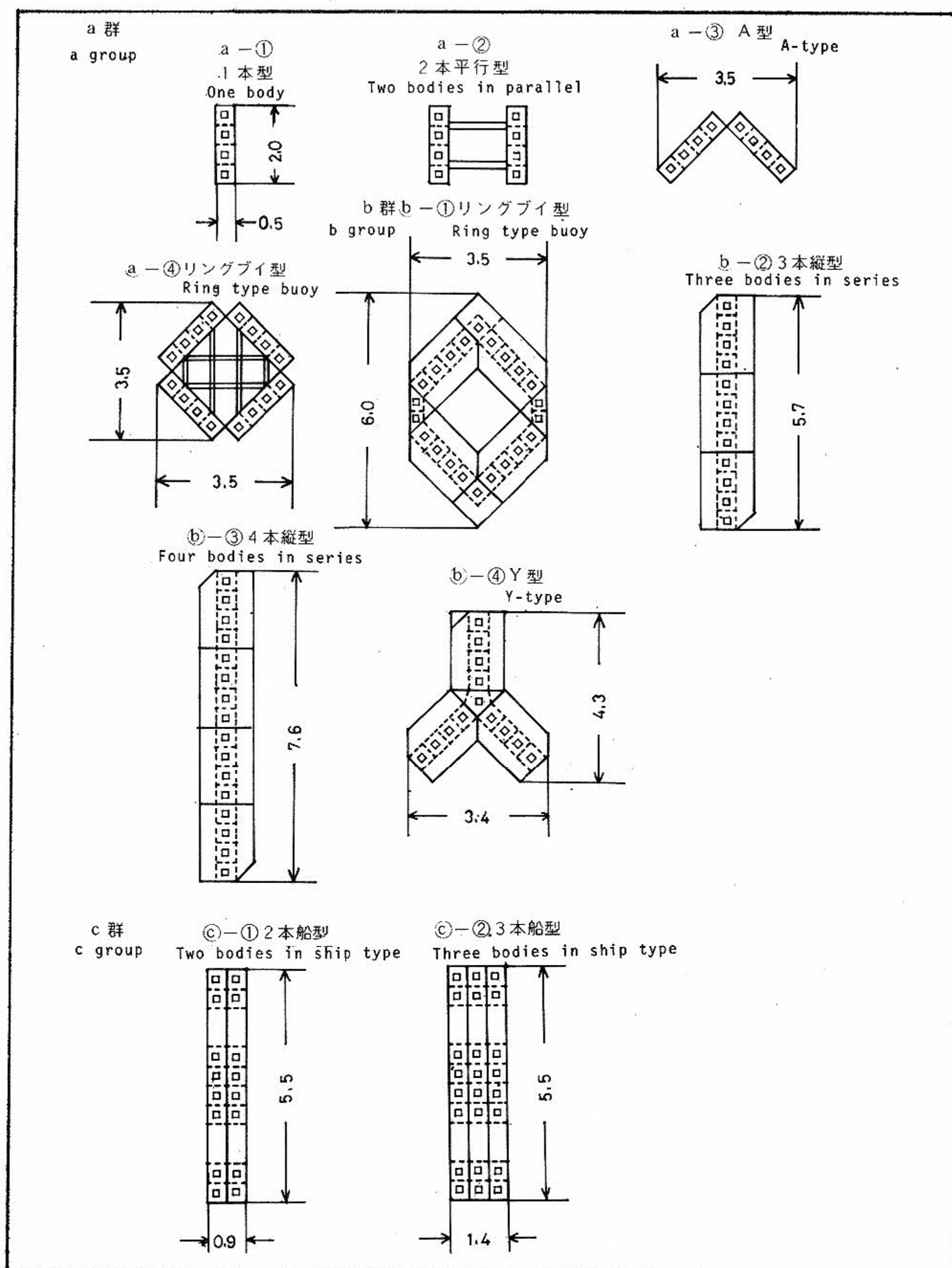


図 4 各種模型 (波は上方より受ける)

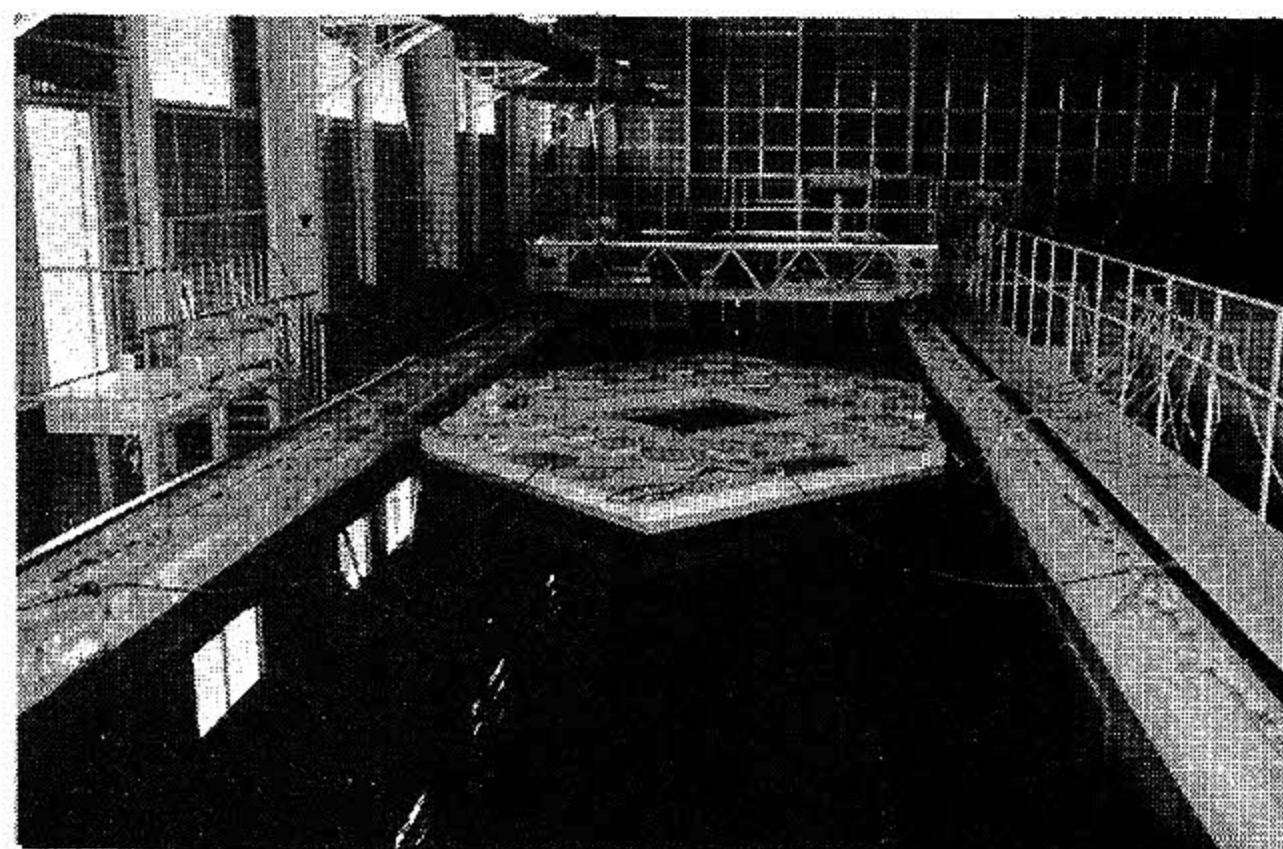


図 5 ⑥-① リングブイ模型
⑥-① Ring type buoy model

った長い装置を海面に浮かべると、装置は比較的安定し、波により海面が上昇するとき、空気室内の空気をノズルから押し出し、下降するときは、ノズルから空気室内に空気を吸い込むことになる。このようにして波エネルギーを空気エネルギーの形へ変換し、これにより空気タービンを回転させ、発電機を駆動しようとするものである。またこのシステムは波エネルギーを吸収するので消波効果があり、浮消波堤としての応用も可能である。

この大型波力発電装置の開発にあたって、最も大切な課題は、波のエネルギーが効率よく空気のエネルギーへ変換されること、また嵐の時でも装置が海上で安全に係留されていることが必要である。このエネルギー変換効率や係留力は装置の形状や寸法によって大きく影響されるので、当センターの波動水槽（長さ40m、巾4m、深さ2m）を使用し、数種の模型を製作し実験を行なった。

4. 模型実験

模型は図3に示す3種に分けることができる。1個の空気室の面積は全ての模型ともに50cm×50cmの2500cm²である。④はアルミニウム製で1ユニット4個の空気室からなっており、上部に可変可能なノズルをもっている。⑤は鋼製で1ユニット4個の空気室からなり、空気室の両側は斜めに切れた浮力室が取り付けられている。⑥は鋼板製で1ユニット8個の空気室と2個の浮力室よりできている。④と⑤はそれぞれ4ユニットずつ、⑥は3ユニット製作し、それぞれ組合せを変え図4に示す10個の組合せについて実験を行なった。

④-①から④-④の実験結果については、すでに発表①しているように、多くの空気室をもつ波力発電装置は波エネルギーから空気エネルギーへの変換効率と消波効果が非常に良く、特に④-④のリングブイ型は優れていることが確認されたが、構造、強度、材料等から発電コストを試算すると④-⑤のA型装置が将来最も有望な形状と思われた。また、波から空気への変換効率に大きな影響を与えるのは、模型の長さとの関係であり、波長が模型の長さの約8割のとき、エネルギーの変換効率は最大を示す。このため波力発電装置を設置する海域の海象条件を調査し、その海域の波長に合った長さの装置が必要であり、そうすれば、かなりの出力が期待できる。

このように日本海、太平洋での出現率の多い波長を考えると、大きな装置が必要になる。

ここで大きな問題の1つに海上での安全な係留があげられる。

そこで波、流れによる抵抗を小さくすることを目的として製作したものが、⑤群の模型であり、波、流れのあたる面をディスクブイと同じ斜めの断面形状とした。

B群の模型実験の結果、⑤-①と④-④型を比較してみると、両模型ともリングブイ型であるが⑤-①は空気室と浮力室が一体化したため抵抗面積が、1.4倍に増加したが、流体抵抗力は図6に示すように逆に減少し、エネルギー変換効率も増加する良い結果を得た。しかし消波効果は低下し波が消えない結果になった。この原因として考えられるのは、模型の前面を斜めにしたため波により模型が動揺しやすくなり、これにより後面から二次波が造波されるためと考えられる。

ここで水槽実験における波エネルギーから空気エネルギーへの変換効率と消波効果の求め方を示す。

エネルギー変換効率は波の持つエネルギーとその波によって発生する空気室ノズルでの空気出力の比で表わす。

波の持つエネルギーは一般に次のように求められる。

水面の単位面積あたりの波のもつ平均エネルギーは

$$E_p = E_k = \frac{1}{16} W H^2 \quad (1)$$

E_p : 位置エネルギー

E_k : 運動エネルギー

H : 波高

W : 流体の単位体積重量

単位時間に単位巾を横切って輸送される平均エネルギーを波の周期 T で表わすと、

$$W = \frac{1}{16} W H^2 \frac{gL}{2} = \frac{1}{16} W H^2 \cdot 1.56 T \quad (2)$$

ここで W は流体の単位体積重量であるから(2)式は

$$W \div H^2 T \quad (3)$$

となり、波高を、容量式波高計を用い、周期はストップウォッチを用いてそれぞれ測定し、波の持つエネルギーを求めた。

空気出力は各空気室ノズルの前後の空気圧の差、 $P_1 - P_0 = P$ 、を微圧圧力計を用い計測し、その差の最大値に0.4を掛けた値を平均圧力 p とし、空気の密度 f 、ノズルでの空気速度を v とすれば、(4)式と(5)式で単位面積を v で通過する空気のもつエネルギーを表わすことができる。

$$P = \frac{f}{2} V^2 \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5)$$

消波効果は模型前方の波高と後方波高の比で表わす。

波と流れによる模型に加わる力は波動水槽に備えられている曳航台車を用い精密天秤で計測し求めたものである。

B群の模型の組合せを変え、波長、波高を変えてくり返し実験した結果、③-③が実験前の予想に反し、十分な空気出力と消波効果が得られることがわかった。③-③型は空気室を縦に連続して並べた型であり、特に波、流れによる力が他の型に比べ、第5回でわかるように特別に小さいことがわかった。

③-②や③-③の縦型は各空気室の出力は波長、波高により異なるが、いま、波高Hの波で発生する空気室内の圧力（大気圧との差圧）を P_i として、各空気室につき $\frac{P_i}{H}$ の比を求めた。ここに波長と模型の長さ（番号）がほぼ等しい場合の例を図7に示す。横軸は空気室の番号で1番は最前部、12番は最後部を表わす。

図6でわかるように圧力の低い範囲が2カ所ある。

そこでこの圧力の低い範囲に浮力室を備えたのがC群の船型模型である。

図8にC-①、C-②、とC-①の斜め係留によるエネルギー変換効率を③-①のリングブイ型と比較して示す。

C群の模型は③-①に比べ最大値は低いが、カーブが比較的平坦であり、いろいろな波に対し有効であることを示している。

④-①の2ユニット型が巾の広いC-②の3ユニット型より高い効率を示したことは特筆すべきことである。またC-①型を波に対して斜めに係留した結果は、図8に示すとおりあまり良い効率とはいえない。

5. 波力発電装置の波エネルギー利用幅

これまでの模型実験の経過から考えると、最初④-④のリングブイ型、から始まり、最後はC-①の船型へと進展してきた。波エネルギーの利用の立場から考えると、利用できる波の幅が小さくなる方向に変わったように思われる。しかし空気出力はピーク値でわずかの減少にすぎず、むしろ広い波長域で出力が得られることが確認され、波力発電装置の波エネルギー利用幅について新しい考え方が必要になっ

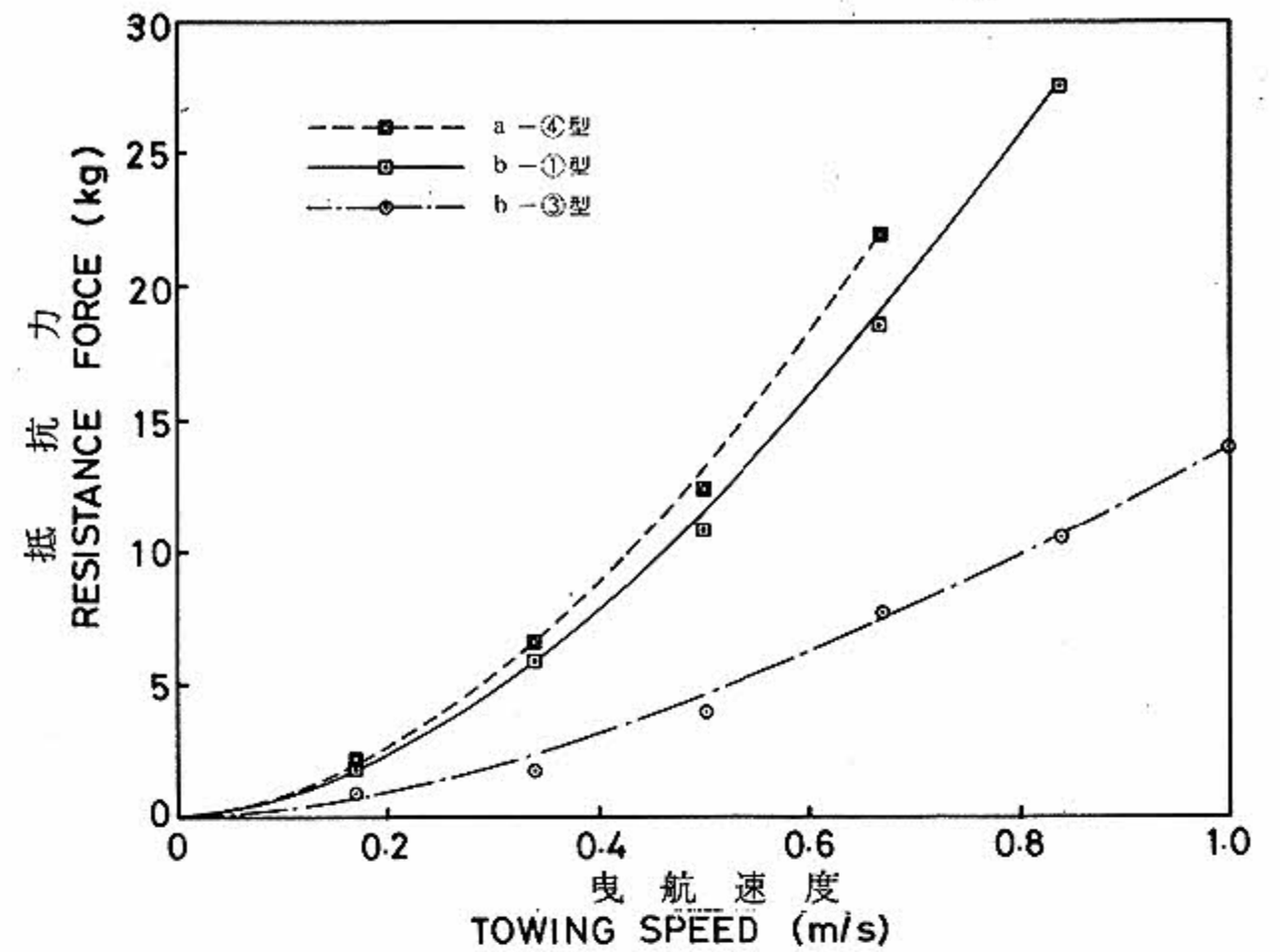


図6 流れによる抵抗力

Drag force by water current

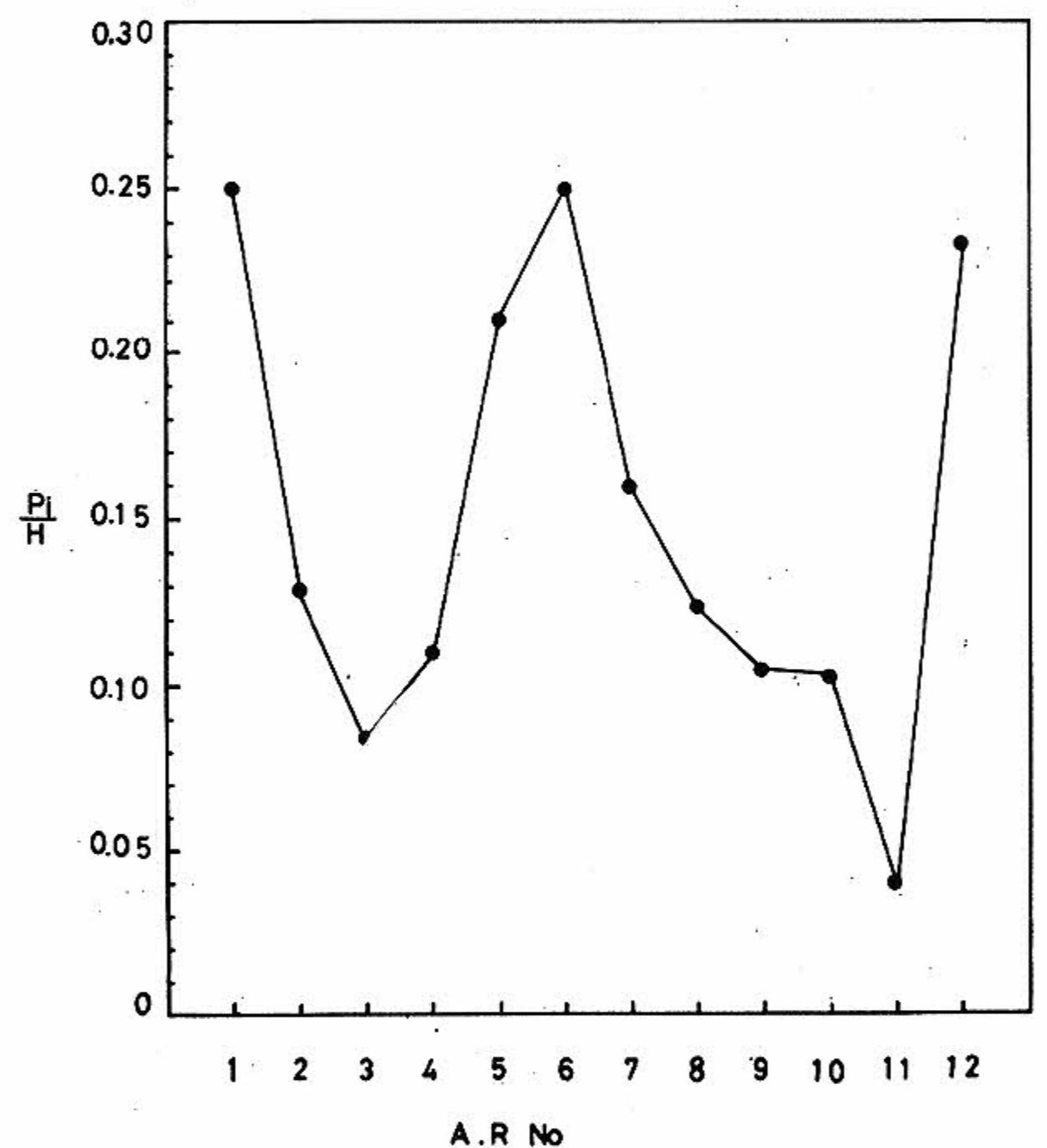


図7 各空気室における空気圧

Air pressure of each air piston rooms

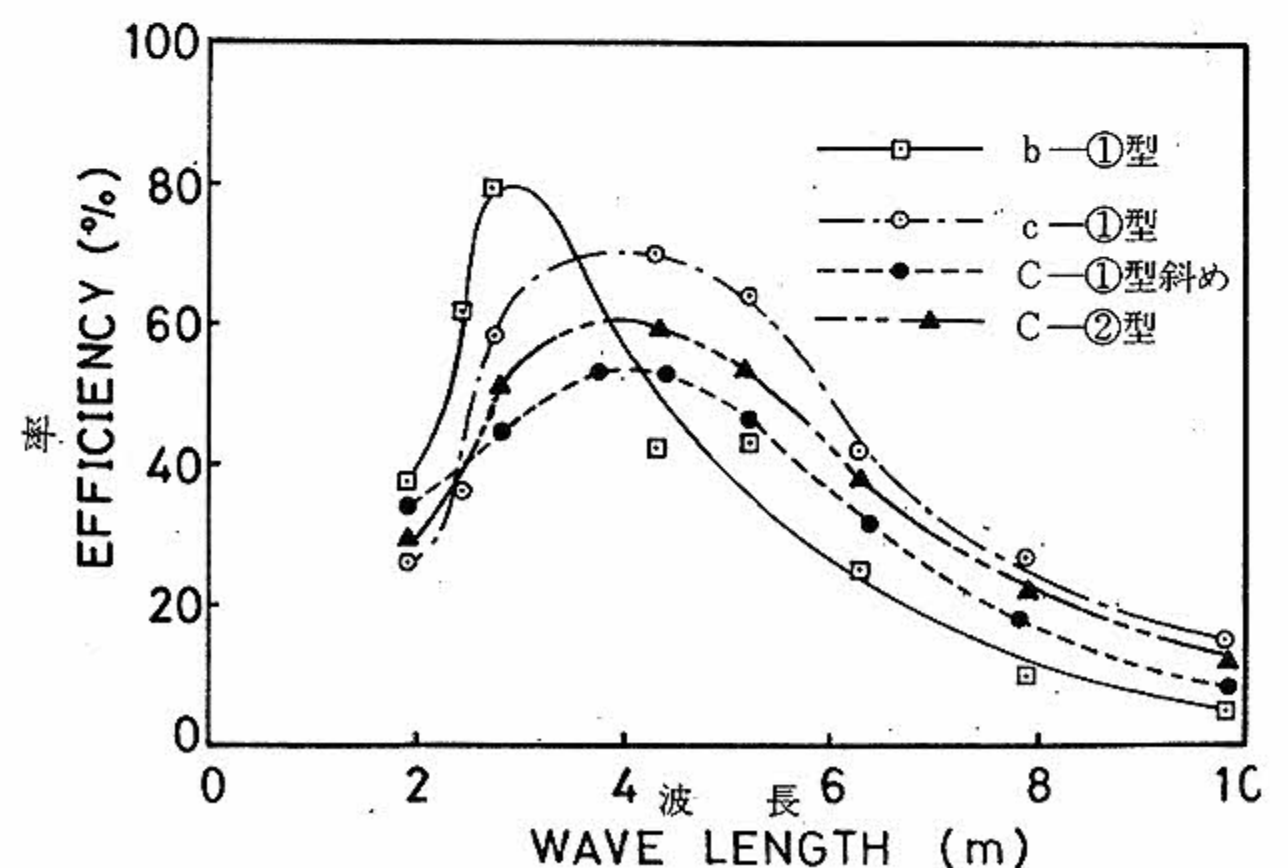


図8 各模型におけるエネルギー変換効率

Comparison of energy conversion efficiency



図11 $\frac{1}{10}$ 模型水槽実験

$\frac{1}{10}$ Water tank test

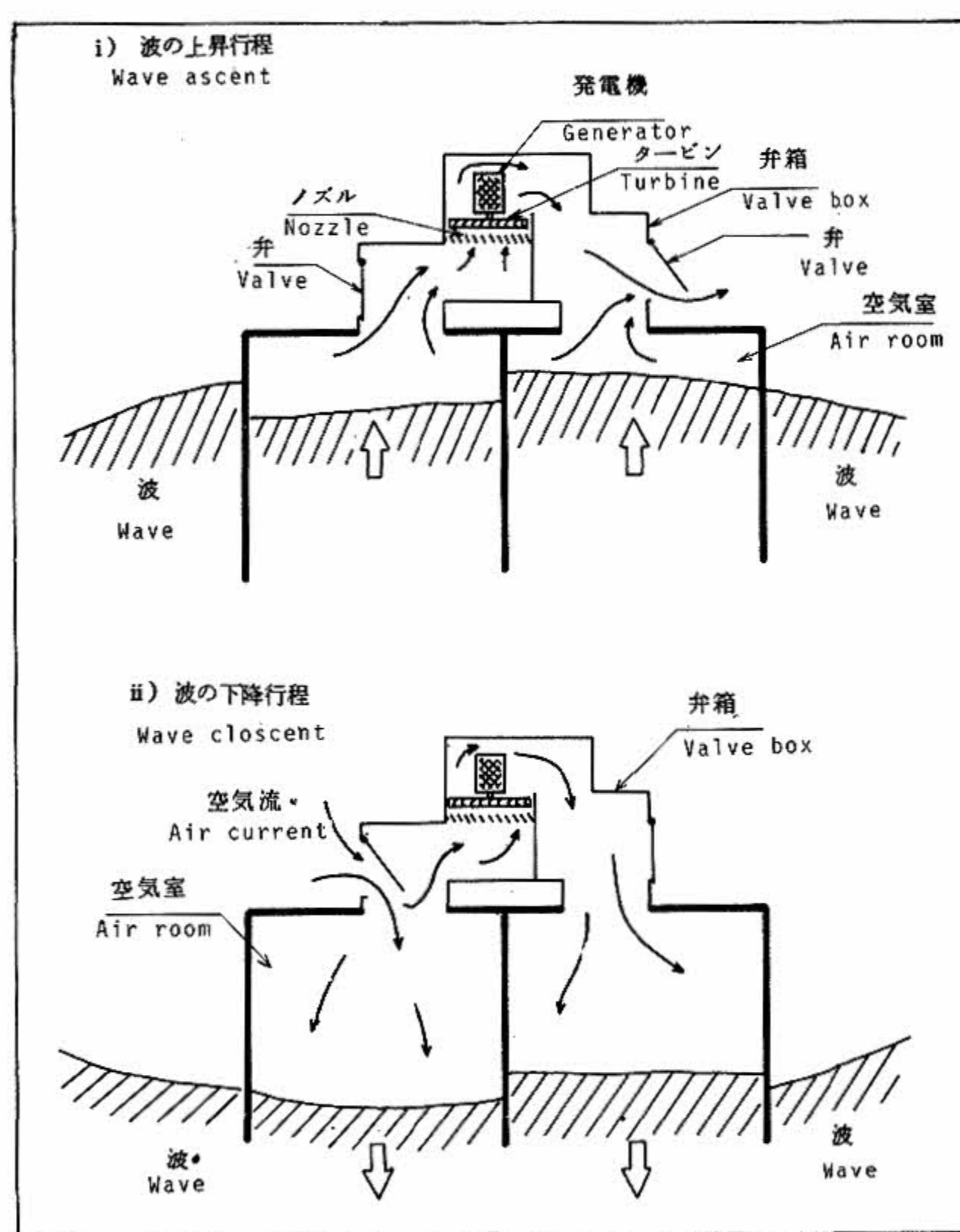


図12 2枚弁空気タービン方式

2 valve air turbine generator

た。

今日までの波についての考え方は、式(1)と(2)で示したように、波により輸送される平均のエネルギーは、位置エネルギー E_p のみが波速 C をもって進行するというものであった。

このようにエネルギーは波の進行方向へ伝播して行き、横方向への広がりはなく、もし横方向に曲がるときには波の回折現象として扱う考えであった。よって波力発電装置の波エネルギー利用幅は装置の幅だけに限られる考え方であった。

この考えでは理解できない現象が観測され、次の

仮説を設け実験を進めてきた。

「波エネルギーの吸収は横方向におよび、その影響は波長と同じ長さである。」

仮説を明確にするため③-②の模型を使い波エネルギーの吸収による波高の減衰を調べる実験を行った。その測定データーを9図に示す。3個のユニットを水槽壁に一行に並べ、波長3.69mと5.16mの2種類の波について水槽全体にわたり波高を測定した。

この結果波エネルギーの吸収により、後方へ行くほど波高が低くなり、また横方向への影響は予想どおり波長の長いほど広いことが確認された。

6. $\frac{1}{10}$ 模型の水槽実験

これまで各種の模型実験で得た成果を基に、昭和51年度より試作する、長さ80m、幅12m、高さ5.5mの大型、消波発電装置の設計データーを得るために約 $\frac{1}{10}$ スケールの模型を製作し、エネルギー変換効率、消波効果、流体抵抗、波により受ける力を測定した。この模型は空気室、浮力室の配置が③-①とほぼ等しいので測定結果もよく似ている。図面を図10で示す。

特にこの模型には空気の流れを制御する弁機構を取り付け、弁による影響についても試験を行った。図11は弁機構を付けて水槽実験中の写真である。

これまでの模型実験では、空気室の上部にノズル孔を付けたものであり、これは空気の往復の流れ両方ともチョークするもので、一般に4枚の弁を用い往復の空気流をタービンに送り発電する4枚弁方式と同じ考えである。

このほか、1個の空気室に1枚の弁を用い、1方向の空気流だけタービンを通し、反対方向の空気流は弁を通し負荷をかけない1枚弁方式と図12のように2個の空気室で2枚弁方式が考えられる。大型装置の試作ではタービンの数を減らすために2枚弁方式の採用を考えているため、図13のように2個の空気室を対と考え、弁の取り付けを反対にして2枚弁方式の試験を行った。

図14にエネルギー変換効率、図15に消波効果を4枚弁、2枚弁両方式について試験した結果を示す。いずれも2枚弁に比較し4枚弁が良好であるが、2枚弁は弁損失が入っている所以この差がでたと思われる。この程度の差であれば、2枚弁方式はタービン発電機の数も4枚弁方式の半分にでき、弁の数を $\frac{1}{4}$ にできるメリットがあり経済的に有利な方式と考えられる。

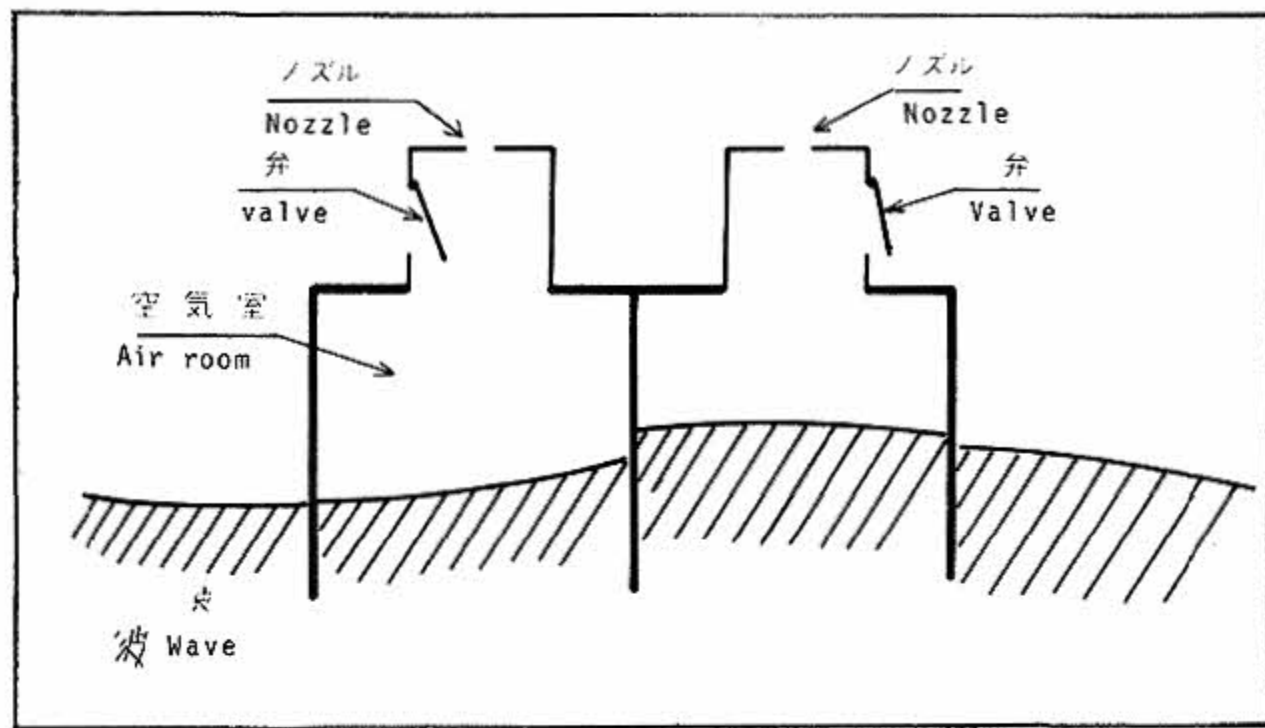


図13 2枚弁方式試験模型
2 valve system model

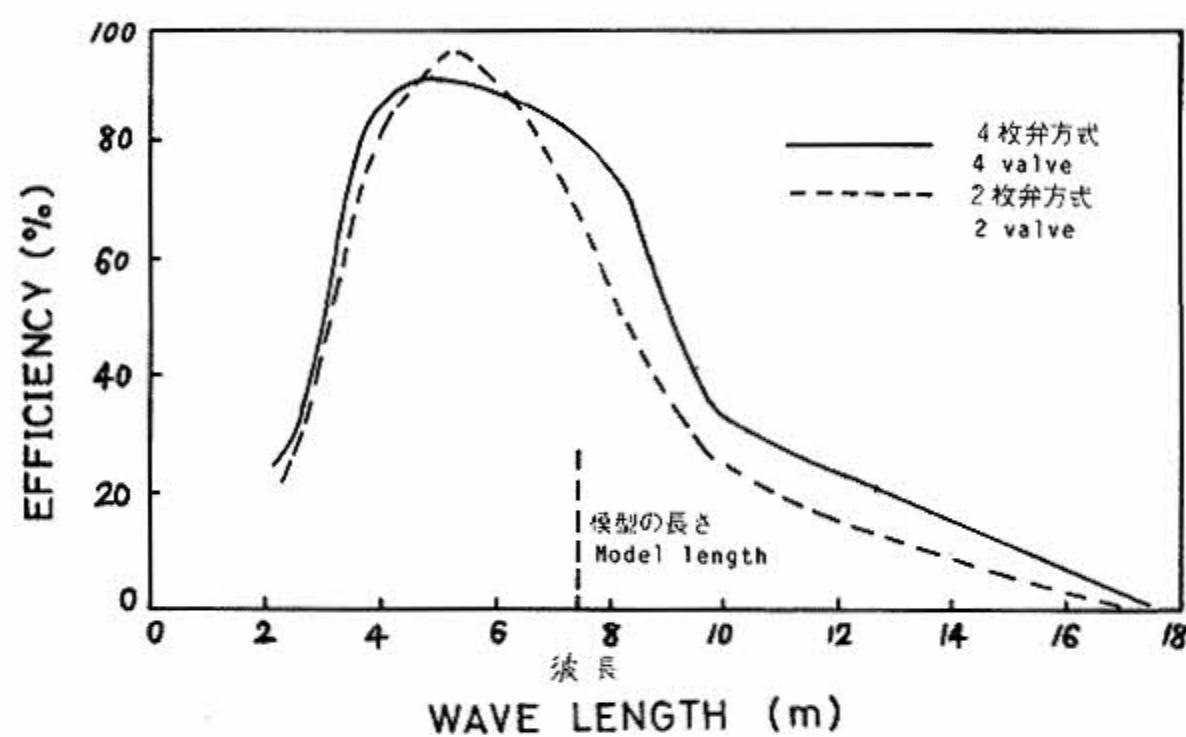


図14 エネルギー変換効率

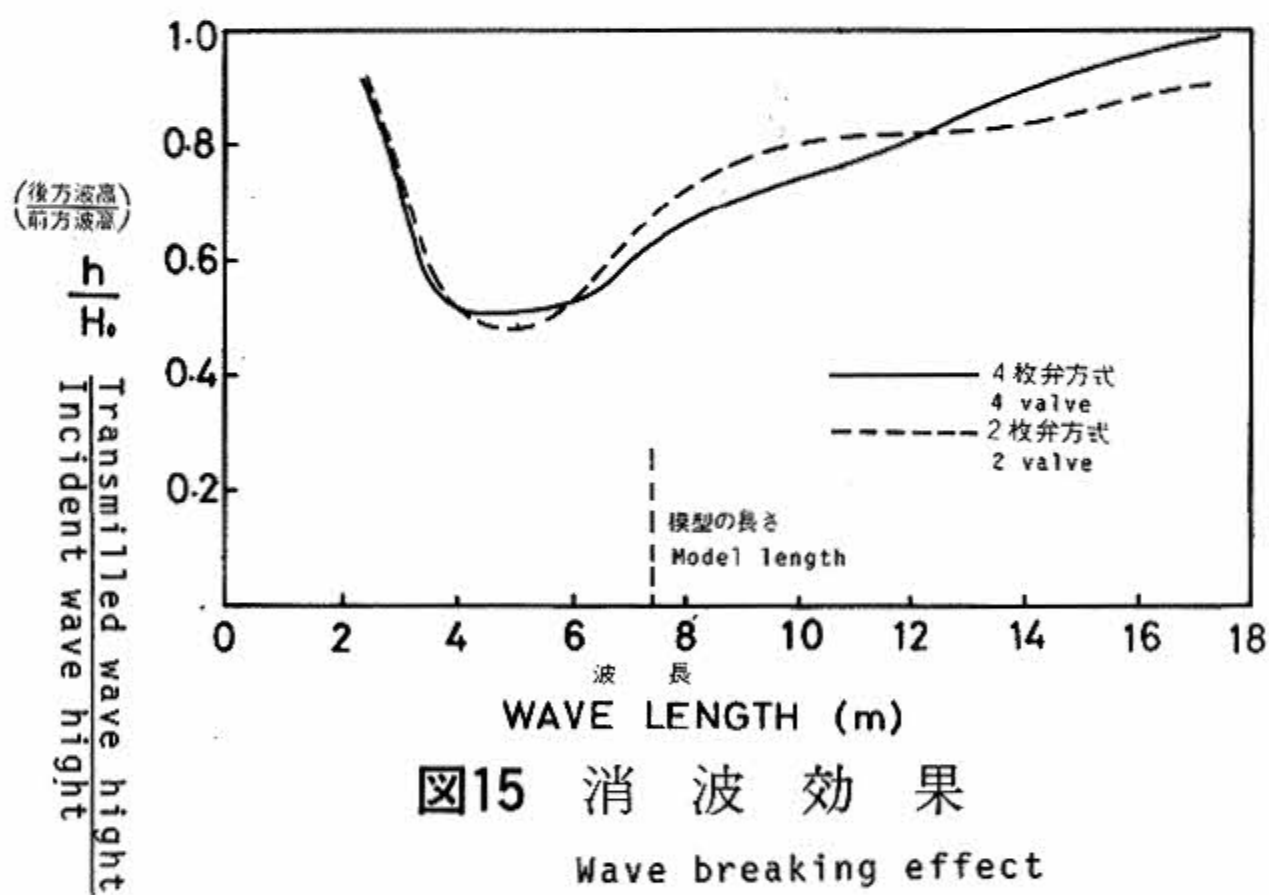


図15 消波効果
Wave breaking effect

7. 結 論

これまで各種の模型実験を実施した結果、船型装置がエネルギー変換効率、消波効果が大きく、特に安全上大切な波、流れによる力が最小であること、また経済性から考え2枚弁方式が、1枚弁、4枚弁方式に比べ優れているといえる。

しかし大型波力発電装置の開発は、まだその緒についた段階であり、今後、基礎的研究を含めて、研究開発すべきところは少なくないが、昭和51年度から開始した長さ80mの消波発電装置の試作と海上実験により大きな成果が得られるものと思われる。

わが国は島国であり、海岸線が長く、波エネルギーの利用に適した環境にあり、クリーン・エネルギーである波のエネルギーが1日も早く有効に利用できるよう、今後も努力を続けて行く必要がある。

参 照 文 献

- 1) 大和田 毅, '大型波力発電装置の開発と今後', 造船界, 84(5), P.22-27 (1976)
- 2) 益田善雄, 宮崎武晃, 他, '浮型波力発電機による大出力波発電の可能性', 第3回国際海洋開発会議和文論文集第2巻, 1975-08, 第3回国際海洋開発会議組織委員会 1975, P.95-101