

複数浮体式波力エネルギー変換装置の開発

DEVELOPMENT OF MULTI-FLOATS TYPE WAVE ENERGY CONVERSION SYSTEM

羽田野袈裟義¹・櫛田 操²・齊藤 俊³・河野俊一⁴・尾崎哲二⁵

Kesayoshi HADANO, Misao HASHIDA, Takashi SAITO, Shunichi, KAWANO and Tetsuji OZAKI

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

²正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科 (〒870-03 大分市大字一本 1727)

³工博 山口大学助教授 工学部機械工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

⁴工博 山口大学教授 工学部機械工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

⁵正会員 工修 (株)青木建設 研究所 (〒300-26 茨城県つくば市大字要 36-1)

Wave energy conversion systems previously proposed are briefly outlined. Then a new system of wave energy conversion is proposed. This consists of multiple sets of float, wire, counterweight, and one-way-clutch. The up/down motion of multiple pairs of float and counterweight caused by water surface wave is converted into a uni-directional rotational motion. This system works irrespectively to the travelling direction of waves. In order to make sure the workability of this system simple performance test has been carried out.

Key Words : wave energy, movable body type, float-counterweight, one-way-clutch

1. 緒言

人類の生活レベルの向上にともない、エネルギー資源の使用は加速的に増大し、化石燃料の枯渇や火力発電所の排出ガスが地球規模環境に及ぼす影響など多くの深刻な問題が生じている。このような状況でクリーンエネルギーに大きな期待がかかっている。自然エネルギーの中で波力は、風力や太陽エネルギーの直接利用に比べて実用化が遅れているが、エネルギーの安定性などの面で大変有利である。海の波は風により発生し、風の無い海域まで伝播するとともにエネルギーを輸送する。風はたえずどこかの海域で発生しているから波のエネルギーは比較的安定している。高橋¹⁾によれば、日本の海岸には平均して 3,500 万 kW の波力エネルギーがもたらされ、これを海岸線の総延長 5,200km で平均すると約 7 kW/m となる。また、3,500 万 kW は日本の総発電量の 1/3 に達するといわれている。波のエネルギーは比較的水面近くに集中しているため、これを利用しようとすれば、エネルギー変換装置を海洋表面近くに線状に配置すればよい。風力や太陽光の利用があまり効率的でないことのひとつの理由は、これらがエネルギー変換器設置地点だ

けの風や日射に左右されるため不安定なことであるが、それ以外に次のような事情がある。風力発電の定格出力は風速と風速頻度がともに大きいような風速の領域にあわせて設定しなければならないが、利得電力は風速の 3 乗に比例する。このため、風力発電の立地には大きな制限がある。太陽エネルギーの直接利用による発電には、太陽熱発電と太陽光発電がある。これらはいずれも機器を面的に配置して太陽のエネルギーを獲得するが、反射鏡に堆積した塵による効率低下やシリコン製造過程でのエネルギーコストなど大きな問題を抱えている。^{2) 3)} このようなことを考慮すると波力は大変有利な自然エネルギーといえる。

本研究は、複数のフロートとカウンターウェイトのペアを用いて水面波のエネルギーを回転エネルギーに変換するシステムとその模型実験の結果を報告する。

2. 従来の主要な方式

波力発電の方式についてはすでに多くの解説^{4), 5)}がな

されており、それによれば従来提案されている波力発電における一次変換の方式は次のように分類される。

A. 波の運動を利用するもの

- ①振動水柱型
- ②可動物体型
- ③受圧面型

B. 波を変形させて利用するもの

- ①越波型
- ②セットアップ型

ここではAについて簡単に説明する。振動水柱型は、容器を逆さにして海面に伏せた形式で、波により容器内部に水面変動をおこし容器内外の圧力差によりタービンの回転に変換するものである。この方式は、可動部を持たないため構造強度上の問題が少なく日本では大規模なエネルギー変換法として大変期待されている。しかし、高出力化のため長区間にわたる連続的な構成とする場合には、容器を多数の水密・気密性の空気室に分割することが必要でこれに適した材料が比較的大量必要である。また、エネルギー利得は容器内の水面変動に直接依存するが、容器内の水面変動が水面波と容器内外の圧力差に依存するため、これを波の条件から算定することは難しいようである。空気室内の水面変動、圧力変動が小さい場合について理論計算^{6),7)}が試みられているが、波高の小さい模型実験の範囲で適合性が検討されているにすぎずプロトタイプのものについては適合性を判断することができない。

可動物体型は、波による物体の運動として動力を取り込むもので、利用する可動物体の運動には上下運動、回転運動、水平運動、連成運動、連結浮体運動が考えられている。この方式は、波の運動により可動物体に作用する力と物体の運動がある程度推定可能なことから高効率のシステムを力学計算により設計することが比較的容易である。また、空気室を持たないので材料が節約できる。反面、構造強度上の問題が生じることが多い。特に物体の回転運動を利用するタイプは、波の進行方向と回転軸が直角でない場合には可動物体とその運動を支える部分(回転軸と軸受け)に有害な拘束力(ねじりと支点反力)が作用する。

受圧面型は、水面下に設置された受圧面が水面変動による圧力変動のために変位することを利用するものである。この方式は海底部の構造物となるため、設置や維持管理上の問題が多く、大規模なエネルギー変換法としてあまり注目されていない。

3. 新しい提案

ここで新しい方式⁸⁾を提案する。そのシステムの概要

は図-1に示すようである。フロートとカウンターウェイトをロープなどの引張部材の材の両端に連結し、引張部材をプーリに巻き掛けておく。フロートを水面に浮かべた状態で水面変動を起こすと、プーリは反転を繰り返す回転運動をする。1対の一方方向クラッチを用いてこの運動を互いに逆向きの1対の定方向回転運動に変換する。これをエネルギー変換の基本要素とし、複数の基本要素を連結する。そしてすべての基本要素により獲得された水面変動のエネルギーを総和した後、変速機により増速して発電機をまわす。この方式では、個々の基本要素のフロートとカウンターウェイトは重力と浮力の作用下で上下運動して発電機を回転させるが、いずれも他の基本要素の運動に拘束されることがない。しかも、発電機の回転に必要なトルクに応じて増速すればよいから、波高や波の位相に場所的な偏りがあってもどの基本要素も無駄に動くことがない構成とすることができる。波力エネルギー変換は物体が負荷を受けながら運動するプロセスである。本提案の場合、個々の基本要素のフロート・カウンターウェイトの上下動が水面の上下動に追従できない部分が生じる。この追従できない部分が負荷に逆らう力を生み出しこの力がフロートの上下動とむすびついてエネルギー変換が行われるわけである。また、引張部材を用いて動力を伝達するためフロート(可動物体)と機

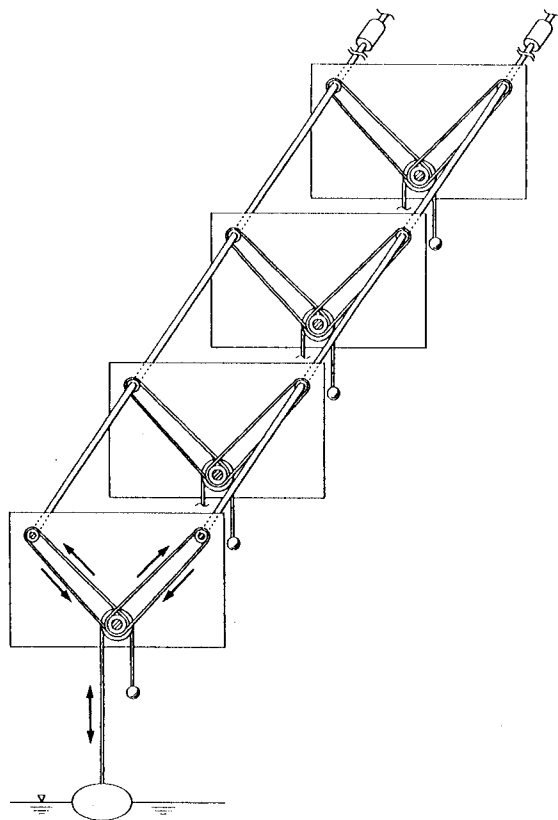


図-1 システムの概念

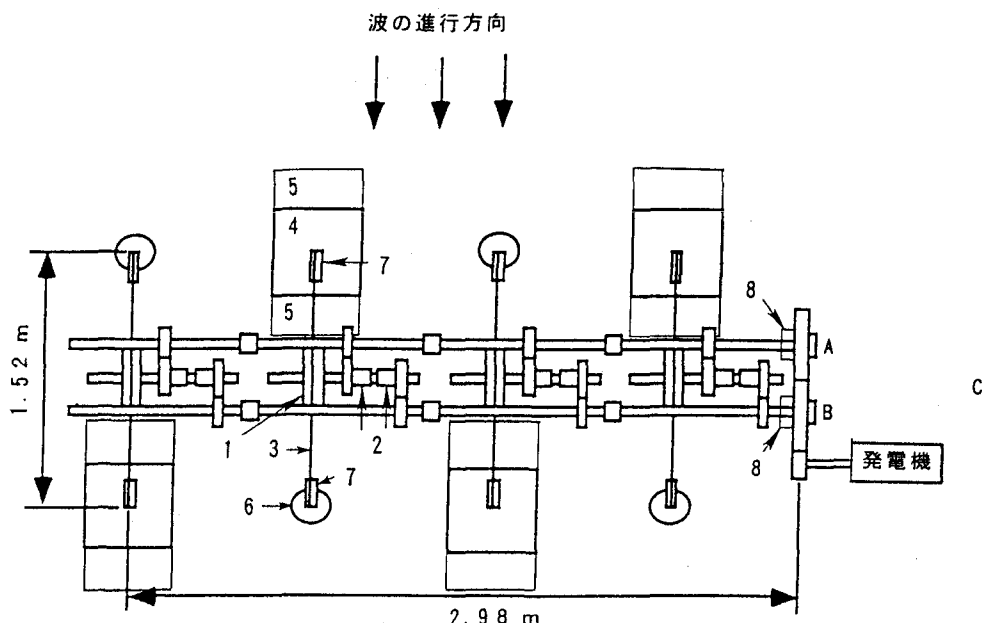


図-2 実験装置の概略図． 1は駆動プーリ、2は一方向クラッチ、3は引張部材、4はフロート本体、5は補助フロート、6はカウンターウェイト、7は自由プーリ、8は一方向クラッチ

械部分が構造的に分離されている。このため可動物体の回転運動を利用するタイプのような有害な拘束力の発生が回避される。また、機械部分が水面より上方に置かれた構造であるため、部品の交換が容易である。設置方法としては、船体状浮体の両側に張り出した部分に支持台を載せてその上に設置してもよいし、橋脚状のものに支持台を載せてその上に設置してもよい。潮位変動が著しい場合は前者が有利である。

4. 模型実験

(1) 実験装置と実験の概要

本提案のシステムの実験模型を作製し、簡単な性能試験を行った。実験は日本文理大学海洋工学実験場の平面造波水槽で行った。実験模型は図-2に示すように、4つの基本要素（フロート・カウンターウェイト・引張部材・一方向クラッチの組）を用いて水面波の運動を互いに逆向きの定方向回転運動に変換し、その後ギアを用いて一つの向きの回転運動にまとめて変速機を経て直流モーターにより電力に変換する。その際、フロートとカウンターウェイトの配置を隣り合う基本要素で互い違いにし、装置全体の動揺を抑えるようにした。また、水面上昇時と下降時にほぼ同程度のエネルギーを獲得するため、フロートとカウンターウェイトの重量比を2:1に設定した。そして最終的に一つの向きの回転にトルクを合成する直前で2つの出力軸に一方向クラッチを挿入した。

これを用いない場合には、たとえば図-2の軸Aに入力し伝えられた回転力は軸Bを強制的に回転させる。そしてBに伝えられたこの強制的な回転力はその前段の個々のエネルギー変換要素に逆伝達され、そこに配置された一方向クラッチを空転させる。軸Aに取り込まれた回転運動のエネルギーが大きい場合にはこれらの一方向クラッチの空転抵抗の影響は小さく、回転運動のエネルギーの大部分が発電機をまわす動力として有効に利用される。しかしながら、取り込まれた回転エネルギーが小さい場合には有効なエネルギー変換が期待できない。同様のことは軸Aと軸Bの立場を入れ替えても成立する。トルク合成ギア直前の一方向クラッチは個々のエネルギー変換要素に設置された一方向クラッチの空転抵抗による変換効率低下を防止するためのものである。

フロートは、外寸 $0.51\text{m} \times 0.51\text{m} \times 0.45\text{m}$ の正方形底面の直方体を基本（以下フロート本体と呼ぶ）とし、この外側に補助フロートを取り付けてフロートの喫水面を $0.51\text{m} \times 1.11\text{m}$ に変更し得るようにした。図-3は補助フロートを取り付けた状態を示す。補助フロートは $0.30\text{m} \times 0.51\text{m} \times 0.20\text{m}$ の直方体の角材であり、ベルトを用いてこれを個々のフロート本体の両側に一対縛り付ける形で取り付けた。フロート本体と補助フロート間の上下方向のずれを完全に抑えることは出来なかった。測定は本装置設置地点の水位変動および利得電力について行った。水位測定は、最後段のエネルギー変換要素の駆動プーリの中心より2m離れた位置（図-2のC

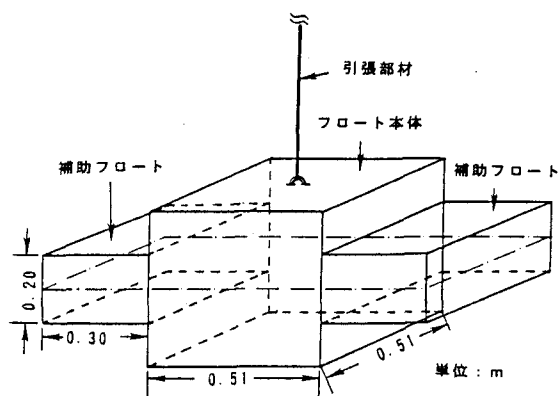


図-3 フロートの構造

点)で行った。また、直流モーターの2本の端子に両端を接続した抵抗器の両端の電位差の変動を測定しこれより利得電力を求めた。実験は、水槽水深0.6m、個々のカウンターウェイトの重量を40kg、70kgの2通りにして表-1に示す条件のもとで行った。また、図-2の最終段階のギアA、Bを組み合わせた場合（出力軸2本）と、ギアを組み合わせず軸Bのみを用いた場合（出力軸1本）について、補助フロートを取り付けない場合と取り付けた場合の双方について行った。なお、本装置のフロート・ワイヤ・カウンターウェイトの系の自由振動の周期は、補助フロート有り・カウンターウェイト重量40kgで0.94秒、補助フロート有り・カウンターウェイト重量70kgで1.24秒、補助フロート無し・カウンターウェイト重量40kgで1.39秒、補助フロート無し・カウンターウェイト重量70kgで1.83秒であったので波の周期2秒以上の条件で実験を行った。

表-1 実験条件

周期(s)	波高(cm)		
2.0	6.63	9.78	12.35
3.0	13.32	15.13	16.87
4.0	10.93	12.11	13.44
5.0	7.83	9.48	11.08
4.5	18.90		
5.3	13.25		
5.5	15.91		
6.5	8.84		

(2) 実験結果

図-4は、周期3.0秒、波高15.13cmの実験で得られた水位変動と出力電力の時系列変化を示す。図中のPower

1は出力軸Bだけを用いた場合の、そしてPower 2は2本の出力軸A、Bを用いた場合の結果である。また、利得電力の実線は補助フロートあり・カウンターウェイト重量40kg、点線は補助フロートあり・カウンターウェイト重量70kg、破線は補助フロートなし・カウンターウェイト重量40kg、一点鎖線は補助フロートなし・カウンターウェイト重量70kgの場合である。

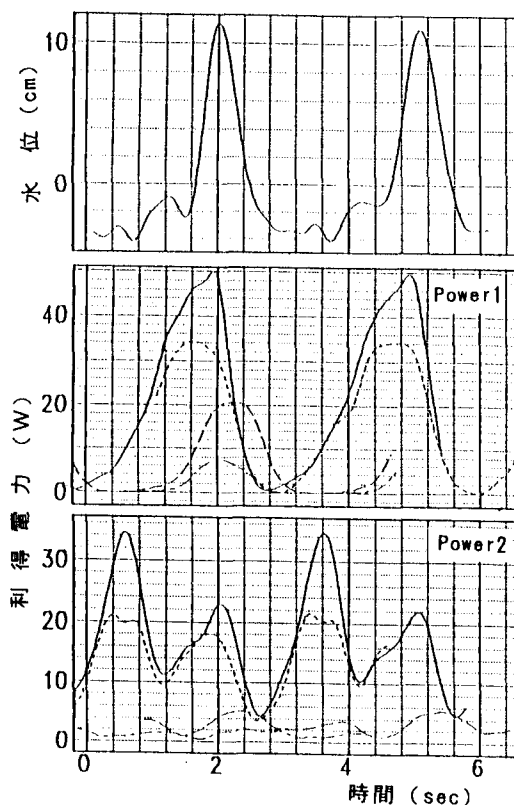
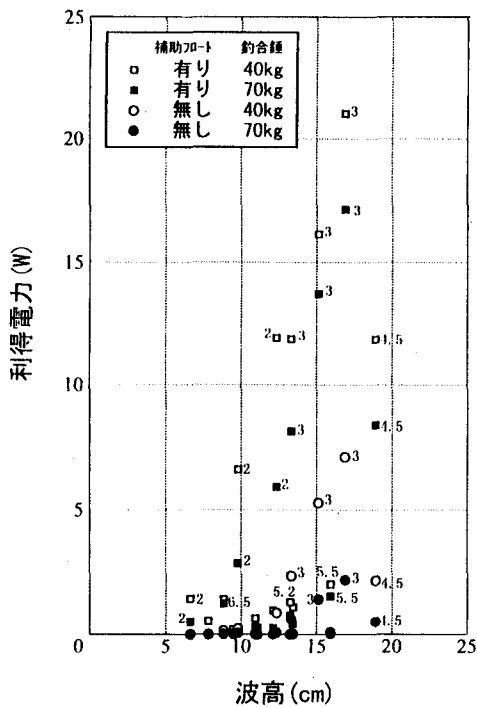
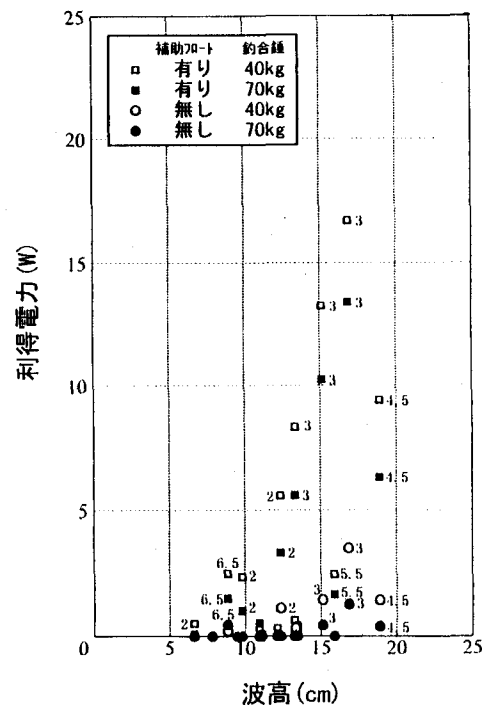


図-4 水位変動と利得電力の時系列
(中段は出力軸が1本、下段は出力軸が2本)

それによると、利得電力は、補助フロートがある場合の方が無い場合よりも大きく、カウンターウェイト重量が40kgの方が70kgより大きく、出力軸1本の場合の方が2本の場合の方よりも大きい。利得電力については図-5および6との関連で再度ふれる。水位変動と利得電力の位相差の関係は単純ではなく、これは波の進行方向にとったフロート中心と水位測定点の間の距離、水面波の波長、波速、および発電機を含む本装置の全体系の機械力学的特性の影響を受けているはずである。本論文ではこれらの詳細を議論出来ないが、近い将来においておこなう予定である。図-5は時間平均の利得電力を波高に対してプロットしたものである。図において、プロットの傍に添えた数値は水面波の周期を示す。これらの図によると、補助フロートがある場合に大きな利得電力と

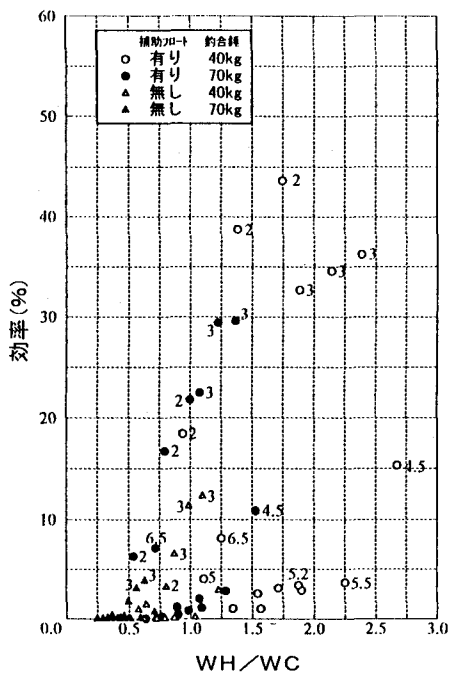


(a) 出力軸 1 本の場合

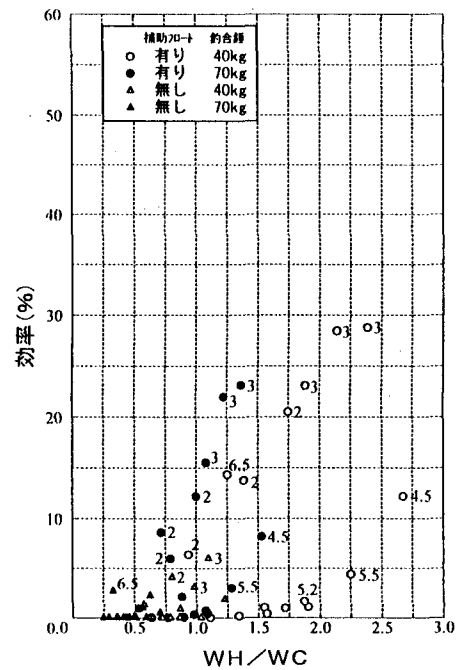


(b) 出力軸 2 本の場合

図-5 利得電力と波高の関係



(a) 出力軸 1 本の場合



(b) 出力軸 2 本の場合

図-6 効率とWH/WCの関係

なっている。これは、補助フロートにより喫水面積が増加したため、エネルギーの入力が大きかったことによる。利得電力が喫水面積と比例関係にないのは、機械損失があるためと考えてよい。また、他の条件を同一とした場

合、出力軸 1 本の場合の方が出力軸 2 本の場合より利得電力が大きい。このシステムでは発電機の数節約することを念頭に置いているが、当然ながら出力軸 2 本の場合の方が 1 本の場合よりエネルギーの入力が大きい。こ

の食い違いは、出力軸が2本の場合にはトルク合成の部分で大きな機械損失が生じているためである。図-6は効率を調べた結果を示す。効率は次式により求めた。

$$\text{効率} = \text{利得電力} / (EF \times B) \quad (1)$$

ここで、EFは波峰線の単位長さあたりのエネルギーフラックス、Bは波に面したフロートの有効幅(射影長さ)である。EFの算定は簡単のため、所定の波高、周期、水深に対する正弦波の値を採用した。横軸のWCは個々のカウンターウェイトの重量で、WHは次式で定義される。

$$WH = w \times H \times A \quad (2)$$

ここで、wは水の単位重量、Hは波の波高、Aは個々のエネルギー変換要素のフロートの喫水面積である。図より、個々の周期の波のデータはWH/WCの増加とともに増大する。特に周期3秒のデータでは図-5よりデータのまとまりがよい。しかしながら、波の周期が長いケースでは効率が低くなっている。これについてはフロート、特に補助フロートの取り付け部の構造と無次元パラメータWH/WCの意味の両方の点から検討することが必要である。また、図-5と対応し、出力軸1本の場合の方が出力軸2本の場合より効率がよい。このことは、本実験での波高が小さかったことが影響していると考えられ、今後より大きな波高での実験が必要である。また、この問題の解決には最後段でのトルク合成部の構造の変更とともに機械力学的なアプローチが不可欠である。

5. 結語

以上、波力エネルギー変換の有用性、従来の主要な方式について概観するとともに、新しい波力エネルギー変換システムを提案し、その模型実験の結果を報告した。本実験により、波高が大きいほど、そしてフロートの喫水面積が大きいほど、大きな利得電力を得た。また、本装置の出力軸を2本に増やした場合、出力軸1本の場合

に比べて利得電力が低下した。これは2本の出力軸の回転運動を合成する際の機械抵抗によるとみられ、今後この機械抵抗を減じる方法を検討する。また、機械力学モデルを整備し、実海域でのプロトタイプの実験を行う予定である。

謝辞：本研究にあたり、日本文理大学海洋環境工学研究室、山口大学水工学研究室の卒研生の多大なご協力を頂いた。実験模型製作において、下関菱重エンジニアリング社の御尽力を頂いた。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 高橋重雄：波エネルギー変換装置の現状について、1993年度(第29回)水工学に関する夏季研修会テキスト(Bコース)、pp. B-1-1-B-1-19、1993
- 2) 樋田敦：すべての石油代替開発は石油のムダ使いである、地球環境・読本(別冊宝島)、JICC出版局、pp. 58-70、1990.
- 3) 小西誠一：地球の破産、講談社、pp. 67-121、1994.
- 4) 前田久明・山下誠也：波浪エネルギー——次変換装置、日本造船学会誌第637号別冊、pp. 10-31、1982.
- 5) 清水幸丸編著：自然エネルギー利用学、パワー社、pp. 123-156、1990.
- 6) 小島・鈴村・合田：波力発電ケーソンの空気出力に関する理論および実験、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 638-642、1983.
- 7) 千村・佐藤・沢本：振動水柱型波力発電装置の空気室体積が発電効率に及ぼす影響、土木学会第52回年次講演会概要集、II、pp. 110-111、1997.
- 8) 羽田野ら：浮体式波力エネルギー変換装置の開発に関する研究、機械学会機械力学・計測制御講演会論文集、vol. A、pp. 211-214、1996.

(1997. 9. 30 受付)