

後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置の一次変換特性への浮体形状影響

永田 修一, 豊田 和隆, 今井 康貴 *1

The Influence of the Body Shape of Backward Bent Duct Buoy to the Primary Wave Energy Conversion Characteristics

Shuichi Nagata, Kazutaka Toyota and Yasutaka Imai

Backward Bent Duct Buoy (BBDB) which has a bent center-pipe opened to the lee side of the incident waves is a kind of moored floating OWC-type wave energy converter. In this paper, in order to make clear the fundamental characteristics of BBDB, three-dimensional experiments in waves for motions of five different BBDB models are carried out. Motions of 6 degrees of freedom of BBDB, pressure and water levels in the air chamber, etc. are measured. From the experiments, fundamental characteristics of BBDB such as the relationship between motions of BBDB and pressure in the air chamber according to the changes of the body shape of BBDB are obtained.

Key Words : Backward Bent Duct Buoy, Primary Energy Conversion, Regular Waves, Experiment

はじめに

近年、多くの種類の波力発電装置が考案されているが、その中でも益田⁽¹⁾により考案された後ろ曲げダクトブイ (Backward Bent Duct Buoy、以後 BBDB) はその優れた発電特性から、将来性が期待されている浮体型の波力発電装置である。そのため、アイルランド、デンマーク、中国、インド、韓国などにおいて BBDB についての研究が行なわれているが、その発電特性と浮体形状および運動特性の関係などについては、なお解明されていない部分が多い。本報ではこれらの点について基本的な知見を得るとともに、最適な浮体形状を求めるために5種類の浮体形状の異なる模型を作成し、これらの模型を用いて造波試験を行った。

ここで簡単に BBDB の発電原理を示す。Fig.1 は BBDB の基本的な構造を示した断面図である。BBDB は浮力体 (Buoyancy Chamber)、L 字型のダクト (Horizontal duct と Air Chamber) およびタービンにより構成されており、通常、1 本のチェーンにより係留されている。静水時、L 字型ダクトの喫水線以下の部分は、海水で満たされている。波は図中の左側から右側に向かって進行し、主に Surge、Heave、Pitch の各運動を BBDB に生じさせる。これらの浮体運動により L 字型ダクト内部の海水が動き、これにともなってダクト上部の空気室の体積が変動する。さらに、この体積変化により発生する空

気流を、空気室の上部に装備したタービンを用いて電気エネルギーに変換する。

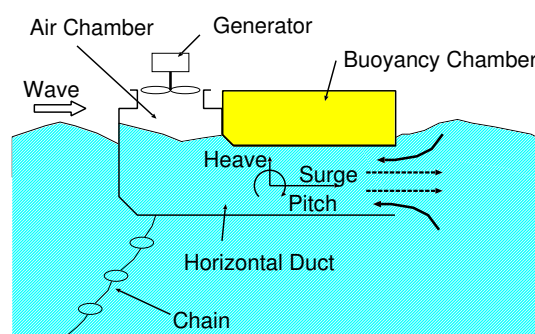


Fig. 1 Principle of BBDB

1. 実験装置および方法

実験には九州大学所蔵の浅海波水槽を使用した。浅海波水槽は長さ 12m、幅 6m、深さ 1.2m の水槽で、16 分割のスネーク型位置制御式造波装置を備えている。本報では基礎的特性を把握することを目的としているため、波条件として、向かい角 0 度の規則波を用い、その周波数を変化させることにより BBDB の波浪中挙動の変化を計測した。

BBDB 供試体の概略図を Fig.2 に、またその諸元を Table.1 に示す。供試体はアルミ製で、円筒状のものが浮力体、L 字型をした部分が空気室を持つダクトである。空気室上部にはタービンを模擬するためのオリフィス穴を設けている。本報では、形状による運動特性への

*1 佐賀大学海洋エネルギー研究センター
佐賀市本庄 1 番地
Email: nagata@ioes.saga-u.ac.jp

影響を明らかにするため、基本形状の供試体に Fig.2 に示すスペーサー、下部ダクト、後部延長ダクトなどを付加した 5 タイプについて実験を行なった。Table.2 に各タイプの形状の違いについて示す。実験では、規則波中で動揺している供試体について空気室内部の圧力、空気室内部の水位 (波上側と波下側の 2 点)、波高、BBDB の運動 (6 モード) を計測した。空気室内部の水位については、2 個の超音波式変位計を BBDB に装着して計測を行なった。装着箇所は供試体空気室のオリフィス付近で、波上側に 1 点、波下側 1 点である。また、運動計測には浮体運動への影響が小さい画像処理による光学式 3 次元運動計測装置を用いた。Fig.3 は計測中の画像で、圧力センサー、空気室内部の水位を計測する超音波式水位計、画像処理運動計測に使用するためのマーカー (赤、緑、黄のボール) を取り付けている。

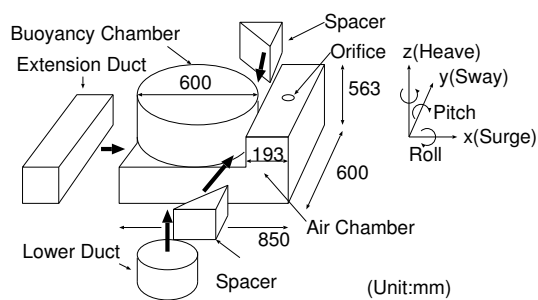


Fig. 2 BBDB Test Piece

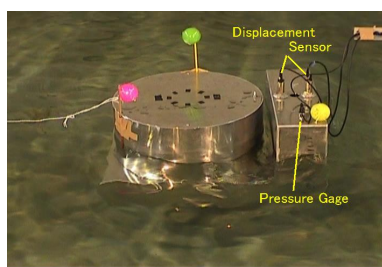


Fig. 3 Measurement Equipment

Table. 1 Size and Characteristics of BBDB Test Model

Length	850(mm)
Width	600(mm)
Height	563(mm)
Diameter of Buoyancy Chamber	600(mm)
Area of Air Chamber	1158(cm ²)
Diameter of Orifice	27(mm)
Weight(no ballast)	43.7(kg)

Table 2 Types of BBDB

A-type	Buoyancy Chamber + Air Chamber
B-type	A-type + Spacer
C-type	A-type + Spacer + Lower Duct
D-type	A-type + Lower Duct
E-type	A-type + Extension Duct

2. 実験結果

2.1 入射波の同定

波浪発電装置の研究において、精度の良い入射波を求める事は、装置の効率について検討を行なう際に非常に重要な事項である。実験に用いた水槽は小規模かつ、非吸収制御式の造波機のため、浮体の定常運動時には浮体からの反射波が水槽壁および造波板で反射し、水槽内の波は多重反射系となる。入射波と反射波が共存する 2 次元水路の場合の入射波の同定には、合田⁽²⁾により提案された手法が有効であるが、3 次元水槽での入射波の同定法は明確に示されていないようである。方向スペクトルを求める計算法の適用も考えられるが、通常方向スペクトル計算法では、成分波の位相のランダム性を基礎にしているため、水路内の多重反射系のように、水路壁での入射波と反射波の位相に特定の関係が成り立つ波浪場には、この方法は直接適用できない。

そこで、本研究では以下に示す手法により入射波を求めた。はじめに、Fig. 4 に示すような矩形の平面形状をもつ水槽の中央に浮体が設置してある場合を考える。造波機で起こされた波が入射して十分時間が経過すると、水槽内の波浪場は定常状態となる。水槽内には浮体が存在するため、浮体からの反射波として円筒波が生じる。この円筒波も、水槽側壁で反射し定常状態になる。また、消波板からの入射波の反射も存在する。そこで、本研究ではこの状態を Fig. 4 のように、浮体の水槽壁に関する 4 個の鏡像を考えモデル化した。厳密には、さらに多くの鏡像を必要とすると考えられるが、最低次のものを考えた。Floating Body 1 は BBDB 自身であり、Floating Body 2~5 は各水槽壁に対する鏡像である。浮体により発生する波は円筒波で表現できるので、水槽内の任意の点の水面変動は

$$\zeta(x,y;t) = \text{Re} \left[\left(a_i e^{ikx} + a_r e^{-ikx} + \sum_{j=1}^5 \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{H_m^{(1)}(kr^{(j)})}{H_m^{(1)}(kl)} \cos m\theta^{(j)} + \sum_{j=1}^5 \sum_{m=1}^{\infty} C_m \frac{H_m^{(1)}(kr^{(j)})}{H_m^{(1)}(kl)} \sin m\theta^{(j)} \right) e^{-i\omega t} \right] \quad (1)$$

と表す事ができる。ここで x, y は水槽上の計測位置、 ω は角振動数、 ζ は水面変動の振幅、 a_i, a_r は入射波およ

び反射波の複素振幅、 $H_m^{(2)}$ は m 次の第 2 種ハンケル関数、 B_m, C_m は m 次の円筒波の複素 $\cos$ 成分および複素 $\sin$ 成分、 l は BBDB の全長、 r^j, θ^j は各鏡像と計測位置の距離および角度である (j は浮体のインデックス)。式 (1) の表現には、浮体近傍の定常散乱波も考慮すべきであるが、浮体から離れた波を対象とする事を考えて、ここでは省略した。

ここで、式 (1) の未知量 a_i, a_r, B_m, C_m を精度良く求めるためには、 $2 + 2 \times 5 \times (m + 1)$ の計測点でデータが必要である。例えば $m = 4$ の時には、52 点での計測データが必要とされる。本研究では水槽内を入射波の伝搬方向に 15 分割、入射波の波峰線方向に 8 分割し、BBDB によって計測できない部分を除いた 84 点において水面変動を計測した。Fig.5 に概略図を示す。図中の黒丸が波高計を設置して計測を行なった点である。ただし、84 点の計測を同時に行なうには、多数の波高計が必要となるため、ここでは図中に楕円で示す 6 箇所および造波板の速度指令を 1 グループとして計測し、この計測を 14 回繰り返してデータを取得した。計測は波浪場が定常状態に収束した、造波機の造波開始から 2 分後にスタートし 20 秒間分のデータを取得した。そして取得したデータ中の造波板の速度指令を用いて同期をとり、各計測点での時系列データを得た。得られた時系列データから最小二乗法を用いて、式 (1) の各成分波の振幅を求めた。

Fig.6 に各形状の BBDB の波浪中応答実験時に得られた入射波の値を示す。図の縦軸は入射波の振幅を示し、5 種類の BBDB、それぞれの場合の入射波振幅および、浮体が存在しない場合の入射波振幅を示している。各タイプの BBDB の計測時に得られた入射波振幅は、浮体が存在しない場合の入射波振幅と良好な一致を示している。これより、本報では提案する解析手法の妥当性を確認した。次に、式 (1) 波を用いて得られた a_i, a_r, B_m, C_m から、Fig.5 の A 点における振幅を求めたものを Table.3 に示す。Table.3 は A-type および B-type の BBDB について、波周波数 0.6Hz の時の場合の各成分の振幅を示している。各成分の振幅を比較すると、入射波振幅に対して反射波および円筒波は非常に小さい値となっている。また、浮体形状の違いにより各タイプの BBDB は異なる運動を行なうため、円筒波の振幅についてはそれぞれの BBDB において異なる分布となっている。

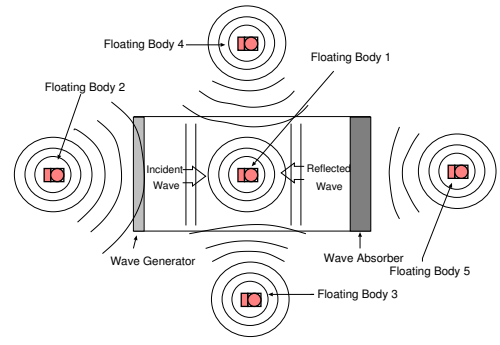


Fig. 4 Mirror image

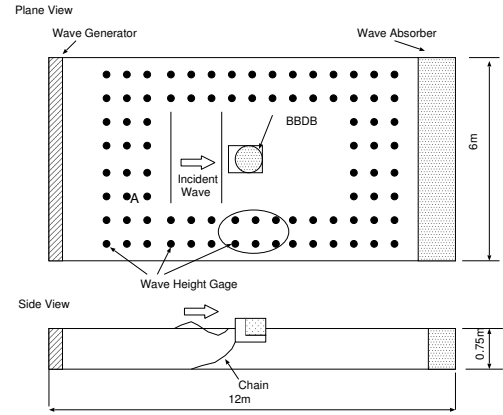


Fig. 5 Configuration of Wave gages and BBDB in the Wave Basin

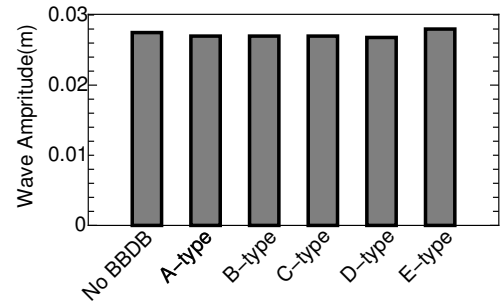


Fig. 6 Incident Wave Amplitude

Table. 3 Components of waves

Component	order	A-type wave amplitude(m)	B-type wave amplitude(m)
Incident		0.27E-01	0.27E-01
Reflected		0.72E-02	0.72E-02
cos	0	0.14E-02	0.10E-02
sin	1	0.25E-03	0.18E-03
cos	1	0.60E-03	0.36E-03
sin	2	0.19E-02	0.23E-02
cos	2	0.42E-03	0.79E-03
sin	3	0.11E-03	0.70E-04
cos	3	0.98E-03	0.50E-03
sin	4	0.15E-03	0.37E-03
cos	4	0.68E-04	0.52E-04
sin	5	0.49E-04	0.90E-04
cos	5	0.57E-04	0.29E-04

2.2 浮体形状の圧力および運動特性への影響

次に Fig.7 は、各波周波数時に得られた空気室の圧力差と前節の手法により得られた入射波高を用いて比圧力 ($P/pg a_i$; P : 空気室圧力差, p : 水の密度, g : 重力加速度, a_i : 入射波振幅) を求めたものである。この図から、本研究で用いた BBDB は全ての形状において波周波数が 0.6Hz の時に高い比圧力が発生し、この波周波数の時に最大効率が得られることがわかる。

次に Fig.8 は、0.6Hz の場合の各タイプの BBDB の運動振幅である。この図に示された各運動の振幅を比較することで、共振時におけるスパーサー、下部ダクト、延長ダクトの影響を検討する。まず、スパーサーの影響について述べる。スパーサーの影響について調べるために、A タイプと B タイプおよび C タイプと D タイプをそれぞれ比較する。これらのタイプの運動振幅について検討すると、Surge については、いずれの場合においてもスパーサーを装着することにより増加する。これに対して Heave 振幅は下部ダクトが無い場合には大きく減少するが、下部ダクトがある場合にはわずかに増加する。Pitch については、同じ、もしくはわずかに増加する傾向にある。次に下部ダクトについて述べる。下部ダクトの影響は、A タイプと D タイプ、B タイプと C タイプを比較することにより可能である。これらの運動振幅を比較すると、まず Surge については、下部ダクトを装着することにより減少することがわかる。これに対して、Heave 振幅はスパーサーが無い場合には大きく減少するが、スパーサーがある場合には逆に増加する。Pitch については、減少する傾向にある。最後に A タイプと E タイプを比較することで、延長ダクトの影響について述べる。A タイプと E タイプの運動振幅を比較すると、Surge に関してはあまり変化がなく、Heave 振幅が増加し、Pitch 振幅が減少している。また、これらの比圧力特性、運動振幅特性などを総合的に比較すると、

C タイプ (スパーサーと下部ダクトを装備) および E タイプ (延長ダクトを装備) がピーク時の比圧力が最も高く、高効率である。さらに延長ダクトを装備した E タイプについては、ピーク時以外の波周波数の場合においても、比圧力の低下量が小さく、全ての周波数に渡って比較的高い比圧力を示している。

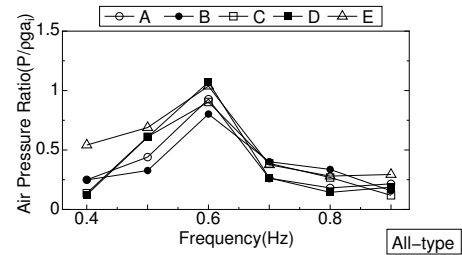


Fig. 7 Air Pressure Ratio

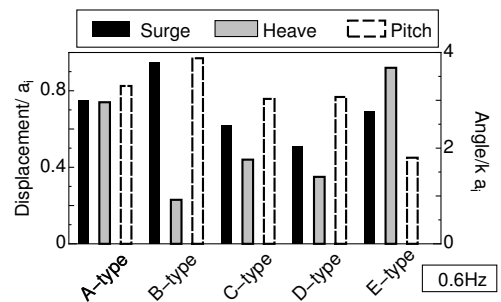


Fig. 8 Amplitudes of each Motion in Resonance (0.6Hz)

結 論

本研究では浮体型波力発電装置 (後ろ曲げダクトブイ) の模型実験を行ない、以下に示す知見を得た。

- スパーサーの単独装着は、BBDB の一次変換特性を悪化させる。しかし、下部ダクトと同時に装着することにより、一次変換特性を向上させることが可能である。
- 延長ダクトの装着は、ピーク時の比圧力を向上させるとともに、比圧力が高い周波数領域を広げる効果がある。

文 献

- (1) Yoshio Masuda, Liang Xianguang, *High Performance of Cylinder Float Backward Bent Duct Buoy (BBDB) and ITS use in european seas*, "Proceedings of 1993 European Wave Energy Symposium", NEL, (1993), pp.323-337
- (2) 合田 良実, 鈴木 康正, 岸良 安治, 菊池 治不規則波実験における入・反射波の分離推定法, "港湾技研資料", No.248, (1976), pp.3-20