# 後ろ曲げダクトブイ(BBDB)に作用する漂流力に関する実験的研究

今井康貴<sup>\*1</sup>, 豊田和隆<sup>\*1</sup>, 永田修一<sup>\*1</sup>, 瀬戸口俊明<sup>\*1</sup> 小田純子<sup>\*1</sup>, 松永成正<sup>\*1</sup>, 下薗貴史<sup>\*2</sup>

# Experimental study of drift force acting on a Backward Bent Duct Buoy (BBDB)

Yasutaka Imai<sup>\*3</sup>, Kazutaka Toyota<sup>\*3</sup>, Shuichi Nagata<sup>\*3</sup>, Toshiaki Setoguchi<sup>\*3</sup>, Junko Oda<sup>\*3</sup>, Narimasa Matsunaga<sup>\*3</sup>, Takafumi Shimozono<sup>\*4</sup>

 \*<sup>3</sup> Institute of Ocean Energy, Saga University 1-Honjyo, Saga, 840-8502 Japan
\*<sup>4</sup> Faculty of Science and Engineering, Saga University 1-Honjyo, Saga, 840-8502 Japan

The application to utilize a renewable energy is required immediately since emission of carbon dioxide is being restricted. We are investigating the ocean wave energy converter, especially a floating OWC "Backward Bent Duct Buoy (BBDB)". BBDB proposed by Masuda in 1986, is wave energy converter of moored floating oscillating water column type which is composed of an air chamber, L-shape bent duct, buoyancy chamber and turbine. BBDB has some good characteristics. Firstly, the primary conversion performance of BBDB is better than other floating OWC. Secondly, the length of BBDB is shorter than that of the other floating OWC. Thirdly, As BBDB advances in incident wave direction with slow speed in waves because of reverse wave drift force, the mooring cost can be reduced.

In this research, experiments under a various wave periods are carried out in order to clarify characteristics and cause of generation of reverse wave drift force acting on BBDB in regular waves with two-dimensional wave tank in Saga University. The length of BBDB model is 65cm. In order to measure the wave drift force, the model is moored with horizontal wire-springs. The motions of the BBDB such as surge, heave and pitch are measured by remotely using image processing. The fluid velocity around the BBDB is measured by using particle image velocimetry (PIV). Motions test of BBDB without mooring is also carried out to measure the horizontal velocity of BBDB in waves. From the experimental results, the characteristics and cause of generation of reverse wave drift force acting on BBDB in regular waves are discussed.

Key Words : Wave energy conversion, Backward bent duct bouy (BBDB), PIV

# 1. 緒 言

地球温暖化防止のため二酸化炭素の排出が制限されつつある今日、世界各所で様々なリニューアブル エネルギーの利用が進められている。著者らは、そ の中の一つである波浪エネルギーを電気エネルギー に変換する波力発電に着目し、"後ろ曲げダクトブ イ (Backward Bent Duct Buoy、以下 BBDB と呼ぶ)"の 研究を進めてきた。<sup>1234)</sup> **BBDB**は 1986 年に Masuda ら<sup>5</sup>によって提案された もので、Fig.1 に示すように、浮体式の振動水柱型

(Oscillating Water Column: OWC)の波力発電装置で、 空気室、L 字形ダクト、浮力体、タービンおよび発電 機から構成される。

BBDB と従来の浮体型発電装置とを比較すると、 ①BBDB の一次変換効率は、他の浮体型 OWC の一次 変換効率より高い、②BBDB の一次変換効率が最大 となる波の波長は、浮体長さの4倍程度となるため、 浮体の長さが短くて良い、③BBDB は、入射波の特 定の周波数帯において、波上側へ微速前進する性質 を持つため、多数の周波数帯の波が混在する実海域 では、波下方向に働く波漂流力を低減でき、係留コ

<sup>\*1</sup> 佐賀大学海洋エネルギー研究センター(〒840-8502 佐賀市本庄町1)

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup> 佐賀大学理工学部(〒840-8502 佐賀市本庄町1) E-mail: imai@ioes.saga-u.ac..jp

ストを低減できる、という利点がある。この入射波 を受けながら物体が波上側へ微速前進する現象は波 食い推進と呼ばれ研究されてきた。67)

これらの利点の中で、③の利点に関して、 McCormick らは、特定の周波数帯の波作用下で、 BBDB には波上側への定常力(以下、負の漂流力と 呼ぶ)が発生することを実験的に示した。89 また、 Hong らも同様な実験を行い、負の漂流力が発生する ことを示すと共に、ポテンシャル理論に基づいた波 漂流力を計算し、実験結果との比較を試みている。<sup>10)</sup> 11) 12) しかしながら、BBDB が、負の漂流力が発生 する原因については明確にされていない。

そこで、本研究では二次元水槽実験を行い、規則 波中での BBDB の運動、BBDB に作用する漂流力及 び周辺流場を計測、可視化することにより、波浪中 で BBDB に働く負の漂流力発生の原因とその特性を 調べた。



Fig.1 Concept of BBDB wave energy converter

#### 2. 水槽実験

# 2·1 実験水槽

実験は、佐賀大学海洋エネルギー研究センター 伊万里サテライトの二次元造波水槽で行った (Fig2)。この水槽は、全長 19.5m, 幅 0.4m,高さ 1.2m の大きさで、水槽の両端に吸収式造波機が 設置されている。水槽の中央部側壁はガラス壁に なっており、BBDB の運動や周辺の流場を側方か ら観測することができる。実験で、水深は1mと した。

#### 2 · 2 BBDB 模型

Fig.3 に BBDB 模型の緒元を示す。 全長 0.85m, 高 さ0.6m, 幅0.78m, 質量47kg で、 喫水は0.36m とし て実験を行った。模型はアクリル製で、空気室内部 の水面変動やダクト内の水流が可視化できる。空気 室天井の中心にはタービン用の孔がある。孔直径は 過去の文献を元に 30,40mm の2パターンを用いた。 2 3 漂流力計測

BBDB 模型に作用する水平方向の漂流力を測定す るため、Fig.2 に示すように、軽いテグスと輪ゴムを 直列に繋いだ係留索を用いて、BBDB 模型を波上側、 波下側の水平両方向に引っ張り、緩係留した。初期 張力は IN 程度とした。波上側、波下側のそれぞれの 係留索端部に検力計を設置し、BBDB 模型に作用す る漂流力を、波上側張力から波下側張力を差引くこ とにより得られた時系列の定常成分として求めた。

波浪の進行波成分を取り出すため、BBDB 模型の 波上側と波下側にそれぞれ 4 本ずつの波高計を設置 し、合田の方法<sup>13)</sup>を用いて、波の入反射分離を行っ た。求められた入射波振幅を用いて漂流力を無次元 化した。



Fig.2 Layout of BBDB in wave tank and measuring systems

入射波周期は0.8~2.5 秒に設定した。入射波波長 をλ、B 模型の代表長さ L を(模型長さ=0.85m)とお くと、λ/L=1.18~8.22 に相当する。入射波振幅は 2.5cm に設定した。ただし T=0.8 秒の場合は 1.5cm と した。

## 2・4 空気室内部圧力および内部水位の計測

空気室内部に発生する圧力を計測するため、空気 室天井に1個の圧力計を設置した。さらに空気室天 井に設置した超音波波高計を用いて空気室内部の水 面変動を計測した。波高計は、空気室内水面に生じ ると予想されるスロッシング等を考慮して空気室内 の波上側と波下側の2箇所(空気室中央から波上側、 波下側に60mmの位置)に設置した。

## 2・5 空気室内部圧力および内部水位の計測

緩係留された模型の運動特性を非接触画像解析 法により計測した。本研究ではMVTec 社製画像処 理システム HALCON を使用した。Fig.4 に示すよう に、模型上部に BBDB と共に運動するマーカー板を 設置して、黒丸で示した 49 個のマーカーを高速度ビ デオカメラで撮影することにより、中央マーカーの 中心座標の水平及び鉛直変位と、その点周りの回転 変位の時系列を計測した。画像取込み周波数は 10Hz とした。得られたマーカー中心座標の変位を重心周 りの値に変換して、BBDB 模型の運動 Surge、Heave、 Pitch を求めた。

# 2・6 PIV による流場の可視化

BBDB が波上側へ前進するメカニズムを解明す るため、ダクト開口部近傍の流速場を PIV(Particle Image Velocimetry)法により計測した。Fig.5 に示すよ うに、没水模型の斜上から 2.5W Nd:YAG レーザー

(532nm,カトウ光研製)を照射し、高速カメラ HAS-500を用いて模型周囲に浮遊するマーカーを撮 影し、画像キャプチャーボード GLINK により,パ ソコンに画像データを取り込んだ。カメラの解像度 は1024 ピクセル×992 ピクセル、取り込み周波数は 100Hz である。トレーサ粒子には、水との比重差が 少なく、流れの変動によく追従する粒径 52μm以下 の不定形ナイロンパウダーを使用した。

撮影した画像はPIV ソフトウェア(ディテクト社 製 Dipp-Flow, ver1.21)を用いて解析し、模型周囲の 流場を算出した。検査領域と参照領域の相関アルゴ リズムを用いて流速場を求めた。



Fig.3 Specifications of BBDB model



Fig.4 Markers upper the BBDB model



Fig.5 Light sheet in PIV measuring system

# 3. 実験結果及び考察

#### 3・1 空気孔直径の影響

実験によって得られた漂流力を Fig.6 に示す。漂 流力は $0.5 \rho$  gL $\zeta 2$ で無次元化した。 $\rho$  は水の密度、 g は重力加速度、L は BBDB の全長、 $\zeta$  は入射波振 幅である。図中、正の漂流力は波下側方向の力を示 す。また、負の漂流力は波上側方向の力を示す。入 射波波長が短い範囲( $\lambda/L=2\sim4$ )において比較的大 きな正の漂流力を受ける。漂流力は $\lambda/L=2.6$ におい て最大になる。波周期が λ/L=2.6 より大きくなると 漂流力が減少し、空気孔径 40mm の場合 λ/L=5.0~ 6.5、孔径 30mm の場合 λ/L=5.3~7.0 において負の漂 流力が発生する。負の漂流力は直径 30mm より直径 40mm の方が大きく、直径 40mm の方がより短い波 長において発生する。

Fig.7 は、空気孔径 40mm の場合における空気内 の2カ所の水位変位振幅とそれらの平均の周波数特 性を示す。これらは、BBDB 固定座標系の下で、空 気室内部水面の静水面位置からの水位変動を示す。 水位変動は入射波振幅くで無次元化している。Fig.8 は、空気孔径 30mm、40mm の場合について、空気 室内の2カ所の水位変位振幅の平均の周波数特性を 示す。また、Fig.9に無次元化した空気室内部圧力の 変動振幅を示す。圧力をρhζで無次元化している。 内部波高振幅は直径30mmより40mmの方が大きい。 λ/L=4 近傍で、空気室内水位が最大になるために圧 力が最大になると考えられる。漂流力が極小になる λ/L=5.5 近くにおいて内部波高振幅も極小になる。 λ/L=6より入射波周期が長い場合、入射波振幅の1.0 ~1.5 倍程度の内部波高変動を示すが、運動周期が長 いため高圧力に結びつかないと考えられる。圧力は 空気孔径 30mm,40mm とも λ/L=4 近くにおいて最大 圧力が発生する。最大圧力は孔径 30mm の方が孔径 40mm の方が高く 1.2 倍程度高い圧力が発生するこ とが分かる。

### 3・2 BBDB の運動と漂流力

空気孔径 40mm の場合における BBDB 模型の重 心位置の運動振幅の周波数特性を Fig.10 に示す。こ の図から BBDB の運動について以下のことが分かる。 入射波周期が比較的短い場合 ( $\lambda$ /L<3) においては Surge が大きく、Heave および Pitch が小さい。これ はほとんど Heave せず波下側に押されて行く目視観 測と合致する。 $\lambda$ /L=3~5 の範囲では Surge が小さく なり、Heave および Pitch が増加する。Heave および Pitch は $\lambda$ /L=5.3 付近で最大となり、 $\lambda$ /L=5.3 より長 波長の場合には減少する。Surge と Heave は波漂流 力が最小となる $\lambda$ /L=5.3 で極小値をとる。









Fig.9 Inner pressure in the air chamber



Fig. 10 Amplitude of Motions of BBDB (40mm Hole)

Fig.10 の BBDB 運動及び Fig.6、Fig8、Fig9 の空気 孔径 40mm の場合の漂流力、空気室内の水面変位、 圧力に関する実験結果を基に、BBDB の特性を総合 的に考察する。入射波波長が短い範囲 ( $\lambda/L=2\sim3$ ) において模型は漂流力が大きいため波下側に押され て移動する。その際ほとんど上下揺、縦揺しないた め、内部波高振幅も小さく、内部圧力も発生しない。  $\lambda/L=2.6$ において漂流力は最大となる。

λ/L=3.9 において内部圧力および内部波高振幅は 最大となる。この周期においては前後揺と縦揺が比 較的大きい。この周期では最もλ/L=1.2 で発生する 内部圧力のほぼ 2.5 倍の内部圧力が発生する。この 周期において漂流力はλ/L=2.6 で発生する最大値の 38%である。

λ/L=3.9~5.3 の範囲では、波長が長くなるにつれ 漂流力、内部波高振幅、内部圧力が減少する。また、 運動は前後揺が小さくなり、上下揺および縦揺が大 きくなる。特にλ/L=5.3 において上下揺および縦揺 は著しいピークを迎える。負の漂流力が発生するλ /L=5~6 において前後揺が小さく、上下揺および縦 揺が大きいことから、負の漂流力発生の原因は上下 揺および縦揺の組合せで発生することが分かる。

## 3・3 BBDB 周辺流体の流速分布と流場の可視化

空気孔径 40mm で負の漂流力が発生する場合(λ/L=5.5)について、ダクト開口部周辺の流場を対象 に、PIV 計測による流速場の計測と染料を流した流れの可視化を行った。

Fig.11の左列にPIV 計測によって得られたダクト 開口部周辺の流速ベクトルを示す。一周期を8分割 し、t=0~3T/8がBBDBのダクト後端下降時、t=4T/8 ~7T/8がダクト後端上昇時の速度場である。ダクト 後端が下がり始めると、それに伴いダクト開口部の 上部からダクト内部に高速で水が進入する。ダクト 後端が最下点まで達するとダクト内への水の進入は 止まる。ダクト後端の上昇が始まるとダクト下端に 反時計回りの強い渦が成長する。この渦はダクト後 端が最高点に達するまで成長し、ダクト後端の下降 が始まるとダクト下端を離れ下流側に流される。

Fig.11 右列に、同じ周期において、染料により可 視化した渦の生成を示す。t=0~3T/8 が後端下降時、 t=4T/8~7T/8 が後端上昇時である。PIV で検知され たダクト下端の渦生成が明確に見られる。t=4T/8 か ら後端上昇が始まるが、後端上昇に伴いダクト下側 に反時計回りの渦が成長し、後端下降にともない BBDB を離れる。

## 3・4 負の漂流力の発生原因について

空気室ダンピングの影響を見るため、空気室天井 の空気孔を塞ぎ漂流力およびダクト周囲の流場を計 測した。可視化した流場を図 12 に、漂流力を図 13 に示す。図 13 には比較のため空気孔 40mm の漂流 力も示す。

空気孔 40mm の場合は λ/L=5-6.5 において負の漂 流力が見られるが、空気孔を塞ぐと負の漂流力が発 生しない。空気孔を塞ぐことにより空気室ダンピン グ効果が無いためと考えられる。空気孔が無いこと によりダクト内に流体運動が発生しない。 λ/L=5.5 において空気孔径 40mm の BBDB が上端から下降を 始める図 11 中 t=0 および t=T/8 ではダクト開口部上 部からダクト内に高速で流体が流入するが、空気孔 を塞いだ場合、下降を開始する t=0 および t=T/8 にお いてダクト内への流入が見られない。また、40mm 空気孔ではダクト開口部下端と上端に交互に渦がで きるが、空気孔を塞いだ場合には開口部上端に渦が 出来ない。

以上の結果と図 11 を比較して波食い推進が発生 する原因について考えると、波食い推進が発生する 場合、空気室を中心としたピッチで後端部が大きく 上下し、後端部が下降するときに水がダクト内に高 速で進入すると同時に BBDB は前進する。空気孔を 塞いだ場合にはダクト内への高速な水の進入は発生 しない。つまり、この高速でダクト内に進入する水 の運動量がダクト内壁を押し、波食い推進が発生す るものと思われる。







t=0



t= T/8



t=2T/8



\$\$t=3T/8\$ Fig.11 Velocity field at BBDB stern (  $\lambda$  /L=5.5, 40mm hole)





t=4T/8



t=5T/8



t=6T/8





\$\$t=7T/8\$ Fig.11 Vortex shedding at BBDB stern (  $\lambda$  /L=5.5, 40mm hole) continued



t=0



# t=T/8



t=2T/8



t=3T/8



t=4T/8



t=5T/8



t=6T/8





Fig.12 Vortex shedding at BBDB stern( $\lambda\,/\text{L=5.5},$  No Hole)



Fig.13 Drift force acting on BBDB without hole



BBDB 型波力発電装置の一次変換特性および漂流力、運動の特性を求めるため、二次元水槽実験を行った。漂流力が最大となる周期とその周波数特性、空気室内部に発生する圧力とその特性を求めた。また画像処理技術を用い非接触運動計測を行い、運動の周波数特性を計測した。その結果、供試模型の場合、λ/L=5~6の周期において波漂流力が負になる事を示し、運動計測から、それが主に上下揺および縦揺の組み合わせによることを明らかにした。

また、BBDB 模型後端にあるダクト開口部周囲の 流場を可視化し、負の漂流力が発生する場合には開 口部に強い渦が成長することを示した。

最後に波食い推進発生の原因について考察した。 波食い推進が発生する場合には空気室を中心とした ピッチ運動のため BBDB後端が大きく上下する。そ の下降時に高速でダクト内に進入する運動量がダク ト内壁を押し、前進運動を発生させると思われる。

# 文 献

- Nagata S. et al., "Experimental Research on Primary Conversion of a Floating OWC "Backward Bent Duct Buoy", Proc. of the Sixteenth ISOPE Conference, 475-482, 2007
- (2) 豊田和隆ほか, "浮体型波力発電装置(後ろ曲げダクトブイ)の一次変換性能に及ぼす浮体形状について", 日本船舶工学会講演会論文集,65-69, 2007
- (3) 永田ほか, "浮体型波力発電装置(後ろ曲げダクトブイ)の一次変換性能に関する実験的研究",日本船舶海洋工学会講演会論文集,235-238,2006
- (4) Toyota K., et al., "Study on Motion of Backward Bent Duct Buoy in Regular Waves", Proceedings of Renewable Energy 2006, CD-ROM, 2006.
- (5) Masuda Y. "Experience in Pneumatic Wave Energy Conversion in Japan", Proceeding of ASCE Specialty Conference on Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion, 1986
- (6) Isshiki, H and Murakami, M "A Theory of Wave Devouring Propulsion (3rd Report)", J. Soc. Naval Arch. Japan, No. 154, pp118-128
- (7) 寺尾裕 "波に向かって進む浮体" 関西造船協会誌, 第184 号, pp. 51-54, 1982
- McCormick, M.E. "Ocean Wave Energy Conversion", A Wilely - Interscience Publication, 1981
- (9) McCormick, M., Sheehan, W. "Positive Drift of Backward Bent Duct Barge", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 118, No. 1, pp 106-111, 1992.
- (10) Kim J.H., Lew J.M., "An Experimental Study on the Reverse Wave Drift Force of a BBDB Type OWC Wave Energy Device", Proc. of the Fifteenth ISOPE Conference, 2006
- Hong, D.C., Hong, S.Y., and Hong, S.W. "Numerical Study on the Reverse Drift Force of Floating BBDB Wave Energy Absorbers", Ocean Engineering, Vol 31, No 10, pp 1257-1294, 2004.
- (12) Hong D. C., Hong S. Y., Hong S. W., "Numerical study of the motions and drift force of a floating OWC device", Ocean Engineering 31, 139-164, 2004.
- (13) 合田ほか"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, pp. 3-22, 1976