

浮体型 OWC 「後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置」の発電効率と運動に関する研究

今井 康貴^{*1}, 豊田 和隆^{*1}, 永田 修一^{*1}, 瀬戸口俊明^{*1}, 高尾 学^{*2}

Generating efficiency of a Floating OWC "Backward Bent Duct Buoy"

Yasutaka IMAI^{*1}, Kazutaka TOYOTA^{*1}, Shuichi NAGATA^{*1}, Toshiaki SETOGUCHI^{*1} and Manabu TAKAO^{*2}

^{*1} Saga University, Institute of Ocean Energy
Honjo-Machi 1, Saga, 840-8502 Japan

Generating efficiency of the floating OWC "Backward Bend Duct Buoy" (BBDB) is measured in a three dimensional wave tank test. At a frequency that final conversion become maximum, motion of the water inside of a duct and motion of surge is out of phase. The motion of the water inside of a duct and pitch is also out of phase.-

Key Words : Wave Energy, BBDB, Impulse Turbine, Generating Efficiency

1. 緒 言

現在世界中で様々な形式の波力発電装置が提案されている。中でも、波エネルギーを空気エネルギーへ変換し、空気エネルギーを電気エネルギーへ変換する振動水柱型波力発電装置は大波浪下での安全性も高く、もっとも実用化に近いと考えられている。本研究は振動水柱型波力発電装置の一種である「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bend Duct Buoy : 以後 BBDB)について注目した。BBDB は 1986 年に Masuda ら⁽¹⁾によって提案された浮体式の振動水柱型の波力発電装置である。Fig.1 に BBDB の概念を示す。BBDB は浮力体、L 字型ダクト、タービン発電部から構成される。BBDB に波が入射すると、入射波のエネルギーは船体後方開口部からダクトに伝播し、ダクト内空気室にある空気を圧縮する。この段階を一次変換と呼ぶ。圧縮され高圧になった空気はタービンを回転させ発電する。この段階を二次変換と呼ぶ。発電性能を示す総合効率（最終効率）は入射波エネルギーと発電量の比で定義される。

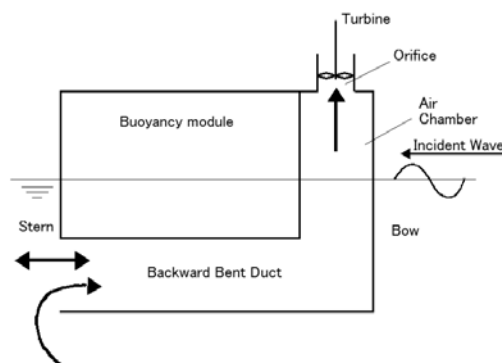


Fig.1 Concept of BBDB

BBDB の特徴として、浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなること、装置自体が小型で浅い海でも使用可能である、波浪中で波の入射方向に微速前進することが挙げられる。これら BBDB の基本特性につ

^{*1} 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)

^{*2} 松江高専

E-mail: imai@ioes.saga-u.ac.jp

いて、過去幾つかの研究がなされてきた。McCormick⁽²⁾ は、全長 35.6m, 幅 9.91m の BBDB を想定し、理論計算により向波および追波中における出力を解析的に求めた。その結果、向波中の方が追波中よりはるかに高い出力が得られることを示した。また、向波中の特定周波数範囲において、波上側に漂流することを示した。さらに、McCormick and Sheehan⁽³⁾ は全長 1.778m, 幅 49.53cm, 喫水 9.81cm の BBDB 模型を用いて水槽実験を行った。水槽の水深は 30.5cm および 22.9cm である。実験では規則波中における BBDB が特定の周波数帯において波上側へ前進することを示した。

Liang ら⁽⁴⁾ は 1995 年 6～9 月、中国科学院 Guangzhou 研究所水槽 (長さ 27m, 幅 1.2m, 水深 0.8m) において BBDB 模型水槽実験を実施した。模型は全長 0.663～0.923m, 幅 0.51～0.62m, 全高 0.43～0.46m, 喫水 0.24～0.31m の 6 種類が使用された。規則波向波中に係留された模型の一次変換効率を計測し、最適な船体形状を求めた。さらに、その最適船体形状における係留力実験を行い、最大係留力は船体質量に比例すること、係留鎖長と水深の比が大きいと係留力が低減すること、空気室開口部を閉じると係留力が最小になること等を示した。

これまで我々が行った水槽実験では、全長 0.85m の小型 BBDB 模型を用いて 2 次元水槽で 70%、3 次元水槽で 100%に近い一次変換効率を得られた。

ただし、発電タービンを搭載した BBDB の発電性能に関する研究はほとんど行われていない。そこで、全長 2.5m、全幅 2.3m、全高 1.7m、喫水 1.1m の模型に発電タービンを搭載して水槽実験を行い、規則波中における BBDB の発電性能と運動特性を調べた。これらの実験により BBDB の基本性能を検証し、実機設計の基礎となるデータを収集した。また、発電効率（最終効率）の周波数特性と浮体運動をより詳細に調べることで両者の関係を明らかにした。

2. 実験方法

水槽実験に使用した BBDB 模型を Fig.2 に示す。模型はアルミ製フレームと外殻、バラスト、タービンおよび発電機部、計測機器から構成される。Table 1 に模型緒元を示す。タービンは佐賀大学および松江高専にて開発された衝動タービン⁽⁵⁾を使用した。Table 2 にタービン仕様を示す。発電機はスカイ電子社製 SKY-HR160 を用いた。外部抵抗は事前の予備試験でタービン回転あたりの出力が最大となるように設定した。

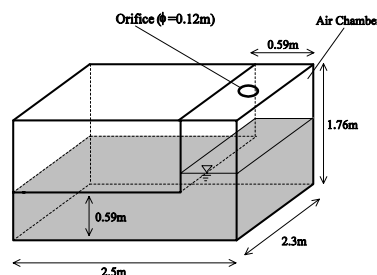


Fig.2 BBDB Model

Table 1 Specification of Model

Length overall	2.50m
Width	2.30m
Buoyancy module draft	0.45m
Draft	1.05m
Displacement	2.56m ³
Longitudinal center of gravity	1.42m (from bow)
Center of Gravity(C.O.G)	0.74m (from bottom)
Radius of gyration (Roll) Kxx	1.00m
Radius of gyration (Pitch) Kyy	1.00m
Radius of gyration (Yaw) Kzz	1.03m

Table 2 Specification of Turbine

Hub-to-tip ratio	0.7
Number of rotor blades	30
Solidity of rotor blade at r_R	2.02
Number of guide vanes	26
Solidity of guide vane at r_R	2.27
Rotor tip diameter	249.2mm
Rotor inlet angle	60deg
Rotor outlet angle	60deg
Rotor thickness ratio	0.3
Rotor tip clearance	0.4mm

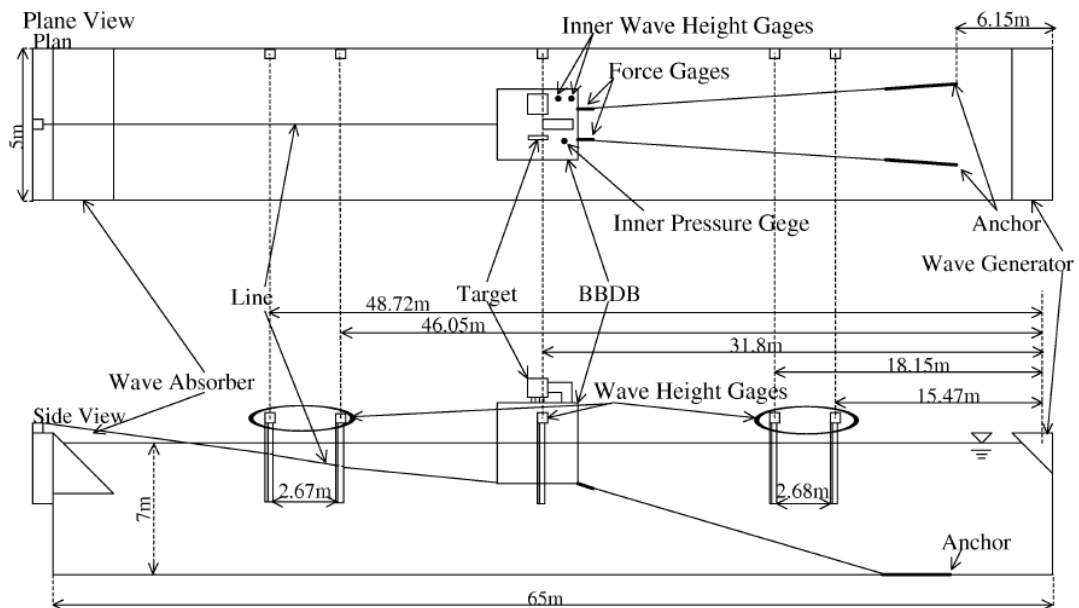


Fig.3 Experimental Arrangement

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽にて実施した。水槽は全長 65m、幅 5m、水深 7m である。Fig.3 に実験機器配置図を示す。水槽中央部に中型模型を係留した。BBDB 船首部の左右 2 ヶ所をワイヤー係留した。水槽端に設置された造波機で規則波を発生させ、規則波中における BBDB の発電量を計測した。入射波波高は BBDB 波上側と波下側に設置した波高計で計測した。同時に空気室内部の水位変動および圧力を計測した。運動はビデオトラッキングにより計測した。10Hz でマーカー画像を撮影し、MV Tec 社製 HALCON を用いて変位を計測した。Fig.4 に設置写真、Fig.5 に衝動タービンを示す。



Fig.4 BBDB model installed in a tank

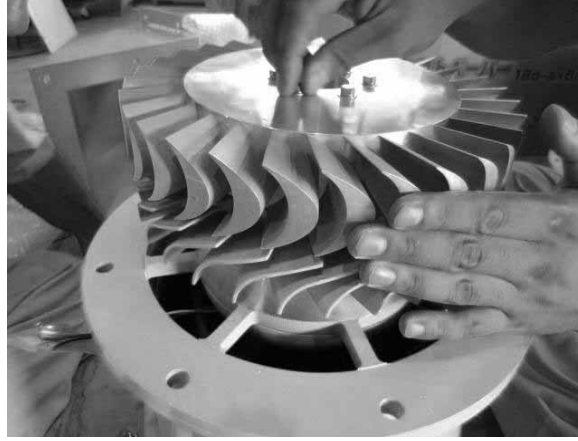


Fig.5 Impulse turbine

運動の固有周期は Surge 方向が 2.68 秒、Heave 方向が 2.92 秒、Pitch 方向が 2.68 秒であった。これは入射波波長 λ と物体 L の比 λ/L に換算するとサージ（前後揺）方向 4.46、ヒーブ（上下揺）方向 5.33、ピッチ（縦揺）方向 4.46 に相当する。

最終効率は入射波エネルギーフラックスに対する発電エネルギーフラックスの比であり次式で定義される。

$$\eta = \frac{E_{turbine}}{E_{wave}} \quad (1)$$

$E_{turbine}$, E_{wave} はそれぞれ以下のように定義される。

$$E_{turbine} = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

$$E_{wave} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_i^2 C_g B \quad (3)$$

ここで V は発電電圧、 R は外部抵抗値、 ζ_i は入射波振幅、 C_g は入射波群速度、 B は BBDB の幅である。

3. 実験結果および考察

Fig.6 に最終効率の周波数特性を表す。Fig.7 に空気室内部圧力の振幅、Fig.8 に空気室内部水面の振幅を表す。最終効率は $\lambda/L=3.52$ において最大 31%を示した。 $\lambda/L=3.52$ では内部圧力および内部水面の振幅が最も大きい。

Fig.9 ~ Fig.11 にそれぞれサージ、ヒーブ、ピッチの無次元運動振幅を示す。周期 $\lambda/L=3.52$ ではサージおよびヒーブ運動振幅が最大となり、ピッチ運動振幅が極大となる。また、周期 $\lambda/L=3.52$ は、前節に示したそれぞれの運動の固有周期には該当しない。最終効率が最大となる周期は固有周期より短い周期であった。

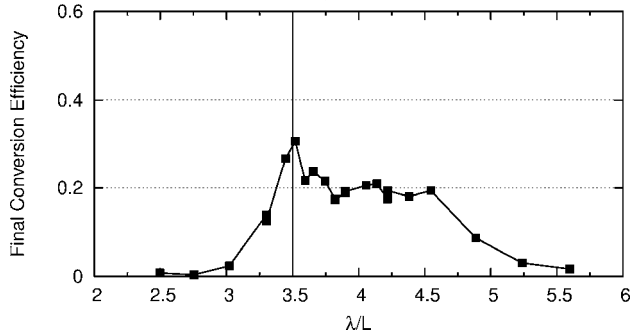


Fig.6 Generating efficiency

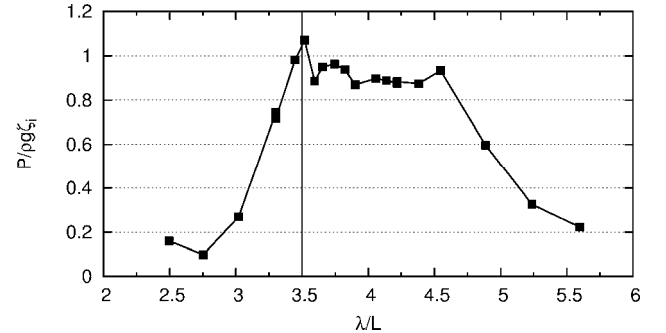


Fig.7 Inner pressure amplitude

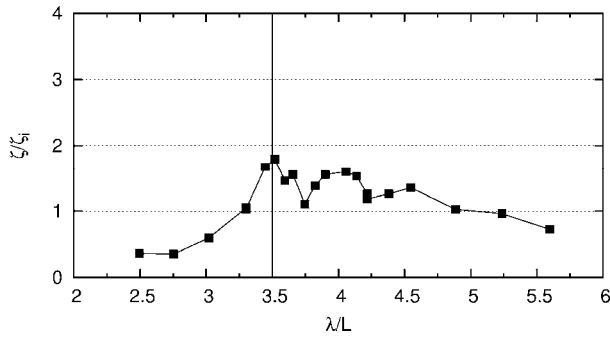


Fig.8 Inner wave height

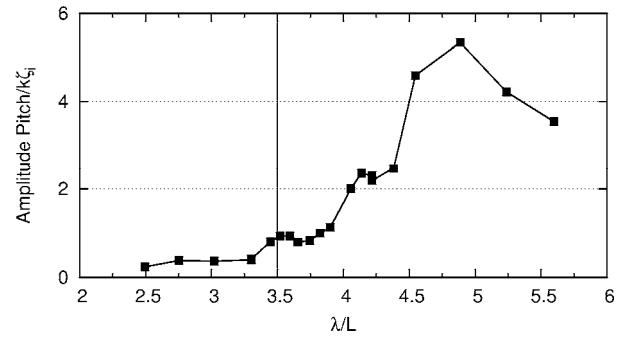


Fig.11 Amplitude of motion (Pitch)

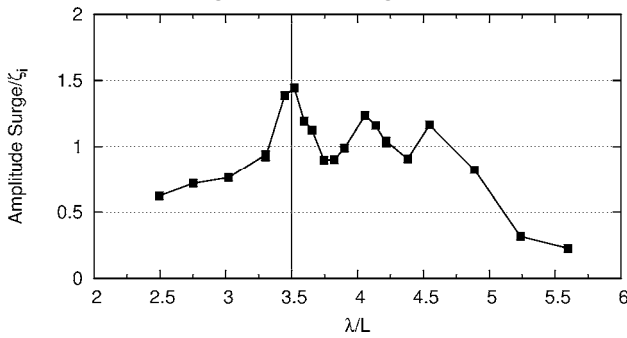


Fig.9 Amplitude of motion (Surge)

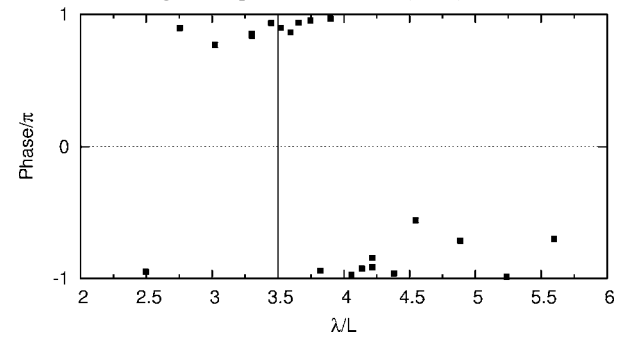


Fig.12 Phase of inner wave height (Surge Based)

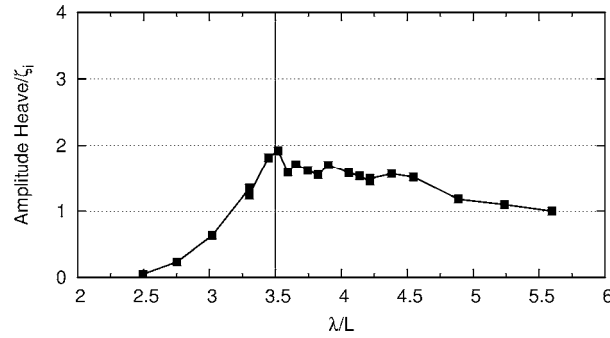


Fig.10 Amplitude of motion (Heave)

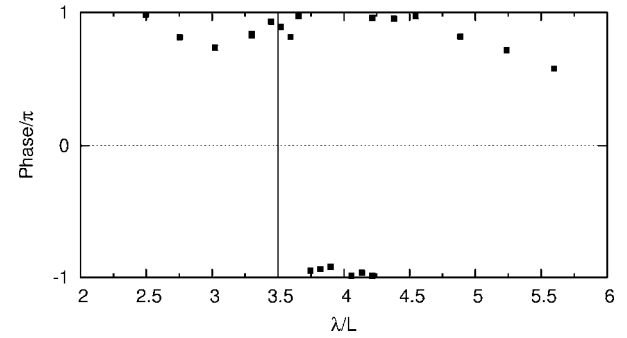


Fig.13 Phase of inner wave height (Pitch Based)

Fig.12 にサージを位相基準とした場合の内部波高の位相を示す。位相差は π で割って-1~+1 の範囲で表す。同じく Fig.13 にピッチを位相基準とした場合の内部波高の位相を示す。最終変換効率が最大となる $\lambda/L=3.52$ ではサージ運動とダクト内部の水運動がほぼ逆位相となる。同じくピッチ運動ダクト内部水運動も逆位相になる。内部波高振幅が最大になり、模型運動と内部水運動が逆位相になることが重なり高い内部圧力が生まれ、その結果最終効率が最大になる。

7. 結 語

全長 2.5m、全幅 2.3m、全高 1.7m、喫水 1.1m の振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」模型に発電タービンを搭載して水槽実験を行い、規則波中における BBDB の発電性能と運動特性を調べた。最終効率は $\lambda/L=3.52$ において最大 31%を示した。最終効率が最大となる波周波数ではサージ運動とダクト内部の水運動が逆位相となること、またピッチ運動とダクト内部の水運動も逆位相となる。模型運動と内部水運動が逆位相になることで高い空気室内部圧力が生まれ、その結果、最終効率が最大になることを明らかにした。

謝 辞

本研究は科研費 MEXT/JSPS 22360369 の助成を受けたものである。また、実験は九州大学応用力学研究所の共同利用研究として実施された。ここに記して感謝する。

文 献

- (1) Masuda Y et. al., Experience in Pneumatic Wave Energy Conversion in Japan, Proceeding of ASCE Specialty Conference on Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion, 1986
- (2) McCormick, M., A Theoretical Analysis of a Self Propelled Backward-Bent Duct Wave Energy Conversion System, Journal of Energy Resources Technology, Vol.113, pp.94-100, 1991
- (3) McCormick M. and 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
- (4) Liang Xianguang, Wang Wei, Du Bin and Jiang Niandong, Experimental Research on Performance of BBDB -- Wave-activated Generation Device Model, The Second European Wave Power Conference, 1995, Lisbon, pp.95-106
- (5) T. Setoguchi, M. Takao, et.al. "Study of an Impulse Turbine for Wave Power Conversion: Effects of Reynolds Number and Hub-to Tip Ratio on Performance", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.126, pp.137-140, 2004