規則波中における後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置の 一次変換性能に関する実験的研究

正会員 今 井 康 貴* 正会員 永 田 修 一*
正会員 豊 田 和 隆** 正会員 村 上 天 元*

An Experimental Study on Primary Efficiency of a Wave Energy Converter
"Backward Bent Duct Buoy" in regular wave conditions

by Yasutaka Imai, *Member* Shuichi Nagata, *Member*
Kazutaka Toyota, *Member* Tengen Murakami, *Member*

Summary

A primary conversion efficiency of a floating OWC-type wave energy converter "Backward Bent Duct Buoy (BBDB)" in regular waves is investigated in 2D and 3D wave tank tests. Firstly, the amplitude and phase difference between the internal wave height and motions are investigated. In a 3D tank test, surge, heave and pitch become in-phase at efficiency become maximum. The phase of internal wave height is close to motion. Secondary, the efficiency of duct-extended buoy is investigated in 2D test. Efficiency is reduced because the pitch becomes small by duct extension. Thirdly, the effect of a moment of inertia is investigated. In case of total mass and draft is constant, frequency band of high-efficiency increases as the moment of inertia become large. Fourthly, the effect of the shape of the air chamber is also investigated.

1. 緒 言

波浪エネルギーは、CO₂排出量を削減できる再生可能エネルギーの1つとして注目されている。そのため、波浪エネルギーを電気に変換する波力発電装置が世界中で提案されている。また、近年は沖合に多くの浮体型波力発電装置を配列したウェーブファームの研究も増加しつつある。

波力発電装置は振動水柱型(OWC)、可動物体型および越波型の3つに大きく分類できる。この中で振動水柱型は台風等の大波等の大波高時において空気室の圧抜弁を開けることで空気室内の高圧空気を大気解放しタービンや発電機を保護できるため、他形式と比較して耐久性が高いとされている。

そこで著者らは振動水柱型波力発電装置に注目し、その中でも高い変換効率をもつ「後ろ曲げダクトブイ(Backward Bent Duct Buoy: BBDB)」の研究を行っている。BBDBは益田¹⁾によって提案された浮体型波力発電装置である。Fig.1

にBBDBの概念図を示す。BBDBは、水中のL字管、浮力体、タービン、発電機から構成される。

Fig 1 Concept of the BBDB

BBDBはまず入射波のパワーを空気パワーに変換する。これは一次変換と呼ばれる。次に空気パワーをタービンと発電機で電気パワーに変換する。これは二次変換と呼ばれる。発電効率(最終効率)は入射波の波パワーに対する電気パワーの比率として定義される。

過去に開発されたマイティホエールのような浮体式の振動水柱型波力発電装置と比較して、BBDBは幾つかの利点がある。第一にBBDBは従来の浮体型波力発電装置と比較し

* 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター

** 故人(佐賀大学 海洋エネルギー研究センター)

て一次変換効率が低い。第二に、BBDB の一次変換効率は全長の約 4 倍の入射波長において最大となるため、装置全長が比較的短くてよい。第三に、BBDB 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特性を持つため、多数の周波数帯の波が混在する実海域では、波下側に働く波漂流力を低減でき、係留コストを削減できる。

BBDB のエネルギー変換については過去いくつかの実験が行なわれた。益田¹⁾は、2 次元水槽実験を行い、規則波中において BBDB が他の浮体型波力発電装置より高い一次変換効率を持つことを示した。入射波に対する BBDB の平面配置については、海水が出入りする水平ダクトの開口部が Fig.1 に示すように波下にある場合が、波上側にある場合に比べて、空気室の圧力が高いことを示した。また、益田ら²⁾³⁾は複数の空気室および浮力体をもつ 2 種類の BBDB を用い三次元水槽実験で一次変換性能を計測し、一次変換効率に及ぼす空気室数や浮体室数の影響を調べた。Xianguang ら⁴⁾は、6 種類の船体形状の BBDB 模型の規則波中における一次変換効率を二次元水槽実験において計測し、それらの一次変換効率は 22~73%であることを示した。Lewis ら⁵⁾は、線形の PTO (Power Take-Off) シミュレータをもつ BBDB 模型の三次元規則波水槽実験を行ない、BBDB の運動や空気室圧力を計測した。Forestier ら⁶⁾は、OceanEnergy 社による "OEBuoy" と名付けられた BBDB の水槽実験および実海域試験の出力結果を報告したが、変換効率については明確に示していない。

そこで本研究では益田らが提案した BBDB 形状をもとに、ダクト形状を変更した 3 種類の模型、空気室形状およびダクト形状を変更した 3 種類の模型について一次変換効率をまとめることを目的とする。

2. 二次元水槽実験

2.1 ダクト形状が一次変換効率に及ぼす影響

二次元水槽における規則波実験で小型 BBDB 模型の一次変換効率を計測した。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水槽で実施した (Fig.2)。水槽は長さ 18m、幅 0.8m および水深 1m であり、両端に吸収式造波機をもつ。

BBDB の基本型(タイプ A)の寸法を Fig.3 に示す。船体形状が一次変換効率に及ぼす影響を評価するため、タイプ A のダクトを 15cm 延長したタイプ B (Fig.4)、45cm 延長したタイプ C(Fig.5)を用いて実験を実施した。緒元を Table 1 に示す。模型はアルミニウム製フレームと透明アクリル板から構成される。空気室天井の中心に直径 40mm のオリフィスをもつ。オリフィス径は固定型振動水柱型波力発電装置の実

験結果を基に⁷⁾、オリフィス断面積が空気室断面積の 1/100 になるよう決定した。空気室には内部波高を計測するため天井に超音波波高計 2 式、空気室内部圧力を計測するために圧力計を設置した。

水槽端に設置された造波機で波高 5cm、一定周期の規則波を発生させ、規則波中における BBDB の空気室内部波高および内部圧力から一次変換効率を算出した。同時に MVTec 社製ビデオトラッキングシステム HALCON を用いビデオトラッキングにより BBDB の運動を計測した。運動は Fig.1 に示すように静止状態を基準として Surge は前進、Heave は鉛直上向き、Pitch は船首下げをそれぞれ正方向とした。

Fig.2 Experimental arrangement (2D)

Fig.3 BBDB dimensions (Type-A)

空気室内部水面変位の定義を Fig.6 に示す。変位はセンサに近づく方向を正とした。空気室内の水面変位を $\zeta_1(t)$ (波上側) と $\zeta_2(t)$ (波下側) とした。

Fig. 4 15cm extended model (Type-B)

Fig. 5 45cm extended model (Type-C)

Table 1 Model BBDB dimensions

Item	Unit	Type-A	Type-B (150mm duct extended)	Type-C (450mm duct extended)
Length	M	0.85	1.00	1.30
Breadth	M	0.78	←	←
Draft	M	0.35	←	←
Longitudinal center of gravity (from bow)	M	0.495	0.500	0.505
Center of Gravity (from keel)	M	0.272	0.275	0.270
Radius of gyration (Pitch)	M	0.336	0.327	0.338
Natural frequency of Surge Motion	Sec	1.8	2.2	2.6
Natural frequency of Heave Motion	Sec	1.7	2.0	2.3
Natural frequency of Pitch Motion	Sec	1.8	2.6	6.3

Fig. 6 Definition of inner water elevation

BBDB によって吸収される波浪エネルギー量は、振動水柱部の仕事量から求めることができる。空気室の圧力 $P(t)$ とオリフィスを通して流出入する流量 $Q(t)$ から、仕事量 $W(t)$ は次式で求まる。

$$W(t) = P(t)Q(t) \quad (1)$$

オリフィスを通過する流量 $Q(t)$ は $\zeta_1(t)$ 、 $\zeta_2(t)$ および空気室断面積 S を用いて次式で表される。

$$Q(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) S \quad (2)$$

$$W(t) = P(t) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) S \quad (3)$$

空気パワー E_{air} は次式で定義される。

$$E_{air} = \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt \quad (4)$$

$$= \frac{S}{T} \int_0^T p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) dt$$

ここで T は入射波周期である。

ダクト内部水の共振周期を計測するため、Type-A 模型を規定喫水 (0.35m) に固定し、向波方向から波を入射させ一次変換効率を計測した。入射波振幅は 2.5cm とした。BBDB の一次変換効率は入射波パワー E_{wave} に対する空気パワー E_{air} との比として定義される。

$$\eta_1 = \frac{E_{air}}{E_{wave}} \quad (5)$$

E_{wave} は以下のように定義される。

$$E_{wave} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_i^2 C_g B \quad (6)$$

ここで ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ζ_i は入射波振幅、 C_g

は群速度、 B は模型幅である。

Type-A 模型を固定した場合の一次変換効率を Fig.7 に示す。一次変換効率の最大値は $\lambda/L=8.5$ において 0.1 であり、これはダクト内共振の固有周期に相当する。

Fig.7 Primary conversion efficiency of fixed BBDB
(head sea)

BBDB の船首底部を一点係留し、片振幅 2.5cm の向波の場合の一次変換効率を Fig.8 に示す。図中の太い実線が Type-A、細い実線が Type-B、点線が Type-C である。

Type-A に着目し、固定した場合と一点係留の場合を比較する。固定した場合は一次変換効率の最大値が 0.10 ($\lambda/L=8.5$) であるが、一点係留では最大値 0.61 ($\lambda/L=3.5$) である。一次変換が最高値となる波長は一点係留の方が固定の場合より短周期側である。これより一点係留の場合、BBDB は運動によって、水中ダクトの固有周期よりかなり短い周期で高い一次変換効率を発生する。また、一点係留では水中ダクトが長くなるにつれ一次変換効率が減少した。この原因を考えるため、Type-A から C の空気室内水面変動振幅を Fig.9 に、内部圧力を Fig.10 に示す。内部水面変動振幅は 2 つある超音波センサの平均値であり、入射波振幅 ζ_i で無次元化した、一方内部圧力は $\rho g \zeta_i$ で無次元化した。Fig.11 から Fig.13 にそれぞれ surge, heave, pitch の振幅を示す。surge および heave 振幅は ζ_i で、pitch 振幅は ζ_i と入射波の波数 k を用いて無次元化した。

Type-A の一次変換効率が大になる $\lambda/L=3.5\sim 4$ はそれ以外の周期と比較して、内部圧力および波高振幅が比較的高い。また surge 振幅が大、heave 振幅と pitch 振幅が小である。Type-B、Type-C はダクト延長量が増加するにつれ一次変換効率のピーク値が低下する。ダクト延長量が大になると pitch が減少し、内部圧力振幅が低下することで一次変換効率も低下する。

Fig.8 Primary conversion efficiency

Fig.9 Amplitude of inner wave height

Fig.10 Amplitude of pressure

Fig.11 Amplitude of surge motion

Fig.12 Amplitude of heave motion

Fig.13 Amplitude of pitch motion

Type-A では $\lambda/L=3.5$ 近傍において内部波高振幅が大きく、圧力が高くなり一次変換効率が最大になった。この理由について運動の位相差から考える。Fig.14 に入射波位相を基準とした場合の Surge, Heave, Pitch 運動の位相差, Fig.15 に内部波高の位相差を示す。位相差は $0 \sim 2\pi$ であるが、 π で割って $0 \sim 2$ の範囲で示した。 $\lambda/L=3.55$ 近くにおいて Heave は入射波と位相が同位相, Surge, Pitch は逆位相になる。また、内部波高は $\lambda/L=3.45$ 付近で入射波と同位相となる。

Fig.14 Phase shift of motion (reference: incident wave)

Fig.15 Phase shift of inner wave height (reference: incident wave)

Surge を基準とした場合の Heave, Pitch の位相を Fig.16 に、内部波高の位相を Fig.17 に示す。 $\lambda/L=3.45$ において Surge と Pitch は同位相になる。Heave は 0.85π の位相差があった。内部波高の位相は 1.19π の位相差があり、これは Surge 運動と逆位相に近い。

Fig.16 Phase shift of motion (reference: surge)

Fig.17 Phase shift of inner wave height (reference: surge)

Fig.18 Motion of fluid in duct at first half period

Fig.19 Motion of fluid in duct at second half period

$\lambda/L=3.5$ における周期前半の Surge, Pitch 運動と内部波高の関係を Fig.18 に、周期前半には前進かつ船首下げを行いながらダクト内の水を後方に排出する。一方、周期後半の関係を Fig.19 に示す。後進および船首上昇ピッチによりダク

ト内に水が押し込まれる. Surge と Pitch が同位相で発生することにより高い一次変換効率を発生させる原因であると考えられる.

2.2 慣性モーメントが一次変換効率に及ぼす影響

2.1 節で使用した実験模型で, 総質量および喫水を変更することなくバラスト配置を変更し, により標準より慣性モーメントの大きい場合および小さい配置をつくり, 慣性モー

メントの違いによる一次変換効率への影響を調べた. バラストを含む模型総重量は 87.68kg 一定, 喫水 0.35m 一定である. Table 2 にそれぞれの重心位置と慣動半径 k_{yy} を示す. k_{yy} が標準模型より 4% 増加したものを Type-S, 25% 増加したものを Type-D とした. 一方, k_{yy} が標準模型より 9% 減少したものを Type-C, 13% 減少したものを Type-L とした.

Table 2 Radius of gyration of BBDB models

	Unit	Type-L	Type-C	standard	Type-S	Type-D
Longitudinal center of gravity (from bow)	M	0.483	0.490	0.497	0.494	0.491
Center of Gravity (from keel)	M	0.282	0.283	0.276	0.377	0.441
Radius of gyration k_{yy}	—	0.299 (87%)	0.315 (91%)	0.345 (100%)	0.358 (104%)	0.431 (125%)

一次変換効率を Fig.20 に示す. 標準型より慣動半径が小さい Type L および C において, 一次変換率は標準型とほぼ同じであった. 一方, 慣動半径大きい Type S および D では $\lambda/L=4.5\sim 6.5$ において標準型より一次変換率が增加する. 特に $\lambda/L=5.5$ では差がもっとも大きくなり, 標準型が 0.12 であるのに対して, Type S, D は 0.34 と 3 倍近い増加を示した. 内部波高振幅 (Fig21), 内部圧力振幅 (Fig22) とともに $\lambda/L=4.5\sim 5.5$ で標準型より増加している.

Fig. 23~25 にそれぞれ Surge, Heave, Pitch の運動振幅を示す. 慣動半径を増加させた場合, $\lambda/L=4.5\sim 5.5$ において Pitch 振幅の増加が最も顕著である. また Surge も増加する. これによりダクト内部の水運動が増加し, 一次変換率が增加する.

Fig.20 Primary conversion efficiency

Fig.21 Amplitude of inner wave height

Fig.22 Amplitude of pressure

Fig.23 Amplitude of surge motion

Fig.24 Amplitude of heave motion

Fig.25 Amplitude of pitch motion

3. 三次元水槽実験

3.1 Type-A 模型の三次元水槽実験

Fig.26 に示すように、三次元水槽において Type-A 模型 (Fig.3) の一次変換効率を計測した。三次元実験は九州大学の応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で実施した。水槽の寸法は全長 65m, 幅 5m, 水深 7m である。模型の条件は二次元実験の Type-A と同一である。係留は直径 2mm ワイヤで船首側を 2 点係留した。また、前進せず、かつ模型の運動を妨げないように、模型の波下側をテグスで軽く係留した。

Fig.26 Experimental arrangement (3D)

Fig.27～29 に Type-A 模型を用いた場合の二次元水槽実験結果と三次元水槽実験結果の比較を示す。Fig.27 が一次変換効率, Fig.28 が内部波高, Fig.29 が内部圧力である。内部波高および圧力は前節と同様に無次元化した。三次元実験では $\lambda/L=4.02$ において一次変換効率は最高になり 1 を超える。これは前田らが指摘するように⁸⁾, 装置への入力エネルギーとしては水槽幅の入射波が関与しているにも関わらず, 今の場合には装置幅分の入射波しか考慮していないためである。

Fig.30 から Fig.32 にそれぞれ surge, heave, pitch 運動の振幅を示す。surge と pitch に明らかな三次元実験影響は見られないが, heave は大きな差が見られた。一次変換効率が最大

Fig. 27 Primary conversion efficiency

Fig. 28 Amplitude of inner wave height

Fig.29 Amplitude of inner pressure

Fig.30 Amplitude of surge motion

となる $\lambda/L=4$ 付近において, 三次元実験の heave 運動の振幅は二次元実験のほぼ 3 倍の値となった. 二次元実験と三次元実験では係留方法が異なるため, これらの違いには係留方法の違いも影響すると考えられる.

Fig.31 Amplitude of heave motion

Fig.32 Amplitude of pitch motion

3.2 円形空気室をもつ BBDB 模型の三次元水槽実験

空気室形状の異なるアルミ製模型を使用して三次元水槽実験を行った. Fig.33 に示すように, 円筒浮力体 BBDB にスペーサー, 延長ダクトを取り付けることで 3 種類の形状に変更することができる. スペーサーおよび延長ダクトを取り付けたものを Type-C1 (Fig.34), スペーサーのみ取り付けたものを Type-C2 (Fig.35), 延長ダクトのみ取り付けたものを Type-C3 (Fig.36) とする.

Fig.33 Metal BBDB model

Fig.34 Type-C1 (Spacer and duct extended)

Fig.35 Type-C2 (Spacer)

Fig.36 Type-C3 (Duct extended)

Table 3 Radius of gyration of BBDB models

	Unit	Type-C1	Type-C2	Type-C3
Longitudinal center of gravity (form bow)	M	0.42	0.41	0.46
Center of Gravity (from keel)	M	0.28	0.29	0.27
Radius of gyration k_{yy}	—	0.041	0.039	0.042

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽で実施した。実験機器は Fig.26 と同様に設置した。入射波は片振幅 2.5cm とした。一次変換効率を Fig.31 に示す。Type-C2 が最も高く、続いて Type-C1, Type-C3 が最も低かった。Type-C2 は Type-C1 から延長ダクトを除去したものであり、ダクト縮小により効率が幾分高くなる。Type-C3 は Type-C1 から空気室横のスペーサーを除去したものであり、Type-C2 に比べ一次変換効率のピーク値が 70% 程度に低下する。C3 ではスペーサーが無いいため空気室と円筒浮力体の間に波が入り共振し、BBDB の運動が乱れ、ピッチ振幅が低下したため低効率になったと考えられる。

Fig.37 Primary conversion efficiency of Metal BBDB

Fig.38 Amplitude of inner wave

Fig.39 inner pressure

4. 結 言

益田らが提案した BBDB 形状をもとに、ダクト形状を変更した 3 種類、さらに空気室形状およびダクト形状を変更した 3 種類の BBDB の一次変換性能を水槽実験で計測した。基本形状である Type-A の二次元水槽実験では、一次変換効率が最大となる $\lambda/L=3.55$ 近くにおいて Surge と Pitch が同位相になる。そのとき Surge および Pitch と内部波高は逆位相に近いことを明らかにした。

また、ダクト形状を延長した Type-A 模型では、模型全長が大きくなるにつれ一次変換効率が低下する。これは模型全長が大きいと Pitch 振幅が小さくなるためである。

Type-A の喫水を一定にして慣動半径を変える場合、慣動半径を大きくした方が高効率となる周波数領域が拡大する。

Type-A 三次元実験においては、一次変換効率が最大となる $\lambda/L=4$ 近くにおいて Surge, Heave, Pitch の 3 つがほぼ同位相になる。そのとき内部波高の位相は運動と同位相に近い。この点が二次元水槽実験と異なり、一次変換効率を高める。

円形浮体室形状をもつ Type-C1~C3 模型の三次元水槽実験を行い、Type-A と異なる浮体室形状をもつ BBDB の一次変換効率を調べた。

謝 辞

1) 本研究の一部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。ここに記して謝意を表する。

2) 共著者の豊田和隆准教授は病気のため2012年9月に他界された。生前のご功績を偲び、ご冥福をお祈り申し上げます

参 考 文 献

- 1) Y. Masuda, "Experience in Pneumatic Wave Energy Conversion in Japan," Proceeding, Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion, ASCE, eds, M. E. McCormick and Y. C. Kim, pp1-33, 1986.
 - 2) Y. Masuda, T. Kuboki, L. Xianguang and S. Peiya, "Development of Terminator type BBDB (Backward Bent Duct Buoy)", Wave Energy 2000, pp.147-152, 2000.
 - 3) Y. Masuda, T. Kuboki, A. Thakker, T. Lewis, L. Xianguang and P. Sun, "Prospect of Economical Wave Power Electric Generator by the terminator Backward Bent Duct Buoy (BBDB)", Proc. of The Twelfth Int. Offshore and Polar Engineering Conference, pp.607-613., 2002.
 - 4) L. Xianguang, W. Wei, D. Bin and J. Niandong, "Experimental Research on Performance of BBDB - Wave-activated Generation Device Model", The Second European Wave Power Conference, Lisbon, pp.95-106, 1995.
 - 5) W. Lewis, T. Gilbaud and B. Holmes, "Modeling the Backward Bent Duct Device - B2D2 A Comparison between Physical and Numerical Model", Proc. of Fifth European Wave Energy Conference, pp. 54-58, 2003.
 - 6) J. M. Forestier, B. Holmes, S. Barrett and A. W. Lewis, "Value and Validation of Small Scale Physical Model Tests of Floating Wave Energy Converters", Proc. of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, 2007.
 - 7) 小島朗史, 合田良美, 鈴木諭司, 波力発電ケーソンの空気出力効率の解析—波エネルギーに関する研究 第 1 報—, 港湾技術研究所報告 第 22 巻 第 3 号, pp125-158, 1983.
 - 8) 前田久明, 山下誠也, 波浪エネルギー一次変換装置 : 1. 波浪発電, 日本造船学会誌 (637), pp.306-327, 1982.
-