

後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置の総合効率に関する実験的研究

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

An experimental study of a total efficiency of a floating-type wave energy converter "Backward Bent Duct Buoy"

Shuichi Nagata^{*1}, Kazutaka Toyota, Yasutaka Imai, Toshiaki Setoguchi and Manabu Takao

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

The characteristics of electric conversion efficiency of a floating-type wave energy converter "Backward Bent Duct Buoy" (BBDB) were measured in tank experiment. The optimal body shape was decided by the preliminary experiment. The effect of duct extension on the primary conversion efficiency is investigated by attaching 15cm and 47cm ducts to the normal model. The experimental result shows that the duct extensions reduce the primary conversion efficiency because they reduce the heaving motion of the buoy. Based on the optimal shape, a new model that installed an impulse turbine and generator was made. The maximum primary conversion efficiency was around 0.8 in regular wave, and a total efficiency was 0.49.

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

1. 結 言

再生可能エネルギーの一つである波エネルギーは、CO₂ 排出を抑える有望な資源として注目されている。日本の排他的経済水域(EEZ)は世界第6位であり、そこにおける膨大な波エネルギー資源を有効活用すれば、CO₂ 削減に大きく寄与できる。このため、波エネルギーを電力に変換する波力発電装置が広く研究されている。波エネルギーの活用は1970年代の石油ショック後に研究がスタートしたが、近年の研究は波エネルギーのより大きい沖合大水深域に小規模装置を多数基分散配置する事を目標にしたものに移行している。そのため海底固定型ではなく浮体型の研究が多く行われている。浮体型波力発電装置は越波型、可動物体型、振動水柱型に分類できるが、このような波力発電装置を我国に設置する場合、台風時の大波浪への対応が問題となる。可動物体型は大波浪によって可動部に大きな力が作用するため強固な設計にする必要があり、コストを押し上げる原因ともなる。これに対し振動水柱型は空気室の非常弁を開けてエネルギーを大気解放しタービン発電機に作用する空気圧力を低減できるため、大波浪に対してより安全となる。著者らは振動水柱型発電装置に着目し、その中でもよりエネルギー変換効率の高い「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bent Duct Buoy : 以下 BBDB)について研究を行っている。

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。波が入射すると、入射波のエネルギーはBBDBを運動させるとともに、船体後方開口部から水流としてダクト内に入り、空気室内の水面を振動させることにより、空気エネルギーに変換される。この段階を一次変換と呼ぶ。振動する空気はタービンを回転させ発電する。空気エネルギーから電気エネルギーへの変換を二次変換と呼ぶ。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。

^{*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 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

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

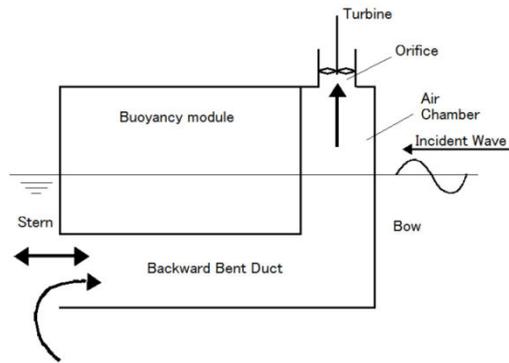


Fig. 1 Concept of BBDB

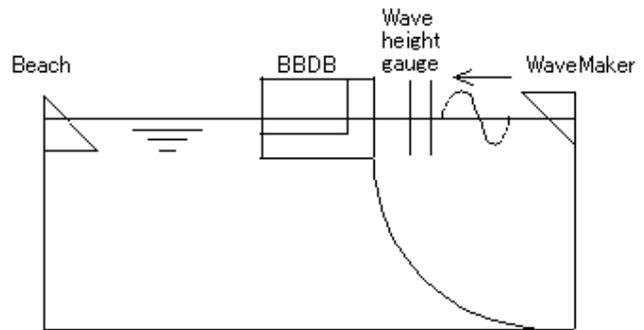


Fig. 2 Experimental apparatus

BBDB は、従来の浮体型発電装置と比較すると、①入射波エネルギーに対する空気室から出入りする空気エネルギーの比として定義される一次変換効率が他の浮体型 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が浮体長さの 4 倍程度のため、他の装置に比べ相対的に浮体の長さが短くて良い、③ 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性質を持つため、多数の周波数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、係留コストを低減できる、という利点がある。

これら利点の中で、①に関しては Masuda ら⁽¹⁾ や Liang ら⁽²⁾ が高い一次変換性能を示した。③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。⁽³⁾ また、Kim らは負の漂流力発生は BBDB 船体形状に依存することを示した。⁽⁴⁾ このような浪上側に向かって浮体が微速前進する現象に似たものとして、船舶流体力学の分野では、振動翼推進がある。⁽⁵⁾⁽⁶⁾ しかしながら、BBDB には振動翼は設置されていないので、これとは別のメカニズムで BBDB は波上側に前進するものと思われる。

従来の研究では、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、本研究はまず全長 0.85m の BBDB 模型を用い、二次元および三次元水槽実験で一次変換および運動の周波数応答を計測した。また、ダクト延長が一次変換に及ぼす影響を調べ、一次変換を最大にする最適形状を調べた。係留力減少に活用できる負の漂流力についても実験を行った。次に、その最適形状寸法を 3 倍にした全長 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。

2. BBDB 小型模型の性能実験

2.1 基本模型の一次変換性能

まず、全長 850mm、幅 780mm の BBDB アクリル模型を用い、二次元水槽および三次元水槽において規則波向波における一次変換性能を計測した。二次元実験は佐賀大学伊万里サテライトの二次元水槽（水槽長さ 18m、幅 0.8m、水深 1.0m）で実施した。一方、三次元実験は九州大学応用力学研究所深海水槽（水槽長さ 65m、幅 5m、水深 7.0m）で実施した。実験の模式図を Fig.2 に示す。

BBDB 模型緒元を Fig.3 および Table 1 に示す。喫水は 350mm である。空気室天井には直径 40mm のオリフィスがある。模型空気室内に圧力センサを 1 基、超音波式内部波高計を 2 基設置し、一次変換効率を BBDB 模型空気室内に搭載した内部波高計および圧力計のデータから算出した。

同時に、MVTec 社製画像処理ソフトウェア HALCON を用いて模型運動を計測した。模型上部に 7x7 の黒点をもつ軽量の板状マーカーを設置し、波浪中で運動するマーカーの座標からブイ重心の運動を求めた。

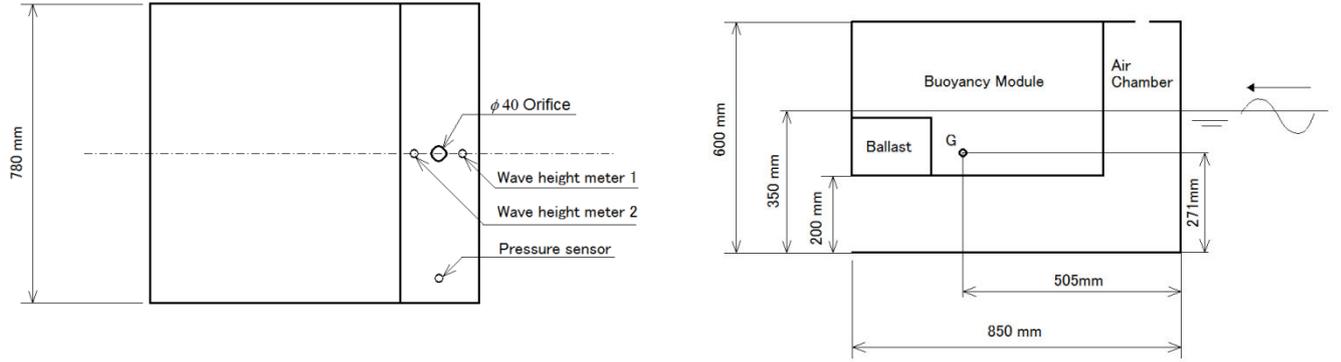


Fig.3 BBDB dimension (Normal type, Left: Top View, Right: Side View)

Table 1 BBDB dimension (Normal type)

Item	Symbol	Unit	
Length	L	m	0.85
Breadth	B	m	0.78
Buoyancy module draft	IT	m	0.15
Draft	D	m	0.35
Displacement	Δ	m ³	0.076
Longitudinal center of gravity	LCG	m	0.505
Center of Gravity (C.O.G)	KGT	m	0.271
Radius of gyration (Pitch)	Kyy	m	0.25

一次変換効率は入射波エネルギーとオリフィスを出入する空気の持つエネルギーの比として定義される。

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (1)$$

E_{in} および E_{out} は次式で定義される。

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

$$E_{out} = \frac{S}{T} \int_0^T p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) dt \quad (3)$$

ここで ρ は水の密度， g は重力加速度， S はオリフィスの面積， T は波の周期である． ζ_1 ， ζ_2 は空気室内水面の変位である。

Fig.4 から Fig.6 にそれぞれ空気室内部波高， 空気室内空気圧力， 一次変換効率の周波数特性について， 二次元実験と三次元実験の比較を示す． 横軸は入射波の波長 λ を BBDB 全長 L で無次元化した値である． 内部波高は入射波振幅で， 空気圧力は， 水の密度， 重力加速度を用いて無次元化した． 三次元実験の場合， 一次変換効率が $\lambda/L=4.02$ で 1 を超える． これは， 式の分母は， 物体幅 B の入射波エネルギーとして定義しているが， 三次元の実験では浮体端部からの回折波の影響で， 吸収したエネルギーが大きくなったためと思われる． $\lambda/L=4$ 付近で内部波高， 圧力ともに最高値を示し， 一次変換効率がピークとなる．

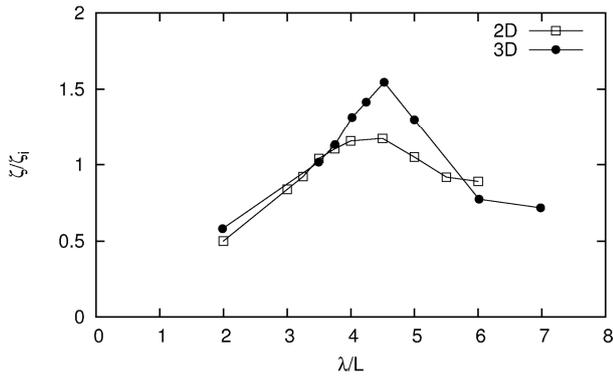


Fig.4 Amplitude of inner wave height

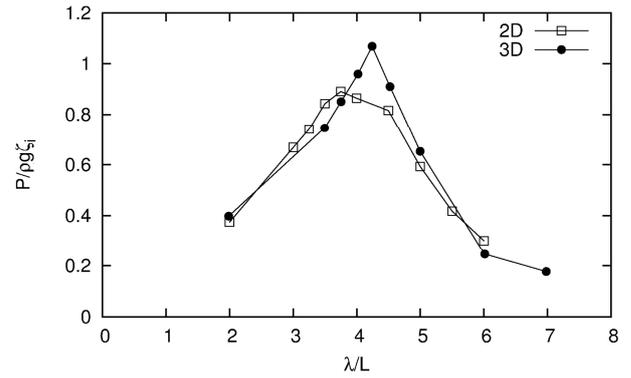


Fig.5 Amplitude of inner pressure

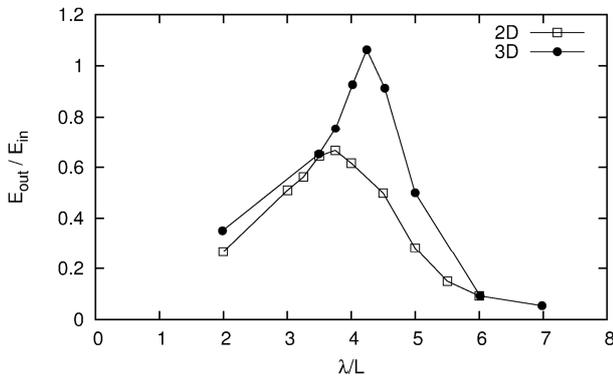


Fig.6 Primary conversion efficiency

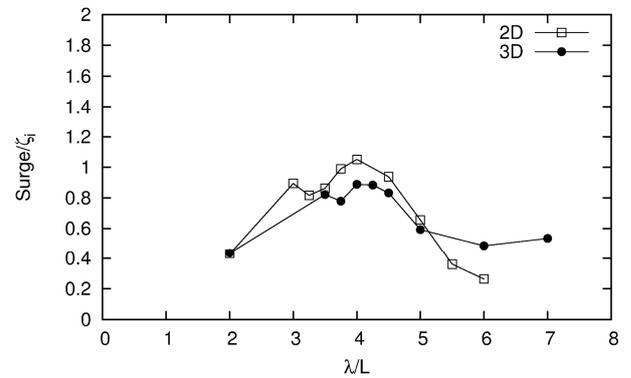


Fig.7 Amplitude of surge motion

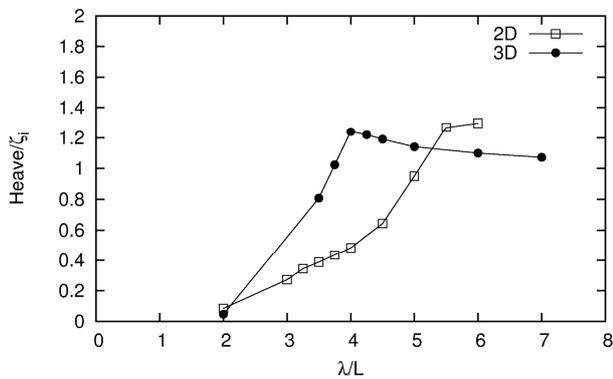


Fig.8 Amplitude of heave motion

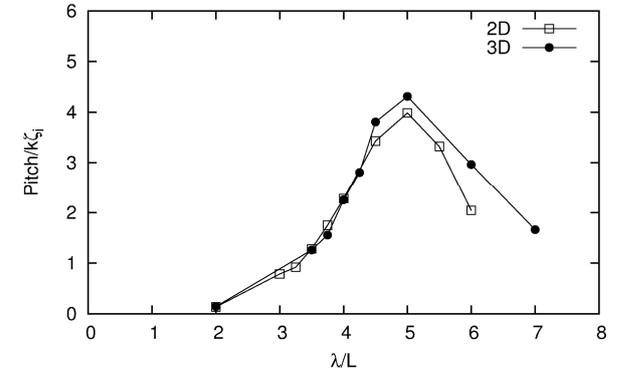


Fig.9 Amplitude of pitch motion

Fig.7からFig.9に、それぞれBBDBの前後揺(サージ)、上下揺(ヒーブ)、縦揺(ピッチ)の運動振幅を示す。これも、入射波の波数を用いて無次元化した。一次変換のピークはサージが最大となる周波数近くで発生する。二次元実験と三次元実験を比較すると、サージおよびピッチの運動振幅にはあまり差が見られないが、ヒーブは大きな違いが見られる。特に一次変換効率がピークとなる $\lambda/L=4$ 付近では、三次元実験のヒーブ振幅は二次元実験振幅より大きくなっている。

2・2 ダクト形状影響が一次変換に与える影響

基本模型のダクトを後方延長した2種類の模型を用いて、ダクト延長が一次変換効率に与える影響を調べた。使用した模型を Fig.10 に示す。模型形状のバリエーションは基本型 (Type-A) に対し、(1)ダクトを 15cm 延長した模型 (Type-B)、(2)ダクトを 47cm 延長した模型 (Type-C) の二種類である。模型喫水は共通で 0.35m である。これら2つの模型の緒元をそれぞれ Table 2, 3 に示す

Type-A 型と同様に、二次元水槽実験で空気室内部波高、内部空気圧力、運動を計測した。Fig.11~13 にそれぞれ空気室内部波高、内部空気圧力、一次変換効率を示す。横軸は入射波波長を模型全長 L で除して無次元化した。内部波高および内部圧力は前節同様に無次元化した。

Fig.11,12 より、ダクトが延長された模型ほど内部波高振幅および内部空気圧力が小さくなる。したがって、Fig.13 に示すように一次変換効率も低下する。この原因は Fig.14~16 に示す運動振幅の違いによる。特にヒーブ、ピッチの違いが顕著であり、高い一次変換効率のためにはピッチが重要である。そのため、この喫水では、ダクト延長はピッチ運動を抑制し一次変換効率を低下させることが明らかになった。

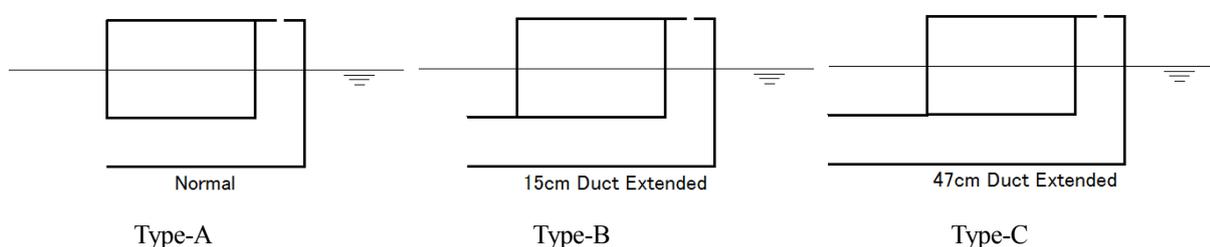


Fig.10 BBDB duct-extended models

Table 2 Specification of Type-B
(15cm-Extended BBDB)

Item	Symbol	Unit	
Length	L	m	1.00
Breadth	B	m	0.78
Buoyancy module draft	IT	m	0.15
Draft	T	m	0.35
Displacement	Δ	m ³	0.076
Longitudinal center of gravity	LCG	m	0.499
Center of Gravity	KGT	m	0.259

Table 3 Specification of Type-C
(47cm-Extended BBDB)

Item	Symbol	Unit	
Length	L	m	1.32
Breadth	B	m	0.78
Buoyancy module draft	IT	m	0.15
Draft	T	m	0.35
Displacement	Δ	m ³	0.076
Longitudinal center of gravity	LCG	m	0.557
Center of Gravity	KGT	m	0.272

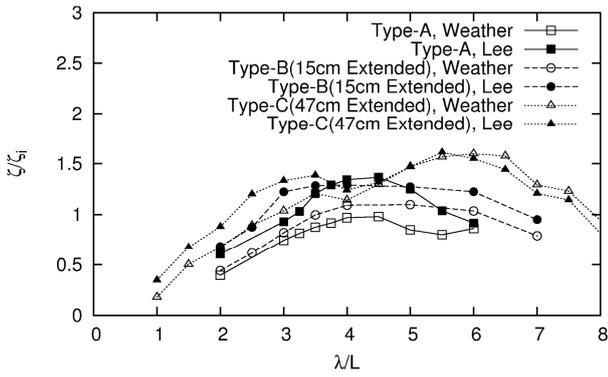


Fig.11 Amplitude of inner wave height

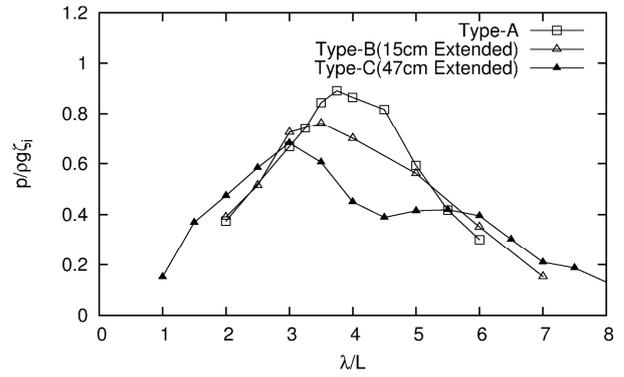


Fig.12 Amplitude of inner pressure

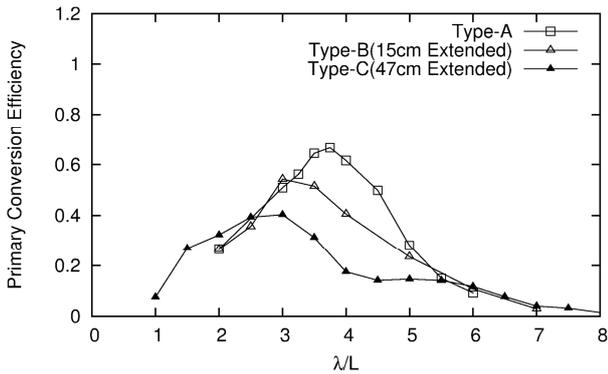


Fig.13 primary conversion efficiency

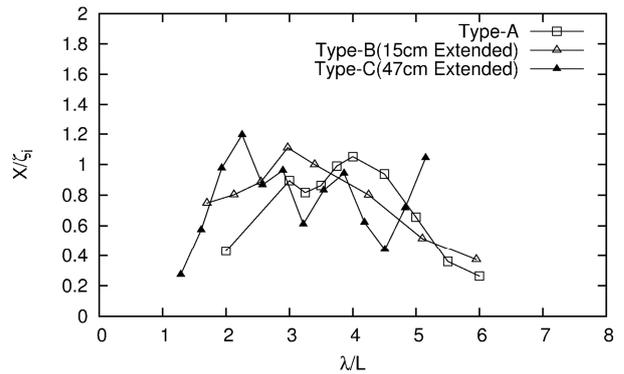


Fig.14 Amplitude of surge motion

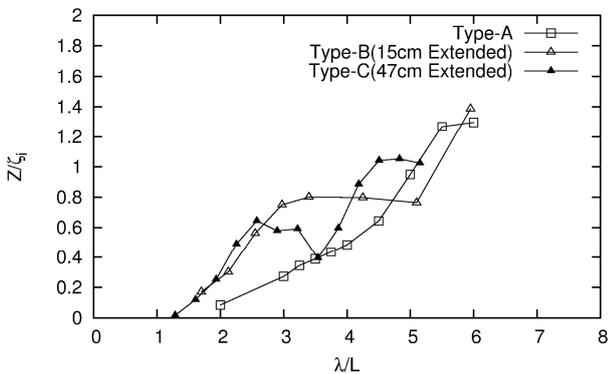


Fig.15 Amplitude of heave motion

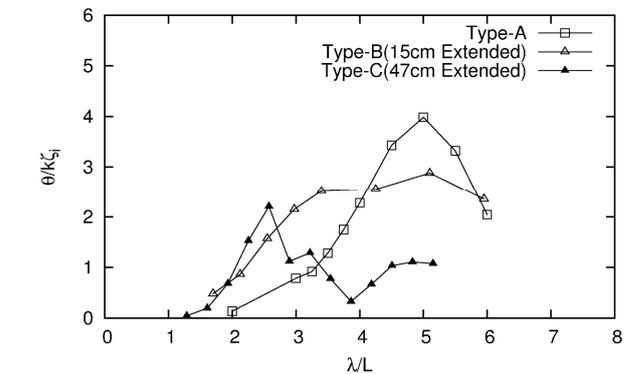


Fig.16 Amplitude of pitch motion

2・3 BBDB に作用する漂流力

負の漂流力を検証するため、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漂流力実験を行った。BBDB 模型に作用する水平方向の漂流力を測定するため、Fig.17 に示すように、軽量の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 1N 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る時系列の定常成分として求めた。

BBDB 模型の空気孔直径 ϕ が 30mm, 40mm の 2 ケースについて、入射規則波の周期を変化させ、水平方向に緩係留した BBDB に働く水平方向の漂流力を計測した。無次元化した漂流力の周波数特性を Fig.18 に示す。 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 L は BBDB の全長、 ζ_i は入射波振幅、 λ は入射波の波長である。図中、正の漂流力は、BBDB に働く漂流力が波下方向に作用することを示す。逆に、負の漂流力は、BBDB に働く漂流力が波上方向に作用することを示す。空気孔径 ϕ 40mm の場合には、 $\lambda/L=5.0\sim 6.5$ において、また、 ϕ 30mm の場合には λ

$\lambda/L=5.3\sim 7.0$ において、負の漂流力が発生した。負の漂流力は $\phi 30\text{mm}$ より $\phi 40\text{mm}$ の方が大きく、 $\phi 40\text{mm}$ の方がより短波長において発生した。

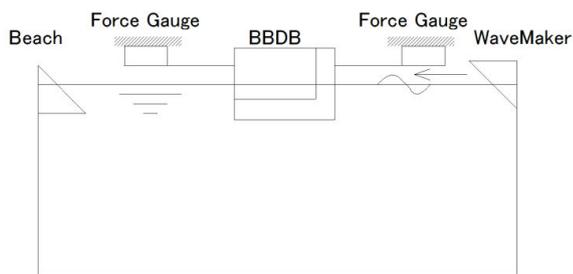


Fig. 17 Apparatus of drift experiment

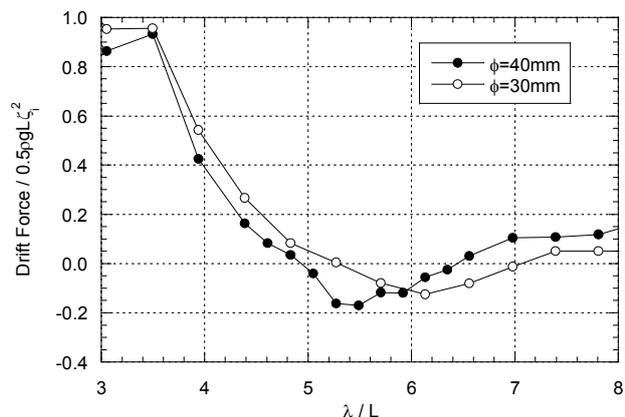


Fig.18 Drift force

3. 衝動タービン搭載 BBDB 中型模型の規則波中発電実験

2.1 節の亚克力模型実験において最も一次変換効率が高い標準型模型のスケールを約 3 倍にしてタービン発電機が搭載可能な模型を製作した。この模型は移動の便を考慮してアルミ製とした。板厚 5mm のアルミを用い、浮力を増すために水柱ダクトの水平部上面および水柱ダクト鉛直部 Bow 側の内側に発泡スチロールを貼っている。バラストの配置場所の制約もあり、中型模型の慣性モーメント等は小型模型とは完全に相似とはなっていない。タービンには佐賀大学と松江高専で開発した案内羽根付き衝動タービンを用いた。⁽⁷⁾

規則波水槽実験により、この模型の一次変換効率、タービン発電機を取付けた場合の二次変換効率を計測した。Table 4 に模型の緒元を示す。また、実験写真を Fig. 19 に、タービンを Fig. 20 に示す。

Table 4 Specification of turbine attached BBDB

Item	Symbol	Unit	
Length	L	m	2.5
Breadth	B	m	2.3
Buoyancy module draft	IT	m	0.55
Draft	T	m	1.05
Displacement	Δ	m^3	2.4
Longitudinal center of gravity	LCG	m	-0.012
Center of Gravity	KGT	m	0.30
Radius of gyration (Pitch)	Kyy	m	0.663

実験は長崎総合科学大学水槽と東京大学生産技術研究所千葉実験水槽において予備実験を、九州大学応用力学研究所深海水槽にて本実験を実施した。以下、九州大学応用力学研究所深海水槽で実施した実験結果を示す。

まず、タービン発電機を搭載せずに空気室天井に空気孔を設置して、規則波中における一次変換効率を算出した。Fig. 21 に内部波高振幅、Fig. 22 に圧力振幅の周波数応答を示す。また Fig. 23 に一次変換効率を示す。一次変換効率のピークは $\lambda/L=3.9$ において 0.78 であった。



Fig.19 Turbine attached BBDB

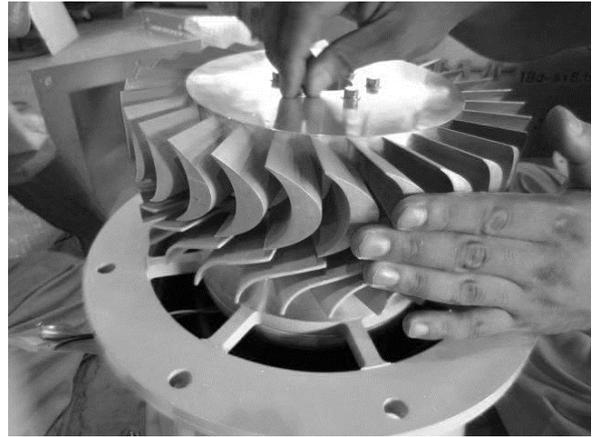


Fig.20 Impulse turbine

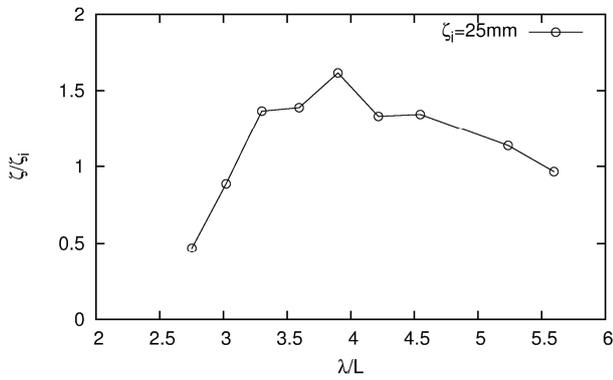


Fig.21 Amplitude of inner wave height

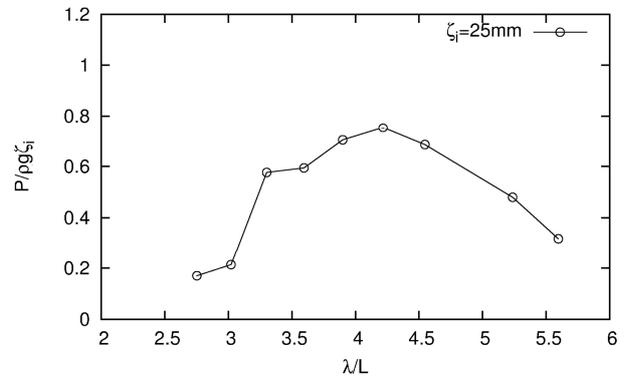


Fig.22 Amplitude of inner pressure

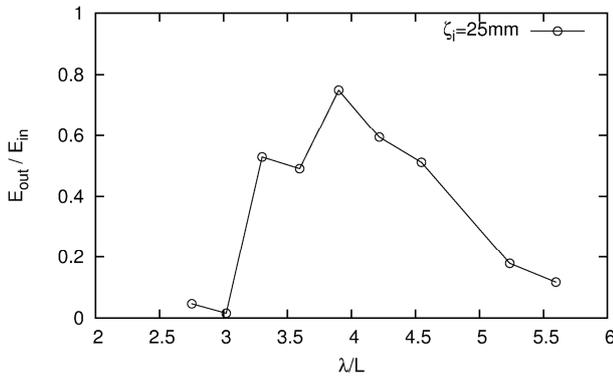


Fig.23 Primary conversion efficiency

次に衝動タービンおよび発電機を取付け、発電エネルギーを入射波エネルギーで除して総合効率を求めた。発電タービンを取付けた際の内部波高を Fig. 24 に、内部空気圧力振幅を Fig. 25 に、総合効率の周波数特性を Fig. 26 に示す。入射波振幅の影響を調べるため、実験は $\zeta_i = 25, 35, 45\text{mm}$ の3種類で行った。Fig. 26 に総合効率を示す。総合効率の最高値は $\zeta_i = 25\text{mm}$ 、 $\lambda/L = 3.59$ において0.49であった。

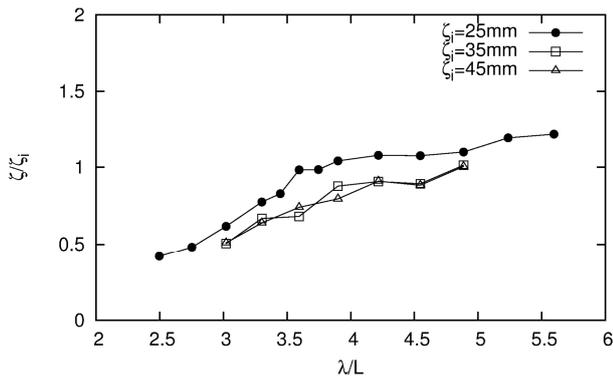


Fig.24 Amplitude of inner wave height

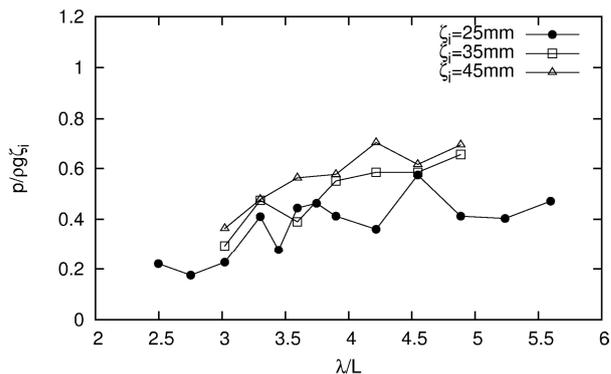


Fig.25 Amplitude of pressure

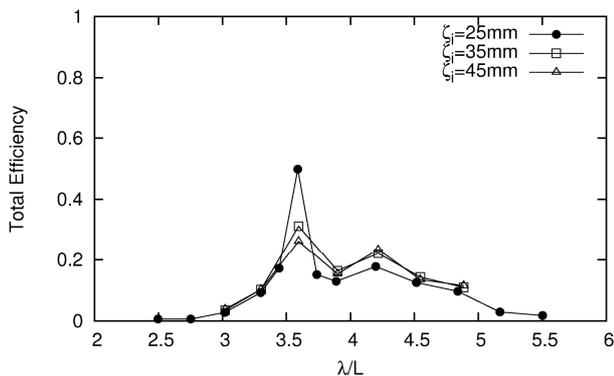


Fig.26 Total Efficiency

4. 結 語

衝動タービン・発電機を取り付けた BBDB 模型の発電変換効率を水槽実験において計測した。一次変換効率が
高い船体形状を探すため、ダクトを延長した模型を用いて予備実験を行った。その結果、ダクト延長はヒープ運
動を抑制し、ダクト長が長いほど一次変換効率が低下することを明らかにした。ダクトを延長しない模型では三
次元水槽実験の特定周波数帯において一次変換効率が 1 を超えた。これは回折効果により波エネルギーを集める
ことによるものと考えられる。

衝動タービンおよび発電機を取り付けた模型で水槽実験を行い、総合効率を算出した。本研究の場合 $\lambda/L=3.59$
に発電効率のピークがあり、最高値は 0.49 であった。今後、より高効率化を目指した調整、不規則波中における
発電効率の実験、多点係留を行った場合の発電効率等、実海域試験に向けて実験を行う予定である。

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) 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
- (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) Kim, J H, et. al., An Experimental Study on Reverse Wave Drift Responses of a BBDB Type OWC Wave Energy Device, Proc. of the Seventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, pp.237-241, 2006

- (5) Isshiki,H and Murakami,M "A Theory of Wave Devouring Propulsion (3rd Report)",J.Soc.Naval Arch.Japan, No.154, pp118-128
- (6) 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
- (7) 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