振動水柱型空気タービン方式波力発電装置付きケーソンの 発電効率に関する検討

A study on Wave Energy Absorption of Breakwater with OWC type Wave Energy Convertors

有川太郎¹・窪田幸一郎²・下迫健一郎³・武田将英⁴・五十嵐 学⁵
加藤 大⁶・金谷泰邦⁷・木原一禎⁸・細川恭史⁹・中村忠之¹⁰

Taro ARIKAWA, Koichiro KUBOTA, Kenichiro SHIMOSAKO, Masahide TAKEDA
Manabu IGARASHI, Masaru KATO, Yasukuni KANAYA, Kazuyoshi KIHARA
Yasushi HOSOKAWA and Tadayuki NAKAMURA

In this research, the hydraulic model experiment examined the power generation efficiency of the caisson furnished with PW-OWC type wave power generation equipment. OWC type wave power generation equipment has established the air chamber in which the portion submerged in water carried out the opening in the front of caisson. The problem is that the primary conversion efficiency of energy will decrease rapidly if the period of a wave separates from a resonance period. Therefore the wall called a projecting wall in the normal line right-angled direction was installed in the front of an air chamber. The primary conversion efficiency of energy of OWC breakwater with PW is larger about 10% that without breakwater.

1. はじめに

東日本大震災において原子力発電所が被災したことにより、自然エネルギーの利用が見直されている。振動水柱型空気タービン方式（OWC型）波力発電装置は30数年にわたる研究開発と実証試験が行われた実績があるものの、発電コストが高いことから、開発が停滞していた。OWC型波力発電装置は、小島ら（1983）の波力発電ケーソンと同様、ケーソン前面に没水部が開口した空気室を設けており、入射波によって空気室内に水塊が上下動し、同時に空気室に設けられたノズルを通して空気流が生じ、この空気流によって空気タービン発電機を駆動する。この課題は、エネルギーの1次変換効率（入射した波エネルギーと空気室内の圧力と水位変動から計算されるエネルギーの比）が、波の周期が共振周期を外れると急減する点であった。そのため共振する周期帯を広げ、発電出力向上を目的として、図-1に示すような法線直角方向に突出したプロジェクティングウォール（以下、PW）と呼ぶ壁構造を空気室の前面に設置した。本研究

図-1 PW-OWC型ケーソンのイメージ図

では、PW-OWC型の波力発電装置を取り付けたケーソンの発電効率について、中規模と大規模の水理模型実験により検討した。

2. 中規模実験による発電効率の検討

(1) 実験方法

a) 実験模型

本実験は、酒田港の既設ケーソン防波堤（設置水深-18m）をモデルとして、縮尺1/26とした（図-2）。本体部の材質はアクリル製で、ケーソン部の延長0.865m×幅0.769m×高さ0.615m、空気室及びPW部は延長1.228m×幅0.598m×高さ1.110mである（写真-1）。実験水路は長さ105m、幅3mで、主水路0.8mに模型を設置する（写真-2）。沖側には1:20の勾配が付いている。計測器は波圧計を図-3のように取りつけた。これは3章で行われる大

1 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所上席研究官
2		(独法)港湾空港技術研究所
3 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所海洋研究領域長
4 正会員		東亜建設工業(株)技術研究開発センター
5 正会員		東亜建設工業(株)東京支店
6		東亜建設工業(株)東北支店
7		東亜建設工業(株)土木事業本部プロジェクト部
8 正会員		三菱重工鉄構エンジニアリング(株)
9 正会員		三菱重工鉄構エンジニアリング(株)
10		三菱重工マシナリーテクノロジー

図-3 波圧計設置断面図 (単位: mm)

表-1 中規模実験における実験ケース

水位	空氣穴 形状	周期 T (s)	波高 H (m)		
+0.0	L H 1/100	1.52	0.05	0.10	0.15
		2.03	0.05	0.10	0.15
		2.53	0.05	0.10	0.15
		3.04	0.05	0.10	0.15
		3.54	0.05	0.10	0.15
		4.05	0.05	0.10	0.15
	S H 1/300	1.52	0.05	0.10	0.15
		2.03	0.05	0.10	0.15
		2.53	0.05	0.10	0.15
		3.04	0.05	0.10	0.15
		3.54	0.05	0.10	0.15
		4.05	0.05	0.10	0.15

規模実験と，縮尺を合わせれば同じになるような位置に設置されている．波高計は空気室内の波高を計測するために，容量式波高計を斜めに設置した．

b) 実験ケース

波浪条件は、水深をL.W.L. (図-2)とし、規則波波高0.05m～0.15m (現地換算, 1.33m～4.00m), 周期1.52s～4.05s (現地換算, 7.75s～20.66s)とした (表-1)。OWCの上部に設置した空気穴は、面積比1/100のもの (ケースLHと言う)と面積比1/300のもの (ケースSHと言う)の2種類を行うこととした。

c) 1次変換効率の計算

一次変換性能は，入射波パワー P_I と波パワー吸収量 P_A との比率によって求める． P_I は微小振幅波を仮定し，

$$P_l = \frac{\rho g^2 a^2}{8\pi} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) (\tanh kh) TB \dots\dots\dots (1)$$

で計算する．ここで，密度 ρ ，入射波振幅 a ，OWC装置の全幅 B ，水深 h ，波数 k ，波の周期 T ，重力加速度 g とする．また，波パワー吸収量 P_A は，

$$P_A = \frac{A_w}{T} \int_0^T p(t) \frac{\partial \eta(t)}{\partial t} dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、水線面積 A_w 、OWC内部の平均水面変動量 η 、空気室内部圧力 p とし、1次変換効率 $E^{(1)}$ は、

$$E^{(1)} = \frac{P_A}{P_I} \dots\dots\dots (3)$$

と定義され、実際に得られた実験データを離散化して計算した。なお、入射波高の整理には、沖側に設置した2本の波高計により入反射分離を行った結果を用いた。

(2) 実験結果

a) 空気穴の形状の違いによる検討 (PW 有)

図-4に、それぞれの1次変換効率をまとめたものを示す。この図より、今回の実験条件では、すべての1次変

換効率は、 $h/L = 0.1$ あたりで極大値をとることが理解できる。また、入射波高が大きくなるほど1次変換効率が大きくなる傾向が見られた。なお、小島ら（1983）の実験結果でも、入射波高が大きくなるほど1次変換効率が大きくなるという傾向が見られる。また、ノズル比が1/100の方 h/L が大きくなるにつれ、1次変換効率が1/300より良くなっている。これは、小島ら（1983）の実験ならびに微小振幅波理論に基づく空気出力特性に関する近似理論における1次変換効率の結果ともよく一致しており、今回の構造により、本条件下では特性が大きく変わるわけではないことがわかる。

図-4 空気穴の形状の違いによる1次変換効率の違い

図-5 PWの有無による1次変換効率の違い (SH)

図-6 PWの有無しによる1次変換効率の違い (LH)

b) PWの有無による1次変換効率の違い

次に、PWの有無による1次変換効率の違いを検討した。図-5および図-6に、それぞれのケースにおけるPWの有無による1次変換効率を示す。

これらを見ると分かるように、小さい波高の場合も含めて、PWを有する方が、PW無しよりも、全体的に10%程度1次変換効率がよくなっていることが分かる。居駒ら（2013）は、PW設置により1次変換効率が50%程度上昇することを報告しているが、これと比べると、今回の実験結果はそれほど大きくなかった。この原因は、PWの特性として、PWを設置することで、PWを設置していない部分の防波堤から、その部分における反射波を回折の影響により集める効果があるためと考えられる。そのため、今回の実験よりより周期の短い波で実験した生駒ら（2013）の結果と差異が生じたと考えられる。

3. 大規模実験による発電効率の検討

(1) 実験方法

a) 実験模型

次に、縮尺の効果およびタービンの発電効率を調べるため、大規模な実験を行った。実験模型の縮尺は1/6.7とし（図-7）、ケーソン部はコンクリート製で延長3.8m×幅3.0m×高さ2.9m、空気室部及びPW部は鋼製で延長3.9m×幅2.3m×高さ3.9m（写真-3）である。実験模型の製作過程の詳細は武田ら（2013）が詳しく述べている。

空気室の上部に面積比1/100の穴（LH）、1/300（SH）の穴（写真-4）ならびにタービンを設置した場合（写真-5）の実験を行った。実験水路は長さ184m、深さ12m、幅3.5mであり、水路中央部には、長さ67m、深さ4mの砂地盤を有している。この砂地盤上に帆布を敷設し、基礎捨石投入後に模型を設置した。基礎捨石が動かないよう被覆ブロックなどを設置した。

計測器は波高計、流速計、波圧計及び間隙水圧計を取り付けた。波高計（WG）は水路の各位置に設置したほか、空気室内の平均波高を計測するため櫛形波高計を設置した。波圧計（PG）はケーソンの前面・背面・上面、PW、空気室前面・上面に設置し、空気室内の圧力を計測するために、空気室内に設置した（図-7）。

図-7 実験断面図：大規模（単位：m）

写真-3 模型設置状況

写真-4 空気穴 1/100取り付け状況

写真-5 タービンを取りつけた様子

図-8 波圧計設置断面図 (単位: mm)

b) 実験ケース

波浪条件は現地の通常時の波浪である波高0.2m～0.6m (現地換算, 約1.3mから4.0m), 周期3s～6s (約7.75s～12.91s) を基本として, 面積比1/100の穴のケース (LH) では周期6s (現地換算, 15.49s, 20.66s) の検討も行った. 造波は規則波で水位は全て+2.7m (図-7) で行った. 実験ケースを表-2に示す. タービン設置時はSHと同じケースで実験を行った.

(2) 実験結果

図-9に, 空気室内の水位, 圧力の平均値ならびに式(2)を用いて計算した波パワー吸収量の時系列の一例を示す. これを見ると, 空気室内の水位の上昇, 下降に応じて, 空気室内の圧力が上昇, 下降し, それに応じて波パワー吸収量がでていることがわかる.

図-10に, 空気穴の大きさによる1次変換効率の違いを示す. これをみると, 大きな穴 (面積比1/100, LH) の方が, 小さな穴よりも効率がよく, 中規模実験の結果とも傾向が一致している. また, 空気穴の大小とタービンを取り付けた場合 (凡例: turbine) の1次変換効率を比較したものである. これをみると, 今回のタービン特性は空気穴の小さいほうに特性がっており, これは, 羽部における損失などが影響したと考えている.

図-11は, 中規模実験との比較であり, これをみると, 大規模実験の結果のほうが, 中規模実験よりも2割～3割ほど効率が悪いことがわかる. これは, 小嶋ら (1983) の考察とも一致しており, 小嶋らの算定方法を用いて, スケール効果を検討することの妥当性を示した.

表-2 中規模実験における実験ケース

水位	空気穴形状	周期 T (s)	波高 H (m)		
L.W.L. (WL+2.70)	L H 1/100	3	0.2	0.4	0.6
		4	0.2	0.4	0.6
		5	0.2	0.4	0.6
		6	0.2	0.4	0.6
	S H 1/300	3	0.2	0.4	0.6
		4	0.2	0.4	0.6
		5	0.2	0.4	0.6

図-9 空気室の水位・圧力・波パワー吸収量の時系列

図-10 空気穴の形状の違いによる1次変換効率の違い

図-13 タービン出力から計算される2次変換効率

図-11 中規模実験との比較 (<1/6.7>が大規模実験)

(2) タービンを取りつけた場合の発電効率

発電効率実験の内、現地で想定している形式のタービン模型(写真-6)を設置した。図-12は空気室に連結したタービン回転数とトルクの測定値および発電ワット数の時系列の例を示したものである。

図-12 タービン回転数(RPM)・トルク(Torque)・出力(Output)

タービン出力は、式(4)を用いて計算した。

$$\text{Output(w)} = \text{回転数(RPM)} \times \text{トルク(Torque)} / 9.55 \quad (4)$$

これより得られた出力を波パワー吸収量(PA)で除した2次変換効率を図-13に示す。これをみると、平均的には、0.35程度であるが、周期が短く、波高が高くなるにつれて効率が悪くなっていることがわかる。これは、波の上下速度の増大に対してタービンが追従していないことが考えられ(高橋ら, 1987), 今後, タービンの特性を改良することで全体効率が上昇することが示唆される。

4. まとめ

既存のケーソンに、PW-OWCを取りつけた際の性能について検討した。その結果、PW-OWCはOWCのみと比較し、今回の条件下では、1次変換効率が10%程度大きくなることがわかり、それはPWの効果は、PWが無い部分からの反射波の回折を取り込むことであることを裏付けた。また、大規模実験の結果と中規模実験の結果から、その縮尺効果は、既存の提案式を適用できることがわかった。さらに、タービンを用い、その効率を検討し、今後、タービンの特性の改良が重要であることを示した。

参考文献

- 居駒知樹・増田光一・大森 光・大澤弘敬・宮崎 剛・木原一禎 (2013): OWC型波エネルギー変換装置のプロジェクトニングウォールが一次変換性能に与える効果に関する研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.69, No.2. (印刷中)
- 小島朗史, 合田良実, 鈴木諭司 (1983): 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-, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 022, No.03, pp. 125 - 158.
- 高橋重雄・安達 崇・田中 智 (1987): 大型模型による波力発電実験, 港湾技術研究所報告第25巻第3号, pp.3-36
- 武田将英・有川太郎・窪田幸一郎・下迫健一郎・五十嵐 学・加藤 大・金谷泰邦 (2013): 波力発電装置波浪実験に関する大規模模型の製作過程, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.69, No.2. (印刷中)