

# 既設港湾構造物を活用した PW-OWC 波力発電装置の開発

## 有孔ケーソンを利用した波力発電装置

木原 一 禎・金谷 泰 邦・増田 光 一

日本において、30年以上の開発実績がある振動水柱型空気タービン方式（Oscillating Water Column: 以下 OWC）に着目し、従来型 OWC の高効率化を目指し、プロジェクティングウォール付ユニット型発電装置（PW-OWC 発電装置）（以下「本発電装置」という）を提案した。OWC 発電装置は、水面変動を往復気流に変換し、空気流で発電タービンを回転させる。発電部が水上（気中）にあるため、維持管理が容易であり、既存の防波堤、護岸などを利用して後付けでユニットを設置することで、建造費を抑えることができる。本稿では、酒田港で実証実験に向けて準備中の消波ケーソン（有孔ケーソン）に設置した事例について紹介する。

キーワード：空気タービン，衝動タービン，振動水柱，OWC，波力発電

### 1. はじめに

日本では30年以上の研究実績がある振動水柱型空気タービン方式（Oscillating Water Column: 以下 OWC）に着目し、従来型 OWC の高効率化を目指し、プロジェクティングウォール（PW）付ユニット型発電装置（本発電装置）を提案した。本発電装置は、既存の防波堤、護岸などを利用して後付けでユニットを設置することで、建造費を抑えることができる。本稿では、平成23年からこれまで開発を行い、既に検証済みである本発電装置の安全性にかかる耐波性能の概要について報告し、本発電装置の一次変換係数（波エネルギーから空気エネルギー（往復流）への変換）に関する研究成果について詳述する。

そして、平成26年度から取り組んでいる、酒田港内の有孔ケーソンを活用した実海域実証実験に関するこれまでの成果を報告する。

### 2. 本発電装置の概要

開発する本発電装置は、図-1に示すような既設の防波堤や護岸に後付けのユニットタイプとし、建造・設置コストの低減化をはかり、発電単価40円/Kwh以下を目指している。

本装置は、海岸線の防波堤や護岸に設置されることを想定しているため、効率や発電コストの他、公共構造物として、安全性について特に慎重に検討する事が

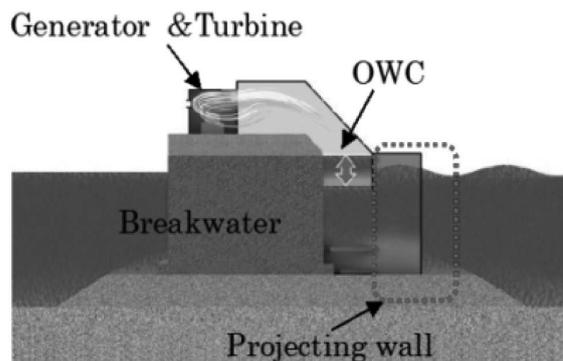


図-1 本発電装置のイメージ図

必要である。以下に技術課題を列記する。

- ①従来の OWC に比べて高効率であることの検証
- ②耐波安全性の確保
- ③発電単価 40 円 /kWh 以下

これらの技術課題に対し、まず、酒田港の第一線防波堤に波力発電装置を設置した場合の検討結果について報告する。続いて、発電装置の設置場所を種々の理由から消波型護岸に変更したので、消波型護岸への発電装置の装着をケーススタディとした実証実験の概要を述べる。

### 3. 安全性の検討

安全性の検証については、港湾空港技術研究所の2次元水槽および大規模波動地盤総合水路でそれぞれ、1/25, 1/6.7 縮尺実験（図-2）により、耐波性能の



図一2 1/6.7 モデルによる水槽実験

検証を行った。

結果、安定性は確保されており、設計法もこれまでの合田波圧（合田式）で評価すれば問題が無いことを確認した<sup>1)</sup>。

#### 4. 本発電装置の一次変換性能について

OWC の発電装置の一次変換の原理は、空気室内の水塊の振動水柱の周期が波の周期と共振することで、波エネルギーを吸収して空気エネルギーに変換することによる。そのため、従来の装置では、波エネルギーを吸収する空気室の水塊振動の周期が波周期との同調周期（共振周期）からはずれると発電効率が急減する。発電装置の固有周期は、空気室の形状で決定されるため単一周期となる。著者らは、より広い波周期レンジでのエネルギー取得が可能となるように図一1に示すようなPW付電装置を考案した<sup>1), 5)</sup>。付設のPWの効果により空気室側の共振周期帯を拡大させることが可能となり、多様な入射波に対して広い周波数帯で空気流が形成され一次変換係数を向上させることができる。

##### (1) 一次変換係数 $\eta^{(1)}$ の試算

一次変換係数  $\eta^{(1)}$  は、入射波パワー変換量  $P_A$  を入射波パワー  $P_I$  で除した値で表され、式 (1) のとおりである。このとき、入射パワー  $P_I$  は式 (2)、波パワー変換量  $P_A$  は式 (3) で表される。

$$\eta^{(1)} = \frac{P_A}{P_I} \tag{1}$$

$$P_I = \frac{\rho g^2 a^2}{8\pi} \left(1 + \frac{2kh}{\sin 2kh}\right) (\tanh kh) TB \tag{2}$$

$$P_A = \frac{A_w}{T} \int_0^T P(t) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} dt \tag{3}$$

$\rho$  : 水の密度,  $a$  : 入射波振幅,  $B$  : 空気室幅,  
 $T$  : 周期,  $\eta$  : OWC の水面変動,  $h$  : 水深,  
 $k$  : 波数,  $A_w$  : OWC の水線面積,  
 $P$  : OWC 室内の圧力

次に、最終的な発電出力に関する比較を実施した。発電出力の比較は文献<sup>2)</sup>に記載される一次変換係数の実験結果を用い、日本周辺の5箇所の海域の周期別波浪頻度分布（喜屋武岬（沖縄）、江島（宮城）、佐多岬（鹿児島）、鹿島（茨城）、石廊崎（静岡）におけるNOWPHASの波出現頻度分布表データ）を適用し、5箇所の港湾での一、二次変換後の取得期待エネルギーを算定した。入射波エネルギーは、(4)式により算定した。

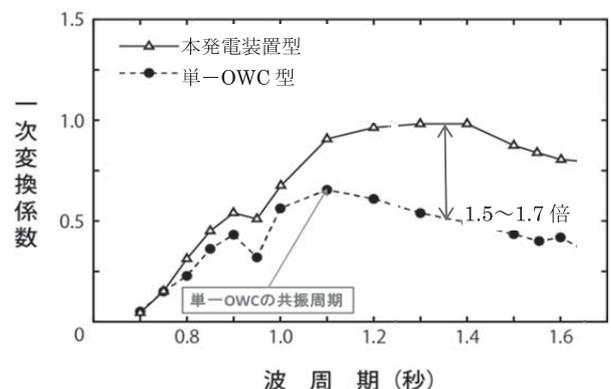
$$E[Wa] = 0.49 \int_0^x \int_0^x \varphi(H_{1/3} \cdot T_{1/3}) H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3} \cdot \eta^{(1)} \eta^{(2)} dH_{1/3} dT_{1/3} \tag{4}$$

$H_{1/3}$  : 有儀波高,  $T_{1/3}$  : 有儀周期,  
 $\eta^{(1)}$  : 1次変換係数,  $\eta^{(2)}$  : 2次変換係数

図一3は、本発電装置と従来型 OWC（単一 OWC）の1/25 実機スケール（酒田港第一線防波堤設置）の模型検証実験の結果である<sup>1)</sup>

図よりPWの効果により発電電力が単一 OWC に比べて幅広い範囲で1次変換効率1.5～1.7倍向上する事がわかる。

なお、タービン、発電機の2次変換率（ $\eta^{(2)}$ ）は過去の実証実験（マイティホエール成果）<sup>3), 4)</sup>より0.4として計算した。



図一3 OWC 本発電装置 効率比較

図一4は、上述した沿岸域での取得期待エネルギーの結果である。

以上のことから、本発電装置は、従来の単一 OWC

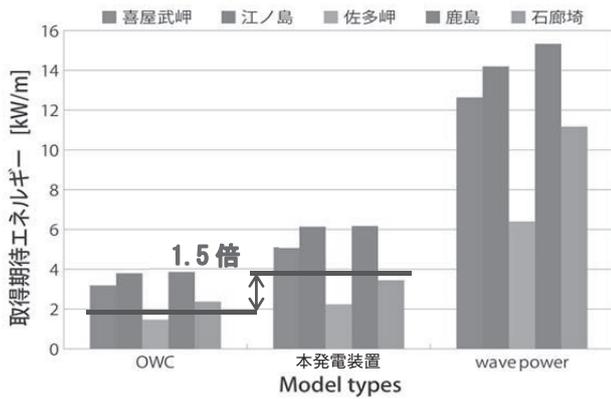


図-4 発電出力の比較

に比べて1.5倍以上のエネルギー取得が期待できる。

### 5. 酒田港一線防波堤設置モデルの一次変換係数

#### (1) 後付けユニット装置の特性

発電装置は、通常図-5のように防波堤に連続設置するが、実証実験を想定した場合、1基のみの設置となる。そこで、発電装置を防波堤に単一（1基のみ）で設置した場合（図-6）を想定し、水槽実験、著者らが開発した数値計算法<sup>5)</sup>を用い特性を確認した。シミュレーションと実験結果を図-7に示す。図より、波周期7.5秒程度の値で一次変換係数が著しく減

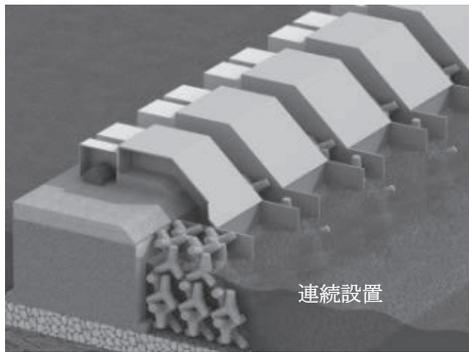


図-5 連続設置

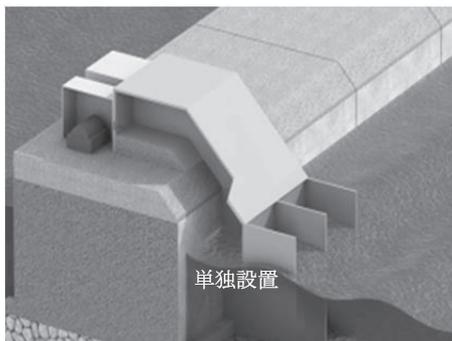


図-6 単独設置

少していることがわかる。この現象を説明するため、実験映像及びシミュレーションで検証したところ、背後の防波堤の反射波の影響でエネルギー変換係数が著しく低下する周期帯が存在することが判明した。

2012年大森<sup>6)</sup>は、反射波影響を調べるために防波堤埋め込み式について水槽試験及び数値解析を行い反射波の影響で変換効率が低下する現象を報告している。

図-8は、著者が実施した単一OWCにおける背後の防波堤がある場合と無い場合のOWC内部圧力の解析結果の比較グラフである。解析した諸元は、表-1のとおりである。このグラフの結果から、背後の反射波の影響が無い場合、図-7に示すような著しい変換係数の低下が生じないことがわかる。防波堤や護岸に後付けで設置するタイプの単独装置の場合、PW部、OWC部が防波堤や護岸の法線ラインから沖側に突出する。そのため、装置の空気室（OWC）への進

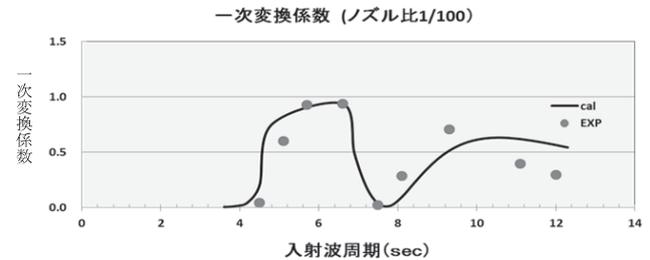


図-7 防波堤設置モデルによる一次変換係数

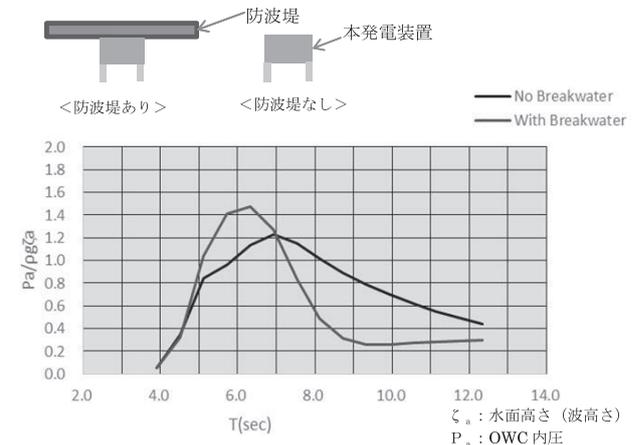


図-8 防波堤影響解析

表-1 モデル寸法

空気室長さ: $L_a$ (m)	7.0
空気室幅: $B_0$ (m)	11.6
空気室開口部深さ: $d_1$ (m)	9.7
水深: $h$ (m)	14.6
PW長さ: $L_p$ (m)	7.0
装置側面ウイングタンク幅: $W$ (m)	9.6

入波が、背後防波堤の反射波と干渉することで、ある周期で一次変換効率が低下すると考えられる。

以上のことから、既存の防波堤や護岸に装置を単独で一基設置する場合、反射波対策（消波工）をしたユニット装置を設置する必要がある。

## (2) まとめ

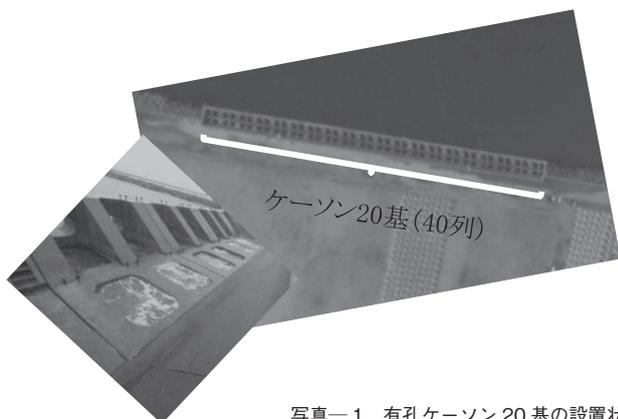
以上のことから、下記のことが分かる。

- ①後付けユニットを防波堤や護岸に設置する場合、背後壁の反射波影響を考慮し、構造体の寸法を決定する必要がある。
- ②消波工をPWの周辺に設置すれば、変換係数の低減が改善できる。
- ③ただし、発電装置を単独で設置する場合、上述の消波工を設置することは、発電単価の増大を招く。したがって、このような対策は、数十基設置する場合の端部の処理対策としての適用が有効である。

## 6. 消波（有孔）ケーソンを活用した本発電装置

上述したように防波堤や護岸など背後に壁がある構造部に発電装置を設置する場合、防波堤の反射波の影響を受け、発電装置の一次変換係数性能が低下する。

著者らは、山形県酒田市酒田港内にある消波ケーソンに着目した。着目した護岸には、写真—1のように2列4孔の遊水部を有する有孔式消波ケーソンが整備されており、防波堤背後壁の反射波の影響を受けにくい構造であると考えられる。



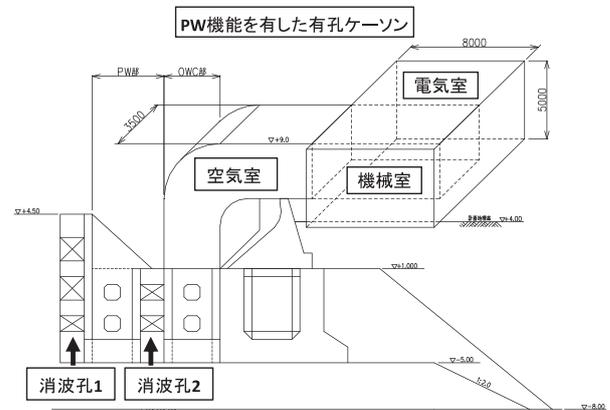
写真—1 有孔ケーソン 20基 (40列) の設置状況

### (1) 設置イメージ

消波ケーソンは、法線直角方向に2つの遊水室を持つ直立消波型ケーソンである。

有孔ケーソンは、入射波を最初に受け入れる前部遊

水室と水中孔でつながっている後部遊水室とで消波部が構成されている。両遊水室とも奥行きは3.5mである。図—9に発電装置の設置イメージを示す。前部の遊水室をPW部とし内側の遊水室をOWC部として、上述の設置タイプとほぼ同じ機構で発電が可能である。



図—9 本発電装置有孔ケーソン設置イメージ（構造物左が海側、右が陸側）

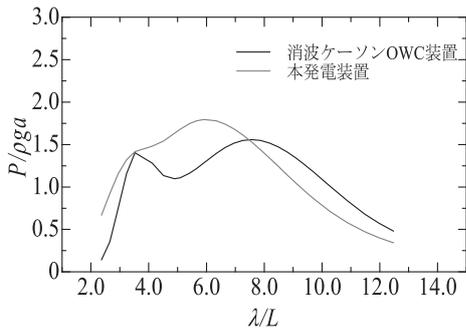
### (2) 消波ケーソン設置による特性

消波ケーソンは、図—9に示すように消波孔1、2部が全開放の大口徑孔ではなく、消波を行うために小径孔となっていることから、一次変換係数が通常のOWCに比して低下する。そのため、消波孔を全開放と仮定した本発電装置（通常本発電装置）との一次変換特性の比較計算を行った。空気室高さは5mと設定し、着底式構造物であることから、水深は装置の喫水と同じ4.1mとした。波周期は実海域を想定し入射波は3.0～13.0秒とした。

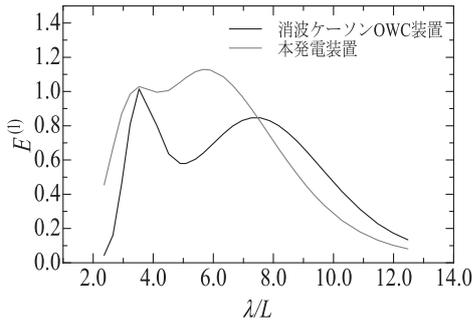
図—10に空気室内部圧力を、図—11に一次変換係数を示す。横軸は波長 $\lambda$ を装置の全長L（10.0m）で無次元化した。図—10及び11の結果から、有孔ケーソンに設置した本発電装置は、二山型の応答を示し、多重共振系を形成していることが示唆される。また、短周期帯で通常の本発電装置より、内部圧力及び変換係数ともやや低い値を示した。長周期帯では、通常本発電装置よりもやや大きな値となった。短い周期帯においては、消波孔による渦の影響で波エネルギーロスが生じているためだと思われる。本来、有孔ケーソンは、3～5秒の短い周期帯の航走波などによる反射波に対して、最も有効に作用するように設計されていることから、この結果は妥当である。

一方、長い周期帯では、この消波ケーソン装置の固有周期が長周期側にシフトしているため、通常本発電装置より変換係数が向上している。

なお、7～8秒の長周期帯でのエネルギーロスは



図一10 空気室内部圧力



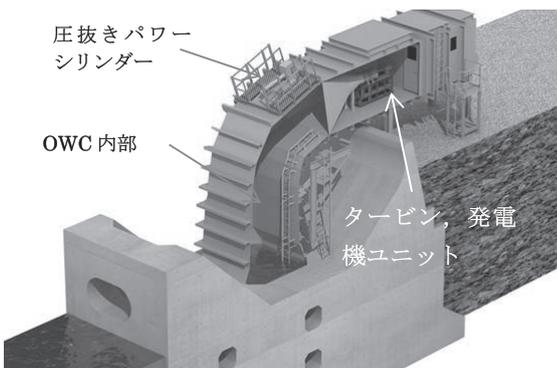
図一11 一次変換係数

20%前後であると想定される。

### 7. 有孔ケーソンを利用した装置の構造概要

上記を踏まえ、実際に酒田港で実験を行う場合の波力発電装置の設計を行った。構造概要を図一12に示す。発電装置の構造決定については、OWC内圧（波浪による）、風荷重、地震時慣性力を考慮し決定した。設計における詳留意点は以下の通りである。

- ①既設ケーソン（有孔ケーソン）の安全性  
既設構造物への重量物搭載影響の照査
- ②本体鋼構造部の設計  
鋼構造物の耐力照査
- ③カットオフ機構（安全装置）  
圧抜き機構、回転ブレーキの設定



図一12 発電装置構造図

- ④タービン設計及び発電設備検討  
タービン出力の検証，発電出力の想定
- ⑤現地架設方法の検討
- ⑥計測項目及び計測方法（適切な計測機器配置）

### 8. 酒田港における建造状況

平成14年12月より、酒田港において設置工事を実施している。ユニットは、富山の鉄構メーカーで7ブロックに分割製作し、大型トレーラーで現地に搬入し、順番に接合し設置工事を行った。

写真一2に現地の施工状況を示す。鋼殻ブロック基部から順番にブロックを積み上げ、最後に機械室、電気室を設置する。施工途中、日本海に停滞した大型低気圧による荒天に遭遇し、1週間工事を中断せざるを得なかったが、設置開始から、約14日間で無事設置を完了した（写真一3）。



写真一2 発電装置設置状況（H26年12月）



写真一3 発電装置設置完了（H26年12月11日）

躯体完成後にタービン、発電機制御設備の整備を行い、平成 27 年 1 月の調整運転に向けて準備中である。

## 9. おわりに

- ①発電装置を防波堤や護岸に単独で設置する場合、背後の防波堤や護岸の壁の反射波の影響で一次変換係数が低下する波周期帯が存在する。
- ②一次変換係数低下の対策として、消波工の設置が有効であるが、発電コストの増大に直結するため、発電装置を連続的に設置する場合の端部対策として有効である。
- ③酒田港の消波ケーソン（有孔ケーソン）に本発電装置 PW-OWC を想定した発電装置を設置する方策を提案した。
- ④有孔ケーソンを利用した本発電装置 PW-OWC は、ケーソンの消波孔の影響を受けて短周期帯で効率が若干低下する傾向が見られた。
- ⑤有孔ケーソンの一次変換におけるエネルギーロスについては、7～8 秒の長周期帯でのエネルギーロスは 20%前後である。
- ⑥平成 27 年 1 月発電開始予定である。

## 謝 辞

本研究の成果は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) と冒頭記載の 2 社を含む 8 者の共同研究成果であり、(独)海洋研究開発機構 大澤弘敬氏、宮崎剛氏、(独)港湾空港技術研究所 下迫健一郎氏、日本大学 居駒知樹准教授、国立大学法人佐賀大学 永田修一教授、(株)本間組 笹木隆行氏、エイ・エス・アイ総研(株) 太田豊彦氏、三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 細川恭史氏には多大な尽力を頂いた。ここに敬

意を表しお礼を申し上げる。

## 《参考文献》

- 1) 木原一禎, 細川恭史, 大澤弘敬, 下迫健一郎, 増田光一, 永田修一, 田口裕之: 空気タービン式波力発電装置の開発 沿岸域学会 研究討論会論文集, JULY, 2013
- 2) 高橋重雄, 安達宗, 中田博昭, 大根田秀明, 加藤久雄, 鹿籠雅純: 波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験における観測データの解析結果, 港湾技術研究所報告 Vol.31 No.2, Jun, pp 21-54, 1992
- 3) 大澤弘敬, 鷲尾幸久, 宮崎剛, 堀田平, 宮崎武晃 (JAMSTEC): 波浪エネルギー利用技術の研究開発—沖合浮体式波力装置「マイティールホール」の開発—, 海洋科学技術センター, 2004
- 4) 海洋科学技術センター監修: 振動水柱型波力装置の技術マニュアル, 2004
- 5) 宮崎 剛, 大澤弘敬, 松浦 正己, 増田 光一, 居駒 知樹, 大森光, 木原 一禎, 金谷 泰邦: プロジェクティングウォール付振動水柱型波力発電装置の一次変換性能に関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第 14 号, pp.337-340, 2013.
- 6) 大森光: OWC 型波エネルギー変換装置のプロジェクティングウォール効果に関する研究 日本大学理工学部修士論文, 2012

JCMMA

## 【筆者紹介】



木原 一禎 (きはら かずよし)  
三菱重工鉄構エンジニアリング(株)



金谷 泰邦 (かなや やすくに)  
東亜建設工業(株)



増田 光一 (ますだ こういち)  
日本大学 理工学部