

PWがOWC型波エネルギー変換装置に与える効果に関する研究 A Study on Effects of Projecting Walls on an OWC Type WEC

居駒 知樹*・増田 光一*・大森 光**・大澤 弘敬***
Tomoki IKOMA, Koichi MASUDA, Hikaru OMORI and Hiroyuki OSAWA

要旨: 著者らは振動水柱 (OWC) 型波エネルギー変換装置にプロジェクティングウォール (PW) を取り付けることで一次変換性能を向上させることができることを水槽実験の結果から示してきた。本研究では理論計算による検討を行った。系統計算を実施することでPW内とOWC内の水の挙動特性を調べ、PW-OWC型装置の一次変換性能に与えるPWの効果について明らかにした。

本理論計算は三次元得点分布法を基にOWC上部の空気室の存在と自由表面の存在を考慮できるように定式化したものであり、本手法についても水槽実験結果との比較から検証した。

キーワード: 波エネルギー変換装置, 振動水柱, プロジェクティングウォール, エンドウォール

1. 緒言

現在、海洋再生可能エネルギーが注目されている。中でも波エネルギーは膨大なエネルギーを秘めている。そこで近年、波力発電装置の実用化に向け、様々な研究開発が行われている。波力発電装置の1つの形式として振動水柱 (Oscillating Water Column: OWC) 型波力発電装置がある。この装置は空気室内の水面が上下に振動することにより空気室天板に開けられたオリフィスから空気が流出入する。この空気流で発電タービンを回すことで発電を行うシステムであり、波エネルギーから圧縮空気のエネルギーへの変換のことを一次変換、空気エネルギーから電気エネルギーへの変換までを二次変換と呼ぶ。近年の実スケールのOWC型波力発電装置の実証実験にはJAMSTECの「マイティーホエール」の実海域実験¹⁾がある。結果的に波周期に対する依存性が高く、特定の波

周期では発電効率は良いが、それ以外では良好な結果を得られなかった。そこで、広い波周期で高効率にするため、OWC前面にプロジェクティングウォール (PW) を取り付けた装置 (以降、PW-OWC型装置と呼ぶ) が提案された²⁾。PW-OWC型装置では、PW内の共振とOWCそのものの固有周期の2つの共振周期が存在し、従来のOWC装置に比べより広い波周期範囲で効率良く波パワーを吸収できることが実験的に確認されている²⁾⁻⁶⁾。斜波中での実験⁵⁾においてもPWを取り付けることにより一次変換性能が高くなることが確認された。

しかしながら、これらの研究²⁾⁻⁵⁾は水槽実験によるPW-OWC型装置の一次変換性能に関する検討のみであったため、高効率化のメカニズムなどについては詳細な考察が加えられていない。つまり、結果的に高効率化は可能であるが、PW長さ

* 正会員 日本大学理工学部海洋建築工学科, ** 非会員 株式会社 IHI エスキューブ (研究当時, 日大院生)
*** 非会員 独立行政法人 海洋研究開発機構

の影響など、系統的な検討は居駒ら⁹⁾のみであり、未だ十分ではない。

そこで本研究は、次のことを目的として実施された。1) PW 長さが一次変換性能向上に与える影響を定量的に明らかにして PW 設置の有用性を具体的に示すこと、2) より広い波周期で高効率な新方式 PW-OWC 型装置を提案してその一次変換性能特性を定量的に明らかにすることである。本研究では、水槽実験ではなくポテンシャル理に基づく理論計算法を適用する。その理論計算法を整備することも本研究の目的の1つである。

なお、本研究では発電機負荷までの全ての過程をオリフィスでのエネルギー損失によって再現し、実質的には一次変換部分の性能のみを評価する。

2. PW-OWC 型波エネルギー変換装置

一次変換性能を向上させるために、OWC 開口部前面に PW を取り付けることで、OWC の固有周期とは別の同調現象を誘起できる。このシステムは PW 内の共振効果と OWC 部の固有周期の2つの共振周期が存在し、従来の OWC 型装置に比べより広い波周期で一次変換性能が高くなると考えられている。実験的に単一型 OWC 型装置よりも PW-OWC 型装置の方が一次変換性能は高くなることが確認できている。

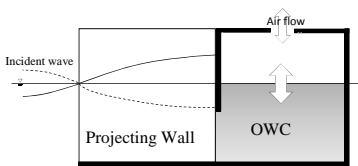


図1 PW-OWC 型の多重共振メカニズム

3. 三次元特異点分布法を用いた流体力解析法

3.1 定式化

本理論は線形ポテンシャル理論に基づく。浮体

動揺問題は散乱波問題と発散波問題に分けて考慮する。理論的な扱いは Kinoshita ら⁷⁾の等価浮体としての扱いから始まり、永田ら⁸⁾や安澤ら⁹⁾のような直接的な解法があるが、本研究では振動水柱の影響を考慮した境界値問題と境界積分方程式を考慮した居駒ら¹⁰⁾を適用する。その基本的なアプローチの詳細は Ikoma ら¹¹⁾に譲る。ここでは、それを基本として発電からくるインピーダンスを振動水柱型波エネルギー吸収装置によるダンパー特性として導入する方法を示す。本研究では、全ての現象は調和振動すると仮定して、規則波中での線形理論の問題として扱う。よって、以降の定式化は全ての物理変数から時間項を分離することで、周波数領域の問題として表現することにする。

本研究では非回転な完全流体を仮定し、速度ポテンシャル ϕ を次のように定義する。

$$\vec{v} = \text{grad}\phi(x, y, z; t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 t は時間である。この時間項の変数分離を次のように定義する。

$$\phi(t) = \text{Re}[-i\omega\phi \cdot e^{-i\omega t}] \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ω は円周波数、 i は虚数単位である。本研究では固定状態を仮定しているので速度ポテンシャル ϕ は次式のように入射波ポテンシャル、散乱波ポテンシャルの総和で表現される。

$$\phi = a\phi_i + a\phi_D \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a は入射波の複素振幅、 ϕ_i は入射波ポテンシャル、 ϕ_D 散乱波ポテンシャルである。

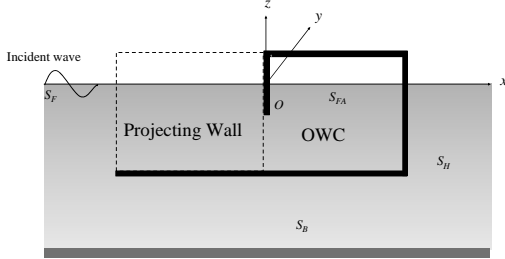
座標系を図2に示す。物体表面の法線は流体に向かって正とする。支配方程式は次のラプラスの方程式である。

$$\nabla^2\phi(x, y, z) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

一般の自由表面条件は次式のように与えられる。

$$K\phi - \frac{\partial\phi}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $K = \omega^2/g$ 、 g は重力加速度である。



S_H 物体表面
 S_F 自由表面
 S_{FA} OWCの自由表面
 S_B 水底面

図2 座標系

次に、OWC 上部の自由表面条件を考える。OWC 上部の自由表面は空気室内の空気圧力 P_a と力学的に釣り合うから、次式のような線形化されたベルヌーイの式で表現できる。

$$P_a(t) = \rho \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} + \rho g \bar{\eta}(x, y, t) \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 ρ は流体密度、 $\bar{\eta}$ は自由表面の鉛直変動量であり、図2の座標系に従って上向き(上昇)が正である。静水圧成分であるが、自由表面上の圧力を表現するため、圧力の符号は海中の静水圧とは異なり水面変動量と同じである。空気室内の圧力は OWC の上下により時間的に変動するので、一般の自由表面とは扱いが異なり、次式のような形式で自由表面条件が得られる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial t} \dots \dots \dots (7)$$

空気室内の圧力については状態方程式を立てる。ボイル・シャルルの断熱圧縮の状態方程式を線形化し次式の形式で与える。

$$P_a(t) = P_s + \bar{\alpha} \frac{\gamma P_s}{V_0} \bar{v}(t) \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 P_s は空気室内初期圧力であり、ゲージ圧力ではなく絶対圧力が適用される。空気室が外部(大気)と直接接続する空気タービンにつなが

る場合は、 P_s は大気圧に等しい。 γ は比熱比で本研究では1.4を適用する。 V_0 は空気室内の空気の初期体積(初期状態では設計される空気室体積に等しい)、 \bar{v} は空気室内空気の体積変動量である。さらに、ノズル係数 $\bar{\alpha}$ を導入する。これはノズルによるダンピング影響を考慮するし、実際にはエネルギー損失を決定するための係数である。この係数は0から1.0をとる。空気室が密閉状態では1.0をとり、完全な解放状態では0となる。

圧力 P_a を使って、空気室内の自由表面条件は(7)式より時間項を分離して次のように与えられる。

$$K\phi - \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{P_a}{\rho g} \dots \dots \dots (9)$$

(9)式は(8)式を用いて次のように書き換えられる。

$$K\phi - \frac{\partial \phi}{\partial z} = \alpha \frac{\gamma P_s}{\rho g V_0} v \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 α はノズル係数で次のような複素係数である。

$$\alpha = \alpha_c - i\omega\alpha_s \dots \dots \dots (11)$$

圧力と体積の変動量の時間項分離は以下のように定義する。

$$P_a(t) = \text{Re}[a p_a \cdot e^{-i\omega t}] \dots \dots \dots (12)$$

$$\bar{v}(t) = \text{Re}[a v \cdot e^{-i\omega t}] \dots \dots \dots (13)$$

空気室の体積変動量は次式で計算される。

$$v = \iint_{S_{FA}} \{\eta(x, y)\} ds \dots \dots \dots (14)$$

ただし、 ζ 最終的に(10)式は次式のように表現可能である。

$$K\phi - \frac{\partial \phi}{\partial z} = \alpha \frac{\gamma P_s}{\rho g V_0} \iint_{S_{FA}} (\eta) ds \dots \dots \dots (15)$$

運動が考慮されない場合には水面変動量のみで計算される。

水面変動量 η は速度ポテンシャルから次のよう表現可能である。

$$\eta = \frac{\partial \phi}{\partial z} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 η_l は入射波，散乱波および発散波の総和である。当然，運動が考慮されない場合には発散波はない。

$$\eta = \eta_l + \eta_D \dots\dots\dots (17)$$

3.2 境界積分方程式

自由表面条件，海底および放射条件を満たしたグリーン関数 G を適用すれば，本研究での問題は次の境界積分方程式によって速度ポテンシャルを表記できる。

$$-C_p \phi(P) = \iint_{S_H} \left(\phi(Q) \frac{\partial G}{\partial n_Q} - G \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \right) ds + \iint_{S_{FA}} \left(\phi(Q) \frac{\partial G}{\partial n_Q} - G \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \right) ds \dots\dots\dots (18)$$

本研究では境界積分方程式を数値的に解くための離散化手法として一定要素を適用する。このとき，速度ポテンシャル $\phi(P)$ が S_H 上で観察される場合， C_p は 1/2 をとる。空気室内の自由表面上 S_{FA} で観察される場合 $\phi(P)$ には C_p は 1.0 である。

観測点 P が物体表面上 S_H にある場合の散乱波ポテンシャル ϕ_D に関する境界積分方程式は次式で与えられる。

$$-\iint_{S_H} \frac{\partial \phi_D}{\partial n} G ds = \frac{1}{2} \phi_D(P) + \iint_{S_H} \phi_D \frac{\partial G}{\partial n} ds + \sum_{n=1}^{N_{AC}} \frac{p_{D,n}}{\rho g} \iint_{S_{FA}} G \cdot n_z ds \quad P \text{ on } S_H, (19)$$

ここで， $p_{D,n}$ は n 番の空気室の圧力であり， N_{AC} は空気室（実際には OWC の）数である。空気室内自由表面の初期高さは $z=0$ である。物体表面では次式で境界条件が与えられる。

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_l}{\partial n} \dots\dots\dots (20)$$

空気室内自由表面において，入射波と発散波による水面変動量の総和 η_S は下記のように表現できる。

$$\eta_S = \eta_l + \eta_D \dots\dots\dots (21)$$

よって，散乱波成分は次式のとおりである。

$$\eta_D = \eta_S - \eta_l \dots\dots\dots (22)$$

散乱波ポテンシャル ϕ_D が空気室内自由表面上 S_{FA} に配置されているとき，境界積分方程式は次式で与えられる。

$$-\iint_{S_{FA}} \frac{\partial \phi_l}{\partial n} G ds + \frac{\eta_l(P)}{K} = \iint_{S_{FA}} \phi_D \frac{\partial G}{\partial n} ds + \frac{\eta_S}{K} + \frac{p_{D,m}}{K \rho g} + \sum_{n=1}^{N_{AC}} \frac{p_{D,n}}{\rho g} \iint_{S_{FA}} G \cdot n_z ds, \quad m=1 \text{ to } N_{AC}, P \text{ on } S_{FA} \dots\dots\dots (23)$$

ただし， $p_{D,m}$ は空気室内圧力である。

(23)式において空気室内自由表面上に設定される未知変数は η_S と p_D の 2 つである。ゆえに方程式を解くためには空気室内自由表面上におけるもう一つの方程式が必要である。そこで，(8)式を適用する。(12)，(13)式によって時間項を分祀した後(14)式を空気体積変動量として代入する。数値計算上は水面変動量 η_S と圧力 p_D は未知変数なので，両者を右辺にして書き改めれば(8)式は次のように表現できる。これは空気室（OWC 装置）ごとに適用される。

$$0 = \alpha \frac{\gamma P}{V_0} \iint_{S_{FA}} \eta_S ds + p_{D,m} \dots\dots\dots (24)$$

4. 一次変換性能算出方法

4.1 入力波パワー

入力単位長さ（波長で除した）あたりの波パワー（波のエネルギー密度）は，水底より表面までの単位断面の水柱が保有する波によるエネルギー密度である。この波が輸送するエネルギーは，伝播方向に垂直な面において一方の側の媒質に対して単位時間になす仕事から求められる（文献 12 を参照）。このとき，エネルギーは群速度によって輸送されるので，結果として幅 B あたりの波パワーは入射波の群速度 C_G を用いて，次のように計

算される。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g a^2 C_G \cdot B$$

$$= \frac{1}{2} \rho g a^2 C \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \cdot B \quad [\text{W/m}] \quad (25)$$

ここで、 k は波数、 C は波速であり、次のように与えられる。

$$C = \frac{\lambda}{T}, [\text{m/s}] \dots\dots\dots (26)$$

波長 λ は次式の分散関係をもつ。

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (27)$$

波数 k は波長を用いて次のように計算される。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \dots\dots\dots (28)$$

4.2 圧縮空気への波パワー変換

OWC 型の波力発電装置では波パワーはまず圧縮空気のそれに変換される。結果として圧縮空気がエアタービンを介して発電機を回転させるという仕事をする。ここまでの過程をここでは波パワーの一次変換 $E^{(1)}$ とする。発電機から電気エネルギーが出力される過程は二次変換である。

単位時間に施される空気室内の空気の仕事、すなわち仕事率は次のように表現できる。

$$P_{air} = \frac{1}{T} \int_0^T A_w P_a(t) \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\bar{v}(t)}{A_w} \right\} dt \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 A_w は OWC の水線面積である。本研究ではすべての物理量の時間項を変数分離することで、周波数領域の問題として取り扱っている。そこで、ここでも(29)式を周波数領域で表現しなおす。

$$\bar{\xi}(t) = \frac{\bar{v}(t)}{A_w} \dots\dots\dots (30)$$

とおけば、(27)式は次のように書き換えることができる。

$$P_{air} = \frac{A_w}{T} \int_0^T P_a(t) \cdot \frac{d}{dt} \bar{\xi}(t) dt$$

$$= \frac{A_w}{T} \int_0^T \text{Re} [p_a e^{-i\omega t}] \cdot \text{Re} \left[\xi \frac{d}{dt} e^{-i\omega t} \right] dt \quad (31)$$

$$= \frac{A_w}{T} \int_0^T \text{Re} \left[\frac{1}{2} \{ p_a \cdot (-i\omega \xi) \cdot e^{-i2\omega t} \} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} (p_a \cdot (-i\omega \xi)^* + p_a^* \cdot (-i\omega \xi)) \right\} \right] dt$$

ただし、 $*$ は複素共役を意味する。(31)式右辺第3式は非線形干渉の和周波数成分と差周波数成分を含むが、和周波数成分は1周期の積分量が0であるので、ここでは差周波数成分のみが必要である。結果的に(29)式は次式で表現可能である。

$$P_{air} = A_w \cdot \text{Re} \left[\frac{1}{4} \{ p_a \cdot (-i\omega \xi)^* + p_a^* \cdot (-i\omega \xi) \} \right] [\text{Watts}], \dots\dots\dots (32)$$

すなわち、規則波中における波パワーの吸収は非線形影響のうちの定常成分のみで決定される。ただし、

$$p_a = p_{ac} + ip_{as} \dots\dots\dots (33)$$

$$\xi = \xi_c + i\xi_s \dots\dots\dots (34)$$

である。

一次変換性能は出力パワーと入力パワーの比により、次式で定義する。

$$E^{(1)} = \frac{P_{air}}{P_w} \dots\dots\dots (35)$$

5. 理論計算手法の妥当性

5.1 実験概要

本理論計算手法の妥当性を示すために実験結果との比較を行う。

本実験は日本大学理工学部船橋校舎テクノプロセス 15 の海洋建築水槽実験室平面水槽にて実施した。水槽規模は長さ 24m, 幅 7m, 実験水深は 1m とした。実験で適用した波浪条件は入射波の波高は 0.02m とし、波周期は 0.7 秒~1.75 秒の規則波とした。空気室天板にオリフィスを設け、この口径と水線面積の比であるノズル比を既存の結

果から 1/300 とした。

実験装置を図 3 に示す。模型は流体の流出部が振動水柱前面にある OWC に PW を取り付けて実施した。計測項目は OWC 内部水面変動を空気室の平均的な水面変位を計測するために楕形の容量式波高計を 3 本用いた。OWC 内部圧力を圧力センサーにて計測した。詳細な装置寸法は Table 1 に示す。

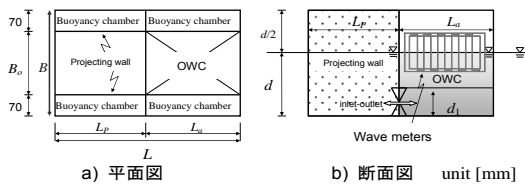


図 3 実験モデル平面・断面図と波高計配置

表 1 理論計算法の検証用モデル諸元

L_p (m)	0.282
L_a (m)	0.3
B_0 (m)	0.3
B (m)	0.44
Water Depth (m)	1
d (m)	0.3
d_1 (m)	0.215
Wave Period (sec)	0.65~2.0

5.2 実験結果および計算結果

一次変換性能の結果計算結果と実験結果を比較して図 4 に示す。横軸は波長 λ を装置長さ L で無次元化し、縦軸は一次変換性能 $E^{(1)}$ を表す。

$\lambda L < 3$ での値の上昇と $\lambda L > 5$ での値の低下傾向は定性的に一致していることがわかる。特に後者では定量的にもほぼ一致している。理論計算値が $\lambda L = 2.5$ 付近にピークをもつものに対して、実験値では最初のピークが $\lambda L = 3.0$ 付近である。また、実験値では $\lambda L = 4.0$ において一次変換性能が落ち込むが計算値ではこれが表現できていない。しかしな

がら、計算値も最初のピークの後に一度は急激な値の低下があり、 $\lambda L = 5.0$ 付近の変曲点に向かう。本計算が線形理論でオリフィス部分での空気渦などによる非線形減衰影響を無視していることを考慮すれば、ピーク値の過大評価と、それに伴う全体の性能の大きめの見積りは理解できる。

これらから本理論計算手法は基本的には妥当性があり、定性的な再現が可能であるとの判断から、同一計算法内における各種のパラメータ変化による一次変換性能変化の比較や考察は十分に可能であると判断する。

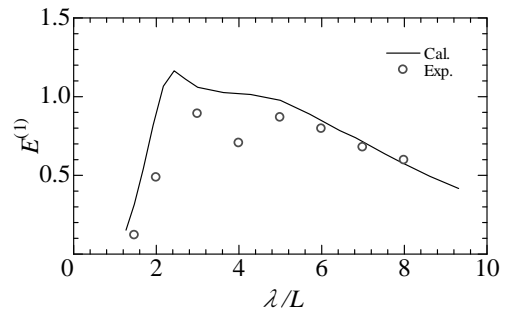


図 4 一次変換係数の実験値および理論値の比較

6. PW 長さが一次変換性能に与える効果

詳細な PW 効果についての考察は行われていない。そこで、理論計算により PW の長さが一次変換性能に与える効果、PW の有用性について明らかにする。

6.1 計算概要

本研究では山形県酒田港の岸壁周辺海域を波力発電装置設置海域と設定した NEDO のプロジェクト^{注1}の参考データとなるよう、装置の諸元を決定した。そこで、ここでの系統計算には実機モデルを適用し、水深は上記理由により 14.5m と設定した。同様の理由から OWC の上下運動固有周期の設定を、年間の波エネルギー分布の大きな 8 秒

付近にするためや構造設計等の種々の理由から装置の図5に定義される各部位の基本寸法をTable 2のように決定した。OWC長さ(奥行) L_a は7m, OWC幅 B_0 は7m, OWC前面開口部高さ d_1 は8.5mである。構造物の壁厚が数値計算上必要であったため, OWC背面と全面の壁は3cmとしている。全長 L の換算ではこれを無視した。また, 2面ある側壁は構造計画上鉄板一枚とはなりえないことから, 1.0mの厚さを考慮した。

ここでは, PWの長さが波エネルギー吸収性能に与える影響について評価するために, PW長さを1m間隔で変化させる系統計算を実施した。なお, 本モデルの没水部深さ水深と同じであり, 着底式として設定された。

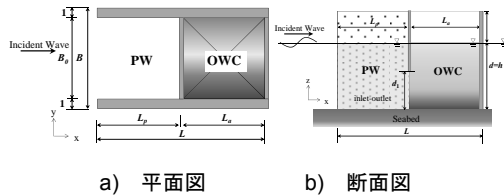


図5 着底式浅海域計算モデルの平面・断面図

表2 系統計算モデル諸元

L_p (m)	3~7	B_0 (m)	7	d (m)	14.5
L_a (m)	7	B (m)	9	d_1 (m)	8.5
B_s (m)	1, 3, 5	h (m)	14.5	Wave Period (sec)	3~15

6.2 計算結果および考察

図6に一次変換性能の結果を示す。図7にOWC開口部深さを变化させた一次変換係数の結果を示す。図8にPWが7mの長さで $\lambda/L_a=5.5$ 付近の一次変換性能が高い値を示した周期でのPW部およびOWC部の水面変位の時間的变化を示す。赤線の左側がPW部, 右側がOWC部である。図9にPWが3mの長さで $\lambda/L_a=5.5$ 付近の一次変換性能が高い値を示した周期でのPW部およびOWC部の

水面変位の時間的变化を示す。図10にPWが7mの長さで $\lambda/L_a=12.5$ 付近の一次変換性能が高い値を示した周期でのPW部およびOWC部の水面変位の時間的变化を示す。

図6および7の横軸は波長 λ を空気室長さ(OWC長さ) L_a で無次元化した。縦軸は一次変換性能 $E^{(1)}$ を表す。図8~10では横軸をPW-OWC装置の x 座標を装置の全体の半分の長さで無次元化し, 縦軸は水面変動量 η を入射波振幅 a で無次元化した。

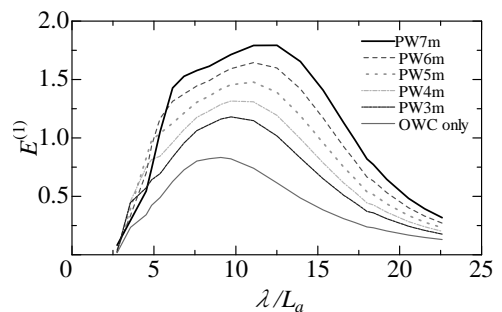


図6 PW長さ毎の一次変換係数の違い

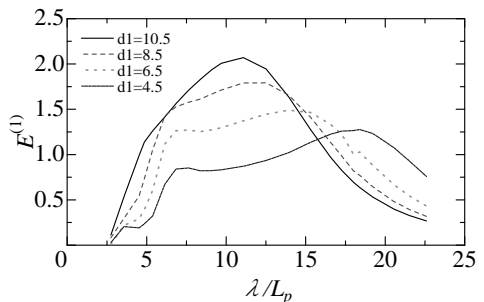


図7 d1開口部深さ毎の一次変換係数の違い

PW-OWC型の装置は, PWの定在波発生に関わる共振周期とOWCの上下揺れの固有周期が存在すると考えられている。²⁾ 図6ではPWが長くなると一次変換性能が短波長域である $\lambda/L_a=5.5$ 付近から上昇する傾向があることから, OWCの固有周期に対応すると思われる $\lambda/L_a=12.5$ の波長域と合わせて2つの同調周期の存在の効果によって幅

広な波周期範囲で一次変換性能が高くなったと思われる。図6では短波長側において顕著なピークは見られないが、急激な上昇と長波長側にある最大ピークに向かう緩やかな上昇の変曲点らしき波長が存在することから、ここでは便宜的に2つのピークの存在を認めると表現する。

$\lambda/L_a=5.5$ 付近では、図8を見ると、OWC 開口部、PW 先端部共に水面変位の値は高くなり、PW 内全体の水面変動量が高いことがわかる。図9を見ると、PW が短い場合は PW 内での水面変動量は低い。これらにより PW が長い場合、PW 内で波が共振しやすくなり、この影響で OWC 部の水面変動量も大きくなったと考えられる。図7より、PW の共振現象が起こる周期は OWC の開口部深さに関係なく、PW 長さに依存することを確認できる。PW が7mのときの $\lambda/L_a=12.5$ の一次変換性能のピーク時の PW 部と OWC 部中央線上 ($y=0$) における水位変動を1周期分の時間を追いながら図10に示す。図10から、PW 部と OWC 部共に水面変動量が同程度に大きくなることがわかる。OWC が十分に動いているこの結果から、これは PW-OWC 装置の固有周期だと考えられる。

よって、図6は、PW が長くなると一次変換性能は高くなり、変換性能が最大となる波周期が長くなることを示唆している。PW が長いと PW 部での水面変動量も大きく、OWC 部での水面変動量も大きくなることは図10の結果にも現れた。PW が短い場合、PW 内、OWC 内の水面変動量は PW が長いモデルに比べて低くなることも本系統計算時に確認している。これは PW が長くなることで、OWC から流出した水を PW の外へ逃がさない効果、特に装置の左右両側への波としてのエネルギーの散逸を防ぐ効果があり、PW が短いモデルに比べて一次変換性能が向上したと推察される。PW が長くなることで、PW-OWC 装置自体が長くなるため、OWC に対する水塊の付加質量は

増える。よって、一次変換性能の最大となる波周期は長くなったと考えられる。

図8および9はPWの共振周期と思われる波長域での水位変動を示すが、PW部およびOWC部の水面変位位相ずれは大きくないが、装置全体の固有周期ではPW部とOWC部の位相が明らかにずれることが図10から読み取れる。

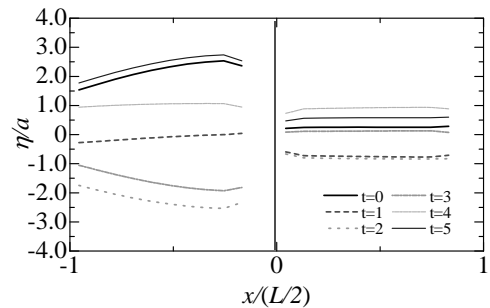


図8 1周期内におけるPW内およびOWCの空間的水面変動 (PW長さ7.0m, $\lambda/L_a=5$, $y=0$)

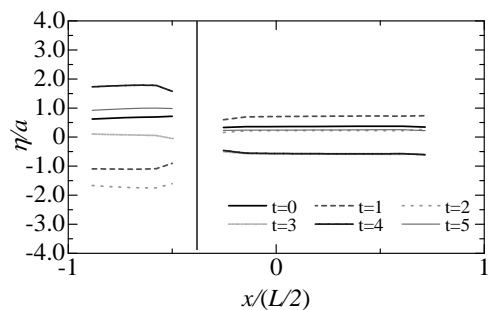


図9 1周期内におけるPW内およびOWCの空間的水面変動 (PW長さ3.0m, $\lambda/L_a=5$, $y=0$)

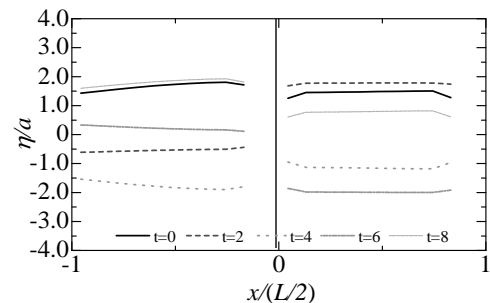


図10 1周期内におけるPW内およびOWCの空間的水面変動 (PW長さ7.0m, $\lambda/L_a=12.5$, $y=0$)

以上のことから、PW が長い場合、一次変換性能は2つのピークとなり、より広範囲な波周期範囲で効率良く波パワーを吸収できることが示唆される。また、PW が短い場合でも、OWC 開口部前面での水面変動量が大きくなるため、PW が無いモデルと比べて一次変換性能は高くなる結果になった。これらはPW 効果によるものと考察できる。これらの結果は、OWC 型装置の性能向上には、PW の設置が極めて有用であることを強く示唆するものである。

7. End Wall 式 PW-OWC 型装置の考案

既に述べたように、長いPW を設置することが装置の一次変換性能を向上させることが系統計算から示唆された。しかし、商用化にあたって、PW を長くすれば良いという問題ではない。PW を長くすれば構造計画上の困難さは増し、さらに材料や施工方法等々の問題を含めて建設コストが上昇するのは明らかである。そこで、PW を短くしてもなお広範囲な波周期範囲で一次変換性能を高く維持できる装置として、PW 部の先端にPW 開口部が狭くなるような壁 (End Wall) を取り付けた End Wall 式 PW-OWC 型装置を考案した。すなわち、PW のないOWC 単体装置ではOWC の固有周期近傍を境に短周期側と長周期側で著しく一次変換性能が低下することを避け、可能な限り短波長域、長周期域までその低下を防ぐことが可能な装置・手法の提案である。ここでは End Wall 式装置の一次変換性能を理論計算により評価し、End Wall 式PW が一次変換性能に与える効果について検討する。

7.1 計算概要

End Wall 式 PW-OWC 型装置の平面図、断面図を図 11 に示す。装置の基本寸法は Table 2 に示すものと同様であり、両側から延びる End Wall 間の

スリット幅を B_S とする。計算モデルは End Wall 式 PW 装置と従来型 PW 装置の一次変換性能を比較するために、前節のPW-OWC 装置のPW を4m、スリット幅 (B_S) を1m、3m および5m の3タイプで実施した。その他パラメータは従来型PW-OWC 型装置と同条件である。

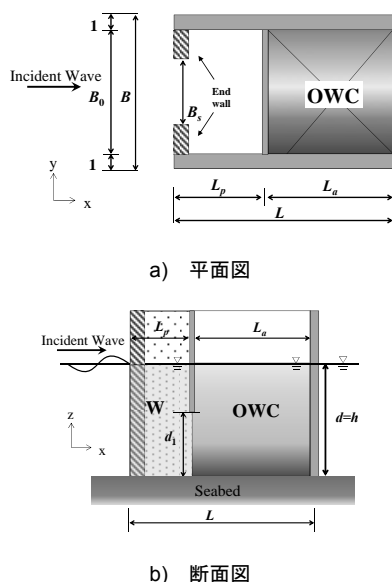


図 11 着底式のEW付PW型の系統計算モデル平面・断面図

7.2 計算結果および考察

図 12 にスリット幅3mの End Wall 式装置と従来型装置の比較の一次変換性能の結果を示す。図 13 にスリット幅 3m の装置の一次変換性能が高い $\lambda/L_a=5$ 付近でのPW 部およびOWC 部の水面変動の時間的变化を示す。図 14 には従来型PW 装置の $\lambda/L_a=5$ 付近でのPW 部およびOWC 部の水面変位の時間的变化を示す。

図 12 では End Wall 式装置は従来型PW 装置に比べて $\lambda/L_a=5$ 付近で一次変換性能の明らかなピークを確認できる。この波長域では、図 13 から、End Wall 式にすることで、PW 部での水面変動量

が明らかに大きくなっていることがわかる。それに比べて従来型である図 14 では、PW 内で水面変動量は図 13 と比べて小さい。OWC 内の水面変動量も End Wall 式 PW と従来型 PW では End Wall 式 PW モデルの方が大きい。

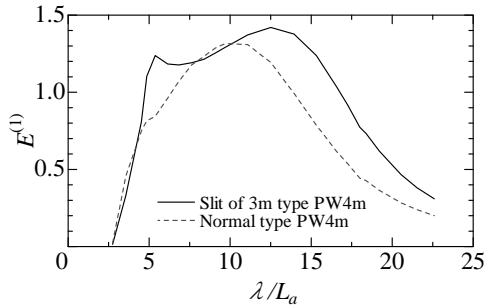


図 12 PW 長さ 4m の場合のスリット幅 3m の EW 付および無モデルの一次変換係数の比較

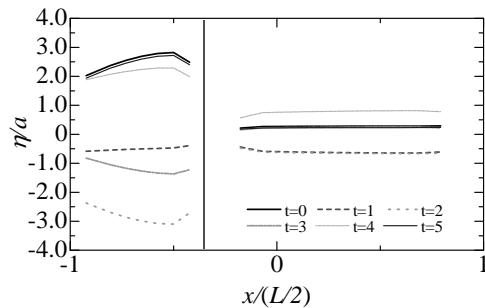


図 13 1 周期内における PW 内および OWC の空間的水面変動 (EW 付 PW 長さ 4.0m, $\lambda/L_a=5$, $y=0$)

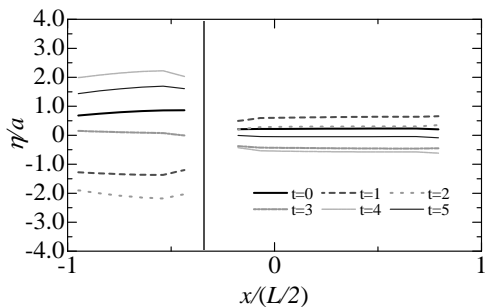


図 14 1 周期内における PW 内および OWC の空間的水面変動 (EW 無 PW 長さ 4.0m, $\lambda/L_a=5$, $y=0$)

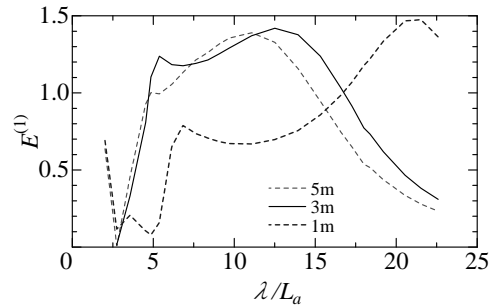


図 15 スリット幅毎の一次変換係数の比較

図 15 にスリット幅を変化させたときの End Wall 式装置の一次変換性能の比較を示す。図 15 では、スリット幅が狭くなるにつれて短周期側での一次変換性能のピークが顕著に現れる。PW 先端部に壁を取り付けることにより、波の遮蔽効果が向上し、PW 内の水塊が上下に振動し易くなっていると推察される。すなわち、これは PW 内の水塊がもう 1 つの OWC のような存在になっている可能性が高い。これにより、従来型 PW に比べて PW 内で波が共振しやすくなったと考えられる。この効果で OWC 内部へ水の流入量が増加し、OWC の変動量も増加したと考えられる。結果的に短周期域において装置の一次変換性能が従来型 PW 装置よりも高くなったと推察される。

また、End Wall 式装置は従来型 PW 装置よりも一次変換性能が最大となる波長域が長くなることが図 12 から確認できる。図 15 では、スリット幅が狭いほど、一次変換性能が最大となる波長域が長くなる。これも先述した PW 内の水塊が OWC 化することで説明が可能となる。すなわち、End Wall のスリット幅が小さいほど、元の OWC が実質的に動かさなくてはいけない付加質量 (PW 部水塊) が大きくなるためであると考えられる。スリット間から流出入する水量はそれが狭いほど下がり、PW 部を上下に振動させなければ、OWC は振動することができないからである。付加質量が

増大すれば、OWCの固有周期も長波長側に移行することになり、図15のような結果を説明することができる。

以上の考察から、End Wallを設置することでPW長さを制限してもPWが長いことと同等な一次変換性能を期待できることが示唆される。

8. 結言

本研究ではPW長さが一次変換性能に与える効果を系統計算結果より考察した。また新たな方式としてEnd Wall式PWを提案し、End Wallが一次変換性能に与える効果を検討した。これらの考察から以下の知見を得た。

- 1) 線形理論に基づく理論計算でOWC装置の一次変換性能の予測は定性的には可能であり定量的にも線形理論であることを考慮すれば概略の推定には適用できるといえる。PW効果については定性的な検討ができたが、共振による一次変換性能のピーク特性については定量的な評価は難しい。
- 2) PWをOWC型波力発電装置に取り付けることで、それが無い装置よりも一次変換性能は著しく向上できる可能性が高い。また、より長いPWを長くすることで、PW内での定在波による共振が顕著になりやすく、一次変換性能はPWの共振周期とOWCの固有周期2つの効果によって顕著にそれが上昇する波長域が2つ存在する。結果としてPWがない同一のOWC単一の装置よりも、より短波長域からより長波長域となる広範囲な波周期域で一次変換性能を向上させることが可能であることが示唆された。
- 3) End Wall式PW装置では従来型PW装置と比べて、PW内の水塊が共振しやすくなるため、一次変換性能は顕著な2つのピークを有した。これにより、End Wall効果によってPW長さ

が短く制限されても広範囲な波周期域で高い一次変換性能を実現することが可能であると思われる。

- 4) 単体で存在するOWC型波力発電装置にPWを取り付けることは、一次変換性能の向上や対象波周期域の拡大に有効であると思われる。装置を実用化する際、実海域の条件合わせた最適化は必要であるが、PWというパラメータが増えるもののそれが無い装置よりもその作業は容易であるといえる。

本研究で対象とした装置は単一で設置される装置であり、複数が並べられた場合のPW等の効果については今後の研究課題としたい。

また、本研究で適用した理論計算法は線形理論に基づくものであった。短波長（短周期）域でオリフィスの流出入の速度が大きくなる場合に、それによる非線形影響が強くなることが予想される。そのため、予測精度を向上させるにはこの非線形影響を考慮する必要がある。また、本研究ではPW長さのみに着目したが、3次元影響が強いため、幅の影響についてもさらに考慮して考察する必要があると思われる。

謝辞

本研究で使用した理論計算プログラムは平成23年度日本大学理工学部シンボリックプロジェクト（海洋利用システム、代表：居駒）の一環で整備された。また、本研究での検討は（独）新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）の平成23年度海洋エネルギー発電システム実証研究の委託業務として、三菱重工鉄構エンジニアリングからの再委託業務として実施した研究の一部であることを付記する。

なお、本研究は平成24年度日本沿岸域学会研究討論会「多重共振型波力発電装置の開発 その2

波エネルギー変換特性」で発表した内容をまとめなおしたものである。

参考文献

- 1) 大澤弘敬, 宮崎剛, 鷺尾幸久, 堀田平, 宮崎武晃: 波浪エネルギー利用技術の研究開発-沖合浮体式波浪装置「マイティーホエール」の開発-, JAMSTEC, 丸庄有限会社, 2004
- 2) 大澤弘敬, 居駒知樹, 米野秀人, 宮崎剛, 増田光一: 多重共振型波エネルギー吸収機構に関する実験, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第4号, pp47-50, 2007
- 3) 居駒知樹, 大澤弘敬, 増田光一, 富沢祐也: 人工ハーバー付 OWC 型波エネルギー吸収装置に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第8号, pp119-122, 2009
- 4) 大澤弘敬, 居駒知樹, 増田光一, 藤田裕貴, 生貝真理子, 市村将太: 人工ハーバー付 OWC 型波エネルギー吸収装置に関する研究-第2報 3次元影響とハーバーの効果-, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第10号, pp263-266, 2010
- 5) 田口裕之, 居駒知樹, 増田光一, 大澤弘敬, 大森光: PW-OWC 型波エネルギー変換装置の一次変換性能に関する研究-その1 正面波及び斜波中における一次変換性能-, 日本建築学会講演梗概集, 10026, CD-ROM, 2012
- 6) 居駒知樹, 大森光, 増田光一, 大澤弘敬: OWC 型波エネルギー変換装置のプロジェクトイングウォール効果, 第23回海洋工学シンポジウム, 2012
- 7) Takeshi KINOSHITA, Koichi MASUDA: SYSTEM SIMULATION AND OPTIMUM DESIGN METHOD OF OWC-WELLS TURBINE WAVE POWER GENERATOR, 東京大学生産技術研究所報告, 1986
- 8) 永田修一, 豊田和隆, 今井康隆, 瀬戸口俊明, 中川寛之: 浮体式振動水柱型波力発電装置の一次変換性能評価法の開発—第1報 周波数領域での2次元問題解析法—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, 2011
- 9) 安澤幸隆, 奥村義隆, 中尾圭輔: 波力発電用円筒型 OWC の規則波中応答特性の数値解析, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第14号, 2012
- 10) 居駒知樹, 増田光一, 林昌奎, 前田久明: 振動水柱型波エネルギー吸収機構を考慮した3次元流体力の直接解法, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第12号, 2011
- 11) Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Chang-Kyu Rheem and Hisaaki Maeda, “An Analysis of Hydroelastic Motion of Aircushion Type Large Floating Structure with Many Aircushions Using a Three-Dimensional Theory,” Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 134, Number 1, ASME, pp.011104-1-011104-8, 2012.
- 12) 光易恒: 海洋波の物理, 第1刷, 岩波書店, pp.185-189, 1995

注1 (独) 新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) の平成23年度海洋エネルギー発電システム実証研究として, 三菱重工鉄構エンジニアリングおよび東亜建設工業が実施する波力発電装置の実証研究事業

著者紹介

居駒 知樹（正会員）

日本大学理工学部海洋建築工学科（千葉県船橋市習志野台7-24-1），昭和44年生まれ，平成4年3月日本大学理工学部海洋建築工学科卒業，平成9年3月同大学院博士後期課程修了・学位取得，同年4月東京大学生産技術研究所にて研究機関研究員として勤務，平成10年6月同研究所助手，平成13年日本大学理工学部海洋建築工学科勤務，現在同大学准教授，博士（工学），日本建築学会，日本船舶海洋工学会会員。

E-mail: ikoma.tomoki@nihon-u.ac.jp



増田 光一（正会員）

日本大学理工学部海洋建築工学科（千葉県船橋市習志野台7-24-1），昭和48年日本大学理工学部建築学科卒業，昭和53年同大学院建築学専攻博士課程修了・工学博士取得，同年日本大学理工学部勤務，現在同大学教授，工学博士，日本建築学会，日本船舶海洋工学会，土木学会会員。

E-mail: masuda.koichi@nihon-u.ac.jp



大森 光

株式会社 IHI エスキューブ（東京都江東区豊洲3-1-1），昭和63年生まれ，平成25年3月日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻修了，同年4月株式会社 IHI エスキューブに入社，修士（工学），日本建築学会会員。

E-mail: hikaru_oomori@iscube.ih.co.jp



大澤 弘敬

独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター海洋技術開発部 海洋基盤技術グループ（神奈川県横須賀市夏島町2-15），昭和38年生まれ，昭和61年3月日本大学理工学部海洋建築工学科卒，同年4月横浜ゴム株式会社入社，平成8年海洋科学技術センター（現 独立行政法人海洋研究開発機構）勤務，現在同機構技術研究主幹（グループリーダー），博士（工学），日本船舶海洋工学会会員

E-mail: osawah@jamstec.go.jp

http://www.jamstec.go.jp/j



A Study on Effects of Projecting Walls on an OWC Type WEC

Tomoki IKOMA, Koichi MASUDA, Hikaru OMORI and Hiroyuki OSAWA

ABSTRACT : This paper describes the power take-off performance of a wave energy converter and the way in order to improve the performance with theoretical calculations. The authors showed the effects of the projecting walls (PWs) attached onto in front of oscillating water column (OWC) type wave energy converters on the improvement of the power take-off performance with the model experiments. The paper studied the effects with theoretical series calculations based on the linear potential theory. From the calculations, the paper investigated behaviours of an OWC and the water sounded the PWs and clarified the effect of the PWs on the characteristic of the power take-off. The three-dimensional singular point distribution method was applied and the paper showed the formulations. The validity of the present method was verified by comparing with the experimental results.

As a result, the results of the calculations suggested that the longer the PWs were useful for the improvement in wider wave period band and the new concept the end-walls were also successful for it despite of the PWs shortened.

KEYWORDS : *wave energy converter, oscillating water column, projecting-wall, end-wall*