

## 固定式振動水柱波力発電装置の性能に関する数値シミュレーション

今井 康貴, 坂中 理恵子, 永田 修一, 村上 天元

### Numerical simulation for oscillating-water-column wave energy converter

Yasutaka IMAI, Rieko SAKANAKA, Shuichi NAGATA and Tengen MURAKAMI

Institute of ocean energy, Saga University, Honjo, Saga, 8408502, JAPAN

#### Abstract

A numerical program is applied to calculate a primary conversion efficiency of a fixed OWC (Oscillating Water Column) wave energy converter. The pressure in air chamber, surface elevation inside and outside of air chamber was compared with the experimental results that was measured in a tank test in Saga University Imari satellite. The verified program helps optimization of OWC geometry in future.

### 1. 緒 言

波力エネルギーを利用した発電方式の一つとして固定式水中振動型発電装置 (OWC) が注目されており, これまでさまざまな研究が行われてきた ([1]~[5]). これは前面没水部が開口した半没水の空気室 (Air Chamber) に波が入射することによって空気室内の水面が上下動し, 空気室上部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 (Fig. 1).

本研究では, タービン負荷をオリフィスで代用し, 波浪に対する空気室の応答を求める数値プログラムの検証を行う. 空気室上部のオリフィス径ノズル比は, 先行研究をもとに 1/80 とした. 入射波条件は, 海洋エネルギー研究センター伊万里サテライトにおける水槽実験結果と対応する, 波高 10cm, 周期 1.0~3.0 秒とした. 数値計算結果と水槽実験結果を比較し, プログラムの妥当性を検証した.

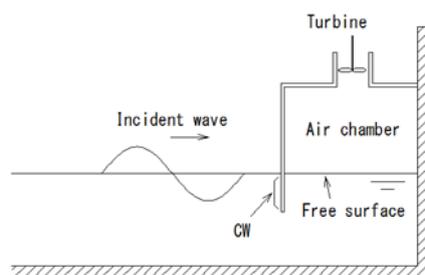


Fig. 1 Concept of OWC wave energy converter

\*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)  
E-mail of corresponding author: imaiy@cc.saga-u.ac.jp

## 2. 数値計算

### 2.1 支配方程式

本研究では自由表面を持つ気液二層流体の領域内に、固定されたオリフィス付き空気室を設置し、波浪による流体の変動を求めるプログラムを適用した。フリーウェアである OpenFOAM、その派生である waveFOAM をベースとして、造波部、波吸収部、波計測部分を改造した。未知数となる物理量は流速の xyz 方向 3 成分と圧力である。支配方程式はナビエ - ストークス式(1)および連続の式(2)である。

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここで,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  : それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の流速,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  : それぞれ流体の単位質量に働く外力,  $\rho$  : 密度,  $\mu$  : 粘性係数,  $\Theta$  : 体積変化の項である. 式(1), (2)より各時間ステップ毎に連立方程式として解を求め, 領域全体の物理量を求めた.

### 2.2 境界条件およびモデル寸法

境界条件を Fig 2.1 に示す. 領域内に気液二層流体, 上部境界(atmosphere)に大気解放条件, 波の流入境界(inlet)に 1 次のストークス波理論式を設定し, また固定式 OWC モデル(block), 水底(bottom), 側面(front)に滑りなし条件付きの壁面を設定した. また, 計算モデルの形状が長手方向に対して対象形状であるため, 中央に対称面境界(center)を設定した.

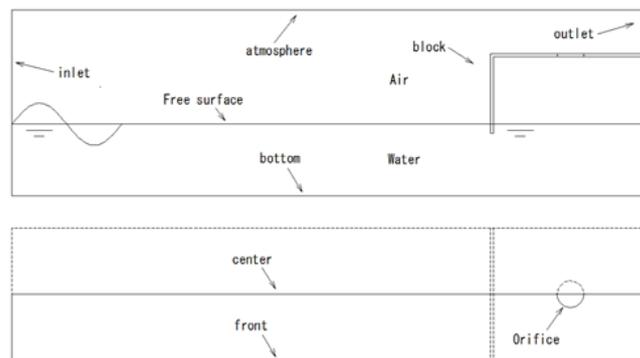


Fig. 2 Calculating area

計算モデルの寸法を Fig.3 に示す．また Table.1 に各寸法の詳細を示す．

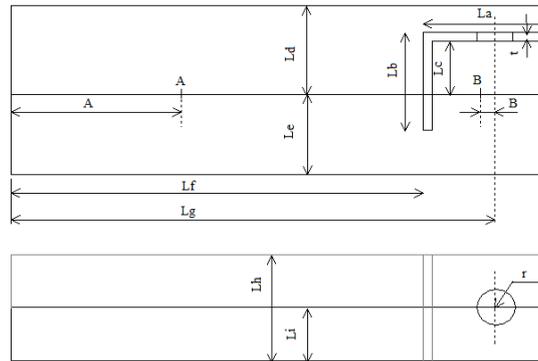


Fig.3 Dimensions of the computational model

Table1 Details of the dimension [mm]

$La$	700	空気室内の長さ
$Lb$	500	カーテンウォール長さ
$Lc$	400	静水時の空気室高さ
$Ld$	600	水面から計算領域上部までの距離
$Le$	600	水深
$Lf$	6350	波流入境界からカーテンウォールまでの距離
$Lg$	7000	波流入境界からオリフィス中心までの距離
$Lh$	800	奥行長さ (fullModel)
$Li$	400	奥行長さ (halfModel)
$t$	10	OWC 板厚
$r$	47.10	オリフィス半径, 天板面積に対する開口比 1/80
A	285	波高計の位置 (空気室外)
B	20	波高計の位置 (空気室内)

### 2・3 格子の設定

計算領域内には構造格子を用いた．格子幅は水面変動、カーテンウォール没水部周囲の流体運動、オリフィス周りの流体運動を考慮した．最少格子幅は 2mm ，総格子数は約 25 万点とした．壁関数および乱流モデルは使用していない．

### 2・4 自由表面モデル

自由表面解析モデルには汎用性が高く、複雑な表面形状を解析可能である VOF (Volume of Fluid)法を用いた．本来、計算領域内部のある点が気相であるか液相であるかはステップ関数となる．しかし、VOF 法では、これを表す関数を計算セル毎に平均した VOF 関数  $F$  の移流方程式、その計算セルが流体か気体かというフラグ  $NF$  を計算することにより自由表面を解析する．VOF 関数の移流方程式を式に示す．

$$\gamma_v \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w \alpha}{\partial z} = S_\alpha \quad (3)$$

ここで  $t$  : 時間、 $x, z$  : 水平および鉛直座標、 $u, w$  : 流速の水平および鉛直成分、 $\gamma_v$  : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_z$  : 水平および鉛直方向の面積透過率である．ここで、 $S_\alpha$  は造波ソースのためのソース項である．なお、VOF 関数  $F$  は二

相流解析などで用いられるボイド率とは異なり, 自由表面をシャープに表現するための関数である. この移流方程式の離散化にはドナー・アクセプター法を用いた.

## 2・5 計算条件

本研究では, オリフィス径 (天板面積に対するオリフィス面積の比) 1/80, 水深 0.6[m], カーテンウォール没水深度 0.1[m]とした. 入射波条件は波高 0.1m, 周期(T)1.00, 1.30, 1.65, 2.00, 2.63, 3.00 [sec]とした.

## 2・6 結果と考察

点 A における水位変動時系列を Fig.4, 点 B における水位変動時系列を Fig.5, 圧力変動時系列を Fig.6 に示す. いずれも青線が数値計算結果, 赤線が実験値である. Fig.4 から振幅, 波長共に実験値と計算値は良く一致している. しかし, 入射波周期  $T$  が大きくなると, 振幅, 波長の差も大きくなった. また, 周期  $T=1.65$ [sec]のとき, 12 秒後から実験値と計算値に大きな差が生じた. Fig.5 では振幅, 波長共に実験値と計算値は良く一致した. Fig.6 では振幅, 波長共に実験値と計算値は良く一致した. これより, 水槽実験の周期範囲において, 本数値計算は十分な精度で OWC 特性を表現できることを確認した.

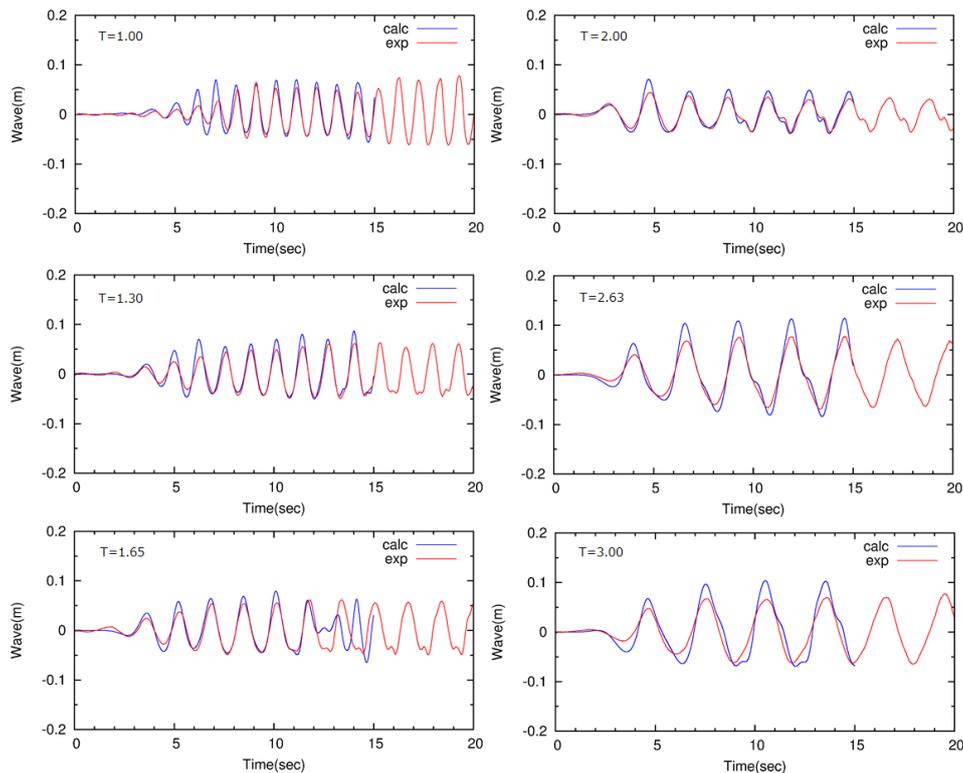


Fig.4 Water elevation at point A

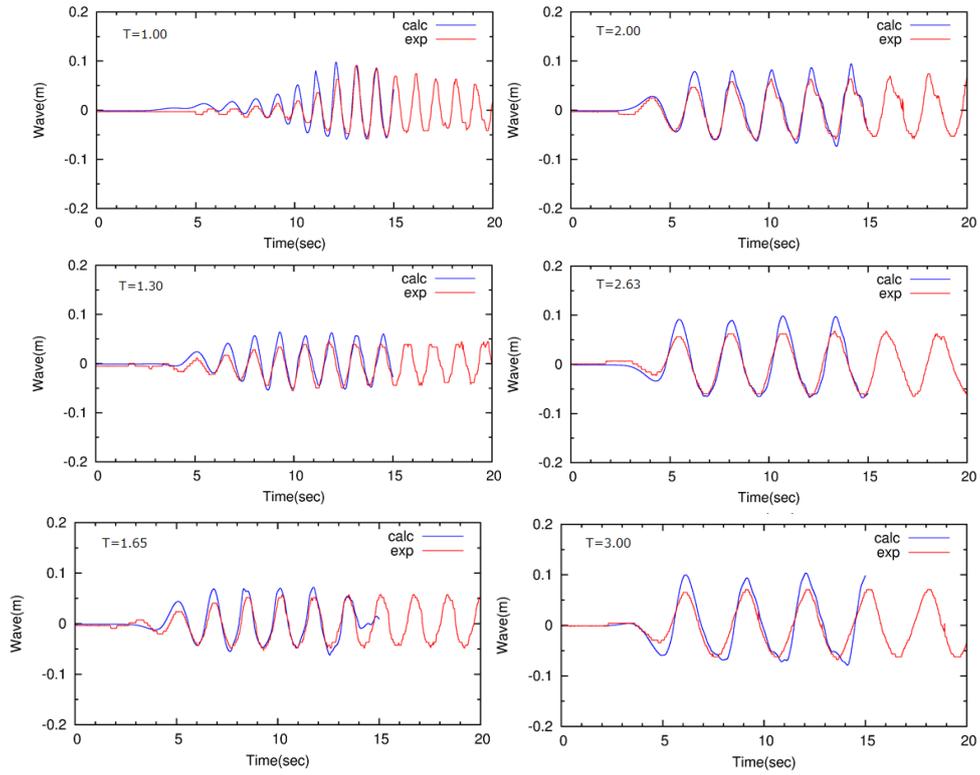


Fig.5 Water elevation at point B

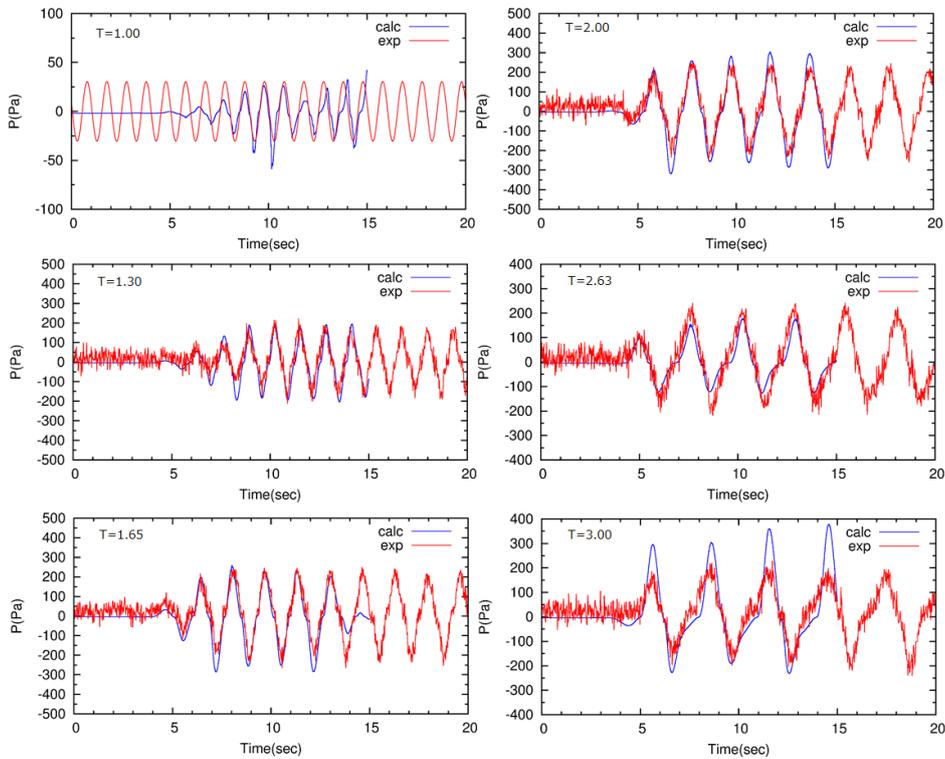


Fig.6 Atmospheric pressure inside air chamber

### 2・7 一次変換効率

OWC によって吸収される波浪エネルギー量は、振動水中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。

$$W(t) = P(t)Q(t) \quad (4)$$

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

$$Q(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) S \quad (5)$$

$$W(t) = P(t) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) S \quad (6)$$

空気パワー  $E_{air}$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} E_{air} &= \frac{1}{T} \int_0^T W(t) dt \\ &= \frac{S}{T} \int_0^T P(t) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\zeta_1(t) + \zeta_2(t)}{2} \right) dt \end{aligned} \quad (7)$$

ここで  $T$  は入射波周期である。OWC 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。

$$E_{wave} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_i^2 C_g B \quad (8)$$

ここで、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $\zeta_i$  は入射波振幅、 $C_g$  は群速度、 $B$  は模型幅である。本計算より得られた一次変換効率を Fig.7 に示す。

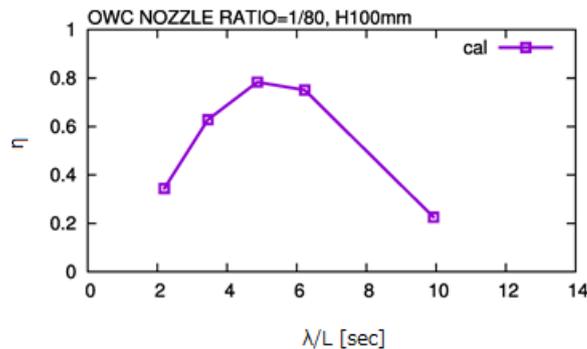


Fig.7 Primary conversion efficiency

### 3. 結言

本研究では、OWC 波力発電装置に波が入射する場合の応答プログラムの検証を行った。水深、ノズル比、カーテンウォール没水深度が与えられ、そこに波高 10cm, 周期 1.00~3.00[sec]の波が入射した場合に、空気室内外

の水位変動, 空気室内部圧力を計算し, 実験結果と比較した. 比較の結果, 水位変動, 内部圧力ともに実験値とよく一致し, プログラムの妥当性を検証した. 今後, 本プログラムを用いて, 想定海域における空気室形状の最適化を行う予定である.

## 5. 参考文献

- [1] 益田善雄, 宮崎武晃, 波力発電装置「海明」の実験, 日本機械学会 第 83 巻 第 737 号, 1980
- [2] 小島郎史, 合田良実, 鈴木諭司, 波力発電ケーソンの空気出力効率の計算, 港湾技術研究所報告 第 22 巻 第 3 号 波エネルギーに関する研究 第 1 報, 1983
- [3] 小島郎史, 鈴木諭司, 波力発電ケーソンに働く波力特性に関する実験, 港湾技術研究所報告 第 23 巻 第 1 号 波エネルギーに関する研究 第 2 報, 1984
- [4] 高橋重雄, 小島郎史, 鈴木諭司, 不規則波に対する波力発電ケーソンの空気出力, 港湾技術研究所報告 第 24 巻 第 1 号 波エネルギーに関する研究 第 3 報, 1985
- [5] 高橋重雄, 鈴木諭司, 明瀬一行, 波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法, 港湾技術研究所報告 第 24 巻 第 2 号 波エネルギーに関する研究 第 4 報, 1985