

浮体式振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の 一次変換効率解析法に関する研究

永田修一^{*1}, 豊田和隆^{*1}, 今井康貴^{*1}, 瀬戸口俊明^{*1}, 中川寛之^{*2}

Numerical Analysis on Primary Conversion Efficiency of Floating Type OWC “Backward Bent Duct Buoy”

Shuichi Nagata^{*1}, Kazutaka Toyota^{*1}, Yasutaka Imai^{*1}, Toshiaki Setoguchi^{*1} and Hiroyuki Nakagawa^{*2}

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

^{*2} Mitsui Akishima Laboratory

In order to design a floating OWC-type wave energy converter such as Backward Bent Duct Buoy (BBDB) it is necessary to develop a numerical method to make clear an optimal hull shape which maximizes the generating electrical energy.

In this paper, a two-dimensional numerical method to estimate the primary conversion efficiency of a floating OWC-type wave energy converter with arbitrary cross section in the frequency domain is proposed. The fluid force by water waves is calculated by using boundary element method based on velocity potential theory. For the air flow in the air chamber, an equation of state and the conservation of mass and energy with the assumption of air being a perfect gas are used. From these equations for the air flow, boundary integral equation for the velocity potential and equations of motion of the floating body, motions of floating body, air pressure in the air chamber, the transmission coefficient and reflection coefficient of water waves and primary conversion efficiency etc. are calculated. Wave tank tests for the primary conversion efficiency of BBDB in regular waves are also carried out and numerical results are compared with experimental results.

Key Words : Wave Energy Converter, Oscillating Water Column, Boundary Element Method

1. 緒 言

波浪エネルギーから電気エネルギーへ変換する波力発電システムとして、数多くの方法が提案されている。中でも、波浪エネルギーから空気エネルギーへ変換し、その後、空気エネルギーから電気エネルギーへの変換を行う振動水柱型波力発電装置は、空気を介するので、大波浪下での安全性が高いとされている。本研究で対象とする「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bend Duct Buoy : BBDB)は、浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなること、装置自体が小型であること、波浪中で波の入射方向に微速前進すること、の利点を持つ装置である。現在、波浪エネルギーから空気エネルギーへの一次変換性能を最大にする BBDB の浮体形状を求めるために、多くの実験的な研究が行われてきたが、その形状は、未だ明らかでない。そこで本研究では、浮体の最適形状を求めるために、周波数領域において、BBDB の一次変換性能を求まる数値解析法を開発した。また、造波水槽を用い

^{*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1番地)

^{*2} 三井造船昭島研究所

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

た実験結果と比較し、その数値解析法の計算精度についても調べた。

2. 計算手法

Fig.1 に示すように、水面に浮かべた BBDB に、右方から波が入射する 2 次元問題を考える。BBDB は線形バネで係留されているものとする。流体は、非粘性、非圧縮の完全流体の無渦運動とすれば、速度ポテンシャルが存在する。波浪中で、浮体は Surge, Heave, Pitch の 3 モード運動をする。

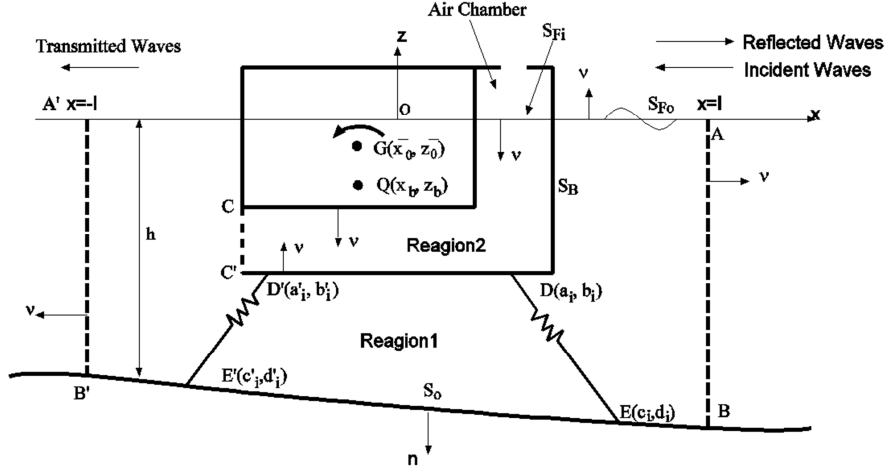


Fig.1 Definition Sketch

浮体の 3 モード運動と空気室内圧力、速度ポテンシャルを以下のように表わす。

$$\xi(t) = x_0 - \bar{x}_0 = \text{Re}[X \cdot e^{i\delta t}] \quad (1)$$

$$\eta(t) = z_0 - \bar{z}_0 = \text{Re}[Z \cdot e^{i\delta t}] \quad (2)$$

$$\delta(t) = \text{Re}[\Theta \cdot e^{i\delta t}] \quad (3)$$

$$p_a(t) - p_0 = \rho g \zeta_0 \text{Re}[p_s^a \cdot e^{i\delta t}] \quad (4)$$

$$\Phi(x, z; t) = \frac{g \zeta_0}{\sigma} \text{Re}[\phi(x, z) \cdot e^{i\delta t}] \quad (5)$$

ここで、 $\xi(t)$: 浮体の水平運動変位、 X : 浮体の水平運動の複素振幅、 $\eta(t)$: 浮体の鉛直運動変位、 Z : 浮体の鉛直運動の複素振幅、 $\delta(t)$: 浮体の回転運動変位、 Θ : 浮体の回転運動の複素振幅、 $p_a(t)$: 空気室内の圧力、 p_0 : 大気圧、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 ζ_0 : 入射波振幅、 p_s^a : 空気室内圧力の無次元複素振幅、 $\Phi(x, z; t)$: 速度ポテンシャル、 $\phi(x, z)$: 速度ポテンシャルの無次元複素振幅、 σ : 入射波の角周波数、 i : 虚数単位、 t : 時間 である。

流体領域を BBDB の内部と外部に分割する。BBDB 外部の流体領域を領域 1、内部の流体の領域を領域 2 とすると、領域 1 における流体に関する支配方程式と境界値問題は次のようになる。

$$\nabla^2 \phi^{(1)} = 0 \quad (\text{in fluid}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu} = \frac{\sigma^2 h}{g} \phi^{(1)} \quad (\text{on free surface}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu} = 0 \quad (\text{on sea bed}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu} = \frac{\sigma^2 h}{g} \left[\frac{X}{\zeta_0} \frac{dz}{ds} - \frac{Z}{\zeta_0} \frac{dx}{ds} - \frac{\Theta h}{\zeta_0} \left\{ (x - \bar{x}_0) \frac{dx}{ds} + (z - \bar{z}_0) \frac{dz}{ds} \right\} \right] \quad (\text{on floating body surface}) \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi^{(1)}(l, z) &= [e^{i\lambda l} + K_r e^{-i\lambda l}] A(\lambda z) \\ \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu}(l, z) &= i\lambda [e^{i\lambda l} - K_r e^{-i\lambda l}] A(\lambda z) \\ A(\lambda z) &= \frac{\cosh \lambda(z+1)}{\cosh \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (\text{on imaginary boundary AB}) \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi^{(1)}(-l', z) &= K_t e^{-i\lambda l'} A(\lambda' z) \\ \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu}(-l', z) &= -i\lambda K_t e^{-i\lambda l'} A(\lambda' z) \\ A(\lambda' z) &= \frac{\cosh \lambda'(z+h')}{\cosh \lambda' h'} \end{aligned} \right\} \quad (\text{on imaginary boundary A'B'}) \quad (11)$$

領域 2 における流体に関する境界値問題は次のようになる。

$$\nabla^2 \phi^{(2)} = 0 \quad (\text{in fluid}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial \nu} = \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ i p_s^a - \left(1 - i \frac{\mu}{\sigma} \right) \phi^{(2)} \right\} \quad (\text{on free surface}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial \nu} = \frac{\sigma^2 h}{g} \left[\frac{X}{\zeta_0} \frac{dz}{ds} - \frac{Z}{\zeta_0} \frac{dx}{ds} - \frac{\Theta h}{\zeta_0} \left\{ (x - \bar{x}_0) \frac{dx}{ds} + (z - \bar{z}_0) \frac{dz}{ds} \right\} \right] \quad (\text{on floating body surface}) \quad (14)$$

仮想境界 CC' での領域 1 と領域 2 の接続条件は以下になる。

$$\phi^{(1)} = \phi^{(2)}, \quad \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial \nu} = \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial \nu} \quad (15)$$

ここで、 ν :境界における外向きまたは内向き法線ベクトル、 h :水深、 λ :入射波の波長、 K_t :波の透過率、 K_r :波の反射率、 μ : Rayleigh の仮想摩擦係数である。

以上の境界値問題に境界要素法を適用する。一定要素で離散化された境界積分方程式は次のようになる。

$$\sum_{j=1}^N [F_{ij} \cdot \phi(j) - E_{ij} \cdot \bar{\phi}(j)] = 0 \quad (i = 1 \sim N) \quad (16)$$

$$F_{ij} = -\delta_{ij} + \bar{E}_{ij} \quad (\text{Region I}) \quad (17)$$

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \bar{E}_{ij} \quad (\text{Region II}) \quad (18)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_{ij}} \log R_{ij} ds, \quad \bar{\phi}(j) = \frac{\partial \phi(j)}{\partial \nu} \quad (19)$$

$$\bar{E}_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_{ij}} \frac{\partial}{\partial \nu} \log R_{ij} ds, \quad R_{ij} = [(\xi_j - \xi_i)^2 + (\eta_j - \eta_i)^2]^{1/2} \quad (20)$$

空気室内の空気については、圧縮性流体と考え、以下の状態方程式、質量保存則、エネルギー保存則を用いる。

$$\text{Eq. of State : } p_a = \rho_a R T_a \quad (21)$$

$$\text{Eq. of Continuity : } \frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V_a}{R T_a} \right) + \frac{d m_a}{dt} = 0 \quad (22)$$

$$\text{Conservation of Energy : } p_a \frac{d V_a}{dt} + C_v \frac{d}{dt} \left(\frac{p_a V_a}{R} \right) + C_p T_j \frac{d m_a}{dt} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{d m_a}{dt} = \pm \rho_j \varepsilon C_d C_s A_w \sqrt{2 C_p |T_a - T_0|} \quad \left(\begin{array}{l} \text{inflow : +} \\ \text{outflow : -} \end{array} \right) \quad (24)$$

ここで、R:気体定数、 ρ_a :空気室内空気の密度、 ρ_0 :大気密度、 ρ_j :流入出する空気の密度(流出時: $\rho_j = \rho_a$, 流入時: $\rho_j = \rho_0$), T_a :空気温度、 T_0 :大気温度、 T_j :流入出する空気の温度(流出時: $T_j = T_a$, 流入時: $T_j = T_0$), V_a :空気の体積、 dm_a/dt : 空気の流入出率、 C_v :空気の定積比熱、 C_p :空気の定圧比熱、 A_v :オリフィス断面積、 A_w :空気室断面積、 ε :ノズル比(= A_v/A_w), C_d :縮流係数、 C_s :速度係数 である。

空気室内の圧力変化、体積変化、温度変化を以下のように表わす。

$$p_a(t) - p_0 = \rho g \zeta_0 \text{Re}[p_s^a e^{i\sigma t}] \quad (25)$$

$$V_a(t) - V_0 = \text{Re}[v_s e^{i\sigma t}] \quad (26)$$

$$T_a(t) - T_0 = \text{Re}[T_s e^{i\sigma t}] \quad (27)$$

上記の式を、空室内空気の状態方程式、質量保存則、エネルギー保存則に代入して、非線形項を線形化すると、空気室内の式は、最終的に次のように表わされる。

$$\sum_{j=1}^{N_1^{(2)}} \left(1 - i \frac{\mu}{\sigma} \right) \phi_1^{(2)}(j) \cdot \Delta x_j - \frac{(1 + i C_E) l_c}{C_E} p_s^a - i l_c \frac{Z}{\zeta_0} - i l_c (x_{0r} - \bar{x}_0) \frac{\Theta h}{\zeta_0} = 0 \quad (28)$$

$$C_E = \frac{p_0}{\rho g D_0} \frac{\sigma \gamma}{i \sigma - \beta(\gamma - 1)}, \quad \frac{\beta_0}{\sigma} = \frac{\varepsilon C_d C_s A_w \sqrt{2 C_p T_0}}{V_0 \sigma} \alpha_0, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$\frac{\beta}{\sigma} = \frac{\beta_0 / \sigma}{\sqrt{|T_s / T_0|}}, \quad \alpha_0 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \xi \cdot \sqrt{\cos \xi} d\xi$$

次に浮体の運動方程式は以下のようになる。

$$M \frac{d^2(X e^{i\sigma t})}{dt^2} = P_X^{(w)} + F_X + P_X^{(a)} \quad (29)$$

$$M \frac{d^2(Z e^{i\sigma t})}{dt^2} = P_Z^{(w)} + P_Z^{(s)} + F_Z + P_Z^{(a)} \quad (30)$$

$$I \frac{d^2(\Theta e^{i\sigma t})}{dt^2} = T_\theta^{(w)} + T_\theta^{(s)} + M_\theta + T_\theta^{(a)} \quad (31)$$

上から順に水平方向, 鉛直方向, 回転方向に関する運動方程式である. このとき, M :浮体質量, I :浮体の慣性モーメント, $P_X^{(w)}, P_Z^{(w)}, T_\theta^{(w)}$:水による流体力, $P_Z^{(s)}, T_\theta^{(s)}$:静的復元力, F_X, F_Z, M_θ :係留力, $P_X^{(a)}, P_Z^{(a)}, T_\theta^{(a)}$:空気室内の空気圧が空気室壁に及ぼす力である.

以上の水に関する境界積分方程式, 浮体の運動方程式, および空気室内空気の方程式に関する積分方程式を解くことによって, 流体境界上の速度ポテンシャルと浮体の運動, 空気室内の圧力を求めることが出来る.

また, 一次変換効率 η は次のように与えられる.

$$\eta = \frac{E_{air}}{E_i} = 2 \left(\frac{\rho \sigma \beta_1}{B} \right) \cdot f(kh) \cdot Re[p_s^a \cdot p_s^{a*}] \quad (32)$$

このとき, E_{air} :空気の持つエネルギー, E_i :入射波のエネルギー, p_s^{a*} : p_s^a の共役複素数, B :浮体幅である.

3. 実験方法及び考察

数値解析法の妥当性を検証するために BBDB の規則波中における応答試験を行った. Fig.2 は実験に用いた BBDB 模型である. 同じの浮体形状と質量を持ち, 重量分布の異なる二つの模型を用意した.

実験には長さ 18m, 幅 0.8m, 水深 1m の二次元造波水槽を使用し, 模型を係留し, 規則的波中における応答試験を行った. 周期 1.0~2.0 秒の波を入射させ, 入射波と透過波, 空気室内の水面変動と空気圧力, 浮体運動, 係留力を計測した. 浮体運動については, BBDB 模型上に取り付けたマーカーをカメラで撮影し画像解析することによって求めた.

実験結果と計算結果の比較を Fig.3 と Fig.4 に示す. これらは規則波中における BBDB の周波数応答を示したもので, Fig.3 は Model 1 について, Fig.4 は Model 2 についての結果である. このとき ζ_i :入射波振幅, ζ_a , ζ_b :空気室内の水面変動振幅, η :一次変換効率である. 横軸は入射波長 λ を浮体長さ L で無次元化している. 計算値と実験値について, 細かい点での違いは見られるが概ね良好な一致が確認された.

4. 結論

BBDB の一次変換性能評価のための数値解析法を開発した. 造波水槽を用いて行った実験結果と計算結果を比較し, その計算精度を調べた. 計算値と実験値に少々の違いはあるが, 解析法の妥当性が確認できた.

参考文献

- (1) 中川 寛之, 振動水柱型波力発電装置の一次変換効率に関する基礎的研究, 日本船舶海洋工学会論文集 第 6 号, 191-197, 2007

Table 1 Moment of Inertia of the Model

Test model	Moment of inertia
Model 1	10.435 [kg m ²]
Model 2	16.336 [kg m ²]

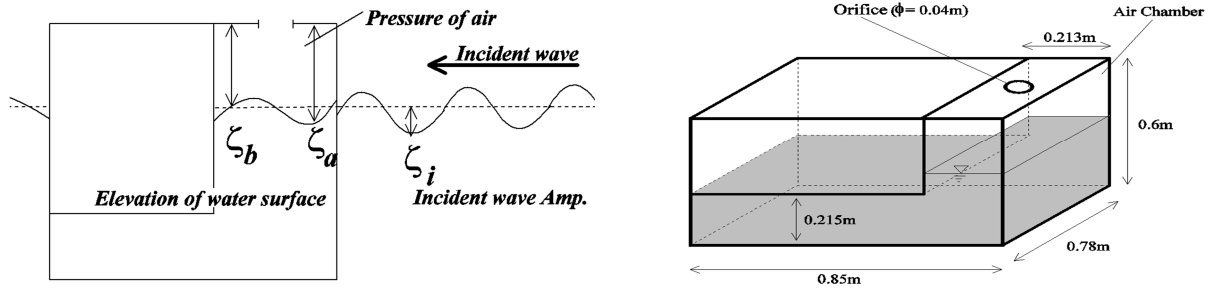


Fig.2 Model of BBDB

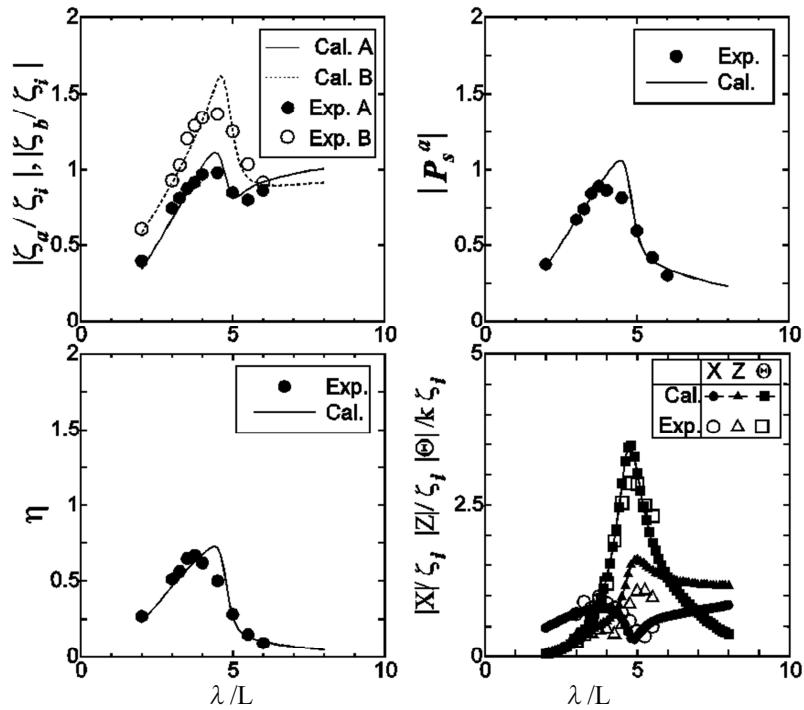


Fig.3 Calculated and Measured Values on Model 1

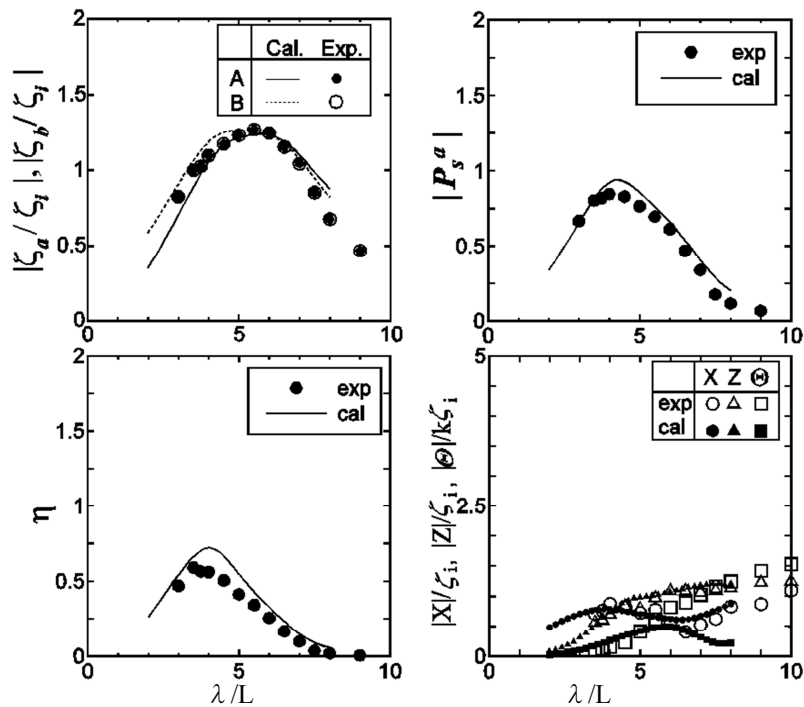


Fig.4 Calculated and Measured Values on Model 2