

浮体振動水柱の種々の波浪条件への応答

Response of an oscillating water column to various wave conditions

北海道大学大学院工学院 ○学生員 大野紘史 (Koshi Ono)
北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. 研究背景

EUの総エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの比率を2020年までに20%に増加させる計画が、2008年のEU政策パッケージに盛り込まれたのを契機に世界的に自然エネルギー利用が進められており、2013年には世界の総発電量の増分の内56%が自然エネルギーをソースとするものになったと報告されている (Renewable Energy Policy Network for 21st Century, 2014)。日本においても2015年に経済産業省がエネルギーベストミックスの案として電源構成の内、再生可能エネルギー比率を22~24%程度まで導入する事を公表した。

波浪エネルギー発電分野においても利用促進の取り組みが活発化しており、特に欧州では数十億円規模の海洋エネルギー関連の国際プロジェクトが複数進行するなど、装置の開発、運用方法、環境評価、経済影響評価など多方面からの研究開発が急速に推進されている。過去、廣井勇博士が考案された振り子式の波力発電装置¹⁾を皮切りに、現在まで様々なメカニズムの波力発電デバイスが提案されている。その中でも、夏季の台風や爆弾低気圧の通過・発生等による暴波浪場が形成される頻度が高い日本海域において、耐久性能の高い振動水柱 (Oscillating Water Column, 以下 OWC) 型波力発電装置に関する研究が数多く行われてきた²⁾³⁾。大陸の東側に位置する日本では沿岸付近における波浪エネルギーは世界の他の地域に比べて大きくはないことから、より高い波浪エネルギーを有する沖合に設置する事が可能な浮体式 OWC 型波力発電装置が適していると考えられる。

波力発電装置を実海域に設置する事を想定した場合、装置へのエネルギーの吸収や波の反射・透過により波浪場が変化し周囲の地形や生物環境に影響を与える為、装置設置後の周辺波浪場の予測は発電事業の環境影響評価の為に必要不可欠である。また、複数の発電装置を連結して波力発電ファームとして運用する場合においても、装置の最適な配置を検討する際に波浪変化の予測が必要となる。例えば、Diaconu and Rusu⁴⁾は発電デバイスを単純な障害物且つ黒海の波を規則波と仮定する事により、波力発電装置 Wave Dragon を実海域に設置した際の波浪場の変化を予測し、環境影響評価を行っているが、実海域における不規則波が、機構を有する装置に入射した場合はまた異なる波浪場が形成される可能性がある。従って、装置設置後の波浪場の変化を正しく予測する為には、装置周辺の不規則波浪条件下における波浪スペクトルの変形を適切に評価する必要がある。

これまでに著者ら⁵⁾は、発電装置によるエネルギー吸

収率が最大となる波の周波数と入射波のピーク周波数との関係から、装置背後の透過波と装置の反射波のスペクトル形状を明らかにした。

本研究はそれを更に発展させ、規則波条件下において装置模型に対する反射率と透過率を理論的に計算すると共に、装置によるエネルギー吸収率を支配するパラメータの1つである、振動水柱振幅と波浪条件との関係について特徴化した。

2. 実験装置と波浪条件

2.1 実験のセットアップ

図-1 の様な全長 27m、幅 60cm の二次元造波水槽内の無勾配部分の中央に、OWC 型波力発電装置を模擬した発電装置模型を設置した。沖側の水路端に設置してある造波機により規則波浪を造波し装置模型に入射させた。装置模型は既往研究における代表的な寸法により決定した。装置模型は、1/50 スケールで、縦 24cm、横 30cm、幅 60cm である。厚さ 0.5cm のアクリル板により作成した。本研究では、簡略化の為装置の動揺と係留は無視しており、水槽上部に装置模型を完全に固定している。装置を二次元形状とする為に上部の空気孔は水路幅と等しいスリット幅である 60cm×0.5cm とした(図-2)。上部のスリットに発電機を模したタービンは付しておらず、単純な浮体式の振動水柱装置を本研究の検討対象とする。装置模型と造波板間における多重反射は造波機による吸収制御によって防いでいる。装置背後では底面勾配により水深が浅くなり波が砕波する為、波エネルギーは殆ど消散するが装置背後の勾配部分に設置された消波工によって、岸からの反射波を更に低減した。測定したい周波数帯を計測する為に、それぞれ間隔 20cm で設置した容量式波高計を沖側に 4 本、岸側に 1 本設置し水位変動を測定した。これらを基本的なセットアップとし、規則波を入射させた際の装置模型に対する反射率と透過率を求めた。

2.2 波浪条件

本稿では、造波水路中央部に固定してある OWC 型装置モデルに種々の波浪条件を規則波として入射させた(表-1)。波高は 2cm、喫水は 8cm から 1cm 刻みで 12cm まで、周期は 0.6s から 0.1s 刻みで 1.5s までとした。全ケースにおいて 60 秒間測定を行った。

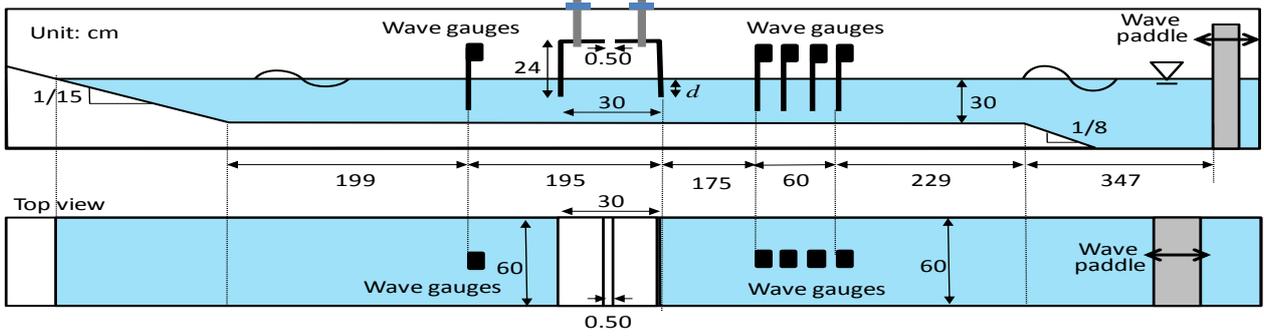


図-1 造波水槽のセットアップ

表-1 実験条件

波高H(cm)	2	サンプリング周波数(Hz)	50
周期T(s)	0.6~1.5(0.1刻み)	サンプリング数	4500
喫水d(cm)	8~12(1刻み)		

2.3 反射率と透過率の定義

本実験において次式で表される入射波と反射波の振幅(それぞれ A_I, A_R)は、4本の波高計から取得したデータを基に最小二乗法により修正した波形をフィッティングさせる事で得た。

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \sigma t + \varepsilon_I) \quad (1)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx + \sigma t + \varepsilon_R) \quad (2)$$

$$\eta = \eta_I + \eta_R \quad (3)$$

また、透過波の振幅(A_T)は岸からの反射波が起こらない様に消波工を設置している為、岸側波高計の水面変位をゼロアップクロス法により波高を算出し、その半分を透過波の振幅とした。反射率(K_R)、透過率(K_T)はそれぞれ以下の様に定義する。

$$K_R = (A_R/A_I) \quad (4)$$

$$K_T = (A_T/A_I) \quad (5)$$

3. 結果

3.1 波長と装置幅の関係

図-2(B:装置岸沖方向の幅 L:入射波周期に対する波長)は、装置幅と種々の入射波周期における波長との関係を示している。本実験の波浪条件では、装置幅に対して1.9~7.8倍の波長の波が入射した。波長が長くなるに連れて波が装置下を透過しやすくなる為、波長は反射率と透過率に影響を与える。図-3では各喫水に種々の入射波浪を与えた場合の反射率を表す。どの喫水でも反射率は波長が長くなるに連れて下がっていき反射率0.1付近で

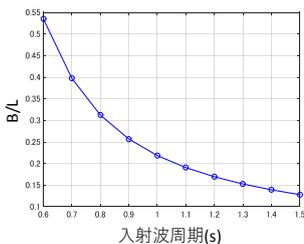


図-2 装置幅と波長

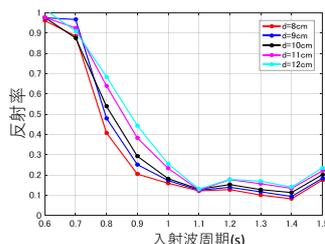


図-3 喫水毎による反射率

底打ちとなる。また、喫水が深くなると装置壁によって波エネルギーが散逸する為、反射率が上昇する。周期0.6, 0.7sの波浪に対しては殆どの波が反射された為、装置模型と造波板間で完全重複波となっていた。

3.2 チャンバー内の水面変位

反射率と透過率の理論解は、中川ら⁷⁾、小島ら⁸⁾を参照した。チャンバー内の体積変化から圧力と温度の振幅を求める為に質量保存則と熱力学の第1法則に則った基礎式(1), (2)を決めた。チャンバー内は理想的な環境としている為、理想気体の状態方程式を基礎式に代入した。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_a V_a}{RT_a} \right) + \frac{dm_a}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$P_a \frac{dV}{dt} + C_v \frac{d}{dt} \left(\frac{P_a V_a}{R} \right) + C_p T_e \frac{dm_a}{dt} = 0 \quad (7)$$

P_a, V_a, T_a : 圧力, 体積, 温度 $\hat{P}, \hat{V}, \hat{T}$: 圧力, 体積,

温度振幅 σ : 波の周期

また、チャンバー内の体積変化は静水位からの変動によって変化する(式 3)。圧力と温度も振動するが水面の振動からの遅れ時間が発生すると仮定した為、

$$P_a = P_0(1 + \hat{P} \sin \sigma(t + \tau_p)) \quad (8)$$

$$V_a = V_0 \left(1 - \frac{a_0 \sin \sigma t}{D_0} \right) \quad (9)$$

$$T_a = T_0(1 + \hat{T} \sin \sigma(t + \tau_t)) \quad (10)$$

温度と圧力の振幅をそれぞれ求める事で位相差が求められる。これらの変数を用いてポテンシャル流れを仮定した際の水位・水平流速・圧力式を図-3に示す3つの領域毎に立て、それらを微小振幅波理論に基づき未知数である $a_{aI}, a_{aR}, \tau_{aR}$ を解く。I~IIIの各領域間における流量と仕事率の連続性を利用し、最終的に a_R, a_{Tr} を数値的に求める。以下にこれら未知数の式を記す。

$$a_{aI} = \frac{2aI \cos \sigma(-t + \tau_p) - C_3 a_0 \sin \sigma(t + \tau_p)}{2 \cos \sigma t} \quad (11)$$

$$a_{aR} = \frac{-C_3 a_0 \sin \sigma(t + \tau_p)}{2 \cos(kB + \sigma t + \sigma \tau_{aR})} \quad (12)$$

$$a_R = \frac{-a_{aI} \cos \sigma t + a_{aR} \cos \sigma(t + \tau_{aR}) + a_I \cos \sigma(-t + \tau_p)}{\cos \sigma(t + \tau_R)} \quad (13)$$

$$a_{Tr} = \frac{a_{aI} \cos(kB - \sigma t) - a_{aR} \cos(kB + \sigma t + \sigma \tau_{aR})}{\cos(kB - \sigma t + \sigma \tau_{Tr})} \quad (14)$$

$$C_3 \equiv \frac{4\gamma P_0 \cos \sigma \tau_p}{D_0 \rho g} \frac{\cosh kh * \sinh k(h-d)}{2k(h-d) + \sinh 2k(h-d)} \quad (15)$$

$$a_0 = \frac{2}{kB} \left\{ a_{aI} \cos(kx - \sigma t + \sigma \tau_I) + a_{aR} \sin\left(\frac{kB}{2} + \sigma \tau_{aR}\right) - a_{aR} \sin \sigma \tau_{aR} \right\} \quad (16)$$

γ : 比熱比 P_0 : 大気圧 k : 波数 σ : 波の周期
 B : 装置幅

装置内部に発生する水面波形を入・反射波各々の振幅を数値的に求める(a_{aI} , a_{aR}). これによって, 装置外の反射波(aR)・透過波(aTr)の振幅求められ, 各領域における波の振幅が明らかとなる(図-4). 従って, 実験値から得られた反射率・透過率の比(K_R/K_T)と式(3)~式(6)の数値的に求めた振幅から得られた反射率・透過率を未知数に含まれる C_3 に適当な値を入れフィッティングさせ, 種々の波浪に対応するチャンパー内の水面変位 a_0 を明らかにした.

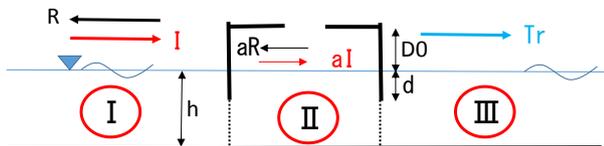


図-4 各領域間の模式図

図-5 は, 喫水毎に周期 0.8~1.5s の波浪を入射させた際のチャンパー内の振幅を表す. どの喫水においても入射波周期 1.4 s の波浪に対して最も振幅が大きくなっている. 即ち本周期(波長)の波が本実験の装置によって最も大きな空気流エネルギーを発生させており, より効率的な波浪から気流へのエネルギー転換が行われているものと考えられる. 周期 1.1s 前後から緩やかなチャンパー内水柱振幅の増大が確認されるが, 1.4s よりも長い周期では急速な振幅の減衰が表れた. この特徴は本実験条件下ではいずれの喫水でも共通して表れた.

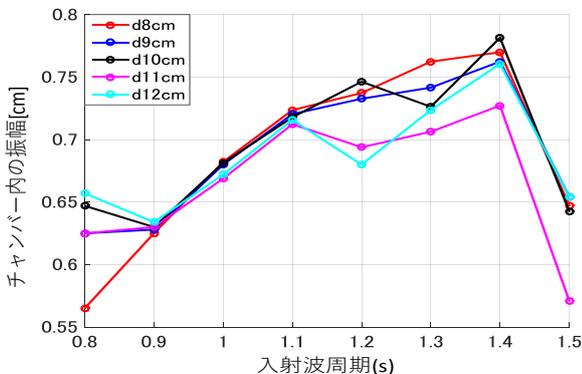


図-5 種々の波浪に対するチャンパー内の振幅

4. まとめ

本稿では, 規則波条件下における理論解と実験による反射率と透過率を利用し, チャンパー内の最大吸収散逸率を示した. 以下に纏めを記す.

(1)本実験の条件下では, 装置幅に対して2倍以上の波を入射させたが周期 0.6, 0.7s の波浪では入射波が殆ど反射波となり, 装置模型と造波板間において完全重複波が形成されていた.

(2)どの喫水においても波長が長くなるに連れて反射率が急激に下がったが, 周期 1.0s 程度の波を境に反射率が 0.1 程度に留まった. また, 喫水を深くすると装置壁下を波が透過する際に波が削られる為, 反射率が上昇していく.

(3)数値的に計算された反射率・透過率の比と実験により得られた反射率・透過率の比をフィッティングさせる事でチャンパー内の振幅を求めた. その結果, 喫水条件に関わらず周期 1.3~1.4s 間において振幅のピーク, 即ち本実験における装置模型において周期 1.3~1.4s 間が最も効率よくエネルギーを吸収できる波浪条件であると言える.

謝辞: 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金から助成を受けた.

参考文献

- 1) 廣井勇: 波動力の測定と其利用, 土木工学会誌第 6 巻第 3 号, p.515-526, 1920
- 2) 高橋重雄, 安達崇: 固定式振動水柱式波力発電システムの設計と実験的検証, 第 35 回海岸工学講演会論文集, p.837-841, 1988.
- 3) He, F. and Huang, Z.: Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters: An experimental study, Ocean Engineering, Vol. 88, p. 618-626, 2014.
- 4) Diaconu, S. and Rusu, E.: The Environmental Impact of a Wave Dragon Array Operating in the Black Sea, The Scientific World Journal, Vol. 2013, p. 1-20, 2013.
- 5) 猿渡 亜由未, 大野 紘史: オフショア振動水柱装置による波浪スペクトル変化の特性評価, 第 31 回 海洋開発論文集, p91-96
- 6) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料 p0248
- 7) 中川寛之, 植木圭一: 防波堤に組み込まれた振動水柱型波力発電装置の一次変換効率に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集 Vol.5(2007) p.155-161
- 8) 小島朗史, 合田良実, 鈴木諭司: 波力発電ケーソンの空気出力に関する理論および実験, 第 30 回海岸工学論文集(1983) p.638-642