

振動水柱型を有する空気室の容積の縮尺影響に関する基礎的研究
 A Fundamental Study on Scale Effects of the Air Chamber Volume
 of OWC Type Power Absorption Model

○平井翔太¹, 居駒知樹², 増田光一², 相田康洋²

*Shota Hirai¹, Tomoki Ikoma², Koichi Masuda², Yasuhiro Aida²

Oscillating water column (OWC) type wave energy converters (WECs) have been studied by a lot of researchers and demonstrated as a full-scale sea test for practical use. However, some problems have remained in putting OWC type WECs into practical use. As one of the problems, it is pointed that difference in scale affects the behavior in characteristics of an air chamber between a full-scale model and a small scaled experimental model, especially in the primary conversion efficiency of WECs. It is still unclear which the cause of effects of the difference in scale is because of the viscosity or the air compressibility. The objectives of this study are to quantitatively investigate how the difference affects the air chamber characteristics such as air pressure, relative water level, and after all the primary conversion efficiency. This study made experimental models of three scales which were $S = 1/1, 1/2, 1/4$ and carried out forced oscillation tests in still water. From the relative water level, we can know air flow rate and we can predict the primary conversion at the air chamber from the flow rate and the pressure. As a result, it was confirmed that the difference in the scale affected the air chamber characteristics.

1. 緒言

振動水柱 (Oscillating Water Column; OWC) 型波力発電装置 (Wave Energy Converter: WEC) は、海洋波のパワーで振動水柱を上下に動かし、それによって空気の往復流を作り出し、空気タービンを回すことにより発電するシステムである。OWC型 WEC には、波パワーを空気パワーへと変換する一次変換と、空気パワーによってタービンを駆動させて電力を得るまでの二次変換がある。OWC 型 WEC の振動水柱 (OWC) の挙動は、上部の空気室内圧力と相互に影響しあい、その圧力はタービン・ダクトを通る空気の流量やタービン負荷と相互に影響しあう非常に複雑な連成システムである¹⁾²⁾。この空気室の挙動は、空気室の体積によっても異なってくる場合もあり、また実機空気室内の挙動を縮尺模型で再現する場合、縮尺の影響があることも報告されている。この影響は粘性によるものであると考えられ、それだけでなく空気の圧縮性によるものであるとも考えられる³⁾⁴⁾。しかし、空気の圧縮性による縮尺影響は理論的な検証によるものが多く、水槽実験によって定量的に調査しているものは少ない。そこで、本研究では基本的な空気室体積の影響と縮尺の影響が空気室内圧力や空気室体積変動にどのような形で現れるのかを水槽実験結果から考察することを目的とする。特に、強制動揺実験により OWC 模型が上下運動する状況で調査する。また、線形ポテンシャル理論を適用した理論計算法によってそれを再現しながら、圧縮性の寄与について若干の考察をする。

2. 水槽実験

日本大学理工学部船橋キャンパスに設置された海洋建築工学水槽にて、静止流体中で上下揺れによる強制動揺実験を実施した。水槽規模は幅 7 m, 長さ 24 m, 常用水深は 1.0m である。OWC 模型は塩化ビニール製の正方形の OWC 水面形状をもつ箱形で、OWC の水の出入り口は模型下部のタイプを採用した。模型は Type A, B と C の 3 つのスケールで製作した。それぞれのタイプ対してさらに 3 つ模型深さ (全高) を設定したため、全 9 体の模型である。

各模型の諸元及び実験条件を Table 1 に示す。空気室高さ、すなわち空気室体積の縮尺影響を調べるために、それぞれの縮尺でさらに 3 つの模型を用意した。空気室上面と側面の 2 点に設置した圧力センサーで空気室内圧力変動を計測し、楕形容量式波高計で空気室内相対水面変動を計測した。また、模型と子油性動揺装置の間に取り付けた 3 分力計で鉛直荷重を計測した。

Table 1 Principal particulars of experimental models and experimental conditions

	Type A		Type B		Type C	
Height of Air Chamber H_A [mm]	L_H	400	L_H	200	L_H	100
	M_H	300	M_H	150	M_H	75
	S_H	200	S_H	100	S_H	50
Draft d [mm]	400		200		100	
Amp. of forced oscillation ζ [mm]	L_ζ	80	L_ζ	40	L_ζ	20
	M_ζ	60	M_ζ	30	M_ζ	15
	S_ζ	40	S_ζ	20	S_ζ	10
Period of forced oscillation T [sec]	1.2 to 3.0		0.85 to 1.2		0.6 to 1.5	

3. 実験結果及び考察

3. 1 縮尺の違いによる比較

Figs. 1-2 に, Type A, B と C それぞれの縮尺模型の空気室高さ設定が $H_A=L_H$ で $\varepsilon=1/50$ の設定時の空気室内圧力と平均相対水位の結果を示す. Fig. 1 の平均水面変動の結果において, Type A との差が高周波数域で若干見られる. 縮尺による差は大きくないが, 横軸が 0.9 以下では明らかな差が確認できる. Fig. 2 では Type A と Type B, C の結果に差が見られるが, Type B と Type C の間にはほとんど圧力の結果に違いはでていない. 本模型サイズにおいて圧力に与える縮尺の差は大きくないことを示唆している.

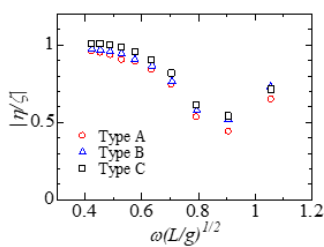


Fig. 1 Relative water level: $\eta, H_A=L_H, \zeta=L_\zeta, \varepsilon=1/50$

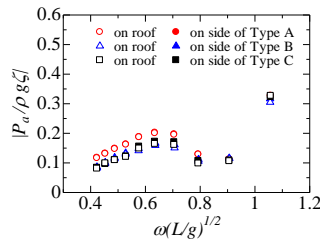


Fig. 2 Air pressure amplitude, $P_a, H_A=L_H, \zeta=L_\zeta, \varepsilon=1/50$

3. 2 位相差と空気圧縮率

Figs. 3 は, 各モデルの空気室内相対水位変動と空気室内圧力変動の位相差を示している. 位相差はほぼ-0.5 に近い値を示した. これは, 内部圧力が減衰力成分として働いていることを考慮すれば妥当な結果である. しかし, 厳密には-0.5 よりも少し大きな値となる. これは圧力全てが減衰力成分に寄与するのではなく, 慣性力あるいは復原力成分として寄与していることを意味する. これは空気の圧縮による復原力成分によるものと推察される. 位相差は高周波数帯において-0.5 から離れている. このことから空気室体積変動の速度が大きいほど圧縮性の影響が強くなることになる.

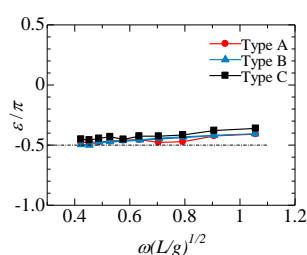


Fig. 3 Phase difference between pressure and water level

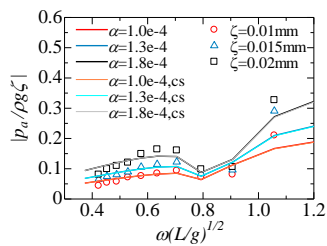


Fig. 4 Air pressure amplitude (Type C)

4. 計算結果との比較

実験の結果から, 空気室内の圧力変動と水面変位に位相差があるという結果を得た. そこで理論計算においても位相を考慮した計算を行う. 居駒ら⁵⁾の方法により, 周波数領域での一次変換を求める. 本手法では, 空気室内の自由表面条件を満足した Green 関数を適用しながら, 物体表面上の速度ポテンシャルと同時に,

空気室内圧力と空気室内水面変位を未知変数として境界積分方程式を解いている. タービンや発電機の負荷を模擬した負荷係数を導入している. 複素数で与えられる負荷係数は α として (1) 式のように導入し空気室内の圧力と自由表面の圧力が釣り合っているという力学的条件と運動学的条件を同時に満たした自由表面条件を与える. Figs. 3 から, 特に値の大きな Type C においては最大で-0.47 であり, degree に変換すると-85 度である. この結果を考慮して αc と αs を考慮して理論値計算を実施した.

$$K\phi - \frac{\partial\phi}{\partial z} = \alpha \frac{P_0}{\rho g V_0} \cdot v \quad (1)$$

P_0 : 空気室内初期圧力, V_0 : 空気室内初期体積,
 $v(t)$: 空気室体積変動, γ : 比熱比 1.4,
 g : 重力加速度, ρ : 密度, ω : 波周波数

Figs. 4 に Type C の, それぞれ強制動揺振幅の違いを比較しながら空気室内圧力の実験値を計算結果と比較した. ここでは, 凡例中で cs が付いた時の結果とそれがないときの結果の比較が重要である. 両者は実線と破線の比較となるが, グラフ上では全く重なっている状態であり, その差はみられない. これは, すくなくとも本理論計算法では-85 の位相差となる圧縮影響は全く圧力特性等に影響していないことを意味する.

5. 結言

本論文では基本的な形状の OWC 模型を用いた強制動揺実験の基本的な項目についてまとめ, 考察を行った. また, 位相差の結果から空気の圧縮影響が若干ではあるが発生していることが示唆されたため, 理論計算によって, 圧力に与えるその影響の程度を調べた. その結果, 今回の実験程度の復原力の影響では圧力特性や水面変動特性に影響が現れない結果となった.

今後はさらに実験結果を整理していく. それを基にして, OWC 装置の縮尺影響や圧縮影響の程度などを考察していく予定である.

6. 参考文献

- [1] 高橋重雄, 安達宗, 中田博昭, 小根田秀明, 加藤久雄, 鹿籠雅鈍: 波力発電ケーソン防波堤の現地実証試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, pp.21-54, 1992.
- [2] 大澤弘敬, 鷲尾幸久, 宮崎剛, 堀田平, 宮崎武晃: 波浪エネルギー利用技術の研究開発—沖合浮体式波力装置「マイティホエール」の開発—, 海洋科学技術センター, 2004
- [3] Kinoshita T., Masuda K., Miyajima S. and Kato W.: Effects of air compressibility in an air-chamber on a performance of a fixed O.W.C. Type Wave Energy Absorber, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.157, pp.211-216, 1985.
- [4] Falcao A.F. and Henriques J.C., "Oscillating Water Column wave energy converters and air turbines: A review", Renewable Energy, Vol. 85, pp.1391-1424, 2016.
- [5] 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, 日本船舶工学会論文集, 第12号, 2011S-OS2-7, 2011.