

発電機を装備した固定式 OWC 型波力発電装置のエネルギー変換効率

村上 天元^{*1}, 今井 康貴^{*1}, 永田 修一^{*1}, 高尾 学^{*2}, 瀬戸口 俊明^{*1}

Energy Conversion Efficiency of a Fixed OWC-Type Wave Energy Converter with Generator

Tengen MURAKAMI^{*1}, Yasutaka IMAI^{*1}, Shuichi NAGATA^{*1}, Manabu TAKAO^{*2} and Toshiaki SETOGUCHI^{*1}

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

^{*2}Department of Mechanical Engineering, Matsue National College of Technology
14-4, Nishiikuma, Matsue, Shimane, 690-8518, Japan

Abstract

A fixed oscillating water column (OWC)-type wave energy converter is composed of an air chamber, an air turbine and a generator. In this unit, the energy conversion process is divided into two main steps, the primary conversion in an air chamber and the secondary conversion of the turbine. For the practical application of a fixed OWC-type wave energy converter, it is necessary to develop a design method which can consider the characteristics of incident wave motion, the motion of the internal free surface affected in the structure such as a partly submerged wall, the fluctuation of air pressure in an air chamber, and the rotation of the air turbine. On the other hand, the impulse turbine as the secondary conversion device in the OWC unit is expected to achieve high efficiency throughout a wide flow rate range. In this paper, the authors conducted the 2-dimensional wave tank tests in regular waves by means of the model OWC equipped with the impulse turbine and a generator to obtain the experimental data needed to make this design method. As the results, the effects of the electric resistor and the rotational speed ratio between the generator and the turbine on the primary conversion and secondary conversion efficiencies are clarified experimentally.

Key words : Wave energy, Oscillating water column, Impulse turbine, Primary conversion, Secondary Conversion

1. 結 言

振動水柱 (OWC) 型波力発電装置は、空気室と空気タービンから構成されて、台風等の異常海象下では、空気室壁の弁を開けて空気室内の空気を大気開放することが可能なため、安全な装置として認識されており、沿岸固定式の場合はタービン・発電機がケーソン上部に据え付けられるため、保守が容易となる。

OWC 型装置のエネルギー変換過程は、波浪の上下動を空気の振動流に変換する一次変換 (Liu, et al., 2008) と、空気の振動流をタービンの回転エネルギーに変換する二次変換 (Takao, et al., 2012) とに分けられる。なお、二次変換装置としてウェルズタービンと衝動タービン (Setoguchi, et al., 2001) があるが、広い流量範囲で高効率を維持できる衝動タービンを搭載した OWC 型装置に関する報告は少ない。

筆者らの一連の研究は、固定案内羽根を有する衝動タービンを搭載した固定式 OWC 型波力発電装置の高効率化を目的として、空気室奥行および波長が一次および二次変換効率に及ぼす影響を実験的に検証し (村上他, 2016)、さらに、衝動ロータの入口 (出口) 角、案内羽根枚数および案内羽根設定角を種々変更した規則波中 2 次元水槽実験も実施した。但し、これらの実験に用いた OWC 模型は発電機を搭載しておらず、タービンはモータで強制回転させた。本報告では、発電機を装備した固定式 OWC 型波力発電装置の一次および二次変換効率に及ぼす発電機・タービンの回転速度比と電気抵抗の影響について述べる。

原稿受付 2017 年 8 月 4 日

^{*1} 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)

^{*2} 松江工業高等専門学校 機械工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)

E-mail of corresponding author: murakami@ioes.saga-u.ac.jp

2. 実験装置

図1は実験に用いた固定式 OWC 型波力発電装置の模型を示す。模型は、長さ 18.5 m、幅 0.8 m、水深 0.8 m の二次元水槽の端に設置し、もう一方の端に設置してある吸収制御式のプランジャー型造波機によって、波高 0.1 m の規則波を発生させて実験を行った。空気室の奥行は 700 mm、カーテンウォールの厚さおよび没水深さはそれぞれ 5 mm および 100 mm である。タービンケーシング内径は 170 mm、ハブ比は 0.7 である。なお、タービン軸端にはプーリーとベルトを介して発電機が設置されている。図2は空気室上部に設置した圧力計および波高計の配置を示す。空気室上部開口部は空気室中央に位置し、波高計は左舷側 3 箇所と右舷側 2 箇所に設置した。

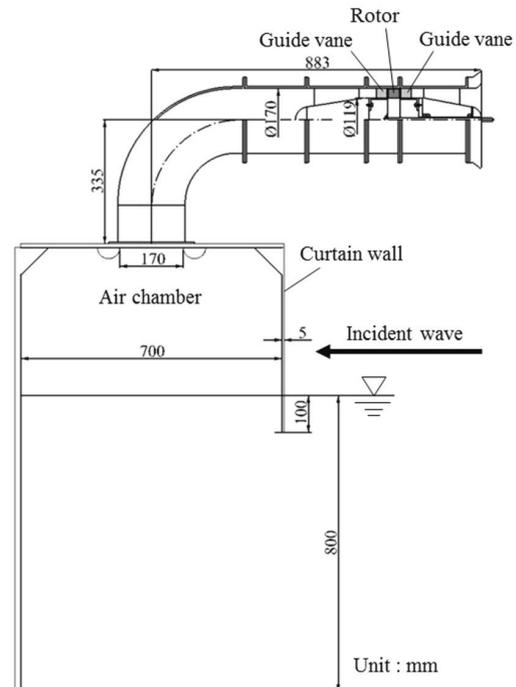


図3はタービンの形状を示す。ロータの翼枚数 Z_r は 30 枚、単段の案内羽根枚数 Z_g は 26 枚であり、ロータの入口（出口）角 γ は 60 deg., 案内羽根設定角 θ は 30 deg. である。

本実験では、二次変換効率を求めるため、図4に示すように、タービンを AC 同期モータと入れ替えて、プーリーおよびベルトを含む発電機部のエネルギー変換効率を計測した。なお、ここでのタービン軸の時間平均回転速度は、上述の規則波中試験結果と一致している。

3. 実験結果

図5は、タービンをモータで強制回転させて、タービン回転速度を 700 rpm 一定に保って得られた従前の実験結果であり、ロータ入口(出口)角 γ が 70 deg., 60 deg. および 50 deg. の場合の一次変換効率 η_1 、二次変換効率 η_2 および η_1 と η_2 の積 η を比較している。横軸は波長 λ と空気室奥行 L との比である。図5に示すように、 γ がいずれの場合も効率 η のピーク値は概ね $\lambda/L = 6.3$ で得られていることから、後述の発電実験は $\lambda/L = 6.3$ 一定の条件で実施した。

図6は、発電機とタービンの回転速度比 N_g/N_i が 0.5, 0.6 および 0.8 の場合の効率を比較している。ここで、 N_g は発電機の時間平均回転速度、 N_i はタービンの時間平均回転速度を表す。横軸の電気抵抗 R は 410 Ω から、610 Ω , 850 Ω , 1220 Ω , 1460 Ω , 1820 Ω , 2070 Ω , 2430 Ω , 3040 Ω , 3280 Ω および 3640 Ω に変化させた。また、図7は発電機部の効率 η_3 を表し、効率 η_1 , η_2 , η および η_3 は以下の式で定義される。

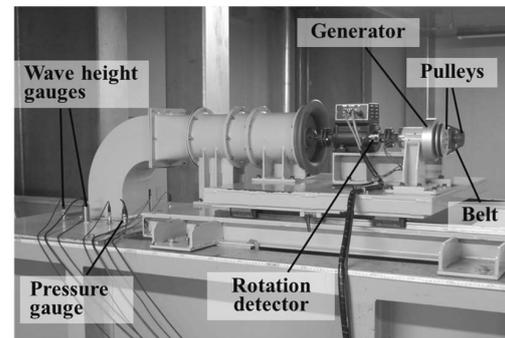


Fig. 1 Model OWC with impulse turbine and generator.

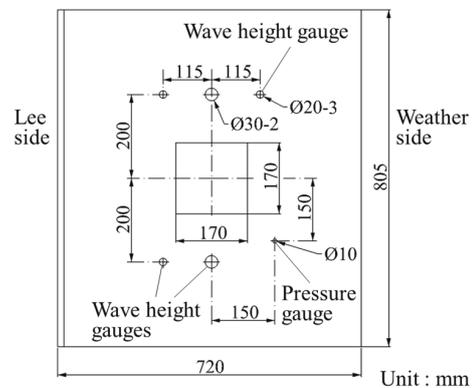


Fig. 2 Positions of pressure and wave height gauges.

$$\eta_1 = \frac{P_{air}}{P_{wave}} \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta}{\eta_1} = \frac{P_{in}}{P_{air}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{wave}} \cdot \frac{1}{\eta_3} = \eta_1 \eta_2 \quad (3)$$

$$\eta_3 = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

ここで、 P_{air} 、 P_{wave} 、 P_{out} および P_{in} はそれぞれ時間平均の空気室内空気パワー、入射波パワー、発電機出力およびモータ入力を表し、これらのパラメータは以下の式で定義される。

$$P_{air} = \frac{S}{T} \int_0^T p(t) \frac{\partial \zeta}{\partial t} dt \quad (5)$$

$$P_{wave} = \frac{1}{2} \rho_w g \zeta_i^2 C_g W \quad (6)$$

$$P_{out} = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

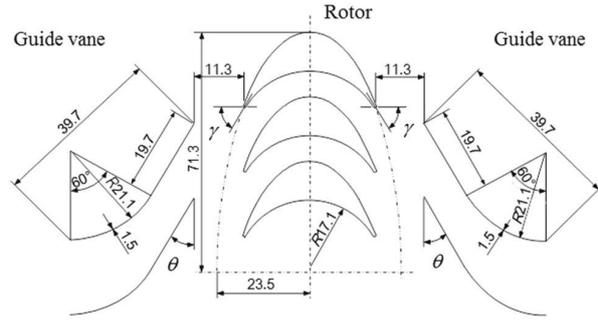
$$P_{in} = T_0 \omega \quad (8)$$

S 、 T 、 p 、 ζ 、 ρ_w 、 g 、 ζ_i 、 C_g 、 W 、 V 、 T_0 および ω は、空気室水線面積、波周期、空気室内圧力、空気室内 5 箇所平均水位振幅、水密度、重力加速度、入射波振幅、群速度、空気室幅、誘起電圧、タービン出力トルクおよびタービン角速度をそれぞれ表す。

図 6 に示すように、電気抵抗 R が 410 Ω から 3040 Ω まで増えるに連れて、速度比 N_g/N_t がいずれの場合も二次変換効率 η_2 は単調増加し、 $N_g/N_t = 0.5$ の場合に効率 $\eta (= \eta_1 \eta_2)$ の最大値 0.27 が得られた。この値 $\eta = 0.27$ は、図 5 に示したモータ駆動タービン試験結果の η の最大値と概ね一致している。

一方、図 7 のプーリおよびベルトを含む発電機部の効率 η_3 は、 R が 1460 Ω から 3040 Ω の範囲で R の増加に伴い低下しているが、これは電流値の低下によるものである。

図 8 は、空気室内の(a)圧力振幅および(b)水位振幅を示すが、速度比 N_g/N_t および電気抵抗 R の影響は殆ど見られず、このことは図 6 に示したように一次変換効率 η_1 が N_g/N_t および R によらずほぼ一定値であったことに対応している。



Unit : mm

Fig. 3 Configuration of rotor and guide vane.

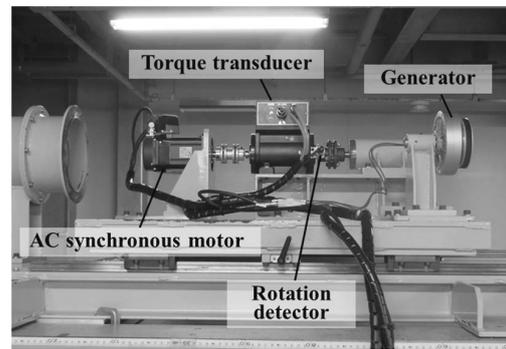


Fig. 4 Arrangement of test devices to measure efficiency of generator, pulleys and belt.

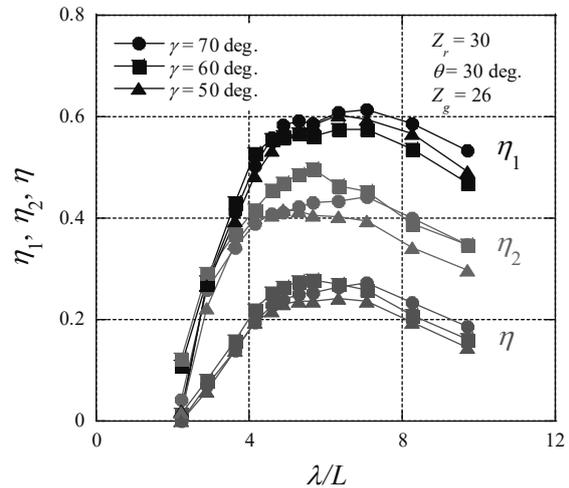


Fig. 5 Changes in efficiencies at time-averaged rotational speed $N_t = 700$ rpm.

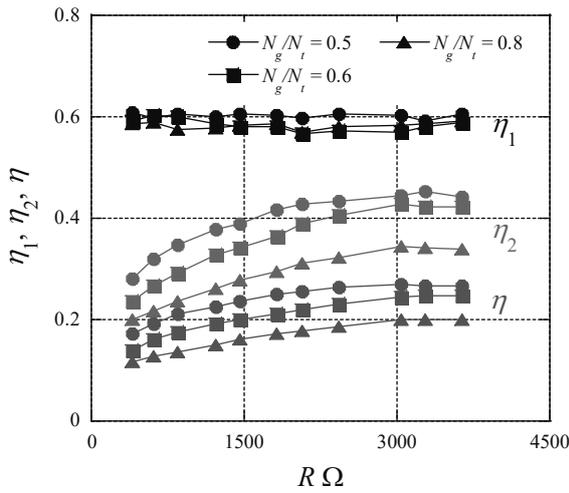


Fig. 6 Change in efficiencies due to electric resistor.

次に, 図9は時間平均タービン回転速度 N_t の R による変化を比較している. 速度比 N_g/N_t がいずれの場合も抵抗 R の増加に伴い回転速度 N_t は単調増加し, $N_g/N_t = 0.5$ の場合に最も高い値を示した.

さらに, 図 10 はタービン性能を示し, 上述の往復気流中の発電試験結果と空気室下部をアクリル板で塞ぎ送風機で定常流を発生させた波の影響が無い場合の試験結果を比較している. なお, トルク係数 C_T , 入力係数 C_A および横軸の流量係数 ϕ は以下の式で定義される.

$$C_T = \eta_2 C_A \phi \quad (9)$$

$$C_A = \frac{\Delta P}{\rho(v_a^2 + U^2)/2} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{v_a}{U} \quad (11)$$

ここで, Δp , ρ , v_a および U はそれぞれタービン前後の全圧差, 空気密度, タービン部軸流速度, 平均半径 $r [= D(1+\nu)/4$, ν : ハブ比] における周速度を表す.

図 10 に示すように, 運転流量範囲は速度比 N_g/N_t が小さいほど, 図 9 のタービン回転速度 N_t の増加に連れて低流量側へ移行し, その結果, $N_g/N_t = 0.5$ の場合に定常流試験結果のピーク値とほぼ同レベルの二次変換効率の最大値 $\eta_2 = 0.45$ が得られた.

4. 結 言

本研究では, 衝動タービンと発電機を装備した固定式 OWC 型波力発電装置のエネルギー変換効率に及ぼす発電機・タービンの回転速度比および電気抵抗の影響を実験的に検証した. 回転速度比は $N_g/N_t = 0.5, 0.6$ および 0.8

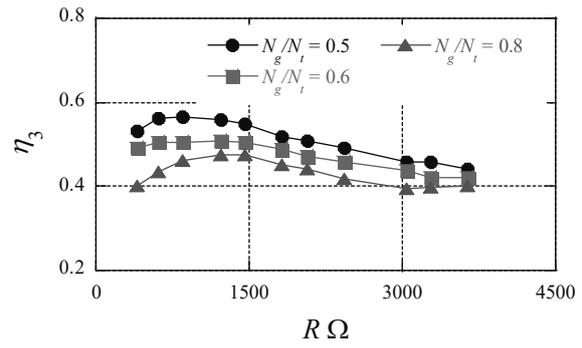
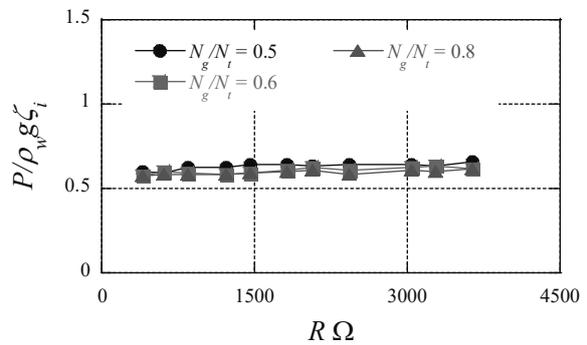
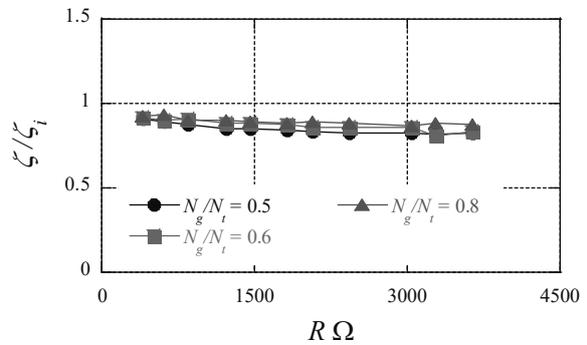


Fig. 7 Energy conversion efficiency of generator, pulleys and belt.



(a) Pressure amplitude.



(b) Water surface elevation.

Fig. 8 Changes in amplitudes of pressure and water surface elevation.

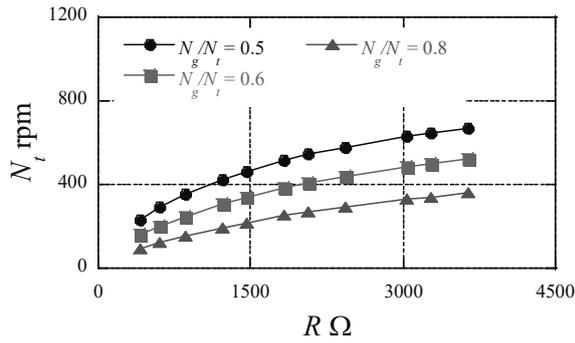


Fig. 9 Variation of time-averaged rotational speed of turbine due to electric resistor.

の3通り、電気抵抗 R は 410Ω から 3640Ω まで段階的に変化させ、その結果、高いタービン回転速度が得られる $N_g/N_t = 0.5$ および R が約 3040Ω の場合に、定常流試験結果とほぼ同レベルの高い二次変換効率 45% が得られることを確認した。

謝 辞

本研究の一部は、経済産業省/三菱総合研究所受託研究「新エネルギー等共通基盤整備促進事業」の一環で実施された。

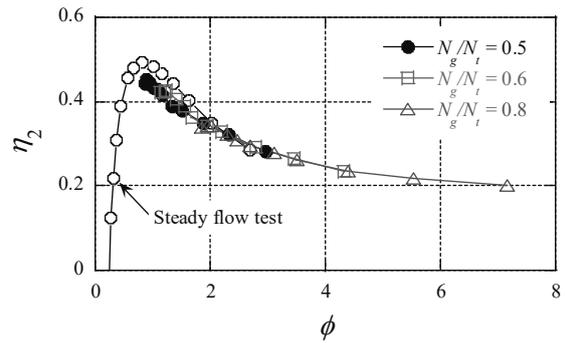
文 献

Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion, Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (2008), pp.350-356.

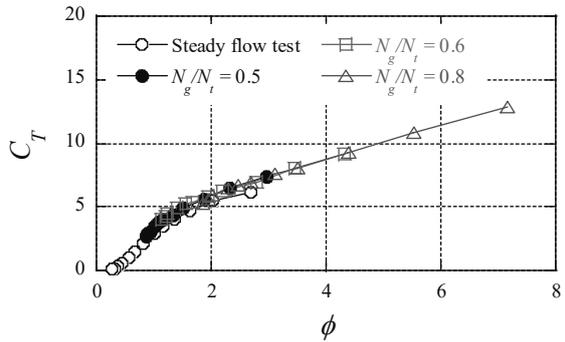
Takao, M., Setoguchi, T., Air Turbines for Wave Energy Conversion, International Journal of Rotating Machinery, Vol.2012(2012), Article ID 717398, doi:10.1155/2012/717398, 10 pages.

Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M., Kaneko, K., A Review of Impulse Turbines for Wave Energy Converter, Journal of Renewable Energy, Vol.23(2001), pp.261-292.

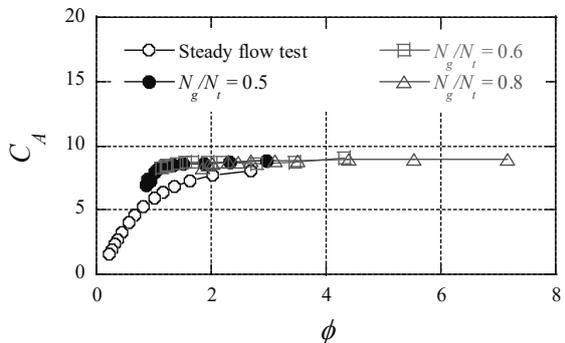
村上天元, 今井康貴, 永田修一, 高尾学, 瀬戸口俊明, 固定式振動水柱型波力発電装置の1次および2次変換効率に関する実験的研究, ターボ機械, Vol.44 (2016), No.6, pp.364-371.



(a) Secondary conversion efficiency.



(b) Torque coefficient.



(c) Input coefficient.

Fig. 10 Comparison between steady air flow and oscillating air flow on turbine performance.