

洋上浮体型波力発電装置の大型化

渡部 富治^{*1}, 浦島 三朗^{*2}, 河合 秀樹^{*3}

Floating type large scale wave energy converter for offshore use

Tomiji WATABE^{*1}, Saburoh URASHIMA^{*2} and Hideki KAWAI^{*3}

^{*1} T-Wave Consultant, 5-23-3, Misono, Noboribetsu, JAPAN

In order to get low cost electricity, the offshore Pendulor of large scale had been studied by Muroran I.T. This idea was transferred to the OWC wave converter to improve it on the saving cost by multiplying with OWC and Pendulor. We named it New OWC which is simple and robust same as the OWC and highly efficient like as the Pendulor. The principle of the New OWC is shown here and a 1/25 scale model of it was made for the experimental study with a 2D wave tank. The test could come to no goal but it clarified fundamental characteristics of the New OWC for future investigations.

Key Words : New wave converter, Cost reduction, OWC, Pendulor, Combined system, Antenna

1. はじめに

早くから波力発電の実用化が期待されながら、コスト高がネックになり、まだ実現したとは言えない。一対策例として、洋上浮体型振り子式波力発電 (Float Pendulor : 廉価で高効率) が提案されている。しかし独自油圧変速機 (HST) の技術習得が条件。

そもそも定評ある OWC 波力発電装置 (水柱振動型) の効率改善ができれば、すべては解決する。この手段として、Floating Pendulor の高効率性を OWC に適用してみることにした。実現すれば、HST 無用 (高度な生産技術も不要)、シンプル・ローバストな構造の下で高効率発電 (大容量) が可能になる。

発電原理にアンテナ方式採用。動力伝達メディアは空気。(高効率性と嵐に対する耐久性の根拠になるもの。)

これらの条件を受け入れる発電システム構造を創出し設計した。システム特性を解析し、システム最適化設計を行った。さらに実用機を想定した発電装置設計を試み、設計例を提示した。1/25 スケールモデルを製作、2次元造波水槽による波浪エネルギー取得効率の実験を行った。研究途上であるが以上につきまとめた。

2. New OWC の構築

アンテナ方式は、先ず可動物体 (振動体) に対し、波と共振状態の振動をするように波力駆動し、次にその振動を高速の定常回転に変換し、発電機駆動するもの。(振り子を対象にした海域実験で、推測発電効率 40%~60% を実測済みであった) ⁽¹⁾

OWC では、水柱が可動物体、水柱の①重力方向変位による復元力 (hydro-dynamic: K_h) および水柱の②送風ピストン作用による反力 (mechanical: K_m) と可動物体質量 ($m_m + m_h$) との関係から共振特性が決まる。OWC の構造をスケルトンで示すと図 1 になる。

図 1 では、水柱 (mechanical mass: m_m) と付加水 (added water mass: m_h) が一体になり振動し、これに対する 2 つの復元力ばね (ばね定数: K_h および K_m) が働く。水柱振動による空気圧縮作用が生まれ、それに伴う空気流によりタービン発電機を駆動、電力生産する。この場合の水柱振動は、式(1)の固有振動数 ω_0 になる。

* 原稿受付 2013 年 6 月 13 日

^{*1} 元 室蘭工業大学

E-mail: t1watabe@rose.ocn.ne.jp

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_h + K_m}{m_m + m_h}} \tag{1}$$

かつ 式(2)の共振状態

$$\omega_0 = \omega \tag{2}$$

ここで ω : 波浪の振動数

になるとき発電量が最大になるので, これを最適運転条件の一つにする. ⁽²⁾

しかし従来の OWC 構造は, 式(1)の分母が小さく, かつ分子が非常に大きくなる. この理由で, 式(2)が成立しない. 結果として

$$\omega_0 > \omega \tag{3}$$

になっていた. 対策として, 式(1)の分母を大きくすると共に, その分子を小さくすることにより, 式(2)の成立を図ることを試みた. このアイディアは, 従来 OWC 構造では実現困難と判断した. ここでは次章の新しい構造 (図 2) を創出し検討した.

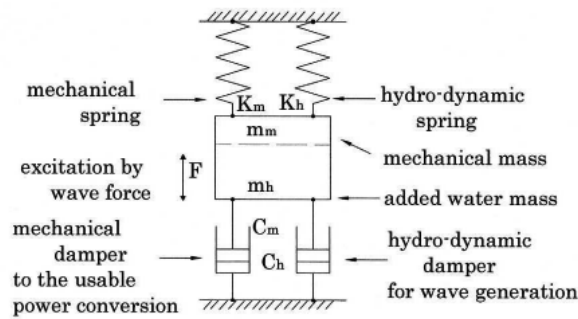


図 1 アンテナ原理からみた OWC 構造

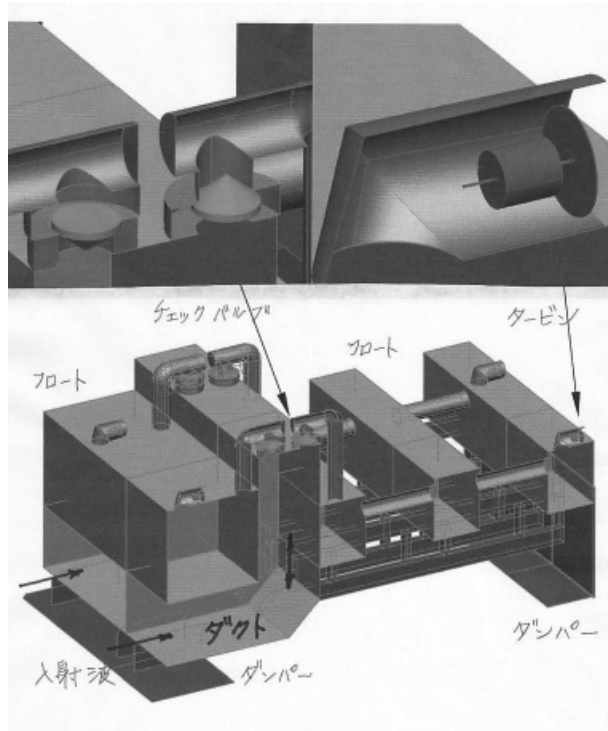


図 2 New OWC の構造 (特願 2010-153409)

3. New OWC 構造

図2について説明する。浮体型 L 型水室（ダクト）内で、入射波力により往復運動する水のピストン作用により、吸入タンク（空気入り口にタービン発電機がつく）から空気を吸い込み、吐出タンク（空気排出口にタービン発電機がつく）へ空気を送り込む。タンクの入排口で、空気流がタービン発電機を駆動し発電する。これによれば、①運動体質量（L 型ダクト内水と付加水と一緒に運動する水の総量）が大きくなり、②反対に水ピストンに働く空気圧ばねのばね定数は小さくなる。目的の固有振動数を持つ実用構造が容易に実現する。空気タンクは、浮力タンクを兼用できる。ただし、空気流は一方向になるから、整流弁が必要、かつタービンも一方向流型を使用することになる。

図2 New OWC につき、次のようにまとめる。⁽³⁾

(1) L 型ダクト内で入射波と共振運動する水柱エネルギーを利用し、一方向空気流れを作る。この空気流でタービン発電機を駆動し電力生産する。

(2) この水柱運動が、式(2)を満たすようにシステムを構成する。

(3) 空気流は低圧・大流量である。整流弁による僅かなエネルギー損失も効率低下に対し無視できない。高効率整流弁の開発が、この研究における鍵になっている。

(4) 図2では、2個のチェックバルブにより整流弁を構成している。バルブ前後の圧力差で開閉する自動弁。弁の圧力損失をどこまで減らせるか、かつ耐久性のクリアが前提になる。

(5) 今回は浮体型なので、浮体安定のため、振子式における active damping 法⁽⁴⁾を参考にした。しかし、空気タンク搭載の影響がマイナス作用し、振子式よりも効果減少になりやすい。

4. New OWC におけるパラメータ

ダクト内水柱に対する力の平衡から、式(3)の運動方程式が成り立つ。

$$(m_m + m_h)\ddot{x} + (N_0 + N)\dot{x} + (K_h + K_m)x = F_0 \sin \omega t \quad (3)$$

ここで、 x : 水柱のダクト軸方向変位、 N_0 : 水柱の造波ダンピング係数、 N : 水ピストン負荷のダンピング係数、 K_h : 水柱の重力方向復元力ばね係数、 K_m : 水ピストンに働く空気弾性によるばね定数、 ω : 入射波の円周期

m_m : 水柱運動部質量は式(4)で示される。

$$m_m = \rho y_2 B l_d \quad (4)$$

ρ : 水の密度、 y_2 : ダクトの縦幅、 B : ダクトの横幅、 l_d : 水柱の入口から L 字型垂直部端面までの全長

付加水の質量 m_h は、式(5)に示される。

$$m_h = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho \sin k_n h}{k_n \left(k_n h + \frac{1}{2} \sin k_n h \right)} \times \frac{B}{k_0} \{ \sin k_n (h - y_1) - \sin k_n (h - y_1 - y_2) \} \quad (5)$$

K_n : 式(6)の関係がある波数、 h : 水深、

$$\frac{\omega^2}{g} = -k_n \tan k_n h \quad (6)$$

g : 重力加速度

N_0 : 水柱の造波ダンピング係数は式(7)。

$$N_0 = \left(\frac{4\rho\omega}{k_0 Z_0} \sinh k_0 h \right) \times \frac{B}{k_0} \{ \sinh k_0 (h - y_1) - \sinh k_0 (h - y_1 - y_2) \} \quad (7)$$

ここで k_0 は式(8)の関係がある波数.

$$\frac{\omega^2}{g} = k_0 \tanh k_0 h \quad (8)$$

$$Z_0 = \sinh 2k_0 h + 2k_0 h \quad (9)$$

N : 水ピストン負荷のダンピング係数は式(10).

$$N = \frac{a_1^3 \dot{x}_1 \rho_1}{(95.8 \times 10^{-2} a)^2} \quad (10)$$

ここで a_1 : 空気室静水表面積, ρ_1 : 空気密度,

a : タービン空気通過路面積, x_1 : ダクト内水柱直角断面の入口からの距離.

$$N_0 = N \quad (11)$$

のとき, impedance match といい, 同時に水柱運動が共振状態にあると, 発電効率は最高になる. (最適条件)
以上の解析結果を用いて, New OWC 200kW 1/25 スケールモデルの設計・製作を実行した.

5. 1/25 スケールモデル

図3は New OWC 200kW の 1/25 scale model (浮体型) である. 図4に, その構造側面図を示した. 水深: $h=0.5\text{m}$, 幅: $B_w=0.6\text{m}$ の 2次元造波水槽に浮かべ, 波高: $H=4\text{cm}, 6\text{cm}, 8\text{cm}$, 周期: $T=1.0\text{s}, \sim 2.0\text{s}$ までの間 0.1s ずつ変化させ, 規則波入力によるエネルギー変換効率測定を行った. 図3では, 水槽右端で造波された波が, 左へ向かって進み, New OWC の右端入口 (水面下) からダクト内に入る.

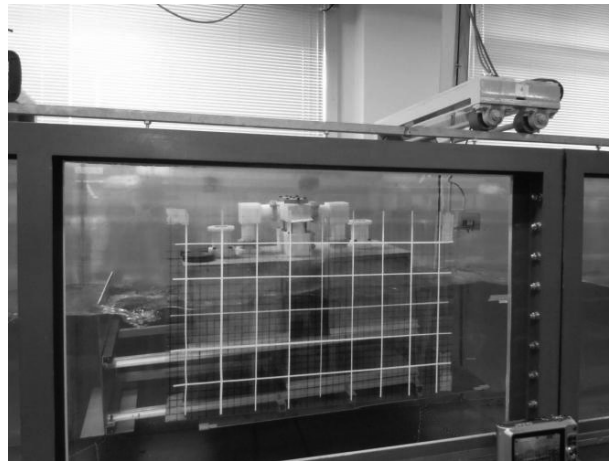


図3 200kW New OWC 1/25 scale model (苫小牧高専)

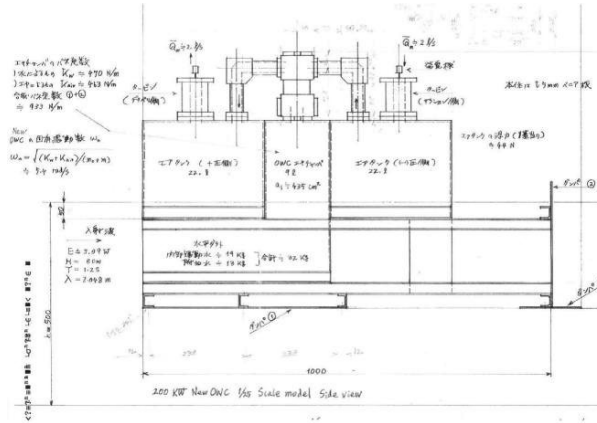


図4 200kW N-OWC 1/25 model side view

入射波高 H をダクト入口前方で計測し、式(12)により入射パワー E を計算した。

$$E = \frac{1}{4}TB \left(\frac{H}{2} \right)^2 \rho g \frac{\omega}{k_0} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \tag{12}$$

今回の代表的実験条件のとき、 $E=3.09W$
 ($H=0.08m$, $T=1.2s$, 波長： $\lambda=2.048m$)

6. 水槽実験

図5は、浮体型の New OWC が、波浪海面ではほぼ静止状態を保つための波力利用原理を説明したもの。位相差のある2つの波を組合せ、浮体に対する波力の打ち消し (X, Y & Pitching direction) をする。振子式に応用し成果を得ていた方式。⁽⁴⁾

今回の New OWC に対し、この方式は予期した効果が現れなかった。波エネルギーは浮体に吸収され、結果として浮体が揺動し、ダクト内に入る波エネルギーは減少した。発電効率が大幅に低下し、やむなく実験方針変更を含め検討した。ついに浮体型を研究対象から外し、代わりに固定型に変更して実験を継続した。

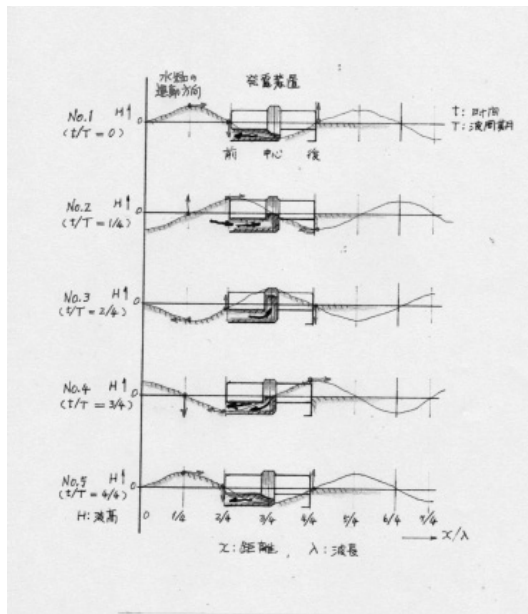


図5 Stabilizing of the Body by Active Damping

こうした経過を経て、装置が浮体型から固定型に入れ替わった。図6はこの写真で、装置下部にフレームを挿入し、重りで装置を、フレームに向け押し付け、水槽底面上に装置が固着している。これにより、波浪による浮体静止が不要になり、New OWC 本来の研究に専念することになった。

対象の装置は、入力3Wクラスである。タービンおよび発電機は市場から入手できなかった。軸流タービンを設計・自作した。しかしタービン出力測定を諦め、タービンへの空気入力測定を試みた。タービン入口の圧力と流量測定をして、入力を計算した。

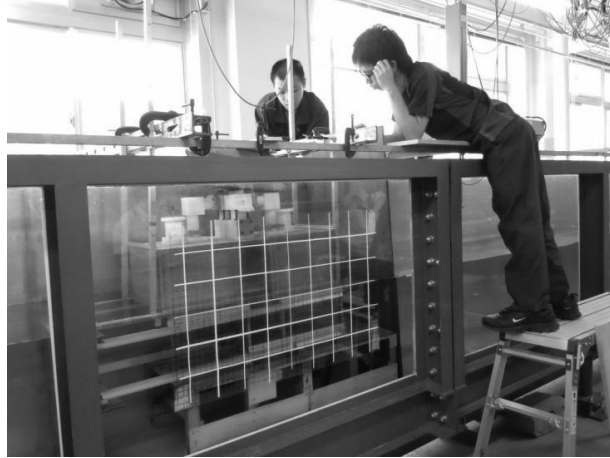


図6 The New OWC being fixed on the bottom

7. 実験結果および考察

式(12)の入射波パワー E は、装置により入排口の空気流パワー P_{air} に変換される。 P_{air} は入排口における合計になり、式(13)で示される。

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho a_o (v_{air1}^3 + v_{air2}^3) \quad (13)$$

ここで a_o : 入排口絞りの面積, v_{air1} : 入口絞りの流速, v_{air2} : 排出口絞りの流速
 v_{air1} : 入口絞りの流速は 式(14)で示される。

$$v_{air1} = \sqrt{2\Delta p_1 / \rho} \quad (14)$$

ここで Δp_1 : 入口絞りの圧力差

v_{air2} : 排出口絞りの流速は 式(15)で示される。

$$v_{air2} = \sqrt{2\Delta p_2 / \rho} \quad (15)$$

ここで Δp_2 : 排出口絞りの圧力差

入射波パワー E と、入排口の空気流パワー P_{air} との比を変換効率 η で示すと式(16)になる。

$$\eta = P_{air} / E \quad (16)$$

実験結果を上記方法で整理し表1に示した。なお測定設備が不十分であったため、圧力差測定の精度低下に対する対策ができぬまま実験した。この理由から、表1には代表的データ(実験周期 $T=1.2s, 1.5s, 1.9s$)にとどめた。

表 1 実験結果

H cm	H_{incid} observe cm	H_{chamb} cm	P_{air} output W	E input W	η eff. %	T peri s
4.0	2.49	0.3	0.004	0.25	1.6	1.2
	4.06	0.9	0.022	0.85	2.6	1.5
	4.64	1.4	0.5	1.28	39	1.9
6.0	3.99	0.6	0.02	0.65	3.1	1.2
	5.94	1.15	0.085	1.82	4.7	1.5
	7.01	3.0	1.92	2.93	65.5	1.9
8.0	5.21	0.8	0.02	1.1	1.8	1.2
	7.84	2.6	0.24	3.17	7.6	1.5
	9.41	3.6	4.14	5.28	78	1.9

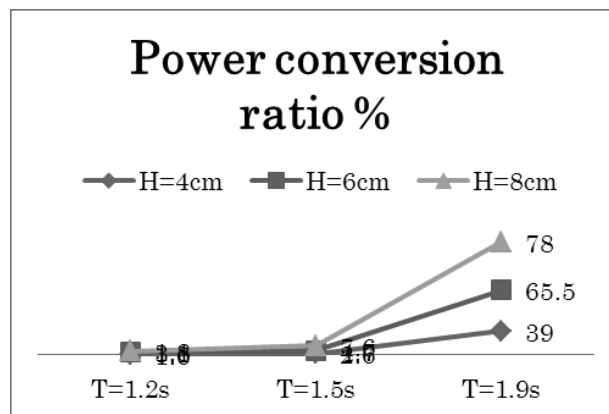


図 7 Efficiency of the New OWC η

表 1 の結果について考察する。

苦勞の末に得た、新しい装置に対する最初の実験結果で、ほんの一部が覗けたという段階のものである。効率（ピーク値 78%）が極めて高く、今後の検討を待って判断するのが良いと思われる。

しかし、発想の狙いである“アンテナ理論の実現”の方向に、目的とする発電コスト低減が存在するらしいことに間違いなさそうである。

特性に影響を及ぼしたのものには、まず波周期 T 、波高 H があり、より T の影響を注目していた。表 1 では、パワー E の影響が目立った。次が考えられる。

モデル実験のパワーレベルは極めて低い。整流弁によるエネルギー損失は見視できぬ状況にあった。弁本体質量に対し、空気力があまりにも微弱であった。それは空気室内の水柱振動が、最適値 $1/2$ に対し、 $1/2.6$ 以下であったことから分かる。海域運転では、この心配がない。

8. 結言

- (1) 浮体型は装置に入射する波エネルギーが減少し、目的の実験を諦めざるを得なかった。対策が必要である。
- (2) 定型に変更し、New OWC の有効性がほぼ確認された。しかし、研究は初期状態にあり、今後の継続が大切であると考ええる。
- (3) 浮体の波浪中における安定性を高めるため、本格的な研究が望まれる。

(4) 高性能整流弁により New OWC の特性が左右されている。外部エネルギーで操作する例えば電磁操作方式などの開発をすれば、整流弁特性は飛躍的に向上するであろう。

本研究は、苫小牧工業高等専門学校学生諸君の卒業研究課題に取り上げられた共同事業による。学生諸君の協力に対し心から感謝します。

文 献

- (1) Watabe T. : Utilization of the Ocean Wave Energy, FUJI Print Co. Ltd. Muroran, Feb. 2008.
- (2) Watabe T. and Kondo H. : Pat. No.2539742, Pendulor wave energy converter, 1996.
- (3) 渡部, 河合, 浦島 : 特願 2010-153409, 洋上型波力発電装置
- (4) 渡部 : 特許 4448972, 浮体型波力発電装置, 2010.