

空気タービン式波浪発電装置の総合設計と特性解析—第1報—

— 初期設計 —

Total Design of Air-Turbin Type Wave Energy Converter and its Performance Analysis

— 1 st. Report, Initial Design —

木下 健*・増田 光一*
Takeshi KINOSHITA and Koh-ichi MASUDA

1. はじめに

本年度、沿岸固定式の振動水柱型波浪発電装置に関する実機実験が計画されている。* 設置水深は 3.0 m で、Fig. 1 に示されるような台形の空気室を持っている。

本論では、タービンの初期設計として、タービン径と回転数の決定に必要な基礎データを理論的に計算した。流体力の計算には、有限要素法を用いた増田のプログラム¹⁾を使用した。

2. 等価浮体近似法による計算^{2),3)}

Fig. 1 で示されるような空気室での波浪エネルギー吸収効率・内部水面の変位を、空気室内の水柱を等価浮体とみなし計算を行った。

流体は、非圧縮性の完全流体と仮定し、ポテンシャル ϕ_2 を導入する。自由表面上の波高、および等価浮体の運動は微小であると仮定し、線形理論の範囲内で議論するものとする。Fig. 1 のように背後が直立壁の空気室では、鏡像効果を利用して、左右対称体の動揺問題として取り扱うことができる。よって、内部水面変位やエネルギー吸収効率は、浮体のエネルギー吸収理論より得られる。

以下に radiation 問題、および diffraction 問題についての考え方を述べる。

2-1. radiation 問題

左右対称浮体の heaving についてのみ考えればよい (Fig. 2 参照)。y 軸上での剛体壁の条件、

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = 0 \tag{1}$$

は、radiation 問題を解く段階で自然条件となり、自動的に満足される。

今、左右対称浮体の radiation 流体力、すなわち、付加質量 m_2 と造波減衰 N_2 を、

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= \rho \int_{\Gamma_u} \phi_{c2} \frac{\partial \phi_2}{\partial n} d\Gamma = \rho f_{c22} \\ N_2 &= -\rho \omega \int_{\Gamma_u} \phi_{s2} \frac{\partial \phi_2}{\partial n} d\Gamma = -\rho \omega f_{s22} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

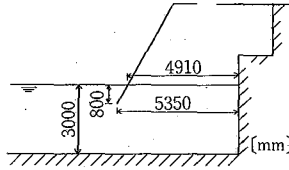


Fig. 1 Section of air-chamber

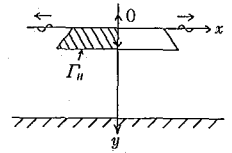


Fig. 2 Radiation problem

のように定義すると、等価浮体の付加質量 m_2^e と、造波減衰 N_2^e は、

$$\left. \begin{aligned} m_2^e &= \frac{1}{2} \rho f_{c22} \\ N_2^e &= -\frac{1}{2} \rho \omega f_{s22} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

となる。さらに、造波減衰は、Haskind-Newman の関係により、Kochin 関数を用いて、

$$f_{s22} = -\frac{1}{2} (|H_2^+(k_0)|^2 + |H_2^-(k_0)|^2) / A(k_0 h) \tag{4}$$

ここで、

$$A(k_0 h) = \frac{2 \cosh^2 k_0 h}{2 k_0 h + \sinh 2 k_0 h}$$

$$\frac{\omega^2}{g} = k_0 \tanh k_0 h$$

と表すことができる。ここで、 ρ は流体密度、 ω は円周波数、 k_0 は浅海波数、 h は水深、 g は重力加速度である。さらに、左右対称浮体の heaving の場合には、 $H_2^+(k_0) = H_2^-(k_0)$ であるから (4) 式は、

$$f_{s22} = -|H_2^+(k_0)|^2 / A(k_0 h) \tag{5}$$

となる。5) 式より、等価浮体の造波減衰は、

$$N_2^e = -\frac{1}{2} \rho \omega f_{s22} = -\frac{1}{2} \rho \omega |H_2^+(k_0)|^2 / A(k_0 h) \tag{6}$$

のようになる。なお、Kochin 関数は、

$$\begin{aligned} H_2^+(k_0) &= \int_{\Gamma_u} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial n} - \phi_2 \frac{\partial}{\partial n} \right) \frac{\cosh k_0 (h-y)}{\cosh k_0 h} \\ &\quad \times \cos k_0 h d\Gamma \end{aligned} \tag{7}$$

と定義される。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

2-2. diffraction 問題

Fig. 3 のように、左右両方向から入射波が入射した状態について考えればよい。

すなわち、入射波のポテンシャル ϕ_0 は、

$$\phi_0 = \frac{\cosh k_0(h-y)}{\cosh k_0 h} 2 \cos k_0 x \quad (8)$$

のように表すことができ、Haskind の関係より、波浪強制力 e_2 は、

$$e_2 = - \int_{\Gamma_u} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial n} - \phi_2 \frac{\partial}{\partial n} \right) \phi_0 dr \quad (9)$$

となり、(8)式を代入して、(7)式を考慮すると、

$$e_2 = -2H_2^+(k_0) \quad (10)$$

となる。そして、等価浮体に作用する強制力は、

$$e_2^* = \frac{1}{2} e_2 = -H_2^+(k_0) \quad (11)$$

のようになる。

3. 運動方程式

今、外部力学系として負荷減衰 d_2 と、負荷ばね k_2 が存在するものと仮定する。外部力学系を含む、等価浮体に関する運動方程式は、heaving の変位を $X_2 = \bar{X}_2 e^{i\omega t}$ とすると、

$$(m + m_2^*) \ddot{X}_2 + (d_2 + N_2^*) \dot{X}_2 + (k_2 + \rho g A_w) X_2 = \rho g a e_2 e^{i\omega t} \quad (12)$$

である。ここで、 $\ddot{X}_2 = d^2 X_2 / dt^2$, $\dot{X}_2 = dX_2 / dt$, A_w は水線面積、 g は重力加速度、 a は入射波振幅である。さらに(12)式は(11)式を代入すると、

$$[-\omega^2(m + m_2^*) + (k_2 + \rho g A_w) + i\omega(d_2 + N_2^*)] \bar{X}_2 e^{i\omega t} = -\rho g a H_2^+(k_0) e^{i\omega t} \quad (13)$$

のようになる。したがって、運動の振幅 \bar{X}_2 は、

$$\bar{X}_2 = \frac{-\rho g a H_2^+(k_0)}{-\omega^2(m + m_2^*) + (k_2 + \rho g A_w) + i\omega(d_2 + N_2^*)} \quad (14)$$

のように求められる。

4. 波浪エネルギー吸収効率

等価浮体によって、単位時間当りに吸収されるエネルギーは、

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} d_2(\omega |\bar{X}_2|)^2 \quad (15)$$

のように表すことができ、(15)式に(14)式を代入して整理すると、

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \omega^2 d_2 \times \frac{\rho^2 g^2 a^2 |H_2^+(k_0)|^2}{[(k_2 + \rho g A_w) - \omega^2(m + m_2^*)]^2 + \omega^2(d_2 + N_2^*)^2} \quad (16)$$

となり、エネルギー吸収効率 η_1 は、

$$\eta_1 = \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right) / \frac{1}{2} \rho g a^2 V_g \quad (V_g: \text{群速})$$

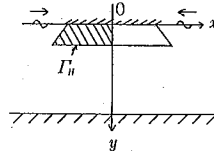


Fig. 3 Diffraction problem

$$= \frac{2\rho\omega^3 d_2 |H_2^+(k_0)|^2 A(k_0 h)}{[(k_2 + \rho g A_w) - \omega^2(m + m_2^*)]^2 + \omega^2(d_2 + N_2^*)^2} \quad (17)$$

ただし、

$$V_g = g / \{2\omega A(k_0 h)\}$$

のように定義できる。

5. 負荷減衰の影響

空気室内の圧力を ΔP とし、負荷ばねは存在しないと仮定すると、圧力変位と水面変位速度は同位相となり、負荷減衰 d_2 は、

$$d_2 = \frac{\Delta P \cdot A_w}{\dot{X}_2} \quad (18)$$

と表すことができる。さらに、空気流量 Q は、

$$Q = \dot{X}_2 \cdot A_w \quad (19)$$

と表され、圧力と流量の関係は、

$$\frac{\Delta P}{Q} = \frac{d_2 \dot{X}_2}{\dot{X}_2 A_w} = \frac{d_2}{A_w^2} \quad (20)$$

となり、負荷減衰 d_2 と $\Delta P/Q$ の関係式を得る。また、流量の振幅 Q_0 は、(19)式より

$$Q_0 = \omega \cdot \bar{X}_2 \cdot A_w \quad (21)$$

となる。

以下に、 $\Delta P/Q$ を変位させた時の計算結果について述べる。水線面積 A_w は、 $4.05 \times 4.91 = 19.89 \text{ m}^2$ である。

Fig. 4 に $\Delta P/Q$ を変位させた場合の、吸収効率 η_1 を示す。横軸は、無次元周波数 KB で、 $K = \omega^2/g$, $B = 5.35 \text{ m}$ である。さらに、入射波周期が、7秒、8秒、9秒の時の、 $\Delta P/Q$ と η_1 の関係を Fig. 5 に示す。ここで横軸は、 $\Delta P/Q$ を造波減衰係数、

$$\mu = \frac{N_2^*}{A_w^2} \quad (22)$$

で無次元化したものであり、副尺として $\Delta P/Q$ の値も示している。また、 μ の値を Fig. 6 に示す。Fig. 7 に付加質量 $m_2^*/\rho V$ を示す。V は等価浮体の体積である。

6. 相当規則波

沖合の不規則波の有義波高、平均周期を H_w , T_w とし、水深 h での規則波の波高、周期を H , T とする。砕波等によるエネルギーの損失なしに、波が岸まで伝播するものとし、両者間にエネルギー保存則が成り立つと仮定すると、以下のような関係が成り立つ。⁴⁾

$$0.55 H_w^2 T_w V_{g\omega} = 0.98 H^2 T V_g \quad (23)$$

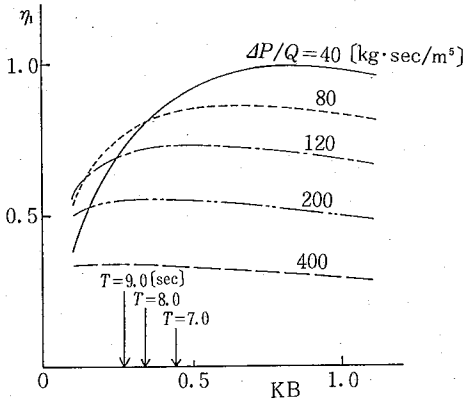


Fig. 4 Efficiency of air-chamber for various load damping

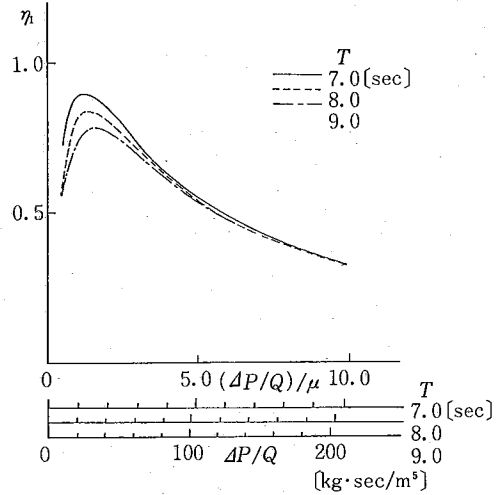


Fig. 5 Efficiency of air-chamber vs. $\Delta P/Q$

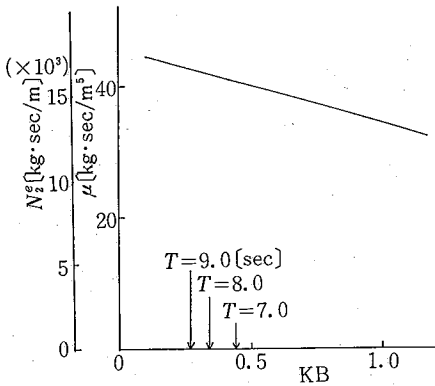


Fig. 6 Wave damping

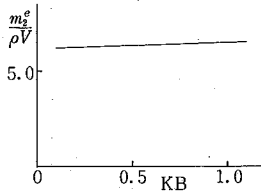


Fig. 7 Added mass coefficient

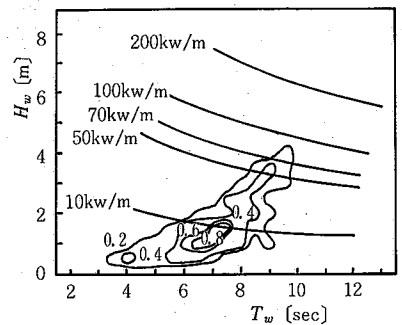


Fig. 8 Frequency of waves

$$V_{g\infty} = g/2\omega$$

$$V_g = \frac{\omega}{2k_0} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right)$$

$V_{g\infty}$ は深海の群速, V_g は水深 h での群速であり, $h=3.0$ m である。

(23) 式の右边が相当規則波の表現である。ここで, $T_w = T$ とすると波高 H は,

$$H = \sqrt{\frac{0.55 V_{g\infty}}{0.98 V_g}} H_w \tag{24}$$

で与えられる。

7. 振動水柱による空気圧と流量の発現頻度

沖波波高 H_w に対する, 水深 $h=3.0$ m での波高 H は, (24) 式より求められ, 振幅 $a=H/2$ を (14) 式に代入すると, 各負荷減衰 d_2 に対する, 水面変位振幅が求められる。この時の空気流量振幅 Q_0 は (21) 式より与えられる。ただし, 空気の圧縮性は無視できるので $k_2=0$ とする。

Fig. 5 よりわかるように, η_1 は $\Delta P/Q = \mu$ で最大となるが, ここでは渦等の損失を考えてないので, $\Delta P/Q$ を μ の 2~3 倍として流量を小さく, 圧力を大きくする方が実際の効率は向上すると考えられる。

Fig. 8 は対象海域の沖で観測された波の発現頻度⁵⁾で, 横軸は平均周期 T_w , 縦軸は有義波高 H_w である。これより, 70 kw/m 以上のエネルギーを持つ波は非常に少ないことがわかる。Fig. 9 は, 対象海域に振動水柱を設置し, 負荷として造波減衰力の 1, 2, 3 倍を加えた際の, 負荷 $\Delta P/Q$ と流量振幅 Q_0 の関係を示しており, 沖波の有義波高 H_w を 1~5 m と, 平均周期 T_w を 5~10 秒まで変えて計算している。つまり, 沖波の有義波高と平均周期がわかれば, 各負荷に対する空気室内の負荷と流量が与えられる。

図中の閉曲線は, 沖波の発現頻度を示しており, Fig. 8 より写したものである。これより, 頻度の高い波に対応

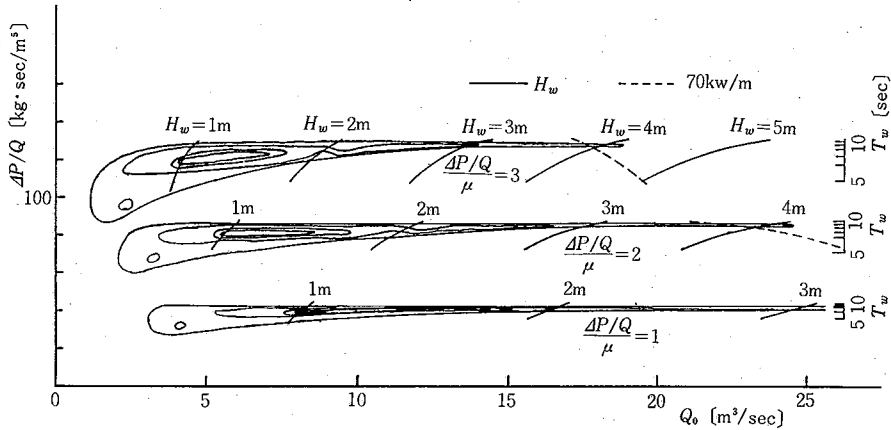


Fig. 9 Frequency of pressure and flow flux by the airchamber with load of 1, 2 and 3 times wave damping

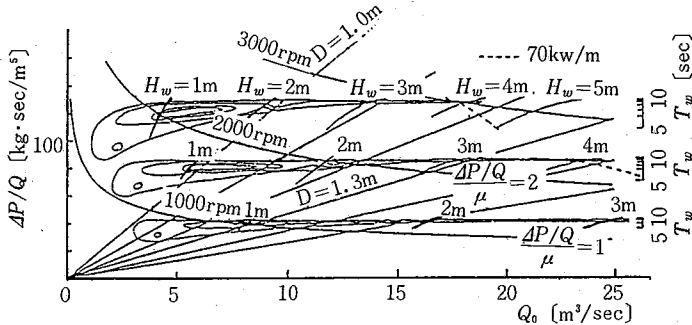


Fig. 10 Design chart of diameter and r. p. m. of turbine

する負荷と、流量が予測できる。また、波のエネルギーが 70 kw/m の線も示してある。

8. タービンの設計

タービンとしてウエルズタービンを用いた場合の、最大効率時 ($\eta_2 \approx 0.36$) の $\Delta P/Q$ と Q_0 の関係の一例⁹⁾ と Fig. 9 を重ねた図を、Fig. 10 に示す。パラメータは、タービン径 D と回転数である。例えば、約 10~70 kw/m のエネルギーを持つ波に着目してタービンを設計する場合、 $D \approx 1.3\text{m}$ に選び回転数を 1500~2500 rpm に調整することにより、 $(\Delta P/Q)/\mu \approx 2$ となり一次変換率 η_1 の高性能の範囲を利用できることがわかる。また、定常的なエネルギー吸収を目指す場合には、発現頻度の大きい波への設定が適当と考えられ、この時、 $D \approx 1.0\text{m}$ 、回転数約 1500 rpm となっている。

9. おわりに

本論文では、タービンの初期設計に必要な基礎データとして沖波と、空気室での圧力・負荷・流量の関係を示した。これより、タービンの最適径と回転数が求められる。

最後に、本論文作成に当たり計算を担当してくれた、日本大学大学院の林 秀郎・宮島省吾両院生、また、ター

ビン特性の資料を利用させていただき、全般についてご討論下さった東京大学工学部 荒川忠一助教授、鈴木正己技官に感謝します。(1983年5月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 増田光一・加藤 渉：有限要素法による浮遊式消波装置の基礎的研究，関西造船学会誌第 174 号 (1979)
- 2) 増田光一・林 秀郎・加藤 渉：空気タービン式沿岸波浪発電装置に関する基礎的研究—第 1 報—，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1982, 10)
- 3) 前田・木下・増田・林・加藤：波浪発電に関する基礎的研究 (その 5)，日本造船学会論文集 vol. 152 (1983, 1)
- 4) 前田久明・木下 健：波浪発電，生産研究 31 卷 11 号 (1979, 11)
- 5) 海洋科学技術センター：波力発電装置「海明」の研究に関する総合報告 (1981, 12)
- 6) 荒川忠一・鈴木正己・木下 健：ウエルズタービンを用いた固定振動水柱型波力発電装置の研究 (第 1 報 初期設計手法)，昭和 58 年日本機械学会講演論文発表予定

* 本装置は、海洋科学技術センター・富士電機等の共同研究である。