

式(3)は、エネルギー保存式で左辺第1項は水面が空気に対してなす仕事率、第2項は空気室内の空気の内部エネルギーの変化率、第3項はノズルを通して流出する空気の保有するエネルギーを表している。式(2)、式(3)の未知数は、空気室の体積 V を仮定すれば結局 p_a , T_a のみとなり、この連立微分方程式を解けばよい。

(2) 近似理論

式(2)および式(3)を解くには数値計算が必要で、入射波に関連させて解を得ることが困難なため次のような仮定を行って近似する。まず、空気室の水面は一樣に昇降し、振幅 a_0 は空気室の高さ D_0 に比べて十分小さく、 p_a および T_a の変動振幅も大気圧 p_0 , T_0 に較べて微小であると仮定する。さらに、 p_a と T_a は V の振動に対し $\sigma\tau$ の位相差を有する次のような正弦変化をするものと仮定する。

$$V = V_0 \left(1 - \frac{a_0}{D_0} \sin \sigma\tau \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$T_a = T_0 [1 + \alpha \sin \sigma(t + \tau)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$p_a = p_0 [1 + \lambda \sin \sigma(t + \tau)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\sigma (=2\pi/T_w)$, T_w : 周期) は角振動数である。式(5), (6), (7)を式(2), (3)に代入し、若干の近似を行って次のように係数が求められる。

$$\alpha = (\gamma - 1) \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma\tau \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\lambda = \gamma \frac{a_0}{D_0} \cos \sigma\tau \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\cos \sigma\tau = \pm \sqrt{1 + K^2} - K \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$K = \varepsilon_p^2 (\gamma - 1) \frac{c_p T_0}{(\sigma D_0)^2} \frac{D_0}{a_0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 γ は比熱比 ($=c_p/c_v$)、 $\varepsilon_p = c_a \varphi \varepsilon$ である。

次に、入射波と空気室の応答とを接続することを考える。入射波の振幅 a_I , 反射波の振幅 a_R とし、空気室内には振幅 a_T の重複波が形成されているものとする。微小振幅波理論によれば領域 I および II における水平水粒子速度 u および圧力 p は減衰定常波を無視してそれぞれ次のように表される。

$$u_I = \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \{ a_I \sin(\sigma t - kx - \phi_I) - a_R \sin(\sigma t + kx - \phi_R) \} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$p_I = p_0 + \rho_w g \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \{ a_I \sin(\sigma t - kx - \phi_I) + a_R \sin(\sigma t + kx - \phi_R) \} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$u_{II} = -\frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} a_T \sin k(x-B) \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$p_{II} = p_a + \rho_w g a_T \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos k(x-B) \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 $k (=2\pi/L)$, L : 波長) は波数、 ρ_w は水の密度、

g は重力の加速度、 ϕ_I , ϕ_R は空気室内の水位変動に対する入射波および反射波の位相差である。また、一樣昇降の振幅 a_0 と a_T とは次のような関係がある。

$$a_0 = \frac{\sin kB}{kB} a_T \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、領域 I と II の境界 $x=0$ において流量および圧力の接続条件を次のように考える。

$$\int_{-h}^0 u_I dz \Big|_{x=0} = \int_{-h}^0 u_{II} dz \Big|_{x=0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$p_I|_{x=0} = p_{II}|_{x=0} \quad (z = -h \sim -d_e) \quad \dots\dots (18)$$

以上から、波高伝達率 $K_T = a_0/a_I$, 反射率 $K_R = a_R/a_I$ は次のように求められる。圧力式については鉛直分布が一致しないので $z = -h \sim -d_e$ で積分したものを等しいとしている。なお、この際両辺に $\cosh k(z+h)$ を乗じている。

$$K_T = 2[\{ A_0 f(kh, kd_e) \sin \sigma\tau \cos \sigma\tau + kB \}^2 + \{ A_0 f(kh, kd_e) \cos^2 \sigma\tau + kB/\tan kB \}^2]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$K_R = \frac{1}{2} K_T [A_0 f(kh, kd_e) \sin \sigma\tau \cos \sigma\tau - kB]^2 + \{ A_0 f(kh, kd_e) \cos^2 \sigma\tau + kB/\tan kB \}^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\phi_I = \tan^{-1} \left\{ -\frac{A_0 f(kh, kd_e) \sin \sigma\tau \cos \sigma\tau + kB}{A_0 f(kh, kd_e) \cos^2 \sigma\tau + kB/\tan kB} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\phi_R = \tan^{-1} \left\{ -\frac{A_0 f(kh, kd_e) \sin \sigma\tau \cos \sigma\tau - kB}{A_0 f(kh, kd_e) \cos^2 \sigma\tau + kB/\tan kB} \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、

$$A_0 = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0} f(kh, kd_e) = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_e)}{\cosh k(h-d_e) \sinh k(h-d_e) + k(h-d_e)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

以上で入射波に対する空気室の応答がすべて解かれたわけである。なお、 $\sigma\tau$ は K_T の関数となっているが、逐次近似計算を行って解を求めることができる。

空気出力を空気室の水面が空気に対してなした仕事率と定義し、1周期の平均空気出力を $\bar{W}_a$, 入射波の平均エネルギー輸送率を $\bar{W}_I$ とすると平均効率 $\overline{EFF}$ は上記の解を用いて次のように表される。

$$\overline{EFF} = \bar{W}_a / \bar{W}_I = \frac{\gamma p_0}{\rho_w g D_0} \frac{B \sigma}{C_g} K_T^2 \sin \sigma\tau \cos \sigma\tau \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 C_g は入射波の群速度である。

式(24)から $\overline{EFF}$ は次のような無次元パラメーターで構成される関数と見ることができる。

$$EFF = F \left\{ \frac{p_0}{\rho_0 g D_0}, \varepsilon, \frac{h}{L}, \frac{B}{L}, \frac{d_0}{h}, \frac{H}{L}, \frac{c_p T_0}{g D_0} \right\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

これによると、効率は波の諸元や空気室の諸元で構成される無次元パラメータのほか大気圧や気温が関係するパラメータが影響することがわかる。

3. 実験の方法

本実験は長さ 40 m, 幅 0.5 m, 深さ 1 m の中型造波水路を用いて行った。空気室の条件としてノズル比 ε , 空気室幅 B , カーテンウォール没水水深 d_0 について変化させている。 ε については $\varepsilon=0$ から $\varepsilon=1/25$ まで 6 種類, B は 20, 40, 60 cm の 3 種類, d_0 は 0~30 cm まで 4 種類で, 空気室の高さ D_0 は 40 cm 一定としている。実験波はすべて規則波で, 周期は 1.15 s~3.0 s まで 5 種類, 波高は 5~25 cm 程度の範囲から 4~5 種類を選定した。なお, 水深は $h=60$ cm で一定である。

実験における空気出力は, 理論解析と同様に空気室内の水面が空気に対して行う仕事率とし, 圧力および水位変動を測定して求めた。

4. 実験結果と考察

(1) 空気圧力ピーク値および K_T

図-2 は, ノズル比が空気圧力に及ぼす影響について実験結果を示したものである。縦軸はノズル比 $\varepsilon=0$ のときの空気圧力ピーク値 $p_{\varepsilon=0}$ に対するあるノズル比のときの圧力ピーク値の比をとってある。これによるとノズル比が増大すると空気圧力のピーク値が密閉した場合に較べてかなり減少し, 周期によって幅があるが, $\varepsilon \approx 0.008$ でおおよそ 50%, $\varepsilon \approx 0.04$ で 10% 以下になることがわかる。また, この図は $H_I \approx 10$ cm の例であり密閉した場合の圧力は周期が長い方が大きく $0.9w_0H$ 程度である。なお, ノズル比が大きくなると空気室内の水位変動が大きくなり, 水面の上板への衝突による揚圧力が生じることが予想されるけれども, 今回の実験条件では $D_0=40$ cm と比較的大きくそうした現象は見られなかった。

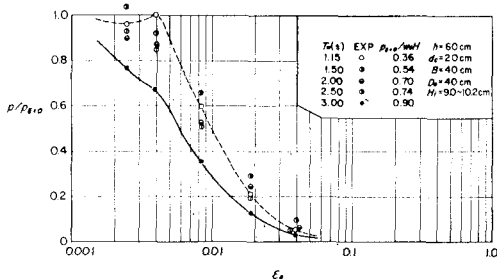


図-2 ノズル比による空気圧力ピーク値の変化 ($H_I=9.0 \sim 10.2$ cm)

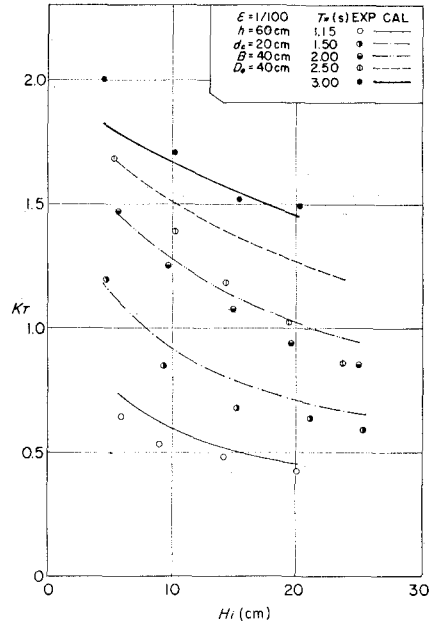


図-3 波高伝達率 K_T ($\varepsilon=1/100$)

図-3 は $\varepsilon=1/100$ の場合の K_T を示したものである。 K_T は入射波高が増大すると減少し, 周期が長くなると増大する傾向が認められる。この図には近似理論による計算値も示しており, $T_w=2.5$ s の条件を除いて実験の結果とよく適合していることがわかる。なお, 計算に際しては $c_d \phi=1.0$ としている。

(2) 空気出力効率の特徴および空気諸元の影響

図-4 は空気室の諸元を一定として効率が入射波の周期と波高によってどう変化するか見たものである。これ

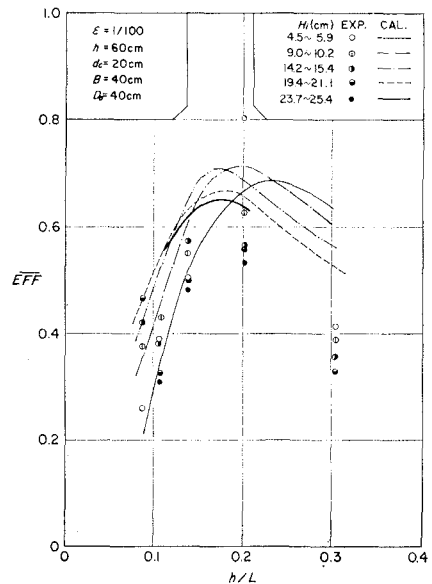


図-4 空気出力効率の周期による変化 ($\varepsilon=1/100$)

によると、効率を最大とする周期が存在することが明らかで、 $h/L=0.17\sim0.22$ ($B/L=0.11\sim0.15$) 付近で極大となり最大 60% 以上の効率が認められる。入射波高の影響はやや複雑で、 h/L が大きい条件では波高の小さい方が効率が高く、逆に小さい条件では波高の大きい方が効率が高いという傾向がある。図には計算値を合わせて示しており、周期が短い条件においてやや差異があり測定値より大きな値となっているが、全体として上述の測定値の傾向をよく表している。

図-5 は周期 2 秒 ($h/L=0.138$) の条件についてノズル比の影響を見たものである。効率が最大となるノズル比があり、最適ノズル比はこの条件では $\epsilon_0=0.004\sim0.008$ となることがわかる。また、最適ノズル比は入射波高によって変化が見られ、波高が増大すると最適ノズル比も大きくなる傾向が認められる。

図-6 は、カーテンウォール没水水深 d_0 による効率の変化を $\epsilon=1/100$ の条件の測定値について示したものである。これによると、効率は $d_0/h=0$ ではかなり低く 50% 以下であり、 d_0/h の増大に従って増大しその後 d_0/h の増大に対して低下する傾向が認められる。この極大値を与える d_0 は入射波高の 0.5~1.0 倍程度と推定される。また d_0/h の増大に対する効率低下の傾向は周期の短い条件で顕著である。 $d_0/h=0$ で効率が低下するのは引波時にカーテンウォール下端以下に波面が下降し空気室が大気に解放されるからである。こうした現象は $d_0/h=0.167$ の条件でも波高の大きいときに見られる

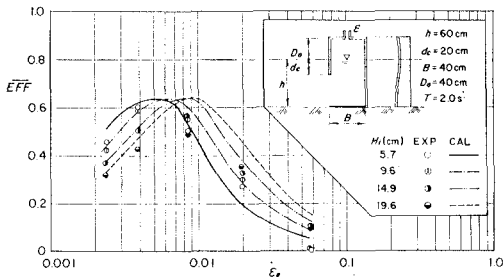


図-5 空気出力効率のノズル比による変化 ($T_w=2.0$ s)

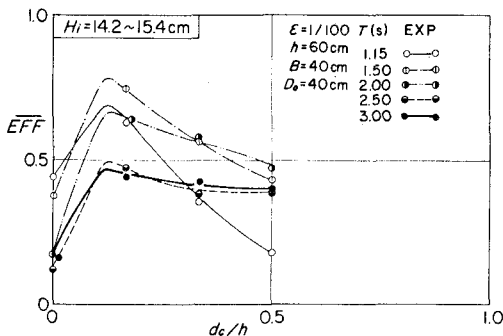


図-6 空気出力効率の d_0 による変化 ($\epsilon=1/100$, $H_t=15$ cm)

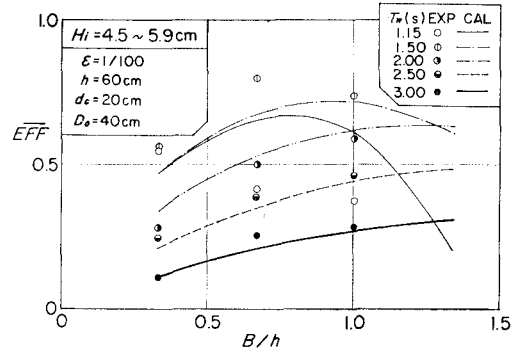


図-7 空気出力効率の空気室幅 B による変化 ($\epsilon=1/100$, $H_t=15$ cm)

けれども、効率低下への影響は小さい。なお、図中の曲線は実験値を適当に結んだものである。

図-7 は、空気室の幅の影響を見たものである。 $\epsilon=1/100$, $h=60$ cm, $d_0=20$ cm, $D_0=40$ cm は一定とし B を 20 cm, 40 cm, 60 cm と変化させた時の効率の変化を示している。まず、測定値に注目すると、 $T_w=1.15$ s では B が増大すると効率が低下するのに対し $T_w=1.5$ s では極大値を有する傾向を示し、さらに周期の長い条件では B の増大に対して効率が增大する傾向が認められる。一方、計算値は $T_w=1.15$ s 以外の条件において測定値の特徴をかなりよく表している。計算値によると $T_w=1.15$ s, 1.50 s の条件では $B/h=0.8$ あるいは $B/h=0.95$ 付近で効率が最大となることがわかる。さらに周期の長い条件では、ここに示した B/h の範囲には効率最大の点が現われていないけれども、 $B/h=1.33\sim1.67$ 程度で最大となることが確認できる。

(3) 模型縮尺の影響

空気室の応答や効率は大気圧等の関数になっているた

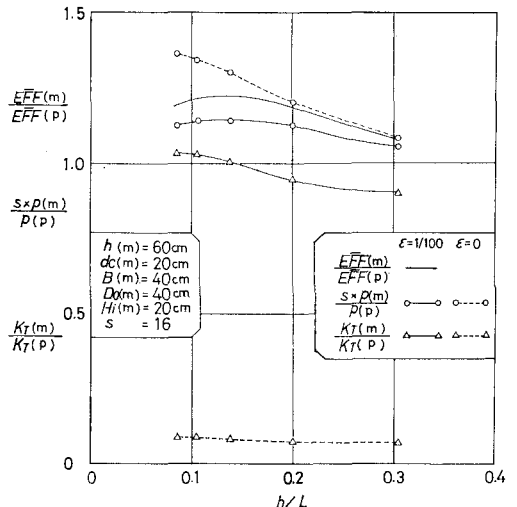


図-8 模型縮尺による効率等への影響 ($\epsilon=1/100$, $\epsilon=0$, 縮尺 1/16)

め縮尺模型実験の結果を通常の相似則によって現地量換算することができない。図-8は効率 $\overline{EFF}$ 、圧力 p および波高伝達率 K_T について、縮尺模型を対象とした計算値をフルードの相似則に従って換算した現地量と現地ユニットを対象とした計算値との比を示したものである。模型は前述の実験での諸元を対象とし、縮尺は16分の1としている。 $\epsilon=1/100$ の条件で $\overline{EFF}_{(m)}/\overline{EFF}_{(p)}$ は1より大きく、縮尺模型の効率がプロトタイプより10~20%高くなることがわかる。圧力については、縮尺模型の結果を換算した値がプロトタイプより5~15%程度大きくなっている。一方、この図には特殊な条件として $\epsilon=0$ の結果を示しており、この場合には圧力および K_T に縮尺の影響がより顕著に現われる。すなわち、圧力については縮尺模型の結果がプロトタイプの値の最大1.35倍となり、 K_T については $K_{T(m)}/K_{T(p)}$ は0.07~0.09程度で縮尺模型による K_T がかなり小さい値を与えることがわかる。以上のように効率や圧力および K_T への縮尺の影響は条件によってはかなり大きなものとなり、模型実験の結果を現地に適用する際には十分な注意が必要である。

5. 効率最大の空気室諸元

以上、現地規模の空気室の最適形状の設計には理論モデルによる検討が重要となってくる。そこで、ここではある一定の波浪条件に対して効率を最大とする空気室の諸元を近似理論を用いて求めてみる。まず、与条件は水深 $h_{op}=10$ m, 定格波高 $H_{op}=1.5$ m, 同周期 $T_{op}=7$ s, 潮差 $\Delta h=1$ m, 設計波高 $H_D=8.0$ m, 同周期 $T_D=13$ s とする。添字 op は運転時の条件を意味している。ここで、効率に関係する条件が多いので簡化するため次のように設定する。すなわち、カーテンウォール没水水深は実験結果などを参考にして $d_c=H_{op}$ と定める。また空気室高さ D_0 については詳しい検討を行っていないので、とりあえず $D_0=0.5H_D$ としておく。図-9はこうした仮定のもとで近似理論を用いて $\overline{EFF}-B$ 図を作成したものである。この結果、効率を最大とする条件は $B=20$ m, $\epsilon=0.003$ となり、最大効率は94%であることがわかる。なお、この条件で設計波高時においても空気室内の水位が上板まで達しないことが確認できる。実際問題としては、ケーソンの設計施工面等を考慮して最

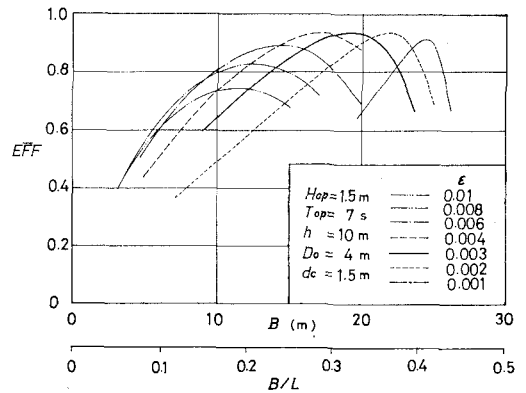


図-9 効率最大の空気室諸元 ($H_{op}=1.5$ m, $T_{op}=7$ s の例)

適形状として検討すればより小さい B が最適となることが予想され、その場合には最適ノズル比も異なってくる。

6. ま と め

- (1) 波力発電ケーソンの水理特性および空気出力特性に関する熱力学的考察に基づく近似理論モデルは、周期が非常に短い条件を除いて実験値の傾向をかなり良く表すことが確認できた。
- (2) これによって、規則波ではあるけれども一定の波浪条件に対して空気出力効率を最大とする空気室の諸元を求めることができる。
- (3) 効率に影響する空気室の諸条件のうち、カーテンウォール没水水深 d_c は入射波高の0.5~1.0倍程度とするのが最も効率が高くなることが明らかとなった。また、空気室幅 B とノズル比は条件によって異なるけれども、最適幅が $B=1.0\sim 2.0h$ 、最適ノズル比が $\epsilon=1/300\sim 1/125$ 程度であることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 前田久明・木下 健・増田光一・林 秀郎・加藤 渉: 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第152号, pp. 250~255, 1982.
- 2) Miles, J. and T. Penney: Fabrication, testing, and modeling plans for a 125 kW counter-rotating-turbine wave energy converter, Proc. of 8th Ocean Energy Conference, 11 p., 1981.