

エアカーテンによる消波機構について

中 村 充*・佐々木泰雄**・大 西 亮 一***・法貴貫四郎****

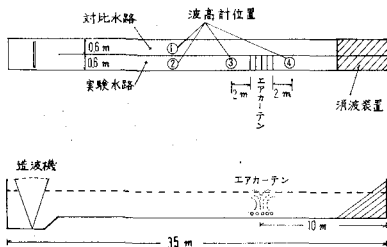
1. ま え が き

昨年は、エアカーテンによる上昇流の発生についてのべた。今回は、エアカーテンを防波堤として用いる場合について報告する。

空気防波堤に関する研究は栗原らの研究がある。この研究は2回の現地実験を含む大規模な研究である。エアカーテンによる消波機構について Taylor は気泡によって上昇流が起こり、これが水平流となり波の進行を阻止するとしたのに対し、栗原らは粘性逸散によるエネルギーの消耗が支配的であるとした。筆者らはエアカーテンによって波が消える場合には、気泡幕があまり横揺れしない。すなわち水粒子の波動運動が遮断されることを観測した。このことはエアカーテンによる波の遮断は反射にも関連することを示すものである。Taylor, 栗原らの消波機構の理由に加えて、反射が無視できないことを確かめた。これらの消波機構を次元解析し実験結果をとりまとめた。

2. 実験装置と実験方法

実験水槽は長さ 35m, 深さ 1.2m, 幅 1.5m のものを 0.6m, 2列に分割し一端にフラップ型造波機, 他端に消波装置がある。気泡発生筒は消波装置端より 10m の位置の水路底に中心間隔 20cm で 6 本平行に設置できるようにしてある。気泡発生筒は内径 48mm, 外径 60mm の塩化ビニール筒で直径(ϕ) 1mm の空気噴出小孔が中心間隔 4.5mm に設けられている。実験は水深=50, 70, 90cm について, 風量 25, 60, 100(m³/hr/0.6m)。発生



図—1 実験装置

筒 1, 2, 3 本とし, 気泡発生幅 (B) をそれぞれ 6, 46, 76cm。波高 (H) 2.8~18.2cm。波の周期 (T) 0.98~2.32 sec。これらの条件で実験を行なった。

観測は超音波波高計を 4 個設けペンレコーダに記録した。波高計の位置は 図—1 に示す配置とする。①は入射波 (H_i) を, ②は入射波と反射波 (H_r) の重複波を観測させるもので最大重複率の得られる位置に調整する。③は流れに遡上して変形した波 (H_s) を, ④はエアカーテン内への伝達波 (H_t) を求めるためのものである。

3. 実験結果

4つの位置の観測波高を用いて, エアカーテンによる減衰率 (η), 反射率 (R), 粘性によるエネルギーの逸散率 (I) は次のように求まる。

(1) 減衰率 η

$$\eta = 1 - \frac{H_i}{H_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) 反射率 R

部分重複波の波形 (ζ) は次式で示される。

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{(H_i + H_r)}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{L} \\ &\quad - \frac{(H_i - H_r)}{2} \cos \frac{2\pi t}{T} \sin \frac{2\pi x}{L} \\ \zeta_{\max} &= \frac{(H_i + H_r)}{2} \cos \frac{2\pi x}{L} \end{aligned}$$

ここに, x は反射壁 (エアカーテンの中心) から波高計までの距離である。よって

$$R = \frac{H_r}{H_i} = \frac{H_2}{H_1} \sec \frac{2\pi x}{L} - 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

反射率は Healy の方法によって検討されるが, この実験の場合反射壁がエアカーテンであり, 固定反射とは異なるので対比水路における波高と対比する。なお, 本実験では観測値は $\sec \frac{2\pi x}{L} = 1$ となる位置で計測されてある。

(3) 粘性逸散率 I

図—1 ①の位置を単位時間に輸送される平均エネルギー E_i は

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{1}{8} w_0 H_1^3 n c \\ n &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right] \end{aligned}$$

* 正 会 員 農林省農業土木試験場
** 農林省農地局
*** 正 会 員 農林省農業土木試験場
**** 学生会員 東海大学学生

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}}$$

ここに, w_0 : 水の密度

c : 波速

n : 群速度と波速の比

である。

図-1 ④における値は,

$$E_t = \frac{1}{8} w_0 H_t^3 n c$$

エネルギー方程式は

$$E_t = E_i + E_r + E_l$$

$$\frac{E_l}{E_i} = 1 - \frac{E_t}{E_i} - \frac{E_r}{E_i}$$

よって

$$\begin{aligned} \frac{E_t}{E_i} &= 1 - \left(\frac{H_t}{H_i} \right)^2 - \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^2 \sec^2 \frac{2\pi x}{L} \\ &\quad + 2 \frac{H_2}{H_1} \sec \frac{2\pi x}{L} - 1 = 1 - (1-\eta)^2 - R^2 \end{aligned} \quad (3)$$

(4) エネルギー伝達率 (E_t/E_i)

$$\frac{E_t}{E_i} = \left(\frac{H_t}{H_i} \right)^2 = (1-\eta)^2 \quad (4)$$

(5) エネルギー反射率 (E_r/E_i)

$$\frac{E_r}{E_i} = R^2 \quad (5)$$

実験値を式(1), (2)によってまとめ減衰率, 反射率を示したのが 図-2~図-7 である。反射率は相当のばらつきがあるがこれは反射波がエアカーテンによる流れの中を進行する過程での減衰や部分重複波などのためである

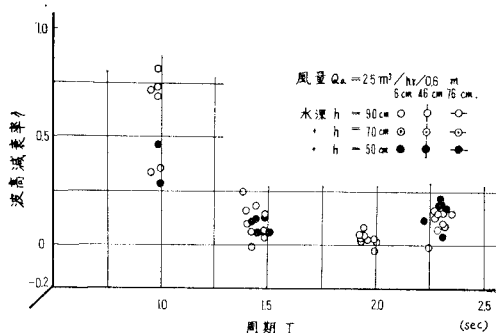


図-2 波高減衰率

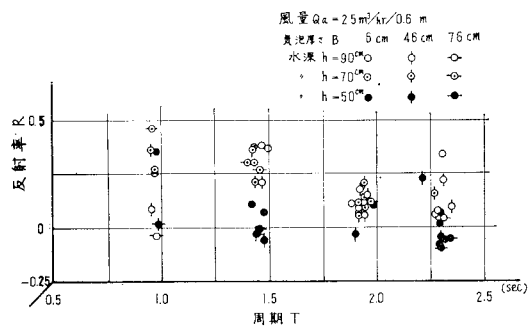


図-5 反 射 率

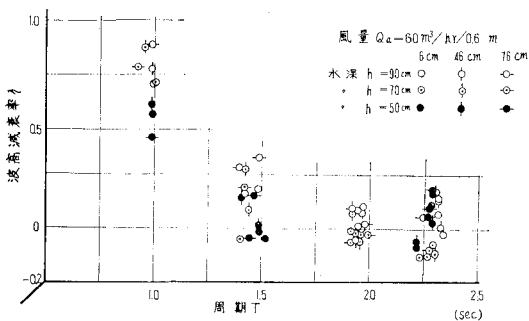


図-3 波高減衰率

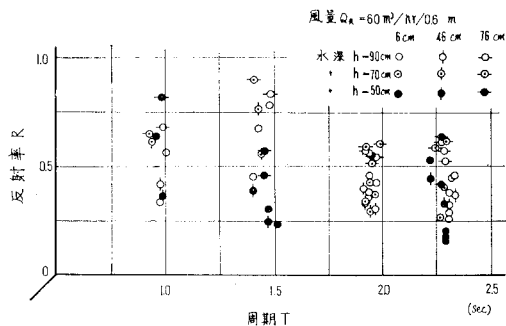


図-6 反 射 率

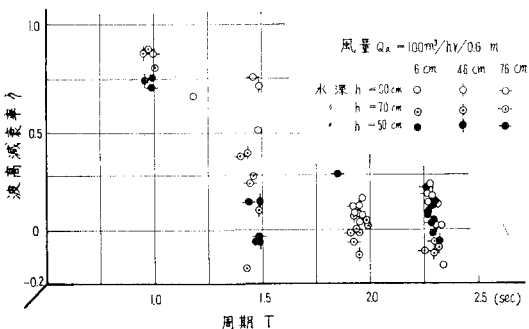


図-4 波高減衰率

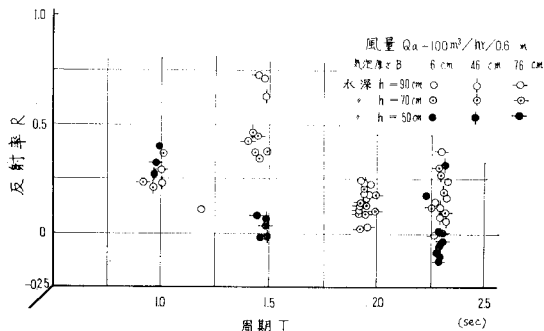


図-7 反 射 率

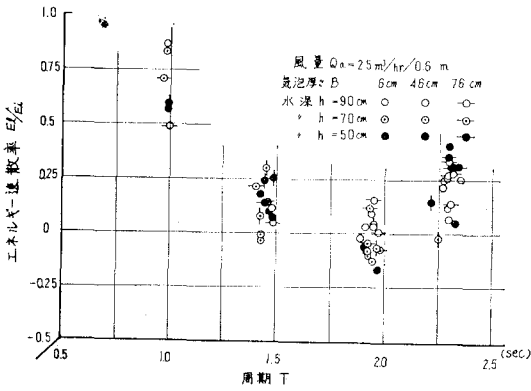


図-8 エネルギー逸散率

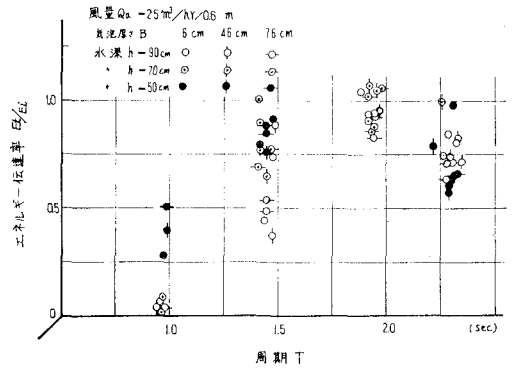


図-11 エネルギー伝達率

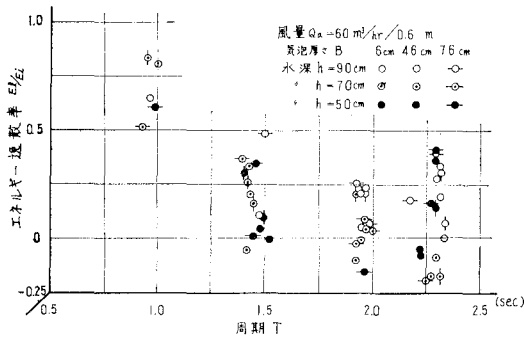


図-9 エネルギー逸散率

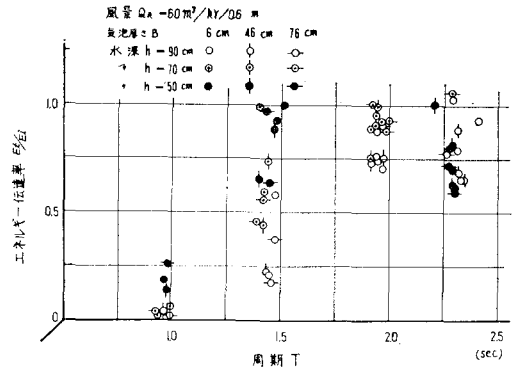


図-12 エネルギー伝達率

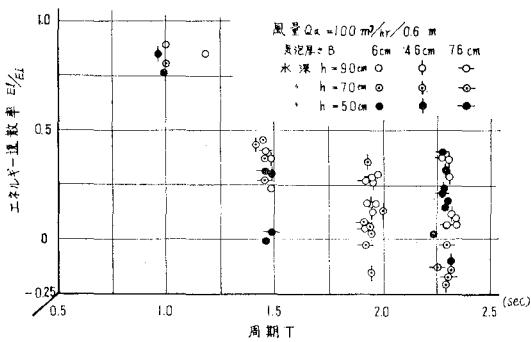


図-10 エネルギー逸散率

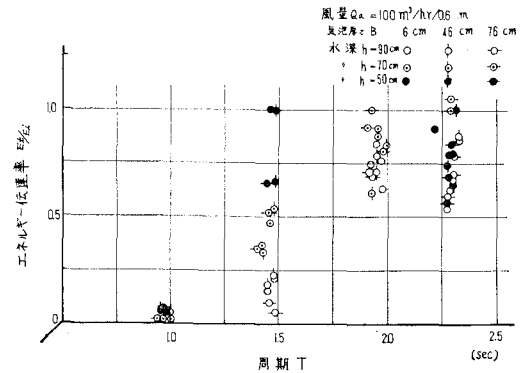


図-13 エネルギー伝達率

う。式(3)、(4)を用いてエネルギーの粘性逸散、および透過率を示したのが図-8～図-13である。

4. 消波機構の理論的考察

エアカーテンの波の遮断は見掛け慣性力による波運動の抑止、粘性力によるエネルギーの吸収、気泡上昇流に誘起される水平流による波の減衰が考えられる。それぞれの機構について若干の考察を行なう。

(1) 慣性抵抗について

気泡に働く波作用に対する慣性抵抗(F_I)が波のエネルギー輸送に対して大きいとき、波の遮断効果が大きい。

$$F_I = C_M V_a \frac{w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_M : 質量係数

V_a : 気泡の水中容積

w_0 : 水の単位重量

u : 気泡と水の相対速度

t : 時間

$$V_a = \frac{h}{v_0} \frac{Q_a h_0}{h_0 + h/2}, \quad v_0 \propto \sqrt{g\phi}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \propto \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh 2\pi(z+h)/L}{\sinh 2\pi h/L} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

ここに, Q_a : 単位時間, 単位長さ当りの気泡噴出量 (1気圧換算値), h : 水深, h_0 : 1気圧を水柱で示した値 ≈ 10 m, v_0 : 気泡の上昇速度, ϕ : 気泡噴出孔の直径, H, L, T : それぞれ波高, 波長, 周期, z : 水面からの深さ。よって,

$$F_1 = \frac{Q_a h H w_0}{\sqrt{g \phi} g T^2} f\left(\frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

単位面積当たりの波のもつエネルギーは

$$E = \frac{1}{8} w_0 H^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(7), (8) から, エアカーテンの消波機構の主たる部分として

$$\eta_1 = f_1\left(\frac{F_1}{E}\right) = \frac{Q_a h}{\sqrt{g \phi} L H} f\left(\frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となることがわかる。

(2) 粘性抵抗

$$F_2 = C_D A w_0 \frac{u^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに, C_D : 抗力係数, A : 気泡の遮影面積

$$A = \left[\frac{3}{4} \frac{\pi^{1/2} Q_a h}{V_0} \frac{h_0}{h_0 + h/2} \right]^{2/3}$$

$$u \propto \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh 2\pi(z+h)/L}{\sinh 2\pi h/L} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

よって

$$F_2 = \left(\frac{Q_a h}{\sqrt{g \phi}} \right)^{2/3} \frac{w_0}{g} \frac{H^2}{T^2} f\left(\frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}\right)$$

ゆえに粘性抵抗による消波は

$$\eta_2 = f_2\left(\frac{F_2}{E}\right) = \left(\frac{Q_a h}{L^2 \sqrt{g \phi}} \right)^{2/3} f\left(\frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。

(3) 表面流による波の抑止

昨年上昇流およびこれに誘起される水平流について次の成果を得た。

$$u_1 = \sqrt{gh} G\left(\frac{\sqrt{g \phi} h}{Q_a}, \frac{B}{h}, \frac{h_0}{h}, \frac{x}{h}\right)$$

ここに, u_1 : 上層平均水平流速, B : 気泡発生の厚さ

x : 気泡幕からの距離

他方, 流れにさかのぼる波の減衰は,

$$\frac{H_x}{H} = \exp(-\alpha), \quad \alpha = f\left(\frac{u_1}{c}\right)$$

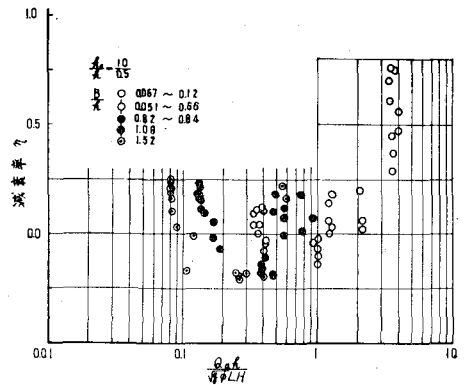
よって

$$\eta_3 = 1 - \frac{H_x}{H} = f_3\left(\frac{T \sqrt{gh}}{L}, \frac{\sqrt{g \phi} h}{Q_a}, \frac{B}{h}, \frac{h_0}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

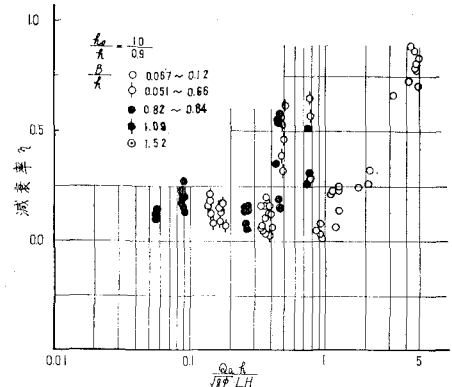
ただし, x/h は全遡上過程の積分値をとることによって定数とみなされる。以上から結局

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3$$

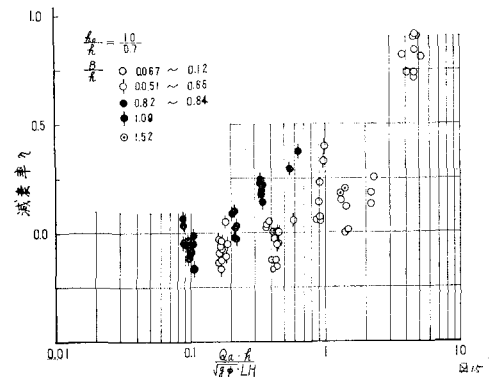
$$= F\left(\frac{Q_a h}{\sqrt{g \phi} L H}, \frac{Q_a h}{\sqrt{g \phi} L^2}, \frac{Q_a}{\sqrt{g \phi} h}, \frac{T \sqrt{gh}}{L}, \frac{h}{L}, \frac{h_0}{h}, \frac{B}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (13)$$



図—14



図—15



図—16

で示される。

式(13)にしたがって実験結果を整理すれば図—14~16を得る。

5. あとがき

以上エアカーテンによる消波効果を実験的にとりまとめた。この実験において水深範囲は大気圧との比においてはほぼ 10~20 の範囲で行なわれた。この範囲を現地における範囲に拡張検討することは今後継続する予定である。