

エアカーテンによる上昇流の発生に関する研究

中 村 充*

1. ま え が き

エアカーテンに関しては空気防波堤として栗原らの研究がある。筆者らがこのテーマを取り上げた理由はエアカーテンが、水産および河口水資源にとって重要な工法であることによる。現在予想している応用分野は以下のようである。① 上昇流の発生によって表層水と底層水の混合拡散をはかり水産水質を改良保全する、② 空気の溶入による溶存酸素量の増大、③ 流速の鉛直分布の制御(水産物の卵、幼生時代には表層に分布するものが多いので表層流の制御に利用できる)、④ 河口における躍層を破壊して強混合型とし塩分遡上を抑止する。⑤ 空気防波堤として防波する、その他がある。この報告はこれら一連の研究のうち上昇流の発生に関するものである。

2. 実験装置と実験方法

実験水槽は長さ 35 m、深さ 1.2 m、幅 1.5 m のものを幅 0.6 m 2 列に分割し両端を通して循環水路としたもので、1 端より 10 m の位置の水路底に気泡発生筒が 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 48 mm 外径 60 mm の塩化ビニールの筒で、これに次の 5 種の直径(ϕ)の空気噴出小孔が設けられている。

$\phi=1$ mm,	中心間隔 4.5 mm
$\phi=2$ mm,	" 6.5 mm
$\phi=3$ mm,	" 10 mm
$\phi=5$ mm,	" 18 mm
$\phi=10$ mm,	" 27 mm

これら気泡筒は、それぞれ 1~6 本、中心間隔 20 cm に設置される。送風機は 15 kW たて型コンプレッサーを用い、風量 6~120 m³/hr の間で実験を行なった。観測計器は超音波流速計を用い、2 方向成分を自動平衡型ペンレコーダーに記録させた。

実験条件を表-1 に示す。

観測は気泡柱の中心から両側に 50, 100, 150, 250, 350, 550, 750, 1,000 cm の位置で、鉛直方向に 5 cm 間隔で流速の測定を行なった。測定開始の

時刻は十分流況が定常化した後(約 20 分以上)に行なった。

表-1 実験条件

実験条件	種 類							
水 深 h cm	70	85	100					
風量 Q_a' m ³ /hr/0.6 m	15	20	25	35	50	70	90	100
気泡筒本数(本)	1	2	3					
気泡発生幅 B cm	6	26	46					

3. 実験結果

観測された流況の一例を図-1 に示す。エアカーテンによって誘起された上昇流は上層で水平流に変じ、下層はエアカーテンに向う流れとなり上層は離れる流れとなる。水平流向の反転する深さを摩擦深度と呼んでその上下の流況を対象とする。図-2 は摩擦深度およびその上下層の流量、流速の一例を示す。図中には表面から摩擦深度まで、摩擦深度から底面までの流量およびおのの区間の平均流速が示してある。各観測断面区間での連続条件の不成立の程度は流速観測の誤差の程度を示すことになる。摩擦深度は図-2 に見るようにエアカーテンのごく近傍を除きほぼ様な水深に生じているので、この平均値を f_a とし、 f_a と水深 h の比が各種の水深 h 、風量 Q_a' 、気泡孔径 ϕ 、カーテン厚さ B とどのように関係するかを図示すると図-3~図-5 のようになる。これら f_a/h は Q_a' の増加とともに減少し表層に流れが集中することがわかる。また h 、 ϕ との関係は少なく、 B との関係は B の大きいほど大きいことがわかる。

表面から摩擦深度までの水平流速の平均を u_1 とし、 u_1 と Q_a' 、 h 、 ϕ 、 B との関係を示したものが図-6~図-12 である。エアカーテンの中心からの距離 x による流

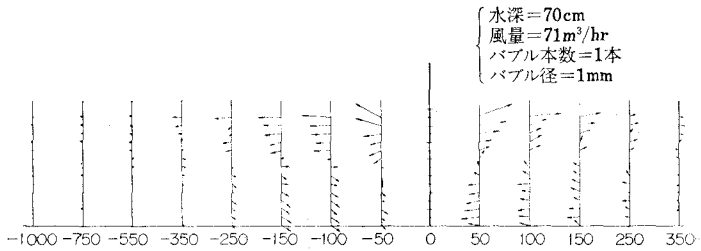


図-1 エアカーテンによる流速ベクトルの例

*正会員 農博 農林省農業土木試験場 海岸研究室長

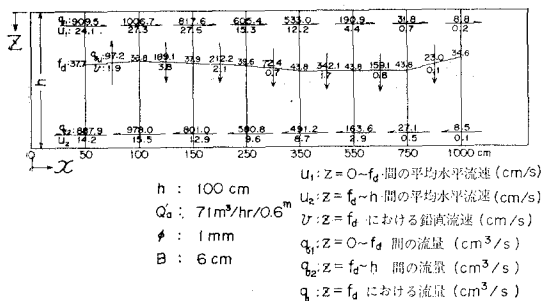


図-2 エアカーテンによる流況例

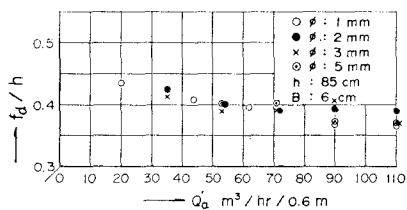


図-3 気泡径別の摩擦深度と風量

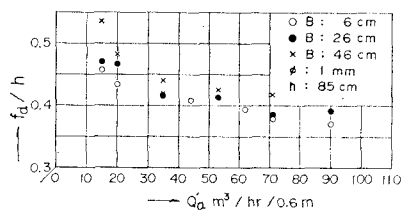


図-4 エアカーテン厚さ別の摩擦深度と風量

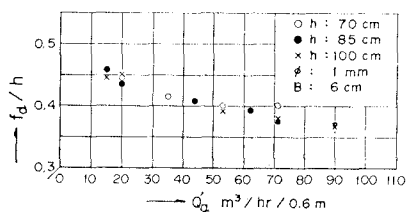


図-5 水深別の摩擦深度と風量

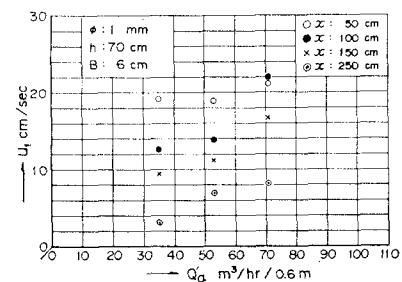


図-6 風量と上層平均流速

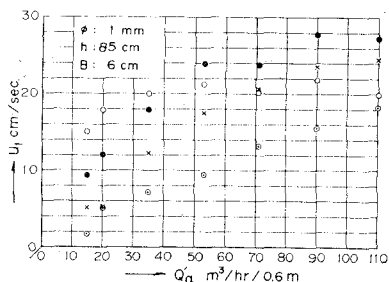


図-7 風量と上層平均流速

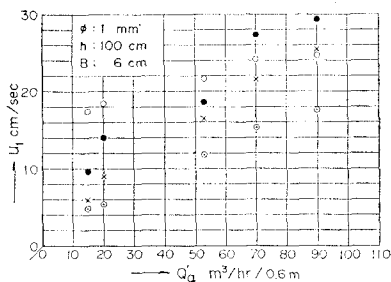


図-8 風量と上層平均流速

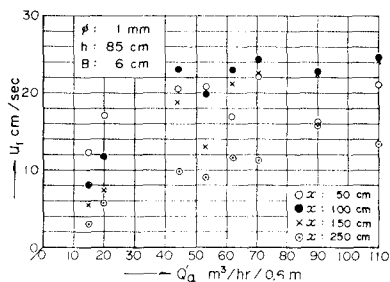


図-9 風量と上層平均流速

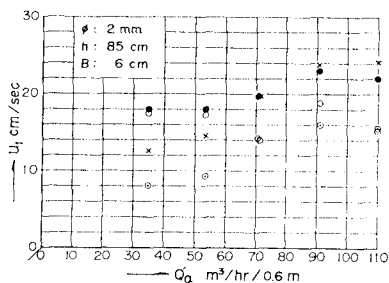


図-10 風量と上層平均流速

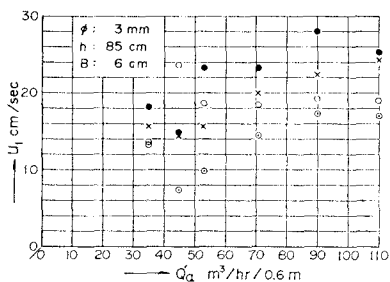


図-11 風量と上層平均流速

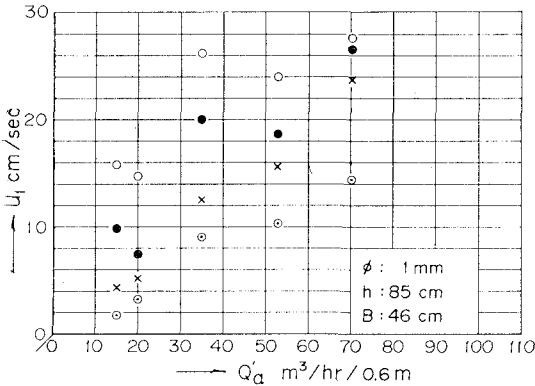


図-12 風量と上層平均流速

速の変化は Q_a' が大きくなると最大流速の発生位置がカーテンから遠ざかる。水平流速の減衰については後述する。

4. 理論的考察

気泡群の上昇によって近傍水塊の上昇流が発生する。したがって上昇流を解析するには、気泡とこのまわりの水との間の抗力、粘性力を考察しなければならない。しかし上昇流は上層および下層水平流となり、この水平流はエアカーテン部の圧力分布と水平流に転じた断面での圧力分布によって検討される。水平流が解析されれば図-2のように上昇流も求められる。

(1) 摩擦深度 f_d の解析

図-13 に示す水理模式図を用いて考察する。気泡の上昇に伴って気泡は分散する。その分布の形状は図-14 の写真に見るように上昇距離に比例して直線的に広がる。このことは栗原らの研究でも求められている。

図-13 から

$$B_z = B + 2(h-z)\tan\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって z なる深さの容気率 r_a は

$$r_a = \frac{Q_a}{B_z V_0} \frac{h_0}{h_0 + z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 θ : 気泡群の拡がりの線と鉛直線との角、 V_0 : 気泡の上昇速度、 Q_a : 気泡発生筒の単位長さ、単位時間当りに噴出する空気量 (1 気圧換算値)、 h_0 : 1 気圧を水柱で表わした値。よってエアカーテン中央部の見掛けの比重 σ_z' は、

$$\sigma_z' = 1 - \frac{Q_a h / V_0}{\{B + 2(h-z)\tan\theta\}(h_0 + z)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

よって、エアカーテン中央断面 (I-I 断面) の z なる点の圧力 p_c は

$$\begin{aligned} p_c &= \int_{-h}^z w \sigma_z' dz \\ &= w \left[(z + h) + K \ln \frac{\{B + 2(h-z)\tan\theta\}(h_0 - h)}{\{B + 2(h+h)\tan\theta\}(h_0 + z)} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$K = \frac{Q_a h}{V_0 \{B + 2(h + h_0)\tan\theta\}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中、 w : 水の密度、 h : 気泡群の作る水面の盛り上り高さ。

気泡の存在しない II-II 断面における圧力分布は

$$p = wz \quad \dots\dots\dots (6)$$

摩擦深度 f_d は $p_c = p$ として求め、

$$\begin{aligned} \frac{f_d}{h} &= \left[\left(\frac{B}{2h\tan\theta} + 1 \right) \left(\frac{h_0}{h} - \frac{h}{h} \right) \exp \left(\frac{h}{K} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{h_0}{h} \left(\frac{B}{2h\tan\theta} + 1 + \frac{h}{h} \right) \right] / \left[\frac{B}{2h\tan\theta} \right. \\ &\quad \left. + 1 + \frac{h}{h} + \left(\frac{h_0}{h} - \frac{h}{h} \right) \exp \left(\frac{h}{K} \right) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで

$$\begin{aligned} V_0 &= c_1 \sqrt{g\phi} \\ \Delta h &= c_2 h \ll h \end{aligned}$$

であるから

$$\frac{\Delta h}{K} = \frac{\sqrt{g\phi} h}{Q_a} \left\{ \frac{B}{h} + 2 \left(1 + \frac{h_0}{h} \right) \tan\theta \right\} c_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

式 (7)、(8) から f_d/h の元方程式は

$$\frac{f_d}{h} = F \left(\frac{\sqrt{g\phi} h}{Q_a}, \frac{B}{h}, \frac{h_0}{h} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。

また一般に $\Delta h/h \ll 1$ であるから、

式 (7) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_d}{h} &= \frac{\frac{h_0}{h} \left(\frac{B}{2h\tan\theta} + 1 \right) (\exp \alpha - 1)}{\frac{B}{2h\tan\theta} + 1 + \frac{h_0}{h} \exp \alpha} \\ \alpha &= \frac{\Delta h}{K} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式 (9) によって実験値をまとめると 図-15 となり、図-15 を計算図表としてまとめると 図-16 のようになる。

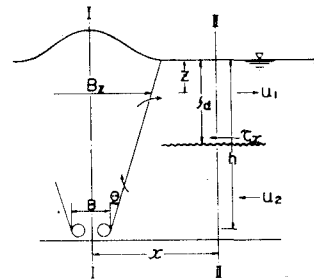


図-13 水理模式図

(2) エアカーテン近傍の水平流速の解析

エアカーテンの近傍で、上昇流の影響のない程度、すなわち上昇流が水平流に転じた直後で、かつこの間での摩擦深度面における粘性抵抗の影響の無視できる程度の

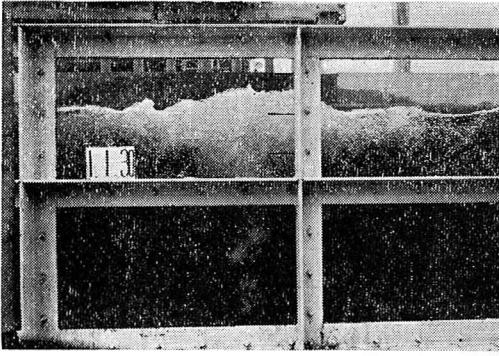


図-14 実験写真

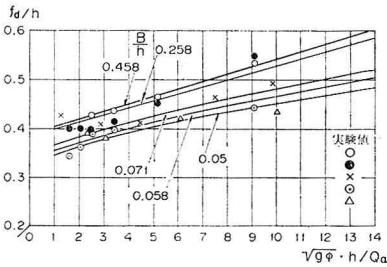


図-15 摩擦深度と風量, 水理量

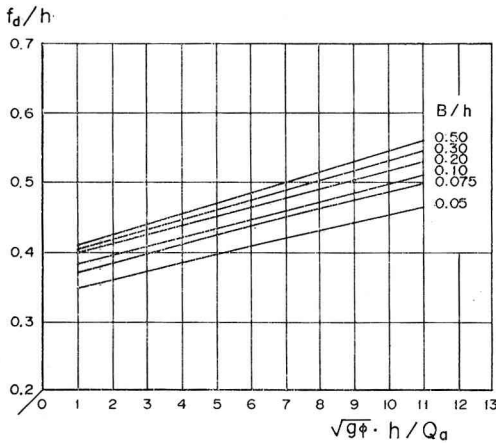


図-16 摩擦深度と風量, 水理量

距離の鉛直断面について考える (II~II 断面)。図-13 の I-I, II-II 断面の $z=0 \sim f_d$ 区間に運動量法則を適用する。圧力分布は式 (4), (6) で与えられるから

$$\int_0^{f_d} (p_c - p) dz = \frac{w u_1^2}{g} f_d \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここに左辺は

$$\begin{aligned} \int_0^{f_d} (p_c - p) dz &= w \int_0^{f_d} \left[\Delta h + K \ln \frac{B+2(h-z)\tan\theta}{B+2(h+\Delta h)\tan\theta} - K \ln \frac{h_0+z}{h_0-\Delta h} \right] dz \\ &= w \left[\Delta h f_d + K \left\{ - \left(h + \frac{B}{2 \tan \theta} - f_d \right) \right. \right. \\ &\quad \times \ln \frac{h+B/2 \tan \theta - f_d}{h+B/2 \tan \theta + \Delta h} + \left. \left(h + \frac{B}{2 \tan \theta} \right) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \ln \frac{B/2 \tan \theta + h}{h+B/2 \tan \theta \Delta h} - (h_0 + f_d) \\ &\times \ln \frac{h_0 + f_d}{h_0 - \Delta h} + h_0 \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h} \left. \right\} \end{aligned}$$

よって式 (11) から

$$\begin{aligned} \frac{u_1}{\sqrt{gh}} &= \left[\frac{\Delta h}{h} + \frac{K}{f_d} \left\{ \left(1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} \right) \right. \right. \\ &\quad \times \ln \frac{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h}}{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} + \frac{\Delta h}{h}} \\ &\quad - \left(1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} - \frac{f_d}{h} \right) \\ &\quad \times \ln \frac{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} - \frac{f_d}{h}}{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} + \frac{\Delta h}{h}} - \left(\frac{h_0}{h} + \frac{f_d}{h} \right) \\ &\quad \times \ln \frac{\frac{h_0}{h} + \frac{f_d}{h}}{\frac{h_0}{h} - \frac{\Delta h}{h}} + \frac{h_0}{h} \ln \frac{h_0}{h_0 - \frac{\Delta h}{h}} \left. \right\} \left. \right]^{1/2} \quad (12) \\ \frac{K}{f_d} &= \frac{Q_a}{\sqrt{g \phi h}} \cdot \frac{c_1}{\frac{f_d}{h} \left\{ \frac{B}{h} + 2 \left(1 + \frac{h_0}{h} \right) \tan \theta \right\}} \quad \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

一般に $\frac{\Delta h}{h} \ll 1$

このとき式 (12) は

$$\begin{aligned} \frac{u_1}{\sqrt{gh}} &= \left[c_2 + \frac{K}{f_d} \left\{ - \left(1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} - \frac{f_d}{h} \right) \ln \right. \right. \\ &\quad \times \ln \frac{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h} - \frac{f_d}{h}}{1 + \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{B}{h}} \\ &\quad - \left(\frac{h_0}{h} + \frac{f_d}{h} \right) \ln \left(1 + \frac{f_d}{h} \cdot \frac{h}{h_0} \right) \left. \right\} \left. \right]^{1/2} \quad \dots (14) \end{aligned}$$

式 (12), (13), (14) の元構成は

$$\frac{v_1}{\sqrt{gh}} = G \left(\frac{\sqrt{g \phi h}}{Q_a}, \frac{B}{h}, \frac{f_d}{h}, \frac{h_0}{h} \right) \quad \dots (15)$$

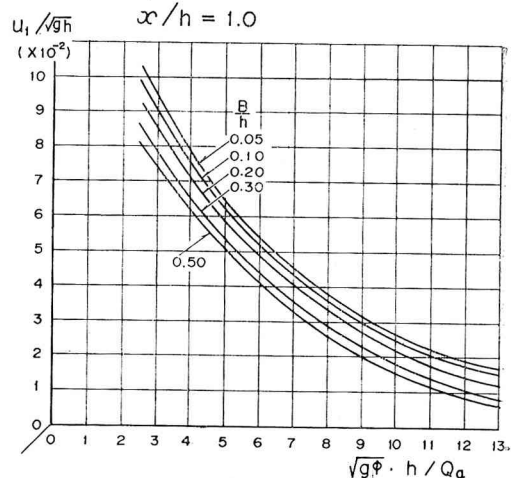


図-17 エアカーテンによる水平流速

である。式 (12) または式 (14) と式 (13) から u_1 を計算するには $c_1 \cdot c_2$ を定める必要がある。いま 図-6~図-12 を式 (15) にしたがって求めると 図-17~図-21 を得る。

(3) 水平流の減衰

図-13 の検査面 II-II 断面の流速 u_1 と、この断面より dx だけ離れた断面における水平流速について考える。

深度 f_d における界面抵抗を τ_x とすると運動量法則から

$$\frac{w f_d}{g} \cdot \frac{du_1^2}{dx} = \tau_x \dots \dots \dots (16)$$

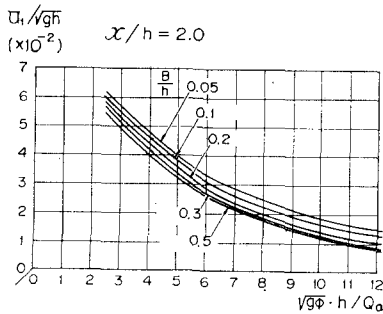


図-18 エアカーテンによる水平流速

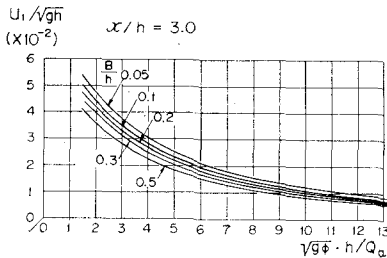


図-19 エアカーテンによる水平流速

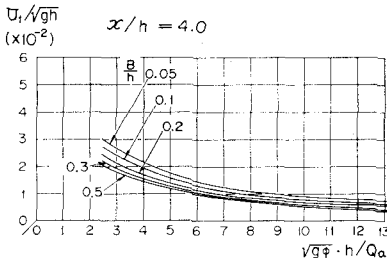


図-20 エアカーテンによる水平流速

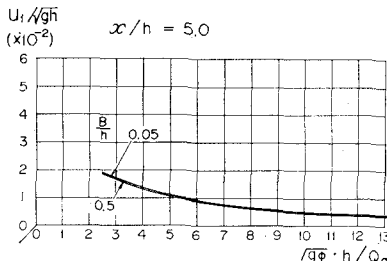


図-21 エアカーテンによる水平流速

また連続の条件から

$$f_d \frac{du_1}{dx} = v \dots \dots \dots (17)$$

ここに v は摩擦深度面を通過する下向流速である。

τ_x は f_d 面を通し u_1 領域から u_2 領域に輸送される運動量と粘性逸散によって示すことができる。 f を f_d 面の摩擦抵抗係数として、

$$\tau_x = -\frac{wv}{g} (u_1 + u_2) - \frac{fw}{g} u_1^2$$

また、 $u_1 f_d = u_2 (h - f_d)$ 、これと式 (17) から

$$\tau_x = \frac{w f_d}{2g} \left(1 + \frac{f_d}{h + f_d} \right) \frac{dv_1^2}{dx} - \frac{fw}{g} v_1^2$$

式 (16) に代入して、

$$\frac{du_1^2}{dx} = -2 K_1 u_1^2, \quad K_1 = \frac{f}{f_d \left(1 - \frac{f_d}{h + f_d} \right)}$$

これを解いて

$$l_n u_1 = -K_1 x + c$$

$x=0$ で $u_1 = u_{1s}$ とすれば、 $c = l_n u_{1s}$

$$\therefore \frac{u_1}{u_{1s}} = \exp \left\{ -\frac{f h}{f_d (1 - f_d / (h + f_d))} \frac{x}{h} \right\} \quad (18)$$

すなわ x/h ちについての指数関数となる。

(4) 鉛 直 流

以上より水平流が求まれば上昇流量 q_v は

$$q_v = 2 u_{1s} f_d = 2 u_{2s} (h - f_d)$$

u_{1s} , u_{2s} は図-13 における II-II 断面、すなわち $x/h = 1 \sim 2$ 程度の水平流速にとる。任意点の f_d 面における下向流速 v は式 (17) で求まる。

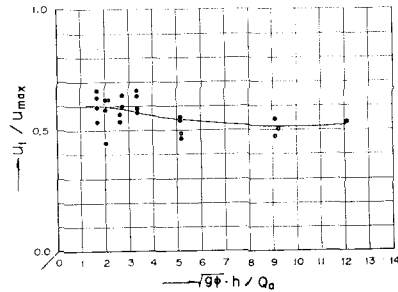


図-22 水平流速の鉛直分布

布の中間分布となり、表層付近に最大流速 u_{max} を生ずる。平均流速 u_1 との比をとれば 図-22 のようであり $\sqrt{g \phi} h / Q_a$ が小さいときは放物線分布に近く、大きいときは三角分布に近づく。

5. あとがき

以上、エアカーテンによる上昇流の発生について理論的考察のもとに実験結果をまとめた。本実験において h_0/h は 10~14 で現地適用に若干の問題を残している。この点については、今後さらに検討したい。最後に本実験にご協力いただいた茨城大学沢田和男、鈴木俊明の両氏に厚く御礼申し上げる。