

(Ⅱ - 29) 躍層を有する密度成層中の Bubble Plume における上層からの連行特性

宇都宮大学工学部 正員 池田裕一
 埼玉大学工学部 正員 浅枝 隆
 宇都宮大学工学部 正員 須賀堯三

1. はじめに

近年、閉鎖水域の富栄養化対策として曝気循環を行うことが多くなってきた。曝気循環には単に酸素を供給して水域の貧酸素状態を解消させるだけでなく、表層あるいは深層の流動・混合を促すことにより、さらに大きな意味での生物環境をコントロールできる可能性がある。そこで本研究は、曝気により生ずる Bubble Plume が、プランクトン増殖に重要な表層（有光層）にどれほどの影響を与え得るか若干の検討を加えたものである。

2. Bubble Plume による混合形態と連行特性

図2は躍層を有する二層状態での Bubble Plume による混合形態の一例を示したものである¹⁾。下層にある密度の高い水塊は気泡の浮力により上昇し、密度界面を越えて上層へと運ばれる。そして、ドームを形成しながら上層の水塊と混合されることにより、上層と下層の間に中間層が発達していく。これを上層側から見れば、上層の水が中間層へと連行されていることになり、場合によっては、水面付近の有光層内に生息している植物プランクトンごと、有光層の水塊をより深い部分に送り込み、その増殖を抑制することが可能となる。したがって、この Bubble Plume が上層からどの程度の水塊を連行するかを知ることは、こうした生物環境を有効に制御するためにも非常に重要なものとなってくる。しかし、このような場合の連行特性を詳細に検討した例は意外に少ない。浅枝ら¹⁾は上層からの連行係数 $f_e (= Q_e / Q_w)$ を中間層上面を通過する Bubble Plume の密度フルード数

$$F_d = \frac{w}{\sqrt{g' b}} \quad (1)$$

($g' = (\rho_c - \rho_u) g / \rho_u$, w, b は Plume の上昇流速および半径) で整理し、

$$f_e = \frac{0.18 F_d^3}{1 + 0.2 F_d^3} \quad (2)$$

なる実験式を提案している。図2に示すように式(2)と実験結果^{1) 2)}との適合性は良好であるが、式(1)、(2)に気泡量の影響が全く入っていないことからわかるように、気泡量が比較的少ない場合に適用できるものといえる。

3. Double Plume Model による解析

気泡量が多い場合に関しては、実験室規模での検討が困難であり、また現段階では有用な現地観測の結果も得られていない。そこで、中心部(inner plume)は上向きの密度噴流、周辺部(outer plume)は下降 Plume (図3)であるような Double Plume Model³⁾を用いて、ドームの挙動を解析し、より広い条件下での混合特性を検討することにする。

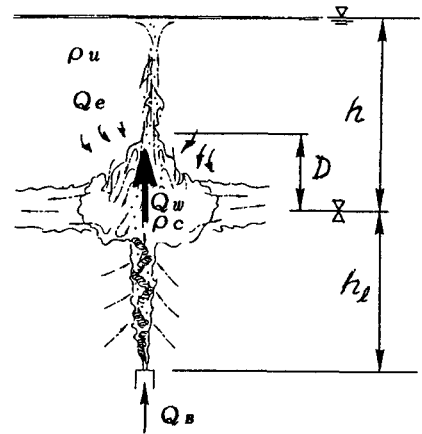


図1. Bubble Plume による混合形態

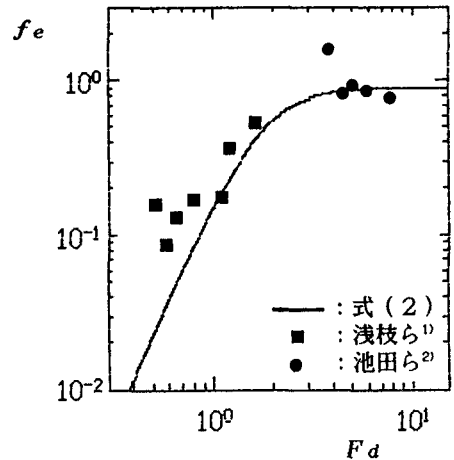


図2. 上層からの連行量と密度フルード数

(1) 支配方程式: 図3のように鉛直上向き, 下向きにそれぞれ z 軸, z^* 軸をとると, inner および outer plume に関する体積, 運動量, 浮力の保存則は次のようになる。

$$\frac{d(r_1^2 v_1)}{dz} = 2r_1 \alpha_B (v_1 + v_2) - 2r_1 \alpha_r v_2 \quad (3)$$

$$\frac{d(r_1^2 v_1^2)}{dz} = -r_1^2 g_1' - 2r_1 \alpha_B v_2 (v_1 + v_2) - 2r_1 \alpha_r v_2 v_1 \quad (4)$$

$$\frac{d(r_1^2 v_1 g_1')}{dz} = -\frac{d(r_1^2 v_1 g_A)}{dz} + 2r_1 \alpha_B (v_1 + v_2) g_2' - 2r_1 \alpha_r v_2 g_{1L}' \quad (5)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2]}{dz^*} = -2r_1 \alpha_B (v_1 + v_2) + 2r_1 \alpha_r v_2 + 2r_2 \alpha v_2 \quad (6)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2^2]}{dz^*} = (r_2^2 - r_1^2) g_2' - 2r_1 \alpha_B (v_1 + v_2) v_2 - 2r_1 \alpha_r v_2 v_1 \quad (7)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2 g_2']}{dz^*} = -2r_1 \alpha_B (v_1 + v_2) g_2' + 2r_1 \alpha_r v_2 g_{1L}' \quad (8)$$

ここに, r, v, g' はそれぞれ plume の半径, 流速, (気泡を含めた) 相対重力であり, inner, outer に対して添字 1, 2 を付した。また, $\alpha, \alpha_B, \alpha_r$ は図3に示すような連行を表すための連行係数である。さらに, A は気泡の(体積)混入率, g_{1L}' は inner plume の液体のみにかかる相対重力であり, 次式により求められる。

$$g_{1L}' = g_1' + g_A \quad (9)$$

$$\pi r_1^2 (v_1 + u_s) A = Q_B \frac{h_a}{h_a + h - z} \quad (10)$$

ただし, u_s : 気泡のslip速度, h_a : 大気圧水頭, h : 上層の水深。

(2) ドーム頂部での条件

inner plume と outer plume がドーム頂部にて接続する際の条件は, 頂部の形状を円柱と球との組み合わせ(図4)と仮定して, これに体積, 質量, 運動量の保存則を考えることにより, 次のようになる。

$$r_1^2 v_1 = (r_2^2 - r_1^2) v_2 \quad (11)$$

$$r_1^2 v_1 g_{1L}' = (r_2^2 - r_1^2) v_2 g_2' \quad (12)$$

$$r_1^2 v_1^2 + (r_2^2 - r_1^2) v_2^2 = r_2^3 \left(\frac{2}{3} + \frac{h_2}{r_2} \right) g_{1L}' \quad (13)$$

以上, 式(3)～(13)を用いて inner plume および outer plume, そしてドーム全体の挙動が計算できることになるが, その結果を含めて詳細は発表当日報告したい。

<参考文献>

- 1) 浅枝・池田・Imberger: 土木学会論文集, No. 438/II-17, pp. 23-30, 1991.
- 2) 池田・臼井・須賀: 第19回関東支部技術研究発表会講演概要集, 1992.
- 3) McDougall, T. J.: Tellus, 33, pp. 313-320, 1981.
- 4) McDougall, T. J.: Jour. Fluid Mech., vol. 85, pp. 655-672, 1978.

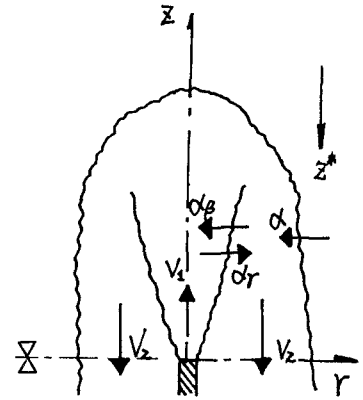


図3. Double Plume Model

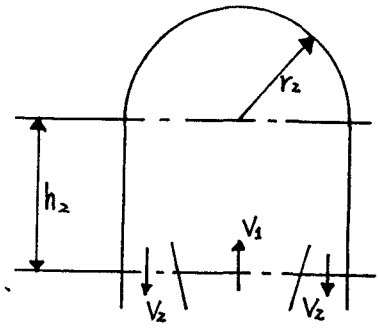


図4. ドーム頂部での接続