

II-131

Double Plume Modelによる密度成層中のBubble Plumeの解析

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 須賀亮三

1. はじめに

Bubble Plumeは、閉鎖性水域の富栄養化対策や河川河口部における塩水遡上防止に用いられるなど、近年重要な環境制御法の一つになっている。しかし、対象水域には密度成層が形成されていることが多く、そのような場合の Bubble Plume の振舞いについては、定性的にいくつかの研究が成されているものの、現象をよく定量化するには至っていない。本研究は、Double Plume Model を用いて、密度成層中の Bubble Plume の挙動を定式化し、その基本的特性の解析を試みたものである。

2. Double Plume Model による定式化

図1のように、気泡の浮力によって下方の密度の高い水塊が上昇していく内側Plumeと、相対重力に抗しきれずに周囲に放出されて下降していく外側Plumeとの、2重構造を考える。すると、双方のPlumeに関する体積・運動量・質量の保存則はそれぞれ式(1)~(6)のようになる。

$$\frac{d(r_1^2 v_1)}{dz} = 2r_1 \alpha_s (v_1 - v_s) - 2r_1 \alpha_r |v_s| \quad (1)$$

$$\frac{d(r_1^2 v_1^2)}{dz} = -r_1^2 g_1' + 2r_1 \alpha_s v_s (v_1 - v_s) - 2r_1 \alpha_r |v_s| v_1 \quad (2)$$

$$\frac{d(r_1^2 v_1 g_1')}{dz} = -\frac{d(r_1^2 v_1 g_A)}{dz} + 2r_1 \alpha_s (v_1 - v_s) g_s' - 2r_1 \alpha_r |v_s| g_{1L}' \quad (3)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2]}{dz} = -2r_1 \alpha_s (v_1 - v_s) + 2r_1 \alpha_r |v_s| + 2r_2 \alpha |v_s| \quad (4)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2^2]}{dz} = -(r_2^2 - r_1^2) g_2' - 2r_1 \alpha_s (v_1 - v_s) v_2 + 2r_1 \alpha_r |v_s| v_1 \quad (5)$$

$$\frac{d[(r_2^2 - r_1^2) v_2 g_2']}{dz} = -2r_1 \alpha_s (v_1 - v_s) g_2' + 2r_1 \alpha_r |v_s| g_{1L}' \quad (6)$$

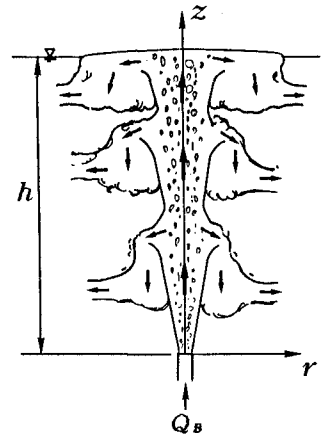


図1. 密度成層中のBubble Plume

ここで、 r 、 v 、 g' はPlumeの半径、流速(鉛直上向きが正)、周囲との相対重力であり、内側・外側の諸量にそれぞれ添字1、2を付した。連行係数 α 、 α_s 、 α_r はそれぞれ、周囲から外側Plumeへ、外側Plumeから内側Plumeへ、内側Plumeから外側Plumeへの連行を示すものである。また、 A は気泡の(体積)混入率、 g_{1L}' は内側Plumeの水塊のみに作用する相対重力であり、それぞれ式(7)、(8)のように求められる。

$$g_{1L}' = g_1' + g_A \quad (7)$$

$$\pi r_1^2 (v_1 + u_s) A = Q_B \frac{h_a}{h_a + h - z} \quad (8)$$

ただし、 u_s : 気泡のslip速度、 h_a : 大気圧水頭、 h : 全水深、 Q_B : 水面での気泡流量。

計算に際しては、McDougal¹⁾の級数解により初期条件を与えて、内側Plumeを鉛直上向きに計算していき、上昇流速が減少して内側Plumeの密度フルード数がある程度小さくなったところから、外側Plumeを下向きに計算し、外側Plumeと周囲の密度が等しくなったところで周囲に貫入していくものとした。そして、許容誤差範囲内に収まるまで、逐次計算を行った。

3. 実験結果との比較

図2にMcDougal¹⁾の連続成層での実験条件に合わせた解析結果を無次元化した形で示す(ただし、 $M = Q_B g h_a / 4 \pi \alpha^2 h^2 u_s^3$)。図中の実線は内側Plume、破線は外側Plumeの諸量を示しており、上昇・下降

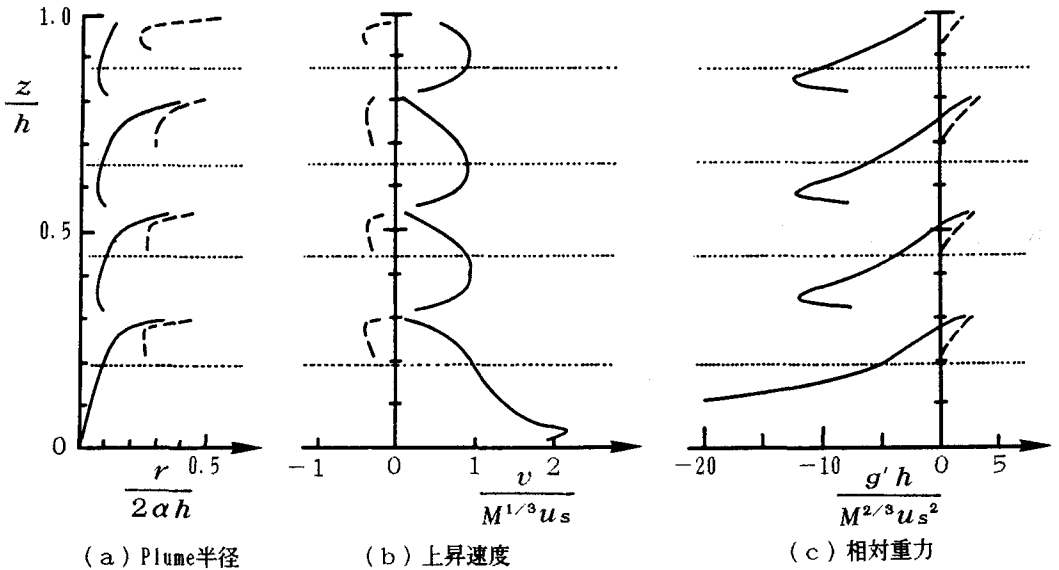


図2. 連続成層中のBubble Plume の解析例

を繰り返しながら水面へと達する Bubble Plumeの特異な挙動がよくわかる。また、点線は外側Plumeの水塊が周囲へと貫入していく高さを実験の写真から読取ったもので、上下のずれが多少はあるものの、貫入部の個数も含めて実験結果をよく説明している。実験での貫入位置が解析結果よりも全体として下側にある理由は、外側Plumeの密度が周囲と等しくなっても、実際には下向きの運動量を有しているので、これと周囲流体に対する浮力とが平衡するまで、さらに下降するためと考えられる。

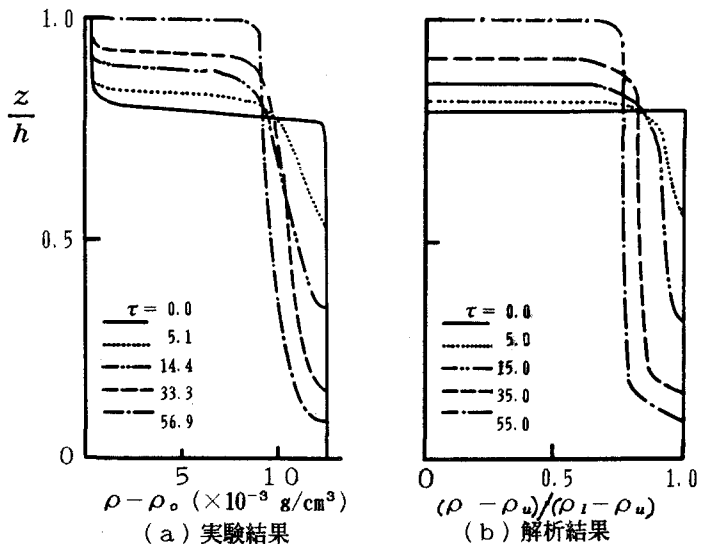


図3. 二成層状態からの混合過程の解析例

つぎに、Bubble Plumeによって躍層を有する密度成層が時間とともに変化していく様子²⁾を解析した例を図3に示す。ただし、 τ は無次元時間（ $= 4\pi\alpha^2 h^2 M^{1/3} u_s t / A_0 h$ 、 t : 時刻、 A_0 : 水槽の断面積）。また、成層の時間推移の計算には、Bubble Plumeの連行・貫入などの影響が瞬時にして水域の水平面内全体に伝播するような鉛直方向の1次元モデル²⁾を用いた。実験結果と比較すると、細かな差違は見られるものの、おおむね一致しているといえよう。初期の段階で上層への混合の進行度が実験結果よりも若干遅れているのは、1次元モデルを用いているために、周囲の密度勾配が実際よりも大きく評価されてしまうためと考えられる。

参考文献

- 1) McDougal, T. J. : J. F. M.、vol. 85、pp. 655-672、1978.
- 2) 浅枝、池田、Imberger, J. : 土木学会論文集、No. 438/II-17、pp. 23-30、1991.