

(Ⅱ - 4) 連続成層水域における二次元 Bubble Plume の 連行特性に関する基礎的研究

宇都宮大学 学生員 高橋 和宏
宇都宮大学 正会員 池田 裕一
宇都宮大学 正会員 須賀 堯三

1. はじめに

ダム湖など水深の大きな水域では、夏期には温度や塩分による密度成層が形成され、下層の無酸素化、上層の富栄養化などの水質障害が生じやすくなる。その対策として、水域下方に気泡を送入する Bubble Plume が用いられることが多い。しかし、こうした成層中での Bubble Plume については、モデル計算についての研究のみが先行し、具体的な連行特性を検討した例はほとんど見られない。また、従来は軸対称 Bubble Plume が研究の主な対象とされ、Bubble Plume のもう一つの形である二次元の研究がほとんど行われていない。そこで本研究では、連続成層水域における二次元 Bubble Plume の混合特性を把握することにする。

2. 実験方法

実験には、断面が $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、深さ 1.5m のアクリル製水槽を用い、二次元性をもたせるために、アクリル製の仕切り板で水槽の前面 10cm を仕切った。密度分布の測定には電気伝導度計を用い、鉛直方向に 1cm ごとにサンプリングを行った。なお、今回自ら行ったものの他に、Bulson¹⁾、ならびに Kobus²⁾ の一様密度水域における実験結果も用いて以後の検討を進めることにする。

3. 密度成層中の Bubble Plume の流動形態

今回の実験で見られた流れの形態を図-1 に示す。まず、気泡発生器から連続的に放出された気泡は、上昇しながら周囲の水を連行して上昇流領域 (Bubble Plume) を形成する。これが水面に達すると、流れは一時水面に沿って広がるが、下方から重い水塊を持ち上げてきているので、周囲との相対重力によって、再び水面下に沈みこむ。やがて、周囲との相対重力が釣り合った高さで下降を止め、今度は周囲へと広がっていく (intrusion) ようになる。

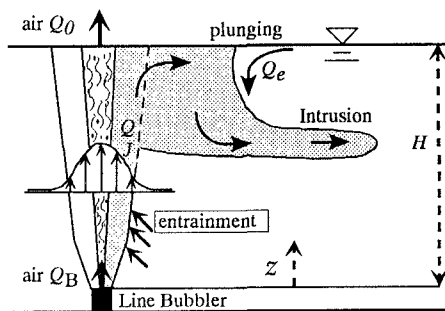


図-1 Bubble Plume の流動形態

4. 一様密度水域における連行特性

まず、一様密度水域の上昇流量を求める。水深 H の地点から水面での流量 Q_0 の空気を送り込んだ場合、 H_a を大気圧水頭、 g を重力加速度とすると、高さ z における浮力フラックスはおおよそ $J_{ns} = Q_0 g H_a / (H_a + H - z) = Q_B g (H_a + H) / (H_a + H - z)$ で与えられる (Q_B : 気泡放出点における空気流量)。次元的考察から、速度スケールは $J_{ns}^{1/3}$ 、また、広がり幅のスケールは αz と書ける (α は連行係数) から、上昇流量のスケールは

$$Q_{ns} = 2\alpha z \left(Q_B g \frac{H_a + H}{H_a + H - z} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。次に気泡の上昇速度の効果を表すパラメーターとして、

$$S_z \equiv \frac{J_{ns}}{u_s^3} = S_H \frac{H_a + H}{H_a + H - z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を導入する。ここで $S_H \equiv Q_B g / u_s^3$ である。式 (2) は、気泡の上昇速度 u_s と Bubble Plume の代表速度の比になっている³⁾。図-2 は、上昇流量 Q_n の測定値とスケール Q_{ns} との比を各ケースごとに平均し、それと S_z との関係を示したものである。その際、連行係数 $\alpha = 0.13$ ⁴⁾、気泡上昇速度 $u_s = 0.3(\text{m/s})$ とした³⁾。こ

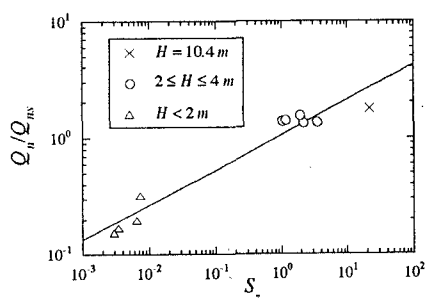


図-2 一様密度水域中の上昇流量

の図より、多少ばらついてはいるものの、 S_z の効果があることがわかる。図中の実線は、両対数グラフ上で直線回帰したもので、これよりおおよそ次式となる。

$$Q_n = 1.15_z^{0.3} Q_{ns} \dots\dots\dots (3)$$

5. 連続成層水域における連行特性

次に、成層中での上昇流量を考えてみる。成層水域では、相対重力の作用による運動量の減少分を考える必要がある。このとき、Bubble Plumeの浮力フラックス J は、

$$J = J_n - \Delta J = J_n - \int_0^z Q N^2 dz \dots\dots\dots (4)$$

と書ける。ここで、 N は浮力振動数である。いま、直線成層とすれば、 $N = \text{const}$ であり、成層中においても Plumeの広がり幅スケールは、おおよそ αz といえる。また、速度スケールは、intrusionの下側では $W_s = (Q_{Bg})^{1/3}$ と書けるから、 ΔJ のおおよそのスケールとして

$$\Delta J_s = \int_0^z 2\alpha z (Q_{Bg})^{1/3} N^2 dz = \alpha Q_{Bg} \left(\frac{z}{L}\right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

と書ける。ここに、 $L = (Q_{Bg}/N^3)^{1/3} = H/P_N^{1/3}$ は、成層の無次元強度 $P_N \equiv N^3 H^3 / Q_{Bg}$ から決まる高さスケールである

3)。次に、運動量フラックスは、運動量保存則からおおよそ

$$F_s = \int_0^z \frac{J_{ns}}{W_s} dz - C_J \int_0^z \frac{\Delta J_s}{W_s} dz \dots\dots\dots (6)$$

となる (C_J : 比例定数)。この運動量フラックスの次元を考えれば、上昇流量のスケールは

$$Q_s = \left(\frac{F_s}{2\alpha z}\right)^{1/2} = (2\alpha z F_s)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

となるので、結局、 C_N を比例定数として

$$\left(\frac{Q}{Q_n}\right)_s = \frac{Q_s}{Q_{ns}} = (1 - C_N \zeta)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

のような形に書くことができる。ここに ζ は

$$\zeta = \left(\frac{z}{L}\right)^2 \left(1 - \frac{z}{H_a + H}\right)^{2/3} \dots\dots\dots (9)$$

であり、成層による影響と水圧変化による影響を含んだ重要なパラメーターといえる。この結果をプロットしたものを図-3に示す。実験データ自体はばらついてはいるものの、おおよそ $C_N = 0.10$ を得ている。

次に、水面からの連行量 Q_e については、軸対称 Bubble Plume ではすでに検討した例もあるが、二次元では検討していない。intrusionより上での流量スケールは、 $Q_{es} = ((Q_{0g})^2 / N^3)^{1/3}$ と書ける。気泡の上昇速度の効果を検討するため、横軸に S_H 、縦軸に連行量の測定値 Q_e とスケール Q_{es} の比をとったものを図-4に示す。図中の実線は、両対数グラフ上で直線回帰を行ったもので、次式で与えられる。

$$Q_e = 0.31 S_H^{0.35} Q_{es} \dots\dots\dots (10)$$

ここで S_H の指数は、先の一様密度の式 (3) の指数 0.3 と同様な値が得られ、気泡の上昇速度の効果の依存性が同程度とも言えよう。以上、二次元 Bubble Plume の連行特性について、一様密度水域から連続成層水域にわたり、単純ながらも大まかな傾向を示す方法を考えた。そして S_H 、 P_N などの無次元パラメーターとの具体的なつながりも把握することができた。

参考文献

- 1) Bulson, P.S.: Dock and Harbour Authority, vol.42, No.487, pp.15-22, 1961.
- 2) Kobus, H.E.: Proc. Coastal Engng. Conf., pp.1016-1031, 1968.
- 3) Lemckert, C.J. and Imberger, J.: J. Hydraul. Engng, ASCE, vol.119, No.6, pp.680-703, 1993.
- 4) Jirka, G.H. and Harleman, D.R.F.: J. Fluid Mech., vol.94, pp.275-304, 1979.

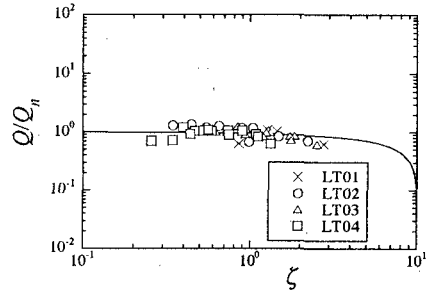


図-3 成層水域における Q/Q_n と ζ

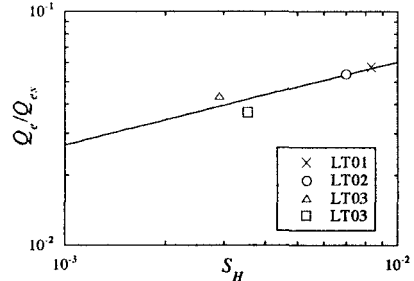


図-4 成層水域における Q_e/Q_{es} と S_H