

II - 261

連続成層における Bubble Plume の連行特性に関する基礎的研究

宇都宮大学大学院	学生員	高橋 和宏
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

ダム湖などの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ており、具体的な連行特性を検討した例はほとんど見られない。そこで本研究では、実験室から現場レベルにわたる幅広いスケールでのデータを元に、連続成層中の軸対称 Bubble Plume の連行特性の実態を検討することにする。

2 成層水域における流動形態

成層水域における Bubble Plume の流動形態を図1に示す。すなわち、Bubbler 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、下方の重い水塊を持ち上げてきているので、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う高さで下降を止め、今度は周囲へと広がっていく (intrusion) ようになる。以上より、上昇流量 Q と、水面に沈み込む際の連行量 Q_e を捉えることで、Bubble Plume の混合特性を把握できると言えよう。

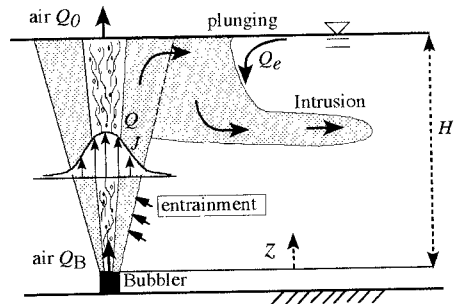


図1 Bubble Plumeの流動形態

3 一様密度水域中の連行特性

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がおおよそ $J_{ns} = Q_0 g H_a / (H_a + H - z)$ であることから、次元的考察より、速度スケールは $(J_{ns}/z)^{1/3}$ 、半径スケールは $2\alpha z$ (α は連行係数) と書けるから、一様密度水域での上昇流量のスケールが³

$$Q_{ns} = \pi (2\alpha z)^2 \left(\frac{J_{ns}}{z} \right)^{1/3} = 4\pi \alpha^2 z^2 \left(\frac{Q_0 g H_a}{z(H_a + H - z)} \right)^{1/3} \quad (1)$$

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

$$M_H = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi \alpha^2 H (H_a + H) u_i^3} \quad (2)$$

を導入する。これは気泡の上昇速度 u_i に対する Bubble Plume の代表速度の比になっている¹⁾。図2は従来の実験観測結果²⁾ について、上昇流量 Q_n の測定値とスケール Q_{ns} の比を各ケースごとに平均したものと M_H の関係をプロットしたものである。その際、連行係数は $\alpha = 0.083$ 、気泡の上昇速度は $u_i = 0.3(\text{m/s})$ とした。この図より多少ばらついてはいるものの M_H の効果があることが分かる。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、これより、おおよそ次式となる。

$$Q_n = 1.5 M_H^{1/9} Q_{ns} \quad (3)$$

4 連続成層中の連行特性

次に、成層中の上昇流量を求める際には、成層による浮力の変化を考える必要がある。このとき浮力フラックスは

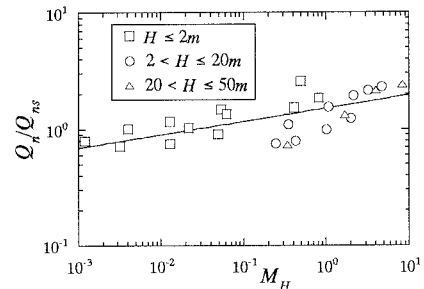


図2 一様密度水域の上昇流量

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

と書ける。 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、また、intrusion 高さより下では、上昇流速は、 $(Q_{Bg}/z)^{1/3}$ と書ける (Q_{Bg} : 気泡放出点の空気流量)。また、密度成層中においても Plume 半径は、おおよそ $2\alpha z$ のスケールだから、 ΔJ のスケールは、

$$\Delta J_s = \int_0^z 4\pi \alpha^2 z^2 N^2 \left(\frac{Q_{Bg}}{z} \right)^{1/3} dz = 4\pi \alpha^2 Q_{Bg} \left(\frac{z}{L} \right)^{8/3} \quad (5)$$

となる。ここに、 $L \equiv (Q_{Bg}/N^3)^{1/4} = H/P_N^{1/4}$ は、成層の無次元強度 $P_N (\equiv N^3 H^4 / Q_{Bg})$ から決まる高さスケールである。これを用いることで、 $\Delta J/J_n$ の大きさはおおよそ、

$$\left(\frac{\Delta J}{J_n} \right)_s = \frac{\Delta J_s}{J_{ns}} = 4\pi \alpha^2 \left(1 - \frac{z}{H_a + H} \right) \left(\frac{z}{L} \right)^{8/3} \quad (6)$$

そして上昇流量は浮力フラックスの $1/3$ 乗に比例するので、 C_J を定数とし、

$$\left(\frac{Q}{Q_n} \right)_s = \left[1 - C_J \left(\frac{\Delta J}{J_n} \right)_s \right]^{1/3} \quad (7)$$

と書くことができる。

図3は、連続成層中における実験観測^{3) 4)}で測定された上昇流量 Q と一様密度水域としての値 Q_n の比が、式(7)のスケールの何倍程度になるか、成層強度 P_N に対してプロットしたものである。係数 C_J の値は P_N に依存しないように調整し、おおよそ $C_J=0.9$ を得ることができた。またこの図から、平均として $Q/Q_n = 0.76(Q/Q_n)_s$ であるので、式(3)、(7)より、

$$Q = 1.2 M_H^{1/9} Q_{ns} \left[1 - 0.9 \left(\frac{\Delta J}{J_n} \right)_s \right]^{1/3} \quad (8)$$

が得られる。図4は、この式の計算結果（実線部）と実際の測定値を比較したものである。実験データ自体がかなりばらついてはいるが、大まかな傾向を良く説明していると言える。

次に、水面での連行量 Q_e については、すでに検討した例もあるが⁴⁾、気泡上昇速度の効果 M_H の依存性は考慮していない。図5は、intrusion より上での流量スケールが $Q_{es} \equiv [(Q_{Bg})^3 / N^3]^{1/4}$ であることから¹⁾、 Q_e/Q_{es} と M_H との関係をプロットしたものである。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。

$$Q_e = 0.15 M_H^{0.08} Q_{es} \quad (9)$$

以上、一様密度水域から連続成層水域にわたる連行特性について、単純かつ大まかな傾向を示す方法を考えた。また、これまで用いられてきた M_H などの無次元パラメーターとのつながりも把握することができた。今後、これを元にして Bubble Plume の混合特性を把握するつもりである。

<参考文献> 1) Lemckert, C.J. & Imberger, J.: J. Hydraul. Engng, ASCE, vol.119, No.6, 680-703, 1993. 2) 例えば Milgram, J. H.: J.Fluid Mech, vol.133, 345-376, 1983. 3) 松梨聖一郎・宮永洋一：水工学論文集，第34巻，145-150，1990. 4) Asaeda, T. & Imberger, J.: J.Fluid Mech., 249, 35-57, 1993.

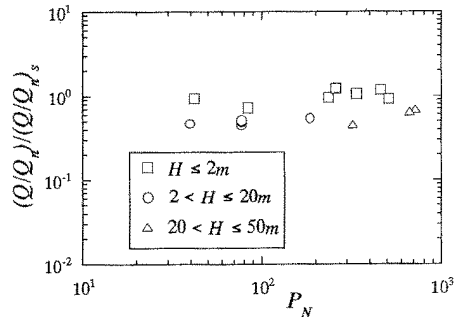


図3 成層水域の Q/Q_n のスケール比と P_N の関係

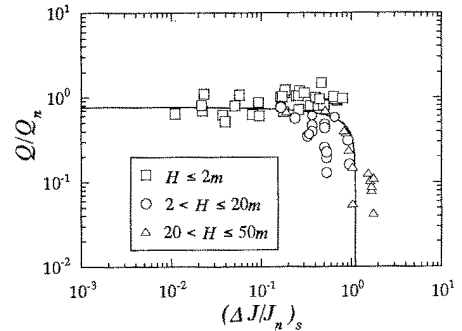


図4 成層水域での Q/Q_n と $(\Delta J/J_n)_s$ の関係

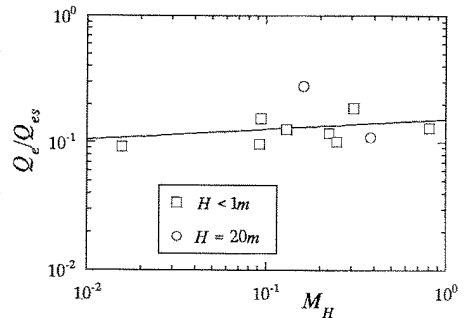


図5 成層水域での Q_e/Q_{es} と M_H の関係