

(Ⅱ-56) 連続成層における Bubble Plume の連行特性に関する基礎的検討

宇都宮大学工学部 学生員 高橋 和宏

宇都宮大学工学部 正員 池田 裕一

宇都宮大学工学部 正員 須賀 堯三

1 はじめに

Bubble Plume は、閉鎖性水域における富栄養化対策や海洋での漁場の開発など多くの目的に利用可能である。その際に Bubble Plume の挙動を予測しようとすると、連行特性をどのように決定するかが重要な問題となる。最近になって現場スケールの実験・観測により、一様密度水域中での連行特性はある程度明らかになってきた。ところが、Bubble Plume を適用する水域では、温度や塩分で密度成層を形成している場合が多く、こうした成層中での連行特性を具体的に検討した例はほとんど見られない。そこで本研究では、周囲の成層による Bubble Plume の浮力の低下に着目し、連続成層中の実験観測結果を整理することにより、一様密度水域での連行特性の補正をすることにする。

2 実験方法

実験には、断面 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 深さ 1m のアクリル製水槽を用いた。密度成層としては塩水を用い、2 タンクシステムによって連続成層を形成させる。そして、底面中央の点源から軸対称 Bubble Plume を発生させ、成層の混合を開始させ、ある程度混合が進んだところで、混合を一時停止させる。その後、流れが静穏になってから電気伝導度計を用い、鉛直方向に 0.5cm ごとに密度分布を測定し、Bubble Plume による混合の進行の具合を調べた。実験結果の解析には、今回の実験の他に、Asaeda & Imberger¹⁾ (水深 0.38m 、空気量 $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)、ならびに松梨ら²⁾ (水深 20m , 30m 、空気量 2.55 , 6.2 , $12 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) の実験結果も用いることにした。

3 成層水域中の上昇流量のスケーリング

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領域すなわち 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。その後、下降を続ける流れは、周囲との相対重力がつ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。このような密度分布の時間変化を図2に示すと、intrusion より下の領域では等密度線が下方へ移動し、上側では逆に上方へ移動していくのがわかる。これは、intrusion より下では、Bubble Plume への連行のために、等密度線の間隔が狭まってくるのに対して、上側の領域では、周囲へと intrusion する分だけ等密度線が上にシフトすることを考えれば明らかである。逆にこのことから、intrusion より下側の部分では、ある高さでの等密度線の移動速度に水域の断面積を乗ずることによって、その高さでの Bubble Plume の上昇流量 Q を求めることができる³⁾。図3はこうして算出した Bubble Plume の上昇流量の例である。

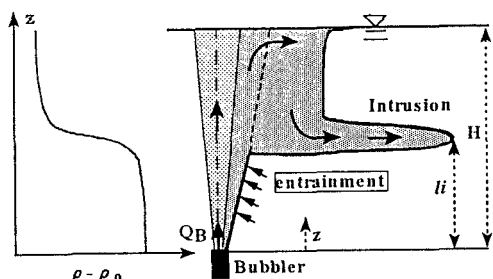


図1 Bubble Plume の流れの形態

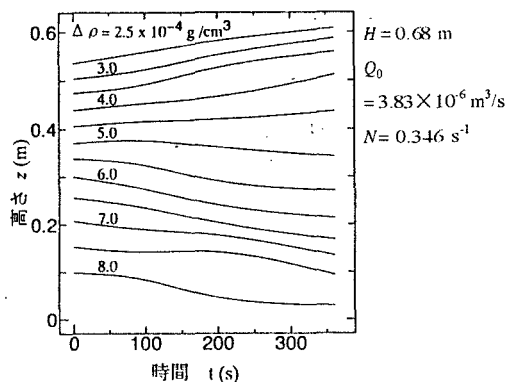


図2 密度分布の時間変化の例

ところで、一様密度水域では、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

$$J_N = \frac{Q_0 g H_a}{H + H_a - z} \quad (1)$$

であることから、一様密度水域での上昇流量が

$$Q_N = 4\pi\alpha^2 z^2 M_i^{1/3} u_i \times 0.49 \quad (2)$$

となる⁴⁾ (添え字 N は一様密度水域中のものであることを示す)。ここに、 $M_i = Q_0 g H_a / [4\pi\alpha^2 z (H + H_a - z) u_i^3]$ 、 u_i は静止流体中の気泡の上昇速度、 α は液体 Plume の連行係数 (≈ 0.083) である。これに対して、密度成層水域では、成層による浮力の変化を考えると、浮力フラックスは

$$J = J_N - \Delta J = J_N - \int_0^z Q N^2 dz \quad (3)$$

と書ける。 N は浮力振動数である。いま、連続成層とすれば $N = \text{const}$ であり、また、intrusion 高さより下では、上昇流速は、 Q_B を気泡放出点の空気流量とすれば、おおよそ、 $(Q_{B0}/z)^{1/3}$ 。また、Bubble Plume 半径は、おおよそ $2\alpha z$ のスケールだから

$$\Delta J \sim 4\pi\alpha^2 N^2 (Q_{B0}/z)^{1/3} \int_0^z z^{5/3} dz \quad (4)$$

となる。一方、Asaeda & Imberger¹⁾ は、次元解析から intrusion の高さスケールを、おおよそ、 $li = 4.5(Q_{B0}/N^3)^{1/4}$ としており、これを用いれば、 ΔJ は、

$$\Delta J \sim 4\pi\alpha^2 Q_{B0} g (z/li)^{8/3} \quad (5)$$

と書くことができる。

そこで、 Q/Q_N と z/li との関係をプロットしたものを図4に示す。この図から水深によってその傾向に違いが見られることがわかる。また、上昇流量は浮力フラックスの1/3乗に比例するので⁴⁾、 C_f を定数とし、

$$\frac{Q}{Q_N} = \left(\frac{J_N - \Delta J}{J_N} \right)^{1/3} = (1 - C_f \zeta)^{1/3} \quad (6)$$

が得られる。ここに

$$\zeta = \left(1 - \frac{z}{H + H_a} \right) \left(\frac{z}{li} \right)^{8/3}$$

である。この結果をプロットしたものを図5に示す。この図から、おおよそ $C_f = 2.0$ であることがわかる。以上、幅広い実験範囲にわたり、連続成層中の上昇流量のスケールリングができ、これを元にして連行特性を把握することができる。

<参考文献>

- 1) Asaeda, T. & Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J.Fluid Mech., 249, 35-57, 1993.
- 2) 松梨史郎・宮永洋一: 気泡噴流に関する現地実験, 水工学論文集, 第34巻, pp145-150, 1990.
- 3) Leitch, A. M. & Baines, W. D.: Liquid volume flux in a weak bubble plume, J.Fluid Mech., 205, 77-98, 1989.
- 4) Asaeda, T. & Ikeda, H. & Imberger, J.: Bubble Plume characteristics in two-layered environments and destratification process, J.Fluid Mech., (to be submitted).

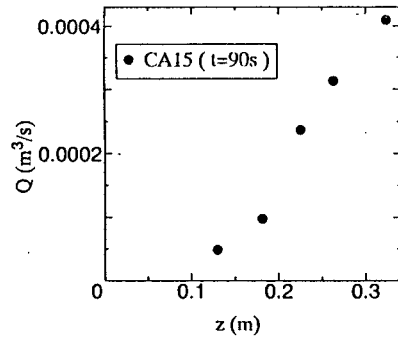


図3 上昇流量の算出例

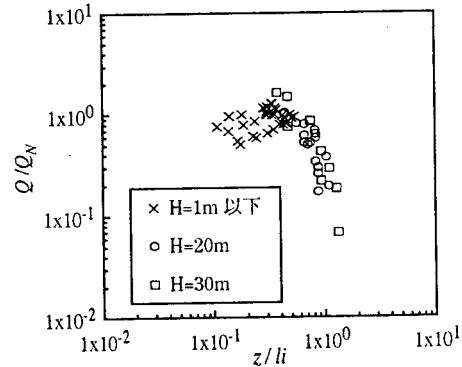


図4 Q/Q_N と z/li の関係

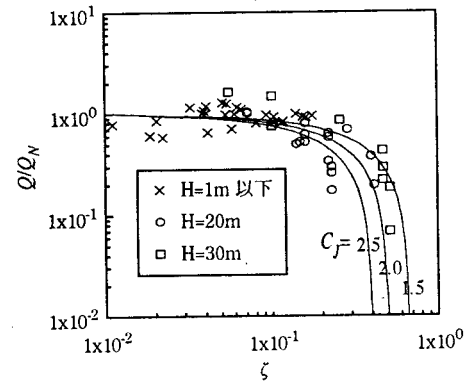


図5 Q/Q_N と ζ の関係