

(Ⅱ - 16) 大深度水域における気泡噴流の基本特性について

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

Bubble Plume はダムや湖沼などの閉鎖性水域における富栄養化対策や河口部での塩水遡上防止、港の凍結防止など多くの目的に利用されている。Bubble Plumeは、通常の液体を放出するPlume と異なり、浮力源となる気泡の大きさが、水域下方では水圧が高いため小さく、水面上昇とともに水圧が低くなるため大きくなり、上昇に伴って浮力が変化することが特徴の1つになっている。このことは実際にBubble Plumeを適用する大深度水域で顕著となる。ところが、こうした大きなスケールでの現象を実験室で再現することは困難であり、現地観測を行うにしても、経済的、時間的に負担が大きい。そこで、こうした大深度水域での現象を実験室レベルで再現する新しい実験手法を考えるその手始めとして、水域の水深がBubble Plumeの基本特性に与える影響について、若干の解析的検討を加えることにする。

2 解析方法

今回は簡単のため、一様密度の水域中の軸対称Bubble Plumeを考える。水深Hの地点から、水面での空気量 Q_0 である空気を送り込んだ時、高さzにおけるBubble Plumeの上昇領域の半径をb、その上昇流速をvとする。Bubble Plumeに関する体積、運動量の保存則は(Turner¹⁾)

$$\frac{d}{dz}(b^2 v) = 2\alpha b v, \quad \frac{d}{dz}(b^2 v^2) = b^2 g' \quad (1)$$

ここに α は連行係数である。また、 g' は気泡による浮力で、 g を重力加速度、 f_a を体積ポイド率とすると、 $g' = f_a g$ の様に与えられる。この f_a を用いると、高さzでの空気流量 Q_z は

$$Q_z = \pi b^2 (v + u_s) f_a \quad (2)$$

と書ける。ただし u_s は静止流体中の気泡の上昇速度である。ここで水圧による等温体積変化を考えると、 H_a を大気圧水頭とすれば、

$$Q_z = Q_0 \frac{H_a}{H_a + H - z} \quad (\text{体積変化あり}) \quad (3)$$

であり、(2)、(3)から直ちに f_a が求められる。今回は、比較のためこうした体積変化の影響を無視したものも考えることにする。この時は $Q_z = Q_0$ とすればよい。

以上の基礎式をAsaeda & Imberger²⁾ にならい

$$z = Hx, \quad b = 2\alpha HB, \quad v = M_{II}^{1/3} u_s V \quad (4)$$

$$g' = \frac{M_{II}^{2/3} u_s^2}{H} G, \quad M_{II} = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi \alpha^2 H (H + H_a) u_s^3}, \quad H_R = \frac{H}{H + H_a}$$

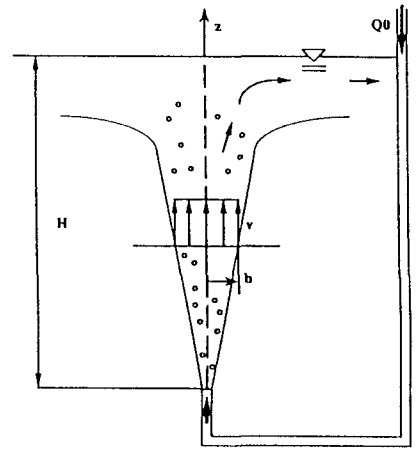


図1 Bubble Plumeの模式図

によって無次元化すると、

$$\frac{d}{dx}(B^2 V) = BV, \quad \frac{d}{dx}(B^2 V^2) = B^2 G \quad (5)$$

$$G = \frac{V}{(1 - H_R x) \left(V + M_{II}^{-1/3} \right) B^2} \quad (\text{体積変化あり}) \quad (6)$$

$$G = \frac{V}{(1 - H_R) \left(V + M_{II}^{-1/3} \right) B^2} \quad (\text{体積変化なし}) \quad (7)$$

なる支配方程式が得られる。方程式に含まれる無次元数は M_{II} と H_R の2つで、 M_{II} は気泡放出口における浮力の強さを示すパラメーター、 H_R は水深の無次元パラメーターである。

(5) と (6)、あるいは (5) と (7) を連立させて、Euler法により数値計算を行った。なお、数値的に求める際の初期値は、McDougall³⁾ の級数解を利用した。

3 解析結果及び考察

図2～4は高さ x に対する流量 $Q = B^2 V$ の変化を示したものである。ただし、Q1は体積変化を考慮しない流量、Q2は考慮した流量である。なお、実線部はAsaeda⁴⁾ による次元解析から求めた次の経験則である。

$$Q = 0.45x^2 \quad (8)$$

図2の水深の浅い場合は、体積変化の考慮の有無による違いは見られない。放出口における浮力のパラメーターである M_{II} を何通りかに変えてみたが、解にそれほど差は見られなかった。両対数グラフ上で経験則と傾きが違うが、これは無次元化の際に連行係数は水深方向に一定としたためで、実際は気泡放出口付近での連行係数は大きく、上昇するにつれ小さくなるものと考えられる。図3の水深が深い場合では体積変化を考慮しないと、その計算結果の差が明らかに大きくなってしまっている。この事は、 M_{II} を一定とした場合である図4を見ても顕著な事である。水深の深い場合は、体積変化による影響が、気泡の持つ浮力による運動量の輸送を減じていることがわかる。

<参考文献>

- 1) Turner, J.S. : Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press, 1972.
- 2) Asaeda, T. & Imberger, J. : Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid Mech., 249, 35-57, 1993.
- 3) McDougall, T.J. : Bubble Plumes in stratified environments, J. Fluid Mech., 85, 655-672, 1978.
- 4) Asaeda, T. & Ikeda, H. & Imberger, J. : Bubble plume characteristics in two-layered environments and destratification process, J. Fluid Mech., (to be submitted).

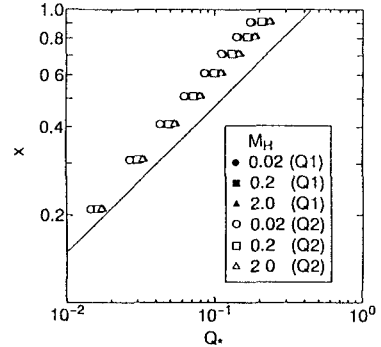


図2 浅い水深での上昇流量($H_R=0.1$)

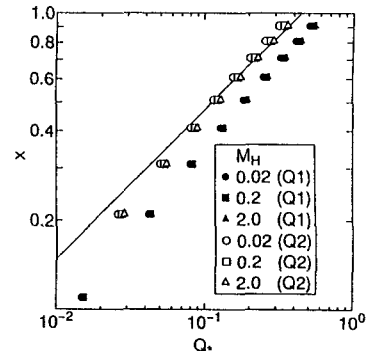


図3 深い水深での上昇流量($H_R=0.8$)

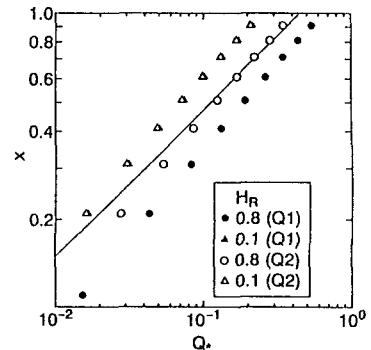


図4 M_{II} 一定での上昇流量($M_{II}=0.2$)