

II-239

一様密度水域における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 正会員 池田 裕一

埼玉大学工学部 正会員 浅枝 隆

宇都宮大学工学部 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。その際、Bubble Plumeの挙動を予測しようとする、連行特性をどのように設定するかが、重要な問題となる。ところが現場スケールでの観測もいくつか見られる昨今においても、これを具体的に評価した例はあまり見られないようである。そこで、本研究ではBubble Plumeの連行特性を明らかにすることを目的とし、フラックス主体の支配方程式の解析結果と実験解析結果とを比較検討することで、幅広いスケールに対応した連行係数の評価を行うことにする。

2 上昇流量の基本特性

一様密度水域中の軸対称Bubble Plumeを考える。水深Hの地点に、水面での流量 Q_0 の空気を送入した場合、 H_a を大気圧水頭、 g を重力加速度とすると、気泡放出点から高さ z における浮力フラックスは、およそ $Q_0 g H_a / (H + H_a - z)$ である。これよりそこでの上昇流量 Q を、 C_Q を定数として、

$$Q = \frac{Q_0}{4\pi\alpha_p^2 (H + H_a)^2 M_z^{1/3} u_s} = C_Q \left(\frac{z}{H + H_a} \right)^2 \quad (1)$$

$$M_z = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi\alpha_p^2 z (H + H_a - z) u_s^3}$$

の形に書くことができる¹⁾。ここで、 α_p は液体Plumeの連行係数（=0.12）とする。また、 u_s は静止流体中の気泡の上昇速度である。図2は、 $H=1m \sim 50m$ にわたる従来の実験観測結果について、 Q と $z/(H + H_a)$ の関係をプロットしたものである。水深の幅広い範囲にわたって系統的に整理できており $C_Q = 0.38$ を得る。

3 鉛直1次元モデル

今回はこのような流れの場を考える際に、流速、密度の分布形を仮定しないで話を進める。気泡放出点から高さ z におけるBubble Plumeの上昇流、運動量フラックス、浮力フラックスを π で除したものを、それぞれ Q 、 M 、 J_a とする。List & Imberger²⁾にならい、Bubble Plumeに関する体積、運動量の保存則を次のように書くことにする。

$$\frac{dQ}{dz} = 2\alpha\sqrt{M}, \quad \frac{dM}{dz} = C_B \frac{J_a Q}{M} \quad (2)$$

ここに α は連行係数、 C_B は流速や気泡の分布形によって決まる補正係数であり、簡単のため2者とも水深方向に一定とする。また、 J_a は空気量の連続式から、

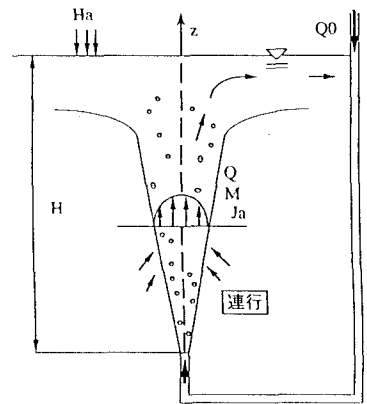


図1 Bubble Plumeの模式図

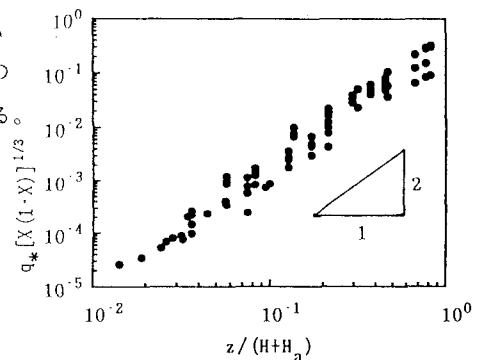


図2 上昇流量と高さ

$$J_a = \frac{Q_0 g}{\pi(M/Q + C_B u_s)} \frac{H_a}{H_a + H - z} \frac{Q}{M} \quad (3)$$

と書ける。以上の基礎式を

$$\begin{aligned} z &= Hx, & Q &= 4\alpha_p^2 H^2 M_H^{1/3} u_s q \\ M &= 4\alpha_p^2 H^2 M_H^{2/3} u_s^2 m, & J_a &= 4\alpha_p^2 H M_H u_s^3 j_a \\ M_H &= \frac{Q_0 g H_a}{4\pi\alpha_p^2 H(H + H_a)}, & H_R &= \frac{H}{H + H_a}, & \alpha &= \alpha_p \beta \end{aligned} \quad (4)$$

によって無次元化³⁾すると、

$$\begin{cases} \frac{dq}{dx} = \beta \sqrt{m} \\ \frac{dm}{dx} = C_B \frac{1}{m/q + C_B M_H^{-1/3}} \frac{1}{1 - H_R x} \end{cases} \quad (5)$$

なる支配方程式が得られる。

4 解析結果および考察

(5) の解析結果と(1)の経験則が合うように β と C_B の値を求めた。その際、初期値は級数解で与え、Euler法を用いて数値計算を行った。図3は C_B と M_H の関係をプロットしたものである。その値はばらついており、一定の傾向は見られないが、 $C_B=0.90$ 程度となっている。この値は、Gauss分布を仮定する場合、流速分布に対する気泡量分布の広がり幅の比に換算すると、おおよそ0.89程度となり、Milgram⁴⁾の実験観測結果にはほぼ一致する。図4は、 β と M_H の関係をプロットしたものである。 β は M_H により系統的に整理でき、これより

$$\beta = \frac{0.86 + 0.57 M_H^{5/3}}{1 + 0.36 M_H^{5/3}} \quad (6)$$

なる経験式を得る。この式によって外部条件のみから容易に連行係数が求められることになる。またこの値と(5)の式を用いて、上昇流量を解析した結果と測定データとの比較を図5、6に示す。それぞれ水深が1.37m, 50mとスケールが異なるものに対して適合性は妥当なものといえよう。

<謝辞> 本研究を行うにあたり、平成5年度文部省科学研究費奨励研究(A) (課題番号05855072、代表者：池田裕一)の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献> 1)Asaeda, T. & Ikeda, H. & Imberger, J. : J. Fluid Mech., (to be submitted). 2)List, E. J. & Imberger, J. : J. Hyd. Div., Proc. ASCE, 99, 1461-1474, HY9, 1973. 3)Asaeda, T. & Imberger, J. : J. Fluid Mech., 249, 35-57, 1993. 4)Milgram, J. H. : J. Fluid Mech., 133, 345-376, 1983.

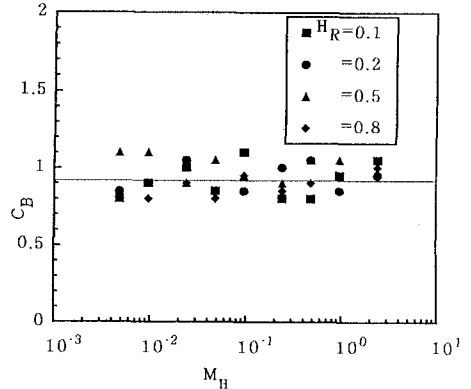


図3 C_B の評価

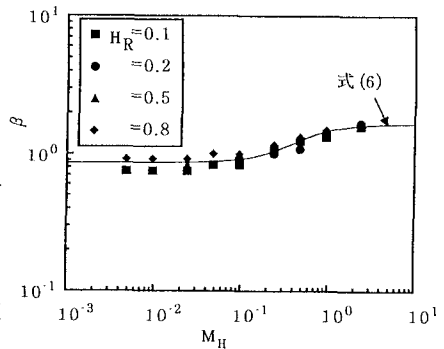


図4 連行係数の評価

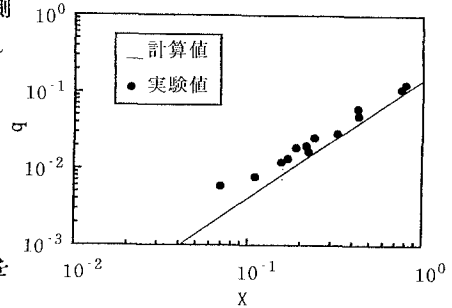


図5 計算結果の適合性 ($H=1.37\text{m}$)

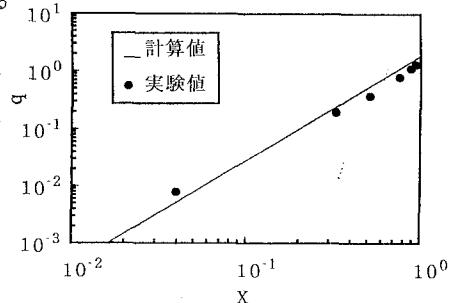


図6 計算結果の適合性 ($H=5.0\text{m}$)