

宇都宮大学 正員 池田裕一

埼玉大学 正員 浅枝 隆

宇都宮大学 正員 須賀堯三

はじめに

気泡噴流は、閉鎖水域に富栄養化をもたらす温度成層を破壊したり、塩水成層を混合させるために、極めて有効な方法と考えられている。ところが、その現象が非常に複雑なために、現象の把握は未だ定性的なものにとどまっており、効果的な運用方法も不明なままである。本研究は、不連続な密度界面を有する成層中に生じた気泡噴流について、実験結果を統一的な形で整理することにより気泡噴流の挙動を定量的に捉え、閉鎖水域における密度成層の時間変化を解析する手法を確立するものである。

気泡噴流の挙動

図1は密度成層が気泡放出量に比べて強い場合の、流れの様子を模式的に示したものである。下層の流体は気泡群の浮力によって上昇し、その流れは密度界面へと達する。そして、さらに上層内へと持ち上げられ、ドーム状の盛り上がりを形成する。そこでは下層からの水塊が上層の流体と混合し、混合後の水塊はその密度が周囲流体と同じになる高さまで落下し、周囲流体中へと貫入して中間層を形成していく。

下層内における気泡噴流の性質は一樣密度流体中のものと同一である。ところが気泡流や液体流のコア半径・最大上昇速度などの極めて局所的な量は、気泡の大きさつまり気泡の噴出の仕方に大きく依存するものであり、普遍的な量として適当であるとはいえない。そこで、鉛直方向の液体流の流速成分を水平断面内で積分し上昇流量を求めると、これは気泡の大きさにほとんど関係なく整理されることがわかった。図2は水深が40cmから50mまでの実験で得られた、高さごとの上昇流量をプロットしたものである。高さスケール

$$L_m = (Q_B / g)^{1/5} \quad (1)$$

は気泡流量と浮力で決まる長さである。この図より、気泡発生点から高さ z における水塊の上昇流量 Q_u は

$$Q_u = 0.302 Q_B (z / L_m)^{4/5} \quad (2)$$

と表わすことができる。データには多少ばらつきがあるものの、実験の範囲を考えればこれで十分といえる。

つぎに、上層に達した下層からの水塊が混合時に上層水を連行する連行流量 Q_e を整理すると図3のようになる。ここに、 Q_{mu} は中間層から上層に流入していく上昇流量、 F_r は密度フルード数で

$$F_r = w_u / \sqrt{\Delta \rho_u b_u}, \quad \Delta \rho_u = (\rho_{mu} - \rho_u) g / \rho_0 \quad (3)$$

で定義される。ただし w_u と b_u はそれぞれ中間層上端における液体流の上昇速度とコア半径、 ρ_{mu} は中間層上端における周囲流体の密度である。この図から上層における連行量は次のように表わすことができる

$$f \equiv Q_e / Q_{mu} = 0.18 F_r^{0.9} / (1 + 0.2 F_r^{0.9}) \quad (4)$$

気泡噴流および密度成層の時間推移の解析

以上得られた結果をもとに、密度成層の時間推移を解析する。用いた方程式や計算方法など、詳しくは参考文献¹⁾を参照されたい。まず下層内においては、流速と気泡密度がGauss分布と仮定した運動量保存則

$$\frac{d(w Q_u)}{dz} = \frac{2 Q_B g}{w / (1 + \lambda^2) + w_s} - \frac{H_T}{H + H_T - z} \quad (5)$$

を式(2)と併せて解くことにする。ここに w は液体plumeの最大上昇速度、 w_s は静止流体中における気泡の上昇速度、 H_T は大気圧水頭。また λ は液体plumeのコア半径に対する気泡plumeのその比であり、これまでの実験結果を参考にして $\lambda = 0.8$ とする。つぎに中間層内においても同様に、質量と運動量の保存則を求めた。通常はこれに流量の保存則を加えることになるが、これには連行係数を導入する必要が生ずる。しかし、この場合の連行則は未だ不明なので、ここではその代わりにplumeのコア半径の増加率をあたえることにし、実験結果からその値を一樣密度中におけるものの30%とした。

周囲の密度成層の時間推移は鉛直方向の1次元モデルによって解析を行う。その際、周囲から液体plume

中へ連行されていくものは、上述のplumeの解析から得られる Q_w を用いることにし、下層水が上層で混合した後に周囲に貫入していくものに関しては混合後の密度 ρ_{ae} が

$$\rho_{ae} = (\rho_{cu} + f\rho_u) / (1 + f) \tag{6}$$

と求まるので、これが流量 $Q_{wu} + Q_e$ で周囲に貫入していくものとする。

図4に密度成層の時間推移の測定結果を、図5に同じ条件のもとに計算された密度成層およびplumeの上昇流量を示す。図4と図5(a)を比較すると、細部における差はあるものの概ね一致している。また図5(b)を見ると、plume内に作用する相対重力に抗しきれずに、途中まで連行してきた水塊を周囲に放出していくところが再現されているのがわかる。さきに述べたように、ここでは気泡径などに影響されるパラメータをほとんど用いていないので、この解析方法は現実問題への適用性も十分高いものであるといえよう。

参考文献

- 1) 浅枝・池田・Imberger：不連続な密度界面を有する成層中におけるBubble Plumeの挙動と成層の時間推移
土木学会論文集（投稿中）
- 2) 浅枝・Imberger：連続成層中のBubble Plumeの挙動について、土木学会論文集, 411(Ⅱ-12), 1989

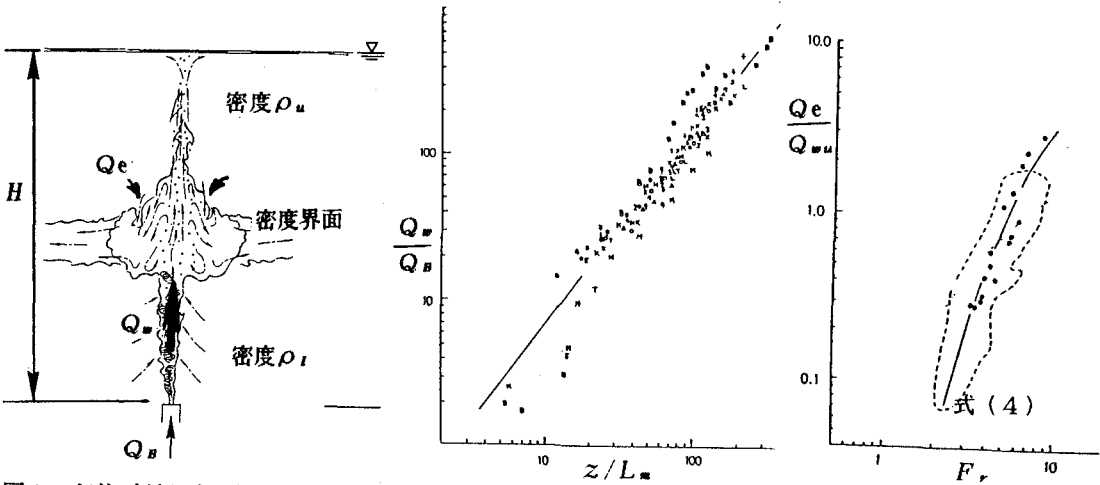


図1. 気泡噴流による混合の模式図 図2. 高さによる上昇流量の変化 図3. 上層における連行流量

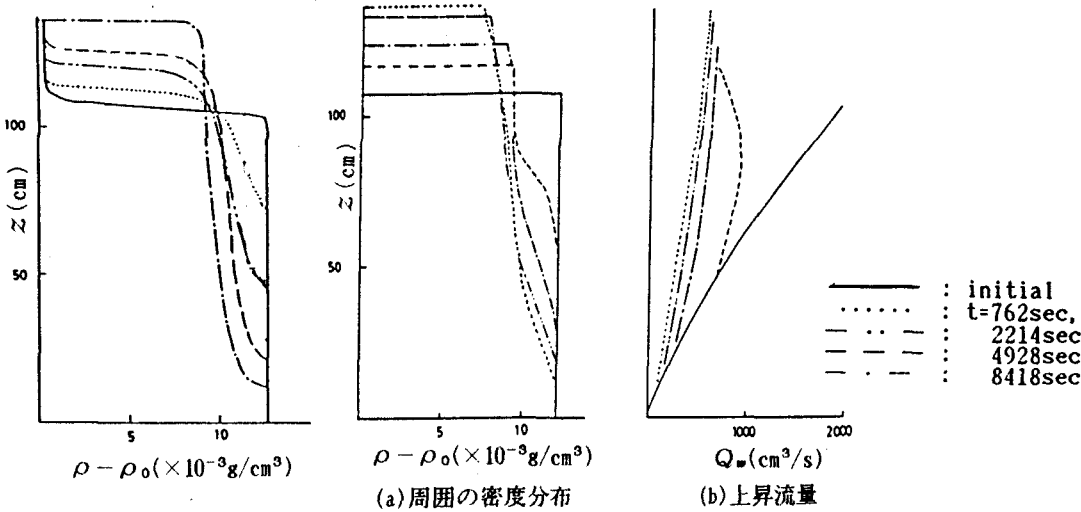


図4. 測定結果

図5. 計算結果