(II－78)　　ガス交換を考慮した水温成層中の Bubble Plume の解析

宇都宮大学工学部　正員　池田裕一

1．はじめに

成層化した閉鎖性水域の水質保全対策には，Bubble Plume による曝気循環を用いるケースが多い．その期待される効果としては，成層破壊による流動促進をねらうものがほとんどである．ところが，曝気循環の対象となる水域では，溶存酸素等が不足していることが多い．その場合には，気泡中の気体成分が水中に吸収されて気泡が小さくなり，Bubble Plume 内の浮力が減少することが予想される．

本研究は，こうしたガス交換を考慮した Bubble Plume の鉛直1次元モデルを構築し，その大まかな挙動を解析しようとするものである．

2．基礎方程式

水深 H のところに気泡発生源を設置し，軸対称 Bubble Plume を発生させる場合を考える．気泡発生源から鉛直上向きに z 軸，半径方向に r をとることにする．このとき，液相の上昇流量 Q，液相の運動量フラックス F，液相の浮力フラックス J_l，i 番目のガス成分の溶存量フラックス D_i およびガス量フラックス G_i，空気流量 Q_g は以下のように定義される．

$$Q=\int_0^\infty w\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(1)$$

$$F=\int_0^\infty w^2\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(2)$$

$$J_l=\int_0^\infty g' w\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$D_i=\int_0^\infty c_i w\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(4)$$

$$G_i=\int_0^\infty m_i (w+w_b)\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(5)$$

$$Q_g=\int_0^\infty f_r (w+w_b)\,2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(6)$$

ただし，w：液相の上昇流速，w_b：気泡の slip 速度，g'：液相の浮力　$(=(\rho_a-\rho_l)g/\rho_0$，$\rho_a$：周囲流体密度，$\rho_l$：plume 内液相密度，$\rho_0$：基準密度，$g$：重力加速度)，$c_I$，$m_i$：気液混合流体に対する i 番目のガス成分の溶存態のモル濃度およびガス態のモル濃度，f_r はボイド率である．

すると，式(1)～(5)の各種フラックス量の保存則は，

$$\frac{dQ}{dz}=q_e \qquad \cdots\cdots(7)$$

$$\frac{dF}{dz}=B_l+B_g \qquad \cdots\cdots(8)$$

$$\frac{dJ_l}{dz}=-QN^2 \qquad \cdots\cdots(9)$$

Key Words：気泡，プルーム，水温成層，ガス交換，曝気循環，溶存酸素
連絡先：〒321　宇都宮市石井町 2753　　FAX：028-662-6367　　E-mail：ikeda@utsunomiya-u.ac.jp

$$\frac{dD_i}{dz} = q_e c_{ia} + e_i \qquad \cdots\cdots(10)$$

$$\frac{dG_i}{dz} = -e_i \qquad \cdots\cdots(11)$$

となる[1]．Q_gは，理想気体の状態方程式$f_r = \Sigma_i m_i RT/p$（R：気体定数，T：絶対温度，p：静水圧）を用いて，

$$Q_g = \sum_i \frac{G_i RT}{p} = \frac{GRT}{p} \qquad \cdots\cdots(12)$$

のように表される．

式(7)～(11)中，q_e：単位高さあたりの連行流量，N：周囲成層の浮力振動数，c_{ia}：周囲流体のc_iの値，B_l，B_gは，液相の密度差およびガス態ガス成分によって得られる単位高さあたりの浮力である．

また，e_iはi番目のガス成分の気相から液相への単位高さあたりのガス交換量で，気泡の単位表面積を通して単位時間あたりに$\gamma_i(c_{si}-c_i)$だけの体積が交換されるから，

$$e_i = \int_0^\infty \frac{f_r}{v_g} a_g \gamma_i (c_{si} - c_i)\, 2\pi r dr = \frac{3}{d}\gamma_i \int_0^\infty f_r (K_i p_i - c_i)\, 2\pi r dr \qquad \cdots\cdots(15)$$

と書くことができる．ここに，γ_i：ガス交換係数，$c_{si}=K_i p_i$：飽和モル濃度，K_i：溶解定数，p_i：分圧（$= pm_i / \Sigma_i m_i$），v_g，a_g，d：気泡１個の体積，面積，半径である． 気泡体積v_gは，水平断面を単位時間あたりに通過する気泡個数N_gを用いて，$v_g = Q_g / N_g$で求められる．N_gについては，今回は気泡の分裂や合体は生じず，気泡発生源から水面まで一定値をとるものとする．

３． フラックス量による定式化

通常はここで各物理量の分布形（たとえばGauss分布，top-hat分布）を仮定し，それを以上の式に代入して問題を解くことになる．しかしそれでは，分布形によって異なる結果が生じることになる．そこで本研究では，フラックス量のみを用いて分布形によらずに定式化することにする．

まず，連行量q_e，液相浮力B_lはList & Imberger[2]にならって，次のように書くことにする．

$$q_e = 2\pi\alpha\sqrt{\frac{2}{\pi}F} \qquad \cdots\cdots(16)$$

$$B_l = \sigma_l \frac{J_l Q}{F} \qquad \cdots\cdots(17)$$

ここに，αは連行係数，σ_lは浮力補正係数で，ともに分布形に依存しない値をとる．

次に，式(17)を導出したのと同様な過程を経て，以下のように書くことができる．

$$B_g = \frac{\sigma_m Q_g g}{\dfrac{F}{Q} + \sigma_m w_b} \qquad \cdots\cdots(18)$$

$$e_i = \frac{3\gamma_i}{d} \frac{Q_g}{\dfrac{F}{Q} + \sigma_m w_b} \left(\sigma_m \frac{G_i}{G} K_i p - \sigma_c \frac{D_i}{Q} \right) \qquad \cdots\cdots(19)$$

ここに，σ_m，σ_cは気相ガスのモル濃度分布と溶存ガスのモル濃度分布に関係する補正係数である．

以上の定式化により，各係数を合理的に決められれば，分布形を特に仮定することなく解析を進めることができる．解析結果については，発表当日に報告したい．

【参考文献】

1) Wuest, et al.：Water Resources Research, vol.38, No.12, pp.3235-3250, 1992.

2) List & Imberger：J.Hydraul.Div, Proc.ASCE, vol.99, No.HY9, 1973.