

水中混入気泡の流下に伴う挙動に関する数値解析

関西電力・総合技術研究所 正員 原田 俊之, 正員 永見 光央
新日本技術コンサルタント 正員 増田 寛, 陳 活雄, 戸田 圭一

1. はじめに: 近年, 泡の発生または泡の流出のない合理的な水路を設計するための配慮が行われているが, 泡の発生および泡の流下に伴う挙動に関してはまだ未解決な問題が多い。本研究ではこれらの問題のうち, いったん発生した泡(水中気泡)の流下に伴う浮上現象についての数値シミュレーションを試みた。

2. 基礎方程式: 水中に混入した気泡は流下とともに浮上し, やがて水表面から逸脱する。この現象を単純化して, 以下に示す2次元定常拡散方程式で表せるものとする。(図-1)

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + w_0 \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

境界条件

$$C = f(y) \quad [x = 0]$$

$$\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - w_0 C = 0 \quad [y = 0] \quad (2)$$

$$\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - (1-A)w_0 C = 0 \quad [y = h]$$

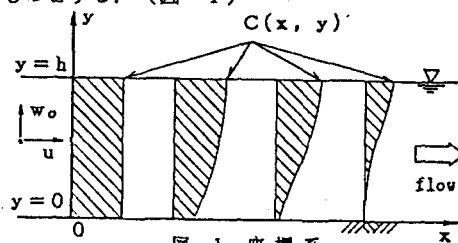


図-1 座標系

ここに, $C = C(x, y)$; 混入気泡濃度, u ; 流下方向(x 方向)の流速, w_0 ; 気泡の浮上速度(一定)

ε_y ; 鉛直方向(y 方向)の乱流拡散係数, A ; 水表面から気泡の抜ける確率(完全に抜ける場合は $A=1$)

3. 数値解析法: 基礎方程式(1)および境界条件式(2)を(5)式に示すパラメータにより無次元化した後, 差分法によって解く。¹⁾

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + W \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} \left(\phi \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad (3)$$

$$C = f(Y) \quad [X = 0]$$

$$\phi \frac{\partial C}{\partial Y} - WC = 0 \quad [Y = 0] \quad (4)$$

$$\phi \frac{\partial C}{\partial Y} - (1-A)WC = 0 \quad [Y = 1]$$

$$\left. \begin{aligned} Y &= y/h && \text{ここに,} \\ W &= 6w_0/\kappa u && h; \text{水深} \\ U &= u/\bar{u} && \kappa; \text{カルマン定数} \\ \phi &= 6\varepsilon_y/\kappa h u && u; \text{摩擦速度} \\ X &= x\kappa u/6\bar{u}h && \bar{u}; \text{平均流速} \end{aligned} \right\} (5)$$

(3)式を以下に示す移流項(6)式と拡散項(7)式に分解し, split-operator-methodにより(6)式を解いた後に(7)式を解けば, (3)式の解が得られる。なお移流項(6)式の差分は, 格子間隔の取り方による計算精度の問題を緩和するため, Hollyら²⁾による "two-point fourth-order method" を用いた。

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + W \frac{\partial C}{\partial Y} = 0 \quad [\text{移流項}] \quad (6)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Y} \left(\phi \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad [\text{拡散項}] \quad (7)$$

4. 結果: 前述した解析法を用いて i) 気泡浮上速度 W , ii) 乱流拡散係数 ϕ , iii) 水表面における泡の逸脱する確率 A , iv) 初期気泡濃度分布 C_0 の各パラメータについて, 流下に伴う気泡濃度変化に及ぼす影響について検討した(図-2～図-5)。各図において(a)は流下に伴う気泡濃度の鉛直分布の変化を, (b)は流下に伴う断面平均気泡濃度の変化を示しており, それぞれ初期濃度 C_0 , C_0 に対する比で表している。また, 計算に用いた水深方向の流速分布 $U(Y)$, 乱流拡散係数の分布 $\phi(Y)$ は一様とし, iv) 以外の初期濃度分布は $C=f(Y)=C_0=1$ (一様)としている。

i) 図-2より, 気泡浮上速度 W が大きいほど流下に伴う濃度減少が著しくなる。また流下距離が短い場合には W が大きいほど鉛直方向の濃度勾配は大きくなる。

ii) 図-3より, 乱流拡散係数 ϕ が大きいほど流下に伴う平均濃度の減少割合は小さくなるが, それほど顕著な差ではない。ただし流下距離が短い場合には, ほぼ同じ平均濃度でもその鉛直分布は著しく異なる。

iii) 図-4より, 水面での泡の逸脱する確率 A が小さいほど水表面付近の濃度が増加し, 鉛直方向の濃度勾配が大きくなる。また平均濃度でみても A が小さいほど濃度の低減は遅くなる。

Toshiyuki HARADA, Mitsunaka NAGAMI, Satoru MASUDA, Ikuro CHIN, Keiichi TODA

iv) 図-5 には、初期の気泡濃度 C_0 が同一の断面平均濃度で鉛直分布の異なる場合の比較を示しており、流下距離の短い場合には平均濃度、鉛直分布ともかなり異なるが、流下距離が長くなるにつれてその差は小さくなる。

以上の結果をまとめると、断面平均気泡濃度に対する支配的なパラメータは気泡浮上速度 W と水表面での気泡逸脱確率 A と考えられ、流下距離が長くなるに従ってその傾向は顕著となる。

5. おわりに：本研究で用いた数値モデルを実際の現象に適用するためには、気泡径と浮上速度の関係、水表面での境界条件等のパラメータの値を適切に与える必要がある。今後は模型実験及び現地での実測結果をもとに、これらの各パラメータの値を推定し、数値シミュレーションの適用性及び精度の向上を図っていく予定である。

なお、本研究を実施するにあたり、名城大学 岩垣雄一教授、関西電力 下平昌兵、渡辺邦男の諸氏より貴重な御助言を賜り、ここに深甚なる謝意を表します。

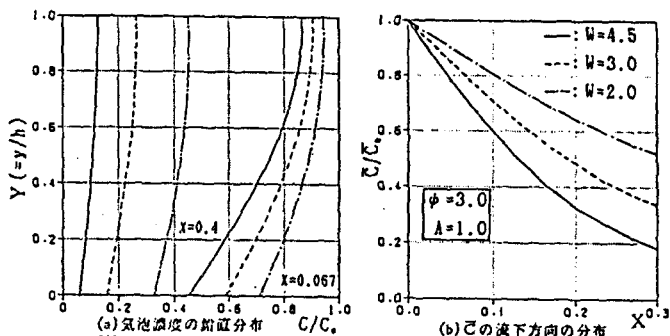


図-2 無次元気泡浮上速度 W による気泡濃度の変化

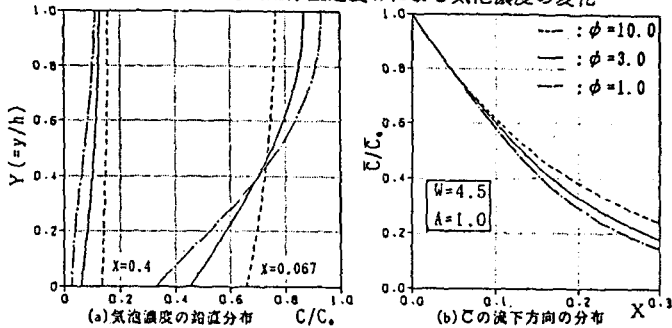


図-3 無次元乱流拡散係数 ϕ による気泡濃度の変化

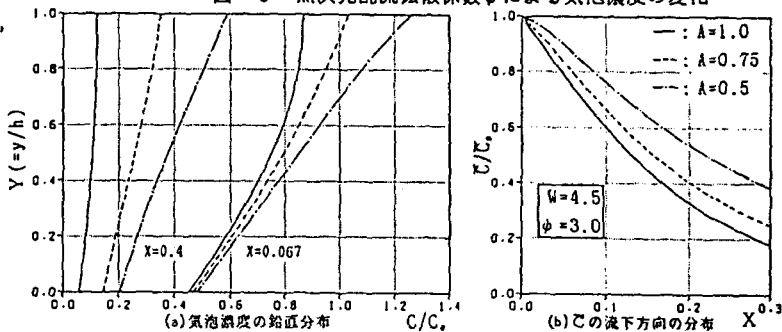


図-4 水表面での気泡逸脱確率 A による気泡濃度の変化

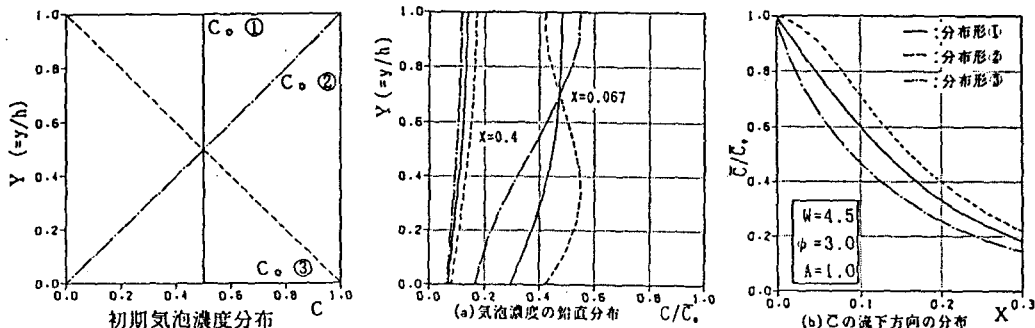


図-5 初期気泡濃度の鉛直分布 C_0 による気泡濃度の変化

参考文献：1) Jobson, H. E. and Sayre, W. W., 'Predicting Concentration Profiles in Open Channels', ASCE, Vol. 96, No. HY10, Oct., 1970. 2) Holly, F. M. and Preissmann, A., 'Accurate Calculation of Transport in Two Dimension', ASCE, Vol. 103, No. HY11, Nov., 1977.