

CS2-6〔Ⅱ〕 水中混入気泡の拡散特性に関する一考察

関西電力総合技術研究所 正員 原田俊之，正員 永見光央，阿部 守
(株)ニュージェック 正員 戸田圭一，正員 陳 活雄

1. はじめに：汽力発電所の放水路系内で発生する泡のコントロールは、合理的な水路を設計する上での一つの検討項目であるが、泡の発生および泡の流下に伴う挙動に関しては未解決な問題が数多く残されているのが現状である。ここでは泡の問題に関する研究の一環として、水中に混入した空気泡の濃度の流下に伴う挙動をモデル化するとともに、解析解を用いて流下に伴う濃度の低減特性について若干の考察を行った。

2. 現象のモデル化：水中に混入した気泡は流下とともに、移流拡散しながら浮上し、やがて水表面から逸脱していく。一様水路とし、流れを鉛直2次元ととらえ、流下方向の拡散効果が鉛直方向のそれより小さいとみなすと、この現象は以下に示す2次元定常拡散方程式でモデル化できる。（図-1参照）

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

$$C = C_0 = f(y) \quad [x=0] \text{ 上流端境界条件} \quad \text{--- (2)}$$

$$\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - w_0 C = 0 \quad [y=0] \text{ 水路床境界条件} \quad \text{--- (3)}$$

$$\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - (1-A)w_0 C = 0 \quad [y=h] \text{ 水表面境界条件} \quad \text{--- (4)}$$

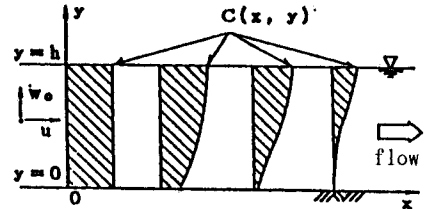


図-1 座 標 系

ここに $C = C(x, y)$ ；混入気泡濃度， $u = u(y)$ ；流下方向(x 方向)の流速， $w_0 = w_0(y)$ ；気泡の浮上速度， h ；水深， $\varepsilon_y = \varepsilon_y(y)$ ；鉛直方向(y 方向)の乱流拡散係数， A ；水表面から気泡の逸脱する確率(完全に抜ける場合は $A = 1$)である。次に(5)式のように各パラメーターを水深 h 並びに摩擦速度 u_* で無次元化すると(6)～(9)式を得る。

$$\begin{aligned} X &= x/h \\ Y &= y/h \end{aligned} \quad \begin{aligned} U \frac{\partial C}{\partial X} + W \frac{\partial C}{\partial Y} &= \frac{\partial}{\partial Y} \left(E \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \end{aligned} \quad \text{--- (6)}$$

$$W = w_0/u_* \quad (5) \quad C = C_0 = f(Y) \quad [X=0] \quad \text{--- (7)}$$

$$U = u/u_* \quad E \frac{\partial C}{\partial Y} - WC = 0 \quad [Y=0] \quad \text{--- (8)}$$

$$E = \varepsilon_y/(h u_*) \quad E \frac{\partial C}{\partial Y} - (1-A)WC = 0 \quad [Y=1] \quad \text{--- (9)}$$

3. 解析解とその特性：今、現象を単純化して U, W, E を一定値とし、上流端の空気濃度分布も水深方向に一様で $C(X=0) = C_0 (= \text{const})$ 、また $A = 1$ とすると(7)～(9)式の境界条件のもとで(6)式を解くと次のような解析解を得る。

$$C/C_0 = 4 \omega \cdot \exp\left(-\frac{E}{U} \omega^2 X + \omega Y\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n (\omega \sin \beta_n Y + \beta_n \cos \beta_n Y)}{(\omega^2 + \beta_n^2)^2 + 2 \omega (\omega^2 + \beta_n^2)} \exp\left(-\frac{E}{U} \beta_n^2 X\right) \quad \text{--- (10)}$$

ただし、 $\omega = \frac{W}{2E}$ ，また β_n は、

$$\tan \beta = \frac{2 \beta \omega}{\beta^2 - \omega^2} \quad \text{--- (11)} \quad \text{を満たす解である。} (\beta > 0, n = 1, 2, \dots)$$

また断面平均値 $\bar{C}/C_0$ は、(10)式の断面平均値をとって、

$$\bar{C}/C_0 = 4 \omega \exp(\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n \sin \beta_n}{(\omega^2 + \beta_n^2)^2 + 2\omega(\omega^2 + \beta_n^2)} \cdot \exp\left(-\frac{E}{U}(\omega^2 + \beta_n^2)X\right) \quad (12)$$

となる。図-2、図-3にそれぞれ(10)式、(12)式を用いて求めた混入気泡濃度の鉛直分布、および流下に伴う断面平均濃度の低減特性の一例を示している。

次に、現象を支配するパラメーター $U(=u/u_*)$ 、 $W(=w_0/u_*)$ および $E(=\varepsilon_y/h u_*)$ の断面平均濃度の低減への影響を調べたものが図-4、図-5、図-6である。これらより E に比べて U 、 W は各々、濃度の低減特性に大きく影響を及ぼすことがわかる。

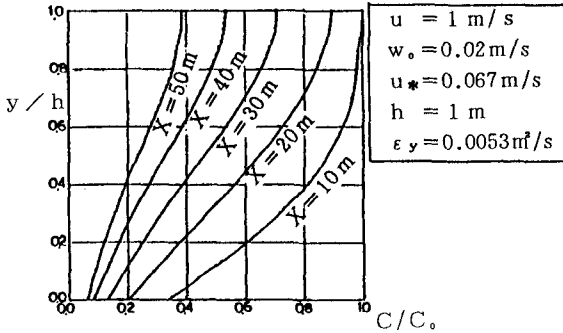


図-2 空気濃度の鉛直分布の一例

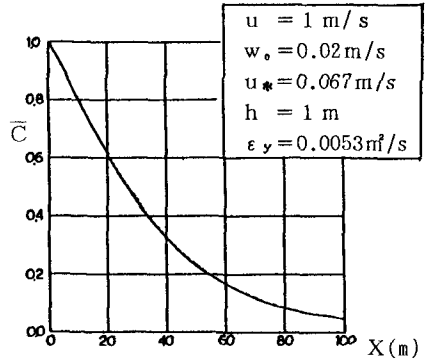


図-3 断面平均濃度の流下方向の変化の一例

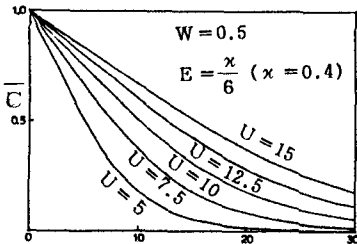


図-4 Uの変化による
断面平均濃度の変化特性

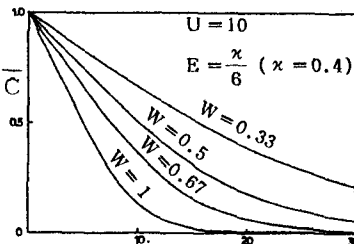


図-5 Wの変化による
断面平均濃度の変化特性

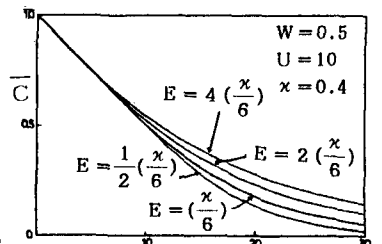


図-6 Eの変化による
断面平均濃度の変化特性

4. おわりに：上流端に混入した空気泡の流下に伴う挙動を2次元定常拡散方程式によりモデル化し、解析解を得た後、その解の特性を無次元パラメーターを用いて検討した。空気泡の浮上速度は実際にはコントロールすることが難しいので、水路の設計上いったん混入した空気泡を早く逸散させるには、流量が与条件の場合、水路幅を十分確保し、水深を小さくし、かつ平均流速をおさえることが得策となる。

5. 参考文献：

- (1) Carslaw H.S. and Jaeger J.C., Conduction of Heat in Solids, Second Edition, Oxford Univ. Press, 1959.
- (2) Jobson H.E. and Sayre, W.W., 'Predicting Concentration Profiles in Open Channels', ASCE, Vol.96, No.HY11, Nov.,1977
- (3) 原田, 永見, 増田, 陳, 戸田, 「水中混入気泡の流下に伴う挙動に関する数値解析」, 平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 1991.
- (4) 原田, 永見, 阿部, 増田, 大本, 「水中混入気泡の流下に伴う挙動に関する数値解析(その2)」, 平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 1992.