

II-217

水中混入気泡の流下に伴う挙動に関する数値シミュレーション

関西電力（株）総合技術研究所 正員 永見光央
 （株）ニュージェック 正員 戸田圭一、大本雄二
 （株）日本工業試験所 渡邊 博

1. はじめに： 沿岸立地された汽力発電所の放水路系が堰越流部を有する場合に、その堰越流部において発生した泡が外海に流出する状況は「環境問題」として捉えられるようになり、気泡の流出が少ない合理的な放水路の設計が望まれるようになっている。本研究は、この水中に混入した気泡の挙動を表現できる数値シミュレーションを構築し、越流落差、単位幅流量等の水理パラメータから任意の流下距離での気泡濃度を把握することによって合理的な放水路の設計指針を提示していくことを目的としている。今回はその前段として数値解と解析解の比較、数値シミュレーションによる実験結果の再現性の検討を行った。

2. 現象のモデル化¹⁾： 本研究では落下水脈による気泡の発生、流下に伴う気泡濃度の低減の現象を大きく3つに分けて扱っている。それらは堰直下流の気泡の発生・混入域、数値計算のモデル化および適用が困難な擾乱域流れが安定し一様な流れとなる一様域である（図-1参照）。

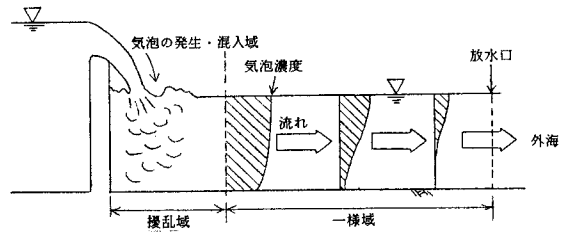


図-1 現象の模式図

一様域において、水中混入気泡は流下とともに浮上し、その後水表面から逸脱するがこの現象を以下に示す2次元定常拡散方程式で表せるものとする（図-2参照）。

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

$$\left. \begin{aligned} C &= f(y) & [x=0] \\ \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - w_0 C &= 0 & [y=0] \\ \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} - (1-A) w_0 C &= 0 & [y=h] \end{aligned} \right\} \dots (2) \quad (\text{境界条件})$$

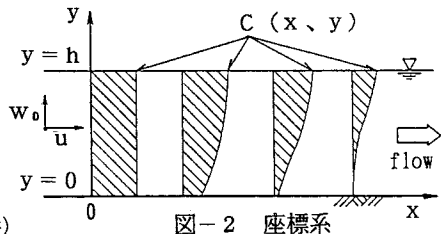


図-2 座標系

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、 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 $A=1$ ）次に、(3)式のように各パラメーターを水深 h 、摩擦速度 u_* で無次元化すると(4)、(5)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} X &= x/h, Y = y/h \\ W &= w_0/u_* \\ U &= u/u_* \\ E &= \varepsilon_y / (h u_*) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + W \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} \left(E \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= C_0 = f(Y) & [X=0] \\ E \frac{\partial C}{\partial Y} - WC &= 0 & [Y=0] \\ E \frac{\partial C}{\partial Y} - (1-A) WC &= 0 & [Y=1] \end{aligned} \right\} \dots (5) \quad (\text{境界条件})$$

基礎方程式(4)を境界条件(5)のもとに差分法で解く。具体的には(4)を下に示す移流項(6)と拡散項(7)に分解し、split-operator-methodにより(6)を解いた後に(7)を解けばよい。

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + W_0 \frac{\partial C}{\partial Y} = 0 \quad [\text{移流項}] \quad \dots (6) \quad U \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Y} \left(E \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad [\text{拡散項}] \quad \dots (7)$$

3. 数値解と解析解の比較： 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 $C = C_0$ とすると、(5)式の境界条件のもとで(4)式を解くと次のような解析解を得る。

$$C/C_0 = \exp\left(-\frac{E}{U} \omega^2 X + \omega Y\right) \sum_{n=1}^{\infty} B_n' \cdot \frac{(\omega \sin \beta_n Y + \beta_n \cos \beta_n Y)}{\sqrt{\omega^2 + \beta_n^2}} \cdot \exp\left(-\frac{E}{U} \beta_n^2 X\right) \quad \cdots (8)$$

$$B_n' = \frac{\frac{\beta_n}{\omega^2 + \beta_n^2} \cdot \left[-e^{-\omega} \frac{2(1-A)\omega}{\sqrt{(1-2A)^2 \omega^2 + \beta_n^2}} + \frac{2\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta_n^2}}\right]}{\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\omega(1-2A)}{(1-2A)^2 \omega^2 + \beta_n^2} - \frac{\omega}{\omega^2 + \beta_n^2} \right\}\right]}$$

ただし、 $\omega = \frac{W}{2E}$ また β_n は $\tan \beta_n = \frac{2\omega \beta_n A}{\beta_n^2 + \omega^2 (1-2A)} \cdots (9)$ を満たす解である。（ $\beta_n > 0, n=1, 2, \dots$ ）

ここでは、 $W=0.3$ 、 $U=10$ 、 $E=1/15$ 、 $A=1$ の条件での解析解と、水深方向（ y 方向）分割間隔0.01、流下方向（ x 方向）分割間隔0.25としたときの数値解を比較した。解析解と数値解の両者を比較したものが図-3であり、図から明らかなように両者はよく一致しており、数値解は十分な精度を有していることがわかる。

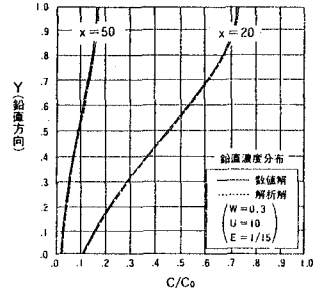


図-3 数値解と解析解の比較

4. 数値解と実験結果^{2) 3)}の比較：水路幅80cmの矩形水路の上流端に越流堰を設け、落差や単位幅流量、下流水深を種々変化させ、越流落水脈によって発生する気泡濃度を堰から下流の数断面で多点測定し、気泡の発生濃度と流下に伴う気泡濃度の低減特性を把握する実験を行った。なお、気泡濃度の測定にはサイフォン式空気採集器を用いている（図-4参照）。

堰高2.4m、下流水深0.9m、越流落差1.37m、流量128 l/s (160 l/s/m) の場合の実験結果と、一様域の上流端を上流端境界条件として数値計算した結果とを図-5に示す。図中の計算条件は、まず実験結果を基に w_0 、 ε_y の値を推定し、次に A の値を変化させ、鉛直濃度分布の実験値とのずれが最も少なくなる A の値を見出したものである。同図より、実験値と計算値はよく合致していることから計算モデルによる気泡の流下過程の再現性は良好といえる。

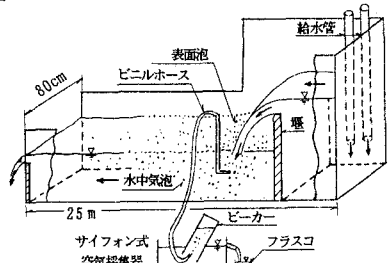


図-4 実験装置

堰高2.4m、下流水深0.9m、越流落差1.37m、流量128 l/s (160 l/s/m) の場合の実験結果と、一様域の上流端を上流端境界条件として数値計算した結果とを図-5に示す。図中の計算条件は、まず実験結果を基に w_0 、 ε_y の値を推定し、次に A の値を変化させ、鉛直濃度分布の実験値とのずれが最も少なくなる A の値を見出したものである。同図より、実験値と計算値はよく合致していることから計算モデルによる気泡の流下過程の再現性は良好といえる。

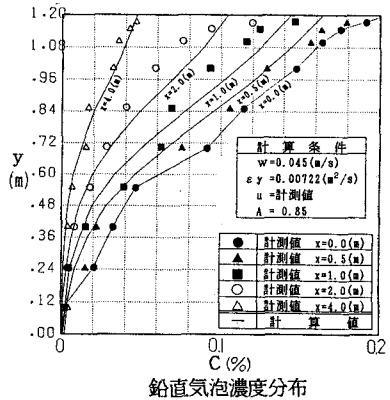
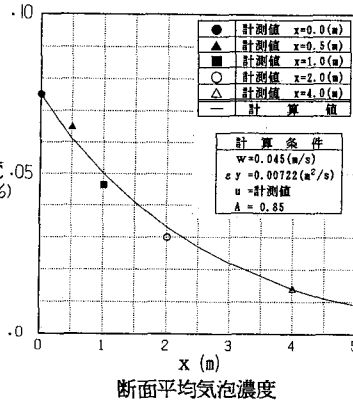


図-5 数値解と実験値の比較

5. まとめ：本数値シミュレーションは、十分な計算精度を有し、パラメータを適切に選ぶことにより水中に混入した気泡の挙動を再

現できていることから、本研究でのモデル化等の手法は妥当であり、今後はこの数値シミュレーションを用いて、泡の流下を考慮した放水路設計の指針を構築していきたい。なお、本研究を実施するにあたり(株)ニュージェックの陳 活雄氏、(株)日本工業試験所の山口 清志氏に御協力頂き、ここに謝意を表します。

6. 参考文献：1)原田ら「水中混入気泡濃度の流下に伴う低減に関する一考察」土木学会第47回年講1991、2)原田ら「越流堰による泡の発生に関する実験的研究」土木学会第48回年講1992、3)永見ら「水中気泡の挙動に関する実験的考察」土木学会第48回年講1992