

九州大学 工学部 学生員 〇川 保 篤久

関東学院大学 工学部 正 員 北野 義則

九州大学 工学部 正 員 東谷 陽一

(1) 諸言 気泡噴流の応用例の1つとして、活性汚泥処理の曝気槽における散気が挙げられ、処理水への酸素供給と汚泥の沈殿防止のための旋回流の誘起を目的としている。現在用いられている主な散気装置として、細孔性散気装置と大孔性散気装置とがあり、後者装置の場合気泡噴流は点源から発生していると考えられる。本研究はその場合の散気効果を検討するために、単一点源から発生する3次元気泡噴流についてその流速分布と気泡密度分布を測定し、その実験結果より3次元気泡噴流の挙動特性について考察を加える。さらに線源より発生する気泡噴流との比較検討の資料とするものである。

(2) 実験装置及び実験方法 実験水槽は、幅 100cm 、奥行 40cm 、全面アクリル製のものを用いた。エアポンププレッシャーケル減圧弁を通して空気を送り、水槽底に設置した内径 0.5cm のステンレス管より気泡を発生させた。流速分布測定にはアロベラ径 10mm のアロベラ流速計を用いた。また流速の変動が大きいため、一点に対し一方向の測定を4～8回行ない、その平均より流速を求めた。気泡密度分布測定には、センサーとして先端を細くしたガラス管から直径 20mm の白金線を 0.5mm 出したものを用い、気泡との接触回数及び接触時間内の累計を測定し、これにより、平均気泡密度と平均気泡径を求めた。

(3) 実験結果 流速分布及び気泡密度分布の例を図1～2に示す。流速分布、気泡密度分布は、いずれもガウス分布に近い形をしていることがわかる。この分布が $u = U_0 \exp(-r^2/\sigma^2)$ 、 $\sigma = \sigma_0 \exp(-x/\lambda)$ なる分布を持つと仮定し、実験結果を収束積分することによって U_0 、 σ_0 、 λ を求めたと図3～6のようになる。

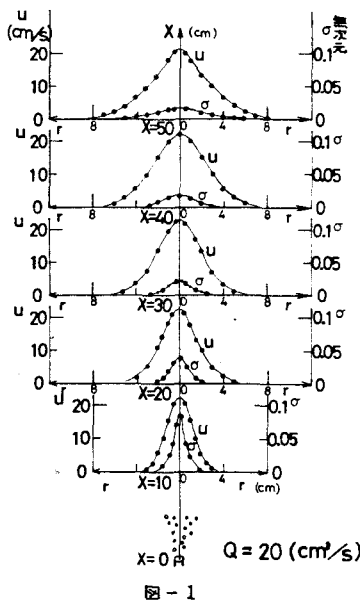


図-1

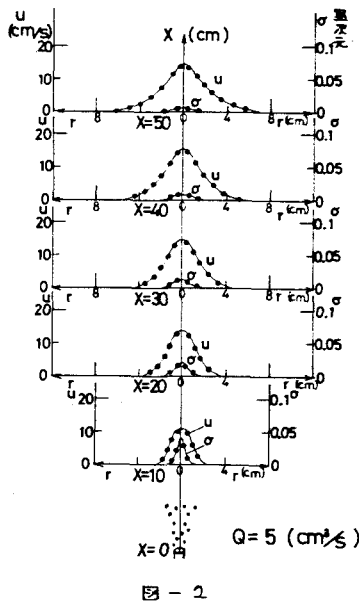


図-2

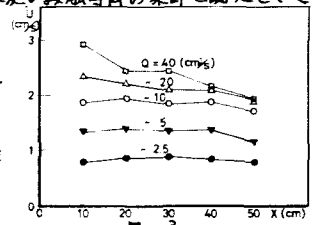


図-3

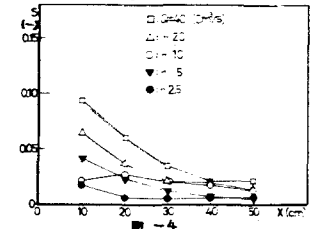


図-4

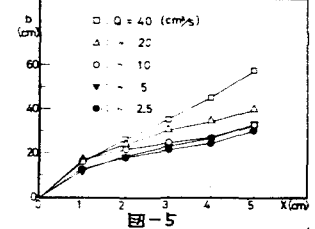


図-5

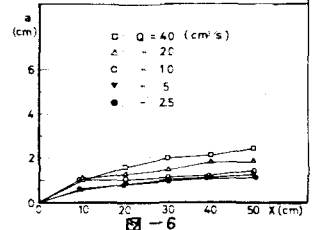


図-6

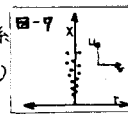


図-7

(4) 理論的検討 気泡噴出口を原点として図7のような円筒座標系と流速をとる。水に対する $x(+)$ 方向の泡の相対速度を $U_0 = (-\text{一定})$ 気泡密度を σ 、渦動粘性係数を ν 、渦動拡散係数を ϵ とする。

噴流が軸対称であり、水平方向の平均流速は鉛直方向のそれと比べて小さいと考え、また簡単のため ν 及び ε は x のみの関数とすると、流体の連続方程式、 $N-S$ 方程式及び拡散方程式は、それぞれ(1)のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r v) = 0 \quad (1), \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2), \quad (u+U_b) \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial r} = \varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3)$$

u, v がガウス分布を持つと仮定し $u = U \exp(-\frac{r^2}{a^2}), v = S \exp(-\frac{r^2}{a^2})$ (4) とおき、(1) 式を(2) 式に代入して v を消去し、両辺の1次及び3次モーメントを求めると運動量の式 $\frac{d}{dx}(U^2 b) = 2gaS$ (5) 及び $\frac{d}{dx}(U^2 b) = 2 \frac{S^2 a^2}{U^2 b} (a^2 - \frac{b^2}{2} + 2bU - b)$ を得る。(6) 式の左辺は連行による噴流流量の増加を示し、右辺の第1項は噴流と同様の連行現象を表わすものであり、 bU に比例すると考え $\nu = \frac{1}{2} abU$ とおく。第2項は浮力分布の連行現象に対する影響を示すものと考えられる。また(1) 式を(3) 式に代入し1次モーメントを求めると、上と同様に気泡の保存式 $\pi S a^2 (U_b + \frac{b}{a^2 + b^2} U) = Q - \Gamma$ (7) が得られる。気泡の拡散幅については本来(3) 式の高次モーメントより求めるべきであろうが、簡単のため次のように考える。気泡の拡散幅は噴流の拡散幅に比べて小さいので、1次元流中の2次元拡散式 $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial \theta}{\partial r})$ に従うとし、これを(4) 式を代入する。 ν として気泡の平均上昇速度 $U_b + \frac{b}{a^2 + b^2} U$ を使い、さらに $\varepsilon = \frac{1}{4} \beta U b$ とおくと気泡の中心濃度 θ の変化を与える式 $(U_b + \frac{b}{a^2 + b^2} U) \frac{d\theta}{dx} = -\beta \theta S$ (8) を得る。(5) (7) (8) 及び(4) を用いて、未知数 U, b, a, S を x の関数として求めることになる。気泡の相対速度が無視できる場合について、Schmidt¹⁾の結果と一致するように α と β の値を定め、さらに気泡の水に対する相対速度を $23u_{ms}$ としたときの数値計算結果を図8~11に示す。

(5) 考察

(i) Plume の場合中心流速は散気孔からの鉛直距離の1/2乗に比例するが、点源からの鉛直上向き気泡噴流の場合、それに比べ流速変化が緩慢であり、送気量が小さい場合、散気孔に近い点では流速がむしろ遅くなっている。これは気泡の特異な挙動によるものであると考えられる。また噴流の広がり方が散気孔からの鉛直距離の増加とともに緩慢になっているという点も Plume と著しく異なる。理論的解析結果は定性的にはこれらの特徴を表わしているが、十分な一致を得るには至らなかった。

(ii) 従来の研究結果より、2次元気泡噴流の場合、気泡の相対速度を考慮しても、噴流の中心流速及び噴流幅の広がり角度は、散気孔からの鉛直距離によらず一定であることがわっている²⁾。しかし3次元気泡噴流の場合、中心流速、ひろがり角度とともに減少している。したがって3次元気泡噴流の場合、散気孔の直上において噴流が非常に大きな流速をもつために、散気効果及び流体に運動量を与える効果のいずれもが、2次元の場合に対してかなりの効率の減少を伴うと考えられる。

(iii) 理論的な取扱については、単に気泡と周囲の流体との相対速度を考えるだけでなく、気泡特有の挙動をより正確に捉える必要があるものと考えられる。またこれからの課題として、散気孔を改良して気泡径をより均一にし、かつ小さくして実験を行なってゆく所存である。

(参考文献)

- 1) Schmidt, W : Turbulente Ausbreitung eines Stromes erhitzter Luft, ZAMM He. 21, 351, 1941
- 2) 豊谷隆一, 北野義朗, 田中経彦 : 静水中における気泡噴流の性質

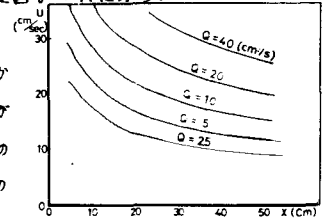


図-8

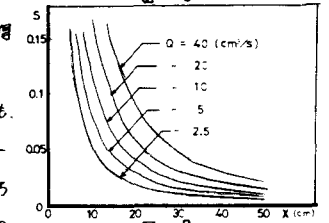


図-9

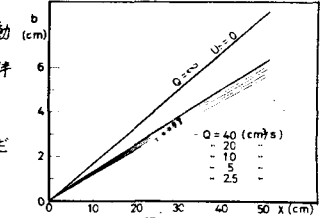


図-10

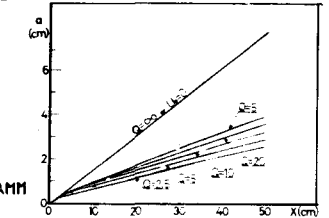


図-11

$\alpha = 0.1031, \beta = 0.1267, U_b = 23 \text{ cm/s}$