II-153

線源気泡噴流の性質

関東学院大学　正員○北野　義則
九州　大学　正員　粟谷　陽一

1．まえがき

線源気泡噴流の性質は、気泡の浮力により運動量は上昇と共に増大する。水流の幅は上昇高に比例して直線的に広がると言われている。その結果、水流の流速は一定値をとることとなる。また気泡分布の幅も水流の幅と同様上昇高に比例する。従って気泡密度は上昇高に逆比例する。しかしながら実験によると、散気装置近傍では気泡のゆらぎによる気泡自身の拡散が卓越するため従来言われているような結果とはならない。この報告は、気泡自身の拡散に注目して検討を行ったものである。

2．理論

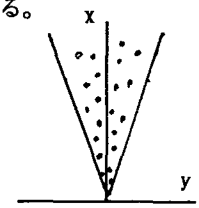

図　1

気泡噴流の基礎式はつぎのとおりである。

連続の式　$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

運動量の式　$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\sigma g+\frac{\partial}{\partial y}\left(\ell^2\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|\frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad (2)$$

気泡の保存式　$$(u+w)\frac{\partial \sigma}{\partial x}+v\frac{\partial \sigma}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\ell^2\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|\frac{\partial \sigma}{\partial y}\right)+K\frac{\partial^2\sigma}{\partial y^2} \qquad (3)$$

気泡の保存式の右辺第２項は、気泡自身のゆらぎによる拡散項であり、拡散係数Kは一定とした。またこの影響は水流にたいして小さいとして運動量式には考慮しなかった。

u：x方向の流速　v：y方向の流速　σ：気泡密度　w：気泡の相対上昇速度　g：重力加速度
ℓ：混合距離

混合距離ℓは噴流幅bに比例するとして　$\ell=\varepsilon b$　(4)　とおいた。噴流の流速分布、気泡密度分布はガウス分布に従うとして次のように置く。

$$u=u_0(x)\exp\{-y^2/b(x)^2\} \quad (5) \qquad \sigma=\sigma_0(x)\exp\{-y^2/a(x)^2\} \quad (6)$$

これらの式を運動量の式、気泡の保存式に代入して各式の０次および１次のモーメントをとれば、次の各式を得る。

$$\sqrt{2}UB\frac{dU}{dX}+\frac{1}{\sqrt{2}}U^2B\frac{dB}{dX}=AS \quad (7) \qquad (\pi+4)UB^2\frac{dU}{dX}+(\pi+2)BU^2\frac{dB}{dX}=2\sqrt{2\pi}BU^2+4A^2S \quad (8)$$

$$\frac{BAS}{(B^2+A^2)^{1/2}}\frac{dU}{dX}+\frac{A^3}{(B^2+A^2)^{3/2}}US\frac{dA}{dX}+\left\{1+\frac{B^3}{(B^2+A^2)^{3/2}}U\right\}S\frac{dA}{dX}+\left\{1+\frac{B}{(B^2+A^2)^{1/2}}U\right\}A\frac{dS}{dX}=0 \quad (9)$$

$$\left(\tan^{-1}\frac{A}{B}+\frac{BA}{B^2+A^2}\right)SBA\frac{dU}{dX}+\left\{\tan^{-1}\frac{A}{B}+\frac{BA(A^2-B^2)}{(B^2+A^2)^2}\right\}SUA\frac{dA}{dX}+2\left\{1+\frac{B^4}{(B^2+A^2)^2}U\right\}SA\frac{dA}{dX}+\left\{1+\frac{B^2}{(B^2+A^2)}U\right\}A^2\frac{dS}{dX}$$
$$=2\sqrt{\pi}\frac{AB^3}{(B^2+A^2)^{3/2}}US+2K_0S \quad (10)$$

(9)式をさらに積分すれば送気量を求める式を得る。　$Q=\sqrt{\pi}AS\left\{1+\frac{B}{(B^2+A^2)^{1/2}}U\right\}$　(11)

ただし　$U=u_0/w$，　$B=b/\varepsilon^2x_0$、　$A=a/\varepsilon^2x_0$、　$S=x_0g\sigma_0/w^2$、　$X=x/x_0$、
$K_0=K/\varepsilon^4wx_0$、　$Q=gq/\varepsilon^2w^3$　であり、x_0は任意で長さの次元をもつ。

$X=0$近傍の解を求めるため　$U=U_1X^h$、$B=B_1X^i$、$A=A_1X^j$、$S=S_1X^k$　とおき、これを(7)～(10)式に代入し各式に生ずる次数を比較すれば、以下の結果を得る。

$$h=1/4 \qquad i=1/2 \qquad j=1/2 \qquad k=-1/2 \qquad \gamma=\sqrt{2}(3\pi+8)/16$$

$$U_1=(\gamma Q)^{1/2}/(2\pi K_0)^{1/4} \qquad B_1=2(K_0)^{1/2}/\gamma \qquad A_1=2(K_0)^{1/2} \qquad S_1=Q/2(\pi K_0)^{1/2}$$

これを用いて$X=\Delta X$でのU,B,A,Sの値とし、以後はRunge-Kutta法により計算を行った。なをｘ$_0$は任意に選べるので$K_0=1$とした。

3．実験

実験装置を図－2に示す。使用した水槽は、長さ4ｍ、深さ1ｍ、幅0．6ｍの片面ガラス張り鉄製水槽である。水槽中央部2ｍ区間に2枚のアクリル板(長さ2ｍ、高さ0．9ｍ)で水槽有効幅を0．4ｍに縮めた。水槽中央底部に幅0．4ｍの散気装置を据えた。水槽幅方向を仕切るのに用いたアクリル板の両端は解放されており、両端からの水流の通過は自由である。これにより水槽全体が貯水槽の役割を果たし、気泡噴流によって水槽内に生じる旋回流を極力、押さえた。更に水槽両端付近にタワシを設置して大きな表面流を小さくした。コンプレッサーより送気し、散気装置に導き気泡を発生させた。途中にフローメータを設置して、送気量を測定した。実験は、送気量を6種類、2倍ずつ 0.83, 1.7, 3.3 6.7, 13.3, 26.6cm²/sに変化させて行った。平均流速は、フォトトランジスターで検出するプロペラ流速計を用いて1点10秒間、断面方向に1ｃｍおきに3回繰り返して計測した。気泡密度分布は、ボイドセンサーを用いて計測した。ボイドセンサーは、気泡との接触回数及び接触時間の累計を測定するものであって、これにより、平均気泡密度を求めた。

4．考察

図3に示すように、流速分布及び気泡密度分布は粒子沈降噴流などと同様にガウス分布で十分近似できる。気泡噴流の運動量の拡がりはその幅を流速値が u_0e^{-1} となる位置で幅を定義すれば図4に示す結果を得る。従来の結果と、著しく異なって散気管近傍では、気泡のゆらぎのため原点を通る直線分布とならない。また気泡密度分布の拡がりもその幅を気泡密度値 σ_0e^{-1} となる位置で定義すれば図4に示すものとなる。このように初期拡がりの影響を気泡のゆらぎによるものだとして、気泡保存式に拡散項を加えて計算を行ったものが、図中の実線である。計算によれば、初期の拡がりは気泡幅が噴流幅より大きくその後乱流拡散が卓越し直線的な挙動を示し気泡の相対上昇速度と中心噴流流速値とで決定される拡がり角度となる。流速値を図5に示す。気泡のゆらぎによる拡散を考えなければ、気泡噴流はプリュームと同様、高さによらず一定値をもつ。しかしながら気泡のゆらぎを考慮すれば、気泡は初期に上昇速度のみで運動し水流の速度は0より始まりその後、高さの1/4 乗で上昇し、その後一定値に到達する。実験値と計算値はほど良い一致を示しているものと考える。気泡の中心密度の変化を図6に示す。実測値はすべて値が小さく実験で得られた各種物理量から送気量を逆算すれば、フローメータより読み取った値と一致しないが約 1.3倍すれば送気量は一致する。従って図6に示す中心密度は、送気量に合うよう補正した実測値である。従来、気泡密度は高さの－1乗に従うと言われているが気泡の揺らぎを考慮すれば、高さの－1/2 乗で始まり－1乗へと移り変わっていくことになる。混合距離の比例定数 ε は0.23～0.24程度であり気泡の揺らぎによる拡散係数Kは1～5cm²/sが得られた。

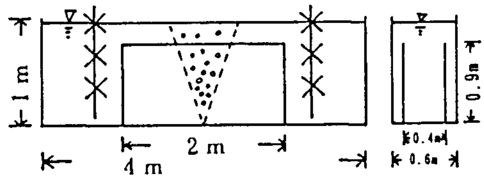

図 2

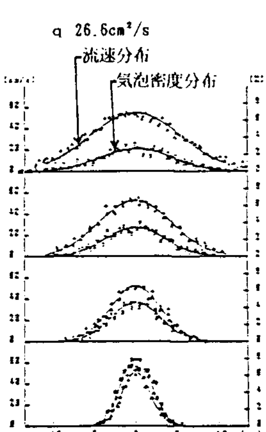

図 3

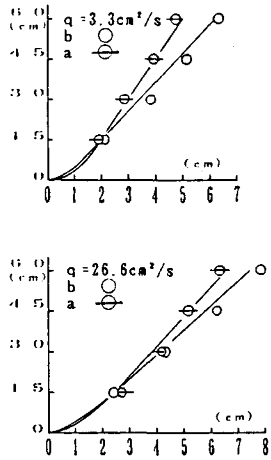

図 4

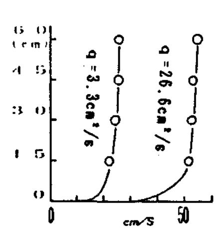

図 5

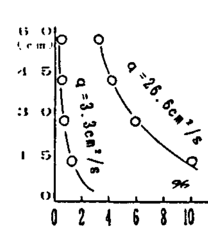

図 6