

水平流中における気泡噴流 Bubble Plume in Horizontal Flow

関東学院大学工学部 北野 義則 Yoshinori KITANO
九州共立大学工学部 粟谷 陽一 Yoichi AWAYA

This paper presents the results of experimental and theoretical investigations on the characteristics of two-dimensional inclined bubble plume. The inclined bubble plume forms when bubbles are released from air line source oriented perpendicular to a horizontal flow. For the measurement of velocity, a propeller-type current meter is used and an air volume fraction is measured using a conductivity probe. From the result of measurements, we find that the inclined bubble plumes are divided into two categories. The velocity and the angle of inclination of bubble plume are obtained theoretically, applying the equations of continuity, momentum and volume conservation of air bubbles to a model based on the assumption which turbulent diffusion is neglected for simplicity. This theoretical result is compared with our experimental data.

Keywords: inclined bubble plume, horizontal flow, multiphase flow

1. まえがき

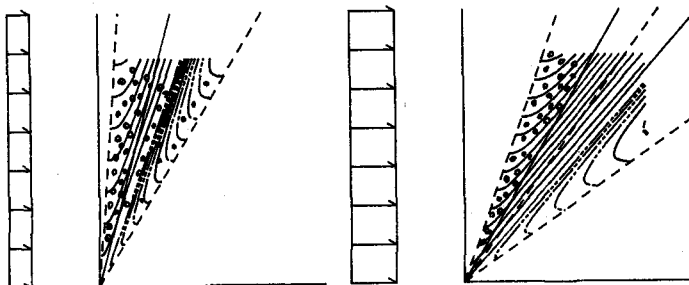
水底より気泡を発生させると気泡は水中を上昇し、気泡の浮力によって気泡噴流を形成する。気泡噴流の応用には、水質の改善、躍層の破壊、波浪の阻止および油濁の拡散防止などが挙げられ、広い応用範囲をもつと考えられる。静水中における2次元および軸対称気泡噴流ともその挙動についてはかなりの程度まで知られるようになってきた¹⁾²⁾。一方、周囲の流れが気泡噴流と同じ向きに流れる場での気泡噴流については、流速分布、気泡密度分布とも噴流中心軸に関して左右対称であるため、静水中での気泡噴流の解析を拡張することにより比較的容易に取扱える³⁾。さらに、水平流中での気泡噴流については波江らの研究があるが、気泡噴流の流速分布等も計測されておらず、また気泡密度と流速分布の中心軸を一致させているなど理論的にも疑問の点をもつ⁴⁾。

以上の観点より本報告では、水平流中での気泡噴流について流速分布、気泡密度分布を実測するとともに、理論的には、簡単のため乱流拡散を無視して、連続の式、運動量の式、気泡の保存式を適用し、気泡噴流の傾斜角等の推定を行うものである。

2. 理論的検討

鉛直方向に上昇する気泡噴流が一樣な流速をもつ水平流を受けると、気泡が押し流されて斜めに上昇する。流れのパターンを図-1に示す。

図-1(1)に示す流れは、水平流速が噴流流速に比較して小さな場合に現れる。気泡は斜めに上昇しながら気泡噴流を形成し、自



(1) 両吸い込み型気泡噴流

(2) 貫通型気泡噴流

図-1 傾斜気泡噴流

由表面に達すると左右に分かれ水面噴流を形成する。気泡噴流は幾分速度分布等の対称性を失うにとどまる。

図-1(2)の流れは、水平流速が増加すると現れ、その増加により気泡群の傾斜角(鉛直方向と気泡群のなす角)は大きくなり、流れが気泡群(以後、気泡列と称する)を横切る。このとき流れは気泡の浮力を受けるので、上向きに曲げられながら気泡列を横断する。横断した噴流はさらに下側の周囲水を連行しながら水表面に達して水面噴流を形成する。この水面噴流の大部分は下流に向かって流れ去る。このような気泡噴流を傾斜気泡噴流、特に前者を両吸い込み型気泡噴流、後者を貫通型気泡噴流と称する。

このように水平流中での気泡噴流の解析は簡単ではないが、ここでは気泡列の傾きの大きい貫通型気泡噴流について若干の理論的検討を行う。

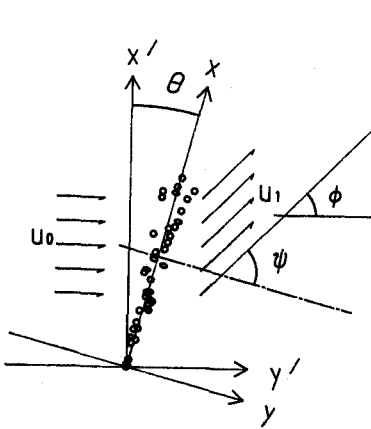


図-2 貫通型気泡噴流の模式図

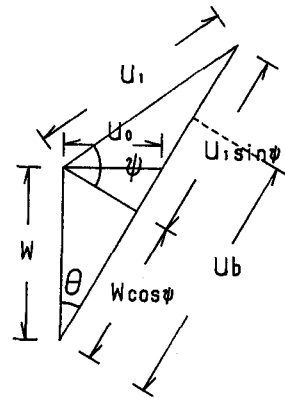


図-3 気泡の上昇速度

貫通型模式図を図-2に示す。簡単のため気泡の乱流拡散を省略し、気泡が一つの面内を上昇するものとして気泡列の傾きを θ 、気泡列単位面積当たりに含まれる気泡の体積を s とし、横断後の流向と気泡列を含む面の法線とのなす角を ψ 、その流速を u_1 とする。

気泡列の傾きは、水平流速 u_0 と気泡の相対上昇速度 w の比で決定されると仮定すると次式を得る。

$$\tan \theta = u_0 / w \quad \dots \dots \dots (1)$$

図-3に示すように、 x 軸に沿う気泡の上昇速度 u_b は流入流速の x 成分 $u_0 \sin \theta$ と横断後の速度の x 成分 $u_1 \sin \psi$ の平均に相対上昇速度の x 成分 $w \cos \theta$ を加えた速度で上昇するものと仮定すれば

$$u_b = \frac{u_0 \sin \theta + u_1 \sin \psi}{2} + w \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

が成り立つ。また

連続の式

$$u_0 \cos \theta = u_1 \cos \psi \quad \dots \dots \dots (3)$$

運動量の式

$$u_0 \cos \theta (u_1 \sin \psi - u_0 \sin \theta) = g s \cos \theta \quad \dots \dots \dots (4)$$

送気量の式

$$q = s u_b \quad \dots \dots \dots (5)$$

が成り立ち、以上を整理すれば

$$\frac{u_1}{w} = \sqrt{\frac{\zeta^2}{1+\zeta^2} + \left\{ \sqrt{1+\zeta^2 + \frac{2\xi}{\zeta}} - \frac{1}{\sqrt{1+\zeta^2}} \right\}^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi = \psi - \theta$$

$$= \tan^{-1} \left[\frac{1}{\zeta} \left\{ \sqrt{(1+\zeta^2) \left(1+\zeta^2 + \frac{2\xi}{\zeta} \right)} - 1 \right\} \right] - \tan^{-1} \zeta \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。ここに、 $\zeta = u_0/w$ 、 $\xi = gq/w^3$ である。

ζ に任意の値を与えれば、 u_1/w と ξ および ϕ と ξ との関係を数値として求めることができる。

3. 実験装置と実験方法

実験装置を図-4に示す。使用した水槽は1m×4m×0.6mの片面ガラス張り鉄製水槽である。この水槽を図-4の側面図が示すようにA、B、C、D4槽に分け、水槽端に直径30cm、長さ1mの回転翼を設置して、直流モーターでその翼を回転させることにより、水平流を発生させ水の循環を得た。これよりB槽に様な流速分布をもつ水平流を作ることができた。

内径0.2mmのステンレスパイプを一行に取り付けた装置を気泡発生源としてその装置を水槽底部に設置し、コンプレッサーより空気を送気して散気装置から気泡を発生させた。気泡は斜めに上昇しながら周囲水を連行し、水表面で左右に分かれ水面噴流を形成する。実験の目的は、この水面噴流の影響がおよばない範囲で行う。つまり水面噴流の影響を取り除く役目がA槽およびC槽であり、これにより目的とする実験ができた。

平均気泡密度の測定は点電極プローブで行った。平均流速はプロベラ流速計により測定される。流れが場所により異なった流向を持つためその向きを知る必要がある。

そのため、プロベラ流速計を2個互いに直交して組み合わせたその流速計を用い、流向および流速を計測する。プロベラ流速計の検定曲線の1計測例を図-5に示す。送気量は3通り水平流速は4通りに変化させて計12通りの実験を行った。実験条件を表-1に示す。

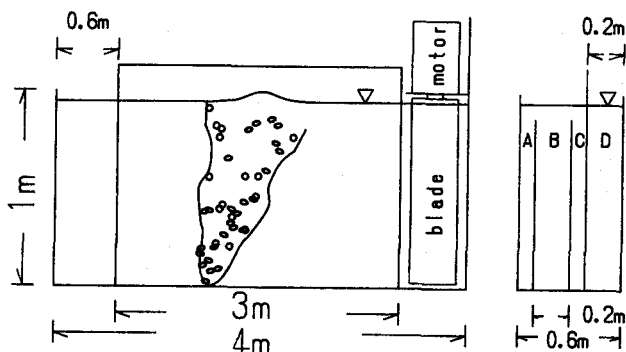


図-4 実験装置

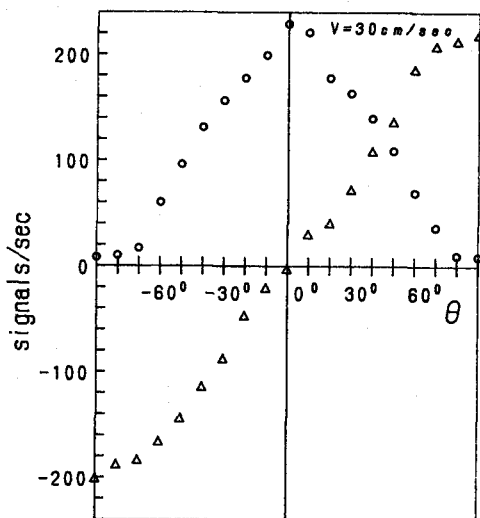


図-5 プロベラの検定曲線

表-1 実験条件と実験結果

実験	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	RUN11	RUN12
送気量 q cm ² /s	3.33				6.67				13.3			
噴流型式	両	両	貫	貫	両	貫	貫	貫	両	両	貫	貫
流入速度 u_0 cm/s	4.4	6.3	9.1	11.4	6.0	9.7	11.6	15.5	6.9	10.9	12.8	14.9
θ°	1.5	6.5	16.0	26.0	5.0	15.5	25.0	32.0	3.0	14.5	24.0	30.0
ϕ°	—	—	55.0	32.0	—	61.0	43.0	33.0	—	—	50.0	36.0

両：両吸い込み型気泡噴流

貫：貫通型気泡噴流

4. 実験結果

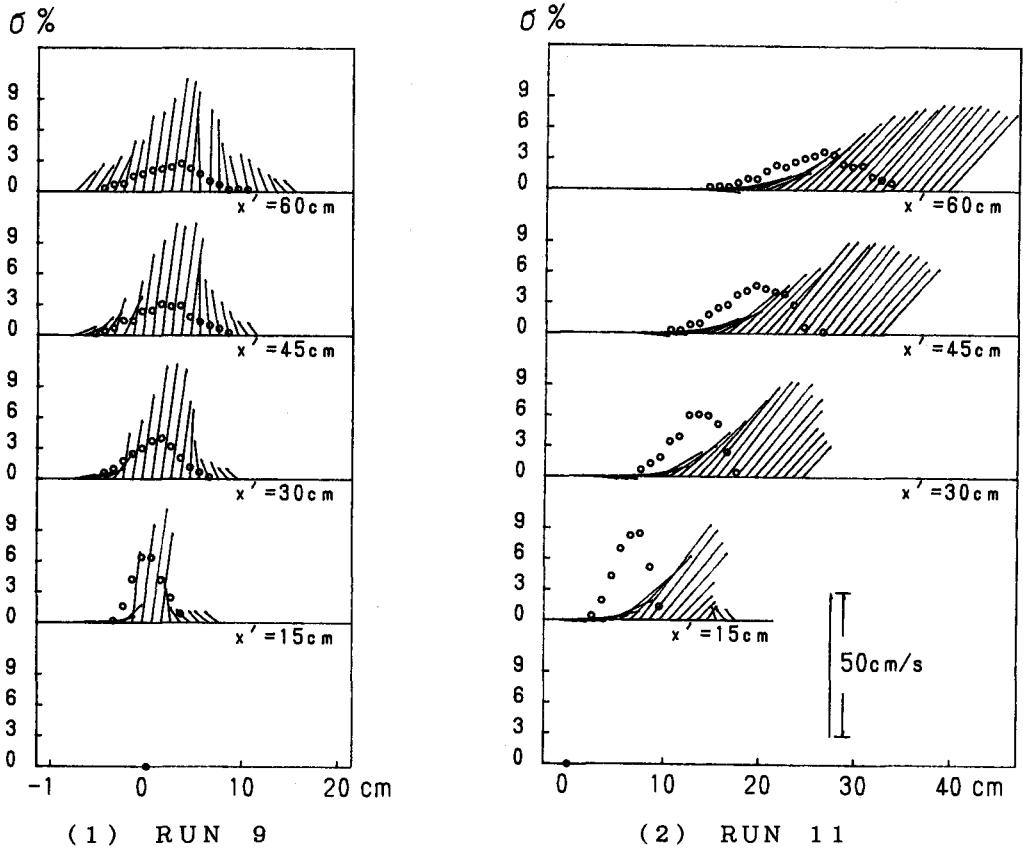


図-6 流速分布と気泡密度分布
(速度 — 気泡密度 ○)

実験結果を図-6(1)～(2)に示す。図-6(1)は気泡列の傾き 3° の実験結果を示すものであって、水平流の流速は小さいので、気泡噴流は少し傾くことになる。気泡密度分布、流速分布ともそれぞれほぼ左右対称であり、気泡噴流の両側より吸い込みがあるため静水中の気泡噴流とその性質には大きな差はな

いものと考えられる。図-6(2)は水平流の流速を増加させた場合の実験結果で、気泡列の傾きは 24° と大きい。気泡噴流に流入する水平流が気泡により浮力を受け、その流れは上向きに曲げられながら気泡列をある一定流速で横断し、その流れに対して下側の流体が連行されてハーフジェットと類似な領域を形成することになる。実測結果より流速分布、気泡密度分布ともに気泡発生源を除けば相似性を持つものと考えられる。

5. 考察

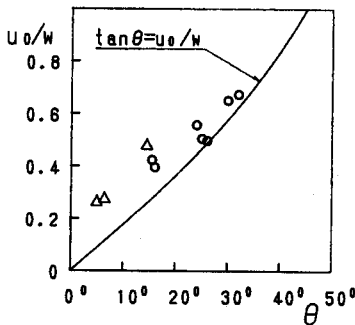


図-7 θ と u_0/w との関係

(実験値 Δ : 両吸い込み型 O : 貫通型)

図-7に気泡列の傾き角度 θ と流入流速と気泡の相対上昇速度との比 u_0/w の関係を示す。式(1)の関係を満たしているものと思われる。

u_0/w をパラメータとして u_1/w と gq/w^3 の関係を図-8に示す。 u_0/w を一定とすると、 u_1/w は送気量の増加とともに増す。また、送気量を一定として u_0/w の変化で見ると、 u_1/w の最小値が表れるこれは u_0 の減少とともに、気泡が上向き運動量を与える流水量が少なく、単純な気泡噴流に近づくためであると思われる。計算値は実測値の傾向を示す。

水平流の横断後の偏り角度 ϕ と送気量 gq/w^3 との関係を図-9に示す。実測値は、ばらつきがあるものの計算値と同様な傾向を示す。これら計算は貫通型気泡噴流の場合であり、その適用にあたっては注意を要する。片方の限界は両吸い込みの状態、もう一方の限界は水平流が横断した後、剥離部分より連行量の補給が見込めず横断後の流れが底面に吹よせられて、その流れが底面に平行となると考えられる状態で、今回の理論の適用はその両限界の間に限って成り立つものと思われる。

つぎに、気泡列の前後には気泡の浮力によりつぎの差圧 Δp を生じる。

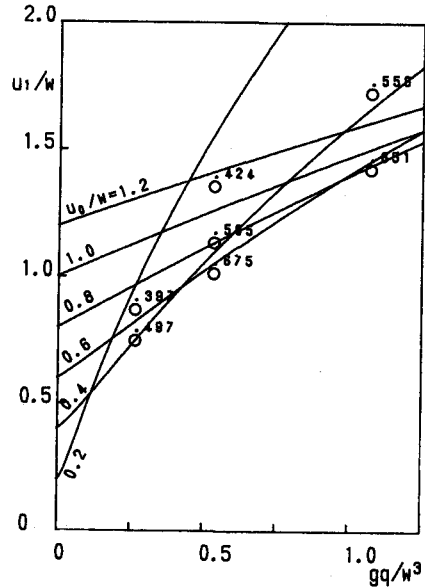


図-8 u_1/w と gq/w^3 との関係
(実験値 O)

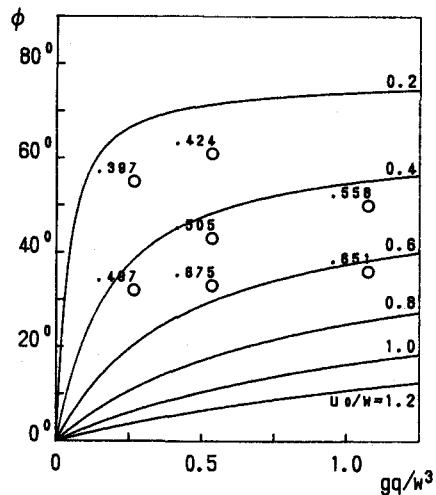


図-9 ϕ と送気量 gq/w^3 との関係
(実験値 O)

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = \zeta^2 \left\{ \sqrt{1 + \frac{2\zeta}{\zeta(1+\zeta^2)}} - 1 \right\} \dots\dots\dots (8)$$

これは水平流を阻止する働きをもつ。したがって潮流などの流速 u_2 が減速されて u_0 になったと見るべきで、どの程度の減速を受けるかは、気泡発生源の深さと全水深との比、気泡発生源の配置、さらには形成された水面噴流にも影響される。気泡噴流の傾きが大きくなると、この水面噴流の上流側への影響は小さくなり波浪阻止の効果も減少するものと考えられる。概略の傾向を見いだすために、 Δp が減速による圧力快復 $1/2\rho(u_2^2 - u_0^2)$ に等しいと仮定し、噴流の傾き角 ϕ を一応 45° 以上に保つために必要な送気量と流入流速などとの関係を求めると図-10になる。 $u_2 < w$ では $q \propto u_2^2$ であるが u_2 が w をこえると $q \propto u_2^4$ となり、送気量が激増することが予想される。

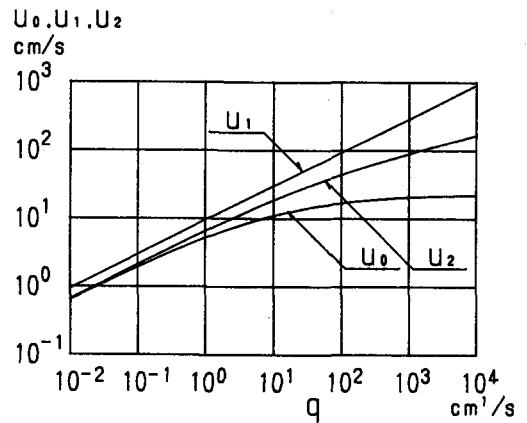
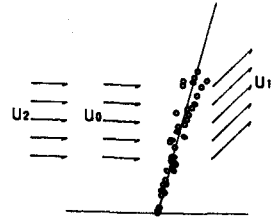


図-10 u_2 と q との関係
($w = 23\text{cm/s}$)

6. あとがき

水平流中での気泡噴流について、実験および簡単な理論の両面より検討を加えた。

1) 2個のプロベラ流速計を組み合わせることにより流向、流速を定めることができた。

2) 実験より傾斜気泡噴流を両吸い込み型、貫通型気泡噴流に分類することができる。

3) 簡単のため乱流拡散を無視した理論的取り扱いによっても、貫通型気泡噴流の性質をある程度知ることが可能で、図-7～図-9より気泡列の傾斜角、気泡列通過後の流向、流速を推定することができる。

4) $u_2 < w$ では $q \propto u_2^2$ 、 u_2 が w をこえると $q \propto u_2^4$ となり、送気量が激増する。

参考文献

- 1) 北野義則、粟谷陽一 線源気泡噴流の性質 第31回水理講演会論文集 昭和62年2月
- 2) Y.Kitano, Y.Awaya Air Bubble Plumes with Diffusion by Interaction of Air Bubbles. Mem.Fac.Kyushu Univ. Vol.48, No.3 1988年9月
- 3) 北野義則、粟谷陽一 上向流中における二次元気泡噴流 土木学会論文集 II-10 第399号 昭和63年11月
- 4) 波江貞弘、原正一、伊飼道明 一様水平流中における二次元気泡浮力噴流の解析、日本機械学会論文集 (B編) 51巻、463号、昭和60年3月