回転楕円体気泡の径、形状、移動方向、移動速度の同時測定に関する一方法

長 瀬 洋 一・安 井 弘 雄*

住 本 哲 宏**・高 木 基 實

広島大学工学部 化学工学科†

互いに直交する 2 本の光束とフォトセンサーを組み込んだユニットを液相内に挿入しておく。両光束の交差域を通過する気泡のみが両方のセンサーにおいて類似な応答を示し、これを解析の対象とする。

理論では気泡は回転楕円体で回転軸方向に移動するとし、気泡が交差域を通過する際に、気泡内を屈折あるいは気泡表面で反射してセンサーに至る光量の変化を幾何学的に計算した。測定した応答曲線を計算曲線と対比して気泡の大きさと長径-短径比 a/b を推定するには曲線の初期の平均変化率と最大回復量を用いるのが便利であった。

気泡が交差域でビームに対して傾いてよぎるときは非対称な応答曲線を与える。この場合の気泡径と a/b の近似推定法も示した。気泡の速度は応答の全時間と推定した相当径より、また気泡の移動方向はセンサーを幾つかに、最小 4 つに、分割すれば求めることができる。

緒 言

気液混相のホールドアップ、気泡径、比表面積などの測定方法について古くから種々の測定原理が開発されている。光散乱の原理に基づく Vermeulen^{13,21)}, Calderbank⁹⁾ の比表面積測定、電気探針^{15,19,20)}, 気泡吸込み²²⁾ による局所ホールドアップや粒子径 (2 本の探針) の測定が最も一般的である。最近では信号処理方法についてより正確な手法が開発されている¹⁹⁾。測定原理は相違するが光ファイバチューブ^{1,9,12,14)}, グラスロッドなどを用いる方法⁹⁾ も種々考案されている¹⁰⁾。以上の方法はいずれも簡便ではあるが、測定項目に限られる。また気泡の移動方向が一定しないときなどには適用しにくいなどの問題があると思われる。

Goldschmidt ら^{5,6,7)}, Bremhorst ら²⁾ は熱線流速計を、大場ら¹⁰⁾, Goldstein ら⁸⁾ はレーザードップラー法、Olszowski ら¹⁷⁾ は超音波信号を利用する方法を気液系に適用した。これらの方法の利点はホールドアップ、気泡径、気泡速度および流体の流速変動など多量の情報を同時に得られることである。しかし高価にならざるをえず、また高級化するほど可搬性に欠けることになるであろう。

ここでは測定対象気泡が回転楕円体の場合に限られるが、反面簡便で可搬性があり、かつ同時多重情報の計測が可能である一つの測定方法を示す。測定原理の主点はあらかじめ気泡形状を仮定して幾何光学的に理論計算さ

れた出力信号と測定された信号とを対比することによって、気泡径および特に気泡形状についての情報を得ること、また気泡の移動方向が不明な流れ場でその方向と速度を推定することなどである。仮屋崎¹¹⁾ も本報と類似した装置を用いているが、本報では個々の気泡の識別に主題をおいている。

1. 測定原理

気液系を対象とする。単一気泡が平行で細いビームをよぎるとき光の大部分は散乱されるが、発光面と受光面距離が短いときはビームと気泡の相対位置関係によってビームの一部が気泡内を屈折しながら透過し、受光面に到達しうる。この到達する光量は気泡がビームを通過する間に刻々変化し、その全応答曲線 (= 到達光量と全光量の比) は気泡の大きさ、形状などをパラメータとして特有の変化を示す。応答曲線を幾何光学的に計算し、実測の応答と対比してパラメータを決定しようとするものである。

具体的には Fig. 1 の (a) のように単一気泡が自由に通過できる程度の距離をへだてて円形光源と受光素子を設け、この 2 組を組みあわせて直交した円形ビームを作る。両ビームの交差域を通過する気泡のみを測定の対象とする。また受光面は例えば四素子 A, B, C, D に分割し、各素子の出力とこれらの合成出力とを検出することにする。このようにすると気泡位置とその通過方向の概要を検知できると共に、次に示すような幾何光学計算と実測応答との対比により明確になる。また光源および受光面を一体に組み上げ、これを液相中の任意位置に挿入し、この点における局所の気泡特性を測定できるように

† 〒730 広島市中区千田町 3-8-2

* ダイキン工業(株)

** 中国工業技術試験所

可搬可能で簡便な測定装置を意図している。そのために光源と受光素子はできる限りコンパクトにする必要があり、例えば受光素子として小型のシリコンフォトセルを予定する。

2. 屈折光量の計算方法

計算の便宜のため次の仮定をおく。

1) 2本のビームは直交し、いずれも円形かつ平行である。断面上で光量は一樣とする。

2) 光源と受光面間の距離は短いので、液相および気相中を進行する間の光量の減衰を無視する。屈折するときは全屈折とする。

3) 気泡は回転楕円体である。ビーム径は小さいので、気泡は回転軸方向にビームを直線的によぎるものとする。

4) ビーム径は 2 mm, 受光面直径は 3 mm, ビーム長さ $L=15\text{ mm}$ とする。

仮定 1)~3), 特に 3) は本測定方法の精度を左右することになるが、ここで第 1 近似として回転楕円体を選んだ。

いま Fig. 1(a) で一方のビームに注目し、その中点をビームに関する座標 (x', y', z') の原点 O' とする。 y' 軸は他方のビーム方向、 z' 軸は自己のビーム方向にとる。光源と光検出面 (受光面) の中心 O_B, O_D は、それぞれ $(0, 0, -L/2), (0, 0, L/2)$ である。気泡に関する座標を (x, y, z) とし、 x 軸を気泡の移動方向にとる。 x 軸は $x'y'$ 面上で角度 α , z' 軸と角度 β をなすとする ((b) 図の $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ は $x'y'z'$ を平行移動したもの)。 x 軸は $y'z'$ 面上の点 $C(0, y_0', z_0')$ を通過する。したがって気泡の移動はパラメータ $\alpha, \beta, y_0', z_0'$ で規定されるものとする。瞬間位置は $\overline{OC}=\delta$ で表す。 y 軸は $\bar{x}\bar{y}$ 面上にとる。この場合 z 軸は x 軸と $\bar{z}$ 軸を含む平面上にあり、角関係は Fig. 1(b) に示すようになる。

以上の仮定と定義により、気泡移動軌跡 (x 軸) は (x', y', z') 系に対して Eq. (1), 気泡形状は Eq. (2) で与えられる。

$$\delta = \frac{x'}{\sin \beta \cos \alpha} = \frac{y' - y_0'}{\sin \beta \sin \alpha} = \frac{z' - z_0'}{\cos \beta} \quad (1)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

また Fig. 2 で発光面上の任意点 A を発する光の光路の方向余弦は気泡に対して $(\cos \beta, 0, \sin \beta)$ で、これが点 $M(x_1, y_1, z_1)$ において気泡表面に到達したとすると

$$\frac{x - x_1}{\cos \beta} = \frac{z - z_1}{\sin \beta}, \quad y = y_1 \quad (3)$$

Eqs. (2), (3) を連立し、実根が存在すれば点 M が確定する。点 M における法線と光路とのなす角 i_1^1 は Eq. (4) で与えられる。

Fig. 1 Coordinates system

Fig. 2 Angular relation of light to bubble

$$\cos i_1^1 = \gamma \left(\frac{x_1}{a^2} \cos \beta + \frac{z_1}{b^2} \sin \beta \right) \quad (4)$$

ただし

$$\gamma = \frac{b^2}{\sqrt{(b^2/a^2)^2 x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}}$$

また $(\gamma x \sqrt{a^2}, \gamma y \sqrt{b^2}, \gamma z \sqrt{b^2})$ は点 M における法線方向余弦である。次に点 M に到達した光が屈折し気泡内に入光するか、表面で反射するかを次の条件より判別する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{屈折: } i_1^1 < \sin^{-1} n \\ \text{反射: } i_1^1 \geq \sin^{-1} n \end{array} \right\} \quad (5)$$

ただし n は相対屈折率で空気-水系の場合 $n=1.33$ である。気泡内に屈折入光した場合、屈折光は入射光および法線と同一平面上にあり法線と i_2^1 をなす。

$$\sin i_2^1 = \sin i_1^1 \quad (6)$$

この条件より、気泡内を M から他の気泡表面 $N(x_2, y_2, z_2)$ に至る光路の方向余弦 (p_1, q_1, r_1) が決定され、光路 MN の方程式 Eq. (7) が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{x_2 - x_1}{p_1} &= \frac{y_2 - y_1}{q_1} = \frac{z_2 - z_1}{r_1} \\ &= -\frac{2\{(b^2/a^2)p_1x_1 + q_1y_1 + r_1z_1\}}{(b^2/a^2)p_1^2 + q_1^2 + r_1^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 3 Illustrations of E_r curves for perpendicularly moving bubbles to a beam

$$\beta = \frac{2}{\pi}, \quad \bar{y}_0 = 0$$

Fig. 4 Definition of λ

Eq. (4) と同様にして光路 MN の点 N における法線との角 i_2^2 を求め、これより屈折角 i_1^2 が次式によって求まる。

$$\sin i_1^2 = \sin i_2^2 / n \quad (8)$$

最後にこの光路が受光面に到達するか否かを次の条件より判定する。

$$\overline{O_D'A'} \leq d_D/2 \quad (\text{受光面半径}) \quad (9)$$

気泡内を通過する屈折率は (b) 図に示すように点 N において折れ曲がることになる。次に P 点で反射された場合、反射光は入射光および法線と同一平面上にあり、かつこれと点 P における法線とのなす角が入射角 i_1^1 に等しい。これより反射光の方程式が導かれ、Eq. (9) の条件によってこれが受光面に到達したかを判定する。発光点 A の位置を変えて同様の計算を反復する。発光面には気泡内を屈折して入光するもの、表面反射して入光するもの、および気泡に接することなく発光面から直接受光面に入光するものの三つの要素が一般に考えられる。それぞれの発光面上における面積を S_A, S_B, S_C とすると、たとえば発光面上で Fig. 2(c) のような図形内にある光が受光面に到達する。先の仮定によって発光面光量とこのうちで受光される光量との比 E_r は

$$E_r = \frac{\text{受光量}(E)}{\text{発光量}(E_0)} = \frac{S_A + S_B + S_C}{S_0} = \frac{S}{S_0} \quad (10)$$

で与えられる。前述のように気泡の移動軌跡はパラメータ $\alpha, \beta, y_0', z_0'$ で表されるが、ビームは円形であるから、フォトセルの A, B, C, D 四要素の合成出力に関しては

Fig. 5 d_{eq} and a/b as functions of parameters of E_r curves

$\alpha=0$ としても一般性は失わない。 α は他方のビーム座標では β の $x'y'$ 面上への投影角に相当する。いま Fig. 1(a) で z' 方向のビームに注目すると、 z_0' が正で大きくなるほど気泡が受光面に近づくために受光面に到達する気泡内屈折光量および表面反射光量は増加する。しかしビーム半径を 1 mm と細くとした場合 y' 軸からみた z_0' の許容範囲は高々 $(-0.3 \sim +0.3)$ mm であり (気泡は両ビームの交差域を通ると仮定している)、 z_0' の大小は実質上問題にならず、 $z_0'=0$ とおくことができる。よって $\alpha=0$ 、 $z_0'=0$ とおきパラメータを β と y_0' の二つに減ずることとする。計算は気泡の球相当直径 d_{eq} 、短径-長径比 a/b 、および β, y_0' を定め、任意の δ に対し発光面を 36,000 メッシュに分割して Eq. (10) の E_r を算出した。

3. 計算結果

空気-水系の場合の計算結果を述べる。

3.1 簡単な場合

気泡がビームの中心を通りかつこれに垂直に移動する場合、すなわち Fig. 1(b) で x 軸と x' 軸が一致する場合は、 $y_0'=0, \beta=\pi/2$ で応答 E_r は最も簡単になる (以下ことわらない限り E_r は Fig. 2(c) と Eq. (10) に定義するように四分割した素子の合成出力を基準とする)。その一例を Figs. 3(a), (b) に示す。横軸 λ は Fig. 4 に示すように気泡がビームをよぎり始めた位置 B から、通り抜け終る位置 D までの距離 BD の 1/2 を基準にして $-1.0, +1.0$ で規格化している。いまの場合は $\lambda=0$ に関して E_r は対称になる。

Fig. 3 にみられるように気泡径が大きくなるほど、また短径-長径比 a/b が 1 に近づくほど気泡内を屈折透過した光が受光面に到達しやすくなり、 E_r 曲線は $\lambda=0$ 付近でより大きく回復する。一般に E_r 曲線の変化は大気泡になるほど激しく、それだけ E_r 曲線に依存する本方法の分解能は向上する。微小気泡を主対象にするときはビーム径をより細くすればよいが、一方微小気泡は通常球形に近づき、 a/b を実質的には考慮する必要がなくなる。ここでは気液系を対象とし、3~10 mm 程度の気泡の測定を前提として、装置製作の便宜なども含め予備実験の

Fig. 6 Illustrations of E_r curves for moving bubbles with constant angle to a beam
 $\beta=1.22$, $\bar{y}_0=0.3$

結果前記のようなビーム径、ビーム長さなどをきめたものである。

Fig. 3 のような E_r 曲線を代表する指標として Fig. 5 (a) に定義するように E_r 曲線の平均的な落ち込み $(dE_r/d\lambda)_{av}$ と $\lambda=0$ における E_r の回復量 $(1-E_{rm})$ をとる。これらのパラメータと d_{eq} および a/b の関係は Fig. 5 (b) となる。図にみられるように計算上の仮定が成立すれば、 E_r 曲線よりかなり精度よく d_{eq} と a/b を推定できる。

3・2 ビームを斜めに通過する場合

前項の場合は実際にはまれである。 $\bar{y}_0 \neq 0, \beta \neq \pi/2$ の場合の E_r 曲線より d_{eq} や a/b を推定できることが望ましい。計算結果は気泡がビームを垂直に横切り、かつ $\bar{y}_0 = y_0'/(d_B/2) < 0.3$ ならば E_r 曲線は前項の結果とほとんど変わらなかった。ただし当然のことながら受光素子の四つの要素ごとの E_r 曲線は大幅に相違するから、各要素の E_r を対比すれば $\bar{y}_0$ の程度を知ることができる。

気泡がビームを斜めに通過する場合、 E_r の λ に関する対称性はなくなる。 β があまりに小さくなると、発光面または受光素子に気泡が衝突するようになる。あらかじめ測定部分全体を傾けるなどしてこのような状態を避ける必要がある。実用的な β の範囲は $\pi/3 < \beta < 2\pi/3$ 、 $\bar{y}_0$ の範囲は上記の結果より $\bar{y}_0 < 0.3$ 程度である。一例として $\beta=1.22(70^\circ)$ 、 $\bar{y}_0=0.3$ における E_r の計算例を Figs. 6 (a), (b), (c) に示す。当然のことながら気泡径が大になるほど、また楕円形が扁平化する (a/b : 小) ほど E_r 曲線の $\lambda=0$ に関する非対称性が顕著になる。 $\beta < \pi/2$ の場合は図のように E_r 曲線の左側 ($\lambda < 0$) がやせ、右側が太る。 $\beta > \pi/2$ のときは逆になる。

いま $\beta < \pi/2$ とする。気泡がビームをよぎり始めた初期段階では気泡内を屈折透過し受光面に至る透過入光 S_A (Fig. 2 (c)) や表面で反射入光する S_B はほとんどなく、直接入光 S_C が単調に減少するだけである。したがって初期段階の E_r 曲線は横軸を適当に選べば β に関

Fig. 7 Method of modification of skewed E_r curves

せず気泡形状に特有の曲線を示すと予想される。Fig. 4 に示す λ の定義はそのためにも選んだものである。気泡がビーム全体をおおうようになると S_A が多くなり E_r の増加が起こるが、Fig. 4 に示すように気泡が扁平でかつ傾くほど、透過入光はより早くから起こり、早い時期に終わる。しばらく全しゃへいがある終段で S_C の回復に至る。この間に E_r の非対称性を与えるので、非対称ではあっても垂直上昇 ($\beta=\pi/2$) のときと同等の E_{rm} (Fig. 5 (a)) を与える気泡位置があるはずである。多数の計算結果によるとこの点は Fig. 7 に示すように大気泡の場合、Fig. 7 の (a) の点 A すなわち気泡が傾いているための余分の透過光 (A B 間に相当する) を除いた位置にほぼ相当した。小気泡になると透過光はなくなるので点 A は (b) 図に示すように A' 点になる。点 A, A' は E_r

Fig. 8 Comparison of modified E_r curves with those at $\beta = \pi/2$

の勾配が急変する位置でかなり明確に確定できる。

結局非対称な実測の E_r 曲線から d_{eq} と a/b を推定する近似方法としては、 $\lambda = -1.0$ からの E_r の平均の勾配 $(dE_r/d\lambda)_{av}$ と点 A または A' における E_r 値を E_{rm} に読み替えて Fig. 5 (b) を用いれば、曲線の非対称性、したがって β に関係なく推定できる。

非対称な E_r 曲線全体を対称形に修正するには Fig. 7 で DE, HI 間はそのままにし、また AB 間、A'B' 間の曲線形に関係なくこれらの間は $E_r = E_{rm}$ 一定であるとする。次に AB 間、A'B' 間の midpoint C または C' と $\lambda = 0$ との距離 l だけ曲線 AF, BG を右または左に平行移動させ点線のような曲線とする。小気泡のときは点 A', B' を l だけ平行移動する。

このように修正をほどこした E_r 曲線と垂直上昇の場合の E_r 曲線との対比の一例を Figs. 8 (a), (b) に示す。図 (b) で最小点付近を除き両者はよく一致している。

β は他方のビームについて四分割された受光素子の出力変化より大約推定できる。

このようにして d_{eq}, β が決定できれば、実測の E_r 曲線で $\lambda = -1.0, +1.0$ 間の距離およびこの間の移動時間がわかり、両者の比として気泡の移動速度を推算できる。

結 言

直交ビームの交差域を気泡が通過するときの光散乱と光透過現象を利用して気泡の大きさと形状、移動速度と方向を推定する方法を提案した。

気泡が回転楕円体でかつその回転軸方向に移動するときは受光量の初期の落ち込みの程度と最大回復量を知れば気泡の大きさと形状の扁平程度を推測できることを示した。また気泡がビームに対して斜めに横切るとき補正方法を確定した。これによって理論上の仮定が満たされる限り多元情報を同時に推算できる。

回転楕円体と近似することによって測定可能な気泡は限定されるが、反面本方法は屈折率が大きければ液液系にも適用できる利点がある。

【謝 辞】 本研究は文部省科学研究費補助金によって行われた。付記して謝意を表わす。

Nomenclature

a	= minor radius of ellipsoid	[mm]
b	= major radius of ellipsoid	[mm]
d_B	= beam diameter	[mm]
d_D	= detector diameter	[mm]
d_{eq}	= volume equivalent diameter	[mm]
E	= light transmission to detector	[W]
E_0	= light radiation from source	[W]
E_r	= E/E_0 , light transmission ratio	[—]
E_{rm}	= maximum recovery of E_r	[—]
i	= refraction angle	[rad]
$i_1^1, i_2^1, i_2^2, i_1^2$	= i defined in Fig. 2(a)	[rad]
L	= beam length	[mm]
n	= relative index of refraction	[—]
p, q, r	= direction cosines	[—]
S	= $S_A + S_B + S_C$, defined in Fig. 2(c)	[mm ²]
S_A	= area on light source in which light arrives on detector by refraction through bubble	[mm ²]
S_B	= area on light source in which light arrives on detector by reflection on bubble surface	[mm ²]
S_C	= area on light source in which light arrives on detector straightly	[mm ²]
S_0	= cross sectional area of light beam	[mm ²]
$\bar{y}_0$	= $2y_0'/d_B$	[—]
y_0', z_0'	= defined in Fig. 1(b)	[mm]
α, β	= angular relations of $x-y-z$ coordinate to $x'-y'-z'$ system	[rad]
δ	= defined in Fig. 1(b)	[mm]
λ	= defined in Fig. 4	[—]

Literature cited

- 1) Bell, R., B. E. Boyce and J. G. Collier: *J. Br. Nucl.*

- Energy Soc.*, 11, 183 (1972)
- 2) Bremhorst, K. and D. B. Gilmore: *J. Phys. Sci. Instrument*, 9, 347 (1976)
 - 3) Calderbank, P. H.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 443 (1958)
 - 4) Danel, F. and J. M. Delhay: *Mesures-Regulation-Automatisme*, Aout-Septembre, 99 (1971)
 - 5) Goldschmidt, V. W.: *J. Colloid Sci.*, 20, 617 (1965)
 - 6) Goldschmidt V. W. and M. K. Householder: *Atmospheric Environment*, 3, 643 (1965)
 - 7) Goldschmidt, V. W., M. K. Householder, G. Ahmadi and S. C. Chuang: *Progress in Heat and Mass Transfer*, 6, 487 (1972)
 - 8) Goldstein, R. J. and D. K. Kreid: *J. Appl. Mech.*, 34, 813 (1976)
 - 9) Hinata, S.: *Bull. JSME*, 15, 1228 (1972)
 - 10) Jones, O. C. and J. M. Delhay: *Int. J. Multiphase Flow*, 3, 89 (1976)
 - 11) Kariyasaki, A.: *Fukuoka University Review of Technological Science*, No. 24, 109 (1980)
 - 12) Kennedy, T. D. A. and J. G. Collier: *Instn. Chem. Engrs. Symp. Ser.*, 38, II, J4 (1974)
 - 13) Langlois, G. E., J. E. Gullberg and T. Vereulen: *Rev. Sci. Inst.*, 25, 360 (1954)
 - 14) Miller, N. and R. E. Mitchie: *ASME, Two-Phase Flow Instrumentation*, 82 (1969)
 - 15) Neal, L. G. and S. G. Bankoff: *AIChE J.*, 9, 490 (1963)
 - 16) Ohba, K., M. Ogasawara, J. Uemura and J. Satoh: *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 42, 3560 (1976)
 - 17) Olszowski, S. T., J. Coulthard and R. S. Sayles: *Int. J. Multiphase Flow*, 2, 537 (1976)
 - 18) Sekiguchi, K., H. Fukui, T. Matsuoka and K. Nishikawa: *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 40, 2295 (1974)
 - 19) Ueyama, K. and T. Miyauchi: *Kagaku Kōgaku Ronbunshu*, 2, 430 (1976)
 - 20) Ueyama, K. and T. Miyauchi: *ibid.*, 2, 595 (1976)
 - 21) Vermeulen, T., G. M. Williams and G. E. Langlois: *Chem. Eng. Prog.*, 51, 85 (1955)
 - 22) Yamashita, F. and Inoue: *Kagaku Kōgaku*, 36, 793 (1972)

(1980年9月20日受理; 化学工学協会第11回秋季大会(東京, 1977年10月)にて発表)

A Method for Simultaneous Measurements of Size, Shape, Direction of Motion and Speed of Ellipsoidal Bubbles

Yoichi Nagase, Hiroo Yasui*, Tetsuhiro Sumimoto**
and Motomi Takagi

Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima 730

A compact unit was devised from a pair of circular beams crossing each other perpendicularly and of photosensors for each beam. This unit was immersed in liquid. Only the bubble which passes through the intersection zone of the beams gives similar response curve of light detected on the sensors. The curve was compared with theoretical ones.

In theory, bubbles were assumed to be rotating ellipsoids which moved toward their axes of rotations. Variation of light detected on the sensor through refraction within bubble and reflection on bubble surface was calculated geometrically for the bubble passing through the intersection zone. Results of calculations showed that it is convenient to use a set of parameters to estimate bubble volume and major-to-minor radius ratio for curve recognition. These were average gradients of the initial response and maximum light recovery due to refraction of light within the bubble.

Bubbles moving in an inclined direction to the beam in the detecting zone gave an unsymmetric response curve. An Approximate method of estimating equivalent diameter and a/b is also presented for the case.

Bubble speed was calculated from the time covered by the bubble and equivalent bubble size. The direction of bubble motion can also be recognized if the photo sensor is divided into many small elements, at least four.

* Daikinkogyo Co. Ltd.

** Government Industrial Research Institute, Chugoku