

# 気泡噴流中の気液間物質移動と気液界面積の評価

熊谷 剛彦\*・井口 学\*・中谷 忠稔\*<sup>2</sup>

Evaluation of Gas-Liquid Mass Transfer and Interfacial Area in Bubbling Jet

Takehiko KUMAGAI, Manabu IGUCHI and Tadatoshi NAKATANI

**Synopsis :** Experimental investigation was carried out on the gas-liquid mass flux and interfacial area in a bottom blown bubbling jet. The mass flux was measured by two methods in a relatively low gas flow rate regime. One is based on a change in the bubble size and the other is based on a change in the pH in the bath. When the gas flow rate exceeded a certain critical value, the mass transfer coefficient was satisfactorily approximated by an previously proposed empirical equation for a clean liquid, regardless of the degree of contamination. An empirical equation was proposed for the total interfacial area in a bubbling jet as a function of the physical properties of fluids and process parameters.

**Key words:** steelmaking; bubbling jet; gas-liquid mass transfer.

## 1. 緒言

気体を液体に溶解させる手法として最も広く利用されているのは、気体をノズルから液体中に噴射する方式である。この場合、溶解速度の多くは容量係数の形で求められているが、装置の形状や寸法で変化するため単位面積あたりの物質移動速度を濃度差で除した物質移動係数での評価が望ましい。しかし、Fig. 1(a) に示すように、多数の気泡からなる気泡噴流中の気液界面積を測定することは非常に困難なため、物質移動係数の評価も難しい。また気泡群において気液界面近傍の流れ場を定量的に記述することも困難なことから、界面近傍の流れ場と物質移動係数との定量的な関係は、Fig. 1(b) に示すように、清浄な液体中を上昇する単一気泡についてのものが多い<sup>1-5)</sup>。しかし、この場合でも流れ場の評価は気泡レイノルズ数にとどまり、同図に示すように部位によって異なるはずの流れの種類を反映したものではない。

そこで著者らはこの3つの流れ場それぞれについて、物質移動係数と流れの種類、速度、乱れ強さとの関係を明らかにするため、Fig. 1(c) に示すようなモデル実験を行い、中程度に汚染された液体中における物質移動係数をシャードウッド数  $Sh$  の形で実験式 (1)、(2) として提案している<sup>6,7)</sup>。式 (1) が適用されるのは Fig. 1(c) の cross flow と parallel flow であり、wake flow に適用されるのは係数が 0.500 となる式 (2) である。

$$Sh_s = 0.664 Sc^{1/3} Re^{1/2+0.17u} \dots\dots\dots (1)$$

$$Sh_b = 0.500 Sc^{1/3} Re^{1/2+0.17u} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $Sc$  はシュミット数、 $Re$  はレイノルズ数、 $Tu$  は乱れ強さである。また  $Sh$  の添字  $s, b$  はそれぞれ側面、底面を意味する。

式 (1) は固液間物質移動の推算式そのものであることから<sup>6)</sup>、界面に波動がなく、中程度に汚染された気液界面からの物質移動は固液間物質移動に等しいことを示している。

つぎに、Fig. 1(b) の単一気泡が激しい乱流場におかれた場合についての実験を行い、単一気泡に関する推算式を導出した<sup>8,9)</sup>。その結果によれば、流れ場の  $Re$  が小さく界面に波動のない領域では、気泡の前面と側面の物質移動係数は式 (1) の中程度に汚染された界面の値に等しいが、 $Re$  が大きくなって界面に波動が生じると、物質移動係数は増加し、式 (3) に示す清浄な気液界面からの値に近づく傾向を示した。

$$Sh_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( 1 - \frac{2.89}{\sqrt{Re}} \right)^{1/2} Sc^{1/2} Re^{1/2+0.17u} \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) は Higbie により提案された気液界面が清浄な場合の物質移動係数の式<sup>10,11)</sup> に著者らが乱れ強さ  $Tu$  の寄与を考慮した式 (修正 Higbie 式と略記) である。

本研究では原点に立ちかえり、Fig. 1(a) に示す気泡群からの物質移動を明らかにするため、単位面積あたりの物質移動速度である物質移動流束の実測を試みた。ガス流量を、単一気泡が周期的に生成し、単独に上昇していく程度の微小流量から、気泡同士が干渉し合う程度の流量まで変化させた。気泡噴流中の気泡の後流では激しい乱れが生成され、気泡の周りの乱れ強さは 50% に達するが、このガス流量

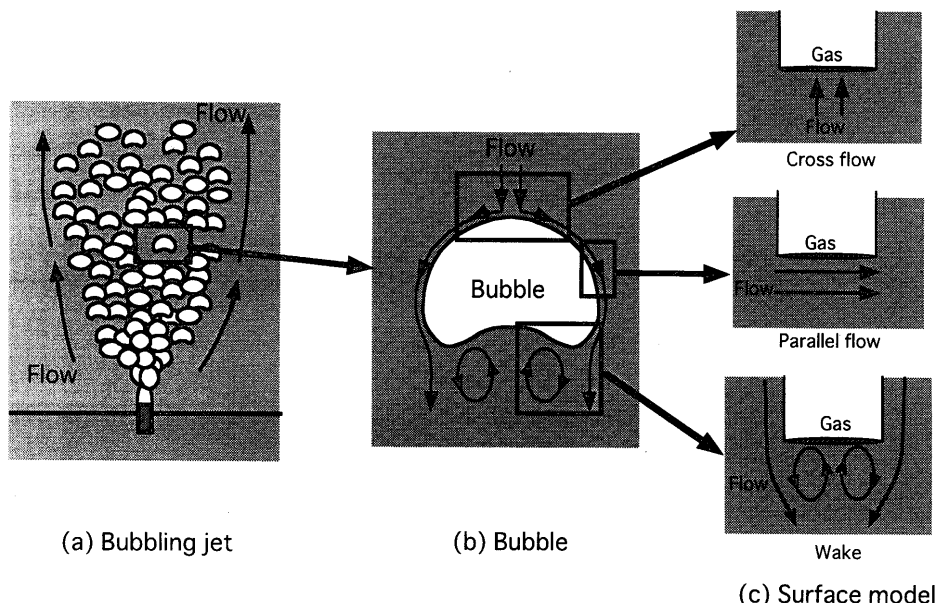


Fig. 1. Flow models around bubble.

の範囲ではノズルで生成した気泡の分裂、合体は生じない。なお、物質移動流束を求めるには気泡と液体との界面積と、溶解速度が明らかでなければならないが、ここでは気泡形状を高速ビデオカメラで記録し、その画像解析より求める方法（Video法と略記）と、所定溶液に気体を溶解させた際生じるpH値の変化から溶解量を求める方法（pH法と略記）の2方法を用いて測定し、すでに報告されている単一気泡に関する実験値<sup>12-15,23</sup>との比較検討を行った。さらに、その結果得られた物質移動流束と従来より求められている容量係数を基にして気泡噴流中の気液界面積に対する実験式を導いた。

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。容器は内径 200 mm、高さ 380 mm の透明アクリル製円筒形水槽であり、浴深  $H_L$  を 340 mm として約 11 l の液体を満した。気泡観察の際、円筒壁による像の湾曲を小さくするため、円筒容器周囲に透明アクリル壁を配して立方容器とし、円筒容器と立方容器の間にも約 30 l の液体を満した。なお、用いた液体はイオン交換処理した水道水である。pH法により溶解量測定を行う際には、液体を NaOH 水溶液とし、その濃度を 0.05 N とした。用いた気体は純  $\text{CO}_2$  ガスで、容器底部に吹込み用の単孔ノズルを設置した。ノズルの内径  $d_{ni}$  は 2 mm、外径  $d_{no}$  は 4 mm で液体との濡れ性が良好なため、生成する気泡径  $d_b$  にノズル外径の影響はない。また、液面上部には排気フードを設置し、ブローアで液面近傍の雰囲気気を吸引した。これは、液体中を上昇して上部に抜けた  $\text{CO}_2$  ガスが液面を介して再び液体と接触するのを妨ぎ、液中上昇時の溶解量のみを正確に求めるためである。吸引により  $\text{CO}_2$

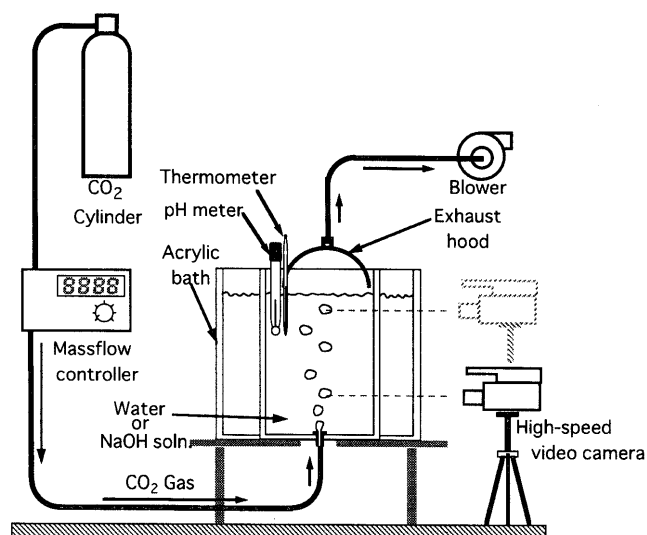
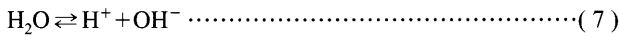
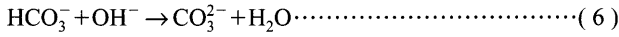
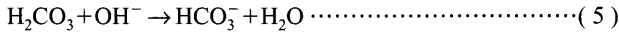
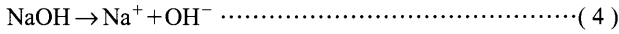


Fig. 2. Experimental apparatus.

ガスの排気と液面近傍への大気の導入を同時に行い、液面における  $\text{CO}_2$  ガス分圧を効果的に低減した。ノズルを離脱した直後の気泡の運動は、慣性力支配から浮力支配へ遷移するため、形状が不安定で Video 法による観察に適さない。そこで、ノズル先端の 50 mm 上方（槽底よりの高さ  $H=63$  mm、下部観測点）で溶解初期の形状観察を行い、その 250 mm 上方（同、 $H=313$  mm、上部観測点）で溶解末期の形状を観察した。上下二カ所において高速度ビデオカメラ (nac-HSV1000FPS) により毎秒 500 フレームの速度で気泡画像を記録し、その解析からそれぞれの気泡の体積、界面積を算出し、5 s あるいは 10 s の間に観察された気泡の平均体積、平均界面積を求めた。

一方、NaOH 水溶液の pH 値の変化を観測する pH 法は、これまでも稲田、渡辺<sup>15,16</sup>をはじめ、Fluehan ら<sup>17</sup> 数多

くの研究者<sup>18,19)</sup>に用いられており、その反応機構も明らかにされている。



全体の反応は、反応(5)と反応(6)が連続的に進行する逐次反応であり、溶解したCO<sub>2</sub>の濃度と[H<sup>+</sup>]の関係は下式(8)で示される。

$$C_{\text{CO}_2} = \left\{ [\text{H}^+] + [\text{NaOH}] - \frac{K_w}{[\text{H}^+]} \right\} \cdot \frac{K_1 \cdot K_2 + K_1[\text{H}^+] + [\text{H}^+]^2}{2 \cdot K_1 \cdot K_2 + K_1[\text{H}^+]} \dots\dots\dots(8)$$

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 10^{-6.35} \dots\dots\dots(9)$$

$$K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10.33} \dots\dots\dots(10)$$

$$K_w = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14.0} \dots\dots\dots(11)$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、[NaOH]はNaOH濃度(kmol/m<sup>3</sup>)である。本実験では測定をpH値11以上の領域で行うため、反応(6)はほとんど進行せず、擬似的に反応(5)のみの一次反応と見なせる。これらの式により実測のpH値から溶解したCO<sub>2</sub>の濃度を求めた。

溶解したCO<sub>2</sub>は液側境界層を移動した後、反応で消費されるため、境界層の濃度勾配は、反応を伴わない物理吸収の場合と比較して大きくなることが予想される。このため移動速度が高くなることも考えられ<sup>20,21)</sup>、その度合いを実験的に確認した。詳しくは後ほど考察で触れる。また、pH法ではその気泡界面積を直接求めてはいないので、下記推算式(13)<sup>22)</sup>を用いて気液界面積S<sub>B</sub>の評価を行った。

$$S_B = 0.147 \left( \frac{\rho_L g^3}{\sigma} \right)^{1/12} \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{1/15} d_{ni}^{-1/6} Q_g^{8/15} H_L \dots\dots\dots(13)$$

ここで、Q<sub>g</sub>はガス流量、H<sub>L</sub>は浴深(液面よりノズル出口までの距離)、ρ<sub>L</sub>は液体密度、ρ<sub>g</sub>は気体密度、σは表面張力、gは重力加速度、d<sub>ni</sub>はノズル内径であり、それぞれの単位はこの式(13)においてのみcm<sup>3</sup>/s、cm、g/cm<sup>3</sup>、g/cm<sup>3</sup>、dyn/cm、cm/s<sup>2</sup>、cmである。この式(13)はノズルで生成した気泡が分裂も合体もしないと仮定して導いた式である。

純CO<sub>2</sub>ガスの供給はポンベよりマスフローコントローラを通じて行い、流量Q<sub>g</sub>を0.5×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/sから40.0×10<sup>-6</sup>

m<sup>3</sup>/sまでの7段階に変化させた。なお実験中、水温を18.0°Cから23.0°Cの間の一定値に保持した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 Video法による測定

Video法で記録された画像の一例をFig. 3に示す。これはガス流量Q<sub>g</sub>が0.5×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/sの場合の気泡形状を示しており、典型的な側面形状はこのように厚みのある楕円形で、ガス流量Q<sub>g</sub>が0.5×10<sup>-6</sup>~5.0×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/sまでは、気泡はほぼ同様の形状を示した。観察から気泡はほぼ、楕円体であることを確かめているが、記録画像から奥行き方向の寸法はわからないので、体積は便宜上回転楕円体として計算している。このようにして求めた気泡体積は実際の値よりも大きくなる。そこで、この体積が実際の体積に合うように奥行き方向の寸法を縮小して気泡形状を決定した。回転楕円体と仮定して求めたガス流量(○で示す)と実測のガス流量(●で示す)とを比較し、Fig. 4に示す。横軸はマス

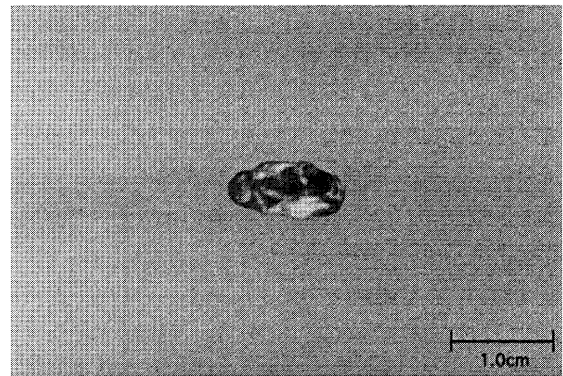


Fig. 3. Shape of rising single bubble Q<sub>g</sub>=0.5×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/s, observation height H=6.3×10<sup>-2</sup>m.

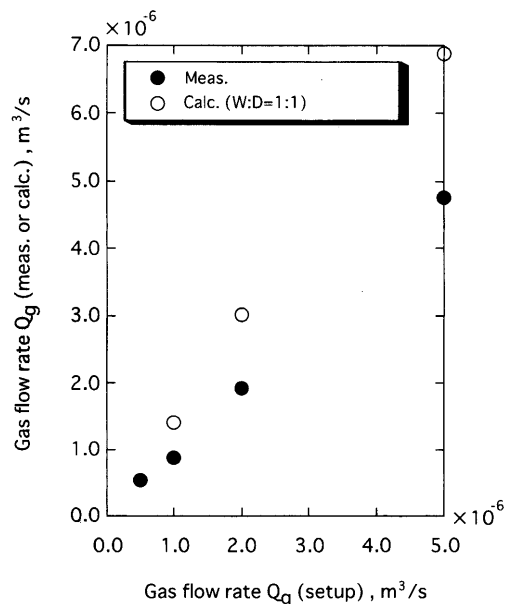


Fig. 4. Comparison of calculated gas flow rate with measured one.

フローメータの設定値を示している。これより仮定の値と実測の値との比は 0.658 と求まるので、奥行きは幅の 0.658 倍であると仮定し、式 (14) を用いて、楕円体気泡の表面積を求めた。

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta \times \sqrt{b^2 c^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi + a^2 c^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi + a^2 b^2 \cos^2 \theta} d\theta d\phi \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $a, b, c$  は楕円体の幅方向、奥行き方向、高さ方向の各軸の半径であり、 $\theta, \phi$  は楕円体の中心を原点に据えたときの垂直、水平方向の角度である。また、式 (15) を用いて気泡体積を求めた。

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \dots\dots\dots(15)$$

下部観測点と上部観測点の間を通過する間に生じる体積変化、およびその間の平均気泡界面積をもとに単位時間あたりに単位面積より溶解した  $\text{CO}_2$  質量を物質移動流束  $m_f$  として求め、ガス流量  $Q_g$  で整理して Fig. 5 に示す。ガス流量  $Q_g = 0.5 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  の範囲では、 $m_f$  はほぼ一定の値を示すが、それよりも  $Q_g$  が大きくなると急な増大を示している。ガス流量  $Q_g$  が  $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  以上の場合、気泡同士が重なって観察されることから、Video 法による解析精度が低下したものと考えられる。

3.2 pH 法による測定

pH 法で得られた結果の一例を Fig. 6 に示す。ガス流量  $Q_g = 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  の場合の溶液の pH 値の経時変化を白丸 (○) でプロットしている。0.05 N-NaOH 水溶液の当初の pH 値はおよそ 12.5 で、 $\text{CO}_2$  の溶解に伴い低下する。溶解実験終了直後、液体を強力に機械攪拌しても、pH 値に変化がないことから液体は上昇する気泡により十分に攪拌されており、場所による pH 値の偏りはほとんどないことを確認している。この pH 値の変化から式 (8) を用いて算出した

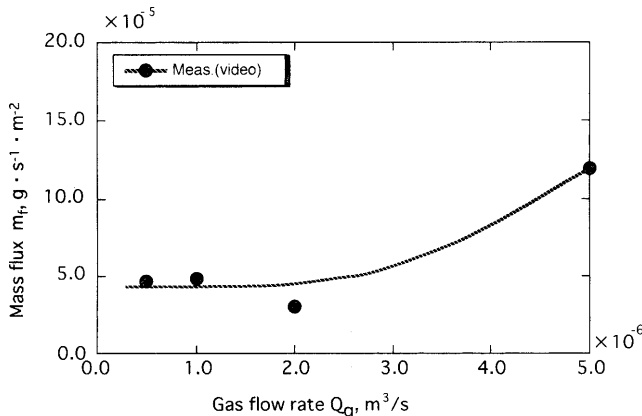


Fig. 5. Relation between mass flux,  $m_f$ , measured by video method and gas flow rate,  $Q_g$ , (video method).

溶解  $\text{CO}_2$  量を白四角 (□) で示す。溶解量は時間の経過と共にほぼ直線的に増加することがわかる。

pH 法では  $\text{CO}_2$  が液体に溶解した後、直ちに NaOH と反応するが、その反応速度が物質移動速度に影響を与える可能性があることは前述した通りである。そこで、Video 法のイオン交換水を用いた場合と比較して物質移動速度がどの程度加速されるかを確認する実験を行った。これは液体の NaOH 濃度を変化させることで反応の速度を変化させ、物質移動速度に与える影響を明らかにするものである。測定した pH 値から式 (8) を用いて溶解した  $\text{CO}_2$  質量を算出し、その経時変化を Fig. 7 に示す。溶解初期の傾きは NaOH 濃度が異なってもほぼ等しく、本実験においては物質移動への反応の影響はほとんどないことがわかった。これは、気泡周りの乱れが大きく、界面の更新が非常に短い時間で完了し、反応生成物が界面近傍にほとんど蓄積しないためと考えられる。なお、NaOH 濃度の低い 0.01 N, 0.02 N の場合、途中から傾きが増大し始めるが、その時点におけるそれぞれの溶液の pH 値はおおよそ 11.0 であった。本実験条件の濃度 0.05 N では、pH 値が終始 11.0 以上を示し、グラフの傾きもほぼ一定なことから、解析が妥当であったことを示している。

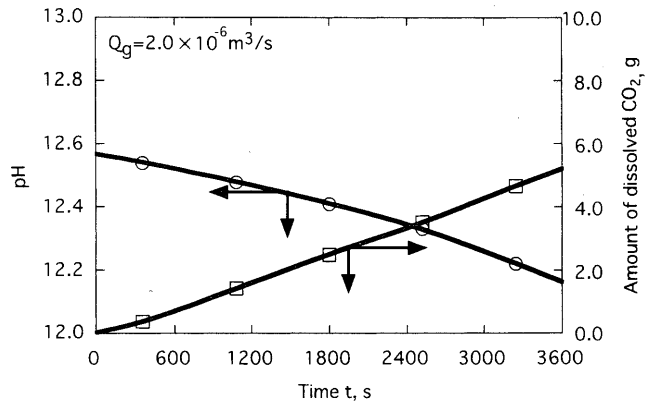


Fig. 6. Time variations of pH in aqueous solution and amount of dissolved  $\text{CO}_2$ .

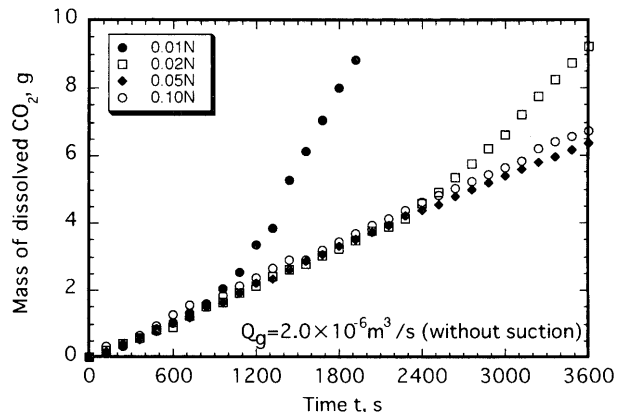


Fig. 7. Time variations of amount of dissolved  $\text{CO}_2$  measured by pH method for various NaOH concentrations.

### 3.3 物質移動の測定値と界面汚染モデルによる推算値との比較

Fig. 6 のプロットから得られる CO<sub>2</sub> の溶解速度、および式 (13) より求めた気液界面積をもとに物質移動流束  $m_f$  を求め、ガス流量  $Q_g = 0.5 \times 10^{-6} \sim 40.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  の範囲について Fig. 8 に示す。気泡群の界面積評価に用いた推算式 (13) は微細な気泡を含まず、気泡同士の合体や分裂がないことを前提としており、それらの現象が生じる大流量域では精度が低い、本実験におけるガス流量  $Q_g$  が  $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  までの範囲ならば推算値は十分な精度を持つ。 $Q_g = 0.5 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  の範囲について pH 法による実測値を Video 法による値と併せて Fig. 9 に示す。黒丸 (●) で示すのが Video 法による実測値、黒四角 (■) で示すのが pH 法による実測値である。 $Q_g = 0.5 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  まではその測定原理から Video 法の精度が高いと考えられ、 $Q_g = 5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  においてはすでに述べたように pH 法の精度が高い。また、Video 法により得られた曲線 (●●●●) と pH 法により得られた曲線 (■■■■) は  $Q_g$  が  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  から  $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  の間で交差しているのをこれらを総合すると、結果として得られる曲線は、 $Q_g$  が  $3.0 \times$

$10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  付近で、Video 法から pH 法の曲線に切り替わる曲線 (●●●●) が適当であると考えられる。

また、Fig. 9 にともに示す破線 (■■■■) は、Fig. 10(a) に示すモデルより求めた推算値で、気泡界面の上半分は清浄で、下半分は汚染されていると仮定している。清浄な界面での物質移動式には式 (3) を、汚染された界面には式 (2) を適用した。この気泡モデルからの物質移動流束は汚染された界面積と清浄な界面積との比率を考慮した式 (16) で示される。

$$m_f = \left( \text{Sh}_s \frac{A_s}{A_B} + \text{Sh}_b \frac{A_b}{A_B} \right) \frac{D}{d_B} \Delta C \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $A_s$  は上側界面積、 $A_b$  は下側界面積、 $A_B = A_s + A_b$  であり、 $\text{Sh}_s, \text{Sh}_b$  にはそれぞれ式 (3), (2) を代入する。

気泡上側の清浄な界面と下側の汚染された界面の面積比は Fig. 3 の気泡形状より 50:50 とした。Fig. 9 のプロットより、ガス流量  $Q_g$  が  $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  までは式 (16) で、実測値を +27% の偏差で推算できる。このことから、気泡同士の干渉が弱い範囲のガス流量であれば前報<sup>9)</sup> で提案した実験式で十分な精度の物質移動係数の推算が可能ながわ

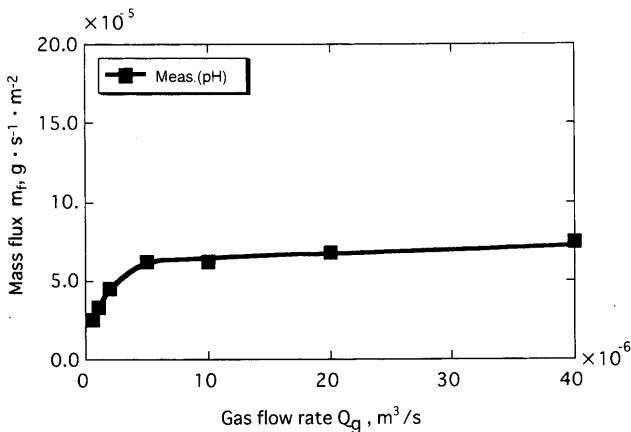


Fig. 8. Relation between mass flux,  $m_f$ , measured by pH method and gas flow rate,  $Q_g$ , (pH method).

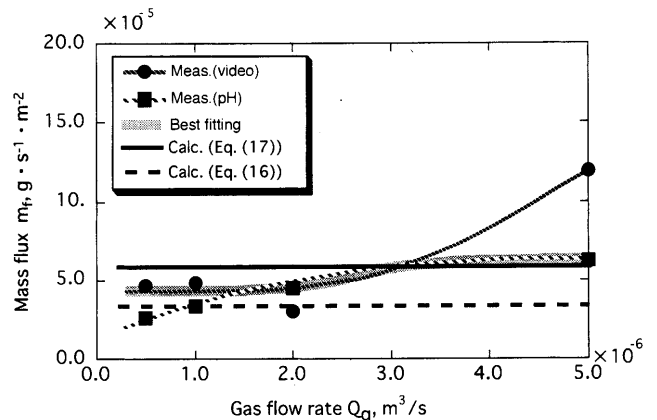
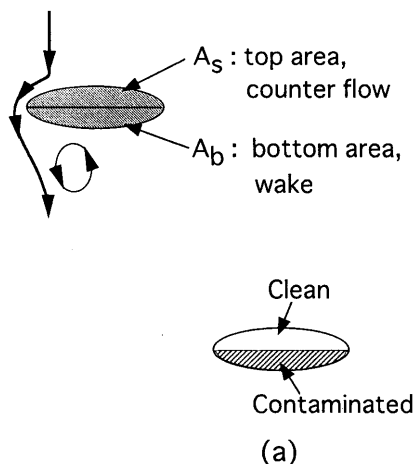


Fig. 9. Comparison of calculated mass flux with measured one.



clean  

$$\text{Sh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( 1 - \frac{2.89}{\sqrt{\text{Re}}} \right)^{1/2} \text{Sc}^{1/2} \text{Re}^{1/2+0.1\text{Tu}}$$

contaminated  

$$\text{Sh} = 0.500 \text{Sc}^{1/3} \text{Re}^{0.5+0.1\text{Tu}} \quad (0.664)$$

Fig. 10. Bubble models with surface contamination.

かった。ガス流量  $Q_g$  が  $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  以上になると、物質移動流束  $m_f$  は増大し、破線から遠ざかり、気泡の上半分、下半分共に清浄であると仮定したモデル (Fig. 10(b)) の推算値を示す実線 (—) に一致するようになる。この推算式を式(17)で示す。

$$m_f = \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( 1 - \frac{2.89}{\sqrt{\text{Re}}} \right)^{1/2} \text{Sc}^{1/2} \text{Re}^{1/2+0.17u} \right) \frac{D}{d_B} \Delta C \dots\dots\dots(17)$$

これは、 $Q_g = 2.0 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  近辺で気泡周囲の液体の乱れが激しくなり、気泡界面に波動が生じるようになると清浄な界面の比率が増大し、最終的に面積比が 100:0 に至ったことを示している。

Fig.11において、ガス流量が  $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  以上の場合、著者らの実測値は実線の推算値よりもやや大きく、 $Q_g = 40.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  において実測値は推算値より約 25% 大きな値を示すが、式 (17) の偏差がもともと  $\pm 60\%$  であることを考えれば両者は一致していると見なせる。また、この値と過去に報告されている気泡群に関する物質移動流束値 (物質移動係数より換算)<sup>14,23)</sup> を比較のため白抜き記号 (○, □) でプロットしているが、双方とも本実験の測定値に近い値を示し、気泡群からの物質移動流束が適切に測定されていたことが確認される。

以上のことから、これまでの報告<sup>6-9)</sup> で明らかにした界面における波動生成や気泡の変形の自由度が大きくなった状態 (ランス等による拘束が無くなること) で、気液間物質移動係数が大幅に増大する傾向は、気泡群についても当てはまり、中程度に汚染された液体中であっても、気液界面に波動が生じると物質移動係数は気泡界面が清浄な場合とほぼ同等に扱えることが分かった。

3.4 気泡界面積の評価

本研究のこれまでの範囲で、流れ場の乱れが十分に強ければ界面の汚染の程度を問わず物質移動係数はほぼ等しい値を示すことを明らかにした。したがって、それぞれの系における物質移動容量係数が求められていれば、逆に気液界面積の評価が可能である。

従来、気泡噴流の気液界面積の評価は個々の気泡形状を観察するのが困難で、本研究の様にガス流量  $Q_g = 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  以下の低ガス流量の場合に行えるに過ぎない。また、それ以上のガス流量ではノズルで生成した気泡の合体や分裂が生じ、式 (13) の精度はガス流量の増大とともに低くなる。

気泡噴流条件下で気体溶解実験を行った過去の報告の中から、ガス吹込み条件と物質移動容量係数を明らかにしている文献<sup>12-15,23)</sup> に関して、式 (13) による気液界面積の推算値  $S_B$  と本解析法による値  $A$  とをそれぞれ求め比較検討した。対象とした文献は蒸留水あるいは NaOH 水溶液に純炭酸ガスを溶解させたものであり、本研究と同じく、自

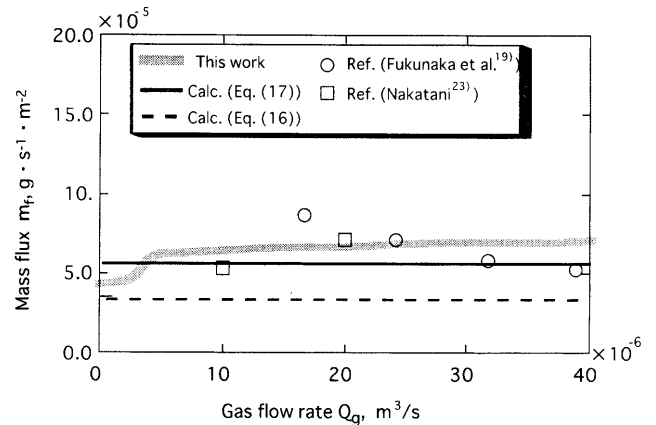


Fig. 11. Comparison of calculated mass flux with previously measured values at higher gas flow rate.

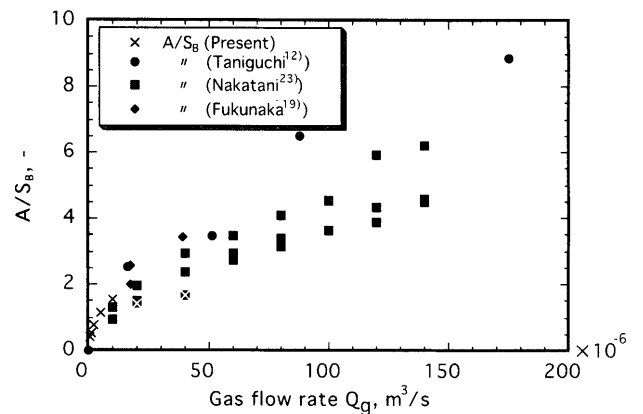


Fig. 12. Relation between  $A/S_B$  and gas flow rate,  $Q_g$ .

由表面からの物質移動分を除いた気泡分散相における物質移動についてのものである。これを Fig.12 に示す。 $S_B$  は浴深  $H_L$ 、ガス流量  $Q_g$ 、ノズル内径  $d_{ni}$  を主なパラメータとして、従来から用いられている推算式 (13) より求めた槽内の気液界面積であり、 $A$  は文献に記載されている物質移動容量係数  $k_L A/V$  あるいは  $k_L A$  と、本研究で明らかにした物質移動係数の推算値から算出した  $k_L$  より求めた気液界面積であるが、浴深に代表される容器形状が各々の文献で異なっており、面積を示す  $S_B$  と  $A$  の比較は困難なので、縦軸には  $A$  と  $S_B$  の比 ( $A/S_B$ ) をとっている。各々の研究のデータは  $Q_g$  の増大に伴い、単調な増加を示した。また、 $A$  と  $S_B$  がほぼ一致すると見なせるのは、ガス流量  $Q_g$  が  $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  程度までである。

ガス流量  $Q_g$  が大きく、気泡噴流に強い乱れがあるときには、小さな気泡が多数生成するが、 $S_B$  を与える式 (13) を導出する際にはこれを無視している。したがって、 $Q_g$  の増大に伴い  $A/S_B$  が一様に増大することは、液体中における微細な気泡の表面積の比率が次第に増加していると考えられることができる。また、式 (13) は槽底部のノズルから気泡が上昇する際、気泡の合体分裂などは起こらず、気泡径は不変であることを前提としているが、実際には流れの乱

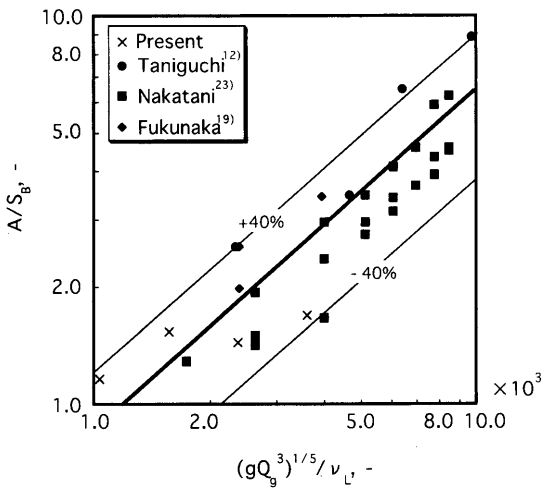


Fig. 13. Relation between  $A/S_B$  and  $(gQ_g^3)^{1/5}/v_L$ .

れが強く、気泡の分裂が生じるとともに界面が激しい変形を受けその面積が増大しているとも考えられる。

そこで、 $A/S_B$ の増大の原因を、上昇する気泡の分裂による小さな気泡の生成、および気泡の激しい変形にあると考え、レイノルズ数の一種である  $(gQ_g^3)^{1/5}/v_L$  を横軸とし、縦軸には  $A/S_B$  をとりプロットした。これを Fig.13 に示す。 $A/S_B$  の値は図中に示した直線の周りに  $\pm 40\%$  の偏差で分散しており、その関係式は式 (18) で示される。

$$\begin{aligned}
 A/S_B &= 0.00219((gQ_g^3)^{1/5}/v_L)^{0.876} && ((gQ_g^3)^{1/5}/v_L \geq 1.21 \times 10^3) \\
 A/S_B &= 1 && ((gQ_g^3)^{1/5}/v_L < 1.21 \times 10^3)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $Q_g$  はガス流量、 $v_L$  は液体の動粘度である。

#### 4. 結論

(1) 中程度に汚染された液体において、気泡表面に波動が生じないガス流量 ( $0.5 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) では気泡噴流中の気泡からの物質移動流束  $m_f$  を式 (16) で近似できる。

(2) 流れ場の乱れが強く気泡表面に波動が生じるガス流量 ( $3.0 \times 10^{-6} \sim 40.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) では、単一上昇気泡に比較して界面活性物質の影響はより小さく、清浄な界面のように振る舞うことがわかった。このときの物質移動流束  $m_f$  は式 (17) で推算できる。

(3) 物質移動容量係数 ( $k_L A/V$ ) より求めた界面積  $A$  とガスホールドアップより求めた気泡面積  $S_B$  との関係式 (18) で示した。この式を用いると、吹込み条件がわかれば

気液界面積を  $\pm 40\%$  の偏差で推算することが可能である。

#### 記号

$A_B$ : 気泡表面積 ( $A_B = A_s + A_b$ )	( $\text{m}^2$ )
$A_s$ : 上側界面積	( $\text{m}^2$ )
$A_b$ : 下側界面積	( $\text{m}^2$ )
$A$ : 実測容量係数より求めた全気液界面積	( $\text{m}^2$ )
$\Delta C$ : 濃度差	( $\text{g}/\text{m}^3$ )
$D$ : 拡散係数	( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$d_b$ : 気泡径 (水平方向の最大径)	( $\text{m}$ )
$g$ : 重力加速度 ( $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ )	
$H_L$ : 浴深 (液面よりノズルまでの距離)	( $\text{m}$ )
$k_L$ : 液側物質移動係数	( $\text{m}/\text{s}$ )
$m_f$ : 物質移動流束	( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )
$Q_g$ : ガス流量	( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Re : レイノルズ数	(-)
$S_B$ : 式 (13) に基づく全気泡表面積	( $\text{m}^2$ )
$Sh_s$ : 側面シャーウッド数	(-)
$Sh_b$ : 底面シャーウッド数	(-)
Sc : シュミット数	(-)
Tu : 乱れ強さ	(-)
$\sigma$ : 表面張力	( $\text{N}/\text{m}$ )
$\nu$ : 液体の動粘度	( $\text{m}^2/\text{s}$ )

#### 文献

- 1) M.H.I. Baird and J.F. Davidson: *Chem. Eng. Sci.*, **17** (1962), 87.
- 2) P.H. Calderbank and A.C. Lochiel: *Chem. Eng. Sci.*, **19** (1964), 485.
- 3) J.A. Redfield and G. Houghton: *Chem. Eng. Sci.*, **20** (1965), 131.
- 4) J.H. Leonard and G. Houghton: *Chem. Eng. Sci.*, **18** (1963), 133.
- 5) F. Takemura and A. Yabe: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **B**, **65** (1999), 1061.
- 6) T. Kumagai and M. Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 159.
- 7) T. Kumagai, M. Iguchi, T. Uemura and N. Yonehara: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 112.
- 8) T. Kumagai, M. Iguchi, T. Uemura and N. Yonehara: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 180.
- 9) T. Kumagai and M. Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 715.
- 10) R. Higbie: *Trans. AIChE*, **31** (1935), 365.
- 11) R. Clift, J.R. Grace and M.E. Weber: *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, New York, (1978), 195.
- 12) S. Taniguchi, Y. Matsukura and J. Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 210.
- 13) N. Bessho, S. Taniguchi and J. Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), 1623.
- 14) M.F. Jiang, Y. Sudo, Y. Fukunaka, Z. Asaki and Y. Kondo: *Suiyou Kaishi*, **20** (1984), 216.
- 15) S. Inada and T. Watanabe: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 37.
- 16) S. Inada and T. Watanabe: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 807.
- 17) S.-H. Kim and R.J. Fruehan: *Metall. Trans. B*, **18B** (1987), 673.
- 18) F. Takemura and Y. Matsumoto: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **B**, **66** (2000), 2999.
- 19) Y. Fukunaka, M.F. Jiang, T. Yamamoto, Z. Asaki and Y. Kondo: *Metall. Trans. B*, **20B** (1989), 5.
- 20) 八田四郎次: 反応を伴う吸収, 新化学工学講座 VII-4, 日刊工業新聞社, 東京, (1957), 1.
- 21) S. Hatta: *Kogyo-Kagaku*, **37** (1934), 601.
- 22) M. Iguchi, T. Chihara, T. Kuranaga, H. Ueda, S. Kodani and Z. Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 742.
- 23) T. Nakatani: Bachelor's dissertation, Osaka Univ., (1994).