気泡流中に置かれた垂直平板近傍の液速度分布の測定[†]

松浦章裕・中村 肇・池田洋一・堀畑秀幸

大同工業大学 機械工学科^{††}

平岡節郎・新垣 勉・山田幾穂

名古屋工業大学 応用化学科^{†††}

垂直平板の下方より電解気泡を発生させ、その垂直平板近傍に生じた気泡流の液速度分布をレーザードップラー流速計を用いて測定した。気泡発生量は電解電流を変えることにより制御した。代表境界層厚さと最大液速度で無次元化した無次元液速度分布は、気泡発生量が多い水素の場合には单相流の自然対流と類似した分布形になった。気泡量が少なく気泡径が大きい場合は水素、酸素気泡とも液上昇速度が最大値を示す位置の近傍のみ速度が大きく、最大上昇速度を示す位置から離れると急速に速度が減少する特異な速度分布形となった。水素気泡を発生させた場合の無次元速度分布は気泡量に関係なく単一の曲線で整理ができた。代表境界層厚さは気泡量および垂直平板下端からの距離に伴い大きくなるが、最大液上昇速度は気泡量のみ依存した値となった。液速度分布から算出した壁面平均剪断応力は平板下端からの距離の影響を受けず、壁面抗力を測定することにより直接求めた前報の壁面平均剪断応力の実験結果と良好に一致した。

緒 言

気液 2 相流の輸送現象は、流れが複雑となり、測定ならびに解析の困難性のために、今日においてもいまだ明らかにされていない点が多い。気液 2 相流問題のなかでも、下方より上昇する気泡流中におかれた垂直平板回りの流動現象は、電気化学工業装置、各種反応装置内の伝熱現象および原子炉中の燃料棒や伝熱管付近で発生する気泡流において観ることができ、単純ではあるが重要な流れ問題であり、各種装置の設計と操作などの最適条件を決定する上でも重要な課題である。この気液 2 相流の実験的研究は、自然循環ボイラーの水循環問題から始まり、どちらかといえば均質流としての考察が多くなされてきた。しかしながら密度差の大きい気液 2 相流は均質流として取り扱うと大きな誤差を含むことが考えられる。そこで今日では気液を個別の 2 流体として扱う種々の実験がなされてきた。例えば、小出・久保田⁵⁾により垂直管内の気泡流動による液速度分布とガスホールドアップ分布に対する研究、Fair³⁾による気泡吹き込み接触装

置の熱除去速度とガス滞留時間に対する研究、水科・宮下¹⁰⁾による気泡塔内の種々の移動係数を求めた飛沫接触式冷却器に関する研究、吉留¹¹⁾による水-空気系の気泡塔における伝熱の研究、小出・久保田⁶⁾による拡散律速の電極反応を気液 2 相流に拡大した実験、Durst¹²⁾による気泡の周りの局所流速、気泡の上昇速度、循環流れの速度分布をレーザードップラー流速計により測定した実験などがある。また、前報⁸⁾の垂直平板回りの運動量移動と物質移動において平均壁面剪断応力を直接測定する事により、気泡流中に置かれた平板回りの物質移動は層流強制対流による Leveque の解⁷⁾ および水科⁹⁾ の解により説明できることを明らかにした。しかし、物質移動過程をより詳細に解明するためには、壁面近傍での速度分布を測定する事が必要である。

本研究では、水酸化カリウム水溶液中に設置した気泡発生用電極から気泡を発生させ、その気液 2 相流中におかれた垂直平板回りの速度分布をレーザードップラー流速計を用いて測定し、前報⁷⁾の平均壁面剪断応力の測定結果と比較検討を行った。

1. 実験装置および方法

本実験において使用した装置の概略を Fig. 1 に示した。用いた電解槽⑥は厚さ 5 mm の透明アクリル板製で、縦、

† 1991年6月6日受理；化学工学協会第53年会（仙台、1988年4月）にて発表

†† 〒457 名古屋市南区大同町 2-21

††† 〒466 名古屋市昭和区御器所町

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

① Vertical flat plate, ② Gas evolving electrode, ③ Counter electrode for gas evolution, ④ Preventive net against a fluid flow, ⑤ electrolytic vessel, ⑥ Photo-multiplier, ⑦ He-Ne gas LASER, ⑧ Frequency shifter, ⑨ Tracker type measuring unit, ⑩ Personal computer

横, 高さがそれぞれ $180 \times 160 \times 80$ mm である。電解槽内に設置した隔壁④は循環流の発生を防止するためであり, 1 mm メッシュのナイロン網を使用した。簡略化のため省略されているが, 電解槽全体を厚さ 5 mm のアクリル板製で, 縦, 横, 高さが $300 \times 300 \times 200$ mm の恒温槽中に浸し, 30°C 一定に保った水を外部循環させることにより液温を一定に保つとともに, 不必要な振動が電解槽に伝わらぬように配慮した。対電極③には気泡発生用電極の面積と比較して十分大きい面積となる 35×80 mm のニッケル板電極を用い, 電解槽の両側に 2 枚接着した。液流速測定はトラッカータイプのレーザードップラー流速計⑥⑦⑧⑨を用い, マイクロコンピュータ⑩により制御できるようになっている。気泡発生用電源には定電流電源を用い, 槽内電位に関係なく一定電流で気泡を発生させた。垂直平板回りの液速度分布測定のための垂直平板①および気泡発生用電極②の詳細を Fig. 2 に示した。垂直平板は, 厚さ 0.1 mm のニッケル板製で縦横が 100×50 mm であり, 気泡発生用電極は厚さ 0.1 mm のニッケル板製で, 15×80 mm の寸法のものを用い, 垂直平板の下方 2 mm の位置に 2 枚設置し, 電極板間隔は 2 mm とした。本実験に用いた電解溶液は 1N-KOH 水溶液である。

実験は, 定電流電源により 1N-KOH 水溶液を電解し, 酸素あるいは水素の気泡を発生させ, 垂直平板に沿って上昇させる。液速度の測定に際し, サンプルング数は 5000 とし, 測定値に含まれる気泡速度, 液速度およびノ

Fig. 2 Detail of vertical flat plate

Fig. 3 Output data of LDV

イズを分離したのち, 液速度の平均値を算出した。測定位置は, 垂直平板入口より上方へ 1 cm 間隔に 5 点, 壁面に垂直方向へは 0.1 mm の間隔で上昇液速度が零となる位置まで測定した。気泡発生電流 I_g は, 水素気泡発生の場合, 0.043 A, 0.163 A で, 酸素気泡発生の場合, 0.163 A, 0.336 A とした。

2. 結果と考察

2.1 液速度分布

本実験は LDV を用いて気泡流の速度測定を行ったため, 測定値には気泡および液の速度の値が任意に混在している。そこで, 測定値より両者のデータの分離を行う必要がある。Fig. 3 は, 測定した速度データのトラッカー出力の 1 例を示している。縦軸には, 速度を, 横軸にはサンプルング数を取り, 発生気泡が酸素で I_g が 0.163 A, $x = 2$ cm の場合の結果を示している。本実験は気泡の浮力により生じた流れを測定した結果であるため, 気泡速度は液速度より大きくなければならない。そこで, サンプルングした全測定データを表示し, 図中に一点鎖線で示したように敷居値を設定することにより分離を行った。測定に付随するノイズは, 測定ごとに最適フィルター周波数を設定することにより取り除いた。Figs. 4~

Fig. 4 Dimensionless velocity distribution for H₂ gas evolution at $I_g = 0.163$ A

Fig. 5 Dimensionless velocity distribution for H₂ gas evolution at $I_g = 0.043$ A

Fig. 6 Dimensionless velocity distribution for O₂ gas evolution at $I_g = 0.336$ A

Fig. 7 Dimensionless velocity distribution for O₂ gas evolution at $I_g = 0.163$ A

7は測定した垂直平板回りの無次元速度分布を示している。縦軸には、上昇液速度 u を最大液上昇速度 $u_{\max}$ で無次元化した値をとり、横軸には壁面からの距離 y を $u_{\max}$ の半分を示す壁面からの距離である代表境界層厚さ $y_{0.5}$ で無次元化した値をとり、垂直平板下端からの距離 x をパラメータにして示した。ここで、無次元化のために用いた $u_{\max}$ は、実測した最大値ではなく、測定された速度分布をEq.(1)に示した3次から9次までの7種の指数関数近似を行い、最小自乗法により最小偏差となる次数を求め、この偏差の値から $\pm 0.5\%$ 以内の偏差となるすべての次数の式と、測定値とを直接照合することにより求めた値である。

$$u = ay^b \exp\left(\sum_{i=1}^n C_i y^i\right) \quad (n=3\sim 9) \quad (1)$$

 $y_{0.5}$ は、近似曲線の $u_{\max}$ の半分の値を示す壁面からの距離としてEq.(1)より決定した。Fig.4は気泡発生電流が0.163 Aで水素気泡を発生させた場合の結果である。速度分布形は、壁面から $u_{\max}$ を示す位置 $y_{\max}$ まで急激に増加し、 $u_{\max}$ をすぎるとゆるやかに減少している。また、 $u_{\max}$ は $y/y_{0.5}$ が約0.5~0.6の位置で現れている。速度分布形に対する電極下端からの距離 x の影響はほとんど見られず、この速度分布形は、単相流における自然対流と類似しており、滑らかな分布形状となっている。これは、小径気泡である水素気泡が多量に発生する場合には、 y 軸方向にはほぼ均一な気泡量分布で上昇するため

Fig. 8 Distance from the flat plate indicating maximum upward velocity for H_2 gas evolution

気泡の相互間隔が小さくなり、周囲の液が気泡速度に見合う速度で上昇することによりこのような分布になると思われる。Fig. 5 に示すように、発生気泡が水素で I_g が 0.043A と小さい場合でも、無次元液速度分布には平板下端からの距離の影響はみられず、速度分布形は代表境界層厚さによる無次元処理で統一的に取り扱うことが可能である。しかし、実測された液速度は、 $y/y_{0.5}$ が約 0.7 の境界層の外縁に近い位置で最大速度となり、その外側で急激に減少する。Fig. 4 の結果の気泡発生量が多い場合に比して、気泡発生量が少なくなると、気泡は上昇液流中での存在確率が低くなり、相互干渉による分散が少なくなる。さらに、液速度勾配が存在するところにある気泡は、その両端の液速度差により生ずる流体力学的な力により、 y_{max} へ集中する傾向が強くなる。このため、上昇速度は気泡の存在確率の高い領域のみ大きく、その両側では流速が急激に減少すると考えられる。

Fig. 6 は、 I_g が 0.336A で酸素気泡を発生させた場合の速度分布を示したものである。この実験条件は I_g が 0.163A で水素気泡を発生させた Fig. 4 の場合とはほぼ同一気泡発生量となる。ここで、Janssen と Hoogland の測定結果⁴⁾ および我々の写真による測定では、酸素の気泡径は 50~100 μm 、水素気泡は 20~50 μm であり、酸素気泡は水素気泡と比較して大きい、発生気泡数は水素と比較して著しく少なくなる。また、気泡径が大きくなることにより気泡の上昇速度も大きくなる。そのため、ボイド率は低下し、発生気体の体積速度が水素の場合と等しくなる電流値においても均一に分散した気泡流を形成せず、滑らかな液速度分布を示さない。また、壁面から y_{max} までの速度分布は、 x とともに変化し、壁面に近

Fig. 9 Distance from the flat plate indicating maximum upward velocity for O_2 gas evolution

い境界層内の速度は上方へ発達しながら流れている。Fig. 7 に示すように、酸素気泡発生電流を 0.163A とした場合も、液速度分布は Fig. 6 の 0.336A の場合とはほぼ同様の結果となった。

Figs. 4~7 の結果を総合すると、水素気泡を発生させた場合の無次元速度分布は、 x によってあまり変化せず、いずれの気泡発生電流においても単一の曲線で近似的に整理できる。一方、酸素気泡を発生させた場合のそれは、 x の変化に伴って壁近傍の液速度が相対的に加速され、単一の曲線で近似することはできなかった。

2.2 最大液速度位置および特性境界層厚さ

Figs. 8, 9 は、最大液上昇速度 u_{max} を示す位置 y_{max} および上昇液速度が $u_{max}/2$ を示す位置 $y_{0.5}$ の x 方向への変化を示したものである。Fig. 8 の発生気泡が水素の場合、 y_{max} は気泡量の影響がみられず同一曲線で表され、 $x=1$ cm における y_{max} 値は、約 0.9 mm、 $x=5$ cm では約 1.2 mm となった。ここでは図示していないが、垂直平板を設置しない場合の気泡発生用電極上方 2 mm (垂直平板下端位置と同じ) での速度分布の測定結果では、 y_{max} が約 0.5 mm となった。垂直平板を設置した場合、装置構造上の都合で $x=0$ cm 位置での速度分布の測定が行えなかったため、平板下端での速度分布は垂直平板を設置した場合としない場合で多少異なるものと推察されるが、それを考慮しても、 y_{max} の位置は垂直平板下端部で急激に壁面より離れる傾向があるように思われる。しかし、 $x \geq 2$ cm の位置では y_{max} 値の変化は小さい。一方、Fig. 8 の水素気泡の場合の $y_{0.5}$ の値は、気泡発生量が大い程、また上方へ行くに従い大きくなる。これは発生気泡径が小さいため気泡合体があまり起こらず、気泡の水平

Fig.10 Maximum upward velocity

方向への分散により境界層厚さが広がることを意味している。

Fig.9の発生気泡が酸素の場合で、 I_g を0.163Aとして気泡を発生させたとき、 y_{max} は $x \geq 1\text{cm}$ で垂直平板面に沿ってほぼ一定値を取り、また、 $y_{0.5}$ の値も同様にほぼ一定となった。一方、 I_g を0.336Aに増加した場合には、 y_{max} は $x \geq 2\text{cm}$ でほぼ一定を示すが、 $y_{0.5}$ は平板上方に行くに従わずに大きくなる傾向が見られる。水素気泡の場合と異なり、酸素気泡を発生させた場合には、 y_{max} および $y_{0.5}$ はともに気泡発生量に大きく依存し、 x に対する依存性は小さいことが明らかとなった。

Fig.10は、 u_{max} の x 方向依存性を示した図である。水素気泡、酸素気泡の場合ともに発生気泡量が増大すると最大液上昇速度の絶対値が大きくなるのがわかる。また、水素気泡を発生させた場合には、 x 方向に u_{max} 値が増大、すなわち加速する傾向が見られるが、酸素気泡を発生させた場合には、 u_{max} の加速傾向は小さい。

u_{max} と y_{max} および無次元速度分布の測定結果より、水素気泡を発生させた場合、速度分布形は相似形となるが、 u_{max} の絶対値は上方へ行くに従い加速され、また $y_{0.5}$ も大きくなる。このことから気泡径の小さい水素気泡を発生させた場合には、流れは、等加速度流あるいは、

Fig.11 Local shear stress for H₂ and O₂ gas evolution

Fig.12 Average shear stress vs. electrolytic current

ほぼ自然対流に類似した流れと考えられる。一方、酸素気泡を発生させた場合には、 u_{max} 、 $y_{0.5}$ ともに平板長さ方向の変化は小さく、 y_{max} と壁面との間の領域で速度分布の発達が見られる。これは、酸素気泡は水素気泡と比較して気泡径が大きく数が少ないため、液流速は y_{max} とはほぼ同一位置を素早く上昇する不連続的な気泡により加速され、気泡量の影響を受けるものと思われる。

2.3 壁面剪断応力

Fig.11は、測定した速度分布の壁面での速度勾配から算出した局所剪断応力を、垂直平板下端からの距離 x に対して示したものである。局所剪断応力は、発生気泡の種類および I_g に関係なく x が大きくなると増加する傾向がみられるが、その増加は比較的小さい。特に、発生気泡がいずれの場合も I_g が大きいときの結果は誤差を考慮すればほぼ一定値とみておさしつかえないように思われる。一方、発生気泡が酸素で I_g が0.163A、 $x=5\text{cm}$ のデータを除けば、 I_g が小さい場合の局所剪断応力は、 I_g が大きい場合と比較して、平板長さとともに増加する傾向を示している。

Fig.12は、測定した壁面速度勾配より求めた局所剪断

応力を垂直平板下端から垂直方向に積分平均した平均剪断応力を図示した。図中の実線は、前報⁸⁾の平均剪断応力の実験式で、 $\tau_w/\mu = 159.9 I_g^{0.578}$ が水素ガス、 $\tau_w/\mu = 83.3 I_g^{0.613}$ が酸素ガス発生の結果である。前報の結果では、平均壁面剪断応力は垂直平板長さの影響がほとんど見られず、 I_g のみにより相関が可能であることを示した。図中にプロットした値は本実験の速度分布の実測値より算出した値である。速度分布測定での実験誤差を考慮すれば、本実験値は抗力より直接測定した前報の結果とよい一致を示していると言える。

結 言

電解気泡流中に置かれた垂直平板回りの液速度分布をレーザー Doppler 流速計により測定し、以下の結論を得た。

発生気泡が水素の場合、平板下端からの距離に関係なく最大液速度 $u_{\max}$ および液速度が $u_{\max}/2$ となる平板からの距離 $y_{0.5}$ により無次元化した液速度分布は、単一曲線で近似することができ、気泡発生量が多くなれば、層流自然対流に類似した滑らかな分布形となった。一方、酸素気泡を発生させた場合、無次元速度分布は平板下端から上方に行くに従い変化し、本測定を行った気泡発生電流値の領域では、単一の曲線で近似することができなかった。

最大液速度 $u_{\max}$ を示す位置 $y_{\max}$ の測定値は、水素気泡発生の場合では、気泡発生量の影響を受けず、平板下端からの距離 x の増加とともに、わずかに増加する傾向を示した。酸素気泡発生の場合では、 $y_{\max}$ 値は気泡発生量および垂直平板下端からの距離 x の増加とともにわずかに増大した。一方、 $y_{0.5}$ は、水素および酸素気泡発生の場合ともに、気泡発生量と x の増加に伴い増大した。また、 $u_{\max}$ は気泡発生量により変化するが、 x への依存性は小さかった。

速度分布から求めた平均剪断応力は、 x とともにわずかに増加する傾向がみられたが、その増加の割合は少なかった。また、垂直平板回りの抗力より求めた前報の平均剪断応力の実測値とよい一致を示した。

Nomenclature

a, b, c = coefficients in Eq.(1)	[-]
I_g = current of electrolysis	[A]
u = x -direction liquid velocity	[cm/s]
$u_{\max}$ = x -direction maximum liquid velocity	[cm/s]
x = distance from leading edge of flat plate	[cm]
y = distance from flat plate	[cm]
$y_{\max}$ = position being maximum liquid velocity	[cm]
$y_{0.5}$ = characteristic boundary layer thickness	[cm]
μ = viscosity	[g(cm·s)]
τ_w = wall shear stress	[g(cm·s ⁻²)]
<Subscripts>	
l = local value	
m = average value	

Literature cited

- 1) Durst, F., A.M.K.P. Taylor and J.H. Witelaw: *Int. J. Multiphase Flow*, **10**, 557 (1984)
- 2) Durst, F., B. Schönung, M. Winter and K. Selanger: *J. Fluid, Mech.*, **170**, 53 (1986)
- 3) Fair, J.R., A.J. Lambright and J.W. Andersen: *I&EC*, **1**, 33 (1962)
- 4) Janssen, L.J.J. and J.G. Hoogland: *Electrochimica Acta*, **18**, 543 (1973)
- 5) Koide, K. and H. Kubota: *Kagaku Kōgaku*, **30**, 801 (1966)
- 6) idem: *ibid.*, **30**, 806 (1966)
- 7) Leveque, M.A.: *Ann. Mines*, **13**, 201 (1928)
- 8) Matsuura, A., H. Nakamura, S. Hiraoka, T. Aragaki and I. Yamada: *Kagaku Kōgaku Ronbunshu*, **15**, 804 (1989)
- 9) Mizushima, T., H. Ueda, N. Okada and M. Uegaki: *J. Chem. Eng. Japan*, **4**, 17 (1971)
- 10) Mizushima, T. and H. Miyashita: *Kagaku Kōgaku*, **32**, 987 (1968)
- 11) Yoshitome, H., Y. mannami, K. Mukai, N. Yoshikoshi and T. Kanazawa: *ibid.*, **29**, 19 (1965)

Measurement of Liquid Velocity Distribution near a Vertical Flat Plate Immersed in Bubble Flow

Akihiro Matsuura, Hajime Nakamura, Yoichi Ikeda
and Hideyuki Horihata

Dept. of Mech. Eng., Daido Inst. of Tech., Nagoya 457

Settsuro Hiraoka, Tsutomu Aragaki and Ikuho Yamada

Dept. of Appl. Chem., Nagoya Inst. of Tech., Nagoya 466

Key Words : Fluid Mechanics, Electrolysis, Bubble Flow, Velocity Distribution, Shear Stress, Laser Doppler

Liquid velocity distributions near a vertical flat plate immersed in bubble flow of electrolytic gas evolved under the plate were measured by using a laser doppler velocimeter.

The evolution rate of the electrolytic gas was controlled by varying an electrolytic current. For high H_2 gas evolution rate, the dimensionless velocity distributions with use of a characteristic boundary layer thickness and a maximum liquid velocity were similar to that for single-phase natural convection. For low H_2 or O_2 gas evolution rate and large bubble diameters, the upward velocity reached high value near a peak and then rapidly decreased far from the peak, and the velocity distribution took a peculiar profile. The dimensionless velocity distribution for H_2 gas evolution was expressed by a single line. The characteristic boundary-layer thickness increased with increased in both gas evolution rate and distance from the leading edge of the plate. The maximum upward velocity depended only on the gas evolution rate. The average shear stress calculated from the velocity distribution was independent of the flat-plate length and agreed well with the measured shear stress obtained directly from the drag force of the plate as described in a previous paper.