D211 二酸化炭素気泡の溶解過程のダイナミズム

Dynamics of the dissolution process of CO₂ bubble

○学 山本 学 (静大院), 学 吉本 賢誠 (静大院), 正 齋藤 隆之 (静大院)

Manabu YAMAMOTO, Kenjo YOSHIMOTO, Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

Mass transfer and flow structure of gas-liquid two-phase flows are essential in a chemical reactor, bio reactor and so on. In this research, a mass transfer process of a single rising bubble is investigated by using PIV (Particle Image Velocimetry) and LIF (Laser Induced Fluorescence) measurement, focusing on a coupling mechanism between mass transfer of a bubble and its surrounding liquid motion. We examined single ascending bubbles of 2-3 mm in equivalent diameter, which showed zigzagging motion in rest water. We visualized both the mass transfer process and wake of the single ascending bubble via LIF. In addition we calculated the turbulence intensity induced by the bubbles. From these results, we conclude that the shape oscillations are considered to play an important role in mass transportation between bubbles and their surrounding liquid.

Key Words: PIV, LIF, bubble, mass transfer, surface oscillations

1. はじめに

気液二相流は熱交換器や化学反応器, バイオリアクターなど様々な工業装置において見られる現象であり, 二酸化炭素深海固定技術 (GLAD システム) などへの応用も期待されている. これらの工業装置の効率的で安全な運転のためには, 気液二相流における気泡の溶解現象と周囲液相運動との関係の詳細な把握が必要である^{(1)~(7)}.

これまでに単一球形 CO₂ 気泡に関する多くの実験及び数値解析が行われてきた^{(8)~(10)}. しかしながらこれらの研究においては気泡の重心運動や界面振動, 周囲液相運動などが考慮されていない. 一方で, 径が 2~3 mm の気泡は扁平回転楕円体形状であると同時に界面振動を持ち, 物質移動係数 K_L が最大値をとる^{(11)~(13)}. さらに, これらの気泡は気泡塔内においてジグザグ・螺旋運動を示すと同時に, 特徴的な気泡後流を放出することが知られており^{(14)~(16)}, 流動及び物質移動における現象をより複雑にしている.

本研究では, ジグザグ上昇する単一気泡の物質移動過程と気泡後流との同時計測を行った. また, PIV 計測結果より液相運動及び乱れ強さを算出し, 物質移動との関係を議論する.

2. 実験装置と計測方法

2.1 PIV の実験装置と計測方法

Fig. 1 に実験装置の概要を示す. 実験は, アクリル製矩形水槽にイオン交換及び脱気処理した精製水を満たして行った. 針には 2 種類の注射針 (内径 0.40 mm, 0.22 mm) を用いた. 注射針を用いることで気泡の径, 軌道, 及び傾斜等の高い再現性を可能にした. 気泡発生にはオーディオスピーカーを用いた気泡発生装置を用いた. 本気泡発生装置はオーディオスピーカーの振動による圧力変動を利用して気泡を発生させている. 気泡の発生タイミングはファンクションジェネレーターを用いて高度に制御した. また, PIV 計測を行うために水槽中に PIV 粒子 (粒径 50 μm , 励起波長 532 nm, 発光波長 570 nm) を混入した. PIV 計測の光源には Q スイッチ YAG レーザー (532 nm) を使用した. 気泡の輪郭をはっきりと検出するために赤色 LED 光源を用い, PIV 粒子と気泡形状の同時計測を行っている. 画像処理に

より気泡と PIV 粒子を分け, 粒子のみの画像に FFT ベースの再帰的相互相関 PIV アルゴリズムをかけることにより, 気泡周囲液相の速度場を算出している^{(17)~(18)}. さらに, 初期検査領域を 64×64 pixels, 最終検査領域を 32×32 pixels とし, 検査領域のオーバーラップを 50% として高い空間分解能を得た. PIV 計測は各条件で 16 回行い, それぞれから算出される液相速度場をアンサンブル平均することで誤ベクトルの少ない液相速度場を得た.

(a) Water vessel, (b) Needle, (c) Bubble generator, (d) High-speed video camera, (e) Continuous LED, (f) High-power laser, (g) Rod lens, (h) Function generator

Fig.1: Schematic of experimental setup for PIV and LIF/HPTS.

2.2 LIF/HPTS の実験装置と計測方法

本研究では物質移動の可視化計測にあたり, 蛍光物質である HPTS (8-hydroxypyrene-1, 3, 6-trisulfonic acid) を用いた LIF 計測を行った. HPTS は pH に依存して発光強度を変え, 特に pH 6~9 での発光強度の変化が顕著である⁽¹⁹⁾. CO₂ 気泡が HPTS 溶液中を上昇する間, CO₂ が溶液に溶け出した領域の発光強度は低下する. HPTS の発光強度 I は次式で表される.

$$I = I_0 C \phi \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射光束、 C は蛍光試薬濃度、 ϕ は量子効率、 ε はモル吸収係数である。LIF/HPTSの実験装置の構成はPIVの実験装置と同様となっている。HPTSは純水中に50 ppmで溶かし、HPTSの励起光源としてアルゴンイオンレーザー(488 nm)を用いた。

3. 結果と考察

3.1 気泡からの物質移動及び気泡後流

Fig. 2に気泡射出直後におけるLIF/HPTSの結果を示す。本研究におけるLIF/HPTSを用いることで、気泡からの物質移動と気泡の後流とを同時に可視化計測することが可能である。Fig. 2より、気泡後部から馬蹄形の渦が放出されていることが分かる。

Fig. 2: Bubble wake (Horse-shoe like vortices) (left) and CO₂-rich (low pH) region (right) ($D_{eq} = 2.9$ mm).

3.2 界面振動の大きさの違いが物質移動に与える影響

Table 1に平均球等価径2.3 mm及び2.9 mmの気泡の終端上昇速度、レイノルズ数、ウェーバー数、エトベス数、及びモルトン数を示す。これらの気泡は共に水中でジグザグ上昇運動を示す。また、Fig. 3にこれらの気泡の軌道及

Table 1: Bubble Properties.

	Case 1	Case 2
Equivalent diameter [mm]	2.3	2.9
Terminal velocity [m/s]	0.32	0.29
Reynolds number [-]	743	849
Weber number [-]	3.3	3.4
Eotvos number [-]	0.72	1.15
Morton number [-]	2.6×10^{-11}	2.6×10^{-11}

び曲率を示す。Fig. 3中において、 X は気泡の重心運動の軌道、 κ_L は気泡の輪郭の左側における曲率、 κ_R は気泡の輪郭の右側における曲率をそれぞれ表している⁽²⁰⁾。このグラフより気泡径が2.9 mmの場合、2.3 mmの場合と比較して、気泡の界面振動が非常に大きくなることが分かる。

Figs. 4, 5に、2.3 mm及び2.9 mmそれぞれの気泡径において、Fig. 3中の青色の領域でのPIV及びLIF/HPTS計測の結果を示す。Figs. 4, 5中における t_1 は、気泡が上記の計測領域を通り過ぎた瞬間の時刻としている。 t_2 , t_3 は t_1 から0.2秒経過ごとのスナップショットである。2.9 mmの気泡について、 t_1 を見ると、CO₂濃度が高い領域は気泡軌

Fig. 3: Trajectory and curvature of the bubbles.

道にはなく、気泡がジグザグ運動する向きを変える変向点間の上部に存在している。 t_2 と t_3 のCO₂濃度分布を見ると、 t_1 に比べCO₂濃度が高い領域が気泡軌道から徐々に外側に移動している。さらに、 t_1 ではCO₂濃度が高い領域が小さいのに対して、 t_2 と t_3 ではそれらの領域が回転しながら拡散し、 t_1 に比べ広がっている。次に、2.3 mmの気泡について、2.9 mmの気泡の結果と比較すると、変向点間の軌道に沿った領域でCO₂濃度が高い領域が存在している。また、2.9 mmの気泡に比べて小さい渦が多数存在している。 t_2 と t_3 の濃度の分布を見ると、 t_1 に比べ、濃度が高い領域が左上方向へ徐々に移動している。それに伴い、濃度が高い領域が拡散し、少しずつ広がっている。このように、気泡径の違いにより、気泡の溶解過程に大きな差が現れる様子が見られた。

加えて、Fig. 6に、気泡が誘起する液相の乱れの強さを示す⁽²¹⁾。PIV計測で得られた各座標での約6.8秒の時系列速度データより以下の手順で速度変動を算出し、速度の変動を求める。初めに、各座標における瞬時の速度 u より平均速度 u_{ave} を求める。

$$u_{ave} = \frac{1}{N} \sum u \quad (2)$$

これより速度変動 u' が得られる。

$$u = u_{ave} + u' \quad (3)$$

速度変動より式(4)を用いて変動強度 u_{rms} を求めた。

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum u'^2} \quad (4)$$

Fig. 6より、気泡径が2.9 mmの場合、2.3 mmの場合と比較して、乱れ強さの大きさと影響範囲が非常に大きくなっている様子が見られる。このことから、気泡径の増加に伴う気泡界面振動の増加は、乱れ強さの増加に非常に大きな

Fig. 4-1: Mass transfer obtained from the LIF/HPTS results.

Fig. 4-2: Flow field obtained from the PIV results.

Fig. 4: Mass transfer and flow field of zigzag ascending bubble with large shape oscillations ($D_{eq} = 2.9$ mm).

Fig. 5-1: Mass transfer obtained from the LIF/HPTS results.

Fig. 5-2: Flow field obtained from the PIV results.

Fig. 5: Mass transfer and flow field of zigzag ascending bubble with large shape oscillations ($D_{eq} = 2.3$ mm).

Fig. 6-1: $D_{eq} = 2.9$ mm. Fig. 6-2: $D_{eq} = 2.3$ mm.

Fig. 6: Turbulence intensity induced by zigzag ascending bubble (Horizontal component).

影響を与えていると考えられる。加えて、これらの乱れ強さが強い領域は、上記における CO_2 濃度が高い領域に似た分布をしている。

これらの結果から、気泡径が 2.9 mm と 2.3 mm の気泡両方において、気泡により誘起された気泡周囲の液体の乱れにより高濃度 CO_2 溶解液が輸送・攪拌されていることがわかり、2.9 mm と 2.3 mm それぞれにおける物質移動過程の顕著な違いには、レイノルズ数の増加と同様に⁽²²⁾、気泡の界面振動の増加が大きな影響を与えていると考えられる。

4. 結言

本研究では、ジグザグ上昇運動する単一 CO_2 気泡からの物質移動及び気泡後流との同時可視化計測を LIF/HPTS 法を用いて行った。結果、平均球等価径 2.9 mm の CO_2 気泡から溶け出した CO_2 溶解液が馬蹄形の渦として放出される様子を可視化計測することができた。

また、気泡径が 2.3 mm と 2.9 mm それぞれにおいて、 CO_2 気泡から溶け出した CO_2 溶解液の輸送・攪拌現象を LIF/HPTS 法により可視化した。可視化結果から、 CO_2 気泡から溶け出した高濃度 CO_2 溶解液の分布が 2.3 mm と 2.9 mm の気泡では大きく異なっていることを明らかにした。

さらに、 CO_2 濃度分布と PIV 計測結果から算出した乱れ強さとの比較により、気泡径が 2.9 mm と 2.3 mm の気泡両方において、気泡により誘起された気泡周囲の液体の乱れにより高濃度 CO_2 溶解液が輸送・攪拌されていることが分かった。同時に、気泡径の違いにより、気泡の溶解過程に大きな差が現れる様子が明らかになった。気泡の界面振動の計算結果より、2.9 mm と 2.3 mm それぞれにおける物質移動過程の顕著な違いには、レイノルズ数の増加と同様に界面振動の増加が大きな影響を与えていると考えられる。

参考文献

- (1) R.F. Mudde, T. Saito, J. Fluid Mech., 437, 203-228 (2001)
- (2) T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya, Chemical Engineering Science, 54, 4945-4951 (1999)
- (3) T. Saito, T. Kajishima, R. Nagaosa, Environmental Science and Technology, Vol. 34, No. 19, 4140-4145 (2000)
- (4) T. Saito, S. Kosugi, T. Kajishima, K. Tsuchiya, Energy & Fuels, Vol. 15, No. 2, 285-292 (2001)
- (5) T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya, Experimental Thermal and Fluid Science, 28, 479-488 (2004)
- (6) T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, 305-313 (2005)
- (7) T. Saito, K. Sakakibara, Y. Miyamoto, M. Yamada, Chemical Engineering Journal, Online journal site Elsevier form August 18th 2008
- (8) E. Achenbach, J. Fluid Mech, 62, 209-221 (1974)
- (9) F. Takemura, Y. Matsumoto, Chemical Engineering Science, 55, 3907-3917 (2000)
- (10) T. Madhavi, A.K. Golder, A.N. Samanta, S. Ray, Chemical Engineering Science, 128, 95-104 (1996)
- (11) R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber, New York: Academic (1978)
- (12) M. Motarjemi, G.J. Jameson, Chemical Engineering Science, 33, 1415-1423 (1978)
- (13) L.S. Fan, K. Tsuchiya, Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering (1990)
- (14) C. Brücher, Physics of Fluids, Vol. 11, No.7 (1999)
- (15) K. Lunde, R. Perkins, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (1997)
- (16) A.W.G. de Vries, A. Biesheuvel, L. van Wijngaarden, International Journal of Multiphase Flow, 28, 1823-1835 (2002)
- (17) D.P. Hart, Experiments in Fluids, 29, 13-22 (2000)
- (18) J. Westerweel, D. Dabiri, M. Gharib, Experiments in Fluids, 23, 20-28 (1997)
- (19) J. Coppeta, C. Rogers, Exp. in Fluids, 25, 1-15 (1998)
- (20) 宮本, 齋藤, 機論 B 編, 71-705, 1307-1313 (2005)
- (21) 森川, 真田, 齋藤, 第 85 期日本機械学会流体工学部門講演会論文集, 246 (2007)
- (22) A. Tokuhito, M. Maekawa, K. Iizuka, K. Hishida, M. Maeda, International Journal of Multiphase Flow, 24, 1383-1406 (1998)