

干渉画像法を用いた微細気泡群の溶解挙動計測

Dissolution Measurement of Microbubbles

by Interferometric Laser Imaging

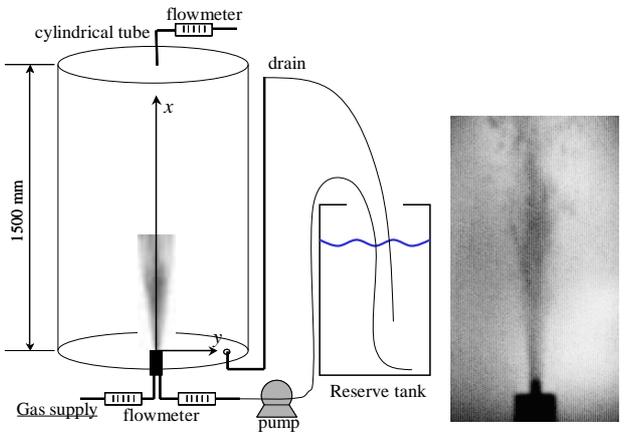
80221543 伊藤博展 (Hironobu Ito) Supervisor 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 緒言

気液反応の一形態として、気泡の溶解現象が化学反応プラントや水質浄化装置など広範囲の分野で利用されている。溶解特性を最適に制御するには、溶解速度に影響を及ぼす気泡径や速度場などの詳細な情報を把握することが重要である。そこで本研究では、溶解挙動における非正常性に着目し、高精度な非接触計測法(干渉画像法; ILI 法)^{[1][2]}を用いて気泡径の面的空間分布や気泡移動速度を計測し、かつ PIV-LIF 法を用いて気泡周囲流動構造を把握することで、サブミリオオーダーの微細気泡群の溶解挙動を定量的に評価することを目的とする。

2. 実験装置

Fig.1 に実験装置概略と座標系(a),および微細気泡発生の様子を示す可視化写真(b)を示す。微細気泡群の溶解現象と周囲流動構造を可視化計測するため、水槽は透明アクリル製である。光学計測を行うため水槽断面は正方形の一つの対角を45度で切り落とした形状をしている。また、軸対称流れを実現するため、水槽内に塩ビ製透明パイプを設置した。作動流体には真空脱気装置で溶存気体を除去した水道水を使用した。微細気泡発生には松本^[3]によって開発されたノズルを用いた。ノズル中心部には気体供給ノズル, その周囲には8本の水噴流ノズルが設置されている。水噴流群が作り出す強いせん断によってノズル中心部で生成される気泡は微細化される。気泡はCO₂とN₂およびそれらの混合気体である。それぞれ、高圧ポンプから減圧弁を通して200kPaに減圧し、流量計, 混合器を用いて流量制御を行った。実験における再現性確保のため、pHは7.60±0.15, 温度は22.0±3.0, 溶存酸素濃度は5.0±0.6mg/lの範囲で計測を行った。



(a) Experimental apparatus (b) Microbubble jet
Fig.1 Experimental apparatus and bubble generation image

3. 計測方法および原理

微細気泡の粒径計測には YAG Laser (λ=532nm)および LYF

Laser (λ=539nm)を光源とした ILI 法を用い、周囲流体の流速計測には同じ光源に粒径が約 1μm 蛍光粒子をトレーサー粒子とした PIV-LIF 法を用いた。PIV-LIF 計測時には気泡界面でのレーザー散乱光を除去するために CCD カメラのレンズ前面に蛍光発光波長(λ=600nm)のみを透過させるハイパスフィルターを取り付けた。また、高分解能 CCD カメラおよび高速度 CMOS カメラの露光時間と光源の照射タイミングはパルスジェネレータによって同期した。

ILI 法は、気液界面での反射・屈折による干渉縞から粒径を得る手法であり、粒径の時間変化、空間分布を二次元的に計測可能である。本計測では、液滴流を対象として開発された計測法^{[1][2]}にならい、干渉縞を焦点外れ面で撮像し、受光部にシリンドリカルレンズ群を用いることで縦方向に圧縮した。本研究で適用した計測概念図を Fig.2 に、圧縮効果を Fig.3 に示す。干渉縞は個々の気泡径と関連があるが、その重複は圧縮によって回避できる。圧縮した線状の干渉縞を画像処理することによって、多数の気泡の粒径を算出することが可能である。干渉縞と気泡径の関係は次式(1),(2)で与えられる。

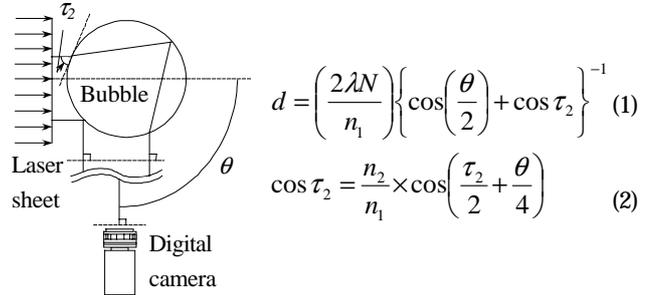
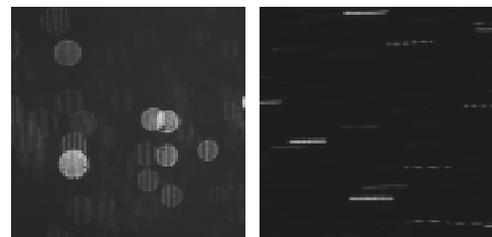


Fig.2 Basic configuration of the ILI measurement

ここで、 $d, \lambda, N, \theta, \tau_2, n_1, n_2$ は、それぞれ粒径、レーザー波長、縞の本数、受光にらみ角、2次屈折角、周囲流体の屈折率、気泡の屈折率である。本研究では $\theta=90^\circ$ で計測。



(a) uncompressed image (b) compressed image
Fig.3 Examples of ILI image

4. 実験条件

作動流体は水道水を真空脱気装置にて脱気処理した水を用いた。脱気処理することにより、溶存酸素濃度を約60mg/lから5.0mg/lまで低下させた。Table.1に本研究で用いた実験条件を示す。

Table.1 Parameters of experiment

供給気体	CO ₂ , N ₂ , Mixed gas (CO ₂ +N ₂ , 混合比1:1)
気体供給量	CO ₂ , N ₂ : 15ml/min Mixed gas: 30ml/min
水供給量	1000ml/min (ノズル出口速度: 10.5m/s)
計測地点	x=100, 150, 700mm

水槽内全体(480l)に溶存可能なCO₂, N₂の体積は20, 100kPaで、それぞれ、420, 7.30l)であり、1実験条件あたりの気泡発生総量は約30mlであるため、溶存気体濃度の増加に伴う測定中の溶解特性の変化は無視できるものと考えられる。

計測領域は25mm×25mmであり、CCDカメラは統計量を得るために使用し、高速度CMOSカメラは気泡径の時系列変化を捉えるために使用した。また、それぞれのカメラの光源はダブルパルスYAG Laser, 高繰返しYLF Laserを使用した。

5. 結果および考察

気体の溶解に伴う気泡径の変化を調べるため、気体の種類、ノズルからの高さxと気泡径の確率密度関数(PDF)分布の関係をFig.4,5に示す。PDFの算出に際して、3000枚の画像から約5万-18万個の気泡径を検出した。なお、本研究と同じノズルを使用し、バックライト法により気泡径のPDFを求めた他者の研究^[3]と同じ条件で計測を行ったところ、気泡径のピークと分布形状がよく一致し、本計測法の妥当性を確認した。Fig.5より、気体の種類に関わらず、小径気泡の存在確率が気泡の上昇と共に増加している。これは溶解に伴う気泡径の減少に対応し、本計測手法により、溶解挙動の定量評価が可能であるといえた。なお、CO₂気泡の場合、高位置(x=700mm)では気泡が検出されず、ほぼ完全に溶解していた。また、体積平均気泡径の変化を調べると、いずれの気体も気泡が上昇するにつれて気泡径が減少していた。

水槽全体での溶解量を調べるため、水槽を密閉し、気体供給量に対して、溶解せずに排気される気体の量の変化を調べた結果、CO₂, N₂気泡共に水へ溶解すると共に、微細化することで溶解が促進していることが確認された(Table.2)。

溶解挙動を定量化するため、x=100, 125, 150mmでのCO₂気泡物質伝達率h_Dに基づいて算出された物質拡散の指標となるSh数をFig.6に示す。h_DとSh数は次式(3),(4)に基づき求めた。

$$\dot{m} = h_D(C_s - C_\infty), \quad Sh = \frac{h_D \cdot R}{D} \quad (3), (4)$$

ここでRは気泡径、Dは拡散係数である。なお、溶解したCO₂の質量流束 \dot{m} は気泡速度とx=100, 125, 150mmの位置での気泡が10mm移動した時の平均気泡体積変化(気泡径変化)から求め、気泡界面溶存CO₂濃度C_sは飽和濃度、Cは0と仮定した。Fig.6より、xが大きくなり、また、ノズル中心から離れるにつれSh数が減少している。このような結果の原因は、ノズル中心直上では気泡と液相との相対速度が瞬時瞬時に変化し、気泡界面の濃度の高い液体が更新されているため、x=100mmでの液相速度とその速度変動、気泡上昇速度とその速度変動の関係をFig.7に示す。ノズル近傍で液相速度の速度変動値の幅が大きく、半径方向離れるにつれ速度変動値の幅が減少していることより、ノズル中心上方では気泡界面近傍の濃度の高い液体の更新が盛んであり、気泡から液体への物質移動が促進されている。

一方、x=100mmにおいて高繰返しYLF Laserと高速度CMOSカメラを組み合わせ、1000Hzで時系列計測した結果、時々刻々と気泡径が減少している様子が捉えられ(Fig.8)、算出された物質伝達率h_Dは統計データより若干大きな値を示したがほぼ一致した(Fig.9)。これより、ノズル出口近傍で気泡界面の更新が盛んであり物質伝達率h_Dが増大した。

6. 結言

多数の液滴の粒径測定法として開発された干渉画像法を微細気泡群に適用し、溶解を伴う微細気泡群の粒径を測定することで、気体による溶解性の違いや下流方向への溶解過程の変化を計測した。また、PIV-LIFによる速度分布計測も行い、溶解現象に関する以下の知見を得た。

- CO₂・N₂気泡共に上昇と共に気泡径が減少する。特に、CO₂気泡の径はノズル出口近傍で顕著に減少する。
- 液相速度変動が気泡界面の更新を促進し、物質伝達率h_Dが増大した。

参考文献

- [1] Kawaguchi, T. et al., *Meas. Sci. Technol.*, **13**, 308-316, 2002.
- [2] Maeda, M. et al., *Meas. Sci. Technol.*, **11**, L13-L18, 2000.
- [3] 松本ら, 高効率液相化学反応器の研究開発, NEDO研究成果報告書(<http://www.nedo.go.jp/>), 060000111, 1999.

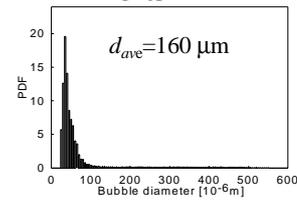


Fig.4 PDF of CO₂ bubble diameter at x=150mm

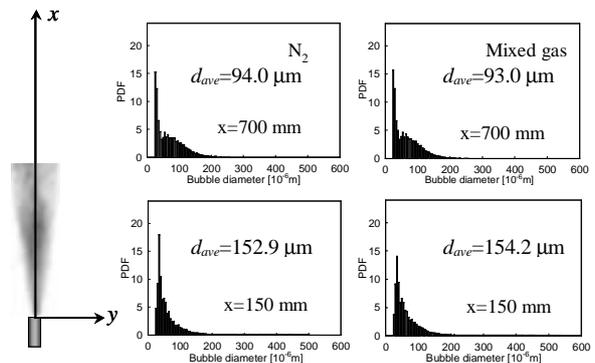


Fig.5 PDF of N₂ and mixed gas bubble at x=150, 700mm

Table.2 マクロでの溶解量

気体	供給量 ml/min	検出量 ml/min	
		微細化なし	微細化
CO ₂	150	26	0
N ₂	150	94	85

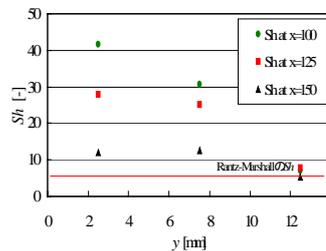


Fig.6 Sh profile

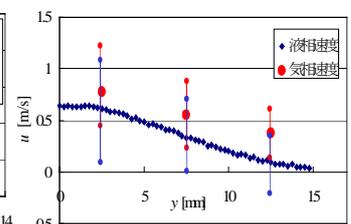


Fig.7 velocity profile of water and bubble



Fig.8 time-series ILL

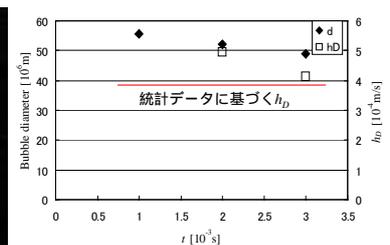


Fig.9 time-series bubble diameter and h_D