

B161

気泡群浮力を利用した二酸化炭素の深海固定 (大口径管内における気泡乱流特性に関する一考察)

Deep Sea Sequestration of Carbon Dioxide Gas Using Bubble Swarm Buoyancy (A Study on Characteristics of Turbulent Bubbly Flows in a Large-diameter Pipe)

○正 齋藤 隆之 (静大工) 梶島岳夫 (阪大院) 土屋活美 (同志社大工)
Takayuki SAITO, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561
Takeo KAJISHIMA, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871
Katsumi TSUCHIYA, Doshisya University, Kyo-Tanabe, Kyoto 610-0394

We have been developing GLAD (Gas Lift Advanced Dissolution) System for the purpose of CO₂ sequestration at the deep sea. In the present paper, large-scale structure of turbulent bubbly flows in a large-diameter pipe (149 mm in diameter and 11 m in height), that is the key phenomena in the system, is experimentally considered using Four-Tip Optical-fiber Probe (F-TOP) and Laser Doppler Anemometer (LDA). Furthermore, characteristics of large-scale gas-lift pump (151 mm in diameter and 212.6 m in height) are discussed experimentally.

Key words: Bubble, Turbulence Intensity, Multiphase Flow, Carbon Dioxide, Ocean Sequestration, Gas Lift

1. はじめに

筆者らは、ガスリフトを利用して低純度 CO₂ 気泡群を海水に溶解しかつ CO₂ 溶解海水を深海に送り込む方式 (GLAD: Gas Lift Advanced Dissolution System) を実験と数値解析により考察し、その技術的可能性ならびに経済性を明らかにしてきた[主要特許: 1-6, 主要論文: 7-13]. GLAD システムでは、送り込むガスの CO₂ 濃度、流量ならびに気泡の溶解を制御することにより、海水の酸性化を抑制することが可能である。また、海洋の密度成層構造に影響されることなく CO₂ 溶解海水を確実に深海に送り込むことができる。本報告においては、同システム内に発生する気泡乱流の特性を実験に基づいて考察するとともに、大規模なガスリフトポンプの特性についても言及する。

2. GLAD のシステム要件と気液二相流動

GLAD システムは、低コスト、低ライフサイクル CO₂、低ライフサイクルエネルギーであると同時に CO₂ の長期間固定機能と高い環境受容性を具備するものでなければならない。このためには、ガスリフト作用と CO₂ 気泡群の溶解とを制御することが必要である。筆者らは、GLAD システムに送り込むガスの CO₂ 濃度と流量ならびに気泡乱流の構造を制御することにより、これを実現可能と考えている。

気泡群の溶解を Fig.1 のように理解する。単一気泡の界面近傍に分子拡散により、CO₂ 濃度の高い層が形成される。この高濃度層が気泡近傍の微小な渦により輸送され、さらに、大規模な液相により濃度輸送が行われる。したがって、気泡界面と微小スケールの液相運動との干渉ならびに気泡群と大規模な液相運動との干渉を制御すれば、気泡群の溶解を制御できると考えている。

3. 実験装置ならびに計測装置

Fig.2 に、気泡乱流の特性を把握するための実験装置の概略を示す。ポンペ(12)から質量流量コントローラ(13)を介して、装置最下部の気相バッファ(1)に純空気を送り込む。気泡分散板(2)により小気泡を気液混合槽(3)内に発生させる。同混合槽内はベルマウス構造を成し、気泡群が滑らかに入口管(4) (アクリル製: 内径 149mm) に流入する。(1)から(4)までの区間においては、液相の平均主流速度は 0 である。実験では、水槽(9)から遠心ポンプ(10)により、清水を液相注入装置(5)に送り込む。液相注入装置は二重管構造で、液相は供試管 (アクリル製、内径 149mm) (6)の内壁に埋め込まれた多孔板を介して管内に注入される。本実験条件では、液相注入

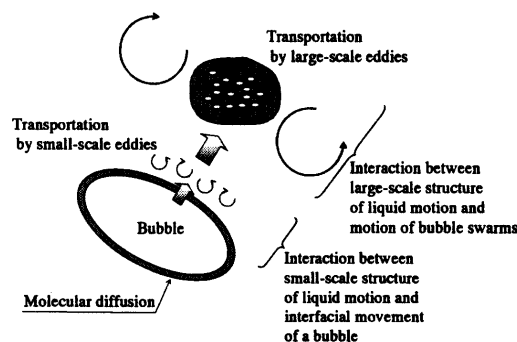
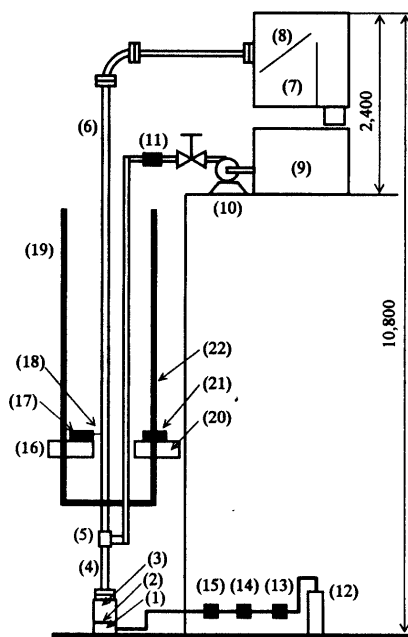
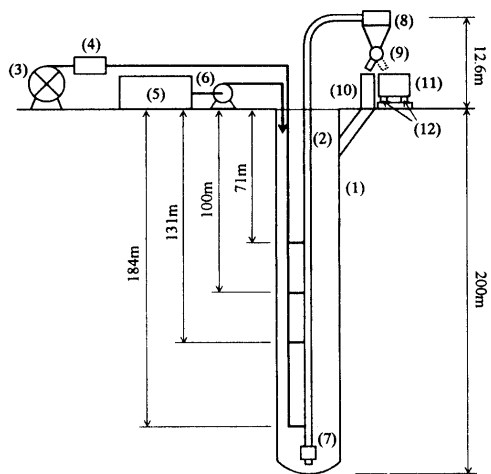


Fig. 1: Schematic of mass transfer between a swarm of bubbles and liquid phase in a turbulent bubbly flow.



(1)Gas buffer, (2)Bubble disperser, (3)Mixing vessel, (4)Inlet pipe, (5)Liquid inlet screen, (6)Test pipe, (7)Knockout tank, (8)Screen, (9)Water vessel, (10)Centrifugal pump, (11)Electromagnetic flowmeter, (12)Cylinder, (13)Mass flow controller, (14)Thermo couple, (15)Pressure transducer, (16)Probe stage, (17)Probe traverse, (18)4-tip probe, (19)Lift, (20)LDA-Probe stage, (21)LDA-probe, (22)Lift

Fig. 2: Schematic of Experimental set up.



(1) Shaft, (2) Gas-lift pipe, (3) Compressor, (4) Cooling tower, (5) Mass flow controller, (6) Water supply tank, (7) Pump, (8) Electromagnetic flow meter, (9) Gas-water separator, (10) Swing pipe, (11) Return pipe, (12) Measure tank, (13) Load cell, (14) Differential pressure transducer, (15) Pressure transducer

Fig. 3: Schematic diagram of 200-m gas-lift pump.

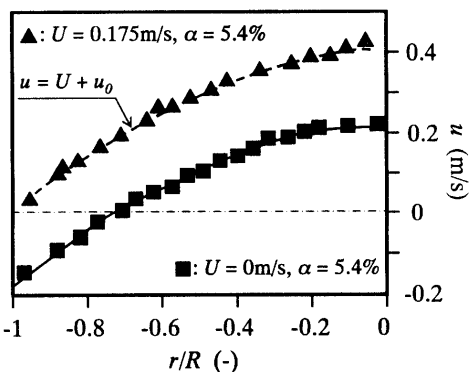
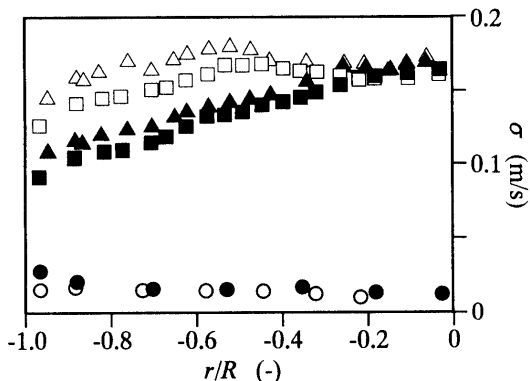


Fig. 4: Radial profile of mainstream velocity of liquid phase.



△: σ_u at $U = 0.175\text{m/s}$, ▲: σ_v at $U = 0.175\text{m/s}$, □: σ_u at $U = 0\text{m/s}$, ■: σ_v at $U = 0\text{m/s}$, ○: σ_u at single phase flow, ●: σ_v at single phase flow.

Fig. 5: Radial profile of fluctuation intensity of liquid velocity.

時の半径方向の平均液相速度は最大で 0.02m/s である。

液相運動の計測には、2次元 LDA を使用した。また、気泡径、気泡速度、局所ボイド率の測定には、独自に開発した4点式光ファイバプローブを用いた。

Fig.3 に大規模ガスリフト装置の特性把握実験に利用した装置の概略を示す。内径 151mm の鋼管を接続して、全高 212.6m とし、これを直径 1.5m、深さ 200m の立型水槽に懸架した。ガスリフト管内の静圧分布、液相見掛け流速、管軸

方向のボイド率分布などを計測した。

4. 結果と考察

液相見掛け流速 $U = 0\text{m/s}$ ならびに 0.175m/s 、ボイド率 $\alpha = 5.4\%$ における液相の平均主流速度 u の半径分布を Fig.3 に示す。 $U = 0\text{m/s}$ では、管壁付近に負の領域が形成され、気泡群の浮力により大規模な対流が管内に発生している。また、 $U = 0.175\text{m/s}$ の速度分布は、 u_0 ($U = 0\text{m/s}$ における平均主流速度 u) に見掛け液相流速 U を加えてものとなっている。

主流方向液相速度 u ならびに半径方向液相速度 v の変動強度を Fig.5 に示す。気泡乱流では、管中心に向かって速度変動強度が増加する。また、気泡乱流の速度変動強度は、液単相の速度変動強度に気泡群の存在により発生する速度変動強度を加えたものとなっている。以上のように、本実験範囲において、気泡乱流の構造は、液単相の流動に気泡群が存在すること、すなわち浮力により発生する流動をスーパーインポーズしたものと考えられる。

以上の考察を基に、大規模なガスリフトポンプの特性を考察する。浮力を駆動源とする GLAD システムの巨視的特性 (ポンプ特性等) は、大規模な構造により決定されるものと考えてよい。すなわち、ライザーにおける管内平均ボイド率

$$\langle \alpha \rangle = \int_0^L \alpha(z) dz \quad (1)$$

により整理可能である。ここに、 α は管断面のボイド率、 L はライザー長である。Fig.6 に $\langle \alpha \rangle$ と修正フルード数 $F_{Rg} = J_g / \sqrt{2gL}$ との関係を示す (J_g は気相見掛け流速)。ガスリフト装置の特性をほぼ整理できることがわかる。

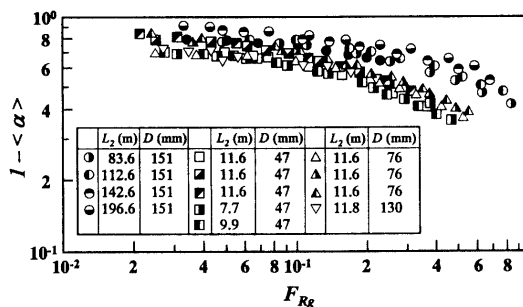


Fig. 6: Relationship between average void fraction and Froude number in various gas-lift system.

5. まとめ

GLAD システムを設計する手法を確立することはできたと考える。今後は、気液二相流における物質輸送の制御手法の確立を目指したい。本研究は、科学研究費基盤(A)課題番号 13355008 により実施した。関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) T. Saito and T. Kajishima: *US Patent No. 5662837*, (1997).
- 2) T. Saito et al.: *US Patent No. 6254667*, (2001).
- 3) T. Saito et al.: *AU Patent No. 752995*, (2003).
- 4) S. Kosugi et al.: *EU Patent No. 1116517*, (2001).
- 5) S. Kosugi et al.: *US Patent No. 6394428*, (2002).
- 6) S. Kosugi et al.: *AU Patent No. 752766*, (2003).
- 7) T. Saito et al.: *Chem. Eng. Sci.*, 54, 4945, (1999).
- 8) T. Saito et al.: *Environ. Sci. and Technol.*, 34, 4140, (2000).
- 9) T. Saito et al.: *Energy & Fuels*, 15, 285, (2001).
- 10) S. Kosugi et al.: *Chem. Eng. Sci.*, 54, 4945, (2001).
- 11) K. Tsuchiya et al.: *Chem. Eng. Sci.*, 54, 4945, (2001).
- 12) R. F. Mudde and T. Saito: *J. F. M.*, 437, 203, (2001).
- 13) T. Saito, et al.: *Exp. Thermal & Fluid Sci.*, in print, (2003).