

K-1616 ガスリフト効果を利用した二酸化炭素海洋固定システムの性能シミュレーション

Numerical Simulation of Unsteady Characteristics of the GLAD System

正 ○齋藤 隆之 (静大工)

正 梶島 岳夫 (阪大院)

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

Takeo KAJISHIMA, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871

GLAD (Gas Lift Advanced Dissolution) System has been investigated to mitigate the estimated peak of atmospheric CO₂ concentration over the next few hundreds years. The system is a practical use of bubbly turbulent flows to a deep-ocean sequestration of CO₂. Unsteady characteristics of the system are discussed by computational simulation on the basis of experimental results using a large diameter pipe. First, outline of experiment and the results are described. Second, the numerical method based on the Drift Flux Model and the experimental results is employed, and finally the performance and characteristics at the starting operation are discussed.

Key Words: Carbon Dioxide, Ocean Sequestration, Gas-Lift, Turbulent Bubbly Flow, Drift Flux Model

1. はじめに

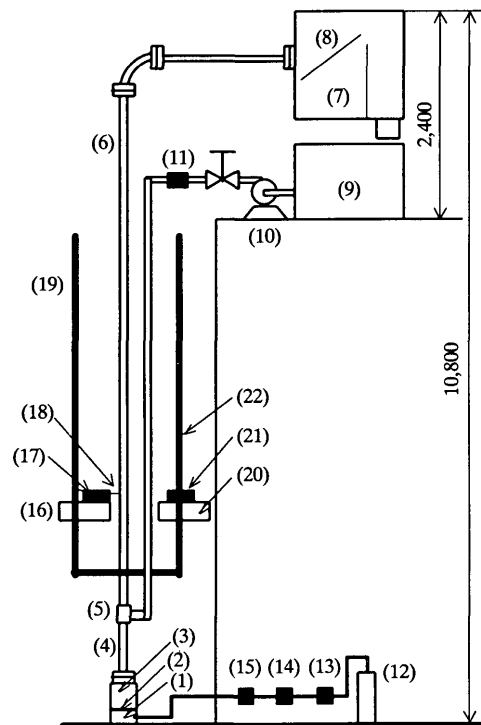
京都で開催されたCOP3から昨年ハーグで開催されたCOP6まで、二酸化炭素排出量の削減に向けた具体策が議論されてきた。しかし、見るべき成果は得られていない。各国のエネルギー、環境、経済政策上の思惑からCOP6における紛糾の収拾に向けた方向も、未だに見えてこない。一方、IEAの一次エネルギー受給予測によれば、新エネルギー開発は進むものの、21世紀においても、人類は一次エネルギーの多くを化石燃料に頼らざるを得ないという現実がある。エネルギー機器の効率化、化石燃料からの脱却ならびにライフスタイルの改革による二酸化炭素の削減が抜本的かつ有効な方法ではあるが、これを実現するまでに「繋ぎの技術」が必要とされる。二酸化炭素の海洋貯留や地中貯留は、その有望なオプションと考えられている。

二酸化炭素の海洋貯留については、液体二酸化炭素の深海底固定、液体二酸化炭素の直接中層放流等が提案・研究されている。筆者らは、ガスリフトポンプを応用して低純度二酸化炭素ガスを深海に輸送・固定するシステム(GLAD System: Gas Lift Advanced Dissolution System)を提案している⁽¹⁻⁶⁾。本研究においては、システム内に現れる混相乱流の素過程に着目し、これに立脚したDrift Flux Modelを構築するとともに、数値解析によって提案するシステムの運転特性を考察する。

2. 大口径管内における気泡乱流の特性

2.1 実験装置 実験に用いた装置の概要をFig.1に示す。ポンペ(12)から質量流量コントローラー(13)を介して、装置最下部の気相バッファ(1)に純空を送り込む。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。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、液相注入時の半径方向の平均液相速度は最大で0.02m/sである。気相の計測には、新たに開発した4点式光ファイバプローブ^(7,8)を、液相の計測には、TSI社製IF750

を使用した (seeding 粒子には密度 $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 粒径 $15 \pm 5 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を使用)。



(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. 1: Schematic of Experimental set up.

2.2 実験結果 (気泡乱流の大規模構造) Fig. 2 に液相平均速度の半径方向分布を示す. 液相見掛け流速 $J_L = 0$ では, 管壁付近に鉛直下向きの流れ領域が形成され, 大規模な構造が現れている. $J_L \neq 0$ における液相速度分布は, $J_L = 0$ に見掛け液相流速をインポーズしたものととなっている. Fig. 3 はボイド率の半径方向分布を示す. $J_L \neq 0$ と $J_L = 0$ における分布形状は類似していることがわかる. また, 液相速度成分の変動強度の半径方向分布を調べたところ, これも $J_L = 0$, すなわち気泡によって生じる液相運動の変動に, 液单相流れの変動をインポーズしたものとになっていた. 以上から, 気泡乱流の大規模な構造は, 液相平均流速 0, すなわち気泡の浮力によって生じる流動構造に, 液单相の大規模乱流構造をインポーズしたものと考えることができる⁹⁾.

3. 解析モデルと数値解析方法

気相速度分布, ボイド率分布, ならびに液相速度分布に関する実験結果と気泡乱流の大規模構造の特性から, 大口径管に対する Drift Flux Model を得ることができる. GLAD システムの管断面積, 液相密度, 流れ場の温度を一定として, 質量ならびに運動量の保存則を考える. 気相の質量保存, 混合体の質量保存ならびに運動量保存は, 次式で与えられる.

$$\frac{\partial(\alpha \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho_g v_g)}{\partial z} = Q_g - \Gamma_g \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = \Gamma_g \quad (2)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho_g v_g^2)}{\partial z} + \frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l v_l^2]}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g - \frac{4\tau_w}{D} \quad (3)$$

ただし, 気液混合体の密度を $\rho = \alpha \rho_g + (1-\alpha)\rho_l$, 運動量を $G = \alpha \rho_g v_g + (1-\alpha)\rho_l v_l$ と与え, α はボイド率, v は流速, 添え字 l, g は各々液相, 気相を表すものとする. Q_g はガス吹き込み量, Γ_g は二酸化炭素溶解量, p は圧力, τ_w は壁面せん断応力である. さらに, 状態方程式をこれに加える. スタガード格子を採用し, 格子中心で圧力・密度・ボイド率を与え, 格子境界で速度と運動量を与える. 計算の安定性と精度の高い非定常性の再現とを同時に満足させるために, 上流補間法^(10, 11)を採用して, 基礎式を差分化する.

4. 計算結果と考察

二酸化炭素ガスを 0 kg/s ($t=0s$) から 0.3kg/s($t=50s$)に徐々に増加させて吹き込んだ場合の入口・出口ガス流量 Q_g ならびに入口・出口揚水量 Q_l の経時変化を Fig.4 に示す. Q_g in が増加するとタイムラグを伴って Q_l in が増加し, 急激な揚水が開始する. Q_l out は, さらに遅れて増加し始める. 気相 Q_g out は大量の液相の排出後, 急激に排気されている. これらは, 振動を繰り返した後に, 一定値となる.

5. まとめ

大口径管内における気泡乱流の特性を実験により把握し, これに基づいて, Drift Flux Model を検討した. さらに, GLAD システムの運転開始時の特性を, 1 次元数値計算により考察した. 今後は, 気泡乱流の構造とメカニズムをより詳細に考察し, より環境受容性の高い GLAD システムを設計する手法を開発したい.

参考文献

1) T. Saito, S. Kosugi, T. Kajishima and K. Tsuchiya, *Energy &*

Fuels, 15, 285, (2001).
 2) T. Saito, T. Kajishima, R. Nagaosa, *Environmental Science & Technology*, 34, 4140, (2000).
 3) T. Kajishima, T. Saito and R. Nagaosa, *Energy*, 22, 257, (1997).
 4) T. Saito and T. Kajishima, USA Patent, No.5662837.
 5) T. Kajishima, T. Saito, R. Nagaosa and H. Hatano, *Energy Conversion & Management*, 36, 467, (1995).
 6) T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya and S. Kosugi, *Chemical Engineering Science*, 54, 4945, (1999).
 7) 齋藤, 日本国特許第 3018178, (2000).
 8) T. Saito & R. F. Mudde, *Proc. ICMF2001*, in CD-ROM, (2001).
 9) R. F. Mudde and T. Saito, *J. Fluid Mech.*, in print, (2001).
 10) 梶島, *機論B編*, 60, 2058, (1994).
 11) 梶島, *機論B編*, 60, 3319, (1994).

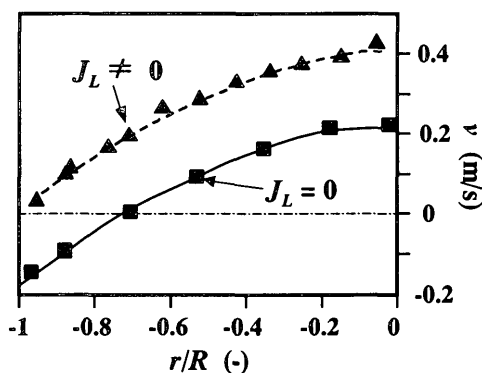


Fig. 2: Radial profile of liquid velocity.

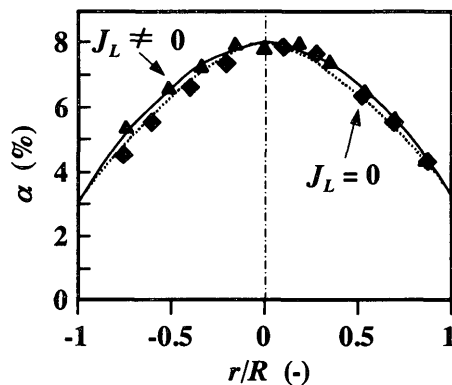


Fig. 3: Radial profile of void fraction.

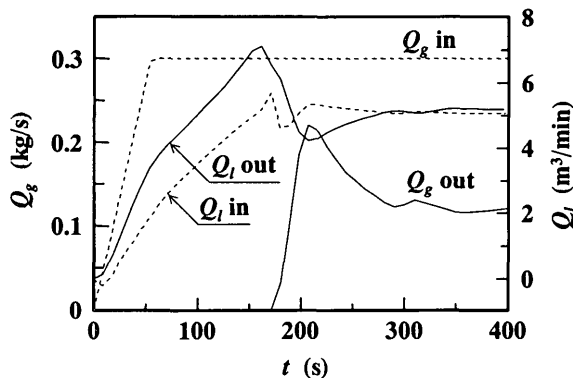


Fig. 4: Characteristics of GLAD at starting operation.