

401 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 Ocean Sequestration System of CO₂ by Gas Lift Effect

正 齋藤隆之 (静大工) ○学 高橋良輔 (静大院)
正 梶島岳夫 (阪大院)

Takayuki SAITO, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561
Ryosuke TAKAHASHI, Shizuoka University
Takeo KAJISHIMA, Osaka University

To mitigate the global warming caused mainly by increase in atmospheric CO₂ concentration, a performance and characteristics of the gas lift system for deep ocean sequestration of CO₂ is numerically discussed. First, it is theoretically shown that they depend on the average void fraction in the system. Second, the numerical method based on the Drift Flux Model is employed, and finally the performance and characteristics at the starting operation are discussed.

Key Words: Carbon Dioxide, Ocean Sequestration, Gas-Lift Pump, Drift Flux Model

1. はじめに

昨年、ハーグで開催されたCOP6では、二酸化炭素排出量削減の数値目標をいかに達成するか、その具体的方法が議論された。しかし、森林のCO₂吸収量の算定方式を巡って議論がかみ合わず、不調に終わった。エネルギー弾性率に示されるように、経済発展にはエネルギー消費が不可欠と考えられていること、削減のために有効かつ具体的な技術開発が進まないことなどを、その本質的な理由として挙げる事ができる。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」が必要とされている。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。

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固定するシステム(GLAD System: Gas Lift Advanced Dissolution System)を提案し[1~5]、システム内に現れる混相乱流の素過程に関する研究[6, 7]に立脚した実用化要素技術を開発中である。(Fig.1 参照)

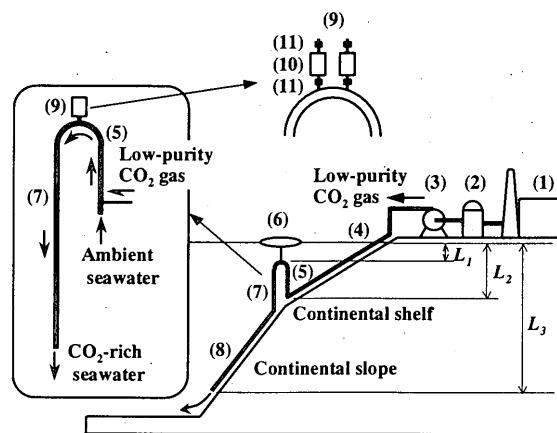
本研究においては、ドリフトフラックスモデルに基づく1次元数値解析により、提案するシステムの起動時ならびに定格特性を考察する。

2. システムの特性を決定する因子

ガスリフトポンプ下端を検査面Ⅰ、上端を検査面Ⅱとして、両検査面間の運動量変化を考える。ガス吹込口を原点として鉛直上向きに距離 z を採る。ガス吹込口下部の管長を L_0 、ガス吹込口上部から水面までの管長を L_1 、ガス吹込口上部から吐出口までの管長を L_2 、各相の見掛け流速を各々 J_l 、 J_g 、管径を D 、管内平均ボイド率を F_g とし、管摩擦係数を λ で与えボイド率により表示される気液二相流の圧力損失式を採用し、運動量変化を整理すれば、式(1)を得る。液相および気相の見掛け流速・管長に基づくFroude数、ガスリフトポンプの形状に関する無次元数ならびに平均ボイド率により、ガスリフトポンプの性能が記述されることがわかる。

$$2 \left(\frac{J_l}{\sqrt{2gL_2}} \right) \left(\frac{J_g}{\sqrt{2gL_2}} \right) = \frac{L_1}{L_2} - (1 - F_g) - \lambda \frac{L_0}{L_2} \left(\frac{J_l}{\sqrt{2gD}} \right)^2 - \lambda \frac{L_2}{D} \left(\frac{J_l}{\sqrt{2gL_2}} \right)^2 \alpha (1 - F_g)^\beta \quad (1)$$

これを基に、管内径 50mm から 154mm、管長 11m から 212.6m [8]のガスリフトポンプの揚水特性を考察したところ、Fig.2に示すように、気相見掛け流速に基づくFroude数と管内平均ボイド率とにより、ほぼ整理できることを見出した。したがって、GLADシステムの定格性能や起動時特性をマクロに把握する際、ドリフトフラックスモデルのような一次元モデルを採用しても、十分にその性能・特性を考察できる



(1) Fired power plant, (2) CO₂ capture plant, (3) Compressor, (4) Underwater gas pipeline, (5) Riser of TURBO-GLAD, (6) Float, (7) Downcomer of TURBO-GLAD, (8) Drain, (9) Indissoluble gas releasing unit. L_1 : 100-200m, L_2 : 300-400m, L_3 : 1,500-3,000m.

Fig. 1 Concept of GLAD System

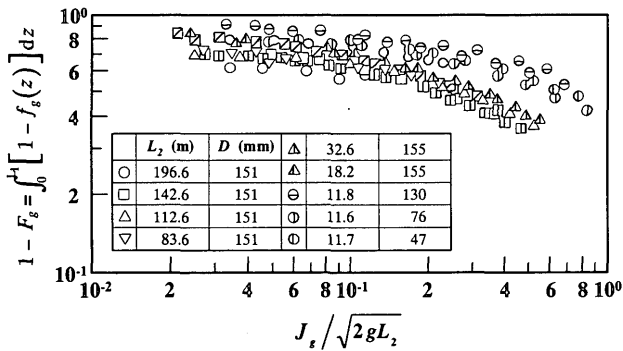


Fig. 2 Relationship between void fraction and Froude number

と判断する。

3. 解析モデルと数値解析方法

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。各相の速度差を表すためにドリフトフラックスモデルを採用する。気液混合体の密度を $\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l$ 、運動量を $G = \alpha \rho_g v_g + (1 - \alpha) \rho_l v_l$ と与える。ここに、 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。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。

$$\frac{\partial(\alpha \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho_g v_g)}{\partial z} = Q_g - \Gamma_g \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = \Gamma_g \quad (3)$$

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

ただし、 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。ドリフトフラックスモデルには、気泡乱流の大規模組織化構造[7]を考慮したモデルを用いる。

ガス吹き込み口からGLADシステム溶解管出口までをスタガード格子により N 分割する。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、梶島[9, 10]が提案する上流補間法を採用して、基礎式を差分化する。計算にあたっては、ガス吹き込み量を0から徐々に所定ガス流量まで増加させる。GLADの定格性能を考察するにはガス吹き込み量が所定量に達した後、十分に時間発展させた時の値を採用すればよい。

4. 計算結果と考察

小規模なGLAD実験装置（管内径 25mm、高さ 8m）による揚水量および気泡溶解量の実験結果と同条件による計算結果とを比較し、上記モデルならびに数値計算方法が妥当であることを確認した[1,2]。次に、ライザー下端の水深を 400m、ガス注入口水深を 390m、GLADライザー長を 300m、管内径を 102mm とした際の計算を行った。

二酸化炭素ガスを 0 kg/s ($t=0s$) から 0.3kg/s ($t= 0s$) 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.3 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、急激な揚水量が開始する。 Q_l out は、さらに遅れて増加し始める。 Q_g out は

大量の液相の排出後、急激に排気されている。増減を繰り返した後に、一定値となる。

Fig.4 に定常状態における溶液 pH の計算結果を示す。 Q_g の増加とともに、pH が徐々に低下している。液体二酸化炭素の直接海洋固定に比べ、pH の効果は小さく、GLADシステムの二次的環境影響は小さいことが予想される。

5. まとめ

気液間の運動量交換などをマクロに表す Drift Flux Model によりGLADシステムの特性を考察した。1次元計算でもその特性の多くを理解することは可能と思われる。しかし、気泡乱流では、大口径管になると小口径管では見られない大規模な組織化構造が現れる。GLADシステムの制御、特に pH 値を下げない（二次的環境影響を避ける）運転を行うには、気泡乱流の素過程の解明ならびに海洋乱流の構造解明など、多くの課題が残されている。

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] R. F. Mudde and T. Saito, *Journal of Fluid Mechanics*, in print, (2001).
- [8] 齋藤他 4 名, *資源・素材学会誌*, 107, 265, (1991).
- [9] 梶島, *機論B*, 60, 2058, (1994).
- [10] 梶島, *機論B*, 60, 3319, (1994).

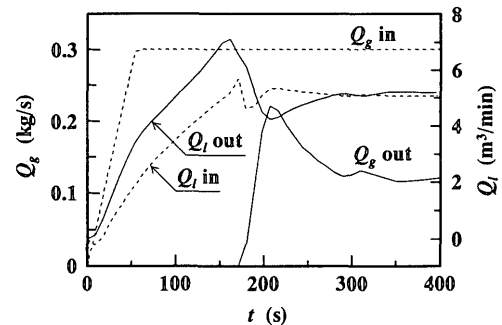


Fig. 3 Characteristics of GLAD at starting operation.

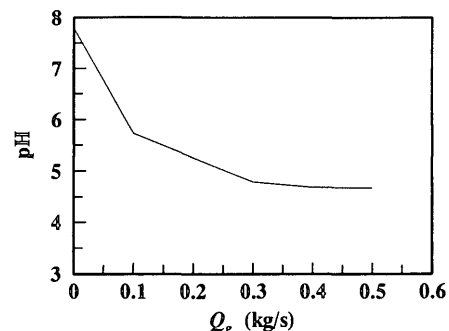


Fig. 4 pH of the solution obtained by numerical simulation.