

Numerical Simulation of Gas-Lift System for CO₂ Disposal

○ 高山 英輔 (阪大院) 正 梶島 岳夫 (阪大工)
 正 斎藤 隆之 (静大工)

Eisuke TAKAYAMA, Graduate School of Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, Osaka
 Takeo KAJISHIMA, Dept. of Mech. Eng., Osaka Univ.
 Takayuki SAITO, Dept of Mech. Eng., Shizuoka Univ.

To mitigate global warming, we have proposed a gas-lift system for CO₂ release into deep ocean. It is an inverse-J pipeline. CO₂ bubbles injected into the pipe form a buoyant plume and dissolve into the seawater as they rise. This dense solution is released from the other side of the pipe. The feasibility of our method has been examined by the numerical simulation as well as the experiment. In this paper, improvements by using a discrete bubble model with a CO₂ dissolution model for the numerical simulation are reported.

Key Words: CO₂ Disposal, Discrete Element Method, Bubbly Flow, Mass Transfer, Numerical Simulation

1. 緒言

大気中のCO₂濃度の増加に伴う諸問題が懸念されている。新エネルギー源への転換とともに、当面は大気への放出を抑制する必要がある。CO₂処理法の選択において、実現可能性・処理可能量で評価すれば海洋の利用は有効である。処理に要するエネルギーが少なく、陸上・海洋の双方の生態系への負荷を最小にする技術の開発が求められる。このような背景から齋藤・梶島は、CO₂ガスで管内気泡流をつくり、溶解させつつ気泡ポンプ効果を利用して深海に送り込む方法を提案した^(1, 2)。実験ならびに数値シミュレーションによってその実現性を確認し、液化してから深海へ貯留または放流する従来提案よりも有利であることを示した。

溶解性気泡乱流の予測においては、過渡状態に対しては数値拡散、定常性能に対しては物質移動モデルの影響が大きい。本研究の目的は、従来の連続体モデル⁽¹⁾を離散気泡法⁽³⁾に変更し、上述の問題を解消することにある。個々の気泡を追跡する方法により、体積率の数値拡散がなくなり、より精密な溶解モデルを取り入れることができるだけでなく、多様な気泡径や表面状態を考慮する拡張性も期待される。本稿では、液相中のCO₂濃度の影響と、画像処理による測定値^(4, 5)を反映した溶解モデルを用いた結果を報告する。

2. 基礎方程式および数値計算法

鉛直円管内気泡流の一次元計算を考える。気相については個々の気泡をラグランジュ的に追跡する。液相についてはオイラー的に差分計算する。数値計算はTrapp & Mortensen⁽³⁾の方法に準じるが、気泡の合体・分裂および気泡運動の変動モデルは考慮しない。連続相の管摩擦は既報^(1, 6)と同様とする。

本計算では、溶解性気泡を扱うため、下記のような物質移動モデルを新たに加える。離散相 p (単一成分の気泡) の質量保存式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt}(\rho_p V_p) = -k_L M_p (C_s - C) A_p \quad (1)$$

$V_p (= 4\pi r_p^3/3)$ は体積, $A_p (= 4\pi r_p^2)$ は表面積, r_p は等価半径である。密度 ρ_p には理想気体の状態方程式を用いる。 k_L は物質移動係数で、空気には0を、CO₂には測定結果^(4, 5)を参考に与える。 C_s は気泡表面での溶液中のCO₂モル濃度, C は溶液中のCO₂モル濃度であり、CO₂

のモル質量は $M_p = 44 \text{ kg/kmol}$ である。 C_s を飽和CO₂濃度で近似し、ヘンリーの法則($C_s = p/H$, ただし p は圧力, H はヘンリー定数⁽⁷⁾)で決める。溶液内の濃度 C には移流拡散方程式

$$\frac{dC}{dt} + J_l \frac{dC}{dx} = D_T \frac{d^2 C}{dx^2} + q_g \quad (2)$$

の計算結果を用いる。 q_g は溶解率, $J_l [= (1 - \alpha)u_l]$ は液相の見掛け速度 (α はボイド率, u_l は液相速度) である。レイノルズ数 $J_l D/\nu$ の単相流を $k-\epsilon$ モデルで解き、乱流シュミット数を1として、断面内の渦粘性係数の平均値 ν_T を式(2)の乱流拡散係数 D_T に用いた。

3. 計算結果と考察

図1のような実験装置を対象として数値計算を行う。溶解管は内径1inの上昇管(L), 水平管(H), 下降管(D)から成り、水槽(B)に接続されている。吹き込み口(I)から気泡を供給すると、管(L)内では気泡ポンプ効果により上昇流が発生する。残った気泡は水平管(H)に入ると直ちに分岐管(S)から抜き取られ、下降管(L)内は液相だけとなる。二酸化炭素の海洋処理法^(1, 2)は、上昇管内でCO₂気泡を海水に溶解させ、そのときの気泡ポンプ効果と密度の増した溶液の重力を利用してCO₂溶存海水を深海に送り込むものである。図1は検証用の室内実験装置で、水槽(B)を加圧して水深200mまでの条件で測定可能であるが、今回は上端を大気圧に開放した。液相には水道水を使用し、吹き込み口(I)下部に電磁流量計を

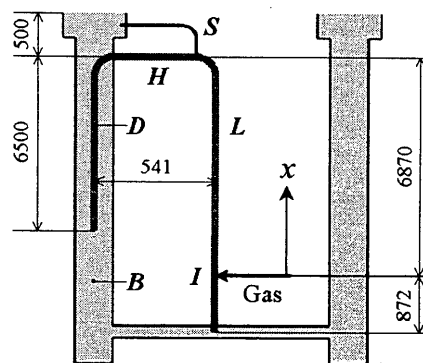


Fig. 1: Experimental setup

Tab. 1: Comparison of water velocity J_l [m/s]

	C ignored	C by Eq.(2)
$k_L = 1 \times 10^{-4}$ m/s	0.097	0.098
$k_L = 2 \times 10^{-4}$ m/s	0.074	0.076
Experiment	0.079	

(CO_2 injection rate $Q_g = 0.98 \times 10^{-5}$ kg/s)

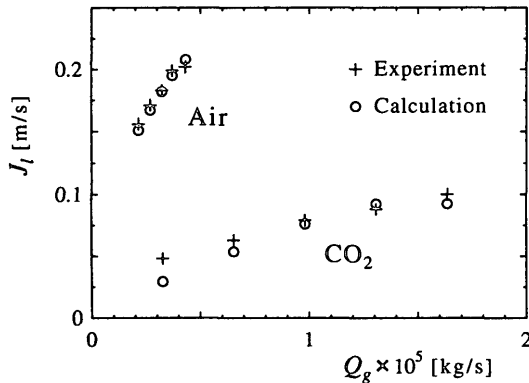


Fig. 2: Specific velocity of lifted water

設置して流速 J_l を測定した。

計算領域は上昇管(L)のみを対象とし、連続相の差分計算のために領域を x 方向に15等分した。圧力境界条件には、流入境界(Lの上端)では吹き込み口(I)下部における管摩擦、流出境界では水平管(H)および下降管(D)における摩擦とベンドによる損失を考慮し、それ以外の諸損失を省略して与えた。供給気泡は、吹込直後の観察によれば長径5mm、短径2mmの回転楕円体であるが、体積が等価な球で近似した。気泡内部の流れや圧力分布は考慮しない。温度は液相・気相とも水温(10°C)で一定とした。

図2は、ガス吹込量 Q_g と揚水速度 J_l の関係を示している。空気($k_L = 0$)の場合には計算結果と測定値との一致は良好であり、離散気泡法を用いた本計算法が妥当であることがわかる。最大吹込時に実験結果の揚水速度が低いのは、上端分岐部に空気がたまり抵抗が増したためである(そのため、これ以上の空気供給を停止した)。

CO_2 気泡ポンプの予測においては物質移動係数の影響が大きい⁽¹⁾。式(1)において、 k_L 値を実験結果^(4, 5)を参考に $k_L = 1 \sim 2 \times 10^{-4}$ m/sとした。さらに、水中での CO_2 濃度増加の影響を調べるため、 C に式(2)の結果を用いる場合と0とする場合を表1で比較する。 $k_L = 2 \times 10^{-4}$ m/sのとき揚水速度は実験結果とよく一致したことから、今後はこの k_L 値に固定する。なお、液相中の CO_2 濃度増加の影響は約2%であり、計算条件の範囲内では軽微である。

図2に示す CO_2 吹込量と揚水速度の関係は、計算結果と測定値の一致は概ね良好であるが、小流量では計算結果の方が揚水速度が大きい。幅広い条件にわたって k_L 値を再検討する必要がある。

図3にはボイド率分布、図4には CO_2 濃度分布を示す。 CO_2 気泡は、吹き込まれてから3m上昇する間にほとんど溶解してしまう。図4に見られるように、 CO_2 濃度は測定値でも $x > 3$ mでほぼ一定であるが、実験では小気

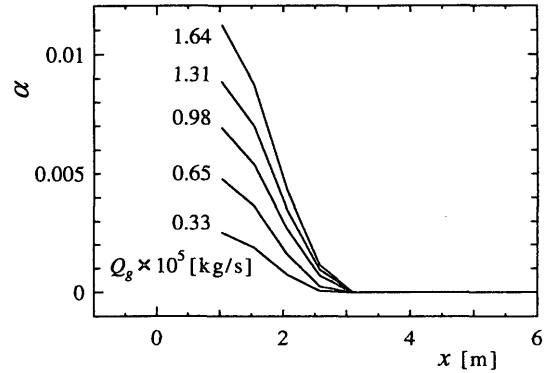


Fig. 3: Void fraction profile

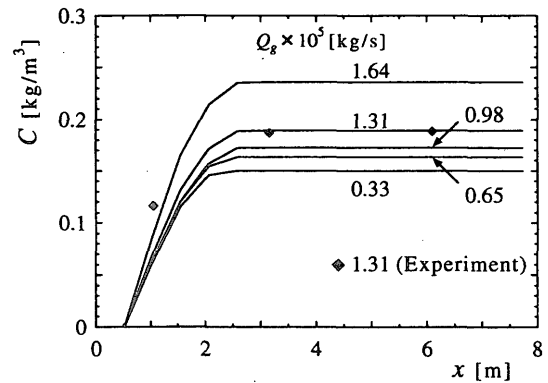


Fig. 4: CO_2 concentration in water

泡の残存が目視された。しかし、吹き込んだ CO_2 ガスの膨張と水道水に溶けていた空気の吸収を考慮すれば、気泡中の CO_2 量はわずかであると考えられる。

4. 結 言

気泡ポンプ効果を利用した二酸化炭素処理システムの設計に供する目的で、溶解性気泡流の予測法を高精度化するため、離散気泡法を用いた数値シミュレーションを試みた。 CO_2 気泡は吹込直後によく溶けるので過渡領域の扱いをさらに精緻化する必要があるため、現段階では実験結果に完全に一致する物質移動係数(k_L)を探索するのは無意味である。しかし、測定値から見積もられる k_L 値を用いたところ、揚水性能・気泡溶解性能に対しておおむね良好な一致が得られた。以上より、本計算法と物質移動モデルの妥当性が示されたものと考えられる。

文 献

- (1) Kajishima, T., Saito, T., Nagaosa, R., Kosugi, S., *Energy*, **22**-2/3 (1997) 257-262
- (2) 齋藤・梶島, 特許番号 2655818 および US Patent No.5662837 (1997)
- (3) Trapp, J.A. and Mortensen, G.A., *J. Comput. Phys.*, **107** (1993) 367-377
- (4) Saito, T., Kajishima, T., Tsuchiya, K. and Kosugi, S., *Chem. Eng. Sci.*, **54** (1999) 4945-4951
- (5) 齋藤・小杉・梶島・土屋, 資源素材学会'99秋季大会講演論文集 C (1999) 125-128
- (6) 梶島・齋藤, 機論B編 **60**-580 (1994) 4125-4131
- (7) 化学工学会(編), 化学工学便覧-改訂6版-, 丸善 (1999)