

エージェント指向による CO₂ ガスの潮流内溶解・浮上に関する研究

日大生産工(院) ○山賀雄太 日大生産工 西 恭一
日大生産工 村田 守 日大生産工 星野和義

1. 緒言

近年、地球温暖化現象が問題となっており、その現象の影響を与える割合の六割を二酸化炭素 (以下 CO₂) が占めている。CO₂を抑制する試みは数多く検討されているが、その一手法として貯留された CO₂を船舶などを利用して海洋に運び、海底方向へ伸ばしたパイプを用いて CO₂気泡 (以下 CO₂ガス) を放出、浮上とともに海中に溶解させる直接溶解・拡散方式がある。しかし、CO₂ガスを放出する深度によっては海中へ溶け込まず大気中へ逆戻りしてしまい効果が得られない恐れがあるため、実用化を進めるにあたりシミュレーションを含む事前実験が必須となってくる。現在、CO₂浮上・溶解シミュレータは海水への影響を調べるためのシミュレーションが大部分を占め、パイプから放出された CO₂単一粒子の挙動に関するシミュレーションはほとんど見られない。

実際の環境に近い条件下における CO₂単一粒子の挙動に関するシミュレータを構築するにあたり、以前の研究成果¹⁾により CO₂ガスが液化する直前の深度 500[m]からの挙動特性に関する数式は提案されている。しかし、主に深い深度で成立する条件的な式であり、簡略している部分が多く、特に浅い深度では誤差が大きいとされている。そこで本研究では簡易的ではあるが、深度 6[m]の実験水槽塔を作成し実験より算出された値と比較することにより近似的な計算が行える CO₂ガスの挙動に関する数式を検討する。

2. 実験水槽塔

2.1 水槽塔およびカメラ塔

浅い深度における CO₂ガスの挙動に関する数式を作成するための実験水槽塔は CO₂ガスを浮上・溶解させるための水槽塔と、CO₂ガスの挙動を撮影するためのビデオカメラを設置するカメラ塔の二塔から構成されている。

水槽塔は CO₂ガスの挙動が確認しやすいように材質にはアクリルを使用し、アクリル部の諸元は 300[mm]×400[mm]×6000[mm]、全長 7110[mm]である。水は上部から注水し、排水は水槽塔下部の側面に取り付けられている穴より行う形式を採っている。

カメラ塔はステップモータを用いて昇降制御を行い、CO₂ガスの浮上と溶解の様子はソニー社製のビデオカメラ HDR-HC3 を用いて撮影を行う。

2.2 解析方法

2.1 節の装置より得られる実験映像の動画のままでは解析が困難なため、1 フレーム(1/30 秒)毎のピクセル画像データへ変換し、ピクセル単位と実際の寸法との比例配分によ

り、CO₂ガスの実際の直径、深度および速度を算出する。また、溶解量は直径より算出できる CO₂ガスの体積と Benedict-Webb-Rubin の式で算出した密度の積を CO₂ガスの重量とし、同様にして算出した数秒後の CO₂ガスの重量との差を溶解量とする。

3. シミュレータに導入する簡易式

3.1 速度式

実験で観測した結果、CO₂ガスはきのご筈状や回転楕円体状に変形して浮上するということがわかる。そこで、浮上速度は CO₂ガスの長軸 a[m]を用いた実質的な投影断面積に基づいて式(1)のようにする²⁾。

このとき CO₂ガス直径を D_p[m]とした時の速度 U[m/s]は、

$$U = \sqrt{\frac{4g(\rho_c - \rho_d)D_p}{3C_D' \rho_c}} \times \frac{D_p}{a} \quad \dots(1)$$

で表わされる。ここで(ρ_c-ρ_d)[kg/m³]は海水と CO₂の密度差、g[m/s²]は重力加速度である。

また、きのご筈状や回転楕円球体状に適する抵抗係数 C_D'を推定すると、

Re<130 の場合

$$C_D' = \frac{24}{Re} (1 + 0.173 Re^{0.675}) + \frac{0.413}{(1 + 1630 Re^{-1.09})} \quad \dots(2)$$

$$Re = \frac{D_p U \rho_c}{\mu_c} \quad \dots(3)$$

となる。なお、抵抗係数 C_D'はレイノルズ数 Re に依存するが、球体積相当径 D_p[m]を用いて式(3)より算出する。

また、

Re ≥ 130 の場合

$$C_D' = 0.95 \quad \dots(4)$$

となる。

3.2 CO₂ガスの海水への溶解量

CO₂の海水に対するヘンリー一定数 H は、

$$\ln\left(\frac{H}{H_0}\right) = A\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + B \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + C\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \quad \dots(5)$$

で求められる。ここで、A, B, C はそれぞれ定数 (詳細は省略) であり、T₀は 298.15[K]、H₀は T₀における CO₂の海水に対するヘンリー一定数である。

また、二重境膜理論における気相側境膜物質移動係数を k_g、液相側境膜物質移動係数を k_l とすると、液相側総括物質移動係数 K_x は以下のように表すことができる。

Study on Agent-Oriented Simulator for Estimating Behavior of CO₂ in Current

Yuta YAMAGA, Yasukazu NISHI, Mamoru MURATA and Kazuyoshi HOSHINO

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{mk_y} + \frac{1}{k_x} \quad \left(m = \frac{H}{P} \right) \quad \dots(6)$$

さらに、物質移動流速 N_A は、液相中のモル分率を x 、気相中のモル分率と平衡な仮想的液相中のモル分率を x^* とすると、

$$N_a = K_x(x^* - x) \quad \dots(7)$$

となるが、気泡の周りを簡単な理論式で見積もると、気泡に限りなく近いところの CO_2 濃度を 100[%]、気泡よりも少しでも離れた場所は溶媒(海水)が限りなくあると考え CO_2 濃度を 0[%] とすると、 $x=0$ 、 $x^*=1$ となり、近似式(7)は $N_a=K_x$ となる。したがって、 CO_2 の海水への溶解量は、 CO_2 ガスの表面積 S 、二酸化炭素の分子量と N_a との積として計算できる。この値を CO_2 ガスの体積と密度の積より差し引くことによって直径の変化を計算する。

4. 浮上速度を考慮した gas の式

4. 1 溶解式

1章で述べたように3. 1節及び3. 2節の簡易式は深い深度において適用可能であることが判っているので、本節では、浅い深度における溶解式の再検討を行う。

3. 2節の簡易式は深度に依存しており、速度に関係なくその瞬間ごとの溶解量を表す計算式である。そこで、 CO_2 ガスの浮上しながらの溶解³⁾を考えると、

$$Sh_c(1 - \omega) = 0.651 \times \left(\frac{U \times D_p}{D_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(8)$$

$$\omega = \frac{x_A \times M_A}{\sum x_i \times M_i} \quad \dots(9)$$

ここで、 Sh_c は Sherwood 数、 D_p [m] は気泡の直径、 D_c [m/s] は気相側の拡散係数、 ω は質量分率、 x_A 、 x_i は気相(液相)のモル分率である。

式(8)を用いて物質移動流束 N_A [kg/(m² s)] を求めると、

$$N_A = \frac{Sh_c \times \rho_c \times D_c \times \omega}{D_p} \quad \dots(10)$$

ここで、 ρ_c [kg/m³] は液相側の密度である。

CO_2 の海水への溶解量は式(10)から求めた N_A と CO_2 ガスの表面積 S との積とし、この値を CO_2 ガスの体積と密度の積より差し引くことによって直径の変化を計算する。

4. 2 実験結果と溶解量比較

実験より得られる溶解量と、4. 1節で示した式を導入したシミュレータにおける溶解量との比較を行う。ここで、初期条件として水温は 25°C を用い、深度および CO_2 ガスの直径は、実験時に観測し始めた各々の値を初期値とした。なお、3. 2節で示した簡易式における溶解量の値は、すべての CO_2 ガスが 1 計算ステップで溶解する結果を得る。

実験水槽塔による実験結果を gas1, gas2, シミュレータにおける結果を simgas1, simgas2 として比較した結果を Fig.1 として示す。シミュレーション結果と比べ、実験による溶

解量は深度 4[m] から 3[m] 付近において、大きな変動がみられる。これは、2. 2節で示したように CO_2 ガスの画像データに対して手作業で値を計測しているため Fig.1 の結果となる。simgas2 は gas2 に比べ溶解量が少し下回る結果となるが、simgas1 は gas1 とほぼ一致した結果となることから、浅い深度においては 4. 1節で示した溶解式が適していることがわかる。

4. 3 深い深度での溶解量比較

以前の研究成果で深い深度は式(7)が使用に適しているということより初期条件を深度 300[m]、直径を 0.008[m] とし、式(7)を使用したシミュレータにおける結果を OLDsim、今回提案した計算式を使用した結果を NEWsim とし比較した結果を Fig.2 に示す。OLDsim は深い深度においては溶解量が多く、浮上していくとともにその値の変化がなだらかになるのに対して、NEWsim では常に一定間隔で溶解する。また、値も大きく違うことから、実際のシミュレータでは深度の変化により、計算式を変えていく必要があるということがわかる。

5. 結言

略

参考文献

- 1) 西 恭一, 田村 顕人 他, マルチエージェントによる二酸化炭素ガスの潮流内溶解浮上に関するシミュレーション, 日本計算工学会論文集 2005 年号, 論文番号 20050023, (2005)
- 2) 化学工学会編, 化学工学便覧第 6 版, 丸善株式会社, (1999), pp.138-142.
- 3) 浅野康一, 物質移動の基礎と応用~Fick の法則から多成分蒸留まで~, 丸善株式会社, (2004), pp.137-154.

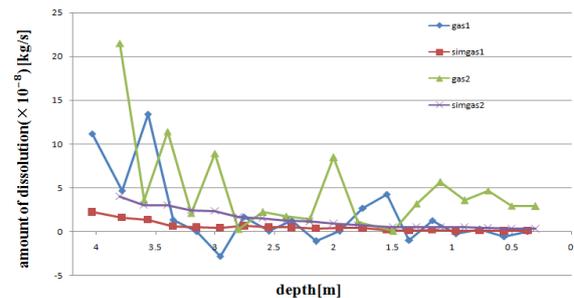


Fig.1 Comparison of Experiment and new Simulator

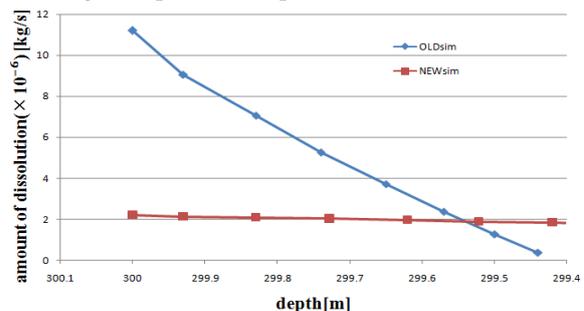


Fig.2 Simulation results of amount of dissolution with deep depth