

## 論文の内容の要旨

### Direct Numerical Simulation of High Schmidt Number Flow about a Droplet by using Moving Unstructured Mesh

#### 液滴に関する高シュミット数問題の 移動非構造格子を用いた直接数値シミュレーション

鄭 魯 澤 (ジョン ノテク)

温暖化ガスである二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の大量処理方法として海洋隔離法が考えられている。現在、海洋隔離の方法としては、深海貯留法、中層放流法、浅海溶解法の3方式に集約されている。ここでは現時点で最も経済的に現実性があり、生態系への影響が少ないと考えられている海洋中層放流法を取り上げる。中層放流法の技術的ポイントは、上昇した  $\text{LCO}_2$  が気化して大気に戻る前に完全に溶解しなくてはならない点と、隔離期間 100 年以上を確保するため  $\text{CO}_2$  が溶解した海水をある程度の深さ以下へ沈降させなくてはならない点、 $\text{CO}_2$  溶解により酸性化した海水の生態系への影響を最小限にするよう、広範囲に希釈させなくてはならない点である。

現在考えられている中層放流法のシナリオでは、火力発電所で分離・吸収された液化二酸化炭素 ( $\text{LCO}_2$ ) を 1,000m~2,000m の深さの深海に固定した、または船で曳航したノズルから放出する。この後の  $\text{CO}_2$  液滴の挙動と  $\text{CO}_2$  の海水への溶解は上記問題点を予測するために重要である。

深海における海域実験や高圧容器を用いた実験は高価であるため、CFD を用いた数値シミュレーションは有効である。そこで本研究では、上昇する  $\text{CO}_2$  液滴の界面の変形・振動を精度よく表現するため、3次元非構造格子を用いた front-tracking 法を採用し、Navier-Stokes 方程式を連続の式と共に解く。液滴付近には境界層を解像するため、薄いプリズム層を配置し、それ以外の部分には計算時間を短くするため四面体格子を生成した。変形・振動する界面の表現には spine 法を用い、ALE 法の公式化を採用した。格子の変形はプリズム層をリメッシュして対応する。

溶解  $\text{CO}_2$  の海水中での拡散係数は、海水の動粘性係数に比べ 2 桁程度小さいため、液滴界面での濃度境界層の厚さは運動量境界層のそれよりオーダーが異なるほど薄い。この高 Schmidt 数問題に対処するため、界面に隣接したプリズム層の第一層内に、さらに薄い

「Very Thin Layer」を生成し、濃度境界層の大勾配を解像した。この「Very Thin Layer」は濃度の移流・拡散方程式を解く際のみ使用され、また時間刻みが小さくなって計算時間が増大することを防ぐため、時間積分に陰解法を用いた。

本手法の妥当性を確認するため、まず一様流中の固体球からの物質移動問題を、さまざまな Reynolds 数・Schmidt 数に関して解析した。その結果、溶解を無次元化した Sherwood 数は、過去の実験式と良い一致となった。また渦放出と濃度境界層の相互作用により、溶解速度が変化することを示した。

次に上昇する液滴からの物質移動に本手法を応用した。この現象を記述する無次元数は、Schmidt 数、上昇速度ベースの Reynolds 数、界面張力と重力の比である Etovos 数、界面張力と粘性力の比である Ohnesorge 数、上昇速度を主に決定する分散層と連続層の密度比、さらに分散層と連続層の粘性係数比である。この内、Ohnesorge 数、密度比、粘性係数比を変化させて、抵抗係数や溶解速度に関して調べ、液滴界面に変形・振動がある場合、抵抗係数や溶解速度に大きく影響することを確認した。またそのメカニズムについて、液滴界面の変形・振動、渦形成や渦放出、濃度境界層の関係に関して議論した。

また液滴が上昇しながら溶解し、徐々に径が小さくなるシミュレーションを行った。但し計算中では液滴サイズは変化させず、小さくなる効果を、与える無次元数を変化させることで表現した。これにより液滴が溶解しながら上昇していく様子を再現することが可能になった。

さらに低濃度の汚染の影響について数値計算によって調べた。汚染は界面の一部を界面活性剤が覆うという現象となり、計算中では、液滴に緯度にして 5~15 度の stagnation cap を施すことにより表現した。その結果、この程度の汚染では抵抗係数や溶解速度はあまり影響されないことがわかった。

本計算法によれば、液滴の種類・サイズ等に対し、抵抗係数と溶解速度のデータベースを作成することが可能となる。このようなデータベースができると、液滴スケールのシミュレーションと共に階層モデルを形成する局所海洋スケールのシミュレーションに対し、サブモデルを提供することができる。これにより、将来的に CO<sub>2</sub> の深海中の挙動をさらに精度良く再現することができ、隔離期間や生物影響のより高精度の予測が可能となる。