

カーボンリサイクルに貢献するファインバブル溶解特性 評価システムの開発

鹿児島大学 理工学研究科(工学系)工学専攻化学工学プログラム

五島 崇

1. はじめに

世界的な脱炭素化の動向を受け、地球温暖化の主な原因である CO₂ の排出量を減らすことが最重要課題の一つとなっている。国内では、CO₂ を資源ととらえて素材や燃料に再利用する研究開発をイノベーションにより取り組むという、経済産業省が提唱する「カーボンリサイクル」が積極的に進められている。

近年、微細な気泡であるファインバブル(Fine bubble, FB)は日本が主導して世界に普及しつつある国産の次世代技術であり、関心が集まっている。FB はサイズにより 1~100 μm のマイクロバブル(Micro bubble, MB)と 1 μm 未満のウルトラファインバブル(Ultrafine bubble, UFB)に分類される。カーボンリサイクルの観点からも FB 技術の利用が始まっており、例えば、コンクリート構造物の長期寿命化、微細藻類の生育促進、およびナノ粒子の高選択的合成を図る方法として、CO₂-FB の高い溶解能を用いた研究開発が取り組まれている。申請者らもこれまでに、魚類養殖業に多大な被害をもたらす赤潮プランクトンに対して、CO₂-FB を用いることで赤潮防除剤の防除効果を飛躍的に高める方法を見出し、実用化に向けたスケールアップ技術の開発を図っている。FB が液中に存在することで様々な効果をもたらすことが期待されるが、開発の鍵は「その効果を最大限に引き出せる FB 発生器の開発」である。FB 発生器から生成する FB は、気泡の微細化によって気泡界面から液中への物質移動が促進される。もし気泡生成直後から気泡の溶解収縮挙動を追跡した定量的な解析が実現できれば、FB の物質移動速度の緻密な制御により、プロセスの高効率化とコンパクト化が期待される。

最近、申請者らは外部からの液流れを用いずに生成気泡の微細化とサイズ制御を可能とする FB 発生器を発明した。また、本発生器を用いて浮上する CO₂-FB の溶解収縮挙動を実験的に調べ、理論モデルを用いた数値解析を実施した¹⁾。空気飽和水中の CO₂ 気泡は初期に急速な溶解収縮を生じるが、溶存する窒素と酸素が気泡内へ拡散し、MB の主成分が窒素と酸素となった(図 1)。また、実験値と計算値との相関性が低いこと(図 2 領域(B))

から、初期気泡径の減少に伴い気泡周囲に形成される溶解気体の過飽和域が物質移動の抵抗となると推察される結果が得られた。したがって、気泡周囲の局所的な気体拡散を考慮することに加えて、溶解収縮により生成される CO₂-UFB のサイズや寿命についても評価が可能な修正理論モデルの構築が必要となる。

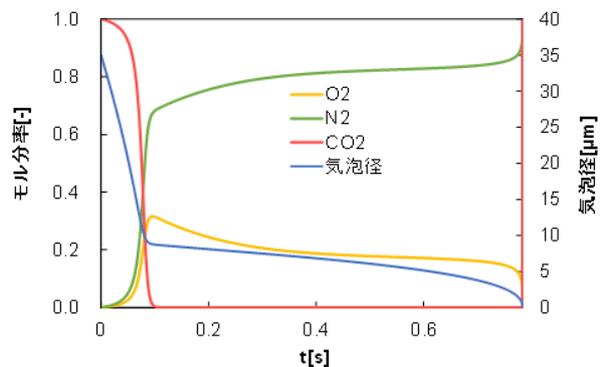


図 1 CO₂-FB 内ガス組成の経時変化

そこで本研究では、ガス組成($\text{CO}_2/(\text{O}_2+\text{N}_2)$ 比)と液組成(純水+添加物(塩))の異なる条件において CO_2 -FB の溶解収縮実験を行い、 CO_2 -FB 発生直後からの溶解特性を評価して溶解メカニズムを明らかにすることを目的とする。

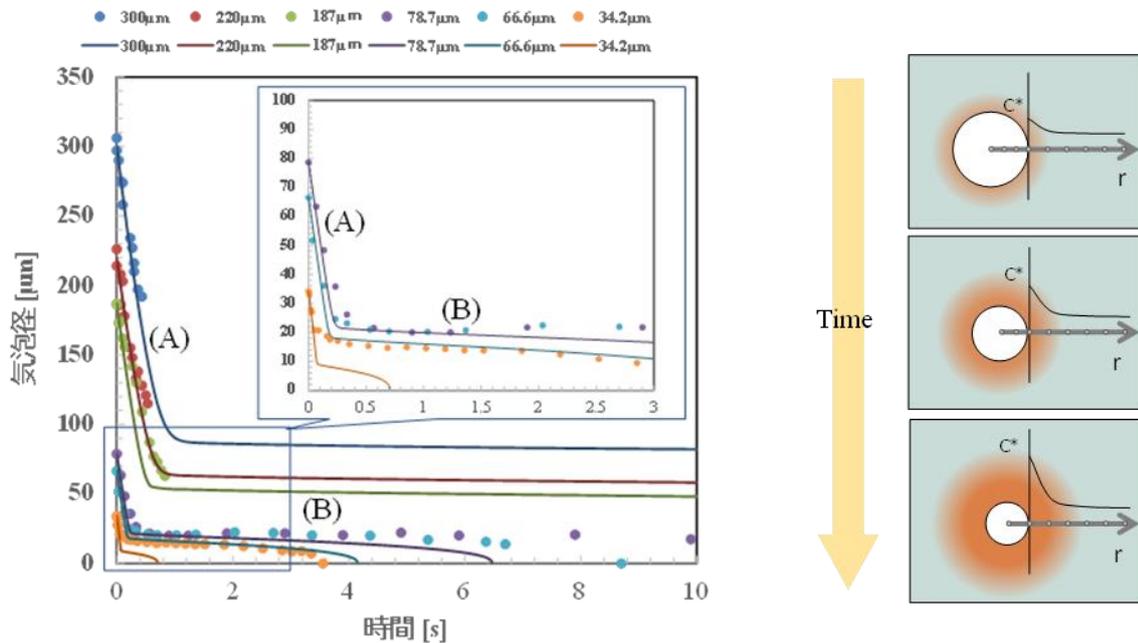


図 2 空気飽和水中での CO_2 気泡の収縮挙動(プロット：実験値、実線：計算値)

2. 気泡溶解収縮モデルの提案

気泡の溶解挙動を計算方法として、岩切ら(2017)により提案された理論モデル²⁾を用いてきた。Ranz-Marshall の式から得られる液側物質移動係数 k_L とヤングラプラスの式から得られる気泡界面濃度 C^* に基づき気泡界面からバルク液中への物質移動速度を算出するため気泡周囲に形成される溶解気体の過飽和域が物質移動過程に考慮されていない。そこで本研究では、気泡表面から半無限液体中へ気体が拡散する 1 次元非定常拡散モデルを連成した修正モデルを提案した。

3. 実験方法

図 3 に、使用する装置の概略図を示す。透明アクリル樹脂製装置の底部に発明した FB 発生器を設置した。計上予定の気泡発生用ノズルを用いて本発生器の気泡微細化能を高める。液を充填した装置内に気泡を発生し、装置側面からズームレンズ付き高速度ビデオカメラを用いて気泡収縮の様子を撮影した。気体として、空気、酸素、窒素、二酸化炭素およびこれらの混合気体を用いた。液体として、空気飽和水、二酸化炭素飽和水、脱気水、およびこれらに添加剤として塩を溶解した水溶液を用いた。画像解析ソフト (Dia.Image2020 西華デジタルイメージ(株)製) を用いて MB の気泡収縮挙動を分析した。提案する修正理論モデルを用いて数値解析を実施し、実験値と理論値を比較することで気泡の溶解特性を調べた。

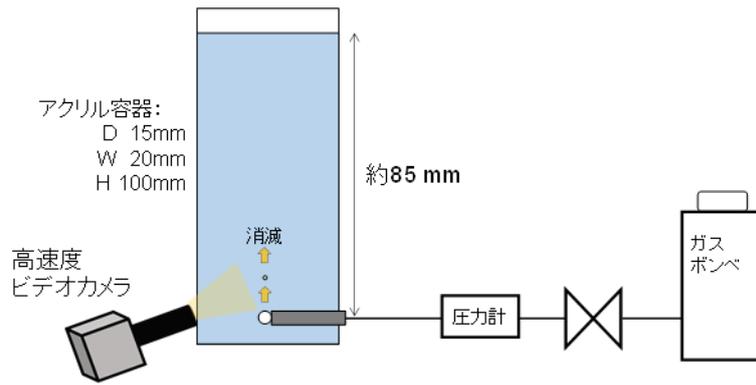


図3 実験装置の概略図

4. 実験結果および考察

図4に、液体としてCO₂飽和水中におけるCO₂-FBの溶解収縮過程の計算結果を示す。岩切ら(2017)が提案する従来モデルに関して初期気泡径によらずFBの気泡径は指数関数的に減少し、気泡径40 μ mでも1s未満で溶解してしまう。一方で、本研究で提案する修正モデルでは、初期気泡径28 μ m程度以下では気泡の溶解が進行するのだがその溶解速度は従来モデルに対して低下し、気泡径20 μ mの場合でも溶解には2s程度を要した。また、初期気泡径が28 μ m程度を超えると気泡は徐々に膨張する傾向が得られ、気泡が溶解するか膨張するかを決める気泡径の閾値が存在することが分かった。図5に、初期気泡径が約38 μ mのCO₂-FBについて得られた実験結果を示す。溶解初期は急速な収縮過程を生じたが、気泡径が25~30 μ mの範囲で収縮速度が大きく低下し、その後は収縮もしくは膨張が生じた。本傾向は修正モデルから得られた傾向と良好な一致を示した。したがって、CO₂-FBでは気泡周囲に形成される過飽和域が拡散抵抗となり、過飽和域内気体の拡散方向に依存して収縮もしくは膨張が生じることが明らかとなった。

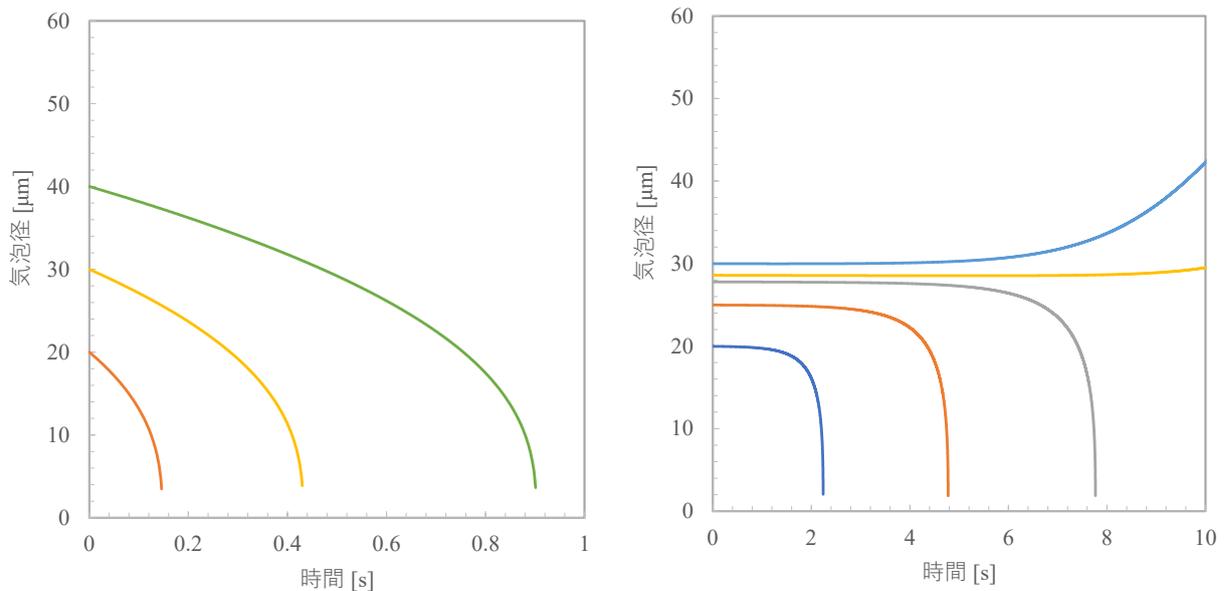


図4 CO₂飽和水中でのCO₂気泡の収縮挙動(左：従来モデル、右：修正モデル)

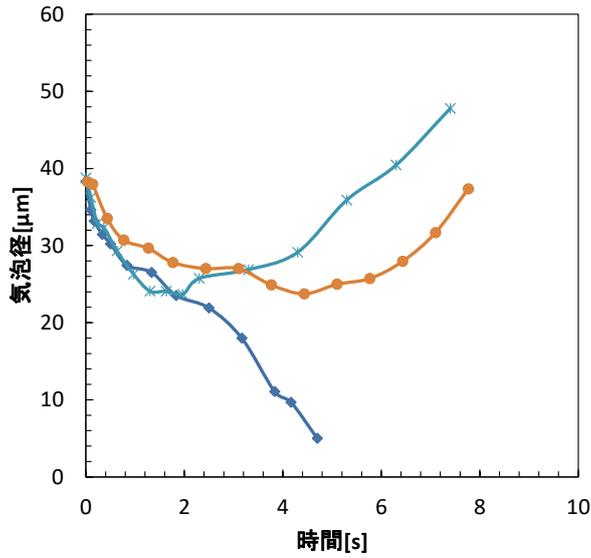


図5 CO₂飽和水中でのCO₂気泡の収縮挙動(実験値)

図6に、図2で示した空気飽和水中におけるCO₂-FBの溶解収縮過程について従来モデルと修正モデルから得られた計算値および実験値を示す。従来モデルは実験結果を過少評価しているのに対して、修正モデルでは実験結果と良好な一致が見られた。修正モデルを用いると気泡収縮に伴い気泡周囲に形成される拡散抵抗を定量的に解析できることがわかった。

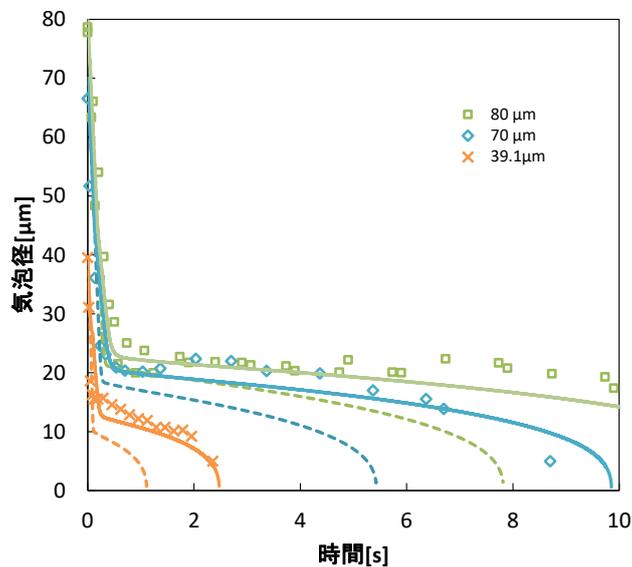


図6 空気飽和水中でのCO₂気泡の収縮挙動
(プロット：実験値、実線：計算値(点線：従来モデル、実線：修正モデル))

図7に、CO₂飽和水中におけるN₂の膨張過程について従来モデルと修正モデルから得られた計算値と実験値を示す。従来モデルは実験結果を過少評価し、かつ時間の経過とともに最終的に再溶解して収縮するのに対して、修正モデルでは気泡径は時間とともに単調

に増加して実験結果と良好な一致が見られた。修正モデルは FB の溶解過程から膨張過程まで気泡の広範な動態を予測できることが示された。

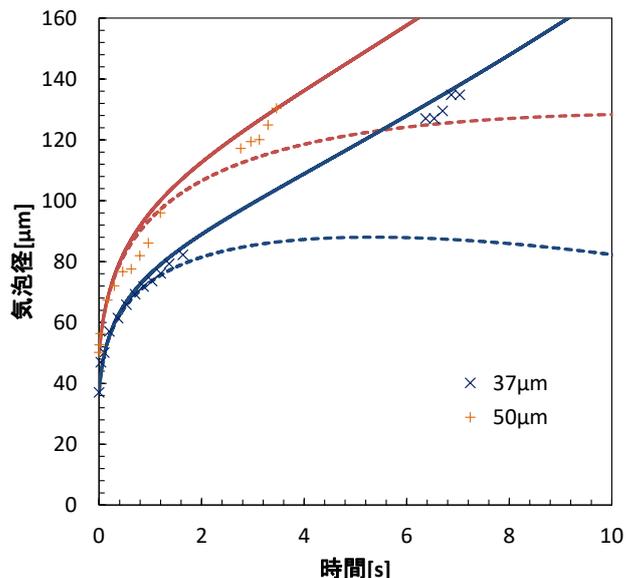


図7 CO₂飽和水中での N₂ 気泡の膨張挙動
(プロット：実験値、実線：計算値(点線：従来モデル、実線：修正モデル))

そこで、図8に、空気飽和した3%塩水中におけるCO₂-FBの溶解収縮挙動について得られた実験結果を示す。初期気泡径によらず溶解初期には急速な収縮過程を生じたが、空気飽和水に比べてその収縮速度は低下した。Kawaharaら(2009)は水道水および3%海水中でのMBの溶解特性を実験的に検証し、液側物質移動係数 K_L を推定しており、海水の K_L は水道水に比べて10分の1程度まで減少することを報告しており³⁾、同様の傾向が得られたと言える。一方で、彼らは容器内に発生させたFB群に関する物質移動特性の評価であるため、今後本研究で得られた単一FBの溶解収縮特性を提案する修正モデルを用いて解析を進めることで、原料ガスや液の組成が極めて複雑な実用系においてもFBの溶解収縮挙動を予測できる高度な溶解特性評価システムの開発が実現できるだろう。

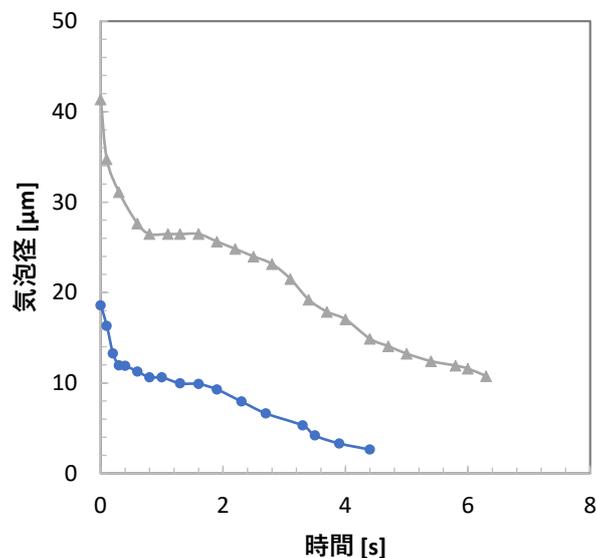


図8 空気飽和した3%塩水中におけるCO₂-FBの溶解収縮挙動(実験値)

5. まとめ

本研究では、カーボンリサイクルに貢献するファインバブル溶解特性評価システムの開発を目的として、ファインバブルの溶解収縮過程を解析して予測できる新たな計算モデルを提案した。実験を通じて、提案した計算モデルが高い定量性を有しており、原料ガスや液の組成が極めて複雑な実用系においても気泡の溶解収縮挙動の予測を実現可能であることを示唆する結果が得られた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 五島崇ら：ファインバブル発生技術の開発と気体溶解特性の評価，化学工学会第 53 回秋季大会, AB201, (2022)
- 2) 岩切扶樹ら：水中を収縮しつつ浮上する単一マイクロバブルからの物質移動，混相流, 30(5), 529-535 (2017)
- 3) Kawahara, A., et al. : Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 883-893 (2009)