溶解拡散型CO₂海洋隔離における希釈放流技術に関する 基礎研究（その2）

正員 尾崎 雅彦*   正員 南浦 純一*
          北島 良則*   正員 溝上 宗二*
          竹内 和久*   正員 畠中 勝則**

Technical Feasibility of CO₂ Injection and Dilution into Ocean Depths
 for Dissolution Type of Ocean Sequestration of CO₂ (second report)

by Masahiko Ozaki, *Member*   Junichi Minamiura, *Member*
 Yoshinori Kitajima   Shuji Mizokami, *Member*
 Kazuhisa Takeuchi   Katsunori Hatakenaka, *Member*

Summary

Ocean sequestration of the captured CO₂ from fossil fuel burning is a possible option to mitigate the increase of CO₂ concentration in the atmosphere. Moving ship type of CO₂ ocean sequestration is treated in this study. That is, liquefied CO₂ is delivered by ship to the site and injected into ocean depths of 1,000 to 2,500m with a suspended and towed pipe by a slowly moving ship. In addition to the horizontal movement of releasing point, use of the rising journey of CO₂ droplets till they disappear by dissolution is effective for the dilution of CO₂ in seawater. The distance between the released depth of CO₂ and the disappearing depth depends on the initial size of droplets, the dissolution rate and the rising velocity. The possibility of generating relatively large size of droplets from moving nozzle was investigated in the previous report. In this report, the terminal velocity of CO₂ droplet under the deep-sea circumstances is measured in a large high-pressure tank, considering the influence of the hydrate film on droplet and the possible deformation when its size is relatively large. And the rising and dissolving behavior of CO₂ droplet is calculated to estimate the rising journey of CO₂ droplets in the scenario of the moving ship type of CO₂ ocean sequestration.

1. 緒 言

大気中へのCO₂排出抑制の一方策として、燃焼排ガスから分離回収したCO₂を海洋へ送り込み長期にわたって大気から隔離する構想が国内外で検討されている^{1), 2), 3)}。本研究では、溶解拡散型のCO₂海洋隔離として、海洋の自然の混合に委ねる前に人為的に一定以上の希釈度を確保する技術的方策；航走船舶（Moving ship）による中層希釈放流方式

（Fig. 1）を提案している。前報⁴⁾では、放出したCO₂を短時間のうちに周辺海水に溶かし込んでCO₂濃度の不均一を解消する「急速溶解による希釈」と、CO₂液滴をある程度大きく生成させ液滴が溶けきるまでの浮上距離を鉛直方向の希釈に利用する「低速溶解による希釈」の二通りの考え方があることを示した。両者のどちらが影響の少なさや復元の可能性で優位であるかは現時点で明らかでないが、技術的な見通しを得るために、特に「低速溶解による希釈」で必要となるCO₂液滴の初期挙動に関する基礎研究を行った。

曳航パイプの下端部近傍に設けられる多数の小孔あるいはノズルから液化CO₂を放流する場合、ノズル出口において周囲流体によってCO₂液滴は形成途中で引きちぎられ、さらにパイプ背後に生じられる渦流によって分裂して、微細化することが、模擬流体を用いた曳航水槽実験により判明した。そこで、各ノズルを渦流の影響のないところに配置するとともに、軸線が曳航方向に沿う流線形の水平曳航体とし、

* 三菱重工業（株）長崎研究所、RITE 長崎分室

** 三菱エンジニアリング（株）

Fig.1 Conceptual view of CO₂ dispersion in ocean depths by moving ship

放出速度を調整して後ろ向きに放流することによって、現実的な曳航速度（4～5 ノット）の下で一定以上（直径10mm以上）の液滴形成が可能であるとの見通しを得た。

本報では、深海の低温・高圧状態を再現した大型高压容器内の海水中に、液化CO₂を放出する実験を行い、液滴の浮上形態の観察、ならびに上昇速度データの取得を行う。また、そのデータにもとづき、上昇しながら周囲の海水に溶けていく液滴の挙動をシミュレーション計算で予測し、実機想定での100 リットル毎秒の規模の放流においても高い初期希釈率が得られることを示す。

2. 大型高压容器内 CO₂ 放出実験

2.1 必要性

深度1,000～2,500m程度の深海の海水中に液化CO₂を送り込む希釈放流方式において、放流点周辺域の環境影響予測を行うために、放流後のCO₂の分散・浮上・溶解・拡散をとまなう挙動を推定する必要がある。この予測のためには、初期条件となる放流直後のCO₂液滴の状態を明確にする必要があるが、液滴状態は周辺海水の条件やCO₂放出条件により変わるので、できるだけ現実に近い条件の下でデータを蓄積するよう、次の点に留意が必要である。

- 1) CO₂は常温・常圧下において気体であり、低温にするだけでは気相から固相へ移るだけである。深海の高圧下における液滴としての挙動を直接調べるためには、高圧実験装置を導入するか実際に深海の場で実験を行う必要がある。
- 2) 深海の温度・圧力条件下では、海水とCO₂の界面にハイドレート膜（固体の薄膜）が生成されるので、特有な現象として考慮に入れる必要がある。ハイドレートの物性データは整備されはじめたばかりである。

- 3) 基礎データの収集には、実験条件の設定が容易でかつ再現できることが望まれる。

以上を勘案し、深海の低温・高圧状態を再現した大型高压容器内の海水中に液化CO₂を放出する実験を実施してCO₂の浮上挙動を観察し、上昇速度に関するデータを取得する。

2.2 実験装置

実験は、大型高压容器内に、CO₂容器および放出装置、ならびに計測装置を入れて、低温海水充填後、所定の圧力まで加圧し、遠隔操作でCO₂放出を行って観察と計測を行う。実験のシステム全体の概念図をFig.2に、装置の設置状況の写真をFig.3にそれぞれ示す。

2.2.1 大型高压容器

実験に利用した大型高压容器は、米国テキサス州サンアントニオ市の研究機関 Southwest Research Institute (SwRI) が保有するものの一つで、以下のような仕様である。

- ・ 縦型円筒圧力容器
- ・ 上蓋着脱式
- ・ 内径 2,280mm、深さ 5,840mm
- ・ 容積約 23m³
- ・ 耐圧 28MPa（深度 2,700m に相当）

2.2.2 CO₂ 容器

CO₂容器はFig.4のような、低温用ゴム製の袋状隔膜（ブラダ）をステンレス製の外殻の内側に装着したもので、準備段階のCO₂充填時の内圧（6.5MPa）に耐え、大型高压容器の加圧時には均圧弁が開いて袋状隔膜の内外圧が均衡するようになっている。充填可能なCO₂は5.1kgであるが、実験時の使用可能量は約3.5kgである。

Fig.2 Arrangement of test apparatus in high pressure vessel

Fig.3 Setting of test apparatus in high pressure vessel

Fig.4 Container of liquid CO₂

2. 2. 3 放出装置

CO₂ 容器内の液化 CO₂ を遠隔操作によって流量を制御しながら放出する装置は、開閉用ボールバルブ、同作動用モータ、定流量ポンプ、ノズル装置および配管・制御系から構成される。定流量ポンプはギアポンプであり、回転数を操作することによって 0~10cc/sec の範囲で流量を制御することができる。ノズル装置は直径 60mm の CO₂ 放出管に 90 度間隔で放射状に 4 個のノズル (内径 3~15mm) を設け、遠隔操作で CO₂ 放出管を回転させてノズル変更を行うことが可能である。放出管・ノズルともにステンレス製である。

2. 2. 4 観察・計測装置

CO₂ 液滴の挙動を観察するために、放出ノズル近傍ならびに約 2,400mm 上方を水中カメラで撮影した。無色透明の CO₂ 液滴を可視化するため、アルミ平板をカメラの対向位置に設置するとともに、水中ランプ (光量調節可能) を被写体の横から照らすように配置した。

上昇時に必ずしも真上に浮上するとは限らない液滴の大きさを、カメラ映像から正確に測定することは難しいと考えられる。そこで、放出ノズルの約 300mm 上方にレーザ式粒径

計測装置を設置した。本装置は工業用に市販されているものを応用したものである。本来の機能としては、回転ミラーとコリメータレンズを使って、レーザビームを同一平面内で平行、高速かつ一定速度でスキャンする。ビームは受光レンズで集光され、受光素子で電気信号に変換される。その強度は投光器と受光器の間に物体が存在しないときに最大で一定である。スキャン域内に不透明な物体があるとビームが遮られ、ある時間、強度が低下するので、その時間間隔により外径を算出する、というものである。本実験の対象は無色透明物体であり、屈折率の違いによって、ビームが物体の端部を通過する時のみ強度が低下するので、スキャンした波形の変化を解析して外径を算出するように機能追加を行った。ガラス玉を対象にした事前性能試験で誤差は 0.1mm 以下であることが確認されている。スキャン方向を水平にし、サンプリング時間間隔を 0.01 秒に設定した。10cm/sec で上昇する直径 10mm の液滴は約 10 回スキャンされることになるので、液滴の赤道部の値 (水平方向直径) をとらえることが可能であると考えられる。

以上のほか、大型高压容器に付属している圧力センサで容器内圧力を、熱電対 4 基で海水温度の鉛直分布をモニタした。

2. 2. 5 低温海水

大型高压容器内の海水は、化学的に厳密なものではない。塩分濃度 3~3.5%、水温 2~5 度 C を目標とし、水道水をベースに、密度を調整するための塩と、温度を調整するための氷を混ぜ、攪拌・濾過を行ったものである。実験に供する前に比重瓶で密度計測を行った。

2. 3 実験

2. 3. 1 実験の種類・条件

実験は平成 10 年 (1998 年) 12 月に、下記の順で行われた。

- ・常温高压海水中 CO₂ 液滴連続放出実験
- ・低温高压海水中 CO₂ 液滴連続放出実験
- ・低温高压海水中 CO₂ 液滴単体放出実験

実験時の大型高压容器内海水の温度・密度（大気圧下）および圧力条件は、Table 1 に示すとおりである。

Table 1 実験条件

	水 圧	水 温	密度(大気圧下)
常温高压海水中 CO ₂ 液滴連続放出	10MPa	17.2°C	1.028
	15 MPa		
低温高压海水中 CO ₂ 液滴連続放出	10 MPa	3.9°C	1.031
	15 MPa		
	20 MPa		
低温高压海水中 CO ₂ 液滴単体放出	10 MPa	2.2°C	1.026
	15 MPa	2.2°C	
	20 MPa	1.7°C	
	15 MPa	5.0°C	
	20 MPa	5.0°C	

2. 3. 2 放出される CO₂ 液滴の挙動観察結果

(1) 常温高压海水中 CO₂ 液滴連続放出実験

ハイドレート生成のために必要な温度条件は約 10 度 C 以下である。したがって常温における放出実験は、ハイドレート生成に起因する装置の不具合の可能性を除外しての、装置作動確認を兼ねたものである。CO₂ の放出流量が 10cc/sec 以下と小さいために、液滴はすべてノズル先端から間欠的に分離して浮上した。予想のとおり、放出された CO₂ 液滴にハイドレート膜は生成しない。浮上時の液滴には周期的変形や上昇経路の蛇行が見られる。断続的に形成される液滴の大きさはほぼ一定であるが、液滴同士の上下間隔は均一でなく、2 個ごとに組になって近づいたり離れたりしながら浮上していくようであった。液化 CO₂ の密度は温度・圧力に対する依存度が高く、常温では海水と CO₂ の密度差が低温の時よりも大きくて余剰浮力が大きいため、液滴上昇速度は後述する実験の時よりも大きかった。

(2) 低温高压海水中 CO₂ 液滴連続放出実験

低温になると液滴にはハイドレート膜が生成した。ただし、ノズルから分離した直後では、ハイドレート膜が生成する場合と生成しない場合とが混在して見られた。しかしノズルから 2.4m 上方のカメラの映像ではすべての液滴がハイドレート膜で覆われていた。実験の時間経過とともにノズルはハイドレートで閉塞する傾向にあり、内径が小さいほど短時間で使用不能となった。最も内径の大きなノズルでは、ハイドレートがノズル開口部を中央付近で二分するように生成した場合があり、並行して二つの液滴が成長しほぼ同時にノズルから分離して浮上した。その二つの液滴は接触しても一つに結合することは稀であり、ハイドレート膜の影響と思われる。

(3) 低温海水中 CO₂ 液滴単体放出実験

1~2 分間に一つの液滴を放出することにより、液滴同士の流体力学的干渉を排除した単一液滴の浮上挙動を調査した。直径 2~23mm の範囲の液滴が単体で上昇するデータが得られた。液滴にはハイドレート膜が生成している。液滴が大

きいと形状が扁平になり、上半分の方がよりつぶれた上下非対称になるが、実験の範囲内では周期的な変形や上昇経路の蛇行はほとんど見られなかった。

2. 3. 3 CO₂ 液滴の大きさと浮上速度の解析

深海の温度・圧力条件を模擬した海水中で CO₂ 液滴が単体で浮上する時の、大きさと上昇速度の関係を求める。上述したように大きい液滴は扁平になるため、レーザ式粒径計測装置で得られる赤道付近の直径を真球の直径とみなすと、液滴の体積を過大に評価してしまう。しかしながらレーザ式粒径計測装置による計測だけでは、液滴の上端・下端付近の測定精度が悪く、また鉛直方向のスキャンが液滴の浮上に依存するという問題がある。そこで以下の手順で解析を行う。

1) CO₂ 液滴の水平方向直径の評価

液滴の水平方向直径 d_h をレーザ式粒径計測装置による計測結果から求める。

2) 液滴形状の把握と鉛直方向直径の算出

ノズルから 2.4m 上方で得られたカメラ映像から液滴形状を把握する。液滴が画面のほぼ中央に来た時の映像をパソコンに取り込み、輝度の閾値を調整して二値化することにより、液滴の輪郭を求める (Fig. 5)。液滴の上昇経路とカメラの前後距離が必ずしも一定でないので、1) で求めた水平方向直径を基準にして大きさの定量化を行う。液滴を上側と下側で曲率の異なるだ円球によりモデル化し、鉛直方向直径 d_v を算定する。

3) 液滴の体積と等価直径の算出

液滴が軸対称であるとみなし、鉛直軸まわりの積分を行って、断面形状から液滴の体積を算出する。この体積と同じ体積を有する真球の直径を求め、これを等価直径 d_{eq} と称することにしてデータ整理に用いる。

4) 浮上速度の評価

液滴が、放出ノズル近傍の水中カメラの画面中央を通過してから、2.4m 上方の水中カメラの画面中央を通過するまでの時間を求め、上昇時の平均速度を算出して浮上速度 u として評価する。双方の撮影画像には 1/100 秒単位の時刻が同期して写し込まれている。

解析結果の例を Fig. 6, 7 に示す。Fig. 6 は、ゲージ圧 20MPa、水温 5.0 度 C の条件で得られた等価直径と浮上速度の関係を示すものである。図中、○は実験結果であり、実線は次式で評価される剛体球の終末速度 u_{rigid} である。

Fig.5 Analysis of picture of CO₂ droplet

$$u_{r,eq} = \{4d_{eq}(\rho_w - \rho_{CO_2})g/3C_D\rho_w\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで ρ_w 、 ρ_{CO_2} はそれぞれ周囲海水密度、液化 CO₂ 密度であり、 g は重力加速度、 C_D は球の抵抗係数で以下のように与えられる。

$$C_D = 24(1 + 0.125R_e^{0.72})/R_e \quad R_e < 1,000 \quad (2)$$

$$= (0.55 + 48/R_e^{1/2})^2 \quad R_e > 1,000 \quad (3)$$

R_e は、レイノルズ数であり、 $u_{r,eq} d_{eq}/\nu$ で定義した。 ν は海水の動粘度である。 ρ_w 、 ρ_{CO_2} および ν は圧力・温度に依存する。海水については大気圧で測定した密度から塩分濃度を算出し、いわゆる状態方程式を用いて高圧下の密度に換算した。 ρ_{CO_2} および ν はハンドブック³⁾記載の物性値を内挿して求めた。

また、Fig. 7 は同じ条件における液滴の扁平度 ($=d_v/d_h$) の結果である。等価直径が 8~9mm 以下では、液滴はほぼ真球であり、浮上速度は剛体球に関する従来知見で求められる計算値と良く一致している。しかし液滴が大きくなると、液滴がしだいに扁平していく。剛体球で予想されるよりも浮上速度は有意に小さくなり、等価直径が 15mm 以上では、ばらつきはあるもののほぼ一定値になって、浮上速度が液滴の大きさにあまり依存しない傾向が見られる。

2. 3. 4 深海環境下の単一 CO₂ 液滴の抵抗係数

流体中を浮上する物体の終末速度は、物体に作用する余剰浮力が周辺流体から受ける抵抗力と平衡する条件で推定される。剛体球の終末速度あるいはその推定に無次元値として与えられる抵抗係数については、古くから実験が行われ、(1)~(3) 式のような推定式が広く知られている。しかしながら、直径が比較的大きな液滴の場合には、抵抗力による変形や摩擦に伴う内部流動の影響を受ける可能性がある。これらについても数値解析によって算定する手法の開発が進められている⁶⁾が、低温・高圧下の液化 CO₂ のように、液滴表面にハイドレート膜が生成する場合の影響は未知である。

前述したように、本研究では、実際の深海環境を想定した温度・圧力・塩分濃度の条件の下で、直径 2~23mm の液滴を単体で放出し、浮上速度を直接測定した。その結果にもとづき、本問題で用いるべき抵抗係数を求めなおした結果が Fig. 8 である。すなわち、抵抗係数 C_{DCO_2} は、実験で得られた等価直径 d_{eq} 、浮上速度 u および海水と CO₂ の密度 ρ_w 、 ρ_{CO_2} を用いて次式で求められる。

$$C_D = \{4/3 \times \pi \times (d_{eq}/2)^3 \times g \times (\rho_w - \rho_{CO_2})\} / \{1/2 \times \rho_w \times \pi \times (d_{eq}/2)^2 \times u^2\} \quad (4)$$

Fig. 8 は横軸にレイノルズ数、縦軸に抵抗係数をとって、温度 2.2~5.0 度 C、ゲージ圧力 10~20MPa の範囲で得られた結果をすべてプロットしてある。条件の違いによる実験結果の差は、同一条件において生じているばらつきのほぼ範囲内であることがわかる。レイノルズ数が概ね 500 以下では、剛体球で用いられてきた従来の抵抗係数曲線 (図中破線) とほぼ一致してレイノルズ数の増加にともなって単調減少しているが、500 以上で抵抗係数が増加に転じている。

そこで、(2)(3) 式に変えて、新たな抵抗係数曲線 (図中実線) を次式のように提案する。ただし $Re < 1,500$ で適用される。

$$C_{DCO_2} = 24(1 + 0.125R_e^{0.75})/R_e + R_e^3/2.2 \times 10^9 \quad (5)$$

3. CO₂ 液滴の浮上・溶解挙動シミュレーション

3. 1 シミュレーション計算手法

航走船舶による CO₂ 中層放流方式において、放流された CO₂ 液滴が周囲の海水に溶解しながら浮上していく挙動をシミュレーション計算手法⁷⁾を用いて推定する。

液滴からの溶解速度は、

$$d(\rho_{CO_2}V)/dt = -kA(C_0 - C_\infty) \quad (6)$$

で表すことができ、ここで ρ_{CO_2} は CO₂ の密度、 V 、 A は液滴

Fig.6 Correlation between terminal velocity and droplet size of CO₂

Fig.7 Correlation between flatness and droplet size of CO₂

Fig.8 Modification of drag coefficient for CO₂ droplet

の体積と表面積、 C_0 、 C_∞ は液滴表面と無限遠方のCO₂濃度、 k は質量移動係数である。

ハイドレート膜で覆われたCO₂液滴表面のCO₂濃度 C_0 は、Hiraiら⁷⁾によって実験的に得られており、無限遠方のCO₂濃度 C_∞ はほぼゼロに近い。質量移動係数はシャーウッド数 S_h の定義で以下のように用いられている。ただし d_{eq} は液滴直径、 D は拡散係数である。

$$S_h = kd_{eq}/D \quad (7)$$

ここで、高圧下でのCO₂-水系の拡散係数は、ウィルケ・チャンの式で求められる⁸⁾。シュミット数 $S_c = \nu/D$ を用いる(ただし ν は動粘度)と、高シュミット数領域において

$$S_h = 1 + 0.752 R_e^{0.472} S_c^{1/3} \quad (8)$$

が近似的に成立する⁹⁾ので、(7)(8)式を等置すると、新たな抵抗係数を用いて浮上速度が(1)式で与えられれば、レイノルズ数 R_e が定まり、 k が求まることになる。抵抗係数はレイノルズ数の関数なので、厳密には繰り返し収束計算が必要であるが、シミュレーション手法として時刻歴計算を行うときに、1ステップ前のレイノルズ数を参照することで現実的な問題はない。なお(8)式は球体を対象として得られている式であり、変形の影響は考慮されていない。陸上実験設備では長い揚程を確保できないので変形による質量移動係数の修正の必要性については実験的な確認が難しいと思われるが今後の課題としたい。

3.2 計算結果・考察

計算例として、海水およびCO₂液滴の温度は深度によらず5度Cとし、初期の等価直径が20mmのCO₂液滴を、深度2,000mで放流した場合のシミュレーション計算の結果をFig. 9に示す。横軸は放流してからの経過時間(秒)であり、液滴の位置(深度)、浮上速度、等価直径、ならびに1m浮上する間の溶解量について時間変遷を示している。抵抗係数としては実験にもとづき新たに得られた(5)式を用いている

が、参考のために剛体球を仮定した(2)(3)式を用いた場合の計算結果も併記した。

この計算例から、以下のようなことがわかる。

- 1) CO₂液滴は放流されてから溶けきるまでに約900m上昇する。この値は、剛体球を仮定した場合に比べて15%ほど小さい。
- 2) 液滴が放流されてから溶けきるまでに約3.5時間かかっている。その間、直径の縮小速度は概ね一定である。
- 3) 液滴の浮上速度は、放流されてから約2.5時間の間、ほぼ一定である。この間に液滴の等価直径は20mmから7mm程度にまで減少している。同一の温度・圧力条件では液滴が小さいほど浮上速度は小さくなるが、浮上して水圧が減じるとCO₂の密度が小さくなり、液滴に作用する余剰浮力が増えるため、浮上速度の低下を補ったと考えられる。
- 4) 1m浮上する間に周囲海水に溶け出すCO₂の量は、放出直後が最も多く、浮上しながら液滴の大きさが減るにつれて減少する。海洋の自然の拡散過程を考慮すると、複数の液滴は上昇しながら水平方向に散らばっていくので、周囲海水のCO₂濃度上昇は、放出点周辺で最も大きくなると言える。今回の計算例では、放流直後に1m浮上する間に、一個のCO₂液滴から0.24%が溶け出す結果となった。この値は、剛体球を仮定した場合と比べて25%大きい。

例えば、実機で想定される1隻あたりの船から放流されるCO₂の総流量 Q を100リットル/sec、曳航速度 v を2.5m/secとし、曳航パイプから放流されるCO₂の横幅 b を小さめに5mと見積もっても、上述の結果を用いると、放流直後に新たに海水中に溶け込むCO₂の海水に対する重量比は、 $0.0024Q/vb = 1/52,000$ と推定される。pH低下に換算すると約1に相当する。この値自身の可否はまだ論じられないが、海洋の自然の希釈に委ねる前に人為的に希釈可能なレベルを提示する一例である。

4. 結 言

溶解拡散型のCO₂海洋隔離において、海洋の自然の混合に委ねる前に人為的に一定以上の希釈度を確保する技術的方策として、航走船舶による中層希釈放流方式を提案している。前報において、水平な軸線を有する流線形のノズルから放出速度を調整して後ろ向きに放流することによって、現実的な曳航速度(4~5ノット)の下で一定以上(直径10mm以上)の液滴形成が可能であるとの見通しを得た。

引き続き本報では、まず、深海の温度・圧力・塩分濃度を再現した大型高圧容器内の海水中に、液化CO₂を少量放出する実験を行い、液滴の浮上形態の観察、ならびに浮上速度のデータ取得を行った。側壁影響がほとんど無く、鉛直方向

Fig.9 Calculated results of rising and dissolving behavior of CO₂ droplet

の距離が大きい容器の中で、実際に液化 CO₂ を用いて浮上挙動を調べた点、ならびに実験中の容器内海水の CO₂ 濃度上昇を極力抑えた実験を行った点に特徴がある。その結果、液滴表面にハイドレート膜が生成する場合の影響を直接考慮に入れた、液中液滴浮上挙動を観察し、剛体球に関する従来知見と比較し、変形にともなう抵抗係数の修正式を新たに提案した。

次に、実験で得られた抵抗係数を用いて、上昇しながら徐々に周囲の海水に溶けていく CO₂ 液滴の挙動をシミュレーション計算で予測した。剛体球を仮定した場合と比べて、溶けきるまでの浮上距離が小さい分、単位長さを浮上する間に溶け出す CO₂ 量が大きくなる点に留意が必要である。実機想定 100 リットル毎秒の規模の放流において、放流直後の最も多い CO₂ 溶解量でも海水に対して 1/52,000 の重量比であるという一計算例を示したが、これは海洋中での自然による拡散挙動予測、生物影響予測の初期条件として工学的に可能なひとつの数値であると言える。

謝 辞

大型高压容器内 CO₂ 放出実験を行うにあたり、SAIC 社の Gilbert. R. Stegen 氏ならびに SwRI の Jesse. I. Ramon 氏をはじめとする実験課員には、現地でひとかたならぬお世話になりました。袋状隔膜を内包する CO₂ 容器の製作にあたっては、(財)電力中央研究所 我孫子研究所の大隅多加志氏をはじめとする関係各位にご指導を賜りました。レーザ式粒径計測装置の機能増強・調整にあたっては三菱重工業(株)長崎研究所の黒田雅博氏ほかのご協力をいただきました。実験装置の作動確認試験では、三菱重工業(株)長崎造船所 特殊機械部の耐圧試験装置を借用しました。多くの関係者の方々にこの場を借りて謝意を表します。

CO₂ 液滴の浮上・溶解挙動シミュレーション計算を行うにあたり、東京工業大学 炭素循環素材研究センターの平井秀一郎教授より懇切なご指導を賜りました。深謝いたします。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から(財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)へ委託された「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術研究開発」の一環として行われた。関係各位に篤くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Herzog, H. *et al.*: Capturing Greenhouse Gases, Scientific American, Feb. (2000).
- 2) Ormerod, W. G. *et al.*: Ocean Storage of CO₂, IEA Greenhouse Gas R&D Programme (1999).
- 3) Handa, N. and Ohsumi, T. *eds*: Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide, Terra Scientific Publ. Co., Tokyo (1995).
- 4) 尾崎雅彦ほか: 溶解拡散型 CO₂ 海洋隔離における希釈放流技術に関する基礎研究 (その1)、日本造船学会論文集 第187号 (2000) .
- 5) *ENCYCLOPEDIE DES GAZ, L'AIR LIQUIDE, ELSEVIER* (1976).
- 6) Sadhal, S. S. *et al.*: Transport Phenomena with Drops and Bubbles, Springer-Verlag New York, Inc. (1997).
- 7) Hirai, S. *et al.*: Dissolution Rate of Liquid CO₂ in Pressurized Water Flows and the Effect of Clathrate Films, Energy Vol. 22, No. 2/3 (1997).
- 8) Hirai, S. *et al.*: Measurement of CO₂ Diffusion Coefficient and Application of LIF in Pressurized Water, Energy Vol. 22, No. 2/3 (1997).
- 9) Clift, R. *et al.*: Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, New York (1978).