

第5章 CO₂深海貯留法への適用

5.1 緒論

本章では、前章までの結論を踏まえ、従来の海洋処理法を評価するとともにCO₂の海洋処理法として、大量処理に適し影響範囲を最小限にとどめるとともに、海洋中隔離期間を長く設定することが可能と考えられる深海底貯留法を取り上げ、その実現性について検討する。即ち、CO₂ハイドレートの溶解性に対応する手段として、深海底の窪地の途中までCO₂を溜める方法である。

5.2 従来の海洋処理の評価

本研究を通して得られた知見を基に、1.2節で述べた従来の海洋処理法の評価を行う。

5.2.1 溶解法

気体溶解法(浅海放出):この方法は、本研究で得られた液体CO₂やハイドレートの溶解挙動からは、直接定量的な評価ができない気体CO₂からの溶解である。大隈ら⁽²⁷⁾の評価では液体CO₂を作ることなく処理できることから処理コストを下げられるメリットがある反面、CO₂を高濃度に溶解した海水が作る高密度流れが、海水を巻き込みながら希釈されることにより密度が小さくなるために到達する深度がそれほど深くないこと、またそれを改善するために海底の谷地形に沿って流す場合、海水の巻き込みは抑制することができるが海底谷斜面を低pH海水にさらすことになり、生態系へ悪影響が指摘されている。

液体溶解法(中層放出):従来、ハイドレート生成深度への適用は不可能と考えられていた⁽³¹⁾が、ハイドレートの溶解性が確認された今、ハイドレート生成深度においても一定の条件を満たせば適用が可能となった。以下に、本研究で得られたCO₂およびハイドレートの溶解度を用い、深度1000mから単一CO₂液泡を放出した場合に溶解完了するまでの時間と直径及び質量の変化について数値シミュレーションを行った例を示す。

本シミュレーションで採用したモデル⁽⁴⁶⁾の特長は、注入液体CO₂の温度範囲をCO₂の3重点温度(約-59℃)まで扱えること、注入液体CO₂の直径に制約を設けていないこと、等の汎用性を持たせている。計算に使った前提条件を以下に示す。

- ①低温CO₂液泡が氷層で被われる場合の氷層外面温度は、海水の氷点(-1.91℃)とする。
- ②液体CO₂界面に生成するハイドレート膜の温度(T_{FILM})は、液泡平均温度に等しい(T_{CO_2})とする。

③海水からの受熱計算に使用されるヌセルト数 N_u は、代表長さを球の直径とするレイノルズ数 R_e と、プラントル数 P_r との間で下記式の関係で結ばれているとする⁽⁴⁹⁾。

$$N_u = 2 + 0.34 R_e^{0.566} \cdot P_r^{1/3} \quad (4-1)$$

④CO₂ の溶解は氷層消滅後に起こり、その際の液泡溶解速度は、ハイドレート膜被覆状態での値と非被覆状態の2種類を採用し、海水からの受熱量は総て液泡温度上昇に費やされる。

⑤液泡の運動（加速度、速度、位置）計算では、球への抗力計数 0.2 を採用。

⑥海水温度の鉛直分布は、日本近海の太平洋のデータを使用。

計算に当り沈降するCO₂塊に作用する力のバランスと熱の出入りについて述べる。

まず、CO₂塊に作用する力 F_b は運動に伴う加速度と海水から受ける抗力の和として下記式で表される。

$$F_b = (M_{CO_2} + M_{ice} - M_{sea})g \mp C_d \cdot \frac{\rho_{sea}}{2} U^2 \cdot \pi R_{out}^2 \quad (4-2)$$

ここで R_{out} は氷層を含む半径、CO₂層までの半径を R_m とする。 M_{CO_2} , M_{ice} , M_{sea} はCO₂、氷、排出海水の質量を、 g , C_d , U は重力加速度、球への抗力係数（上述の仮定値）、球体の運動速度を、 ρ_{sea} , ρ_{ice} は海水および氷の密度をそれぞれ表す。式内での \mp は球体が下降する時は－を上昇時には＋を採用する。

次に、熱の出入りに関する基礎式であるが、氷を通しての伝熱問題と考えられることから下記式の適用によって求める。

氷内部の温度分布 T を一様とすると、総熱量の時間変化率 \dot{Q} と氷の熱伝導率 λ_{ice} を使えば、

（海水からの dt 間の受熱） + （ dR 分の氷生成に伴う発熱） = （氷内部へ dt 間に流れ込む熱） の関係から熱バランスとして、

$$h_m (T_{sea} - T_{melt}) dt + \rho_{ice} L_{ice} dR = \frac{\lambda_{ice} (T_{melt} - T_{CO_2})}{\left(\frac{1}{R_m} - \frac{1}{R_{out}} \right)} \frac{dt}{R_{out}^2} \quad (4-3)$$

が得られる。またCO₂の受熱量は

$$-Q = \{ \rho_{ice} L_{ice} \cdot dR + h_m (T_{sea} - T_{melt}) \cdot dt \} \cdot 4\pi R_{out}^2 \quad (4-4)$$

となる。ここで h_m は冒頭に仮定した N_u を使って

$$h_m = \frac{N_u \cdot \lambda_{sea}}{2R_{out}}$$

で整理した量である。また L_{ice} は氷の融解熱を、 C_{pCO_2} は CO_2

の定圧比熱を表す。

CO_2 の溶解は氷層消滅後に起こり、その際の液泡溶解速度は、(1-2)式を使う。

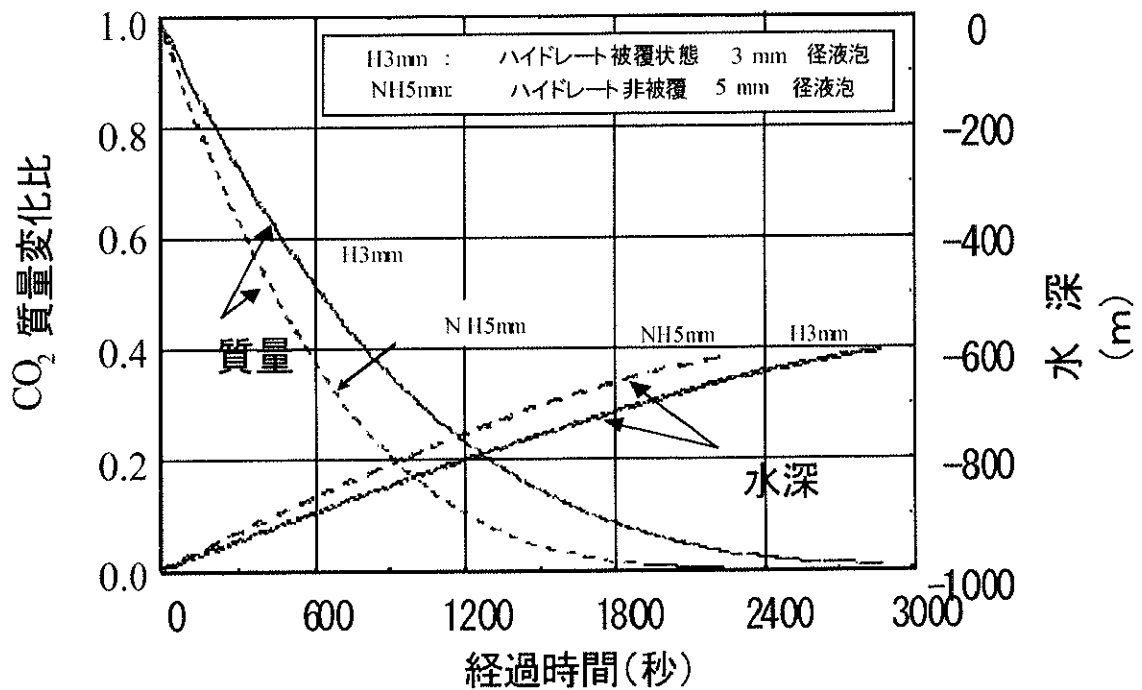


図 34 CO_2 液泡深海放出後の挙動

これらの一連の微分方程式を数値シミュレーションによって解いた例を図 34 に示す。初期値としてハイドレート被覆状態の 3mm 液泡とハイドレート非被覆状態の 5mm 液泡を考え、放出液温度は $-30^\circ C$ で、放出水深は 1000m で解析した。

この図から読み取れるように、ハイドレート被覆状態の場合、3mm 径の液泡で放出すれば水深 600m 付近で完全に溶解する結果となっている。言い換えれば、ハイドレート生成海域で多孔管⁽²⁰⁾を使って溶散させようとした場合、多孔管に設ける孔の直径を小さくする必要があり、同一流速で同一の処理量を得たいとするなら、ハイドレート非生成海域に比べて 2.8 倍 $((5/3)^2 \approx 2.8)$

の個数を持った多孔管を持つ溶散装置を放出海域に敷設する必要があることを示唆している。また、この 3mm 口径の放出径はハイドレート生成による閉栓が懸念される大きさでもある。

この他、CO₂ 溶解海水が、海洋の鉛直循環⁽⁵⁵⁾にのり、隔離したはずの CO₂ が 50~200 年で海面から大気中に環流することが懸念される。この点について、太平洋などの大洋で 3 次元拡散シミュレーションを行って隔離効果の検討⁽²⁶⁾が試みられている。

5. 2. 2 貯留法（窪地貯留法およびハイドレート型貯留法）

貯留法は、適用深度が 3500m 以深であり、貯留サイトから溶出した CO₂ が 1000 年程度（海洋鉛直循環⁽⁵⁵⁾の 1/2）海洋中に留まると考えられおり、溶解法に比べて隔離効果が優れている。また、貯留サイトから溶出するまでの期間（溶出期間）が総隔離期間に加算できるため、さらに長期の隔離が期待されている。液体 CO₂-海水界面上に現れる CO₂ ハイドレート膜も海水に溶解することから⁽³²⁾⁽⁵⁶⁾、ハイドレートの溶解抑制効果だけに頼っては溶出期間を長くできない。一方、地球温暖化の緩和に効果的とされる規模の貯留サイトは数 10Km²にも及ぶ湖のようになると考えられる。ハイドレート膜で被われた広大な液体 CO₂ 界面が溶解に伴って低下して行く降下速度を見積もる場合、界面上の水平深海流の濃度が下流ほど増大すると考えられ、図 18 に示す小規模の液泡溶解速度を直接適用することができない。液面降下速度つまり、溶出期間を見積もるためには、貯留サイトの地形を、差分法等の離散化手法を用いて数値表現し、実海域海流の流速や乱流強度を適用した数値シミュレーションを行う必要がある。このシミュレーションは今後の課題であるが、図 26 に示すハイドレート共存溶解度が重要な境界条件であるハイドレート膜に接する海水の CO₂ 濃度を与え、その溶解度の大きさが貯留期間の計算結果に直接かつ線形的に影響するものと考えられる。

ハイドレート型貯留法においては、窪地型貯留法の問題点に加え、CO₂ のハイドレート化により体積が増加（液体 CO₂ に比べて 3.4 倍程度になる）することから、貯留サイトもその分大きくしなければならない欠点がある。

5. 3 新しい深海貯留法

液体 CO₂-海水界面上に現れる CO₂ ハイドレート膜も海水に溶解するため、ハイドレート共存溶解度による溶解抑制効果だけに頼った貯留法では十分な隔離期間が確保できないこと、また、溶解法には基本的に海洋中隔離期間が短い欠点があることや溶解させるための装置にハイドレートによる閉塞の問題がある等、従来型の海洋処理には深刻な問題点があることを踏まえ、

新たな深海貯留法を提案する。図35の概念図に示すようにCO₂ハイドレートの溶解性に対抗する方法として、深海底の窪地の途中までCO₂を溜める。CO₂と海水との界面にはハイドレート膜が生成されるが、その上方にはCO₂溶解海水が成層をなす。界面では飽和となる溶解濃度は、上方に向かってほぼ直線的に減少し、窪地頂部で極めて低い海洋の自然濃度となる。CO₂溶解海水の密度は濃度が高いほど大きくなるため、界面上方の密度成層はそれ自身安定化する性質がある。この密度成層が窪地上方の深海流や地球深部からの熱流などの不安定化要因に対しても安定であるならば、密度成層を上方に向かって流れるCO₂フラックスは分子拡散程度となり、事実上、CO₂を安定に貯留できることになる。

現時点では深海流や反応熱などの密度成層不安定化要因の影響等、不確定要素を内在するものの長期の隔離期間を期待することができ、貯留サイトから外の海域に対する酸性海水汚染を最小限に止めることができると考えられている。

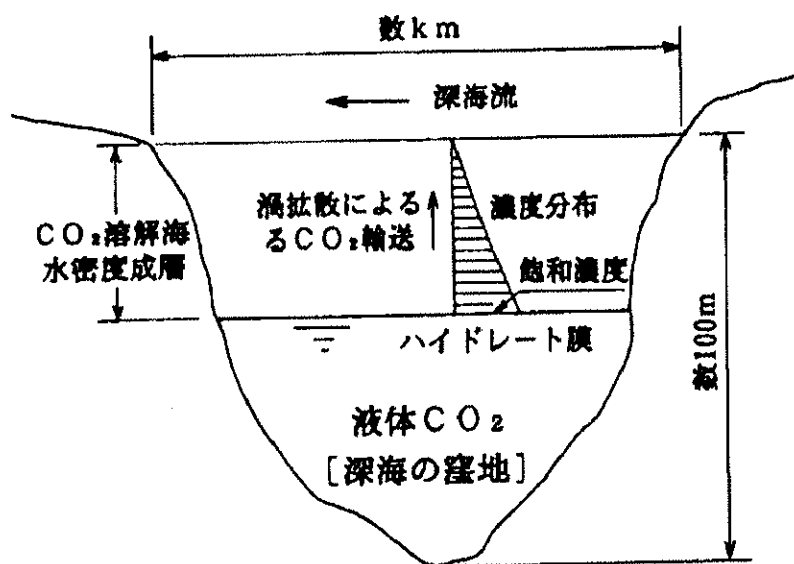


図35 CO₂ハイドレートの溶解性を考慮した新貯留法

5.3 まとめ

前章までに得られた液体CO₂の溶解に関する知見を基に従来の海洋処理法の評価を行った。溶解法においては、日本近海の海域を想定した一定の深度(1000m)からCO₂液泡を放出した場合の数値シミュレーションを行い、その結果、液泡が水深600m(CO₂の気化直前水深)に上昇するまでに総て溶解するための放出直径は、ハイドレート被覆状態の3mmに比べハイドレ

ート非被覆状態では 5mm となる等を示した。このことはハイドレート領域にある海域にも溶解法が適用可能であることを示す反面、ハイドレート被覆状態の液泡放出に対する液泡径制御の困難性を新たな問題点として提起した。

貯留法の評価では CO_2 ハイドレート膜も海水に溶解することから、ハイドレートの溶解抑制効果だけに頼っては十分な貯留期間が確保できない。

本章で述べた提案は、 CO_2 ハイドレートの溶解性に対応する方法として深海底の窪地の途中まで CO_2 を溜める方法である。この方法は、溶解法の 50～200 年と言われる短い海洋隔離期間の欠点を補い、 CO_2 海洋隔離期間を長期にできること、貯留サイトから外の海域に対する酸性海水汚染を最小限に止めることができること、等の利点がある。