

二酸化炭素深海実験, O A C E - 新投入技術 C O S M O S と環境影響 -

大阪支所 ギ装研究グループ *綾 威雄、山根 健次、小島 隆志

環境・エネルギー研究領域 波江 貞弘

海上安全研究領域 危険物輸送防災研究グループ 城田 英之

中島 康晴、岡 秀行

輸送高度化研究領域 新材料利用研究グループ 川越 陽一

海洋開発研究領域 深海技術研究グループ 田村 兼吉、久松 勝久

佐伯 延博

1. はじめに

温暖化対策技術として、分子数で大気の 430 倍を有する広大な海洋に、火力発電所等の集中発生源から分離・回収した CO₂ を隔離するというアイデアが 1977 年に米国の研究者により提案⁽¹⁾された。このアイデアは、「1988 年の米国上院における気象学者の温暖化に関する証言」と 1997 年の「第 3 回気候変動枠組み条約締約国会議 (COP3)」を経て、有望な革新的温暖化対策技術としてその実現が期待されるようになった。CO₂ 海洋隔離法として、これまでに数多くの提案^{(2)~(4)}がなされているが、それらの代表的なものとして、1000 m ~ 2000 m の中層に CO₂ を液体で放出し、広大な海洋に溶解希釈させる「溶解法」と、CO₂ が CO₂ 溶解海水より重くなり密度的に安定となる 3500 m 以深の深海底窪地に溜める「貯留法」を挙げることができる⁽⁵⁾。いずれの方法も、CO₂ 問題の本質である「処理量の超大量性」を十分クリアしていることが、実現が期待される大きな理由となっている。しかしながら、一旦海洋に処理した CO₂ は永遠に海洋に止まるとは考えにくく、溶解法の場合、その隔離期間は、海洋循環数値シミュレーションの結果等から、処理海域と深度に依存するが、概ね 100 ~ 300 年程度であると考えられている。これに対し、貯留法の場合は、海洋鉛直循環周期の 2000 年以上が期待できると言われている。さらに、原理的に元に戻すことができない溶解法に対し、貯留法の場合は、いざとなればポンプでくみ上げることができ、万一の場合の原状回復が可能である。このように、貯留法は、処理深度が深いためコスト的には不利であるが、隔離期間が長いことと可逆性が備わっているという、大きな利点がある。

このような背景の下、当所は、上述の米国上院における証言から 2 年後の 1900 年から、貯留法をターゲットとして、実験を中心とする CO₂ 海洋隔離研究を開始し、CO₂ 海洋隔離法の評価に不可欠な、CO₂ ハイドレートに関する様々な物性データ⁽⁶⁾を提供してきた。そして、1999 年 3 月には、貯留法の弱点である高深度放出を克服するため、タンカー輸送される低温 CO₂ が浅海でも海水より重くなるという性質を利用した浅海投入法 COSMOS (CO₂ Sending Method for the Ocean Storage) の基本特許を取得した。同年から、COSMOS 開発のための基礎データの取得を目指したノルウェーのベルゲン大学 (UoB: University of Bergen) との国際共同研究を、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

の助成事業として実施し、2002 年 3 月に終了した。

また、2002 年度からは、1998 年から続けてきた米国のモンテレー湾海洋研究所(MBARI, Monterey Bay Aquarium Research Institute)との CO₂ 放出実海域実験を、ベルゲン大学を加えた新たな国際共同研究 OACE (Ocean Abyssal Carbon Experiment) として、NEDO の助成の下に活動を開始した。

本報告では、COSMOS プロジェクトの成果と始まったばかりの OACE プロジェクトを紹介するとともに、これらの研究の最終目標である CO₂ 深海貯留法の実現に向けての課題を考察する。また、これまでの研究成果を基にした当所の新たな取り組みを紹介する。

2. COSMOS プロジェクト

2.1 COSMOS の概要

図 1 は、当所が基本特許(2896399 号)を所有している COSMOS の概念を示している。回収 CO₂ を貯留サイトまで輸送する際、CO₂ はタンク圧力をできるだけ下げるため、3 重点(-56.6℃, 0.518MPa) 近くの -50℃ 以下に冷却される。このような低温 CO₂ は深度 500m の浅海でも海水より重くなるため、直径 1m 以上の大液泡として放出できれば、図 1 に示すように、海水からの受熱にも拘わらず、海水と同温度の CO₂ が海水と同密度となる深度 2700m を越え、貯留サイトまで自由沈降させることができる⁽⁷⁾。

2.2 ベルゲン大学(UoB)との共同研究⁽⁸⁾

2.2.1 COSMOS チームの結成

COSMOS の実現には、ブレイクスルー技術と見られる低温 CO₂ 放出ノズルの開発が必要となることから、その基礎研究を共同で行う相手先を探していたところ、天然ガスからの回収 CO₂ を採掘後の海底油層に送り込む技術⁽⁹⁾を開発するなど、温暖化対策に熱心な UoB から 1998 年秋に誘いがあり、同大学の 3 教授と当所の 1 研究者の計 4 名で COSMOS チームを結成した。1999 年 3 月、Kvamme 教授をリーダーとする共同研究を NEDO に申請し、同年 7 月採択された。

2.2.2 各メンバーの役割

COSMOS チームは、ハイドレート専門家 (B. Kvamme)、COSMOS 提案者(綾)、海洋学 (P.M.

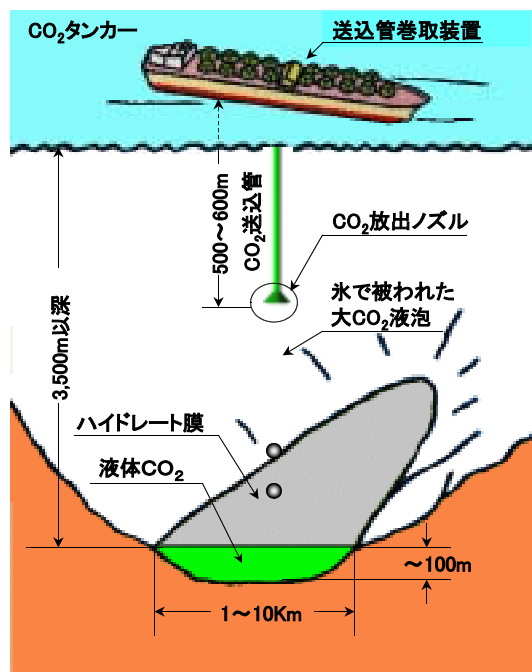


図 1 COSMOS の概念

表 1 海技研と UoB の役割

メンバー名	分 担 内 容
I. Aya (NMRI)	実験から、低温 CO ₂ 放出ノズルの開発基礎資料収集。 ハイドレート物性値取得。
B. Kvamme (UoB)	沈降 CO ₂ 液泡を包むハイドレート膜と氷層の発達過程。 ハイドレート化学データ。
P. M. Haugan (UoB)	CO ₂ 液泡を包む氷層発達実験から、熱伝達率を推定。 貯留 CO ₂ の溶解・拡散解析。
T. Johannessen (UoB)	沈降過程及び貯留 CO ₂ の溶解過程モニター用高耐圧・高精度 pH センサの開発。

表 2 MBARI との共同実海域実験一覧

Haugan)および海洋化学(T. Johannessen)を専門とするメンバーから構成されており、それぞれの専門を生かした役割分担を決めた(表 1)。

2.3 モンテレー湾海洋研究所(MBARI)との共同実海域実験

当所は、COSMOS メンバーが 1997 年 9 月に MBARI を初めて訪問して以来、実海域実験に不可欠な ROV (Remotely Operated Vehicle) を有する同研究所との協力関係の維持・発展に努めてきた。最初の実海域実験は、CO₂ ハイドレートの生成・分解挙動とメクラウナギなどの魚類の溶解 CO₂ に対する反応を観察することを目的として、翌 1998 年 11 月に行われた。この実験から、当所が高圧ループを使って得た CO₂ ハイドレートの性質が実海域でも現れることが確認されるとともに、底層魚類は溶解 CO₂ を余り関知しない可能性のあることが判明した⁽¹⁰⁾。

UoB との共同研究が始まった 1999 年からは、COSMOS 用低温 CO₂ 放出ノズルについての基礎的データ取得を目的とした共同実験を、年 1 回

No	実験日	実験内容と結果
1	1998.11.17-18	CO ₂ ハイドレートの生成・溶解状況の観察と pH 変化計測。底層魚類の CO ₂ 溶解海水に対する反応観察。 ROV 潜行回数：各 1(計 2)
2	1999.10.13	CO ₂ 放出実験で装置の機能を確認。保温不良により低温放出とならず、放出 CO ₂ 塊は界面不安定により分裂。ROV 潜行回数：2
3	2000.10.5-6	低温 CO ₂ 放出・追跡に成功。氷層被覆スリ-塊は分裂せず 50m 沈降。氷層消滅後、分裂。 ROV 潜行回数：2
4	2002.2.19-20	機能を単純化したノズルによる CO ₂ スリ-の放出に成功。新 COSMOS の提案へ。ROV 潜行回数：2



図 2 MBARI との共同実海域実験で使用された 3 台の CO₂ 放出ノズル

のペースで、これまで計 3 回実施した。表 2 は、上述の第 1 回共同実験を含む 4 回の共同実験の内容をまとめたものである。この内、第 2 回共同実験については、当所の講演会で発表した⁽¹¹⁾。図 2 は、第 2 回目以降の共同実験で使した 3 種類の試作 CO₂ 放出ノズルを示している。次第に改良が加えられ、二つの半球状殻からなる最後のノズルは、それ以前の 2 回のノズルより更に単純な操作で低温 CO₂ が放出できるよう設計したものである。

2.3 COSMOS プロジェクトの成果

2.3.1 大液泡の界面不安定

COSMOS の求める低温 CO₂ 液泡の大きさは直径 1m 以上であることから、大液泡に作用する界面不安定 (Taylor Instability) により小液泡に分裂するのではないかと懸念がある一方、数値シミュレーション結果を根拠に、低温大液泡の持つ大きな冷熱により生成される氷層が液泡分裂を妨げるとの期待もあった。しかし、陸上模擬実験や実海域実験から、確かに低温 CO₂ 液泡は、10 mm を超える氷層を生成させるだけの冷熱を保有するが、そのような丈夫な氷層が生成される前に、上述の界面不安定により小液泡に分裂する傾向の強いことが判明した。図 3 は、放出数秒後に多くの小液泡に分裂する様子を示している。なお、低温 CO₂ 液泡はハイドレート膜で覆われるが、その厚みは μm オーダーと極めて薄く、大液泡を分裂から守ることはできない。これらの事実は、低温大液泡の浅海放出という COSMOS の実現は、原理上は可能であるが技術的に容易でないことを示唆している。

2.3.2 スラリー放出の検討

そこで、連続投入を可能とする、液体の要素を損なわずに、冷熱が更に大きく、氷層の急速発達期待できるスラリー(ドライアイスと低温 CO₂ との混合物)放出を考え、UoB 及び MBARI との共同研究の後半では、その実現可能性に焦点を絞り、各種実験を繰り返し、解析的検討を加えた。



図 3 放出された単一 CO₂ 塊が小液泡群に分裂する様子(第 2 回実海域実験)



図 4 タンク内を自由沈降する氷層で覆われた CO₂ スラリー塊(大型タンク [大阪支所] の観察窓から見た様子)



図 5 深度 530m のモンテレー湾内を沈降する氷層被覆の CO₂ スラリー塊 (直径約 8 cm)

実海域実験に先立ち、NEDO Grant で製作した「二酸化炭素放出ノズル特性実験装置 (内径 1m, 高さ 3m, 耐圧 5 MPa)」を使い、CO₂ スラリー放出の陸上実験を行った。図 4 は、その陸上実験の一コマで、氷層に包まれた CO₂ スラリー塊 (直径約 10 cm) がタンク内を自由沈降する様子を示している。また、図 5 は、第 3 回実海域実験において厚い氷層に包まれた CO₂ スラリー塊が深度 530m のモンテレー湾の海中を沈降していくときの様子である。図 6 は、図 5 で示されるスラリー塊の沈降過程を、深度と速度がどのように変化してゆくかを示したもので、放出 150 秒で深度 548m に達した後、海水からの受熱により暖められた CO₂ 塊は上昇に転じることが分かる。Uターン後は、氷層もほとんど溶け、CO₂ 塊は薄いハイドレート膜のみで覆われ、界面張力の不均衡による不思議なマランゴニー運動を示しつつ、小液泡に分裂することが観察された(図 7)。

本年 2 月に行った第 4 回実海域実験では、それまでの試作ノズルとは異なり、圧力平衡装置を省略した単純化したノズルにより、CO₂ スラリー塊の放出を試みた。放出は成功し、自由沈降とUターン軌跡が求められ、前回と同様のデータを得た。これらの陸上実験と実海域実験から、スラリー放出のための基礎技術を取得することができた。

次に、COSMOS 提案時に開発したシミュレーションプログラムが図 6 で示される CO₂ スラリー塊の沈降挙動を定量的に模擬できることを確認した後、同じプログラムを使って、安定貯留可

可能な深度 3500m 以深に到達することのできる CO₂ スラリー塊の限界寸法を求めた。図 8 は、ドライアイス率 α が 0.5 のスラリー塊を深度 100m (ドライアイスが溶け切るまで - 50

以下の低温が保たれるため、500m より浅海放出が可能) から放出した場合の沈降挙動を、放出径をパラメータとして示したものである。この図から、 $\alpha = 0.5$ の場合、直径 40cm のスラリー塊は、密度平衡深度の 2700m を通過し、貯留可能な深海底に達することが分かる。放出径が COSMOS が求める 1m の 1/2 以下で、放出深度も 500m より浅海となるなど、スラリー放出の有望性が数値シミュレーションからも示された。

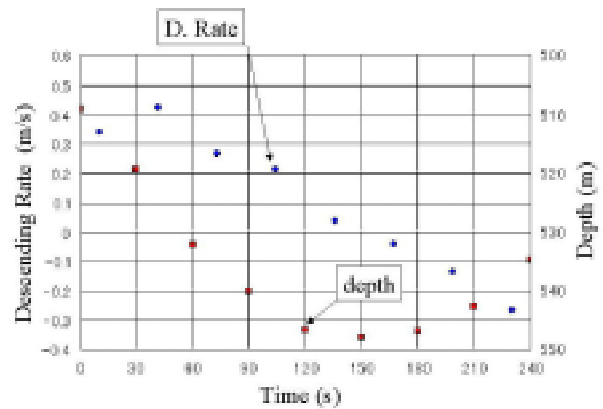
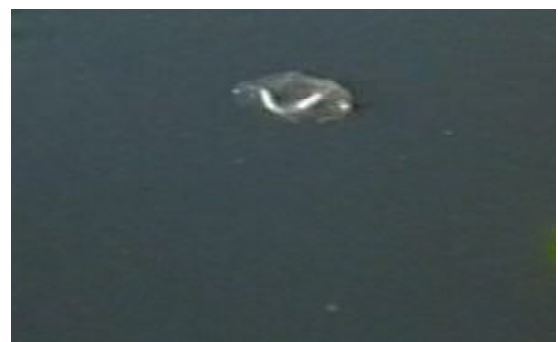


図 6 CO₂ スラリー塊の沈降・上昇過程例



(a) 分裂直前



(b) 分裂開始直後

図 7 氷層溶解直後の CO₂ 液泡のマランゴニー運動

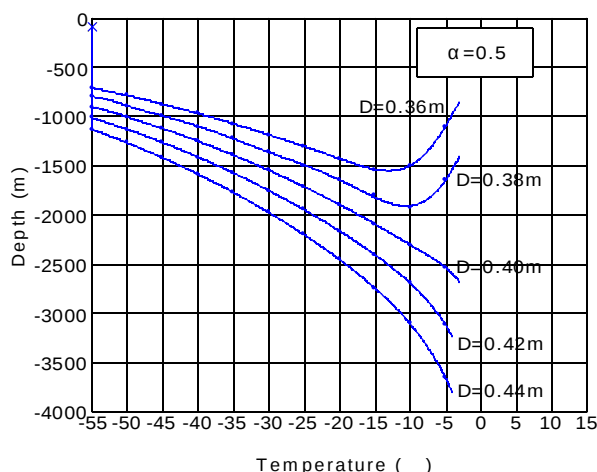


図 8 深度 100m に放出された CO₂ スラリー塊の挙動解析例 ($\alpha = 0.5$)

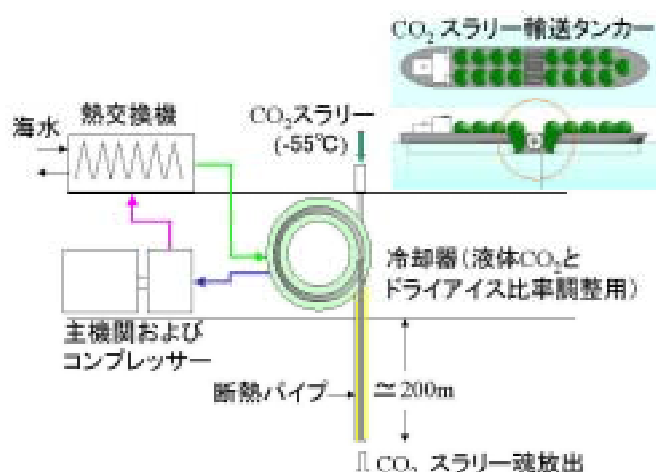


図 9 新 COSMOS の概念(α 調整に主機利用)

2.3.3 新 COSMOS の提案

上述のスラリー放出法を、図 9 に示すような新 COSMOS として提案した⁽¹²⁾。新 COSMOS では、数値シミュレーションより安全側の深度 200m からの放出を考えているが、この深度は、放出管を洋上でつなぎ合わせるといった煩わしさを排除できるという大きなメリットがある。限界放出径は、元の COSMOS の 40 % 以下にでき、大幅な小型化が可能となる。また、スラリー輸送することにより、タンク内の CO₂ は 3 重点温度となり、圧力を最小に保つことができる。そして、CO₂ 放出時は CO₂ タンカー主機の負荷は非常に小さいので、その余力をスラリー率の調整に使えば、20 万トンタンカーで運ばれる CO₂ (100 万 kW の原油発電所から排出される CO₂ の約 10 日分)を 2 日以内に処理することができる。

さらに、新 COSMOS では、ドライアイス率と放出径を適当に選択すれば、任意の深度で U ターンさせることができる。その際、図 7 に示されるように U ターン前後で小液泡に分裂するため、「溶解法」にも適用可能となり、しかも、深海底から相変化深度(約 400m)までの全深度を溶解に利用でき、溶解に伴う CO₂ 濃度の増加を最小にすることができる。

この新 COSMOS は、本年 9 月、従来の COSMOS の改良版として特許申請したが、この提案が、UoB と MBARI との共同研究の最大の成果と考えている。

表 3 新旧 COSMOS の特徴と(液体)溶解法との比較

比較項目	新 COSMOS	旧 COSMOS	溶解法
放出形態(温度)	CO ₂ スラリー(- 55)	低温液泡(~ - 40)	気泡 or 液泡(海水温度)
放出寸法	0.4 m	1.0 m 以上	0.5 ~ 数 cm
放出深度	200m(理論上は 100m も可)	500 m	気体 : ~ 300m 液体 : 1000 ~ 2000m
ブレイクル技術	CO ₂ スラリー放出ノズル	低温 CO ₂ 放出ノズル	液泡放出用移動船舶等
開発難易度	開発は可能	開発はかなり困難	容易
実現時コスト	溶解法と同程度	溶解法よりやや高い	—

2.3.4 その他の成果

(1) ハイドレート物性

これに属する成果としては、CO₂ 貯留サイトからの溶解量の評価に必要な、ハイドレート生成条件の理論的検討⁽¹³⁾や、貯留 CO₂ の安定性に関わる CO₂ ハイドレート膜の強度データ⁽¹⁴⁾とそれを説明する自由水分子モデル⁽¹⁵⁾の提案などがある。

(2) 貯留期間の推定

UoB の Haugan 教授は、溶解法の提唱者⁽¹⁶⁾として著名であるが、COSMOS プロジェクトでは、卓越した拡散解析技術を活用し、厚い密度成層で覆われていない 500m×500m×50m 規模の貯留サイトからの溶解・拡散数値解析を行い、溶解速度を貯留 CO₂ の高さに換算して、1.23 cm/year の結果を報告している⁽¹⁷⁾。この値は、当所が崇城大学に研究委託した結果 0.15 mm/year⁽¹⁸⁾と大きく異なっており、その違いが窪地上方に生成する密度成層の厚みなどの解析体系の違いだけによるものかどうか、今後検討を要する。



図10 新 COSMOS 確認のための伝熱実験と COSMOS メンバー (2002.2.7, 大阪支所)
氷層で覆われた金属球の直径：35 cm (新 COSMOS の限界直径より少し小さい)
左から、Prof. Johannessen, Haugan, Kvamme, Dr. Aya と Dr. Bellerby (UoB)

(3) 氷層成長速度(低温 CO₂ - 海水間の熱伝達)

Haugan 教授は、低温 CO₂ 液泡を包む氷層の発達過程を模擬実験により詳細に調べ、実際の CO₂ 液泡の安定性評価に有用なデータを得た⁽¹⁹⁾。図 10 は、COSMOS メンバー全員立ち会いの下に行った「大気圧 CO₂ スラリー伝熱模擬実験」終了後の記念写真である。この実験から、CO₂ スラリー塊は深度 2700m に達するまでの約 30 分間にわたり、分裂から守るに十分な氷層に覆われることが確認された。

(4) 高耐圧・高精度 pH センサの開発

UoB の Johannessen 教授は、光吸収スペクトルが pH に強く依存する化学物質を利用した新型高耐圧 pH センサを開発し、高精度性(感度 0.003pH)をフィヨルドの実海域試験等

で確認した⁽²⁰⁾。COSMOS 実現時には、貯留サイトからの CO₂ 溶解・拡散のモニターとしての利用が考えられている。今後、OACE プロジェクトとして、モンテレー湾等で詳細な試験が予定されている。

図 11 Johannessen 教授が開発した 40MPa・高感度 pH 計測システム (原理：色素 [C₂₇H₂₉NaO₅S] の分光光度の pH 依存性，計測範囲：pH1.5 ~ 8.0, サンプリング：20/h)



3．OACE プロジェクト

当所の CO₂ 深海貯留研究も 10 数年を経て、その実現性を分かりやすい形でアピールする段階にさしかかってきており、実海域実験から得られるデータの重要性が益々増してきた。そうした中、これまで 4 回の共同実海域実験を行ってきた、MBARI との協力関係を強化すべく、COSMOS チームのメンバーであった UoB を加えた新たな国際共同研究チーム OACE を結成した。新チームから申請した国際共同研究(2002 ~ 2004)が NEDO 助成の採択を受け、本格的な活動を開始したところである。表 4 は、メンバー組織の役割分担を示している。以下に、それぞれの機関が主導する共同研究の内容を説明する。

表 4 OACE チームにおける各メンバーの役割分担

メンバー組織名	分 担 内 容
MBARI (P. G. Brewer)	チームの活動計画を纏めるとともに、2 台の ROV とその RV (Research Vessel) 及び計測器類を提供し、年 1 回の実海域実験を指揮する。また、得られる科学データ及び映像データを管理し、米国内での公表を対当する。
海技研 (I. Aya)	高圧設備を使い、実海域実験を越える広範なパラメータに対する模擬実験を行い、CO ₂ 深海貯留の評価に必要な未解決現象の解明を担当する。また、海底沈殿物の採取器を設計・製作するとともに、実海域実験に参加する。
UoB (P. M. Haugan & T. Johannessen)	実海域実験における観察とモデル化など、海洋学分野を分担する。また、海底に堆積した CO ₂ 塊の挙動観察と低 pH トレーサー雲の挙動を調べ、実海域実験規模から大規模スケールについて、数値シミュレーションを行う。高耐圧・高精度 pH センサを完成させ、実海域実験において、堆積した CO ₂ 塊からの溶解量を計測するとともに化学データ計測の指揮を執る。

3.1 実海域実験

OACE プロジェクトの中核をなす実海域実験は、図 12 に示される、サンフランシスコ南方 150 km にあるモンテレー湾の深度 3500m 以深の深海底で行われる。図から分かるよ

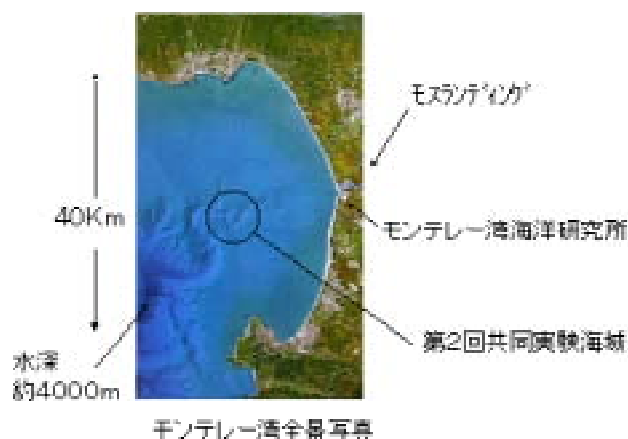


図 12 モンテレー湾と MBARI の位置

うに、グランドキャニオンを凌ぐ海底峡谷が太平洋の海底からモスランディングに向かって続いており、MBARI は深海実験を行うには理想的な場所に位置している。3500m 級の実験を行うには、4 日（往復各 1 日、現場海域で予備日を入れて 2 日）の航海で可能であるが、前後の準備や整理を考えると、最低 1 週間はかかる。

初年度に当たる本年度は、4000m 級 ROV Tiburon 号（図 13）のスケジュールが詰まっているため、これまでの実海域実験で使用してきた 1000m 級 ROV Ventana 号 と RV (Research Vessel) Point Lobos 号 による予備実海域実験を計画している。

その他の使用機器としては、図 15 に示される、CO₂ ハイドレート計測用高圧ラマン分光光度計等がある。一回当たりの放出 CO₂ 量は、ROV の搭載能力の制限から 40 ℓ 以内である。実海域実験の状況は、モンテレー湾水族館の大画面に生中継され、CO₂ 海洋隔離に対しての一般公衆への啓蒙に役立てる。

実海域実験から得られるデータは、貯留 CO₂ の溶解速度、海底堆積物との相互作用など多岐にわたる。例えば、図 16⁽²¹⁾に示されるような、CO₂ 溶解に伴う下流側の pH の経時変化など、貯留サイト周辺の酸性度分布の予測に有用なデータが期待される。



図 13 4000m 級 ROV "Tiburon 号"



図 14 4000m 対応の RV "Western Flyer 号"



図 15 高圧ラマン分光光度計と耐圧容器

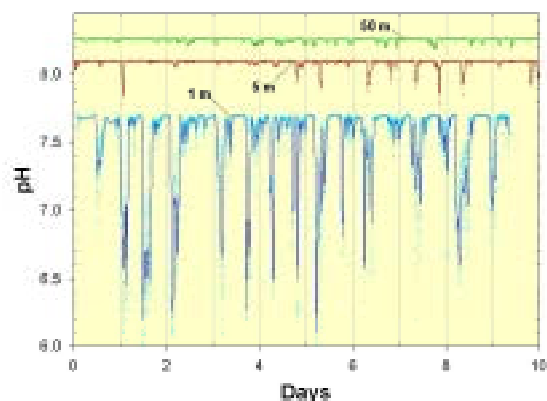


図 16 CO₂ 溶解に伴う pH 変化例

3.2 陸上模擬実験

当所の既存設備を使って、高価な実海域実験を成功させるための予備実験、結果を一般化させるための広範なパラメータにわたる補足実験や基本現象を解明するための実験が予定されている。この他、当所のメンバーは、これまでの共同実海域実験と同様、CO₂ ハイドレートの性質についての豊富な知識に基づき、実験結果を解釈する役割も期待されている。

基礎実験としては、図 17 に示される小型高压ループ (容積: 2 l) と中型高压ループ (32 l, 30 MPa) により、ハイドレート生成におけるメモリー効果を、実海域から採取した海水を使って明らかにする。さらに、液体 CO₂ と海水間に生成する CO₂ ハイドレート膜が、界面近傍の流れがほぼ停止した際の静的成長速度⁽²²⁾の計測や、実際の貯留 CO₂ に含まれるであろう、種々の不純物がハイドレート生成に及ぼす影響について調べる。

実海域実験支援として、図 18 に示される昨年度末完成の大型高压タンクを用いて、貯留 CO₂ の長期安定性と溶解速度の測定、MBARI の実海域実験で発見された膨張現象⁽²³⁾の防止策⁽²⁴⁾の確認、人工堆積物と実際の堆積物を使った CO₂ - 海底堆積物相互作用(図 20 参照)の解明、流速の影響を調べる他、実海域実験で使用する装置の耐圧試験や機能試験を行う。

当所の陸上実験から得られるデータは、実海域実験の条件設定(放出深度、放出量、計測期間、計測データの種類、計測機器の選定)に活用されるだけでなく、UoB が担当する数値シミュレーションにおける物性データともなる。

図 19 は、メタンハイドレートの溶解クラスターが含まれていることが予想される、モンテレー湾からクラスターが生きたまま海技研まで輸送するために考えた、特殊キャスクの概念を示している。クラスターが存在しないと考えられるハワイ沖からのサンプル水とともに、ハイドレートのメモリー効果実験に使用する。本年度は、600m の浅海で行われる予備実海域実験において、透明容器を用いて、クラスターの存在を確認する。

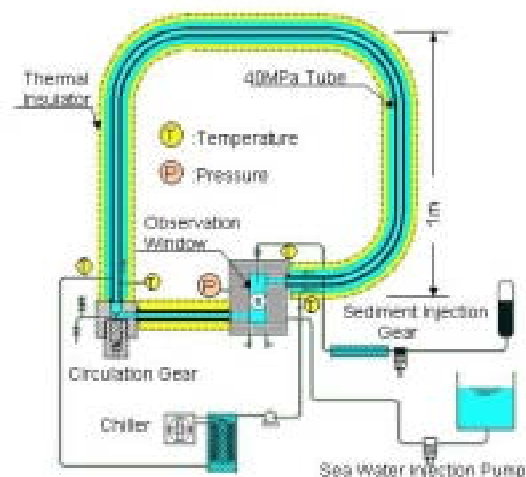


図 17 40 MPa 小型ループ(大阪支所)

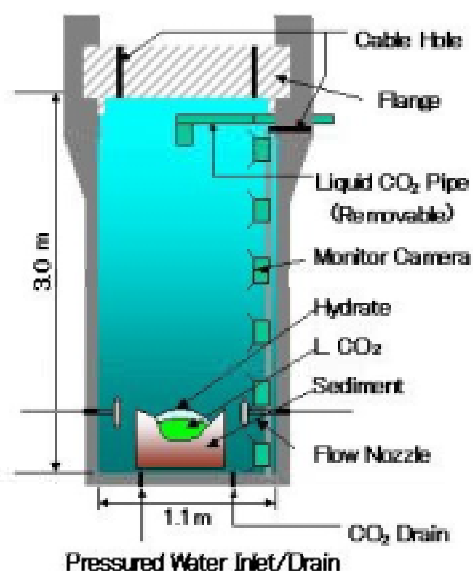


図 18 60 MPa 大型高压タンク(三鷹)

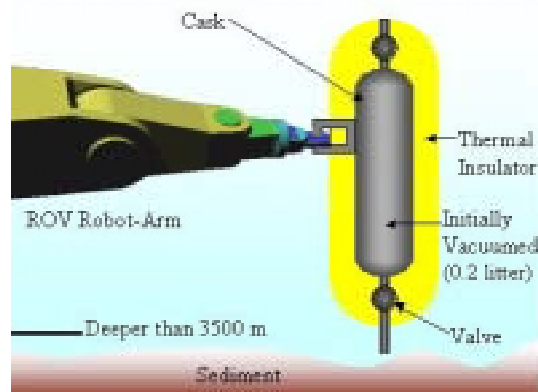


図 19 海底沈殿物採取キャスク

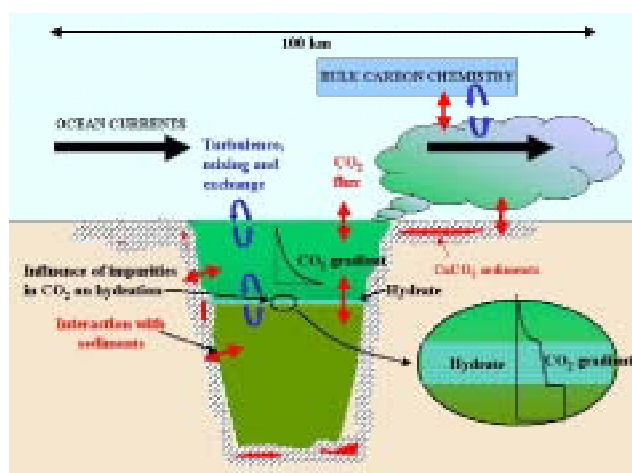


図 20 窪地の途中まで溜める貯留概念

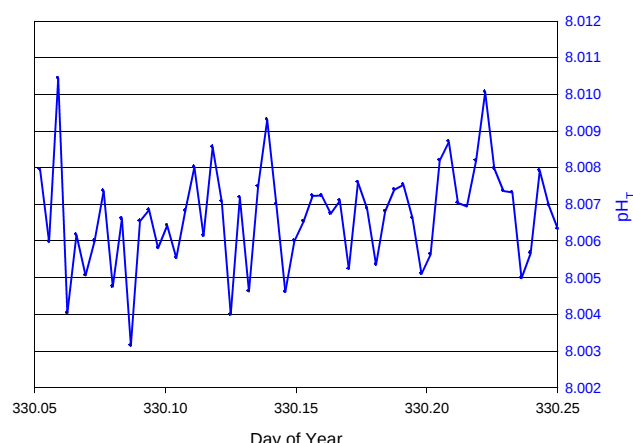


図 21 新型 pH センサの実海域テスト例

3.3 数値シミュレーションと新型 pH センサの開発

UoB の Haugan 教授のグループは、図 20 で示される、窪地の途中まで溜めた貯留サイトからの CO_2 の溶解・拡散過程を数値シミュレーションし、 CO_2 が海洋に止まる期間を推定する。対象とする解析体系は、実際に行う実海域実験（小規模体系）から、数 km から数 10 km におよぶ実際の貯留サイト（大規模体系）までの幾つかの体系について行う。手順としては、先ず、実海域実験結果がうまく再現できることを確認した後、より大きな体系のシミュレーションへと進む。解析に当たっては、各種輸送物性について、最新の文献データや当所で行う基礎実験のデータを活用するが、特に、大きな密度勾配が存在する密度成層中の鉛直渦拡散係数、或いはそれに関わる物性の取り扱いは細心の注意を払う必要がある。また、海底に沿ってまれに発生する大きな流れ(benthic storm)の影響、逆に、深海流が極めて微弱になった際に予想されるハイドレートの静的成長⁽²²⁾の影響は、 CO_2 隔離期間の推定に大きな影響を及ぼすことが予想されるため、メンバー間の情報交換を密に保ちつつ行うこととなる。

Johannessen 教授のグループは、2002 年 3 月に終了した COSMOS プロジェクトにおいて新型高耐圧・高精度 pH センサの開発をほぼ終わっている。図 21 は、フィヨルドで連続計測した結果の例で、目標とする感度 0.003 pH が確認された。本年度からの OACE プロジェクトでは、実海域実験でその性能を確認し、堆積した CO_2 塊からの溶解量の計測に使われる。さらに、実海域実験では、化学データの計測の指揮を執ることとなる。

4 . 今後の課題

CO_2 海洋隔離の是非についての判断は、それが温暖化対策を目指したものであるだけに、国際社会や国際政治への影響も大きく、残された課題を解決するに当たっては、慎重な手順の下に進める必要がある。これを誤ると、世界世論から見放されることは避けられないであろう。その意味で、一研究グループが今後の見通しめいたことを述べることは差し控えたい。しかし、10 年余にわたって科学的・技術的観点からこの問題を検討してきた者として、今後に残された課題の幾つかは指摘することができるので、以下に列挙する。

4.1 地中貯留との関係

火力発電所等の集中発生源からの CO₂ の分離・回収は、技術的にはほぼ実用段階に来ているが、分離・回収した膨大な量の CO₂ をいかに処理するかは技術が立ち後れている。しかし、処分先としては、「大地」か「海」しかないと考えられており、世界的に見れば、大地を利用した「地中貯留」の検討を行っている国が多いのが現状である。これに対し、四方を海で囲まれ、世界第 6 位の排他的経済水域 (EEZ)⁽²⁵⁾ を誇る我が国では、CO₂ 海洋隔離研究が世界で最も進んでいるが、最近、世界の流れに押されるように、地中貯留研究に重心が移行しつつある。しかしながら、地中貯留の場合、研究者自身も認めるように、「貯留 CO₂ の大気への環流が絶対起こらないとは言い切れない」ことと、国土の狭い我が国では環流時の被害が大きいことから、地中貯留一本に絞ることはできないと思われる。このことが、OACE プロジェクトが、本年度 NEDO で採択された背景にあると考えている。

4.2 技術的課題

COSMOS の実現のためのブレイクスルー技術と位置づけられた、CO₂ 浅海放出ノズルが、CO₂ をスラリーとして放出する新 COSMOS の提案で原理的にはほぼ解決されたと考えている。しかし新 COSMOS 或いは非 COSMOS (2700m 以深に放出する従来方式) による深海貯留法の実現には、「長大管を含む投入システムの開発・安全対策と実海域試験」、「CO₂ タンカーの概念設計」、「CO₂ タンカーからの放出手順の確立」など、当所の所掌に含まれる未解決技術が数多くあり、当所の貢献が期待される。

なお、技術的課題への本格的参入は、次項の環境影響評価にある程度めどが立った後が望ましいであろう。

4.3 環境影響評価

溶解法、貯留法とも海洋環境への影響を皆無にすることはできないため、どの程度であれば、温暖化緩和という大きなメリットに見合うと考えられるかが、これらの方法の容認のポイントとなる。しかし、いかなる自然もそのまま残さねばならないとの考えも強く、最終的に世界世論の同意を得ることは容易ではないが、焦らず、一つ一つ科学的データを積み上げることが肝要であると考えている。OACE プロジェクトでは、海洋生態系の研究スタッフが充実している MBARI が行っている「溶解 CO₂ の生態系影響評価研究」の成果を実海域実験の成果と重ね合わせることが可能であり、科学的バックデータの蓄積は確実に進むものと期待できる。

生態系への影響に関しては、貯留サイトからの CO₂ の溶解拡散とそれに基づく低 pH 領域の分布予測が、当所が取り組める重要項目であろう。貯留 CO₂ 上方に生成する密度成層が、紅海の海底で確認されている、「高濃度塩水からなる密度成層の拡散抑制効果」⁽²⁶⁾ と同様の効果を持つことの確認が急がれる。これらの環境影響評価の結果は、実用化に向けて不可欠な、「サイト選定要件の確立」へと結びつくであろう。

さらに、環境影響評価という観点から溶解法と貯留法を比較した場合、前者は、局所的影響が限りなく 0 に近づき、影響範囲が限りなく広がる、いわゆる「0 × ∞」の形となり、数学的には不定形となり答えが出しにくくなる。例えば、1000 倍に薄まった際の局所影響を 1000 倍の精度で評価しなければ、影響範囲の 1000 倍を掛けたときの総影響評価はで

きないが、この作業は容易ではないと思われる。通常、局所影響が 0 に近づくことで、影響自体が小さくなると判断されることが多いが、明らかに誤りである。また、大気中の CO₂ 濃度が 360 ppm に増えても、呼吸がしにくくなるなどのローカルな影響が出るレベルではないが、地球全体を掛け合わせたとき、やっかいな温暖化をもたらすことから、温暖化自身が $0 \times \infty$ 問題の典型例であることが分かる。このように、「 $0 \times \infty$ 問題」の評価は難しい。

これに対し、後者の場合は、「有限 $\times$ 有限」の形となり、評価が可能となる。このように、環境影響評価の難易度が両者で大きく異なることの理解も重要と考えている。

4.4 実海域実証試験

OACE で計画されている実海域実験は、世界唯一のものであるが、規模としては極めて小規模に止まっている。CO₂ 深海貯留の実現までには、何段階かのスケールアップが必要となると考えられる。その意味からも、2 組の ROV と RV を有し、世界最大の CO₂ 排出国である米国に所属する MBARI との連携強化は、当所が将来の大規模実験に関わって行く上で、また世界世論の形成に影響を与えるために必要なことであろう。

4.5 国際的認知

我が国では、「地球温暖化対策推進大綱」(1998 年 6 月)において「緊急に取り組むべき革新的技術」として CO₂ 貯留・固定化技術が提示されており、さらに、総合科学技術会議は、「分野別推進戦略」(2001 年)において、緊急に推進すべき重点研究課題として「温室効果ガス固定化・隔離技術開発プログラム」を指定している。また、環境省ではこれに対応して、「地球温暖化統合研究イニシアティブ/対策技術研究開発)」の中で、各省連携による総合的評価研究対象の一つとして CO₂ 海洋処理技術が検討されている。このように、我が国では CO₂ 海洋隔離が温暖化対策技術としての認知を得つつある。しかし、COP3 以降の数回の COPs で公式に取り上げられたことがないなど、国際的認知は遅れている。今後、COP での認知に努力するとともに、ロンドンダumping条約など、CO₂ 海洋隔離を規制する可能性のある国際条約への対応が求められるであろう。

また、温暖化対策の研究とその実施は、各国と連携して取り組む必要があるが、とりわけ、世界の CO₂ 排出量の 1/4 近くを占める米国の研究所と連携することの意義は大きい。

4.6 コスト問題

これまで、CO₂ 分離回収設備を設けた新設火力発電所からの分離・回収コストは、海洋処理を含め、発電コストの 20 % 程度だと言われている。非可逆過程である分離・回収コストが全体の 6 ~ 7 割を占めるため、全コストへの海洋処理法の違いの影響は大きくはない。しかし、コストの抑制は処理のために新たに発生する CO₂ 量が減らせるという 2 重の利点があるため、今後ともその削減への努力が求められる。

CO₂ 海洋隔離に要する費用は、問題の性質上、国民全体で負担すべきものと思われる。また、海洋処理量は、省エネルギーや自然エネルギーの利用など、副作用の少ない対策で賄いきれない部分を引き受けるべきものであるため、全排出量の高々 5 % までと考えられる。すると、国民の負担増加は、 $20 \times 0.05 = 1$ % 程度となり、許容レベルとなる。

5. おわりに — 当所の新たな取り組み —

以上、二つの NEDO 国際共同研究と今後の課題について報告した。一つ目は、2001 年度に終了した、UoB との共同研究で、CO₂ 深海貯留法の弱点克服を目指した COSMOS プロジェクトについて、二つ目は、2002 年度からの、MBARI と UoB との国際共同研究 OACE プロジェクトについてであった。前者からは、COSMOS の概念を究極まで高めた新 COSMOS という新たな特許申請に結びつけた。後者では、CO₂ 深海貯留の科学的バックデータの内、最も不足している実海域条件下での貯留 CO₂ の挙動解明に向けた研究計画について述べた。今後の課題では、CO₂ 深海貯留が実現へ向かうことを願いつつ、深海貯留研究の置かれている状況について、忌憚のない私見を述べた。

当所では、10 数年に及ぶ CO₂ 深海貯留研究を通して培ったハイドレート研究のポテンシャルを活用し、競争型特研「ガスハイドレートペレットによる天然ガス海上輸送に関する研究」を 2001 年度から、指定研究「ガスハイドレートの分解挙動に関する基礎研究」を 2002 年度から、それぞれ開始した。また、昨年度末に完成した深海再現水槽は、CO₂ 放出管への適用が考えられる、特別研究「大深度ライザーシステムの安全性に関する研究 (2001 ~ 2005)」に利用されている。

なお、OACE プロジェクトの開始に当たり、NEDO 側から、「石油代替えエネルギー源としてのメタンハイドレートの開発に関連した実海域実験」について検討依頼があった。MBARI との今後の共同研究候補と考えられる。

この様に、CO₂ 深海貯留研究を起点とし、ハイドレート或いは深海技術をキーワードとする研究群が大きな広がりを持って成長しつつある。

謝 辞

本報告で紹介した二つの国際共同研究は、NEDO の助成により実施されたものと実施中のものであり、関係者各位並びに両共同研究メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) Machetti, C., *Climate Change* **59**, 59-68, 1977.
- (2) Haugan, P.M. et al., *Nature*, **357-28**, 318, 1991.
- (3) Aya, I. et al., *Energy Convers. Mgmt.* **36**, 6-9, 485, 1995.
- (4) M. Ozaki, in *Greenhouse Gas Control Technol.*, ed. B. Eliasson, Elsevier Science, 275-280, 1999.
- (5) 綾威雄 他, 月刊・コインダストリー **5-7**, 16-30, 2000.
- (6) 綾威雄, 高圧力の科学と技術, **12-1**, 40, 2002.
- (7) Aya, I. et al., same as ref. (4), 269-274, 1999.
- (8) NEDO Int. Joint Res. Grant, 99GP3, 119, 2000.
- (9) Zweigel, P. et al., GHGT-5, CISRO, 360, 2001.
- (10) 綾威雄 他, 海洋開発ニュース **28-6**, 9-17, 2000.
- (11) 綾威雄 他, 第 2 回船研講演会, 23-34, 2000.
- (12) Aya, I. et al., 223rd ACS National Mtg., Orlando, April 7, 2002.
- (13) Kvamme, B., ISOPE-2001, Stavanger, 508-516.
- (14) Yamane, K. et al., *Gas Hydrate*, Annals of New York Academy of Sciences, **912**, 254-260, 2000.
- (15) Aya, I. et al., same as ref. (13), 495-497, 2001.
- (16) Haugan, P.M. et al., *Nature* **357-28**, 318, 1992.
- (17) Fer, I. and Haugan, P.M., GHGT-6, Kyoto, 2002.
- (18) 古林義弘 他, 日本造船学会論文集 **189**, 115-126, 2001.
- (19) Haugan, P.M. et al., *Geophysical Research Letters*, 2002 (to be submitted).
- (20) Bellerby, R.G.J. et al., *Talanta* **56**, 61-69, 2002.
- (21) NEDO Int. Joint Res. Grant, 02GP1, 2002.
- (22) 綾威雄, 混相流 **16-3**, 223-231, 2002.
- (23) Brewer, et al., *Science* **284-5416**, 943-945, 1999.
- (24) Aya, I. et al., GHGT-5, CISRO, 423-428, 2001.
- (25) 栗林忠男, *Ship & Ocean Newsletter* **41**, 2, 2002.
- (26) Brewer, et al., *A Geochemical and Geophysical Account*, Springer-Verlag New York Inc., 1969.