

スラリー化二酸化炭素深海投入法、新 COSMOS、の提案

大阪支所 *山根健次、綾 威雄、小島隆志 機関動力部 汐崎 浩毅

Monterey Bay Aquarium Research Institute Peter G. Brewer, Edward T. Peltzer

1. まえがき

地球温暖化防止京都会議（COP3）の議定書の内容を受けた「地球温暖化対策推進大綱」（平成10年6月）において、「緊急に取り組むべき革新的技術」の一つとして二酸化炭素海洋貯留・固定化技術が提示された。海洋行政を担う、国土交通省は、二酸化炭素海洋処理に係わる経済活動あるいはそのための海洋施設等に対し行政権を有することになる。

図1にCO₂隔離技術全般のイメージを示すが、当所では、地球温暖化を緩和する方法として、深海窪地でのCO₂貯留法に関する様々な基礎的研究を行ってきた。この方法は、2000年以上といわれるCO₂隔離効果の長期性や、海洋生態影響を貯留サイト周辺だけに限定できる可能性、等の理由から大きな期待が寄せられている。貯留法を安定的に成り立たせるためには液体CO₂がCO₂飽和溶解海水よりも重くなる3500mよりも深いサイトを必要とする。従来、貯留サイトの深さに伴う技術的な困難性と高コストが、貯留法の実現性においてマイナス要因と見られてきた。しかし、タンカー輸送される液体CO₂は、タンク圧をできるだけ減少させる必要性から蒸気圧の低い摂氏-55℃まで冷却されると想定される。3重点温度（-56.6℃）近くまで冷やされたCO₂は、深度500m程度の浅海中においても海水よりも重く、この海水より重い低温液体CO₂を液泡として浅海に放出すると、液泡は海中を沈降するが、回りの海水からの熱供給により液泡が加熱され、やがて海水より軽くなり上昇に転ずる。しかし、海水からの熱供給による液泡の平均温度の上昇は大きな液泡ほど小さくなることから、ある限界直径以上の低温CO₂液泡は、浅海に放出されても、等密度深度の2,750mを通過し、3500m以深の貯留深度に達することができる。当所ではこの新しい方法をCOSMOS(CO₂ Sending Method for Ocean Storage)と名付け、1999年3月に我が国の特許を取得した^[1]。

2000年秋、著者らは、COSMOS実現のための基礎データ取得を目的として、前年に試作したCO₂放

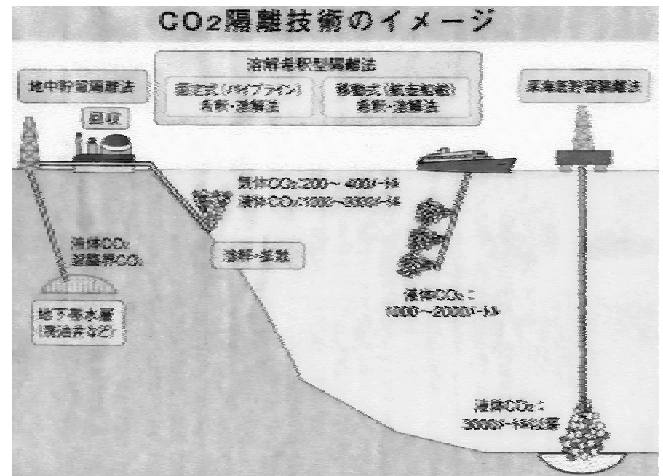


図1 CO₂隔離技術のイメージ
（日刊工業新聞、平成13年4月6日より転載）

出システムの機能を改良し、米国の Monterey Bay Aquarium Research Institute(MBARI)と共同で、実海域実験を行った。

2. 改良型試作低温CO₂液泡放出装置

ROV(Remotely Operated Vehicle)を使った500m級深海実験で用いる低温液体CO₂放出装置は以下の要件を満たす必要がある。装置のROVへの搭載に始まって、潜行開始、500m級深度への到達、放出実験開始、という一連のプロセスの間、タンク・ホルダー内に充填されたCO₂が-55℃近くの低温を保持しなければならない。タンク・ホルダー内CO₂状態監視のための温度・圧力モニターはROVの計測系に依存することなく自己完結していなければならない。実海域深海放出のための操作はROVに備え付けられているロボットアームによって容易に操作できる程度の簡単なものでなければならない。装置の総重量はROVの搭載重量制限を越えてはならない(250ポンド=113kg)。

これらの要件を考慮して、図2に示す改良型試作低温CO₂液泡放出装置を製作した。主な改良点として、液体CO₂ホルダと蓋は、保冷用の真空二重

殻構造に加え、新たにシリカバルーンとエポキシの複合体断熱材を用いて断熱されている。更に、温度・圧力モニター用のシース熱電対およびコイル状ステンレス細管を蓋の部分から取り出し、新規製作した高耐圧ホルダー内に組み込まれた温度計・圧力計に導き温度・圧力計測を可能とした。これらの温度・圧力情報は ROV のリモートカメラモニターを経由して監視された。

その他、大きな変更はないが主な仕様として、CO₂ホルダ容積は約 2 リットル。蓋は開閉が簡単なクラッチ構造で、1/8 回転することによって素早く開閉が可能。CO₂押し出しピストン動作用の油圧シリンダの背後は粘性の低いタービン油によって満たされ CO₂放出までの間、空気ホルダーから送られる高圧空気によるパワーピストン押し下げ力を支えている。CO₂ホルダー内の圧力と深海圧はフレキシブル給油装置から連通管を通じておられる油によってバランスしており、ホルダー内のピストンや、蓋は力学的に平衡状態となっている。平衡状態のピストンは、油圧シリンダ内の油をボールバルブを通して抜くことによって押し下げられる。ピストンの下向きの運動速度は油圧シリンダとボールバルブの間にあるニードルバルブの開度によって制御される。この装置の総重量は CO₂ホルダ、CO₂及び放出機構、ROV に固定するための枠組み、を含め約 70kg である。等である。

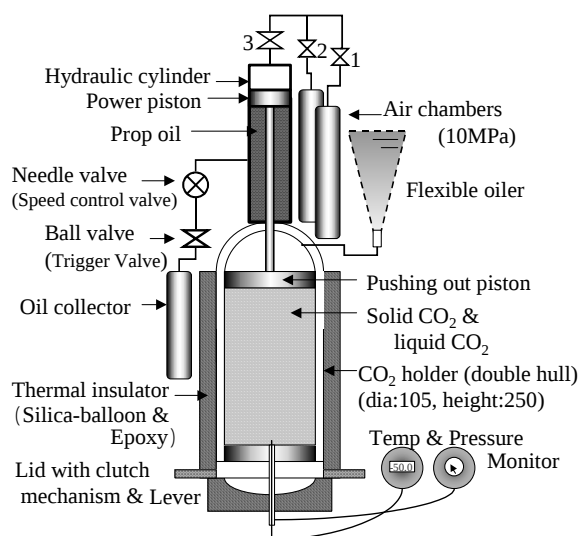


図 2 改良型試作低温 CO₂液泡放出装置

深海での CO₂ 放出に要する操作は 2 アクションとした。すなわち、蓋のクラッチを 1/8 回転させる、パワーピストンを支える油を抜くためのボールバルブを開ける、である。これらの操作を深海ロボットアームが容易にできるよう、蓋およびボールバルブにモンキーボール付き補助ロープを接続した。

3. 実海域実験

3.1 実海域実験の場所(MBARI)

サンフランシスコのおよそ 150km 南にある耳の形をしたモンテレー湾の中央に位置するモスランディング(Moss Landing)にある MBARI は今回の実海域実験で用いた ROV (Ventana 号) とその母船 (Point Lobos 号) を所有している。非常に大きく急な海洋峡谷(Monterey Canyon)が太平洋から Moss Landing に続いているため、深海海洋調査等が 1 日の巡航でできる好立地な場所である。

3.2 改良型試作低温 CO₂液泡放出装置の試験

1998 年秋の MBARI との第 1 回目米共同実海域実験⁽²⁻³⁾、1999 年秋の第 2 回実海域実験⁽⁴⁾に引き続き、2000 年 10 月 5~6 日、第 3 回実海域実験が実施された。今回の主な潜水目的は、改良型試作 CO₂液泡放出装置によって低温 CO₂液泡を放出しその挙動を観察することである。

10 月 5 日(木)、Peter G. Brewer 率いる実験スタッフと我々を乗せた母船は予定通り午前 7 時に出航し、1 時間 20 分で実験海域に着いた。

まず、ROV の改良型放出装置搭載状態での海中バランスを取るため、深度 5 m への予備潜水を行った。予備潜水から上がってきた改良型放出装置のホルダー内に、予冷却用のドライアイスを入れ、10 分間放置後、入れ替えに、放出用 CO₂となるドライアイス 2kg をホルダー内に充填した。バルブ類の開閉・開度や ROV ロボットアームが引く 2 本の補助ロープの動きを確認し、ROV に改良型放出装置を取り付け、潜水を開始した。図 3 に潜水直前のチェックが行われている改良型放出装置を示す。

通常の ROV の沈降速度(約 0.3m / s)では、CO₂放出の深度 500m に達するには、30 分近くを要するが、CO₂ホルダーの断熱性能の都合上、高速沈降を要求し、潜水開始後約 15 分で実験深度に達した。



図 3 入念にチェックされる CO₂ 放出装置

到着後、直ちに改良型放出装置の 1 回目の放出実験を開始した。今回新設した CO₂ ホルダー内温度計は -51 を示していた。手慣れた ROV パイロットの操作により、CO₂ ホルダーの蓋をフリーにする操作と、CO₂ を押し出すピストンを動かせる操作が手順よく行われ、開いた蓋からドライアイスが塊となって沈降していく様子が高解像度記録装置上で観察された。

10 月 6 日(金)、午前 7 時に出航し、前日同様、1 時間 20 分ほどで実験海域に到着した。

早速、ホルダーの予冷却を行い先日同様、ホルダーにドライアイス 2kg を詰め、放出装置を ROV に搭載し潜行開始した。やはり、15 分程度で放出深度の 500m に達した。前日の実験では放出 CO₂ の全量がドライアイス状態であったため、低温液体放出を狙う今回は、放出深度でホルダー内のドライアイスの液化を待つこととした。2 時間経過後、指示温度から、ドライアイスの一部は液化していないと思われたが、第 2 回目の放出を開始した。

前日同様、ROV パイロットがロボットアームをうまく操り、低温液体 CO₂ の放出に成功した。一部ドライアイスが残る氷被覆低温液体 CO₂ を約 50m 追跡することに成功した。追跡終了後、コントロールルーム内に誰からともなく大きな拍手の輪が広がった。

図 5 は、氷被覆低温液体 CO₂ が沈降していく映像である。図 6 は映像データから求めた CO₂ 塊の深度方向の挙動である。沈降する氷被覆液体 CO₂ の塊は直径(推定 8cm)が小さいため 150 秒後に密度逆転

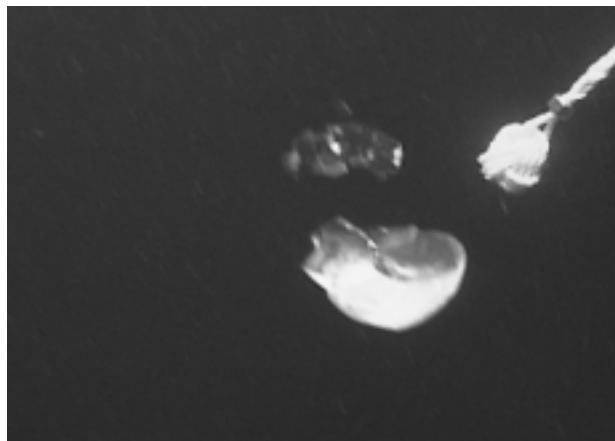


図 4 沈降を続ける氷被覆低温液体 CO₂

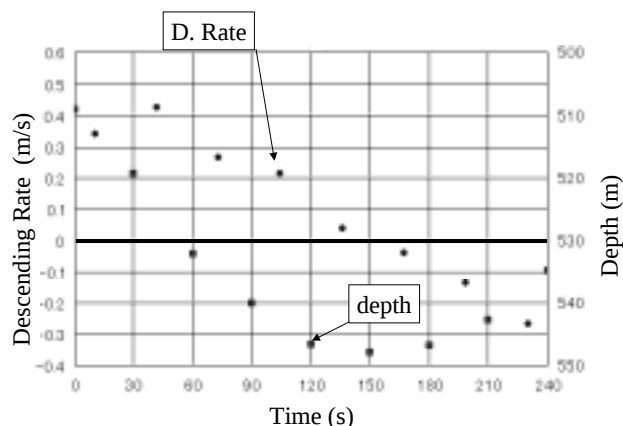


図 5 氷被覆スラリー型 CO₂ の挙動(実験値)

が生じ海水中を上昇する結果となっている。

4. 議 論

今回の実海域実験において、装置改良によって、ホルダー内の CO₂ 保冷性能が向上したことから十分な低温状態での CO₂ の放出が可能となった。偶然的に、ホルダー内に残るドライアイスと液体 CO₂ が混在した塊を放出したことから、結果として氷被覆が容易になった。このように、固体と液体の CO₂ がスラリー状態で存在した場合、COSMOS における深度 2700m 通過限界直径にも大きな影響を与える。図 6 ~ 7 に氷被覆 CO₂ スラリーボールの挙動シミュレーションを示す。図中記号 α はドライアイス率を D は直径を表す。図 6 ~ 7 において $\alpha=0.5$, $D=0.4m$ では深度 2700m を通過して沈降を続けるが、 $D=0.38m$ では深度 2000m で U ターンすることになり、溶解法にとっても興味深い結果となっている。

5. 新 COSMOS の提案

本実海域実験の主目的である低温 CO₂ 液泡を放

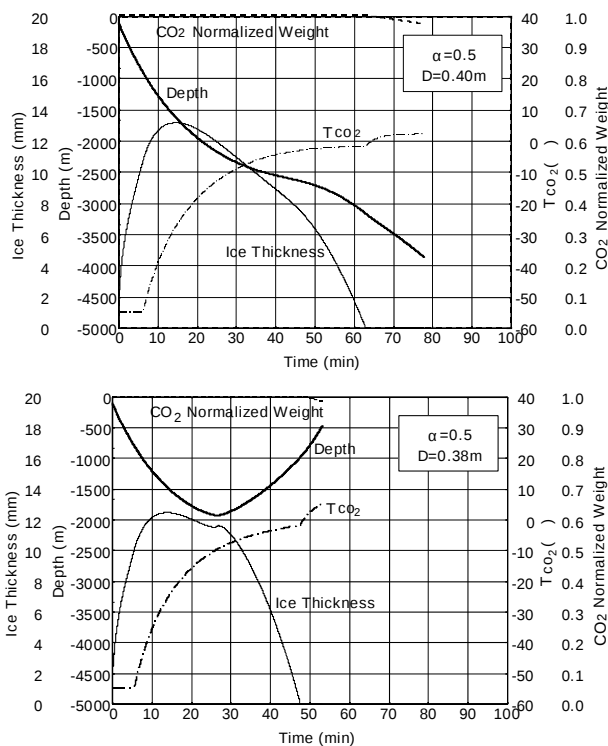


図 6 氷被覆スラリー塊の挙動シミュレーション例（時間依存）

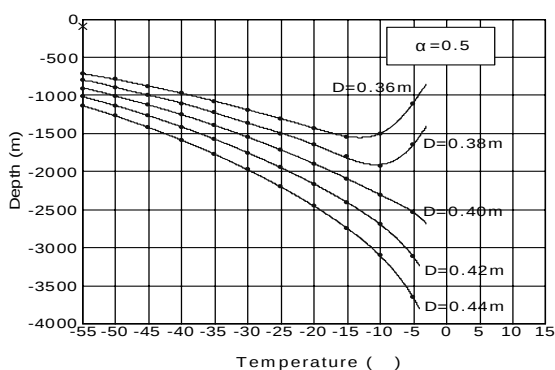


図 7 氷被覆スラリー塊の挙動シミュレーション（温度-深度）

出しその挙動を観察する実験は成功した。特にドライアイスが一部残る CO₂ スラリーボールは COSMOS において沈降を続けるために必要な氷被覆を容易にすることが分かった。シミュレーションの結果、このようなスラリーボールは深度 2700m を通過するための限界直径も 0.4m 程度と低温液体 CO₂ の熱容量に依存した場合の 1m に比較して開発が容易な寸法となっている。

実海域実験と数値シミュレーションを基に、図 8 に示すような CO₂ スラリーを製造するための冷却

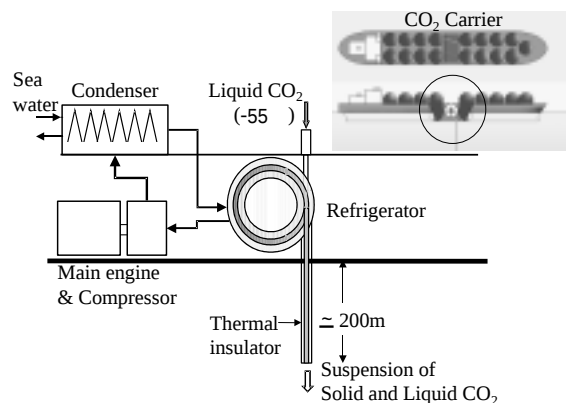


図 8 新 COSMOS の概念図

機構を船上に持つ新たな CO₂ 深海送り込み法、新 COSMOS、を提案する。新 COSMOS の CO₂ スラリー球を覆う氷層は低温液体 CO₂ の氷層よりも厚く、球体が海水中を落下していく際の摩擦力や流体力などに打ち勝つ上で有利であるばかりでなく、スラリー球の寸法と固体率を適切に選択することにより、特定の深度に到達した時点で氷層を自然破壊させ、流出した液体 CO₂ を分散溶解させることも可能となる。COSMOS の概念をこのように修正することにより、より経済的に CO₂ を任意の深度の海中に送り込むことが可能となる。

参考文献

- [1] I. Aya, K. Yamane and K. Shiozaki, "Proposal of Self Sinking CO₂ Sending System: COSMOS," Greenhouse Gas Control Technologies, Pergamon, Proceedings of GHGT-4, Interlaken (Aug., 1998), pp.269-274.
- [2] P. G. Brewer, E. T. Peltzer, G. Friederich, I. Aya and K. Yamane, "Experiment on the Ocean Sequestration of Fossil Fuel CO₂: pH Measurements and Hydrate Formation," Marine Chemistry, 72(2000)83-93.
- [3] Mario N. Tamburri, E. T. Peltzer, G. Friederich, I. Aya, K. Yamane and P. G. Brewer, "A field study of the effects of CO₂ ocean disposal on mobile deep-sea animals" Marine Chemistry, 72(2000)95-101.
- [4] 山根健次、他「深海貯留二酸化炭素の安定性確認実験」、第 7 3 回船研発表講演集、1999 年 6 月。