

第3回二酸化炭素深海貯留国際共同実験

海上安全研究領域
大阪支所
東京大学海洋研究所
モンテレー湾海洋研究所
ベルゲン大学

* 中島 康晴
綾 威雄、山根 健次
中山 典子
P. G. Brewer、E. T. Peltzer, III、P. Walz、R. Dunk
P. M. Haugan、G. Alendal

1. はじめに

火力発電所等の排気ガスから回収された二酸化炭素（CO₂）を深海底へと送り込み、海底上で長期間にわたって貯留するCO₂深海貯留は、地球温暖化を抑制するための革新的技術の1つとして注目されている。図1にCO₂深海貯留のイメージを示す。海上技術安全研究所（以下、当所）では、1980年代の後半から液体CO₂やCO₂ハイドレートの物性などのCO₂深海貯留の基礎となる知見の充実に努めてきた。¹⁾ 1990年代末からは、それまでの研究成果に基づき、CO₂深海貯留のための液体CO₂深海投入法（COSMOS）の開発を行った。^{2,3)} また、同時期から米国のモンテレー湾海洋研究所（MBARI）及びノルウェーのベルゲン大学との共同研究を開始し、米国カリフォルニア沖での実海域実験に参画してきた。⁴⁾ 研究の進展とともに、深海に貯留したCO₂の挙動や、海洋環境への影響に関する重要な知見が蓄積された。

その結果、(1) 液体CO₂を安定的に貯留できるか、(2) 周囲の環境への影響をどのように評価するかという点が、重要な研究課題として浮上してきた。前者のポイントは、Brewerらが水深3650mにおいて観察した「溢れ現象（オーバーフロー現象）」である。この現象は、海底上に設置したビーカー内に注入した液体CO₂が、ビーカーから溢れ出てきたことに由来する。⁵⁾ 当所では、ラボ実験によりその原因を検討し⁶⁾、貯留深度を水深約3800m以深とすれば溢れ現象は起こらないと予測した。一方、後者については、最終的には海洋生物等への影響についても検討する必要があるが、そのためにはまず貯留したCO₂の溶出特性を解明

することが必要と考えられた。

そこで、これらの問題を検討するため、上記3研究機関の国際共同プロジェクトとして、2002年度から3カ年間にわたり「二酸化炭素深海実験（Ocean Abyssal Carbon Experiment, OACE）」プロジェクトを実施した。本プロジェクトでは、実海域実験を中心として、高圧実験装置を利用した陸上模擬実験や数値シミュレーションを実施した。実海域実験は、MBARIの所在地である米国カリフォルニア州モンテレー湾の沖合海域において2003年2月、同年10月、及び2004年11月の計3回実施された。本報では、まず過去2回の実験の経緯について紹介し、その結果を踏まえて、第3回実海域実験について報告する。

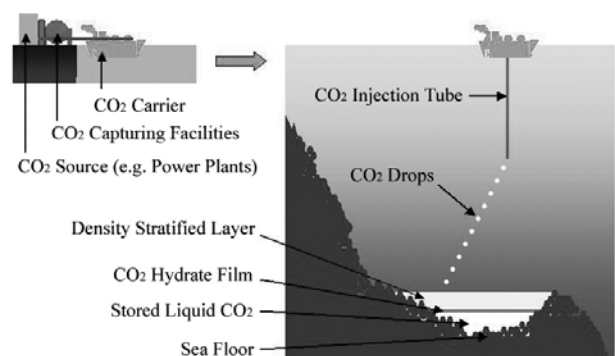


図1 CO₂深海貯留のイメージ

2. これまでの実験の経緯

まず、過去2回の実験の経緯と結果について簡単に述べる。第1回実海域実験は、予備実験として水深680mの海域で実施された。海底から約1mの高さに設置した底面の開いた容器に液体CO₂を貯留し、その表面におけるCO₂ハイドレート膜の

生成や、pH等のデータを計測した。⁷⁾ 続く第2回実海域実験は、これまでに実施された深海貯留実海域実験としては世界最深となる、水深3940mの海域で実施された。液体CO₂を海底に設置した実験装置（Benthic Flume）に貯留し、溢れ現象が起こるかどうかを確認した。また、貯留CO₂の周囲においてpH等のデータを計測した。さらに、Benthic Flumeに取り付けたスラストや造波板により液体CO₂上に流れや波を発生させ、pH変化に及ぼす流れや波の影響についても検討した。⁸⁾

その結果、水深3940mの海域では、溢れ現象が起こらないことが確認された。また、貯留CO₂の周囲においてpHが低下するのはごく狭い範囲に限定されるが、その範囲などは流れや波の影響を受けることが示された。さらに、周辺海水のpHと電気伝導度の実験データを比較した結果、溶解したCO₂分子の水和反応の速度がかなり遅いのではないかと示唆された。⁹⁾

そこで、第3回実海域実験では、pH変化に及ぼす流れや波の影響を詳細に検討する。また、CO₂分子の水和反応速度の測定についても検討することとした。実験サイトは、第2回実海域実験と同一地点とした。

3. 実験装置

本実験では、第2回実海域実験で使用した実験装置（Benthic Flume）を改良して使用した。実験装置全体の外観を図2に示す。この装置はスラスト及び造波板を備えたプラスチック製の長方形の容器（1.5m×0.4m×0.4m）であり、内部に液体CO₂を貯留し、その表面上に流れや波を起こして実験を行う。この装置の上面は開放されており、水中で液体CO₂を注入することができる。また、前面は透明なアクリル樹脂製であり、貯留した液体CO₂の様子を観察することができる。また、スラスト及び造波板とは反対側にpHセンサ及び流速計が設置されている。pHセンサ及び流速計の外観を図3に示す。さらに、Benthic Flumeから離れた位置における水の電気伝導度、水温及び水圧のデータを収集するため、3台のデータ記録装置（Conductivity, Temperature, Depth Meter : CTD）を使用した。これらの実験装置は輸送コンテナに搭

載され、海上から直接海中へと投入される。

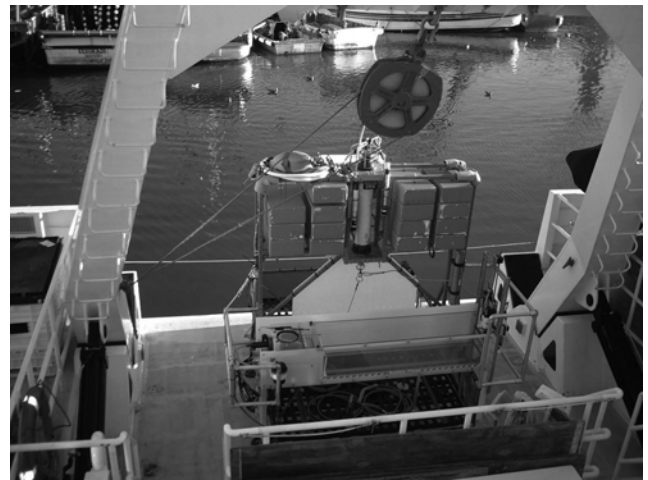


図2 輸送コンテナに搭載された実験装置（Benthic Flume）

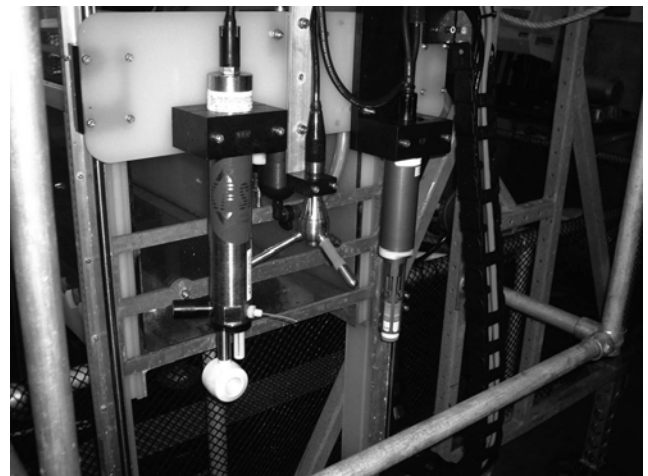


図3 Benthic Flume に設置した pH センサ及び流速計

これらの実験装置を海底に設置し、実験を行うため、MBARIが保有する水深4000m級の深海探査艇（ROV）であるTiburonを使用した。その外観を図4に示す。Tiburonには、水中カメラ、pHセンサ、pH指示薬放出ノズルなどが搭載され、水中で各種の実験作業を行う。さらに、海底への液体CO₂運搬や、Benthic Flumeに設置した機器への電力の供給及び各種計測データの中継を行う。液体CO₂は船上でTiburonに取り付けられたチタン合金—FRP製の耐圧容器に注入し、海底へと運搬した。

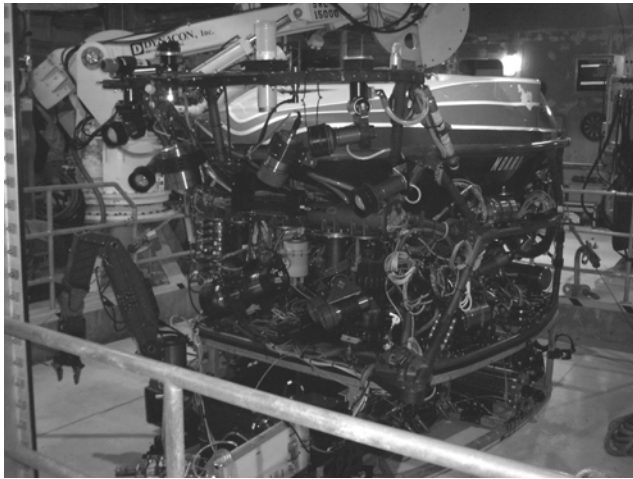


図 4 深海探査艇 Tiburon

Tiburon の母船となるのが図 5 に示す Western Flyer 号である。Western Flyer 号は双胴船であり、船体中央の ROV 格納庫の底板を開放して Tiburon を潜水させる。Tiburon は船内の制御室から操縦され、水中カメラの映像や各種データも制御室でモニターされる。



図 5 母船 Western Flyer 号

実験航海は、2004 年 11 月 1 日から 6 日までの 5 泊 6 日の行程で行った。11 月 1 日に MBARI を出港し、半日の航海で実験サイト（北緯 37° 11′、西経 124° 19′）に到着した。同日夜に Benthic Flume などの実験装置を輸送コンテナに搭載して海中に投入し、翌 2 日から Tiburon を潜水させて実験を開始した。5 日に実験を完了し、実験装置を回収してサイトを離れ、6 日に帰港した。

4. 実験結果

実験サイトにおける水温、塩分濃度等の鉛直分布を図 6 に示す。水深 3940m の海底における水温は 1.5°C、塩分濃度は 34.5‰であった。

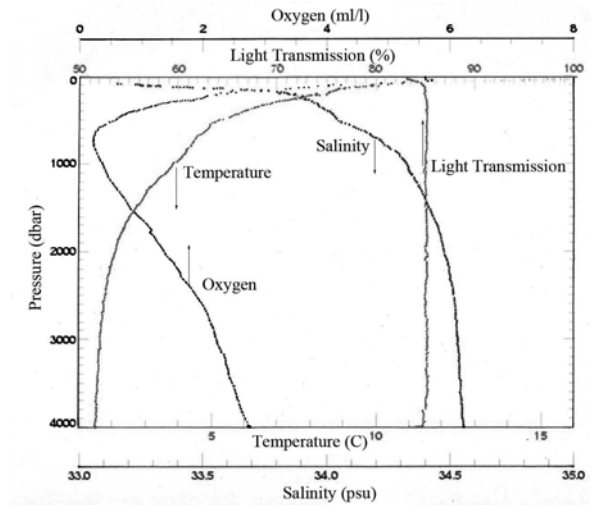


図 6 実験サイトにおける水温等の鉛直分布

実験では、Benthic Flumeを海底に設置し、そこから 1m、2m及び 5m離れた位置にCTDを 1 台ずつ設置した。Benthic Flumeに液体CO₂を注入すると、その表面には速やかにCO₂ハイドレート膜が生成した。スラスト及び造波板を稼働させて表面に流れや波を発生させ、ハイドレート膜の状況を観察した。ハイドレート膜が引きはがされた場合、直ちに新しい膜が生成し、液体CO₂の表面が常にハイドレート膜で保護されることが確認された。この様子を図 7 に示す。

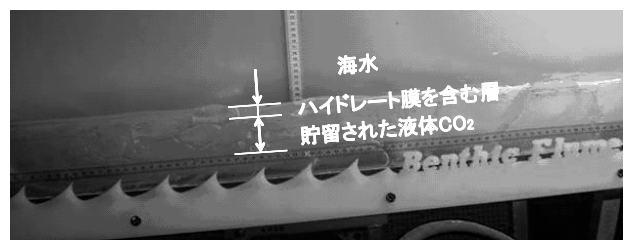


図 7 液体CO₂の表面におけるCO₂ハイドレート

次に、スラスト及び造波板を稼働しながら液面上で pH 指示薬を放出し、流れ及び波浪状態における pH の分布を記録した。pH 指示薬としてフェノールレッドを使用した。Benthic Flume の出口付近に設置した流速計により流速を、水中カメラにより波の周期と波長を測定した。図 8 に pH 指示

薬を放出する様子を示す。

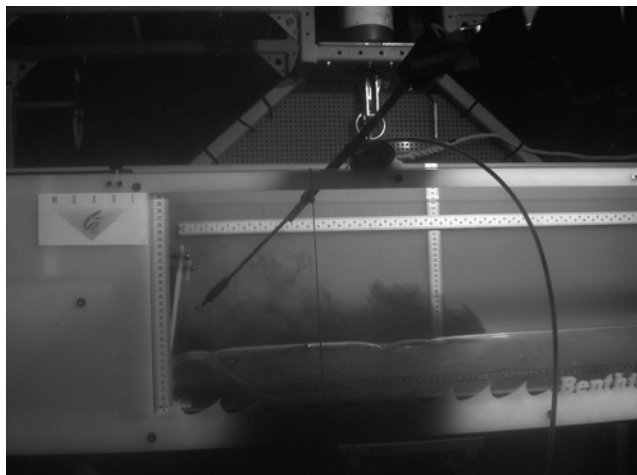


図 8 液体CO₂上でのpH指示薬の放出

さらに、Tiburónに取り付けたpHセンサにより、水中に溶解したCO₂分子の水和反応速度についても測定を試みた。これらの実験により収集したデータは膨大であり、現在も解析中である。

5. まとめと今後の展望

二酸化炭素深海貯留に関する国際共同研究プロジェクトの一環として、米国カリフォルニア州沖の水深 3940mの深海底において実海域実験を実施した。貯留した液体CO₂近傍におけるpH変化に及ぼす流れや波の影響や、CO₂分子の水和反応速度を検討するための実験を行い、多数のデータを収集した。

本プロジェクトの前回実験までの研究成果は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が作成している「二酸化炭素の回収・隔離に関する特別報告書」に盛り込まれている。今回の実験の成果についても、このような場に反映されることが期待されている。

6. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の国際共同研究助成事業（NEDO グラント）として実施されました。また、実海域実験にあたってご協力をいただいた、モンテレー湾海洋研究所の Western Flyer 号の乗員ならびに Tiburón のパイロットの皆様へ、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 綾, 山根, CO₂海洋処理法の基礎研究, 船舶技術研究所報告, **33**(2), pp. 91-135 (1996).
- 2) Aya, I., et al, Proposal of Self Sinking CO₂ Sending System: COSMOS, Proc. 4th Intl. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies, pp. 269-274 (1999).
- 3) Aya, I., et al, Proposal of Slurry Type CO₂ Sending System to the Ocean Floor, New COSMOS, Fuel Chemistry Division Preprints 223rd American Chemical Society National Meeting, **47**(1) (2002).
- 4) Brewer, P. G., et al, Experiments on the Ocean Sequestration of Fossil Fuel CO₂: pH Measurements and Hydrate Formation, Marine Chemistry, **72**, pp. 83-93 (2000).
- 5) Brewer, P. G., et al, Direct Experiments on the Ocean Disposal of Fossil Fuel CO₂, Science, **284**, pp. 943-945 (1999).
- 6) Aya, I., et al, Simulating Experiment of CO₂ Storage at 3600m Deep Ocean Floor, Proc. 5th Intl. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies, pp. 423-428 (2000).
- 7) Brewer, P. G., et al, Small Scale Field Study of an Ocean CO₂ Plume, J. Oceanography, **60**(4), pp. 751-758 (2004).
- 8) Haugan, P. M., et al, Ocean Abyssal Carbon Experiments at 0.7 and 4 km Depth, Proc. 7th Intl. Conf. Greenhouse Gas Control Technologies (in press).
- 9) Nakayama, N., et al, First Results from a Controlled Deep-sea CO₂ Perturbations Experiment: Evidence for Rapid Equilibration of the Oceanic CO₂ System at Depth, J. Geophysical Research—Oceans (in press).