

CO₂はどのように堆積物や水柱を移行したのか？

なぜ移行経路の理解は重要なのか？

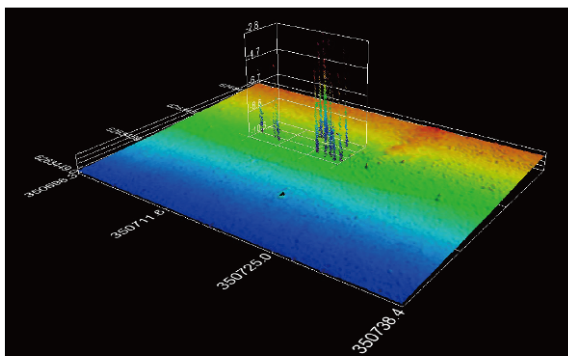
二酸化炭素地中貯留の潜在的影響を理解するには、ガスがどのように地下を移行し、主要な化学的・生物学的過程と相互作用するのかの知識が必要である。攪乱がない自然環境でのガス伝播の移行経路および移行率を理解することは、海底放出の初期段階で起こることを予測するのに重要である。QICS 実験は、地球物理調査技術やダイバーによる直接観測により、CO₂がどのように地下パイプラインの末端から堆積物および水柱へと移動するのかを分析できるよう設計された。

ガス移行の画像化に利用できる技術

地震反射法。ガス状 CO₂ は、周囲の堆積物より密度が低いため、地下を上方に伝播し、海水と接触すると徐々に溶解する。我々は、音響エネルギーの反射を利用する反復地震探査を用いて、地下のガスの位置を特定し、時間と共にどのように移動したのかを検出した。遊離ガスは、その物理的特性が非ガス状堆積物と著しく異なり、ガス気泡が音響エネルギーを散乱して地震断面の特性を生じさせるため、特に遠隔音響技術での画像化が容易である。QICS 実験で、小型調査船は2つの異なるタイプの音響源（ブーマーおよびチャープ）と、反射された音響エネルギーを記録するための別々の水中聴音器を用いた。



曳航チャープシステム



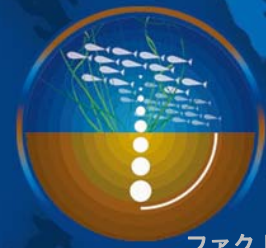
気泡流を明確に示す測深データ

マルチビーム測深法。ガス状 CO₂ が海底表面を上昇すると、それが海底表面を突き破ってあばたとして知られる海底沈下を形成する前の閉じ込められている間、一般的に軟弱堆積物の反り上がりを生じさせる。マルチビーム測深法は、一連の高周波数音波を使用して、海底の3D画像を生成する。マルチビーム調査により、地下放出地点の上に生じた海底のあばた、および水柱の気泡が明確に画像化された。

ダイバー観測および音響モニタリング。水柱内で、ダイバーは海底のあばたから上昇する CO₂ の気泡を観測し測定した。これらの気泡は振動するので音響エネルギーを出すため、水柱内に吊り下げられた水中聴音器で記録された。水中聴音器で記録された信号を解析すれば、どのくらいの量のガスが海底から出ていたのかを決定できる。この測定値を、その後ダイバーの直接測定と比較した。気泡サイズ、形状および上昇率を、デジタル写真で解析した。



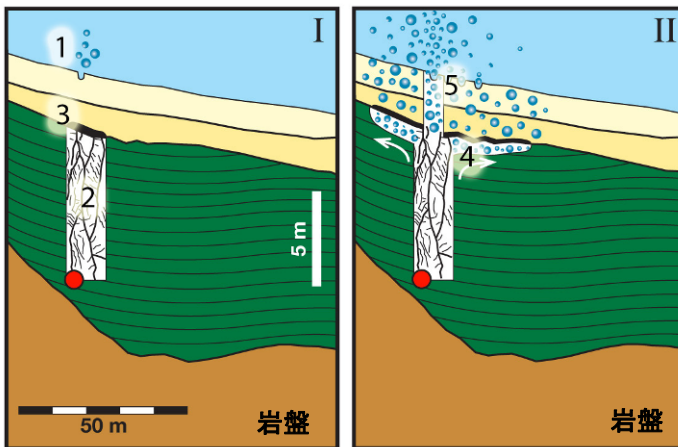
「ハイテク」気泡測定



CO₂ 移行経路

堆積物は、~8m の微細薄層泥（緑色）の層状構造から成り、その上を~2m の微細シルト質砂が覆い（黄色）、さらに 1~2m の粗砂および砂礫が海底を形成していた（淡黄色）。

1. CO₂ の注入開始後数時間以内に、ダイバーにより海底で小さなガスプルームが観測された。この水柱への最初の CO₂ 流は限定的であり、おそらく地震探査の分解能を超えた先在の微細割れ目を通じて生じたと考えられる。
2. 反復地震探査から、放出の最初の 13 日間は、大半の CO₂ が下部泥層内の幅約 5~10m の相互に繋がった割れ目の垂直ガス「チムニー」に閉じ込められることが分かった。これらの泥内では、臨界圧力を超えると割れ目の伝播によってガスが垂直に移行する。



放出地点（赤い点）からのガス流の概念図

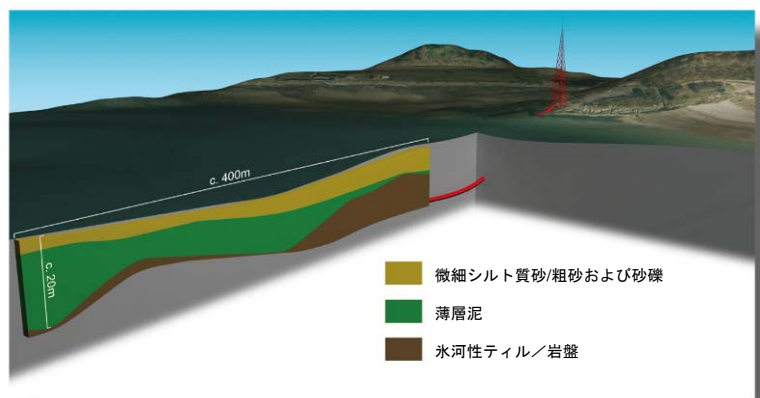
3. 泥から被覆シルトおよび砂への粒径の変化は、割れ目支配型の流動様式から、毛細管侵入および流動化支配型の流動様式への段階的变化を生じさせ、これによってガスはよりゆっくりとした垂直伝播のみが可能になった。

4. これにより、薄層泥層の最上部でガスの蓄積と水平拡散が生じた。放出の初期段階に上層での反射信号が欠如することは、ガスがゆっくり拡散することと一致する。

5. 実験の後半で行われた注入率の増加は、ガスがシルト質砂層を破碎し、海底の粗砂および砂礫に浸透するのを可能にした。このことは、チムニーの地震探査画像が注入地点から海底まで及ぶことと一致する。その結果、地下流動は流量が増すにつれて、時間と共に空間的に焦点を合わせたものになった。

結論と意味

- ・ 反射法地震探査、マルチビーム測深法、水中聴音器モニタリングおよびダイバーによる直接観測は、すべて海底地下および水柱における CO₂ の移行経路の側面を明らかにできる方法である。
- ・ 地表付近の地質（特に堆積物の粒径、孔隙率および浸透性）が、注入されたガスフラックスと共に、CO₂ の海底への移行機構を制御した。
- ・ 海底から出る CO₂ のフラックス測定は、注入された CO₂ のごく一部だけがガスとして水柱に入ったことを示している。残りの部分は、地下堆積物内に捕捉されたか、または溶解した。
- ・ CO₂ が流動化および割れ目伝播により移行経路を誘発したため、漏洩経路は時間とともに特定の場所に集中してきた。



注入サイト図