

光ファイバーを用いた地層変形監視技術の開発

CCSサイトにおいて、CO₂圧入時に地層の状況をモニタリングすることはプロジェクトの安全性を評価するうえで重要である。RITEでは、光ファイバーセンシングによる地層変形の監視技術を開発している。深部坑井に光ファイバーを設置し、地表から地下までの地層変形(ひずみ)を深度方向に連続的にモニタリングすることを目指すものである。

1. 背景

- In SalahのCCSサイトでは、CO₂圧入で圧入坑周囲の地表が隆起 → 間隙水圧の上昇で生じた貯留層内の変形が地表面まで伝播
- 貯留層の変形が大きくなると上位の遮蔽層の安定性にも影響が及ぶ
- 深度方向に地層変形を連続的に把握することが重要
- 従来のモニタリング手法は計測点が限定、新しい測定技術開発が求められている

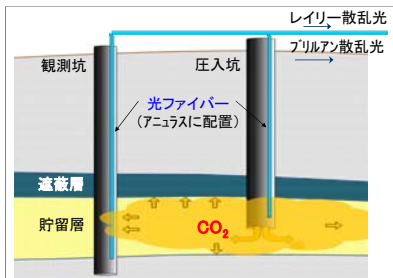


図-1 光ファイバーによる地層変形監視

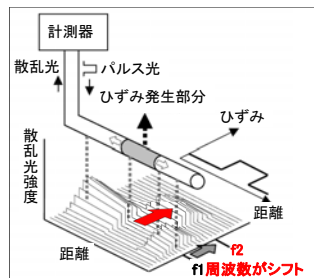


図-2 ひずみの計測原理

2. 計測方法

- 光ファイバーにパルス光を入射した時の後方散乱光が、物理量に比例し周波数シフトする特性を利用して地層変形(ひずみ)を計測する。
- 周波数シフトは温度、圧力、ひずみの影響を統合的に受けるため、データ解析ではそれぞれを分離する必要がある。
- 従来のブリルアンだけでなく、レイリー散乱も計測することにより複合的な影響の分離が可能となる。(図-4)

$\Delta V_B^1 = C_{11}^1 \Delta \epsilon + C_{12}^1 \Delta T + C_{13}^1 \Delta P$
 $\Delta V_R^1 = C_{21}^1 \Delta \epsilon + C_{22}^1 \Delta T + C_{23}^1 \Delta P$
 $\Delta V_B^2 = C_{11}^2 \Delta \epsilon + C_{12}^2 \Delta T + C_{13}^2 \Delta P$
 $\Delta V_R^2 = C_{21}^2 \Delta \epsilon + C_{22}^2 \Delta T + C_{23}^2 \Delta P$

図-3 温度・圧力・ひずみ分離手法(特許)

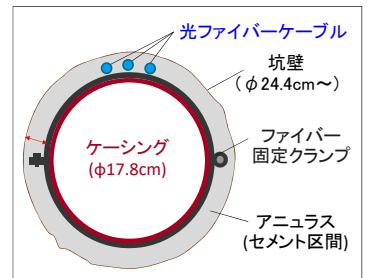


図-4 坑井への光ファイバーの設置

3. 揚水による地層変形の計測試験

- 地下水の汲上げで生じる地層変形を、ケーシング外側に設置した光ファイバーで計測できるか検証するために、揚水試験を行った(図-5)。
- その結果、揚水によって生じた帯水層(深度150~230m付近)の圧縮ひずみを光ファイバーで計測することに成功した。圧縮ひずみは揚水を開始してからすぐに帯水層中に生じ始め、時間が経つにつれて徐々に大きくなり、揚水終了後は元にもどる傾向を示した(図-6)。
- 帯水層の浅部・深部では、揚水による間隙水圧の一時的な増加に伴って難透水層の地層膨張(Reverse water level fluctuation)が計測された(図-7)。

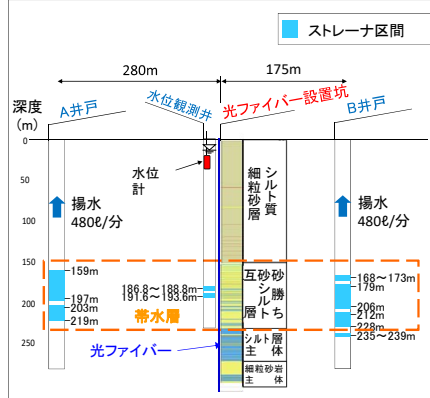


図-5 光ファイバー設置坑と農業用水井戸の配置

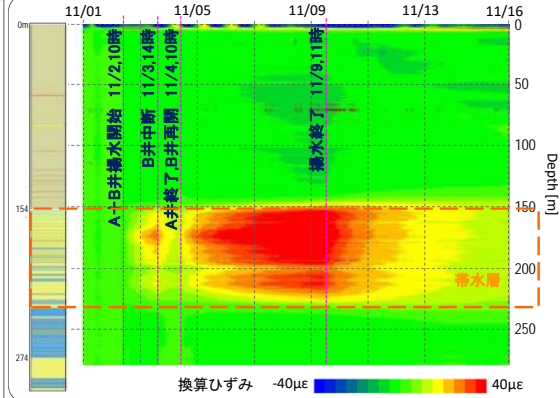


図-6 揚水時の地層変形結果

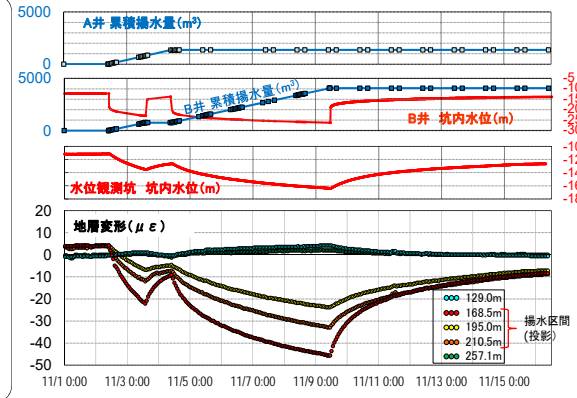


図-7 揚水量・坑内水位・地層変形の対比

4. 弾性波の計測試験 (DAS; Distributed Acoustic Sensing)

- 光ファイバーは、温度・圧力・ひずみの計測だけでなく、弾性波計測 (DAS計測) も可能である。
- 地層変形計測に設置済みの光ファイバーケーブルを活用して弾性波の計測試験を行った。
- スタック後のDAS計測結果は、ジオフォンの波形記録に比べてノイズを多く含むものの、P波初動を追跡可能な記録が得られた。

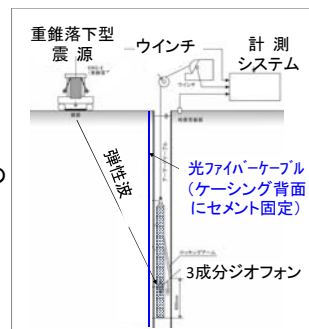
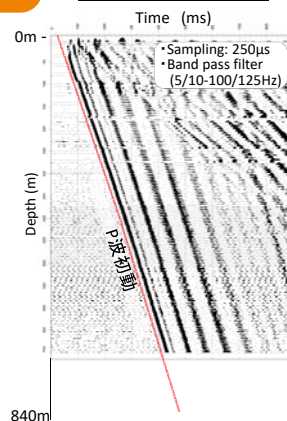
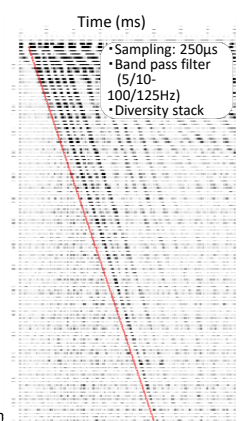


図-8 ジオフォンと光ファイバーDASの波形記録の対比

Geophone (one stack)



DAS (36 stacks)



5. 今後の課題

- 高感度と高強度を備えた地中埋設型光ファイバーケーブルの開発・改良
- レイリー散乱光とブリルアン散乱光を用いた温度・圧力・ひずみ分離技術の高度化
- データ処理・解析の自動化・リモート化、計測システムのパッケージング化等

(本資料は経済産業省からの委託事業の成果をもとに作成しています。)

漏出CO₂の海中拡散シミュレーションのための海洋モデル開発

CCSIにおいては、貯留サイトが慎重に選ばれるため、CO₂漏出の恐れは極めて小さいと考えられている。しかし、CCSIは新しい技術のため、一般社会においては漏出に対する懸念もある。海底下貯留において、万が一漏出が起きた場合、海底から漏出したCO₂が海中に拡散することになる。漏出域周辺に、どのくらいの範囲にどの程度の濃度のCO₂が広がるのかを評価するための海洋モデルが必要である。CO₂は主に気泡として海底から出てくると考えられている。気泡CO₂は海水に溶解しながら海中を上昇する。海水に溶解したCO₂ (溶存CO₂) は海の流れによって移流・拡散され広がって行く。我々は、このような気泡の運動・溶解と溶存CO₂の広がりを予測できる海洋モデルの開発を行っている。ここでは、気泡の運動・溶解が溶存CO₂の広がりに与える影響と広域の水塊分布の影響を示す。

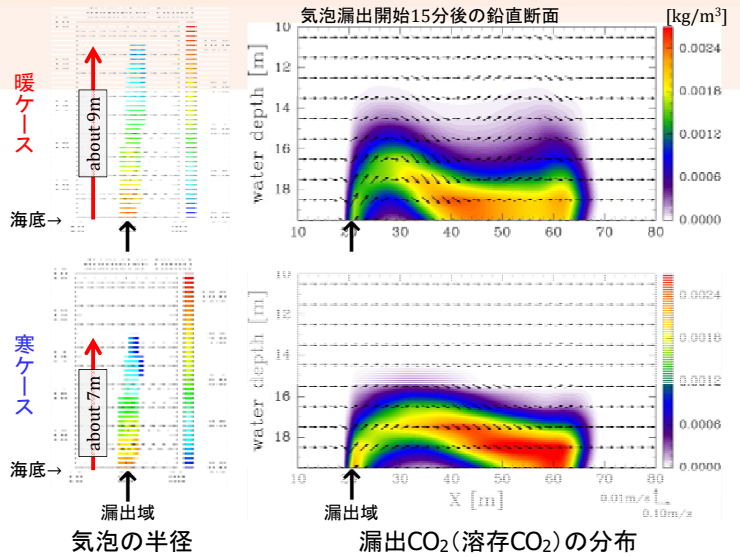
単純な系での計算例：気泡の運動と溶解が溶存CO₂の広がりに与える影響

暖ケース(夏)と寒ケース(冬)の2ケースの計算を行った。
2つのケースは水温が20°C異なる以外は同じ条件。

基本設定 (領域、漏出前の流れ・水温条件)
モデル領域: 水深20mで東西にのびる領域
初期条件(水温成層): 水温は海面で25°C/5°Cで海底に向かって線形的に下がり海底で24°C/4°C(赤が暖ケース、青が寒ケース)
初期条件(流速): 全領域一様に0.05 m/sの東向流

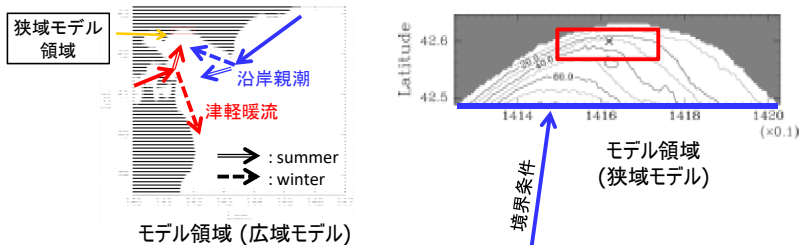
CO₂漏出条件
漏出率: 395 気泡/秒 (≈450トン/年); 気泡直径10mm(平均値)
漏出域: 半径1.5mの円形領域

結果(右図; 10m以深のみの断面図)
CO₂気泡は水温が低いほどよく溶けるため、気泡が作る上向きの水の流れ(矢印)は暖ケースより寒ケースの方が弱い。その結果、暖ケースの方が寒ケースより溶存CO₂が広く(浅い方まで)分布しており、また海底付近では、寒ケースの方が溶存CO₂の値が大きくなっている。



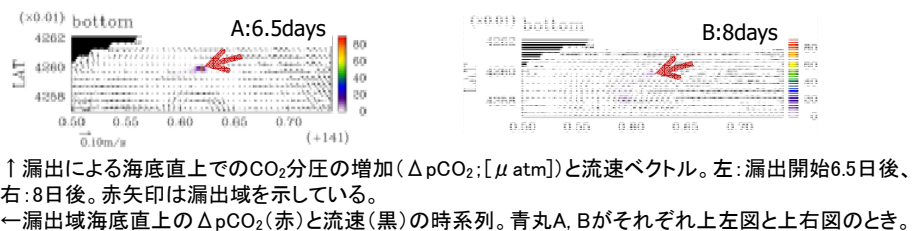
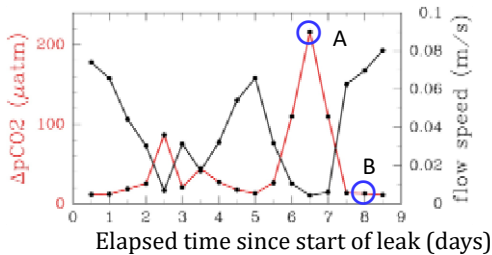
広域の水塊分布の影響の組み込み

海の水温や塩分等の分布は、必ずしも局所的に決まるわけではなく、遠く離れた広域の影響を受けることも珍しくない。例えば、苫小牧沖の場合、冬は低温・低塩の沿岸親潮が流れ込み、夏は高温・高塩の津軽暖流が流れ込む。苫小牧沖で漏出CO₂のシミュレーションをする場合、漏出CO₂の拡散が予想される範囲(狭域モデル)のモデルだけではなく、沿岸親潮や津軽暖流の計算が可能なおもっと広い領域のモデル(広域モデル)も必要である。広域モデルで計算した水温、塩分を狭域モデルの境界条件として与えることで、狭域モデルに広域の水塊分布の影響を組み込めるようにした。



狭域モデルでの漏出CO₂シミュレーションの例
漏出条件: 約150mの円形領域から約250トン/年
漏出開始: 2月1日(冬条件)
海面境界条件: 運動量フラックス(風)、熱フラックス
側面境界条件: 広域モデルの計算結果(水温、塩分)

結果



漏出CO₂の広がりは、流れの強さや向き、成層(水温や塩分の鉛直分布)の有無など様々な要因で決まる。また成層の強さが同じでも水温が異なると気泡の溶解も異なり、その結果気泡に励起される流れも変わる。もちろん、漏出率・漏出量によっても大きく変わる。したがって様々な条件下でシミュレーションを行い、漏出が起きた場合にCO₂がどのような濃度でどのように広がるかを予測する必要がある。海中拡散シミュレーションは海洋汚染防止法で求められている漏出を想定した海域影響評価においても必要である。

海域CO₂地中貯留モニタリングにおける 常設型OBC観測システムの利用

常設型OBC(Ocean Bottom Cable)観測システムは、海域の地中に貯留されるCO₂の挙動をモニタリングする上で有効な手法であり、自然地震およびCO₂圧入に起因して発生する可能性のある微小振動の観測をリアルタイムで行うことが可能である。RITEでは2007年から2012年にかけて2箇所の沿岸域サイトにおいてフィールド実験を行い、OBCの2次元/3次元弾性波探査および自然地震観測に対して適用性を有することを確認した。これらのフィールド実験結果を基に、苫小牧の大規模実証試験サイトにおいて常設型OBC観測システムを2013年に設置し、2016年から行われる予定のCO₂圧入に先行してベースライン観測を行い、現在モニタリングに利用されている。

常設型OBC観測システムの概要と特長

常設型OBC観測システムには多数の振動観測用のセンサーモジュールが等間隔で取り付けられている(Fig.1)。各モジュールは3成分ジオフォンとハイドロフォンから構成されており(Fig.2)、ジオフォンの傾斜と回転を補正できるように、モジュール毎に傾斜計が入っている。センサーモジュールはアーマード(鎧装)および樹脂製の保護具で覆われている(Fig.3)。

常設型OBC観測システムは、海底下に長期間埋設設置され、海域の地下貯留層に貯留されたCO₂挙動をモニターするための線返し2次元/3次元弾性波探査に利用される(Fig.4,5)。通常の弾性波探査ではストリーマケーブルを曳航する方法(Fig.6)が行われるが、この方法に比べて常設型OBCを用いた方法では、ケーブル、すなわちセンサーを海底に埋設設置するため受振点が不動となり安定した高品質のデータ取得が可能、ストリーマ曳航を行わないので水深が浅い海底でも探査可能、発振船の稼働のみで観測ができるため効率的な探査が可能、などの利点を有する。そのほか、常設型OBCは海底に埋設設置されており3成分ジオフォンで観測するため、弾性波探査においてはP波に加えてS波(厳密にはP-S変換波)の観測も可能である。P波とS波の両方を利用することにより、P波のみに比べて多様な物性評価が可能になるものと期待できる。

また、常設型OBC観測システムでは、自然地震およびCO₂圧入に起因して発生する可能性が考えられる微小振動を観測することが可能である。



Fig. 1 Ocean Bottom Cable (OBC)

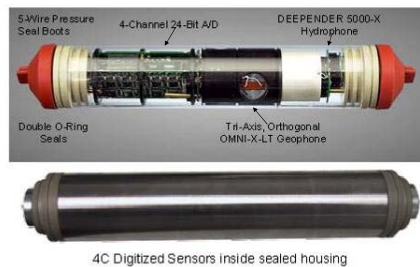


Fig. 2 Sensor Module (Source: Geospace)

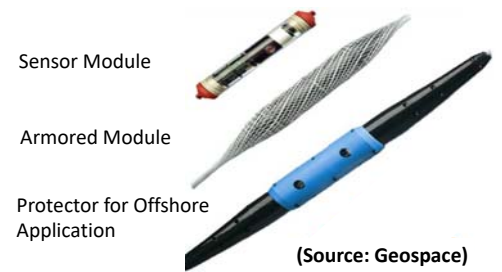


Fig. 3 Armored Module and Protector (Source: Geospace)

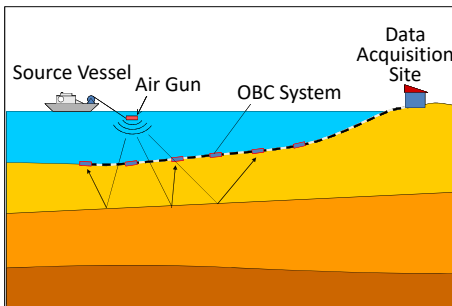


Fig. 4 Seismic Survey with OBC System

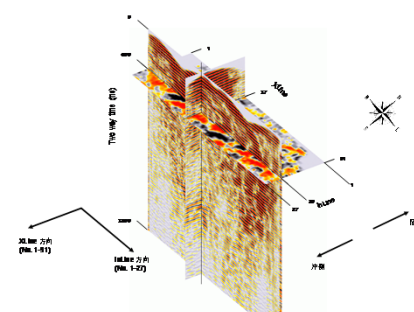


Fig. 5 An Example of 3D Seismic Survey Result

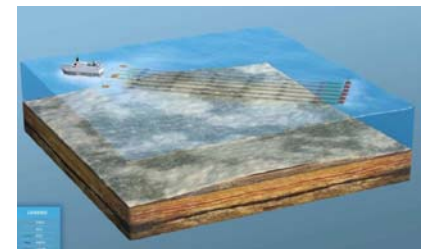


Fig. 6 Conventional Seismic Survey

苫小牧CCS実証試験サイトにおける常設型OBC観測システムの利用

2013年に苫小牧CCS実証試験サイトにおいて、常設型OBC観測システムを2つの貯留層の直上を交差する位置に埋設設置した(Fig.7)。本サイトでは、2016年春から3年間にわたりCO₂圧入が行われる計画である。常設型OBC観測システムは、50m間隔で72個のセンサーモジュールが配置されている長さ3.6kmのモジュールケーブルと陸上に信号を伝送するリードインケーブル、および地上のデータ収録装置から成る。この観測システムにより微小な自然地震も観測でき、防災科学技術研究所のHi-netの記録とともに Fig.8 に示す。OBCではセンサーが多数あるために位相の連続性から比較的容易にイベントの識別が可能となっている。



Fig. 7 OBC System in Tomakomai CCS Project

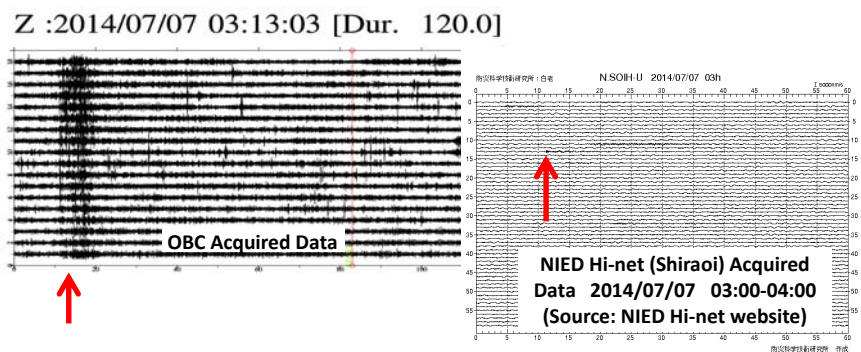


Fig. 8 Comparison of Natural Earthquake Data