

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

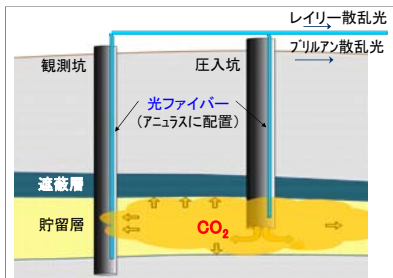


図-1 光ファイバーによる地層変形監視

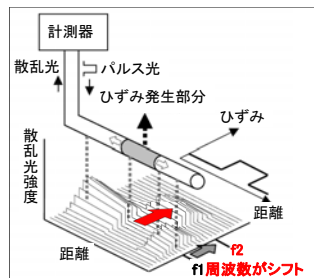


図-2 ひずみの計測原理

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)

2本のファイバーでブリルアン(v_B)とレイリー(v_R)を計測(4つのデータセット)
温度、圧力、ひずみの3つのパラメータに対して式が4つあり解が求まる

$$\Delta v_B^1 = C_{11}^1 \Delta \epsilon + C_{12}^1 \Delta T + C_{13}^1 \Delta P$$

$$\Delta v_R^1 = C_{21}^1 \Delta \epsilon + C_{22}^1 \Delta T + C_{23}^1 \Delta P$$

$$\Delta v_B^2 = C_{11}^2 \Delta \epsilon + C_{12}^2 \Delta T + C_{13}^2 \Delta P$$

$$\Delta v_R^2 = C_{21}^2 \Delta \epsilon + C_{22}^2 \Delta T + C_{23}^2 \Delta P$$

図-3 温度・圧力・ひずみ分離手法(特許)

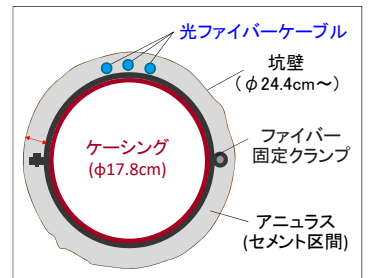


図-4 坑井への光ファイバーの設置

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)。

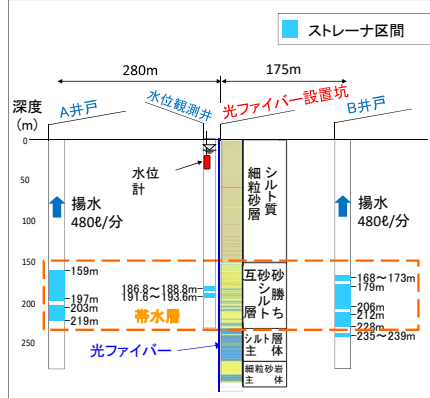


図-5 光ファイバー設置坑と農業用水井戸の配置

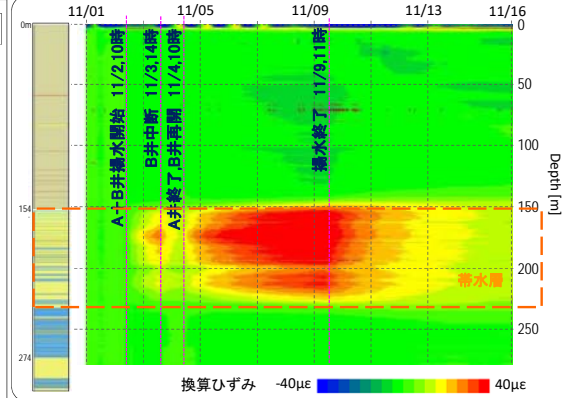


図-6 揚水時の地層変形結果

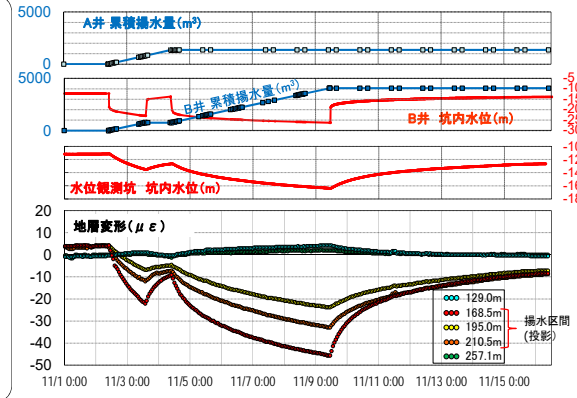


図-7 揚水量・坑内水位・地層変形の対比

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。

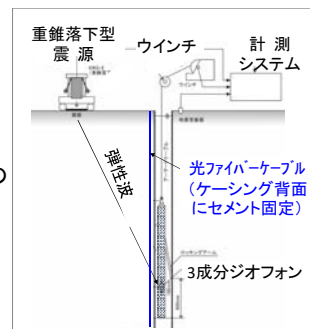
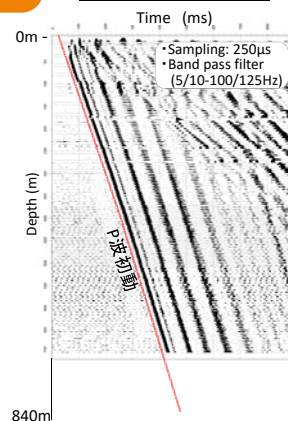
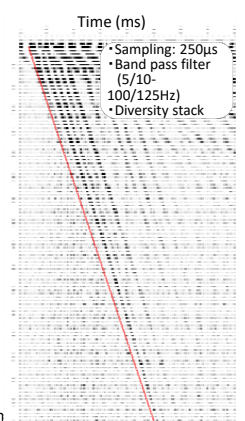


図-8 ジオフォンと光ファイバーDASの波形記録の対比

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

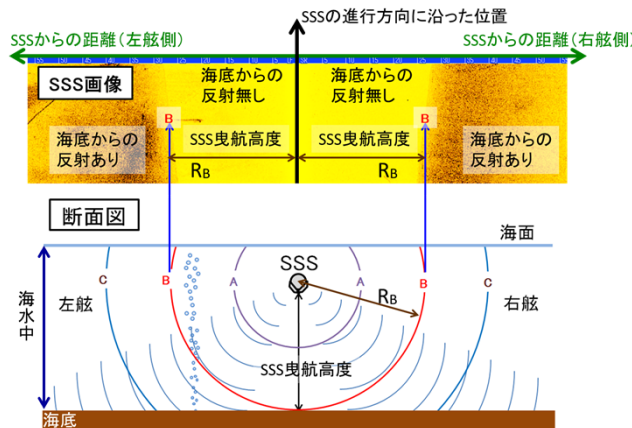
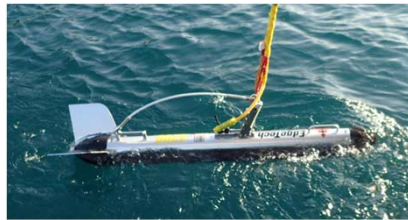
(本資料は経済産業省からの委託事業の成果をもとに作成しています。)

海水中CO₂気泡検知技術開発

海底下にCO₂を貯留する場合、万が一の漏出に備えて、海域での漏出監視が必要である。浅海域における海底の温度圧力条件下では、CO₂は気相になるため、CO₂は気泡として海底から出てくると考えられる。海水中の気泡は音響機器を用いて検知できることが知られている。本研究では、音響機器の一つであるサイドスキャンソナーを漏出検知に用いる場合、どの程度の漏出率のCO₂気泡を検知できるのか、漏出ポイントからどの程度離れた位置から検知できるのかなどを現場実験を行って明らかにした。

サイドスキャンソナー(SSS)の概略

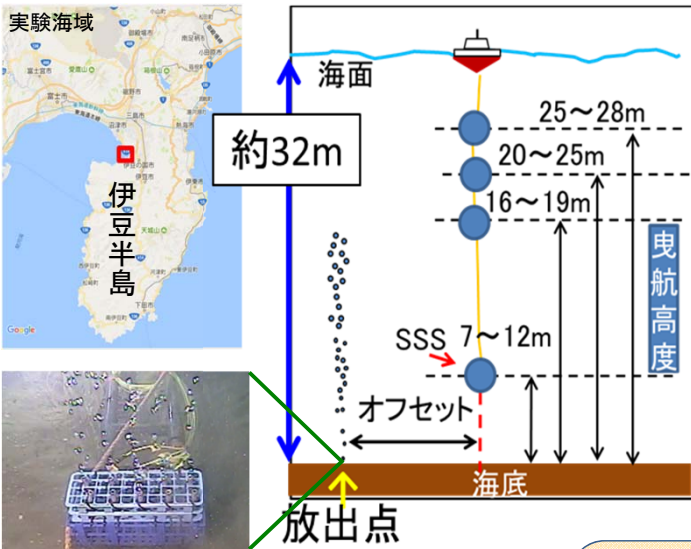
サイドスキャンソナーは船などに曳航されて海中を移動する。左右両サイドに向かって音波を発し、海水中の物体(気泡や魚など)や海底による反射波を受信することで、海水中の物体の存在や海底の凹凸などの情報を画像化する。



SSS画像の横軸は、SSSからの直線距離。断面図で、SSSから等距離にある物体はSSS画像上では同じ点に表示される(左右の区別はある)。例えば円B上のどこにあってもSSSからの距離は R_B なので、SSSの右にあるか左にあるかによって、SSS画像上の左右どちらかのBに表示される。断面図で半径が R_B より大きな円は必ず海底と交わるので、SSS画像で横軸が R_B より大きなところは海底が表示される。つまり、SSS画像の中央部(黄)は断面図の円B内の領域、両端部(茶)は断面図の円Bの外側の領域に相当する。

現場実験

実験概要

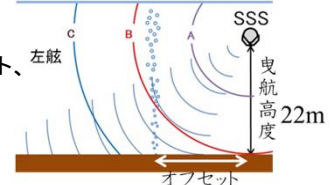
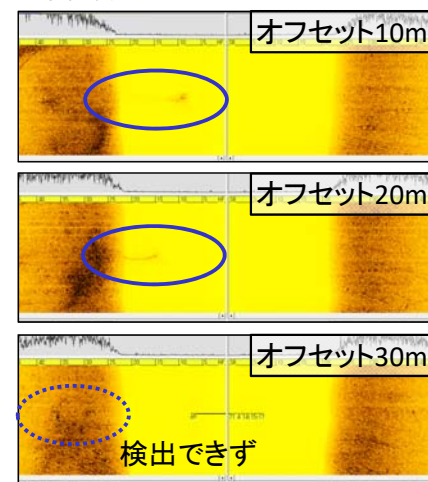


実験条件

- ◆ CO₂気泡放出率: 500~5000ml/分
- ◆ オフセット(SSSと放出点の水平距離): 0~50m
- ◆ SSS曳航高度(海底からの高さ): 約10~27m
- ◆ SSS曳航速度: 3~6ノット (1ノット=時速1.8km)

実験結果

SSS画像例: 放出率5000ml/分、曳航速度3ノット、曳航高度22m



曳航高度が22mの場合、オフセットが22m未満であれば気泡柱の一部が円B内に入りSSS画像中央部(黄)に表示される。オフセットが22mを超えると気泡柱は円B内には入らず全て海底と重なって表示される。左図の通り、検出できるのは、円B内の気泡のみで、海底と重なっている気泡柱は検出できない。

まとめ

- ◆ SSSが探査可能範囲: SSSを中心とする半径がSSSの曳航高度の円内
 - ◆ 検出下限: 500ml/分以下(曳航速度 \leq 5ノット)、500~1000ml/分(6ノット)
 - ◆ 参考: 500ml/分は本実験条件の場合おおよそ2トン/年に相当
- ⇒ 実際の漏出検知では海面下5m程度を5ノットで曳航するのが効率的

謝辞 この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。