

P22. 光ファイバーを用いた地層変形監視技術の開発

Geological formation deformation monitoring by optical fiber sensing

○橋本 励 (サンコーコンサルタント), 薛自求 (地球環境産業技術研究機構), 山内良昭 (ニュープレクス)

Tsutomu Hashimoto, Ziqiu Xue, Yoshiaki Yamauchi

1. はじめに

CO₂ 地中貯留サイトにおいて、CO₂ 圧入時に地下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¹⁾。In Salah の CO₂ 地中貯留プロジェクトでは、CO₂ 圧入に伴い圧入坑周辺で地表の隆起が確認された。貯留層内の間隙圧が上昇して地層に変形が生じ、その影響が地表にまで伝わったと推測されている。貯留層の変形量が大きくなると、その上位にある遮蔽層にも影響を及ぼすことが懸念され、地中貯留の安全性に問題が生じる。

このような背景のもと、RITE では光ファイバーを用いた地層変形監視技術について研究開発を行っている。光ファイバーを分布式センサーとして坑井に設置し、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。

2. 計測方法

分布式光ファイバーによる計測では、温度、圧力およびひずみの変化を光ファイバーに沿って分布的に得ることができる。光ファイバーの計測技術にはいくつかの方式があるが、本研究ではブリルアン散乱による BOTDR、およびレイリー散乱による TW-COTDR 方式を利用した。計測機は 1 台でブリルアン、およびレイリー計測の周波数シフトが計測可能な NBX-8000（ニュープレクス社製）を用いた。

なお、以下に示す計測結果はすべてレイリー計測によって得たものである。

3. 現場試験

光ファイバーを用いた岩石試料のひずみ計測技術²⁾をもとに、現場坑井での適用可能性を検討するために深度 300m 坑井に実際に光ファイバーを設置して CO₂ 圧入に伴う地層変形試験などの現場試験を行った。

図-1 に光ファイバー設置坑の掘削から CO₂ 圧入までの模式図を示す。

光ファイバー設置坑の掘削は、9-7/8inch のトリコンビットでノンコア掘削を標準として行った。ただし、地表から深度 103m までは坑壁保護のために拵坑後 STK 管を設置した。深度 234m から 288m までは CO₂ 圧入地層選定のためにコア掘りを行った。

光ファイバーの設置はケーシング挿入作業と並行して、光ファイバーを鋼線でモールドした光ファイバーケーブルを 7inch のケーシングパイプに一定間隔で

固定しながらケーシングとともに坑井に挿入した。

ケーシング外側のアニュラス(セメント区間)は 3cm 程度しかスペースがないため、ケーシング挿入時に光ファイバーケーブルが坑壁と接触することで断線、損傷が懸念された。このため、図-2 に示したカップリングプロテクター、ファイバー固定用クランプを設計・製作して用いた。また、セントラライザーも通常より多めに使用するように施工に注意を払った。

セメンチングは STK 管深度より下部はインナーストリング法、STK 管の区間はトップジョブセメンチングで行った。これにより光ファイバーがセメントを介して地層と一体化し、地層変形の計測が可能となる。その後、坑井内から地層に CO₂ を圧入するために、砂層が分布する深度 277.4~279.4m 区間でパーフォレーションを行った。

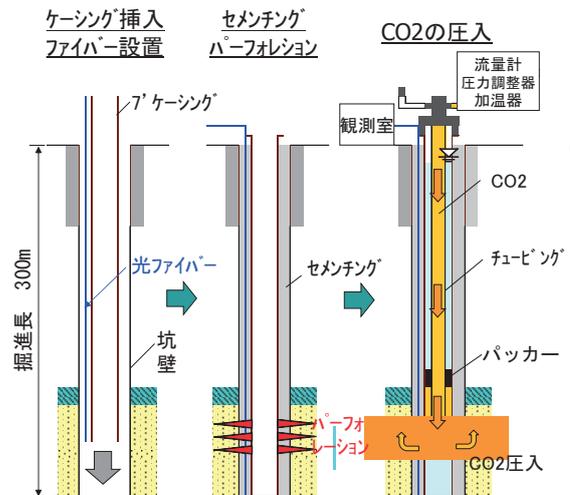


図-1 現場作業の模式図



図-2 光ファイバーの取付け方法

図-3 に CO₂ の圧入実績を示した。圧入レートは、

地層への圧入が始まってから翌朝までは 40~80L/分、その後は圧入レートを 0~300L/分の範囲で変化させた。CO₂ 圧入期間は約 1 日、累積圧入量は約 320kg と見積もられる。

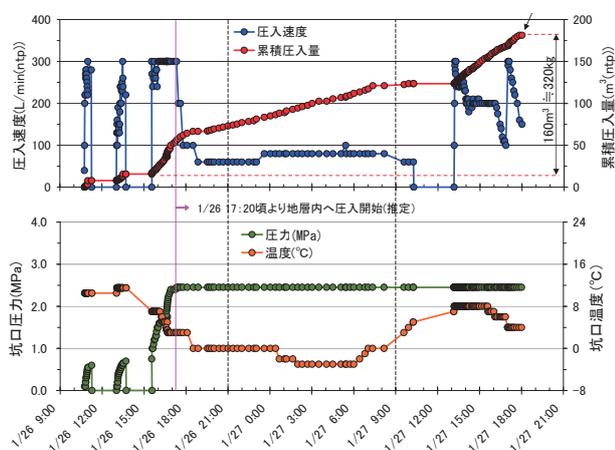


図-3 CO₂ 圧入実績

4. 試験結果

図-4 に、温度用ファイバーを用いて温度補償を行った後の CO₂ 圧入に伴う地層変形（ひずみ）の結果を示す。計測深度は 5cm 間隔であり、計測サンプリングは、圧入開始直後から 33 時間までは約 30 分間隔、それ以降は 1 時間間隔である。CO₂ の圧入に伴い圧入区間だけにひずみが生じ始め、圧入を続けるに連れてそのひずみが徐々に大きくなっていく状況をアニュラスに配置した光ファイバーで計測することに成功した。ひずみ量は最大でマイナス 24 $\mu\epsilon$ からプラス 16 $\mu\epsilon$ の範囲を示した。

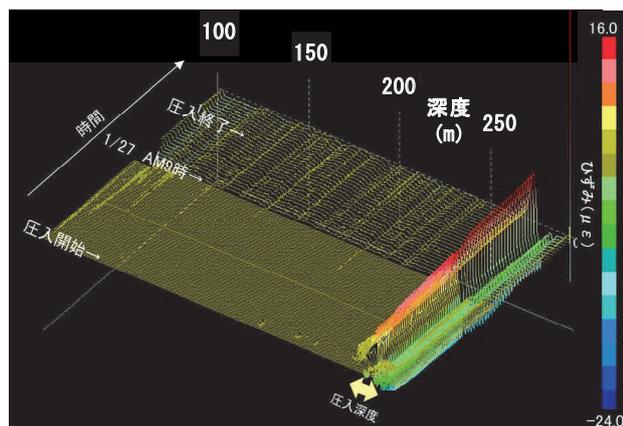


図-4 CO₂ 圧入時の地層変形結果

図-5 に坑内パッカーのステップ解放に伴うケーシングひずみ変化の結果を示す。クレーンの吊り荷重計を参考にしながら、ケーシングにかかるゴムパッカー（RTTS パッカー；Halliburton 社）の圧力を段階的に解放していく試験を試みたものである。パッカー設置時にかけた荷重 2.5t を 0.5t ずつ減らしていくと、ケーシングに生じたひずみも段階的に小さくなり、両者は

調和的な結果を示した。パッカーのステップ解放試験をもとに現場でのレイリーの計測能力を見積もると、数 $\mu\epsilon$ 程度のひずみまで検知可能であると考えられる。

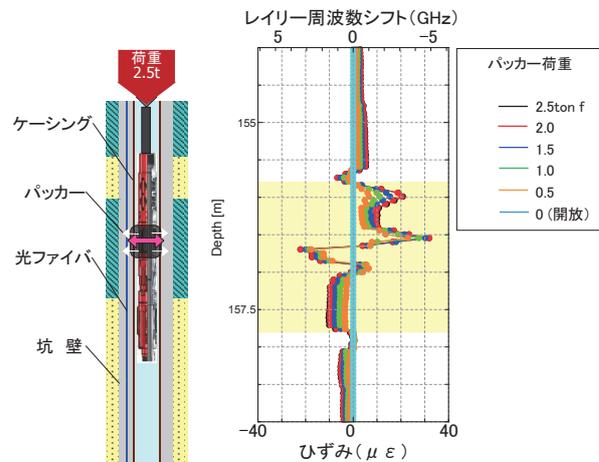


図-5 パッカー開放時のケーシングひずみ変化

5. まとめ

深度 300m 坑井のアニュラスに光ファイバーを設置して現場試験を行った結果、CO₂ 圧入に伴う地層変形の計測に成功し、本手法による地層変形監視技術の有効性を確かめることができた。また、パッカーのステップ解放試験から、本システムでのひずみ計測能力は数 $\mu\epsilon$ 程度と想定される。従来の分布式光ファイバー計測では 100 $\mu\epsilon$ 程度までが一般的であることから、2桁ほど高い精度を有していることが示された。

今後、本技術を CO₂ 貯留サイトで実用化する際の課題としては、1,000m から数 1,000m の深部坑井にも設置可能な高強度・高感度地中埋設型光ファイバーケーブルの製作が必要である。同時にデータ処理・解析技術、このうち特に温度、圧力、ひずみの分離技術について高度化を図る必要がある。

本技術はこれまではない計測能力の高さから、CO₂ 地中貯留モニタリングに限らず資源開発、地盤防災、構造物の維持管理の分野にも広く活用可能である。

6. 謝辞

本研究は経済産業省の委託事業「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術研究開発」の成果の一部である。

文献

- 1) 薛自求, 松岡俊文 (2008): 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題, 地学雑誌, 117, 734-752.
- 2) 小暮哲也, 堀内侑樹, 木山保, 西澤修, 薛自求, 松岡俊文 (2015): 分布式光ファイバーセンサーによる静水圧環境下におけるひずみ測定, 物理探査, Vol.68, No.1, pp.23-38.