

繰り返し坑井間地震探査による 圧入CO₂の流動モニタリング

尾西 恭亮^{1*}・松岡 俊文¹・信岡 大²・齋藤秀樹²・東宏幸²・薛自求¹

¹京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²応用地質株式会社 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸ヶ丘43)

*E-mail: onishi@tansa.kumst.kyoto-u.ac.jp

長岡サイトにおけるCO₂圧入試験にて、繰り返し坑井間弾性波トモグラフィが行われた。圧入前後の記録からCO₂浸透域を推定することができる。しかし、圧入前後のトモグラフィ記録にはCO₂の浸透による変化以外にも、震源や受信器の位置や特性などの様々な差異が生じており、解析誤差として結果に反映される。このため、本研究では差解析処理を用い測定条件による差異の低減化を図った。通常は各記録で独立して逆解析を行った後に速度差の抽出を行うが、差解析処理では一方の記録の逆解析結果に対し、波動場伝播計算して取得した初動走時に比較記録との走時差を付加して逆解析を行う。その結果、速度上昇しない制限付き逆解析において、キャップロック下面に沿ったCO₂浸透の様子が明瞭な解析断面を得た。

Key Words : CO₂ sequestration, cross-well tomography, time-lapse, difference analysis, monitoring

1. はじめに

温室効果抑制のためのCO₂の大気中への排出量の削減には、地下帯水層への圧入が低コストで技術的課題が少なく現実性が高いと考えられている。CO₂地中貯留の実現には長期安定性や経済性を評価するためにCO₂挙動のモニタリングが必要不可欠であり、弾性波探査による速度変化のイメージングがCO₂地中挙動モニタリングに有効であるとされる。本研究では、長岡CO₂地中貯留実証試験において実施された坑井間弾性波トモグラフィ探査に対し、繰り返し探査データの解析に有効な差解析¹⁾を適用してモニタリング技術の高精度化を検討した。

2. 長岡 CO₂ 地中貯留実証試験

新潟県南長岡ガス田において帯水層へのCO₂地中貯留実証試験が実施された²⁾。長岡サイトではCO₂圧入に伴って各種モニタリング計測が行われ、本研究では坑井間地震探査記録を用い、差解析法¹⁾を適用して再解析を行った。

長岡サイトでのCO₂の圧入対象は深度約1,100mの地層水を含む帯水層である。対象深度では圧入CO₂は超臨界状態となり、その密度は地層水よりも小さくなる。従

ってCO₂は圧入後に帯水層の上方へ移動すると考えられるが、長岡サイトでは帯水層上面に背斜構造の難透水性泥岩層がキャップロックとして存在しているために長期貯留安定性が期待されている。

圧入坑から半径120m以内の範囲で坑井掘削および物理検層を行った結果、帯水層は層厚約60mの砂岩および礫岩の層で、キャップロックは層厚約140mの泥岩であることが判明した²⁾。図-1にトモグラフィ断面の地質構造の概略図を示す。

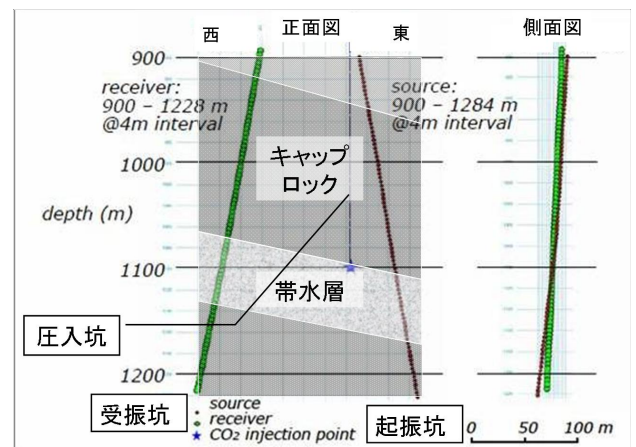


図-1 観測井配置と周辺の地質構造

3. 弾性波トモグラフィ解析

(1) CO₂挙動のモニタリング方法

長岡サイトでの CO₂圧入に伴う坑井間地震探査は、圧入前に1回(BLS: Base Line Survey)、圧入中に3回(MS1~3: Monitoring Survey)行われた。本研究では BLS と MS1 の繰り返しデータを用いて CO₂ 流動挙動解析を行う。MS1 計測時の CO₂ 圧入総計量は 3180~3400t である。

過去に行われた長岡サイトの帯水層コア試料を用いた室内実験により、CO₂ 圧入に伴って岩石中の弾性波速度が最大で約 20% 低下することが知られている³⁾。この結果を踏まえて、本研究では BLS データと MS1 データの逆解析を行い、圧入前後の速度モデルの差をとって速度変化モデルを計算し、CO₂ が広がっている範囲を速度低下領域としてイメージングした。

(2) 初期速度モデルの作成

本研究では、起振坑および受振坑で測定された速度検層記録を利用し、初期速度モデルを作成した。二つの速度検層記録は約 11° の傾斜角で層序がよく対応していたため、トモグラフィ断面の地質構造モデルとして傾斜多層構造を仮定してそれぞれの対応する点の間を線形に補完し、さらにその深度方向に移動平均をかけて初期速度モデル図-2(a)を作成した。

上記のようにして得られた初期速度モデルを用いて BLS データを逆解析し、イメージングした BLS 速度モデルを図-2(b)に示す。深度約 1,100m の帯水層上面境界が明瞭に再現されていることが分かる。

(3) 速度変化モデルのイメージング結果

BLS の解析と同様の初期モデルを用い、弾性波トモグラフィインバージョンによって得られた MS1 の速度分布および速度変化分布を図-3 に示す。速度変化分布は BLS から MS1 への速度変化量と元の BLS 速度モデルとの比を百分率で表示した。CO₂ 圧入部周辺の速度低下領域が明瞭にイメージングされており、CO₂ が帯水層上面のキャップロック下面に沿って上方に広がっている

様子がモニタリングできている。しかし、この速度変化イメージング結果においては以下の二種類の偽像が発生していると考えられる。

イ) 圧入点周辺を通過する波線上(図-3(b)の破線の矢印)の速度低下

ロ) 速度上昇(図-3(b)の点線で囲んだ領域)

イ)については、弾性波トモグラフィ解析のプログラムにおいてスローネスの更新の際に局所的な速度異常を波線上に振り分けてしまうことが原因であると考えられる。

ロ)については図の白抜きの矢印で示すように、CO₂ 圧入点周辺を通らない波線がイ)で発生した速度低

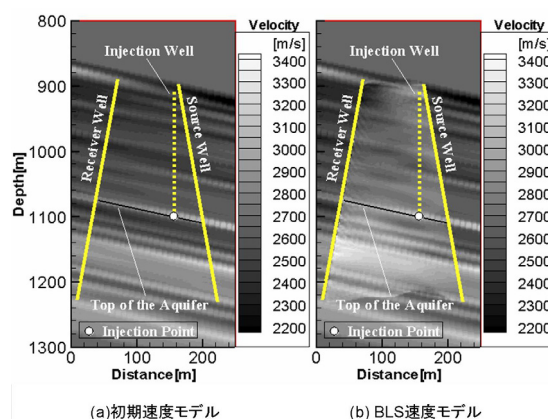


図-2 (a) 速度検層記録から作成した初期速度モデル (b) BLS インバージョン結果

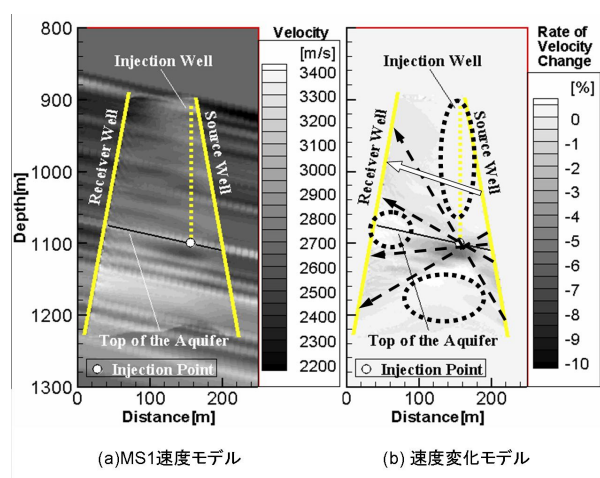


図-3 (a) MS1 インバージョン断面 (b) BLS と MS1 の速度変化分布

下の偽像の影響を受けて現れた二次的な偽像であると考えられる。

4. 制約条件の適用

CO₂ の岩石コアへの圧入による室内実験³⁾により、CO₂ 圧入に伴って岩石の弾性波伝播速度は低下することが確認されている。CO₂ 圧入後では弾性波速度は上昇しないという制約条件を加えて解析を行った。すなわち、MS1 記録の逆解析において速度モデルの更新の際に、初期モデルとして採用した BLS 速度分布よりも速度が増える格子点は更新せず、BLS 速度分布のままとし、速度が低下する格子点のみ更新するという条件をつけて解析を行った。

解析結果を図-4 に示す。図-3 に比べ速度上昇領域はなくなり、速度変化境界がより明瞭になったが、圧入点と無関係な遠方の領域に依然として偽像が存在している。ただし、速度低下量の最大値が圧入部周辺で 10~20%と、室内実験に近い変動が再現された点は重要である。

5. 差解析の適用

(1) 差解析の特徴と解析手順

次に、坑井間地震探査の繰返しデータの解析に差解析¹⁾を適用し、逆解析に伴って生じる偽像の抑制について検討する。差解析は繰返しデータを解析して物性値変動をモニタリングする際に、解析前のデータの段階で差を取る手法である(図-5)。これにより差解析は従来法と比較してチューブウェーブ等の不変性の高いノイズ成分や受信器特性の相違の影響を軽減できる特徴を有する。

差解析処理は以下の手順で解析を行う。

- ① 基準データ(BSLの観測走時)の逆解析(走時トモグラフィ)を行い、基準モデル(BSLの速度モデル)を得る。
- ② 基準モデルに対してフォワードモデリングを行い、擬似基準データ(BLSの計算走時)を得る。
- ③ 繰返しデータ(MS1の観測走時)と基準データとの差データを得る。
- ④ 擬似基準データに差データを加えて擬似繰返しデータを得る。
- ⑤ 基準モデルを初期モデルとして擬似繰返しデータの逆解析を行い、擬似繰返しモデルを得る。
- ⑥ 得られた擬似繰返しモデルと基準モデルの差を取り、差モデル(BLS から MS1 への速度変化モデル)を得る。

(2) 制約条件付き差解析による速度変化モデルのイメージング結果

制約条件付き差解析によるイメージングの結果を図-6に示す。イメージングの結果、速度上昇の偽像が解消され、速度変化領域がキャップロック下面に沿うように存在している様子を捉えることに成功した。

(3) 差解析による改善効果について

BLS から MS1 への速度変化モデルのイメージングについて、制約条件のみの適用では偽像の改善は見られなかったが、差解析処理を適用することにより偽像の大幅な改善が見られた。

図-5 で示される差解析フローにおいて、擬似繰返しデータを走時残差を含む擬似基準データに微少量の差データを加えて作成している。擬似基準データはすでに基準モデルに収束したデータなので、それに差データを加えた擬似繰返しデータは基準モデルを初期モデルとしても走時残差の影響を受けない。

差解析では、基準データから擬似繰返しデータを作成することによって擬似繰返しデータの逆解析の際に基準モデルを初期モデルに使用しても計算誤差、すなわち走時残差が小さく抑えられる。これにより、精度向上に効果的な制約条件をつけた繰返しデータの逆解析の有効性が高くなるものと考えられる。

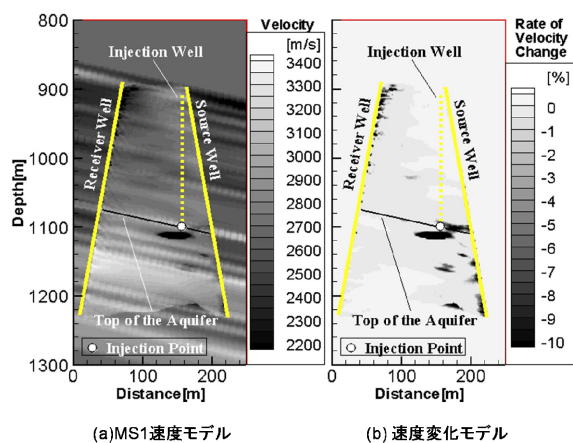


図-4 (a) MS1の制約条件付きインバージョン断面 (b) BLS と MS1 の速度変化分布

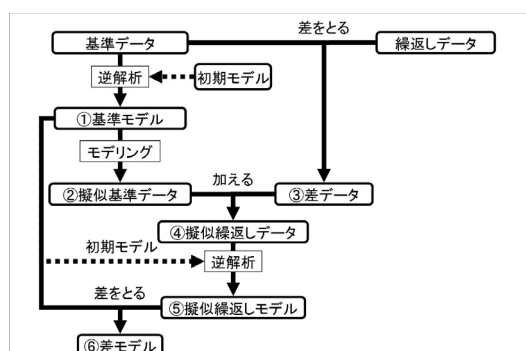


図-5 差解析処理法の解析手順

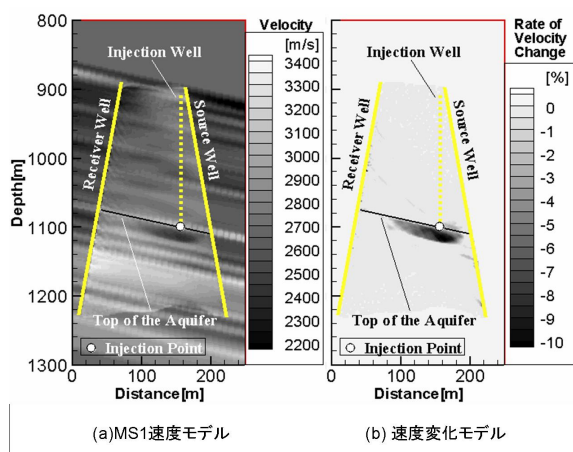


図-6 (a) 制約条件付き差解析による MS1 速度分布 (b) BLS と MS1 の速度変化分布

6. シミュレーションによる差解析の効果の検討

制約条件付き差解析によるノイズ低減効果の評価のため、シミュレーション解析による検討を行った。また、差解析で用いた疑似 MS1 速度モデルはノイズを含んでいる疑似 BSL 速度モデルから作成されているため、実

際の記録の解析だけでは偶然に良好な結果が得られた可能性を排除できない。この点に対する解決も目的としてシミュレーション解析を行った。

図-7 にシミュレーションに用いた速度分布モデルを示す。深度方向に速度上昇する地質モデルを設定し、CO₂ 圧入後は約 10% の速度低下が生ずるものとした。送受信器配置位置となる坑井位置は垂直方向で、坑井間距離は 200m で平行となる設定とした。

インバージョンは 2 つの条件に対し 2 つの解析手法を適用し計 4 設定で行った。真の初動走時に対し速度変化前後で各受信器固有の最大 5% のコヒーレントな誤差を加えた場合と最大 5% のランダムな誤差を加えた場合の 2 条件で行った。また、2 つの解析手法は、CO₂ 圧入前後の記録を独立に逆解析する標準的な処理方法と差解析処理を用いた方法である。2 つの解析手法共に、CO₂ 圧入後は速度が上昇しないとする制約条件を付加した。

各設定条件で解析した後、CO₂ 圧入前後の速度分布の変化を計算したものを図-8 に示す。図-8 では唯一、右端のコヒーレントノイズが加わった記録を差解析処理で解析したもののみインバージョンが良好となっている。ことことから、差解析処理はコヒーレントなノイズに対して有効に働くことが判明した。

7. まとめ

本研究では、長岡 CO₂ 地中貯留実証試験サイトで測定された坑井間地震探査データについて、弾性波トモグラフィを用いて制約条件付き差解析を行い、偽像の少ない速度変化イメージングに成功した。

一方、制約条件付き差解析による CO₂ 挙動モニタリングの結果を解釈すると、地中貯留された CO₂ がキャップロック下面に沿って帯水層上方へと移動していることが確認された。

シミュレーションによる検討を加え、差解析処理が送受信器ジオメトリに対しコヒーレントなノイズの影響を軽減する効果があることが確認された。

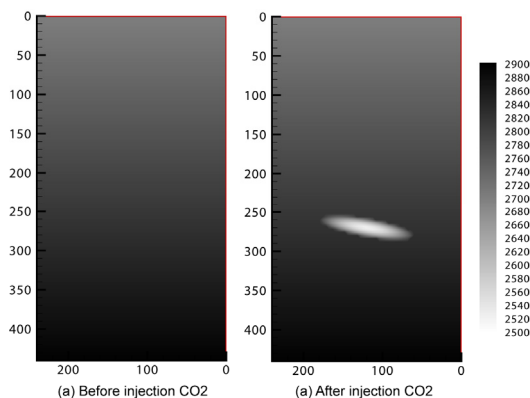


図-7 シミュレーション用の速度モデル。

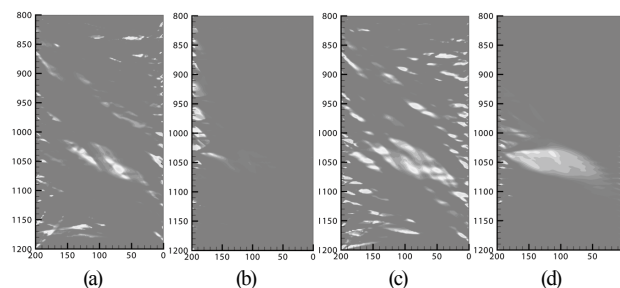


図-8 インバージョン結果の差分断面。 (a), (b) : ランダムノイズを加えた走時記録を用いた解析結果。 (c), (d) : 受信器に固有のノイズを加えた走時記録を用いた解析結果。 (a), (c) : 制約条件付き標準処理。 (b), (d) : 制約条件付き差解析。

謝辞：名古屋大学渡辺俊樹先生には差解析処理の改善効果の議論において有益なご助言をいただきました。

参考文献

- 1) Watanabe, T., Shimizu, S., Asakawa, E., Matsuoka, T., Differential waveform tomography for time-lapse crosswell seismic data with application to gas hydrate production monitoring, *Expanded Abstract of 74th Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, TOM1.1, 2004.
- 2) 財団法人 地球環境産業技術研究機関, 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 2005.
- 3) 薛自求, 二酸化炭素地中貯留と岩石物性の地殻工学への応用, *地学雑誌*, 114, 988-10, 2005.

CO₂ FLOW MONITORING BY TIME-LAPSE CROSS-WELL SEISMIC SURVEYS

Kyosuke ONISHI, Toshivumi MATSUOKA, Dai NOBUOKA, Hideki SAITO, Hiroyuki AZUMA and Ziqiu XUE

The pilot-scale CO₂ sequestration experiment has been undertaken at the Minami-Nagaoka gas and oil field, near Nagaoka, Niigata Prefecture, and we conducted time-lapse cross-well seismic tomography to detect the spread of injected CO₂. In this research, we applied a differential analysis to cross-well seismic tomography for a more accurate monitoring. In imposing a constrained condition that the seismic velocity always decreases by CO₂ injection, the flow of CO₂ along the top of the aquifer was well monitored. Moreover, the calculated seismic velocity reduction due to CO₂ injection quantitatively agreed to the laboratory experiment.