

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18332

研究課題名(和文)地震波の減衰と速度変化によるCO₂地中貯留におけるCO₂モニタリング技術の開発研究課題名(英文) Development of monitoring approach for injected CO₂ in CO₂ capture and storage using change in seismic attenuation and velocity

研究代表者

池田 達紀 (Ikeda, Tatsunori)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・助教

研究者番号：00736845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではフィールドで取得された地震波データ解析とデジタル岩石を用いた数値シミュレーションから、CO₂地中貯留におけるモニタリングに関する以下の成果が得られた。(1)精密制御震源システムを用いて、表層の地震波速度を時空間的にモニタリングするための手法を開発した。この手法は、表層変動の補正による深部貯留層モニタリングの高精度化や、漏洩したCO₂の検出に応用できると考えられる。(2) CO₂分布の異なるデジタル岩石に波動シミュレーションを適用した結果、地震波速度と減衰はCO₂分布に異なる感度を有しており、それらを組み合わせることで、より定量的なCO₂の評価ができる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：By analyzing continuous field seismic data and numerical simulation using digital rock, we obtained the following achievements related to monitoring in CO₂ capture and storage. (1) We developed a method to monitor spatial and temporal variation of seismic velocity in shallow subsurface using controlled seismic source system. This method could be applied to improve the accuracy of monitoring of deep reservoirs by considering near-surface variation, and to identify CO₂ leakage in shallow subsurface. (2) We performed seismic wave propagation simulation for digital rock models with different CO₂ distribution. Our results indicated that seismic attenuation has different sensitivity to CO₂ distribution from seismic velocity. Using both seismic velocity and attenuation, more quantitative evaluation of injected CO₂ may be possible.

研究分野：物理探査

キーワード：二酸化炭素地中貯留 モニタリング デジタル岩石物理 地震波

1. 研究開始当初の背景

近年、温室効果ガスの排出を削減する試みの一つとして、CO₂を地中に圧入し、貯留するCO₂地中貯留 (CO₂ Capture and Storage: CCS) が注目され、国内でも苫小牧沖で貯留計画が進行している。貯留層に圧入したCO₂の空間分布や時間変化をモニタリングする技術の開発は、効率的なCO₂の圧入や圧入したCO₂の漏洩評価など、長期的に安全なCCSを行う上で必要不可欠である。

CCSにおけるモニタリングでは、くり返し地震探査 (タイムラプス地震探査) により地下の地震波特性の時間変化が推定され、CO₂圧入に伴う貯留層の変動が予測される。しかしながら、人工震源を用いた従来の地震探査は、1回の探査が非常に高価であるため、モニタリングの間隔が長く、連続モニタリングが難しいのが現状である。一方、アクロスと呼ばれる精密制御震源は、SN比の高い信号を連続的に発生させることができる震源システムであるが、現状では設置可能な台数が限られているため、従来の人工地震探査に比べると空間分解能が限定されてしまうという問題がある。

また、タイムラプス地震波探査の結果から貯留層内に存在するCO₂を定量的に評価するためには、通常、貯留層内の地震波速度とCO₂飽和度の関係が利用される。近年の研究では、地震波速度とCO₂飽和度の関係が一意ではなく、孔隙中のCO₂の不均質な分布に依存するということが明らかになっている (西澤ほか、2016)。さらに地震波速度のみではなく、減衰特性 (減衰係数およびQ値) の変化を用いた研究も行われている。

しかし、従来の岩石物理学による理論的なモデル化では、現実の岩石の複雑な空隙形状を取り扱うことができないという問題がある。このような問題を解決するためのアプローチとして、岩石サンプルをX線CTスキャナによりデジタル化し、数値シミュレーションを適用することで、不均質な岩石の物性を評価するデジタル岩石物理学が急速に発達している。

2. 研究の目的

本研究では、CCSサイトのモニタリングにおいて連続モニタリングを実現するため、アクロスによる連続地震波形データから、CCSサイトを時空間的に連続モニタリングする手法開発を行う。特に、限られたアクロス震源から空間的な地震波特性を推定する手法の開発を行う。

また、地下に圧入したCO₂を定量的に評価するため、CO₂分布の異なるデジタル岩石に対し、弾性波動シミュレーションを適用することで、複雑な空隙中に分布するCO₂と地震波速度および減衰特性の関係性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 精密制御震源によるモニタリング

本研究では、カナダアクイストア CCS プロジェクトにおいてアクロス震源により取得された連続地震波データを解析することで、モニタリング手法の開発を行う。

(2) CO₂飽和度の異なるデジタル岩石に対する地震波速度および減衰の推定

デジタル岩石データとして、マイクロX線CTスキャナによりデジタル化されたペレア砂岩に対し、様々なCO₂圧入パラメータ (キャピラリー数および粘性比) で流体流動シミュレーションを行った結果 (Tsuji et al., 2016) から、CO₂飽和度とその分布が異なるデジタル岩石モデルを抽出する。それぞれのデジタルデータに対し、rotated staggered gridを用いた3次元弾性波動シミュレーションを適用することで、数値的に地震波速度と減衰定数を推定する。推定した地震波特性とCO₂分布や飽和度の関係を調べる。

4. 研究成果

(1) 精密制御震源によるモニタリング

研究計画当初はCO₂を圧入した深部貯留層のモニタリングを想定していたが、アクロス震源と圧入井の配置から、圧入井周辺では表層を伝わる表面波が卓越していることがわかった。そこで表層付近を伝わる表面波を利用したモニタリング手法の開発を行った。

まず、SN比の高いアクロス震源周辺のデータを利用し、表層の地震波速度の連続モニタリングを行った。その結果、温暖な季節に比べ、冬に推定された地震波速度の方が速いことが明らかになった (図1)。これは冬に表層付近の間隙水が凍結していること反映していると考えられる。

さらに1台のアクロス震源から地震波速度を空間的に推定およびモニタリングする手法を開発した。具体的には、観測データに空間ウィンドウを適用することで、CCSサイトの3次元的な速度情報を推定することに成功した (図2)。この手法を用いて地震波速度の時空間変化を推定した結果、アクロス震源周辺の点的なモニタリング結果 (図1) 同様、季節変動を確認でき、提案手法によりその空間分布を明らかにすることができた (図3)。さらに温暖な季節においては、高い時間解像度で高精度に浅層をモニタリングすることができた。

本研究により、対象地域の表層では季節性の地震波速度変動が生じていることが明らかになった。これはCO₂圧入とは関連のない変動であると考えられるが、反射波を使った深部貯留層モニタリングでは、その影響によりモニタリング精度が低下してしまう。そのため、提案手法による表層の季節変動の評価は、深部貯留層モニタリング精度の向上のため、重要な手法である。

また、季節変動の影響が小さい温暖な期間内では、提案手法により高い精度で地震波速度のモニタリングに成功した。これは圧入し

た CO₂ が漏洩した際、その影響を地震波速度変化として表層で捉えられる可能性を示唆している。

(2) デジタル岩石を用いた CO₂ 分布と地震波速度および減衰の関係

デジタル化した岩石モデル(図 4)をミラーリングしながら、水平方向は周期境界条件、鉛直方向には吸収境界条件を仮定し、モデルの下部から平面波を入射した場合の波形データを 3 次元弾性波動シミュレーションにより計算した(図 5)。モデルを伝播する卓越する波の走時情報から P 波速度を推定し、振幅値から減衰係数および Q 値を計算した。

キャピラリー数と粘性比が異なる様々な CO₂ 圧入パラメータにより得られた CO₂ 分布が異なるデジタルモデルに対し、P 波速度と Q 値を計算したところ、CO₂ 飽和度の値が同様であっても、異なる P 波速度および Q 値が得られた(図 6)。間隙中の CO₂ の分布の違いによる影響を調べるため、各モデルにおける CO₂ と水の接触面積を計算したところ、接触面積が大きいほど P 波速度が遅く、Q⁻¹ が大きい(減衰が大きい)傾向が得られた(図 7)。これは CO₂ クラスターのサイズの違いによる CO₂ と水の pressure communication の違い(西澤ほか、2016)を反映している可能性がある。

また、CO₂ 分布に対する Q⁻¹ の感度は P 波速度とは異なる傾向が得られたため、地震波速度に加え減衰を利用することで、貯留層内の CO₂ をより定量的に評価することができる可能性があると考えられる。

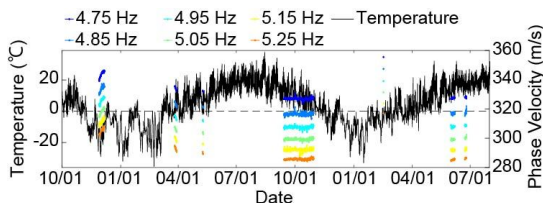


図 1. アクロス震源周辺の地震波速度(表面波位相速度)変化 (Ikeda et al., 2017, JGR)

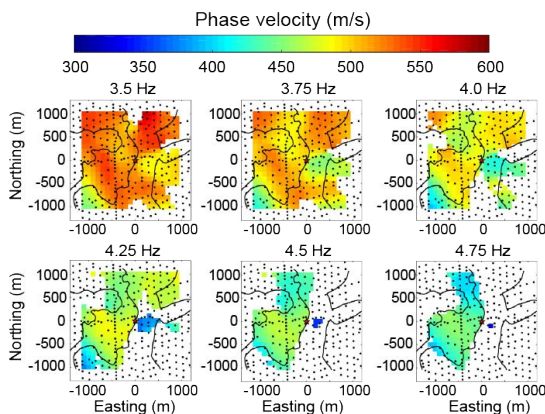


図 2. アクイストア CCS サイトにおける表面波位相速度の空間分布 (Ikeda et al., 2017,

SEG)

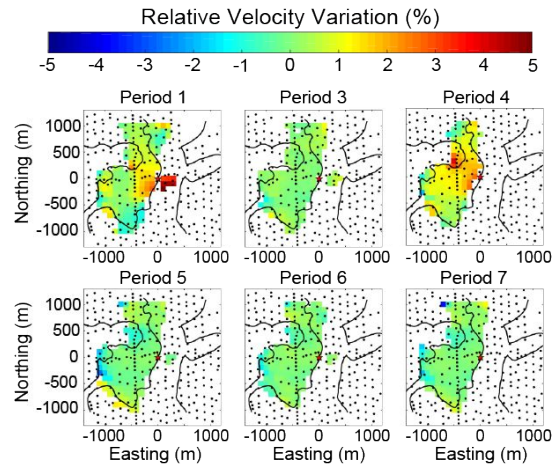


図 3. 4.5Hz におけるアクイストア CCS サイトにおける表面波位相速度の時空間変化 (Ikeda et al., 2017, SEG)。カラーは温暖な期間(期間 2)との相対的な変化を表し、暖色系は各期間の速度が期間 2 に対して速いことを表す。期間 1, 4 は氷点下の冬に対応し、そのほかの期間は温暖な期間に対応する。

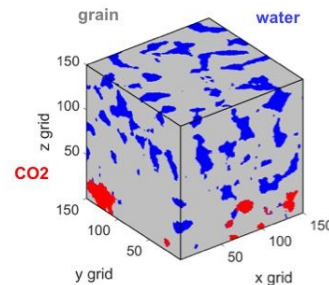


図 4. シミュレーションに利用したデジタル岩石モデルの例

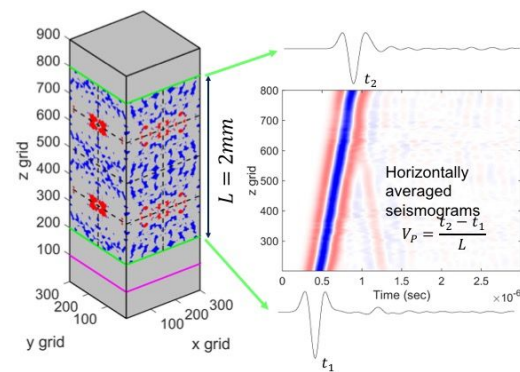


図 5. 弾性波動シミュレーションにより計算された波形と P 波速度推定の例。(左) 数値シミュレーションに用いたモデル。(右) シミュレーションにより計算した波形(水平方向の波形データを平均化したもの)。

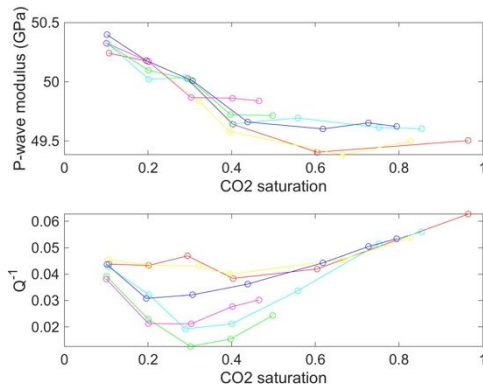


図 6. 異なる CO₂ 圧入パラメータを用いた流体流動シミュレーションにより得られたデジタルモデル(Tsuji et al., 2016)に対し、弾性波動シミュレーションにより推定した P 波速度および Q 値(Q⁻¹)と CO₂ 飽和度の関係。同じ CO₂ 圧入パラメータのデータを同じカラーで表示している。

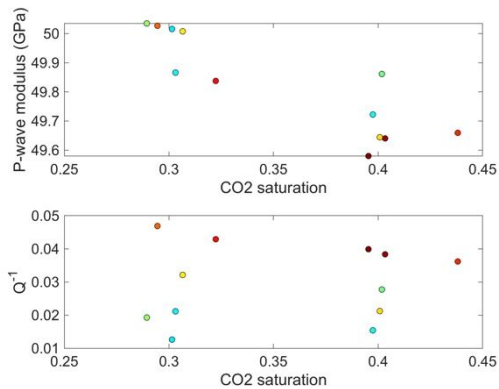


図 7. 図 6 の結果において、CO₂ と水の接触面積をカラーで示したもの。暖色系のカラーは接触面積が大きいことを表し、寒色系のカラーは接触面積が小さいことを表す。

< 引用文献 >

T. Tsuji, F. Jiang, and K. Christensen, Characterization of immiscible fluid displacement processes with various capillary numbers and viscosity ratios in 3D natural sandstone, *Advances in Water Resources*, 95, 2016, 3-15.

西澤 修、張 毅、薛 自求、岩石物性研究と CO₂ 地中貯留 II: 砂岩における CO₂ 飽和度と P 波速度変化、*物理探査*, 69(3)、2016、195-214.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

R. D. Andajani, T. Ikeda, and T. Tsuji, Surface wave analysis for heterogeneous geological formation in

geothermal field: Effect of wave propagation direction, *Exploration Geophysics*, 査読有, 印刷中
DOI: 10.1071/EG17129

H. Nimiya, T. Ikeda, and T. Tsuji, Spatial and temporal seismic velocity changes on Kyushu Island during the 2016 Kumamoto earthquake, *Science Advances*, 査読有, 3(11), 2017, e1700813
DOI: 10.1126/sciadv.1700813

T. Ikeda, T. Tsuji, M. Takanashi, I. Kurosawa, M. Nakatsukasa, A. Kato, K. Worth, D. White, and B. Roberts, Temporal variation of the shallow subsurface in the Aquistore CO₂ storage site associated with environmental influences using a continuous and controlled seismic source, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 122(4), 2017, 2859-2872
DOI:10.1002/2016JB013691

[学会発表](計 5 件)

T. Ikeda, T. Tsuji, M. Nakatsukasa, H. Ban, A. Kato, K. Worth, D. White, and B. Roberts, Shallow characterization and monitoring of the Aquistore CO₂ storage site from spatially windowed surface-wave analysis with a permanent seismic source, 2017, 87th SEG Annual Meeting, Houston, USA.

池田 達紀、辻 健、中務 真志、伴 英明、加藤 文人、Kyle Worth、Don White、Brian Roberts、単一アクロス震源を用いた Aquistore CCS サイトにおける表面波位相速度の空間分布とモニタリング、2017、物理探査学会第 136 回学術講演会、東京。

T. Ikeda, and T. Tsuji, Robust subsurface monitoring using a continuous and controlled seismic source, GHGT-13, 2016, Lausanne, Switzerland.

T. Ikeda, T. Tsuji, M. Takanashi, I. Kurosawa, M. Nakatsukasa, K. Worth, D. White, and B. Roberts, Time-lapse monitoring of shallow subsurface in the Aquistore CO₂ storage site from surface-wave analysis using a continuous and controlled seismic source, 86th SEG Annual Meeting, 2016, Dallas, USA.

T. Ikeda, F. Jiang, and T. Tsuji,
Digital rock physics for evaluating
effects of CO₂ saturation on seismic
velocity in natural sandstone, Asia
Oceania Geosciences Society (AOGS),
2016, Beijing, China.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 達紀 (IKEDA Tatsunori)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー
国際研究所・助教

研究者番号：00736845