

京都大学	博士 (工学)	氏名	東 宏幸
論文題目	地中圧入における二酸化炭素の分布域と飽和度の推定に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、地球温暖化対策の一つである CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) において地中に圧入した二酸化炭素の分布域と飽和度の量を、観測された弾性波速度から求めようとするものであり、6章から成っている。</p> <p>第1章は緒言であり、地球温暖化対策の中での CCS の位置づけ、および CCS そのものの概要について述べている。さらに CCS の中で、地中に圧入された二酸化炭素の分布域と飽和度を求めるモニタリングの重要性について述べ、本研究の背景と目的について述べている。また本章で本論文の構成について示している。</p> <p>第2章ではまず、世界の主要な CCS プロジェクトにおいて弾性波を用いたモニタリングがどのように使われているか概観している。その結果、すべての主要な CCS プロジェクトで、弾性波によるモニタリングが実施されていることが示された。さらに具体的にどのように適用されたか例を挙げている。またこれまでの主要プロジェクトにおけるモニタリングは地中の二酸化炭素の分布範囲を求めているものがほとんどで、飽和度まで求めているものは少ないことを述べて、この論文の弾性波速度から二酸化炭素飽和度を推定する方法開発の動機づけとしている。</p> <p>第3章では弾性波速度から二酸化炭素飽和度をどのように求めるか、方法を述べている。まず、単一の流体が岩石内の間隙にあるときに、岩石全体の弾性波速度がどのようになるか Gassmann の式を用いて示した。次に間隙内流体が複数の場合、たとえば二酸化炭素と水の場合について述べている。複数の流体の分布状態によって岩石全体の弾性波速度が異なることを示し、具体的に定式化を行っている。複数の流体が均質に分布する場合と部分的に分布する場合のそれぞれについて弾性波速度の求め方を示している。前者は均質飽和モデルと呼ばれ Gassmann-Wood の方法で、後者は部分飽和モデルと呼ばれ Gassmann-Hill の方法で定式化できることを示した。また、Gassmann の式の適用にあたって、乾燥骨格の弾性係数が必要であるが、それは Rock Physics モデルを使って決めている。CCS の貯留層となりうるような砂岩系の Rock Physics モデルについて複数説明し、そのなかから、次章での長岡プロジェクトへの適用を目指して、Soft-sand モデルを選択して内容を詳述している。</p> <p>実際の観測データは、上記2つの方法で推定した弾性波速度の中間となるため、新しい考えを提出している。部分飽和モデルは間隙の中を CO₂ が完全に水と置換できるとして定式化がなされているが、本研究では最大置換できるガスの量を定義し、臨界ガス飽和度と名付けて定式化を行ない、修正部分飽和モデルと名付けた。臨界ガス飽和度は CO₂ と水の二相流移行シミュレーションの分野で扱われているパラメータの不動水飽和度に対応するものとして、この量の導入は自然であり、モデルの妥当性を主張している。</p> <p>部分飽和モデルにおいて、適用する弾性波の周波数と部分飽和している部分のサイズを検討する必要があるが、岩石の浸透率などから決まる間隙水圧の拡散係数と流体の粘性度などの性質からその周波数で部分飽和モデルとして観測できる最少サイズを求める方法を述べている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	東 宏幸
<p>第4章では第3章で述べた方法を長岡プロジェクトの検層データに適用している。Soft sand モデルによって岩石の骨格の弾性係数を決めたあと、均質飽和、部分飽和、修正部分飽和モデルを用いて、二酸化炭素飽和度と弾性波速度の理論曲線を描き、検層データと比較している。用いた検層データは、弾性波速度は音波検層から、二酸化炭素飽和度は中性子検層から算出したものを用いている。その結果、この論文で提出した修正部分飽和モデルが最も適合していることを示している。またそのときの臨界ガス飽和度の値も、長岡の二相流移行シミュレーションで用いられた値と整合していることを述べている。</p> <p>さらに対象区間を細分化し、それぞれに修正部分飽和モデルを適用している。そのときの臨界ガス飽和度は核磁気共鳴 (NMR) 検層の結果である FFV (Free Fluid Volume) から算出したものを用いている。適用結果は検層データをよく説明している。</p> <p>3章で示した部分飽和として観測できる最少サイズを求める方法を用いて、長岡で適用した音波検層の周波数と長岡の貯留層のパラメータを用いて間隙水圧の拡散係数を計算した結果から、具体的に最少サイズを計算している。その値は、別に行われた薄片の顕微鏡写真でみられる間隙の大きさより大きく、部分飽和は多くの間隙をまたいで存在することからその事実を裏付けていることを示している。</p> <p>第5章では地中の二酸化炭素の分布域を求める方法として長岡で適用された弾性波トモグラフィについて検討している。二酸化炭素の地中での分布範囲と飽和度を同時に求めることを目標としている。初動走時トモグラフィによって得られた結果は二酸化炭素分布範囲を明瞭に描き出しているが、弾性波速度は検層結果と整合せず、そのため、速度低下範囲を制限する手法を用いて、再解析を実施している。しかし、その値はまだ検層結果とは差があったために、その理由について述べたあと、同じ長岡のデータを用いた波線の拡がりを考慮した解析結果を用いて修正部分飽和モデルでの適用を行なって、検層結果と同等の値を得ている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文によって得られた成果について要約している。二酸化炭素飽和度と弾性波速度の関係は間隙内の二酸化炭素の分布形態に依存しており、形態によって均質飽和モデル、部分飽和モデルがあり、それに加えてこの論文では修正部分飽和モデルを導入している。実際の二酸化炭素圧入プロジェクトでの実測データは修正部分飽和モデルで説明できている。</p> <p>今後の展開として、弾性波によって地下に圧入された二酸化炭素の総量を知るためには分布域の把握と同時にそこでの正確な弾性波速度の取得が必要としている。そのために反射法の音響インピーダンスへのインバージョンの精密化が望まれるとしている。修正部分飽和モデルの適用のためには臨界ガス飽和度を定める必要があるが、核磁気共鳴検層の適用のほかに、浸透率から推定できる可能性について触れている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、地球温暖化対策の一つである CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) のうち二酸化炭素地中貯留において、弾性波を用いて地中の二酸化炭素の分布域と飽和度(量)を求めることを目的としている。世界の主要な CCS プロジェクトにおける弾性波を用いたモニタリング手法について調べ、次に、二酸化炭素飽和度と弾性波速度の関係を求める方法を定式化し、実際の地中貯留サイトのデータに適用している。また、地中の二酸化炭素の分布域の把握のための弾性波トモグラフィについて検討し、飽和度を求めている。得られた主な成果は以下の通りである。

- ① 二酸化炭素地中貯留における弾性波を用いたモニタリングについて、世界の主要なプロジェクトについて調べ、そのすべてにおいて弾性波が使われていることを示した。その用途は分布域を把握することが中心であり、飽和度を求めている例は非常に少ないことを示した。
- ② 岩石中の流体が複数になる場合(たとえば、水と二酸化炭素)について Gassmann の式を用いて検討し、岩石の弾性波速度は岩石間隙中の分布状態によって同じ飽和度でも異なることを示した。その分布状態の違い(均質飽和:各間隙に二酸化炭素が均質に分布する状態、部分飽和:岩石中に二酸化炭素が部分的に分布する状態)において、岩石の弾性波速度がどのようになるか定式化を行った。
- ③ さらに、実際に観測されるデータは均質飽和と部分飽和の中間に存在することが多いことに触れ、その場合の理論モデルとして修正部分飽和モデルを提出した。ここでは岩石の間隙が最大包含できる二酸化炭素の量があるとして、臨界ガス飽和度という新たな概念を提案している。これは水、ガスの2相流の移行数値シミュレーション分野のパラメータである不動水飽和率に対応するもので物理的に意味のある概念である。
- ④ 実際の地中貯留サイトである長岡プロジェクトの検層結果に上記の3モデルを適用し、この論文で提出した修正部分飽和モデルを用いてデータを説明することに成功した。ここで用いた臨界ガス飽和度の値はこのプロジェクトでの二相流移行数値シミュレーションで用いた不動水飽和率の値と整合的であった。
- ⑤ モデル適用のために必要な Gassmann の式を使うには骨格の弾性係数を求める必要がある。貯留層となりうる砂岩系の Rock Physics モデルについて複数示したあと、その中から長岡の地質や圧入前の検層結果から Soft sand モデルを採用した。
- ⑥ 修正部分飽和モデルの適用性をさらに検討するために、対象層を小区分して、各区間に適用した。そのときの臨界ガス飽和度は核磁気共鳴(NMR)検層から求めた間隙径分布を用いて求め、観測データとの整合性を確認した。
- ⑦ 二酸化炭素の地中での分布を求めるために長岡での弾性波トモグラフィにおいて、分布と飽和度を求めた。初動走時トモグラフィでは十分な速度低下が得られないことを示し、波線の広がりを考慮するトモグラフィで得られた結果を用いて飽和度を求めた。

以上、本論文は、地中の二酸化炭素の飽和度を求めるに際し、新しい修正部分飽和モデルという物理的考察に基づいたモデルを提案し、実測データに適用して成功を収めている。これは、地球温暖化対策に必要な地中貯留において、地下に圧入された二酸化炭素の正確な定量化をもたらす理論として、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年8月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。