

第Ⅲ部門

Biot 理論における弾性波速度分散への間隙流体の粘性の影響に関する研究

京都大学工学部 学生員 ○平田 卓也
 京都大学大学院工学研究科 正会員 大西 有三
 京都大学大学院工学研究科 正会員 西山 哲
 京都大学大学院工学研究科 正会員 矢野 隆夫
 (独) 産業技術総合研究所 正会員 高橋 学

1 はじめに

近年、岩盤が持つ遮蔽性、耐久性を利用した、CO₂の地中貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分のような、地下空間を利用した技術の研究が盛んに行われている。このようなプロジェクトにおいては、CO₂圧入後のCO₂の挙動や、放射性廃棄物を処分するサイトにおける地下水挙動の把握のための、空間的な透水性分布のような、地下岩盤における広域の情報が必要とされる場合が多い。そこで、広域の二次元情報が得られる弾性波トモグラフィが注目されている。弾性波トモグラフィとは、対象とする岩盤においてボーリング孔間で複数周波数の弾性波を透過させ、その走時データから弾性波速度を算出し、その空間分布を取得する技術である。更にその結果を他の手法で得られる情報や、化学的性質と組み合わせることで、地下岩盤における物性値の分布状況を面的に取得できる。本研究では、水とCO₂の二相混合モデルにおいて、CO₂の溶解量によって溶液の粘性が変化する現象に着目した。弾性波の速度分散は間隙を飽和させる流体によってその特性が変化するので、この二つの現象を組み合わせることでCO₂地中貯留モニタリングへの応用が可能ではないかと考えられる。したがって、本研究では基礎的実験として、人工供試体（ポーラスストーン）を粘性の異なる流体で飽和させて室内実験を行い、得られた結果を間隙流体の粘性の違いという観点から評価した。

2 Biot 理論の概要

多孔質弾性論と呼ばれる Biot 理論では、間隙を流体で満たされた媒体中を透過する弾性波は、固体と流体の相互作用によって速度分散が起こるという現象、すなわち、弾性波分散現象が導かれている¹⁾²⁾。低周波の場合、流体に働く粘性力が慣性力に比べて相対的

に大きくなるため、固体と流体が混合物として一緒に動く。その結果、流体の分だけ見かけの質量が増加し、弾性波速度が減少する。高周波の場合、流体に働く慣性力が粘性力に比べて相対的に大きくなるため、流体は固体の運動に従うことができず、流体は固体骨格に閉じ込められることになる。その結果、流体が全体の体積弾性率を増加させ、弾性波速度が増加する。

以上に述べたような概念を基にして、Biot 理論では弾性波分散現象が導かれている。

3 室内実験

人工供試体を粘性の異なる流体で飽和させ、弾性波速度測定実験を行った。間隙流体の粘性が、弾性波分散現象にどのような影響を与えるかを評価することが目的である。実験装置は、ファンクションジェネレーターで1波のバースト波の正弦波を発振させ、増幅器、振動子を介して供試体内を透過させ、受信した波をオシロスコープで出力し観測するというものである。受信波の立ち上がり時間から弾性波速度を算出する。また、弾性波の周波数は70kHzから1200kHzの間の15種類の周波数について測定を行った。実験に用いた供試体は、骨格構造は人工供試体2種類、間隙流体は水（純水）とシリコンオイル2種類である。間隙流体の密度、粘性係数を表1に示す。

表1 間隙流体の密度と粘性係数

	密度(kg/m ³)	粘性係数(kg/(m・s))
純水	997	8.87E-04
シリコンオイル1	758	4.93E-04
シリコンオイル2	951	2.85E-03

4 実験結果と考察

図1と図2に各供試体について実験結果を示す。図から、周波数の増加とともに、弾性波速度が増加する様子が見て取れる。この現象は、ポーラスストーンのような間隙を有する媒体において、その間隙が流体で

飽和されることで引き起こされていると考えられ、この現象は先述した Biot 理論で導かれている弾性波分散現象と一致していると考えられる。また、間隙流体が異なると、弾性波の分散特性が異なる様子も観察される。

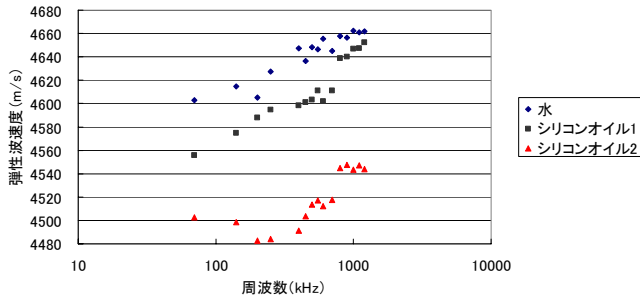


図1 ポーラスストーン 100 測定結果

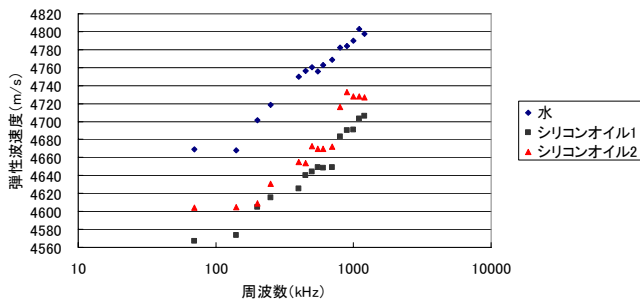


図2 ポーラスストーン 60 測定結果

次に、分散特性の違いを、間隙流体の違いという観点から、Biot 理論を用いて説明可能であるか検証する。

まず、Biot 理論解において、間隙流体の粘性係数について感度分析を行った (図3)。

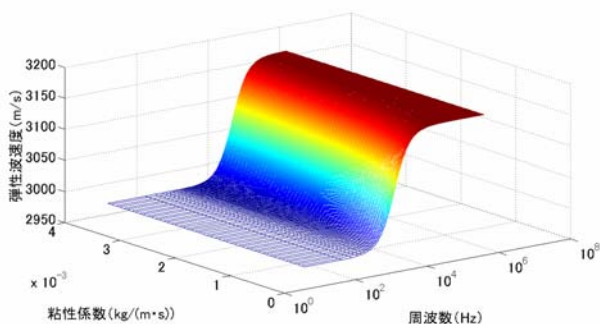


図3 Biot 理論解における粘性係数の影響

感度分析の結果、粘性係数の変化は周波数方向にのみ影響を与え、弾性波速度に関しては影響を与えないことが分かる。

一方で、実験結果を粘性係数と速度変化量についてまとめたものを図4に示す。図4から、実験結果においては、粘性係数が増加すると速度変化量が減少していることが分かる。一方、感度分析から、粘性係数の変化は弾性波速度に関して影響を与えないことが分かっている。

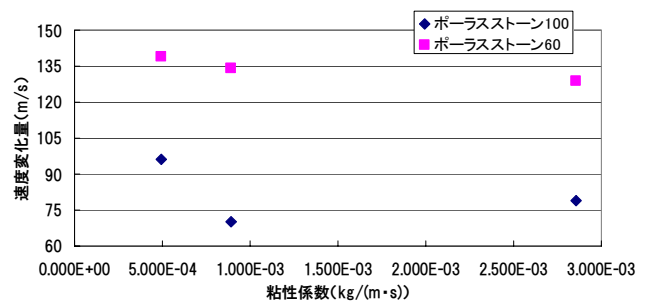


図4 粘性係数と速度変化量の関係

したがって、実験において観測されたこの現象は、粘性係数の増加によって Biot 理論曲線が高周波側に平行移動する一方で、観測周波数域は固定されているために、速度変化量が減少したのと考えられる。水とシリコンオイルそれぞれの粘性係数と密度を用いて描いた Biot 理論曲線で、今回の現象を説明できる観測周波数域は図5のようになる。

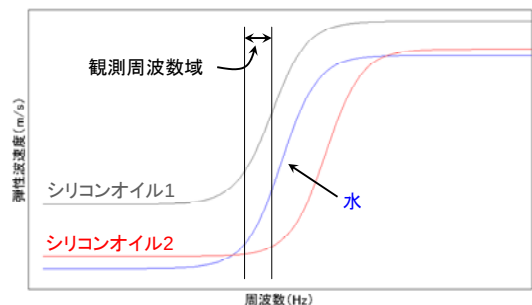


図5 理論曲線と観測周波数域の関係

これは、速度変化量と合致するだけでなく、曲線の立ち上がり方や傾きとも整合的であると言える。

5 まとめ

間隙流体の粘性が異なることで、弾性波速度の分散特性が異なることが確認された。また、同じ骨格構造の供試体を異なる間隙流体で飽和させた場合、測定する周波数域を適切に設定することで、複数周波数で計測された弾性波速度の変化量から、間隙流体の粘性の変化を捉えることができる可能性があることが示された。

参考文献

- 1) M.A.Biot : Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I.Low-Frequency Range, The Journal of The Acoustical Society of America, Vol.28, No.2, 168-178(1956)
- 2) M.A.Biot : Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II.Higher Frequency Range, The Journal of The Acoustical Society of America, Vol.28, No.2, 179-191(1956)