

# 弾性波の振幅減衰トモグラフィを用いた地下流体のモニタリング手法の開発

JFE シビル(株) 正会員 ○田子 彰大, 榎原 淳一  
 JOGMEC 高梨 将  
 佐藤工業(株) 正会員 永尾 浩一

## 1. はじめに

石油の増産や炭酸ガスの地層貯留を目的として地下にガスなどの流体を圧入する際、圧入計画の作成、圧入量などの管理において圧入した流体の挙動を把握することは重要である。しかし、圧入された流体は地層構造の影響を受けて移動するため、実際の挙動が事前の予測と一致しないことも多く、この圧入流体のモニタリング技術の開発が必要とされている。弾性波探査や電気探査などの物理探査技術は、広い範囲を非破壊で可視化できるため、このモニタリングに適していると考えられるが、圧入流体が弾性波速度や電気比抵抗値に与える影響が小さい場合のモニタリングは難しいとされてきた。

榎原, 山本(2009)が開発した音響トモグラフィ地盤探査手法<sup>1)</sup>は、弾性波探査の一つに分類されるが、他の一般的な手法に比べて計測精度と計測再現性が高いこと、また、弾性波速度と比較してより鋭敏に地盤の状態変化に反応する振幅の変化を正確に可視化<sup>2)</sup>できることに特徴がある。今回、この圧入流体のモニタリングに対する本手法の適用性を検証するため、岩石試験体を用いた基礎的な実験を実施した。実験結果から、本手法により得られた振幅減衰分布図は岩盤内部に圧入された流体の挙動を反映しており、本手法が圧入流体のモニタリングに適用可能であることがわかった。

## 2. 実験概要

### (1) 音響トモグラフィ地盤探査法とは

本手法は非破壊の可視化技術という点において医療技術のCT スキャンと類似の技術である。振幅と周波数を正確に制御した高周波数の弾性波を用いること、疑似ランダム波と呼ばれる連続波を共振すること、弾性波速度だけでなく振幅の減衰量を結果として出力できることに特徴がある。図-1 に本手法の概要を示すが、圧電素子型発振器から共振し、多連の圧電素子型受信器で受信した信号をデータロガーに記録する。記録された受信波形をもとに初動波の到達時間と受信振幅を読み取り、計測断面の伝播速度と振幅減衰率分布図を逆計算手法により求める。なお、振幅減衰率は式(1)により求める。ここで  $\alpha$  は振幅減衰率、 $A_0$  は発振振幅、 $A$  は受信振幅、 $d$  は伝播距離を示す。

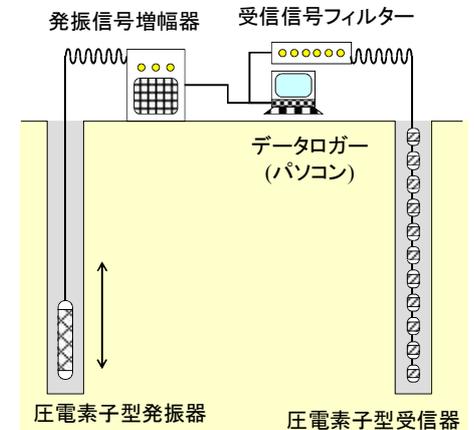


図-1 音響トモグラフィ法の概念図

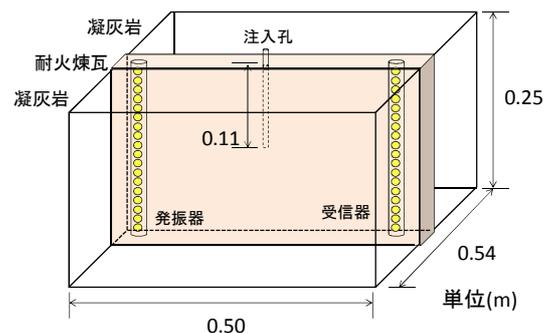


図-2 実験に用いた試験体

表-1 主な使用機器

名称	仕様
発振器	圧電素子型, Benthos 社製, 外径 約 15mm, 長さ 約 20mm, 使用可能周波数帯域, 10Hz ~ 150kHz (実績).
受信器	圧電素子型, フジセラミックス製, 外径 約 10mm, 最小センサー間隔 10mm, 使用可能周波数帯域 10kHz ~ 200kHz (実績).
増幅器	出力電圧 50V (150kHz 時), 使用可能帯域 1Hz ~ 200kHz, 電源 AC100V, 消費電力 30W.
信号フィルター	ゲイン 1 倍 ~ 100 倍, 使用可能周波数帯域 5kHz ~ 200kHz, 電源 DC+12V.
データロガー	入力 4ch, 出力 1ch, AD 変換速度 1MHz/ch, DA 変換速度 2MHz, 入力分解能 14bit.

$$\alpha = \frac{A}{A_0} d \quad (\text{式 1})$$

キーワード 地下流体, モニタリング, 弾性波, 振幅減衰, 可視化

連絡先 〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4 JFE シビル(株) TEL 03-3864-3793

## (2) 実験装置

実験装置を図-2 に示す。低浸透性の地層に挟まれた高浸透性の地層に流体を圧入することを想定し、2 個の低浸透性の凝灰岩(透水係数  $1.1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ) で高浸透性の耐火煉瓦(透水係数  $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  以上)を挟み、注入孔を用いて耐火煉瓦内部に流体を注入した。これらの岩石試験体は、事前に真空装置を用いて完全に飽和させてあり、実験は試験体を水槽内に設置して行った。圧入流体には拡散能力の高いマイクロバブル水<sup>3)</sup>を用いた。耐火煉瓦には直径 20mm の計測孔を 2 本削孔してあり、発振器と受信器をそれぞれ設置した。計測は注入前、注入 7 分後、16 分後、27 分後の 4 回行い、逆計算により速度と振幅減衰率分布図を出力した。発振周波数は 78kHz、センサーへの印加電圧は 50V であった。実験に用いた主な使用機器と実験状況を表-1、写真-1 に示す。

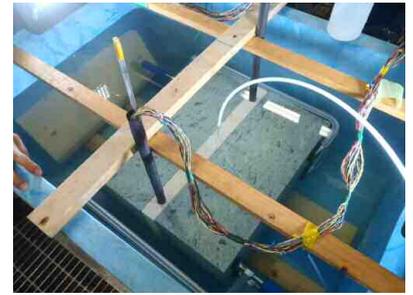


写真-1 実験状況

3. 実験結果

実験結果として減衰率分布図と速度分布図の時系列変化を図-3、図-4 に示す。図-3 の減衰率分布図からは、注入 7 分後には高減衰率部が注入孔の左側に広がり始め、注入後 16 分、27 分と進むにつれ高減衰率部が大きく広がっていることが分かる。現場での目視観察結果から、注入 7 分後には図中左側の上面や側面から気泡が漏れ始め、注入 27 分後には右側から漏れていたことが確認されており、このことは図-3 の結果と一致する。一方、図-4 の速度分布図からは、注入の前後で明瞭な速度変化を確認できなかった。

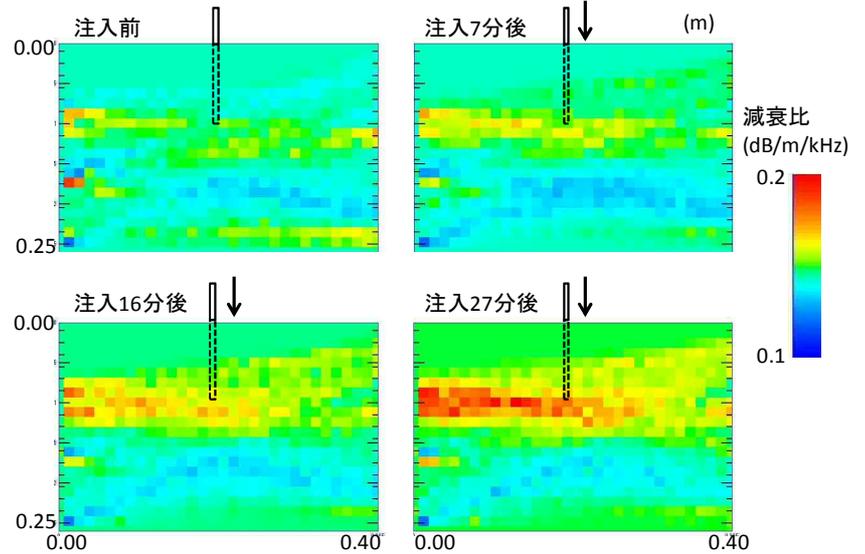


図-3 減衰率分布図の変化

4. まとめ

地盤に圧入した流体のモニタリングに対する音響トモグラフィ法の適用性を検証するために岩石試験体にマイクロバブル水を注入して検証実験を行った。この結果から音響トモグラフィ法で得られる減衰率分布図はこの圧入流体の挙動を反映していること、一方、速度分布図は圧入流体の影響をほとんど受けていないことがわかった。

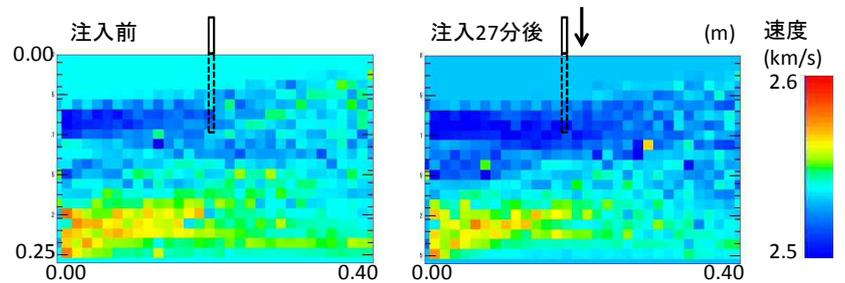


図-4 速度分布図の変化

## 参考文献

- 1) 榊原淳一, 山本督夫(2009): 高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, 97-106.
- 2) 榊原淳一, 毛利栄征, 山本督夫: 高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発, 土木学会論文集 C Vol. 67, No. 3, 310-318, (2011).
- 3) 永尾浩一, 前田幸男, 末政直晃: マイクロバブル水混入工法による地盤の液状化対策工に関する検討実験, 佐藤工業技術研究所報, No. 32, pp21-25, 2007.