

弾性波の振幅減衰トモグラフィによる 地中へのマイクロバブル水注水のモニタリング

榊原淳一*、田子彰大、中村悠希、国司洋介、高梨将

Monitoring of Injected Micro-bubble-water by P-Wave Attenuation Tomography

Junichi Sakakibara*, Akihiro Tago (JFE Civil),
Yuki Nakamura, Yosuke Kunishi, Mamoru Takanashi (JOGMEC)

Abstract: It is desirable to monitor subsurface fluid movement for planning enhanced oil recovery (EOR) and controlling fluid injection. We have experimentally carried out monitoring of injected micro-bubble-water by P-wave attenuation tomography for the purpose of developing a high-resolution cross-well monitoring system. Micro-bubble-water, which contains bubbles smaller than 0.1 millimeter in diameter, was injected into underground in between two holes separated by 64m and cross-well tomography was repeated several times before and after injecting micro-bubble-water. The attenuation tomography result showed spread of highly attenuated area spreaded with increasing micro-bubble-water injection, although corresponding velocity change was not observed by travelttime tomography..

1. はじめに

石油の増産や CO₂ 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、圧入計画の作成や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や浸透率、圧力等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。例えば弾性波を用いた手法に関しては、新潟県長岡市の CO₂ 圧入実証試験サイトにおいて坑井間弾性波トモグラフィが実施されており、CO₂ 圧入による P 波速度の低下を確認している(斎藤ほか, 2008)。また、東、薛(2013)は諸現象に対してより鋭敏に変化する弾性波の振幅減衰による手法を提案しているが、フィールドでの圧入流体による振幅減衰の変化を確認した事例はほとんどない。

筆者らは、この振幅減衰の変化を確認する手法として、榊原・山本(2009)が開発した高周波数の弾性波を用いた音響トモグラフィ地盤探査法に着目し、圧入流体のモニタリング手法としての可能性を実験的に検証した。実験を簡素化するために CO₂ の代わりにマイクロバブル水を圧入流体として用いた。実験結果から、マイクロバブル水の圧入に伴い振幅減衰が増加すること、一方で速度はほとんど変化しないことを確認し、弾性

波の振幅減衰比の計測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. 実験方法

本手法で用いる音響トモグラフィ地盤探査法は、圧電素子型震源から疑似ランダム波を発振することで振幅と周波数を正確に制御した弾性波を発振・受信することに特長がある。振幅減衰比は式 (1) により求める。ここで α は振幅減衰比、 A_0 は発振振幅、 A は受信振幅、 d は伝播距離を示す。

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

(1) 岩石試験体による予備実験

前述したように、本研究では CO₂ の代わりにマイクロバブル水を用いた。マイクロバブル水は直径 0.1mm 以下のマイクロバブルを含む水である。このマイクロバブルは気泡同士が結合しないこと、浮力が小さく上昇しにくいことなどから液体の摩擦を低減し流動性を向上させるという特徴がある。主に食品などの洗浄や殺菌に用いられており、建設目的では地盤の液状化対策などへの適用が期待されている(永尾ほか, 2006)。

フィールド実験に先立ち、マイクロバブル水の注入が CO₂ の注入と同様に速度変化が小さいこと、振幅を減少させることを確認するため、岩石試験体を用いた

予備実験を行った。Fig.1 に示すように、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マイクロバブル水を注入した。これらの岩石試験体は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た状態で行った。耐火煉瓦には直径 20mm の計測孔を 2 本削孔してあり、小型の発振器と受信器をそれぞれ設置した。計測は注入前から注入終了までの 27 分間に計 4 回行い、逆計算により速度と振幅減衰比分布図を出力した。発振周波数は 78kHz、センサーへの印加電圧は 50V であった。

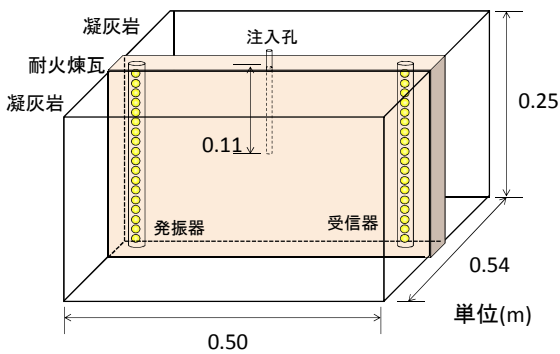


Fig.1 予備実験に用いた岩石試験体

実験結果のうち注入前と注入終了後の減衰比分布図と速度分布図を Fig.2 に示す。同図から注入後は減衰比が最大で 50%増加していること、この高減衰部は注入孔から左右に広がっていることがわかる。目視観察の結果、注入開始 27 分後には耐火煉瓦の左右両側から気泡が漏れていたことが確認されており、このことは実験結果と一致する。一方、速度は注入前に比べて 1% 程度低下したに留まった。以上のことから、マイクロバブル水の圧入は弾性波速度にはあまり影響を与えず振幅は大きく減衰させるという知見を得たため、引き続き実施したフィールド実験においてはマイクロバブル水を圧入流体として用いることとした。

(2) フィールド実験の内容

フィールド実験は 2015 年 6 月に千葉市内の実験場で行った。計測レイアウトと事前計測の結果(速度分布図)を重ねて Fig.3 に示す。GL.-20m~GL.-26m にある沖積細砂層への圧入を行うため、2 本の計測孔(深度 50m)の間に注入孔を設置し、GL.-26m から注入を行った。マイクロバブル水の注入量は $3 \text{ l/min} \sim 6 \text{ l/min}$ で最終的な累積注入量は 6 m^3 であった(Fig.4)。トモグラフィ計測は注入開始前および注入開始後 1 時間から 74 時間の間に 15 回実施した。使用した機材を Table 1 に示す。発振点は GL.-13m~ -50m の 48 ヶ所、受信点は GL.-13m

~ -36m の 24 ヶ所であり、発振周波数は 2kHz、1 回の計測時間は約 25 分であった。計測終了後、注入孔からそれぞれ 0.5m, 10m 離れた位置に目視観測孔を掘削し、何れも GL.-20m~GL.-25m の範囲においてマイクロバブルが存在することを確認した(Fig. 5)。

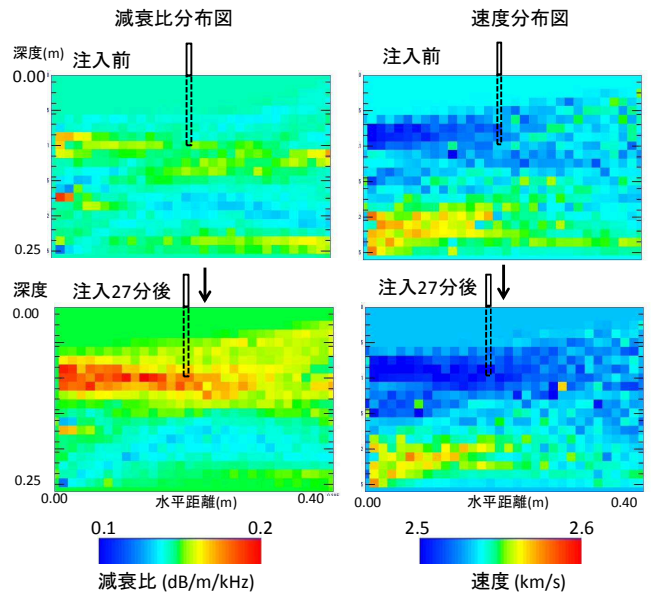


Fig. 2 岩石試験体による予備実験の結果

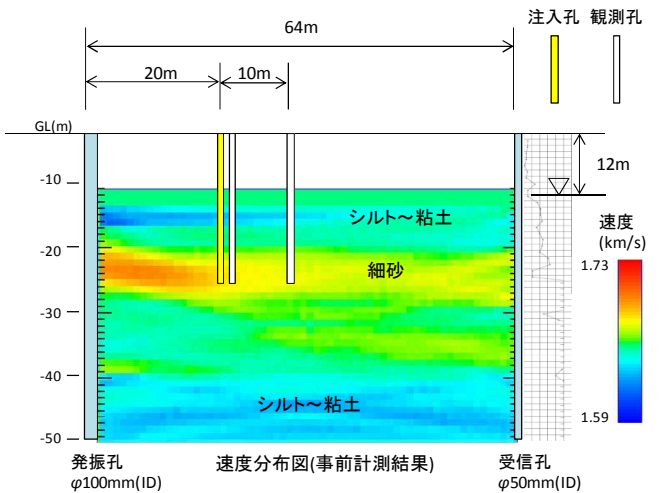


Fig.3 フィールド実験の計測レイアウト図

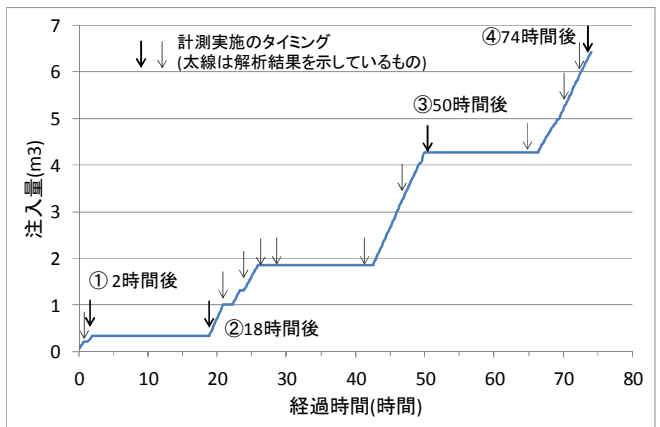


Fig.4 マイクロバブル水の注入量と計測タイミング

Table 1 主な機材の仕様

名称	仕様
発振器	寸法：φ44mm×L600mm, 3kg 出力：122dB (6kHz), 発振周波数：0.2kHz～40kHz
受信器	センサー数：24 個 寸法：φ30mm×L250mm(1 センサー), 感度：-202dB re 1V/1μPa, 使用周波数：10Hz～40kHz
発振器用 増幅器	出力：～100Vrms 使用周波数：DC～40kHz
受振器用 ノイズフィル ター	入力：24CH 周波数帯域：100Hz～100kHz 倍率：1 倍～1000 倍
データ ロガー	入力：24CH サンプリング周波数：100kHz/ch 分解能：14 bit

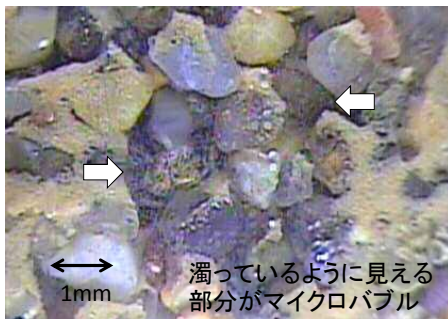


Fig. 5 孔内カメラによる目視観測の結果

3. 実験結果

受信波形の例として、発振位置 GL.-25m の時の受振位置 GL.-24m と GL.-36m の波形図を Fig.6 に示す。図中、マイクロバブル水注入の影響を受けている(a)は注入開始後 18 時間後(緑線)から初動波の振幅が半分程度に小さくなり、50 時間後(赤線)では到達時間も約 0.1ms 遅くなっていることがわかる。これは速度に換算すると 0.4%程度に相当する。一方、注入の影響を受けていない(b)は注入による波形の変化は認められない。

逆計算の結果として減衰比分布図と速度分布図をそれぞれ Fig.7 と Fig.8 に、注入前の結果との差分から得た変化率を Fig.9 と Fig.10 に示す。これらの図から、減衰比は注入孔を中心として増加し、その変化の範囲は Fig.3 で示した地層構造に沿うように計測孔から 10m 以上離れた位置まで広がっていること、変化率は最大で 30%程度であったことがわかる。Fig.9 の“④差分 74 時間後”に観測坑における目視によるマイクロバブルの確認深度を合わせて示しているが、この深度は減衰比が増加した部分とよく一致している。一方、速度については、計測孔の右側にやや速度が低下した部分が認められるが減衰ほど明瞭な変化はない。

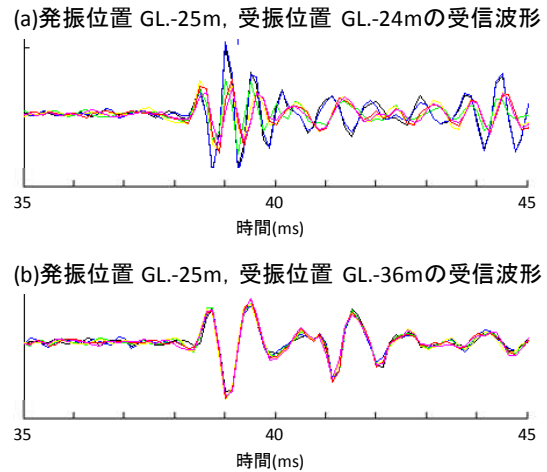


Fig. 6 受信波形 (a) 受振位置 GL.-24m , (b) 受振位置 GL.-36m (黒線 1 時間後, 青線 2 時間後, 緑線 18 時間後, 黄線 26 時間後, 赤線 50 時間後, 桃線 74 時間後)

4. まとめ

本実験の結果、弾性波の振幅減衰比の変化によりマイクロバブル水の圧入状況をモニタリングできることがわかり、CO₂などの圧入流体のモニタリングにおける本手法の適用可能性を示すことができた。

謝辞

本研究は JOGMEC の“平成 26 年度「技術ソリューション事業(フェーズ 1 案件)」に関する委託技術開発”の一部として行われた。

参考文献

- 斎藤秀樹・信岡 大・東 宏幸・棚瀬大爾・薛 自求 (2008) : 長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素圧入実験の坑井間弾性波トモグラフィによるモニタリング. Journal of the Mining and Material Processing Institute of Japan, 124, 78-86.
- 東 宏幸・薛 自求(2013) : CO₂ 地中貯留における部分飽和と弾性波の減衰, 物理探査学会第 128 回学術講演会論文集, 50-53
- 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.
- 永尾浩一・前田幸男・末政直晃・片田敏行・京藤敏達 (2006) : マイクロバブルを用いた液状化対策工法の適用性に関する基礎的研究, 佐藤工業技術研究所報, No.31, 13-20.

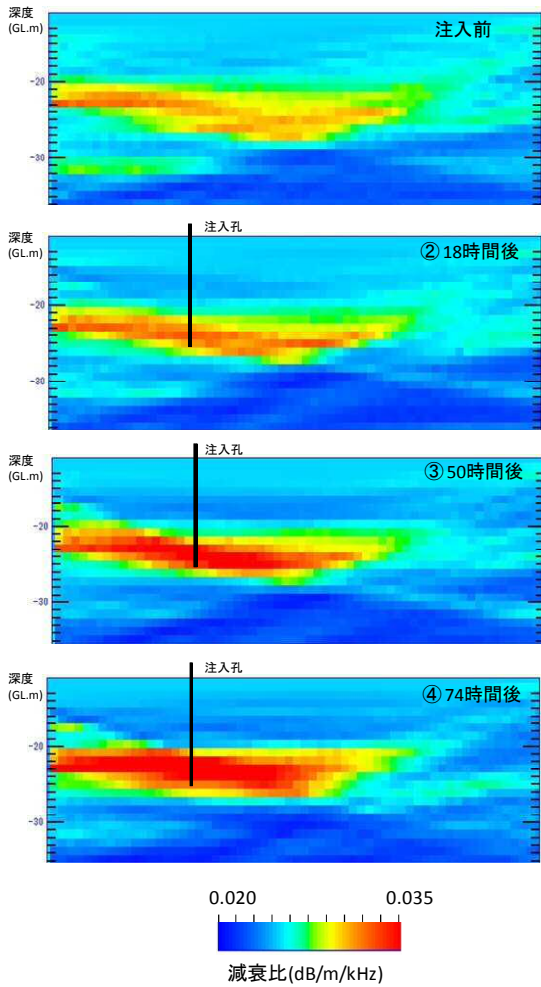


Fig.7 解析結果(減衰比分布図)

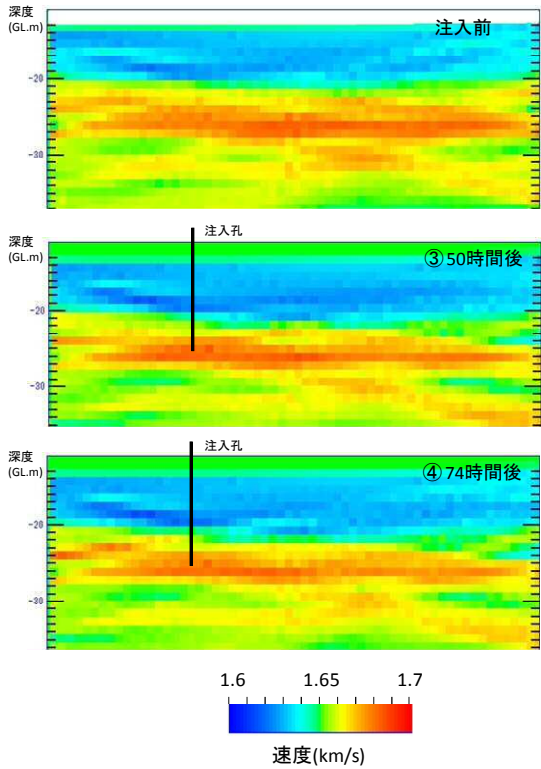


Fig.8 解析結果(速度分布図)

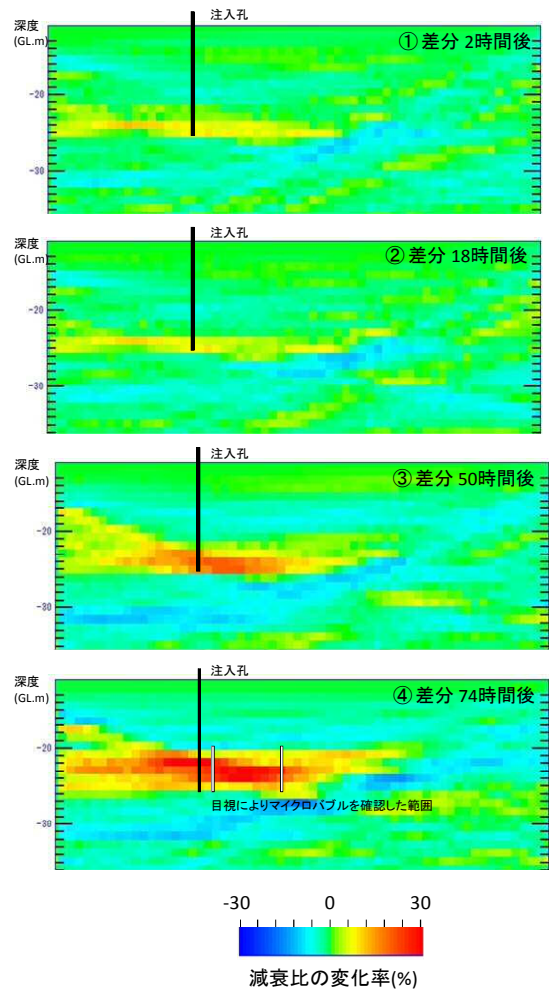


Fig.9 減衰比の変化率の時系列変化

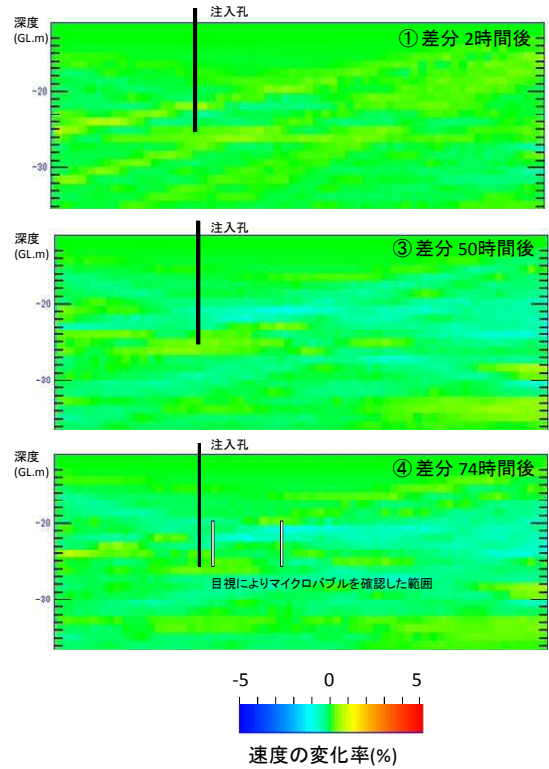


Fig.10 速度の変化率(注入前と 74 時間後)