

メタンハイドレート分解過程における 弾性波トモグラフィーの精度向上と適用性

三保雄司^{1*}・斉藤秀樹²・中山栄樹²・谷和夫³

¹三井住友建設株式会社 東北支店土木部 (〒980-8608 宮城県仙台市青葉区春日町9-15)

²応用地質株式会社 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)

³横浜国立大学大学院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

*E-mail: ymiho@smcon.co.jp

メタンハイドレート (以下, MHと称する) は主として海底下の砂質堆積層の孔隙に存在している. このようなMH層からメタンガスを生産する場合, MHの分解に伴う地盤の安定性を確認するため, MHが分解した範囲を面的, かつ, 継続的に捉えることのできるモニタリング技術が必要となる.

そこで, モニタリング技術として弾性波トモグラフィーに着目し, その精度向上のための解析アルゴリズムを検討した. また, 実地盤に対する解析アルゴリズムの適用性を評価した.

その結果, 分解領域における速度の値を再現するアルゴリズムを提案し, 弾性波トモグラフィー解析の精度向上が確認された.

Key Words : Methane hydrate, seismic exploration, tomography, elastic wave, monitoring

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

自然界において MH は主として海底下の砂質堆積層の孔隙に存在している. このような MH 層からメタンガスを生産する場合, MH の分解に伴う地盤の不安定化が問題となる. そのため, MH が分解した範囲を把握するためのモニタリング技術が必要となるが, 未だ確立されていない.

一方, 近年, 石油貯留層や CO₂ 地中貯留などのモニタリング技術として, 地盤中の速度構造を面的に, かつ, 継続的に捉えることのできる弾性波トモグラフィーが注目されている.

そこで, MHの分解過程における弾性波トモグラフィーの適用性を明らかにすることを目的とした研究を行う.

(2) 検討項目

MH 層は砂泥互層に存在するため, MH 層の上下層と, MH の分解前と分解後における剛性の変化が, 弾性波の伝達経路に影響をもたらす. そこで, MH 層の断面をトモグラフィー解析し, MH の分解過程が, 解析結果にどのように反映されるか検討する必要がある.

検討項目は以下の2点である.

① MH の分解過程における弾性波トモグラフィーの

解析精度を評価し, 精度向上のための解析アルゴリズムを提案する.

② 提案した解析アルゴリズムの実地盤に対する適用性を評価する.

(3) 検討方法

検討項目①②に対して, 以下の検討方法を採用した.

① 分解過程を伴う MH 層を模擬した地盤に対し順解析の数値実験を行い, 定量的に精度を評価し, また, アルゴリズムを適用した解析を行う.

② 室内試験により逆解析の弾性波トモグラフィー解析を行い, 精度の評価を行う.

2. 数値実験

(1) 全領域を解析対象とした数値実験

(a) 解析方法

厚さ 48m の砂層の中央に水平な厚さ 16m の MH 層が存在する三層の速度構造モデルの概要を図 1.2 に示す.

MH 層に設置した鉛直な生産孔から同心円状に分解領域が広がると想定する. 分解する前の MH 層を高速度地盤とし, MH が分解した後の砂層 (低速度地盤) の半径として $r_1=3.4, 6.8, 10.2, 13.6, 17.0$ m ($r_1/r_0=0.16, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83$)

の6ケースを設定した。高速度及び低速度地盤のP波速度 V_p は、3500m/s 及び 1500m/s とし、MH 層を挟む上下の砂層の V_p も 1500m/s とした。生産孔と $r_0=20.4\text{m}$ の同心円状に配置した測定孔に起振受振点を鉛直方向に 2.3m 間隔に各 20 点ずつ配置した。

設定した速度構造モデルに対して波線経路を計算（順解析）して得られた走時を入力データとして（観測走時 T_{oi} と考えて）、速度構造モデルを再構成するためのトモグラフィー解析（逆解析）を行った。解析セルの配置は鉛直 30 個×水平 24 個とし、波線経路の計算と各セルの V_p の修正を繰返し行った。速度を修正する方法には SIRT 法を用い、20 回反復して計算した。

(b) 解析結果と考察

$r/r_0=0.0$ と 0.50 の結果を図 3 に示す。

解析の精度を定量的に評価するため、式 (1) に示す各セルの解析誤差 e を図 4 に示す。ただし、速度構造モデルの各セルに与えられた P 波速度を V_{orig} 、トモグラフィー解析による再構成後の P 波速度を V_{cal} とする。また、 e の総計を解析セルの総数 J で正規化した解析モデルの誤差示標 E として式 (2) に定義した。

$$e = |V_{cal} - V_{orig}| \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J e^2}{J}} \quad (2)$$

$r/r_0=0.0$ においては砂層と MH 層の境界部分、 $r/r_0=0.16, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83$ においては分解フロント部及び未分解の MH 層の速度構造について $e > 1.0\text{km/s}$ の領域が多く見られ、再現性が低い。これは、弾性波の伝達経路が高速度地盤に影響を受けやすいため、走時残差が大きくなり、砂層と MH 層の境界付近及び分解フロント付近の e が大きくなったためと考えられる。

(2) MH 層のみを解析対象とした数値実験

(a) アルゴリズムの提案

前述の問題点を改善するため以下のアルゴリズムを提案した。

仮定 1 として、MH 層の探査時に調査した上下の砂層の厚さ及びその V_p を既値とし、トモグラフィー解析を行う。

仮定 2 として、生産孔から分解フロントまでの距離 r より内側の分解した領域の V_p は上下層の V_p と同値とした。ただし r は、走時残差である RMS 残差（式 (3) に示す）が最小となるように定める。ここで、 T_{oi} は解析後に得られた各波線の走時、 N は波線の総数である。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{oi} - T_{ci})^2}{N}} \quad (3)$$

(b) 解析方法

基本的に 2(1)節に記した解析方法と同様である。ただし、仮定 1, 2 で既知とした項目をモデルを修正するたびに入力する。 $r/r_0=0.0, 0.16, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83$ の 6 ケースに対して解析を行い、モデル修正を 20 回行った時点での RMS 残差を計算した。 $r/r_0=0.50$ における r/r_0 と RMS 残差の関係を図 5 に示す。 $r/r_0=0.50$ では $r/r_0=0.50$ において RMS 残差が最小値となる。

(c) 解析結果と考察

砂層の厚さ及び V_p が既知とする仮定 1 と RMS 残差を最小とするように分解フロントの位置を推定した仮定 2 を用いて得られた結果を図 6 に示す。砂層の境界、分解フロント、速度の値が良く再現されている。

次に、各ケースにおける解析精度を評価するため、 E と r/r_0 の関係を図 7 に示す。分解領域を仮定するアルゴリズムを用いたものの E は 0.1 以下となり、精度の著しい向上が見られる。仮定 1 のみを用いた解析では、上下砂層の V_p が既知であるため、MH 層との境界部分の誤差が著しく低減されるが、分解領域が広がると分解フロント部での誤差が大きくなるとともに、RMS 残差も大きくなり E も大きくなる。一方、仮定 1 と 2 を用いた解析では、 r と r_f がほぼ近い値となり、分解フロント部における V_p が明確になるため、誤差が著しく低減される。

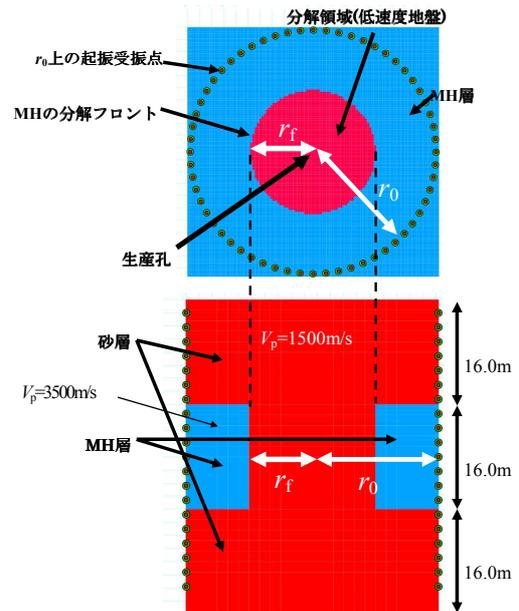


図-1 速度構造モデルの概要

上: 平面図 下: 断面図

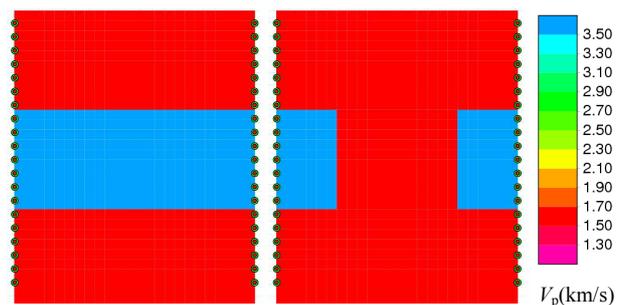


図-2 速度構造モデルの断面

左: $r/r_0=0.0$ 右: $r/r_0=0.50$

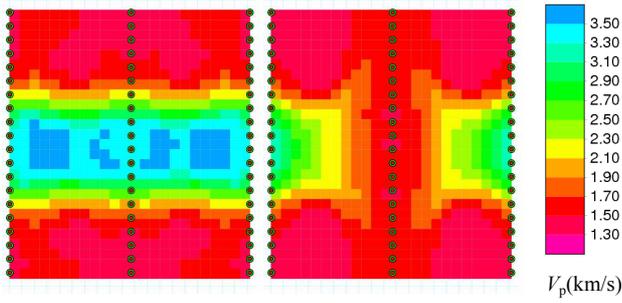


図-3 解析結果

左 : $r_f/r_0=0.0$ 右 : $r_f/r_0=0.50$

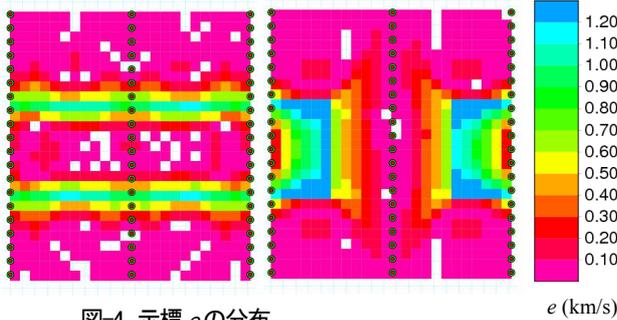


図-4 示標 e の分布

左 : $r_f/r_0=0.0$ 右 : $r_f/r_0=0.50$

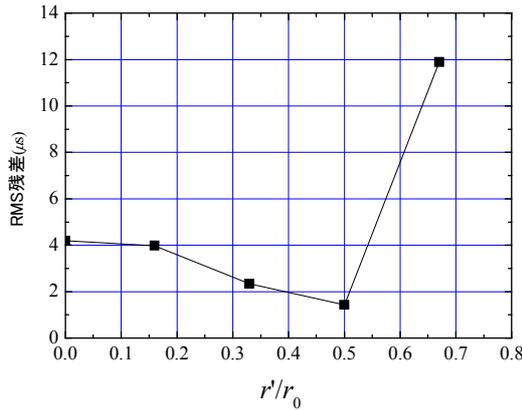


図-5 $r_f/r_0=0.50$ のときの RMS 残差と r_f/r_0 の関係

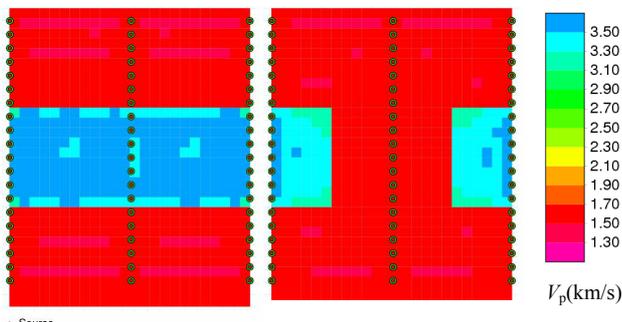


図-6 アルゴリズムを用いた解析結果

左 : $r_f/r_0=0.0$ 右 : $r_f/r_0=0.50$

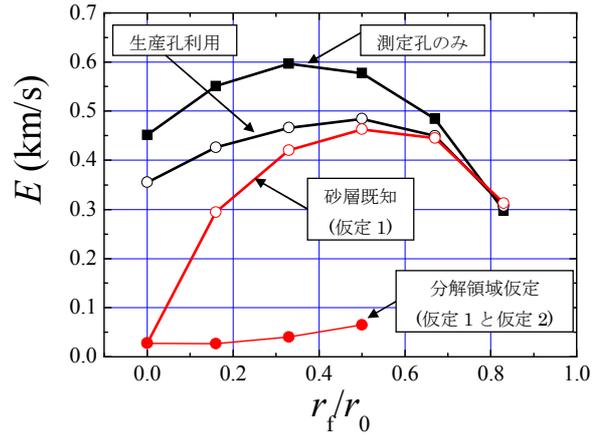


図-7 E と r_f/r_0 の関係

3. 室内実験

(1) 実験装置と実験方法

土槽として、ダイラタンク製の容器を使用した。形状は外径 380mm、高さ 525mm、肉厚 3mm の円柱状である。次に、弾性波起振受振センサーとして、素子形式が圧電型セラミック、共振周波数が約 200kHz、最大出力が 700V のセンサーを使用した。

MH の分解過程を模擬したモデル地盤の概要を図 8 に示す。順解析の数値実験で用いた速度構造モデルに合わせて三層とした（上下に砂層 $V_p=1500m/s$ 、中間に MH 層 $V_p=3500m/s$ ）。これを模擬するため、砂層を水で MH 層を相対的に剛性が高い石膏で代替した。水を用いた理由は、砂層より波の減衰が少なく、SN 比が高い媒体であるからである。

石膏の供試体(直径 50mm、高さ 100mm)を作製し、超音波伝播速度測定試験(JGS 2110-1998)を行った。測定結果から、石膏の超音波速度は $V_p=2900m/s$ とした。モデル地盤の形状は、各層高さ 125mm、数値実験の $r_f/r_0=0.50$ のケースを対象とし、分解領域の幅を 175mm とした。

起振受振点は、測定孔として土槽側面の対面上に 25mm 間隔で起振受振用のセンサーを 15 点ずつ配置した。また、同じ高さのセンサー間の距離は 350mm とした。生産孔も測定孔として用いるとして、土槽の中央にも受振用のセンサーを 15 点配置した。配置方法として、センサーを防水加工し、発泡スチロールの棒に固定し、上下させることで所定の高さに調節する。

起振受振点の番号を各配置列(左側面, 右側面, 中央)の下から No.1,2,...,15 とした。起振点が片側の側面のみを観測を行い、軸対称を仮定して解析した。

(2) 実験結果

(a) 観測走時の測定結果

3(1)節で記したモデル地盤において各起振受振点で順解析した理論走時と実際の測定から逆解析で得られた観測走時の結果を図9, 10に示す。図9が起振点が上の低速度地盤にあるケースを、図10が起振点が高速度地盤中にあるケースである。

ケース No1-5(起振-受振)や No5-1~15 では理論走時と観測走時の差が大きなケースがあった。これは、観測走時を測定する際、起振受振点付近に高速度領域が存在するため、その構造体への波の出入りによるエネルギーの損失、分散が影響し、波の初動が明確にならなくなってしまったのが原因と考えられる。

(b) 解析結果及び考察 (理論走時解析と観測走時解析の比較)

図11に示すモデル地盤の理論走時と実際に測定した観測走時に対して弾性波トモグラフィー解析を行った。解析方法は、数値実験について記した2(1)(a)項で記した方法とほぼ同様である。異なる点は、高速度構造体の $V_p=2900\text{m/s}$ である、中央の生産孔のセンサーが受振のみである、解析セルの分割数が鉛直 $32 \times$ 水平 28 、一辺のセル長 12.5mm である、の3点である。

まず、仮定1と仮定2を適用せずに全領域を対象とした解析を行った。理論走時に対する解析の結果、及び、観測走時に対する解析の結果を図12に示す。どちらのケースも同じような速度の値が得られた。また、どちらのケースも上下層との境界位置、分解フロント位置、速度の値の再現精度が低い。

次に、生産孔から分解フロントまでの距離を仮定するアルゴリズム (仮定1及び2) を用いて解析を行った。理論走時を用いた解析においては $r/r_0=0.36, 0.43, 0.50, 0.57$ 、観測走時を用いた解析においては $r/r_0=0.50, 0.57, 0.64$ と仮定し RMS 残差を求めた。理論走時及び観測走時の解析における RMS 残差と r/r_0 の関係を図13に示す。理論走時の解析において $r/r_0=0.43$ で、観測走時の解析において $r/r_0=0.57$ で RMS 残差が最小値となり、その値を生産孔から分解フロントまでの距離とした。また、生産孔から分解フロントまでの距離の真値となる $r/r_0=0.50$ に対してどちらのケースも $r/r_0=0.07$ (セル1つ分の距離) の誤差をもつ。

理論走時及び観測走時の解析の結果を図14に示す。どちらのケースも上下層との境界、分解フロントが明確になり高速度領域における速度の値の再現性も向上したといえる。

これらの結果を図11で示したモデル地盤を基に2章と同様の評価を行い比較した。解析誤差の示標 e の分布を図15に、各ケースの E の結果を表1に示す。仮定1と仮定2を適用した解析において理論走時の解析も観測

走時の解析も $r/r_0=0.07$ (セル1つ分の距離) の誤差をもつため、分解フロント部の誤差が大きい。しかし、全領域を解析対象としたケースに比べ、高速度領域の e の値がほぼ 0.50km/s 以下であり精度の向上がみられる。各ケースの E の値を比較すると、理論走時と観測走時の解析のケースは $0.04 \sim 0.06\text{km/s}$ の差しかなく、ほぼ同等の精度といえる。また、全領域を解析対象としたケースの E に比べ、仮定1と仮定2を適用したケースの E は $1/2$ 程度の値となり、精度向上が確認できる。

したがって、計測された走時を用いた弾性波トモグラフィー解析に対しても提案したアルゴリズム(仮定1と仮定2)は有効であることが確認できた。

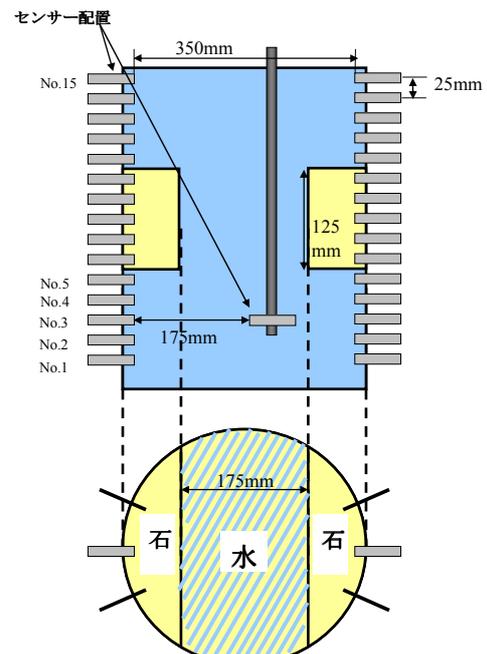


図-8 実験装置とモデル地盤

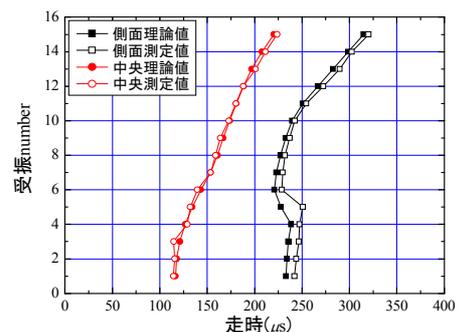


図-9 起振点 No1 における理論走時と観測走時

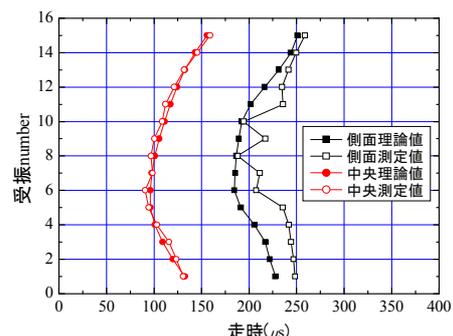


図-10 起振点 No5 における理論走時と観測走時

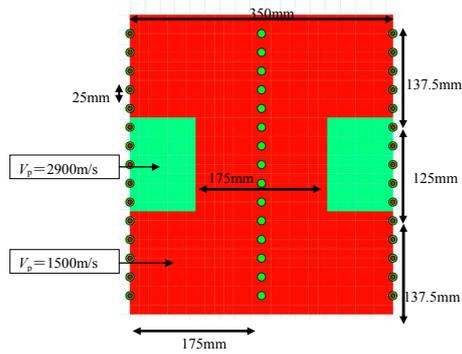


図-11 モデル地盤速度構造

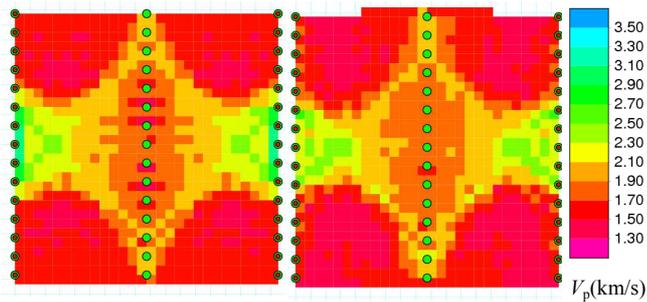


図-12 全領域を解析対象とした解析結果
左:理論走時解析 右:観測走時解析

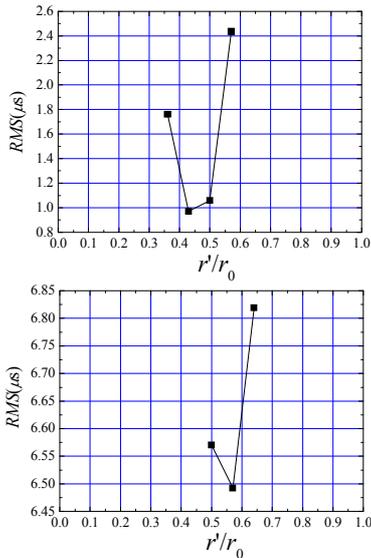


図-13 RMS 残差と r/r_0 の関係
上:理論走時解析 下:観測走時解析

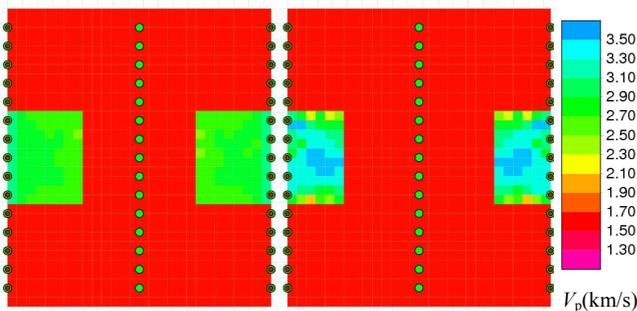


図-14 仮定1と仮定2の適用時の解析結果
左:理論走時解析 右:観測走時解析

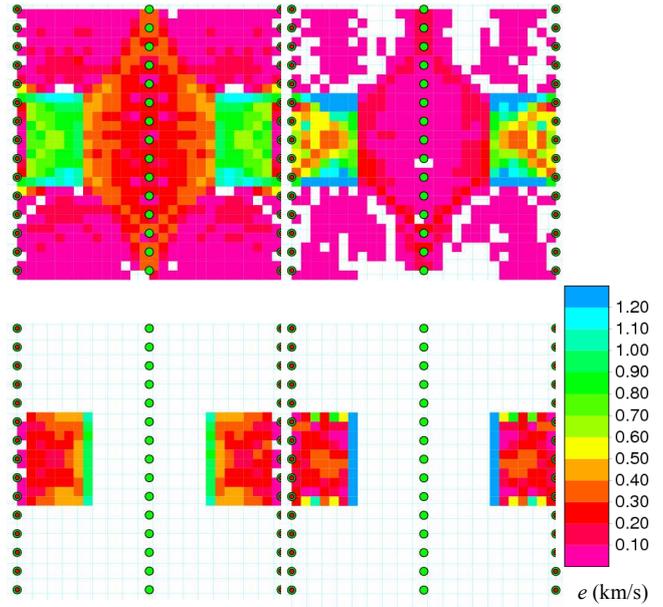


図-15 示標 e の分布

左上:全領域を対象とした理論走時解析
右上:全領域を対象とした観測走時解析
左下:仮定1,2を適用した理論走時解析
右下:仮定1,2を適用した観測走時解析

表-1 各解析ケースにおける解析誤差の示標 E

解析ケース	E (km/s)
全領域を解析対象とした理論走時解析	0.37
全領域を解析対象とした観測走時解析	0.41
仮定1と2を適用した理論走時解析	0.18
仮定1と2を適用した観測走時解析	0.24

4. まとめ

MH 層の分解を伴う地盤をモニタリングする技術として弾性波トモグラフィーに着目し, MH の分解過程における適用性を明らかにするため, その解析精度を評価し, 精度向上のためのアルゴリズムを提案した. また, 実地盤における適用性も評価した. その結果, 提案したアルゴリズムによって, 分解フロントの位置及び分解領域における速度の値を再現した.

模擬地盤においてもアルゴリズムを適用した弾性波トモグラフィー解析の精度向上が確認された.

仮定した生産孔から分解フロントまでの距離と真の生産孔から分解フロントまでの距離の誤差は数% 程度であり, 誤差が小さいことを示した.

今後の課題として, 分解が軸対称に進行しない場合を想定して, 三次元における波の伝播の影響を考慮した解析に対する検討を行う必要がある.

謝辞：本研究のテーマは、非常に壮大であり私個人の力では結果を出すことはできませんでした。本研究を産総研、応用地質、横浜国立大学の共同研究として携わらせていただき、多くの方々の御協力を受けて、有意義な結果を得ることができたことを感謝いたします。また、産総研の海老沼氏には、私が本研究に携わるにあたり多大な御尽力を頂きました。

最後に、本研究に携わって頂いた方々、研究活動でお世話になった方々に改めて感謝の意を示したいと思います。

参考文献

- 1) 小林秀男:次世代エネルギー資源『メタンハイドレート』, 資源と素材, Vol.114,No.14,pp.993~1004, 1996.
- 2) Saito, H・Noboka,, D・Azuma, H・Xue, Z・Tanase, D :Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, Butsuri-Tansa, Vol.59, No.1
- 3) 三保雄司・斉藤秀樹・中山栄樹・谷和夫 メタンハイドレート分解過程を模擬した弾性波トモグラフィの適用性, 第3回地盤工学会関東支部研究発表, pp392~394, 2006.

IMPROVEMENT AND APPLICABILITY OF ELASTIC WAVE TOMOGRAPHY TO EVALUATE METHANE HYDRATE RESOLUTION PROCESS

Yuji MIHO, Hideki SAITOU, Eiki NAKAYAMA and Kazuo TANI

To evaluate the stability of the ground in which the methane hydrate, hereafter denoted as MH, is decomposed for production of methane gas, appropriate monitoring technology for the range of MH layer and its decomposition process is needed. In this study, attention was paid to the elastic wave tomography as a promising monitoring technology. A series of numerical as well as physical model studies were conducted to evaluate the applicability of this technology and to examine the new analytical algorithm for the accuracy improvement. As a result, two kinds of assumptions were proposed as the new algorithm for the back analyses, and the accuracy improvement of the elastic wave tomography analysis was confirmed.