

# 音響透水トモグラフィによる 大型模型地盤の均一性の可視化

毛利栄征<sup>1</sup>・榊原淳一<sup>2</sup>・山本督夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>農博 独立行政法人農業工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)  
<sup>2</sup>川鉄シビル株式会社 (〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4)  
<sup>3</sup>Ph.D マイアミ大学 (Miami Florida,33149 USA)

High-resolution images of the compressional wave velocity and attenuation structure within clean sand foundation have been determined from high-frequency crosswell acoustic tomography. Crosswell acoustic transmission tests were performed in the saturated clean sand installing in the big-scale laminar container, by using a high-frequency (1-78kHz) piezoelectric acoustic transducer as a source, and as receivers. We estimate that imaging the permeability structure within the sand foundation is possible from compressional velocity images measured at various frequencies.

**Key Words :** acoustic tomography, model foundation, permeability, porosity, images

## 1. はじめに

大型模型地盤を用いた液状化実験などの地盤振動実験において地盤の均一性を評価する手法としてトモグラフィ等の可視化技術は非常に有効である。このトモグラフィ技術の一つである音響透水トモグラフィは疑似ランダムコード(PRBSコード)を用いた高周波弾性波探査により地盤の透水係数と間隙率を直接計測可能な手法である。これは周波数と出力音量を正確に制御することで弾性波速度および減衰率を計測し、多孔質媒体内の弾性波伝播理論(Biot理論)を用いて地盤の透水係数や間隙率を解析する。昨年度は円型実験土槽を用いた予備的な実験を実施し、壁面の影響や精度など模型土槽への適用性の評価検討を行った。

本報では同手法を用いた模型土槽内の不均一性、特に透水係数と間隙率の可視化を目的とした実験結果と三木市に建設中の大型実験土槽への適用性について考察を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 弾性波を用いた透水係数の把握

弾性波を用いた地盤の透水係数の把握についてはBiot(1956)などにより報告されているが、Yamamoto(1989)はこれらを基に砂地盤において弾性波速度と減衰率における周波数分散から透水係数が計算できることを示した。

$$f_r = \frac{\rho\eta}{2\pi(\rho m - \rho_f^2)} \frac{V_0}{k_s V_\infty} \quad (1)$$

式(1)は分散周波数 $f_r$ から透水係数 $k_s$ が求まることを示しており、 $\rho$ 、 $\rho_f$ は水および土の密度、 $\eta$ は水の粘性係数、 $m$ はBiotの付加質量、 $V_0$ 、 $V_\infty$ は遅い弾性波と速い弾性波の速度を示す。図-1は砂(粒径0.3mm)、シルト(粒径0.03mm)における計算例であり、砂では5kHz、シルトでは50kHzで分散が起こっていることがわかる。Yamamotoは砂およびシルトの透水係数をそれぞれ $10^2$ cm/sec、 $10^3$ cm/secと計算しており、砂については実験でこれを検証した。また、Yamamoto et al.(1994)やYamamoto and Sakakibara(1998)は石灰岩や砂岩における透水係数の把握を行っているが、いずれも現場での実験であり、模型土槽のような狭い範囲での材質の揃った地盤における検証は行われていない。

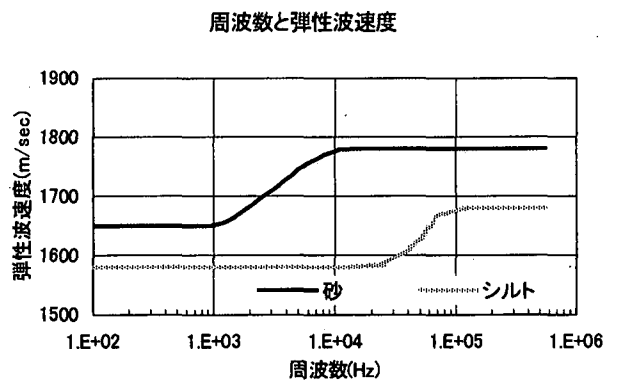


図-1 周波数分散の計算例(Yamamoto1990)

### (2) 高周波数に対応した計測システムの開発

毛利ら(2001)は小型の円型土槽実験において、高周波

数弾性波を用いることでステンレスの壁面で囲まれた狭い領域でのトモグラフィ計測が可能であることを示した。一方、①塩ビ管を用いた計測孔内部での発震器と受振器の位置のずれ(1cm以下)が計測に影響を与えること、②通常の計測機材では高周波数の入出力に適していないため計測値のキャリブレーションが必要であることなど、低周波数での精度の低い計測では問題とはならなかった課題を新たに示した。今回の実験ではこれらの課題を解決すべく、計測コンピューターの高速化、正確な発震、受振点の設定を目的とし、新たな計測システムを開発した。

表-1 に計測システムを旧システムと比較して示した。新システムは発震周波数が 78kHz までの計測を行うことが可能である。さらに周波数の設定間隔を狭くすることで、周波数特性を細かく計測することができた(計測条件: 計測周波数を参照)。また Sample Rate は旧システムより 4 倍短くなり、長波長(低周波数)での計測でも初動の読み取り誤差を小さく押さえることができた。

図-2 に使用した発震器と受振器を示す。受振器はハイドロフォンアレイを用いたが、ハイドロフォンの間をプラスチック製のスペーサーで固定した。これにより計測孔内でのハイドロフォンの水平方向および鉛直方向のずれを小さく押さえることができた。また、異なる長さのスペーサーを準備することでハイドロフォンの間隔を 15cm から 50cm まで変えることが可能で、異なる大きさの模型地盤にも対応できるようになっている。なお、計測システムは水のみを入れた水槽でキャリブレーションを行い、この値を用いて計測結果を補正した。

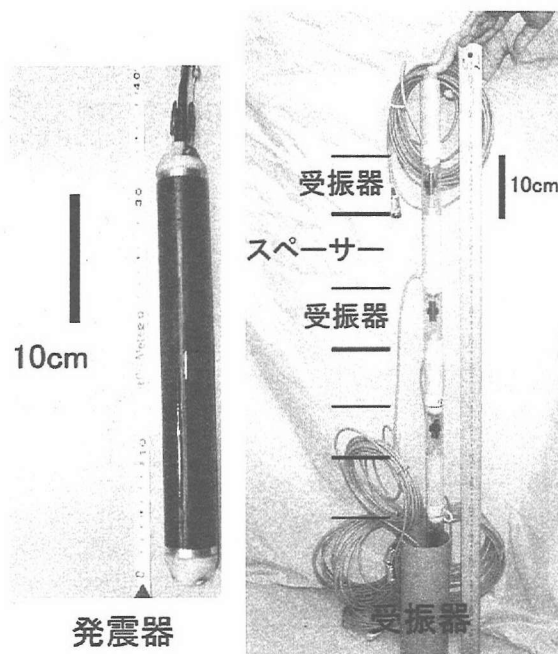


図-2 発震器および受振器

間隔は発震器の振動部分の長さ 20cm を考慮して 20cm 間隔とした。発震・受振方法、計測データのキャリブレーションおよび逆解析手法などについては毛利ら(2001)を参照されたい。

模型地盤は霞ヶ浦砂を用いた。物理的性質については表-3 にまとめた。地盤は振動ふるいをを用いた自然落下方式により作成し、模型地盤の加振前に計測を行ったため、ゆるい状態の砂地盤であると考えられる。

### (3) 実験概要

図-3 に模型地盤および計測レイアウト図、表-2 に計測条件を毛利ら(2001)が実施した内容と比較して示す。模型地盤の内部に 2 断面として 4 本の塩ビケーシングを建て込み、この内部に発震器と受振器を設置した。計測孔間距離は 2.4m および 2.7m である。発震点と受振点の

表-1 計測システムの比較

項目	旧システム	新システム
最高発震周波数	31kHz	78kHz
発震波の波長	5cm~50cm	2cm~25cm
Sample Rate	4~8 個/波長	4~32 個/波長
計測 bit 数	16 bit	12bit
同時計測 ch 数	4 ch	4 ch
増幅器・フィルタ一の特徴	20kHz まで	100kHz まで

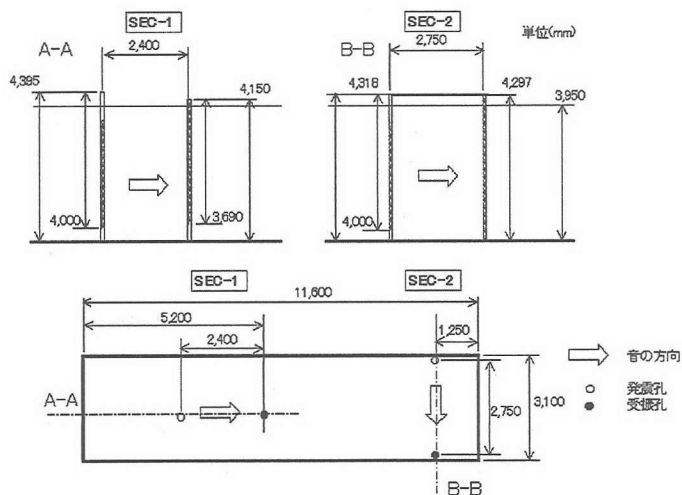


図-3 計測レイアウト図

表-2 計測条件

項目	今回の実験	毛利ら(2001)の実験
計測周波数 (kHz)	8, 11, 15, 20, 26, 31, 39, 52, 78 全断面は 15, 31, 52kHz のみ	6, 10, 20, 31 全断面は 6, 31kHz のみ
計測点間隔	20cm	15cm
発震・受振数	20x24	12x12
投入電圧	4V	10V

表-3 実験に用いた砂の物理的性質

項目	数値
比重	2.718
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.731
最小乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.386
平均粒径 (mm)	0.311

### 3. 実験結果

#### (1) 速度・減衰率と地盤の均一性

図-4, 5に受振波形の例として第2断面の52kHz, 15kHzの波形記録を示す。図中の曲線は速度2.0km/secと1.4km/secの等速度線を、右端の●印は初動の振幅から計算した音圧を示す。これらから周波数が高くなると波長が短くなり、初動が読み取り易くなり、また反射波や屈折波などに対応して細かい反応を示していることがわかる。全体的には均質に見えるが、例えば矢印で示す部分では速度の不連続が明瞭に認められることがわかる。

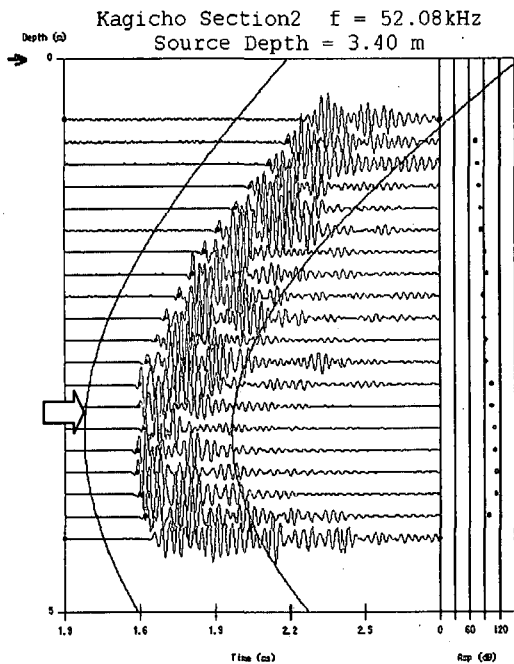


図-4 第2断面の受振記録 (52kHz)

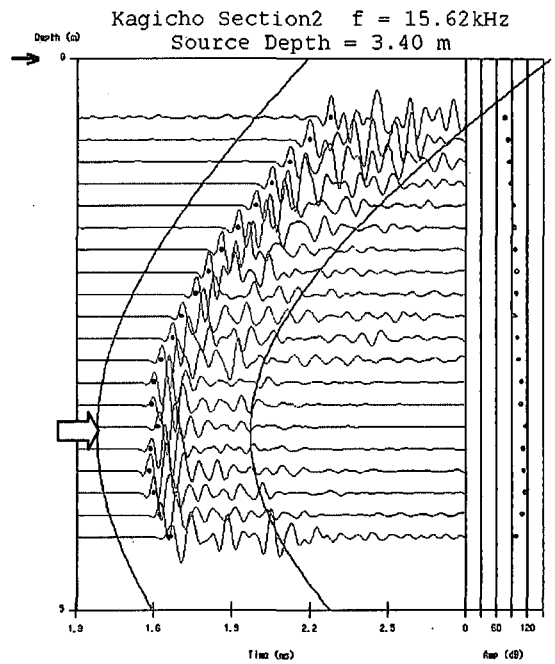


図-5 第2断面の受振記録 (15kHz)

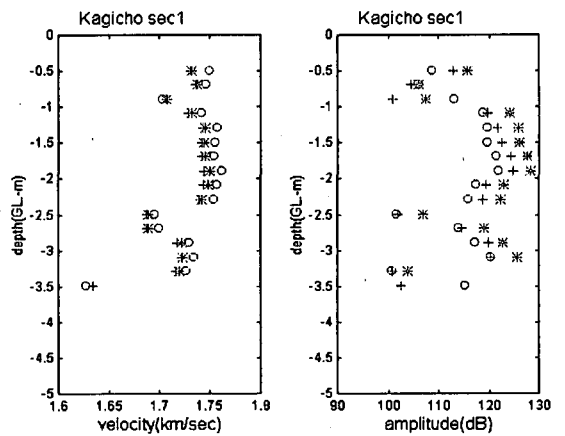


図-6 第1断面の初動速度と音圧  
○15kHz, \*31kHz, +52kHz

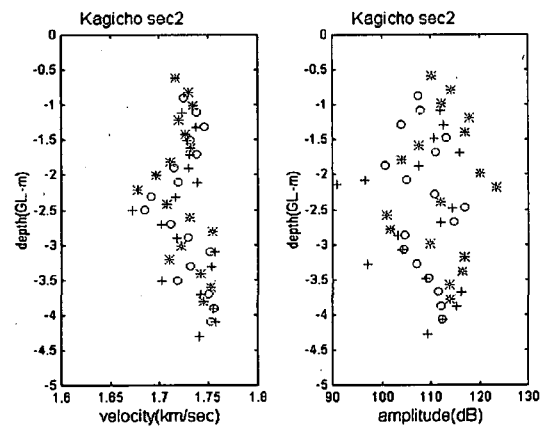


図-7 第2断面の初動速度と音圧  
○15kHz, \*31kHz, +52kHz

図-6, 7に水平方向の波線だけに着目した初動の弾性波速度と音圧を深度毎に示す。第1および第2断面とも速度は 1.68km/sec~1.75km/sec, 音圧は 100dB から 130dB 程度を示している。また, 第1断面と第2断面とも G.L.-2.0~G.L.-2.5m 付近に低速度で特徴付けられる部分があるが, 第1断面と第2断面ではその不均一性が若干異なる。第2断面の方が深度方向には不均一であり速度, 音圧ともばらつきが大きいことがわかる。

図-8, 9は逆解析により求めた第2断面の速度・減衰率分布である。速度については水平構造を示しており, 高さ 2.5m と 1.5m 付近に低速度部分が認められる。減衰率については速度よりも水平構造が弱く, 高さ 1.8m 付近に高減衰部分があることが読みとれる。中央部分に低速度部分があることは毛利ら(2001)が実施した円形土槽での実験結果と同様の傾向を示しているが, 低速度部の真下に高減衰率を示す部分があることは興味深い。

図-10に第1断面と第2断面の減衰率分布の比較を示す。図-6と図-7の比較においても第1断面と第2断面は異なる様相を示していたが, 本模型地盤は深度方向だけでなく水平方向にも不均一である可能性があると考えられる。

## (2) 透水係数分布の計算

図-11に第1断面, 第2断面の両方における弾性波速度と周波数の関係を示した。10kHz より低い周波数については, 波長が計測距離に対して長すぎるため計測することができなかった。低い周波数帯域の変化は透水係数が高い場合重要であり, これを把握することは今後の課題といえる。

今回は弾性波速度の低周波帯域での変化を推定して図中に点線で示したが, 図-1で示したものと同様の速度変化がおこっており, 分散周波数は少し高めめの 8kHz ~10kHz であると推定できる。この分散周波数の値から考えると, 砂地盤の透水係数は  $10^2$ cm/sec 付近であると計算できる。

図-12に本実験で得られた透水係数と間隙率分布の計算結果を示す。高さ 2m 付近で透水係数, 間隙率とも大きくなっている部分があり, これは地盤がゆるくなっていることを示しているのではないかと考えられる。地盤全体では透水係数は  $10^2 \sim 10^3$ , 間隙率は 0.30~0.40 の間を示している。試験材料である霞ヶ浦砂の物理的性質と比較すると, 透水係数の差は1オーダー以内の値であるが, 間隙率は小さめであるといえる。

## (3) 他の実験結果との比較

図-11には比較のために実施した実験結果を ○ 印

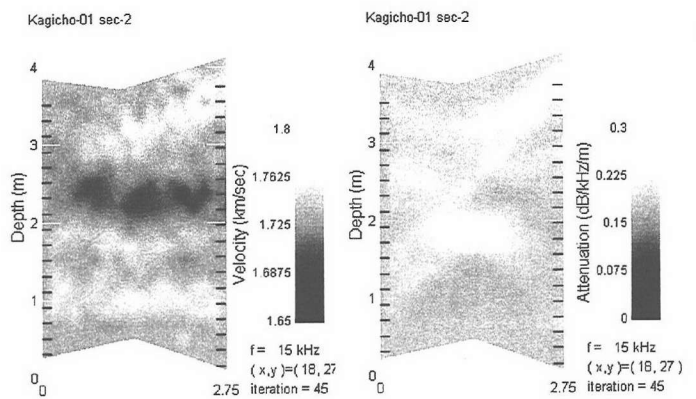


図-8 第2断面の速度・減衰率分布 (15kHz)

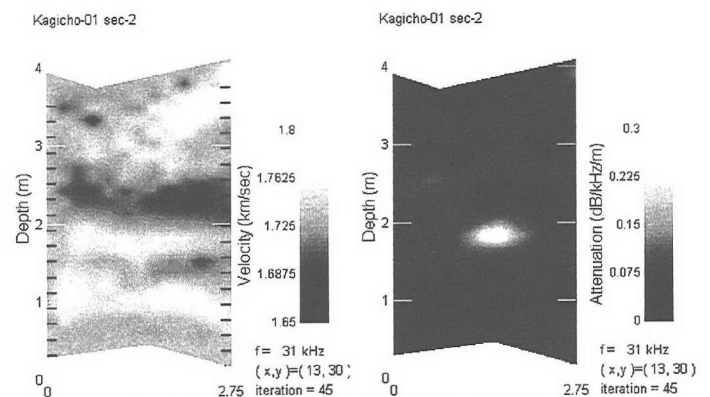


図-9 第2断面の速度・減衰率分布 (31kHz)

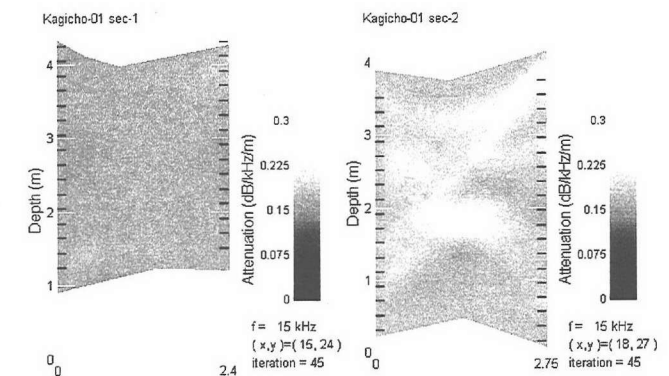


図-10 第1断面と第2断面の減衰率の比較

付き直線で示した。この実験は粒径の異なる砂質模型地盤に於いて, 本実験とは異なる発震器, 受振器および小型の水槽(φ30cm, 発震点・受振点間隔 20~40cm)で実施した結果である。また, 表-4に本実験結果と小型水槽の実験結果および Yamamoto(1989)のシミュレーション結果をまとめて示した。小型水槽実験の結果は本実験結果とほぼ同じ速度変化および周波数分散を示しており, 透水係数もほぼ一致していると言える。これから, 本実験で得られた透水係数が妥当なものであることがわかる。

#### 4. まとめ

地盤の均一性評価を可視化することを目的として、大型模型地盤で実施した音響透水トモグラフィの結果は、地盤の状態を精度良く2次的に把握できることがわかった。特に透水係数を計測値から直接得られることを他の実験との比較により検証することができた。このことは、地盤定数の一つである透水係数や間隙率をパラメータとすることで、地盤の状態を直接的にわかりやすい形で出力することが可能であることを示している。

今後、さらに大型の実験設備で地盤のモニターリングを行うためには、①計測、解析時間を短縮すること、②計測機器を壁面に固定するなどして計測作業を簡略化すること、③得られた計測値を直接物理量に変換するための地盤のデータベースを構築することなどが必要であると考える。

また、今回は時間的な制約があり加振前の状態しか計測することができず、砂の締固め状態の変化を比較することはできなかったが、液状化などによる地盤の変化をリアルタイムモニターリングできるような開発目標設定を検討していきたい。

#### [謝辞]

本実験は科学技術進行調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施されたものである。また、実験に当たっては独立行政法人防災科学技術研究所（他5研究機関）との共同研究（研究課題：「地盤の液状化と速報流動に関する大型土槽実験」、平成13年度）に基づき実施したものであることを付記し、関係者の方々に感謝の意を表します。

表-4 他の実験結果との比較

項目	本実験結果	小型水槽実験結果	Yamamoto (1989)
試料名	霞ヶ浦標準砂	豊浦標準砂	シミュレーション
$V_0$ (km/sec)	1,550~1,650	1,550	1,650
$V_\infty$ (km/sec)	1,700~1,750	1,650	1,760
分散周波数(kHz)	8~10	8~10	5
透水係数(cm/sec)	0.5~ $5 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
間隙率(%)	30~40	—	40

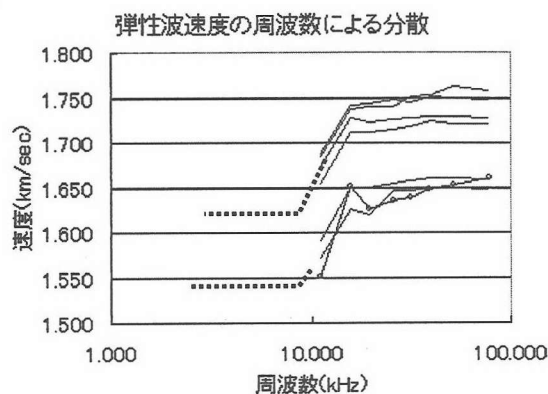


図-11 弾性波速度における周波数分散  
—本実験結果, -○-小型水槽の実験結果 -推定値

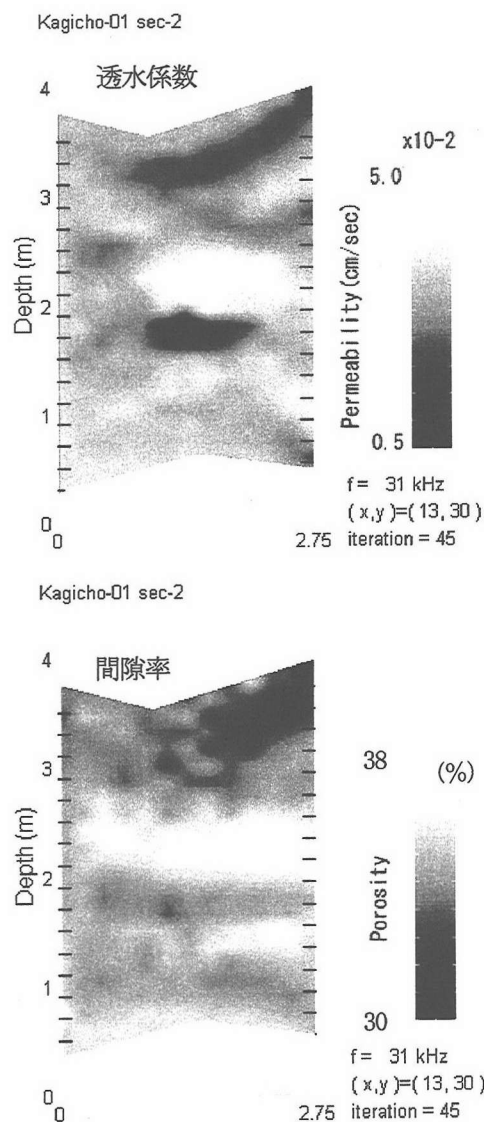


図-12 透水係数と間隙率の分布

【参考文献】

1. Biot, M. A.: Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media, The journal of the acoustical society of America, 34-9pp. 1254-1246, 1956
2. Yamamoto, T. and Turgut, A.: Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments, J. Acoust. Soc. Am., 87(6), pp. 2376-2383, 1995
3. Yamamoto, T., Nye, T., and Kuru, M., Imaging the permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography, Geophysics, 60-6, p1634-1645, 1994
4. Yamamoto, T. and Sakakibara, J., Crosswell tomography imaging of the permeability structure within a sandstone oil field, 4<sup>th</sup> SEGJ Intl', p343-347, 1998
5. 毛利栄征, 榊原淳一, 吉村公孝, 山本督男: せん断土槽地盤の作成方法と均一性, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, p83-88, 2001. 3