

P波とS波を使った弾性波CTによる岩石内を浸潤する水の観察

WATER INFILTRATION IN ROCK OBSERVED BY CT USING P AND S WAVES

柳谷 俊*・寺田 孚**

By Takashi YANAGIDANI and Makoto TERADA

Ultrasonic (seismic) computer tomography (CT) was applied to visualize water infiltration into dry granite and to characterize its presence. The ultrasonic waves carry the information of density, orientation, and aspect ratio of microcracks, and also the information of fluid within them. When the microcracks within a rock are filled with water, the effective bulk modulus of a rock increases, and hence V_p increases. In contrast, V_s is scarcely affected by the presence of fluid. Attention was focused on obtaining the spatial distribution of both V_p and V_s simultaneously. As expected, the V_s maps show no change, although the V_p maps clearly show large changes caused by the permeating water. It is possible to determine the presence of water within microcracks only by simultaneous reconstruction of V_p and V_s .

Keywords: computer tomography, ultrasonic CT, infiltration, V_p , V_s .

1. イントロダクション

われわれは、“弾性波CTによる岩石のダイレイタンスー局所化の観察¹⁾”(以下、論文1とよぶ)において、岩石のFaultingとダイレイタンスー局所化の関係を調べるために、破壊(強度)点近くまで載荷し、その後、除荷した試料を用いて、弾性波CTを試みた。この方法では、まず、観察したい面内の多数のパスでP波速度を測定し、次に、計算によってP波速度の分布(再構成)を得る。P波速度はダイレイタンスーの発達に応じて低下するので、弾性波CTによってP波速度の分布を得ることにより、ダイレイタンスーの分布を観察できるわけである。弾性波CTのすぐれた特徴として、非破壊的な測定が可能であること、弾性波速度の絶対値の分布が得られるので結果の定量的な比較が可能であることが挙げられる。しかし、弾性波CTが岩石破壊実験に応用できるかどうかを検討することが論文1の主たる目的であったので、上に述べたような弾性波CTがもつ特徴を十分生かしたとはいいがたかった。

そこでわれわれは、岩石力学に対する弾性波CTの

有効性を実証するために、“弾性波CTによる岩石内を浸潤する水の観察²⁾”(論文2)と題する研究を行って、乾燥した花崗岩の中へ水を浸潤させ、浸潤前線が広がってゆく過程を可視化して観察した。水の浸潤領域を輪切りにするような2つの断面で、P波速度と減衰係数の分布(Seismic profiles)が再構成された。この結果、連結しているマイクロクラックを伝って流れてゆく水の様相を可視化して観察することができた。ここでは、岩石においてしばしば観察されるP波速度の異方性を、アルゴリズムの中に組み込んで補正・処理するという拡張がなされた。この結果、異方性の補正なしで再構成した場合に起こる偽像の発生を避けることができた。

われわれは、次に報告した“弾性波CTでみた岩石の断層形成過程³⁾”(論文3)において、研究をさらに展開し、岩石の断層(Faulting)の形成過程の観察に弾性波CTを使った。ここでは、一軸下で応力速度一定圧縮試験を行い、載荷軸に直交する断面でのP波速度の分布を、非破壊的に、破壊に至るまで連続して観測することを試みた(再構成はリアル・タイムではなく、実験終了後に行った)。さまざまな応力レベルでの再構成を行ったので、試料のFaultingに至る過程を可視化することができた。

さて、論文1, 2, 3では、弾性波CTのRadiationと

* 正会員 工修 京都大学助手 工学部
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部(同上)

してP波が使われた。しかし、S波を使うことにはなんら理論的制約はなく、P波速度とS波速度の分布が同時に得られれば、弾性波CTから得られる情報は飛躍的に向上することが期待される。なぜなら、両者は異なった情報をもった像を出すことが期待できるからである。

岩石・岩盤中を伝播する弾性波速度はマイクロクラックの密度、アスペクト比、方向、およびマイクロクラックの中を充填する物質（物性）の関数である。特に、岩石の温度や岩石に作用する応力が変われば、マイクロクラックの形状が変化（マイクロクラックが閉じたり開いたり）し、岩石を構成する鉱物の弾性的変化に起因する変化に比較して、弾性波速度は2~4桁大きい変化を示す。たとえば、岩石・岩盤の中で、先在するマイクロクラックが伸展したり、マイクロクラックが新たに発生すると、P波速度もS波速度もともに大きく減少する^{4)~6)}。一方、岩石や岩盤中に存在するマイクロクラックの中に水が存在する場合を考えてみよう。飽和度がまずとP波速度は増加するが、S波速度にはなんら影響がない^{7)~9)}。しかし、マイクロクラックのなかに存在する水が凍結すると、S波速度にも大きな変化が現われる^{10)~12)}。このように、P波速度とS波速度は、岩石・岩盤中に存在するマイクロクラックの状態に対して、異なった“ものさし”（Measure）を与える。P波とS波を用いて再構成を行えば、P波だけの場合と異なり、水の移動・存在を確認できるはずである。このような観点にたつて、この研究では、実際にS波もRadiationに使う再構成を行い、さまざまな解決を必要とする技術的な問題に対して検討を加えることにする。われわれは、論文2で、乾燥した花崗岩の中を浸潤してゆく水の様相を、P波速度の分布を再構成することにより観察したが、この研究では、同様な実験を行い、P波速度とS波速度の分布を同時に測定することを試みた。ここではその結果を報告する。

2. 実験に用いた岩石試料

弾性波CTによる水の浸潤実験に使用した大島花崗岩試料のダイヤグラムをFig. 1に示す。試料の形状は論文2で用いた試料の形状と同じである。異なっている点は、注入孔の側壁から水が浸透するのを防ぐため、アクリルのパイプを用いてシールが施され、孔の底面からのみ水が浸透するようにした。実験中を通して、水温と水位は一定（水温：20°C、水頭48 mm）に保たれた。

S波の送波と受波には、厚みすべりモード（Thickness shear）の角板形の圧電磁器振動子（富士セラミック（株）製0.4 Z10×10 S-EYXC-1：一辺が10 mm、共振周波数400 kHz）を直接試料表面に接着して用いた。トランスデューサーから送波されるS波の変位の振動方向が、

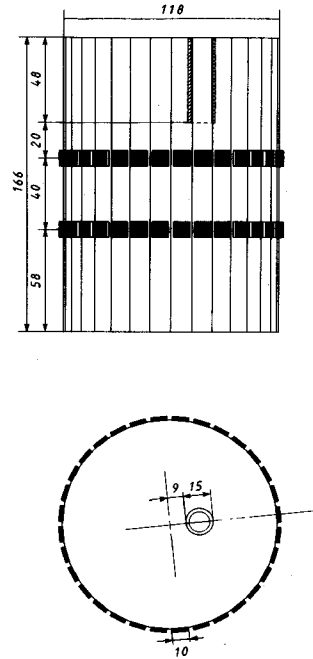


Fig. 1 A diagram of the Ohshima granite specimen used in seismic tomography to observe the infiltration of water. The hole for water injection was drilled from the top surface, and the side wall was sealed by PMMA pipe to inhibit water injection. Water head was kept constant during the experiment. Temperature of the specimen and water was kept at 20°C. Regular polygonal prisms with 32 faces were used for tight installation of PZT-7 transducers, used both as a transmitter and receiver. Their locations are also shown. The direction of particle motion was perpendicular to the center axis.

試料の中心軸に垂直になるようにトランスデューサーを接着した。後で示すように、現実には、すべりモードの振動子を用いた場合でも、S波のみならずP波も放射され、また、P波の入射に対しても応答する。したがって、S波トランスデューサーだけで、P波速度の測定もでき、その再構成も同時に可能である。

3. 弾性波CTのハードウェアとソフトウェア

P波速度とS波速度を測定するためのハードウェアは、論文2で用いたものと同じである。ただし、パルス・ジェネレーターが、パルス・パラメーター（パルスの電圧の高さ）をマイクロコンピュータによって自由に設定・変更できるようにフル・プログラマブルなタイプに取り替えられている。なぜなら、すべりモードのトランスデューサーによって送波できるP波のエネルギーは弱く、また、受ける感度も鈍いため、P波速度をスキャンする場合とS波速度をスキャンする場合には、トランス

デューサーを励起する波高電圧を変えなければならないからである。

Fig. 2とFig. 3に、P波とS波のスキャン・パス (Fan beam) を示す。再構成に使用する要素分割も同時に書き入れた。P波速度を測定する場合には、まず、1つの送波トランスデューサー①から、向かい合うトランスデューサー・アレー⑨～⑳への17パスを順にスキャンする。次に送波トランスデューサーを1つ隣に変える。このような測定を繰り返しながら一周する。測定パスの総数は、272本である。S波速度の場合には、①のトランスデューサーから⑫～㉑への11パスをスキャンする。パスの総数は176本である。このようなスキャン・パターンは、次に述べる伝播波形を参考にして決められた。

Fig. 4とFig. 5に、このパス配列 (上段の①を送波のトランスデューサーとする) で得られた、P波とS波の代表的な波形を示す。水の浸潤実験を始める前の、乾燥した花崗岩の中を伝播する波形と、水を浸潤させてから20h経過した波形を重ね合わせて示した。水が浸透していると期待される領域を通るパスでのP波速度ははやくなり振幅は減少している。一方、S波の部分の変化はわずかである。すでに述べたように、P波の信号は弱いので倍率を上げて示した。P波初動は下方 (マイナス側) に振れている。明らかに、トランスデューサー面に垂直 (正面) 方向に伝播するP波は弱く、Fanの周縁部に向かうP波は強くなっている。17本のすべてのパスでP波初動到着時間を正確に読み取ることが可能である。一方、S波はトランスデューサー面に垂直に入射する波の振幅が一番大きく、Fanの周縁部に向かうパスでは、S波よりはやく伝播するP波に邪魔をされて、S

波の初動 (図中ではプラス側に振れている) を正確に読み取ることが難しくなっている。ここでは、S波の初動が読み取れる11本のパスの波形を図示している。

以上のようなスキャン・パターンを採用した結果、S波の場合には、画素数196に対して、測定パスの数は176本となり、S波速度分布は原理的に求まらないことになる。なぜなら、再構成を行うことは、画素のSlowness (速度の逆数) を未知数とする多元連立一次方程式を解くことに帰着するからである。しかし、われわれが再構成にあたって使用したアルゴリズム (SIRT) は、測定値によくFitするように画素のSlownessを修正しながらイテレーション (反復計算) するので、データに欠落があったり、ノイズが重畳している場合でも実用にたえる収束が得られる¹³⁾ (または、論文1参照)。このような状態をCTでは、Underdetermineとよんでいる。測定パスの数が未知数の数を上回るとOverdetermineとよばれる。測定パスの数がふえるに従い再構成はより正確になってゆくことが期待される。したがって、Underdetermineの状態は、数学的に解けないという言葉を使うより、画像がぼけるとでもいった方が適切である。

このような条件のもとでは、実際の条件をモデル化して、再構成にどのような影響が現われるかをあらかじめシミュレーションするというやり方が、一般に広く試みられている方法である。したがって、われわれもこの方法を用いて、S波速度の再構成の評価を行った。その結果、反復計算の途中で測定値と再構成値の差をわりふる際、パスの密度が低い周縁部に誤差が累積する現象がみられた。しかし、当然のことながら、パス密度の高い中

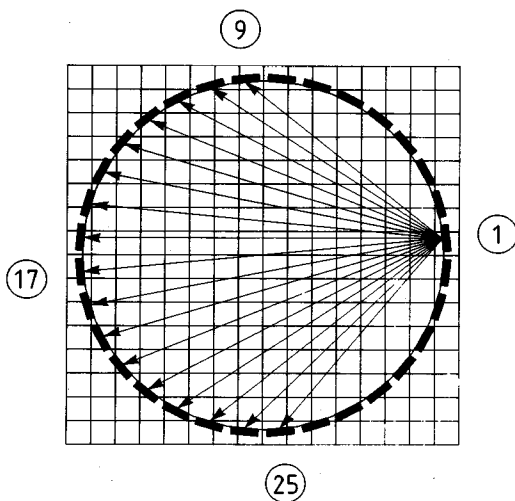


Fig. 2 Straight ray path linking of transmitters to receivers of the fan beam scan of P wave is shown. A single transmitter has 17 receivers.

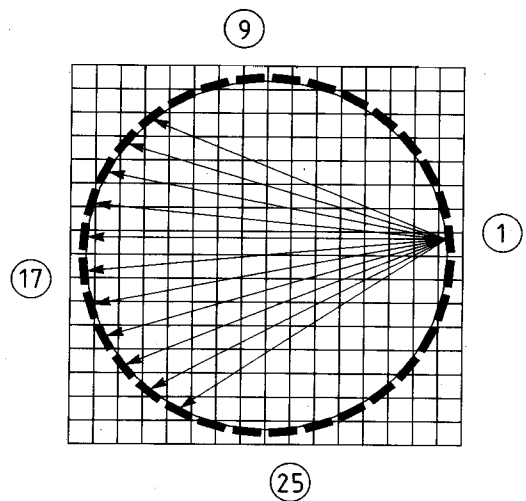


Fig. 3 Straight ray path linking of transmitters to receivers of the fan beam scan of S wave is shown. A single transmitter has 11 receivers.

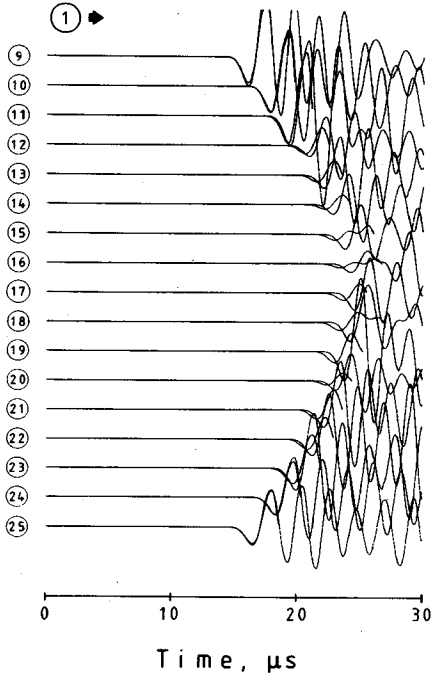


Fig. 4 Arrivals of P waves detected by 17 receivers (⑨~⑳) of the upper section in response to the shot at the transducer ①. The traces at 20 h are superimposed on those at 0 h. The velocities of P waves propagated through the water penetrating region were increased, whereas their amplitudes were attenuated.

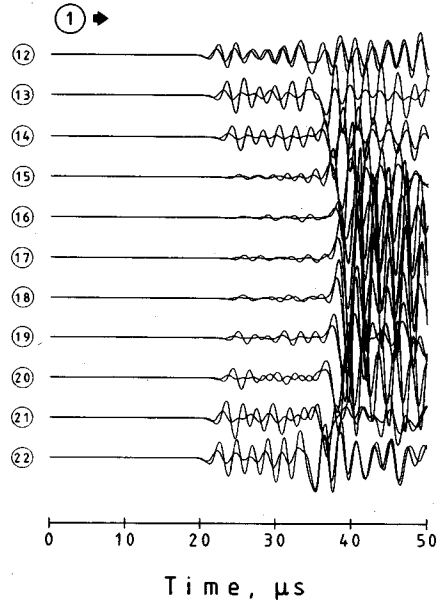


Fig. 5 Arrivals of S waves detected by the same receivers as used in P wave scan. Eleven traces (①→⑫→㉒) were used for the reconstruction. The traces at 12 h are superimposed on those at 0 h. Both shear wave velocities and amplitude were unaffected by the saturation of microcracks.

中央は正確な再構成が得られた。

次に、ソフトウェアについて述べる。再構成に用いたアルゴリズムは論文2で報告したものと同一である。この実験に使用した大島花崗岩には、わずかな弾性波速度の異方性が観測されるので (Fig. 6), その影響を避けるため以下に述べる方法 (論文2, 3を参照) によってその影響を補正・処理することにした。すなわち、P波速度の絶対値を再構成しなくとも、P波とS波速度の変化の分布を知ることができれば、試料の中を移動する水の動きをとらえることができると考えた。そこで、異方性を補正せずに表示したい時間ごとに再構成を計算し、乾燥状態 (0 h) でのP波とS波速度の分布を基準に、その変化 ($\Delta V_p = (V_p - V_{p0}) / V_{p0}$, $\Delta V_s = (V_s - V_{s0}) / V_{s0}$) の分布を得る方法を採用した。

以上に述べたように、この研究では弾性波速度の変化のみを観察することに焦点を絞ったので、これまでの弾性波CTの作業の中で最も単純ではあるが時間を使う初動の読み取りをやめ、そのかわりに初動のピークの時間を読み取ることにした。初動ピークの読み取りはマイクロコンピューターを使って行った。その結果、読み取りに伴う誤差は非常に少なくなった。しかし、初動がピー

$$V_{pmaj.} = 5.25 \text{ km/s} \quad V_{smaj.} = 3.09 \text{ km/s}$$

$$V_{pmin.} = 5.10 \text{ km/s} \quad V_{smin.} = 3.07 \text{ km/s}$$

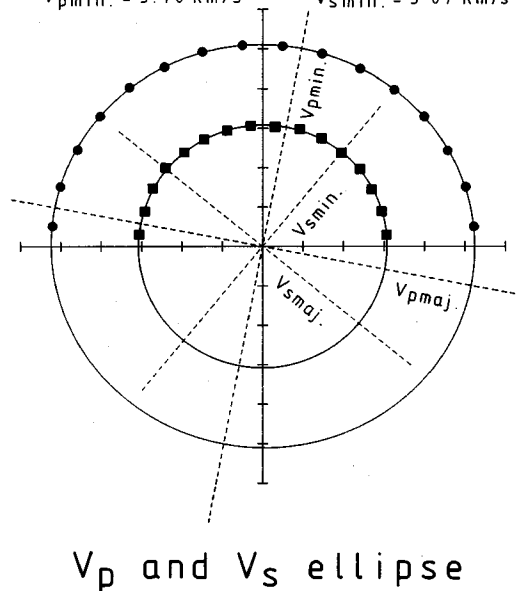


Fig. 6 P and S wave velocity ellipses (the azimuthal variation of V_p and V_s) of specimen within the plane of reconstruction.

クに達した時間は真の弾性波伝播時間とは異なるので、最大1~2%程度の誤差が再構成に生じる。しかし、この誤差は系統的な性質をもつ誤差である。初動がピークに達した時間を初動が到着した時間とみなすことにより生じる誤差は、P波速度の絶対値ではなく、その変化分だけを取り出してみるとときには無視し得る。また、手作業によって初動到着時間を読み取る場合にも読み取りに誤差が加わる。したがって、初動の到着時間を読み取って再構成した場合に比較して、この方法を採用したことによって画像の劣化はないと考えられる。このような手順を採用すれば、再構成のプロセスは完全に自動化でき、リアル・タイムの再構成も可能になると考えられる。

4. 実験結果とその考察

上と下の再構成断面での注入孔のすぐ下と試料の中心を通る代表的パスでのP波速度の変化をFig. 7に、S波速度の変化をFig. 8に示す。上の断面では、水を注入した直後から、P波速度の増加が観測された。下の断面でも、約120時間遅れてP波速度は変化した。S波速度もP波速度の変化と同様な変化をみせるが、変化量は小さい。時間の経過とともに、P波速度とS波速度は一定値に近づいた。しかし上の段と下の段ではその値が異なっている。この変化を参考に、どの時間のところを再構成するかを決めた。Fig. 9に上の断面の、Fig. 10に下の断面の、P波速度とS波速度の再構成の結果を示す。図中の大きな円は試料断面、小さな円は水の注入孔を示す。P波速度、S波速度とも、5回の反復計算によって、変動は0.1%以内に収束した。

上の断面でのP波速度の変化をみると、12時間後には注入孔の直下の領域で、P波速度がわずかに増加し、その後、P波速度の増加する領域は拡大してゆくことがわかる。下の断面では、96時間遅れてP波速度が変化しはじめ、そのパターンは上の断面のそれと同じであるが、変化量は小さいことがわかる。再構成でのP波速度の変化が側面に達する時間にはほぼ一致して、岩石側面の色調が変化し、実際に水が側面に浸潤してきたことが確かめられた。再構成の結果、P波速度の分布は水の浸潤の様相をよく表わしていることがわかる。

一方、S波速度の分布には、系統だった変化がみられず、再構成に伴う誤差のばらつきが現われておりその大きさも小さい。したがって、水の浸潤によって、S波速度の分布の変化はわずかであると結論できる。

弾性波CTの結果を解釈するには、“ものさし”として参照できる、弾性波速度（P波速度）と、飽和度の関係を知っておくことが必要である。このような“ものさし”を与える研究として、Nur and Simmons⁷⁾と阿部・斎藤⁹⁾の行った理論的研究がある。これらの研究の結果、

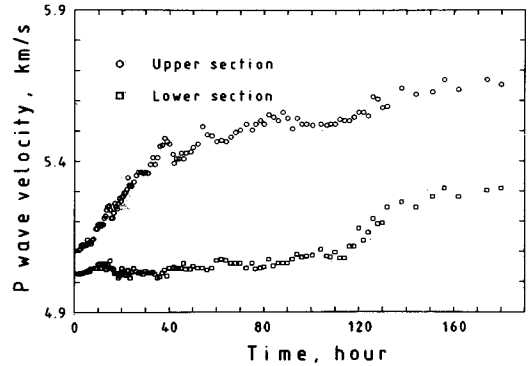


Fig. 7 The changes of V_p along the scanning paths within upper and lower sections. The propagated paths were just below the injection hole.

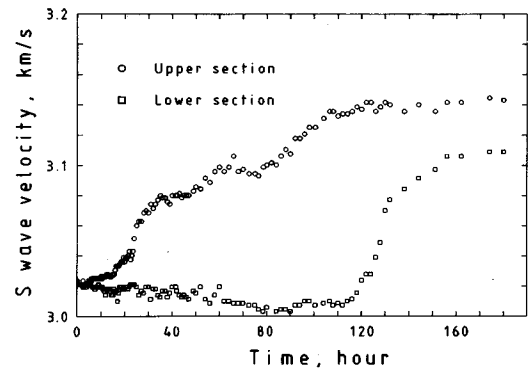


Fig. 8 The changes of V_s along the scanning paths within upper and lower sections. The propagated paths were just below the injection hole.

花崗岩のように空隙率が低く、マイクロクラックのアスペクト比（幅/長さ）が小さい場合には、飽和度の増加に正比例してP波速度は増加する。しかし、論文2で述べたように、厳密な議論をするには、この関係だけでは不十分で、マイクロクラックの中の水の存在様式を考慮（不飽和の様相を正確に定量化）する必要がある場合がある。しかし、一般的に、マクロ的・平均的な飽和度が増加するに従いP波速度は単調に増加するといえる。一方、S波速度はマイクロクラックの中に水が入っても、ほとんど変化しないことが知られており、P波速度だけが水の存在によって変化するのであれば、S波速度を併用・参照することにはなんの意味もないように思える。しかし、フィールドでP波速度の増加が検出された場合を想定してみよう。P波速度の増加は、応力が高まりマイクロクラックが閉塞したことによるのか、水の浸入・移動にその原因があるのかを知るには、S波速度の変化を参照するか、他のパラメーターを観察しなければならない。この意味で、P波速度とS波速度の2つの“もの

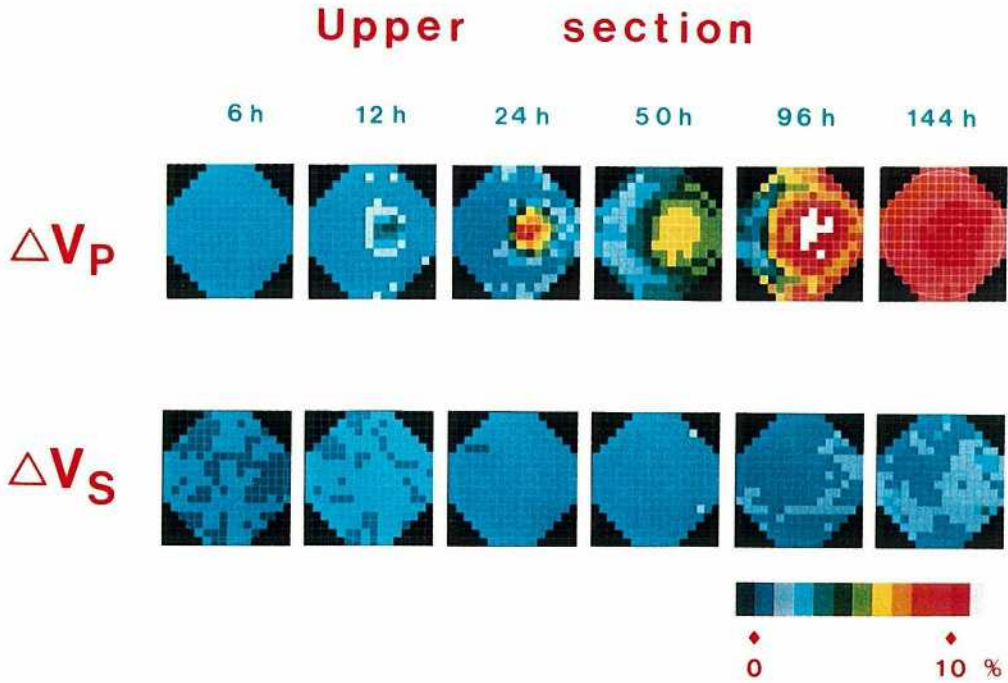


Fig. 9 Reconstructions of $\Delta V_p = (V_p - V_{p0}) / V_{p0}$ and $\Delta V_s = (V_s - V_{s0}) / V_{s0}$ within the upper section during water infiltration.

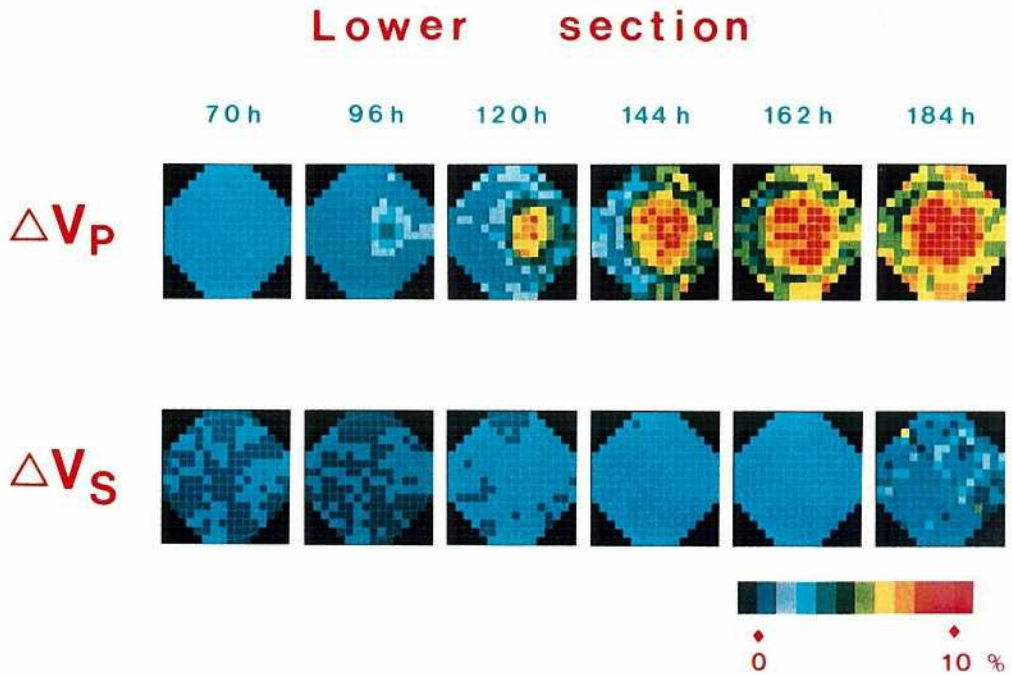


Fig. 10 Reconstructions of $\Delta V_p = (V_p - V_{p0}) / V_{p0}$ and $\Delta V_s = (V_s - V_{s0}) / V_{s0}$ within the lower section during water infiltration.

さし”を使うことは重要である。

以上に述べた“ものさし”を参照すれば、P波速度、S波速度の再構成は、水の浸潤の様相を理論どおりに写し出していることがわかる。

以上の研究の結果、P波のみならず、S波をRadiationとして使うことにより、弾性波CTの岩盤への有効性・応用性が増すことが、実験的に示された。すなわち、現実の岩盤には、多くのマイクロクラック、ジョイント、断層が含まれている。これらの情報は、P波、S波のどちらからも得られるが、その中に水が存在するかどうかは、両者を併用してのみ得られることが示された。

参 考 文 献

- 1) 柳谷 俊・寺田 孚：弾性波CTによる岩石のダイレイタンシー局所化の観察，土木学会論文集，第370号／Ⅲ-5，pp.159～168，1986.
- 2) 柳谷 俊・山田浩陽・寺田 孚：弾性波CTによる岩石内を浸潤する水の観察，土木学会論文集，第370号／Ⅲ-5，pp.169～177，1986.
- 3) 柳谷 俊・山田浩陽・寺田 孚：弾性波CTでみた岩石の断層形成過程，土木学会論文集，第382号／Ⅲ-7，pp.73～82，1987.
- 4) Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H. and Martin, R. J., III : The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, pp. 4451～4458, 1978.
- 5) Lockner, D.A., Walsh, J.B. and Byerlee, J.D. : Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite, Vol. 82, pp. 5374～5378, 1977.
- 6) 柳谷 俊・西山 哲・寺田 孚：花崗岩のダイレイタンシー異方性について，土木学会論文集，第382号／Ⅲ-7，pp.63～72，1987.
- 7) Nur, A. and Simmons, G. : The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 7, pp. 183～193, 1969.
- 8) 阿部 司・斎藤徳美：クラック状空隙に含まれる水分が岩石の弾性波速度に及ぼす影響，*日本鉱業会誌*，Vol. 92, pp. 73～78, 1976.
- 9) O'Connell, R.J. and Budiansky, B. : Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, pp. 5412～5426, 1974.
- 10) Takeuchi, S. and Simmons, G. : Elasticity of water-saturated rocks as a function of temperature and pressure, Vol. 78, pp. 3310～3320, 1973.
- 11) 江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚：岩石のP波速度におよぼす温度の影響，*材料*，Vol. 35, pp. 1291～1297, 1986.
- 12) 江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚：低温で熱サイクルをうける岩石の弾性定数について，*材料*，Vol. 35, pp. 1298～1303, 1986.
- 13) Herman, G. T. : *Image Reconstruction from Projections—The Fundamentals of Computerized Tomography*, Academic Press, 1980.

(1986. 6. 26・受付)