

クラック群による弾性波散乱減衰のモデル実験

安川香澄* 栗原保人** 西沢 修* 佐藤隆司***

YASUKAWA, Kasumi, KUWAHARA, Yasuto, NISHIZAWA, Osamu and SATOH, Takashi (1992) A laboratory experiment on seismic scattering attenuation caused by aligned cracks. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 43 (3), p. 165-173, 8fig., 1tab.

Abstract: A laboratory experiment has been made to investigate seismic scattering caused by cracks whose sizes are comparable to the seismic wavelength. The measured wavenumbers of seismic waves and sizes of cracks are in the ranges of $0.28 < k_p a < 2.8$ for P-waves and of $0.29 < k_s a < 5.8$ for S-waves, where k_p and k_s are the wavenumbers of P- and S-waves, respectively, and a is a half length of cracks. Test specimens containing cracks were composed of piled up steel plates with aligned slits. The aligned slits were thus regarded as aligned cracks in the present study. Three different shapes of slits were prepared to examine the effect of crack shape on seismic scattering. P- and two cross-polarized S-waves of 250kHz to 2MHz were transmitted perpendicularly to the direction of the slit width. The scattering attenuations, Q_p^{-1} and Q_s^{-1} , of P- and S-waves were measured by comparing the first arrival amplitudes of P- and S-waves propagating through the slit specimens with those through the slit free specimen. The main results are as follows: 1) Q_p^{-1} and Q_s^{-1} decrease with the seismic frequency even in the frequency range of $\omega a / \beta < 1$ (ω : angular frequency, β : S-wave velocity), where Q_p^{-1} and Q_s^{-1} have been theoretically expected to increase with frequency. 2) When the porosity is constant, Q_p^{-1} and Q_s^{-1} increase with the slit width. 3) Q_s^{-1} for the S-wave motion direction parallel to the direction of the slit width is larger than Q_s^{-1} for the motion direction perpendicular to the one. The difference of Q_s^{-1} between two cross-polarized S-waves increases with the slit depth. 4) When the slit width is constant, Q_p^{-1} / Q_s^{-1} is independent of the porosity. 5) Q_p^{-1} / Q_s^{-1} significantly changes with the slit width, while it changes little with the slit depth.

要 旨

クラックによる弾性波の散乱減衰の周波数特性、及びクラック形状の影響を弾性波の波長とクラックの長さと同程度の場合について室内モデル実験によって調べた。測定する弾性波の波数とクラック長の範囲は、 $0.28 < k_p a < 2.8$ 、及び $0.29 < k_s a < 5.8$ とした。ここで k_p 、 k_s は P 波、S 波の波数、 a はクラックの半長である。クラック形状の影響を調べるため、3種類の異なる形状のスリットの入った金属円盤を用意した。あらかじめ発震、及び受震用の振動子を貼った2個の金属円柱の間にそれらを挟みこみ、両端から適当な荷重を加えることでクラックを含む媒質モデルを作成した。ここではスリットの幅をク

ラック長、スリットの深さをクラックの開口幅とみなす。散乱減衰の測定では、媒質モデルの両端の共振周波数 500 kHz から 2 MHz の P 波、S 波振動子を用い、パルス透過法により初動振幅を測定する。この振幅値をスリットの無い円盤を挟んだモデルで得た初動振幅値と比較することで減衰量 Q^{-1} を求めた。弾性波の進行方向はいずれの場合もスリット幅の方向に直交する場合を測定した。S 波については振動方向がスリット幅に平行な場合と直交する場合について調べた。P 波及び S 波の減衰量 Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} について以下のような結果が得られた。1) Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} は周波数の増大とともに減少する。2) 空隙率が一定の場合、 Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} はスリット幅の増大とともに増加する。3) Q_s^{-1} は S 波の振動方向がスリット幅に平行な場合のほうが直交する場合に比較して大きく、その差はス

Keywords: seismic scattering attenuation, cracks, Q_p^{-1} / Q_s^{-1} , frequency dependence, crack shape

*地殻熱部
**地殻物理部
***環境地質部

リットの深さが大きいほど大きい。4)スリットの幅が同じ場合には、 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} 比は空隙率によらない。5) Q_p^{-1}/Q_s^{-1} 比はスリット幅に強く依存し、スリットの深さへの依存性は弱い。

1. はじめに

近年、地下亀裂の存在形態を知ることが、地熱貯留層開発や地下空間利用、地震学等の分野で重要になってきている。地下亀裂探査法のうち、弾性波を用いる方法では、亀裂(クラック)による弾性波の速度低下や弾性波速度の異方性を用いるものが広く普及している(例えば、Crampin, 1978; Crampin *et al.*, 1986)。一方、亀裂の存在により弾性波は顕著な減衰を受けることも知られ(例えば、Hudson, 1981; O'connell and Budiansky, 1977)、減衰を用いた亀裂探査も有効なものと考えられる。しかしながら、亀裂の存在によって弾性波がどのように減衰を受けるのかは定量的にはまだ十分理解されていない。そこで本論では亀裂による弾性波の減衰についてモデル実験により調べたので、それを報告する。

弾性波の減衰には、媒質の内部摩擦等によって波動エネルギーが熱エネルギーに変換されるために起こる減衰(以下、本質的な減衰と呼ぶ)と、媒質内の不均質性を原因とする散乱による見かけの減衰とがある。散乱による減衰は、波動エネルギーが伝播途中で散乱され、前方へ到達するエネルギーが見かけ上小さくなるものである。弾性波が亀裂を含む岩石中を透過する場合、弾性波は空隙により散乱され、減衰量は、空隙の各種パラメータ、例えば空隙の数量、形状や大きさ、または亀裂内の流体の性質を反映する。従って、実際の亀裂の大きさや卓越方向、存在範囲を調べるためには、散乱による減衰を調べることが有効と思われる。

散乱の研究は、大別すると、(a)不均質性を、均質な媒体からの物性の統計的なゆらぎと考え、物性のゆらぎにより散乱が起きるとする方法と、(b)媒質に急激な物性の変化があった場合、これから散乱される波を調べる方法、 c に分けられる。(a)は、自然地震研究分野におけるコグ波解析の理論的な取り扱いの基礎となっており、Aki and Richards (1980) や佐藤 (1984) 等により理論的に詳しく解析されている。また Matsunami (1990) はこの観点から、金属板内に多数の空孔を開けて多重散乱の問題を実験的に考察している。(b)は、不均質部の境界条件を決定論的に与える方法で、Hudson (1981)、河原 (1990)、Kikuchi (1981)、Yamashita (1990) 等により研究されている。散乱減衰とクラックのパラメータを結びつけるためには(b)の手法が有効であろう。

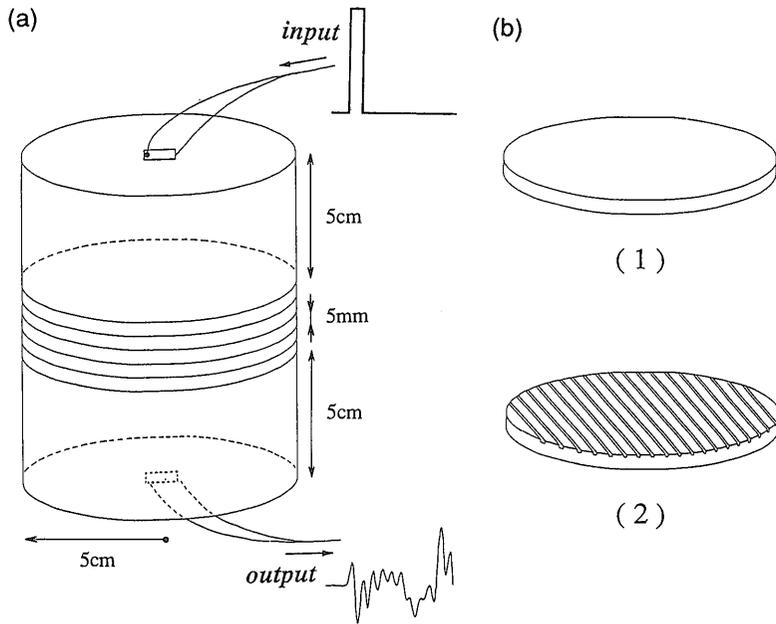
Hudson (1981) は、クラックがランダムに分布する媒質中を伝播する弾性波の速度及び減衰について、3次元問題として理論的に解析しているが、そこで扱っているのは、弾性波の波長がクラックより十分大きい場合に限られる。河原 (1990)、Kikuchi (1981)、Yamashita (1990) は、数値計算法を用いて、多数のクラックを含む媒体の散乱特性を広い周波数帯にわたって解析しているが、彼らは問題を2次元問題とし、またクラックの開口幅は無限小としている。また河原 (1990) は、クラック面上での境界条件については、開口変位を無視するという近似を行っている。このように、広い周波数帯域にわたった亀裂による散乱の解析は、まだ不十分なものである。

そこで本研究では、弾性波の波長が対象物の大きさと同程度の場合は、どのような散乱現象が起きるかを実験により解明しようと試みた。具体的には室内モデル実験により、クラックでの散乱による減衰量をP波及びS波についてそれぞれ測定し、減衰を表すパラメータ Q^{-1} を求め、形状の異なるクラックについて比較した。

2. 実験及び解析法

本研究は岩石中のクラックをとらえるのが目的であるが、岩石のマトリックスは不均質性が高くサンプルによる個体差が出てくる上、実際のクラック分布も明らかではない。従って金属(鋼)を加工して、あらかじめクラックの形状や分布が明らかなモデルを作り、弾性波の散乱減衰を調べた。

実際にはまず第1図(a)に示すように、高さ50mmの金属の円柱の間に厚さ5mmの金属の円板5枚を挟み、金属モデルを作成する。円柱と円板の直径は100mmである。円板間の接触状態を一定に保つため上下から荷重を加える。上の円柱に貼った振動子から弾性波を送り、下の振動子で透過波をとらえる。間に挟む円板は、第1図(b)のように、両面が平らなもの(1)と片面に溝を切ったもの(2)を用意した。まず溝のない板だけを5枚挟み、透過波の波形を得、これを参照波形とする。次に、挟む板を溝のある板と順次交換し、溝板の枚数を1枚から5枚まで増やし、得られた波形を参照波形と比較する。溝板を重ねるときは、必ず溝の向きを揃え、平行に置く。この方法を用いると、接触面の数や到達距離、振動子の接着状態は常に一定なので、溝での散乱による影響だけを見ることが出来る。前方へ到達する波のエネルギーの中には、散乱を繰り返して到達するものもあるが、初動付近では直達波だけになっているとみなせる。従って、散乱源がある場合と無い場合とで初動付近の振幅を比較すれば、散乱されたエネルギー量が推定できる。また円柱の



第1図 モデル実験の概略図

スチール円柱の間に金属円板を挟み、上の振動子からパルス波を送り、下で透過波をとらえる。円板は、(1)両面とも平らなもの (2)片面に溝を切ったものを用意した。(1)だけを重ねた場合と、(2)を挟んだ場合の透過波を比較することにより、溝で散乱されたエネルギー量を調べる。

Fig. 1 Schematic expression of the model experiment. Steel plates were piled up between two steel columns of 5cm height. Pulse signal were input with the transducer on the top, and resultant signal were recieved at the bottom. Some plates have plain surfaces, while the others have slits in one surface. Differences between amplitudes of first arrival signals obtained with different plates give the amount of elastic wave energy scattered at slits.

第1表 溝の形状
Table 1 Sizes of slits.

plate type	Ss	Sl	Ls
Slit pitch	5.0	5.0	5.0
slit width (crack length)	1.0	1.0	2.5
slit depth (crack width)	0.5	1.2	0.5

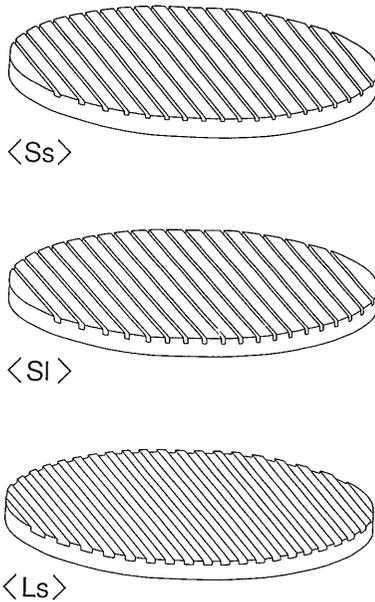
(unit; mm)

側面等からの反射波は、初動時間よりも十分遅れて到達するよう、モデルのサイズを考慮した。

溝を切った板は、溝の形状の違う3種類を用意した(第1表及び第2図)。板に付けられた記号は、それぞれ溝と深さを表している。Ssを標準とすると、Slは深い溝、Lsは幅の広い溝となる。溝の間隔はいずれも5ミリである。溝の走行に直交する断面で見ると、Slは開口幅の大きいクラック、Lsはクラック長の大きいクラックをシミュ

レートしていることに相当する。本実験でのSlは波の進行方向に長いクラック、Lsは進行方向の直交方向に長いクラックに相当する。SlとLsは、媒質の空隙率がほぼ等しく、Ssの約2.5倍となっている。用いた金属中のP波速度は約5,600 m/sec、S波は約2,700 m/secである。したがって、周波数1 MHzでP波の波長は5.6 mm、S波は2.7 mmとなり、溝の間隔や深さ、幅と同じオーダーになる。振動子は、P波については共振周波数が500 kHz、1 MHz、2 MHzのものを用いた。S波については500 kHzと1 MHzのものを用い、S波の振動方向と溝の走行が直交する場合と平行な場合について実験を行った。解析する弾性波の周波数はP波で500 kHz-2 MHz、S波は250 kHz-2 MHzとした。P波、S波の波数 k_p 、 k_s とクラックの半長 a の関係は、 $0.28 < k_p a < 2.8$ 、 $0.29 < k_s a < 5.8$ となる。

P波の測定の場合は、板間の接触面での減衰を防ぐため、板の面にグリースを塗った。接触面をグリースでお



第2図 実験で用いた溝板の形状

溝を切った板は、溝の形状の異なる3種類を用意した。いずれも溝は平行に刻まれており、溝の断面は矩形で、溝の間隔は5mmで等しいが、溝の幅と深さがそれぞれ異なる。Slは、溝幅はSsに等しく深さが深く、Lsは、深さはSsに等しいが幅が広い。なお、SlとLsとは空隙率がほぼ等しい。

Fig. 2 Cut plates used for experiments. Three different types of cut plates were used. In each plate, parallel slits are in 5mm pitch. The cross section of each slit has a square shape. The depth and width of slits are different among plate types. In comparison with Ss, Sl has deeper slits, Ls has wider slits. Sl and Ls have about the same volume of slits.

おうことにより、各接触面上の細かい凹凸による空隙の影響は無視できるほど小さくなり(例えば, Stesky, 1985)事実上、5枚の板を一個の試料として扱うことができると考えられる。P波では、上下にかける荷重が2t以上では振幅はほとんど変化しなくなるので、試料を挟む荷重を3.5t程度と定めた。こうして得られた波形はS/N比が高く、再現性が非常に高かったので、スタッキングの必要は無かった。P波については、5枚の円盤の中で溝板の占める位置の違いによる波形の変化は殆ど無かったため、一例だけの初動振幅を用いて解析した。

S波の溝板を挟んだ実験では、溝板の枚数は同じにして、5枚の円盤中の溝板の位置を変化させて実験を行い、それぞれで得られた初動振幅を平均した。このとき、明

らかに板の表面仕上げの影響が出ているデータが含まれないように留意した。またS波については、振動子と溝との位置関係による影響を除くため、上下の円柱に約6mm間隔で3ヵ所ずつ平行に振動子を貼った。向かい合う振動子の中で透過波をとり、初動振幅の読み取り値を3ヵ所について平均した。またS波の場合は、板の面を洗浄し、面についている油などを除去してから重ねた。S波の実験では、数t程度の荷重では、荷重の増加に従って振幅が大きくなったので、荷重は5tに統一して実験を行った。油や埃などで接触面が汚れないように留意したが、S/N比が低かったので、5回または10回ずつのスタッキングを行った。それでもなお、(1)荷重を一定にしても板の反りの影響が出やすく、用いる板によって接触状態が変化する、(2)測定毎に荷重がわずかに変化し、これにより振幅も変化する、などの理由により、P波に比べてデータのバラツキが大きかった。

解析は、各々の場合について、波の減衰を表すパラメータ Q^{-1} を以下に示す方法で求めて比較することとした。 Q^{-1} 値は、一般に次式を用いて求められる。

$$Q^{-1} = \ln(A/A_i) \times 2c/\omega x \quad (1)$$

ここで、 A は透過波の振幅、 A_i は入力波の振幅、 c は媒体中の弾性波速度、 ω は角周波数、 x は媒体中の透過距離である。 Q^{-1} が表す減衰の大きさは、距離 x を通過する間に失った波動エネルギー全体の量、つまり本質的な減衰と散乱による減衰とを併せた量に対応し、次式のように表される。

$$Q^{-1} = Q^{-1}_{intrinsic} + Q^{-1}_{scattering} \quad (2)$$

いま、本質的な減衰のみ存在する時の透過波振幅を A_0 とすると、

$$\begin{aligned} Q^{-1} &= -\ln(A_0/A_i \times A/A_0) \times 2c/\omega x \\ &= -\ln(A_0/A_i) \times 2c/\omega x \\ &\quad - \ln(A/A_0) \times 2c/\omega x \end{aligned} \quad (3)$$

と書ける。(3)式の右辺の第1項が本質的な減衰を表し、 A_0 は本実験での参照波形の振幅に相当する。また、第2項は散乱による減衰を表している。従って、(3)式第2項より、実験で得られる参照波形の振幅 A_0 と溝板を挟んだ時の振幅 A の比から、散乱による Q^{-1} が求められる。

3. 実験結果

3.1 Q_p^{-1} について

P波の1MHzの振動子を使用した場合の出力波形の例を、第3図に示す。溝板の枚数を増すと、初動付近で

は振幅が小さくなり、とくに高周波数成分が著しく減衰する。各周波数成分に対する初動の減衰量を求めるため、得られた波形にバンドパスフィルターをかけ、初動振幅を読み取った。第4図に、溝板を挟んだときの振幅 A と参照波形の振幅 A_0 の比を示す。ここでは、例えば 500 kHz の初動振幅としては、共振周波数が 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz の各振動子を用いて得られた波形に対し、それぞれ 500 kHz のバンドパスフィルターをかけ、それらの初動振幅比 (A/A_0) を A_0 の大ききで重み付け平均した値を用いた。他の周波数についても同様にして、用いるデータ数を多くした。

縦軸は対数表示であり、挟んだ枚数に対して、プロットがほぼ直線上に並んでいることがわかる。つまり、ここで取り扱っている空隙率の範囲では、 $-\ln A/A_0$ はクラックの数 (空隙率) に対して線形とみなせる。一方、SI と L_s では、空隙率はほぼ等しいが、減衰量には大きな違いが現れている。つまり、減衰量は溝の断面の形状に関係する。

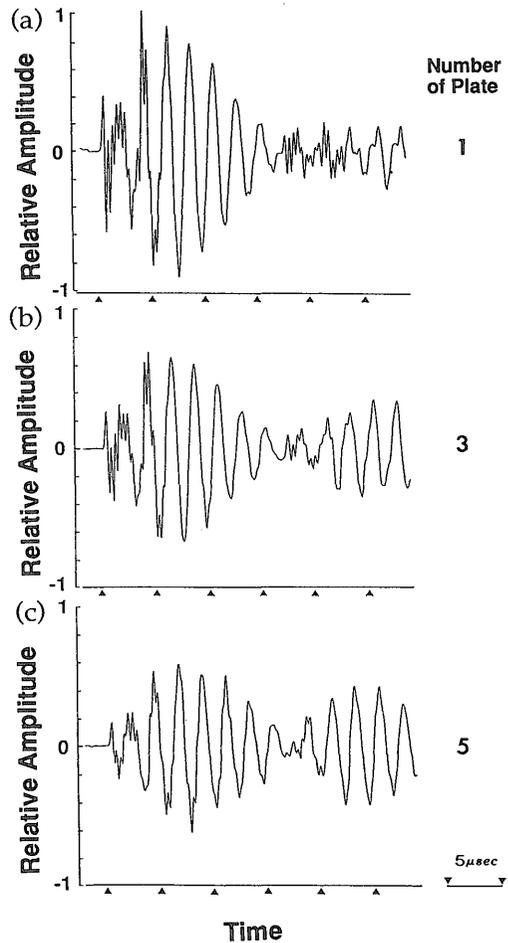
第4図から、前述の方法により Q_p^{-1} を求めた。ただし、透過距離 x は、上下の振動子間の距離ではなく、クラックを含む部分を透過した距離 ($\{\text{板の厚さ (5 mm)}\} \times \{\text{溝板を挟んだ枚数}\}$) とした。従って、第4図に見られる $-\ln A/A_0$ と溝板の枚数との線形な関係から、溝板の枚数に関係なくほぼ同一の Q_p^{-1} が求められることがわかる。従って、ここではクラックによる散乱の Q_p^{-1} は板の枚数に関係なく同一であると仮定し、(3)式の $-\ln(A/A_0)/x$ の部分に、第4図の破線で示される傾きを代入し、 Q_p^{-1} を計算した。これを周波数に対してプロットした結果が、第5図である。

第5図では、いずれの場合も右下がりの傾斜が認められるが、 L_s での周波数依存性が直線的なのに対し、SI では上に凸の曲線を示し、 S_s ではさらに非線形性が強くなり、上に凸の傾向が強まる。 Q_p^{-1} の値は、 S_s が最も小さく、 L_s が最も大きい。 L_s と SI では空隙率はほぼ等しいが、 Q_p^{-1} は L_s の方が有意に大きい。

3.2 Q_s^{-1} について

S波についてもP波と同様に、各周波数ごとに A/A_0 をプロットすると、減衰量は溝板の枚数に比例することが確認された(第6図)。また高周波数になるほど、板の位置関係や振動子の場所により、振幅比のパラツキが大きくなり、そのことが第6図の誤差の大きさに反映されている。ただし、溝板を3枚にしたときは、減衰量が異常に大きい。本研究ではそのメカニズムを解明するまでには至らなかったため、これを除いたデータを解析した。

Q_p^{-1} の場合と同様に、第6図の傾きから Q_s^{-1} を計算

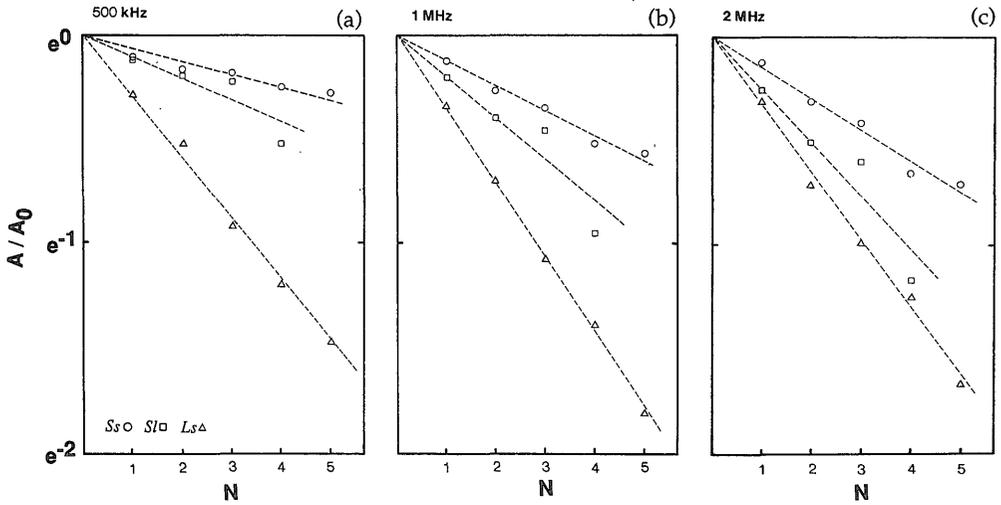


第3図 P波出力形の例

1MHzの振動子、溝板 S_s を使用。右の数字は挟んだ溝板の枚数。振幅のスケールは、溝板 S_s を一枚挟んだときの最大振幅を1としたもの。

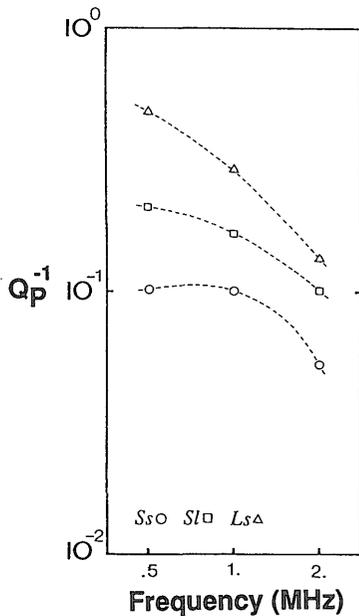
Fig. 3 Examples of resultant P-wave forms. 1MHz transducers and plate- S_s were used. Each wave form is labeled the number of plate- S_s . Amplitude scale is normalized by the maximum amplitude of the case (a).

し、周波数に対してプロットした(第7図)。第7図では、S波の振動方向が直交する場合も平行な場合も Q_p^{-1} と同様、周波数の増加とともに Q_s^{-1} が減少する傾向が認められる。しかし、前述のように、高周波数側でデータの誤差は非常に大きいことに注意されたい。 Q_s^{-1} の値は、どちらの振動方向の場合でもP波と同様に、 S_s が最も小さく、 L_s が最も大きい。 L_s と SI とでは空隙率はほぼ等しいが、 Q_p^{-1} と同様、 Q_s^{-1} は L_s の方が大きい。振動方向



第4図 各溝板形状でのP波の初動振幅の比 A/A_0 と溝板の枚数 (N) との関係
 (a)500kHz, (b)1MHz, (c)2MHzのバンドパスフィルターをかけた結果である。シンボルの違いが溝板の種類を表す。

Fig. 4 First arrival amplitude (A/A_0) of P-wave versus the number (N) of cut plates. The vertical axis stands for first arrival amplitudes normalized by reference amplitude A_0 after bandpass filtering of (a)500kHz, (b)1MHz, and (c)2MHz, respectively. The symbols distinguishes the slit types.



第5図 P波の減衰量 Q_p^{-1} の周波数依存性
 Fig. 5 Frequency dependence of P-wave attenuation Q_p^{-1} .

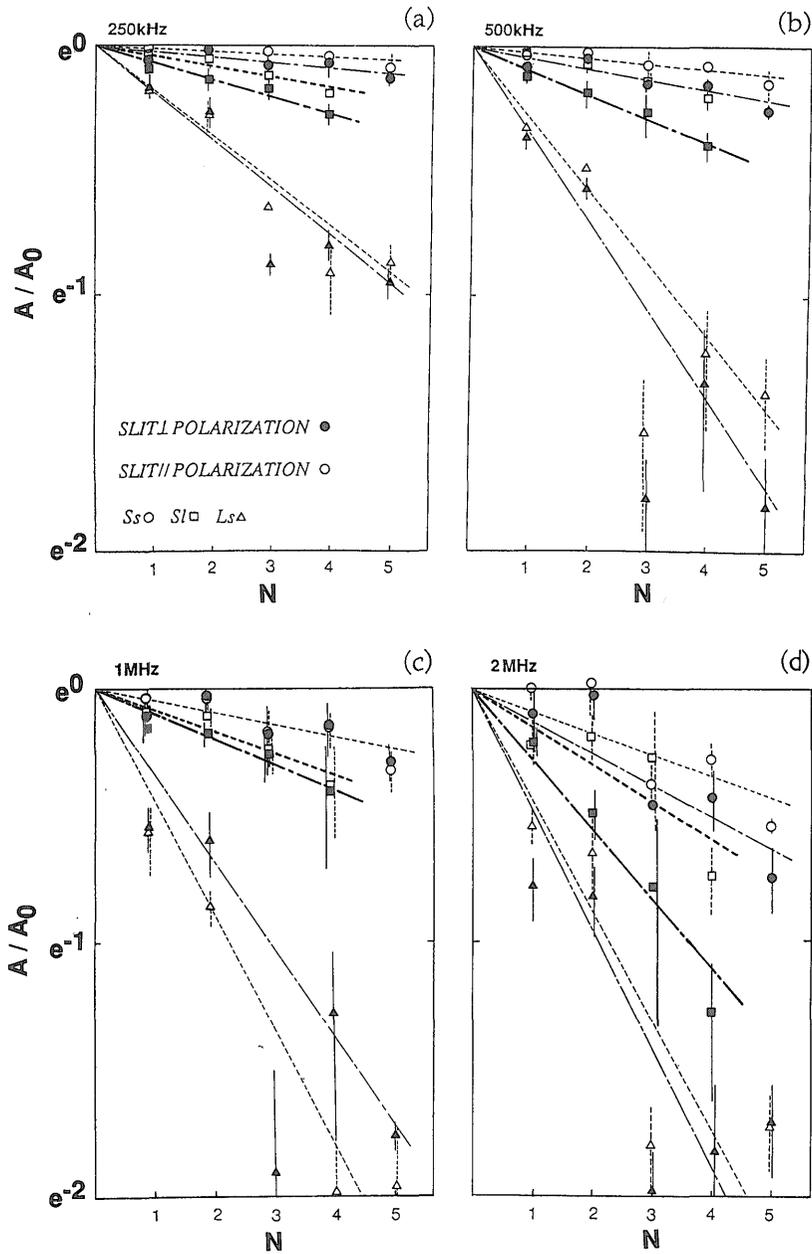
と溝が平行な場合と直交する場合の違いが最も顕著なのはSIであり、振動方向が溝に垂直なほうが大きい。波の進行方向に長く伸びた形状、すなわち開口幅の大きいクラックほど、S波の振動方向による Q_s^{-1} の違いの大きいことが示される。

3.3 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} について

第8図に、 Q_p^{-1} と Q_s^{-1} の比 (Q_p^{-1}/Q_s^{-1}) を示す。S波については振動方向と溝が直交する場合と平行な場合があるので、それぞれについてのP波との比をとった。両方ともに、Lsが最も Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の値が小さく、周波数依存性も小さい。またSsとSIの差はLsとの差に比べ有意に小さい。振動方向と溝が直交する場合は、いずれの溝についても、周波数1MHzのときに最も比の値が大きい。一方平行な場合は、いずれの溝を用いても周波数の増加とともに Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の値は減少していく。しかし Q_s^{-1} の実験誤差が大きいことを考慮すると、振動方向による、この Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の周波数依存性の違いはまだ確定的でない。

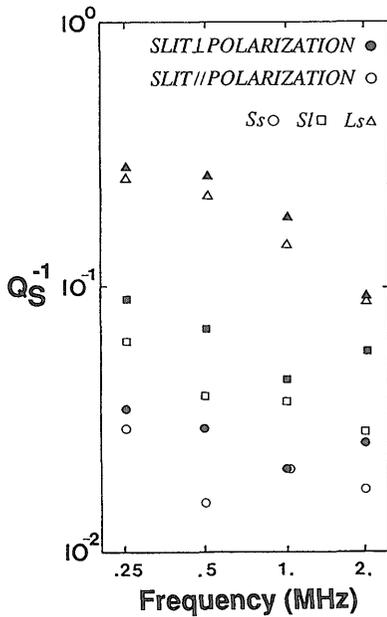
4. 議 論

Kikuchi (1981) によれば、特定のクラック長を持つクラックを含む媒体を透過する弾性波について、散乱によ



第 6 図 各溝板形状でのS波の初動振幅の比 A/A_0 と溝板の枚数 (N) との関係
 (a)250kHz, (b)500kHz, (c)1MHz, (d)2MHzのバンドパスフィルターをかけた結果である。横軸は溝板を挟んだ枚数。黒抜ききのシンボルは溝の方向とS波の振動方向が直交する場合、白抜ききは平行な場合を示す。

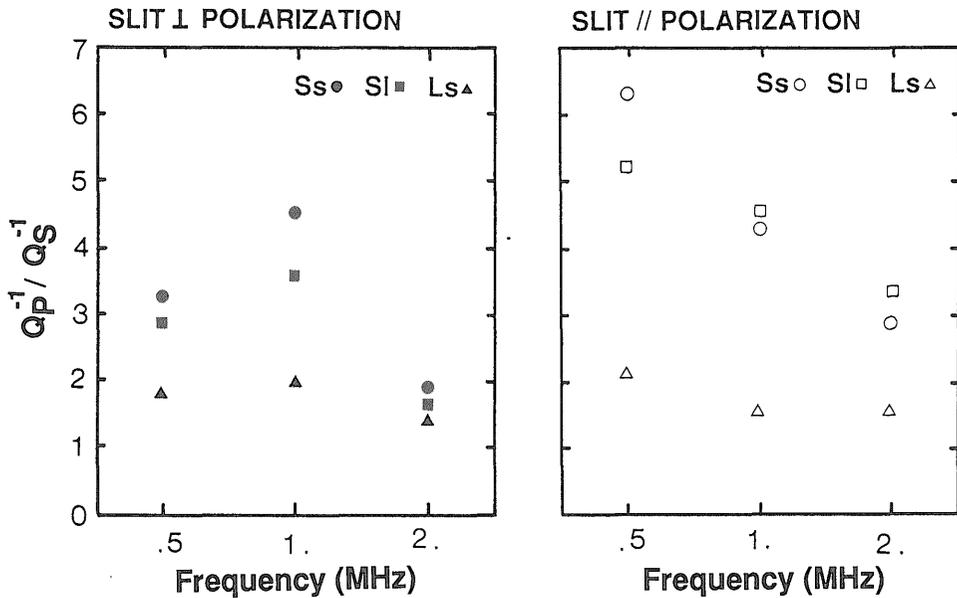
Fig. 6 First arrival amplitude (A/A_0) of S-wave versus the number (N) of cut plates. The vertical axis indicates first arrival amplitudes normalized by reference amplitude A_0 after bandpass filtering of (a)250kHz, (b)500kHz, (c)1MHz, and (d)2MHz respectively. Solid symbols are data for the polarization direction of S-wave perpendicular to the slit direction, open symbols are those of S-wave parallel to it.



第7図 S波の減衰量 Q_s^{-1} の周波数依存性。
シンボルは図6と同様
Fig. 7 Frequency dependence of S-wave attenuation Q_s^{-1} . The symbols are the same as in Fig. 6.

る見掛けの減衰の Q_p^{-1} 及び Q_s^{-1} の値は、それぞれ特定の周波数でピーク値をとる。Kikuchi (1981) は2次元空間でクラック長を $2a$ 、S波速度を β とし、周波数 ω の波の無次元周波数を $\omega_D = a\omega/\beta$ と定めると、P波、SV波、SH波のそれぞれのピーク周波数は $\omega_D = 1.1, 2.3, 1.3$ となることを報告した。

本実験で空隙率の等しいSIとLsとで比較してみると、P波(第5図)において、SIは上に凸の周波数依存性が見られるが、Lsでは直線的に減少している。本実験での溝の幅を $2a$ とすると、周波数0.5 MHzはLsでは $\omega_D = 1.5$ に相当し、Ss、SIでは $\omega_D = 0.58$ に相当する。従ってSIについてはKikuchi (1981) のピーク付近を、Lsについてはピークよりも高周波数側を扱っていることになる。実際の実験データではSs、SIについてピーク周波数はみられないが、これはKikuchi (1981) の結果は2次元解析であることや、クラックの開口幅を無限小とする近似を行なっているものであり、Kikuchi (1981) のピークをそのまま適用できないことによるものと考えられる。S波(第7図)については、 Q_s^{-1} の周波数依存性は、Lsでの傾斜が上に凸であり、SIでは直線的に減少しており、上の議論に反するように見える。しかし本実験では高周波数側で、振動子と個々の溝との位置関係によりS波初動の振幅が10倍程度異なる場合もあり、 Q_s^{-1} の実



第8図 P波とS波の減衰量の比 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の周波数依存性
Fig. 8 Frequency dependence of the ratio Q_p^{-1}/Q_s^{-1} .

観値のバラツキは大きい。従って、本実験のデータだけで Q_p^{-1} の周波数依存性を確定的に議論するのは現在のところ難しいと考える。

Q_p^{-1}/Q_s^{-1} 値(第8図)は、Ss 及び S1 の板では特に Q_p^{-1} と Q_s^{-1} の差が大きく、周波数依存性も大きいことを示す。Ss と S1 との間にはあまり顕著な違いは見られないが、Ls との間にはこのような違いが見られるということは、 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} は、空隙率や開口幅にはあまり依存せず、クラック長に大きく依存することを示している。このことは、実際の Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の比の観測から地下のクラック長が推定できる可能性を示す。佐藤 (1984) によれば、リソスフェアで観測された Q_p^{-1}/Q_s^{-1} のうち、特に破碎の著しい地域で観測されたものに限れば、1~2 程度になるという。今回の実験では、溝の中は流体で満たされていないために、これらのリソスフェアでの観測値との直接の比較はできない。今後、実際の観測値と比較していくために空隙内を流体で満たした実験を行っていきたい。

5. まとめ

P 波及び S 波について、形状の異なる 3 種類のクラックモデルでの散乱による減衰量を $0.28 < k_p a < 2.8$, $0.29 < k_s a < 5.8$ の範囲で測定し、以下のことが明らかになった。

- 1) Q_p^{-1} , Q_s^{-1} は周波数の増大とともに減少する。 Q_p^{-1} の周波数に対する減少率はクラック長が小さいほうが小さい。
- 2) 空隙率が等しい場合、 Q_p^{-1} , Q_s^{-1} はクラック長の大きい方が大きい。
- 3) 開口幅の広いクラックの方が、S 波の振動方向による減衰量の違いが大きい。
- 4) クラック長が等しい場合、 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} は空隙率によらない。
- 5) 空隙率が等しい場合、クラック長の大きいクラックの方が Q_p^{-1}/Q_s^{-1} は小さい。 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} の測定は、卓越するクラック長を測定するのに有効と思われる。

謝辞 環境地質部楠瀬勲一郎博士には原稿を読んで有益な助言を頂いた。記して感謝いたします。

文 献

Aki, K and Richards, P. G. (1980) Quantitative Seismology. W. H. Freeman and Co., San

Francisco, 932p.

Crampin, S. (1978) Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 53, p. 467-496.

——— Bush, I., Naville, C. and Taylor, D. (1986) Estimating the internal structure of reservoirs with shear-wave VSPs. *Leading Edge*, vol. 5, no. 11, p. 35-39.

Hudson, J. A. (1981) Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 64, p. 133-150.

河原 純 (1990) 破碎帯における弾性波の散乱特性. 東京大学理学部地球物理学科修士論文.

Kikuchi, M. (1981) Dispersion and attenuation of elastic waves due to multiple scattering from cracks. *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 27, p. 100-105.

Matsunami, K. (1990) Laboratory measurements of spatial fluctuation and attenuation of elastic waves by scattering due to random heterogeneities. *PAGEOPH*, vol. 132, p. 197-220.

O'Connell, R. J., and Budiansky, B. (1977) Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.*, vol. 82, p. 5719-5735.

佐藤春夫 (1984) リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰: ランダムな不均質構造による一次散乱理論. 国立防災センター研究報告, no. 33, p. 101-186.

Stesky, R. M. (1985) Compressional and shear velocities of dry and saturated jointed rock: a laboratory study. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 83, p. 239-262.

Yamashita, T. (1990) Attenuation and dispersion of SH waves due to scattering by randomly distributed cracks. *PAGEOPH*, vol. 132, p. 545-568.

(受付: 1991年8月12日; 受理: 1991年9月30日)