

岩石試料中の S 波の散乱特性

福島 洋¹・西澤 修²・佐藤春夫¹・大竹政和¹

1. 東北大学大学院理学研究科, 2. 地質調査所

1. はじめに

地殻のランダムな不均質構造の特徴を解明するうえで、S 波の散乱に着目した解析はきわめて有用なアプローチとなる。また、その多様性・複雑性から、不均質媒質中の波動伝播に関する研究においては室内実験によるアプローチも有効であると考えられる。昨年の研究会では、西澤らにより不均質媒質中での波動伝播物理実験の手法と実例が紹介された。西澤らの実験では、Compressional モードを持つ、つまり P 波をよく励起するような圧電素子が発振源として用いられ、岩石の粒径サイズによって弾性波の散乱の様子が著しく変化することが示された。本研究では、自然地震との類似性という観点から、Shear モードを持つ圧電素子を発振源として用い、測定される S 波の散乱特性をしらべた。

2. 実験装置と試料

図 1 は実験装置と試料の概略図である。用いた試料は、スチール (steel, 均質), 斑レイ岩 (gabbro, 等方性不均質), 大島花崗岩 (Oshima granite, 異方性不均質, 方向の異なるものふたつ) の三種類で、300 mm × 300 mm × 80 mm のブロックを用いた。大島花崗岩の異方性は、石英の結晶中に含まれるクラックの配向によるものである。斑レイ岩中を伝播する弾性波の散乱は鉱物粒子の分布によるものと考えられ、大島花崗岩中を伝播する弾性波の散乱は鉱物粒子の分布とクラックによるものと考えられる。クラックの配向による散乱の性質の違いもしらべるため、大島花崗岩については図 2 に示す三通りで測定をおこなった。斑レイ岩と大島花崗岩の粒径サイズは見た目では同程度 (約 1 - 3 mm) である。鉱物粒子の分布による不均質を指数関数型の自己相関関数を仮定して求めたところ、相関距離 a と速度のゆらぎの標準偏差 ε は、斑レイ岩で $a = 0.84$ mm, $\varepsilon = 8.1$ %, 大島花崗岩で $a = 0.39$ mm, $\varepsilon = 17.0$ % であった。

試料の一方の面の中心に直径が 5 mm, 共振周波数が 1 MHz の Shear モードを持つ圧電素子を貼りつけ、その電極間に正弦波型のパルス (100 Vpp) を与えて振動を励起させた。散乱の周波数依存性をしらべるために、正弦波の周波数 (加振周波数) を 0.25 MHz, 0.5 MHz, 1 MHz と変化させた。これは、 ka (S 波の波数 × 相関距離) にして $ka = 0.35 \sim 1.4$ (斑レイ岩), $ka = 0.2 \sim 0.8$ (大島花崗岩) の領域をしらべることに対応する。レーザードップラー振動計を用い、圧電素子と向かい合う 9 点で三成分速度記録を測定した (図 1)。その際、アレイの半径は 9.8 mm (射出角 7° に対応) とした。

3. 測定波形と解析結果

以下では、たとえば Steel (0.25 MHz) のように試料の種類と加振周波数を表すことにする。図 3 に、アレイの中心点での x 成分 (圧電素子の振動方向

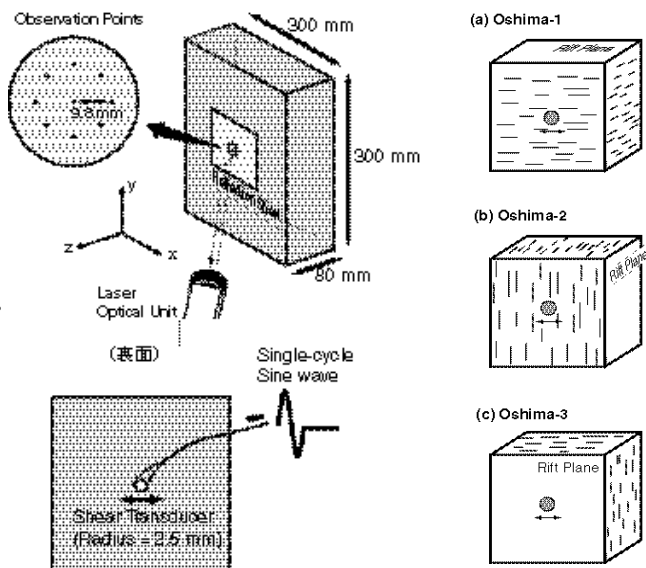


図 1. 実験装置と試料の概略図。

図 2. 大島花崗岩を用いた測定とリフト面 (クラックを含むような面) の関係。

に平行な成分) 速度波形に加振周波数を中心周波数とするバンドパスフィルタを施したものと、9点のバンドパスフィルタを施したx成分の速度波形から求めたRMSエンベロープを0.25 MHz, 1 MHz 加振の場合のみ示す。RMSエンベロープの図中のエラーバーは、各時刻における9点でのRMS振幅のゆらぎの標準偏差を表している。20–30 μs 付近に到着している顕著なフィエズが直達S波である。直達S波の到着は、散乱が卓越しているOshima-1-3 (1 MHz) の場合には明瞭に判別できなくなっている。また、Steel (0.25, 1 MHz) や Gabbro (0.25 MHz) の場合には、直達S波がさらに一往復してきた反射S波が直達S波走時の3倍の走時に明瞭に確認できる。

得られたRMSエンベロープからエンベロープ幅 t_q を読み取り、図4に加振周波数に対してプロットした。ここで t_q は、S波の到着時刻からRMS振幅がピーク値の半分に減少するまでの時間と定義した。散乱によるSコーダ波の励起がない場合、 t_q は発振源の振動時間とほぼ等しくなるため、Steelでは加振周波数に対してエンベロープ幅 t_q が単調減少している。Gabbro (0.25, 0.5 MHz) に対する値は対応するSteelに対する値とほぼ等しいが、Gabbro (1 MHz) に対する値はSteel (1 MHz) に対する値より2倍以上大きい。Oshima-1-3の場合の t_q は加振周波数に対して単調増加しており、Oshima-1-3 (1 MHz) では Gabbro (1 MHz) に対する値の2倍 (Oshima-1,2) から4倍 (Oshima-3) 程度の値が得られている。この結果は、大島花崗岩がクラックを多く含むということと、より大きな弾性係数のゆらぎを持つために散乱がより強いことを意味している。また、Oshima-1,2 (1 MHz) と Oshima-3 (1 MHz) に対する値の差異は、クラックによる散乱の方位依存性を示唆する。

図5は、直達S波群のy成分とx成分のRMS振幅比を加振周波数でプロットしたものである。その際、S波の着信から加振周期の3倍までの時間を直達S波群の到来とみなし、その

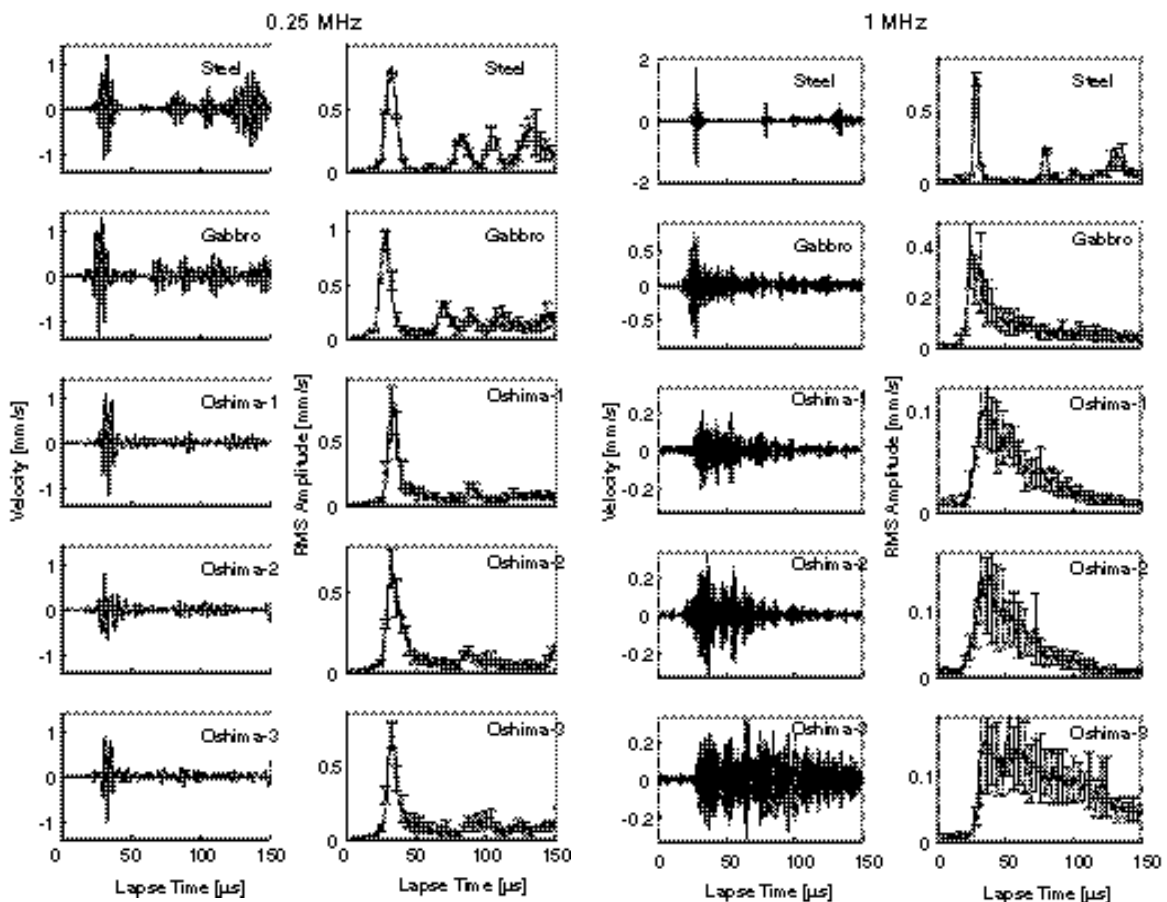


図3. 各試料で、0.25 MHz, 1 MHz 加振に対して得られたアレイの中心点での速度波形にフィルタ処理を施したものと、9点での速度波形から得られたRMSエンベロープ。

区間内の平均振幅値の比を直達 S 波群の RMS 振幅比と定義した .RMS 振幅比をみることは、パーティクルモーションのアスペクト比をみることとほぼ同等の意味を持ち、数値が大きいほど S 波の偏向の乱れが大きいことを意味する。均質であるスチールの場合と比較すると、岩石試料での振幅比はすべて有意に大きく、散乱によって弾性波エネルギーが y 成分に分配されていることがわかる。また、平均値で見ると、Oshima-1-3 に対する振幅比はすべて Gabbro に対する振幅比より大きくなっている。これは、S コーダ波の励起と同様に、大島花崗岩のほうがより散乱が強いことを意味している。1 MHz 加振の場合には、Oshima-1-3 に対する振幅比はすべて 1 のまわりにばらついており、S 波の偏向が完全に乱されていることがわかる。

4. まとめ

S 波速度ゆらぎ 8.1% を持つ岩石試料と、S 波速度ゆらぎ 17.0% を持ちクラックを含む岩石試料中を伝播する S 波の散乱特性を 0.25 – 1 MHz の帯域でしらべた。この周波数帯域は、およそ $ka = 0.3 \sim 1$ の領域に対応する。主要な結論は以下の通りである。(1) $ka \sim 0.3$ (0.25 MHz) の領域 散乱の効果は S コーダ波の励起にはほとんど現れなかった。しかし、S 波の偏向の乱れには有意に現れ、その程度はクラックを含む不均質性がつよい試料のほうが大きかった。(2) $ka \sim 1$ (1 MHz) の領域 S コーダ波の励起は両試料で明確に見られた。また、S コーダ波励起のクラック配向による影響も顕著であった。S 波の偏向は、全体的に(1)の領域の場合と比較して乱れが大きく、クラックを含む不均質性がつよい試料ではほぼ完全に乱されていた。

この実験結果は、自然地震のエンベロープ拡大現象において、短波長不均質による広角度の散乱やクラック起源の散乱が大きく寄与している可能性を示唆するものである。

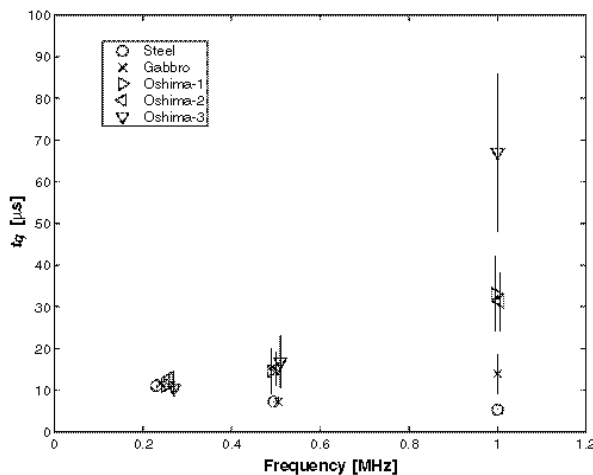


図 4 . 各試料での加振周波数に対するエンベロープ幅 t_q のプロット .シンボルは 9 個のデータに対する平均値を表し、エラーバーは標準偏差を表す .

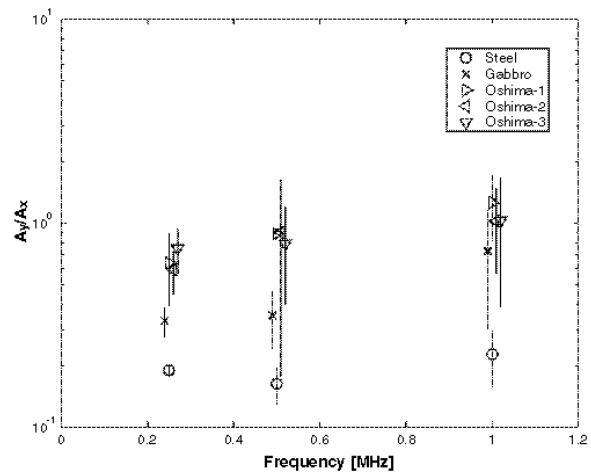


図 5 . 各試料での加振周波数に対する直達 S 波群の RMS 振幅比のプロット (A_y (y 成分) / A_x (x 成分)). シンボルは 9 個のデータに対する平均値を表し、エラーバーは標準偏差を表す .