

## 2次元多孔性媒質モデルにおける S 波の散乱について

松 波 孝 治

### SCATTERING OF S WAVES IN A TWO-DIMENSIONAL POROUS MODEL OF MEDIUM

By *Koji MATSUNAMI*

#### Synopsis

The effects of S-wave scattering by regularly distributed small-scale scatterers on the wave form of S waves and the amplitude level of S coda are investigated by ultrasonic model experiments. In the experiments, P and SV pulses radiated simultaneously from piston-type emitter are used, and the property of S-wave scattering is compared with that of P-wave scattering and is discussed. The variances of spatial amplitude fluctuations of each phase within the duration of S waves strongly depend on the frequency of S waves, and the later the phase arrives, the larger its variance becomes. The logarithmic amplitude ratio of S coda to direct S pulse also strongly depends on the frequency of S waves. These properties are also observed in the case of P-wave scattering, but the effect of S-wave scattering appears more sensitively than that of P-wave scattering because the wave length of S waves is shorter than that of P waves in the case of the same frequency.

#### 1. はじめに

近年、地震記象の coda part および遠地震の P 波の振幅や走時の空間的変動は、地球内部に存在する種々の規模の地震波速度の不均質による地震波の散乱に起因していると考えられているが<sup>1)</sup>、地震波の散乱の物理的メカニズムはまだ十分に解明されていない。このような複雑な波動現象の解明には、模型実験による simulation が有効であり、P 波の散乱に関する研究<sup>2),3)</sup>はいままでいくつか行なわれ、地震波の散乱のメカニズムの研究に有益な情報を与えている。地震記象上において S 波は coda waves に先行する実体波であり、その散乱の性質を知ることは重要であるが、S 波に関するこの種の研究は非常に少ない。

ここでは、S 波の散乱の性質を知るために、超音波を使った 2 次元模型実験により、S 波の duration 内と S coda における散乱の影響を検討する。媒質モデルは先の実験<sup>3)</sup>に使用された 2 次元多孔性媒質モデルである。S 波 duration 内の各 phase の peak と trough を形成している各 extremum の振幅ゆらぎと、S coda の direct S 波に対する相対的な振幅レベルとが、それぞれ P 波の散乱の場合と比較検討される。

#### 2. 実験方法

実験装置は、先に報告された実験<sup>3)</sup>の場合と同じである (Fig. 1)。emitter と receiver はともに同じ共振周波数  $f_0$  を持った直径 4 mm の厚み振動型の PZT 磁器振動子から成る。ここでは、110 KHz, 150 KHz および 250 KHz の  $f_0$  を持った 3 組の emitter と receiver が使用される。

媒質モデルは、大きさ 200×52×0.2(cm) の duralumin 板である。scatterer を持った heterogeneous なモデルとしては、先の実験<sup>3)</sup>で使用された porosity が 3% (穴の直径が 1.7 mm) の model HC と同等のものが使用される。Fig. 2 に示されるように、辺の長さが 1 cm の六角形の中心と各頂点に 1.7 mm の穴が

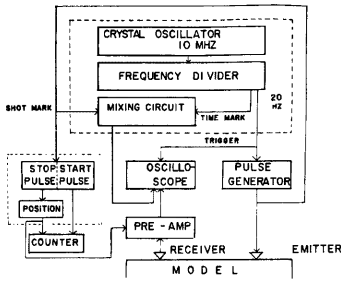


Fig. 1. Block diagram of apparatus.

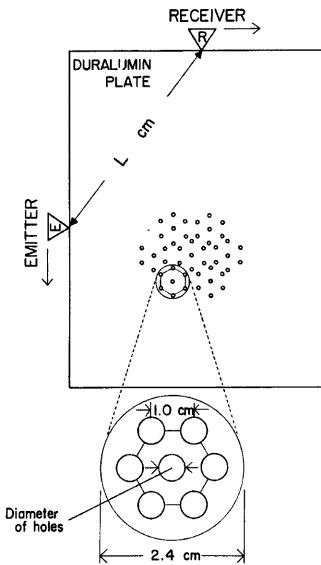


Fig. 2. Heterogeneous model. As shown at the bottom, holes of diameter 1.7 mm are made at the center and each vertex of a hexagon, and the area surrounded by a circle is considered as the element of medium. Such elements are regularly distributed in the plate model.

### 3. 実験結果

heterogeneous なモデルには直径 1.7 mm の穴が数多く分布させられている。このため、このモデルを伝播する波はこの穴によって散乱させられる<sup>3)</sup>。ここでは、profile で観測される P 波および S 波の dura-

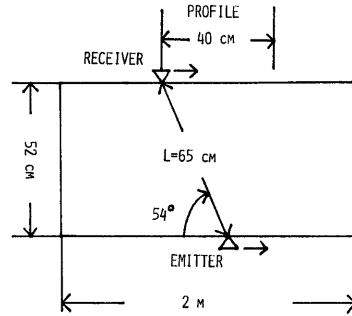


Fig. 3. Configuration of the emitter and receiver used for measurements.

あけられ、このような六角形が duralumin 板の全表面に規則的に分布させられる。このようなモデルでは  $f_0$  が 200 KHz あたりから穴による散乱減衰が顕著になることが知られている<sup>3)</sup>。一方、scatterer を持たない homogeneous なモデルとしては、穴のあけられていない同じ大きさのモデル (model HA) が使用される。両モデルの弾性波速度および音響 impedance が Table 1 に示される。

計測の際の emitter と receiver の配置が Fig. 3 に示される。通常、piston 型の振動子からは P 波と SV type の S 波が同時に放射される<sup>3)</sup>。Fig. 3 のような配置で P 波と S 波の振幅 (板の edge に対して垂直な振幅成分) がほぼ同じになるような射出角 ( $54^\circ$ ) を選び、emitter と receiver を、1 cm 間隔で長さ 2 m の edge 上を同時に平行移動させる。先の実験<sup>3)</sup>でも示されたように、model HC ではほぼ波面に沿った profile における P 波の振幅の変動は非常に小さい。それ故ここでは、profile の各点での P 波の first extremum の振幅の変動は実験誤差によるものと見なし、first extremum の振幅が profile のどの点においても同じになるように pre-Amp. の gain を調整する。このようにして、長さ 40 cm の profile における P 波および S 波の波形が同時に観測される。

Table 1. Measured elastic wave velocities and acoustic impedances.

Model	Diameter of holes, D in mm	Porosity, $Q_c$ in %	Plate dilatation velocity, $V_p$ in mm/microsec.	Shear velocity, $\beta$ in mm/microsec.	Acoustic impedance, $\rho V_p$ in bar/kine
HA	0	0	5.45	3.15	1.52
HC	1.7	3	5.21	3.03	1.40

tion 内の phase の peak と trough を形成している各 extremum の 対数振幅ゆらぎと, direct P 波に対する P coda の 対数振幅比および direct S 波に対する S coda の対数振幅比とがそれぞれ検討される。

profile における対数振幅ゆらぎ  $\delta \log A$  は次のようにして決定される：

$$\delta \log A = \log A - \langle \log A \rangle \tag{1}$$

ここで,  $\log A$  は計測された振幅の対数であり,  $\langle \log A \rangle$  は  $\log A$  の profile についての平均値である。さらに振幅ゆらぎの variance  $D\delta \log A$  は次のようにして決められる：

$$D\delta \log A = \langle (\delta \log A)^2 \rangle \tag{2}$$

こんど, ここでは, Никомев<sup>1)</sup>に従って, (1) 式によって得られるゆらぎ  $\delta \log A$  を波動場の散乱成分として検討する。

実験で得られた記録例を **Photo. 1**, **Photo. 2** および **Photo. 3** に示す。それぞれの上部には, emitter と receiver を直接に接触させて得られた波形が, そして中間には homogeneous なモデルで得られた波形が, さらに下部には heterogeneous なモデルで得られた波形がそれぞれ示されている。homogeneous なモデルで得られた波形は, profile のどの点においても, emitter と receiver を直接に接触させて得られた波形とよく似ている。しかし, heterogeneous なモデルの場合には, 共振周波数  $f_0$  が高周波な場合ほど観測点の違いによる S 波の波形の変動が大きい。さらに, P および S coda の direct P 波および S 波に対するそれぞれの相対的な振幅レベルが homogeneous なモデルの場合と比較して顕著に大きい。

**Fig. 4** には, homogeneous なモデルで得られた P 波および S 波の各 extremum の振幅  $\log A$  の profile における分布が示されている。P 波および S 波ともに later extremum まで非常に安定した分布をしている。一方, **Fig. 5** および **Fig. 6** には, heterogeneous なモデルで得られた振幅分布が示されている。**Fig. 5** および **Fig. 6** より次のような特徴が見い出される。P 波のゆらぎ  $\delta \log A$  は S 波の場合にくらべて顕著に小さい。P 波および S 波ともに, later extremum ほどゆらぎ  $\delta \log A$  が大きくなる。 $f_0$  が高周波であるほどゆらぎ  $\delta \log A$  は大きい。これらの特徴は, ゆらぎの variance  $D\delta \log A$  を求めることにより, より明瞭になる。**Fig. 7** に, P 波および S 波の各 extremum のゆらぎの variance  $D\delta \log A$  が示される。横軸には, P 波および S 波の onset からの時間  $\tau$  がとられている。この図より明らかなように, S 波のゆらぎの variance  $D\delta \log A$  は P 波の場合にくらべて, およそ10倍ほど大きい。従って, 時間  $\tau$  に関する  $D\delta \log A$  の増加の割合もまた同程度に大きい。

**Fig. 8** に, P coda の振幅  $A_c$  の direct P 波の振幅  $A$  に対する対数振幅比  $\log(A_c/A)_p$  と, 同じく S coda の場合の  $\log(A_c/A)_s$  とが示される。振幅  $A$  には duration 内の最大振幅が, 振幅  $A_c$  には emitter の duration time  $\Delta t$  (20~30 microsec.) 毎の最大振幅がそれぞれとられる。emitter と receiver を直接に接触させた場合 (◎) と homogeneous なモデルの場合 (○(P coda), △(S coda)) とを比較すると, 両者の対数振幅比  $\log(A_c/A)$  の差は, どの  $f_0$  の場合でもほぼ同じである。これ故, この差は音響 impedance の違いによるものと考えられる。一方 homogeneous なモデルの場合と heterogeneous なモデルの場合 (●(P coda), ▲(S coda)) とを比較すると, 両者の音響 impedance は 9%程度しか変わらず, さらに両者の

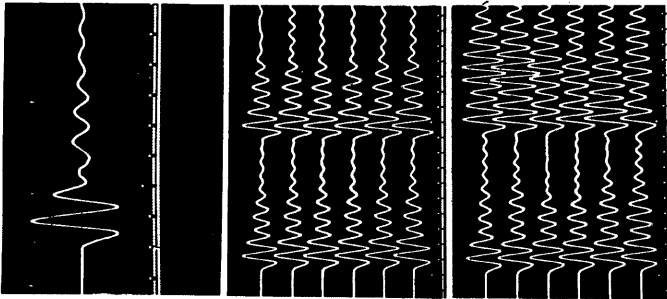


Photo. 1. Examples of the records obtained in the case of  $f_0 = 110$  KHz. Wave forms obtained by the operation of directly contacting the receiver with the emitter are shown at the top. Ones obtained in the homogeneous and the heterogeneous models are shown at the middle and the bottom, respectively.

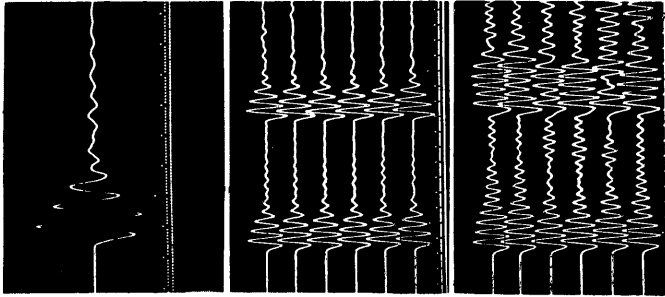


Photo. 2. Examples of the records obtained in the case of  $f_0 = 150$  KHz. The top, the middle and the bottom of the photograph are similar to Photo. 1.

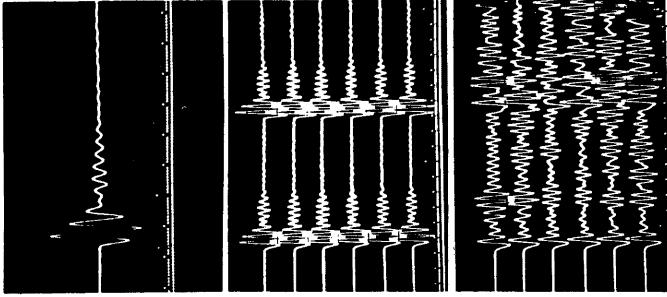


Photo. 3. Examples of the records obtained in the case of  $f_0 = 250$  KHz. The top, the middle and the bottom of the photograph are similar to Photo. 1.

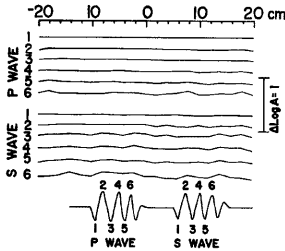


Fig. 4. Logarithmic amplitude distributions of the extrema of P and S pulses observed in the profile of the homogeneous model for the resonance frequency  $f_0=250$  kHz. As shown at the bottom, the extrema (the peaks and troughs) of P and S pulses are numbered according to the order of arrivals, respectively.

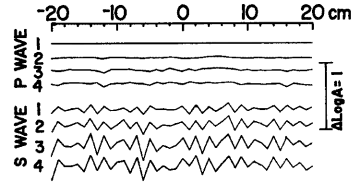


Fig. 5. Logarithmic amplitude distributions of the extrema of P and S pulses observed in the profile of the heterogeneous model for  $f_0=110$  kHz.

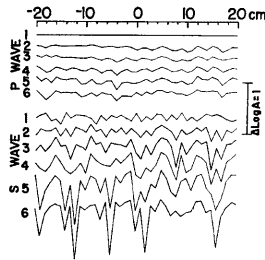


Fig. 6. Logarithmic amplitude distributions of the extrema of P and S pulses observed in the profile of the heterogeneous model for  $f_0=150$  kHz.

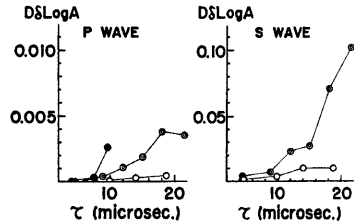


Fig. 7. Mean square amplitude fluctuations of the extrema of P and S pulses observed in the following cases:  $f_0=110$  kHz ( $\circ$ ),  $f_0=150$  kHz ( $\odot$ ) and  $f_0=250$  kHz ( $\bullet$ ). The value of time  $\tau$  is measured from P and S onsets, respectively.

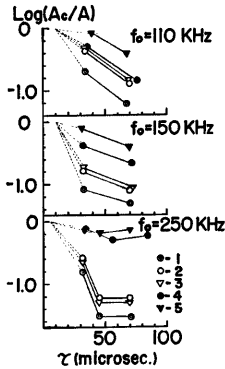


Fig. 8. Logarithmic amplitude ratios of P coda to direct P pulse and S coda to direct S pulse. 1 shows the case contacted directly the receiver with the emitter. 2 and 3 show the cases of P and S codas observed in the homogeneous model, respectively. 4 and 5 show the cases of Pand S codas observed in the heterogeneous model, respectively.

対数振幅比  $\log(A_c/A)$  の差は,  $f_0$  が高周波な場合ほど大きい。しかも, 図より明らかなように, P coda よりも S coda の場合の方がより大きい。この両モデルにおける違いは, 穴による波の散乱の影響と考えられる。

以上の実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) S 波の duration 内における振幅ゆらぎの variance  $D\delta\log A$  は強く周波数に依存し, しかも P 波の場合にくらべておよそ10倍ほど大きい。
- 2) S 波の duration 内においては, P 波の場合と同様に, later extremum ほど  $D\delta\log A$  は大きくなる。
- 3) S coda の direct S 波に対する対数振幅比  $\log(A_c/A)$  は, P coda の場合と同様に強く周波数に依存するが, P coda の場合よりも顕著に大きい。

#### 4. おわりに

ここでの実験では, emitter と receiver 間の中央における波動 parameter  $B(=2L\lambda/\pi a^2)^{1/2}$  の値は, P 波およびS 波の場合ともに, 明らかに Fraunhofer diffraction の領域の値である。ここで, L は波の伝播距離,  $\lambda$  は波長, a は scatterer の平均 size である。一方, 波長と scatterer の size との比  $\lambda/a$  は, P 波の場合で約11~27, S 波の場合で約7~15である。このような条件の場合には P 波も S 波も通常, 等方散乱が予想される<sup>4)</sup>。これ故, duration 内における時間  $\tau$  に関する variance  $D\delta\log A$  の増加の傾向は, 波動場の構成に寄与する媒質領域の時間的な拡大に伴なう scatterer の数の増加に関係していることが期待される<sup>1)</sup>。一方, P coda および S coda における対数振幅比  $\log(A_c/A)$  の考察から, P および S coda は波の散乱の影響を強く受けていることが理解される。また, 同じ周波数においては, P 波よりも S 波の場合の方に散乱の影響が大きく現われるのは主として波長の違いによるものと考えられる。

こんご, duration の異なる source および 異なる媒質モデル等を使用してさらに実験的に検討していく必要がある。

終りに, 実験装置の製作等に種々御協力下さった防災研究所技官西正男氏に厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Николаев, A.B.: Сейсмика неоднородных и мутных сред, Наука, М., 1972.
- 2) Алешин, A.C.: Флуктуация интенсивности продольной волны в трехмерной твердой модели случайно-неоднородной среды, Изв. АН СССР. Физика Земли, No. 9, 1973.
- 3) 松波孝治: ランダムな速度のゆらぎを持つ2次元媒質モデルにおける P 波の散乱について, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-1, 1979. pp. 91-105.
- 4) Chernov, L.A.: Wave propagation in a random medium, McGraw-Hill, New York, 1960.