

# アレイ観測でとらえられた地震波形の Angular Spectrum 解析

斉藤竜彦, 佐藤春夫, 吉本和生, 大竹政和(東北大・理)

松本聡(秋田大鉱資), 小原一成(防災科研)

## 1. はじめに

パルスの信号がランダム媒質を通過すると, 波形は乱されてピーク到達時刻は遅れ, エンベロープは時間領域で拡大する. この現象は多重前方散乱モデルで説明することができる [Ishimaru(1975)]. 地震学の分野では, 観測される地震波形の MS エンベロープの解析から不均質構造の特徴が推定されてきた [Sato(1989), Scherbaum and Sato(1991), Obara and Sato(1995)]. 本稿ではエンベロープを構成するパワーの進行方向の角度分布 (angular spectrum) の解析を, アレイ観測記録を用いて行う.

## 2. 理論

大局的な波の進行方向  $z$  軸とするとき  $z$  軸から角度  $\theta$  をなす方向へ伝播する波のパワー密度である angular spectrum  $P(z, \theta, t)$  は, 2 周波数相互相関関数  $\Gamma(r_{\perp 1}, r_{\perp 2}, z, \omega_1, \omega_2)$  を用いてあらわすことができる.

$$P(z, \mathbf{k}_{\perp}(\theta), t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint d\mathbf{r}_d \int d\omega_c \int d\omega_d \Gamma_2 \exp\left[-i\omega_d\left(t - \frac{z}{c}\right)\right] \exp(-i\mathbf{k}_{\perp}(\theta)\mathbf{r}_d)$$

媒質の特徴的スケールに比べて波長が短い場合には前方散乱が卓越することが知られている. 前方散乱が卓越する場合にはランダム媒質中の波動伝播を放物型の微分方程式で記述することができ, これをもとに  $\Gamma_2$  を解くことができる [Sato and Fehler(1998)Chap.8].

## 3. 観測

97年10月初旬から11月下旬まで岩手県沢内村(140.8E, 39.4N)にアレイ地震観測点を設置した. アレイは800m程度の2つの測線からなるL字型アレイで地震計毎の間隔は20m程度である. 固有周波数2Hzの上下動速度型地震計78個, 固有周波数1Hzの3成分速度型地震計6個から構成される. 本解析では沢内アレイのほぼ真下(140.6°E, 39.3°N 深さ約120km)で発生した(1997年10月27日午前4時7分)Mw5.6の地震について, 上下動記録78トレースを用いて解析した.

## 4. 解析

多重前方散乱モデルから導かれる MS エンベロープとアレイ観測記録による MS エンベロープを比較して不均質のパラメタである  $\varepsilon^2/a$  を推定する.  $\varepsilon^2/a$  は散乱の度合いを表すパラメタで,  $\varepsilon^2/a$  が大きいほど散乱は大きくなる. アレイ記録の MS エンベロープは, バンドパスフィルターをかけた各トレースをオンセットでそろえてスタックした後, 2乗振幅をとり時間領域で平滑化を行って作成する. 推定された  $\varepsilon^2/a$  の値を用いて多重前方散乱モデルの angular spectrum を求め, 観測から得られる angular spectrum とを比較する. アレイ観測記録からの angular spectrum は, FK 解析の結果の水平方向波数を大局的な波の進行方

向からの角度 $\theta$ に変換してもとめる。上記の解析を 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz の周波数帯にわけて P 波および P コーダ部分でおこなう。FK 解析をするときのウィンドウ幅は中心周期の 2.4 倍にした。つまり, 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz でそれぞれ 0.4s, 0.2s, 0.1s とした。

## 5. 結果

図 1 に 16-32Hz の周波数帯で観測された MS エンベロープを理論値と共に示す。理論 MS エンベロープの形状は周波数によらず、緩やかな曲線を描く。アレイ記録から得られた MS エンベロープはスパイク状のエネルギーの到来が見られる。不均質のパラメタ  $\varepsilon^2/a$  は 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz でそれぞれ  $0.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ ,  $0.2 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ ,  $0.2 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$  程度である。8-16Hz, 16-32Hz の周波数帯では観測と理論がよく一致している。4-8Hz で観測エンベロープは理論からずれるが、これは広角散乱の影響によると考えられる。

図 2 に 16-32Hz の周波数帯で観測された angular spectrum を理論値と共に示す。理論から導かれる angular spectrum は、時間の経過とともにパワーの最大到来方向が震源方向  $\theta = 0$  からずれていくことを示している。その現象が 16-32Hz 帯の観測記録(5.476s, 5.538s の入射角 10 度付近の極大値)(図 2)に現れている。8-16Hz の周波数帯にも同じ現象が見られた。同じ時間での 30 度から 60 度の間に見られる極大値は、広角散乱と考えられる。

今後は、解析事例を増し統計的な量として MS エンベロープ、angular spectrum の推定を行う必要がある。理論との定量的な比較を行うことにより、速度ゆらぎ相関関数の決定精度の向上や広角散乱の定量的な見積もりなどが期待される。

## あとがき

本解析は 97 年沢内、山内アレイ観測の記録をつかわせていただきました。

# MS Envelope

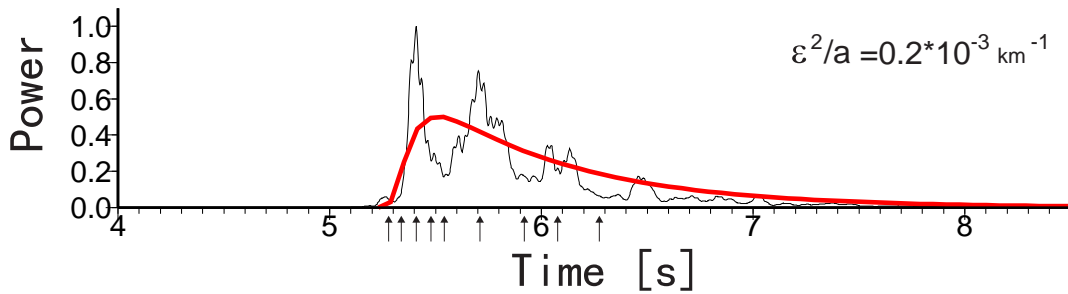


図1. 沢内アレイのほぼ真下120kmで起きた地震の観測エンベロープ（細線）と理論エンベロープ（太線）. 理論エンベロープはMarkov近似にもとづく. 観測エンベロープは上下動速度記録に16-32Hzのバンドパスフィルター処理をほどこし, 78観測点をスタックしてからもとめた. 最大振幅で規格化. 矢印は図2のangular spectrumのグラフに対応.

# Angular Spectrum

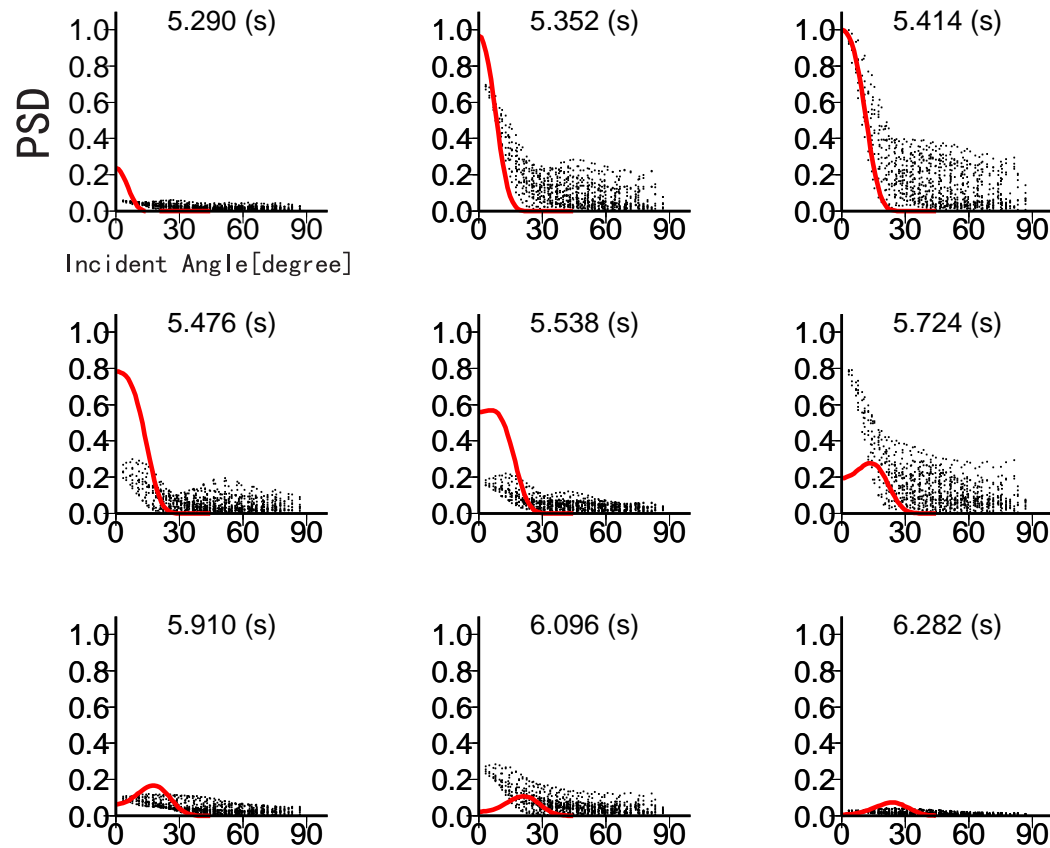


図2. 16Hzから32Hz帯域のangular spectrumの時間変化. 表の上の時間は図1のトレースの時間に対応している. 点は観測からもとめられたもの, 太線はMarkov近似でもとめた理論曲線をあらわす. 観測, 理論それぞれの最大PSDで規格化.