

震源・パス・サイトを Convolution 表現した時の振幅のバラツキ

干場充之 (気象庁精密地震観測室)

Fluctuation of wave amplitude when assuming convolution of source, path and site factors

Mitsuyuki HOSHIBA (Matsushiro Seismological Observatory, JMA)

TEL. 026-278-2656 E-MAIL mhoshiba@mri-jma.go.jp

1. はじめに 観測される地震動のフーリエスペクトル $O_{ij}(f)$ は、震源の項 $S_i(f)$ 、パスの項 $T_j(f)$ 、およびサイトの増幅特性 $G_j(f)$ の積、 $O_{ij}(f) = R_{\theta\phi} \cdot S_i(f) \cdot G_j(f) \cdot T_j(f)$ で表現される場合が多い。ここで、添え字の i は i 番目の地震を、 j は j 番目の観測点を表し、 $R_{\theta\phi}$ は 4 象現型の震源球解を表す。上記の表現を用いて、相対的な震源の強さや、パスの影響 (たとえば Q^{-1} 値など)、サイトの増幅特性の定量的な見積もりが行なわれているが、この表現の定量的な限界を考慮して議論されることは少ない。そこで、この表現を用いた時にどの程度、スペクトルの振幅に不安定性 (バラツキ) があるのか、について考察を行った。

2. 方法 震源メカニズムが良く似た非常に近接したところで発生した 2 つの震源を考える (震源の間の距離を l とする)。これらの震源から出た波を、 l よりも十分に遠い観測点 j で観測したとすると、それらのパスはほとんど同じなので $T_{1j}(f) \approx T_{2j}(f)$ 、また、震源メカニズムがよく似ているので $R_{\theta\phi} \approx R_{\theta\phi}$ と仮定される。地震動のスペクトルの比は、上記のコンボリューションを用いた表現を用いると、

$$\frac{O_{1j}(f)}{O_{2j}(f)} = \frac{R_{\theta\phi} \cdot S_1(f) \cdot G_j(f) \cdot T_{1j}(f)}{R_{\theta\phi} \cdot S_2(f) \cdot G_j(f) \cdot T_{2j}(f)} \approx \frac{S_1(f)}{S_2(f)} \quad (1)$$

から、震源の項の比 $S_1(f)/S_2(f)$ となり、観測点 j に寄らない。これは、多くの観測点で地震動のスペクトル比、 $O_{1j}(f)/O_{2j}(f)$ を求めても、ほとんど同じ値になることを示している。しかしながら、実際にはどの程度ばらつかないものなのであるか? そこで、実際に地震動のスペクトル比を求め、どの程度安定しているのかについて求めた。

3. スペクトル比 例として、1997 年の鹿児島県西部での群発地震から 2 つの震源 (3 月 26 日 18 時 05 分と 4 月 4 日 2 時 33 分のイベント、以後、03261805 および 04040233 と表す) を用いた場合を示す (Fig.1)。両者のマグニチュードは 4.4 と 4.6 (JMA による) あるいは 4.6 と 4.7 (Freesia による M_w) であり、震源間の距離 l は約 1.5 km (JMA 震源による) であり、いずれも東西に伸びる群発域で発生している。図中に Freesia による震源メカニズム解を示す様に、震源メカニズム解は似ている。これらの震源から震央距離 40~100 km のところにある K-NET 観測点での地震動記録を用い、スペクトルを求めた。Fig.2 には、KGS018 で観測された 2 つの地震の 3 成分記録と S 波オンセットの直前から 20 秒間で求めたフーリエスペクトルを示す。最大振幅で見ると、03261805 のイベントの方が 04040233 よりも最大振幅は 2-3 倍大きい (震源距離は 03261805 の方がやや大きい)。また、Fig.3 には KMM011 で観測された例を示すが、最大振幅は、Fig.2 の KGS018 とは逆に、04040233 の方が 2-3 倍大きい。また、Fig.4 には、スペクトル比、 $O_{1j}(f)/O_{2j}(f)$ を成分別に示す。各成分・各周波数とも $O_{1j}(f)/O_{2j}(f)$ は、おおむね 1 を平均に分布しており、このことは震源からの輻射エネルギー量は 2 つの地震でほぼ同じであることを示している。そのバラツキは、1 Hz 以下あるいは 6 Hz 以上では比較的小さいが、2 から 4 Hz では最小と最大の差が 10 倍程度となる。バラツキが大きいことは、たとえ上記のコンボリューション表現を用いたとしても、2 から 4 Hz では、振幅で最大で 10 倍程度の不安定性 (バラツキ) があることを示唆している。

4. 結果 たとえ上記のコンボルーション表現を用いたとしても、場合によっては数倍の振幅のばらつきを考慮しなければならないこと、と言える。たとえば、上記の 03261805 と 04040233 のイベント、KGS018 と KMM011 の観測点のペアだけで 2 重スペクトル比法を用いると、負の減衰域（増幅域？）が余震域の中に存在するという結果になってしまう。特にデータ数が少ない場合には、注意しなければならないであろう。

5. 考察 このばらつきの生じる原因として、

(1) 微妙なパスの違い (2) 破壊方向の依存性 (3) 微妙な震源球解の違い

(2) サイト増幅特性 $G_j(f)$ の方位角依存性

が、考えられる。しかし、地震間の距離は震源距離に比べてかなり小さいので、どの観測点においても 2 つの地震の back azimuth はほとんど同じなので、(4) の可能性は薄いであろう。ここでは、(2)、(3) の可能性について考察する。

5. 1 (2) 破壊方向の依存性の可能性 この可能性を考察するためスペクトル比、 $O_{ij}(f)/O_{jk}(f)$ の方位角の依存性を吟味する。この結果を Fig.5 に示す（震源から見て北の観測点が 0 度、東が 90 度とする）。理論的には、1 つの地震は、

$$1 / (v_s/v_r \cdot \cos \theta) \quad (2)$$

の角度依存性をもつことが予想される（たとえば、Boore and Joyner (1978, 1989), Boatwrite and Boore (1982)、三宅 (2000) など）。ここで、 v_s , v_r はそれぞれ S 波速度と破壊速度、 θ は破壊方向と観測点の方向をはさむ角度である。結果は、Fig.4 でスペクトル比のバラツキが大きかった 2–4Hz で明瞭な方位依存性が見られた。この方位依存性は震源の破壊伝播方向による可能性を示唆している。0°（北）と 180°（南）にスペクトル比の最小と最大があるので、もし、破壊伝播方向だとすると、東西に伸びる群発震源域の中でも南北方向に破壊したイベントがあることを示している。なお、方位依存性は震源のペアにより、見えない場合もある。

5. 2 (3) 微妙な震源球解の違い この可能性を考察するため、 P 波部分と S 波部分それぞれに、Fig.5 と同様な方位角依存性を求めた。 P 波と S 波では、震源球解上においてエネルギーの輻射パターンが異なるため、もし、震源球解の違いが Fig.4 のバラツキの原因だとすると、 P 波と S 波では、まったく異なる方位角依存性が得られることが予想される。しかし、Fig.6 に示す様に、 P 波も S 波部分も方位角依存性はほとんど同じで、このことは、震源球解の違いがスペクトル比のバラツキの主要因ではないことを示唆している。

上記の考察から、スペクトル比のバラツキの原因として、破壊方向の違いが有力かもしれない。しかしながら、(2) 式から P 波と S 波では、方位角依存性のパターン（ θ の依存性）は同じようになるが、 v_s と v_r が異なるため、スペクトル比の振幅は異なることが予想される。Fig.6 をもう一度見てみると、 P 波と S 波で、振幅の相違は明瞭ではなく、ほとんど同じように見える。この点は、まだ、破壊方向の違いだけからでは説明できていない。

6. 結論 たとえ、震源・パス・サイトの増幅特性のコンボルーション表現を用いたとしても、数倍の振幅のばらつきがある場合がある。その原因としては、Rupture の Directivity の可能性が考えられるが、それだけでは説明できない点も残されている。

謝辞 K-NET および Freesia の資料を使わせていただいた。東電設計（株）の中村亮一氏には未発表の研究内容について紹介していただいた。また、作図には GMT を使用した。これらの方々に感謝します。

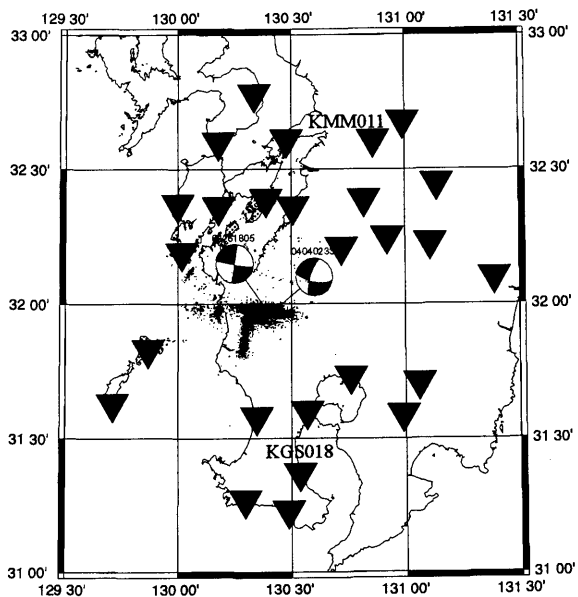
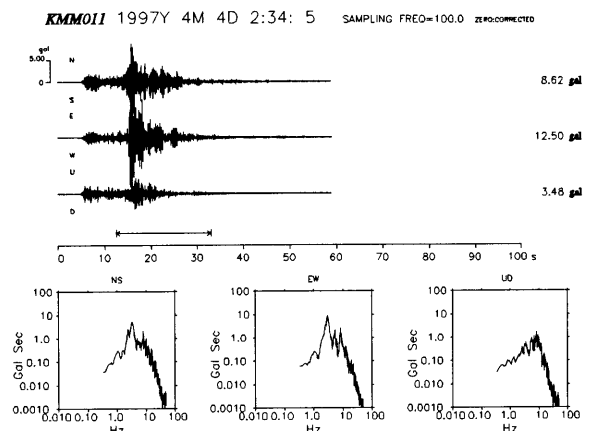
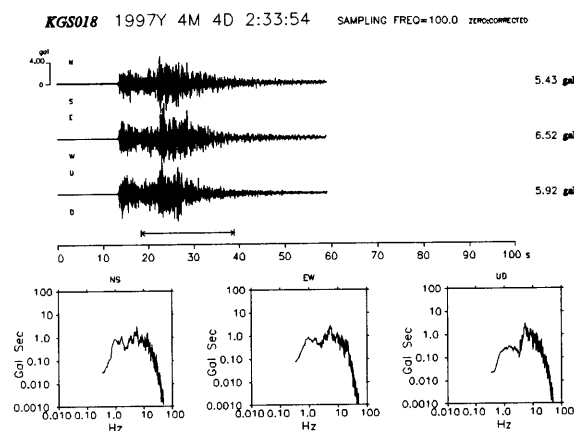
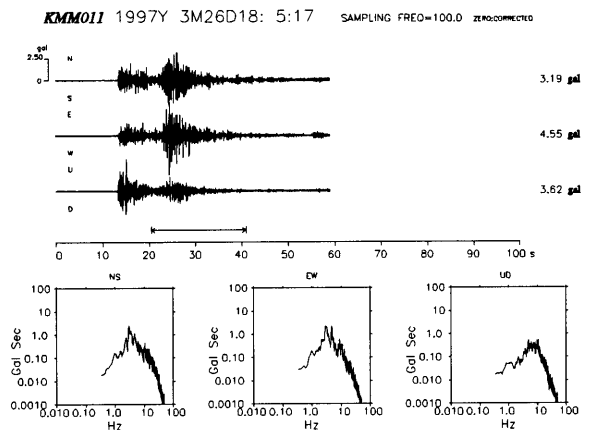
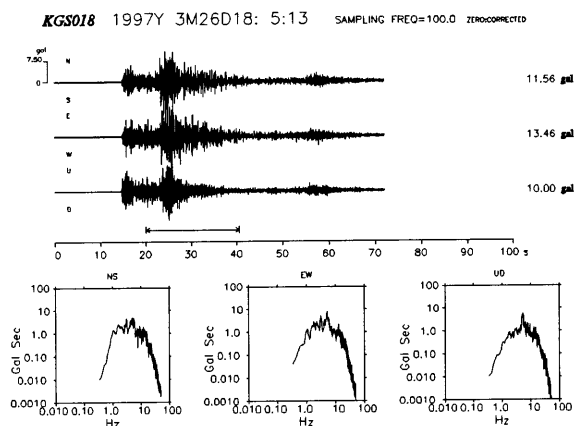


Fig.1
解析に用いた2つのイベント（3月26日18時05分と4月4日2時33分）メカニズム解（Freesiaによる）。小点はこの群発域で発生した震央位置（1997年3月から1999年12月まで、JMAによる）、逆三角はスペクトル比を求めるのに用いたK-NET観測点を示す。



Max. Amplitude; 3M26D18:05 > 4M04D02:33

Max. Amplitude; 3M26D18:05 < 4M04D02:33

Fig.2
KGS018で観測された2つのイベントの3成分波形とスペクトル。3月26日のイベントの方が4月4日のイベントより振幅が2倍程度大きい。

Fig.3
KMM011で観測された2つのイベントの3成分波形とスペクトル。4月4日のイベントの方が3月26日のイベントより振幅が2~3倍大きい。

Earthq1: 9703261805 40.0 =<r(km)<= 100.0
 Earthq2: 9704040233

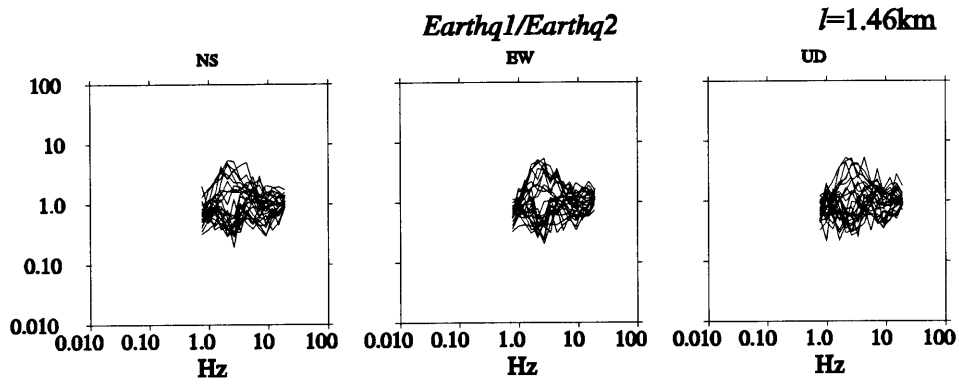


Fig.4 2つのイベントのスペクトル比。Fig.1で示したK-NET観測点で求められたものを重ね書きした。

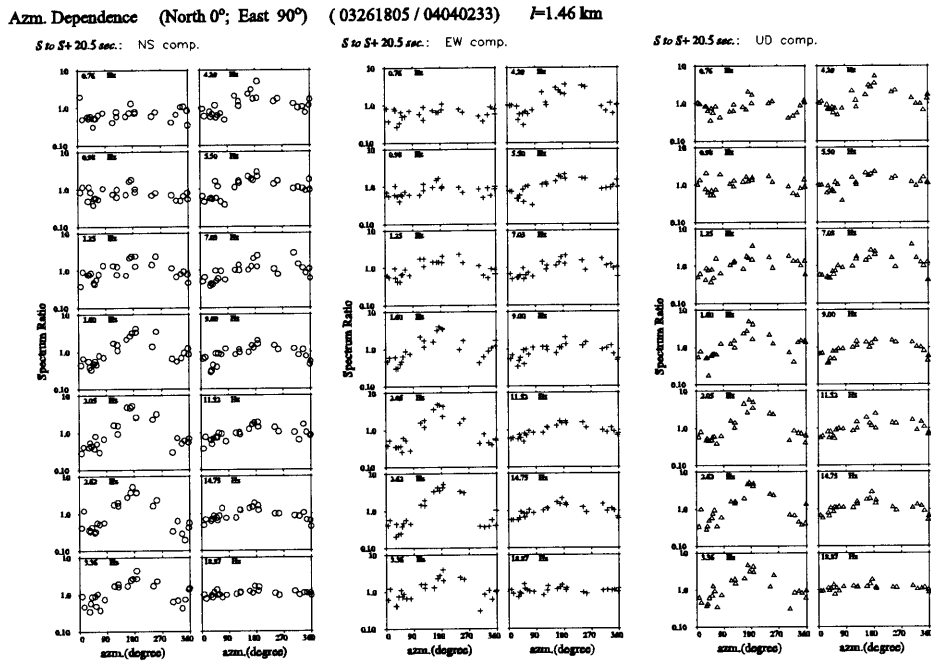


Fig.5 スペクトル比の方位角の依存性。方位角は震源から見た観測点の方位、北が0°で、東が90°。

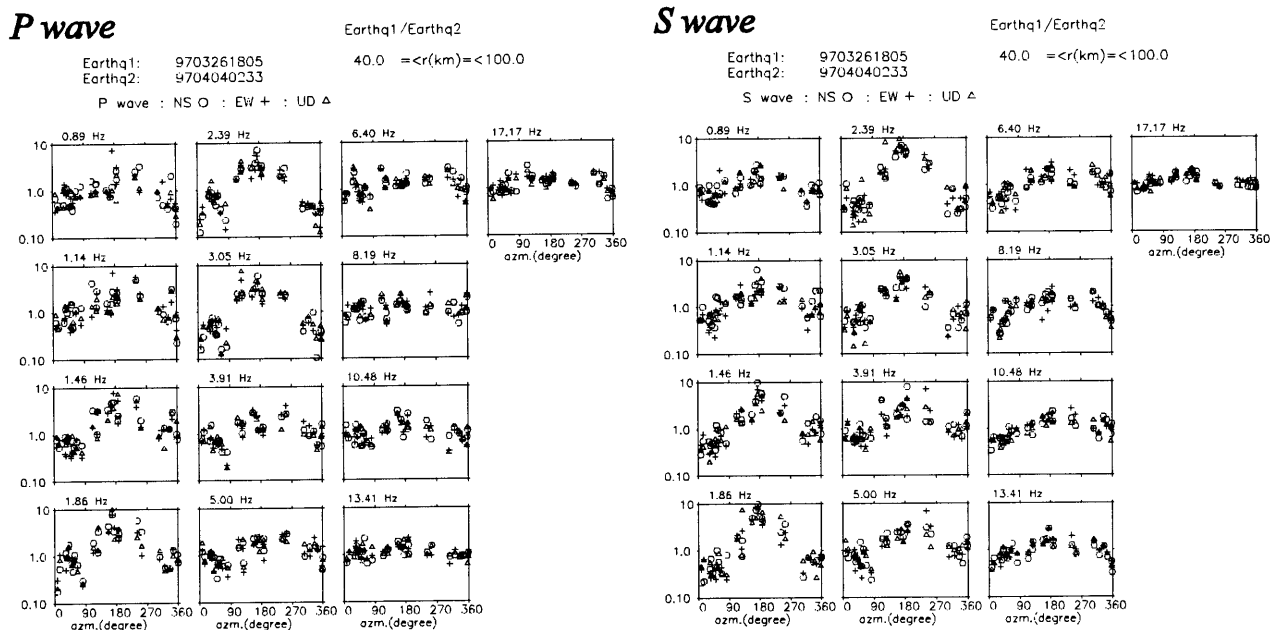


Fig.6 P波とS波の部分それぞれにスペクトル比を求め、方位角の依存性をプロットしたもの。P波とS波で方位角依存性にほとんど違いはない。