

Rupture Directivity の周波数依存性について 干場充之 (気象庁精密地震観測室)

Frequency Dependence of Rupture Directivity

Mitsuyuki HOSHIBA (Matsushiro Seismological Observatory, JMA)

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

1. はじめに 昨年度の研究会では、マグニチュードの大きさと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つのイベント (震源の間の距離を l は 1.5km) のスペクトル比を遠方 (40–100km) の多数の観測点で求めたところ、方位角依存性が見られることを報告した (Fig.1)。この原因として、破壊方向の依存性 (Rupture Directivity) が考えられる。しかし、Fig.1 で見られるようにコーナー周波数付近で顕著な方位角依存性が認められるものの、それよりも低周波や高周波では認められない。各々の地震波形のスペクトルが、 ω^2 モデルに則っていると仮定すると、Fig.2 のようなスペクトルになると予測される。そこで、今回は、Rupture Directivity により、このような周波数依存性を生じさせる原因について議論する。

2. 破壊方向の依存性 遠方近似での Rupture Directivity は、

$$\Omega(\mathbf{x}, t) = W \int_0^L u[\xi, t - \frac{r_0}{c} - (\int_0^\xi \frac{d\mu}{v(\mu)} - \frac{\xi \cos \theta}{c})] d\xi \quad (1)$$

で表される (例えば、Ben-Menahem, 1961)。ここで、 W と L は、断層の幅と長さで c と v は位相速度と破壊速度、 r_0 と θ は震源と観測点までの距離と破壊の進む方向と観測点の方向を結ぶ角度 ($\theta=0^\circ$ が Forward で、 180° が Backward)、 Ω と u は、波形とスリップ速度時間関数である。なお、簡単のため、 W は L に比べて充分小さく、つまり、2次元空間での線状の断層をイメージしている。(1) のフーリエ変換は、

$$\Omega(\mathbf{x}, \omega) = W \cdot \exp(i\omega r_0 / c) \int_0^L u(\xi, \omega) \cdot \exp[i\omega (\int_0^\xi \frac{d\mu}{v(\mu)} - \frac{\xi \cos \theta}{c})] d\xi \quad (2)$$

となる。ここで、 u と v が場所に依存しないとすると、スペクトルの大きさは、

$$\begin{aligned} |\Omega(\mathbf{x}, \omega)| &= W \cdot u_0(\omega) \cdot L \cdot \frac{\sin X}{X} \cdot |\exp(iX)| = W \cdot E_0(f, \theta) = W \cdot |u_0(\omega)| \cdot D_0(f, \theta) \\ E_0(f, \theta) &= |u_0(\omega)| \cdot \left| \int_0^L \exp[i\omega \xi (\frac{1}{v_0} - \frac{\cos \theta}{c})] d\xi \right| \\ D_0(f, \theta) &= \left| \int_0^L \exp[i\omega \xi (\frac{1}{v_0} - \frac{\cos \theta}{c})] d\xi \right| = L \cdot \frac{\sin X}{X} \cdot |\exp(iX)| \end{aligned} \quad (3)$$

となり、ここで、 $f = \omega / 2\pi$, $X = (\omega L / 2) [1/v_0 - (\cos \theta)/c]$ である。Fig.3 には、 $|\Omega(\mathbf{x}, \omega)|$ に方位角依存性をもたらす $D_0(f, \theta)$ の一例をしめす ($c=3.0\text{km/s}$, $v_0=2.4\text{km/s}$, $L=2\text{km}$ の場合)。なお、周波数依存性では、 $[0.9f, 1.1f]$ の範囲で平均を取ったものを、 f の値としてプロットしている。Fig.3 では、低周波数では方位角依存性が見られないものの、コーナー周波数を越えると顕著に見られるようになり、高周波数でも顕著である。これを、Fig.1, 2 に見られた観測結果と見比べると、低周波数からコーナー周波数までは再現できているものの、高周波数では方位角依存性が顕著でなくなるという観測結果は再現できていない。

3. 揺らぎの導入 そこで、 v や u が空間的に一様ではなく、揺らいでいる場合を考察し、高周波数では方位角依存性が顕著でなくなるという観測結果を説明できるかどうかを試みる。

3.1 v の揺らぎ 破壊速度に揺らぎがある場合は、 D_0 に代わり、

$$D_1(f, \theta) = \left| \int_0^L \exp[i\omega (\int_0^\xi \frac{d\mu}{v(\mu)} - \frac{\xi \cos \theta}{c})] d\xi \right| \quad (4)$$

で表され、その一例を Fig. 4 にしめす。ただし、破壊速度は、位相速度を越えないものとし ($v \leq c$)、負になることもないとする ($v > 0$)。この図は、揺らぎの RMS は 10% として、揺らぎの相関距離を変えたものである。 v に揺らぎを導入しても、高周波数で方位角依存性はなくなっておらず、むしろ増大されている。揺らぎの大きさを大きくしてもこの傾向は変わらなかった。この結果は、Boor and Joyner(1978)の理論的考察である「揺らぎを導入すると Directivity の効果が強調される」と一致するものの、破壊速度の揺らぎだけでは、高周波数では方位角依存性が顕著でなくなるという観測結果を説明できないことを示している。

3. 2 u の揺らぎ 最終すべり量、 $A(\xi)$ 、が空間的に非一様であることは、大地震の場合にはしばしば見られ、中小地震でも非一様であることが想像される。この最終すべり量の揺らぎは、スリップ速度時間関数、 u 、の揺らぎに起因するが、ここでは、その u の揺らぎによる Directivity の周波数依存性について議論する。

$$\int_0^{\infty} u(\xi, t) dt = A(\xi) \quad (5)$$

(3) の E_0 に代わり、

$$E_1(f, \theta) = \left| \int_0^L u(\xi, f) \cdot \exp[i\omega(\xi(\frac{1}{v_0} - \frac{\cos \theta}{c}))] d\xi \right| \quad (6)$$

で表される。さらに、 u の揺らぎとして、①スリップの継続時間は空間的に一様であるが、スリップ速度が空間的に変化するもの、②最大スリップ速度は空間的に一様だが、継続時間が空間的に変化するもの、の 2 通りについて考察する。

①の場合には、 $u(\xi, t) = A(\xi)R(t)$ と分解して、

$$E_1(f, \theta) = R_0(f) \cdot \left| \int_0^L A(\xi) \cdot \exp[i\omega(\xi(\frac{1}{v_0} - \frac{\cos \theta}{c}))] d\xi \right| = |R_0(f)| \cdot F_1(f, \theta) \quad (7)$$

$$\text{where } F_1(f, \theta) = \left| \int_0^L A(\xi) \cdot \exp[i\omega(\xi(\frac{1}{v_0} - \frac{\cos \theta}{c}))] d\xi \right|$$

と表せ、Fig. 4 にはこのうちの方位角依存性を与える F_1 の一例を示す。この例では、揺らぎの相関距離が一定で、揺らぎの RMS として 4 通りを示したものであるが、依然として高周波で方位角依存性が見られる。他の相関距離でも同様であった。

②の場合の一例として、

$$\begin{aligned} u(\xi, t) &= u_0 \cdot t / (\tau/6) & (0 \leq t \leq \tau/6) \\ &= \frac{6}{5} u_0 \cdot (1 - t / \tau) & (\tau/6 \leq t \leq \tau) \\ &= 0 & (t < 0, t > \tau) \end{aligned}$$

を考察し (u_0 が最大スリップ速度、 τ が継続時間： τ が空間的に変化する)、 u_0 として 1m/s を仮定した $E_1(f, \theta)$ の例を Fig. 5 に示す。この例では、コーナー周波数付近でのみ方位角依存性が見られ、低周波数、高周波数では顕著ではない。これは、Fig. 1, 2 で見られた観測結果の特徴を再現している。

4. 結論 スペクトル比の方位角依存性から、Rupture Directivity の影響はコーナー周波数付近で見られ、低周波数、高周波数では顕著でない、と思われる。「高周波で見られない」という現象は、一様な破壊速度、スリップ速度時間関数では説明できず、破壊速度に揺らぎを入れても再現することは難しい。スリップに揺らぎ、とくに継続時間に揺らぎを入れることで再現することが可能である。

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。

文献

Ben-Menahem A., 1961, Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources, Bull. Seis. Soc. Am., 51: 401-435.

Boor, D.M. and Joyner, W.B., 1978, The influence of rupture incoherence on seismic directivity, Bull. Seis. Soc. Am., 68: 283-330.

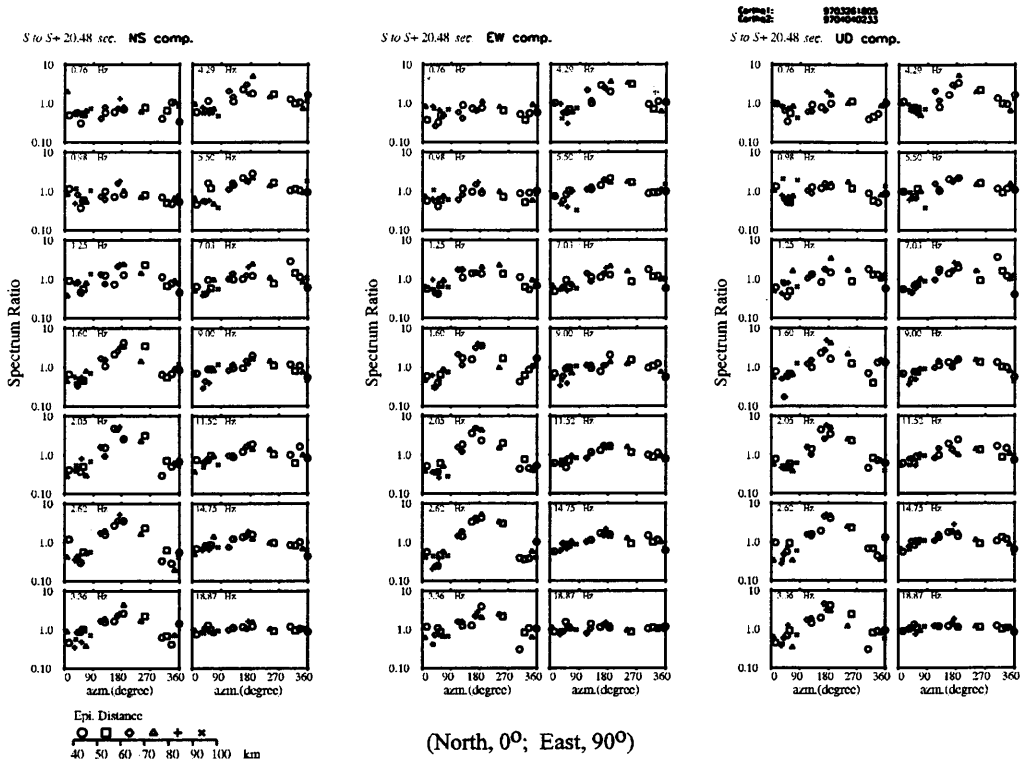


Fig.1a. Azimuthal dependence of the spectrum ratio observed from the pair of the events shown in Fig.1b. Azimuth of the site located in just north is defined as 0° and that of just north is 90°. Epicentral distances are represented by the different symbols.

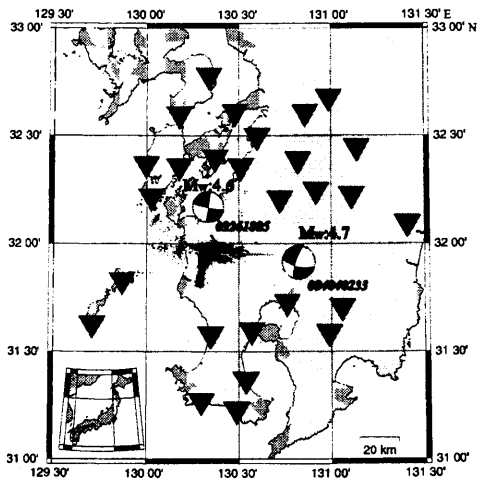


Fig.1b. Events and K-NET stations used for Fig.1a. Radiation pattern and moment magnitude were determined by Freesia.

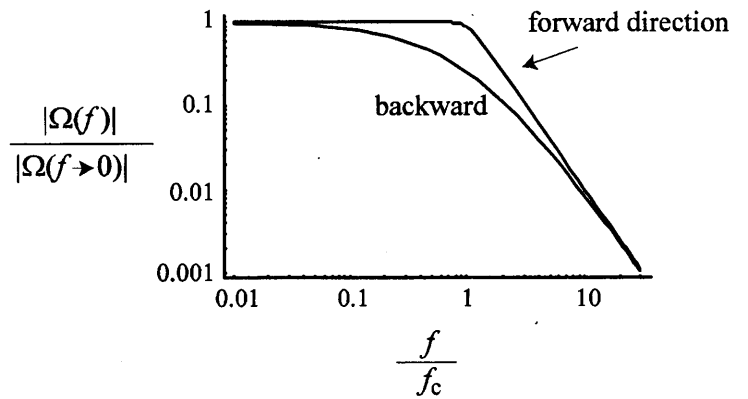


Fig.2. The spectra shapes expected from the observed spectrum ratios of Fig.1a. At around corner frequency azimuthal dependence is large.

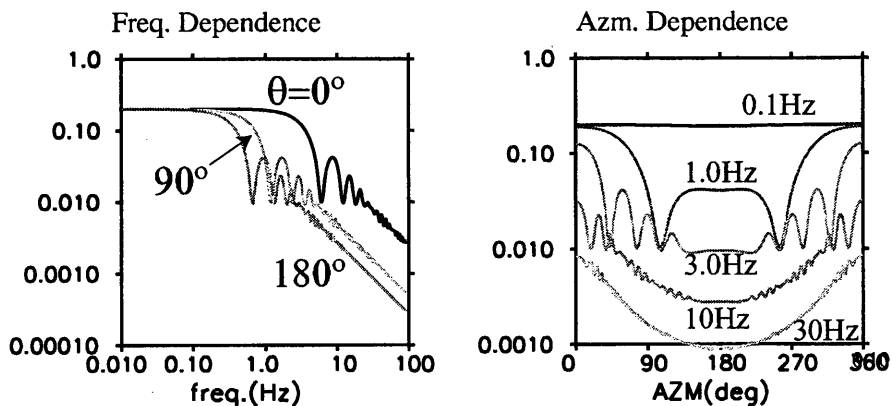


Fig.3. Example of frequency and azimuthal dependence for smooth rupture. ($c=3.0\text{km/s}$, $v=2.4\text{km/s}$, $L=2.0\text{km}$)

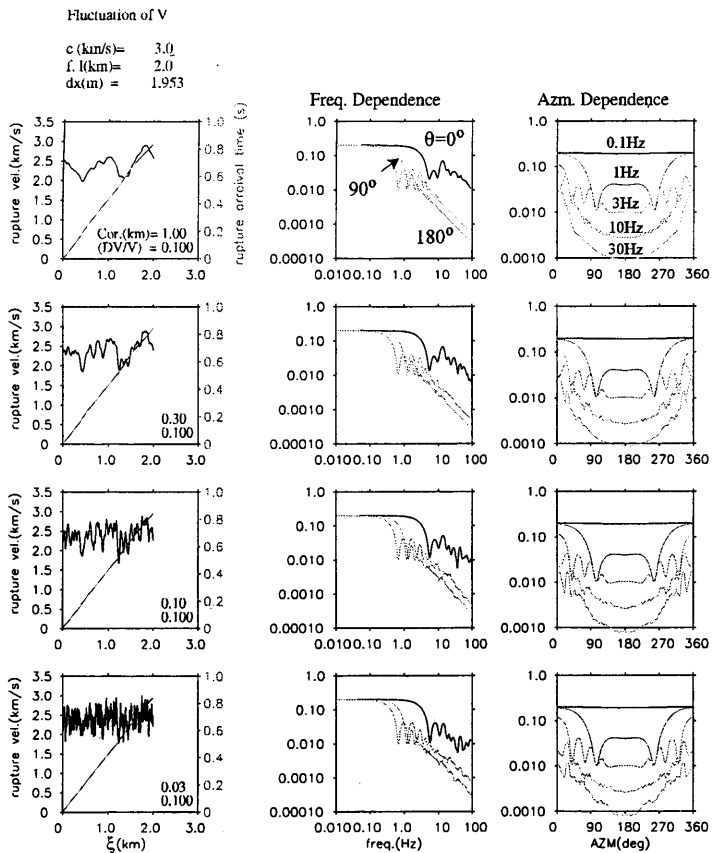


Fig.4. Four examples for frequency and directional dependence, D_1 , for the case that the rupture velocity has fluctuation. Left figures show fluctuation of rupture velocity and rupture arrival time.

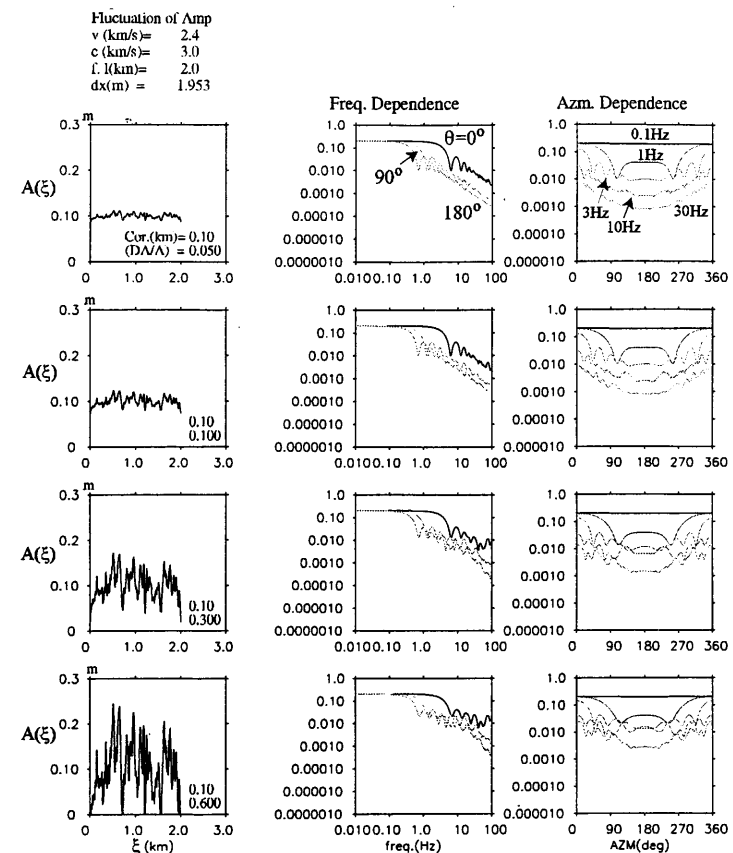


Fig.5. Exmples of frequency and directional dependence, F_1 , when introducing inhomogeneous final slip amplitude. Left figures show the distribution of the final slip.

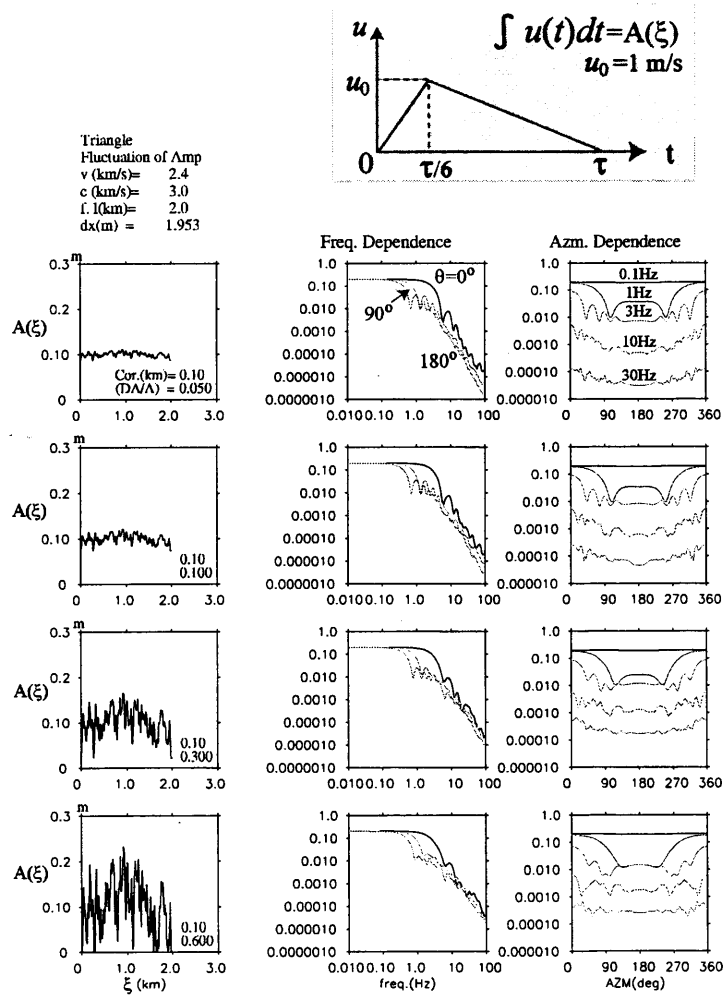


Fig.6. Exmples of frequency and directional dependence, E_1 , when introducing inhomogeneous slip velocity time function. Here it is assumed that the slip velocity time function is triangle, maximum slip velocity, u_0 , is 1m/s, and slip duration, τ , has fluctuation.