A Brief Review of Techniques Used to Estimate Radiated Seismic Energy

Anupama Venkataraman
Gregory C. Beroza

担当:理学系研究科地球惑星科学専攻　太田

Different Techniques to estimate radiated energy

①Radiated energy を求める手法—wave typeによって分類

1.Body waves long-distances

2.Mixed waves near-distances

3.Coda waves insensitive to source effects

4.Method Based on Empirical Green Function all distances

5.Finite Fault Model determine lower bound

②other macroscopic parameter

Static stress drop
Rupture velocity

$$\eta_R = \frac{E_R}{E_R + E_G} = \frac{2\mu \tilde{e}}{\Delta \tau}$$

with various earthquake size

Introduction

地震のサイズ・・・ Seismic moment

Amplitude of seismic wave

static

⬇ 広帯域の地震観測網の発達(Hi-net,SAFOD)

Seismic energy(放射エネルギー)

dynamic

Seismic efficiency・・・地震の全エネルギーに対する放射エネルギーの割合

⇨ **断層の種類、地質、テクトニックな環境、地震の大きさと断層運動との関わり**

前半・・・Seismic Energyを推定する様々な手法の紹介と比較

後半・・・その他のmacroscopicパラメータ

Basic Formulation

・Radiated Energy・・・減衰のない無限媒体中を伝わる地震波によって
far-fieldに伝えられるenergy[Haskell, 1964]

$$E_R = \int_{-\infty}^{\infty}\int_S \rho[\alpha \dot{u}_\alpha^{\,2}(t,\theta,\varphi) + \beta \dot{u}_\beta^{\,2}(t,\theta,\varphi)]dSdt$$

Point sourceの仮定をすると

$$\dot{u}_\alpha(t,\theta,\varphi) = \frac{R_\alpha(\theta,\varphi)}{4\pi\rho\alpha^3 r}\ddot{M}_0(t) \qquad \dot{u}_\beta(t,\theta,\varphi) = \frac{R_\beta(\theta,\varphi)}{4\pi\rho\beta^3 r}\ddot{M}_0(t)$$

$$\Rightarrow \quad E_R = \frac{1}{5\pi\rho}\left(\frac{1}{3\alpha^5} + \frac{1}{2\beta^5}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\ddot{M}_0^{\,2}(t)dt$$

$$= \frac{1}{10\pi\rho\beta^5}\left(1 + \frac{1}{q}\right)\int_{-\infty}^{\infty}\ddot{M}_0^{\,2}(t)dt$$

$$q \equiv \frac{3}{2}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^5 \cong 23.4$$ (ideal)

~ 15.6 with Mw≦5[Boatwright and Fletcher, 1984]

$\sim 20-30$ with larger[Venkataraman, 2004a]

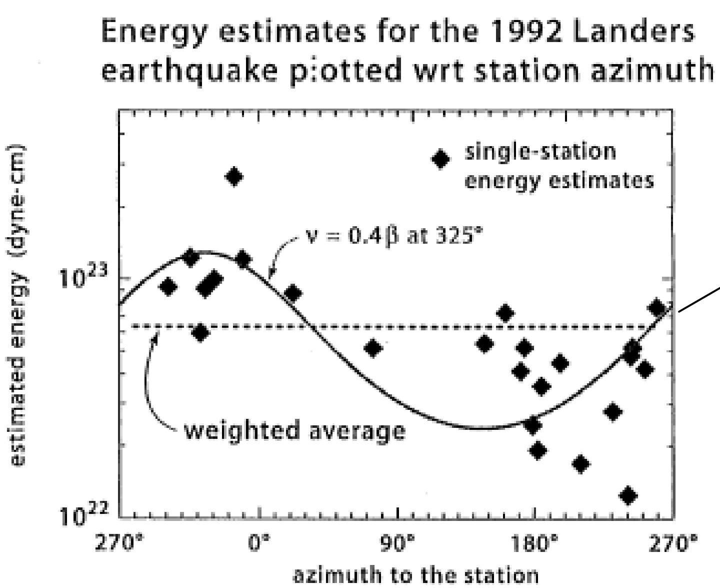
・現実の地震波形は・・・

site effects (amplification)
path effects (attenuation, geometric spreading)
source effects (radiation pattern, directivity)

これらの補正を目指す

・特に(1)〜(4)式はdirectivityを無視。

・Example.1) Correction for directivity



$$\left[1-\frac{v_R}{\beta}\cos(\varphi-\varphi_R)\right]^{-2}$$

Different Techniques used to Estimated Radiated Energy

3.1 Body Waves(1)

$$|\hat{\dot{M}}_0(f)| = \frac{4\pi\rho^3 v^3 R_E e^{(\pi f t^*)} |\hat{u}(f)|}{g(\Delta) R(\theta,\varphi) C |\hat{I}(f)|}$$

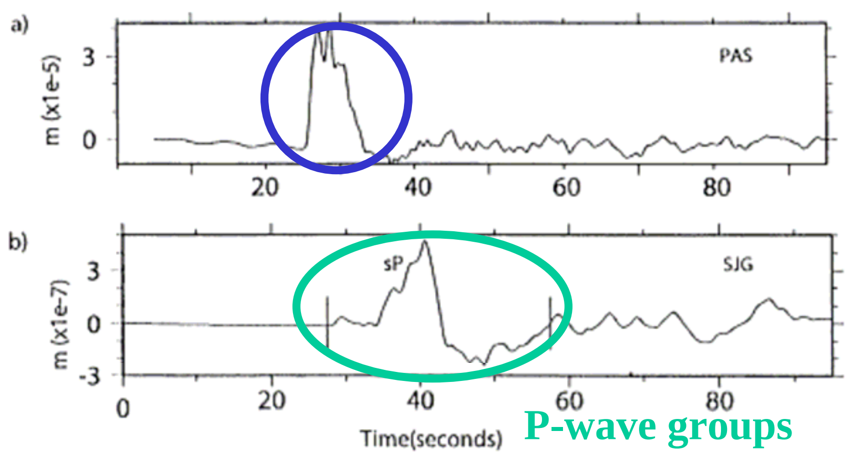
$$E_R = \left(\frac{8\pi}{15\rho\alpha^5} + \frac{8\pi}{10\rho\beta^5} \right) \int_0^\infty f^2 |\hat{\dot{M}}_0(f)|^2 \, df$$

・**伝えられるエネルギー**：~~S-waves～95%,~~　P-waves～5%

遠地(Δ>30°)で減衰大

・Teleseismic data of Large Earthquakes

Clear P-wave pulse



P-wave groups

Deep earthquake

Shallow earthquake

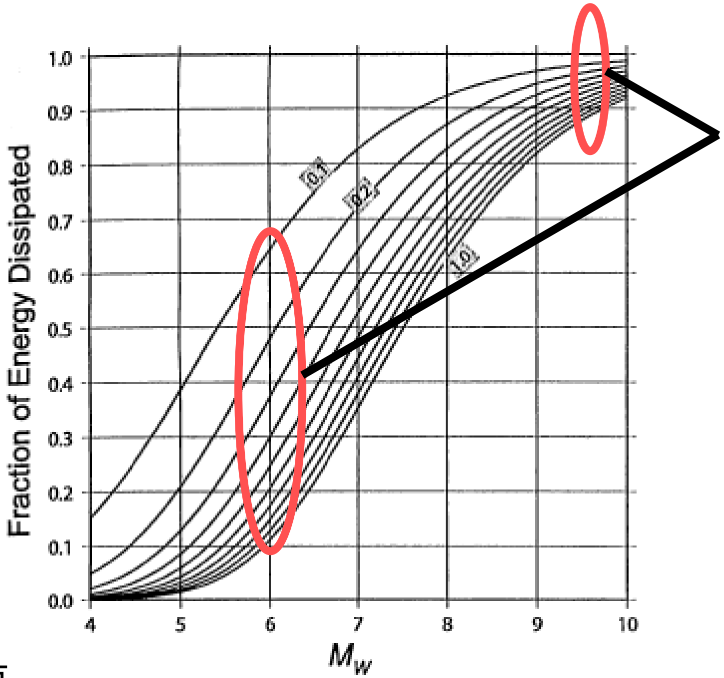
3.1 Body Waves(2)

･Attenuation correction

Global model of Attenuation structure

↑

低周波数でより正確なため、
大きい地震ではより正確



Mwが小さい方が減衰因子t^*により敏感(不安定)

･Directivity correction

-directivityの大きな地震には補正必要

-ruptureが柔らかい媒質に向かっている場合、Far fieldではこの寄与を無視できる。

･Small earthquakes

-Boreholeでのデータが使用可能

-観測点数が限定

3.2 Mixed Waves

・Using S-wave train

- $\Delta < 500$km
- Empirical correction for attenuation and site effect

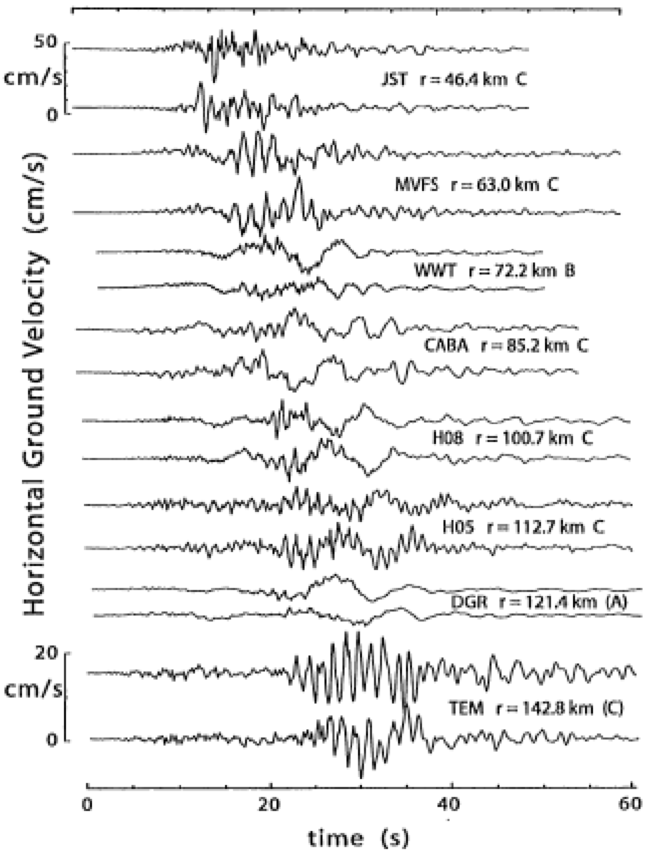
・Conversion of body-waves to Lg and surface waves

-body-wavesはあるhingeでLg波及び表面波に変換される

$$g(r) = \begin{cases} r^{-1} & r \le r_0 \\ r_0^{-1}(r/r_0)^{-\gamma} & r > r_0 \end{cases}$$

・Difference between Lg and surface waves

$$\gamma(f) = \begin{cases} 0.5 \\ 0.5 + 2\log(5f) \\ 0.7 \end{cases}$$



3.3 Coda Waves

-S波に続く散乱波

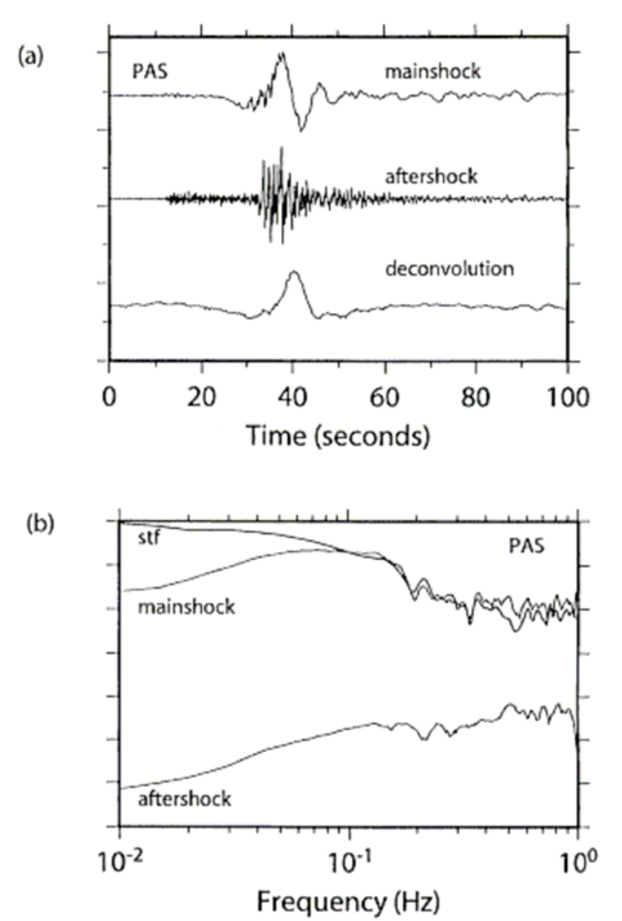
-radiation pattern, inhomogeneous path effect, directivityの影響を受けない
-Emiprical path and site corrections

3.4 Methods based on Empirical Green functions(eGf)

-all distance

-large earthquake に対して small earthquake(同震源・メカニズム)の地震波形を経験的なグリーン関数として扱う。

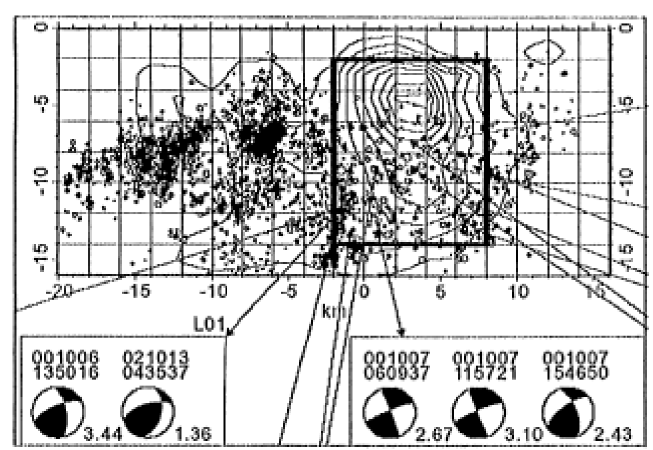
-少なくともマグニチュード1以上の差の地震のペアが必要。



3.5 Finite Fault Models

-有限のsource model から無限媒体に放射される放射エネルギーをforward計算

-lower boundが求まる(高周波エネルギーの欠落)



Other Macroscopic Measurement

・macroscopic parameter required for complete picture of rupture dynamics

$$\boxed{\begin{array}{l}\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 \\ D_c\end{array}}$$

・Radiation efficiency $\eta_R = \dfrac{E_R}{E_R + E_G} = \dfrac{2\mu\tilde{e}}{\Delta\tau} \geq \dfrac{E_R}{E_R + E_G + E_F} = \eta$

-異なる地震間でのエネルギー配分を理解する上で重要

・Static Stress drop $\Delta\tau$ $\left\{\begin{array}{ll}\text{well determined} & \text{large} \\ \text{Large uncertainty} & \text{small}\end{array}\right.$

$\Rightarrow$ Few direct estimate of radiation efficiency of small earthquakes

～0.1-2.0MPa(similar to large)	Imanishi et al.[2004]
change with size	Venkataraman et al.[2006]
～1MPa	Prieto et al.[2002]

Conclusions

・radiation energy の測定は高感度の広帯域観測網の発達と共に改善

・地震サイズにおけるエネルギーとモーメントの比のばらつきから更にsmall earthquakeの観測が必要

・様々なサイズにおけるエネルギーの多様性を説明するためには、static stress とrupture velocityをよく決定することが必要。