

地殻のランダム不均質性による地震波の振幅の揺らぎ

吉本和生¹・武村俊介²・小林学¹ (¹横浜市立大学, ²東京大学地震研究所)

1. はじめに

高周波数帯 (約 1 Hz 以上) では観測される地震波の振幅に大きな揺らぎ (ばらつき) がみられる. この要因には, 震源の輻射特性とともに地殻構造に含まれる短波長のランダム不均質性の影響が指摘されている (例えば, Hoshiba 2000). 本研究では, この現象の物理的な理解と定量的な評価を目的として, 観測・数値・理論的な解析を同時に実施した.

2. データ・解析方法

観測データ

中国地方の地殻内で発生した小・中規模の横ずれ型の地震について, 高感度地震観測網Hi-netで得られた速度波形記録を用いてP波最大振幅 (以下では単にP波振幅と呼ぶ) のばらつきの震源距離に対する変化を調べた. 解析周波数帯は1-2 Hzおよび2-4 Hzとした.

地震動シミュレーション

Kobayashi et al. (2015) に基づいて差分法による地震動シミュレーションを行った. 計算領域の中心に爆破型の点震源を仮定し, 震源パルスにはRicker waveletおよびsin waveletを使用した. 背景の地震波速度構造にはacoustic型およびelastic型の無限均質媒質を仮定し, 中国地方の上部地殻における地震波伝播を模擬するために指数関数型の不均質性 (相関距離 $a = 1$ km, 揺らぎの強さ $\varepsilon = 0.03$) を重畳させた.

数理モデル

ランダム不均質なacoustic媒質を想定し, Ishimaru (1997)に従い, 点震源からtime-harmonicかつ等方的に輻射された波 (球面波) の振幅のばらつきの震源距離変化を解析的に評価した. 波形解析では, 振幅 u のばらつき σ^2 として $2(\ln\langle u \rangle - \langle \ln u \rangle)$ を指標とした. 媒質の不均質性には, von Kármán型 (指数関数型を含む) の速度揺らぎを仮定し, そのパワースペクトル密度関数を次式によって表した.

$$\Phi(\nu) = \alpha \varepsilon^2 (\nu^2 + a^{-2})^{-\beta} \quad \text{where} \quad \alpha = \pi^{-\frac{3}{2}} a^{-2(\beta-\frac{3}{2})} \Gamma(\beta) \Gamma(\beta - \frac{3}{2})^{-1} \quad (1)$$

ここで ν は波数, β は定数, Γ はガンマ関数である. 数理モデルに基づいたvon Kármán型の不均質媒質中での振幅のばらつきの評価には次式の値を求めればよい.

$$\sigma_{\text{vK}}^2 = \alpha \pi^2 k^2 \varepsilon^2 a^{2(\beta-1)} \int_0^L d\eta \left[\frac{1}{\beta-1} - \text{Re} \Psi \left(1, 2-\beta, i \frac{\gamma(L-\eta)}{ka^2} \right) \right] \quad (2)$$

ここで L は震源距離, k は波数, $\gamma \equiv \eta/L$, Ψ は第二種合流型超幾何関数である. 指数関数型の不均質媒質中での振幅のばらつきの評価には, 式(2)に $\beta = 2$ を代入して得られる次式を使用すればよい.

$$\sigma_{\text{Exp}}^2 = k^2 \varepsilon^2 a \left[L - \int_0^L d\eta \text{Re} \Psi \left(1, 0, i \frac{\gamma(L-\eta)}{ka^2} \right) \right] \quad (3)$$

なお平面波の振幅のばらつきについては、上記の式で $\gamma=1$ とすれば評価が可能である。

3. 結果・まとめ

観測データの解析では、P波振幅のばらつきの震源距離変化が明瞭に検出された。ばらつきの大きさとその距離変化率は高周波数ほど大きいことが明らかになった。2-4 Hzの周波数帯では、P波振幅のばらつきは震源距離約30 kmまで単調に増大するが、それ以上の震源距離では頭打ち（最小値と最大値の差は約10倍）になることが明らかになった。地震動シミュレーションについてもほぼ同様の結果（下図）が得られた。図に示した結果はacoustic不均質媒質中のsin waveletについてのものであるが、elastic不均質媒質中のRicker waveletの結果についてもほぼ同様である。図cは、地震動シミュレーションと数理モデルから得られた振幅のばらつき σ_{Exp}^2 の比較である。両者は概ね一致することが確認できる。この結果は、数理モデルの有効性を示すものと考えられる。今後の課題としては、数理モデルのS波解析への適用の検討などがあげられる。

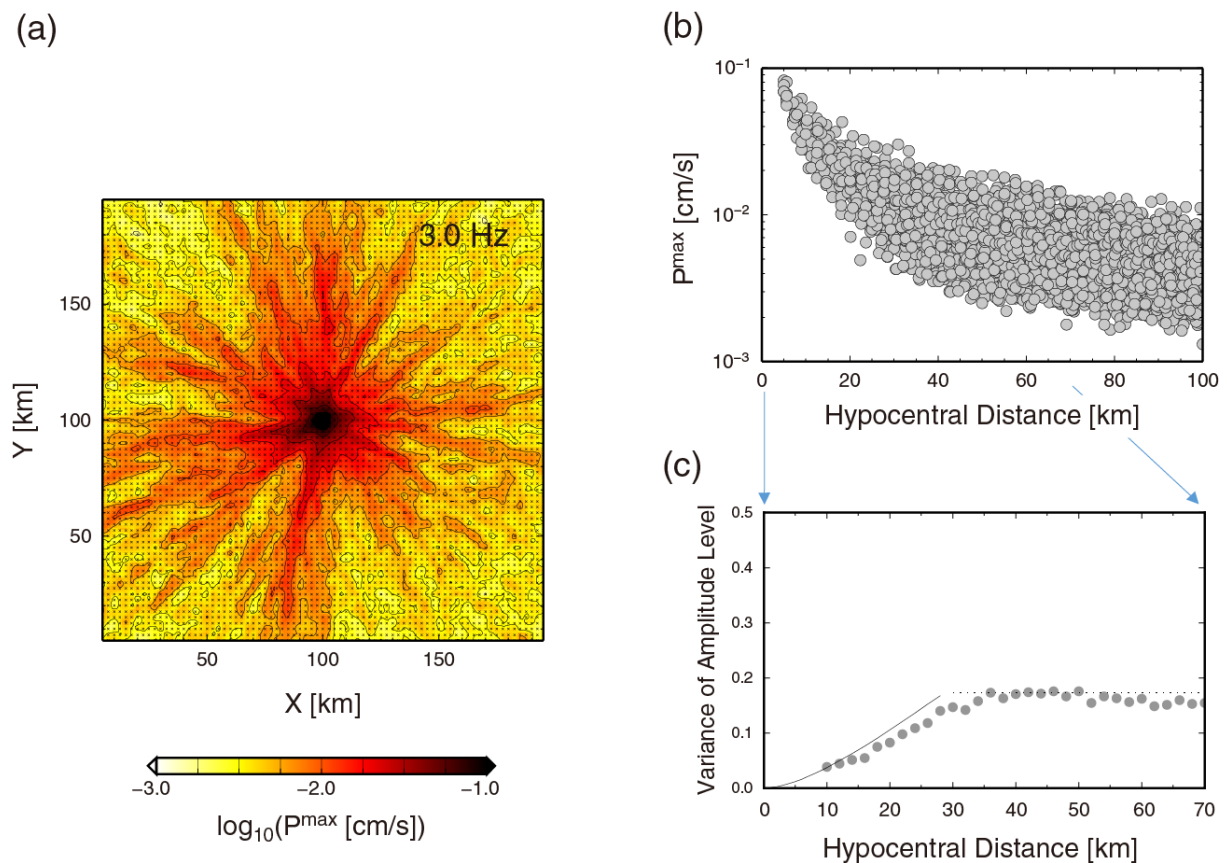


図. (a) 地震動シミュレーションによる 3.0 Hz の sin 波（継続時間 9 s）の P 波振幅の空間変化。 (b) P 波振幅の揺らぎの震源距離変化。 (c) 振幅のばらつき σ_{Exp}^2 の地震動シミュレーションの結果（灰色丸印）と数理モデルの予測（実線）の比較。破線は強い揺らぎの予測。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net, 広帯域地震観測網F-netの波形記録, F-netのCMT解及び気象庁の一元化震源情報を使用しました。地震動シミュレーションには東京大学地震研究所の計算機システムを利用しました。記して感謝いたします。