

18. 緊急地震速報の高度化の試み

倉橋 奨・入倉孝次郎

1. はじめに

巨大地震時における緊急地震速報は、予想震度が実際の観測震度よりも過小評価となる地点が出ることもある。この原因は、緊急地震速報は基本的には、点震源として震度が計算されるためである。実際に、2011年東北地方太平洋沖地震では、震源（破壊開始点）に近い宮城県や福島県では、観測震度と予測震度が概ね一致したものの、震源から離れた関東地方では、震度階で1~2程度予測震度が過小評価となった。この緊急地震速報による“巨大地震時での予測震度の過小評価の問題”の解決方法の一つとして、マグニチュードを決めずに、対象地点よりも震源に近い地点の観測記録から対象地点の地震動を予測する方法が挙げられる。Hoshiba (2013a) では、キルヒホッフ積分により、震源に近い観測点のS波震動から、対象地点のS波震動を予測する方法が提案されている。しかしながら、緊急地震速報のように早く情報を提供するためには、P波震動から予測される地震動（S波震動）を予測するほうが時間の利得が大きい。そこで、本研究では、波線理論を基に、震源に近い観測点におけるP波震動から、より遠くの地域のS波震動を予測する手法とその事例について報告する。

2. 予測手法の構築

2.1 P波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

本研究で考える、震源特性、伝播経路特性、地盤特性および、すでに観測された地点、予測される地点との幾何学的な関係を図1に示す。ここで、 $S(x_0, t)$ は x_0 点における震源の震源特性、 $P(r, t)$ は震源距離 r となる伝播経路特性、 $G(x, t)$ は x 点におけるサイト特性を示す。また、 $u_s(x_1, t)$ および $u_s(x_2, t)$ は x_1 点、 x_2 点における地震動を示す。

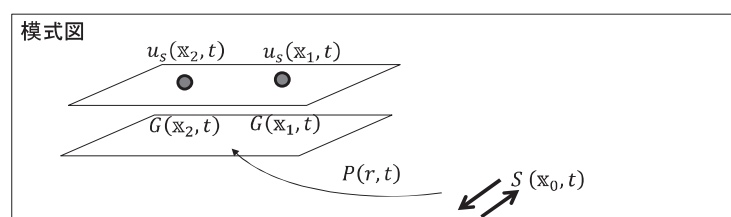


図1 本研究で考える震源特性、伝播経路特性、地盤特性および対象地点幾何学的な関係の模式図

ここで、すでに記録された地点 (x_1) の地表での上下動と水平動の震度および予測される地点 (x_2) の地表での上下動と水平動の震動は、それぞれ式1、式2のように記述される。なお、それぞれの記号の上付き文字の V と H は、それぞれ上下動成分と水平動成分を示す。

また、観測点間の距離が小さければ、 x_1 におけるP波震動から、 x_2 におけるS波震動への伝達関数は、式3のように表される。

●予測に利用する地点の上下動と水平動の震動

$$\begin{aligned}
 u_s^V(x_1, t) &= S^V(x_0, t) * P^V(r_1, t) * G^V(x_1, t) \\
 u_s^H(x_1, t) &= S^H(x_0, t) * P^H(r_1, t) * G^H(x_1, t) \\
 r_1 &\sim |x_1 - x_0|
 \end{aligned}
 \tag{式1}$$

●予測される地点の地中の上下動と水平動の震動

$$\begin{aligned}
 u_s^V(x_2, t) &= S^V(x_0, t) * P^V(r_2, t) * G^V(x_2, t) \\
 u_s^H(x_2, t) &= S^H(x_0, t) * P^H(r_2, t) * G^H(x_2, t) \\
 r_2 &\sim |x_2 - x_0|
 \end{aligned}
 \tag{式2}$$

$$\begin{aligned}
 T^{VtoH}(x_1, x_2, f) &= \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_1, f)} \\
 &\quad \parallel \quad \parallel \quad \parallel \\
 &\quad T^{source} \quad T^{path} \quad T^{ground}
 \end{aligned}
 \tag{式3}$$

(1) 震源特性の表現

式4に、P波とS波の波線理論による震源特性に関する量の比を示す。この比は、地震発生場所および地表の密度と速度、放射特性で表現される。ただし、P波震源では、速度がP波速度、S波震源はS波速度となる。なお、密度と速度の比は、近似的にP波とS波の比の3乗、P波とS波の放射特性の比は、高周波近似と仮定と1と仮定でき、簡単に表現できる。

$$\begin{aligned}
 \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} &= \frac{\rho_S^{1/2} \cdot \alpha_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \alpha_G^{1/2}}{\rho_S^{1/2} \cdot \beta_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \beta_G^{1/2}} \cdot \frac{R_{\theta\phi}^S}{R_{\theta\phi}^P} \\
 &\sim \frac{\alpha_S^3}{\beta_S^3} \sim 1
 \end{aligned}
 \tag{式4}$$

(2) 伝播経路特性の表現

P波とS波の伝播経路特性に関する量の比は、式5のように表すことができる。

$$\frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp\left[\left(\frac{-\pi r_2}{\beta Q_\beta} - \frac{-\pi r_1}{\alpha Q_\alpha}\right) \cdot f\right]
 \tag{式5}$$

(3) 地盤特性の表現

地震波の上下動と水平動に関する地盤特性の量の比は、式6のように示すことができる。ここで、右辺の右側の項は x_2 点と x_1 点の上下動震動の比として表現でき、左側の項は x_2 点での地震動のH/Vで表現できる。

$$\frac{G_S^H(x_2, f)}{G_S^V(x_1, f)} = \frac{G_S^V(x_2, f)}{G_S^V(x_1, f)} \cdot \frac{G_S^H(x_2, f)}{G_S^V(x_2, f)}
 \tag{式6}$$

2.2 P波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

上記の震源特性、伝播経路特性、地盤特性の表現を利用して、P波震動による x_1 の上下動地震動からS波震源による水平動地震動への伝達関数は、式7の式で表される。

$$\begin{aligned}
 T^{VtoH}(x_1, x_2, f) &= \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_1, f)} \\
 &= 1 \cdot \frac{\alpha^3 r_1}{\beta^3 r_2} \cdot \exp\left[\left(-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\alpha Q_\alpha}\right) f\right] \cdot \frac{G^V(x_2, f)}{G^V(x_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_2, f)}
 \end{aligned}
 \tag{式7}$$

式7の伝達関数は、 r_1 と r_2 が近い時、減衰特性に関する項はほぼ1.0で近似できるので、 x_1 と x_2 での上下動の増幅特性の比および x_2 での地震動のH/Vを前もって調べておくことで、容易に評価可能となる。

2.3 S波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

S波震源による x_1 点の上下動地震動からS波震源による x_2 点の水平動地震動への伝達関数は、式8で評価できる。P波震源とS波震源の比の違いであったP波速度とS波速度の比は、S波速度とS波速度の比となるため、1となる。

$$\begin{aligned} T^{VtoH}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, f) &= \frac{S^H(\mathbf{x}_0, f)}{S^V(\mathbf{x}_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)} \\ &= 1 \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp\left[\left(-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\beta Q_\beta}\right)f\right] \cdot \frac{G^V(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_2, f)} \quad \text{式8} \end{aligned}$$

3. 伝達関数のためのフィルターの作成

3.1 フィルターの作成

2.1の(3)で記述したように、地盤特性は“ x_2 点と x_1 点の上下動震動の比”と“ x_2 点での地震動のH/V”の掛け算で表現される。これらは、過去の小地震などの観測記録により計算が可能である。しかしながら、緊急地震速報に利用するためには、すでに観測された記録にリアルタイムで逐次的に計算する必要がある。そこで、ここでは、これらの周波数特性を再現したIIRフィルターを作成する。本研究では、Hoshiba (2013b)の方法を踏襲する。

(1) “ x_2 点と x_1 点の上下動震動の比”と“ x_2 点での地震動のH/V”のフィルターのモデル化

はじめに“ x_2 点と x_1 点の上下動震動の比”と“ x_2 点での地震動のH/V”を周波数領域であらかじめ計算をしておく。これらの周波数に合うように、1次と2次の線形フィルターでモデル化する。モデル化された式を式9に示す。この式からわかるように、これらのフィルターは角周波数と減衰項の関数であるため、“ x_2 点と x_1 点の上下動震動の比”と“ x_2 点での地震動のH/V”に合うようにこのパラメータを決める。本研究では、焼きなまし法により最適な角周波数と減衰項の値を決めた。

$$F(s) = G_0 \prod_{n=1}^N \left(\frac{\omega_{2n}}{\omega_{1n}} \right) \cdot \frac{s + \omega_{1n}}{s + \omega_{2n}} \cdot \prod_{m=1}^M \left(\frac{\omega_{2m}}{\omega_{1m}} \right)^2 \cdot \frac{s^2 + 2h_{1m}\omega_{1m}s + \omega_{1m}^2}{s^2 + 2h_{2m}\omega_{2m}s + \omega_{2m}^2} \quad \text{式9}$$

N, M : 1次、2次フィルターの数

$\omega_{1n}, \omega_{2n}, \omega_{1m}, \omega_{2m}$: 角周波数

h_{1m}, h_{2m} : damping factor

$S = i(2\pi f)$

(2) デジタルフィルターの構成

決定した角周波数と減衰項により構築された周波数領域のフィルターをデジタルフィルターで構成する。この方法には、Scherbaum (1996)を利用した。

3.2 対象地点のH/VスペクトルのIIRフィルターの計算例

IIRフィルターの計算は、具体的には以下のように実施した。図2に計算例を示す。

- 1) 5地震の観測記録のH/Vスペクトルの平均をターゲットH/Vスペクトルとする。
- 2) 焼きなまし法により、ターゲットH/Vスペクトルとモデル化した線形フィルターとフィッティングさせ、フィルターのパラメータを決定する。
- 3) デジタルフィルターを構築し、時刻歴波形を得る。

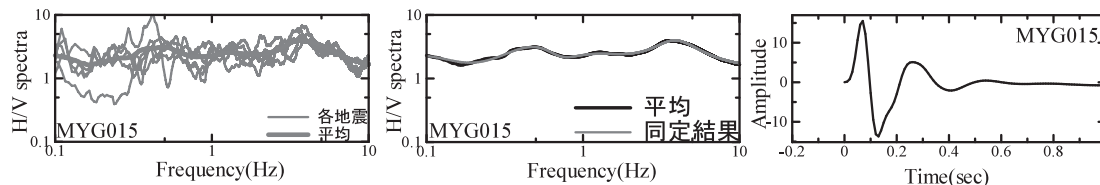


図2 (a) 5地震の観測記録のH/Vスペクトルとその平均H/Vスペクトル、(b) 平均H/Vスペクトルと同定した角周波数と減衰項から計算された1次と2次フィルターのスペクトル、(c) 1次と2次フィルターの時刻歴 (IIRフィルター)。

4. 解析結果

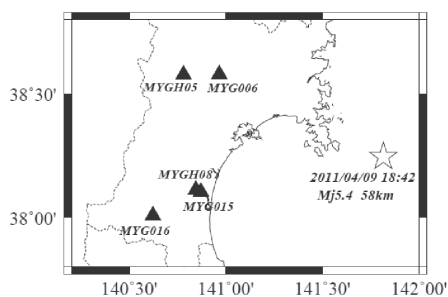


図3 対象地震と対象観測点

図3に対象地震と解析対象とした地点の地図を示す。対象は宮城県のMj5.4の地震と宮城県のK-NET、KiK-net観測点を利用した。図4に解析結果を示す。中図が計算結果であり、細線がP波震動から計算されたS波震動、太線がS波震動からS波震動である。また、中図の黒線は、計算波形の最大値をプロットしている。予測される地点において、S波震動が到達する前にS波震動の最大値相当の値が、すでに到達した地点のP波震動から計算されており、S波震動が早く推定されていることがわかる。

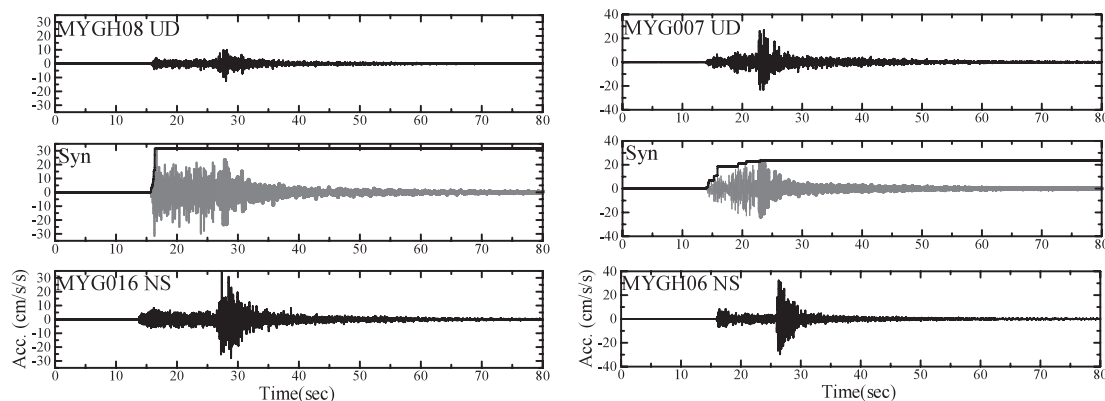


図4 (上図)すでに地震動が到達した地点 (MYGH08およびMYG007) の上下動記録、(中図)すでに地震動が到達した記録から計算された波形 (細線はP波震動からS波震動を、太線はS波震動からS波震動を計算した波形)、(下図) 予測される地点 (MYG016およびMYGH06) の水平動記録。

参考文献

Mitsuyuki Hoshiya, "Real-time prediction of ground motion by Kirchhoff-Fresnel boundary integral equation method: Extended front detection method for Earthquake Earth Warning", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, pp. 1038-1050, doi: 10.1002/jgrb. 50119, 2013a.

Mitsuyuki Hoshiya, "Real-Time Correction of Frequency-Dependent Site Amplification Factors for Application to Earthquake Early Warning", *Bulletin of the Seismological Society of America* published ahead of print October 29, 2013b.

Scherbaum, F., "Of poles and zeros: Fundamentals of digital seismology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 156, 1996.