

緊急地震速報の高度化-P 波震動波形から S 波最大動の波形を即時予測する方法

入倉孝次郎・倉橋 奨 (愛知工業大学)

要旨

点震源を仮定してマグニチュードを求め、距離減衰式を介して震度を予測する現在の緊急地震速報システムは、直下地震や巨大地震のとき、時間的に間に合わなかったり、予測震度が過小評価されたり、など致命的な問題がある。干場(2012)が提案するKirchhoff積分を用いて、地震波が到達した地点の情報から未だ到達してない地域の地震動を逐次的に予測する方法は、次世代型速報システムとして重要と考える。その方法をより実用的に有効な情報とするには、P波震動が到達した地点の情報から、未だ強い揺れの到着してない地域の最大動を含むS波震動を予測することが必要である。本研究は、そのための理論的な方法論を提案する。

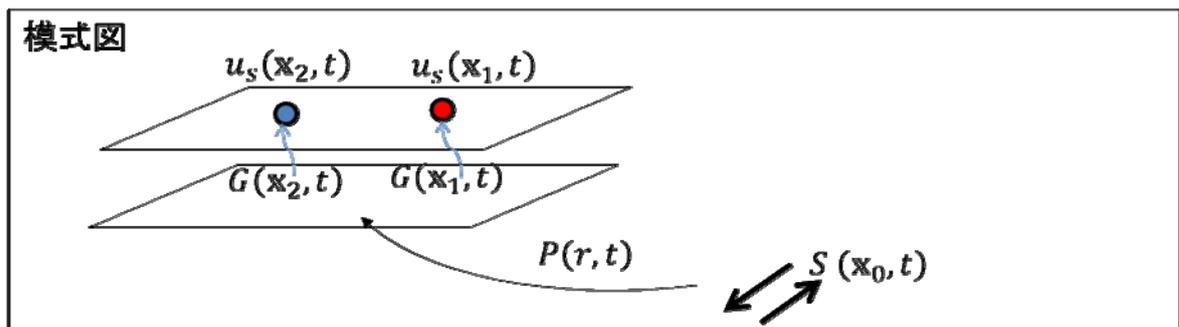
1. 問題提起

干場 (2012) は、Huygens Principle に基づき、すでに到着した観測点の地震波形から未だ到着していない地点の地震波形を精度良く予測する ” Time Evolutional Prediction ” を提案している。この方法の実用化を目指すには、緊急地震速報に必要不可欠な速報性に関する改良が必要と考える。

その1つは、この方法は、S 波震動から S 波震動を予測するものとなっている。緊急地震速報の予測情報は、正確に、だけでなく、できるだけ早く、伝達することが要請される。より早く情報を伝達するためには、時間の利得が得られるように、観測点に P 波震動が到着したときに、未だ到着していない地点の S 波震動を予測することが望ましい。

問題を簡単化するために、ここでは、干場の提案の中で、観測点の記録から、観測点近傍の実観測地点の地震波形の予測について考える。

2. P 波上下動震動から S 波水平主要動への伝達関数



- すでに記録された地点 (\mathbf{x}_1) の地表での上下動と水平動の震動

$$u_s^V(\mathbf{x}_1, t) = S^V(\mathbf{x}_0, t) * P^V(r_1, t) * G^V(\mathbf{x}_1, t)$$

$$u_s^H(\mathbf{x}_1, t) = S^H(\mathbf{x}_0, t) * P^H(r_1, t) * G^H(\mathbf{x}_1, t)$$

- 予測される地点 (\mathbf{x}_2) の地表での上下動と水平動の震動

$$u_s^V(\mathbf{x}_2, t) = S^V(\mathbf{x}_0, t) * P^V(r_2, t) * G^V(\mathbf{x}_2, t)$$

$$u_s^H(\mathbf{x}_2, t) = S^H(\mathbf{x}_0, t) * P^H(r_2, t) * G^H(\mathbf{x}_2, t)$$

$$r_2 \sim |\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0|$$

ここでは、時間の利得を考えて

$u_s^V(\mathbf{x}_1, t)$: \mathbf{x}_1 点の P 波震動から

$u_s^H(\mathbf{x}_2, t)$: \mathbf{x}_2 点の S 波震動を推定する方法を考える

\mathbf{x}_1 の P 波と \mathbf{x}_2 の S 波との伝達関数の評価方法を与える

観測点間の距離が小さければ、 \mathbf{x}_1 における P 波震動 から \mathbf{x}_2 における S 波震動 への伝達関数は以下で表わされる。

$$T^{V \text{ to } H}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, f) = \frac{S^H(\mathbf{x}_0, f)}{S^V(\mathbf{x}_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)}$$

$$\begin{array}{ccc} \parallel & \parallel & \parallel \\ T_{\text{source}} & T_{\text{path}} & T_{\text{site}} \end{array}$$

ここで、 S^V 、 P^V 、 G^V は P 波震源による震源特性、電波特性、地盤特性で S^H 、 P^H 、 G^H は S 波震源によるものである。

P 波震動と S 波震動を波線理論で表わすと、

$$u^P(\mathbf{x}_1, t) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\rho_S^{1/2} \cdot \alpha_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \alpha_G^{1/2}} \cdot \frac{1}{r} \cdot R_{\theta\varphi}^P \cdot S_o(t)$$

$$u^S(\mathbf{x}_1, t) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\rho_S^{1/2} \cdot \beta_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \beta_G^{1/2}} \cdot \frac{1}{r} \cdot R_{\theta\varphi}^S \cdot S_o(t)$$

P波とS波の震源特性に関する量の比は、

$$\frac{S^H(\mathbf{x}_0, f)}{S^V(\mathbf{x}_0, f)} = \frac{\rho_S^{1/2} \cdot \alpha_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \alpha_G^{1/2}}{\rho_S^{1/2} \cdot \beta_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \beta_G^{1/2}} \cdot \frac{R_{\theta\phi}^S}{R_{\theta\phi}^P}$$

$$\sim \frac{\alpha^3}{\beta^3} \quad \sim 1$$

P波とS波の伝播特性に関する量の比は、

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

地震波の上下動と水平動に関する量の比は、

$$\frac{G_S^H(\mathbf{x}_2, f)}{G_S^V(\mathbf{x}_1, f)} = \frac{G_S^V(\mathbf{x}_2, f)}{G_S^V(\mathbf{x}_1, f)} \cdot \frac{G_S^H(\mathbf{x}_2, f)}{G_S^V(\mathbf{x}_2, f)}$$

上下動震動の x_2 と x_1 点の比 x_2 点での地震動の H/V

Kawase et al. (2011)によると、地震動の水平動と上下動の比 (H/V)は、拡散理論に基づいて、以下の式で表わされる。

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \sqrt{\frac{2 \operatorname{Im}[G_{11}^{\text{ID}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)]}{\operatorname{Im}[G_{33}^{\text{ID}}(\mathbf{x}, \mathbf{x}; \omega)]}}$$

これに Claerbot (1968) の理論を使うと、

$$\frac{H(0, \omega)}{V(0, \omega)} = \sqrt{\frac{2\alpha_H}{\beta_H} \frac{|TF_1(0, \omega)|}{|TF_3(0, \omega)|}}$$

最終的に、伝達関数は以下の式で表わされる。

- P波震源による地点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、

$$T^{VtoH}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, f) = \frac{S^H(\mathbf{x}_0, f)}{S^V(\mathbf{x}_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)}$$

$$= 1 \cdot \frac{\alpha^3 r_1}{\beta^3 r_2} \cdot \exp \left[\left(-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\alpha Q_\alpha} \right) f \right] \cdot \frac{G^V(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_2, f)} \quad (1)$$

上の伝達関数は、 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、容易に評価可能である。

3. S波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

地震観測点 x_1 において、震源からのP波震動が続いている間は、 x_2 におけるS波震動は、 x_1 での上下動震動と上に述べた(1)の伝達関数との convolution により評価できる。しかしながら、 x_1 において、震源からのS波震動が到着すると、S波震源による地点 x_1 の上下動地震動から地点 x_2 でのS波の水平動への伝達関数、が必要となる。

■ S波震源による地点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、

$$T^{VtoH}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, f) = \frac{S^H(\mathbf{x}_0, f)}{S^V(\mathbf{x}_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)}$$

$$= 1 \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\beta Q_\beta}\right] f \cdot \frac{G^V(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_1, f)} \cdot \frac{G^H(\mathbf{x}_2, f)}{G^V(\mathbf{x}_2, f)}$$

で評価される。

4. 評価例

ここでは、宮城県の Kik-net 観測点 MYGH11 の上下動成分から、比較的近い同じく Kik-net 観測点 MYG007 のS波の水平動成分の波形の推定例を示す。

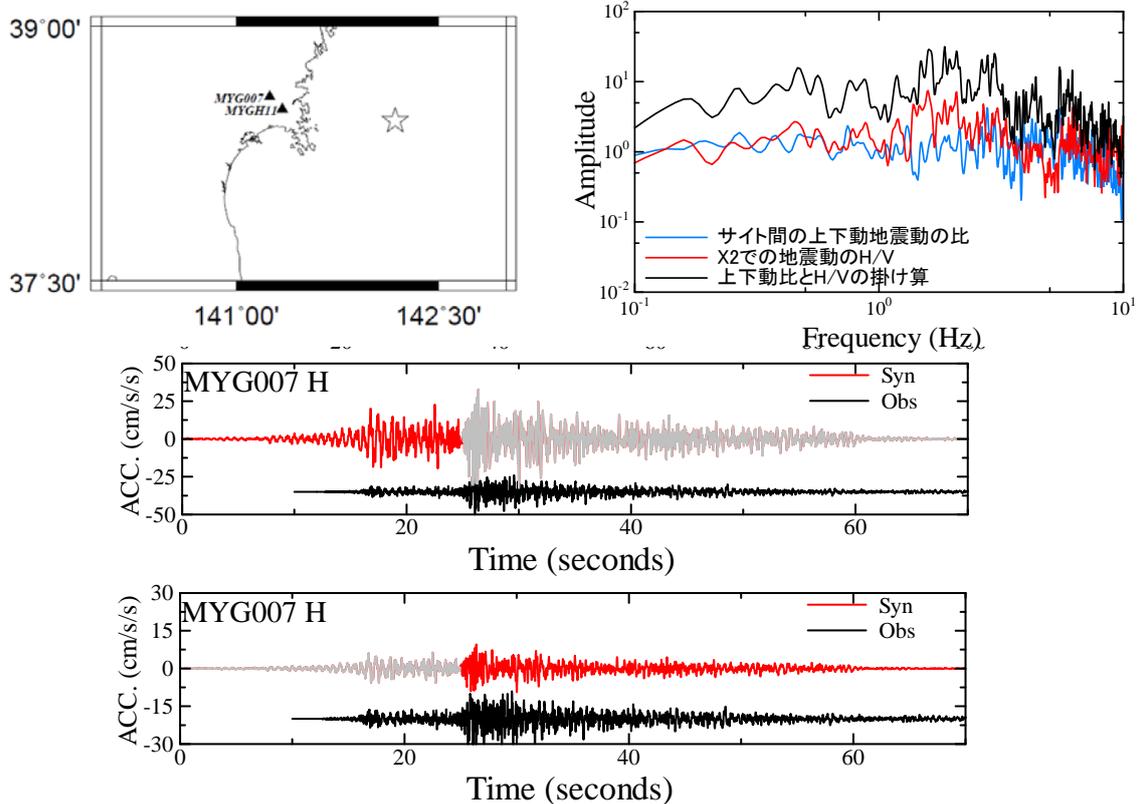


図1. 宮城沖の地震（左上図の星印）からの観測点 MYGH11 の上下動震動から MYG007 における水平動震動の予測評価結果と観測との比較。サイト間の伝達関数評価に必要な上下動震動の比および H/V は右上図で青線と赤線で示される。MYGH11 でのP波上下動から予測された MYG007 のS波水平動が中図の赤線、比較すべき観測記録は黒線で示される。MYGH11 にS波震動到着後、MYGH11 でのS波上下動から予測された MYG007 のS波水平動が下図の赤線、比較すべき観測記録は黒線で示される。