

春本鐵工所(株) 正員 富本 信

京都大学工学部 正員 山田善一 野田 茂

1. まえがき 本研究の目的は、小地震から本震時の波動を合成する半経験的手法に改良を加え、一連の新しいプログラムを開発することである。さらに、日本海中部地震時の周期10秒前後の地動の評価に適用し、本手法の妥当性を吟味した。なお、グリーン関数としては、気象庁1倍強震計記象から求めた余震の地動を採用した。

2. 余震から本震の地動を合成するための手法の提示 まず、断層面をstrike方向に N_L 個、dip方向に N_W 個分割する。余震記録のNS、EW、UD成分のフーリエスペクトルを $NS_a(\omega)$ 、 $EW_a(\omega)$ 、 $UD_a(\omega)$ とする。ここに、添字のaは、余震を意味する。余震から観測点までの震央距離を r_a 、方位角を $N\theta_a^\circ E$ とすると、観測点での接線方向、法線方向のフーリエスペクトルは以下になる。

$$\begin{Bmatrix} U_{Ra}(\omega) \\ U_{Ta}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} NS_a(\omega) \\ EW_a(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

断層面のグリッド (ξ, η) から射出される本震時のフーリエスペクトルは、余震のフーリエスペクトルを用いると、容易に表示できる。今、 (ξ, η) から見た、観測点のradial方向のスペクトルは以下になる。ただし、Rayleigh波が主に卓越するものと考えている。

$$S_R(\omega, r_{\xi\eta}, \theta_{\xi\eta}) = \frac{\chi_R(\omega, h_{\xi\eta}, \theta_{\xi\eta}, \phi, \lambda, \delta, k_R, V_R(h_{\xi\eta}), V_V(h_{\xi\eta}))}{\chi_R(\omega, h_a, \theta_a, \phi_a, \lambda_a, \delta_a, k_R, V_R(h_a), V_V(h_a))} \cdot \left(\frac{r_a}{r_{\xi\eta}}\right)^{1/2} \exp\left\{-\left(r_{\xi\eta} - r_a\right)\left\{\frac{1}{2}k_R(\omega) + \frac{\omega}{2Q_R(\omega)}\right\}\right\} \cdot U_{Ra}(\omega) \quad (2)$$

ここに、走向、傾斜角、食い違いの方向、震源深さ、観測点の方位角、震央距離、波数、Q値、群速度、水平および上下の変位モードを $\phi, \delta, \lambda, h, \theta, r, k_R, Q_R, U_R, V_R, V_V$ としている。 χ_R は方位特性関数である。また、添字のaは余震の、添字なしおよび ξ, η の付いたものは、本震時のパラメータを採用する。本研究では、定式化の便宜上、基本モードのみに着目した。

式(2)と同様にすると、本震時に観測点で得られる、上下変位(Rayleigh波による)と接線方向の変位(Love波による)のスペクトル、すなわち、 $S_V(\omega, r_{\xi\eta}, \theta_{\xi\eta})$ と $S_T(\omega, r_{\xi\eta}, \theta_{\xi\eta})$ は、 $UD_a(\omega)$ と $U_{Ta}(\omega)$ および距離補正と方位特性関数の補正などを施すことにより、得られる。

こうして得られた要素波を、FFTにより時間領域に逆変換したものを、 $U_{r,\xi\eta}(t)$ 、 $U_{\theta,\xi\eta}(t)$ 、 $U_{z,\xi\eta}(t)$ とする。その結果、合成した地動のNS、EW、UD成分は次に示すように求められる。

$$\begin{cases} U_{NS}(t) = C \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_T} \left[\cos \theta_{ij} U_{r,ij}(t - \tau_{ijk}) - \sin \theta_{ij} U_{\theta,ij}(t - \tau_{ijk}) \right] \\ U_{EW}(t) = C \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_T} \left[\sin \theta_{ij} U_{r,ij}(t - \tau_{ijk}) + \cos \theta_{ij} U_{\theta,ij}(t - \tau_{ijk}) \right] \\ U_{UD}(t) = C \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{N_T} U_{z,ij}(t - \tau_{ijk}) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $C = N / (N_L N_W N_T)$

$$\tau_{ijk} = \tau_{ij} - \tau_{00} + \frac{\sqrt{\{x_{ij}^2 - x_{00}^2 + (k-1)V_R \tau_a \cos \lambda\}^2 + \{y_{ij}^2 - y_{00}^2 + (k-1)V_R \tau_a \sin \lambda\}^2}}{V_R}$$

ただし、 τ_{ij} 、 τ_{00} はグリッド (i, j) と破壊開始点からの走時である。ここでは、地下平行層モデルから、直達S波の走時を理論的に計算している。また、 (x, y) は断層上での位置座標を示している。余震のライズタイム τ_a は $\tau_a = \tau / N_T$ から求められる。

上式に見られるように、本研究では、地震記録に方位補正、距離補正、震源の深さによる違いの補正などをし、余震と本震の震源パラメータの相違や表面波の分散現象を考慮する、加速度が τ_a の周期関数とならないようにする、など新しい工夫をしている。

3. 昭和58年日本海中部地震時の地震動の合成 地下構造としては第1層を海と考え、気仙沼・男鹿沖の爆破探査の結果から推定したモデルを採用した。これより、表面波の変位と応力のモードの深さ方向の

分布などを計算した。

本震発生時から6月30日までの余震分布および本震(5月28日)と余震(6月9日, 21日)の震央位置より、断層の幾何を決め、図1のような2つのモデルを考えた。モデル1は、2つのEventよりなる。各モデルの本震時の断層パラメーターおよび余震のそれは、各種の文献や島崎氏との私信により決定した。ちなみに、後述の相川における数値計算では、モデル1の第1Eventで $N=6, N_L=N_W=2, N_C=1$, 第2Eventで $N=9, N_L=N_W=N_C=2$, モデル2で $N=15, N_L=3, N_W=N_C=2$ とした。なお、モデル1では、2つのEventとしての断層の発震源の相違を考慮して、波の合成を行なった。次に示す4通りの方法により、地動の合成を行なった。ただし、いずれも今回は、非弾性減衰による補正をしていない。CASE 1: モデル1を用いて、距離補正のみ実施し、方位特性の補正や式(3)の座標変換を考慮しない、CASE 2: 次に、式(2)と(3)による補正を施すが、断層面上での各要素波の震源深さと余震の深さを同一にとり、CASE 3: さらに、各要素波の深さを変化させ、式(2)と(3)をそのまま適用する、CASE 4: モデル2を用いて、CASE 2と同じ方法で合成を行なう。

相川における地動のNS成分をシミュレートした。2. で述べた手法を用いて、6月21日に発生した余震から、地動の重ね合わせを実施している。図2は、本震と余震時の地動変位およびCASE 2による合成波を比較したものである。従来の方法に近いCASE 1よりも、ここで提案したアイデアを含むCASE 2の波が本震の波形とよく調和していることがわかった。モデル2よりもモデル1の断層がより現実的なので、CASE 4の結果は余りよくない。図3は、水平EW成分に関する変位応答スペクトル($h=2\%$)を求めたものである。他の成分についても同様に調べたところ、やはりCASE 2が本震時の応答をもっともよく再現していた。図より、一般に、CASE 1は本震の応答を過小に、CASE 4は若干過大に評価していることがわかる。これらの結果、CASE 2と3のように、表面波の方位特性関数を考慮する必要性を示唆している。ただし、観測点が震源よりも離れていること、表面波と震源の特性などから、図3において、CASE 2とCASE 3の相違はあまり見られない。

相川と同様の手続により、2つの余震記録を用いて、新潟の本震時の速度応答スペクトル($h=0.1\%$)を求めたのが図4である。図中には、工藤、井上、岡本による結果も併記している。NS成分は、本震時に振りきれていたもので真の応答はわからない。しかし、ここで推定した結果は、卓越周期が若干ずれているものの、他の人による結果と比べても遜色ないことがわかる。一方、本手法によって求めたCASE 1とCASE 3のUD成分の応答は本震時のものとよく対応している。このことは、本研究で提案した手法が10秒前後の応答の評価に際し威力を発揮するものと言える。一般に、CASE 4は他の結果よりも過小な応答を与えており、断層モデルの設定に問題を残している。

4. あとがき

本研究で提案した合成法による波形と応答スペクトルは本震時のものをよく再現しており、本方法の有効性が確認できた。さらに、実記録と合成結果の相関性を高めるためには、より最適な断層モデルと断層パラメーターを採用する必要がある。

謝辞 本研究の遂行に当ってお世話頂いた、新潟地方気象台、相川測候所および島崎邦彦助教授(東大・地震研)にお礼申し上げます。

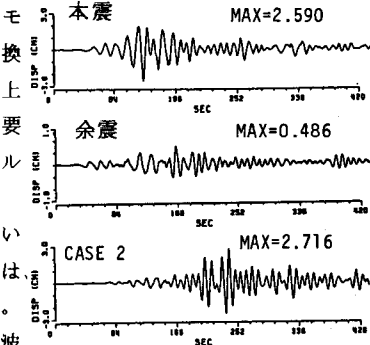
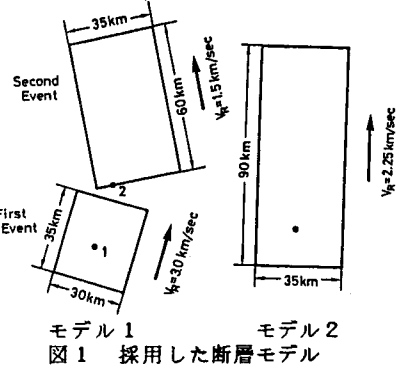


図2 相川での本震時の地動の変位波形と合成波形の比較 (NS成分)

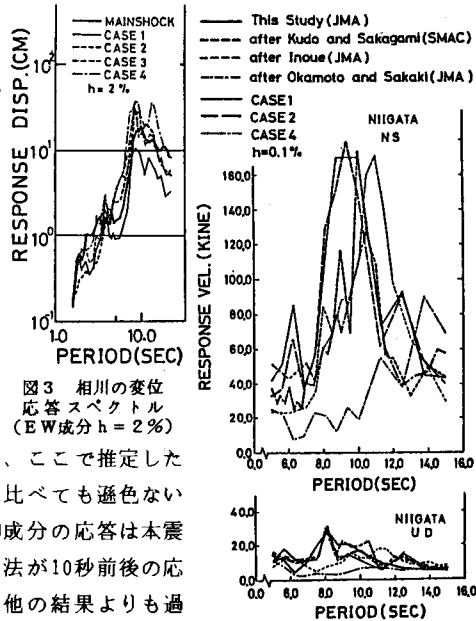


図4 新潟の速度応答スペクトル (NS, UD成分 $h=0.1\%$)