

(58) 短周期S波の震動卓越方向について

信州大学工学部 学生 寺田 彰
信州大学工学部 正会員 泉谷 恭男

1. はじめに 地球を均質等方弾性体と考えて合成した強震記録は、震源での放射特性を反映した卓越方向を示す。しかし現実には、同一観測点においては異なる地震の際にも地震動卓越方向は同じであったという観測例が報告されている¹⁾。また、ごく近接した観測点において、同一地震の際に、低周波地震動の卓越方向は似ているが高周波地震動については卓越方向が異なっていたことが報告されている²⁾。最近著者らは、東京大学生産技術研究所千葉アレー内の9観測地点における17個の地震の記録を解析し、8～10 Hzの周波数帯のS波部分の震動卓越方向に対する震源の影響と地盤の影響について調べた³⁾。その結果、各観測点が、地震の際に揺れ易い方向を有していること (Directional Site Resonanceを生じていること) が分かったが、それが地盤のどのような性質に原因するのかについては未解明であった。

千葉アレーでの地盤調査結果を見ると、地表から約5mの深さまではローム層 (S波速度140m/s) それ以深では粘土やシルトを含んだ砂層 (S波速度320～420m/s) となっている。単純に1/4波長則を適用すると、ローム層の卓越振動数は約7 Hzである。本研究においては、6～8 Hzの周波数帯における Directional Site Resonance について調べ、地盤の性質との関連について検討する。

2. 地下1mの加速度計記録の主軸解析 震央距離70 km以内の17個の地震についての、千葉アレー内の9観測点 (C0～C4, P1～P4) における加速度記録を使用した。これらの観測点は半径15 mの円内に設置されている。S波が卓越している付近に5秒間のウィンドウをかけて記録を取り出し、6～8 Hzのバンドパスフィルターに通した。この記録を用いて、地震動の主軸解析⁴⁾を行った。最大主軸方向は地震時の震動卓越方向を示す。S波はほぼ水平方向に震動しているため、簡単に水平面内における2次元の震動として取り扱い、震動卓越方向特性を最大主軸の方向 ϕ 、および、中間固有値と最大固有値の比 γ の2つのパラメータで表現する。

比較的大きい地震では9つの観測点間で観測記録の最大主軸の方向はあまり揃っていないが、比較的小さい地震ではかなり揃っている。例として、比較的大きい地震 (EQ 16, $M=6.7$, EQ 23, $M=6.0$) と小さい地震 (EQ 20, $M=4.2$) の震動卓越方向特性を図-1-1, 1-2, 1-3に太線の楕円で示した。楕円の長軸の方向は最大主軸の方向を、短径と長径の比は中間固有値と最大固有値の比を示している。観測された強震動の卓越方向特性 (ϕ_{jk}, γ_{jk}) は、各地震に固有でかつ9地点に共通する要素 (ϕ_j, γ_j) と、地震に無関係で各観測点に固有の要素 (ϕ_k, γ_k) の合成された結果であると仮定する。ここで j は地震、 k は観測点を表現するための添え字である。震源での放射特性や、震源から千葉アレーに至る経路での地震波の散乱の影響などは、(ϕ_j, γ_j) に含まれ、(ϕ_j, γ_j) はアレー全体の平均的な震動卓越方向特性を表していると言い換えることもできる。これに対して、(ϕ_k, γ_k) は観測点のごく近傍の地盤状態などの影響を表しており、アレー全体の平均的な震動場 (ϕ_j, γ_j) からの変動分に相当するすなわち (ϕ_k, γ_k) は9観測点における「相対的な Directional Site Resonance」を意味する。

(ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) の合成は、(ϕ_j, γ_j) で表される楕円の径と (ϕ_k, γ_k) で表される楕円の径を各方向毎に積算することによって行われるものと仮定する。ただしこのように合成すると、結果が必ずしも楕円とはならない。そこで実際には、次に示す関係式を用いて合成し、合成結果を楕円で表現できるようにした。

$$\phi_{jk} = \begin{cases} \phi_j & ; \phi_j = \phi_k \pm 90^\circ \text{ and } \gamma_j < \gamma_k \\ \phi_k & ; \phi_j = \phi_k \pm 90^\circ \text{ and } \gamma_j > \gamma_k \\ \frac{\{\gamma_k(1-\gamma_j)\}\phi_j + \{\gamma_j(1-\gamma_k)\}\phi_k}{\gamma_k(1-\gamma_j) + \gamma_j(1-\gamma_k)} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_{jk} = \begin{cases} (\gamma_j/\gamma_k) \sin^2(\phi_j - \phi_k) + \gamma_j \gamma_k \cos^2(\phi_j - \phi_k) & ; \gamma_j < \gamma_k \\ (\gamma_k/\gamma_j) \sin^2(\phi_j - \phi_k) + \gamma_j \gamma_k \cos^2(\phi_j - \phi_k) & ; \gamma_j \geq \gamma_k \end{cases} \quad (2)$$

(1), (2)式によって計算される $(\phi_{jk}^{(o)}, \gamma_{jk}^{(o)})$ が, 17地震に対して9観測点で得られた $(\phi_{jk}^{(o)}, \gamma_{jk}^{(o)})$ を同時にうまく説明できるよう

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^{17} \sum_{k=1}^9 \{ (\phi_{jk}^{(o)} - \phi_{jk}^{(o)})^2 + (\gamma_{jk}^{(o)} - \gamma_{jk}^{(o)})^2 \omega^2 \} \rightarrow \text{minimum} \quad (3)$$

によって (ϕ_j, γ_j) と (ϕ_k, γ_k) を求めた。

求められた (ϕ_j, γ_j) を3地震を例にとつて図-1-1, 1-2, 1-3の左上隅に示した。また, (ϕ_k, γ_k) を図-2に示した。 (ϕ_j, γ_j) が (ϕ_k, γ_k) によって影響を受けると図-1-1, 1-2, 1-3の細線の楕円で示されたようになり, 観測をよく説明できる。図-2より, 震動卓越方向特性に対する地盤の影響が, 非常に狭い地域内の各観測点でかなり異なっていることが分かる。また, 比較的大きな地震では, 地盤特性と観測された震動卓越方向特性(太線)が似ており, また, γ_j が大きい。これに対し, 小さな地震では, 入射波の性質と観測主軸が似ており, γ_j が小さい。これより, 比較的大きな地震では, 入射してきた波の偏向性があり強くないために, 観測される震動卓越方向特性が地盤特性すなわち, Directional Site Resonance を強く反映していると解釈することもできる。これに対し, 小さな地震では入射波が偏向性を強く持っているため, 地盤特性の影響を受けにくく, 入射波の偏向特性がそのまま地表の震動特性に現れている。

3. 深さ1m及びそれ以深の震動特性の比較 地表から1m, 5m, 10m, 20m, 40mの深さの加速度記録について主軸解析を行った。EQ16, 20, 23についての解析例を図-3-1, 3-2, 3-3に示す。楕円の長軸(線分の引いてある線)が最大主軸方向, 短軸が中間主軸方向である。なお, この図は鉛直上方から水平面への投影図である。楕円をはさんで上下の数値は, 上が最大固有値の大きさ, 下が最大主軸の天頂からの角度である。図-3-1, 3-2, 3-3を見ると, 深さ5mでは最大固有値が深さ1mよりも非常に小さく, 震動の節になっていることが分かる。図-4-1~5はデータベース中最大の地震であるEQ16について, 観測点C0~C4における深さ1m/5mのスペクトル比を表している。図中の太線はEW方向, 細線はNS方向のスペクトル比を示している。C0からC4の順に, それぞれEW NS方向のスペクトル比の7Hz付近のレベルを相対的に比較してみると, C0からC2まではEW方向のスペクトル比の大きさがNS方向を上回っており, その上回り方が順に増してゆく。これに対してC3 C4ではNS方向のスペクトル比がEW方向を上回っている。C0~C4地点でのNS, EW方向のスペクトル比の大小関係は, 図-2に地盤特性として示された楕円のNS方向の径とEW方向の径の相対的な大小関係と調和的である。また, 図-3-1, 3-2, 3-3を見ると, 深さ40mから10mまでの観測点では, 比較的大きな地震も含め, 最大主軸方向が地震毎にほぼ同一方向を示しており, その方向は各地震の入射波の偏向特性として求められた ϕ_j に近い。従つて, 非常に定性的にはあるが, 図-2に示されたDirectional Site Resonance の原因は厚さ約5mのローム層の震動特性にあるものと推定される。

4. 結論
- ・観測された強震動卓越方向特性は、偏向した入射波の性質と観測点固有の Directional Site Resonance の影響の両者が入り混じった結果であると解釈できる。
 - ・6～8 Hz の周波数帯の Directional Site Resonance は、表層に存在する厚さ約5 m のローム層の影響を強く受けている。
 - ・比較的大きな地震は、入射波があまり偏向していないため、観測された強震動卓越方向特性は観測点固有の Directional Site Resonance を比較的良好に反映している。
 - ・比較的小さな地震は、入射波が強く偏向しているため、地表の強震動卓越方向特性は、入射波の偏向特性を反映している。

謝辞 本研究で使用した加速度記録は東京大学生産技術研究所片山研究室よりお借りした。記して感謝します。

- 参考文献
- 1) Vidale et al. (1991) Earthq. Spectra, 7, 107-125.
 - 2) Katayama et al. (1990) Earthq. Eng. Struct. Dyn., 19, 1089-1106.
 - 3) 泉谷・寺田 (1993) 地震, 46, 印刷中.
 - 4) 星谷・石橋 (1977) 土木学会論文報告集, 268, 33-46.

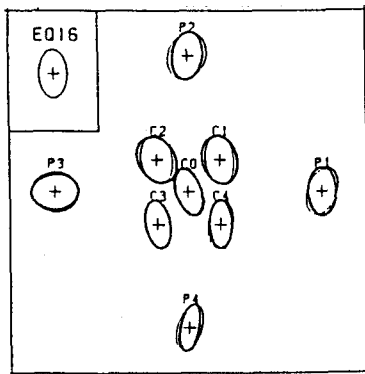


図-1-1 地震動の偏向特性及び入射波の偏向特性 (EQ. 16)

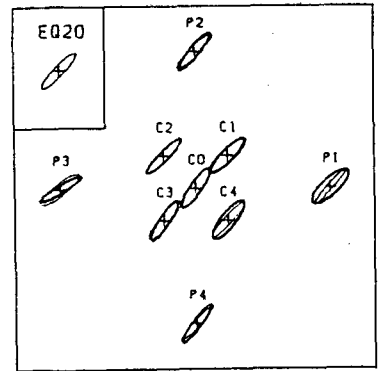


図-1-2 (EQ. 20)

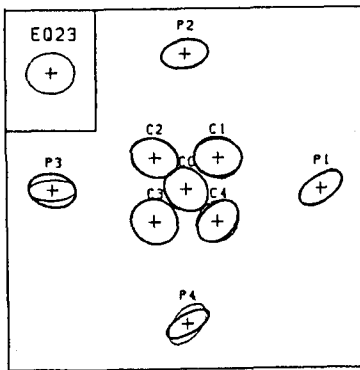


図-1-3 (EQ. 23)

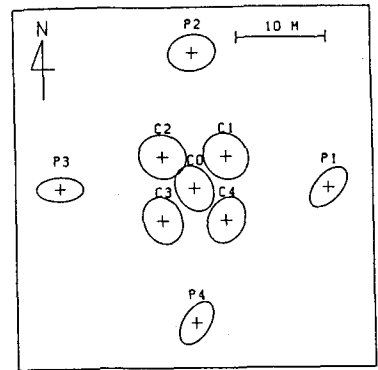


図-2 地盤特性

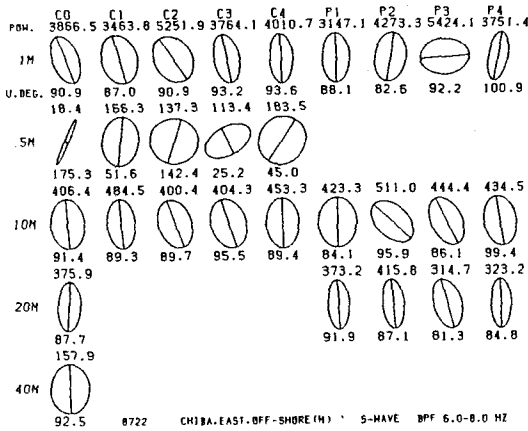


図-3-1 各深さにおける加速度記録の主軸解析結果 (EQ. 16)

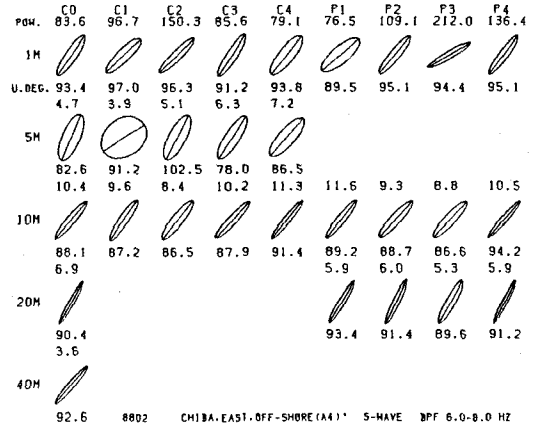


図-3-2 (EQ. 20)

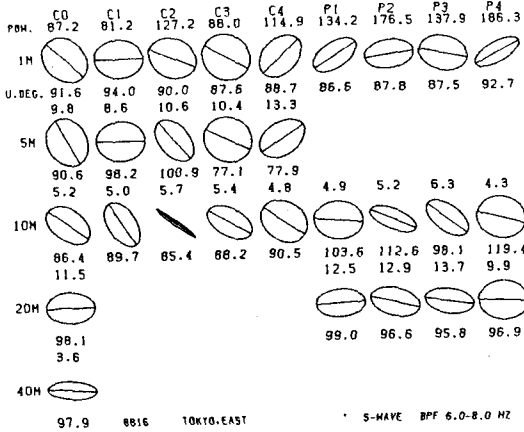


図-3-3 (EQ. 23)

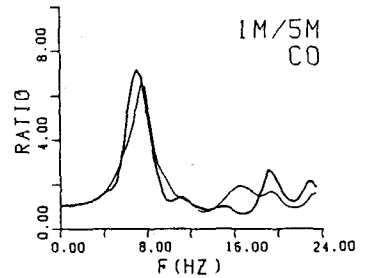


図-4-1 EQ. 16の深さ1m/5mのスペクトル比 (観測点 C0)

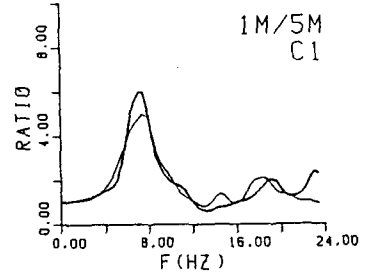


図-4-2 (観測点 C1)

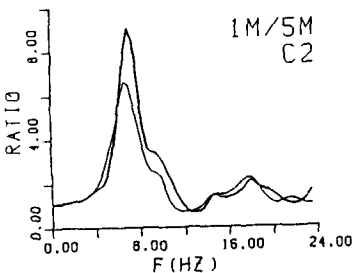


図-4-3 (観測点 C2)

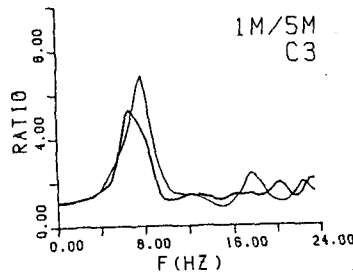


図-4-4 (観測点 C3)

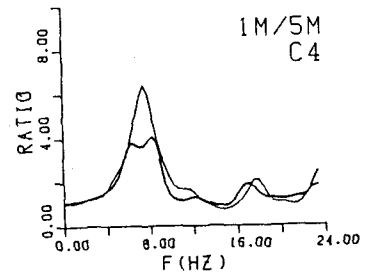


図-4-5 (観測点 C4)