

## 地震基盤 P 波に対する地表 S 波の振幅比の周波数特性に関する検討

鉄道総研 (現 JR 東日本) 正会員 ○宮腰 寛之  
 鉄道総研 正会員 津野 靖士

### 1. 目的

現在の早期地震警報は P 波の初動部分を利用して震源の位置とマグニチュードを推定し、地震の規模に応じた範囲に対して警報を出力している。一方、P 波振幅から直接的に S 波振幅を予測する手法[例えば、鷹野・栗田 (2011), 倉橋・入倉 (2014), 宮腰・津野 (2014)]が、単純かつ確実に早期地震警報を出力できる手法として期待される。関東平野においては、深さ数千 m の地震基盤に深に設置された地中地震計を活用することで地震動を若干早く検知し、地表において問題となる人工ノイズの影響を受けにくいオンサイト早期地震警報が実現可能と考える。地中 P 波振幅から直接的に地表 S 波振幅を予測する場合、その物理的背景となる地中 P 波に対する地表 S 波の振幅比における震源・伝播経路・サイト増幅特性の影響を明らかにすることは、振幅比をオンサイト早期地震警報として利用した際の予測精度を把握するために重要であると考えられる。そこで本研究では、(独)防災科学技術研究所の基盤強震観測網 KiK-net の関東平野内の地震基盤 (以下、基盤) と地表の記録を使用して、観測点ごとの基盤 P 波に対する地表 S 波のフーリエスペクトル (以下、スペクトル) 振幅比を評価し、その周波数特性について考察した。

### 2. 使用したデータ

図 1 のように、関東平野内の KiK-net 観測点のうち、ボアホールが基盤に到達している 12 観測点 [林・他 (2006)] を対象とした。また、関東平野内およびその周辺を震源とする M4.5~7.0 の 207 地震における 1167 記録を使用した。

全地震記録の加速度波形を用いて、P 波と S 波の到着時間の読み取りを目視で行った。P 波の読み取りに対しては鉛直成分、S 波の読み取りに対しては水平 2 成分のうち先に到着した成分の加速度波形を用いた。次に、P 波と S 波のスペクトルを、P 波と S 波の到着後最大 5 秒間の加速度波形の鉛直成分に後続のゼロを付加した 10.24 秒のデータからそれぞれ計算した。P 波スペクトルの計算に当たり、P 波到着後 5 秒経過する前に S 波が到着した場合は、S 波到着前までのデータを使用した。S 波のスペクトルは南北、東西成分の幾何平均とした。ここで、データ長の 5 秒は S 波の主要動が含まれるよう定めたものである。地中地震計の設置方位は防災科研の公開データに基づき、水平 2 成分の方位が南北と東西に一致するよう修正した。

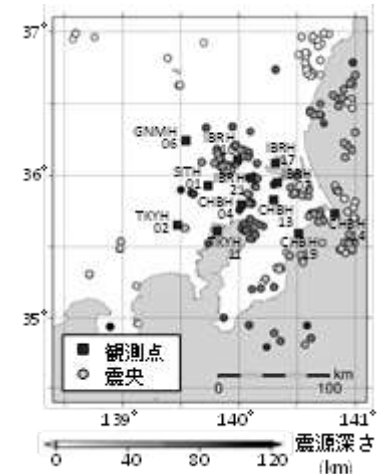


図 1 使用した観測点と地震

### 3. 地震基盤 P 波に対する地表 S 波の振幅比

基盤 P 波  $O_b^P(\omega)$  に対する基盤 S 波  $O_b^S(\omega)$  の振幅比は次式で表される [宮腰・津野 (2014)].

$$\log O_b^S(\omega) = \log O_b^P(\omega) + a_1(\omega) \quad (1) \quad a_1(\omega) = \log \frac{V_P^3}{V_S^3} + \log \frac{R_{\theta\phi}^S}{R_{\theta\phi}^P} + \log e^{\frac{r\omega}{2} \left( \frac{1}{Q_S V_S'} + \frac{1}{Q_P V_P'} \right)} \quad (2)$$

ここで、 $\omega$  は角周波数、 $\rho$  と  $V$  は地震発生域周辺の密度と弾性波速度、 $r$  は震源距離、 $R$  はラディエーション係数、 $V'$  と  $Q$  は地殻内における平均的な実体波の伝播速度と内部減衰を表す。添字  $P$  と  $S$  は P 波と S 波、添字  $b$  は基盤を表す。 $a_1(\omega)$  は地震発生域周辺の  $V_P/V_S$  比、P 波に対する S 波のラディエーション係数比、そして P 波と S 波の伝播経路における地震波の減衰、つまり、震源特性と伝播経路特性の影響を含んでいることが分かる。また、基盤 S 波  $O_b^S(\omega)$  に対する地表 S 波  $O_s^S(\omega)$  の振幅比は次式で表される。

$$\log O_s^S(\omega) = \log O_b^S(\omega) + a_2(\omega) \quad (3) \quad a_2(\omega) = \log G^S(\omega) \quad (4)$$

キーワード 地中地震計, 振幅比, 震源特性, 伝播経路特性, サイト増幅特性

連絡先 〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479 JR 東日本研究開発センター 防災研究所 TEL 048-651-2693

〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総研 鉄道地震工学研究センター 地震解析 TEL 042-573-7273

$a_2(\omega)$ は観測点直下の基盤から地表までの S 波速度構造による伝達関数  $G^S(\omega)$ の影響, すなわちサイト増幅特性の影響を含んでいる. 基盤 P 波  $O_b^P(\omega)$ に対する地表 S 波  $O_s^S(\omega)$ の振幅比は(1)式と(3)式より, 次式で表される.

$$\log O_s^S(\omega) = \log O_b^P(\omega) + b(\omega) \quad (5) \quad b(\omega) = a_1(\omega) + a_2(\omega) \quad (6)$$

4. フーリエスペクトルによる振幅比の評価結果

各観測点におけるフーリエスペクトル振幅比の幾何平均  $a_1(\omega)$ ,  $a_2(\omega)$ ,  $b(\omega)$ , およびそれらの対数標準偏差  $\sigma_{a1}(\omega)$ ,  $\sigma_{a2}(\omega)$ ,  $b(\omega)$ の比較を図2に示す. 幅広い周波数帯域において  $a_1(\omega)$ よりも  $a_2(\omega)$ の方が大きい傾向が確認できる. つまり, 関東平野では厚い堆積層の影響を受けて, 基盤 P 波に対する地表 S 波の振幅比において震源・伝播経路特性よりもサイト増幅特性の方が大きく影響する. 一方, 全周波数帯域において  $\sigma_{a1}(\omega)$ は  $\sigma_{a2}(\omega)$ よりも大きい. したがって, 基盤 P 波に対する地表 S 波の振幅比のバラツキには, 個々の地震のサイト増幅特性のバラツキよりも震源・伝播経路特性のバラツキの方が大きく影響し,  $\sigma_b(\omega)$ が  $\sigma_{a1}(\omega)$ と同程度となっている.

$a_1(\omega)$ における震源特性と伝播経路特性の影響を考察するために, (2)式に理論値・経験値を代入して, 右辺各項の幾何平均と対数標準偏差を周波数  $f=0.5, 1, 2, 5, 10\text{Hz}$  について評価した. 右辺第一項の地震発生域の  $V_P/V_S$ 比は, 地震ごとに日本列島下の三次元地震波速度構造 [Matsubara and Obara (2011)] を利用して求めた. 右辺第二項のラディエーション係数は, 地震ごとに Aki and Richards (2002) の理論式により求めた. 節でラディエーション係数が 0 になると P 波に対する S 波のラディエーション係数比が無限大となることから, P 波と S 波のラディエーション係数の絶対値に下限値 0.1 を設定した [Boore and Boatwright (1984)]. また, 香川 (2004) に従い, 高周波数領域で等方放射に遷移するようなラディエーションパターンの周波数依存性を与えた. 右辺第三項においては,  $V'$ は Matsubara et al. (2005) の関東平野直下の地殻内の速度分布を参考に, その平均値である  $V'_S=4.17\text{km/s}$ ,  $V'_P=7.30\text{km/s}$  を与えた.  $Q_S$ は中村 (2010) による関東平野周辺の周波数依存性  $Q_S=124f^{0.59}$ を用いて平均的に評価した.  $Q_P$ は宇津 (1984) より  $Q_P=9/4Q_S$ とした.  $r$ は個々の地震の震源距離を与えた. (2)式の右辺各項を評価した結果を図3に示す.  $a_1(\omega)$ の平均値に対しては, 主に地震発生域の  $V_P/V_S$ 比と高周波数帯域における伝播経路特性が影響する. 一方,  $a_1(\omega)$ のバラツキに対しては, 低周波数帯域ではラディエーションの影響が, 高周波数帯域では伝播経路特性の影響が大きく, 結果として図2に示したように  $\sigma_{a1}(\omega)$ の周波数依存性が見えにくくなっていると考えられる.

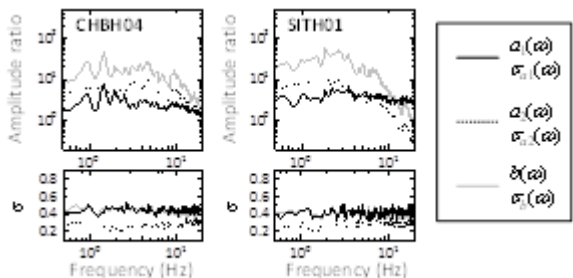


図2 スペクトル振幅比の幾何平均と対数標準偏差

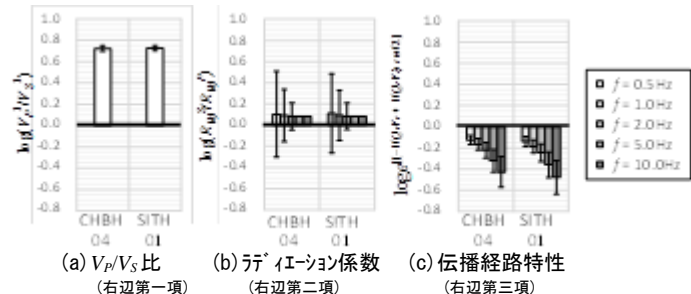


図3  $a_1(\omega)$ における震源特性と周波数特性の影響

謝辞 本研究では, (独)防災科学技術研究所の KiK-net の観測記録を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- Aki, K and P.G Richards, 2002, Quantitative Seismology, 2nd ed., University Science Books, Sausalito, 108-109.
- Boore, D. M. and J. Boatwright, 1984, Average body-wave radiation coefficients, Bull. Seism. Soc. Am., **74**, 1615-1621.
- 林・他, 2006, 関東平野の地下に分布する先新第三系基盤岩類, 地質学雑誌, **112**, 2-13.
- 香川敬生, 2004, ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集, **4**, 21-32.
- 倉橋・入倉, 2014, 緊急地震速報の高度化の試み, 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, **10**, 107-110.
- Matsubara, M., H. Hayashi, K. Obara, and K. Kasahara, 2005, Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, J. Geophys. Res., **110**, B12304.
- Matsubara, M. and K. Obara, 2011, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, Earth Planets Space, **63**, 663-667.
- 宮腰・津野, 2014, 地表での P 波と S 波の関係に地下速度構造が及ぼす影響評価, 物理探査学会第 130 回学術講演会論文集, 24-27.
- 中村亮一, 2010, 短周期地震動記録に基づく日本列島下の三次元減衰構造  $Q_S$ ・震源スペクトル・地盤増幅の同時インバージョンとその応用, 東京大学学位論文.
- 鷹野・栗田, 2011, ボーリング地震計データによるオンサイト地震警報システムの検討—緊急地震速報の弱点を補い直下型地震に備えるには—, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, HDS030-02.
- 宇津徳治, 1984, 地震学, 共立出版社, 67