

周波数依存性をもつ地盤増幅特性のリアルタイム補正：
位相の導入による震動継続時間の再現・予測
干場充之（気象研）

1. はじめに：

地震動即時予測では、震源位置と M_w を推定し、地震動予測式により揺れの強さを予測する考え方が多い。一方、我々は、“揺れから揺れを予測する”という考え方に則り、現時点の波動場から未来の波動場を予測する手法（波動場推定法）の構築を進めている（Hoshiya and Aoki, 2015; Kodera et al, 2018）。

地盤増幅特性は、震源特性や伝播経路特性とともに地震動を特徴づける重要な要素であり周波数依存性がある。波動場推定法では、この周波数依存性をリアルタイムで補正することが求められ、このため（周波数空間上ではなく）時間空間上で補正することが望ましい。地盤増幅特性には、振幅特性と位相特性があり、このうち、Hoshiya (2013) やOgiso et al.(2016)では振幅特性をIIRフィルター用いてリアルタイム補正することを提案している。今回は、位相特性について補正する方法を提案する。

2. 方法：

Hoshiya (2013) では、周波数依存性を有する振幅特性のリアルタイム補正として

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

を用いることを提案している（ここで、 $\omega_{1n}, \omega_{2n}, \omega_{1m}, \omega_{2m}, h_{1m}, h_{2m}$ はパラメータ。 $s = i\omega = i \cdot 2\pi f$; f は周波数。 双一次変換, $s = 2/\Delta T \cdot (1 - z^{-1}) / (1 + z^{-1})$, を用いることで、 z 表現で表すことができ、IIRフィルターを作成できる。 ΔT はデジタルデータのサンプリング間隔）。これは最小位相特性をもつフィルターで振幅特性については十分に考慮できるものの、位相特性については必ずしも十分に考慮できるわけではない。このため、震動継続時間が十分に再現できない場合があった。

一方、振幅特性に影響を与えることなく、位相特性だけを変化させるものとして、オールパスフィルターが知られている。例えば、

$$F_P(s) = \prod_{j=1}^J \frac{s^2 - 2k_{1j}\omega_{1j}s + \omega_{1j}^2}{s^2 + 2k_{1j}\omega_{1j}s + \omega_{1j}^2} = \prod_{j=1}^J \frac{\{\omega_{1j}^2 - \omega^2\} - i \cdot 2k_{1j}\omega_{1j}\omega}{\{\omega_{1j}^2 - \omega^2\} + i \cdot 2k_{1j}\omega_{1j}\omega} \quad (2)$$

（ここで $\omega_{1j}, \omega_{2j}, k_{1j}, k_{2j}$ はパラメータ）で与えられる。この形では、分母と分子が複素共役なので、周波数にかかわらず $|F_A(s)|=1$ であり、振幅特性は周波数で変化しないが、位相を変化させることができる。そこで、

$$F_M(s) = F_A(s) \cdot F_P(s) \quad (3)$$

を用いて、振幅特性と位相特性の両方をリアルタイム補正することを考える。

3. 応用例：

KiK-netのIBRH07は、1,200mのボアホールがあり、そこで記録された波形と地表の波形を比べることにより、振幅、位相ともに強い周波数依存性をもつ増幅特性があることが分かる（図1）。

なお、ここでは、位相特性として位相そのものに代わり、 ω で微分した群遅延時間で考察する。図1の振幅特性に合うように $F_A(s)$ を、群遅延時間特性に合うように $F_P(s)$ をモデル化する。

図2には、2008/5/8のM7.0の地震の例を示す。ボアホールでの波形(a)に、振幅特性だけを考慮した $F_A(s)$ のフィルターを施した波形(b)、位相特性も考慮した $F_M(s)$ のフィルターを施した波形(c)、実際に地表で観測された波形(d)を示す。実際の観測の(d)の波形に比べて、(b)の波形では波が前方に集まっている。これは、最小位相特性のためである。また、これにより、(d)に比べて最大振幅が過大評価になっている。(c)の波形では、前方に集まるのが緩和され、(d)に近い最大振幅が再現されている。

謝辞：解析には防災科研の KiK-net の波形を使用した。

文献

Hoshiya, 2013: BSSA, 103: 3179-3188. <https://doi.org/10.1785/0120130060>.

Hoshiya and Aoki, 2015: BSSA, 105: 1324-1338. <https://doi.org/10.1785/0120140280>.

Kodera et al. 2018: BSSA, 108, 983-1003. <https://doi.org/10.1785/0120170085>.

Ogiso et al., 2016: EPS, 63, 83. DOI 10.1186/s40623-016-0467-4.

図 1

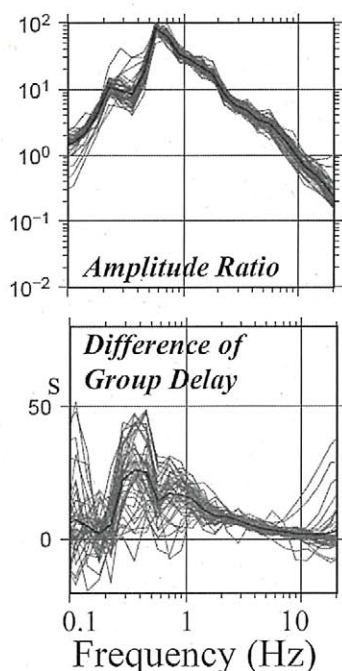


図 1 (左)

IBRH07 の地盤増幅特性. 地表とボアホールでの振幅比(上)と群遅延時間の差(下).

図 2

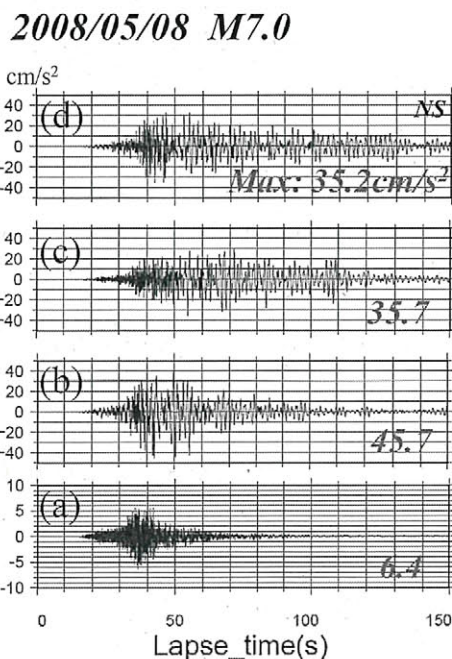


図 2 (右)

2008年5月8日のM7.0での例。(a)ボアホールでの観測波形。(b)(a)の波形に $F_A(s)$ のフィルターを施した波形。(c) $F_M(s)$ のフィルターを施した波形。(d)実際に地表で観測された波形。