

# 2008年岩手・宮城内陸地震 本震記録の 高域遮断フィルターに関する検討

鶴来雅人<sup>1</sup>・香川敬生<sup>2</sup>・入倉孝次郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>財団法人 地域 地盤 環境 研究所  
(〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:turugi@geor.or.jp

<sup>2</sup>鳥取大学大学院教授 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail:kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

<sup>3</sup>愛知工業大学客員教授 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4)

E-mail:irikura@geor.or.jp

強震動予測を精度良く行うには、高周波数領域の地震動特性を明らかにすることが必要である。そこで、本研究では2008年岩手・宮城内陸地震の本震を対象として、それらの記録の高周波数領域におけるスペクトル低減特性を検討した。その結果、この地震の  $f_{max}$  は7.7Hz、スペクトルの低減傾向を示すべき乗数は0.83と推定された。この  $f_{max}$  の値は既往大地震の観測記録から得られた値の中間的な値である。また、この地震の観測記録に見られるスペクトル低減特性は、2003年宮城県北部地震や2005年福岡県西方沖地震の観測記録のそれとほぼ同等であることが明らかとなった。

**Key Words :** High frequency range, Spectral decay characteristics, The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake,  $f_{max}$ , High cut filter

## 1. はじめに

地震動のスペクトルが  $\omega^{-2}$  則<sup>1)</sup>に従うと仮定した場合、加速度スペクトルの形状はコーナー周波数以上の高周波数領域で平坦となる。しかし、実際にはある周波数より高周波数領域では低減傾向を示す。Hanksはこの低減傾向に遷移する周波数を  $f_{max}$  (高域遮断周波数) と名づけ、その成因に関する問題提起をした<sup>2)</sup>。この  $f_{max}$  の生成要因については、地表近傍での影響によるとする考え例えば<sup>3)</sup>と震源の影響によるとする考え例えば<sup>4)</sup>の2通りがあり、現在でもその決着はついていない。

経験的グリーン関数法<sup>5), 6)</sup>や統計的グリーン関数法<sup>7)</sup>、ハイブリッド法<sup>8)</sup>などにより強震動予測を精度良く行なう際には、この高周波数領域におけるスペクトル低減特性の解明が重要である。地震観測記録から  $f_{max}$  の値やその地震規模依存性および高域遮断フィルターの形状を検討する試みは複数行われている。例えば、佐藤<sup>9)</sup>は2000年鳥取県西部地震の本震および余震の KiK-net 観測点での記録を用いた解

析を行い、 $f_{max}$  は2~20数Hz に存在しその地震規模依存性は見られないとしている。また、川瀬・松尾<sup>10)</sup>は1996年8月~2002年6月に発生した地震(全 228 地震,  $M_J$ : 4.5~7.3)について解析を行ない、 $f_{max}$  の値には明瞭な地震規模依存性は見られないとしている。著者らは、1995年兵庫県南部地震など最近国内で発生した大地震の硬質地盤や岩盤における観測記録を用いて、高周波数領域における低減特性を検討し、 $f_{max}$  はサイトによらずほぼ一定であることを示した上で、高域遮断フィルターを提案している<sup>11)~15)</sup>。香川・ほか<sup>11)</sup>やKagawa *et al.* <sup>13)</sup>は前述した大地震の高域遮断フィルターの提案、鶴来・ほか<sup>12), 15)</sup>やTsurugi *et al.* <sup>14)</sup>は小地震と大地震の高域遮断フィルターおよびそれらの違いを補正するフィルターの提案を行っている。

本検討では、強震動予測に資することを目的に、2008年岩手・宮城内陸地震( $M_J$ : 7.2)の本震観測記録の高周波数領域におけるスペクトル低減特性について検討し、既往研究成果と比較する。

## 2. 検討手法

まず、岩盤観測点（防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の地中観測点）における観測記録から震源スペクトルを求める。この時、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域から概ね100km以内、かつ地中地震計設置深度におけるせん断波速度が2,000m/sec以上の地点の記録を用い、この条件に当てはまる複数地点の記録から震源スペクトルを推定し、その平均を求めた。せん断波速度が2,000m/sec以上の地点の記録を用いることによりサイト特性の影響を、また、複数地点の記録を用いることにより、断層破壊伝播の指向性(Directivity)やラディエーションパターンの影響を小さくすることができるものと考えられる。

スペクトルの算出には主要動部 20 秒間を用い、水平2方向のベクトル和とした。ここで、主要動部の抽出にあたってマルチテーパー<sup>16), 17)</sup>を用いることにより、スペクトル算出の精度向上を図った。さらに、計器特性の補正を行った。 $Q$  値は当該地域で発生する地殻内地震の観測記録を用いたスペクトルインバージョン解析によって得られた特性〔式(1)〕を用いた。

$$Q(f)=93.2 \times f^{1.01} \quad (1)$$

続いて、地震モーメント  $M_0$  およびコーナー周波数  $f_c$  を評価する。Andrews<sup>18)</sup>の方法により、震源変位スペクトルの低周波数領域におけるフラットレベル  $\Omega_0$  およびコーナー周波数  $f_c$  を求め、式(2)により地震モーメントを得る。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3}{R_{\phi\theta}} \times \Omega_0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ ,  $\beta$  は媒質の密度およびせん断波速度であり、 $R_{\phi\theta}$  はラディエーションパターンの係数であり、ここでは平均値である0.63<sup>19)</sup>を用いる。

最後に、高周波数領域におけるスペクトル低減特性を規定するフィルターを Boore<sup>20)</sup>による形状〔式(3)〕とし、先に得られた地震モーメント  $M_0$  およびコーナー周波数  $f_c$  を既知として与えた上で、式(3)の係数である高域遮断周波数  $f_{max}$  およびべき乗数  $s$  を焼きなまし法<sup>21)</sup>により求める。

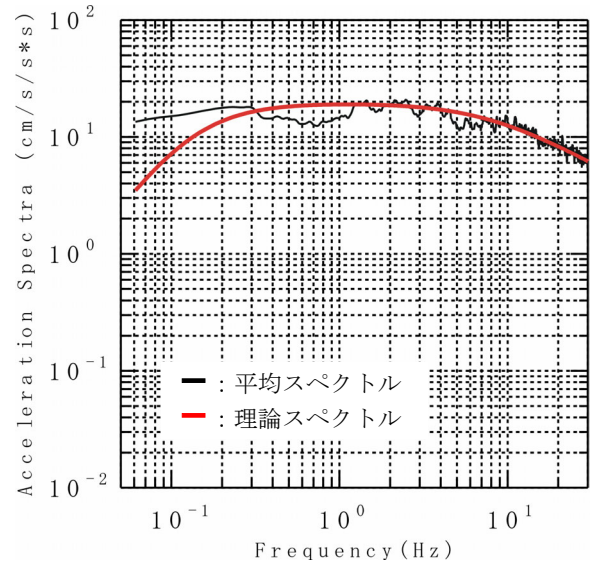


図-1 平均距離におけるスペクトルと理論スペクトルの比較

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2s}}} \quad (3)$$

## 3. 検討結果

複数地点における観測記録から求めた平均震源スペクトルより得られた地震モーメント  $M_0$ 、コーナー周波数  $f_c$ 、高域遮断周波数  $f_{max}$  およびべき乗数  $s$  の値は以下の通りである。

- ・地震モーメント  $M_0$  :  $3.87 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$
- ・コーナー周波数  $f_c$  : 0.1Hz
- ・高域遮断周波数  $f_{max}$  : 7.7Hz
- ・べき乗数  $s$  : 0.83

本検討で推定された地震モーメントは F-net の値に対して1.42倍である。既往の震源インバージョン解析<sup>22)~25)</sup>による地震モーメントの値は F-net の値に対して0.8~1.8倍の範囲にばらついていることを考慮すれば、ここで推定した値は概ね妥当性であると言える。また、平均距離におけるスペクトルとそれに適合する理論スペクトル  $A(f)$  を図-1 に示す。理論スペクトル  $A(f)$  とは、 $\omega^{-2}$ 則に基づく震源特性と伝播経路特性および高域遮断フィルター  $P(f)$  を考慮した加速度スペクトルである〔式(4)参照〕。

$$A(f) = CM_0 S(f) \frac{1}{X} \exp \frac{-\pi f X}{Q(f) \beta} P(f) \quad (4)$$

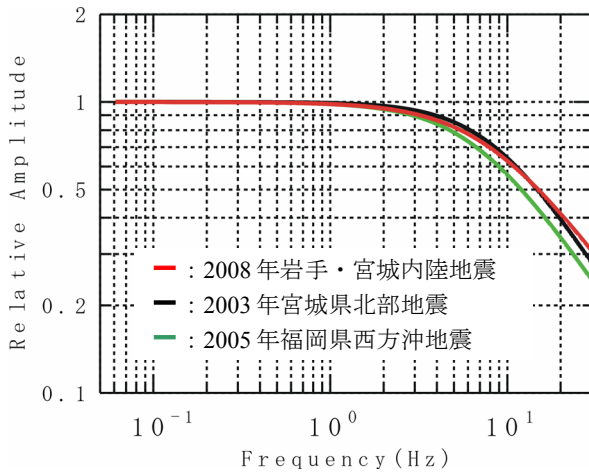


図-2 大地震の高域遮断フィルター

ここで、 $S(f)$  は  $\omega^{-2}$  則に基づく震源特性で式(5)で表せる．また、 $X$  は解析に用いたサイトまでの震源距離の平均値 (cm)， $\beta$  はせん断波速度 (cm/s) であり、 $C$  はラディエーションパターンなどその他の係数である．

$$S(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (5)$$

図-1より、平均スペクトルと理論スペクトルは良く適合していることが判り、得られたパラメータの妥当性が確認できる．

高域遮断周波数  $f_{max}$  は 7.7Hz，べき乗数  $s$  は 0.83，すなわち高域遮断フィルターは式(6)のように推定された．この  $f_{max}$  の値は2003年宮城県北部地震観測記録の値 (8.3Hz) と2005年福岡県西方沖地震観測記録の値 (6.5Hz) の中間的な値である．この高域遮断フィルターを図-2に示す．比較のため、同図には2003年宮城県北部地震 本震 ( $M_j$  : 6.4) および2005年福岡県西方沖地震 本震 ( $M_j$  : 7.0) の観測記録より得られた高域遮断フィルター<sup>14), 15)</sup> [式(7)および(8)] を併記する．これより、本研究で得られた高域遮断フィルターの形状は2003年宮城県北部地震の観測記録のそれとほぼ同じで、2005年福岡県西方沖地震の観測記録のそれとも大きな差がないことがわかる．

・2008年岩手・宮城内陸地震 ( $M_j$  : 7.2)

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{7.7}\right)^{2 \times 0.83}}} \quad (6)$$

・2003年宮城県北部地震 ( $M_j$  : 6.4)

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{8.3}\right)^{2 \times 0.96}}} \quad (7)$$

・2005年福岡県西方沖地震 ( $M_j$  : 7.0)

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{6.5}\right)^{2 \times 0.90}}} \quad (8)$$

#### 4. おわりに

本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震 本震記の高周波数領域におけるスペクトル低減特性を検討した．その結果、 $f_{max}$  は7.7Hz，べき乗数は0.83と推定された．また、この地震の観測記録から得られる高域遮断フィルターの形状は 2003 年宮城県北部地震や 2005 年福岡県西方沖地震のそれと顕著な差がないことが確認された．この結果はマグニチュード 6.5 程度以上の大地震では、高周波数領域におけるスペクトル低減特性はほぼ同じ傾向を示すことを示唆しており、大地震の強震動評価に資するものと期待される．

今後は、余震記録の高周波数領域のスペクトル低減特性について検討し、スペクトル低減特性に地震規模依存性があるかどうかを確認する予定である．

**謝辞：** マルチテーパーによるスペクトルの算出にはエール大学 Park 教授・ほか<sup>17)</sup>が作成したプログラムを使用しました．また、防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の観測記録および広帯域地震観測網 F-net の震源パラメータを使用しました．記して感謝いたします．

#### 参考文献

- 1) Aki, K. : Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.

- 2) Hanks, T.C. :  $f_{max}$ , *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.72, pp.1867-1879, 1982.
- 3) Anderson, J.G. and Hough, S.E. : A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.74, pp.1969-1993, 1984.
- 4) Papageorgiou, A.S. and Aki, K. : A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion II. Application of the model, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.73, pp.953-978, 1983.
- 5) Hartzell, S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 6) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 7) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.430, pp.1-9, 1991.
- 8) 入倉孝次郎, 釜江克宏 : 1948年福井地震の地震動 ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現, 地震第2輯, Vol.52, pp.129-150, 1999.
- 9) 佐藤智美 : KiK-net強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震とラディエーションパターンおよび  $f_{max}$  の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.25-34, 2002.
- 10) 川瀬博, 松尾秀典 : K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.1, pp.33-52, 2004.
- 11) 香川敬生, 鶴来雅人, 佐藤信光 : 硬質サイトの強震観測記録に見られる高周波低減特性の検討, 第27回地震工学研究発表会, 315, 2003.
- 12) 鶴来雅人, 香川敬生, 岡崎敦, 羽田浩二, 入倉孝次郎 : 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 ー1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討ー, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.4, pp.94-112, 2006.
- 13) Kagawa, T., Tsurugi, M., and Irikura, K. : High Frequency Cut-off Characteristics of Strong ground Motion Records at Hard Sites, Subduction and Intra-Slab Earthquakes, *American Geophysical Union 2006 Fall Meeting*, S23E-0214, 2006.
- 14) Tsurugi, M., Kagawa, T., and Irikura, K. : Study on High-cut Frequency Characteristics of Ground Motions for Inland Crustal Earthquakes in Japan, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, No.02-0036, 2008.
- 15) 鶴来雅人, 香川敬生, 入倉孝次郎 : 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 (その2) ー2005年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討ー, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.4, pp.94-112, 2009.
- 16) Thomsom, D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, pp.1055-1096, 1982.
- 17) Lees, J.M. and Park, J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geosciences*, Vol.21, pp.199-236, 1995.
- 18) Andrews, D.J. : Objective determination of source parameters and similarity of earth-quakes of different size, *Geophysical monograph* 37, Maurice Ewing Vol.6, pp.259-267, 1986.
- 19) Boore, D.M. and Boatwright, J. : Average body-wave radiation coefficient, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.74, pp.1615-1621, 1984.
- 20) Boore, D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 21) Ingber, L. and Rosen B. : Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: A comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.16, 1992, pp.87-100.
- 22) 鈴木亘, 青井真, 関口春子 : 近地強震記録による平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の震源インバージョン, [http://www.knet.bosai.go.jp/knet/topics/Iwatemiyaginairiku\\_080614/inversion/](http://www.knet.bosai.go.jp/knet/topics/Iwatemiyaginairiku_080614/inversion/)
- 23) 山中佳子 : NGY 地震学ノート No.9 : 2008年6月14日岩手・宮城内陸地震(M 7.2)遠地実体波解析(暫定解改訂版), [http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/2008/NGY9.html](http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2008/NGY9.html)
- 24) 山中佳子 : NGY 地震学ノート No.9 : 2008年6月14日岩手・宮城内陸地震(M 7.2) 近地波形解析(暫定解改訂版), [http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/2008/NGY9.html](http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2008/NGY9.html)
- 25) 八木勇治 : 2008年6月14日岩手・宮城内陸地震(暫定), <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/20080613/>

# HIGH-CUT FILTER DUE TO MAINSHOCK OF THE 2008 IWATE-MIYAGI NAIRIKU EARTHQUAKE

Masato TSURUGI, Takao KAGAWA and Kojiro IRIKURA

Spectral decay characteristics in high frequency range due to mainshock of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake are examined. The Butterworth type high-cut filter with cut-off frequency  $f_{max}$  and its power coefficient is assumed in this study. The two parameters are estimated by fitting Fourier spectra of observed records at rock sites with the theoretical filter shape. In result, the cut-off frequency  $f_{max}$  of the mainshock is estimated as 7.7Hz, and the power coefficient,  $s$ , is estimated as 0.83, respectively. The  $f_{max}$  filter shape due to the mainshock of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake is almost same with those of the mainshocks of the 2003 Miyagi-Ken Hokubu Earthquake and the 2005 Fukuoka-Ken Seiho-oki Earthquake.