



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) —2005年福岡県西方沖地震の観測記録に基づく検討—

鶴来雅人¹, 香川敬生², 入倉孝次郎³

1) 正会員, 財団法人地域 地盤 環境 研究所, 主任研究員, 博(工)

E-mail: turugi@geor.or.jp

2) 正会員, 鳥取大学大学院工学研究科, 教授, 博(理)

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

3) 正会員, 愛知工業大学, 客員教授, 理博

E-mail: irikura@geor.or.jp

要 約

強震動予測の高周波数帯域における精度向上を図るには, この帯域における地震動特性を明らかにする必要がある. そこで本研究では強震動予測のための高域遮断フィルターを提案することを目的に, 2005年福岡県西方沖地震の本震および余震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を示す高域遮断フィルターを求めた. その結果, 2005年福岡県西方沖地震の本震の高域遮断フィルターを規定する周波数(高域遮断周波数 f_{max})は6.5Hz, 余震のそれは9Hz~20Hzと推定された. また, 強震動予測においては大地震と小地震のスペクトル低減特性の違いを補正するフィルターも重要であり, これについても検討を行った.

キーワード: 強震動予測, 2005年福岡県西方沖地震, f_{max} , 高域遮断フィルター, 補正フィルター

1. はじめに

これまで, 強震動の予測は最大加速度や最大速度あるいは応答スペクトルの距離減衰式といった経験的手法により行われることがほとんどであった. 1995年兵庫県南部地震以降の強震観測網の整備とそれに基づく強震記録の蓄積により, 地震動の構成要素である震源特性・伝播経路特性・サイト特性を精度良く評価する手法が確立されるようになってきた. また, 強震動予測手法の標準化を目的とした「強震動予測レシピ」がまとめられている^{1)~3)}. こうしたことを背景に昨今では断層モデルに基づく強震動予測が主流になりつつある^{例えば4)~6)}. しかし, 断層モデルに基づく強震動予測には未解決の問題がいくつか残されている. 例えば, 強震動予測レシピに基づく断層パラメータの設定方法は既往地震の断層パラメータの統計解析に基づいているため, 2008年中国四川大地震のような巨大地震の断層パラメータの設定方法はまだ確立されていない. このほか, 高周波数帯域における地震動特性を解明

することが未解決の問題として残されている。

地震動の震源スペクトルが ω^{-2} 則⁷⁾に従うと仮定した場合、加速度フーリエスペクトルの形状はコーナー周波数以上の高周波数帯域で平坦となる。しかし、実際には f_{max} (Cut-off frequency: 高域遮断周波数)⁸⁾と呼ばれる周波数より高周波数帯域では低減傾向を示す。この f_{max} の生成要因については震源の影響によるとする考え^{例えば9)}と地表近傍での影響によるとする考え^{例えば10)}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^{11), 12)}や統計的グリーン関数法¹³⁾あるいはハイブリッド法¹⁴⁾などにより強震動予測を行なう際には、この高周波数帯域におけるスペクトル低減特性の地震規模依存性の有無が重要である。これについては、 f_{max} の値に地震規模依存性があるとする研究すなわち生成要因を震源に求める研究^{9), 15)~17)}、 f_{max} の値に地震規模依存性がないとする研究すなわち生成要因を地表近傍での影響に求める研究^{8), 10), 18)}、生成要因には言及せず震源規模依存性について経験的に評価する研究^{19)~21)}などが数多くなされている。

このような地震規模依存性の有無に関する検討のほかに、強震動予測のための高域遮断フィルターの形状を求める試みもなされつつある。香川・ほか²²⁾は最近国内で発生した大地震 (M_J : 6.3~7.3) の硬質地盤における観測記録を用いて、高周波数帯域における低減特性を検討し、大地震を対象とした硬質サイトの一般的な高域遮断フィルターを提案している。鶴来・ほか²³⁾は、「強震動予測においては、大地震の高域遮断フィルターだけではなく、大地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性と小地震のそれとの違いを補正するフィルターも重要である」との指摘を行なった上で、これらを提案している。

本研究では、強震動予測に用いるための高域遮断フィルターを提案することを目的に、2005年福岡県西方沖地震の本震および余震を対象に、まず、その高域遮断フィルターを求める。続いてこの結果を基に大地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性と小地震のそれの違いを補正するフィルターを求める。

2. 本研究における高域遮断フィルターの基本的考え方

本研究における高域遮断フィルターの基本的な考え方は鶴来・ほか²³⁾と同じである。すなわち、まず Papageorgiou and Aki⁹⁾の考え方に立脚して、「地震規模が大きくなると f_{max} の値が小さくなる」と考える。このとき、小地震のスペクトルの ω^{-2} 則に従うスペクトルからの偏差をもたらす高域遮断フィルターを $P_S(f)$ 、大地震のそれを $P_L(f)$ 、大地震と小地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性の違いを補正するためのフィルターを補正フィルター $P_C(f)$ とすると、式(1)に示す関係が成立するものと考えられる(図1参照)。ここで注意すべき点は、 $P_S(f)$ や $P_L(f)$ は高域遮断周波数 f_{max} で規定される高域遮断フィルターであるが、 $P_C(f)$ は補正フィルターであり、高域遮断フィルターとは別の意味合いを持つことである。

$$P_L(f) = P_S(f) \times P_C(f) \quad (1)$$

また、強震動予測における各フィルターの位置づけを図2に示す。ここで、本研究は高周波数帯域を対象としたものであるため、差分法や有限要素法など低周波数帯域を対象とした地震動予測手法については、図2に反映させていない。図2からわかるように、強震動予測の過程で小地震観測記録を用いる場合(経験的グリーン関数法や経験的サイト増幅特性を用いた統計的グリーン関数法)は $P_C(f)$ による補正が、これを用いない場合は $P_L(f)$ による補正が必要であると考えられる。

本研究は2005年福岡県西方沖地震の本震および余震記録を用いて $P_L(f)$ および $P_S(f)$ を求め、さらに補正フィルター $P_C(f)$ を評価する。

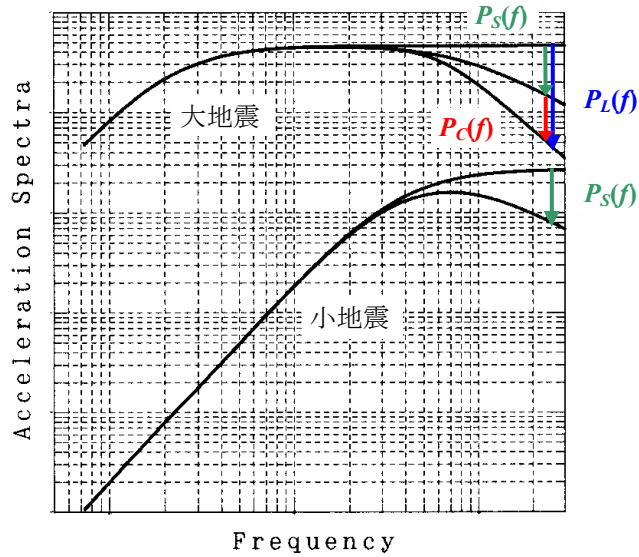


図1 小地震と大地震の加速度フーリエスペクトルの概念図

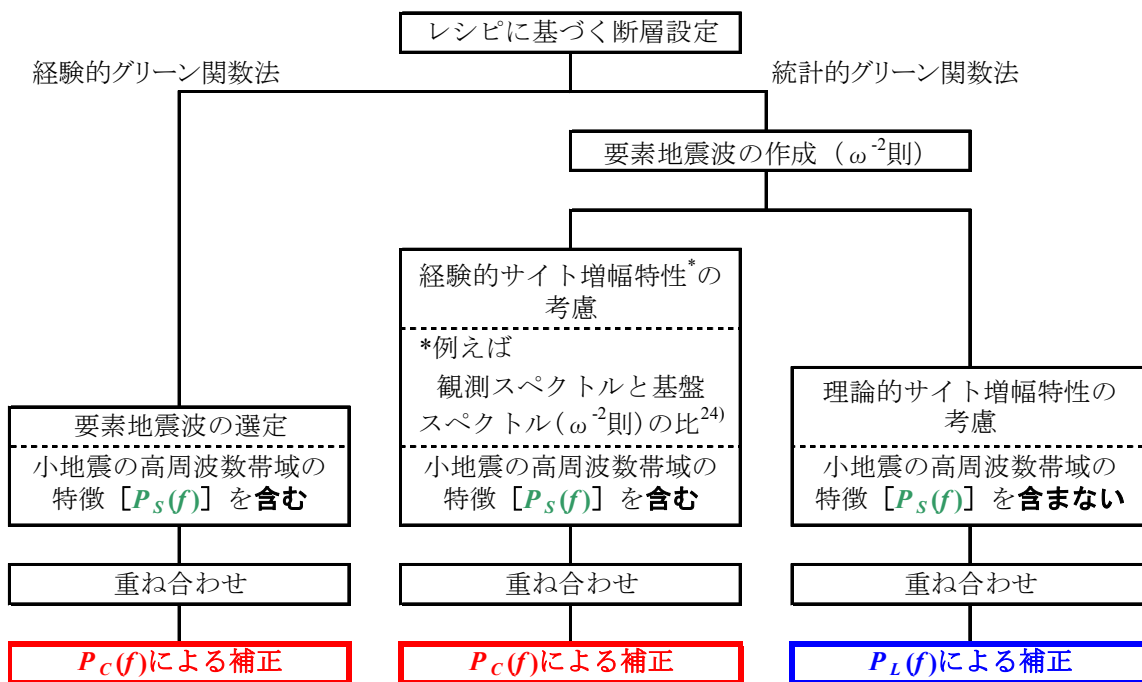


図2 強震動予測における各フィルターの位置づけ

3. 解析概要

まず、岩盤観測点(独立行政法人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、2005年福岡県西方沖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。対象地点の抽出範

圏を狭くした場合は、対象サイト数が少なくなり、1地点における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が大きくなるため、適切なパラメータを決定できない可能性がある。逆に、対象地点の抽出範囲を広くした場合は、複雑な伝播経路の影響により震源変位スペクトルの評価精度が落ち、適切なパラメータを決定できない可能性がある。これらを鑑み、震源域から概ね100km以内の観測点を対象とすることとし、その範囲に含まれる複数地点の記録を用いることにより、Directivityやラディエーションパターンの影響を小さくした。また、対象地点を抽出する際の基準せん断波速度を高速度とした場合は、対象サイト数が少なくなり、1地点におけるDirectivityやラディエーションパターンの影響が大きくなるため、適切なパラメータを決定できない可能性がある。逆に、基準せん断波速度を低速度とした場合は、その記録にはサイト増幅特性の影響が含まれることになり、適切なパラメータを決定できない可能性がある。これらを鑑み、せん断波速度が2,000m/sec以上の観測点を対象とし、サイト増幅特性の影響を極力小さくした。

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。本研究では後述する通り、高周波数領域におけるスペクトル低減特性を規定する係数だけでなく、比較的低周波数領域のスペクトル特性を規定するパラメータ(地震モーメントおよびコーナー周波数)を同時に得ることも付随的な目的としている。比較的低周波数領域のスペクトルの精度を高めるために、波形の抽出区間を主要動部20秒とやや長く抽出した。また、主要動部の抽出にあたってマルチテーパー^{25)~27)}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。地中観測点の記録については地表からの反射波と入射波の干渉の影響が危惧されるが、これに起因するスペクトルの落ち込みが明確に確認できなかったため、観測記録をそのまま用いた。さらに計器特性の補正を行った。なお、KiK-net地中地震計と同じ孔内に設置されているHi-net地震計については、地震計を収納した容器の共鳴振動により20Hz程度の周波数帯域においてスペクトルの急激な低減傾向が見られたが、容器に制振治具等を加えることによって共振の制御を行ない、共振点は測定帯域外まで高められている²⁸⁾。KiK-net地震計についても、この共振現象の影響が懸念されるが、本検討の対象周波数範囲で容器の共振に起因するスペクトルの急激な低減は認められなかった。 Q 値は九州北部および西部地域の地殻内地震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(2)]²¹⁾を用いた。

$$Q(f)=112.0 \times f^{0.70} \quad (2)$$

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。まず、地点 i における観測記録 $O_i(f)$ より震源変位スペクトル $\Omega_i(f)$ を算出し[式(3)]、複数地点の記録からこの平均スペクトル $\Omega(f)$ を求める。続いて、Andrews²⁹⁾の方法により、震源変位スペクトル $\Omega(f)$ [式(3)]の低周波数帯域におけるフラットレベル Ω_0 およびコーナー周波数 f_c を求め、式(4)により地震モーメントを得る。

$$\Omega_i(f) = \frac{O_i(f)}{\frac{1}{X_i} \exp\left\{\frac{-\pi f X_i}{Q(f)\beta}\right\}} \quad (3)$$

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

ここで、 X_i は地点 i までの震源距離である。 ρ は媒質の密度および β はせん断波速度であり、それぞれ 2.7g/cm^3 、 3.6km/sec を用いた。このうち、せん断波速度はUehira *et al.*³⁰⁾による福岡地域の地下構造を参考に決定し、密度はせん断波速度との経験的な関係³¹⁾を参考にして与えた。また、 $R_{\phi\theta}$ はラディエーションパターンの係数で、 0.63 ³²⁾を用いる。 FS はサイト増幅率に関わる係数であり、地表記録の場合は2.0となる。KiK-netの掘削長程度では地中記録と地表記録の長周期成分の振幅比は1になることが

表1 解析に用いた地震の諸元および推定した各種パラメータ

No.	発震時刻	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	M_J	M_0 (N·m)	f_c (Hz)	M_w	f_{max} (Hz)	s	M_0 比	サイ ト数
1	2005.03.20 10:53	33.738	130.175	9	7.0	1.15×10^{19}	0.16	6.6	6.5	0.90	1.47	9
2	2005.03.20 14:32	33.797	130.087	12	4.5	3.98×10^{15}	0.78	4.3	14.6	0.80	1.34	3
3	2005.03.20 15:41	33.708	130.222	10	3.6	3.79×10^{14}	1.58	3.7	10.4	1.02	1.55	2
4	2005.03.20 16:08	33.762	130.143	12	4.1	9.83×10^{14}	1.48	3.9	9.2	0.33	2.08	4
5	2005.03.20 20:38	33.745	130.170	11	4.5	4.22×10^{15}	1.13	4.4	13.4	1.47	1.94	9
6	2005.03.21 06:17	33.728	130.193	12	3.9	1.03×10^{15}	2.02	3.9	19.0	2.35	1.42	7
7	2005.03.21 15:37	33.783	130.097	11	4.2	1.30×10^{15}	1.62	4.0	19.3	2.11	1.73	6
8	2005.03.21 23:59	33.785	130.100	12	4.8	9.42×10^{15}	0.97	4.6	16.5	1.78	1.68	8
9	2005.03.24 23:38	33.740	130.170	11	4.3	8.07×10^{14}	1.95	3.9	15.8	1.51	1.50	6
10	2005.03.25 03:43	33.722	130.215	11	4.0	1.00×10^{15}	1.54	3.9	17.2	1.83	1.46	4
11	2005.03.25 21:03	33.785	130.117	12	4.1	1.76×10^{15}	1.79	4.1	14.4	1.42	1.54	8
12	2005.04.20 06:11	33.677	130.287	14	5.8	1.43×10^{17}	0.67	5.4	8.8	0.98	1.09	9
13	2005.04.20 06:22	33.678	130.288	13	4.7	7.03×10^{15}	1.00	4.5	19.7	1.73	1.32	8
14	2005.04.20 09:09	33.678	130.283	13	5.1	2.12×10^{16}	1.01	4.8	11.0	1.40	1.41	9

M_0 : 地震モーメント, f_c : コーナー周波数, M_w : モーメントマグニチュード

M_0 比 : 地震モーメントのF-netの値に対する推定値の比

知られている。本研究では地中記録を用いているが、 FS は 2.0 とした。PRTITN はエネルギー分配の係数で、本検討では水平動のスペクトルのベクトル和を取っているため 1.0 とした。

最後に、高周波数帯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Boore¹⁸⁾による形状[式(5)]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(5)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³³⁾により求める。

検討対象地震の諸元を表1に、それらの震央および対象地点の位置を図3に示す。表1中、No.1の地震が本震、No.2~No.14の地震が余震である。表1中の震央位置および震源深さは地震・火山月報(カタログ編)に示された値である。また、図3中の括弧内の数字は、当該地点の地中地震計設置深度におけるせん断波速度(m/sec)である。

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2s}}} \quad (5)$$

4. 解析結果

4.1 得られた各種パラメータ

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 の値を表1に示す。同表には推定した地震モーメントから得られるモーメントマグニチュード M_w 、地震モーメントの F-net の値に対する推定値の比 (M_0 比) および検討に用いたサイト数を併記する。これより、推定された地震モーメントは F-net の値に対して1.09倍~2.08倍程度であることがわかる。F-net による地震モーメントの値に比べやや大きく

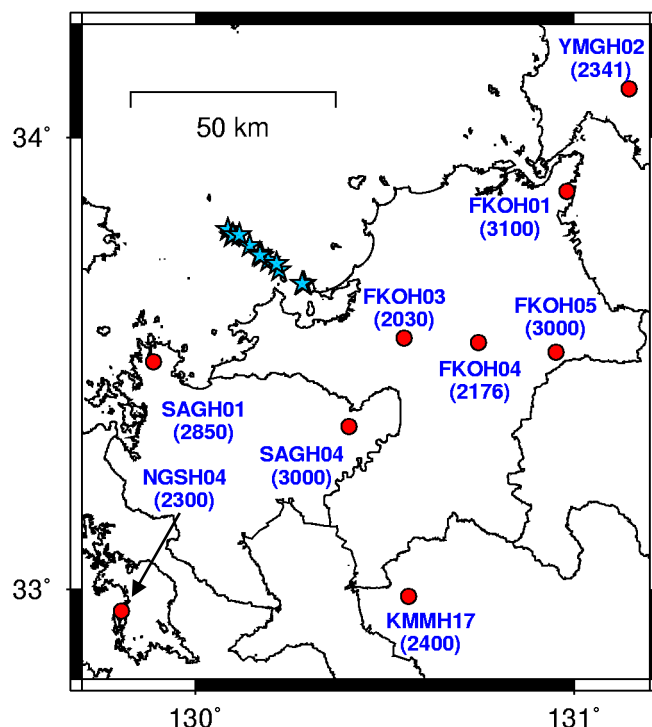


図3 解析に用いた地震の震央(★)と地震観測点(●)の位置
 [括弧内の数字は当該サイトの地中地震計設置深度におけるせん断波速度(m/sec)]

評価された原因として、本研究に用いた地点の地中地震計設置深度におけるせん断波速度が2,000m/sec～3,000m/secと、地震基盤で想定されるせん断速度に比べやや小さく、地震動が増幅した可能性も考えられる。しかし、本研究の目的である高域遮断フィルターの形状の評価には影響を及ぼさない。

なお、ここでは震央距離が概ね100km以内の観測点の記録を用いたが、震源距離が長い場合は複雑な伝播経路の影響により適切な震源スペクトルの評価が困難となることが危惧される。そこで、震央距離が比較的短く、伝播経路がより単純と考えられる震央距離が50km以内の観測点の記録を用いた解析も行なった。その結果、推定された各パラメータは表1に示す値とほぼ同じであった。また、本検討では主要動部20秒間を抽出して解析に用いた。抽出区間を主要動部10秒間とした解析を行った結果、地震モーメントやコーナー周波数といった低周波数領域のスペクトル特性を規定するパラメータは、抽出区間を20秒間とした値と異なる値となったが、本研究の目的である高周波数領域のスペクトル低減特性を規定するパラメータ(f_{max} および s)の値は表1に示す値と顕著な差は認められなかった。さらに、本研究ではせん断波速度との経験的な関係を参考に密度を 2.7g/cm^3 としたが、密度の値が f_{max} および s の評価結果に与える影響は小さいことを確認した。

4.2 本震記録の高域遮断フィルター

2005年福岡県西方沖地震 本震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ を図4に示す。ここで、平均スペクトルとは、対象観測点までの震源距離の平均値に相当する地点におけるスペクトルであり、平均震源スペクトルに平均震源距離までの伝播経路特性を考慮して算出される。また、理論スペクトル $A(f)$ とは、 ω^{-2} 則⁷⁾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 $P(f)$ を考慮したスペクトルであり [式(6)参照]、表1に示した値を与えることにより計算される。

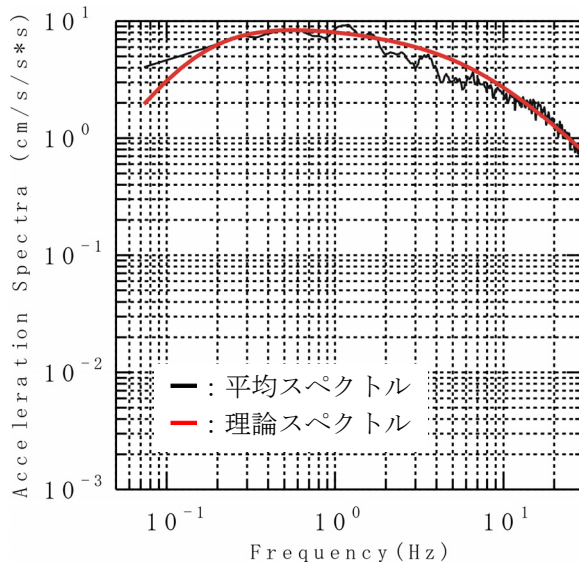


図4 本震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル

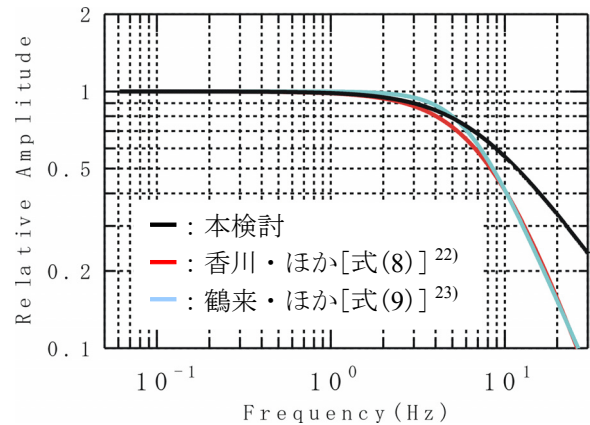


図5 大地震の高域遮断フィルター

$$A(f) = CM_o S(f) \frac{1}{X} \exp \frac{-\pi f X}{Q(f) \beta} P(f) \quad (6)$$

ここで、 $S(f)$ は ω^{-2} 則⁷⁾に基づく震源特性で式(7)のように表せる。また、 X は対象とした複数の観測点までの震源距離の平均値、 β はせん断波速度であり、 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。

$$s(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (7)$$

図4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。本震の高域遮断周波数 f_{\max} は6.5Hz、べき乗数 s は0.9、すなわち高域遮断フィルターは式(8)のように推定された。この高域遮断フィルターを図5に示す。比較のため、同図には香川・ほか²²⁾によるフィルター[式(9)]、鶴来・ほか²³⁾によるフィルター[式(10)]を同図に併記する。ここで、香川・ほか²²⁾は1997年鹿児島県北西部地震および2000年鳥取県西部地震を対象とし、それらの平均的特性を求めたものであり、鶴来・ほか²³⁾は1995年兵庫県南部地震を対象としたものである。なお、香川・ほか²²⁾では1995年兵庫県南部地震も検討対象としているが、式(9)を導出する際にはこれを用いていない。これより、本研究で得られた高域遮断フィルターの低減し始める周波数は香川・ほか²³⁾や鶴来・ほか²³⁾によるフィルターとほぼ同じであるが、その低減の傾きはやや小さいことがわかる。本検討ではせん断波速度が2,000m/secを越える地点の記録を用いている。これに対して、香川・ほか²²⁾や鶴来・ほか²³⁾では洪積層や風化岩(せん断波速度は500~1,000m/sec程度と推測できる)の記録を用いており、堅固さにやや劣る層における減衰効果がこれらの結果に現れていると考えられる。その意味で、得られるスペクトル低減特性にはサイト特性の影響も含まれていると考えられる。なお、「堅固さの影響である」という仮説の妥当性については第5章で検討する。

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

$$P_L(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{8.3}\right)^{1.92}} \quad (9)$$

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{6.0}\right)^{2 \times 1.55}}} \quad (10)$$

4.3 余震記録の高域遮断フィルター

2005年福岡県西方沖地震 余震の一例として、

No. 3 (発震時刻：2005年03月20日 15時41分, M_J : 3.6)

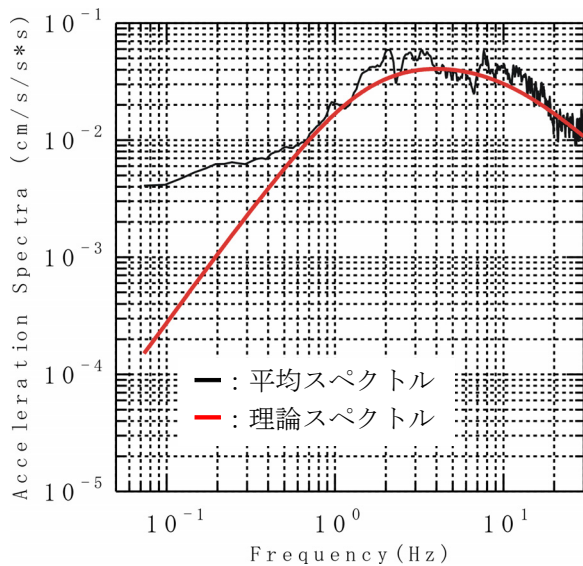
No.12 (発震時刻：2005年04月20日 06時11分, M_J : 5.8)

の2地震について、その平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトルを図6に示す。ここで、平均スペクトルおよび理論スペクトルとは前節に記述した通りである。なお、No.3の地震については0.7Hz程度以下、No.12の地震については0.4Hz程度以下の周波数帯域では十分なSN比がないと判断される。これらの図より、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。ここでは2地震のみを示したが、他の地震についても両スペクトルはこれらと同程度適合している。表1より、2005年福岡県西方沖地震 余震の f_{max} は9Hz~20Hz、べき乗数 s は0.3~2.4と推定され、いずれも比較的大きくばらついていることがわかる。その結果、高域遮断フィルターの形状も比較的大きくばらついている（図7参照）。この余震の高域遮断フィルターの平均およびこれに近似するフィルター[式(11)]を図8に示す。同図には1995年兵庫県南部地震の余震等の高域遮断フィルターの平均的特性[式(12)]²³⁾も併記した。これより本検討で得られた余震のフィルターは1995年兵庫県南部地震の余震等の高域遮断フィルターに比べ、傾きには大きな差がないが、低減し始める周波数は高周波数側に推移していることがわかる。この要因として、前節の大地震の高域遮断フィルターの場合と同様、解析に用いたサイトの堅固さの違いが考えられる。この仮説の妥当性については第5章で検討する。

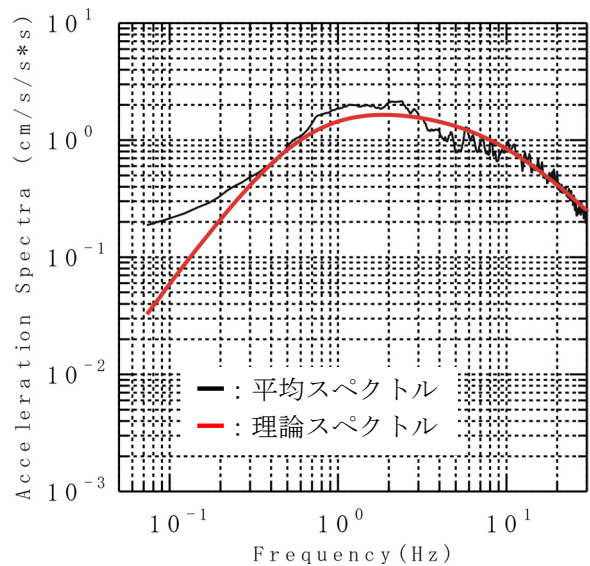
$$P_S(f) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{14.5}\right)^{2 \times 1.3}}} \quad (11)$$

$$P_S(f) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{7.5}\right)^{2 \times 1.2}}} \quad (12)$$

地震モーメントと f_{max} の関係を図9に示す。参考のため同図には1995年兵庫県南部地震および2003年宮城県北部地震の本震の f_{max} の値^{23), 34)}も併記した。ここで、1995年兵庫県南部地震の地震モーメントは釜江・入倉³⁵⁾による値、2003年宮城県北部地震の地震モーメントは本検討と同様な方法で求めた値である。地震モーメントが比較的小さい場合は f_{max} の値のばらつきが大きい、余震の f_{max} の値は本震の値よりは明らかに大きい。また、最大規模の余震すなわち本震に続いて2番目に規模の大きな地



(1) No. 3 : 2005年3月20日15時41分の地震



(2) No. 12 : 2005年4月20日6時11分の地震

図6 余震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル

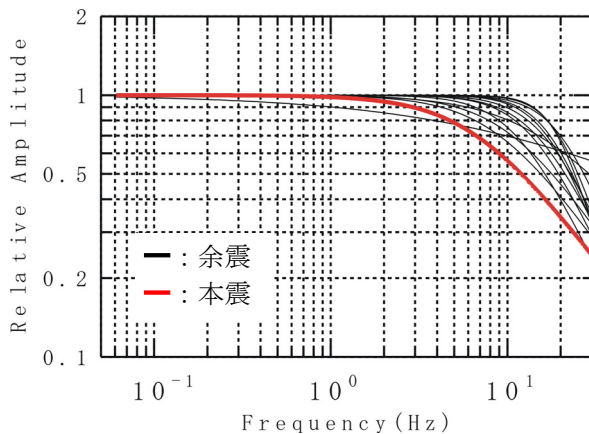


図7 本震と余震の高域遮断フィルター

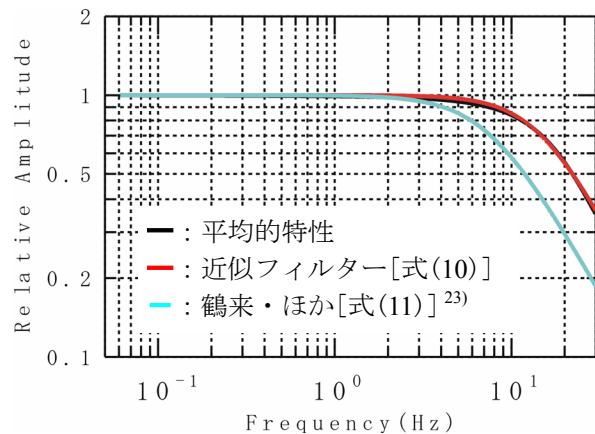


図8 余震の高域遮断フィルターの平均的特性およびそれに近似するフィルター

震 (No.12の地震)の f_{max} は8.8Hzとなり、本震の次に小さな値となった。 f_{max} の値の地震規模依存性を考える上で興味深い結果と言える。現段階では f_{max} の地震規模依存性の有無を明確に判断することはできないが、ここで得られた結果は、 f_{max} の値に地震規模依存性があることを示唆している。なお、せん断波速度に対する最大速度の比によって簡易的に得られる本震時に発生したひずみレベルは $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度で、地盤の非線形性の影響は極めて小さいものと推測される。したがって、この地震に関して、本震記録に含まれる f_{max} の値が余震記録に含まれるそれに比べて小さくなった要因として、地盤の非線形性は考えにくいと言える。また、1995年兵庫県南部地震 本震や2003年宮城県北部地震 本震の f_{max} の値は全体的傾向と矛盾のない結果であることがわかる。

4.4 大地震と小地震のスペクトル低減特性の違いを補正するフィルター

大地震と小地震の高域遮断フィルター $[P_L(f), P_S(f)]$ および補正フィルター $P_C(f)$ の間には式(1)つま

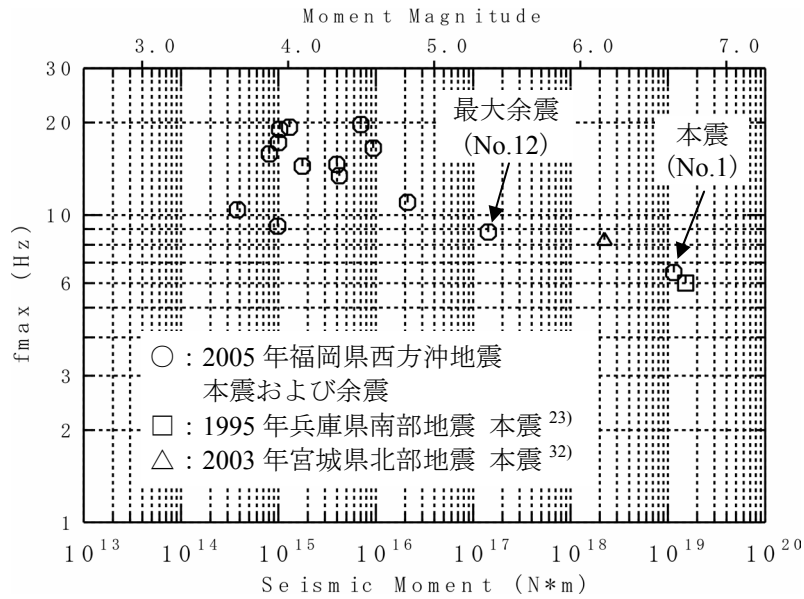


図9 地震モーメントと f_{max} の関係

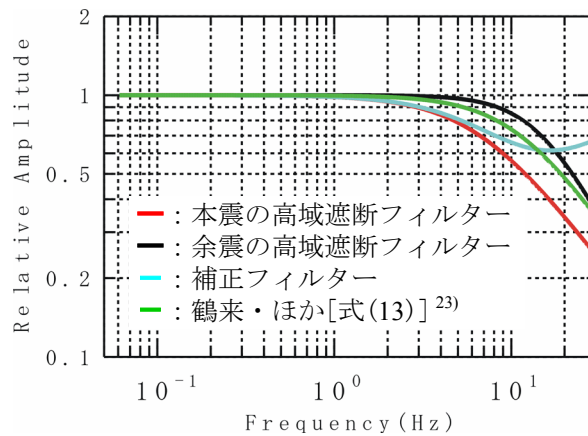


図10 補正フィルター

り式(13)に示す関係があると考えられる。前節までに得られた大地震と小地震の高域遮断フィルター[式(8)および式(11)]をこの関係に代入し補正フィルター $P_C(f)$ を求めた。その結果、補正フィルター $P_C(f)$ は図10に示すフィルターとなった。同図には1995年兵庫県南部地震本震および余震等の解析によって得られた補正フィルター[式(14)]²³⁾も併記した。これより、本検討で得られた補正フィルター $P_C(f)$ の値は2Hz程度以上の周波数帯域で徐々に小さくなり、15Hz程度で最小、それ以上の周波数帯域では徐々に大きくなる傾向を示し、式(14)のような周波数の増加とともに相対振幅が減少する形状で $P_C(f)$ を近似することは不可能であることがわかる。これは高域遮断フィルターの低減傾向を示す係数 s の値が本震は0.90であるのに対して余震は1.30と、余震の値のほうが大きいためである。

$$P_C(f) = \frac{P_L(f)}{P_S(f)} \quad (13)$$

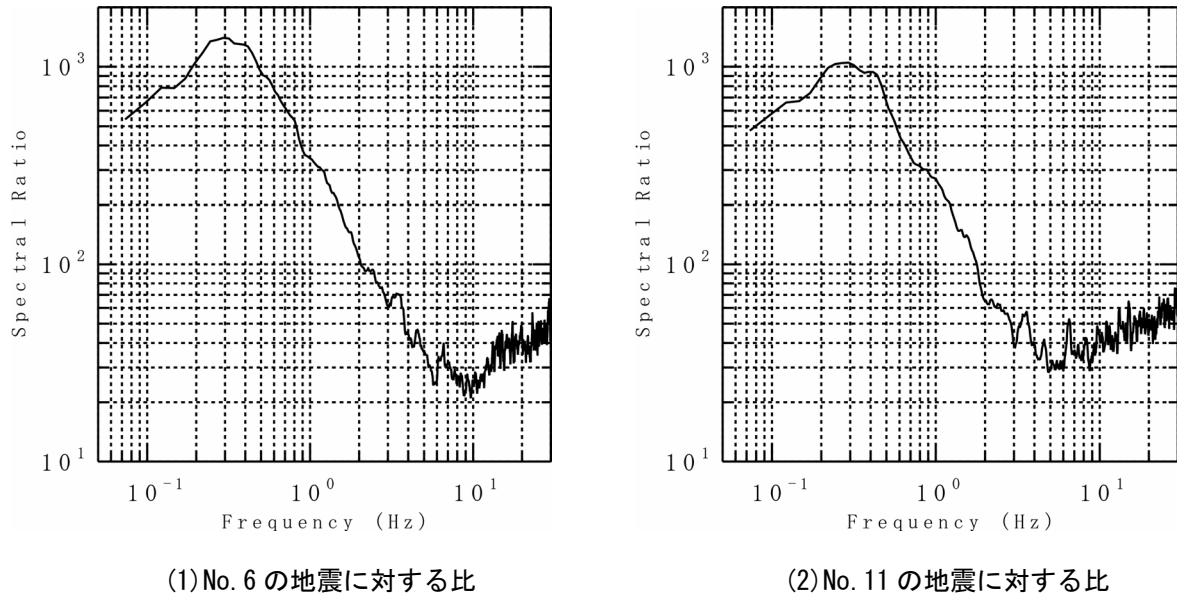


図 11 余震に対する本震のスペクトル比の一例

$$P_C(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{11.0}\right)^{2 \times 1.0}}} \quad (14)$$

本研究においては検討対象地震の高周波数帯域のスペクトル低減特性を式(5)に示す高域遮断フィルター形状で近似している. したがって, 「スペクトル比が 10 数 Hz で最小となり, それ以上の周波数帯域では徐々に大きくなっていく」傾向がスペクトル低減特性を近似する際のエラーに起因している可能性が危惧される. そこで, 式(15)に示すスペクトル比 $R(f)$ を求めることによって, 観測記録にこのような特徴があるかどうかを検討し, その要因が近似する際のエラーかどうかを判断する.

$$R(f) = \frac{O_M(f)}{O_A(f)} \quad (15)$$

ここで, $O_M(f)$, $O_A(f)$ はそれぞれ本震および余震のスペクトルである. この余震に対する本震のスペクトル比の一例を図 11 に示す. ここで, 本震および余震のスペクトルは複数地点における観測記録から求めた平均スペクトルである. これより, スペクトル比は 5~10Hz 程度で最小, それ以上の周波数帯域では徐々に大きくなっていき, 図 10 に示した補正フィルターの形状と似た特徴があることがわかる. ここでは 2 つの余震に対する比を示したが, 他の余震に対するスペクトル比についても概ね同様の傾向が見られた. したがって, 補正フィルター $P_C(f)$ が 15Hz 程度で最小となり, それ以上の周波数帯域では徐々に大きくなっていく傾向を持つことは, 高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を高域遮断フィルターで近似する際のエラーではなく, 観測記録に元々含まれている特徴であることが明らかとなった.

なお, 補正フィルターの形状が鶴来・ほか²³⁾によって得られたそれと異なる原因として, 地域性や地震規模等が考えられるが, 現状ではこれを明確にすることは困難である.

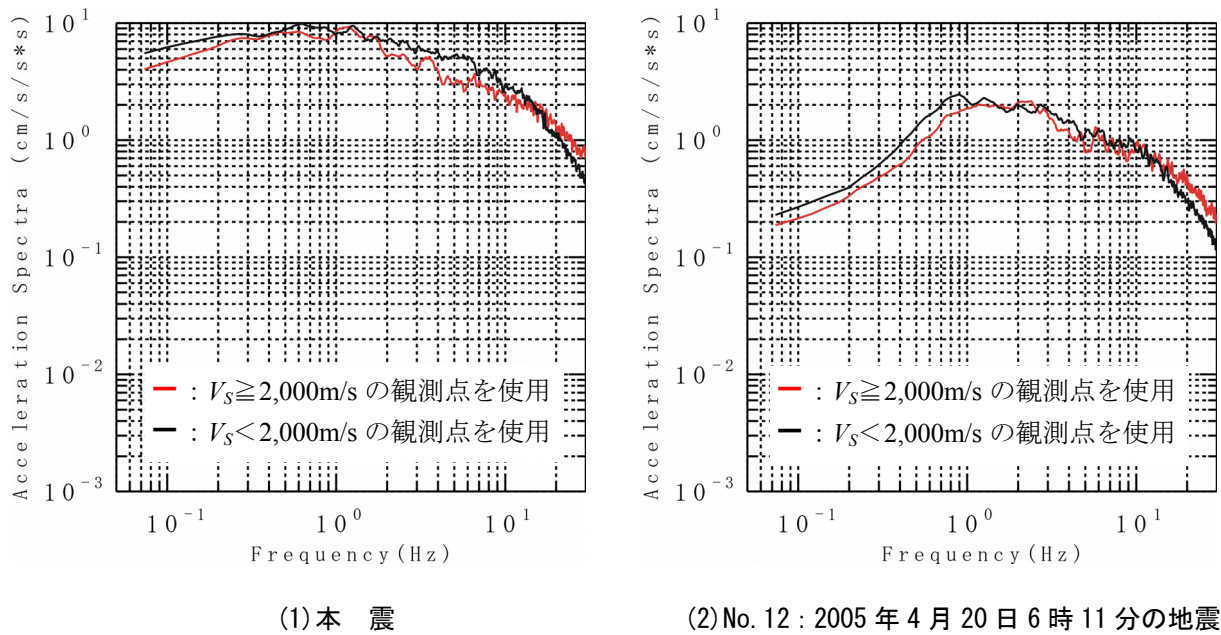


図 12 検討対象サイトの堅固さが高周波数帯域における地震動特性に及ぼす影響

5. サイトの堅固さが高周波数帯域における地震動特性に及ぼす影響

第 4 章第 2 節では、本検討により得られた本震記録の高域遮断フィルターの低減の傾きが、香川・ほか²²⁾や鶴来・ほか²³⁾によるフィルターに比べやや小さいことを指摘した。また、第 4 章第 3 節では、本検討により得られた余震記録の高域遮断フィルターの低減し始める周波数は鶴来・ほか²³⁾に比べ高周波数側に推移していることを指摘した。これらはいずれも、高周波数帯域におけるスペクトルの低減傾向が本検討では小さいことを意味している。第 4 章では、これらの要因は解析に用いたサイトの堅固さの違いであるとの仮説を示した。第 4 章で示した結果(図 5 や図 8)は異なる地震のスペクトル低減特性を示しているが、ここでは、同一地震の堅固さが異なる地点の観測記録を用いて、この仮説の妥当性を確認する。

本震および No.12 の余震(2005 年 4 月 20 日 6 時 11 分)について、地中地震計設置深度におけるせん断波速度が 900~2,000m/sec の KiK-net 地中観測点(全 13 地点)の記録から平均スペクトルを求め、先に求めた 2,000m/sec 以上の観測点の記録から求めたそれとの比較を行なった(図 12 参照)。同図よりせん断波速度が 2,000m/sec 以上の観測点の記録から求めた平均スペクトルは、それ未満の観測点の記録から求めたそれに比べ、緩やかな低減傾向を示すことがわかる。ここでは、本震および No.12 の余震について示したが、他の地震についても同様の傾向が認められた。以上より、「サイトの堅固さがスペクトル低減傾向に影響を及ぼす」との第 4 章における仮説の妥当性が確認されたと言える。

図 9 に地震モーメントと f_{max} の関係を示したが、これより f_{max} の地震規模依存性は明確ではないものの、これを示唆する結果を得ている。さらに、サイトの堅固さの違いがスペクトル低減特性に影響を及ぼすことも確認された。これらのことは f_{max} の生成要因として震源および地表近傍のいずれもが考えられることを示唆している。

6. 大地震の高域遮断フィルターが強震動予測結果に及ぼす影響評価

本章では、提案した大地震の高域遮断フィルターが地震動予測結果にどの程度影響を及ぼすかについて検討する。地震動シミュレーションは統計的グリーン関数法¹³⁾により行なった。想定する断層は

表2 設定した巨視的断層パラメータ

断層上端深度 (km)	2.0
断層長さ (km)	21.0
断層幅 (km)	18.0
断層分類	横ずれ断層
断層傾斜角 (°)	90.0
すべり角 (°)	0.0
全断層面積 (km ²)	378.0
地震モーメント (N・m)	7.00×10 ¹⁸
モーメントマグニチュード	6.5
平均応力降下量 (MPa)	2.32
平均すべり量 (m)	0.64
立ち上がり時間 (sec)	0.84
破壊伝播速度 (km/sec)	2.7

表3 設定した微視的断層パラメータ

アスペリティの個数	1
アスペリティの面積 (km ²)	81.0
アスペリティ面積比 (%)	21.4
アスペリティでの総モーメント (N・m)	3.01×10 ¹⁸
アスペリティ	
面積 (km ²)	81.0
地震モーメント (N・m)	3.01×10 ¹⁸
すべり量 (m)	0.91
応力降下量 (MPa)	10.8
立ち上がり時間 (sec)	0.63
背景領域	
面積 (km ²)	297.0
地震モーメント (N・m)	3.98×10 ¹⁸
すべり量 (m)	0.33
応力降下量 (MPa)	4.0
立ち上がり時間 (sec)	0.69

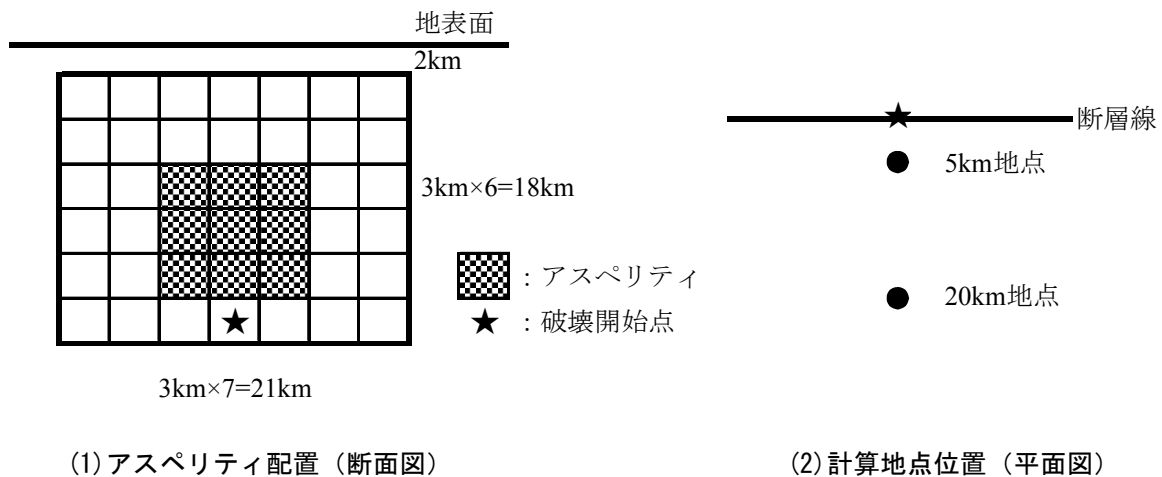


図 13 アスペリティ配置および計算地点位置

長さ 21km, 幅 18km の横ずれ断層とし, 各種断層パラメータは強震動予測レシピ^{2),3)}に従い設定した. 設定した巨視的および微視的断層パラメータを表 2 および表 3 に示す. 計算地点の位置は断層中央から断層直交方向に 5km および 20km の 2 地点とした. アスペリティ配置および計算地点位置を図 13 に示す. なお, 計算周波数範囲は 0.2~20Hz (0.05~5 秒) である.

大地震の高域遮断フィルターは小地震の地震動特性を用いずに行なう強震動予測, 例えば, 統計的グリーン関数法¹³⁾においてサイト増幅特性の評価を小地震記録ではなく地盤モデルから評価する場合など, に適用するものである. そこで, まず図 13(2)に示した計算地点の地震基盤における地震動を統計的グリーン関数法¹³⁾で算出し, 続いて 1 次元地盤モデルを用いた線形の地震応答解析³⁶⁾により地表面地震動を求め, この地震動に対して高域遮断フィルターの影響を検討した. 解析に用いた 1 次元地盤モデルは大阪府内で PS 検層が実施されている地点のデータである. なお, 比較のため既往の高域遮断フィルターが強震動予測結果に及ぼす影響についても検討した. 比較対象とした既往の高域遮断フ

フィルターは香川・ほか²²⁾および鶴来・ほか²³⁾によるもの[式(9)および式(10)]である。また、統計的グリーン関数法¹³⁾による基盤地震動は乱数時系列を変えた2波を作成し、それぞれについて地表地震動を求めた。なお、これらの断層パラメータや計算地点位置等の解析条件は、鶴来・ほか²³⁾で行なった同様の高域遮断フィルターの影響評価の解析条件と同じである。

強震動予測結果の比較の一例を図14に示す。示した結果は断層からの距離が5km地点における加速度波形および減衰定数5%の加速度応答スペクトルである。ここでは高域遮断フィルターが強震動予測結果に及ぼす影響を検討することが目的であるため、これ以外の解析条件は同一としている。つまり、同じ乱数時系列を使っているため、図14(1)に示した加速度波形は、振幅は異なるが位相特性は同じ波形となっている。これより、各フィルターにより高周波数帯域を補正した場合は補正無しの場合に比べ最大加速度は小さくなるが、用いるフィルターによる差異は小さいことがわかる。また、加速度応答スペクトルは周期0.5秒程度以下では、補正無しの場合に比べ小さくなるが、最大加速度値と同様、用いるフィルターによる差異は小さいことがわかる。

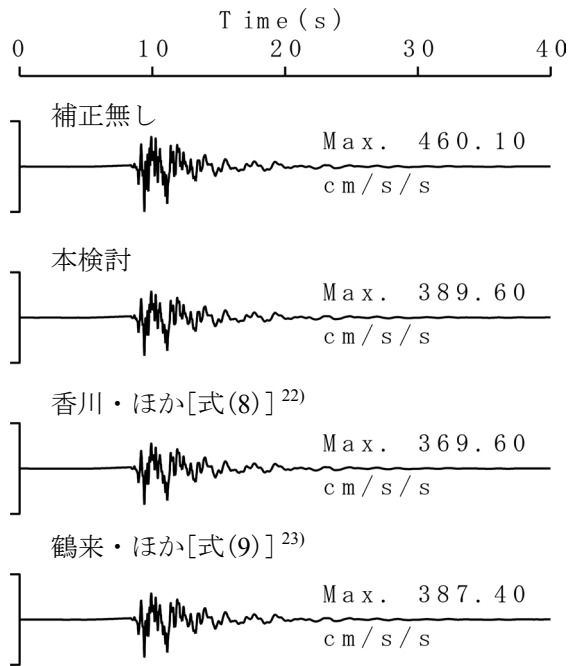
それぞれの高域遮断フィルターを用いた場合の地震動特性値〔最大加速度PGA、周波数10Hz(周期0.1秒)における加速度応答スペクトル値SA(減衰定数5%)、計測震度〕の比較を図15に示す。棒グラフ中もしくはその横の数字はPGA、SAおよび計測震度を、括弧内の数値は補正無しの場合の各特性値に対するそれぞれの比率を示している。これより、最大加速度PGAは補正無しの場合に対し10~15%程度小さくなること、他のフィルターを用いた場合の結果とほぼ同等なこと、が明らかとなった。周波数10Hz(周期0.1秒)における加速度応答スペクトル値SAは、補正無しの場合に対し20~25%程度小さくなること、他のフィルターを用いた場合の結果よりは大きな値となるもののその差は顕著ではないこと、が明らかとなった。また、計測震度は補正なしの場合と同じもしくは0.1小さくなる程度で、影響は小さいことがわかる。これは、気象庁が波形から計測震度を求める際に用いている周波数特性を補正するフィルターは0.5Hz程度を中心とした周波数帯域のウェートが高く³⁷⁾、高周波数帯域のフィルター形状が与える影響は限定的であるためと考えられる。

7. おわりに

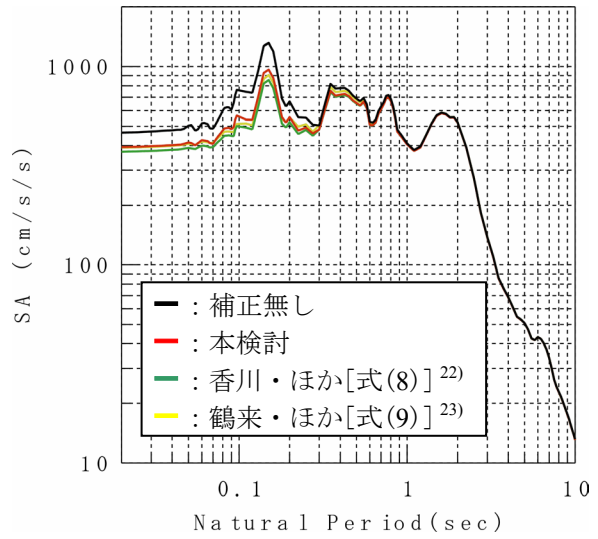
本研究では、強震動予測に用いるための高域遮断フィルターを提案することを目的に、2005年福岡県西方沖地震本震および余震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を検討した。その結果、本震記録の f_{max} は6.5Hzと推定された。この値は1995年兵庫県南部地震本震の値とほぼ同等である。しかし、高域遮断フィルターの高周波数帯域における低減の傾きは1995年兵庫県南部地震本震のそれに比べやや小さくなった。この傾きの違いの原因として、解析に用いたサイトの堅固さの違いが考えられる。解析に用いるサイトの堅固さが高周波数帯域におけるスペクトル低減特性に与える影響をさらに検討する必要がある。

余震の f_{max} は概ね9Hz~20Hzと比較的大きくばらついているが、本震の値よりは明らかに大きいと言える。最大規模の余震すなわち本震に続いて2番目に規模の大きな地震の f_{max} は8.8Hzとなり、本震の次に小さな値となった。 f_{max} の値の地震規模依存性を考える上で興味深い結果と言える。現段階では f_{max} の地震規模依存性の有無を明確に判断することはできないが、ここで得られた結果は、 f_{max} の値に地震規模依存性があることを示唆している。なお、この地震に関しては地盤の非線形性が地震動の高周波数領域におけるスペクトルの低減特性に与えた影響は小さいと考えられるが、地震規模や対象サイトによっては地盤の非線形性によって f_{max} が低周波数側に推移する可能性もあり、注意が必要である。また、本検討で得られた余震の高域遮断フィルターは近畿地方で発生した小地震のそれに比べ、傾きには大きな差がないが、低減し始める周波数は高周波数側に推移していることが明らかとなった。これは、大地震の高域遮断フィルターの場合と同様、解析に用いたサイトの堅固さの違いが要因として考えられる。以上の結果は、 f_{max} の生成要因として震源および地表近傍のいずれもが考えられうることを示唆している。

また、大地震と小地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性の違いを補正するフィルター



(1) 加速度波形



(2) 加速度応答スペクトル

図 14 強震動予測結果の一例 (断層からの距離が5km 地点, 乱数時系列 1)

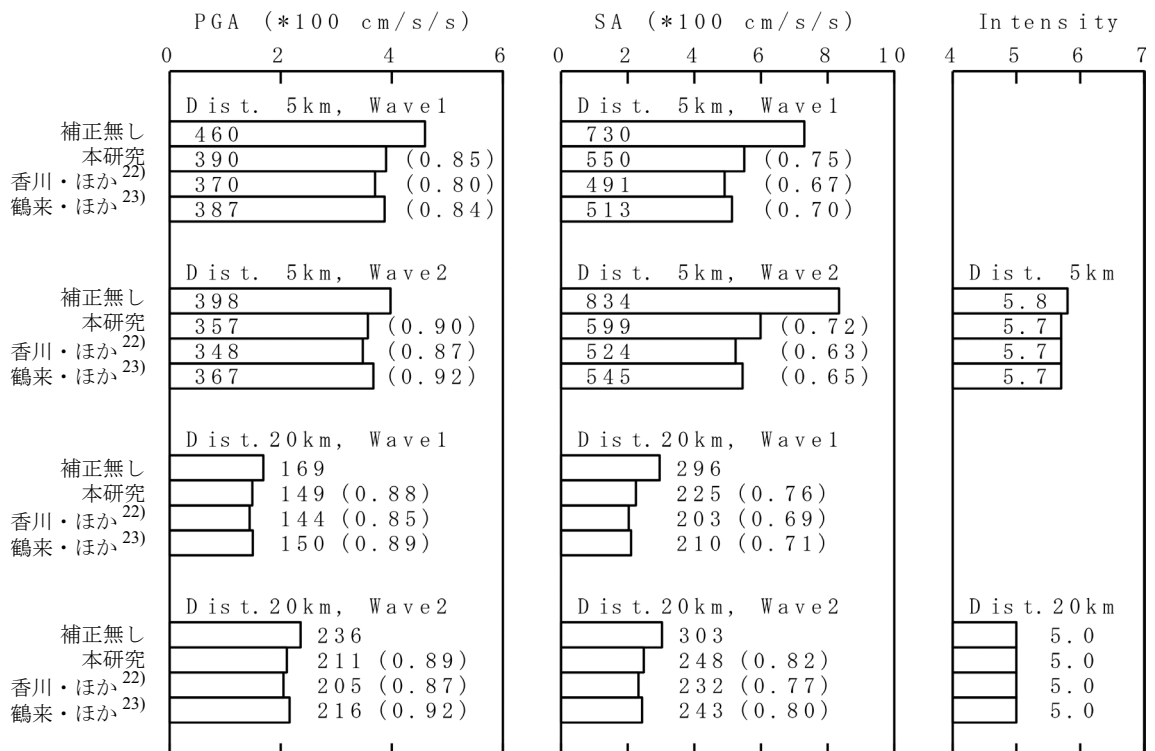


図 15 各フィルターを用いた場合の地震動特性値の比較

$P_c(f)$ を求めた。 $P_c(f)$ の値は 2Hz 程度以上の周波数帯域で徐々に小さくなり、 15Hz 程度で最小、 それ以上の周波数帯域では徐々に大きくなる傾向を示し、 周波数の増加とともに相対振幅が減少する形状で近似することは不可能であることが明らかとなった。 今回 $P_c(f)$ のモデル化は困難であったが、 今後、 他の地震について解析を行ない、 モデル化の可否について検討を進める必要がある。

最後に大地震の高域遮断フィルターが強震動予測結果に及ぼす影響について検討した。 その結果、 本検討で得られた大地震の高域遮断フィルターによる補正をした場合は、 補正無しの場合に比べ、 最大加速度は 10~15%程度、 周波数 10Hz(周期 0.1 秒)における加速度応答スペクトルは 20~25%程度小さくなることが明らかとなった。 また、 これまで提案されている他の高域遮断フィルターを用いた場合とほぼ同等の結果が得られ、 フィルターによる差異がほとんど認められないことが明らかとなった。 本研究で得られた結果は強震動予測の高精度化につながるものと期待される。

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 が作成したプログラムを使用しました。 独立行政法人 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。 査読者の皆様には有益なご意見を頂きました。 また、 一部の図の作成には GMT³⁸)を用いました。 記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, Vol.110, 2001, pp.849-875.
- 2) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲: 強震動予測のための修正レシピとその検証, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002, No.109.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf, 2008.
- 4) 大阪府土木部: 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
- 5) 大阪府: 大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書, 2007.
- 6) 文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会: 糸魚川-静岡構造線断層帯(北部, 中部)を起震断層と想定した強震動評価手法について, <http://www.jishin.go.jp/main/>, 2001.
- 7) Aki,K.: Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, 1967, pp. 1217-1231.
- 8) Hanks,T.C.: f_{max} , *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.72, 1982, pp.1867-1879.
- 9) 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 the Seismological Society of America*, Vol.73, 1983, pp.953-978.
- 10) Anderson,J.G. and Hough,S.E.: A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.74, 1984, pp.1969-1993.
- 11) Hartzell,S.H.: Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, 1978, pp.1-4.
- 12) Irikura,K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1986, pp.151-156.
- 13) 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, 1991, pp.1-9.
- 14) 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, 1999, pp.129-150.
- 15) Faccioli,E.: A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, *Geophysical Monograph*, Vol.37, Maurice Ewing, AGU, 6, 1986, pp.297-309.
- 16) 中村洋光, 工藤一嘉: 伊豆半島東方沖群発地震の Source-controlled f_{max} , 第 2 回都市直下地震災害

総合シンポジウム論文集, 1997, pp.77-80.

- 17) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明: 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性 仙台地域のボアホールで観測された多数の小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, No.462, 1994, pp.79-89.
- 18) Boore,D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
- 19) 佐藤智美, 小林義尚, 八代和彦: 強震動の高周波フーリエスペクトル特性 $-f_{max}$ と応力降下量-, 日本建築学会構造系論文集, No.527, 2000, pp.79-87.
- 20) 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の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, 2002, pp.25-34.
- 21) 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, 2004, pp.33-52.
- 22) 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, 2003, No.315.
- 23) 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 -1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討-, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.4, 2006, pp.94-112.
- 24) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震第2輯, Vol.50, 1997, pp.215-228.
- 25) Thomsom,D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, 1982, pp.1055-1096.
- 26) Lees,J.M. and Park,J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geosciences*, Vol.21, 1995, pp.199-236.
- 27) 加藤護, 中西一郎, 小林昭夫, 高山博之: マルチプル・テーパー法を用いた遠地地震波形記録のスペクトル解析, 気象庁精密地震観測室技術報告, Vol.15, 1998, pp.1-23.
- 28) 笠原敬司, 岡田義光, 山本明: Hi-net(2): 地震観測施設の整備, 日本地震学会講演予稿集 2000年度秋季大会, P005, 2000.
- 29) Andrews,D.J. : Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, *Geophysical monograph 37*, Maurice Ewing Vol.6, 1986, pp.259-267.
- 30) Uehira,K., Yamada,T., Shinohara,M., Nakahigashi,K., Miyamachi,H., Iio,Y., Okada,T., Takahashi,H., Matsuwo,N., Uchida,K., Kanazawa,T., and Shimizu,H. : Precise aftershock distribution of the 2005 West off Fukuoka Prefecture Earthquake ($M_f=7.0$) using a dense onshore and offshore seismic network, *Earth Planets and Space*, Vol. 58, No. 12, 2006, pp.1605-1610.
- 31) Brocher,T.M. : Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.95, 2005, pp.2081-2092.
- 32) Boore,D.M. and Boatwright,J. : Average body-wave radiation coefficient, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.74, 1984, pp.1615-1621.
- 33) Ingber,L. and Rosen B. : Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: A comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.16, 1992, pp.87-100.
- 34) 鶴来雅人, 香川敬生, 入倉孝次郎: 最近発生した地殻内大地震の高域遮断フィルター -検討対象地点の硬軟によるスペクトル低減傾向の違い-, 日本地震学会 2007年秋季大会, P3-053, 2007, p.280.
- 35) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.500, 1997, pp.29-36.
- 36) 例えば Schnabel,P.B., Lysmer,J. and Seed,H.G. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC 72-12, 1972.

37) 気象庁監修：震度を知る 基礎知識とその活用，ぎょうせい，1996.

38) Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, American Geophysical Union, 1998.

(受理：2008年6月4日)

(掲載決定：2008年11月21日)

**Study on a high-cut filter for strong ground motion prediction (Part2)
- Based on the observed records during the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki Earthquake -**

TSURUGI Masato¹⁾, KAGAWA Takao²⁾, and IRIKURA Kojiro³⁾

1) Member, Senior Researcher, Geo-Research Institute, Dr.Eng.

2) Member, Professor, Tottori University, Dr.Sci.

3) Member, Visiting Professor, Aichi Institute of Technology, Dr. Sci.

ABSTRACT

Spectral decay characteristics in high frequency range due to mainshock and aftershocks of the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki Earthquake are examined. The Butterworth type high-cut filter with cut-off frequency, f_{max} and its power coefficient of high-frequency decay is assumed in this study. The four parameters such as seismic moment, corner frequency, f_{max} , and its power coefficient are estimated by comparing observed spectra at hard rock sites with theoretical spectra. The theoretical spectra are calculated, based on the omega squared source characteristics convolved with propagation-path effects and f_{max} filter shapes. In result, the f_{max} of the mainshock is estimated as 6.5Hz and those of aftershocks are estimated in the range from 9Hz to 20Hz. The filter to correct the difference of the spectral decay characteristics between large event and small event is very important for strong ground motion prediction using observed small event records. The correcting filter is also examined in this paper. The results in this study may contribute to strong ground motion prediction in high frequency range.

Key Words: Strong ground motion prediction, The 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki Earthquake, f_{max} , High-cut filter, Correcting filter