



## 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—

鶴来雅人<sup>1</sup>，香川敬生<sup>2</sup>，岡崎敦<sup>3</sup>，羽田浩二<sup>4</sup>，入倉孝次郎<sup>5</sup>

- 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，財団法人地域 地盤 環境 研究所，主席研究員，博(理)  
E-mail: kagawa@geor.or.jp
- 3) 非会員，関西電力株式会社，工修  
E-mail: okazaki.atsushi@e3.kepco.co.jp
- 4) 非会員，株式会社ニュージェック，工修  
E-mail: hadakj@newjec.co.jp
- 5) 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、1995年兵庫県南部地震の本震および近畿地方で発生した小地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および両者の違いを補正するフィルターを求めた。その結果、1995年兵庫県南部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6Hzと推定された。さらに、これらのフィルターが地震動予測結果に及ぼす影響について検討した。

キーワード: 強震動予測,  $f_{max}$ , 高域遮断フィルター, 補正フィルター, 1995年兵庫県南部地震, 統計的グリーン関数法

### 1. はじめに

地震動が震源特性・伝播経路特性・サイト特性で構成されていることは良く知られている。強震動予測にあたってはこれらの特性を事前に精度よく評価することが重要である。入倉・三宅<sup>1)</sup>や入倉・ほか<sup>2)</sup>は①想定する地震の震源のモデル化、②震源と対象地域を包含する地下構造・地盤構造のモデル化、および③地震動のシミュレーション手法、を示したいわゆる「強震動予測レシピ」をまとめた。震源特性はこのレシピを参考にすることで、その平均像を与えることが可能になりつつある。伝播経路特性は距離減衰および粘性減衰や散乱減衰を示す見掛けの減衰 ( $Q$  値) に代表されるが、 $Q$  値はスペクトルインバージョン法<sup>3)</sup>や二重スペクトル比法<sup>4)</sup>などによって評価が可能である。サイト特性は観測記録から震源特性と伝播経路特性を取り除く手法<sup>5)</sup>やスペクトルインバージョン法<sup>3)</sup>といった経験的手法、あるいは地盤情報に基づく理論的手法<sup>6)</sup>によって評価される。また、最近では時間領域においてサイト特性を評価する試み<sup>7)</sup>も行なわれている。このように、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の評価手法の精度向上に伴い、各特性を個別に評価した上で強震動予測を行なう事例が増えつつある(例えば8), 9)。

こうした強震動予測の課題の一つが高周波数帯域における地震動特性の問題である。地震動の震源スペクトルが  $\omega^{-2}$  則<sup>10)</sup>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、実際にはある周波数より高周波数帯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>11)</sup>。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<sup>例えば<sup>12)</sup></sup>と地表近傍での影響によるとする考え<sup>例えば<sup>13)</sup></sup>の2通りがあり、現在でもその決着はついていない。木下<sup>14)</sup>は、 $\omega^{-2}$ モデル<sup>10)</sup>やバリアモデル<sup>例えば<sup>12)</sup></sup>といった強震動予測モデルにおける  $f_{max}$  の取り扱い方、および国内外における観測記録を用いた  $f_{max}$  の評価事例を取りまとめている。

経験的グリーン関数法<sup>15), 16)</sup>や統計的グリーン関数法<sup>17)</sup>あるいはハイブリッド法<sup>18)</sup>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地震動特性の地震規模依存性の有無が重要であり、地震観測記録から  $f_{max}$  の値とその地震規模依存性を求める試みは数多くなされている。

$f_{max}$  の値に地震規模依存性がある、すなわち  $f_{max}$  の生成要因を震源に求める研究は Papageorgiou and Aki<sup>12)</sup>による理論的な検討に始まった。Faccioli<sup>19)</sup>、中村・工藤<sup>20)</sup>、佐藤・ほか<sup>21)</sup>などは観測記録を用いた経験的な検討を行っている。Faccioli<sup>19)</sup>はイタリアやユーゴスラビアにおける観測記録を分析し、 $f_{max}$  と地震モーメントとの関係式を提案している。中村・工藤<sup>20)</sup>は1989年、1993年および1997年に発生した伊豆半島東方沖群発地震(全97地震、 $M_j$ : 2.5~5.7)を対象としてこれらの震源スペクトルを求め、 $f_{max}$  を見積っている。その結果、 $f_{max}$  は5~20Hzに存在するとしている。さらに  $f_{max}$  の生成要因としてクラック終端での破壊速度の減速に着目した検討を行っている。佐藤・ほか<sup>21)</sup>は福島県沖や茨城県沖等を震源とする地震( $M_j$ : 4.1~7.1)の仙台市における観測記録を対象とした解析を行い、 $f_{max}$  は10~23Hzに存在するとしている。これら2つの研究では、 $f_{max}$  の値に弱いながらも地震規模依存性があることを指摘している。また、釜江・入倉<sup>22)</sup>は1995年兵庫県南部地震を対象に、池田・ほか<sup>23)</sup>は2000年鳥取県西部地震を対象に、それぞれ経験的グリーン関数法<sup>15), 16)</sup>を用いて地震動シミュレーションを行い、高周波数帯域において過大評価となることを示している。この2つの研究は  $f_{max}$  の値を求めることを目的としたものではないが、ここで示された結果はこの周波数帯域において大地震のスペクトル特性とグリーン関数として用いた小地震のそれが異なる、すなわち高周波数帯域における低減特性が地震規模に依存することを示唆するものであると言えよう。

これに対し、 $f_{max}$  の値に地震規模依存性がない、すなわち  $f_{max}$  の生成要因を地表近傍での影響に求める研究は Hanks<sup>11)</sup>に始まった。Boore<sup>24)</sup>は観測スペクトルが震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で表せるとし、これらを区別して論じているが、この中では、明確ではないが  $f_{max}$  の影響をサイト特性に組み込んでいる。Anderson and Hough<sup>13)</sup>は高周波数帯域でのスペクトル低減特性が  $\exp(-\pi\kappa f)$  の形状で近似できるとし、 $\kappa$  の特性に関する検討を行った。その結果は高周波帯域でのスペクトルの低減がサイトに起因することを示唆するものである。国内の観測記録を用いた経験的な研究事例として、佐藤・ほか<sup>25)</sup>、佐藤<sup>26)</sup>、川瀬・松尾<sup>27)</sup>が挙げられる。佐藤・ほか<sup>25)</sup>は福島県沖や茨城県沖等を震源とする地震(全50地震、 $M_j$ : 4.0~6.6)の福島県富岡およびいわきにおける観測記録を対象とした解析を、佐藤<sup>26)</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、川瀬・松尾<sup>27)</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、いずれも  $f_{max}$  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。なお、これらの研究<sup>25)~27)</sup>では震源規模依存性の有無については述べているが、 $f_{max}$  の生成が地表近傍での影響に起因するとは述べていない。

このような地震規模依存性に関する検討のほかに高域遮断フィルターの形状を求める試みもなされている。香川・ほか<sup>28)</sup>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。このほか、Kinoshita<sup>29)</sup>は関東地方で発生した地震(全40地震、 $M_j$ : 3.6~6.0)を6つの震源域に分類した上で  $f_{max}$  を評価し、2つの震源域では10Hz~20Hz、残り4つの震源域では25Hz以上であると、震源位置依存性を指摘している。

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、まず、1995年兵庫県南部地震を対象に地震動シミュレーションを行い、この結果を基に小地震の高周波数帯域におけるスペクトル特性と大地震のその違いを補正するフィルター  $P_c(f)$  を求める。続いて、小地震および大地震(1995年兵庫県南部地震)の高域遮断フィルター [ $P_S(f)$ ,  $P_L(f)$ ] を個別に求める。最後に、補正フィルターや高域遮断フィルターが地震動予測結果に及ぼす影響について検討する。

## 2. 本研究の基本的考え方

ここでは、地震の加速度フーリエスペクトルは $f_{max}$ より高周波数帯域で一般に低減すると考える。図1に大地震および小地震の加速度フーリエスペクトルの概念図を示す。ここで、小地震のスペクトルの $\omega^{-2}$ 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 $P_L(f)$ とする。Papageorgiou and Aki<sup>12)</sup>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」という特性があるとすれば、大地震のスペクトルは小地震のそれより低い周波数から低減を始めることとなる。この大地震と小地震の高周波数帯域におけるスペクトル特性( $f_{max}$ の値およびこれより高周波数帯域でのスペクトルの低減傾向)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。この $P_S(f)$ 、 $P_L(f)$ および $P_C(f)$ の間には式(1)に示す関係が成立するものと考えられる。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、および補正フィルターを規定する周波数〔後述する式(4)や式(5)の $f_0$ 〕は高域遮断周波数 $f_{max}$ と全く同じではない点である。

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

本研究では大地震として1995年兵庫県南部地震を取り上げるが、この地震の岩盤観測点における記録はほとんどない。そこで、風化岩および洪積層の観測点を対象とした地震動シミュレーションを行って $P_C(f)$ を評価し、小地震の岩盤記録から評価した $P_S(f)$ との積を求めることにより大地震の高域遮断フィルター $P_L(f)$ を求めることとした。

また、強震動予測における本研究の位置付けを図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 $P_L(f)$ および $P_C(f)$ の2つのフィルターを提案し、強震動予測に資することを目的とする。なお、香川・ほか<sup>28)</sup>が提案している高域遮断フィルターは $P_L(f)$ に相当するが、補正フィルター $P_C(f)$ について検討した事例はない。また、 $P_L(f)$ と $P_S(f)$ は「 $\omega^{-2}$ 則にしたが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」という意味で同じ性質のものであり、同じ関数形で表現されるべきと考えられる。さらに、本研究で対象とする周波数範囲(0.2Hz~20Hz)では $P_C(f)$ は $P_L(f)$ 、 $P_S(f)$ と同じ関数形で近似的に表現される(付録1参照)。以上を勘案し、本研究では後述するように、 $P_L(f)$ 、 $P_S(f)$ および $P_C(f)$ を同じ関数形とした。

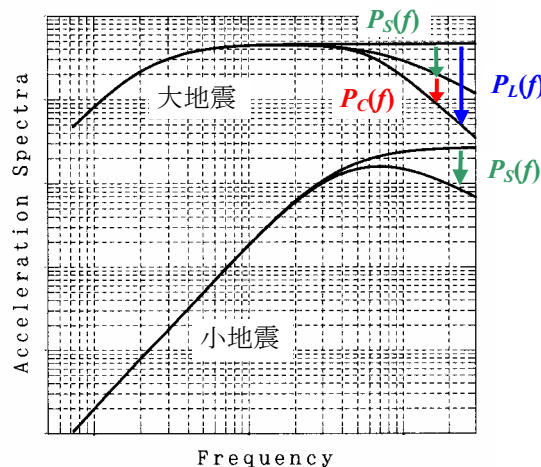


図1 小地震と大地震の加速度フーリエスペクトルの概念図

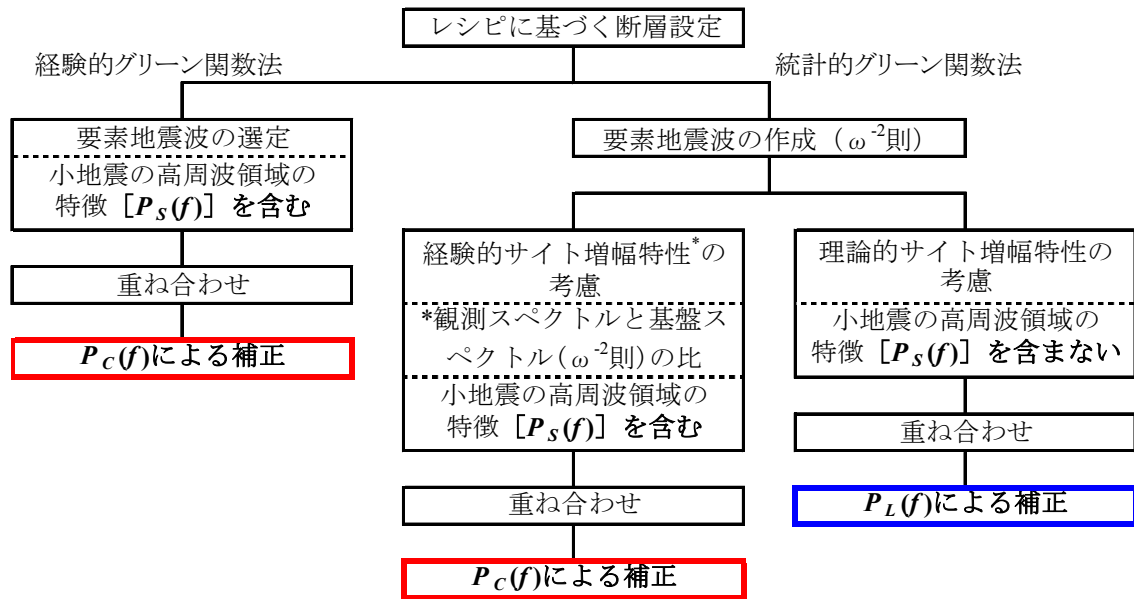


図2 強震動予測における本研究の位置付け

### 3. 補正フィルター $P_c(f)$ の検討

#### 3.1 解析概要

##### (1) 解析手法

統計的グリーン関数法<sup>17)</sup>を用いて地震動シミュレーションを行なう。このとき、小地震の観測記録から求めたサイト増幅特性を用いる。つまり、地震動シミュレーション結果には小地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性が含まれることになる。したがって、高周波数帯域におけるスペクトル低減特性が小地震と大地震で同じであれば、この帯域においてシミュレーション結果は観測記録と整合する。一方、これが小地震と大地震で異なればシミュレーション結果は観測記録と整合せず、何らかの補正をする必要性が生じる。ここでは、補正の必要性の有無を検討した後、必要と判断されれば、シミュレーションによるスペクトルに対する観測スペクトルの比  $R(f)$  を求め、このスペクトル比  $R(f)$  に最も近い形状を示す、すなわち式(2)の  $Error$  を最小とするフィルターを補正フィルター  $P_c(f)$  として提案する。このとき、シミュレーションによるスペクトルに対する観測スペクトルの比  $R(f)$  を複数の震源モデルや複数のサイトに対して求め、これらの平均を取ることで、解析に用いる震源モデルや検討対象地点の影響を小さくし、精度向上を図る。こうして得られた補正フィルター  $P_c(f)$  は、シミュレーションによるスペクトル  $S_s(f)$  と観測スペクトル  $S_o(f)$  の差 [式(3)] を最小とする補正フィルターと等価となる。

$$Error = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{f=f_1}^{f_2} \{\log P_c(f) - \log R(f)\}^2} \quad (2)$$

ここで、 $P_c(f)$  : 補正フィルター

$R(f)$  : 平均スペクトル比 (観測スペクトル/シミュレーションによるスペクトル)

$N_f$  : 対象とする周波数帯域 ( $f_1 \leq f \leq f_2$ ) における周波数の数 ( $f_1=0.2\text{Hz}$ ,  $f_2=20\text{Hz}$ : 後述)

$$\sqrt{\frac{1}{N_i} \frac{1}{N_j} \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{f=f_1}^{f_2} \{\log S_s(i, j, f) - \log S_o(j, f)\}^2} \quad (3)$$

ここで、 $S_s(i, j, f)$  : シミュレーション波のフーリエスペクトル

$S_o(j, f)$ : 観測波のフーリエスペクトル

$N_i, N_j$ : 解析に用いる震源モデルおよび対象地点の数 (後述)

補正フィルターの形状として式(4)<sup>24)</sup>および式(5)<sup>30)</sup>に示すフィルターを採用し、最終的には最適な解を選択する。なお、ここで求めるフィルターは大地震の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ためのものである。前述の通り、この補正フィルターの形状を規定する周波数はいわゆる高域遮断周波数  $f_{max}$  ではない。したがって、混同をさけるため式(4)および式(5)では  $f_{max}$  ではなく  $f_0$  と表現した。

$$P_C(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^{2s}}} \quad (4)$$

$$P_C(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^n} \quad (5)$$

補正フィルター  $P_C(f)$  の最適解を求めるにあたり、式(2)の *Error* を最小とする  $f_0$  および  $s$  または  $n$  の組み合わせをグリッド・サーチ法により求める。グリッド・サーチ法における  $f_0$  の探索周波数範囲は 1Hz 以上とした。これはコーナー周波数の影響を受けず、かつ *Error* の最小値を把握するのに十分な範囲として決定した。なお、事前の予備的検討により *Error* は  $f_0$  や  $s$  あるいは  $n$  の値に対して鋭敏ではないことが確認されたため、 $f_0$  については 1Hz 刻みで、 $s$  や  $n$  は 0.5 刻みで検討する。なお、 $s$  や  $n$  が 1.5 以上の場合は高周波数帯域でのスペクトルの低減の傾きが大きく平均スペクトル比とのフィッティングが良くないため、検討から除外した。また、式(5)において  $n=0.5$  とした場合は比較的低周波数領域からフィルターが掛かり、「コーナー周波数以上  $f_{max}$  以下の周波数帯域ではスペクトルが平坦になる」という  $\omega^{-2}$  則の特徴が崩れる可能性があるため、検討から除外した (付録 2 参照)。

なお、地震動シミュレーションの対象周波数範囲は 0.2Hz~20Hz である。この周波数範囲は後述するサイト増幅率が十分な SN 比を有している範囲を考慮して決定した。式(2)において *Error* を算出する周波数範囲もこれに準じた。また、地震計の計器特性は大地震および小地震のいずれにも等しく反映されていると考えられ、その補正をする必要はない。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。スペクトルの算出にあたってはマルチテーパー<sup>31)~33)</sup>を用いることによりその精度向上を図った。

## (2) 解析対象地震とその震源モデル

解析対象の大地震は 1995 年兵庫県南部地震である。その震源モデルとして多くのモデルが提案されているが、ここでは本研究で着目している高周波数帯域を含む広帯域を対象とした解析により得られた釜江・入倉<sup>22)</sup>によるモデルおよび山田・ほか<sup>34)</sup>によるモデルを用いた。これらのモデルは経験的グリーン関数法<sup>15), 16)</sup>を用いて得られたものであり、3 枚あるいは 4 枚の *Subfault* からなる。これらの断層の位置およびモデルを図 3 および図 4 に、断層パラメータを表 1 に示す。なお、本章で得られる補正フィルターの評価結果は震源モデルに依存すると考えられるが、複数の震源モデルについて検討し、その平均像を求めることにより、震源モデルの影響が小さくなると思われる。

## (3) 伝播経路特性 ( $Q$ 値)

$Q$  値は近畿地方で発生した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<sup>35)</sup> [式(6)]を用いる。この  $Q$  値を用いて評価したサイト増幅特性は、1 次元地盤構造から理論的に評価したそれとの比較<sup>36)</sup>および深発地震のスペクトル比から評価したそれとの比較<sup>37)</sup>により妥当性が確認されている。これらの結果は式(6)に示した  $Q$  値の妥当性を間接的に示すものと言える。

$$Q(f) = 63.8 \times f^{1.00} \quad (6)$$

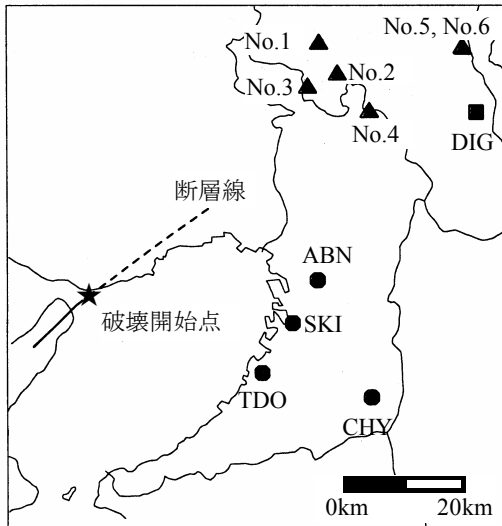
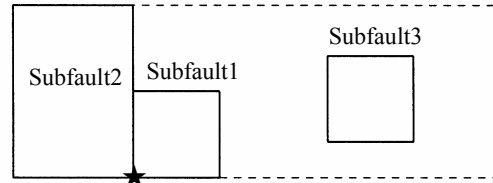
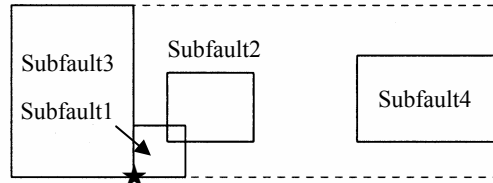


図3 断層および解析対象地点等の位置



(1)釜江・入倉モデル



(2)山田・ほかモデル

図4 震源断層モデル (★：破壊開始点)

表1 断層パラメータ

	釜江・入倉モデル			山田・ほかモデル			
	Subfault 1	Subfault 2	Subfault 3	Subfault 1	Subfault 2	Subfault 3	Subfault 4
断層分類	右横ずれ	右横ずれ	右横ずれ	右横ずれ	右横ずれ	右横ずれ	右横ずれ
走向角 (°)	53.0	45.0	233.0	53.0	53.0	45.0	233.0
傾斜角 (°)	90.0	82.0	85.0	90.0	90.0	82.0	85.0
上端深度 (km)	8.0	0.0	5.0	11.0	6.2	0.0	5.0
長さ (km)	8.0	11.0	8.0	4.8	8.0	11.2	12.8
幅 (km)	8.0	16.0	8.0	4.8	6.4	16.0	8.0
地震モーメント (N・m)	$3.40 \times 10^{18}$	$1.00 \times 10^{19}$	$1.80 \times 10^{18}$	$1.10 \times 10^{18}$	$2.30 \times 10^{18}$	$1.00 \times 10^{19}$	$3.60 \times 10^{18}$
応力降下量 (MPa)	16.3	8.6	8.6	23.4	15.6	8.6	8.6
立ち上がり時間 (sec)	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6
破壊伝播速度 (km/sec)	2.8			2.8			

#### (4) 解析対象地点とその増幅特性

解析対象地点は関西地震観測研究協議会の観測点のうち、サイト増幅特性の影響が比較的小さい風化岩相当および洪積層の観測点である ABN, CHY, SKI, TDO の4地点 (位置は図3中●印) とした。その増幅特性は小地震の観測記録を用いて鶴来・ほか<sup>35)</sup>によって得られている。なお、釜江・入倉<sup>22)</sup>は震源モデルの構築にあたり7地点の観測記録を用いているが、今回解析の対象とした4地点のうち CHY, SKI, TDO の3地点はその中に含まれている。また、山田・ほか<sup>34)</sup>は震源モデルの構築にあたり8地点の観測記録を用いているが、今回解析対象とした4地点は使用されていない。末富・土岐<sup>38)</sup>は、神戸大学観測点において兵庫県南部地震の本震および余震について H/V スペクトル比 (H: 水平成分, V: 鉛直成分) を求め、本震のピーク周波数が余震のそれに対し低周波数側に推移していることから、当該地点における本震時の地盤の非線形性を指摘している。これに倣い、今回解析対象とした4地点に対して本震および余震の H/V スペクトル比を求めた結果、地盤の非線形性は認められなかった。つまり、地盤の非線形性に起因する高周波数領域におけるスペクトルの低減はないものと考えられる。

### 3.2 解析結果

釜江・入倉モデルに対するシミュレーション結果と観測記録の比較を図5に示す。これより、すべてのサイトで5~8Hz程度以上の周波数帯域においてシミュレーション結果が過大評価となり、これを補正する必要があることがわかる。また、山田・ほかモデルに対してもシミュレーション結果は過大評価となった。

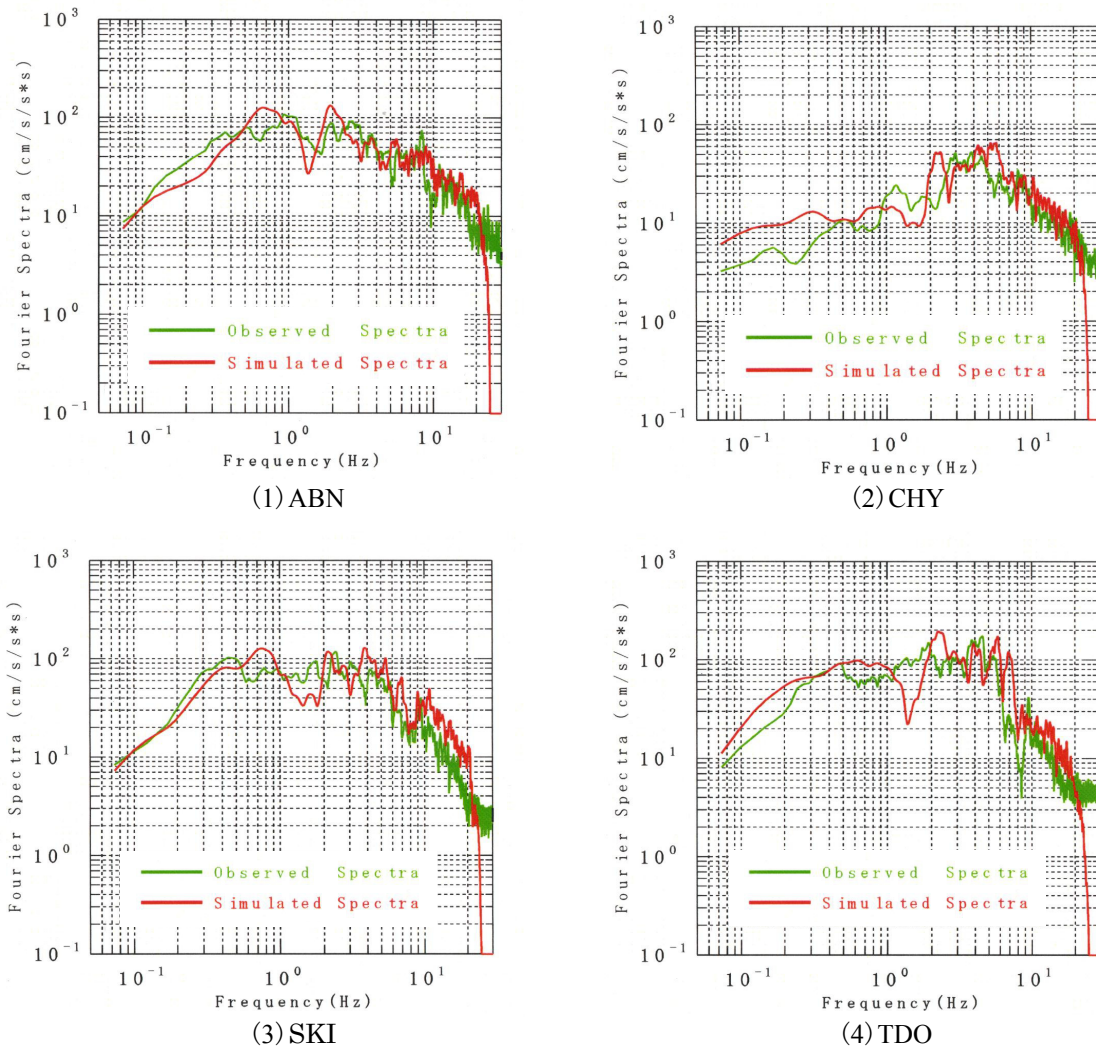


図5 観測記録とシミュレーション結果の比較

シミュレーションによるスペクトルに対する観測スペクトルの比を図6に示す。同図中(1)は震源モデル2通り，対象地点4地点，全8通りのスペクトル比，同図(2)はこれらを平均し，さらに平滑化を施したものである。このスペクトル比が大地震の高周波数領域におけるスペクトル低減特性と小地震のその違い，すなわち  $P_C(f)$  に相当する。平均スペクトル比 [図6中(2)] との残差  $Error$  が最小となるフィルターの係数  $f_0$  と  $s$  または  $n$  をグリッド・サーチ法により求めた。その結果，式(7)～式(10)に示す4式がその候補となった。このときの  $Error$  の値は順に，0.0863，0.0852，0.0856，0.0856となり，これが最小となる式(8)を補正フィルターとして採用した。式(8)に示すフィルター形状を図6(2)に併記する。この補正フィルターで補正したシミュレーションによるスペクトルと観測スペクトルの比較を図7～図10に示す。例えば，図7(1)[ABN，釜江・入倉モデル]や図9(2)[SKI，山田・ほかモデル]のように，観測記録に対し過小評価もしくは過大評価となるケースも見られるが，全般的には観測記録と概ね対応していると言える。

$$P_C(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{11.0}\right)^{2 \times 0.5}}} \quad (7)$$

$$P_C(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{11.0}\right)^{2 \times 1.0}}} \quad (8)$$

$$P_C(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{25.0}\right)^{1.0}} \quad (9)$$

$$P_C(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{26.0}\right)^{1.0}} \quad (10)$$

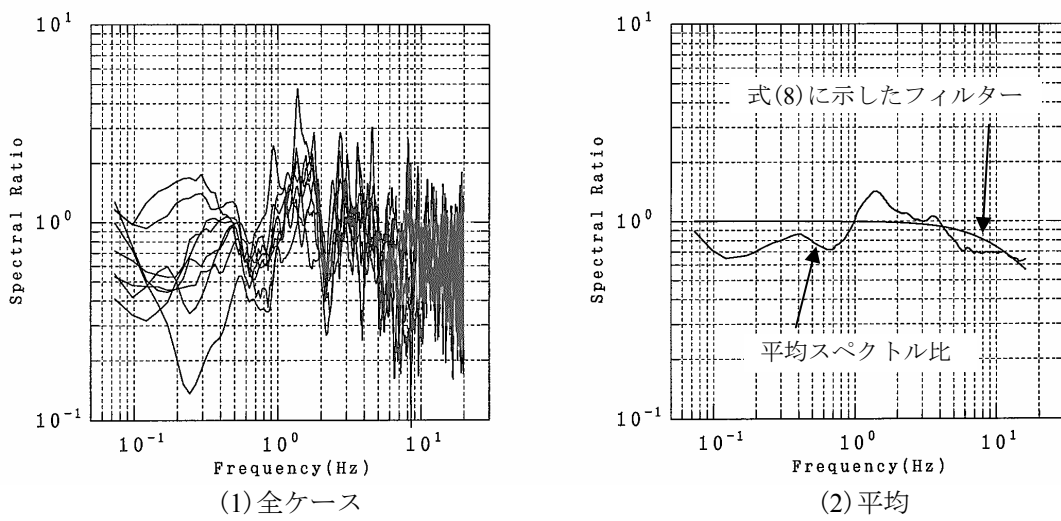


図6 シミュレーションによるスペクトルに対する観測スペクトルの比

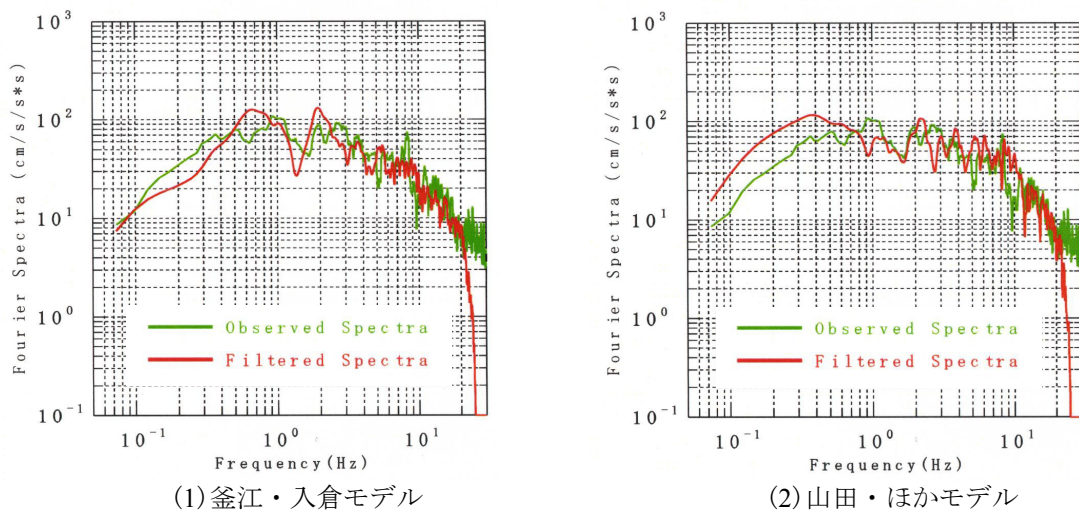
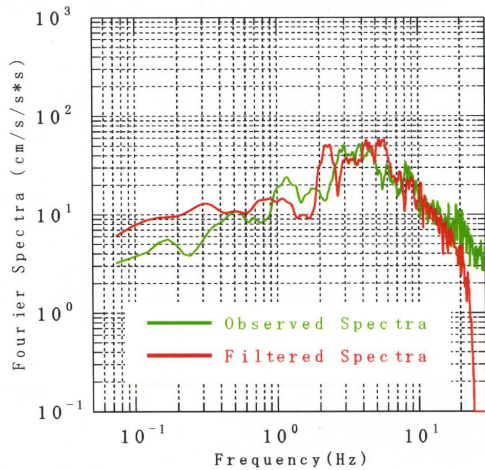
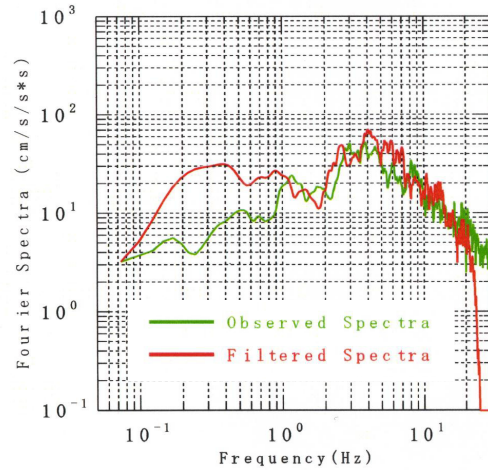


図7 補正フィルターで補正したシミュレーション結果と観測記録の比較 (ABN)



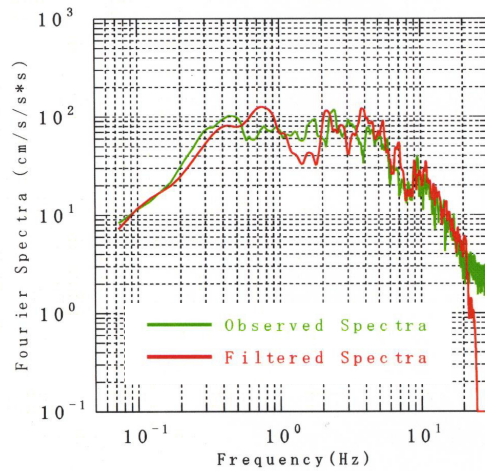


(1) 釜江・入倉モデル

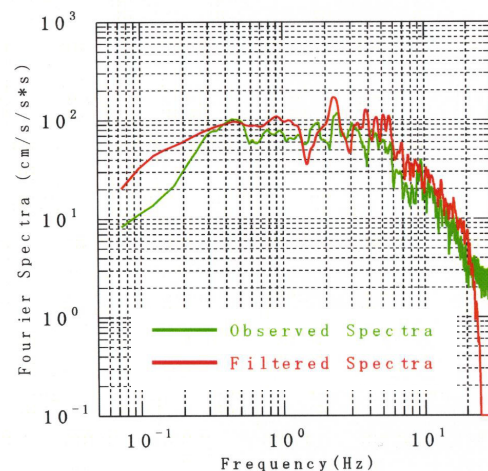


(2) 山田・ほかモデル

図8 補正フィルターで補正したシミュレーション結果と観測記録の比較 (GHY)

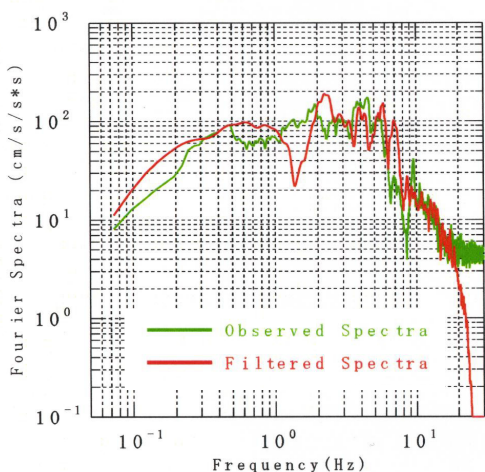


(1) 釜江・入倉モデル

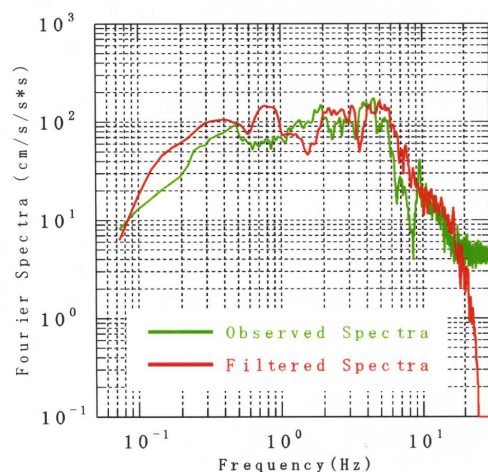


(2) 山田・ほかモデル

図9 補正フィルターで補正したシミュレーション結果と観測記録の比較 (SKI)



(1) 釜江・入倉モデル



(2) 山田・ほかモデル

図10 補正フィルターで補正したシミュレーション結果と観測記録の比較 (TDO)

#### 4. 小地震の高域遮断フィルター $P_S(f)$ の検討

小地震の高域遮断フィルターを求めるにあたっては香川・ほか<sup>28)</sup>が用いた手法に倣った。すなわち、岩盤相当観測点における観測記録に対して、地震モーメントおよびコーナー周波数を既知として与え、 $f_{max}$  および低減の傾向を示す係数  $s$  [式(11)] を焼きなまし法<sup>39)</sup>による値を参考に決定した。ここで、補正フィルター  $P_C(f)$  として式(4)の形状を採用したので、 $P_S(f)$  についても同じ形状である式(11)を採用した。その妥当性については付録1に示す。

解析には表2に示す地震のDIGにおける観測記録を用いた。これらの地震は近畿地方で発生した深さ20km以浅の地殻内地震（震央位置は図3中▲印）であり、鶴来・ほか<sup>35)</sup>がサイト増幅特性を算出する際に用いられている。その地震モーメント ( $M_0$ ) およびコーナー周波数 ( $f_c$ ) は同研究により表2のように推定されている。また、DIGは京都市南部に位置する岩盤観測点（位置は図3中■印）である。なお、前章と同様、スペクトルの算出には主要動部20秒間を用い、水平2方向のベクトル和を算出した。また、地震計の計器特性の補正を行なった。

決定した各地震の  $f_{max}$  と  $s$  の値を表2に併記する。図11に小地震の観測スペクトルと理論スペクトルの比較例を示す。また、得られた各地震のフィルター形状すなわち得られた各地震の  $f_{max}$  と  $s$  の値を式(11)に代入して得られるフィルター  $P_S(f)$  およびこれらの平均および平均±標準偏差を図12に示す。さらに、この平均に近似する式を求めた。これを式(12)に示す。

表2 小地震の高域遮断フィルターの検討に用いた地震

No.	発震時	震央位置	深さ (km)	$M_J$	$M_0$ (N・m)	$f_c$ (Hz)	$f_{max}$ (Hz)	$s$
1	1997.09.07 02:19:35.8	京都・大阪府境	18	4.1	$1.83 \times 10^{15}$	2.10	7.9	1.4
2	1999.02.12 03:16:45.8	京都・大阪府境	15	4.0	$1.19 \times 10^{15}$	3.06	6.6	1.2
3	2000.05.16 04:09:25.9	京都・大阪府境	16	4.3	$3.50 \times 10^{15}$	1.20	9.4	1.0
4	2000.05.20 23:39:12.7	京都・大阪府境	16	3.7	$2.91 \times 10^{14}$	3.94	7.8	1.1
5	2000.05.21 10:42:34.8	京都・大阪府境	15	3.8	$1.21 \times 10^{15}$	2.87	6.7	1.3
6	2000.08.21 15:18:09.8	京都・大阪府境	15	3.8	$2.87 \times 10^{14}$	4.23	6.2	1.0

$$P_S(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2s}}} \quad (11)$$

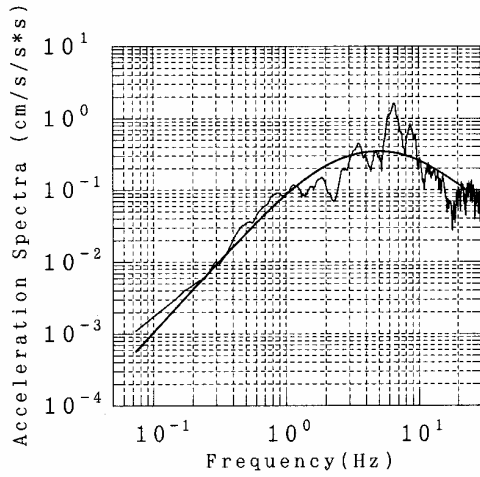
$$P_S(f) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{7.5}\right)^{2 \times 1.2}}} \quad (12)$$

#### 5. 大地震の高域遮断フィルター $P_L(f)$ の検討

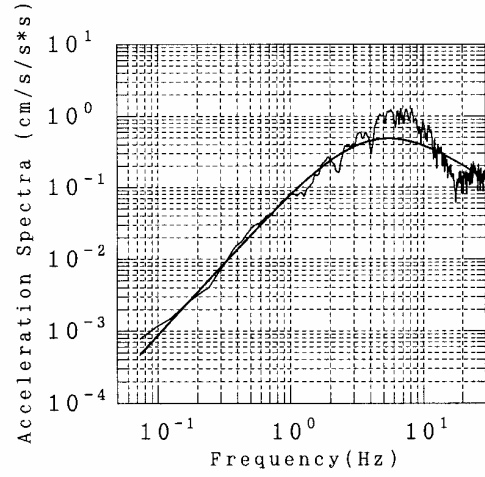
##### 5.1 大地震の高域遮断フィルター

式(1)に示すように、大地震の高域遮断フィルター  $P_L(f)$  は小地震の高域遮断フィルター  $P_S(f)$  と補正フィルター  $P_C(f)$  の積で表せると考えられる。そこで、小地震の高域遮断フィルターの平均[図12(2)の○印]と第3章で得られた補正フィルター  $P_C(f)$  [式(8)]との積を求め、これに近似する式を求めた。これを図13および式(13)に示す。なお、補正フィルター  $P_C(f)$  として式(4)の形状を採用したので、 $P_S(f)$  と同様、 $P_L(f)$  についても式(4)の形状を採用した。その妥当性については付録1に示す。

$$P_L(f) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{6.0}\right)^{2 \times 1.55}}} \quad (13)$$

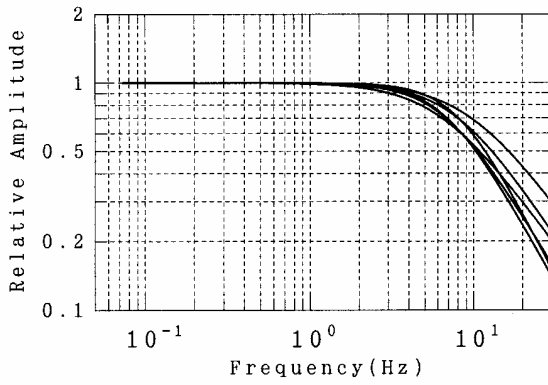


(1)No.1 の地震

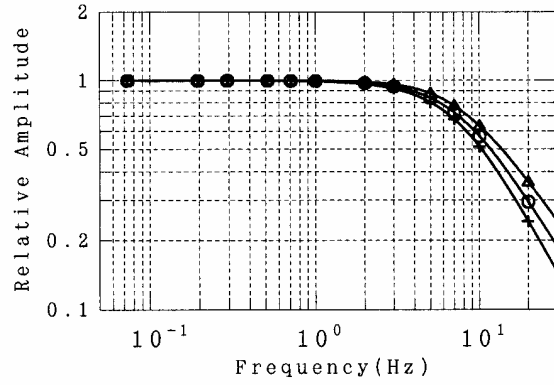


(2)No.2 の地震

図 11 小地震の観測スペクトルと理論スペクトルの比較例



(1)全地震



(2)平均(○)および平均±標準偏差(△, +)

図 12 小地震の高域遮断フィルター  $P_S(f)$

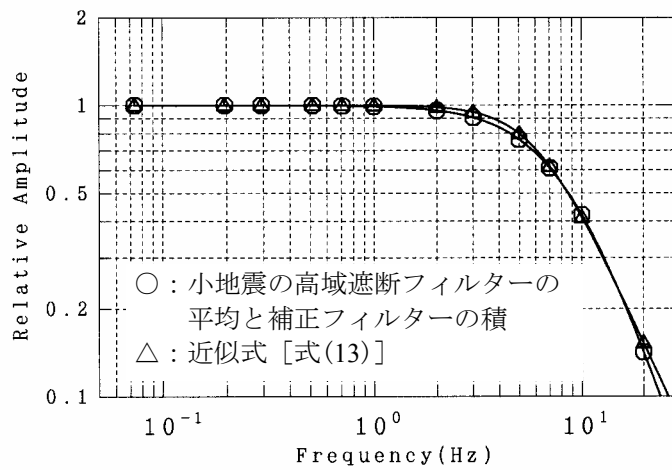


図 13 大地震の高域遮断フィルター  $P_L(f)$

## 5.2 既往の高域遮断フィルターとの比較

ここでは、前項で提案した大地震の高域遮断フィルターと既往のそれとの比較を行なう。比較対象とする大地震の高域遮断フィルターは、中央防災会議東南海・南海地震等に関する専門調査会が採用しているもの<sup>40),41)</sup> [式(14)] および香川・ほかによるもの<sup>28)</sup> [式(15)] である。図 14 にこれらのフィルターの比較を示す。これより、本研究で得られた大地震の高域遮断フィルターは、香川・ほかによるフィルターと比べ2~7Hzの周波数帯域で若干異なるものの、両者はほぼ同じ形状をしていると言える。また、中央防災会議が採用しているフィルターは他の2つのフィルターに比べ高周波数帯域の低減がやや大きいことがわかる。

$$P_L(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{6.0}\right)^{2.0}} \quad (14)$$

$$P_L(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{8.3}\right)^{1.92}} \quad (15)$$

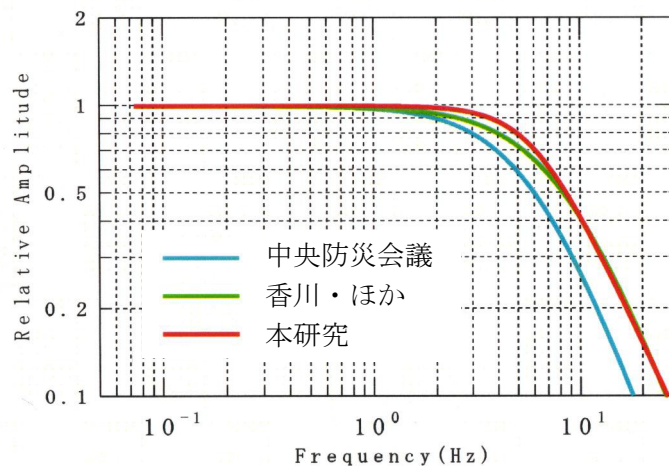


図 14 既往の大地震の高域遮断フィルターとの比較

## 6. 強震動予測結果に及ぼす影響

### 6.1 強震動予測の概要

本章では、第3章で提案した補正フィルターや第5章で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<sup>17)</sup>により行なった。想定する断層は長さ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<sup>1),2)</sup>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3および表4に示す。計算対象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15に示す。なお、計算周波数範囲は0.2~20Hz(0.05~5秒)である。

### 6.2 補正フィルター $P_C(f)$ の影響評価

ここでは、第3章で提案した補正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する。前述の通り補正フィルターは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である。したがって、経験的グリーン関数法や小地震の観測記録から評価したサイト増幅特性を用いた統計的グリーン関数法による強震動予測に適用可能である。そこで、図15(2)に示した計算地点における増幅特性としてABN, CHY, SKI, TDOの4通りを与えた。また、統計的

表3 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 <sup>2</sup> )	378.0
地震モーメント (N・m)	7.00×10 <sup>18</sup>
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4 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 <sup>2</sup> )	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 <sup>18</sup>
アスペリティ	
面積 (km <sup>2</sup> )	81.0
地震モーメント (N・m)	3.01×10 <sup>18</sup>
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 <sup>2</sup> )	297.0
地震モーメント (N・m)	3.98×10 <sup>18</sup>
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

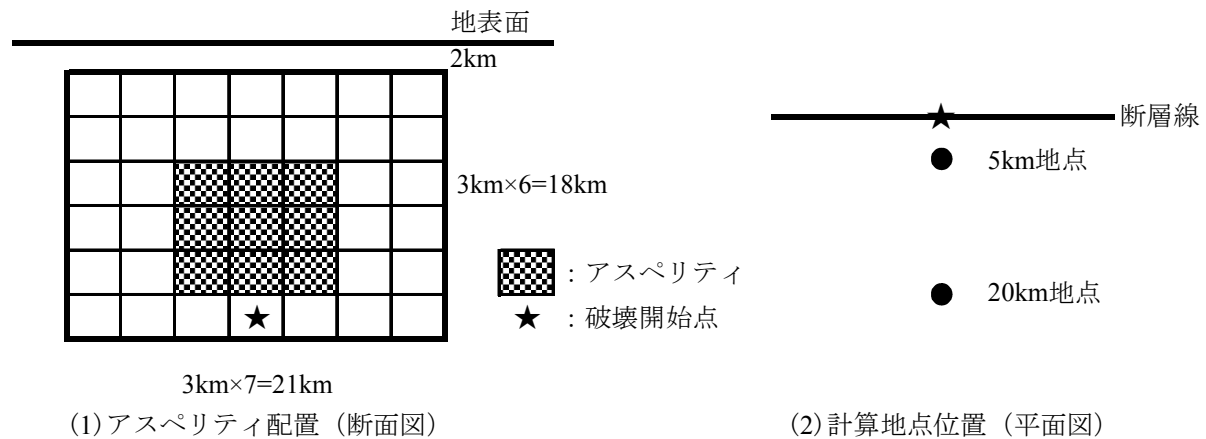


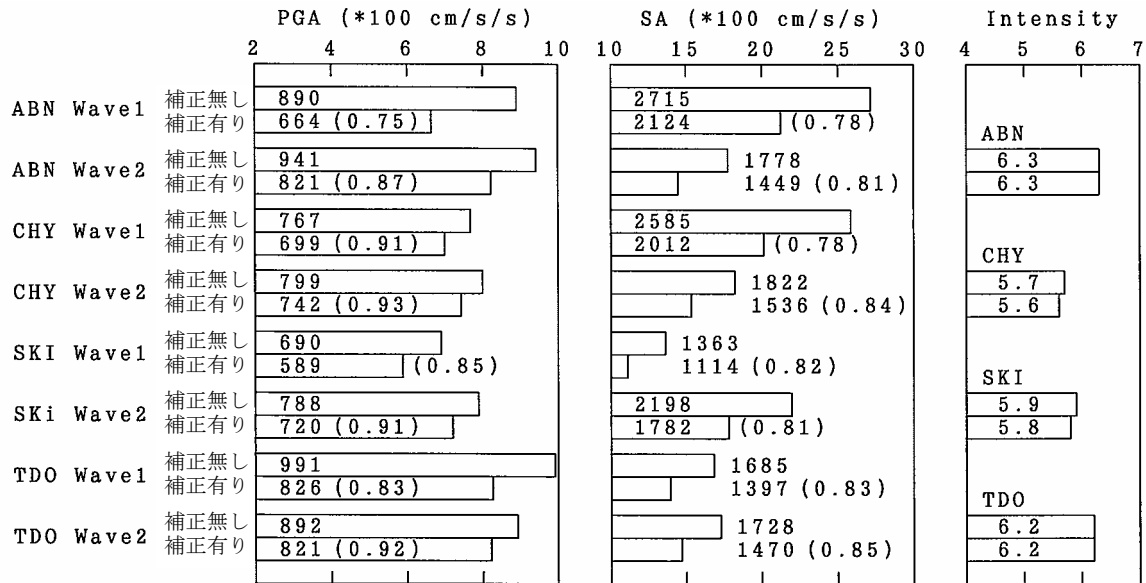
図 15 アスペリティ配置および計算地点位置

グリーン関数を作成する際に乱数時系列を変えた2波を作成した。

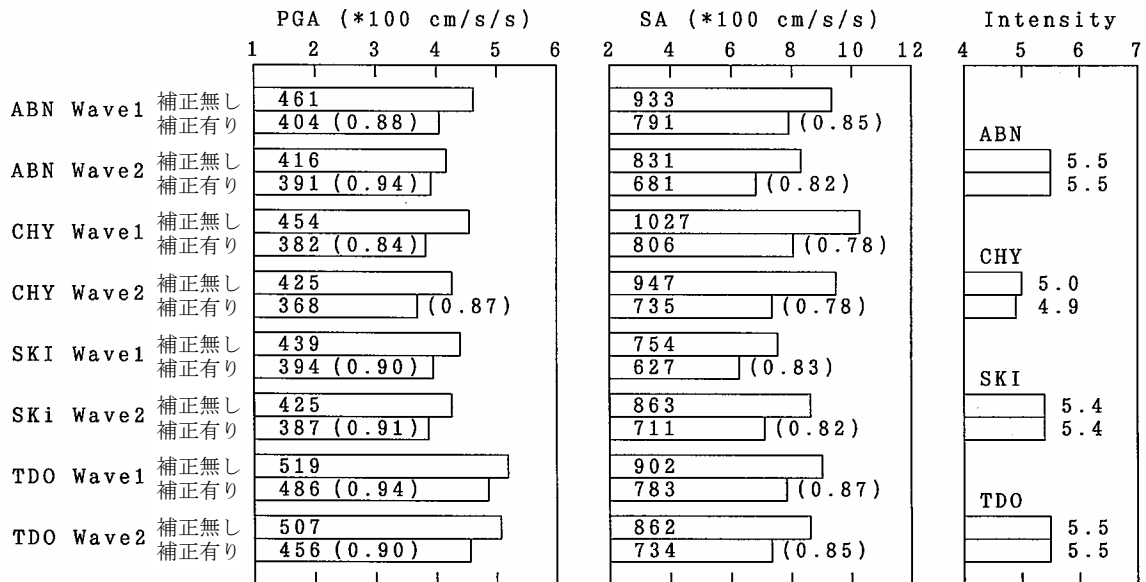
補正の有無による地震動特性値（最大加速度 PGA，周期 0.1 秒における減衰定数 5%の加速度応答スペクトル値 SA，計測震度）の比較を図 16 に示す。図中，上段の棒グラフが補正無しの場合，下段の棒グラフが補正フィルター  $P_c(f)$  による補正をした場合である。棒グラフ中あるいはその横の数値は PGA，SA あるいは計測震度の値を，括弧内の数値は補正無しの場合の各特性値に対する補正有りの場合のそれぞれの比率を示している。同表より，補正フィルターによる処理を施すことによって，最大加速度は 0.75~0.94 倍，周期 0.1 秒における加速度応答スペクトル値は 0.78~0.87 倍となることがわかる。一方，計測震度の差はほとんど認められないことがわかる。

### 6.3 大地震の高域遮断フィルター $P_L(f)$ の影響評価

本節では，第 5 章で提案した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する。このフィルターは大地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を示したものである。したがって，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の適用に際し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 15(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



(1) 断層最短距離 5km 地点



(2) 断層最短距離 20km 地点

図 16 補正フィルター $P_c(f)$ の影響評価

(棒グラフ中あるいはその横の数値：PGA, SA あるいは震度の値)

(括弧内の数値：補正無しの場合の各特性値に対する補正有りの場合のそれぞれの比率)

数法で算出し、続いて 1 次元地盤モデルを用いた線形の地震応答解析<sup>6)</sup>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の影響についても検討した。比較対象とした既往のフィルターは第 5 章と同様、中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会が採用しているフィルター<sup>40), 41)</sup>および香川・ほかによるフィルター<sup>28)</sup>である。また、前節と同様、統計的グリーン関数法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面地震動を求めた。

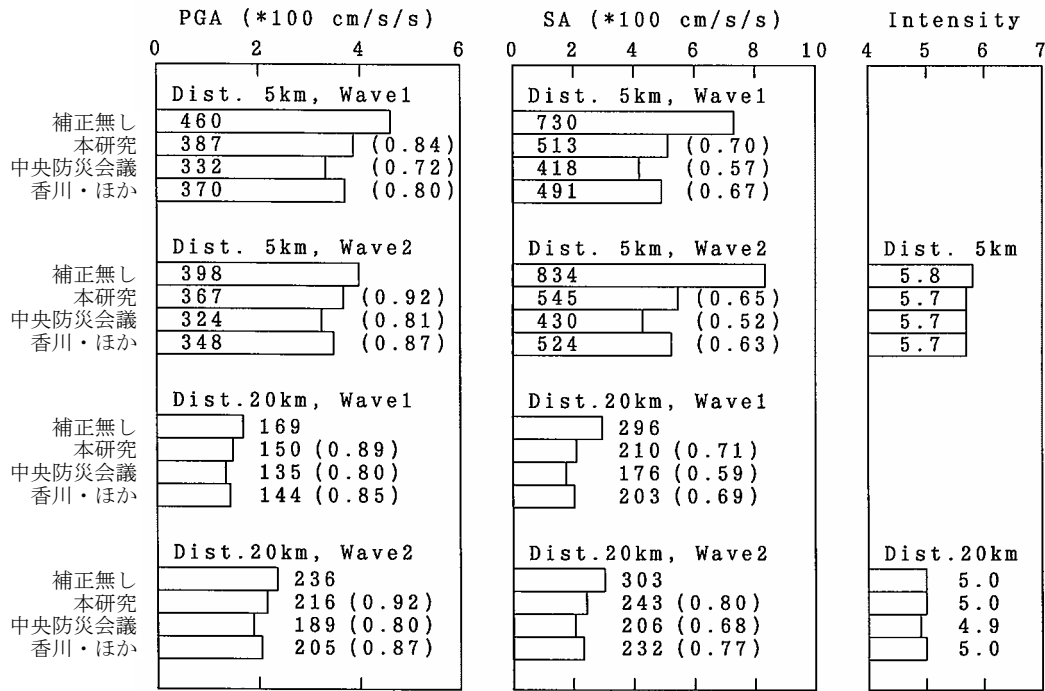


図 17 大地震の高域遮断フィルター $P_L(f)$ の影響評価  
 (棒グラフ中あるいはその横の数値：PGA, SA あるいは震度の値)  
 (括弧内の数値：補正無しの場合の各特性値に対するそれぞれの比率)

各フィルターを用いた場合の地震動特性値（最大加速度 PGA, 周期 0.1 秒における減衰定数 5% の加速度応答スペクトル値 SA, 計測震度）の比較を図 17 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。前述の通り、本研究で提案した大地震の高域遮断フィルター[式(13)]は 2~7Hz の周波数帯域以外では香川・ほかによるフィルター<sup>28)</sup>とほぼ同じ特性を有しているため、両フィルターを用いた場合の PGA や SA の値はほぼ同等である。中央防災会議が採用しているフィルターは、他の 2 つのフィルターに比べ高周波数帯域において大きく低減するフィルターとなっているため、PGA および SA に与える影響はこれらのフィルターに比べてやや大きいといえる。

## 7. 強震動予測レシピとの関連性

第 3 章で行なった 1995 年兵庫県南部地震の地震動シミュレーションでは、その震源モデルとして釜江・入倉によるモデルおよび山田・ほかによるモデルを用いた。得られたシミュレーション結果はこれらのモデルの震源パラメータ、とりわけ応力降下量の値と関係する。本研究で得られた補正フィルターや高域遮断フィルターを強震動予測に用いるのであれば、シミュレーションに用いた応力降下量の値と強震動予測において設定される値が概ね整合している必要がある。

今後の強震動予測においては「強震動予測レシピ」<sup>1),2)</sup>を基に断層設定される場合が多くなると思われる。このレシピでは、地震モーメントが  $1 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m}$  程度以下の地震に対して平均応力降下量は 2.3MPa 程度、アスペリティにおける応力降下量は 10.5MPa 程度で与えられ、 $1 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m}$  程度を越える地震に対しては、応力降下量は地震モーメントに依存して大きくなる<sup>1)</sup>。例えば、地震モーメントが  $1 \times 10^{20} \text{N} \cdot \text{m}$  ( $M_w=7.2$  に相当) では平均応力降下量は 4.9MPa 程度、アスペリティにおける応力降下量は 22.5MPa 程度となる。今回解析に用いた震源モデルの応力降下量は、釜江・入倉によるモデルでは 8.6~16.3MPa, 山田・ほかによるモデルでは 8.6~23.4MPa であり、「強震動予測レシピ」によって与えられるアスペリティにおけるそれとほぼ同等である。したがって、本研究で得られた補正フィルターや高域遮断フィルターはレシピに基づく強震動予測において適用可能と考えられる。

## 8. 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、各種検討を行った。ここでは1995年兵庫県南部地震を対象としたが、この地震の岩盤観測点における記録はほとんどないため、風化岩および洪積層の観測点を対象とした地震動シミュレーションを行って、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  $P_C(f)$  を評価した。これと岩盤観測記録を用いて評価した小地震の高域遮断フィルター  $P_S(f)$  との積をとることにより大地震の高域遮断フィルター  $P_L(f)$  を求めた。

まず、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  $P_C(f)$  として式(8)に示すフィルターを提案した。提案したフィルターは小地震の地震動特性を用いて行なう強震動予測、例えば、経験的グリーン関数法や小地震の観測記録から評価したサイト増幅特性を用いた統計的グリーン関数法など、に適用が可能である。

続いて、小地震 ( $M_J=3.7\sim 4.3$ ) および大地震 (1995年兵庫県南部地震) の高域遮断フィルターに関する検討を行い、大地震の高域遮断フィルター  $P_L(f)$  として次式を提案した。さらに、これと既往の大地震の高域遮断フィルターとの比較を行なった。得られた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の適用に際し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、に適用が可能である。

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

最後に、提案したフィルター [式(8)および上式] が地震動予測結果に及ぼす影響について統計的グリーン関数法を用いて検討した。

ここで提案したフィルターは1995年兵庫県南部地震を対象としたものであり、他の大地震に対して保証するものではないが、第1次的な結果として強震動予測に用いることが可能と考えられる。

本研究では強震動予測に用いる高域遮断フィルターや補正フィルターを提案することを目的としており、高周波数帯域におけるスペクトル低減の要因分析を行なうことが目的ではない。この要因分析を行なうためには木下<sup>14)</sup>や香川・ほか<sup>28)</sup>が指摘する通り、震源域近傍の花崗岩等露頭域での群列観測が必要であり、今後の観測体制の整備が望まれる。

## 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・ほかによるプログラムを使用しました。また、関西地震観測研究協議会による観測記録を使用しました。3名の査読者には有益なコメントを頂きました。記して感謝いたします。

## 付録 1

本研究では大地震および小地震の高域遮断フィルター  $P_L(f), P_S(f)$  と補正フィルター  $P_C(f)$  の間には式(1)、すなわち式(16)に示す関係が成立するとした。また、これらを同じ関数形で表現し、各フィルターの形状としてそれぞれ式(13)、式(12)および式(8)を提案した。これらのフィルターを同じ関数形で表現することの妥当性を数学的に証明することは困難であり、式(13)と式(12)から得られる式(16)左辺と、式(8)で示される式(16)右辺は数学的には一致しないが、本研究の対象とする周波数範囲 (0.2Hz~20Hz) においては両者の差は小さく、概ね近似されていることがわかる (付図1参照)。

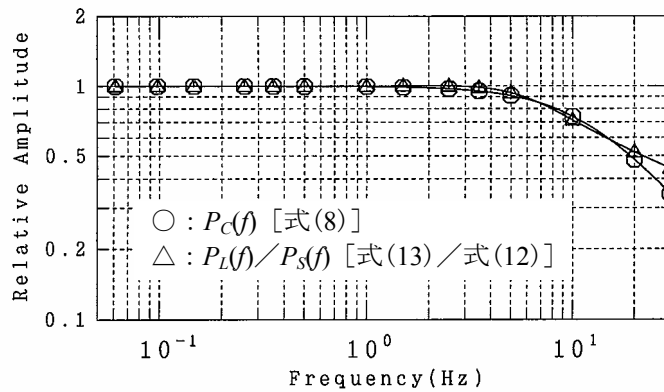
$$\frac{P_L(f)}{P_S(f)} = P_C(f) \quad (16)$$

## 付録 2

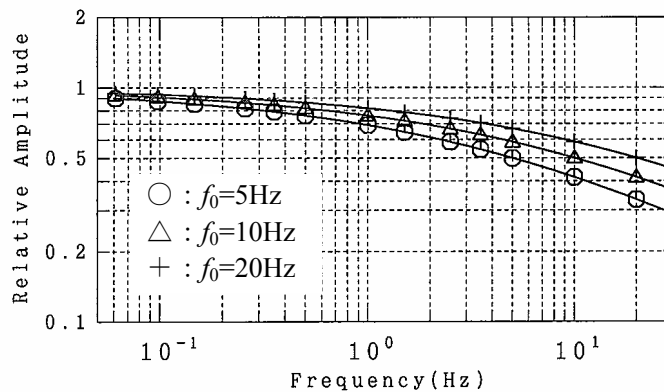
式(5)において  $n=0.5$  とした場合の  $P_C(f)$  の例を付図2に示す。これより、このフィルターによる補正をした場合比較的低周波数領域からフィルターが掛かり、「コーナー周波数以上  $f_{max}$  以下の周波数帯域ではスペクトルが平坦になる」という  $\omega^{-2}$  則の特徴が崩れる可能性があることがわかる。したがって、



式(5)で  $n=0.5$  とした場合は検討から除外した。



付図1  $P_L(f)/P_S(f)$ と  $P_C(f)$ の比較



付図2 式(5)で  $n=0.5$  とした場合の  $P_C(f)$

#### 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回地震工学シンポジウム, 2002, No.109.
- 3) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震第2輯, Vol.39, 1986, pp.579-593.
- 4) 松澤暢, 長谷川昭, 高木章雄: 二重スペクトル比による Q の推定, 日本地震学会 1984 年度秋季大会, 1984, C75.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Birgoren,G. and Irikutra,K.: Estimation of response in time domain using the Meyer-Yamada wavelet analysis, 日本地震工学会・大会, 2003, pp.162-163.
- 8) 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.
- 9) 文部科学省地震調査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.
- 10) Aki,K.: Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, 1967, pp.1217-1231.
- 11) Hanks,T.C.:  $f_{max}$ , *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.72, 1982, pp.1867-1879.
- 12) 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, 1983, pp.953-978.
- 13) 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, 1984, pp.1969-1993.
  - 14) 木下繁夫 :  $f_{max}$  周辺の話題, 地震第 2 輯, Vol.41, 1988, pp.629-639.
  - 15) Hartzell, S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, 1978, pp.1-4.
  - 16) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1986, pp.151-156.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.
  - 20) 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.
  - 21) 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.
  - 22) 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.
  - 23) 池田隆明, 釜江克宏, 三輪滋, 入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.561, 2002, pp.37-45.
  - 24) 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, 1983, pp.1865-1894.
  - 25) 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.
  - 26) 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, 2002, pp.25-34.
  - 27) 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.
  - 28) 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.
  - 29) Kinoshita, S. : Local Characteristics of the  $f_{max}$  of Bedrock Motion in the Tokyo Metropolitan Area, Japan, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.40, 1992, pp.487-515.
  - 30) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震 ( $M7$  級) のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.416, 1990, pp.57-70.
  - 31) Thomsom, D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, 1982, pp.1055-1096.
  - 32) Lees, J.M. and Park, J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geosciences*, Vol.21, 1995, pp.199-236.
  - 33) 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.
  - 34) 山田雅行, 平井俊之, 岩下友也, 釜江克宏, 入倉孝次郎 : 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, 日本地震学会 1999 年秋季大会講演予稿集, 1999, No.A14.
  - 35) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝 : 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002, pp.577-586.
  - 36) Cho, I., Tsurugi, M., Iwata, T., and Kagawa, T. : Modeling of the spectral amplification characteristics at the strong motion observation sites in the Osaka basin, Japan, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004, No.825.
  - 37) 赤澤隆士 : 深発地震記録を用いたサイト特性の簡易評価 (その 2), 地球惑星科学関連学会 2005

- 年合同大会, 2005, S051-P004.
- 38) 末富岩雄・土岐憲三: 神戸大学観測点における表層地盤の影響に関する検討, 第24回地震工学研究発表会, pp.57-60, 1997.
- 39) Ingber, L. and Rosen B.: Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: A comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.16, 1992, pp.87-100.
- 40) 例えば, 中央防災会議 東南海, 南海地震等に関する専門調査会: 第7回資料, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/7/index.html>, 2002.
- 41) 内閣府: 私信

(受理: 2005年12月13日)  
(掲載決定: 2006年10月17日)

**Study on a high-cut filter for strong ground motion prediction  
- Based on the observed records during the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake -**

TSURUGI Masato<sup>1)</sup>, KAGAWA Takao<sup>2)</sup>, OKAZAKI Atsushi<sup>3)</sup>,  
HADA Koji<sup>4)</sup>, and IRIKURA Kojiro<sup>5)</sup>

- 1) Member, Senior Researcher, Geo-Research Institute, Dr.Eng.  
2) Member, Chief Researcher, Geo-Research Institute, Dr.Sci.  
3) Kansai Electric Power Co. Inc., M.Eng.  
4) NEWJEC Inc., M.Eng.  
5) Member, Visiting Professor, Aichi Institute of Technology, Dr. Sci.

**ABSTRACT**

Spectral attenuation characteristics of small events and the 1995 Hyogo-Ken Nambu Earthquake in high frequency range are examined and high-cut filters with a cut-off frequency,  $f_{max}$  are proposed for small and large events. The obtained high-cut filter of large event is compared with the filters proposed in previous studies. Moreover, a filter to correct difference of spectral attenuation between small event and large events in high frequency range is proposed. Finally, effects of the proposed filters on strong ground motion prediction are examined through simulations by stochastic Green's function method. The results obtained in this paper may contribute to strong ground motion prediction in high frequency range.

*Key Words: Strong ground motion prediction,  $f_{max}$ , High-cut filter, Correcting filter, The 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake, Stochastic Green's function method*