

高周波数領域における スペクトル減衰特性に関する検討

鶴来雅人¹・香川敬生²・入倉孝次郎³

¹正会員 博(工) 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 主任研究員
(〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail: turugi@geor.or.jp

²非会員 博(理) 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 主席研究員 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail: kagawa@geor.or.jp

³非会員 理博 京都大学 名誉教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: irikura@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.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。経験的グリーン関数法を用いた大地震記録の再現解析では高周波数領域において過大評価される事例が報告されている。そこで本検討では、1995年兵庫県南部地震のシミュレーションを行ない、大地震記録に見られる高周波数領域におけるスペクトル減衰特性を検討する。その結果、複数の地点に対して共通の高域遮断フィルターを施すことで、観測大地震記録を再現できることが明らかとなった。得られた結果は経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法による強震動予測に際し有益な情報を提供するものと期待される。

Key Words : High frequency range, Spectral attenuation character, The 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Stochastic Green's function method, High-cut filter

1. はじめに

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。地震動のスペクトルが ω^{-2} 則¹⁾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一定となる。しかし、実際にはある周波数より高周波数領域では減衰傾向を示す。Hanks²⁾はこの減衰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²⁾。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ものとする考え^{例えば 3)}と震源の影響によるものとする考え^{例えば 4)}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^{5) 6)}や統計的グリーン関数法⁷⁾、ハイブリッド法⁸⁾などにより強震動予測を行なう際には、この高周波数領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る。地震観測記録から f_{max} の値や高域遮断フィルターの形状および地震規模依存性を検討する試みは数多くなされている。例えば、佐藤⁹⁾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¹⁰⁾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。これに対し、釜江・入倉¹¹⁾は1995年兵庫県南部地震を対象に、池田・ほか¹²⁾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^{5) 6)}を用いて地震動シミュレーションを行い、高周波数領域において過大評価となることを示している。この結果は、この周波数領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中小地震のそれが異なる、すなわち高周波数領域における減衰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。また、香川・ほか¹³⁾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、高周波数領域における減衰特性を検討し、高域遮断フィルターを提案している。

本検討では、1995年兵庫県南部地震のシミュレーションを行ない、大地震記録に見られる高周波数領域におけるスペクトル減衰特性を検討する。さらに、観測記録に

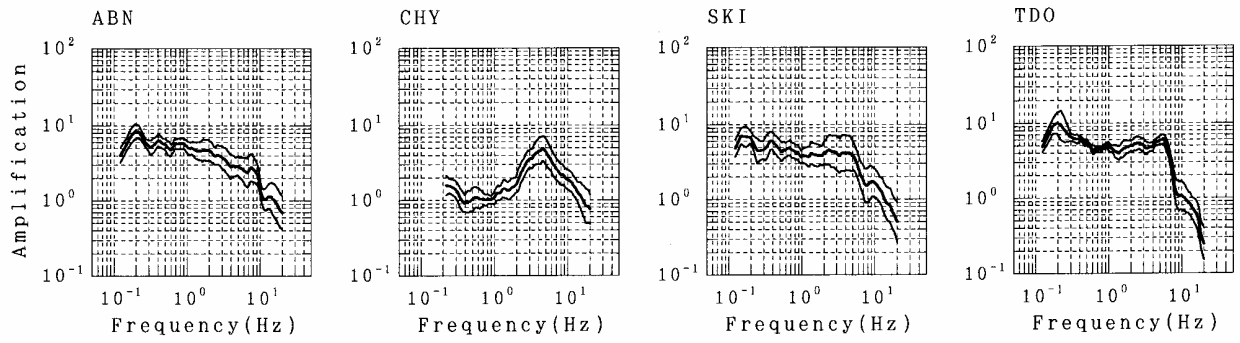


図-1 解析対象地点のサイト増幅特性 (太線：平均，細線：平均±標準偏差)

整合するようなシミュレーション結果を与えるハイカットフィルターを提案する。

2. 解析概要

(1) 検討手法

地震動シミュレーションは統計的グリーン関数法⁷⁾を用いて行う。このとき，中小地震の観測記録から求めたサイト増幅特性を考慮する。したがって，高周波数領域におけるスペクトル特性が中小地震と大地震で同じであれば，この領域において観測記録と整合し，シミュレーション結果を補正する必要はない。一方，スペクトル特性が中小地震と大地震で異なれば観測記録とは整合せず，シミュレーション結果に何らかの補正をする必要がある。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，Boore¹⁴⁾による高域遮断フィルターと同じフィルター形状 [式(1)] を用い，その係数である f_0 および s の適切な値を試行錯誤的に求める。

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

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求める。ここで，主要動部の抽出にあたってマルチテーパ^{15), 16)}を用いることにより，スペクトル算出の精度向上を図る。また，8~20Hz の周波数範囲に対してシミュレーションによるスペクトルと観測スペクトルとの残差平方和の平均値 δ_0 を求め [式(2), (3)]，フィッティングの指標とした。

$$\delta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\log S_s(i) - \log S_o(i)\}^2 \quad (2)$$

$$\delta_0 = 1 \times 10^{\delta_1} \quad (3)$$

ここで，

$S_s(i)$ ：シミュレーション波のフーリエスペクトル

$S_o(i)$ ：観測波のフーリエスペクトル

N ：8~12Hz の周波数領域で，スペクトルを求めている周波数の数 ($N=492$)

である。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。

(2) 震源モデル

1995年兵庫県南部地震の震源モデルとして，釜江・入倉によるモデル¹¹⁾および山田・ほかによるモデル¹⁷⁾を用いた。これらは経験的グリーン関数法^{3), 9)}を用いて比較的高周波数領域までを対象とした解析で得られたモデルである。なお，本研究で得られる高周波数スペクトル減衰特性評価結果は採用する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対して検討を行ない，その平均像を求めることで，震源モデルの影響が低減されるものと思われる。

(3) 伝播経路特性 (Q値)

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で得られた特性¹⁸⁾ [式(4)] 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次元地盤構造から評価したそれ¹⁹⁾や深発地震のスペクトル比から評価したそれ²⁰⁾との比較によりその妥当性が概ね示されている。これは式(4)に示したQ値の妥当性を間接的に示すものと言えよう。

$$Q(f) = 63.8 \times f^{A_0} \quad (4)$$

(4) 解析対象地点とそのサイト増幅特性

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，サイト特性の影響が比較的少な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 地点とした。そのサイト増幅特性は中小地震の観測記録を用いて鶴来・ほか¹⁸⁾によって得られており，これを図-1に示す。図中，太線が平均値，細線が平均値±標準偏差であり，解析には平均値を用いる。

表-1 適切と思われる f_0 および s の値
[釜江・入倉モデル]

	f_0 (Hz)	s	δ_0	δ_0 (無補正)	δ_0 (共通 フィルター)
ABN	11.0	0.5	1.078	1.147	1.129
	12.0	0.5	1.077		
CHY	10.0	0.5	1.047	1.064	1.092
	11.0	0.5	1.044		
	12.0	0.5	1.041		
SKI	8.0	1.0	1.039	1.263	1.039
	9.0	1.0	1.039		
TDO	8.0	0.5	1.078	1.170	1.119
	9.0	0.5	1.077		

なお、釜江・入倉¹¹⁾はその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¹²⁾はその震源モデルの構築にあたり 8 地点の観測記録が用いているが、今回解析対象とした 4 地点はその中には含まれていない。

3. 解析結果

(1) 釜江・入倉による震源モデルを用いた検討

ABN における観測記録と釜江・入倉による震源モデルを用いたシミュレーション結果の比較を図-2(1)に示す。これより、8Hz~20Hz 程度の周波数領域においてやや過大評価であることがわかる。そこで、 $f_0=11\text{Hz}$, $s=0.5$ とした高域遮断フィルターで補正した結果との比較を同図(2)に示す。このフィルターは観測記録と整合するよう試行錯誤的に決められたものである。このほか、CHY, SKI, TDO における観測記録とシミュレーション結果の比較を図-3~図-5 に示す。いずれの地点においても無補正では高周波数領域でやや過大評価となり、高域遮断フィルターによる補正が必要である。適切と思われるフィルターの f_0 および s の値は以下の通りであり、各図(2)にはこのフィルターで補正した結果を示している。

- ・ CHY : $f_0=11\text{Hz}$, $s=0.5$ ・ SKI : $f_0=8\text{Hz}$, $s=1.0$
- ・ TDO : $f_0=8\text{Hz}$, $s=0.5$

なお、観測スペクトルとの残差は f_0 および s の値に対して敏感ではない。したがって、適切と思われるそれぞれの値は唯一ではなく、ある程度の幅をもつものとして評価できる。適切と思われる値を表-1に示す。同表には観測スペクトルとの残差平方和の平均値 δ_0 を併記する。ABNやCHYではSKIやTDOに比べ、 f_0 は高い周波数に決まっていることがわかる。

表-2 適切と思われる f_0 および s の値
[山田・ほかモデル]

	f_0 (Hz)	s	δ_0	δ_0 (無補正)	δ_0 (共通 フィルター)
ABN	6.0	0.5	1.112	1.266	1.131
	7.0	0.5	1.111		
	8.0	0.5	1.112		
CHY	8.0	0.5	1.050	1.166	1.049
	9.0	0.5	1.052		
SKI	6.0	1.0	1.035	1.496	1.054
	7.0	1.0	1.039		
TDO	6.0	0.5	1.101	1.308	1.118
	7.0	0.5	1.105		

(2) 山田・ほかによる震源モデルを用いた検討

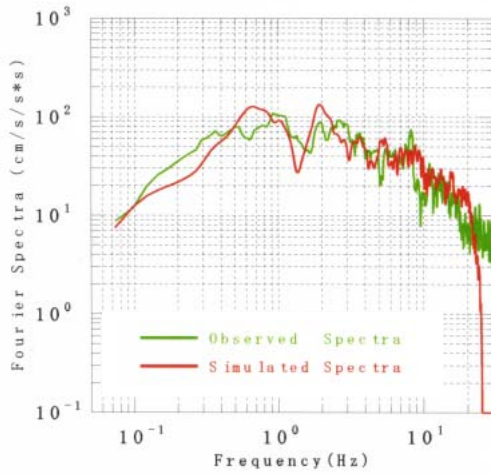
釜江・入倉による震源モデルを用いた検討と同様、無補正の場合、シミュレーション結果はやや過大評価となった。無補正の場合および適切と思われるフィルターで補正した場合のシミュレーション結果と観測記録の比較を図-6~図-9 に示す。なお、適切と思われる f_0 および s の値は以下の通りであり、各図(2)にはこのフィルターで補正した結果を示している。

- ・ ABN : $f_0=11\text{Hz}$, $s=0.5$ ・ CHY : $f_0=11\text{Hz}$, $s=0.5$
- ・ SKI : $f_0=8\text{Hz}$, $s=1.0$ ・ TDO : $f_0=8\text{Hz}$, $s=0.5$

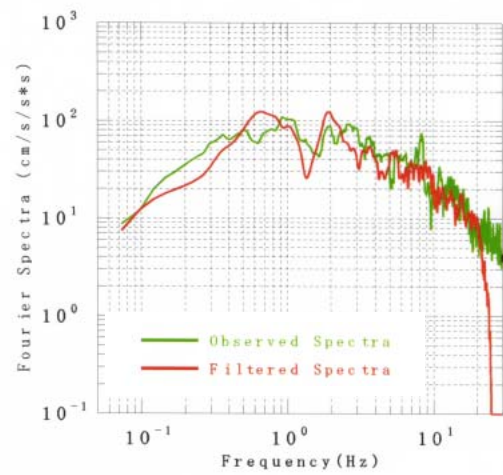
なお、前節と同様、適切と思われる f_0 および s の値は唯一ではなく、ある程度の幅を有するものとして評価できる。適切と思われる値を表-2 に示す。同表には観測スペクトルとの残差平方和の平均値 δ_0 を併記する。山田・ほかによる震源モデルを用いた場合、釜江・入倉による震源モデルを用いた場合に比べ、全地点で f_0 は低い周波数に決まっていることがわかる。

(3) 共通フィルターの提案

現段階ではデータ数の不足により、高域遮断フィルターの特性にサイト依存性があるかどうかの検討はできない。本節では、強震動予測に広く用いることを考慮し、検討対象の 4 地点および 2 つの震源モデルに共通のフィルターで観測記録が説明できるかどうかを検討した。その結果、 $f_0=8\text{Hz}$, $s=1.0$ の組合せで概ね説明できることが明らかとなった。このフィルター処理した場合の観測スペクトルとの比較を図-10~図-13 に示す。また、この場合の観測スペクトルとの残差平方和の平均値 δ_0 を表-1 および表-2 に併記する。釜江・入倉モデルを用いた ABN や CHY ではこの共通フィルターの処理をすることにより観測記録に比べ過小評価となるが、山田・ほかモデルを用いた結果では、観測記録と概ね整合することがわかる。また、SKI や TDO はいずれの震源モデルに対

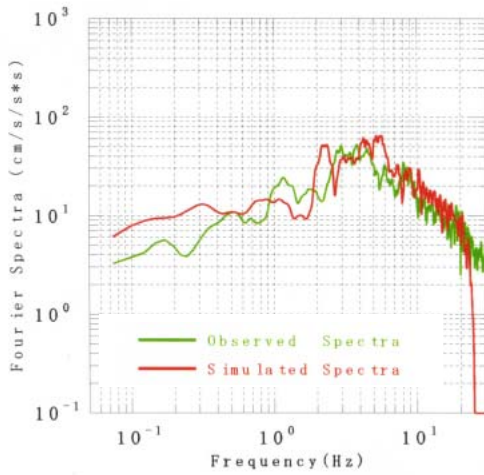


(1) 無補正

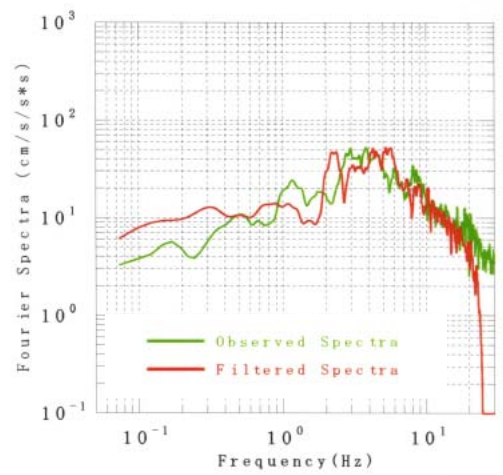


(2) $f_0=11\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-2 ABNにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (釜江・入倉モデル)

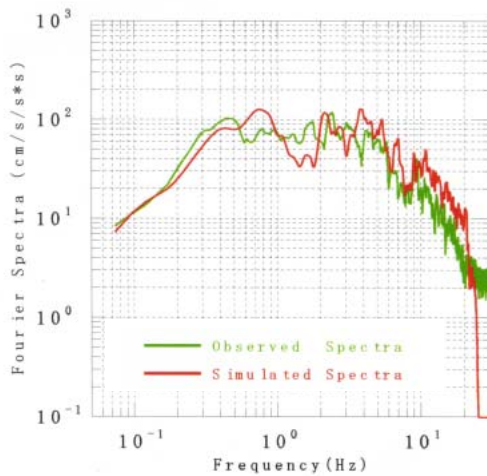


(1) 無補正

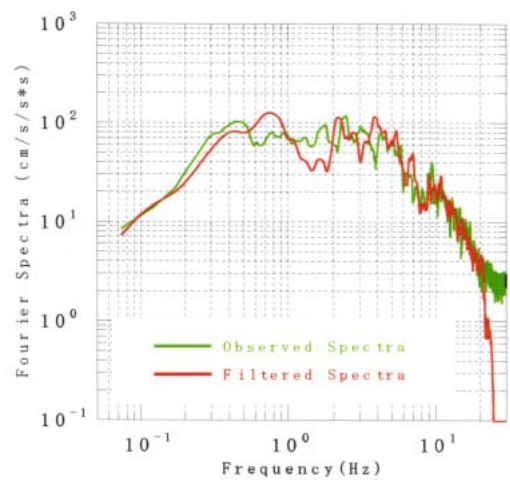


(2) $f_0=11.0\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-3 CHYにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (釜江・入倉モデル)

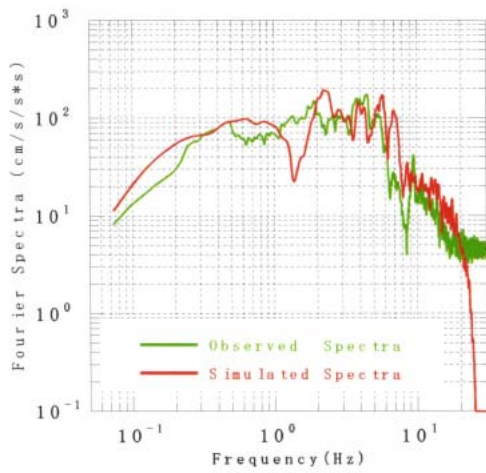


(1) 無補正

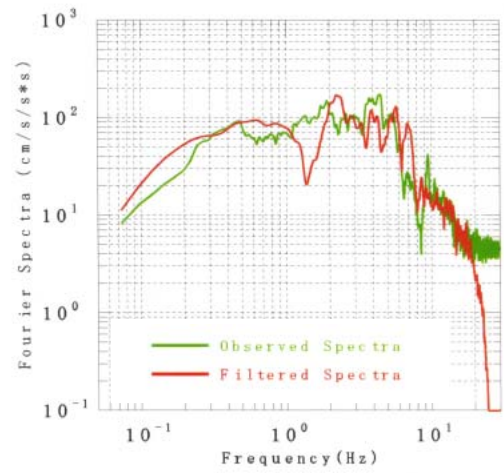


(2) $f_0=8.0\text{Hz}$, $s=1.0$ としたフィルターで補正した場合

図-4 SKIにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (釜江・入倉モデル)

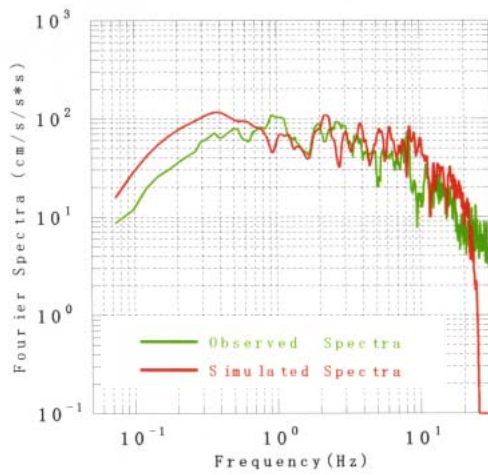


(1) 無補正

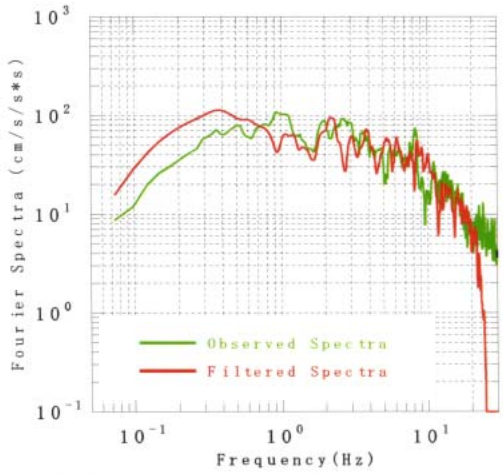


(2) $f_0=8.0\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-5 TDOにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (釜江・入倉モデル)

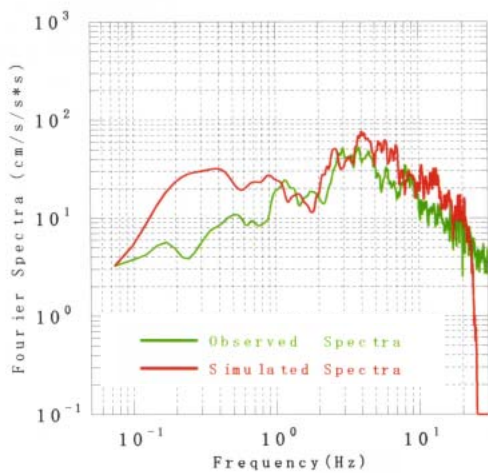


(1) 無補正

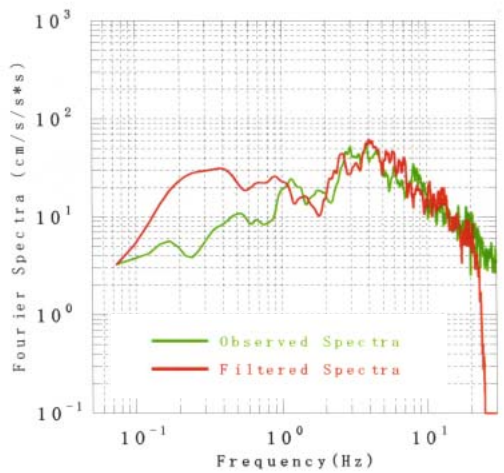


(2) $f_0=7.0\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-6 ABNにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (山田・ほかモデル)

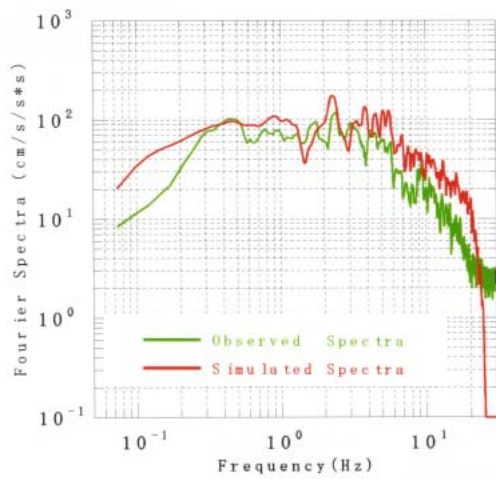


(1) 無補正

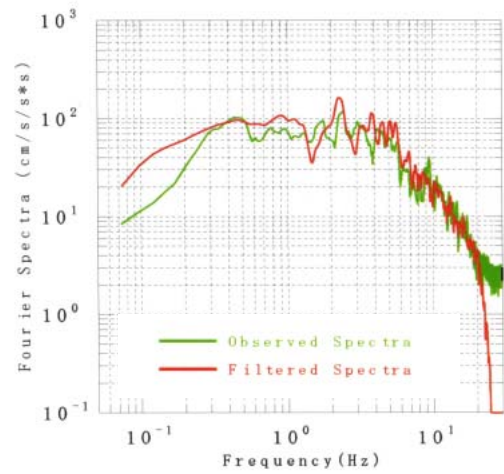


(2) $f_0=9.0\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-7 CHYにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (山田・ほかモデル)

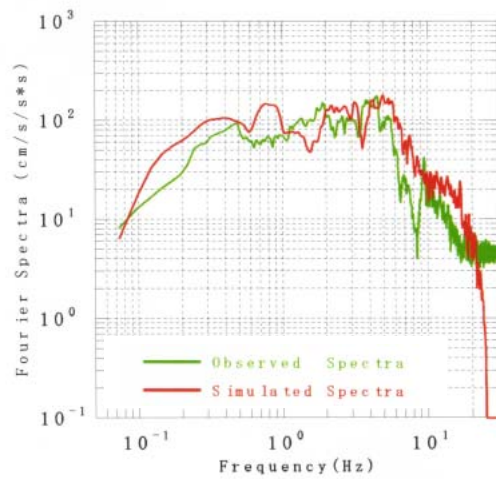


(1) 無補正

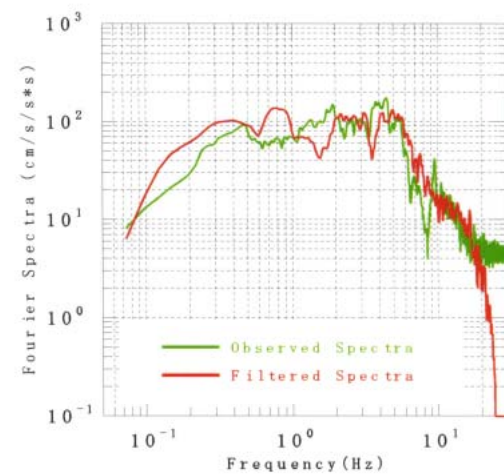


(2) $f_0=6.0\text{Hz}$, $s=1.0$ としたフィルターで補正した場合

図-8 SKIにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (山田・ほかモデル)

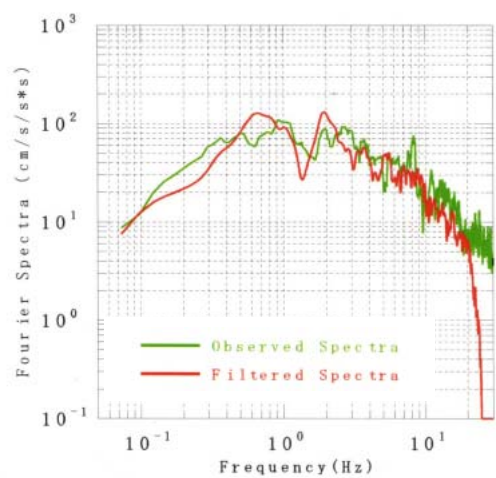


(1) 無補正

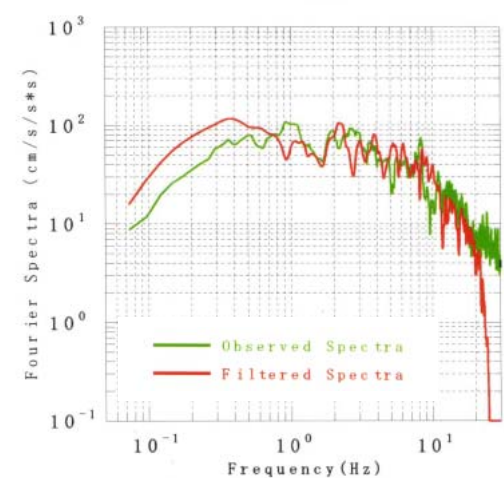


(2) $f_0=6.0\text{Hz}$, $s=0.5$ としたフィルターで補正した場合

図-9 TDOにおける観測記録とシミュレーション結果の比較 (山田・ほかモデル)

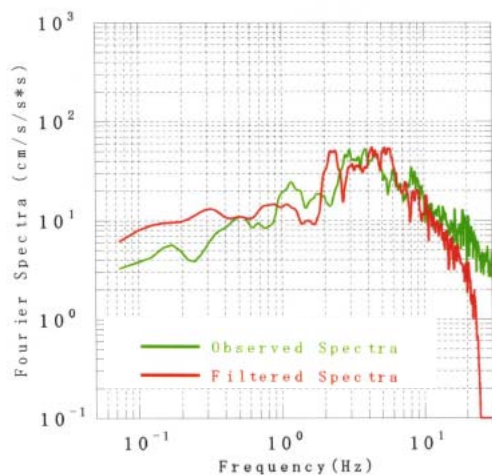


(1) 釜江・入倉モデル

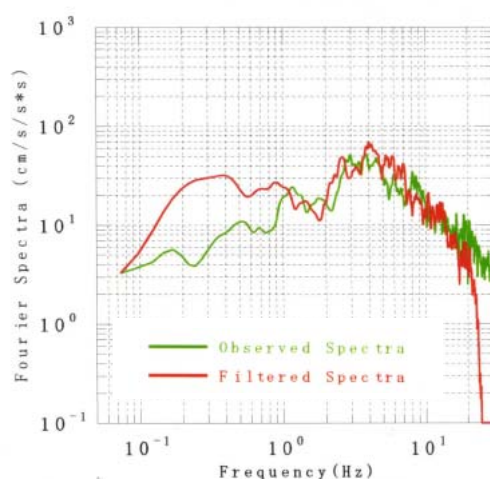


(2) 山田・ほかモデル

図-10 共通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)

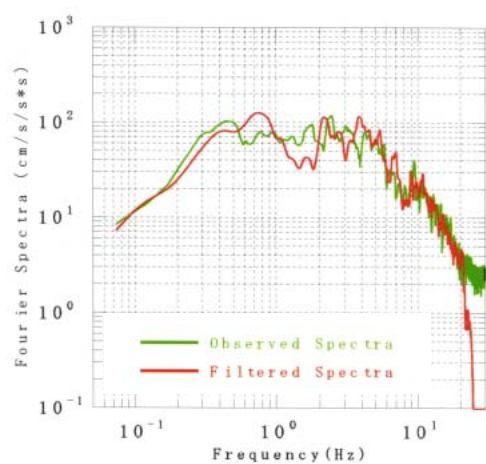


(1) 釜江・入倉モデル

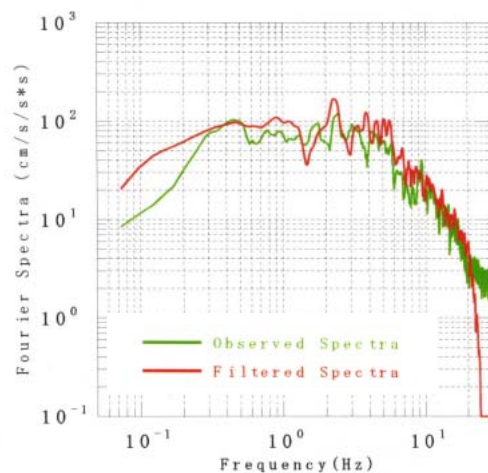


(2) 山田・ほかモデル

図-11 共通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 (CHY)

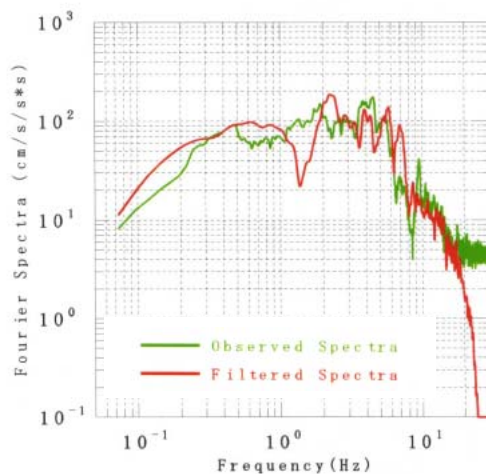


(1) 釜江・入倉モデル

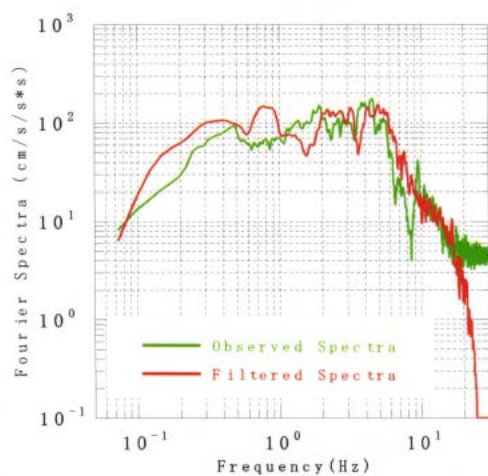


(2) 山田・ほかモデル

図-12 共通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-13 共通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)

しても観測記録と概ね整合することがわかる。

4. 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、まず、1995 年兵庫県南部地震観測記録の高周波数領域におけるスペクトル減衰特性を検討した。続いて、得られた減衰特性を整理し、複数の震源モデルおよび複数のサイトに対して観測記録を概ね説明しうる共通の高域遮断フィルターを提案した（次式）。得られた高域遮断フィルターは強震動予測を行なう上で有益な情報を提供するものと考えられる。

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{8.0}\right)^2}}$$

なお、ここで得られたフィルターは大地震と中小地震の高周波数領域におけるスペクトル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、中小地震の地震動特性を利用した強震動予測（例えば、経験的グリーン関数法や中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）に対し適用可能である。強震動予測にあたって中小地震の地震動特性を利用しない場合（例えば、統計的グリーン関数法の適用に際し、サイト増幅特性を中小地震の観測記録からではなく、例えば地盤モデルから評価する場合）は大地震の観測記録から直接求めた高域遮断フィルター〔例えば、香川・ほか¹³⁾〕を用いるのが望ましい。今後、既往の高域遮断フィルターとの比較、提案したフィルターおよびその共通化が地震動予測結果に及ぼす影響を検討する予定である。

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 が作成した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。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 : 地震のスケール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) 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, pp.29-36, 1997.
- 12) 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, pp.37-45, 2002.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Thomson, D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, pp.1055-1096, 1982.
- 16) Lees, J.M. and Park, J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geosciences*, Vol.21, pp.199-236, 1995.
- 17) 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, A14, 1999.
- 18) 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, pp.577-586, 2002.
- 19) 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*, No.825, 2004.
- 20) 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, S051-P004, 2005.

(2005.06.13 受付)

STUDY ON SPECTRAL ATTENUATION CHARACTER IN HIGH FREQUENCY RANGE

Masato TSURUGI, Takao KAGAWA, and Kojiro IRIKURA

The spectral attenuation character in high frequency range during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake is examined in order to propose a high-cut filter for strong ground motion prediction in this paper. It's cleared that the simulated spectra by the stochastic Green's function method are overestimated in high frequency range. The most suitable high-cut filter for two source models and four target sites is examined by comparing simulated spectra with observed ones. The obtained most suitable filter is very effective for strong ground motion prediction using the empirical Green's function method or stochastic Green's function method.