

高周波数帯域におけるスペクトル低減特性 ～パラメータ κ を用いた検討～

鶴来 雅人¹・田中 礼司²・香川 敬生³・入倉 孝次郎⁴

¹ 非会員 一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 2-1-2)

E-mail:turugi@geor.or.jp

² 正会員 一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 2-1-2)

E-mail:tanaka@geor.or.jp

³ 正会員 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

⁴ 非会員 愛知工業大学客員教授 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 2-1-2)

E-mail:irikura@geor.or.jp

強震動予測を精度良く行うには、高周波数帯域の地震動特性を明らかにすることが必要である。この帯域では、周波数の増加に伴いスペクトルが低減することが知られている。著者らはこれまで日本国内で発生した大地震とそれらの余震を中心とした中小地震を対象に、その低減特性を f_{max} フィルターを用いて明らかにしてきた。一方、アメリカ等諸外国では、このスペクトル低減特性をパラメータ κ を用いて表現するのが主流となっている。そこで本検討では、これまで f_{max} フィルターを用いてスペクトル低減特性が評価されている地殻内地震を対象に、パラメータ κ を用いてスペクトル低減特性を評価し、 f_{max} フィルターとの関係を整理した。その結果、 f_{max} フィルターのスペクトル低減の傾きを示す係数 s と κ の間には概ね正の相関が認められた。これは、同じ低減特性を異なる方法を用いて表現したことによるもので、合理的な結果と言える。また、得られた κ を震源項と伝播経路項に分離する試みを行なった。

Key Words: High frequency range, Spectral decay characteristics, κ , f_{max} , Crustal earthquakes

1. はじめに

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²⁾。一方、Anderson and Hough³⁾ は1971年サンフェルナンド地震などの観測記録を分析し、S波の加速度スペクトルはある周波数 f_E 以上の帯域に対し指数関数的な低減傾向を示すことを指摘し、その低減の傾きを κ (Kappa) と表現した(図-1参照)。その後、日本では高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を f_{max} を用いて表現することが主流となったのに対し、アメリカなど諸外国では κ を用いて表現するのが主流となった。

著者らは経験的グリーン関数法^{4,5)}や統計的グリーン関数法⁶⁾、ハイブリッド法⁷⁾などによる強震動予測の高

精度化に資することを目的に、最近国内で発生した地殻内大地震およびその余震を中心とした中小地震の岩盤観測記録を用いて、高周波数帯域におけるスペクトル低減特性を f_{max} フィルターによって評価してきた⁸⁻¹³⁾。

本研究では、これらの地震を対象として高周波数帯域におけるスペクトル低減特性をパラメータ κ を用いて評価し、 f_{max} フィルターのパラメータとの関係性、 κ の震源項と伝播経路項の分離などについて検討を行なう。

2. 検討手法

Anderson and Hough³⁾ はS波の加速度スペクトル $A(f)$ が ある周波数 f_E 以上の周波数帯域に対し、指数関数的な低減傾向を示す、すなわち

$$A(f) = A_0 \exp(-\pi f \kappa) \quad (f > f_E) \quad (1)$$

が成立するとした。ここで、 A_0 は震源および伝播経路

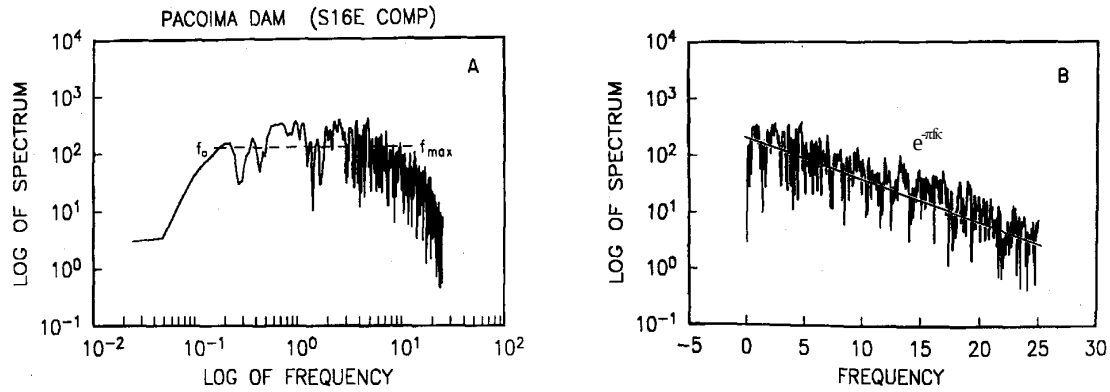


図-1 S波の加速度スペクトルの例³⁾ (1971 San Fernando 地震 Pacoima Dam における記録)

左：周波数軸 対数軸表示，右：周波数軸 実数軸表示

特性より得られる振幅スペクトルである。本研究においても、これに倣い式(1)の κ を求めた。対象とした観測スペクトルは既往研究^{10)~13)}で f_{max} フィルターを評価した際に求めた「平均観測スペクトル」である。「平均観測スペクトル」とは、震源距離が概ね100km以内の複数の岩盤観測点（ここでは、設置深度におけるせん断波速度が 2,000 m/sec 以上の KiK-net 地中観測点）における観測記録を用いて、解析に用いたサイトまでの平均震源距離 X におけるスペクトルの平均として与えられる。

本研究ではまず、スペクトルが最大となる周波数およびスペクトル形状を参考に f_c を定め、 $f_c \sim 30\text{Hz}$ の範囲に対し、最小二乗法によりスペクトル低減の傾き κ を求める。なお、 κ に関する既往研究では、 f_c はコーナー周波数以上³⁾と記載されているのみで十分な議論がなされていないが、強震動予測にあたっては重要なパラメータであると考えられる。

検討対象地震は既往研究^{10)~13)}により f_{max} フィルターがすでに評価されている地殻内地震である。その M_J は 3.4 ~ 7.3、震源深さは 3 ~ 20km で、全 108 地震である。その中には、下記の大地震 ($M_J > 6.0$) が含まれている。

- *2003年宮城県北部地震 (M_J : 6.4)
- *2005年福岡県西方沖地震 (M_J : 7.0)
- *2008年岩手・宮城内陸地震 (M_J : 7.2)
- *2011年静岡県東部の地震 (M_J : 6.4)
- *2011年福島県浜通りの地震 (M_J : 7.0)
- *2016年熊本地震 最大前震 (M_J : 6.5)
- *2016年熊本地震 本震 (M_J : 7.3)

3. κ の評価結果

大地震 ($M_J > 6.0$) の κ の評価結果を図-2 に示す。比較のため、同図には f_{max} フィルターの評価結果^{10)~13)} を併記する。 f_{max} フィルターの評価結果は平均観測スペクトルに適合する理論スペクトル $A(f)$ の形で表現した。ここで、

理論スペクトル $A(f)$ とは ω^{-2} 則¹⁾に基づく震源特性 $S(f)$ と伝播経路特性および高域遮断フィルター $P(f)$ ¹⁴⁾ を考慮したスペクトルである [式(2)~式(4) 参照]。

$$A(f) = CM_0 S(f) \frac{1}{X} \exp \frac{-\pi f X}{Q(f) \beta} P(f) \quad (2)$$

$$S(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \quad (3)$$

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}} \right)^{2s}}} \quad (4)$$

ここで、 M_0 : 地震モーメント

f_c : コーナー周波数

X : 解析に用いた観測点までの平均震源距離

$Q(f)$: Q 値

β : 媒質のせん断波速度

C : その他の係数

である。

これより、いずれの大地震のスペクトルも概ね指数関数的な低減傾向を示していること、 f_{max} フィルターによる理論スペクトルと κ によるフィッティングは概ね調和的であること、がわかる。

大地震 ($M_J > 6.0$) について、得られた f_c および κ の値を表-1に示す。同表には、既往研究で得られた各種パラメータの値も併記した。これより、

- ・2003年宮城県北部地震 本震
- ・2005年福岡県西方沖地震 本震

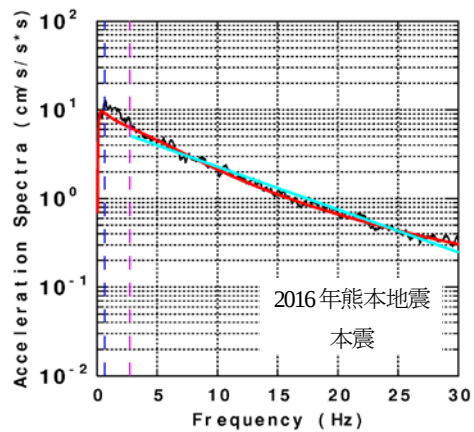
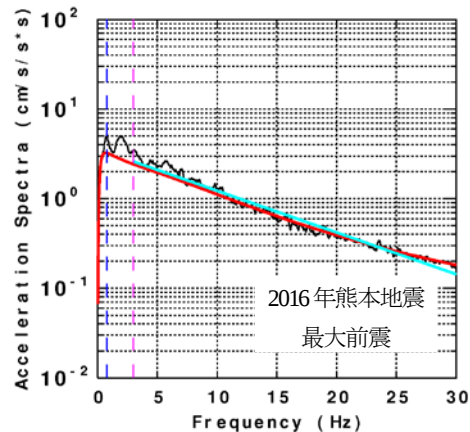
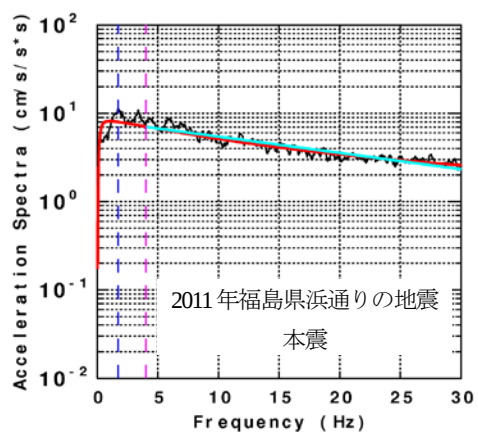
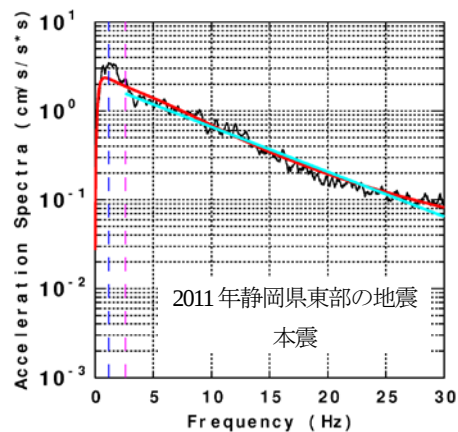
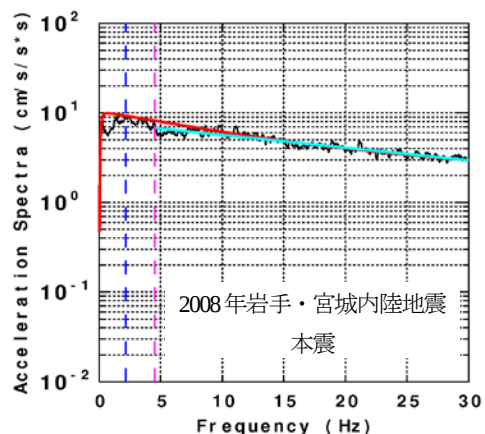
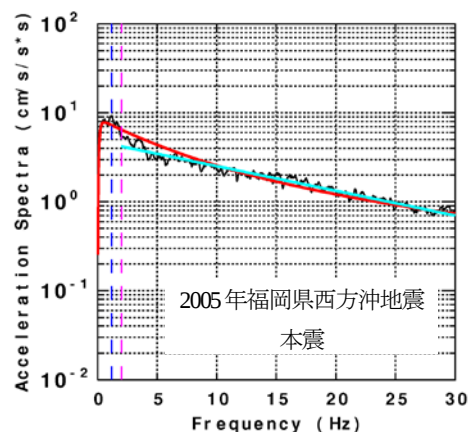
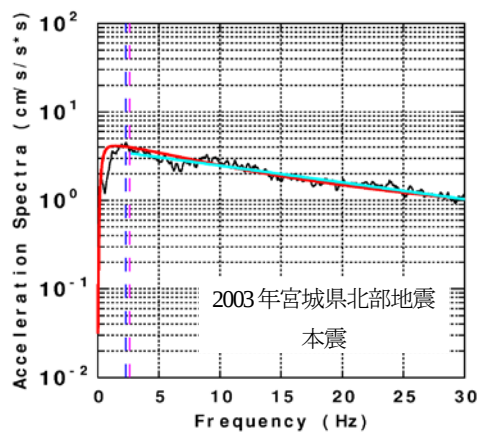


図-2 高周波数帯域におけるスペクトル
低減特性

- : 平均観測スペクトル
- : f_{max} フィルターを用いた理論スペクトル
- : κ による Fitting
- : スペクトルが最大となる周波数
- : f_E

表-1 得られた各種パラメータ

	深さ (km)	M_J	M_o ($N \cdot m$)	f_c (Hz)	f_{max} (Hz)	s	f_E (Hz)	κ
2003年宮城県北部地震 本震	12	6.4	2.71×10^{18}	0.32	8.0	0.93	2.6	0.0190
2005年福岡県西方沖地震 本震	9	7.0	1.15×10^{19}	0.16	6.5	0.90	2.0	0.0277
2008年岩手・宮城内陸地震 本震	8	7.2	3.64×10^{19}	0.12	9.4	0.84	4.5	0.0142
2011年静岡県東部の地震 本震	14	6.4	9.05×10^{17}	0.33	8.6	1.60	2.6	0.0505
2011年福島県浜通りの地震 本震	6	7.0	1.14×10^{19}	0.18	8.0	0.78	4.0	0.0184
2016年熊本地震 最大前震	11	6.5	2.09×10^{18}	0.22	9.9	1.43	3.0	0.0466
2016年熊本地震 本震	12	7.3	2.33×10^{19}	0.11	7.1	1.37	2.7	0.0482

M_o : 地震モーメント, f_c : コーナー周波数

・2008年岩手・宮城内陸地震 本震

・2011年福島県浜通りの地震 本震

の κ は 0.0142 ～ 0.0277 であるのに対して,

・2011年静岡県東部の地震 本震

・2016年熊本地震 最大前震および本震

の κ は 0.0466 ～ 0.0505 と大きな値となった。中小地震 ($M_J \leq 6.0$) についても静岡県東部や熊本地域で発生した地震の κ は他地域で発生した地震のそれより比較的大きく、スペクトル低減特性の地域性が示唆された。この傾向は f_{max} フィルターの評価結果でも見られた傾向であり、調和的である。

大地震の f_E は 2～4.5Hz, 中小地震の f_E は 2.5～15Hz となった。なお、本手法では f_E の評価が主観的である。そこで、 f_E をスペクトルが最大となる周波数として客観的に与えた場合の κ を求めた結果、ここで得られた値と顕著な差はなく、 f_E の影響は小さいことが明らかとなった。

4. κ や f_E と各種パラメータとの関係

f_{max} フィルターのパラメータ (f_{max} , s) や地震モーメントと f_E や κ との関係求めた。ここで、地震モーメントや f_{max} フィルターのパラメータは既往研究^{10)~13)}で得られた値である。その結果を図-3に示す。これより下記傾向が認められた。

・ f_E と f_{max} の間には概ね正の相関がある。

・ κ と f_{max} フィルターのスペクトル低減の傾き s についても全般的には正の相関が認められる。

これらの結果は、同じ低減特性を異なる方法を用いて表現したことによるもので、合理的と言える。その他、地震モーメントとの関係として下記傾向が見られた。

・地震モーメントと f_E の間には負の相関が認められる。

これは、地震モーメントと f_{max} の間に概ね負の相関があることと調和的である。

・地震モーメントと κ の間には相関が見られない。これも f_{max} フィルターのスペクトル低減の傾き s と地震モーメントの間に相関が認められないことと調和的である。

5. κ の震源項および伝播経路項

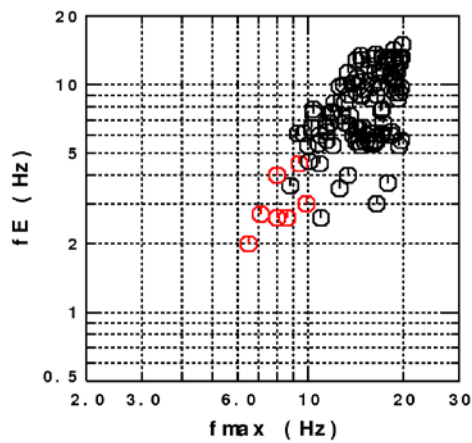
最近の研究では、 κ を震源項、伝播経路項、サイト項に分離する試みが行われており^{例えば15)}。これらにおいては、 κ は一般に式(5)で表される。

$$\kappa = \kappa_{Source} + \kappa_{Path} + \kappa_{Site} \quad (5)$$

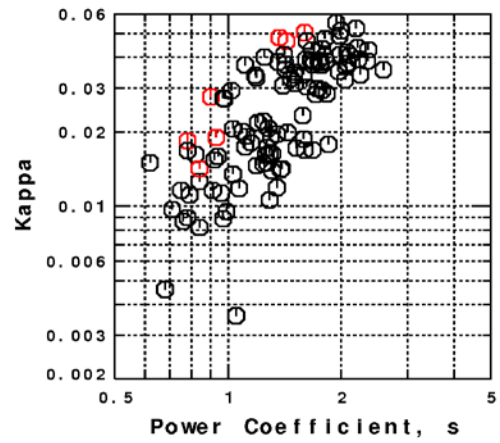
ここで、 κ_{Source} , κ_{Path} および κ_{Site} はそれぞれ κ の震源項、伝播経路項およびサイト項である。

本章では、 $M_J > 6.0$ の7つの大地震を対象に、得られた κ の震源項と伝播経路項への分離を試みた。まず、これまで用いた平均観測スペクトルではなく、各観測点における観測スペクトルを用いて κ を評価した。続いて、観測スペクトルからスペクトル・インバージョン解析で得られた伝播経路特性の補正を行って、震源スペクトルを求め、これに対しても κ を評価した。サイトの影響が小さい岩盤観測記録を用いていることと、地中地震計設置深度におけるせん断波速度と得られた κ に相関が認められなかったことから、 κ_{Site} は 0.0 と考えても良い。したがって、震源スペクトルより求めた値は κ_{Source} と考えられる。さらに、式(5)より κ_{Path} が得られる。

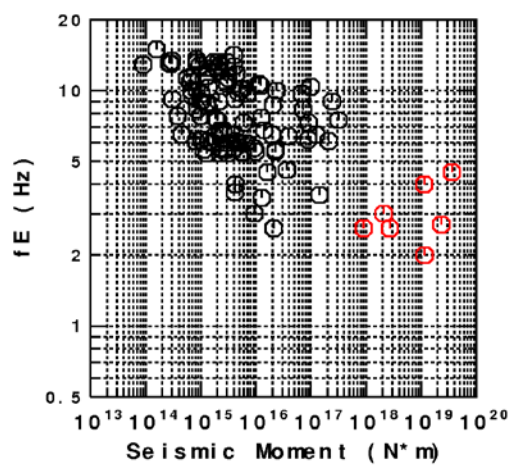
一例として、2003年宮城県北部地震および2016年熊本地震 最大前震の κ , κ_{Source} および κ_{Path} の震源距離依存性を図-4に示す。 κ_{Path} の震源距離依存性が明瞭に確認できるが、これは Q 値による減衰項の距離依存性と対応している。また、 κ_{Source} のばらつきは比較的大きいことがわかる。さらに、減衰が大きい2011年静岡県東部の地震や2016年熊本地震の遠距離(80～100km)の観測点では、 κ_{Source} と κ_{Path} の値は同程度となるが、それ以外では κ_{Source}



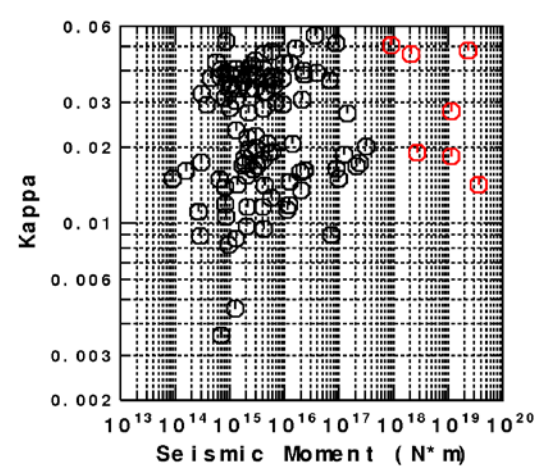
(1) $f_{\max}$ と f_E の関係



(2) $f_{\max}$ フィルターのべき乗数 s と κ の関係



(3) 地震モーメントと f_E の関係



(4) 地震モーメントと κ の関係

図3 各種パラメータ間の関係 [○ : 大地震($M_J > 6.0$), ○ : 中小地震($M_J \leq 6.0$)]

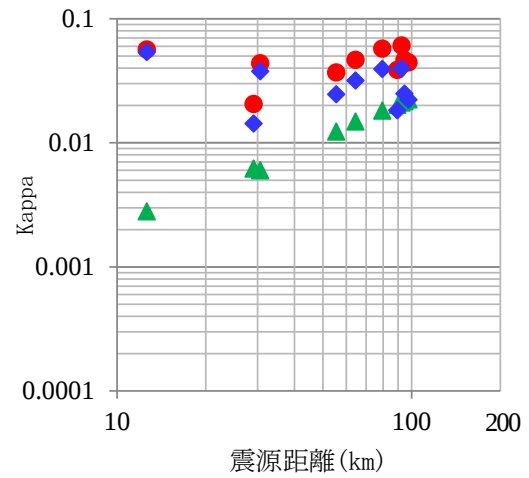
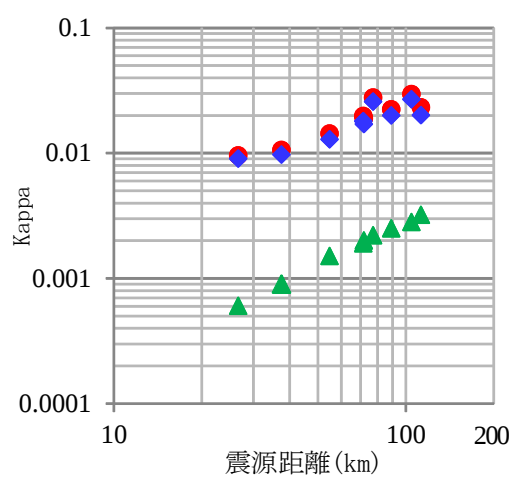


図4 κ の震源距離依存性 (● : κ , ◆ : κ_{Source} , ▲ : κ_{Path})
(左 : 2003年宮城県北部地震 本震, 右 : 2016年熊本地震 最大前震)

は κ_{Pah} に比べ大きいことがわかる。Tsai and Chen¹⁶⁾は「高周波数帯域におけるスペクトルの低減には震源、震源距離、サイトのいずれもが寄与している。ただし、震源距離の影響は小さい」と指摘しているが、ここで得られた結果は Tsai and Chen¹⁶⁾の指摘と矛盾しない。

6. おわりに

本研究では、 f_{max} フィルターによって高周波数帯域におけるスペクトル低減特性が評価されている地震を対象としてパラメータ κ を用いて低減特性を評価し、 f_{max} フィルターのパラメータとの関係性、得られた κ の震源項と伝播経路項の分離などについて検討を行なった。

その結果、加速度フーリエスペクトルは概ね指数関数的な低減傾向を示していること、 f_{max} フィルターによる理論スペクトルと κ によるフィッティングは概ね調和的であること、が明らかとなった。得られた大地震の κ は 0.0142~0.0505 であり、静岡県東部や熊本地域で発生した地震の κ は他地域で発生した地震のそれに比べ有意に大きく、スペクトル低減特性の地域性が示唆された。この傾向は f_{max} フィルターの評価結果でも見られた傾向であり、調和的である。

続いて、スペクトルが指数関数的な低減に遷移する周波数 f_E や κ と f_{max} フィルターのパラメータ (f_{max} , s) との関係性を求めた。その結果、 f_E と f_{max} および κ と f_{max} フィルターのスペクトル低減の傾き s の間には概ね正の相関が認められた。これは、同じ低減特性を異なる方法を用いて表現したことに因るもので、合理的な結果と言える。

さらに κ の震源項および伝播経路項への分離を試みた。その結果、震源項のばらつきは比較的大きいこと、一部を除いて震源項は伝播経路項に比べて大きく、既往研究と矛盾しないことが明らかとなった。

謝辞：本研究は、原子力規制庁の委託研究「平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の検討）事業」の一部として実施しました。防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の観測記録を使用した。

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) Hartzell,S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 5) Irikura,K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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, pp.94-112, 2006.
- 10) 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) —2005 年福岡県西方沖地震の観測記録に基づく検討—, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.1, pp.1-18, 2009.
- 11) 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.
- 12) 鶴来雅人, 香川敬生, 入倉孝次郎 : 2016年熊本地震 前震および本震記録の高域遮断フィルター, 第36回土木学会地震工学研究発表会, C12-950, 2016.
- 13) Tsurugi,M., Kagawa,T., and Irikura,K. : Spectral Decay Characteristics f_{max} and κ for Strong Ground Motion Prediction, *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, No.1232, 2017.
- 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) Van Houtte,C., Drouet,S., and Cotton,F. : Analysis of the origins of κ (Kappa) to compute hard rock to rock adjustment factors for GMPEs, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.101, pp.2926-2941, 2011.
- 16) Tsai,C.P. and Chen,K. : A model for the high-cut process of strong-motion accelerations in terms of distance, Magnitude, and site condition: An example from the SMART 1 Array, Lotung, Taiwan, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.90, pp.1535-1542, 2000.

SPECTRAL DECAY CHARACTERISTICS OF GROUND MOTIONS FROM CRUSTAL EARTHQUAKES USING PARAMETER κ

Masato TSURUGI, Reiji TANAKA, Takao KAGAWA and Kojiro IRIKURA

Spectral decay characteristics in high frequency range of ground motions for crustal earthquakes in Japan are examined using parameter κ (Kappa). Seven large earthquakes are included in the target earthquakes. κ 's of large earthquakes are estimated to be 0.0142 to 0.0505. κ 's of earthquakes occurred in Shizuoka and Kumamoto prefecture are larger than those of earthquakes occurred in other region. From this result, a region dependency of spectral decay characteristic is suggested. There are positive correlation between s as power coefficient of high-frequency decay of f_{max} filter and κ as spectral decay parameter and between f_{max} for the f_{max} filter and f_E for parameter κ . f_E is a frequency at which spectrum starts to decrease on log-linear scale. f_E is a very important parameter for strong ground motion prediction, however f_E has not been examined carefully enough in previous κ studies. It is confirmed that evaluated high frequency characteristics by f_{max} filter and those from spectral decay parameter, κ agree well with each other.