

# 応答スペクトルに関する 地震動ハザード評価（試作版） 概要資料

令和4年（2022年）11月28日  
地震調査研究推進本部 事務局

# 背景と目的

- 地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策（第1期<sup>(平成11年公表)</sup>及び第2期<sup>(平成21年公表、平成24年改訂)</sup>）
  - 全国地震動予測地図の公表
  - 長周期地震動予測地図の公表
- 第3期総合基本施策（令和元年公表）<sup>注1)</sup>
  - 「工学的利活用に向けて、地震動の応答スペクトルに関する地震動予測地図を作成する」
- 以上の背景のもと、応答スペクトルに関する地震動ハザード評価（試作版）を作成
  - 工学的利活用をはじめとした様々なニーズを踏まえた成果のあり方を検討する基礎資料となるよう、試作版は評価条件や試算結果を中心にまとめた。

注1) 正確には、「地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策（第3期）」（令和元年5月31日公表）

## 「応答スペクトルに関する地震動ハザード評価(試作版)」構成

- ポイント
  - 概要資料
  - 報告書
- } 要約など

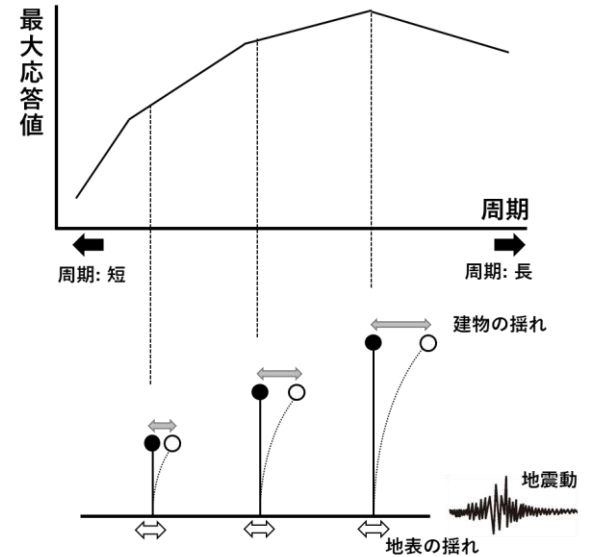
- 目次
1. はじめに
  2. 応答スペクトルに関する地震動ハザード評価の基本的な考え方
  3. 応答スペクトルに関する地震動予測式の整理と選定
  4. 応答スペクトルに関する地震動ハザードの評価条件
  5. 各地点の地震動ハザードの試算結果
  6. 今後に向けて
- 付録1 全国地震動予測地図2020年版の地震活動モデルの概要  
付録2 近年の地震に対する地震動予測式の評価結果  
付録3 地震動予測式のばらつき  
付録4 地震動予測式と地震動ハザード評価

- 地震調査研究推進本部はこれまで、地震動予測地図として、全国地震動予測地図及び長周期地震動予測地図(試作版)を公表してきた。このうち、全国地震動予測地図は確率論的地震動予測地図及び震源断層を特定した地震動予測地図(シナリオ地震動予測地図)から構成される。
- 新たに公表する応答スペクトルに関する地震動ハザード評価(試作版)は、確率論的地震動予測地図と同様に、今後の一定期間内に強い揺れに見舞われる可能性を、工学的基盤における地震動の応答スペクトルの観点から示したものである。
- 本試作版の地震動評価では、応答スペクトルに関する地震動予測式を用いており、複数の固有周期を考慮した地震応答振幅の確率評価を行うことが可能となる。

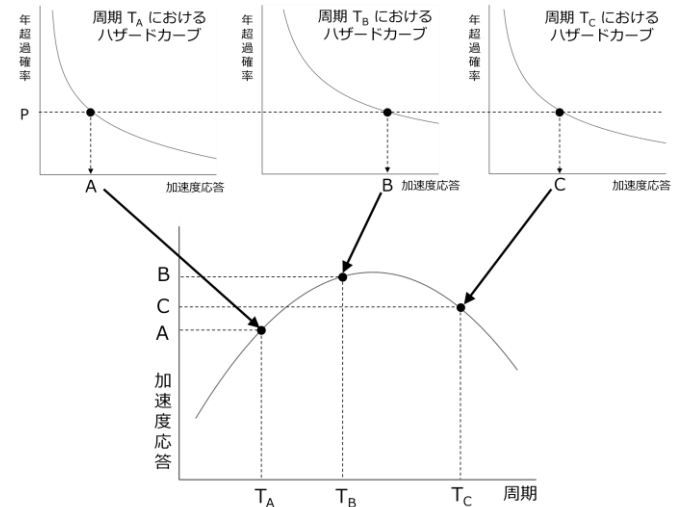
地震調査研究推進本部で作成してきた地震動予測地図の種類と用途

地震動予測地図の種類		用途
全国地震動予測地図	確率論的地震動予測地図	リスクマネジメント等のための基礎資料、耐震対策の計画など
	シナリオ地震動予測地図	特定の地震を想定した強震動の予測、耐震対策の計画など
長周期地震動予測地図(試作版)		長い固有周期を持つ建造物を対象とした耐震・制震・免震対策など

- 応答スペクトルとは、耐震設計など工学分野において、地震動特性を表現する1つの指標である。様々な周期特性を持つ構造物に対して、その地震動がどの程度の揺れの強さ(応答)を生じさせるかを示すものである。応答スペクトルは、ある固有周期と減衰定数を有する1質点系モデルに地震動を入力し計算される応答波形の最大値とその固有周期の関係として求められる。
- 本試作版の地震動評価では、工学的基盤上を対象に、従来のハザードカーブだけでなく、一様ハザードスペクトルの試算も行う。
- 一様ハザードスペクトルとは、周期ごとの応答スペクトルに関するハザードカーブに基づき、同一の超過確率となる応答スペクトルの値を、周期を横軸としてつないだものである。全周期において同じ超過確率となる地震動を表現したものであり、種々の地震の影響が周期ごとに異なる度合いで統合されている。



応答スペクトルの模式図



一様ハザードスペクトルの模式図

- [1次絞り込み] まず、既往の地震動予測式を以下の条件で整理し、10式を抽出した。

条件	抽出した式
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 主に日本の観測記録を用いている。</li> <li>✓ 2003年十勝沖地震<sup>注1)</sup>による強震動記録を含む。</li> <li>✓ 少なくとも周期0.1～1.0秒が含まれる。</li> <li>✓ 特定の地震・観測点のみを対象としていない。</li> <li>✓ 2016年末までに査読付き論文として発表されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Kanno et al. (2006)</li> <li>・ Zhao et al. (2006)</li> <li>・ 内山・翠川(2006)</li> <li>・ 片岡・他(2006)</li> <li>・ 佐藤(2008, 2010)</li> <li>・ Goda and Atkinson (2009)</li> <li>・ Morikawa and Fujiwara (2013)</li> <li>・ Zhao et al. (2015)</li> <li>・ 佐々木・伊藤(2016)</li> <li>・ Zhao et al. (2016a), Zhao et al. (2016b), Zhao et al. (2016c)</li> </ul>



- [2次絞り込み] 次に、日本全国を対象とした地震動ハザード評価を目的として、以下の条件で選別し、2式を選定した。

条件	選定した式
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ マグニチュード(M)9クラスまで適用可能である。</li> <li>✓ 地震タイプ別の適用が可能である。</li> <li>✓ 前弧域と背弧域での減衰特性の違いを考慮可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Morikawa and Fujiwara (2013) → <b>【MF13】</b>と記載する。</li> <li>・ Zhao et al. (2016a), Zhao et al. (2016b), Zhao et al. (2016c), Zhao et al. (2015)<sup>注2)</sup> → <b>【ZZ16】</b>と記載する。</li> </ul>



注1) 防災科学技術研究所のK-NET設置後に初めて発生した海溝型巨大地震である。

注2) Zhao et al. (2015) の内容はZhao et al. (2016a) 等に含まれるため、まとめて【ZZ16】として扱う。

		Morikawa and Fujiwara(2013) 【MF13】	Zhao et al.(2016a,b,c) 【ZZ16】
地震動強さ		水平2成分の時刻歴応答のベクトル和	水平2成分の最大応答の幾何平均
震源特性	$M_w$ と地震動強さの関係	2次関数(Model 1)とバイリニア型(Model 2)でのモデル化 ※本試作版ではModel 1を採用	バイリニア型でのモデル化 (プレート内は2次関数も併用)
	地震タイプ	地殻内、プレート間、プレート内	地殻内、プレート間、プレート内 (それぞれ別の文献で提案されている)
	フィリピン海プレートのプレート内地震の補正項	地震動強さの震源深さ依存性やプレートの違いを考慮するため森川・藤原(2015)で提案	—
減衰特性	式の特徴	【ZZ16】に比べて減衰特性に関する項及び係数が少ない、ややシンプルなモデル式	【MF13】に比べて減衰特性に関する項及び係数が多い、やや複雑なモデル式
	前弧域と背弧域での減衰特性の違いの考慮の仕方	火山フロント(藤原・他、2015)からの距離と震源深さ(震源深さ30km以深の地震に適用)	火山帯を通過する距離 ※論文に倣い下限値12km、上限値80km
サイト特性	浅部地盤	地表から30mの平均S波速度(AVS30)	SC I : AVS30 > 600m/s SC II : AVS30 = 300~600m/s SC III: AVS30 = 200~300m/s SC IV: AVS30 < 200m/s
	浅部地盤の非線形性	—	基盤での推定値を入力に浅部地盤の非線形性を考慮 ※本試作版では考慮しない
	深部地盤	$V_s \geq 1400\text{m/s}$ となる層の上面深度( $D_{1400}$ )	—

- 【MF13】と【ZZ16】の構築に使用されていない2013年以降の計23地震(Mw5.5~7.1)を対象とし、地震動予測式による応答スペクトルの予測値と観測値の残差<sup>注1)</sup>を検討した。

## 条件

K-NET及びKiK-netの地表観測記録のうち、

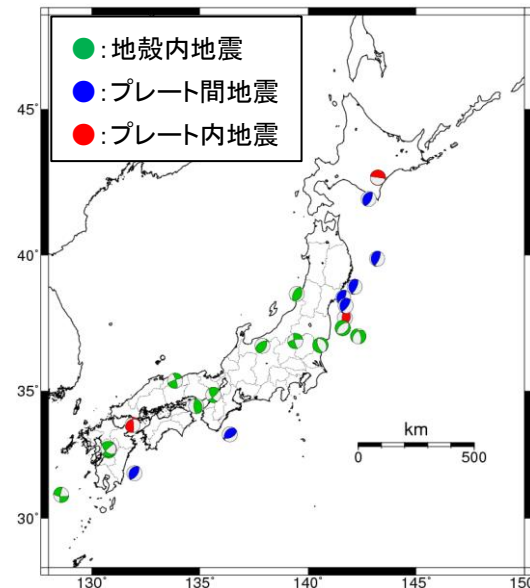
- PS検層結果より翠川・野木(2015)の方法でAVS30の算出が可能な観測点の記録
- 断層最短距離が200km以内の観測点の記録
- 波形のペースアップの確認よりS波主要動が得られている記録



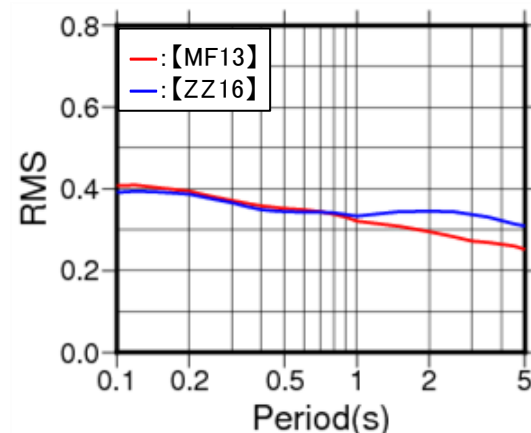
## 対象

23地震4488記録、周期0.1~5.0秒

- 【MF13】と【ZZ16】それぞれの残差を比較すると、短周期側(1.0秒以下)では大きな違いは見られないが、長周期側では【MF13】の残差が【ZZ16】の残差に比べて小さい。
- 【MF13】を用いると、堆積層が厚く深部地盤による増幅が現れる平野における周期1.0秒以上の周期帯の地震動ハザードをより精度良く評価できる可能性がある。
- 以上を踏まえ、本試作版では【MF13】を用いることとした。



残差の検討に用いた23地震



【MF13】と【ZZ16】それぞれの残差の比較

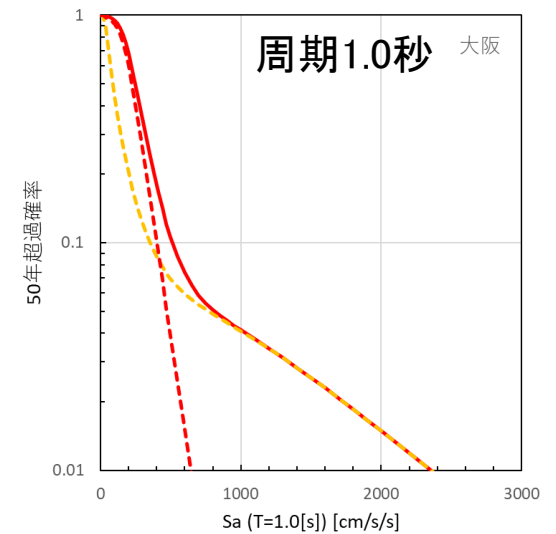
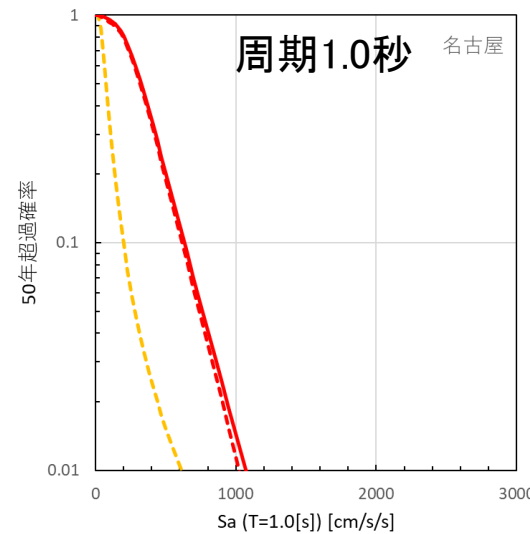
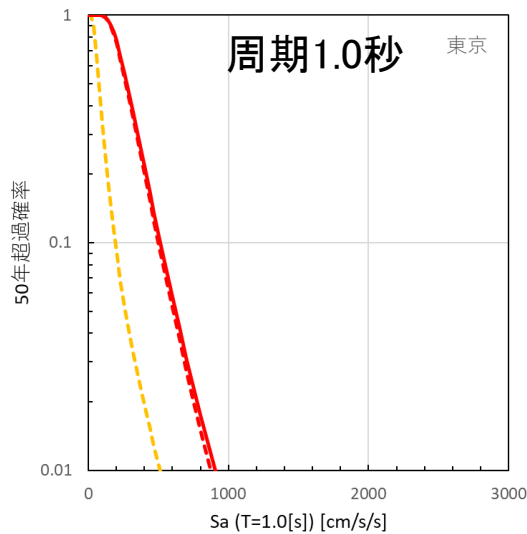
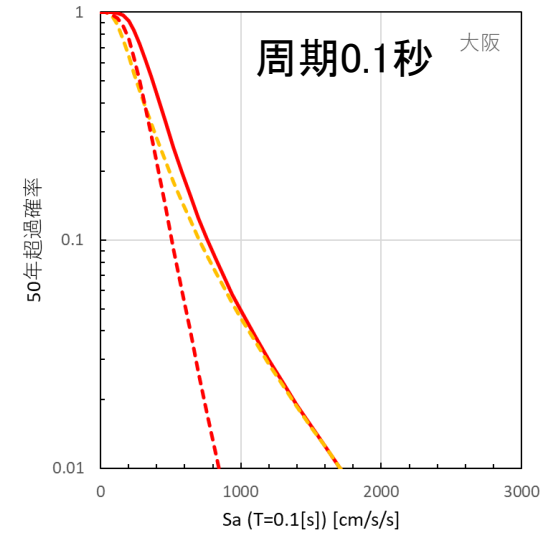
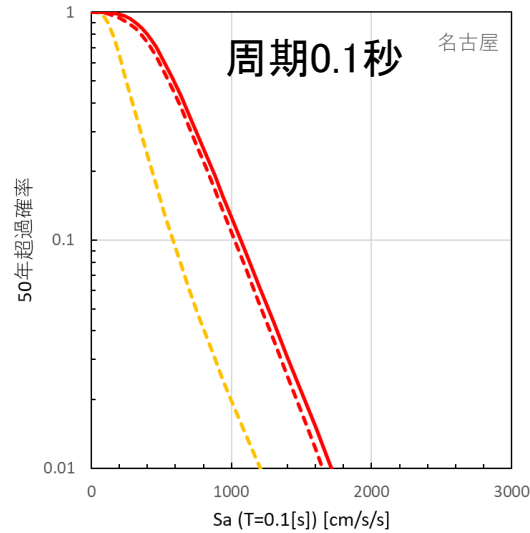
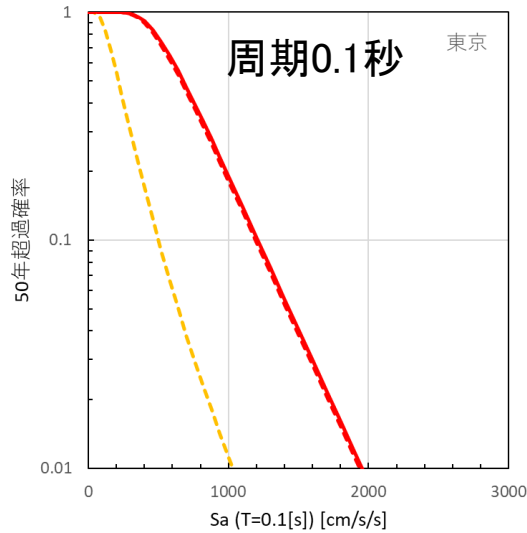
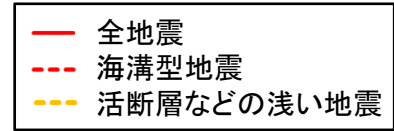
注1) 観測記録を用いて、予測値Preと観測値Obsの残差RMSを次式で求めた。
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \{\log(Obs/Pre)\}^2}{n}}$$



- 影響度の高い地震の種別が異なる3地点を対象
  - ・ 東京:海溝型地震(震源断層を予め特定しにくい地震、以降では震源不特定地震と呼ぶ)の影響が大きい
  - ・ 名古屋:海溝型地震(特に南海トラフ地震)の影響が大きい
  - ・ 大阪:活断層などの浅い地震の影響が大きい
- 工学的基盤上でのハザードカーブを試算(加速度、減衰定数 $h=5\%$ )
  - ・ 4種類の周期(0.1秒、0.5秒、1.0秒、5.0秒)に対する50年超過確率
- 工学的基盤上での一様ハザードスペクトルを試算(加速度、減衰定数 $h=5\%$ )
  - ・ 周期8ポイント: 0.1秒、0.2秒、0.3秒、0.5秒、1.0秒、2.0秒、3.0秒、5.0秒
  - ・ 4種類の超過確率レベル: 50年2%、50年5%、50年10%、50年39%
- 地震活動モデルは全国地震動予測地図2020年版の平均ケースを使用
- 地震動予測式は【MF13】を使用<sup>注1)</sup>
- ばらつき(標準偏差)は全国地震動予測地図2020年版と同じ値を使用<sup>注2)</sup>

注1) AVS30を400m/sとした。また、フィリピン海プレートと比較的浅いプレート内地震については森川・藤原(2015)による追加補正項を適用した。

注2) ばらつきに関する研究成果は徐々に蓄積されつつあるが、適切なばらつきを設定することは今後の課題である。



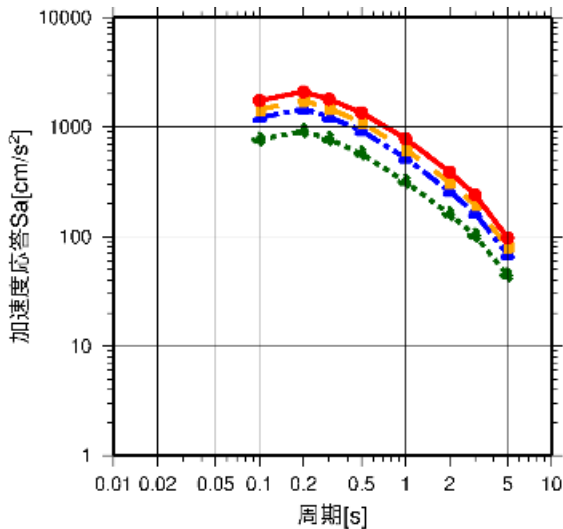
東京都庁位置

名古屋市役所位置

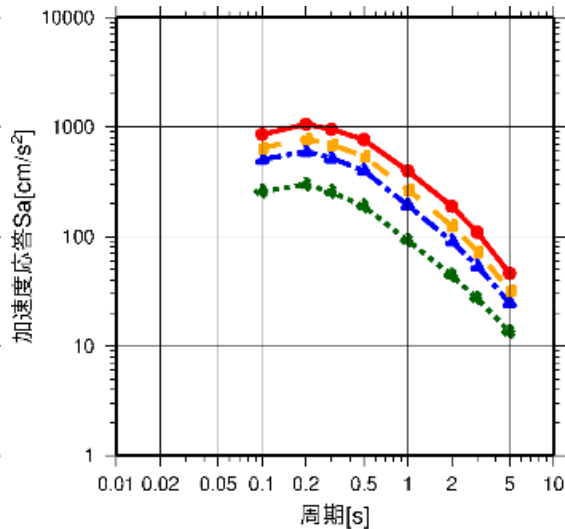
大阪市役所位置

## ○ 一様ハザードスペクトルの特徴

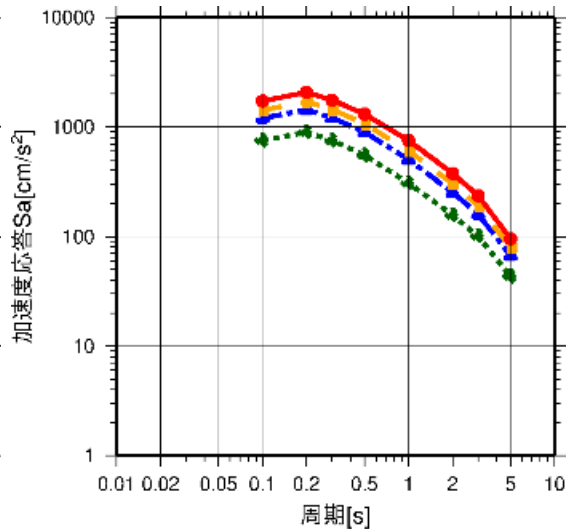
- (a)全地震 と (c)海溝型地震 のスペクトル形状と振幅はよく似ており、どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある。



(a) 全地震



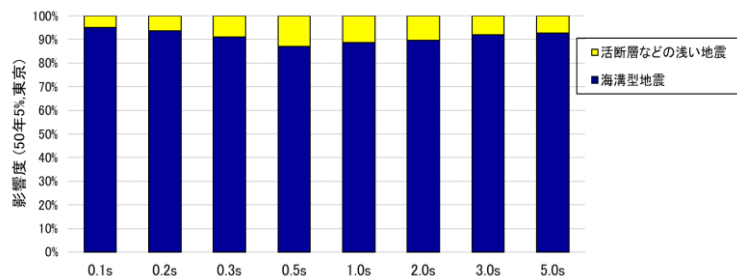
(b) 活断層などの浅い地震



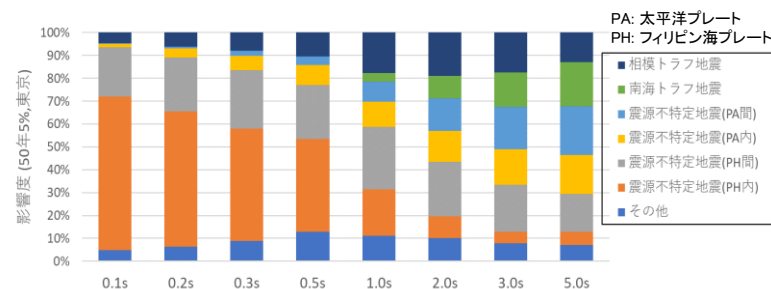
(c) 海溝型地震

## ○ 50年超過確率5%(再現期間1,000年相当)

- どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある(図a)。
- 詳細な再分解(図b)を見ると、短周期側ではフィリピン海プレートのプレート間やプレート内の震源不特定地震の影響度が大きい。一方、長周期になるにつれて、太平洋プレートのプレート間やプレート内の震源不特定地震や、相模トラフ、南海トラフ地震の影響度が大きくなっている。



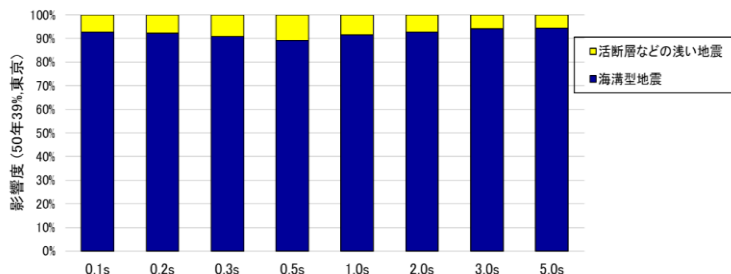
(a) 再分解による影響度評価



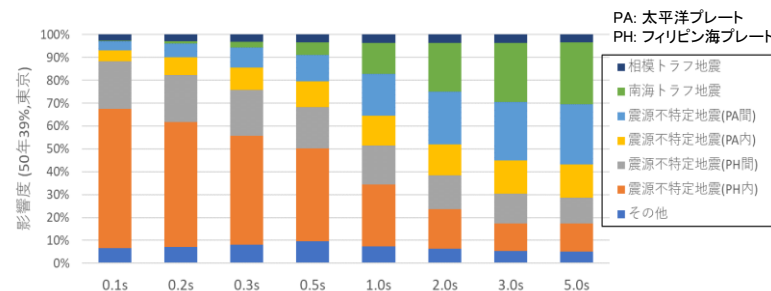
(b) 詳細な再分解による影響度評価

## ○ 50年超過確率39%(再現期間100年相当)

- 図aと同様に、どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある(図c)。
- 図bと比べて、長周期側では南海トラフ地震の影響度が大きくなっている(図d)



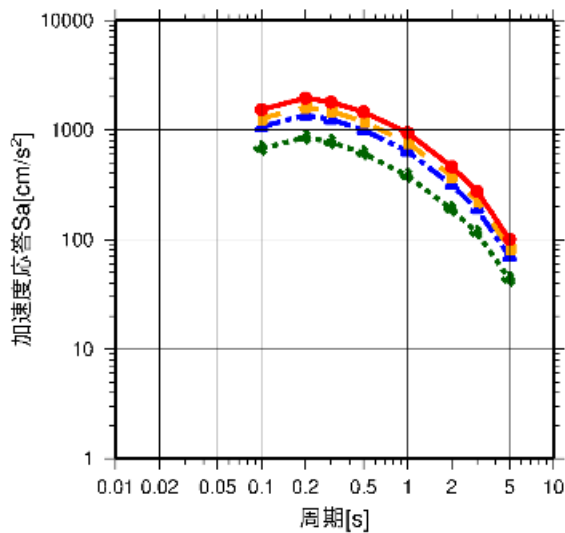
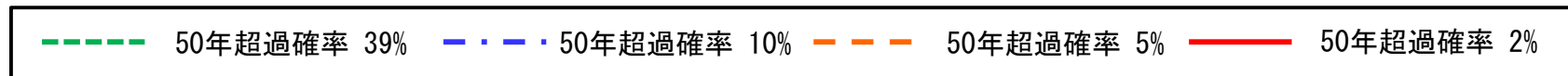
(c) 再分解による影響度評価



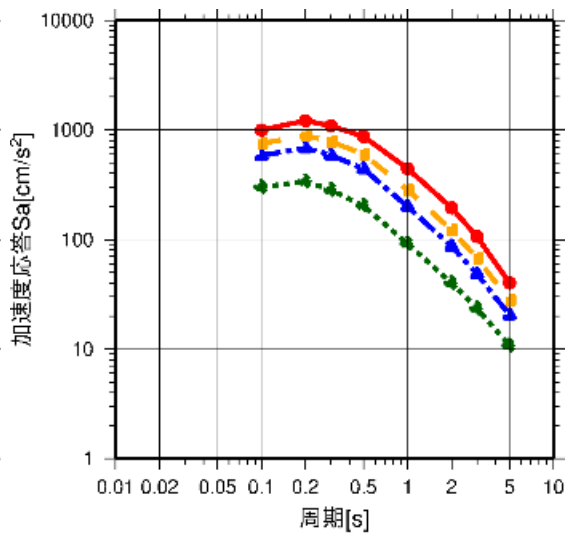
(d) 詳細な再分解による影響度評価

## ○ 一樣ハザードスペクトルの特徴

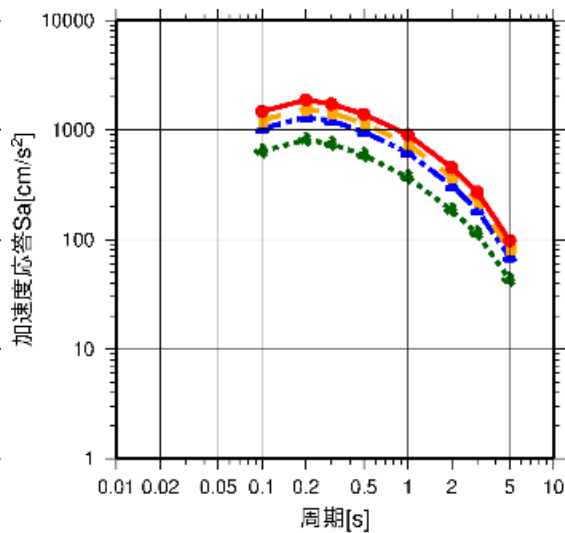
- 東京都庁位置の一樣ハザードスペクトルと同様に、(a)全地震 と (c)海溝型地震のスペクトル形状と振幅はよく似ており、どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある。



(a) 全地震



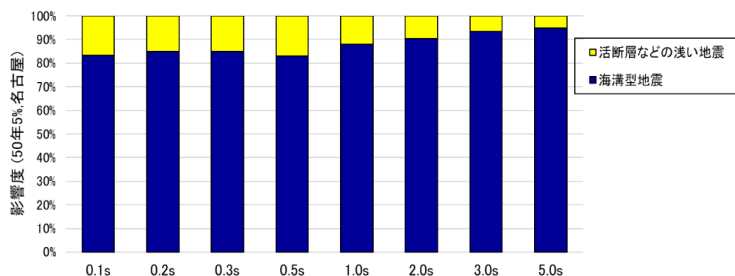
(b) 活断層などの浅い地震



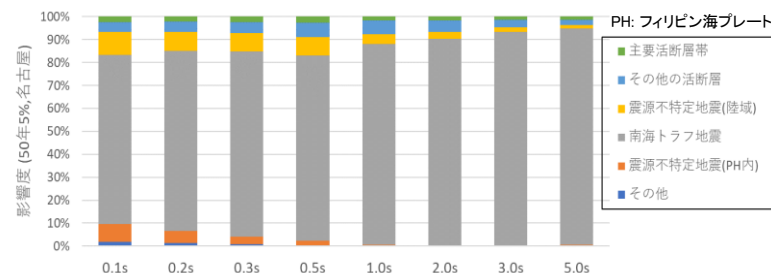
(c) 海溝型地震

### ○ 50年超過確率5%(再現期間1,000年相当)

- どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある(図a)。
- 詳細な再分解(図b)を見ると、どの周期ポイントにおいても南海トラフ地震の影響度が卓越している。この傾向は東京都庁位置の試算結果と異なっている。



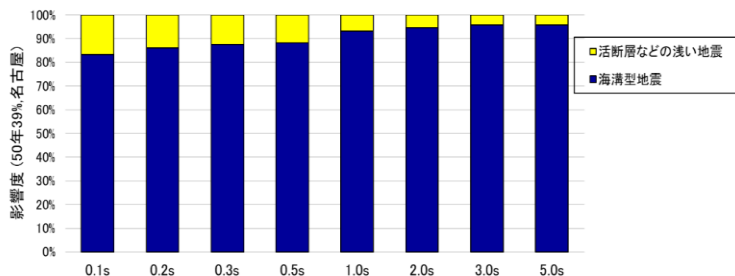
(a) 再分解による影響度評価



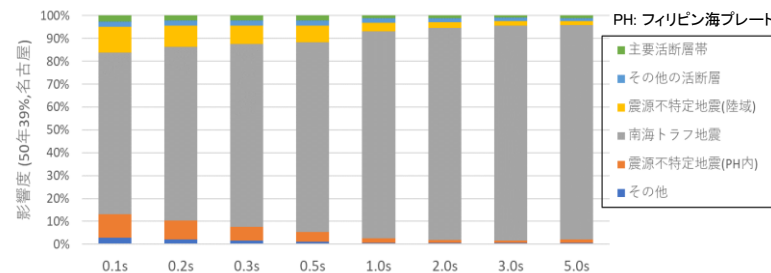
(b) 詳細な再分解による影響度評価

### ○ 50年超過確率39%(再現期間100年相当)

- 図aと同様に、どの周期ポイントにおいても海溝型地震の寄与が大きい傾向にある(図c)。
- 図bと同様に、どの周期ポイントにおいても南海トラフ地震の影響度が卓越している(図d)。
- 超過確率の値によらず、海溝型地震、特に南海トラフの地震の影響度が卓越する傾向にあるといえる。



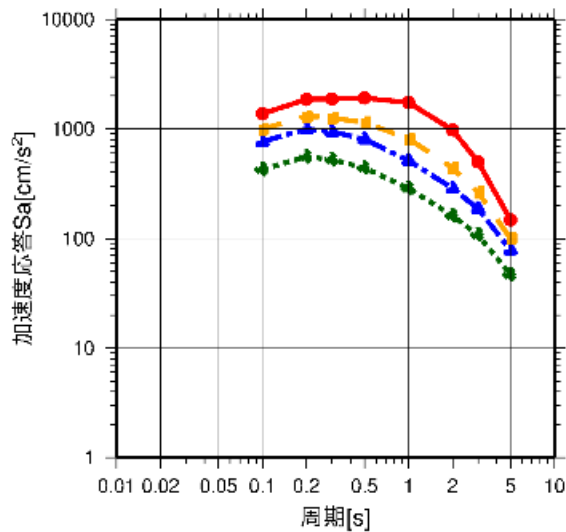
(c) 再分解による影響度評価



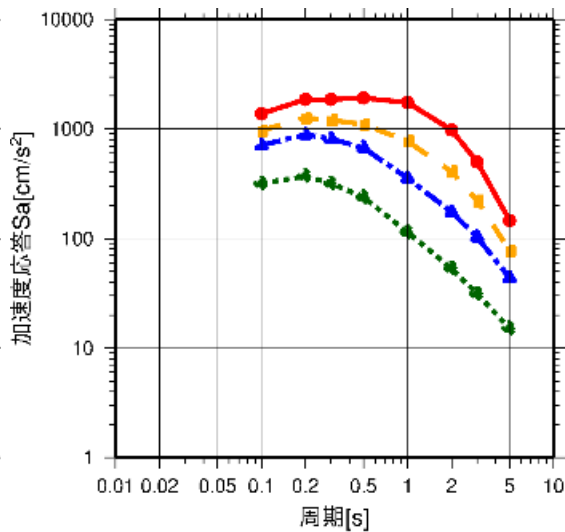
(d) 詳細な再分解による影響度評価

## ○ 大阪市役所位置の一樣ハザードスペクトルの特徴

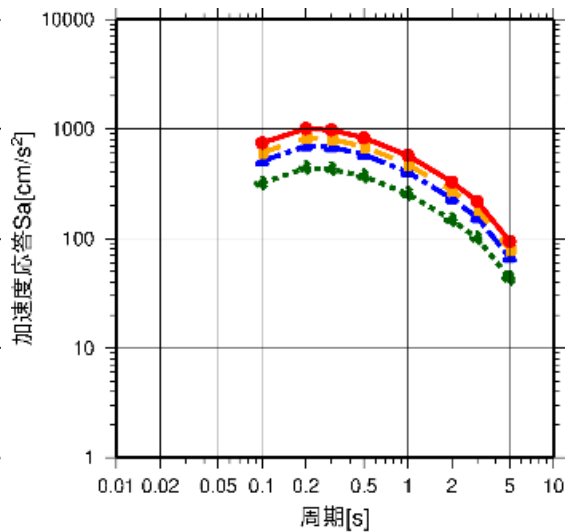
- (a)全地震 において、50年超過確率が比較的低いスペクトル(50年超過確率2%・5%)は (b)活断層などの浅い地震 の寄与が大きく、50年超過確率が比較的高いスペクトル(50年超過確率39%)は (c)海溝型地震 の寄与が大きい傾向にある。



(a) 全地震



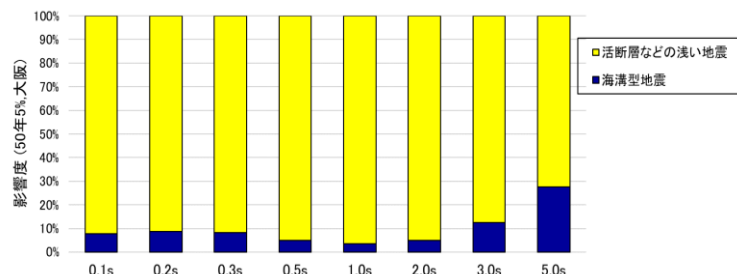
(b) 活断層などの浅い地震



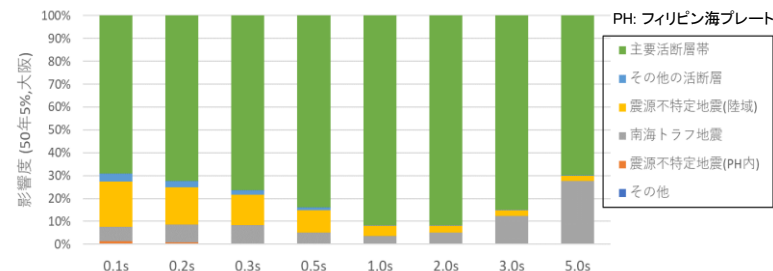
(c) 海溝型地震

## ○ 50年超過確率5% (再現期間1,000年相当)

- 活断層などの浅い地震の寄与が大きい、長周期側では海溝型地震の影響度がある程度見られる(図a)。
- 詳細な再分解(図b)を見ると、主要活断層帯による影響度が大きい。長周期側では、海溝型地震の影響度を支配しているのは南海トラフ地震であることがわかる。
- 大阪市役所の近傍には主要活断層帯に属する上町断層帯が位置しており、この断層帯による影響が大きくなっている。



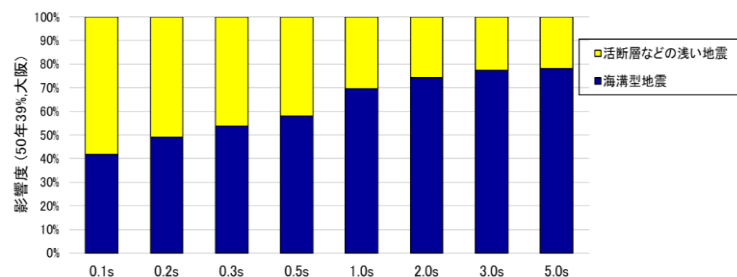
(a) 再分解による影響度評価



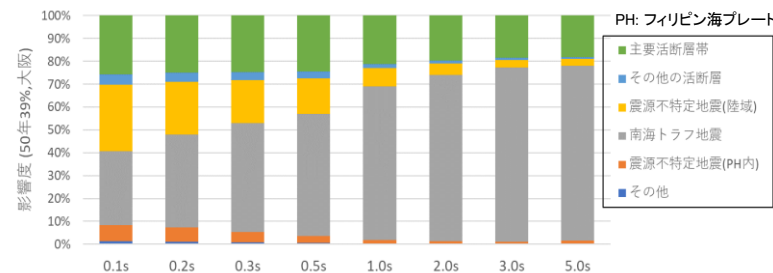
(b) 詳細な再分解による影響度評価

## ○ 50年超過確率39% (再現期間100年相当)

- 図aと比べて、海溝型地震の寄与が大きい傾向にあり、長周期側ほど顕著に見られる(図c)。
- 図bと比べて、南海トラフ地震の影響度が大きくなっている(図d)。



(c) 再分解による影響度評価



(d) 詳細な再分解による影響度評価



- 今後の利活用の一例として、現行の設計実務においては、以下のような観点で広く活用されることが期待される。
  - 建築物や地域の地震環境の特徴を考慮した建設地点選定や設計方針の決定
  - 高層建築物の耐震設計における想定地震の選定や地震荷重との比較検討
  - 中低層建築物の設計層せん断力との比較による地震荷重の検討
  - 構造安全性に加えて、非構造部材、設備などを含めた建築物の被害(被害額、機能停止期間)など事業継続性に関する評価
- また、耐震設計(非構造部材、建築物の継続利用の評価を含む)やBCPに係る地震リスク評価などの検討を行う上では、ハザードとして確率の低い部分のみならず、確率の高い部分についての評価結果も有用であると考えられる。
  - 例えば、試算結果で示した周期ごとのハザードカーブを用いることで、注目する周期、及び50年超過確率に対する加速度応答値が取得可能

## ○ 地震動予測式の精度向上の課題

- 強震観測網の継続的な維持整備
- 震源・観測点・地震動記録に関する統一的なデータベースの構築
- 表層地盤による増幅効果を取り除いた基盤波の使用
- 長周期帯域に適用可能な精度の高い地震動予測式の構築

## ○ 地震動ハザード評価の予測精度向上の課題

- ばらつきの検討(地震規模依存性、距離依存性、周期依存性)
  - 本試作版では全国地震動予測地図2020年版のばらつきの値を周期によらず使用
  - 地震観測記録と地震動予測式に基づいた地震動のばらつきに関する近年の知見を報告書の付録3にて紹介
- 認識論的不確定性の考慮
  - 複数の地震動予測式を用いて認識論的不確定性を考慮する方法もあるが、本試作版では1つの地震動予測式【MF13】を使用
  - 異なる地震動予測式【ZZ16】を用いた地震動ハザードの評価結果を報告書の付録4にて紹介

## ○ 利活用に関する課題

- 試作版を踏まえて工学を含めた様々な分野での利活用検討の促進
- 利活用の検討を踏まえた新たな切り口のデータ分析、より多くの地点の評価結果の提供方法などの検討

例えば

- 評価期間
- 面的な評価
- 短周期帯域から長周期帯域までをカバーする周期ポイント数
- より短周期帯域(0.1秒未満)の地震動ハザード評価
- 上下動を対象とした地震動ハザード評価
- 地表における地震動ハザード評価

- ・ 防災科学技術研究所(2019): 防災科研K-NET, KiK-net. <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
- ・ 藤原広行・森川信之・河合伸一・青井真・先名重樹・前田宜浩・東宏樹・はお憲生・岩城麻子・若松加寿江・井元政二郎・長谷川信介・奥村俊彦・早川俊彦・高橋真理(2015): 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良、防災科学技術研究所研究資料、第399号。
- ・ Goda, K. and G. M. Atkinson (2009): Probabilistic Characterization of Spatially Correlated Response Spectra for Earthquakes in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.99, pp.3003–3020. <https://doi.org/10.1785/0120090007>
- ・ 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2021): 全国地震動予測地図 2020 年版。
- ・ Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006): A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, pp.879–897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>
- ・ 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明(2006): 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A、第62巻、第4号、pp.740–757。
- ・ 翠川三郎・野木淑裕(2015): 深さ30mまでの地盤の平均S波速度を深さの浅いデータから推定する方法について、日本地震工学会論文集、第15巻、第2号、pp.91–96。
- ・ Morikawa, N. and H. Fujiwara (2013): A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.8, pp.878–888. <https://doi.org/10.20965/jdr.2013.p0878>
- ・ 森川信之・藤原広行(2015): 海溝型プレート内地震のための地震動予測式の補正項に関する検討、日本地球惑星科学連合2015年大会、SSS25–14。
- ・ 佐々木隆・伊藤壮志(2016): 東北地方太平洋沖地震を踏まえたダム基礎岩盤における地震動距離減衰式、日本地震工学会論文集、第16巻、第4号(特集号)、pp.80–92。
- ・ 佐藤智美(2008): 地殻内地震に対するP波部・S波部・全継続時間の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第632号、pp.1745–1754。
- ・ 佐藤智美(2010): 日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第647号、pp.67–76。
- ・ 内山泰生・翠川三郎(2006): 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第606号、pp.81–88。
- ・ Zhao, J. X., K. Irikura, J. Zhang, Y. Fukushima, P. G. Somerville, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, and H. Ogawa (2006): An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, pp.914–925. <https://doi.org/10.1785/0120050124>
- ・ Zhao, J. X., S. Zhou, P. Gao, T. Long, Y. Zhang, H. K. Thio, M. Lu, and D. A. Rhoades (2015): An Earthquake Classification Scheme Adapted for Japan Determined by the Goodness of Fit for Ground-Motion Prediction Equations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.105, pp.2750–2763. <https://doi.org/10.1785/0120150013>
- ・ Zhao, J. X., X. Liang, F. Jiang, H. Xing, M. Zhu, R. Hou, Y. Zhang, X. Lan, D. A. Rhoades, K. Irikura, Y. Fukushima, and P. G. Somerville (2016a): Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Interface Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.106, pp.1518–1534. <https://doi.org/10.1785/0120150034>
- ・ Zhao, J. X., F. Jiang, P. Shi, H. Xing, H. Huang, R. Hou, Y. Zhang, P. Yu, X. Lan, D. A. Rhoades, P. G. Somerville, K. Irikura, and Y. Fukushima (2016b): Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.106, pp.1535–1551. <https://doi.org/10.1785/0120150056>
- ・ Zhao, J.X., S. Zhou, J. Zhou, C. Zhao, H. Zhang, Y. Zhang, P. Gao, X. Lan, D. A. Rhoades, Y. Fukushima, P. G. Somerville, and K. Irikura (2016c): Ground-Motion Prediction Equations for Shallow Crustal and Upper-Mantle Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.106, pp.1552–1569. <https://doi.org/10.1785/0120150063>