

標準応答スペクトルに係る検討について

令和元年8月7日

目次

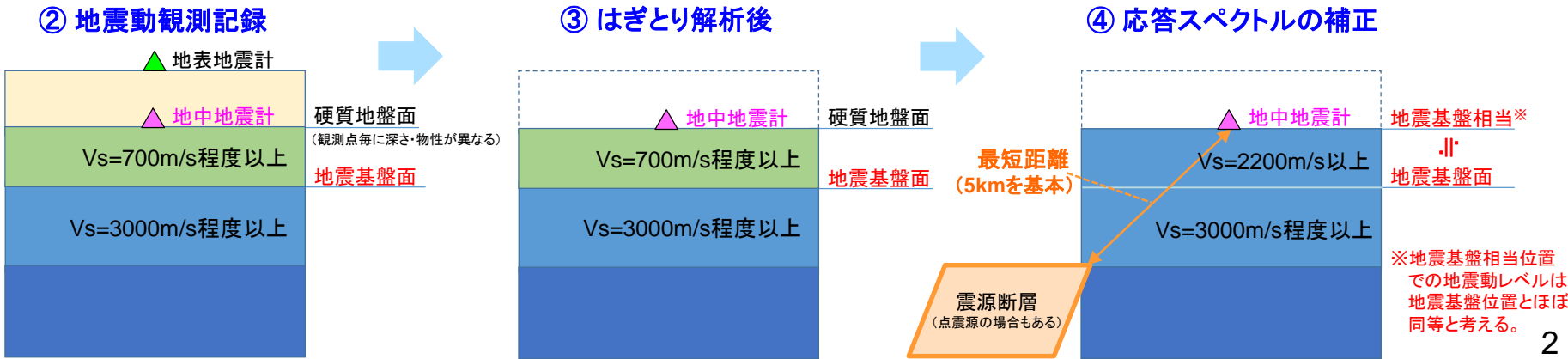
1. はじめに.....	2
2. 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)に係る整理.....	4
3. 地震動観測記録の収集・整理.....	7
4. はぎとり解析.....	11
5. 応答スペクトルの補正.....	16
5.1 震源距離補正.....	18
5.2 地盤物性補正.....	25
5.3 応答スペクトルの補正前後の比較.....	26
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認.....	31
7. 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出.....	67
7.1 データ選別・重み付けの条件.....	68
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果.....	74
8. 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認.....	95
8.1 標準応答スペクトルの設定.....	96
8.2 標準応答スペクトルの妥当性確認.....	107
9. 時刻歴波形の作成方法.....	117
付録A はぎとり解析手法の妥当性確認(予備検討).....	135
付録B 震源距離補正に用いる距離減衰式の選定.....	147
付録C 対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果の確認.....	155
付録D 2004年北海道留萌支庁南部地震K-NET港町観測点の地震動との比較.....	159
引用文献.....	160

1. はじめに (1/2)

これまでの検討チーム会合における全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の「標準応答スペクトル」に係る検討について、会合に用いた資料を整理して、本資料に示す。
なお、内容は最終結果を反映して適宜更新した。

標準応答スペクトルに係る検討概要(1/2)

- ① 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)に係る整理
本検討で対象とする全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に対し、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」との関係、対象地震及び地震動策定についての考え方を整理した。
- ② 地震動観測記録の収集・整理
Mw5.0~6.5程度の内陸地殻内地震について、震央距離30km以内の地中観測記録を収集・整理した。
- ③ はぎとり解析
地表地震計と地中地震計の間の地盤モデル(公開データ)を用いて、硬質地盤面での地中観測記録(層内波)に対して、はぎとり解析を実施し、地中地震計より上の地盤の影響を除去した「はぎとり波(露頭波)」を算出した。
- ④ 応答スペクトルの補正
各観測記録を半径10km程度以内の震源近傍の領域での地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$ 以上*)における地震動として扱うために、必要に応じて、はぎとり波の応答スペクトルに「震源距離補正」及び「地盤物性補正」を施した。
* 本検討では、地震基盤相当面でのS波速度(V_s)は、地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)による経験式における定義を参考に $V_s=2200\text{m/s}$ 以上とした。



1. はじめに (2/2)

標準応答スペクトルに係る検討概要 (2/2)

⑤ ラベル付け※に基づく統計処理のデータセットの確認

統計処理で用いる補正後の応答スペクトルに対して、11項目を対象にラベル付けに基づくグループ分けを行い、グループ毎の応答スペクトルを比較して特徴を分析し、データセット(データ数)に地震・観測条件や解析処理(はぎとり解析、補正)による極端又は非現実的な偏りや影響が生じていないかを確認した。

※ここでの「ラベル付け」とは、各地震動記録(応答スペクトル)に地震・観測に係る項目の情報(ラベル)を付加して区別・整理するための処理である。

⑥ 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出

ラベル付けによる分析結果に基づいて、地震動への影響が大きいと考えられる複数の条件について、データの選別・重み付けを考慮した非超過確率別応答スペクトル(5ケース及び参考・確認用の4ケース)を算出した。

⑦ 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認

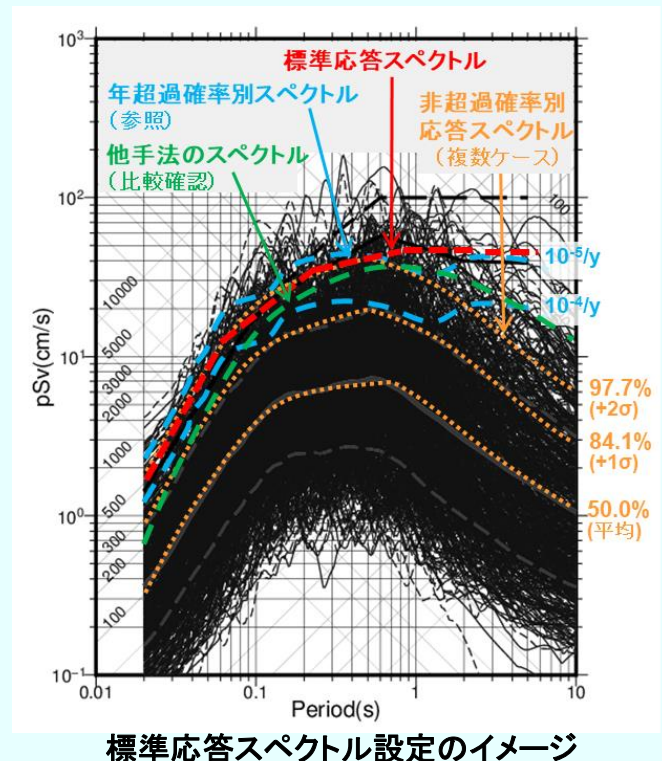
非超過確率別応答スペクトルの算出ケースのうち、全国共通に考慮すべき震源を特定せず策定する地震動の条件を満たすように精度を上げる目的で不確実さを低減させた3ケース(+確認用の2ケース)を基に、以下の観点による妥当性確認の結果も踏まえて、標準応答スペクトルの設定を行った。

〈妥当性確認の観点〉

- ・地震動の年超過確率の参照
- ・他の手法による応答スペクトルレベルとの比較

⑧ 時刻歴波形の作成方法

標準応答スペクトルに基づいて事業者が作成することとなる模擬地震波の時刻歴波形について、作成方法とその留意点に関して議論を行った。



2. 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)に係る整理 (1/3)

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」について

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の対象地震の考え方及び地震動設定の流れを以下に示す。

震源を特定せず策定

震源を特定せず策定

①全国共通
②地域性考慮

<震源を特定せず策定する地震動とは>

敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての敷地(対象サイト)において共通的に考慮すべき地震動であるという意味づけられた地震動。

①**全国共通に考慮すべき地震(Mw6.5程度未満)**：
地表地震断層が出現しない可能性がある地震で、国内においてどこでも発生すると考えられ、事前に震源の位置も規模もわからない地震。
→ 本検討チームで対象とする地震
(ただし、Mw6.5程度の地震については一旦は地域性考慮の地震や震源を特定して策定する地震動も含めて統計処理を検討)

②**地域性を考慮する地震(Mw6.5程度以上)**：
事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域で発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震

<震源を特定せず策定する地震動：震源像のイメージ>

①**全国共通に考慮すべき地震 *1** ②**地域性を考慮する地震 *2**

① 震源断層 (地表)

② 震源断層 (地表)

③ 震源断層 (地下) 孤立した長さの短い活断層 地震発生層

地表に明瞭な痕跡が見られない地震 (地表地震断層が出現しない可能性がある地震)

事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表に一部の痕跡が確認された地震

* 1: 地震規模は、震源断層面積と地震規模の相似則が成り立つMw6.5程度未満
* 2: 地震規模は、Mw6.5程度以上

<震源を特定せず策定する地震動(全国共通)の策定フロー>

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の対象地震動観測記録の収集・整理

- 地震規模Mw5.0～Mw6.5程度
- 震源周辺(震央距離30km以内)のKiK-netの地中観測記録

地震基盤相当面での震源近傍の地震動(応答スペクトル)の算出

- はぎとり解析
- 応答スペクトルの補正(震源距離・地盤物性)

地震基盤相当面での「標準応答スペクトル」の策定

- 統計処理による非超過確率別応答スペクトル
- 妥当性の確認(超過確率の参照、既往の地震動レベル等との比較)

敷地ごとの地盤特性の適切な考慮

- 地震基盤相当面～解放基盤面～基礎下地の地盤増幅

基礎下端での模擬地震動の作成

解放基盤面での模擬地震動の作成(基準地震動の策定)

地震基盤相当面*での模擬地震動の作成

*敷地ごとの地盤特性を適切に考慮する過程が必要に応じて実施。

基礎下端

解放基盤面

地震基盤相当面

※ 地震基盤相当面、解放基盤面及び基礎下地の位置関係は、敷地により異なる。

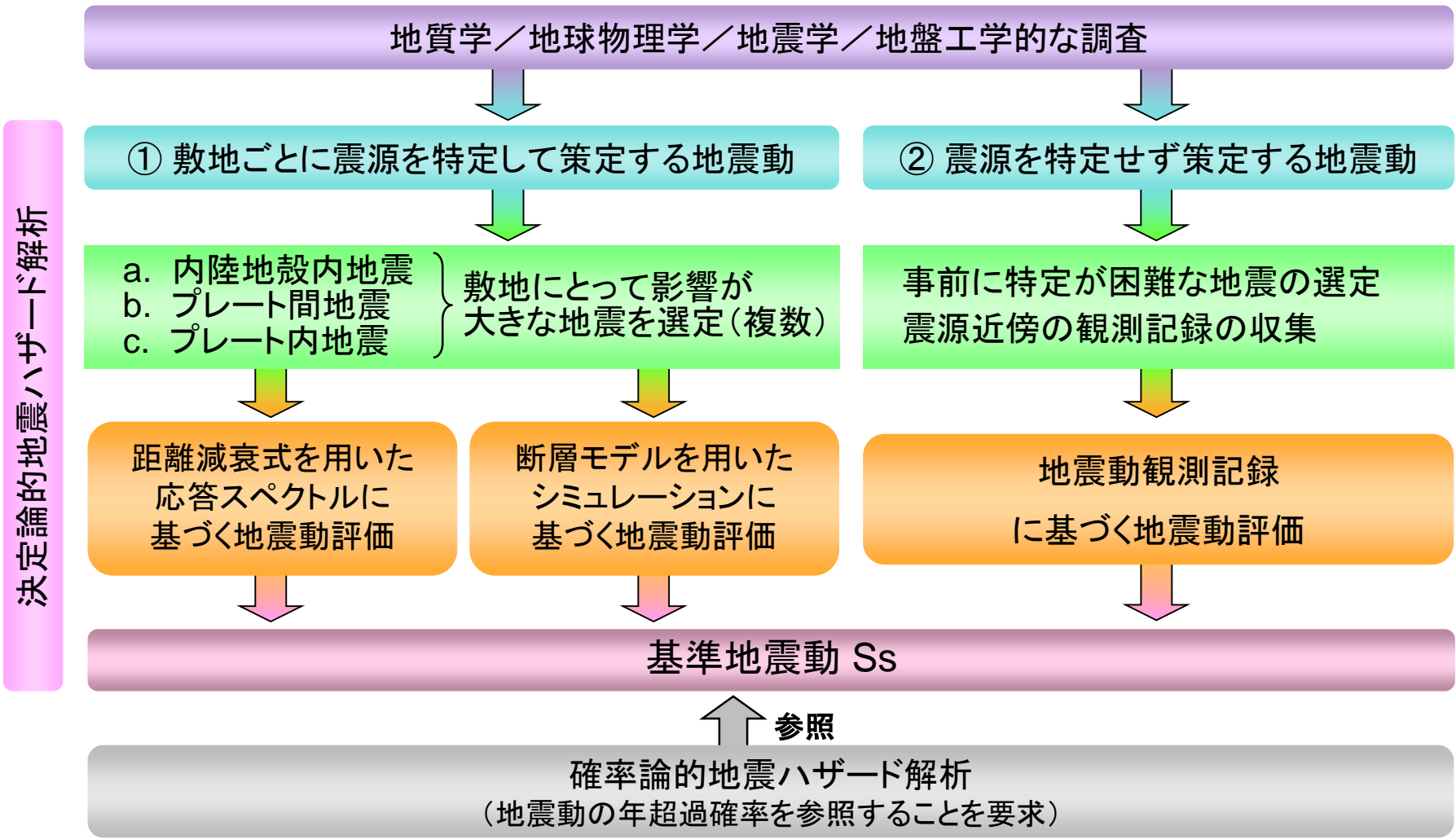
本検討チームの検討対象

事業者の検討対象

2. 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)に係る整理 (2/3)

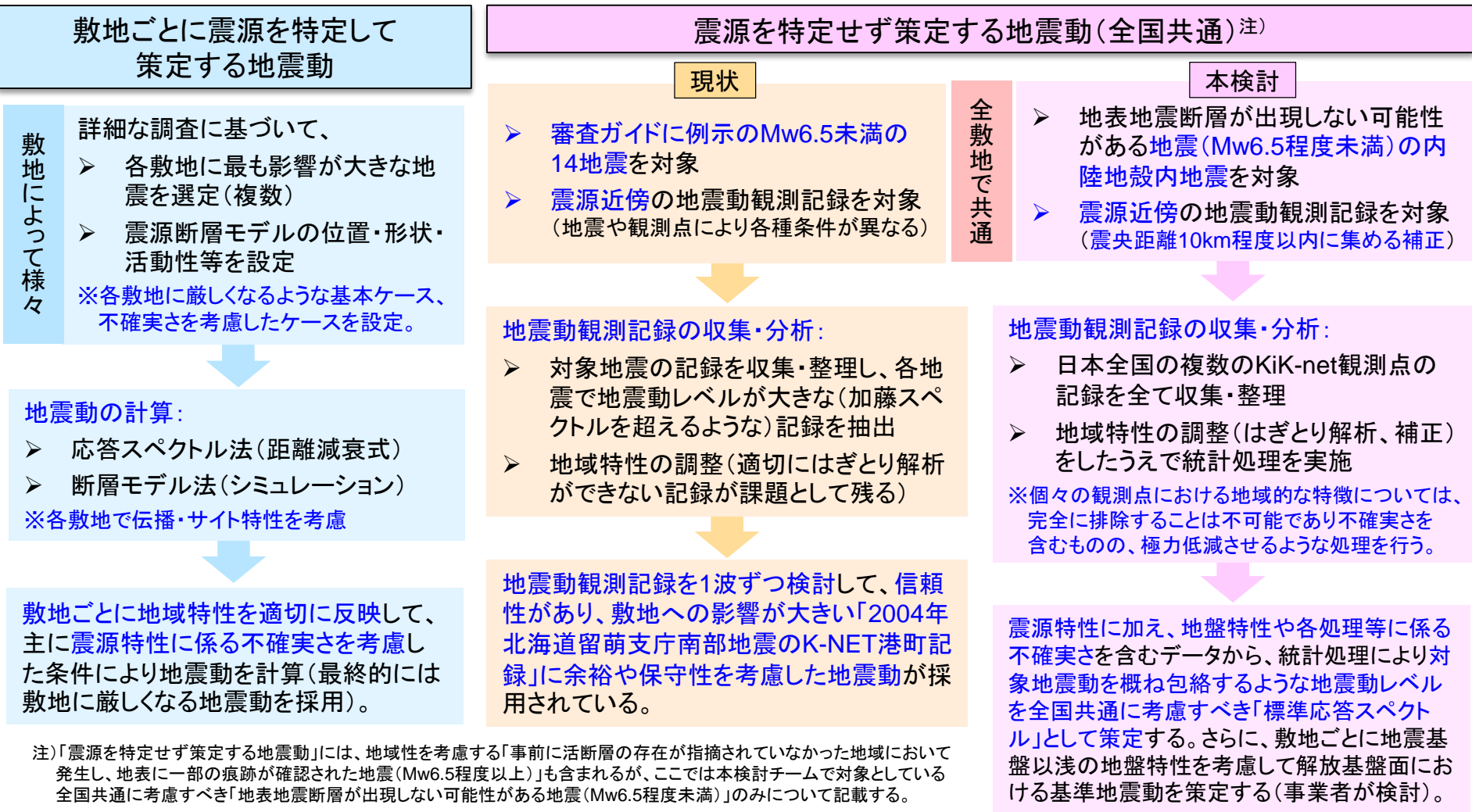
基準地震動について

基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド* (原子力規制委員会, 2013)においては、原子力発電所等における基準地震動について、2種類の地震動を以下に示すような流れで策定することとしている。
* 以降「審査ガイド」という。



2. 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)に係る整理 (3/3)

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」の関係



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

敷地によって様々

- 詳細な調査に基づいて、
- 各敷地に最も影響が大きな地震を選定(複数)
- 震源断層モデルの位置・形状・活動性等を設定
- ※各敷地に厳しくなるような基本ケース、不確実さを考慮したケースを設定。

地震動の計算:

- 応答スペクトル法(距離減衰式)
- 断層モデル法(シミュレーション)
- ※各敷地で伝播・サイト特性を考慮

敷地ごとに地域特性を適切に反映して、主に震源特性に係る不確実さを考慮した条件により地震動を計算(最終的には敷地に厳しくなる地震動を採用)。

震源を特定せず策定する地震動(全国共通)注)

現状

- 審査ガイドに例示のMw6.5未満の14地震を対象
- 震源近傍の地震動観測記録を対象(地震や観測点により各種条件が異なる)

地震動観測記録の収集・分析:

- 対象地震の記録を収集・整理し、各地震で地震動レベルが大きな(加藤スペクトルを超えるような)記録を抽出
- 地域特性の調整(適切にはぎとり解析ができない記録が課題として残る)

地震動観測記録を1波ずつ検討して、信頼性があり、敷地への影響が大きい「2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET港町記録」に余裕や保守性を考慮した地震動が採用されている。

本検討

- 地表地震断層が出現しない可能性がある地震(Mw6.5程度未満)の内陸地殻内地震を対象
- 震源近傍の地震動観測記録を対象(震央距離10km程度以内に集める補正)

地震動観測記録の収集・分析:

- 日本全国の複数のKiK-net観測点の記録を全て収集・整理
- 地域特性の調整(はぎとり解析、補正)をしたうえで統計処理を実施
- ※個々の観測点における地域的な特徴については、完全に排除することは不可能であり不確実さを含むものの、極力低減させるような処理を行う。

震源特性に加え、地盤特性や各処理等に係る不確実さを含むデータから、統計処理により対象地震動を概ね包絡するような地震動レベルを全国共通に考慮すべき「標準応答スペクトル」として策定する。さらに、敷地ごとに地震基盤以浅の地盤特性を考慮して解放基盤面における基準地震動を策定する(事業者が検討)。

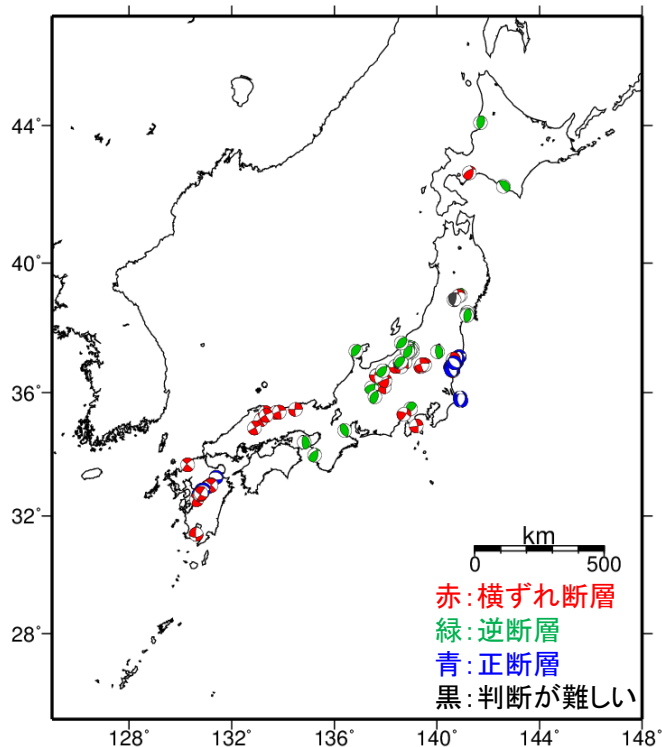
注)「震源を特定せず策定する地震動」には、地域性を考慮する「事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表に一部の痕跡が確認された地震(Mw6.5程度以上)」も含まれるが、ここでは本検討チームで対象としている全国共通に考慮すべき「地表地震断層が出現しない可能性がある地震(Mw6.5程度未満)」のみについて記載する。

- 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」では、地震動策定の際の各種条件が異なるため、それらの結果については両者を相補的に扱うことが重要である。
- 両者の地震動の策定フローでは共通して「地震動の年超過確率の参照」を要求しており、地震動のレベルを年超過確率の観点で比較・確認することができる。

3. 地震動観測記録の収集・整理 (1/4)

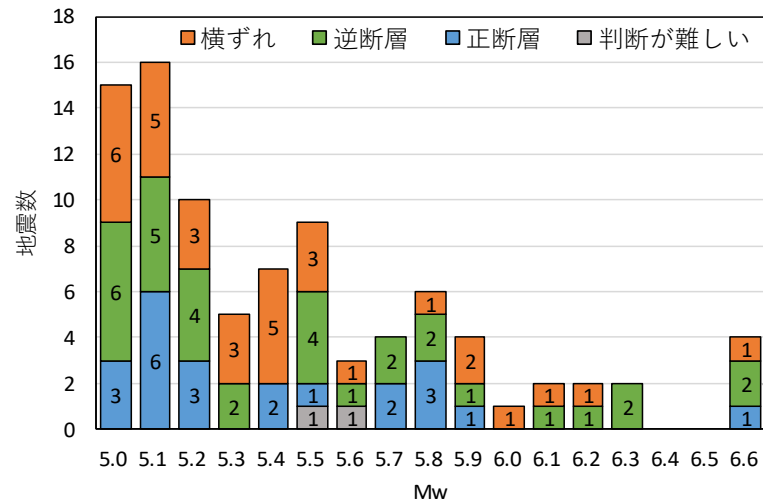
地震動観測記録の収集条件

- 観測期間: 2000年1月1日～2017年12月31日
- 地震規模: Mw5.0～6.6 (F-netの震源メカニズム情報)
- 震源深さ: 0～20km*¹ (気象庁一元化震源) *1: 地殻内地震であることを気象庁資料を参考に確認。
- 地震動観測記録: 震央距離30km以内にKiK-netによる記録がある



収集条件を満たす地震の震央分布(90地震)

※ 震央位置が重なっている地震があるため、詳細はp.39を参照。
 ※ 断層タイプは、地震調査研究推進本部(以降「地震本部」という)による公開情報を参考に分類した。
 ただし、断層タイプに関する十分な情報が得られない地震については、F-netのメカニズムから断層タイプを推定した。



→ その後の確認により1地震になった。(p.9右上の*参照)

断層タイプごとの地震数

	横ずれ	逆断層	正断層	判断が難しい	合計
地震数※	33	33 (32)	22	2	90 (89)

【収集結果】

→ 収集条件を満たす90地震のうち、解析には89地震(水平動614波、上下動304波)*²を採用した。

*2: PS検層未実施の観測点や不適切と考えられる記録(成分毎)は解析から除外した。

→ 断層タイプごとの地震数の偏りは小さい。

3. 地震動観測記録の収集・整理 (2/4)

対象地震一覧 (1/3)

朱書き: 審査ガイドに例示の9地震

気象庁一元化震源

防災科学技術研究所(F-net)

活断層詳細デジタルマップ(今泉ほか, 2018)注)

地震 No.	発生時刻	震央地名	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	Mj	Mw	M ₀ (N・m)	断層タイプ	地震タイプ	断層面の出典 (設定方法)	最寄り活断層 (震央から40km以内)	最寄り活断層からの概算距離 (km)	最寄り推定活断層からの概算距離 (km)	収集記録数	解析波形数*	
																水平動	上下動
01	2000/10/06-13:30	鳥取県西部	35.2742	133.3490	8.96	7.3	6.6	8.62E+18	横ずれ	本震	Semmane et al.(2005)	布部断層帯	15	6	4	8	4
02	2000/10/08-13:17	鳥取県西部	35.1393	133.1502	6.80	5.6	5.1	4.65E+16	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	布部断層帯	19	19	3	5	2
03	2000/10/08-20:51	鳥取県西部	35.3688	133.3107	8.30	5.2	5.0	3.11E+16	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	布部断層帯	13	14	2	4	2
04	2001/01/04-13:18	新潟県中越地方	36.9565	138.7687	11.23	5.3	5.2	7.50E+16	逆断層	本震	点震源を仮定	六日町断層帯	4	37	4	7	4
05	2001/01/12-08:00	兵庫県北部	35.4660	134.4900	10.59	5.6	5.2	7.11E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	雨滝-釜戸断層帯	11	3	2	4	2
06	2001/03/31-06:09	栃木・群馬県境	36.8210	139.3750	4.73	5.2	5.0	3.28E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	片品川左岸断層帯	11	7	4	8	4
07	2002/09/16-10:10	鳥取県中・西部	35.3700	133.7393	9.64	5.5	5.1	5.43E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	岩坪断層帯	29	1	4	8	4
08	2003/07/26-00:13	宮城県北部	38.4345	141.1642	11.55	5.6	5.5	1.71E+17	逆断層	前震	Hikima and Koketsu (2004)	加護坊山-旭山断層帯	18	3	2	4	2
09	2003/07/26-07:13	宮城県北部	38.4050	141.1710	11.87	6.4	6.1	1.53E+18	逆断層	本震	Hikima and Koketsu (2004)	加護坊山-旭山断層帯	22	6	2	4	2
10	2003/07/26-16:56	宮城県北部	38.5003	141.1895	12.04	5.5	5.3	9.45E+16	逆断層	余震	Hikima and Koketsu (2004)	加護坊山-旭山断層帯	12	0	2	4	2
11	2004/10/23-17:56	新潟県中越地方	37.2925	138.8672	13.08	6.8	6.6	7.53E+18	逆断層	本震	Asano and Iwata (2009)	十日町盆地東縁断層帯	5	8	4	6	3
12	2004/10/23-18:03	新潟県中越地方	37.3540	138.9833	9.38	6.3	5.9	9.33E+17	逆断層	余震	Hikima and Koketsu (2005)	六日町断層帯	6	3	5	8	4
13	2004/10/23-18:07	新潟県中越地方	37.3482	138.8650	14.90	5.7	5.3	1.19E+17	逆断層	余震	点震源を仮定	悠久山断層帯	5	14	3	4	2
14	2004/10/23-18:11	新潟県中越地方	37.2530	138.8295	11.52	6.0	5.7	4.11E+17	逆断層	余震	Hikima and Koketsu (2005)	十日町盆地東縁断層帯	2	13	4	6	3
15	2004/10/23-18:34	新潟県中越地方	37.3063	138.9300	14.17	6.5	6.3	2.93E+18	逆断層	余震	Hikima and Koketsu (2005)	六日町断層帯	4	3	4	6	3
16	2004/10/23-18:57	新潟県中越地方	37.2063	138.8635	7.53	5.3	5.1	4.86E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	六日町断層帯	6	13	4	6	3
17	2004/10/23-19:36	新潟県中越地方	37.2170	138.8243	10.97	5.3	5.0	4.13E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	十日町盆地東縁断層帯	4	15	4	6	3
18	2004/10/23-19:45	新潟県中越地方	37.2957	138.8762	12.35	5.7	5.5	1.78E+17	逆断層	余震	経験則により断層面を仮定	十日町盆地東縁断層帯	6	7	4	6	3
19	2004/10/23-23:34	新潟県中越地方	37.3170	138.9058	19.88	5.3	5.0	4.14E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	六日町断層帯	6	5	4	6	3
20	2004/10/25-00:28	新潟県中越地方	37.2025	138.8707	10.08	5.3	5.1	5.21E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	六日町断層帯	5	13	2	2	1
21	2004/10/25-06:04	新潟県中越地方	37.3300	138.9468	15.20	5.8	5.6	2.47E+17	逆断層	余震	経験則により断層面を仮定	六日町断層帯	4	2	3	4	2
22	2004/10/27-10:40	新潟県中越地方	37.2918	139.0333	11.60	6.1	5.8	6.34E+17	逆断層	余震	Hikima and Koketsu (2005)	六日町断層帯	4	4	6	10	5
23	2004/11/04-08:57	新潟県中越地方	37.4303	138.9157	18.02	5.2	5.1	5.64E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	悠久山断層帯	2	2	4	6	3
24	2004/11/08-11:15	新潟県中越地方	37.3960	139.0320	0.00	5.9	5.5	2.24E+17	逆断層	余震	経験則により断層面を仮定	六日町断層帯	11	4	5	8	4
25	2004/11/10-03:43	新潟県中越地方	37.3697	139.0007	4.55	5.3	5.1	4.37E+16	逆断層	余震	点震源を仮定	六日町断層帯	7	4	4	6	3
26	2004/12/14-14:56	留萌支庁南部	44.0767	141.6995	8.58	6.1	5.7	4.44E+17	逆断層	本震	Maeda and Sasatani(2009)	石狩沼田断層帯	31	15	2	4	2
27	2005/04/20-06:11	福岡県西方沖	33.6782	130.2882	13.50	5.8	5.4	1.31E+17	横ずれ	余震	Asano and Iwata (2006)	警固断層帯	12	22	3	6	3
28	2006/04/21-02:50	伊豆半島東方沖	34.9415	139.1958	7.11	5.8	5.6	2.76E+17	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	北伊豆断層帯	15	10	4	8	4
29	2007/03/25-18:11	能登半島沖	37.3043	136.8395	13.45	5.3	5.2	6.22E+16	逆断層	余震	経験則により断層面を仮定	珠洲-穴水断層帯	22	3	4	7	4
30	2007/04/15-12:19	三重県中部	34.7912	136.4077	15.97	5.4	5.0	3.94E+16	逆断層	本震	経験則により断層面を仮定	一志断層帯	2	0	6	11	6

※「収集記録数×3成分=解析波形数(水平動+上下動)」とならない場合は、PS検層がない観測点(はざとり解析不可)や成分毎の波形データの確認により解析から除外した波形があるためである。

注)「活断層との位置関係」についてのラベル付けの検討のために簡易に推定した地震の震央から活断層までの距離である(詳細はp.47を参照)。

3. 地震動観測記録の収集・整理 (3/4)

対象地震一覧 (2/3)

* 2007年新潟県中越沖地震(No.31)については、震央距離30km以内のKiK-net観測点
が1地点であったが、PS検層が実施されていないため、はぎとり波が算出できない。
→ 解析の対象から外れた。

朱書き: 審査ガイドに例示の9地震

気象庁一元化震源 防災科学技術研究所(F-net) 活断層詳細デジタルマップ(今泉ほか, 2018)注)

地震No.	発生時刻	震央地名	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	Mj	Mw	M ₀ (N・m)	断層タイプ	地震タイプ	断層面の出典(設定方法)	最寄り活断層(震央から40km以内)	最寄り活断層からの概算距離(km)	最寄り推定活断層からの概算距離(km)	収集記録数	解析波形数*	
																水平動	上下動
31	2007/07/16-10:13	新潟県中越沖	37.5568	138.6095	16.75	6.8	6.6	9.30E+18	逆断層	本震	—	—	—	—	—	—	—
32	2008/06/14-09:20	岩手・宮城内陸	38.8863	140.6730	6.50	5.7	5.5	2.09E+17	?	余震	経験則により断層面を仮定	新庄盆地東縁断層帯	34	8	4	8	4
33	2008/06/16-23:14	岩手・宮城内陸	38.9972	140.8397	7.12	5.3	5.1	4.97E+16	横ずれ	余震	点震源を仮定	北上低地西縁断層帯	21	5	6	12	6
34	2010/07/04-04:33	岩手県内陸南部	39.0247	140.9128	7.12	5.2	5.0	4.13E+16	逆断層	本震	点震源を仮定	北上低地西縁断層帯	14	12	4	8	4
35	2010/09/29-16:59	福島県中通り	37.2850	140.0255	7.62	5.7	5.5	2.34E+17	逆断層	本震	経験則により断層面を仮定	会津盆地東縁断層帯	14	7	5	10	5
36	2011/02/27-05:38	岐阜県飛騨地方	36.1563	137.4547	4.34	5.5	5.1	5.24E+16	逆断層	本震	点震源を仮定	江名子-大原断層帯	3	35	8	16	8
37	2011/03/12-03:59	長野県・新潟県県境付近	36.9860	138.5978	8.38	6.7	6.2	2.13E+18	逆断層	本震	気象庁震源過程	十日町盆地西縁断層帯	8	28	5	10	4
38	2011/03/12-04:31	長野県・新潟県県境付近	36.9488	138.5725	0.78	5.9	5.6	2.63E+17	?	余震	経験則により断層面を仮定	長野盆地西縁断層帯	12	25	7	12	5
39	2011/03/12-05:42	長野県・新潟県県境付近	36.9732	138.5905	3.79	5.3	5.0	3.84E+16	横ずれ	余震	点震源を仮定	十日町盆地西縁断層帯	10	27	6	12	5
40	2011/03/15-22:31	静岡県東部	35.3095	138.7145	14.31	6.4	5.9	8.38E+17	横ずれ	本震	気象庁震源過程	富士川断層帯	11	10	3	6	3
41	2011/03/16-12:52	千葉県東方沖	35.8370	140.9065	9.97	6.1	5.8	6.44E+17	正断層	本震	経験則により断層面を仮定	なし	—	—	2	4	2
42	2011/03/19-08:49	茨城県北部	36.7373	140.6045	4.95	5.3	5.1	5.30E+16	正断層	前震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	17	2	4	8	4
43	2011/03/19-18:56	茨城県北部	36.7837	140.5715	5.37	6.1	5.8	6.35E+17	正断層	本震	田中・岩切(2017)	井戸沢断層帯	16	7	4	8	4
44	2011/03/23-07:12	福島県浜通り	37.0848	140.7878	7.60	6.0	5.7	4.26E+17	正断層	本震	武藤・他(2014)	湯ノ岳断層帯	6	16	2	4	2
45	2011/03/23-07:13	福島県浜通り	37.0353	140.7693	0.93	5.8	5.2	7.01E+16	正断層	余震	点震源を仮定	湯ノ岳断層帯	1	18	2	4	2
46	2011/03/23-07:34	福島県浜通り	37.0982	140.7958	6.69	5.5	5.0	3.40E+16	正断層	余震	点震源を仮定	湯ノ岳断層帯	8	15	2	4	2
47	2011/03/23-07:36	福島県浜通り	37.0633	140.7707	7.30	5.8	5.4	1.32E+17	正断層	余震	点震源を仮定	湯ノ岳断層帯	3	18	2	4	2
48	2011/04/11-17:16	福島県浜通り	36.9457	140.6727	6.42	7.0	6.6	9.58E+18	正断層	本震	Tanaka et al.(2014)	井戸沢断層帯	3	5	3	6	3
49	2011/04/11-20:42	福島県浜通り	36.9658	140.6348	10.58	5.9	5.5	1.72E+17	正断層	余震	経験則により断層面を仮定	井戸沢断層帯	6	5	2	4	2
50	2011/04/12-07:26	長野県北部	36.8187	138.6057	0.00	5.6	5.4	1.42E+17	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	長野盆地西縁断層帯	14	27	3	3	1
51	2011/04/12-14:07	福島県浜通り	37.0525	140.6435	15.08	6.4	5.9	7.05E+17	横ずれ	余震	気象庁震源過程	井戸沢断層帯	2	15	3	6	3
52	2011/04/13-10:07	福島県浜通り	36.9152	140.7068	4.52	5.7	5.4	1.36E+17	正断層	余震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	2	6	3	6	3
53	2011/04/14-12:08	福島県浜通り	36.9838	140.7730	10.75	5.4	5.0	3.80E+16	正断層	余震	点震源を仮定	湯ノ岳断層帯	4	15	1	2	1
54	2011/06/30-08:16	長野県中部	36.1885	137.9547	4.30	5.4	5.0	3.15E+16	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	糸魚川-静岡構造線断層帯	2	4	7	14	6
55	2011/07/05-19:18	和歌山県北部	33.9905	135.2342	7.33	5.5	5.0	3.35E+16	逆断層	本震	経験則により断層面を仮定	中央構造線断層帯	30	22	1	2	1
56	2011/09/07-22:29	日高地方中部	42.2607	142.5892	10.23	5.1	5.0	4.15E+16	逆断層	本震	点震源を仮定	なし	—	5	1	2	1
57	2011/09/21-22:30	茨城県北部	36.7372	140.5772	8.64	5.2	5.1	5.81E+16	正断層	本震	点震源を仮定	湯ノ岳断層帯	18	3	4	8	4
58	2011/09/29-19:05	福島県浜通り	37.1325	140.8695	8.84	5.4	5.1	5.67E+16	正断層	本震	点震源を仮定	二ツ筋断層帯	3	12	2	4	2
59	2011/10/05-18:59	富山県東部	36.5328	137.6502	0.68	5.4	5.3	8.77E+16	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	牛首断層帯	11	9	4	8	4
60	2011/10/05-19:06	富山県東部	36.5488	137.6473	0.00	5.2	5.2	6.26E+16	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	牛首断層帯	12	8	3	6	3

※「収集記録数×3成分=解析波形数(水平動+上下動)」とならない場合は、PS検層がない観測点(はぎとり解析不可)や成分毎の波形データの確認により解析から除外した波形があるためである。

注)「活断層との位置関係」についてのラベル付けの検討のために簡易に推定した地震の震央から活断層までの距離である(詳細はp.47を参照)。

3. 地震動観測記録の収集・整理 (4/4)

対象地震一覧 (3/3)

朱書き: 審査ガイドに例示の9地震

気象庁一元化震源

防災科学技術研究所(F-net)

活断層詳細デジタルマップ(今泉ほか, 2018)注)

地震 No.	発生時刻	震央地名	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	Mj	Mw	M ₀ (N・m)	断層タイプ	地震タイプ	断層面の出典 (設定方法)	最寄り活断層 (震央から40km以内)	最寄り推定活断層からの概算距離 (km)	最寄り推定活断層からの概算距離 (km)	収集記録数	解析波形数*	
																水平動	上下動
61	2011/11/20-10:23	茨城県北部	36.7107	140.5882	8.99	5.3	5.0	3.78E+16	正断層	本震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	20	1	4	8	4
62	2011/11/21-19:16	広島県北部	34.8717	132.8937	11.66	5.4	5.2	6.99E+16	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	なし	-	-	4	8	4
63	2012/01/28-07:43	山梨県東部・富士五湖	35.4892	138.9770	18.16	5.4	5.2	6.14E+16	逆断層	本震	経験則により断層面を仮定	塩沢断層帯	12	5	7	14	7
64	2012/03/10-02:25	茨城県北部	36.7177	140.6125	6.52	5.4	5.2	6.52E+16	正断層	本震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	18	0	4	8	4
65	2012/03/14-21:05	千葉県東方沖	35.7477	140.9320	15.08	6.1	5.8	5.11E+17	正断層	本震	経験則により断層面を仮定	なし	-	-	2	4	2
66	2012/07/10-12:48	長野県北部	36.8315	138.3883	8.53	5.2	5.1	4.49E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	長野盆地西縁断層帯	3	10	6	10	5
67	2013/02/25-16:23	栃木県北部	36.8737	139.4128	2.84	6.3	5.8	5.54E+17	横ずれ	本震	引間(2013)	片品川左岸断層帯	18	13	5	10	5
68	2013/04/13-05:33	淡路島付近	34.4188	134.8290	14.85	6.3	5.8	5.47E+17	逆断層	本震	気象庁震源過程	六甲-淡路断層帯	7	3	2	4	2
69	2013/09/20-02:25	福島県浜通り	37.0513	140.6953	16.69	5.9	5.4	1.66E+17	横ずれ	本震	経験則により断層面を仮定	井戸沢断層帯	0	15	4	6	3
70	2013/12/31-10:03	茨城県北部	36.6915	140.6287	6.63	5.4	5.0	3.89E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	20	3	4	6	3
71	2014/07/08-18:05	胆振地方中東部	42.6498	141.2670	3.23	5.6	5.4	1.40E+17	横ずれ	本震	点震源を仮定	当別-野幌丘陵断層帯	40	-	3	6	3
72	2014/09/03-16:24	栃木県北部	36.8737	139.5225	7.14	5.1	5.0	3.46E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	片品川左岸断層帯	26	15	5	10	5
73	2014/11/22-22:08	長野県北部	36.6928	137.8910	4.59	6.7	6.3	2.76E+18	逆断層	本震	気象庁震源過程	糸魚川-静岡構造線断層帯	2	4	6	11	6
74	2016/04/14-21:26	熊本県熊本地方	32.7417	130.8087	11.39	6.5	6.1	1.74E+18	横ずれ	前震	Asano and Iwata (2016)	布田川-日奈久断層帯	0	6	6	12	6
75	2016/04/14-22:07	熊本県熊本地方	32.7755	130.8495	8.26	5.8	5.4	1.27E+17	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	布田川-日奈久断層帯	1	10	4	8	4
76	2016/04/15-00:03	熊本県熊本地方	32.7007	130.7777	6.71	6.4	6.0	1.06E+18	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	布田川-日奈久断層帯	0	11	4	8	4
77	2016/04/16-01:45	熊本県熊本地方	32.8632	130.8990	10.55	5.9	5.7	4.33E+17	正断層	余震	経験則により断層面を仮定	布田川-日奈久断層帯	3	2	4	8	4
78	2016/04/16-03:03	熊本県熊本地方	32.9638	131.0868	6.89	5.9	5.5	1.92E+17	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	鞍岳断層帯	8	8	3	6	3
79	2016/04/16-03:55	熊本県熊本地方	33.0265	131.1910	10.89	5.8	5.5	2.14E+17	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	別府地溝断層帯	10	3	3	6	3
80	2016/04/16-07:11	大分県中部	33.2715	131.3957	5.70	5.4	5.1	5.13E+16	正断層	余震	点震源を仮定	別府地溝断層帯	1	3	1	2	1
81	2016/04/16-09:48	熊本県熊本地方	32.8470	130.8350	15.91	5.4	5.2	6.27E+16	正断層	余震	経験則により断層面を仮定	布田川-日奈久断層帯	5	7	4	8	4
82	2016/04/16-16:02	熊本県熊本地方	32.6992	130.7200	12.30	5.4	5.1	5.65E+16	正断層	余震	点震源を仮定	布田川-日奈久断層帯	5	5	3	6	3
83	2016/04/18-20:41	熊本県熊本地方	33.0020	131.1998	8.64	5.8	5.5	1.87E+17	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	別府地溝断層帯	13	2	2	4	2
84	2016/04/19-17:52	熊本県熊本地方	32.5352	130.6353	9.96	5.5	5.3	1.01E+17	横ずれ	余震	経験則により断層面を仮定	布田川-日奈久断層帯	3	8	4	8	4
85	2016/10/21-14:07	鳥取県中部	35.3805	133.8562	10.61	6.6	6.2	2.24E+18	横ずれ	本震	Kubo et al. (2017)	岩坪断層帯	18	7	3	6	3
86	2016/12/28-21:38	茨城県北部	36.7202	140.5742	10.84	6.3	5.9	9.00E+17	正断層	本震	気象庁震源過程	井戸沢断層帯	20	2	6	10	5
87	2017/06/25-07:02	長野県南部	35.8680	137.5865	6.66	5.6	5.2	6.89E+16	逆断層	本震	経験則により断層面を仮定	西野断層帯	8	13	6	12	6
88	2017/07/11-11:56	鹿児島湾	31.3840	130.6200	10.23	5.3	5.3	8.59E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	なし	-	-	2	4	2
89	2017/08/02-02:02	茨城県北部	36.8035	140.5352	8.65	5.5	5.1	4.31E+16	正断層	本震	点震源を仮定	井戸沢断層帯	18	5	5	8	4
90	2017/12/06-00:13	長野県中部	36.3772	137.9725	10.38	5.3	5.1	4.45E+16	横ずれ	本震	点震源を仮定	糸魚川-静岡構造線断層帯	3	14	5	10	5

*「収集記録数×3成分=解析波形数(水平動+上下動)」とならない場合は、PS検層がない観測点(はざとり解析不可)や成分毎の波形データの確認により解析から除外した波形があるためである。

注)「活断層との位置関係」についてのラベル付けの検討のために簡易に推定した地震の震央から活断層までの距離である(詳細はp.47を参照)。

4. はぎとり解析 (1/5)

はぎとり解析の方針

収集したKiK-netの地中観測波(E+Fの層内波)について、重複反射理論に基づくはぎとり解析により地中地震計位置における「はぎとり波」(2Eの露頭波)を算出する。

- 対象記録 : 89地震のKiK-netの地中観測記録(水平2成分614波、上下動304波)を使用。
- 手法 : 重複反射理論に基づく一次元線形解析を採用。
- 地盤モデル: KiK-net観測点のPS検層結果[層厚, S波速度(V_s), P波速度(V_p)]を参考に地盤モデルを設定。減衰定数は、以下の複数通りを検討して適切な値を選定。
 - 水平動: 1%, 3%, 5%, 7%, 9%の計5種
 - 上下動: 1%, 3%, 5%の計3種

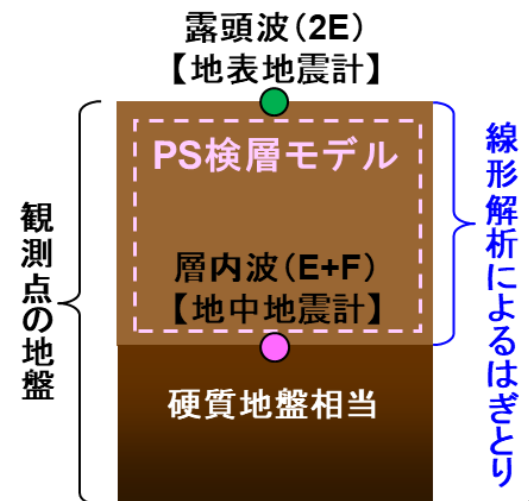
※7%と9%については非線形性が生じているような記録を対象とするため上下動では検討しない。
- 地表観測記録との比較による結果の妥当性の確認のために、地中観測波(E+F)を地表に立ち上げた波も算出。

減衰定数の選定

以下の確認により、地盤モデルに設定する適切な減衰定数を選定する。

- ① 地中観測波を地表に立ち上げた波と地表観測波の応答スペクトルの比の対数(対数残差)を計算する。
- ② 試行した減衰定数(水平動:5種類、上下動3種類)のうち、対数残差の二乗和平方根が最も小さくなる減衰定数による結果を採用する。

※ はぎとり精度の判断指標として、地中観測波を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性の高低を基準としていることに留意。



4. はぎとり解析 (2/5)

解析に用いる波形の処理方針

- はぎとり解析に用いる地中地震計の波形データ※1は「P波到達からS波の主要動継続時間※2」の長さにトリミングし、前後にテーパー処理を施す。

※1: 地中観測記録はHi-netの公開情報を基に地震計設置方位の適正化を行った。

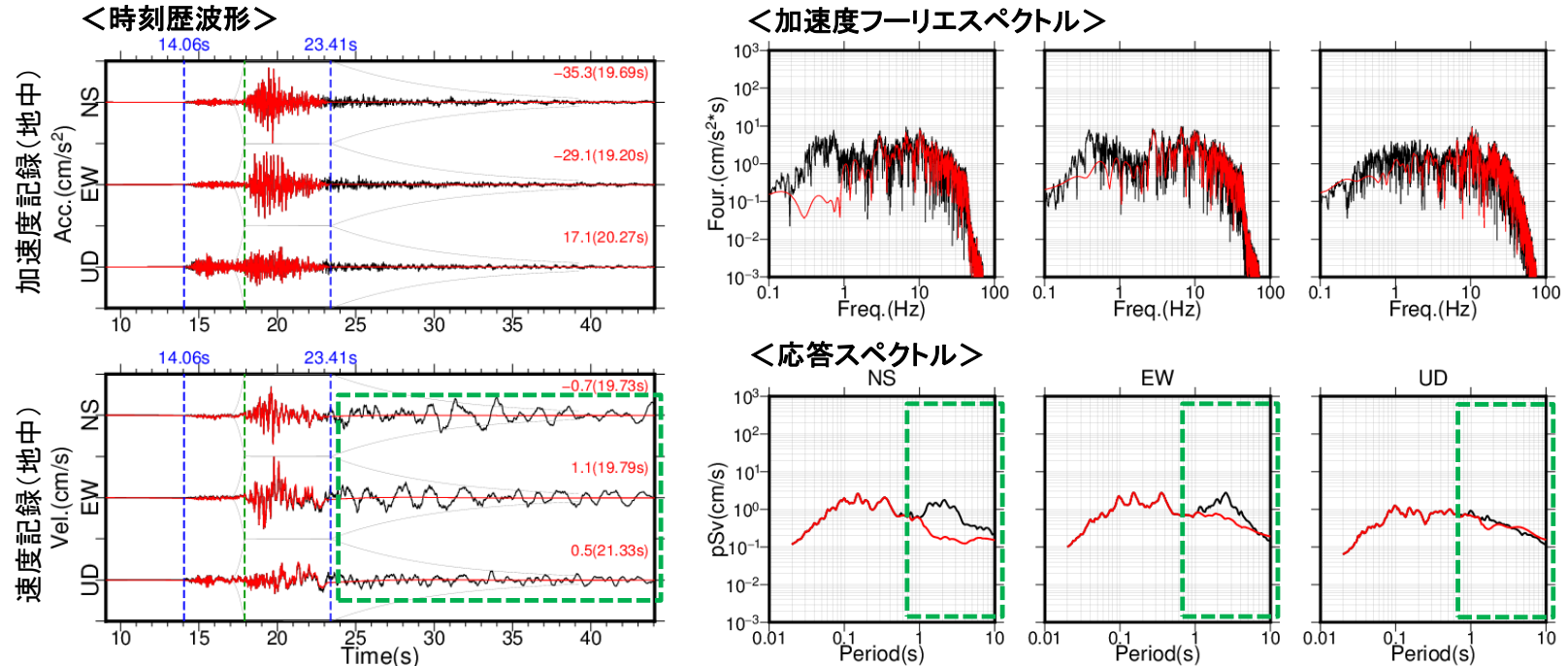
※2: 主要動継続時間はNoda et al. (2002)による包絡関数を参考にマグニチュードに依存した長さとした。

- さらに、トリミング前後の波形を確認し、必要に応じて適宜調整する。
 - ・ 表面波のトリミングが十分でない場合は、さらにトリミングを行う(主要動継続時間を短くする)。
 - ・ 主要動部分が削られてしまっている場合は、主要動継続時間を長くする。

トリミング前後の比較: 表面波が卓越している記録の例

2004年10月25日新潟県中越地震の余震(Mw5.6)のKiK-net下田(NIGH09)

◆ 震央距離28km、地中地震計深度100m、地中Vs=1380m/s、Vp=2190m/s



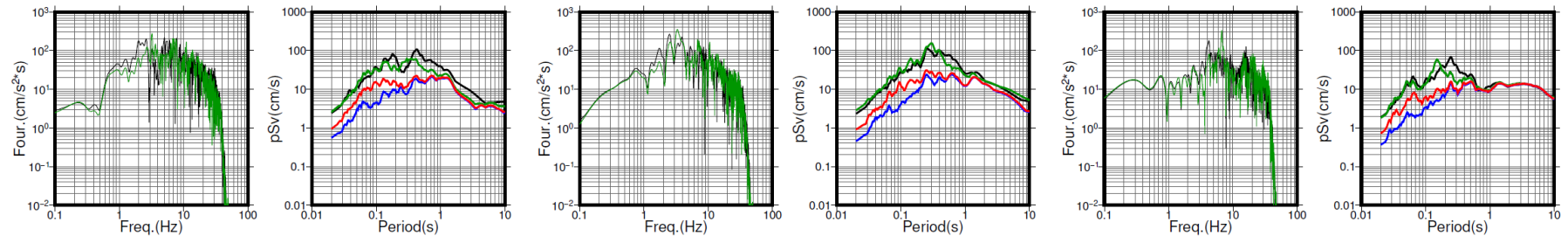
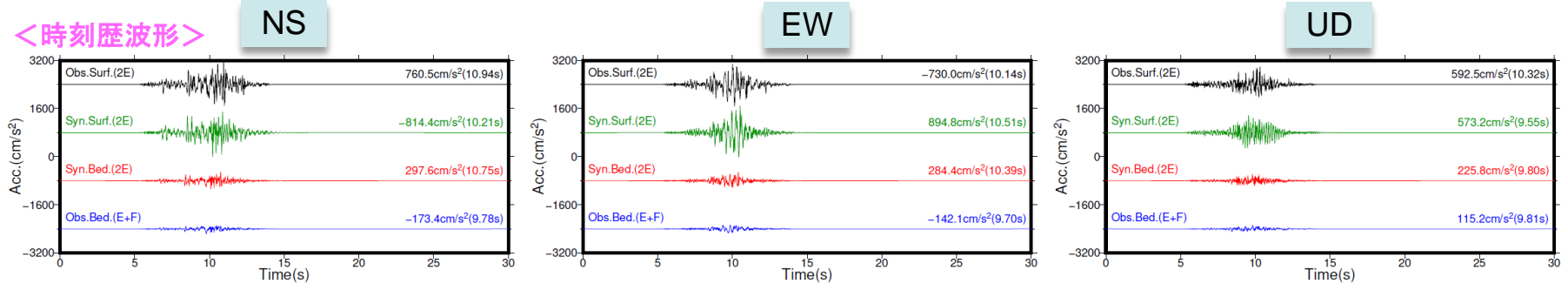
4. はぎとり解析 (3/5)

はぎとり解析結果の例

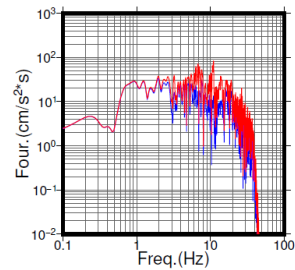
2016年12月28日茨城県北部の地震(Mw5.9)のKiK-net高萩(IBRH13)における記録について、はぎとり解析結果の例を示す(地盤の減衰定数: 水平動と上下動ともに5%の場合)

◆断層最短距離4km、地中地震計深度100m、地中Vs=3000m/s、Vp=4900m/s

＜時刻歴波形＞



＜応答スペクトル＞



＜フーリエスペクトル＞

黒: 地表観測波(2E)、緑: 地表立ち上げ波(2E)、赤: はぎとり波(2E)、青: 地中観測波(E+F)

※地中記録を設定地盤より地表に立ち上げた波

※統計処理で使用

4. はぎとり解析 (4/5)

はぎとり解析における減衰定数の調整①: はぎとり精度が高い例

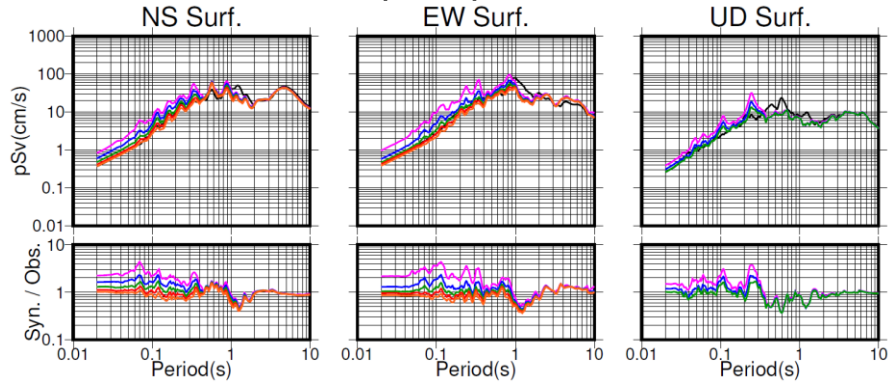
2011年4月11日福島県浜通りの地震(本震:Mw6.6)のKiK-netいわき東(FKSH14)における記録について、地盤の減衰定数(h)を変えた場合の解析(水平動1~9%の5種類、上下動1~5%の3種類)を実施した。
 → 最終的に地表立ち上げ波の観測との整合性が高い、水平動h=7%、上下動h=5%を採用した。

◆断層最短距離13km、地中地震計深度147m、地中Vs=1210m/s、Vp=2740m/s

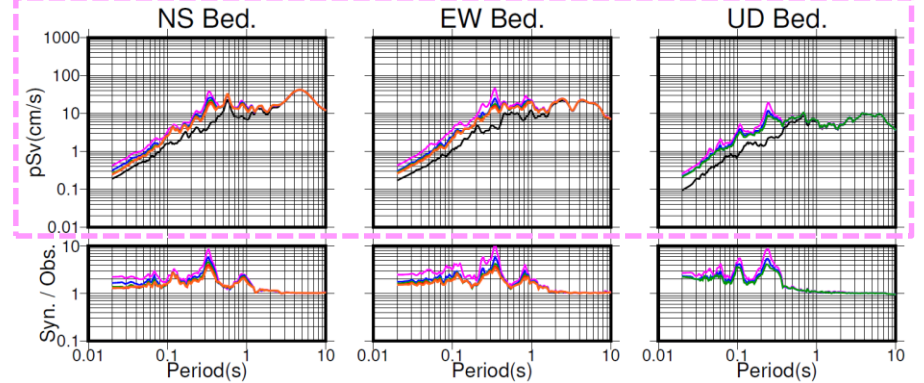
地表

地中

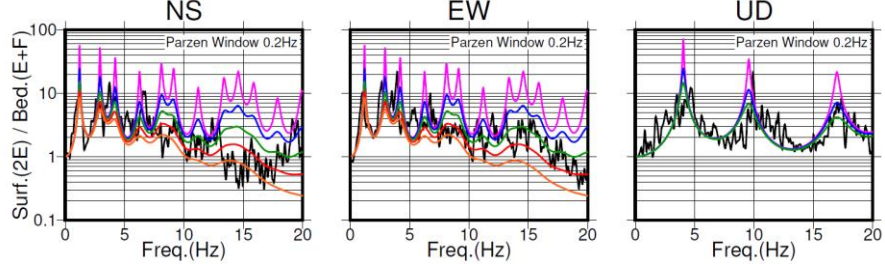
<擬似速度応答スペクトル(h=5%)(上)、計算/観測の比(下)>



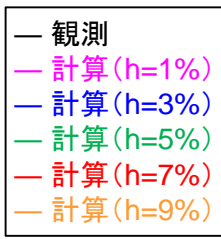
※統計処理で使用



<加速度フーリエスペクトル比: 地表(2E)/地中(E+F)>



※観測は地中E+F波、計算は地中2Eのはぎとり波



↓
 減衰定数(特にh=3~9%)の違いが地中地震計位置でははぎとり波へ与える影響は顕著ではない。

➡ 設定地盤での計算結果が地表観測記録をよく説明している (特に周期1秒以下の短周期側の適合度に着目) ➡ はぎとり解析の精度が高いと判断注)

注)ここでは、はぎとり精度の判断指標として、地中記録を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性の高低を基準としていることに留意。各周期の「地表立ち上げ波(計算)/地表観測波」の応答スペクトル比が1/3~3倍の範囲内であれば、はぎとり精度が高いと判断。

4. はぎとり解析 (5/5)

はぎとり解析における減衰定数の調整②: はぎとり精度が低い例

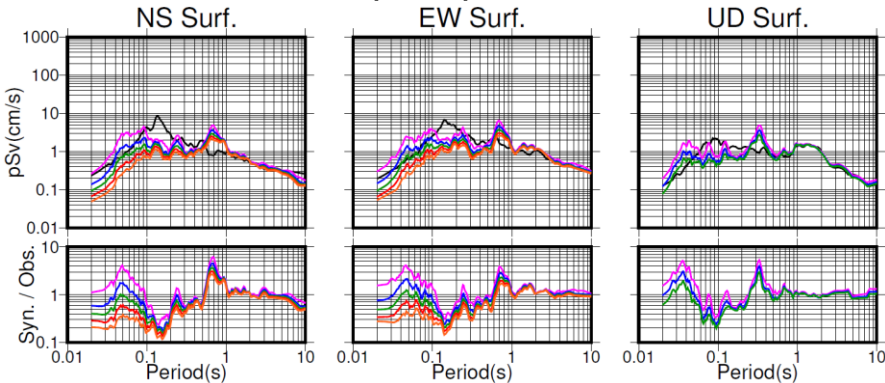
2012年3月10日茨城県北部地震(Mw5.2)のKiK-net山方(IBRH16)における記録について、地盤の減衰定数(h)を変えた場合の解析(水平動1~9%の5種類、上下動1~5%の3種類)を実施した。
 → 最終的に地表立ち上げ波の観測との整合性が高い、水平動h=3%、上下動h=3%を採用した。

◆断層最短距離22km、地中地震計深度300m、地中Vs=2050m/s、Vp=4000m/s

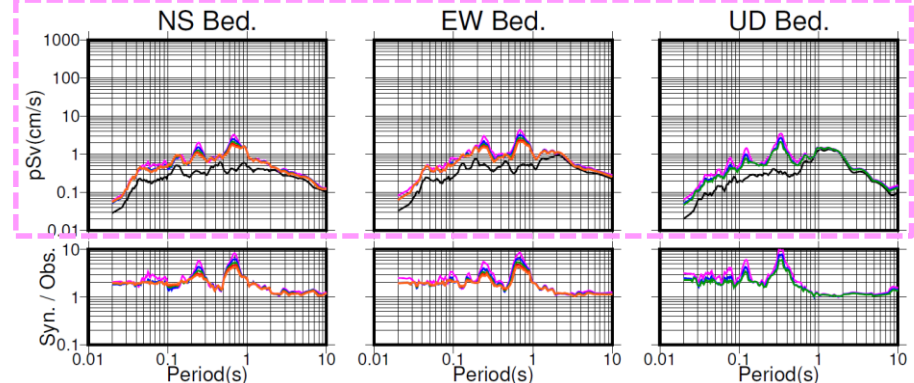
地表

地中

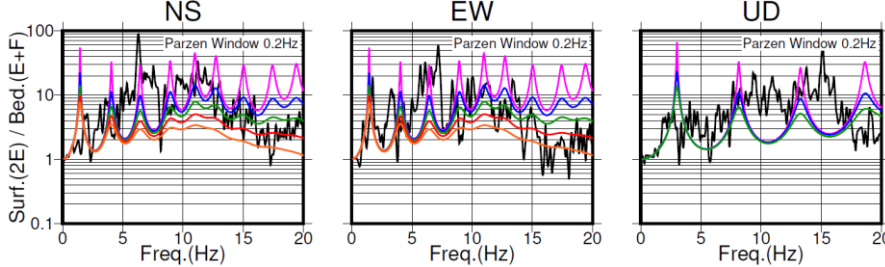
<擬似速度応答スペクトル(h=5%)(上)、計算／観測の比(下)>



※統計処理で使用



<加速度フーリエスペクトル比: 地表(2E)／地中(E+F)>



※観測は地中E+F波、計算は地中2Eのはぎとり波

- 観測
- 計算 (h=1%)
- 計算 (h=3%)
- 計算 (h=5%)
- 計算 (h=7%)
- 計算 (h=9%)

↓
 減衰定数(特にh=3~9%)の違いが地中地震計位置ではぎとり波へ与える影響は顕著ではない。

➡ はぎとり解析の精度が低いと考えられる^{注)}
 (特に周期1秒以下の短周期側の適合度に着目)

➡ はぎとり解析によって特異なピーク等が生成されているか等を確認し、統計処理におけるデータの選別や重み付けに反映することを検討。

注)ここでは、はぎとり精度の判断指標として、地中記録を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性の高低を基準としていることに留意。各周期の「地表立ち上げ波(計算)／地表観測波」の応答スペクトル比が1/3~3倍の範囲外であれば、はぎとり精度が低いと判断。

5. 応答スペクトルの補正 (1/2)

応答スペクトル補正の方針

- 本検討で策定する標準応答スペクトルは、**地盤の影響を大きく受けないと考えられる地震基盤**における**震源近傍の地震動強さ**とすることとする。
- 統計処理で用いる地震動(応答スペクトル)については、**地域的な特徴を極力低減**させることが望ましいと考えられることから、**事前に位置も規模も分からないような地震**を想定していることを踏まえつつ、はぎとり波の応答スペクトルに対し、以下の補正を施す。

(1) 震源距離補正

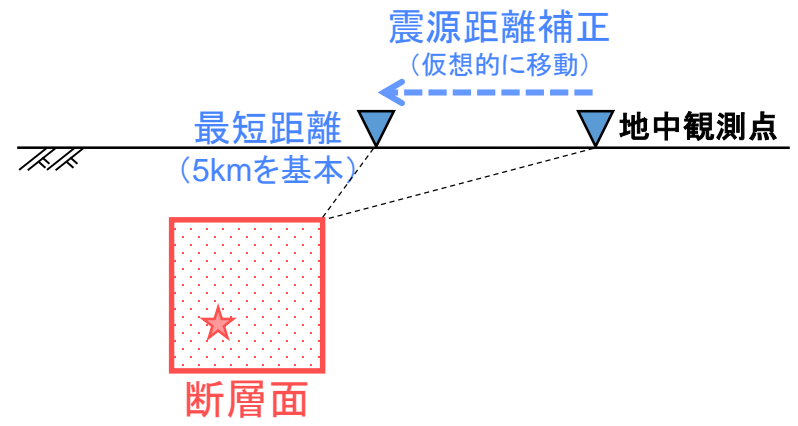
震源と各観測点の距離はそれぞれ異なるため、各観測記録を半径10km程度の震源近傍の領域に集めるために、震源距離補正(最短距離5kmを基本)を実施する(詳細は5.1.参照)。

(2) 地盤物性補正

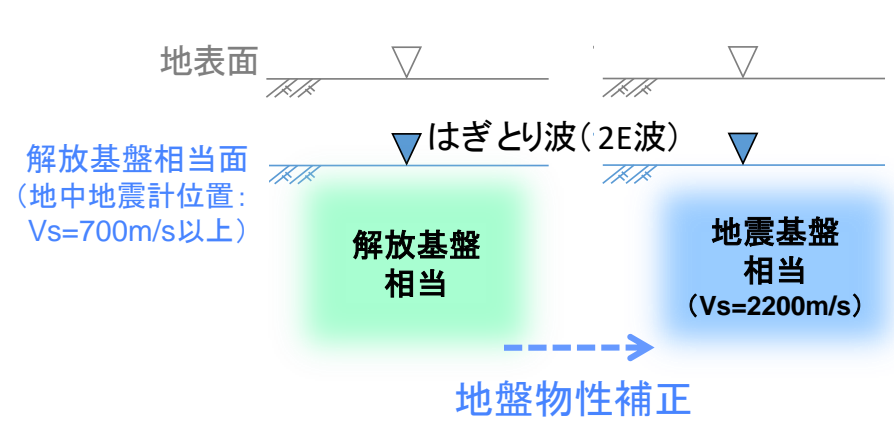
KiK-netの地中地震計位置における地盤のS波速度(V_s)は、観測点毎に異なっているため、地震基盤相当*となるように地盤物性補正を実施する(詳細は5.2.参照)。

* 地震基盤相当面の V_s は、地盤物性補正に用いたNoda *et al.* (2002)による経験式における定義を参考に $V_s=2200\text{m/s}$ 以上とする。

【震源距離補正※1の概念】



【地盤物性補正※2の概念】



※1: 震源(断層面/点震源)からの最短距離が5kmより遠い場合に検討

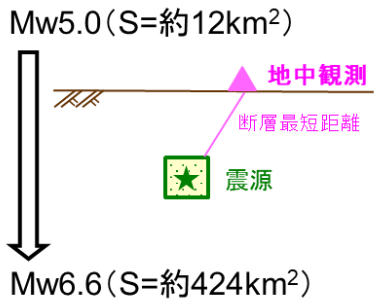
※2: 地中地震計位置の地盤の V_s が2200m/sよりも遅い場合に検討

5. 応答スペクトルの補正 (2/2)

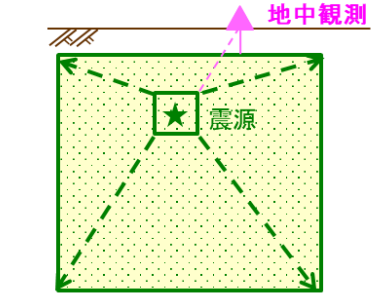
補足: 地震規模について

- 以下の理由で、地震規模を一律の規模に補正する処理は実施しないこととした。
 - 「震源を特定せず策定する地震動」は事前に位置も規模も分からないような地震を想定している。
 - 対象地震の地震規模(Mw)の差異は最大1.6(= Mw6.6 - 5.0)と大きい。
 - 各地震動に含まれる震源特性(破壊伝播に係るピークなど)の違いを適切に補正することは困難。
 - 地震規模が変わることで断層面積も変わるため、震源距離補正にも影響を与える。
- 地震規模の一律補正を実施せずに、統計処理において事前に位置や規模を特定できないようなランダム的に発生する地震を扱う場合には、対象データセットに含まれる地震がG-R則に従って地震規模が小さくなると発生頻度が高くなるような関係に従うことが望ましい。
 - 下図(中央)に示すように、本検討の対象地震の規模別地震数は概ねG-R則に従っていることを確認した(ただし、余震も多く含むため地震発生頻度の検討等には適さないこと等に留意が必要)。
 - ※地震が1つもない規模や地震数の凹凸については、最終的な統計処理において結果が過小とならないような処理を検討する。

<地震規模補正の課題点>

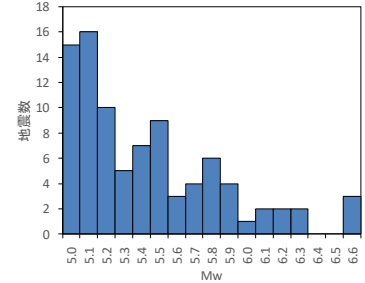


例えば、Mw5.0からMw6.6に補正することは断層面積Sを約35倍も変化させることになる。

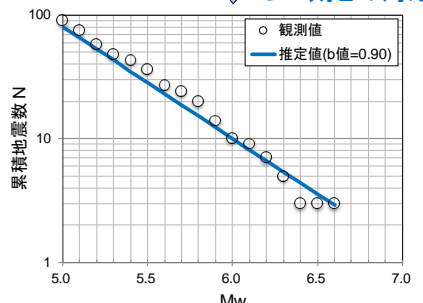


震源特性を変化させる。
断層面積Sの変化に伴い断層最短距離も変化するため、震源距離補正にも影響を与える。

<本検討の対象地震>



G-R則との対応



<地震本部(2018)による「震源断層を予め特定しにくい地震」の考え方>

震源断層を特定しにくい地震

Gutenberg-Richter の式 $\log N(M) = a - bM$

地震発生度数 N はマグニチュード M の増加と共に指数関数的に減る

規模も対象地点からの距離もいろいろ

マグニチュードの確率関数 $P_k(m_i)$

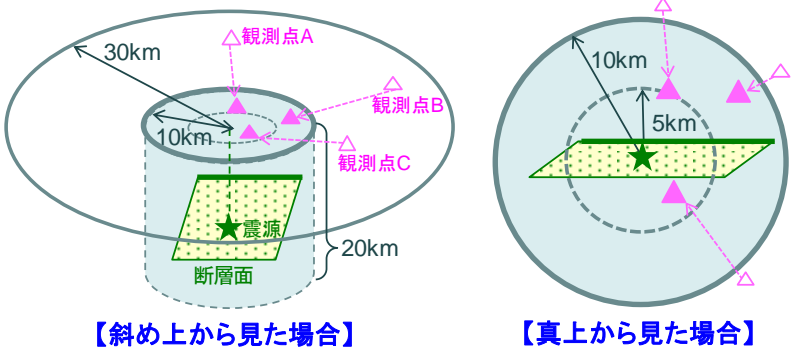
マグニチュードが m_i である条件下での距離の確率関数 $P_k(r_j | m_i)$

5.1 震源距離補正 (1/7)

震源距離補正の概要

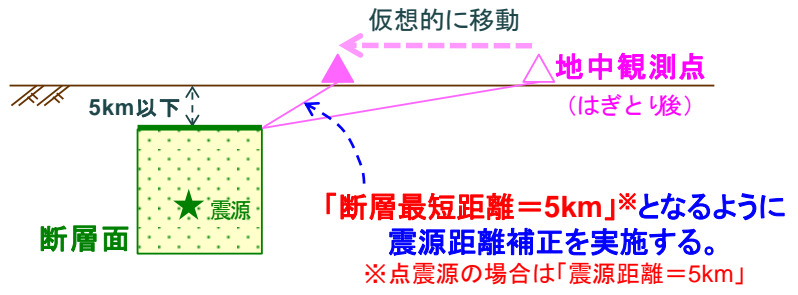
- 統計処理上は、ある領域内での記録数の割合(データ密度)を高くすることが望ましい。
 - 震央距離30km以内の記録を収集するため、震源と地中観測点との位置関係が震源近傍記録として扱うにはやや遠いものも含む。
- 方針: 観測記録を半径10km程度の震源近傍の領域*1に集めてくる方法として、震源(断層面または点震源)と観測点の距離について、以下のような補正を施した。
- *1: 観測記録をどの程度の領域に集めるかについては、標準応答スペクトルを決める際の地震動の(非)超過確率の設定と合わせて検討することにより、何kmに補正するかが本質的に影響しない考え方を示した(p.114参照)。
- 手法: 原子力安全基盤機構*2(2013)による距離減衰式を用いた相対補正を行った。
- *2: 原子力安全基盤機構(JNES)は、2014年3月1日に原子力規制委員会原子力規制庁に統合された。

<震源距離補正のイメージ(断層面設定の場合)>

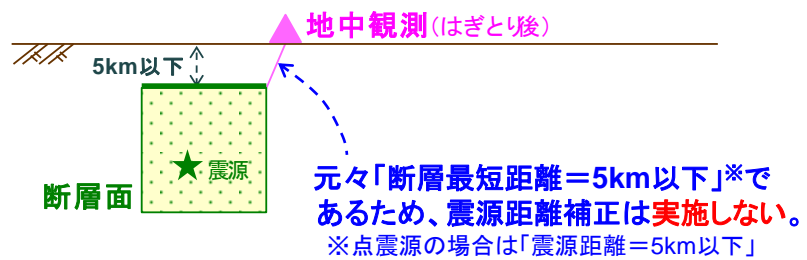


① 断層上端深さが5km以浅であり、補正前の断層最短距離が5kmより遠い場合

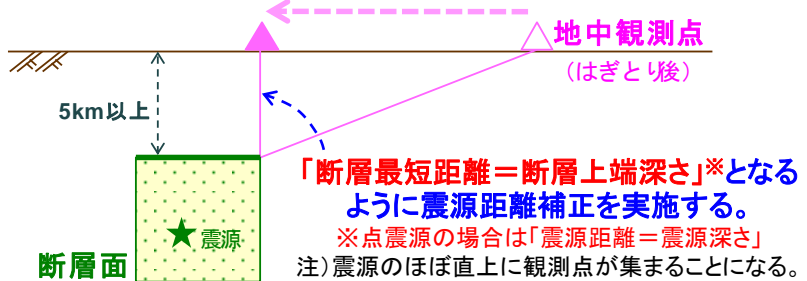
基本



② 断層上端深さが5km以浅であり、補正前の断層最短距離が5kmより近い場合



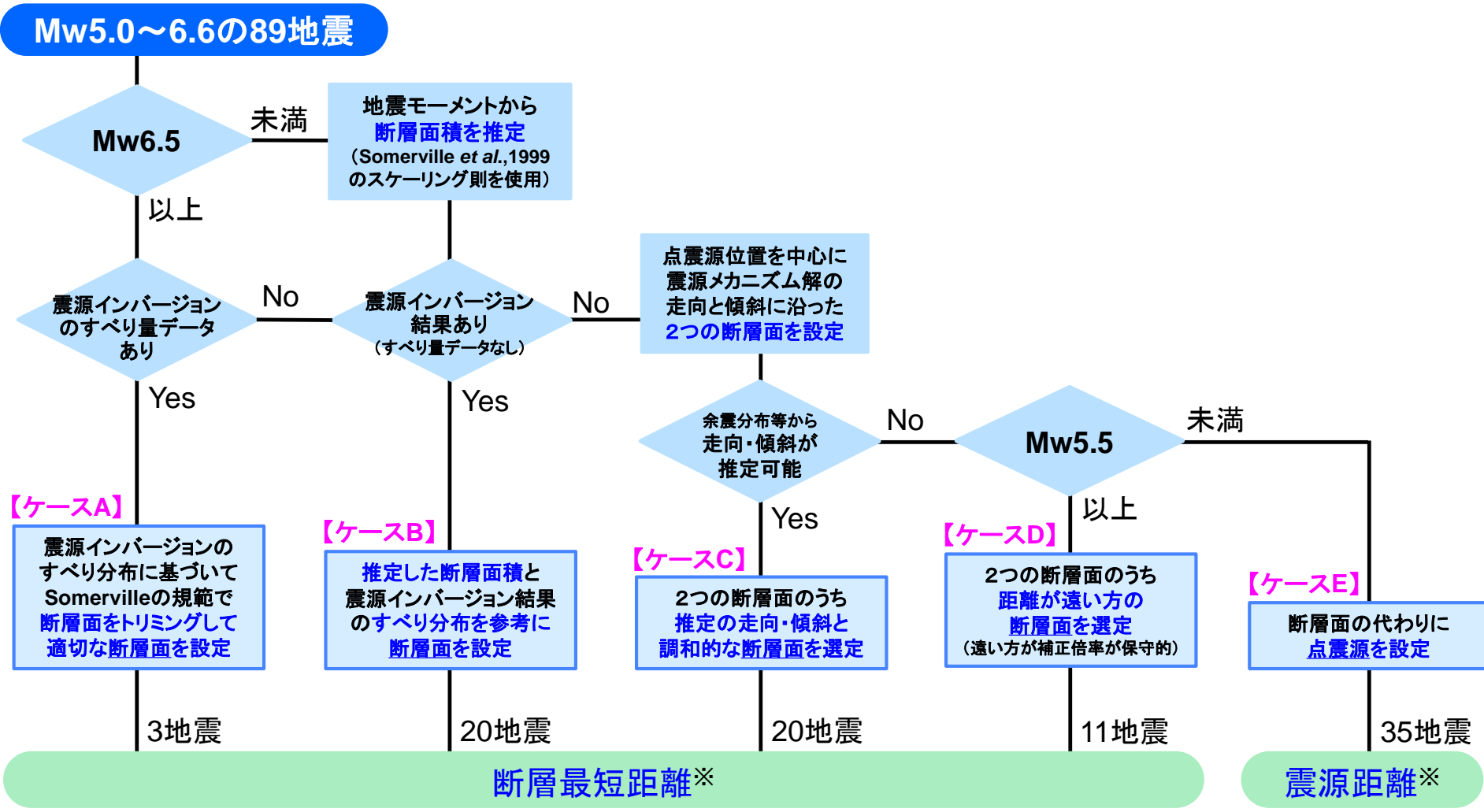
③ 断層上端深さが5kmより深い場合



5.1 震源距離補正 (2/7)

補正前の距離推定における震源の設定方法

震源距離補正を施す前の各地震の震源(断層面または点震源)の設定及び、震源と各観測点の間の距離推定で使用する距離の種類(断層最短距離または震源距離)との関係について、以下のフローに示す。



※補正前の最短距離の推定で使用する距離の種類

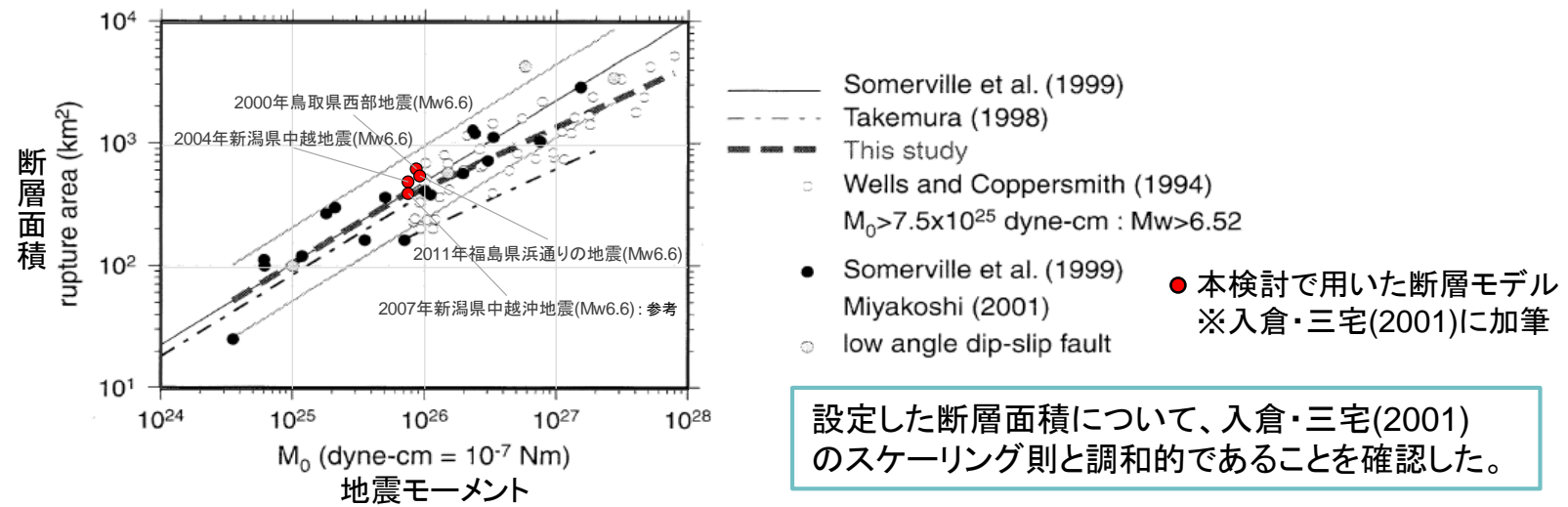
5.1 震源距離補正 (3/7)

補正前の距離算出方法 (1/5)

【ケースA】 Mw6.5以上の地震で震源インバージョン結果がある地震(すべり量データも入手可)
 Mw6.5以上の地震については、震源インバージョンによる断層面をSomerville *et al.* (1999)の
 規範に基づいてトリミングした断層面を採用し、断層最短距離(観測点が3次元的に断層面と最も
 近くなる距離)を算出する。

震源インバージョン結果はすべり分布のデジタルデータが公開されている査読付きの文献を参考にした。
 なお、採用した文献の結果が他の文献による結果(すべり量が大きい領域)と調和的であることを確認している。

地震名	最短距離計算に用いた断層の面積	参考とした文献	Somerville <i>et al.</i> (1999)の規範によるトリミング
2000年鳥取県西部地震(Mw6.6)	32km × 20km (=640 km ²)	Semmane <i>et al.</i> (2005)	トリミングは不要と判定された
2004年新潟県中越地震(Mw6.6)	28km × 18km (=504 km ²)	Asano and Iwata (2009)	トリミングは不要と判定された
2011年福島県浜通りの地震(Mw6.6)	22km × 14km+ 18km × 14km (=560 km ²)	Tanaka <i>et al.</i> (2014)	トリミングは不要と判定された



設定した断層面積について、入倉・三宅(2001)のスケーリング則と調和的であることを確認した。

5.1 震源距離補正 (4/7)

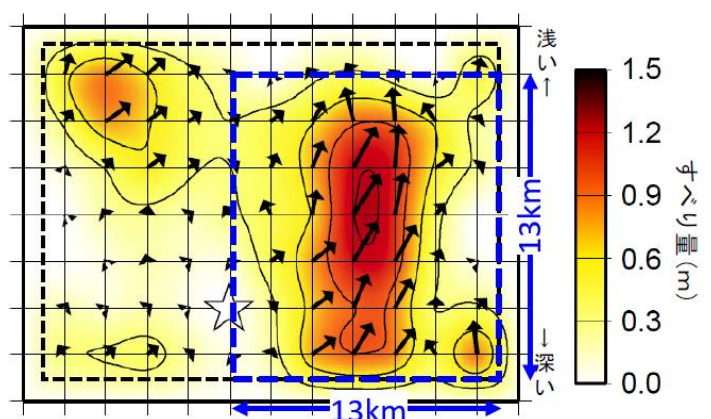
補正前の距離算出方法 (2/5)

【ケースB】 Mw6.5未満の地震で震源インバージョン結果がある地震(すべり量データ入手困難)
 Mw6.5未満の地震で既往研究による震源インバージョン結果がある場合には、以下の手順で断層面を設定し、断層最短距離を算出する。

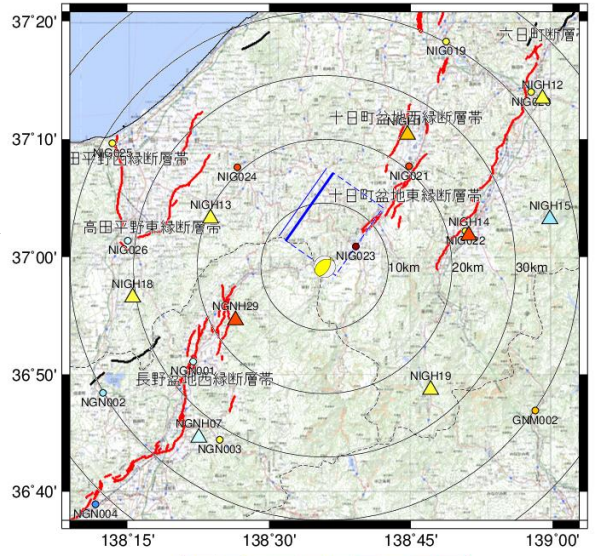
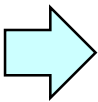
※震源インバージョン解析で設定されている断層面は、研究目的に応じて大きめに設定されていることから、以下の手順を採用する。

- ① Somerville et al. (1999)による地震モーメント(M_0)と断層面積(S)のスケージング関係、及びF-netによる M_0 に基づき、断層面積を算出する。
- ② 既往研究の震源インバージョン解析における断層面(特にすべり量が大きい領域)を参考に、①で求めた面積を満たす矩形の断層面を設定する。

<2011年3月12日 長野県北部の地震(Mw6.2)の例>



震源インバージョンによるすべり分布と設定した断層面(青破線)の対応例
 ※気象庁(2015)に加筆



青矩形: 設定した断層面
 △: KiK-net観測点
 ○: K-NET観測点
 ※ 観測点の色は地表最大加速度を表す

5.1 震源距離補正 (5/7)

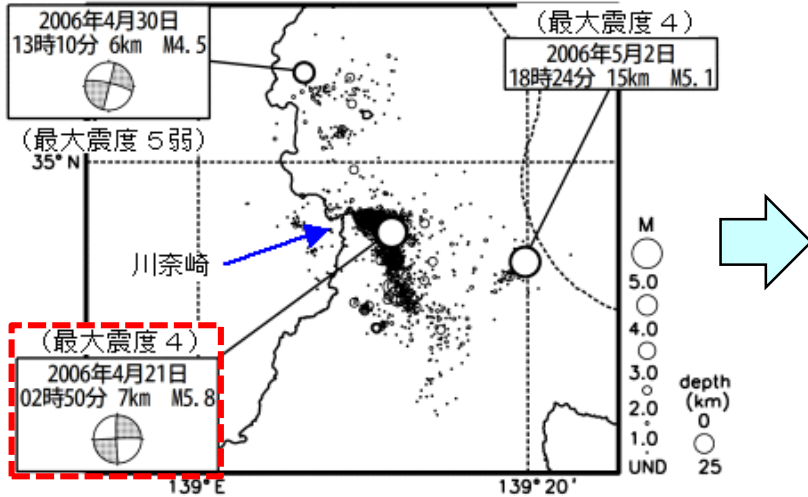
補正前の距離算出方法 (3/5)

【ケースC】 Mw6.5未満で余震分布から断層面が推定可能な地震(震源インバージョン結果なし)

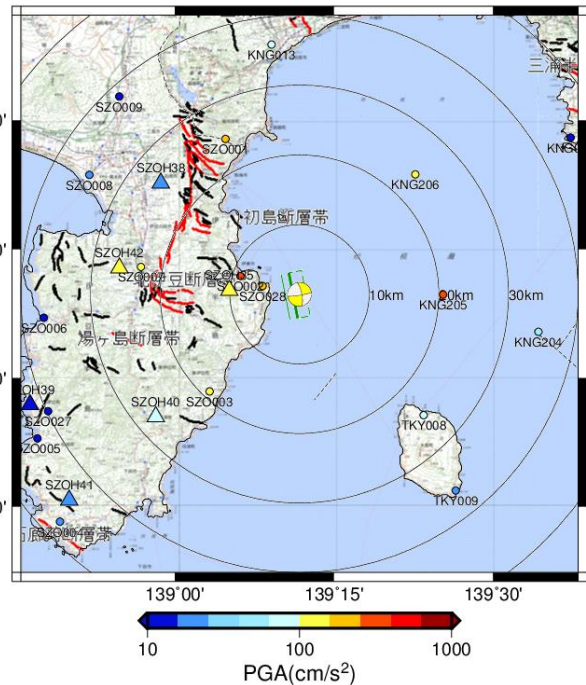
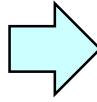
Mw6.5未満の地震で震源インバージョンの結果はないが、余震分布等から震源断層の走向と傾斜が推定可能な場合には、以下の手順で断層面を設定し、断層最短距離を算出する。

- ① Somerville *et al.* (1999)による M_0 -Sのスケーリング関係、及びF-netによる M_0 に基づき、断層面積Sを算出する。
- ② 気象庁による一元化震源の位置を中心に、長さ \sqrt{S} と幅が \sqrt{S} の断層面を設定する。
このとき、走向と傾斜角はF-netによるメカニズム解(ダブルカップル)より、2つの断層面を仮定する。
- ③ 2つの断層面のうち余震分布と調和的な断層面を採用する。

<2006年4月21日 伊豆半島東方沖の地震(Mw5.6)の例>



※地震本部(2006)より引用・加筆



緑矩形: 設定した断層面
 △: KiK-net観測点
 ○: K-NET観測点
 ※ 観測点の色は地表最大加速度を表す

メカニズムは横ずれ断層であり、南北走向あるいは東西走向の断層面が考えられる。
 余震分布より南北走向の地震であると推定できる。

ダブルカップルの2断層面のうち、南北走向の断面を採用

5.1 震源距離補正 (6/7)

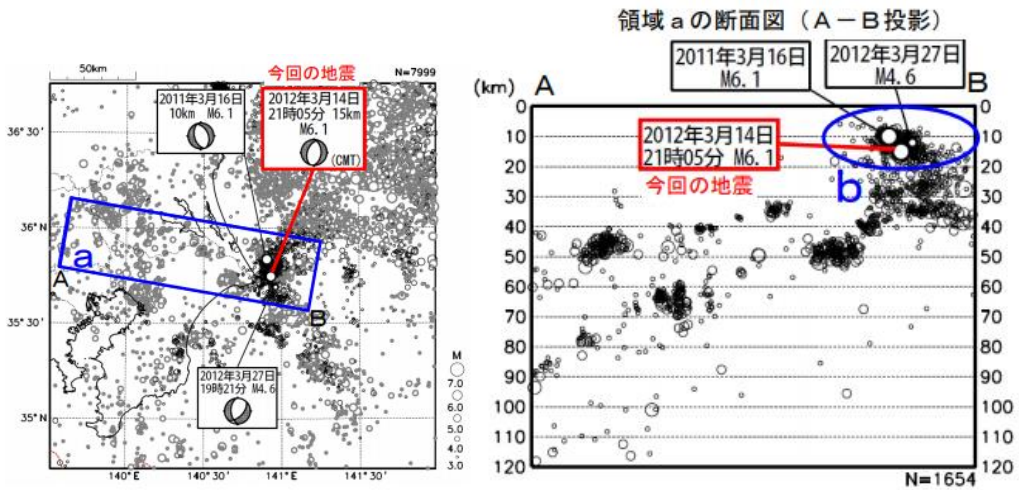
補正前の距離算出方法 (4/5)

【ケースD】 Mw5.5以上Mw6.5未満でのケースB, C以外の地震

Mw5.5以上Mw6.5未満の地震で、震源インバージョンの結果がなく、余震分布等から断層面の推定が難しい場合には、以下の手順で2つの断層面を設定して、両者の断層最短距離のうち遠くなる方*を採用した。

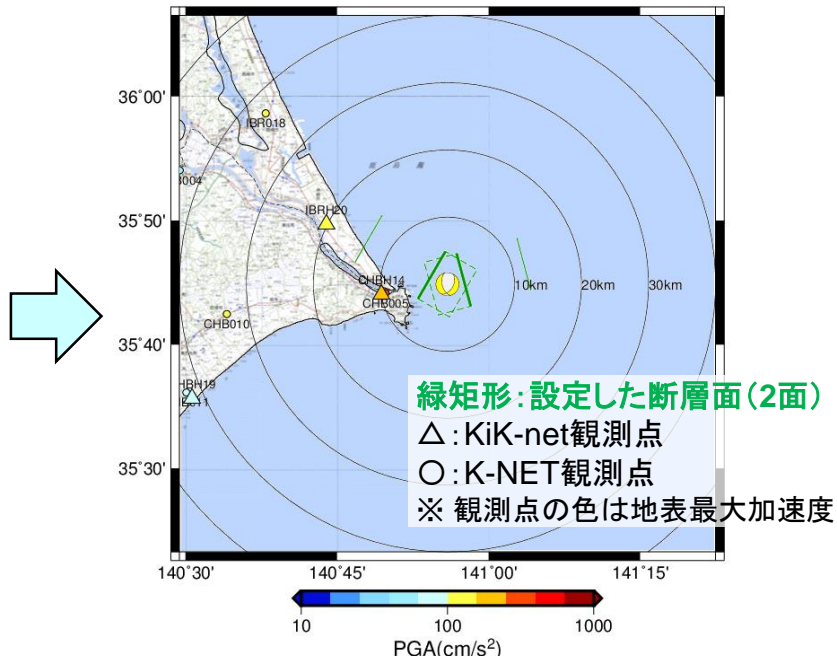
- ① Somerville *et al.* (1999)による M_0 -Sのスケーリング関係、及びF-netによる M_0 に基づき、断層面積Sを算出する。
- ② 気象庁による一元化震源の位置を中心に、長さ \sqrt{S} と幅 \sqrt{S} の断層面を設定する。
このとき、走向と傾斜角はF-netによるメカニズム解(ダブルカップル)より、2つの断層面を設定する。

<2012年3月14日 千葉県東方沖の地震(Mw5.8)の例>



※地震本部(2012)より引用

メカニズムは東西方向に張力軸をもつ正断層であり、西側傾斜あるいは東側傾斜の断層面が考えられる。
余震分布から東側傾斜である可能性もあるが、断定することは難しい。



ダブルカップルの2断層面のうち、観測点ごとに断層最短距離が遠くなる方を採用する。

5.1 震源距離補正 (7/7)

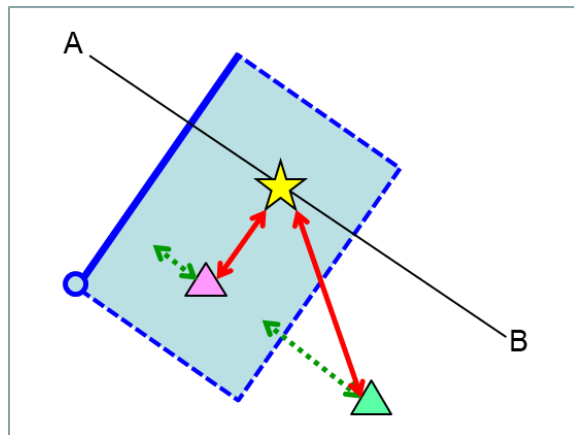
補正前の距離算出方法 (5/5)

【ケースE】 Mw5.5未満でケースB, C以外の地震

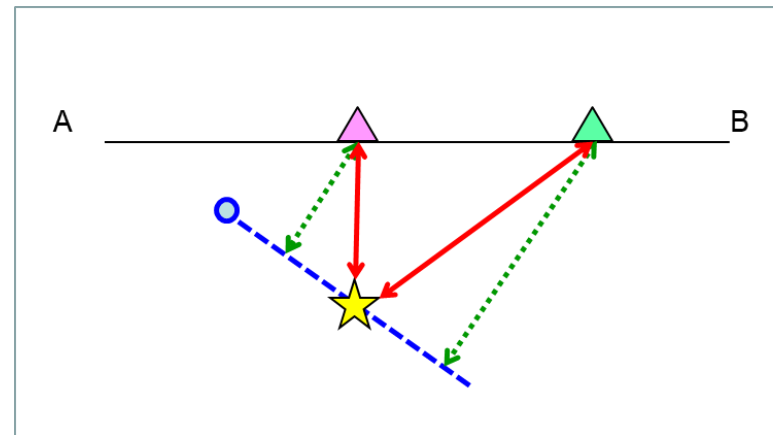
Mw5.5未満の地震で、震源インバージョンの結果がなく、余震分布等から断層面の推定が難しい場合には、下記を鑑みて点震源を仮定し、気象庁の一元化震源を用いて震源距離を算出した。

- Mw5.5未満の地震では、震源断層面の長さ・幅は数kmよりも小さくなり、震源が面によることの影響が小さくなると考えられる。
- 一般に距離減衰式の構築においても、震源インバージョンの結果がない地震(Mw6.0~5.5よりも小さい規模の地震)については、点震源を仮定するが多い。
(今回採用する原子力安全基盤機構,2013による距離減衰式においても同様。)
- 点震源を仮定した震源距離の方が、断層最短距離を求める(ケースA~D)の場合よりも推定距離は遠くなると思われ、距離補正としては保守的になると考えられる(いくつかの例で確認済み)。

<平面図>



<断面図(走向直行方向)>



震源距離と断層最短距離の算出方法の違い

- △: 観測点 ☆: 点震源 □: 断層面(仮)
↔: 震源距離(採用) <...>: 断層最短距離(仮)

5.2 地盤物性補正

地盤物性補正の概要

- 統計処理において、各観測点における地震動(応答スペクトル)を地震基盤※¹相当面で扱うことを目的に地盤物性の補正を施した。
- 方針:補正の方針は、地中地震計の設置地盤の速度に応じて以下のとおりとした。
 - ① 地震基盤相当よりも速い場合: 補正を行わない。
 - ② 地震基盤相当よりも遅い場合: 経験式を用いた補正を施した。
- 手法:Noda et al. (2002)による応答スペクトルの距離減衰式における地盤増幅率を使用して、当該文献の地震基盤相当面 (Vs=2200m/s、Vp=4200m/s)※²における地震動レベルに補正した。

※1: 「地震基盤」とは、せん断波速度Vs=3000m/s 程度以上の地層をいう(審査ガイドより引用)。
 ※2: 地震基盤相当面 (Vs=2200m/s以上)における地震動レベルは地震基盤位置とほぼ同等と考える。一般にVs=2000~3000m/s程度での地盤増幅率は十分小さいと仮定し、地震基盤面での地震動レベルと考える。なお、加藤ほか(1998)により、Noda et al. (2002)の地盤増幅率算定の基準となった小玉川観測点 (Vs=2200m/s)といわき観測点・富岡観測点 (Vs=2800m/s)の観測記録を用いた解析により地盤増幅率が十分に小さいことが確認されている。

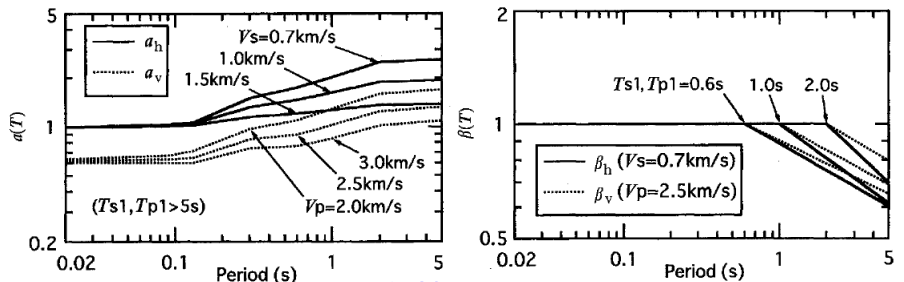
◆Noda et al. (2002)による地盤増幅率の概要

$$S(T) = S_b(T) \times \alpha(T) \times \beta(T)$$

【補正項】

水平動 $\alpha_h(T) = \begin{cases} \left(\frac{V_s}{V_{sb}}\right)^{-\delta_h(T)} & (T \leq T_{s1}) \\ \left(\frac{V_s}{V_{sb}}\right)^{-\delta_h(T_{s1})} & (T > T_{s1}) \end{cases}$, $\beta_h(T) = \begin{cases} 1 & (T \leq T_{s1}) \\ \left(\frac{T}{T_{s1}}\right)^{-\log \alpha_h(T_{s1})} & (10T_{s1} > T \geq T_{s1}) \\ 10^{-\log \alpha_h(T_{s1})} & (T \geq 10T_{s1}) \end{cases}$

上下動(鉛直動) $\alpha_v(T) = \begin{cases} \alpha_{bv}(T) \times \left(\frac{V_p}{V_{pb}}\right)^{-\delta_v(T)} & (T \leq T_{p1}) \\ \alpha_{bv}(T) \times \left(\frac{V_p}{V_{pb}}\right)^{-\delta_v(T_{p1})} & (T > T_{p1}) \end{cases}$, $\beta_v(T) = \begin{cases} 1 & (T \leq T_{p1}) \\ \left(\frac{T}{T_{p1}}\right)^{-\log \left\{ \frac{\alpha_v(T_{p1})}{\alpha_{bv}(T_{p1})} \right\}} & (10T_{p1} > T \geq T_{p1}) \\ 10^{-\log \left\{ \frac{\alpha_v(T_{p1})}{\alpha_{bv}(T_{p1})} \right\}} & (T \geq 10T_{p1}) \end{cases}$



【地盤補正率の例】

S(T): 加速度応答スペクトル(cm/s²)
 S_b(T): 水平動の地震基盤での加速度応答スペクトル(cm/s²)
 α_h(T), α_v(T): 水平動、上下動の地盤増幅率の補正項
 α_{bv}(T): 地震基盤における上下/水平動のスペクトル比
 β_h(T), β_v(T): 水平動、上下動の地盤の卓越周期の補正項※
 T_{s1}, T_{p1}: 水平動、上下動の地盤の卓越周期(s)
 δ_h, δ_v, δ_{bv}: 各コントロールポイントでの補正係数

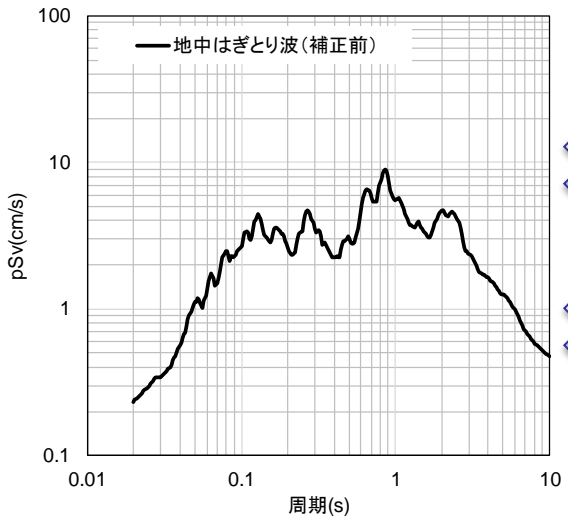
※地盤の卓越周期(T_{s1}, T_{p1})は観測点位置におけるPS検層結果とJ-SHISの深部地盤モデルを用いて推定した。

5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (1/5)

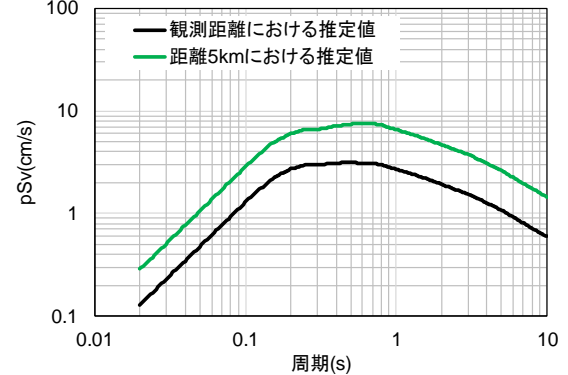
応答スペクトル補正の例

2010年9月29日福島県中通りの地震(Mw5.5)のKiK-net西郷(FSKH10)の記録(NS成分)

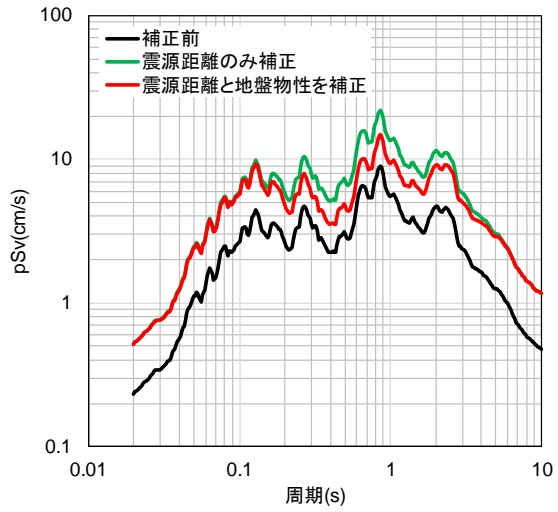
【観測記録の諸元】
 断層最短距離 : 14km
 地中地震計Vs : 870m/s
 卓越周期Ts1 : 0.6s



原子力安全基盤機構(2013)の距離減衰式による推定値

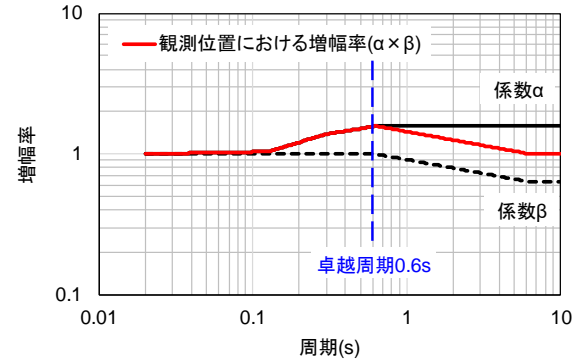


【補正後の諸元】
 断層最短距離 : 5km
 地中地震計Vs : 2200m/s
 卓越周期Ts1 : 0.6s



震源距離補正倍率 = $\frac{\text{距離5kmにおける推定値}}{\text{観測距離における推定値}}$

地盤物性補正倍率 = $\frac{1(\text{地震基盤における増幅率})}{\text{観測位置における増幅率}}$



※震源距離と地盤物性を補正した応答スペクトル(赤線)を最終的な統計処理で用いる。

5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (2/5)

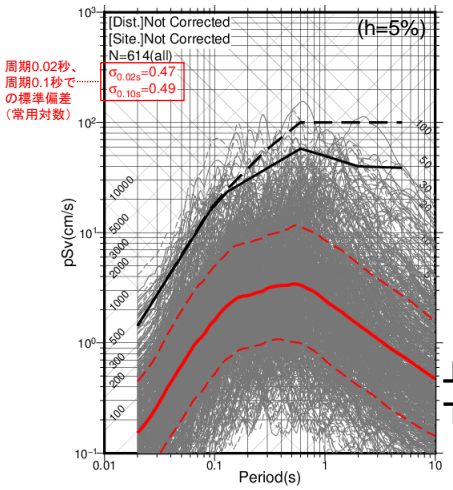
水平動

補正前



補正後(震源近傍、地震基盤相当)

震源距離・地盤物性の補正



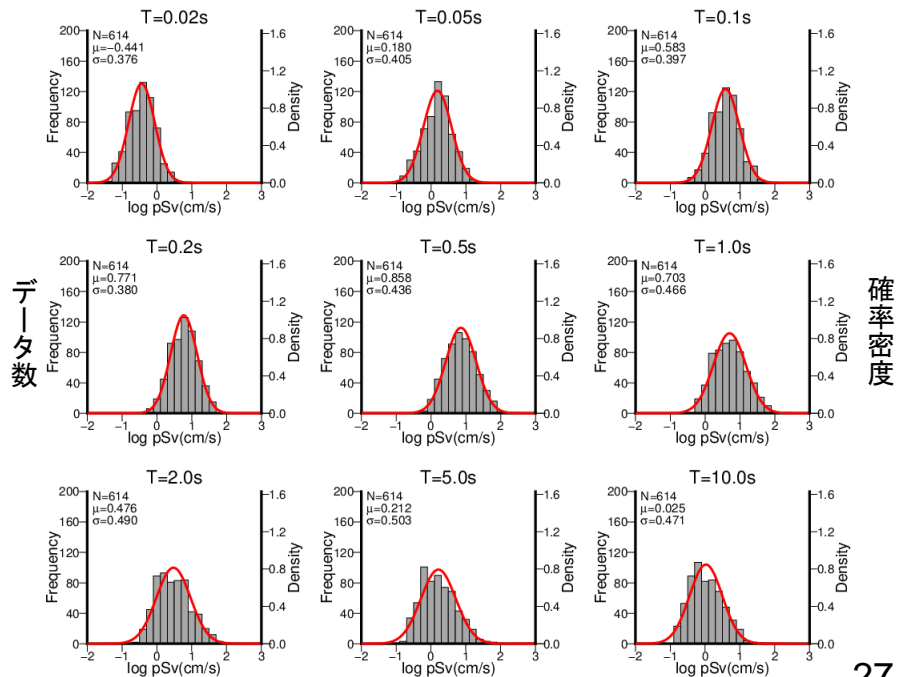
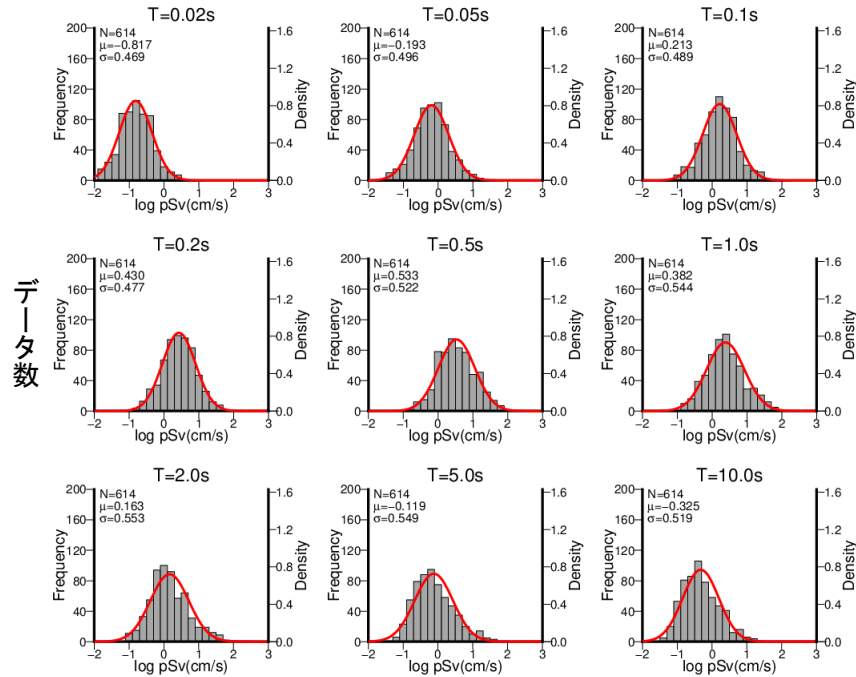
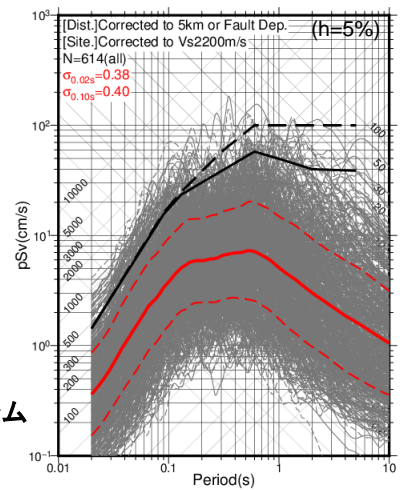
黒色: 加藤スペクトル* (水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

* 加藤ほか(2004)による応答スペクトル (以降「加藤スペクトル」という)

上段: はぎとり波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

下段: 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム

※補正によりばらつきが低減したことが分かる



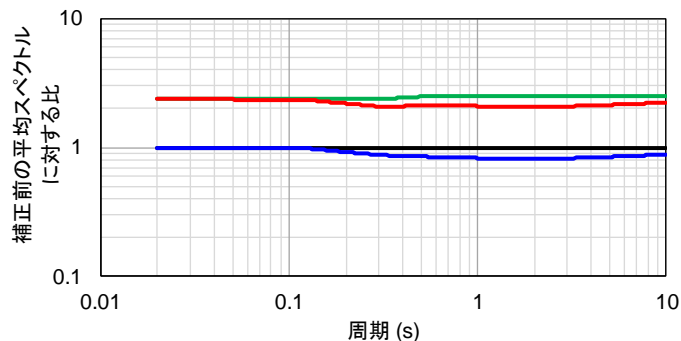
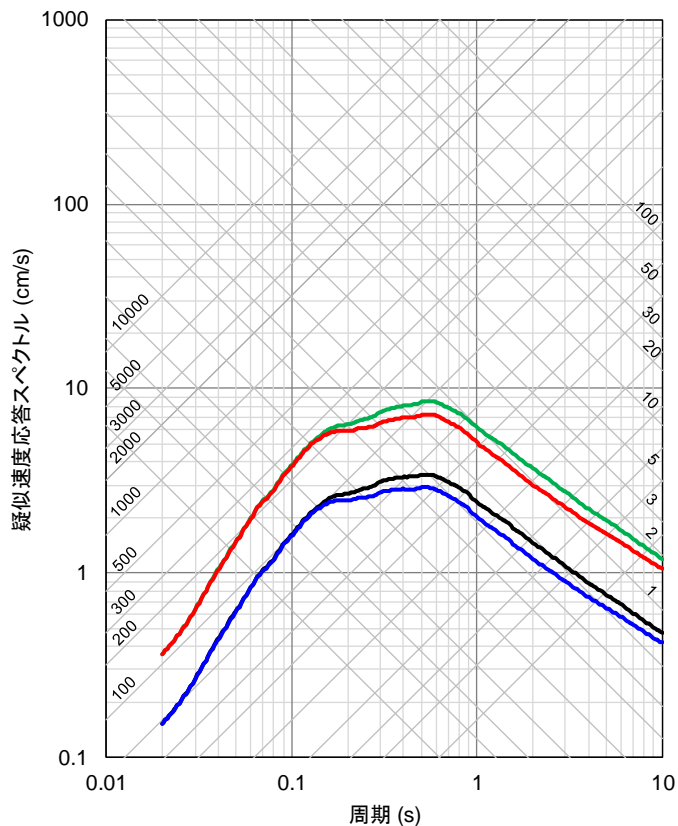
地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

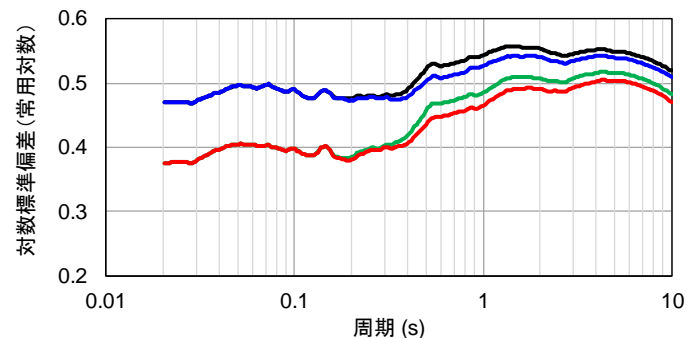
5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (3/5)

水平動

平均スペクトルの比較



標準偏差の変化



黒:補正前
緑:震源距離のみ補正
青:地盤物性のみ補正
赤:震源距離と地盤物性を補正

【平均スペクトルの大小関係】

距離補正 > 距離補正 + 地盤補正 > 補正なし > 地盤補正

【標準偏差の大小関係】

距離補正 + 地盤補正 < 距離補正 < 地盤補正 < 補正なし

※距離補正 + 地盤補正(赤線)が今回の最終的な処理結果

5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (4/5)

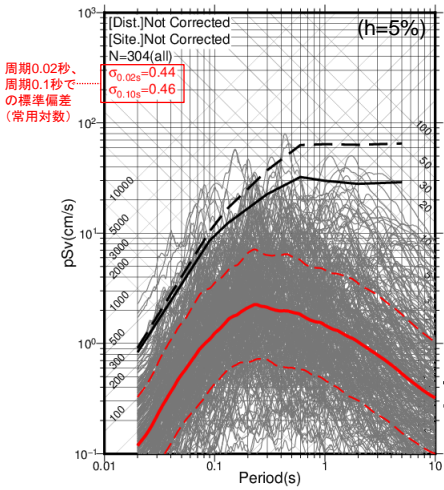
上下動

補正前

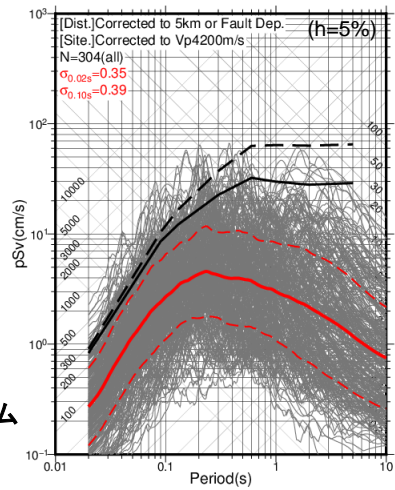


補正後(震源近傍、地震基盤相当)

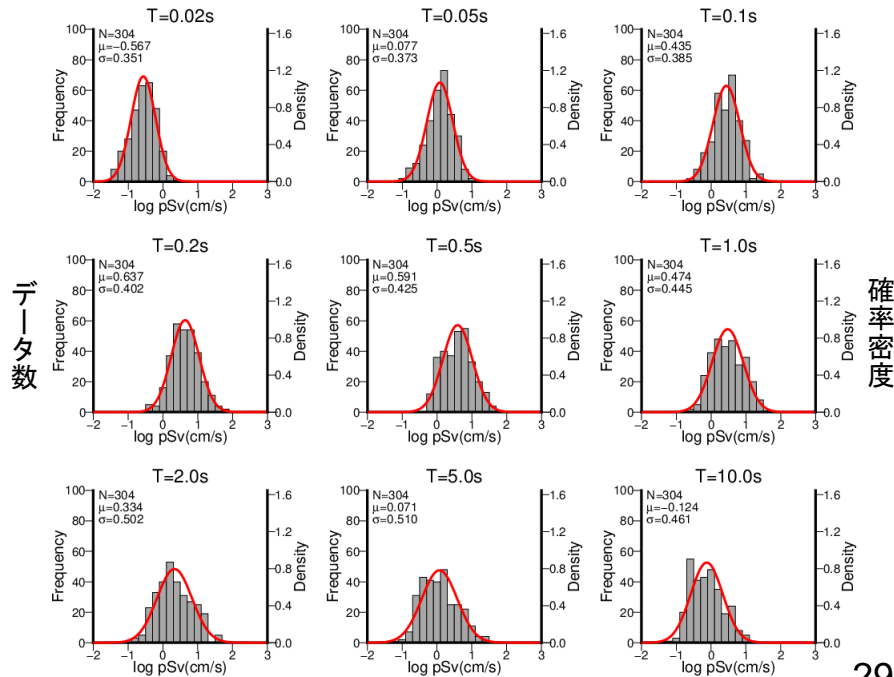
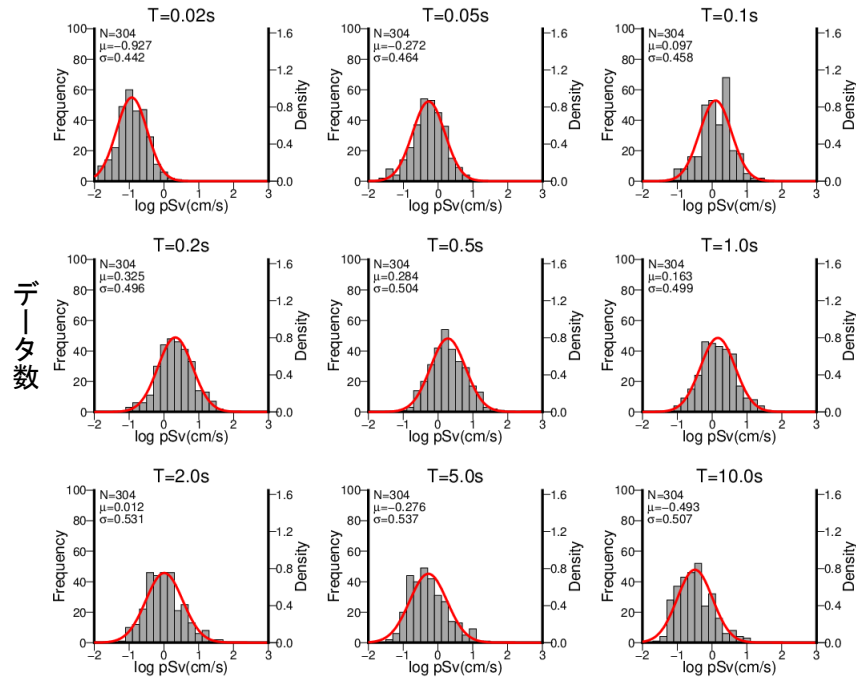
震源距離・地盤物性の補正



黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波
 実線: UD
 赤色: 統計処理
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ



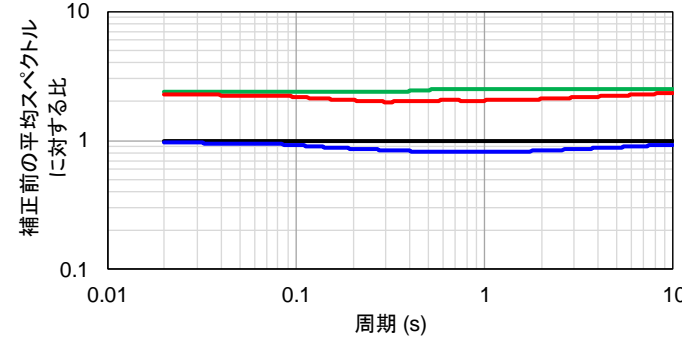
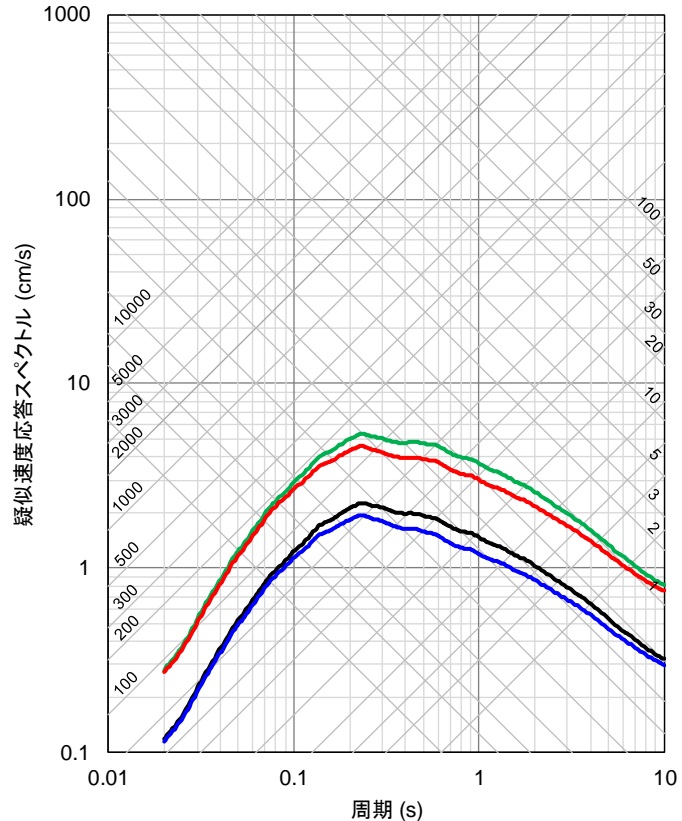
上段: はぎとり波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)
 下段: 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム
 ※補正によりばらつきが低減したことが分かる



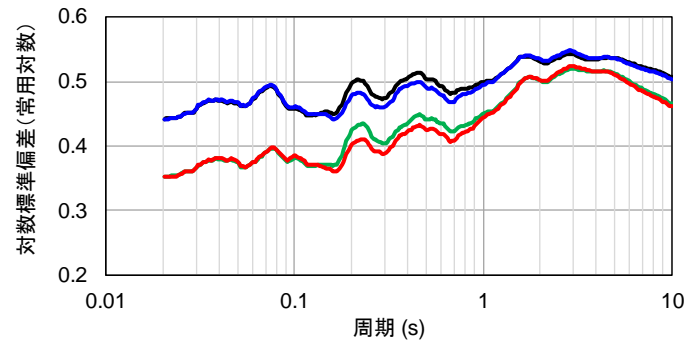
5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (5/5)

上下動

平均スペクトルの比較



標準偏差の変化



黒: 補正前
 緑: 震源距離のみ補正
 青: 地盤物性のみ補正
 赤: 震源距離と地盤物性を補正

【平均スペクトルの大小関係】
 距離補正 > 距離補正 + 地盤補正 > 補正なし > 地盤補正

【標準偏差の大小関係】
 距離補正 + 地盤補正 < 距離補正 < 地盤補正 < 補正なし
 ただし、地盤補正による周期1秒以上の標準偏差はほぼ変化がない(水平動は周期1秒以上も減少)。

※距離補正 + 地盤補正 (赤線) が今回の最終的な処理結果

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (1/36)

背景

- 最終的に策定する標準応答スペクトルは、今後の統計処理で算出する非超過確率別応答スペクトルに基づいてレベルを設定する。
- 本検討では、以下のような条件を前提としている。
 - 「震源を特定せず策定する地震動」は、事前に位置も規模も分からないような地震を想定している。
 - 自然現象である地震の数やその観測条件等は限られている中で地震動観測記録を重視する。
- ➔ 上記を考慮し、地震規模(Mw5.0~6.6)に幅を持たせ、観測記録を震源近傍の領域(半径10km程度以内)に集めて、地震基盤面相当の地震動レベルを推定することとした。

ラベル付けによる分析の目的

11項目を対象にラベル付けに基づくグループ分けを行い、グループ毎の補正後の地震動(応答スペクトル)を比較して特徴を分析した。特に、以下のような観点について確認した。

- 統計処理の対象となる応答スペクトルのデータセット(データ数)について、地震や観測における各種条件による極端又は非現実的な偏り等*が生じていないか。
* 全国共通に考慮する地震動であることから、統計処理のデータセットに含まれる各グループのデータ数等に偏りがないかを確認することを主な目的としている。グループごとの地震動レベルに差異が生じる場合であっても、非現実的な特性でなければ、統計処理においては1つのデータセットとして扱うこととした。
- はざとり解析や補正により応答スペクトルへの極端又は非現実的な影響等が生じていないか。

<ラベル付けを実施した項目>

地震	① 地震規模(Mw)	p.32
	② 震源深さ	p.36
	③ 地震活動地域(西日本、東日本)	p.40
	④ 断層タイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)	p.42
	⑤ 地震活動タイプ(前震、本震、余震)	p.44
	⑥ 震央と活断層の地表における最短距離	p.47

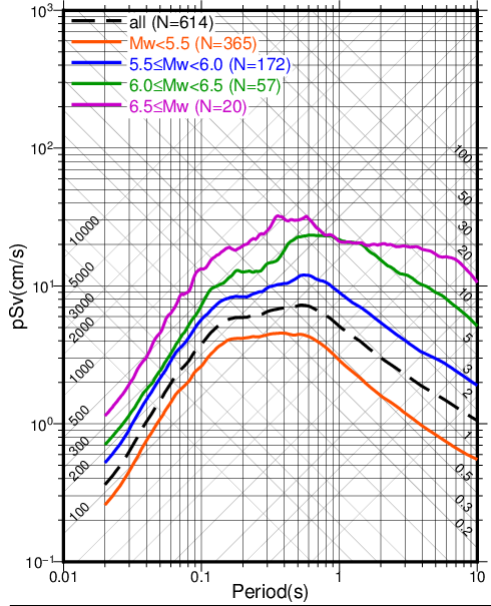
観測記録	⑦ 補正前の震源(面/点)と観測点の最短距離	p.52
	⑧ 地中地震計位置の地盤のS波速度(Vs)	p.55
	⑨ 地中地震計位置の地震基盤深さ	p.57
	⑩ 統計処理に用いる地震の数	p.59
	⑪ 特徴的な地震動	p.61

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (2/36)

① 地震規模 (Mw) : 水平動

周期0.02秒、周期0.1秒での標準偏差(常用対数)
(全記録では、 $\sigma_{0.02s}=0.38$ 、 $\sigma_{0.10s}=0.40$)

平均スペクトルの比較



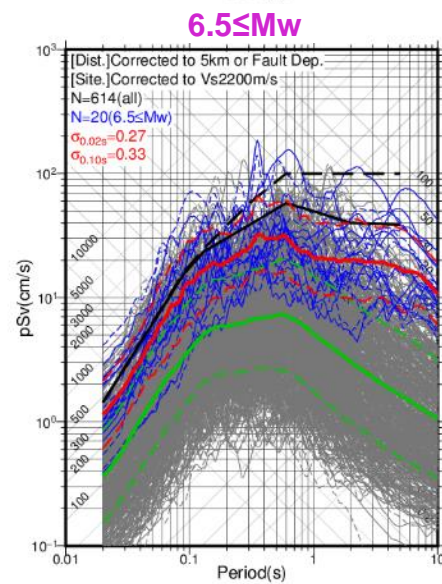
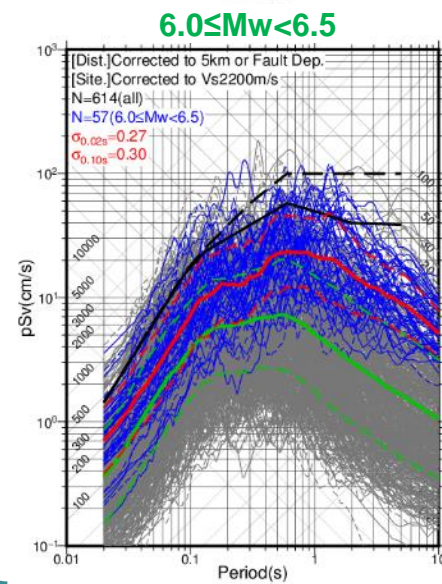
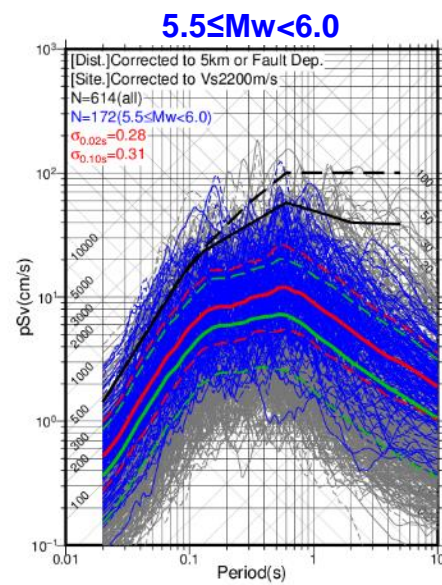
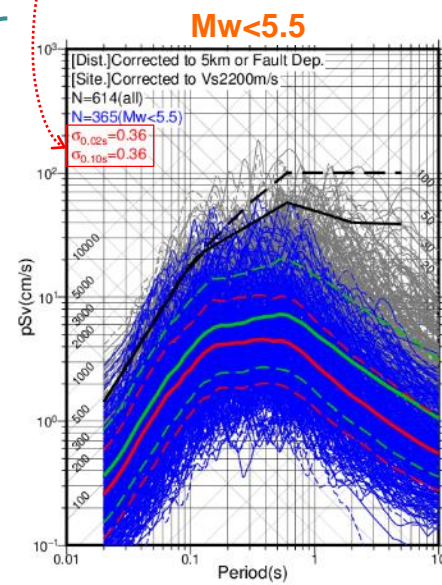
黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>

地震規模が大きいほど、地震動レベルが大きくなる(長周期になるほど顕著)。周期0.6秒程度以下ではMw5.5未満のグループにも地震動レベルが大きい記録もある。

<データセット(データ数)に係る確認>

地震規模が小さいほど頻度が高くなっており、データ数には現実的な偏りが生じている(G-R則に従う)。また、地震規模を特定せずに幅をもたせることにより、データセットには規模相応の地震動レベルの差異が含まれる。



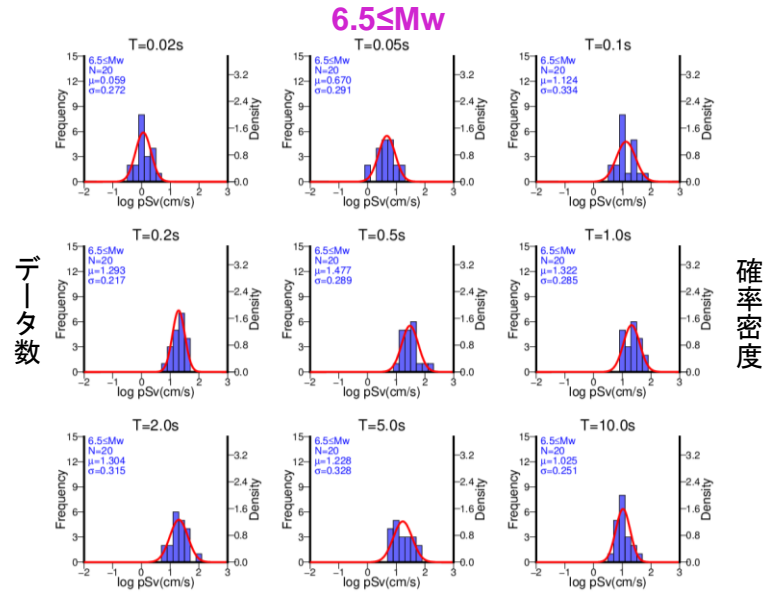
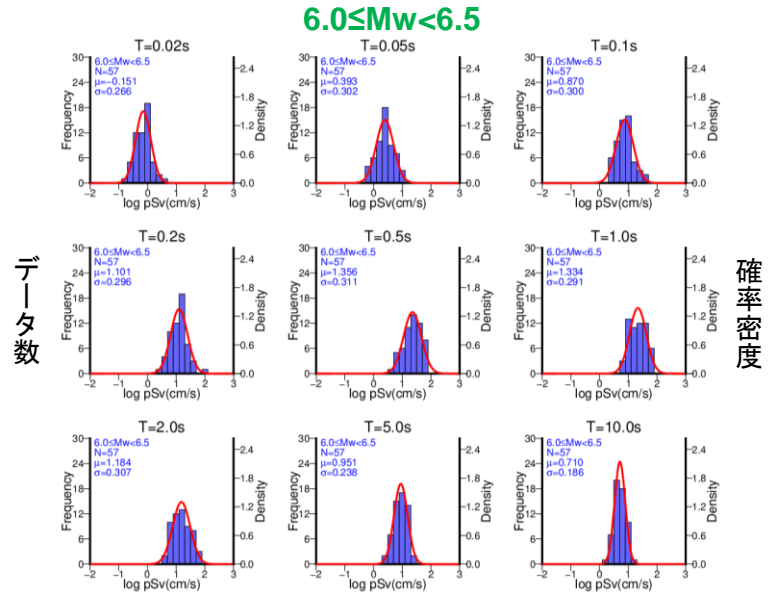
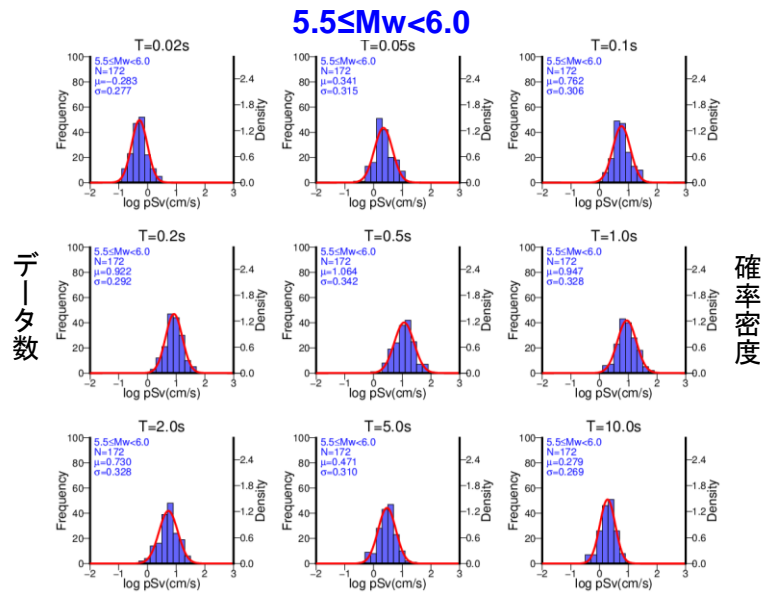
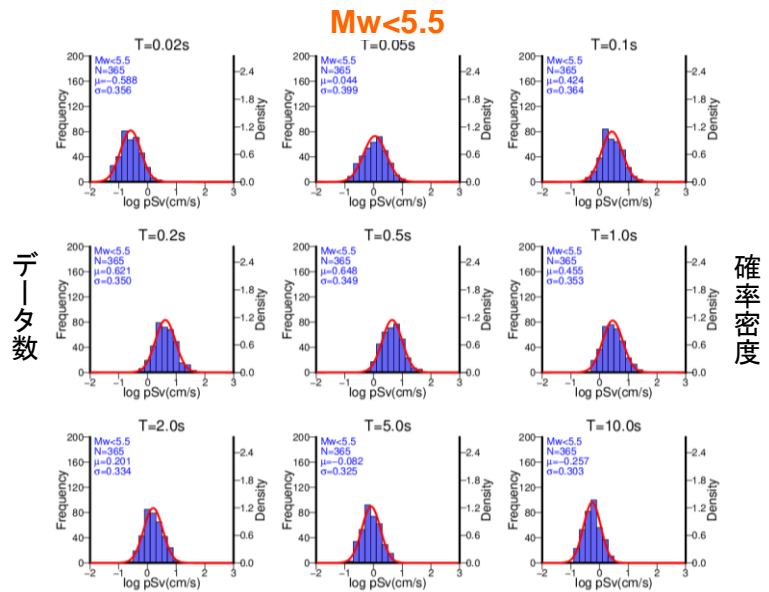
各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (3/36)

① 地震規模 (Mw) : 水平動

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム



地震動強さ [擬似速度応答 (h=5%) の常用対数]

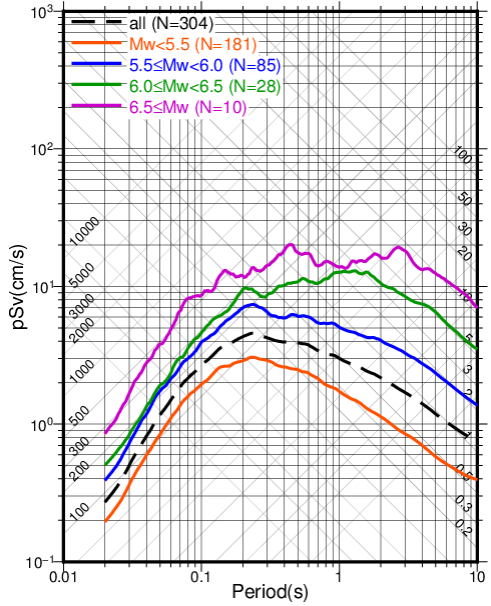
地震動強さ [擬似速度応答 (h=5%) の常用対数]

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (4/36)

① 地震規模(Mw): 上下動

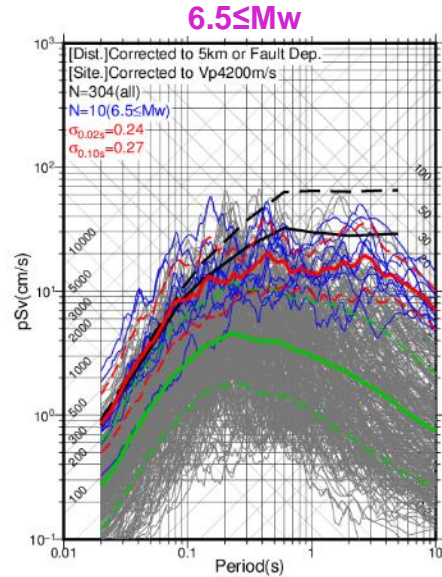
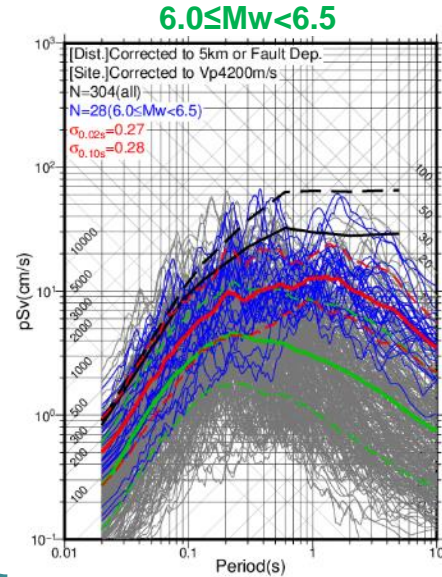
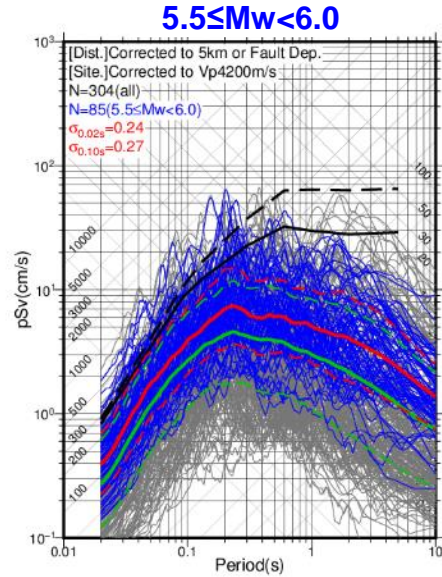
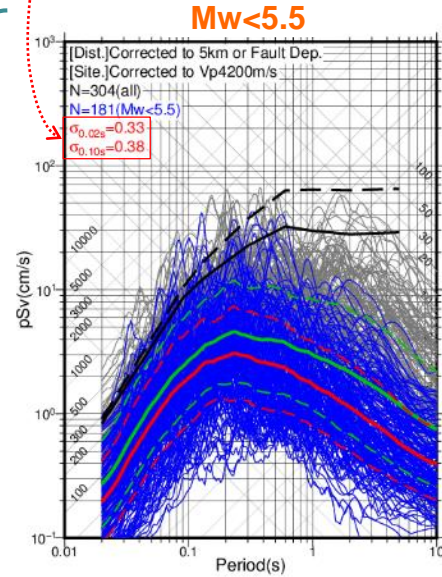
周期0.02秒、周期0.1秒での標準偏差(常用対数)
 (全記録では、 $\sigma_{0.02s}=0.35$ 、 $\sigma_{0.10s}=0.39$)

平均スペクトルの比較



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。



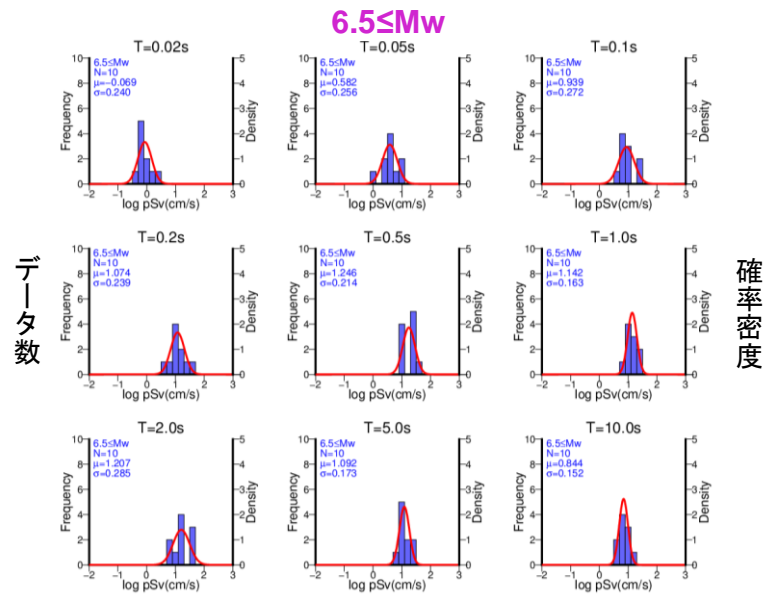
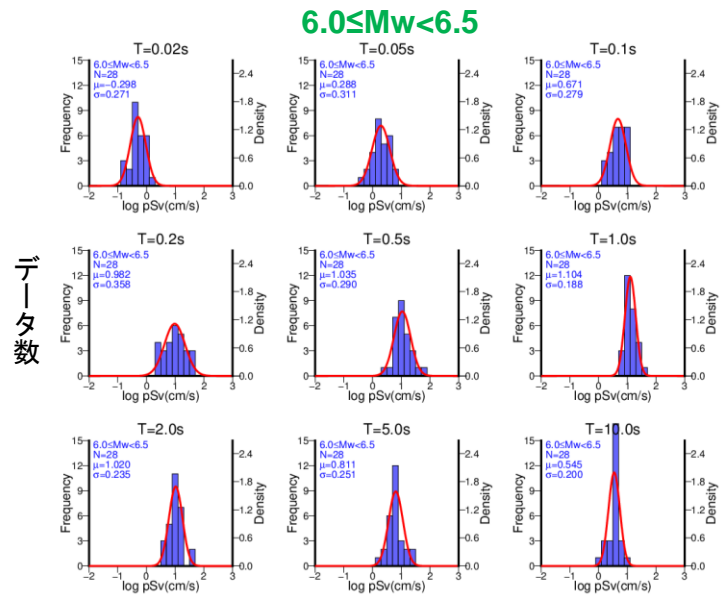
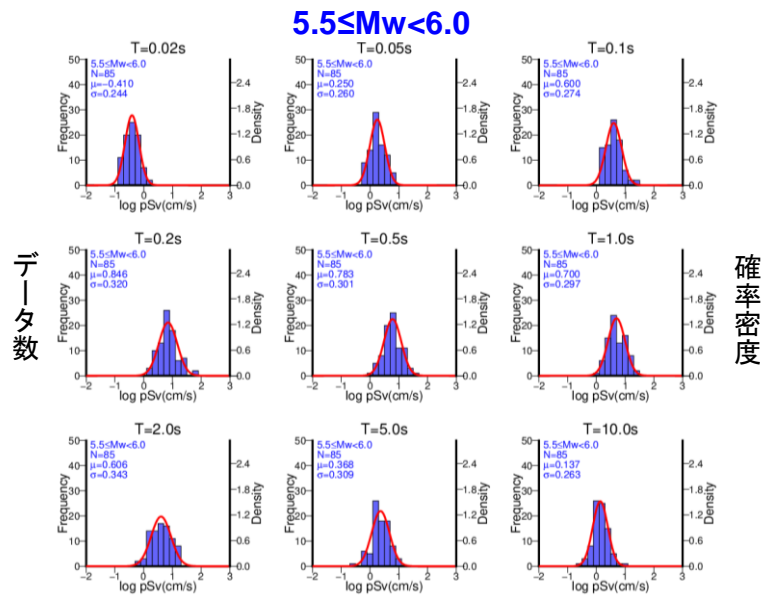
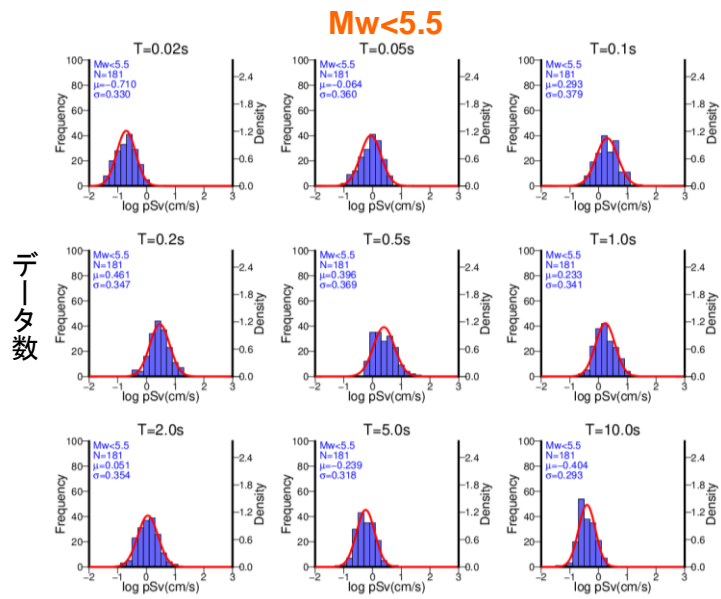
各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はざとり波(全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はざとり波(灰色)の平均
 破線: はざとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はざとり波(グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はざとり波(青色)の平均
 破線: はざとり波(青色)の平均±σ

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (5/36)

① 地震規模(Mw) : 上下動

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム

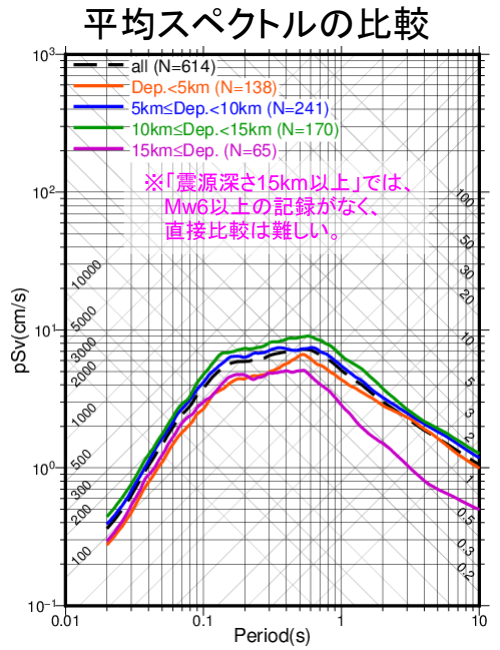


地震動強さ〔擬似速度応答(h=5%)の常用対数〕

地震動強さ〔擬似速度応答(h=5%)の常用対数〕

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (6/36)

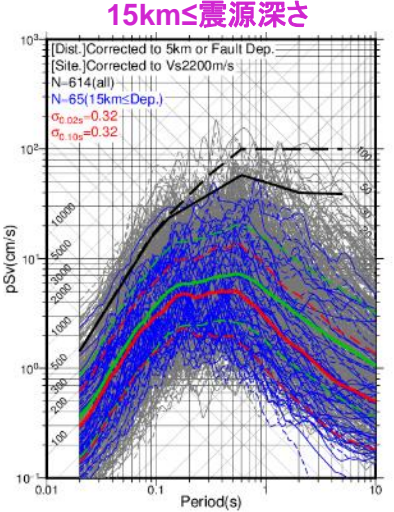
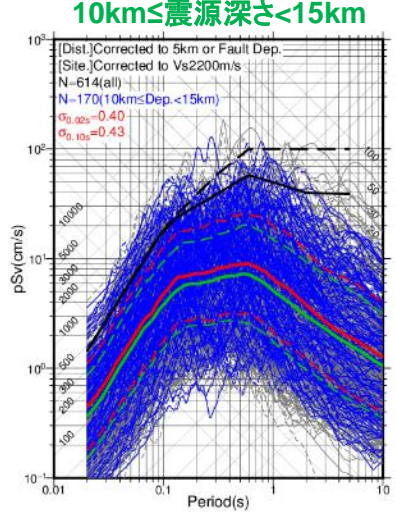
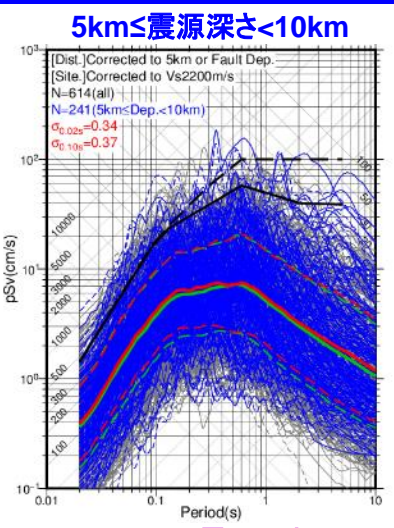
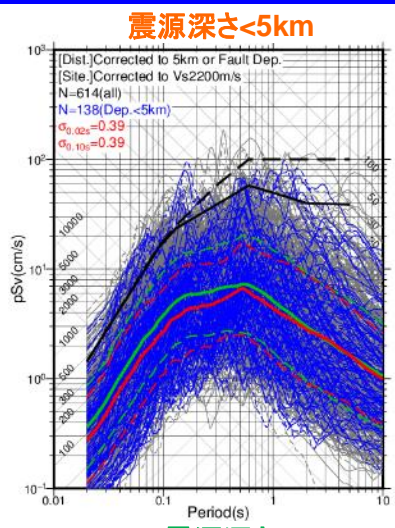
② 震源深さ: 水平動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

＜グループ分けによる特徴分析＞
 平均スペクトルのレベルには大きな差異は見られないものの、震源深さが浅い(5km未満)のグループでは周期0.6秒程度以下の地震動レベルがやや小さい傾向がある(応力降下量の深さ依存性と関連する可能性もある)。

＜データセット(データ数)に係る確認＞
 中間的な震源深さ(10km前後)のデータが多くなる傾向があるものの、極端又は非現実的な偏りは生じていない。

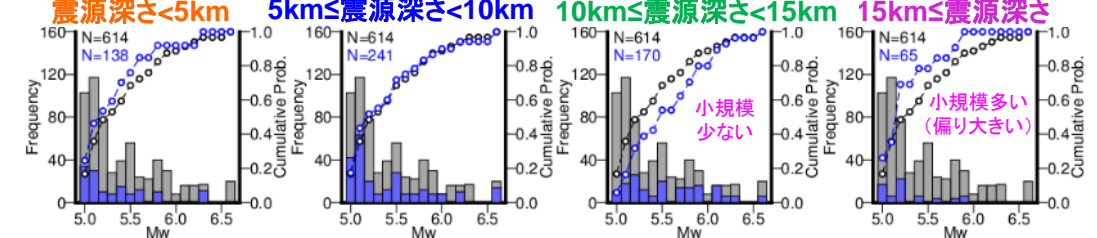


各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

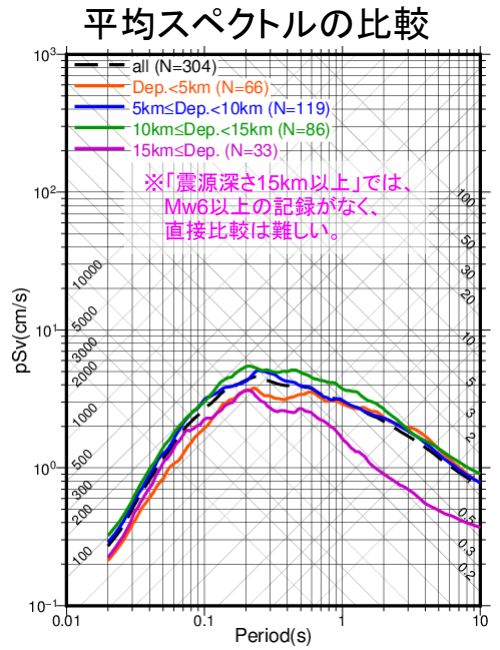
＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

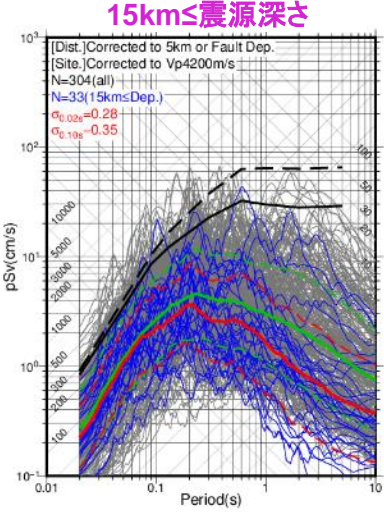
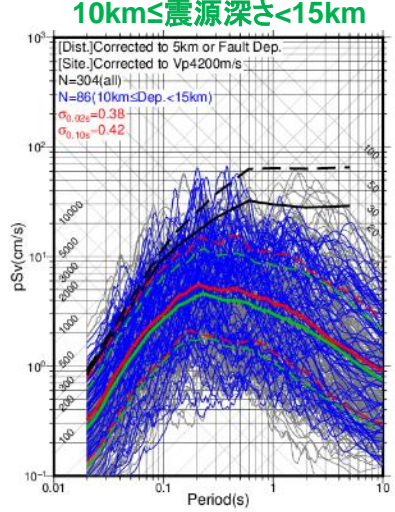
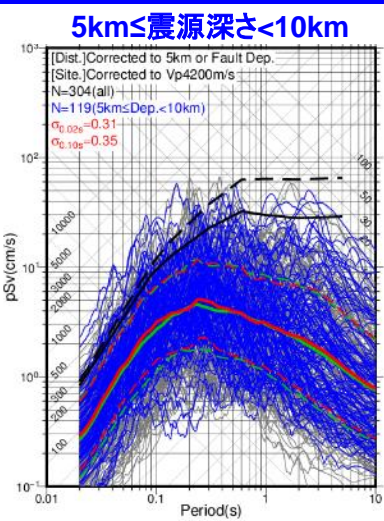
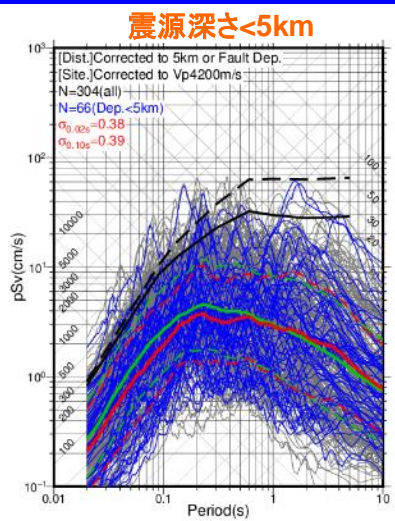
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (7/36)

② 震源深さ: 上下動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。



各図で共通(同じ)の凡例

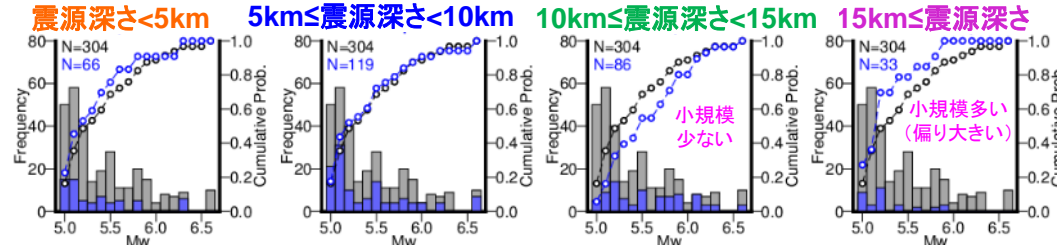
- 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
- 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: UD
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: UD
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (8/36)

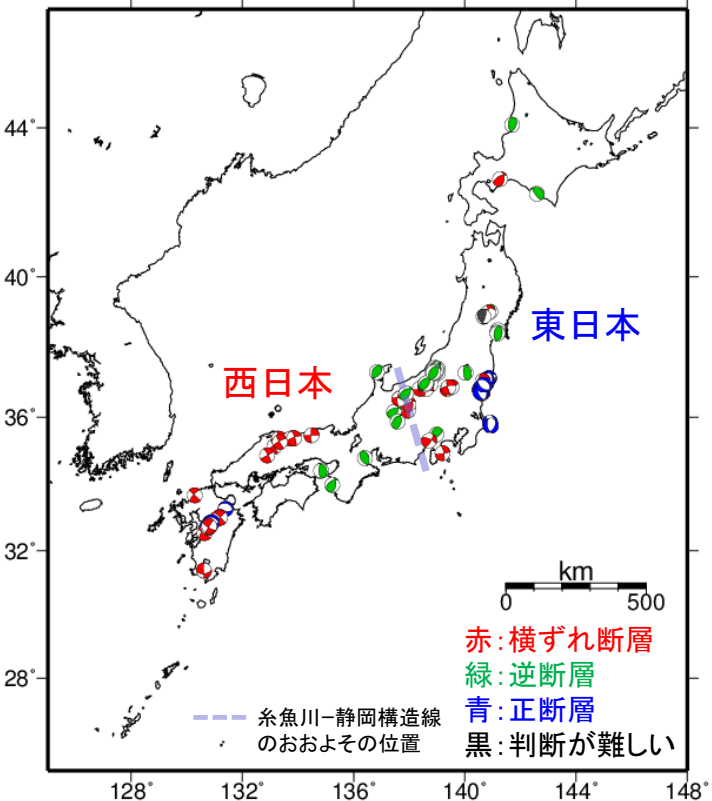
「③地震発生地域」と「④断層タイプ」のラベル付けについて

<地震発生地域>

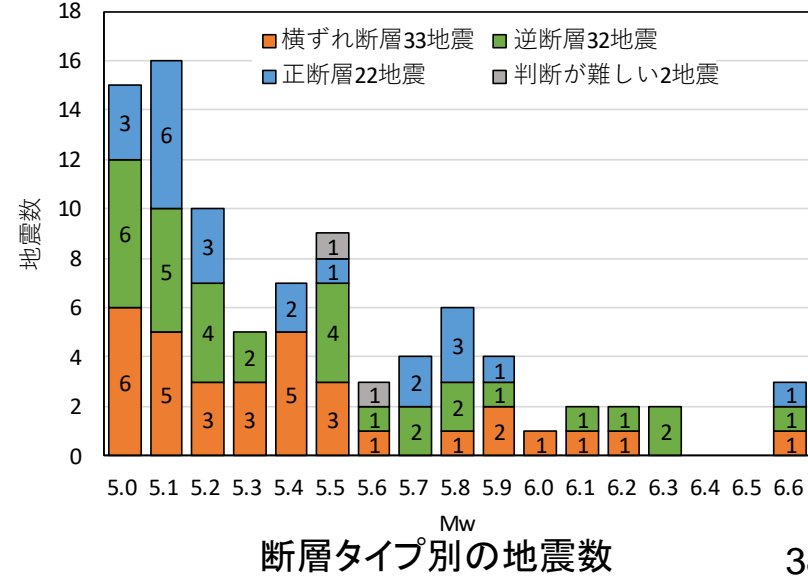
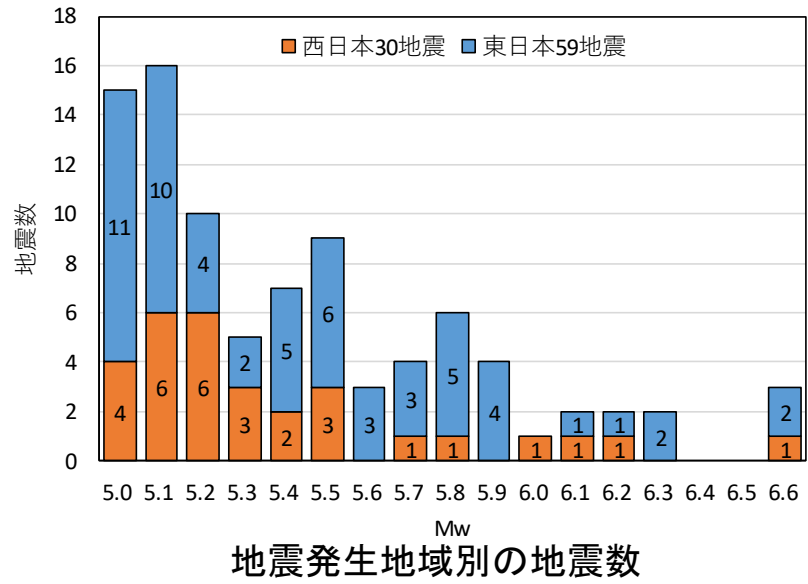
糸魚川-静岡構造線を境に西日本と東日本に分類した。
 ※構造線上の地震は、横ずれ断層の地震は西日本に、逆断層の地震は東日本に分類した。

<断層タイプ>

地震本部による評価及びF-netのメカニズム解を参考に、
 横ずれ断層、逆断層、正断層の3タイプに分類した。
 ※メカニズム解を参考とする場合は、すべり角(λ)を基準とし、横ずれは $\lambda=0^\circ$ または $180^\circ \pm 45^\circ$ 、
 逆断層は $\lambda=90^\circ \pm 45^\circ$ 、正断層は $\lambda=-90^\circ \pm 45^\circ$ とした。



※震央位置が重なっている地震があるため、詳細は次ページを参照。



6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (9/36)

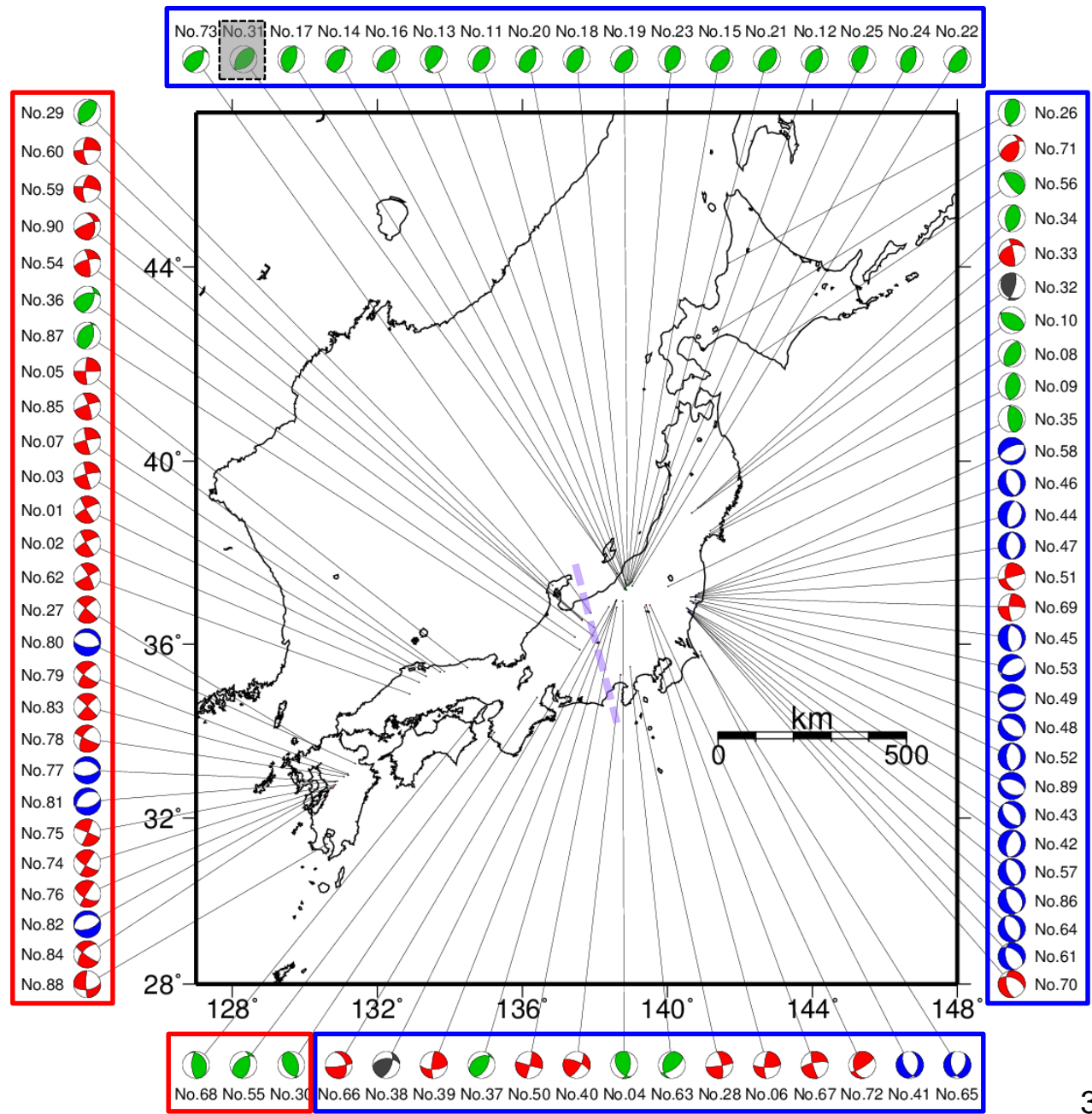
「③地震発生地域」と
「④断層タイプ」の
ラベル付けについて

右図にラベル付けした地震の震央位置及び震源メカニズム解を示す。
震源メカニズム解と地図を結ぶ線の先が地震の震央位置に対応する。

<地震発生地域>
西日本と東日本に分類した結果を以下のとおり色枠で示す。
赤枠内: 西日本(30地震)
青枠内: 東日本(59地震※)
※薄紫の破線は糸魚川-静岡構造線の概略位置である。

<断層タイプ>
震源メカニズム解(ビーチボール)を以下のとおり色分けした。
赤色: 横ずれ断層(33地震)
緑色: 逆断層(32地震※)
青色: 正断層(22地震)
青色: 判断が難しい(2地震)

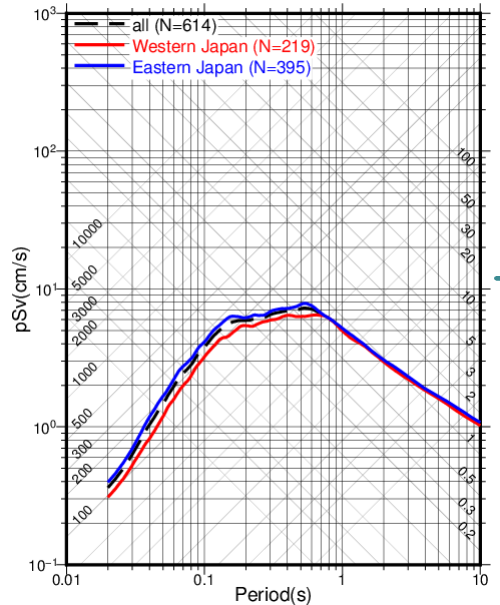
※収集した1記録の観測点のPS検層結果がないため解析に使用しないこととした2007年新潟県中越沖地震(地震No.31)を除いた地震数である。



6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (10/36)

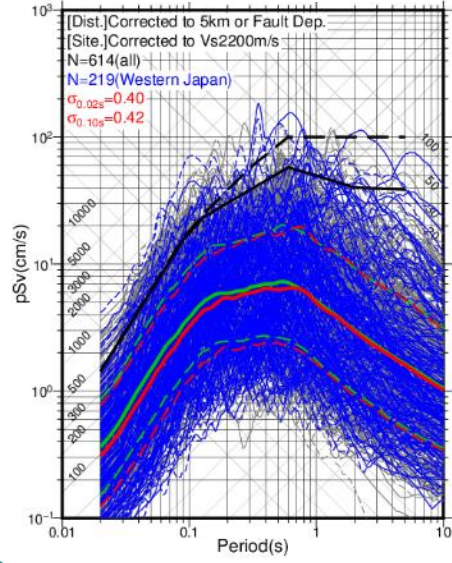
③ 地震活動地域: 水平動

平均スペクトルの比較

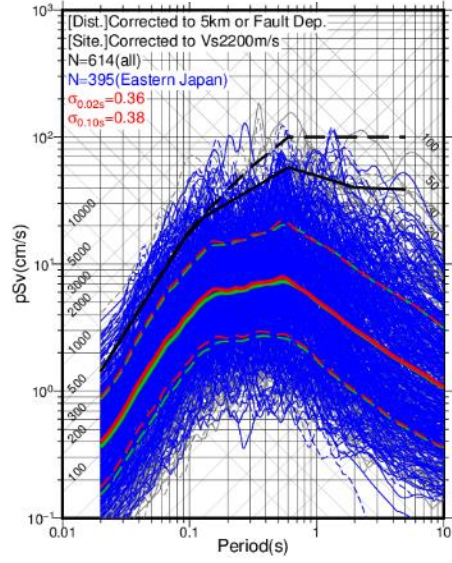


黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

西日本



東日本



各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>

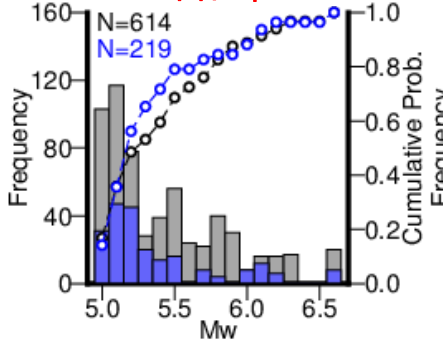
<グループ分けによる特徴分析>

西日本と東日本ではほぼ同等の地震動レベルである。
 (周期0.6秒程度以下では東日本の方が若干大きい。)

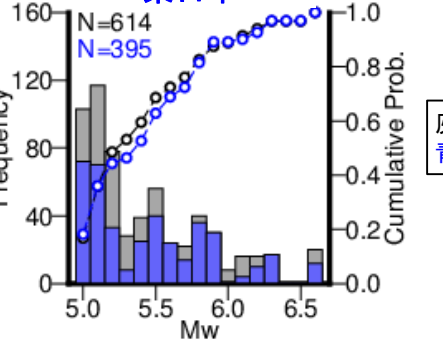
<データセット(データ数)に係る確認>

データセット(データ数)には極端又は非現実的な偏りは生じていない。

西日本



東日本

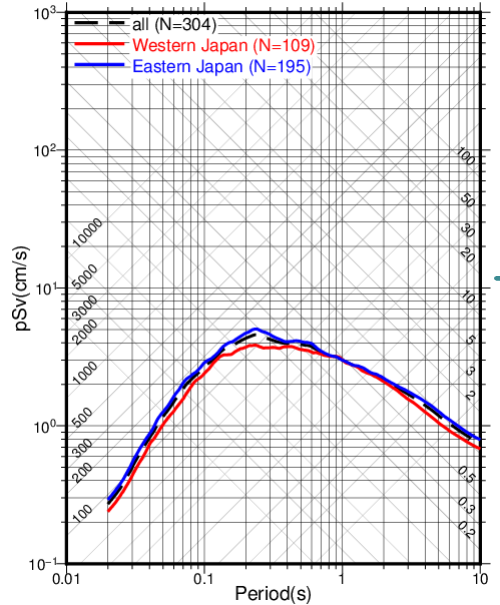


灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

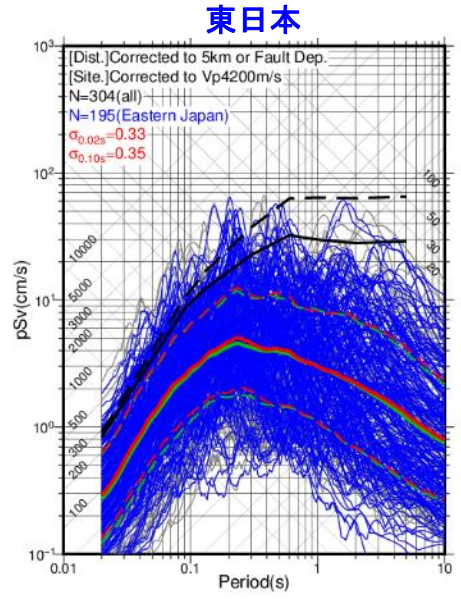
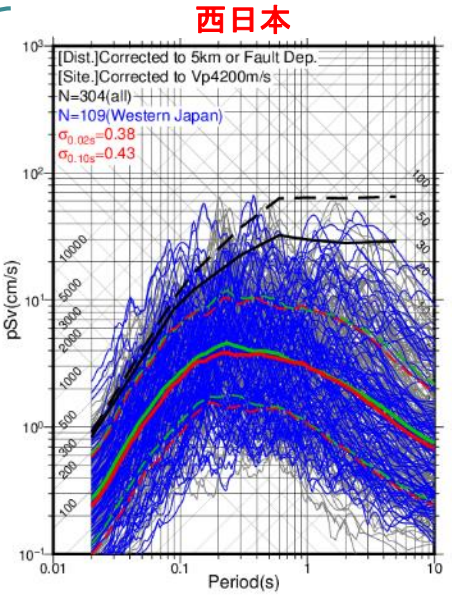
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (11/36)

③ 地震活動地域: 上下動

平均スペクトルの比較



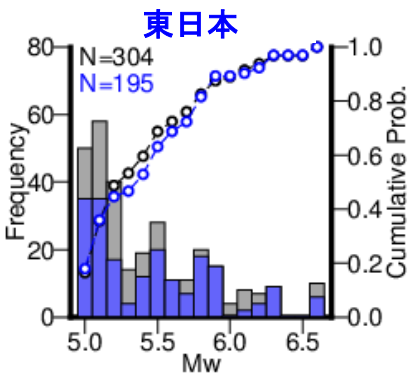
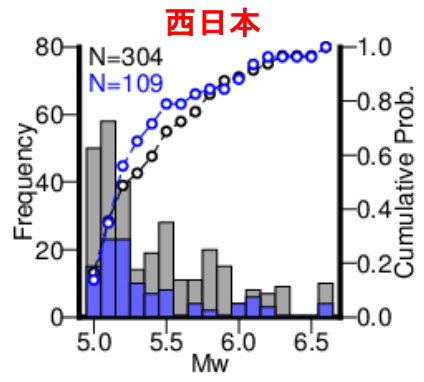
黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)



各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>

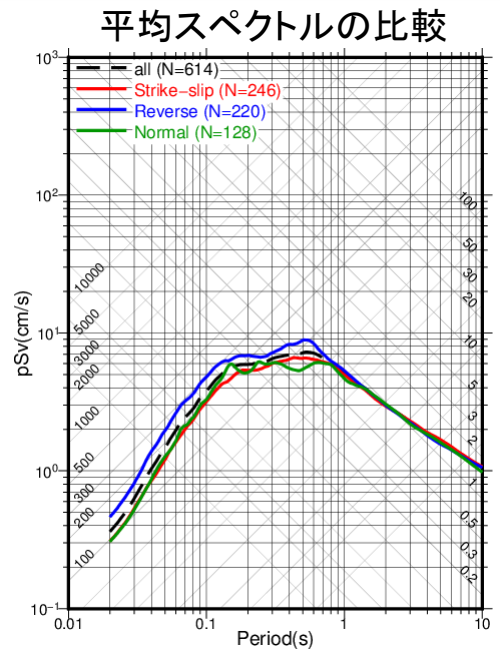


灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

水平動と同様の傾向である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (12/36)

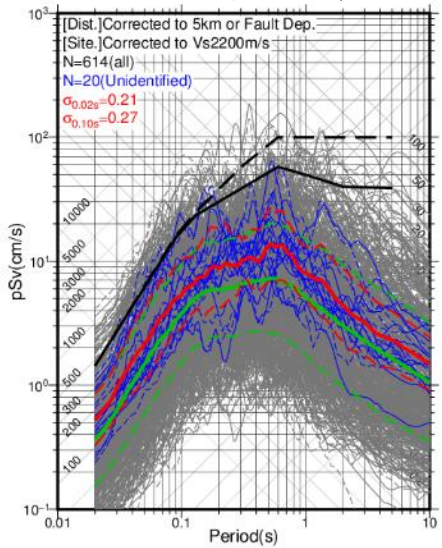
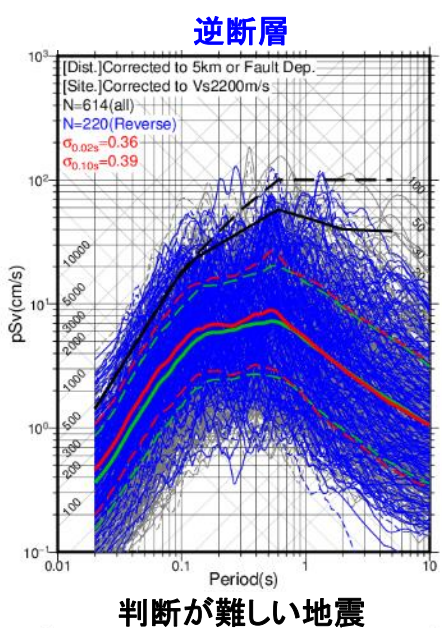
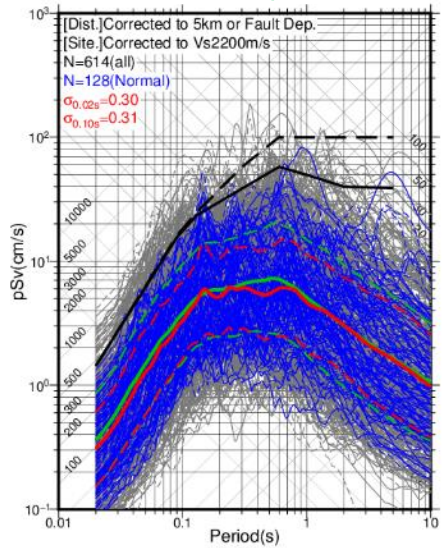
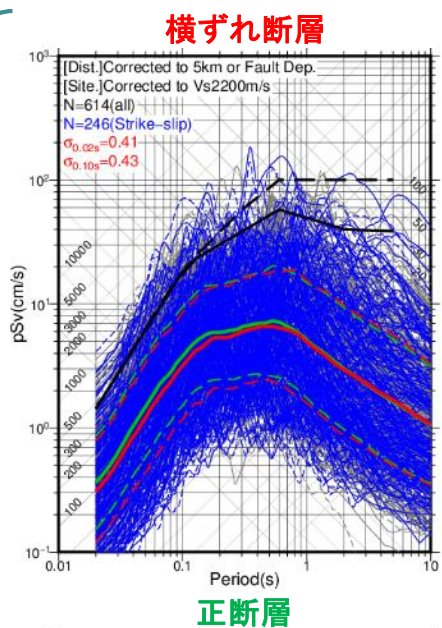
④ 断層タイプ: 水平動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)
 ※判断が難しい地震は除く

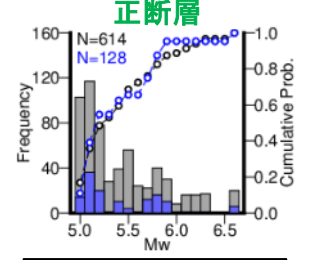
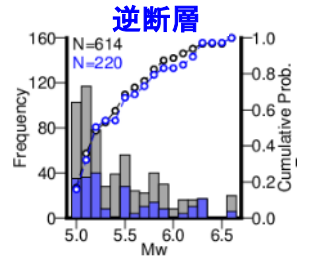
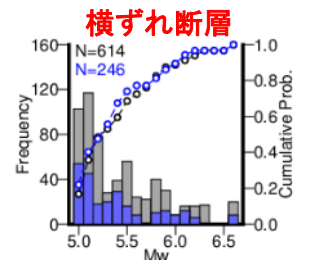
<グループ分けによる特徴分析>
 平均スペクトルのレベルは、周期0.6秒程度よりも長周期側ではほぼ同等であるが、それよりも短周期側では逆断層がやや大きい傾向がある(既往研究でも逆断層地震の短周期の地震動が大きいという知見がある)。

<データセット(データ数)に係る確認>
 データ数は、横ずれ断層と逆断層は同等であり、正断層では少ない傾向があり、極端又は非現実的な偏りは生じていない。



各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

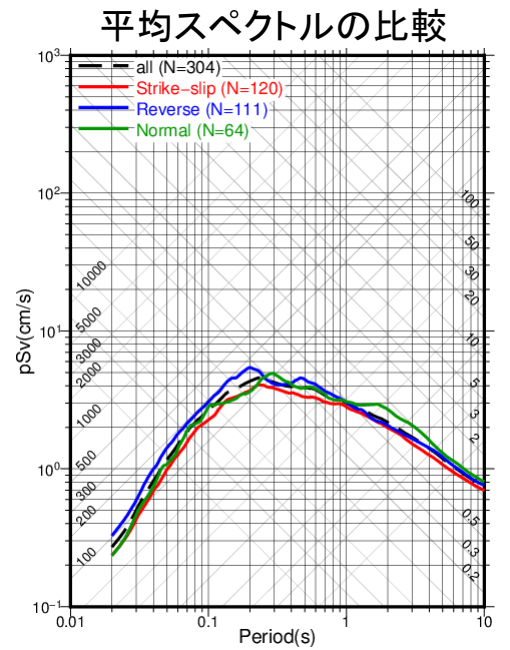


※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

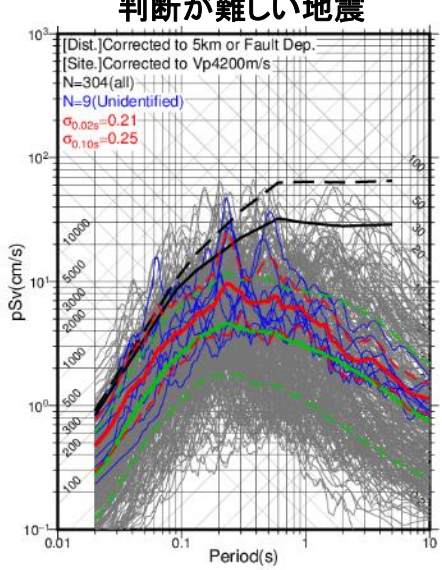
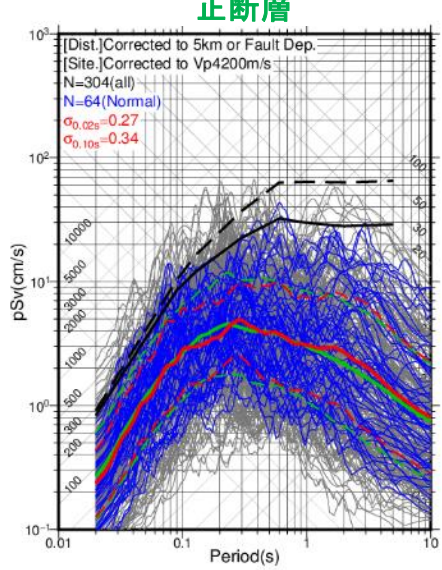
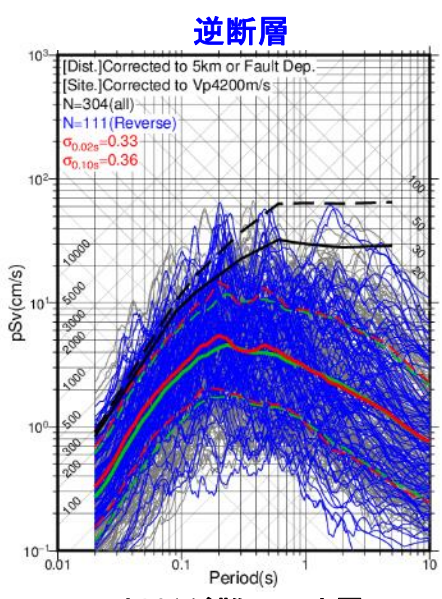
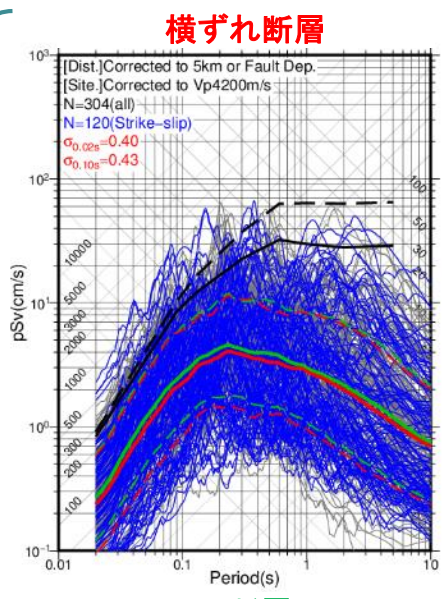
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (13/36)

④ 断層タイプ: 上下動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)
 ※判断が難しい地震は除く

水平動と同様の傾向である。

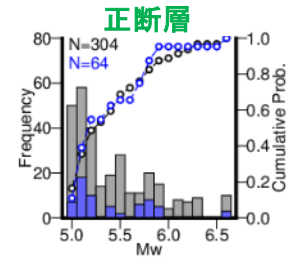
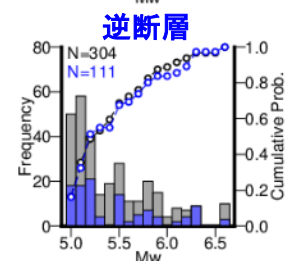
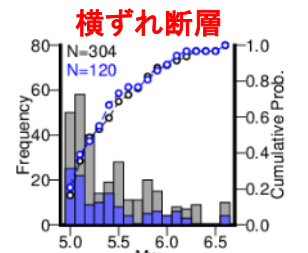


各図で共通(同じ)の凡例

黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ



※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (14/36)

「⑤地震活動タイプ」のラベル付けについて

地震本部による公開情報(「主な地震活動」の評価結果など)をもとに、対象地震を本震、前震、余震の3つの地震活動タイプに分類した。

【本震】:45地震

本震にはM5クラスの単発で発生した地震も含めた。

【前震】:3地震

前震に分類された地震は以下の3地震のみであった。

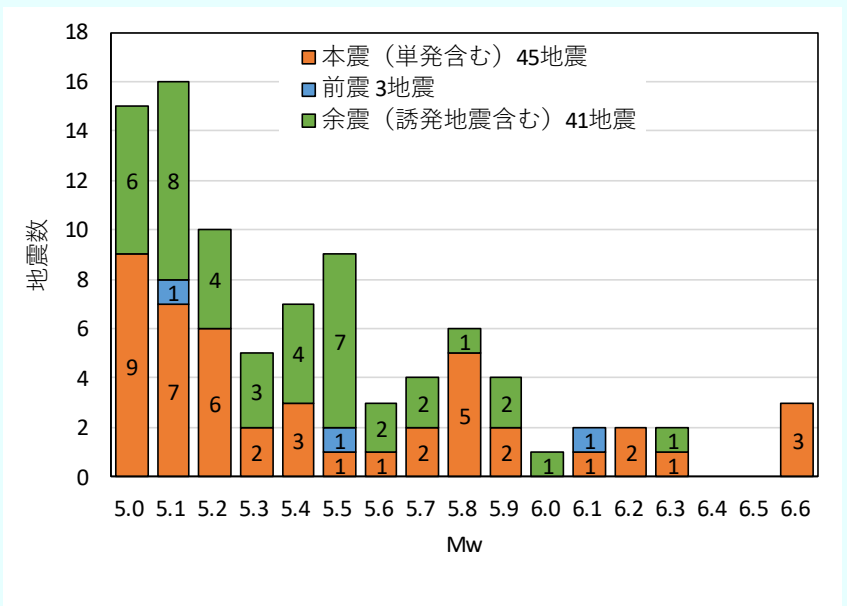
なお、前震の余震は「余震」に分類した。

- ・2003年7月26日宮城県北部地震の前震
- ・2011年3月19日茨城県北部地震の前震
- ・2016年熊本地震の最大前震

【余震】:41地震

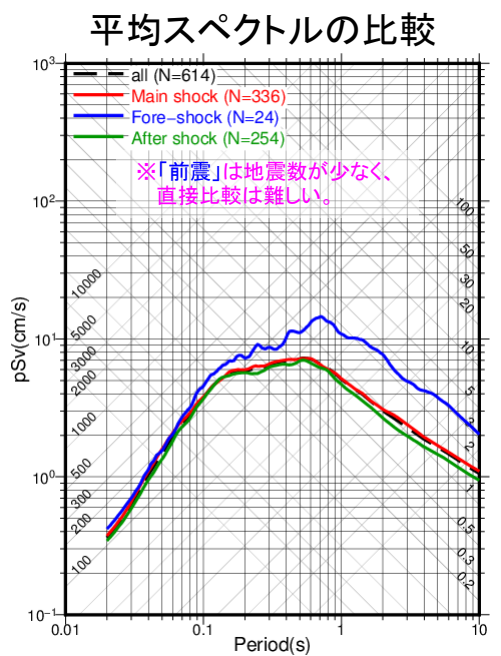
誘発的な地震も余震として分類した。対象地震に多く含まれる地震として以下の3つの地震系列があげられる。

- ・2004年新潟県中越地震系列:14地震
- ・2011年浜通りの地震系列:7地震
- ・2016年熊本地震系列:10地震



6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (15/36)

⑤ 地震活動タイプ: 水平動

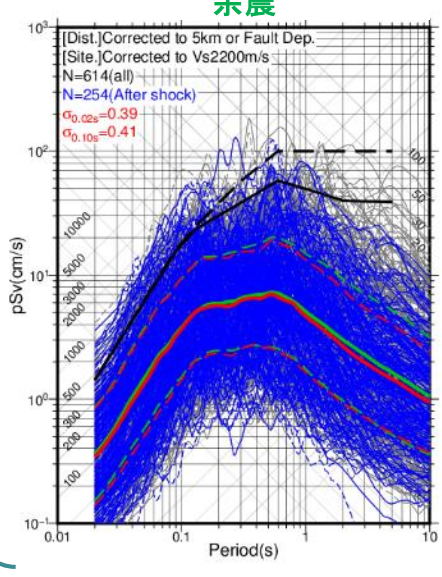
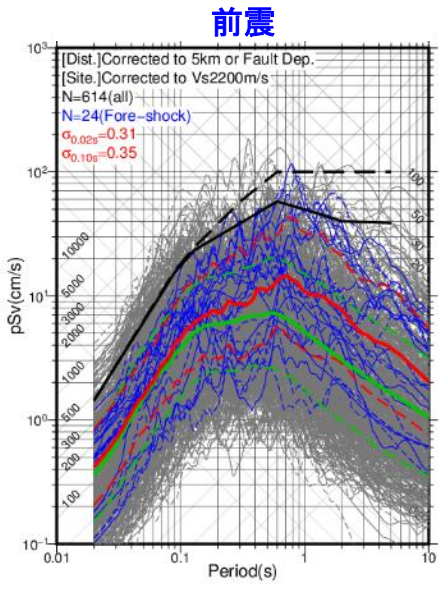
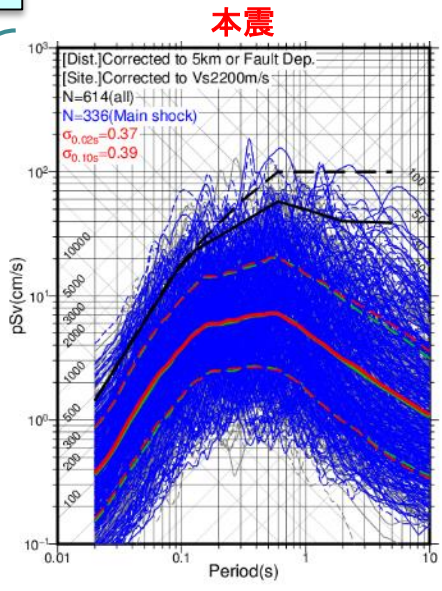


黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

＜グループ分けによる特徴分析＞

平均スペクトル及びばらつきは、本震と余震ではほぼ同等のレベルである(前震はデータ数が顕著に低いので比較対象から除外)。

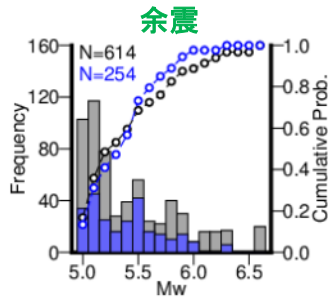
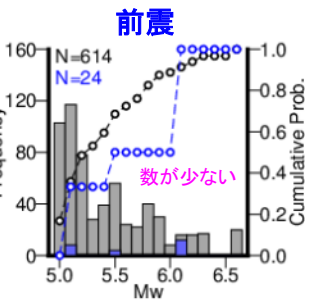
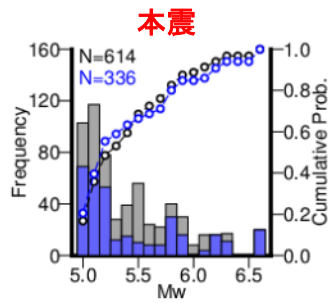
統計処理上のデータ数を確保するために、本震以外の余震と前震の記録もすべて1つのデータセットとして扱うこととする。



各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞

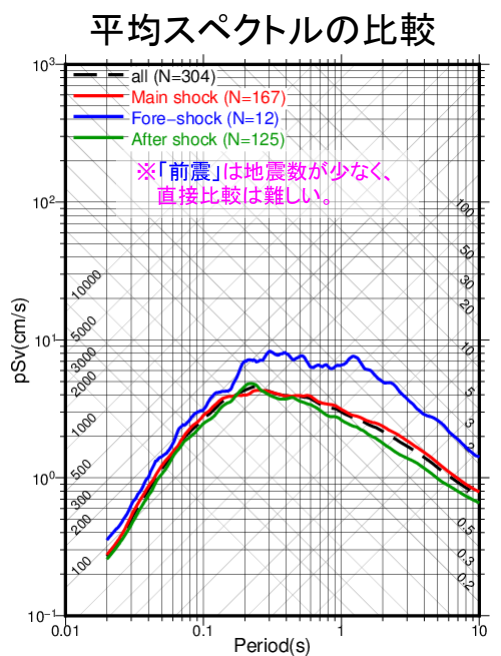


灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

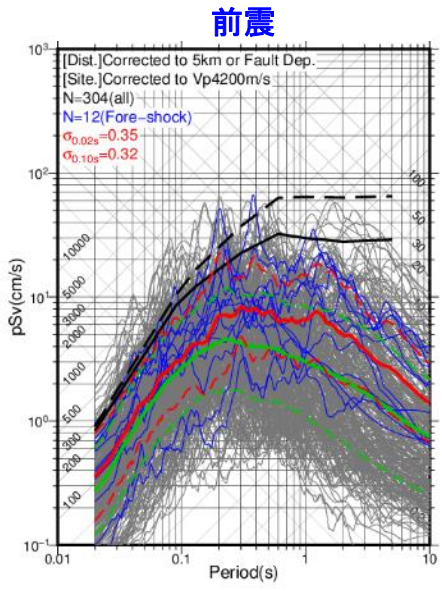
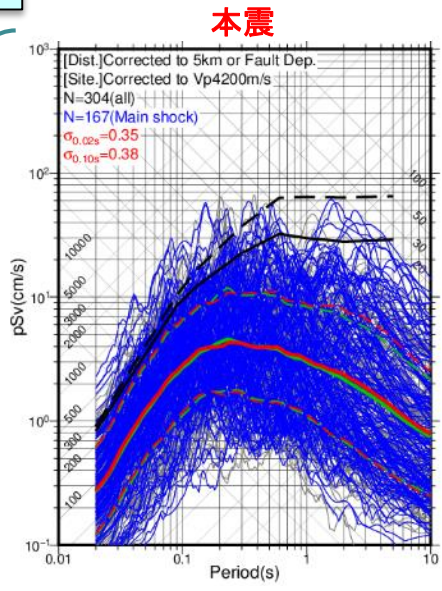
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (16/36)

⑤ 地震活動タイプ: 上下動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。

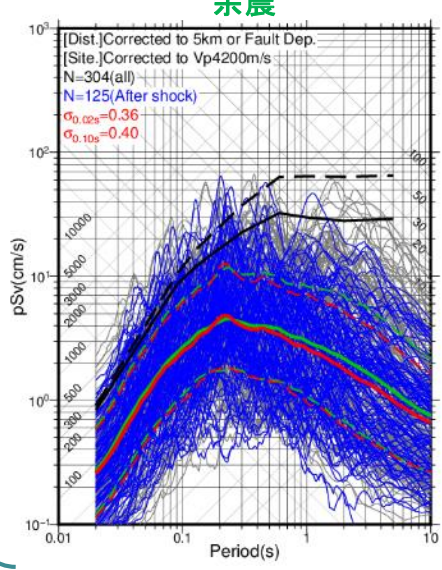


各図で共通 (同じ) の凡例

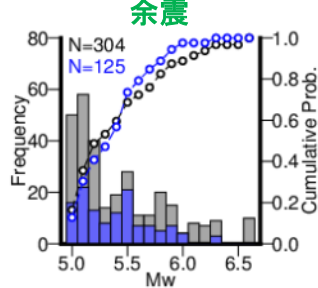
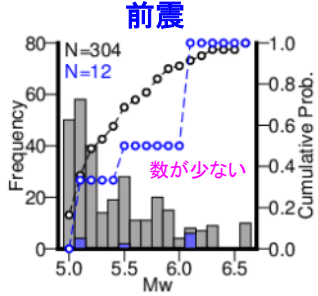
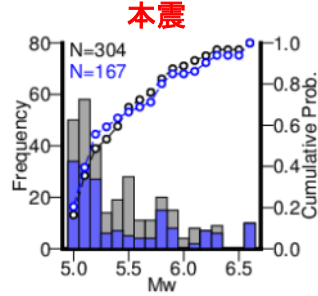
- 黒色: 加藤スペクトル (上下動)
- 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
- 灰色: はぎとり波 (全記録)
- 実線: UD
- 緑色: 統計処理 (全記録)
- 実線: はぎとり波 (灰色) の平均
- 破線: はぎとり波 (灰色) の平均 $\pm\sigma$

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波 (グループ毎)
- 実線: UD
- 赤色: 統計処理 (グループ毎)
- 実線: はぎとり波 (青色) の平均
- 破線: はぎとり波 (青色) の平均 $\pm\sigma$



<グループ毎の規模別データ数 (左軸) と累積相対頻度 (右軸) の確認>



灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル (h=5%) である。

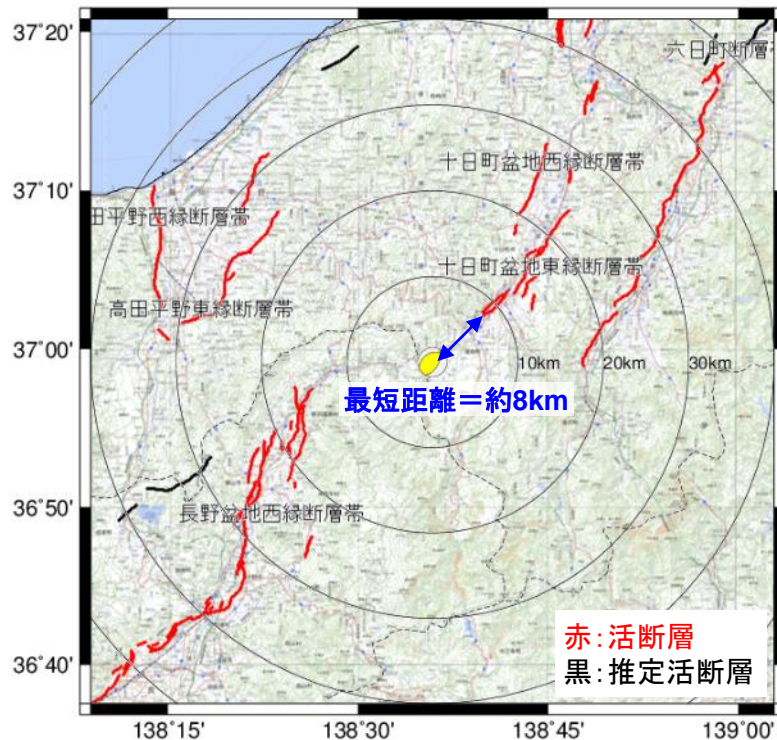
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (17/36)

「⑥震央と活断層の地表における最短距離」のラベル付けについて

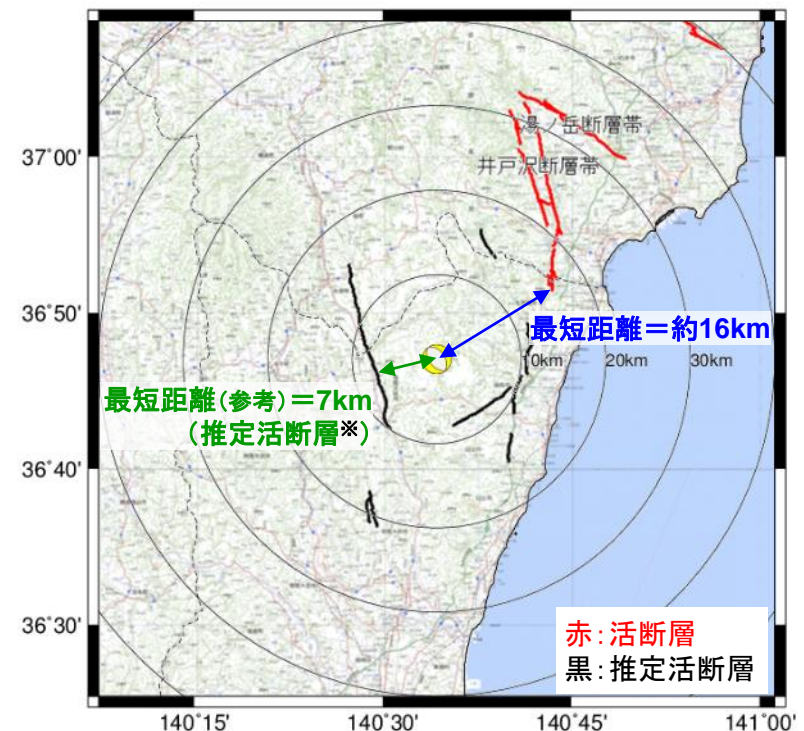
活断層詳細デジタルマップ(今泉ほか,2018)の地図上に震央位置を重ね描き、**震央から最も近い活断層までの距離を算出した。**

※活断層の傾斜や断層面の広がりなどを考慮せずに簡易に推定している。

◆2011年3月12日長野県北部の地震(Mw6.2)の例



◆2011年3月10日茨城県北部の地震(Mw5.8)の例



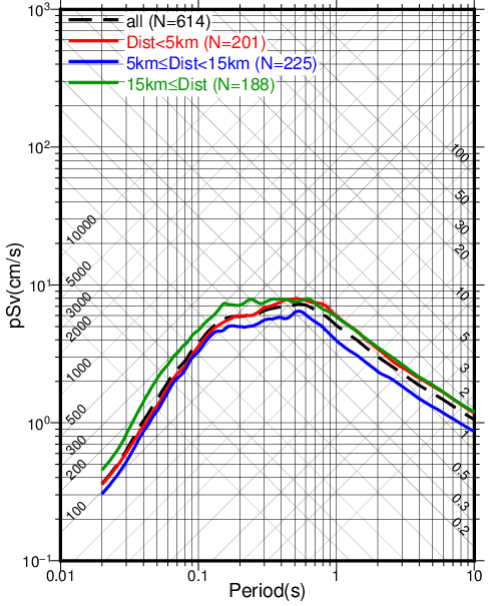
※「推定活断層」は、断層変位地形が最近数十万年前以降(特に後期更新世以降)に形成されたものかどうかの判定が「活断層」に比べて難しいものや、地形そのものが他の理由(要因)で形成された可能性があることを示す場合に用いた[活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)より抜粋]。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (18/36)

⑥ 震央と活断層の距離(活断層のみ): 水平動

※震央から最も近い活断層(推定活断層を除く)までの最短距離

平均スペクトルの比較



黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

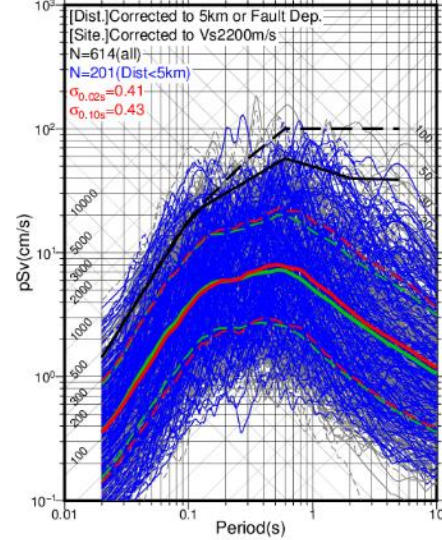
<グループ分けによる特徴分析>

周辺に活断層がない場合(距離15km以上)の平均スペクトルはやや大きくなるが、ばらつき(標準偏差)は小さくなる傾向がある。有意な差異であるかどうかについては、今回の簡易検討からは判断が難しい(推定活断層を含む場合には差異はさらに小さくなる)。

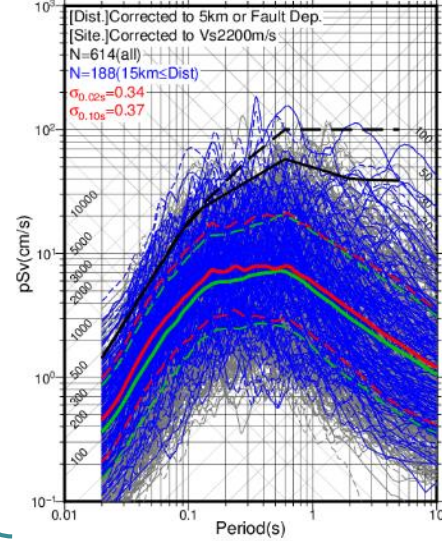
<データセット(データ数)に係る確認>

データセット(データ数)には極端又は非現実的な偏りは生じていない。

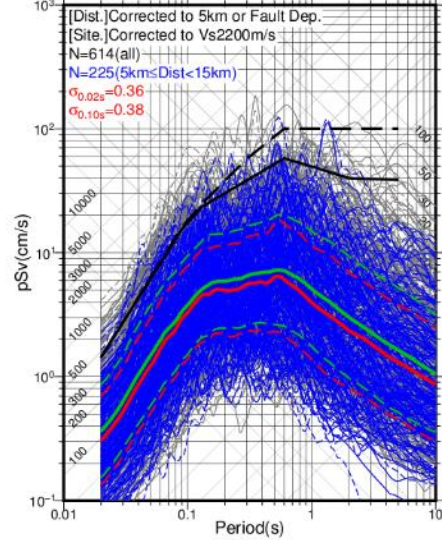
活断層からの距離<5km



15km<=活断層からの距離



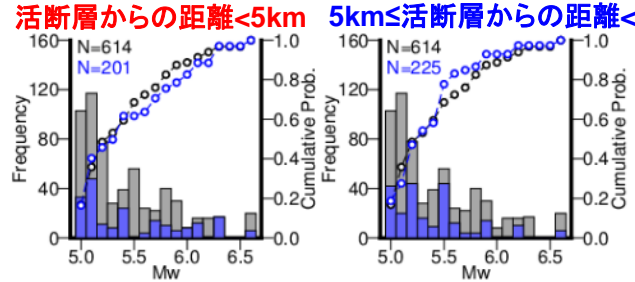
5km<=活断層からの距離<15km



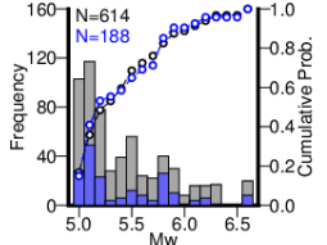
各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>



15km<活断層からの距離



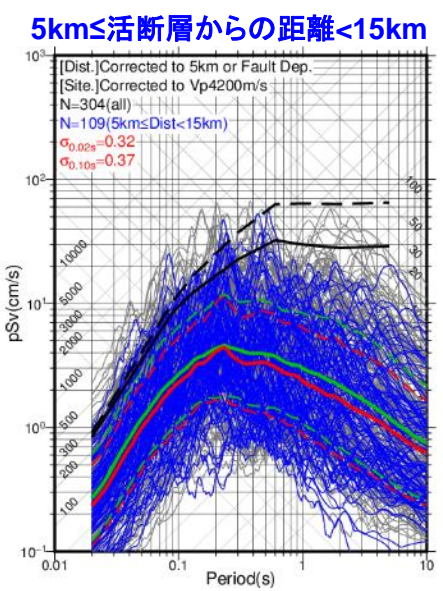
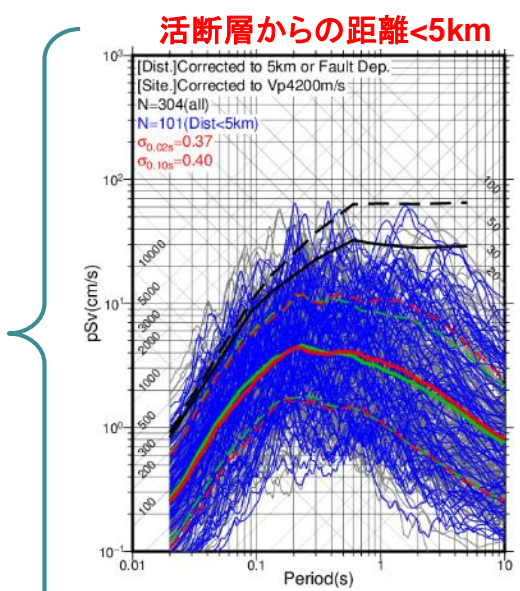
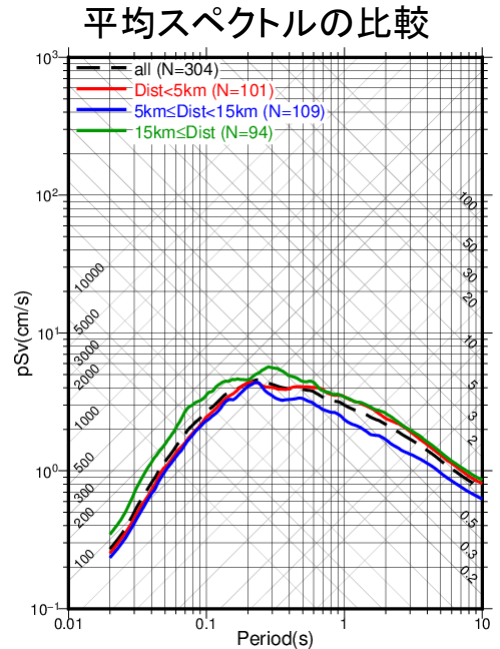
灰色: 全記録(各図で共通)
青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (19/36)

⑥ 震央と活断層の距離(活断層のみ): 上下動

※震央から最も近い活断層(推定活断層を除く)までの最短距離



各図で共通(同じ)の凡例

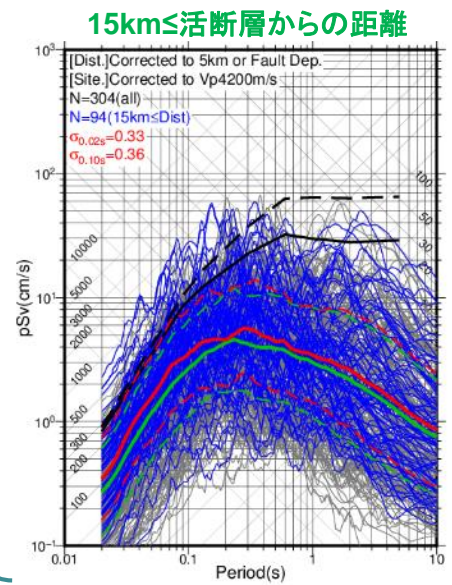
黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

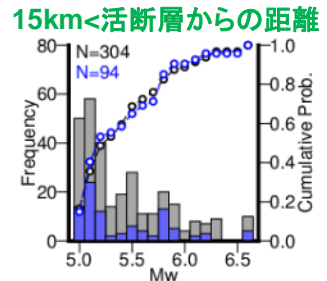
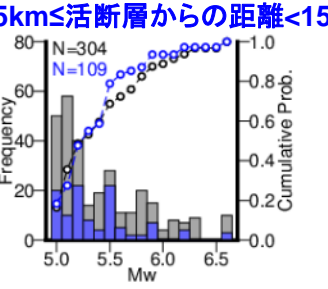
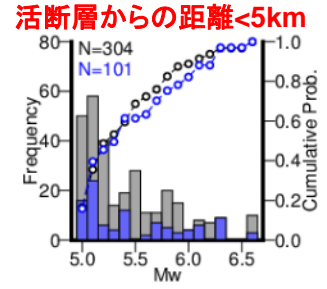
青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。



<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>



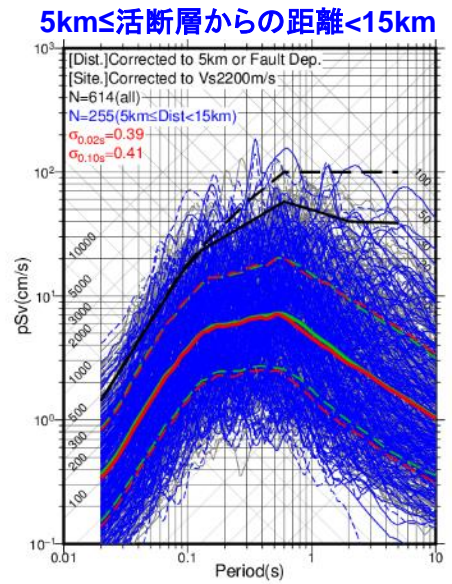
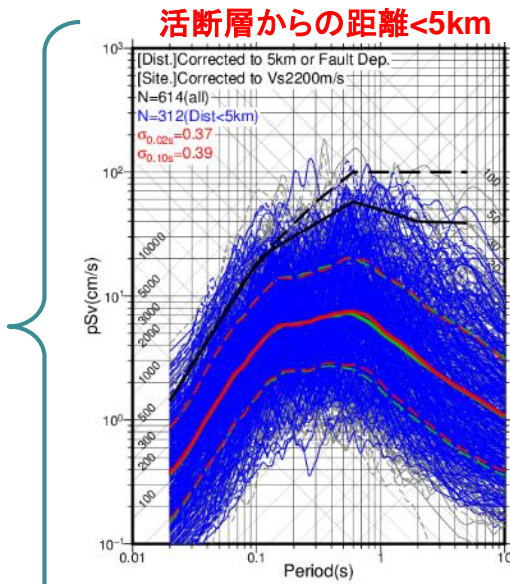
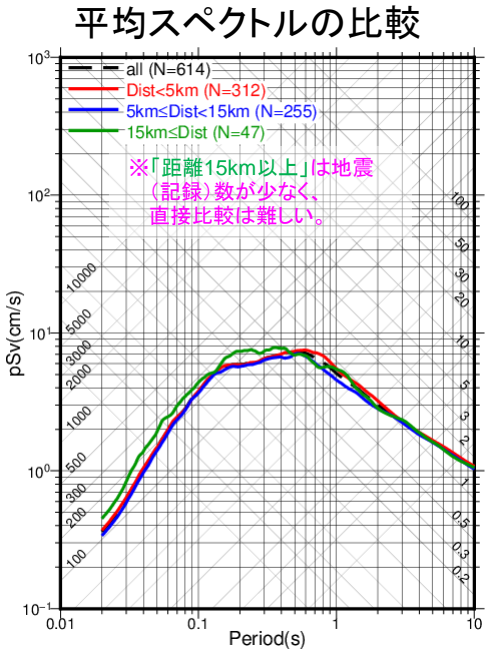
灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (20/36)

⑥ 震央と活断層の距離(活断層または推定活断層): 水平動

※震央から最も近い活断層または推定活断層までの最短距離



各図で共通(同じ)の凡例

黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

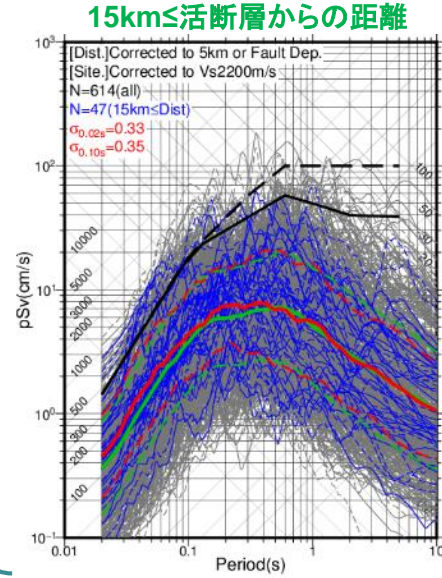
黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

＜グループ分けによる特徴分析＞

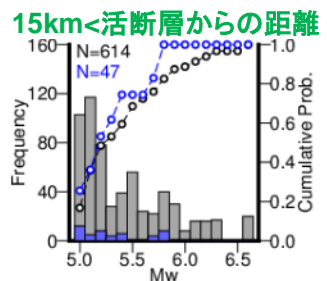
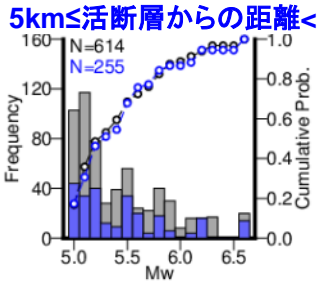
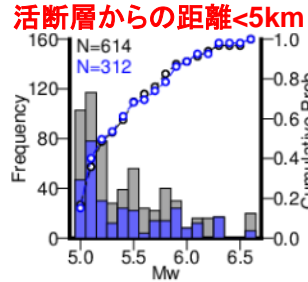
活断層または推定活断層からの距離とした場合には、地震動レベルはほぼ同等となる。

＜データセット(データ数)に係る確認＞

データセット(データ数)には極端又は非現実的な偏りは生じていない。



＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



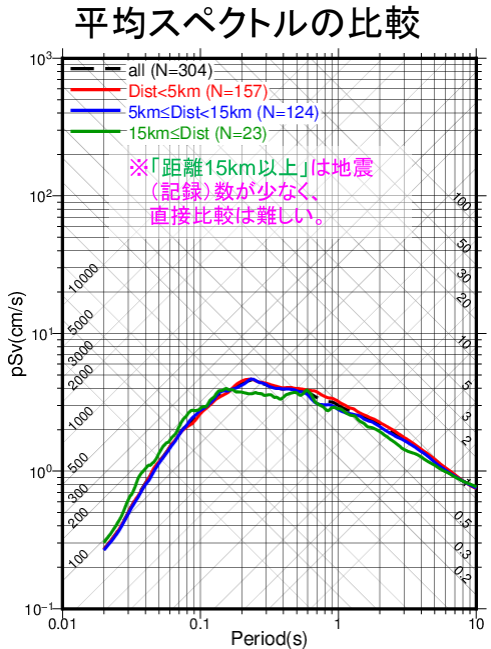
灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (21/36)

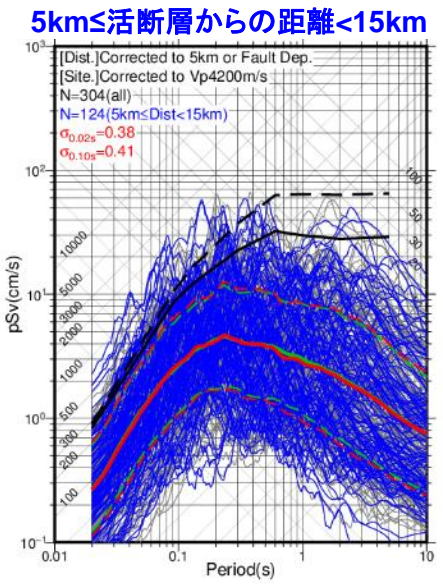
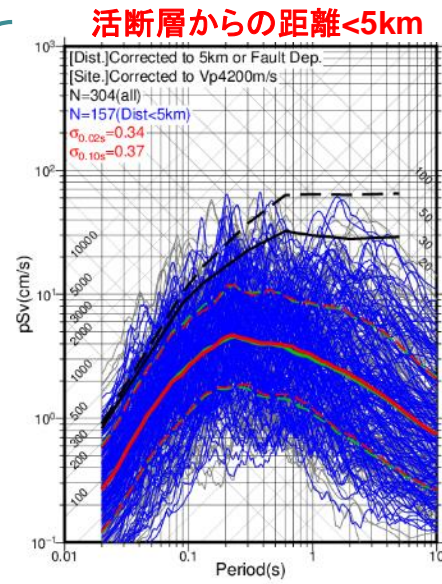
⑥ 震央と活断層の距離(活断層または推定活断層): 上下動

※震央から最も近い活断層または推定活断層までの最短距離



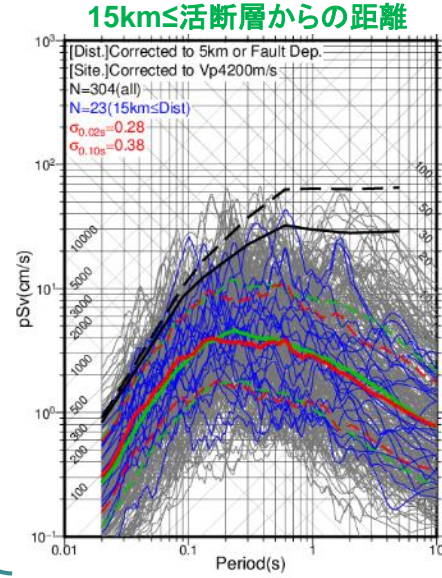
黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。

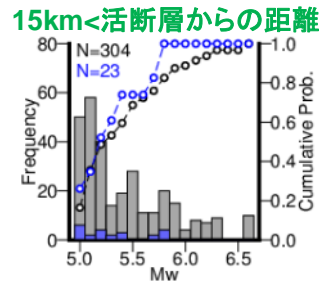
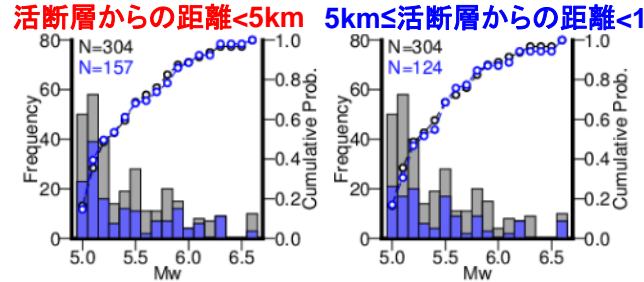


各図で共通(同じ)の凡例
 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ



<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>

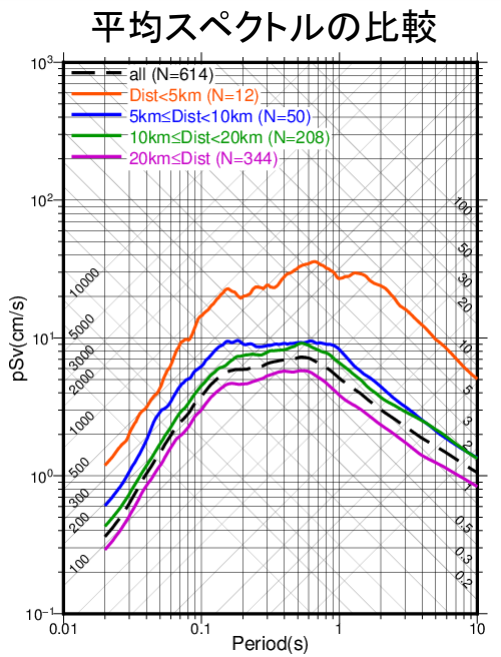


灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (22/36)

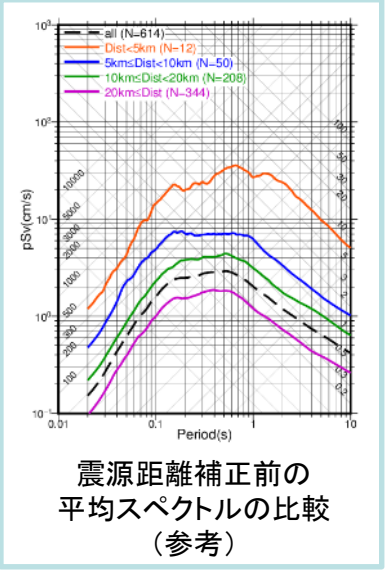
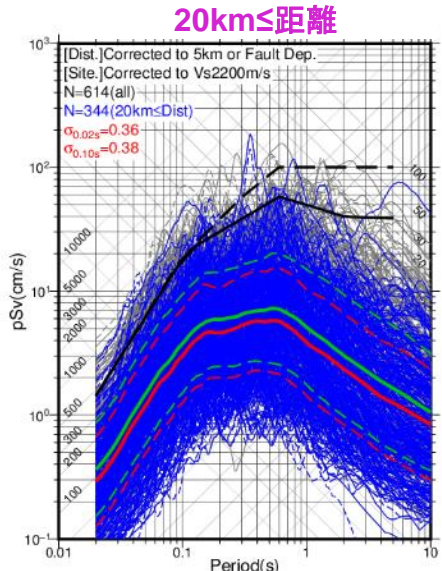
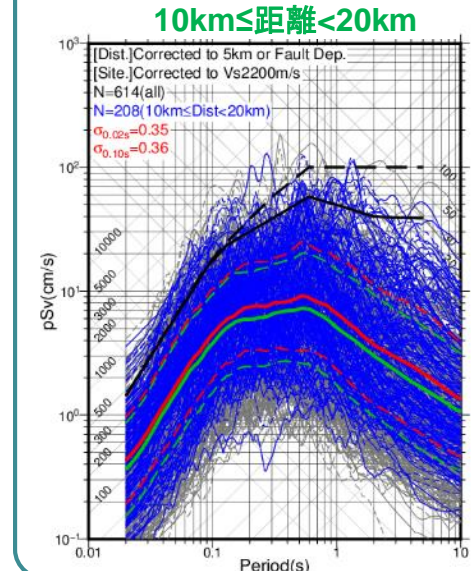
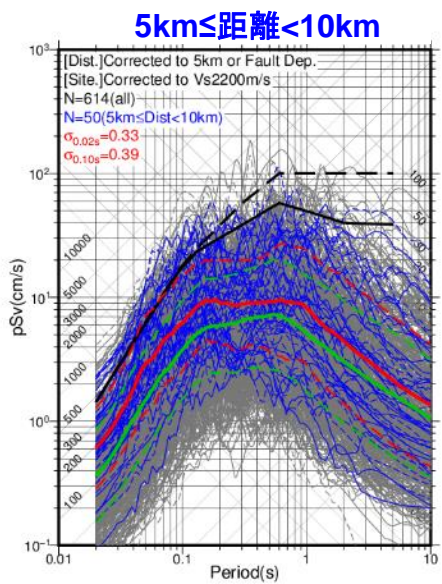
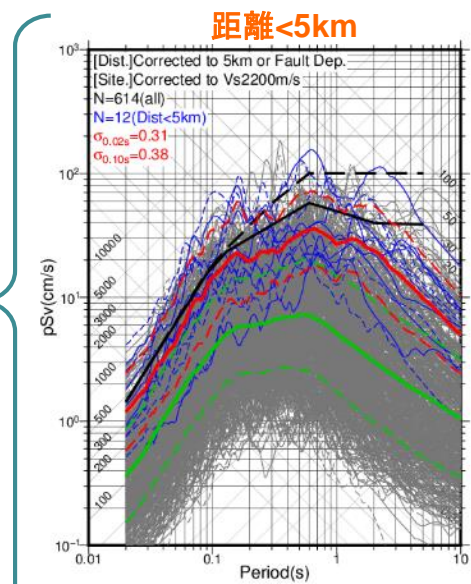
⑦ 補正前の震源(面または点)と観測点の最短距離: 水平動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>
 震源距離補正を施した距離5km以遠では平均スペクトルのレベルの差異が小さくなっている。
 ただし、距離が近くなるほど平均スペクトルが大きくなる傾向がみられる。

この差異の要因について、分析を行った(次ページ)。



各図で共通(同じ)の凡例

- 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
- 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: NS, 破線: EW
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: NS, 破線: EW
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

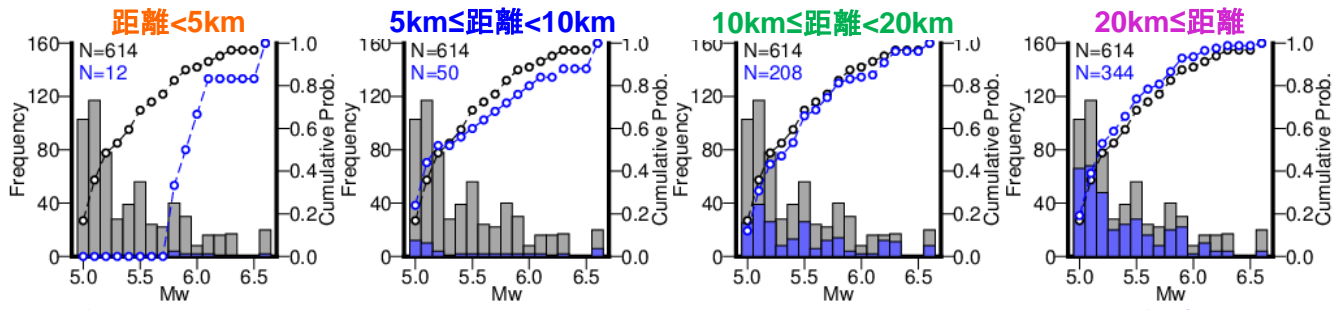
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (23/36)

震源距離補正の後にも距離毎の地震動レベルに差異が生じることの要因

震源距離補正を施した後も、補正前の最短距離が遠い記録の地震動レベルが小さくなる要因には、グループ毎の地震規模(断層面積)の差異が関係していると考えられる。

- 断層最短距離が近い記録はMwが大きい地震の記録が相対的に多く含まれる。
- 断層最短距離が遠い記録はMwが小さい地震の記録が相対的に多く含まれる。

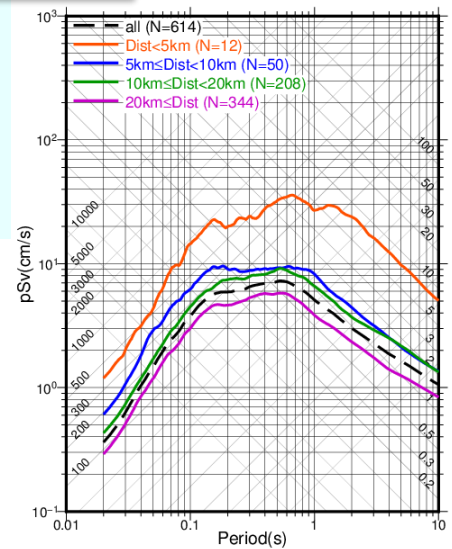
＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



距離近い
規模大きい

灰色: 全記録(各図で共通)
青色: グループ毎

距離遠い
規模小さい



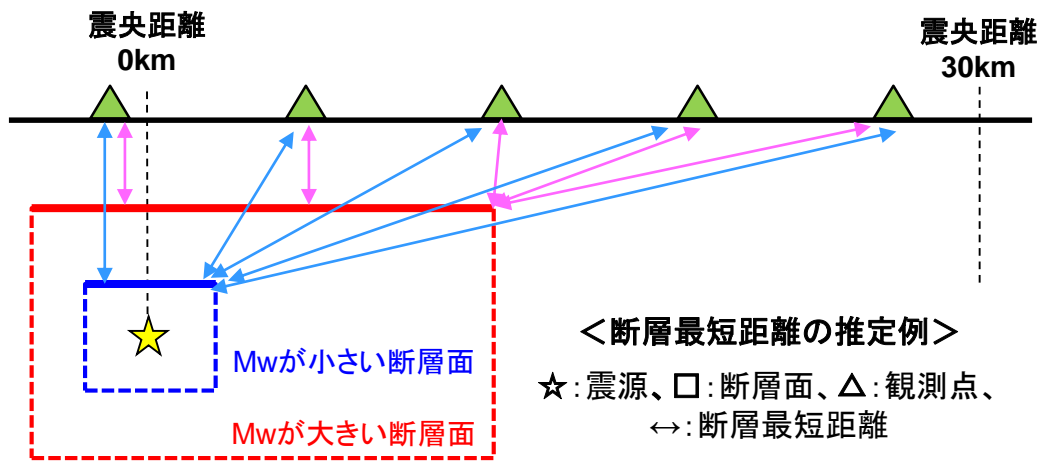
黒色破線: 全記録の平均スペクトル
色付実線: グループ毎の平均スペクトル

平均スペクトルの比較(再掲)

＜データセット(データ数)・補正処理に係る確認＞

地震規模(Mw)が大きい地震は断層面が大きくなるため、断層最短距離が近い記録が増えることが考えられる(右図)。
Mwが大きい記録の方が地震動が大きい傾向があるため、距離補正を施しても距離ごとのスペクトルに差異が生じていると考えられる。

地震動レベルの差異は震源距離補正の不具合ではなく、現実的な傾向であると考えられる。

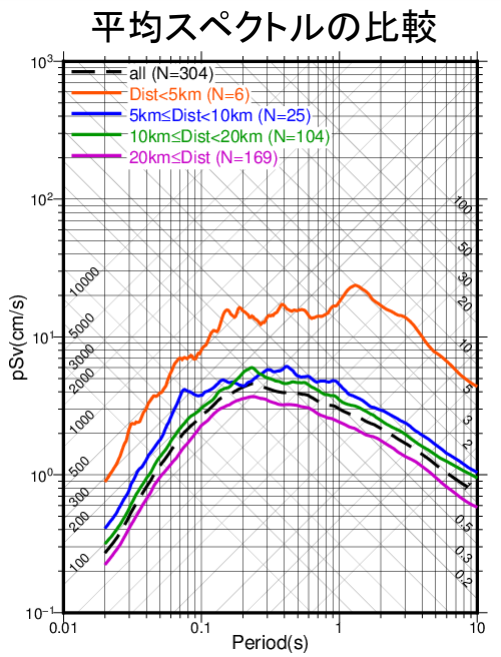


＜断層最短距離の推定例＞

☆: 震源、□: 断層面、△: 観測点、
↔: 断層最短距離

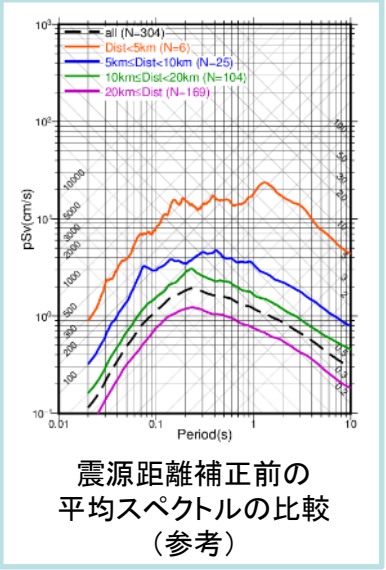
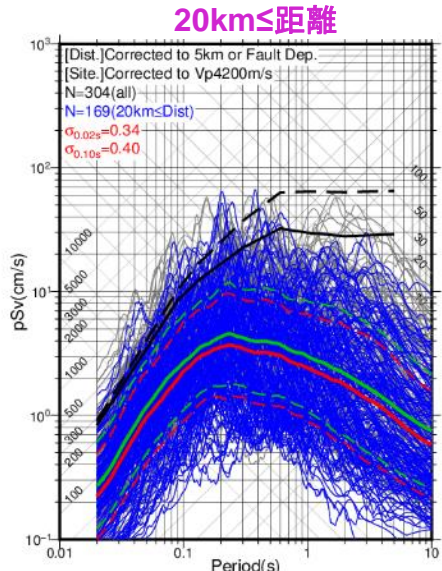
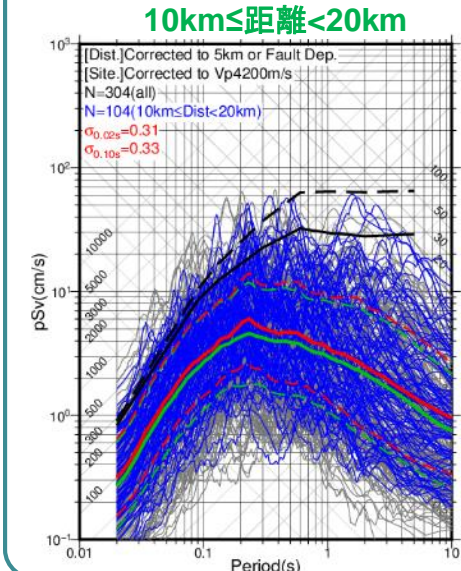
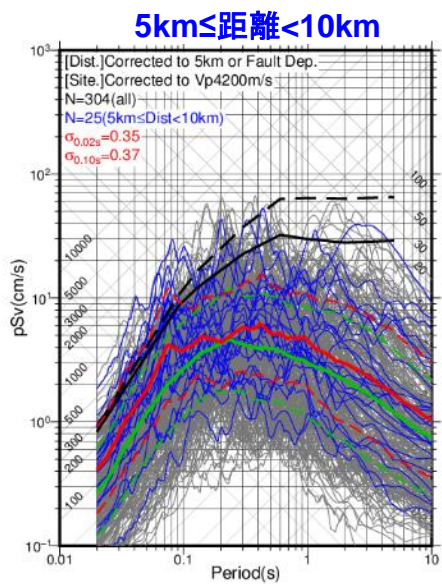
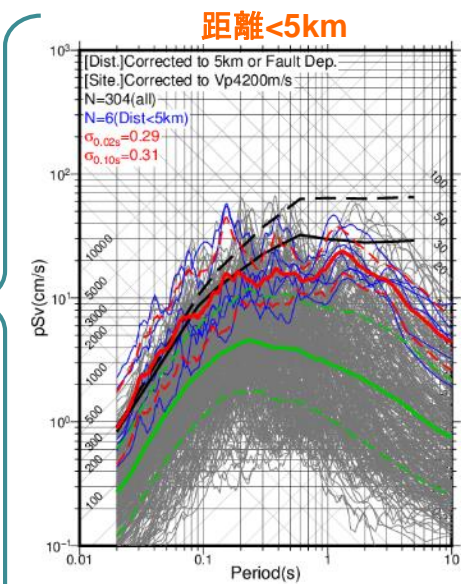
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (24/36)

⑦ 補正前の震源(面または点)と観測点の最短距離: 上下動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。



各図で共通(同じ)の凡例

- 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
- 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: UD
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

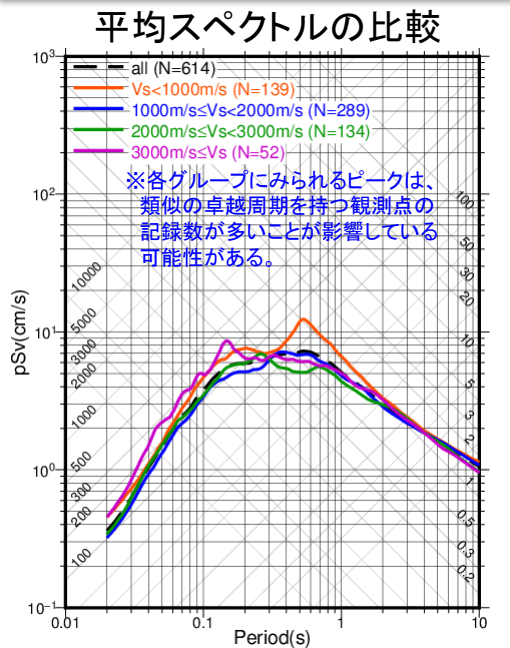
各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: UD
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (25/36)

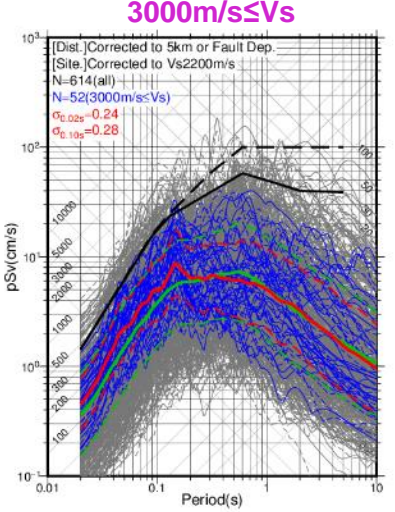
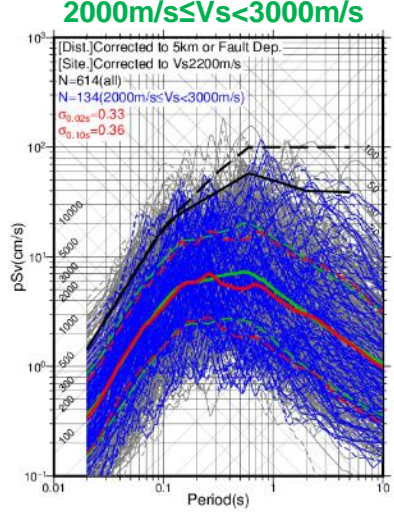
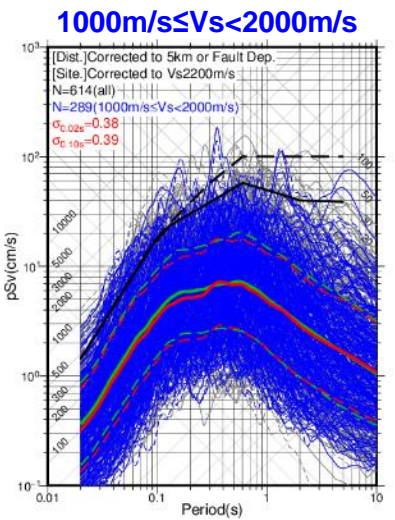
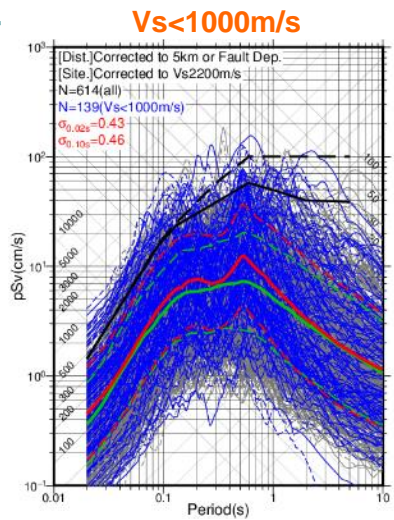
⑧ 地中地震計位置の地盤のVs: 水平動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

＜グループ分けによる特徴分析＞
 地盤物性補正後の平均スペクトルのレベルには大きな差異はなく、平均レベルに対する地盤物性補正は問題なく施されていると考えられる。

＜データセット(データ数)・補正処理に係る確認＞
 データセット(データ数)及び補正処理結果には、極端又は非現実的な偏りや影響は生じていない(ただし、右に記す特徴に留意)。



各図で共通(同じ)の凡例

黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

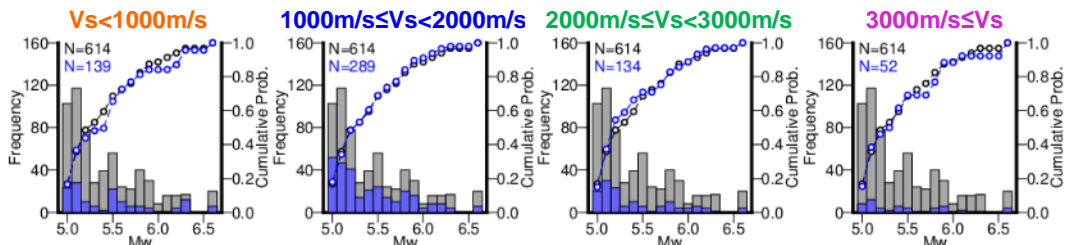
青色: はぎとり波(グループ毎)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(グループ毎)
 実線: はぎとり波(青色)の平均
 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

＜地震動の特徴＞
 ① Vs=1000m/s未満とVs=2000~3000m/s(地震基盤相当に近い地盤)を比較すると、Vsが速い場合の標準偏差が小さくなる傾向がある。
 ② Vs=3000m/s以上では加藤スペクトルを上回る記録はほとんどない。

最終的な統計処理に用いる地震動のデータセットに、地震基盤相当よりも遅いVsの地盤の記録を含めることは、ばらつき(標準偏差)を過大評価していることになると思われる。

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

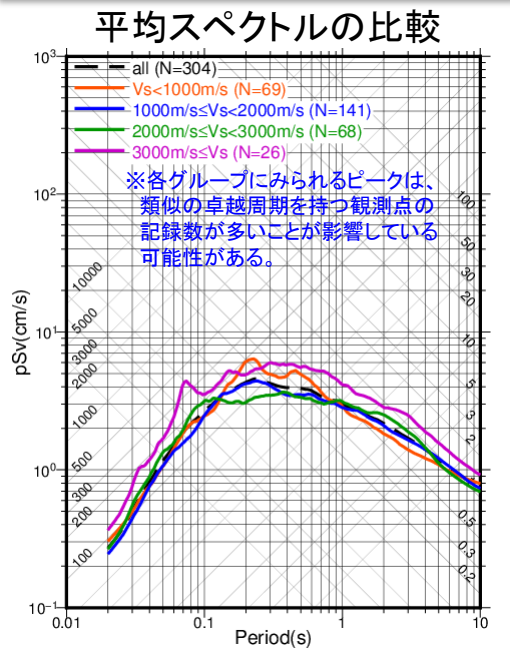
＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (26/36)

⑧ 地中地震計位置の地盤のVs* : 上下動

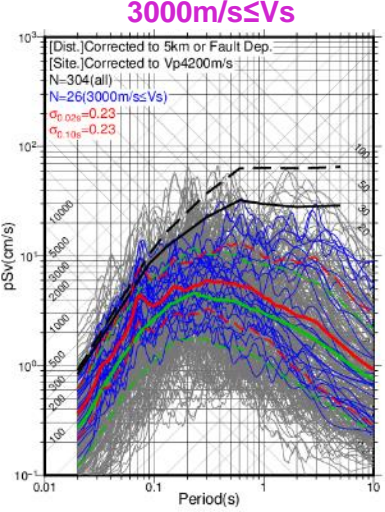
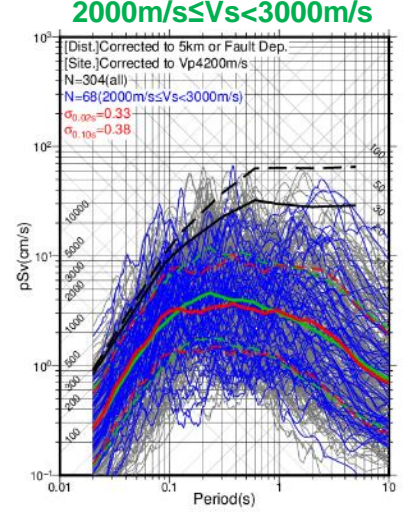
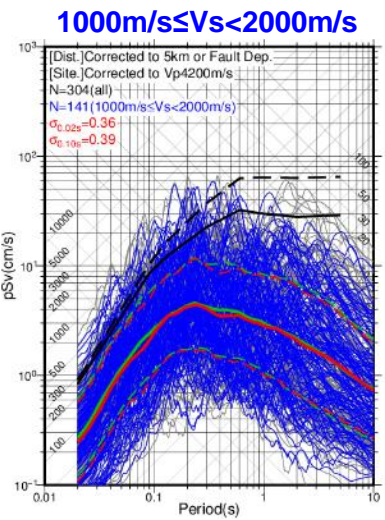
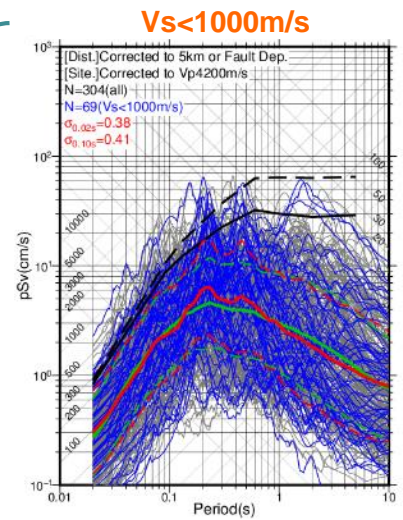


黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

* 上下動は地盤のP波速度 (Vp) の影響を受けると考えられるが、ここでは水平動との記録の対応を重視してS波速度 (Vs) によりラベル付けを行った。

水平動と概ね同様の傾向である。ただし、Vs=2000m/s以上の地震動であっても加藤スペクトルを大きく上回る記録が目立つ。

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル (h=5%) である。



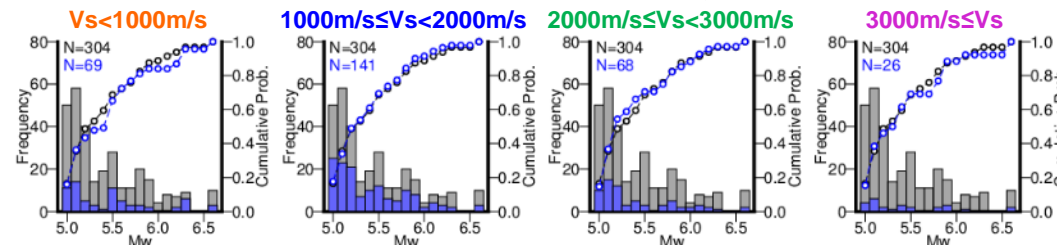
各図で共通 (同じ) の凡例

黒色: 加藤スペクトル (上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波 (全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理 (全記録)
 実線: はぎとり波 (灰色) の平均
 破線: はぎとり波 (灰色) の平均±σ

各図で異なる凡例

青色: はぎとり波 (グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理 (グループ毎)
 実線: はぎとり波 (青色) の平均
 破線: はぎとり波 (青色) の平均±σ

◀グループ毎の規模別データ数 (左軸) と累積相対頻度 (右軸) の確認▶

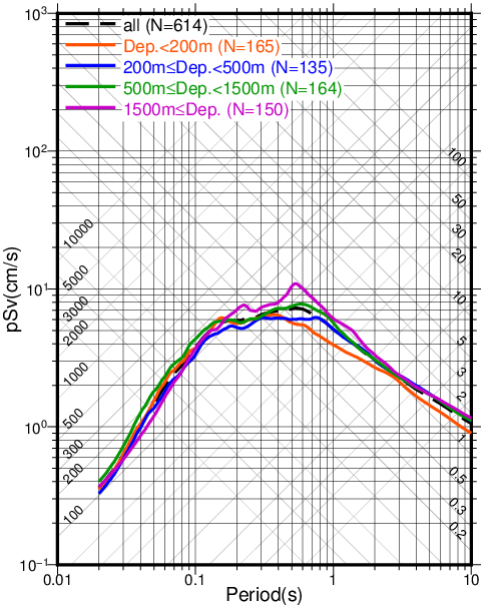


灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (27/36)

⑨ 観測点位置の地震 基盤深さ: 水平動

平均スペクトルの比較



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>

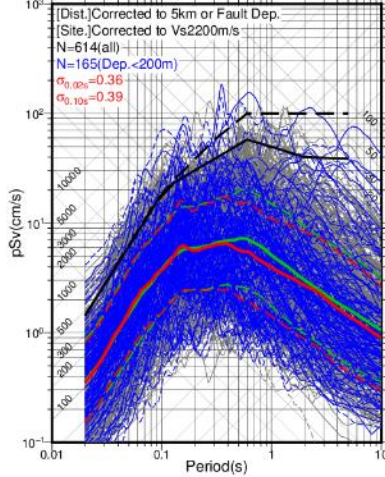
地震動レベルに大きな差異は見られない(地震基盤深度は地中計位置のVsとも相関があるため、前ページの傾向とも類似する)。

<データセット(データ数)に係る確認>

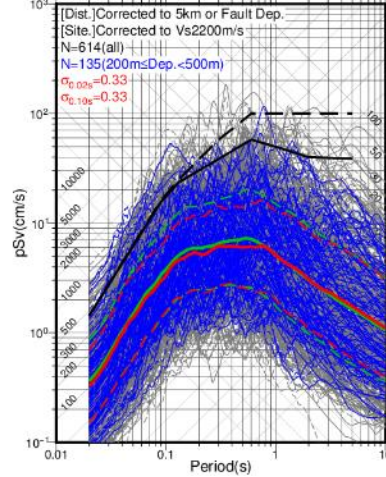
データセット(データ数)には極端又は非現実的な偏りは生じていない。

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

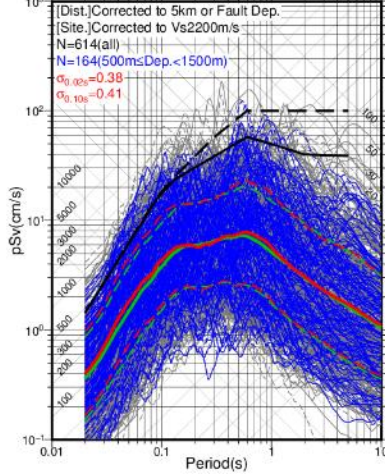
地震基盤<200m



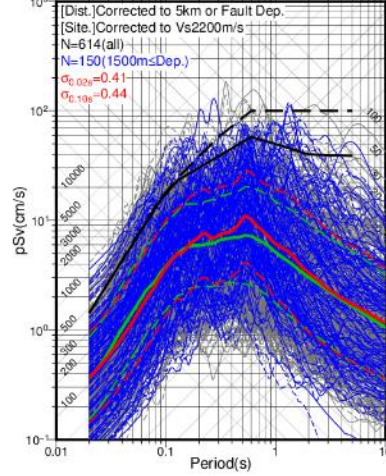
200m<地震基盤<500m



500m<地震基盤<1500m



1500m<地震基盤



※ 地震基盤の深度は、J-SHISの深部地盤モデルでVs=3000m/s以上となる深度とした。

各図で共通(同じ)の凡例

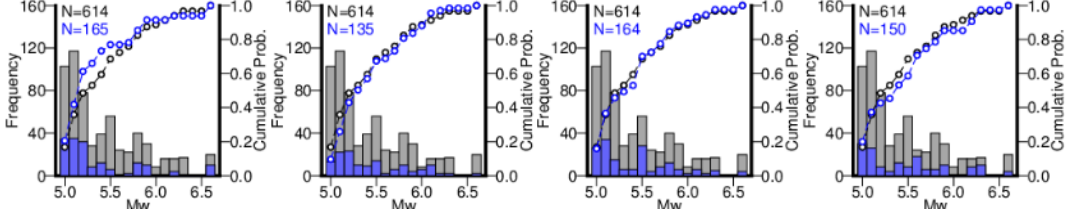
- 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
実線: NS, 破線: EW
- 緑色: 統計処理(全記録)
実線: はぎとり波(灰色)の平均
破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
実線: NS, 破線: EW
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
実線: はぎとり波(青色)の平均
破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>

地震基盤<200m 200m<地震基盤<500m 500m<地震基盤<1500m 1500m<地震基盤

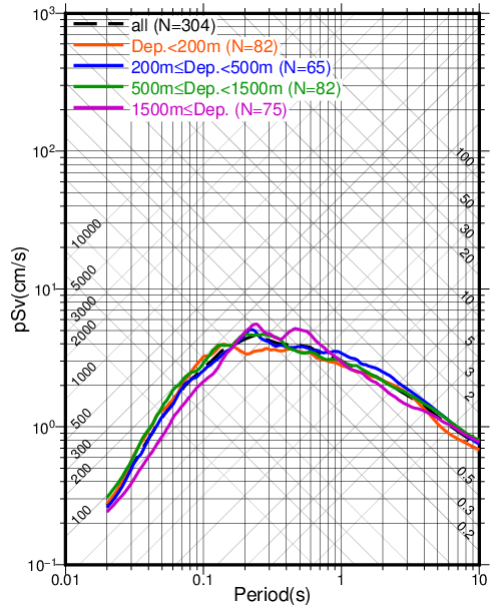


灰色: 全記録 (各図で共通)
青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (28/36)

⑨ 観測点位置の地震 基盤深さ: 上下動

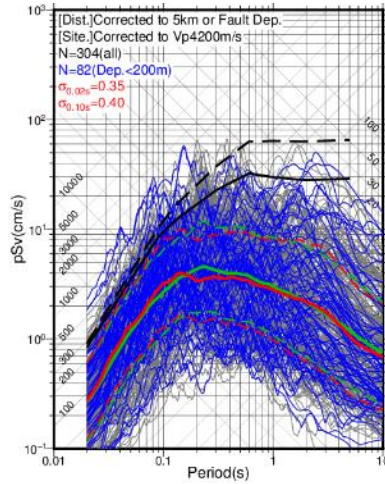
平均スペクトルの比較



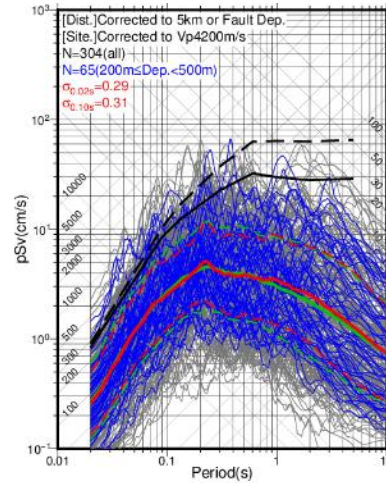
黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。

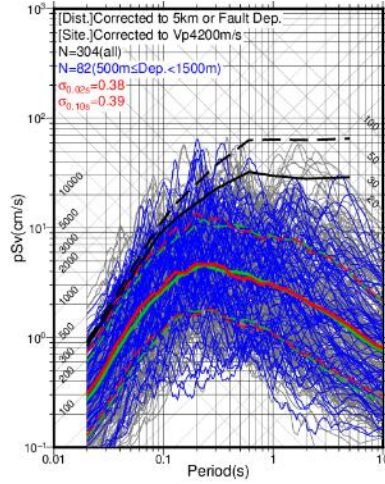
地震基盤<200m



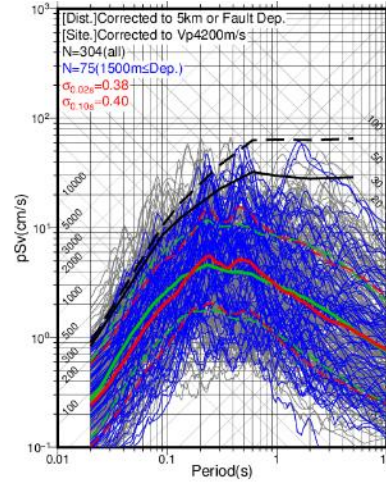
200m<地震基盤<500m



500m<地震基盤<1500m



1500m<地震基盤

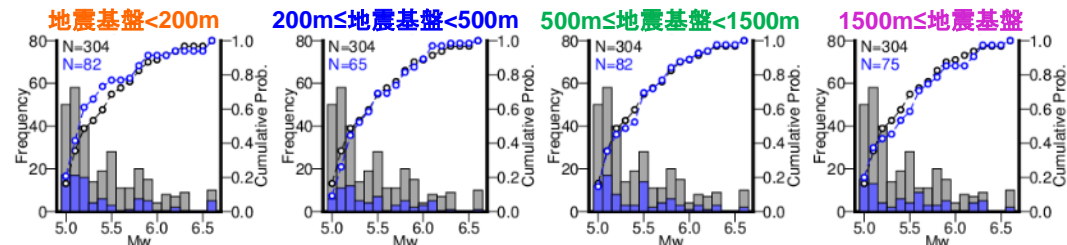


※ 地震基盤の深度は、地震ハザードステーション (J-SHIS) の深部地盤モデルで Vs=3000m/s 以上となる深度とした。

各図で共通 (同じ) の凡例
 黒色: 加藤スペクトル (上下動)
 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
 灰色: はぎとり波 (全記録)
 実線: UD
 緑色: 統計処理 (全記録)
 実線: はぎとり波 (灰色) の平均
 破線: はぎとり波 (灰色) の平均 ± σ

各図で異なる凡例
 青色: はぎとり波 (グループ毎)
 実線: UD
 赤色: 統計処理 (グループ毎)
 実線: はぎとり波 (青色) の平均
 破線: はぎとり波 (青色) の平均 ± σ

＜グループ毎の規模別データ数 (左軸) と累積相対頻度 (右軸) の確認＞

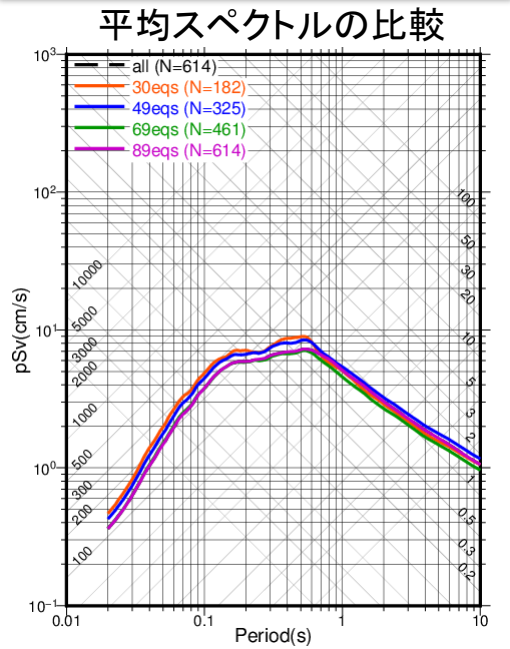


灰色: 全記録 (各図で共通)
青色: グループ毎

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル (h=5%) である。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (29/36)

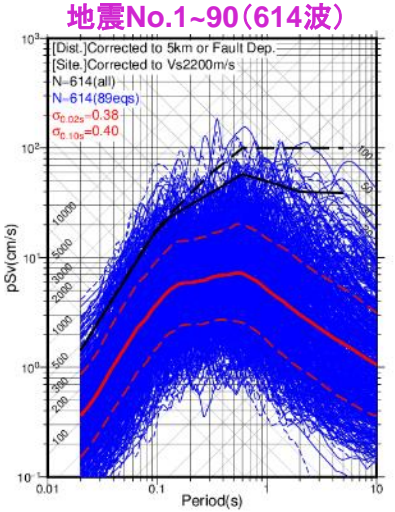
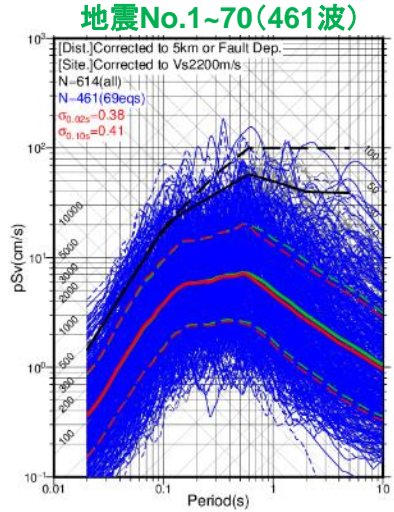
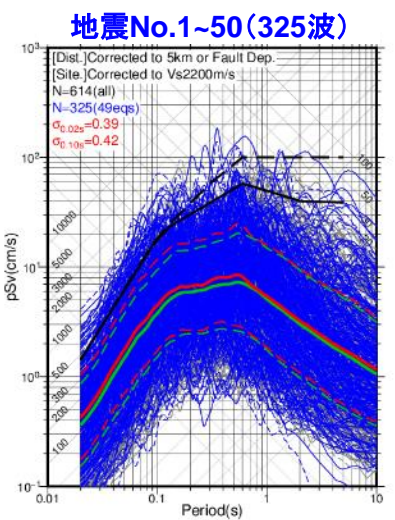
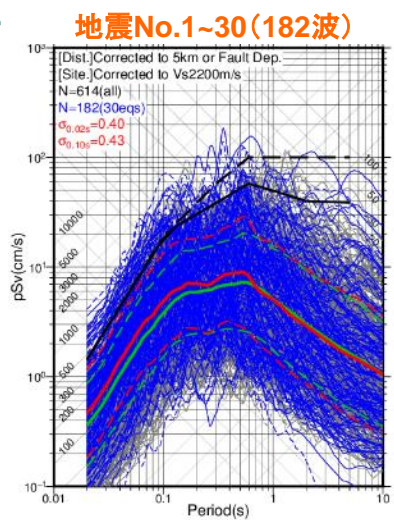
⑩ 統計処理に用いる地震の数: 水平動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

＜グループ分けによる特徴分析＞
 統計処理で扱う地震数(観測記録数)を増やしていった場合にも、地震動の平均及びばらつきはほとんど変化せず、特に70地震を超えると平均と標準偏差はほぼ同等となる。

＜データセット(データ数)に係る確認＞
 89地震の記録を使用している本検討の統計処理の結果は安定していると考えられる(今後対象地震が増えても大きく変化しないことが予測される)。



【ラベル付けについて】
 地震数を発生時刻順に20地震ずつ増やしていくことにより、4ケースのデータセットを作成した(20地震増えると観測記録は150波程度増える)。
 なお、地震No.31の2007年新潟県中越沖地震は解析対象外であるため、当該地震の地震動記録はデータセットに含まれてないことに留意(詳細はp.9参照)。

各図で共通(同じ)の凡例

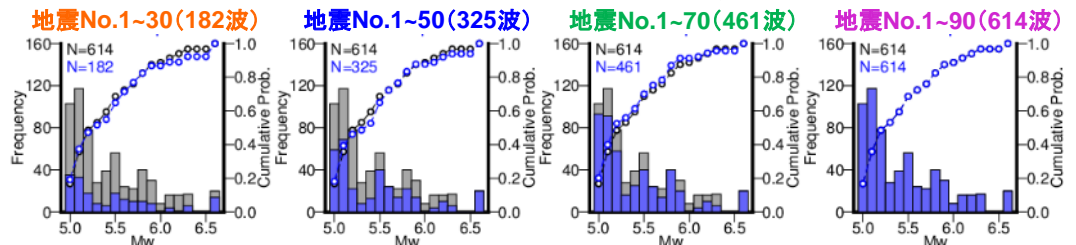
- 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
- 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: NS, 破線: EW
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均± σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: NS, 破線: EW
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均± σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞

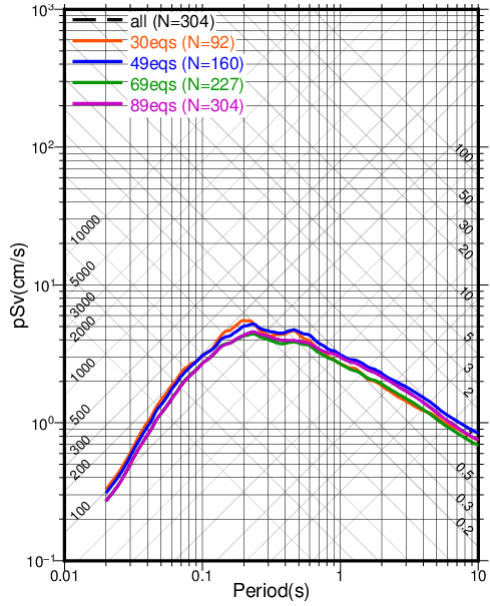


灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (30/36)

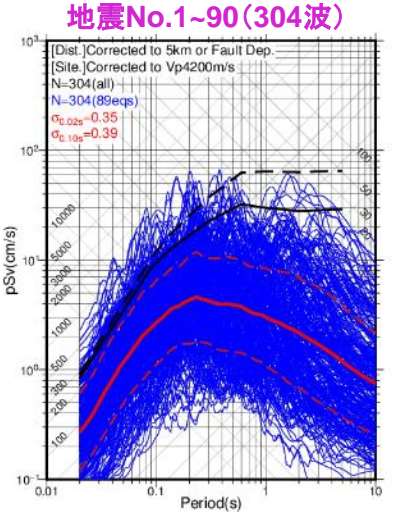
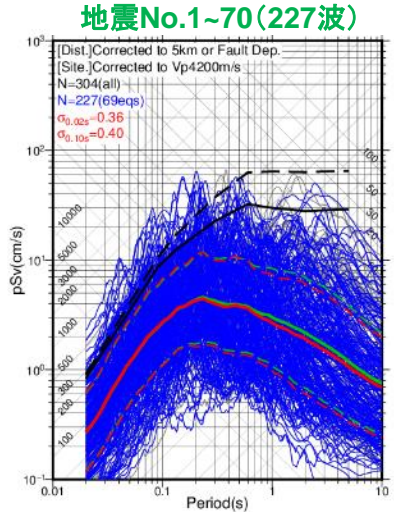
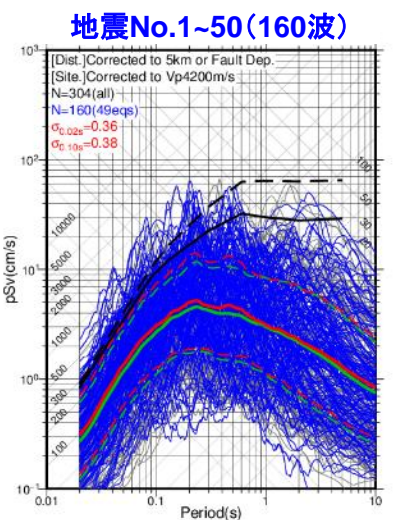
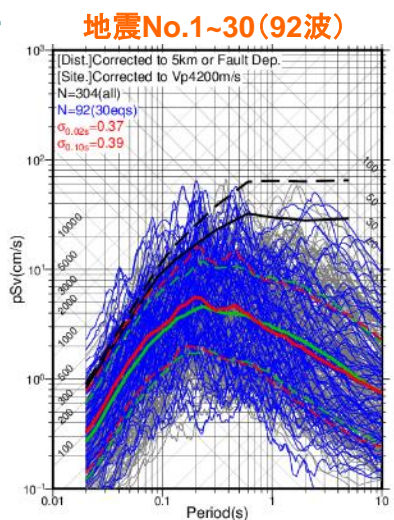
⑩ 統計処理に用いる地震の数: 上下動

平均スペクトルの比較



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

水平動と同様の傾向である。



各図で共通(同じ)の凡例

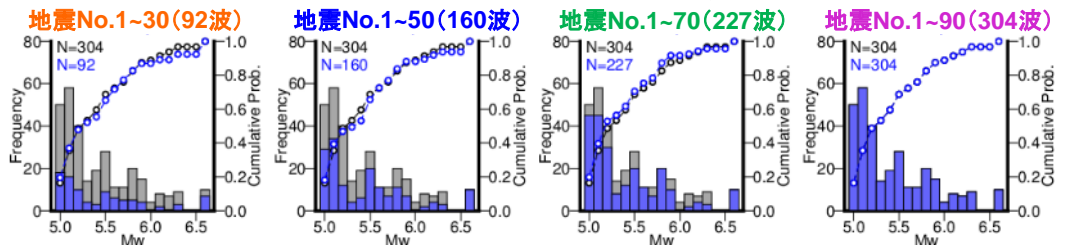
- 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
- 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: UD
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均± σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: UD
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均± σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

＜グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認＞



灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (31/36)

⑪ 「特徴的な地震動」のラベル付けの方針

統計処理に用いたはぎとり波(震源距離・地盤物性の補正前)について、距離減衰式との比較により特徴的な地震動を抽出し、観測記録との比較及びはぎとり精度の確認による要因の大別を行い、地震動の特徴を分析した結果を示す。

確認①: 特徴的な地震動の抽出(距離減衰式との比較)

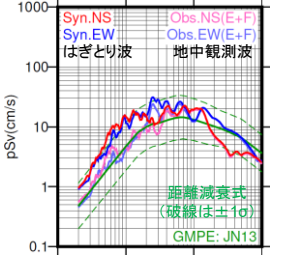
補正前のはぎとり波が距離減衰式の標準偏差を大きく上回るまたは下回る記録(周期1秒以下の短周期側で平均±1.5σの範囲外の部分がある記録)を「特徴的な地震動」として抽出した(水平動)。

ここで、比較する距離減衰式は地中地震計位置の地盤のVsによって以下の2式を使用した。

- Vsが2000m/s以上の場合 → 原子力安全基盤機構(2013)
- Vsが2000m/s未満の場合、地表記録の場合 → Morikawa and Fujiwara (2013)

※上下動については、水平動で特徴的な地震動として抽出された記録を上下動でも特徴的な地震動とした。

Group A:
はぎとり波が距離減衰式と調和的である。



確認②: 特徴的な地震動の要因確認

特徴的な地震動に含まれるピーク等の要因について、以下の確認により、「自然要因」と「人工要因」に大別した。具体的には、地中観測波を地表に立ち上げた計算波と地表観測波の比較より、はぎとり精度が低い周期を確認した。

- ① 「地中・地表の観測記録」と「はぎとり波」のいずれでも同様の周期で特徴的なピーク等が現れている場合は、観測記録そのものに含まれる特徴(自然要因)である可能性が高いと判断した。
- ② はぎとり精度※が低い周期帯と特徴的なピークが一致しており、地表・地中観測記録にはそのようなピークがない場合には、はぎとり解析によって生じた特徴(人工要因)である可能性が高いと判断した。

Group B: 自然要因
はぎとり精度※が高く、地表・地中観測記録にもピークが見られる。

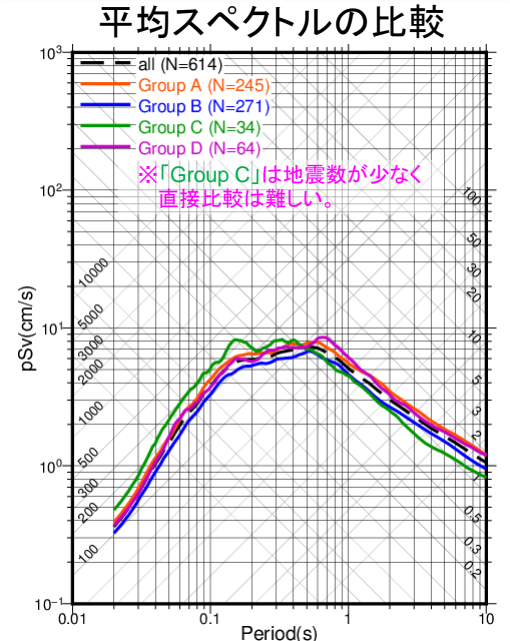
Group C: 自然要因+人工要因
はぎとり精度※が低い周期帯が地表・地中観測波のピーク周期と重なっている。

Group D: 人工要因
はぎとり精度※が低い周期において、はぎとり波のみに顕著なピークが生じている。

※はぎとり精度は、地中観測波を地表に立ち上げた計算波と地表観測波のスペクトル比を基準とし、周期1秒以下で計算/観測比が1/3~3倍の範囲外の周期帯をはぎとり精度が低いと判断している。

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (32/36)

⑪ 特徴的な地震動: 水平動



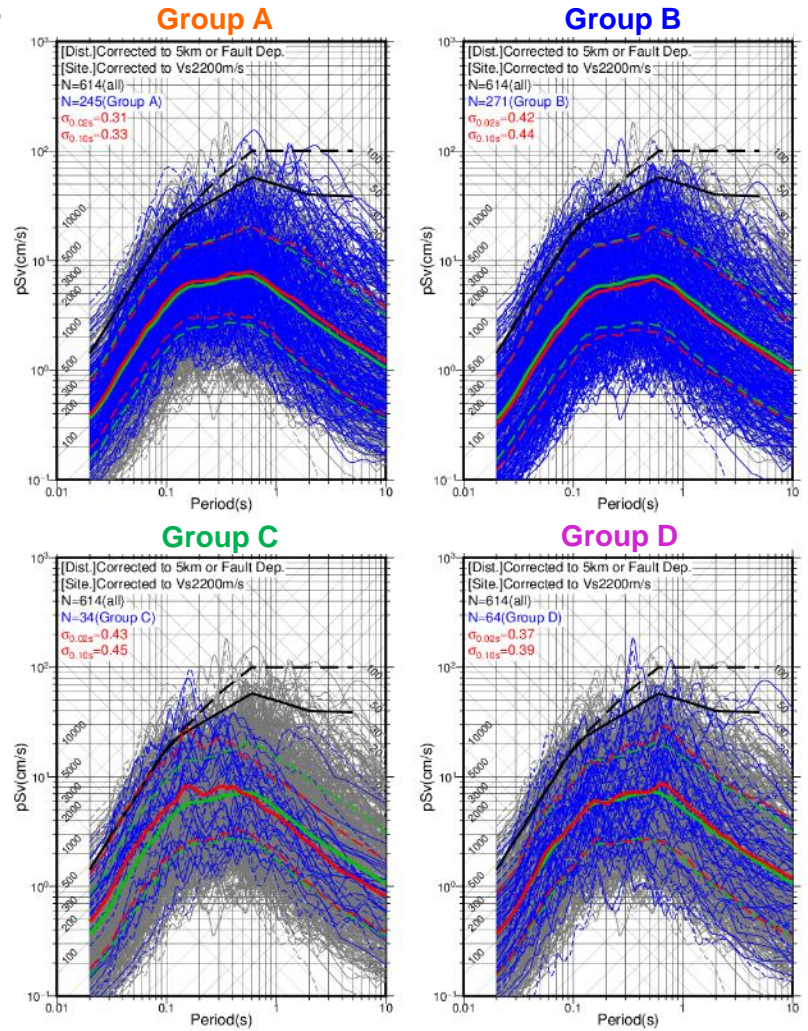
黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>

各グループの平均スペクトルには、大きな差異は見られないが、特徴的な地震動 (Group B~D) のばらつきは大きくなる傾向がある。
 またMw6.0以上の地震は少ない。

<はぎとり解析・データセットに係る確認>

はぎとり解析により極端又は非現実的な影響は生じていないと考えられる。ただし、人工要因の寄与があるGroup C, Dについては、統計処理において重みを下げた場合の影響を確認する。



各図で共通(同じ)の凡例

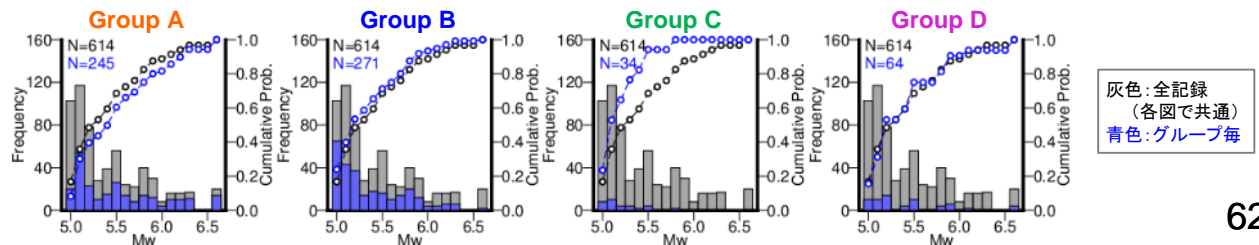
- 黒色: 加藤スペクトル(水平動)
- 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: NS, 破線: EW
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: NS, 破線: EW
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

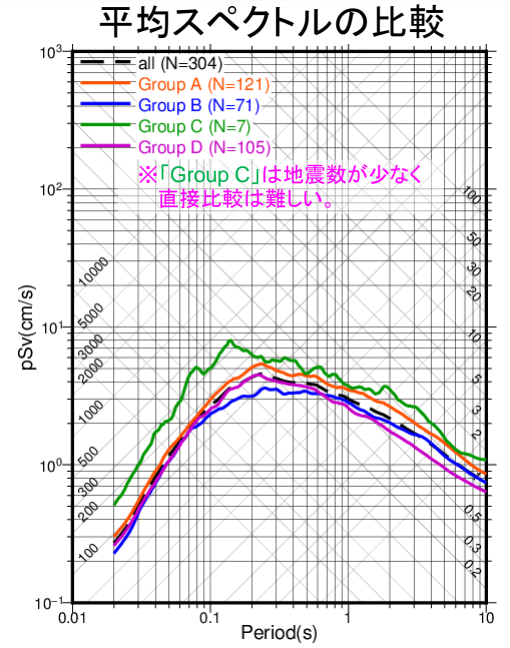
<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>



灰色: 全記録 (各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (33/36)

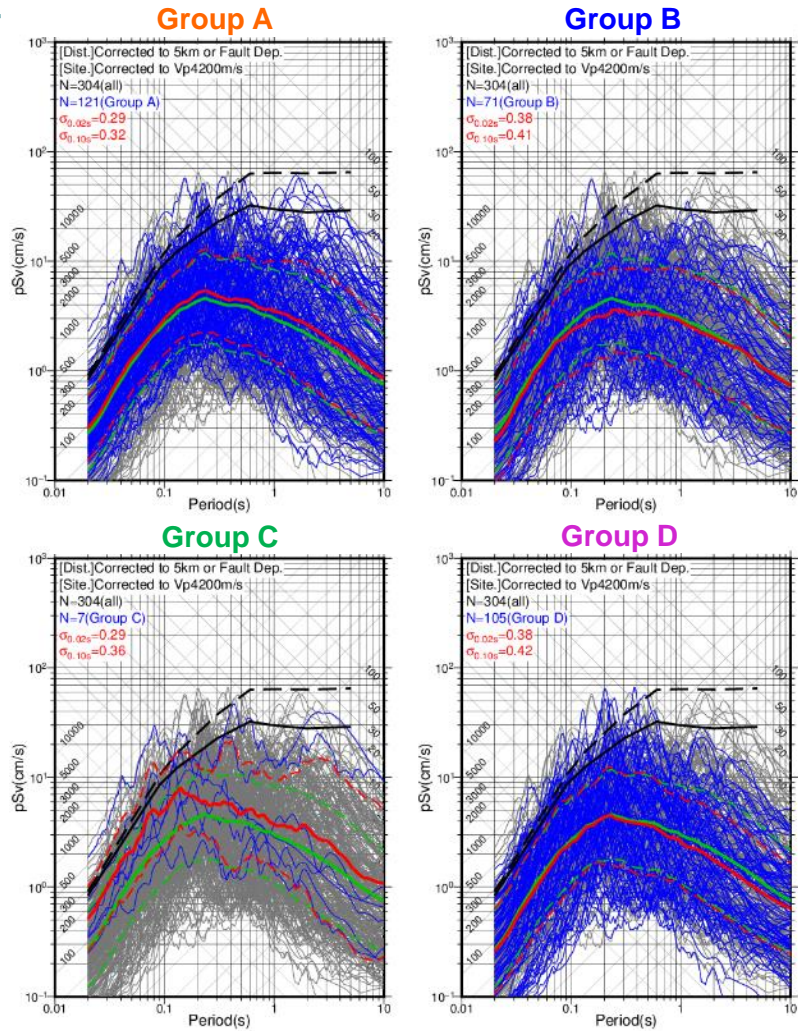
⑪ 特徴的な地震動: 上下動



黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

<はぎとり解析・データセットに係る確認>
 概ね水平動と同様の傾向であるが、人工要因による特徴的な地震動の割合が多く(105波/全304波)、水平動よりはぎとり精度が低い傾向がある。

統計処理の際に、はぎとり精度に留意して、地中観測記録2倍の場合の結果による地震動レベルの確認を行うこととした(p.85)。



各図で共通(同じ)の凡例

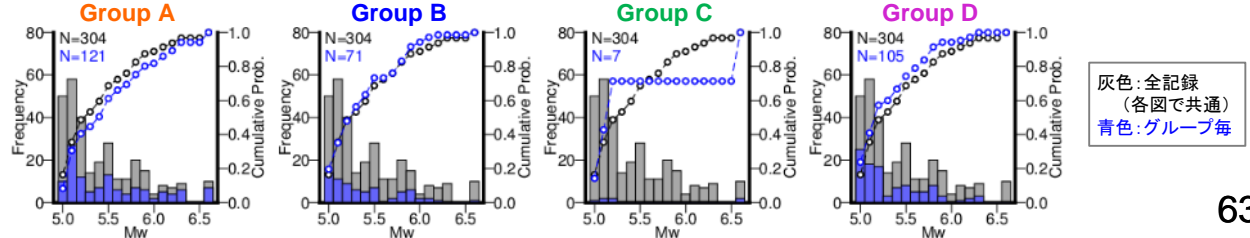
- 黒色: 加藤スペクトル(上下動)
- 実線: Vp4200m/s, 破線: Vp2000m/s
- 灰色: はぎとり波(全記録)
- 実線: UD
- 緑色: 統計処理(全記録)
- 実線: はぎとり波(灰色)の平均
- 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

各図で異なる凡例

- 青色: はぎとり波(グループ毎)
- 実線: UD
- 赤色: 統計処理(グループ毎)
- 実線: はぎとり波(青色)の平均
- 破線: はぎとり波(青色)の平均±σ

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>



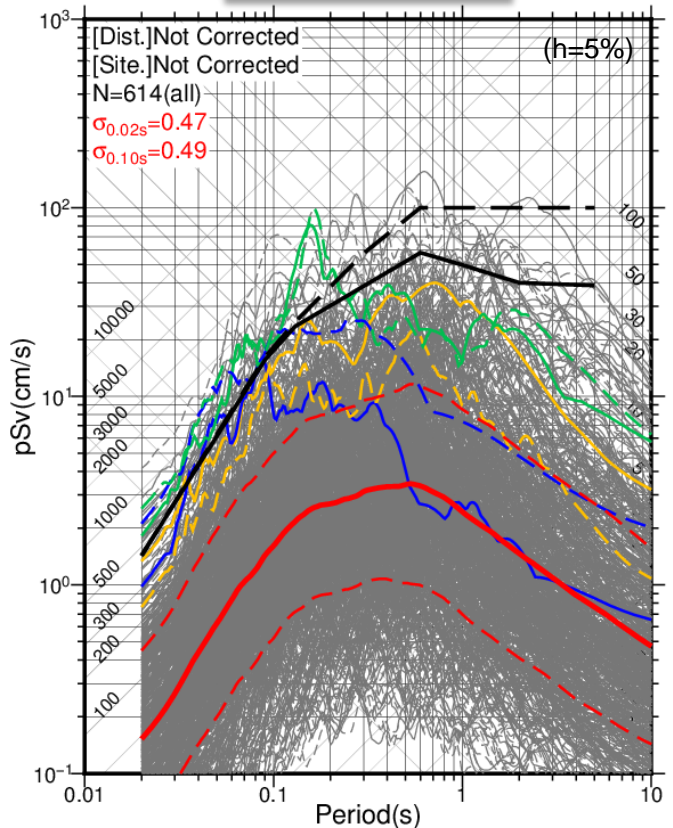
6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (34/36)

【補足説明①】特徴的な地震動の要因に係る考察 (1/2)

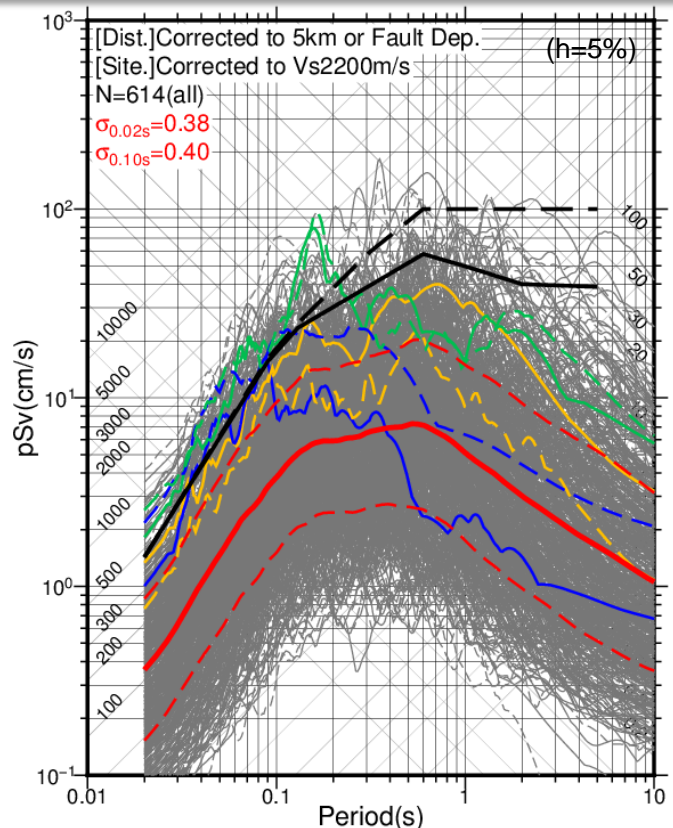
事業者が中長期的な課題としている以下の3記録については、本検討のラベル付けによる分析においても特徴的な地震動として抽出され、「自然要因(Group B)」または「自然・人工両者の要因(Group C)」によるものと大別された。ここでは、事業者による分析結果を基に、これらの要因について考察する。

- 黄色: 2011年茨城県北部の地震(Mw5.8)、KiK-net高萩(IBRH13) → Group B
- 緑色: 2013年栃木県北部の地震(Mw5.8)、KiK-net栗山西(TCGH07) → Group C
- 青色: 2011年和歌山県北部の地震(Mw5.0)、KiK-net広川(WKYH01) → Group B

補正前



補正後(震源近傍、地震基盤相当面)



黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(本年度)
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理(灰色)
 実線: 平均, 破線: 平均±1σ

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (35/36)

【補足説明①】特徴的な地震動の要因に係る考察 (2/2)

- 第5回検討チーム会合後に事業者より提出された主要原子力施設設置者(2018)による資料では、中長期課題とされている記録について、**中小地震との比較による要因分析の結果**が示された。
 - この結果より、本検討で「自然要因」の特徴的な地震動とされた記録については、**収集対象となった観測点固有のサイト特性や伝播経路特性による特徴**である可能性が高いと考えられる。
- ただし、統計処理による非超過確率別応答スペクトル算出においては、自然要因(Group B)の記録については、今回分析した以外の地震では一部に震源特性による特徴を含む可能性も否定できないことから、統計処理においては重みを下げずに(重み1として)扱うこととした。

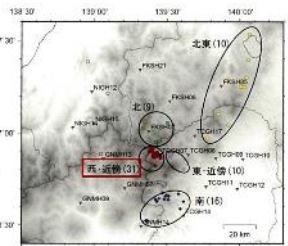
4地震に係る中小地震の観測記録等の分析 (5) まとめ

	2013年栃木県北部	2011年茨城県北部	2011年和歌山県北部	2011年長野県北部
観測点	KiK-net栗山西	KiK-net高萩	KiK-net広川	K-NET津南
本震観測記録	・水平動に0.15秒程度のピーク有	・上下動に0.03~0.05秒程度のピーク有	・水平動・上下動の0.06秒程度のピーク有	・水平動・上下動の0.1秒程度のピーク有
中小地震観測記録	・水平動に0.15秒程度のピーク無	・上下動に0.03~0.05秒程度のピーク有	・水平動・上下動の0.06秒程度のピーク有	・水平動・上下動の0.1秒程度のピーク有
①地盤同定を踏まえた解放基盤波算定(川内審査時)	・同定地盤はKiK-net地盤情報と不整合	・同定地盤は観測記録(伝達関数)、KiK-net地盤情報と不整合	・同定地盤はKiK-net地盤情報と不整合	・地表のみの観測記録であり、地盤情報が乏しいため、未実施
	×	×	×	—
②地盤調査等を踏まえた解放基盤波推計(第5回検討チーム時)	・KiK-net地盤情報と不整合 ・ダウンホール法とサスペンション法の差が大	・KiK-net地盤情報と不整合 ・ダウンホール法とサスペンション法による速度構造のモデル化が可能	・KiK-net地盤情報と不整合 ・ダウンホール法とサスペンション法の差が大	・深部に速度が小さくなる層があり、互層構造を呈している ・速度の大きい換層結果が際に影響されている可能性
	×	○(上下動:×)	×	—
【参考】 ①と②の水平動の比較・検討	・若干差異が見られるものの、概ね同等。 ・双方とも0.15秒付近の特異なピークが見られる。	・若干差異が見られるものの、概ね同等。 ・双方とも加藤ほか(2004)の応答スペクトルに概ね包絡される。	・若干差異が見られるものの、概ね同等。 ・双方とも0.06~0.07秒付近の特異なピークが見られる。	—

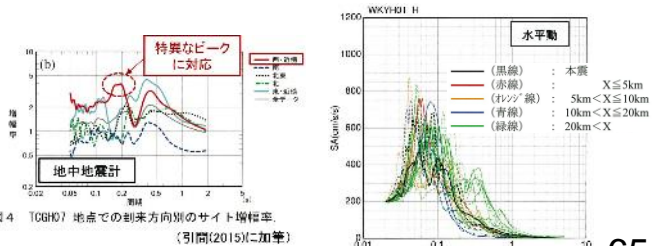
65 4地震に係る中小地震の観測記録等の分析 (5) まとめ

	2013年栃木県北部	2011年茨城県北部	2011年和歌山県北部	2011年長野県北部
観測点	KiK-net栗山西	KiK-net高萩	KiK-net広川	K-NET津南
既往の知見の収集	・既往の知見によると、特異なピークは、本震が位置する西・近傍領域からの地震動のみに見られる	—	—	—
評価	・解放基盤波の水平動に見られる0.15秒付近の特異なピークは、本震が位置する西・近傍領域からの地震動のみに見られるため、震源特性によるものではなく、地中地震計より深部地盤の影響と考えられる。	・解放基盤波の上下動に見られる0.03~0.05秒程度の特異なピークは、中小地震にも見られるため、震源特性によるものではなく、地中地震計より深部地盤の影響と考えられる。	・解放基盤波の水平動に見られる0.06~0.07秒程度の特異なピークは中小地震にも見られるため、震源特性によるものではなく、地中地震計より深部地盤の影響と考えられる。	・地表のみの観測記録を基に、精度高く解放基盤表面での地震動の推計を行うことに大きな課題がある。

■2013年栃木県北部の地震(Mw5.8)
KiK-net栗山西(TCGH07)



■2011年和歌山県北部の地震(Mw5.0)
KiK-net広川(WKYH01)



※主要原子力施設設置者(2018)より抜粋

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (36/36)

【補足説明②】 詳細な地盤調査前後のはぎとり解析結果に係る考察

- 第5回検討チーム会合後に事業者より提出された主要原子力施設設置者(2018)による資料では、中長期課題とされている記録について、**詳細な地盤調査前後のはぎとり解析結果の比較**が示された。
- この結果より、詳細な地盤調査により地盤の層厚や物性値が変わっても、**地中観測点位置におけるはぎとり結果は概ね同等となり、地盤条件がはぎとり波に与える影響は小さい**ことが分かった。
- ➔ 本検討チームによる予備検討(公開のPS検層結果使用)においては、**はぎとり解析手法が地中地震計位置のはぎとり波に与える影響は小さい**ことも確認している(詳細は「第4回会合資料2」参照)。
したがって、**今回のように、はぎとり波を統計処理のデータとして扱う場合には、本検討で実施している公開のPS検層結果を使用したはぎとり解析は妥当な手法である**と考えられる。

2011年茨城県北部の地震(Mw5.8)
KiK-net高萩(IBRH13)

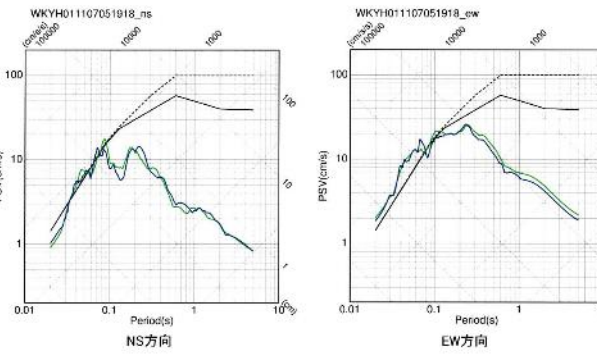
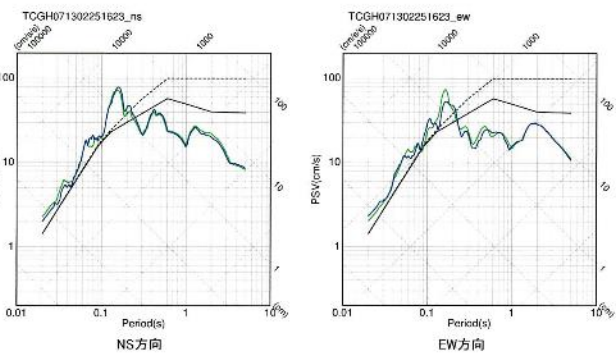
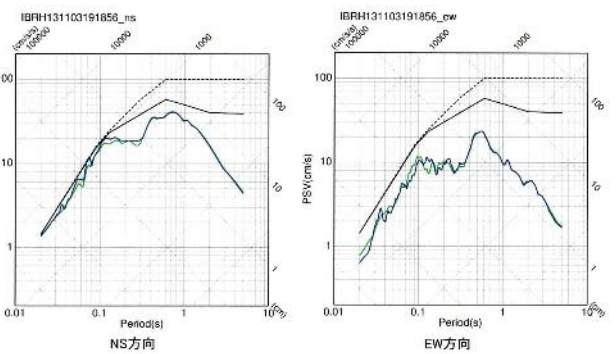
2013年栃木県北部の地震(Mw5.8)
KiK-net栗山西(TCGH07)

2011年和歌山県北部の地震(Mw5.0)
KiK-net広川(WKYH01)

--- Kato2004(Vs=700)
— Kato2004(Bedrock)
— ①川内審査時解放基盤波 ← 詳細地盤調査前(公開PS検層結果を基に地盤を最適化)
— ②第5回検討チーム時解放基盤波 ← 詳細地盤調査後(詳細調査結果を基に地盤を最適化)

--- Kato2004(Vs=700)
— Kato2004(Bedrock)
— ①川内審査時解放基盤波
— ②第5回検討チーム時解放基盤波

--- Kato2004(Vs=700)
— Kato2004(Bedrock)
— ①川内審査時解放基盤波
— ②第5回検討チーム時解放基盤波



■ 若干差異が見られるものの、概ね同等の評価である。
■ 双方とも加藤ほか(2004)の応答スペクトルに概ね包絡される。

■ 若干差異が見られるものの、概ね同等の評価である。
■ 0.15秒付近の特異なピークは双方に見られる。

■ 若干差異が見られるものの、概ね同等の評価である。
■ 0.06~0.07秒付近の特異なピークは双方に見られる。

※主要原子力施設設置者(2018)より抜粋(緑字・青字部分加筆)

7. 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出 (1/2)

目的

ラベル付けによる分析から、様々な観測記録を全国共通に考慮すべき震源近傍の地震基盤相当面での地震動として扱うための処理等を行ったことに伴い、データセットに以下のような不確実さが含まれることを把握することができた。

- 対象地震の選定(地震規模の設定)、規模別の地震・記録数に係る不確実さ
- 観測記録から地盤特性を取り除く処理(はぎとり解析、地盤物性補正)に係る不確実さ
- 統計処理で扱う震源近傍での観測記録の数を補うための処理(震源距離補正)に係る不確実さ

そこで、影響が大きな項目に係る複数の条件に基づいて、データの選別や重み付けを考慮した非超過確率別応答スペクトルを算出する。

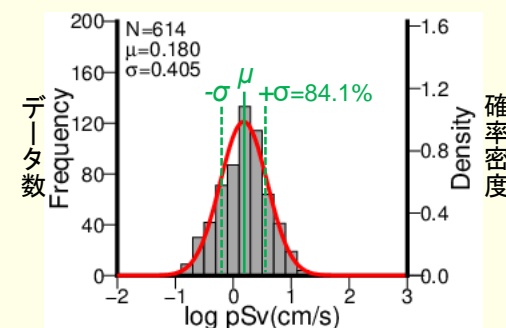
非超過確率別応答スペクトルの算出

対象記録(はぎとり波)の擬似速度応答スペクトルからなるデータセットの各周期での値に対して、統計モデルとして対数正規分布を仮定し、平均(μ)と標準偏差(σ)を用いて確率密度分布を求め、非超過確率別の応答スペクトルを算出した。

本検討では、分析対象の地震規模の範囲をMw5.0~6.5程度として地震動強さのばらつき度合いを σ により検討するため、以下について留意が必要である。

- 地震動強さの確率密度について対数正規分布の仮定が可能であるか。 ※実際のデータとの比較(p.86~94)により確認している。
- 非超過確率が高くなる場合(例えば、99%程度以上)には対数正規分布の裾野の議論の領域に入り、推定される地震動の値が不安定で現実的でなくなる可能性がある。

周期 T_i 秒での地震動強さのヒストグラム



周期 T_i 秒での地震動強さ(擬似速度応答の常用対数)

7. 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出 (2/2)

データの選別・重み付けの概要

以下のとおりデータの選別・重み付けを行い、それぞれの条件で非超過確率別応答スペクトルを算出した(詳細は次ページ以降を参照)。

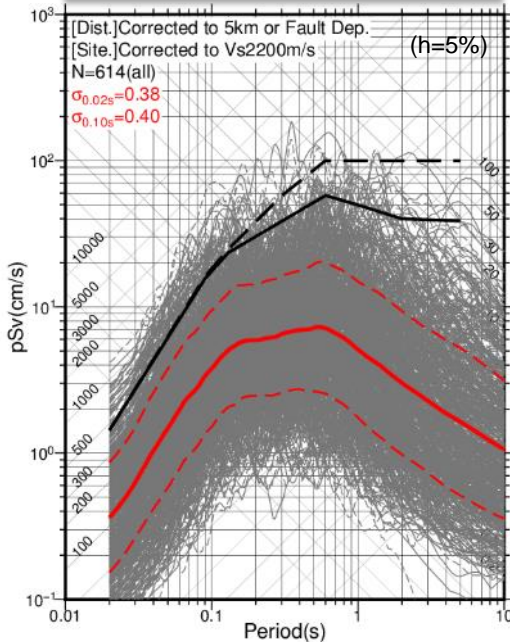
- ① **全データ**: 補正後の全てのはぎとり波を同等の重みで扱った場合
※震源距離・地盤物性の補正の有無による影響確認も実施
- ② **対象地震**: 対象地震を全国共通に考慮すべき地表地震断層が出現しない可能性がある地震 (Mw6.5程度未満)に近いものにした場合
- ③ **規模別の地震・記録数**: より長期間に渡って観測することを想定して理想的にG-R則に従う重み付けを施した場合
- ④ **はぎとり精度**: はぎとり解析の精度が低いこと(人工要因)による特徴的な地震動の影響を低減させた場合
- ⑤ **地中地震計位置の地盤条件**: 地中地震計位置の地盤のS波速度(V_s)が元々地震基盤相当に近い(地盤物性補正がほとんど不要な)観測記録に絞った場合

7.1 データ選別・重み付けの条件 (1/6)

方針

- 前章までの統計処理(平均及び標準偏差の算出)においては、全ての応答スペクトルのデータの重みを「1」として対等に扱っていた。
- 以降では複数条件でデータに重みを付加した場合の統計処理(非超過確率考慮)を実施する。

全てのデータの重みを1とした場合のはぎとり波(水平動)の統計処理結果
 <震源距離・地盤物性補正後>



黒色: 加藤スペクトル*(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波
 実線: NS, 破線: EW
 赤色: 統計処理
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

<重み付け考慮の統計処理の考え方>

データの数・値 (応答スペクトル) × 重み w_i (係数) : あるデータが「重み w_i 」倍の個数になると仮定して一連の処理を行う

※「重み1」は重み付けなし、「重み0」はデータ除外、「重み2」はデータが2個分として扱う。

例えば、平均値を計算する場合には、以下のようなになる。
 通常使用する平均は「算術平均」で、以下のように計算する(Σは和の略記号)。

算術平均

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

データ数を重み w_i とした場合の「重み付き平均(加重平均)」は、データの値を x_1, x_2, \dots, x_n として以下のように計算する。

重み付き平均(加重平均)

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} &= \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \\ &= \frac{w_1}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} x_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} x_2 + \dots + \frac{w_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} x_n \end{aligned}$$

7.1 データ選別・重み付けの条件 (2/6)

重み付け考慮の統計処理による非超過確率別応答スペクトル算出の条件 (1/3)

はぎとり波の応答スペクトルに震源距離・地盤物性の補正を施したデータセットについて、以下の条件で非超過確率別応答スペクトルを算出した。

- ケース1: 全データ(選別・重み付けなし)

→ 補正後の全てのはぎとり波を同等の重みで扱ったケースである。

<重み付け> [重み付け後の記録数=水平614波、上下304波]

・全データ: 重み=1

<参考ケース>

補正による影響の確認として以下のケースとの比較を行う。

ケース1'a: 震源距離・地盤物性の補正なし

ケース1'b: 地盤物性補正のみ(震源距離補正なし)

* 1: 震源距離補正を施さず震央距離30km以内の記録を用いているため震源近傍記録としては遠い記録を含み(詳細はp.74参照)、さらに地盤物性補正も施していない場合は地震基盤相当面での地震動として適切ではないため、参考ケースとする。

- ケース2: 対象地震(Mw6.5未満*2)

→ 対象地震を全国共通に考慮すべき「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」に近いものにするために、Mw6.5以上で「震源を特定して策定する地震動」と「地域性考慮の震源を特定せず策定する地震動」にあたる地震を除いた(Mw6.5未満の地震を対象とした)ケースである。

<重み付け> [重み付け後の記録数=水平594波、上下294波]

・Mw6.5未満*1: 重み=1

[水平594波、上下294波]

・Mw6.5以上(地域性考慮の特定せず、特定しての地震動を含む): 重み=0 [水平20波、上下10波]

* 2: 「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」の規模をMw6.5程度未満と考えており、これは地震発生層内での断層幅の飽和に起因して、スケーリング則が遷移する(スケーリング則が不連続となる)地震規模が $M_0 = 7.5 \times 10^{18}$ Nm (Mw6.5)程度であるという知見に基づいている [例えば、Shimazaki (1986)、武村(1998)、入倉・三宅(2001)など]。

7.1 データ選別・重み付けの条件 (3/6)

重み付け考慮の統計処理による非超過確率別応答スペクトル算出の条件 (2/3)

● ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定)

→ 本検討では2000~2017年の18年間に起きた内陸地殻内地震の記録(Mw5.0~6.6)を収集し、データセットの規模別頻度は概ねG-R則に従っていることを確認しているが、偏りや凸凹も見られるため、より長期間に渡って観測することを想定して理想的にG-R則に従うデータセットになるように重み付けを施したケースである。

<重み付け> [重み付け後の記録数=水平621.6波、上下310.8波]

- ・各地震規模ごとにG-R則(b値=0.9)に従う地震数とその記録数を計算して「元々の記録数/G-R則想定記録数」を規模別の重みとして各データに乗ずる。なお、記録がないMw6.4, 6.5相当の地震動も追加する。 ※詳細はp.73参照。

● ケース4: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)

→ はぎとり解析の精度が低いこと(人工要因)による「特徴的な地震動^{*3}」がデータセットに含まれることによる影響を低減させたケースである。

<重み付け> [重み付け後の記録数 = (a) Group C=0.5の場合: 水平533.0波、上下195.5波; (b) Group C=0の場合: 水平516波、上下192波]

- ・距離減衰式と調和的な地震動^{*4}(Group A): 重み=1 [水平245波、上下121波]
- ・自然要因^{*5}による特徴的な地震動(Group B): 重み=1 [水平271波、上下71波]
- ・自然要因^{*5}と人工要因^{*6}による特徴的な地震動(Group C): 重み=0.5 または 0 [水平 34波、上下 7波]
- ・人工要因^{*6}による特徴的な地震動(Group D): 重み=0 [水平 64波、上下105波]

*3: 補正前のはぎとり波の応答スペクトルが周期1秒以下で距離減衰式の平均±1.5σの範囲外となる地震動(水平動を基準に抽出)

*4: 補正前のはぎとり波の応答スペクトルが周期1秒以下で距離減衰式の平均±1.5σの範囲内に収まる場合(それ以外は特徴的な地震動)

*5: 自然要因は「地中・地表の観測記録」と「はぎとり波」のいずれでも同様の周期で特徴的なピーク等が現れている場合

*6: 人工要因ははぎとり精度が低い周期帯と特徴的なピーク等が一致しており、地表・地中観測記録にはそのようなピークがない場合

※詳細はp.61参照。

7.1 データ選別・重み付けの条件 (4/6)

重み付け考慮の統計処理による非超過確率別応答スペクトル算出の条件 (3/3)

- ケース5: 地中地震計位置の地盤のVs (Vs=2000m/s以上)

→ 地中地震計位置の地盤のVsが元々地震基盤相当に近い地震動記録に絞り、地盤物性補正の不確かさを低減したケースである。

<重み付け> [重み付け後の記録数=水平186波、上下94波]

- ・Vs=2000m/s以上のデータ: 重み=1 [水平186波、上下94波]
- ・Vs=2000m/s未満の記録のデータ: 重み=0 [水平428波、上下210波]

- はざとり精度に係る確認用ケース

ケース2': ケース2 (Mw6.5未満) について、ケース4と同様にはざとり精度に係る人工要因による特徴的な地震動の影響を低減させた場合。

[重み付け後の記録数 = (a) Group C=0.5の場合: 水平517.0波、上下186.5波; (b) Group C=0の場合: 水平500波、上下184波]

ケース4': はざとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合 (重み付けなし)。

[重み付け後の記録数=水平614波、上下304波]

※ケース4の重み付けを施した場合でも、はざとり精度の不確かさを完全に除外することはできないことから、周期0.5秒程度以下のはざとり精度を確認するために使用する。

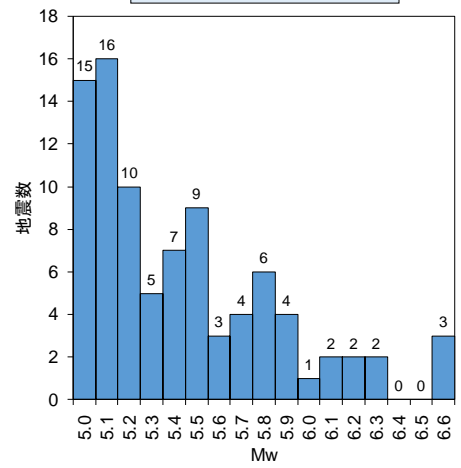
7.1 データ選別・重み付けの条件 (5/6)

補足説明:【ケース3】G-R則に従う地震・記録数を想定した重み付けについて

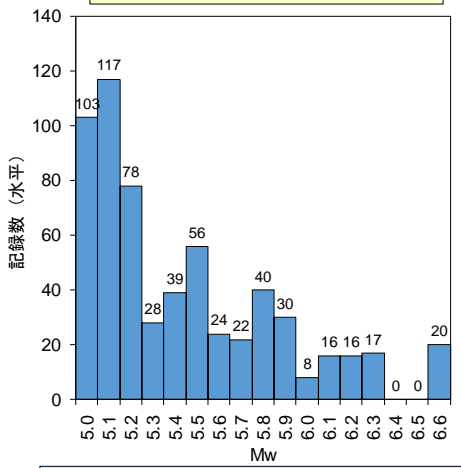
■元々の対象地震・記録数

Mw	地震数	水平動記録数 (NS,EW成分)	上下動記録数 (UD成分)
5.0	15	103	50
5.1	16	117	58
5.2	10	78	40
5.3	5	28	14
5.4	7	39	19
5.5	9	56	28
5.6	3	24	11
5.7	4	22	11
5.8	6	40	20
5.9	4	30	15
6.0	1	8	4
6.1	2	16	8
6.2	2	16	7
6.3	2	17	9
6.4	0	0	0
6.5	0	0	0
6.6	3	20	10
合計	89	614	304

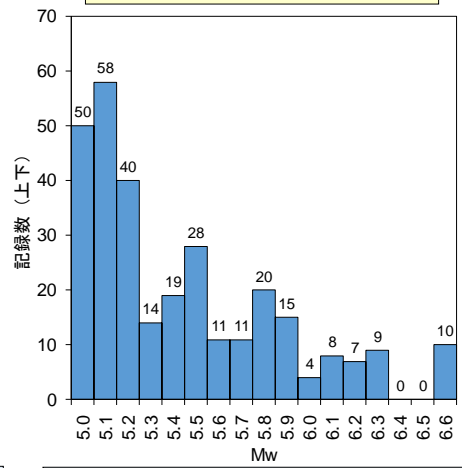
元々の地震数: $n_E(Mw)$



元々の記録数(水平動): $n_H(Mw)$



元々の記録数(上下動): $n_V(Mw)$



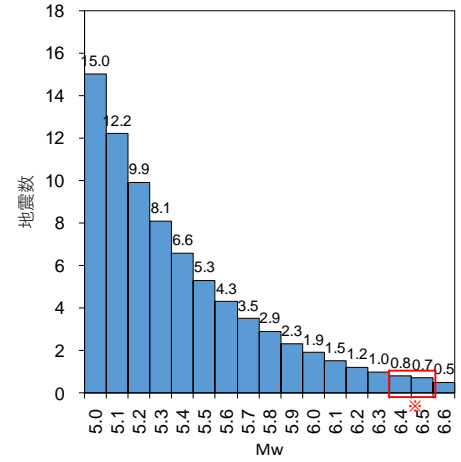
記録数: $n_{H-GR}(Mw) = n_{E-GR}(Mw) \times 8^*$
 重み: $w_H(Mw) = n_{H-GR}(Mw) / n_H(Mw)$
*どの地震でも1地震につき4記録×2成分収集したと仮定。

記録数: $n_{V-GR}(Mw) = n_{E-GR}(Mw) \times 4^*$
 重み: $w_V(Mw) = n_{V-GR}(Mw) / n_V(Mw)$
*どの地震でも1地震につき4記録×1成分収集したと仮定。

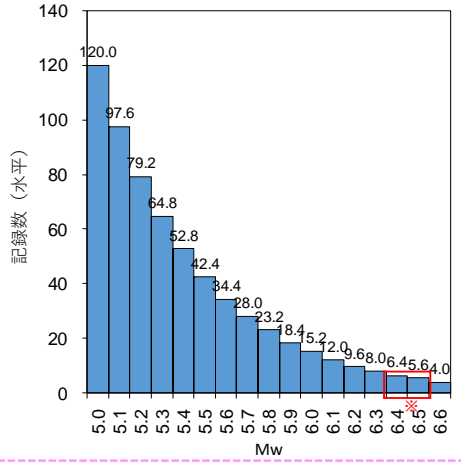
■G-R則を想定した場合 (b値=0.9*)

Mw	地震数	水平動記録数 (地震数×8)	上下動記録数 (地震数×4)
5.0	15.0	120.0	60.0
5.1	12.2	97.6	48.8
5.2	9.9	79.2	39.6
5.3	8.1	64.8	32.4
5.4	6.6	52.8	26.4
5.5	5.3	42.4	21.2
5.6	4.3	34.4	17.2
5.7	3.5	28.0	14.0
5.8	2.9	23.2	11.6
5.9	2.3	18.4	9.2
6.0	1.9	15.2	7.6
6.1	1.5	12.0	6.0
6.2	1.2	9.6	4.8
6.3	1.0	8.0	4.0
6.4	0.8	6.4	3.2
6.5	0.7	5.6	2.8
6.6	0.5	4.0	2.0
合計	77.7	621.6	310.8

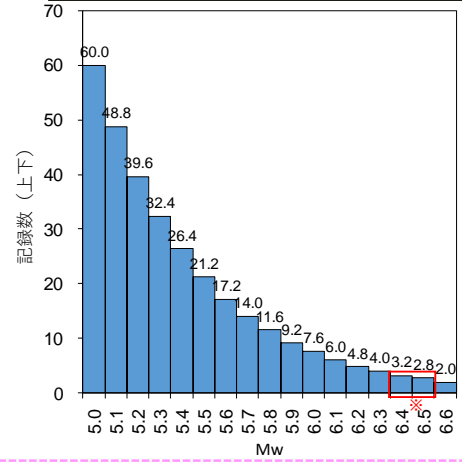
G-R則想定地震数: $n_{E-GR}(Mw)$



G-R則想定記録数(水平動): $n_{H-GR}(Mw)$



G-R則想定記録数(上下動): $n_{V-GR}(Mw)$



*元々のデータの累積地震数から推定した結果

※地震数(記録数)がゼロであるMw6.4, 6.5の地震については、旧JNES(2013)による距離減衰式の平均+標準偏差(1σ)のレベルのデータをG-R則に従った数加えた。一方、日本の内陸地殻内地震では震源断層が地表に突き抜ける影響でMw6.5付近でマグニチュードの不連続がありその付近の地震が少ないという知見もあるため、Mw6.4, 6.5の地震が無いことは偶然でない可能性があるが、保守性を考えてMw6.4, 6.5の地震を加えることとした。

7.1 データ選別・重み付けの条件 (6/6)

補足説明: 震源距離補正を実施しないケースについて

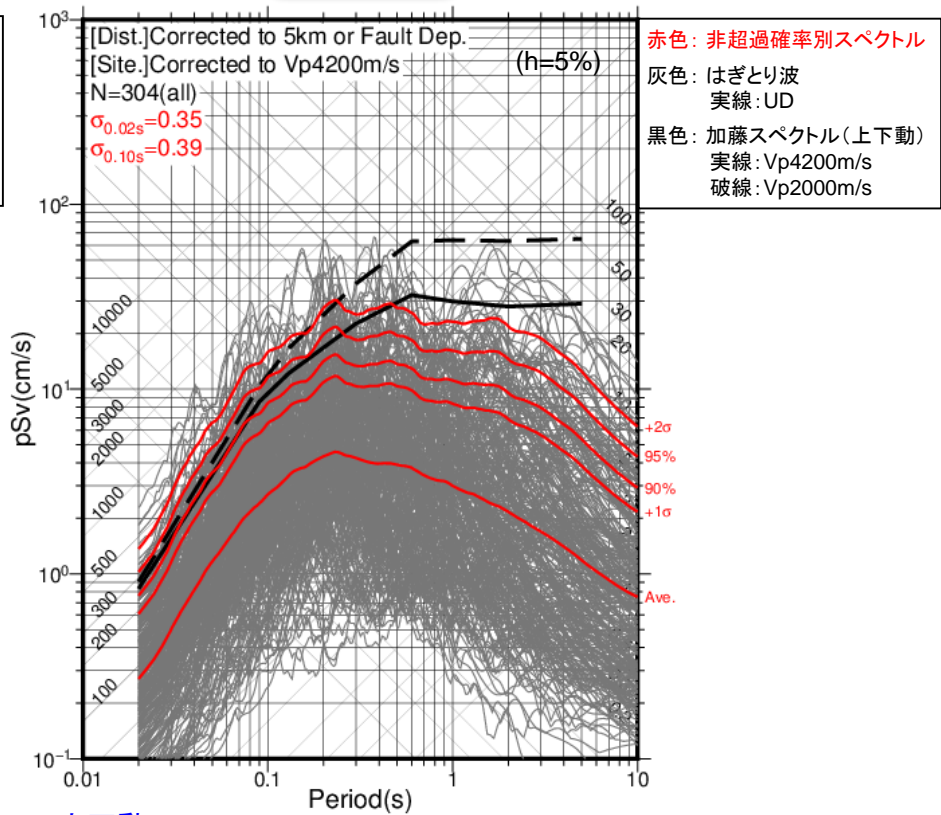
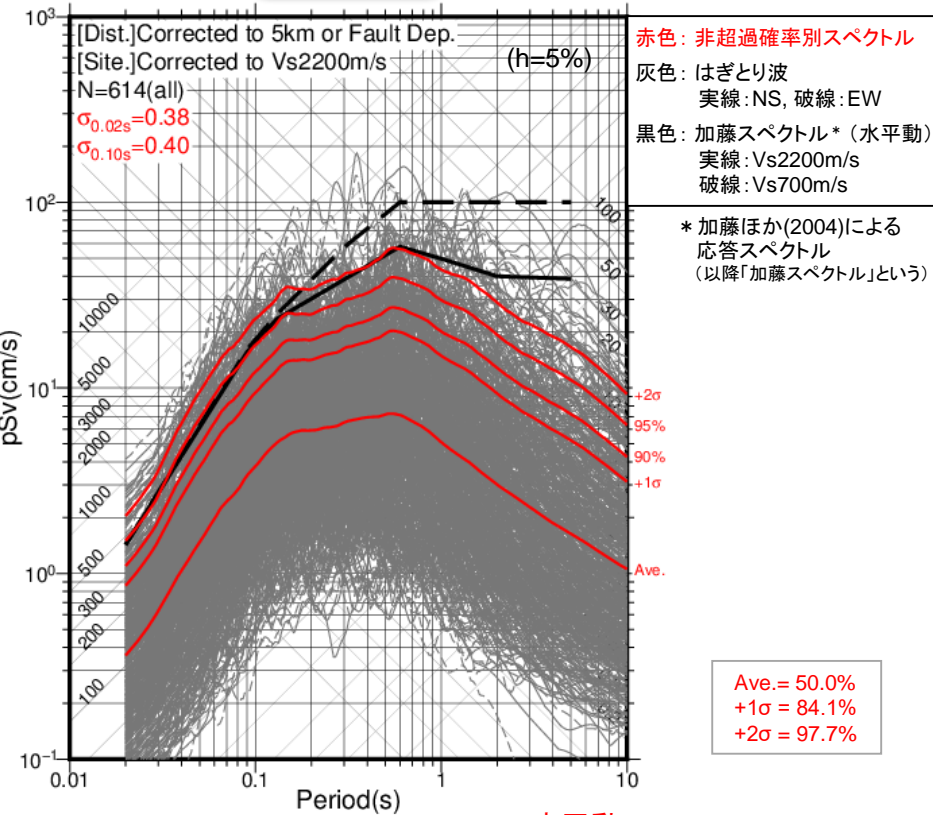
- 震源距離補正を行わずに震央距離30km以内の記録を用いる場合、震源近傍記録としては遠いものを含むため、本検討でターゲットとするデータセットとは異なる。
また、震央距離10kmより遠いデータが増えることにより地震動レベルは下がり、例えば、地震動の年超過確率の概算による確認を行った場合には、年超過確率 1×10^{-4} よりも低確率に対応する非超過確率は約99.5%以上となり(詳細はp.112参照)、データセットの上限付近にあたる少数のデータの影響を受けやすい不安定な非超過確率別応答スペクトルを基に標準応答スペクトルを決めることとなり適切でないと考えられる。
 - 震源距離補正を行わずに震央距離10km以内の記録のみを用いる場合には震源近傍の記録としては適切であるが、震央距離10km以内で実際に観測された記録は少ない(1成分40波程度となり対象地震も減りG-R則からの乖離が大きくなる)ため、統計処理に用いるデータセットとしては適切ではないと考えられる。将来的に震央距離10km以内の震源近傍の観測記録が十分蓄積されれば解決される課題であるが、現状では統計処理上のデータ数を確保するために何かしらの距離補正を実施する必要があると考えられる。
- 上記のような理由により、本検討では震央距離30km以内の観測記録を収集したうえで、半径10km程度以内の震源近傍の領域に観測点を集めるために震源距離補正を実施した。
なお、震源距離補正では、最短距離5km(10kmの中間距離)に補正することを基本とし、断層上端(点震源の場合は震源)の深さが5kmよりも深い場合には(観測点を地下に沈めて近づけない限りは最短距離は5kmより遠くなるため)断層の直上に観測点が集まる(観測点と断層が最も近付く)最短距離に補正する方針を採用し、実際は半径10km以内のより近いところに多くの観測点が集まる(保守的になる)ように工夫した。

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (1/20)

ケース1: 全データ(選別・重み付けなし)、震源距離・地盤物性の補正あり

水平動

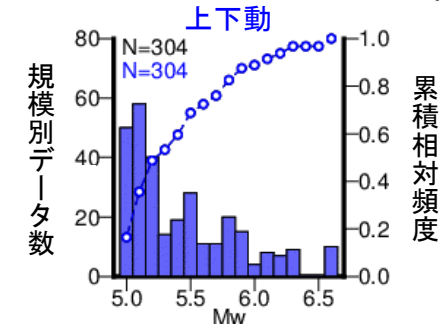
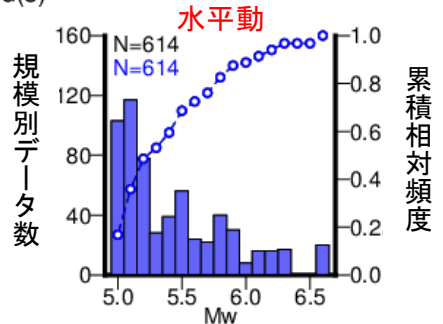
上下動



規模別の記録数→

灰色: 全記録
 青色: 本ケースでの対象記録
 ※本ケースでは両者は重なる。

※地震動強さのヒストグラム
 (対数正規分布との比較確認)
 はp.86に示す。



震源距離補正・地盤物性補正を施した全ての
 のはぎとり波を同等の重みで処理。

- ・データ充足度が高い。
- ・対象地震(規模)、補正処理、はぎとり解析に係る各種の不確実さを含む。

→ 標準応答スペクトルの設定には使用しない。

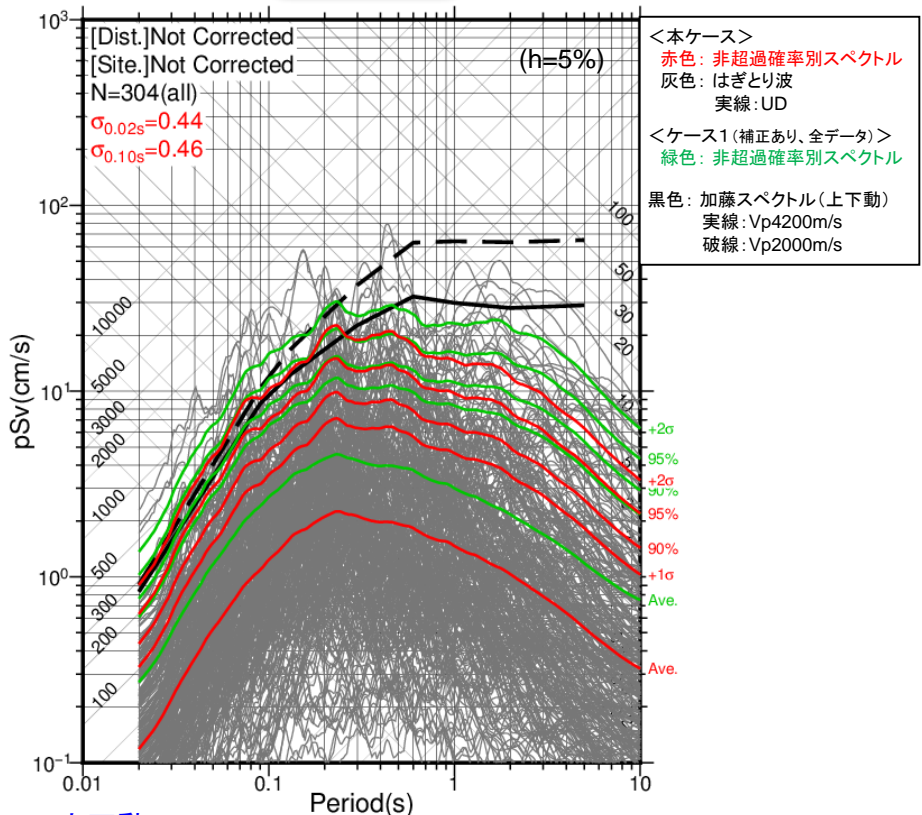
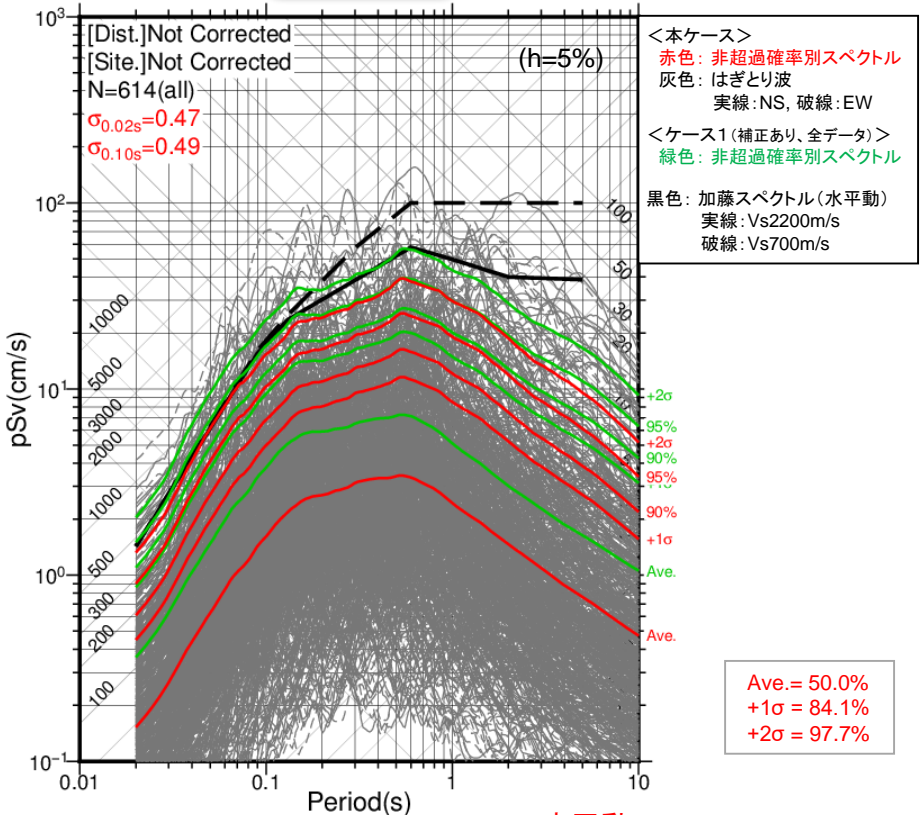
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (2/20)

ケース1'a: 全データ(選別・重み付けなし)、震源距離・地盤物性の補正なし

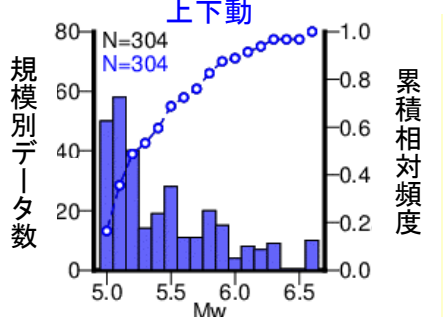
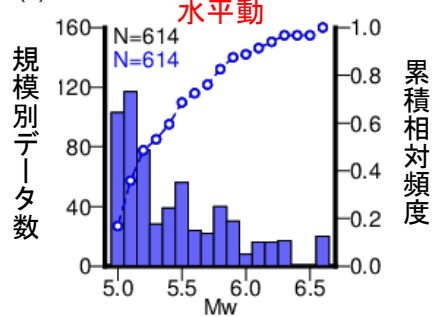
参考

水平動

上下動



規模別の記録数→
 灰色: 全記録
 青色: 本ケースでの対象記録
 ※本ケースでは両者は重なる。



・ 震源距離補正を施さず震央距離30km以内の記録を用いているため震源近傍記録としては遠い記録を含み、さらに地盤物性補正も施していないため地震基盤相当面での地震動として適切ではないため、参考扱いとする。
 ・ 地震動レベルはケース1よりも顕著に小さくなり、平均+2σで加藤スペクトルと同等である。
 → 標準応答スペクトルの設定には使用しない。 76

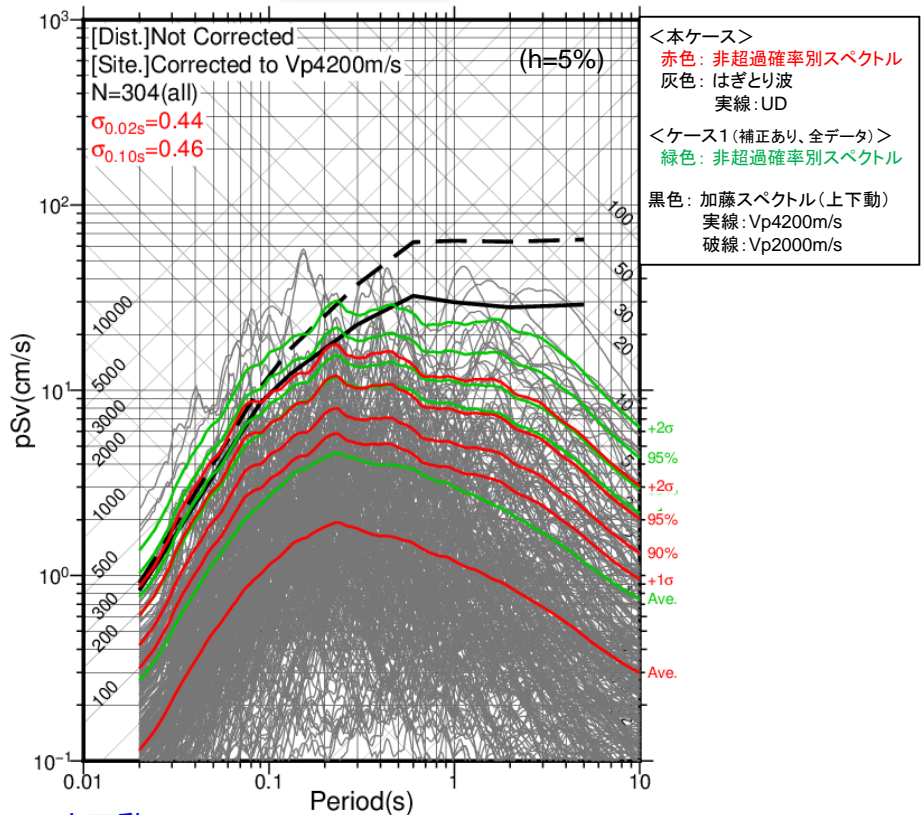
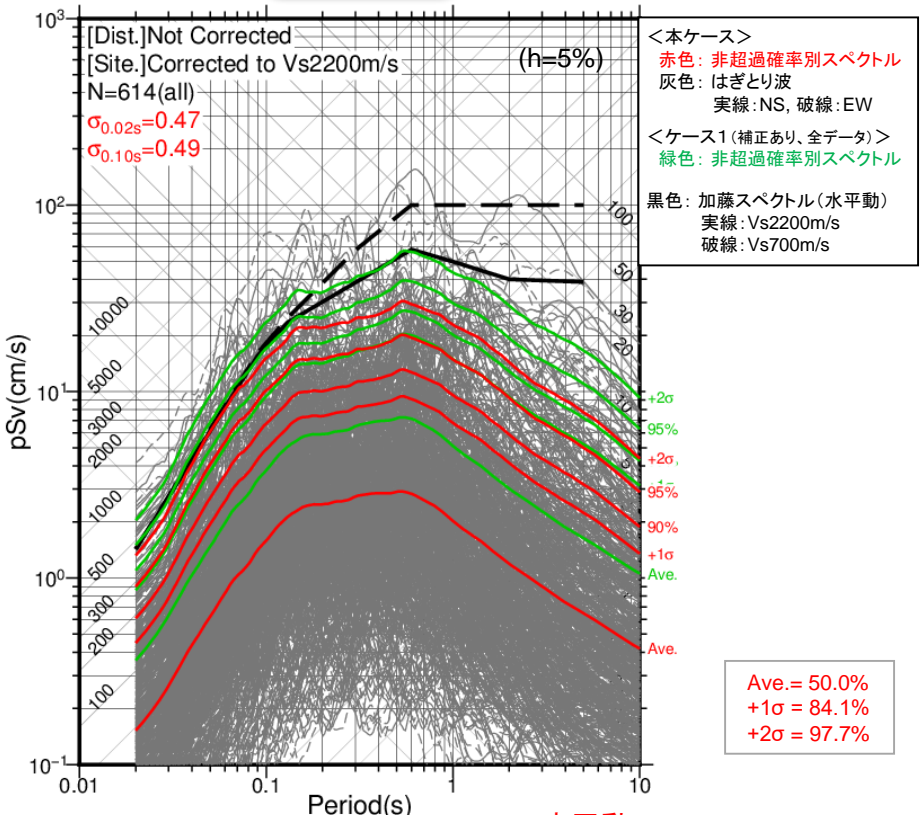
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (3/20)

ケース1'b: 全データ(選別・重み付けなし)、地盤物性補正のみ(震源距離補正なし)

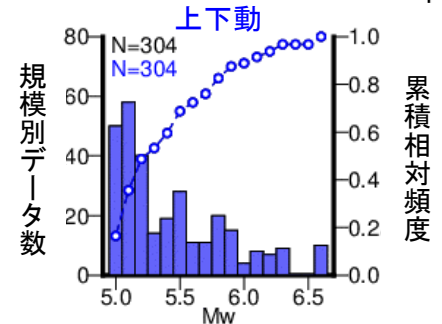
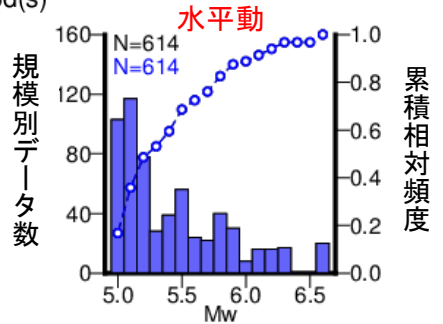
参考

水平動

上下動



規模別の記録数→
 灰色: 全記録
 青色: 本ケースでの対象記録
 ※本ケースでは両者は重なる。

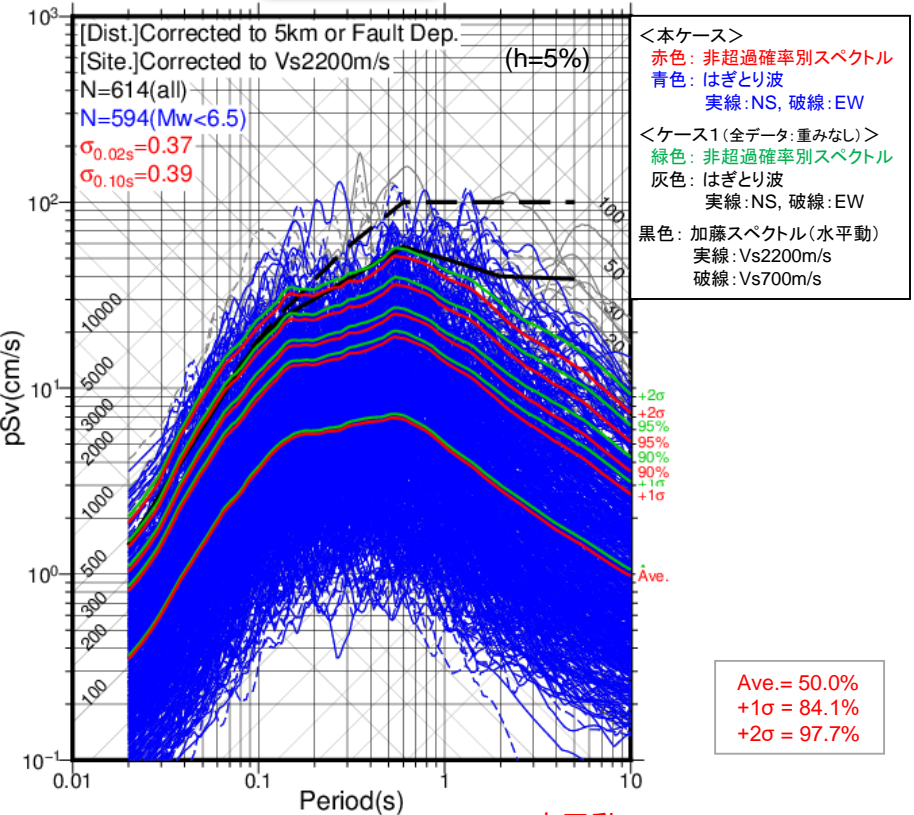


- 震源距離補正を施さず震央距離30km以内の記録を用いているため震源近傍記録としては遠い記録を含むため、参考扱いとする。
 - 地震動レベルはケース1よりも顕著に小さくなり、平均+2σで加藤スペクトルと同等である。
- 標準応答スペクトルの設定には使用しない。

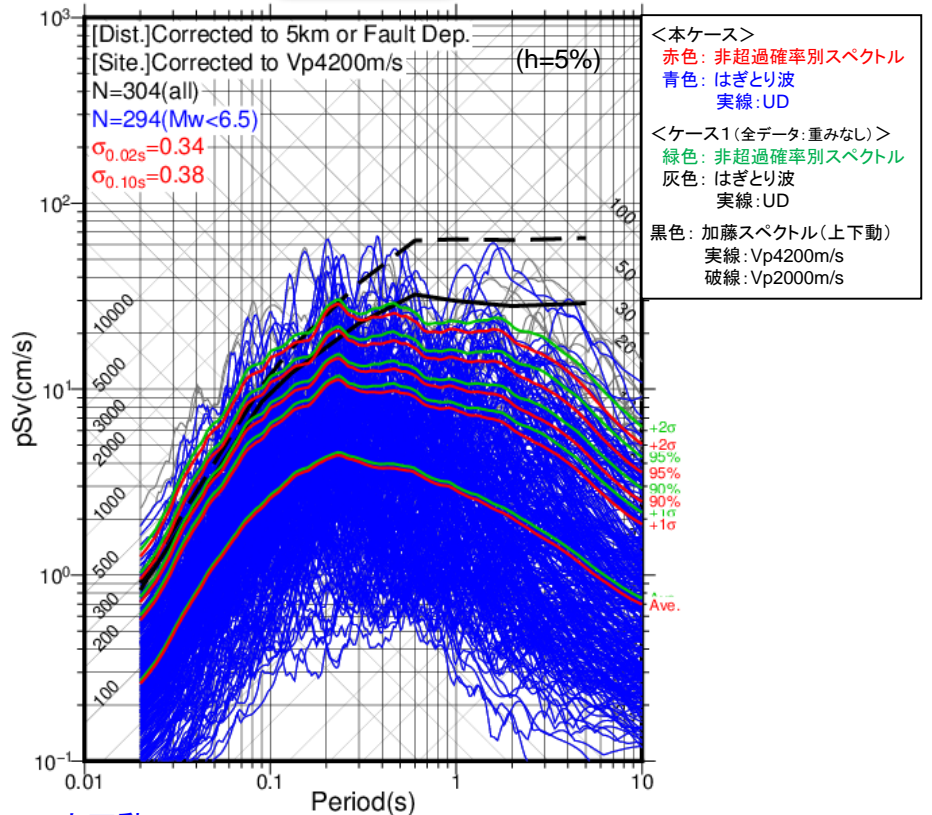
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (4/20)

ケース2: 対象地震 (Mw6.5未満)

水平動



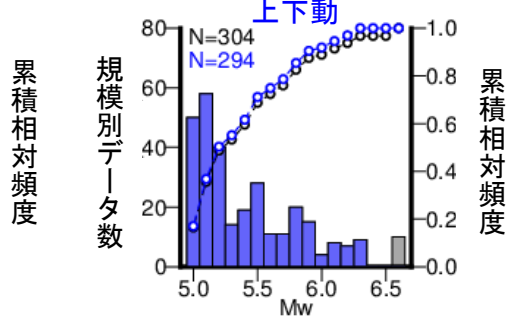
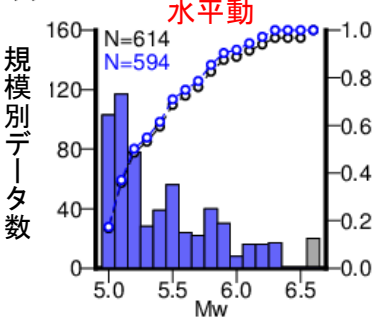
上下動



規模別の記録数 →

灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録

※地震動強さのヒストグラム (対数正規分布との比較確認) はp.87に示す。



Mw6.5以上で「震源を特定して策定する地震動」と「地域性考慮の震源を特定せず策定する地震動」にあたる地震を除外。

- ・データ充足度が高い。
- ・震源を特定せず策定する地震動(全国共通)の対象地震の概念と調和的である。
- ・補正処理、はぎとり解析による不確実さを含む (はぎとり精度はケース2で確認)。

→ 標準応答スペクトルの設定に使用。

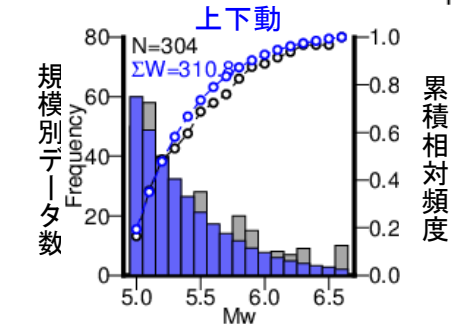
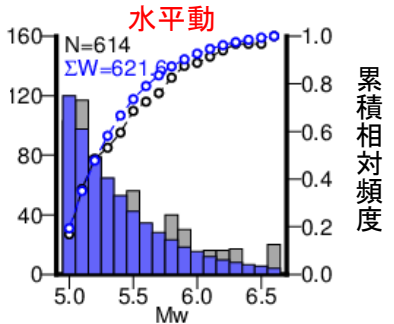
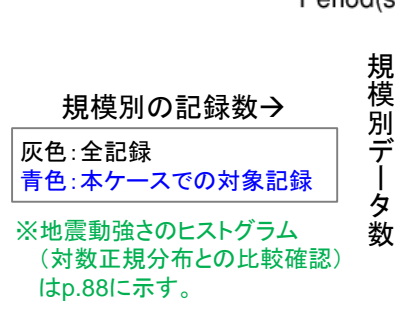
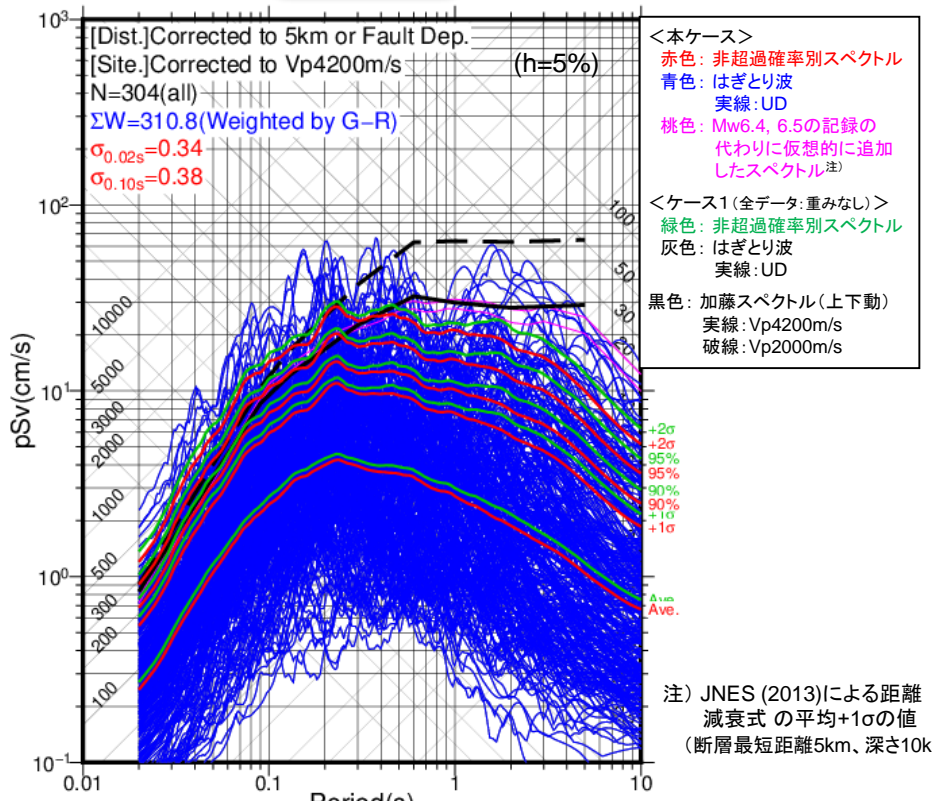
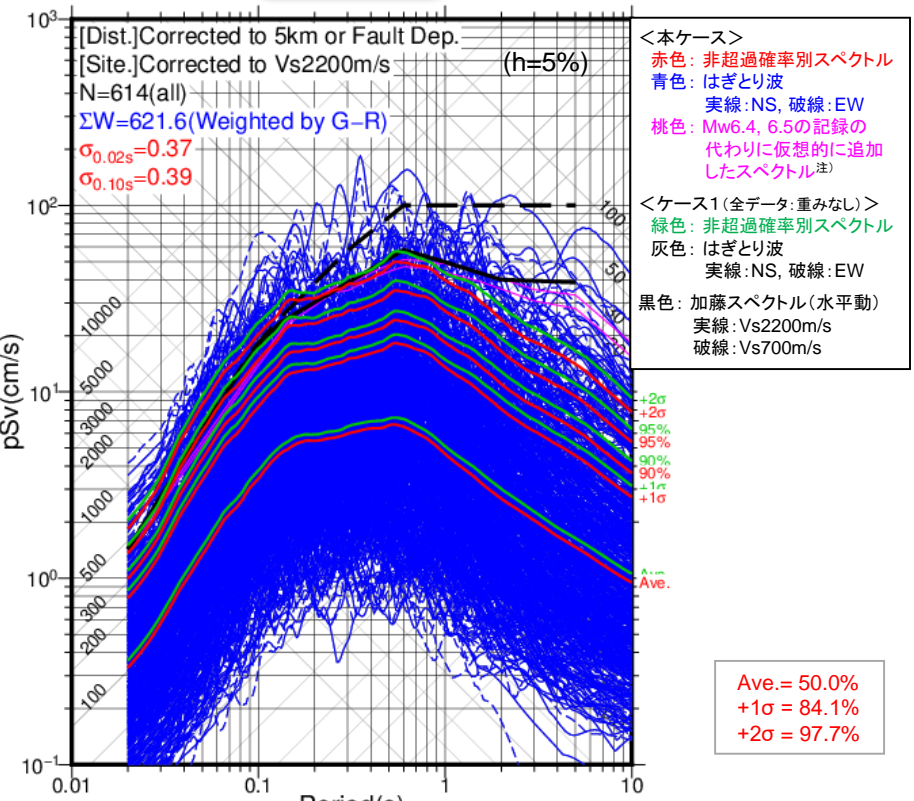
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (5/20)

ケース3: 規模別の地震・記録数 (G-R則想定) *

* 重み付けの詳細はp.73参照

水平動

上下動



より長期間に渡って観測することを想定して理想的にG-R則に従う重み付けを施した。

- データ充足度が高い。
- 長期的に収集する地震・記録の数(規模別頻度)に係る不確かさが低い。
- 補正処理、はざとり解析による不確かさを含む。

→ 標準応答スペクトルの設定に使用。

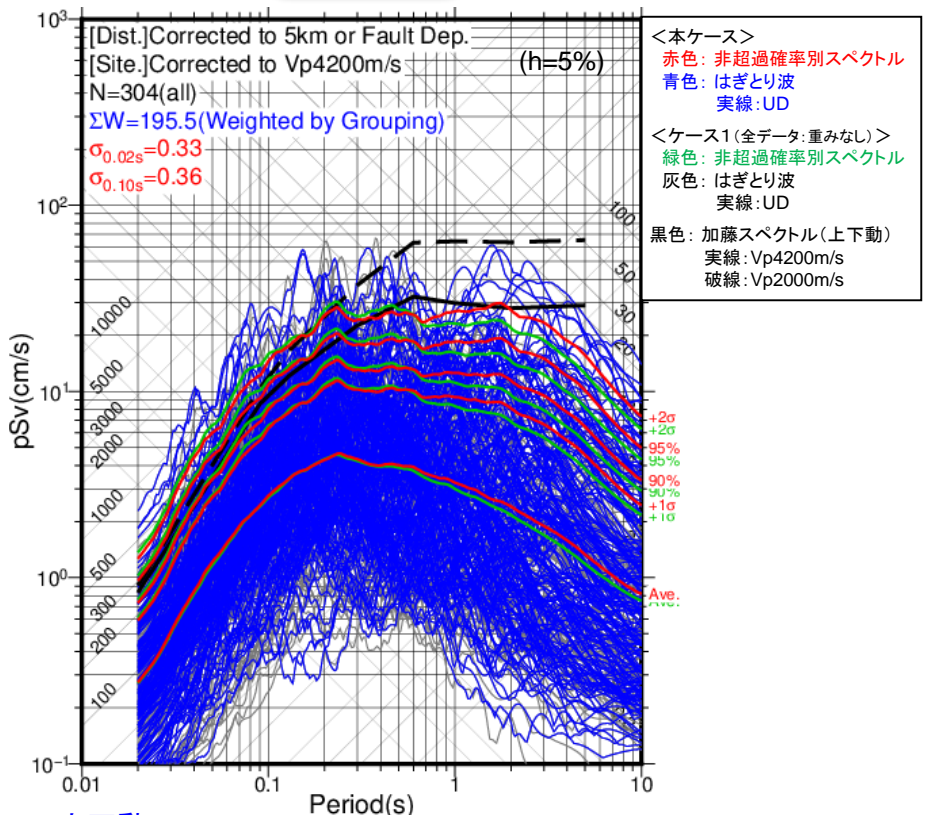
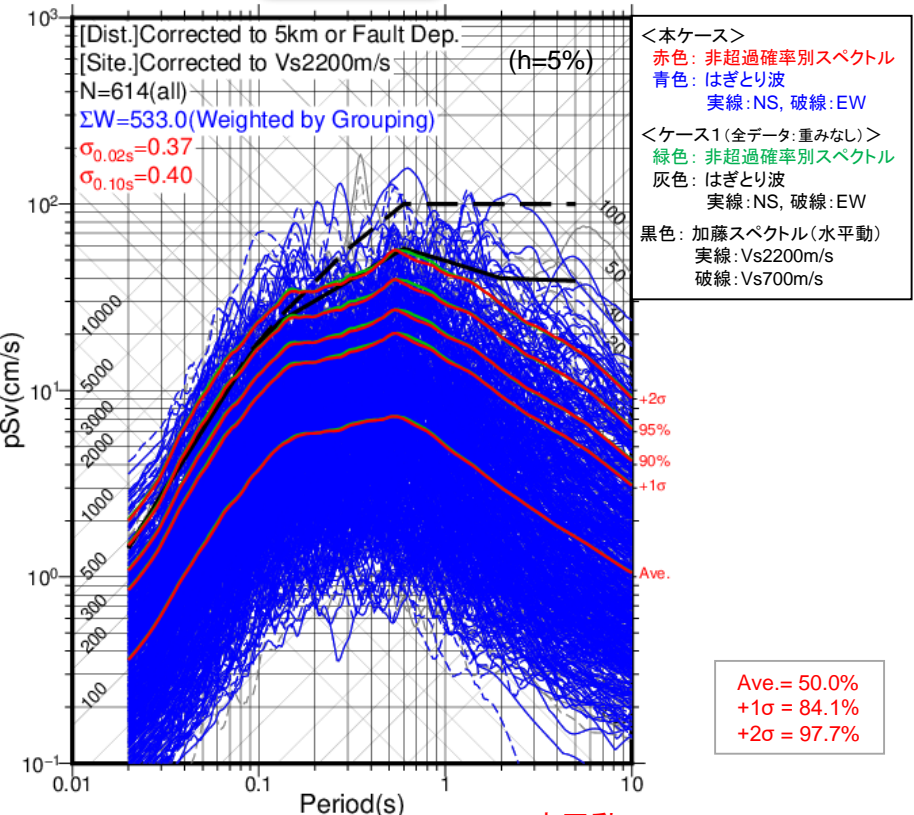
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (6/20)

ケース4a: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

水平動

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

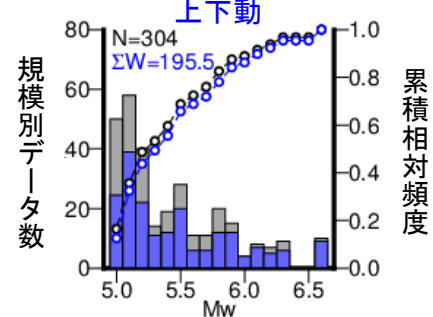
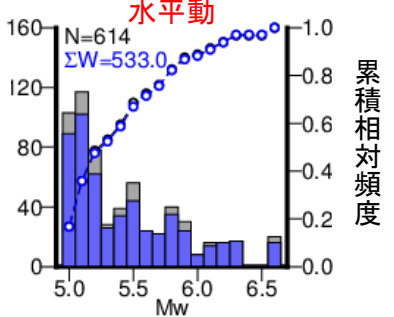
上下動



規模別の記録数→

灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録

※地震動強さのヒストグラム
(対数正規分布との比較確認)
はp.89に示す。



はぎとり解析の精度が低いこと(人工要因)による特徴的な地震動の影響を低減。

- 対象地震(規模)、補正処理に係る不確実さを含む。
- はぎとり解析に係る不確実さが低い。

→ 標準応答スペクトルの設定に使用。

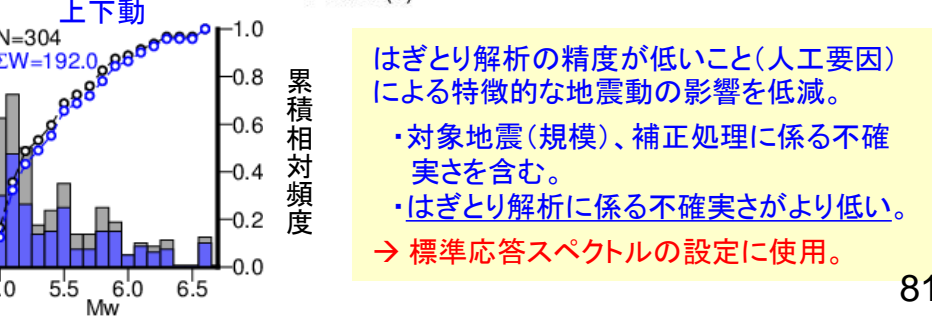
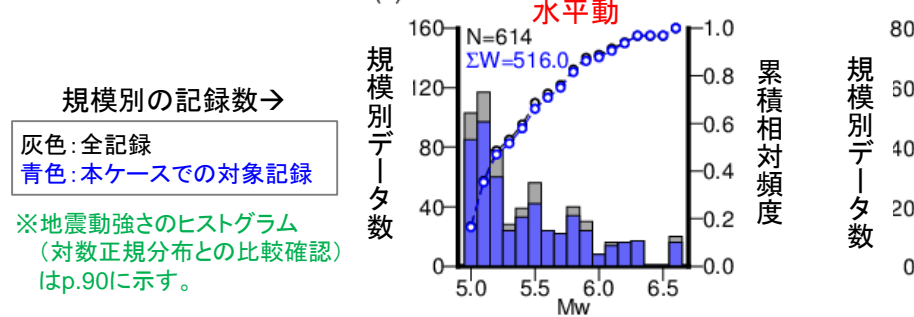
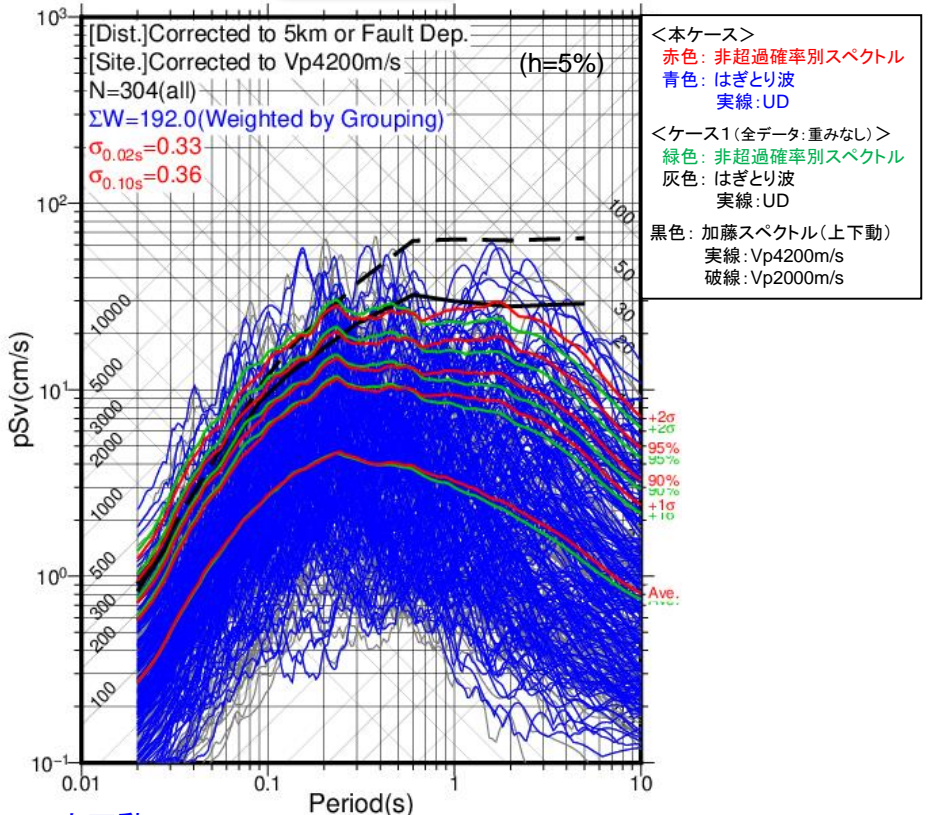
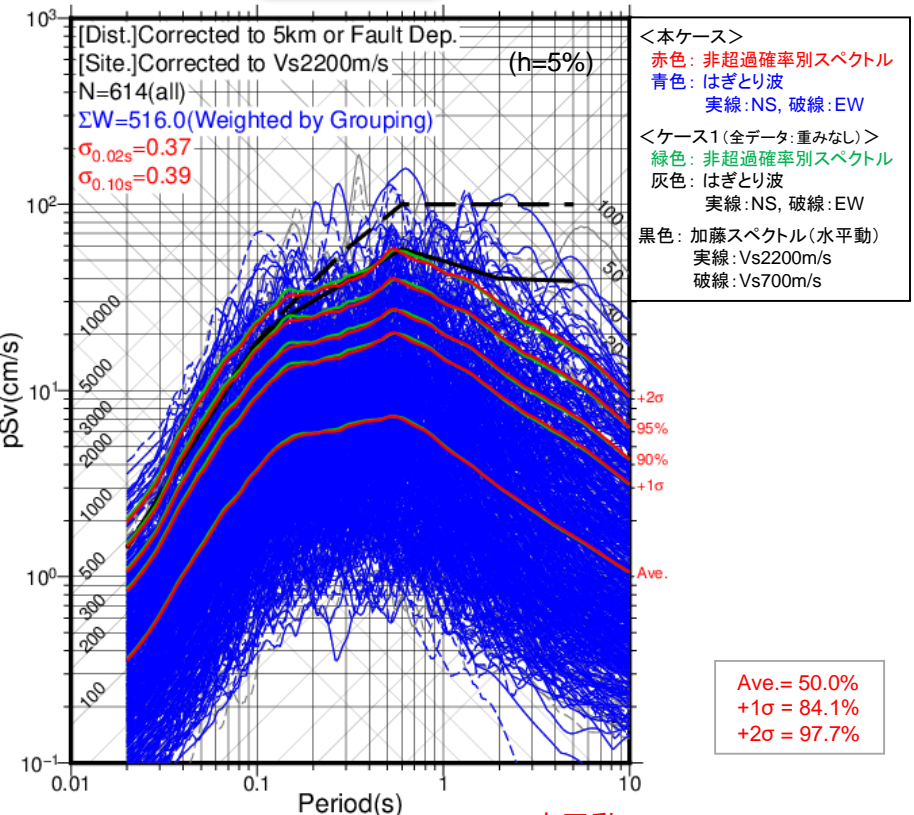
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (7/20)

ケース4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

水平動

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

上下動

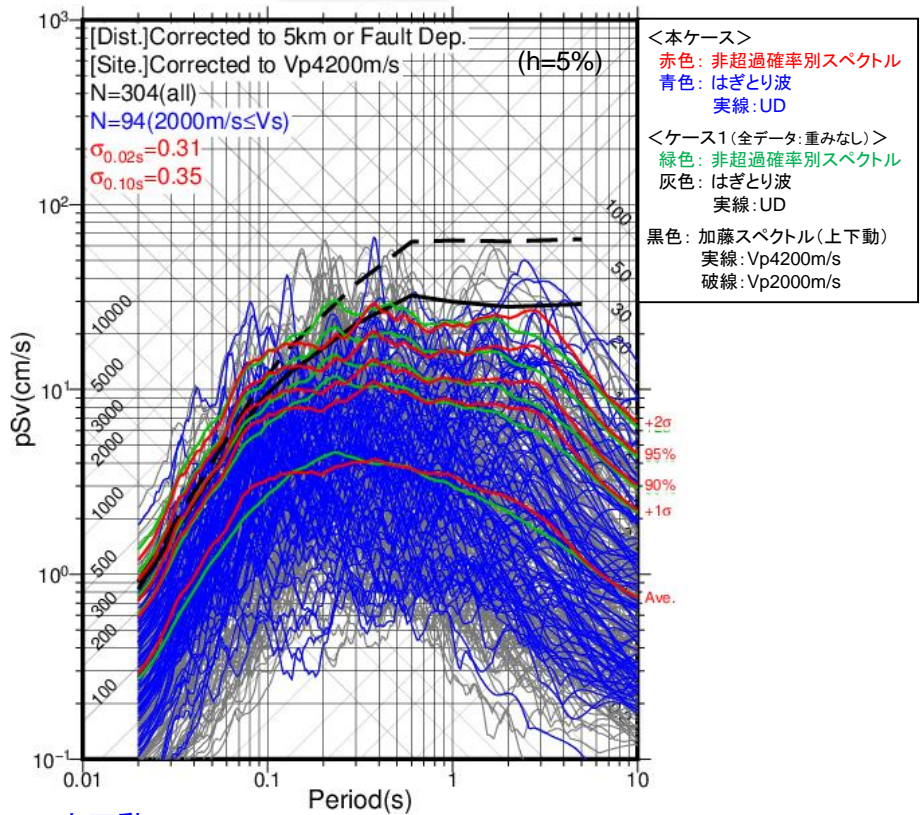
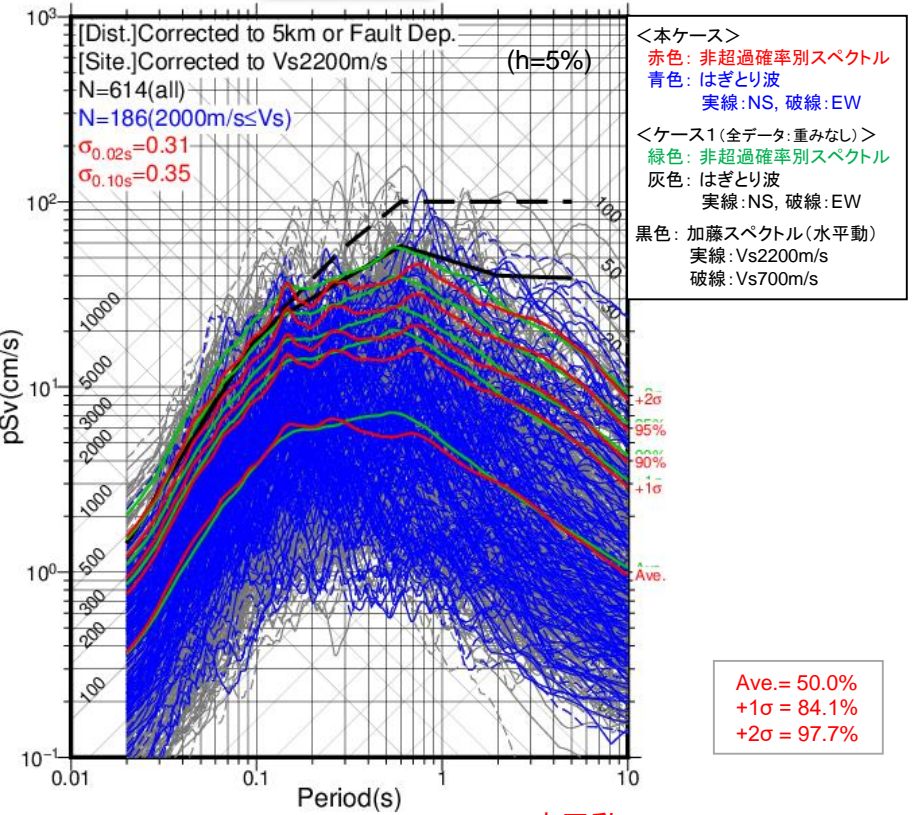


7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (8/20)

ケース5: 地中地震計位置の地盤のVs (Vs=2000m/s以上)

水平動

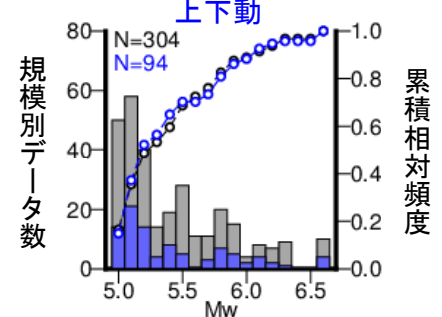
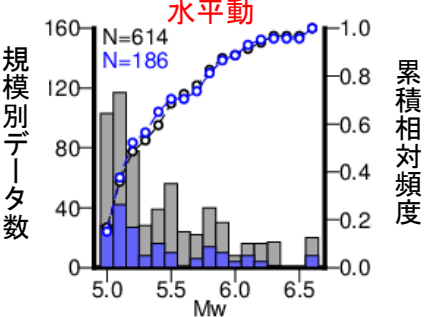
上下動



規模別の記録数→

灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録

※地震動強さのヒストグラム (対数正規分布との比較確認) はp.91に示す。



地盤物性補正(観測点固有の地盤増幅を除去する処理)に係る不確かさを排除。

- ・データ充足度が低い。
- ・対象観測点に制約がある。
- ・地盤物性補正の不確かさがほとんど無い。
- ・対象地震(規模)、震源距離補正、はぎとり解析に係る不確かさを含む。

→ 標準応答スペクトルの設定には使用しない。82

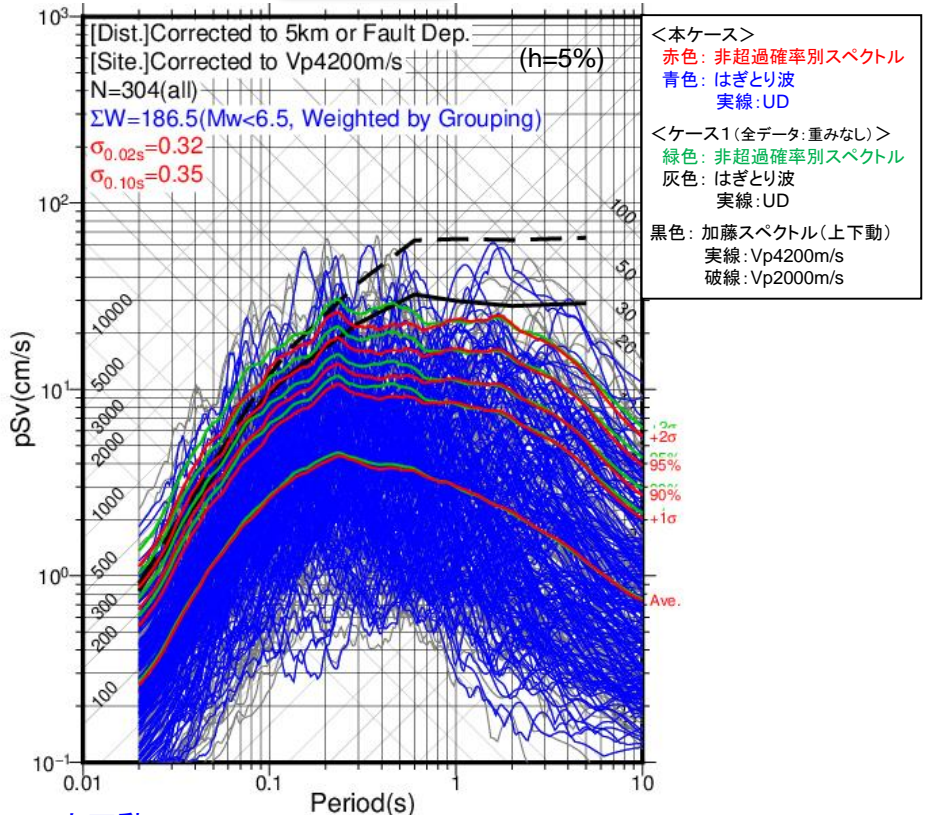
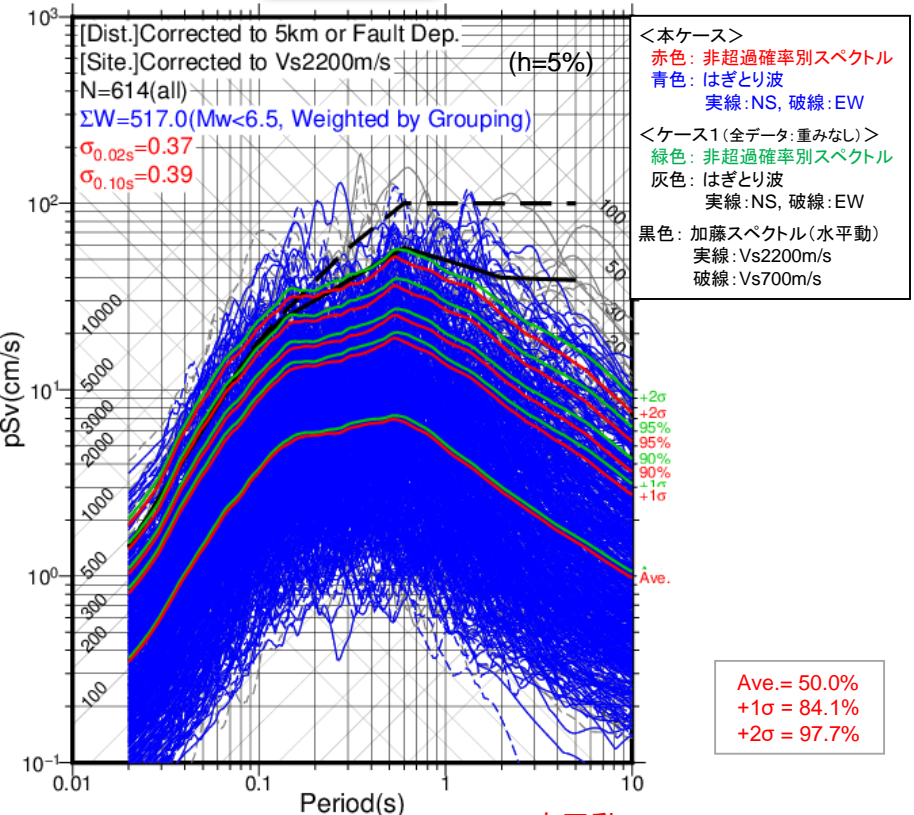
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (9/20)

はざとり精度の確認用 | ケース2'a: 対象地震(Mw6.5未満)、はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

水平動

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合 (グループ分けの詳細はp.61参照)

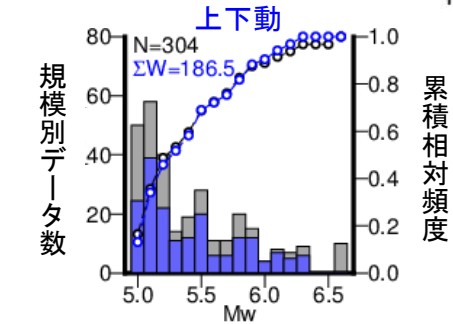
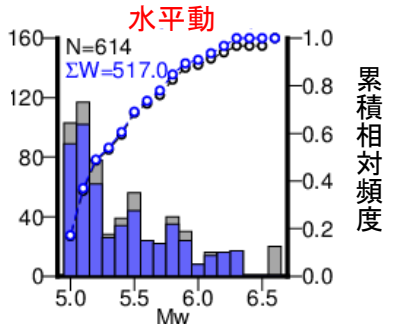
上下動



規模別の記録数 →

灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録

※地震動強さのヒストグラム (対数正規分布との比較確認) はp.92に示す。



ケース2 (Mw6.5未満)について、ケース4と同様に人工要因による影響を低減。

- データ充足度がやや低い。
- 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)の対象地震の概念と調和的である。
- はざとり精度による不確かさが低い。

→ 標準応答スペクトルの設定の際に、はざとり精度の確認に使用。

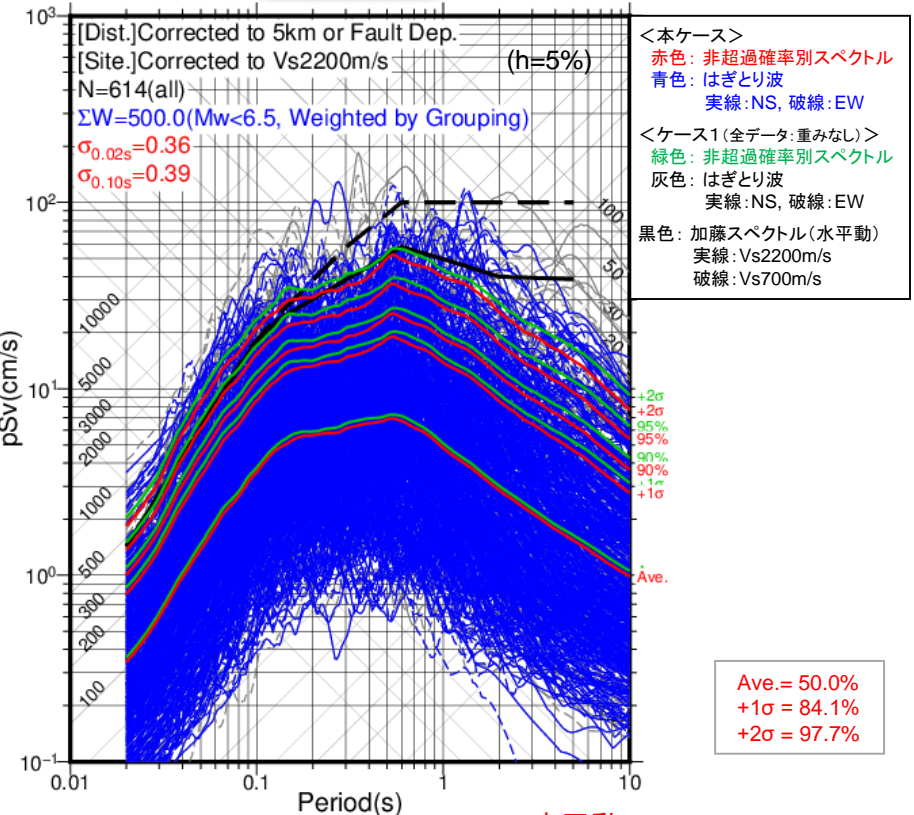
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (10/20)

はざとり精度の確認用 | ケース2'b: 対象地震(Mw6.5未満)、はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

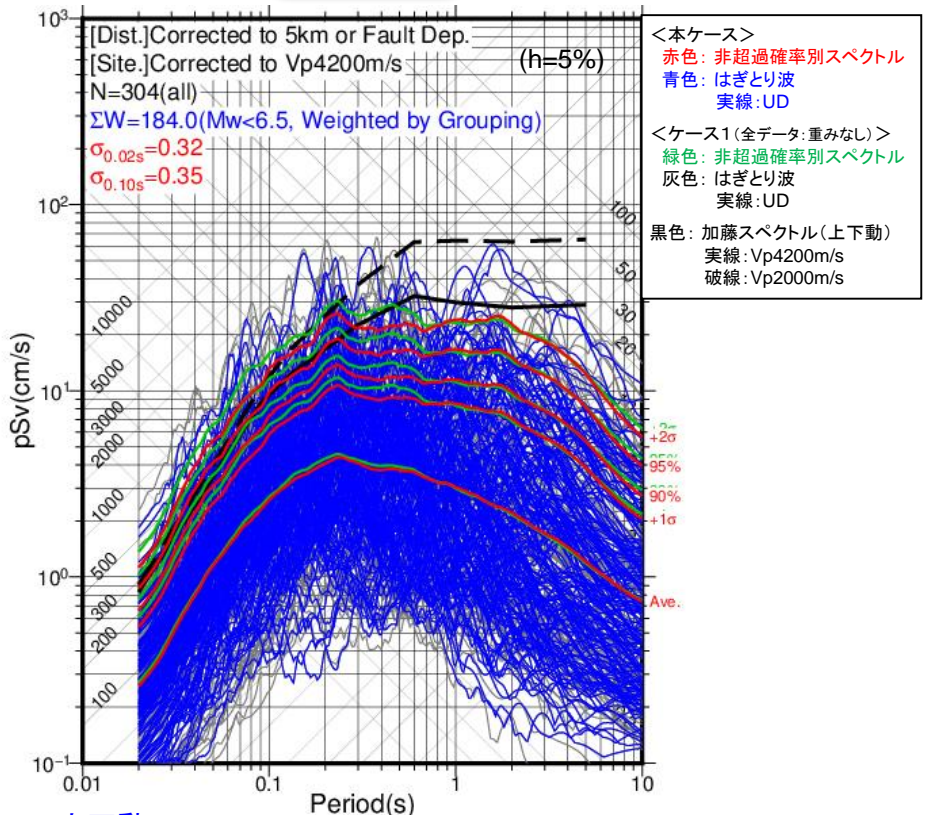
水平動

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合 (グループ分けの詳細はp.61参照)

上下動

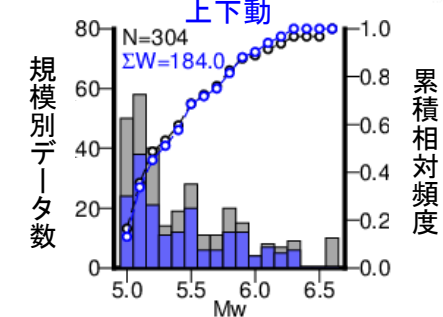
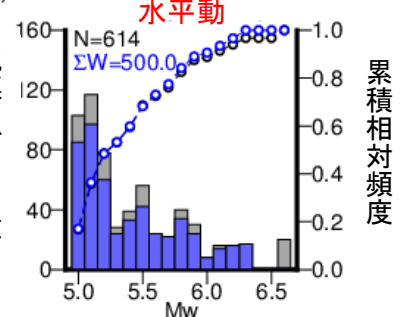


Ave. = 50.0%
+1σ = 84.1%
+2σ = 97.7%



規模別の記録数 →
灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録

※地震動強さのヒストグラム (対数正規分布との比較確認) はp.93に示す。



ケース2 (Mw6.5未満)について、ケース4と同様に人工要因による影響を低減。

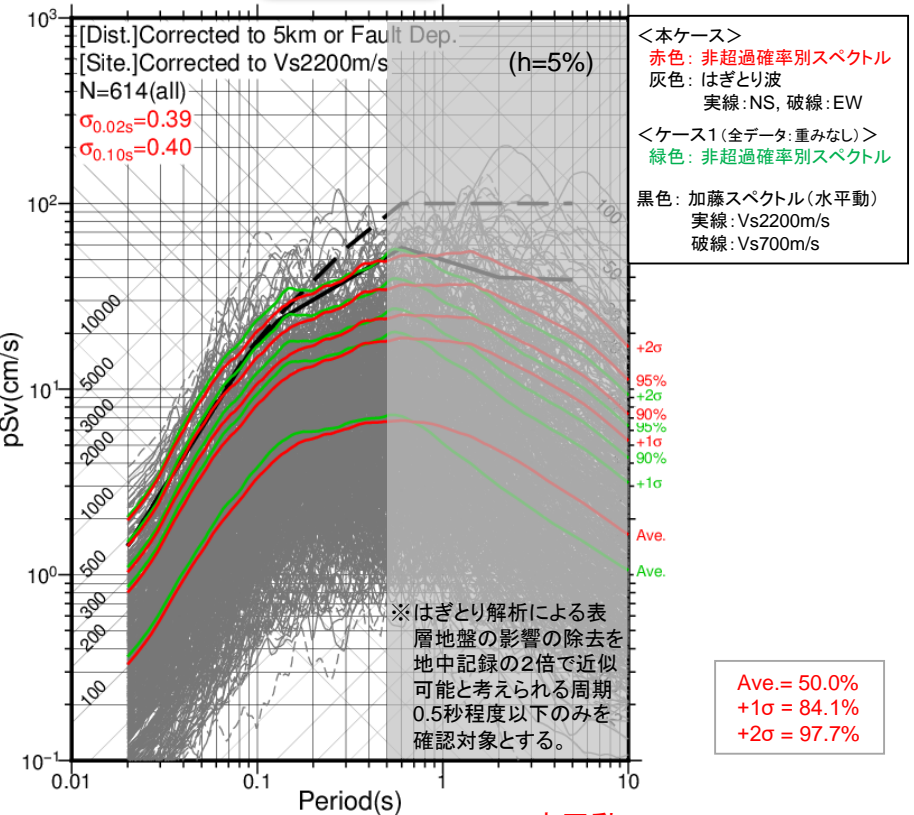
- データ充足度がやや低い。
- 震源を特定せず策定する地震動(全国共通)の対象地震の概念と調和的である。
- はざとり精度による不確かさがより低い。

→ 標準応答スペクトルの設定の際に、はざとり精度の確認に使用。

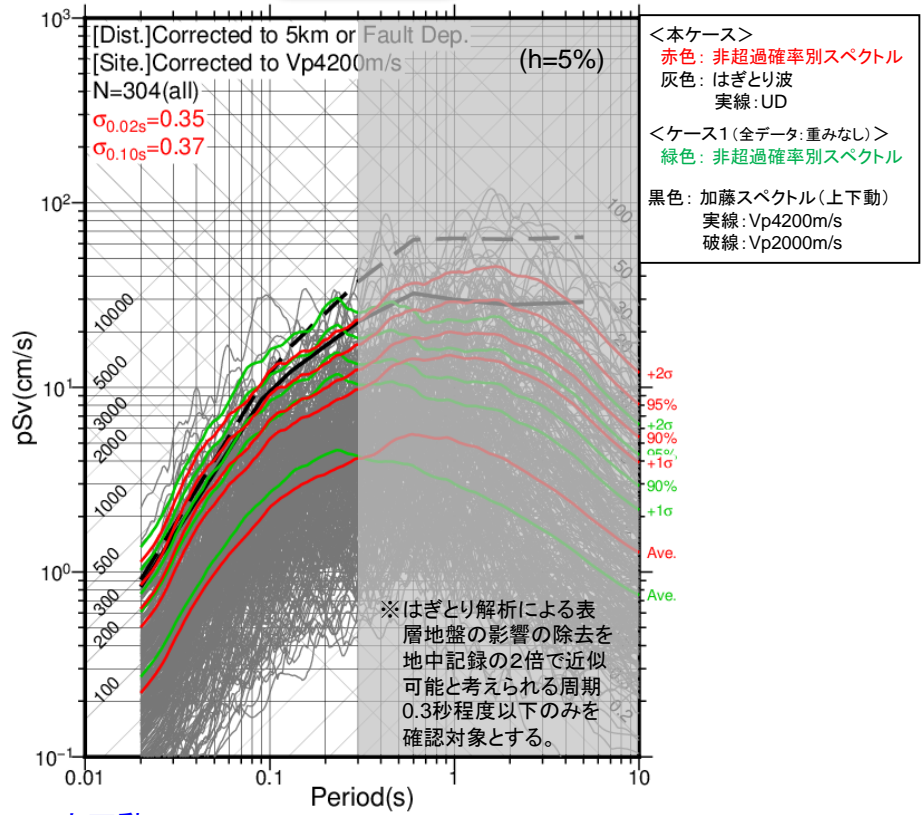
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (11/20)

はぎとり精度の確認用 | ケース4': はぎとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合

水平動



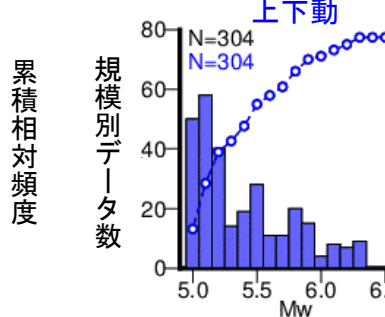
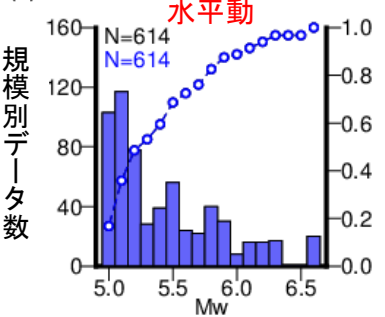
上下動



規模別の記録数 →

灰色: 全記録
青色: 本ケースでの対象記録
※本ケースでは両者は重なる。

※地震動強さのヒストグラム (対数正規分布との比較確認) はp.94に示す。



地中観測記録を単純に2倍する。

- データの充足度が高い。
- はぎとり解析により2Eとなる周期0.5秒程度以下におけるはぎとり精度が安定している。
- 全周期帯(長周期側)での精度がない。

→ 標準応答スペクトルの設定の際に、はぎとり精度の確認に使用。

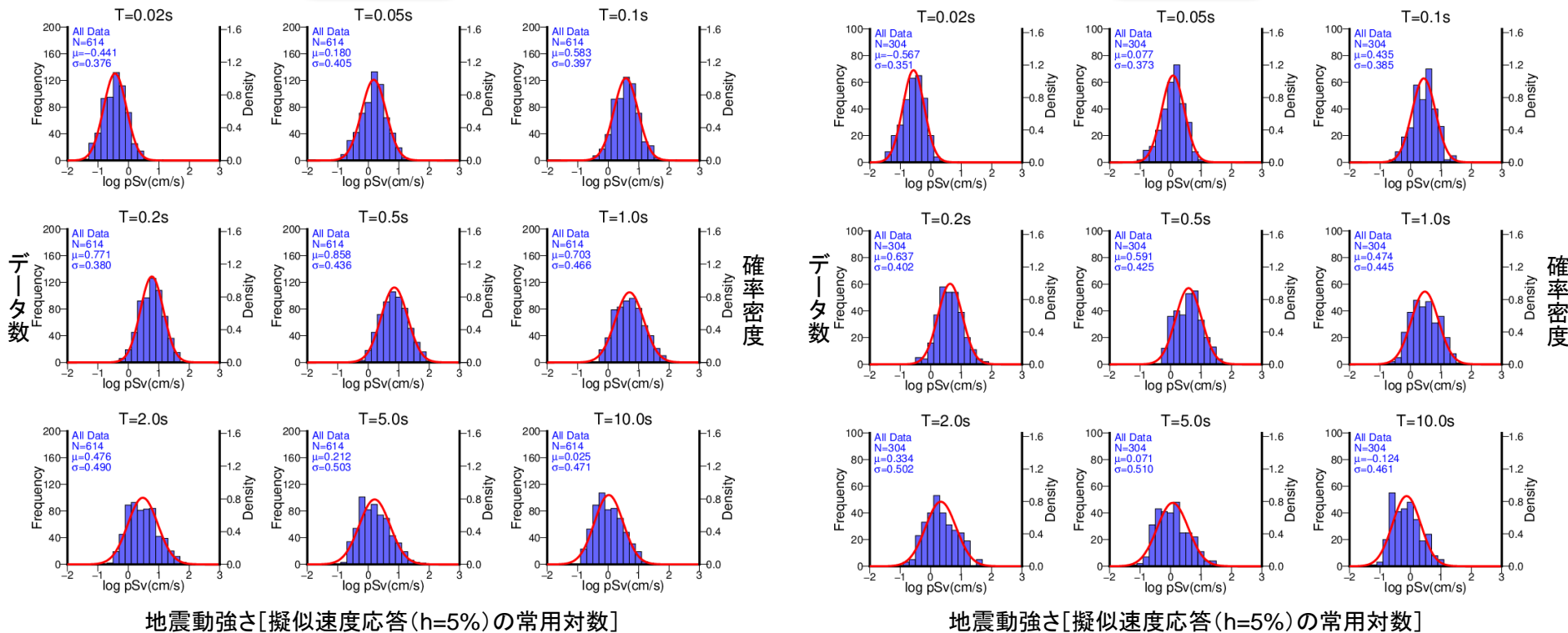
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (12/20)

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (1/9)

ケース1: 全データ(選別・重み付けなし)

水平動

上下動



青色: データ数
赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

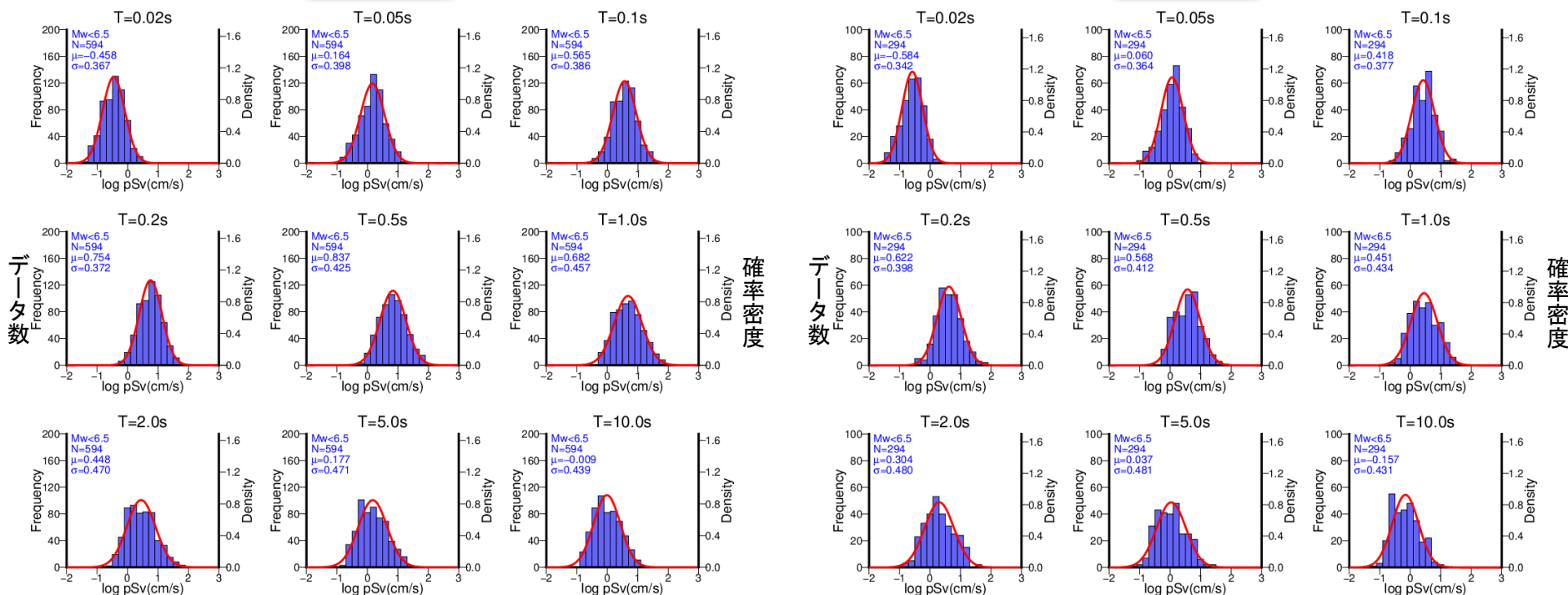
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (13/20)

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (2/9)

ケース2: 対象地震(Mw6.5未満)

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

青色: データ数

赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (14/20)

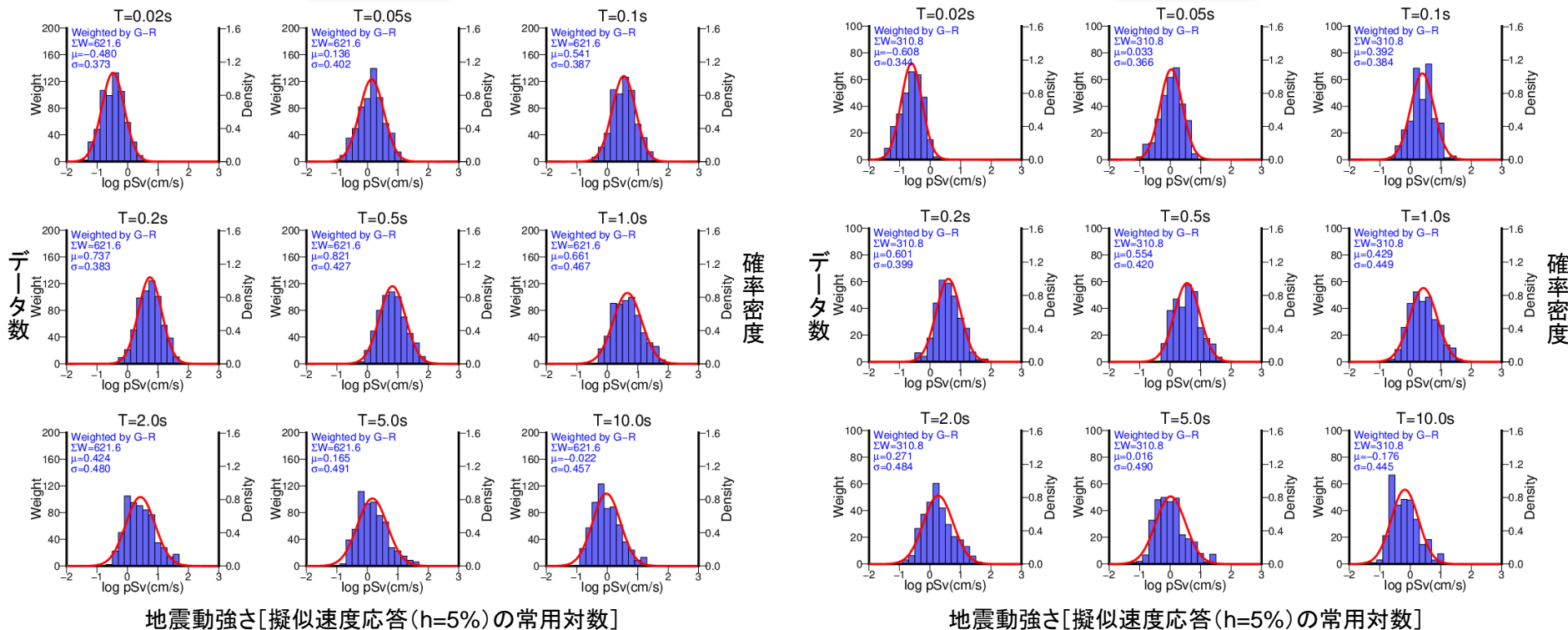
代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (3/9)

ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定) *

* 重み付けの詳細はp.73参照

水平動

上下動



青色: データ数

赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (15/20)

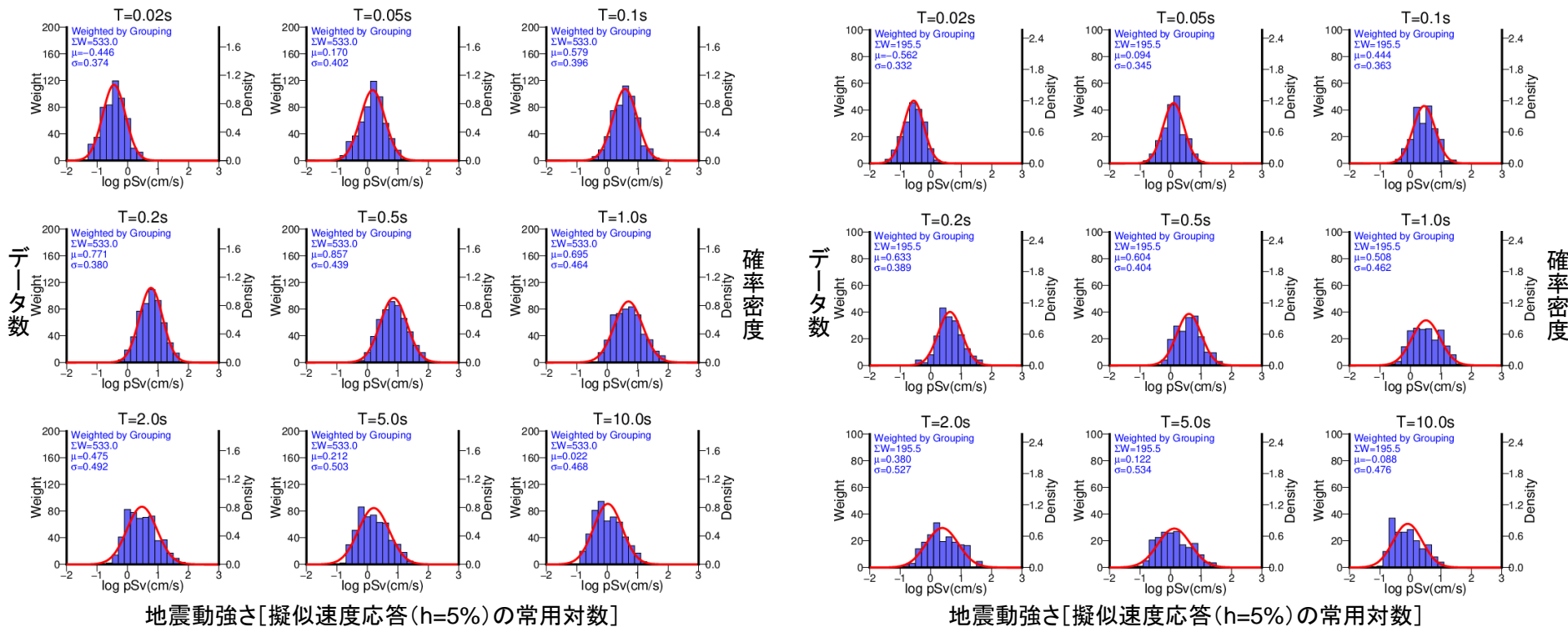
代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (4/9)

ケース4a: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



青色: データ数
赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (16/20)

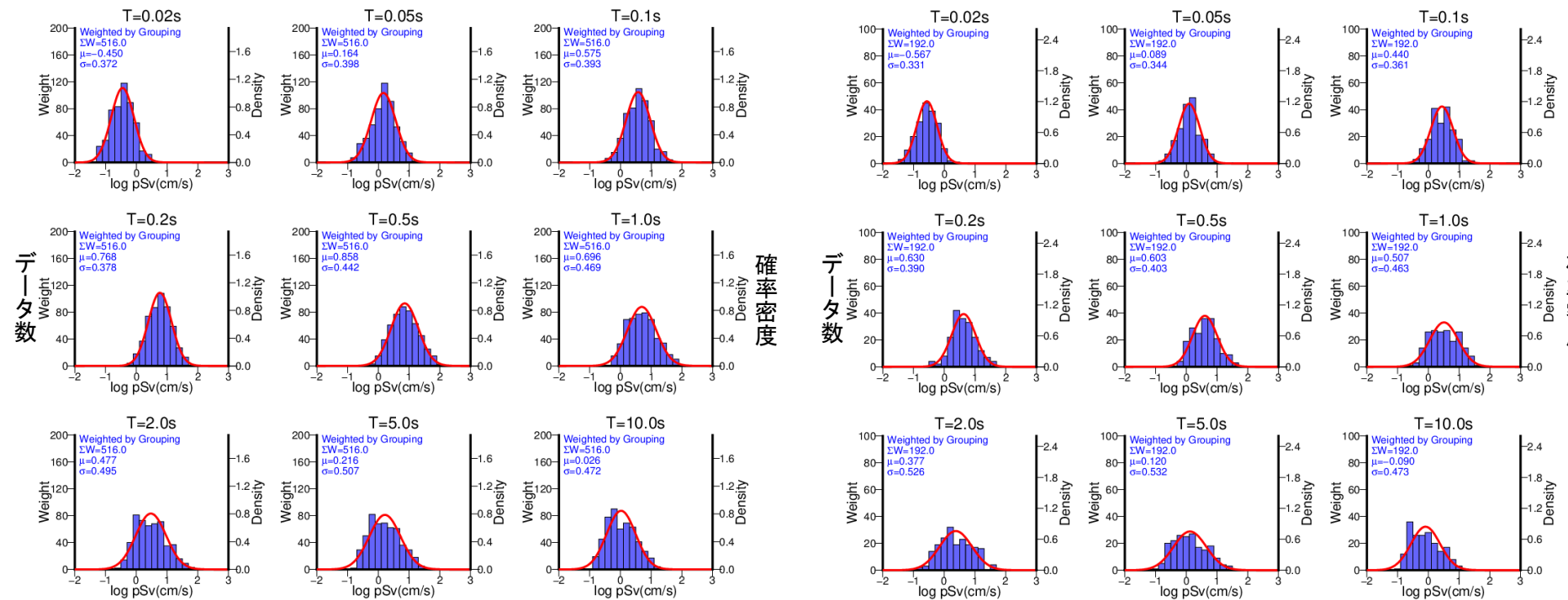
代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (5/9)

ケース4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

青色: データ数
赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

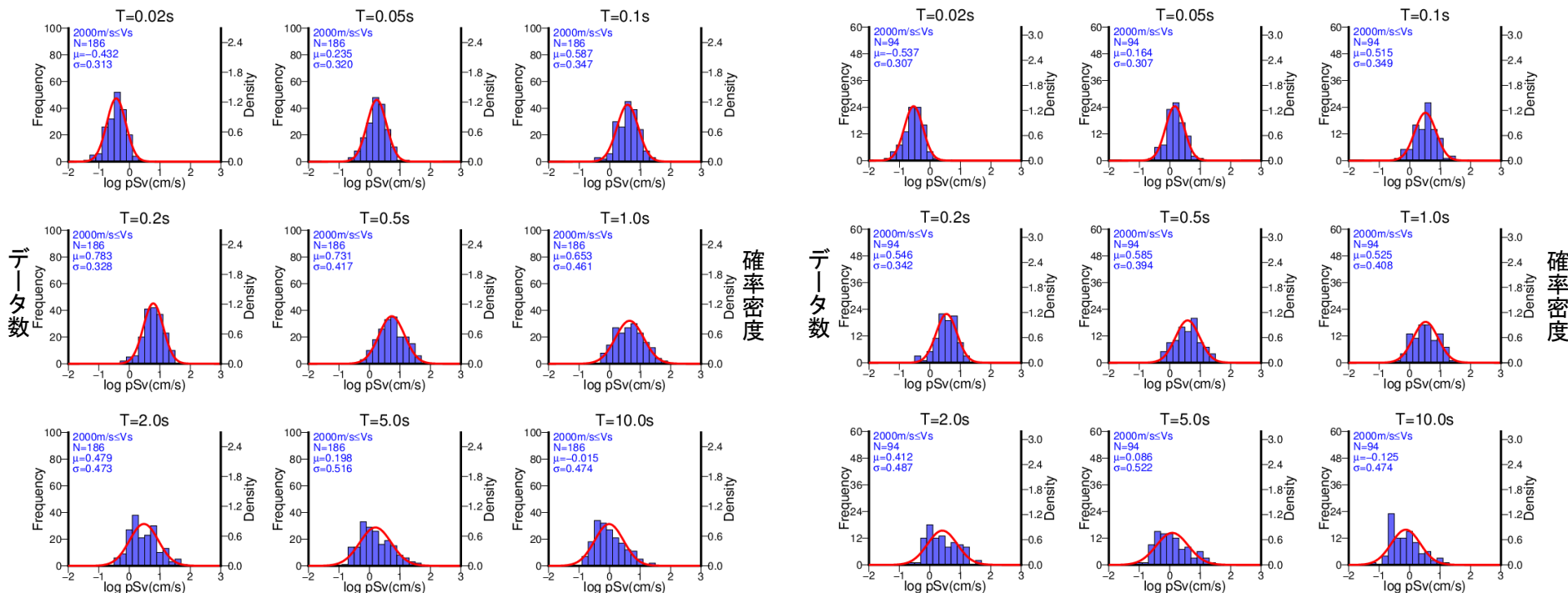
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (17/20)

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (6/9)

ケース5: 地中地震計位置の地盤のVs (Vs=2000m/s以上)

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

青色: データ数

赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (18/20)

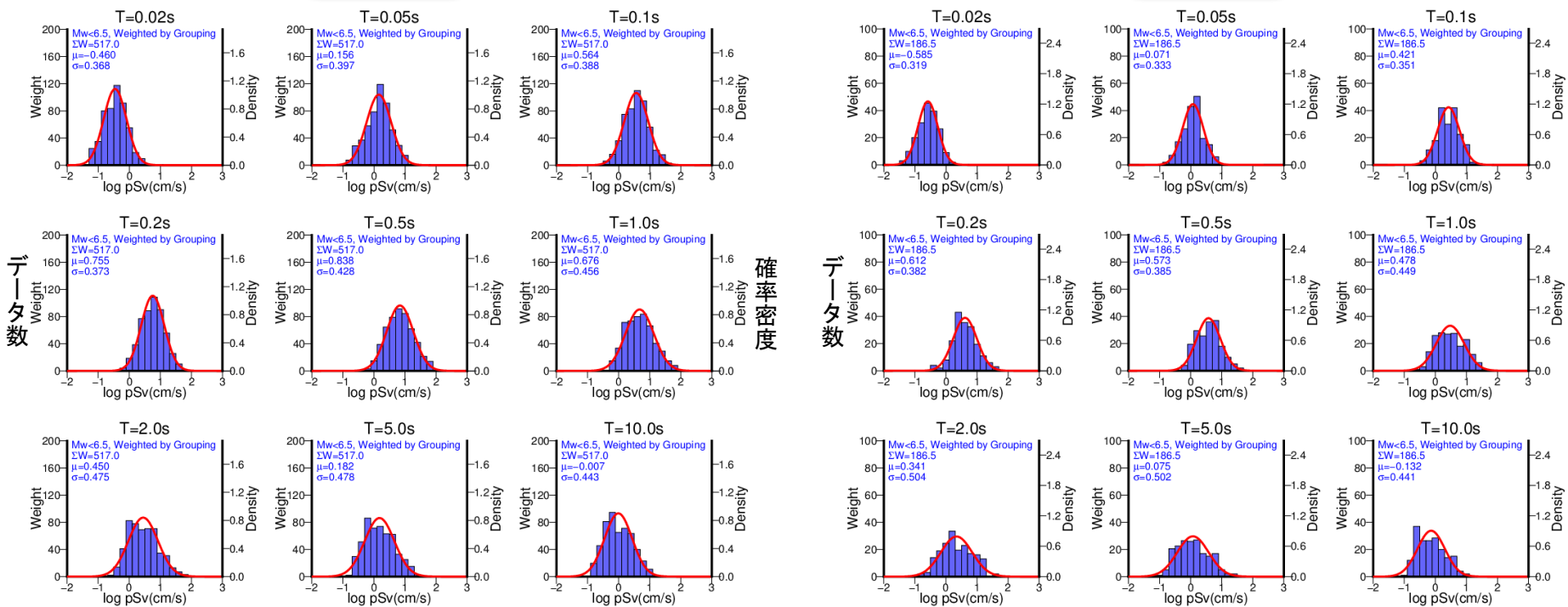
代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (7/9)

はざとり精度の確認用 | ケース2'a: 対象地震(Mw6.5未満)、
はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

青色: データ数
赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (19/20)

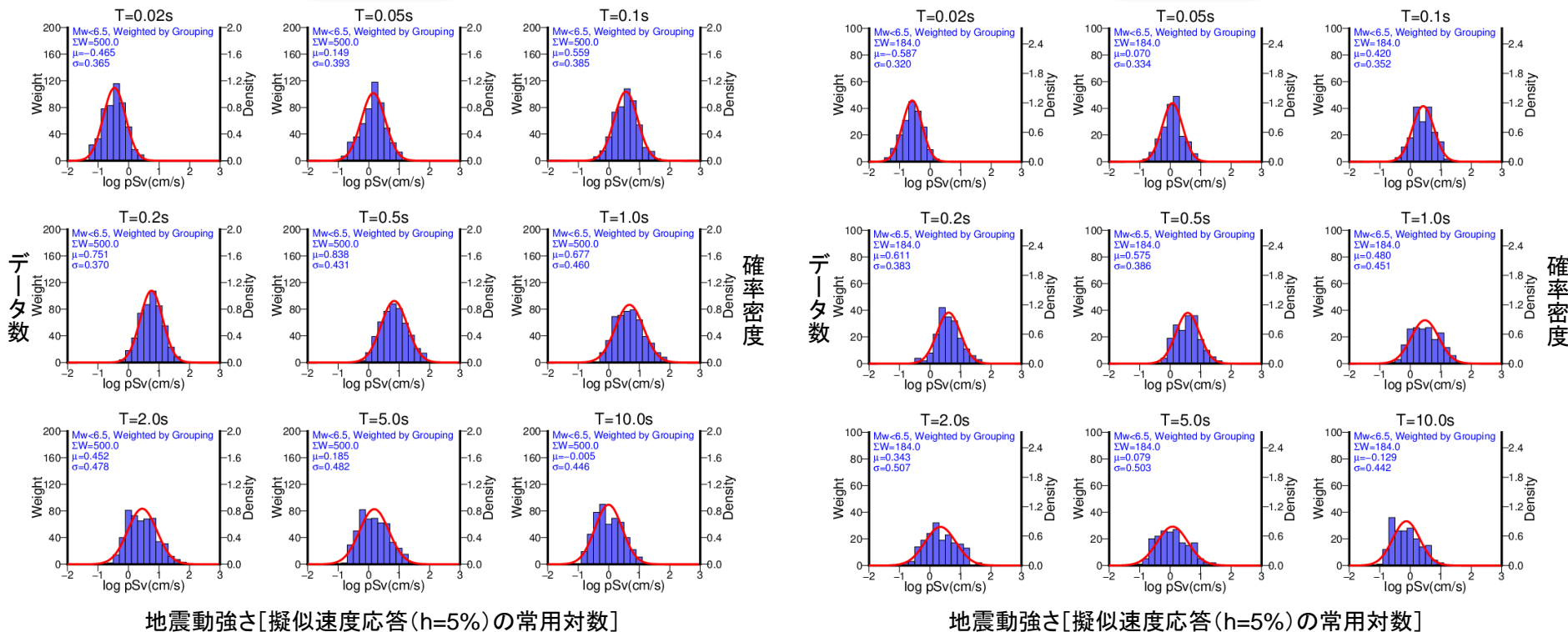
代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (8/9)

はぎとり精度の確認用 | ケース2'b: 対象地震(Mw6.5未満)、
はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

青色: データ数
赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

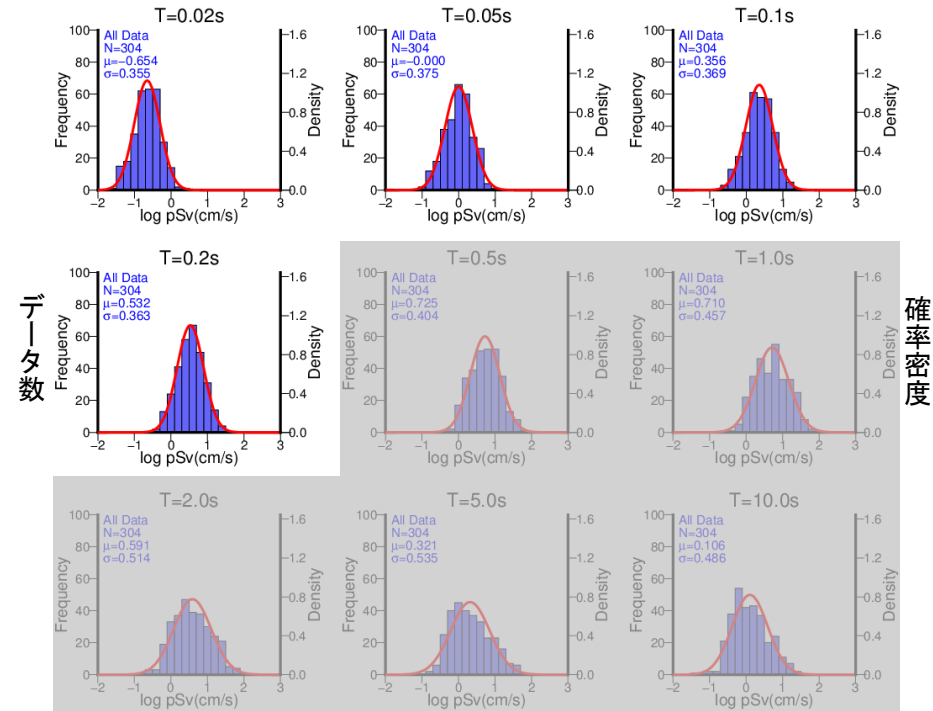
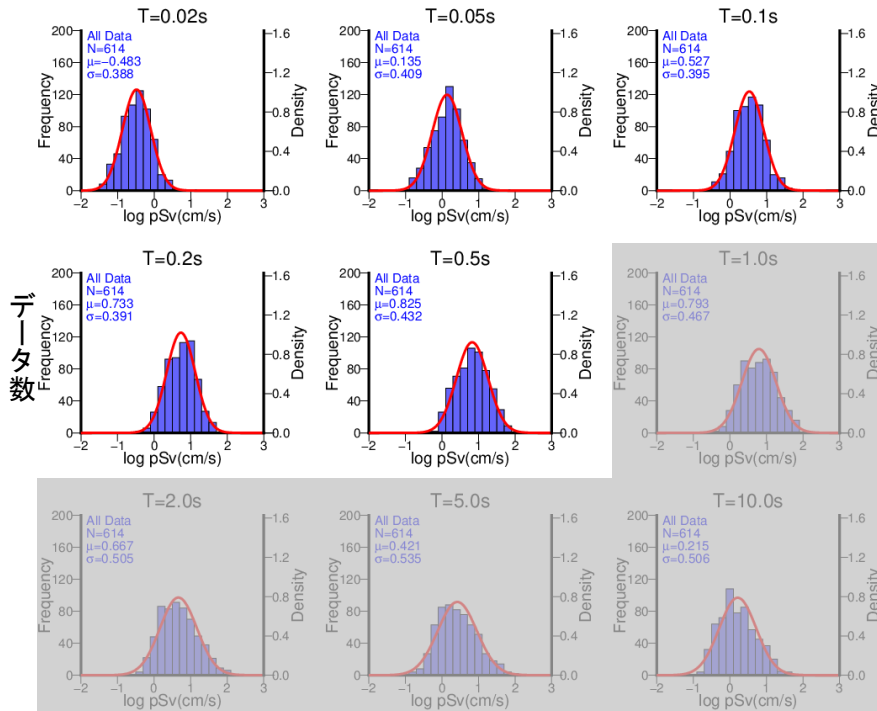
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (20/20)

代表的な周期における地震動強さのヒストグラム(データと対数正規分布の比較) (9/9)

はぎとり精度の確認用 | ケース4': はぎとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合

水平動

上下動



地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

※はぎとり解析による表層地盤の影響の除去を地中記録の2倍で近似可能と考えられる周期0.5秒程度以下のみを確認対象とする。

※はぎとり解析による表層地盤の影響の除去を地中記録の2倍で近似可能と考えられる周期0.3秒程度以下のみを確認対象とする。

青色: データ数

赤色: 対数正規分布を仮定した確率密度

8. 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認

本章では、以下について示す。

- 8. 1. 標準応答スペクトルの設定
- 8. 2. 標準応答スペクトルの妥当性確認

8.1 標準応答スペクトルの設定 (1/10)

方針 (1/2)

本検討では以下の条件を満たす地震動(地震規模Mw5.0~6.5程度)を対象とする。

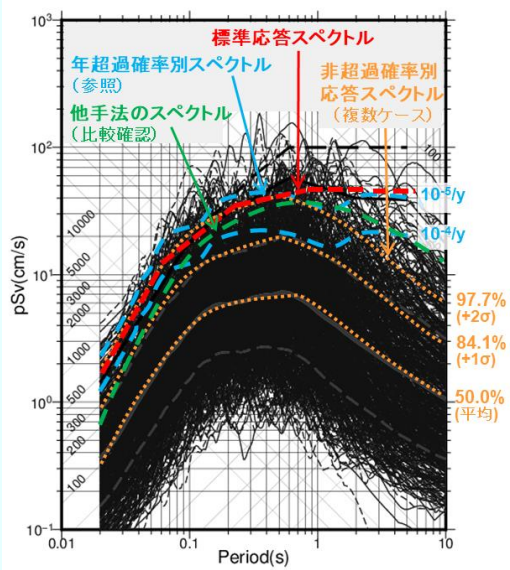
- 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の観測記録に近い。
- 震源近傍における地震基盤相当面での地震動とみなすことができる。

標準応答スペクトルの設定においては、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」として審査ガイドに例示された14地震(Mw5.0~6.2)について一部周期帯で加藤スペクトルを超える地震動が観測されていることから、短周期側(周期1秒程度以下)で加藤スペクトル相当の地震動レベルとなる非超過確率95%のスペクトル(地震規模Mw5.0~6.5程度*1で震源近傍*2の地震基盤相当面での地震動記録より算出)を上回るレベルとすることを前提とする。

そのうえで、地震動の年超過確率の参照及び他手法により求めたスペクトルレベルとの比較による妥当性確認結果*3を踏まえて、非超過確率97.7%(平均+2σ)のスペクトルに基づいて標準応答スペクトルを設定する。

なお、本検討での対象地震動は、地盤特性や解析・処理に係る不確実さを含むこと、また、個々の観測記録には大きな山谷があるが非超過確率別応答スペクトルは周期ごと(300点)に対応する応答値を算出してそれをつなげていることから、保守的なスペクトルレベルとなっていると考え、対象地震動記録を最大包絡する考え方は採らない。

- * 1: 本検討でMw5クラスの地震を含めているのは、短周期の地震動については震源や地下構造の不均質性等と関連して地震動のランダム性が強く、Mw5程度の地震でも震源近傍であれば短周期の地震動レベルがMw6クラスの地震動と同等に大きくなる場合がある影響を考慮するためである。
- * 2: 本検討では地震動観測記録を震源近傍のものとして扱うために、半径10km程度の領域に集める震源距離補正を施している。
- * 3: 標準応答スペクトルのレベルが、地震動の年超過確率で 10^{-4} と 10^{-5} の間程度(詳細はp.111,112)、かつ、他手法(特に距離減衰式)により求めた対象地震規模の上限に近いMw6.5相当の地震の震源近傍における地震動の平均に対して保守性を考慮したレベルであり、さらには「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価との連続性があること(詳細はp.115,116)を確認することにより、妥当性を判断する。



標準応答スペクトル設定のイメージ

8.1 標準応答スペクトルの設定 (2/10)

方針 (2/2)

以上より、対象地震動の非超過確率97.7%のスペクトルを基に、以下の手順で標準応答スペクトルを設定する。

- ① 全データセット(ケース1)からMw6.5以上で「震源を特定して策定する地震動」と「地域性考慮の震源を特定せず策定する地震動」にあたる3地震を除いた(対象地震規模Mw6.5未満とした)ケース2の非超過確率97.7%の応答スペクトルを上回る(はぎとり精度※が低い周期帯は必ずしも上回らない)ように標準応答スペクトルを設定する。

※ はぎとり精度はケース2' (a, b: はぎとり解析に係る不確実さを低減)、ケース4' (地中観測記録の2倍)との比較に基づき、はぎとり精度が低いことによる影響を受けているかを判断する。特に、上下動については特徴的な地震動の分析から、はぎとり精度が低いこと(人工要因)により特徴的なピーク等が生じている地震動データが多いことが分かっている(詳細はp.63参照)。

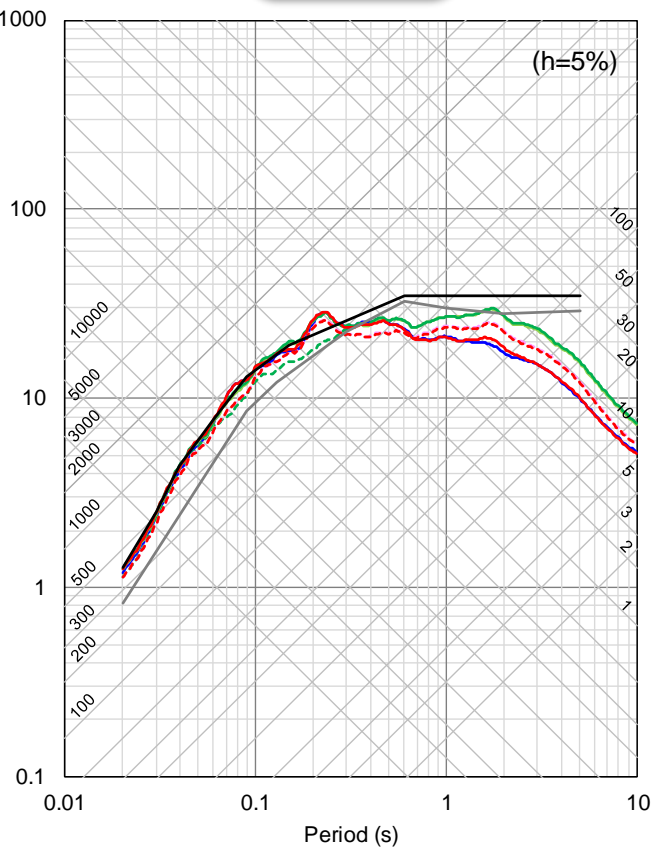
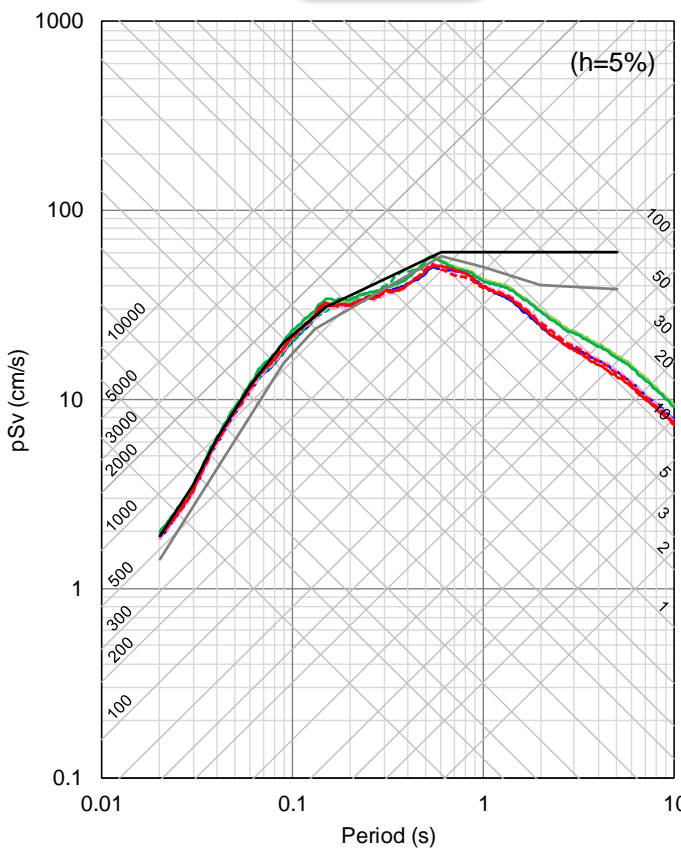
- ② ただし、今後、全国共通に「震源を特定せず策定する地震動」として考慮すべきMw6.5以上の地震が発生する可能性も否定できないことから、規模Mw6.6の地震まで含めたケース3(規模別の地震・記録数に係る不確実さを低減)及びケース4(a, b: はぎとり解析に係る不確実さを低減)の非超過確率97.7%の応答スペクトルも考慮して設定する。
- ③ なお、長周期側(周期1秒程度以上5秒程度未満)の地震動レベルについては、周期が長くなるにつれて規模依存性等に伴い地震動強さの確率密度分布推定の不確実さが大きくなる(詳細はp.86~94を参照)と考えられ、また、Mw6クラスの地震では断層破壊伝播の指向性効果等により地震動レベルが大きくなる可能性もあることから、妥当性確認結果(詳細は8.2. 参照)を踏まえたうえで、一定のレベルに設定することとする。

8.1 標準応答スペクトルの設定 (3/11)

非超過確率97.7%(平均+2σ)の応答スペクトルに基づく地震動レベルの設定

水平動

上下動



- 標準応答スペクトル
- 加藤スペクトル
水平動: Vs=2200m/s、上下動: Vp=4200m/s
- <非超過確率97.7%の応答スペクトル>
【標準応答スペクトルの設定に使用】
- ケース2: 対象地震(Mw6.5未満)
- ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定)
- ケース4a: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)その1
※重み: Group A=1, B=1, C=0.5, D=0の場合
- ケース4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)その2
※重み: Group A=1, B=1, C=0, D=0の場合
- 【はぎとり精度の確認に使用】
- - - ケース2'a: 対象地震(Mw6.5未満)、はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)その1
※重み: Group A=1, B=1, C=0.5, D=0の場合
- - - ケース2'b: 対象地震(Mw6.5未満)、はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)その2
※重み: Group A=1, B=1, C=0, D=0の場合
- - - ケース4': はぎとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合
※水平動は周期0.5秒以下、上下動は周期0.3秒以下のみを表示

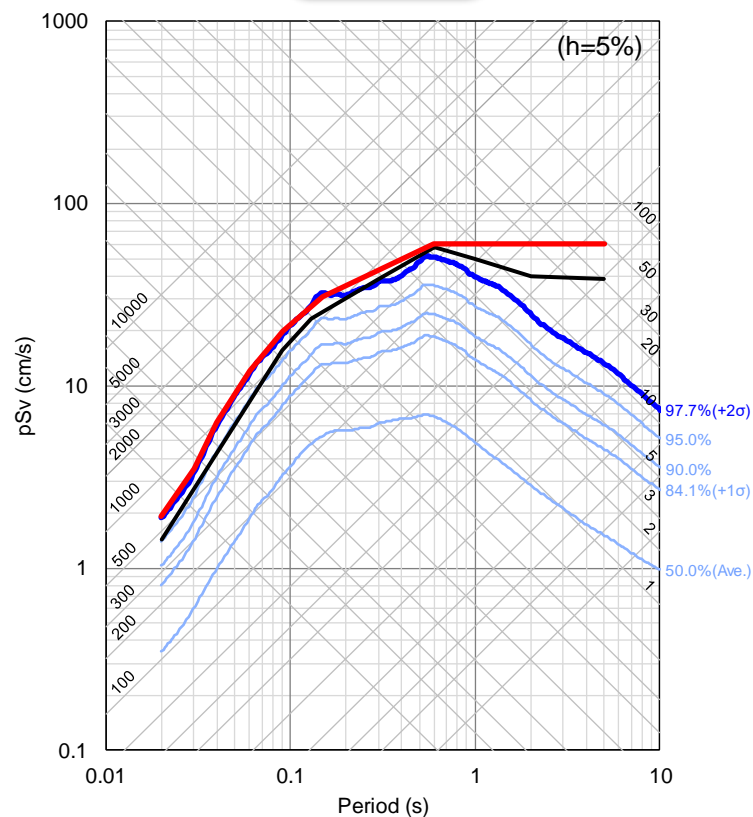
- > ケース2の非超過確率97.7%の応答スペクトルを上回っている(ただし、はぎとり精度が低い※周期帯は必ずしも上回っていない)。
※ はぎとり精度については、ケース2' (a, b: はぎとり精度に係る不確実さを低減)、ケース4' (地中観測記録の2倍)との比較に基づき、はぎとり精度が低いことによる影響を受けているかを判断。
- > データセットに規模Mw6.6の地震まで含めたケース3、ケース4の非超過確率97.7%の応答スペクトルとも調和的なレベルとなっている。
- > 長周期側(周期1秒程度以上5秒程度未満)については、年超過確率の参照、他手法による地震動レベルとの比較による妥当性確認(詳細は8.2.参照)を踏まえて過小評価とならない地震動レベルとなっている。

8.1 標準応答スペクトルの設定 (4/11)

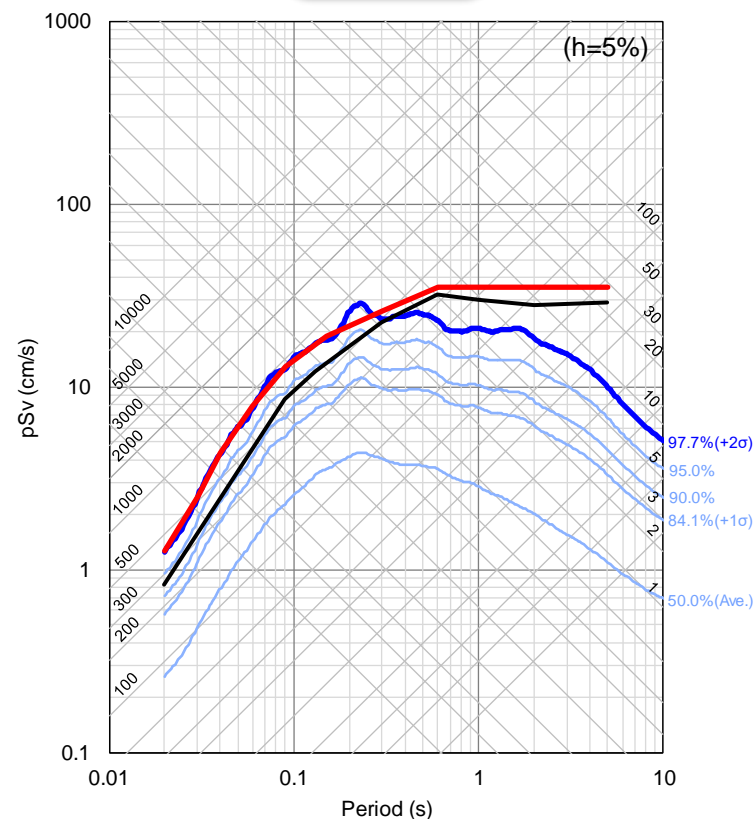
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (1/7)

ケース2: 対象地震(Mw6.5未満)

水平動



上下動



赤色: 標準応答スペクトル
青(水)色: 非超過確率別スペクトル
黒色: 加藤スペクトル
水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (5/11)

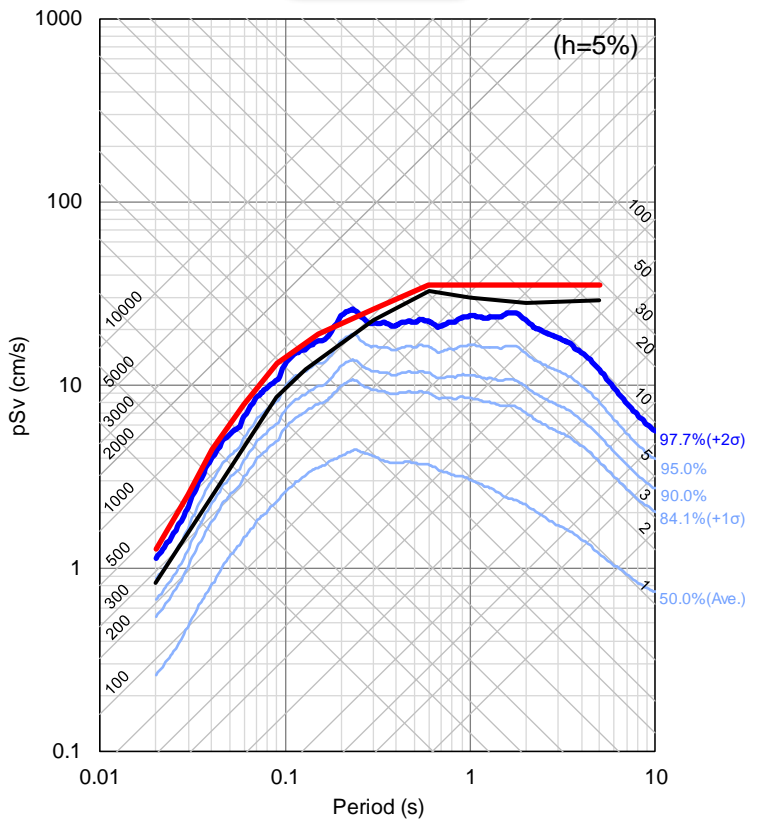
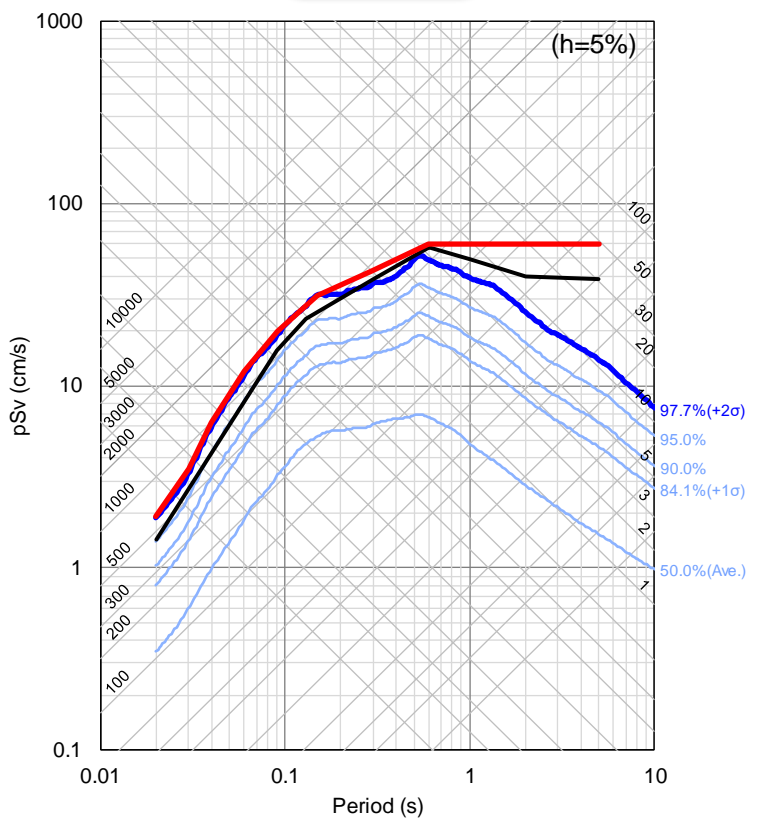
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (2/7)

はざとり精度の確認用 | ケース2'a: 対象地震(Mw6.5未満)、はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



赤色: 標準応答スペクトル
 青(水)色: 非超過確率別スペクトル
 黒色: 加藤スペクトル
 水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (6/11)

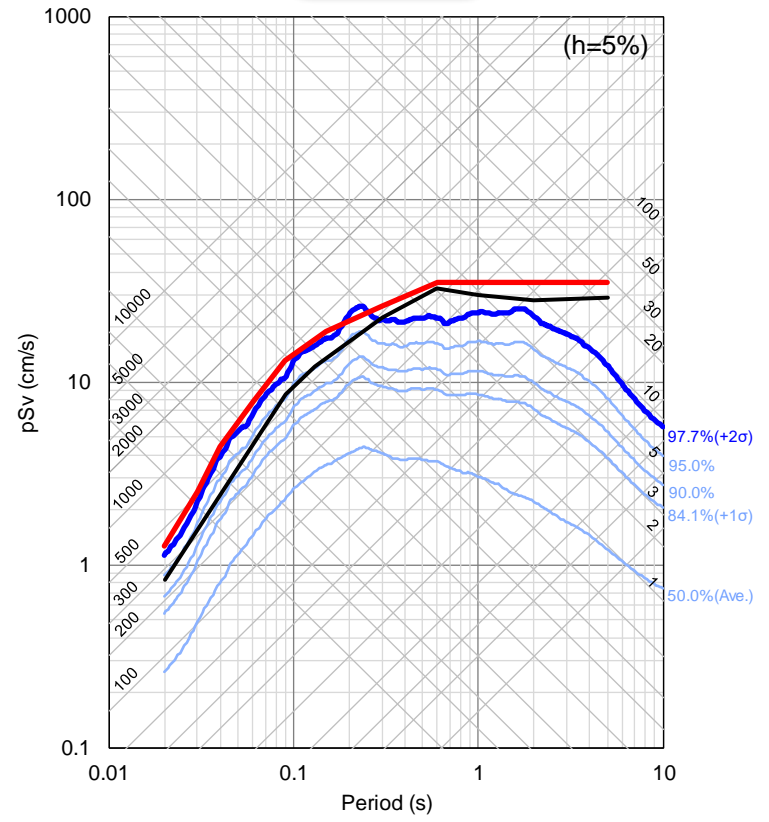
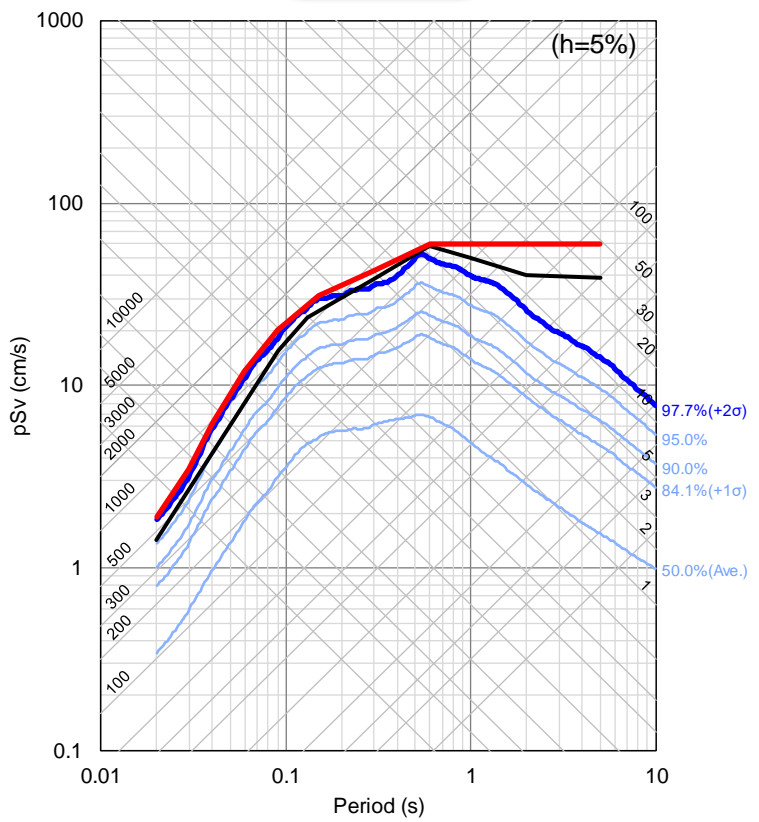
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (3/7)

はざとり精度の確認用 | ケース2'b: 対象地震(Mw6.5未満)、はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



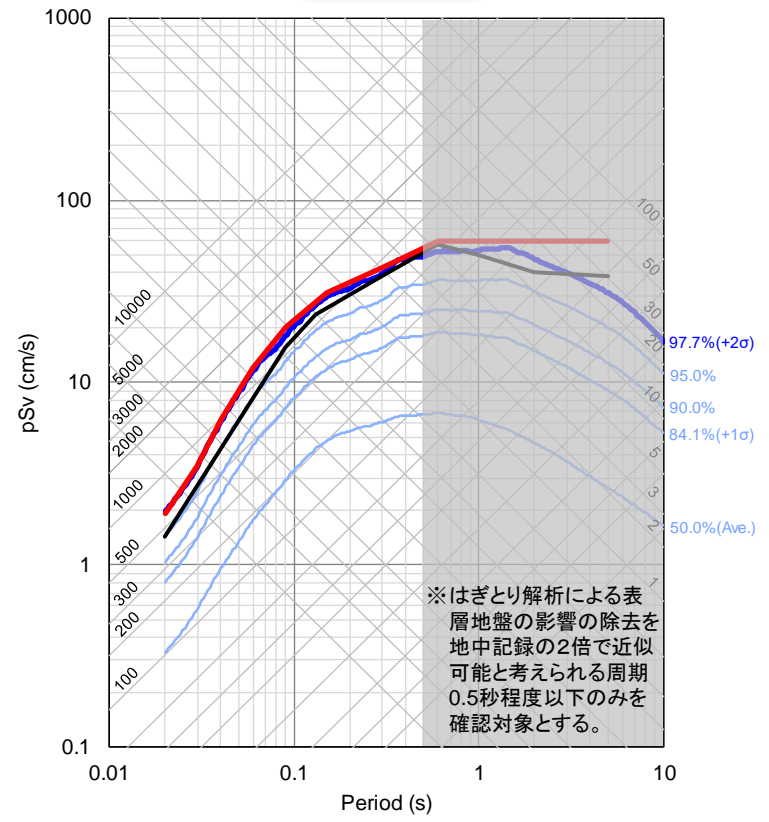
赤色: 標準応答スペクトル
 青(水)色: 非超過確率別スペクトル
 黒色: 加藤スペクトル
 水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (7/11)

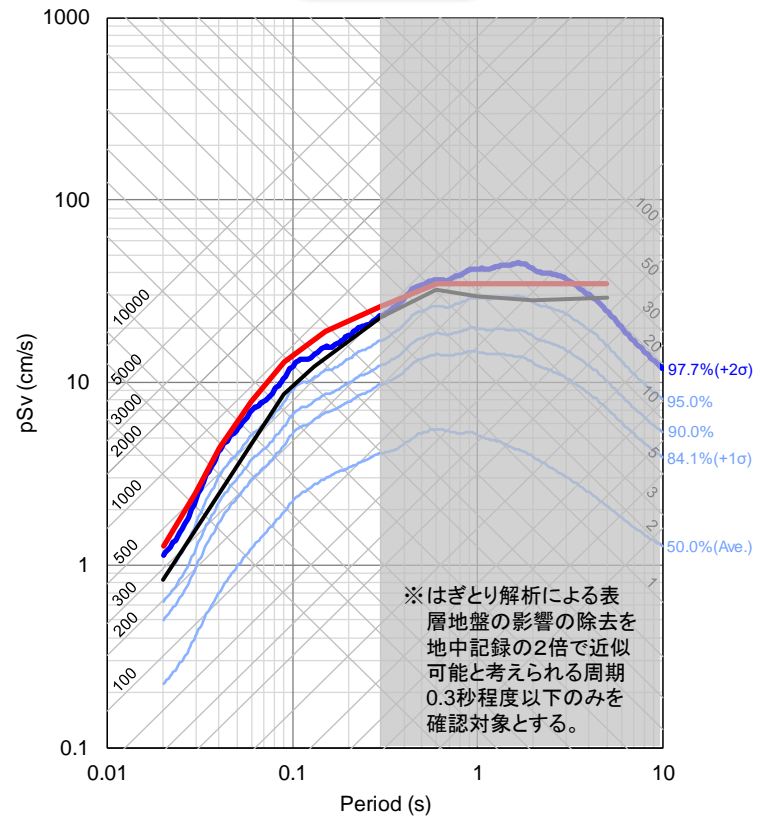
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (4/7)

はぎとり精度の確認用 | ケース4': はぎとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合

水平動



上下動



赤色: 標準応答スペクトル
 青(水)色: 非超過確率別スペクトル
 黒色: 加藤スペクトル
 水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (8/11)

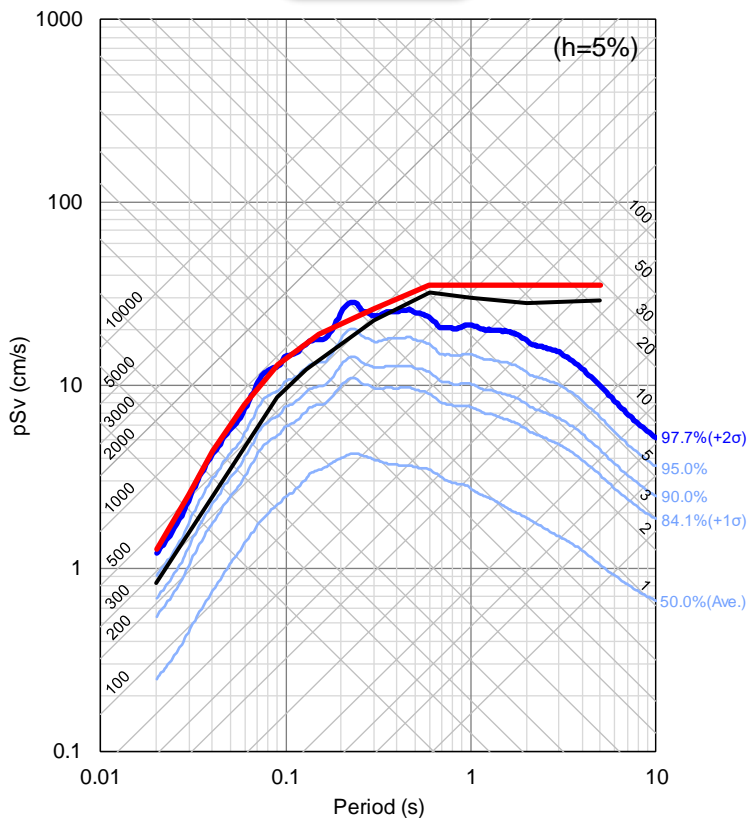
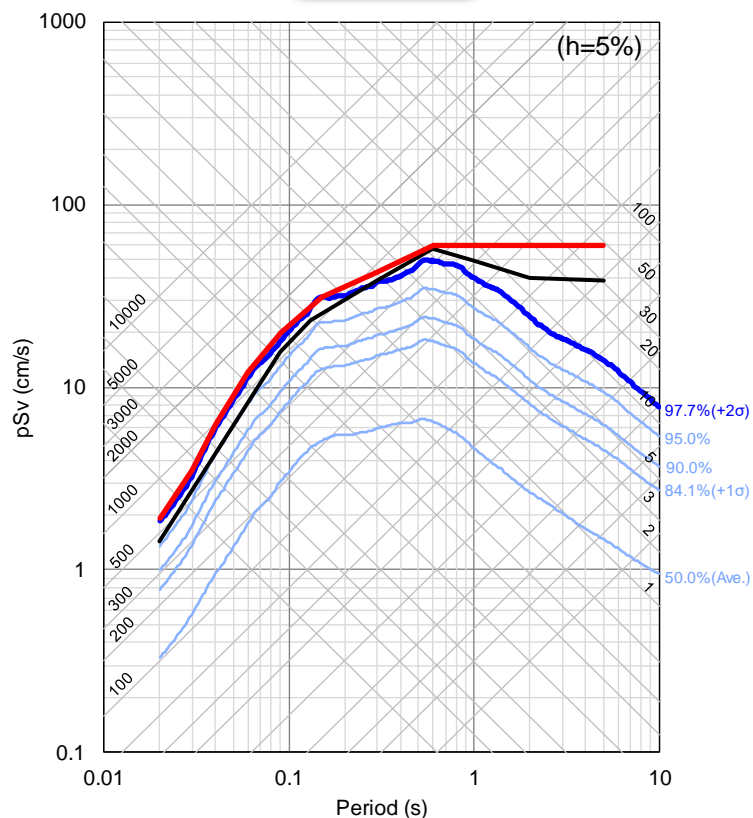
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (5/7)

ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定) *

* 重み付けの詳細はp.73参照

水平動

上下動



赤色: 標準応答スペクトル
青(水)色: 非超過確率別スペクトル
黒色: 加藤スペクトル
水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (9/11)

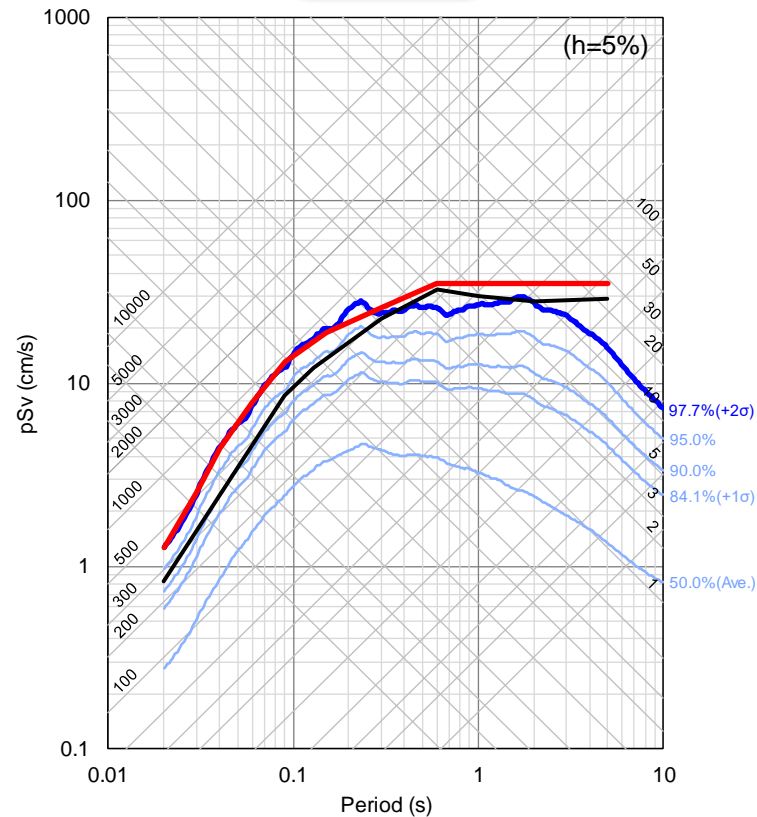
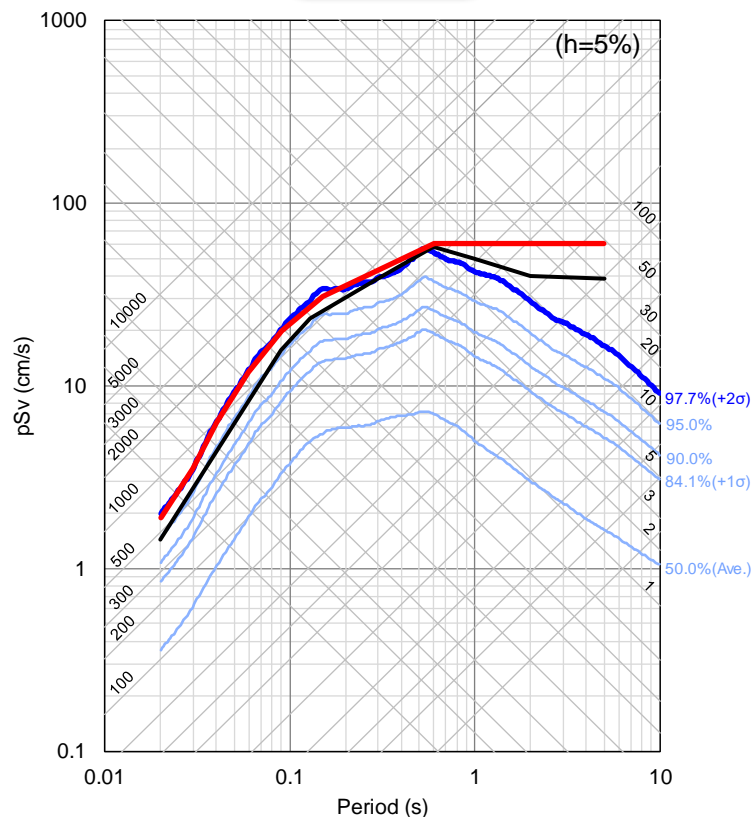
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (6/7)

ケース4a: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その1

※重みをGroup A=1, B=1, C=0.5, D=0とした場合(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動



赤色: 標準応答スペクトル
青(水)色: 非超過確率別スペクトル
黒色: 加藤スペクトル
水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (10/11)

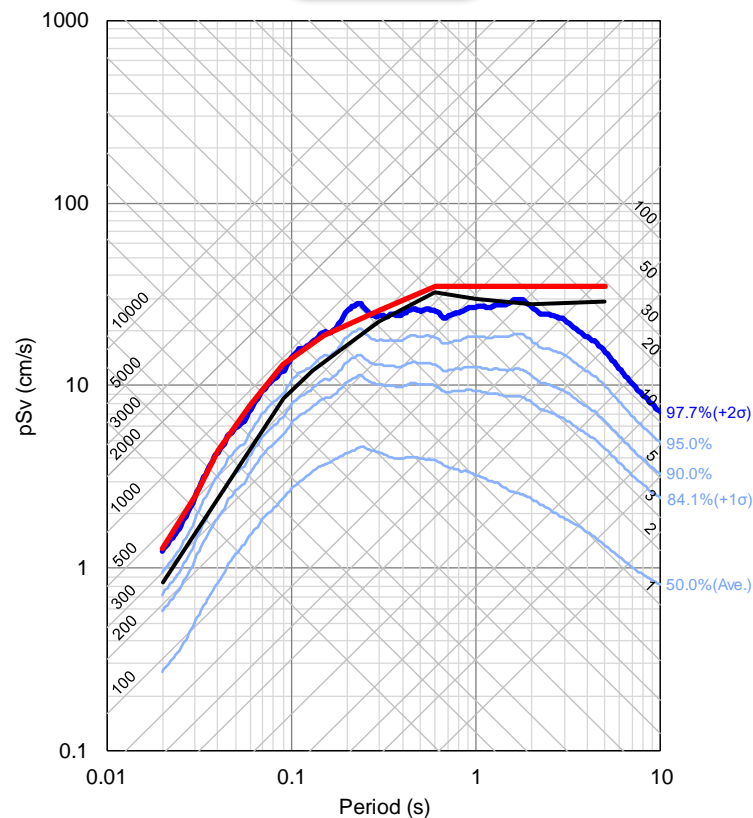
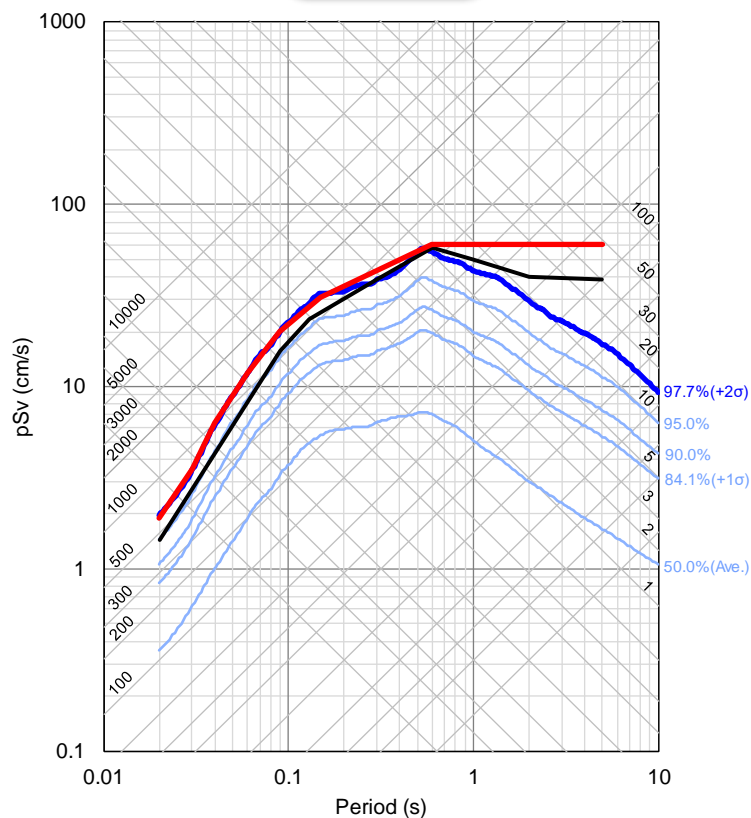
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (7/7)

ケース4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合(グループ分けの詳細はp.61参照)

水平動

上下動

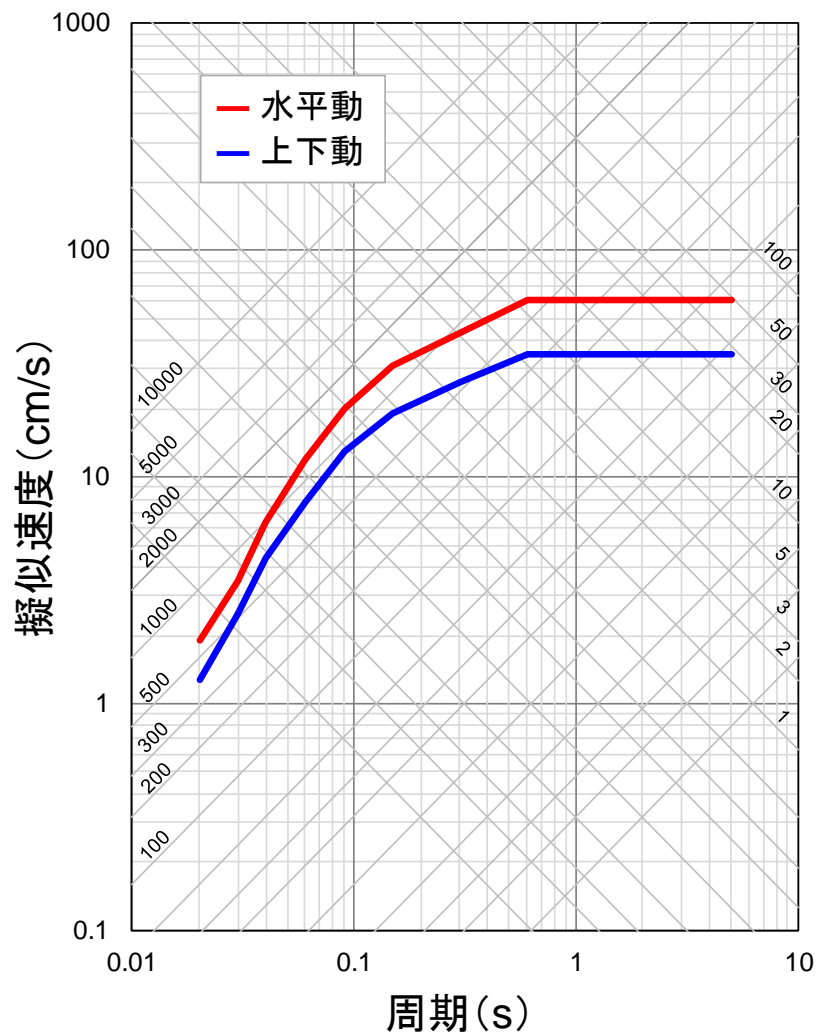


赤色: 標準応答スペクトル
青(水)色: 非超過確率別スペクトル
黒色: 加藤スペクトル
水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

8.1 標準応答スペクトルの設定 (11/11)

標準応答スペクトルのコントロールポイント

擬似速度応答スペクトル(h=5%)



コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

8.2 標準応答スペクトルの妥当性確認

方針

以下の既往文献や他の手法による結果との比較(参照)を行い、妥当性を確認する。

【A】地震動の年超過確率の参照 [詳細は8.2.(1)]

- (1) JNES (2005, 2012*¹)による地震動の年超過確率別スペクトル
- (2) 地震動の年超過確率の考え方*²に基づく概算による確認

* 1: 第3回会合資料3で紹介、 * 2: 第4回会合資料2で紹介

【B】他の手法により求められた応答スペクトルレベルとの比較 [詳細は8.2.(2)]

- (1) 距離減衰式による推定値(地震規模Mw6.5相当、震源近傍、地震基盤相当面)
 - Noda *et al.* (2002)による距離減衰式: 審査で多用
 - JNES (2013)による距離減衰式: 震源距離補正で使用
 - Idriss (2014)による距離減衰式(水平動のみ): 米国NGA-West2の式の1つ
- (2) 断層モデル法による計算結果
 - JNES (2012)による計算[香川(2004)による長周期帯まで拡張した統計的グリーン関数法]: 震源の不確かさをモンテカルロ法により設定した計算結果(断層最短距離10km以内)
- (3) 審査関連の地震動レベル
 - 2004年北海道留萌支庁南部地震(K-NET港町)*³: 新規制基準審査
 - 加藤スペクトル: 改訂耐震設計審査指針関連
 - 大崎の式*³: 改訂前の旧耐震設計審査指針関連

* 3: 地震基盤相当面における地震動レベルではないことに留意

8.2 (1) 妥当性確認：地震動の年超過確率の参照 (1/7)

【A】JNES (2005, 2012)による地震動の年超過確率の参照 (1/4)

「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルの妥当性を確認する方法として、超過確率別スペクトルを参照することが考えられる。

- 審査ガイドの「解説」ではJNESによる地震動の年超過確率別スペクトルに関連する文献が例示されている。
- 本検討では、JNES(2005, 2012)による研究結果を参照し、妥当性の確認を行う。

【参考】

< 解釈別記¹⁾より抜粋 >

「震源を特定せず策定する地震動」として策定された基準地震動の妥当性については、申請時における最新の科学的・技術的知見を踏まえて個別に確認すること。その際には、地表に明瞭な痕跡を示さない震源断層に起因する震源近傍の地震動について、確率論的な評価等、各種の不確かさを考慮した評価を参考とすること。

< 審査ガイド²⁾より抜粋 >

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル(地震動レベル)は、解放基盤表面までの地震波の伝播特性が反映され、敷地の地盤物性が加味されるとともに、個々の観測記録の特徴(周期特性)を踏まえるなど、適切に設定されていることを確認する。

[解説]

- 設定された応答スペクトル(地震動レベル)の妥当性の確認として、例えば、原子力安全基盤機構による「震源を特定しにくい地震による地震動:2005³⁾」、「震源を特定せず策定する地震動:2009⁴⁾」等に基づく地震動の超過確率別スペクトルを参照する。
- 併せて、旧原子力安全委員会による「仮想震源を用いた面的地震動評価」に基づき地震動の妥当性が検討されていることを確認することが望ましい。

1) 实用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 別記2

2) 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド(原子力規制委員会, 2013)

3) JNES (2005)、4) JNES (2009)

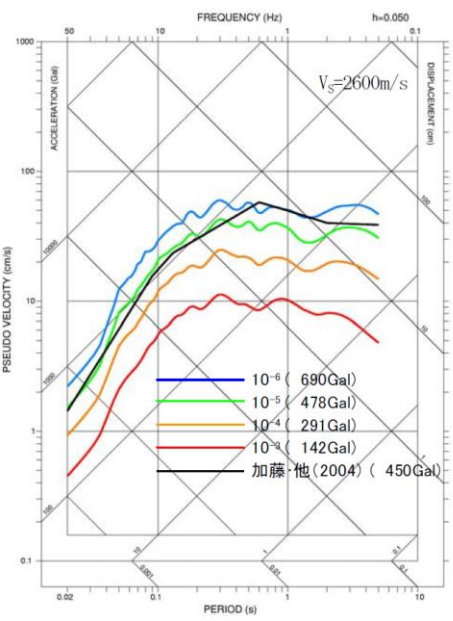
8. 2 (1) 妥当性確認: 地震動の年超過確率の参照 (2/7)

【A】 JNES (2005, 2012)による地震動の年超過確率の参照 (2/4)

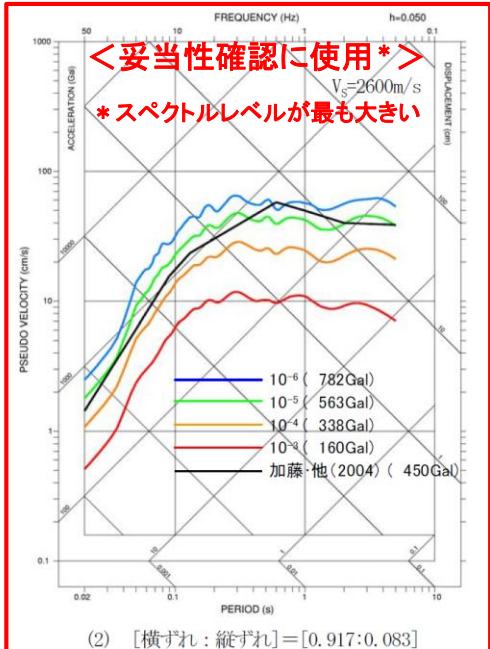
JNES (2005)による年超過確率別スペクトル

- 対象規模: 横ずれ断層はMj5.5~7.3、縦ずれ断層(逆断層)はMj5.5~6.8
- 評価地盤: Vs=2600m/s (当該文献における地震基盤相当面)
- 計算領域: 80km x 40kmの領域に評価点(観測点)を4km間隔に配置して地震動を計算。
 ※震源と観測点を入れ替え、評価点を固定して震源を分布させた場合の地震動とみなして地震動強さの超過確率を算定。
- 地震動計算手法: ハイブリッド合成法
- 不確実さ: アスペリティ位置、応力降下量、 f_{max}
- 地域性: 地震の発生頻度、断層非出現率、縦ずれと横ずれの比率により考慮(4地域、8地域)

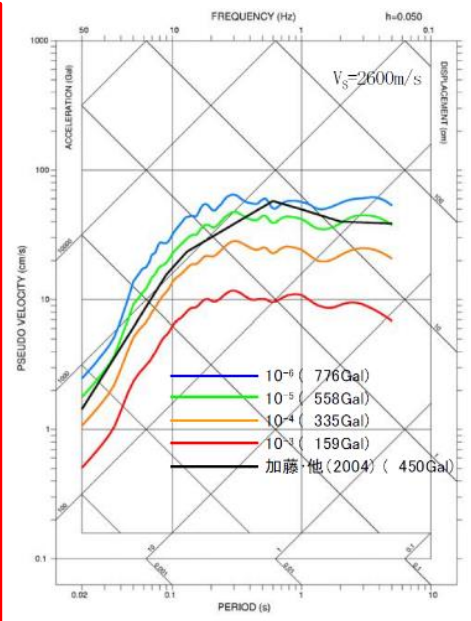
全国平均の発生頻度を使用した場合の年超過確率別応答スペクトル(横ずれと縦ずれの比率変化)



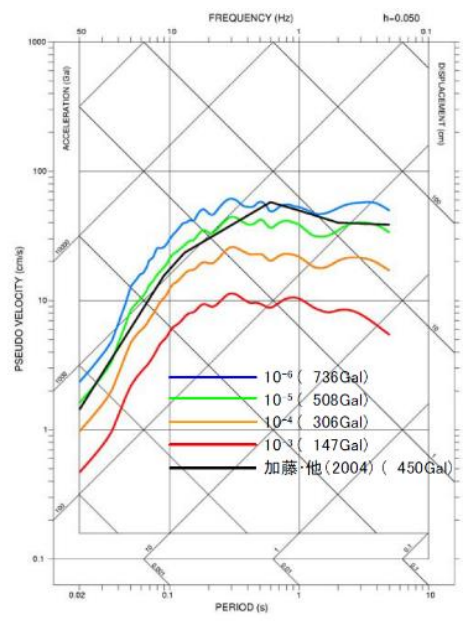
(1) [横ずれ: 縦ずれ]=[0.333:0.667]



(2) [横ずれ: 縦ずれ]=[0.917:0.083]



(3) [横ずれ: 縦ずれ]=[0.867:0.133]



(4) [横ずれ: 縦ずれ]=[0.500:0.500]

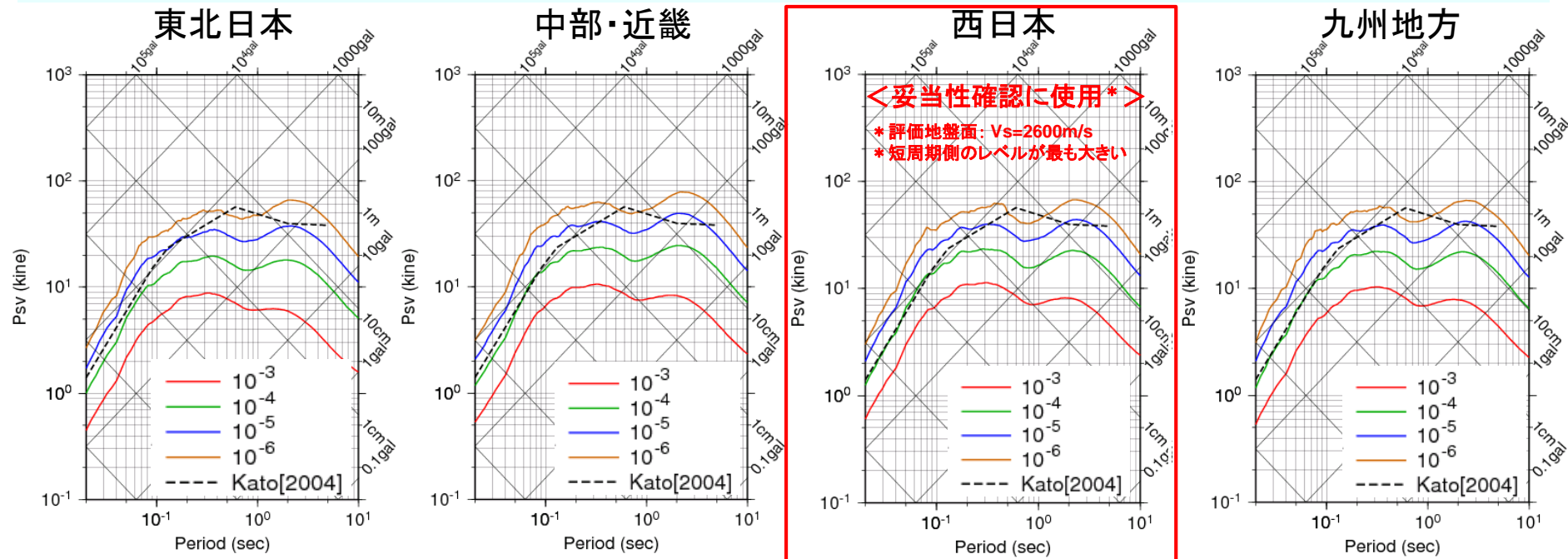
8. 2 (1) 妥当性確認: 地震動の年超過確率の参照 (3/7)

【A】 JNES (2005, 2012)による地震動の年超過確率の参照 (3/4)

JNES (2012)*による年超過確率別スペクトル

※詳細は第3回検討チーム会合資料3を参照

- 対象規模: Mj5.5~7.3
- 評価地盤: 解放基盤面(西日本はVs=2600m/sの地震基盤面相当面*)
 - * 本検討では、地震基盤相当面のVsは、補正に用いたNoda et al. (2002)における定義を参考にVs=2200m/s以上とした。
- 計算領域: 半径30km以内の領域
- 地震動計算手法: モンテカルロ法+香川(2004)による長周期帯まで拡張した統計的グリーン関数法
- 不確実さ: アスペリティ個数・位置・面積、破壊開始点、応力降下量、断層走向・傾斜・すべり角
- 地域性: 地震の発生頻度、断層非出現率、断層走向・傾斜・すべり角により考慮(4地域)



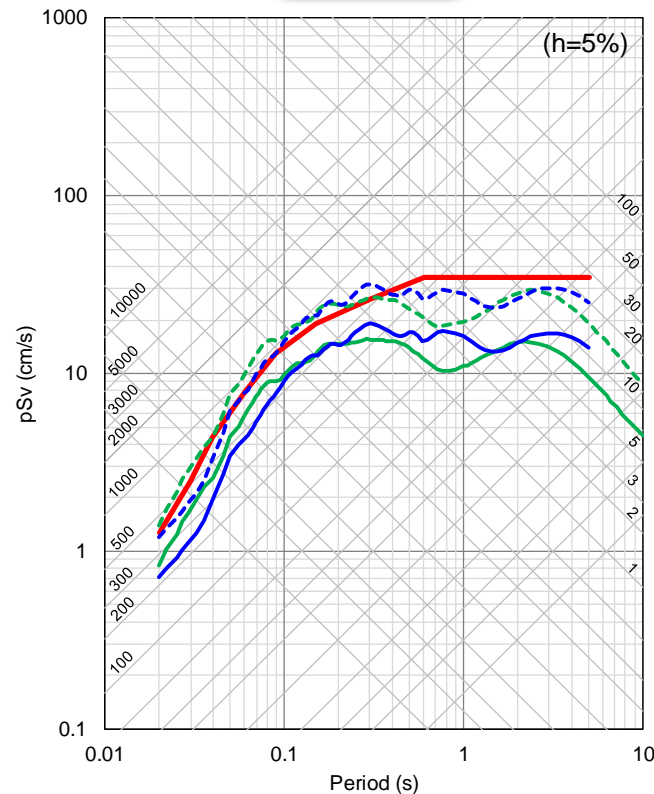
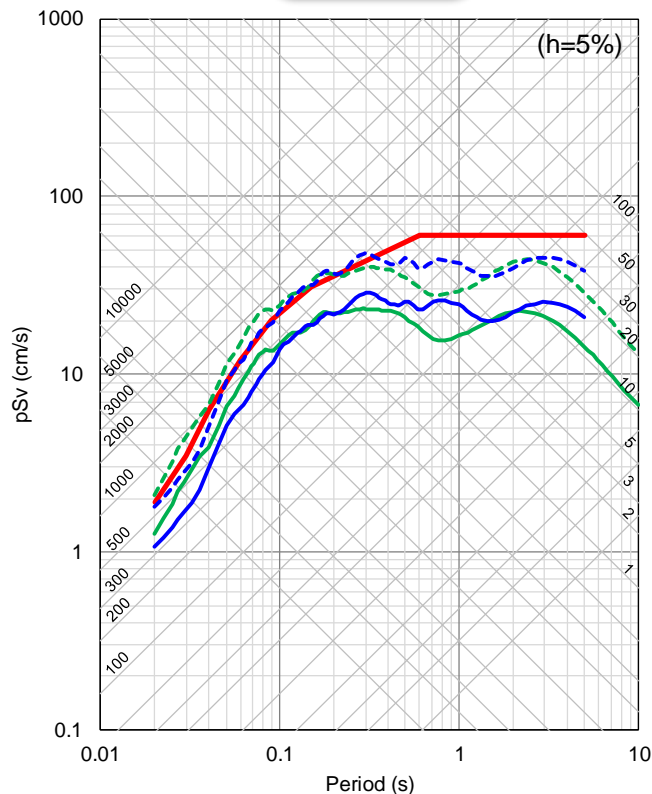
表層地盤の地盤減衰特性
 東北日本: 女川サイトの地盤 中部・近畿: 敦賀サイトの地盤 西日本: 伊方サイトの地盤 九州地方: 川内サイトの地盤

8. 2 (1) 妥当性確認: 地震動の年超過確率の参照 (4/7)

【A】 JNES (2005, 2012)による地震動の年超過確率の参照 (4/4)

水平動

上下動



— 標準応答スペクトル

— JNES (2005)による年超過確率別スペクトル
 実線: 年超過確率 10^{-4} 、破線: 年超過確率 10^{-5}
 ※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面

— JNES (2012)による年超過確率別スペクトル
 実線: 年超過確率 10^{-4} 、破線: 年超過確率 10^{-5}
 ※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面(西日本)

— 標準応答スペクトル

— JNES (2005)による年超過確率別スペクトル
 [水平動の2/3のレベル^{注)}]
 実線: 年超過確率 10^{-4} 、破線: 年超過確率 10^{-5}
 ※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面

— JNES (2012)による年超過確率別スペクトル
 [水平動の2/3のレベル]
 実線: 年超過確率 10^{-4} 、破線: 年超過確率 10^{-5}
 ※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面(西日本)

注) 本検討で算出した応答スペクトルの上下/水平比も平均で2/3程度であることを確認。

8.2 (1) 妥当性確認: 地震動の年超過確率の参照 (5/7)

[B] 地震動の年超過確率の考え方*に基づく概算による確認

* 詳細はp.113参照

標準応答スペクトルを対象地震動(Mw5.0~6.5程度)の非超過確率97.7%の応答スペクトルレベルに基づいて設定したことの妥当性について、本検討で収集・整理した地震の情報を基に「地震動の年超過確率」に対応する「地震動強さの非超過確率」を概算することにより確認した。

- 対象領域は、震源距離補正で観測点を集める範囲に対応する半径10kmの領域とした。
- 対象領域での地震の年発生頻度は、「日本全国(内陸部)での地震の年発生頻度*」と面積比から算出した。

→ 半径10kmの領域で地震動の年超過確率 1×10^{-4} に対応する非超過確率は約95.2% (5×10^{-5} では約97.6%)と概算され、対象地震動の概ね包絡のレベルを非超過確率97.7%(平均+2 σ)程度としていることは、年超過確率 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ の間の地震動レベルであるという観点では妥当と考えられる。

なお、付録C(p.101~104)に対象地震規模の下限を変えた場合の同様の確認結果を示す。

<地震動強さの非超過確率の概算>

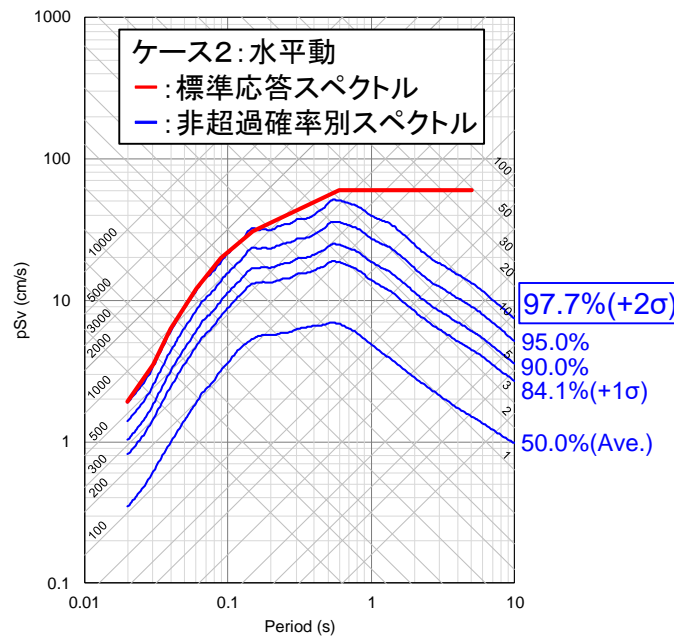
表1: 日本全国(Mw5.0~6.6の地震を対象)

観測期間(年)	地震数(数)	地震の年発生頻度(個/年)	面積(km ²)
18	45	2.50	378,000

- 地震が期間と場所によらずランダムに発生すると仮定し、対象領域の地震の年発生頻度Aが十分に小さい場合には地震動の年超過確率 $P = 1 - \exp(-A \times B)$ は $P \approx A \times B$ と近似できる。
- 概算では、近似を踏まえ、地震動強さの超過確率 $B = P/A$ を計算し、 $1 - B$ で非超過確率を算出。

表2: 対象領域(Mw5.0~6.6の地震を対象)

半径(km)	面積(km ²)	地震の年発生頻度A(個/年)	地震動の年超過確率P	地震動強さの超過確率B		地震動強さの非超過確率1-B	
				値	%	値	%
10	314	0.00208	1×10^{-4}	0.048	4.8%	0.952	95.2%
			5×10^{-5}	0.024	2.4%	0.976	97.6%
			1×10^{-5}	0.005	0.5%	0.995	99.5%
30(参考)	2,827	0.01870	1×10^{-4}	0.005	0.5%	0.995	99.5%



※ 地震の発生頻度をG-R則に基づいて検討する際には一般に余震の除去を行うため、(KiK-netの記録がある)日本内陸部での本震の地震数(詳細はp.44参照)と観測期間を用いて日本全国での地震の年発生頻度[45/18(数/年)]を求めた。一方、地震動強さの非超過確率を考慮した応答スペクトルを算出する際には(詳細は7.参照)、統計処理上のデータ数を確保するために、本震と余震の地震動の特徴には顕著な差異が無いことを確認した上で(詳細はp.45,46参照)、余震の記録も含めて補正処理を行い、仮想的に半径10km程度以内でG-R則に従うデータセットを用いている。

8.2 (1) 妥当性確認：地震動の年超過確率の参照 (6/7)

参考：既往研究による地震の年発生頻度を用いた場合の概算結果との比較

前ページでは本検討で収集対象とした「日本全国(日本内陸部)での地震の年発生頻度」と面積比を基に、対象領域(半径10kmの領域)での地震の年発生頻度を求めた。ここでは、**既往研究による地震の年発生頻度を用いて「地震動強さの非超過確率」を概算し、同等の結果が得られることを確認した。**

表1：日本周辺領域における地震の年発生頻度

研究	領域	対象地震規模／深さ(km)	観測期間	地震の*1 年発生頻度 (個/年)	面積 (km ²)
本検討	日本内陸部	Mw5.0~6.6／ 20km以浅	18年間 (2000~2017年)	2.50	378,000
地震本部*2 (確率論的地震 動予測地図)	図1の全領域	Mj5.0以上／ 25km以浅	最長85年間※ (1926~2010年)	12.41	1,485,688
	図1から海域付近の 領域(No.1, 4, 21~23, 25~29)を除いた 領域	(一部40km以浅)※ ※領域により異なる (図1参照)		4.08	562,845
JNES (2012)	日本内陸部と 沖合を含む領域	Mj5.0以上／ 25km以浅	84年間 (1926~2009年)	4.83 (伊豆半島で発生 した地震を除く)	570,000

*1：領域面積内での余震を除いた1年あたりの地震発生数
*2：年発生頻度と領域面積は防災科学技術研究所からの提供情報に基づく

表2：半径10kmの領域における地震動強さの非超過確率の概算

地震の年発生頻度 の基とした研究	半径 (km)	面積 (km ²)	地震の 年発生頻度 (個/年)	地震動の 年超過確率	地震動強さの 超過確率		地震動強さの 非超過確率	
					値	%	値	%
本検討	10	314	0.00208	1×10^{-4}	0.048	4.8%	0.952	95.2%
					5×10^{-5}	0.024	2.4%	0.976
地震本部 (確率論的地震 動予測地図)	全領域	10	0.00262	1×10^{-4}	0.038	3.8%	0.962	96.2%
					5×10^{-5}	0.024	2.4%	0.976
	海域付近を 除いた領域	10	0.00228	1×10^{-4}	0.044	4.4%	0.956	95.6%
					5×10^{-5}	0.022	2.2%	0.978
JNES (2012)	10	314	0.00266	1×10^{-4}	0.038	3.8%	0.962	96.2%
					5×10^{-5}	0.019	1.9%	0.981

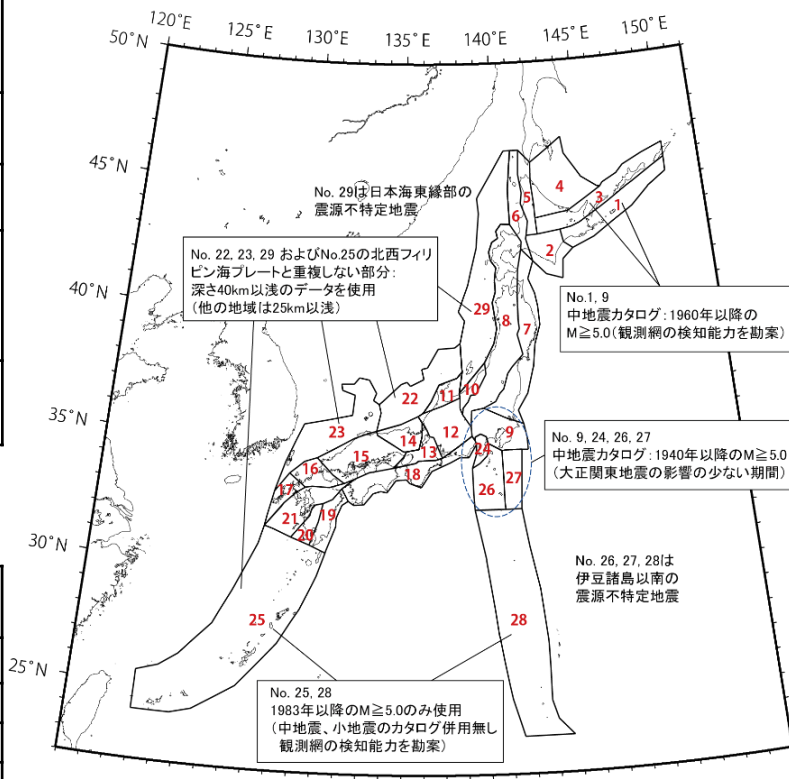


図1 陸側プレートの震源断層を予め特定しにくい地震の領域及び番号 (地震調査研究推進本部, 2014)

8.2 (1) 妥当性確認: 地震動の年超過確率の参照 (7/7)

地震動の年超過確率(概算)の考え方

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」は、事前に位置や規模を特定できないような内陸地殻内地震を対象とし、震源近傍における観測記録を収集することを前提としている。

ある領域での地震動の年超過確率注)

注) 地震が期間と場所によらずランダムに発生すると仮定し、発生頻度(下図のA)が十分に小さい場合には $1 - \exp(-A \times B) \approx A \times B$ と近似できることを考慮。

A. 日本のある領域で1年間に対象地震*が発生する頻度
 *Mw5.0~6.5程度の内陸地殻内地震

日本の面積 378,000 km²

半径r=30kmの領域

半径r=10kmの領域

断層最短距離5kmに補正した断層面の地表投影イメージ

$$A = \frac{\text{半径}r\text{の領域面積}(r^2 \pi)}{\text{日本の面積}(378,000 \text{ km}^2)} \times \frac{v_{jp}}{\text{期間}T} \times \text{地震数}N_e$$

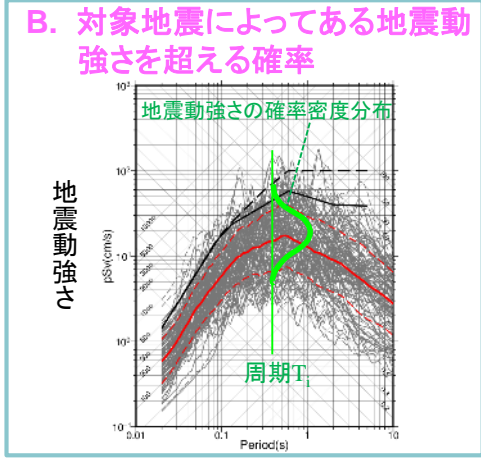
日本でT年間に内陸の地殻内でMw5~6.6の地震(本震)が発生する頻度(本検討ではp.44に基づく「45地震/18年」となる)

×

【前提】ある規模別頻度のモデルに従うと仮定
 例) Gutenberg-Richter則

N (累積地震数)

M (地震規模)



例) 上記の考え方を基に、ある地震動の年超過確率に対応する地震動強さの非超過確率を概算した場合

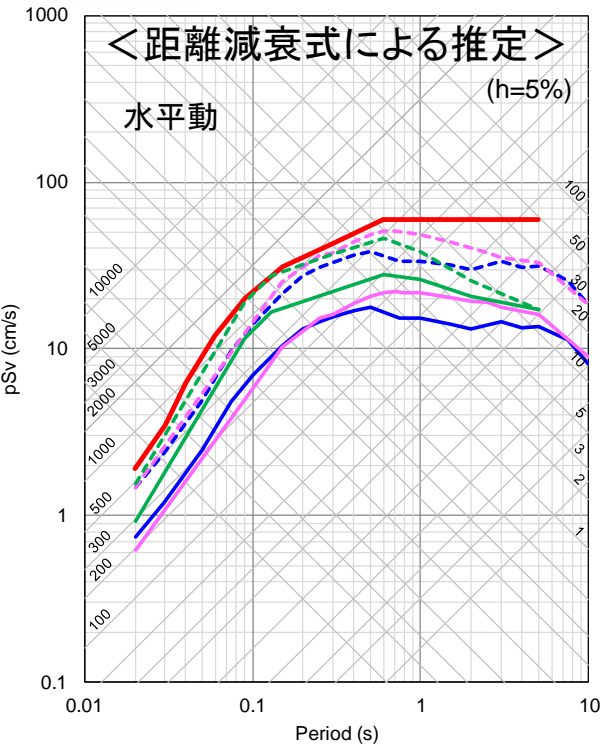
領域半径	A. 領域内での1年間の対象地震の発生頻度	B. 「年超過確率を 1×10^{-1} 」と考えた場合の地震動強さの超過確率(非超過確率)	取り扱う地震動記録
30 km 大	$30^2 \pi \div 378000 \times v_{jp}$ $= 7.48 v_{jp} \times 10^{-3}$ 大	$(1 \times 10^{-1}) \div (7.48 v_{jp} \times 10^{-3}) \times 100 = P_{r30}\%$ 小 (非超過確率 = $100 - P_{r30}\%$) 大	震源距離補正前の収集記録(震央距離30km以内)。震源近傍記録としては遠い記録を含む。
10 km 小	$10^2 \pi \div 378000 \times v_{jp}$ $= 8.31 v_{jp} \times 10^{-4}$ 小	$(1 \times 10^{-1}) \div (8.31 v_{jp} \times 10^{-4}) \times 100 = P_{r10}\%$ 大 (非超過確率 = $100 - P_{r10}\%$) 小	震源距離補正後の記録。統計処理で扱う記録数を確保するために、収集記録(震央距離30km以内)を半径10程度の震源近傍の領域に集めてくる方法として、10kmの中間距離程度となる最短距離5kmを基本として震源距離補正を実施。

- **震源距離:** 「標準応答スペクトル」の策定において、上記のような地震動の年超過確率の考え方(及び既往研究による地震動レベル)を参照する場合には、標準応答スペクトルのレベルは震源距離(領域面積)の設定に依らない。したがって、震源近傍記録を対象とする方針、統計処理上のデータ数確保の観点で設定することが望ましいと考えられる。
- **地震規模:** 上記のような地震動の年超過確率の考え方の参照を考慮すると、地震規模別の頻度としてG-R則に従うような地震動のデータセットを用いることが望ましい。本検討のデータについては、全データを対象とする場合には概ねG-R則に従っており、G-R則想定の子み付け処理をしたケースと比べても保守的な地震動レベルとなっている(詳細はp.79参照)。

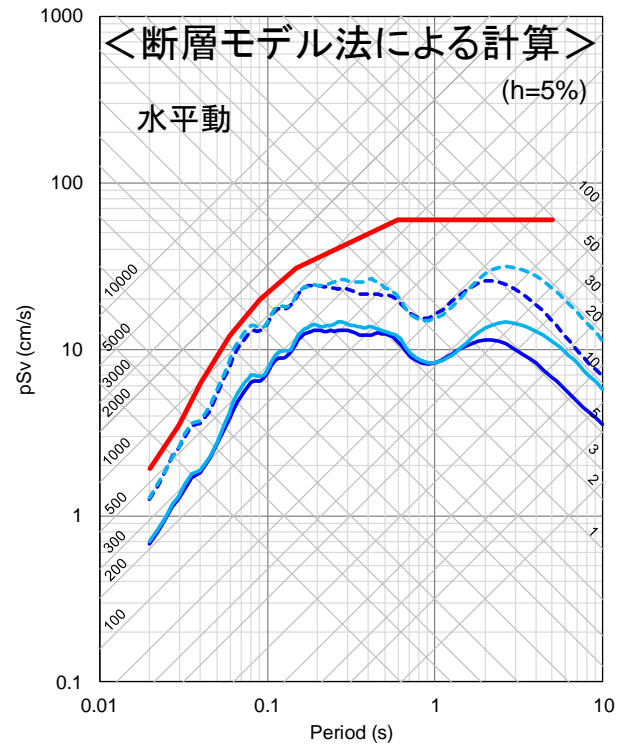
8.2 (2) 妥当性確認: 他手法による地震動レベルとの比較 (1/2)

水平動

他の手法により求められた応答スペクトルレベルとの比較



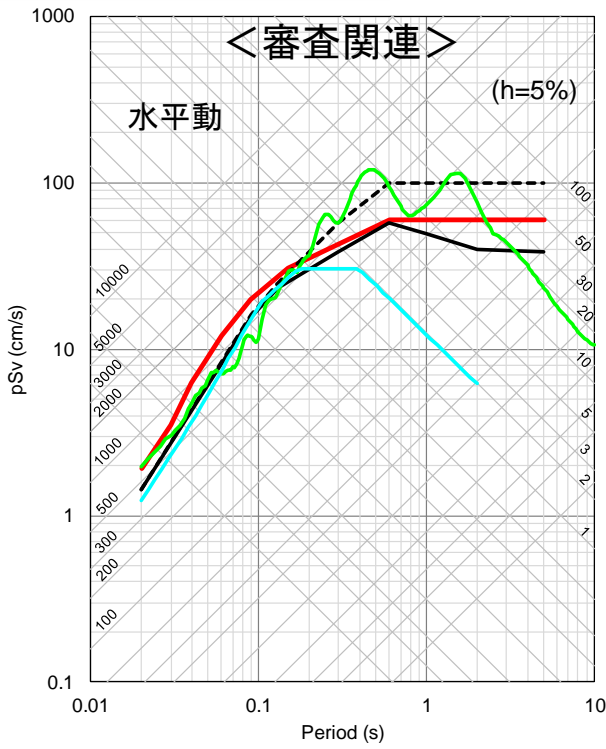
- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)
- Noda et al. (2002)による距離減衰式
実線: 内陸補正あり, 破線: 補正なし^{注1)}
※Mj6.9 (Mw6.5相当), 等価震源距離10km, $V_s=2200\text{m/s}$
- JNES (2013)による距離減衰式
実線: 平均, 破線: 平均+1 σ
※Mw6.5, 断層最短距離5km, $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 程度
- Idriss (2014)による距離減衰式
(米国NGA-West2の距離減衰式の1つ)
実線: 平均, 破線: 平均+1 σ
※Mw6.5, 断層最短距離5km, AVS30=2500m/s



- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)
- JNES (2012)による計算^{注2)} (拡張統計的グリーン関数法)
実線: 平均, 破線: 平均+1 σ
※Mj6.5, 断層最短距離10km以内, $V_s=2600\text{m/s}$ (西日本)
- JNES (2012)による計算^{注2)} (拡張統計的グリーン関数法)
実線: 平均, 破線: 平均+1 σ
※Mj6.8, 断層最短距離10km以内, $V_s=2600\text{m/s}$ (西日本)

注1) 新規基準適合性審査における「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の策定の際には、2007年新潟県中越沖地震の知見を踏まえて、内陸型地震の場合にも保守性を考慮するために「補正なし」の推定値が採用されており、周期0.6秒以下の地震動レベルは、内陸地震に対する補正関数をかけた「内陸補正あり」の約1.67倍である。なお、「補正なし」の距離減衰式の標準偏差は約0.23(常用対数)である(Nishimura et al., 2001)。

注2) JNES (2012)による確率論的地震ハザード評価(p.110)において、実施された断層モデル法(詳細法)による地震動計算結果である。



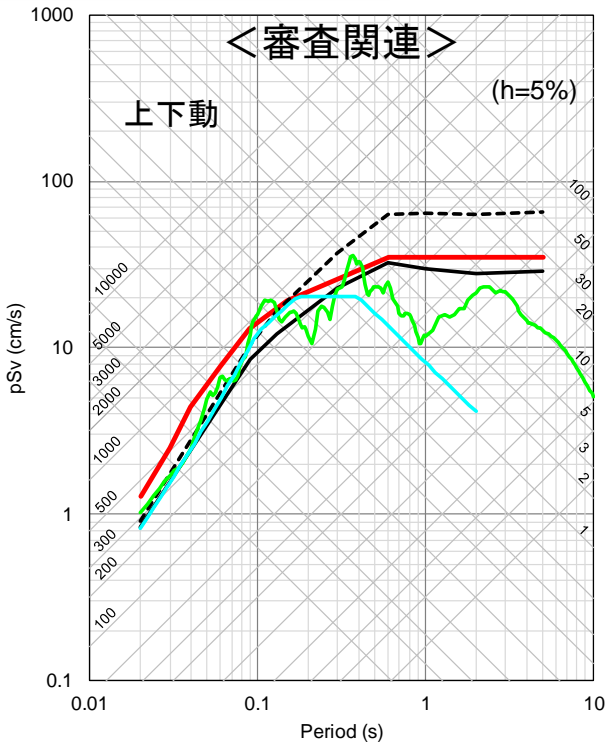
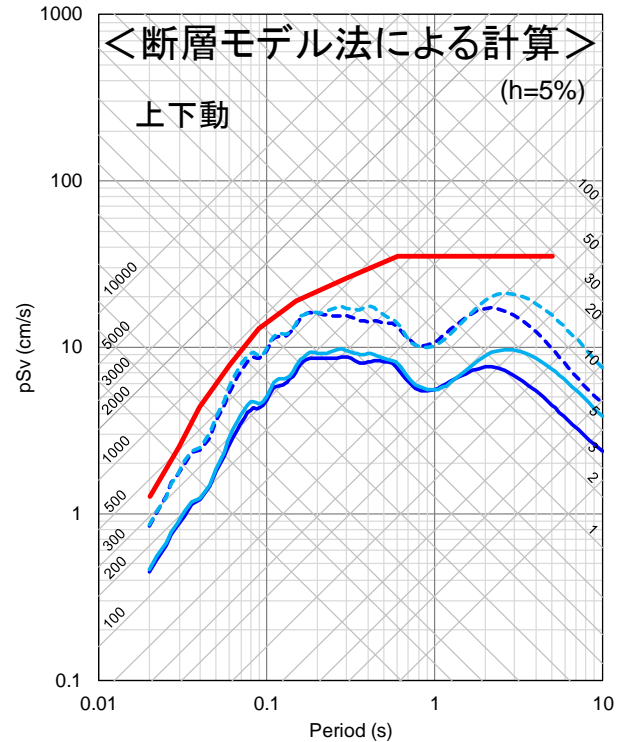
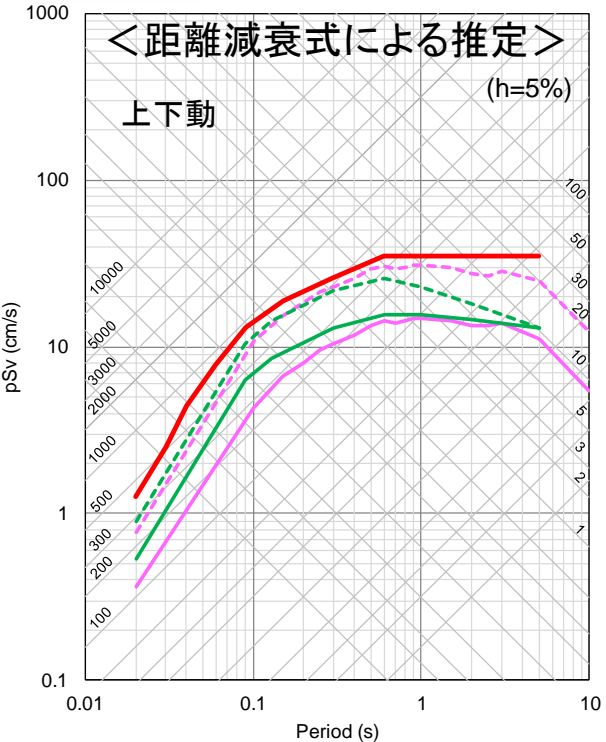
- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)
- 2004年北海道留萌支庁南部地震(Mw5.7)
【新規基準審査】
K-NET港町観測点の解放基盤波に余裕を持たせた地震動(硬岩サイトで使用されているレベル)
※ $V_s=938\text{m/s}$ の解放基盤面(直接比較できないことに留意)
- 加藤スペクトル(水平動)^{【改訂耐震設計審査指針関連】}
実線: $V_s=2200\text{m/s}$, 破線: $V_s=700\text{m/s}$
- 大崎の手法(日本電気協会,1987)
【改訂前の旧耐震設計審査指針関連】
※Mj6.5, 震源距離10km, 解放基盤面
(直接比較できないことに留意)

※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル(h=5%)である。

8.2 (2) 妥当性確認: 他手法による地震動レベルとの比較 (2/2)

上下動

他の手法により求められた応答スペクトルレベルとの比較



- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 [Vs=2200m/s以上 (Vp=4200m/s以上)]
- Noda et al. (2002)による距離減衰式
実線: 内陸補正あり, 破線: 補正なし
※Mj6.9 (Mw6.5相当)、等価震源距離10km、
Vs=2200m/s (Vp=4200m/s)
- JNES (2013)による距離減衰式
実線: 平均、破線: 平均+1σ
※Mw6.5、断層最短距離5km、Vs=2000~3000m/s程度

- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 [Vs=2200m/s以上 (Vp=4200m/s以上)]
- JNES (2012)による計算 (拡張統計的グリーン関数法)
[水平動の2/3のレベル^注]
実線: 平均、破線: 平均+1σ
※Mj6.5、断層最短距離10km以内、Vs=2600m/s (西日本)
- JNES (2012)による計算 (拡張統計的グリーン関数法)
[水平動の2/3のレベル^注]
実線: 平均、破線: 平均+1σ
※Mj6.8、断層最短距離10km以内、Vs=2600m/s (西日本)

- 標準応答スペクトル
地震基盤相当面 [Vs=2200m/s以上 (Vp=4200m/s以上)]
- 2004年北海道留萌支庁南部地震 (Mw5.7)
【新規制基準審査】
K-NET港町観測点の解放基盤波に余裕を持たせた地震動
(硬岩サイトで使用されているレベル)
※ Vs=938m/s (Vp=2215m/s)の解放基盤面
(直接比較できないことに留意)
- 加藤スペクトル (上下動) 【改訂耐震設計審査指針関連】
実線: Vp=4200m/s, 破線: Vp=2000m/s
- 大崎の手法 (日本電気協会, 1987)
【改訂前の旧耐震設計審査指針関連】
[水平動の2/3のレベル^注]
※Mj6.5、震源距離10km、解放基盤面
(直接比較できないことに留意)

^注 本検討で算出した応答スペクトルの上下/水平比も平均で2/3程度であることを確認している。
※ここに示すスペクトルは擬似速度応答スペクトル (h=5%) である。

9. 時刻歴波形の作成方法 (1/18)

<概要>

- 震源を特定せず策定する地震動の策定において、本検討チームでは統計的な手法により地震基盤面における応答スペクトル(以下、「標準応答スペクトル」という。)を策定する。
- 時刻歴波形については、策定された標準応答スペクトルを用いて事業者が作成し、その詳細については審査で確認することとしている。
- 今回、時刻歴波形の作成方法について、これまでの安全審査・新規制基準適合性審査における事例を紹介するとともに、作成時の留意点等を整理し、今後、審査ガイドへ反映する際に参考とする。

■資料内容

1. 解釈別記*1及び審査ガイド*2の記載について
2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例
 - ①観測記録を用いた事例
 - * 新規制基準適合性審査例(Mw6.5未満の震源を特定せず策定する地震動)
＜留萌支庁南部地震の観測記録＞
 - ②正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(1)
 - * 平成18年に改訂された耐震設計審査指針に基づく安全審査における事例
＜加藤ほか(2004)の応答スペクトルを用いた加速度時刻歴波形の作成＞
 - ③正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(2)
 - * 新規制基準適合性審査における「応答スペクトルに基づく地震動評価」の作成事例
3. 他分野の事例
 - (1)鉄道構造物等の事例
 - (2)道路橋の事例
 - (3)ダムの耐震性能照査事例
4. 時刻歴波形の経時的変化について

*1 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 別記2

*2 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

9. 時刻歴波形の作成方法 (2/18)

1. 解釈別記及び審査ガイドの記載について

解釈別記では、震源を特定せず策定する地震動の策定については、「設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性を適切に考慮すること」を要求している。

また、審査ガイドでは以下のとおり示されている。

4. 震源を特定せず策定する地震動

4.1 策定方針

- (1) 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定されている必要がある。
- (2) (略)
- (3) 地震動の策定においては、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性が適切に評価されている必要がある。

(4) (略)

5. 基準地震動

5.2 基準地震動の策定

(1) (略)

(2) (略)

- (3) 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性が適切に考慮されていることを確認する。

9. 時刻歴波形の作成方法 (3/18)

2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例

① 観測記録を用いた事例

- 新規制基準適合性審査における震源を特定せず策定する地震動(Mw6.5未満)
 - 2004年北海道留萌支庁南部地震におけるK-NET港町観測点(HKD020)の観測記録から震源を特定せず策定する地震動を策定。
 - 得られた観測記録について、ボーリング等の地質調査、物理探査及び地盤資料の室内試験のデータに基づき地盤モデルを構築、表層地盤の非線形性を考慮した**はざとり解析により基盤地震動を算定**。
 - 地盤モデルの不確かさを考慮(減衰定数)するとともに、敷地の地盤物性(基盤相当位置の地盤物性の相違)による影響等を考慮して基盤地震動を評価。

表 「震源を特定せず策定する地震動」の評価事例

サイト	評価内容	設定位置のVs	水平加速度	鉛直加速度
		(m/s)	(cm/s ²)	(cm/s ²)
美浜発電所 (関西電力)	震源を特定せず策定する地震動(Ss-24)	1650	620	320
	佐藤ほか(2013)の評価・検証による設定	938(港町GL-41m)	609	306
柏崎刈羽 原子力発電所 (東京電力)	震源を特定せず策定する地震動(Ss-8)	700以上	650	330
	敷地における地盤物性の影響を考慮	730 (大湊側での応答評価)	643	310
	佐藤ほか(2013)の評価・検証による設定	938(港町GL-41m)	609	306
佐藤ほか(2013)		938(港町GL-41m)	585	296

9. 時刻歴波形の作成方法 (4/18)

2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例

① 観測記録を用いた事例

【美浜発電所】

- 佐藤ほか(2013)の地盤モデルをもとに、GL-6mまでの非線形性を考慮し、GL-6m以深の減衰定数を3%とし水平動を評価、上下動は表層部に重点をおいたPS検層の再測定の結果を踏まえて、体積弾性率一定とした基盤地震動を評価(水平方向:609cm/s²、鉛直方向:306cm/s²)。
- 保守性を勘案して、水平方向:620cm/s²、鉛直方向:320cm/s²の地震動を震源を特定せず策定する地震動として設定。

【柏崎刈羽原子力発電所】

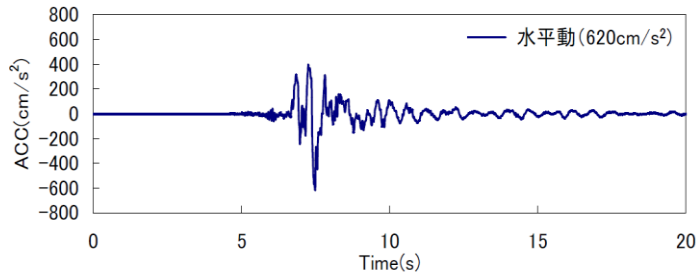
- 佐藤ほか(2013)の基盤地震動の評価結果を、以下の検討により検証。
 - GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向)を評価(最大加速度:561cm/s²)。
 - 佐藤ほか(2013)の地盤モデルをもとに、GL-6mまでの非線形性を考慮し、GL-6m以深の減衰定数を3%とし水平動を評価、上下動は表層部に重点をおいたPS検層の再測定の結果を踏まえて、体積弾性率一定とした基盤地震動を評価(水平方向:609cm/s²、鉛直方向:306cm/s²)。
 - 地下水位の状況を踏まえ、GL-6mまでポアソン比一定、GL-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価(最大加速度:262cm/s²)。
- 敷地における地盤物性の影響を考慮して基盤地震動(水平・鉛直)を評価。
 - HKD020港町観測点の基盤層のVs=938m/sに近いVs=960m/s層の上面に検証結果を考慮した基盤地震動(水平方向:609cm/s²、鉛直方向:306cm/s²)を入力し、Vs=730m/sの解放基盤表面の応答を評価(水平方向:643cm/s²、鉛直方向:310cm/s²)。
- 保守性を考慮して、水平方向:650cm/s²、鉛直方向:330cm/s²の地震動を震源を特定せず策定する地震動として設定。

9. 時刻歴波形の作成方法 (5/18)

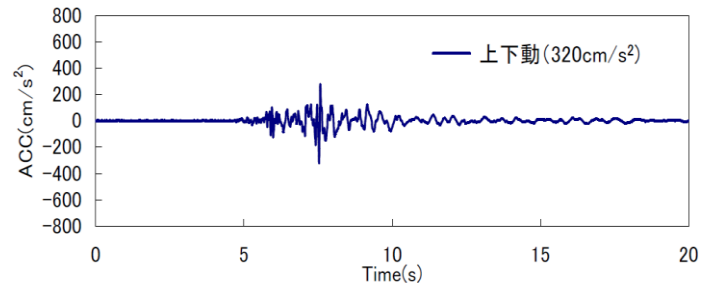
2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例

① 観測記録を用いた事例

【美浜発電所】



加速度(水平動)

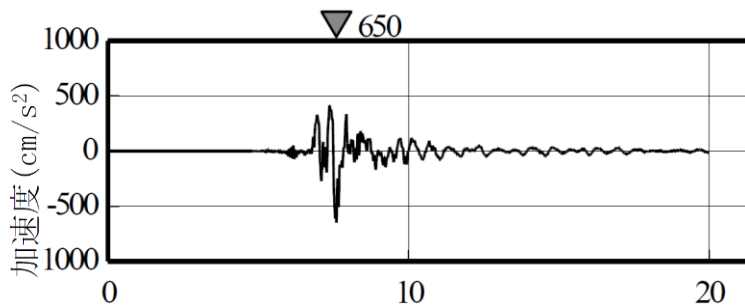


加速度(鉛直動)

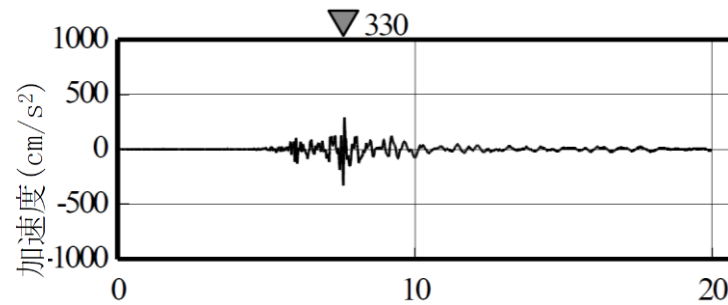
図1 2004年北海道留萌支庁南部地震の観測記録を元に作成した加速度時刻歴波形例(美浜発電所)

第361回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 美浜発電所3号炉 地震動評価について 関西電力株式会社(平成28年5月20日)から一部抜粋<<https://www.nsr.go.jp/data/000150450.pdf>>

【柏崎刈羽原子力発電所】



時間(秒)
加速度(水平動: Ss-8)



時間(秒)
加速度(鉛直動: Ss-8)

図2 2004年北海道留萌支庁南部地震の観測記録を元に作成した加速度時刻歴波形例(柏崎刈羽原子力発電所)

第404回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合 柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉 基準地震動の策定について【補足説明資料】 東京電力ホールディングス株式会社(平成28年9月30日)から一部抜粋<<http://www.nsr.go.jp/data/000165353.pdf>>

9. 時刻歴波形の作成方法 (7/18)

2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例 ②正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(1)

- 平成18年に改訂された耐震設計審査指針に基づく安全審査において、震源を特定せず策定する地震動を策定。
 - ・大間原子力発電所(電源開発):平成20年4月設置許可
 - ・東通原子力発電所(東京電力):平成23年1月設置許可
- 加藤ほか(2004)*1による応答スペクトルをターゲットスペクトルとして参照。
- 応答スペクトルに適合するような周波数－振幅特性と、一様乱数の位相特性をもつ正弦波の重ね合わせによって作成。
- 適合度判定
 - ・応答スペクトル比の下限値を0.85(日本電気協会(JEAG4601))。
 - ・応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上であること。

表 耐震設計審査指針(H18改定)に基づく安全審査における「震源を特定せず策定する地震動」の模擬地震波作成事例

サイト	設計用模擬地震波	位相特性	Mj	Xeq(km)	振幅包絡線の経時変化(sec)			
					Tb	Tc	Td	手法
東通	Ss-2H Ss-2V	一様乱数	6.8	10	2.95	13.92	26.39	Noda <i>et al.</i> (2002)
大間	Ss-2H Ss-2V	一様乱数	—	—	0.93	13.92	31.71	次ページ参照

*1 加藤研一、宮腰勝義、武村雅之、井上大榮、上田圭一、壇一男(2004):震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル、一地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討一、日本地震工学会論文集 第4巻、第4号、2004

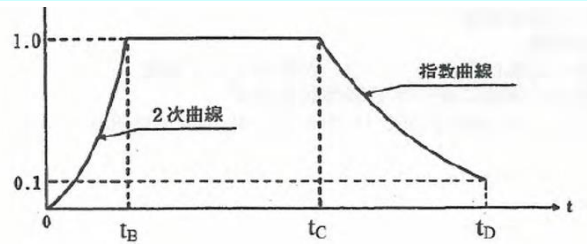
9. 時刻歴波形の作成方法 (8/18)

2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例 ② 正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(1)

<経時的変化>

■ 東通原子力発電所

- $M_j=6.8, X_{eq}=10\text{km}$ とし、Noda *et al.* (2002)に基づき設定。
(加藤ほか(2004)で用いた地震観測波形を包絡)



$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

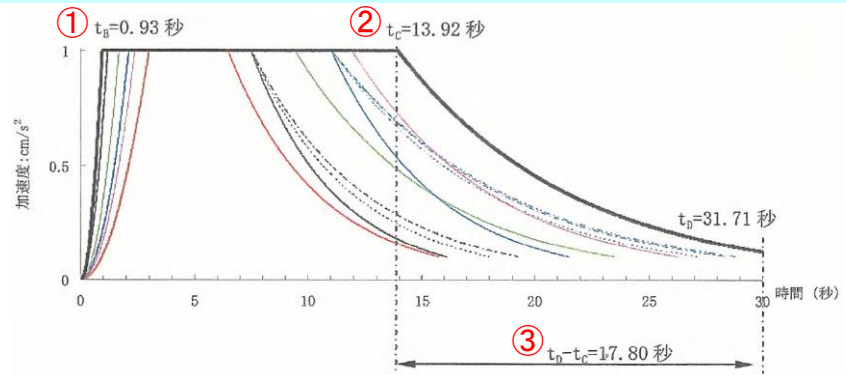
$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

M: マグニチュード, X_{eq} : 等価震源距離

振幅包絡線の経時変化
[Noda *et al.* (2002)]
出典: 日本電気協会 (JEAG4601)

■ 大間原子力発電所

- 加藤ほか(2004)による震源を事前に特定できない地震動レベルの設定に用いた地震及び1984年長野県西部地震の観測記録に対してNoda *et al.* (2002)の方法により振幅包絡形状を算定(地震規模、発生位置の概念がないため)した上で、主要動部分の継続時間が長くなるよう設定。
- $t_C \sim t_D$ は1984年Morgan HillのG1観測点の観測記録($t_C \sim t_D$ が最も長い)に基づき設定。



凡例

— 1991 Sierra Madre (M5.8, $X_{eq}=12\text{km}$)	— 1979 Coyote Lake (M6.0, $X_{eq}=0\text{km}$) 1978 Santa Barbara (M6.0, $X_{eq}=13\text{km}$) 1978 Santa Barbara 1979 Coyote Lake (M6.0, $X_{eq}=16\text{km}$)
— 1987 Whittier Narrows (M6.3, $X_{eq}=18\text{km}$)	— 1984 Morgan Hill (M6.5, $X_{eq}=0\text{km}$) 1984 Morgan Hill (M6.5, $X_{eq}=20\text{km}$) 1966 Parkfield (M6.5, $X_{eq}=23\text{km}$)
..... 1984 Morgan Hill (M6.5, $X_{eq}=24\text{km}$) 1997 鹿児島県北部 (M6.6, $X_{eq}=15\text{km}$) 1984 長野県西部 (M6.8)	— Ss-2の振幅包絡線の経時的変化

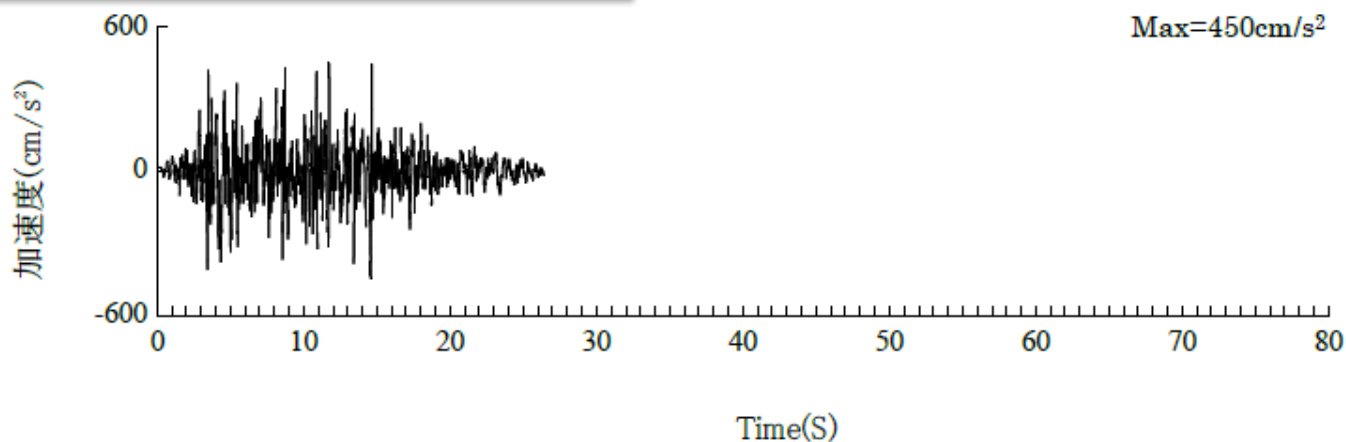
- ① t_B : 1991 Sierra Madre
- ② t_C : 1984 長野県西部
- ③ $t_C \sim t_D$: 1984 Morgan Hill

9. 時刻歴波形の作成方法 (9/18)

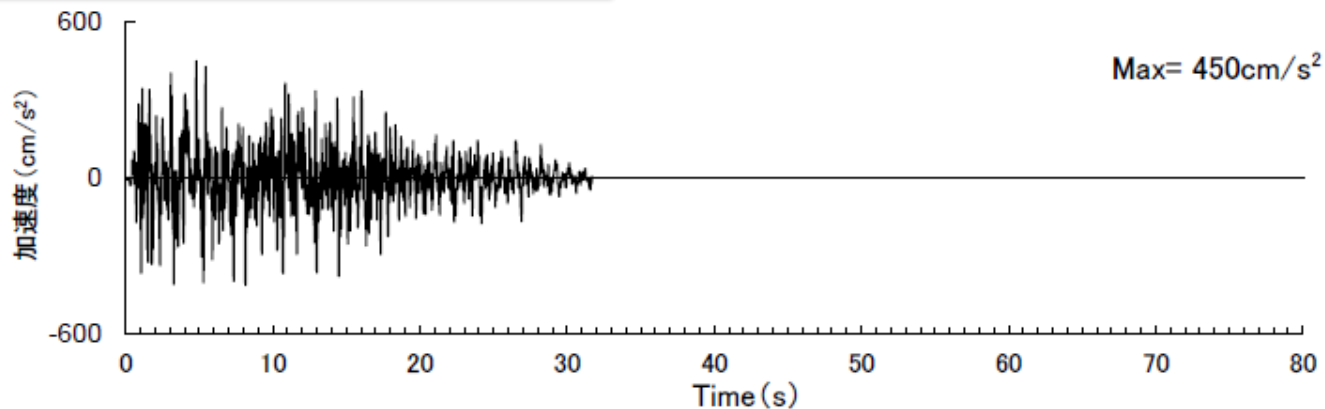
2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例 ②正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(1)

模擬地震波(加速度波形)

東通原子力発電所(東京電力)



大間原子力発電所(電源開発)



9. 時刻歴波形の作成方法 (10/18)

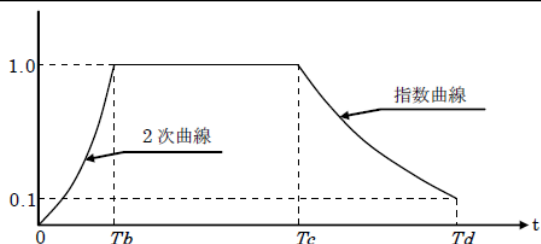
2. 安全審査・新規制基準適合性審査における時刻歴波形の作成事例 ② 正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の作成事例(2)

■ 新規制基準適合性審査における応答スペクトルに基づく手法(美浜発電所)

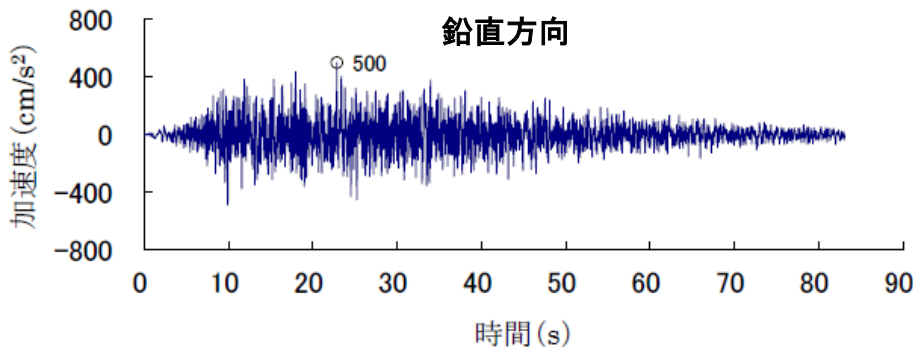
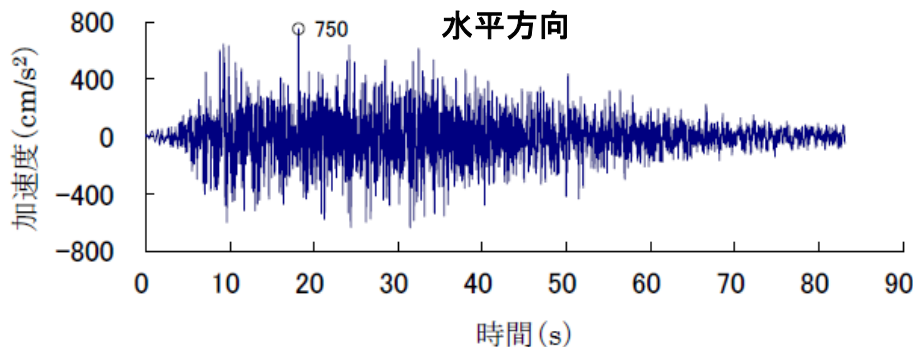
- 審査ガイドでは、応答スペクトルに基づく手法による基準地震動は、検討用地震ごとに評価した応答スペクトルを下回らないように作成することを要求しており、原則、基準地震動の応答スペクトルは、検討用地震の応答スペクトルを包絡するように設定している。
- 応答スペクトルに適合する模擬地震波は、位相角を一様乱数として与えた正弦波を重ね合わせて目標とする応答スペクトルに適合するように作成する。振幅包絡線の経時的变化についてはNoda *et al.* (2002)に基づくものとし、マグニチュード、等価震源距離から設定。

模擬地震波の振幅包絡線の経時的变化

マグニチュード M	等価震源距離 Xeq (km)	振幅包絡線の 経時的变化 (s)		
		T_b	T_c	T_d
7.8	68	9.3	31.2	83.2



$$E(t) = \begin{cases} (T/T_b)^2 & 0 \leq T \leq T_b & T_b = 10^{0.5M-2.93} \\ 1.0 & T_b \leq T \leq T_c & T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0} \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{T_d-T_c}(T-T_c)} & T_c \leq T \leq T_d & T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6} \end{cases}$$



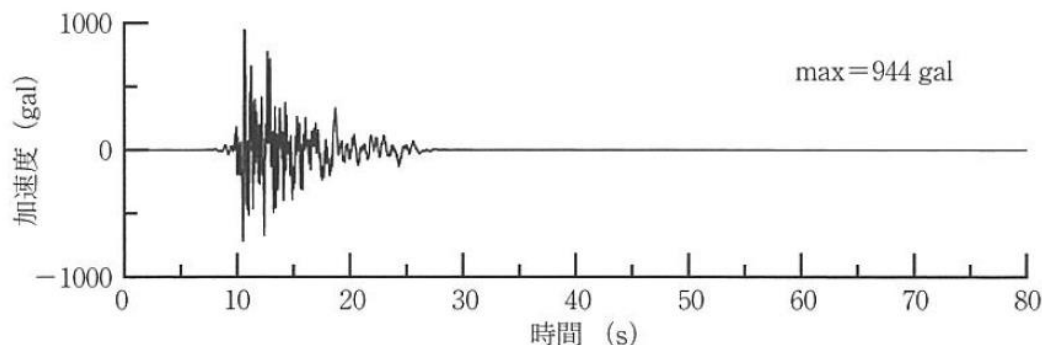
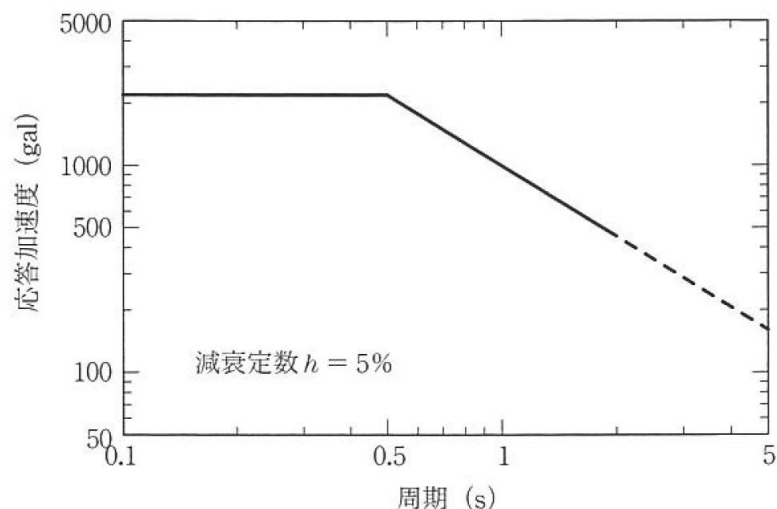
9. 時刻歴波形の作成方法 (11/18)

3. 他分野の事例 (1) 鉄道構造物等の事例

< 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計 >

< 簡易な手法によりL2地震動を算定する場合 >

- これまでの観測記録及び断層破壊過程を考慮した手法により位相特性をモデル化(群遅延時間を考慮)し、弾性加速度応答スペクトルに適合させることによって算出。標準応答スペクトルに適合する時刻歴波形の1サンプルであり、地盤、構造物の応答値を動的解析によって算定する際に用いる事を目的として作成されたもの



解説図 6.4.5 スペクトルIIの弾性加速度応答スペクトル

解説図 6.4.7 スペクトルIIの時刻歴波形

出典:財団法人鉄道総合技術研究所 編(2012): 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版(株), 平成24年9月(運輸省鉄道局 監修)

9. 時刻歴波形の作成方法 (12/18)

3. 他分野の事例 (2) 道路橋の事例

<道路橋示方書・同解説 V耐震設計編>

(c) レベル2地震動 (タイプII)

呼び名	地盤種別	振幅調整のもととなった強震記録の地震名と記録場所及び成分	
2-II-I-1	I種地盤	平成7年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上 NS 成分
2-II-I-2			神戸海洋気象台地盤上 EW 成分
2-II-I-3			猪名川架橋予定地点周辺地盤上 NS 成分
2-II-II-1	II種地盤		JR 西日本鷹取駅構内地盤上 NS 成分
2-II-II-2			JR 西日本鷹取駅構内地盤上 EW 成分
2-II-II-3			大阪ガス章合供給所構内地盤上 N27W 成分
2-II-III-1	III種地盤		東神戸大橋周辺地盤上 N12W 成分
2-II-III-2			ポートアイランド内地盤上 NS 成分
2-II-III-3			ポートアイランド内地盤上 EW 成分

- 加速度波形は強震記録をもとに、耐震設計上の地盤面における地震波の減衰定数0.05の加速度応答スペクトルの特性が、標準加速度応答スペクトルと一致するように振幅調整して求める。
- 位相特性の異なる振幅調整した加速度波形を少なくとも3波設定し、動的解析に用いることが求められている。

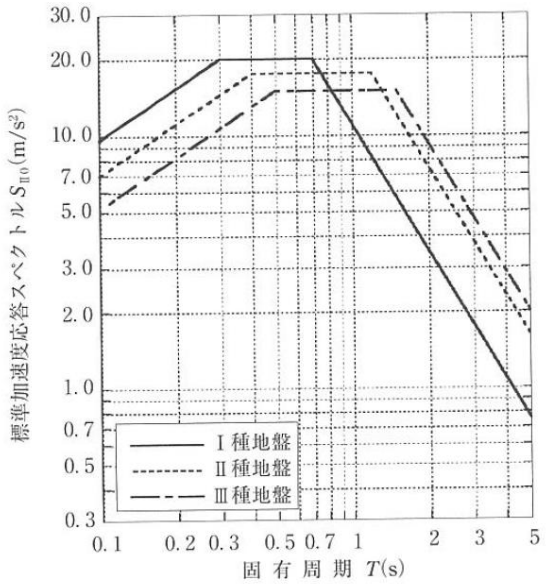
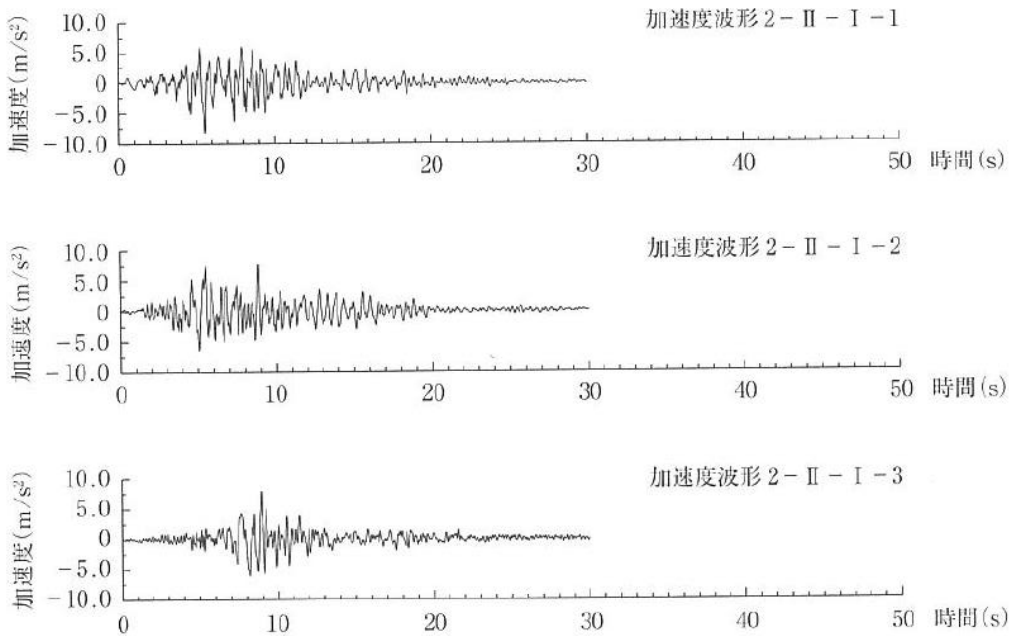


図-解3.3.2 レベル2地震動 (タイプII) の標準加速度応答スペクトル S_{H0}



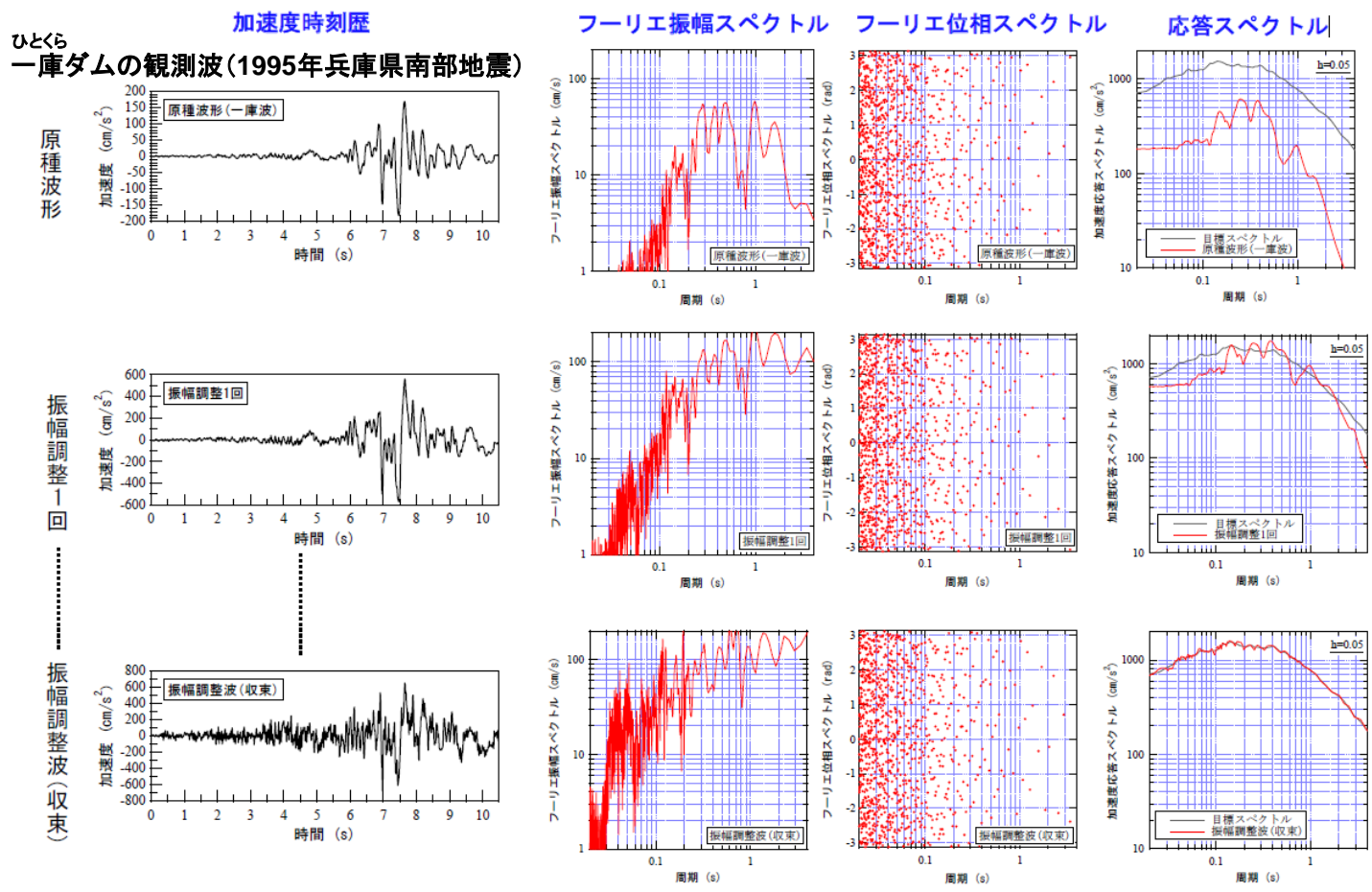
(a) I種地盤

9. 時刻歴波形の作成方法 (13/18)

3. 他分野の事例 (3)ダムの耐震性能照査事例

<大規模地震に対するダムの耐震性能照査>

- 強震記録をもとに、位相特性は変化させず、強震記録の加速度応答スペクトルと目標スペクトルが実用上十分な精度で一致するまで、周波数領域における振幅特性を変化させて調整を繰り返す。



出典:「大規模地震に対するダムの耐震性能照査」国土交通省 国土技術政策総合研究所
 試行ダムの照査例 * 地震動の設定: <http://www.nilim.go.jp/lab/fdg/l2/data/5-112.pdf>

9. 時刻歴波形の作成方法 (14/18)

4. 時刻歴波形の経時的変化について

➤ 安全審査、新規制基準適合性審査及び他分野の事例を踏まえて、標準応答スペクトルから、時刻歴波形を作成する手法として、主に以下のように整理した。

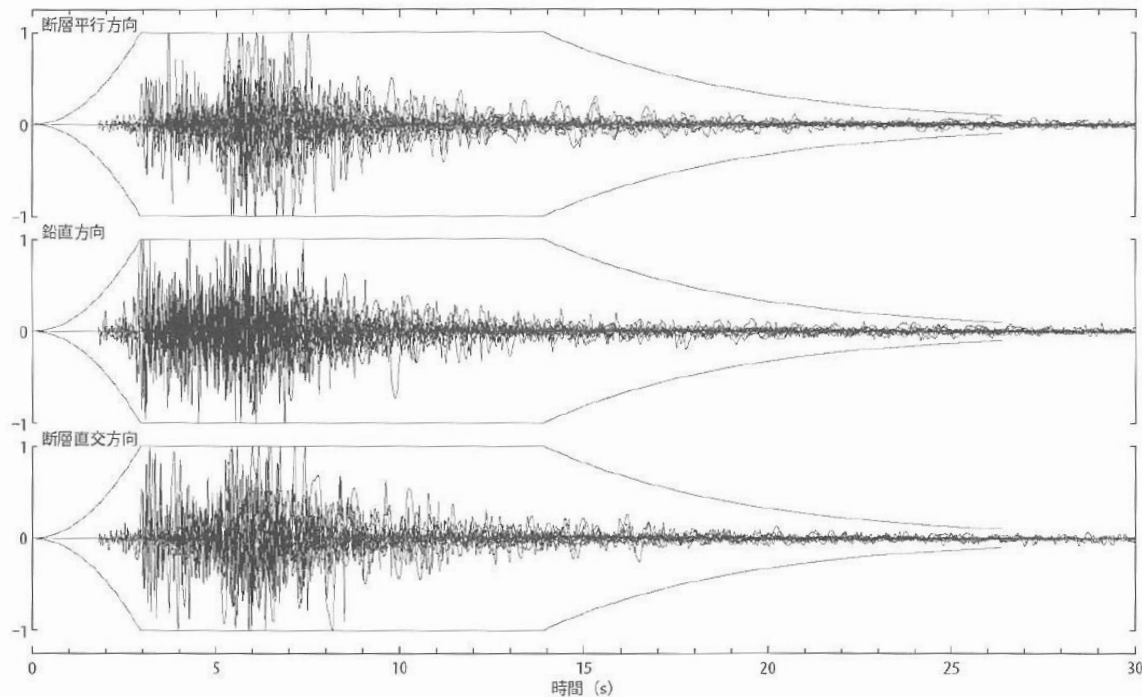
① 振幅包絡線を与え、位相は正弦波の重ね合わせにより作成する方法。

＜振幅包絡線の与え方の例＞

- ・Jennings *et al.* (1968)の手法、大崎(1994)の手法、Noda *et al.* (2002)の手法など
- ・統計処理の対象とした観測記録を参照し経時的変化を推定(下図例参照)

② 実観測記録を用いて与える方法

③ 群遅延時間を考慮して与える方法(断層破壊過程を考慮する方法)



＜参考図: 日本電気協会(JEAG4601)＞
観測波形の重ね書き及び振幅包絡線の例

9. 時刻歴波形の作成方法 (15/18)

4. 時刻歴波形の経時的变化について(審査ガイドへの反映)

- 時刻歴波形については、本検討チームにおいて策定された標準応答スペクトルを用いて事業者が作成し、その詳細については新規制基準適合性審査で確認することとしている。
- 審査ガイドには、以下に示すような手法のうち、「複数の手法を用いた検討が行われていることを確認する」等の記載とすることも考えられる。

- これまでの安全審査・新規制基準適合性審査における審査実績を踏まえて、
① **振幅包絡線を与え、位相は正弦波の重ね合わせを用いる方法。**

震源を特定せず策定する地震動という観点から、

- ② **震源を特定せず策定する地震動の策定においては、観測記録を重視するという考え方から、
実観測記録を用いる方法。**

- ③ **他分野の事例も踏まえて、地震動の非定常性及び断層破壊過程を考慮した、
群遅延時間を用いる方法。**

➤ 留意点

✓ 地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的变化等の地震動特性が適切に考慮されているか。

✓ 実観測記録を用いる場合には、適切な観測記録が抽出されているか。

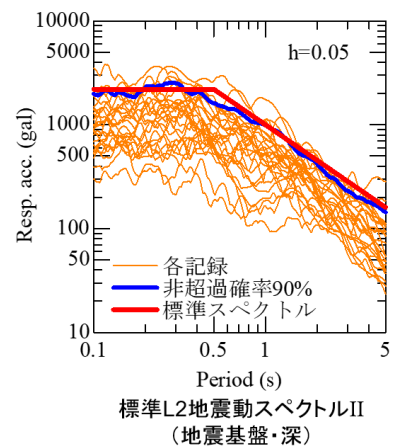
(例: 内陸地殻内地震のうち震源近傍で観測された記録(KiK-net等含む)や、敷地内において観測された記録)

9. 時刻歴波形の作成方法 (16/18)

＜参考＞ 群遅延時間を考慮した方法 第2回検討チーム会合 資料2より抜粋

時刻歴波形の選択方針 21/34

- 弾性応答スペクトルが標準L2地震動に一致
- 想定地震規模(Mw=7.0, 直下)の中で起こりうる地震動波形
- 構造物の非線形応答の観点での配慮(非線形応答が比較的大きくなる)



位相のモデル化方法 23/34

群遅延時間(位相スペクトルの微分)

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

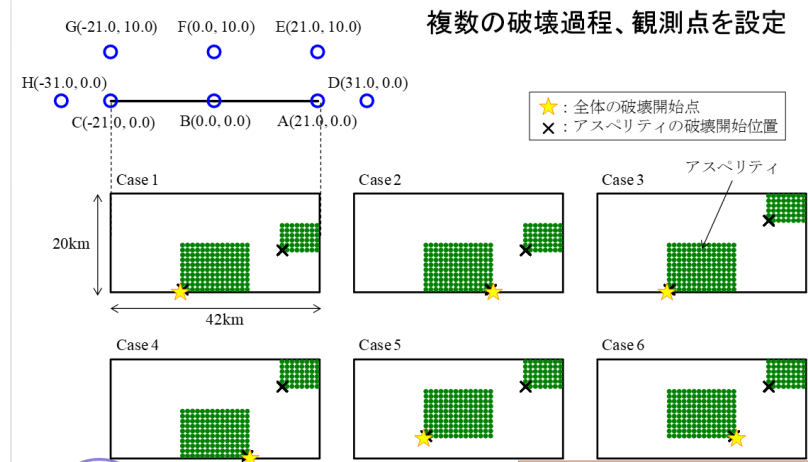
震源特性
+
伝播経路特性
+
サイト特性

過去に提案している群遅延時間シミュレート手法を用いて想定地震レベル(Mw=7.0, 断層直上)として起こりうる位相スペクトルのセットを多数作成

設計地震動波形の作成の流れ 22/34

- ①位相のモデル化(多数の位相スペクトルを作成)
- ②弾性加速度応答スペクトルへのフィッティング(多数の時刻歴波形を作成)
- ③各波形の非線形応答スペクトルを計算
- ④全結果を非超過確率90%で包絡する1波形を選択

位相の評価(震源特性) 24/34



$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

9. 時刻歴波形の作成方法 (17/18)

＜参考＞群遅延時間を考慮した方法 第2回検討チーム会合 資料2より抜粋

位相の評価(震源特性) 25/34

インパルス列の重ね合わせで表現

$$t_{gr}^S(\omega) = \frac{-\sum_{i=1}^N a_i^2 t_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N a_i a_j (t_j + t_i) \cos\{\omega(t_j - t_i)\}}{\sum_{i=1}^N a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N a_i a_j \cos\{\omega(t_j - t_i)\}}$$

Case 4

Case 5

Site A, Site B, Site C

Amp. vs Time(sec)

破壊開始点と観測点の位置関係でパルスの継続時間が変化

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

位相の評価(震源特性) 26/34

時刻歴波形の例

Site A, Site B, Site C

Acc(gal) vs Time(sec)

パルスの継続時間に比例して時刻歴波形の形状が変化

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

位相の評価(伝播経路特性) 27/34

伝播経路特性の評価

震源距離に比例する形でモデル化

$$\mu_{igr}^P(\omega) = \beta_1(\omega) \cdot R^2$$

$$\sigma_{igr}^{P^2}(\omega) = \beta_2^2(\omega) \cdot R^2$$

R=3kmとしてモデル化

Frequency [Hz]

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

位相の評価(サイト特性) 28/34

サイト特性群遅延時間の平均, 標準偏差

$$\mu_{igr}^L(\omega) = \gamma_1(\omega) \cdot (3000 - V_s)^2$$

$$\sigma_{igr}^{L^2}(\omega) = \gamma_2^2(\omega) \cdot (3000 - V_s)^2$$

Site特性群遅延時間の平均, 標準偏差

Site特性0.1倍

Site特性0.5倍

Site特性1.0倍

Acc(gal) vs Time(sec)

$\mu_{igr}^L, \sigma_{igr}^{L^2}$ とともにバラツキが大きい

$\mu_{igr}^L, \sigma_{igr}^{L^2}$ をそれぞれ0.1~1.0倍まで10通りの変化をさせる

サイト特性の平均、標準偏差大 → 継続時間大

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega)$$

9. 時刻歴波形の作成方法 (18/18)

＜参考＞群遅延時間を考慮した方法 第2回検討チーム会合 資料2より抜粋

時刻歴波形の作成 29/34

- 位相スペクトルのモデル化 (計4800ケース)

$$I_{gr}^O(\omega) = I_{gr}^S(\omega) + I_{gr}^P(\omega) + I_{gr}^L(\omega)$$
- 弾性応答スペクトル ($h=0.05$) に一致するような振幅スペクトルの探索
- 誤差5%以内の波形を作成 (計4800波)

全波形の非線形応答スペクトル(所要降伏震度スペクトル)を算定

Railway Technical Research Institute

非線形応答スペクトル算定結果 31/34

- $\mu=1$ (弾性) の場合は、バラツキが小さい
- 位相特性の違いにより、構造物の非線形応答が大きく変化する

Railway Technical Research Institute

非線形応答スペクトル(所要降伏震度スペクトル) 30/34

固有周期の異なる複数の構造物

1自由度系の弾塑性応答解析

固有周期, 降伏震度を変化させた網羅的な解析

ある応答塑性率 μ になる
 ・固有周期 T
 ・降伏震度 k_{hy}
 の組み合わせを图示

塑性率小 $\mu=1.0$ (弾性)
 $\mu=2.0$
 $\mu=3.0$
 塑性率大 $\mu=4.0$

所要降伏震度スペクトルのイメージ

Railway Technical Research Institute

設計地震動波形の選択 32/34

選択する設計地震動としては、同じ弾性応答スペクトルを有する波形の中でもある程度安全側に設定していることが望ましい

↓

非線形応答量として非超過確率90%を満足する時刻歴波形を選択

選択した波形

所要降伏震度

非超過確率90%

$\mu=1, 3, 6, 9$

選択した波形

Railway Technical Research Institute


付録A: はぎとり解析手法の妥当性確認(予備検討)

次ページ以降に、第4回会合資料2(p.4~24)を抜粋して示す。

第4回会合では、以下に示す審査ガイドに例示されたMw6.5未満の14地震のうち、KiK-netの観測記録が収集可能な9地震を対象に実施した予備検討の結果を示した。

予備検討における対象地震(KiK-net観測記録が得られた9地震)

地震番号 Eq.	地震名	Mw	Mj	緯度 (deg.)	経度 (deg.)	深さ (km)	観測点数 (震央距離40km 以内のKiK-net)
03	2011年長野県北部地震	6.2	6.7	36.9860	138.5978	8.4	8 (7)*
04	1997年3月鹿児島県北西部地震	6.1	6.6	31.9728	130.3590	11.9	0
05	2003年宮城県北部地震	6.1	6.4	38.4050	141.1710	11.9	4
06	1996年宮城県北部(鬼首)地震	6.0	6.1	38.9082	140.6335	8.6	0
07	1997年5月鹿児島県北西部地震	6.0	6.4	31.9483	130.3027	9.2	0
08	1998年岩手県内陸北部地震	5.9	6.2	39.8060	140.9012	7.9	0
09	2011年静岡県東部地震	5.9	6.4	35.3095	138.7145	14.3	10
10	1997年山口県北部地震	5.8	6.6	34.4415	131.6662	8.3	0
11	2011年茨城県北部地震	5.8	6.1	36.7837	140.5715	5.4	6
12	2013年栃木県北部地震	5.8	6.3	36.8737	139.4128	2.8	9
13	2004年北海道留萌支庁南部地震	5.7	6.1	44.0767	141.6995	8.6	5
14	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	5.4	5.8	33.6782	130.2882	13.5	4
15	2012年茨城県北部地震	5.2	5.4	36.7177	140.6125	6.5	7
16	2011年和歌山県北部地震	5.0	5.5	33.9905	135.2342	7.3	4

 : KiK-net観測記録が得られていない地震 (対象外)

合計

57
※採用は56

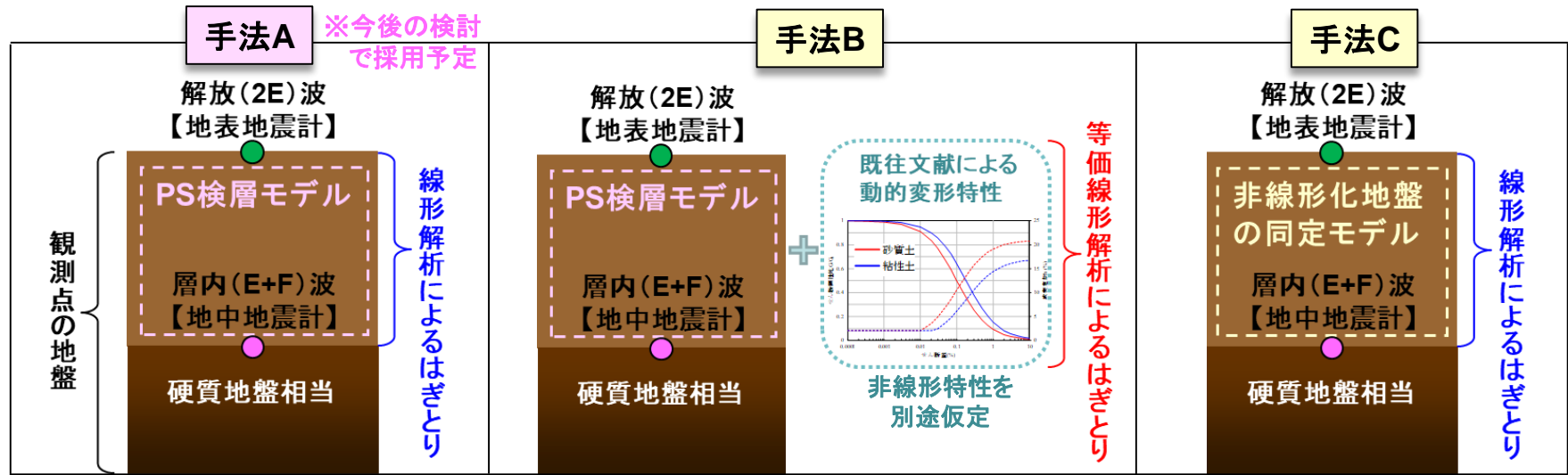
* MwはF-netのモーメント・テンソルカタログ、Mj・緯度・経度・深さは気象庁の一元化震源カタログによる値(以降同様)

付録A: 4. はぎとり解析

はぎとり解析の方針

- 対象記録 : 9地震のKiK-netの地中観測記録 (水平2成分112記録、上下動56記録)
- 手法 : 公開のPS検層モデルを用いた重複反射理論に基づく線形解析 (手法A)
 - 統計処理を行うことを前提に簡便な手法Aを基本とする。ただし、一部記録については、地盤の非線形性に係る手法の妥当性確認を行った (手法B, C)。

手法	使用する地盤モデル	解析手法	対象地震数	対象記録数
A	PS検層モデル (減衰定数は複数検討のうえ決定)	線形解析	KiK-netの観測記録が得られている9地震	56記録 (3成分168波)
B	PS検層モデル (文献による動的変形特性により 非線形性を考慮)	等価線形解析	上記のうち6地震	強震記録が得られている11記録 (水平22波)
C	地盤同定解析に基づくモデル (地盤モデルに非線形効果を含む)	線形解析		

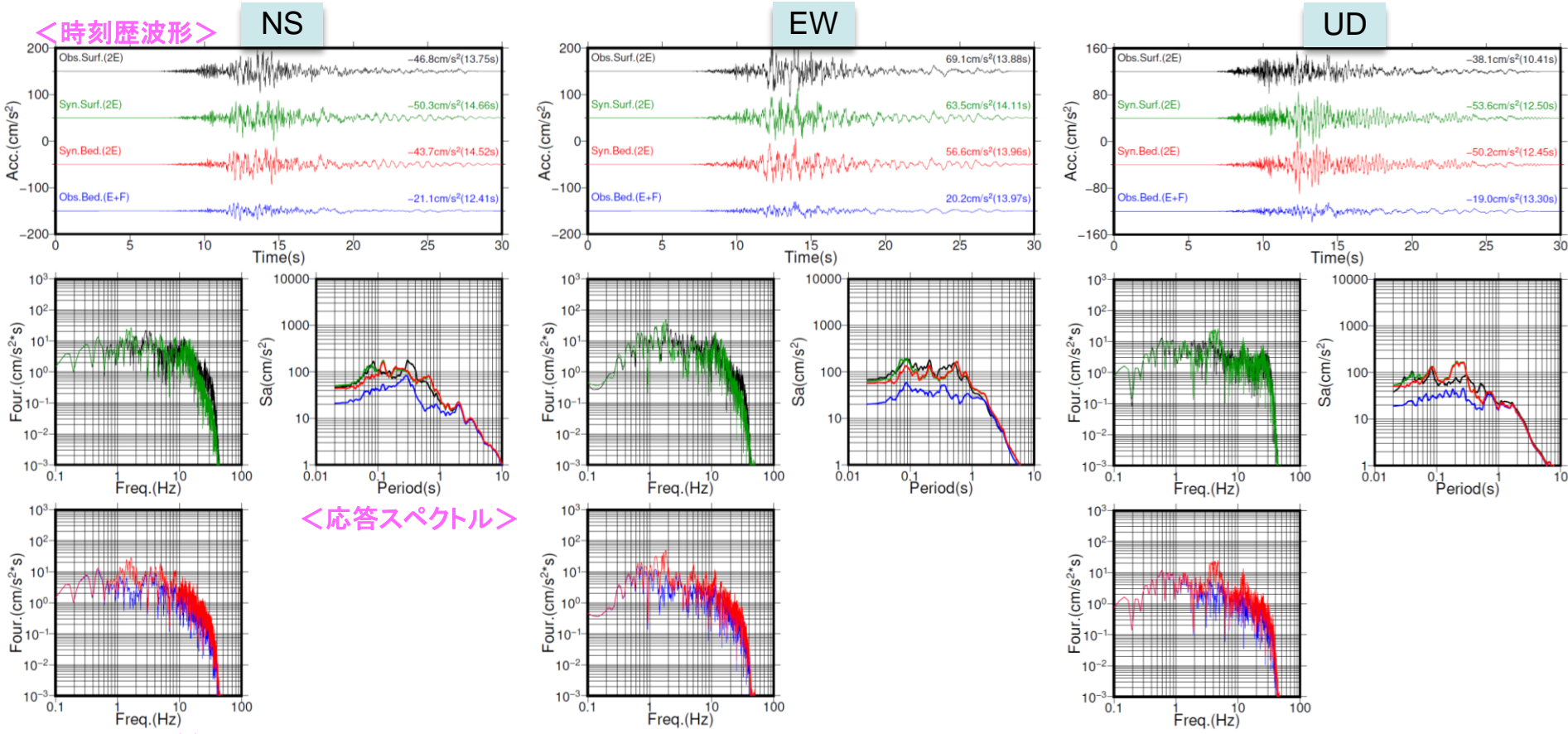


付録A: 4. 1. はぎとり解析: 手法A

【手法A】はぎとり解析結果の例

2011年静岡県東部地震(Eq.09: Mw5.9)のKiK-net身延(YMNH13)における記録について、はぎとり解析結果の例を示す（地盤の減衰定数5%の場合）。

◆加速度記録(No.24): 断層最短距離25km、地中地震計深度204m、地中Vs=1350m/s、Vp=3560m/s
 ※はぎとり解析では、主要動を含む波形を切り出し、前後にテーパー処理を施している。



＜フーリエスペクトル＞

黒: 地表観測波(2E)、緑: 地表立ち上げ波(2E)、赤: はぎとり波(2E)、青: 地中観測波(E+F)

※地中記録を設定地盤より地表に立ち上げた波

※統計処理で使用

付録A: 4. 1. はぎとり解析: 手法A

【手法A】 はぎとり解析における減衰定数の調整①: はぎとり精度が高い例

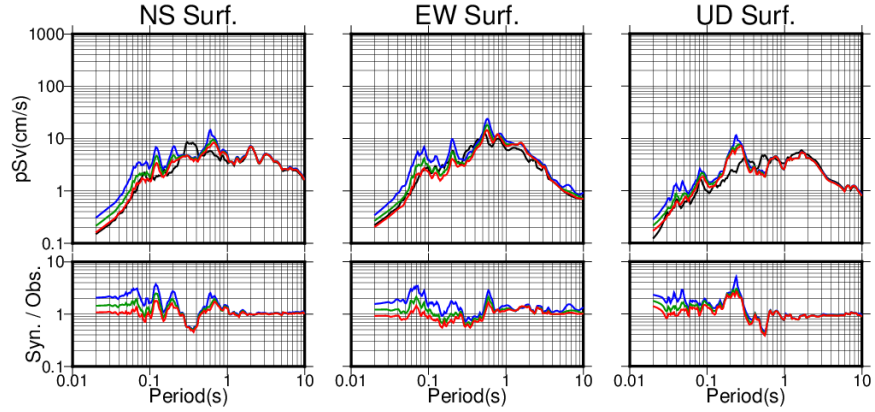
2011年静岡県東部地震(Eq.09: Mw5.9)のKiK-net身延(YMNH13)における記録について、地盤の減衰定数(h)を変えた場合の解析(1%, 3%, 5%の3パターン)を実施。
 → 最終的に地表立ち上げ波の観測との整合性が良いh=5%を採用した。

◆記録No.24: 断層最短距離25km、地中地震計深度204m、地中Vs=1350m/s、Vp=3560m/s

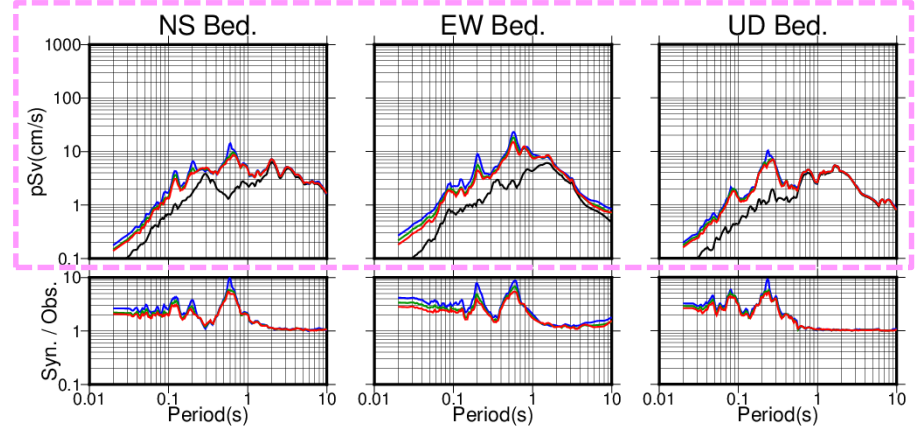
地表

地中

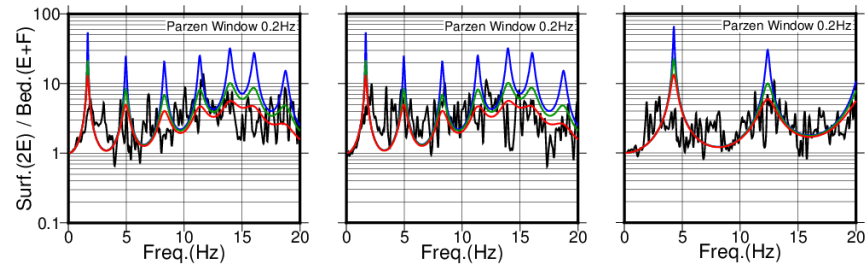
<擬似速度応答スペクトル (上)、計算/観測の比 (下) >



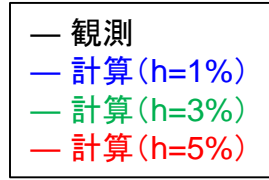
※統計処理で使用



<加速度フーリエスペクトル比: 地表(2E)/地中(E+F)>



※観測は地中E+F波、計算は地中2Eのはぎとり波



減衰定数(特にh=3%, 5%)の違いが地中のはぎとり波へ与える影響は顕著ではない。

➡ 設定地盤での計算結果が地表観測記録をよく説明している ➡ はぎとり解析の精度が高いと判断注)

注)ここでは、はぎとり精度の判断指標として、地中記録を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性の高低を基準としていることに留意。

付録A: 4. 1. はぎとり解析: 手法A

【手法A】はぎとり解析における減衰定数の調整②: はぎとり精度が低い例

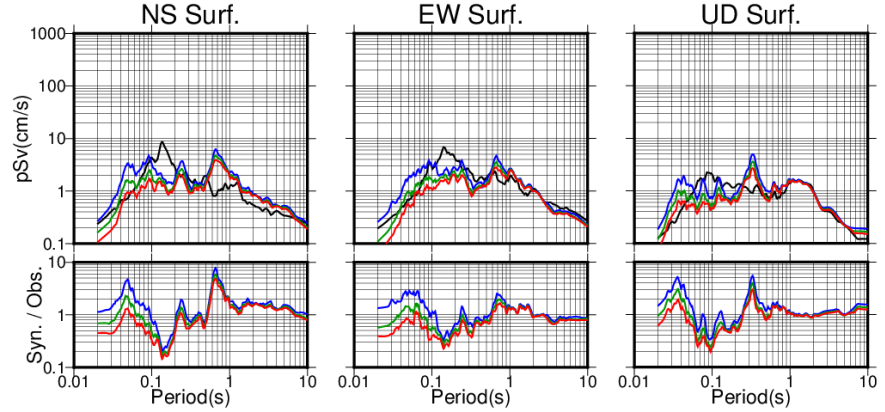
2012年茨城県北部地震(Eq.15: Mw5.2)のKiK-net山方(IBRH16)における記録について、地盤の減衰定数(h)を変えた場合の解析(1%, 3%, 5%の3パターン)を実施。
→ 最終的に地表立ち上げ波の観測との整合性が良いh=3%を採用した。

◆記録No.13: 断層最短距離22km、地中地震計深度300m、地中Vs=2050m/s、Vp=4000m/s

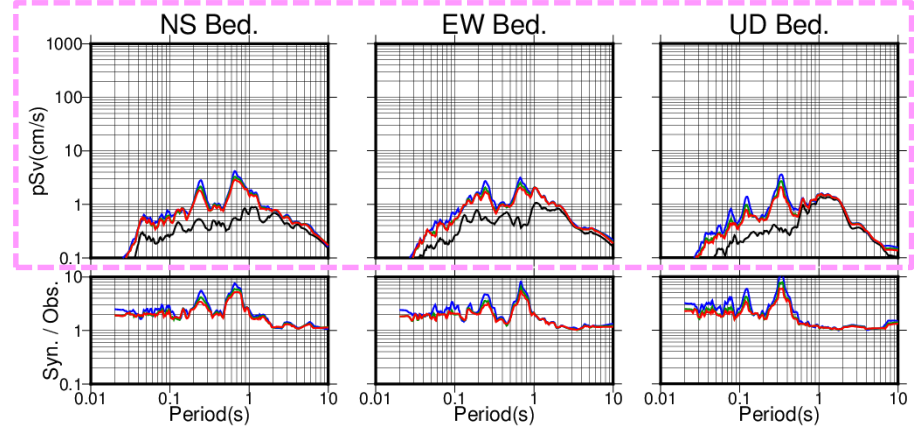
地表

地中

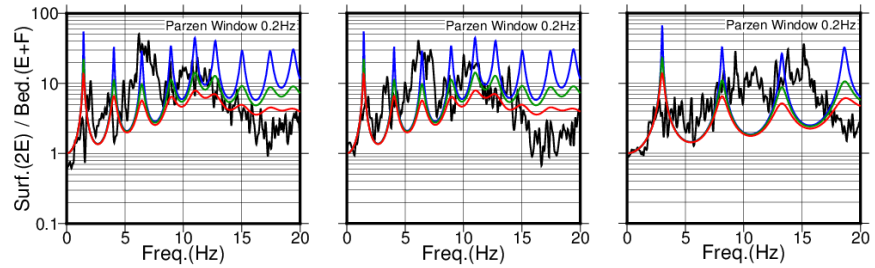
<擬似速度応答スペクトル (上)、計算/観測の比 (下)>



※統計処理で使用



<加速度フーリエスペクトル比: 地表(2E)/地中(E+F)>



※観測は地中E+F波、計算は地中2Eのはぎとり波

- 観測
- 計算 (h=1%)
- 計算 (h=3%)
- 計算 (h=5%)

減衰定数(特にh=3%, 5%)の違いが地中のはぎとり波へ与える影響は顕著ではない。



※今後、統計処理において、計算/観測比を指標としたデータの重み付け等を検討

➡ はぎとり解析の精度が低いと考えられる注) ➡ 統計処理の中でどう扱うか?

注)ここでは、はぎとり精度の判断指標として、地中記録を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性の高低を基準としていることに留意。

付録A: 4. 1. はぎとり解析: 手法A

手法Aで採用した減衰定数(1/2)

通し 番号 No.	地震 番号 Eq.	観測点 コード	観測点名	震央 距離 (km)	断層最 短距離 (km)	観測の地表最大加速度 (cm/s ²)			地中 深度(m)	地中 Vp (m/s)	地中 Vs (m/s)	採用した 減衰定数
						NS	EW	UD				
1	11	IBRH13	高萩	1.3	4.0	1026.5	526.1	733.1	100.0	4900	3000	5%
2	16	WKYH01	広川	2.3	7.7	754.2	1064.5	385.8	101.0	3846	1580	5%
3	12	TCGH07	栗山西	3.7	3.3	1224.3	835.0	736.5	100.0	3600	1870	5%
4	15	IBRH14	十王	6.4	9.1	229.0	390.5	251.7	100.0	5350	3200	5%
5	13	RMIH05	小平西	9.1	8.9	340.4	236.1	66.2	105.0	2760	1180	3%
6	15	IBRH13	高萩	9.3	11.4	691.2	304.4	408.6	100.0	4900	3000	3%
7	11	IBRH14	十王	10.4	9.6	407.2	382.6	404.7	100.0	5350	3200	5%
8	12	FKSH07	檜枝岐	15.5	10.6	91.7	105.3	74.1	200.0	5100	2600	5%
9	03	NGNH29	野沢温泉	16.3	14.8	279.5	323.8	259.1	110.0	2340	1040	5%
10	09	SZOH37	芝川	18.0	15.5	362.5	475.9	142.5	304.0	4080	1400	3%
11	03	NIGH13	牧	19.4	12.4	143.1	135.9	69.6	100.0	1700	910	3%
12	12	TCGH08	栗山東	20.8	19.8	69.8	62.2	42.8	203.0	3940	1960	5%
13	15	IBRH16	山方	21.0	22.0	73.9	60.3	39.6	300.0	4000	2050	3%
14	13	RMIH04	小平東	21.2	16.9	83.0	81.8	36.5	100.0	2510	950	3%
15	11	IBRH16	山方	22.2	21.4	187.7	184.1	123.0	300.0	4000	2050	3%
16	05	MYGH06	田尻	22.4	16.0	126.3	125.5	104.8	100.0	2310	1480	5%
17	03	NIGH14	塩沢	23.2	17.4	300.0	346.1	149.0	387.0	3020	1330	1%
18	11	IBRH12	大子	23.4	22.5	145.2	168.5	74.9	200.0	3000	1700	1%
19	05	MYGH01	仙台	23.8	23.5	85.1	84.1	42.4	1206.0	5630	3260	3%
20	03	NIGH11	川西	24.5	12.6	238.5	158.4	90.6	205.0	2080	850	3%
21	03	NIGH19	湯沢	25.6	25.5	139.8	127.3	70.5	100.0	4310	1910	3%
22	12	GNMH07	利根	26.4	24.4	74.6	69.0	54.2	200.0	4000	1700	5%
23	09	YMNH15	上九一色	26.7	22.2	187.7	139.0	121.7	116.0	3500	1600	5%
24	09	YMNH13	身延	27.1	24.6	46.8	69.1	38.1	204.0	3560	1350	5%
25	14	FKOH03	宇美	27.6	25.9	264.6	290.3	126.1	100.0	4840	2030	3%
26	12	TCGH17	藤原2	27.8	26.7	34.2	30.3	17.4	104.0	5400	2800	5%
27	15	IBRH12	大子	29.4	30.1	77.5	70.4	36.8	200.0	3000	1700	1%
28	14	SAGH03	富士	30.2	29.6	119.5	123.4	64.5	103.0	4250	1980	3%
29	14	FKOH09	玄海	30.4	32.3	61.6	78.2	25.5	200.0	3400	1220	3%
30	03	NIGH18	妙高	30.5	25.7	90.5	137.3	40.6	110.0	2150	930	3%

手法B,Cで対象とする記録

付録A: 4. 1. はぎとり解析: 手法A

手法Aで採用した減衰定数(2/2)

通し 番号 No.	地震 番号 Eq.	観測点 コード	観測点名	震央 距離 (km)	断層最 短距離 (km)	観測の地表最大加速度※ (cm/s ²)			地中 深度(m)	地中 Vp (m/s)	地中 Vs (m/s)	採用した 減衰定数
						NS	EW	UD				
31	12	GNMH13	水上2	31.2	30.7	108.7	76.6	40.0	204.0	4600	2400	1%
32	09	YMNH14	都留南	32.1	27.9	138.9	185.0	82.3	250.0	4770	2280	5%
33	09	KNGH19	山北中	32.2	29.9	73.1	51.8	22.8	100.0	4000	1800	5%
34	09	SZOH34	清水北	33.1	30.2	130.8	186.8	93.5	118.0	2800	1100	3%
35	15	IBRH15	御前山	33.1	33.7	59.8	64.6	23.0	107.0	3100	1700	3%
36	03	NGNH07	中野	33.4	33.7	64.2	60.5	36.1	200.0	柱状図のみ		
37	13	SRCH04	沼田	34.4	32.9	70.0	95.4	24.4	105.0	1750	700	3%
38	09	SZOH38	函南	34.5	36.3	79.6	77.6	50.8	200.0	3530	1820	5%
39	12	FKSH06	伊南	34.5	30.1	33.2	86.3	25.0	100.0	3200	1700	5%
40	11	IBRH15	御前山	34.9	33.1	118.3	89.3	60.0	107.0	3100	1700	3%
41	13	SRCH03	幌加内南	35.2	31.9	43.5	37.9	21.3	100.0	4120	1820	3%
42	05	MYGH12	志津川	35.4	22.9	143.7	119.8	73.7	102.0	5510	2670	5%
43	11	TCGH13	馬頭	35.6	34.9	127.8	132.5	46.3	140.0	3750	2010	3%
44	13	SRCH02	幌加内中	35.7	30.1	187.5	268.9	55.2	100.0	3840	1850	1%
45	03	NIGH15	六日	36.1	28.1	51.5	48.1	33.2	100.0	3710	1540	3%
46	16	WKYH09	和歌山	36.1	36.8	14.2	13.8	5.8	200.0	3400	1430	5%
47	14	SAGH04	東脊振	36.3	34.1	95.7	58.5	32.5	200.0	5400	3000	5%
48	12	TCGH11	今市	36.7	33.0	35.3	92.0	25.6	200.0	3070	1600	5%
49	09	YMNH12	増穂	37.0	33.7	24.3	49.5	22.5	148.0	2950	1350	5%
50	09	YMNH09	早川	37.3	35.0	99.7	106.2	29.3	158.0	4500	1830	3%
51	12	TCGH09	矢板	37.8	36.1	41.5	23.8	17.1	103.0	1720	1050	5%
52	09	KNGH20	松田	37.9	36.7	200.7	201.1	88.4	106.0	3800	1400	3%
53	16	NARH01	十津川西	38.4	39.1	44.0	47.3	23.0	99.0	5015	2289	5%
54	16	WKYH07	上富田	38.4	39.1	13.9	23.6	9.2	100.0	3580	1850	5%
55	15	TCGH13	馬頭	38.8	39.3	73.0	79.1	28.2	140.0	3750	2010	3%
56	05	MYGH05	小野田	39.2	36.7	108.0	85.4	53.5	337.0	1970	690	3%
57	15	IBRH18	ひたちなか	39.4	39.9	34.6	37.2	27.7	504.0	4100	2200	1%

■ : PS検層の数値データ不明のため不採用とした記録

※最大加速度については、今後の検討において観測点方位の適正化等を実施することにより数値が変動する可能性がある。

手法AはPS検層モデルを用いた線形解析であるため、一部の記録(6地震11記録)を対象に、地盤の非線形性の影響を考慮した解析(手法B, C)を実施し、結果の妥当性を確認した。

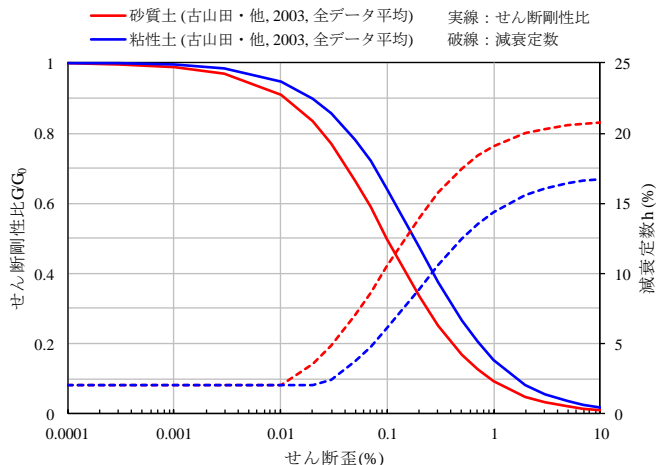
→ 手法の違いがはぎとり解析結果(地中の2E波)に与える影響を確認した。

【手法B】等価線形化法

重複反射理論に基づく等価線形化法により、地盤の非線形性を考慮した解析を実施。

- 解析対象層: Vsが500m/s未満の層を対象。
※PS検層によるVsを初期値とする。
- 動的変形(ひずみ依存)特性:
古山田ほか(2003)による粘性土または砂質土の特性を使用。
※各地点での動的試験結果がないため。

<手法Bで用いた動的変形特性>



【手法C】地盤同定解析に基づく手法

強震時の観測の地表/地中スペクトル比をターゲットに、Vs500m/s以下の層に対して地盤同定を行い、同定モデルを用いた線形解析を実施。

※観測記録との適合度を考慮して、地盤モデルの速度と減衰を独立に推定するため、手法Bよりも各地点の特性を適切に考慮可能。

<地盤同定の解析条件>

- 探索手法: mGA(遺伝的アルゴリズムの一種)により観測と理論の適合度を評価して近似解を探索する。
- 探索対象及び範囲: 下表の通り。

探索対象	初期値	探索範囲	
		初期Vs500m/s未満	初期Vs500m/s以上
速度Vs	PS検層	初期値~0.1×初期値	初期値で固定
減衰Qs (hs)	手法Aで採用した減衰定数(1%, 3%, 5%のいずれか)	Qs: 2~200 (hs: 0.25~25%)	Qs: 10~400 (hs: 0.125~5%)

Vsは層ごとに変動させる。

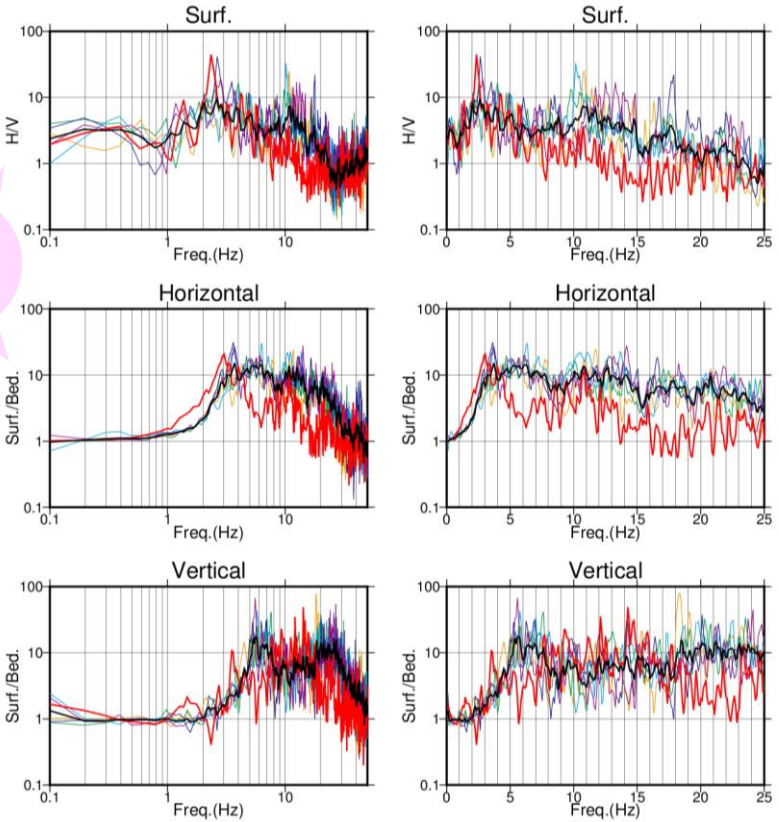
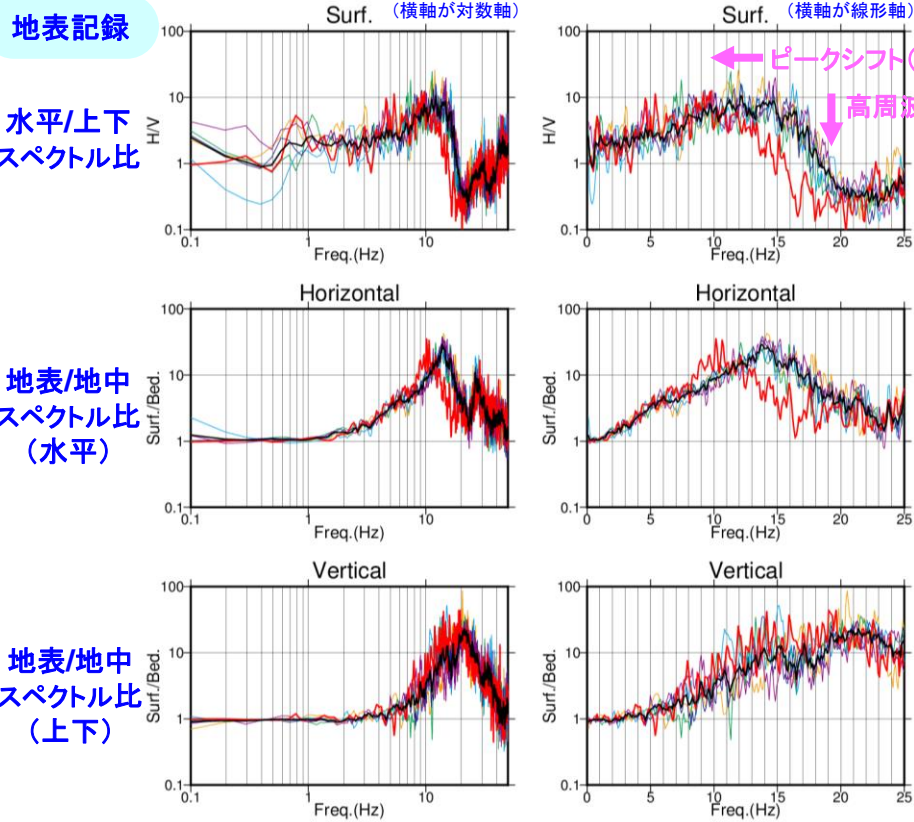
QsはVs500m/s未満とVs500m/s以上で変動させる。

- 適合度判定周波数帯: 1~20Hz
※非線形性の検討のため1Hz以上を対象。

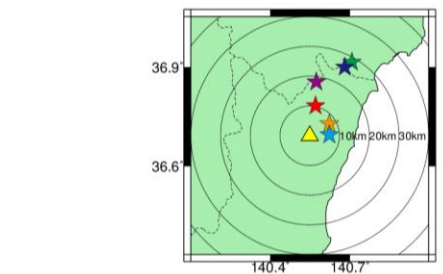
地盤の非線形性の確認例①: 強震記録と弱震記録の比較(非線形性が顕著な例)

2011年茨城県北部地震(Eq.11: Mw5.8)のKiK-net十王(IBRH14)における記録(No.7)

2013年栃木県北部地震(Eq.12: Mw5.8)のKiK-net栗山西(TCGH07)における記録(No.3)

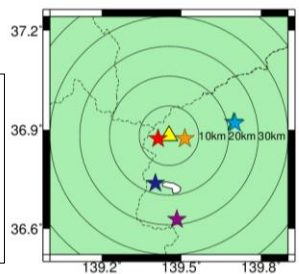


地盤の非線形性あり



- Average excluding red line
- 2011/03/19-18:56 Mj=6.1 PGA=407gal (Main)
 - 2011/10/15-11:55 Mj=4.2 PGA=50gal
 - 2011/04/13-10:08 Mj=5.7 PGA=49gal
 - 2011/12/20-02:24 Mj=4.4 PGA=48gal
 - 2011/04/11-18:36 Mj=4.8 PGA=47gal
 - 2011/12/31-08:11 Mj=4.5 PGA=46gal

赤: 強震記録 (はぎとり解析対象)
 黒: 弱震記録の平均
 その他: 各弱震記録 (中小地震)



- Average excluding red line
- 2013/02/25-16:23 Mj=6.3 PGA=1224gal (Main)
 - 2014/09/04-05:34 Mj=4.5 PGA=75gal
 - 2000/10/18-12:58 Mj=4.5 PGA=64gal
 - 2000/10/19-16:25 Mj=4.0 PGA=51gal
 - 2016/07/09-06:28 Mj=4.4 PGA=32gal
 - 2005/05/15-15:55 Mj=4.8 PGA=12gal

地盤の非線形性の確認例②: 強震記録と弱震記録の比較(非線形性が小さい例)

2011年長野県北部地震(Eq.03: Mw6.2)のKiK-net牧(NIGH13)における記録(No.3)

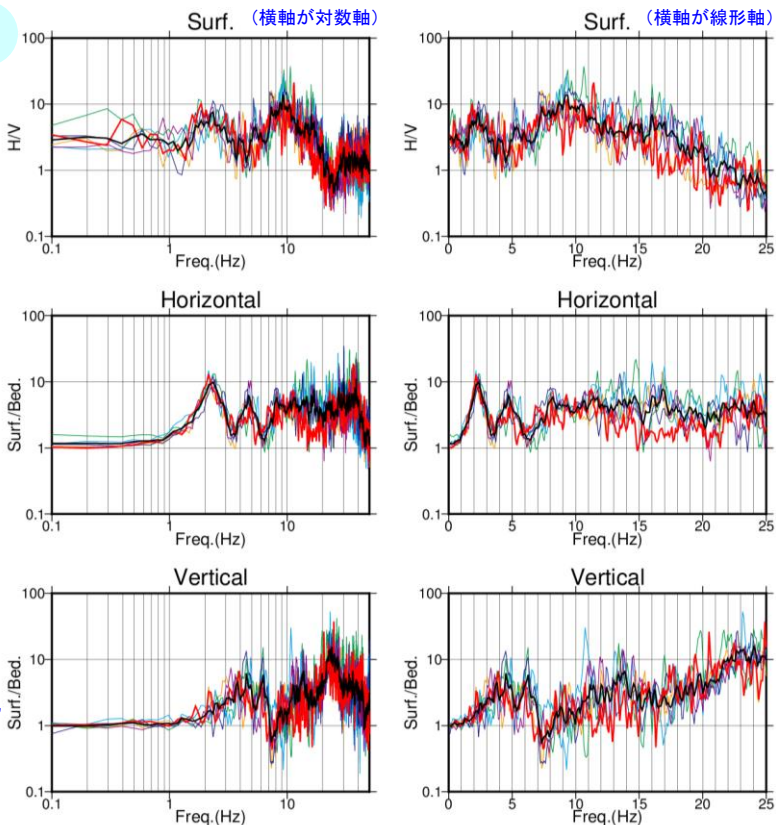
2004年北海道留萌支庁南部地震(Eq.13: Mw5.7)のKiK-net小平東(RMIH04)における記録(No.14)

地表記録

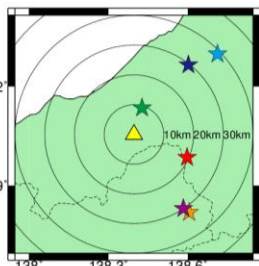
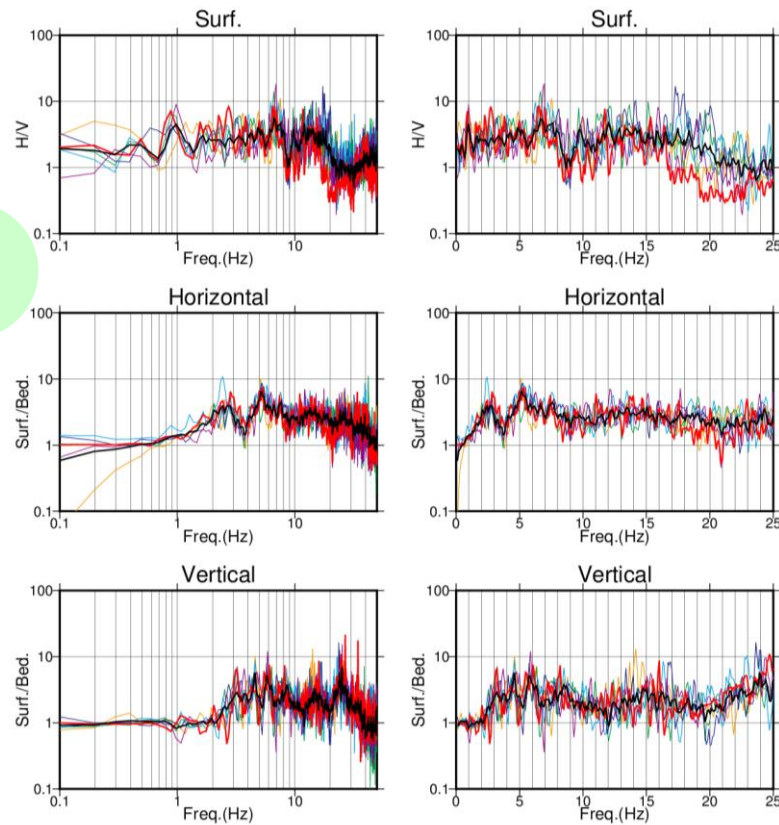
水平/上下
スペクトル比

地表/地中
スペクトル比
(水平)

地表/地中
スペクトル比
(上下)

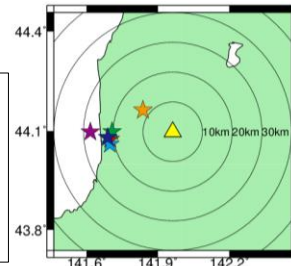


地盤の
非線形性
は小さい



Average excluding red line
 2011/03/12-03:59 Mj=6.7 PGA=143gal (Main)
 2011/04/12-07:26 Mj=5.6 PGA=56gal
 2010/10/02-12:35 Mj=4.0 PGA=45gal
 2005/08/21-11:29 Mj=5.0 PGA=18gal
 2001/01/02-19:53 Mj=4.4 PGA=17gal
 2011/04/12-07:32 Mj=4.7 PGA=16gal

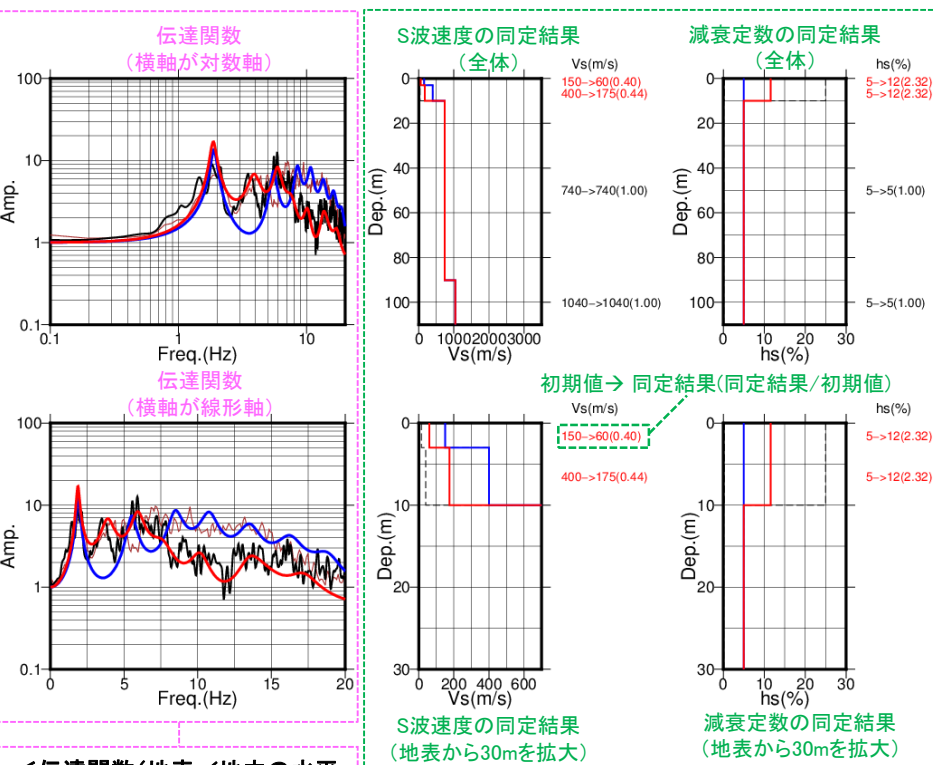
赤: 強震記録
 (はぎとり解析対象)
 黒: 弱震記録の平均
 その他: 各弱震記録
 (中小地震)



Average excluding red line
 2004/12/14-14:56 Mj=6.1 PGA=83gal (Main)
 2010/09/13-04:31 Mj=3.7 PGA=23gal
 2007/04/23-17:27 Mj=4.6 PGA=17gal
 2012/01/11-15:00 Mj=4.0 PGA=7gal
 2004/12/15-08:41 Mj=3.5 PGA=4gal
 2004/12/15-02:29 Mj=4.6 PGA=4gal

【手法C】非線形化層を対象とした地盤同定結果の例

KiK-net野沢温泉 (NIGH29)



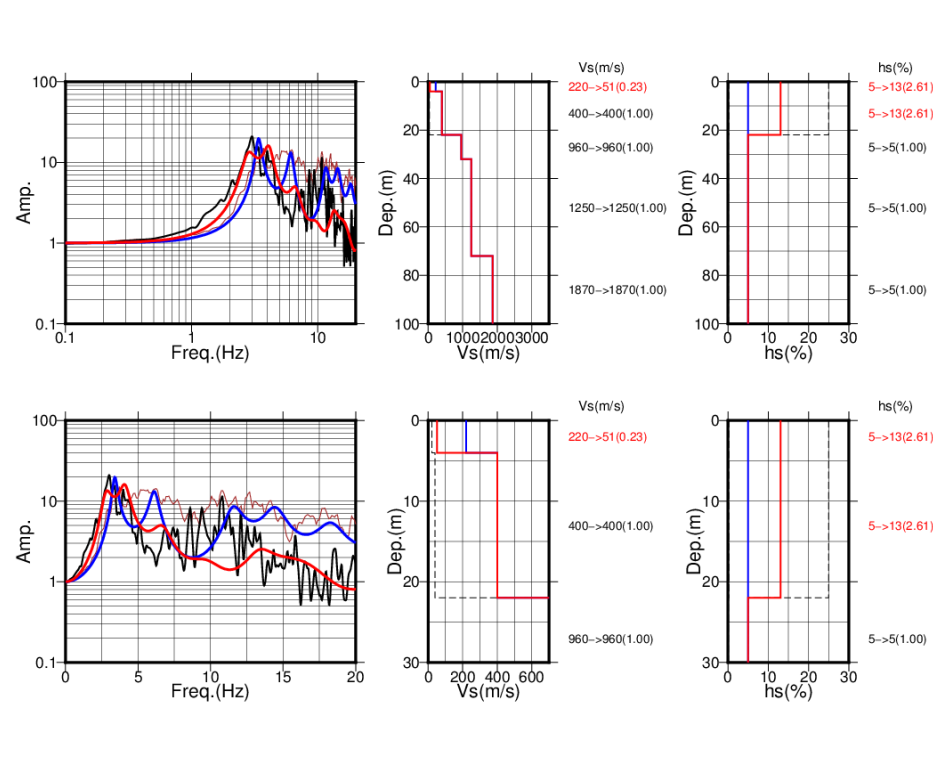
<伝達関数(地表/地中の水平動のフーリエスペクトル比)>

青: 初期モデル(手法A)
 黒: ターゲットスペクトル(強震時)、
 赤: 地盤同定結果
 茶(細線): 中小地震の平均(参考)

<S波速度(Vs)および減衰定数(hs)の同定結果>

青: 初期モデル(手法A)、黒(破線): 探索範囲
 赤: 地盤同定結果 (Vsは500m/s未満、減衰は全層を対象)

KiK-net栗山西 (TCGH07)



➡ 地盤同定の精度が低い

非線形層に地盤同定を行っても観測記録(ターゲット)との適合度が低い記録があることが分かった(11記録のうち5記録が該当)。

➡ 地盤同定の精度が高い

手法Aによる結果の妥当性確認: 手法B, C結果との比較 (NS成分)

2011年長野県北部地震(Eq.03: Mw6.2)の
KiK-net野沢温泉(NGNH29)における記録

2013年栃木県北部地震(Eq.12: Mw5.8)の
KiK-net栗山西(TCGH07)における記録

◆記録No.9: 断層距離15km、地中地震計深度110m、地中Vs=1040m/s、Vp=2340m/s

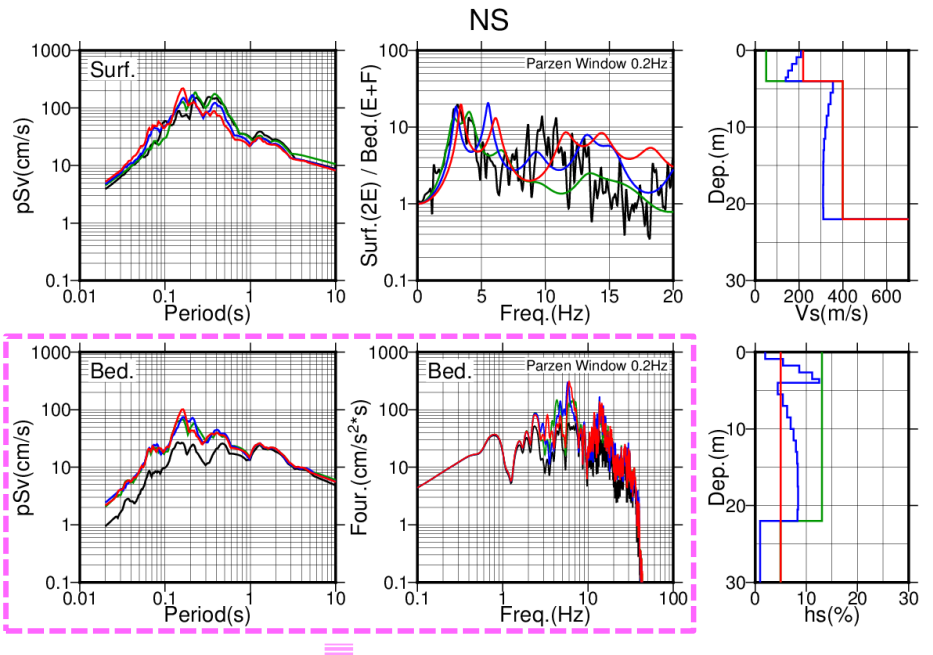
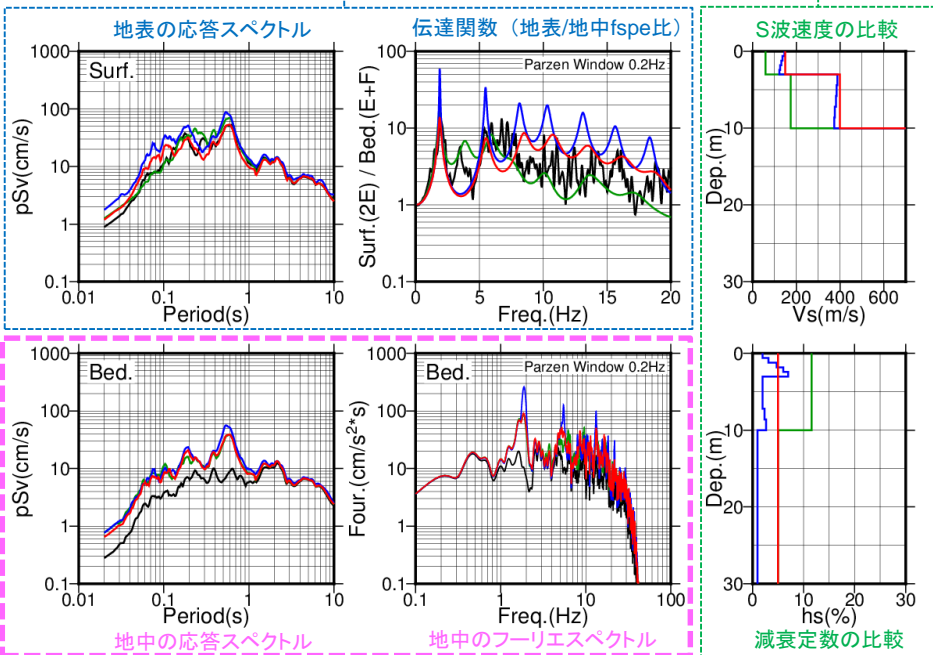
◆記録No.3: 断層距離3km、地中地震計深度100m、地中Vs=1870m/s、Vp=3600m/s

<地表立ち上げ波(2E)と地表観測波(2E)の比較>

赤: 手法Aによる立ち上げ波
青: 手法Bによる立ち上げ波、緑: 手法Cによる立ち上げ波
黒: 地表観測波 (2Eのため立ち上げ波と直接比較可能)

<S波速度(Vs)・減衰定数(hs)の比較>

(地表から30mまでを表示)
赤: 手法A、青: 手法B、緑: 手法C



<はぎとり波(2E)と地中観測波(E+F)の比較>

赤: 手法Aによるはぎとり波 (応答スペクトルの統計処理に使用)
青: 手法Bによるはぎとり波、緑: 手法Cによるはぎとり波
黒: 地中観測波 (E+Fであることに注意)

※応答スペクトルの統計処理には手法Aによる
はぎとり波 (赤枠内の赤線) を用いる

- はぎとり手法(A, B, C)の違いがはぎとり波に与える影響は小さい。ただし、手法Aによる地表立ち上げ波と地表観測記録の整合性が低いものについては、はぎとり精度はやや低くなる。
<参考> 3成分168波のはぎとり精度の判定(暫定)[高:60波、中:68波、低:40波]
- 今後の検討では統計処理における重み付けを検討する。

付録B：震源距離補正に用いる距離減衰式の選定

次ページ以降に、第3回会合資料2 (p.3~9)を抜粋して示す。

付録B: 2. 1. 震源距離の補正: 距離減衰式の選定(1/7)

KiK-net観測記録(はぎとり波)に震源距離の補正を施す際に用いる応答スペクトル距離減衰式について、以下の調査対象及び条件に基づいて選定を行った。

<調査対象>

- 日本建築学会構造系論文集
- 日本地震工学会論文集
- 土木学会論文集
- Douglas (2017)による世界中の距離減衰式のリスト(1973~2017年:277式)
- 原子力規制庁、原子力安全基盤機構(JNES)による研究成果(技術資料)

<条件1>

- K-NET・KiK-net設置以降に内陸地殻内で起きた被害地震の記録を多数使用している。
(2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島沖地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2016年熊本地震などを半数以上含むことを目安)
- 工学的基盤相当または硬質岩盤相当の地盤に適用可能である。
- 少なくとも周期0.1~5.0秒が含まれる。

<条件2>

- 上下動成分の距離減衰式がある。

○結果1

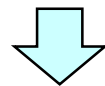
調査対象のうち、条件1を満たす文献は以下の6文献※であった。

- ① 佐藤 (2008)
- ② Goda and Atkinson (2009)
- ③ 原子力安全基盤機構(2013)
- ④ Morikawa and Fujiwara (2013)
- ⑤ Zhao *et al.* (2015)
- ⑥ Zhao *et al.* (2016)

○結果2

結果1のうち、さらに条件2を満たす文献は以下の2文献※であった。

- ① 佐藤 (2008)
- ② 原子力安全基盤機構(2013)



➤ 結果2の2文献について、詳細条件を比較したうえで、1式を選定する。

(1式を選定するが、検討過程においては、一部のデータを対象に、2式による結果の比較等も実施する。)

※今回の調査の範囲内での抽出結果であることに留意

付録B: 2. 1. 震源距離の補正: 距離減衰式の選定(3/7)

○結果2で選定された2式の特徴の比較

距離減衰式		原子力安全基盤機構(2013)	佐藤(2008)
期間 (対象地震の発生期間)		1983年5月～2011年4月	1995年1月～2007年4月
地震規模 (対象地震のMw)		Mw5.5～9.1	Mw5.0～6.9 ※横ずれはMw4.9以上
距離の範囲 (対象地震と観測点の距離)		断層最短距離が約2～300km	断層最短距離が約1～200km
周期		0.1～10.0秒	0.07～5.0秒
地盤種別		$V_s \geq 1000\text{m/s}$ ※KiK-netのはざとり波を多数含む	工学的基盤 (AVS30の平均681m/s) I種地盤 (工学的基盤を除く) II種地盤, III種地盤, 全平均
地震タイプの分類		地殻内地震、プレート内地震、 プレート境界地震	地殻内地震 ※横ずれ断層と逆断層で震源項を区別
審査ガイドに例示の地震の使用状況 (参考)	2008年岩手・宮城内陸地震 Mw6.9	○	×
	2000年鳥取県西部地震 Mw6.6	○	○
	2011年長野県北部地震 Mw6.2	○	×
	1997年3月鹿児島県北西部地震 Mw6.1	○	○
	2003年宮城県北部地震 Mw6.1	○	×
	1996年宮城県北部(鬼首)地震 Mw6.0	×	×
	1997年5月鹿児島県北西部地震 Mw6.0	○	○
	1998年岩手県内陸北部地震 Mw5.9	×	×
	2011年静岡県東部地震 Mw5.9	○	×
	1997年山口県北部地震 Mw5.8	×	○
	2011年茨城県北部地震 Mw5.8	×	×
	2013年栃木県北部地震 Mw5.8	×	×
	2004年北海道留萌支庁南部地震 Mw5.7	×	×
2005年福岡県西方沖地震の最大余震 Mw5.4	× (Mw範囲外)	○	
2012年茨城県北部地震 Mw5.2	× (Mw範囲外)	×	
2011年和歌山県北部地震 Mw5.0	× (Mw範囲外)	×	
○の数		7個	5個

付録B: 2. 1. 震源距離の補正: 距離減衰式の選定(4/7)

○ 距離減衰式の選定結果

- 原子力安全基盤機構(2013)による応答スペクトルの距離減衰式(断層最短距離)を採用する。

○ 理由

■ 原子力安全基盤機構(2013)を採用する理由

解析に用いられたデータは、 V_s 1000m/s以上の硬質岩盤上の記録(過半数がKiK-netのはぎとり波)を用いており、主に $V_s=2000\sim 3000$ m/sのデータで構成されている(図1)。

→ 本検討と地震動特性(地盤条件)の整合性が高い。

■ 断層最短距離の式を採用する理由

- 断層最短距離の方が等価震源距離よりも距離減衰式の標準偏差が小さくなる(観測記録との整合性が高い)。特に、短周期地震動ではその傾向が大きい(図2)。
- 応答スペクトルの距離減衰式では、断層最短距離を採用している文献が(国際的にも)非常に多いため、他の距離減衰式との比較を行う際にも都合が良い。

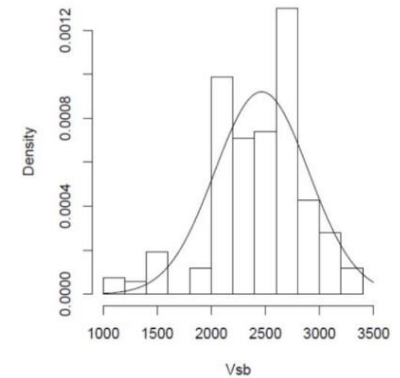


図1 解析に用いた観測記録の V_s の分布

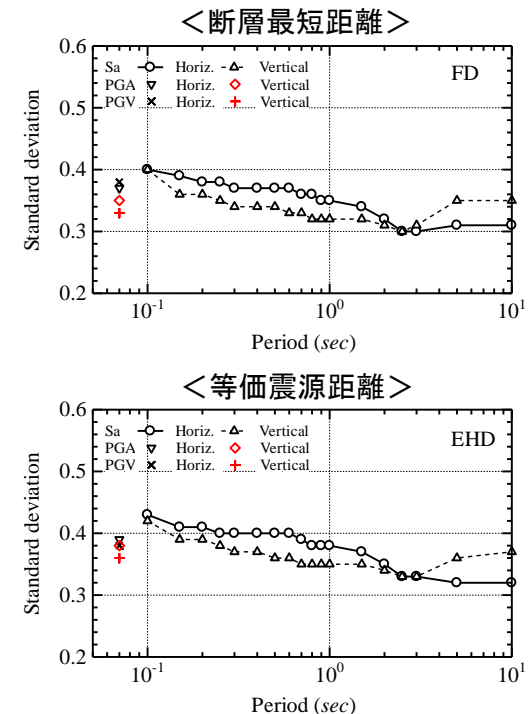


図2 原子力安全基盤機構(2013)による距離減衰式の標準偏差

○原子力安全基盤機構(2013)*による距離減衰式の概要

$$\log S_a = b + g(\Delta) - k\Delta$$

$$b = \begin{cases} a_1 M_w + d_i + hD + \varepsilon_1 \\ a_2 M_w + d_i + hD + \varepsilon_2 \end{cases} \begin{cases} (a_1, \varepsilon_1 : M_w < 8.3 \text{ if } T < 2s \text{ or } M_w < 7.5 \text{ if } T \geq 2s) \\ (a_2, \varepsilon_2 : M_w \geq 8.3 \text{ if } T < 2s \text{ or } M_w \geq 7.5 \text{ if } T \geq 2s) \end{cases}$$

$$g(\Delta) = \begin{cases} -\log(\Delta + C); D \leq 30km \\ 0.61\log(1.7D + C) - 1.6\log(\Delta + C); D > 30km \ \& \ \Delta \geq 1.7D \end{cases}$$

$$C = 0.0055 \cdot 10^{0.5M_w}, T < 0.3s$$

$$= 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w}, T \geq 0.6s$$

$$k = 0.003, T < 0.3s$$

$$= 0.002, T \geq 0.6s$$

*原子力安全基盤機構により平成20年～23年度までに開発された「震源近傍まで適用できる地震基盤における応答スペクトル距離減衰式」について、M9を超える巨大地震への適用性向上などを含めて更新した式。一連の研究成果については、「原子力安全研究評価委員会」等において外部専門家の評価を受けるとともに、司ほか(2010)、Si et al. (2013)、IAEA (2016)により発表/公開されている。

- S_a : 加速度応答スペクトル[cm/s²] (最大速度、最大加速度の式としても利用可)
- b : 震源に係る項
 - ω^2 モデルに従う振幅とMwのスケーリング関係及び、観測記録の分析より、Mwが増加すると地震動強さが飽和することを考慮。
- $g(\Delta)$, $-k\Delta$: 幾何減衰, 粘性減衰に係る項
 - $g(\Delta)$ では、距離(深さ)に応じて、地殻構造の層境界での地震波の反射の影響により幾何減衰の減衰率が異なること、 C , k は周波数に依存し(図3)、 C では距離が近付くことによる地震動の飽和、 k では粘性減衰の度合いが変化することを考慮。

Δ : 断層最短距離[km]、

M_w : モーメントマグニチュード、

D : 震源深さ[km]、

$a_1, a_2, d, h, \varepsilon_1, \varepsilon_2$: 回帰係数(周期ごとに推定: 次ページ参照)、

i : d の係数で地震タイプ(地殻内、プレート内、プレート境界)を表す

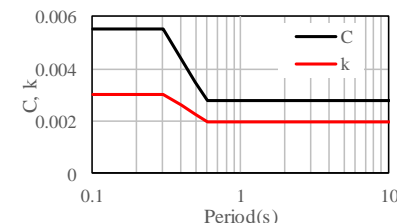


図3 係数C, kの周期依存性

○原子力安全基盤機構(2013)による距離減衰式

<係数一覧>

水平成分

T	a1	h	d		ε_1
			Intra-plate	Inter-plate	
PGA	0.5715	0.0090	0.1532	-0.0794	-0.3347
0.10	0.5435	0.0109	0.1125	-0.1026	0.1060
0.15	0.5632	0.0100	0.1346	-0.1055	0.0569
0.20	0.5646	0.0093	0.1871	-0.0605	0.0250
0.25	0.6001	0.0089	0.1659	-0.0946	-0.2238
0.30	0.6246	0.0084	0.1608	-0.0775	-0.4348
0.40	0.6296	0.0078	0.1757	-0.0838	-0.5861
0.50	0.6300	0.0073	0.1718	-0.0726	-0.6950
0.60	0.6261	0.0069	0.1704	-0.0637	-0.7698
0.70	0.6343	0.0065	0.1568	-0.0583	-0.8798
0.80	0.6428	0.0062	0.1730	-0.0347	-0.9966
0.90	0.6700	0.0060	0.1736	-0.0558	-1.2224
1.00	0.6834	0.0058	0.1800	-0.0704	-1.3557
1.50	0.7352	0.0048	0.2017	-0.0871	-1.8910
2.00	0.7843	0.0042	0.1357	-0.1280	-2.3476
2.50	0.8306	0.0037	0.0826	-0.1513	-2.7504
3.00	0.8422	0.0033	0.0728	-0.1270	-2.9291
5.00	0.9647	0.0022	0.0025	-0.2890	-3.9748
10.00	0.9696	0.0006	0.0480	-0.2778	-4.5504
PGV	0.6644	0.0066	0.0885	-0.1350	-2.0972

T	a2	ε_2
PGA	-0.0618	4.8992
0.10	0.0149	4.4289
0.15	0.0030	4.6353
0.20	-0.0187	4.8599
0.25	-0.0802	5.3885
0.30	-0.0496	5.1429
0.40	-0.0801	5.3208
0.50	-0.1383	5.7114
0.60	-0.1246	5.4563
0.70	-0.1507	5.6355
0.80	-0.2196	6.1928
0.90	-0.2921	6.7926
1.00	-0.3291	7.0575
1.50	-0.3164	6.8051
2.00	0.1482	2.5895
2.50	0.1734	2.2843
3.00	0.1825	2.1437
5.00	0.1626	2.0980
10.00	0.0831	2.3704
PGV	-0.2951	5.8245

※d: 地殻内地震の場合は0

鉛直成分

T	a1	h	d		ε_1
			Intra-plate	Inter-plate	
PGA	0.6476	0.0053	0.2826	-0.0893	-1.0204
0.10	0.6024	0.0077	0.2338	-0.1004	-0.3730
0.15	0.6115	0.0066	0.2458	-0.1158	-0.4089
0.20	0.6205	0.0058	0.2806	-0.0502	-0.5032
0.25	0.6399	0.0052	0.2717	-0.0754	-0.6455
0.30	0.6371	0.0047	0.2646	-0.0603	-0.6595
0.40	0.6475	0.0040	0.2913	-0.0336	-0.8615
0.50	0.6554	0.0034	0.2849	-0.0211	-1.0048
0.60	0.6745	0.0029	0.2825	-0.0074	-1.2305
0.70	0.6993	0.0025	0.2989	-0.0072	-1.4685
0.80	0.7221	0.0021	0.2953	-0.0209	-1.6547
0.90	0.7236	0.0018	0.2966	-0.0207	-1.6981
1.00	0.7428	0.0015	0.3097	-0.0329	-1.8630
1.50	0.8270	0.0004	0.3058	-0.0914	-2.5900
2.00	0.9408	-0.0004	0.2729	-0.0999	-3.4768
2.50	0.9770	-0.0010	0.2614	-0.1249	-3.8021
3.00	1.0490	-0.0015	0.2326	-0.1782	-4.3279
5.00	1.1297	-0.0028	0.2319	-0.1757	-5.1594
10.00	1.1462	-0.0047	0.3184	-0.0625	-5.8570
PGV	0.7559	0.0022	0.2441	-0.0736	-2.9011

T	a2	ε_2
PGA	-0.0419	4.6320
0.10	0.1361	3.3871
0.15	0.0808	3.8657
0.20	-0.0307	4.8837
0.25	-0.1415	5.8263
0.30	-0.0820	5.2821
0.40	-0.1768	5.9909
0.50	-0.1820	5.9474
0.60	-0.2129	6.1038
0.70	-0.2383	6.3165
0.80	-0.2581	6.4555
0.90	-0.2982	6.7764
1.00	-0.3923	7.5745
1.50	-0.4279	7.7471
2.00	0.1854	2.2655
2.50	0.1787	2.2265
3.00	0.1758	2.1915
5.00	0.1699	2.0923
10.00	0.0217	3.0170
PGV	-0.2632	5.4378

※d: 地殻内地震の場合は0

付録B: 2. 1. 震源距離の補正: 距離減衰式の選定(7/7)

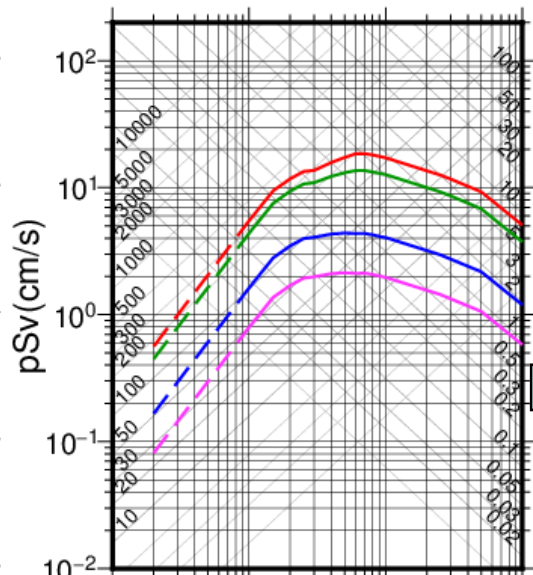
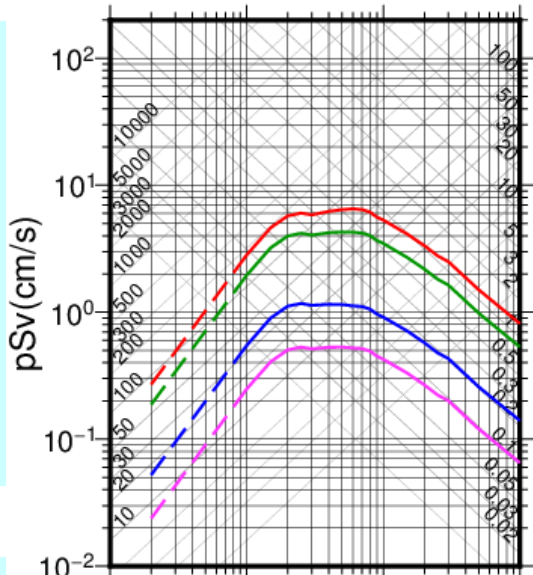
○原子力安全基盤機構(2013)による距離減衰式

<断層最短距離による応答スペクトルの変化>

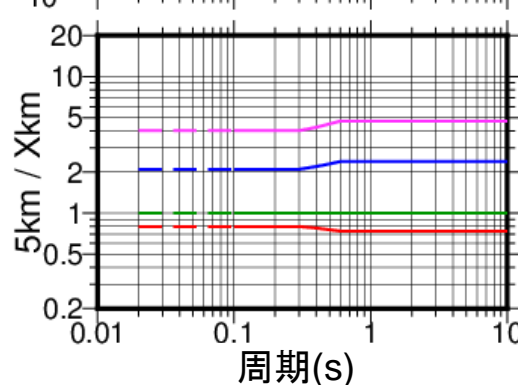
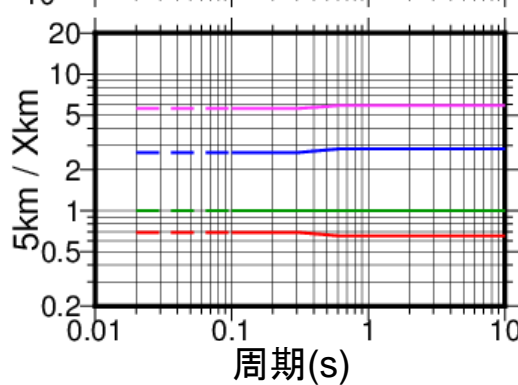
Mw5.0の場合

Mw6.0の場合

疑似速度応答スペクトル



5 kmの場合との比



赤 : 3km, 緑 : 5km, 青 : 15km, ピンク : 30km

<0.1秒以下の周期>

- 距離減衰式の数値データとして用いたはずの短周期波の解析においては、0.1秒以下の周期での精度の担保が難しい。
→ 応答スペクトルの距離減衰式では周期0.1~10秒を対象としている。
- 同式では最大加速度 (PGA) の距離減衰式も求められている。
- 周期0.1秒以下については、周期0.02秒の値=PGAとして、応答スペクトルを延長して使用することとする。

<Mw5.5未満の地震>

- 距離減衰式の数値データとして用いた地震の規模の下限は、強震動及び震源過程の研究が豊富であるという観点から Mw5.5に設定されている。
- 近傍距離かつ Mw5.0程度の規模までであれば同式を適用可能と判断。
(相対補正のため震源項はキャンセルされるが、震源項では ω^2 モデルを仮定。)
- 距離減衰式を Mw5.0まで外挿して利用する。また、検討過程では、一部データで確認検討も行う。

付録C：対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果の確認(1/4)

方針

標準応答スペクトルは、Mw5.0~6.5程度の地震を対象とした地震動の非超過確率97.7%(平均+2σ)の応答スペクトルに基づいて設定した(詳細は8. 1. 参照)。

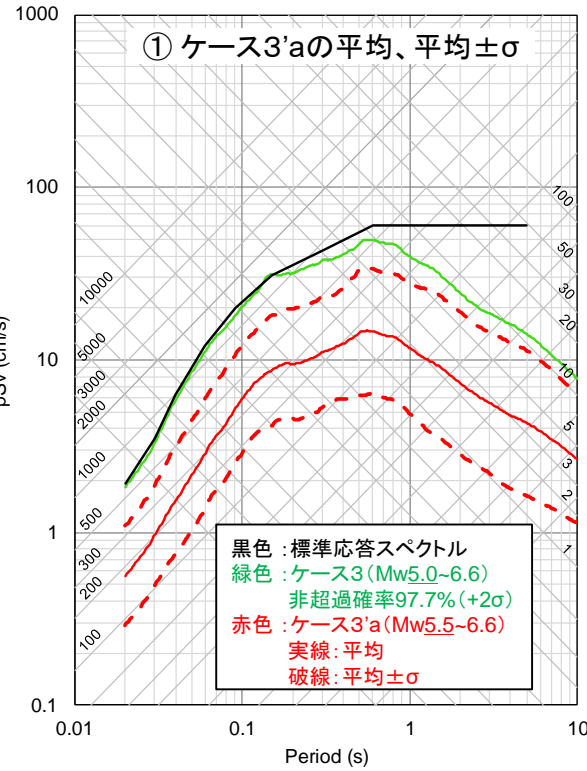
ここでは、規模別の地震・記録数にG-R則を想定したケース3(詳細はp.71参照)を対象に、対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果を比較・確認した。

<検討ケース:対象地震規模>

- ・ケース3: Mw5.0~6.6
- ・ケース3'a: Mw5.5~6.6
- ・ケース3'b: Mw6.0~6.6

<算出スペクトル>

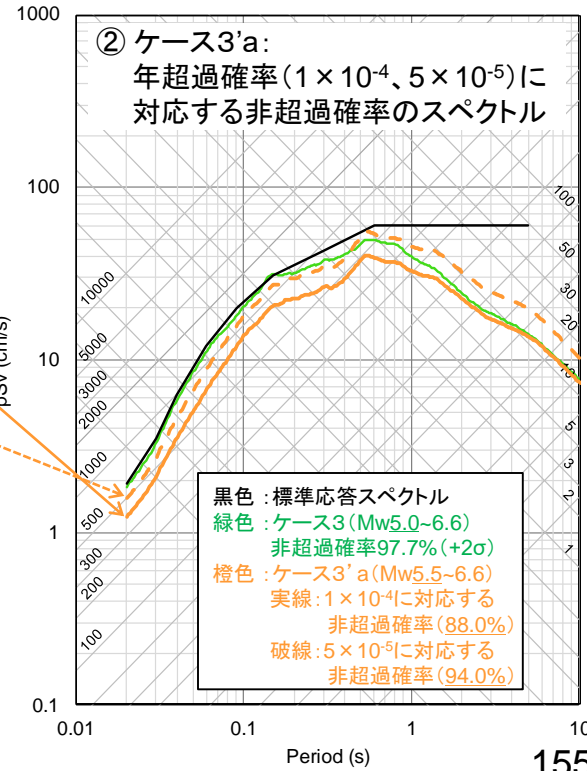
- ① 平均、平均±標準偏差(σ)のスペクトル
- ② 「地震の年発生頻度」と「地震動の年超過確率(1×10⁻⁴、5×10⁻⁵)」から概算した非超過確率のスペクトル(詳細はp.112~114参照)



半径10kmの領域における「地震動の年超過確率」に対応する「地震動強さの非超過確率」の概算

ケース	対象地震規模 Mw	地震の年発生頻度 (個/年)	地震動の年超過確率	地震動強さの非超過確率※	
				値	%
3	5.0~6.6	2.08 × 10 ⁻³	1 × 10 ⁻⁴	0.952	95.2%
				0.976	97.6%
3'a	5.5~6.6	8.31 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻⁴	0.880	88.0%
				0.940	94.0%
3'b	6.0~6.6	3.23 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻⁴	0.691	69.1%
				0.845	84.5%

※各ケースの地震動強さの非超過確率の概算結果は、JNES(2012)による地震の年発生頻度を用いた場合と概ね同等であることを確認している(p.113参考)。

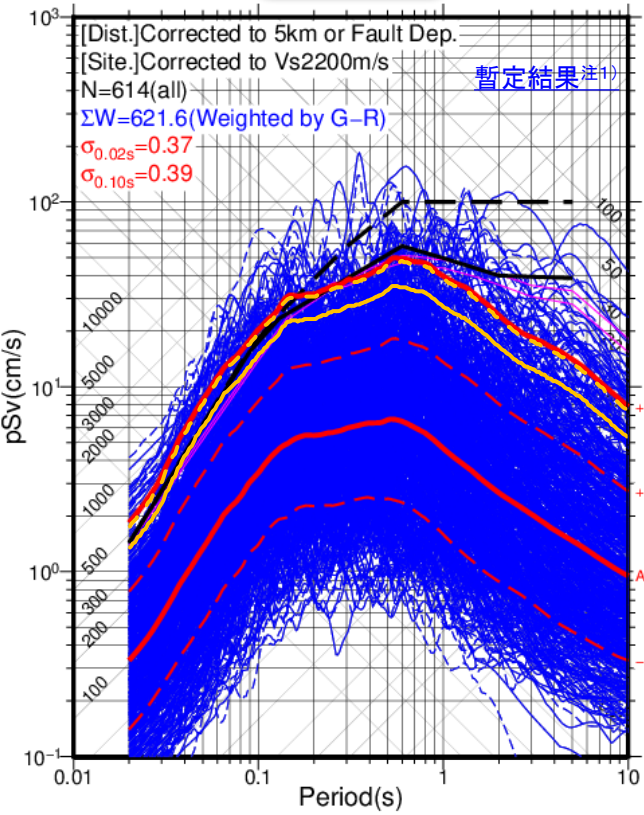


付録C：対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果の確認(2/4)

ケース3(Mw5.0~6.6)：規模別の地震・記録数(G-R則想定)*

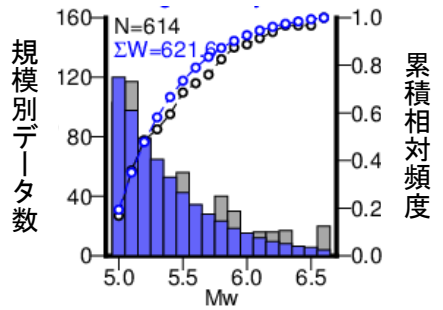
* 重み付けの詳細はp.73参照

水平動



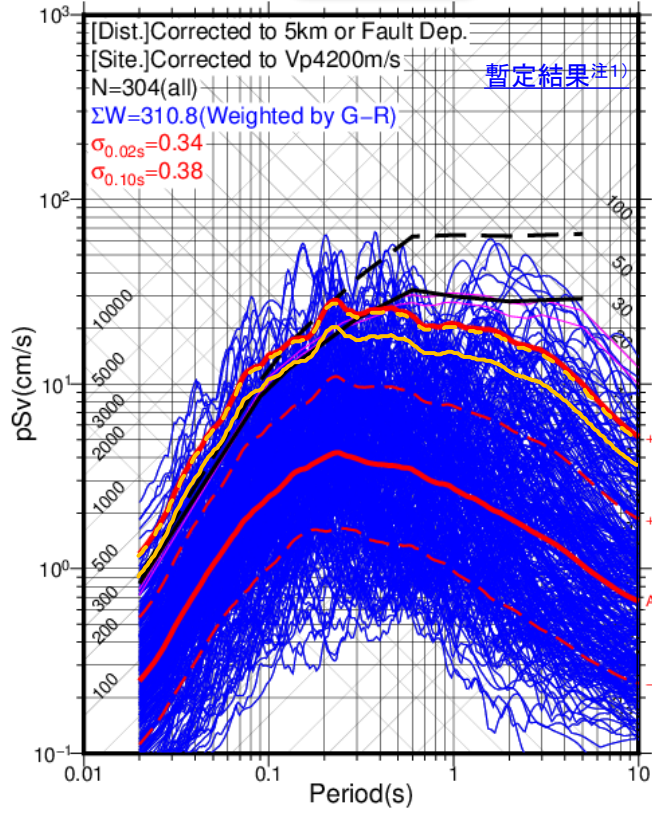
<本ケース(Mw5.0~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する 非超過確率(95.2%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する 非超過確率(97.6%)
 黒色：加藤スペクトル(水平動)
 実線：Vs2200m/s
 破線：Vs700m/s

-1σ = 15.9%
 Ave. = 50.0%
 +1σ = 84.1%
 +2σ = 97.7%

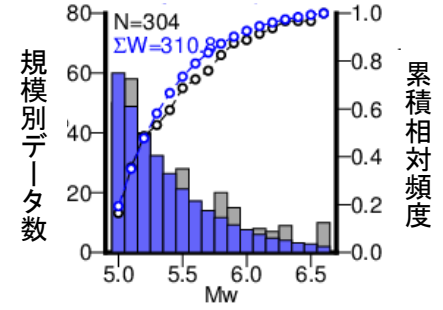


灰色：全記録
 青色：本ケースでの対象記録

上下動



<本ケース(Mw5.0~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：UD
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する 非超過確率(95.2%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する 非超過確率(97.6%)
 黒色：加藤スペクトル(上下動)
 実線：Vp4200m/s
 破線：Vp2000m/s



注1) 現時点での暫定結果であり、今後の検討・確認等により結果が変動する可能性がある。

注2) JNES (2013)による距離減衰式の平均+1σの値(断層最短距離5km、深さ10km)

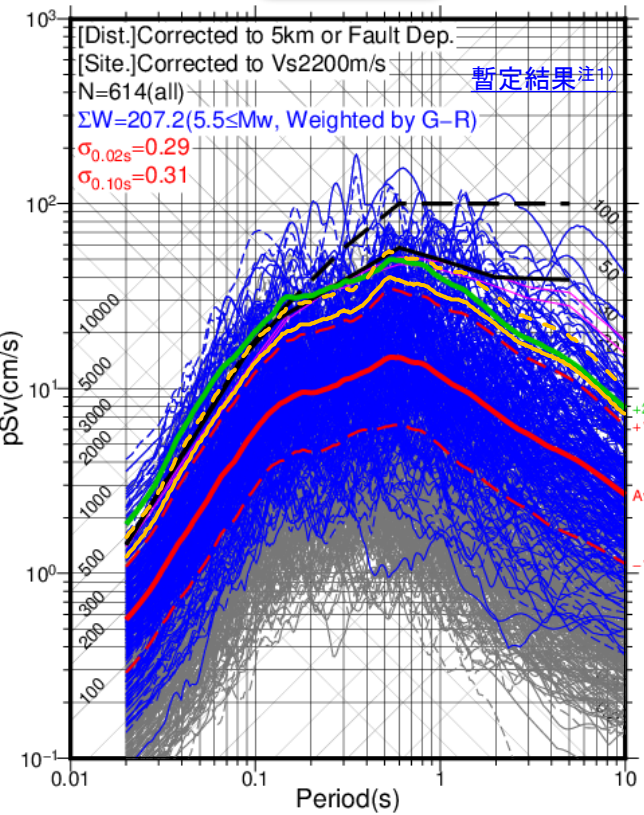
付録C：対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果の確認(3/4)

ケース3'a (Mw5.5~6.6)：規模別の地震・記録数(G-R則想定)

水平動

※Mw5.0を下限とした場合(緑実線)よりも短周期側で過小となり、長周期側で過大となる傾向があることには、本来は強震動として年超過確率 10^{-4} 以下に寄与するMw5.0以上5.5未満の地震の影響を見込んでいないことが影響していると考えられる。

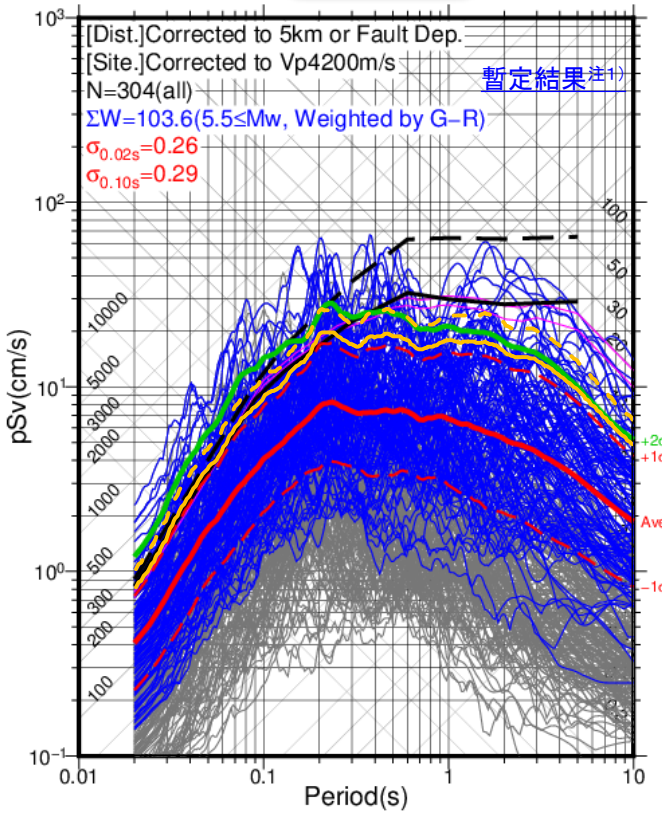
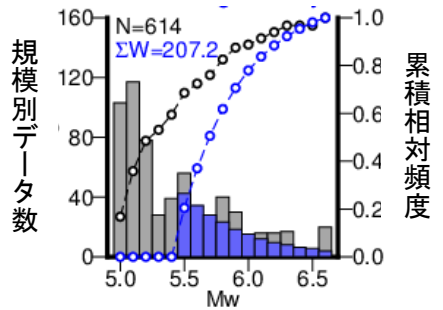
上下動



<本ケース(Mw5.5~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する非超過確率(88.0%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する非超過確率(94.0%)

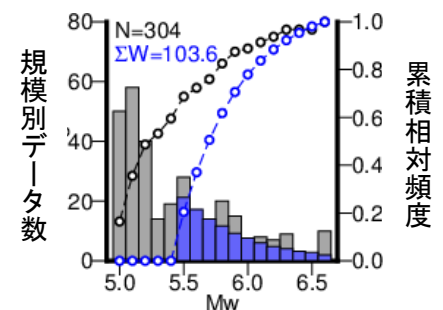
<ケース3(Mw5.0~6.6)>
 緑色：非超過確率97.7%(+2σ)
 灰色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 黒色：加藤スペクトル(水平動)
 実線：Vs2200m/s
 破線：Vs700m/s

-1σ = 15.9%
 Ave. = 50.0%
 +1σ = 84.1%
 +2σ = 97.7%



<本ケース(Mw5.5~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：UD
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する非超過確率(88.0%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する非超過確率(94.0%)

<ケース3(Mw5.0~6.6)>
 緑色：非超過確率97.7%(+2σ)
 灰色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 黒色：加藤スペクトル(上下動)
 実線：Vp4200m/s
 破線：Vp2000m/s



注1) 現時点での暫定結果であり、今後の検討・確認等により結果が変動する可能性がある。

注2) JNES (2013)による距離減衰式の平均+1σの値(断層最短距離5km、深さ10km)

付録C：対象地震規模の下限を変えた場合の統計処理結果の確認(4/4)

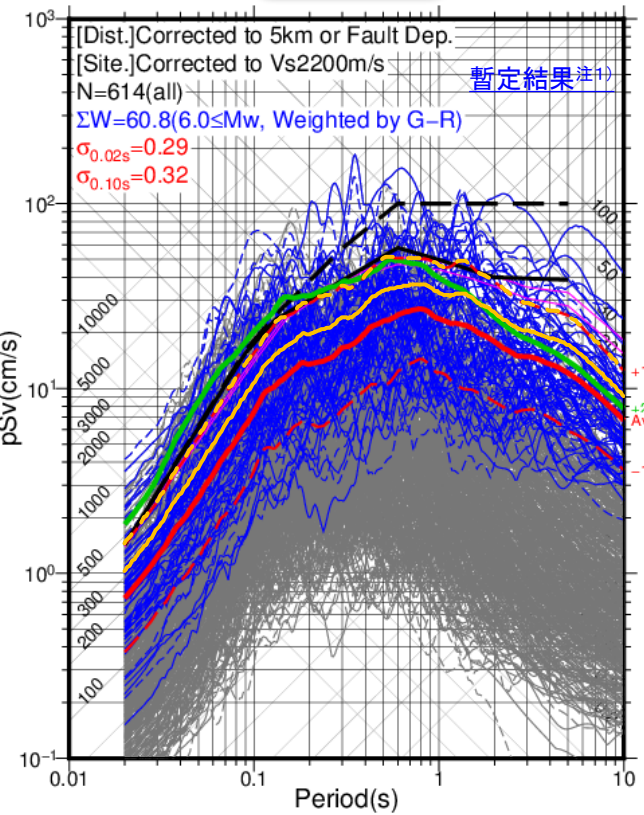
ケース3'b (Mw6.0~6.6)：規模別の地震・記録数 (G-R則想定)

* データ数が少ないため(水平動60.8波、上下動30.1波)、統計処理結果は参考扱いとする。

水平動

※Mw5.0を下限とした場合(緑実線)よりも短周期側で過小となり、長周期側で過大となる傾向があることには、本来は強震動として年超過確率 10^{-4} 以下に寄与するMw5.0以上6.0未満の地震の影響を見込んでいないことが影響していると考えられる。

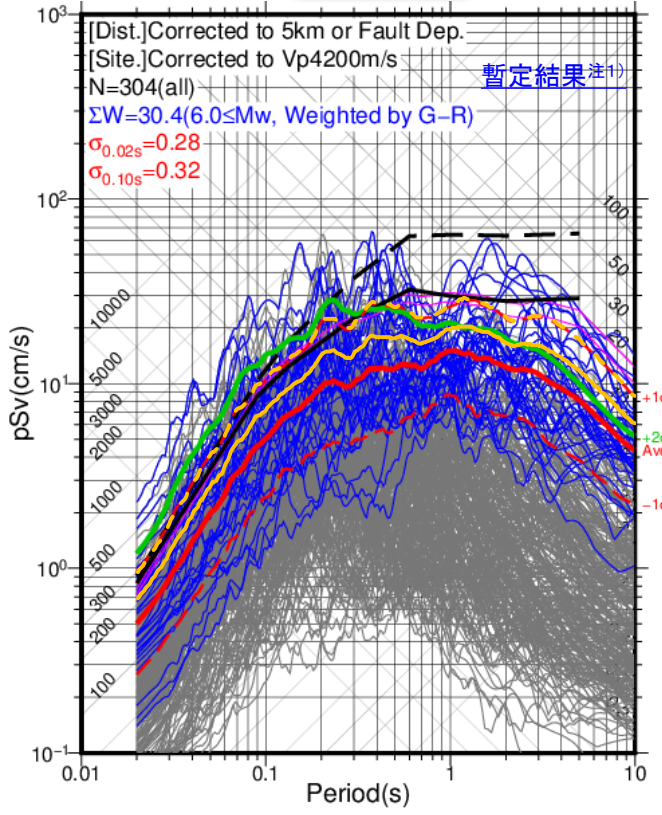
上下動



<本ケース (Mw6.0~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル(注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する 非超過確率(69.1%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する 非超過確率(84.5%)

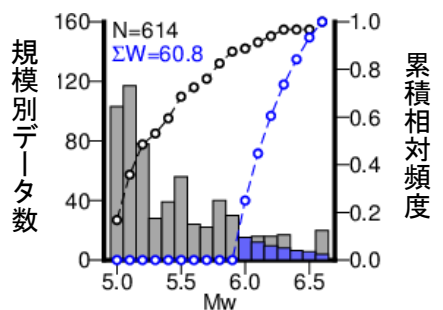
<ケース3 (Mw5.0~6.6)>
 緑色：非超過確率97.7%(+2σ)
 灰色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 黒色：加藤スペクトル(水平動)
 実線：Vs2200m/s
 破線：Vs700m/s

-1σ = 15.9%
 Ave. = 50.0%
 +1σ = 84.1%
 +2σ = 97.7%

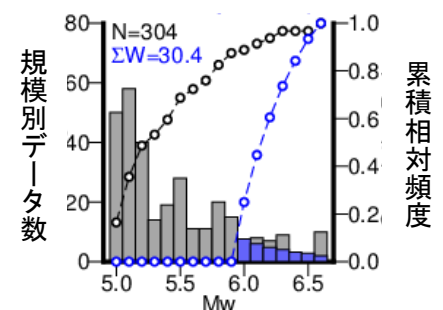


<本ケース (Mw6.0~6.6)>
 赤色：非超過確率別スペクトル
 青色：はぎとり波
 実線：UD
 桃色：Mw6.4, 6.5の記録の代わりに仮想的に追加したスペクトル(注2)
 橙色：年超過確率との対応
 実線： 1×10^{-4} に対応する 非超過確率(69.1%)
 破線： 5×10^{-5} に対応する 非超過確率(84.5%)

<ケース3 (Mw5.0~6.6)>
 緑色：非超過確率97.7%(+2σ)
 灰色：はぎとり波
 実線：NS, 破線：EW
 黒色：加藤スペクトル(上下動)
 実線：Vp4200m/s
 破線：Vp2000m/s



灰色：全記録
 青色：本ケースでの対象記録



注1) 現時点での暫定結果であり、今後の検討・確認等により結果が変動する可能性がある。

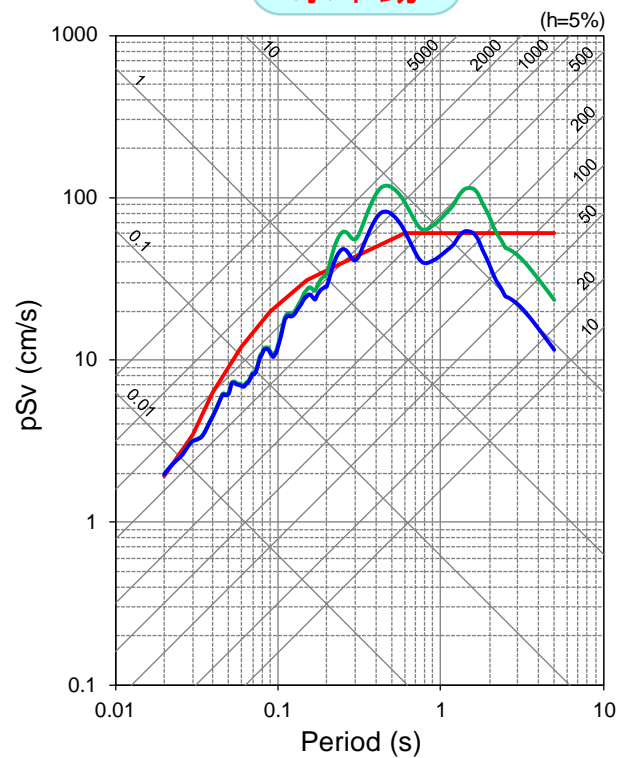
注2) JNES (2013)による距離減衰式の平均+1σの値(断層最短距離5km、深さ10km)

付録D：2004年北海道留萌支庁南部地震K-NET港町観測点の地震動との比較

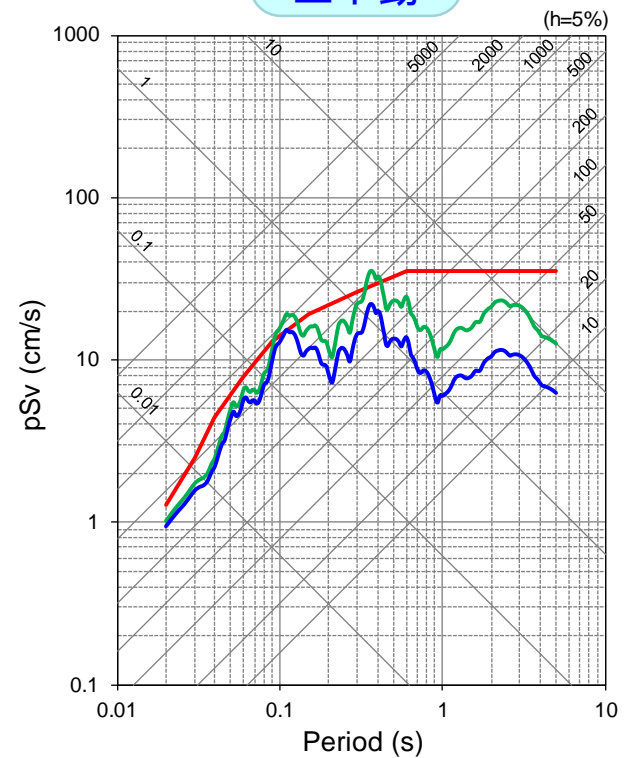
2004年北海道留萌支庁南部地震K-NET港町観測点の解放基盤波に余裕を持たせた地震動(硬岩サイトで使用されているレベル)に対して、試行的に本検討と同様のNoda *et al.* (2002)の地盤増幅率による地盤物性補正*1(詳細はp.25参照)を施して地震基盤相当面の地震動を推定した場合には、水平動については周期0.2~0.6秒付近を除いては標準応答スペクトルと概ね同等又はそれを下回る地震動レベルとなり*2、上下動については全周期帯において標準応答スペクトルと概ね同等又はそれを下回る地震動レベルとなることを確認した。

- * 1: ここでの地盤物性補正においては地盤の卓越周期は考慮していない。
- * 2: 水平動の周期0.02秒においては、2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET港町観測点の解放基盤波に余裕を持たせた地震動の応答スペクトルの方が標準応答スペクトルよりもわずかに大きな地震動レベルとなる。

水平動



上下動



— 標準応答スペクトル ※地盤条件: 地震基盤相当面 [$V_s=2200\text{m/s}$ 以上 ($V_p=4200\text{m/s}$ 以上)]

2004年北海道留萌支庁南部地震($M_w5.7$)のK-NET港町観測点の地震動

— 解放基盤波に余裕を持たせた地震動(硬岩サイトで使用されているレベル)
 ※地盤条件: 解放基盤面 ($V_s=938\text{m/s}$, $V_p=2215\text{m/s}$)

— 上記の地震動に対して試行的にNoda *et al.* (2002)の地盤増幅率により地震基盤相当面に補正した地震動レベル
 ※地盤条件: 地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$, $V_p=4200\text{m/s}$)

引用文献 (1/5)

- Asano, K., and T. Iwata (2006): Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth, Planets and Space*, 58, 93-98.
- Asano, K., and T. Iwata (2009): Source Rupture Process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata Prefecture, Japan, Earthquake Inferred from Waveform Inversion with Dense Strong-Motion Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 123-140.
- Asano, K., and T. Iwata (2016): Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, 68:147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.
- 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション (J-SHIS), <<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>>.
- 防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網 (F-net), <<http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>>.
- 防災科学技術研究所: 高感度地震観測網 (Hi-net), <<http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>>.
- 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>>.
- Douglas, J. (2017), Ground motion prediction equations 1964-2017, <<http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.html>>.
- 原子力安全基盤機構(2005): 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書(平成16年度).
- 原子力安全基盤機構(2009): 震源を特定せず策定する地震動の設定に係る検討に関する報告書.
- 原子力安全基盤機構(2012): 基準地震動の超過確率評価に係わる技術の整備, *安全研究年報(平成23年度)*, 79-88, <<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000123375.pdf>>.
- 原子力安全基盤機構(2013): 平成24年度 地震基盤における応答スペクトルの距離減衰式に適用する地盤増幅特性評価手法の検討 付録E「平成20~23年までに作成された硬質岩盤上距離減衰式のアップデート」.
- 原子力規制委員会(2013): 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド(平成25年6月19日制定).
- Goda, K., and M. Atkinson (2009) : Probabilistic characterization of spatially correlated response spectra for earthquakes in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 3003-3020.
- 引間和人(2013): 2月25日栃木県北部の地震の強震動と震源過程, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 21162, 323-324.
- 引間和人(2015): 2013年栃木県北部の地震の震源域におけるKiK-net観測点を用いたサイト・伝播特性に関する検討, *日本建築学会学術講演梗概集*, 21026, 51-52.

引用文献 (2/5)

- Hikima, K., and K. Koketsu (2004): Source processes of the foreshock, mainshock and largest aftershock in the 2003 Miyagi-ken Hokubu, Japan, earthquake sequence, *Earth, Planets and Space*, 56, 87-93.
- Hikima, K., and K. Koketsu (2005): Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system, *Geophysical Research Letters*, 32, L18303.
- Idriss, I. M. (2014): An NGA-West2 Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra*, 30, 1155-1177.
- 今泉俊文・宮内崇裕・堤浩之・中田高(2018): 活断層詳細デジタルマップ 新編, 東京大学出版会, 154pp.
- International Atomic Energy Agency (2016): Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations: Ground Motion Prediction Equations and Site Response, *IAEA-TECDOC-1796*, 132pp.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875.
- Jennings, P.C., G.W. Housner, and N.C. Tsai (1968): Simulated earthquake motions, *Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena*.
- 地震調査研究推進本部: 主な地震活動, <https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_annual/>.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2006): 伊豆半島東方沖の地震活動, <https://www.jishin.go.jp/main/chousa/06may_izu/p01.htm>.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2012): 3月14日千葉県東方沖の地震, <https://www.static.jishin.go.jp/resource/seismicity_annual/major_act/2012/20120314_chiba-touhouoki_01.pdf>.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2014): 全国地震動予測地図2014年版～全国の地震動ハザードを概観して～ 付録-1, <https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2014/>.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2018): 全国地震動予測地図 手引・解説編 2018年版, <https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/>.
- 香川敬生(2004): ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, *日本地震工学会論文集*, 4, 21-32.
- 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇 一男 (2004): 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—, *日本地震工学会論文集*, 4, 46-86.

引用文献 (3/5)

- 加藤研一・武村雅之・八代和彦(1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, *地震 第2輯*, 51, 123-138.
- 気象庁(2013): 2013年4月13日淡路島付近の地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2013/4/23, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2013041305331775near.pdf>>.
- 気象庁(2015): 2014年11月22日長野県北部の地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2015/1/15, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/20141122near.pdf>>.
- 気象庁(2015): 2011年3月12日長野県北部の地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2015/12/22, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2011031203591562near.pdf>>.
- 気象庁(2016): 2011年3月15日静岡県東部の地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2016/1/15, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2011031522314634near.pdf>>.
- 気象庁(2016): 2011年4月12日福島県中通りの地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2016/1/15, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2011041214074228near.pdf>>.
- 気象庁(2017): 2016年12月28日茨城県北部の地震ー近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, 最終更新日: 2017/2/17, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2016122821384904near.pdf>>.
- 古山田耕司・宮本裕司・三浦賢治(2003): 多地点での原位置採取資料から評価した表層地盤の非線形特性, *第38回地盤工学会研究発表会 発表講演集*, 2077-2078.
- Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi (2017), Source rupture process of the 2016 central Tottori, Japan, earthquake (M_{JMA} 6.6) inferred from strong motion waveforms, *Earth, Planets and Space*, 69:127, doi:10.1186/s40623-017-0714-3.
- Maeda, T., and T. Sasatani (2009): Strong ground motions from an Mj 6.1 inland crustal earthquake in Hokkaido, Japan: the 2004 Rumoi earthquake, *Earth, Planets and Space*, 61, 689-701.
- Morikawa, N., and H. Fujiwara (2013): A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, *Journal of Disaster Research*, 8, 878-888.
- 武藤大介・上野寛・溜渕功治・岩切一宏(2014): 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震以降に活発化した福島県浜通りから茨城県北部における地震活動の特徴とその要因, *験震時報*, 78, 1-28.
- 中田高・今泉俊文(2002): 活断層詳細デジタルマップ, *東京大学出版会*, 60pp.
- 日本電気協会(1987): 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-1987, 896pp.

引用文献 (4/5)

- Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe (2001): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, *Transactions, SMIRT 16*, Paper#1133, 1-8.
- Noda, S., K. Yasiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe (2002): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, *OECD Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering*, 399-408.
- 大崎順彦(1994): 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 299pp.
- 佐藤浩章・芝良昭・東貞成・功刀卓・前田宜浩・藤原広行(2013): 物理探査・室内試験に基づく2004年留萌支庁南部の地震によるK-NET港町観測点(HKD020)の基盤地震動とサイト特性評価, *電力中央研究所報告*, 研究報告:N13007.
- 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*, 73, 1745-1754.
- Semmane, F., F. Cotton, and M. Campillo (2005): The 2000 Tottori earthquake: A shallow earthquake with no surface rupture and slip properties controlled by depth, *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004JB003194.
- Shimazaki, K. (1986): Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Earthquake Source Mechanics, AGU Geophysical Monograph 37*, 209-216.
- 司 宏俊・堤 英明・翠川三郎・野田朱美・正月俊行(2010): 地震基盤における震源近傍まで適用できる応答スペクトル距離減衰式の整備に関する研究, *日本地震学会秋季大会講演予稿集*, p.50.
- Si, H., S. Midorikawa, H. Tsutsumi, C. Wu, T. Masatsuki, and A. Noda (2013): Preliminary analysis of attenuation relationship for response spectra on bedrock based on strong motion records including the 2011 Mw9.0 Tohoku earthquake, *Proceedings of 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, 113-117.
- 主要原子力施設設置者(北海道電力等9社、日本原電、日本原燃及び電源開発)(2018): 4地震に係る中小地震の観測記録等の分析, 平成30年12月13日 震源を特定せず策定する地震動に係る電気事業連合会等との面談(第7回震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム会合において「机上配付資料4」として使用), <<http://www2.nsr.go.jp/data/000257115.pdf>>.

引用文献 (5/5)

- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80.
- 武村雅之(1998): 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, *地震 第2輯*, 51, 211-228.
- Tanaka, M., K. Asano, T. Iwata, and H. Kubo (2014): Source rupture process of the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake: how did the two subparallel faults rupture?, *Earth, Planets and Space*, 66:101, doi:10.1186/1880-5981-66-101.
- 田中美穂・岩切一宏(2017): 2つの茨城県北部の地震($M_{\text{JMA}}6.1$, $M_{\text{JMA}}6.3$)の震源過程と破壊域の比較, *駿震時報*, 81:7, 1-11.
- Zhao, 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*, 105, 2750-2763.
- Zhao, 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 (2016) : 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*, 106, 1552-1569.