

標準応答スペクトルの策定について

令和3年12月23日

原子力規制庁

標準応答スペクトル策定に係る背景

(1) 「震源を特定せず策定する地震動」の審査における事業者の中長期課題

- 従前の新規制基準適合性審査において、敷地に及ぼす影響が大きいとして抽出された5地震(2011年長野県北部地震, 2011年茨城県北部地震, 2013年栃木県北部地震, 2004年北海道留萌支庁南部地震及び2011年和歌山県北部地震)のうち、2004年北海道留萌支庁南部地震に不確かさを考慮して策定した地震動を「震源を特定せず策定する地震動」として策定することを妥当と判断してきた
- 事業者は、残りの4地震の検討については、各観測地点における詳細な地盤物性値が得られておらず、精度の高い解放基盤表面における地震動の推定が困難なことから、今後取り組むべき中長期課題と整理し、各観測地点の地盤調査等による地盤物性値の評価等に時間を要していた
- このような状況に鑑み、原子力規制委員会は、全国の原子力発電所等において共通に適用できる地震動の策定方法を早期に明示することが望ましいと考え、平成29年11月29日に「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」を設け、平成30年1月から令和元年8月まで計11回の検討チーム会合を開催して所要の検討を行った

(2) 標準応答スペクトルに係る検討(検討チームにおける審議)

- 地震動観測記録の収集・整理, はぎとり解析, 応答スペクトルの補正, ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認, 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出, 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認, 時刻歴波形の作成方法, 標準応答スペクトルに係る将来の課題等について、検討チームにおいて審議した

震源を特定せず策定する地震動に関する検討チームについて(1/3)

<概要>

- 全国共通に適用できる地震動の策定方法を明示することを目的として、過去の内陸地殻内地震の地震動観測記録を収集・分析し、地域的な特徴を極力低減させて普遍的な地震動レベルを設定するために、地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面における震源近傍の多数の地震動記録について統計的な処理を行い、全国標準的な応答スペクトル(標準応答スペクトル)を策定するための検討及び議論等を実施

<構成員>

- 原子力規制委員会
石渡 明 原子力規制委員会委員
- 外部専門家 (順不同、敬称略)
遠田 晋次 東北大学災害科学国際研究所災害理学研究部門 教授
久田 嘉章 工学院大学総合研究所・都市減災研究センター長 教授
藤原 広行 防災科学技術研究所マルチハザードリスク評価研究部門長
三宅 弘恵 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター 准教授
室野 剛隆 鉄道総合技術研究所 研究開発推進部JR部長
山岡 耕春 名古屋大学環境学研究科地震火山研究センター 教授
- 原子力規制庁
櫻田 道夫 原子力規制技監 他

震源を特定せず策定する地震動に関する検討チームについて(2/3)

＜検討チーム会合開催実績＞

回数	主な議題
第1回 (H30.1.25)	<ul style="list-style-type: none">・「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」について・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の評価について・「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」の主な検討課題について
第2回 (H30.2.22)	<ul style="list-style-type: none">・事業者の「震源を特定せず策定する地震動」に関する取り組み状況について・他分野における検討事例について・第1回会合における議論の整理
第3回 (H30.3.30)	<ul style="list-style-type: none">・これまでの会合における議論の整理・観測記録の補正(震源距離及び地盤物性)について・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確認方法について
第4回 (H30.6.14)	<ul style="list-style-type: none">・これまでの会合における議論の整理について・予備検討結果の紹介及び今後の方針について・今後のスケジュールについて
第5回 (H30.10.4)	<ul style="list-style-type: none">・事業者の「震源を特定せず策定する地震動」に関する取り組み状況について・これまでの会合における議論の整理・震源を特定せず策定する地震動の時刻歴波形について

震源を特定せず策定する地震動に関する検討チームについて(3/3)

<検討チーム会合開催実績(続き)>

回数	主な議題
第6回 (H30.11.8)	・これまでの会合における議論の整理 ・対象地震動記録の検討状況について
第7回 (H31.3.4)	・これまでの会合における議論の整理 ・対象記録の検討結果及び標準応答スペクトル(案)について
第8回 (H31.3.29)	・検討チーム会合に対する事業者意見について ・これまでの会合における議論の整理及び将来の課題について
第9回 (R1.5.10)	・これまでの会合における議論の整理 ・本検討で対象とした地震動のデータセットについて ・検討結果の取りまとめについて
第10回 (R.1.7.8)	・これまでの会合における議論の整理 ・検討結果の取りまとめについて
第11回 (R1.8.7)	・検討結果の取りまとめについて

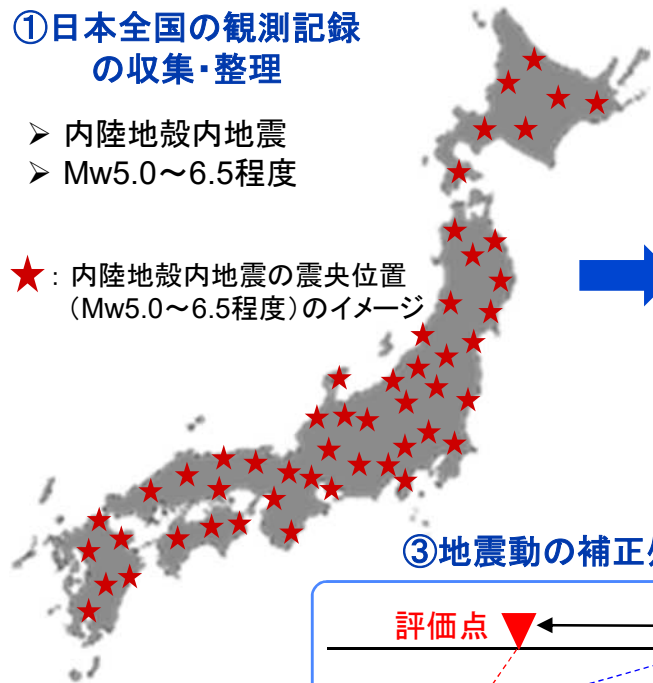
標準応答スペクトル策定の流れ

- 過去に起きた内陸地殻内地震の観測記録 (Mw5.0~6.5程度) を収集し、89地震 (水平動614波、上下動304波) を対象に、地震動の「はぎとり解析」及び「補正処理 (震源距離・地盤物性)」を行い、震源近傍での地震基盤相当面における地震動を算出した。
- 上記の多数の地震動について、統計的な処理を行い、妥当性確認 (地震動の年超過確率の参照、他手法による応答スペクトルとの比較) の結果も踏まえて「標準応答スペクトル」を策定した。

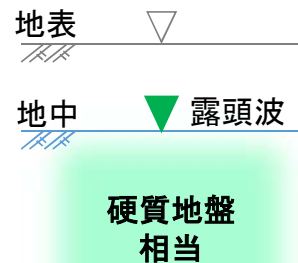
①日本全国の観測記録の収集・整理

- 内陸地殻内地震
- Mw5.0~6.5程度

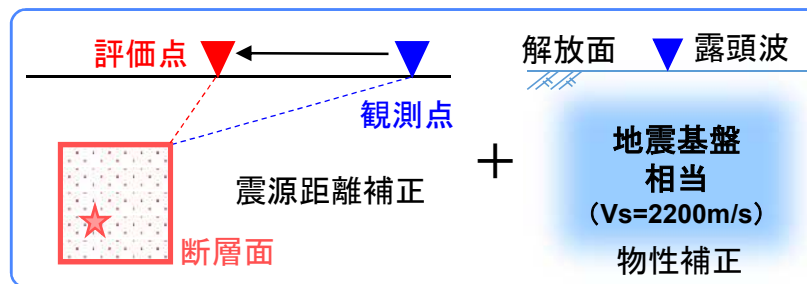
★ : 内陸地殻内地震の震央位置 (Mw5.0~6.5程度) のイメージ



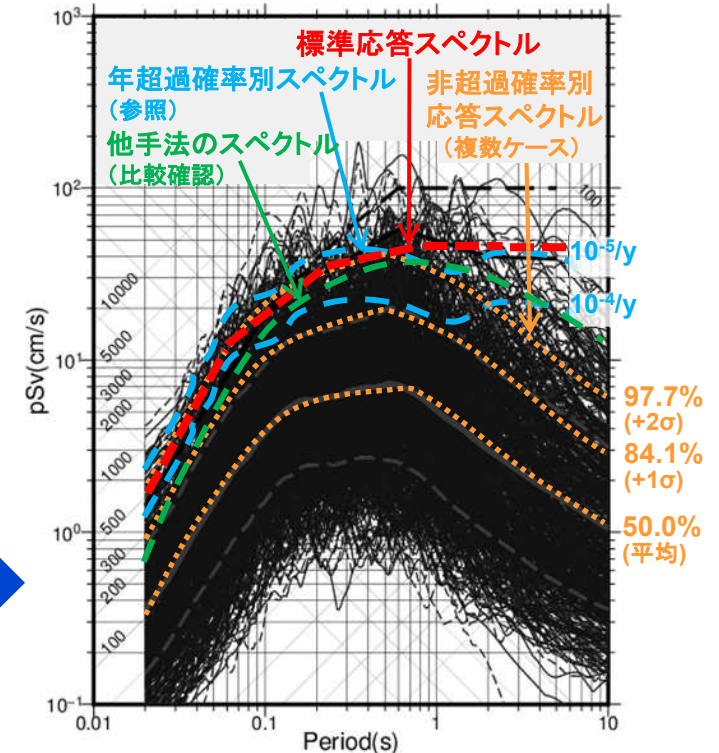
②はぎとり解析



③地震動の補正処理 (震源距離・地盤物性)



④統計処理結果に基づく標準応答スペクトルの策定及び妥当性確認



Tajima, R., H. Tanaka, and C. Wu (2021). An Empirical Method for Estimating Source Vicinity Ground-Motion Levels on Hard Bedrock and Annual Exceedance Probabilities for Inland Crustal Earthquakes with Sources Difficult to Identify in Advance, Bull. Seismol. Soc. Am. 111, 2408–2425, doi: 10.1785/0120210065.

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

以降、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書
参考資料より抜粋

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。

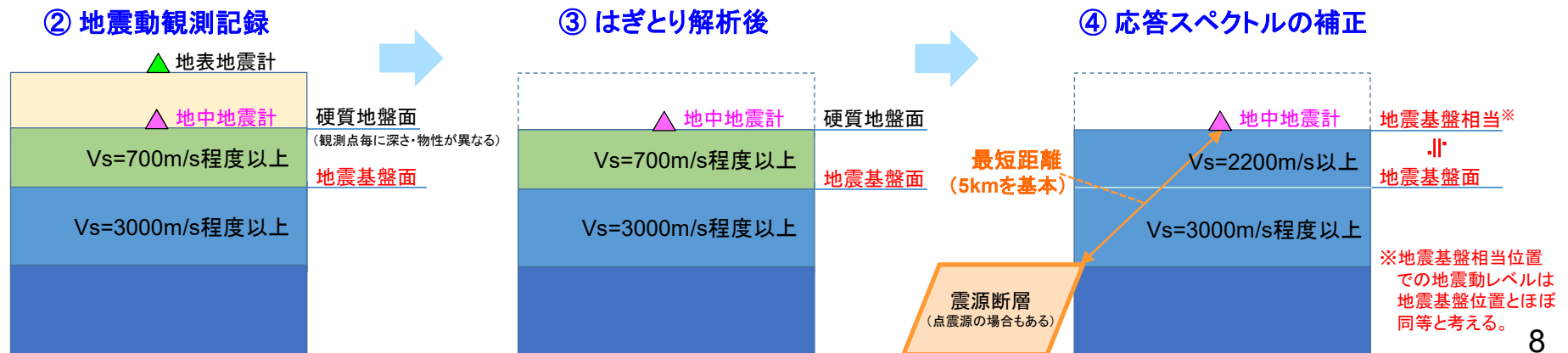
③ はぎとり解析

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

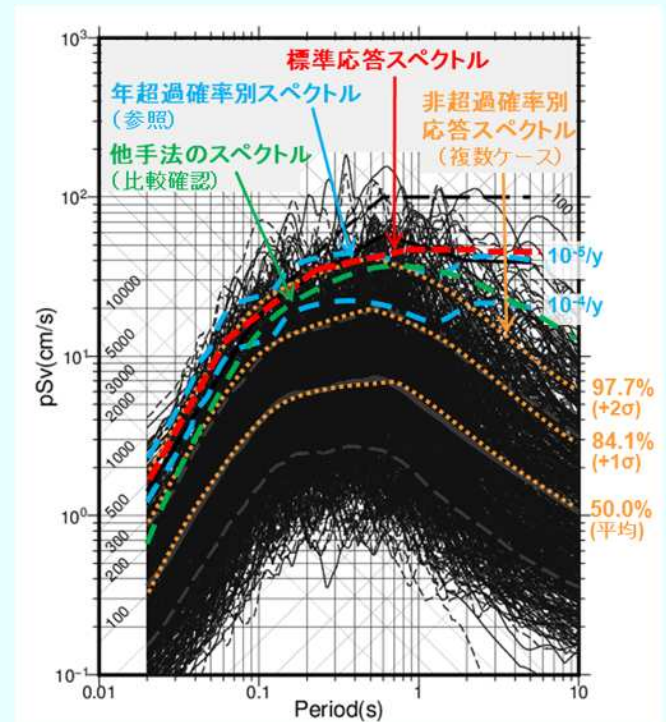
非超過確率別応答スペクトルの算出ケースのうち、全国共通に考慮すべき震源を特定せず策定する地震動の条件を満たすように精度を上げる目的で不確実さを低減させた3ケース(+確認用の2ケース)を基に、以下の観点による妥当性確認の結果も踏まえて、標準応答スペクトルの設定を行った。

〈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。



標準応答スペクトル設定のイメージ

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。

震源を特定して策定

震源を特定せず策定

①全国共通
②地域性考慮

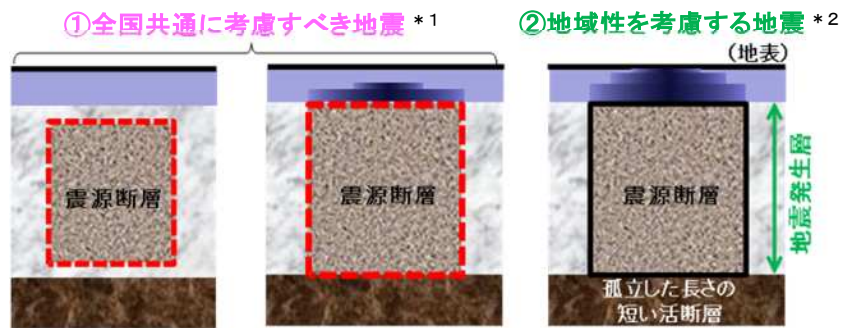
＜震源を特定せず策定する地震動とは＞

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感じた地震動。

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＞

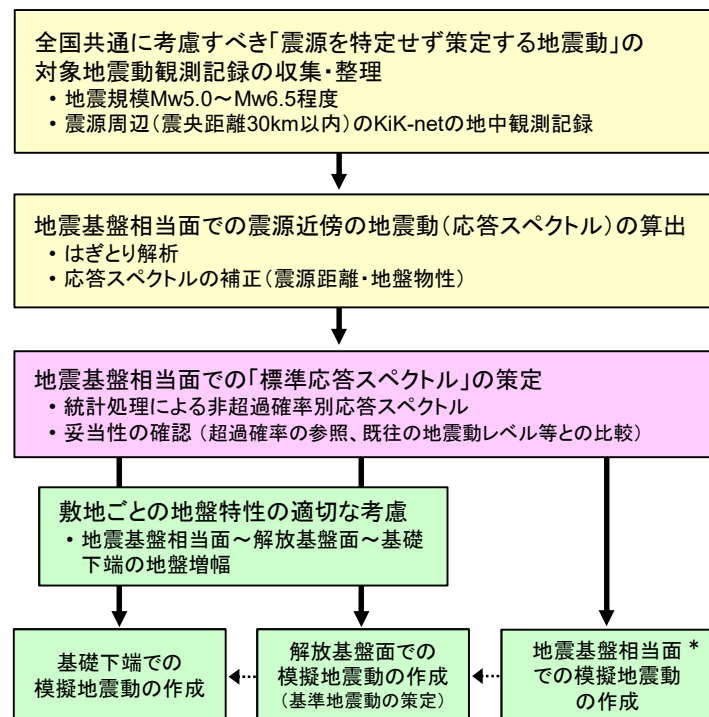


地表に明瞭な痕跡が見られない地震
(地表地震断層が出現しない可能性がある地震)

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

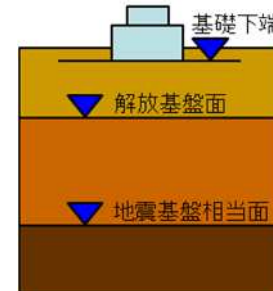
- * 1: 地震規模は、震源断層面積と地震規模の相似則が成り立つMw6.5程度未満
* 2: 地震規模は、Mw6.5程度以上

＜震源を特定せず策定する地震動(全国共通)の策定フロー＞



本検討チームの検討対象

事業者の検討対象

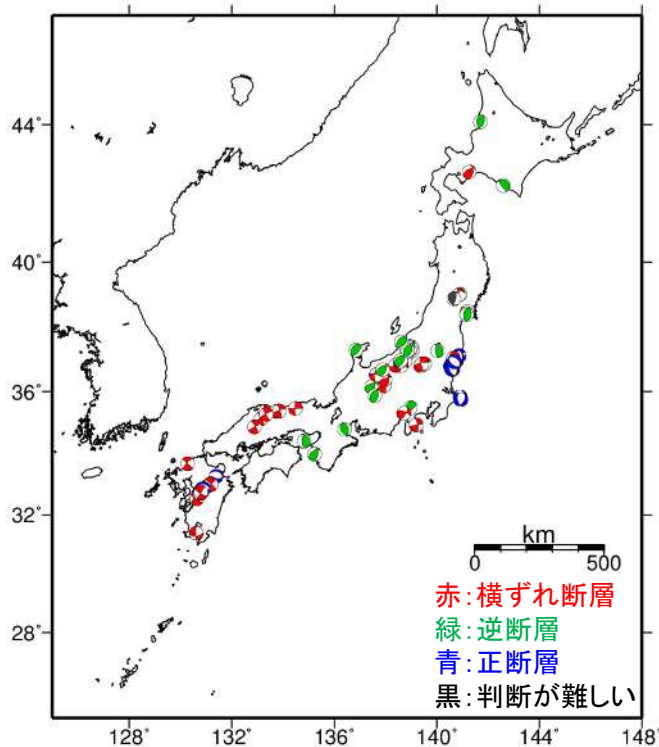


※ 地震基盤相当面、解放基盤面及び基礎下端の位置関係は、敷地により異なる。

3. 地震動観測記録の収集・整理 (1/4)

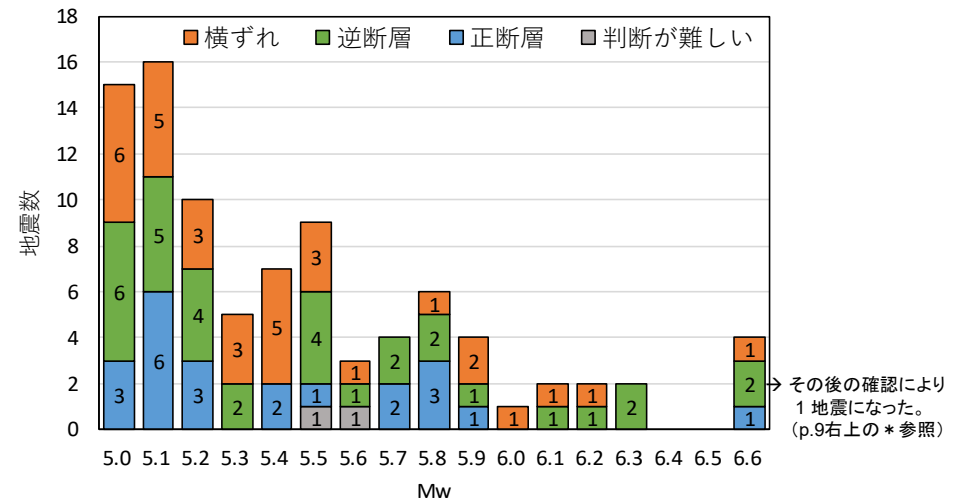
地震動観測記録の収集条件

- 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。

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。

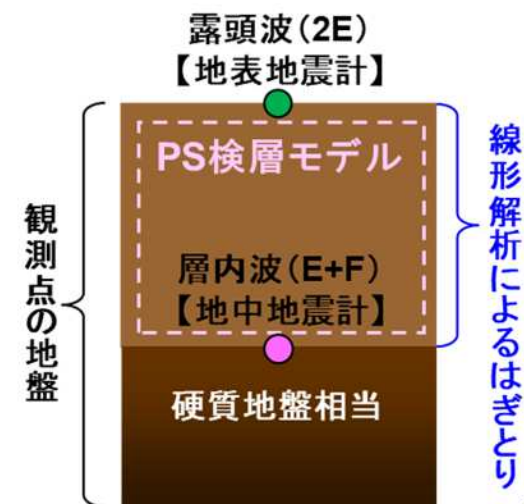
- ▶ 対象記録 : 89地震のKiK-netの地中観測記録(水平2成分614波、上下動304波)を使用。
 - ▶ 手法 : 重複反射理論に基づく次元線形解析を採用。
 - ▶ 地盤モデル: KiK-net観測点のPS検層結果[層厚, S波速度(V_s), P波速度(V_p)]を参考に地盤モデルを設定。減衰定数は、以下の複数通りを検討して適切な値を選定。
 - 水平動: 1%, 3%, 5%, 7%, 9%の計5種
 - 上下動: 1%, 3%, 5%の計3種
- ※7%と9%については非線形性が生じているような記録を対象とするため上下動では検討しない。
- ▶ 地表観測記録との比較による結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。



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

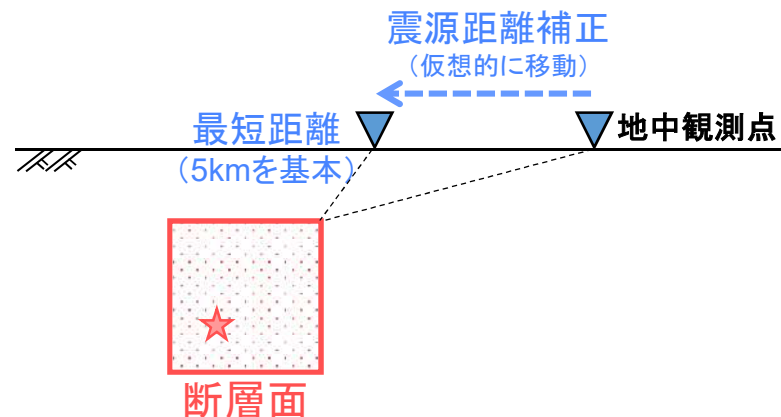
震源と各観測点の距離はそれぞれ異なるため、各観測記録を半径10km程度の震源近傍の領域に集めるために、震源距離補正(最短距離5kmを基本)を実施する(詳細は5.1.参照)。

(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)。

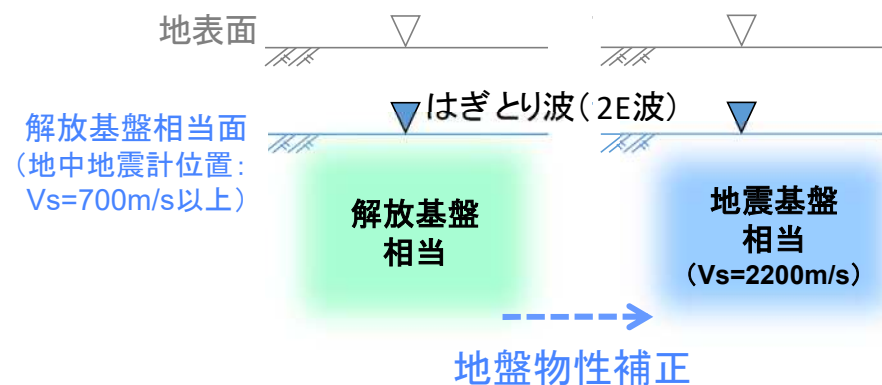
* 地震基盤相当面の V_s は、地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)による経験式における定義を参考に $V_s=2200\text{m/s}$ 以上とする。

【震源距離補正※1の概念】



※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

【地盤物性補正※2の概念】



※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

5.1 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。

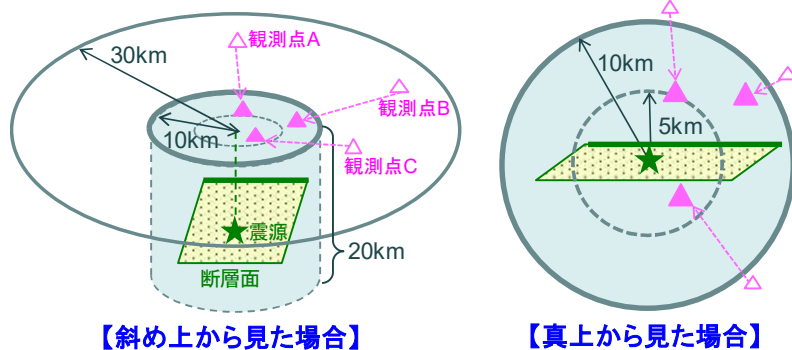
→ 方針: 観測記録を半径10km程度の震源近傍の領域*1に集めてくる方法として、震源(断層面または点震源)と観測点の距離について、以下のような補正を施した。

*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。

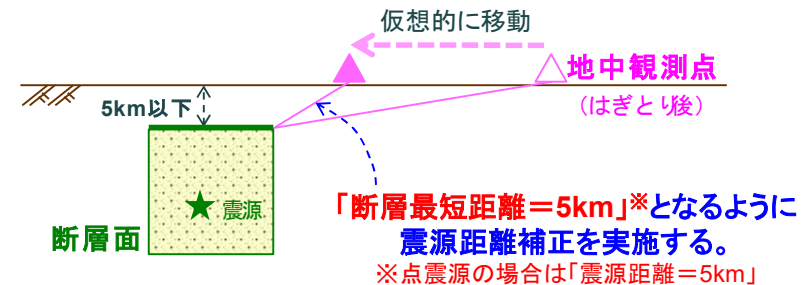
*2: 原子力安全基盤機構(JNES)は、2014年3月1日に原子力規制委員会原子力規制庁に統合された。

<震源距離補正のイメージ(断層面設定の場合)>

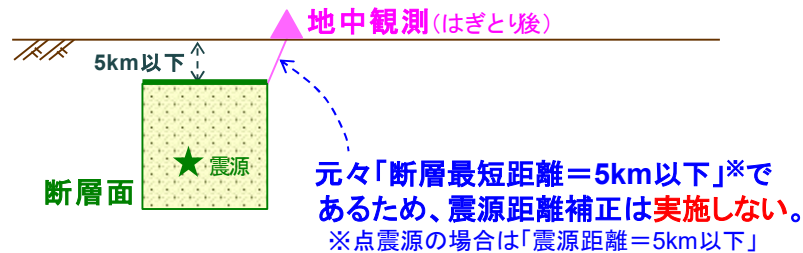


① 断層上端深さが5km以下であり、補正前の断層最短距離が5kmより遠い場合

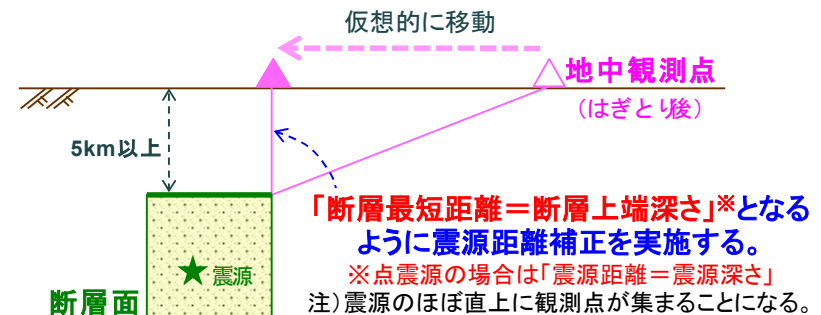
基本



② 断層上端深さが5km以下であり、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



5.2 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

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

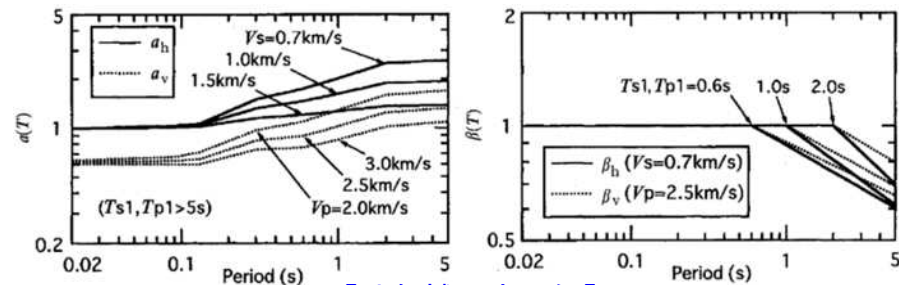
【補正項】

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。

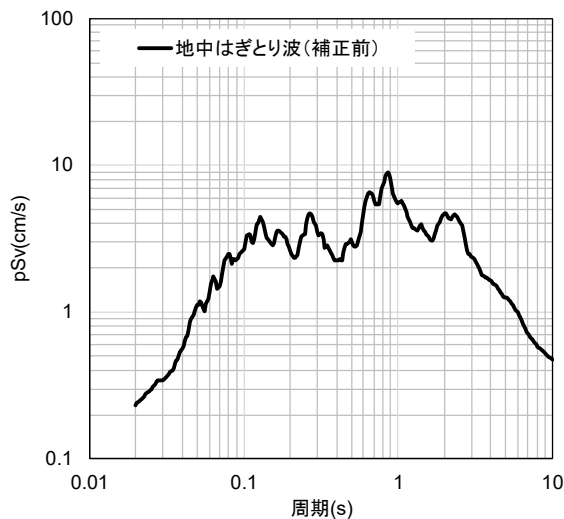
5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (1/5)

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

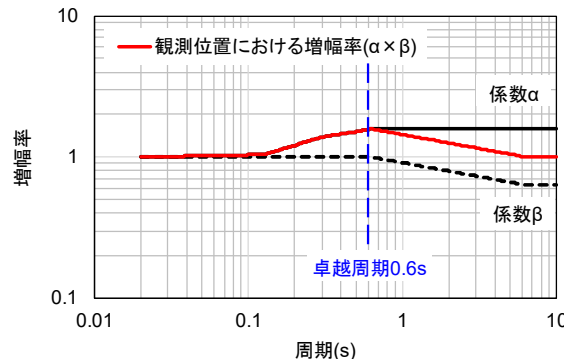


×

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

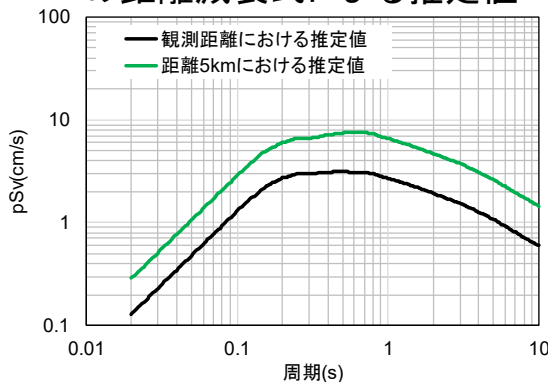
×

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



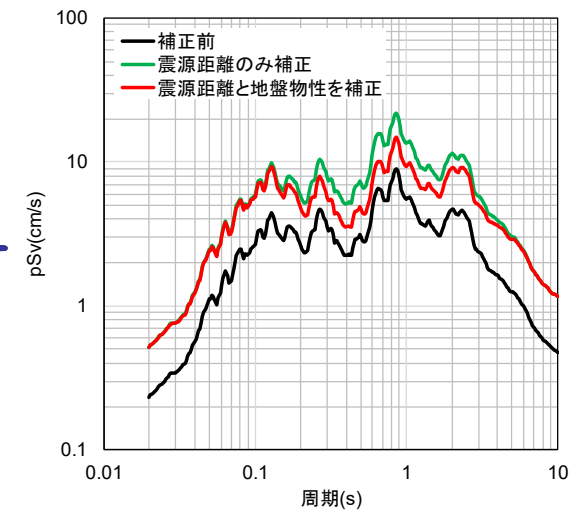
Noda et al. (2002)の地盤増幅率

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)

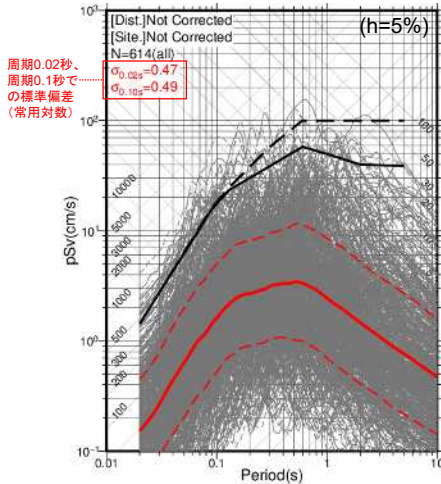
水平動

補正前



補正後(震源近傍、地震基盤相当)

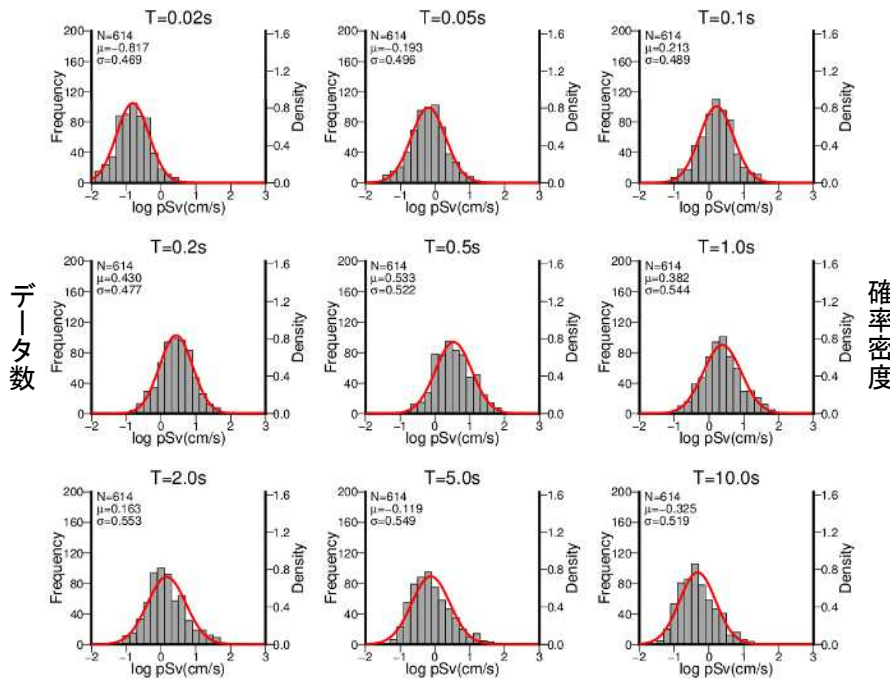
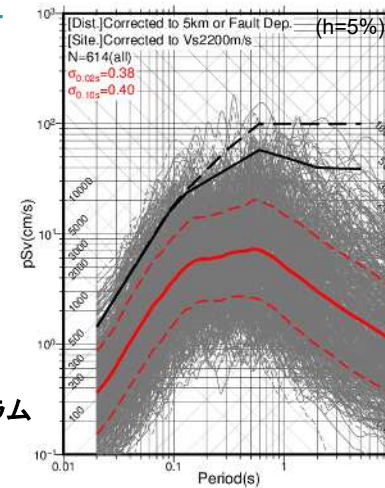
震源距離・地盤物性の補正



周期0.02秒、
周期0.1秒で……
の標準偏差
(常用対数)

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)

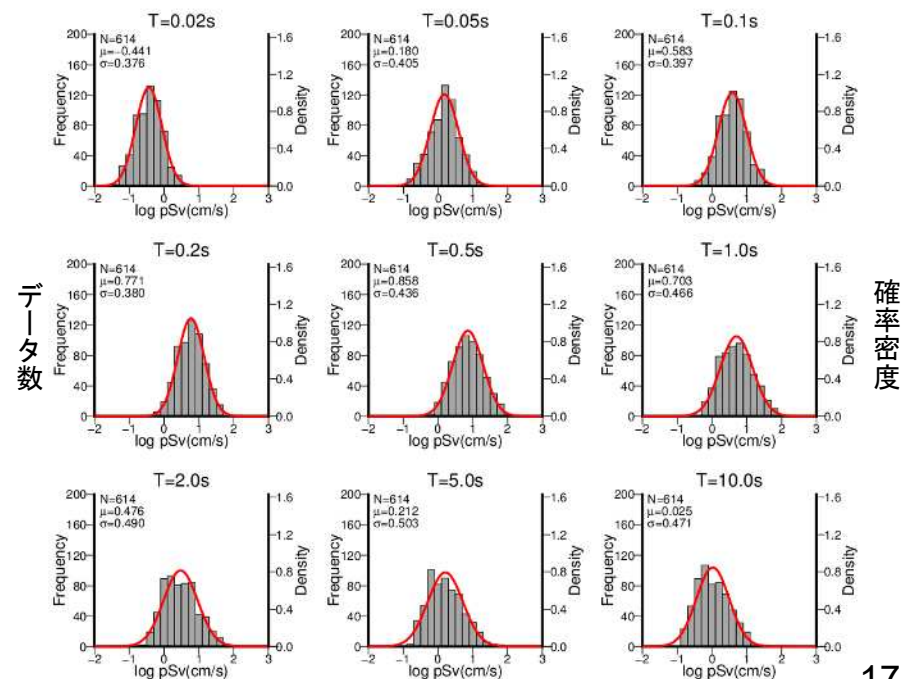
上段: はぎとり波の擬似速度応答スペクトル(h=5%)
下段: 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム
※補正によりばらつきが低減したことが分かる



データ数

確率密度

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]



データ数

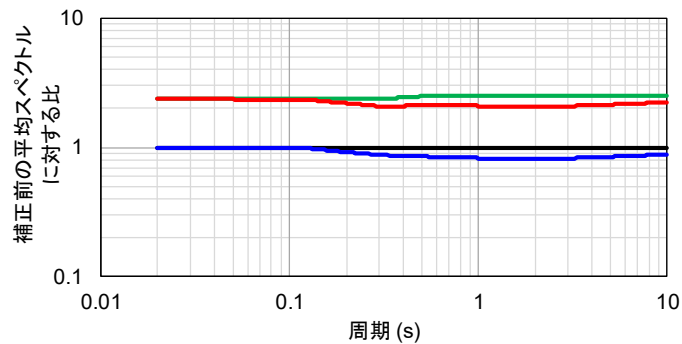
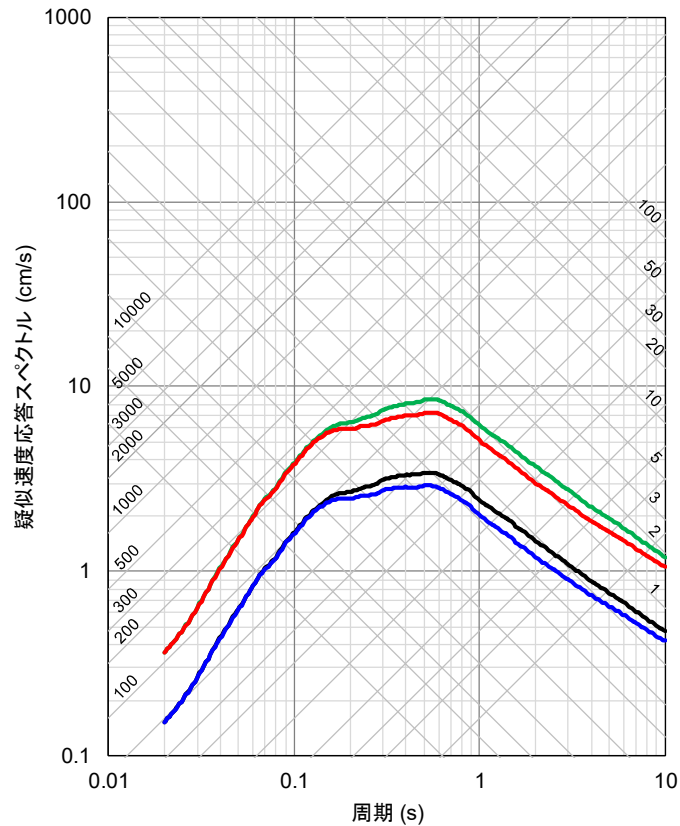
確率密度

地震動強さ[擬似速度応答(h=5%)の常用対数]

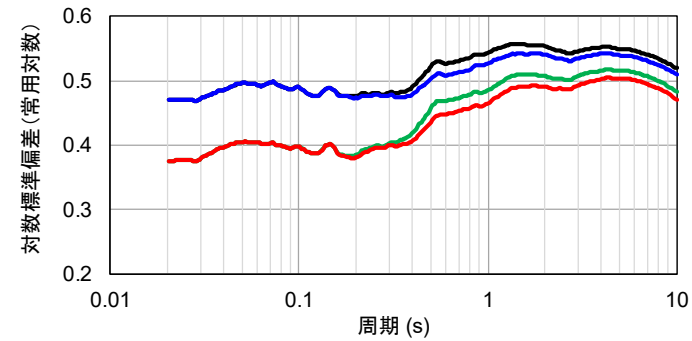
5.3 応答スペクトルの補正前後の比較 (3/5)

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

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い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。

- はぎ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>

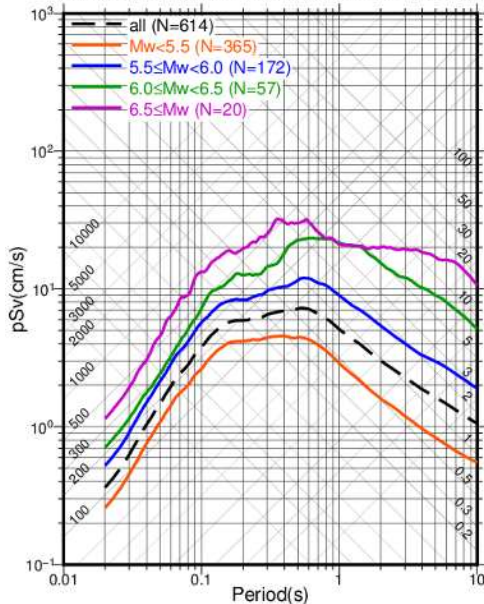
地震	① 地震規模(Mw)	p.32	観測記録	⑦ 補正前の震源(面/点)と観測点の最短距離	p.52
	② 震源深さ	p.36		⑧ 地中地震計位置の地盤のS波速度(Vs)	p.55
	③ 地震活動地域(西日本、東日本)	p.40		⑨ 地中地震計位置の地震基盤深さ	p.57
	④ 断層タイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)	p.42		⑩ 統計処理に用いる地震の数	p.59
	⑤ 地震活動タイプ(前震、本震、余震)	p.44		⑪ 特徴的な地震動	p.61
	⑥ 震央と活断層の地表における最短距離	p.47			

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



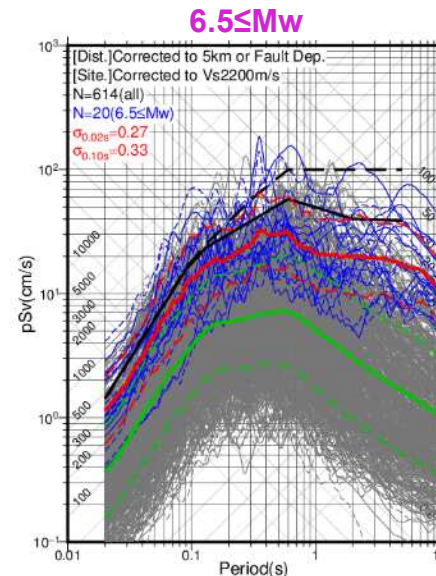
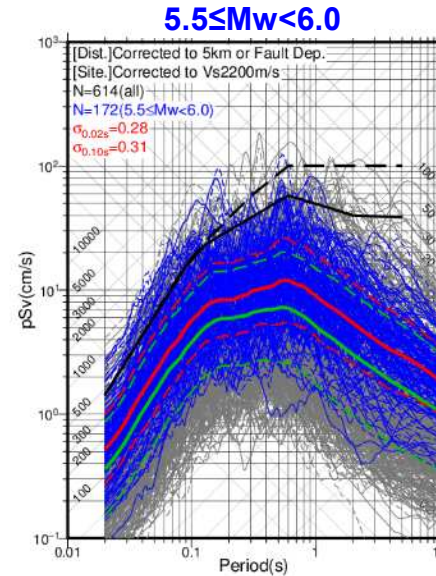
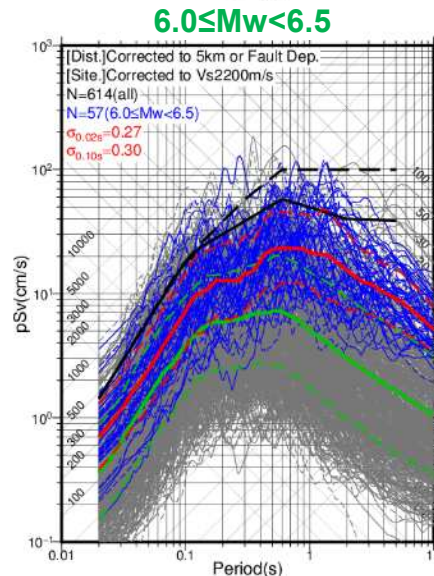
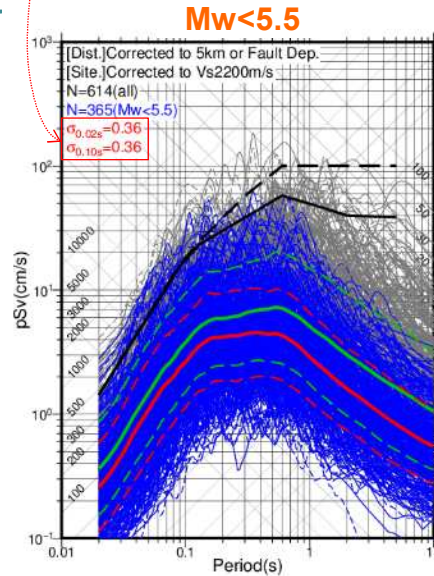
黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>

地震規模が大きいくほど、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

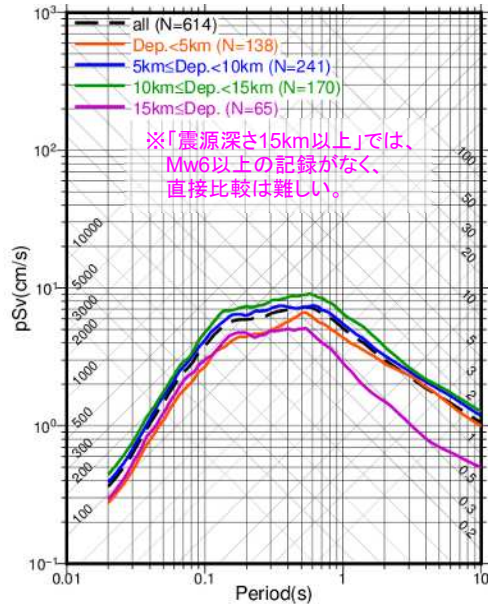
各図で異なる凡例

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 (6/36)

② 震源深さ: 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)

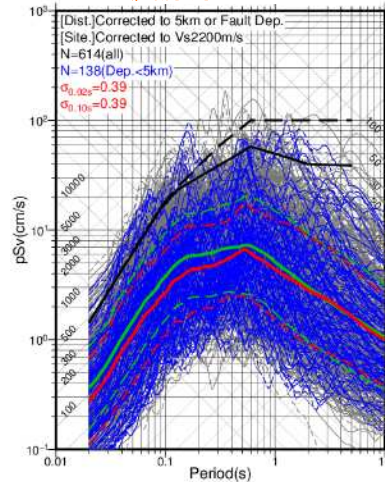
<グループ分けによる特徴分析>

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)。

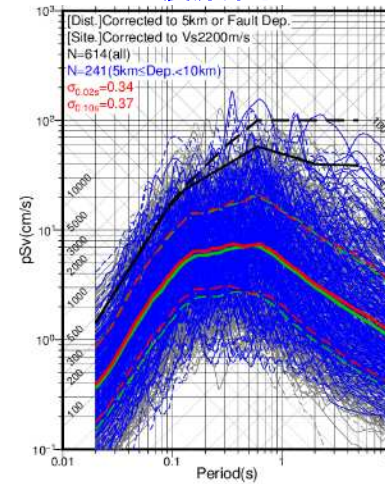
<データセット(データ数)に係る確認>

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。

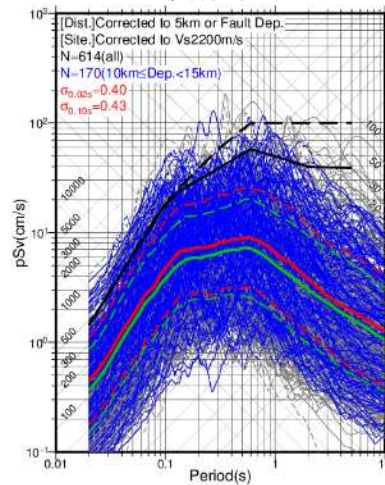
震源深さ<5km



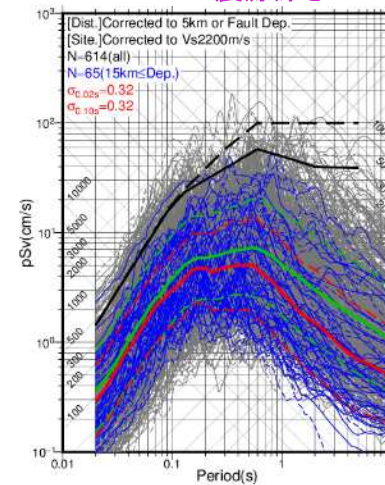
5km<=震源深さ<10km



10km<=震源深さ<15km



15km<=震源深さ



各図で共通(同じ)の凡例

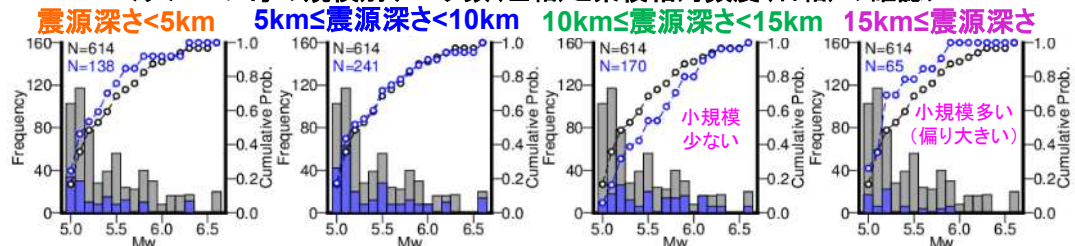
黒色: 加藤スペクトル(水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波(全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理(全記録)
 実線: はぎとり波(灰色)の平均
 破線: はぎとり波(灰色)の平均±σ

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 (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。

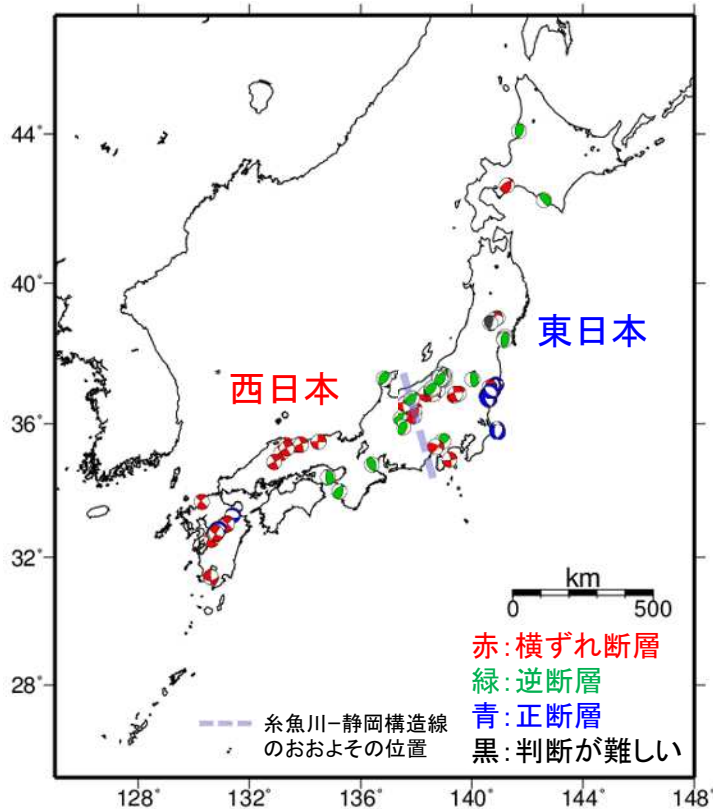
※構造線上の地震は、横ずれ断層の地震は西日本に、逆断層の地震は東日本に分類した。

<断層タイプ>

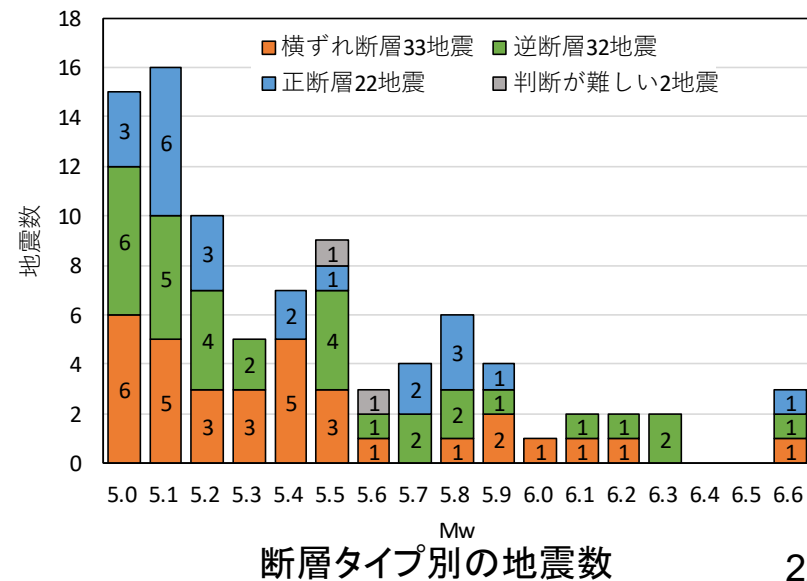
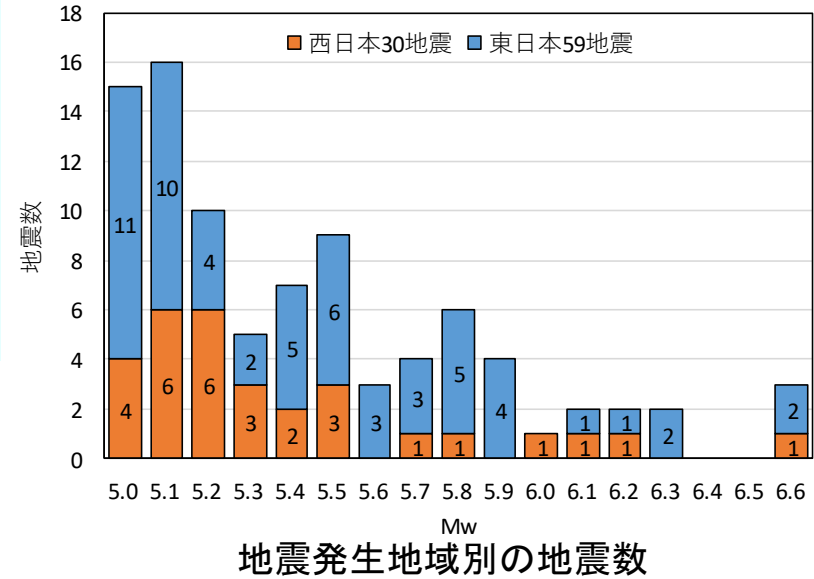
地震本部による評価及びF-netのメカニズム解を参考に、

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。

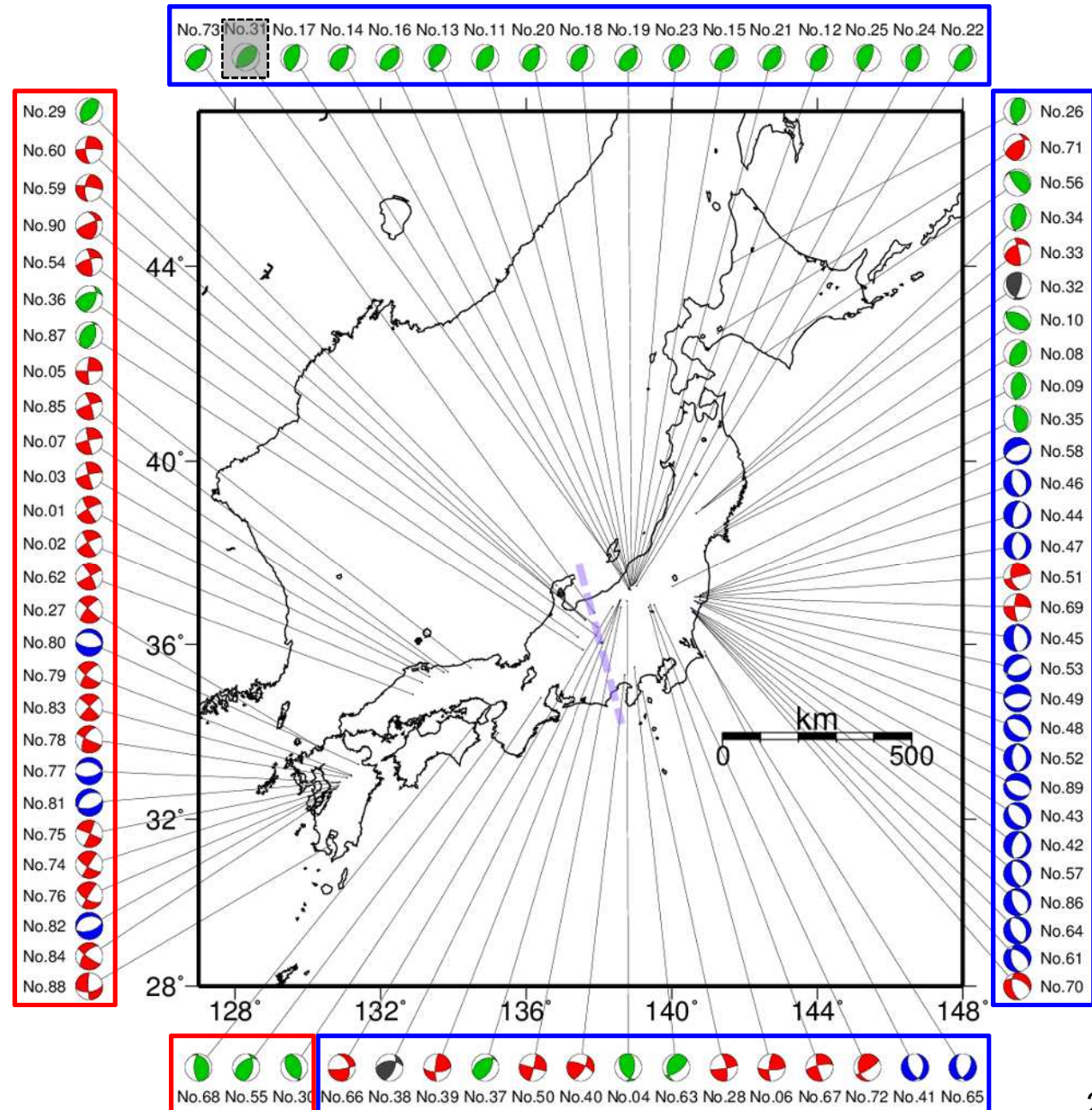
赤色: 横ずれ断層(33地震)

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)

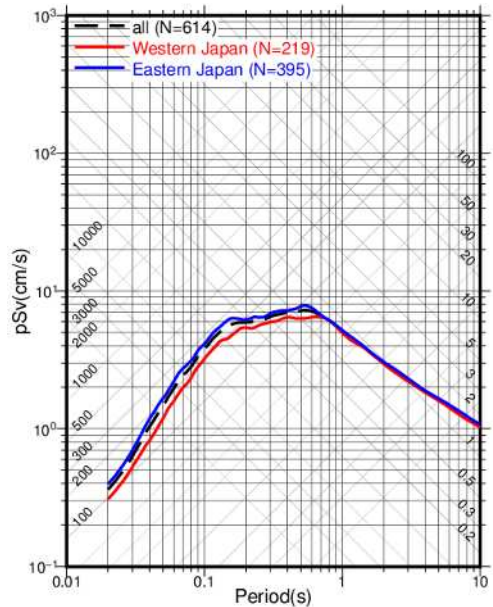
※収集した1記録の観測点のPS検層
結果がないため解析に使用しない
こととした2007年新潟県中越沖地震
(地震No.31)を除いた地震数である。



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)

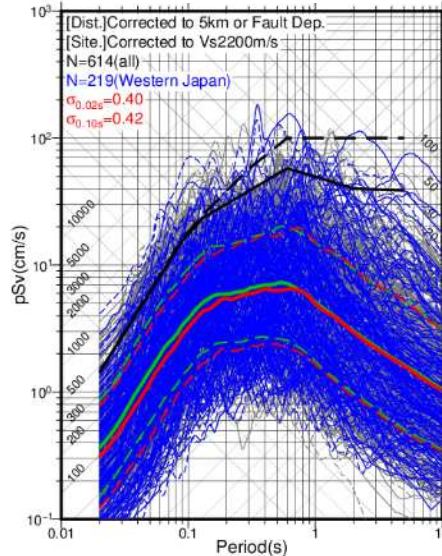
③ 地震活動地域: 水平動

平均スペクトルの比較

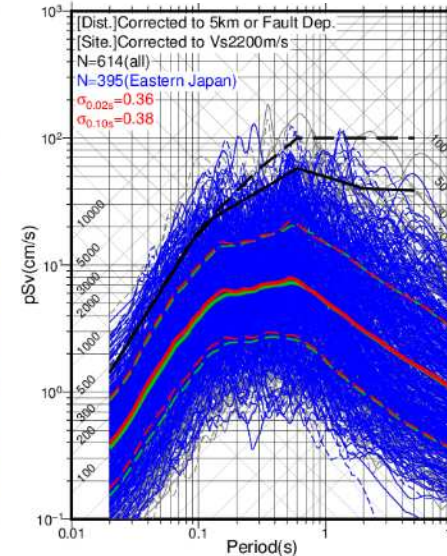


黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

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

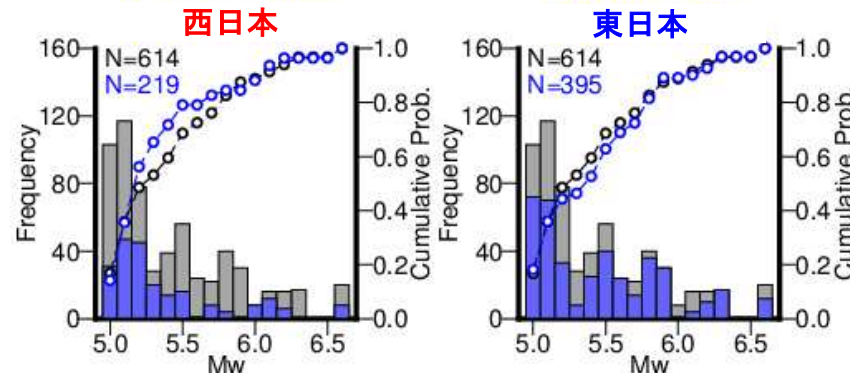
<グループ毎の規模別データ数(左軸)と累積相対頻度(右軸)の確認>

<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。

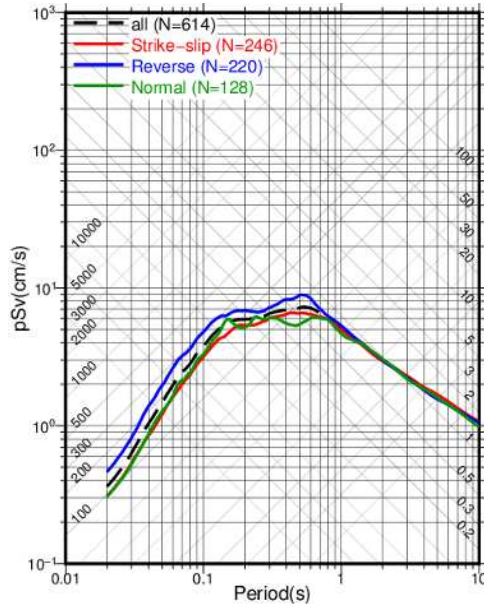


灰色: 全記録 (各図で共通)
青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (12/36)

④ 断層タイプ: 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)
 ※判断が難しい地震は除く

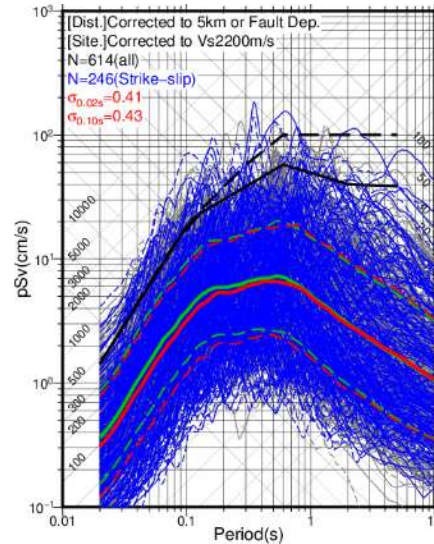
<グループ分けによる特徴分析>

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)。

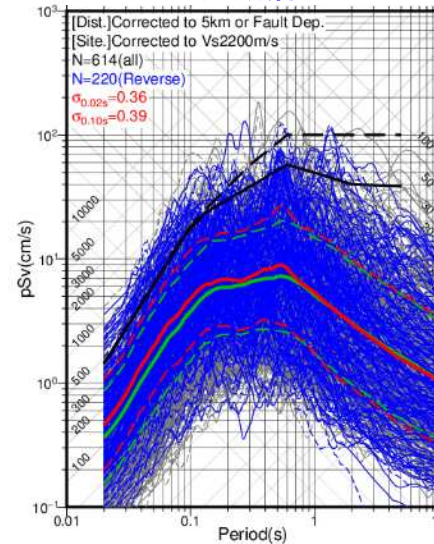
<データセット(データ数)に係る確認>

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。

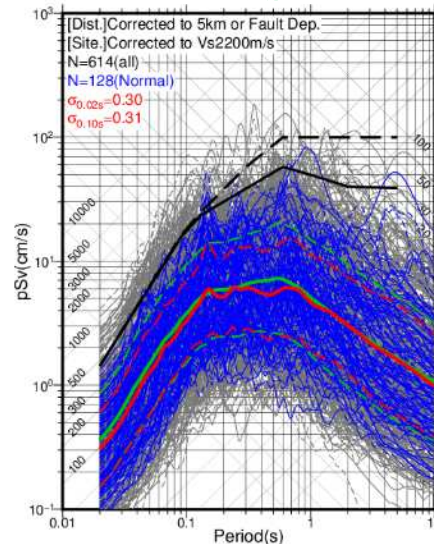
横ずれ断層



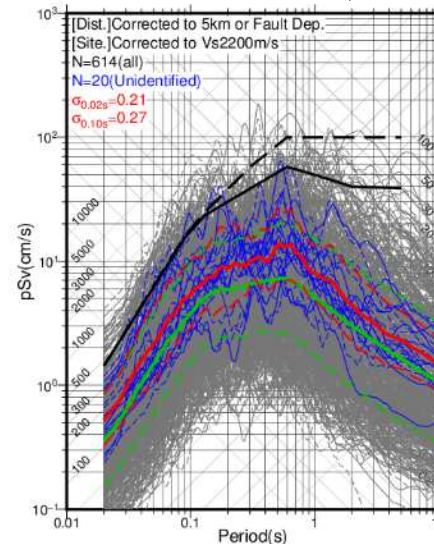
逆断層



正断層



判断が難しい地震



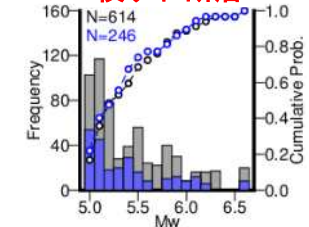
各図で共通(同じ)の凡例

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

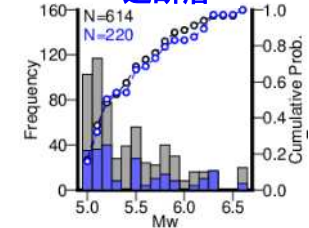
各図で異なる凡例

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

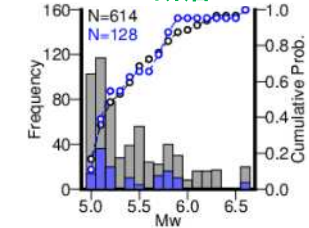
横ずれ断層



逆断層



正断層



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 (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。

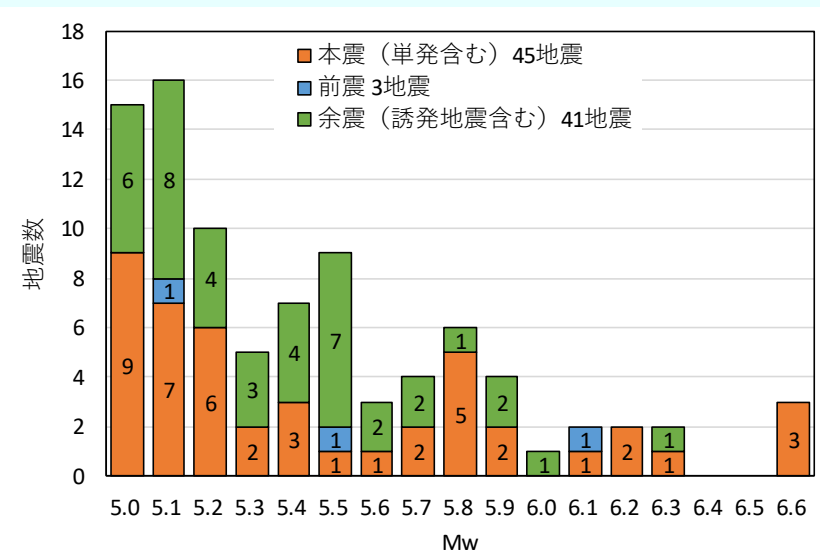
- ・2003年7月26日宮城県北部地震の前震
- ・2011年3月19日茨城県北部地震の前震
- ・2016年熊本地震の最大前震

【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。

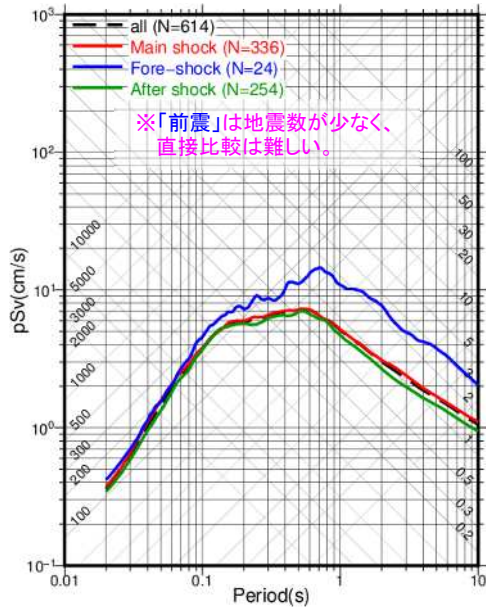
- ・2004年新潟県中越地震系列:14地震
- ・2011年浜通りの地震系列:7地震
- ・2016年熊本地震系列:10地震



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

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)

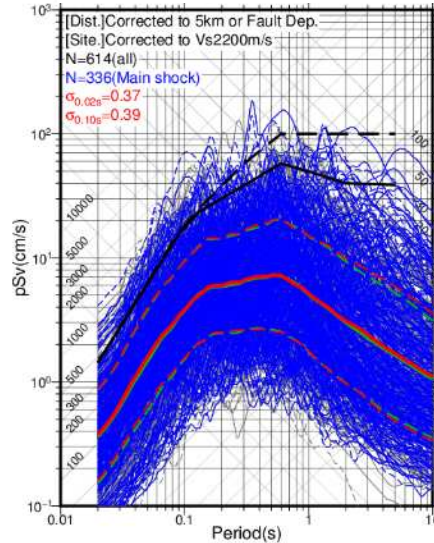
<グループ分けによる特徴分析>

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)。

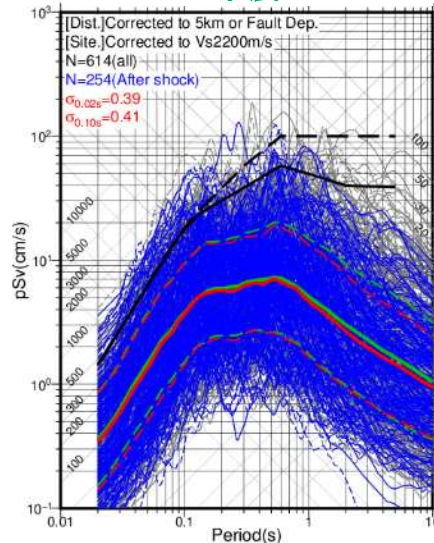
統計処理上のデータ数を確保するために、本震以外の余震と前震の記録もすべて1つのデータセットとして扱うこととする。

※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。

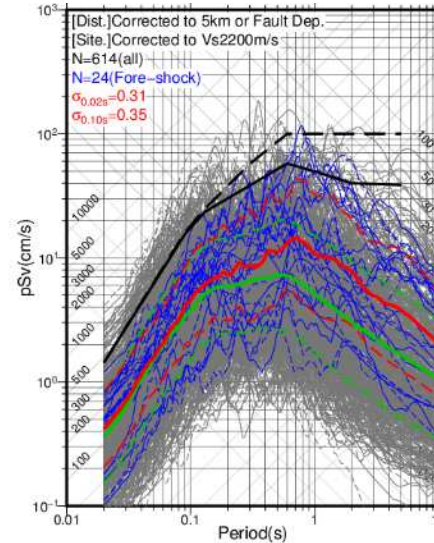
本震



余震



前震



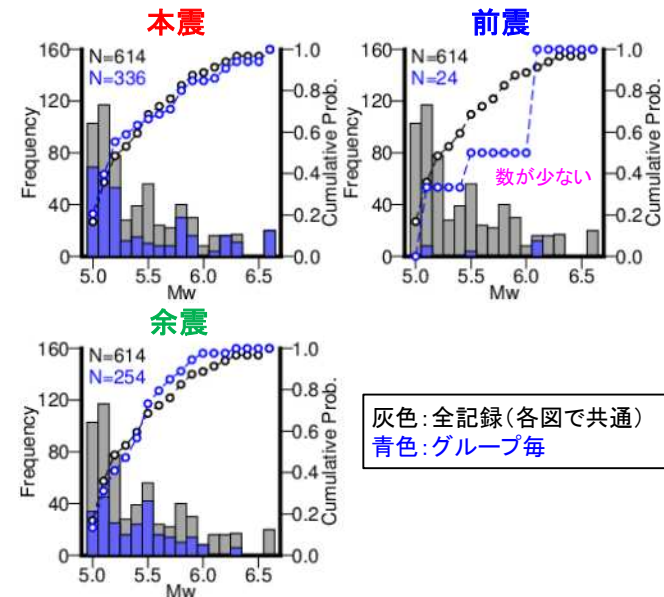
各図で共通(同じ)の凡例

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>

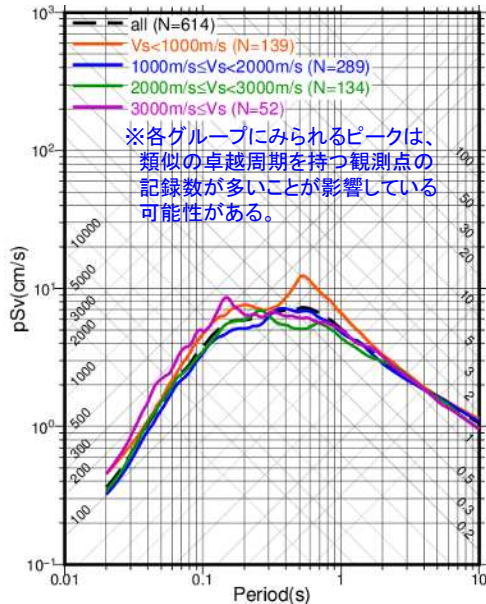


灰色: 全記録(各図で共通)
青色: グループ毎

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

平均スペクトルの比較



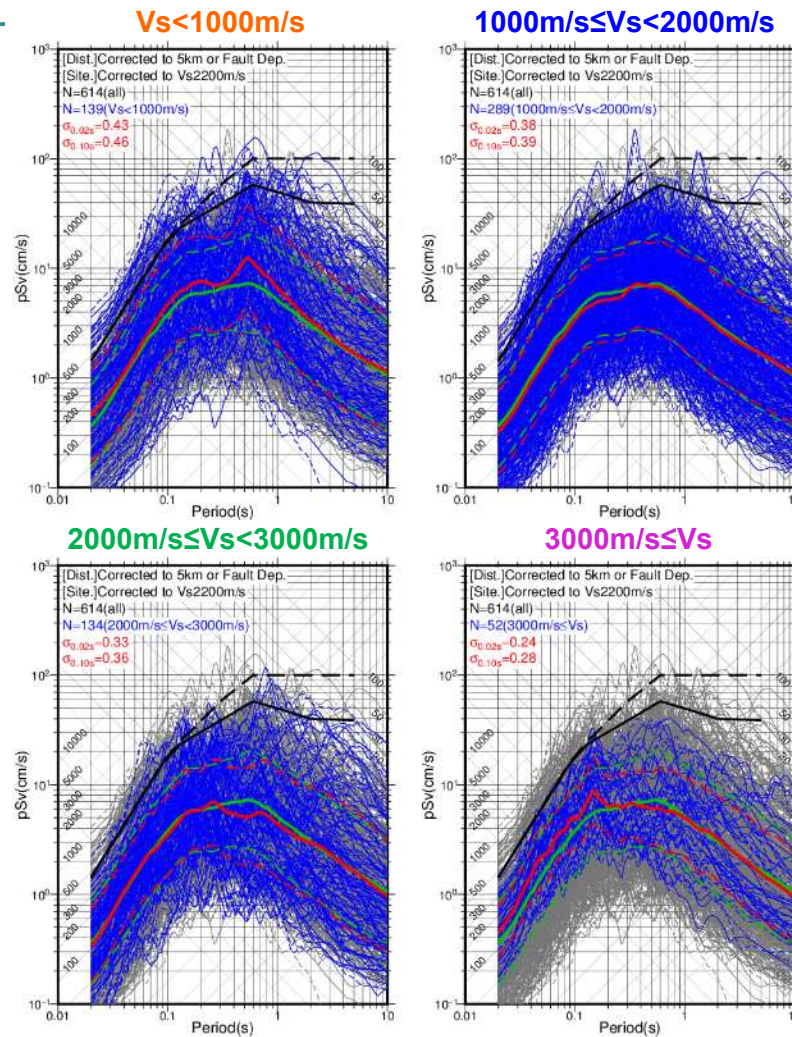
黒色破線: 全記録の平均スペクトル(右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル(右図赤実線)

<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

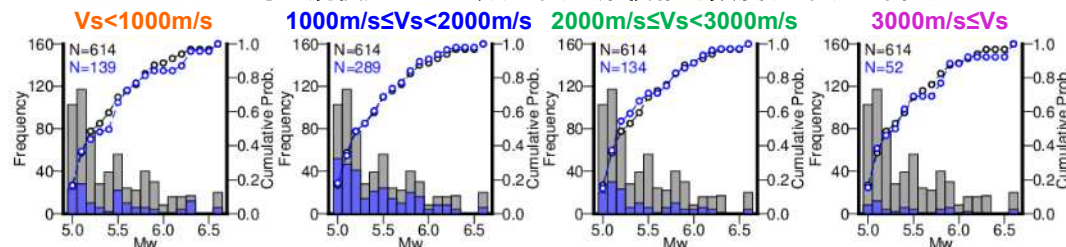
<地震動の特徴>

- 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考えられる。

※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>

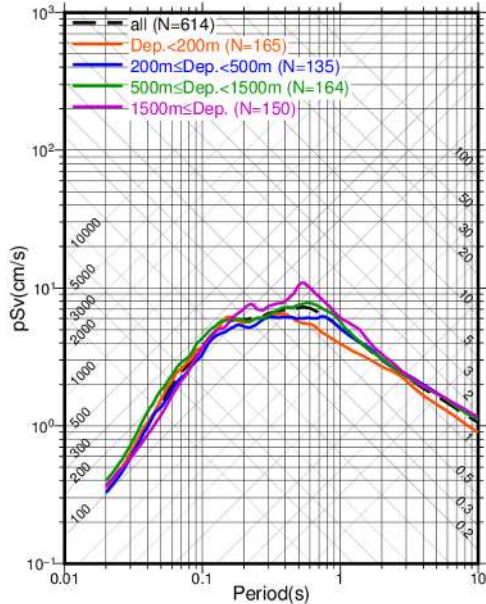


灰色: 全記録(各図で共通)
 青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (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>

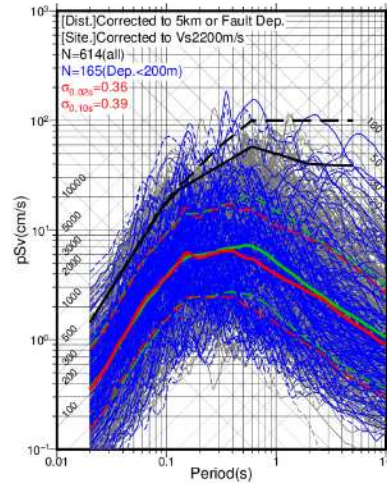
地震動レベルに大きな差異は見られない(地震基盤深度は地中計位置のVsとも相関があるため、前ページの傾向とも類似する)。

<データセット(データ数)に係る確認>

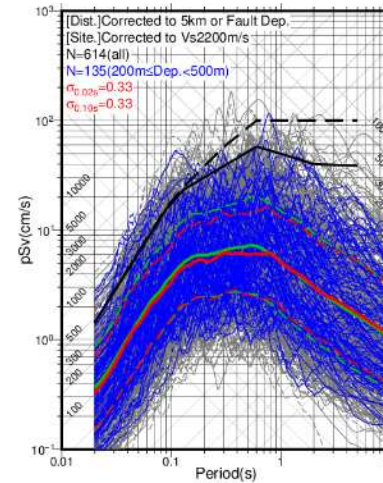
データセット(データ数)には極端又は非現実的な偏りは生じていない。

※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。

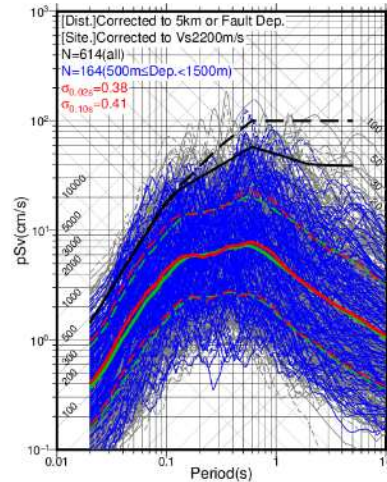
地震基盤<200m



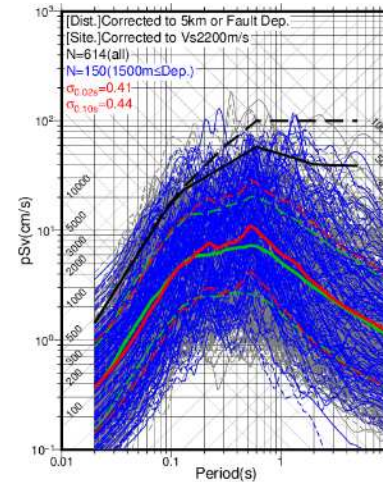
200m<=地震基盤<500m



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)

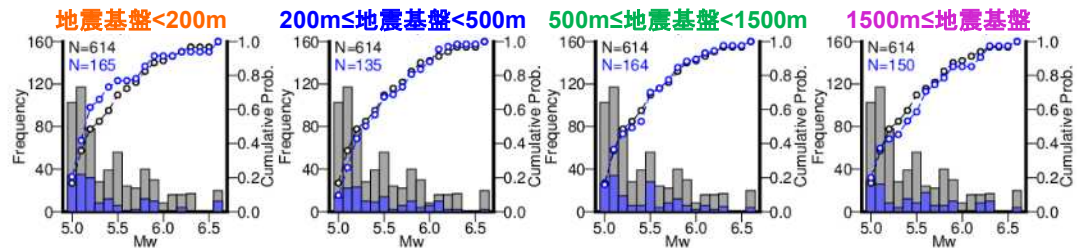
実線: NS, 破線: EW

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>

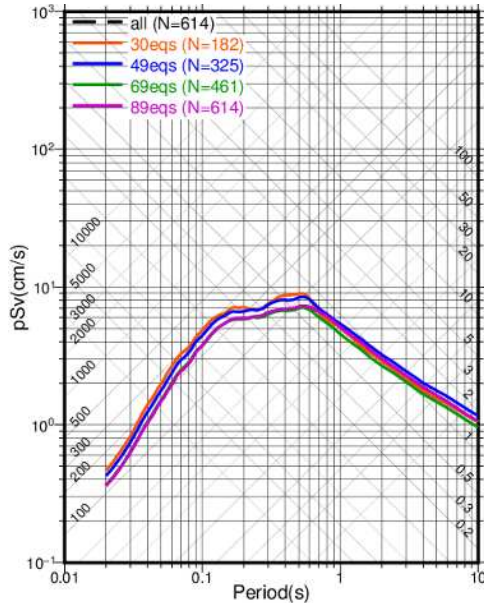


灰色: 全記録 (各図で共通)
青色: グループ毎

6. ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認 (29/36)

⑩ 統計処理に用いる地震の数: 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)

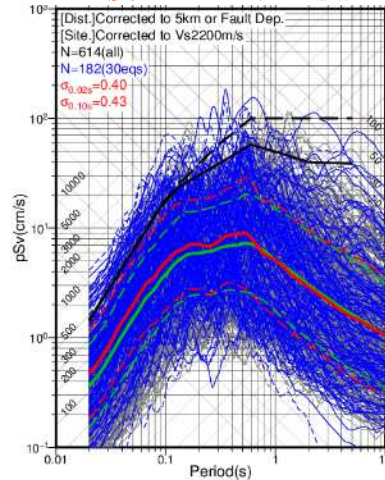
<グループ分けによる特徴分析>

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。

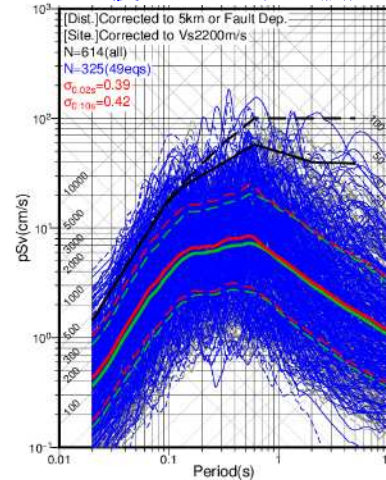
<データセット(データ数)に係る確認>

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)。

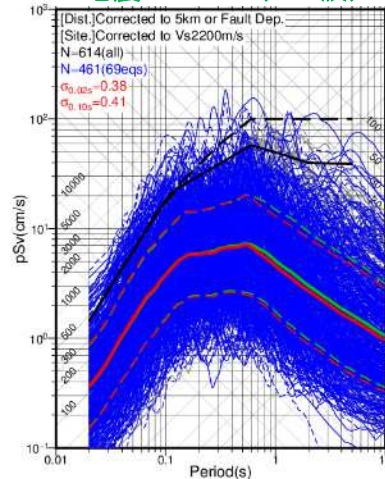
地震No.1~30(182波)



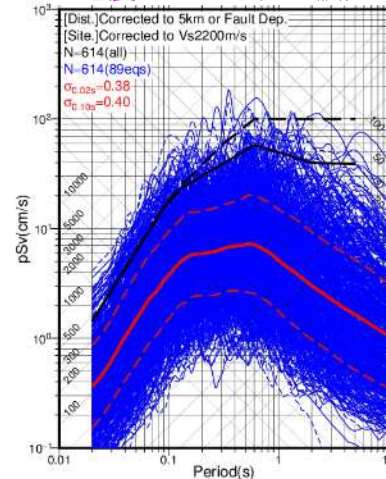
地震No.1~50(325波)



地震No.1~70(461波)



地震No.1~90(614波)



【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いないことに留意(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

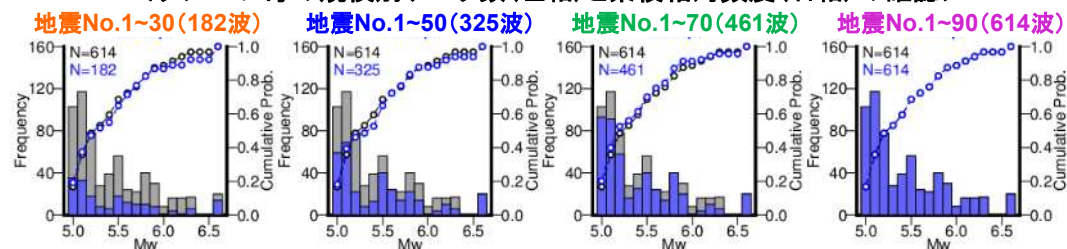
各図で異なる凡例

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 (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秒以下の短期側で平均 $\pm 1.5\sigma$ 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)。

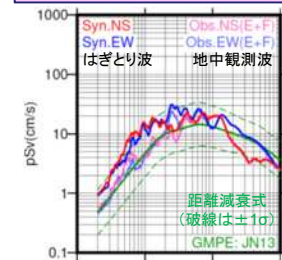
ここで、比較する距離減衰式は地中地震計位置の地盤のVsによって以下の2式を使用した。

- 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。

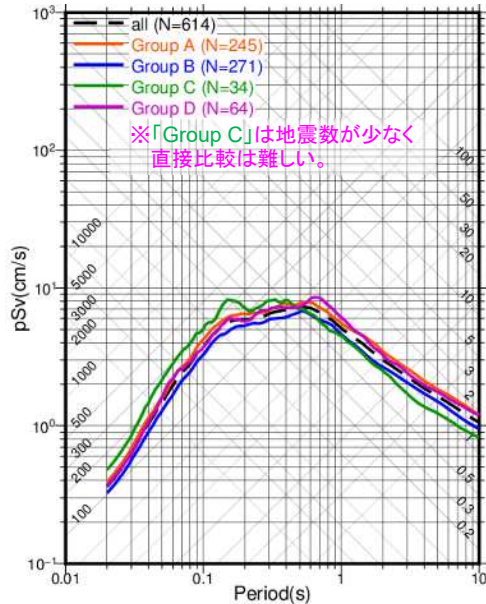
※はぎとり精度は、地中観測波を地表に立ち上げた計算波と地表観測波のスペクトル比を基準とし、周期1秒以下で計算/観測比が1/3~3倍の範囲外の周期帯をはぎとり精度が低いと判断している。

→ 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検討(詳細は7.) 31

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

平均スペクトルの比較



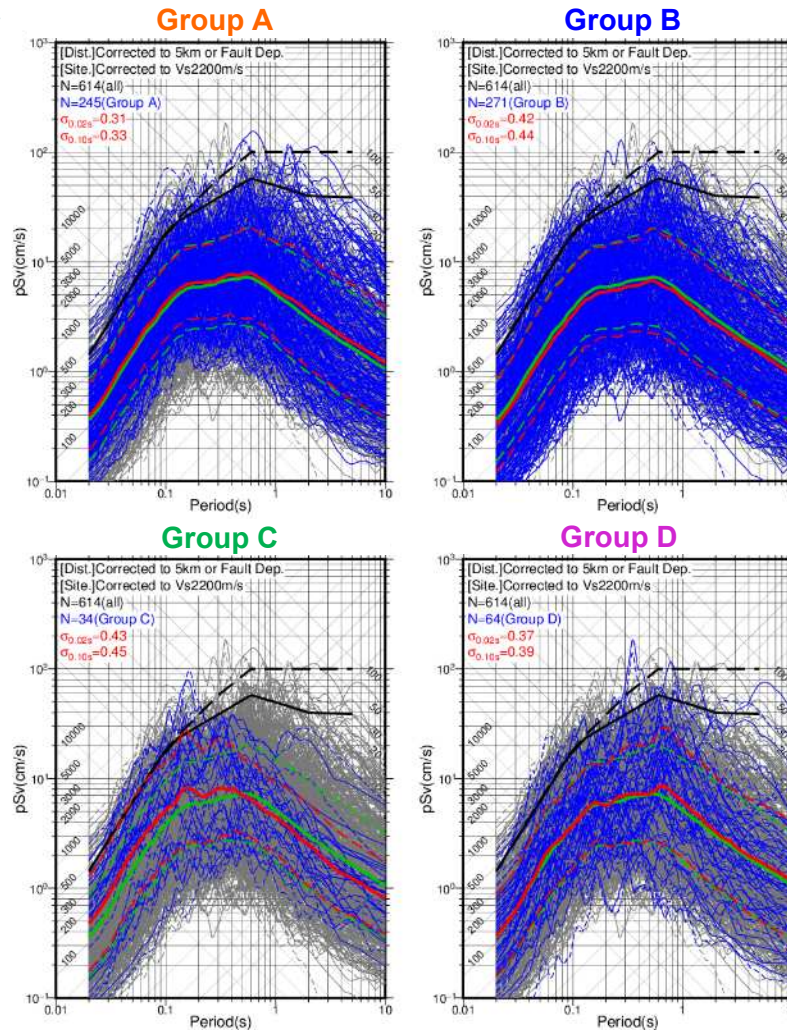
黒色破線: 全記録の平均スペクトル (右図緑実線)
 色付実線: グループ毎の平均スペクトル (右図赤実線)

<グループ分けによる特徴分析>

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

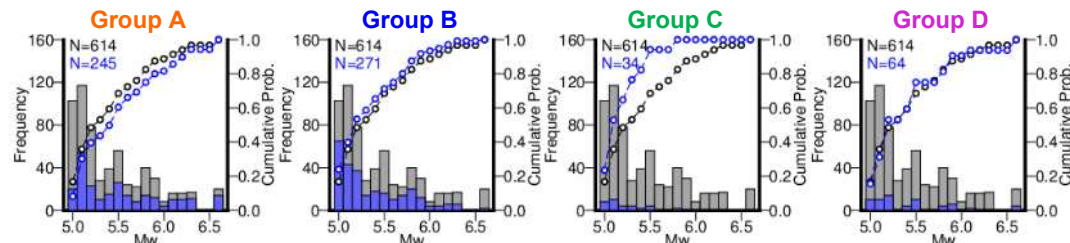
黒色: 加藤スペクトル (水平動)
 実線: Vs2200m/s, 破線: Vs700m/s
 灰色: はぎとり波 (全記録)
 実線: NS, 破線: EW
 緑色: 統計処理 (全記録)
 実線: はぎとり波 (灰色) の平均
 破線: はぎとり波 (灰色) の平均 $\pm \sigma$

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 $\pm \sigma$

※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

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。

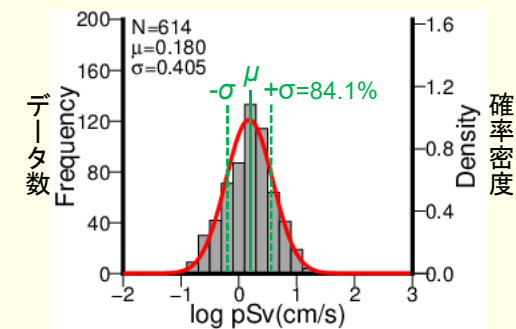
非超過確率別応答スペクトルの算出

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

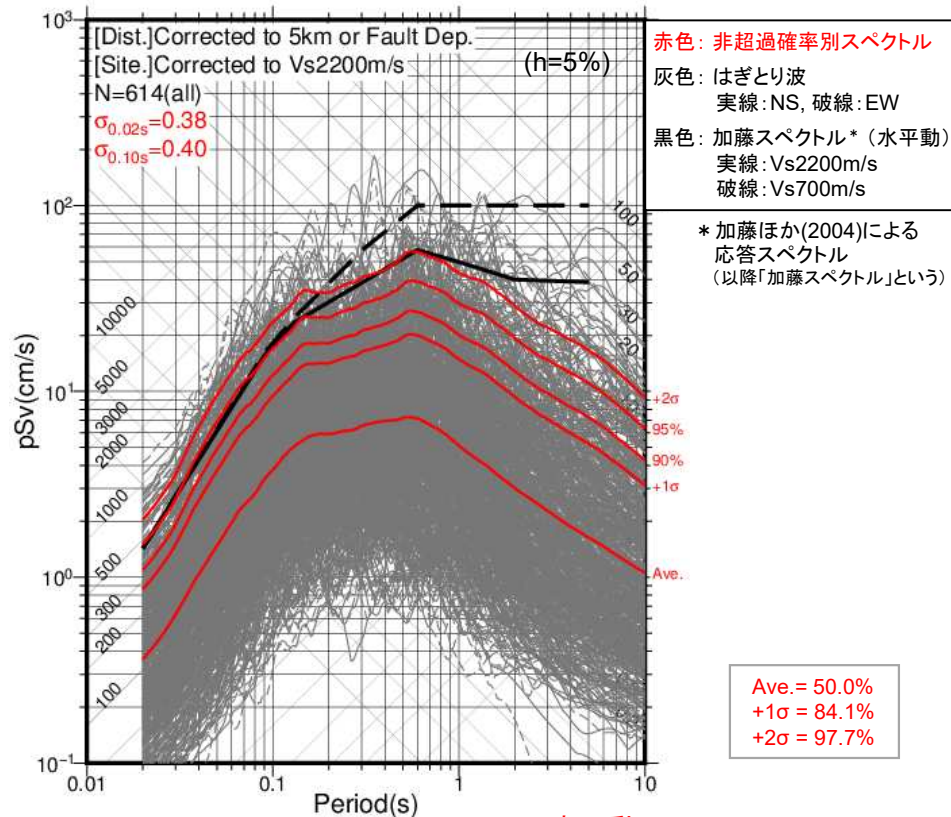
以下のとおりデータの選別・重み付けを行い、それぞれの条件で非超過確率別応答スペクトルを算出した(詳細は次ページ以降を参照)。

- 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

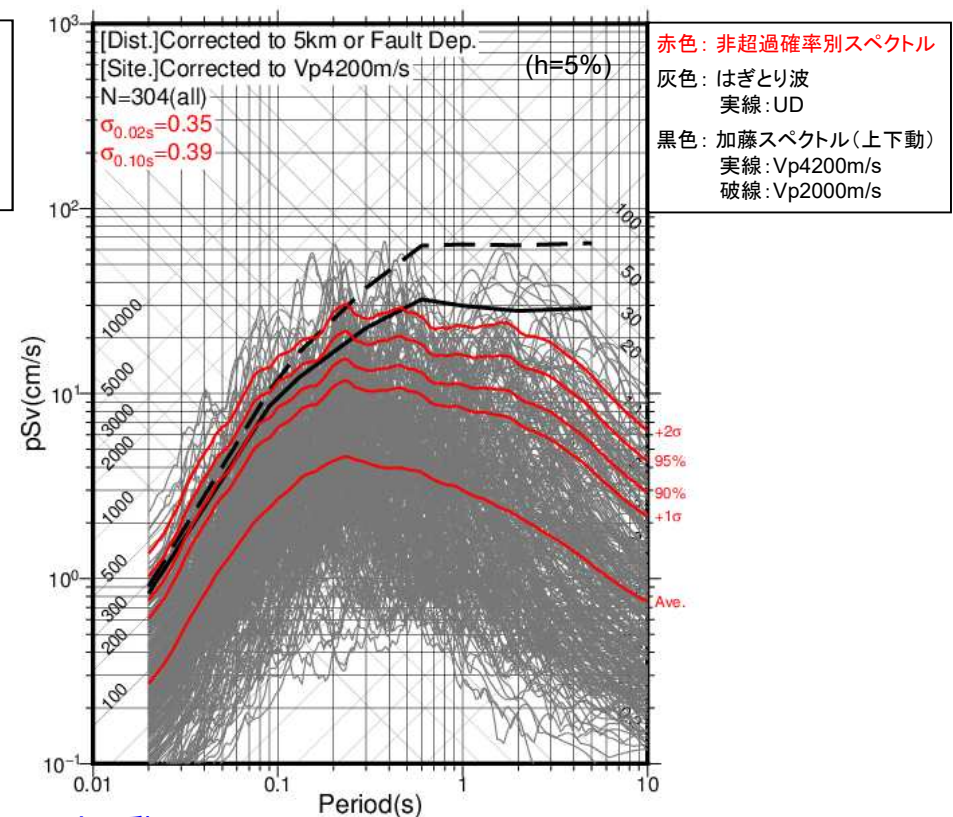
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (1/20)

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



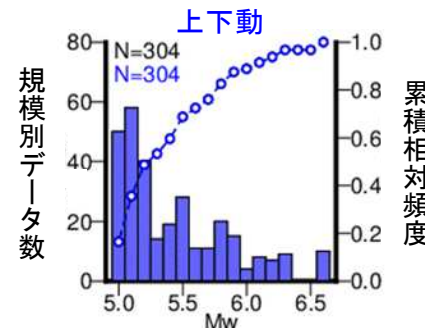
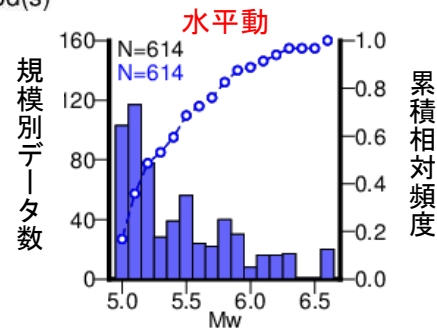
上下動



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。

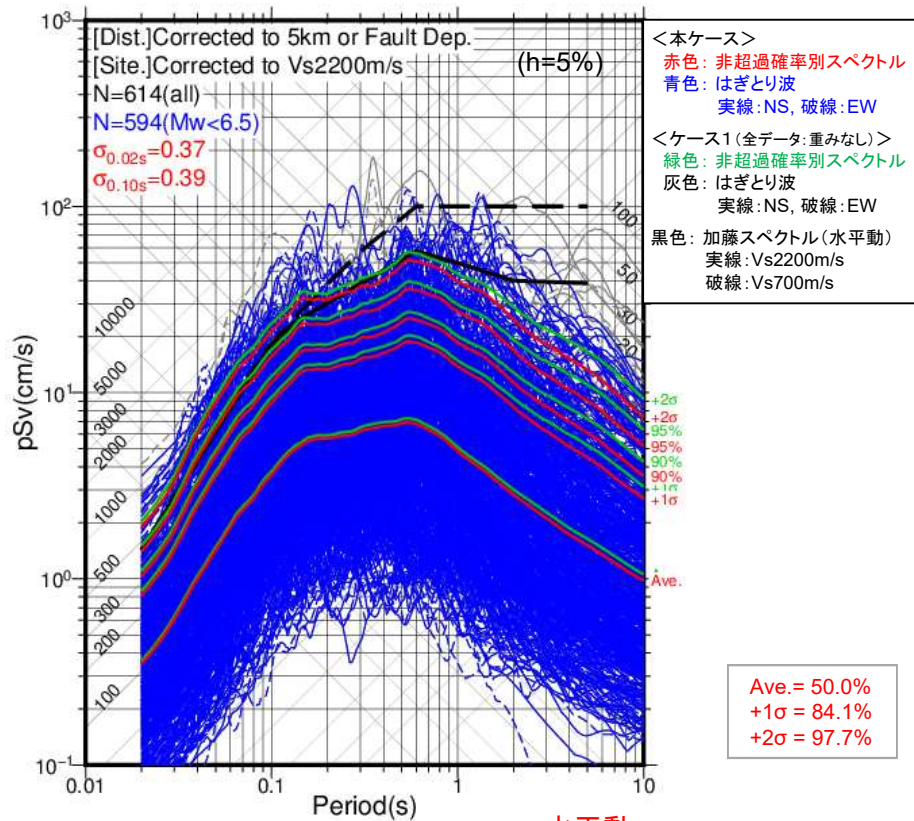
- ・データ充足度が高い。
- ・対象地震(規模)、補正処理、はぎとり解析に係る各種の不確かさを含む。

→ 標準応答スペクトルの設定には使用しない。

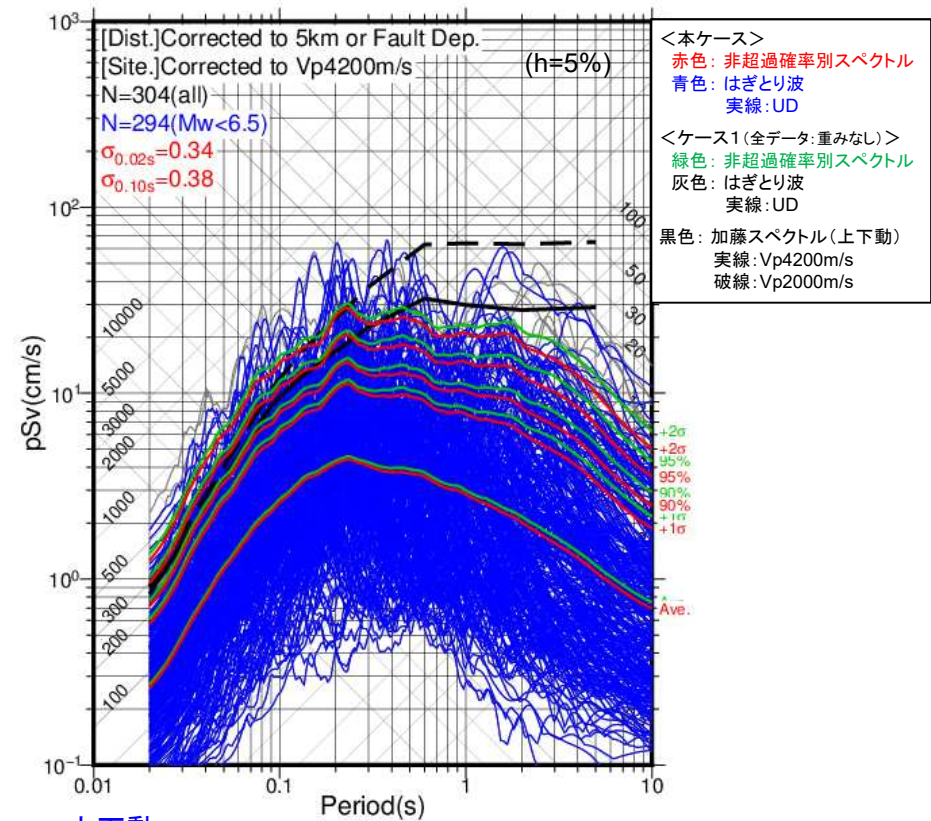
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (4/20)

ケース2: 対象地震 (Mw6.5未満)

水平動

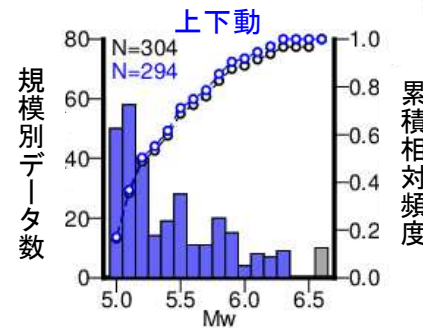
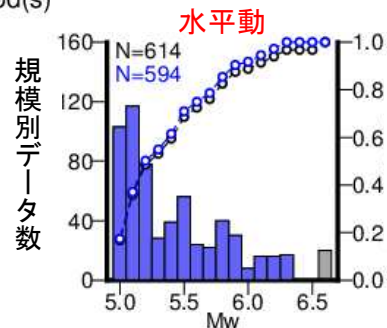


上下動



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、はざとり解析による不確実さを含む(はざとり精度はケース2'で確認)。

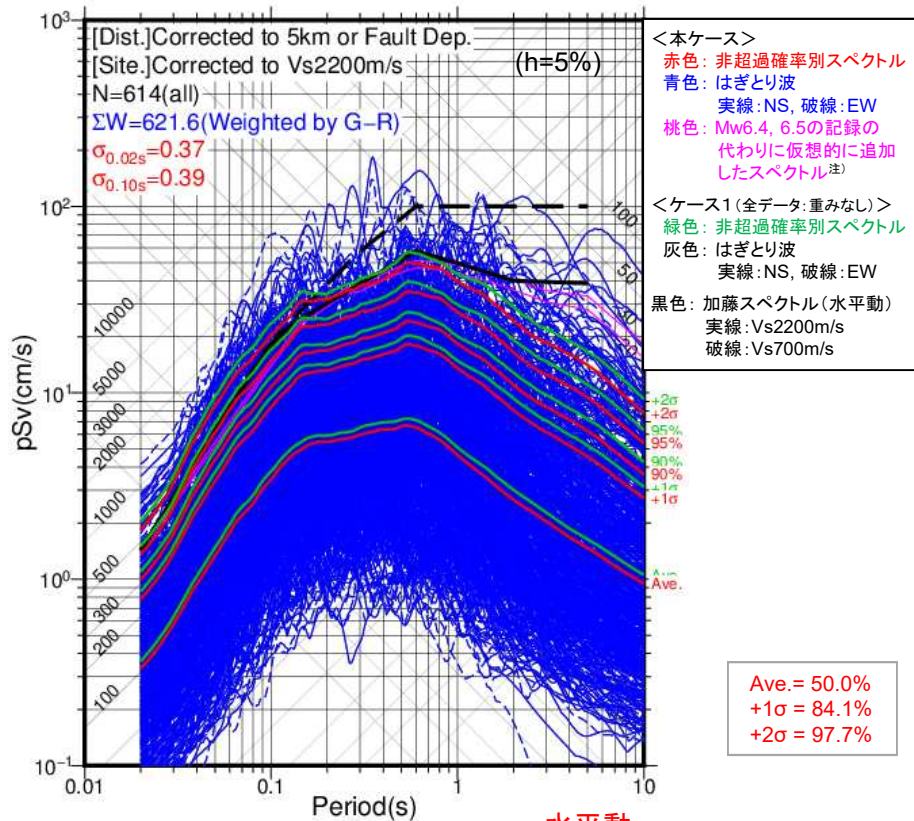
→ 標準応答スペクトルの設定に使用。

7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (5/20)

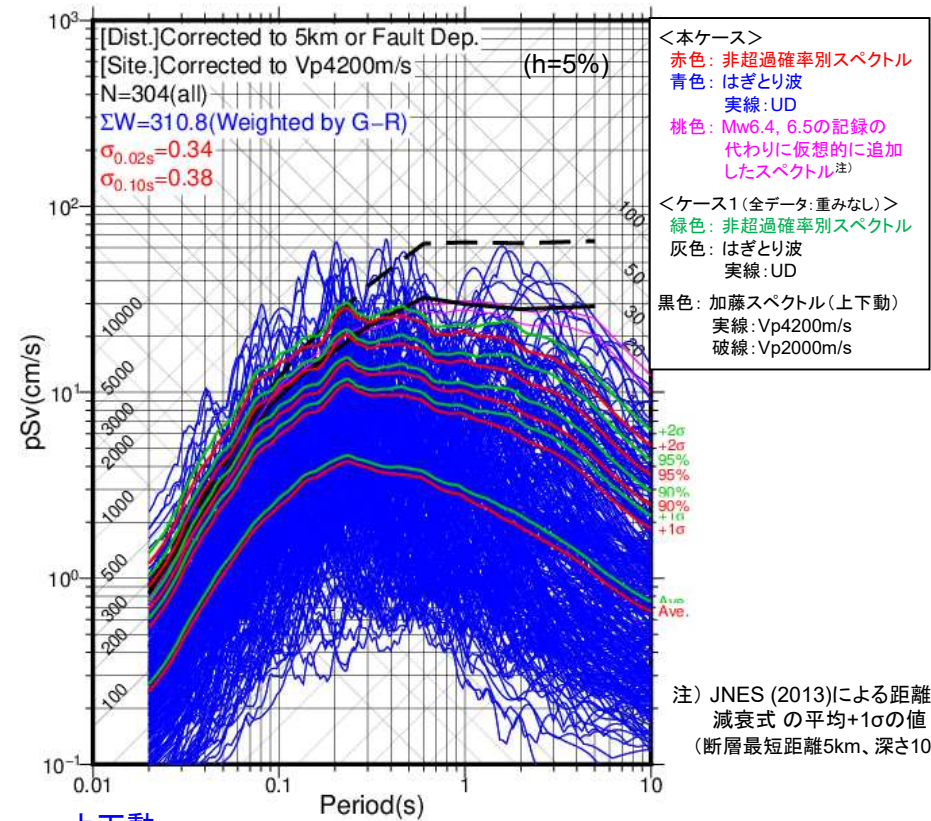
ケース3: 規模別の地震・記録数 (G-R則想定) *

* 重み付けの詳細はp.73参照

水平動

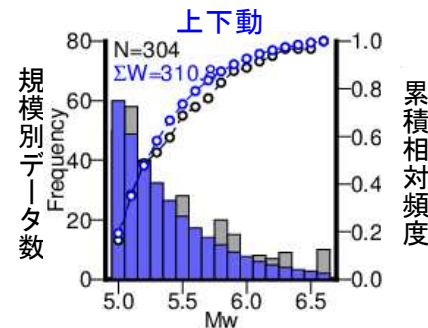
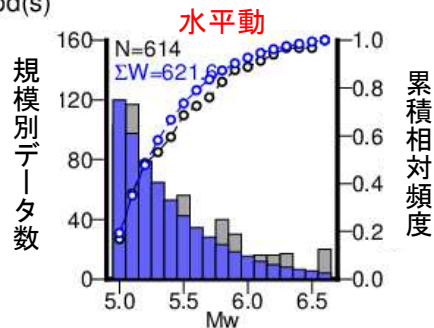


上下動



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.88に示す。



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、はぎ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。

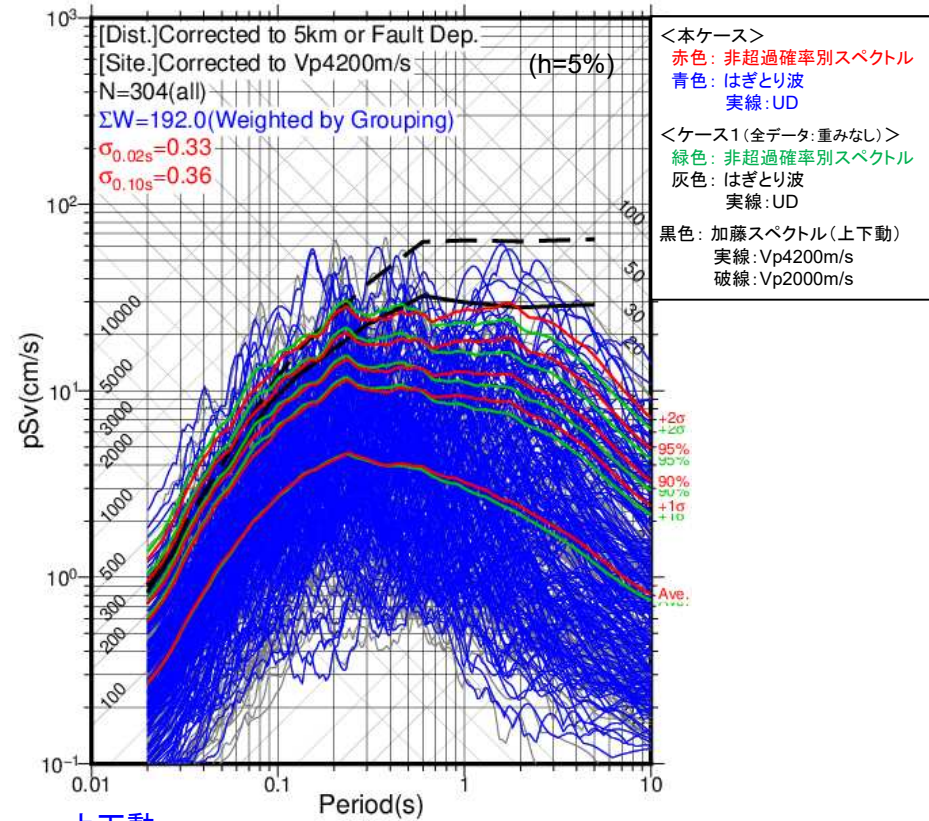
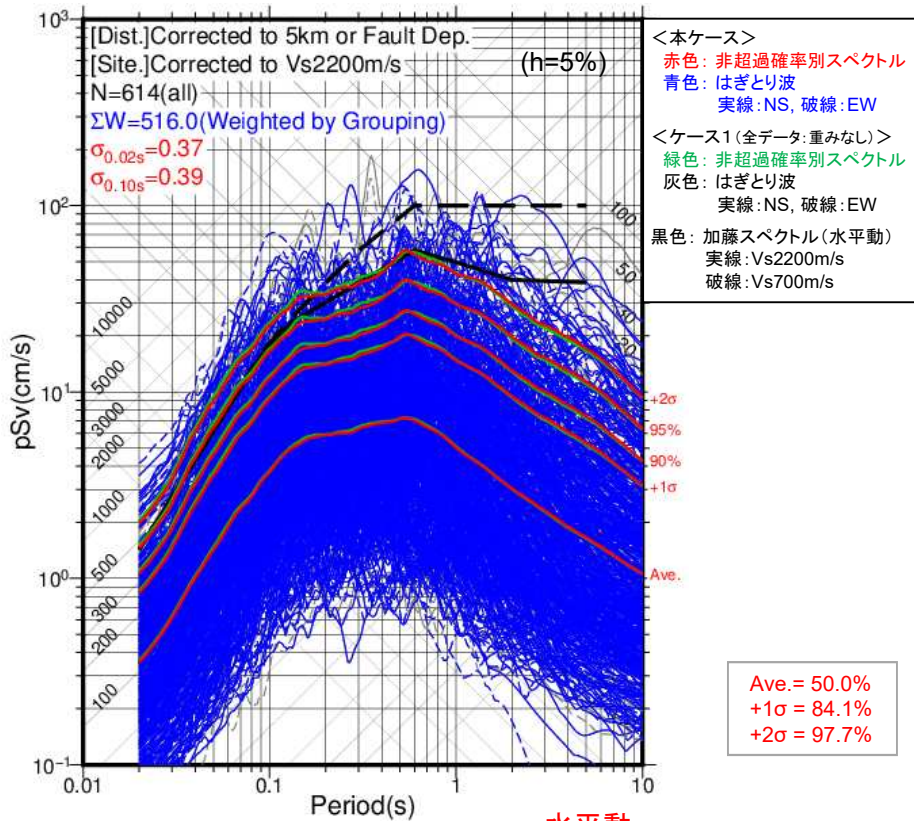
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (7/20)

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

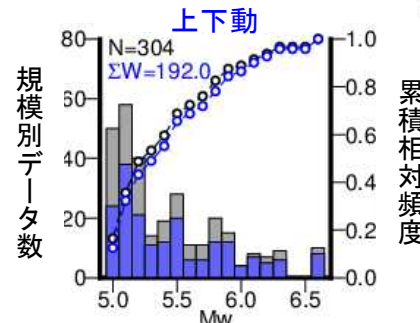
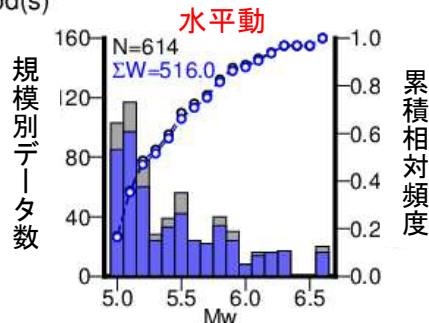
※重みをGroup A=1, B=1, C=0, D=0とした場合
(グループ分けの詳細はp.61参照)

上下動



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.90に示す。



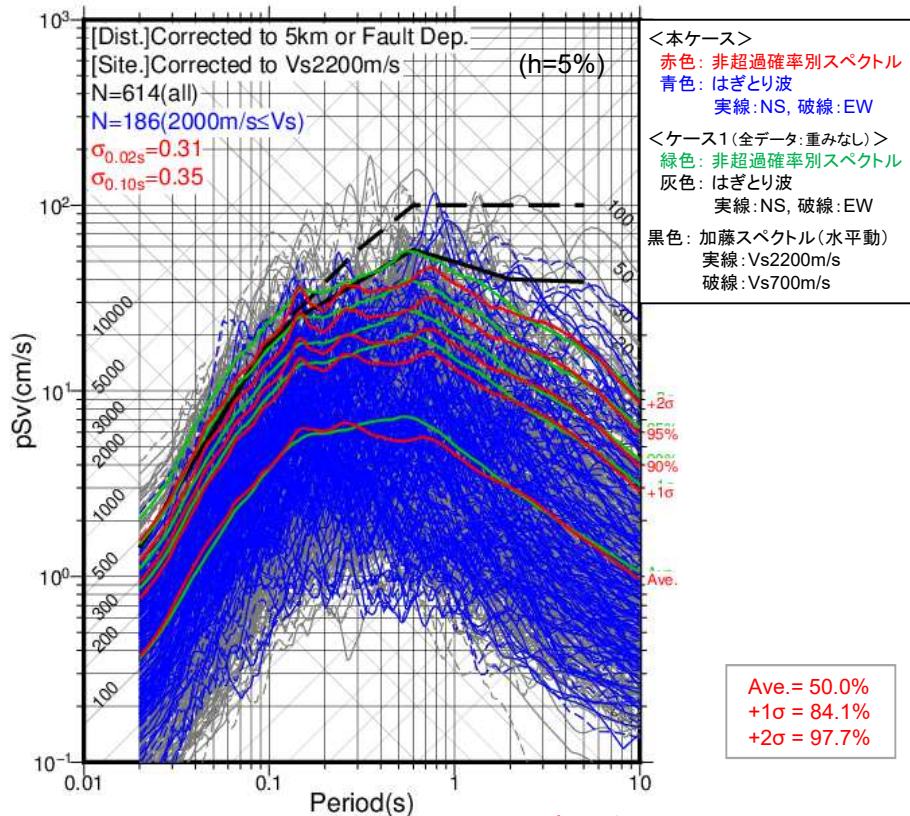
はぎとり解析の精度が低いこと(人工要因)による特徴的な地震動の影響を低減。

- ・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より低い。
- 標準応答スペクトルの設定に使用。

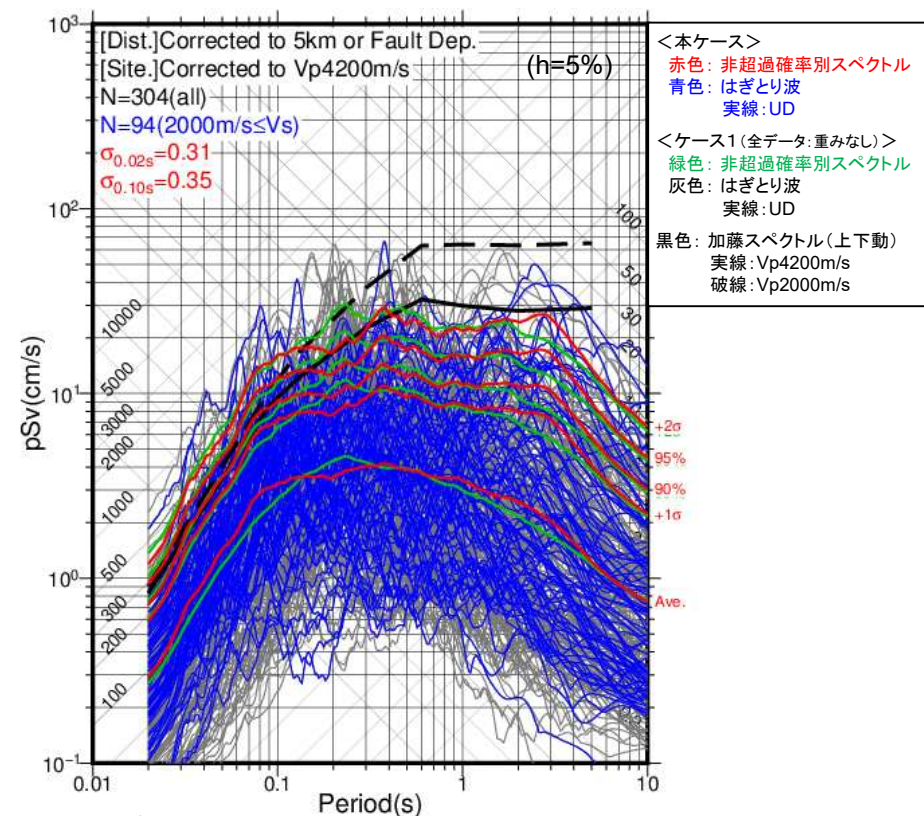
7.2 非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (8/20)

ケース5: 地中地震計位置の地盤のVs (Vs=2000m/s以上)

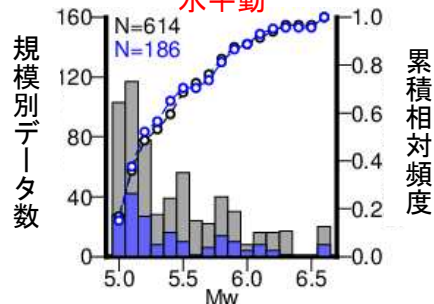
水平動



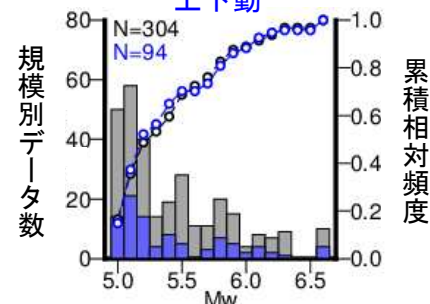
上下動



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。39

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。

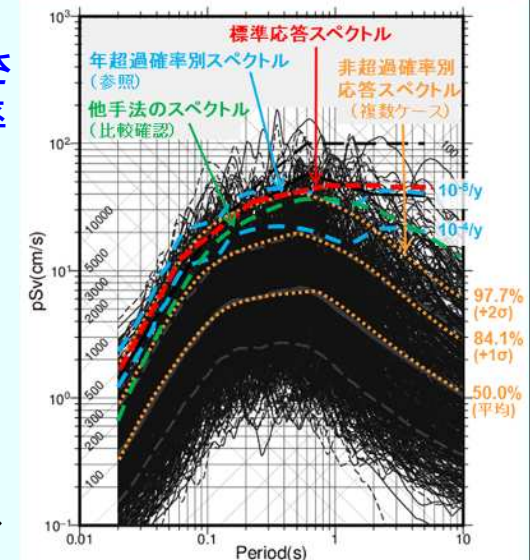
- 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の観測記録に近い。
- 震源近傍における地震基盤相当面での地震動とみなすことができる。

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・処理に係る不確かさを含むこと、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)。

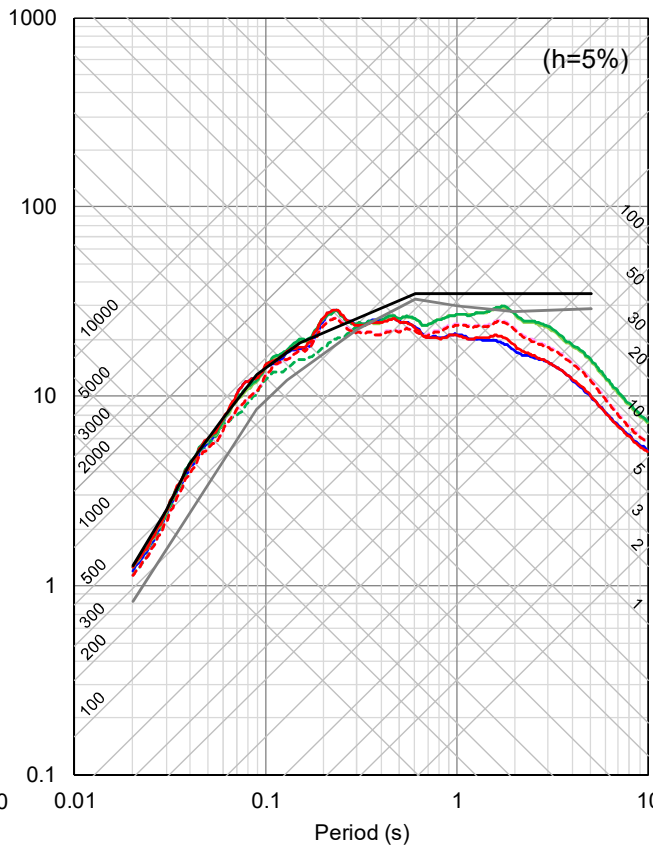
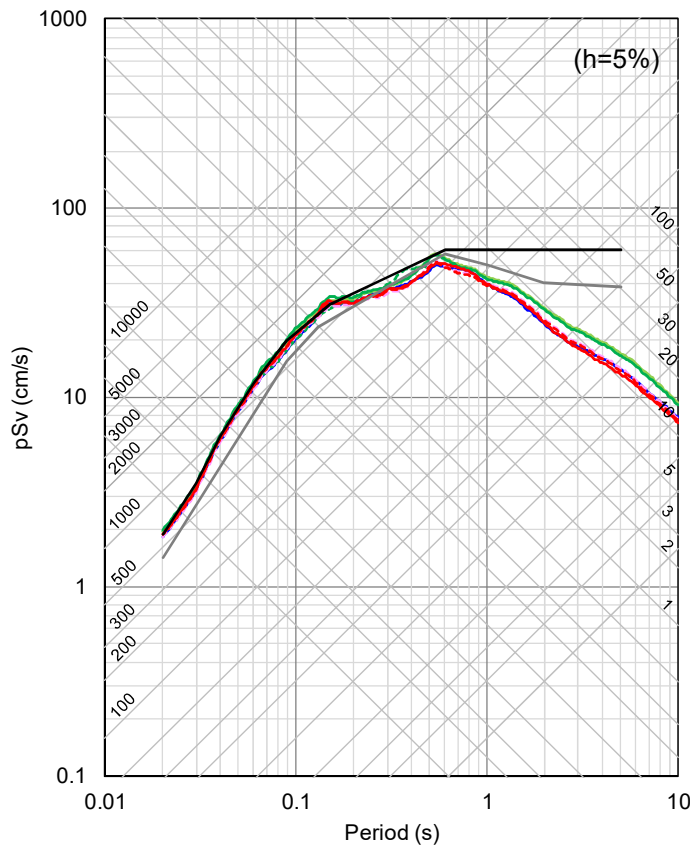
- ② ただし、今後、全国共通に「震源を特定せず策定する地震動」として考慮すべきMw6.5以上の地震が発生する可能性も否定できないことから、規模Mw6.6の地震まで含めたケース3(規模別の地震・記録数に係る不確実さを低減)及びケース4(a, b: はぎとり解析に係る不確実さを低減)の非超過確率97.7%の応答スペクトルも考慮して設定する。
- ③ なお、長周期側(周期1秒程度以上5秒程度未満)の地震動レベルについては、周期が長くなるにつれて規模依存性等に伴い地震動強さの確率密度分布推定の不確実さが大きくなる(詳細はp.86~94を参照)と考えられ、また、Mw6クラスの地震では断層破壊伝播の指向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

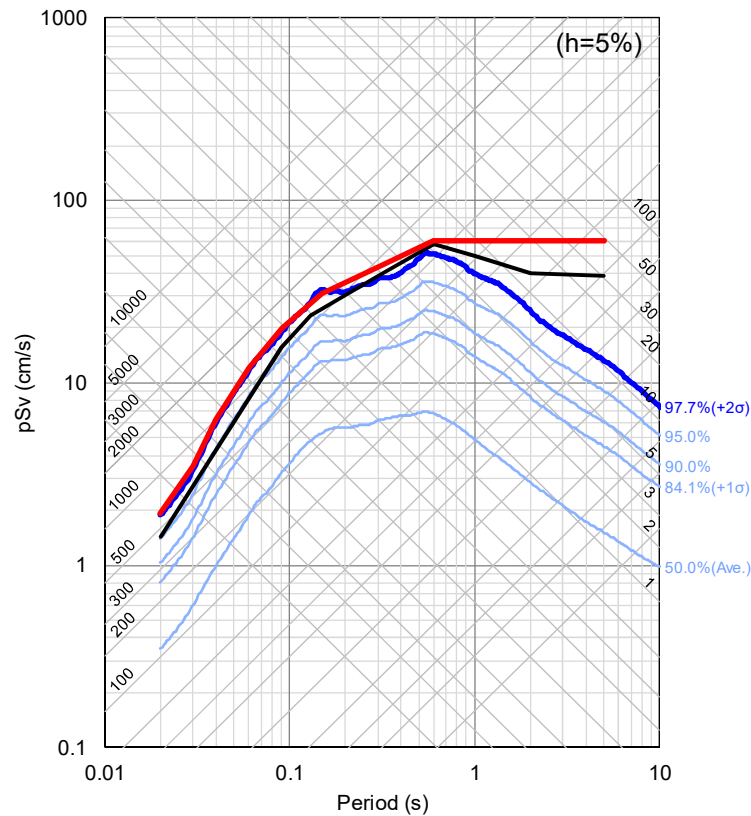
- ケース2の非超過確率97.7%の応答スペクトルを上回っている(ただし、はぎとり精度が低い※周期帯は必ずしも上回っていない)。
 ※ はぎとり精度については、ケース2' (a, b: はぎとり精度に係る不確実さを低減)、ケース4' (地中観測記録の2倍)との比較に基づき、はぎとり精度が低いことによる影響を受けているかを判断。
- データセットに規模Mw6.6の地震まで含めたケース3、ケース4の非超過確率97.7%の応答スペクトルとも調和的なレベルとなっている。
- 長周期側(周期1秒程度以上5秒程度未満)については、年超過確率の参照、他手法よる地震動レベルとの比較による妥当性確認(詳細は8.2.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

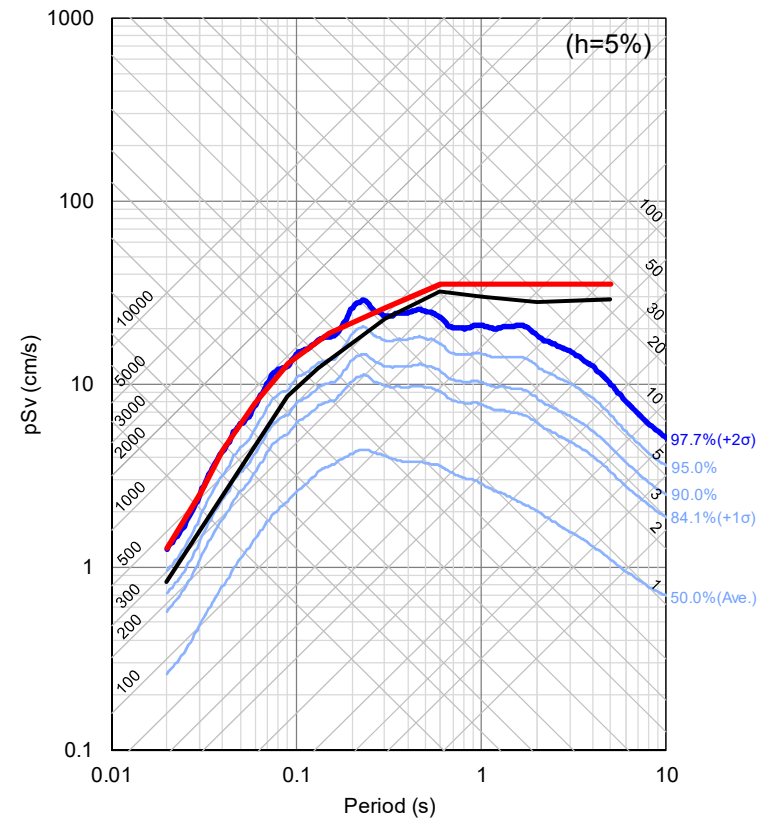
標準応答スペクトルと各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較 (1/7)

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

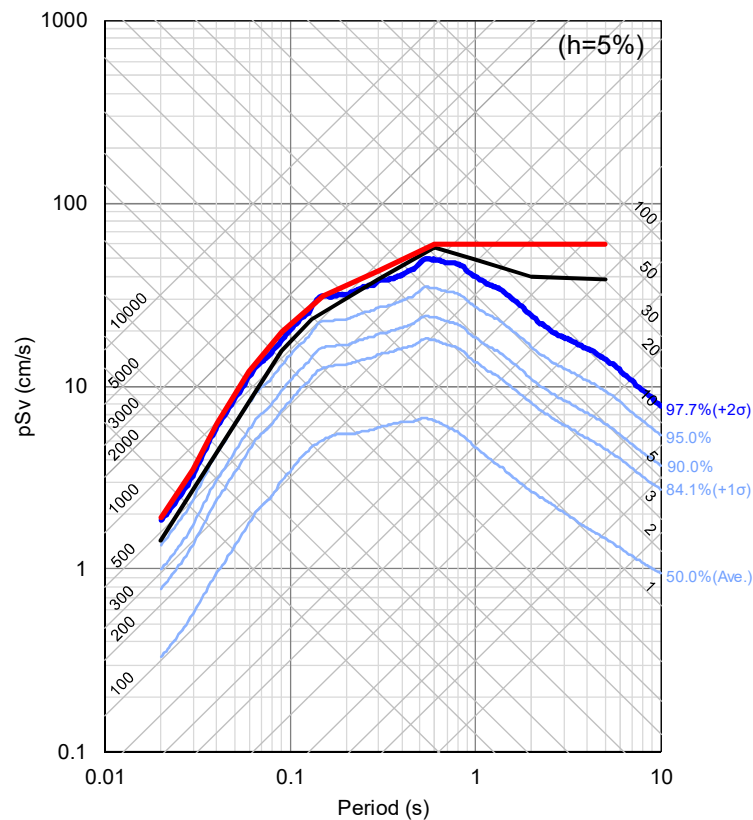
8.1 標準応答スペクトルの設定 (8/11)

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)

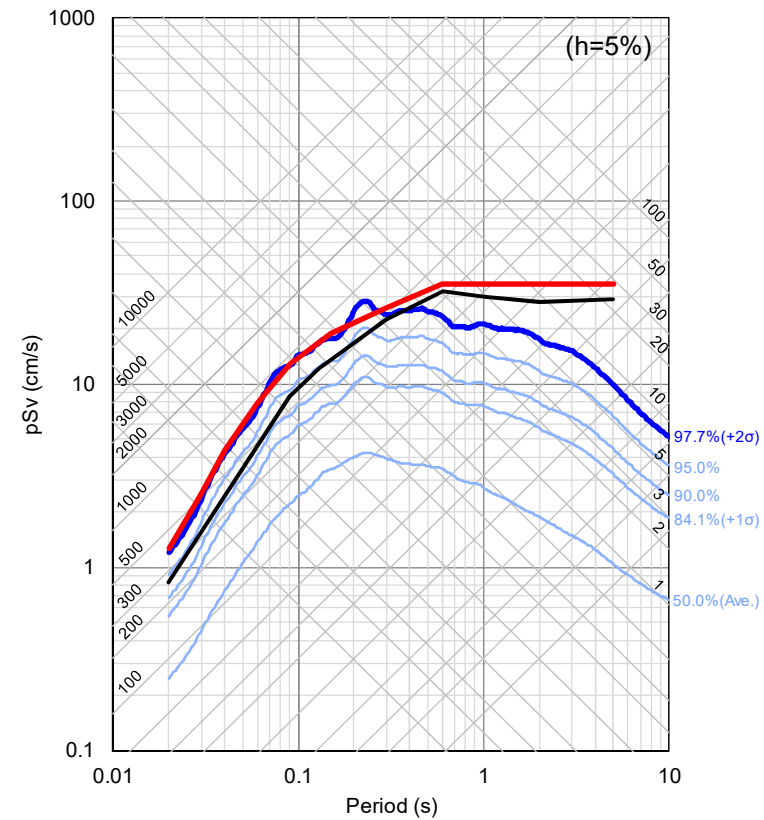
ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定) *

* 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

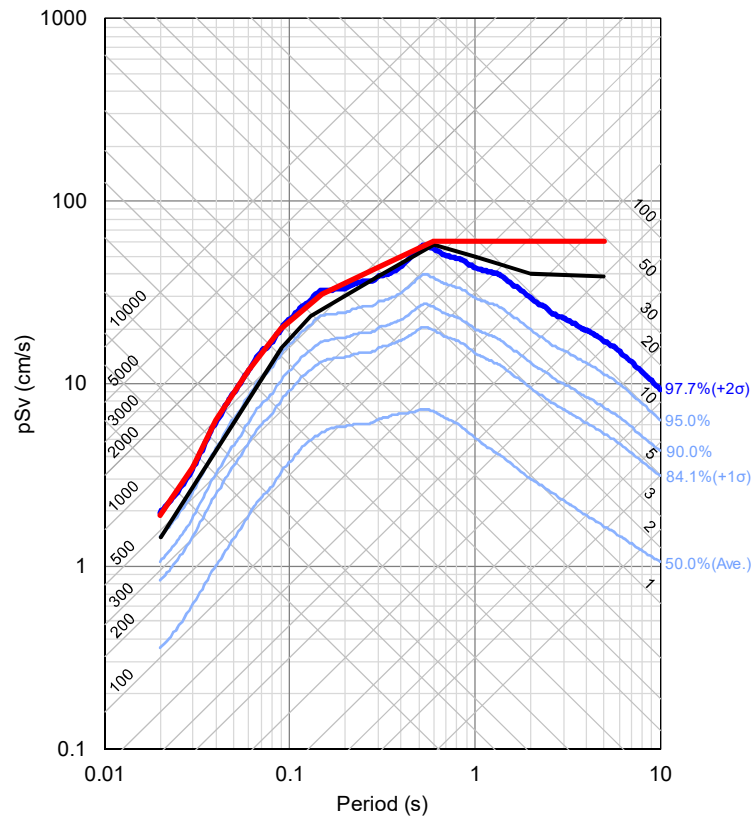
8.1 標準応答スペクトルの設定 (10/11)

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)

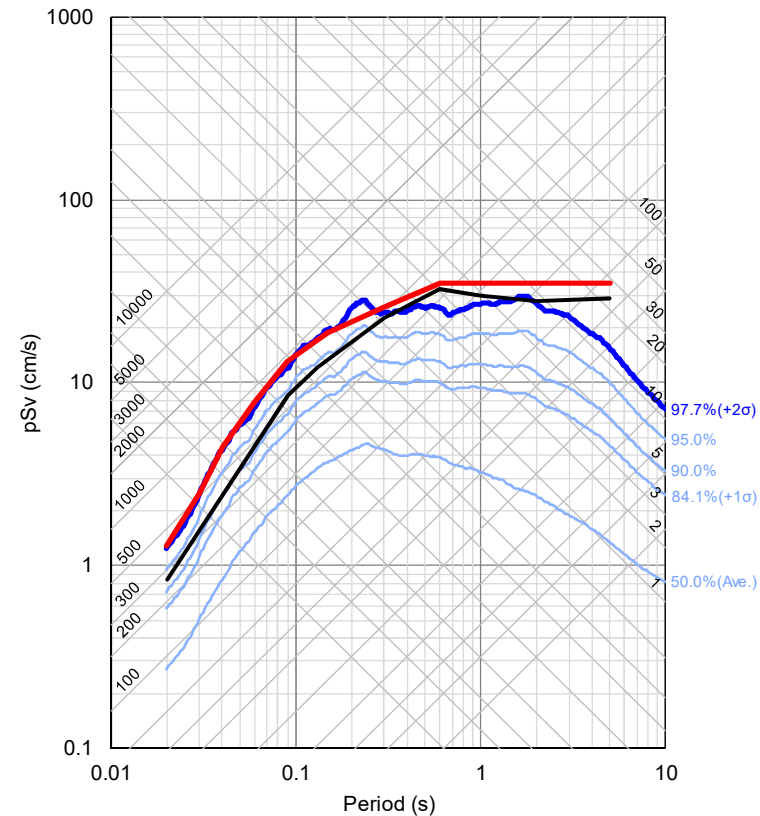
ケース4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減※) その2

※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

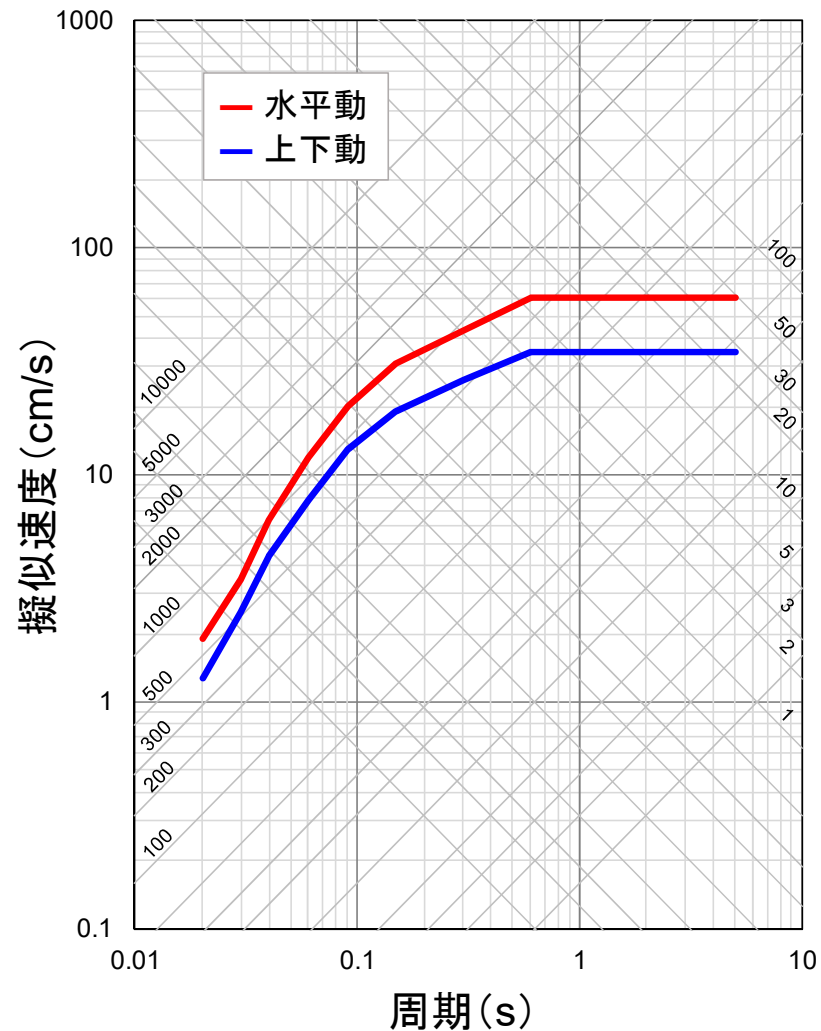


赤色: 標準応答スペクトル
青(水)色: 非超過確率別スペクトル
黒色: 加藤スペクトル
水平動: Vs2200m/s、上下動: Vp4200m/s

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)]

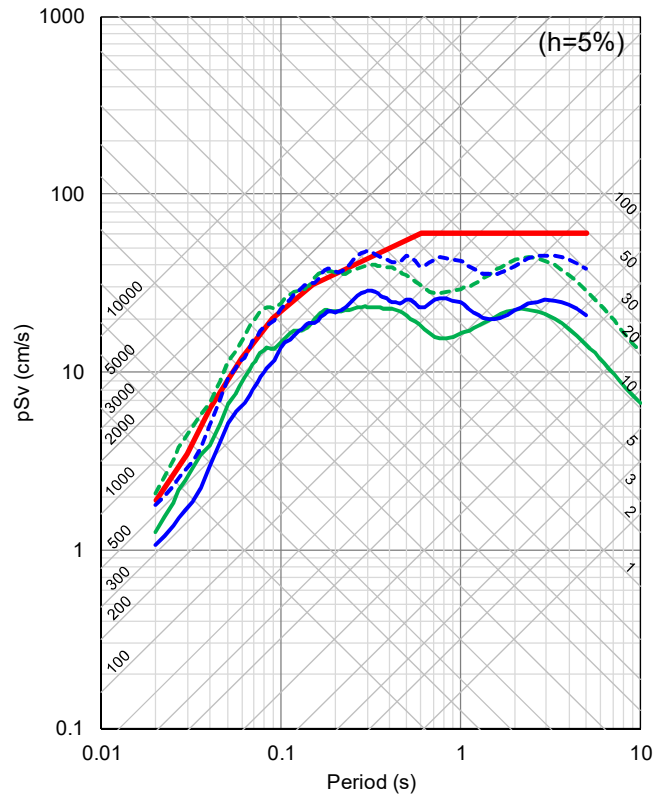
- (1) 距離減衰式による推定値(地震規模Mw6.5相当、震源近傍、地震基盤相当面)
 - Noda *et al.* (2002)による距離減衰式: 審査で多用
 - JNES (2013)による距離減衰式: 震源距離補正で使用
 - Idriss (2014)による距離減衰式(水平動のみ): 米国NGA-West2の式の1つ
- (2) 断層モデル法による計算結果
 - JNES (2012)による計算[香川(2004)による長周期帯まで拡張した統計的グリーン関数法]: 震源の不確実さをモンテカルロ法により設定した計算結果(断層最短距離10km以内)
- (3) 審査関連の地震動レベル
 - 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 (4/7)

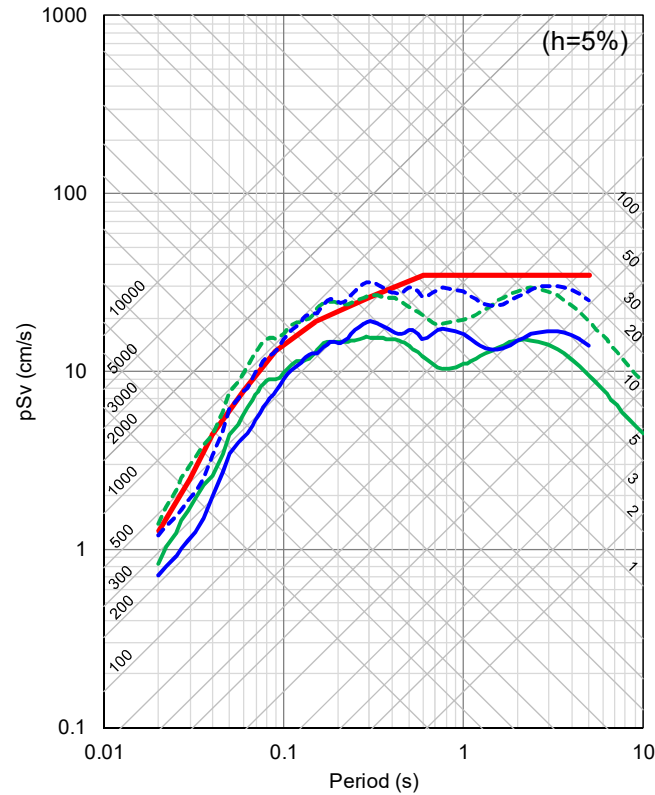
【A】 JNES (2005, 2012)による地震動の年超過確率の参照 (4/4)

水平動



- 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)

上下動



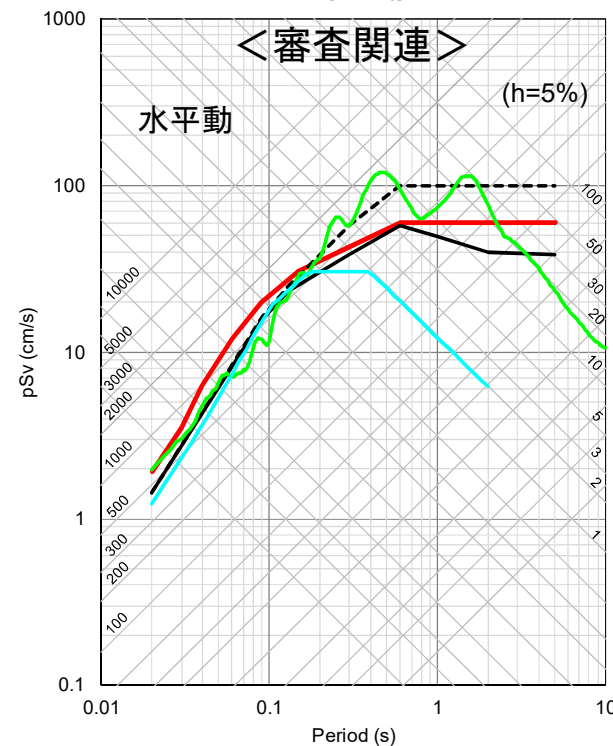
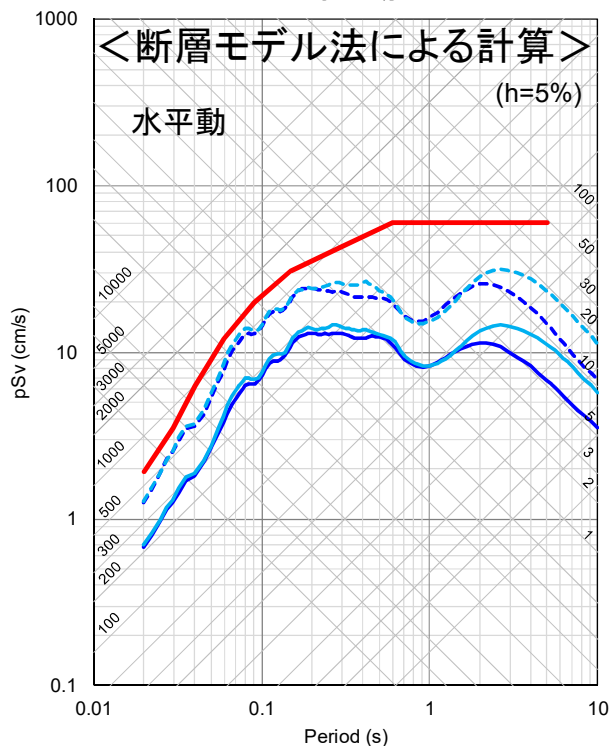
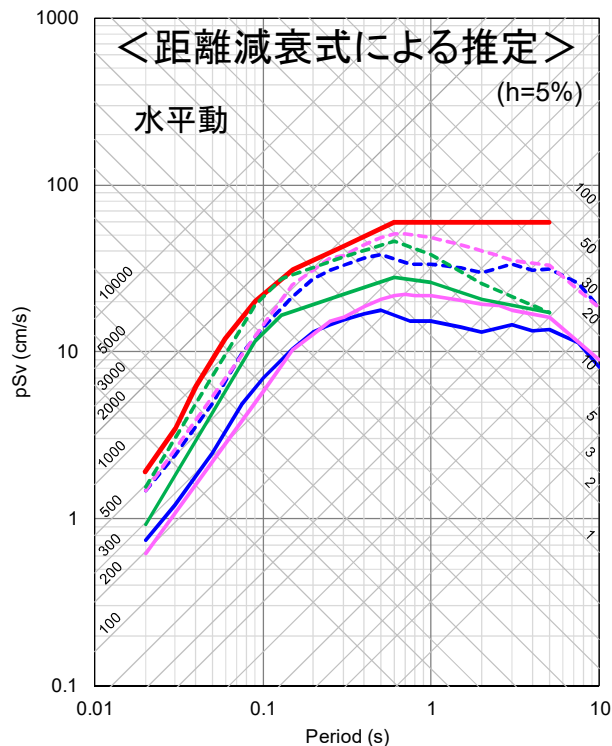
- 標準応答スペクトル
- JNES (2005)による年超過確率別スペクトル
[水平動の2/3のレベル^{注)}]
実線：年超過確率 10^{-4} 、破線：年超過確率 10^{-5}
※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面
- JNES (2012)による年超過確率別スペクトル
[水平動の2/3のレベル]
実線：年超過確率 10^{-4} 、破線：年超過確率 10^{-5}
※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面(西日本)

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 (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、 $AVS30=2500\text{m/s}$

- 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) 新規制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)
※ $V_s=938\text{m/s}$ 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。